

# 光纤光缆测试讲义

湖北凯乐新材料科技股份有限公司

二 00 二年六月

## 目 录

第一章 光纤连接.....	4
第一节 光耦合.....	4
一、光纤与光源耦合.....	4
二、光纤与光接收器的耦合.....	8
第二节 光纤连接.....	9
一、光纤连接方法.....	9
二、光纤连接损耗的初步分析.....	9
三、光纤的熔接.....	13
第二章 光纤尺寸参数测量.....	23

第一节	光纤尺寸参数定义 .....	23
一、	作用 .....	23
二、	定义 .....	23
第二节	光纤几何尺寸参数测量方法 .....	25
一、	近场图像法 .....	25
二、	折射近场法 .....	27
三、	侧视法 .....	30
四、	机械法 .....	32
五、	传输或反射脉冲延迟法 .....	33
六、	光纤伸长量的测定 .....	35
第三章	光纤带尺寸参数测量 .....	38
第一节	光纤带结构 .....	38
一、	结构 .....	38
二、	类型 .....	38
第二节	光纤带尺寸参数定义 .....	39
一、	定义 .....	39
二、	尺寸要求 .....	39
第三节	光纤带尺寸参数测量 .....	40
一、	目视测量法 .....	40
二、	孔径规法 .....	41
第四章	光纤传输特性和光学特性 .....	42
第一节	光纤传输特性和光学特性测试目的 .....	42
第二节	性能测量 .....	42
一、	衰减 .....	42
二、	色散 .....	55
三、	偏振模色散 .....	65
四、	截止波长 .....	77
五、	模场直径 .....	83
六、	有效面积 .....	90
七、	数值孔径 .....	95
八、	光学连续性 .....	97
九、	微弯敏感性 .....	98
第五章	光纤机械性能 .....	102
第一节	光纤机械性能测试的目的 .....	102
第二节	测量方法 .....	103
一、	光纤强度 .....	104
二、	疲劳参数 .....	111
三、	可剥性 .....	115
四、	光纤的翘曲 .....	117
第六章	光纤带机械性能 .....	122
第一节	光纤带机械性能测试的目的 .....	122

第二节	测量方法	122
一、	光纤带可分离性	122
二、	光纤带可剥离性	123
三、	光纤带抗扭转	124
四、	光纤带残余扭转	125
第七章	光纤的环境性能	126
第一节	光纤环境性能测试的目的	126
第二节	测量方法	126
一、	温度循环	126
二、	温度时延漂移	128
三、	浸水	130
四、	高温高湿	130
五、	高温	131
六、	核辐照	132
第八章	光纤机械性能测试	137
第一节	光缆机械性能测试的目的	137
第二节	性能测试	138
一、	拉伸	138
二、	光缆护套耐磨损	140
三、	压扁	140
四、	冲击	142
五、	反复弯曲	144
六、	扭转	145
七、	曲挠	148
八、	弯折	149
九、	弯曲	149
十、	耐切入	150
十一、	枪击损伤	150
十二、	刚性	151
十三、	拉力弯曲	154
第九章	光缆的环境性能	155
第一节	环境性能测试的目的	155
第二节	性能与测试	156
一、	温度循环	156
二、	渗水	158
三、	阻水油膏滴流	159
四、	油分离和蒸发	160
五、	气体阻力	161
六、	风积振动	162
七、	过滑轮	164
八、	舞动	165
九、	耐电痕	166

十、阻燃.....	167
第十章 光缆线路工程测量.....	169
第一节 光缆线路工程测量的目的.....	169
第二节 单盘光缆现场复测.....	169
一、规定.....	169
二、光缆长度复测.....	170
三、单盘光缆衰减测量.....	173
第三节 光纤后向散射衰减曲线.....	178
一、曲线的作用.....	178
二、观察和评价.....	179
第四节 工程竣工测量.....	180
一、目的.....	180
二、测量内容.....	180
三、光缆线路衰减测量.....	180
四、光缆线路衰减曲线测量.....	182
五、光缆线路电特性测量.....	186
六、光缆护层对地绝缘测量.....	188
七、光缆线路对地绝缘监测.....	189
第五节 光缆链路偏振色散测量.....	190
一、目的.....	190
二、偏振模色散对系统的影响.....	190
三、光缆链路偏振模色散.....	192
四、光缆链路偏振模色散的测量.....	196
第六节 光缆线路自动监控.....	197
一、目的.....	197
二、监测原理与系统组成.....	197
三、光缆线路监控.....	199

# 第一章 光纤连接

在介绍光纤光缆性能检测方法之前,先讲述光纤连接特别是光纤端面处理和熔接技术,作为必须掌握的基本技能训练。

实际的光通信系统由光发射器、光传输通道(光纤)、光接收器三个主要部分组成,光纤光缆的传输性能检测系统也同样如此。系统各部分之间的衔接就是光耦合或光纤连接问题。通信系统和检测系统都要求各部分之间光耦合有高耦合效率、稳定可靠、连接损耗小的连接。而且光耦合和光纤连接技术是光纤通信系统和检测系统中一门非常基本和实用的技术。

## 第一节 光耦合

### 一、光纤与光源的耦合

在光纤通信系统和光纤传输特性检测系统中使用多种光源,有半导体激光器、气体激光器、液体激光器、发光二极管、宽光谱光源等等。它们大致可以分为两大类,一类是相干光源,如各种激光器;另一类是非相干光源,如发光二极管、宽光谱光源(白炽灯)。光耦合先要解决如何高效率地把光源发射的光注入到传输通道中去的问题。为此,先了解一下光源的特性。

#### (一) 光源特性

##### 1. 半导体激光器(LD)

半导体激光器的发光区是窄条形的发光区域,它的发光区域很薄,只有大约 $0.3\mu\text{m}$ 。半导体激光器的发光强度在其谐振腔内中的谐振腔外部的空间按一定的规律分布。半导体激光器工作电流在超过其阈值电流 $I_{th}$ 不多时(约大于 $I_{th}$ 的10%),它发光的模式是基横模(光强度在空间的不同分布称为不同的模式)。基横模在垂直于光轴的平面内光强度的分布是两维高斯形状。这种高斯形光束的腰部宽度即激光器谐振腔镜面上发光区域的宽度和厚度。即约 $30\mu\text{m}$ 和 $0.3\mu\text{m}$ 。半导体激光器在其宽度方向上(即平行于P-n结的方向)光束比较集中,其发散角比较小,约 $5\sim 6^\circ$ 。而在厚度方向(即垂直于P-n结的方向)上其光束的发散角较大,约有 $40\sim 60^\circ$ 。所以半导体激光器发射的光束的强度分布在空间上是不对称的,它所发射的光的远场图形是一种细长的椭圆形(远场概念在第二章中叙述)。

##### 2. 面发光二极管(LED)

面发光二极管发出的光是由自发辐射产生的非相干辐射光。一般来说,LED是个均匀的面发光器件。非相干光源的基本参数之一是它的亮度,即单位面积上的某方向在单位立体角内所发射的光功率,以字母 $L$ 来表示、所谓的均匀发光,

是指在整个发光面上各处的发光亮度都是一样的，并且在空间也是各向同性的。这种光源在空间单位立体角内所含的光功率分布遵循其法线夹角 $\theta$ 的余弦的 $m$ 次方比例关系： $L_e(\theta) \propto \cos^m \theta$ ，特例当 $m=1$ 时，即 $L_e(\theta) \propto \cos \theta$ 的光源就是朗伯光源。面发光二极管属于此类光源。

当发光面很小时，在空间的一点处面积为 $\Delta S$ 的小区域内所得到的光功率 $\Delta P$ 是光源的亮度 $L_e$ 和其发光面积 $A_E$ 与面积元( $\Delta S$ )对光源所张立体角 $\Delta \Omega$ 和该面积元位置的余弦 $\cos \theta$ 之乘积：

$$\Delta P = L_e A_E \cdot \cos \theta \Delta \Omega \quad (1-1)$$

式中： $\theta$ —观察方向与光源发光面法线的夹角

面发光二极管的亮度一般只有 $100\text{W}/\text{sr}/\text{cm}^2$ 。

## (二) 光纤与光源耦合

### 1. 直接耦合

直接将光纤靠近光源，由光纤接收光源发出的光。

#### (1) 光纤与半导体激光器直接耦合（如图 1-1 所示）

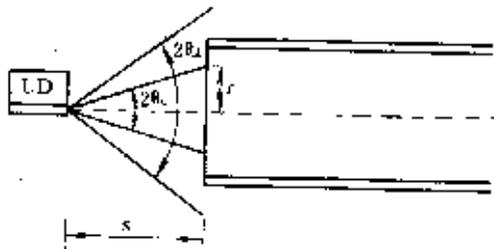


图 1-1 光纤与激光器直接耦合

半导体激光器的发光面积很小，当光纤端面与它的发光区靠得足够近的时候，激光器发出的光能全部照射到光纤端面上，甚至光纤的芯上。这时由光纤本

身的数值孔径决定了光耦合的效率  $\eta = \frac{\text{光纤接收的光功率}}{\text{激光器发射的总光功率}}$ 。

多模光纤，标称数值孔径 0.20；单模光纤一般只有 0.11 左右。说明通信用多模光纤的光接收孔径约  $23^\circ$ ，单模光纤只有  $13^\circ$  弱。由于光纤端面还存光反射，所以还需考虑到光垂直入射情况下有约 4% 的反射损失。估计光纤与半导体激光器直接耦合时的最高耦合效率约 20%，换言之，光纤与半导体激光器直接耦合时，光耦合损耗约 7dB（耦合损耗  $L = 10 \lg \eta \text{ dB}$ ）。

#### (2) 光纤与面发光二极管直接耦合

当光纤纤芯的截面积大于发光二极管的发光面积，且光纤端面离发光面足够近时，可以用比较简单的方法求出这时的耦合效率

$$\eta = \text{Sin}^2\theta_c = (\text{NA})^2 \quad (1-2)$$

式中， $\theta_c$  是光纤的临界接收角，NA 是光纤的数值孔径。标称多模光纤  $\text{NA}=0.20$  ( $\theta_c=11.5^\circ$ )，所以它与面发光二极管直接耦合时效率只有 4% 左右，也即光耦合损耗约 14dB。

## 2. 透镜耦合

光纤与光源直接耦合，特别是与非相干光源耦合时，光耦合效率是低的。为了提高光纤与光源之间的光耦合效率，可以在光纤端面与光源发光面之间加入某些光学元件。通过改变光源的发光的方向性或者改变光纤的接收角，来提高光耦合效率。

(1) 对于激光器一类相干光源，可以使用多种方法。其中最简单的方法是将光纤端面熔融成一个半球形状，它能起短焦距透镜的作用，改变光纤的等效接收角。这就是所谓的光纤端面球透镜，减小球透镜的半径，光纤的等效接收角增大，但最终有个极限值。这种方法可使耦合效率达到 60%。这种方法对于突变型光纤效果较好。

一种方法是用柱状透镜，将半导体激光器的垂直于 P-n 结方向上的光束进行压缩，改变它在空间的细长椭圆形分布，使光斑接近圆形，以利于与圆形截面的光纤进行耦合。图 1-2 示出柱透镜的排列情况。

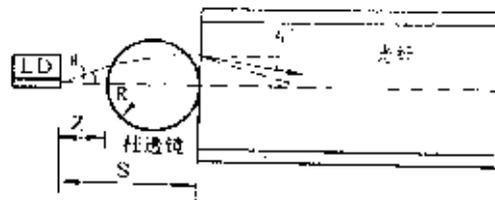


图 1-2 柱透镜耦合

从图 1-2 中可以看出，自激光器发出的张角为  $\theta$  的光，经过柱透镜的两次折射以后，比较小的角度  $\theta'$  射入光纤，实际上扩大了光纤的等效接收角。当柱透镜的半径 R 与光纤纤芯半径差不多或者更小一些，而且激光器的发光面位置  $z=0.3R$  时，能达到约 80% 的耦合效率。

第三种方法是通过一段锥形光纤来耦合。采用腐蚀光纤或熔融拉锥的方法将光纤弄成一段锥形部分，如图 1-3 所示。锥形光纤的前端（细的那端）半径为  $a_1$ ，光纤本身的半径为  $a_n$ 。

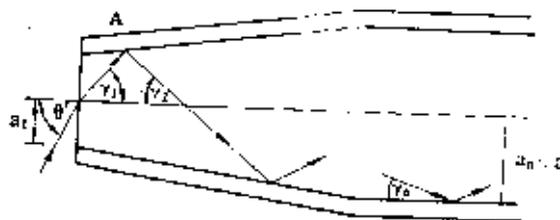


图 1-3 锥形光纤耦合

锥形光纤的前端的临界接收角  $\theta'_c$ 。与正常光纤段的临界接收角  $\theta_c$  之间有近似关系:

$$\frac{\sin \theta'_c}{\sin \theta_c} = \frac{a_n}{a_1} \quad (1-3)$$

公式 (1-3) 说明, 锥形段光纤的前端接收数值孔径扩大到了  $\frac{a_n}{a_1}$  倍。结果证实了这

种耦合方式效率可以达到 97%。

还有一种方法是通过凸透镜进行光耦合, 这是一种最常用的耦合方式。将激光器发光面放在凸透镜的焦点位置处, 这样, 通过透镜出射的光就会变成平行光; 然后再用第二个凸透镜, 将平行光重新聚焦到光纤的输入端面上。一般采用直径为 6mm 的凸透镜, 其焦距  $f$  为 4~15mm (用于光纤与激光器之间耦合, 可使用焦距长些的透镜)。一般, 使第二个透镜所成的像比发光面大 (如成像比率 4:1), 使入射光能充满光纤纤芯 (如图 1-4 所示)。

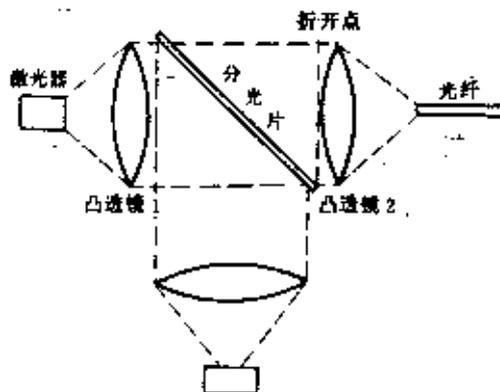


图 1-4 双凸透镜耦合

这种耦合方式用得较广泛, 在两个透镜之间还可以安放其它光学元件, 如加入可变光阑改变从第二个透镜出射的光束的孔径角 (这在以后光纤损耗测量的注入条件中将会看到); 如图 1-4 中已经示出的那样放置一块分光板, 就可用于双光束监控或监控光纤的对中情况; 当第二透镜换用不同焦距的透镜时, 又可改变从它出射的光斑的大小。

光纤与激光器之间的光耦合还可以通过自聚焦透镜 (自聚焦光纤) 进行, 调节自聚焦透镜的位置能使成像缩小或放大; 在自聚焦透镜前加一个柱透镜的复合透镜, 耦合效果更好, 光耦合效率可以达 80% 以上。

(2) 对于发光二极管一类非相干光源, 根据哈密顿几何光学刘维定理可知, 朗伯型光源, 无论在光纤与光源之间添加何种光学系统, 其光耦合效率都不会超

过某个极值  $\eta_{\max}$ :

$$\eta_{\max} = \frac{A_E}{A_F} (NA)^2 / n^2 \quad (1-4)$$

式中,  $n$  为光源与光纤之间介质的折射率;  $A_F$  是光纤的接收面积;  $A_E$  为光源发光面积;  $NA$  为光纤的数值孔径。公式 (1-4) 说明, 当光源的发光面积大于光纤的接收面积时, 添加任何光学元件都不能提高光耦合效率; 当光源的发光面积小于光纤的接收面积时, 通过附加光学元件的方法来提高光耦合效率的途径是有效的, 而且发光面积越小, 耦合效率的提高也就越多。

这一类光源的发光面直径较大, 一般利用附加光学系统的方法并不能改善光耦合效率; 这类光源的发光面积小时, 又会使它总的发光功率降低。一般地, 面发光二极管的发光面直径约为  $40 \sim 50 \mu\text{m}$  时, 耦合情况最佳 (对多模光纤而言)。用直径约  $100 \mu\text{m}$  的球透镜可以改善面发光二极管的发射光束的方向性, 使其半功率点发散角降至  $40^\circ$  左右。当今, 已经有一种新型的边辐射高亮度发光二极管, 它的发光区域很薄, 只有  $0.05 \mu\text{m}$  左右, 在垂直于结面方向上发射角也大大地减小了: 从  $120^\circ$  左右下降到  $35^\circ$  左右。用这种发光器件, 可望在与光纤耦合时获得较高的耦合效率。

## 二、光纤与光接收器的耦合

在光纤通信系统和光纤传输特性检测系统中, 所用的光电接收 (检测) 器件基本上是 PIN 光电二极管和 APD 雪崩光电二极管。光电二极管的光敏面积, 一般地相对于光纤纤芯横截面积而言, 是较大的。如 APD 的光敏面直径一般有  $100 \sim 300 \mu\text{m}$ , PIN 的接收面直径可大于  $500 \mu\text{m}$ , 甚至大达  $\phi 10\text{mm}$ 。所以光纤与检测器之间的耦合是比较简单的事情, 只要光纤出射端面 and 光电检测器的光敏面之间的距离足够近, 光纤出射的光能全部照射到检测器光敏面上, 那么它们之间的低损耗耦合就很容易实现。一般, 光纤与光检测器之间, 不使用任何光学元件, 就可以达到  $85\%$  以上的耦合效率。

虽然光纤与光电检测器之间的耦合比较容易, 一般采用直接耦合方式, 但也需要良好的对准调节和定位。有的场合, 特别是在检测仪器上和系统中使用裸光纤 FC 型活动连接器定位耦合, 有的通过耦合光纤 (尾纤) 用光纤活动连接器来耦合。有的场合下, 为了减小光检测器表面的光反射, 还需加合适的折射率匹配材料。

在必要的时候, 光纤与光电检测器之间也采用透镜来实现光耦合, 用该透镜将从光纤出射的光成像到检测器的光敏面上。用透镜耦合时, 即使光纤端面的位置稍有变动, 也不致于对光耦合效率产生影响。譬如, 在光纤的某些特性检测系统中, 为了提高光耦合的重复性, 或者在某些特殊场合中, 光纤出射端面不得不远离光检测器时, 常常使用透镜来进行光耦合。

## 第二节 光纤连接

### 一、光纤连接方法

光纤通信系统和光纤光缆传输性能检测系统中，都需要把光路连接起来，光纤之间的连接是必不可少的一环。光纤的连接本质上是光纤之间的对接耦合，光纤的连接是通信系统构成和光纤光缆性能检测中时刻要碰到的，我们必须熟练掌握光纤的连接技术。

在光纤之间实现互连主要有两种方式。一种是用连接器实现光纤的活动连接，它可以多次反复插拔装接。光纤通信系统的光端机和许多光纤光缆性能检测仪器都装有光纤连接器接口，对装有光纤接头的光纤，可以直接与这些端机或仪器相接，使用十分方便。只需注意，光纤连接器有许多种类，它们的结构有所不同，互相之间并不一定能互换使用，这时候就必须使用转接器（适配器）进行转接。另外一种光纤连接方式是固定连接或者永久性连接，这是一种得到广泛应用的光纤连接方式，在光纤链路构成中得到最广泛的应用。

光纤的固定连接也有多种形式，光纤连接过程中的光纤处理、端面制备等方法为光纤测量的基本技能，我们专门用一节来介绍这些技术。

### 二、光纤连接损耗的初步分析

在介绍光的固定连接方法之前，先初步了解一下光纤对接时的耦合损耗情况。

影响光纤对接时的耦合效率（或耦合损耗）的因素很多，这些因素基本上可分为两大类。一类是固有的，是被连接光纤本身的特性参数的差异，如纤芯直径、模场直径、数值孔径的差异、纤芯（或模场）的同心度偏差、纤芯随圆度等。由这些因素所引起的光纤对接损耗，一般是无法通过连接技术来改善的；另一类是光纤连接时光纤的端面质量、对中质量和连接质量等因素，具体来说就是光纤的端面切割质量，光纤轴间的横向错位、端面间距、纤轴的角度倾斜、纤芯形变等因素。这类因素所引起的连接损耗可通过连接技术的改进得到改善。

#### （一）光纤端面的反射损耗

两根光纤对接时，端面之间可能没有紧密接触而留有一些空隙。间隙中介质一般是空气，其折射率  $n_0$  与光纤纤芯的折射率  $n$  是不同的。这样，在两个光纤的端面上光传输时便会产生菲涅尔反射，引起光传输损耗。在一个光纤端面上，光传输时的耦合效率  $\eta$  为：

$$\eta = \left[ \frac{4nn_0}{(n+n_0)^2} \right]^2 \quad (1-5)$$

公式(1-5)说明不考虑其它因素时，光纤对接因端面间隙处端面反射的存在而引起的耦合损耗。

一般空气的折射率  $n_0=1$ ，光纤纤芯折射率  $n=1.46$ ，所以在一个光纤端面上的光耦合效率  $\eta=0.93$ ，即在一个光纤端面上产生反射损耗  $L_f$ ：

$$L_f = 10|\lg \eta| = 0.16\text{dB} \quad (1-6)$$

光通过光纤接点传输，经受在两个端面上反射，一次从发射光纤到空气；一次从空气到接收光纤，所以在一个光纤接点上，由反射引起的损耗总是  $0.32\text{dB}$ 。

这是个相当大的损耗，在实际的光纤对接时应设法避免或降低。减小这种反射损耗的途径，一是设法使对接的两个光纤端面紧密接触（如光纤连接器中的物理接触——PC），甚至干脆把两根光纤熔融连接起来，这样，两个端面之间完全没有了空气间隙，也就消除了因端面反射引起的光传输损耗。这一点，在监测光纤熔接过程中还可以用来判别光纤熔接质量的好坏。在无法完全消除面之间的间隙时，应在两个对接光纤端面之间加注折射率匹配材料，因其折射率接近光纤纤芯的折射率，从公式(1-5)可知，这样可以大大降低端面反射所引起的光传输损耗。

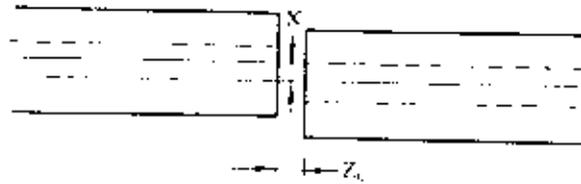


图 1-5 光纤对接时横向错位 X

### (二) 光纤的横向错位

光纤在对接时，无论用微调架调节对准还是用 V 型槽之类工具定位，都不可能使两根光纤的纤轴完全平行并对准，在两根对接的光纤的轴线之间多少有一些偏离，如图 1-5 所示。

当要求因纤轴的横向错位 X 所引起的光纤连接耗小于  $0.1\text{dB}$  时，对于常规多模渐变光纤 ( $2a=50\ \mu\text{m}$ ,  $\Delta=1\%$ )，横向错位必须小于  $3.0\ \mu\text{m}$ ；对于  $1300\text{nm}$  通信用单模光纤 ( $2a=10\ \mu\text{m}$ ,  $\Delta=0.3\%$ )，横向错位必须小于  $0.8\ \mu\text{m}$ 。显然，对单模光纤连接其对准确精度比多模光纤要高得多。

### (三) 光纤纤轴的角度倾斜

光纤连接时，因种种原因，使两根要连接的光纤纤轴互相不平行，形成图 1-6 所示的那种情况，即两根光纤的轴之间有一角度倾斜，这种纤轴之间的倾角  $\theta$  也会引起光耦合损耗。



图 1-6 纤轴之间的倾角  $\theta$

要使因纤轴倾角引起的光耦合损耗小于 1dB, 必须要求倾角  $\theta$  小于  $5^\circ$ ; 若使光纤连接损耗小于 0.1dB, 要求多模光纤的轴倾角  $\theta$  小于  $0.7^\circ$ , 而单模光纤的轴倾角必须小于 0.3。

#### (四) 光纤端面间隙

两根对接光纤端面之间留有一定间隙  $d$  时, 显然也会引起光传输损耗。

在同样的连接损耗要求下, 对端面间隙  $d$  的要求不如对纤轴的横向偏移  $X$  那样严格。

以上各种情况都要假定用同一种光纤进行连接的情况, 若连接的光纤不是同样光纤, 那末由于光纤本身特性参数的差异, 将引入连接损耗。

#### (五) 光纤参数的差别

##### 1. 多模光纤

我们把连接的光纤一根称为发射光纤, 记为 T; 另一根称为接收光纤, 记为 R。

(1) 纤芯直径不同, 它们的半径分别标为  $a_R$  和  $a_T$ 。当把它们连接起来时, 在均匀模式功率分布条件下的光耦合效率为 (假定  $a_T > a_R$ ):

$$\begin{aligned} R \rightarrow T \quad \eta &= 1 \text{ (无耦合损耗)} \\ T \rightarrow R \quad \eta_{SI} = \eta_{GI} &= \left( \frac{a_R}{a_T} \right)^2 \end{aligned} \quad (1-7)$$

(2) 数值孔径 (NA) 不同, 同样记为  $NA_R$  和  $NA_T$ , 并设  $NA_T > NA_R$ , 则在均匀模式功率分布条件下, 光耦合效率为:

$$\begin{aligned} R \rightarrow T \quad \eta &= 1 \text{ (无耦合损耗)} \\ T \rightarrow R \quad \eta_{SI} = \eta_{GI} &= \left( \frac{NA_R}{NA_T} \right)^2 \end{aligned} \quad (1-8)$$

(3) 光纤的折射率分布指数  $q$  不同, 记为  $q_R$  和  $q_T$ , 并设  $q_R \geq q_T$ , 则在均匀模式功率分布条件下, 连接时的耦合效率为:

$$\eta_{GI} = \frac{q_T(q_R + 2)}{q_R(q_T + 2)} \quad (1-9)$$

(4) 光纤纤芯椭圆。光纤纤芯不圆时, 对接损耗就会增大。纤芯不规则无法考虑, 这里只涉及纤芯椭圆的情况并设椭圆度  $e = \frac{b-a}{a}$ , 而且连接的两根光纤有同样的椭圆度, 在最差的情况下对接, 即一根光纤的长轴 (2b) 对另一根光纤的短轴 (2a), 这时, 对接收的耦合效率  $\eta_{MM}$  为:

$$\eta_{MM} = \frac{4}{\pi} \sin^{-1} \frac{1-e}{\sqrt{(1-e)^2 + 1}} \quad (e \leq 5\% \text{ 时}) \quad (1-10)$$

## 2. 单模光纤

模场直径的差异。用模场半径计算连接时的耦合效率：

$$\eta = \frac{1}{4} \left( \frac{\omega_T}{\omega_r} + \frac{\omega_r}{\omega_T} \right)^2 \quad (1-11)$$

由于单模光纤的特殊性，所以无论是从模场直径大的光纤向模场直径小的光纤传输还是从模场直径小的光纤向模场直径大的光纤传输，它们的光耦合效率是一样的，即连接损耗一样。这一点，与不同芯径的多模光纤连接的结果完全不同。

### (六) 光纤端面情况

光纤相连接时，光纤的端面都需经过切割处理，所得的光纤端面与理想状态总有一点差别。端面质量不理想，造成了光纤连接时光传输损耗增大，特别是在对接（不是熔接）时，影响更大。

1. 光纤端面与纤轴不垂直(斜的端面)，对接时有一夹角 $\theta$ ，如图1-7所示。 $\theta$ 是两个光纤的端面角 $\theta_1$ 与 $\theta_2$ 之和。这种光纤端面相对接时，在均匀模式功率分布时，在突变型光纤时耦合效率是：

$$\eta_{sl} = 1 - \frac{|K-1|}{\pi K \sqrt{2\Delta}} \theta \quad (1-12)$$

式中， $K$ 是光纤折射率与端面间介质折射率之比， $\Delta$ 是光纤纤芯、包层相对折射率差。

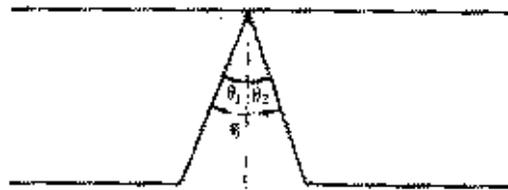


图 1-7 斜端面耦合情况

2. 凸形光纤端面。这种端面情况如图1-8所示。图中 $d_1$ 、 $d_2$ 表示两个端面的弯曲程度。突变型光纤，在均匀的模式功率分布情况下，其耦合效率为：

$$\eta_{sl} = 1 - \frac{1}{2\sqrt{2\Delta}} \frac{|K-1|}{K} \frac{(d_1 + d_2)}{a} \quad (1-13)$$

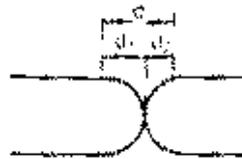


图 1-8 凸形端面对接

以上列举了影响光纤连接时耦合效率或耦合损耗(即连接损耗)的许多因素,以及单独考虑一种因素影响的结果。实际光纤连接的光传输损耗是各种因素综合影响的结果,可以在以后的实际操作中参照上述结论,分析体会影响光纤连接损耗的主要因素。

### 三、光纤的熔接

在这一部分我们将简单介绍几种光纤固定连接的方法,并着重介绍光纤熔接的全过程。这些方法是在光纤检测和通信工程中要广泛使用的。

#### (一) 光纤固定连接的几种方法

##### 1. 套管连接

光纤经过去除涂层、清洁处理后,插入图 1-9 所示的套管,直到两个端面接触。一般地需要在切割好的光纤端面上先蘸上折射率匹配材料再进行对接。套管的内径应与光纤外径相当,这样可得到满意的连接效果。

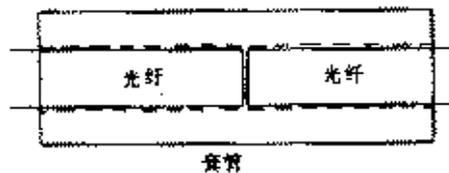


图 1-9 套管连接

##### 2. V 形槽连接

将处理好的光纤放入 V 形槽内,放上盖板,然后轻轻推插光纤,使两个端面接触到。必要时端面之间应加注匹配材料。V 形槽的深浅和光纤外径的一致性将保证可以获得满意的连接效果(见图 1.10)。

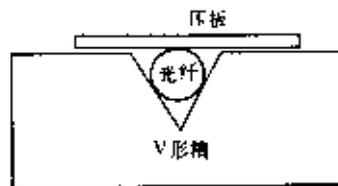


图 1-10 V 形槽和板

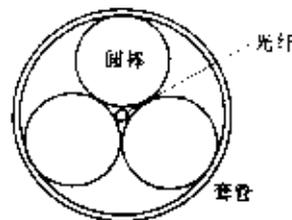


图 1-11 三棒连接

##### 3. 三棒连接

图 1-11 示出了三棒的放置,棒的直径约为光纤外径的 6.5 倍,外面套有弹性材料,用以固定棒的位置。用类似于套管连接的方法使光纤在三棒的空隙中对接。

##### 4. 熔融连接

用电弧、火焰或激光加热要连接的光纤的两个端面(已处理过的),使它们熔融直至“烧结”在一起。这种方法连接光纤都是在专门的光纤熔接机上完成的。

## (二) 光纤的熔接

### 1. 光纤的熔融方法

可以用多种方法加热光纤并使其熔融。如用电热丝加热，这种方法不容易得到能使玻璃光纤熔融的高温(对石英玻璃光纤，其熔融连接温度要 2000℃ 以上)。也可以有用大功率激光器，如 CO<sub>2</sub> 激光器的激光束加热光纤，这可以获得非常清洁的加热状态，很适宜于做高强度光纤接头。但是使用激光束加热的激光器辅助装置较为庞大，花费也大，所以使用得并不广泛。也有使用各种火焰进行加热的，如丁烷氧焰，氢气火焰，氢氧焰，氢氟焰，氢氟氧焰等等。特别是氢氟焰，能做出强度最好的光纤熔接头。可惜的是使用各种火焰加热时自动控制比较困难，而且也不甚安全，所以还没有得到普遍推广应用，仅在个别对光纤接头强度有特高要求的场合使用。另外一种加热方法就是通过电弧放电，在光纤端头附近局部区域通过放电的方法产生高温使光纤熔融。这种方法可以通过控制电弧的放电电流而很方便地得到不同的温度，所以很容易实现自动控制。而且用这种方法所做的光纤接头质量好、损耗小、接头的强度也不错。这种电弧熔接光纤的方法已经在光纤熔接机中得到了广泛的应用。

### 2. 用光纤熔接机熔接光纤

光纤熔接机的发展史，已经经历了几代商品过程，最早的光纤电弧熔接机，光纤的对中和熔接过程都是手动操作的。从只适用于多模光纤发展到适用于多模光纤单模光纤的熔接，光纤熔接机的对中调整和定位精度大大提高了，可以达到 0.1 μm。最初的多模光纤熔接机以光纤外层作基准面进行对中调整，以后发展成光功率监测调整，现今的自动对中熔接机融入了显微摄像、微机技术和图像校正等新技术，形成了“纤芯直视”式自动熔接机，甚至可以一次熔接多根光纤。

光纤熔接机必须具备下述性能：

- 熔接机必须具有能固定光纤的精密光纤夹具，放置发射光纤和接收光纤的夹具的轴向应有极高的平行度。

- 要有精密的微调功能，一般要求能在 x、y、z 三个方向上能进行精密调整，调节精度达 0.1 μm。

- 电弧放电要稳定，光纤熔接条件可调节，以适应各类光纤的熔接。

#### (1) 光纤熔接前的准备工作

在光纤熔接的全过程中，需要精确地执行许多操作，主要是三个方面，即光纤端面制备、光纤精密对中和光纤的熔接和定位。在光纤熔接之前，光纤涂层的去除、清洁及端面制备工作必须仔细认真地对待。

- 光纤护层的去除。剥开光缆，其中的光纤的外面可能还有两层塑性保护层。一般，最外层是光纤的二次被覆层，二次被覆层可能是紧套的尼龙护层，也可能是松套的聚丙烯(P.P)、聚酯(PBT)、聚四氟氯乙烯(FEP)等塑料套管。这二

次被覆层可以用专用的割刀割断然后用手拉去；在没有专用工具时，用单面或双面刀片割断被覆层，用手拉去套管。但除去紧套的尼龙护层必须用刀片来削除。

紧贴着石英玻璃光纤外表面上还有一层塑料涂层，即光纤的一次涂覆层，这一层涂覆材料一般用两种方法来去除。一种是机械方法，可用刀削去，也可用火焰把它烧掉，最好利用专用工具来剥除一次涂覆层，用机械方法剥除光纤的一次涂覆层，可能会损伤石英玻璃光纤的外表面，特别是用火焰方法去除涂层，将使光纤本身的机械强度大大降低；另一种方法是化学方法。用某种化学溶剂来去除光纤上的一次涂覆材料，根据不同的一次涂覆材料选用不同的化学溶剂；紫外固化 (uv) 的丙烯酸酯涂层，可以用二氯甲烷或二氯乙烷和三氯甲烷中任何一种作溶剂，将带有涂层的光纤在溶剂中浸泡数分钟，这类涂层便会溶胀，甚至脱落。用脱脂棉或纱布轻轻揩抹就能方便地去除这类涂覆层；当光纤的一次涂层材料是有机硅树脂时，需把它放在浓硫酸中浸泡，直到把有机硅树脂涂覆层全部溶解掉；如果光纤的一次涂覆层材料是环氧树脂，那么就要用热的（约 200℃）强酸（如浓硫酸）来浸泡、去除。硫酸有很强的腐蚀性，使用时必须千万小心，务必慎用。

光纤的一次涂覆层去除后，需仔细检查一下一次涂覆层是不是已经去除干净了。一次涂层去除干净以后，用蘸有酒精（无水乙醇）或丙酮的纱布或脱脂棉捏住光纤轻轻擦洗，务必使去除了一次覆层的裸光纤外表面上没有污染、水份及灰尘，否则会影响光纤熔接质量，甚至出现气泡。

● 光纤端面切割。无论是光纤对接还是熔接，要获得耦合损耗小的光纤高质量接头，被接光纤端面的质量是关键。光纤连接，要求光纤端面必须平整、端面与纤轴垂直。要得到满意的光纤端面，必须使用光纤切割刀等手段来获取高质量的光纤端面。当然可以采用切割、研磨、抛光的方法来获得平整的光纤端面，就像做光纤连接器那样，但这种手段太繁杂，不能在要求快捷时使用。在光纤对接和熔接过程中现在都使用专门的光纤切割刀来制备光纤端面，现在商品光纤熔接机都附有性能很好的光纤切割器。

高级的商用光纤切割刀，可以做出几乎接近理想的高质量光纤端面，而且成功率也很高。这些光纤切割刀工具所用的光纤切断方法基本上有两种。一种是在施加有一定张力的光纤上用金刚石一类刀刃在光纤的要切断部位处划（或刻）痕，一旦光纤表面出现裂纹，光纤就会在所加张力的作用下在划痕处崩断，从而得到所要的平整端面。另一种是先在裸光纤上用刀刃划痕，然后弯折光纤，或者在对光纤同时施加张力的情况下弯折光纤，光纤折断后便获得高质量的光纤断面。实际切割光纤时，对光纤施加的张力应在正确的范围内，如对外径为  $\phi 125 \mu\text{m}$  的石英玻璃光纤，所加的张力约 100~300 克。另外，必须注意，在弯折光纤时要防止光纤受到扭转（光纤的扭转必须小于 1cm），否则断裂端面会出现唇边，或断面粗糙，如图 1-12 中所示的情况 (a) 和 (b)。

这种划痕-弯拉光纤的切割过程可用图 1-13 来概括:



(a) 唇边; (b) 中间雾状区右边粗糙不平; (c) 良好的端面

图 1-12 光纤端面的质量

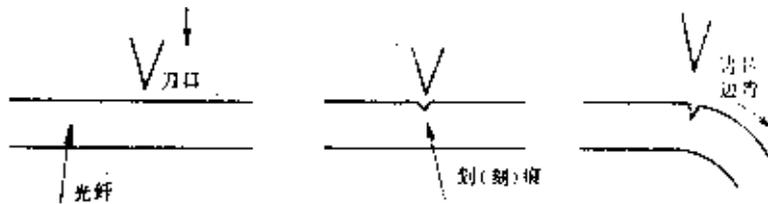


图 1-13 光纤端面切割过程

在图 1-12 中, 已经看到了切割光纤所得到的质量, 我们可以把光纤断面分成三个区域, 见图 1-14 所示。

(a) 划痕点附近虚线内的区域, 其半径为  $r$ , 这是很平整的镜面区域; (b) 镜面区域边缘附近的雾状模糊区; (c) 凹凸不平的粗糙区域, 位于划痕点的对面。

光纤断面上的镜面区域的大小与光纤上所受到的本地应力  $F$  有关。

$$r = \left( \frac{K}{F} \right)^2 \quad (1-14)$$

式中,  $K$  是镜面常数, 对于熔融石英  $K$  为  $7.5\text{kg}/\text{mm}^2$ ; 碱玻璃的  $K$  为  $6.1\text{kg}/\text{mm}^2$ 。从(1-26)式可知, 在光纤上用金刚石划痕以后, 光纤上必须有足够的应力, 才能使光纤断裂; 但是, 所加的应力不能太大, 否则镜面区域的半径将太小。同时在光纤划痕点的对面将出现上述 (b) 那样的粗糙不平的区域。由公式(1-14)得, 要使镜面区域的半径  $r \geq a$  ( $a$  是光纤半径), 要求在端面上所有点处的本地应力  $F$  小于  $K/\sqrt{2a}$ 。但是无疑地,  $F$  必须大于 0。否则在划痕点的对面将形成唇边。此外, 应力  $F$  必须与光纤的纤轴平行。应力  $F$  与纤轴不平行的后果是形成非零端面角 (即端面与纤轴不垂直)。这样, 光纤上所加应力  $\sigma$  的范围是  $0 < F < K/\sqrt{2a}$ 。若在光纤上划痕太轻, 那么需要加比较大的应力才能使光纤折断, 这样得到的光纤端面质量就不会高。但是, 划痕太重, 会在端面上留下缺口, 甚至直接弄断光纤。对于单用张力拉断光纤的切割方法, 为保证获得镜面似的端面, 需加较重的

划痕，使在划痕点处所受的张应力最大，而后向周边逐渐减小，只要直到划痕点对面的应力仍然大于零的话，这样获得的光纤切割端面的质量是好的。对光纤施加张力的同时再弯曲光纤，是通过光纤弯曲产生弯曲应力  $F_b \left( = E \frac{a}{R} \right)$ ，在光纤上实现上述应力状态（E 为光纤的杨氏模量，石英光纤的  $E=7000\text{kg/mm}^2$ ，R 是弯曲半径）。

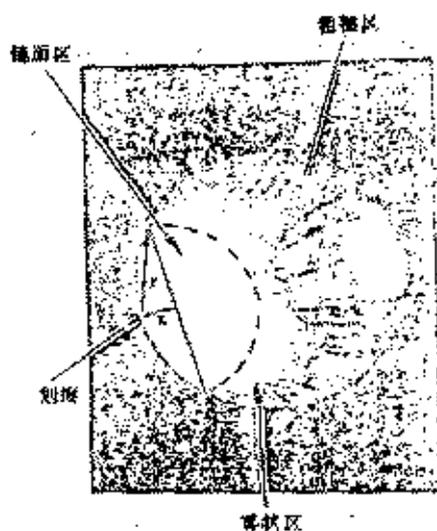


图 1-14 光纤断面情况

我们了解了光纤切割的断面形成过程，将有助于掌握手持光纤切割端面的方法。因为有些场合受条件限制没有很好的光纤切割刀，有些场合用手工切割光纤可以加速检测过程。所以必须掌握光纤手工切割制备的技能。手工切割光纤时，手持裸光纤，用金刚石刀、红宝石刀、或碳硅片的刀口以一定的力在裸光纤表面上划（刻）痕，然后拗断光纤，手工切割光纤过程很简单，但仍需多加练习才能熟练掌握。特别要注意对光纤划痕时，切割刀口必须与光纤轴要尽可能垂直。手工切割所得光纤端面的端面角在  $0 \sim 5^\circ$  之间。优异的光纤切割器可以得到端面角小于  $1^\circ$  的光纤端面。

光纤切割工具再好，也不可能达到 100% 的成功率，因此在切割光纤以后，应检查一下光纤的端面质量如何。一般在光学显微镜下观察光纤端面，从放大的端面像能清楚地看出端面质量情况，正如图 1-12 所示的那样。同时还可以看出光纤端面的清洁程度。一旦发现光纤端面质量不好或被沾污时，应重新清洗、切割，直到满意为止。现在商品光纤熔接机都有观察监视功能，光纤端面从正交的两个方向得到监视。

## (2) 光纤的熔接

● 裸光纤在制备好端面以后，就可放入光纤熔接机的光纤夹持器上并固定。光纤夹持器多为 V 形槽结构，压板由弹性材料做成。注意用压板夹持光纤时，应

压在光纤的未去除涂层的部分，不要夹在裸光纤上，以免光纤表面受到损伤或者甚至夹断裸光纤。

有些光纤熔接机的光纤装夹，光纤是以一定的弧度放置的，这样可以保证近光纤端面附近一段保证平直，如图 1-15 所示。

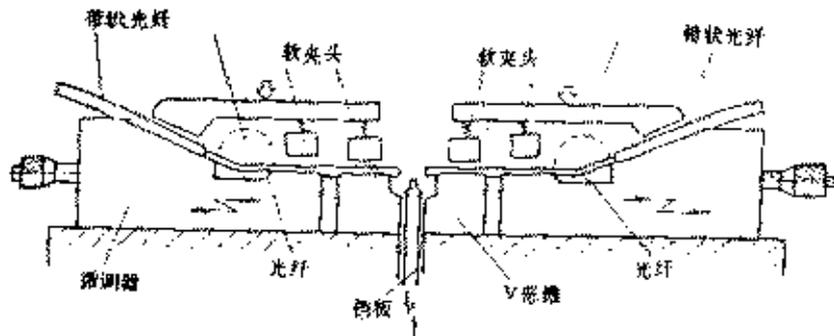


图 1-15 带状光纤熔接机的夹纤机构

- 光纤对中。利用光纤熔接的精密微调机构，将两根要连接的光纤面准确地对中。可以根据光纤的外表面作基准面使被连接光纤对中；也可以根据透过的光功率大小为依据进行对中；也可以以光纤纤芯中心为基线进行对中。这一过程，在自动光纤熔接机上是由机器自动完成的，光纤对准精度优于  $0.1\ \mu\text{m}$ ，调节范围数十微米。一般，对中过程需在 x、y、z 三个方向反复进行，直至达到一个最佳位置。有些光纤熔接机只有一维调节机构（z 方向）。

- 放电。在光纤熔接机的电极上加上直流电压、交流电压或高频电压都能引起两个电极间的火花放电。光纤自动熔接机中，由微机自动控制放电电流的大小和放电时间的长短，甚至有的还通过气压传感器自动调整放电强度。图 1-16 示出了电极之间放电电弧的强度分布。

- 光纤的熔接过程。把光纤熔接起来是使光纤对中状态固定下来的最好的一种定位方式，是获得高质量光纤接头的最后的关键过程。

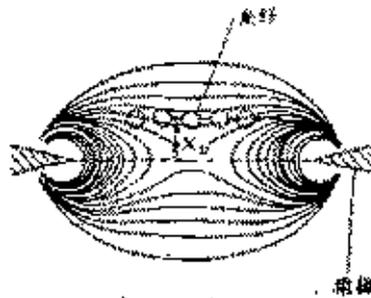


图 1-16 电火花的电流分布

自动光纤熔接机中存储有 20 多种熔接参数，使用时必须根据光纤类型预先选用设定，有些可能要先经熔接试验后，才能选定。



究皎皖 □ 翫屑□□□ □ □ □  
亭 晉□ □□□ 飴 Ⅱ 藿ó □





□□□ 罍 Ψ □ □ 罍 □ □ 楮 拊 □ 缸 菸 □

葑 □ □

Í □ 畚 𠄎 非 □

∞ Ā □ □ 非 □

罍 罍 ⑧ 箱

□ 𦏰 𦏰 □ □

□ □ 俚

箱

□ 铿 𠄎 □

□ 𠄎 □

□ □ □

ε ˘

□ W □

𦏰 □ □ □ 罍 菘 扶

铿 志 彡

胙 □ □ □ 𦏰 𦏰 𦏰 𦏰 𦏰 𦏰 𦏰 𦏰 𦏰 𦏰

Ŭ

□ □ 羈

□ 𦏰 𦏰 𦏰 𦏰 𦏰 𦏰 𦏰 𦏰 𦏰 𦏰

r ∞ □

D

□ 𦏰 𦏰 □

□ 𦏰 𦏰 𦏰

Ψ □

□ □ 菘 □

□

□ 乞

□ 𦏰 □ 𦏰 □

𦏰 □

□

0 𦏰

□ 𦏰 □ □

坑 𦏰 N 𦏰 𦏰 𦏰 𦏰 𦏰 𦏰 𦏰 𦏰 𦏰 𦏰

𦏰 □ □ 𦏰

□ 葑 𦏰 𦏰 □

□ 箱 □

□ 𦏰 □

𦏰

坑 余 □

















愀     □ ☞    □ Ā □   □ □ □ □     愀  
□ ☞   □ Ā   ☉ □     □   督   ◡     □     齋  
□  
□ □ □ □ □     愀     □ ☞   □ Ā □  
□  
□ □     愀     □ ☞   □ Ā  
□  
□ □   □ □   □ □ □ □ □     愀     □ ☞  
□ Ā     □ □   □ □   □ □   慮 捎 □ □   箱  
□  
□   虐   ◡     □ 齣 학     □ □   □ □   ㄹ ㄷ ㄹ ㄷ ㄹ ㄷ   鵬   □  
□ ◡ ◡ □ □ □ □ 豳 +     𠄎 𠄎   □ □   □ □   𠄎 𠄎

驥   □   □ □     𠄎     v   □   ㄹ □ ㄹ   u  
   𠄎 照 ㄹ □ □     憐 □ □ □ □   □

① ☉     𠄎 蕙   □ ◡ 𠄎 𠄎   □ □   □ □   □ □   □ □  
□ □ □ □   □ 葍 𠄎 葍 𠄎 □ □   脛     □ 葍   WS   ◡  
ㄹ     ㄹ     莧   𠄎   鷓 𠄎 □ □ □ □ □ □ □ □ | □ □  
⑦ □   □ ㅅ □ □ □ □ ◡ 葍 □ ㅅ   ㄹ a ◡   𠄎   □ □   枳   □   𠄎

   綾 □ ㅅ □ □ □ □ □ ◡     𠄎     𠄎   𠄎  
ㄹ □     □   □ y ㄹ □ □ □ □   桧 膈     葛     □  
□ □ ㅅ □ □   葍   □   葍 𠄎   □ ㄹ     R □ □   ㅅ ㄹ □ ㅅ 葍 葍  
葍   □ ㄹ □ □ □ □ □ □ □ ㅅ □   □ □ □ ㄹ □ □ ㅅ 𠄎 𠄎 葍 葍   ◡  
□ □ □ □   □ □ □ ㅅ   v □   ㄹ ◡ □ (ㄱ) □ □ □ □ □ □ □ □  
q     u     著 □ ㅅ ㄹ ◡ □ ☞ □ □   □   葍 □   ㅅ   □ ㅅ ㄹ ◡ 著  
葍 ㄹ □ □ □ □   葍 𠄎   □ □   葍   ◡     ㄹ ◡ □ □ □ □  
ㄹ     □ 豈 N   □ □   ㄹ     ㄹ     𠄎'   \ □   著 ㄹ ◡ ㄹ N ㄹ

   0 ㄹ   ㄹ ㅅ   \ □   著 ㄹ ◡ □ ㅅ   □   ㄹ   \ □   ㄹ 𠄎 □ ㅅ  
□ □ '   ◡   □ □ ㅅ ㄹ ◡ □ □ □ □ □ □ ' □ □ □   ㄹ     職 葍(3) □ ' 葍  
ㅅ   葍 面   □ □   ㄹ   桥   ◡ □ □   □ □ □ □ □ □ □ □   𠄎  
□ □ ◡ □   □   ㄹ □ □ W   □ □   □ W ㄹ ㄹ □ □ □ □ □ □ □ □ □  
ㅅ □   □ ㅅ □   ㄹ ㄹ 葍 ㄹ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □   著 □   ㄹ   著 □ ㅅ ㄹ □  
□ ㅅ □ □ □ □ 桎 □ VIII □ □ ㅅ ㄹ ◡ □ □   □   □   葍   □   葍  
葍   □   □   □ □ □ u     著   葍   ◡ □ □ □ □ □   葍 □  
□ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ u     著   葍   ◡ □ □   □   葍 □  
□ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ u     著   葍   ◡ □ □   □ □ □ □ □   □ □ □

□ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □   ㄹ   𠄎   □   □ □ □ □ □ □ □ □ □











Ü □□ 羈 □ 왓r o □ D  
꺄 𪛗 □ □ 주 𪛗 𪛗 □ □ □ □ □ □ 𪛗 □ □ 蕨 □  
□ □ □ 乞 □ 𪛗 □ □ 擦 𪛗 □ □  
0 𪛗 □ 𪛗 □ □ □ 坑 𪛗 N 𪛗 𪛗  
뵓 汶 □ 𪛗 □ □ 𪛗 □ □ 𪛗 □ □ 葑 𪛗 𪛗 □ 箱 □  
□ □ 𪛗 □ □ 𪛗 坑余 □















愀 □ㄱ □Ā 𤑔𤑔捎 𤑔 灼祥 □

愀 □ㄱ □Ā 𤑔 𤑔 𤑔 𤑔 𤑔 𤑔

곶꺠꺠 ㅍ □ 齋 □ □ 督 ㄱ  
□ 齋 勻 □ 葑 □ □ 愀  
□ㄱ □Ā □ ' 𤑔 □ □ □ □ □ □

□□□ □뽁□□내□□□' 橙꺠□ 齋 □

愀 □ㄱ □Ā □ □□□ □ 愀 □ㄱ  
□Ā ㅅ □ □ 督 ㄱ □ 齋 ㄱ

□□□□ □ 愀 □ㄱ □Ā □ □□ □

□□ □ 愀 □ㄱ □Ā □

□ □ □□ □ 愀 □ㄱ □Ā □

□ □ □□ 𤑔捎 □□ 菡 □ □ 虐

ㄱ □뽁학 □ □ 곶 왔꺠꺠 ㅍ 鵬 □ □ ㅍ

ㄱ □□□□ 豸 + 𤑔變 곶 □□ 𤑔變驥 □

● □ □ ㄱ 곶 □ □ 𤑔꺠꺠□□□ □

□□ 菡 □ □ □ 乞

□ㅍ□擦 ㄱ□ □ 0 畜 □뽁□□

坑 ㅍN ㄱ 𤑔 𤑔□ 𤑔汶均 □ □ 왔□□ 典

□ 葑 𤑔 □菡 □ □ ㄱ 𤑔 坑余 □





















愀 □ㄷ □Ā 윗ㅇ ㄴ □畧彰□ □畧  
콜릭할 ㅓ □ 齋 □ □ 督 ㅇ  
□ □ 齋 勻 □ 葑 □ □ 愀  
□ㄷ □Ā □ ' 號 □ □ □ □ □ □ □  
□□□ □문□□내□□□ㄹ 橙곡□ 齋 □  
愀 □ㄷ □Ā □ □□□ □ 愀 □ㄷ  
□Ā ㅅ □ □ 督 ㅇ □ 齋 ㄷ  
□□□ □ 愀 □ㄷ □Ā □ ㄷ□  
□□ □ 愀 □ㄷ □Ā □  
□ □ □□ □ 愀 □ㄷ □Ā □  
□ □ □ □ 慮捎 □□ 藉 □ □ 虐  
ㄴ □畧학 □ □ 골 윗킹할 ㅓ 鵬 □ □ ㅓ  
ㄴ □□□□ 豕 + 𪚩樂 골 □□ 𪚩樂驥 □  
藉 归□□ □ □□ □畧□꺽菝 腎  
i匣□b □ □ □ □꺽 □ ㄱ ㄱ  
換 □□ □%□□ □꺽 □ ㅓ 換□□□b ㄴ □ □  
골z골 □□□ □ㅇ ㅓ ㅓ ㅓ ㅓ ㅓ ㅓ  
□꺽 ㄱ □ □ □ □ ㅓ ㅓ ㅓ ㅓ ㅓ ㅓ  
왈알땀 ㅇ□ 救 □ □꺽□□□□ 藉 i □ □ □꺽菝絶  
余d i 捷蒟 □ 鶉 面 ㄴ □ □ □  
콜릭할 ㅓ□꺽□y □ □ 꺽할 ㅓy 윗葑□□□□畧학 ㅓy □葵 □大 ㅓ한 □  
꺽f□꺽 ㅓ ㄴ □꺽蒟 □葵 v 꺽를할 골 □ □ ㅓ □  
藉 ㅓR療링할□瑞慥□□ ° ㅓ꺽꺽□□□ ㅓ 齋  
齋 齋 □□꺽□꺽목□□ ° □ 꺽땀□□□□  
□□□ ㅓ □ □ □ 慮 □ □R ㅓ를할□□□□□  
卷 □ □ □ ㅓ① ㅓ3 ㄴg 꺽를할 □리털 향ㅓ □ 違  
□□ □ □ □ □  
齋 □□ □ ㅓ ㅓ 齋 □ 8. □ 齋  
□□꺽목 땀□ □□ □ □□□  
た □畧後彼□R꺽 □ □畧ضخم 齋 2 꺽 ㅓ □ ㅓ ㅓ  
ㅓ □ □ □ 鵬 ㅓ ㅓ ㅓ ㅓ ㅓ ㅓ ㅓ











□Ā      𠄎焯捐⊕ ； 灼祥 □      愀      □𣎵  
□      □  
□Ā      𠄎⊕ ⊕      □𣎵彰□      □𣎵      𠄎⊕⊕⊕⊕ ⊕      □      𣎵𠄎  
□      □  
𠄎□□□□□□□□□□      □      □      督      ⊕      □      齋      匀      □  
葯      □      □      愀      □𣎵      □Ā      □      '      𣎵  
□      □  
□      □      □      □      □      □□□      □𣎵□□𠄎□□□𠄎 橙  
𣎵□      齋      □      愀      □𣎵      □Ā      ⊕□      □  
□Ā      □      □□⊕□      愀      □𣎵      □Ā      ⊕□      □  
□      □      督      ⊕      □      齋      ⊕□□⊕□  
愀      □𣎵      □Ā      □      ⊕□      □□  
愀      □𣎵      □Ā      □      □      □      □□□  
□  
𣎵□□□      □□      -      葬𣎵 𣎵□□      𣎵𠄎□□□𣎵□□□  
𣎵𣎵□𣎵□□°      □大      ⊕□𣎵      □      𠄎      □      □      □      𣎵𠄎□□𣎵  
□      □𣎵□□⊕大      ⊕□𣎵      □      □      □𣎵□张□      □□𠄎大      ⊕□  
𣎵𣎵𣎵□𣎵𣎵      𣎵𣎵𣎵𣎵𣎵□𣎵𣎵𣎵𣎵      捶 ； 灼  
□□⊕□⊕      𣎵𣎵𣎵𣎵      𣎵𣎵𣎵      𣎵      □□𣎵𣎵      𣎵𠄎□𣎵漏      □  
𣎵𣎵𣎵𣎵𣎵□□□□      (11)      葛      □□𣎵      𣎵𣎵      面  
𣎵      □      𣎵      □R□𣎵𣎵      𣎵𣎵      □大      ⊕°      𣎵𣎵  
□      𣎵      □      □𣎵𣎵𣎵𣎵𣎵捶□ ； 灼 卦      □□□  
□大      ⊕      齋      𣎵      𣎵𣎵𣎵𣎵𣎵𣎵𣎵      (𣎵)𣎵      □□□𣎵  
捶      齋      𣎵      𣎵      刀 刀      刀A      刀      □      捶 ； 灼□𣎵 刀  
𣎵𣎵𣎵𣎵□𣎵      𣎵      𣎵□□□      𣎵      ； 灼□𣎵 刀      𣎵□□□□  
𣎵𣎵𣎵𣎵𣎵𣎵      □      𣎵      ； 灼𣎵□□□      𣎵𠄎□𣎵𣎵𣎵𣎵𣎵𣎵𣎵  
□□      □      愀      □𣎵      □Ā      □𣎵□  
□  
𣎵□      □      愀      □𣎵      □Ā      □  
□  
愀      □𣎵      □Ā      𠄎焯捐⊕ ； 灼祥      □  
□  
愀      □𣎵      □Ā      𠄎⊕ ⊕      □𣎵彰□      □𣎵  
□  
𣎵𣎵𣎵𣎵 ⊕      □      齋      □      □      督      ⊕  
□      □      齋      匀      □      葯      □      □      愀  
□𣎵      □Ā      □      '      𣎵      □      □      □      □      □      □

□□□ □윤□□내□□□□ 橙곡□ 齋 □  
愀 □ㄷ □Ā □ □□□ □ 愀 □ㄷ  
□Ā ㅅ □ □ 督 ㄴ □ 齋 (ㄷ)  
□□□ □ 愀 □ㄷ □Ā □ □ (ㄷ)  
□□ □ 愀 □ㄷ □Ā □ □  
□ □ □□ □ 愀 □ㄷ □Ā □ □  
□ □ □□ □□ □□ 慮捎□□ 藉 □ □ 虐  
ㄴ □ 齋학 □ □ 골 왔링할 ㅁ 鵬 □ □ ㅁ  
ㄴ □□□□ 豸 + 𪚩變 골 □□ 𪚩變驥 □  
彰□ □ 齋□골릭할 ㅁ □ 齋  
□ □ 督 ㄴ □ 齋 匀 □ 葑 □  
□ □ □ 愀 □ㄷ □Ā □ ' 號 □ □  
□□ □ □ □ □□ □윤□□내□□□□ 橙곡□  
齋 □ □ 愀 □ㄷ □Ā □ □□□ □  
愀 □ㄷ □Ā ㅅ □ □ 督 ㄴ □  
齋 (ㄷ)□□□ □ 愀 □ㄷ □Ā □ □  
□□ □□ □ □ □□ □□ □ □  
□Ā □ □ □ □□ □ □  
愀 □ㄷ □Ā □ □ □ □ □□  
慮捎□□ 藉 □ □ 虐 ㄴ □ 齋학 □ □ 골  
왔링할 ㅁ 鵬 □ □ ㅁ □□□□ 豸 + 𪚩變  
골 □□ 𪚩變驥 □ □ □ 𪚩 v □  
왔□뉘變y□□𪚩變揚𪚩漏□□菘□□鏻ㄹ □핀□㉔ > 照畧□□ 憐□  
□ ① ㄷ 腴蕒 □ ㉔ 𪚩 𪚩 □ □ □ □  
□□ □ □ □ □ 藉 𪚩廬葑 𪚩□ □ 腥 □ 藉  
WS ㄴ 𪚩 왔 𪚩 𪚩 □ 𪚩 □  
ㄴ ⑦ □ □ ㅍ□□□ ㅍ 𪚩 𪚩 𪚩 𪚩 𪚩 𪚩 𪚩 𪚩 𪚩

































薑□□□□□□□□□□u      著□ ᄉ° 著□씩,□□팍 □씩□□□桴□viii□□씩  
j ᄉ° □ □ 茈 葶□                      茈 葶      茈      □룩 u  
著 葶 ᄉ° □ □ □눈      葶□                      □눈      葶 □눈 □룩 u  
著 葶 ᄉ° □ □                      꺾 □                      꺾 卦삼 ᄉ° 艘  
□                      □b ᄉ° □ □ □ □ □□                      薑①      “ 莖  
葶                      ㄱ □ □                      莖□□□, )鐘 □꺾葶 v□薑變□□  
攀<sub>昫昫</sub> 驶      □□□□                      愀                      □ᄉᄉ □A

□(ㄱ)□ □□ᄉᄉ □□ □ □  
3/5 荊□□      ᄉ°據      ㅍ(ㄱ)□ □ □ □ □ □      ㅍ 靛船 □                      [□  
꺾 薑□□□                      □                      愀  
□ᄉᄉ □A                      □(ㄱ)□(ㄱ)□□ᄉᄉ □□ □

□ ᄉ° 靛□□□  
j 靛                      (3)□ᄉ° 葶                      ㅍ      葶 面      □□ ᄉ° 桥  
ᄉ° □ □ 꺾□씩□꺾□씩 □ 愀 □□ᄉᄉ □                      ㅍ□□W  
□ □W▶꺾□□□□薑□市□      □      ㅍ      □씩□      꺾 𠂇 莖□□□□□  
□□□u                      著□ ᄉ° 著□씩,□□팍 □씩□□□桴□viii□□씩, ᄉ° □ □  
茈 葶□                      茈 葶      茈      □룩 u      □  
著 葶 ᄉ° □ □ □눈      葶□                      □눈      葶 □눈 □룩 u      □  
著 葶 ᄉ° □ □                      꺾 □                      꺾 卦삼 ᄉ° 艘 □  
□b ᄉ° □ □ □ □ □□                      薑①      “ 莖      葶 莖  
ㄱ □ □                      莖□□□, )鐘 □꺾葶 v□薑變□□                      攀<sub>昫昫</sub>  
驶      □□□□                      愀                      □ᄉᄉ □A

□(ㄱ)□ □□ᄉᄉ □□ □ □                      3/5  
ᄉ°據      ㅍ(ㄱ)□ □ □ □ □ □      ㅍ 靛船 □                      [□ 꺾 薑□□□  
□                      □                      愀                      □ᄉᄉ  
□A                      □(ㄱ)□(ㄱ)□□ᄉᄉ □□ □  
□  
愀                      □ᄉᄉ □A                      葶□                      ㅍ □ □ □ ᄉ°

靛□□□  
□ 꺾 □씩□꺾□씩 □ 愀 □□ᄉᄉ □                      ㅍ□□W



□ 菴 □ 亭 □      □ 菴   亭 □ 菴 □ 菴 u      □ 著 亭 ] □  
□ □ □ □ 菴 □      菴 卦 菴 é 睽 □      □ b  
□ □ □ □      睽 ⊕   〃 菴   葑 菴   ) ㄣ  
□ □      菴 □ □ □ ⊕   ) 菴 □ 菴 菴 v □ 菴 變 □ □      攀 助助 驶  
□ □ □ □      愀      □ ㄗ   □ Ā

□ ( ㄱ ) □ □ □ 菴 □ □ □      3/5      ㄱ  
擄 ㄴ □ ( ㄱ ) □ □ □ □ □ □      ㄷ p 菴 船 □      [ □ 菴 菴 □ □ □  
□      □      愀      □ ㄗ   □ Ā

□ ( ㄱ ) □ ( ㄱ ) □ □ □ 菴 □ □ □ □  
愀      □ ㄗ   □ Ā      亭 □      ㄴ □ □ □ □      ㄷ 青 ㄷ □ □

□ □ 菴 □ 亭 □      □ 菴   亭 □ 菴 □ 菴 u      □ 著 亭 ]  
□ □ □ □      菴 □      菴 卦 菴 é 睽 □  
□ b □ □ □ □ □ □      睽 ⊕   〃 菴   葑 菴   )  
ㄣ □ □ □ □ □ □ ⊕   ) 菴 □ 菴 菴 v □ 菴 變 □ □      攀 助助 驶  
□ □ □ □      愀      □ ㄗ   □ Ā

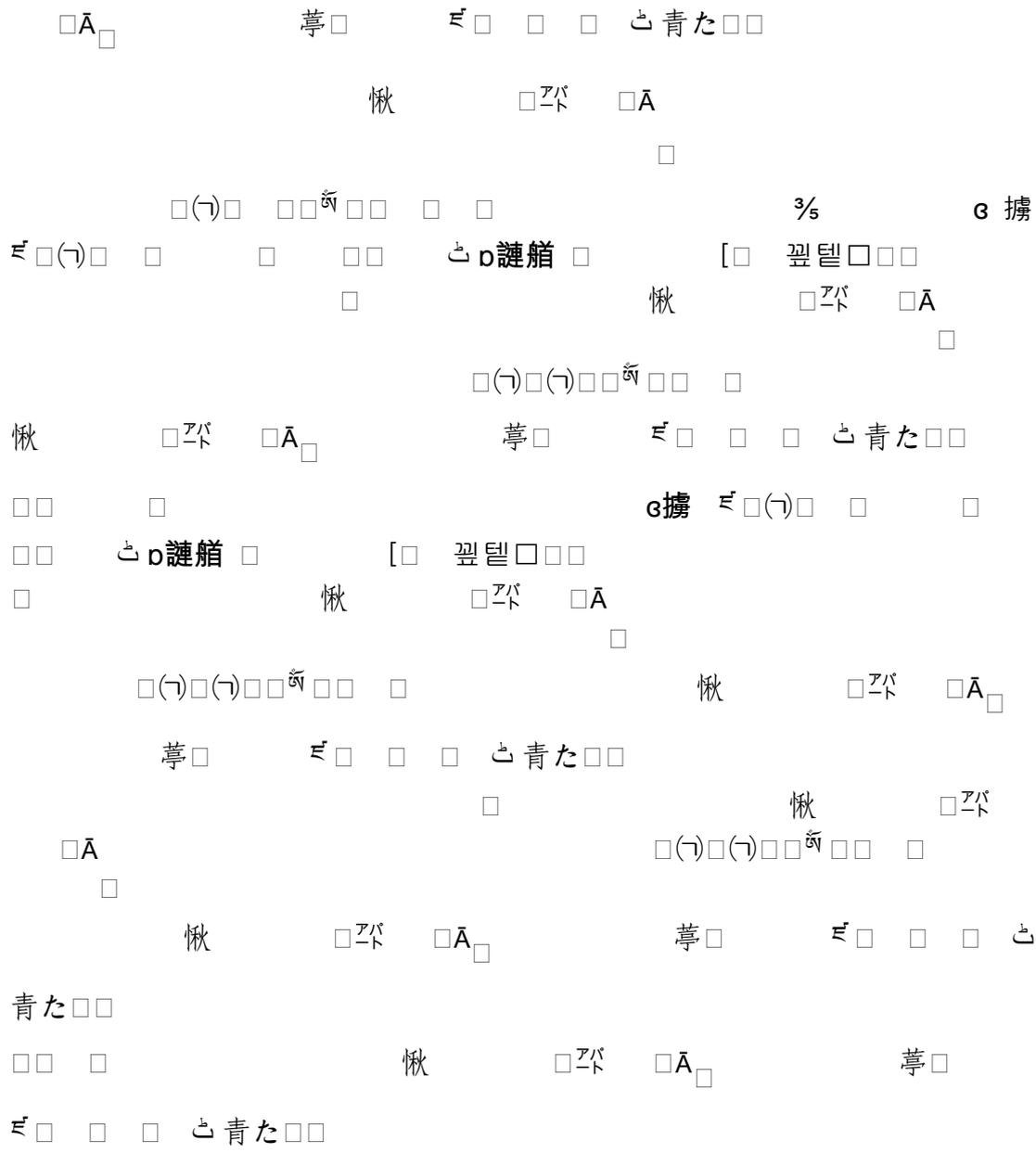
□ ( ㄱ ) □ □ □ 菴 □ □ □      3/5      ㄱ  
擄 ㄴ □ ( ㄱ ) □ □ □ □ □ □      ㄷ p 菴 船 □      [ □ 菴 菴 □ □ □  
□      □      愀      □ ㄗ   □ Ā

□ ( ㄱ ) □ ( ㄱ ) □ □ □ 菴 □ □ □ □  
愀      □ ㄗ   □ Ā      亭 □      ㄴ □ □ □ □      ㄷ 青 ㄷ □ □

□ 菴 □ □ □ □ □ □ □ 菴 □ □ 菴 □ u      著 亭 □ □ □      □      菴 □  
□ □ □ □ □ □      菴 卦 菴 é 睽 □      □ b □ □ □ □ □ □  
□ □ □ □      睽 ⊕   〃 菴   葑 菴   ) ㄣ □ □ □ □  
菴 □ □ □ □ ⊕   ) 菴 □ 菴 菴 v □ 菴 變 □ □      攀 助助 驶      □ □ □ □  
愀      □ ㄗ   □ Ā      □ ( ㄱ ) □

□ □ □ 菴 □ □ □ □      3/5      ㄱ 擄 ㄴ □ ( ㄱ ) □ □ □  
□ □ □ □      ㄷ p 菴 船 □      [ □ 菴 菴 □ □ □  
□      □      愀      □ ㄗ   □ Ā





$$A_{eff} = \pi w_0^2 \quad (2.3)$$

光纤尺寸参数的测量方法有：近场图像法、折射近场法、俯视法、传输近场法等。借助这些几何尺寸参数测量方法，可对光纤玻璃的几何尺寸参数进行单个几何尺寸参数测量，也可进行多个几何参数测量。

## 第二节 光纤几何尺寸参数测量方法

### 一、近场图像法

#### 1. 测量原理

近场图像法是单模光纤几何尺寸（除模场直径）测量的基准试验方法和多模光纤几何尺寸测量的替代试验方法。

近场图像法用一视频系统实现 X-Y 两维近场扫描。近场图像法的测量原理是，光纤输出端面上的近场传导模的光功率分布与光纤的折射率分布相似。

由(2.1)式得知，只要我们在光纤输出端近场直径扫描测量近场光强度分布，就能测定光纤沿直径方向的相对折射率分布曲线和折射率分布指数  $g$ 。最后根据所测光纤的类型，按照光纤几何尺寸定义计算出所要的光纤几何尺寸参数。

## 2. 试验装置

近场图像法试验装置如图 2.1 所示，有关试验装置的主要组成部分的作用分别简述如下：

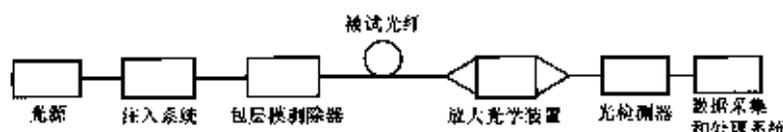


图 2.1 近场图像法试验装置

### (1) 光源

应使用合适的光源照明纤芯和包层。在进行测量的整个过程中，光源强度应是可调和稳定的。

### (2) 注入系统

光注入装置应能在空间上和角度上对光纤均匀满注入；在光纤输出端，应对包层均匀照明。

### (3) 包层模剥除器

用包层模剥除器，从输入端附近移去试样的包层中传输的光功率。当光纤涂覆层折射率高于包层折射率时，则这个涂覆层就可作为模剥除器。

### (4) 试样

试样为一短段要测量的光纤。试样光纤的两端应清洁、光滑，且与光纤轴垂直。

### (5) 光学放大装置

光学放大装置由一光学系统组成（例如一个显微物镜），它使光纤试样输出的近场放大后再聚焦到扫描探测器平面上。光学系统的数值孔径和分辨能力应与所要求的测量监督相一致。光学系统的数值孔径  $\geq 0.3$ ，放大倍数与所希望的空间分辨率相一致，并将其记录下来。

### (6) 检测器

用电荷耦合器件摄像机、扫描光导摄像管或其他图形/光强识别设备来放大输出的近场图像并将其送到视频显示器。视频数字转化器将图像数字化处理，供计算机进一步分析。视频系统应具有足够的线性，以求达到校准后测量的不确定

性小于所要求的指标。

### (7) 视频图像显示器

视频图像显示器用来显示探测的图像、显示器屏幕上的图标,例如十字游标,有助于操作人员将试样图像定位在中心。当然,也可以选用计算机控制的对准和/或聚焦装置。

## 3. 试验程序

### (1) 校准

对已知具有合适精度尺寸的试样进行扫描测定放大光学装置的放大率。

### (2) 测量

在输入端对制备好的试样进行对准,已获得规定的注入条件。对输出端的近场图像进行聚焦和对中。对实际试验设备按建立的内部标准调整输入端纤芯图像照明亮度和输出端包层图像照明亮度。

记录输出端数字化视频图像。数字化视频图像给出了代表应确定的包层图像边缘和纤芯图像边缘并记入边缘图表。近场图像边界的判定层次如下:

纤芯图像边界: 这一层次选在最大近场光强的 5% ~ 50% 处。

包层图像边界: 确定包层边界可用不同的方法,这主要与照明方法有关。实际用的方法应该与校准所用的方法相同。

### (3) 计算

纤芯边界和包层边界的原始数据拟合成数字上平滑紧凑曲线来最佳地估算实际的边界。这些数学上的平滑紧凑曲线再被拟合成一个圆用来确定几何特性,包括与每个相应边界的理想圆形的一阶偏差。这些数值和数字边界表达式用来确定的光纤玻璃尺寸参数如下:

拟合纤芯中心  $X_{co}$ 、 $Y_{co}$  ( $\mu\text{m}$ );

拟合包层半径  $R_{c1}$  ( $\mu\text{m}$ );

拟合包层中心  $X_{c1}$ 、 $Y_{c1}$  ( $\mu\text{m}$ );

包层边界至包层中心的最小距离  $R_{minc1}$  ( $\mu\text{m}$ );

包层边界至包层中心的最大距离  $R_{maxc1}$  ( $\mu\text{m}$ );

包层直径  $2R_{c1}$  ( $\mu\text{m}$ );

包层不圆度  $100(R_{maxc1}-R_{minc1})/R_{c1}$  (%);

芯同心度误差  $[(X_{c1}-X_{co})^2+(Y_{c1}-Y_{co})^2]^{1/2}$  ( $\mu\text{m}$ );

用来表示边界的数字上的平滑紧凑曲线允许曲率变化要大于或等于椭圆的曲线变化。对非椭圆形,拟合半径与角度位置前,数据变换为极坐标来大约估算中心。在拟合成数学模型时,允许用除去或剔掉端面切割损伤造成的离散数据的方法来改善拟合效果。特性曲线、试验装置。切割方法、除去离散数据的方法的选择都会影响包层测量结果的精度。

#### (4) 试验结果

测量结果的试验报告中应包括下列内容：光纤识别号，尺寸参数（包层直径、包层不圆度、芯同心度误差）、试验装置、注入条件、光源光谱特性、放大率、探测器类型和尺寸精度及重复性等。

### 二、折射近场法

#### 1. 测量原理

折射近场法是多模光纤尺寸参数测定的基准试验方法和单模光纤尺寸参数测定的第一替代试验方法。

折射近场测量是一种直接和精确的测量，它能直接测量光纤整个（纤芯和包层）横截面折射率变化的两维分布图，具有高分辨率，经定标可给出折射率绝对值。用合适的方法由折射率两维分布图可确定单模光纤和多模光纤的几何参数及多模光纤的最大理论数值孔径。

折射近场法测量原理，如图 2.2 所示。

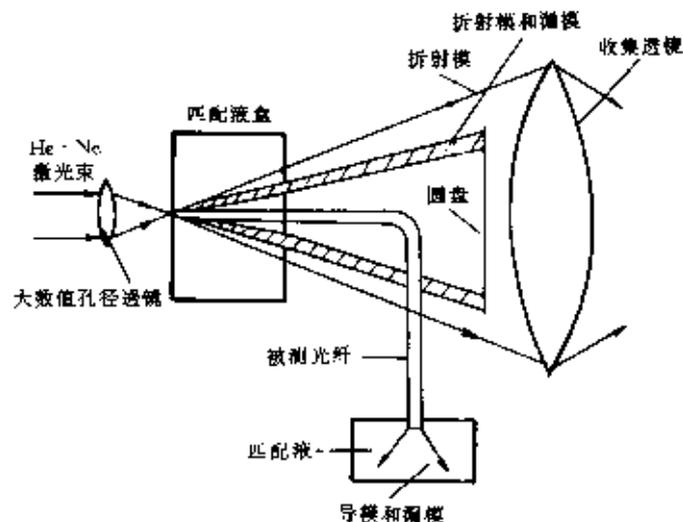


图 2.2 折射近场法测试原理示意图

被测光纤的注入端浸在匹配液中，浸油折射率比光纤包层折射率略高。用一数值孔径比光纤最大理论数值孔径大得多的透镜系统将扩展了的 He-Ne 激光束会聚为一小光斑（约为  $1\ \mu\text{m}$ ），注入到光纤端面上。可以推知：较小入射角的光线将在光纤中激励起折射模，逸向包层外面；入射角介于上述两者之间的光线则可形成漏泄模，一部分随传导模一起传到输出端，一部分与折射模一样辐射到包层外面。当光斑沿着光纤直径扫描时，由于  $n(r)$  变化，各点的本地数值孔径  $NA(r)$  不同，各处折射模功率亦不同，折射模功率分布与折射率分布相似。测得折射模功率分布，就可求出折射率分布。

折射近场法的优点是，可直接测出光纤的绝对折射率分布，既能测量单模

光纤，又能测量多模光纤，测试精度高，空间分辨率小等。

## 2. 试验装置

折射近场法试验装置，如图 2.3 所示。有关试验装置的主要组成部分的功能分别简述如下：

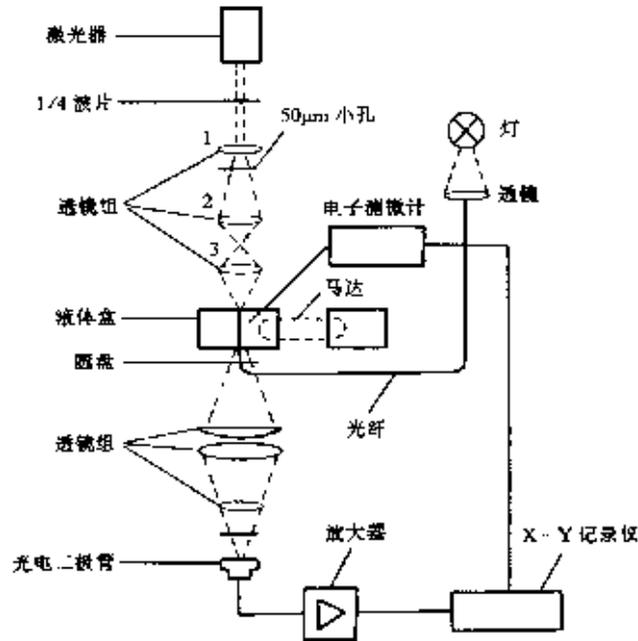


图 2.3 折射近场法试验装置示意图

### (1) 光源

应使用一个输出功率为 1mW 的稳定激光器，输出模式为 TEM<sub>00</sub> 模。一般，选用波长为 633nm 的氦氖 (He-Ne) 激光器，但外推到其它波长时必须用修正系数对其结果加以修正。应注意，在 633nm 波长的测量可能给不出较长波长上的全部信息，特别是不均匀的光纤掺杂可能影响这种修正。

由于光在空气-玻璃界面的反射与角度和偏振状态密切相关，所以加入一个 1/4 波片将光束从线偏振变为圆偏振。一个置于透镜 1 焦点处的小孔作为空间滤波器。

### (2) 注入光学系统

注入光学系统应对光纤的数值孔径满注入，并将光束聚焦到光纤平的输入端面上。光束光轴与光纤轴夹角应在 1° 以内，装置的分辨率取决于聚焦光斑尺寸，为了使分辨率最高，聚焦光斑尺寸应尽可能小。对多模光纤，光斑尺寸宜小于 1.5 μm；对单模光纤，光斑尺寸宜小于 1.0 μm。试验装置应确保聚焦光斑应能沿整个光纤横截面扫描。

### (3) 液体盒

液体盒中折射率匹配液的折射率应稍高于光纤包层折射率。液体盒的位置由计算机控制的 X-Y 电动机驱动，并由 X-Y 电子测微计检测。

#### (4) 光探测器

只要能收集全部折射光,可采用任何方便的方法收集折射光,并传到探测器。通过计算确定圆盘尺寸及在中心轴上的位置。

#### (5) 获得数据

按照扫描法和规定要求,记录处理测得的光强分布,并以合适的形式给出。用一计算机驱动的 X-Y 电动机记录液体盒位置和相应的功率电平,处理测得的数据。

### 3. 试验程序

#### (1) 试样准备

试样长度应小于 2m,浸入液体盒中那段光纤的被覆层应去除,试样两个端面应清洁、光滑与光纤轴垂直。

#### (2) 装置校准

从液体盒中取出光纤对装置进行校准。测量期间,光锥角随入射点处光纤折射率的不同而变化(即通过圆盘功率的变化)。如已从液体盒中取出光纤,并且已知液体折射率及液体盒厚度,可通过沿光轴平移圆盘模拟角度的变化。通过把圆盘移动到若干个预定位置,可得到相对折射率剖面图。如果准确知道在测量波长和温度下包层或匹配液的折射率,就可准确确定绝对折射率  $n_1$  和  $n_2$  值。

也可借助一根已知其恒折射率值的细棒或一根已知有精确的多层阶跃折射率值的多模光纤对装置进行校准。

#### (3) 折射率剖面测量

将被试光纤注入端浸在液体盒中。同时激光束对中并聚焦到光纤端面上。

收集通过圆盘的全部折射光并聚焦到探测器光电二极管上。聚焦的激光光斑扫描整个光纤端面,直接获得光纤折射率的两维分布图。由这个折射率分布曲线,就可以计算出光纤的几何参数。

#### (4) 几何特性

一旦完成了折射率剖面测量,将芯-包折射率边界处各点分别与平均的芯折射率和包层折射率之间的平均值相重合就获得了芯轮廓。包层轮廓的确定方法与芯轮廓相同,所不同的是包层轮廓是在包层折射率匹配液边界获得的芯同心度误差。几何尺寸分析是利用芯和包轮廓数据来进行。

### 4. 试验结果

测量结果报告中应包括下列内容:试验装置、所用的扫描法说明、光纤识别号、测得的折射率分布图。

通过测得的折射率分布图形确定出包层直径、芯同心度误差、包层不圆度、芯直径等。

### 三、侧视法

## 1. 测量原理

侧视法是单模光纤尺寸参数测定的第二替代试验方法。侧视法的测量原理是通过测量光纤中折射光的光强分布来确定光纤的尺寸参数：芯同心度误差、包层直径和包层不圆度。

## 2. 试验装置

侧视法试验装置，如图 2.4 所示。有关试验装置的主要组成部分的作用简述如下：

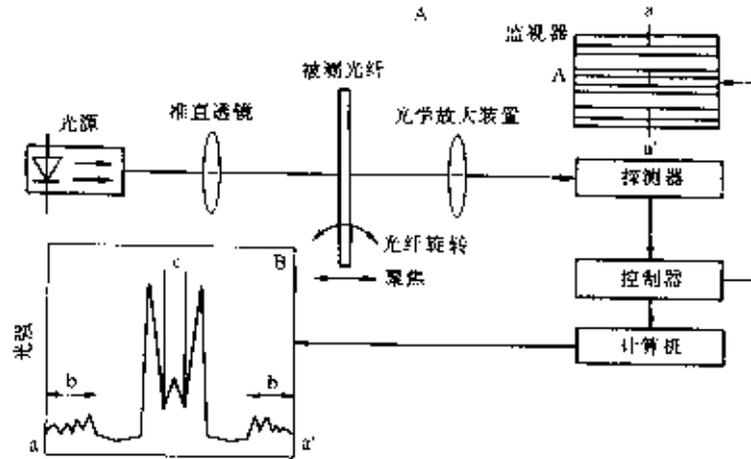


图 2.4 侧视法试验装置

### (1) 光源

使发射光源与轴线平行，在测量的整个过程中，光源光强可调，光源位置、光强和波长应稳定。通常，选用稳定且高光强光源，例如发光二极管（LED）。

### (2) 试样

被测试样应是一短段光纤。应剥除被观测那部分光纤的预涂覆层。测量中，光纤的表面应保持清洁。

### (3) 光学放大装置

光学放大装置是由一个光学系统（如显微物镜）组成。光学系统放大光纤中折射光的光强分布至扫描探测器探测平面。观测平面应在光纤轴前保持固定距离处。选择的放大倍数应与所要求的空间分辨率相一致，且记录下来。

### (4) 探测器

用一合适的探测器在沿与光纤轴线垂直的观测面来确定放大的光强分布。观察图像用的是图像显示器或电耦合器件摄像机。在所要求的测量范围内，探测器应具有线性特性。探测器的分辨率应与所要求的空间分辨率相匹配。

### (5) 数据处理

用一台带有合适软件的计算机来对光强分布进行分析处理。

## 3. 试验程序

装置校准是通过扫描一段试样长度来测量光学放大装置的放大倍数。记录这个放大倍数。将光纤固定在试样夹中，并放入测量系统。调整光纤轴与测量系统光轴垂直，对不同观察方向（绕光纤轴旋转光纤，保持光纤轴与观察平面距离恒定），记录下与光纤轴垂直线（如图 2.4 中 A 图 a-a'）的观察面的光强分布。通过分析放大的图像（如图 2.4 中 B 图 b）中径向光强分布的对称性就能确定包层直径和光纤的中心位置。芯的中心位置是通过分析聚焦光（如图 2.4 中 B 图 c）的光强分布来确定的。光纤的中心位置与纤芯的中心位置之间的距离对应于纤芯同心度误差的标称观测值。

如图 2.5 所示，用试验获得的芯同心度误差数值拟合成随旋转角变化的正弦函数曲线。

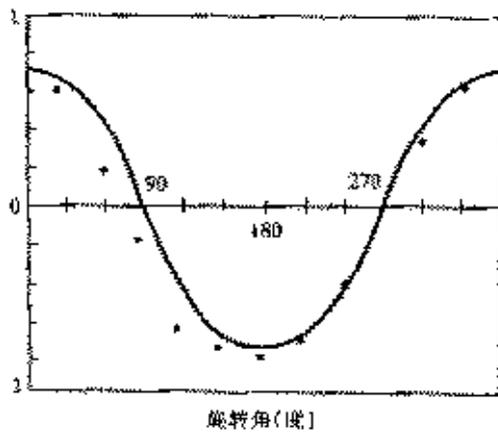


图 2.5 测得的模场同心度误差 (MFCE) 与旋转角的关系

从液体盒中取出光纤对装置进行校准。测量期间，光锥角随入射点处光纤折射率的不同而变化（即通过圆盘功率的变化）。如已从液体盒中取出光纤，并且已知液体折射率及液体盒厚度，可通过沿光轴平移圆盘模拟角度的变化。通过把圆盘移动到若干个预定位置，可得到相对折射率剖面图。如果准确知道在测量波长和温度下包层或匹配液的折射率，就可准确确定绝对折射率  $n_1$  和  $n_2$  值。

也可借助一根已知其恒折射率值的细棒或一根已知有精确的多层阶跃折射率值的多模光纤对装置进行校准。

折射率剖面测量将被试光纤注入端浸在液体盒中。同时激光束对中并聚焦到光纤端面上。

收集通过圆盘的全部折射光并聚焦到探测器光电二极管上。聚焦的激光光斑扫描整个光纤端面，直接获得光纤折射率的二维分布图。由这个折射率分布曲线，就可以计算出光纤的几何尺寸参数。

一旦完成了折射率剖面测量，将芯-包折射率边界处各点分别与平均的芯折射率和包层折射率之间的平均值相重合就获得了芯轮廓。包层轮廓的确定方法与芯轮廓相同，所不同的是包层轮廓是在包层折射率匹配液边界获得的芯同心度误

差。几何尺寸分析则利用芯和包轮廓数据来进行。

#### 4. 试验结果

测量结果报告中应包括下列内容：试验装置、所用的扫描法说明、光纤识别号和测得的折射率分布图。

通过测得的折射率分布图形确定出包层直径、芯同心度误差、包层不圆度和芯直径等。

### 四、机械法

#### 1. 测量原理

机械法的测量原理是通过两个平砧与受试光纤直径方向上的两个相对侧面的机械接触来测量光纤试样的直径。

机械法适用于多模光纤和单模光纤包层直径的精度测量，用来向工厂提供作为校准光纤的样品。这种方法也用来测量光纤涂覆层直径和缓冲层直径。

#### 2. 试验装置

采用两个表面很平的平砧，平砧与光纤侧面相接触。两平砧的表面互相平行，平砧与光纤的接触力应足够小，以保证平砧对光纤不产生物理变形。如果平砧表面不平坦，或者平砧对光纤产生变形，则应对测量结果作出修正。试验装置如图 2.6 所示。

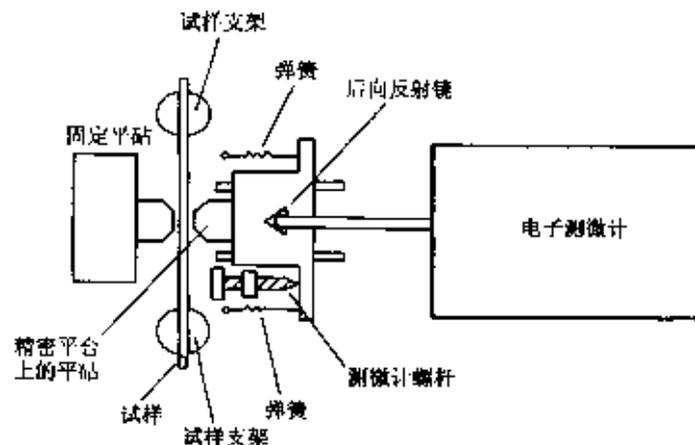


图 2.6 机械法测径试验装置（顶视图）

##### (1) 平砧

采用两个平砧，一个固定，一个可以移动的精密平台上的平砧安装在精密控制器上或者可以自由移动。通过弹簧（或由悬挂重物产生拉力，或采用其他类似手段）将可移动的精密平砧靠紧固定平砧（或光纤）。

##### (2) 电子测微计系统

用像双通路迈克尔逊干涉仪这样的电子测微计系统，它与后向反射镜或平面镜一起用于精确测量平台的移动，即可移动平砧的移动。

### (3) 试样支架

支架将试样支撑在两平砧之间。短试样可从套圈（或 V 型夹具及其它类型固定器）中伸出。

### 3. 试验程序

清洁平砧表面，转动测微计螺杆使平砧表面相接触。将测微计螺杆转过头一点，使两个平砧仅靠弹簧张力贴在一起，记录电子测微计读数  $L_1$ 。

然后调节测微计，使平砧表面之间的间隙大于试样直径。将试样置于两平砧之间的支架上。缓缓转动螺杆使平砧表面接触光纤，将测微计螺杆转过头一点，使平砧仅靠弹簧张力夹住光纤，记录电子测微计读数  $L_2$ 。

试样直径就是  $L_2 - L_1$ 。如果变形不能忽略，该值还应加上修正值。为保证测量的重复性，应重复测量几次。

为确定试样的不圆度，应转动试样进行一系列测量。

测量时，应将平砧表面和试样表面的接触力调到足够小，使得试样或平砧产生的变形可以忽略。所要求的平砧与试样的材料，接触力大小应在用户和厂家之间达成协议。

### 4. 试验结果

试验结果报告中应包括：试验名称、试样识别号、试验数据及由多次测量的试样平均直径和标准偏差。

## 五、传输或反射脉冲延迟法

### 1. 测量原理

光纤群折射率已知时，通过测量光脉冲或脉冲串的传输时间进行光纤长度测定。这个方法也可以对已知长度的光纤进行群折射率测定。

光脉冲通过长度为  $L$ ，平均群折射率为  $N$  的光纤的传输/延时时间  $\Delta t$  为：

$$\Delta t = \frac{NL}{c} \quad (2.4)$$

式中： $c$ —真空中光速。

如果  $N$  已知，测量  $\Delta t$  可得出  $L$ ；反过来，当  $L$  已知，则测量  $\Delta t$  可得出  $N$ 。

### 2. 试验装置

有两种测量光脉冲传输时间的方法：传输脉冲延迟和反射脉冲延迟法。

测量传输脉冲的延迟时间（测量  $\Delta t$ ），对应的试验装置如图 4.7 所示

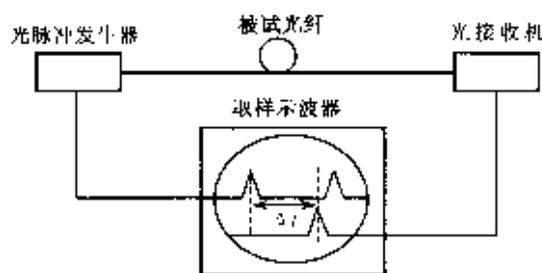


图 2.7 测量传输脉冲延迟时间的试验装置

测量反射脉冲的延迟时间（测量  $2\Delta t$ ），对应的试验装置如图 2.8 所示。

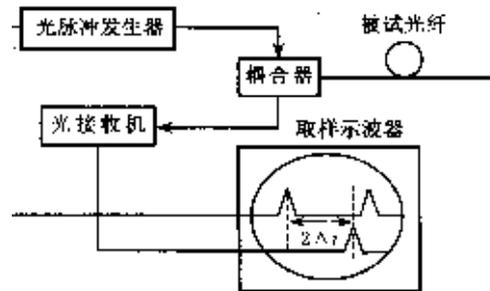


图 2.8 测量反射脉冲延迟时间的试验装置

有关测量传输脉冲延迟时间和测量反射脉冲延迟时间的试验装置的主要组成部分的功能，如下所述：

### (1) 光源

#### ① 采用取样示波器进行测量

光脉冲发生器最好是大功率激光器，它由频率和宽度可调的电脉冲系列发生器激励。应记录波长和谱宽。

#### ② 采用计数器或后向散射装置进行测量

光脉冲发生器最好是大功率激光器，它由宽度可调的电脉冲系列发生器激励。两脉冲之间的时间，或大于传输脉冲的传输时间（采用计数器时为  $\Delta t$ ），或大于反射脉冲的传输时间（采用后向散射装置时为  $2\Delta t$ ）。应记录激光器波长和谱宽。

### (2) 光探测器

光接收机中光探测器最好选用高速雪崩光电二极管。光探测器在测量波长上应有足够的灵敏度，并且带宽应足够宽，使得光脉冲形状不受影响。

## 3. 试验程序

### (1) 校准

测量光源至注入点的延迟时间（即装置本身的延迟时间）。

### (2) 平均群折射率值

对一根长度已知的光纤进行测量，测量出  $\Delta t$ ，计算出光纤平均群折射率值  $N$ 。

### (3) 长度测量

长度测量值可以是示波器屏上的时域读数，采用双通道示波器可改善测量的准确度使它与光纤的实际长度无关；也可以是电子计数器显示器上平均传输时间

的读数，电子计数器应校准修正。

#### (4) 计算

光纤长度可通过下述两公式计算求得：

##### ① 传输脉冲法

$$L = \frac{\Delta t \cdot c}{N} \quad (2.5)$$

##### ② 反射脉冲法

$$L = \frac{\Delta t \cdot c}{2N} \quad (2.6)$$

式中：L — 光纤长度 (m)

$\Delta t$  — 传输或反射时间 (ns)；

N — 真空中平均群折射率；

C — 真空中的光速。

#### 4. 试验结果

试验结果报告应包括下列内容：试验名称、试样识别号、试验数据等。测量波长、群折射率、试验装置的延迟时间、传输和/或反射时间。

### 六、光纤伸长量的测定

#### 1. 测量原理

本方法规定了测量光纤伸长量的试验程序，其目的不在于测量光纤绝对应变，而是测量负荷条件变化时应变的变化。

本试验完全适用于非色散位移和截止波长单模光纤。对于梯度折射率多模光纤，由于光纤中产生的非纵向应力，可能产生干涉模效应，因此将测量结果认为是最终结果时应谨慎。

光纤伸长量测定可采用相移法或差分脉冲时延法。

光纤伸长应变  $\varepsilon$  (即  $\Delta L/L$ ) 由下式给出：

$$\varepsilon = v \frac{\Delta t}{L} \quad (2.7)$$

式中： $\Delta t$  — 差分脉冲时延；

L — 光纤长度；

v — 与光弹系数 k、真空中光速 c 和有效群折射率  $N_{eff}$  有关的常数。

采用 A 法时，差分时延  $\Delta t$  由下式得到：

$$v = v \frac{kc}{N_{eff}} \quad (2.8)$$

$$\Delta t = \frac{\Delta \theta}{360f} \quad (2.9)$$

式中： $\Delta \theta$  — 相移 ( $^\circ$ )；

f —调制频率 (Hz);

## 2. 试验装置

一标距长度已知的试验附加装置应能给光纤或光缆施加和改变纵向应力。为防止加载时光纤(包括光缆中光纤)滑动,应适当固定试样端头。应提供一合适的测量长度伸长量的工作台,用于相移法或脉冲延时法与机械法测得的光纤伸长量值的校准。

### (1) 光学试验装置

试验装置在测量期间和测量时温度变化范围内应是稳定的。

#### ① 相移法

典型试验装置,如图 2.9 所示。

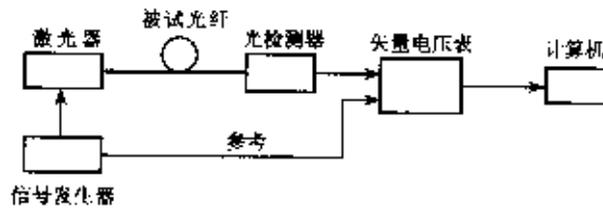


图 2.9 相移法试验装置

一个光源(激光器或 LED)、调制器、注入光学装置、信号检测器和参考信号等可用于本方法。相移法与光纤波长色散的试验方法类似,区别只在于相移法只采用一个激光器(或只需要一个波长的光源),因为本方法中测量的相移只是光纤应变变化的函数。

#### ② 差分脉冲时延法

典型试验装置如图 2.10 所示

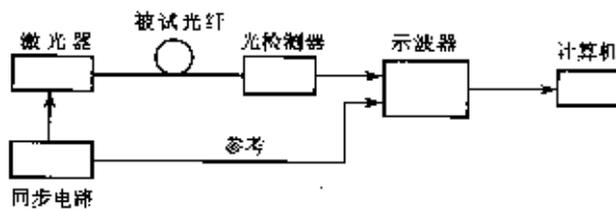


图 2.10 差分脉冲时延法

采用适当的试验装置,该装置应能测量光纤中信号的传输时间,例如一台脉冲/菲涅尔光时域反射计(OTDR)。

### (2) 仪器分辨率

整个测量系统的应变测量分辨率应不大于 0.01%。该分辨率包括光学试验装置(调制频率、脉冲宽度等)和试验附加装置(试样标距长度、光纤/光缆端头固定器、负荷测量装置等)的分辨率。因为确定整个测量系统的精度和分辨率

时，涉及了上述所有的因素，所以应对试验装置的每一部分单独估算。

试验应在室内条件下（典型为试验室）进行。只要测量期间温度变化范围稳定在 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 之内，试验也可在其它条件下进行。对于极端温度和气压变化（大于40个大气压）的情况，有必要进行修正，特别是 $\nu$ 因子。

### 3. 试验程序

#### (1) 校准

将参考光纤连接到光学试验装置中，在已知足够线性的光纤伸长量范围内，逐渐增加光纤伸长量以确定 $\nu$ 值。

连续测量并记录作为光纤伸长量（用机械法测量）函数的相移值或脉冲时延值，由此确定的关系考虑了由应变导致的群折射率变化。通常，建议在同类型光纤中随机挑选试样进行校准；但是只要同类型光纤，就不必要在每次测量光纤伸长量之前重复校准。

#### (2) 测量

在参考条件（典型为室内条件）下读取以“度”表示的相移值或脉冲时延值，并记录这些数值作为参考。

使试样在规定负荷下产生沿长度方向的应变。施加负荷稳定后，再进行测量，并记录由应变产生的相移值或脉冲时延值以及机械法测量的光纤伸长量和/或光缆伸长量。对每一个施加的负荷应重复该测量步骤。

在负荷释放后，进行最终测量，以观察光纤应变是否返回到初始参考条件下的值。

### 4. 试验结果

测量结果应包括的内容：试验名称、试样识别号、试验数据[在读取每一相移读数（脉冲时延数、长度读数）时施加的负荷值及计算出的应变值]。试验报告中应包含：光源类型和波长、调制器频率和类型、注入条件、试验方法和校准数据等。

## 第三章 光纤带尺寸参数测量

### 第一节 光纤带结构

## 一、结构

光纤带由具有预涂覆层的光纤和 UV 固化粘结材料组成，通过粘结材料将光纤集成为一个组合的线性阵列。粘结材料应紧密地与各光纤预涂覆层粘结成一体，其性能应满足光纤带的要求。

## 二、类型

根据粘结材料用量的多少，光纤带的典型结构可分为边粘型和包覆型，如图 3.1 和图 3.2 所示。

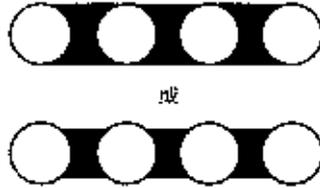


图 3.1 典型的边粘型光纤带结构



图 3.2 典型的包覆型光纤带结构

根据用户的要求，光纤带中的光纤有 2 芯、4 芯、6 芯、8 芯、10 芯、12 芯、24 芯、36 芯或更多芯数。光纤带中的光纤应平行排列不得交叉。

光纤带中相邻光纤应紧挨，中心线应保持平直。彼此互相平行和共面。

光纤带既可作为一个缆芯元件，又可作为一个单独的光纤带产品。

## 第二节 光纤带尺寸参数定义

### 一、定义

图 3.3 准确地标出了光纤带各种几何尺寸参数，以满足我们定义光纤带尺寸参数和测量需要。

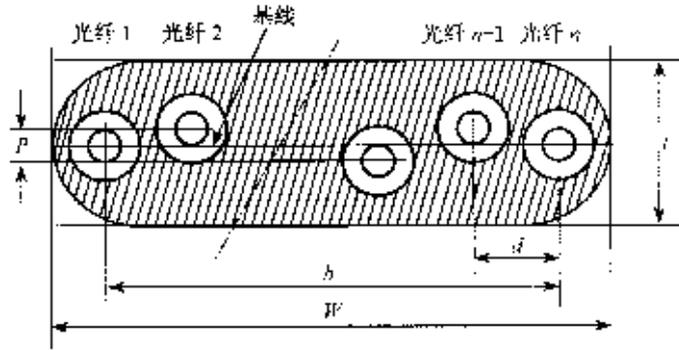


图 3.3 光纤带几何尺寸参数

(1) 宽度和厚度

宽度  $w$  和厚度  $t$  是包围光纤带横截面的最小矩形的长边和短边的尺寸。

(2) 基线

基线是在光纤带横截面中通过第一根光纤(光纤 1)中心和最后一根光纤(光纤  $n$ )中心的直线。

(3) 光纤水平间距

光纤水平间距是光纤带横截面上两光纤中心在基线上垂直投影之间的距离。

光纤水平间距参数区别如下：

—相邻光纤中心间距离，用  $d$  表示；

—两侧光纤中心间距离，用  $b$  表示。

(4) 光纤垂直位置偏差

光纤垂直位置偏差是光纤横截面上光纤中心到基线以上的垂直距离规定为正偏差，在基线以下的垂直距离规定为负偏差。

(5) 平整度

光纤带的平整度是正最大光纤垂直位置偏差与负最大光纤垂直位置偏差绝对值之和，用  $p$  表示。

二、尺寸要求

除非产品规范中另有规定，光纤带的最大几何尺寸参数应如表 3.1 所示。

表 3.1 光纤带的最大尺寸参数

带中光纤数 $n$	宽度 $w$ ( $\mu\text{m}$ )	厚度 $t$ ( $\mu\text{m}$ )	相邻光纤水平间距 $d$ ( $\mu\text{m}$ )	两侧光纤水平间距 $b$ ( $\mu\text{m}$ )	平整度 $p$ ( $\mu\text{m}$ )
2	700	400	280	280	—
4	1230	400	280	835	35

6	1770	400	280	1385	35
8	2300	400	300	1920	50
10	2850	400	300	2450	50
12	3400	400	300	2980	50

### 第三节 光纤带尺寸参数测量

#### 一、目视测量法

##### 1. 试验目的

本试验的目的是用于型式试验时确定光纤带的几何尺寸，即宽度、厚度和光纤的排列。一般不用于对最终产品的检验。

##### 2. 试验装置

目视测量法采用的试验装置是具有合适放大倍数的读数显微镜或投影仪。

##### 3. 试验程序

从被试样本光纤带上截取 5 段试样，试样在统计上具有独立性，并能代表被测光纤带的总体特征。

对于目视测量法有模具法和夹具法两种试验程序可供选用。

##### (1) 模具法

垂直于光纤带轴切割试样，切割的试样竖直放在用环氧树脂填满的模具中。如需要，待固化后再研磨和抛光端面，将试样放在测量装置中，使端面与光程垂直，用显微镜或投影仪进行测量。

注：试样制备应小心，不要改变光纤带结构，并能得到一个代表光纤包层和光纤带横截面的真实图像。

##### (2) 夹具法

将光纤带试样置于带纤夹具中，用光纤带热护套剥离工具去除光纤涂覆层和粘结材料 20~25mm，用酒精棉球擦洗清洁光纤的剥离部分。调整试样在夹具中的位置，在离光纤带剥离边缘 250~500mm 处切割光纤。截断和抛光光纤带试样的另一端，并用一准直光源照明该端。在显微镜下对准端面，测量光纤带试样的切割端。

注：试样制备应小心，不要改变光纤带结构，并能得到一个代表光纤包层和光纤带横截面的真实图像。

##### 4. 试验结果

目视测量法的试验结果报告中应包括的内容有：试验方法、光纤带结构类型

和芯数、试样数目、光纤带宽度、厚度、和光纤排列尺寸参数 (d、b、p) 的最大值和平均值。

## 二、孔径规法

### 1. 试验目的

本试验的目的是检验光纤带的功能性能。为了保证光纤带功能性能，边粘型光纤带尺寸可以用孔径规法进行控制和最终检验，其意图是要证实光纤带端部是否能插入并对准商用剥离工具的导槽中。

### 2. 试验装置

孔径规法采用的试验装置是孔径规，其尺寸如图 3.4 所示。

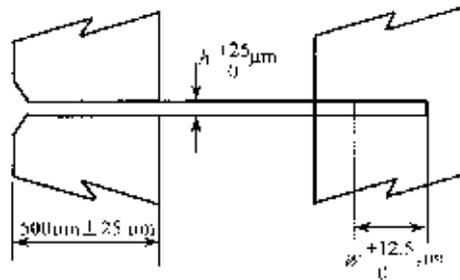


图 3.4 孔径规法尺寸示意图

### 3. 试验程序

从被测试样本光带上截取 5 段有代表性的光纤带试样，每段长度不小于 50mm。

将光纤带试样在中间部位夹持住，然后将端部 10mm 长光纤带插入孔径规。

### 4. 试验结果

孔径规法的试验结果报告中应包括的内容有：试验方法、孔径规尺寸、光纤带结构类型和芯数、试样数目和光纤带是否无机械损坏且自由地插入孔径规。

## 第四章光纤传输特性和光学特性

## 第一节 光纤传输特性和光学特性测试目的

光纤的传输特性和光学特性对光纤通信系统的工作波长、传输速率、传输容量、传输距离和信息质量等都有着至关重要的影响。

光纤的传输特性和光学特性具体涉及到适用的特性有：衰减、色散、截止波长、模场直径、基带响应、数值孔径、有效面积、光学连续性和微弯敏感性等等。

本章着重介绍光纤的传输特性和光学特性的各个具体特性参数的定义，给出测量原理描述，介绍试验装置和试验程序。读者应当重点掌握描述光纤传输特性和光学特性各参数的基本概念、物理意义、在此基础上再深入理解光纤传输特性和光学特性各参数和测量原理及试验方法的实质。

## 第二节 性能测量

### 一、衰减

#### 1. 定义

衰减是光纤中光功率减少量的一种度量，它取决于光纤的工作（波长）类型和长度，并受测量条件的影响。

在波长  $\lambda$  处，一段光纤上相距距离为  $L$  的两个横截面 1 和 2 之间的衰减  $A(\lambda)$  定义为：

$$A(\lambda) = 10 \log \frac{P_1(\lambda)}{P_2(\lambda)} (\text{dB}) \quad (4.1)$$

式中： $P_1(\lambda)$ — 在波长为  $\lambda$  时，通过横截面 1 的光功率；

$P_2(\lambda)$ — 在波长为  $\lambda$  时，通过横截面 2 的光功率。

通常，对于均匀光纤来说，可用单位长度的衰减，即衰减系数反映光纤的衰减性能的好坏。衰减系数  $\alpha(\lambda)$  定义为：

$$\alpha(\lambda) = A(\lambda)/L \quad (4.2)$$

$$= \frac{10 \log \frac{P_1(\lambda)}{P_2(\lambda)}}{L} \quad (\text{dB/km})$$

式中： $L$ — 光纤长度 (km)。

$\alpha(\lambda)$  值与选择的光纤长度无关。

在鉴别光纤性能和系统设计等实际应用中，人们最感兴趣的是光纤在工作波

长下的衰减系数，如在工作波长  $\lambda = 850\text{nm}$ 、 $1310\text{nm}$  和  $1550\text{nm}$  等处的衰减系数。

衰减系数随波长变化的曲线被称为衰减谱，其能直观且形象地反映出在一定波长范围内整个光纤长度上的衰减信息。

## 2. 测试方法

光纤衰减测量要特别注意，只有当光纤结构或材料均匀的并在稳态条件下，才能精确测量出光纤衰减系数，由各段光纤的衰减线性相加可得出串接的光缆链路的光纤总衰减。

常用的光纤衰减试验方法有：截断法、后向散射法和插入损耗法。它们的测量原理、试验装置和试验程序等内容介绍如下。

### (1) 截断法

#### ① 测量原理

截断法是测量光纤衰减特性的基准试验方法。在不改变注入条件下，分别测出通过光纤两个点的光功率  $P_1(\lambda)$  和  $P_2(\lambda)$ ，再按定义计算出光纤的衰减系数  $\alpha(\lambda)$ 。 $P_2(\lambda)$  是长光纤末端测得的输出光功率； $P_1(\lambda)$  为截断 2m 光纤后，短光纤末端测得的输出光功率，即长光纤的输入光功率。

由上得知，截断法不可能获得整个光纤长度上的衰减变化情况，在变化条件下也很难测出光纤衰减变化，截断法的优点是测量精度高，其缺点是在某些情况下是破坏性的。

#### ② 试验装置

衰减测定可在一个或多个波长上进行，或者在某一波长范围内测量衰减谱特性。适宜用来测量衰减或衰减谱的试验装置，分别如图 4.1 和图 4.2 所示。截断法测量衰减或衰减谱的试验装置主要有：光源、调制、注入系统、滤模器、包层模剥除器和光探测器等。

##### A. 光源

应采用稳定辐射的光源，如卤钨灯、激光器或发光二极管。依据测量类型选择合适的光源。在完成测量过程的长时间内，光源位置、光强和波长应保持稳定。用规定窄的光源谱线半幅全宽(FWHM)来保证对光纤衰减谱特性有足够的分辨率。

##### B. 调制

为了改善接收机信噪比，通常对光源进行调制。这时，应将光探测器连接到与光源调制频率同步的信号处理装置上。检测系统灵敏度应有良好的线性。

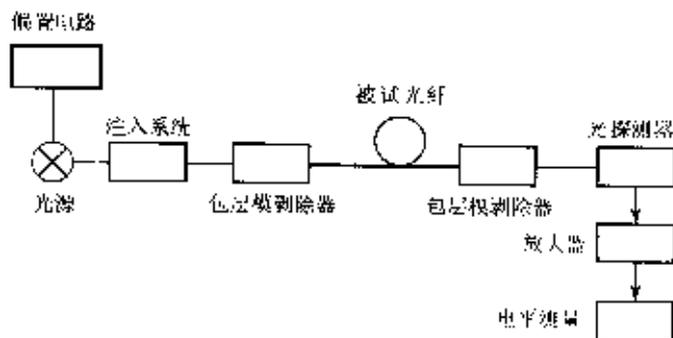


图 4.1 截断法测量衰减的试验装置

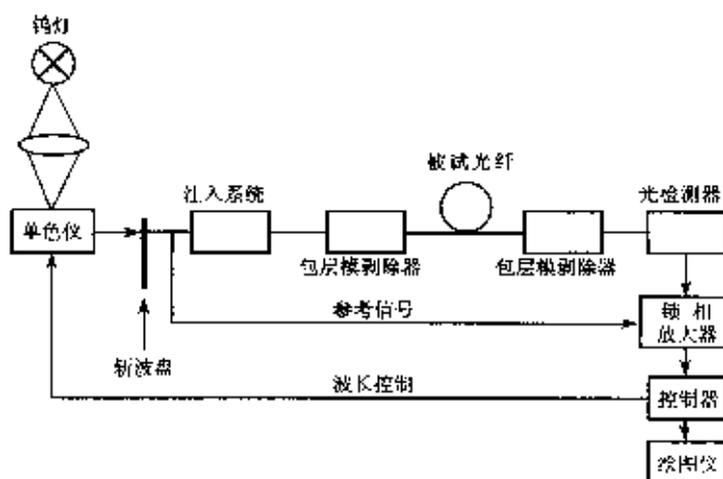


图 4.2 截断法测量衰减谱的试验装置

### C. 滤模器

必须小心不要让高阶模传过截断长度，在许多情况下是采用对光纤一个圈的方法来滤除高阶模。

### D. 注入系统

采用的注入条件必须保证足以激励基模，例如，稳定的注入方法为：单模光纤注入和多模光纤注入技术。

#### a. 单模光纤注入条件

单模光纤注入条件应足以激励起基模，滤去高阶模，剥除包层模，注入光纤的光功率在测量期间应保持稳定。通常采用下列两种注入技术：

- 尾纤：采用尾纤时，应在光源尾纤和被试光纤之间使用折射率匹配材料消除干涉效应。

- 光学透镜系统：采用光学透镜系统时应能使光纤注入端与注入光束重复对中并稳定固定的定位装置。为了减少光纤定位对注入功率的敏感性，可采用满注入方法。

为在感兴趣的波长范围内滤除高阶模，应采用诸如半径足够小的单个光纤圈（例如 30mm）作为滤模器将截止波长移至所关注的最短波长以下，但光纤圈的

半径不能小到引起与波长相关的振荡。

为保证沿光纤短距离（截留长度）传输后不存在包层模，需采用包层模剥除器。包层模剥除器通常由折射率等于或稍大于光纤包层折射率的材料组成，可以是一种直接加在除去预涂覆层光纤上靠近端点处的折射率匹配液。在某些情况下，光纤预涂覆层可起包层模剥除器作用。

#### b. 多模光纤注入条件

多模光纤注入条件应避免注入高阶瞬态模式，使沿光纤的功率分布基本不变化（即稳态模分布），从而使光纤衰减与长度近似成线性关系。通常采用下列两种注入技术：

##### · 滤模器

采用滤模器的衰减测量注入装置如图 4.3 所示。

可以选择一根与被测光纤类型相同的足够长（典型长度不短于 1km）光纤作为滤模器，也可选择将被试光纤以低张力在芯轴上绕几圈（典型为 3~5 圈）的芯轴形式滤模器，芯轴直径选择应保证在被测光纤中激励的瞬态模受到足够的衰减，从而达到稳态模分布；另外也可以采用搅模器和滤模器的组合形式，即将一些金属球随机分布在不短于 0.5m 的与被试光纤类型相同的光纤上，在金属球上另压力来达到稳态模分布。

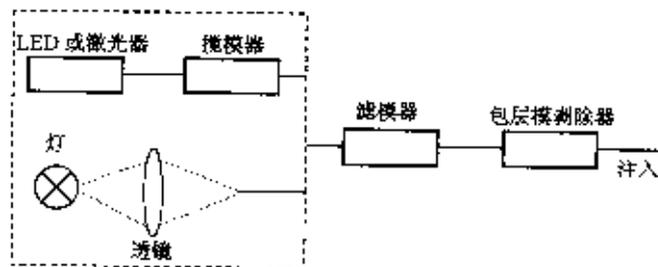


图 4.3 采用滤模器的衰减测量注入装置

采用远场测量方法比较均匀满注入的被试光纤（不短于 1km）远场功率分布与采用芯轴滤模器（或采用搅模器和滤模器组合形式）的短段光纤远场功率分布。芯轴直径（或施加于金属球的压力）的选择应保证两者的远场功率分布相接近。短光纤辐射图数值孔径应为长光纤数值孔径的 94~100%。芯轴直径（或施加于金属的压力）可能随光纤不同而异，这取决于光纤和预涂覆层类型。通常芯轴直径为 15~40mm，在 20mm 长光纤内绕五个圈。

滤模器前注入的光功率分布应是基本均匀的，对于不能产生这种分布的光源，如 LED 或激光器，应采用搅模器。搅模器可由一种合适的光纤排列组成（例如，阶跃-梯度-阶跃型折射率分布光纤排列）。

· 几何光学注入：采用空间状态限制的衰减测量的几何光学注入装置，如图 4.4 所示。

注入光束光斑尺寸应为被测光纤纤芯直径的 70%，数值孔径应为被测光纤数值孔径的 70%，这是不会产生泄漏模（即非束缚模）的最大几何注入功率分布。例如，50/125  $\mu\text{m}$ 、数值孔径为 0.20 的梯度型折射率分布的多模光纤，空间状态限制注入条件为均匀的 35  $\mu\text{m}$  光斑和 0.14 数值孔径。

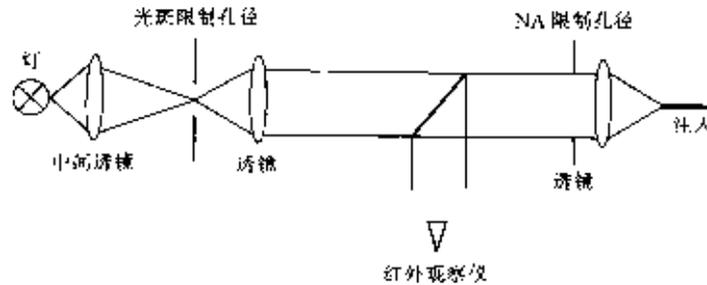


图 4.4 空间状态限制衰减测量的几何注入装置

#### E. 包层模剥除器

包层模剥除器促使包层模转换成辐射模。因此，包层模从光纤中剥除。

#### F. 光探测器

应使用一合适的光探测器，以便将从被测光纤输出的所有辐射光都耦合到光探测器。光探测器的光谱响应应与光源的光谱特性相适应。光探测器应稳定，且具有线性灵敏特性。

#### ③ 试验程序

被测光纤的两个端面应清洁、光滑，且与光纤轴垂直。测量未成缆光纤应在松绕的光纤盘上进行，即光纤盘表面不应引起微弯。

将被测光纤放入试验装置中，记录输出光功率  $P_2$  保持注入条件不变，将光纤截断至截留长度（例如距离光注入点 2m）记录从光纤截留长度输出的光功率  $P_1$ 。

按式 (4.1) 衰减定义，由测得的  $P_1$  和  $P_2$  计算出  $P_1$  与  $P_2$  两功率点间光纤段的衰减和衰减的系数。

#### (2) 后向散射法

##### ① 测量原理

后向散射法测量光纤衰减的第一替代法。它基于光纤中双向后向散射光信号来提取光纤衰减或衰减系数、光纤长度、衰减均匀性、点不连续性、光学连续性、物理缺陷和接头损耗等信息。

单向后向散射测量适用于一些特殊情况，例如检验成缆光纤的散射斜率的变化。

因为后向散射法是一种非破坏性测试方法，所以这种方法被广泛应用在光纤光缆研究、生产、质量控制、工程施工、验收试验和安装维护时对光缆链路点不

连续性作大致判断。

后向散射法的测量原理是将大功率的窄脉冲注入被测光纤，然后在同一端检测光纤后向返回的散射光功率。由于主要的散射作用是瑞利散射，瑞利散射光的特征是它的波长与入射光波的波长相同，它的光功率与该点的入射光功率成正比，所以测量沿光纤返回的后向瑞利散射光功率就可以获得光沿光纤传输的衰减及其他信息。图 4.5 所示为后向散射法测得的衰减曲线。因为信号是通过数对数放大器处理的，衰减曲线相对后向散射功率是对数标度，即读得的是电平值。而且是经过往返两次衰减的值，所以曲线斜率为常数的 AB 段光纤的衰减为：

$$A(\lambda)_{AB} = \frac{1}{2}(P_A - P_B) \quad (\text{dB}) \quad (4.3)$$

$$\alpha(\lambda) = \frac{A}{L_{AB}} \quad (\text{dB/km}) \quad (4.4)$$

至于衰减曲线坐标的长度标准是通过时标换算得到的，即：根据光在光纤中传播速度和传输时间换算为长度（距离）。

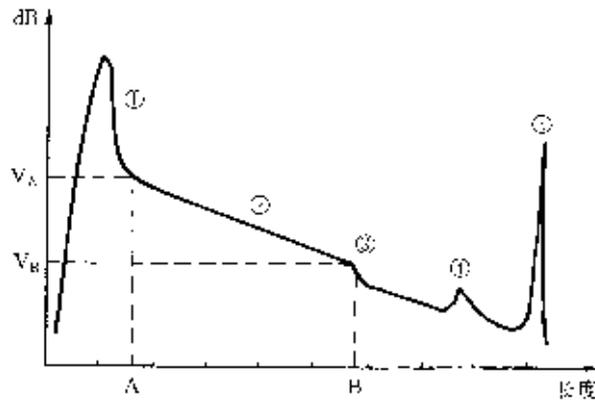


图 4.5 后向散射法测得的衰减曲线

光在真空中的传播速度  $c_0=3 \times 10^8 \text{m/s}$ ，光纤的折射率为  $n(\lambda)$ ，所以光在光纤中的传输速度  $c=c_0/n(\lambda)$ 。

设衰减曲线横坐标 AB 间的时间间隔为  $\Delta t$ ，注意这是经过往返传输的时间，故 AB 间的长度（距离）为：

$$L = \frac{c_0}{n(\lambda)} \cdot \frac{\Delta t}{2} \quad (\text{m}) \quad (4.5)$$

例如，光纤在  $0.85 \mu\text{m}$  波长的  $n(\lambda)=1.482$ ，当  $\Delta t=12 \mu\text{s}$  时，代入式 (4.5) 计算的长度或距离  $L=1214.6 \text{m}$ 。

由图 (4.5) 得知，单向后向散射衰减曲线仅反映的是衰减与长度的关系。利用后向散射法测得的单向后向散射衰减曲线，我们可以监测到许多现象，分别见图 4.5 中曲线的 ① ~ ⑤ 段。

- ① 表示在光纤输入端由光分路器和耦合器产生的反射。
- ② 是散射斜率恒定区。
- ③ 由于局部缺陷、连接或耦合造成的不连续性。
- ④ 表示散射斜率随波长而变化。
- ⑤ 在光纤输出端的波动，例如衰减随温度的变化。

## ② 试验装置

通常，后向散射的光信号的信号电平小，且与噪声电平相当。为改善信噪比和动态测量范围，常常使用一大功率光源与检测到的信号进行信号处理的装置相连接。另外，通过调节脉冲宽度来妥善处理分辨率与动态范围之间的关系。

后向散射法试验所用的装置就是光时域反射计 OTDR (Optical Time Domain Reflectometer)。OTDR 的组成，如图 4.6 所示。OTDR 各主要组成部分的作用，如下所述。

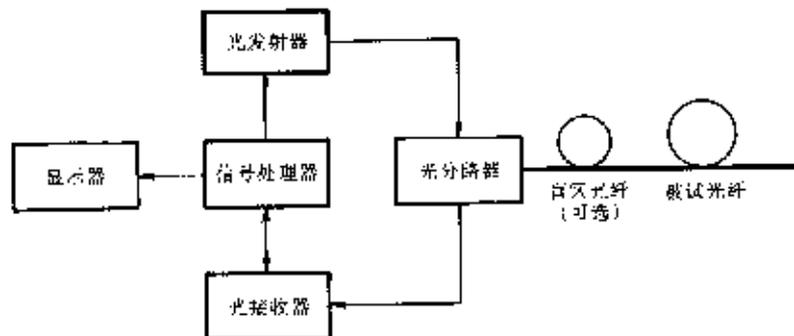


图 4.6 OTDR 试验装置框图

### A. 光发射器

通常包括一个脉冲激光二极管，能提供一个或多个脉冲宽度和脉冲重复频率。多波长仪器通常具有多个光源，标称中心波长可分为 850nm、1300nm、1310nm 或 1550nm，或按光纤产品规范规定。中心波长应在规定值的 15nm 以内。对于精确测量，中心波长应在规定值的 10nm 以内。如果光源中心波长和规定波长差值大于 10nm，应在测量结果报告中指出。光源均方根谱宽 (RMSW) 应不大于 10nm，或者光源半幅全宽 (FWHM) 应不大于 25nm。

如果衰减谱模型中采用 OTDR 数据，实际中心波长应在规定值的 2nm 之内，水峰波长区域 (1360 ~ 1430nm) 的光源谱宽不应大于 10nm (FWHM) 或 4nm (RMSW)。

采用诸如光谱分折仪这样合适的测量仪器对光源中心波长和谱宽进行周期检测。

### B. 输出口

以某种方法将被测光纤或盲区光纤连接到仪器面板或光源尾纤上。

### C. 光分路器

耦合器/光分路器将光源输出光耦合到光纤和将后向散射光耦合到探测器，同时避免光源与探测器的直接耦合。耦合器/光分路器不应有偏振效应。

#### D. 光接收器

通常包括光电二极管探测器，探测器的带宽、灵敏度、线性度及动态范围应与采用的脉宽和接收信号电平相适应。

#### E. 信号处理

用一个对数响应的信号处理器处理信号，并采用信号平均技术提高信噪比。

#### F. 显示器

显示器可以是阴极射线管、液晶显示器或是这两者，也可以是计算机的部件。显示器上垂直分度标尺为分贝数，对应于往返光信号损耗之半的分贝数变化；水平分度标尺为 m 或 km，对应于往返光信号群时延之半的长度。

仪器面板控制器可对显示器上的曲线进行定位，并能对长度或分贝的较小区域显示的部分曲线进行扩展。可控制一个或多个能对曲线上某些点定位的可移动光标，显示器上给出移动光标的坐标和一些适合于本仪器的辅助信息。

#### G. 数据接口（可选）

仪器可提供显示曲线的硬拷贝，并能与计算机连接。

#### H. 反射控制器（可选）

为将高菲涅尔反射引起的接收器瞬时饱和降到最低限度，以减少每一反射点后光纤盲区范围，选用电子屏蔽或在耦合器/光分路器中采用适合的方法。

为了减少 OTDR 连接处初始反射对结果的影响，通常在 OTDR 连接器和被测光纤之间采用一段盲区光纤。

#### I. 接头和连接器

为了将 OTDR 曲线的附加影响减至最小，OTDR 所要求的任何接头或连接器应具有低插入损耗和低反射（高回波损耗）。

### ③ 试验程序

被测试样为成盘光纤或光缆中的光纤。可在工厂或现场对一段或连接起来的多段光纤进行测量。

将被测光纤与光耦合系统对准。从受试光纤每一端测量一个单向后向散射衰减曲线。图 4.5 所示的是一个单向后向散射衰减曲线的实例。用信号处理器来分析每个散射衰减曲线，且记录在对数坐标上。由于光纤两端的耦合和光分路器引起反射，所以要去掉衰减曲线两端的部分（参见图 4.5 中的①和③两部分）。

由散射衰减曲线两端之间的时延  $t$  和光纤的群折射率  $N$  来计算光纤的长度  $L_f$  即：

$$L_f = \frac{ct}{N} \quad (4.6)$$

式中： $c$ —真空中的光速。

我们用下列给出的方法由两个测得和记录的单向后向散射衰减曲线来求得双向后向散射衰减曲线。

$a(x)$  和  $b(z)$  是描述两个单向后向散射衰减曲线的函数，单位为 dB， $x$  和  $z$  分别是光纤两端至光注入点的最近距离。双向后向散射衰减曲线由下式给定：

$$y(x) = \frac{a(x) - b(L_f - x)}{2} \quad (4.7)$$

由端点位置  $x_0$  和  $x_1$  ( $x_0 < x_1$ ) 定义的光纤段的衰减系数， $A(x_0, x_1)$  可按下式求得：

$$A(x_0, x_1) = \frac{y(x_0) - y(x_1)}{x_1 - x_0} \quad (4.8)$$

式 (4.8) 可用最小二乘法对  $x_0$  和  $x_1$  之间的数据进行线性拟合求得。两端点之间的光纤衰减系数也可按式 (4.8) 求出。所用的数据应尽可能靠近各端点。但是，这些点应选在盲区和端点反射区之外。

#### A. 长度测定

如图 4.7 所示，将光标置于试样末端反射脉冲上升边缘的一点，确定  $Z_2$ ；将同一光标或另一光标置于试样始端反射脉冲上升边缘的一点确定  $Z_0$ （如试样前无光纤或光缆段则  $Z_0$  为零，如试样前有已知长度为  $Z_0$  的光纤或光缆段，则  $Z_0$  为  $Z_0$ ）。如果由于不连续性极小而不宜确定  $Z_2$  和  $Z_0$  的位置，就在该处加一个绷紧的弯曲并改变弯曲半径以帮助光标定位，对于  $Z_2$  的定位如有可能，切割试样远端，使那里产生反射。试样长度为  $Z_2 - Z_0$ 。

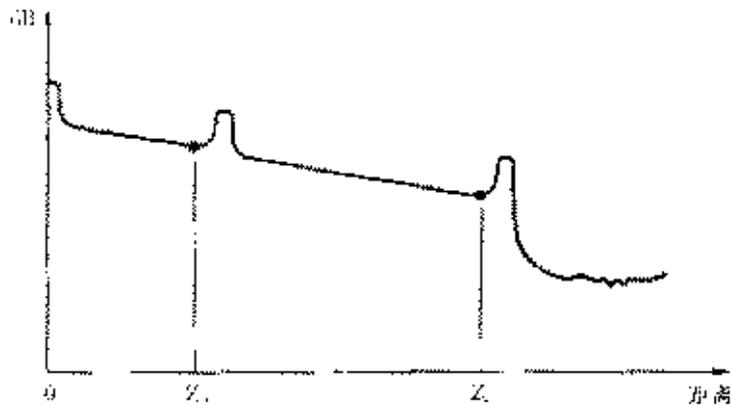


图 4.7 长度测定的 OTDR 衰减曲线

#### B. 衰减和衰减系数的测定

如图 4.8 所示，将光标置于试样始端反射脉冲上升边缘的一点，确定  $Z_0$ （如试样前无光纤或光缆段，则  $Z_0$  为零）。

将光标置于试样曲线线性始端（紧挨近端）。确定  $Z_1, P_1$ ；将同一光标或另一光标置于试样末端反射脉冲上升边缘的一点，确定  $Z_2, P_2$ 。

如果因不连续性极小而不易确定  $Z_0$  和  $Z_2$  的位置，就在该处加一个绷紧的弯曲并改变弯曲半径以帮助光标定位；对于  $Z_2$  的定位，如可能，切割试样远端，使那里产生反射。

始于盲区之后光纤或光缆段的单向后向散射衰减：

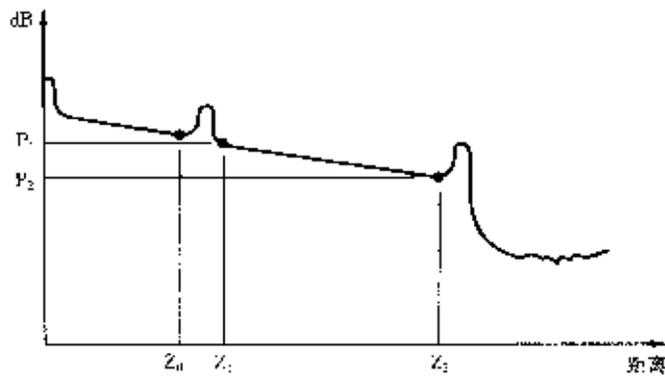


图 4.8 OTDR 衰减曲线

$$A = (P_1 - P_2) \quad (\text{dB}) \quad (4.9)$$

始于盲区之后光纤或光缆段的单向后向散射衰减系数：

$$\alpha = (P_1 - P_2) / (Z_2 - Z_1) \quad (\text{dB/km}) \quad (4.10)$$

光纤或光缆段总单向后向散射衰减：

$$A_{\text{总}} = \alpha (Z_2 - Z_0) \quad (\text{dB}) \quad (4.11)$$

通常，OTDR 能直接给出  $A$  值和  $\alpha$  值。该数据可以用两点法给出，也可以用最小二乘（LSA）法拟合曲线给出。LSA 法得出的结果可能与两点法得出的结果不同，但 LSA 法的重复性更好。

应进行双向测量，将双向测量获得的数值取平均得到精确衰减和衰减系数；如光纤两端均匀性好，亦可进行单向测量。

需要时可进行多波长测量，对非色散位移单模光纤和色散位移单模光纤可按照衰减谱模型给出的关系式计算衰减谱。

### C. 点不连续的测定

点不连续是连续的 OTDR 信号在朝上或朝下方向的暂时或永久性的局部偏移，偏移特征能够随试验条件（例如 OTDR 信号脉宽、波长和方向）变化。

点不连续的持续时间约为脉冲宽度。为了确定不连续（而不是衰减不均匀性）的存在，应采用两种不同的脉宽观察有疑问的区域。如果损耗或增益的形状随脉宽而变，则该异常情况是点不连续；否则要按照测量光纤或光缆衰减的程序进行衰减不均匀性测量。

如图 4.9 所示，将光标置于不连续点处功率开始上升或下降的始端来确定点不连续的位置。一般仪器要求一对光标置于不连续点处的两侧，将两根最佳拟合

直线（每一根分别由两点法或最小二乘法得到）外推到不连续点处的位置。两直线在不连续点处的垂直距离为点不连续的视在损耗或增益。

应进行双向测量，将双向测量取得的数值进行平均（这样可消除视在增益）得出点不连续损耗。

### (3) 插入损耗法

#### ① 测量原理

插入损耗法是测量光纤衰减特性的第二替代法。其测量原理类似于截断法。只不过插入损耗法用带活接头的连接软线代替短光纤进行参考测量，计算在预先相互连接的注入系统和接收系统之间（参考条件）因插入被测光纤引起的功率损耗。因此，功率  $P_1$ 、 $P_2$  的测量没有截断法那么直接，而且由于连接的损耗会给测量带来误差，所以插入损耗法不适用于工厂来测量光纤和光缆的制造长度的衰减。

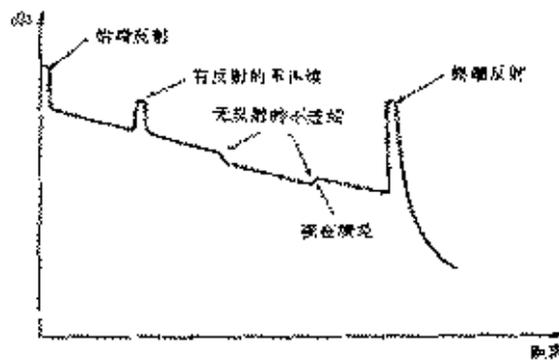


图 4.9 OTDR 点不连续曲线

插入损耗法的缺点是测量精度低于截断法。但是它具有非破坏性，即不需剪断被测光纤，被测光纤两端各带半个连接器和操作简单等优点。因此，用插入损耗法做成的便携式仪表，非常适用于现场用来测量带有连接器光缆中继段长度的总衰减。

插入损耗法有两个可供选择的参考条件下的测量原理方案，如图 4.10 所示。它们的区别本质在于注入系统和接收系统。图 4.10(a) 方案中固定到被测光纤的半个连接器的质量会影响测量结果。图 4.10(b) 方案则不存在这种影响。原因是它们采用光学系统精密耦合，代替了连接器耦合，它的测量精度更高，更适合于只需要知道光纤的真实衰减的场合，反之，当被测光纤段带有半个连接器，而且必须与其它元件串接时，要考虑半个连接器与标称衰减偏差时，图 4.10(a) 方案测得的结果才更具有意义。

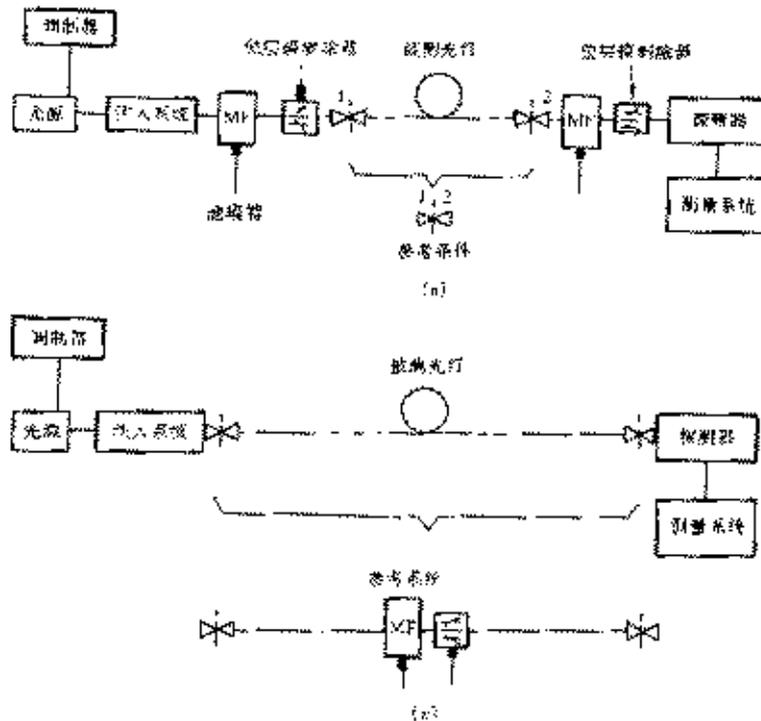


图 4.10 典型的插入损耗法测试装置

## ② 试验装置

插入损耗法测试装置如图 4.10 所示。衰减测量可在一个或多个波长上进行，而衰减谱的测量则是在一个波长范围内进行的。

### A. 光源

大功率稳定辐射光源适合于作为光源，例如卤钨灯、激光器或发光二极管。如果用宽光谱光源，其后应接上一个波长选择器（这个波长选择器被插在探测器之前）。在考虑选用波长选择器时，应该知道每种情况下光源的标称波长。光谱宽（FWHM）要窄，应与光纤衰减谱的任何分辨特征相适应。

### B. 调制器

为了改善接收机信噪比，通常对光源进行调制。这时，将光探测器连接到与光源调制频率同步的信号处理装置上。检测系统灵敏度应有良好的线性。

### C. 注入系统

#### a. 方案 1

光源与被测光纤相同标准特性的一短段单模光纤相耦合，而且配置一个滤模器和一个包层模剥除器。

上述的一短段单模光纤借助一个非常精密的耦合装置与被测光纤耦合，以减小耦合损耗和确保测量结果有意义。如果测试光纤是用半个连接器来耦合，应用一个比较高质量的半个连接器来与注入光纤连接。

b. 方案 2

通过一个合适的光学系统将光源耦合到被测光纤中。在光纤输入端面的注入光斑具有一近场光强，在模场直径内有一个均匀的远场光强，那么被测光纤则有一个远场光强。

光学系统使用几个透镜和一个光纤定位器。光先注入到一根阶跃折射率分布多模光纤，再将多模光纤与被测光纤连接。试验完成是通过任何耦合器或半个连接器与那些被测光纤进行连接的。

D. 参考系统

参考系统仅适用于方案 2。这个系统是由一短段与被测光纤相同标准特性的光纤组成的。该光纤带有一个滤模器和一个包层模剥除器，它们都不应对基模引起任何损耗。

E. 滤模器

滤模器只允许基模在光纤中传输。例如，这可以通过对光纤进行适当的弯曲来实现。

F. 包层模剥除器

包层模剥除器用来促使包层模转换成辐射模。如果光纤本身不传输包层模，那么就不需要选用包层模剥除器。

G. 光探测器

光探测器的光谱响应要与光源的光谱特性相一致。光探测器要具有线性敏感特性。

a. 方案 1

光探测器应与被测光纤具有相同特性的单模光纤相连接。该光纤应带有一个滤模器和一个包层模剥除器。

b. 方案 2

被测光纤的端面应定位在光探测器的前面，应选用一个适合的光探测器来截断来自光纤的所有辐射。光探测器应是空间均匀的。光探测器与一阶跃折射率分布多模光纤相连接。该光纤再通过任何耦合装置或一个与被测光纤进行连接的半个连接器来与被测光纤进行耦合。

③ 试验程序

如果光纤与连接器耦合，就需要弄清楚试验程序。一旦选定测量波长，首先按下述方法测量功率  $P_1$ 。

a. 方案 1

首先将注入系统的光纤与接收系统的光纤相连接，其次记下测得的接收功率  $P_1$ ；然后将被测光纤连接到注入系统与接收系统之间，测出功率  $P_2$ ，那么被测光纤段的总衰减可按下式计算：

$$A = 10 \log \frac{P_1(\lambda)}{P_2(\lambda)} + C_r - C_1 - C_2 \quad (4.12)$$

式中： $C_r$ 、 $C_1$ 和 $C_2$ 分别是在参考条件下，被测光纤输入端和输出端连接器的标称平均损耗 (dB)。

#### b. 方案 2

首先将参考系统连接在注入系统和接收系统之间，其次记录测出的功率  $P_1$ ，然后按注入系统方案 1 测出功率  $P_2$ ，则被测光纤段的总衰减的计算式如下：

$$A = 10 \log \frac{P_1(\lambda)}{P_2(\lambda)} \quad (\text{dB}) \quad (4.13)$$

## 二、色散

### 1. 定义

光纤中色散主要是指集中的光能，例如光脉冲经过光纤传输后在光纤输出端发生能量分散，导致传输信号畸变。在光纤数字通信系统中，由于信号的各频率成分或各模式成分的传输速度不同，信号在光纤中传输一段距离后，将互相散开，脉冲展宽。严重时，前后脉冲将互相重叠，形成码间干扰，增加误码率，影响了光纤的带宽，限制了光纤的传输容量和传输距离。

与光纤色散有关的系统性能损伤主要有：码间干扰、模分配噪声和啁啾噪声。

多模光纤的色散主要包括：模间色散、材料色散、波导色散等。单模光纤色散主要包括：材料色散、波导色散、折射率剖面色散和偏振模色散等。

色散是单模光纤的重要参数之一。研究光纤的色散特性，对合理地设计光纤折射率剖面结构，改善光纤的传输特性是极为重要的。值得指出的是，G. 653、G. 655 单模光纤都是由优化光纤工作波长处的材料色散和波导色散的方法，即通过改变光纤波导结构研制出来的新型光纤。

单模光纤的色散决定着光纤所能传输的速率、距离、容量，对于超长距离、超大容量、超高速率的通信系统有着极为重要的意义。色散和衰减是系统设计的光中继段受限距离的两个重要参数。

传输系统设计中，色散限制系统光中继距离的估算公式：

$$L = 10^6 \cdot \varepsilon / (B \cdot D \cdot \delta \lambda) \quad (4.14)$$

式中： $L$  — 色散受限系统光中继距离 (km)；

$\varepsilon$  — 当光源为多纵横激光器时取 0.115，发光二极管或单纵横激光器时取 0.306；

$B$  — 传输比特率 (Gbit/s)；

$D$  — 光纤色散系数 ps/(nm·km)；

$\delta \lambda$  — 光源的均方根谱宽 (nm)。

由式 (4.14) 得知，系统传输距离与光纤的色散系数成反比。特别是当今在掺

铒光纤放大器广为采用的前提下, 光纤的色散、色散系数、零色散波长、零色散斜率已成为光纤、有源器件及系统设备研究人员共同努力解决的热点研究课题之一。

### (1) 色散

色散是由组成光源谱的不同波长, 以不同群速度传输所引起的光纤中单位光源谱宽的光脉冲展宽, 用 ps/nm 表示。它取决于光纤的特性和长度。单模光纤色散通常是由材料色散、波导色散和剖面色散三部分共同组成。

### (2) 色散系数 $D(\lambda)$

色散系数  $D(\lambda)$  是单位长度光纤的波长色散, 单位为: ps/(nm·km)。若在波长  $\lambda$  下, 单位长度的群时延为  $\tau(\lambda)$ , 则波长色散系数  $D(\lambda)$  如下式:

$$D(\lambda) = \frac{d\tau(\lambda)}{d\lambda} \cdot \frac{1}{L} \quad \left[ \frac{\text{ps}}{\text{nm} \cdot \text{km}} \right] \quad (4.15)$$

### (3) 零色散波长 $\lambda_0$

零色散波长  $\lambda_0$  是波长色散为零的波长, 单位为 nm。

### (4) 零色散斜率 $S_0$

在零色散波长处, 波长色散系数随波长变化曲线的斜率为  $S_0$ , 单位为 ps/(nm<sup>2</sup>·km)。

## 2. 测量方法

与多模光纤相比单模光纤没有模间色散, 故其总色散很小, 即对信号的畸变或展宽很小, 带宽很宽。因此单模光纤色散的测量需要用精密灵巧的皮秒级时延差的测量方法: 相移法、干涉法和脉冲时延法。ITU-T G.650(2000) 规定相移法为光纤色散测量的基准试验方法, 干涉法和脉冲时延法为替代试验方法。下面主要介绍这些试验方法的测量原理、试验装置和试验程序。

### (1) 相移法

#### ① 测量原理

相移法是测量光纤色散的基准试验方法。相移法的测量原理是通过测量不同波长的光纤的光信号, 通过光纤后产生相移法, 计算得出不同波长间的相对群时延再根据时延  $\tau(\lambda_i)$  得到最佳拟合时延曲线  $\tau(\lambda)$ , 通过数学运算进一步得到光纤色散特性曲线  $D(\lambda)$ 。

假设有波长  $\lambda_1 \sim \lambda_n$  的几个光源, 分别用频率为  $f$  的正弦电信号调制, 光纤输入端信号的初始相位是  $\theta_1 \sim \theta_n$ , 用  $\tau_1 \sim \tau_n$  表示传输群时延, 则通过被测光纤后的相位分别为:

$$\begin{aligned} & \theta_1 + 2\pi f \tau_1 \\ & \cdot \\ & \cdot \\ & \theta_n + 2\pi f \tau_n \end{aligned} \quad (4.16)$$

假定通过一段光纤每一波长的参考信号的时延都一样, 且用  $\tau_0$  表示, 则测

量信号与参考信号相比后，每一波长的相位差分别为：

$$\begin{aligned} \phi_1 &= 2\pi f(\tau_1 - \tau_0) \\ &\vdots \\ &\vdots \\ \phi_n &= 2\pi f(\tau_n - \tau_0) \end{aligned} \quad (4.17)$$

相应的时延表示分别为：

$$\begin{aligned} \tau_1 &= \frac{\phi_1}{2\pi f} + \tau_0 \\ &\vdots \\ &\vdots \\ \tau_n &= \frac{\phi_n}{2\pi f} + \tau_0 \end{aligned} \quad (4.18)$$

测量时，为了消除相位旋转数目的影响，使用的调制频率  $f$  必须满足： $(2N-1)\pi < \phi$ ， $-\phi_n < (2N+1)\pi$  ( $N$  为相位旋转数目)。于是，相差  $\phi_1 \sim \phi_n$  可重新表示为：

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \phi_1 + 2\pi N \\ &\vdots \\ &\vdots \\ \phi_n &= \phi_n + 2\pi N \end{aligned} \quad (4.19)$$

相应的延迟时间重新表示为：

$$\begin{aligned} \tau_1 &= \frac{\phi_1 + 2\pi N}{2\pi f} + \tau_0 \\ &\vdots \\ &\vdots \\ \tau_n &= \frac{\phi_n + 2\pi N}{2\pi f} + \tau_0 \end{aligned} \quad (4.20)$$

由式 (4.20) 可以清楚地看出，从测得的相移量  $\phi'_1 \sim \phi'_n$  就能计算出不同波长的相对群时延。根据群时延  $\tau(\lambda)$  得到最佳拟合群时延  $\tau(\lambda)$ ，再经过数学计算进一步得到光纤的色散特性曲线  $D(\lambda)$ 。

$$D(\lambda) = \frac{d\tau}{d\lambda} \quad (4.21)$$

当  $D(\lambda) = 0$  时，就称之为零色散波长  $\lambda_0$ 。

相移法适用于实验室、工厂和现场测量长度大于 1km 的单模光纤和多模光纤的波长色散，在测量精度或重复性满足要求的情况下，也可以用来测量更短的光纤；但测量波长范围可按要求改变。

## ② 试验装置

相移法测量单模光纤色散特性的试验装置，如图 4.11 所示。试验装置主要包括：光源波长选择器、光探测器、参考信道、时延检测器和信号处理器等。

#### A. 光源

在测量期间内，光源的位置、光强和波长都应稳定。根据测量的波长范围，可以选用的光源是激光二极管 (LD 阵列)、可调波长激光二极管 (如外腔激光器)、发光二极管 LED 或宽带光源 (如拉曼光纤 Nd: YAG 激光器)。

在任何情况下，调制信号都应确保群时延测量有足够的时间响应。

#### B. 波长选择器

波长选择器和监测器用来选择和监视测量的群时延波长。根据光源的类型和测量装置来选用波长选择器、光开关、单色仪、色散仪、滤光器、光耦合器、连接器、通过改变电驱动信号来选择不同波长的光源。波长监测是由一个光纤耦合器和一个波长仪来完成的。波长选择器和监测仪既可放置在被测光纤的输入端，又可放置在被测光纤的输出端。

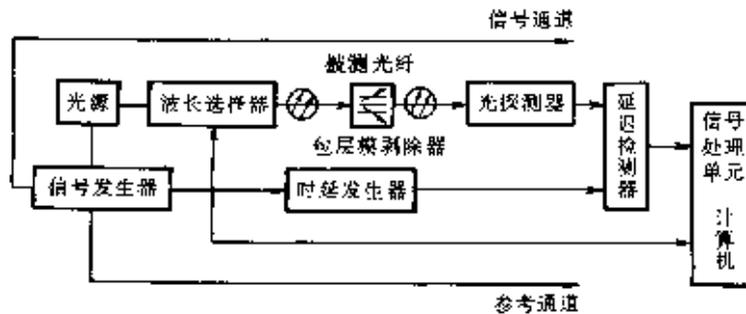


图 4.11 相移法测量单模光纤色散的试验装置

如果用数学拟合 [式 (4.22)、式 (4.24)] 来处理数据，至少有一个数据必须在  $\lambda_0$  的 100nm 以内。

#### C. 光探测器

由被测光纤出射的光、参考光纤或分光器等与光探测器耦合，光探测器的信噪比和时间响应都应与测量相适应。如果需要，光探测器后应接一个低噪声放大器。

#### D. 参考信道

参考信道可由电信号线组成，也可由光信号线组成。参考信道中可插入一合适的时延发生器。在某些情况下，被测光纤本身就可以作为参考信道线。

#### E. 时延探测器

时延探测器用来测量参考信号和信道信号之间的相位移。一般选用一个矢量电压表。

#### F. 信号处理器

为了减小噪声和/或测量波形的抖动，往往加入一个信号处理器。需要时，

用一台数字计算机来实现仪器控制、数据获取、数据的数值计算。

### ③ 试验程序

被测光纤通过波长选择器或分光器等与光源和光探测器耦合。需要时,先对光源的色散时延进行校正。必须在波长分辨率与信号电平之间获得一种合适的均衡。除非被测光纤也被用作参考信道线,在测量中光纤的温度必须足够的稳定。在测量波长下,参考信号和信道信号间的相位移是用延时检测器进行测量的。为了获得测量波长处的色散系数,数据处理应与所用的调制类型相适应。需要时,应做出群时延谱扫描与波长的曲线关系。由测量值来获得拟合曲线。

由测得的相位移  $\phi$ ,再通过关系式  $\tau = \phi / 2 \pi f$  就能求得群时延,  $f$  是调制频率。根据 ITU-T G. 650 (2000) 规定,各种光纤的群时延与波长的拟合公式和光纤的色散系数的计算公式分别介绍如下。

对 G. 652 光纤:

G. 652 光纤零色散波长在 1310nm 附近,其工作波长在 1270 ~ 1340nm 之间。测得的单位长度光纤的群时延与波长的关系由三项 Sellmeier 表达式拟合如下:

$$\tau(\lambda) = \tau_0 + \frac{S_0}{8} \left( \lambda - \frac{\lambda_0^2}{\lambda} \right)^2 \quad (4.22)$$

式中:  $\tau_0$  是在零色散波长  $\lambda_0$  处的相对最小群时延。

G. 652 光纤的色散系数  $D(\lambda)$ , 可将式 (4.22) 对波长求微分得到:

$$D(\lambda) = \frac{d\tau}{d\lambda} = \frac{S_0}{4} \left( \lambda - \frac{\lambda_0^2}{\lambda} \right) \quad (4.23)$$

式中:  $S_0$  零色散斜率,即色散斜率  $S(\lambda) = dD/d\lambda$  的在零色散波长  $\lambda_0$  处的值,单位为 ps/(nm<sup>2</sup> · km)。

对 G. 653 光纤:

G. 653 光纤零色散波长在 1550nm 附近,其工作波长在 1550 ~ 1600nm 之间。测得的单位长度光纤的群时延与波长关系的拟合表达式为:

$$\tau(\lambda) = \tau_0 + \frac{S_0}{2} (\lambda - \lambda_0)^2 \quad (4.24)$$

式中:  $\tau_0$  为零色散波长处最小的相对时延。通过将式 (4.24) 对波长求微分可获得 G. 653 光纤的色散系数表达式为:

$$D(\lambda) = (\lambda - \lambda_0) S_0 \quad (4.25)$$

式中:  $S_0$  为零色散斜率,即  $S(\lambda) = dD/d\lambda$  在零色散波长  $\lambda_0$  处的值。

对于 G. 652 光纤和 G. 653 光纤的色散系数曲线,如图 4.12 所示。

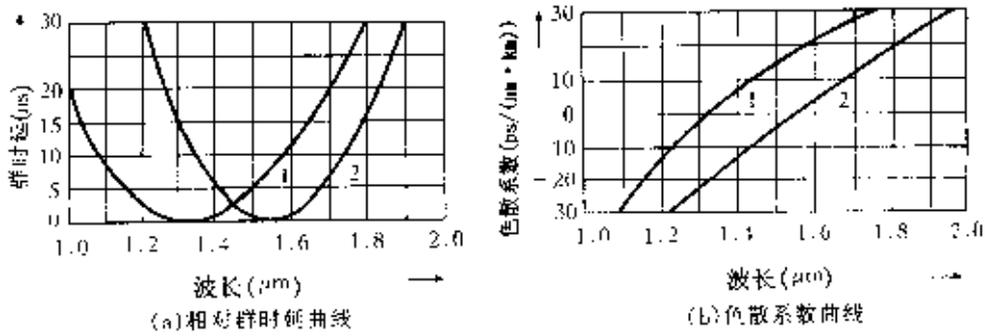


图 4.12 G.652 光纤(1)和 G.653 光纤(2)的色散曲线

对 G.655 光纤:

G.655 光纤的零色散波长在 1550nm 附近, 在使用波长区域: 1530~1625nm 具有一个非零的小色散值, 以抑制密集波分复用中四波混频等非线性效应。

G.655 光纤在使用的波长范围内有一个允许的色散系数绝对值, 在规定的波长范围内色散系数不能为零。同时也规定色散的正负符号。

$$D_{\min} \leq |D(\lambda)| \leq D_{\max} \quad \lambda_{\min} \leq \lambda \leq \lambda_{\max} \quad (4.26)$$

· 波长色散特性

非零色散区 (nm):  $1530 \leq \lambda_{\min} \leq \lambda_{\max} \leq 1625$

非零色散区色散系数绝对值 ps/(nm·km)  $1.0 \leq D_{\min} \leq D_{\max} \leq 10$

色散符号: 正或负

最大色散系数与最小色散系数差 ps/(nm·km)  $D_{\max} - D_{\min} \leq 5.0$

· L 波长色散特性

非零色散区 (nm):  $1565 \leq \lambda_{\min} \leq \lambda_{\max} \leq 1625$

非零色散区色散系数绝对值 ps/(nm·km) 待定

色散符号: 正

(2) 干涉法

① 测量原理

干涉法是单模光纤色散测量的第一替代试验方法。干涉法的特点是仅用一根几米长的短光纤就可以测量出光纤的色散。干涉法还可给出光纤色散纵向均匀性。而且它还可检测出整体或局部的因素, 例如: 温度变化、微弯损耗等对色散的影响。

干涉法测量原理是按照干涉法测量原理, 即用 Mach-Zehnder 干涉法测量被测光纤试样和参考通道之间与波长有关的时延。参考通道既可是空气通道, 又可

以是已知群时延谱的单模光纤

这里应指出的是,用干涉法测出的几米长短光纤色散值外推到纵向均匀的长光纤,并非适用每一种情况。

用一根单模光纤作为参考的测试装置的测量原理。如图 4.13 所示。这个试验装置的测量原理用分振幅的方法产生双光束,实现干涉。从光源出来经波长选择器的光束被光束分离器 1 分为两束光,它们分别经过被测光纤和参考光纤传输后,又由光束分离器 2 将两束光合二为一进入光探测器。只要精确调整参考光纤出射端面与第二个光束分离器间的距离  $X$ ,就可使进入光探测器中的二束光满足相关条件,在锁相放大器中显示最大值。

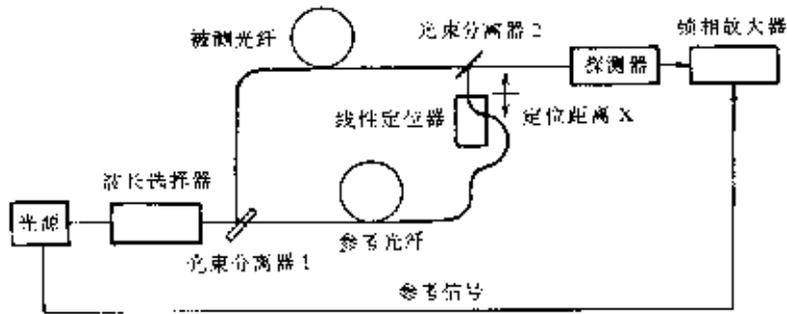


图 4.13 干涉法测量色散的试验装置

测量时,保持注入条件不变,测量不同波长点的群时延。每一个波长  $\lambda_i$  ( $i=0, 1, 2, \dots, n$ ) 分别测出对应于干涉图上最大中心光强的位置  $X_i$ , 于是这个波长上参考通道与试验通道的群时延差为:

$$\Delta \tau_g(\lambda_i) = \tau_{Tf}(\lambda_i) - \tau_{Rf}(\lambda_i) = (X_0 - X_i) / c \quad (4.27)$$

式中:  $\tau_{Tf}(\lambda_i)$  和  $\tau_{Rf}(\lambda_i)$  分别为被测光纤和参考光纤的群时延,  $c$  为真空中的光速。由式(4.27)可得到被测光纤的群时延的公式:

$$\tau_{Tf}(\lambda_i) = \tau_{Rf}(\lambda_i) + (X_0 - X_i) / c \quad (4.28)$$

被测光纤单位长度上的群时延为:

$$\tau(\lambda_i) = \frac{\tau_{Rf}(\lambda_i) + (x_0 - x_i) / c}{L} \quad (4.29)$$

式中:  $L$  为被测光纤的长度。

在求出一组  $\tau(\lambda_i) - \lambda_i$  的值后,根据被测光纤的类型,分别进行相对时延曲线拟合,求出  $\lambda_0$  和  $S_0$  后,再计算出各类光纤的色散系数曲线。

## ② 试验装置

干涉法测量光纤色散有两个试验方案:参考光纤方案和空气通道参考方案。参考光纤方案的试验装置,如图 4.13 所示。这个试验装置主要组成部分有:光源、波长选择器、光束分离器、被测光纤、参考光纤、光探测器等。

### A. 光源

在测量期间光源的位置、光强和波长应保持稳定。光源应是稳定的光源，如带拉曼光纤的 YAG 激光器或卤钨灯和发光二极管等。对采用锁定放大技术时，应选用低频调制 (50 ~ 500Hz) 光源就能满足要求。

#### B. 波长选择器

波长选择器的波长应选在测量群时延的波长。根据光源类型和测量系统来选用单色仪、光干涉滤光器或其他波长选择器。波长选择器可放在被测光纤的输入端，也可放在被测光纤的输出端。光源的光谱宽度主要由色散测量精度决定。光源的光谱宽度大约为 2 ~ 10nm。如果要对测得的数据进行数学拟合，那么至少有一个数据应在零色散波长  $\lambda_0$  的 100nm 内。

#### C. 光探测器

光探测器在测量色散的波长范围内应具有足够的灵敏度。需要时，接收信号应用一个互阻抗电路进行增强。

#### D. 试样

试验用的试样可以是未成缆单模光纤，也可以是成缆的单模光纤。试样的长度为 1 ~ 10m。光纤试样长度的精度应为  $\pm 1\text{mm}$ 。应十分小心地制备试样光纤的端面。

#### E. 数据处理

用一台带有合适软件的计算机来对干涉图型进行分析和数据处理。

#### ③ 试验程序

将被测光纤安放在图 4.13 所示的试验装置中。所用的优化光探测器接受光功率的方法是借助一台三维微定位器来对试样光纤端面进行定位。消除了包层模产生的误差。

群时延测量是通过用一维定位器来对不同波长的参考通道与二个干涉仪通道的光长进行平衡来实现的。波长  $\lambda_i$  干涉图型的最大强度位置  $x_i$  与波长  $\lambda_0$  的位置  $x_0$  之间的位置差就确定出参考通道和被测通道之间的群时延差  $\Delta \tau_g(x_i)$ ：

$$\Delta \tau_g(\lambda_i) = \frac{x_0 - x_i}{c_0} \quad (4.30)$$

式中： $c$  为真空中的光速。由  $\Delta \tau_g(\lambda_i)$  与参考通道的群时延谱可求出被测光纤的群时延。将被测光纤的群时延除受试光纤长度就给出了被测光纤单位长度的群时延  $\tau(\lambda)$ ，如图 4.14 所示。

对不同类型的单模光纤采用相应的时延拟合公式和色散系数算式就可求各种单模光纤的群时延和色散系数。

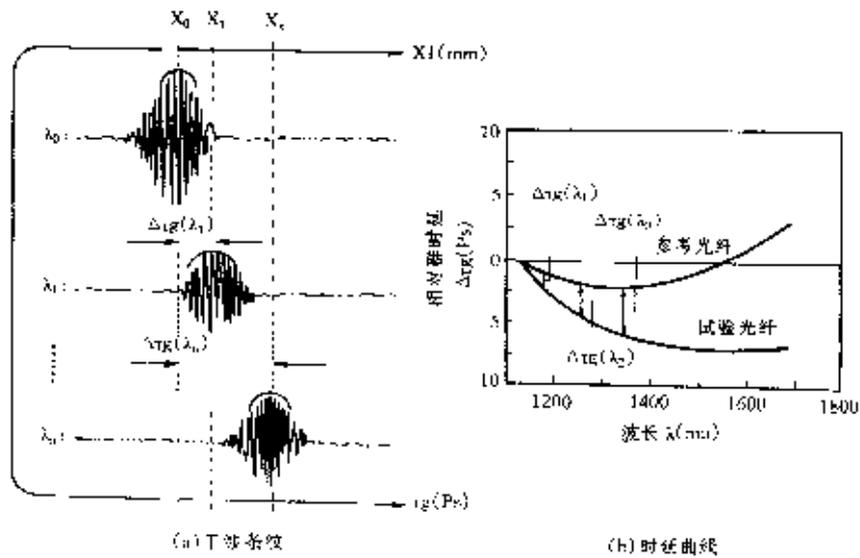


图 4.14 群时延谱的确定

### (3) 脉冲时延法

#### ① 测量原理

脉冲时延法是单模光纤色散测量的第二替代试验法。这种试验方法的测量原理是，使不同波长的窄光脉冲分别通过已知长度的受试光纤时，测量不同波长下产生的相对群时延，再由群时延差计算出被测光纤的色散系数。群时延的测量采用时域法，即通过探测、记录、处理不同波长下脉冲的时延。具体的脉冲时延法的测量原理，如图 4.11 所示。

脉冲时延法的关键问题在于极窄光脉冲的产生、光探测和测量。因此，脉冲时延法对测量系统各组成部分（如电脉冲发生器产生极窄光脉冲、光探测器高速响应和示波器高速取样）的技术指标要求都非常高。例如，光纤长度为 10km，色散系数大约是  $2\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ ，如果我们选用中心波长相差 10nm 的两个波长进行测量，这样我们可估算出示波器上的时延差为： $\Delta \tau = 10\text{km} \times 10\text{nm} \times 2\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km}) = 200\text{ps}$ 。在如此短的时间间隔，要得到精确的测量，光脉冲宽度应小于 100ps，而光探测器的响应小于 50ps，相应的取样示波器的带宽应在 10GHz 以上。

由上可知，当光纤的色散系数很小或光纤长度不长时，估算时延  $\Delta \tau$  很小。如需要进一步提高时间的分辨率，就要对光纤探测器和取样示波器提出更苛刻的要求。因此，脉冲时延法测试系统一般用于长距离（如光纤链路和光缆中继段）总色散的测量。

#### ② 试验装置

脉冲时延法试验装置主要组成部分有：光源、波长选择器、光探测器、参考

信道、时延探测器、信号处理器等。有关试验装置具体组合方案，如图 4.11 所示。

#### A. 光源

在整个测量期间，光源的位置，光强和波长都应稳定。根据测量的工作波长范围，可供选用的光源有：激光二极管、激光二极管阵列（LD-阵列）、可调波长激光器（外腔激光器）和宽带光源（拉曼光纤 Nd:YAG 激光器）。在任何情况下，群时延测量中调制信号都应保持足够的时间响应。

#### B. 波长选择

波长选择器和监视器用来选择和监视群时延测量的波长。根据光源类型和测量装置来选用波长选择器、光开关、单色仪、微调定位器、滤光器、光耦合器、光连接器。波长监视是由一个光纤耦合器和波长仪来完成的。波长选择器和监视仪可以安放在被测光纤的输入端，也可以安放在被测光纤的输出端。需要对测量数据进行数学拟合时，至少有一个数据点应在零色散波长 $\lambda_0$ 的 100nm 内。

#### C. 光探测器

由被测光纤出射的光、参考光纤或光隔离器应与适合于测量的信噪比和时间响应的光探测器耦合。需要时，光探测器后应接入一个低噪声放大器。

#### D. 参考信道

参考信道可由电信号线或光信号线组成。在参考信道中可插入一适宜的时延发生器。在某些情况下，被测光纤本身可作为参考信道线。

#### E. 时延探测器

时延探测器测量的是参考信号和信道信号之间的时延。可用作时延检测的仪表为高速示波器或取样示波器。

#### F. 信号处理器

为减小噪声和/或测得的波形抖动应加入一个信号处理器。需要时，用一台计算机来进行仪器控制、数据获取和数据的数值计算。

### ③ 试验程序

#### A. 参考光纤的测量

将参考光纤放入试验装置，并将光源波长调至第一个测量波长。调节时延发生器，以便在已知的经校准的示波器时间刻度上显示出输入光脉冲。脉冲位置由其波峰或中心点确定。将该波长作为基准波长，记录该基准波长脉冲相对于校准的标准（例如显示标线）的时间位置。

将光源调至下一个测量波长，不改变时延发生器，记录该波长脉冲和基准波长脉冲之间的时间差 $\tau_{in}(\lambda_i)$ 。在所要求的各波长 $\lambda_i$ 上重复本程序。

#### B. 被测光纤的测量

将被测光纤放入试验装置，并将光源调至第一个测量波长，调节时延发生器，

以便在已知的经校准的示波器时间刻度上显示出输入脉冲。

按参考光纤测量中由脉冲波峰或中心步骤确定基准波长,记录基准波长脉冲的时间位置。将光源调至下一个测量波长,不改变时延发生器,记录该波长脉冲和基准波长脉冲(由参考光纤测量中确定)之间的时间差 $\tau_{out}(\lambda_i)$ 。在所要求的各波长 $\lambda$ 上重复本程序。

从每个波长的输入脉冲时间差中减去在该波长上测得的输入脉冲时间差。单位长度的群时延为:

$$\tau(\lambda) = \frac{\tau_{out}(\lambda_i) - \tau_{in}(\lambda_i)}{L} \quad (\text{ps/km}) \quad (4.31)$$

式中:  $\tau_{out}(\lambda_i)$ —输出脉冲时间差 (ps);

$\tau_{in}(\lambda_i)$ —输入脉冲时间差 (ps);

$L$ —减去参考光纤长度后的被测光纤长度 (km)。

对于各类光纤,群时延曲线 $\tau(\lambda)$ 的拟合和色散系数 $D(\lambda)$ 的计算按相移法中规定的方法进行。

### 三、偏振模色散

#### 1. 定义

##### (1) 偏振模色散

偏振模色散(PMD, Polarization Mode Dispersion)是指单模光纤中的两个正交偏振模之间的差分群时延,它在数字系统中使脉冲展宽产生误码。

##### (2) 主偏振态

对于一在给定时间和光频上应用的单模光纤,总存在着两个称之为主偏振态的正交偏振态,如果当一准单色光仅激励一个主偏振态时,不发生由于偏振模色散引起的脉冲展宽;当一准单色光均匀激励这两个主偏振态时,将发生由于偏振模色散引起的最大脉冲展宽。光纤输出的主偏振态的两个正交偏振态,当光频稍微变化时,输出偏振并不改变,相应的输入正交偏振态是输入主振模态。

##### (3) 差分群时延

差分群时延是两个主偏振态之间群时延的时间差,一般用 ps 为单位。

##### (4) 偏振模色散差分群时延

在所有实际情况下,下面介绍偏振模色散差分群时延三种定义在所能达到的测量重复性之内是等效的。

##### ① 二阶矩偏振模色散差分群时延 $P_s$

二阶矩偏振模色散差分群时延定义为,当一准单色光窄脉冲注入到光纤经传输后,忽略波长色散的影响,在光纤输出端输出脉冲中光强分布 $I(t)$ 的均方差 $\sigma$ 的 2 倍,即:

$$P_s = 2\left(\langle t^2 \rangle - \langle t \rangle^2\right)^{1/2} = 2\left\{\frac{\int I(t)t^2 dt}{\int I(t)dt} \left[\frac{\int I(t)t dt}{\int I(t)dt}\right]^2\right\}^{1/2} \quad (4.32)$$

式中:  $t$ —光到达光纤输出端所需的时间 (ps)。

② 平均偏振模色散差分群时延  $P_m$

平均偏振模色散差分群时延是在光频范围 ( $\nu_1 \sim \nu_2$ ) 内偏振态差分群时延  $\delta \tau(\nu)$  的平均值, 即:

$$P_m = \frac{\int_{\nu_1}^{\nu_2} \delta \tau(\nu) d\nu}{\nu_2 - \nu_1} \quad (4.33)$$

式中:  $\nu$ —光频率;

$\nu_1, \nu_2$ —分别为频率范围上下限。

③ 均方根偏振模色散差分群时延  $P_r$

均方根偏振模色散差分群时延是在光频范围 ( $\nu_1 \sim \nu_2$ ) 内主偏振态差分群时延  $\delta \tau(\nu)$  的均方根值, 即:

$$P_r = \left[ \frac{\int_{\nu_1}^{\nu_2} \delta \tau(\nu)^2 d\nu}{\nu_2 - \nu_1} \right]^{1/2} \quad (4.34)$$

式中:  $\nu$ —光频率;

$\nu_1, \nu_2$ —分别为频率范围上下限。

(5) 偏振模色散系数

偏振模色散系数用 PMDc 表示。应区别两种情况:

弱偏振模耦合 (短光纤):

$$PMDc = \frac{P_s}{L}, \frac{P_m}{L}, (ps/km) \quad (4.35)$$

强偏振模耦合 (长光纤):

$$PMDc = \frac{P_s}{\sqrt{L}}, \frac{P_m}{\sqrt{L}}, \frac{P_r}{\sqrt{L}} (ps/\sqrt{km}) \quad (4.36)$$

式中:  $L$ —光纤长度

## 2. 测量方法

为了适应超高速率光纤数字通信系统发展的需要, 人们对光纤偏振模色散的研究工作越来越深入。究其原因是光纤的偏振模色散对超高速光纤数字通信系统的传输性能有着不可忽视的影响, 所以人们对光纤偏振模色散的研究涉及到偏振模色散的产生机理、理论分析计算、测量方法标准、光缆链路偏振模色散设计等。

作为国内广大光纤光缆研制、生产、工程施工的人员和用户, 更加关心和迫

切需要了解与掌握的是偏振模色散的定义，试验方法，测量原理、试验装置和试验程序等详细内容。

本节主要以国际电信联盟电信标准化部门建议 ITU-T G. 650(2000) 和国际电工委员会标准草案 IEC61941(1999) 中介绍的单模光纤偏振模色散的定义和测量方法为依据，对偏振模色散的基准试验方法，即斯托克斯参数测定法和替代试验方法，即偏振态法与干涉法的测量原理、试验装置和试验程序等，给予简述。

### (1) 斯托克斯参数测定法

#### ① 测量原理

斯托克斯参数测定法是测量单模光纤 PMD 的基准试验方法。它的测试原理是，在一波长范围内，以一定的波长间隔测量出输出偏振态随波长的变化，该变化可采用琼斯矩阵本征分析或邦加球(Poincare Sphere)上输出偏振态矢量的旋转来表征，通过分析和计算从而得到 PMD 的结果。

斯托克斯参数测定法与偏振模耦合程度无关，适用于短的和长的光纤。在某些情况下，为获得满意的测量精度，要进行重复测量。这个方法仅限于波长大于或等于光纤有效单模工作波长的情况。

#### ② 试验装置

斯托克斯参数测定法测量 PMD 的试验装置如图 4.15 所示。试验装置主要包括：光源、偏振调节器、线偏振器组和输入光学器件等。

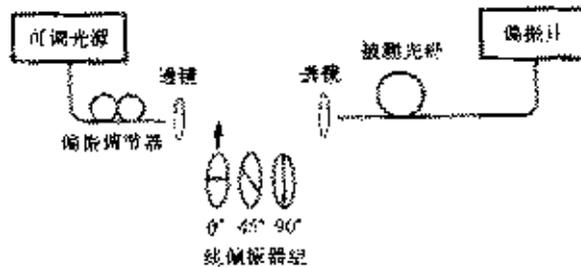


图 4.15 斯托克斯参数测定法试验装置

#### A. 光源

光源是一只单纵模激光器或窄带光源，在测量波长范围内波长是可调的。光谱分布足够窄，使得从被测光纤出来的光在所有测量条件下都保持偏振状态。偏振度(DOP, Degree Of Polarization)不小于 90%，虽然偏振度低到 25% 时仍然可进行测量，但降低了测量精度。对于一给定的差分群时延值  $\Delta \tau$ ，要求的最低偏振度 DOP(%) 由下式给出：

$$DOP = 100 \exp \left[ -\frac{1}{4 \ln 2} \left( \pi c \Delta \tau \Delta \lambda_{FWHM} / \lambda_0^2 \right)^2 \right] \quad (4.37)$$

式中： $\lambda_0$  — 高斯谱中心波长（假定光谱为高斯分布）；

$c$  — 真空中光速；

$\Delta \tau$  — 给定的差分群时延值;

$\Delta \lambda_{\text{FWHM}}$  — 光谱半幅全宽度 (FWHM)。

#### B. 偏振调节器

一个偏振调节器置于可调光源之后,其作用是使线偏振器组提供近似圆偏振光,使得线偏振器的极化方向不会与输入光的偏振方向相交。

#### C. 线偏振器组

采用三个线偏振器,将它们以相对角度约为  $45^\circ$  安排依次置于测量光路中,应知道实际的相对角度。

#### D. 输入光学器件

可以采用单模尾纤或一个光学透镜系统来激励被测光纤。

##### a. 尾纤

如果采用尾纤,应避免反射引起的干涉影响,要求使用折射率匹配液或成角度的切割面。尾纤应是单模光纤的尾纤。

##### b. 光学透镜系统

如果采用光学透镜系统,应使用一些适当的方法,例如一真空吸盘来稳固地支撑光纤输入端。

##### c. 包层模剥除器

用包层模剥除器,剥除任何包层模中传输的光功率。当光纤预涂覆层材料的折射率等于或大于光纤包层折射率时,光纤预涂覆层就可起到包层模剥除器的作用。

#### E. 输出光学器件

输出光学器件将被测光纤出射的全部功率耦合至偏振计中。例如可用一个光学透镜系统、一个与单模尾纤对接的接头或使用折射率匹配液将一个直接连到探测器的光纤与被测光纤耦合。

#### F. 偏振计

采用一个偏振计测量三个线偏振器分别插入光路时所对应的三个输出偏振态。偏振计的波长范围应覆盖光源的波长范围。

### ③ 试验程序

试样应为已知长度的一段成缆或未成缆的单模光纤。在整个测量期间,被测试样和尾纤的位置及所处环境温度均应保持稳定。可以通过在邦加球上观测被测光纤输出偏振态监视试验器械环境的温度稳定性,在相应于一对相邻琼斯矩阵测量的时间内,输出偏振的变化相对于波长增加产生的变化应是很小的。

当需要减小附加模耦合时,未成缆光纤应当用适当的方法来固定(通常是卷绕在最小半径为 150mm 的光纤盘上),光纤所受张力基本为零(曲型值小于 0.15N)。

测量程序为调整光源输出光的偏振方向。将可调激光器波长定于待测波长范围的中心波长,将三个线偏振器依次插入光路中,测量出它们相应的输出光功率,通过偏振调节器调整光源的偏振方向,使得三个功率相互差别在大约 3dB 范围之

内。首先将光源通过偏振调节器耦合至线偏振器组。其次将线偏振器组的输出耦合至被测光纤的输入端。再将被测光纤的输出耦合至偏振计。选择进行测量的波长步长  $\Delta \lambda$ ， $\Delta \lambda$  最大允许值应满足下式：

$$\Delta \tau_{\max} \Delta \lambda \leq \frac{\lambda_0^2}{2c} \quad (4.38)$$

式中： $\Delta \tau_{\max}$ —测量波长范围内预计的最大差分群时延数值；

$\lambda_0$ —中心波长；

$c$ —真空中光速。

例如，在 1550nm 波长处最大差分群时延  $\Delta \tau_{\max}$  与波长  $\Delta \lambda$  的乘积大小应保持不大于 4 (ps · nm)；在 1300nm 波长处应保持不大于 2.8 (ps · nm)。这个要求保证了从一个测量波长到下一个测量波长时，输出偏振态围绕邦加球偏振态轴旋转角度小于 180°。

在不能预计  $\Delta \tau_{\max}$  的情况下，可以在测量波长范围内实现一系列的试样测量，每次测量采用与光源谱宽和最小调谐步长相称的一对靠近的波长，将测得的最大差分群时延值乘以余量因子 3 作为  $\Delta \tau_{\max}$  代入上式，计算出用于实际测量的  $\Delta \lambda$  值。如果此波长间隔太大，可再用较小波长间隔重复测量，直至差分群时延值与波长关系曲线形状和平均差分群时延值基本保持不变时，波长间隔就满意了。在测量波长范围内，选定的波长步长间隔，在选定的波长上，依次插入每一个线偏振器，用偏振计记录相应的斯托克斯参数，完成测量数据的收集。

#### ④ 结果计算

##### A. 琼斯矩阵本征分析法

##### a. 单次测量差分群时延的计算

由斯托克斯参数计算各波长响应的琼斯矩阵，对每一波长间隔，计算出较高光频上琼斯矩阵  $T(\omega + \Delta \omega)$  与较低光频上逆琼斯矩阵  $T(\omega)$  的乘积。对一特定波长间隔，可从下式找到差分群时延值，即  $\Delta \tau$  为：

$$\Delta \tau = \left| \text{Arg} \left( \frac{P_1}{P_2} \right) / \Delta \omega \right| \quad (4.39)$$

式中： $\omega$ —光波角频率 (rad/s)；

$\Delta \omega$ —光波角频间隔 (rad/s)；

$P_1, P_2$ — $T(\omega + \Delta \omega)T(\omega)$  的复数本征值。

$\text{Arg}$  为幅角函数，即  $\text{Arg}(Ae^{j\theta}) = \theta$

将计算得到的每一个差分群时延值作为相应波长间隔中心波长上的差分群时延值，然后对这些值在整个波长范围内取平均得到单次测量的差分群时延。图 (4.16a) 示出了单次测量得到的差分群时延与波长关系曲线，差分群时延值的直方图及麦克斯韦分布曲线。

### b. 多次测量平均差分群时延的计算

单次测量得到的 PMD 值  $\langle \Delta t \rangle_\lambda$  仅仅是测量波长范围内各波长间隔差分群时延测量值的平均。如果为了增加样本数量, 在不同条件下进行多次测量, 就应使用系统平均值。图 (4.16b) 示出了多次测量得到的差分群时延与波长关系曲线, 差分群时延值的直方图及麦克斯韦分布曲线。

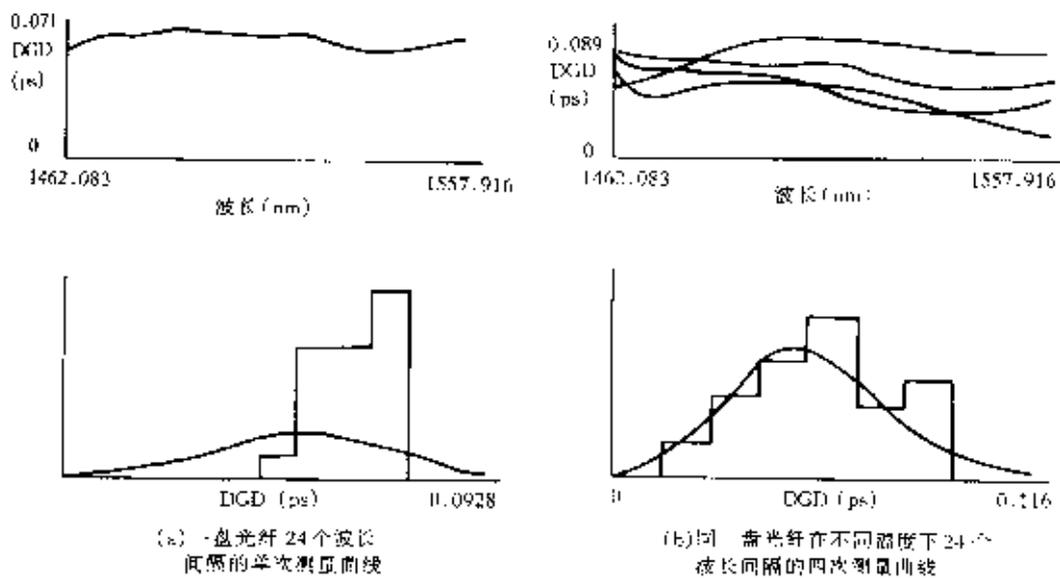


图 4.16 琼斯矩阵法计算的差分群时延结果

### c. 偏振模色散系数计算

根据被测光纤呈现出的模耦合类型, 偏振模色散系数, 可以用式 (4.35) 或 (4.36) 计算。弱偏振模耦合时, 用式 (4.35) 计算; 强偏振模耦合时, 用式 (4.36) 计算。如果在整个测量波长范围内,  $\Delta \tau$  的标准偏差小于平均值的十分之一, 受试光纤被认为呈现可忽略的偏振模, PMD 可用短光纤的 PMD 系数  $\Delta \tau / L$  表示。

#### B. 邦加球法

从测得的斯托克斯参数 ( $S_0$ 、 $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ ) 重建在邦加球上描述偏振态随波长演变的轨迹  $S_0$ 、 $S_1$ 、 $S_2$  和  $S_3$  分别与总的光功率、 $\theta=0^\circ$  的线性偏振态、 $\theta=45^\circ$  的线性偏振态和右旋圆偏振态有关。图 4.17 给出两个实测的例子, 图上当 (O) 和 (X) 代表由于 PMD 是波长  $\lambda$  函数而测得的偏振态弧段,  $P_{a-a}$  是主偏振态。

考虑到波长间隔 (它们可以包括两个波长步长以上), 邦加球上描述偏振态

随波长演变的轨迹应分段地分析，以保证确定的主偏振态存在的假定成立。再用简单的几何考虑确定邦加球上本地主偏振态轴和由波长变化引起的旋转角度  $\Delta\phi$ 。一个可用的方法是能够通过考虑三个、三个的测量点分析邦加球上的轨迹，找出由两对点确定的线段轴的交点，从这点开始，用三角关系可以计算出  $\Delta\phi$ 。

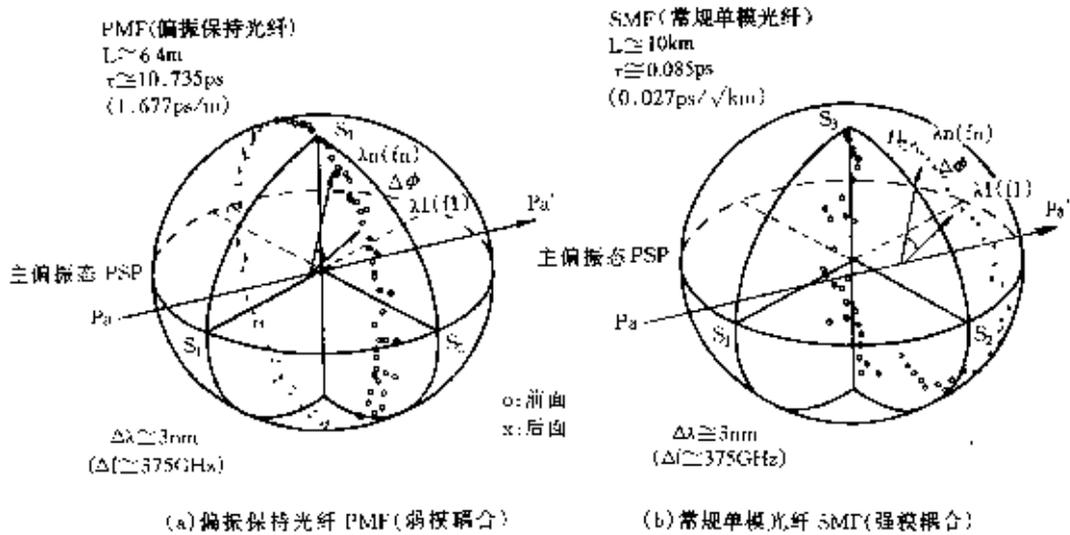


图 4.17 邦加球法测量分析的两种光纤的 PMD 实例

差分群时延或 PMD 时延  $\delta\tau$  由下式给出：

$$\delta\tau = \frac{\Delta\phi}{2\pi\Delta f} = \frac{\Delta\phi\lambda_1\lambda_n}{2\pi c\Delta\lambda} \quad (4.40)$$

式中： $\Delta\phi$ —相位差（邦加球上斯托克斯矢量弧的角宽度，即旋转角度）；

$\Delta f$ —频率差；

$\Delta\lambda$ —波长间隔；

$c$ —真空中光速

$\lambda_1, \lambda_n$ — $\Delta\lambda$ 的起始和终止波长。

计算差分群时延（单位 ps）与波长的关系，也可以根据测得的差分群时延值作出直方图来表示数据。计算测量波长范围内差分群时延的平均值  $\langle \delta\tau \rangle$ 。为了增加样本空间，可进行多次测量。由  $\langle \delta\tau \rangle$  根据模耦合的类型，分别由式 (4.35) 和 (4.36) 计算 PMDc。

## (2) 偏振态法

### ① 测量原理

偏振态法是测量单模光纤 PMD 的第一替代试验方法。它的测量原理是，对于一固定的输入偏振态，当注入光波长（频率）变化时，在斯托克斯参数空间里邦加球上被测光纤输出偏振态也会发生演变，它们环绕与主偏振态方向重合的轴旋

转，旋转速度取决于 PMD 时延：时延越大，旋转越快。通过测量相应角频率变化  $\Delta \omega$  时，邦加球上代表偏振态点的旋转角度  $\Delta \theta$ ，就可以按下式计算出 PMD 时延  $\delta \tau$ ：

$$\delta \tau = |\Delta \theta / \Delta \omega| \quad (4.41)$$

这种方法直接给出了被测试样主偏振态间差分群时延与波长或时间的函数关系，然后通过或在时间或波长范围内取平均值得到 PMD。这个方法能够给出有关差分群时延统计的整个信息。

偏振态法与偏振模耦合程度无关，适用于短的和长的光纤。但这个方法仅限于波长大于或等于光纤有效单模工作波长的情况。

### ② 试验装置

偏振态法测量 PMD 的试验装置，如图 4.18 所示。偏振态法试验装置主要组成有：光源、偏振控制器、偏振计等。

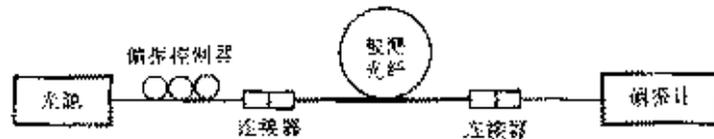


图 4.18 偏振态法的试验装置

#### A. 光源

需要一只稳定的单纵模激光器，在测量范围内波长可调。单纵模激光器的谱线宽度必须足够窄，以保证在所有测量条件下不会因被测光纤偏振模色散导致信号消偏振。

#### B. 偏振控制器

偏振控制器应置于光源和被测光纤之间。

#### C. 偏振计

在被测光纤的输出端，应使用偏振计测量斯托克斯参数。斯托克斯参数是输出波长的函数。

### ③ 试验程序

试样应为一段已知长度的成缆或未成缆的单模光纤。在整个测量期间，被测试样和尾纤的位置及所处环境温度均应保持稳定。应采用标准大气条件，对已安装的光纤和光缆，可采用实际应用的条件。

当减小附加模耦合最为重要时，未成缆光纤应当用合适的方法来固定（通常是卷绕在最小半径为 150mm 的光纤盘上），光纤所受张力基本为零（典型值小于 0.15N）。测量程序为通过偏振控制器将光源耦合至被测光纤输入端。如有必要，可调节偏振控制器来得到确定邦加球上输出偏振态旋转角度的最佳条件。将被测光纤输出端耦合至偏振计。选择进行测量的波长范围。选择测量斯托克斯参数的波长步长  $\Delta \lambda$  (nm)。为避免从一个波长变换到下一个波长时，输出偏振态在球上

环绕主偏振态轴旋转角度大于  $180^\circ$ ，对 1550nm 波长区域，应当满足  $\Delta \tau_{\max} \cdot \Delta \lambda < 4$  (ps · nm) 的要求，对 1300nm 波长区域，应当满足  $\Delta \tau_{\max} \Delta \lambda \leq 2.8$  (ps · nm) 的要求。 $\Delta \tau_{\max}$  (ps) 是预计的被测光纤最大差分群时延值。在选定的各个波长上测量出斯托克斯参数值，并以适于下面分析的方式进行记录。

#### ④ 结果计算

用斯托克斯分析器（或旋转分析器）测出偏振波动后，可将它转换为偏振态与波长关系的曲线。根据测得的斯托克斯参数，用下式确定每一偏振态的偏振椭圆度  $\eta$ ：

$$\eta = \tan \left[ 0.5 \tan^{-1} \left( \frac{S_3}{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}} \right) \right] \quad (4.42)$$

式中： $S_1$ 、 $S_2$  和  $S_3$  都是斯托克斯参数。

计算偏振态，偏振态用下式表示：

$$SOP = \frac{1 - \eta^2}{1 + \eta^2} \quad (4.32)$$

式中： $\eta$ —偏振椭圆度。

绘出偏振态与波长关系曲线，确定偏振态曲线上峰值（或极值）间隔的数目，相邻峰值间相位差为  $\pi$ ，差分群时延或 PMD 时延  $\delta \tau$  由下式给出：

$$\delta \tau = \frac{N}{2} \cdot \frac{1}{\Delta f} = \frac{N}{2} \cdot \frac{\lambda_1 \lambda_n}{c \Delta \lambda} \quad (4.44)$$

式中： $N$ —偏振态曲线上峰的数目；

$\Delta f$ —频范围；

$\Delta \lambda$ —波长范围；

$c$ —真空光速；

$\lambda_1 \lambda_n$ — $\Delta \lambda$  的上、下限波长。

由测得的差分群时延平均值即  $\langle \delta \tau \rangle$ ，根据模耦合类型，分别由公式 (4.35) 和 (4.36) 来计算 PMD 系数。图 4.19 绘出了两个实测的例子。

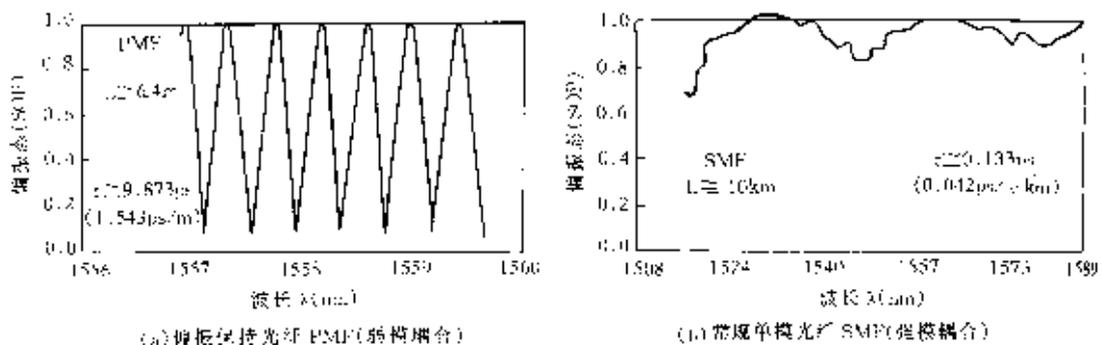


图 4.19 偏振态测量 PMD 的两个实例

### (3) 干涉法

#### ① 测量原理

干涉法是测量单模光纤 PMD 的第二替代试验方法。当测量处于动态中的光缆时（例如 OPGW 光缆和 ADSS 光缆），干涉法可以作为基准试验方法。干涉法介绍的是一种测量单模光纤和光缆的平均偏振模色散的方法。干涉法的测量原理是，当光纤一端用宽带光源照明时，在输出端测量电磁场的自相关函数或互相关函数，从而确定 PMD。在自相关型干涉仪表中，干涉图具有一个相应于光源自相关的中心相干峰。测量值代表了在测量波长范围内的平均值。在 1310nm 或 1550nm 窗口，波长范围典型值是 60nm 至 80nm。

干涉法的主要优点是测量速度非常快，测量设备体积小，特别适合于现场使用。干涉法与偏振模耦合程度无关，适用于短的光纤和长的光纤。但这个方法仅限于波长大于或等于光纤有效单模工作波长的情况。

#### ② 试验装置

测量时可以使用 Michelson 干涉仪或 Mach-Zehnder 干涉仪，干涉仪的参考通道可以是空气通道，也可以是一段单模光纤；试验中它们可放在光源端，也或放在探测器端。典型位置的例子。如图 4.20、图 4.21 和图 4.22 所示。

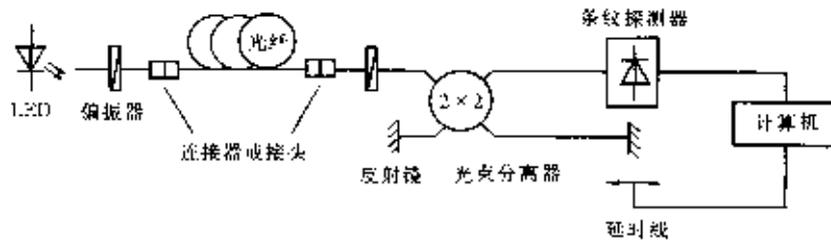


图 4.20 光纤参考通道的 Michelson 干涉仪法的试验装置

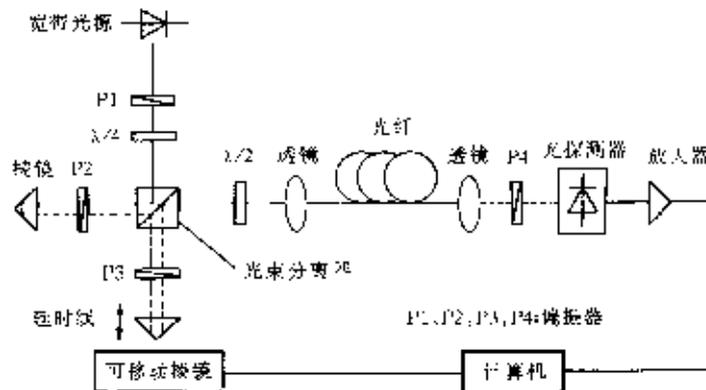


图 4.21 空气参考通道的 Michelson 干涉仪法的试验装置



的干涉条纹对比度，应使干涉仪两臂中的功率基本相同。通过移动干涉仪两臂中反射镜，记录光强来得到第一个测量结果，对于一选定的偏振态，从得到的干涉条纹图，按下述的方法计算 PMD 时延。弱偏振模耦合和强偏振模耦合的干涉条纹图例子，如图 4.23 所示。在偏振模耦合不够或 PMD 较低的情况下，为了得到在所有情况下的平均结果，宜对不同的偏振态进行测量或在测量时对偏振状态进行调制。

设备校准可用已知 PMD 时延的高双折射光纤或已知 PMD 时延的标准光纤进行。

弱偏振模耦合情况下，干涉条纹是分离的峰，两个伴峰相对于中心主峰的延迟都是对应于被测器件的差分群时延。对于这种情况，差分群时延等效于 PMD 群时延。

$$\Delta \tau = 2 \Delta L / c \quad (4.45)$$

式中： $\Delta L$ —光延迟线移动的距离；

$c$ —真空中光速。

强偏振模耦合情况下，根据干涉图中干涉图型的宽度来确定 PMD 群时延。这时干涉条纹很接近。PMD 时延  $\Delta \tau$  从干涉图高斯拟合曲线参数  $\delta$  得到：

$$\Delta \tau = \sqrt{\frac{3}{4}} \cdot \delta \quad (4.46)$$

式中： $\delta$ —高斯曲线标准偏差。

图 4.23 对弱偏振模耦合（上方）和强偏振模耦合（下方）光纤，分别用自相关型仪器 (a. b) 和互相关型仪器 (c. d) 测得的干涉条纹图。

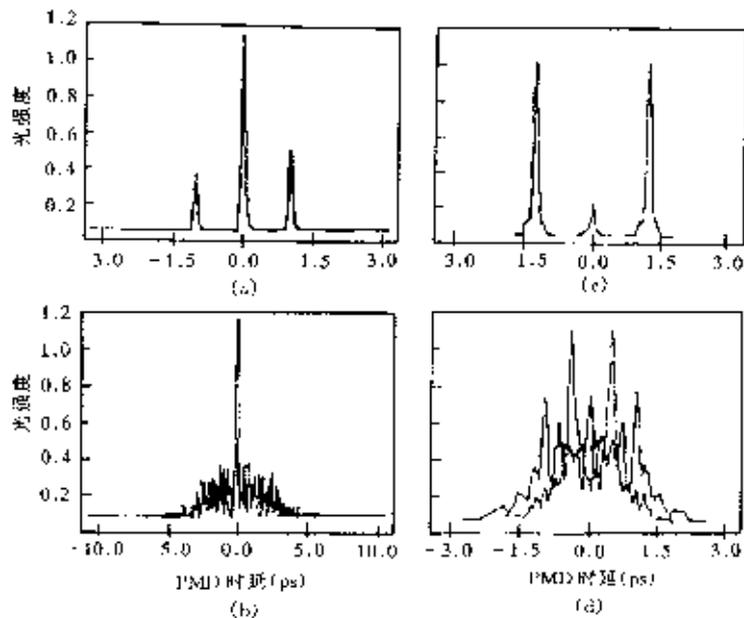


图 4.23 自相关型仪器 (a. b) 和互相关型仪器 (c. d) 测得的干涉条纹图

#### 四、截止波长

##### 1. 定义

当光纤的结构参数（折射率与芯径）确定后，光纤是否工作于单模状态完全决定于其中传播光的波长。由于最临近基模  $LP_{01}$  的高阶模是  $LP_{11}$ 。因此，我们定义使  $LP_{11}$  模截止（完全不能传输）的波长为单模光纤的截止波  $\lambda_c$  长。 $\lambda_c$  定义为总功率，包括注入的高阶模与基模光功率之比减小到小于 0.1dB 时所对应的更长波长。按照这个定义，当各次模基本上受到均匀激励时，二阶模  $LP_{11}$  比基模  $LP_{01}$  衰减大的波长就是截止波长。

只有当工作波长大于单模光纤的截止波长  $\lambda_c$  时，才能保证光纤工作单模状态。归一化截止频率  $V$  值与光纤折射率分布指数  $g$  有关。

综上所述，单模光纤的单模工作截止状态仅取决于光纤的结构参数，称之为理论截止波长  $\lambda_{cc}$ 。由于其未考虑光纤所处的实际状态，故理论截止波长只具有理论分析研究价值。

通常，人们所指的截止波长是实际测得的截止波长。实际测量研究表明，光纤的截止波长与光纤的长度和光纤所处的状态，如弯曲和受到应力作用等有关。为了使实际测得的截止波长更具工程实用价值，国际电信联盟标准化部门在 ITU-T G. 650 (2000) 中将实际测量的截止波长分为三类：光缆截止波长、光纤截止波长和跳线光缆截止波长。

##### (1) 光缆截止波长 $\lambda_{cc}$

光缆截止波长是在预先将 22m 光缆平直安放，剥去被测光缆两端护套等保护层，两端各裸露出 1m 长的预涂覆光纤，并在两根裸露光纤上各松绕一个半径为 40mm 的圆圈的条件下，测得的成缆光纤截止波长。光缆截止波长的替代试验方法是通过测量 22m 具有预涂覆层的未成缆光纤中间松绕  $n$  个半径大于 140mm 的圆圈，光纤的两端各弯一个半径为 40mm 的圆圈的光纤的截止波长来获得光缆的截止波长。实践证明，光波经过 22m 成缆光纤后， $LP_{11}$  模不能继续传播。因此，光缆截止波长是确保光缆中光纤单模工作最为直接有效的参数。

为了避免模式噪音和色散的影响，最短缆长的截止波长必须小于系统预先设定的最短工作波长。这样就确保了光缆线路中每段光缆中的光纤都是处在单模工作状态。

##### (2) 光纤截止波长 $\lambda_c$

光纤截止波长是对包含一个半径 140mm 松绕圆圈的其他部分保持平直 2m 长光纤测得的截止波长。

##### (3) 跳线光缆截止波长 $\lambda_{cj}$

跳线光缆截止波长是对包含一个半径为 76mm 圆圈，其他部分保持平直的 2m

长跳线光缆测得的截止波长。

$\lambda_c$ 、 $\lambda_{cc}$ 和 $\lambda_{cj}$ 测量值之间的关系取决于光纤种类、光缆结构和试验条件。但是不管怎样，根据 $\lambda_{cc}$ 、 $\lambda_c$ 和 $\lambda_{cj}$ 定义得知， $\lambda_{cc}$ 、 $\lambda_c$ 和 $\lambda_{cj}$ 分别对应于LP<sub>11</sub>模完全不能传输的波长或经过22m成缆光纤、2m光纤和2m跳线缆光纤后LP<sub>11</sub>模完全截止的波长。

虽然 $\lambda_{cc}$ 、 $\lambda_c$ 和 $\lambda_{cj}$ 三者之间的定量关系不易确定，但是由光纤种类、光缆结构和试验条件来确保在最短工作波长，在两连接之间的最短光缆中传输单模是极为重要的。

为避免模噪声和色散补偿，最短光缆长度的截止波长 $\lambda_{cc}$ （包括提出的修复长度）应该小于最小预先考虑的系统波长 $\lambda_s$ ，即： $\lambda_{cc} < \lambda_s$ 。

这样便确保了每一段光缆都能满足单模工作。任何不完善的接续点都会产生一些高阶模(LP<sub>11</sub>)功率。对短距离(n米，具体大小取决于敷设条件)，单模光纤支持这种高阶模。为了给出足够的光纤距离来使LP<sub>11</sub>模到下一个接续点前衰减掉，我们必须规定出两个接续点之间的最短距离。如果最短光缆段满足 $\lambda_{cc} < \lambda_c$ ，所有的更长光缆都会自动地满足单模系统操作，不必考虑光缆的基本段长。

光纤截止波长和模场直径可用来估算光纤的弯曲敏感性。大的光纤截止波长和小的模场直径会得到更好的抗弯曲光纤。这就揭示了即使截止波长的上限已超过工作波长，往往还希望将截止波长 $\lambda_c$ 规定得更高的理由。所有实际安装技术和光缆结构将确保光缆截止波长小于操作波长。

由于光缆截止波长 $\lambda_{cc}$ 比光纤截止波长 $\lambda_c$ 更直接确保光缆的单模工作，所以人们常常喜欢选用 $\lambda_{cc}$ 而不用 $\lambda_c$ 。然而，当环境条件不宜用 $\lambda_{cc}$ 的规定时（如，单芯光缆：尾纤、跳线缆或以与 $\lambda_{cc}$ 基准试验方法完全不同的方法敷设的光缆），再规定出 $\lambda_c$ 或 $\lambda_c$ 的上限是合适的。有关各种单模光纤的截止波长的详细规定，请读者查阅ITU-T G.652、G.653、G.654和G.655光纤2000年10月版本中规定值。

通常，对同一类型光纤， $\lambda_{cc}$ 、 $\lambda_c$ 、 $\lambda_{cj}$ 的关系如下：

$$\lambda_c > \lambda_{cj} > \lambda_{cc} \quad (4.47)$$

G.652光纤和G.655光纤的截止波长在国家标准GB/T9771-2000《非色散位移型单模光纤》和《非零色散位移型单模光纤》中的规定值，分别为：

G.652光纤  $\lambda_{cc} \leq 1260\text{nm}$ ， $\lambda_c \leq 1250\text{nm}$ ， $\lambda_{cj} \leq 1250\text{nm}$ ；

G.655光纤  $\lambda_{cc} \leq 1480\text{nm}$ ， $\lambda_c \leq 1470\text{nm}$ ， $\lambda_{cj} \leq 1480\text{nm}$ 。

## 2. 测量方法

从单模光纤的传输理论可知，截止波长是单模光纤所特有的重要参数之一，它是保证光纤实现单模传输的必要条件。

单模光纤截止波长的测量目的是确保单模光纤在系统规定的波长以上进行

有效的单模工作。

测量预涂覆单模光纤截止波长、跳线光缆单模光纤和成缆单模光纤截止波长的基准试验方法是传输功率法。传输功率法和替代法的测量原理、试验装置和试验程序如下所述。

### (1) 传输功率法

#### ① 测量原理

单模光纤中除了光纤固有的吸收和散射损耗外，还存在着其他附加损耗，如：光纤芯包界面缺陷、纵向不均匀性、光纤微（宏）观弯曲等。这些附加损耗在单模光纤截止波长处对基模的衰减影响极大。当单模光纤工作波长稍低于理论截止波长时，单模光纤中激励的基模急剧衰减。传输功率法的测量原理是在规定的试验条件下，通过测试被测的一短段光纤传输的功率随波长变化与参考的传输功率之比来确定截止波长。

按照 ITU-T G. 650 (2000) 规定取 2m 长度被测光纤作试样，将其传输功率谱与参考传输功率谱相比较，确定出光纤截止波长。引进参考传输功率是为了排队测量系统随波长的起伏所造成的影响。获得参考传输功率的方法有两种：将待测光纤试样打一小圈或用一根 1~2m 长的多模光纤。

#### ② 试验装置

传输功率法测量光纤截止波长的试验装置，如图 4.24 所示。这个试验装置主要组成部分有：光源、包层模剥除器、光探测器等。

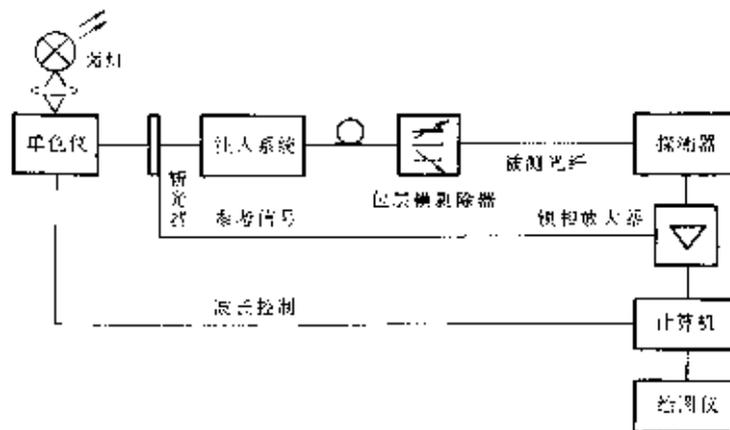


图 4.24 传输功率法试验装置

#### A. 光源

选用的光源 FWHM 谱宽不超过 10nm。在完成整个测量过程中，光源的位置、光强和波长应稳定不变，并能够在足够宽的波长范围内工作。

#### B. 调制

为改善接收器处的信噪比，通常采用调制光源方法。如果采取这个办法，光探测器应与光源调制频率同步信号处理系统连接探测。系统应是基本线性的。

#### C. 注入条件与系统

应用的注入条件是均匀地激励  $LP_{01}$  和  $LP_{11}$  模，例如，稳定的注入方法是与多模光纤相连接或用稳定的大光斑、大数值孔径的注入光学系统。

#### D. 包层模剥除器

包层模剥除器是一个确保包层模转换成辐射模的器件。因此，它从光纤中剥除包层模，应小心不要影响  $LP_{01}$  模的传输。

#### E. 光探测器

选用一个合适的光探测器，以求截断来自光纤的所有辐射。光探测器的光谱响应与光源的光谱特性相一致。光探测器应具有良好的表面均匀性和线性灵敏度。

### ③ 试验程序

#### A. 预涂覆光纤截止波长

##### a. 标准试样

测量是在 2m 长的光纤试样上进行的。试样光纤插入试验装置中并被变成一个松弛圈。松弛圈形成一个半径为 140mm 完整圈。光纤试样其它部分应基本未受到外部应力作用。尽管光纤试样上允许半径大于 140mm 偶然弯曲，但是这些偶然弯曲不会对测量结果产生明显的影响。在预计测量的截止波长附近的足够宽范围内，记录输出功率  $P_1(\lambda)$  与  $\lambda$  的关系曲线。

##### b. 通过参考试样的传输

测量截止波长时，可从下述的两个试验方法中任选一个。

##### ● 待测光纤试样

采用待测光纤试样，保持注入条件不变，在被测光纤试样上至少打一个小半径圆圈滤掉  $LP_{11}$  模，再在截止波长附近的足够宽的范围内测量输出功率  $P_2(\lambda)$ 。这个圆圈的半径典型值 30mm。

##### ● 多模光纤试样

1~2m 的短多模光纤，在上述相同的波长范围内测量输出功率  $P_3(\lambda)$ 。多模光纤作参考试样时，泄漏模的存在会使测得的传输谱出现不希望的波纹影响测量结果。为了减小波纹，对多模光纤的注入条件限制，只对多模光纤芯直径和数值孔径进行 70% 的注入或用合适的滤模器。

##### c. 计算

光纤试样的衰减谱与参考功率的关系：

$$a(\lambda) = 10 \log \frac{P_1(\lambda)}{P_i(\lambda)} \quad (4.48)$$

式中：i=2 或 3，分别代表上述两种方法。

假设直线代表更长波长区，高阶模与基模的偏差为：

$$\Delta \alpha (\lambda) = \alpha (\lambda) - (A_0 + B_0 \lambda) \quad (4.49)$$

求出  $A_0$  和  $B_0$ ，这样  $(A_0 + B_0 \lambda)$  表示波长在高级模衰减急剧增大区（转变区）以上的衰减谱曲线部分。对上述的采用待测光纤试样的方法， $A_0$  和  $B_0$  都为零，参见图 4.25。

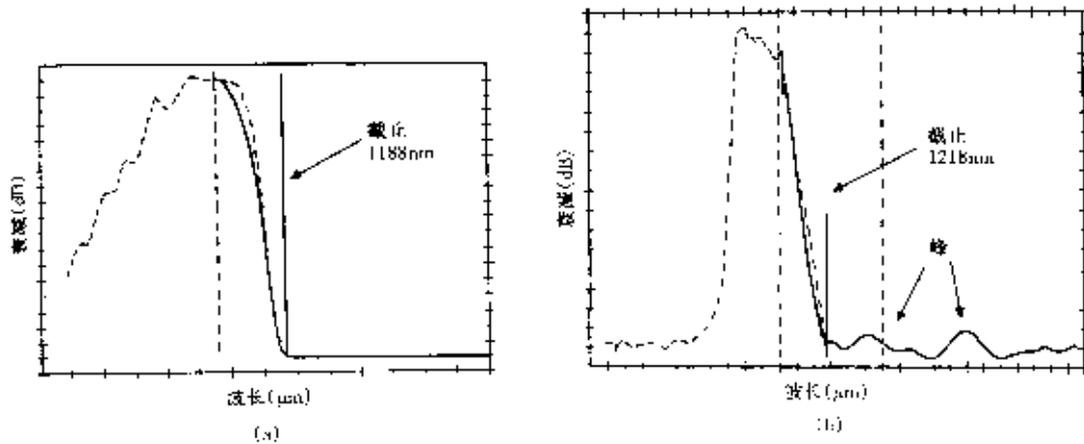


图 4.25 单模光纤截止波长

在转变区，高阶模功率随波长增大而降低。光纤的截止波长  $\lambda_c$  定义为高阶模功率相对于基模功率  $\Delta \alpha (\lambda)$  降低到 0.1dB 的波长。

### B. 成缆光纤截止波长

#### a. 试样准备

在模拟室外光缆线路最短缆长的应用条件下，对成缆单模光纤的截止波长  $\lambda_{cc}$  进行测量，旨在确保所使用的最短光缆在规定的工作波长以上能有效地呈单模状态工作。

成缆光纤截止波长的测量是在一根单模光纤光缆的光纤上进行的。准备一根 22m 光缆，将其两端各剥开 1m 露出预涂覆光纤，所剩 20m 长的光缆段平整放置，避免产生任何可能影响测量结果的小弯，参见图 4.26 所示。

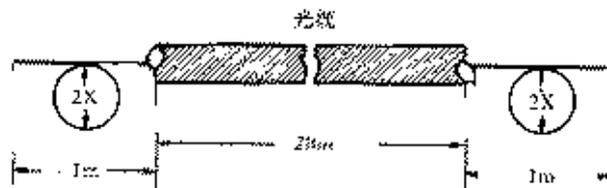


图 4.26 成缆光纤截止波长测量中使用的条件

#### b. 测量步骤

$\lambda_{cc}$  测量步骤与  $\lambda_c$  相同。为模拟接头盒的效果，在试样光缆两端裸露的 1m

光纤上各打一个半径为 40mm 的圈，如图 4.26 所示。光纤或光缆中允许有些大半径的偶然弯曲，但它们对测量结果引起明显的变化。在预计的截止波长附近足够宽的波长范围内，测量输出光功率谱  $P_1(\lambda)$ 。

然后将两端露出的光纤各打一个半径为 30mm 的圆圈，测出  $P_2(\lambda)$ ，同样计算出：

$$a(\lambda) = 10 \log \frac{P_1(\lambda)}{P_2(\lambda)} \quad (4.50)$$

成缆光纤截止波长就是  $\alpha(\lambda)$  等于 0.1dB 所对应的最大波长。

## (2) 替代法

为了测量成缆光纤截止波长的方便和容易实现，ITU-G.650(2000) 还介绍了一个替代法。这个替代法测量的不是在成缆光纤上进行，而是在未成缆光纤上进行。为了确保  $\lambda_{cc}$  的测量结果与对成缆光纤的测量结果相一致，必须采用合适的测量条件。有关用未成缆光纤替代成缆光纤进行截止波长的使用条件和具体方法，如图 4.27 所示。

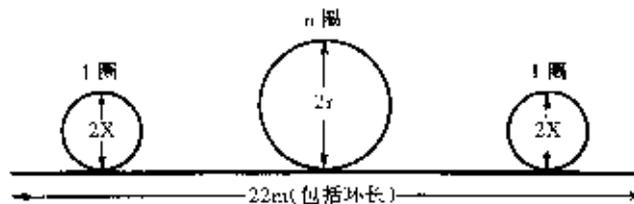


图 4.27 用未成缆光纤测量  $\lambda_{cc}$  的试样条件

未成缆光纤是预涂覆光纤或完整的二次套塑光纤。将 22m 长的光纤插入试验装置中。除了在 22m 光纤两端各打一个半径  $X=40\text{mm}$  的圆圈外，其余 20mm 光纤松绕成半径  $r \geq 140\text{mm}$  的  $n$  个松圆圈，为的是模拟成缆条件。未成缆光纤截止波长  $\lambda_{cc}$  的试验程序和确定方法与成缆光纤完全相同。

## 五、模场直径

### 1. 定义

模场直径是单模光纤所特有的一个重要参数。它的标称值和容差大小与光纤的连接损耗和抗弯性有着密切的关系，而且可以从模场直径随波长的变化谱估算单模光纤的色散值、单模光纤连接损耗、弯曲损耗和单模光纤有效面积等。因此，在单模光纤生产光缆、施工接续和实际使用中，人们非常重视模场直径这一参数。与模场特性相关的几个定义如下：

#### (1) 模场

模场是光纤中的基模  $LP_{01}$  的单模电场在空间的强度分布。

#### (2) 模场直径

单模光纤中的场并不完全集中在纤芯中，而有相当部分的能量在包层中传

输，所以不用纤芯的几何尺寸作为单模光纤的特性参数，而是用模场直径作为描述单模光纤中光能集中程度的度量。模场直径  $2w$  表示光纤横截面基模的电磁场强度横向分布的度量，模场直径可由远场强度分布为  $F(\theta)$  来定义， $\theta$  为远场角，则模场直径定义为：

$$2w = \frac{\lambda}{\pi} \left[ \frac{2 \int_0^{\pi/2} F^2(\theta) \sin \theta \cos \theta d\theta}{\int_0^{\pi/2} F^2(\theta) \sin^3 \theta \cos \theta d\theta} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.51)$$

### (3) 模场中心

模场中心是光纤内基模场空间强度分布的中心位置。模场中心位于  $r_c$ ，它是位置矢量  $r$  的标称强度加权积分：

$$r_c = \frac{\iint_{Area} r I(r) dA}{\iint_{Area} I(r) dA} \quad (4.52)$$

### (4) 芯同心度误差

芯同心度误差是模场中心和包层中心之间的距离。

### 2. 测量方法

模场直径是单模光纤基模模场强度空间的一种度量。用模场直径概念的理由是因为单模光纤中的场并不是完全集中在纤芯中，而有相当部分的能量在包层中传输，所以不宜用纤芯的几何尺寸作为单模光纤的特性参数，而是用模场直径作为描述单模光纤中光能集中的范围。

模场直径的测量目的是确定出单模光纤内光功率的分布范围及其同轴性。经过长时间研究后，ITU-T G. 650 (2000) 对模场直径和测量作了明确规定。值得指出的是模场直径与测量方法紧密相关。

模场直径测量方法有：远场扫描法、可变孔径法和近场扫描法等。模场直径的定义及不同测量方法之间的数学等效关系，如图 4.28 所示。

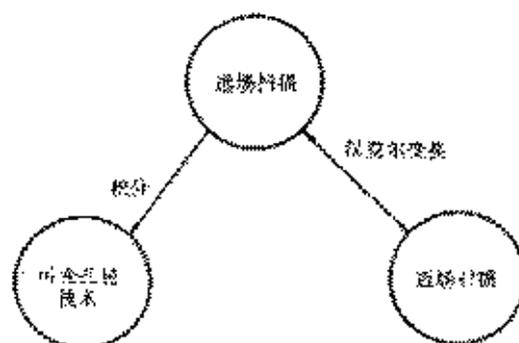


图 4.28 模场直径测量方法之间的数学关系

模场直径的等效转换式：

- 可变孔径法

由远场可变孔径法测得的互补孔径功率传输函数  $F(\theta)$  确定模场直径 ( $2w_0$ ) 的等效式为:

$$2w_0 = \frac{\sqrt{2}\lambda}{\pi} \left[ \int_0^\infty F(\theta) \sin 2\theta d\theta \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.53)$$

式中:  $\lambda$  — 测量波长;

互补孔径功率传输函数  $F(\theta)$  的定义为:

$$F(\theta) = 1 - \frac{P(\theta)}{P_{\max}} \quad (4.54)$$

式中:  $P_{\max}$  — 通过最大孔径的光功率;

$\theta$  — 偏离光纤轴的远场测量角。

#### ● 近场扫描法

由近场扫描法测得的近场光强度分布  $F(r)$  确定模场直径 ( $2w_0$ ) 的等效式为:

$$2w_0 = 2 \left[ 2 \frac{\int_0^\infty r \cdot F^2(r) dr}{\int_0^\infty r \left( \frac{dF(r)}{dr} \right)^2 dr} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.55)$$

式中:  $r$  — 径向坐标。

下面分别介绍远场扫描法、可变孔径法、近场扫描法的测量原理、试验装置、试验程序等。

#### (1) 远场扫描法

##### ① 测量原理

远场扫描法是 ITU-T G. 650 规定的单模光纤色散测量的基准试验方法。它是直接按照式 (4.51) 模场直径定义由远场光强分布  $F(\theta)$  来确定模场直径的。式 (4.51) 中的积分上下限为 0 到  $\pi/2$ , 但我们应该理解为增加了自变量的范围带来的积分限的取舍。当自变量  $\theta$  的最大物理值为  $\pi/2$  时, 在  $\theta$  达到  $\pi/2$  之前。被积函数迅速趋于零。由积分上下限的取舍引起的模场直径确定的相对误差, 将在试验装置中有关扫描检测器作用中讨论。

模场直径的测量原理是将光纤的注入端与入射光纤对准, 光纤输入端对中探测器件, 以固定的程序启动扫描探测器, 特别是要保证扫描探测器通过模场中心, 探测器将各个角度上探测到的功率转化为电信号, 由放大器放大后送入信号处理部分。与相应的测角仪的角信号进行处理后送入计算机就可得出远场光强度分布  $F(\theta)$ , 再按定义式 (4.51) 编制好的积分程序计算出光纤的模场直径。

##### ② 试验装置

远场扫描法测量单模光纤模场直径的试验装置, 如图 4.29 所示。远场扫描

法试验装置主要由光源、扫描探测器和信号处理等部分组成。

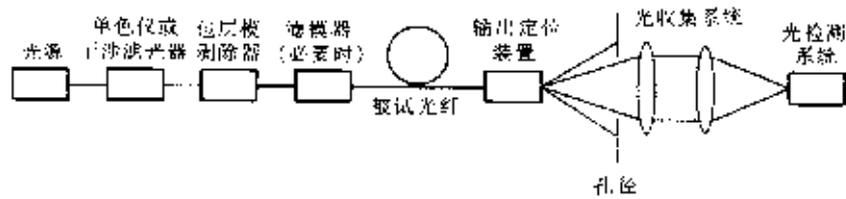


图 4.29 远场扫描法试验装置

#### A. 光源

在完成整个测量过程中，光源位置、光强和波长应保持稳定。所选择的光源光谱特性应消除多模工作。光源谱线宽度 FWHM 应不大于 10nm。

#### B. 调制

通常调制光源的目的是为了改善接收器的信噪比。这时探测器应与光源调制频率同步的信号处理系统相连。检测系统应具有良好的线性灵敏度特性。

#### C. 注入条件

所用的注入条件应保证激励起基模 ( $LP_{01}$ )。例如，适宜的注入方法是用尾纤或合适的光学透镜系统来激励被测光纤。小心不要让高阶模传导。为此目的，需要在被测光纤上松绕一个合适半径的圆圈或加入其他类型的滤模器来消除高阶模。

#### D. 包层模剥除器

应采取措施来防止包层模的传导和被探测到。

#### E. 试样

被测试样应是一段短光纤。如果所用的试样是具有预涂覆层的光纤，那么插入包层模剥除器的那部分光纤的预涂覆层应去除。试样光纤的两端面应清洁、平滑且光纤轴垂直。我们建议试样光纤两端面应平整且与光纤轴的垂直度小于 1%。

#### F. 扫描检测器

用来对光纤远场光强分布进行扫描的检测器是一个具有针孔或一个带尾纤的扫描光电探测器。探测器离开光纤输出端面至少 10mm，其光敏面的远场张角不应太大，否则会引起大的测量误差。为此要求探测器光敏面离光纤输出端的距离  $S$  大于  $40w_{ob}/\lambda$ ， $2w$  为估计的被测光纤模场直径， $b$  为探测器光敏面的直径， $\lambda$  为工作波长。

测量系统的最小动态范围应为 50dB。对 G. 652 光纤和 G. 653 光纤，上述动态范围分别对应于  $20^\circ$  和  $25^\circ$  的最大扫描半角或者更大。如果动态范围减小，就会带来测量误差。例如，对 G. 652 光纤只要 30dB 动态范围 ( $12.5^\circ$  半张角)；对 G. 653 光纤只要 40dB 动态范围 ( $20^\circ$  半张角) 就会使模场直径测量误差大于

1%。

#### G. 探测器

选用一合适的探测器。探测器应具有线性灵敏度特性。

#### H. 放大器

使用一个放大器来放大信号电平。

#### I. 获得数据

测得的信号大小应予以记录并进行合适的处理。

#### ③ 试验程序

将制备好的光纤试样安放至试验装置中，借助注入光束来对准光纤光注入端。用试样光纤输出端对准光探测器来获得最大光功率。接着的试验程序如下：启动扫描检测器，以不大于  $0.5^\circ$  的固定步长进行量扫描测量出远场光强分布  $F(\theta)$ 。按式 (4.51) 计算出被测光纤的模场直径。

#### (2) 可变孔径法

##### ① 测量原理

虽然远场扫描法是测量模场直径的基准试验方法，尽管其测量精度高，但是由于动态范围大，对系统要求高，实现的技术难度大，因而实际上远场扫描法很少使用。人们更常用的是替代试验法，特别是可变孔径法。可变孔径法是测量单模光纤模场直径的第一替代试验法。

测量单模光纤模场直径的可变孔径法的测量原理是将光源发出的光耦合到被测单模光纤中，经滤模和剥除包层模后，将光纤的出射端面对准光学系统的光轴。光学系统由微调架、透镜系统和光探测器组成。在光纤端面与透镜之间，装有一个与光学系统光轴垂直的转盘。转盘上开有至少 12 个以上直径不同的圆孔，要求这些圆孔半径对应的远场半张角的数值孔径覆盖  $0.02 \sim 0.25$  的范围，对 G.653 光纤，则数值孔径覆盖范围为  $0.02 \sim 0.4$ ，光学系统的孔径更大一些。测量单模光纤模场直径时，将被测光纤放入测量装置依次转动转盘，测量通过每一个孔径  $\theta$  的光功率  $P(\theta)$ ，求出透射互补函数  $F(\theta)$ ：

$$F(\theta) = 1 - \frac{P(\theta)}{P_{\max}} \quad (4.56)$$

计算出  $F(\theta)$  后，即可按式 (4.53) 编制的积分程序，由计算机计算出被测光纤的模场直径。为避免光源与光探测器直接耦合，要选用光分路器将光源发出的光耦合至光纤和将散射的光耦合到光探测器，还应避免使用与偏振相关的器件。

##### ② 试验装置

可变孔径法测量单模光纤模场直径的试验装置，如图 4.30 所示。该试验装置主要由光源、可变孔径器件、透镜系统、探测器等部分组成。可变孔径法试验装置中的光源、调制。注入条件、包层模剥出器、试样、探测器、放大器、数据

获取等部分的作用与远场扫描法中的相同。所不同的只是在光纤端面与透镜系统之间装有一个与光学系统光轴垂直的可变孔径转盘。转盘上开有至少 12 个不同孔径的圆孔，要求这些圆孔半径对应的远场半张角的数值孔径覆盖范围为 0.02 ~ 0.25 (对 G.653 光纤，要求覆盖范围为 0.02 ~ 0.401)。将通过转盘上每个圆孔传输的光收集起来并聚焦到探测器。

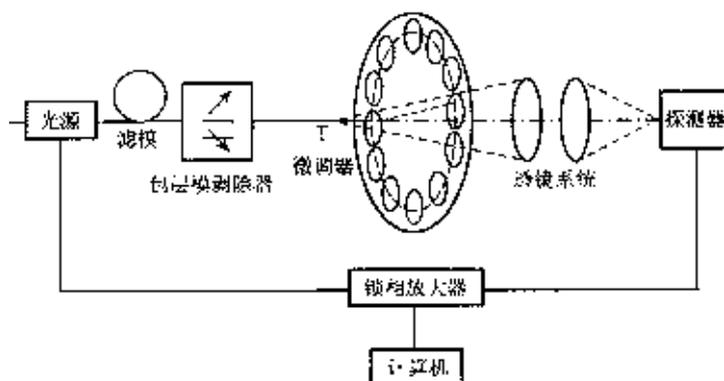


图 4.30 可变孔径法试验装置

### ③ 试验程序

将制备好的光纤试样插入试验装置中，借助注入光束来对准光纤光注入端。光纤输出端的对中使用一个合适的输出器件。

测量通过每个孔径传输的光功率，求出互补孔径传输函数  $F(\theta)$ ，再利用式 (4.53) 计算出被测光纤的模场直径。

### (3) 近场扫描法

#### ① 测量原理

近场扫描法是测量单模光纤模场直径的第二替代试验法。近场扫描法的测量原理是使用具有针孔的扫描光探测器或摄像机，在近场图上沿一经过模场中心的直线扫描，测量出近场光强度与分布  $F(r)$  由式 (4.55) 计算出被测光纤的模场直径。

#### ② 试验装置

近场扫描法测量单模光纤模场直径的试验装置，如图 4.31 所示。该试验装置主要由光源、放大光学系统、扫描探测器或摄像机等部分组成。近场扫描法试验装置中的光源、调制、注入条件、包层模剥除器、试样、探测器、放大器、数据获取部分的作用与远场扫描法中的相同。

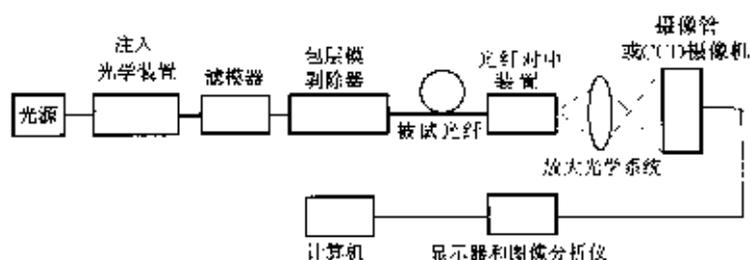


图 4.31 近场扫描法试验装置

与远场扫描法试验装置所不同的是扫描组件。用一个放大光学系统将光纤近场图像放大并聚焦到扫描探测器平面上（例如，具有针孔的扫描光探测器或带尾纤的扫描光探测器）。所选择的数值孔径和放大倍数应与所需要的空间分辨率相一致。光学系统的放大倍数是通过扫描已知长度的光纤试样来校准的。

### ③ 试验程序

用注入光束来对准光纤的注入端，用合适的输出器件来对准光纤输出端。试验程序为：用放大光学系统来放大光纤近场图像，并将其聚焦至探测器平面上。为减小散射图像扫描造成的尺寸误差，应以最大精度来完成聚焦，用扫描得到的近端光强度分布  $F(r)$ ，按式 (4.55) 计算出被测光纤的模场直径。

### (4) 双向后向散射差法

#### ① 测量原理

双向后向散射差法是测量单模光纤模场直径的第三替代试验法。双向后向散射差法的测量原理是由两个方向的后向散射通过一根已知模场直径的盲区光纤接头所产生的双向后向散射差来确定被测光纤的模场直径：

$$w_s = w_d 10^{\frac{g(L_d - L_s) + f}{20}} \quad (4.57)$$

式中： $w_d$ —盲区光纤的模场直径；

$w_s$ —被测光纤的模场直径；

$L_d$ —由盲区光纤测量时通过接头的后向散射的变化 (dB)；

$L_s$ —由被测光纤测量时通过接头的后向散射的变化 (dB)；

$g$ —与波长和光纤结构有相关的修正因子；

$f$ —与波长和光纤结构有关的修正因子。

#### ② 试验装置

双向后向散射差法测量光纤模场直径所使用的试验装置，如图 4.32 所示。试验装置中的光时域反射计 (OTDR) 的组成与工作原理如第 6 章 2 节 1 中所述的 OTDR 的组成和工作原理相同。图 4.32 给出的是一个采用光开关的试验装置的示意图。这样的试验装置是经选定的。

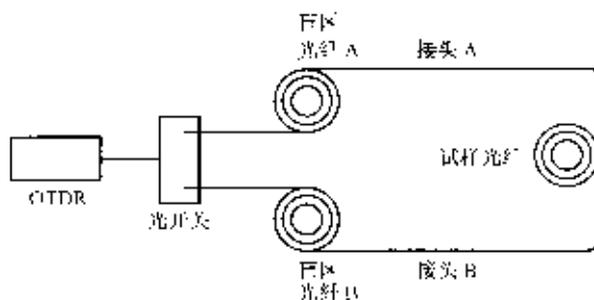


图 4.32 选定的试验装置双向后向散射法

光时域反射计 (OTDR) 光源波长在  $2\text{nm}$  内。在  $1310 \sim 1550\text{nm}$  范围内测量时,  $2\text{nm}$  的移动会引起  $0.02 \mu\text{m}$  的误差。

盲区光纤应足以防止由接头或与被测光纤的对耦合点造成的盲区。采用任一方法, 基准法或第一替代法或第二替代法测量  $1310 \text{ nm}$  和  $1550\text{nm}$  盲区光纤的模场直径。盲区光纤的典型结构应与被测光纤相同。

在整个测量过程中, 接头或对接耦合点应保持稳定, 以求不影响测量结果。当采用对接耦合点时, 建议选用折射率匹配液来减小反射。

### ③ 试验程序

双向后向散射差法试验程序分为两个步骤。首先, 在已知修正因子  $g$  和  $f$  的情况下求出光纤和波长程序, 其次, 在给定波长下, 验证光纤类型和结构程序。定量程序包括  $g$  和  $f$  修正因子的精确计算, OTDR 波长偏离标准波长允许修正  $g$  和  $f$ 。在  $g$  和  $f$  未知, 而且精确的确定做不到时, 我们假定  $g$  和  $f$  的标准值为 1 和 0。

#### A. 在给定波长下的光纤测量

微调光纤使光源由盲区光纤 A 注入试样光纤 (由 OTDR 经过接头 A 进入试样光纤, 如图 4.32 所示)。

测量通过接头的后向散射的变化 (如图 4.32 所示的接头 A), 避免任何反射, 将后向散射的变化值记录为  $L_d$ 。

微调光纤使光源由试样光纤注入盲区光纤 A (由 OTDR 经过接头 B 进入试样光纤, 再经过图 4.32 所示的接头 A)。

测量通过接头的后向散射的变化 (如图 4.32 所示的接头 A), 避免任何反射, 记录后向散射变化值为  $L_s$ 。

按照式 (4.57) 计算被测光纤的模场直径。

#### B. 光纤类型、结构和波长的判定

选择一个光纤, 对其类型和结构进行测量。测量方法既可采用基准试验法也可采用第一替代试验法和第二替代试验法, 在所需的波长下测量光纤的模场直径  $W_s$ , 光纤的模场直径范围代表着试样的光纤类型和结构。

由给定波长下的光纤测量程序来确定经过接头的后向散射的变化  $L_d$ 、 $L_s$ ，计算每种光纤的  $20\log_{10}\left(\frac{W_s}{W_d}\right)$ ，做出  $20\log_{10}\left(\frac{W_s}{W_d}\right)$  与  $(L_d-L_s)$  的线性回归线来确定  $g$

(斜率) 和  $f$  (截距)。选择第二种光纤试样来确定  $g$  和  $f$ 。光纤模场直径的测量方法仍可用基准试验法或第一替代试验法或第二替代试验法。

完成给定波长下的光纤测量程序，再用回归线求得  $g$  和  $f$  来确定模场直径  $W_s$ 。找出与用基准试验法和第一替代试验法或第二替代试验法的测得值的差别，如果要说明等效性要计算平均差 (bias) 标准偏差。

通过计算等效性大小  $B$  可以求得可接受的测量等效性。

$$B = |bias| + 2\sigma_d / \sqrt{n} \quad (4.58)$$

式中： $n$  为样本大小。 $B$  的典型上限为  $0.1 \mu\text{m}$ 。如果  $B$  超过上限，需要调整试验程序，例如建议改善接头或对耦接头。

## 六、有效面积

### 1. 定义

#### (1) 非线性效应

当前人们通过采用光纤放大器增大光纤中的光传输功率的方法来实现远距离传输。但是，因光纤芯面积上的光信号功率过大而使传输光纤出现非线性效应。因此，光纤的非线性效应已在大容量和远距离的传输系统中受到高度重视。光纤的非线性效应通常分为散射效应（受激布里渊散射和受激拉曼散射）或与 Kerr 效应相关的效应，即光强与折射有关（自相位调制、交叉相位调制、调制不稳定、孤子形成和四波混频）。影响这些非线性效应程度的因素包括：光纤色散特性、单模、光纤的有效面积、波分复用系统中的信道数、信道间距大小。整个无中继系统距离、光纤特性的纵向均匀性、信号光强和光源谱线宽度。

#### (2) 有效面积 $A_{\text{eff}}$

单模光纤有效面积是一个影响光纤系统（特别是远距离光放大系统）传输质量与光纤非线性效应直接相关的参数。有效面积的定义如下：

$$A_{\text{eff}} = \frac{2\pi \left[ \int_0^{\infty} I(r) r dr \right]^2}{\int_0^{\infty} I(r)^2 r dr} \quad (4.59)$$

式中： $I(r)$  为半径  $r$  的光纤基模场强度（场幅值的平方）分布。式 (4.59) 积分是对光纤的整个横截面积。例如，如果我们做一个高斯近似则得：

$$I(r) = \exp\left(\frac{-2r^2}{w_0^2}\right) \quad (4.60)$$

式中： $2w_0$  为模场直径，那么式 (4.59) 分开积分且得到：

$$A_{eff} = \pi w_0^2 \quad (4.61)$$

高斯近似对波长在 LP<sub>11</sub> 附近的 G. 652 光纤和 G. 654 光纤是精确的。对更长波长的 G. 652 光纤、G. 654 光纤和 G. 653 光纤的有效面积不能由式 (4.61) 精确地估算出 A<sub>eff</sub> 和 w<sub>0</sub> 之间的经验关系式更通用形式为：

$$A_{eff} = k\pi w_0^2 \quad (4.62)$$

式中：k 是一个修正系数。对不同光纤，在不同波长 k 值取值不同。

### (3) 修正系数 k

式 (4.62) 的修正系数 k 与波长和光纤参数有关，例如：折射率分布、模场直径和零色散波长有关。经过实验证实，通常波长增大，G. 652、G. 653、G. 655 光纤模场直径和有效面积都会增大。G. 652 光纤、G. 653 光纤和 G. 654 光纤的修正系数 k 的范围，参见表 4.1。

表 4.1 几种光纤的修正系数 k

光纤类型	工作波长	
	~ 1310nm	~ 1550nm
G. 652	0.970 ~ 0.980*	0.960 ~ 0.970
G. 654	0.970 ~ 0.980	0.975 ~ 0.985*
G. 653	0.940 ~ 0.950	0.950 ~ 0.960*
G. 655		1.020 ~ 1.160

\*最佳波长范围

## 2. 测量方法

可借助单模光纤模场直径的测量方法来确定单模光纤（特别是 G. 655 光纤）的有效面积。ITU-T G. 65 (2000) 推荐的单模光纤有效面积测量方法有远场扫描法和可变孔径法。下面介绍远场扫描法和可变孔径法的测量原理。试验装置和试验程序。

### (1) 远场扫描法

#### ① 测量原理

单模光纤的有效面积可用远场扫描法来测量，其测量原理是将光纤注入端与注入光束对准，光纤输出端与合适的输出装置对准，通过变换扫描角度测量远场辐射光功率，再利用合适的数值积分法计算出近场光强，求出单模光纤的有效面积。

#### ② 试验装置

远场扫描法测量单模光纤有效面积的典型试验装置，如图 4.33 所示。有关

试验装置中光源、调制、注入条件、包层剥除器、试样、扫描装置、放大器和数据处理等内容,请读者参阅本书 4.2.5 节单模光纤模场直径的远场扫描法试验装置的内容。

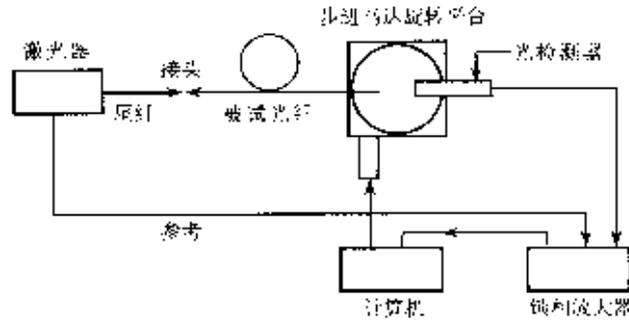


图 4.33 远场扫描法试验装置

### ③ 试验程序

注入光束应与光纤注入端对准,光纤的输出端应与合适的输出装置对准。由测得的远场辐射光功率计算出单模光纤的有效面积。

通过扫描一定长度的试样(其尺寸精度已知)来校正放大用光学器件的放大倍数,并记录这个光放大倍数。叠加远场辐射光功率数据,让  $P(\theta_i)$  测得的光功率,其为变换角度  $I$  的角位置  $\theta_i$  函数  $0 \leq \theta_i \leq \theta_{\max}$  的叠加的光功率曲线函数  $P_f(\theta_i)$  为:

$$P_f(\theta_i) = \frac{P(\theta_i) + P(-\theta_i)}{2} \quad (4.63)$$

计算近场光强图形,用一合适的数值积分法来算出式(4.59)的积分。如下是一例子。任何其他积分法至少应是精确的。计算半径为  $r$  的光强近场分布图,求得的光强分布在最大半径的光强大比半径为零处的光强的 0.01% 还要小。

$$I(r_j) = \left[ \sum_{j=0}^n P_f^2(\theta_i) J_0 \left( \frac{2\pi r_j \sin(\theta_i)}{\lambda} \right) \sin(2\theta_i) \Delta\theta \right]^2 \quad (4.64)$$

式中:  $\Delta\theta = \theta_i - \theta_0$

对式(4.55)进行积分,用一合适的数值积分法对式(4.60)进行积分。下列公式为一例子。任何其他积分法也应是精确的。

单模光纤的有效面积可由下式求得:

$$A_{\text{eff}} = \frac{2\pi T}{B} \quad (4.65)$$

式中:  $B = \sum_0^m I^2(\gamma) \gamma \Delta\gamma, T = \left[ \sum_{j=0}^m I(r_j) r_j \Delta r \right]^2, \Delta\gamma = \gamma_1 - \gamma_0$

m 为测得的位置数。

图 4.34 是由测得的远场光功率数据绘制的光强分布图。

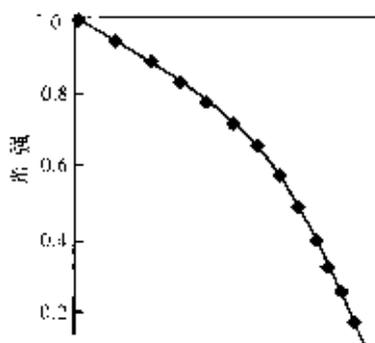


图 4.34 远场法测得的光功率分布

## (2) 可变孔径法

### ① 测量原理

单模光纤的有效面积可用远场测量技术中的可变孔径法测量,其测量原理是通过测量已知数值孔径的光纤对应的远场角 $\theta$ 总的归一化功率 $f(\theta)$ ,由四次方函数拟合成远场孔径数据,再由半径为 $r$ 的近场光功率分布 $I(r)$ 求出单模光纤的有效面积。

### ② 试验装置

可变孔径法测量单模光纤的有效面积的试验装置,如图 4.35 所示。试验装置中的光源、调制、注入条件、包层模剥除器、试样探测器、放大器和数据处理等内容,请读者参阅本书第 6 章第 2 节 5 中单模光纤模场直径测量的可变孔径法试验装置内容。孔径装置至少包含 12 个数值孔径扫描半角。所选用的数值孔径为 0.02~0.25。通过孔径传输出光纤的光被收集聚焦到探测器。收集光的光学装置的数值孔径应大一些,以免影响到测量结果。

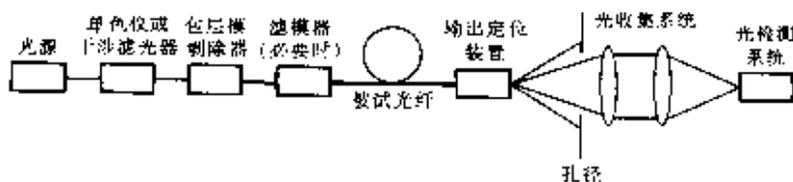


图 4.35 可变孔径法试验装置

输出可变孔径系统由一个可变孔径圆传输设备(例如,一个孔径盘)组成。该系统放置在离开光纤端面至少为 $100w_0/\lambda$ 的距离为 $D$ 处。它用来改变由光纤输出图形获得的光功率。所用的典型孔径为 12 至 20,且其位置距离光纤端面大约

20 ~ 50mm。试验装置最大数值孔径应为 0.40。应该选用与光纤端面角不敏感的图形定位方法。作为试验装置的一部分（如图 4.35 所示），仔细地测量和记录下光纤输出端位置与孔径盘面之间的距离 D 和每个孔径的直径  $X_i$ 。确定孔径盘中每个孔径对应的半角。并为进一步计算需要记录下这些  $\theta_i$  (为增大孔径尺寸  $i=1-n$ ) 值。这些  $\theta_i$  值与试验波长无关。

### (3) 试验程序

用注入光束对准光纤注入端面，光纤输出端面与合适的输出装置对准。单模光纤的有效面积  $A_{eff}$  由式 (4.63) ~ (4.67) 求得。

试验装置校正 是通过扫描用已知具有合适精度的装置来测量放大装置的放大倍数。单模光纤的有效面积的计算是用可变孔径法测量角  $\theta$ ，如图 4.35 所示。光纤对应的远场，即通过已知孔径总的归一化光功率  $f(\theta)$ 。这些光功率值等效归一化远场光功率分布  $F(\theta)$  的积分：

$$\int(\theta) = \int_0^{\infty} F^2(\theta) \sin(\theta) d\theta \quad (4.66)$$

四次方函数拟合成远场孔径数据的公式如下：

$$\int(\theta) = A\theta^4 + B\theta^3 + C\theta^2 + D\theta + E \quad (4.67)$$

单模光纤的有效面积  $A_{eff}$  可由作为半径  $r$  的函数的近场光功率分布  $I(r)$  求得。为进行计算必须对积分的光功率数据  $f(\theta)$  进行一次微分求出远场光功率分布  $F(\theta)$ ：

$$F^2(\theta) = \frac{df(\theta)}{d(\theta)} \cdot \frac{1}{\sin \theta} \quad (4.68)$$

由远场光功率分布  $F(\theta)$ ，用逆 Hanke1 变换可将计算的近场光功率分布  $I(r)$  表示为半径  $r$  的函数：

$$I(r) = \left[ \int_0^{\infty} \sqrt{F^2(\theta)} \cdot J_0\left(\frac{2\pi r}{\lambda}\right) \sin 2\theta d\theta \right] \quad (4.69)$$

那么，有效面积  $A_{eff}$  可用公式 (4.70) 由近场光功率分布  $I(r)$  求得：

$$A_{eff} = 2\pi \cdot \frac{\left[ \int_0^{\infty} I(r) \cdot r \cdot dr \right]^2}{\int_0^{\infty} I(r)^2 \cdot r dr} \quad (4.70)$$

## 七、数值孔径

### 1. 定义

数值孔径是多模光纤的一个重要光学参数，它表征多模光纤集光能力大小及与光源耦合难易程度，同时对连接损耗、微弯损耗、宏弯损耗、衰减温度特性和传输带宽等都有影响。通常，根据折射率分布测量方法将数值孔径定义如下：

(1) 最大理论数值孔径  $NA_{th}$

根据光纤折射率分布得出的最大理论数值孔径定义为：

$$NA_{th} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \approx n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (4.71)$$

式中： $n_1$ —光纤芯的最大折射率；

$n_2$ —包层的折射率；

$\Delta$ —芯包相对折射率差；

$$\Delta = (n_1 - n_2) / n_1 \leq 1$$

$NA_{th}$  表述的物理意义是光纤收集光线的的能力。

(2) 远场数值孔径  $NA_{ff}$

远场数值孔径是通过测量光纤远场分布确定的。远场数值孔径  $NA_{ff}$  的定义为光纤远场辐射图上光强下降到最大值 5% 的半角 ( $\theta_s$ ) 的正弦值。

$$NA_{ff} = \sin \theta_s \quad (4.72)$$

(3)  $NA_{th}$  与  $NA_{ff}$  之间的关系

$NA_{ff}$  和  $NA_{th}$  之间的关系与测量波长有关。测量远场光强分布大多在 850nm 波长上进行，而测量折射率分布通常则在 540nm 或 633nm 波长上进行。对于这些波长， $NA_{ff}$  和  $NA_{th}$  之间的关系如下：

$$NA_{ff} = k NA_{th} \quad (4.73)$$

式中： $k$ —修正系数，取值为 0.95 和 0.96，它们分别对应的测量波长为 540nm 和 633nm。

通常，我们应将 850nm 波长上测得的  $NA_{ff}$  作为光纤数值孔径。光纤的数值孔径可直接通过测量 850nm 波长上的远场光强分布获得，或间接由  $NA_{th}$  来获得。

## 2. 测量方法

多模光纤的数值孔径的测量方法有测量短段光纤远场辐射图(远场光强分布法)和测量光纤折射率分布(折射近场法)两种。

有关远场光强分布法和折射近场法的测量原理、试验装置和试验程序等内容如下所述。

### (1) 远场光强分布法

#### ① 测量原理

远场光强分布法是测量多模光纤数值孔径的基准试验法。远场光强分布法测量原理是先测量出光纤远场角辐射光强分布，再利用远场分布法的  $NA_{ff}$  定义式 (4.72) 计算出光纤的数值孔径。

#### ② 试验装置

多模光纤数值孔径的远场光强分布法的试验装置，如图 4.36 所示。

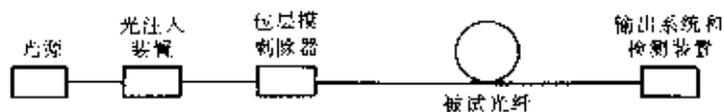


图 4.36 远场光强分布法试验装置

#### A. 光源

光源为强度可调的非相干光源，它能在光纤试样端面上产生基本恒定的辐射（光强变化 $<10\%$ ）面。在整个测量过程中，光源的强度、波长和位置应保持稳定。光源中心波长为 $850 \pm 25\text{nm}$ 。

#### B. 光注入装置

为稳定和重复定位而不使光纤明显变形，应配置一个光纤试样输入固定端装置。为使光纤试样输入面与注入光束对中，应配置一个合适的装置来达到对中目的。同时还应提供一种对光纤试样端面是否与注入光束对中的检验方法。

#### C. 包层模剥除器

为消除包层中传输的光功率，应选用一个合适的包层模剥除器担当此任。

#### D. 输出系统和检测装置

通常，可采用远场辐射图的角扫描和空间场扫描方法检测光纤试样出射远场的角辐射光强度分布。

### ③ 试验程序

被测光纤长度为 $2.0 \pm 0.2\text{m}$ 。所制备的试样两端面应清洁、平整光滑，且与光纤轴垂直，端面角 $<2^\circ$ 。为避免弯曲产生模转换和模辐射，光纤试样要放直。

试验前应将试样两端置于对中固定装置上。试样输入端应大致位于恒定辐射光斑聚焦像的中心。将光源调整到试验要求的波长和光谱线宽。扫描远场辐射图，并记录作为角位置函数的光强。

从远场光辐射图上找出光强最大值 $5\%$ 处的点，将这两点对应的半角作为 $\theta_5$ 记录下来，再用式(4.72)计算出远场数值孔径 $NA_{\text{ff}}$ ，即光纤的有效数值孔径。

### (2) 折射近场法

折射近场法是用来测量光纤最大理论数值孔径的方法。折射近场法是替代试验法。折射近场法的测量原理是，首先用折射近场法测出光纤的折射率分布曲线，然后从折射率分布曲线上求出纤芯中最大折射率 $n_1$ 和包层折射率 $n_2$ ，再根据式(4.71)计算出光纤的最大理论数值孔径 $NH_{\text{th}}$ 。

有关折射近场法的试验装置，试验程序等内容，请读者参阅本书2.2.2节中，有关光纤折射率分布测量的折射近场法的相关内容。

## 八、光学连续性

### 1. 定义

光纤的光学连续性并不作为一促光纤性能的测量方法，而仅是对光纤的连续性或断裂的差异进行检测。例如，一段短光纤在拉伸、曲挠、弯曲和扭转试验期

间受到机械损伤时，由于光纤长度太短（即分辨率受限制），在采用后散射仪不合适的情况下，光学连续性的检测就显得十分必要。

光纤段光学连续性的定义是表征光纤段传导光功率的能力。光学连续性可用在光纤一端注入光时，另一端输出的光功率来表示。

光纤光学不连续是指在特定的注入和检测条件下，光纤输出端实际测得的光功率比注入光纤的光功率小一个约定值时，则认为这根光纤光学不连续。该约定值应由用户和厂商商定。

## 2. 测量方法

光纤光学连续性的检测采用的方法是传输或辐射光功率法。有关传输功辐射光功率法的测量原理、试验装置和试验程序等内容，如下所述。

### (1) 测量原理

传输或辐射光功率法的测量原理是借助一个光功率计来指出一根光纤光学连续或产生严重的衰减增大。

### (2) 试验装置

传输或辐射光功率法测量光纤光学连续与否的试验装置，如图 4.37 所示，试验装置主要光发射单元和光接收单元两部分组成。

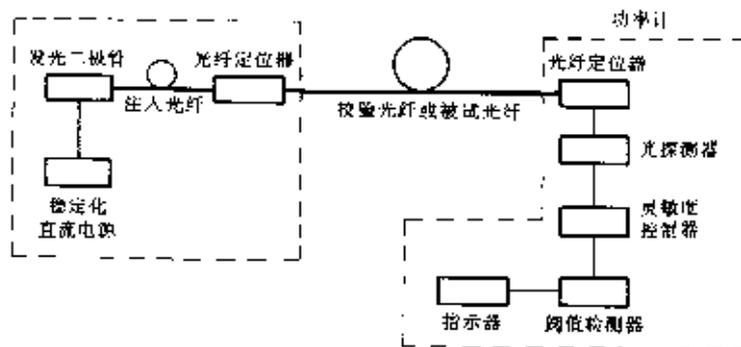


图 4.37 传输或辐射光功率法试验装置

#### ① 光源

光源是一个由 LD 或 LED 组成的大发光面积的注入光纤光学终端器件。为方便起见，它也可与一根注入光纤耦合。为了减少注入光纤光学终端器件一侧的损耗变化，当采用注入光纤时，注入光纤应是阶跃型折射率分布光纤。光纤纤芯直径要大于被测光纤芯直径。

#### ② 光探测器

采用与光源相匹配的光探测器，例如光电二极管。它与由灵敏度控制器调节的阈值探测器和指示器相连。光探测器的光敏面应有较大的面积。

#### ③ 光纤定位器

光纤定位器用来对注入光纤光学终端和被测光纤光学终端的快速定位。

#### ④ 校验光纤

连接发射器和接收器的校验光纤用来获得零校准点。

### (3) 试验程序

装置调节时,采用一根已知是光学连续的短校验光纤来检验试验装置的工作情况。当采用图 4.37 所示试验装置时,调节灵敏度控制器,使接收光功率刚好超过阈值探测器的阈值,并且指示器工作。

初始测量时,将用被测光纤取代检验光纤。在确定的灵敏度值的基础上,按对被测光纤预期的衰减量增加灵敏度保证指示器工作。指示器工作表明光纤是光学连续的。

如指示器不工作就增加灵敏度,直至指示器工作。计算使指示器工作所需要的以 dB 表示的灵敏度增量。如果衰减增量(或灵敏度增量)超过约定值,则认为光纤断裂。

光纤受到机械损伤后测量,仅对受机械损伤前是光学连续的光纤进行。使光纤能经受所要求的机械损伤作用。如有必要,则更换试验装置中的光纤。

如指示器不工作,应增加灵敏度,直至它工作。计算相对于初始测量确定的灵敏度值的灵敏度增量,如因机械损伤试验导致衰减增量(或灵敏度增量)超过约定值,则认为光纤断裂。

## 九、微弯敏感性

### 1. 定义

光纤是柔软的可弯曲的,如果弯曲的曲率半径太小,将使光的传播途径改变,使光从纤芯渗透到包层,甚至有可能穿过包层向外泄漏掉。因此当光纤弯曲时,例如常发生在成缆、现场敷设(管道转弯)、光缆接头等场合下引起弯曲损耗。

微弯是一些随机的曲率半径可以与光纤的横截面尺寸相比拟的畸变,常发生在套塑、成缆过程,光纤(或光缆)的周围温度发生变化等场合下。所以,微弯损耗是光纤随机畸变而产生的高次模与辐射之间的模耦合所引起的光功率损失。其微弯损耗大小由下式求出:

$$\alpha_m = N h^2 \frac{\alpha^4}{b^6 \Delta^3} \left( \frac{E}{E_f} \right)^{3/2} \quad (4.74)$$

式中: N — 随机微弯的个数;

h — 微弯凸起的高度;

< > — 表示统计平均符号;

E — 预涂覆层材料的杨氏模量;

$E_f$  — 光纤的杨氏模量;

$\alpha$  — 纤芯半径;

b — 光纤外半径;

$\Delta$  — 光纤的相对折射差。

微弯敏感性则指的是光纤对微弯损耗的相对敏感性。

## 2. 测量方法

单模光纤和多模光纤微弯损耗的敏感性的测量方法有可膨胀圆筒法、固定直径圆筒法和金属格网法三种。这三种测量方法的试验结果只能进行定性比较，它通常只用在光纤的一般评估。

### (1) 可膨胀圆筒法

#### ① 测量原理

可膨胀圆筒法的测量原理是由一个在施加的线性压力范围内测量单模光纤由于微弯效应产生的损耗增加，其损耗增加量是施加在光纤上一线性压力的函数。所测得的结果反映出单模光纤微弯敏感性。

#### ② 试验装置

可膨胀圆筒法试验装置是由一个可膨胀的圆筒组成。其直径能连续改变。为了避免宏弯效应，要求包括膨胀部分的任何局部最小弯曲直径小于 200mm。圆筒表面衬垫是具有一定粗糙度的特定材料（例如粘覆颗粒度为  $40\mu\text{m}$   $\text{Al}_2\text{O}_3$  的砂纸的薄膜— $40\mu\text{m}$  级矿质  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ）。

圆筒膨胀时，应采用本章单模光纤色散测量方法中的相移法试验装置，测量光纤伸长率。衰减测定应采用衰减测量中截断法或后向散射法。

#### ③ 试验程序

将被测光纤无张力地小心地在圆筒上绕一层，卷绕时应避免光纤任何交叉或重叠，并使光纤固定以防相对滑动。试验中应记录圆筒膨胀时衰减系数的变化和相位的变化。

光纤伸长率  $\varepsilon$  可由下式求得：

$$\varepsilon = \frac{\Delta\theta}{fL} V \quad (4.75)$$

式中：  $\Delta\theta$  — 相移 ( $^\circ$ )；

$f$  — 调制频率 (Hz)；

$L$  — 试样长度 (km)；

$V$  — 与光弹系数  $k$ 、真空中光速  $c$  和有效群折射率  $N_{ef}$  有关的常数。

$$V = \frac{kc}{360N_{ef}} \quad (4.76)$$

对非色散位移单模光纤（常规单模光纤）， $V$  的典型值为  $726$  (km/s) ( $^\circ$ )。由此可计算线性压力：

$$P = T/R = EA\varepsilon/R \quad (4.77)$$

式中：  $T$  — 施加于光纤上的张力 (N)；

$R$  — 静止条件下可膨胀圆筒半径 (mm)；

E—光纤杨氏模量 (N/mm)；

A—光纤（芯与包层构成的玻璃部分）横截面积 (mm<sup>2</sup>)。

作出衰减系数 (dB/km) 变化与线性压力 P (N/mm) 或伸长率  $\epsilon$  (%) 的函数关系曲线。由所获得的点通过内插得到一条经过坐标原点的直线，这条直线的斜率是被测光纤的微弯敏感性。微弯敏感性的单位为 (dB/km) / % 或 (dB/km) / (N/mm)。

## (2) 固定直径圆筒法

### ① 测量原理

固定直径圆筒法的测量原理是在给光纤施加固定线性压力时，由微弯效应致使被测光纤产生的附加损耗。

### ② 试验装置

固定直径圆筒法试验装置由固定直径的圆筒组成。为了避免宏弯效应，要求固定圆筒最小直径为 200mm。圆筒表面衬垫是具有一定粗糙度的特定材料（例如粘覆颗粒度为 40 $\mu$ m Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 砂纸的薄膜）。在圆筒覆盖层表面上至少能绕 400mm 被测光纤。

衰减测量应采用衰减测量中截断法或后向散射法。

### ③ 试验程序

应用 3N（暂定值）的卷绕力将被试光纤单层绕在圆筒上，再测量总衰减系数。为了得到由微弯敏感性引起的衰减增加，应用被试光纤固有的衰减系数对测得的总衰减系数进行修正。在大卷绕力情况下，测得的总衰减主要是微弯损耗。

微弯敏感性可由下式求出：

$$\text{微弯敏感性} = \frac{\alpha R}{T} = \frac{\alpha}{P} \quad (\text{dB/km}) (\text{N/mm}) \quad (4.78)$$

式中： $\alpha$ —由微弯引起的衰减增加 (dB/km)；

P—线性压力 (N/mm)；

R—固定圆筒半径 (mm)；

T—施加于光纤上的卷绕张力 (N)。

可采用不同的卷绕张力按程序进行多次测量。

## (3) 金属网格法

### ① 测量原理

金属网格法的测量原理是利用金属网格使光纤产生微弯，从而确定光纤微弯损耗的相对敏感性。

### ② 试验装置

金属网格法试验装置的主要组成部分有：光源、探测器、微弯引入装置等。

#### A. 光源

光源的 FWHM 谱宽应不大于 10nm（或在光纤产品规范中规定）在整个测量期间，光源波长、强度和位置应保持稳定，并能在某一波长范围内工作。

#### B. 探测器

应采用谱响应与光源相匹配的光电二极管探测器，光探测器的系统响应应与所采用的调制技术相匹配，并且在测量波长范围内是线性的。为改善接收机信噪比，应对光源进行调制。

#### C. 滤模器

为防止光纤中有高次模传输，应采用滤模器，可在光纤上打一直径为 60mm 的单圈作为滤模器。

#### D. 微弯引入设备

产生微弯损耗的典型设备，如图 4.38 所示。金属基座平台起稳定作用，其表面光滑。两个定位柱固定在基座平台上。

一薄片硬化橡胶被固定在基座平台上，它相对于定位柱不能移动。橡胶片上面作了一个标记，该标记是一个直径为 98.5mm 的圆。将橡胶片的一部分切割掉以防止光纤交叉，这使被试光纤长度减少了大约 8mm。橡胶片表面应平坦，上面不能刻任何形式的槽。

金属网格上有二个孔，以便能用基座平台上的定位柱对金属网格进行重复的精确定位。

标称质量为 1kg 的顶板上有两个孔，使得它能滑进基座平台上的定位柱。一组 5 块负荷（例如 5 块  $\times$  1kg）提供附加负荷以引起附加微弯损耗。

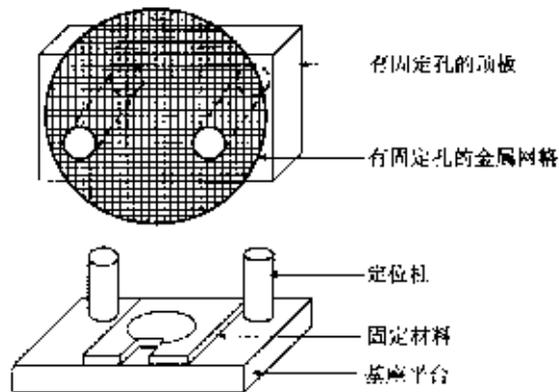


图 4.38 微弯引入设备示意图（金属网格法）

试验条件：

- a. 波长范围：1200 ~ 1600nm；
- b. 光源谱宽：不大于 10nm；
- c. 波长步进量：10nm；
- d. 1 块负荷重量：1kg；
- e. 金属网格特征：70 根丝编成；
- f. 采样数：5 ~ 10。

#### ③ 试验程序

将光纤绕成一圈圈的圆环放置在橡胶片上。必要时用几片胶带(不超过三片)将光纤固定。将金属网安放在定位柱上,小心地把顶板放下,下推金属网格使之压在光纤上。在规定的波长范围内记录功率读数。

将规定的负荷块压在顶板上,并在规定波长范围内记录功率读数。依次将其他的负荷块加在顶板上,并在规定波长范围内记录功率读数。计算出平均损耗增量,用  $(\text{dB/m}) / (\text{kg/m})$  表示。该平均损耗增量是在规定波长范围内波长的函数。

## 第五章 光纤机械性能

### 第一节 光纤机械性能测试目的

当光纤在成缆过程中和用于实际环境中时,必须经受住一定的机械应力和化学环境的侵蚀;在光缆施工过程中,光纤需要量熔融连接,光纤涂敷层的可剥离后裸纤的翘曲度都会影响光纤的熔接难易和损耗大小,这些都属于光纤机械性能和操作性能的范畴。石英光纤必须具有足够的强度来经受机械环境,例如光纤的二次被覆,以及光缆敷设和运行期间受到的张力、宏弯和微弯。在通常的使用条件下,光纤都会受到张力(如在光缆中)、均匀弯曲(如在圆筒上)或平行表面的两点弯曲(如在熔接情况中)。在所有这些机械环境中,光纤经受了环境构成所特有的应力。最普通的机械环境是单轴向张力。石英光纤是一种脆性材料,在施加的应力下经历持续的变形后会断裂成两段或几段。由于光纤断裂会导致通信线路中断,故光纤的材料强度和可靠性是人们最关心的问题。对于系统上的光纤而言,系统失效的唯一主要原因就是光缆失效,固有因素引起的失效很少,多半原因是由于火灾和直埋光缆附近的挖掘引起突然断裂一类的外部因素。随着光纤制造技术的不断提高,目前所用光纤的筛选强度都在  $0.69\text{GPa}$  以上,内在的机械失效的概率很低,尽管如此,由于修理和更换光纤的成本很高,故相关的经济风险便不可小视,这些风险促使人们努力把运行中的内在机械失效的概率减小到最低,因而提高光纤产品的长期机械可靠性是主要的课题。

实际上,光纤的机械强度由表面存在的裂纹和杂质决定,涂敷层也起着至关重要的作用。涂敷层的粘附力越强,对裂纹的保护作用就越明显,光纤的强度就越高。另一方面,在光缆的连接中,需要剥除光纤的涂敷层进行熔接,在光纤光缆的测试中,需要剥除光纤的涂敷层制作端面,也就是说,光纤涂敷层应具有可剥性。所以涂敷层的粘附力不宜小也不宜大,按国家标准规定,涂敷层的剥离力

在 1.3~8.9N 之间。

当剥去涂敷层后，一根未支撑的光纤有一个自然弯曲的趋势，即翘曲性能。例如，一根从 V 形槽的端面出来的悬空光纤可以向上、向下或者向左右弯曲。虽然翘曲对连接器、机械连接或使用有源校准的熔融连接没有坏的影响，但翘曲可在光纤是无源熔融连接时或许多光纤同时熔接(光纤带的批量熔接)时产生偏离。

为了使得光纤能在实际的通信线路上使用，它应具有足够的机械强度和便利的操作性能，以便于成缆和敷设，而且可在恶劣的环境条件下不会因疲劳而断裂，以保证光纤足够的使用寿命。我们必须弄清光纤的断裂机理、机械强度试验方法、表征光纤强度的各参数的物理意义和光纤使用寿命的计算方法。

## 第二节 测量方法

用来表征具有预涂覆层或缓冲层光纤的机械强度、操作性能、物理缺陷、可剥离性、应力腐蚀敏感性参数、翘曲性能优劣的测量方法有：筛选试验、光纤抗拉强度、磨损、目视、静态和动态疲劳、侧视显微法和激光束散射法。下面将分别介绍这些试验方法的测量原理、试验装置和试验程序。

### 一、光纤强度

#### (1) 裂纹及断裂

光纤制造中石英玻璃的理论强度是由(SiO<sub>2</sub>)分子之间的键结合力所决定的。然后，石英玻璃光纤中玻璃基体存在的微小不均匀性、高温熔融骤冷拉丝使表面形成应力分布不匀及环境尘埃、机械损伤等致使光纤产生微裂纹。特别应指出的是光纤强度既与光纤表面微裂纹有关，又与光纤纵向分布的微裂纹数量、大小和分布有关。

借助脆性材料断裂理论可以提示光纤表面微裂纹是如何导致光纤断裂的原因。根据 Griffith 的脆性材料断裂理论，假定光纤表面的微裂纹的裂口形状为 U 字形。外界作用压力将集中在 U 字形裂口的顶端，其上的应力可用弹性理论计算出来。如图 5.1 所示的一个 U 字形裂纹，且所加应力垂直于裂纹。如外加应力为 S，裂纹尖端有应力  $\sigma$  可用下式计算：

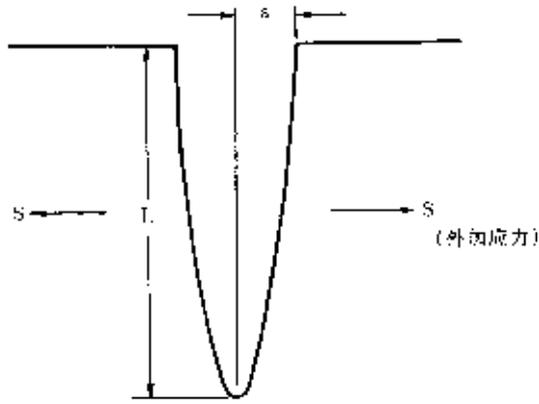


图 5.1 U 字形裂纹

$$\sigma = S \left( 1 + \frac{2L}{\alpha} \right) \quad (5.1)$$

式中：L 为裂纹长度， $\alpha$  为裂纹宽度的一半。如果裂纹尖端的曲率半径  $\rho = \alpha/L$ ，并假设  $L \geq \alpha$ ，则  $\sigma$  为：

$$\sigma = 2S \left( \frac{L}{e} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.2)$$

断裂应力  $\sigma$  与裂纹长度平方根成正比。又由 Griffith 断裂理论中应力一倍移关系得知断裂应力  $\sigma$  与裂纹长度 L 的关系为：

$$\sigma = \left( \frac{2Er}{\pi L} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.3)$$

式中：E 是杨氏模量，r 为表面能。用裂纹尖端的应力场表示应力强度因子 K 则有：

$$K_1 = \sigma \sqrt{\pi L} \quad (5.4)$$

将式 (5.3) 代入式 (5.4)，可得到断裂条件为：

$$K_{IC} = \sqrt{2Er} \quad (5.5)$$

$K_{IC}$  是应力强度因子的临界值，称为断裂韧度。当裂纹应力强度因子  $K_1$  增加到  $K_{IC}$  时，光纤上的微裂纹将会生长、扩展直至发生断裂。断裂力学正是研究有关光纤微裂纹生长规律的。

若已知断裂韧度  $K_{IC}$ 、裂纹大小和形状，所谓光纤强度的问题就是如何消除微裂纹、怎样保护微裂纹不遭水分、尘埃和化学物质的侵蚀、设法缓解裂纹生长，预报光纤在容许的应力作用下光纤的使用寿命。

## (2) 裂纹生长

假设石英玻璃光纤长度方向分布着非常小的物理缺陷或微裂纹。这样光纤的

临界断裂的发生常常是因为受到潮湿、尘埃、化学物质作用使表面强度变弱，石英玻璃光纤的包层玻璃周围涂覆着聚合物涂覆层或密封膜（例如，非晶态碳膜和施加金属涂覆层）旨在减小这些削弱光纤强度的作用。

在理想惰性环境条件下（低温、湿度为零、高真空），任何裂纹都不会生长。仅当外界施加的应力增加到  $K_{Ic}$  时，断裂才会发生。

对非惰性环境下的光纤（如高温、潮湿、环境中水分或化学物质），任何施加应力都会使裂纹生长。由于二氧化硅键发生水解，故它被称作为应力腐蚀。

在非惰性环境下，假定裂纹生长速率  $V$  与应力强度因子有关的经验公式如下：

$$V = \frac{dL}{dt} = AK_I^n(t) \quad (5.6)$$

瞬间断裂的临界裂纹生长速率  $V_c$  则为：

$$V_c = AK_{Ic}^n \quad (5.7)$$

式中： $A$  为与临界裂纹生长速率所处的环境有关的材料尺寸参数。例如， $V_c$  随水分增加而增大。无量纲指数  $n$  为裂纹应力腐蚀敏感性参数简称  $n$  值。 $A$  和  $n$  都与实际环境有关。 $n$  值既可表明裂纹生长快慢（ $n$  值越高，裂纹生长越慢），又可以用来计算光纤的使用寿命。

### (3) 疲劳

在一定条件下，光纤表面微裂纹生长扩大至光纤断裂的过程称为光纤的疲劳。应力腐蚀（敏感性）参数  $n$  是一个与施加应力使裂纹生长有关的无量纲的经验参数，其大小取决于环境温度、湿度和其他环境条件。通常，人们按施加的应力方式不同，将疲劳分为静态疲劳和动态疲劳。

#### ① 静态疲劳

静态疲劳即施加一个恒定的应力，测量其断裂时间。试验时，光纤在一个恒定外加应力  $\sigma$  的作用下，观察最弱的裂纹断裂所需的时间  $t_f(\sigma)$ 。断裂时间可由下式表示：

$$t_f(\sigma) = A_1 \sigma^{-n_s} \quad (5.8)$$

利用断裂时间与施加应力的关系简单求出  $n_s$ ， $n_s$  称为静态疲劳指数。 $A_1$  为一常数。

#### ② 动态疲劳

动态疲劳即施加一个具有恒定速率的应力，测量加载和断裂时间。在恒定外加应力速率  $\sigma_a$  下，观察断裂时间  $t_{fd}$  和断裂应力  $\sigma_f$ ，三者之间满足的关系为：

$$\sigma_f = \sigma_a t_{fd} \quad (5.9)$$

同时还有：

$$\sigma_f(\sigma_a) = A_2 \sigma_a^{\frac{1}{nd-1}} \quad (5.10)$$

由式 (5.10) 可求出  $n_d$ ,  $n_d$  称为动态疲劳指数。  $A_2$  为一常数。

#### (4) 使用寿命

当光纤处在真空环境中, 由于没有水分存在, 所以不会发生应力侵蚀, 其疲劳参数  $n$  (如  $n_d$  和  $n_s$ ) 为最大值, 光纤也具有最高的强度, 这时的强度就是光纤的惰性强度  $S_i$ 。

当光纤在使用环境中具有使用寿命  $t_s$  与它所承受的应力  $\sigma$  和光纤的惰性强度  $S_i$  之间有如下关系:

$$\lg t_s = -n \lg \sigma + \lg B + (n-2) \lg S_i \quad (5.11)$$

上式中后两皆为常数, 所以当承受到的应力  $\sigma$  恒定时, 光纤的使用寿命  $t_s$  只与光纤的疲劳参数  $n$  值有关。  $n$  值愈大, 光纤的使用寿命  $t_s$  也就愈长。

### 2. 测量方法

#### (1) 筛选试验

##### ① 测量原理

为了保证一个最低的光纤强度, 筛选试验是最好的方法。筛选试验的目的就是将整个光纤制造长度上的强度低于或等于筛选应力的点去除, 保证幸存光纤的机械可靠性。 ITU-TG. 650 规定的筛选试验的基准试验方法为纵向张力法。

纵向张力试验法测量原理是一种施加张力荷载至拉丝涂覆后的整根连续长度光纤上。被测的初始光纤会断成几段短光纤, 可以认为每段短光纤已通过筛选试验。

试验结果既可用应力  $\sigma$  表示, 也可用应变  $\varepsilon$  表示, 它们的关系如下:

$$\sigma = E(1 + c\varepsilon)\varepsilon \quad (5.12)$$

式中:  $E$  为零应力下的杨氏模量,  $c$  是一个非线性参数, 其值由试验确定 (典型值为 3~6)。由施加张力  $T$  计算得到的光纤张力  $\sigma$  为:

$$\sigma = \frac{(1-F)T}{\pi\alpha^2} \quad (5.13)$$

式中:  $2\alpha$  为玻璃光纤的直径 (125  $\mu\text{m}$ ),  $F$  是涂覆层承受的张力份额。  $F$  的大小由下式给出:

$$F = \frac{\sum_{j=1}^n E_j A_j}{E_g \pi \alpha^2 + \sum_{j=1}^n E_j A_j} \quad (5.14)$$

式中:  $n$ —涂覆层层数;

$E_j$ —第  $j$  个涂覆层的模量;

$A_j$ —第  $j$  个涂覆层的标称横截面积;

$E_g$ —玻璃光纤的弹性模量。

## ② 筛选试验参数

用规定的筛选应力  $\sigma_p$  来控制幸存段光纤。筛选试验中施加应力  $\sigma_a$  的大小如图 5.2 所示。图 5.2 也显出了加载时间  $t_1$ 、卸载时间  $t_u$  和筛选时间  $t_d$ 。筛选试验施加抗张负荷的时间要尽可能地短，为了确保玻璃光纤经受住筛选应力、筛选时间又要足够的长。故光纤经受抗张负荷的筛选时间一般为 1s。

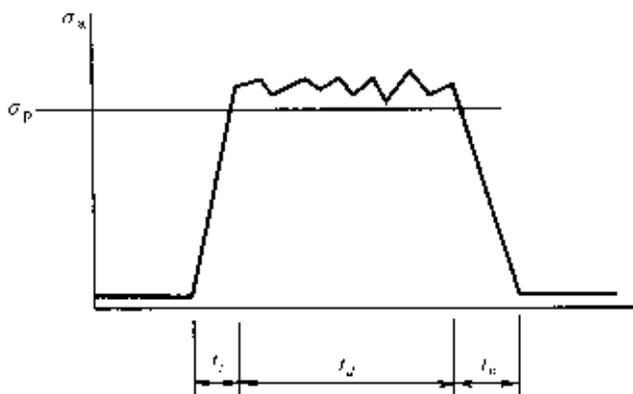


图 5.2 筛选试验中应力  $\sigma$  与时间  $t$  的关系

筛选试验中所施加的应力应始终超过规定的筛选应力  $\sigma_p$ ，以保证光纤有一个最低强度。不过，在这里需要提醒读者的是，光纤的这个最低强度实际上是不可靠的，因为在卸掉筛选试验应力期间的动态疲劳降低了最低强度，这将涉及到一个实验上很难确定的裂纹生长参数，正是在卸掉筛选应力期间的次临界裂纹生长降低了这个最低强度。

在图 5.2 中，放丝和收丝区，光纤上维持一低应力值（典型值应不超过筛选应力的 10%）。在加载区，光纤应力由低应力倾斜上升至筛选应力，加载时间为  $t_1$ 。筛选试验区，施加的筛选应力  $\sigma_a$  值应大于规定的筛选应力  $\sigma_p$ 。卸载区，光纤应力从施加应力倾斜地降至小的应力值，卸载时间为  $t_u$ ，卸载时间应控制在用户与厂家共同认可的最大值以下。

## ③ 试验装置

通过，光纤光缆生产中用来进行光纤筛选试验的试验有两种类型：制动轮筛选试验机和固定重量筛选试验机。它们的结构和工作原理，如下所述。

### A. 制动轮筛选试验机

制动轮筛选试验机的结构组成，如图 5.3 所示。被筛选的光纤是以恒定的低张力从光纤盘上放出，经筛选后，光纤在恒定张力下重新被绕到收线盘上。放线和收线张力是可调的。

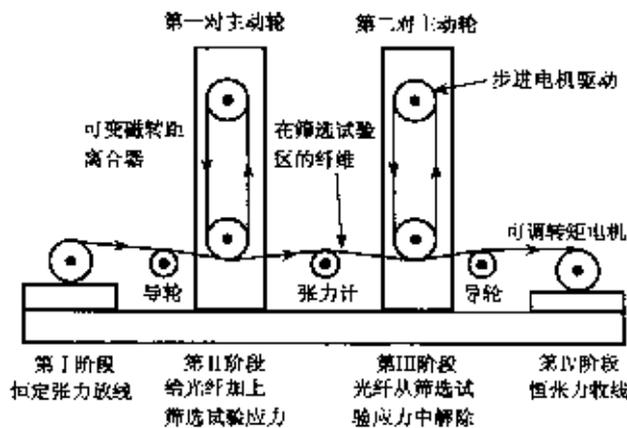


图 5.3 制动轮筛选试验机的结构组成示意图

施加到光纤上的筛选荷载是由制动轮和驱动轮之间产生的速度差造成的。制动轮和驱动轮上皮带用于防止光纤打滑。高精度张力计用来测量光纤上的荷载和控制制动轮与驱动轮之间的速度差来达到所需要的筛选荷载。筛选机施加荷载大小和操作速度快慢，可以由各自独立的装置控制。

#### B. 固定重量筛选试验机

固定重量筛选试验机的结构组成，如图 5.4 所示。装置中放线和收线动轮本身很轻，以求传导给光纤最小的张力。放线轮和收线轮彼此同步。放线轮和收线轮上的压紧皮带用来防止光纤滑动。它们既不会对光纤施加附加张力，也不会损伤光纤涂覆层。

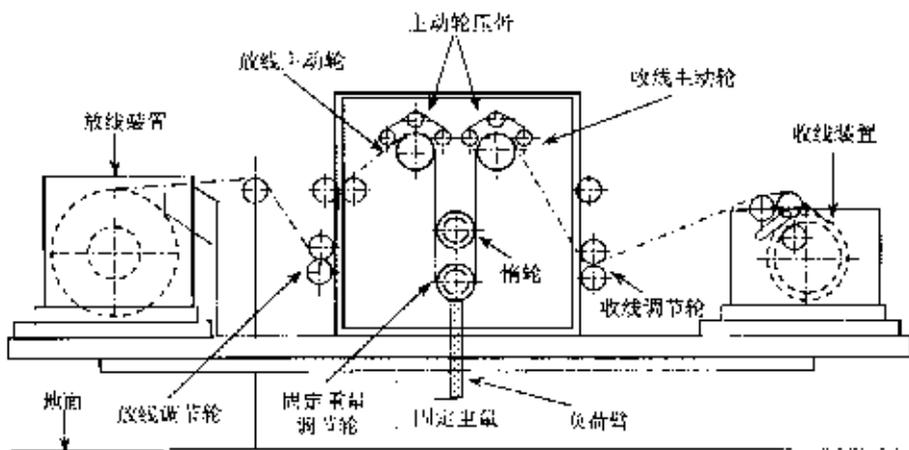


图 5.4 固定重量筛选试验机的结构组成示意图

荷载臂和一个盘子上的固定重物被安装到一个固定重物轮的轴上来向光纤提供筛选应力。当需要增加光纤在筛选试验区的长度时，可利用附加的惰轮来实现。图 5.5 是一种利用惰轮增加光纤受试长度的方法。

#### ④ 试验程序

试样应是一根全长光纤，两端的短段可能不能满足筛选试验期间的所有技术

要求，如最大卸载时间，应该在筛选试验后去掉。短段试样光纤长度的典型值小于 50m。

筛选试验后，光纤的完全断裂证明光纤受到破坏。检验光纤断裂的方法包括：目视检查和 OTDR 测量。将断裂区去除后，经受住的光纤长度被认为通过了筛选试验。如果筛选机经张力校准，可由式 (5.13) 求出应力，由式 (5.12) 求出应变。

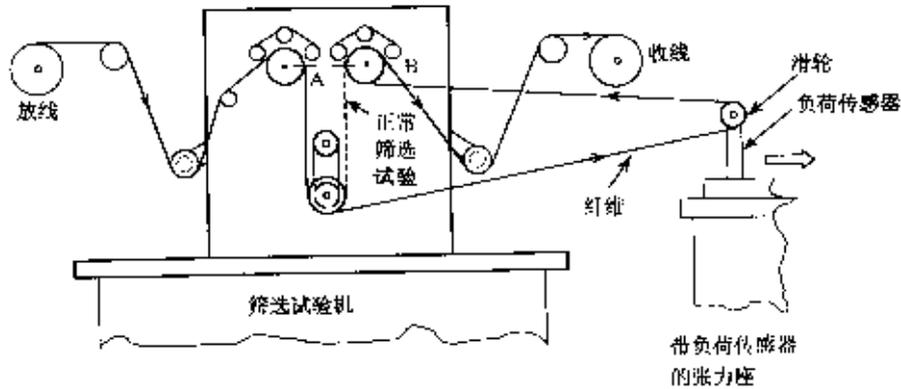


图 5.5 增加光纤受试长度的方法

涂覆光纤机械强度筛选试验分级要求应符合表 5.1 的规定。

表 5.1 光纤强度筛选试验分级

等 级	I	II
筛选应力不低于 GPa	0.69	1.38
筛选应变不低于%	1.0	2.0

注：上述两种表示方法是等效的

## (2) 抗拉强度

### ① 测量原理

筛选试验只是保证了光纤的最低强度，在一根实际的石英玻璃光纤表面，存在着许多微裂纹，简单地对光纤施加张力，那么沿着光纤长度方向和在光纤的横截面积中均匀地存在着应力。我们也可以用光纤断裂累积概率的威泊尔分布来表征光纤的强度，即：一定长度的光纤，在应力  $\sigma$  的作用下，光纤的断裂累积概率可用威泊尔分布来描述。

$$F(L, \sigma) = 1 - \exp \left[ - \frac{L}{L_0} \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (5.15)$$

式中：F 为小于或等于  $\sigma$  的应力下光纤断裂的累积概率； $\sigma_0$  是在“标距”长度  $L_0$  下测得的，与  $e^{-1}$  或 36.8% 的累积概率相对应的强度； $L_0$ 、 $\sigma_0$  和  $m$  均为常数。

为获得不同长度光纤断裂概率的威泊尔分布，必须对光纤试样作拉力试验。将光纤试样拉断，记下断裂的应力值，最后根据记录统计光纤在不同拉力强度下

断裂累计概率分布，作出威泊尔分布曲线（参看 5.2.2 节），并用其来判断光纤抗拉强度和使用寿命。

### ② 试验装置

光纤抗拉强度的试验装置为一台合适的拉力机。拉力机的拉伸方向可以是垂直的或水平的。拉力机的拉伸速度每分钟应为试样长度的约 3%~5%。夹持光纤可用卡盘或其他合适的方法，光纤夹具应不使光纤试样损坏和打滑。

### ③ 试验程序

应使制备的试样受试长度达到 1m（短试样）或 10~20m（长试样）。如果需要，试样可在温度 20℃的自来水槽中或在气候室（如控制温度 23℃和相对湿度 95%）中作预处理。预处理时间应不少于 24h。

#### ● 试验 A:

试验 A 适合于试样不要求作预处理的情况。试验前，先将试样安置在拉力机上，两夹具之间的光纤自由长度应达到 1m 或 10~20m。拉伸速度按光纤产品规范中的要求。

#### ● 试验 B:

试验 B 适合于试样要求作预处理的情况。试验时，将试样从预处理装置中取出后的 5 分钟内将其安置到拉力机上，两夹具之间的光纤自由长度应达到 1m 或 10~20m。拉伸速度按光纤产品规范中的要求。

未老化光纤的最低抗拉强度应符合表 5.2 中的规定。

表 5.2 未老化光纤的最低抗拉强度 (GPa)

光纤标距长度 (m)	威泊尔概率水平	
	15%	50%
0.5	3.14	3.80
1.0	3.05	3.72
10	2.76	3.45
20	2.67	3.37

## 二、疲劳参数

### 1. 定义

在一定应力条件下，光纤表面微裂纹生长扩大至光纤断裂的过程称为光纤的疲劳。通常，按施加应力的模式光纤的疲劳可分为：静态疲劳和动态疲劳。人们常常用静态疲劳参数和动态疲劳参数来表征光纤的疲劳性能。

### 2. 测量方法

任何光纤的疲劳试验都应在尽可能接近实际应用的模拟条件下确定断裂应力和疲劳性质。ITU-T G. 650 推荐的疲劳参数的试验方法有：动态疲劳的轴向张

力法、动态疲劳的两点弯曲法、静态疲劳的轴向张力法、静态疲劳的两点弯曲法和静态疲劳的均匀弯曲法。

鉴于本书篇幅限制，我们仅介绍国内通用的动态疲劳轴向张力法和静态疲劳轴向张力法，以飨读者。

### (1) 动态疲劳参数的轴向张力测试法

#### ① 测量原理

轴向张力法是用来确定光纤在规定的恒定应变速率下的动态疲劳参数。轴向张力法测量原理是通过改变应变速率来检验光纤的动态疲劳性能。这个试验方法适用于断裂应力值的对数与应变速率的对数呈线性关系的那些光纤和应变速率。

#### ② 试验装置

轴向张力法测定光纤动态疲劳参数  $n_d$  的试验装置，如图 5.6 所示。试验装置的主要组成有：试样夹持装置、力值传感器、可变速度驱动装置等。

##### A. 试样夹持装置

选择一种用弹性材料套覆盖表面的合适轮子来夹持光纤。不受试验的一段光纤围绕轮子缠绕几圈，端头用弹性或胶粘带固定。光纤绕在轮子上不得交叉。光纤伸长前两轮轴芯之间的光纤长度定为标距长度。

确定轮子和滑轮直径的原则是，缠绕在轮子上的光纤不应受到能引起光纤断裂的弯曲应力。对典型的石英玻璃光纤，光纤缠绕在轮子上或绕过滑轮时，弯曲应力不应超过 175MPa（对 125/250  $\mu\text{m}$ -包层/涂覆层石英玻璃光纤，最小的轮子直径为 50mm）。轮子表面应有足够的刚性，以保证充分加载时，光纤不会切割表面。

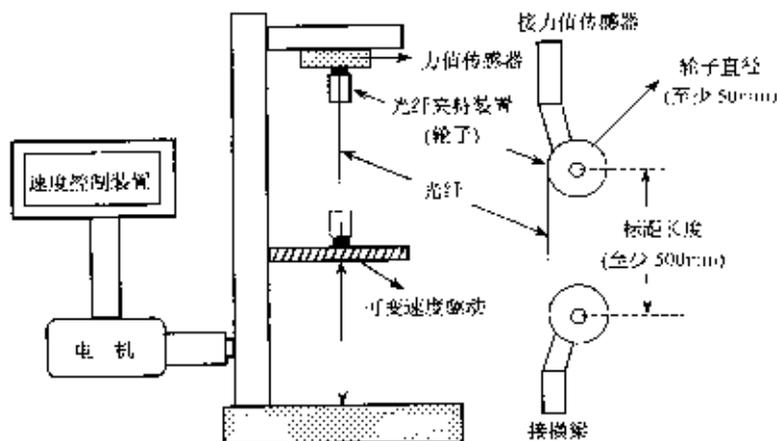


图 5.6 动态疲劳轴向张力法试验装置

##### B. 力值传感器

力值传感器用来测定每根被测光纤在轴向张力拉伸过程中直至断裂时的抗拉应力。力值传感器应与光纤受到负载时的同样方式进行定标和定向。在恒定的

速率下移动一个或两个轮子来增加夹持轮子之间的间距,其初始间距等于光纤的标距长度。标定力值传感器重量包括断裂负载或最大负载(最大负载的50%、最大负载、大于最大负载50%)。

### C. 可变速度驱动装置

速度控制单元的设定应通过试验确定,以符合规定的应变速率。应变速率应用单位时间标距长度的百分数来表示。选择有效的最大应变速率时,应考虑试验方法的各个方面,诸如设备的能力及试样的材料特性等。

缩短试验周期的方法是使用较快的应变速率和较低的负载。例如,规定的应变速率为0.025%/min,先用次快速率(0.25%/min)来试验一些试样,以建立断裂应力范围;然后用次快速率把光纤预加载到等于或小于在此速率下找到的最低断裂应力的80%;最后按规定的应变速率进行试验直至光纤断裂。

### ③ 试验程序

所有试样应在试验环境中至少预处理24h。试验应在恒定的环境条件下进行。试验期间,温度的标称值应在 $20 \sim 23 \pm 2^\circ\text{C}$ 之内;相对湿度的标称值应在 $40\% \sim 60 \pm 5\%$ 之内;为获得可靠的实验结果,要求相对湿度的标称值靠近50%RH。

轴向张力法测量光纤动态疲劳参数的试验程序下:设定和记录标距长度,设定和记录应变速率,将夹持轮返回到标距长度的间隔位置。将光纤试样两端依次安装在夹具上。光纤的切线点应与负载标定时处于同一位置。引导每根试样,在卡盘上至少缠绕要求的圈数,各圈不得互相交叉。将负载记录仪置于零位。启动电机拉伸光纤,记录应力与时间的关系曲线,直至光纤断裂,关掉电机。对试样组的所有光纤重复上述试验程序,以获得所有的光纤应力与时间的关系曲线。动态疲劳参数的计算步骤如下:

#### A 断裂应力

当忽略涂层效应(小于5%)时,对通用包层直径为 $125 \mu\text{m}$ 、涂覆层直径为 $250 \mu\text{m}$ (聚合物涂覆层)的光纤,可用下式计算断裂应力 $\sigma_r$ :

$$\sigma_r = T/A_g \quad (5.16)$$

式中: T—涂覆层光纤试样的断裂张力;

$A_g$ —玻璃光纤的标称横截面积。

#### B. 给定应变速率下的断裂应力

绘制表征总体的威泊尔分布曲线需按以下步骤进行:

a. 将断裂应力从最低至最高值依次排列好,并按顺序给定一个序号 k,即第一号为最低断裂应力,第二号为低断裂应力等等。即使几个试样的断裂应力相同,也要对其给定不同的序号。

b. 计算每一断裂应力的累积失效概率  $F_k$ :

$$F_k = (k-0.5)/N \quad k=1, 2 \quad (5.17)$$

式中：N—样本大小。

- c. 在威泊尔概率纸上绘出  $\ln[-\ln(1-F_k)]$  对  $\ln(\sigma_f)$  的威泊尔曲线。
- d. 曲线上标出所需数据。

对给定标距长度和直径的试样，动态疲劳的威泊尔曲线与下述累计概率函数有关：

$$F_k = 1 - \exp[-(\sigma_f / \sigma_0)^m d] \quad (5.18)$$

设  $k(P) = PN + 0.5$  来定义一个与给定概率  $P$  有关的序号。若  $k(P)$  为整数，令  $\sigma_f(P) = \sigma_{F_{k(P)}}$  为第  $k(P)$  序号的断裂应力。若  $k(P)$  不为整数，令  $k_1$  为低于  $k(P)$  的整数，且  $k_2 = k_1 + 1$ 。然后，令

$$\sigma_f(P) = (\sigma_{f_{k_1}} \sigma_{f_{k_2}})^{1/2}$$

中值断裂应力为  $\sigma_f(0.5)$ 。威泊尔斜率为：

$$md = \frac{2.457298}{\ln[\sigma_f(0.85)] - \ln[\sigma_f(0.15)]} \quad (5.19)$$

式中： $\sigma_f(0.85)$ —累积失效概率为 0.85 时的断裂应力；  
 $\sigma_f(0.15)$ —累积失效概率为 0.15 时的断裂应力。

威泊尔参数为：

$$\sigma_0 = \exp\left[\frac{0.366512}{m_d} + \ln[\sigma_f(0.5)]\right] \quad (5.20)$$

绘出每种应力速率的威泊尔分布曲线，确定每种应力速率的中值断裂应力  $\sigma_f(0.5)$ 。

动态疲劳参数  $n_d$  的计算为中值断裂应力  $\sigma_f(0.5)$ ，通常会随恒定应力速率  $\sigma_a$  按下式变化：

$$\lg \sigma_f(0.5) = \frac{\lg \sigma_a}{1 + n_d} + \text{截距} \quad (5.21)$$

式中：截距为单位应力速率下断裂应力的对数，如图 5.7 所示。

按 ITU-T G. 650(2000) 规定光纤的动态疲劳参数  $n_d$  应不小于 20。

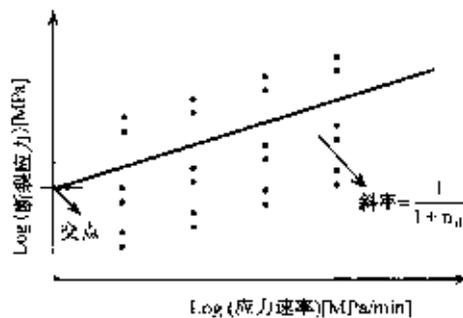


图 5.7 断裂应力与应力速率的动态疲劳参数曲线

## (2) 静态疲劳参数的轴向张力测试法

### ① 测量原理

轴向张力法又可以用来确定单根光纤段张力下的静态疲劳参数。轴向张力法测量光纤静态疲劳参数的测量原理是通过改变施加的应力大小来检验光纤的静态疲劳性能。

### ② 试验装置

图 5.8 所示的是两种轴向张力试验装置。每种试验都由光纤夹具对光纤施加应力和监测光纤断裂时间部分构成。由图可知，受试光纤的标距长度，即两个光纤卡盘之间的距离应力 500mm。

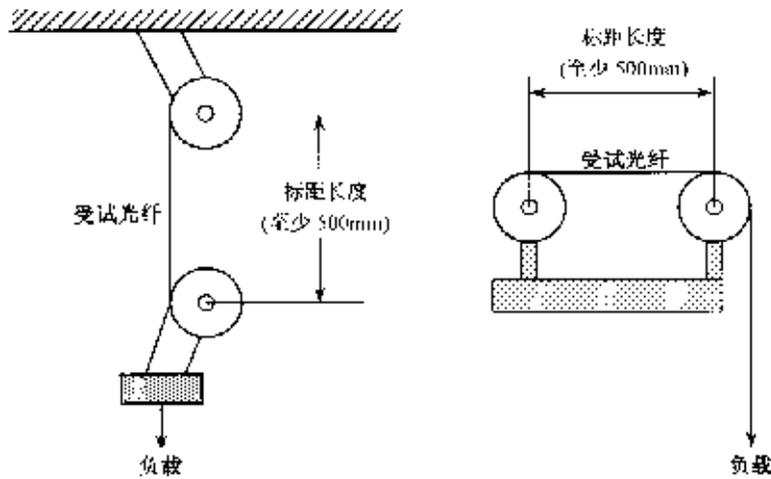


图 5.8 静态疲劳轴向张力法试验装置

光纤夹具如图 5.8 所示。施加应力的方法是用已知重量悬挂在一个轮子上给光纤施加应力。

在对光纤施加应力的悬挂重物下放置记时器用来测量光纤断裂时间。

### ③ 试验程序

每个标称应力水平下的样本大小应至少为 15 个光纤试样。应对至少五种不同的标称施加应力水平  $\sigma_0$  进行试验。标称应力的选择应使其中值断裂时间大约从 1 小时 ~ 30 天，使得在对数坐标纸上有大约相等的间距。对标准的石英玻璃光纤，达到这一要求的负载范围为 30 ~ 50N。

由于断裂时间取决于光纤断裂应力和疲劳参数，所施加的实际标称应力水平和施加的应力水平的个数能反复来确定。换句话说，开始试验时可以用一个宽的应力水平范围，将断裂太快或太慢的试验数据舍去。

样品作完预处理之后，安装在试验装置上，监测并记录每根光纤断裂的时间。对一样品组在给定的标称应力水平下进行试验时，只要中间样品已断裂，就可提

前中止试验。若多半样品已断裂,在所有余留样品断裂以前就可进行计算并确定中值断裂时间。断裂应力和静态疲劳参数  $n_s$  的计算步骤如下:

A. 断裂应力

断裂应力与动态疲劳参数中计算方法相同。

B. 静态疲劳参数  $n_s$

样品中值法不需假设威泊尔斜率为线性。对每种标称应力水平  $\sigma_i$  对应的中值断裂时间  $t_i$  就被确定。用最小均方差的方法把数据拟合到下面线性回归模式:

$$-n_s \ln(\sigma_i) + \text{截距} = \ln(t_i) \quad (5.22)$$

上式中的截距值为:

$$\text{截距} = \text{中值}[\ln(t_i)] + n_s \cdot \text{中值}[\ln(\sigma_i)] \quad (5.23)$$

### 三、可剥性

#### 1. 测量原理

光纤的可剥性的测量原理是利用立式拉力机提供受试光纤和剥离工具之间的相对运动来定量确定沿光纤纵向机械剥去保护涂覆层所需的力。

可剥性试验主要用于检验具有预涂覆层的光纤或具有其他被覆层光纤的涂覆层或被覆层剥离的难易程度。

#### 2. 试验装置

光纤涂覆层剥离试验装置,如图 5.9 所示。试验装置主要有:拉伸装置、力值传感器、转换放大器和剥离工具等。它们的工作作用如下所述。

##### (1) 拉伸装置

使用一台合适的拉力机(如立式拉力机)来提供受试光纤与剥离工具之间的相对运动。拉伸装置应能提供恒定的剥离速率,没有猛拉受试光纤或剥离工具的现象。拉伸装置还能提供两个方向的相对运动,以便复位。剥离工具应在拉伸装置的夹头上夹紧,其刀刃与光纤轴垂直。为防止光纤弯曲,牢固夹紧受试光纤的另一端。

##### (2) 力值传感器

采用一台合适的能检测出剥去光纤涂覆层时施加于光纤的力的传感器。

##### (3) 转换放大器

转换放大器接收来自力值传感器的信号,并能显示出被测光纤涂覆层剥除时的剥离力,力值读数应是连续的。例如,用一台曲线记录仪记录最大力和平均力,以及剥离中力值波动的幅度和频率。

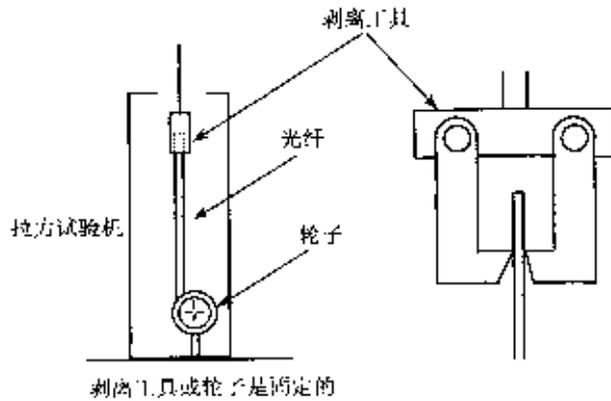


图 5.9 光纤涂覆层剥离试验装置

#### (4) 剥离工具

试验结果的准确性主要取决于剥离工具的设计。剥离工具应做到不损伤光纤包层表面，刀刃直径大于被剥离光纤标称包层直径  $50\ \mu\text{m}$ 。剥离工具刀刃应不引起光纤弯曲，刀刃对接在同一平面上为最佳状态。剥离工具应安装在拉力机固定架上，刀刃磨损到影响试验结果时，应予以更换。

#### 3. 试验程序

试样应能代表总体光纤，以便作出正确的质量评估。由于试验的可变性，故至少取 10 段试样做试验，然后取平均值得到该试样的试验结果。

所剥光纤长度会影响剥离力。对于标称涂覆层直径为  $250\ \mu\text{m}$  的光纤，所剥光纤长度对剥离力影响很小。光纤的剥离长度规定为：对于标称涂覆直径为  $250\ \mu\text{m}$  的光纤，可取的值为 20mm、30mm 和 50mm；对于有较粗的涂覆层直径的光纤，可选取较短的剥离长度。

试样总长度由光纤固定端与剥离工具间的距离，要通过剥离工具所规定的待剥光纤长度和在固定端把光纤绕到轮子上所需的长度来确定。试验结果部分取决于光纤的剥离长度，与试样总长度无关。

从光纤上剥去涂覆层所需的力部分取决于剥离速率。如果要比较不同试验的结果，应采用相同的剥离速率。拉伸试验应按规定的速率在光纤与剥离工具之间提供相对运动（对于标称涂覆层直径为  $250\ \mu\text{m}$  的光纤，可取的值为 100mm/min 或 500mm/min，较粗涂覆层直径的光纤剥离速率或取 100mm/min）。试样应在  $25\pm 5^\circ\text{C}$  的温度和 30%~60% 的相对湿度下至少预处理 24h。每组试样光纤试验前，应按设备仪器使用说明书标定转换器和力值传感器。安装之前，剥离工具两刀刃周围的区域应无残渣和/或累积物。

试验光纤的一端应紧固在试验夹具上，使其在加载时不打滑（例如光纤在直径为 80mm 的轮子上绕三圈）。光纤的另一端穿过剥离工具，并插入到光纤导向孔中。距光纤端头规定的距离处切开涂覆层。启动拉伸机，在光纤和剥离工具之间提供一个恒定的相对运动，从光纤上剥去涂覆层。观察、测量记录剥去玻璃光纤涂覆层所需的力，要去除试验期间光纤断裂情况下的数据。当涂覆层完全从光纤

上剥去时，试验完成。

GB/T 9771.1~.5-2000 规定单模光纤涂覆层所需的剥离力峰值宜在 1.3~8.9N 范围内。

#### 四、光纤的翘曲

##### 1. 定义

光纤的翘曲是剥除预涂覆层后的石英玻璃裸光纤自然弯曲的曲率半径，以米表示。

光纤的翘曲特性是由于光纤制造过程中的高速拉制和骤然冷却过程致使光纤中产生内应力，即淬火造成的裸光纤固有的一种弯曲特性。

为了更好地理解光纤翘曲的物理意义，我们以一圆形的模型来解析光纤的翘曲。光纤翘曲的圆形模型，如图 5.10 所示。当光纤进行熔接时，需要将待熔接的光纤端头上的涂覆层剥去，然后将其放在熔接机中的 V 型槽中的光纤定位器上夹好，被熔接的裸光纤将伸出一段长度为  $x$ 。由于石英玻璃裸光纤固有的自然弯曲（翘曲）特性，光纤的自由端就会偏离光纤固定器的轴线一定距离  $\delta_f$ 。我们假设光纤伸出段弯曲后形成一个以  $R$  为半径的圆周上的一段圆弧，这样我们就可以借助图 5.10 所示的圆形模型来求出光纤的曲率半径（翘曲） $R$  的值。由图 5.10 得知，三角形 ABC 是一直角三角形，AB 是斜边，长度用  $c$  表示则有：

$$c = (x^2 + \delta_f^2)^{\frac{1}{2}} \quad (5.24)$$

又知三角形为一等腰三角形， $OC'$  为底边上的高，三角形 ABC 的角  $\alpha$  等于三角形  $AOC'$  的角  $\alpha$ ，则有：

$$\sin \alpha = \frac{\delta_f}{c} = \frac{(c/2)}{R} \quad (5.25)$$

将式 (5.24) 代入式 (5.25) 则可将光纤的曲线半径（翘曲） $R$  的表示式为：

$$R = \frac{(x^2 + \delta_f^2)}{2\delta_f} \quad (5.26)$$

利用式 (5.26)，只要测出裸光纤的伸出长度  $x$  和偏移距离  $\delta_f$ ，我们就可以计算出光纤的翘曲度参数  $R$ 。

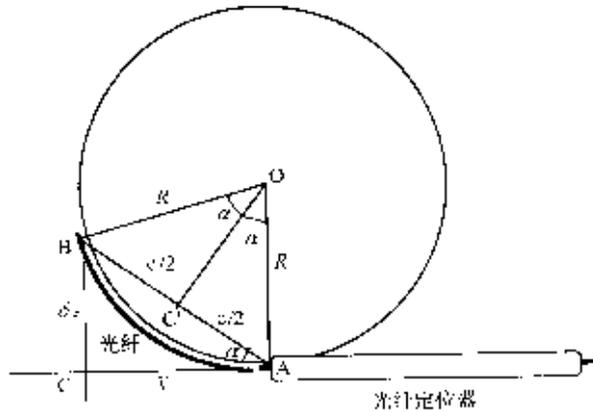


图 5.10 光纤翘曲的圆形模型

## 2. 作用

光纤翘曲是光纤本身固有的自然弯曲特性，它对光纤的连接损耗的影响相当大，特别是对多根光纤构成的光纤带的连接，由于各根光纤翘曲方向是随机的，故对靠 V 槽定位和对准的光纤带中诸多的连接损耗的影响将更大。因此对光纤带光缆中所用的光纤翘曲度要比普通光缆中光纤翘曲度要求更严格。

光纤翘曲特性对连接损耗的影响机理是由于光纤翘曲导致被连接两光纤间的轴线倾斜，如图 5.11 所示。图 5.11 (a) 表示一根光纤有翘曲，另一根光纤无翘曲的情况，等效轴线斜角为  $\theta$ ；图 5.11 (b) 表示二根光纤都有同样翘曲的情况，等效轴线斜角为  $2\theta$ 。当然，有翘曲的两根光纤连接时，二者的相对位置情况多样，但最坏的情况是两者翘曲方向完全相反，这时产生的连接损耗最大。

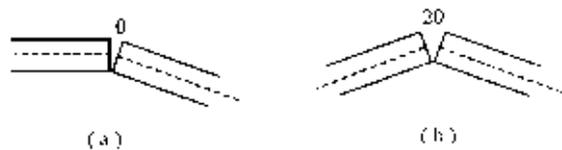


图 5.11 光纤翘曲引起的轴线倾斜情况

轴线倾斜角  $\theta$  的数值可以通过图 5.10 所示的曲率半径  $R$  和伸出长度  $x$  来计算：

$$\theta = \frac{x}{R} \cdot \frac{180}{\pi} \text{ (度)} \quad (5.27)$$

由式 (5.27) 得知，光纤翘曲度  $R$  越大，伸出长度  $x$  越小，等效轴线型倾斜角越小，连接损耗也越小；因此，当前有关光纤标准已将光纤翘曲半径数值由原来的 2m 提高到 4m，这对确保很小的光纤连接损耗起到十分大的作用。

## 3. 测量方法

光纤翘曲的测量方法有侧视显微技术和激光束散射法。这两种测量方法的测量原理、试验装置、试验程序和试验结果等如下所述。

## (1) 侧视显微技术

### ① 测量原理

侧视显微技术测量光纤的翘曲的测量原理是通过确定未支撑光纤端头绕光纤轴旋转时产生的偏离量来确定未涂覆光纤的曲率半径（翘曲）。在已知光纤最大偏离量和从光纤夹具到测量点的悬空距离，用一个简单的圆模型就能计算出光纤的曲率半径（参看图 5.10）。

### ② 试验装置

侧视显微技术中的光学显微镜测量光纤翘曲试验装置，如图 5.12 所示。试验装置的主要组成部分有：光纤夹具、旋转夹具、偏离测量装置、摄像机、监视器和视频分析仪等。

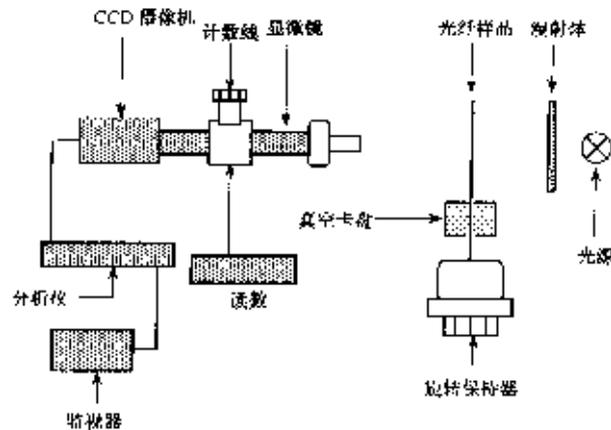


图 5.12 光学显微镜测量光纤翘曲试验装置

#### A. 光纤夹具

用一合适的夹具来保持试样光纤在一个恒定的轴上并允许光纤旋转  $360^\circ$ 。夹具可以由 V 型槽，例如真空卡盘或一光纤套筒组成。若使用套筒，为减小测量偏离的易变性，需保证内径与光纤外径的配合公差足够小。

#### B. 旋转夹具

采用一旋转夹具夹住光纤一端，并能提供将试样旋转  $360^\circ$  的精确方法。该装置可以手动操作，或靠步进电机驱动。

#### C. 偏离测量装置

提供一种来测量光纤旋转  $360^\circ$  时偏离的装置。该装置由可视显微镜组成。若采用可视显微镜，要提供允许精确测量光纤偏离的方式。例如测微目镜或图像分析系统。

#### D. 摄像机和监视器

摄像机和监视器可用于增强手动或自动操作的可视系统功能。

#### E. 视频分析仪

采用视频图像分析仪，可提供更精密的测量线定位

## F. 计算机

可用计算机系统进行过程控制、数据收集和计算。

### ③ 试验程序

试样应是一段适当长度的未成缆光纤，其一端应剥去足够长度的涂覆层，使之能安装在夹具上并有适当悬空长度。

将裸光纤端安放在光纤夹具中，端头伸出夹具外适当的悬空距离，典型悬空距离是 10~20mm。试样另一端固定在旋转装置上。

旋转试样直到偏离读数是在最大或最小位置，记录此时的偏离值  $D_0$ ；在旋转试样约 180° 直到偏转读数是在另一极端位置，记录偏离值  $D_1$ 。

偏离量  $\delta_f$  可由下式计算：

$$\delta_f = \frac{D_0 - D_1}{2} \quad (5.28)$$

式中： $D_0$ 和 $D_1$ 分别是最小偏离值和最大偏离值。

因为测量任何样品的总光纤偏离量将取决于悬空距离  $x$ ，采用圆模型把光纤翘曲作为曲率半径  $R_c$  进行计算是方便的。

$$R_c = \frac{x^2 + \delta_f^2}{2\delta_f} \quad (5.29)$$

式中： $R_c$ —曲率半径；

$x$ —悬空距离；

$\delta_f$ —光纤偏离量。

## (2) 激光束散射法

### ① 测量原理

激光束散射法测量裸光纤曲率半径（翘曲）的测量原理是用激光束散射，通过线传感器读出反射光束之间的距离，再将其有关参数代入光纤曲率半径（翘曲）计算公式，从而求出未涂覆光纤的翘曲。

### ② 试验装置

激光束散射法测量光纤翘曲的试验装置，如图 5.13 所示。试验装置主要由光源和检测器组成。

#### A. 光源

光源选用的是分离的氦氖激光束作为光源，由一只氦氖激光器、光束分离器和一个三棱镜组成。

#### B. 检测器

采用像电荷耦合器件线性传感器一类的图像传感器作检测器。

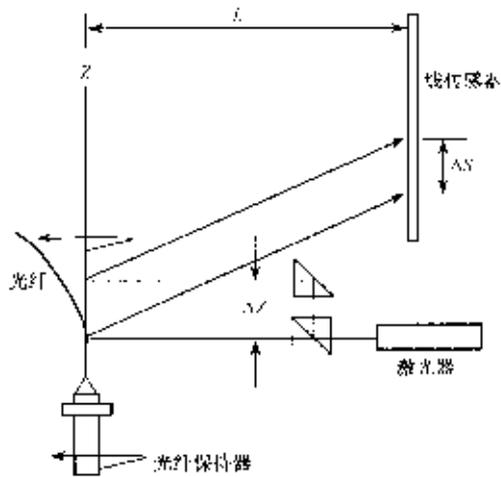


图 5.13 激光散射法试验装置

### ③ 试验程序

光纤试样被固定在一个旋转夹持器中，夹持器应允许试样光纤绕夹具的轴旋转  $360^\circ$ 。裸光纤固定在试样夹持器中并竖直延伸出夹持器一个规定的悬空长度。用一根非翘曲光纤给出系统的标定因子。

光纤试样旋转时，通过线性传感器读出两反射光束之间的距离。将最大反射光束距离记作  $\Delta s$ 。光纤的曲率半径可由下式求出：

$$R_c = \frac{2L}{\frac{\Delta s}{\Delta z} - 1} \quad (5.30)$$

式中： $R_c$ —光纤的曲线半径；

$L$ —光纤和线传感器的距离；

$\Delta s$ —反射光束距离；

$\Delta z$ —入射光束距离。

按国家有关光纤性能的规定，光纤的翘曲度宜大于  $4m$ 。

## 第六章 光纤带机械性能

### 第一节 光纤带机械性能测试的目的

众所周知，光纤带是由紫外光固化涂覆光纤和紫外光固化粘结材料共同组合的线性矩阵。如果光纤带在成缆、施工、使用、维护中受扭转、残留扭转等外力

作用，那么会影响光纤的传输性能和机械使用寿命。同时，光纤带在施工、维护中应具有可分离性，即光纤能从光纤带中分离成若干根光纤的子单元或单根光纤。光纤带便于剥离，即光纤涂覆层及光纤带粘结材料能容易地剥除。

这样，光纤带机械性能包括：可分离性、可剥离性、抗扭转能力和残余扭转度。研究光纤带机械性能的目的在于，从光纤带结构出发，通过模拟光纤带在成缆、施工中受扭转等条件进行必要的试验来确保光纤带的传输、机械性能及使用寿命。

## 第二节 测量方法

国内外有关标准中介绍的验证光纤带机械性能优劣的试验方法有：光纤带的可分离性、光纤带剥离性、光纤带抗扭转能力和光纤带残余扭转度。本章将简要介绍这些试验的测量原理、试验装置和试验程序。

### 一、光纤带可分离性

#### 1. 测量原理

光纤带可分离性试验的测量原理是利用一工具或手工将未老化的 6 芯或 12 芯或 24 芯光纤带中的光纤分离成单根或多根光纤的子单元。

光纤带可分离性试验的目的有两个：(1) 保证要求分离的光纤带具有足够的抗撕裂性能。(2) 确保要求分离的光纤带具有可分离成单根光纤或多根光纤子单元的可分离性。

#### 2. 试验装置

光纤可分离性试验装置应包括一个具有合适夹具的张力强度测量装置和一个放大倍数为 100 倍的显微镜。

#### 3. 试验程序

对于  $n$  芯光纤带，从被测的每个约 1m 长的光纤带试样上截取最小长度为 100mm 的光纤带试样，共取  $n/2$  段试样；对  $m$  批光纤带，光纤带试样数共有  $m \times n/2$  个。

对于  $x$  个光纤带试样（从批次中抽取，在产品规范中， $x$  一般规定为 3~5），用刃器将被试光纤带中光纤一根根与光纤带中其他光纤分开至长度为 25~30mm，以便于试验时夹持，如图 6.1 所示。对于  $x$  较多的光纤带试样，要将光纤带中光纤两根两根地与光纤带中其他光纤分开，直至分出的光纤根数为被测试光纤带芯数的一半，即  $n/2$ 。

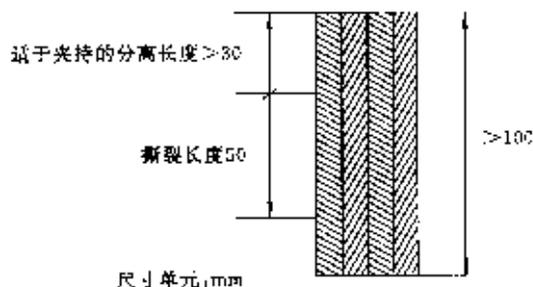


图 6.1 可分离性试验试样制备

可分离性试验程序如下：将每个试样插入强度测量装置上，如图 6.2 所示，在分离起始点约 3mm 处位置将分开的光纤夹住，以 100mm/min 的速度慢慢地将光纤撕开至 50mm 的长度，并连续记录 50mm 的长度上的撕裂力。用显微镜检查可分离性，即光纤带撕裂后预涂覆层和着色层受损的情况。最后，比较所测的各光纤所需撕裂力的大小。

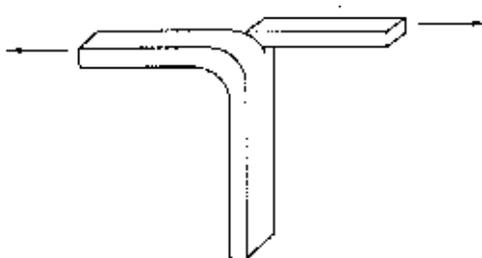


图 6.2 光纤带可分离（撕裂）试验示意图

评定光纤带可分离性优劣条件有：不使用特殊工具或器械就能完成光纤带的分离。完成撕开时所需的应力不超过 4.4N。光纤分离过程不应对光纤的传输和机械性能造成永久性的损伤。在分离试验后光纤着色层允许有点脱落，但在任意 2.5cm 长度的光纤上应留有足够的便于光纤带中各光纤相互区别的色标。

## 二、光纤带可剥离性

### 1. 测量原理

使用专用的剥离工具，从未老化和老化的光纤带上，以机械的方式剥去一段长度大于 25mm 光纤带的粘结材料、着色层和光纤预涂覆层，以验证光纤带的可剥离性的优劣。

### 2. 试验装置

光纤带可剥离性的试验装置为一专门的剥离工具和用来擦去光纤带上各涂覆层残留物的酒精。

### 3. 试验程序

受试光纤带试样预处理方法有两种：温度湿度老化法和水老化法。温度湿度

老化法是将受试光纤带浸泡在温度为  $85 \pm 2^\circ\text{C}$ ，非冷凝湿度为  $85 \pm 5\%$  环境中停留 30 天。水老化法是将受试光纤带浸泡在温度为  $23 \pm 5^\circ\text{C}$  的去离子水或蒸馏水中持续 14 天。

光纤带可剥离性试验在标准大气压下进行。未经过老化、湿度老化和水老化光纤带的可剥离性试验应在老化后的 8 小时内完成。剥离后的光纤带的清洁应用酒精擦清光纤上的残留涂覆物，以使玻璃光纤能够熔接。可剥离性试验的试样最少为 10 个。

### 三、光纤带抗扭转

#### 1. 测量原理

光纤带在成缆、敷设、使用和维护中不可避免地受到扭转的作用。光纤带抗扭转试验的测量原理是设法在光纤带上施加荷载，借助循环扭转来模拟光纤带实际扭转情况，以检验光纤带结构的机械和功能的完整性，确保光纤带经受扭转力作用后，光纤带中光纤不会分离成单根光纤或多根光纤子单元。

#### 2. 试验装置

光纤带扭转试验的试验装置，如图 6.3 所示。该试验装置由两个竖直放置的光纤带定位夹具和为每根光纤施加 1N 张力的吊挂荷重器具组成。



图 6.3 抗扭转试验装置

#### 3. 试验程序

从不同批次的光纤带中选取 5 个有代表性试样，每个试样长度为 340mm。将制备好的光纤带试样牢固地固定在试验装置中，两夹具夹持的光纤带距离为 300mm。试验时，先将顶端夹具顺时针旋转  $180^\circ$  回到起始位置后，再逆时针旋转  $180^\circ$ ，然后再回到起始位置，这就构成一个循环扭转试验。扭转试验应重复进行 20 个循环，扭转速度为每分钟 20 个循环。

### 四、光纤带残余扭转

#### 1. 测量原理

光缆中绞合的光纤带长度与敷设的光缆中的光纤长度相等。接入网中馈线和配线中所用的光缆要经受很宽的温度和湿度的作用。这种作用在光缆接续点或地

上标准终接点或接头盒处特别显著。光纤带必须在无扭转状态才能保持它们的尺寸完整性，允许重新排列或限制因光纤扭转引起宏观弯曲致使衰减增大。

光纤残余扭转的测量原理是在受试光纤带底部悬挂 1N 的荷载，使光纤带发生扭转，测量出扭转角  $\theta$ ，用扭转角  $\theta$  除以光纤带试样长度就可以计算出光纤带的残余扭转。

## 2. 试验装置

光纤带残余扭转试验装置，如图 6.4 所示。该试验装置由两个夹具、一个加载重物和扭转角测量仪器组成。

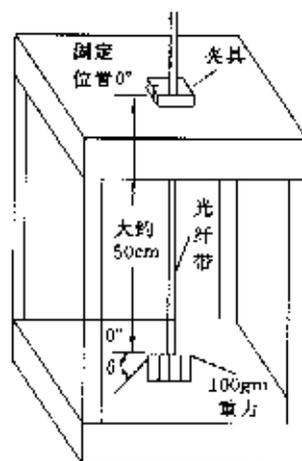


图 6.4 光纤带残余扭转试验装置

## 3. 试验程序

从被试光纤带中选取 5 个有代表性的试样，每个试样长度应不小于 50mm。将试样置于 85℃ 下老化 30 天。

试验时，用夹具固定光纤带的顶部，并在光纤带底部加 1N 的荷重，使光纤带无扭转，记录下此时光纤带的位置，然后，卸除负荷，光纤带发生扭转，测量扭转角  $\theta$ ；用  $\theta$  角除以光纤带试样长度计算出光纤的残余扭转。

# 第七章 光纤的环境性能

## 第一节 光纤环境性能测试的目的

随着人们对信息需求的日益增长及光纤通信技术的日趋成熟，光纤光缆正在以架空、直埋、管道、沟道、隧道、水下等敷设方式在各种各样的实际使用环境中，织制着纵横交错的光缆网络。光纤光缆跨越各种温区，要能经受不同环境条件的作用。

为确保光纤能在各种严酷环境条件下正常工作，我们应该模仿光纤实际使用

场所的温度、潮湿、高温高湿、高温、核辐射等环境条件设计出温度循环、浸水、高温高湿、高温、核辐射等试验来检验光纤对气候的适应性、耐核辐射等性能是否符合要求。

人们正是在充分研究光纤的环境性能的基础上，设法改进光纤的材料选择、结构设计、制造工艺、正确选择涂覆、套塑材料及相应的涂覆工艺和合理选择光缆材料、光缆结构和成缆工艺。如果我们从理论和试验中找出致使光纤环境性能下降的原因所在，那么改善光纤环境性能的办法也就指日可待了。

## 第二节 测量方法

光纤环境性能试验主要包括温度循环、浸水、高温高湿、核辐射等。温度循环试验用来验证光纤的气候适应性能，浸水试验是考察光纤的耐水侵蚀性能，高温高湿试验则是判断光纤耐高温高湿作用的性能，高温试验是用来评价光纤耐高温的性能，核辐射试验用以检测光纤耐 $\gamma$ 射线辐射的耐辐照性能。下面对光纤环境性能的测量原理、试验装置和试验程序等作简单介绍。

### 一、温度循环

#### 1. 测量原理

光纤温度循环试验的测量原理是通过模拟光纤在储存、运输和使用期间可能经受的最坏温度变化来确定 A1a-A1d 多模光纤和 B1-B4 单模光纤对温度变化的衰减稳定性，即光纤的衰减温度特性。

光纤的温度衰减特性试验是将受试的整筒光纤放在气候室内，在温度循环试验规定的温度范围内进行温度循环试验，以确定温度变化时，光纤的附加损耗量。

温度循环试验结束后，可按下列式计算出光纤的平均附加损耗：

$$\Delta\alpha(\lambda) = \frac{10}{L} \log \frac{P}{P_0} \quad (\text{dB/km}) \quad (7.1)$$

式中：P—分别在试验点  $T_A$ 、 $T_B$ 、保温后的稳定光功率；

$P_0$ —参考温度  $T_0$  的光功率；

L—试样长度。

另外，我们还可以用光时域反射计 (OTDR) 直接测量不同温度点的 OTDR 曲线，从而确定光纤的温度附加损耗量。

#### 2. 试验装置

光纤的温度衰减特性的试验装置主要由衰减测量装置和气候室组成。

##### (1) 衰减测量装置

应采用 GB/T 15972.4-1998 《光纤总规范第 4 部分：传输特性和光学特性试验方法》中规定的传输功率监视法和 GB/T 15972.4 规定的后向散射法中的衰减

测量装置来测定被测光纤的温度衰减变化。

## (2) 气候室

气候室的体积大小应适合容纳被试光纤线盘，气候室的温度应地规定试验温度范围内，其温度控制精度应在 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 内。采用强制空气循环来维持气候室内温度均匀，气候室的设置及辅助设备的安放要避免冷凝水滴落到受试光纤试样上。

## 3. 试验程序

试样为出厂长度或按产品规定的长度，并应为可达到所需试验准确度的适当长度。建议被试光纤最短长度为：多模光纤(A1a ~ A1d)应不短于1000m，单模光纤(B1 ~ B4)应不短于2000m。

如果受试光纤经滑石粉处理，那么应从该试样光纤中抽出一段未涂抹滑石粉的光纤进行试验。为了得到具有重复性的试验结果，试验光纤应松弛地绕在线盘上并置于气候室内。试验结果可能会受到光纤弯曲半径的影响。基于这个考虑，试样松绕成卷并用滑石粉材料处理，以便使卷绕的紧挨各圈，彼此能自由地移动。受试光纤可以以水平或垂直方式绕成最小弯曲直径为150mm，以避免发生宏弯作用。

被测光纤试样放入气候室内，在规定的时间内经受各种温度变化。试验条件，如表7.1所示。

表 7.1 温度循环试验条件

预处理条件	温度测试条件	标称值 2h, 23°C, 50% RH
最低温度	$T_A$	$-60^{\circ}\text{C}$ 或 $-40^{\circ}\text{C}$
最高温度	$T_B$	$+85^{\circ}\text{C}$ 或 $+70^{\circ}\text{C}$
在每个温度下最小的持续时间	$t_1$	2h
最大的温度速率	斜坡速率	$1^{\circ}\text{C}/\text{min}$
需要完成的循环次数	循环次数	2

试验具体步骤与内容大致如下：

试验前应将被试光纤试样置于正常试验大气环境中预处理时，目视检查外观，然后将试样光纤的两端分别与稳定光源和光检测系统连接好，待监测系统稳定后测定环境温度下的衰减基准值。

将处于环境温度下的试样光纤置入气候室，并将试样光纤两端引出气候室外，与稳定光源和光检测系统连接好或与光时域反射计连接好。再以适当的冷却速率将气候室温度降到规定的低温 $T_A$ ，待室内温度达到稳定后，接着使试样光纤在 $T_A$ 温度下保温适当的时间 $t_1$  ( $t_1 \geq 2\text{h}$ )。然后以适当的加热速率将气候室温度升高至规定的高温 $T_B$ ，待室内温度稳定后，使试样光纤在 $T_B$ 温度下保温适当的时间 $t_1$ ，再以适当的冷却速率将气候室温度降至环境温度。上述的降温、保温、升

温、保温过程构成了一个温度循环。如图 7.1 所示。

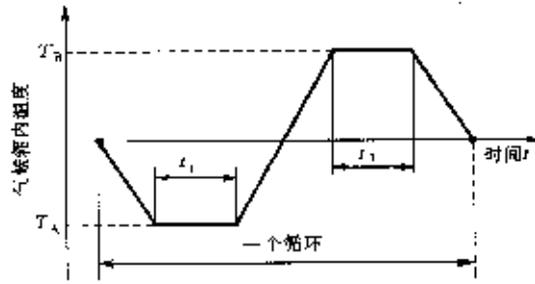


图 7.1 一个温度循环的试验气候室内温度循环曲线

在一个温度循环过程中要记录好温度点环境温度  $T_A$ 、 $T_B$  下经过保温时间  $t_1$  后输出光功率  $P_0$ 、 $P_A$ 、 $P_B$ 。

光纤温度衰减特性实验时，被测光纤试样应经历两个温度循环过程。试验结束后，按照式 (7.1) 计算出光纤的平均附加损耗量。

## 二、温度时延漂移

### 1. 测量原理

当今光纤光缆被广泛使用在不同的敷设方式和环境中，敷设方式有架空、管道、直埋、缆沟和水下等，使用环境温度为  $-50 \sim +60^\circ\text{C}$ ，因此要求光纤的性能要有高度的稳定性。长期以来，人们始终关心的光纤温度特性包括温度特性和时延温度特性。由于过去的光纤通信采用的是异步数字传输，不考虑时钟温度漂移问题。当今，随着光同步数字传输网的普及应用，人们开始重视时钟漂移问题，也开始研究光纤脉冲时延温度特性。尽管光纤的时延温度系数很小，但其对 40Gbit/s 速率的高速系统仍有影响。

众所周知，光脉冲通过长度为  $L$  的光纤的群时延为：

$$\tau = \frac{L}{V_g} = \frac{LN}{c} \quad (7.2)$$

式中： $L$  为光纤长度， $N$  为光纤材料群折射率， $c$  为真空中的光速。当温度发生变化时，群时延也发生变化，将时延  $\tau$  对温度  $T$  求导可得：

$$\frac{d\tau}{dT} = \frac{1}{c} \left( L \frac{dN}{dT} + N \frac{dL}{dT} \right) \quad (7.3)$$

实际上，光纤时延温度的变化是一种慢变化，称为温度漂移。我们定义单位长度单位温度间隔时延变化量为光纤温度时延漂移常数，记作  $K_f$ ，单位为  $\text{ps}/(\text{km} \cdot ^\circ\text{C})$ ，表示式为：

$$K_f = \frac{d\tau}{dT} \cdot \frac{1}{L} = \frac{1}{c} \left[ \frac{dN}{dT} + \frac{N}{L} \cdot \frac{dL}{dT} \right] \quad (7.4)$$

式中：第一项是由于光纤材料群折射率随温度变化而引起的，第二项是由于光纤物理变化引起的。

温度时延漂移常数的测量原理是利用应变测量仪，在频域法中，测量同一波长下温度变化引起的正弦波调制信号的相位移 $\Delta\phi$ ，即：

$$\Delta\phi=2\pi f\Delta\tau =2\pi f k_f L\Delta T \quad (7.5)$$

将式(7.5)稍作变换得  $k_f$ ：

$$k_f = \frac{\Delta\phi}{2\pi f L\Delta T} \quad (7.6)$$

式中： $f$  为调制频率； $L$  为试样光纤长度； $\Delta T$  为温度间隔。

在一般情况下，时延随温度的变化并不完全是线性关系。试验时应多选择一些试验温度点，由测量取得的多组数据求出拟合曲线，从而确定不同温度间隔内的平均时延漂移常数。

## 2. 试验装置

光纤温度时延漂移常数的试验装置与色散测量试验装置基本相同。所不同的是光纤先后放入温箱和冰柜中，光缆放在人工气候室内。温度变化范围为 $-40 \sim +60^\circ\text{C}$ 之间。色散测量的是不同波长间的时延差，而温度时延漂移常数是测量不同温度下的时延差。光纤温度时延漂移常数测量用的试验装置是应变测量仪（色散测量仪加应变测量软件）。

## 3. 试验程序

光纤时延温度常数的试验方法与单模光纤色散系数的试验方法基本相同，所不同的是，对色散测量的是同一温度下（室温）不同波长间的时延差；对时延温度漂移，测量的是同一波长下（工作波长，如1310nm），温度变化引起的光脉冲时延的变化。

如将石英玻璃光纤的热膨胀系数、石英玻璃在1310nm处的群折射率和折射率随温度变化值代入式(7.4)可算出  $k_f \approx 36\text{ps}/(\text{km} \cdot ^\circ\text{C})$ ，式(7.4)估算  $k_f$  时，未考虑光纤预涂覆材料的影响，实际上，不同的涂覆材料和工艺，光纤的温度时延漂移常数相差很大，大约在  $30 \sim 200\text{ps}/(\text{km} \cdot ^\circ\text{C})$  之间。另外，成缆光纤的温度时延漂移常数会大一些，具体数值取决于光缆结构设计和填充材料。一般要求光纤的温度时延漂移常数以  $40\text{ps}/(\text{km} \cdot ^\circ\text{C})$  为好。

# 三、浸水

## 1. 测量原理

光纤浸水试验的测量原理是通过将多模光纤(A1a ~ A1d)和单模光纤(B1 ~ B4)浸入蒸馏水或去矿物或离子水中来模拟光纤在实际使用、储存和运输中可能遇到浸水环境条件来确定光纤的耐浸水适用性。

我们可以借助插入损耗法和后向散射法来测量经规定的浸水时间后浸泡的

光纤试样的衰减变化。

## 2. 试验装置

光纤浸水试验的试验装置主要由水箱和衰减测量装置组成。

### (1) 水箱

浸泡光纤试验的水箱装满蒸馏水，去矿物质或离子水。水的 PH 值为 5.0 ~ 8.0。

### (2) 衰减测量装置

应采用 GB/T 15972.4-1998《光纤总规范第 4 部分：传输特性和光学特性试验方法》中规定的插入损耗法和后向散射法中的衰减测量装置来测定浸水后的光纤衰减变化。

## 3. 试验程序

为确保光纤光传输性能测量的重复性，被测多模光纤 (A1a ~ A1d) 的最短长度为 1000m，单模光纤 (B1 ~ B4) 的最短长度则为 2000m。水箱外部的光纤试样长度越短越好。所制备的光纤试样不会影响到其受试结果。光纤试样应松绕成盘，而且光纤两端应保持在水外，试样光纤以最小弯曲直径 150mm 水平或垂直绕成盘，以防止引起宏观弯曲损耗。

光纤试样被放入充满水的水箱中，水温为  $23 \pm 5^{\circ}\text{C}$ 。光纤试样在水箱中放置 30 天。接着，可以用插入法和后向散射法，在规定波长下，测量浸水前、浸水中和浸水后的光纤试样的衰减变化。

## 四、高温高湿

### 1. 测量原理

光纤高温高湿试验原理是通过模拟光纤在实际使用、储存和运输中可能经受到的高温高潮湿环境条件来确定适用性。

高温高湿试验是通过观察规定时间范围内恒温下高潮湿对光纤的作用，从而达到评价光纤的实用性能的目的。这个试验给出一个实用的方法。

### 2. 试验装置

光纤的高温、高湿试验的试验装置主要由气候室、增湿器和衰减测量装置组成。

#### (1) 气候室

气候室的体积大小应适应容纳被测光纤线盘，而且便于试验中测量装置的接入。同时，气候室也能在规定的精度内保持给定的高温和高湿。高温高湿气候室和辅助设备的安放应避免冷凝水滴落到光纤试样上。

#### (2) 增湿器

用去矿物质或去离子水来获得规定的湿度。试验装置的锈或腐蚀杂质都不应作用到光纤试样上。应该按照增湿器制造厂家说明书要求控制加到增湿器中的水

量。

### (3) 衰减测量装置

采用 GB/T 15972.4-1998《光纤总规范第 4 部分：传输特性和光学特性试验方法》中规定的插入损耗法和后向散射法中的衰减测量装置来测定被测光纤的衰减变化。

### 3. 试验程序

为确保被测光纤光传输性能测量的重复性对被测多模光纤 (A1a ~ A1d) 的最短长度为 1000m; 对被测的单模光纤 (B1 ~ B4) 的最短长度则为 2000m。位于气候室外的光纤试样长度越短越好。如果气候室外的光纤试样长度超过试样光纤总长度的 10% 应记载于试验报告中。

光纤试样的制备不应影响到其被测的性能。光纤试样应松绕成线盘, 而且被涂上例如滑石粉材料, 以求线盘上的彼此紧靠的各圈光纤可自由移动, 光纤试样可以以水平或垂直绕成最小弯曲直径为 150mm 的线圈, 以免产生宏观弯曲作用。如果光纤试样用滑石粉处理, 那么应从该光纤试样中抽一段未涂滑石粉的光纤, 暴露到试验环境中进行试验。

高温高湿试验的试验条件为: 温度为+85%, 相对湿度为+85%, 持续试验时间为 30 天。

受试光纤的衰减测量是在规定的波长下, 用插入法或后向散射法测量试验前、试验中 (一旦试样稳定在规定的温度和相对湿度下) 和试验后的光纤衰减变化。

## 五、高温

### 1. 测量原理

光纤高温试验的测量原理是通过模拟多模光纤 (A1a ~ A1d) 和单模光纤 (B1 ~ B4) 在实际使用、储存和运输中所经受的高温环境条件作用下, 测量光纤衰减变化来确定光纤的适用性。这个试验目的是在给定的时间范围内观察高温对光纤的作用。

### 2. 试验装置

光纤高温试验的试验装置主要由高温箱和衰减测量装置组成。

#### (1) 高温箱

高温箱的体积大小应能容纳被测光纤线盘, 并不会使辐射热直接作用到试样光纤上, 且便于试验条件下测量装置的接入。高温箱还应具有在规定的精度范围内保持规定的温度的能力。可采用强制空气循环方法来保持高温箱内的温度均匀。

#### (2) 衰减测量装置

光纤高温环境下的衰减变化测量装置采用的是 GB/T 15972.4-1998《光纤总规范第 4 部分：传输特性和光学特性试验方法》规定的插入法和后向散射法中的

衰减测量装置。

### 3. 试验程序

为获得测量的重复性, 光纤高温环境下衰减变化测量所需多模光纤最短长度为 1000m, 单模光纤最短长度为 2000m。放在高温箱外的光纤试样长度应越短越好。光纤试样的制备应不影响在受试条件下的性能。建议将光纤试样松绕成线盘, 并用诸如滑石粉等材料涂抹, 以便使绕成的彼此紧靠的光纤圈可自由移动。光纤试样可水平或垂直地绕成一个最小弯曲直径为 150mm 的线盘, 以防产生任何宏观弯曲作用。如果试样光纤被涂抹滑石粉处理, 那么应从该试样光纤中抽出一段未涂抹滑石粉的光纤暴露到试验环境中进行试验。

光纤高温试验的试验条件: 温度为+85℃, 持续试验时间为 30 天。尽管高温试验不控制湿度, 但是试验开始时 35℃下相对湿度不低于 50%, 衰减测量是在规定的波长下, 用插入法或后向散射法来测量试验前、试验中(一旦试样稳定在规定的温度)和试验后被测光纤的衰减变化。

## 六、核辐照

### 1. 测量原理

为确保敷入有背景辐射和有害核辐射环境中的光纤能够安全可靠地工作, 有必要研究测量暴露在  $\gamma$  辐射环境中的成缆或未成缆单模光纤或多模光纤中产生的辐照感应衰减的增加。这主要是由于光纤玻璃缺陷部位俘获了辐射分解的电子和空穴造成的(即形成了色心)。

光纤核辐照测量原理是采用衰减测量中的截断法来确定光纤在环境背景下的辐照感应衰减。通过监测试样光纤暴露在  $\gamma$  辐照前后及期间的功率来实现光纤在有害核辐照环境下的辐照感应衰减。

由于光或热作用导致的色心减少产生了恢复效应(减小了辐照感应衰减)。恢复效应可在  $10^4 \sim 10^2$  时间范围内发生, 这使得辐照引起的衰减变化特征变得很复杂。因为衰减与许多变量有关, 如: 试验环境温度、试样结构、施加于试样的辐射总剂量和剂量率以及测量衰减所使用的光平。

### 2. 试验装置

两种辐照环境下的光纤核辐照试验装置, 如图 7.2 和 7.3 所示。两种试验装置主要由辐照源、光源、光滤波器/单色仪、光探测器、光功率计和辐射剂量计等组成。

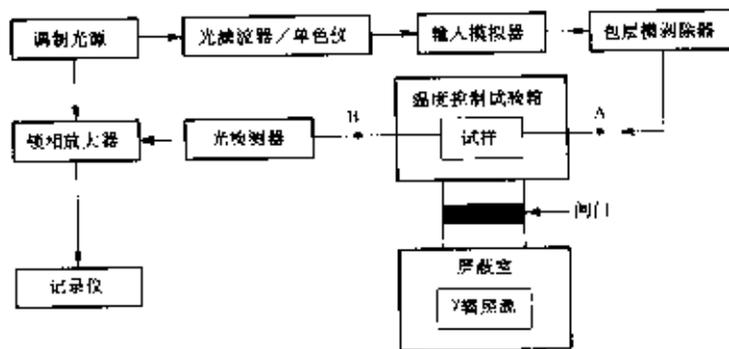


图 7.2 环境背景辐照试验装置

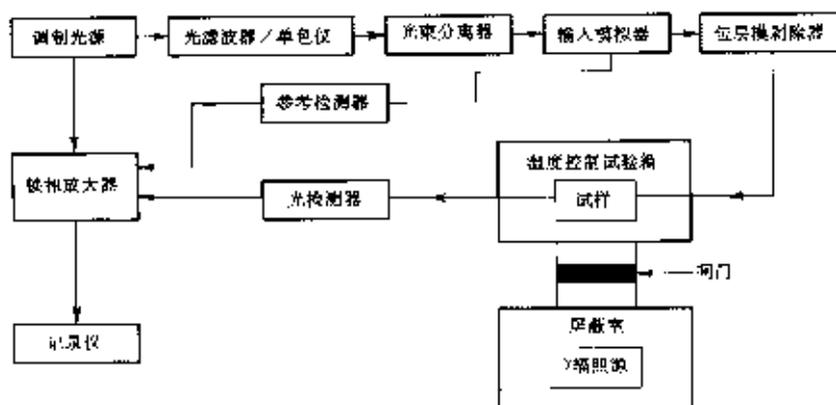


图 7.3 有害核环境辐照试验装置

(1) 辐照源

① 环境背景辐照试验

应采用一个 Co (钴) 或等效的电离源以不大于 0.2Gy/h 的低剂量率产生  $\gamma$  辐射。

② 有害核环境辐照试验

应采用一个 Co (钴) 或等效的电离源以 0.05Gy/s 至 2.5Gy/s 范围内所需的剂量产生辐射。

(2) 光源

应采用诸如卤钨灯、一组激光器或 LED 等光源来产生 850nm、1300nm(1310nm)、1550nm 工作波长。在完成测量的时间内，光源强度应保持稳定。从光源耦合到试验光纤中的功率应不大于 -30dBm (1.0 $\mu$ W)。光源应用占空比为 50% 的脉冲信号进行调制。

(3) 光滤波器/单色仪

应用一组滤光器材或一单色仪获得波长为  $850 \pm 20\text{nm}$ 、 $1300(1310) \pm 20\text{nm}$  和  $1550 \pm 20\text{nm}$  的光。滤光器 3dB 光谱宽度大于 25nm。

(4) 包层模剥除器

必要时,应在试样光纤输入端和输出端采用包层模剥除器以剥除包层模。如果光纤涂覆材料设计成可去除包层模(涂覆材料折射率略高于玻璃包层折射率),则不要求包层模剥除器。

#### (5) 光纤固定和定位装置

试样光纤应固定在能和真空吸盘能稳定支撑试样输入端的装置上,以便试样端可与输入光进行重复定位。

#### (6) 输入端注入模拟器

##### ① 多模光纤(折射率渐变型)

应用一稳态模滤波器去掉高阶传输模,在光纤输入端建立稳态条件。

##### ② 单模光纤

一光学透镜系统或尾纤可用于激励被试光纤。耦合进试样光纤中的光功率在试验期间应保持稳定。如果采用一光学透镜系统,一种使光纤定位较不敏感的方法就是对光纤输入端进行空间和角度的满注入;如果采用尾纤,可能有必要采用折射率匹配材料来消除干涉效应。应采用高阶模滤波器来滤除高阶模。

#### (7) 光探测器

应采用在接收光强范围内线性并稳定的光探测器。典型系统可包括采用电流输入前置放大器进行放大的光生伏打型光电二极管,由锁相放大器进行同步检测。

#### (8) 光功率计

应采用合适的光功率计测定从光源耦合进试样的光功率,确保它不大于  $1.0\mu\text{W}$  或按产品规范规定的值。

#### (9) 辐射剂量计

应采用热致发光 LiF 或 CaF 晶体检测器(TLD)测定试样光纤接收到的辐射剂量。

#### (10) 温度受控试验箱

温度受控试验箱应能将规定温度保持在  $\pm 2^\circ\text{C}$  以内。

#### (11) 试验线轴

试验线轴对本试验所采用的辐射不应起屏蔽或吸收作用。

### 3. 试验程序

试样置入试验箱以前,应对辐照源剂量均匀性和强度进行校准。将四个 TLD 置于辐照区,使它们的中心放在试样所在线轴或线盘轴线上。采用四个 TLD 以便于获得具有代表性的平均值。应采用等于或略大于实际试验剂量的校准系统。为保证实际试验剂量测量的最大可能的准确度,TLD 只限于使用一次。

被测光纤端面应光滑、清洁并与光纤轴垂直。

#### (1) 环境背景辐照试验

测量试样暴露在  $\gamma$  辐照源前后衰减变化的测量步骤如下:

- ① 将光纤或光缆试样(绕成圈或绕在线轴或线盘上)置于图 7.2 所示的试验箱中;

- ② 将光纤输入端和输出端放在定位装置上，并分别与光源和探测器对准；
- ③ 试验前，应对试样在  $25 \pm 5^\circ\text{C}$  的温箱中预处理 1h，或在该温度下按产品规范规定的时间预处理；
- ④ 按截断法，测量试样在规定波长下的衰减值，并记录暴露于  $\gamma$  辐射源之前光纤的衰减值  $A_i$ ；
- ⑤ 采用经校准的功率计测量试样输入端（图 7.2 中 A 点）的功率。需要时，应调节光源功率使得 A 点功率小于  $1.0\mu\text{W}$  或按产品规范中的规定；
- ⑥ 按要求制备试样端面，并将试样端对在试验装置上；
- ⑦ 在辐射源关闭的情况下，应对试样的输入端进行定位，以便在探测器上获得最大光功率。一旦调好之后，在  $\gamma$  辐照试验期间不应改变输入端光注入条件；
- ⑧ 辐照前，应在规定的试验温度下对所有试验波长测量输出功率；
- ⑨ 将某种曲线记录仪或合适的测量装置连接到检测系统进行连续功率测量，应调整测量设备。使检测信号不超过设备的极限；
- ⑩ 通过使试样经受不大于  $0.2\text{Gy/h}$  的剂量率来测量由于暴露于  $\gamma$  辐照而产生的环境背景辐射效应。试样应经受至少为  $1\text{Gy}$  的最小总剂量；
- (11) 在  $\gamma$  辐照周期内应记录试样输出功率；
- (12) 在完成辐照过程的 2h 之内，应按截断法进行试样的衰减测量，应记录暴露于  $\gamma$  辐射源之后试样的衰减值  $A_i$ ；
- (13) 对要求的试验温度和波长，重复步骤①~(12)。对每一个要求的温度，必须采用新的未经辐照的试样。

## (2) 有害环境试验

在暴露于  $\gamma$  辐射源前后及期间，测量试样中传输功率的程序如下所述；

- ① 按要求制备短段试样 (1 ~ 2m) 端面；
- ② 将短段试样输入端置于定位装置上并与试验装置对准（见图 7.3），使得用经校准的功率计测量时获得最大光功率。需要时，应采用中性密度滤波器调节光源功率，以在短段试样输出端获得不大于  $1.0\mu\text{W}$  或按产品规范规定的光功率；
- ③ 将试样轴放于试验装置中，如图 7.3 所示；
- ④ 应将试样输入端置于定位装置上并进行对准，应对输出端进行定位以使从试样出射的全部光入射到探测器光敏面上；
- ⑤ 试验前，应对试样在  $25 \pm 5^\circ\text{C}$  温度箱内预处理 1h；
- ⑥ 辐射源关闭后，应对试样输入端进行定位，以在探测器上获得最大光功率。一旦调好后，在  $\gamma$  辐照期间，不应改变输入端注入条件；
- ⑦ 辐照前，应在规定的试验温度下，在所有的试验波长测量输出功率。这时还应测量参考探测器功率；
- ⑧ 应将某种曲线记录仪或合适的连续测量装置连接到检测系统，以便进行

连续功率测量。应调整测量设备以使检测信号不超过设备极限；

⑨ 通过使试样至少经受表 7.2 规定的剂量率和总剂量大小组合之一来测定由于暴露于  $\gamma$  辐照而产生的有害效应。

表 7.2 总剂量/剂量率组合

总剂量 Gy (Sievert)	剂量率 Gy/s
30	0.05
100	0.5
1000	2
10000	2

因为辐射源特性变化，剂量率大小仅是近似值。辐射源之间剂量率的变化预计高达  $\pm 50\%$ ，打开或关闭辐射源所需的时间应不大于总暴露时间的  $10\%$ ；

(10) 在  $\gamma$  辐照周期内记录试样输出功率，在完成辐照过程后至少还要记录功率  $15\text{min}$  或按产品规范规定。在完成辐照过程之后的恢复期内，还应记录参考检测功率大小；

(11) 对要求的试验温度和波长，重复步骤②~(10)。对每一个要求的温度，必须采用新的未经辐照的试样。

(3) 计算

① 光衰减变化  $\Delta A$  (环境背景辐照试验)

$$\Delta A = A_2 - A_1 \quad (7.7)$$

式中： $A_1$ —暴露于  $\gamma$  辐照之前试样的衰减 (dB)；

$A_2$ —暴露于  $\gamma$  辐照之后试样的衰减 (dB)。

② 每一波长下光透射率变化  $A$  (有害环境试验)

$$A_0 = -10 \lg(P_0/P_B) \quad (7.8)$$

$$A_{15} = -10 \lg(P_{15}/P_B) \quad (7.9)$$

式中： $P_0$ —停止辐照  $I_s$  内试样的功率输出 (除非另有规定) (mW)；

$P_{15}$ —停止辐照  $15\text{min}$  内试样的功率输出 (除非另有规定) ( $\mu\text{W}$ )；

$P_B$ —辐照开始前试样的功率输出 ( $\mu\text{W}$ )；

$A_0$ —紧接辐照之后试样的光透射率变化 (光衰减) (dB)；

$A_{15}$ —辐照后  $15\text{min}$  内试样的光透射率变化 (光衰减) (dB)。

③ 考虑到系统的不稳定性，采用参考测量时，参考探测器的测量结果为：

$$A_{\text{REF}} = -10 \lg(P_E/P_{\text{BN}}) \quad (7.10)$$

式中： $P_E$ —测量结束时由参考探测器测得的功率 ( $\mu\text{W}$ )；

$P_{\text{BN}}$ —辐照开始前由参考探测器测得的功率 ( $\mu\text{W}$ )。

④ 考虑系统不稳定，修正后的试验结果为：

$$A_{0\text{NOR}}=A_0-A_{\text{REF}} \quad (7.11)$$

$$A_{15\text{NOR}}=A_{15}-A_{\text{REF}} \quad (7.12)$$

## 第八章 光纤机械性能测试

### 第一节 光缆机械性能测试的目的

光缆机械性能试验是指检验光缆产品所具有的抗外部机械力作用能力的试验。光缆在制造、运输、施工和使用过程中都会受到各种外机械力作用。光缆在外机械力作用下。光缆中光纤很可能会受到外机械力作用，其传输性能可能发生变化，使用寿命有可能缩短，甚至出现断纤现象。光缆的机械性能技术指标是光缆产品质量的重要技术指标。光缆机械性能检测设备是检验光缆产品机械性能的设备。

光缆在制造、运输、施工和使用中通常受到综合型的外机械力作用，不同情况下光缆承受的外作用力不但大小不同，而且类型也不同。综合各种受力状态，可分解为：拉伸、压扁、冲击、反复弯曲、扭转、曲绕、卷绕和振动等八种典型的受力状态。

光缆机械性能试验是检验光缆产品机械性能是否达到企业标准或者订货合同技术指标要求的检测试验，即判断被检测光缆产品是否合格的试验，光缆厂要定期按本厂企业标准对所生产的各种型号光缆做这种常规试验，以便及时判断所生产的光缆产品质量及质量控制是否存在问题。

### 第二节 性能测试

本章介绍的各种光缆机械性能测试方法，应根据光缆类型由用户与厂家共同商定。不同的光缆类型应选择不同的试验项目，并非所有的光缆类型都要做所有的项目。合格判据和试样数量等应符合相关的国家标准、行业标准和产品进网规定。

#### 一、拉伸

##### 1. 目的

拉伸的测试方法适用于在规定的拉力下试验光缆，以验证在敷设的光缆中光纤的衰减和光纤伸长应变性能与负载之间的关系。这个方法的初衷是非破坏性的

(即施加的拉伸力应在光缆的弹性范围内)。

两种测试方法为：

方法 1：测量衰减变化的方法。

方法 2：确定光纤伸长应变的方法。

方法 2 可以提供现场敷设光缆最大允许拉力和光缆应变安全系数。两个方法既可单独使用，也可以组合使用，应按详细规范要求或按用户和厂方协商意见进行。

## 2. 试样

试样应在整盘光缆上进行。在受试光缆的两端做好光纤端面处理。

## 3. 试验装置

试验装置组成的示例，如图 8.1 和图 8.2 所示。

(1) 方法 1：用一台衰减测量仪来测量衰减变化

(2) 方法 2：用一台光纤伸长应变测量仪（详见光纤伸长测量方法）测量其拉伸应变。抗拉强度测量装置能够调节受试光缆的最小长度。所用的转向滑轮，如图 8.2 所示。

负载传感器的最大负载范围的最大误差为 3%。仔细地按规定方法调节夹持装置来夹持光缆使之不影响试验结果。如需要，应提供机械和电气方法来测量光缆伸长。

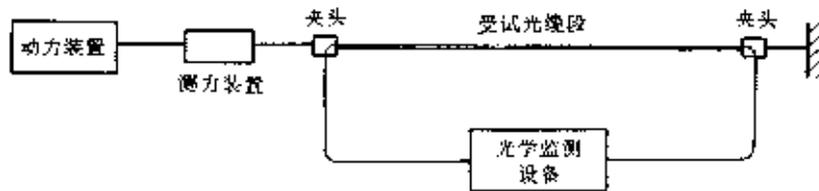


图 8.1 拉伸性能测量原理

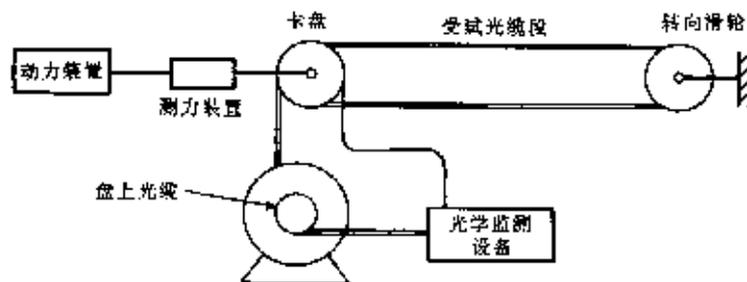


图 8.2 用转向滑轮和卡盘的拉伸试验装置示例

## 4. 试验程序

试验应在标准大气条件下进行。安装光缆至拉伸设备并保证其固定安全。在

拉伸设备和两端所用的固定光缆的方法是均匀地固定受试光缆，限定住光缆中的所有元件的移动。对多层光缆结构（例如，层绞式光缆），实际上是夹持住光缆各元件（除光纤外），足以获得衰减变化和/或光缆的最大允许拉伸负载和应变极限。然而，对某些光缆结构（如中心管式）需要通过防止光纤滑动措施才能获得正确的应变极限值。

将拉伸试验中光缆的光纤连接到测量仪。对方法 2（光纤伸长测量方法—差分脉冲时延），在试样拉伸中要小心不要让标准光纤长度发生变化。

按有关规范要求连续增大拉伸负载至规定值。记录衰减变化和/或光纤应变与光缆负载或伸长的函数关系。对大芯数光缆，可以采用一台多路衰减和（或）多路光纤应变测量仪。通常，试验循环次数为一次。

试样的衰减和/或光纤应变不超过相关规范的要求值。对方法 2 如果有详细的规范要求，应该计算出光纤伸长率与负载，包括去除拉伸负荷后的残留伸长。光缆伸长率  $\varepsilon_c$  和光纤伸长率  $\varepsilon_f$ ，如图 8.3 所示。

如果需要，应在光纤应变与拉伸负荷曲线上定义出光纤开始发生应变处的负荷，即曲线的线性部分与负荷横坐标轴的相交点。试验报告中应包括下列内容：光缆长度和受试长度、光纤端面制备状况、负荷传感器、注入条件、衰减测量仪用的光纤应变测量装置、在特定波长的衰减或光纤应变变化与负荷的函数关系及拉伸速率等。

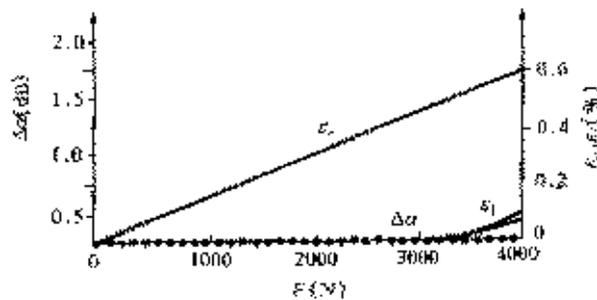


图 8.3 光纤伸长和光缆伸长与拉伸负荷的函数关系

## 二、光缆护套耐磨损

### 1. 目的

光缆耐磨损包括两个涵义：护套的耐磨损和光缆标志的耐磨损。本书光缆耐磨损试验的目的是确定光缆护套耐磨损。

### 2. 试样

试样长度按规定要求，典型的试样长度为 750mm。

### 3. 试验装置

耐磨损试验装置是由一个设计成沿平行光缆纵轴从两个方向以每分钟  $55 \pm 5$  个循环的频率磨擦光缆外表面的长度为  $10 \pm 1\text{mm}$  的设备组成。一个磨擦沿两个

方向各移动一次构成一个磨损循环。磨擦刃口应是直径为按详细规范规定的一个钢针。一个典型的磨损试验装置，如图 8.4 所示。

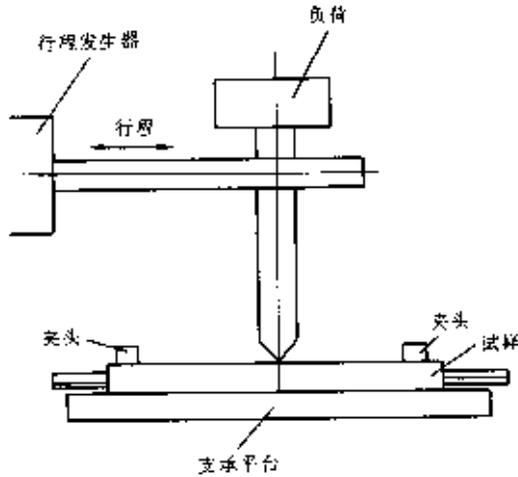


图 8.4 磨损试验装置

#### 4. 试验程序

试验应在标准大气条件下进行。用光缆夹头将测量长度大约为 750mm 的光缆试样牢牢地固定在支撑平台上。按有关规范要求给磨擦刃口提供所需的负荷力，而且要避免冲击光缆。对每个试样进行四次试验，每次试验后试样向前移动 100mm，同时按同一方向旋转 90°。

按有关规范要求的循环数试验后，光缆护套应无磨穿现象出现，而且要保持光缆中光纤的光学连续性。

### 三、压扁

#### 1. 目的

压扁试验的目的是验证光缆的耐压能力。

#### 2. 试样

光缆试样长度要保证完成试验规定的要求。

#### 3. 试验装置

试验装置应能使在平钢板和可移动钢板之间的光缆试样的受试长度为 100mm 的部分受到均匀的压力。可移动钢板的边缘应倒圆，倒圆的半径大约为 5mm。在钢板的平面部分不包括边缘。典型的试验装置如图 8.5 所示。

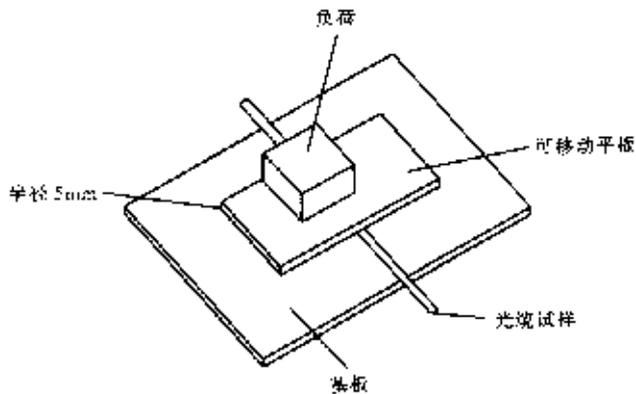


图 8.5 压扁试验装置

#### 4. 试验程序

将光缆试样置于两平钢板间，防止其侧向移动。逐渐施加压力，以求不产生突然变化。如采用逐步增量方式施加压力，则增量比不超过 1.5:1。

在不转动光缆试样的情况下，压力应施加在试样的三个不同的位置，它们的位置间隔应大于 500mm。

如有规范要求进行工作条件试验，可在垂直于试样方向插入一根或多根钢棒（直径为 25mm）进行附加或替代试验。试验应在标准大气压下进行，试验时应在有关规范中规定最大压扁力、允许的短暂压扁力和长期压扁力。通常，试验施加负荷的持续时间至少为 1min。如有要求应在加载下测量试样的附加衰减，卸载 5min 后，测量试样衰减变化。

试验合格判断依据应详细规定。典型的破坏形式包括：光缆中光纤丧失光学连续性，光传输性能恶化或光缆遭受到物理损伤。

图 8.6 所示为典型的压扁试验中测量的压扁力与附加衰减的变化曲线。

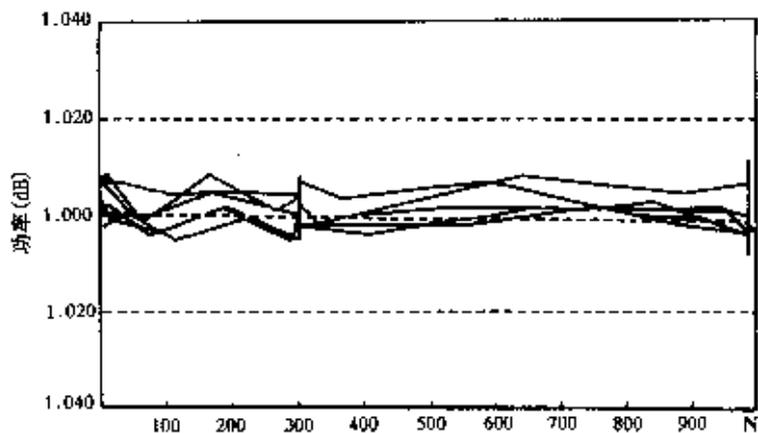


图 8.6 压扁力与附加衰减的变化曲线

#### 四、冲击

##### 1. 目的

冲击试验的目的是验证光缆耐冲击能力。

##### 2. 试样

光缆试样长度要保证完成试验规定的要求，当只对光缆试样物理损坏进行判定时，试样长度为 1m（如小直径的软跳线光缆或双芯光缆）至 5m（大直径光缆）。如要进行光缆光学性能测量时则要求的光缆试样长度较长。

光缆试样和每端连接一个连接器或者采用一种典型的方法，将光纤、护套和加强件夹持在一起，如冲击装置上的夹具合适，试样就不受上述限制。

##### 3. 试验装置

试验装置将使冲击作用到固定在一个钢基座平台上的光缆试样上。对只需一次或几次冲击的试验，所选用的合适试验装置，如图 8.7 所示。

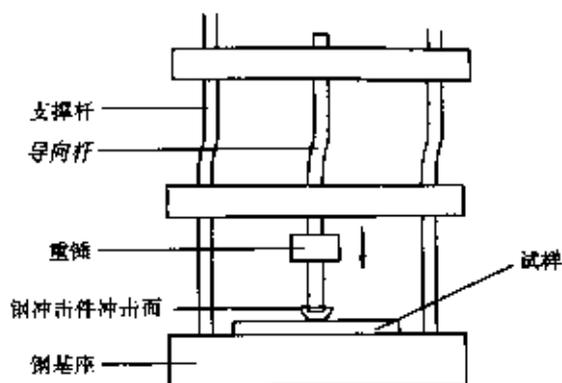


图 8.7 几次冲击试验装置

冲击试验装置将重物以垂直落体方式使冲击力传递到受试光缆试样的一个中间钢件上。当需要进行重复冲击（即冲击数大于 5 次）试验时，选用的是更为实用的冲击试验装置，如图 8.8 所示。通过落锤可实现重复冲击。通常，冲击速率约为 2 秒一个循环。

与试样接触的冲击表面应为圆形。它即可是半球形（图 8.9A）又可是圆柱形（图 8.9B）。冲击件表面半径  $R$  应为 300mm。试验装置应包括光学性能测试设备，按规范要求对试样进行衰减变化的测量。

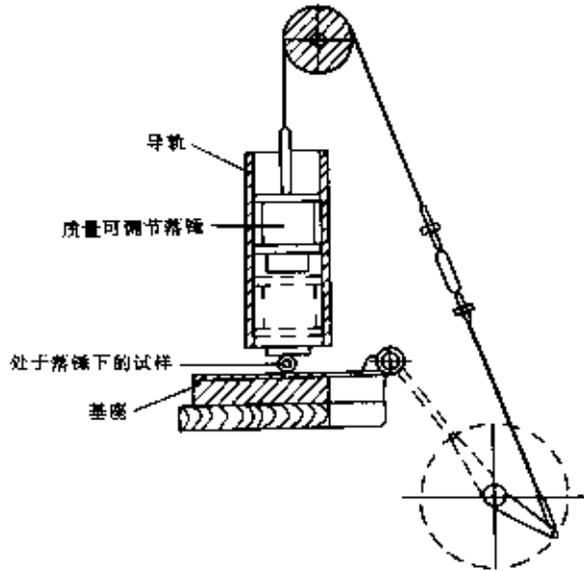


图 8.8 重复冲击试验装置

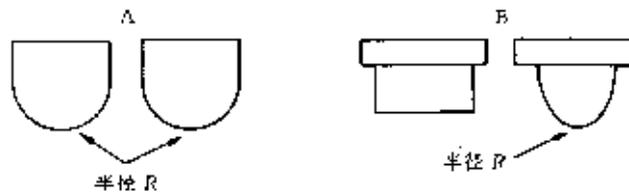


图 8.9 冲击件表面形状

#### 4. 试验程序

试验是在标准大气压条件下进行。如需要，光缆试样应在标准大气压条件下预处理 24h。冲击试验规范中应规定冲击次数、冲击速率和在试样上的冲击位置。

试验合格判据应按有关规范内容进行。典型的试样失效形式包括：光缆中光纤丧失光学连续性、光传输性能降低或光缆物理损伤、图 8.10 给出一个典型的冲击试验引起光纤附加衰减的曲线。

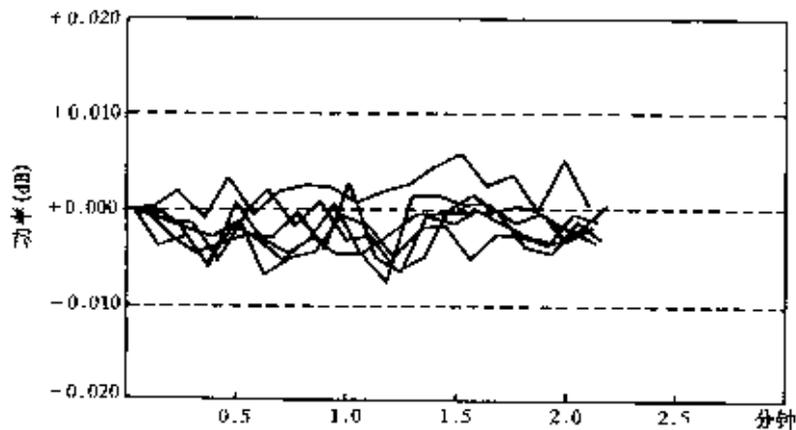


图 8.10 冲击试验的光纤附加衰减

## 五、反复弯曲

### 1. 目的

反复弯曲试验的目的是验证光缆经受反复弯曲的能力。

### 2. 试样

试样长度应满足试验规定的要求。当只鉴别光缆试样物理损伤时，试样长度为 1m（例如，小直径的软跳线光缆或双芯光缆）至 5m（如大直径光缆）。如要进行光学性能测量时，所需要的试样长度会更长。

光缆试样的每端应与连接器连接，或以一种典型的方法将光纤、护套和加强件夹持在一起。如果弯曲装置上的夹具合适，试样长度不受上述条件限制。

### 3. 试验装置

试验装置允许试样左右往复弯曲角度达  $180^\circ$ 。试样的两个极根位置为试样的两个垂直边弯成  $90^\circ$ 。与此同时，试样受到一个拉伸负荷。光缆反复弯曲试验装置，如图 8.11 所示。对带有连接器的光缆反复弯曲试验装置，如图 8.12 所示。

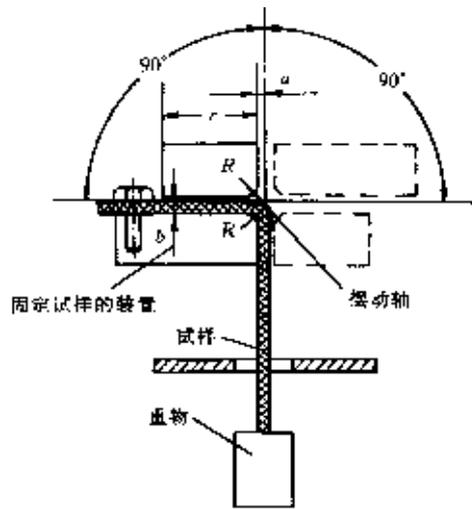


图 8.11 光缆反复弯曲试验装置

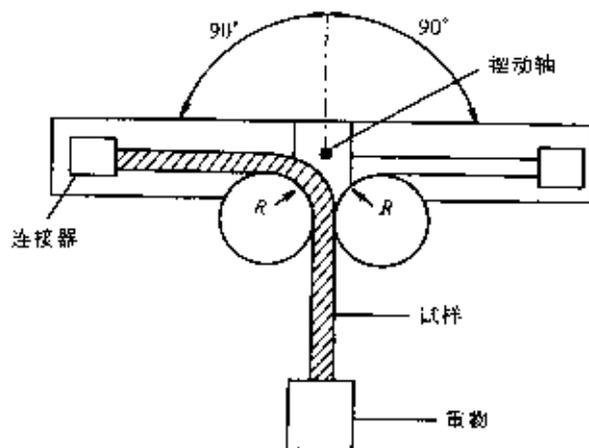


图 8.12 带连接器的光缆反复弯曲试验装置

试验装置应具有一可调节的夹具或固定件来牢牢地夹住光缆试样，以求试验中不压住光纤或引起光衰减。对带有连接器的光缆，可用连接器将试样光缆固定到弯曲臂上。

试验装置应具有循环能力，将试样由垂直位置移至右端极限位置。然后摆动弯曲到左端极限位置，再返回到原始的垂直位置构成一个循环。通常，弯曲速率为 2 秒一个循环。如有必要，试验装置应包括光传输性能测试设备来测量受试光缆中光纤的光衰减变化。

#### 4. 试验程序

试验应在标准大气压条件下进行，试验程序分为六个步骤实施。

- (1) 将光缆试样在标准大气压下预处理 24h;
- (2) 将试样固定在试验装置上，方法如图 8.11 和图 8.12 所示;
- (3) 按规范要求对试样施加重物;
- (4) 建立测量合格判据的基准值;
- (5) 按规范规定的循环次数进行反复弯曲;
- (6) 进行合格判据参数测量，如需要，将试样从试验装置上取下进行外观检查。

试验合格判据应在规范要求内，典型的试验失效形式包括：受试光缆中光纤丧失光学连接性、光传输性能下降或光缆受到物理损伤。

## 六、扭转

### 1. 目的

扭转试验旨在确定光缆抗机械扭转的能力。本试验的目的一是当光缆护套受到扭转外力作用时，测量光纤的光功率变化；二是判定当扭转外力作用时，光缆发生物理损伤的可能性。

### 2. 试样

光缆试样的总长度应确保其夹持和扭转要求，且能满足按规范要求传输性能测量的长度。

### 3. 试验装置

扭转试验装置主要由两个光缆夹头组成。一个固定夹头和一个转动夹头作为夹持用。两个夹头之间的距离是可调的。转动夹头与合适的转动装置（如一扭转柄）相连接。所用的夹头支架、夹具或扭转装置应允许与光缆试样两端相连接，以便进行必要的传输性能试验。一些典型的光缆扭转试验装置，如图 8.13、图 8.14、图 8.15 所示。

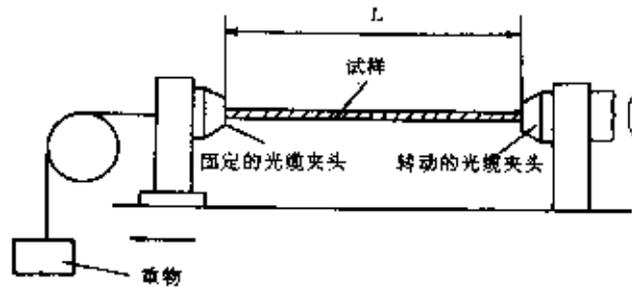


图 8.13 光缆扭转试验装置

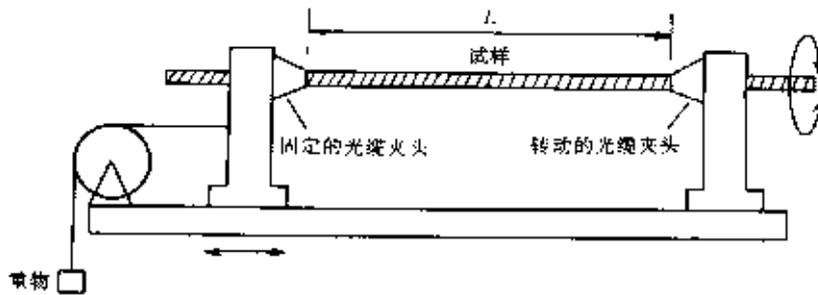


图 8.14 施加拉伸力的光缆扭转试验装置

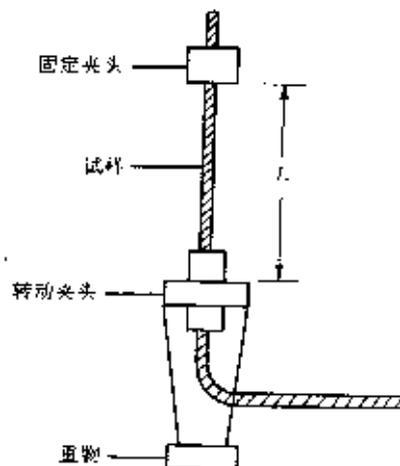


图 8.15 施加拉伸的替代光缆扭转试验装置

光缆夹头应具有下列功能：

- (1) 夹头应紧紧夹住光缆周围，以防止光缆在夹头中移动。
- (2) 夹头牢固地夹持光缆呈直线。
- (3) 夹头既不会由夹头内缘对光缆产生局部扭转损伤，又不会在光缆上造成压力局部集中。
- (4) 夹持过程中不会使试样中产生任何明显或精确到可测的衰减增加。

如果规范要求试样由弯曲变直，在夹头处加上重物或合适的负载装置使光缆受到拉伸负荷，详见图 8.14 和图 8.15 所示。

正如具体规范要求，试验装置包括光传输性能测量设备来测量整个测试过程中光缆中光纤的光传输性能变化。

#### 4. 试验程序

夹在试验装置中的试样受试长度应满足具体规范要求。小心确保试样不受到初始应力，除非需要进行扭转操作外，在整个试验中注意不要移动或扰动两端。尽最大可能减小试样垂度（图 8.13 和图 8.14）或与直线的垂直偏差（图 8.15）。如果具体规范要求测量光传输性能变化，所测的试样应不受力，比较夹持后的测量结果，以保证夹持不会明显地降低光缆光传输性能。

除非另有要求，通过支撑试验长度或对处在两夹头之间光缆试样施加拉力使试样垂度和弯曲得更小。如需要，按具体规范的要求施加拉力使试样呈直线状。施加拉力的数值，如表 8.1 所列。

表 8.1 施加的拉力

标称光缆直径范围	mm	最小负载	N
≤ 2.5		15	
2.6 ~ 4.0		25	
4.1 ~ 6.0		40	
6.1 ~ 9.0		45	
9.1 ~ 13.0		50	
13.1 ~ 18.0		55	
18.1 ~ 24.0		65	
24.1 ~ 30.0		70	
≥ 30.1		75	

如具体试验规范要求测定光传输性能变化，应在光缆试样夹好且施加拉力负载后测量试样光缆中光纤的光输出功率。

旋转活动夹头的方法如下：顺时针旋转 180° 返回起始位置，反时针旋转

180° 返回起始位置。四个旋转运动构成一个循环。除非另有规定，每个循环应在 1min 内完成，总的循环数为 10。

在最后一个（即第十个）循环过程中，为确定光缆中传输光纤数要使试样光缆顺时针旋转 180°，反时针旋转 180° 在最后一个循环完成后，光缆不转动。

完成合格判据参数测量。让试样至少静止 5min。如果需要，将试样从试验装置上取下进行目视检查。

被测试样的合格判据应在具体的规范中予以阐述。典型的损伤形式为：丧失光学连续性、光纤损耗增加和光缆护套组件损坏。

## 七、曲挠

### 1. 目的

曲挠试验的目的是确定光缆在服役（如电梯光缆）中耐反复曲挠的能力。

### 2. 试样

试样应终接在一连接器的两端或以一种典型的方式将光纤、护套和加强件夹持在一起。试样长度应满足完成试验的规定要求。

### 3. 试验装置

曲挠试验所用的试验装置，如图 8.16 所示。装置中的各滑轮，对圆形光缆，滑轮凹槽为半圆形；对扁平形光缆，滑轮凹槽为扁平形。固定限位夹头，通过拖架往复移动由拖架上的重物来始终对试样施加拉伸。

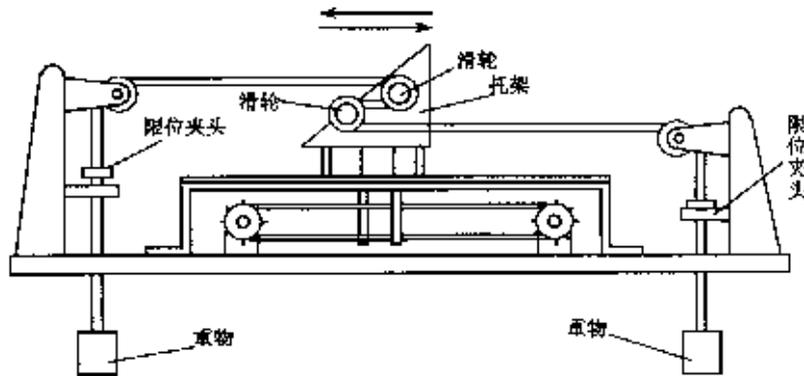


图 8.16 曲挠试验装置

### 4. 试验程序

试验后在标准大气压条件下进行。试样应通过滑轮拉紧。试样每端都加载重物。重物的质量和滑轮的直径应在规范中规定。应具体规定要求的循环次数，对光缆试样进行曲挠。一个循环的定义为：拖架离开起始位置移动到往复运动一端，再反向移动到往复运动的另一端回到起始位置。

在有关规定中应对试验的合格判据提出要求。典型损坏形式包括：丧失光学连续性、光传输性能降低或光缆物理损伤。

试验规范中应规定出：滑轮的直径、重物质量和循环次数。

## 八、弯折

### 1. 目的

弯折试验的目的是确定光缆由弯折成一个圈开始缩小至最小圈的直径。

### 2. 试样

试样光缆长度应满足试验规定的要求。

### 3. 试验装置

试验如图 8.17 所示。即无需具体的试验装置。

### 4. 试验程序

按图 8.17 所示(1)。双手将试样光缆弯成一个圈，按图 8.17 所示(2)慢慢拉光缆试样两端使弯折圈直径开始缩小。位于弯折圈底部的力应作用在同一平面上。

试验应在标准大气条件下进行。图 8.17 所示(3)为弯折出现。

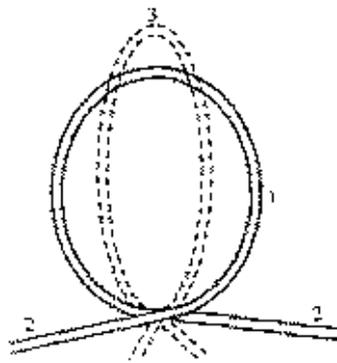


图 8.17 弯折试验

## 九、弯曲

### 1. 目的

弯曲试验的目的是确定光缆或光缆元件耐围绕试验圆柱心轴弯曲的能力。

### 2. 试样

试样的两端应进行端接，典型的方法是将光纤、护套和加强件夹在一起。

### 3. 试验装置

一个圆柱心轴装置能使试样围绕圆柱心轴切向密密地缠绕成螺旋状。

### 4. 试验程序

可从下述的两个试验程序中任选一个进行试验。每个试验程序的具体规范分述如下：

#### (1) 试验程序 1

试样应以均匀速率围绕圆柱心轴切向密密地缠绕成螺旋状。施加足够的张力

来确保试样紧紧缠绕到圆柱心轴外表面，然后退绕。一次缠绕和一次退绕就组成一个循环。

试验圆柱心轴直径、每个试验的螺旋圈数和循环次数在具体规范中列出。

#### (2) 试验程序 2

试样应绕试验圆心轴弯曲  $180^\circ$ 。弯曲时试样应保持在拉紧状态。一个弯曲循环是由一个 U 形弯曲紧接着一个反向 U 形弯曲。再返回到半径状组成。试验圆心轴直径和循环次数应在具体规范中列出。

试验合格判据应在具体规范中列出。典型的损坏形式包括：丧失光学连续性、光传输性能下降或光缆物理损坏。

### 十、耐切入

#### 1. 目的

耐切入试验方法的目的是确定光缆（如航空光缆）护套耐切入性能。

#### 2. 试样

试样长度应满足试验规定要求。

#### 3. 试验装置

所设计的试验装置应能以规定的速率对试样施加要求的切入力。适用的典型试验装置，如图 8.18 所示。应详细规范针棒的半径。

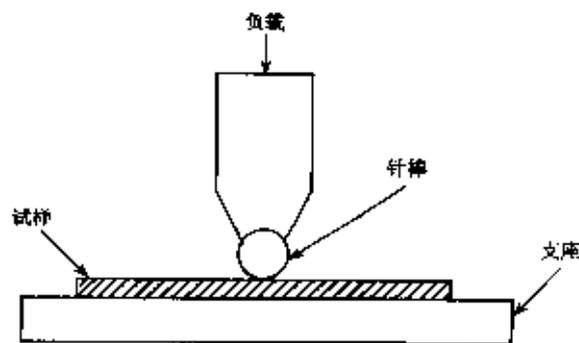


图 8.18 切入试验装置

#### 4. 试验程序

试验时，以  $50 \pm 10\text{N/min}$  的速率逐渐地将切入力施加到试样上，所施切入力直至规范要求值。切入力持续作用时间应达到试验要求的时间。

试验结束后，用 5 倍和 10 倍放大镜目力观察试样是否遭受任何损伤。判断受试光缆合格与否的条件为：试样光缆护层上观察不到贯穿，而且试样光缆保持着光学连续性。

### 十一、枪击损伤

#### 1. 目的

枪击损伤试验的目的是确定架空光缆耐猎枪枪击的损伤能力。

## 2. 试样

所用的光缆试样的典型长度为 3m。

## 3. 试验装置

枪击损伤试验的试验装置由枪和光缆试样组成。有关枪击损伤试验的试验条件为：

(1) 按规定要求规定枪型，枪型各国差别很大；

(2) 夹持光缆试样的支架应能使试样自由摆动。试验装置也应考虑与所用的枪有关的枪弹以椭圆形式散射击中试样；

(3) 子弹尺寸差别很大。它应该代表着实际安装光缆遭受枪击危险的情况。应具体规定子弹头类型。常用的弹头为铅或钢，与国别和厂家有关。铅弹头易冲击变形，其破坏性小于钢弹头。应对弹壳提出具体的规范要求。

## 4. 试验程序

将光缆试样安装在支架上，按规范要求的距离射击，典型的射击距离为 20m。可见弹着点数少，典型的为 3 个或更少。如光缆上弹着点数超过 3 个，应重新进行枪击试验。经过枪击试验后的光缆试样中的光纤仍应保持光学连续性。

## 十二、刚性

### 1. 目的

刚性试验的目的是测量光缆的刚性。通常可按光缆的类型从三个试验方法中任选一个进行光缆的刚性试验。

刚性是评价采用常用的拉放技术敷设（例如，管道、导管或地毯下）和吹气技术敷设时的光缆刚性，刚性也用于确保跳线光缆和室内光缆经受严重弯曲仍能进行敷设和正常使用的性能。在此应指出的是，由下述的三个试验方法测得的光缆刚性值与用其他试验方法确定的值并不相等。

### 2. 试样

光缆刚性试验按光缆类型不同可分为 A、B、C 三种方法，方法 A 和方法 B 适用于大直径光缆，方法 B 也适用于小直径光缆，包括：轻型铠装光缆和室内光缆。有关三种试验方法中涉及到的试样、试验装置、试验程序等内容，如下所述：

#### (1) 试验方法 A

##### ① 试样

试样长度应满足试验规定的要求。

##### ② 试验装置

三点弯曲试验装置，如图 8.19 所示。将光缆试样放置在允许试样光缆自由运行的两个支撑件上（例如用可旋转的棒作为支撑件）。试验装置应能对放在两个支撑件之间的试样施加作用力，并能测量受力后光缆试样发生的位移。

##### ③ 试验程序

按具体规范要求确定两个支撑件分开的距离。先将试样光缆放在两个支撑件上，再对试样施加作用力，最后测量光缆试样受力后发生的位移。

试样光缆长度超过两个支撑件距离，以此来保证光缆各组成件的任何内部的移动都不会影响测量结果。

作用力是通过固定到拉力试验机上的一个刀片或一个钩到光缆上的重物施加到光缆试样上的。

如果作用力为  $F(N)$  引起试样光缆产生的位移为  $Y(m)$ ，两个支撑件之间的距离为  $X(m)$ ，那么光缆的刚性  $B$  为：

$$B = \frac{X^3(m)F(N)}{48y(m)} \quad (N \cdot m) \quad (8.1)$$

由于有些光缆（如铠装光缆）受到力作用后会呈现出一个由弹性状态到非弹性状态的变化特点，如图 8.20 所示。所规定的刚性是弹性刚性为：

$$B = \frac{X^3(m)}{48} \tan \alpha \quad (N \cdot m) \quad (8.2)$$

式中： $\alpha$  为曲线线性部分与横座标之间的夹角。

光缆刚性应满足规范中规定的要求。

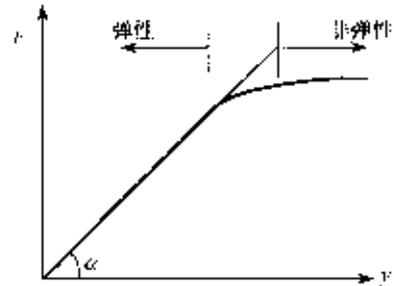
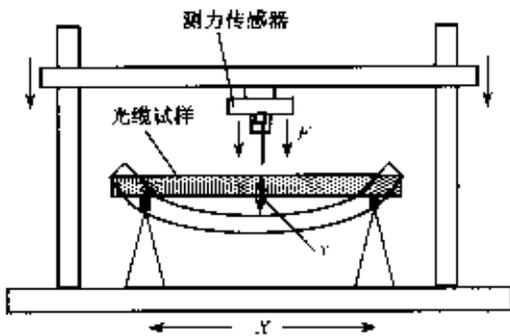


图 8.19 试验方法 A 的试验装置      图 8.20 力作用后引起光缆的位移变化的特点

## (2) 试验方法 B

### ① 试样

试样长度应满足试验规定的要求。

### ② 试验装置

悬臂试验装置，如图 8.21 所示。先将光缆试样牢牢地固定在一个夹具中，再借助试验装置对远离夹具的试样端施加一个作用力，最后测量受力后光缆发生的位移。在有些情况下（如小直径的跳线光缆），夹具设计成能够控制试样的弯曲半径。

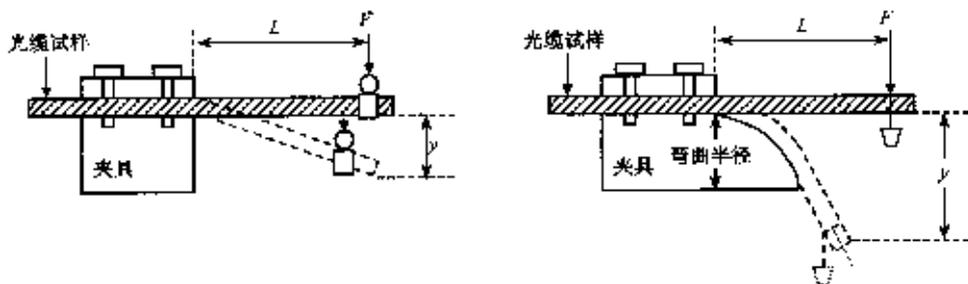


图 8.21 试验方法 B 的试验装置

### ③ 试验程序

先将光缆试样牢牢地固定在夹具中，再在离开夹具距离为  $L$  的试样处施加一作用力，最后测量受力后光缆发生的位移。

作用力是由拉力试验机或重物提供的。所选的试样长度应能保证光缆各组成件任何内部移动都不会影响测量结果。如一作用力  $F(N)$  引起光缆产生的位移为  $Y(m)$ ，试样光缆悬跨长度为  $L(m)$ ，那么光缆的刚性为：

$$B = \frac{L^3 F}{3y} \quad \text{或} \quad B = \frac{L^3}{3} \tan \alpha \quad (N \cdot m^2) \quad (8.11)$$

式中： $\alpha$  为弯曲角。

光缆刚性应满足详细的技术规范要求。

### (3) 试验方法 C

#### ① 试样

试样长度应满足试验规定的要求。

#### ② 试验装置

试验装置，如图 8.22 所示。试验装置应提供一种测定试样光缆 U 形弯曲时作用在试样上的力的方法。适宜的试验装置是一台配置有压力传感器和在规定的试验过程中具有维持给定的夹片间距的拉力试验机。

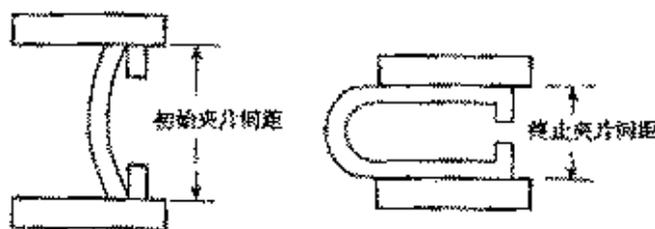


图 8.22 试验方法 C 的试验装置

### ③ 试验程序

试样以平直状态放入试验装置中。减小夹片间距到由  $S \cdot d$  给定的值。 $d$  为

光缆直径,  $S$  是具体规范要求的间距因子。在按具体规范要求的试验时间作用后, 记录作用在试样上的力。光缆的刚性为:

$$B = F \pi r^2 \quad (\text{N} \cdot \text{m}^2) \quad (8.4)$$

式中:  $F$ —测得的力 (N);

$r$ —最终的夹片间距的试样光纤的弯曲半径。

光缆刚性应满足详细的技术规范要求。

### 十三、拉力弯曲

#### 1. 目的

拉力弯曲试验是一个对光缆进行的动态试验, 其目的是通过对试样光缆施加特定的负荷来确定光缆耐绕滚轮的弯曲或敷设中的弯曲的能力。

#### 2. 试样

试样是从成品光缆一端抽出。按规范要求不要剪断。试样光缆两端应进行端接。端接的方法应便于对试样施加规定的负荷。试样光缆上应标出 A 点和 B 点, 标注方式, 分别如图 8.23 和图 8.24 所示。

#### 3. 试验装置

试验装置是由一台最大误差为  $\pm 3\%$  的拉力驱动装置组成。如特殊用户需要, 试验装置还应配置一台衰减测量仪来测定衰减变化和/或一台光纤拉伸应变测试仪。

拉力弯曲试验有两种试验方法: U 形弯曲试验和 S 形弯曲试验。U 形弯曲试验装置, 如图 8.23 所示。在相关的试验规范中应给出图中滚轮的半径  $r$ 。S 形弯曲试验装置, 如图 8.24 所示。在相关的试验规范中应给定两个滚轮的半径  $r$ , 两个滚轮的间距  $Y$  和弯曲角  $\phi$ 。

#### 4. 试验程序

试验应在室温下进行。按具体技术规范中规定的要求, 测量和记录施加规定负荷前和试验后负荷为零时的衰减变化。根据敷设方法和具体规范要求, 可从下述的两个试验程序中任选一个进行试验。

##### (1) U 形弯曲试验程序

光缆应绕一个圆筒形成一个最小的弯曲  $180^\circ$  (U 形弯曲), 如图 8.23 所示。或者是用户与制造厂家共同商定的其它值。拉力连续地增大到具体规范给出的要求值。光缆从 A 点移动到 B 点。再返回到 A 点, 具体规范中应规定出移动速度和循环次数。

##### (2) S 形弯曲试验程序

光缆绕两个圆筒形成一个 S 形 (S 形弯曲), 如图 8.24 所示。拉力连续地增大到具体规范的要求值。光缆从 A 点移动到 B 点, 再返回到 A 点, 具体规范中应规定移动速度和循环次数。

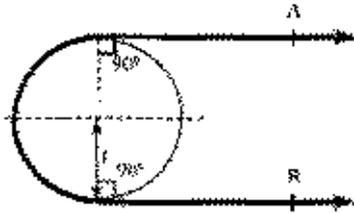


图 8.23 U形弯曲

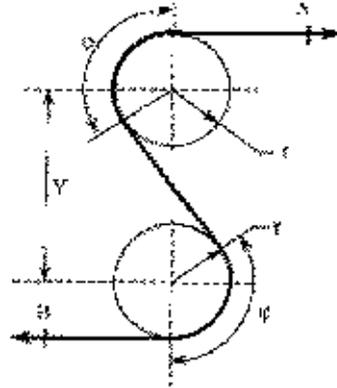


图 8.24 S形弯曲

经过拉力弯曲试验后，光缆护层和/或光缆组成元件无目力可见的损坏。拉力弯曲试验后，光缆中的光纤永久性衰减增大应不超过规范中的规定。

## 第九章 光缆的环境性能

### 第一节 环境性能测试的目的

光纤的光传输理论和物理特性与传统的金属导体有所不同，但光缆结构的基本要求与传统的金属通信电缆相同，即在光缆的生产、敷设和使用环境中保持光传输性能、环境性能、机械强度、电气性能的长期稳定。

由于通信光缆敷设到实际线路的路由上，它们会遇到各种不利的自然环境条件的作用或人为因素的影响，因此，人们应该在深入研究光缆的温度衰减、渗水、油膏滴流与蒸发、风积振动、过滑轮、舞动、耐电痕、阻燃性能的基础上，设计和制造出能够胜任任何可能面临的环境条件的光缆。换言之，实际使用的光缆应按其使用的环境要求分别具有良好的温度衰减性能、足够的机械强度、阻止水的渗透、耐电痕、阻燃等性能。总之，光缆结构的选择必须适应其使用的环境条件要求。

光缆环境性能测量的目的是模仿光缆实际使用条件，测量高低温度变化引起的光缆中光纤的附加损耗，光缆纵向、横向水渗透与否、阻水油膏高温下滴落和蒸发量、光缆受外力作用后光纤的衰减变化和光缆或光纤应变的大小，以及在感应电场和燃烧环境中光缆是否耐电痕、阻燃程度高低，以求使我们设计和制造出光缆完全适用于各种各样的通信网络，并在实际使用环境中可保证网络的长期安

全可靠。

## 第二节 性能与测试

### 一、温度循环

#### 1. 目的

温度循环试验方法是对光缆进行温度循环试验来确定光缆经受温度变化的衰减稳定特性。

光缆中光纤的衰减随温度的变化，通常是由于光缆加强件与各种护层之间热膨胀系数差异引起光纤弯曲和拉伸造成的。衰减与温度关系的测量试验条件应在最恶劣的温度条件下进行。

温度循环试验既可用于监视光缆在储存、运输和使用中温度变化时的特性。在选定的温度范围（通常比上述的温度范围更宽）又可检查衰减稳定性与光缆结构中光纤基本情况及有微弯情况的关系。

#### 2. 试样

试样应为一个工厂制造长度或有关规定的满足试验要求的长度。但是，试样还应能达到衰减测量所需的精度。我们建议：多模光纤光缆，试样长度不小于1000m；单模光纤光缆，试样长度不小于2000m。

为了获得再现值，光缆试样松绕成圈或绕在光缆盘上放入气候室内。光缆弯曲半径会影响到光纤对不同的膨胀和收缩（例如光纤在光缆中的滑动）的适应能力。因此，光缆的试验条件应尽可能在正常使用条件下进行。

可能出现的问题是在热循环中试样和光缆支架（盘、筐、平板等）之间膨胀系数不同引起的实际差别。只要不满足应有作用条件，试验结果将会受到明显的影响。

影响试验结果的主要因素：试验温度条件、光缆支架的类型和材料。通常建议的内容如下：

(1) 光缆盘缠绕直径要足够大，以确保光纤能调整不同的伸长和收缩。因此，缆盘缠绕直径应大于光缆运输选定的缆盘直径值。

(2) 消除试验条件下产生的光缆膨胀（或收缩）的任何危险。实际上，我们应特别小心防止试验中光缆中的残余应力。例如，光缆试样不应紧绕在缆盘上，因为紧绕会限定低温下试样的收缩。另外多层紧绕会限制高温下试样的膨胀。

(3) 推荐采用松绕，例如大直径松绕圈、具有柔软垫层缆盘或无应力装置。若需要时，为限制受试光缆长度，允许将光缆中几根光纤连接起来，对被连接光纤进行测量。应限制连接光纤数，并将连接光纤端头置于气候室外。

#### 3. 试验装置

试验装置是由一台适合确定衰减变化的衰减测试仪和一个能容纳试样的大小合适的气候室组成控制气候室温度，以保证在规定试验温度下温差变化在 $\pm$

3℃内

#### 4. 试验程序

##### (1) 起始测量

试样应在环境温度下至少放置 24h 进行预处理, 对试样进行外观检查并在起始温度下测量衰减基准值。

##### (2) 试验

- ① 将处于环境温度下的试样放入具有同样温度的气候室内。
- ② 以合适的冷却速率, 将气候室的温度由环境温度降低至适当的低温  $T_A$ 。
- ③ 待气候室温度达到稳定后, 将试样暴露到低温下停留适当的时间  $t_1$ 。
- ④ 以合适的升温速度, 将气候室的温度升高至适当的高温  $T_B$ 。
- ⑤ 待气候室温度达到稳定后, 将试样暴露到高温下停留适当的时间  $t_1$ 。
- ⑥ 接着, 以合适的冷却速率将气候室的温度降低到环境温度值。这个试验过程就构成了一个温度循环, 如图 9.1 所示。

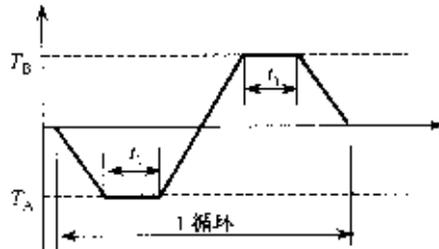


图 9.1 一个温度循环试验程序

- ⑦ 除非另有详细的规范要求, 光缆试样应经历两个温度循环试验。

##### ⑧ 有关详细规范阐述的内容:

- A. 试验过程中衰减变化和观察比较。
- B. 在哪段时间后完成观察。

- ⑨ 被测试样从气候室取出之前, 应在环境温度下稳定一段时间。

⑩ 如果比较详细的规范给出的是储存和使用的不同温度范围, 而不是两个不同的试验, 则应按图 9.2 所示的组合试验程序进行试验。

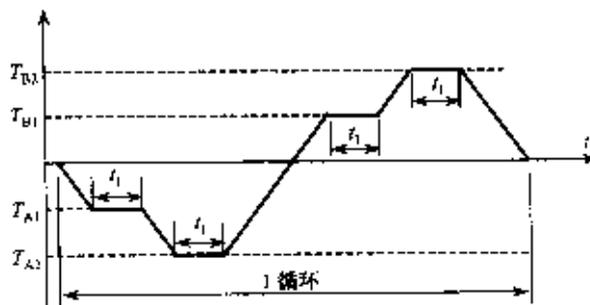


图 9.2 组合试验程序

(1)  $T_{A1}$ 、 $T_{A2}$ 、 $T_{B1}$ 、 $T_{B2}$  和  $t_1$  与冷却（或加热）速率应详细的规范中规定。由于光缆结构不同，缆芯的温度与气候室的温度也不同。

### (3) 恢复

① 如果试样从气候室取出用于试验条件不是标准大气压条件，试样应在标准大气压条件下获得稳定的温度。

② 相关的详细技术规范中对不同类型的试样，一般都要求规定恢复周期。

有关规范中应绘出试验的合格判据。典型的损伤形式包括：光连续性损耗、光传输劣化或光缆的物理破坏。

## 二、渗水

### 1. 目的

渗水试验的目的是确定光缆在规定长度方向上阻止水迁移的能力。图 9.3 所示的两种渗水试验适用于连续的填充型阻水光缆。

通常，选用方法 A 或方法 B 之一来检查光缆渗水。方法 A 用来检验缆芯外空隙与外护层之间的水迁移。方法 B 则用来检验设计的填充型阻水光缆全横截面的水迁移。

### 2. 试样

#### (1) 方法 A

在位于光缆试样一端 3m 处去除一圈 25mm 宽的护层和绕包层，以使 1m 高的水柱的水密套筒作用在裸露的缆芯上，检验在缆芯外空隙与外来护层中形成桥接间隙的水迁移。

#### (2) 方法 B

受试光缆试样长度大于 1m，但不超过 3m。如果需要，试样先按弯曲试验程序进行弯曲试验，再从试样的中部截取最大光缆长度为 3m。光缆试样的一端插入水密套筒，检验 1m 高水柱对试样进行全截面水迁移作用。

### 3. 试验装置

两种渗水试验的试验装置分别为如图 9.3 所示。

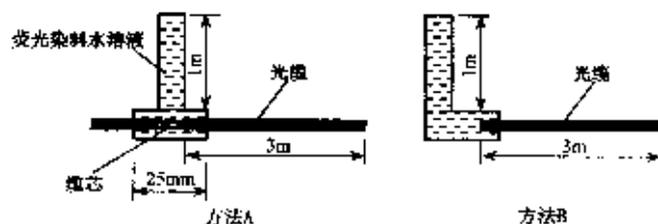


图 9.3 渗水试验

### 4. 试验程序

试样应水平放置，在  $20 \pm 5^\circ\text{C}$  温度下，施加 1m 高水柱持续作用 24h。为直观清晰地检查水渗漏，通过用水溶性荧光染料或其他合适的着色剂组成溶液。所选

择的荧光染料应不与任何光缆组成元件发生化学反应。

试验裸露端应观察不到渗水。如采用的是荧光染料水溶液，则可用紫外光来进行渗水检查。

### 三、阻水油膏滴流

#### 1. 目的

阻水油膏滴流试验的目的是证实填充型光缆内注入和填充的阻水油膏在规定温度下是否从光缆中滴流出来。

#### 2. 试样

##### (1) 试样数和类型

除非另有规定，从每种光缆中取 5 个光缆试样进行验证试验。每个光缆试样代表着规范中规定的光缆类型。

##### (2) 试样长度

除非另有规定，每个试样长度应为  $300 \pm 5\text{mm}$ 。

##### (3) 试样制备

光缆试样制备步骤如下：

① 从试样的一端剥去一节  $130 \pm 2.5\text{mm}$  长的外护层；

② 从试样光缆同一端去掉  $80 \pm 2.5\text{mm}$  长的所有非光缆本征元件（如铠装、屏蔽、内护套、螺旋加强件、阻水带、其他的缆芯包带等）。不要干扰光缆的保留件（如，容纳光纤的松套管、用来保持圆形的填充物等）。

③ 轻轻地去除经过①、②步骤后试样弄乱的粘附的一些注入或填充的阻水油膏。但要确保试样基本上保持原有的注入或填充（即不要擦干净）。

④ 如预先允许，在施加夹具、塞子（插头）之前，称量每个试样的重量。

⑤ 对包含有光纤束或光纤带的光缆结构测试时，光纤束或光纤带会因自重作用发生滑动。为确保试样未处理端的这些元件一点都不会扰动试样的填充物。用夹具、环氧树脂塞或其他方式固定光纤束和光纤带，以满足试验目的要求。

⑥ 详细规范允许时，可将松套上端密封起来达到模拟长的光缆试样的情况。

#### 3. 试验装置

用来完成阻水油膏滴流试验的装置有：温度试验箱、盛料器皿和天平等。

##### (1) 温度试验箱

温度试验箱应具有足够的热容量以便在试验期间保持规定的温度，并具有足够的空间放置试样。如温度试验箱为空气环流型的，则空气不应直接吹到试样上。

##### (2) 盛料器皿

收集滴流物的盛料器皿应是非吸湿性容器。

##### (3) 天平

天平精度应至少为  $0.001\text{g}$ ，并且能称出空的和滴有允许量的滴落物盛料器

皿间的重量差。

#### 4. 试验程序

阻水油脂滴流试验的试验程序，如下所述：

- (1) 将温度试验箱预热至规定的温度；
- (2) 将制备好的试样放入试验箱内，制备好光缆试样一端朝下垂直悬挂。将预先经称重的清洁盛料器皿直接置于（但不能碰）悬挂的试样下；
- (3) 除非另有标准规定时，可按下列步骤对试样进行预处理，否则继续步骤(4)；

① 使温度试验箱内温度达到稳定，除非另有规定，每个试样预处理 1h。

② 预处理结束后，以另一个预先经称重的清洁盛器皿替换原先的那个。对预处理期间使用的盛料器皿称重，记录预处理期间可能滴流的光纤或光缆用阻水油脂量。滴流量大于规定值应作为一次试验失效。除非另有规定，此值应为试样重量的 0.5% 或 0.5g。

③ 通常，试验时间应为 23h，然后继续步骤(5)。

(4) 使箱内温度达到稳定。除非另有规定，试验时间应为 24h；

(5) 试验时间结束后从试验箱内取出盛料皿并对其称重；

(6) 记录每一个试样可能滴流的光纤或光缆用阻水油脂重量，除非另有规定，滴流量不大于 0.005g，作为“无滴流”。试验温度和是否进行预处理应在有关标准中规定。

所有试样中应允许出现一个大于 0.050g 的滴流量。如最初的 5 个试样中有 1 个滴流量大于 0.050g，但小于 0.100g，则应按试样长度和试样制备要求重新制备 5 个追加试样，按试验程序中(1)至(6)进行试验。如追加试样中滴流量无一大于 0.050g，则作为试验合格。

### 四、油分离和蒸发

#### 1. 目的

油分离和蒸发试验的目的是测量用于与光纤接触的注入阻水油脂高温时的析出和/或蒸发。

#### 2. 试样

用来与光纤接触的填充阻水油脂。

#### 3. 试验装置

油分离和蒸发试验的试验装置由加热温箱、分析天平和吊挂圆锥漏斗等组成。

- (1) 一台带自然通风的电加热温箱。
- (2) 一架误差极限  $G=0.1\text{mg}$  的分析天平。
- (3) 吊挂圆锥漏斗等试验装置（如图 9.4 所示）的构成如下：

① 一个带金属丝吊钩圆锥漏斗镍金属网，网眼为 60 目（孔数 5.6/mm、金属丝直径 0.19mm、网眼 0.28mm）。圆锥漏斗也可由 60 目不锈钢丝网（网眼 0.25mm）构成。焊线宽大于 1mm。业已证实，两根金属网组成的圆锥漏斗对试验结果无多大的区别。

② 一个 200ml 无倾口的长形烧杯。

③ 一个干燥器。

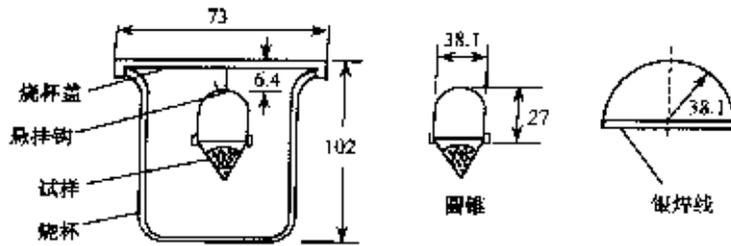


图 9.4 油分离和蒸发试验装置

#### 4. 试验程序

称量干净的烘干烧杯的重量记作  $M_1$ （称重准确到 1mg），称量配有圆锥漏斗和圆锥漏斗支撑件的烧杯重量记作  $M_2$ 。向圆锥漏斗中加大约 10g 的试样（圆锥漏斗上表面应平滑和凸出，以求流体不被收集，而且在金属网中没有聚积材料）。称量安装好的试验装置和试样的重量记作  $M_3$ 。

将整个试验装置放入温箱内按规定的要求加热并持续一段时间。然后，将整个试验装置从温箱中取出，放入一个干燥器中冷却到室温。再称量整个试验装置的重量记作  $M_4$ 。小心地取出圆锥漏斗及其支撑件后，再称量烧杯的重量记作  $M_5$ 。计算出油分离（析油）和蒸发的百分比，报告重复测试平均值。析油和蒸发量的计算式为：

$$\text{油分离}(\%) = \frac{M_5 - M_1}{M_3 - M_2} \times 100 \quad (9.1)$$

$$\text{油蒸发}(\%) = \frac{M_3 - M_4}{M_3 - M_2} \times 100 \quad (9.2)$$

油分离和油蒸发的试验结果应不超过规定要求的最大值。

### 五、气体阻力

#### 1. 目的

气体阻力试验仅适用于气体压力保护非填充光缆。气体阻力试验的目的是检验非填充光缆的气体阻力。

#### 2. 试样

最终的光缆试样长度应满足完成规定的试验要求的长度。

### 3. 试验装置

气体阻力试验装置由下列几个部分组成：

- (1) 向光缆试样提供稳定气压的空气压缩机；
- (2) 气体流量计；
- (3) 气压表；
- (4) 温度计。

### 4. 试验程序

测量室温和气压表压力。在室温下，最终的光缆试样的一端连接到一个压力稳定的干燥空气（空气干燥度为 5%RH 或更好）的气源，试样光缆的另一端裸露到大气中。施加到穿过光缆的压力应为 62kPa，其相对容量差为  $\pm 2\%$ 。用一个校正到  $\pm 10\%$  的气体流量计记录稳定气体流量，也可按特殊用户的要求和有关规定选用其他的气体压力。我们测量的只是那些通过光缆护层内的气路的气流，沿空气流动方向相反的方向做第二测量，分别记录两次的测量结果。可由下式求得气体阻力 F：

$$F = \frac{3720}{f \cdot L} \quad (\text{kPa} \cdot \text{s}/\text{m}^3 \cdot \text{m}) \quad (9.3)$$

式中：L—试样长度 (m)；

f—气体流量 (m/s)。

气体阻力应满足有关规定给出的气体阻力的最大值。

## 六、风积振动

### 1. 目的

风积振动试验的目的是评价 ADSS 光缆在典型的风积振动条件下，光缆的疲劳性能和光纤的光学特性。

### 2. 试验装置

风积振动用的试验装置的典型配置和技术保证措施，如图 9.5 所示。两端支座用来给光缆上加张力负载和维持光缆上的张力。被测光缆段安放在两个中间支座之间。如果组合装置能按规定提供足够空间，端头支座和中间支座就不必做成分离装置。截取的受试光缆长度应超过两中间支座间距离，以便于剥去光缆护层和光纤的接入操作。为便于将光缆固定放到两中间支座之间，试样光缆上配有末端或端头金具。在对试样光缆施加张力前，应对试样光缆两端作终接处理，以使光纤不会发生相对于光缆的位移。光缆的张力测量用的是测力计、负载传感器、校正臂或其他装置。风积振动试验中应采取一些措施来保证温度波动条件下光缆受试张力恒定。将受试光缆上张力加至额定的最大安装张力的 100%。

为获得试验结果的重复性，主动作用跨距为两末端金具之间距的三分之二，即大约在悬挂金具所处的位置。主动作用和/或背后跨距也可用更长的距离，见

图 9.5 所示。悬挂金具支撑的高度要确保在主动作用跨距内光缆与水平所成静垂直角为  $1.75 \pm 0.75^\circ$ 。

应提供一些方法来测量和监视自由驻波而不是支撑点处的中间波腹点振幅。用一合适的电控振动器来激振垂直平面上的光缆。振动器的衔铁被牢固地拴在光缆上，以使其与垂直面的光缆垂直。振动器安放在跨内的位置应保证在悬挂金具和振动器之间，最少有六个振动驻波。

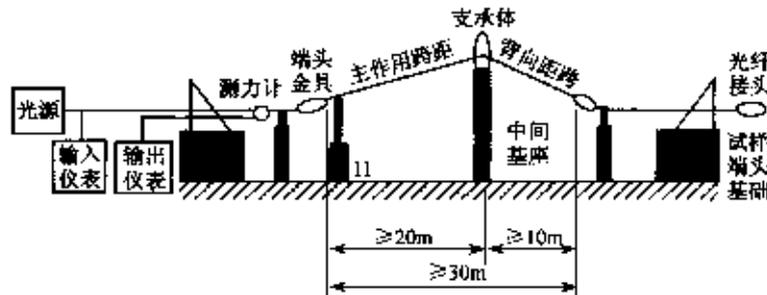


图 9.5 风积振动试验装置

光纤的受试长度（即两终端之间的距离）至少应为 100m，为达到 100m 长度的试验要求，可将几根光纤串联熔接起来。从被测光缆中的一根松套管或一个光纤束中至少抽一根光纤进行试验。应使所做的光纤接头与光设备在同一端。进行光纤光学性能测量所用的光源标称波长值：单模光纤 1550nm，多模光纤 1300nm。

光源被分成两个信号，一个信号接至光功率计作为参考信号，另一个信号与被测光纤自由端相连作为注入信号。从被测光纤输出的信号接至第二个光功率计。整个试验期间，所有的光学和接头都应保持着原封不动状态。

初始光学性能测量应在光缆跨度上预先加张力至大约为最终最大安装张力的 10% 时进行。初始测量的两信号之差给出了一个参考电平，试验中这个信号差的变化将显示出受试光纤的衰减变化。为连续复制记录，测得的信号被输入纸带曲线记录仪。

### 3. 试验程序

光缆应受到最小  $10^8$  次循环振动。试验跨度的振动频率，应等于和维持在由 16.1km/h 风速产生的共振频率（即频率 =  $82.92 \div$  光缆直径 (cm)，振幅为光缆直径 / 2）自由波腹点峰与峰振幅应保证等于光缆半径。在开始阶段，应密切注意光缆试验区域。在试验区域稳定前，应每隔 15min 记录一次，在试验区域稳定之后，应每天记录两次（一般是每工作日开始和结束时）数据。

最终测试应在振动完成 2h 后进行，且应重复一次光缆拉伸试验。金具支撑位置处取来的光缆，应加负载到最大额定光缆负载。衰减必须符合有关规定要求。

## 七、过滑轮

### 1. 目的



## 八、舞动

### 1. 目的

舞动试验的目的是评定在典型的舞动条件下的 ADSS 光缆的疲劳性能和光纤的光学特性。

### 2. 试验装置

舞动试验所用的典型装置，如图 9.7 所示。试验装置中的末端金具之间的整个跨度最短为 35m。两端支座用来对光缆施加负载和维持张力。被测光缆段放置在两个中间支座之间。如果组合装置能按规定的装置提供足够的空间，端头和中间支座不必做成分离的装置。截取的受试光缆长度应超过两中间支座间距离，以便于剥去光缆护层和光纤的接入操作。在对试样光缆施加张力前应对光缆两端进行终接，以便光纤不会发生相对于光缆的位移。测量光缆张力的装置是测力计、负载传感器、校正臂或其他装置。舞动试验中应采取一些措施来保证试验中温度波动条件下光缆受试张力不变。然而，舞动本身会引起一些张力波动。向受试光缆所加的张力最小到额定最大安装张力的 50% 或最大加到 4900N。对某些光纤结构，试验张力必须小于 2450N 以便诱发，对这些设计，2450N 试验张力是可以接受的。

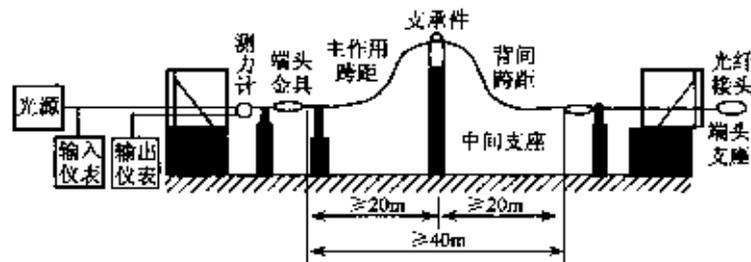


图 9.7 舞动试验装置

一个合适的悬挂金具应放在两端头金具中间的位置。悬挂金具支撑的高度要确保在主动作用跨距内，光缆与水平方向所成的静态垂度角不超过  $1^\circ$ 。

应提供一些方法来测量和监视中间波腹点舞动振幅。用一个合适的振动器来激振垂直平面上的光缆，振动器衔铁被牢固地拴在光缆上。

受试光纤长度（即两终端金具之间的距离）至少应为 100m。为达到 100m 长度的试验要求，可将几根光纤串联熔接起来。从被测光缆中的一根松套管或一个光纤束中至少抽一根光纤进行试验。所做的光纤接头与设备应在同一端。进行光纤光学性能测量所用的光源标称波长值：单模光纤 1550nm，多模光纤 1300nm。

光源被分成两个信号，一个信号连至光功率计作为参考，另一个信号连接到被测光纤自由端作为注入信号。从被测光纤输出的信号连接到第二个光功率计。整个测试期间，所有的光学连接和接头都应保持着原封不动。

初始光学性能测量应在光缆跨度上预先加张力至大约最大安装张力的 5%

时进行。初始测量的两信号之差给出了一个参考电平。试验中这个信号差的变化将显示出受试光纤的衰减变化。为连接复制记录，测得的信号输入纸带曲线记录仪。

### 3. 试验程序

试样光缆至少应经受  $10^5$  次循环舞动。试验跨距的振动频率应是单驻波共振频率。在进行测量的主动跨距内，驻波波腹峰与峰的振幅与驻波长度之比应保持在  $1/25$ 。

试验中的机械和光学数据大约每 2000 个循环阅读和记录一次。光功率计应在试验开始前 1 小时和试验结束后 2 小时进行连续监视。最终的光学性能测量应在振动完成后至少 2 小时以后才能进行。

## 九、耐电痕

### 1. 目的

耐电痕试验的目的是验证在电场和机械应力共同作用下，ADSS 光缆外护层耐侵蚀和耐电痕作用的能力。

### 2. 试验装置

从生产线上取下一段一定长度的光缆试样。在将光缆试样水平放置到盐雾室内两个固定点之前，应先将其两端头密封，以防湿气浸入试样光缆。这样做可以保证受试光缆上的机械应力加至盐雾试验条件要求的初始应力值。接地终端的情况应该与光缆制造厂家建议的光缆用于支持铁塔上的服役情况十分接近。接地终端可由如螺旋缠绕夹紧线与任何合适的消除机械或电应力的附件共同组成。这种高压终端装置应由光缆制造厂家选定。

光缆试样地盐雾试验装置中的两终端间的受测长度必须足够长，以避免在盐雾试验中发生飞弧。通常，合适的试样长度为  $25\text{mm/kV}$ 。用一弹簧拉紧受试光缆，以求在试验中的光缆材料的任何蠕变都不会引起明显的张力减小。试验中检查张力的合适间隔为 100 小时一次。只要张力变化大于初始张力值的 10%，那么应将张力再次调整至试验张力范围内。

在盐雾室内，借助合适数目的雾化喷嘴产生电导盐雾，盐雾室内雾化喷嘴数选择的实用准则是按盐雾室体积算，2.5 立方米一个喷嘴。至雾化喷嘴的盐水应由 NaCl 和蒸馏去离子水配制的。雾化喷嘴喷出的雾滴大小为  $5\sim 20\mu\text{m}$ ，喷嘴上的气压为 3.3bar。雾化喷嘴应沿盐雾室四周均匀地分布，使盐雾室获得盐雾密度均匀，且盐雾滴不应直接喷射到光缆试样上。为使盐雾室内的空气自然排出，盐雾室应开一个不大于  $80\text{cm}^2$  的孔。试验用的一台工频试验变压器的最小连续额定电流为 250mA，跳闸电流为 1A。受试光缆对地距离至少为 300mm。

### 3. 试验程序

光缆拉紧后，应用在水中浸湿的毛巾或纸巾擦洗光缆，随后才对受试光缆进行盐雾试验。盐雾试验条件如下：

试验持续时间: 1000h  
盐水流速:  $0.4 \pm 0.1$ L/h (每立方米盐雾室体积)  
雾滴大小:  $5 \sim 20 \mu\text{m}$   
温度:  $15 \sim 25^\circ\text{C}$   
盐水中的 NaCl 含量:  $10 \pm 0.5$ kg/m<sup>3</sup>  
试验电压和频率: 与用户商定

含 NaCl 的盐水不允许循环使用。为了检查光缆张力, 允许试验中断几次, 但每次中断的时间不应超过 15min。中断时间 (如典型 100 小时) 不计入试验持续时间。

## 十、阻燃

### 1. 目的

阻燃试验的目的是确定光缆遭受火焰燃烧时, 火焰的蔓延是否仅在限定范围内, 残焰残灼是否在限定时间内能自行熄灭, 光缆在火焰中燃烧一定时间内是否能保证正常通信的性能。

阻燃试验方法是按光缆敷设方式和光缆根数可以为两种, 单根垂直燃烧和成束燃烧。对于通信光缆的燃烧性能的试验方法常常按照光缆是单根敷设或成束安装分别选用单根垂直和成束燃烧试验来评定阻燃光缆的阻燃性能。

### 2. 试验装置

光缆成束燃烧试验装置, 如图 9.8 所示, 试验设备有: 燃烧试验箱、钢梯和火源等。

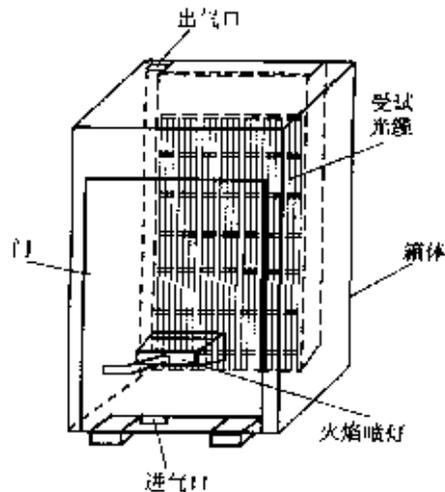


图 9.8 光缆成束燃烧试验装置

#### (1) 燃烧试验箱

燃烧试验箱的内部尺寸为宽  $1000 \pm 100$ mm、深  $2000 \pm 100$ mm 和高  $4000 \pm 50$ mm。

#### (2) 钢梯

安装试样的钢梯用钢管焊接制成，钢梯宽  $500 \pm 5\text{mm}$ ，高  $3500 \pm 10\text{mm}$ ，梯子沿高度方向分为 9 级。

### (3) 火源

火源宜采用带型喷灯，用丙烷作燃料。

### 3. 试验程序

成束燃烧试验的程序是先按光缆每米长度所含非金属材料的体积不同为 A、B、C、D 四类，再根据每米光缆金属的总体积除以某类每米光缆非金属材料的总体积计算出试样根数取整数 ( $\geq 0.5$  取 1)。然后将一定根数的试样 (每根 3.5m 长) 按彼此紧挨或互相留有规定间隙的方法安放在钢梯上，用 0.5~1.0mm 的金属线将试样绑扎在梯子的每一级横档上，安装试样应在梯宽中部，其总宽度应不超过 30mm，光缆束的任一边与梯子立柱的间距应不小于 50mm。随后启动消烟除尘器，点燃喷灯，按规定 20min 供火时间用喷灯火焰燃烧试样，在燃烧完全停止后，检查试样损坏的程度，即试样碳化部分所达到的高度小于 2.5m 则可判定试验结果为合格。

## 第六章 光纤带机械性能

### 第一节 光纤带机械性能测试的目的

众所周知，光纤带是由紫外光固化涂覆光纤和紫外光固化粘结材料共同组合的线性矩阵。如果光纤带在成缆、施工、使用、维护中受扭转、残留扭转等外力作用，那么会影响光纤的传输性能和机械使用寿命。同时，光纤带在施工、维护中应具有可分离性，即光纤能从光纤带中分离成若干根光纤的子单元或单根光纤。光纤带便于剥离，即光纤涂覆层及光纤带粘结材料能容易地剥除。

这样，光纤带机械性能包括：可分离性、可剥离性、抗扭转能力和残余扭转度。研究光纤带机械性能的目的，在于从光纤带结构出发，通过模拟光纤带在成缆、施工中受扭转等条件进行必要的试验来确保光纤带的传输、机械性能及使用寿命。

### 第二节 测量方法

国内外有关标准中介绍的验证光纤带机械性能优劣的试验方法有：光纤带的可分离性、光纤带剥离性、光纤带抗扭转能力和光纤带残余扭转度。本章将简要介绍这些试验的测量原理、试验装置和试验程序。

#### 五、光纤带可分离性

### 1. 测量原理

光纤带可分离性试验的测量原理是利用一工具或手工将未老化的 6 芯或 12 芯或 24 芯光纤带中的光纤分离成单根或多根光纤的子单元。

光纤带可分离性试验的目的有两个：(1) 保证要求分离的光纤带具有足够的抗撕裂性能。(2) 确保要求分离的光纤带具有可分离成单根光纤或多根光纤子单元的可分离性。

### 2. 试验装置

光纤可分离性试验装置应包括一个具有合适夹具的张力强度测量装置和一个放大倍数为 100 倍的显微镜。

### 3. 试验程序

对于  $n$  芯光纤带，从被测的每个约 1m 长的光纤带试样上截取最小长度为 100mm 的光纤带试样，共取  $n/2$  段试样；对  $m$  批光纤带，光纤带试样数共有  $m \times n/2$  个。

对于  $x$  个光纤带试样（从批次中抽取，在产品规范中， $x$  一般规定为 3~5），用刀器将被试光纤带中光纤一根根与光纤带中其他光纤分开至长度为 25~30mm，以便于试验时夹持，如图 6.1 所示。对于  $x$  较多的光纤带试样，要将光纤带中光纤两根两根地与光纤带中其他光纤分开，直至分出的光纤根数为被测试光纤带芯数的一半，即  $n/2$ 。

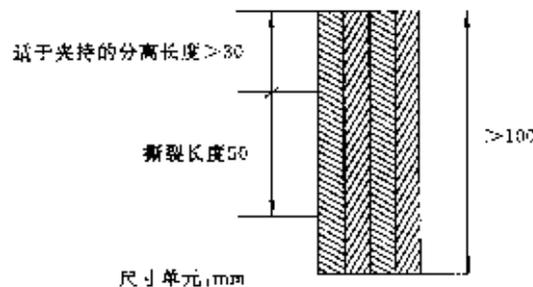


图 6.1 可分离性试验试样制备

可分离性试验程序如下：将每个试样插入强度测量装置上，如图 6.2 所示，在分离起始点约 3mm 处位置将分开的光纤夹住，以 100mm/min 的速度慢慢地将光纤撕开至 50mm 的长度，并连续记录 50mm 的长度上的撕裂力。用显微镜检查可分离性，即光纤带撕裂后预涂覆层和着色层受损的情况。最后，比较所测的各光纤所需撕裂力的大小。

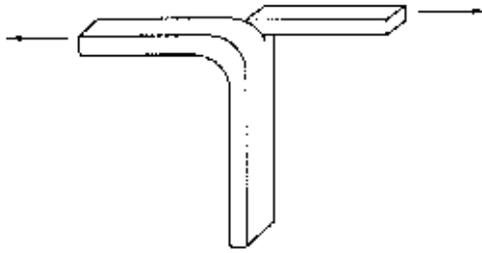


图 6.2 光纤带可分离（撕裂）试验示意图

评定光纤带可分离性优劣条件有：不使用特殊工具或器械就能完成光纤带的分离。完成撕开时所需的应力不超过 4.4N。光纤分离过程不对光纤的传输和机械性能造成永久性的损伤。在分离试验后光纤着色层允许有点脱落，但在任意 2.5cm 长度的光纤上应留有足够的便于光纤带中各光纤相互区别的色标。

## 六、光纤带可剥离性

### 1. 测量原理

使用专用的剥离工具，从未老化和老化的光纤带上，以机械的方式剥去一段长度大于 25mm 光纤带的粘结材料、着色层和光纤预涂覆层，以验证光纤带的可剥离性的优劣。

### 2. 试验装置

光纤带可剥离性的试验装置为一专门的剥离工具和用来擦去光纤带上各涂覆层残留物的酒精。

### 3. 试验程序

受试光纤带试样预处理方法有两种：温度湿度老化法和水老化法。温度湿度老化法是将受试光纤带浸泡在温度为  $85 \pm 2^\circ\text{C}$ ，非冷凝湿度为  $85 \pm 5\%$  环境中停留 30 天。水老化法是将受试光纤带浸泡在温度为  $23 \pm 5^\circ\text{C}$  的去离子水或蒸馏水中持续 14 天。

光纤带可剥离性试验在标准大气压下进行。未经过老化、湿度老化和水老化光纤带的可剥离性试验应在老化后的 8 小时内完成。剥离后的光纤带的清洁应用酒精擦清光纤上的残留涂覆物，以使玻璃光纤能够熔接。可剥离性试验的试样最少为 10 个。

## 七、光纤带抗扭转

### 1. 测量原理

光纤带在成缆、敷设、使用和维护中不可避免地受到扭转的作用。光纤带抗扭转试验的测量原理是设法在光纤带上施加荷载，借助循环扭转来模拟光纤带实际扭转情况，以检验光纤带结构的机械和功能的完整性，确保光纤带经受扭转力作用后，光纤带中光纤不会分离成单根光纤或多根光纤子单元。

### 2. 试验装置

光纤带扭转试验的试验装置，如图 6.3 所示。该试验装置由两个竖直放置的光纤带定位夹具和为每根光纤施加 1N 张力的吊挂荷重器具组成。



图 6.3 抗扭转试验装置

### 3. 试验程序

从不同批次的光纤带中选取 5 个有代表性试样，每个试样长度为 340mm。将制备好的光纤带试样牢固地固定在试验装置中，两夹具夹持的光纤带距离为 300mm。试验时，先将顶端夹具顺时针旋转 180° 回到起始位置后，再逆时针旋转 180°，然后再回到起始位置，这就构成一个循环扭转试验。扭转试验应重复进行 20 个循环，扭转速度为每分钟 20 个循环。

## 八、光纤带残余扭转

### 1. 测量原理

光缆中绞合的光纤带长度与敷设的光缆中的光纤长度相等。接入网中馈线和配线中所用的光缆要经受很宽的温度和湿度的作用。这种作用在光缆接续点或地上标准终接点或接头盒处特别显著。光纤带必须在无扭转状态才能保持它们的尺寸完整性，允许重新排列或限制因光纤扭转引起宏观弯曲致使衰减增大。

光纤残余扭转的测量原理是在受试光纤带底部悬挂 1N 的荷载，使光纤带发生扭转，测量出扭转角  $\theta$ ，用扭转角  $\theta$  除以光纤带试样长度就可以计算出光纤带的残余扭转。

### 2. 试验装置

光纤带残余扭转试验装置，如图 6.4 所示。该试验装置由两个夹具、一个加载重物和扭转角测量仪器组成。

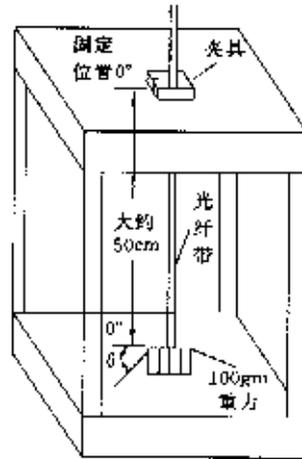


图 6.4 光纤带残余扭转试验装置

### 3. 试验程序

从被试光纤带中选取 5 个有代表性的试样，每个试样长度应不小于 50mm。将试样置于 85℃ 下老化 30 天。

试验时，用夹具固定光纤带的顶部，并在光纤带底部加 1N 的荷重，使光纤带无扭转，记录下此时光纤带的位置，然后，卸除负荷，光纤带发生扭转，测量扭转角  $\theta$ ；用  $\theta$  角除以光纤带试样长度计算出光纤的残余扭转。

## 第七章 光纤的环境性能

### 第一节 光纤环境性能测试的目的

随着人们对信息需求的日益增长及光纤通信技术的日趋成熟，光纤光缆正在以架空、直埋、管道、沟道、隧道、水下等敷设方式在各种各样的实际使用环境中，织制着纵横交错的光缆网络。光纤光缆跨越各种温区，要能经受不同环境条件的作用。

为确保光纤能在各种严酷环境条件下正常工作，我们应该模仿光纤实际使用场所的温度、潮湿、高温高湿、高温、核辐射等环境条件设计出温度循环、浸水、高温高湿、高温、核辐射等试验来检验光纤对气候的适应性、耐核辐射等性能是否符合要求。

人们正是在充分研究光纤的环境性能的基础上，设法改进光纤的材料选择、结构设计、制造工艺、正确选择涂覆、套塑材料及相应的涂覆工艺和合理选择光缆材料、光缆结构和成缆工艺。如果我们从理论和试验中找出致使光纤环境性能下降的原因所在，那么改善光纤环境性能的办法也就指日可待了。

## 第二节 测量方法

光纤环境性能试验主要包括温度循环、浸水、高温高湿、核辐射等。温度循环试验用来验证光纤的气候适应性能，浸水试验是考察光纤的耐水侵蚀性能，高温高湿试验则是判断光纤耐高温高湿作用的性能，高温试验是用来评价光纤耐高温的性能，核辐射试验用以检测光纤耐 $\gamma$ 射线辐射的耐辐照性能。下面对光纤环境性能的测量原理、试验装置和试验程序等作简单介绍。

### 一、温度循环

#### 1. 测量原理

光纤温度循环试验的测量原理是通过模拟光纤在储存、运输和使用期间可能经受的最坏温度变化来确定A1a-A1d多模光纤和B1-B4单模光纤对温度变化的衰减稳定性，即光纤的衰减温度特性。

光纤的温度衰减特性试验是将受试的整筒光纤放在气候室内，在温度循环试验规定的温度范围内进行温度循环试验，以确定温度变化时，光纤的附加损耗量。

温度循环试验结束后，可按下式计算出光纤的平均附加损耗：

$$\Delta\alpha(\lambda) = \frac{10}{L} \log \frac{P}{P_0} \quad (\text{dB/km}) \quad (7.1)$$

式中：P—分别在试验点 $T_A$ 、 $T_B$ 、保温后的稳定光功率；

$P_0$ —参考温度 $T_0$ 的光功率；

L—试样长度。

另外，我们还可以用光时域反射计(OTDR)直接测量不同温度点的OTDR曲线，从而确定光纤的温度附加损耗量。

#### 2. 试验装置

光纤的温度衰减特性的试验装置主要由衰减测量装置和气候室组成。

##### (3) 衰减测量装置

应采用GB/T 15972.4-1998《光纤总规范第4部分：传输特性和光学特性试验方法》中规定的传输功率监视法和GB/T 15972.4规定的后向散射法中的衰减测量装置来测定被测光纤的温度衰减变化。

##### (4) 气候室

气候室的体积大小应适合容纳被试光纤线盘，气候室的温度应地规定试验温度范围内，其温度控制精度应在 $\pm 3^\circ\text{C}$ 内。采用强制空气循环来维持气候室内温度均匀，气候室的设置及辅助设备的安放要避免冷凝水滴落到受试光纤试样上。

#### 3. 试验程序

试样为出厂长度或按产品规定的长度，并应为可达到所需试验准确度的适当长度。建议被试光纤最短长度为：多模光纤(A1a~A1d)应不短于1000m，单模光

纤 (B1 ~ B4) 应不短于 2000m。

如果受试光纤经滑石粉处理, 那么应从该试样光纤中抽出一段未涂抹滑石粉的光纤进行试验。为了得到具有重复性的试验结果, 试验光纤应松弛地绕在线盘上并置于气候室内。试验结果可能会受到光纤弯曲半径的影响。基于这个考虑, 试样松绕成卷并用滑石粉材料处理, 以便使卷绕的紧挨各圈, 彼此能自由地移动。受试光纤可以以水平或垂直方式绕成最小弯曲直径为 150mm, 以避免发生宏弯作用。

被测光纤试样放入气候室内, 在规定的时间内经受各种温度变化。试验条件, 如表 7.1 所示。

表 7.1 温度循环试验条件

预处理条件	温度测试条件	标称值 2h, 23°C, 50% RH
最低温度	$T_A$	-60°C 或 -40°C
最高温度	$T_B$	+85°C 或 +70°C
在每个温度下最小的持续时间	$t_1$	2h
最大的温度速率	斜坡速率	1°C/min
需要完成的循环次数	循环次数	2

试验具体步骤与内容大致如下:

试验前应将受试光纤试样置于正常试验大气环境中预处理时, 目视检查外观, 然后将试样光纤的两端分别与稳定光源和光检测系统连接好, 待监测系统稳定后测定环境温度下的衰减基准值。

将处于环境温度下的试样光纤置入气候室, 并将试样光纤两端引出气候室外, 与稳定光源和光检测系统连接好或与光时域反射计连接好。再以适当的冷却速率将气候室温度降到规定的低温  $T_A$ , 待室内温度达到稳定后, 接着使试样光纤在  $T_A$  温度下保温适当的时间  $t_1$  ( $t_1 \geq 2h$ )。然后以适当的加热速率将气候室温度升高至规定的高温  $T_B$ , 待室内温度稳定后, 使试样光纤在  $T_B$  温度下保温适当的时间  $t_1$ , 再以适当的冷却速率将气候室温度降至环境温度。上述的降温、保温、升温、保温过程构成了一个温度循环。如图 7.1 所示。

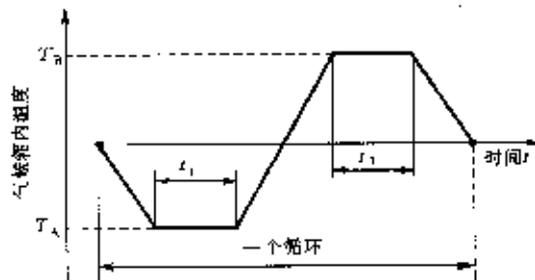


图 7.1 一个温度循环的试验气候室内温度循环曲线

在一个温度循环过程中要记录好温度点环境温度  $T_A$ 、 $T_B$  下经过保温时间  $t_1$  后输出光功率  $P_0$ 、 $P_A$ 、 $P_B$ 。

光纤温度衰减特性实验时，被测光纤试样应经历两个温度循环过程。试验结束后，按照式 (7.1) 计算出光纤的平均附加损耗量。

## 二、温度时延漂移

### 1. 测量原理

当今光纤光缆被广泛使用在不同的敷设方式和环境中，敷设方式有架空、管道、直埋、缆沟和水下等，使用环境温度为  $-50 \sim +60^\circ\text{C}$ ，因此要求光纤的性能要有高度的稳定性。长期以来，人们始终关心的光纤温度特性包括温度特性和时延温度特性。由于过去的光纤通信采用的是异步数字传输，不考虑时钟温度漂移问题。当今，随着光同步数字传输网的普及应用，人们开始重视时钟漂移问题，也开始研究光纤脉冲时延温度特性。尽管光纤的时延温度系数很小，但其对 40Gbit/s 速率的高速系统仍有影响。

众所周知，光脉冲通过长度为  $L$  的光纤的群时延为：

$$\tau = \frac{L}{V_g} = \frac{LN}{c} \quad (7.2)$$

式中： $L$  为光纤长度， $N$  为光纤材料群折射率， $c$  为真空中的光速。当温度发生变化时，群时延也发生变化，将时延  $\tau$  对温度  $T$  求导可得：

$$\frac{d\tau}{dT} = \frac{1}{c} \left( L \frac{dN}{dT} + N \frac{dL}{dT} \right) \quad (7.3)$$

实际上，光纤时延温度的变化是一种慢变化，称为温度漂移。我们定义单位长度单位温度间隔时延变化量为光纤温度时延漂移常数，记作  $K_f$ ，单位为  $\text{ps}/(\text{km} \cdot ^\circ\text{C})$ ，表示式为：

$$K_f = \frac{d\tau}{dT} \cdot \frac{1}{L} = \frac{1}{c} \left[ \frac{dN}{dT} + \frac{N}{L} \cdot \frac{dL}{dT} \right] \quad (7.4)$$

式中：第一项是由于光纤材料群折射率随温度变化而引起的，第二项是由于光纤物理变化引起的。

温度时延漂移常数的测量原理是利用应变测量仪，在频域法中，测量同一波长下温度变化引起的正弦波调制信号的相位移  $\Delta\phi$ ，即：

$$\Delta\phi = 2\pi f \Delta\tau = 2\pi f k_f L \Delta T \quad (7.5)$$

将式 (7.5) 稍作变换得  $k_f$ ：

$$k_f = \frac{\Delta\phi}{2\pi f L \Delta T} \quad (7.6)$$

式中： $f$  为调制频率； $L$  为试样光纤长度； $\Delta T$  为温度间隔。

在一般情况下，时延随温度的变化并不完全是线性关系。试验时应多选择一些试验温度点，由测量取得的多组数据求出拟合曲线，从而确定不同温度间隔内的平均时延漂移常数。

## 2. 试验装置

光纤温度时延漂移常数的试验装置与色散测量试验装置基本相同。所不同的是光纤先后放入温箱和冰柜中，光缆放在人工气候室内。温度变化范围为 $-40 \sim +60^{\circ}\text{C}$ 之间。色散测量的是不同波长间的时延差，而温度时延漂移常数是测量不同温度下的时延差。光纤温度时延漂移常数测量用的试验装置是应变测量仪（色散测量仪加应变测量软件）。

## 3. 试验程序

光纤时延温度常数的试验方法与单模光纤色散系数的试验方法基本相同，所不同的是，对色散测量的是同一温度下（室温）不同波长间的时延差；对时延温度漂移，测量的是同一波长下（工作波长，如 $1310\text{nm}$ ），温度变化引起的光脉冲时延的变化。

如将石英玻璃光纤的热膨胀系数、石英玻璃在 $1310\text{nm}$ 处的群折射率和折射率随温度变化值代入式(7.4)可算出 $k_r \approx 36\text{ps}/(\text{km} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ，式(7.4)估算 $k_r$ 时，未考虑光纤预涂覆材料的影响，实际上，不同的涂覆材料和工艺，光纤的温度时延漂移常数相差很大，大约在 $30 \sim 200\text{ps}/(\text{km} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 之间。另外，成缆光纤的温度时延漂移常数会大一些，具体数值取决于光缆结构设计和填充材料。一般要求光纤的温度时延漂移常数以 $40\text{ps}/(\text{km} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 为好。

# 三、浸水

## 1. 测量原理

光纤浸水试验的测量原理是通过将多模光纤(A1a ~ A1d)和单模光纤(B1 ~ B4)浸入蒸馏水或去矿物或离子水中来模拟光纤在实际使用、储存和运输中可能遇到浸水环境条件来确定光纤的耐浸水适用性。

我们可以借助插入损耗法和后向散射法来测量经规定的浸水时间后浸泡的光纤试样的衰减变化。

## 2. 试验装置

光纤浸水试验的试验装置主要由水箱和衰减测量装置组成。

### (3) 水箱

浸泡光纤试验的水箱装满蒸馏水，去矿物水或离子水。水的PH值为 $5.0 \sim 8.0$ 。

### (4) 衰减测量装置

应采用GB/T 15972.4-1998《光纤总规范第4部分：传输特性和光学特性试

验方法》中规定的插入损耗法和后向散射法中的衰减测量装置来测定浸水后的光纤衰减变化。

### 3. 试验程序

为确保光纤光传输性能测量的重复性,被测多模光纤(A1a~A1d)的最短长度为1000m,单模光纤(B1~B4)的最短长度则为2000m。水箱外部的光纤试样长度越短越好。所制备的光纤试样不会影响到其受试结果。光纤试样应松绕成盘,而且光纤两端应保持在水外,试样光纤以最小弯曲直径150mm水平或垂直绕成盘,以防止引起宏观弯曲损耗。

光纤试样被放入充满水的水箱中,水温为 $23\pm 5^{\circ}\text{C}$ 。光纤试样在水箱中放置30天。接着,可以用插入法和后向散射法,在规定波长下,测量浸水前、浸水中和浸水后的光纤试样的衰减变化。

## 四、高温高湿

### 1. 测量原理

光纤高温高湿试验原理是通过模拟光纤在实际使用、储存和运输中可能经受到的高温高潮湿环境条件来确定适用性。

高温高湿试验是通过观察规定时间范围内恒温下高潮湿对光纤的作用,从而达到评价光纤的实用性能的目的。这个试验给出一个实用的方法。

### 2. 试验装置

光纤的高温、高湿试验的试验装置主要由气候室、增湿器和衰减测量装置组成。

#### (4) 气候室

气候室的体积大小应适应容纳被测光纤线盘,而且便于试验中测量装置的接入。同时,气候室也能在规定的精度内保持给定的高温和高湿。高温高湿气候室和辅助设备的安放应避免冷凝水滴落到光纤试样上。

#### (5) 增湿器

用去矿物质水或去离子水来获得规定的湿度。试验装置的锈或腐蚀杂质都不应作用到光纤试样上。应该按照增湿器制造厂家说明书要求控制加到增湿器中的水量。

#### (6) 衰减测量装置

采用GB/T 15972.4-1998《光纤总规范第4部分:传输特性和光学特性试验方法》中规定的插入损耗法和后向散射法中的衰减测量装置来测定被测光纤的衰减变化。

### 3. 试验程序

为确保被测光纤光传输性能测量的重复性对被测多模光纤(A1a~A1d)的最短长度为1000m;对被测的单模光纤(B1~B4)的最短长度则为2000m。位于气候

室外的光纤试样长度越短越好。如果气候室外的光纤试样长度超过试样光纤总长度的 10% 应记载于试验报告中。

光纤试样的制备不应影响到其被测的性能。光纤试样应松绕成线盘，而且被涂上例如滑石粉材料，以求线盘上的彼此紧靠的各圈光纤可自由移动，光纤试样可以以水平或垂直绕成最小弯曲直径为 150mm 的线圈，以免产生宏观弯曲作用。如果光纤试样用滑石粉处理，那么应从该光纤试样中抽一段未涂滑石粉的光纤，暴露到试验环境中进行试验。

高温高湿试验的试验条件为：温度为+85%，相对湿度为+85%，持续试验时间为 30 天。

受试光纤的衰减测量是在规定的波长下，用插入法或后向散射法测量试验前、试验中（一旦试样稳定在规定的温度和相对湿度下）和试验后的光纤衰减变化。

## 五、高温

### 1. 测量原理

光纤高温试验的测量原理是通过模拟多模光纤 (A1a ~ A1d) 和单模光纤 (B1 ~ B4) 在实际使用、储存和运输中所经受的高温环境条件作用下，测量光纤衰减变化来确定光纤的适用性。这个试验目的是在给定的时间范围内观察高温对光纤的作用。

### 2. 试验装置

光纤高温试验的试验装置主要由高温箱和衰减测量装置组成。

#### (3) 高温箱

高温箱的体积大小应能容纳被测光纤线盘，并不会使辐射热直接作用到试样光纤上，且便于试验条件下测量装置的接入。高温箱还应具有在规定的精度范围内保持规定的温度的能力。可采用强制空气循环方法来保持高温箱内的温度均匀。

#### (4) 衰减测量装置

光纤高温环境下的衰减变化测量装置采用的是 GB/T 15972.4-1998《光纤总规范第 4 部分：传输特性和光学特性试验方法》规定的插入法和后向散射法中的衰减测量装置。

### 3. 试验程序

为获得测量的重复性，光纤高温环境下衰减变化测量所需多模光纤最短长度为 1000m，单模光纤最短长度为 2000m。放在高温箱外的光纤试样长度应越短越好。光纤试样的制备应不影响在受试条件下的性能。建议将光纤试样松绕成线盘，并用诸如滑石粉等材料涂抹，以便使绕成的彼此紧靠的光纤圈可自由移动。光纤试样可水平或垂直地绕成一个最小弯曲直径为 150mm 的线盘，以防产生任何宏观弯曲作用。如果试样光纤被涂抹滑石粉处理，那么应从该试样光纤中抽出一段未

涂抹滑石粉的光纤暴露到试验环境中进行试验。

光纤高温试验的试验条件：温度为+85℃，持续试验时间为30天。尽管高温试验不控制湿度，但是试验开始时35℃下相对湿度不低于50%，衰减测量是在规定的波长下，用插入法或后向散射法来测量试验前、试验中（一旦试样稳定在规定的温度）和试验后被测光纤的衰减变化。

## 六、核辐照

### 1. 测量原理

为确保敷入有背景辐射和有害核辐射环境中的光纤能够安全可靠地工作，有必要研究测量暴露在 $\gamma$ 辐射环境中的成缆或未成缆单模光纤或多模光纤中产生的辐照感应衰减的增加。这主要是由于光纤玻璃缺陷部位俘获了辐射分解的电子和空穴造成的（即形成了色心）。

光纤核辐照测量原理是采用衰减测量中的截断法来确定光纤在环境背景下的辐照感应衰减。通过监测试样光纤暴露在 $\gamma$ 辐照前后及期间的功率来实现光纤在有害核辐照环境下的辐照感应衰减。

由于光或热作用导致的色心减少产生了恢复效应（减小了辐照感应衰减）。恢复效应可在 $10^4 \sim 10^2$ 时间范围内发生，这使得辐照引起的衰减变化特征变得很复杂。因为衰减与许多变量有关，如：试验环境温度、试样结构、施加于试样的辐射总剂量和剂量率以及测量衰减所使用的光平。

### 2. 试验装置

两种辐照环境下的光纤核辐照试验装置，如图7.2和7.3所示。两种试验装置主要由辐照源、光源、光滤波器/单色仪、光探测器、光功率计和辐射剂量计等组成。

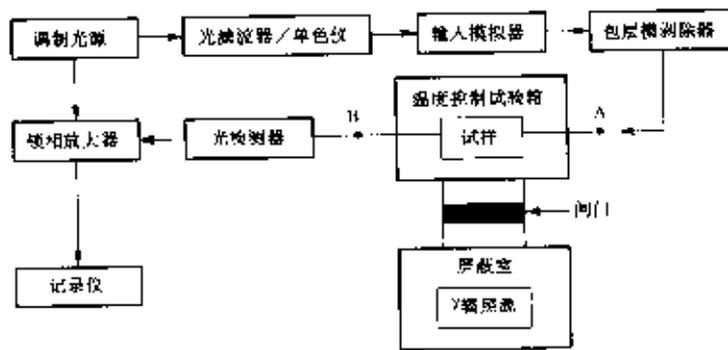


图 7.2 环境背景辐照试验装置

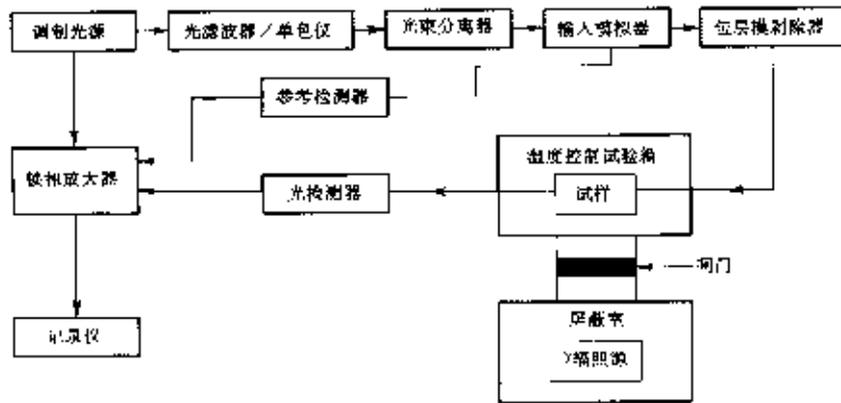


图 7.3 有害核环境辐照试验装置

## (12) 辐照源

### ① 环境背景辐照试验

应采用一个 Co (钴) 或等效的电离源以不大于 0.2Gy/h 的低剂量率产生  $\gamma$  辐射。

### ② 有害核环境辐照试验

应采用一个 Co (钴) 或等效的电离源以 0.05Gy/s 至 2.5Gy/s 范围内所需的剂量产生辐射。

## (13) 光源

应采用诸如卤钨灯、一组激光器或 LED 等光源来产生 850nm、1300nm(1310nm)、1550nm 工作波长。在完成测量的时间内，光源强度应保持稳定。从光源耦合到试验光纤中的功率应不大于 -30dBm (1.0 $\mu$ W)。光源应用占空比为 50% 的脉冲信号进行调制。

## (14) 光滤波器/单色仪

应用一组滤光器材或一单色仪获得波长为  $850 \pm 20\text{nm}$ 、 $1300(1310) \pm 20\text{nm}$  和  $1550 \pm 20\text{nm}$  的光。滤光器 3dB 光谱宽度大于 25nm。

## (15) 包层模剥除器

必要时，应在试样光纤输入端和输出端采用包层模剥除器以剥除包层模。如果光纤涂覆材料设计成可去除包层模(涂覆材料折射率略高于玻璃包层折射率)，则不要求包层模剥除器。

## (16) 光纤固定和定位装置

试样光纤应固定在能和真空吸盘能稳定支撑试样输入端的装置上，以便试样端可与输入光进行重复定位。

## (17) 输入端注入模拟器

### ① 多模光纤 (折射率渐变型)

应用一稳态模滤模器去掉高阶传输模，在光纤输入端建立稳态条件。

### ② 单模光纤

一光学透镜系统或尾纤可用于激励被试光纤。耦合进试样光纤中的光功率在

试验期间应保持稳定。如果采用一光学透镜系统，一种使光纤定位较不敏感的方法就是对光纤输入端进行空间和角度的满注入；如果采用尾纤，可能有必要采用折射率匹配材料来消除干涉效应。应采用高阶模滤模器来滤除高阶模。

#### (18) 光探测器

应采用在接收光强范围内线性并稳定的光探测器。典型系统可包括采用电流输入前置放大器进行放大的光生伏打型光电二极管，由锁相放大器进行同步检测。

#### (19) 光功率计

应采用合适的光功率计测定从光源耦合进试样的光功率，确保它不大于  $1.0\mu\text{W}$  或按产品规范规定的值。

#### (20) 辐射剂量计

应采用热致发光 LiF 或 CaF 晶体检测器 (TLD) 测定试样光纤接收到的辐射剂量。

#### (21) 温度受控试验箱

温度受控试验箱应能将规定温度保持在  $\pm 2^\circ\text{C}$  以内。

#### (22) 试验线轴

试验线轴对本试验所采用的辐射不应起屏蔽或吸收作用。

### 3. 试验程序

试样置入试验箱以前，应对辐照源剂量均匀性和强度进行校准。将四个 TLD 置于辐照区，使它们的中心放在试样所在线轴或线盘轴线上。采用四个 TLD 以便于获得具有代表性的平均值。应采用等于或略大于实际试验剂量的校准系统。为保证实际试验剂量测量的最大可能的准确度，TLD 只限于使用一次。

被测光纤端面应光滑、清洁并与光纤轴垂直。

#### (1) 环境背景辐照试验

测量试样暴露在  $\gamma$  辐照源前后衰减变化的测量步骤如下：

将光纤或光缆试样（绕成圈或绕在线轴或线盘上）置于图 7.2 所示的试验箱中；

将光纤输入端和输出端放在定位装置上，并分别与光源和探测器对准；

试验前，应对试样在  $25 \pm 5^\circ\text{C}$  的温箱中预处理 1h，或在该温度下按产品规范规定的时间预处理；

按截断法，测量试样在规定波长下的衰减，并记录暴露于  $\gamma$  辐射源之前光纤的衰减  $A_1$ ；

采用经校准的功率计测量试样输入端（图 7.2 中 A 点）的功率。需要时，应调节光源功率使得 A 点功率小于  $1.0\mu\text{W}$  或按产品规范中的规定；

按要求制备试样端面，并将试样端对在试验装置上；

在辐射源关闭的情况下，应对试样的输入端进行定位，以便在探测器上获得最大光功率。一旦调好之后，在  $\gamma$  辐照试验期间不应改变输入端光注入条件；

辐照前，应在规定的试验温度下对所有试验波长测量输出功率；

将某种曲线记录仪或合适的测量装置连接到检测系统进行连续功率测量，应调整测量设备。使检测信号不超过设备的极限；

通过使试样经受不大于 0.2Gy/h 的剂量率来测量由于暴露于  $\gamma$  辐照而产生的环境背景辐射效应。试样应经受至少为 1Gy 的最小总剂量；

(1) 在  $\gamma$  辐照周期内应记录试样输出功率；

(2) 在完成辐照过程的 2h 之内，应按截断法进行试样的衰减测量，应记录暴露于  $\gamma$  辐射源之后试样的衰减值  $A_i$ ；

(3) 对要求的试验温度和波长，重复步骤①~(12)。对每一个要求的温度，必须采用新的未经辐照的试样。

## (2) 有害环境试验

在暴露于  $\gamma$  辐射源前后及期间，测量试样中传输功率的程序如下所述；

① 按要求制备短段试样(1~2m)端面；

② 将短段试样输入端置于定位装置上并与试验装置对准(见图 7.3)，使得用经校准的功率计测量时获得最大光功率。需要时，应采用中性密度滤波器调节光源功率，以在短段试样输出端获得不大于 1.0 $\mu$ W 或按产品规范规定的光功率；

③ 将试样轴放于试验装置中，如图 7.3 所示；

④ 应将试样输入端置于定位装置上并进行对准，应对输出端进行定位以使从试样出射的全部光入射到探测器光敏面上；

⑤ 试验前，应对试样在 25 $\pm$ 5 $^{\circ}$ C 温度箱内预处理 1h；

⑥ 辐射源关闭后，应对试样输入端进行定位，以在探测器上获得最大光功率。一旦调好后，在  $\gamma$  辐照期间，不应改变输入端注入条件；

⑦ 辐照前，应在规定的试验温度下，在所有的试验波长测量输出功率。这时还应测量参考探测器功率；

⑧ 应将某种曲线记录仪或合适的连续测量装置连接到检测系统，以便进行连续功率测量。应调整测量设备以使检测信号不超过设备极限；

⑨ 通过使试样至少经受表 7.2 规定的剂量率和总剂量大小组合之一来测定由于暴露于  $\gamma$  辐照而产生的有害效应。

表 7.2 总剂量/剂量率组合

总剂量 Gy (Sievert)	剂量率 Gy/s
30	0.05
100	0.5
1000	2
10000	2

因为辐射源特性变化，剂量率大小仅是近似值。辐射源之间剂量率的变化预计高达  $\pm 50\%$ ，打开或关闭辐射源所需的时间应不大于总暴露时间的  $10\%$ ；

(10) 在  $\gamma$  辐照周期内记录试样输出功率，在完成辐照过程后至少还要记录功率  $15\text{min}$  或按产品规范规定。在完成辐照过程之后的恢复期内，还应记录参考检测功率大小；

(11) 对要求的试验温度和波长，重复步骤②~(10)。对每一个要求的温度，必须采用新的未经辐照的试样。

(3) 计算

④ 光衰减变化  $\Delta A$  (环境背景辐照试验)

$$\Delta A = A_2 - A_1 \quad (7.7)$$

式中： $A_1$ —暴露于  $\gamma$  辐照之前试样的衰减 (dB)；

$A_2$ —暴露于  $\gamma$  辐照之后试样的衰减 (dB)。

⑤ 每一波长下光透射率变化  $A$  (有害环境试验)

$$A_0 = -10 \lg(P_0/P_B) \quad (7.8)$$

$$A_{15} = -10 \lg(P_{15}/P_B) \quad (7.9)$$

式中： $P_0$ —停止辐照  $I_s$  内试样的功率输出 (除非另有规定) (mW)；

$P_{15}$ —停止辐照  $15\text{min}$  内试样的功率输出 (除非另有规定) ( $\mu\text{W}$ )；

$P_B$ —辐照开始前试样的功率输出 ( $\mu\text{W}$ )；

$A_0$ —紧接辐照之后试样的光透射率变化 (光衰减) (dB)；

$A_{15}$ —辐照后  $15\text{min}$  内试样的光透射率变化 (光衰减) (dB)。

⑥ 考虑到系统的不稳定性，采用参考测量时，参考探测器的测量结果为：

$$A_{\text{REF}} = -10 \lg(P_E/P_{\text{BN}}) \quad (7.10)$$

式中： $P_E$ —测量结束时由参考探测器测得的功率 ( $\mu\text{W}$ )；

$P_{\text{BN}}$ —辐照开始前由参考探测器测得的功率 ( $\mu\text{W}$ )。

④ 考虑系统不稳定，修正后的试验结果为：

$$A_{\text{ONOR}} = A_0 - A_{\text{REF}} \quad (7.11)$$

$$A_{15\text{NOR}} = A_{15} - A_{\text{REF}} \quad (7.12)$$

## 第八章 光纤机械性能测试

### 第一节 光缆机械性能测试的目的

光缆机械性能试验是指检验光缆产品所具有的抗外部机械力作用能力的试验。光缆在制造、运输、施工和使用过程中都会受到各种外机械力作用。光缆在外机械力作用下，光缆中光纤很可能会受到外机械力作用，其传输性能可能发生变化，使用寿命有可能缩短，甚至出现断纤现象。光缆的机械性能技术指标是光缆产品质量的重要技术指标。光缆机械性能检测设备是检验光缆产品机械性能的设备。

光缆在制造、运输、施工和使用中通常受到综合型的外机械力作用，不同情况下光缆承受的外作用力不但大小不同，而且类型也不同。综合各种受力状态，可分解为：拉伸、压扁、冲击、反复弯曲、扭转、曲绕、卷绕和振动等八种典型的受力状态。

光缆机械性能试验是检验光缆产品机械性能是否达到企业标准或者订货合同技术指标要求的检测试验，即判断被检测光缆产品是否合格的试验，光缆厂要定期按本厂企业标准对所生产的各种型号光缆做这种常规试验，以便及时判断所生产的光缆产品质量及质量控制是否存在问题。

## 第二节 性能测试

本章介绍的各种光缆机械性能测试方法，应根据光缆类型由用户与厂家共同商定。不同的光缆类型应选择不同的试验项目，并非所有的光缆类型都要做所有的项目。合格判据和试样数量等应符合相关的国家标准、行业标准和产品进网规定。

### 十一、拉伸

#### 1. 目的

拉伸的测试方法适用于在规定的拉力下试验光缆，以验证在敷设的光缆中光纤的衰减和光纤伸长应变性能与负载之间的关系。这个方法的初衷是非破坏性的（即施加的拉伸力应在光缆的弹性范围内）。

两种测试方法为：

方法 1：测量衰减变化的方法。

方法 2：确定光纤伸长应变的方法。

方法 2 可以提供现场敷设光缆最大允许拉力和光缆应变安全系数。两个方法既可单独使用，也可以组合使用，应按详细规范要求或按用户和厂方协商意见进行。

#### 2. 试样

试样应在整盘光缆上进行。在受试光缆的两端做好光纤端面处理。

#### 3. 试验装置

试验装置组成的示例，如图 8.1 和图 8.2 所示。

- (1) 方法 1: 用一台衰减测量仪来测量衰减变化
- (2) 方法 2: 用一台光纤伸长应变测量仪 (详见光纤伸长测量方法) 测量其拉伸应变。抗拉强度测量装置能够调节受试光缆的最小长度。所用的转向滑轮, 如图 8.2 所示。

负载传感器的最大负载范围的最大误差为 3%。仔细地按规定方法调节夹持装置来夹持光缆使之不影响试验结果。如需要, 应提供机械和电气方法来测量光缆伸长。

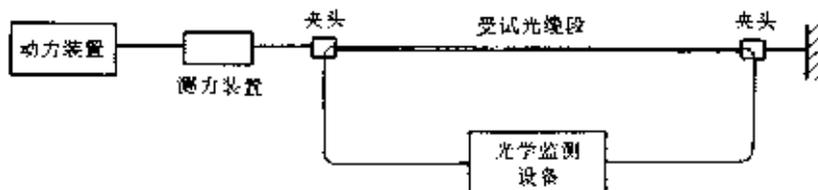


图 8.1 拉伸性能测量原理

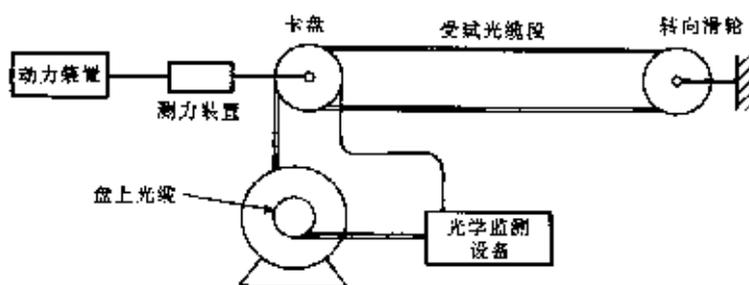


图 8.2 用转向滑轮和卡盘的拉伸试验装置示例

#### 4. 试验程序

试验应在标准大气条件下进行。安装光缆至拉伸设备并保证其固定安全。在拉伸设备和两端所用的固定光缆的方法是均匀地固定受试光缆, 限定住光缆中的所有元件的移动。对多层光缆结构 (例如, 层绞式光缆), 实际上是夹持住光缆各元件 (除光纤外), 足以获得衰减变化和/或光缆的最大允许拉伸负载和应变极限。然而, 对某些光缆结构 (如中心管式) 需要通过防止光纤滑动措施才能获得正确的应变极限值。

将拉伸试验中光缆的光纤连接到测量仪。对方法 2 (光纤伸长测量方法—差分脉冲时延), 在试样拉伸中要小心不要让标准光纤长度发生变化。

按有关规范要求连续增大拉伸负载至规定值。记录衰减变化和/或光纤应变与光缆负载或伸长的函数关系。对大芯数光缆, 可以采用一台多路衰减和 (或) 多路光纤应变测量仪。通常, 试验循环次数为一次。

试样的衰减和/或光纤应变不超过相关规范的要求值。对方法 2 如果有详细

的规范要求，应该计算出光纤伸长率与负载，包括去除拉伸负荷后的残留伸长。光缆伸长率  $\varepsilon_c$  和光纤伸长率  $\varepsilon_f$ ，如图 8.3 所示。

如果需要，应在光纤应变与拉伸负荷曲线上定义出光纤开始发生应变处的负荷，即曲线的线性部分与负荷横坐标轴的相交点。试验报告中应包括下列内容：光缆长度和受试长度、光纤端面制备状况、负荷传感器、注入条件、衰减测量仪用的光纤应变测量装置、在特定波长的衰减或光纤应变变化与负荷的函数关系及拉伸速率等。

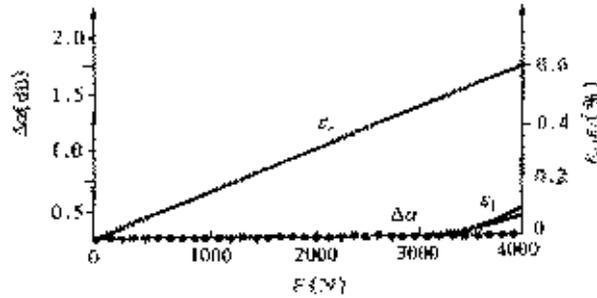


图 8.3 光纤伸长和光缆伸长与拉伸负荷的函数关系

## 十二、 光缆护套耐磨损

### 1. 目的

光缆耐磨损包括两个涵义：护套的耐磨损和光缆标志的耐磨损。本书光缆耐磨损试验的目的是确定光缆护套耐磨损。

### 2. 试样

试样长度按规定要求，典型的试样长度为 750mm。

### 3. 试验装置

耐磨损试验装置是由一个设计成沿平行光缆纵轴从两个方向以每分钟  $55 \pm 5$  个循环的频率磨擦光缆外表面的长度为  $10 \pm 1\text{mm}$  的设备组成。一个磨擦沿两个方向各移动一次构成一个磨损循环。磨擦刃口应是直径为按详细规范规定的一个钢针。一个典型的磨损试验装置，如图 8.4 所示。

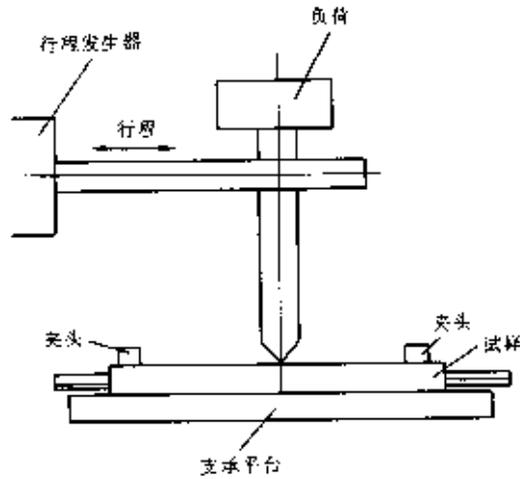


图 8.4 磨损试验装置

#### 4. 试验程序

试验应在标准大气条件下进行。用光缆夹头将测量长度大约为 750mm 的光缆试样牢牢地固定在支撑平台上。按有关规范要求给磨擦刃口提供所需的负荷力，而且要避免冲击光缆。对每个试样进行四次试验，每次试验后试样向前移动 100mm，同时按同一方向旋转 90°。

按有关规范要求的循环数试验后，光缆护套应无磨穿现象出现，而且要保持光缆中光纤的光学连续性。

### 十三、压扁

#### 1. 目的

压扁试验的目的是验证光缆的耐压能力。

#### 2. 试样

光缆试样长度要保证完成试验规定的要求。

#### 3. 试验装置

试验装置应能使在平钢板和可移动钢板之间的光缆试样的受试长度为 100mm 的部分受到均匀的压力。可移动钢板的边缘应倒圆，倒圆的半径大约为 5mm。在钢板的平面部分不包括边缘。典型的试验装置如图 8.5 所示。

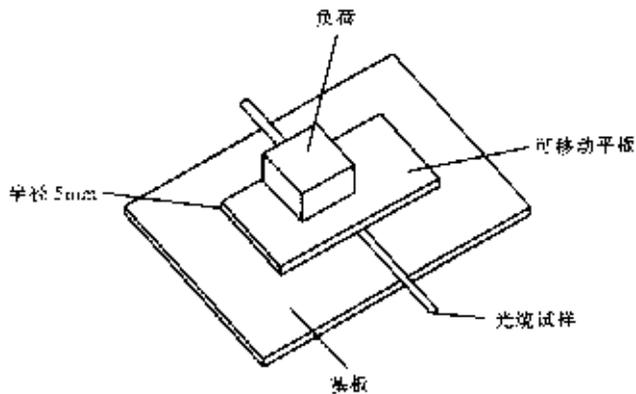


图 8.5 压扁试验装置

#### 4. 试验程序

将光缆试样置于两平钢板间，防止其侧向移动。逐渐施加压力，以求不产生突然变化。如采用逐步增量方式施加压力，则增量比不超过 1.5:1。

在不转动光缆试样的情况下，压力应施加在试样的三个不同的位置，它们的位置间隔应大于 500mm。

如有规范要求进行工作条件试验，可在垂直于试样方向插入一根或多根钢棒（直径为 25mm）进行附加或替代试验。试验应在标准大气压下进行，试验时应在有关规范中规定最大压扁力、允许的短暂压扁力和长期压扁力。通常，试验施加负荷的持续时间至少为 1min。如有要求应在加载下测量试样的附加衰减，卸载 5min 后，测量试样衰减变化。

试验合格判断依据应详细规定。典型的破坏形式包括：光缆中光纤丧失光学连续性，光传输性能恶化或光缆遭受到物理损伤。

图 8.6 所示为典型的压扁试验中测量的压扁力与附加衰减的变化曲线。

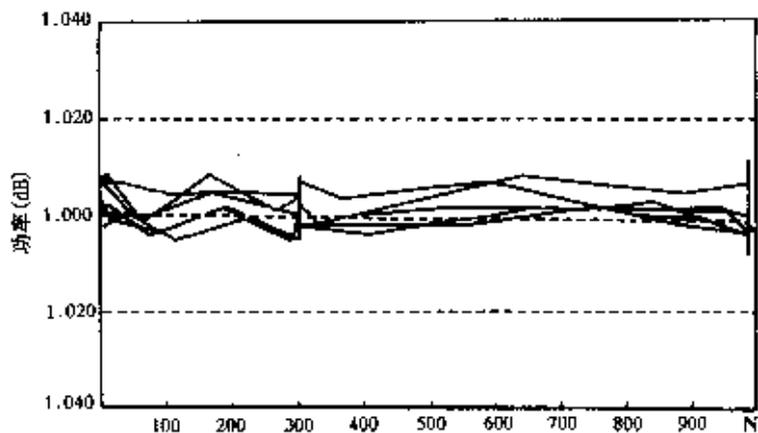


图 8.6 压扁力与附加衰减的变化曲线

#### 十四、 冲击

##### 1. 目的

冲击试验的目的是验证光缆耐冲击能力。

##### 2. 试样

光缆试样长度要保证完成试验规定的要求，当只对光缆试样物理损坏进行判定时，试样长度为 1m（如小直径的软跳线光缆或双芯光缆）至 5m（大直径光缆）。如要进行光缆光学性能测量时则要求的光缆试样长度较长。

光缆试样和每端连接一个连接器或者采用一种典型的方法，将光纤、护套和加强件夹持在一起，如冲击装置上的夹具合适，试样就不受上述限制。

##### 3. 试验装置

试验装置将使冲击作用到固定在一个钢基座平台上的光缆试样上。对只需一次或几次冲击的试验，所选用的合适试验装置，如图 8.7 所示。

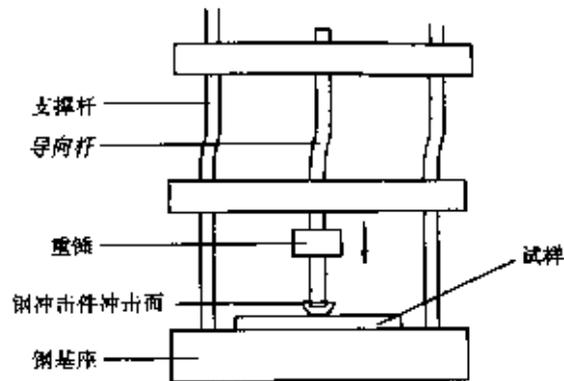


图 8.7 几次冲击试验装置

冲击试验装置将重物以垂直落体方式使冲击力传递到受试光缆试样的一个中间钢件上。当需要进行重复冲击（即冲击数大于 5 次）试验时，选用的是更为实用的冲击试验装置，如图 8.8 所示。通过落锤可实现重复冲击。通常，冲击速率约为 2 秒一个循环。

与试样接触的冲击表面应为圆形。它即可是半球形（图 8.9A）又可是圆柱形（图 8.9B）。冲击件表面半径  $R$  应为 300mm。试验装置应包括光学性能测试设备，按规范要求对试样进行衰减变化的测量。

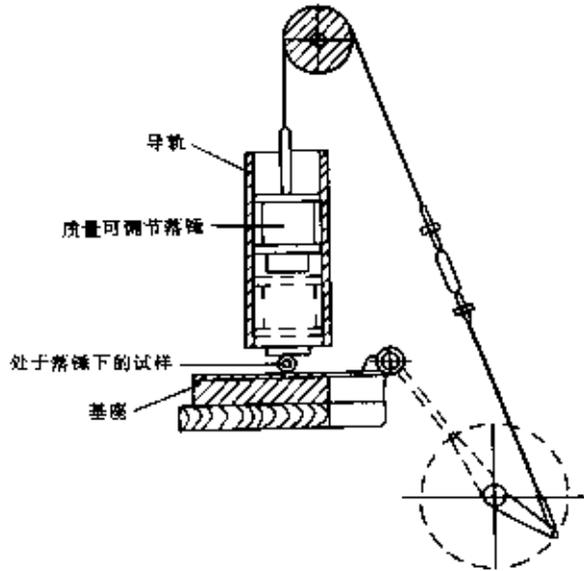


图 8.8 重复冲击试验装置

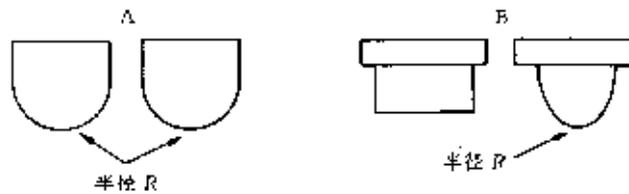


图 8.9 冲击件表面形状

#### 4. 试验程序

试验是在标准大气压条件下进行。如需要，光缆试样应在标准大气压条件下预处理 24h。冲击试验规范中应规定冲击次数、冲击速率和在试样上的冲击位置。

试验合格判据应按有关规范内容进行。典型的试样失效形式包括：光缆中光纤丧失光学连续性、光传输性能降低或光缆物理损伤、图 8.10 给出一个典型的冲击试验引起光纤附加衰减的曲线。

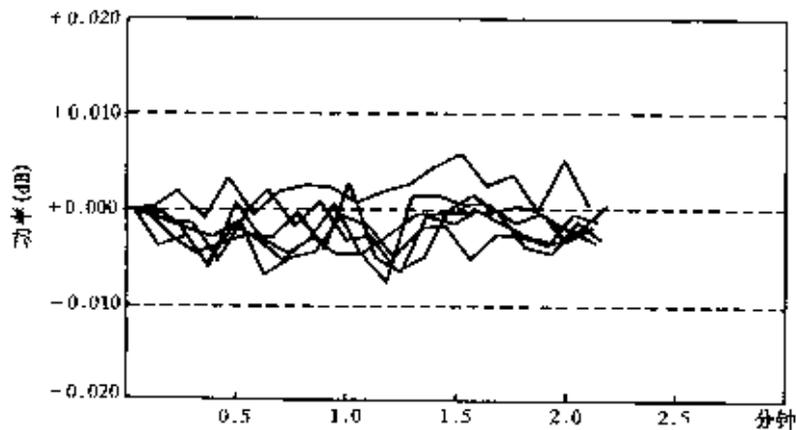


图 8.10 冲击试验的光纤附加衰减

## 十五、反复弯曲

### 1. 目的

反复弯曲试验的目的是验证光缆经受反复弯曲的能力。

### 2. 试样

试样长度应满足试验规定的要求。当只鉴别光缆试样物理损伤时，试样长度为 1m（例如，小直径的软跳线光缆或双芯光缆）至 5m（如大直径光缆）。如要进行光学性能测量时，所需要的试样长度会更长。

光缆试样的每端应与连接器连接，或以一种典型的方法将光纤、护套和加强件夹持在一起。如果弯曲装置上的夹具合适，试样长度不受上述条件限制。

### 3. 试验装置

试验装置允许试样左右往复弯曲角度达  $180^\circ$ 。试样的两个极根位置为试样的两个垂直边弯成  $90^\circ$ 。与此同时，试样受到一个拉伸负荷。光缆反复弯曲试验装置，如图 8.11 所示。对带有连接器的光缆反复弯曲试验装置，如图 8.12 所示。

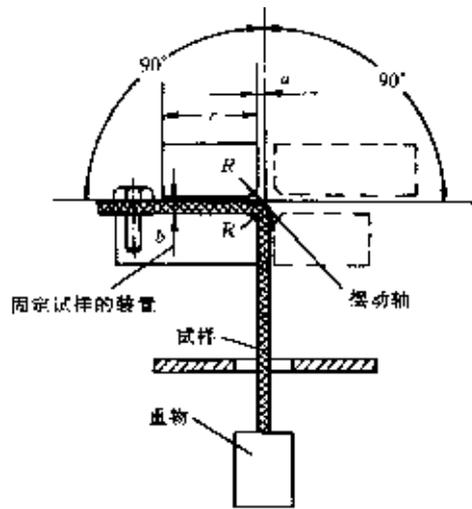


图 8.11 光缆反复弯曲试验装置

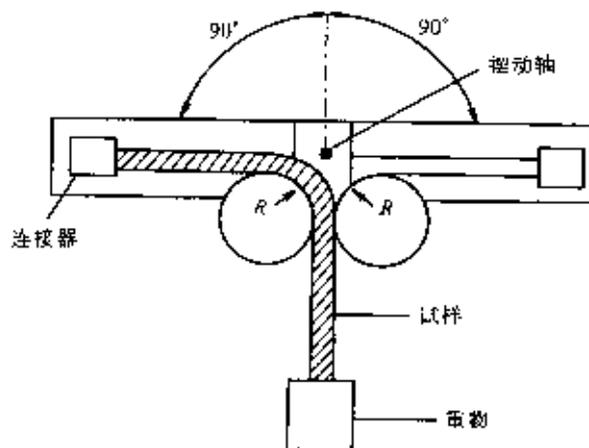


图 8.12 带连接器的光缆反复弯曲试验装置

试验装置应具有一可调节的夹具或固定件来牢牢地夹住光缆试样，以求试验中不压住光纤或引起光衰减。对带有连接器的光缆，可用连接器将试样光缆固定到弯曲臂上。

试验装置应具有循环能力，将试样由垂直位置移至右端极限位置。然后摆动弯曲到左端极限位置，再返回到原始的垂直位置构成一个循环。通常，弯曲速率为 2 秒一个循环。如有必要，试验装置应包括光传输性能测试设备来测量受试光缆中光纤的光衰减变化。

#### 4. 试验程序

试验应在标准大气压条件下进行，试验程序分为六个步骤实施。

- (1) 将光缆试样在标准大气压下预处理 24h;
- (2) 将试样固定在试验装置上，方法如图 8.11 和图 8.12 所示;
- (3) 按规范要求对试样施加重物;
- (4) 建立测量合格判据的基准值;
- (5) 按规范规定的循环次数进行反复弯曲;
- (6) 进行合格判据参数测量，如需要，将试样从试验装置上取下进行外观检查。

试验合格判据应在规范要求内，典型的试验失效形式包括：受试光缆中光纤丧失光学连接性、光传输性能下降或光缆受到物理损伤。

## 十六、 扭转

### 1. 目的

扭转试验旨在确定光缆抗机械扭转的能力。本试验的目的一是当光缆护套受到扭转外力作用时，测量光纤的光功率变化；二是判定当扭转外力作用时，光缆发生物理损伤的可能性。

### 2. 试样

光缆试样的总长度应确保其夹持和扭转要求，且能满足按规范要求传输性能测量的长度。

### 3. 试验装置

扭转试验装置主要由两个光缆夹头组成。一个固定夹头和一个转动夹头作为夹持用。两个夹头之间的距离是可调的。转动夹头与合适的转动装置（如一扭转柄）相连接。所用的夹头支架、夹具或扭转装置应允许与光缆试样两端相连接，以便进行必要的传输性能试验。一些典型的光缆扭转试验装置，如图 8.13、图 8.14、图 8.15 所示。

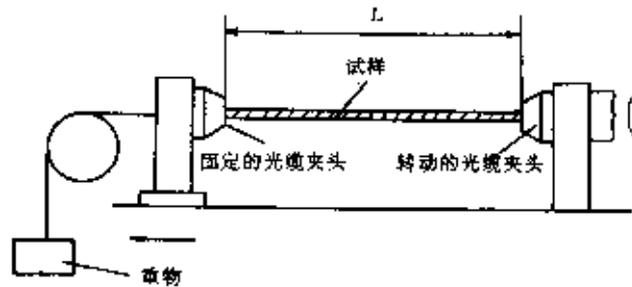


图 8.13 光缆扭转试验装置

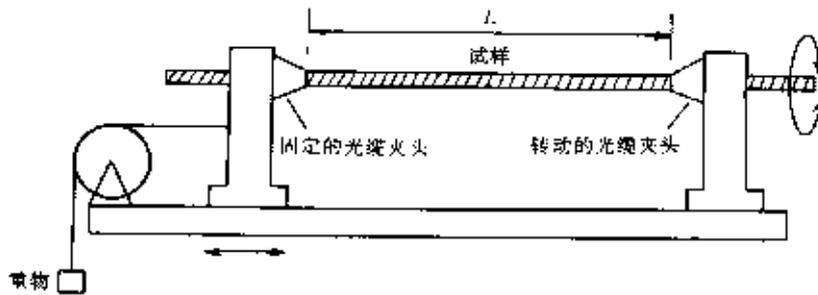


图 8.14 施加拉伸力的光缆扭转试验装置

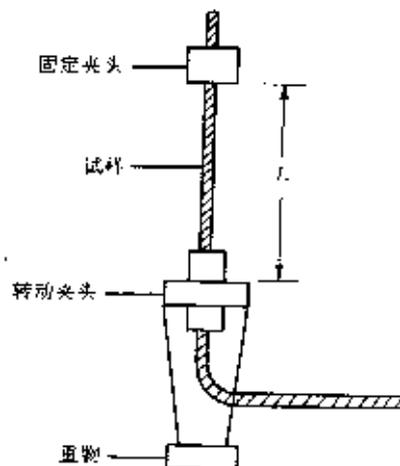


图 8.15 施加拉伸的替代光缆扭转试验装置

光缆夹头应具有下列功能：

- (1) 夹头应紧紧夹住光缆周围，以防止光缆在夹头中移动。
- (2) 夹头牢固地夹持光缆呈直线。
- (3) 夹头既不会由夹头内缘对光缆产生局部扭转损伤，又不会在光缆上造成压力局部集中。
- (4) 夹持过程中不会使试样中产生任何明显或精确到可测的衰减增加。

如果规范要求试样由弯曲变直，在夹头处加上重物或合适的负载装置使光缆受到拉伸负荷，详见图 8.14 和图 8.15 所示。

正如具体规范要求，试验装置包括光传输性能测量设备来测量整个测试过程中光缆中光纤的光传输性能变化。

#### 4. 试验程序

夹在试验装置中的试样受试长度应满足具体规范要求。小心确保试样不受到初始应力，除非需要进行扭转操作外，在整个试验中注意不要移动或扰动两端。尽最大可能减小试样垂度（图 8.13 和图 8.14）或与直线的垂直偏差（图 8.15）。如果具体规范要求测量光传输性能变化，所测的试样应不受力，比较夹持后的测量结果，以保证夹持不会明显地降低光缆光传输性能。

除非另有要求，通过支撑试验长度或对处在两夹头之间光缆试样施加拉力使试样垂度和弯曲得更小。如需要，按具体规范的要求施加拉力使试样呈直线状。施加拉力的数值，如表 8.1 所列。

表 8.1 施加的拉力

标称光缆直径范围	mm	最小负载	N
≤ 2.5		15	
2.6 ~ 4.0		25	
4.1 ~ 6.0		40	
6.1 ~ 9.0		45	
9.1 ~ 13.0		50	
13.1 ~ 18.0		55	
18.1 ~ 24.0		65	
24.1 ~ 30.0		70	
≥ 30.1		75	

如具体试验规范要求测定光传输性能变化，应在光缆试样夹好且施加拉力负载后测量试样光缆中光纤的光输出功率。

旋转活动夹头的方法如下：顺时针旋转 180° 返回起始位置，反时针旋转

180° 返回起始位置。四个旋转运动构成一个循环。除非另有规定，每个循环应在 1min 内完成，总的循环数为 10。

在最后一个（即第十个）循环过程中，为确定光缆中传输光纤数要使试样光缆顺时针旋转 180°，反时针旋转 180° 在最后一个循环完成后，光缆不转动。

完成合格判据参数测量。让试样至少静止 5min。如果需要，将试样从试验装置上取下进行目视检查。

被测试样的合格判据应在具体的规范中予以阐述。典型的损伤形式为：丧失光学连续性、光纤损耗增加和光缆护套组件损坏。

## 十七、 曲挠

### 1. 目的

曲挠试验的目的是确定光缆在服役（如电梯光缆）中耐反复曲挠的能力。

### 2. 试样

试样应终接在一连接器的两端或以一种典型的方式将光纤、护套和加强件夹持在一起。试样长度应满足完成试验的规定要求。

### 3. 试验装置

曲挠试验所用的试验装置，如图 8.16 所示。装置中的各滑轮，对圆形光缆，滑轮凹槽为半圆形；对扁平形光缆，滑轮凹槽为扁平形。固定限位夹头，通过拖架往复移动由拖架上的重物来始终对试样施加拉伸。

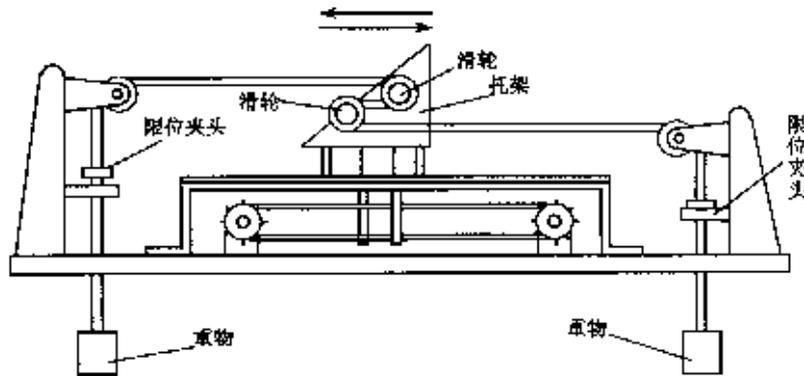


图 8.16 曲挠试验装置

### 4. 试验程序

试验后在标准大气压条件下进行。试样应通过滑轮拉紧。试样每端都加载重物。重物的质量和滑轮的直径应在规范中规定。应具体规定要求的循环次数，对光缆试样进行曲挠。一个循环的定义为：拖架离开起始位置移动到往复运动一端，再反向移动到往复运动的另一端回到起始位置。

在有关规定中应对试验的合格判据提出要求。典型损坏形式包括：丧失光学连续性、光传输性能降低或光缆物理损伤。

试验规范中应规定出：滑轮的直径、重物质量和循环次数。

## 十八、弯折

### 1. 目的

弯折试验的目的是确定光缆由弯折成一个圈开始缩小至最小圈的直径。

### 2. 试样

试样光缆长度应满足试验规定的要求。

### 3. 试验装置

试验如图 8.17 所示。即无需具体的试验装置。

### 4. 试验程序

按图 8.17 所示(1)。双手将试样光缆弯成一个圈，按图 8.17 所示(2)慢慢拉光缆试样两端使弯折圈直径开始缩小。位于弯折圈底部的力应作用在同一平面上。

试验应在标准大气条件下进行。图 8.17 所示(3)为弯折出现。

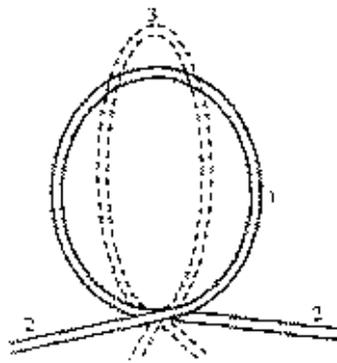


图 8.17 弯折试验

## 十九、弯曲

### 1. 目的

弯曲试验的目的是确定光缆或光缆元件耐围绕试验圆柱心轴弯曲的能力。

### 2. 试样

试样的两端应进行端接，典型的方法是将光纤、护套和加强件夹在一起。

### 3. 试验装置

一个圆柱心轴装置能使试样围绕圆柱心轴切向密密地缠绕成螺旋状。

### 4. 试验程序

可从下述的两个试验程序中任选一个进行试验。每个试验程序的具体规范分述如下：

#### (1) 试验程序 1

试样应以均匀速率围绕圆柱心轴切向密密地缠绕成螺旋状。施加足够的张力

来确保试样紧紧缠绕到圆柱心轴外表面，然后退绕。一次缠绕和一次退绕就组成一个循环。

试验圆柱心轴直径、每个试验的螺旋圈数和循环次数在具体规范中列出。

## (2) 试验程序 2

试样应绕试验圆心轴弯曲  $180^\circ$ 。弯曲时试样应保持在拉紧状态。一个弯曲循环是由一个 U 形弯曲紧接着一个反向 U 形弯曲。再返回到半径状组成。试验圆心轴直径和循环次数应在具体规范中列出。

试验合格判据应在具体规范中列出。典型的损坏形式包括：丧失光学连续性、光传输性能下降或光缆物理损坏。

## 二十、耐切入

### 1. 目的

耐切入试验方法的目的是确定光缆（如航空光缆）护套耐切入性能。

### 2. 试样

试样长度应满足试验规定要求。

### 3. 试验装置

所设计的试验装置应能以规定的速率对试样施加要求的切入力。适用的典型试验装置，如图 8.18 所示。应详细规范针棒的半径。

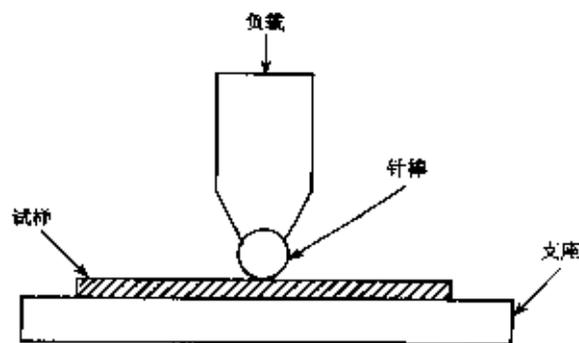


图 8.18 切入试验装置

### 4. 试验程序

试验时，以  $50 \pm 10\text{N/min}$  的速率逐渐地将切入力施加到试样上，所施切入力直至规范要求值。切入力持续作用时间应达到试验要求的时间。

试验结束后，用 5 倍和 10 倍放大镜目力观察试样是否遭受任何损伤。判断受试光缆合格与否的条件为：试样光缆护层上观察不到贯穿，而且试样光缆保持着光学连续性。

## 十一、枪击损伤

### 1. 目的

枪击损伤试验的目的是确定架空光缆耐猎枪枪击的损伤能力。

## 2. 试样

所用的光缆试样的典型长度为 3m。

## 3. 试验装置

枪击损伤试验的试验装置由枪和光缆试样组成。有关枪击损伤试验的试验条件为：

(1) 按规定要求规定枪型，枪型各国差别很大；

(2) 夹持光缆试样的支架应能使试样自由摆动。试验装置也应考虑与所用的枪有关的枪弹以椭圆形式散射击中试样；

(3) 子弹尺寸差别很大。它应该代表着实际安装光缆遭受枪击危险的情况。应具体规定子弹头类型。常用的弹头为铅或钢，与国别和厂家有关。铅弹头易冲击变形，其破坏性小于钢弹头。应对弹壳提出具体的规范要求。

## 4. 试验程序

将光缆试样安装在支架上，按规范要求的距离射击，典型的射击距离为 20m。可见弹着点数少，典型的为 3 个或更少。如光缆上弹着点数超过 3 个，应重新进行枪击试验。经过枪击试验后的光缆试样中的光纤仍应保持光学连续性。

## 十二、刚性

### 1. 目的

刚性试验的目的是测量光缆的刚性。通常可按光缆的类型从三个试验方法中任选一个进行光缆的刚性试验。

刚性是评价采用常用的拉放技术敷设（例如，管道、导管或地毯下）和吹气技术敷设时的光缆刚性，刚性也用于确保跳线光缆和室内光缆经受严重弯曲仍能进行敷设和正常使用的性能。在此应指出的是，由下述的三个试验方法测得的光缆刚性值与用其他试验方法确定的值并不相等。

### 2. 试样

光缆刚性试验按光缆类型不同可分为 A、B、C 三种方法，方法 A 和方法 B 适用于大直径光缆，方法 B 也适用于小直径光缆，包括：轻型铠装光缆和室内光缆。有关三种试验方法中涉及到的试样、试验装置、试验程序等内容，如下所述：

#### (1) 试验方法 A

##### ① 试样

试样长度应满足试验规定的要求。

##### ② 试验装置

三点弯曲试验装置，如图 8.19 所示。将光缆试样放置在允许试样光缆自由运行的两个支撑件上（例如用可旋转的棒作为支撑件）。试验装置应能对放在两个支撑件之间的试样施加作用力，并能测量受力后光缆试样发生的位移。

##### ③ 试验程序

按具体规范要求确定两个支撑件分开的距离。先将试样光缆放在两个支撑件上，再对试样施加作用力，最后测量光缆试样受力后发生的位移。

试样光缆长度超过两个支撑件距离，以此来保证光缆各组成件的任何内部的移动都不会影响测量结果。

作用力是通过固定到拉力试验机上的一个刀片或一个钩到光缆上的重物施加上到光缆试样上的。

如果作用力为  $F(N)$  引起试样光缆产生的位移为  $Y(m)$ ，两个支撑件之间的距离为  $X(m)$ ，那么光缆的刚性  $B$  为：

$$B = \frac{X^3(m)F(N)}{48y(m)} \quad (N \cdot m) \quad (8.1)$$

由于有些光缆（如铠装光缆）受到力作用后会呈现出一个由弹性状态到非弹性状态的变化特点，如图 8.20 所示。所规定的刚性是弹性刚性为：

$$B = \frac{X^3(m)}{48} \tan \alpha \quad (N \cdot m) \quad (8.2)$$

式中： $\alpha$  为曲线线性部分与横座标之间的夹角。

光缆刚性应满足规范中规定的要求。

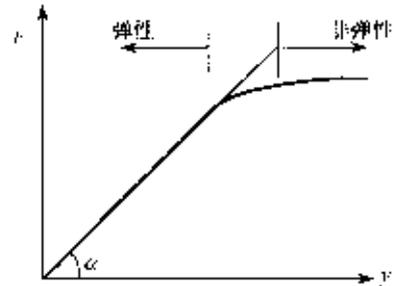
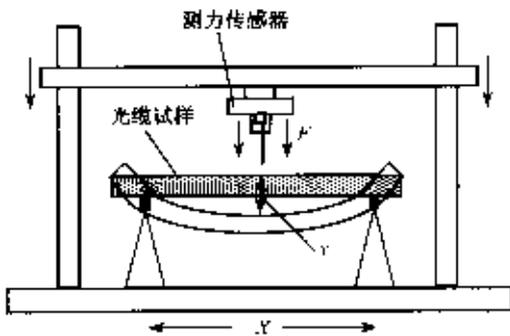


图 8.19 试验方法 A 的试验装置

图 8.20 力作用后引起光缆的位移变化的特点

## (2) 试验方法 B

### ① 试样

试样长度应满足试验规定的要求。

### ② 试验装置

悬臂试验装置，如图 8.21 所示。先将光缆试样牢牢地固定在一个夹具中，再借助试验装置对远离夹具的试样端施加一个作用力，最后测量受力后光缆发生的位移。在有些情况下（如小直径的跳线光缆），夹具设计成能够控制试样的弯曲半径。

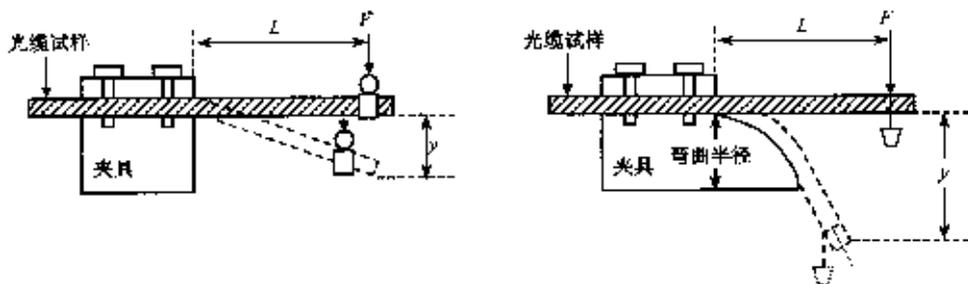


图 8.21 试验方法 B 的试验装置

### ③ 试验程序

先将光缆试样牢牢地固定在夹具中，再在离开夹具距离为  $L$  的试样处施加一作用力，最后测量受力后光缆发生的位移。

作用力是由拉力试验机或重物提供的。所选的试样长度应能保证光缆各组成件任何内部移动都不会影响测量结果。如一作用力  $F(N)$  引起光缆产生的位移为  $Y(m)$ ，试样光缆悬跨长度为  $L(m)$ ，那么光缆的刚性为：

$$B = \frac{L^3 F}{3y} \quad \text{或} \quad B = \frac{L^3}{3} \tan \alpha \quad (N \cdot m^2) \quad (8.11)$$

式中： $\alpha$  为弯曲角。

光缆刚性应满足详细的技术规范要求。

### (3) 试验方法 C

#### ① 试样

试样长度应满足试验规定的要求。

#### ② 试验装置

试验装置，如图 8.22 所示。试验装置应提供一种测定试样光缆 U 形弯曲时作用在试样上的力的方法。适宜的试验装置是一台配置有压力传感器和在规定的试验过程中具有维持给定的夹片间距的拉力试验机。

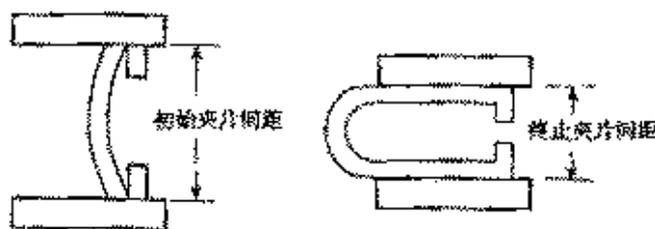


图 8.22 试验方法 C 的试验装置

### ③ 试验程序

试样以平直状态放入试验装置中。减小夹片间距到由  $S \cdot d$  给定的值。 $d$  为

光缆直径,  $S$  是具体规范要求的间距因子。在按具体规范要求的试验时间作用后, 记录作用在试样上的力。光缆的刚性为:

$$B = F \pi r^2 \quad (\text{N} \cdot \text{m}^2) \quad (8.4)$$

式中:  $F$ —测得的力 (N);

$r$ —最终的夹片间距的试样光纤的弯曲半径。

光缆刚性应满足详细的技术规范要求。

### 十三、拉力弯曲

#### 1. 目的

拉力弯曲试验是一个对光缆进行的动态试验, 其目的是通过对试样光缆施加特定的负荷来确定光缆耐绕滚轮的弯曲或敷设中的弯曲的能力。

#### 2. 试样

试样是从成品光缆一端抽出。按规范要求不要剪断。试样光缆两端应进行端接。端接的方法应便于对试样施加规定的负荷。试样光缆上应标出 A 点和 B 点, 标注方式, 分别如图 8.23 和图 8.24 所示。

#### 3. 试验装置

试验装置是由一台最大误差为  $\pm 3\%$  的拉力驱动装置组成。如特殊用户需要, 试验装置还应配置一台衰减测量仪来测定衰减变化和/或一台光纤拉伸应变测试仪。

拉力弯曲试验有两种试验方法: U 形弯曲试验和 S 形弯曲试验。U 形弯曲试验装置, 如图 8.23 所示。在相关的试验规范中应给出图中滚轮的半径  $r$ 。S 形弯曲试验装置, 如图 8.24 所示。在相关的试验规范中应给定两个滚轮的半径  $r$ , 两个滚轮的间距  $Y$  和弯曲角  $\phi$ 。

#### 4. 试验程序

试验应在室温下进行。按具体技术规范中规定的要求, 测量和记录施加规定负荷前和试验后负荷为零时的衰减变化。根据敷设方法和具体规范要求, 可从下述的两个试验程序中任选一个进行试验。

##### (1) U 形弯曲试验程序

光缆应绕一个圆筒形成一个最小的弯曲  $180^\circ$  (U 形弯曲), 如图 8.23 所示。或者是用户与制造厂家共同商定的其它值。拉力连续地增大到具体规范给出的要求值。光缆从 A 点移动到 B 点。再返回到 A 点, 具体规范中应规定出移动速度和循环次数。

##### (2) S 形弯曲试验程序

光缆绕两个圆筒形成一个 S 形 (S 形弯曲), 如图 8.24 所示。拉力连续地增大到具体规范的要求值。光缆从 A 点移动到 B 点, 再返回到 A 点, 具体规范中应规定移动速度和循环次数。

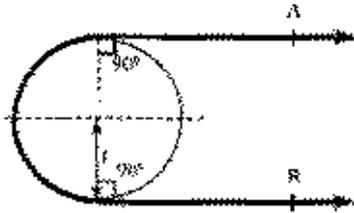


图 8.23 U形弯曲

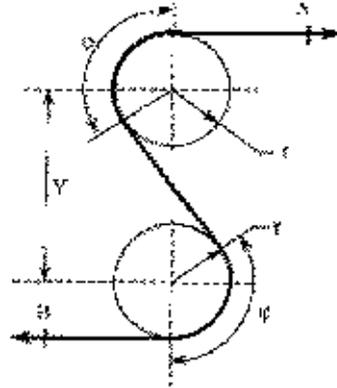


图 8.24 S形弯曲

经过拉力弯曲试验后，光缆护层和/或光缆组成元件无目力可见的损坏。拉力弯曲试验后，光缆中的光纤永久性衰减增大应不超过规范中的规定。

## 第九章 光缆的环境性能

### 第一节 环境性能测试的目的

光纤的光传输理论和物理特性与传统的金属导体有所不同，但光缆结构的基本要求与传统的金属通信电缆相同，即在光缆的生产、敷设和使用环境中保持光传输性能、环境性能、机械强度、电气性能的长期稳定。

由于通信光缆敷设到实际线路的路由上，它们会遇到各种不利的自然环境条件的作用或人为因素的影响，因此，人们应该在深入研究光缆的温度衰减、渗水、油膏滴流与蒸发、风积振动、过滑轮、舞动、耐电痕、阻燃性能的基础上，设计和制造出能够胜任任何可能面临的环境条件的光缆。换言之，实际使用的光缆应按其使用的环境要求分别具有良好的温度衰减性能、足够的机械强度、阻止水的渗透、耐电痕、阻燃等性能。总之，光缆结构的选择必须适应其使用的环境条件要求。

光缆环境性能测量的目的是模仿光缆实际使用条件，测量高低温度变化引起的光缆中光纤的附加损耗，光缆纵向、横向水渗透与否、阻水油膏高温下滴落和蒸发量、光缆受外力作用后光纤的衰减变化和光缆或光纤应变的大小，以及在感应电场和燃烧环境中光缆是否耐电痕、阻燃程度高低，以求使我们设计和制造出光缆完全适用于各种各样的通信网络，并在实际使用环境中可保证网络的长期安

全可靠。

## 第二节 性能与测试

### 十一、 温度循环

#### 1. 目的

温度循环试验方法是对光缆进行温度循环试验来确定光缆经受温度变化的衰减稳定特性。

光缆中光纤的衰减随温度的变化,通常是由于光缆加强件与各种护层之间热膨胀系数差异引起光纤弯曲和拉伸造成的。衰减与温度关系的测量试验条件应在最恶劣的温度条件下进行。

温度循环试验既可用于监视光缆在储存、运输和使用中温度变化时的特性。在选定的温度范围(通常比上述的温度范围更宽)又可检查衰减稳定性与光缆结构中光纤基本情况及有微弯情况的关系。

#### 2. 试样

试样应为一个工厂制造长度或有关规定的满足试验要求的长度。但是,试样还应能达到衰减测量所需的精度。我们建议:多模光纤光缆,试样长度不小于1000m;单模光纤光缆,试样长度不小于2000m。

为了获得再现值,光缆试样松绕成圈或绕在光缆盘上放入气候室内。光缆弯曲半径会影响到光纤对不同的膨胀和收缩(例如光纤在光缆中的滑动)的适应能力。因此,光缆的试验条件应尽可能在正常使用条件下进行。

可能出现的问题是在热循环中试样和光缆支架(盘、筐、平板等)之间膨胀系数不同引起的实际差别。只要不满足应有作用条件,试验结果将会受到明显的影响。

影响试验结果的主要因素:试验温度条件、光缆支架的类型和材料。通常建议的内容如下:

(1) 光缆盘缠绕直径要足够大,以确保光纤能调整不同的伸长和收缩。因此,缆盘缠绕直径应大于光缆运输选定的缆盘直径值。

(2) 消除试验条件下产生的光缆膨胀(或收缩)的任何危险。实际上,我们应特别小心防止试验中光缆中的残余应力。例如,光缆试样不应紧绕在缆盘上,因为紧绕会限定低温下试样的收缩。另外多层紧绕会限制高温下试样的膨胀。

(3) 推荐采用松绕,例如大直径松绕圈、具有柔软垫层缆盘或无应力装置。若需要时,为限制受试光缆长度,允许将光缆中几根光纤连接起来,对被连接光纤进行测量。应限制连接光纤数,并将连接光纤端头置于气候室外。

#### 3. 试验装置

试验装置是由一台适合确定衰减变化的衰减测试仪和一个能容纳试样的大小合适的气候室组成控制气候室温度,以保证在规定试验温度下温差变化在 $\pm$

3℃内

#### 4. 试验程序

##### (1) 起始测量

试样应在环境温度下至少放置 24h 进行预处理, 对试样进行外观检查并在起始温度下测量衰减基准值。

##### (2) 试验

① 将处于环境温度下的试样放入具有同样温度的气候室内。

② 以合适的冷却速率, 将气候室的温度由环境温度降低至适当的低温  $T_A$ 。

③ 待气候室温度达到稳定后, 将试样暴露到低温下停留适当的时间  $t_1$ 。

④ 以合适的升温速度, 将气候室的温度升高至适当的高温  $T_B$ 。

⑤ 待气候室温度达到稳定后, 将试样暴露到高温下停留适当的时间  $t_1$ 。

⑥ 接着, 以合适的冷却速率将气候室的温度降低到环境温度值。这个试验过程就构成了一个温度循环, 如图 9.1 所示。

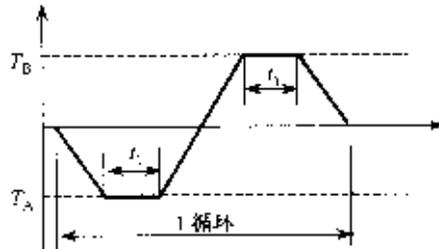


图 9.1 一个温度循环试验程序

⑦ 除非另有详细的规范要求, 光缆试样应经历两个温度循环试验。

⑧ 有关详细规范阐述的内容:

A. 试验过程中衰减变化和观察比较。

B. 在哪段时间后完成观察。

⑨ 被测试样从气候室取出之前, 应在环境温度下稳定一段时间。

⑩ 如果比较详细的规范给出的是储存和使用的不同温度范围, 而不是两个不同的试验, 则应按图 9.2 所示的组合试验程序进行试验。

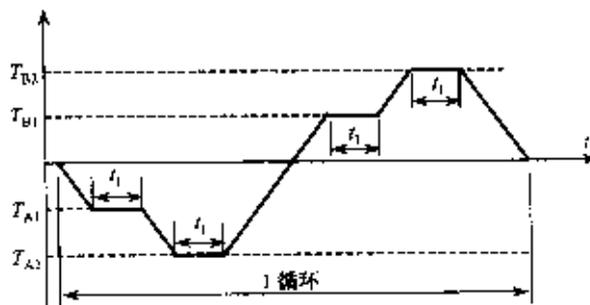


图 9.2 组合试验程序

(1)  $T_{A1}$ 、 $T_{A2}$ 、 $T_{B1}$ 、 $T_{B2}$  和  $t_1$  与冷却（或加热）速率应详细的规范中规定。由于光缆结构不同，缆芯的温度与气候室的温度也不同。

### (3) 恢复

① 如果试样从气候室取出用于试验条件不是标准大气压条件，试样应在标准大气压条件下获得稳定的温度。

② 相关的详细技术规范中对不同类型的试样，一般都要求规定恢复周期。

有关规范中应绘出试验的合格判据。典型的损伤形式包括：光连续性损耗、光传输劣化或光缆的物理破坏。

## 十二、 渗水

### 1. 目的

渗水试验的目的是确定光缆在规定长度方向上阻止水迁移的能力。图 9.3 所示的两种渗水试验适用于连续的填充型阻水光缆。

通常，选用方法 A 或方法 B 之一来检查光缆渗水。方法 A 用来检验缆芯外空隙与外护层之间的水迁移。方法 B 则用来检验设计的填充型阻水光缆全横截面的水迁移。

### 2. 试样

#### (1) 方法 A

在位于光缆试样一端 3m 处去除一圈 25mm 宽的护层和绕包层，以使 1m 高的水柱的水密套筒作用在裸露的缆芯上，检验在缆芯外空隙与外来护层中形成桥接间隙的水迁移。

#### (2) 方法 B

受试光缆试样长度大于 1m，但不超过 3m。如果需要，试样先按弯曲试验程序进行弯曲试验，再从试样的中部截取最大光缆长度为 3m。光缆试样的一端插入水密套筒，检验 1m 高水柱对试样进行全截面水迁移作用。

### 3. 试验装置

两种渗水试验的试验装置分别为如图 9.3 所示。

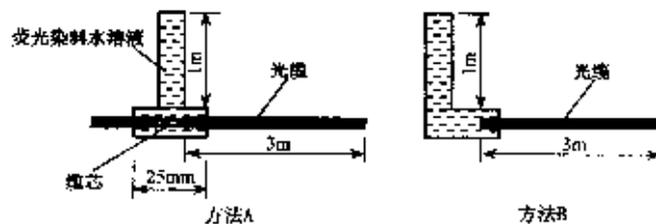


图 9.3 渗水试验

### 4. 试验程序

试样应水平放置，在  $20 \pm 5^\circ\text{C}$  温度下，施加 1m 高水柱持续作用 24h。为直观清晰地检查水渗漏，通过用水溶性荧光染料或其他合适的着色剂组成溶液。所选

择的荧光染料应不与任何光缆组成元件发生化学反应。

试验裸露端应观察不到渗水。如采用的是荧光染料水溶液，则可用紫外光来进行渗水检查。

### 十三、 阻水油膏滴流

#### 1. 目的

阻水油膏滴流试验的目的是证实填充型光缆内注入和填充的阻水油膏在规定温度下是否从光缆中滴流出来。

#### 2. 试样

##### (1) 试样数和类型

除非另有规定，从每种光缆中取 5 个光缆试样进行验证试验。每个光缆试样代表着规范中规定的光缆类型。

##### (2) 试样长度

除非另有规定，每个试样长度应为  $300 \pm 5\text{mm}$ 。

##### (3) 试样制备

光缆试样制备步骤如下：

① 从试样的一端剥去一节  $130 \pm 2.5\text{mm}$  长的外护层；

② 从试样光缆同一端去掉  $80 \pm 2.5\text{mm}$  长的所有非光缆本征元件（如铠装、屏蔽、内护套、螺旋加强件、阻水带、其他的缆芯包带等）。不要干扰光缆的保留件（如，容纳光纤的松套管、用来保持圆形的填充物等）。

③ 轻轻地去除经过①、②步骤后试样弄乱的粘附的一些注入或填充的阻水油膏。但要确保试样基本上保持原有的注入或填充（即不要擦干净）。

④ 如预先允许，在施加夹具、塞子（插头）之前，称量每个试样的重量。

⑤ 对包含有光纤束或光纤带的光缆结构测试时，光纤束或光纤带会因自重作用发生滑动。为确保试样未处理端的这些元件一点都不会扰动试样的填充物。用夹具、环氧树脂塞或其他方式固定光纤束和光纤带，以满足试验目的要求。

⑥ 详细规范允许时，可将松套上端密封起来达到模拟长的光缆试样的情况。

#### 3. 试验装置

用来完成阻水油膏滴流试验的装置有：温度试验箱、盛料器皿和天平等。

##### (1) 温度试验箱

温度试验箱应具有足够的热容量以便在试验期间保持规定的温度，并具有足够的空间放置试样。如温度试验箱为空气环流型的，则空气不应直接吹到试样上。

##### (2) 盛料器皿

收集滴流物的盛料器皿应是非吸湿性容器。

##### (3) 天平

天平精度应至少为  $0.001\text{g}$ ，并且能称出空的和滴有允许量的滴落物盛料器

皿间的重量差。

#### 4. 试验程序

阻水油膏滴流试验的试验程序，如下所述：

- (1) 将温度试验箱预热至规定的温度；
- (2) 将制备好的试样放入试验箱内，制备好光缆试样一端朝下垂直悬挂。将预先经称重的清洁盛料器皿直接置于（但不能碰）悬挂的试样下；
- (3) 除非另有标准规定时，可按下列步骤对试样进行预处理，否则继续步骤(4)；

① 使温度试验箱内温度达到稳定，除非另有规定，每个试样预处理 1h。

② 预处理结束后，以另一个预先经称重的清洁盛器皿替换原先的那个。对预处理期间使用的盛料器皿称重，记录预处理期间可能滴流的光纤或光缆用阻水油膏量。滴流量大于规定值应作为一次试验失效。除非另有规定，此值应为试样重量的 0.5% 或 0.5g。

③ 通常，试验时间应为 23h，然后继续步骤(5)。

(4) 使箱内温度达到稳定。除非另有规定，试验时间应为 24h；

(5) 试验时间结束后从试验箱内取出盛料皿并对其称重；

(6) 记录每一个试样可能滴流的光纤或光缆用阻水油膏重量，除非另有规定，滴流量不大于 0.005g，作为“无滴流”。试验温度和是否进行预处理应在有关标准中规定。

所有试样中应允许出现一个大于 0.050g 的滴流量。如最初的 5 个试样中有 1 个滴流量大于 0.050g，但小于 0.100g，则应按试样长度和试样制备要求重新制备 5 个追加试样，按试验程序中(1)至(6)进行试验。如追加试样中滴流量无一大于 0.050g，则作为试验合格。

#### 十四、油分离和蒸发

##### 1. 目的

油分离和蒸发试验的目的是测量用于与光纤接触的注入阻水油膏高温时的析出和/或蒸发。

##### 2. 试样

用来与光纤接触的填充阻水油膏。

##### 3. 试验装置

油分离和蒸发试验的试验装置由加热温箱、分析天平和吊挂圆锥漏斗等组成。

(1) 一台带自然通风的电加热温箱。

(2) 一架误差极限  $G=0.1\text{mg}$  的分析天平。

(3) 吊挂圆锥漏斗等试验装置（如图 9.4 所示）的构成如下：

① 一个带金属丝吊钩圆锥漏斗镍金属网，网眼为 60 目（孔数 5.6/mm、金属丝直径 0.19mm、网眼 0.28mm）。圆锥漏斗也可由 60 目不锈钢丝网（网眼 0.25mm）构成。焊线宽大于 1mm。业已证实，两根金属网组成的圆锥漏斗对试验结果无多大的区别。

② 一个 200ml 无倾口的长形烧杯。

③ 一个干燥器。

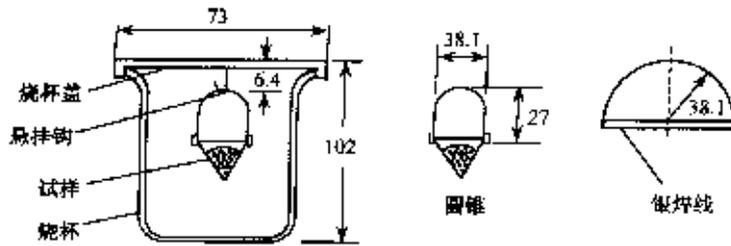


图 9.4 油分离和蒸发试验装置

#### 4. 试验程序

称量干净的烘干烧杯的重量记作  $M_1$ （称重准确到 1mg），称量配有圆锥漏斗和圆锥漏斗支撑件的烧杯重量记作  $M_2$ 。向圆锥漏斗中加大约 10g 的试样（圆锥漏斗上表面应平滑和凸出，以求流体不被收集，而且在金属网中没有聚积材料）。称量安装好的试验装置和试样的重量记作  $M_3$ 。

将整个试验装置放入温箱内按规定的要求加热并持续一段时间。然后，将整个试验装置从温箱中取出，放入一个干燥器中冷却到室温。再称量整个试验装置的重量记作  $M_4$ 。小心地取出圆锥漏斗及其支撑件后，再称量烧杯的重量记作  $M_5$ 。计算出油分离（析油）和蒸发的百分比，报告重复测试平均值。析油和蒸发量的计算式为：

$$\text{油分离 (\%)} = \frac{M_5 - M_1}{M_3 - M_2} \times 100 \quad (9.1)$$

$$\text{油蒸发 (\%)} = \frac{M_3 - M_4}{M_3 - M_2} \times 100 \quad (9.2)$$

油分离和油蒸发的试验结果应不超过规定要求的最大值。

### 十五、 气体阻力

#### 1. 目的

气体阻力试验仅适用于气体压力保护非填充光缆。气体阻力试验的目的是检验非填充光缆的气体阻力。

#### 2. 试样

最终的光缆试样长度应满足完成规定的试验要求的长度。

### 3. 试验装置

气体阻力试验装置由下列几个部分组成：

- (1) 向光缆试样提供稳定气压的空气压缩机；
- (2) 气体流量计；
- (3) 气压表；
- (4) 温度计。

### 4. 试验程序

测量室温和气压表压力。在室温下，最终的光缆试样的一端连接到一个压力稳定的干燥空气（空气干燥度为 5%RH 或更好）的气源，试样光缆的另一端裸露到大气中。施加到穿过光缆的压力应为 62kPa，其相对容量差为 ± 2%。用一个校正到 ± 10% 的气体流量计记录稳定气体流量，也可按特殊用户的要求和有关规定选用其他的气体压力。我们测量的只是那些通过光缆护层内的气路的气流，沿空气流动方向相反的方向做第二测量，分别记录两次的测量结果。可由下式求得气体阻力 F：

$$F = \frac{3720}{f \cdot L} \quad (\text{kPa} \cdot \text{s}/\text{m}^3 \cdot \text{m}) \quad (9.3)$$

式中：L—试样长度 (m)；

f—气体流量 (m/s)。

气体阻力应满足有关规定给出的气体阻力的最大值。

## 十六、风积振动

### 1. 目的

风积振动试验的目的是评价 ADSS 光缆在典型的风积振动条件下，光缆的疲劳性能和光纤的光学特性。

### 2. 试验装置

风积振动用的试验装置的典型配置和技术保证措施，如图 9.5 所示。两端支座用来给光缆上加张力负载和维持光缆上的张力。被测光缆段安放在两个中间支座之间。如果组合装置能按规定提供足够空间，端头支座和中间支座就不必做成分离装置。截取的受试光缆长度应超过两中间支座间距离，以便于剥去光缆护层和光纤的接入操作。为便于将光缆固定放到两中间支座之间，试样光缆上配有末端或端头金具。在对试样光缆施加张力前，应对试样光缆两端作终接处理，以使光纤不会发生相对于光缆的位移。光缆的张力测量用的是测力计、负载传感器、校正臂或其他装置。风积振动试验中应采取一些措施来保证温度波动条件下光缆受试张力恒定。将受试光缆上张力加至额定的最大安装张力的 100%。

为获得试验结果的重复性，主动作用跨距为两末端金具之间距的三分之二，即大约在悬挂金具所处的位置。主动作用和/或背后跨距也可用更长的距离，见

图 9.5 所示。悬挂金具支撑的高度要确保在主动作用跨距内光缆与水平所成静垂直角为  $1.75 \pm 0.75^\circ$ 。

应提供一些方法来测量和监视自由驻波而不是支撑点处的中间波腹点振幅。用一合适的电控振动器来激振垂直平面上的光缆。振动器的衔铁被牢固地拴在光缆上，以使其与垂直面的光缆垂直。振动器安放在跨内的位置应保证在悬挂金具和振动器之间，最少有六个振动驻波。

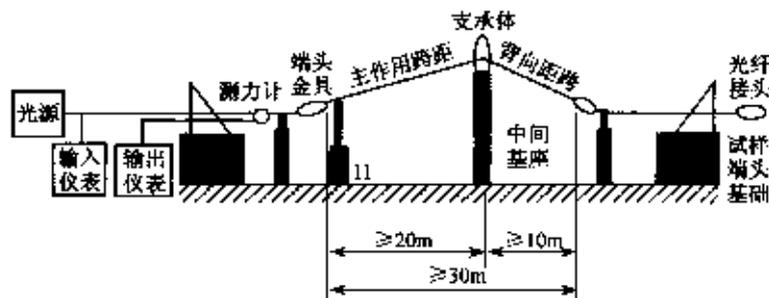


图 9.5 风积振动试验装置

光纤的受试长度（即两终端之间的距离）至少应为 100m，为达到 100m 长度的试验要求，可将几根光纤串联熔接起来。从被测光缆中的一根松套管或一个光纤束中至少抽一根光纤进行试验。应使所做的光纤接头与光设备在同一端。进行光纤光学性能测量所用的光源标称波长值：单模光纤 1550nm，多模光纤 1300nm。

光源被分成两个信号，一个信号接至光功率计作为参考信号，另一个信号与被测光纤自由端相连作为注入信号。从被测光纤输出的信号接至第二个光功率计。整个试验期间，所有的光学和接头都应保持着原封不动状态。

初始光学性能测量应在光缆跨度上预先加张力至大约为最终最大安装张力的 10% 时进行。初始测量的两信号之差给出了一个参考电平，试验中这个信号差的变化将显示出受试光纤的衰减变化。为连续复制记录，测得的信号被输入纸带曲线记录仪。

### 3. 试验程序

光缆应受到最小  $10^8$  次循环振动。试验跨度的振动频率，应等于和维持在由 16.1km/h 风速产生的共振频率（即频率 =  $82.92 \div$  光缆直径 (cm)，振幅为光缆直径 / 2）自由波腹点峰与峰振幅应保证等于光缆半径。在开始阶段，应密切注意光缆试验区域。在试验区域稳定前，应每隔 15min 记录一次，在试验区域稳定之后，应每天记录两次（一般是每工作日开始和结束时）数据。

最终测试应在振动完成 2h 后进行，且应重复一次光缆拉伸试验。金具支撑位置处取来的光缆，应加负载到最大额定光缆负载。衰减必须符合有关规定要求。

## 十七、过滑轮

### 1. 目的

过滑轮试验的目的是验证 ADSS 光缆通过推荐尺寸的架线滑轮和作业过程后光缆没有损伤或光纤光学性能未劣化。

## 2. 试验装置

过滑轮试验的典型装置，如图 9.6 所示。过滑轮试验应在数米长的光缆试样上进行。端头金具应在试样光缆的 3m 处卡紧。光纤的彼此连接是通过熔接或同样可靠的连接方法实现的。光纤的受试长度至少为 100m。光源与受试光纤的一端相连，受试光纤的另一端用光功率计来监测相对的功率大小。在试验中，光功率计与一个连续工作的纸带曲线记录仪相连接。

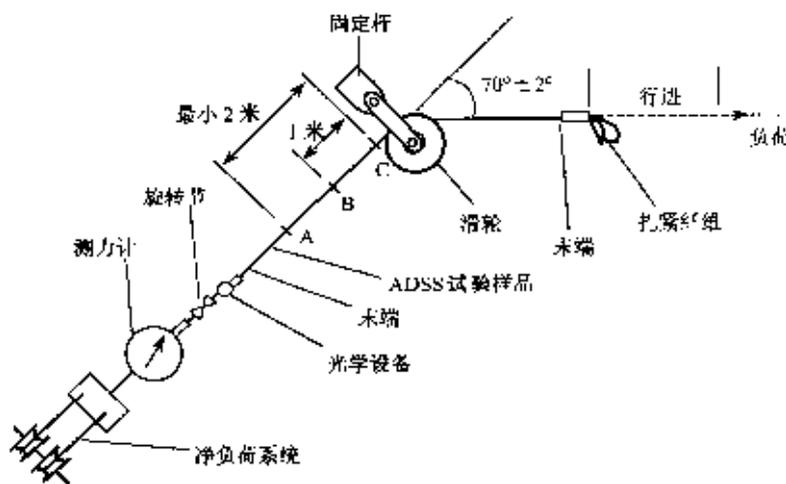


图 9.6 滑轮试验装置

ADSS 光缆制造厂商是按线路角度大小来推荐各种不同直径的架线滑轮。因此，过滑轮试验应按下述试验程序中介绍的，用不同直径滑轮对应的试验线路角进行试验。在试验光缆的终端按 ADSS 光缆制造厂商规定的最大架设张力拉光缆。采用非刚性连接牵引端头方法限制了牵引端处发生扭转的数量。一测力计和一旋转接头安装在卡箍和另一终端之间。

## 3. 试验程序

最短 2m 的 ADSS 光缆试样过滑轮来回拉 120 次（每个方向 60 次），120 个来回的分配为：拉的角度  $70^\circ$ ，通过次数 120。

ADSS 光缆制造厂商应给拉角所对应的滑轮直径。在开始拉之前，应在试样光缆长度方向的始点、中点和终点作上标记。在第一次通过滑轮前后，每 10 个循环应读取游标卡尺上所示的光缆直径值并作记录。试验中应用监视光功率计连续地监视试样光缆的光功率输出变化。试验完成后，取出受试光缆段，目力检查光缆表面是否有任何损伤。我们也可以剖开光缆来观察其内部结构是否有任何损坏征兆。

通常，光源波长的标称值：单模光纤 1550nm，多模光纤 1300nm。

## 十八、 舞动

### 1. 目的

舞动试验的目的是评定在典型的舞动条件下的 ADSS 光缆的疲劳性能和光纤的光学特性。

### 2. 试验装置

舞动试验所用的典型装置，如图 9.7 所示。试验装置中的末端金具之间的整个跨度最短为 35m。两端支座用来对光缆施加负载和维持张力。被测光缆段放置在两个中间支座之间。如果组合装置能按规定的装置提供足够的空间，端头和中间支座不必做成分离的装置。截取的受试光缆长度应超过两中间支座间距离，以便于剥去光缆护层和光纤的接入操作。在对试样光缆施加张力前应对光缆两端进行终接，以便光纤不会发生相对于光缆的位移。测量光缆张力的装置是测力计、负载传感器、校正臂或其他装置。舞动试验中应采取一些措施来保证试验中温度波动条件下光缆受试张力不变。然而，舞动本身会引起一些张力波动。向受试光缆所加的张力最小到额定最大安装张力的 50% 或最大加到 4900N。对某些光纤结构，试验张力必须小于 2450N 以便诱发，对这些设计，2450N 试验张力是可以接受的。

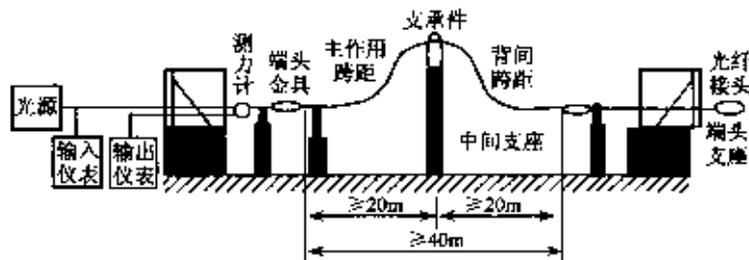


图 9.7 舞动试验装置

一个合适的悬挂金具应放在两端头金具中间的位置。悬挂金具支撑的高度要确保在主动作用跨距内，光缆与水平方向所成的静态垂度角不超过  $1^\circ$ 。

应提供一些方法来测量和监视中间波腹点舞动振幅。用一个合适的振动器来激振垂直平面上的光缆，振动器衔铁被牢固地拴在光缆上。

受试光纤长度（即两终端金具之间的距离）至少应为 100m。为达到 100m 长度的试验要求，可将几根光纤串联熔接起来。从被测光缆中的一根松套管或一个光纤束中至少抽一根光纤进行试验。所做的光纤接头与设备应在同一端。进行光纤光学性能测量所用的光源标称波长值：单模光纤 1550nm，多模光纤 1300nm。

光源被分成两个信号，一个信号连至光功率计作为参考，另一个信号连接到被测光纤自由端作为注入信号。从被测光纤输出的信号连接到第二个光功率计。整个测试期间，所有的光学连接和接头都应保持着原封不动。

初始光学性能测量应在光缆跨度上预先加张力至大约最大安装张力的 5%

时进行。初始测量的两信号之差给出了一个参考电平。试验中这个信号差的变化将显示出受试光纤的衰减变化。为连接复制记录，测得的信号输入纸带曲线记录仪。

### 3. 试验程序

试样光缆至少应经受  $10^5$  次循环舞动。试验跨距的振动频率应是单驻波共振频率。在进行测量的主动跨距内，驻波波腹峰与峰的振幅与驻波长度之比应保持在  $1/25$ 。

试验中的机械和光学数据大约每 2000 个循环阅读和记录一次。光功率计应在试验开始前 1 小时和试验结束后 2 小时进行连续监视。最终的光学性能测量应在振动完成后至少 2 小时以后才能进行。

## 十九、耐电痕

### 1. 目的

耐电痕试验的目的是验证在电场和机械应力共同作用下，ADSS 光缆外护层耐侵蚀和耐电痕作用的能力。

### 2. 试验装置

从生产线上取下一段一定长度的光缆试样。在将光缆试样水平放置到盐雾室内两个固定点之前，应先将其两端头密封，以防湿气浸入试样光缆。这样做可以保证受试光缆上的机械应力加至盐雾试验条件要求的初始应力值。接地终端的情况应该与光缆制造厂家建议的光缆用于支持铁塔上的服役情况十分接近。接地终端可由如螺旋缠绕夹紧线与任何合适的消除机械或电应力的附件共同组成。这种高压终端装置应由光缆制造厂家选定。

光缆试样地盐雾试验装置中的两终端间的受测长度必须足够长，以避免在盐雾试验中发生飞弧。通常，合适的试样长度为  $25\text{mm/kV}$ 。用一弹簧拉紧受试光缆，以求在试验中的光缆材料的任何蠕变都不会引起明显的张力减小。试验中检查张力的合适间隔为 100 小时一次。只要张力变化大于初始张力值的 10%，那么应将张力再次调整至试验张力范围内。

在盐雾室内，借助合适数目的雾化喷嘴产生电导盐雾，盐雾室内雾化喷嘴数选择的实用准则是按盐雾室体积算，2.5 立方米一个喷嘴。至雾化喷嘴的盐水应由 NaCl 和蒸馏去离子水配制的。雾化喷嘴喷出的雾滴大小为  $5\sim 20\mu\text{m}$ ，喷嘴上的气压为 3.3bar。雾化喷嘴应沿盐雾室四周均匀地分布，使盐雾室获得盐雾密度均匀，且盐雾滴不应直接喷射到光缆试样上。为使盐雾室内的空气自然排出，盐雾室应开一个不大于  $80\text{cm}^2$  的孔。试验用的一台工频试验变压器的最小连续额定电流为 250mA，跳闸电流为 1A。受试光缆对地距离至少为 300mm。

### 3. 试验程序

光缆拉紧后，应用在水中浸湿的毛巾或纸巾擦洗光缆，随后才对受试光缆进行盐雾试验。盐雾试验条件如下：

试验持续时间: 1000h  
盐水流速:  $0.4 \pm 0.1$ L/h (每立方米盐雾室体积)  
雾滴大小:  $5 \sim 20 \mu\text{m}$   
温度:  $15 \sim 25^\circ\text{C}$   
盐水中的 NaCl 含量:  $10 \pm 0.5$ kg/m<sup>3</sup>  
试验电压和频率: 与用户商定

含 NaCl 的盐水不允许循环使用。为了检查光缆张力, 允许试验中断几次, 但每次中断的时间不应超过 15min。中断时间 (如典型 100 小时) 不计入试验持续时间。

## 二十、 阻燃

### 1. 目的

阻燃试验的目的是确定光缆遭受火焰燃烧时, 火焰的蔓延是否仅在限定范围内, 残焰残灼是否在限定时间内能自行熄灭, 光缆在火焰中燃烧一定时间内是否能保证正常通信的性能。

阻燃试验方法是按光缆敷设方式和光缆根数可以为两种, 单根垂直燃烧和成束燃烧。对于通信光缆的燃烧性能的试验方法常常按照光缆是单根敷设或成束安装分别选用单根垂直和成束燃烧试验来评定阻燃光缆的阻燃性能。

### 2. 试验装置

光缆成束燃烧试验装置, 如图 9.8 所示, 试验设备有: 燃烧试验箱、钢梯和火源等。

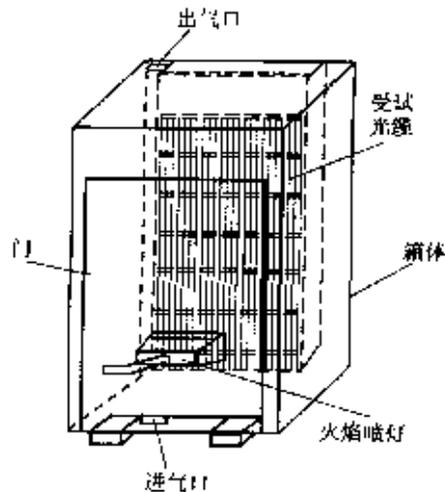


图 9.8 光缆成束燃烧试验装置

#### (1) 燃烧试验箱

燃烧试验箱的内部尺寸为宽  $1000 \pm 100$ mm、深  $2000 \pm 100$ mm 和高  $4000 \pm 50$ mm。

#### (2) 钢梯

安装试样的钢梯用钢管焊接制成，钢梯宽  $500 \pm 5\text{mm}$ ，高  $3500 \pm 10\text{mm}$ ，梯子沿高度方向分为 9 级。

### (3) 火源

火源宜采用带型喷灯，用丙烷作燃料。

### 3. 试验程序

成束燃烧试验的程序是先按光缆每米长度所含非金属材料的体积不同为 A、B、C、D 四类，再根据每米光缆金属的总体积除以某类每米光缆非金属材料的总体积计算出试样根数取整数（ $\geq 0.5$  取 1）。然后将一定根数的试样（每根 3.5m 长）按彼此紧挨或互相留有规定间隙的方法安放在钢梯上，用 0.5~1.0mm 的金属线将试样绑扎在梯子的每一级横档上，安装试样应在梯宽中部，其总宽度应不超过 30mm，光缆束的任一边与梯子立柱的间距应不小于 50mm。随后启动消烟除尘器，点燃喷灯，按规定 20min 供火时间用喷灯火焰燃烧试样，在燃烧完全停止后，检查试样损坏的程度，即试样碳化部分所达到的高度小于 2.5m 则可判定试验结果为合格。