

高功率光纤激光器

●朱赫

1 引言

光纤激光器是一种可用简单方式获得的全固态高亮度激光热源,它具有以1m焦距实现高速焊接的光束品质及高生产效率,其机壳很小,可用小型卡车搬运。光纤激光器的输出功率能达到10kW,因此有望用于桥梁和钢管等的焊接。

光纤激光器不仅应用于试验、计量、科学研究和远程通信,而且可应用于工业加工。本文主要介绍光纤激光器的特点和发展史。

2 高功率光纤激光器的发展史

光纤激光器的可行性研究最早是从1990年发表10W、100W级的光纤激光器开始的。在此之前,谁也想像不到光纤激光器会有今天这种发展方向。

第2次变革发生在1992~1993年,即将侧激励方式的多包层光纤作为增益介质;把多个单发射二极管用于激光源。此后出现了高功率用有源光纤、传输光纤、光纤反射镜、滤波器、耦合器、隔离器和光束组合器等光纤器件。与此同时,利用单发射二极管实现了高功率和高可靠性。目前市场上已有200多种10W、100W级的连续波脉冲光纤激光器,并已有8000多台光纤激光器正应用于现场或实验室。

第3次变革发生在1999年末。在国际会议QSA、SPIE上发表了千瓦级光纤激光器,并已在实验室进行了1.2kW输出的实验。2002年中期,千瓦级光纤激光器已有市售,2003年已有10kW

级的产品,目前市场上出售的光纤激光器的输出功率已超过50kW。

与投入大量人力和资金,经过35年的研发才达到千瓦级的CO₂激光器和YAG激光器相比,光纤激光器的发展速度极快。

光纤激光器正迅速扩大其市场分额,2005年1月已有50多台千瓦级光纤激光器在美国、欧洲、亚洲得到广泛应用。

3 基本原理和特点

与单模光纤气体激光器和固体激光器不同,光纤激光器是将掺稀土类的光纤用于增益介质上,谐振器的其他部件,诸如反射镜、分束器、滤波器、起偏镜和传输介质均用光纤制成。这些部件可熔接在单片谐振器上,同样地可熔接在放大区段、传输光纤上,不需要使用迄今激光器所必需的机械装配和定位调整机构。

光纤激光器是由主腔振荡器和放大区段组成。在各个分段通过多个高功率单发射二极管进行侧激励。所用单发射二极管的亮度以及在长达数十万小时的工作可靠性方面,与棒状或叠式二极管有所不同。

密封在二极管中的光纤像素模块也是以相同熔接法耦合在光纤单片上,使整个激光模块变成单片,因此具有防尘、耐潮、耐机械振动,耐其他环境压力的特点。

所谓侧激励是一种对高浓度掺杂的多包层光纤进行均匀分布激励的独创技术。

根据规格, 光纤呈 $125\mu\text{m}$ 的圆形状, 线芯的模场直径因用途而取 $9\sim 14\mu\text{m}$, 光纤长度一般取 $5\sim 8\text{m}$ 。通过使用一定规格的光纤, 就可与其他光纤连接器或传输光纤进行无损耦合集成, 并可制造出小型且成本低的产品。

激光模块的输出光束因采用独创的模式滤波技术, 故只有 $M^2 < 1.1$ 的基模, 而无损耗的最小曲率半径 $< 1.5\text{cm}$ 。

将单模激光器从 100W 调制到 1kW , 光-光转换效率 (即激光芯片与光纤激光器功率之比) 超过 65% , 而电光转换效率超过 36% , 水冷管的壁塞效率达 28% 。虽然是水冷模块, 但不需要纯水, 也不需要水温控制。

将构成振荡器和放大区段的光纤部件和二极管模块置于背面水冷的铝板上; 将驱动电子装置、系统主运算器 (MC) 和进行高速交换控制信息的微处理器安装在 IU (约 44.45mm) 框架中。

在 $80\text{V}\sim 90\text{V DC}$ 下驱动各种模块, 以连续波振荡 (CW) 或以 20kHz 的高速调制 (QCW) 模式工作。

4 光束组合器

通过使用光纤光束组合器, 并行安装单模 (SM) 光纤模块使光纤激光器的功率得到了进一步提高。光束组合器用的输出光纤是一种根据总功率和用途而制成的芯径为 $50\mu\text{m}$ 至数百微米的单芯多模光纤。

超过 100 多个 SM 模块有可能实现这样的耦合, 即使是这种情况, 传输光纤的芯径也小于 $400\mu\text{m}$ 。为了提高功率, 可在二极管阵列和叠层中并行耦合单发射器, 但在千瓦级固体激光器中则不能这样做, 这是因为该项技术有一定的难度。

当使用全光纤非准直组合器时, 例如当耦合 7 根单模光束时, $M^2 < 6$ 即可; 而耦合 19 根光束时, 则要求 $M^2 < 13$ 。

如果使用正在开发中的 1kW SM 模块, 则可以制成 $\text{BPP} < 2\text{mm}^*\text{mrad}$ (功率为 7kW) 和 $\text{BPP} < 4.3\text{mm}^*\text{mrad}$ (功率为 19kW) 的光纤激光器。

实际上, 通过并行安装 SM 光纤模块, 可以简单地功率的无限扩充, 以紧凑而实用的机箱获得高达几百千瓦级的 CW 或 QCW 激光器。

另外, 并行安装也解决了对激光器可靠性的不利影响。以往采用增大谐振器激励 (热负载) 和多段放大器的方法导致激光器的可靠性降低, 因此功率提高是有限的, 而且还出现热光效应引起的光束畸变, 这是导致 CO_2 激光器和 YAG 激光器的功率在过去的 10 年踌躇不前的原因。

SM 光纤激光器因其高效而无热光效应, 使固体激光器的 SM 功率提高了 10 倍 (可从 $70\sim 80\text{W}$ 提高到 1.5kW)。从可靠性方面考虑, 通过增加放大区段获得大于 1.5kW 功率的方法没有实用价值, 而有效的方法是通过并行安装及有效地利用高可靠性 SM 光纤模块。

随着元件技术的提高和现场的实际应用, 可逐渐提高各种模块的功率, 而且可以做到在不降低可靠性的情况下, 使总功率提高。利用这种方法, 2002 年已在现场正式使用 100W 模块, 目前 $400\sim 500\text{W}$ 模块已投入使用, 而 1kW 模块现正处于可靠性试验评价阶段。

在并行安装中, 即使一个模块发生故障, 也不会出现整体输出停止的现象, 功率仅降低安装模块数 n 的 $1/n$ 。一般这种功率下降为百分之几, 这种情况通过提高其他模块的驱动电流可得到补偿。为以防万一, 产品必须安装备用模块。即使发生故障, 有备用模块也可以使总功率保持稳定。因此, 可以说并行安装是一种可明显提高千瓦级光纤激光器可靠性的技术。

将这种全光纤光束组合器熔接耦合在基模块上, 这不仅在各元件的层面, 而且在高度一体化的系统中也起到了保持可靠性稳定的作用。

5 泵浦技术

用于泵浦光纤激光器的二极管位于 $100\mu\text{m}$ 纤芯的多模光纤终端, 发射 N, A, O, 13 以下的理想光束。在 6A 额定电流下使用, 其壁塞效率超过 50% 。第 1 代二极管的认定于 2003 年完成, 并已进入批量生产; 第 2 代的批量生产计划已于

2005年1月实施。日本现生产能力为150,000支/年,2年内要达到100万支。

从生产线抽取288个样品进行了老化试验,在35℃~90℃的温度环境和4A~10A的驱动电流下,进行了超过6000h的实验。

实验结果表明,在额定电流为6A、管壳温度为35℃时,平均无故障工作时间超过170,000h。

同样,将288支样品在9A、70℃条件下,经过了350h的老化试验,对额定电流下二极管进行了100%的老化,得出平均无故障工作时间最低延长了3倍。这种可靠性数据比棒状或叠式二极管好100倍。利用全光纤并行光耦合法可提高模块功率。

组合器的输出光纤芯径和数值孔径接近于激活光纤的包层径(125μm)和数值孔径(~0.45),激励二极管的输出可以无损传输到激活光纤。

采用单发射极并行耦合二极管棒,最大区别是各发射极的空间间隔各异。棒状置于同一个衬底上,因热负载大的一个发射极的损伤而加速了相邻发射极的老化,而在并行光耦合中,各发射极为完全独立,因此不存在这样的问题。

另一个优点是可以对各发射极实施电串联耦合,并可利用高电压电源降低驱动电流。

泵浦二极管的并行耦合和光纤模块的并行耦合一样,同样可以获得冗余效应。一般激励各放大区段需使用38支二极管,这样即使有一支二极管出现故障,也只对总功率产生小于3%的影响,对主激励电流稍加修正,即可进行补偿。

6 系统设计

这里列举10kW的YLR-1000-P型光纤激光器。该激光器安装了25个SM光纤模块和1个或2个备用模块,即使发生故障,启动备用模块便可在1ns内使其稳定工作。各个模块的光超过400W的输出功率通过单模光纤传输到光束组合器。

光束组合器上有与模块数相同的27个单模输入光纤。与各个模块的单模光纤熔接可获得输出芯径为200μm、包层径300μm的阶跃折射率多模

光纤,光纤长度为5m或20m均可,传输光纤通过连接器,与加工头部或光纤耦合器、光束组合器等光学介质相耦合。光纤模块和光束组合器均安装在同一个水冷式IU机架上,并与安全电子线路、接口等控制部件一起安装在机壳内。各个部件易于取下与备用件交换,各个光纤模块均安装了二极管的驱动电子线路和微处理器插件板,通过传感器监视模块的工作状态,并经常与主运算器(MC)交换信息。模块的最大输出功率可高速调制到20kHz,并可监视二极管的驱动电流、机壳温度、模块内各处的散射光输出等。电源是以3相AC线路工作,视用途设定电压和频率。使用高可靠性部件的军用特需品则需将电流、输出电压、机壳温度和其他主要元件的温度等工作信息提供给激光器MC。当电源发生故障时,MC能及时判断故障是由高负载、冷却水、3相AC线路,还是内部元件的损伤所致。

备用电源也可放在用户处,30min即可更换。

机壳是根据IP54标准定制的,具有防水和防尘特性,在有烟雾和金属粉的工厂环境下,也可保证长期工作。在高湿度环境下,必需在机壳后部安装上具有1.2kW冷却能力的小型除湿器。

整个机壳非常紧凑,底板1.2m²,高1.49m,比相同功率的CO₂激光器小5~10倍。

为使光纤激光器稳定工作,并不需要冷机致冷的条件。

但实际情况是用户并不一定按要求准备具有充分水压的清洁水,这是导致发生故障的主要原因。因此,开发了两个系统循环的特殊冷机,与激光器配套提供给用户。该机对激光器主体使用自来水,而连接器、光纤耦合器和光束开关等的光学冷却则使用纯净水。

用电缆将其与激光器相连接,并用激光器的主控制器来控制冷却水的温度、纯净水的电导率和冷机的工作状态。安全电子设备和控制接口采用EN60825-1, EN954-1, cat. III规格,安装在与IP44规格的主机相独立的机壳中,以提高保养性能。通过E-Stop In/Out接口与用户安全网络连

接。在该机壳中设置激光器的控制和维修用接口,其中有(1)对驱动电流的模拟控制;(2)与机器人的硬件连接接口;(3)监视器、手动控制用以太网;(4)保养和固件升级的RS-232-C接口等。

与机器人的硬件连接要与激光器的高速响应相适应,可以实现小于1ms的响应速度。这与以往的Interbus, Profibus, Devicenet等接口相比,速度更快。当然也可以根据需要安装以往的接口。模拟控制接口可以50 μ s以下的时间延迟来控制驱动电流,并以最大功率20kHz的频率调制出10kW的输出功率。

激光器装有WindowsCE计算机。通过PC104并行接口与主控制器相连接,进行无错误高速通信。

计算机利用40GB的硬盘保存激光器的工作状态,并负责100Mbit以太网的接口工作。以太网连接激光器与用户的Win/Dows PC。在WindowsPC中使用程序“Laser Net”进行激光器工作状态的 control 与手动控制,并将来自激光器的存入文件通过调制解调器输送到服务站。

如果激光器发生故障,则根据存入文件,远程诊断激光器的工作情况,以便进行早期维修。

主控制器根据激光器的各部分、冷机、传输光纤中的信息进行实时控制。主控制器通过外部计算机和波长服务器及以太网并行连接,也可远程控制激光器。

7 批量生产设备的可靠性

光纤激光器用单发射二极管以惊人的平均无故障工作时间和安装多个二级管所带来的冗余效应使高功率激光器的可靠性得到显著提高。该技术完全解决了与棒状叠式泵浦二极管相关的问题。

在批量生产中,谐振器的激光棒或反射镜、透镜或其他体元件的损伤是导致可靠性出现问题的原因。然而,光纤激光器则不存在这些问题。光纤模块的并行耦合、插入一个或多个(根据情况)备用模块所带来的冗余效应提高了光学部件

的可靠性,实际上根本不需要维修。

其次是电源、控制系统、安全电路等电子学可靠性问题。这是所有千瓦级激光器共同的问题。

光纤激光器的优点是效率高,电源若是提供的功率越小,则对其热负载越有利,可提高可靠性。电源可以做得很小,且成本低,因此可根据用户的要求,把备用件放在用户处。

若出现问题,用户可以更换电源。几乎所有的电路板、安全部件和接口均安装在独立的机壳中,用户经过简单的培训,自己就可对部件进行更换和保养。

冷机易出现问题。因为所需水量少,所以与CO₂激光器和YAG激光器不同,小而便宜。IPG的冷机具备自诊断功能,在控制冷机工作参数的同时,可根据需要请求维修。全维修服务是由制造厂负责,在紧急情况下,暂时可由用户替换备品。在24h满负荷运行时,最好把备用冷机放在用户处。

唯一不能简单交换备用件的是从光纤组合器到传输光纤和连接器的部分。当这一部分损坏时,必须把有问题的部分送到服务中心。但对OEM用户则实施24h全方位服务体制,而对24h满负荷运行的用户则时常设置替代机,以建立一种机制,让预先受过培训的用户自己进行替换。

当不允许替换时,可考虑采用清洁帐篷进行现场修理的措施。

上述内容始终是发生故障时所采取的措施。2002~2004年,光纤组合器、传输光纤在公司内外进行了试验,并通过了高可靠性验证,因此这种故障发生的可能性极少。

实际运行累积时间已达30000h以上,目前尚无劣化的征兆。

实践证明,光纤激光器比CO₂激光器和YAG激光器的寿命长。6kW光纤激光器在恒定电流模式下可工作4000h以上,仍无输出下降的征兆。若将10%的劣化视为寿命,并考虑50%的运行,那么光纤激光器的实际寿命可达10000h(10年以

上)。

现场实验证明,高功率固体激光器每 2000h~3000h 要更换激光系统,100,000h 之内必须更换光学元件。与此相比,光纤激光器则有惊人的进步。

8 未来展望

为了迅速捕捉高功率光纤激光器的现场特性,为各种实验室和特定用户及系统制造者设置了光纤激光器,根据用户的反馈意见,对光纤激光器进行了不断改进,使传输光纤的坚固性、控制功能和安全电路得到提高。加工数据的分析进一步提高了光束品质,从而促进了传输光学元件制造商进一步开发的积极性。

从各种应用中所收集的数据证明,光纤激光器的焊接和切割加工结果并不逊色于 $1\mu\text{m}$ 带激光器,甚至在品质和速度上有所超越。虽然光纤激

光器已被商家看好,但要使用户接受这种新技术,将需要相当长的一段时间。这是因为所用激光器的应用领域与瞬息万变的低功率激光器的应用领域不同,高功率市场是数十年使用同一种激光器;而另一重要原因是技术工作者并不想做新技术的先行者,而是喜欢有历史有绩效的技术,这就成为光纤激光器普及的拌脚石。相信,随着光纤激光器的优异性能在生产现场得到不断证实的同时,光纤激光器将得到广泛应用。光纤激光器不需要准直和维修,不需要为保持加工质量而经常监视光束。占地面积虽小,但可用于长焦加工,可以最简单的方法提供高品质光束。

光纤激光器作为工业界企盼的真正激光热源,不久将出现在建设现场。(No.1)

这把“尺子”测出长度计量新水平

中国计量科学研究院研究的具有自主知识产权的 532nm 碘稳定固体激光频率标准,通过了由国家质检总局组织的专家鉴定。这一重大科研成果,使我国长度基准由气体发展到固体,提高了长度计量的精确度,为我国更为准确地实现长度单位“米”定义的复现提供了新途径,标志着我国长度计量跃上新的台阶。

中国计量科学研究院 2002 年开始研制的 532nm 碘稳定固体激光频率标准装置属国内首创,在国际上也只有少数发达国家才有。该项研究是当前国际上以量子物理为基础的计量技术前沿,采用了物理学、计量学、激光技术、电子学和自动控制学等领域的诸多先进技术。实验测量表明,我国建立的这一装置,激光频率锁定后可长时间连续稳定工作,其主要技术指标:1s 取样的激光频率稳定度优于 3×10^{-14} ,超过目前国际上已报道的最好结果;ks 取样的激光频率稳定度 4×10^{-15} ,达到了目前国际上已报道的最好结果;万秒激光频率稳定度 5×10^{-15} ,为国际上首次报道的最好结果。4 周内多次测量重新锁定后的标准频差小于 35Hz,相当于 6×10^{-14} 。上述频率稳定度和复现性的指标,为目前可见光波段内分子光频标的最佳结果,已跻身国际先进水平的前列。