

高功率激光对激光同轴全息 测量粒子场的影响

刘振清, 李作友, 罗振雄, 郑贤旭, 叶 雁, 钟 杰, 李 军
(中国工程物理研究院流体物理研究所 109 室, 四川绵阳 621900)

摘 要: 在激光同轴全息测量粒子场的实验中, 经常使用的光学传像系统能起到扩大工作距离和调整测试系统空间分辨率的作用。但是在利用高功率脉冲激光作为照相光源时, 经传像系统传像后的夫朗和费全息图上所记录的粒子中心出现了由暗纹变成亮纹的反常现象。产生这种现象是由于激光经传像系统实焦点处聚焦击穿空气产生等离子体, 等离子体吸收物场的参考光, 导致参考光无法到达干板上与物光产生干涉。针对此问题提出了对传像系统实焦点抽真空的方案, 解决了该问题, 得到了理想的全息图。

关键词: 高功率激光; 同轴全息; 粒子场; 传像系统

1 引 言

脉冲激光同轴全息技术是测量高速运动粒子场的重要测试方法, 能够获取微喷粒子的大小、形状、分布、速度及总质量等信息, 具有测量精度高、图像直观、景深长、光路简单和获得的信息量大等优点^[1]。但由于粒子的高速运动, 当用激光照射粒子场时, 粒子在曝光时间内会产生位移, 使生成的全息图产生一定的动态模糊, 最终导致粒子场的再现像出现相应的模糊, 从而给粒子的判读带来困难。所以为拍摄高速运动的粒子, 要求曝光时间很短, 才能保证粒子处于“冻结”状态(即相对静止状态)。在一般的全息照相中, 当粒子在曝光时间内移动的距离小于十分之一粒子直径时, 通常可以认为粒子处于“冻结”状态^[2], 就可以忽略粒子的动态模糊。粒子的运动速度越低或激光的脉宽越窄, 粒子就越容易被“冻结”。因此, 在测量高速粒子场的激光全息实验中, 短脉冲激光器作为照相光源被广泛的应用。

在实际工程应用中, 为保护干板和方便实验, 通常采用传像系统, 将粒子场的信息转移到一定距离外的全息干板上。同时传像系统还可以起到将粒子像进行一定程度的放大, 以提高系统分辨能力的作用。为了保证信息量的完整, 该传像系统通常采用具有实焦点的凸镜组合系统。但在采用高功率短脉冲激光器作为照相光源, 同时使用传像系统开展全息实验时, 全息干涉图的中心出现由暗纹变成亮纹的反常现象, 本文就该现象的产生进行分析和讨论, 并提出有效的解决方法。

2 实验布局及现象

实验测试系统采用传统的同轴夫朗和费全息光路, 光路图如图 1 所示。

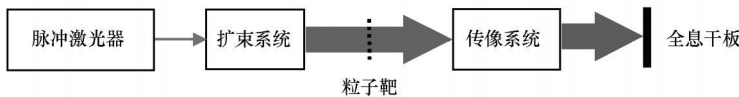


图 1 实验测试系统示意图

实验中,脉冲激光器输出的脉冲激光经扩束系统扩束后照射在粒子靶上,传像系统将粒子靶的信息成像到全息干板上,被干板记录下来。实验中被照的目标物是 $20\ \mu\text{m}$ 左右的不同形状的光刻粒子靶,它的原始图像如图 2 所示。使用纳秒激光器(功率密度约为 $6 \times 10^{10}\ \text{W}/\text{cm}^2$) 作为照相光源时获得了如图 3 所示的正常全息图,图像背景灰度低,粒子对应的灰度高,光强分布均匀,记录下来的粒子为白色的亮点,粒子场中间的十字线也为白色的亮线,其场分布为标准的夫朗和费全息场分布。但当用皮秒激光器(功率密度约为 $4 \times 10^{12}\ \text{W}/\text{cm}^2$) 进行实验时得到的却是如图 4 所示的全息图,该全息图上显示的背景灰度高,而粒子对应的灰度低,记录下来的粒子及十字线均变成了黑色,光强也由当初的均匀分布变成了亮暗相间的圆环状分布,粒子的光强度分布与图 3 相比发生了突变,出现了异常的现象。

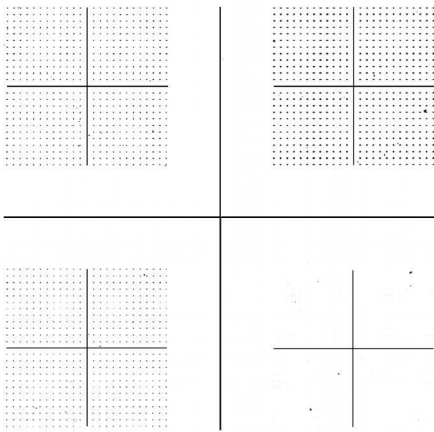


图 2 粒子靶原始图像

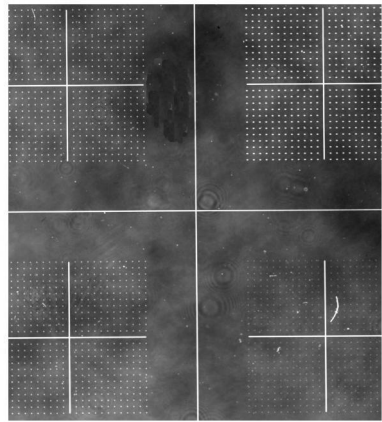


图 3 使用纳秒激光器拍摄的粒子靶全息图

3 现象分析和解决方案

全息照相是利用光的干涉原理,同时记录物光波的振幅和位相信息。满足相干条件的两束光可以产生干涉,干涉条纹中记录了物光的振幅和位相信息。因此,如果照相干板上除了接收物光波外,还接收另一束未被物体扰动的参考光波,则物光波和参考光波在照相干板平面上会发生干涉,产生干涉条纹,并且被全息干板所记录,物光波的位相分布就包含在干涉条纹的分布中^[2],通过对干板的处理再现,就得到全息图。可见全息照相就是利用物光与参考光的干涉,从而记录下物光的全部信息。而在同轴全息实验中,由于照明物体的光是平面波,到达全息干板的光未被物体干扰仍是平面波,它就是参考光,照明光被物体衍射的光就是物光。

在图 1 的实验中,平行光通过粒子场时,少部分激光被粒子衍射成为物光,未被扰动的激光继续向前传播成为参考光,物光与参考光在全息干板处相干涉,从而记录下粒子靶的正常全息像。但是在激光功率较强的情况下,由于平行光在通过传像系统第一透镜的实焦点处要产生聚焦现象,当聚焦区内光功率密度超过一定的阈值时(当激光脉宽大于 $1\ \text{ns}$ 时,大气击穿阈值为 $3.2 \times 10^{11}\ \text{W}/\text{cm}^2$)^[3],该区域内的空气将被迅速电离,所产生的电子通过逆韧致吸收激光能量,这一过程最终导致内部高温高压的激光等离子体的产生。激光等离子体产生的同时,聚焦区域内还有明亮的火花和响声生成,并且产生膨胀的冲击波向四周传播^[4],这一小

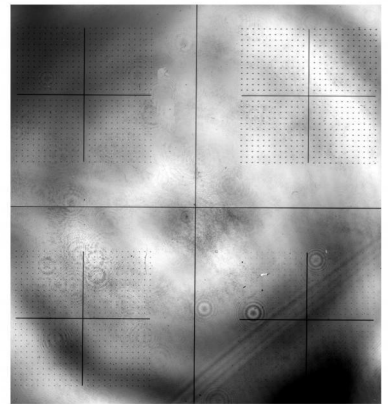


图 4 使用皮秒激光器拍摄的粒子靶全息图

范围的爆炸现象称为空气光频击穿。击穿产生的等离子体吸收系数较大,其通过逆轫致吸收的形式大量吸收后续激光的能量^[5],结果导致参考光被吸收,无法到达接收面与物光产生干涉。因此在传像系统的后焦面接收的只是粒子的衍射像,因为被测粒子是不透光的,因此后焦面接收的相当于圆屏衍射图像,中心出现亮点(中心亮度最强),由于干板是负片,所以在干板接收的情况下成为黑点。当使用纳秒激光器作为照相光源时,由于纳秒激光器的功率相对较低,激光在通过传像系统时,能量不足以击穿空气,参考光与物光就能够顺利到达全息干板处产生干涉,粒子在干板上就会形成中心较亮的标准全息图。

要解决该问题只需要避免激光在经过传像系统时的空气击穿现象即可。降低照明激光器的输出能量可以避免传像系统实焦点处因功率密度过高导致的空气击穿现象,但会导致到达全息干板的激光能量不足,从而影响全息图的线性接收。通过在传像透镜组设计时采用没有实焦点的凹透镜系统可以避免空气击穿,但凹透镜系统可能导致光信息的通过不足,最终导致物体的细节信息丢失,影响实验系统的分辨能力。综合考虑,在激光能量、波长、脉宽等参量不能改变的情况下,采用对传像系统进行抽真空密封设计。因为激光击穿空气除了与激光光强、激光频率、气体种类等元素有关外,还与气体的压强有直接关系。随着气体压强的增加,气体的密度也随之增加,在同样的激光条件下,光子被吸收的几率和电子与邻近中性分子的碰撞概率都要增大^[6],从而空气被电离的概率也相应的增加。传像系统实焦点处于真空状态,空气被击穿的阈值会大大提高。根据实验得到的数据,在其它条件不变的情况下,皮秒激光在传像系统后焦面发生空气击穿时的真空度的临界点为 2500 Pa。实验时,传像系统中的真空度低于 2500 Pa 就不会发生空气击穿现象,参考光就可以到达传像系统后焦面与物光产生干涉形成正常全息图。传像系统的抽真空密封设计对系统改动不大,不会对系统参数产生任何影响。图 5 是使用真空传像系统(实验时真空度保持在 100 Pa 以下)所获得的一张粒子靶全息图,图像背景灰度低,记录下来的粒子为白色亮点,对应的灰度高,与使用纳秒激光器所拍摄的全息图的情况相一致,为标准的夫朗和费全息图,有效地解决了反常全息图的问题。

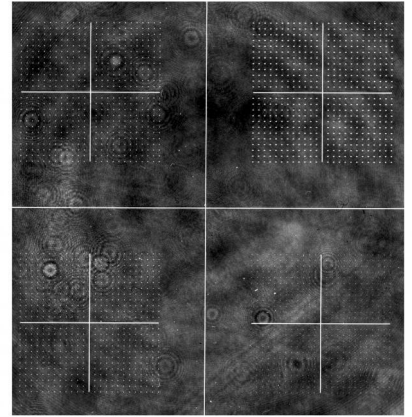


图 5 使用真空传像系统拍摄的粒子靶全息图

4 结 语

分析了在激光同轴全息实验中,高功率短脉冲激光通过传像透镜时因功率密度过高而击穿空气,导致产生反常全息图的原因,并对产生机理进行了详细的分析,在此基础上提出对传像系统进行抽真空密封设计。大量实验证明,能有效解决高功率短脉冲激光应用于全息照相时产生反常全息图的问题,为高功率激光应用于同轴全息照相提供了技术基础。

参考文献:

- [1] 叶 雁, 郑贤旭. 用脉冲激光同轴全息技术测量微射流. 强激光与粒子束, 2004, 16(2): 159.
- [2] 刘子超, 赵云惠. 液雾及颗粒的激光测量. 北京: 宇航出版社, 1988: 224- 293.
- [3] Kroll N. Theoretical Study of Ionization of Air by Intense Pulses, Institute for Defense Analysis, Arlington, VA: JASON 1970.

(下转第 71 页)

