

文章编号 1674-2915(2013)03-0359-06

平面激光诱导荧光实验中 激励激光的光束整形

张振荣,王 晟,李国华,赵新艳,叶景峰,胡志云*,叶锡生
(西北核技术研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室,陕西 西安 710024)

摘要:分析了激励激光光强分布对平面激光诱导荧光(PLIF)实验中荧光强度的影响。基于柱面微透镜列阵设计了一套激光片状光束匀滑整形系统,并根据 PLIF 实验的具体要求,通过光线追迹方法优化了系统参数。建立了片状光束整形实验系统,对染料激光进行了匀滑整形,获得了不均匀性 <4% 的均匀片状光束,满足了 PLIF 实验所需。在此基础上建立了 PLIF 实验系统,获得了酒精灯火焰和 CH₄/air 预混火焰中 OH 的二维荧光分布。

关键词:光束整形;平面激光诱导荧光;柱面微透镜列阵;片状光束

中图分类号:TN241 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/CO.20130603.0359

Exciting laser beam shaping in planar laser-induced fluorescence experiment

ZHANG Zhen-rong, WANG Sheng, LI Guo-hua, ZHAO Xin-yan,
YE Jing-feng, HU Zhi-yun*, YE Xi-sheng
(State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter,
Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)
Corresponding author, E-mail: ninthzy@163.com

Abstract: Influence of exciting laser sheet intensity distribution on the fluorescence intensity distribution in a Planar Laser-induced Fluorescence(PLIF) experiment was analyzed. Based on cylindrical lens array, a laser sheet shaping system was designed. According to the requirement of PLIF, several parameters were optimized with ray tracing method. The laser beam shaping experiment system was established and applied to the PLIF experiment for dye laser beam shaping and acquiring smoothing laser sheet with the nonuniformity no more than 4%. With the uniformity laser sheet beam, PLIF was applied to the measurement of fluorescence imaging of OH in alcohol flame and CH₄/air premixed combustion.

Key words: beam shaping; Planar Laser-induced Fluorescence(PLIF); cylindrical lens array; laser sheet

收稿日期:2013-02-12;修订日期:2013-03-16

基金项目:激光与物质相互作用国家重点实验室基金资助项目(No. SKLLIM1009-02)

1 引言

作为燃烧流场激光诊断技术的主要分支之一,平面激光诱导荧光(Planar Laser Induced Fluorescence, PLIF)技术能够实现燃烧流场参数的二维可视测量,获得丰富而直观的信息,是燃烧流场诊断的一个强有力工具^[1-5]。根据荧光光谱理论分析可知,要通过二维荧光强度分布获得所需的组分浓度或燃烧场温度信息,必须消除荧光信号中激光强度及其分布的影响,因此,准确获得激励激光的光强分布十分重要。目前,在 PLIF 实验中,通常采用柱面透镜组将激励激光整形为片状光束,但不做专门的匀滑处理。为了满足定量测量的需要,常常在实验系统中建立参考光路,监测激励激光的光强分布。具体的做法是在激励激光的光路上分出一束监测光,使其入射到充满某种荧光物质的腔室内,并用相机监测相应的荧光强度分布,再根据荧光强度与激光强度的关系计算出激光片的光强分布。这种方法等于在实验系统中附加了一套 PLIF 诊断系统,不仅使系统变得更加昂贵,同时也增加了诊断系统的复杂性。如果事先通过光束匀滑,将激励激光整形为强度分布均匀的片状光束,无疑能够在有效简化实验系统的同时提高测试精度。

目前,在激光与物质相互作用的许多领域,都需要对激光光束进行匀滑整形,但不同的应用领域对匀滑整形效果的要求各不相同,所采用的整形技术也会有较大差异。为了满足各种需求,人们提出了多种光束空间匀滑整形技术^[6-10],如:随机相位板法、列阵透镜法、偏振光控制板等。

这些技术为开展 PLIF 技术激励激光光束匀滑整形提供了很好的借鉴,但还需要针对 PLIF 技术的特殊要求开展相应的技术研究工作。对于 PLIF 技术而言,要求激励激光在探测区域较大空间尺度内形成二维光强均匀分布和很薄的片状光束。本文主要针对燃烧流场参数的二维可视定量测量,开展了满足 PLIF 技术需求的片状激光光束匀滑整形技术研究。建立了片状激光光束匀滑整形系统,针对 PLIF 技术的激光光源,获得了均匀的二维片状激光光束,满足了实验所需。

2 激励激光强度分布对荧光信号的影响

处于基态的分子通过共振吸收相应能量的光子以后,跃迁至激发态,然后在向下跃迁的同时辐射荧光。当激励激光较弱时,荧光信号强度与激励激光的光强成线性关系,实验中由 ICCD 相机拍摄得到的荧光图像包含了激励激光的二维分布信息,要想获得实际的荧光强度分布,需要消除激励激光光强分布的影响:

$$S(x,y) = S'(x,y)/I(x,y), \quad (1)$$

式中: $S'(x,y)$ 表示实验中由相机获得的荧光强度分布; $S(x,y)$ 为对激励激光光强分布进行归一化后的荧光强度分布; $I(x,y)$ 表示激励激光片状光束的二维光强分布。由于在实验中实时准确获得激励激光的二维光强分布较为困难,所以,实验中往往难以消除光强分布不均的激励激光对荧光强度分布的影响。

另外,式(1)成立的前提是激励激光功率较小,处于线性激励范围,当激光强度功率增加到一定程度后,会出现饱和现象,此时荧光强度对激光强度的依赖关系变得非常复杂。对于光强分布均匀性较差的激励激光,会出现激光强度较弱的区域为线性激励而激光强度较强的区域却处于饱和激励,此时,消除激光强度分布的影响将变得非常困难。

3 光束整形系统设计实验

为了满足 PLIF 实验对激励激光的特殊要求,设计了激励激光整形系统,如图 1 所示。该系统主要由柱面微透镜列阵(CLA)、两块轴线相互正交的柱面透镜(CL1、CL2)组成,其中 CLA 由 N 个相同参数的微柱面透镜组成,每个微柱面透镜的宽度为 d ,焦距为 f 。入射激光束通过柱透镜列阵后,在 Z 方向被分割成 N 个子光束,每个子光束经各自的透镜聚焦后再发散,然后全部辐照探测空间中的同一区域,即各子光束在传播过程中会彼此重合叠加在一起。当对入射光束的分割足够细时,每一个子束的光强分布可视为均匀的,这些

均匀的子光束相互重叠辐照到同一空间区域,就可使入射光束近场分布的不均匀性相互平均补偿,得到接近平顶分布的矩形光斑。柱面透镜 CL1 主要用于沿 Y 方向对光束进行压缩,产生满足 PLIF 技术所需的薄片激光束;CL2 主要用于在 X 方向对光束进行准直;CL1 和 CL2 的焦距分别为 f_1 、 f_2 。

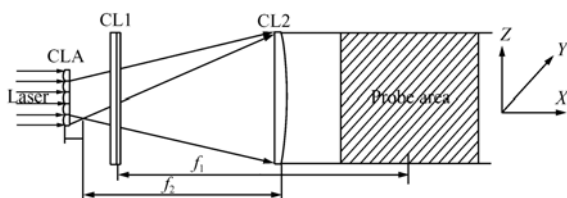


图1 光束匀滑整形系统示意图

Fig. 1 Optical system diagram for beam shaping and homogenization

匀滑后片状光束的宽度 D 为:

$$D = \frac{f_2}{f} d. \quad (2)$$

所以,要想获得合适大小的片状激光束,需要合理设计柱面微透镜的焦距、微透镜宽度以及柱面透镜 CL2 的焦距。

由于只是对激光束沿 Z 方向进行了匀滑整形,而没有改变光束沿 Y 方向的特性,所以,上述系统中形成的片状光束的厚度与不进行匀滑处理产生的片状光束的厚度相同,位于 CL1 焦线处片状光束的厚度为:

$$\omega = f_1 \theta, \quad (3)$$

式中, θ 为激励激光的发散角。为了在焦线附近一定距离内基本保持片状光束厚度与焦线处的厚度接近,应使 CL1 具有较长的焦距。

为了分析该设计的匀滑效果,并优化各种设计参数,对上述系统采用光线追迹技术进行了数值计算。分析了微透镜数量、各个透镜的焦距等设计参数对匀滑效果的影响。并结合实际实验中激光的相干特性、光束直径、所需片状激光光束的尺寸、光学加工难度等因素确定了最佳设计参数。图2所示为在各种参数优化后计算得到的典型光强分布。以高斯圆斑为例,理论计算得到的片状光束不均匀性 $< 3\%$, 光束能量利用率 $> 90\%$, 满足了实验所需。

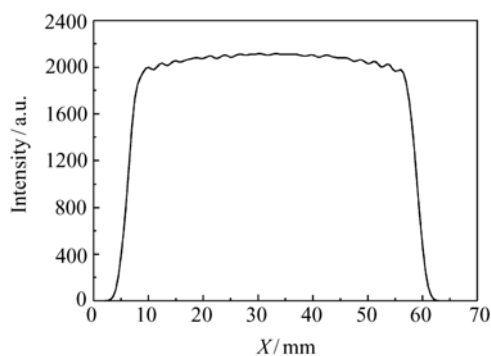


图2 设计参数优化后计算得到的光强分布
Fig. 2 Calculated intensity distribution after optimization of design parameters

实际用于 PLIF 实验的激励激光为倍频后的染料激光,该激光光束典型的近场分布如图3所示,光束直径约为 5 mm。由于染料激光器放大级的结构、染料浓度以及泵浦激光的均匀性等因素,导致输出的激光光束的光强分布较差。将这种激光直接整形为片状光束,其光强分布如图4所示,

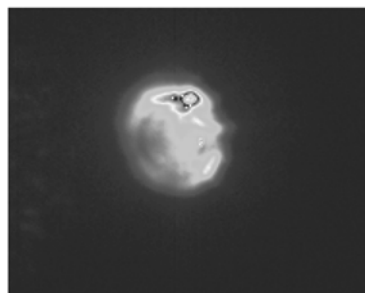


图3 激励激光原始光束
Fig. 3 Beam distribution of dye laser

可见未对激光光束进行匀滑处理时,整形后片状光束的光强分布反映了原始光束中的不均匀性,所获得的片状光束光强分布均匀性非常差。

PLIF 定量测量一般要求激励激光光束在整个测量区域内的均匀性优于 95%, 测量区域尺寸大于 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$, 激光片厚度为 0.5 mm。基于这些实验要求及数值分析结果,确定了用于片状光束匀滑整形的主要器件的参数:柱面微透镜阵列中单个柱面透镜的厚度为 0.5 mm;实际使用的微透镜数量为 10 个;柱面微透镜的焦距为 50 mm;准直柱面透镜的焦距为 0.5 m;压缩用柱面透镜的焦距为 1 m。

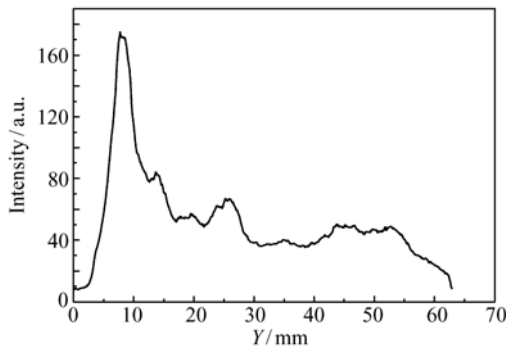


图4 未匀滑片状光束光强分布

Fig.4 Intensity distribution of laser sheet without beam smoothing

采用上述光束匀滑系统对激励激光匀滑后,获得的片状激光光强分布如图5所示。比较图5与图4可以看出,激光片的光强分布明显改善。

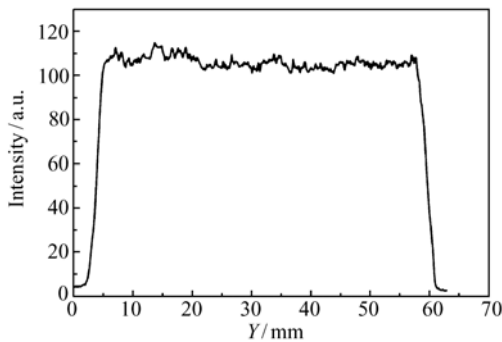


图5 匀滑后片状光束光强分布

Fig.5 Intensity distribution of laser sheet with beam smoothing

采用均方根(RMS)方法对光束顶部的不均匀性进行定量评价:

$$\text{RMS} = \frac{1}{M-1} \sqrt{\sum_{m=1}^M \left[\frac{I(m)}{\bar{I}} - 1 \right]^2}, \quad (4)$$

式中, $\bar{I} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M I(m)$ 。根据实验数据,由式(4)计算得到平滑后光束顶部的不均匀性为3.4%,满足了PLIF实验需要。

4 荧光图像测量

在实现光束匀滑的基础上,建立了一套PLIF实验测量系统,并测量了酒精灯、CH₄/air预混火

焰中OH的二维荧光图像。为了对比匀滑前后激励激光光强分布对荧光强度分布的影响,针对酒精灯火焰,分别采用了未匀滑片状激光和匀滑后片状激光进行激励,获得了相应的二维荧光强度分布,如图6所示。其中图6(a)为未匀滑激光激励产生的二维荧光强度分布,图6(b)为匀滑后激励激光产生的二维荧光强度分布。比较两幅荧光图像可以明显看出激励激光光强分布对荧光强度分布的影响,即只有当激励激光光强分布均匀时,所获得的荧光图像才能够代表真实的荧光强度分布。

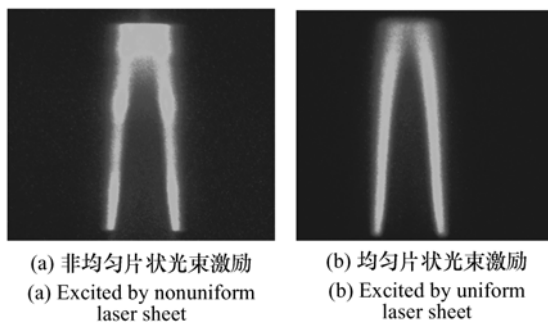
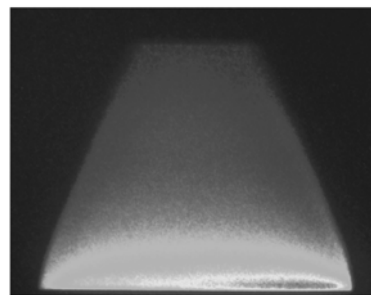


图6 酒精灯火焰荧光图像

Fig.6 Fluorescence image of alcohol flame

图7为在CH₄/air火焰中获得的OH荧光图像,图8为火焰中心荧光强度随火焰高度的变化曲线。由于消除了激励激光光强分布的影响,从而获得了真实的荧光强度分布,为计算火焰中的OH浓度分布提供了可靠的实验数据。对图8中OH密度随火焰高度的衰减曲线进行拟合,能够

图7 CH₄/air预混火焰中的OH荧光图像Fig.7 Fluorescence image of OH in CH₄/air premixed flame

获得CH₄/air预混火焰中心沿高度方向OH的密

度分布规律。拟合结果表明:OH 主要集中在火焰底部并随高度的增加按照指数规律衰减。

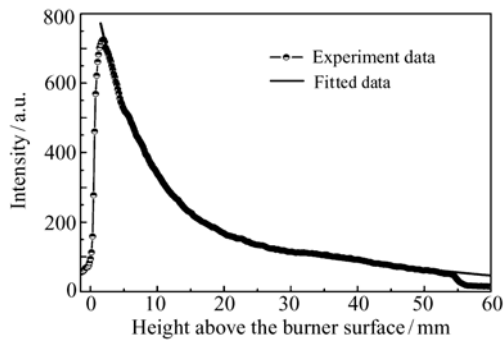


图8 火焰中心荧光强度随火焰高度变化曲线

Fig.8 Fluorescence intensity change with flame center height

5 结 论

在 PLIF 实验中,激励激光光强分布对实验结果影响较大,要获得真实可靠的荧光图像,需要消除激励激光光强分布的影响。对激励激光进行匀滑整形,产生均匀分布的二维片状激光束是其中的最佳方法。本文在数值计算、器件参数优化的基础上,建立了光束匀滑系统,该系统能够对 PLIF 实验所用染料激光光束进行匀滑整形,片状光束的不均匀性 < 4%,满足了 PLIF 实验所需。利用匀滑后的激光激励介质获得的二维荧光图像反映了实际的荧光强度分布,能够为获得燃烧场中 OH 的分布规律,进而为燃烧机理等研究提供更为可靠的实验数据。

参考文献:

- [1] RYAN M, GRUBER M, CARTER C, *et al.*. Planar laser-induced fluorescence imaging of OH in a supersonic combustor fueled with ethylene and methane[J]. *Proc. Combust. Inst.*, 2009, 32: 2429-2436.
- [2] DANEHY P M, WILKES J A, ALDERFER D W, *et al.*. Planar laser-induced fluorescence (PLIF) investigation of hypersonic flowfields in a Mach 10 wind tunnel (invited) [EB/OL]. [2012-12-11]. <http://archive.org/nasa-techdoc-200600201811/200600201811#page/no/mode/2up>.
- [3] 刘晶儒, 胡志云, 张振荣, 等. 激光光谱技术在燃烧流场诊断中的应用[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(2): 284-296.
LIU J R, HU ZH Y, ZHANG ZH R, *et al.*. Laser spectroscopy applied to combustion diagnostics[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(2): 284-296. (in Chinese)
- [4] 关小伟, 刘晶儒, 黄梅生, 等. PLIF 法定量测量甲烷-空气火焰二维温度场分布[J]. *强激光与粒子束*, 2005, 17(2): 173-176.
GUAN X W, LIU J R, HUANG M SH, *et al.*. Two-dimensional temperature field measurement in a methane-air flame by PLIF[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(2): 173-176. (in Chinese)
- [5] HEINZE J, MEIER U, BEHRENDT T, *et al.*. PLIF thermometry based on measurements of absolute concentrations of the OH radical[J]. *Z. Phys. Chem.*, 2011, 225: 1315-1341.
- [6] 林勇, 胡家升, 吴克难. 一种用于光束整形的衍射光学元件设计算法[J]. *光学学报*, 2007, 27(9): 1682-1686.
LIN Y, HU J SH, WU K N. Algorithm for the design of diffractive optical elements for laser beam shaping[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(9): 1682-1686. (in Chinese)
- [7] 高鸿奕, 楼祺洪, 董景星, 等. XeCl 准分子激光光束均匀器及其应用[J]. *光学学报*, 1996, 16(10): 1379-1382.
GAO H Y, LOU Q H, DONG J X, *et al.*. Beam homogenizer for XeCl excimer laser and its applications[J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, 16(10): 1379-1382. (in Chinese)
- [8] 樊桂花, 吴健华, 孙华燕, 等. 采用组合透镜阵列准直半导体激光器线阵[J]. *光电工程*, 2010, 37(11): 32-36.
FAN G H, WU J H, SUN H Y, *et al.*. Laser diode linear array collimated by lens combination array[J]. *Opto-Electronic Eng.*, 2010, 37(11): 32-36. (in Chinese)
- [9] 郝明明, 朱洪波, 秦莉, 等. 百瓦级高亮度光纤耦合半导体激光模块的研制[J]. *发光学报*, 2012, 33(6): 651-659.

HAO M M, ZHU H B, QIN L, *et al.*. Research on high brightness fiber coupled diode laser module with hundred watts class power[J]. *Chinese J. Luminescence*, 2012, 33(6):651-659. (in Chinese).

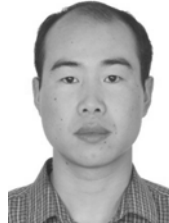
[10] 王鹏程, 邓永丽, 张立平, 等. 高亮度半导体激光阵列光纤耦合模块[J]. *发光学报*, 2012, 33(12):1335-1341.

WANG P CH, DENG Y L, ZHANG L P, *et al.*. High brightness fiber coupled diode laser module[J]. *Chinese J. Luminescence*, 2012, 33(12):1335-1341. (in Chinese)

作者简介:



张振荣(1974—),男,陕西蒲城人,硕士,副研究员,1997年于西北工业大学获得学士学位,2004年于西北核技术研究所获得硕士学位,主要从事激光技术及应用方面的研究。E-mail: nintzr@163.com



叶景峰(1979—),男,河南西平人,硕士,助理研究员,2001年于国防科技大学获得学士学位,2004年于国防科技大学获得硕士学位,主要从事激光技术及应用方面的研究。E-mail: leafey1979@163.com



王 晨(1977—),男,山东乳山人,硕士,工程师,1999年于天津大学获得学士学位,2008年于西北核技术研究所获得硕士学位,主要从事激光技术及应用方面的研究。E-mail: pplunum1@163.com



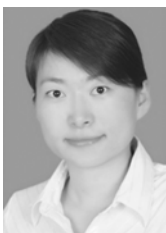
胡志云(1969—),男,河南人,博士研究生,高级工程师,1993年于哈尔滨工业大学获得学士学位,1999年于西北核技术研究所获得硕士学位,主要从事激光技术及应用方面的研究。E-mail: nintzzy@163.com



李国华(1985—),男,甘肃武威人,硕士,工程师,2007年于国防科学技术大学获得学士学位,2010年于国防科学技术大学获得硕士学位,主要从事激光光谱技术方面的研究。E-mail: liguohua@163.com



叶锡生(1967—),男,江苏人,博士,研究员,1989年于浙江大学获得学士学位,1997年于浙江大学获得博士学位,主要从事激光与物质相互作用方面的研究。E-mail: yxschx@yeah.net



赵新艳(1980—),女,新疆昌吉人,硕士,助理研究员,2003年于吉林大学获得学士学位,2006年于西北核技术研究所获得硕士学位,主要从事激光技术及应用方面的研究。E-mail: joyce200zh@sohu.com