

文章编号: 1001-3806(2004)01-0020-03

超音速燃烧室氢氧基平面激光诱导荧光测量

杨仕润, 赵建荣, 俞刚, 张新宇

(中国科学院力学研究所 高温气体动力学重点实验室, 北京 100080)

摘要: 用平面激光诱导荧光 (PLIF) 技术测量了氢/空气和煤油/空气超音速燃烧室氢氧基的荧光以及背景辐射光的图像。实验结果表明, PLIF 是鉴别对燃烧性能起关键作用的燃料/空气混合过程的有效手段, 发现在超音速燃烧室中 PLIF 氢氧基主要集中在凹腔区域, 这有助于解释凹腔对超音速燃烧起稳定作用的机理。

关键词: 平面激光诱导荧光; 超音速燃烧; 氢氧基; 凹腔

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A

Planar laser induced fluorescence imaging of OH radical in supersonic combustor

YANG Shi-run, ZHAO Jian-rong, YU Gong, ZHANG Xin-yu

(Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: Planar laser induced fluorescence (PLIF) technique is utilized to measure the images of hydroxyl radicals (OH) fluorescence and spontaneous emission in hydrogen/air and kerosene/air supersonic combustion. The results show that PLIF has been an efficient approach for identification of fuel/air mixing and combustion process. It is found that large number of OH radical is concentrated in the cavity range of the combustor, it is helpful to understand the mechanism of the cavity as the flame-holder in supersonic combustor.

Key words: planar laser induced fluorescence (PLIF); supersonic combustion; OH radical; cavity

引 言

超音速燃烧是一种燃料与空气在超音速条件下混合并发生燃烧化学反应的复杂过程, 流场中存在着强激波以及剧烈的化学热释放, 对于这种高温高速的复杂流场, 实验测量将十分困难, 特别是侵入式的物理探针测量无法使用。非侵入式的光学测量方法成为必然的选择, 相干反斯托克斯喇曼光谱 (CARS) 技术已成功地应用于燃烧场温度和成分浓度的测量^[1], 由于它是一种点测量技术, 获取的数据量受到很大的限制。平面激光诱导荧光技术 (PLIF) 提供了另一种有用的手段。

激光诱导荧光 (LIF) 技术是用激光激发介质分子或原子的特定能级的跃迁, 获得该介质的荧光, 它

的信号强度要比喇曼信号强几个数量级, 可以用来诊断燃烧过程中产生的稀有成分, 如 OH, NO, CH, CN 自由基等的含量, 为燃烧的化学反应动力学和火焰结构的研究提供了强有力的工具^[2]。早期 LIF 技术的研究是以单点测量为主, 随着对复杂的湍流燃烧火焰的研究, 后来又发展成平面激光诱导荧光技术 PLIF, 即获得一个面上的二维参数的分布, 并在成分浓度、温度、速度、压力等物理参数的平面图像测量中得到应用^[3,4]。

当前超音速燃烧室中的壁面凹腔作为稳定火焰的主要手段已得到普遍的应用, 但是它的机理还不是很清楚, 有各种说法, 主要困难是缺乏实验验证的数据。由于碳氢燃料燃烧氢氧基的存在是反应进行的重要标志, 超音速燃烧本质上是一种燃料逐渐掺混的扩散燃烧, PLIF 诊断技术通过获得燃烧室中氢氧基的分布, 对超音速扩散燃烧流场进行分析。重点诊断了凹腔附近的区域, 并选择了激发氢氧基的 Q₁(8) 支紫外谱线, 这是由于 Q₁(8) 线在 1000 K~2600 K 的温度范围内对温度的变化不敏感。从获得

基金项目: 国家自然科学基金重点基金资助项目 (1023060)

作者简介: 杨仕润 (1966-), 男, 副研究员, 从事高温气体动力学方面的研究工作。

E-mail: yangsr @imech. ac. cn

收稿日期: 2003-05-30; 收到修改稿日期: 2003-07-16

的荧光图像的强度可以定性地反映氢氧基浓度的相对变化。

1 基本原理

荧光是分子或原子在特定的选择定则条件下,由高能态(激发态)向低能态跃迁所产生的自发光辐射。在激光诱导荧光测量中,分子或原子受到入射激光束的激发,跃迁到激发态,使得激发态的粒子聚居数增加,而当入射激光束的频率和激发态、低能态的共振吸收频率相同时,荧光信号将得到共振增强。在未受到激光激发的情况下,粒子数主要集中在电子基态,其它电子能态的粒子聚居数可以忽略。激发态的粒子(分子或原子,在燃烧 LIF 测量中分子更具有代表性)聚居数经历分子受激发以及同其它分子之间发生非弹性碰撞过程发射荧光,产生 LIF 信号。

荧光信号强度 F 是温度 T 、压力 p 和介质分子或原子的浓度 χ 的函数,可以表示为^[1,3]:

$$F = \frac{E\chi p}{SkT} \sum_j B_j g_A \frac{A}{A+Q} \eta \quad (1)$$

式中, E 为入射激光的能量, S 为激光束与介质相互作用区的面积, k 为玻耳兹曼常数, f_j 是转动量子数为 J 的吸收态的玻耳兹曼分布, B 是爱因斯坦吸收系数, g 是光谱重叠积分, A 为自发辐射率, Q 是中子受激发碰撞淬灭速率, η 是辐射荧光在光接收装置 ICCD 中的转换效率,它依赖于收集光路的性能、滤光片、时间快门、光阴极量子效率和增益。 $A/(A+Q)$ 称为荧光产生率。

在燃烧测量中,通过选择激发具有特定转动量子数 J^* 的吸收能级,可以使得荧光信号强度 F 对温度的变化不敏感。特定转动量子数 J^* 的选择由下式确定^[1]:

$$J^{*2} + J^* - (k/hcB_v) \overline{T} = 0 \quad (2)$$

式中, \overline{T} 为火焰的平均温度。那么在氢氧基荧光测量中,若在 1000 K~2600 K 范围内,激发 $Q_1(8)$ 线, $J^* = 8.5$,而在 900 K~1700 K 范围内,激励 $Q_2(6)$ 线, $J^* = 5.5$,则荧光信号强度是温度的弱函数^[1]。这样选择合适的光激励条件,可以得到仅与浓度有关的荧光信号。

2 实验装置

2.1 超音速燃烧实验装置

超音速燃烧实验装置(见图 1)的详细描述可参阅文献[5]。燃烧室进口横截面为 50mm × 70mm,

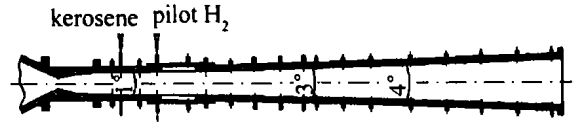


Fig. 1 Schematic of supersonic combustor

长 1020mm,逐渐向下游扩张。观察窗由 2 片宽 47mm,长 80mm 的石英窗片组成,位于壁面凹腔位置附近。作为起稳定燃烧作用的壁面凹腔位于距燃烧室进口 290mm 下游,凹腔几何为深 12mm,长 88mm,并在下游带 45° 台阶,燃料注入孔位于凹腔上游 40mm 处。总温 2000 K,总压 1.3MPa 的高温试验空气在加热器中通过氢/空气燃烧补氧产生,二维拉瓦尔喷管将空气膨胀成马赫数为 2.5 的超音速气流。燃料氢/煤油垂直注入与空气混合,静温静压条件合适产生自燃。

2.2 PLIF 测量装置

PLIF 测量装置由 3 部分组成:(1)光源系统,由 Nd:YAG 激光器(GCR290-30, Spectra Physics),染料激光器(HD-500, Lumonics)和倍频器(HT-1000, Lumonics)组成的光源系统可以获得用于激发特定的氢氧基共振辐射荧光所需的激光频率;(2)激光片光源产生系统,由反射镜、凹柱面镜和聚焦镜组成;(3)荧光信号采集和图像处理系统。由 ICCD 摄像机和控制器及计算机和相应的图像处理软件组成。

图 2 为 PLIF 实验光路图。光源系统输出波

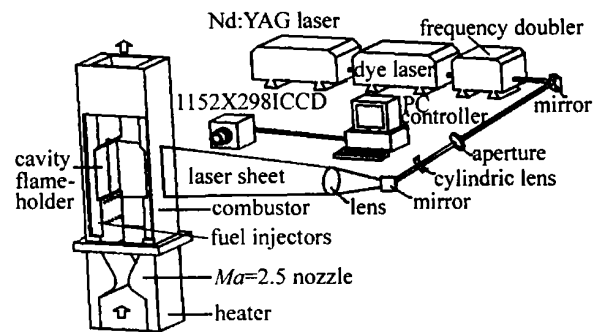


Fig. 2 Schematic of PLIF experimental setup

长为 283.642nm,能量约 5mJ/pulse,脉冲宽度 5ns,带宽 100MHz 的泵浦激光,用于激励氢氧基 $X^2 \Pi - A^2 \Sigma^+(0,1)$ 跃迁的 $Q_1(8)$ 线。输出光束经反射镜反射,由凹柱面镜($f = 5\text{mm}$)扩束形成片状光束,并由长焦距聚焦镜($f = 400\text{mm}$)聚焦到测试窗中,得到高约 80mm,厚约 0.4mm 的片状光束。其光腰位于测试窗中心位置。配置长焦距紫外镜头(Nikon, UV-Nikker, $f = 105\text{mm}$, $f/4.5$)的 ICCD 探测器(ICCD 1152 MGE, Princeton Instruments)在与入射片光束方向垂直的窗口正前方约 1.5m 处接收产

生的荧光信号。为了消除火焰发射的可见光辐射和泵浦光的瑞利散射,在收集镜头的前面加了3片2mm厚的Schott UG11和1片WG305光学滤光片,用3片UG11是为了更好地滤掉煤油燃烧产生的极强的可见光和近红外光辐射。由ICCD接收的荧光图像由计算机系统采集存储,并由特定的图像分析软件进行处理和分析。

3 实验结果与讨论

3.1 氢/空气超音速燃烧羟基荧光图像

图3a所示为氢/空气超音速燃烧实验中测量的羟基激光诱导荧光图像。实验条件为:总温度1750K,总压10.6MPa,氢/空气当量比0.45。由于

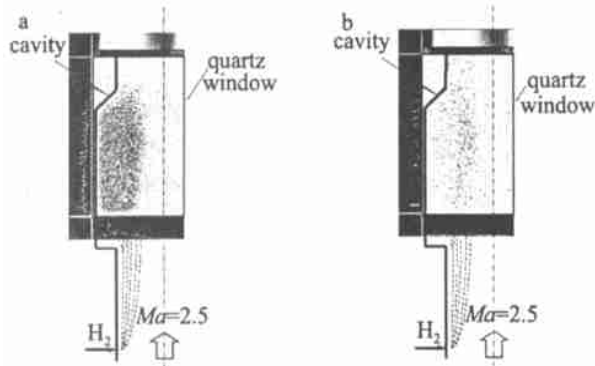


Fig. 3 PLIF image in H_2 /air supersonic combustion

a—OH radical PLIF image b—spontaneous emission image

燃烧室的对称性和燃料氢注入的对称性,测量主要集中在燃烧室一侧靠近凹腔的区域,成像的曝光时间为1s(30个激光脉冲)。从测量的图像可以看出,首先,羟基没有充满燃烧室,主要分布在侧壁区域,燃烧室中部基本没有羟基,这表明燃料混合没有达到中部区域燃烧,由此可以判明燃料混合不理想。此外,羟基在侧壁的分布也是不均匀的。羟基主要集中在凹腔中和靠近凹腔的区域,这是由于在凹腔中低速回流区的存在,使得氢和空气在此区域混合发生化学反应所产生的羟基得到维持,形成稳定的燃烧区,燃烧将主要发生在靠近羟基右侧的区域。而在靠近燃烧室中心的区域,由于高速空气主气流的影响,氢横向注入深度将受到限制,在此区域将难以形成稳定的燃烧火焰,图3a中的羟基基图像也说明了这一点。为了判明所测量的图像为羟基荧光图像,还对燃烧过程中的自发辐射进行了测量,如图3b所示,从图中可以看出,自发辐射的强度要比羟基的荧光辐射强度弱得多,表明在氢/空气超音速燃烧实验中,自发背景辐射对羟基荧光测量的影响是很微弱的。

3.2 煤油/空气超音速燃烧羟基荧光图像

图4a给出了煤油/空气超音速燃烧实验中测量的羟基激光诱导荧光图像。实验条件为:总温度1750K,总压10.5MPa,煤油/空气当量比0.34。获得的图像也类似于氢/空气超音速燃烧实验的结果(见图3a),羟基分布在侧壁区域,且分布不均匀。

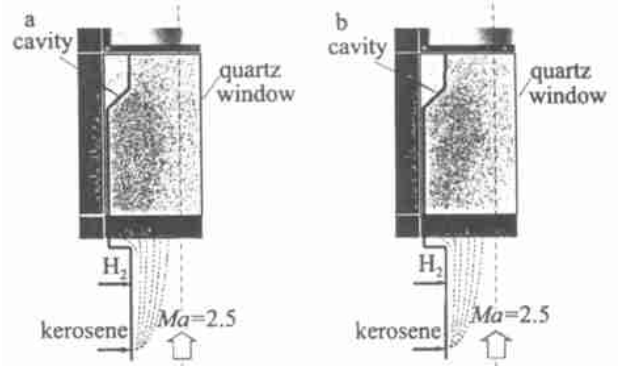


Fig. 4 PLIF image in kerosene/air supersonic combustion

a—OH radical PLIF image b—spontaneous emission image

羟基主要集中在凹腔中以及靠近凹腔的区域,这表明了稳定燃烧区主要在凹腔的临近区域。而燃烧过程中的自发辐射图像不同于氢/空气超音速燃烧实验的结果(见图3b),如图4b所示,自发背景辐射要比氢/空气超音速燃烧实验中的背景辐射要强得多,这说明在图4a中测量的荧光图像包含着较强的背景辐射干扰,这部分背景干扰除了由燃烧过程中羟基的紫外自发辐射、火焰的可见光辐射(主要是近红外辐射)和入射光在燃烧场中的瑞利散射光外,还有碳粒子(如 C_2 , C_3 等)的紫外自发辐射。这是由于碳氢燃料(煤油)的燃烧化学过程要比氢燃烧的过程复杂得多,而且产生的中间成分也很复杂,这些中间产物(如 C_2 , C_3 ,CN和CH等)在羟基荧光产生的紫外光谱区会有自发和受激辐射光谱线和带,尽管在激光诱导荧光测量中使用了光学滤光片UG11隔离可见光和WG305隔离紫外入射激光的瑞利散射,但滤光片的滤光效率不可能作到100%,况且如 C_2 , C_3 ,CN和CH等自由基产生的紫外辐射光是无法隔离的,这些无疑对羟基荧光的分析带来了很大的困难,因为在ICCD接收的辐射荧光图像中,难以将羟基的荧光成份分辨出,这也将是碳氢燃料燃烧荧光测量所面临的一大问题,对这一问题的研究势必要借助于光谱分析的技术,也就是说通过对荧光的谱分析来确定所测量的荧光是由哪些关键的分子贡献的,所占的比例有多少,这将是下一步所要进行的研究。

(下转第32页)



Fig. 6 SEM image of a cleaved GaN epilayer facet on sapphire 整光滑,质量要远远好于直接解理蓝宝石衬底所得 GaN 面。为进一步加工激光器谐振腔创造了条件。

3 总结

利用激光剥离技术成功地将 MOCVD 生长的 GaN 基单层外延片和 InGaN 多量子阱 LD 结构外延片与蓝宝石衬底分离。实验表明,对于背面抛光的样品,在单个脉冲辐照情况下,激光剥离所需的能量密度阈值约为 $200\text{mJ}/\text{cm}^2$,能量密度大于 $400\text{mJ}/\text{cm}^2$ 时可以实现稳定的剥离。对背面未抛光的外延片,能量密度阈值约为 $300\text{mJ}/\text{cm}^2$,在大约 $600\text{mJ}/\text{cm}^2$ 时

可以实现稳定剥离。通过优化工艺和激光扫描,可以对极薄的 MOCVD 生长的 GaN 基外延膜进行大面积剥离。剥离后 GaN 基外延膜易于解理,镜面平整光滑,根本上克服了蓝宝石难以解理、不易制备 GaN 解理面的困难。

参考文献

- [1] NAKAMURA S.J Cryst Growth,1997,170:11~15.
- [2] MORKOC H,STRITE S,GAO GB *et al.* J A P,1994,76:1363~1398.
- [3] STEIGERWALD D A,BHAT J C,COLLINS D *et al.* IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics,2002,8:310~320.
- [4] KELL Y M K,AMBACHER O,DAHLHEIMER B *et al.* A P L,1996,69:1749~1752.
- [5] WONG W S,SANDS T,CHEUNG N W *et al.* A P L,1998:72:599~602.
- [6] WONG W S,SANDS T,CHEUNG N W *et al.* A P L,1999,75:1360~1363.
- [7] WONG W S,KNEISSL M,MEI P *et al.* A P L,2001,78:1198~1201.
- [8] JOHNSON J W,LAROCHE J,REN F. Solid State Electron,2001,45:405~410.
- [9] MORITA D,SANO M,YAMAMOTO M *et al.* J A P,2002,41:1434~1436.
- [10] KELL Y M K,VAUDO R P,PHANSE V M *et al.* Japan J A P,1999,38:217~219.
- [11] STACH E A,KELSCH M,NELSON E C *et al.* A P L,1999,77:1819~1822.
- [12] MARTIN R W,KIM H S,CHO Y *et al.* Materials Science and Engineering,2002,B93:98~101.
- [13] 童玉珍. GaN 及其三元化合物的 MOCVD 生长和性质及蓝光 LED 的研究. 北京大学博士毕业论文,1999. 68.
- [14] KAWASHIMA T, YOSHIKAWA H, ADACHIS *et al.* J A P,1997,82:3528~3535.

(上接第 22 页)

尽管从上面的分析讨论中可以看出煤油/空气超音速燃烧的平面激光诱导荧光图像很复杂,已经不能用“纯”的氢氧基荧光来表示了,但是测量的荧光图像还是揭示了煤油/空气超音速燃烧实验室中燃烧区域的直观图像,荧光的出现毕竟表明了在该区域发生了燃烧的化学反应过程,因为荧光是由化学反应过程中的中间产物所产生的。

4 总结

平面激光诱导荧光技术是一种能对超音速扩散燃烧场进行诊断的有效手段,通过氢氧基的分布可以鉴别对燃烧性能起关键作用的燃料/空气混合过程,实验所获得的 PLIF 氢氧基荧光图像表明氢氧基主要集中在凹腔中和靠近凹腔的侧壁区域,有助

于解释凹腔对超音速燃烧起稳定作用的机理,并发现氢/空气超音速燃烧所产生的自发背景辐射对氢氧基荧光测量的影响比较弱,而在煤油/空气超音速燃烧过程中的产生的自发背景辐射则较强,而且复杂。

作者对参加实验研究工作的李建国,李英,钱大兴作出的贡献表示衷心的感谢。

参考文献

- [1] YANG S R,ZHAO J R,SUNG C J *et al.* Appl Phys,1999,B68:257~265.
- [2] ECKBRETH A C. Laser diagnostics for combustion temperature and species. UK Kent:Abacus Press,1988. 301~361.
- [3] HANSON R K,SEITZMAN J M,PAUL P H. Appl Phys,1990,B50:441~454.
- [4] HILLER B,HANSON R K. Appl Opt,1988,27(1):33~48.
- [5] YU G,LIJ G,ZHAO J R *et al.* Experimental studies on supersonic combustion. 7th International Spaceplanes and Hypersonics Systems & Technology Conference. Norfolk,1996. 4512.