

燃烧场波系显示及燃烧区域诊断研究

岳茂雄¹, 苏铁¹, 杨顺华², 袁强¹, 乐嘉陵²

(1. 中国空气动力研究与发展中心 设备设计及测试技术研究所, 四川 绵阳 621000;

2. 中国空气动力研究与发展中心 吸气式高超声速技术研究中心, 四川 绵阳 621000)

摘要: 燃烧场的流场诊断研究, 有利于燃烧室的结构设计和燃烧状态的组织。研究主要采用激光纹影/阴影和差分干涉方法显示燃烧场的波系结构, 并用羟基平面激光诱导荧光(OH-PLIF)方法诊断燃烧边界和核心燃烧区域, 得到了清晰的燃烧场波系显示结果和燃烧情况的 PLIF 显示结果。将差分干涉/激光阴影和 PLIF 方法结合, 可以考察波系结构与燃料燃烧的关系。研究采用了一种新型消相干技术的激光纹影, 可以像常规纹影一样用刀片切割光源像, 不会产生明显的激光散斑和衍射现象; 同时在工程上将波系结构显示和 PLIF 进行同步诊断, 也是比较有意义的工作。该工作对于超声速燃烧流场的研究具有参考意义。

关键词: 燃烧; 流场显示; 激光诱导荧光; 图像处理

中图分类号: V211.72; O443 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0239001

Research for visualizing wave structure of combustion field and diagnosing burning area

Yue Maoxiong¹, Su Tie¹, Yang Shunhua², Yuan Qiang¹, Le Jialing²

(1. Facility Design and Instrumentation Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China;

2. Air Breathing Hypersonic Technology Research Center, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: Diagnosis of combustion field was mainly useful to structure designing and combustion state organization of the combustion chamber. Laser schlieren/shadow and difference interferometer were used to study the wave structures of combustion field. And combustion border and combustion violent region were diagnosed by the planar laser-induced fluorescence of OH groups (OH-PLIF) method to get a clear field of combustion wave lines and the combustion results displaying by PLIF. Combining laser shadow/difference interferometer and OH-PLIF, the relationship between the wave lines and combustion could be seen. To cut the image of light source similarly to traditional schlieren by adopting a new laser schlieren technology, which produced not obvious laser speckle and diffraction phenomenon. What's more, it was meaning to display the wave structure and diagnosis by PLIF at the same time. The work above can be a reference for the study of supersonic combustion fluid field.

Key words: combustion; visualization; laser induced fluorescence; image processing

收稿日期: 2016-06-10; 修订日期: 2016-07-20

基金项目: 国家自然科学基金(91641126)

作者简介: 岳茂雄(1971-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事光学流动显示方面的研究。Email: ymxyxx@163.com

0 引言

对燃烧室的波系结构显示和对燃烧火焰边界的准确判定,对于设计和控制高超声速燃烧及燃料注入方式等具有重要意义。目前这方面的研究较多,邢建文等人采用数值模拟的方法进行研究^[1-3];肖保国等人采用数值模拟和试验相结合的方法进行研究^[4-5];最常见的试验方法是常规纹影/阴影方法,同时结合火焰直拍进行研究^[6-7],采用常规纹影显示燃烧场时,要考虑燃烧场的自发光,也可以利用这一点,采用合适的曝光将火焰和纹影图像拍摄到一张图片上;该研究采用激光方法显示燃烧场的流场结构和火焰边界,激光纹影和差分干涉显示波系结构方法,OH-PLIF 显示火焰的边界层。这方面的研究,如李剑和陈辉等人分别采用激光纹影和差分干涉研究过磁重联和等离子体现象^[8-9],这里用来研究燃烧场,而且激光纹影采用了新型消相干技术,得到了较好的显示结果。对三维燃烧场的火焰直拍是有局限性的,这方面多采用光谱方法,如李麦亮等人采用的 PLIF 方法^[10],洪延姬等人采用可调谐半导体激光器吸收光谱(TDLAS)方法研究燃烧场^[11-12],而 Matthew Leonard Fotia 却独辟蹊径,采用差分干涉来显示燃烧场的燃烧边界^[13],也得到了相关结果。

研究采用激光纹影和差分干涉显示燃烧场,并将激光阴影和 OH-PLIF 结合起来同步显示燃烧场。类似工作 Adela Ben-Yakar 较早前曾做过小口径喷氢流场的原理性研究^[14],本研究将同步显示区域从 $\varphi 35\text{ mm}$ 扩大到了大于 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$,改进了光路布局,直接应用到了工程上,得到了较好的试验结果。

1 激光方法显示燃烧场波系结构

1.1 试验模型

试验模型为一个凹槽燃烧模型,如图 1 所示,灰色所示的区域为流场显示区域,火花塞(Spark)安装在凹槽的上壁面中心位置,有 3 个煤油注入口, K1 位于凹槽前隔离段末端,在 K1 之前为氢气注入孔,煤油注入孔 K2 和 K3 位于后端,燃烧过程中,可以通过控制煤油和氢气注入当量比和压力来控制燃烧工况。

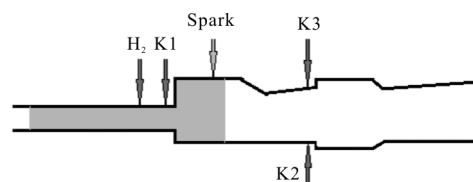


图 1 燃烧模型

Fig.1 Combustion model

1.2 光学显示方法

针对上述发动机燃烧室和隔离段的流场,采用了差分干涉和激光纹影进行显示,这两种方法光路相似,而且光源是同一个光源,为 5 W 的连续激光器,波长为 532 nm。如图 2 所示,为差分干涉的光路示意图,激光器发出的光束经过反射镜 M1 反射后,被扩束镜 SP 发散,再经反射镜 M2 照明纹影镜 S1,调节扩束镜的位置和扩束比例,使得光束通过 S1 后,光线呈平行光照明流场 TS,然后被纹影镜 S2 会聚,并用反射镜 M3 反射向高速相机,在光束会聚点位置放置差分干涉组件 DI,差分干涉组件由两片偏振片和夹在中间的渥拉斯顿棱镜组成,通过成像透镜成像在高速相机靶面上得到流场显示图像,调节光束会聚点在渥拉斯顿棱镜的位置,可以得到宽度不一致的有限干涉条纹或无限宽干涉条纹。

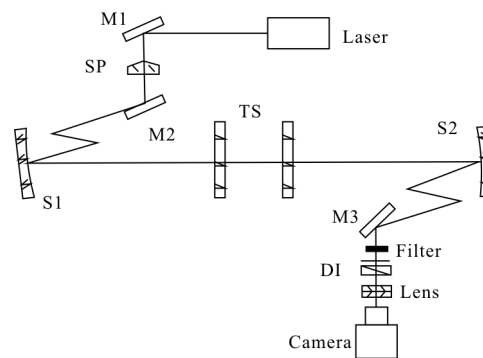


图 2 差分干涉光路示意图

Fig.2 Optical sketch map of difference interferometer

激光纹影技术的光路图和差分干涉光路图类似,只是在扩束镜位置附近用一个激光消相干装置取代扩束透镜,调节消相干装置的位置,使得照明试验段的光束为平行光,然后在高速相机前,采用刀口代替干涉组件,并用刀口去切割光束会聚点,如果是燃烧场要去掉流场自发光,在会聚点附近加上干涉滤光片(filter)就可以了。这里采用的激光纹影技术由锦州航星光电设备有限公司提供技术支持。

1.3 试验显示结果

试验主要是考察燃烧室和隔离段的波系情况,相机的曝光时间均为 360 ns。图 3 和图 4 为喷氢燃烧流场,差分干涉和激光纹影均能够清晰显示燃烧场结构,通过喷氢时刻作为参考,能得到它们的大致同时刻流场图像,波系结构吻合得较好。燃烧室开始燃烧后,由于压力增大,反推斜激波,在隔离段形成激波串,通过控制 K1、K2 和 K3 等注入燃料的参数变动,改变燃烧室的燃烧状态,形成激波串的振荡。图 5 和图 6 为测压结果与显示结果



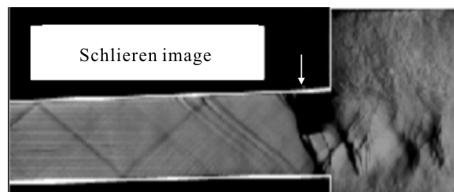
图 3 燃烧场差分干涉图

Fig.3 Difference interferometer image of combustion field



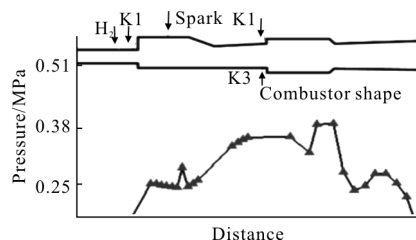
图 4 燃烧场激光纹影图

Fig.4 Laser schlieren image of combustion field



(a) 纹影图像

(a) Schlieren image



(b) 压力曲线

(b) Pressure curve

图 5 喷氢纹影图和压力结果

Fig.5 Schlieren image of hydrogen combustion field and its pressure result

的对比,注入煤油形成燃烧振荡时,燃烧室压力相对于喷氢时明显增加,相对压力增加了约 50%。

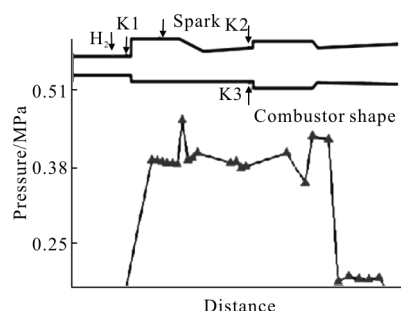


图 6 燃料纹影图和压力结果

Fig.6 Schlieren image of fuel combustion field and its pressure result

2 激光阴影/差分干涉和 OH-PLIF 同步诊断燃烧场

2.1 燃烧模型

用火焰直拍观察燃烧状态并不准确,研究在得到了燃烧场的波系结构基础上,尝试采用 PLIF 和激光阴影/差分干涉同步诊断燃烧场。试验模型采用一个喷氢的凹槽模型,如图 7 所示,K1 和 K2 分别代表不同工况下,氢气喷入位置。来流马赫数约为 2,总温约为 1 000 K。灰色区域为流场诊断的区域。

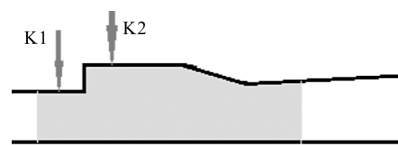


图 7 喷氢位置示意图

Fig.7 Sketch map for position of spray hydrogen

2.2 试验显示方法

该方法光路图如图 8 所示,激光器同样为中心波长为 532 nm 的连续激光器,功率 5 W,采用发散镜组 SP 将光束发散后,被第 1 纹影镜 S1 准直为平行光透过二向色分光镜后照明流场,第 2 纹影镜 S2 将光线会聚,并被反射镜 M2 反射向高速相机,在光线会聚之前,采用滤光片滤除流场自发光,将差分干

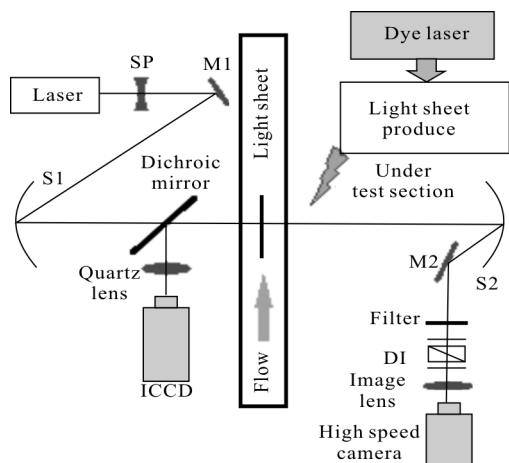


图 8 试验布局示意图

Fig.8 Sketch of test layout

涉组件 DI 放置到光线会聚点位置附近,最后用成像透镜将流场成像到高速相机靶面上。调节会聚点在渥拉斯顿棱镜里面的位置,可以得到有限和无限的差分干涉图。激光阴影方法则去掉差分干涉组件,并对流场适当离焦就可以了。

染料激光器发出的光线反射到流场的下面,将片光发生装置布置在流场的下方,并使片光照明流场的观测位置,与连续激光照明宽度大致重合,试验流场中被激光诱导的荧光被二向色分光镜反射到像增强相机 (ICCD) 方向,并用石英透镜成像流场。试验中的同步采用外触发控制延时触发器,然后同时触发 ICCD 和高速相机开始采集,高速相机采集的帧频是 ICCD 相机的 1000 倍,这样既可以得到整个流场的波系结构图,又可以根据激光诱导荧光图得到对应的温度分布,图 9 为试验现场光路布置图。



图 9 试验现场图

Fig.9 Scene for test

2.3 试验结果

根据前面光路布局,进行了试验,凹槽内喷氢气,调节氢气当量小于 0.15,喷射压力 1.4 MPa。在图 10(a)喷氢 5 ms 时刻,形成明显的人射激波轨迹,

基本上到达了凹槽的下壁面,燃烧室内压逐渐增大,来流通道变窄,在凹槽前缘拐角处产生的斜激波;如图 10(b)喷氢 85 ms 时刻和图 10(c)喷氢 185 ms 时刻,稳定燃烧后,燃烧室内压继续增大,斜激波激波稳定在某个位置,对应的分离激波也是如此。如图 10(d)喷氢 285 ms 时刻所示,喷氢结束,斜激波和分离激波移到下游,并逐渐衰减。

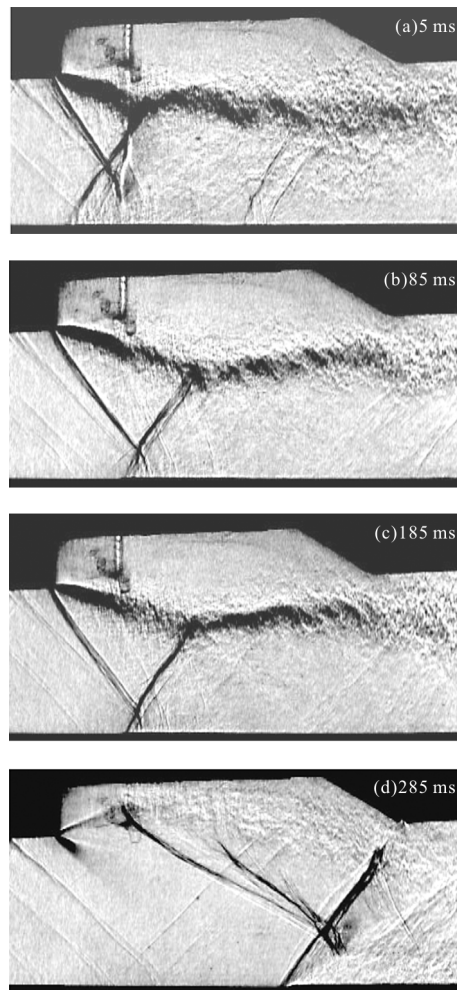


图 10 激光阴影显示结果

Fig.10 Result of laser shadow

凹槽外喷氢气工况时,氢气当量比为 0.04,氢气压力 0.65 MPa,在喷氢气 150 ms 时刻,得到了差分干涉、激光阴影和 PLIF 图,并进行了合成,如图 11 所示。此时喷氢的当量比较低,压力也较低,所以只能看到氢气的喷射激波轨迹,火焰的燃烧区域也相对较为稳定。从图 11(a)来看,火焰的燃烧区域包括浅色部分,这点从火焰直拍显示也可以看出,但燃烧核心区域颜色渐变的区域,这是从火焰直拍看不到的,通过与其它光谱

方法标定结果对照, 最高温度达到了 2900K。图 11(b)和图 11(c)为激光阴影和差分干涉图, 二者吻合较好, 图 11(d)和图 11(e)为 PLIF 图中燃烧较为剧烈的部分和激光纹影和差分干涉各自的合成图, 可见在该试验条件下, 燃烧核心部分位于燃料和来流混合较为充分的高湍流度区域。

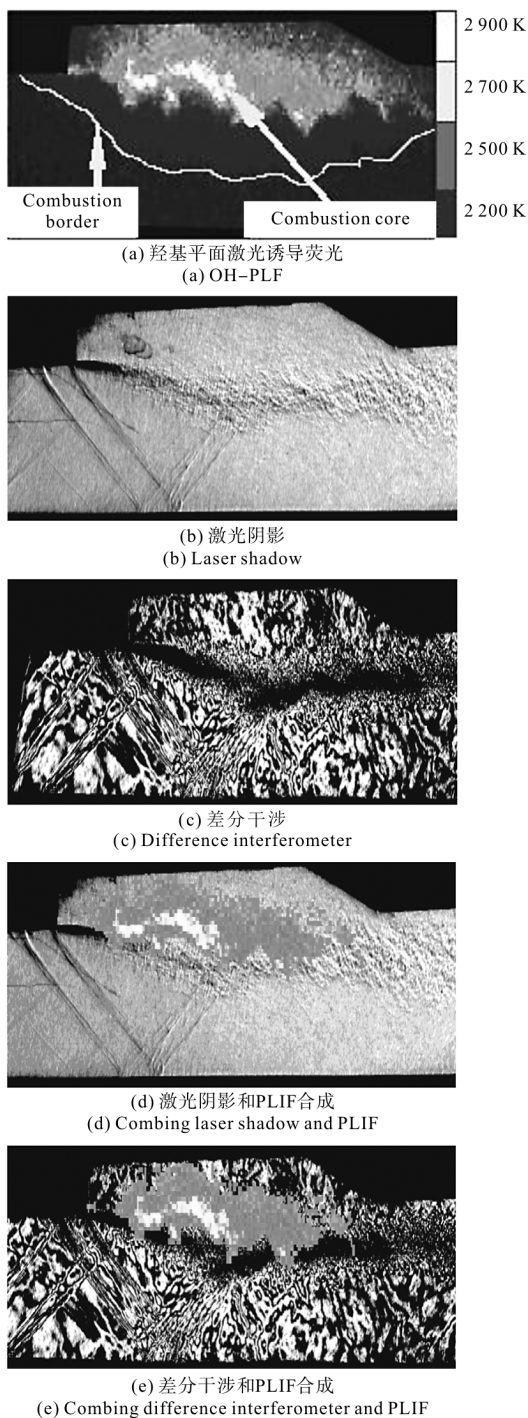


图 11 同时刻几种结果

Fig.11 Several results at same time

3 结 论

(1) 采用激光纹影/阴影和差分干涉能够很好显示燃烧场的波系结构, 采用新型消相干技术的激光纹影/阴影方法消除了激光散斑效应, 得到了较短曝光时间的流场显示图像, 这几种方法非常适合燃烧场的波系结构显示。

(2) OH-PLIF 显示结果能够准确显示某燃烧界面的边界, 凹槽显示区域中比下部底色较浅的整个区域就是该片光所在截面的燃烧区域, 还可以观察到亮白色周围的燃烧核心区域, 混合越充分的湍流区域, 燃烧越充分。

(3) 激波波系和 PLIF 显示结果存在差别, 这是由于阴影和差分干涉是三维燃烧流场的通程积分, 而 PLIF 结果是一个三维燃烧场的某个截面的结果。

(4) 下一步工作可采用 PLIF 试验用的脉冲光分光做聚焦纹影的光源, 这样在时间分辨率和同步上完全满足要求; 采用聚焦纹影对片光所在截面流场聚焦, 这样可以得到燃烧场某截面的更为准确的激波和 PLIF 结果, 并标定 PLIF 显示结果。

参考文献:

[1] Xing Jianwen, Le Jialing. Numerical study of flame plane model in scramjet [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2008(2): 40-45. (in Chinese)
邢建文, 乐嘉陵. 火焰面模型在超燃冲压发动机数值模拟中的应用[J]. 实验流体力学, 2008(2): 40-45.

[2] Chi Hongwei, Wei Zhijun, Li Bi ao, et al. Difference of self-ignition performance in solid fuel scramjet with setup or cavity[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2014(5): 628-639. (in Chinese)
迟鸿伟, 魏志军, 李彪, 等. 台阶和凹腔在固体燃料超燃冲压发动机内自点火性能对比 [J]. 固体火箭技术, 2014(5): 628-639.

[3] Wang Xiyao. Numerical study of unsteady flow in scramjet. [D]. Mianyang: China Aerodynamics Research and Development Center, 2012, 2: 123-134. (in Chinese)
王西耀. 超燃冲压发动机定常流动数值研究[D]. 绵阳: 中国空气动力研究与发展中心, 2012, 2: 123-134.

[4] Xiao Baoguo, Yan Zhihui, Tian Ye, et al. Preliminary study on criterion of indentifying combustion mode for scramjet [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2015, 36(8): 1121-

1126. (in Chinese)
肖保国, 晏至辉, 田野, 等. 超燃发动机燃烧模态判别准则初步研[J]. 推进技术, 2015, 36(8): 1121–1126.
- [5] Zhang Wanzhou. Research on the sstart –up process of scramjet combustor [D]. Chengdu: Southwest Jiao tong University, 2013, 4: 37–85. (in Chinese)
张弯洲. 超燃冲压发动机燃烧室起动过程研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2013, 4: 37–85.
- [6] Liu Juan, Pan Yu, Liu Weidong, et al. Analysis of the hydrogen combustion field in scramjet dual–cavity combustor [J]. *Journal of Aero Space Power*, 2009, 12 (1): 55–59. (in Chinese)
刘娟, 潘余, 刘卫东, 等. 超燃发动机双凹腔燃烧室氢气燃烧流场研究[J]. 航空动力学报, 2009, 12(1): 55–59.
- [7] Liu Shijie, Pan Yu, Liu Weidong, et al. Experimental study on the combustion and flow process in a scramjet with strut injector[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2009(1): 2501–2505. (in Chinese)
刘世杰, 潘余, 刘卫东, 等. 超燃发动机支板喷射燃料的燃烧过程试验[J]. 航空动力学报, 2009(1): 2501–2505.
- [8] Li Jian, Dan Jiakun, Zhao Xincui, et al. Measurement of magnetic reconnection driven by pulse power using ultra high speed laser schlieren technology [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(9): 092006. (in Chinese)
李剑, 但加坤, 赵新才, 等. 超高速激光纹影技术测量脉冲功率驱动的磁重联现象[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(9): 092006.
- [9] Chen Hui, Guo Jiangjian, Huang Xianbin, et al. Two–frame differential interferometry for aluminum wires Z –Pinch plasma diagnostics [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(9): 2287–2291. (in Chinese)
陈辉, 郭江建, 黄显宾, 等. 两幅差分干涉诊断铝丝阵 Z 箍缩等离子体[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(9): 2287–2291.
- [10] Li Mailiang, Zhou Jin, Geng Hui, et al. Analysis for flame structure of the alcohol supersonic combustion with hydrogen flame as pilot flame [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2005, 7(3): 280–283. (in Chinese)
李麦亮, 周进, 耿辉, 等. 氢气引燃的酒精超燃火焰结构分析[J]. 推进技术, 2005, 7(3): 280–283.
- [11] Hong Yanji. Progress in absorption spectroscopy diagnosis techniques for combustion flowfields [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2014, 28(3): 12–25. (in Chinese)
洪延姬. 燃烧场吸收光谱诊断技术研究进展[J]. 实验流体力学, 2014, 28(3): 12–25.
- [12] Liu Jingru, Hu Zhiyun, Zhang Zhenrong, et al. Laser spectroscopy applied to combustion diagnostics [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(2): 284–296. (in Chinese)
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.
- [13] Matthew Leonard Fotia. Experimental study of shock –train/ combustion coupling and flame dynamics in a heated supersonic flow[D]. Michigan:University of Michigan, 2012: 25–32.
- [14] Adela Ben–Yakar, Michel Kamel, Christopher Morris, et al. Hypersonic Combustion and mixing studies using simultaneous OH –PLIF and schlieren imaging [C]// 36th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 1998, 2514: 940.