

文章编号:1000-8055(2011)08-1782-05

FRS 技术对瞬态高速喷流的可视化研究

王 晟, 胡志云, 张振荣, 刘晶儒, 叶景峰, 张立荣

(西北核技术研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室, 西安 710024)

摘 要: 为了诊断瞬态高速喷流的结构特征,开展了基于分子滤波瑞利散射(FRS)技术的可视化研究.介绍了 FRS 技术的基本原理,分析了散射光的多普勒频移对诊断的影响.针对瞬态高速喷流特点,建立了 FRS 诊断系统,设计了两种不同的激光入射方式.采用与流场方向垂直的激光入射方式,获得了喷流与空气作用的湍流结构.而采用与流场轴向平行的激光入射方式,则获得了喷流自身的结构. FR S 技术对瞬态高速喷流的可视化研究,对研究超声速湍流混合层流场具有重要指导意义.

关 键 词: 激光光谱; 湍流结构; 可视化; 分子滤波; 瑞利散射

中图分类号: TN249

文献标志码: A

Research on visualization of transient high speed exhaust flow by FRS technique

WANG Sheng, HU Zhi-yun, ZHANG Zhen-rong, LIU Jing-ru,
YE Jing-feng, ZHANG Li-rong

(State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter,
Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: A visualization technique based on of molecular filtered Rayleigh scattering (FRS) was studied for diagnosing the structures of transient high speed exhaust flow. The diagnostics system was composed of a narrow line width laser, a molecular/atomic absorption filter and a collection device such as ICCD (intensified charge coupled device). The absorption filter was used to modify the spectra of the Rayleigh scattering signal from the flow field illuminated by a laser sheet from a Nd : YAG (neodymium-doped yttrium aluminium garnet) pulsed laser. The laser was tuned to an absorption line of iodine vapor contained in the filter. This caused background scattering from solid particles and surface to be strongly absorbed, while much of Doppler broadened Rayleigh scattering was transmitted through the filter. FRS diagnostic system was described. FRS technique was used to diagnose transient high speed exhaust flows. The turbulence structures on the area of laser action were obtained. These demonstrate the ability of the FRS technique to diagnose supersonic flow.

Key words: spectroscopy; turbulence structures; visualization; molecular filter; Rayleigh scattering

随着航空、航天技术的飞速发展,超声速湍流混合层流场结构的研究成为国内外湍流研究的热点和难点.光学诊断方法^[1-2]具有非接触式、在线

测量、分辨率高和可视化等优点,越来越受到人们的关注.对于流场结构的测量,光学测量方法有纹影法^[3-4]、激光诱导荧光法^[5-6]、瑞利散射(Ray-

收稿日期:2010-08-09; 修订日期:2011-01-13

作者简介:王晟(1977—),男,山东威海人,工程师,硕士,主要从事激光应用方面的研究工作.

leigh scattering,简称RS)法^[7-8]等技术.这几种方法都有各自特点,如纹影法是根据光线的偏折角来确定流场折射率一阶倒数,适合测量流场密度的梯度变化,激光诱导荧光法是利用流场反应时发射出的荧光来显示流场结构,适合测量反应流场.

瑞利散射技术是基于流场本身分子弹性散射的光学测量方法.由于其信号强度与流场总分子的密度成正比,信号图像可以直观反映流场的结构分布.但传统RS技术存在易受干扰的问题,因为物体表面反射的背景激光杂散光和米散射都与瑞利散射光频率相同,它们都会对测量信号产生干扰,甚至将其掩盖.分子滤波瑞利散射(filtered Rayleigh scattering,简称FRS)技术^[9]是RS技术的改进技术,它结合可调谐、窄线宽激光器和分子滤波器,有效地解决了干扰问题,并且使流场温度、密度、压力和速度等参量定量测量成为可能.FRS技术在国外发展迅速,已广泛应用于烟熏火焰、等离子体、超声速燃烧流场及其他复杂流场的诊断^[10-11].本文根据FRS技术的工作原理,采用分子滤波器吸收掉很强的背景激光杂散光,而让流场的散射光通过作为检测信号,获得了瞬态高速喷流的结构图像.

1 FRS 流场可视化原理

FRS技术是通过在散射光接收光路上添加了一个分子滤波器,预先调谐窄线宽激光输出频率与分子吸收凹陷的中心频率匹配,利用分子吸收光谱中所特有的超精细凹陷(凹陷宽度在GHz)吸收窄线宽的背景激光杂散光或米散射,而激光与流场作用产生的瑞利散射光由于多普勒效应展宽,可以部分的通过吸收凹陷,作为检测信号,此过程如如图1(a)所示.

FRS信号与激光能量、流场状态存在如下关系:

$$S = C I_0 n \sum_k x_k \frac{d\sigma}{d\Omega}(\varphi)_k \int R_k(\nu, \Delta\nu_D, p, T, M_k) \tau(\nu) d\nu \quad (1)$$

其中S为FRS信号强度;C为与光学系统有关的常数; I_0 为入射激光强度; n 是流场分子数密度; $(d\sigma/d\Omega)$ 为瑞利微分散射截面; $R_k(\nu, \Delta\nu_D, p, T, M_k)$ 为瑞利散射光谱线型函数,可以通过Tenti提出的S6瑞利散射模型^[12]数值模拟,而 ν 为激光频率, $\Delta\nu_D$ 为散射光的多普勒频移, M_k 为第k

种粒子分子质量; $\tau(\nu)$ 为分子滤波器透过率.

将流场FRS信号图像S与空气参考FRS图像 S_{ref} 相比,消掉与系统有关的常量C,得到如下结果:

$$\frac{S}{S_{ref}} = \frac{n \sum_k x_k (d\sigma/d\Omega) \int_{k\Delta\nu} R_k(\nu, \Delta\nu_D, T, p, M_k) \tau(\nu) d\nu}{n_0 \sum_{k'} x_{k'} (d\sigma/d\Omega) \int_{k'\Delta\nu} R_{k'}(\nu, T_0, p_0, M_{k'}) \tau(\nu) d\nu} \quad (2)$$

其中 T_0 为室温, p_0 为常压, n_0 为常温、常压下空气的数密度.

从公式(2)可以看出, S/S_{ref} 主要为流场分子数密度 n 的函数,同时还存在与温度、压力、频移等因素有关的散射光谱线型 $R_k(\nu, \Delta\nu_D, T, p, M_k)$ 与吸收光谱 $\tau(\nu)$ 卷积的修正量.从公式(2)可以定性分析流场旋涡、冲击波和切变层等结构信息,这也是FRS技术可视化的主要根据.

流场散射光的多普勒频移对信号的影响可以通过图1(b)说明.当流场存在流速时,散射光会发生频移,偏离吸收凹陷中心,如图1(b)所示.此时检测的信号为流场散射光,散射光谱线型 $R_k(\nu, \Delta\nu_D, T, p, M_k)$ 与吸收光谱 $\tau(\nu)$ 卷积也就发生改变.

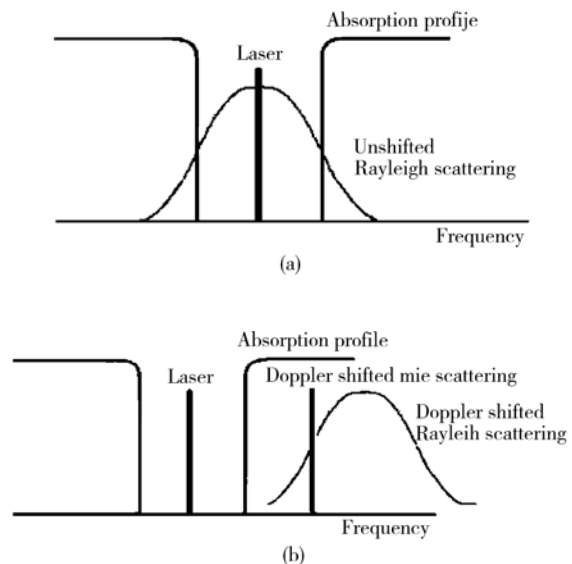


图1 FRS 可视化原理图

Fig. 1 Working principle of flow visualization by FRS

散射光的多普勒频移 $\Delta\nu_D$,可以通过下面公式给出:

$$\Delta\nu_D = \frac{1}{\lambda} |\mathbf{V} \cdot (\mathbf{e}_s - \mathbf{e}_0)| = \frac{2V \cos \alpha \sin \frac{\theta}{2}}{\lambda} \quad (3)$$

式中 λ 是介质的激光波长, $\mathbf{e}_0$ 是入射光的单位向量, $\mathbf{e}_s$ 是粒子散射光的单位向量, α 为速度 $\mathbf{V}$ 与 $\mathbf{e}_s - \mathbf{e}_0$ 的夹角, θ 为入射光和散射光单位向量的夹角。

通过对公式(3)的分析发现,当改变速度 $\mathbf{V}$ 与 $\mathbf{e}_s - \mathbf{e}_0$ 的夹角 α 时,多普勒频移 $\Delta\nu_D$ 的大小也会发生改变。这里存在两种极端情况,一种是夹角 α 为 90° ,即速度 $\mathbf{V}$ 与 $\mathbf{e}_s - \mathbf{e}_0$ 平面垂直,这时多普勒频移为 0,此时可忽略流场速度的影响,FRS 信号收集过程如图 1(a) 所示;另一种情况是夹角 α 为 0° 或 180° ,这时多普勒频移最大,流场散射光从吸收凹陷偏移出,此过程可参考图 1(b)。

2 实验诊断系统

2.1 FRS 实验系统

FRS 诊断系统如图 2 所示,由激光光源、诊断光路、数据采集和同步控制四部分组成。光源采用重频 10 Hz、种子注入锁定的 Nd:YAG(钕铝石榴石晶体)激光器,通过调节种子激光器的腔长来调谐激光器的输出波长,经二倍频为 532 nm 绿色激光。绿光通过光楔分成两束,约 4% 能量进入激光能量与输出频率监测光路,而大部分能量用于诊断流场,其中半波片用来调节激光的偏振方向,空间滤波/扩束器用以提高激光光束质量和改变光斑的大小,柱面透镜组合(长焦柱面透镜和短焦柱面透镜共焦安置)将激光束横截面压窄,形成激光片(laser sheet),通过 45° 全反射镜来控制激

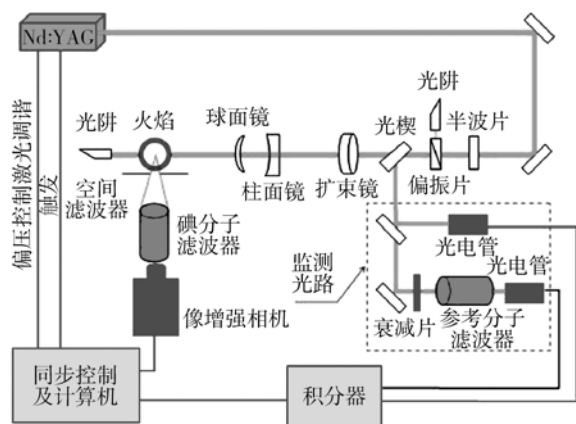


图2 FRS诊断系统示意图

Fig. 2 Schematic of molecular filtered Rayleigh scattering system

光与流场的作用方向。选择碘蒸气作为滤波物质,

而碘蒸气密闭在两端有着光学窗口的圆柱形玻璃容器中,从碘蒸气透过的散射信号成像到 12-bit 像增强器(ICC)上,最后数据通过计算机收集并处理。

碘蒸气的吸收谱采用种子注入锁定的可调谐 Nd:YAG 激光器的二倍频 532 nm 激光进行了扫描测量^[13],图 3 是测量碘蒸气的典型吸收谱线。碘分子吸收凹陷的透过率最低达到了 0.06%,基本可以满足滤波的要求。

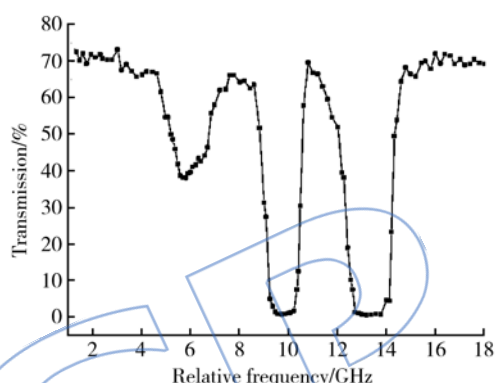


图3 碘分子在 18788.44 cm^{-1} 处的吸收凹陷

Fig. 3 Measured absorption lines of iodine

2.2 系统同步控制

诊断的瞬态高速流场采用封闭容器内燃烧后气体突然释放并流经超声速喷管的方式获得。脉冲超声速高温流场具有流速高(马赫数约为 1.9),温度高(约 $1000 \sim 2500 \text{ K}$),并且持续时间短(约为 10 ms)的特点。为了捕捉到流场的瞬态结构,采用了图 4 所示的同步控制。主触发采用 Nd:YAG 激光器的同步输出信号,该信号为 10 Hz 的 TTL(transistor-transistor logic)脉冲信号,经脉冲触发发生器 DG535(数字延迟触发器)后分别触发 ICCD 快门、数据采集系统和点火。机械触点开关用于捕捉激光器同步输出信号,并导通触发系统,确定触发的零时。点火信号展宽并延

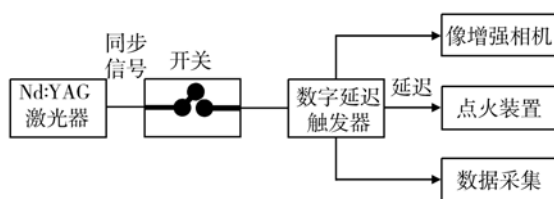


图4 系统同步控制示意图

Fig. 4 Schematic of system timing synchronization

迟,延迟时间的设定保证在喷流持续时间(10 ms)内另外两路触发信号正好触发相机快门开关和采集系统。

3 实验结果与讨论

3.1 与流场方向垂直入射激光

诊断光路如图 5 所示。由公式(3)分析可知,当与流场方向垂直的入射激光时,在垂直入射光与流场速度构成的平面上接收散射光时,散射光的多普勒频移为零,此过程可参考图 1(a)所示。此时,展宽的瑞利散射光部分通过作为检测信号,典型的诊断结果如图 6 所示。气流是从右向左的方向喷出,图像中间较暗部分为喷射气流,密度较低,所以信号较弱,而两边较亮部分为喷流与空气交界的湍流区。从图上可以看出激光作用区内喷流结构成扁“X”状分布。在扁“X”的两端为喷流的扩张区,中间为喷流的压缩区。

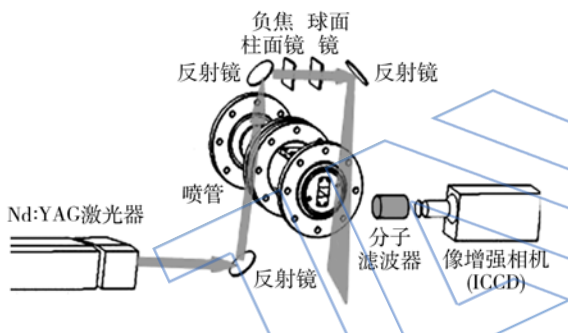


图 5 垂直流场入射诊断光路

Fig. 5 Schematic of exhaust flows visualization in perpendicular mode

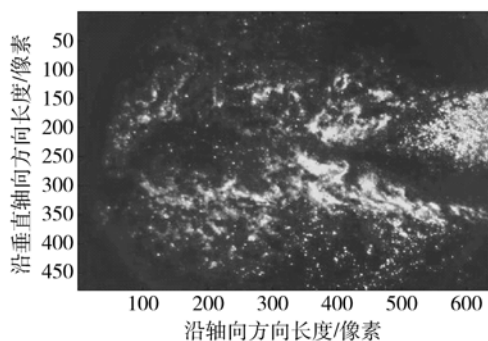


图 6 垂直瞬态高速流场入射的 FRS 诊断图像

Fig. 6 Image of exhaust flows in perpendicular mode

3.2 与流场轴向平行入射激光

诊断光路如图 7 所示。采用激光平行流场掠入射时,在垂直入射光与流场速度构成的平面上接收散射光时,喷流散射光的多普勒频移最大。按

照流场速度 $V = 1\,000\text{ m/s}$, $\alpha = 60^\circ$, $\theta = 90^\circ$, 则 $\Delta\nu_D = 1.8\text{ GHz}$, 喷流散射光已经偏离吸收凹陷, 如图 1(b) 所示。图 8 为获得的典型结果。喷流与空气交界的湍流区由于速度较低, 多普勒频移较小被吸收凹陷吸收, 而喷流散射光被 ICCD 接收作为检测信号, 喷流信号较为明显。采用掠入射诊断的流场结构, 不仅包含流场的密度信息, 还包含流场的速度信息。掠入射时为了安全考虑, 流场两侧加装防护罩, 流场为约束流场。图 8(b) 为与图 8(a) 相隔 100 ms 后的流场图像, 此时流场已经处于尾流状态。

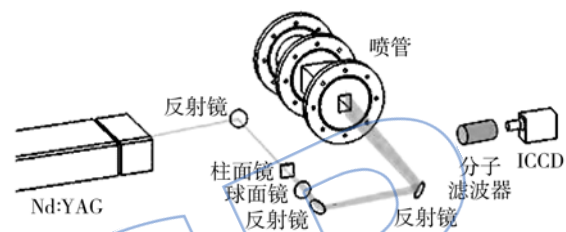
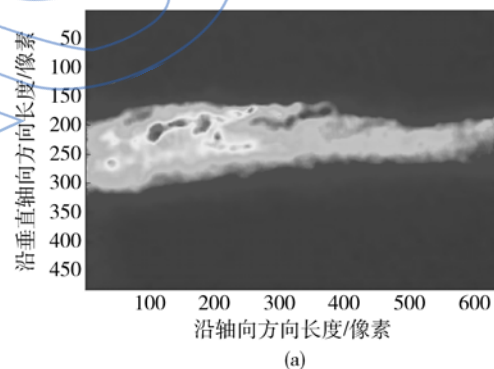
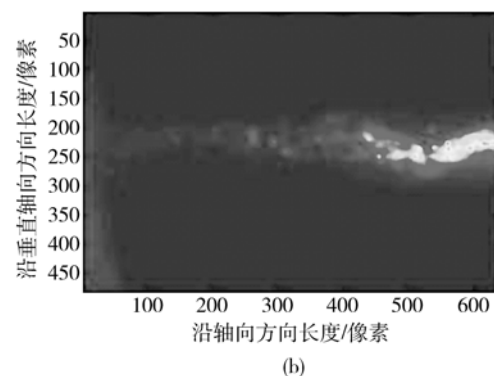


图 7 平行流场入射诊断示意图

Fig. 7 Schematic of exhaust flows visualization by FRS in parallel mode



(a)



(b)

图 8 FRS 平行瞬态高速流场入射的 FRS 诊断图像

Fig. 8 Images of exhaust flows in parallel mode

4 结 论

为了诊断瞬态高速喷流的结构特征,开展了FRS技术对瞬态高速喷流的可视化研究.对瞬态高速流场进行两种入射方式的诊断,采用与流场方向垂直的激光入射方式,获得了喷流与空气作用的湍流结构;而采用与流场轴向平行的激光入射方式,流场结构不仅包含流场的密度信息,还包含流场的速度信息.研究表明分子滤波瑞利散射技术能对流场可视化,对研究湍流混合层流场结构具有重要的指导意义.

参考文献:

- [1] 张平,程雪玲.国外燃烧诊断技术的新进展[J].固体火箭技术,1998,21(2):66-70.
ZHANG Ping, CHENG Xueling. Recent development on combustion diagnostics technique [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 1998, 21(2): 66-70. (in Chinese).
- [2] 胡志云,刘晶儒,关小伟,等.燃烧场参数的激光诊断技术研究[J].强激光与粒子束,2002,14(5):702-706.
HU Zhiyun, LIU Jingru, GUAN Xiaowei, et al. Study on laser diagnostics applied to combustion and flame[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2002, 14(5): 702-706. (in Chinese)
- [3] 徐翔,谢爱民,吕治国,等.聚焦纹影显示技术在激波风洞的初步应用[J].实验流体力学,2009,23(3):75-79.
XU Xiang, XIE Aimin, LÜ Zhiguo, et al. Application of focusing schlieren visualization system in shock tunnel experiment[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2009, 23(3): 75-79. (in Chinese)
- [4] 梁获胜,高伟,许全宏,等.超临界航空煤油喷射到大气环境的喷射特性[J].航空动力学报,2009,24(6):1258-1263.
LIANG Huosheng, GAO Wei, XU Quanhong, et al. Injection characteristics of the supercritical jet fuel injected into the atmospheric environment [J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(6): 1258-1263. (in Chinese)
- [5] Koch A, Voges H. Planar imaging of laboratory flame and of internal combustion in an automobile engine using UV Rayleigh and fluorescence Light [J]. Applied Physics B Photophysics and Laser Chemistry, 1993, 56(3): 177-184.
- [6] Stojkovic B D, Fansler T D, Drake M C, et al. High-speed imaging of OH and soot temperature and concentration in a stratified-charge direct-injection gasoline engine[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2005, 30(2): 2657-2665.
- [7] Jiang L Y, Sislian J P. Rayleigh scattering in supersonic high temperature exhaust plumes[R]. AIAA 2000-0779, 2000.
- [8] Panda J, Seasholtz R G. Density fluctuation measurement in underexpanded supersonic jets using rayleigh scattering [R]. AIAA 98-0281, 1998.
- [9] Elliott G S. Toward multiple property measurements[R]. AIAA 2001-0301, 2001.
- [10] Hoffman D, Munch K U, Leipertz A. Two-dimensional temperature determination in sooting flames by filtered Rayleigh scattering[J]. Optics Letters, 1996, 21(7): 525-527.
- [11] Kearney S P, Beresh S J. A filtered Rayleigh scattering apparatus for gas phase and combustion temperature imaging [R]. AIAA 2003-584, 2003.
- [12] Tenti G, Boley C D, Desair R C D. On the kinetic model description of Rayleigh-scattering from molecular gases[J]. Canadian Journal of Physics, 1974, 52(4): 285-290.
- [13] 王晨,刘晶儒,胡志云,等.参考谱线法测量倍频Nd:YAG激光器调谐波长的研究[J].激光技术,2008,33(6):565-567.
WANG Sheng, LIU Jingru, HU Zhiyun, et al. Measurement of tuning wavelength of frequency-doubled Nd:YAG laser by means of reference spectrum[J]. Laser Technology, 2009, 33(6): 565-567. (in Chinese)