

激光燃烧诊断技术及应用研究进展

胡志云, 刘晶儒, 张振荣, 叶景峰, 关小伟,
张立荣, 王 晟, 黄梅生, 赵新艳, 叶锡生

(西北核技术研究所, 西安 710024)

[摘要] 介绍了用于燃烧场温度、组分、火焰构造和流场速度等参数测量的相干反斯托克斯喇曼散射、自发振动喇曼散射、激光诱导荧光和 OH 示踪测速实验系统, 给出了在预混火焰、高能固体推进剂瞬态燃烧场和超声速高温流场测量的部分实验结果, 并分析了激光作用区域燃烧场温度、主要组分及流场速度的分布和火焰构造。

[关键词] 激光; 燃烧诊断; 固体推进剂; 超声速流场

[中图分类号] TN24 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2009)11-0045-06

1 前言

激光燃烧诊断技术是以激光技术、光谱技术、光电探测技术、数据图像处理技术等为基础的一种综合性测试诊断技术, 可以实现燃烧场温度、组分及浓度、火焰构造和流速等参量信息的高时空分辨精确测量, 而且测量对燃烧过程无扰动。这些参数的测量对于研究燃烧场的瞬态化学反应动力学过程, 如固体推进剂燃烧动力学、超声速燃烧动力学、汽车和飞机发动机燃烧效率和污染控制等具有重要意义。笔者研究团队已建立用于测量燃烧场温度、组分、火焰构造和流场速度的比较完善的激光燃烧诊断实验系统, 开展了相干反斯托克斯喇曼散射(CARS)、自发振动喇曼散射(SVRS)、平面激光诱导荧光(PLIF)和 OH 示踪测速(HTV)等测试技术的研究, 全面测量了火焰的温度、主要组分及浓度、火焰构造和高温流场速度等参量, 并获得较高的测试精度。在此基础上利用不同测试技术的优势互补, 实现了对固体推进剂瞬态燃烧场主要参数的诊断, 并初步应用于脉冲超声速高温流场诊断。

2 CARS 测量燃烧场温度及组分浓度^[1~4]

[收稿日期] 2008-12-17

[作者简介] 胡志云(1969-), 男, 河南浚县人, 西北核技术研究所高级工程师, 研究方向为激光技术及应用; E-mail: ninthzy@163.com

2.1 实验系统

CARS 实验系统由 YAG 激光器、染料激光器、相应的测量光路和信号采集分析系统组成, 实验布局如图 1 所示, 测量的实验数据由 CARS 光谱计算拟合软件进行光谱拟合确定温度和组分浓度。

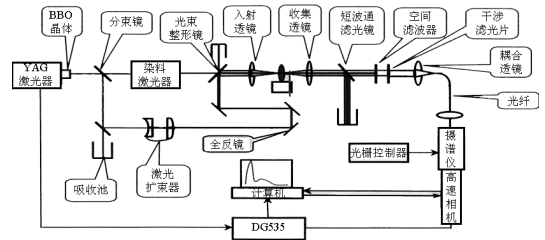


图 1 CARS 实验系统示意图

Fig. 1 Experimental setup of CARS

10 Hz 重复频率运转的 YAG 激光器的二倍频输出(波长 532 nm, 脉宽约 8 ns)通过分束镜后约 140 mJ 用于泵浦宽带染料激光器, 得到约 14 mJ, 中心波长为 606 nm, FWHM(半高宽)为 130 cm^{-1} 的斯托克斯光(ω_s); 其余 532 nm 激光再经分束镜取出 50 mJ 的能量作为 CARS 的泵浦光(ω_p), ω_p 经透镜组扩束和反射镜组延时后与 ω_s 同时到达中心有 $\phi 5 \text{ mm}$ 孔的光束整形镜, ω_s 从孔中心穿过, ω_p 被反射后由高斯光束变成环形光束以满足 CARS 的相位

匹配要求。 ω_s 在 ω_p 的环心与 ω_p 平行到达入射透镜,并聚焦于探测区,产生的 CARS 信号和入射激光经与入射透镜共焦的收集透镜形成平行光束到达短波通滤光镜,大部分 ω_s 和 ω_p 被反射,CARS 光束 ω_a 透过短波通滤光镜、空间滤波器、干涉滤光片和光纤耦合透镜进入光纤。空间滤波器可滤去 CARS 光束的共线部分,干涉滤光片滤掉残余的 ω_s 和 ω_p , ω_a 经光纤进入摄谱仪,由 ICCD(增强型电荷耦合器件)接收,经控制器采集信号并存入计算机,实验系统可实现 10 Hz 重复频率瞬时测量,时间分辨率约 8 ns,空间分辨率约 $\phi 0.1 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 。

2.2 实验结果

采用 CARS 技术测量了 $\text{H}_2/\text{合成空气}$ 预混火焰温度和氮气浓度。实验条件为:氢气流量 9.85 L/min,氮氧合成气体流量 7.24 L/min,合成气体中氮气摩尔浓度约 32%,氧气摩尔浓度约 68%,氢气/合成空气的化学配比 $\varphi = 1$ 。激光聚焦在燃烧炉表面上方约 5 mm 的火焰中心区域,用氮 CARS 谱测量火焰温度和氮气浓度。图 2 为 30 次激光脉冲积累测量的氮 Q 支 CARS 谱与理论谱拟合结果,温度为 1 744 K, N_2 浓度 18.9%。PREMIX 软件计算温度为 1 763 K, N_2 摩尔浓度为 19%。图 3 为多次测量结果,温度测量值为 $(1\ 750 \pm 20) \text{ K}$,氮气摩尔浓度测量值为 $(19.6 \pm 0.4)\%$,脉冲平均氮 CARS 谱测量温度和组分浓度的相对不确定度分别优于 2% 和 4%。单次激光脉冲氮 Q 支 CARS 谱测温不确定度优于 4%。

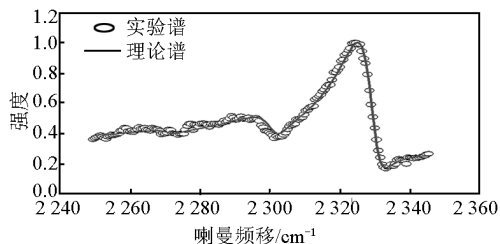


图 2 CARS 谱与理论谱的对比
Fig. 2 Comparison of theoretical and experimental CARS spectra

图 4 和图 5 分别是在常压和 2 MPa 氮气背景压力下一种双基固体推进剂燃烧场不同高度的温度和 N_2 浓度测量结果。图 4 表明双基固体推进剂在常压下燃烧不充分,温度相对较低,约 2 500 K;在 12 mm 高度以下,由于 N_2 浓度很低,没有获得信噪比较好的 CARS 谱;在 12 ~ 24 mm 高度,随着燃烧的继续, N_2 浓度从 10% 逐步增加到约 25%。图 5 表

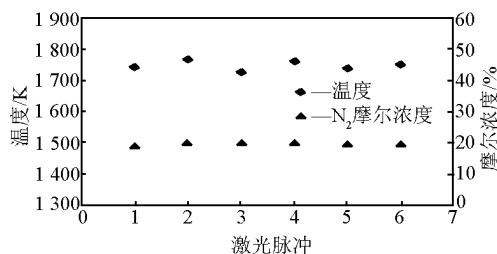


图 3 不同次激光脉冲 CARS 测量温度和氮气浓度结果

Fig. 3 Temperature and N_2 concentration from different laser pulse

明在 2 MPa 背景压力下双基固体推进剂燃烧相对充分,在 2 mm 后氮气浓度基本保持在约 25%,在距燃剂表面 1 ~ 5 mm 范围内温度快速升高至约 3 000 K,随后温度缓慢下降,在 17 mm 高度后温度下降很快,一般认为是火焰周围冷氮对燃烧场温度产生了影响,在燃剂将要燃烧结束时,温度降至约 2 000 K。

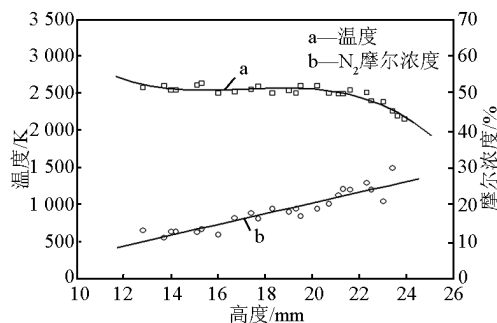


图 4 常压下固体推进剂燃烧场温度和 N_2 浓度分布

Fig. 4 Distribution of temperature and N_2 concentration in propellant combustion at normal pressure

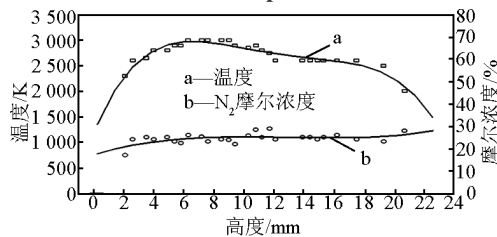


图 5 2 MPa 压力下双基推进剂火焰温度和 N_2 浓度随高度分布

Fig. 5 Distribution of temperature and N_2 concentration in double base propellant combustion at 2 MPa pressure

表 1 是采用 CARS 技术对研制的 2 Ma 冲超声

速高温流场的温度典型测量结果,由表 1 可以看出,未约束超声速流场是温度分布极不均匀的流场,压缩区温度明显高于膨胀区。100 ms 后喷管出口已非超声速流场,流场温度比较均匀,约 1 200 K 左右。

表 1 CARS 测量脉冲超声速高温流场温度的典型结果

Table 1 Measured temperature by CARS in supersonic flowfields

诊断区域	温度/延迟时间		
膨胀区(距出口 48 mm)	1 120/1.8	1 310/2.7	1 170/102
压缩区(距出口 98 mm)	1 710/1.8	2 210/2.3	1 200/102

3 SVRS 测量燃烧场温度及组分浓度^[5,6]

3.1 实验系统

SVRS 实验诊断系统如图 6 所示,主要由激光源、外光路系统、成像系统和光电探测系统构成。激

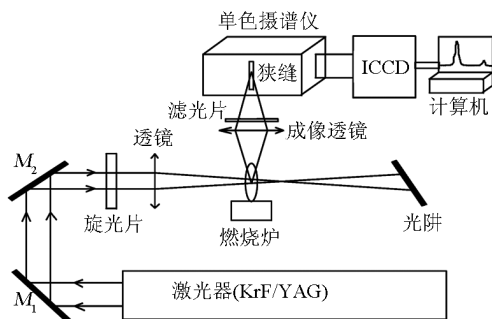


图 6 自发喇曼散射实验装置

Fig. 6 Experimental setup of Raman scattering

光源可采用 COMPex 150 KrF 激光器或 YAG 激光器。COMPex 150 KrF 激光器的激光调谐范围为 248.0 ~ 248.7 nm,脉冲宽度 25 ns,激光最大能量 450 mJ。YAG 激光器的三倍频输出波长 355 nm,脉冲宽度 8 ns,最大能量 300 mJ。光电探测部分为光学多通道分析仪(OMA-4),其中摄谱仪为 Acton Spectropro 500,数据采集为像增强型 CCD(ICCD)或高速 NanoStar 相机。实验中用焦距为 1 m 透镜将激光聚成一束很细的光束穿过燃烧火焰,产生的散射光在激光光束垂直方向用透镜成像系统收集进入摄谱仪的狭缝,并用 ICCD 接收。

3.2 实验结果

SVRS 技术主要用于测量燃烧火焰的主要组分,图 7 为在化学配比 $\Phi = 0.5$ 的 CH_4 /空气预混火焰中测量的主要组分及其相对浓度距标定燃烧炉表

面高度的变化,主要组分浓度测量的相对不确定度可优于 10%。利用 SVRS 技术也可以测量火焰的温度,其中光谱拟合法的精度较高,而且不受激光能量抖动等因素的影响,在 CH_4 /空气火焰中采用 N_2 喇曼谱拟合测温的相对不确定度可优于 5%。

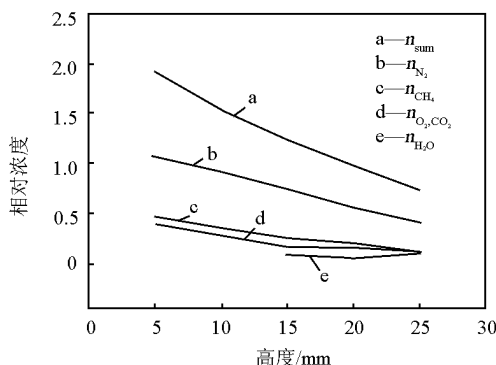


图 7 主要组分浓度随高度分布

Fig. 7 The density distribution at different heights

固体推进剂燃烧是一个剧烈的发光发热的化学物理过程,具有温度高、组分复杂、颗粒浓度大以及燃烧时间短等特点。对其燃烧过程主要产物的瞬态诊断十分困难。图 8 给出了双基固体推进剂常压燃烧场的喇曼散射光谱。从三幅光谱图可以很明显地看到燃烧过程中部分组分的变化规律。初期,燃烧很不充分,中间产物(如 H_2CO , CH_4)较多,相应的谱线较强,如图 8(a)所示;随着燃烧的进行,中间产物逐渐减少, N_2 和水浓度增加,其喇曼光谱见图 8(b);在燃烧末期,由于周围冷空气的影响,喇曼光谱已与在空气中得到的喇曼光谱相差不大,只是由于燃烧场温度较高、分子数密度较小,信号比较弱,如图 8(c)所示。

采用密闭容器内燃料燃烧过程模拟发动机燃烧室燃料燃烧过程的压力变化,用于研究燃料燃烧过程主要组分变化。图 9 为采用 SVRS 方法测量的密封容器内富氢燃烧条件下燃烧场主要组分浓度随燃烧时刻的变化曲线及其与燃烧场压力的对应关系。

图中的零时刻对应的各组分的浓度为预充气体的组分及浓度。从浓度变化曲线及其与燃烧场压力变化曲线的对应关系可知,在燃烧初期,燃烧场压力较低,测量点各燃烧组分的浓度也比较低,当燃烧较充分时,燃烧场压力达到最大值,此时对应的测量点的组分浓度也达到最大值,此后测量点组分的浓度及燃烧场压力随着时间逐渐降低。

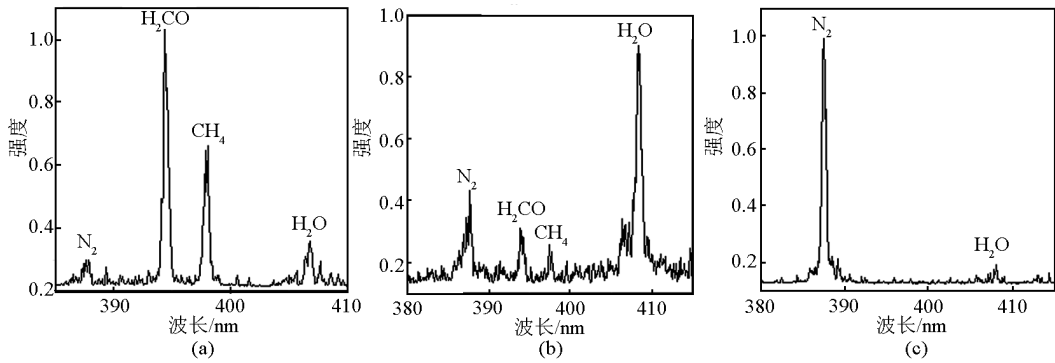


图 8 固体推进剂燃烧场中的喇曼光谱

Fig. 8 Raman spectra of double - solid propellant combustion at different moments

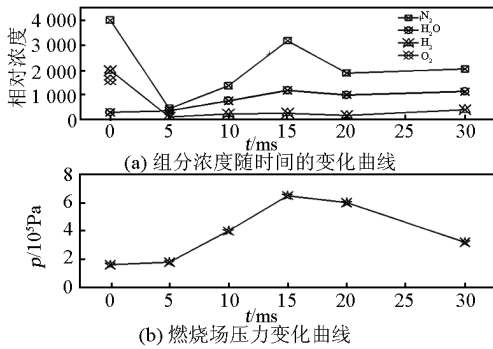


图 9 燃烧场组分随时间变化曲线
及其与燃烧场压力的对应关系

Fig. 9 Species and pressure at different moments

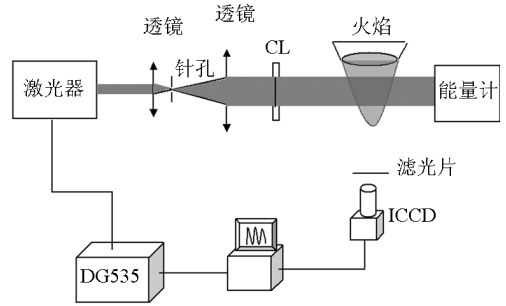


图 10 PLIF 实验装置

Fig. 10 Experimental setup of PLIF

二维温度场分布。为了验证测温精度,将测量结果与相同条件下的 CARS 测温结果进行比对,数据分析结果表明,在距燃烧炉表面 5 ~ 12 mm 高度范围内,PLIF 测量结果与 CARS 测量结果在 5 % 范围内吻合。

4 PLIF 测量二维温度场及微量组分分布^[7,8]

4.1 实验系统

PLIF 技术的实验装置如图 10 所示,激光源采用可调谐 OPO 激光器,激光输出首先经过一空间滤波/扩束器,用以提高激光光束的质量和改变光斑的大小,然后经过一组柱面透镜聚焦后,把激光束横截面压窄,形成激光片。在信号收集光路上用带通滤波片滤掉干扰光,只保留荧光信号,经光学透镜把荧光成像到 ICCD 上。该实验的数据记录及处理系统采用高速 NanoStar 相机,它包括紫外镜头,ICCD,计算机及专用软件。

4.2 实验结果

以 CH₄/空气火焰作为研究对象,测量了其温度场分布。激光片的截面尺寸为 10 mm × 1 mm,其下沿距燃烧炉面 5 mm。图 11 为在 CH₄/空气火焰中得到的累积二维 OH 荧光图像及其对应的燃烧场的

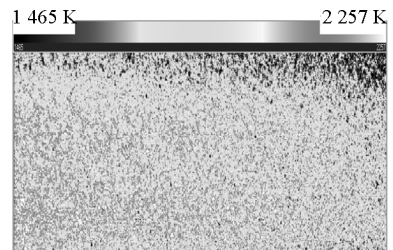


图 11 甲烷空气火焰的温度场分布
Fig. 11 Temperature distribution
in CH₄/air flame

采用密闭容器内燃料燃烧模拟发动机燃烧室燃料点火过程,用于分析燃料点火过程火焰构造及传播。图 12 为采用 PLIF 技术测量密闭容器内燃料点火 OH 分布,图 12(a),12(b)为测量的典型 OH 分

子荧光图像(点火起 5 ms),图像形状的不同是由于钨丝点火不均匀造成的,从图中可以看到明显的燃烧波传播界面将拍摄区域分为已燃区和未燃区。

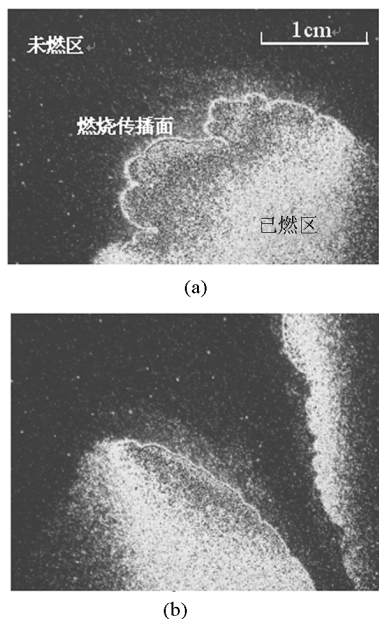


图 12 密闭容器内燃烧典型的 OH 分子荧光图像
Fig. 12 OH - PLIF images in the H_2 /air flame

5 HTV 诊断超燃流场速度

HTV 过程可以被形象地描述为两个过程:“写”过程和“读”过程。“写”激光解离流场中的水产生 OH 自由基,然后通过 PLIF 的“读”过程显示这些 OH 自由基的运动轨迹,从而得到流场的速度信息。HTV 技术不用注入示踪粒子,不会对流场产生干扰,适合于亚声速、超声速和高超声速高温气流速度测量。单线 HTV 实验系统如图 13 所示,主要由 ArF 激光器(“写”激光)、PLIF 系统(“读”激光)、同步控制系统和脉冲超声速燃烧模拟装置组成。

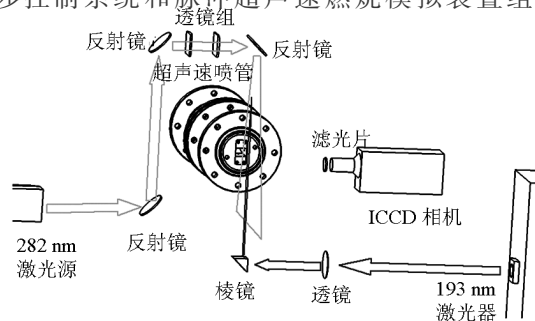


图 13 单线 HTV 实验系统示意图
Fig. 13 Experimental setup of HTV

ArF 激光器输出 193 nm 激光,单脉冲能量约 120 mJ,脉冲宽度约 25 ns。PLIF 系统的 282 nm 激光由 YAG 激光器、可调谐染料激光器和相应的倍频器共同产生,脉冲宽度约 8 ns,单脉冲能量约 7 mJ。实验中 282 nm 激光片和 193 nm 激光片要严格共面,并且使激光片处于喷管通过轴线的竖直面内。ICCD 用来进行 PLIF 的图像采集,镜头前放置滤光片用来过滤背景干扰光。脉冲超声速燃烧模拟装置采用封闭燃烧气体突然释放并流经超声速喷管的方式产生超声速高温流场,设计流速 2 Ma,脉冲持续时间 > 10 ms,喷管出口尺寸 30 mm × 40 mm。同步系统用来控制“写”和“读”过程的时间延迟。

图 14 和图 15 中清晰锐利的直线是 OH 分子处于初始位置的荧光图像(50 次测量平均结果),不规则的曲线是延迟 Δt 时刻移动后的荧光图像(单

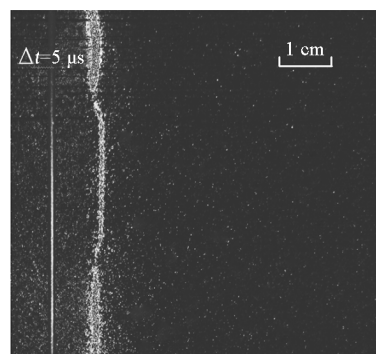


图 14 膨胀区 OH 荧光图像
Fig. 14 OH - PLIF images in expansion region

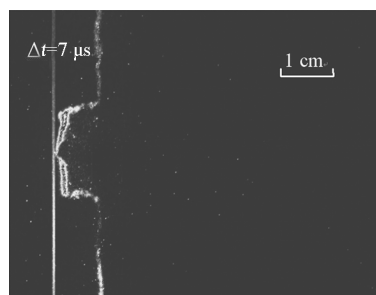


图 15 压缩区 OH 荧光图像
Fig. 15 OH - PLIF image in compression region

次测量结果)。图 14 对应的是喷流中心气流仍在膨胀,外侧边缘开始压缩的区域,喷流部分 OH 分子线形状为中心前凸的弧形,说明喷流在该区域中心处速度要高于两侧速度,计算得到此处喷流中心处的速度约为 2 400 m/s。图 15 对应的是喷流的压缩区,从图中可以看出气流在压缩区速度明显降低,该

测量位置中心处速率约 340 m/s, 两侧气流速率约 1 500 m/s。HTV 技术测量速度的相对不确定度优于 6 %。HTV 和 CARS 测量结果表明超声速流场是速度和温度极不均匀的流场, 在膨胀区加速, 温度降低, 在压缩区域速度降低, 温度升高。

6 结语

讨论了 CARS, SVRS, PLIF 和 HTV 技术在燃烧诊断中的应用。用 CARS 和 SVRS 技术测量了预混火焰温度和主要组分, 测温相对不确定度优于 5 %, 主要组分浓度测量相对不确定度优于 10 %; 用 PLIF 技术测量了预混火焰的 OH 二维空间荧光图像, 分析了火焰的构造及温度场分布; 利用上述技术测量了固体推进剂瞬态燃烧场温度、组分和火焰构造; 利用 CARS 和 HTV 技术测量了脉冲超声速高温流场温度和速度分布, HTV 技术测速不确定度优于 6 %。实验结果表明, 基于激光的燃烧诊断技术不仅能够实现对稳态燃烧场的高精度测量, 而且能够应用于复杂的固体推进剂和超声速瞬态燃烧场

诊断。

参考文献

- [1] Hu Zhiyun, Liu Jingru, Zhang Zhenrong, et al. Single pulse CARS spectra in solid propellant combustion at atmosphere pressure[J]. Chinese Optics Letters, 2003, 1(7): 395 - 397
- [2] 张振荣, 胡志云, 黄梅生, 等. BOXCARS 测量燃烧场温度[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(4): 323 - 325
- [3] 胡志云, 张振荣, 刘晶儒, 等. 单次脉冲 USED CARS 技术用于测量火焰温度[J]. 中国激光, 2004, 31(5): 609 - 612
- [4] 胡志云, 张振荣, 刘晶儒, 等. 宽带 USED CARS 诊断固体推进剂燃烧场[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(1): 19 - 22
- [5] 刘建胜, 刘晶儒, 张振荣, 等. 利用拉曼散射法测量燃烧场的温度及组分浓度[J]. 光学学报, 2000, 20(3): 1263 - 1267
- [6] 张振荣, 刘晶儒, 黄梅生, 等. 自发拉曼散射技术对燃烧场的诊断[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(5): 646 - 650
- [7] 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
- [8] 关小伟, 刘晶儒, 黄梅生, 等. 利用平面激光诱导荧光测量燃烧场 NO 的浓度分布[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(7): 629 - 631

The research progress of laser combustion diagnostics techniques and applications

Hu Zhiyun, Liu Jingru, Zhang Zhenrong, Ye Jingfeng,
Guan Xiaowei, Zhang Lirong, Wang Sheng,
Huang Meisheng, Zhao Xinyan, Ye Xisheng
(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

[Abstract] This paper overviewed recent progress in the evolution of four different diagnostic concepts: coherent anti-stokes Raman spectroscopy, laser-induced fluorescence, vibrational Raman scattering, and hydroxyl tagging velocimetry. Techniques based on these measurement concepts can monitor a variety of parameters including temperature, species concentration, and velocity. The experimental results were given by these laser-based methods in premixed flame, solid propellant burning, and supersonic flowfields.

[Key words] laser; combustion diagnostics; propellant; supersonic flowfield