

文章编号 1004-924X(2016)04-0709-05

超燃发动机流场组分浓度的在线测量

张振荣*, 李国华, 叶景峰, 胡志云, 邵 璿, 王 晟

(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:为了正确评价超燃发动机试验状态,采用自发拉曼散射技术在线测量了超燃发动机流场的主要组分。基于发动机试验条件和发动机与光学诊断技术的接口,建立了用于发动机流场组分测量的自发拉曼散射实验系统;测量了多车次发动机试验过程中流场主要组分的拉曼光谱;最后,通过光谱计算获得了流场主要组分浓度信息并重点分析了来流氧气含量及其变化情况。实验显示:发动机试验中,部分车次试验补氧后的来流中氧气的最大含量达到了30%,最小含量为18%,说明发动机试验过程中,对补氧量的控制精确和稳定性还有待提高。结果表明:采用自发拉曼散射技术可以较好地来完成来流主要组分浓度测量工作,测量结果可用于发动机试验数据的分析及来流补氧控制方式和控制精度的改进。

关键词:超燃发动机;拉曼散射;流场;组分测量;浓度测量

中图分类号:TH744.4; O437.3 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162404.0709

On-line measurement of species concentration in flow field of scramjet engine

ZHANG Zhen-rong*, LI Guo-hua, YE Jing-feng, HU Zhi-yun, SHAO Jun, WANG Sheng

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

* Corresponding author, E-mail: zhangzhenrong@nint.ac.cn

Abstract: To properly evaluate the experimental state of a scramjet engine, the Spontaneous Raman scattering technique was used to measure the main species in flow field of the scramjet engine. According to the engine experimental conditions and the interface of engine and optical diagnosis, a spontaneous Raman scattering experimental system for the engine flow field diagnosis was established. Then, the Raman spectra of the major species in the flow field of scramjet experiment were measured. Finally, the concentration of the major species was obtained by analyzing the Raman spectra, and the oxygen content of the incoming flow was emphatically analyzed. The results show that the maximum oxygen content and minimum oxygen content are 30% and 18% respectively in the incoming flow after oxygen supplementation. It means that the control precision and stability of oxygen supplementation in the scramjet experiment should be improved. The results also demonstrate that spontaneous Raman scattering technique works well for the species concentration measurements in the flow field, and obtained measurement results can be utilized for the analysis of scramjet experimental data and the improvement of the control method and control accuracy of oxygen supplementation for the incoming flow.

收稿日期:2015-12-21;修订日期:2016-01-08.

基金项目:激光与物质相互作用国家重点实验室研究基金资助项目(No. SKLLIM1507)

Key words: scramjet engine; Raman scattering; flow field; species measurement; concentration measurement

1 引言

超燃冲压发动机以其高比冲、较高的推力和推重比以及较宽的马赫数等优点有望成为高速飞行器(M>6)动力装置的最佳选择。地面实验是超燃冲压发动机研制的基础,地面实验时需要模拟实际的来流条件,包括来流速度、温度和氧气含量等。为了产生所需的来流温度,实验中需要加热来流空气。加热主要有两种方式:一种是电加热^[1],其优点是清洁、无污染,缺点是能耗高,效率较低,加热慢;另一种是燃烧加热,即采用燃料燃烧加热来流空气。该方式具有效率高、升温快等特点,但由于燃烧会消耗来流中的氧气,所以需要进行必要的氧气补充。另外,燃烧产生的CO₂、H₂O等对后续燃烧有一定的影响^[2]。目前,超燃冲压发动机地面实验大多采用燃烧加热的方式。这种加热方式中来流的主要组分浓度,特别是补氧后氧气的含量与后续燃烧组织的成功与否息息相关。因此,在线测量来流气体的主要组分浓度,分析确定补氧后来流气体中的氧气含量,对于超燃冲压发动机地面实验的控制及发动机性能评估等具有非常重要的意义。

由于常规的接触式探测器往往难以实现对发动机高温、高速流场组分的在线测量,因此非接触式在线测量发动机流场参数的光学方法成为了研究热点^[3-6]。目前,可用于发动机流场组分测量的方法很多,其中,自发拉曼散射(Spontaneous Raman Scattering, SRS)技术因单次测量就可以实现流场主要组分的定量测量而在流场主要组分浓度测量方面具有独特优势。该技术现已成功应用于测量多种燃烧流场组分^[6-9]。Grady^[7]等人用248 nm激光激励SRS技术测量了超音速燃烧流场的参数信息,为了减少实际燃料及燃烧产生的多环芳烃(Polycyclic Aromatic Hydrocarbon, PAH)的干扰,实验采用70%的甲烷和30%的氢气混合作为燃料。Pitz等人^[8]采用248 nm激光测量了简单碳氢燃料燃烧的超音速燃烧流场组分的浓度信息。Smith等人^[9]用248 nm激光激励SRS技术测量了马赫数为8的超音速风洞内气

流组分的浓度信息。Wedr等人^[10]用355 nm激光激励一维SRS技术测量了高压燃气轮机燃烧场,燃气轮机采用天然气作为燃料,获得了燃烧场的主要组分信息,并用于燃烧过程的大涡模拟(LES)。Locke^[11]采用532 nm激光激励SRS技术测量了模拟燃烧流场主要组分的浓度信息。Sutton^[12]等人建立了高重频532 nm激光激励的一维SRS实验系统,测量了高雷诺数流场的组分信息。

目前,发动机试验流场组分测量主要关注燃烧场中的主要组分信息,测量工作也主要针对燃料的燃烧过程展开,尚未见发动机试验全过程主要组分监测的报道。本文采用SRS技术对超燃冲压发动机试验全过程流场进行了测量,获得了发动机试验过程来流气体中主要组分的拉曼光谱,计算了发动机实验过程中不同实验阶段来流气体主要组分的摩尔分数,并重点分析了氧气的含量及变化。

2 测量原理

激光作用到气体分子时会产生弹性瑞利散射,同时还会产生较弱的非弹性散射即拉曼散射。拉曼散射光与激励激光存在一定的频差,该频差与激励激光的波长无关,由散射分子的振转能级决定。不同的分子,振动能级往往各不相同,因此,一次激发即可获得被测气体中所有组分的拉曼光谱。通过光谱分析可以获得被测气体的组分信息,同时还可以根据各组分拉曼光谱的强度计算出各种组分的相对浓度信息。气体组分的拉曼散射信号强度可以表示为^[12]:

$$I_i = A I_0 n_i \sigma_i, \quad (1)$$

式中:A是与诊断系统相关的常数,通常需要采用实验标定的方法获得;I₀为激励激光强度;n_i表示被测组分气体的分子数密度;σ_i为被测组分的拉曼散射截面。通常条件下,被测组分的绝对分子数密度往往难以获得,而是由式(1)计算出被测气体中各个主要组分的相对分子数密度,最终给出被测气体中各种组分的摩尔分数。

3 实验系统

发动机流场组分浓度测量系统主要由激光光源、光谱仪、信号收集系统、发动机模型等部分组成,如图 1 所示。其中,光源为 Nd:YAG 激光器的三倍频输出,脉宽约为 8 ns,波长为 355 nm,重复频率为 10 Hz,线偏振。光谱仪使用 600 g/mm 刻线光栅,光谱分辨率为 0.2 nm,中心波长为 392 nm,光谱测量波段为 370~420 nm,涵盖了被测主要组分的振动拉曼光谱。信号收集系统为自行设计,主要由一对大口径球面透镜和一块宽带反射镜组成。发动机模型的燃烧室三面开光学窗口,水平方向有对开的两个光学窗口,正下方有一个光学窗口。发动机来流马赫数为 2,采用氢气燃烧的方式加热来流。YAG 激光器发出的激光经三倍频后形成 355 nm 波长激光,经过一块半波片后由焦距为 800 mm 的透镜聚焦,沿水平方向入射到发动机燃烧室,产生的拉曼散射信号穿过正下方的光学窗口后由信号收集系统成像至光谱仪狭缝处,经光谱分光后由 ICCD 接收。半波片的作用是调整激光的偏振方向,提高信号强度。

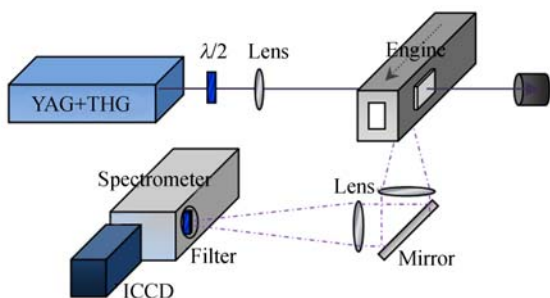


图 1 组分测量实验系统
Fig.1 Experimental set-up

4 测量实验与结果

超燃发动机流场组分浓度测量实验在时间上可大体分为六个阶段,如图 2 所示:第一阶段,从组分测量系统开始工作到发动机正式启动;第二阶段,从发动机启动到加热器开始工作;第三阶段,从加热器工作到煤油点燃;第四阶段,煤油燃烧阶段;第五阶段,从煤油燃烧结束到加热器关闭;第六阶段,加热器关闭到流场组分测量实验结



图 2 发动机流场组分测量实验阶段划分
Fig.2 Steps of species measurement experiment

束。由于发动机试验过程中采用氢燃烧加热来流,需要消耗来流气体中的部分氧气,所以需要在加热器启动后补充一定量的氧气。理想条件下,补氧后来流气体中氧气的含量应与空气中氧气的含量相同。

采用 SRS 技术开展了超燃发动机流场主要组分的浓度测量,获得了多车次发动机试验全过程主要组分的拉曼散射光谱。根据所测拉曼光谱的强度,由式(1)可以计算出流场中主要组分的相对浓度。图 3 为发动机实验过程中流场组分的典型拉曼光谱。由图 3 可以看出实验过程中燃烧室主要组分的变化情况。

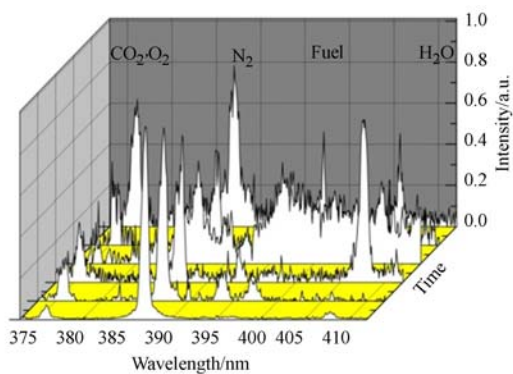


图 3 发动机流场组分的拉曼光谱
Fig.3 Raman spectra of species in engine flow field

图 4~图 6 分别给出了三车典型试验中流场主要组分的摩尔分数随时间的变化情况。由图 4 可知,在第一阶段,发动机内部主要以 N₂ 气为主,同时含有少量 O₂ 和微量 H₂O。发动机试验开始之前,利用 N₂ 对发动机流道进行了吹扫,因此在燃烧室内积聚了大量的 N₂。在 N₂ 吹扫以后

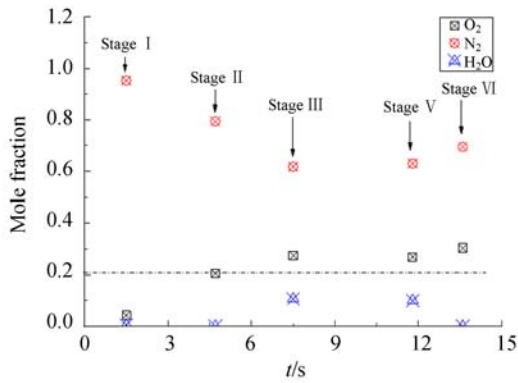


图 4 发动机流场主要组分的摩尔分数(实验编号:2301)

Fig. 4 Mole fractions of major species in engine flow field (experiment No. 2301)

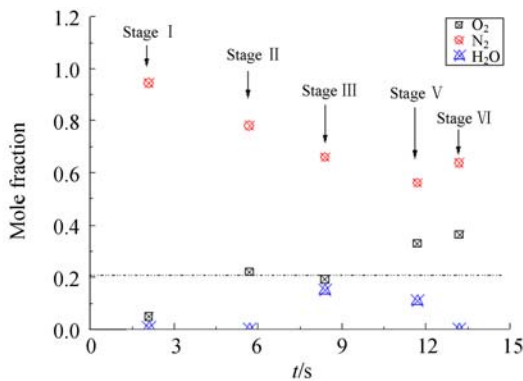


图 5 发动机流场主要组分的摩尔分数(实验编号:2302)

Fig. 5 Mole fractions of major species in engine flow field (experiment No. 2302)

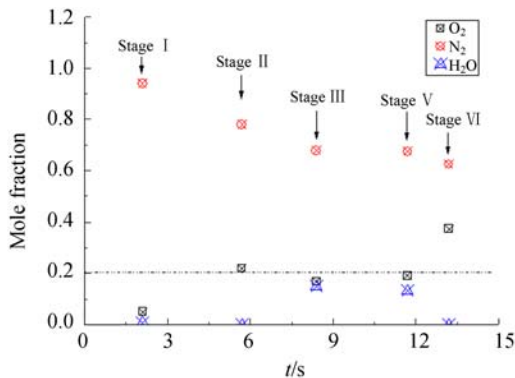


图 6 发动机流场主要组分的摩尔分数(实验编号:2303)

Fig. 6 Mole fractions of major species in engine flow field (experiment No. 2303)

到试验测量开始前,外界空气中少量的 O_2 和 H_2O 通过发动机出口扩散到达测量区域。在这一阶段,三车测量数据的一致性很好。

在第二阶段,流场中的主要组分为 N_2 和 O_2 。

此时发动机试验已经开始,来流气体流过测量区域,但加热器尚未开始工作,因此,这一阶段测量区域只有低温来流气体。试验所测主要组分皆为 N_2 和 O_2 ,所测组分摩尔分数的一致性较好,与空气中 N_2 和 O_2 的浓度一致。

在第三阶段,试验测量得到的主要组分为 N_2 、 O_2 和 H_2O 。这一阶段加热器已经开始工作,氢气燃烧产生了大量的水,同时,从 O_2 含量来看,来流中已经补充了一定量的 O_2 。对比测量结果,编号为 2301 的试验来流中 O_2 含量较其他两车试验的 O_2 含量高出了许多,达到了 27%,明显高于空气中 O_2 的含量。另外两次试验(编号 2302/2303)中的 O_2 含量接近,分别为 19% 和 18%,略低于空气中 O_2 的含量。

在第四阶段,燃烧场组分比较复杂,测量点存在的组分主要有 CO_2 、 O_2 、 N_2 、Fuel 和 H_2O 等。由于激光与未燃烧的燃料相互作用会对拉曼光谱产生较强的干扰,因此,这一阶段得到的光谱信号的信噪比较差,给分析各组分的相对浓度带来很大困难,未能给出组分浓度的定量测量结果。

在第五阶段,这一阶段煤油燃烧已经结束,但加热器仍在工作。此时流场的主要组分为 O_2 、 N_2 和 H_2O ,与第三阶段类似。其中,车次号为 2301 的试验中,该阶段主要组分的相对浓度与第三阶段主要组分的相对浓度基本相同, O_2 的相对浓度为 27%。车次号为 2302 的试验中,该阶段的 O_2 含量明显高于第三阶段,达到了 30%。车次号为 2303 的试验中,第五阶段与第三阶段各主要组分浓度的相对含量基本一致,且 O_2 含量比较接近空气中的 O_2 含量。

在第六阶段,流场的主要组分为 O_2 和 N_2 。但该阶段 O_2 含量较高,表明加热器关闭后补氧还会持续一段时间。

5 结 论

本文采用 SRS 技术对超燃冲压发动机流场进行了诊断,获得了实验全过程流场的主要组分信息。实验结果表明:部分车次发动机试验过程中,补氧后的来流中氧气含量最大达到了 30%,最小为 18%,说明发动机试验过程中,对补氧量的控制精度和稳定性还有待提高。

超燃发动机试验需要在线测量来流的主要组

分浓度,采用 SRS 技术可以较好地完成来流主要组分浓度的测量工作,测量结果对于发动机实验

数据分析及来流补氧控制方式和控制精度的改进具有较好的指导价值。

参考文献:

- [1] 王建臣,林宇震,刘伟,等.蓄热式加热纯净空气直连台试验能力研究[J].推进技术,2014,35(10):1392-1397.
WANG J CH, LIN Y ZH, LIU W, *et al.*. Research of clean air storage heater for direct-connected test-bed[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2014,35(10):1392-1397. (in Chinese)
- [2] 郭帅帆,宋文艳,李建平,等.燃烧加热污染空气对超燃冲压发动机性能影响研究[J].推进技术,2013,34(4):493-498.
GUO SH F, SONG W Y, LI J P, *et al.*. Numerical investigation of effects of vitiated air on scram jet performance[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2013,34(4):493-498. (in Chinese)
- [3] 王晟,胡志云,邵珺,等.双色热敏磷光涂层测温技术[J].红外与激光工程,2014,43(5):1406-1410.
WANG SH, HU ZH Y, SH J, *et al.*. Two-color thermally sensitive phosphor coatings for temperature measurement[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014,43(5):1406-1410. (in Chinese)
- [4] 瞿谱波,关小伟,张振荣,等.激光诱导热光栅光谱测温技术研究[J].物理学报,2015,64(12):123301.
QU P B, GUAN X W, ZHANG ZH R, *et al.*. Laser induced thermal grating spectroscopy thermometry technique[J]. *Acta Phys. Sin.*, 2015,64(12):123301. (in Chinese)
- [5] 王晟,张振荣,邵珺,等.瞬态流场定量测量中平面激光诱导荧光图像的降噪[J].光学精密工程,2013,21(7):1858-1894.
WANG SH, ZHANG ZH R, SHAO J, *et al.*. Denoising of PLIF images for flow parameter measurement[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013,21(7):1858-1894. (in Chinese)
- [6] 张振荣,叶景峰,王晟,等.煤油燃烧场主要组分浓度测量[J].强激光与粒子束,2014,26(7):019003.
ZHANG ZH R, YE J F, WANG SH, *et al.*. Measurements of major species concentration in kerosene combustion[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014,26(7):019003. (in Chinese)
- [7] GRADY N R, FRANKLAND J H, PITZ R W. UV Raman scattering measurements of supersonic reacting flow over a piloted, ramped cavity[C]. AIAA, 2012:614.
- [8] PITZ R W, GRADY N R, SHOPOFF S W. UV Raman scattering measurements of a Mach 2 reacting flow over a piloted cavity[C]. AIAA, 2008:244.
- [9] SMITH M S. Raman density and gas-sampling measurements during Tunnel 9 Mach 8 calibration[C]. AIAA, 2006:2814.
- [10] WEHR L, MEIER W, KUTNE P, *et al.*. Single-pulse 1D laser Raman scattering applied in a gas turbine model combustor at elevated pressure[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007,31:3099-3106.
- [11] LOCKE R J. Temperature and species measurements of combustion produced by a 9-point lean direct injector[C]. AIAA, 2013:562.
- [12] SUTTON J A, PATTON R A, GABET K N, *et al.*. Towards high-repetition rate Rayleigh and Raman scattering imaging in turbulent jets and flames[C]. AIAA, 2010:857.

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: zhang-zhenrong@nint.ac.cn



李国华(1985—),男,甘肃武威人,硕士,工程师,2007年、2010年于国防科学技术大学分别获得学士、硕士学位,主要从事燃烧流场激光诊断技术的研究。E-mail: liguohua@nint.ac.cn