

文章编号 1004-924X(2017)05-1119-07

利用平面激光诱导荧光技术及 CH 滤镜测量 微喷管射流火焰 OH 及 CH 基元

李 星^{1,2,3}, 蒋利桥^{1,2,3}, 杨浩林^{1,2,3}, 张 京^{1,2,3}, 赵黛青^{1,2,3*}

1. 中国科学院广州能源研究所, 广东 广州 510640;
2. 中国科学院可再生能源重点实验室, 广东 广州 510640;
3. 广东省新能源和可再生能源研究开发与应用重点实验室, 广东 广州 510640)

摘要:微射流火焰形貌观测及火焰中重要基元的准确测量,对利用微尺度火焰燃烧特性研制开发微型燃烧动力系统具有重要意义。本文建立了微喷管射流火焰实验及光学测量系统,对 H₂ 和 CH₄ 微射流火焰进行了实验研究,测量了两种重要基元(OH,OH)的空间分布。首先,探索了相机曝光时间对 H₂ 微射流火焰成像的影响,得到了不同流速下 H₂ 微射流火焰形貌的变化规律。其次,采用平面激光诱导荧光测量技术得到了不同燃料流速下 H₂ 及 CH₄ 微射流火焰中 OH 基元分布,同时还利用单反相机加 CH 滤镜通过长时间曝光(30 s)的方法获得了 CH₄ 微射流火焰中 CH 基元的分布。结果表明,火焰图像清晰度随曝光时间增加提高,曝光时间 30 s 时可获得 H₂ 微射流火焰的清晰照片;采用分辨率 2 048×2 048 的 ICCD 相机可获得微尺度火焰 OH 基元分布的清晰图像。微射流火焰形貌及重要基元的实验结果表明相关数值计算方法准确可靠。

关键词:光学测量;激光光谱;平面激光诱导荧光;微射流火焰;OH;CH

中图分类号:TN247;TK16 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172505.1119

Measurement of OH and CH radicals in micro-jet flames using planar laser induced fluorescence and CH filter

LI Xing^{1,2,3}, JIANG Li-qiao^{1,2,3}, YANG Hao-lin^{1,2,3}, ZHANG Jing^{1,2,3}, ZHAO Dai-qing^{1,2,3*}

1. Guangzhou Institute of Energy Conversion,
Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;
 2. Key Laboratory of Renewable Energy, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;
 3. Guangdong Provincial Key Laboratory of New and Renewable
Energy Research and Development, Guangzhou 510640, China)
- * Corresponding author, E-mail: zhaodq@ms.giec.ac.cn

Abstract: The observation of micro-jet flame shape and measurements of important radicals in micro-jet flame are of great significance to the research and development of micro energy and power system based on combustion characteristics of micro-jet flames. In this work, an optical measurement system

收稿日期:2016-11-09;修订日期:2016-12-01.

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(No. 51336010);国家重点基础研究发展计划资助项目(No. 2014CB239601);广东省科技计划资助项目(No. 2016A040403095)

of micro-jet flames was established experimentally to study micro-jet flames using H_2 and CH_4 as fuels and to measure the spatial distribution of two important radicals, CH and OH. Firstly, the effect of exposure time of camera on images of the H_2 micro-jet flames was explored, obtaining the variation of micro-jet flame shape under different flow velocities. Then, the Laser Induced Predissociative Fluorescence (OH-PLIF) technique was applied to obtain the distribution of OH radical in H_2 and CH_4 micro-jet flames under different fuel flow velocities, meanwhile, a Digital Single Lens Reflector (DSLR) plus a CH filter with a long time exposure (30 s) was employed to obtain the distribution of CH radical in CH_4 micro-jet flame. The results showed that, the clarity of flame image is promoted as the exposure time increased and a clear image of H_2 micro-jet flame is acquired when exposure time is 30 s; a clear image of distribution of OH radical in micro-scale flames is captured via an ICCD camera with a resolution of 2048×2048 . The experimental results indicate that the numerical computation of micro-jet flame shape and important radicals is accurate and reliable.

Key words: optical measurement; laser spectrum; planar laser induced fluorescence; micro-jet flame; OH; CH

1 引言

基于微尺度燃烧的微小型能源转换装置及系统在过去近十年来受到了广泛的关注^[1-2],并成为燃烧领域一个重要的研究课题。相关研究表明,微尺度下很难获得稳定的燃烧火焰,因此如何获取稳定燃烧的微尺度火焰成为微尺度燃烧领域的重要研究课题。而对微尺度火焰的观测及火焰中各重要基元的准确测量不仅有助于理解和认识微尺度火焰的燃烧特性,还可以为微尺度火焰的数值计算提供相关参考及判断依据。

在微尺度非预混火焰的燃烧方面,国内外学者展开了大量的实验及数值研究^[3-9]。然而由于微尺度火焰非常小且微弱,采用热电偶或者探针取样等接触式测量方法必然极大地影响火焰本身的燃烧特性,从而引入误差。以往的微尺度非预混火焰实验研究主要采用相机拍摄微射流火焰,以获得微火焰的形貌特征^[3,5,9],但无法获得全面的信息。因此,非接触式光学测量成为微尺度火焰检测的首选方法。不过由于微尺度火焰非常小,对测量精度的要求又较高,因此相关的文献报告较少。Chao 等人采用紫外拉曼散射及激光诱导预分离荧光法(Laser Induced Predissociative Fluorescence, LIPF)对采用 H_2 为燃料的微射流扩散火焰进行测量,得到了不同高度位置上 OH 基元、 H_2 、 O_2 、 H_2O 、及 N_2 的摩尔浓度沿轴向位置的分布规律^[4]。然而其测量工况较少同时测量结果分辨率较低,无法提供关于微尺度非预混火

焰机构的详细信息。为了更准确地把握微尺度火焰内基元的分布,需要对其进行更全面精确的测量。

近年来,激光光谱测量技术得到了长足的发展,它能够有效测量流场、温度场及重要组分的分布^[10-14]。特别地,平面激光诱导荧光测量技术(Planar Laser Induced Fluorescence, PLIF)能够测量燃烧场内的重要基元,因此成为火焰燃烧特性研究的有力工具^[15]。同时,电子器件的发展促使激光光谱测量精度有了大幅度提高。本文建立了非预混微射流火焰实验系统,将高分辨率 OH-PLIF 测量技术引入到微尺度火焰的测量中。采用 OH-PLIF 技术测量氢气及甲烷微射流火焰的 OH 分布,利用单反相机和长时间曝光方法获得了氢气微射流火焰的清晰照片,并利用 CH 滤镜结合长时间曝光方法获得了甲烷微射流火焰中 CH 基元的分布。

2 实验系统及测量方法

2.1 微射流实验系统

实验系统如图 1 所示,实验装置的主体部分为不锈钢腔体。腔体内布置有陶瓷蜂窝板及陶瓷小球,以获得速度均匀的空气伴流;腔体中间为不锈钢燃料管,燃料管的前端连接不锈钢微喷管;腔体上部燃料管外侧为石英方管,其外部尺寸为 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$,壁厚为 4 mm。实验中将干空气通入腔体整流后进入方向石英管,燃料通过燃料管前端的不锈钢微管喷入伴流空气。通过电脑和

质量流量计(MKS-GE50系列)控制干空气及燃料的流量。实验前,采用湿式体积流量计(Shinagawa WS-2A)和皂膜流量计标定不同量程的质量流量计。不锈钢微喷管的内径为 $425\ \mu\text{m}$ 、壁厚为 $140\ \mu\text{m}$ 、长度为 $5\ \text{cm}$,通过调节燃料射流速度来研究采用氢气及甲烷为燃料的微射流火焰的燃烧特性。

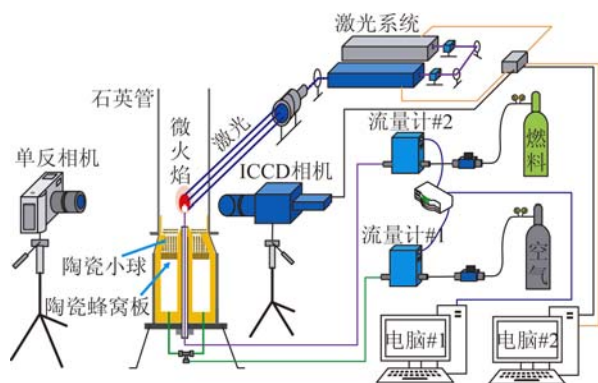


图1 微射流火焰实验系统

Fig. 1 Experimental system of micro-jet flames

2.2 光学测量系统及方法

实验过程中通过单反相机(Nikon D-610)拍摄火焰照片,并采用OH-PLIF技术对火焰的OH分布进行测量。通过YAG激光器(Quanta-Ray Pro-230)产生 $355\ \text{nm}$ 波长的激光($10\ \text{Hz}$,脉冲时间为 $10\ \text{ns}$,单脉冲能量维持在 $200\ \text{mJ}$),然后通过染料激光器(Sirah PSCAN-G-30)中的染料光栅调谐以及BBO倍频晶体倍频转换成 $283.565\ \text{nm}$ 左右的激光,通过透镜组件将激光束转换为激光薄片。激光束由火焰的一侧进入火焰,通过激发反应区域内的OH产生对应的荧光。通过ICCD相机与增强器(LaVision VC13-0189),UV镜头(Nikon Rayfact PF 10545MF-UV)及OH滤光片(LaVision VZ13-0390)来获得OH的相关信号,信号经处理转换为OH的相对分布。其中,ICCD相机的最佳分辨率为 2048×2048 。实验前对不同波长的激光能量进行标定。激光薄片在火焰位置附近的厚度约为 $100\ \mu\text{m}$ 、高度约为 $6\ \text{cm}$ 。实验过程中,通过计算机软件控制纳秒级的时序控制单元同步控制激光脉冲、增强器和ICCD相机。ICCD光圈设最大 $f=4.5$,曝光时间为 $125\ \text{ns}$,延迟为 $120\ \text{ns}$,增益为 65% ,频率为 $10\ \text{Hz}$ 。

在OH-PLIF测量的基础上,本研究采用简单的方法对碳氢燃料微火焰中CH基元进行了测

量。该方法在单反相机前端配置CH滤光片(透过波长为 $431.4\ \text{nm}$,半宽为 $6.4\ \text{nm}$),通过长时间曝光的方法来获得CH基元的分布。

3 微射流火焰数值计算

在实验的基础上采用数值计算对微尺度火焰进行研究。数值计算中不仅考虑了气体的流动化学反应及传热,还考虑了火焰与固体间的耦合效应即采用流固耦合。数值计算采用的基本控制方程包括:连续性方程、能量方程、质量输运方程、理想气体状态方程、固体导热方程,其中将燃烧过程释放热量作为源项加入了能量方程。由于燃料及外部空气伴流都为层流状态,数值计算采用层流模型。燃料的化学反应采用可以对 CH_4 及 H_2 的燃烧进行计算的C1化学反应机理^[16],该机理包含17种基元58步反应。由于本研究涉及的物理模型可看作严格对称模型,这里采用简化的二维轴对称模型进行数值计算。计算区域为 $30\ \text{mm}\times 300\ \text{mm}$ 。燃料及空气的入口为速度边界,出口及四周为压力边界。数值计算结果表明,不同流速下火焰的高度及宽度远小于计算域尺寸。数值计算采用正方形网格并在壁面及反应区域进行了加密,计算前对网格的独立性进行了验证。对数值计算相关模型的详细描述可以参考相关论文^[17-18]。

4 测量结果与分析

4.1 H_2 微射流火焰图像及OH基元测量结果

首先对 H_2 微喷管射流火焰进行实验研究,实验结果显示 H_2 微射流火焰的发光非常微弱。图2给出了空气伴流速度为 $5\ \text{cm/s}$, H_2 燃料流速为 $10\ \text{m/s}$ 时不同曝光时间下由单反相机拍摄到的 H_2 微射流火焰的图像。可以看到,当曝光时间为 $1\ \text{s}$ 时照片中基本看不到火焰图像,只能看到被 H_2 火焰加热的微喷管的顶端部分。曝光时间为 2.5 和 $5\ \text{s}$ 时, H_2 微射流火焰的外部轮廓依然难以辨识。当曝光时间由 $10\ \text{s}$ 逐渐增加到 $30\ \text{s}$ 时, H_2 微火焰的轮廓逐渐清晰。曝光时间为 $30\ \text{s}$ 时 H_2 微火焰的轮廓较为清晰,因此,采用 $30\ \text{s}$ 的曝光时间对不同流速下的 H_2 微火焰进行拍摄。

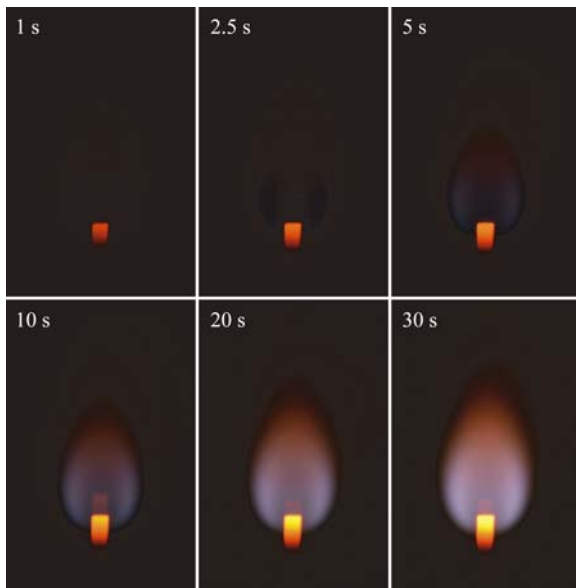
图 2 不同曝光时间下 H₂ 微射流火焰图像Fig. 2 Images of H₂ micro-jet flames obtained by digital reflex camera with different exposure time

图 3 给出了燃料流速为 1, 2.5, 5 和 10 m/s 时 H₂ 微射流火焰的照片。其中, 燃料流速为 2.5, 5 和 10 m/s 时, 火焰照片采用 30 s 的曝光时间进行拍摄; 而当燃料气体流速为 1 m/s 时, H₂ 微射流火焰极其微弱, 因此在采用 30 s 曝光的基础上对火焰光强进行 100 倍放大处理。从拍摄到的火焰照片可以看到, H₂ 微射流火焰的形态随流速发生变化, 低流速时火焰位于喷管上方, 中间流速时火焰包裹喷管, 10 m/s 时火焰的根部和 5 m/s 时相比略微上移。同时发现火焰和固体微管存在热耦合效应, 固体微管被火焰加热, 2.5 和 5 m/s 时热耦合效应较强烈。

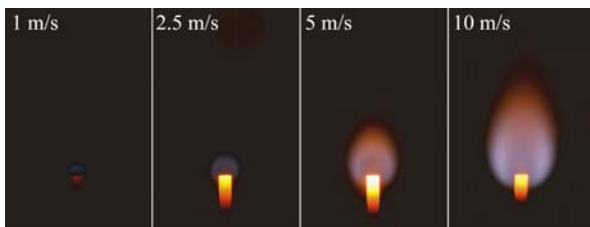
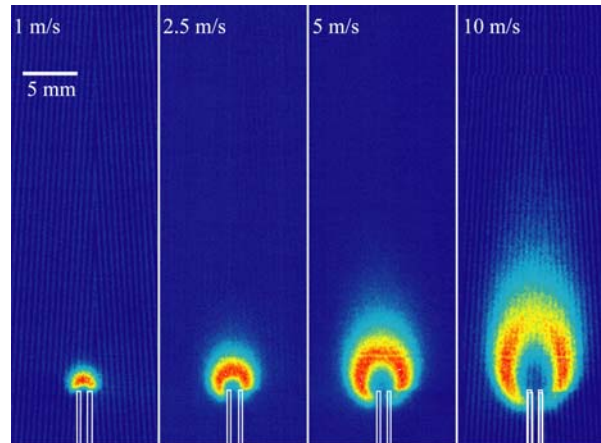
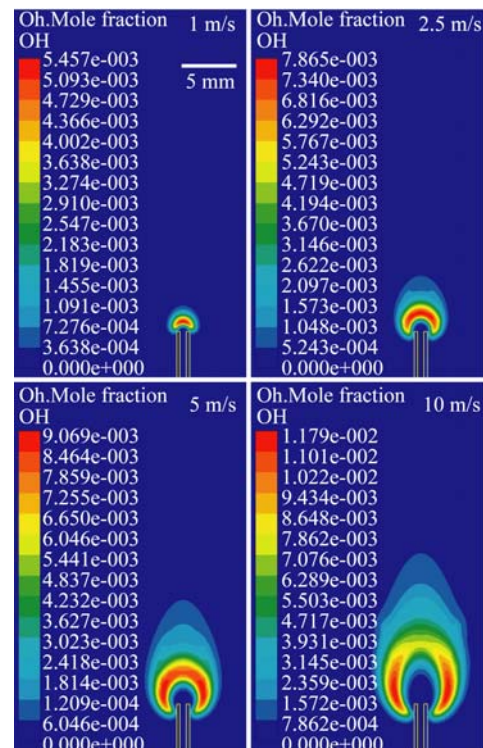
图 3 不同流速下 H₂ 微射流火焰图像Fig. 3 Images of H₂ micro-jet flames with different fuel flow velocities

图 4 给出了燃料流速为 1, 2.5, 5 和 10 m/s 时 H₂ 微射流火焰的 OH-PLIF 照片。相关研究表明, 在 1 800 K 以内 OH 光强和 OH 摩尔浓度

成正比^[19-20], 图 4 可看作 OH 摩尔浓度的分布。图 5 给出了相同流速下 OH 摩尔浓度的数值计算结果。通过对比图 4 和图 5 可知, OH 摩尔浓度分布的数值计算结果和测量结果吻合得较好。采用当前高分辨率 OH-PLIF 测量技术得到不同流速下火焰清晰的 OH 浓度分布, 尤其燃料低流速下 (1~2.5 m/s) OH 基元的图像清晰度比前人的测量结果^[4]有大幅提高。

图 4 不同流速下 H₂ 微射流火焰 OH 分布的测量结果Fig. 4 Measured OH distributions of H₂ micro-jet flames at different fuel velocities图 5 不同流速下 H₂ 微射流火焰 OH 分布的数值计算结果Fig. 5 Computational OH distributions of H₂ micro-jet flames at different fuel velocities

由图 3~图 5 可知, H₂ 微射流火焰的形状随燃料气体流速的变化而变化。通过 OH 浓度分布的相关结果可知, 不同流速下 H₂ 微射流火焰的主要化学反应区域的分布是不同的, 因而导致了不同的热耦合效应。

4.2 CH₄ 微射流火焰 OH 及 CH 基元测量结果

对不同燃料流速下甲烷非预混微射流火焰进行了实验研究, 首先采用 OH-PLIF 测量 OH 分布。图 6 上半部分给出了燃料气体流速为 0.5, 0.6, 1.0 和 2.5 m/s 时 CH₄ 微射流火焰的 OH-PLIF 测量结果, 图 6 下半部分给出了 OH 摩尔浓度的数值计算结果。对比实验及数值计算结果, 可以看到二者在火焰的形状及 OH 浓度的分布上吻合得较好。燃料流速为 0.5 及 0.6 m/s 时, OH 基元主要集中在微管喷口的上方; 燃料流速为 1 m/s 时, OH 基元包裹整个喷管的出口; 燃料流速为 2.5 m/s 时, OH 基元分布在喷管的两侧及上方。

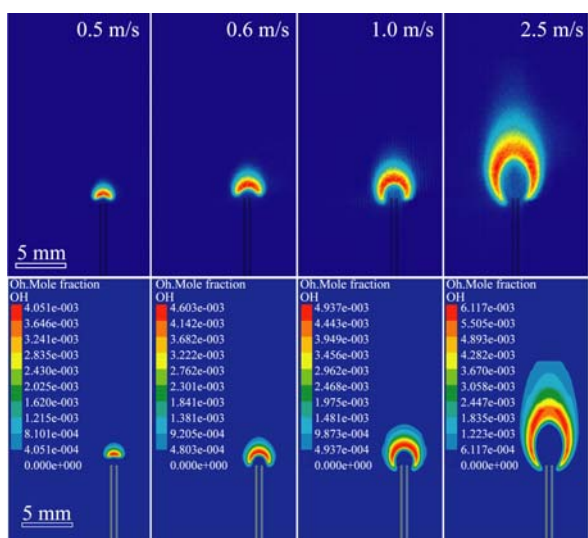


图 6 不同流速下 CH₄ 微射流火焰 OH 分布的测量及计算结果

Fig. 6 Measured and computational OH distributions of CH₄ micro-jet flames at different fuel velocities

图 7 给出了不同燃料气体流速条件下微射流火焰 CH 的测量结果和数值计算结果, 实验中曝光时间为 30 s。可以看到 CH₄ 微射流火焰的形状随燃料流速变化, 低流速下火焰悬浮在喷管上

方, 当燃料流速略微升高后, 火焰的底部向下延伸到喷管出口附近。采用单反相机加 CH 滤镜并采用长时间曝光的方法, 可以获得清晰的 CH 分布照片, 数值计算和实验结果吻合得较好。综上所述可知, 本研究采用的数值计算手段可以准确地计算 CH₄ 微射流火焰。

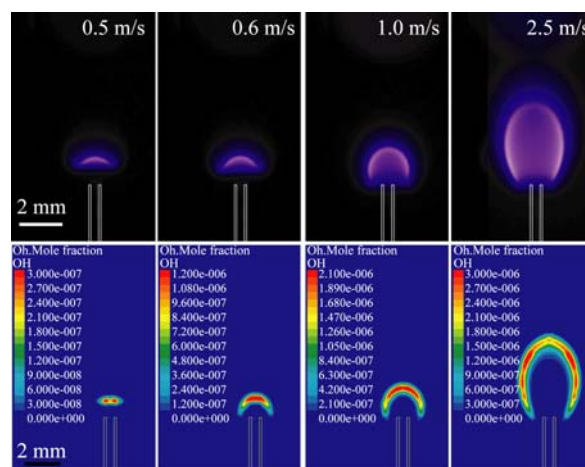


图 7 不同流速下 CH₄ 微射流火焰 CH 分布的测量及计算结果

Fig. 7 Measured and computational CH distributions of CH₄ micro-jet flames at different fuel velocities

5 结 论

本文对管内径为 425 μm 的微细管 H₂ 及 CH₄ 非预混微射流火焰进行了实验研究及测量。实验结果表明: H₂ 微射流火焰的发光极其微弱, 火焰图像的清晰度随相机曝光时间的增加而提高, 高流速时采用 30 s 的曝光时间可以获得清晰的火焰照片; 然而, 当燃料气体流速较低时, 在长时间曝光的基础上需增强照片光强 100 倍才能获得清晰的火焰图像。采用 OH-PLIF 测量装置得到了不同燃料流速下 H₂ 及 CH₄ 微射流火焰的 OH 基元浓度分布。采用分辨率为 2 048 × 2 048 的 ICCD 相机可获得微尺度火焰 OH 基元分布的清晰图像, 验证了数值计算结果的准确性, 为掌握微射流火焰结构提供重要参考。利用单反相机和 CH 滤镜并采用 30 s 曝光时间的方法得到了 CH₄ 微射流火焰的 CH 浓度分布结果, 测量结果和数值计算结果吻合得较好。

参考文献:

- [1] JU Y G, MARUTA K. Microscale combustion: Technology development and fundamental research [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2011, 37(6): 669-715.
- [2] MARUTA K. Micro and mesoscale combustion [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011, 33(1): 125-150.
- [3] MATTA L M, NEUMEIER Y, LEMON B, *et al.*. Characteristics of microscale diffusion flames [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2002, 29(1): 933-939.
- [4] CHENG T S, CHAO Y C, WU C Y, *et al.*. Experimental and numerical investigation of microscale hydrogen diffusion flames [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2005, 30(2): 2489-2497.
- [5] CHENG T S, CHEN C P, CHEN C S, *et al.*. Characteristics of microjet methane diffusion flames [J]. *Combustion Theory and Modelling*, 2006, 10(5): 861-881.
- [6] NAKAMURA Y, YAMASHITA H, SAITO K. A numerical study on extinction behaviour of laminar micro-diffusion flames [J]. *Combustion Theory and Modelling*, 2006, 10(6): 927-938.
- [7] FUJIWARA K, NAKAMURA Y. Experimental study on the unique stability mechanism via miniaturization of jet diffusion flames (microflame) by utilizing preheated air system [J]. *Combustion and Flame*, 2013, 160(8): 1373-1380.
- [8] HOSSAIN A, NAKAMURA Y. Thermal and chemical structures formed in the micro burner of miniaturized hydrogen-air jet flames [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, 35(3): 3413-3420.
- [9] 李星, 张京, 杨浩林, 等. 微喷管甲烷非预混射流火焰燃烧特性实验研究 [J]. *工程热物理学报*, 2016, 37(4): 907-911.
- LI X, ZHANG J, YANG H L, *et al.*. Experimental investigation on combustion characteristics of methane non-premixed micro-jet-flames [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2016, 37(4): 907-911. (in Chinese)
- [10] 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.
- LIU J R, HU ZH Y, ZHANG ZH R, *et al.*. Laser spectroscopy applied to combustion diagnostics [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(2): 284-296. (in Chinese)
- [11] 苏铁, 陈爽, 杨富荣, 等. 双色平面激光诱导荧光瞬态燃烧场测温实验 [J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(6): 1750-1754.
- SU T, CHEN SH, YANG F R, *et al.*. Investigation of temperature of transient combustion using two-line PLIF [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(6): 1750-1754. (in Chinese)
- [12] 李国华, 胡志云, 王晟, 等. 基于相干反斯托克斯拉曼散射的二维温度场扫描测量 [J]. *光学精密工程*, 2016, 24(1): 14-19.
- LI G H, HU ZH Y, WANG SH, *et al.*. 2D scanning CARS for temperature distribution measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(1): 14-19. (in Chinese)
- [13] 王晟, 张振荣, 邵璐, 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): 1858-1864.
- WANG SH, ZHANG ZH R, SHAO J, *et al.*. Denoising of PLIF images for flow parameter measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(7): 1858-1864. (in Chinese)
- [14] 邵璐, 叶景峰, 胡志云, 等. 用于超燃流场羟节标记示踪背景抑制的逐步逼近特征窗口滤波 [J]. *光学精密工程*, 2015, 23(10): 221-228.
- SHAO J, YE J F, HU ZH Y, *et al.*. Progressive approach characteristic window filtering for HTV background suppression in supersonic combustion field [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(10): 221-228. (in Chinese)
- [15] 张猛, 王金华, 谢永亮, 等. 利用 OH-PLIF 测量 CH_4/H_2 /空气混合气湍流燃烧速率 [J]. *燃烧科学与技术*, 2013, 19(6): 512-516.
- ZHANG M, WANG J H, XIE Y L, *et al.*. Measurement of turbulent burning velocity of CH_4/H_2 /air mixtures using OH-PLIF [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2013, 19(6): 512-516. (in Chinese)
- [16] BILGER R W, STÄRNER S H. On reduced mechanisms for methane-air combustion in non-premixed flames [J]. *Combustion and Flame*, 1990, 80(2): 135-149.
- [17] 张京, 李星, 杨浩林, 等. 微喷管氢气非预混射流火焰燃烧特性 [J]. *化工学报*, 2016, 67(7): 2724-2731.
- ZHANG J, LI X, YANG H L, *et al.*. Combustion characteristics of hydrogen non-premixed micro-jet flames [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2016, 67(7): 2724-2731. (in Chinese)

tion characteristic of hydrogen non-premixed micro-jet flames [J]. *CIESC Journal*, 2016, 67(7): 2724-2731. (in Chinese)

- [18] LI X, ZHANG J, YANG H L, *et al.*. Combustion characteristics of non-premixed methane micro-jet flame in coflow air and thermal interaction between flame and micro tube [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 112:296-303.
- [19] YAMAMOTO K, OHNISHI M, HAYASHI N, *et*

al.. Flame image and flame structure of turbulent premixed flames using simultaneous OH-HCHO PLIF technique [J]. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series B*, 2007, 73(733): 1943-1949.

- [20] YAMAMOTO K, OZEKI M, HAYASHI N, *et al.*. Burning velocity and OH concentration in premixed combustion [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009, 32(1):1227-1235.

作者简介:



李 星(1984—),男,陕西汉中,人,博士,副研究员,2006年、2014年于北京交通大学分别获得学士、博士学位,主要从事燃烧的基础研究及火焰的光学测量。E-mail: lixing@ms.giec.ac.cn

通讯作者:



赵黛青(1958—),女,江苏南京人,博士,研究员,中科院“百人计划”入选者,1982年于南京工业大学获得学士学位,1985年于华东理工大学获得硕士学位,1997年于日本东北大学获得博士学位,主要从事燃烧基础研究、微型能源动力系统及能源科技战略方面的研究。E-mail: zhaodq@ms.giec.ac.cn