

HE Lifang, ZHENG Huilong, WANG Xikun, YANG Xiaofang, ZHANG Xiaowu. Ground Experiment Investigation of PIV Unit for Combustion Science Experimental System of China Space Station (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2022, 42(6): 1152–1160. DOI:10.11728/cjss2022.06.211123121

中国空间站燃烧科学实验系统 PIV 单元地面试验*

何丽芳^{1,2} 郑会龙² 王希坤¹
杨肖芳² 张晓武²

1(江苏大学流体机械工程技术研究中心 镇江 212013)

2(中国科学院工程热物理研究所 北京 100190)

摘要 中国空间站燃烧科学实验系统是用于开展微重力燃烧实验研究的综合性科学实验平台,可以实现燃烧流场测量。为了验证燃烧科学实验系统粒子图像测速 (PIV) 单元对燃烧流场测量的功能与可行性,本文基于与在轨状态一致的连续激光器和相机的空间布局,搭建了地面层流圆孔射流试验平台,选取 Al_2O_3 、 TiO_2 、 ZrO_2 三种示踪粒子进行冷态试验与热态试验。试验结果表明,自主研制 Nd:YVO₄ 泵浦连续激光器偏光角度合适,能照亮被测流场主流区域,燃烧科学实验系统 PIV 单元可用于低速燃烧流场测量;相同工况下, Al_2O_3 粒子在冷态试验测量的速度值更接近于理论值,速度幅值比更接近 1,更适用于低速流体测量。

关键词 燃烧科学实验系统, PIV 单元地面试验, 冷态流场, 热态流场

中图分类号 V524

Ground Experiment Investigation of PIV Unit for Combustion Science Experimental System of China Space Station

HE Lifang^{1,2} ZHENG Huilong² WANG Xikun¹
YANG Xiaofang² ZHANG Xiaowu²

1(Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013)

2(Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract The Combustion Science Experimental System of China Space Station is a comprehensive scientific platform for microgravity combustion experiment research, which is feasible for velocity mea-

* 中国载人航天工程计划燃烧科学实验系统项目资助

2021-11-19 收到原稿, 2022-04-26 收到修定稿

E-mail: helifang@iet.cn. 通信作者 郑会龙, E-mail: zhenghuilong@iet.cn

surement. In order to test the feasibility function of Particle Image Velocimetry (PIV), an experimental platform for laminar circular orifice jet, which has the same spatial layout of the laser and camera as that in-orbit operation, was built for reacting flow field and non-reacting flow field experiment. Al_2O_3 , TiO_2 and ZrO_2 were selected as tracer particles. The experimental results indicate that the combustion science experimental system of PIV unit is feasible for low-speed combustion field measurement. Under the same conditions, the obtained velocities by using Al_2O_3 particles are closer to analytical values with velocity amplitude ratio nearest to 1, which suggests that Al_2O_3 particles are more suitable for low-speed field. The present study can provide the selection basis for particle species in ground-space comparison experiments.

Key words Combustion science experimental system, Ground experiment of PIV unit, Reacting flow field, Non-reacting flow field

0 引言

燃烧是获取能源的主要手段,加深对燃烧的理解对高效利用能源、控制燃烧污染等具有重要意义。重力使燃烧过程中质量及能量传递趋于复杂化,因此经典燃烧理论大多忽略了重力的影响^[1]。微重力环境具有抑制自然对流、消除重力沉降效应的优势,有利于实现静止、低速流动及稀燃极限(低当量比)的燃烧,拓宽燃烧时空尺度,实现被浮力诱导效应而掩盖的次级力对燃烧影响的研究。微重力燃烧研究对深入探索燃烧过程的基本特征和规律以及促进燃烧理论和应用技术的发展具有不可替代的作用^[2]。

空间站、航天飞机和实验卫星等航天飞行器都可以提供长时间、稳定的微重力燃烧实验环境。国内外在航天飞行器上规划并开展了许多与微重力燃烧相关的科学研究工作,包括微重力下扩散火焰燃烧特性研究^[3-5]、孤立液滴和液滴云燃烧特性研究^[6-7]、防火材料燃烧试验研究^[8-12]等。中国目前正开展空间站建设任务,规划了数个空间站微重力研究单元,微重力燃烧实验研究是空间研究计划的核心内容之一。由于微重力燃烧实验具有很高的技术难度以及很大的不确定性,其所需资源、成本远高于普通实验室的燃烧实验,因此需要在满足燃烧流场测量功能的要求下,综合考虑燃烧实验测量方法的前沿性、可行性及经济性。

激光流场诊断技术是 20 世纪 70 年代后以激光技术和计算机图像处理技术为基础发展起来的先进测量技术,因其不影响流场自身结构的优点而得到广泛应用。表 1 总结了目前常用的激光流场诊断技术,

其中激光诱导荧光技术(LIF)只能给出定性化流场信息,激光多普勒测速法(LDV)只能进行单点测量,可调谐二极管激光吸收光谱技术^[13](TDLAS)的空间分辨率太低,而粒子图像测速技术(PIV)可以提供全局流场瞬时速度,最适合燃烧流场的测量。

PIV 技术常用的双脉冲激光器具有尺寸大、质量大的缺点,无法满足空间布局与发射重量要求,因此需要研制适用于空间站燃烧科学实验系统的小型连续激光器。为验证小型连续激光 PIV 测试单元的功能和可行性,更好地完成微重力环境下的 PIV 燃烧流场测量,必须开展前期地面试验研究。

本文通过已研制的 PIV 测量单元研究连续激光器的光强对粒子成像效果的影响,验证 PIV 测量单元对低速流场测量的可行性;基于与在轨状态一致的连续激光器与相机的空间布局,搭建地面层流圆孔射流试验平台,选取 Al_2O_3 , TiO_2 , ZrO_2 三种示踪粒子开展冷态与热态试验,分析不同示踪粒子对燃烧流场的表现,并进一步验证 PIV 测量单元对低速燃烧流场测量的可行性。

1 燃烧科学实验系统 PIV 单元

燃烧科学实验系统是用于开展微重力燃烧科学实验研究的综合性科学实验平台,具备燃烧流场测量功能。空间站对燃烧科学实验系统的功耗、质量、尺寸与散热等方面有严格的设计限制。由于空间约束,必须将复杂的科学装置以及精确的光路设计在有限的空间内,完成高紧凑性、高可靠性系统集成^[14]。图 1 所示为燃烧科学实验系统 PIV 单元,主要包括连续激

表 1 激光流场诊断技术
Table 1 Laser diagnostic technology of flow field

测速方法	测量原理	测量特点	不足
粒子图像测速技术(PIV)	粒子示踪 激光散射 粒子成像 互相关算法	特定波长激光激发 粒子成像可见性 多点瞬时流场	需添加示踪粒子
激光多普勒测速技术(LDV)	粒子示踪 激光散射 光电转换 多普勒频移	单一频率激光激发 分光、聚焦光路 光信号收集与检测	需添加示踪粒子 单点测量
激光诱导荧光技术(LIF)	分子示踪 激光诱导荧光 光谱比分析法	紫外调谐激光激发 多种组分	定性化测量 荧光弱、时间短 吸收波段窄
可调谐二极管激光吸收光谱技术(TDLAS)	分子示踪 零吸收基线拟合 多普勒频移	激光激发 吸收中心频移 分光、聚焦光路	空间分辨率低

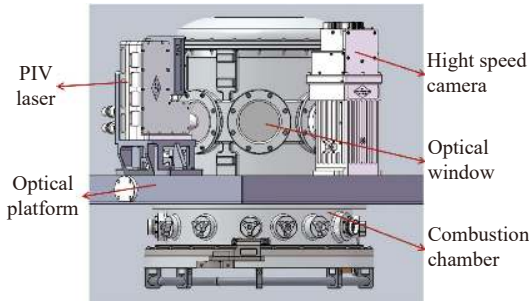


图 1 燃烧科学实验系统 PIV 单元
Fig. 1 Combustion science experimental system of PIV unit

光器与高速相机,二者成直角分布。连续激光器主要由电源模块、控制模块、液冷模块与泵浦激光模块组成,设计功率为 350 W,激光能量 ≥ 10 W,波长为 532 nm,采用液冷冷却。连续激光器出射光束通过柱面透镜将激光光束扩展为扇形片光,通过球面透镜聚焦,形成毫米级片光,满足二维 PIV 测量要求。高速相机由相机、光路模块组成,选用了具备高分辨率、高灵敏度、高帧速、高 ISO 值、超高动态范围、低噪声和多种输出接口支持能力等优点的 PCO.DIMAX.CS1 (黑白版本),机身的抗冲击性能达到 $150\text{ g} > 11\text{ ms}$ (所有轴),符合发射的力学要求。

2 地面试验系统

地面试验系统由燃烧系统和连续激光 PIV 测量系统组成(见图 2)。PIV 测量系统包括连续激光器、

水冷机、高速相机、示踪粒子发生器等装置。连续激光器型号为 Nd:YVO₄ 泵浦激光器,激光功率为 10 W,片光角度 15°,波长 532 nm,测量区片光厚度约为 1 mm;高速相机(PCO.DIMAX.CS1)使用定焦镜头,分辨率为 1296 pixel×1024 pixel,满分辨率下最高采集频率为 3086 Hz,试验采集频率为 2500 Hz。连续激光器和高速相机的主要参数列于表 2。燃烧系统主要包括气瓶、质量流量控制器、燃烧器等。燃烧器出口直径为 10 mm,能够产生稳定的轴对称火焰。

为验证连续激光 PIV 测量系统对低速流场测量的可行性,设计了两种地面试验方案,即冷态射流试验(简称冷态试验)与预混燃烧射流试验(简称热态试验)。冷态试验由压缩空气气瓶提供稳定气源,空气进入流化床式粒子发生器后再通入燃烧器。热态试验同时输入甲烷和空气,二者在文丘里射流器内混合后通入燃烧器,预混气体当量比为 1。冷态试验与热态试验的出口速度保持一致,出口雷诺数为 471.2,均为层流状态。

冷态试验与热态试验均选用 0.2~0.5 μm 的 Al₂O₃, TiO₂ 和 ZrO₂ 三种示踪粒子。Al₂O₃, TiO₂, ZrO₂ 为三种常用于显示燃烧流场 PIV 测量的固态耐高温粒子,其物性参数见表 3。由于粒子速度能否准确反映流场速度是 PIV 测速的关键^[15],因此要求示踪粒子具有良好的散射性与跟随性。其中,散射性用相对折射指数描述,一般要求大于 1;跟随性用粒子的响应时间 τ 以及粒子与流场运动幅值比 η 描述,粒子响应时间越短,表明粒子跟随性越好。

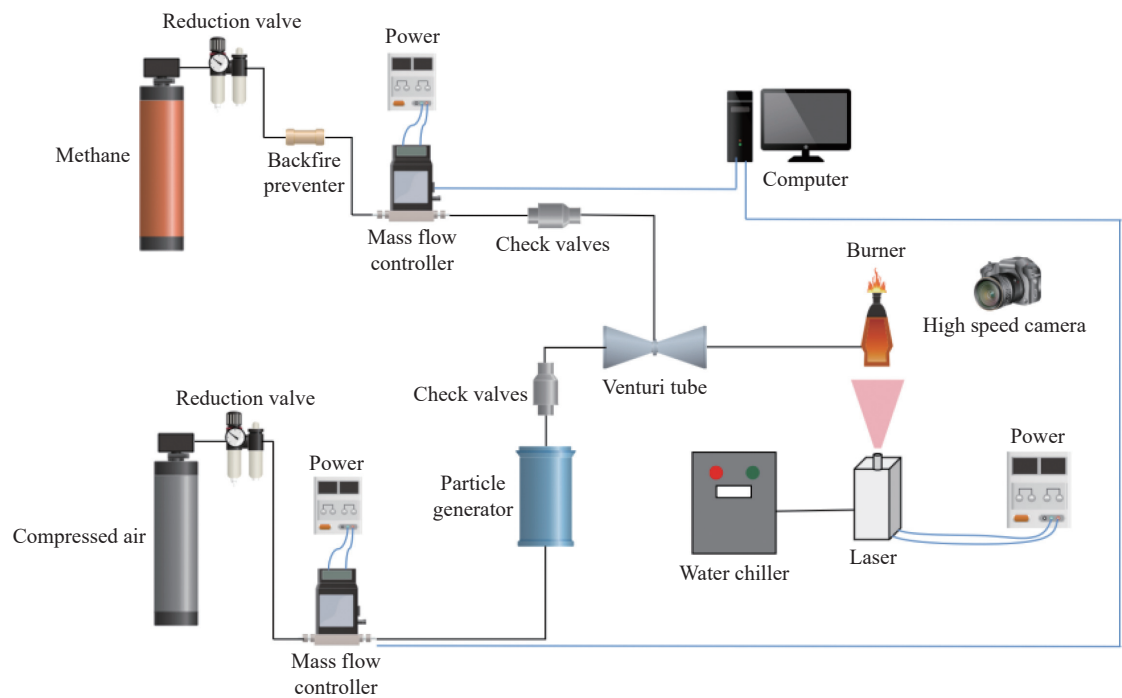


图 2 试验系统

Fig. 2 Schematic of experimental system

表 2 连续激光器与高速相机主要技术参数
Table 2 Main parameters of camera and laser

连续激光器		高速相机	
激光器类型	Nd:YVO ₄	相机型号	PCO.DIMAX.CS1 (黑白版本)
尺寸/mm	211×190×344	尺寸/mm	85×85×102.5
质量/kg	7.9 (不含水冷)	质量/kg	0.985 (含 C-mount)
激光功率/W	10	曝光时间/ms	0.0015~40
功率稳定性	小于3% (RMS)	像元尺寸/μm	11×11
波长/nm	532	图像拍摄速率/(frame·s ⁻¹)	3086 (满分辨率 1296 pixel×1024 pixel)
偏光角度/(°)	15	ISO灵敏度	1250~16000

粒子响应时间为示踪粒子从静止状态达到与流体运动速度一致所用的时间,表达式^[16,17]为

$$\tau = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu}. \quad (1)$$

式中, ρ_p 为粒子密度, d_p 为粒子直径, μ 为空气动力粘度。这里取 $\mu=1.846 \times 10^{-5}$ Pa·s (温度 300 K)。

由于试验无法测量粒子响应时间,考虑到粒子响应时间对试验结果的影响,因此在试验中加长了粒子发生器与燃烧器之间的管路长度,增加了粒子的加速时间,使其速度更能接近空气速度,并与空气充分混合。

粒子与流场运动速度幅值比的定义为

$$\eta = |u_p/u_f|. \quad (2)$$

式中, u_p 为粒子速度, u_f 为流体速度。 η 越接近于 1, 表示粒子的跟随性越好, 越能准确反映流场信息。粒子与流场运动速度幅值比的具体表达式为

$$\eta = \sqrt{1 - \frac{(\sigma - 1)(\sigma + 2)}{(18N_s^2)^2 + (\sigma + 1/2)^2}}. \quad (3)$$

式中, 密度比 $\sigma = \rho_p/\rho_f$, N_s 表示斯托克斯数。

采用 PIV View 软件对粒子图像进行后处理, 基于快速傅里叶变换 (FFT) 和三点高斯拟合 (3-Piont Gauss Fit) 的互相关法计算粒子位移。后处理选择燃

烧流场的主要流动区域作为感兴趣区域(ROI), 设置视野大小为 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$, 询问域(IA)大小为 $48\text{ pixel} \times 48\text{ pixel}$, 步长为 $16\text{ pixel} \times 16\text{ pixel}$, 重叠率为 67%, 最后生成 50×50 个矢量。此时, 速度场的空间分辨率为 $0.80\text{ mm} \times 0.80\text{ mm}$ 。

3 结果与分析

3.1 冷态试验结果与分析

以激光面垂直于射流出口端面上方 2 mm 并通

过射流中心为 O 点(即坐标系原点), 沿射流的中心线(竖直方向)为 y 轴, 水平方向为 x 轴。

图 3 给出了三种示踪粒子在相同试验工况下的冷态射流。由图 3 可见, 三种示踪粒子的射流宽度基本不变, 射流边界清晰呈直线状态; 粒子之间未出现黏连和拖尾现象, 粒子清晰独立、分布均匀。图 4 给出的是 1000 幅原始图像经过后处理获得的平均速度矢量云图。可以看到, 三种示踪粒子的流场分布一致, 层流特征明显, 连续性较好。射流边界层流体速

表 3 示踪粒子物理特性

Table 3 Physics properties of the three tracer particles used

粒子类型	粒径/ μm	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	熔点/ $^{\circ}\text{C}$	粒子响应时间/ $(\times 10^{-6})/\text{s}$	密度比	相对折射指数
Al_2O_3	$0.3 \sim 0.5$	2100	2054	1.578	1627.9	1.765
TiO_2	$0.3 \sim 0.5$	3140	1840	2.362	2434.1	2.61
ZrO_2	$0.3 \sim 0.5$	7110	2700	5.349	5511.6	2.17

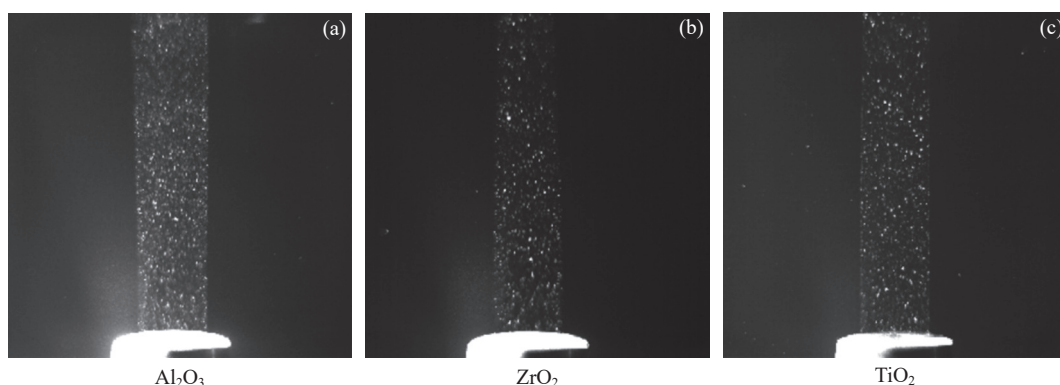


图 3 三种示踪粒子在相同试验工况下的冷态射流

Fig. 3 Three tracer particles under the same non-reacting condition

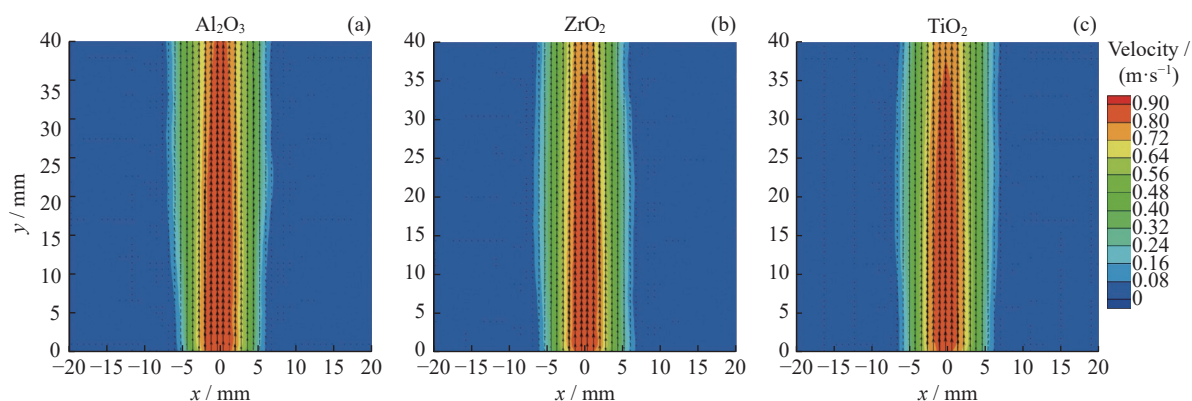


图 4 三种示踪粒子的冷态速度矢量云图

Fig. 4 Velocity vector plots of the three tracer particles under non-reacting flow field

度与主流方向一致, 未出现漩涡, 这说明该工况下流体卷吸作用不明显。

图 5(a)~(d) 是三种示踪粒子在 $y = 5\text{ mm}$, 15 mm , 25 mm , 35 mm 四个射流断面的速度分布, 图 5(e) 是 Al_2O_3 粒子在四个射流断面上的归一化速度值与高斯分布曲线。由图 5 可以看出, 三种示踪粒子在不同射流断面的流速分布趋势非常一致, 符合射

流断面上的自保性特征(高斯分布), 且流速最大值均在射流中心位置; 射流边界层速度值出现波动, 这是由于流体进入静止环境时, 与周围流体间存在速度不等的间断面, 间断面受到干扰。

图 6 给出的是三种示踪粒子沿射流中心轴线速度分布。由图 6 可见, 在相同试验工况下, 三种示踪粒子的中心轴线速度变化趋势一致, 即随着射流出口

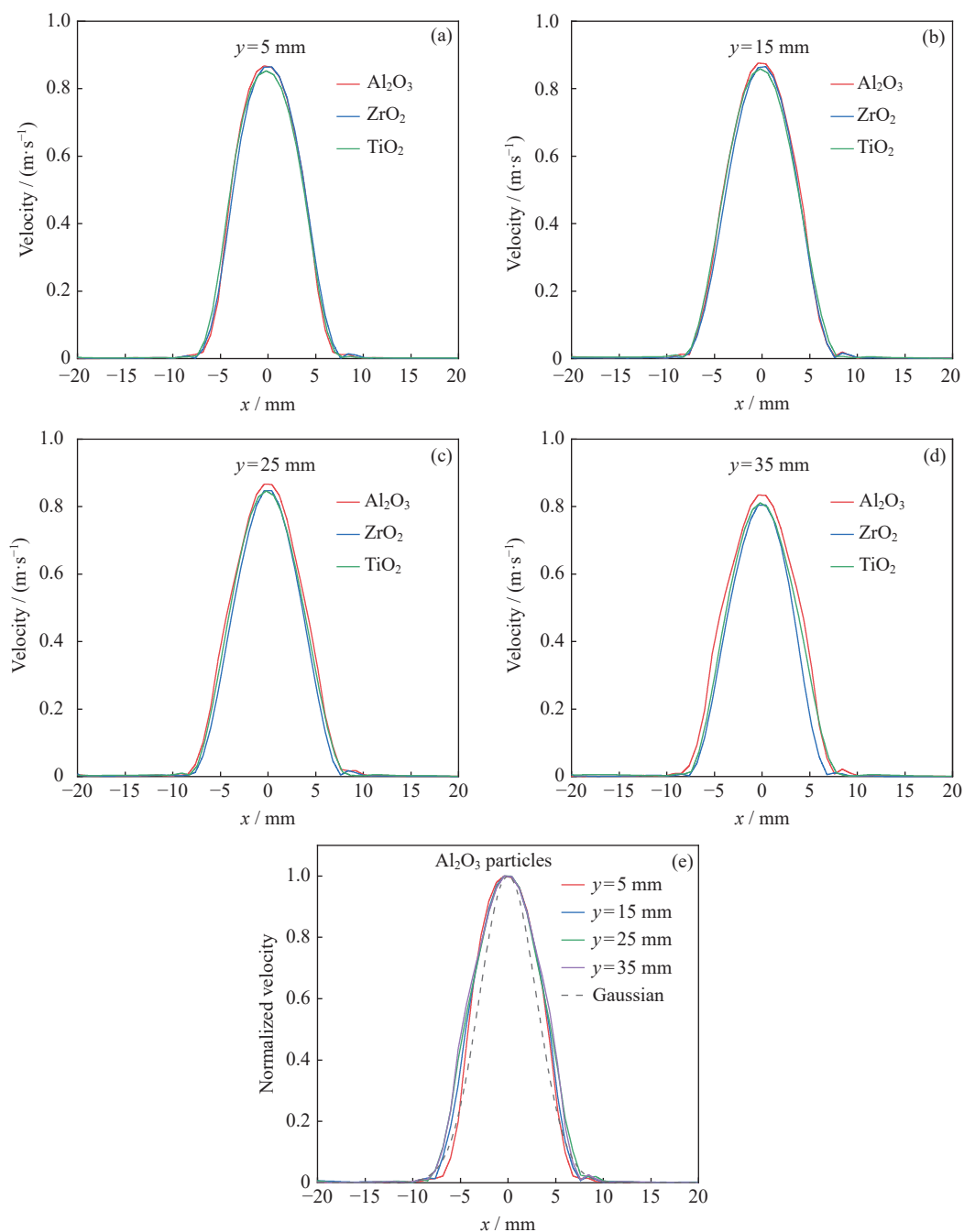


图 5 不同射流断面的速度分布与 Al_2O_3 粒子归一化速度分布

Fig. 5 Velocity profiles at different jet sections and normalized velocity of Al_2O_3 particles

距离增大,中心轴线速度呈微弱减小趋势。根据等密度气体射流理论,射流起始段中心轴线速度保持不变,而后中心轴线速度因射流间断面的卷吸和掺混作用使断面不断扩大,流速降低^[18]。由于冷态试验属于低速流动,射流的卷吸和掺混作用很小,所以射流断面宽度变化较小,速度变化很小。另外,根据粒子物理特性,粒子相对于空气的密度比越小,受重力减速作用越小,则该粒子越能维持速度初值。在冷态试验中, Al_2O_3 密度比最小, TiO_2 次之, ZrO_2 最大,因此 Al_2O_3 粒子的速度测量值比另外两种示踪粒子更接近理论出口速度值,速度幅值比更接近 1。综合粒子物理特性分析与冷态试验结果, Al_2O_3 粒子测量的速度值更接近理论值,更适合低速流场测量。

3.2 热态试验结果与分析

由于燃烧实验温度很高,火焰背景噪声大,使得高速相机光学元件容易发生像素感光饱和现象,因此必须验证连续激光 PIV 对热态试验测量的可行性。

图 7 是经过灰度处理的三种示踪粒子在预混火焰中的粒子信息场图像。由图 7 可见, ZrO_2 粒子在火焰背景下,火焰出现了过曝光,导致此区域的粒子边界无法清晰区分,不符合后处理要求; TiO_2 粒子受到燃烧局部高温(可达 1300°C)的影响,表面化学键可能在高温下发生缩合-团聚而导致粒径变大^[19],所以显示的粒子浓度较低,后处理时出现较多错误矢量;相比之下, Al_2O_3 粒子显示的分布范围最大且最均匀,散射性好,用于后处理的速度矢量连续性最好。

图 8 是采用 Al_2O_3 粒子测量得到的热态流场平均速度矢量云图与不同燃烧断面的速度分布曲线。速度矢量云图显示,预混气体经过火焰锥面后改变方

向,由竖直向上变为向两侧流动,热态流场的射流宽度约为冷态流场的 2 倍。从燃烧断面的速度分布曲线可以看到,在 $y = 1\text{ mm}$ 处,速度分布呈抛物线型分布,这是由于火焰根部的流场受温度梯度影响非常小,因此速度大小与冷态分布基本一致;在 $y = 5\text{ mm}$, 15 mm 处,速度分布呈 M 型,这是由于热态流场受到预混气体流动与温度梯度的共同作用,最大速度出现在距离射流中心 7 mm 位置处,而射流中心速度受动量减少的影响而减小;随着高度增加,预混气体流动受火焰锥面的影响逐渐减小直至消失,射流速度趋于平均,呈倒 U 型分布。

热态流场的高速区域出现在燃烧反应中心区(高温区),即 $y = 25 \sim 35\text{ mm}$ 燃烧断面中心。由连续性方程要求,有

$$\rho_u S_L A \equiv \rho_u u_u A = \rho_b u_b A. \quad (4)$$

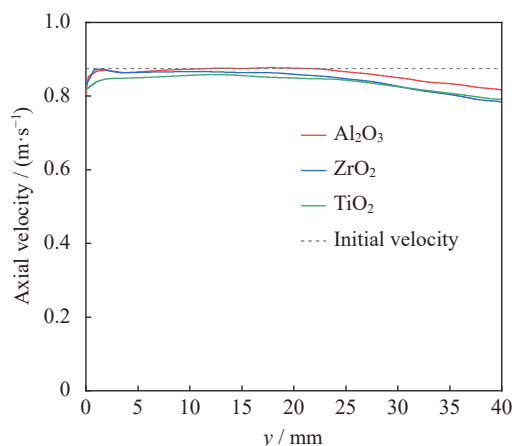


图 6 三种示踪粒子沿射流中心轴上的速度分布
Fig. 6 Velocity distributions of the three tracer particles along the central axis of the jet

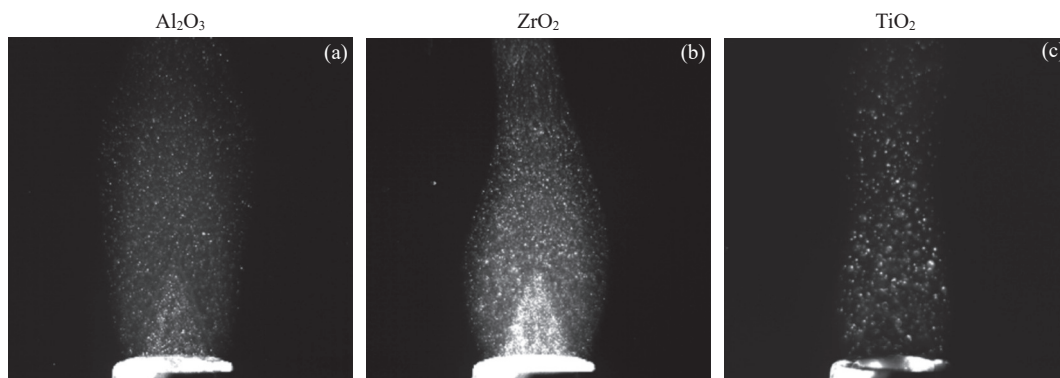
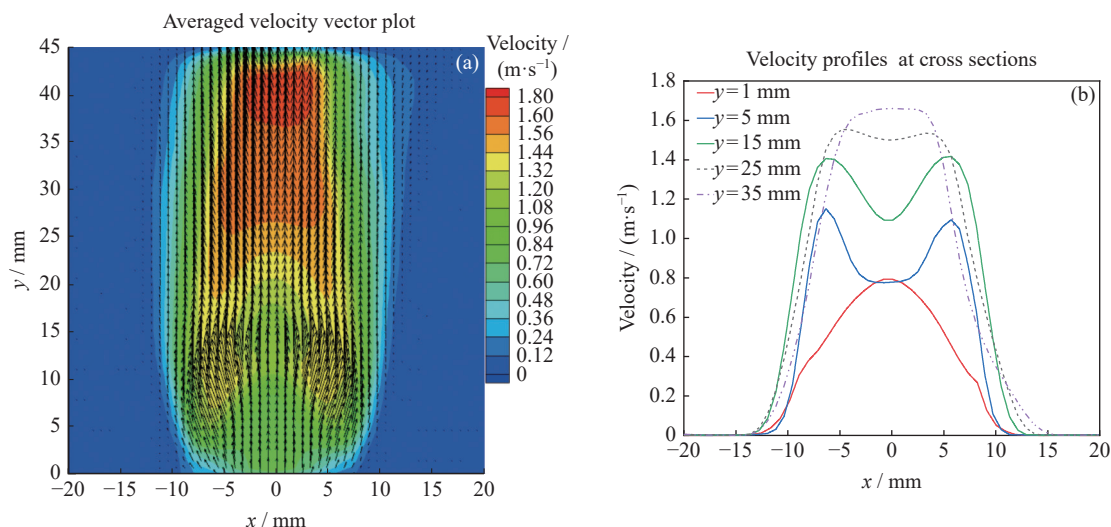


图 7 相同热态试验工况下的粒子信息场

Fig. 7 Particle information field under the same reacting condition

图8 Al_2O_3 粒子测量的热态流场Fig. 8 Velocity measured by Al_2O_3 particles

式中, S_L 为火焰传播速度, ρ_u 为未燃气体密度, u_u 为未燃气体速度, ρ_b 为已燃气体密度, u_b 为已燃气体速度, A 为区域面积。

结合式(4)分析可知,在燃烧反应中心区,燃烧产物密度小于燃气密度,所以充分燃烧区域的流体速度最大。对典型的常压烃-氧火焰,燃烧前后的气体密度比约为7,因而气流在火焰前后有明显的加速^[20],试验中热态流场速度能够达到 $1.75 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

4 结论

根据空间站燃烧科学实验系统 PIV 单元的技术要求,基于与在轨状态一致的连续激光器与相机的空间布局,搭建了地面层流圆孔射流试验平台,选取 Al_2O_3 , TiO_2 , ZrO_2 三种示踪粒子进行冷态与热态试验研究,验证了燃烧科学实验系统 PIV 单元对燃烧流场测量的功能与可行性。研究结论如下。

(1) 自主研制 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 泵浦连续激光器偏光角度合适,能够照亮被测流场主流区域;当连续激光功率为 10 W 时,可记录清晰的粒子散射场信息,实现低速流场测速。

(2) Al_2O_3 , TiO_2 , ZrO_2 三种示踪粒子在冷态试验中的流场分布趋势一致,符合射流断面上的自保性特征(高斯分布);热态试验的流场分布符合理论分析,能够验证燃烧科学实验系统 PIV 单元用于低速燃烧流场测量可行; Al_2O_3 粒子在冷态试验的速度测量方

面表现优于其他两种示踪粒子,且速度幅值比更接近于1,更适用于低速流场测量,此结论可为后续地面试验、天地对比试验提供粒子种类选择依据。

参考文献

- [1] KONG Wenjun, ZHANG Xiaoqian. Opportunities and progress of research on combustion in microgravity[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 1997, **3**(4): 424-436 (孔文俊, 张孝谦. 微重力环境下燃烧科学研究的机遇与进展[J]. *燃烧科学与技术*, 1997, **3**(4): 424-436)
- [2] ZHAO Jianfu, WANG Shuangfeng, LIU Qiang, et al. Retrospect and perspective on microgravity science in China[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2021, **41**(1): 34-45 (赵建福, 王双峰, 刘强, 等. 中国微重力科学研究回顾与展望[J]. *空间科学学报*, 2021, **41**(1): 34-45)
- [3] IRACE P H, LEE H J, WADDELL K, et al. Observations of long duration microgravity spherical diffusion flames aboard the international space station[J]. *Combustion and Flame*, 2021, **229**: 111373
- [4] LIN K C, FAETH G M, SUNDERLAND P B, et al. Shapes of nonbuoyant round luminous hydrocarbon/air laminar jet diffusion flames[J]. *Combustion and Flame*, 1999, **116**(3): 415-431
- [5] DOTSON K, SUNDERLAND P, YUAN Z G, et al. Laminar smoke points in coflow measured aboard the international space station[C]//Proceedings of the 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Orlando, Florida: AIAA, 2010
- [6] FAROUK T I, HICKS M C, DRYER F L. Multistage oscillatory "Cool Flame" behavior for isolated alkane droplet combustion in elevated pressure microgravity con-

- dition[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, **35**(2): 1701-1708
- [7] YOSHIDA Y, IWAI K, NAGATA K, *et al.* Flame-spread limit from interactive burning droplets in microgravity[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, **37**(3): 3409-3416
- [8] YOSHIDA Y, SEO T, MIKAMI M, *et al.* Temperature-field analysis of flame spread over droplet-cloud elements with interactive droplets in microgravity aboard Kibo on ISS[J]. *International Journal of Microgravity Science and Application*, 2019, **36**(3): 360303
- [9] KIMZEY J H. Skylab experiment M479 Zero gravity flammability[C]//Proceedings of the 3rd Space Processing Symposium on Skylab Results. Skylab Results: 1974: 115-130
- [10] LI Y J, LIAO Y T T, FERKUL P V, *et al.* Experimental study of concurrent-flow flame spread over thin solids in confined space in microgravity[J]. *Combustion and Flame*, 2021, **227**: 39-51
- [11] WU C J, HUANG X Y, WANG S F, *et al.* Opposed flame spread over cylindrical PMMA under oxygen-enriched microgravity environment[J]. *Fire Technology*, 2020, **56**(1): 71-89
- [12] WANG Shuangfeng, YIN Yongli. Microgravity smoldering combustion experiments aboard the China recoverable satellite SJ-8[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2008, **28**(1): 22-27 (王双峰, 尹永利. 卫星搭载聚氨酯泡沫闷烧实验[J]. *空间科学学报*, 2008, **28**(1): 22-27)
- [13] YANG Bin, QI Zongman, YANG Huinan, *et al.* Velocity measurement method based on TDLAS for combustion flow[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2015, **21**(6): 516-520 (杨斌, 齐宗满, 杨荟楠, 等. 基于TDLAS的燃烧流场速度测量方法[J]. *燃烧科学与技术*, 2015, **21**(6): 516-520)
- [14] ZHANG Zhenzhong, KONG Wenjun, ZHANG Hualiang. Design of combustion science experimental system for China space station[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2020, **40**(1): 72-78 (张振忠, 孔文俊, 张华良. 空间站燃烧科学实验系统设计[J]. *空间科学学报*, 2020, **40**(1): 72-78)
- [15] WANG Zhenan, ZHANG Yang, WU Yuxin, *et al.* Analysis on flow field of coal jet flame using PIV[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2015, **36**(6): 1356-1359 (王振南, 张扬, 吴玉新, 等. PIV对射流煤粉火焰流场特性的分析[J]. *工程热物理学报*, 2015, **36**(6): 1356-1359)
- [16] LI Zhiping. Research on the Features of Particle Tracers and Experimental Technique of Laser Particle Image Measurement[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007 (李志平. 激光粒子图像测量中示踪粒子特性及实验方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2007)
- [17] TANG Chunxiao. Study of Digital Particle Image Velocimetry Based on Multispectral Imaging[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010 (唐春晓. 基于多光谱成像的数字粒子图像测速技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2010)
- [18] PING Jun. Theoretical Basis and Application of Jet[M]. Beijing: Astronautic Publishing, 1995 (平浚. 射流理论基础及应用[M]. 北京: 宇航出版社, 1995)
- [19] ZHAO Weiwei, ZHANG Dong, SHI Qiang, *et al.* Effect of calcination temperature on the structure and photocatalytic properties of TiO_2 powder[J]. *China Science and Technology Information*, 2011(19): 72-73 (赵伟伟, 张栋, 史强, 等. 焙烧温度对 TiO_2 粉末的微结构及光催化特性的影响[J]. *中国科技信息*, 2011(19): 72-73)
- [20] TURN S R. An Introduction to Combustion: Concepts and Applications[M]. YAO Qiang, LI Shuiqing, WANG Yu, trans. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2015 (特纳. 燃烧学导论: 概念与应用[M]. 姚强, 李水清, 王宇, 译. 3版. 北京: 清华大学出版社, 2015)