

旋流火焰三维温度场与速度场的同时激光测量

张斌*, 肖立辉, 侯俊庆, 陈伟, 姜婕妤, 何燕

青岛科技大学机电工程学院, 山东 青岛 266061

摘要 燃烧诊断与流场显示领域的研究热点已延伸至研发同时满足非侵入式、多参量同步测量、定量计算、多维可视化等技术要求的显示、测量新方法。研究复杂燃烧三维温度场和速度场的同时激光测量, 表征燃烧化学反应和流场输运的重要特性。提出一种光偏折层析测温方法与粒子图像测速方法相结合的燃烧多参量场激光测量方法。设计温度场和速度场激光测量的实验系统, 获取 4 方向莫尔偏折条纹和 4 幅火焰粒子图像。同时重建与可视化旋流燃烧温度分布和速度云图、流线、涡量等流场, 并分析不同工况下的旋流火焰特性。对直接测量数据与重建结果进行对比, 验证了所提方法的有效性。

关键词 测量; 燃烧诊断; 光偏折层析; 粒子图像测速; 旋流火焰

中图分类号 O438

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.0304002

1 引言

燃烧机理研究和新型燃烧器设计均依赖于对燃烧过程和流场参数的测量与分析。近几十年来, 燃烧诊断与流场显示技术蓬勃发展, 为燃烧基础研究提供了必要的测量手段和严格的实验验证方法, 同时为燃烧效率最大化、污染最小化提供了重要的解决策略^[1-3]。燃烧诊断一直强调温度、组分浓度、密度、烟黑体积分数等标量场对理解燃烧机理的重要性; 但近年来, 随着对复杂、快速演化的流场中燃烧动力学的重视, 对速度、涡量、扩散等输运特性进行同时测量的需求日益增强。国际上, 基于各种先进的光学与激光测量理论及方法, 燃烧诊断与流场显示领域的研究热点和前沿方向已延伸至研发同时满足非侵入式、多参量同步测量、定量计算、多维可视化等要求的新方法和新技术。速度和温度作为反映化学反应和流场输运的两个重要参数, 影响着燃烧机理和燃烧动力学特性。特别是对于旋流火焰等具有复杂流场结构和演变过程的燃烧现象^[4], 温度、速度分布的同时测量成为共同诊断和调控燃烧的关键。

现代测速技术包括激光多普勒测速(LDV)、相位多普勒粒子分析(PDPA)、粒子图像测速(PIV)

等。基于多普勒效应的 LDV^[5-6] 和 PDPA^[7] 可以实现球形颗粒、液滴、气泡尺寸和速度的逐点测量, 但却无法实现全场测量, 无法获得流场结构的变化信息。PIV 克服了单点测速的局限性, 能在瞬态记录大量空间点的速度分布信息, 并可清晰地呈现流场空间结构和流动特性^[8-9]。定量测量和可视化的 PIV 技术已被成功应用于验证和评估燃烧模型, 探究燃烧流场运动规律^[10]。然而, 旋流燃烧因内部强烈的燃烧反应和复杂多变的流动结构^[11], 速度测量难度大, 关于 PIV 技术应用于该领域的研究鲜有报道。

在燃烧温度测量领域, 点测量和平面成像测量方法中主要依据的光谱分析技术在燃烧诊断中仍具有重要的价值并在持续发展^[12-14]。光学计算层析(CT)作为另一种成像策略, 可以有效弱化平面成像方法在实际测量中的缺陷。CT 成像通过获取吸收/消光系数或折射率等被测场的多方向信号积分, 结合重建算法来反演流场参量的空间分布。CT 方法与光干涉、光衍射、光谱吸收、化学发光等原理相结合, 形成了多样的流场 CT 测量技术, 近年来国际上有大量燃烧(火焰)CT 测量和可视化的成果面世。其中, 光偏折 CT 方法对光源要求不高、抗干扰性强、可定量测量; 更为重要的是, 对于高速、高温和

收稿日期: 2020-07-24; 修回日期: 2020-08-24; 录用日期: 2020-09-24

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2017MF030)、泰山学者特聘专家工程(ts20190937)

*E-mail: zb-sh@163.com

非稳态流场,光偏折 CT 方法所具有的低敏感性使其可以适用于宽广的动态测温域,在测量与显示复杂流场方面具有显著优势^[15]。

而对于燃烧多参量同时测量这一前沿热点领域,国内学者在最新的研究中基于近红外光谱开展了超声速燃烧场的多参数同时点测量^[16]。国际上,多位学者聚焦于 PIV 与平面激光诱导荧光(PLIF)技术的结合^[17-18],已开展了有意义的实验探索,但仍有一些关键问题尚未解决:使用 PLIF 技术进行低温燃烧诊断时难以确定与温度相关的光谱强度信息;现 PLIF 与 PIV 结合的测量方法仅限于二维温度速度场的诊断,尚未实现三维参量场的同时测量。CT 的成像特质使其与粒子成像方法相融合进而实现多参量同时测量成为一种极具潜力的方案。然而融合两种方法后,将有多个理论问题和技术问题需要分析解决:1)非预混旋流燃烧场的示踪粒子选择和布撒方法;2)多波长激光介入和火焰高亮背景条件下的粒子图像采集和识别;3)示踪粒子对莫尔条纹的成像影响及对偏折信息提取精度的影响;4)速度和温度同时测量的光路设计及极少方向投影条件下的 CT 重建方法等。

本工作以燃烧多参量场同时测量为目标,开展光偏折 CT 与 PIV 的集成效应研究、影响因素分析及实验方法设计,建立旋流火焰多参量测量的实验系统,实现燃烧流场三维温度场和速度场的同时定量测量与可视化。

2 速度和温度同时测量的理论与方法

2.1 PIV 原理

PIV 技术是一种由固体力学散斑法发展起来的流场测量与显示技术。PIV 原理是基于粒子速度的基本物理定义的,通过测量粒子图像中示踪粒子的位移 Δx 、 Δy (或 Δz),结合实验过程中设置的时间间隔 Δt 计算粒子速度。速度 u 、 v 的表达式分别为

$$u = \lim_{t_2 \rightarrow t_1} \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1}, \quad (1)$$

$$v = \lim_{t_2 \rightarrow t_1} \frac{y_2 - y_1}{t_2 - t_1}, \quad (2)$$

式中:粒子 A 在 t_1 时刻的坐标为 (x_1, y_1) ,在 t_2 时刻的坐标为 (x_2, y_2) 。

体 PIV 技术是一种在二维 PIV 基础上发展起来的三维速度场测量方法^[19],与二维 PIV 的主要区别在于:激光光源由片光源改为体光源,将一个流场体积内的所有示踪粒子照亮,粒子图像采样过程使

用 3 台(或 4 台)CCD 相机完成。处理图像时需要先匹配 3 个(或 4 个)二维图像中的粒子,再匹配三维体积内的粒子;根据互相关法计算其空间三维位移,从而得到三维速度分布。用于体 PIV 的三维互相关算法公式为

$$R_{12} = \frac{\sum_{i=1}^{n_x} \sum_{j=1}^{n_y} \sum_{k=1}^{n_z} I_1(i, j, k) I_2(i + \Delta i, j + \Delta j, k + \Delta k)}{\sigma_1 \sigma_2}, \quad (3)$$

式中: R_{12} 为互相关系数; I 为强度; σ 为判读体内强度的标准偏差,下标“1”和“2”表示两个时间步; i 、 j 、 k 为三维坐标系中的位置分量; n_x 、 n_y 、 n_z 分别表示判读体在 x 、 y 、 z 三个方向上的尺寸。 R_{12} 出现峰值时,得到判读体内粒子的平均位移,通过高斯拟合获得峰值位置的亚像素精度。

2.2 光偏折 CT 测温原理

光偏折 CT 测温技术通过获得多方向的投影数据来重建被测流场的温度分布。其基本原理:先将被测场分为若干个探测层面(将三维问题简化为二维问题),然后在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 的多个方向对被测场进行投影,进而获取每个层面上的积分投影数据,再利用重建算法进行反演运算,得出各层面的参量分布。

当光线沿某一方向垂直穿过平行叠栅时,偏折信号被放大,探测光线通过被测场后形成的偏折角为 α ,表达式为

$$\alpha(x, y) = \frac{2D(x, y) \tan(\theta/2)}{\Delta}, \quad (4)$$

式中: Δ 为两光栅间距; θ 为两光栅夹角; $D(x, y)$ 为莫尔条纹的位移量。将被测流场分割成 ω 个网格,设各网格的折射率为 n_p ,重建平面中第 q 条偏折光线的偏折角可以写为

$$\alpha_q \approx \sum_{p=0}^{\omega-1} A_{pq} \left(\frac{1}{n_0} \frac{\partial n_p}{\partial y} \right), \quad (5)$$

式中: A_{pq} 为第 q 条投影光线在第 p 个网格内的长度; $\partial n_p / \partial y$ 为使用四邻域算法求得的偏导数; n_0 为环境折射率(参考折射率)。使用偏折角压缩传感修正(DARRT+CS)算法^[20]进行折射率反演计算,由(5)式偏折角投影数据重建折射率分布,进而由 Gladstone-Dale 公式^[21]计算温度分布。折射率与气体密度 ρ 的关系为

$$n - 1 = \rho C, \quad (6)$$

式中: C 为 Gladstone-Dale 常数。在恒压条件下,近似将燃烧烟气视为理想气体,可推导出温度计算的

简化形式:

$$T = \frac{n_0 - 1}{n - 1} T_0, \quad (7)$$

式中: T_0 为环境温度。

2.3 速度与温度同时测量的方法设计

2.3.1 成像系统的设计

对于结构复杂且快速变化的非对称旋流燃烧流场, CT 重建需要获取 $0^\circ \sim 180^\circ$ 多方向投影采样数据。为减少多方向成像所需的激光光源和平行光栅等关键器件, 设计采用单光源分光 and 反射镜调整方向的方法, 生成 4 路探测光后, 探测光平行通过同一光栅副, 实现同时采集 4 方向的莫尔条纹阵列。为减小 PIV 光源对测温莫尔条纹成像的影响, 设计 PIV 激光方向平行于光栅副和条纹的成像屏, 且要避免照射到任何成像元件。

高亮火焰和通过流场的 CT 激光严重影响粒子成像, 特别是火焰内部的粒子难以被识别。为此在每个 PIV 相机镜头前安装具有 PIV 激光波长的带通滤波片, 有效滤除杂散光并使示踪粒子清晰成像。

2.3.2 示踪粒子的选取和布撒

PIV 中对示踪粒子的选取需要考虑多种因素: 粒子的密度越小, 在流场中的跟随性越好; 粒子直径越大, 光强分布越均匀, 与入射光成 90° 方向 (粒子图像采样方向) 上的光强也越强; 由于火焰的高温 and 避免遮挡测温成像光路, PIV 相机需要与火焰保持拍摄距离。在对 TiO_2 、 Al_2O_3 、空心玻璃珠等多种不同材质和粒径的粒子进行布撒、采样、识别后, 选取粒子成像效果最好的粒径为 $10 \mu\text{m}$ 的空心玻璃珠 (密度小、熔点高、散射性好) 作为测量用示踪粒子。

PIV 测速要求在全场均匀布撒示踪粒子, 而对于旋流燃烧场的漩涡中心等区域, 由于存在离心力、速度梯度等因素, 粒子难于布撒至核心区域。旋流空气的高流速决定了示踪粒子主要通过空气侧布撒, 由此在空气管路中设计独立的示踪粒子发生器和燃烧器的空气-粒子二次混合结构; 并将燃烧器喷嘴设计为锥台结构, 以利于粒子由外侧的旋流空气向旋流中心特别是近喷嘴处散布。

2.3.3 示踪粒子对 PIV 和 CT 成像的影响

对于 PIV 测量, 示踪粒子浓度过低, 计算单元格内识别的粒子数太少, 无法重建真实流场。相反, 当示踪粒子浓度增加, CT 探测光线通过粒子产生的衍射散射时, 图像质量下降, 条纹清晰度变差。在控制粒子浓度进行成像和分析实验时发现, 当每个计算网域 ($32 \text{ pixel} \times 32 \text{ pixel}$) 内的粒子数少于 5 时,

重建出的速度矢量杂乱无章, 不能表征真实的流场情况; 当控制单元网域内的粒子数增加到约 15 时, 重建结果中无错误矢量, 显示出清晰的流动规律, 此刻流场内的粒子使莫尔条纹的成像光强略有减弱, 但 CT 成像质量并未明显下降。对参考莫尔条纹进行关于示踪粒子影响投影信息的定量分析, 分别提取播撒粒子和无粒子流场的条纹像素坐标并进行差运算。结果显示, 仅有个别位置点出现了坐标偏移, 相应的最大偏折角为 7.0×10^{-5} 。

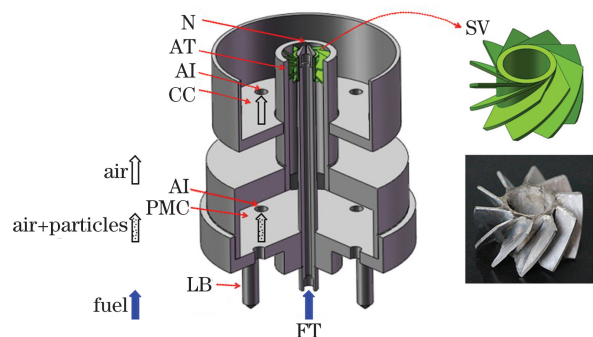
2.3.4 极少方向投影条件下的 CT 重建

对于非稳态、非对称的旋流燃烧流场, PIV 与 CT 集成的测量系统仅能获得有限方向的投影采样。本研究使用前期工作中提出的 DARRT+CS 算法进行 CT 反演。压缩传感 (CS) 的本质是由极少数投影数据重建原场, 其核心优点在于信号投影的数据量远小于传统方法所获得的数据量, 这一特质极好地契合了复杂流场 CT 的极度欠采样重建要求。该算法将偏折角修正重建技术与压缩传感理论相结合, 以待测场梯度的 l_1 范数为稀疏性先验模型, 结合最速下降法进行全变差调整, 减小温度场梯度的 l_1 范数, 并引入压缩传感权重因子对迭代过程进行优化, 有效提高偏折角修正迭代计算在极少投影数据条件下的重建精度。

3 实验装置

3.1 燃烧系统

非预混旋流燃烧器由燃料管、烧嘴、空气管、示踪粒子混合腔、伴流腔、旋流叶片等组成, 如图 1 所示。甲烷气体自底部入口向上流经内径为 6.0 mm 的燃料管, 燃烧器喷口直径为 1.0 mm 。携带示踪粒子的



AT: air tube; AI: air inlet; FT: fuel tube; N: nozzle; LB: leveling bolts; PMC: particle mixing chamber; CC: co-flow chamber; SV: swirl vanes

图 1 燃烧器结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of the burner

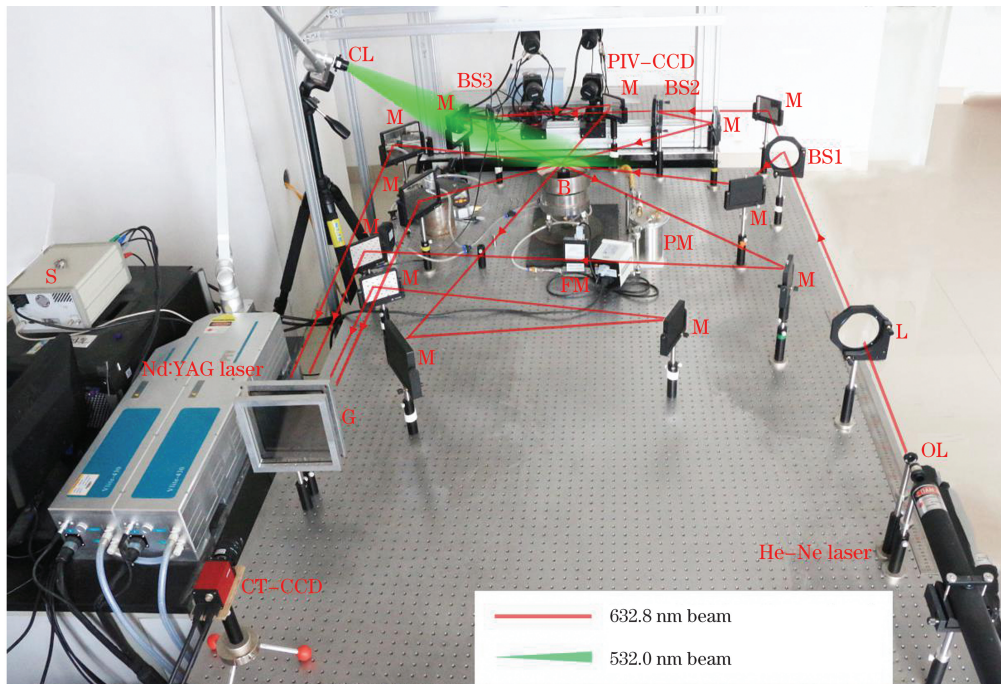
空气分 4 路进入燃烧器下部的混合腔以进一步均匀混合,随后进入内外套管间的环形通道,向上经旋流叶片后形成旋流空气。旋流轴向导叶的倾角为 45° ,内、外径分别为 10.0 mm、32.0 mm,由旋流强度公式^[22]计算得旋流数为 0.74。燃烧器上部设置有伴流腔,其内部填充钢球并覆盖金属丝网,以产生均匀的低速空气伴流。

3.2 测量系统

实验测量系统如图 2 所示。在光偏折 CT 测温部分,波长为 632.8 nm 的激光由 He-Ne 激光器发出,经扩束准直后成为直径为 65.0 mm 的光束。准直光束被 3 个分光光楔分为 4 束探测光并通过被测火焰,各光束的重建角度分别为 $30^\circ, 75^\circ, 120^\circ, 165^\circ$ 。3 个分光光楔的透反比分别为 $7:3, 7:3, 5:5$,因而 4 束探测光的光强分别占总光强的 30.0%,21.0%,24.5%,24.5%。探测光经反射镜组改变方向后形成

4 路平行光,平行光垂直通过平行放置的 Ronchi 光栅副,在投影成像屏上生成 2×2 的莫尔条纹图阵列。使用 CCD 相机(分辨率为 $1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$)同时采集投影屏上的条纹图阵列。

在体 PIV 部分,使用双脉冲 Nd:YAG 激光器(波长为 532.0 nm,脉冲频率为 15.0 Hz)作为光源。激光由导光臂引导至距离光学平台 600.0 mm 高度的位置,经 2 个垂直放置的柱面透镜扩束为圆锥体激光,从而照亮流场内播撒的示踪粒子。使用 4 台 CCD 相机(分辨率为 $2360 \text{ pixel} \times 1776 \text{ pixel}$)采集粒子图像,每个相机镜头前均安装 $(532.0 \pm 10.0) \text{ nm}$ 带通滤波片,相机的拍摄方向与激光照射方向垂直。4 台相机采集 4 组图像,每组包含 A、B 两帧图像,拍摄时间间隔为 $100.0 \mu\text{s}$ 。PIV 系统中的 4 台 CCD、CT 系统中的 1 台 CCD 与 Nd:YAG 激光器由同步器控制同时触发,同步器的精度为 1.0 ns。



BS: beam splitter; M: mirror; OL: objective lens; CL: cylindrical lens; L: lens; G: grating; B: burner; PM: particle mixer; FM: flow meter; S: synchronizer; PIV-CCD: PIV-CCD camera; CT-CCD: CT-CCD camera

图 2 实验测量系统图

Fig. 2 Experimental measurement system

4 实验结果及讨论

4.1 旋流火焰与测量实验图像

在燃烧实验开始前,对 PIV 系统和光偏折 CT 系统进行标定,获得实际尺寸与相机像素的对应关系,并采集参考莫尔条纹。实验中,首先采用热电偶和热线风速仪对火焰温度和流场速度进行直接点测

量,此过程的气路中未加入示踪粒子。使用高速相机(Photron Fastcam MINI UX100)拍摄的旋流火焰如图 3 所示,图中位置 a 和位置 b 分别为热电偶和热线风速仪测点。由图 3 可见,火焰绕喷嘴旋转,火焰表面不规则,两个突出的焰尾近似对称分布。火焰高度约为 40.0 mm,宽度约为 23.0 mm,火焰尺寸是设置后续速度场与温度场重建区域的重要参

考。随后开启 Nd : YAG 激光器和 He-Ne 激光器,使发出的激光束穿过火焰,携带示踪粒子的空气进入燃烧流场。基于示踪粒子对 PIV 和 CT 成像的影响,控制粒子发生器内的粒子装载量,使得粒子图像单元网域内的粒子数约为 15 个。同步器以

15.0 Hz 频率控制 CT-CCD 和 PIV-CCD 相机采样,拍摄 4 方向莫尔条纹图组和 4 机位示踪粒子图组,如图 4 所示。图 4(a)中标识了用于温度场重建的 8 个截面,图 4(b)中标识的虚线矩形为速度场重建区域。



图 3 旋流火焰

Fig. 3 Swirling flame

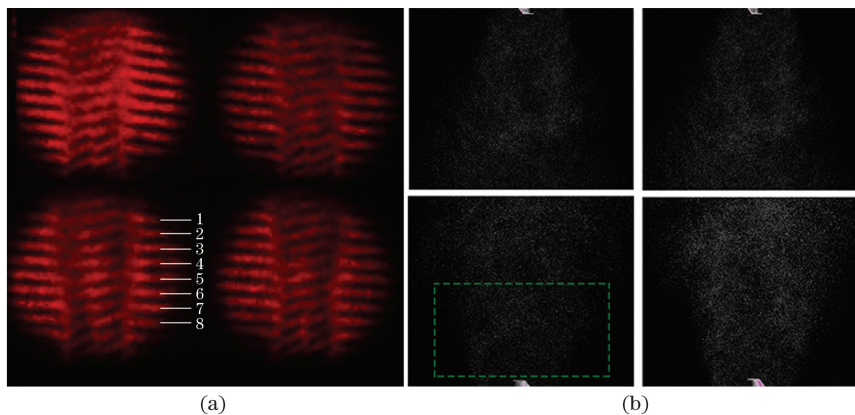


图 4 莫尔条纹与示踪粒子图像。(a)莫尔条纹;(b)示踪粒子

Fig. 4 Moiré fringe images and tracer particle images. (a) Moiré fringes; (b) tracer particles

4.2 温度场的重建与可视化

截取同一方向、像素区域尺寸对应相等的参考条纹与偏折条纹,对选择的条纹区域进行灰度处理及图像增强处理,消除莫尔条纹图中的噪声;条纹细化,对条纹进行骨架抽取,使条纹单像素化;对细化条纹进行跟踪,对偏折条纹与参考条纹位置坐标进行差值运算,计算出偏折条纹的相对偏移量;根据偏移量与偏折角的关系(4)式,计算出光线通过被测燃烧场的偏折角数据。图 5 为 4 方向的光线偏折角,每个方向包含 70 条投影光线。

将重建区域划分为 30×30 网格,使用 DARRT+CS 算法进行温度场反演,由 4 个方向上每根条纹对应的偏折角数据重建出一个横截面的二维温度分布,在选定的重建区域中计算得到 8 个火焰截面的温度分布,如图 4(a)所示。将此 8 个截面的重建数

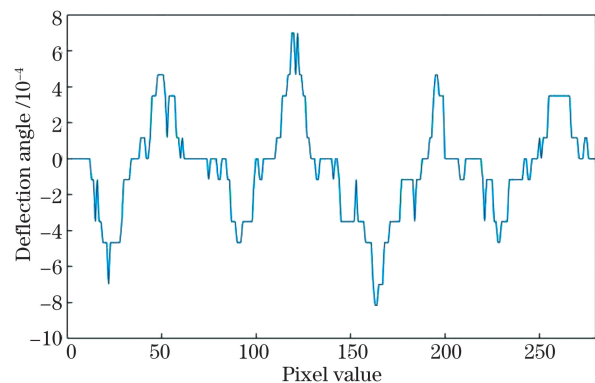


图 5 光线偏折角

Fig. 5 Light deflection angle

据耦合为三维温度值矩阵,使用 Visualization Toolkit (VTK)软件对得到的矩阵进行三维温度场 ($25.0 \text{ mm} \times 22.0 \text{ mm} \times 41.0 \text{ mm}$)可视化。图 6 为

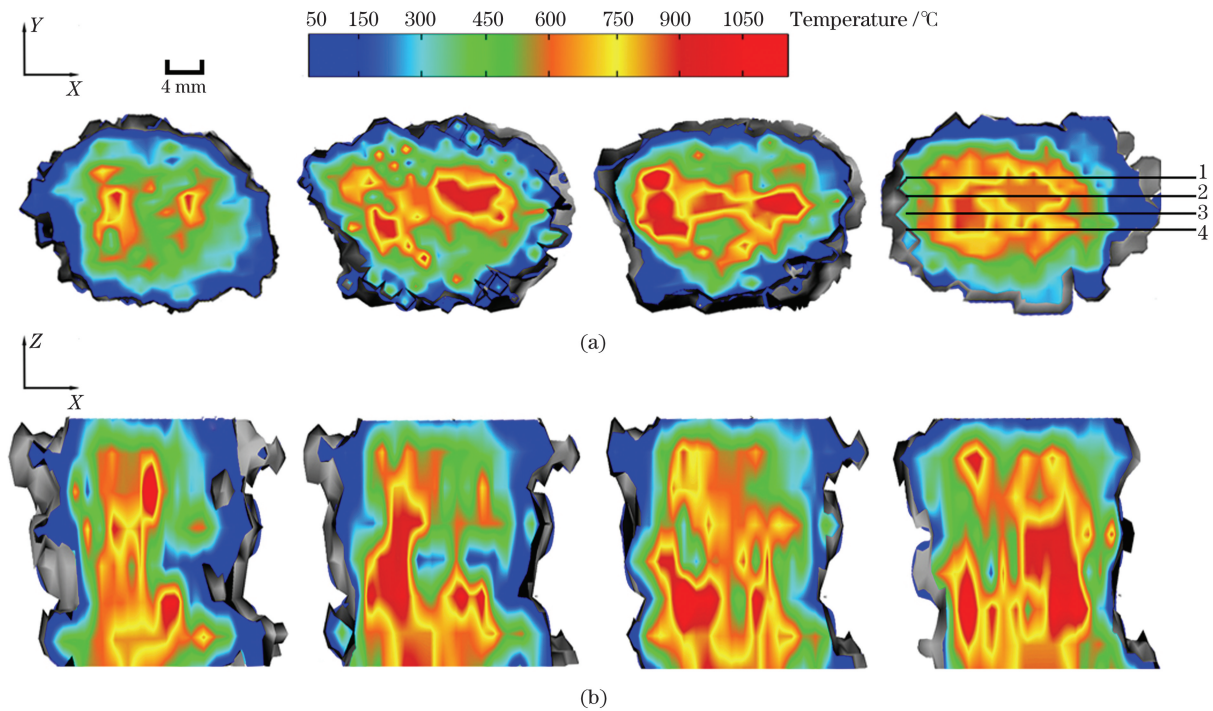


图 6 CT 重建结果。(a)横截面温度分布;(b)纵截面温度分布

Fig. 6 CT reconstruction results. (a) Temperature distributions in different cross-sections; (b) temperature distributions in different longitudinal-sections

沿燃料射流方向距喷口 12.0, 20.0, 28.0, 36.0 mm 处横截面的温度分布和 4 个标识纵截面的温度分布,重建区域的最高温度为 1143 °C。由图 6 可见,由于旋流火焰的锥形螺旋特性,形成了近似封闭或半封闭的环形高温区,表明在燃料与空气的混合界面发生了激烈的化学反应和传热传质过程。相应地,在纵截面沿射流方向出现了围绕燃料流的高温区域,随着截面与喷嘴距离的增加和下游热量的损失,火焰温度逐渐降低。

4.3 速度场的重建与可视化

在图 4(b)所示的粒子图像中筛选、判定示踪粒子,并对每帧采样中 4 幅图像(由 4 台 CCD 相机同

时拍摄)识别的粒子进行三维匹配,得到示踪粒子的空间分布。对双脉冲 A 帧和 B 帧粒子分布进行三维互相关计算,得到三维速度场。设定重建与显示区域为 100.0 mm × 50.0 mm × 100.0 mm,计算速度矢量场、等速面、涡量等势面,显示流线图。图 7 为体 PIV 重建的速度云图,同时显示了 XY、XZ、YZ 截面的速度分布(三维速度场以 Z 轴代表物理空间竖直方向)、速度值为 0.75 m/s 的等速面(红色曲面)与涡量值为 0.6 s⁻¹ 的等涡面(绿色曲面)。在 XY 平面增加了流线图的显示,如图 7(b)所示,清晰地呈现了燃烧流场的旋流效应,红色等速面显示的两个近似对称的突出焰尾也与图 3 的火焰图像相对应。

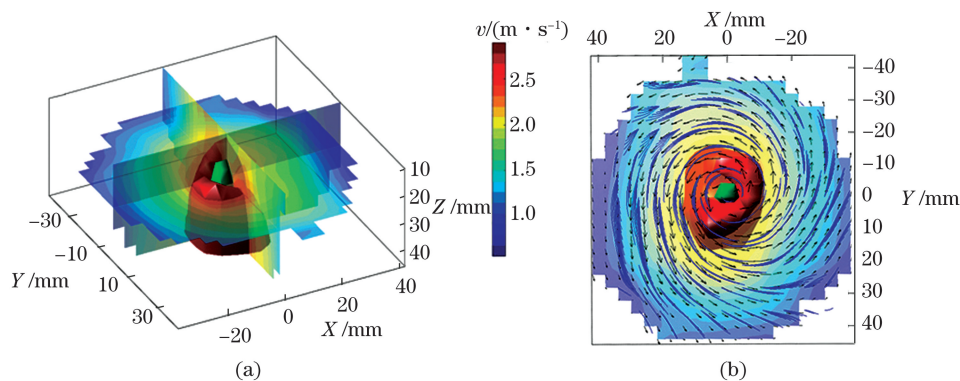


图 7 体 PIV 重建结果。(a)不同截面的速度云图和等速面;(b)流线图

Fig. 7 PIV reconstruction results. (a) Velocity nephogram on different sections and isovelocity surface; (b) streamline diagram

图 8 显示了燃烧流场不同横截面和纵截面的速度分布。图 8(a) 清晰地呈现出涡核边缘的高速区和涡核中心的低速区。在涡核之内, 速度随涡核直径增大而增大; 涡核之外, 速度随着离涡核中心的距离增加而逐渐减小。图 8(b) 纵向截面上的速度分布显示了燃烧从上游到下游的速度变化, 速度云图呈 M 形分布。出现这些现象的原因是, 由于卷吸效

应, 旋流空气穿透火焰面进入燃气侧进行反应, 在涡核边缘, 高速区旋流气流与燃气发生明显掺混, 输运特性最为显著, 在此区域反应最为剧烈, 火焰表现为不稳定振荡。在从燃烧器喷嘴到下游的燃烧流场发展过程中, 速度梯度的存在导致涡核破裂, 涡核对燃烧流场下游的影响逐渐减弱, 从而导致轴向速度(动量)逐渐衰减。

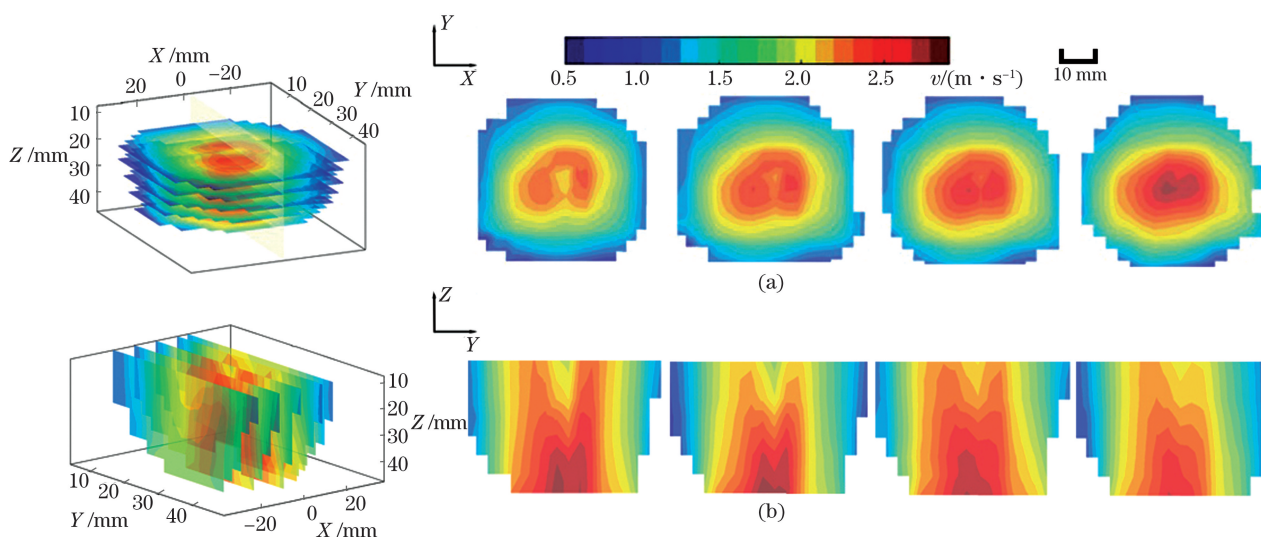


图 8 重建的速度分布。(a)横截面速度分布;(b)纵截面速度分布

Fig. 8 Reconstructed velocity distributions. (a) Velocity distributions in different cross-sections; (b) velocity distributions in different longitudinal-sections

对比横截面上的图 6(a) 温度分布和图 8(a) 速度分布, 在距离喷嘴不同高度的横截面上, 高速区和高温区均呈现相似的封闭或半封闭环形结构, 高速区环形半径大于高温区半径, 即高速区位于高温区外围。由图 8(b) 可知, 高速区靠近喷嘴, 涡核的发展和破碎影响了组分输运, 从而导致速度场由中心流区向周边环形高速区演化。对比图 6(b) 和图 8(b) 可以看出, 沿射流方向的高温区与高速区并不重合, 高温区位于相对下游的位置。这些现象解释了流场演变和燃烧反应的过程: 空气带动燃料在喷嘴外进行旋流运动, 在环形高速区内侧, 燃料与空气充分混合并发生化学反应, 激烈的燃烧过程中产生大量的光和热, 形成旋流高温区, 而旋流中心和涡核外区域的速度和温度较低。

4.4 误差分析

实验过程中, 温度测量的误差来源主要有: 燃烧流场中播撒的示踪粒子会吸收火焰的部分热量, 使燃烧流场的温度降低; 示踪粒子的加入与 Nd:YAG 激光器脉冲时的散射光会增加莫尔条纹的背景噪声, 导致莫尔条纹信息提取精度受到影响。速

度测量的误差来源主要有: 尽管示踪粒子有较好的跟随性, 但示踪粒子与流场之间必然存在速度差, 这是 PIV 的系统误差; 示踪粒子的播散均匀程度也是影响因素之一, 被测流场不同位置处的示踪粒子数量不同, 则在相同尺寸诊断区间内的粒子识别、矢量的互相关计算也有差异。

使用热电偶与热线风速仪对多参量测量系统的重建结果进行验证, 对热电偶在温度测量点测量的数据与光偏折 CT 测温方法在对应位置(如图 3 的 a 点)测量的重建数据进行对比, 对热线风速仪在速度测量点测量的数据与体 PIV 方法在相应位置(如图 3 的 b 点)测量的重建数据进行对比。根据旋流场瞬时变化快的特点, 对比验证时不仅要控制工况一致, 而且在同一测点取 5 次测量的平均值作为对比测量数据。结果表明, 光偏折 CT 测温值与热电偶测量值之间的相对误差约为 6.9%, 体 PIV 测量值与热线风速仪测量值之间的相对误差约为 3.3%。

5 结 论

建立一种复杂燃烧流场多参数同时激光测量的

新方法和系统,将光偏折 CT 原理与 PIV 原理相结合,实现了旋流火焰三维温度场、速度场及涡量场的同时测量与可视化,实验结果清晰地呈现了旋流火焰特性,并以此为基础,分析了温度与速度耦合对燃烧流场产生的影响规律。本研究证实了定量、多维、可视化诊断复杂流场的可行性和有效性,建立的流场多参量同时测量方法有望为理解复杂流动现象、控制燃烧过程、研发新型动力装置提供重要的基础理论依据和应用研究支持。

参 考 文 献

- [1] Hoinghaus K K, Jeffries J B. Applied combustion diagnostics[M]. Liu J R, Ye J F, Tao B, et al, Transl. Beijing: National Defense Industry Press, 2017: 169-187.
Hoinghaus K K, Jeffries J B. 应用燃烧诊断学[M]. 刘晶儒, 叶景峰, 陶波, 等, 译. 北京: 国防工业出版社, 2017: 169-187.
- [2] Kan R F, Xia H H, Xu Z Y, et al. Research and progress of flow field diagnosis based on laser absorption spectroscopy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(9): 0911005.
阚瑞峰, 夏晖晖, 许振宇, 等. 激光吸收光谱流场诊断技术应用研究与进展[J]. 中国激光, 2018, 45(9): 0911005.
- [3] Aldén M, Bood J, Li Z S, et al. Visualization and understanding of combustion processes using spatially and temporally resolved laser diagnostic techniques [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(1): 69-97.
- [4] Candel S, Durox D, Schuller T, et al. Dynamics of swirling flames [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2014, 46(1): 147-173.
- [5] Mychkovsky A G, Ceccio S L. LDV measurements and analysis of gas and particulate phase velocity profiles in a vertical jet plume in a 2D bubbling fluidized bed part III: the effect of fluidization [J]. Powder Technology, 2012, 220: 37-46.
- [6] Li Y Z, Li T, Zhang H T, et al. LDV measurements of particle velocity distribution and annular film thickness in a turbulent fluidized bed [J]. Powder Technology, 2017, 305: 578-590.
- [7] Kim H, Tongchai S, Lim O. A study on the particle size and velocity profile on a gasoline port injector using a phase Doppler particle analyzers (PDPA) [J]. Energy Procedia, 2018, 145: 374-380.
- [8] Ergin F G, Olofsson J, Petersson P, et al. A hybrid phase boundary detection technique for two-phase-flow PIV measurements [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2020, 74: 101776.
- [9] Luan K P, Ye J F, Wang S, et al. Flow field measurements in gain zone of XeF (C-A) gas laser based on particle image velocimetry [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(2): 0204007.
栾昆鹏, 叶景峰, 王晟, 等. 基于粒子图像测速的 XeF(C-A)气体激光器增益区流场测量[J]. 中国激光, 2019, 46(2): 0204007.
- [10] Zhang Y L, Luo Q, Ma Z, et al. Flow field investigation in single-dome combustor using particle image velocimetry [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2018, 50(4): 484-493.
张亿力, 罗谦, 马柱, 等. 单头部燃烧室流场 PIV 试验测量[J]. 南京航空航天大学学报, 2018, 50(4): 484-493.
- [11] Zhou Y H, Li Y C, Jiang H P, et al. Experimental studies on flame instability and combustion limit of premixed ammonia swirl combustion [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2018, 39(7): 1592-1597.
周永浩, 李艳超, 姜海鹏, 等. 氨气预混旋流燃烧火焰稳定性及燃烧极限研究[J]. 工程热物理学报, 2018, 39(7): 1592-1597.
- [12] Zhang B Q, Xu Z Y, Liu J G, et al. Absorption model of wavelength modulation spectroscopy in combustion flow field [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(7): 0711001.
张步强, 许振宇, 刘建国, 等. 燃烧流场波长调制光谱吸收模型的研究[J]. 中国激光, 2019, 46(7): 0711001.
- [13] Zeng H, Ou D, Chen L, et al. Combined tunable diode laser absorption spectroscopy and monochromatic radiation thermometry in ammonium dinitramide-based thruster [J]. Optical Engineering, 2018, 57(2): 026106.
- [14] Zhang J F, Chen L H, Yu J H, et al. Detection of polycyclic aromatic hydrocarbons in diffusion flame of propane by laser induced fluorescence [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(4): 0411002.
张健夫, 陈玲红, 余佳涵, 等. 丙烷扩散火焰中多环芳烃的激光诱导荧光测量研究[J]. 中国激光, 2020, 47(4): 0411002.
- [15] Zhang B, Liu Z G, Zhao M M. Three-dimensional dynamic visualization of premixed flame based on optical deflection tomography [J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2015, 26(10): 1947-1952.
张斌, 刘志刚, 赵敏敏. 预混燃烧火焰的光偏折层析三维动态可视化[J]. 光电子·激光, 2015, 26(10): 1947-1952.
- [16] Qu D S, Fan H J, Liu L W, et al. Measurement of gas parameters in supersonic combustion field based

- on near-infrared spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(3): 0330001.
- 屈东胜, 樊宏杰, 刘连伟, 等. 基于近红外光谱的超声速燃烧场气体参数测量研究[J]. *光学学报*, 2020, 40(3): 0330001.
- [17] Jeong C, Bae J, Kim T, et al. Investigation of flashback characteristics coupled with combustion instability in turbulent premixed bluff body flames using high-speed OH-PLIF and PIV[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2017, 36(2): 1861-1868.
- [18] Milton-McGurk L, Williamson N, Armfield S W, et al. Experimental investigation into turbulent negatively buoyant jets using combined PIV and PLIF measurements[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2020, 82: 108561.
- [19] Cierpka C, Kähler C J. Particle imaging techniques for volumetric three-component (3D3C) velocity measurements in microfluidics [J]. *Journal of Visualization*, 2012, 15(1): 1-31.
- [20] Zhang B, Zhao M M, Liu Z G, et al. Flame four-dimensional deflection tomography with compressed-sensing-revision reconstruction[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 83: 23-31.
- [21] Zhang B, Wu Z H, Zhao M M. Deflection tomographic reconstructions of a three-dimensional flame structure and temperature distribution of premixed combustion[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(6): 1341-1349.
- [22] Huang Y, Yang V. Dynamics and stability of lean-premixed swirl-stabilized combustion[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2009, 35(4): 293-364.

Simultaneous Laser Measurement of Three-Dimensional Temperature and Velocity Fields in Swirling Flame

Zhang Bin*, Xiao Lihui, Hou Junqing, Chen Wei, Jiang Jieyu, He Yan

College of Electromechanical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266061, China

Abstract

Objective Combustion mechanism research and new burner design rely on the measurement and analysis of important parameters such as temperature, velocity, and composition of the combustion process. Combustion laser diagnostic technology provides the advantages of being nonintrusive and highly precise, providing both real-time results as well as high temporal and spatial resolutions. In recent decades, combustion diagnosis methods based on laser and optical technology have been developed vigorously. Combustion diagnosis has always emphasized the importance of scalar fields such as temperature, component concentration, density, and soot volume fraction to understand the combustion mechanism. However, with the emphasis on combustion dynamics in complex and rapidly evolving flow fields in the recent years, the demand for the measurement of transport characteristics such as velocity, vorticity, and diffusion is increasing. As two important parameters that reflect chemical reactions and flow field transport, velocity and temperature affect combustion mechanism and combustion dynamics. Therefore, simultaneous measurement and visualization of the two parameters become crucial to characterize and understand complex combustion.

Methods Herein, a measurement technique coupled with deflection tomography and particle image velocimetry (PIV) is proposed to obtain the three-dimensional (3D) temperature and velocity fields of swirling combustion. PIV overcomes the limitation of single-point velocity measurement and enables two-dimensional (2D) or even 3D velocity field measurements. PIV records velocity distributions from numerous spatial points under certain transient conditions and provides abundant flow field spatial structures and flow characteristics. Deflection tomography using Moiré technology is known for its simple devices, wide temperature-measurement range, and a low requirement for mechanical stability. Deflection tomography is considered suitable for the measurements of high temperature and high flow-velocity fields.

A combustion system is developed to generate a nonpremixed swirling flame. A hybrid imaging system is designed for the simultaneous sampling of Moiré fringes and particle images (Fig. 2). Particle image acquisition and particle recognition were realized under a flame high brightness background. The effects of the particle size and concentration of tracer particles on deflection tomography and PIV imaging are studied, and the optimum particle

parameters are determined.

Results and Discussions The PIV and deflection tomography systems are experimentally calibrated to obtain the correspondence between the actual size and the camera pixels. Direct measurement is performed prior to the laser measurement. A thermocouple and a hot-wire anemometer are used for point measurements of the combustion temperature and velocity. Then, the laser beams emitted from the Nd:YAG for PIV and He-Ne lasers for deflection tomography are passed through the flame. Fringe patterns are obtained in four view angles, and the deflection angles are extracted. The deflection angle revision reconstruction technique is used to reconstruct the temperature distributions on different cross sections. Visualization technology is then employed to generate a 3D temperature field (Fig. 6). Four CCD cameras capture the particle images illuminated by a volume light source. The tracer particles in four particle images obtained are then screened, identified, and matched. A 3D cross-correlation calculation is performed on the particle distributions of the A- and B-frame images generated through the double pulses to obtain a 3D velocity field. Then, the isovelocity surface, constant vorticity surface, and velocity streamlines are visualized simultaneously (Fig. 7 and Fig. 8). The relative error of the temperature between the reconstruction value and the thermocouple measurement is 6.9%, and the relative error of the velocity between the reconstruction value and the anemometer measurement is 3.3%. The factors affecting the measurement results are analyzed. The swirling combustion characteristics are analyzed based on the quantitative measurement and visualization of parameter distributions. The evolution of the flow field and the combustion reaction process are explained.

Conclusions A multitechnology integrated method for the multiparameter measurement of swirling combustion was constructed herein. PIV and deflection tomography are combined for the simultaneous measurement and visualization of 3D temperatures and velocity fields. Fringe patterns are obtained in four view angles using a Moiré deflectometer to reconstruct the temperature distributions in different cross sections. Visualization technology is used to generate a 3D temperature field. The particle images illuminated by a volume light source are captured using four CCD cameras to reconstruct the velocity distribution. Furthermore, the isovelocity surface, isosurface of vorticity magnitude, and velocity streamlines are visualized simultaneously. The swirling combustion characteristics are analyzed on the bases of quantitative measurement and visualization of the parameter distributions. The validity of the experimental results is verified via direct point measurements, and the measurement errors are then discussed.

Key words measurement; combustion diagnosis; optical deflection tomography; particle image velocimetry; swirling flame

OCIS codes 120.1740; 120.6780; 120.7250