

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2026.03.03

基于飞秒激光诱导氰基发光技术的边界层速度测量

李晓峰¹, 鲁政², 武腾飞^{1,3}, 朱志峰¹, 张磊¹, 李博², 高强^{2*}

(1. 中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095;

2. 天津大学 先进内燃动力全国重点实验室, 天津 300350; 3. 北京理工大学 光电学院, 北京 100081)

摘要: 针对现有边界层流场速度测量技术难以实现高时空分辨测量的问题, 本研究团队提出飞秒激光诱导氰基化学发光测速技术(Femtosecond Laser-Induced Cyano Chemiluminescence Speed Measurement Technique, FLICC), 利用飞秒激光在甲烷/氮气混合流场中产生光丝, 诱导产生高强度、长寿命的氰基自由基CN(*B-X*)荧光作为示踪标记, 提升信号质量并扩展时间追踪窗口, 实现边界层内速度场的高精度测量。实验结果表明: FLICC能够有效适应复杂流动环境, 成功实现了对边界层区域低流速流场的高时空分辨测量, 速度测量下限下探至5 m/s, 为流体力学和航空航天研究提供了一种新的高精度流场速度诊断手段。

关键词: 飞秒激光; 激光诱导化学发光; 复杂流动环境; 边界层测速; 荧光示踪标记; 光谱分析; 高时空分辨测量; 流体力学

中图分类号: TB9; O43

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795 (2026) 03-0015-07

Boundary layer velocity measurement based on femtosecond laser-induced cyano luminescence

LI Xiaofeng¹, LU Zheng², WU Tengfei^{1,3}, ZHU Zhifeng¹, ZHANG Lei¹, LI Bo², GAO Qiang^{2*}

(1. AVIC Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China; 2. State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 3. School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In response to the difficulty of achieving high spatiotemporal resolution measurements of boundary layer flow velocity using existing techniques, the femtosecond laser-induced cyano chemiluminescence speed measurement technique (FLICC) has been proposed. This technique employs femtosecond laser pulses to generate filaments in a methane/nitrogen mixed flow field, inducing intense and long-lived cyano radical CN (*B-X*) fluorescence as a tracer marker, thereby enhancing signal quality and extending the temporal tracking window to enable high-precision velocity measurements within the boundary layer. Experimental results demonstrate that the FLICC technique can effectively adapt to complex flow environments and successfully achieve high spatiotemporal resolution measurements of low-velocity flow fields in the boundary layer region, with the lower limit of velocity measurement reaching as low as 5 m/s. This provides a new high-precision diagnostic tool for flow field velocity measurements in fluid dynamics and aerospace research.

Key words: femtosecond laser; laser-induced chemiluminescence; complex flow environment; boundary layer velocimetry; fluorescent tracer marker; spectral analysis; high spatiotemporal resolution measurement; fluid mechanics

收稿日期: 2025-11-11; 修回日期: 2026-02-24; 录用日期: 2026-03-02; 发表日期: 2026-06-28

基金项目: 国家“十四五”计量技术基础科研项目(JSJL202205XXXX)

引用格式: 李晓峰, 鲁政, 武腾飞, 等. 基于飞秒激光诱导氰基发光技术的边界层速度测量[J]. 计测技术, 2026, 46(3): 15-21.

Citation: LI X F, LU Z, WU T F, et al. Boundary layer velocity measurement based on femtosecond laser-induced cyano luminescence[J]. Metrology & Measurement Technology, 2026, 46(3): 15-21.



0 引言

边界层流场作为紧贴物体表面的关键流动区域,其速度分布的精确测量一直是流体力学研究及工程应用中的核心问题与难点所在^[1-2]。该区域的流动特性,包括从层流至湍流的转捩过程^[3]、边界区显著的速度梯度^[4],以及由此引发的壁面摩擦阻力与热交换效应,直接决定了飞行器、水下航行器等装备的气动/水动性能、能量效率及运行稳定性^[5]。深入理解并精确获取边界层内的速度结构,已成为优化设计、提升系统效能及突破现有技术瓶颈的关键前提。

然而,边界层速度场的高分辨力、非接触测量在实际操作中面临严峻挑战^[6]。该区域一般厚度极薄,速度梯度很大,近边界区域往往有复杂的结构,传统接触式探针(如皮托管)会对流场产生明显的干扰^[7];而基于示踪粒子的光学测量方法,例如粒子图像测速技术(Particle Image Velocimetry, PIV),在近壁区域受限于粒子的跟随性、分布均匀性和壁面反射干扰等问题,在边界层^[8-9]的测量精度很难得到保证。因此,迫切需要发展能够实现无干扰、高时空分辨力捕捉边界层内精细速度分布的测量手段。

飞秒激光电子激发标记测速技术(Femtosecond Laser Electronic - Excitation Tagging Speed Measurement Technique, FLEET)是一种基于飞秒激光与介质相互作用产生标记点的非接触式瞬态测速方法。该技术最初由 MILES 等人^[10]于2011年提出,其基本原理:将飞秒激光脉冲紧密聚焦于空气中,仅需单束激光即可激发空气中氮分子至特定电子能级,通过探测其所发出的荧光信号的时空演化来实现流速的定量测量。近年来,随着激光技术与光学诊断方法的不断进步, FLEET 技术已被成功应用于多种复杂流动环境,包括可压缩流、湍流边界层以及燃烧场等,并取得了一系列有价值的实验成果^[11-14],展现出良好的适用性与发展潜力。

传统的 FLEET 技术在实际应用中也面临着一些挑战:其所依赖的氮气荧光信号强度有限、寿命较短(通常为纳秒量级),在低信噪比条件下及长时间跟踪测量场景中,该技术的应用受到一定限制。

针对上述问题,采用一种改进的速度测量技术——飞秒激光诱导氰基化学发光测速技术(Femtosecond Laser-Induced Cyano Chemiluminescence Speed Measurement Technique, FLICC)^[15-16]。在氮气环境中掺入少量甲烷作为种子气体,利用飞秒激光光丝作用诱导产生氰基自由基 CN,并激发其产生强烈的化学发光。对甲烷/氮气混合流场的飞秒激光激发荧光光谱进行测量,确认 CN 自由基的典型谱线。选择合适的甲烷浓度,在提升信号强度的同时延长荧光寿命。开展实验分析低速、长时间延迟条件下近壁面分子标记的状态,探索 FLICC 技术在低流速及复杂近壁面环境下的测量边界与约束条件,为推动边界层流场速度高精度测量技术发展提供借鉴。

1 实验原理及装置

1.1 实验原理

FLICC 本质上是利用非线性光学效应与光化学反应机制实现流场诊断的技术,通过高能飞秒激光脉冲在流场中诱导光丝化,经多光子解离电离过程原位生成激发态示踪分子(CN 自由基);示踪分子跟随流体进行拉格朗日运动并辐射长寿命荧光,利用带有时序控制的增强型电荷耦合器件(Intensified Charge Coupled Device, ICCD)相机捕捉其在特定延迟时间内的位移演化;最终通过图像处理算法解算位移矢量,从而实现对流场的高时空分辨、无干扰精确测量。分子标记示踪测速原理如图1所示。

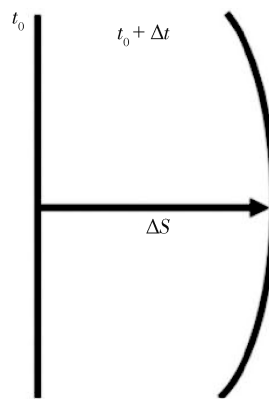
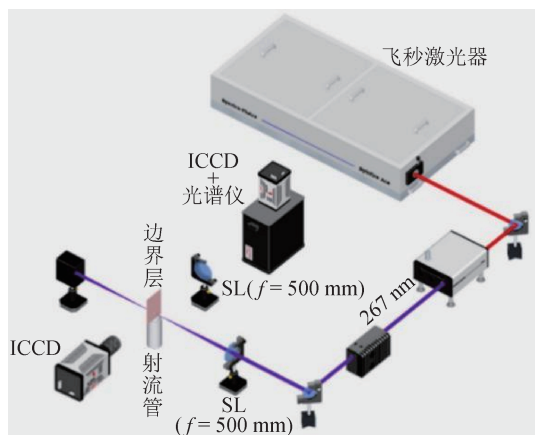


图1 分子标记示踪测速原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of molecular tagging velocimetry

1.2 实验装置

甲烷/氮气 FLICC 光谱及边界层流场速度测量实验装置如图 2 所示。钛蓝宝石飞秒激光器经三倍频模块倍频后, 将中心波长为 800 nm、单脉冲能量为 4 mJ 的飞秒激光脉冲转化为中心波长为 267 nm、单脉冲能量为 280 μ J 的激光脉冲。转换后的激光脉冲在待测流场区域经透镜〔焦距(Focal Length, FL) $f=500$ mm〕聚焦后生成丝状离子体, 该丝状等离子体置于流场出口正上方 2 mm 的位置。流场产生于内径为 10 mm 的自制拉瓦尔喷管, 流场中心位置放置带孔平板以形成边界层流场, 孔直径为 2 mm, 等离子体通道从孔中心穿过。流场气氛为甲烷/氮气混合气, 流速通过质量流速计控制。



注: 增强型电荷耦合器件(Intensified Charge-Coupled Device, ICCD)

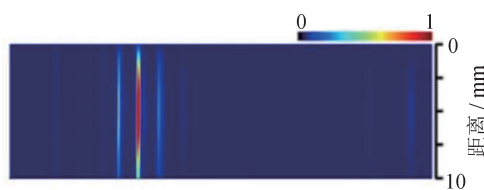
图2 甲烷/氮气 FLICC 光谱及边界层流场速度测量实验装置

Fig. 2 Experimental setup for measuring methane/nitrogen FLICC spectrum and boundary laminar flow field velocity

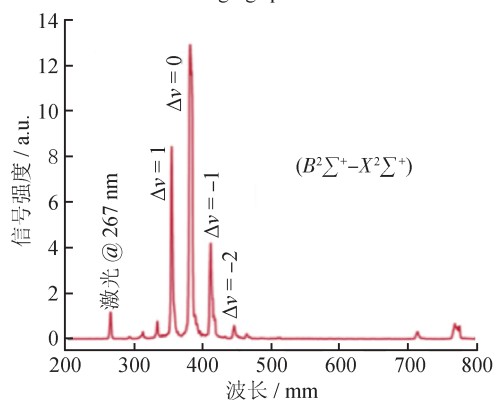
飞秒激光等离子体光丝会诱导化学反应, 在甲烷/氮气流场中产生荧光信号。将光谱仪(型号为 ACTONSP-2300i)的入射狭缝宽设置为 100 μ m, 并使其方向与流向平行, 以获得沿流场速度方向的空间分辨光谱。此时, 透过一个焦距为 100 mm 的透镜, 荧光信号被成像于狭缝中。分子标记的荧光信号经光栅(光栅参数为 300 g/mm, 闪耀波长为 300 nm)分光后, 由光谱仪出口端连接的 ICCD 摄像机(型号为 PIMAX4: 1024i)进行拍摄获取。激光激发流场中的标记分子, 在经过一段精确的延迟时间后, 检测分子标记因流场运动而产生的位移, 根据位移与时间的关系确定流速。

2 实验结果

飞秒激光聚焦后, 会在含有 500 mg/m³ 甲烷的氮气流场中产生强烈的荧光发射。实验中设置相机门宽为 100 μ s, 积分 500 次。267 nm 飞秒激光光解诱导下的 CN 化学发光光谱如图 3 所示, 其中, 图 3(a)中标注 0 和 1 的颜色条为归一化后无量纲的相对强度, 用于标定颜色与强度的对应关系。



(a) 成像光谱仪拍摄的空间分辨光谱
(a) Spatial resolution spectra captured by an imaging spectrometer



(b) 图3(a)的纵向强度积分
(b) Longitudinal strength integral of Fig.3 (a)

图3 267 nm 飞秒激光光解诱导下的 CN 化学发光光谱

Fig.3 267 nm femtosecond laser photodissociation-induced CN chemiluminescence spectrum

由图 3 可知: 在含有 500 mg/m³ 痕量甲烷的氮气流场中, 由 267 nm 飞秒激光激发产生的荧光信号主要来源于 CN($B-X$) 的能级跃迁。由于流场初始成分仅包含 CH₄ 与 N₂, 并不存在 CN 自由基, 因此可以推断, CN 源自 267 nm 激光光解 CH₄ 和 N₂ 后所产生的分子或原子碎片之间发生的化学反应。另外, 由于 267 nm 波长并不与 CN 的任何固有能级共振, 处于 B 态的 CN 由化学反应直接生成, 或通过周围分子、原子或自由电子之间的非弹性碰撞过程激发产生。综合分析表明: 实验中观测到的 CN($B-X$) 荧光信号来源于 267 nm 飞秒激光诱导的化学反应过程。在所有谱带中, 振动能级 $\Delta v=0$ 的

振动跃迁发光强度最高。具体识别出的谱线包括：358 nm 处对应于 $\text{CN}(B^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Sigma^+)(\Delta v = 1)$ 跃迁，388 nm 处对应于 $\text{CN}(B^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Sigma^+)(\Delta v = 0)$ 跃迁，415 nm 处对应于 $\text{CN}(B^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Sigma^+)(\Delta v = -1)$ 跃迁。其中，388 nm 处的 $\text{CN}(B^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Sigma^+)(0, 0)$ 带信号最强，358 nm 谱线次之，415 nm 谱线相对最弱。值得注意的是：飞秒激光在痕量甲烷掺杂的氮气等离子体中诱导的发光信号强度，远高于在纯氮气等离子体中的信号。这一增强现象在纳秒激光激发的等离子体实验中也曾被观测到，进一步说明甲烷引入的 CN 对化学发光过程具有显著的增强作用^[17]。

荧光信号的寿命在测速实验中对速度测量范围的影响是决定性的。在飞秒激光激发标记分子后，发光分子会随流场移动。实验中，必须为相机设定一定的延迟时间再进行拍摄，以便捕捉荧光标记的位移。延迟时间越长，在相同位移条件下可测量的最低流速越低，因此，荧光寿命直接决定了速度测量的有效动态范围。为了明确荧光寿命特性，系统研究了飞秒激光在痕量甲烷掺杂的氮气等离子体中诱导 CN 发光的动力学过程，并根据时间的不同测量了 FLICC 信号在不同 CH_4 浓度下衰减的规律。分别利用甲烷浓度为 500、1 000、2 000、5 000 mg/m^3 的 CH_4/N_2 混合气流场进行实验，通过 ICCD 相机记录 FLICC 信号强度随延迟时间的变化，以评估该技术在流速测量中的适用性。摄像头门宽设置为 1 μs ，在 1 ~ 250 μs 条件下共选取 11 个延迟时间点进行采样。图 4 为 FLICC 信号强度随时间的变化趋势。

由图 4 可见，不同甲烷浓度下 FLICC 信号强度随时间变化呈现相似趋势：甲烷浓度较高时，信号峰值出现较早，衰减较快，整体荧光强度也更高。整个发光过程可分为三个阶段：飞秒激光诱导激发^[10, 18]、电子-离子复合^[19]、 CH_4 和 N_2 的光解与电离过程。首先，在亚皮秒量级的时间内^[20]生成高能自由基(如 CH_3 、 CH_2 、 CH 、 C 、 N_2^+ 、 N)，为后续形成 CN 提供反应前驱物；随后，通过一系列化学反应，这些活性自由基产生了呈激发态的 $\text{CN}(B)$ ；最后， $\text{CN}(B)$ 通过 $(B^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Sigma^+)$ 跃迁发射荧光，该辐射过程的固有寿命为纳秒量级。由于

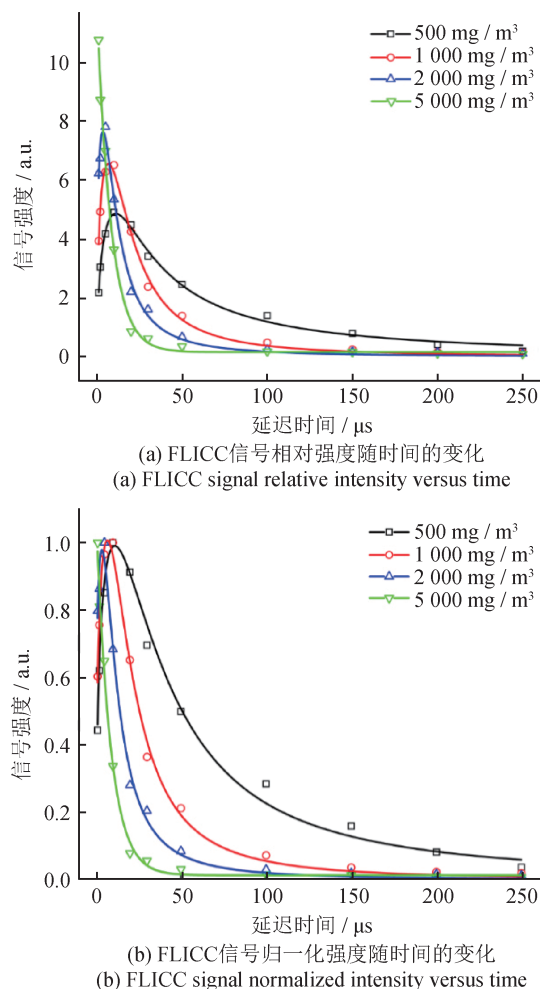


图4 FLICC 信号强度随时间的变化趋势

Fig.4 Variation of FLICC signal intensity over time

第一阶段与第三阶段的时间尺度极短，可视为瞬时过程，因此观测到的荧光衰减曲线形态主要由第二阶段的化学反应动力学过程所决定。涉及反应为

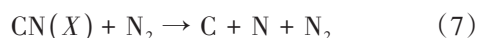
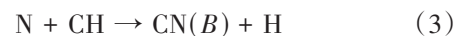
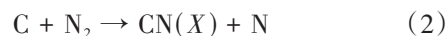
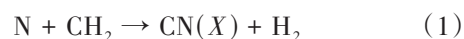


图 4 中，CN 浓度的时间演化特性是其竞争性生成与消耗反应路径共同作用的结果。例如，500 mg/m^3 工况在 15 μs 前后分别由反应(1) ~ 反应(7)主导。较高 CH_4 浓度通过提供更多前驱体加速

了CN的初始积累,这一动力学效应导致了峰值浓度的提前出现。但当 CH_4 浓度达到 $5\,000\text{ mg/m}^3$ 时,上升段已无法测量,荧光信号的强度呈指数衰减。

图4表明,实验中 $\text{CN}(B)$ 的荧光衰减时间达到微秒量级,但有研究表明CN自由基的本征荧光寿命仅为数纳秒^[21]。寿命的差异主要源于飞秒激光光解甲烷/氮气混合气体后所触发的一系列持续化学反应。前期研究已说明了此过程的机理^[15, 22]:如式(3)所示,反应可直接生成处于高能级的 CN ;或如式(7)所示,部分初始处于低能态的 $\text{CN}(X)$ 分子可从激发态氮分子 $\text{N}_2(A)$ 或基态 $\text{N}_2(X)$ 获取能量,被进一步激发至 $\text{CN}(B)$ ^[23]。由于这些涉及 $\text{CN}(B)$ 生成的化学反应进程相对缓慢,耗时在微秒尺度,因此实验中观测到的CN荧光信号具有较长的持续时间。在荧光强度方面, CH_4/N_2 气流场产生的信号强度较纯 N_2 流场高出1~2个数量级^[24],信噪比也得到了相应程度的提升。这种高强度与长寿命的荧光特性为流速测量提供了重要的信噪比与时间窗口保障。此外,不同 CH_4/N_2 浓度混合气条件下,FLICC信号的寿命也有明显差异,因此在实际测量中,混合气中 CH_4/N_2 比例可以根据测量的流场流速范围调整。例如,本研究所涉及的边界层流场中,流速相对较低,为 $5\sim 10\text{ m/s}$,选择低浓度 CH_4 的混合气可以使FLICC信号的寿命进一步延长,更有利于准确测速。

在边界层射流中开展FLICC速度测量原理验证实验。示踪气体选用含有 500 mg/m^3 CH_4 的 CH_4/N_2 混合气体,气体供应速度分别为 5 m/s 和 10 m/s 。边界层流场测速结果如图5所示。使用DG645信号延迟发生器触发ICCD相机进行单幅成像,相机门宽设置为 $1\text{ }\mu\text{s}$ 。为了获取速度信息,分别在 50 、 100 、 150 、 $200\text{ }\mu\text{s}$ 延迟时间条件下进行拍摄,每次成像结果为100次累加平均。图5中最下方的直线

为初始时刻($t = 0\text{ }\mu\text{s}$)飞秒激光成丝的位置,作为速度计算的参考基线。流场沿垂直方向自下向上喷射,FLICC信号线随之向上迁移。

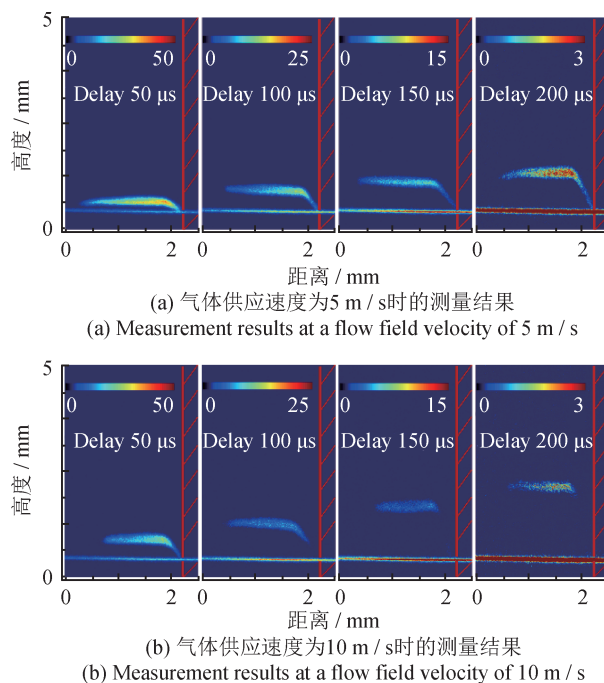


图5 边界层流场测速结果

Fig.5 Velocity measurement results of boundary laminar flow field

在水平方向上,右侧红色区域为边界层。分析表明:当测量点紧贴边界层(水平距离为 0 mm)时,流速数值趋近于零;随着测量点逐渐远离壁面,速度逐渐增大,并在距离壁面约 1 mm 处趋于稳定,接近该工况下的自由来流速度,这与经验结果一致。基于图5中基线位置与不同延迟时刻下示踪分子的位移,计算得到流场速度,具体结果如表1所示。

根据图5及表1可以看出:FLICC技术在边界层速度测量方面具有明显优势。在边界层区域,传统方法受制于强烈的近场散射,难以获得有效

表1 根据图5图像计算的流场速度结果

Tab.1 Flow field velocity calculated from the images in Fig.5

单位: m/s

自由流速度	0 ~ 50 μs 测速		0 ~ 100 μs 测速		0 ~ 150 μs 测速		0 ~ 200 μs 测速	
	结果	误差	结果	误差	结果	误差	结果	误差
5	4.89	0.11	4.84	0.16	4.74	0.26	4.78	0.22
10	9.34	0.66	9.53	0.47	9.45	0.55	9.59	0.41

信号。FLICC技术的核心优势在于其“时空分离”策略,即利用荧光的长寿命特性,使标记粒子在远离激光照射区的下游位置被探测,从而在信号采集层面上消除了散射光干扰。因此,FLICC能够在近边界层区域获得清晰信号,并成功提取该区域的流场信息。

3 结论

为解决现有边界层流场速度测量技术难以进行高时空分辨测量的问题,本研究团队提出了飞秒激光诱导氰基化学发光测速技术,采用267 nm飞秒激光在甲烷/氮气混合气体中诱导产生高强度荧光光丝,结合光谱仪与ICCD相机的高时空分辨能力,捕获并解析了激光诱导发射的演化特性。光谱指认结果表明:体系的辐射跃迁主要由CN($B-X$)的振动带系($\Delta v=1, 0, -1, -2$)所主导。通过研究不同 CH_4 浓度下FLICC信号的时域衰减特性,证实可通过调整 CH_4 浓度以适应不同流速条件的测量需求。在5 m/s与10 m/s的边界层流场实验中,选用500 mL/ m^3 甲烷/氮气混合气作为示踪气体,FLICC信号寿命可达200 μs ,充分满足该流速条件下的测量要求,实现了过去的分子标记测速工作中很少关注的低速度条件下的测量^[15-16, 22]。实验成功实现了边界层速度分布的高信噪比检测,所获结果与经验结果相符,验证了FLICC技术在实际边界层流场诊断中的可行性与可靠性。

参考文献

- [1] UNNIKRISHNAN S. Recent advances in feature extraction techniques for high-speed flowfields[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2023, 140: 100918.
- [2] WANG Y L, LI Q, SHANG D J, et al. Passive flow velocity and direction measurement system under interference environment based on the turbulent boundary layer pressure fluctuation field[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 9511821.
- [3] LI Q, WANG Y L, SHANG D J, et al. A flow velocity measurement method based on turbulent pressure fluctuation characteristics[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(20): 23162-23173.
- [4] WALLACE J M, VUKOSLAVČEVIĆ P V. Measurement of the velocity gradient tensor in turbulent flows[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2010, 42: 157-181.
- [5] LI F B, ZHANG H B, BAI B F. A review of molecular tagging measurement technique[J]. Measurement, 2021, 171: 108790.
- [6] CAO X D, LIU J J, JIANG N, et al. Particle image velocimetry measurement of indoor airflow field: a review of the technologies and applications[J]. Energy and Buildings, 2014, 69: 367-380.
- [7] KLOPFENSTEIN R J. Air velocity and flow measurement using a pitot tube[J]. ISA Transactions, 1998, 37(4): 257-263.
- [8] AYEGBA P O, EDMONYI-OTU L C. Turbulence statistics and flow structure in fluid flow using particle image velocimetry technique: a review[J]. Engineering Reports, 2020, 2(3): e12138.
- [9] WESTERWHEEL J, ELSINGA G E, ADRIAN R J. Particle image velocimetry for complex and turbulent flows[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2013, 45: 409-436.
- [10] MICHAEL J B, EDWARDS M R, DOGARIU A, et al. Femtosecond laser electronic excitation tagging for quantitative velocity imaging in air[J]. Applied Optics, 2011, 50(26): 5158-5162.
- [11] DANEHY P M, BURNS R A, REESE D T, et al. FLEET velocimetry for aerodynamics[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2022, 54: 525-553.
- [12] JIANG N B, HALLS B R, STAUFFER H U, et al. Selective two-photon absorptive resonance femtosecond-laser electronic-excitation tagging velocimetry[J]. Optics Letters, 2016, 41(10): 2225-2228.
- [13] LEVATON J, AMORIM J. Metastable atomic species in the N_2 flowing afterglow[J]. Chemical Physics, 2012, 397: 9-17.
- [14] LI B, ZHANG D Y, LI X F, et al. Femtosecond laser-induced cyano chemiluminescence in methane-seeded nitrogen gas flows for near-wall velocimetry[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2018, 51(29): 295102.
- [15] 李晓峰, 武腾飞. 基于激光诊断的分子标记示踪测速技术研究进展[J]. 计测技术, 2022, 42(5): 13-22.
- [16] LI X F, WU T F. The progress of molecular tagging velocimetry technology based on laser diagnosis[J]. Metrology & Measurement Technology, 2022, 42(5): 13-22. (in Chinese)
- [17] 李明, 高强, 陈爽, 等. 基于飞秒激光诱导化学发光的流场速度测量研究[J]. 光子学报, 2022, 51(3):

- 0314001.
- LI M, GAO Q, CHEN S, et al. Velocity measurement of gas flow field based on femtosecond laser-induced chemiluminescence [J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(3): 0314001. (in Chinese)
- [17] ABDELLI-MESSACI S, KERDJA T, BENDIB A, et al. Emission study of C_2 and CN in laser-created carbon plasma under nitrogen environment [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2002, 35(21): 2772-2778.
- [18] KONG F N, LUO Q, XU H L, et al. Explosive photodissociation of methane induced by ultrafast intense laser [J]. The Journal of Chemical Physics, 2006, 125(13): 133320.
- [19] XU H L, LI R X, CHIN S L. Photoemission mechanisms of methane in intense laser fields [J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(7): 70007-70010.
- [20] BAÑARES L, BAUMERT T, BERGT M, et al. The ultrafast photodissociation of $Fe(CO)_5$ in the gas phase [J]. The Journal of Chemical Physics, 1998, 108(14): 5799-5811.
- [21] JONSSON M, BORGGREN J, ALDÉN M, et al. Time-resolved spectroscopic study of photofragment fluorescence in methane/air mixtures and its diagnostic Implications [J]. Applied Physics B, 2015, 120(4): 587-599.
- [22] HAN L, GAO Q, LI B, et al. Cryogenic to high temperature measurements in gas flows by femtosecond laser-induced CN luminescence [J]. Measurement, 2024, 229: 114491.
- [23] PINTASSILGO C D, CERNOGORA G, LOUREIRO J. Spectroscopy study and modelling of an afterglow created by a low-pressure pulsed discharge in N_2-CH_4 [J]. Plasma Sources Science and Technology, 2001, 10(2): 147-161.
- [24] LEE G, GO D B, O'BRIEN C P. Nonthermal plasma-stimulated C-N coupling from CH_4 and N_2 Depends on the presence of surface CHx and plasma-phase CN species [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2024, 16(22): 28367-28378.

(本文编辑: 刘圣晨 李成成)



第一作者: 李晓峰(1990—), 男, 工程师, 博士, 主要研究方向为激光诊断、飞秒激光测试技术。



通信作者: 高强(1985—), 男, 副研究员, 博士生导师, 天津大学北洋青年骨干教师。主要从事飞秒激光及高压放电等离子体光谱技术的开发与应用研究, 发表SCI论文80余篇, 主持国家自然科学基金项目4项。