



基于飞秒激光成丝测量燃烧场温度

李帅瑶 张大源 高强 李博 何勇 王智化

Temperature measurement in combustion flow field with femtosecond laser-induced filament

Li Shuai-Yao Zhang Da-Yuan Gao Qiang Li Bo He Yong Wang Zhi-Hua

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 69, 234207 (2020) DOI: 10.7498/aps.69.20200939

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200939>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

温度对飞秒激光脉冲在NaCl溶液中成丝产生的超连续谱的影响

Influence of temperature on supercontinuum generation induced by femtosecond laser filamentation in NaCl solution

物理学报. 2018, 67(18): 184206 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180686>

不同散射介质对飞秒脉冲激光传输特性影响研究

Influence of different scattering medium on propagation characteristics to femtosecond laser pulses

物理学报. 2019, 68(19): 194207 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190430>

平顶飞秒激光经圆锥透镜在熔融石英中成丝及超连续辐射

Filamentation and supercontinuum emission generated from flattened femtosecond laser beam by use of axicon in fused silica

物理学报. 2020, 69(4): 044202 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191350>

飞秒激光成丝诱导Cu等离子体的温度和电子密度

Temperature and electron density in femtosecond filament-induced Cu plasma

物理学报. 2017, 66(11): 115201 <https://doi.org/10.7498/aps.66.115201>

飞秒平顶光束经微透镜阵列在熔融石英中的成丝及其超连续辐射

Filamentation and supercontinuum emission with flattened femtosecond laser beam by use of microlens array in fused silica

物理学报. 2018, 67(17): 174205 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180306>

整形飞秒激光脉冲的成丝超连续辐射控制

Control of supercontinuum generation from filamentation of shaped femtosecond laser pulses

物理学报. 2020, 69(3): 034206 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191438>

基于飞秒激光成丝测量燃烧场温度*

李帅瑶¹⁾ 张大源¹⁾ 高强^{1)†} 李博¹⁾ 何勇²⁾ 王智化²⁾¹⁾ (天津大学, 内燃机国家重点实验室, 天津 300072)²⁾ (浙江大学, 能源清洁利用国家重点实验室, 杭州 310027)

(2020年6月18日收到; 2020年7月13日收到修改稿)

激光诊断技术是燃烧温度场无干扰在线测量的主要手段, 开发精确的燃烧场温度测量技术对于研究燃烧基础问题具有重要意义. 目前, 基于激光的燃烧场测温技术大多以纳秒激光作为光源, 基于飞秒激光的测温技术相对较少. 本文开发了一种基于飞秒激光成丝的燃烧场温度测量方法. 飞秒激光在光学介质中传播时, 会形成一条具有一维长度且强度均匀分布的光丝, 由于光丝内的功率密度极高, 足以通过光解和激光诱导光化学反应等方式将原子/分子激发到高能级, 进而向低能级跃迁时释放荧光. 通过相机收集荧光信号即可获得光丝的空间长度, 光丝的长度与光学介质的温度密切相关, 将光丝置于已知温度的燃烧场中, 可获得不同温度下的光丝长度, 结合理论推导, 对实验数据进行拟合, 可获得光丝长度与温度的定量关系, 进而实现燃烧场温度的测量.

关键词: 飞秒激光, 成丝, 温度**PACS:** 42.65.Hw, 42.65.Jx, 47.15.-x, 52.38.Hb**DOI:** 10.7498/aps.69.20200939

1 引言

燃烧是物理领域, 尤其是工程热物理领域中的重要研究内容, 温度是燃烧中的重要参数, 实现燃烧场温度的精确测量能够优化整个燃烧过程^[1], 帮助人们更好地理解燃烧机理^[2]和燃烧动力学特性^[3]. 随着对燃烧领域研究的不断深入, 燃烧过程正朝着瞬态和复杂的方向发展, 为了研究其丰富的物理过程, 也需要对燃烧诊断技术进行不断地开发与改进.

目前, 对于温度测量的技术相对较多, 根据其测量方式的不同, 可分为接触式测量和非接触式测量. 接触式测量主要以热电偶^[4,5]为代表, 其具有结构简单、操作方便、成本低廉和测温范围广等优点. 但是这种测量方法需在待测燃烧场中侵入探头, 具有干扰性, 并且在实际测量过程中, 会因为

侵入热电偶位置的不同而产生不同的热电势. 因此, 热电偶测温方法在燃烧场中具有一定的局限性.

与接触式测量相比, 以可调谐二极管激光吸收光谱技术 (tunable diode laser absorption spectroscopy, TDLAS)^[6-8]、激光诱导荧光技术 (laser-induced fluorescence, LIF)^[9,10]、激光诱导热光栅光谱技术 (laser-induced thermal gratings spectroscopy, LITGS)^[11,12]、瑞利散射技术 (Rayleigh scattering, RS)^[13]、自发拉曼散射技术 (spontaneous Raman scattering, SRS)^[14,15] 以及相干反斯托克斯拉曼散射技术 (coherent anti-Stokes Raman scattering, CARS)^[16-18] 等为代表的非接触式测量技术具有对待测燃烧场干扰小的优点, 能够实现实时在线温度测量. TDLAS 技术具有响应速度快和灵敏度高的优点, 但由于其是视线积分测量, 因此通常情况下 TDLAS 技术不具备空间分辨能力, 只能反演一维

* 国家自然科学基金 (批准号: 51806149, 91741205) 和浙江大学能源清洁利用国家重点实验室开放基金 (批准号: ZJUCEU2019011) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: qiang.gao@tju.edu.cn

光学路径上的全局温度. 相比于 TDLAS 技术, 双线 LIF 测温技术具有空间分辨率高的优点, 其测量通过示踪剂荧光信号强度的比值对于温度的依赖性实现温度的定量测量. LITGS 技术无需示踪剂, 通过激光聚焦形成的热光栅周期可以推导出燃烧场的温度信息. 但 LITGS 信号容易受到气体动力学参数变化的影响, 激发激光的强度或频率的波动也会造成测量误差, 同时该技术对于温度的反演过于复杂. RS 技术由于实验系统简单, 信噪比高和时间、空间分辨率好等优点, 被常用于测定湍流火焰温度. 但 RS 是一种弹性散射, 所采集的信号和入射激光的波长相同, 使得这项技术容易受到背景散射光及各种微粒散射光的干扰; 且 RS 技术只能应用于主要组分的瑞利散射截面已知的燃烧场, 非常具有局限性. 而 SRS 技术是一种非弹性散射, 能够对于燃烧场中的温度进行定量测量, 具有较高的空间分辨率. 但是这项技术最主要的缺点是信号很弱, 测量过程中易受干扰. CARS 技术由于具有良好的测量精度, 已广泛应用于燃烧场的温度测量, 并且可作为其他光学测温技术开发的标准. 但 CARS 技术的光路系统复杂, 对于实验条件的要求较为苛刻.

上述介绍的测量方法大多是基于纳秒激光实现的, 随着超快激光技术的发展, 飞秒激光诊断技术逐渐出现, 并为燃烧诊断提供新的工具. 在这方面 fs-CARS 技术逐渐应用于燃烧场的温度测量^[19], 但 fs-CARS 技术的实验光学系统复杂.

与纳秒激光相比, 飞秒激光具有脉宽极短, 峰值功率极高的特点. 当飞秒激光能量超过临界功率时, 由于光学克尔效应引起的自聚焦和等离子体引起的散焦效应之间达到动态平衡而形成均匀稳定的等离子体通道, 被称为飞秒激光成丝现象^[20]. 飞秒激光成丝现象目前已应用到燃烧场的速度和混合分数等方面的测量^[21–23], 但在温度测量方面相对较少.

本文从飞秒激光成丝的原理出发, 推导出飞秒激光成丝长度与温度场的函数关系, 通过测量已知不同燃烧场温度下的飞秒光丝长度, 利用幂函数拟合方法, 确定了飞秒光丝长度与温度的关系式, 进而实现燃烧场温度的测量.

2 实验原理

随着近几十年的研究, 飞秒激光成丝的物理过

程已经得到了基本的了解, 人们普遍认为光丝是由克尔效应引起的激光自聚焦与等离子体引起的散焦之间达到动态平衡所形成的^[24]. 当飞秒激光在光学介质中传播时, 由于峰值功率极高, 会使介质的折射率发生变化, 而飞秒激光束中心的强度较边缘更高, 介质的折射率变得更大, 此时传输介质相当于一块凸透镜, 使得飞秒激光产生自聚焦效应. 当焦点处激光功率密度足够大时, 飞秒激光开始电离空气分子产生等离子体, 等离子体的形成会引起折射率的负变化, 此时传输介质相当于一块凹透镜, 会导致光束散焦. 当自聚焦和散焦之间达到动态平衡时会形成一条肉眼可见的光丝, 这个现象被称为飞秒激光成丝^[25]. 所形成的这段飞秒光丝的长短与多种激光参数、电离过程和燃烧场温度有关, 在实验过程中, 系统确定后, 飞秒激光和电离过程的相关参数都已确定, 其光丝的长短只与燃烧场温度和二阶折射率有关, 而在本实验条件下气体的二阶折射率变化极小, 因此可以将飞秒光丝的长短与燃烧场温度建立联系, 其理论推导如下.

飞秒光丝内等离子体的功率密度 I 可由如下公式表示:

$$I = \left(\frac{0.76n_2 P_{cr}}{\sigma_k t_p \rho_{at}} \right)^{1/(K-1)}, \quad (1)$$

式中, n_2 为二阶非线性折射率; K 为多光子电离所需的光子数, 当使用波长为 800 nm 的飞秒激光作为光源时, 电离待测流场中分子约需要 8 个光子, 即可近似认为 $K = 8$; σ_k 为多光子电离的吸收截面; t_p 为飞秒激光脉冲持续时间; ρ_{at} 为待测流场中的粒子数密度; P_{cr} 为飞秒激光成丝的临界值功率, 公式为

$$P_{cr} = 3.72\lambda^2 / (8\pi n_0 n_2), \quad (2)$$

式中, λ 为入射激光波长, 本实验中 $\lambda = 800$ nm; $n_0 = 1$ 为线性折射率, n_2 为二阶非线性折射率. 等离子体的电子数密度 ρ 可由下式表示为

$$\rho = \left[\frac{(0.76n_2 P_{cr})^K}{\sigma_k t_p \rho_{at}} \right]^{1/(K-1)}. \quad (3)$$

燃烧场的温度对于光丝的长度有明显的影响, 随着温度的增加, 分子热运动加剧, 导致粒子密度下降, 光丝长度 L 由下式表示^[26] 为

$$L = \left(\frac{\beta_K}{K} I^{K-1} + \frac{\sigma}{K+1} \rho \right)^{-1} \times \log \frac{E_{in} \sqrt{2}}{t_p \sqrt{\pi} P_{cr}}, \quad (4)$$

式中, σ 代表逆韧致辐射吸收光子的吸收截面;

E_{in} 为激光输入能量; β_K 为多光子电离系数可由如下公式表示为

$$\beta_K = \sigma_K h \omega \rho_{at}, \quad (5)$$

式中, h 为普朗克常数; ω 为激光频率; ρ_{at} 为待测流场中粒子数密度, 可通过下面的理想气体状态方程表示:

$$P = \rho_{at} k T, \quad (6)$$

式中, P 为压强; $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ 为玻尔兹曼常数; T 为待测燃烧场温度. 综合 (1)—(6) 式并进行简化, 飞秒激光成丝的长度可由下式表示:

$$L = \frac{\log(Xn_2)}{Y + ZT^{1/(K-1)}}, \quad (7)$$

式中, X 代表与入射激光参数相关的吸收; Y 代表光丝传输过程中由于多光子电离引起的损耗而产生的系数; Z 代表光丝传输过程中由于逆韧致辐射吸收引起的损耗而产生的系数. 通过 (7) 式可以看出光丝的长度是二阶折射率 n_2 和待测燃烧场温度 T 的复杂函数. 待测流场的气体组分和温度变化均会影响流场的二阶折射率. 本工作中, 甲烷预混火焰的燃空当量比的变化范围为 0.8—1.2, 待测流场的主要气体组分为空气, 其体积分数变化为 93%—89%. 根据表 1 甲烷和空气的非线性折射率^[27], 可计算出气体组分变化对于 n_2 的影响约为 0.34%, 根据 (4) 式, 可推导其燃空当量比变化范围内, 飞秒激光成丝长度的变化约为 0.07%. 因此, 由于二阶非线性折射率导致的丝长变化可以忽略不计.

表 1 不同气体非线性折射率 n_2

Table 1. Nonlinear refractive index n_2 of different gases.

气体	非线性折射率/ $10^{-18} \text{cm}^2 \cdot \text{W}^{-1}$
空气	1.2
甲烷	1.1

综上, 我们认为造成飞秒激光成丝长度变化的主要因素来自于燃烧场温度的变化, 而二阶非线性折射率的改变对于飞秒激光成丝的长度影响可以忽略, 即 $\log(Xn_2)$ 为常数, 因此飞秒光丝长度与温度的关系可简写成如下形式:

$$y = \frac{1}{A + B \times x^{1/7}}, \quad (8)$$

其中 A 代表激光传输过程中与多光子电离相关的系数; B 代表传输过程中与逆韧致辐射吸收相关的系数.

3 实验系统

实验系统如图 1 所示. 飞秒激光器 (Spectra-Physics 公司) 输出 800 nm 的基频光, 脉宽为 45 fs, 重频为 1 kHz, 光斑直径约为 6 mm, 单脉冲最高激光能量为 7.5 mJ. 输出的激光通过衰减器 (Thorlabs, VA-800-CONEX) 来进行能量调节, 经过焦距为 300 mm 的聚焦透镜聚焦后入射到待测流场中.

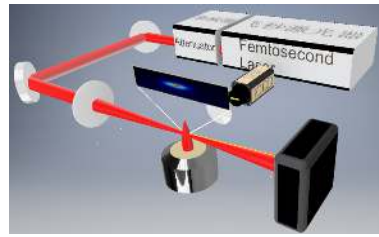


图 1 实验所用装置及光路图

Fig. 1. Diagram of experimental equipment and light path.

用于采集信号的实验装置包括 ICCD (PI MAX-3) 相机. 其触发信号由飞秒激光器提供. ICCD 相机采用的镜头型号为 Nikon 50 mm, 实验中采用的光圈为 $f/1.2$. 镜头前加装了滤光片 (UG11, 260—380 nm, Andover) 用以获取在此波长范围内的 N_2/N_2^+ 荧光信号, 并滤除激光杂散光的干扰. ICCD 相机成像的空间分辨约为 $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$. 对于光谱测量, 荧光信号通过焦距为 100 mm 的球面透镜成像至光谱仪 (Acton SP-2300i) 的输入狭缝上, 其狭缝宽度为 $200 \mu\text{m}$, 将光谱仪狭缝放置在垂直于激光束的方向以记录具有空间分辨的光谱.

本实验中的燃烧系统采用国内外通用的 McKenna 燃烧器, 此燃烧器是燃烧领域中的标准燃烧器, 被广泛地应用于燃烧的基础研究和诊断技术的开发, 其主要由供气系统和冷却系统组成. 图 2(a) 为 McKenna 燃烧器实物图, 其供气系统由四氟乙烯搭建, 通过热线式质量流量计控制燃空当量比来供给燃料. 其顶部的供气元件主要包括一个位于内圈直径为 60 mm 的多孔圆形烧结金属板和位于外圈宽为 10 mm 的环形多孔烧结金属板. 实验中内层通甲烷/空气混合气, 产生稳定的层流预混火焰用于光学诊断, 外层通纯氮气, 用于保护内层的燃烧流场防止周围气体的干扰, 如图 2(b) 所示, 其供气速度为 0.15 m/s.

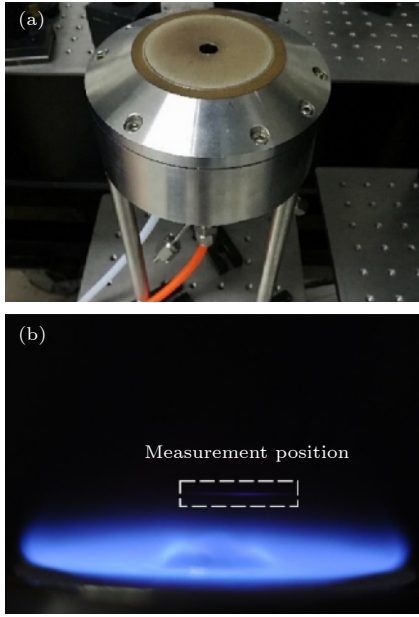


图 2 (a) 燃烧器实物图; (b) 甲烷/空气层流预混火焰
Fig. 2. (a) Photo of the McKenna burner; (b) laminar pre-mixed CH₄/air flame.

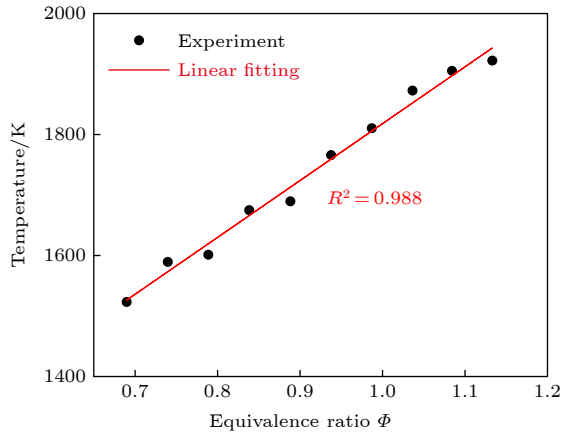


图 3 燃烧场温度随燃空当量比的变化
Fig. 3. Variation curves of temperature with equivalence ratio in the combustion field.

实验分别采用燃空当量比为 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 图 3 为 Rabenstein 等^[28] 应用上述的 McKenna-燃烧器, 通过拉曼散射技术获得了 CH₄/air 预混火焰燃尽区的温度, 该温度将作为后续实验的参考温度.

4 结果与讨论

4.1 飞秒激光成丝

首先在燃烧场中进行了飞秒激光成丝的实验, 观察到了燃烧场中的成丝现象, 如图 4(a) 所示, 为

燃空当量比为 0.8 的甲烷/空气预混层流火焰中飞秒激光诱导成丝的单反相机拍摄照片, 图 4(b) 为 ICCD 成像图. 通过观察图 4, 可以发现在一定的空间范围内, 等离子体的强度基本维持不变, 这说明飞秒激光诱导产生的等离子体通道具备一维均匀性.

其次, 探究了光丝中的信号来源, 测量了飞秒激光成丝的发射光谱, 图 5 是燃空当量比为 0.8 的甲烷/空气预混层流火焰燃尽区中飞秒激光成丝的发射光谱. 发射光谱主要来自于 OH, N₂, CN, CH 及 H 原子等, 其中 CH 和 H 原子主要来自于 CH₄ 的光解, 而 CN 是通过复杂的光化学反应生成, 实验主要获取 350 nm 左右的 N₂/ N₂⁺ 荧光信号来代表光丝长度, 之后通过飞秒光丝长短反演温度场信息.

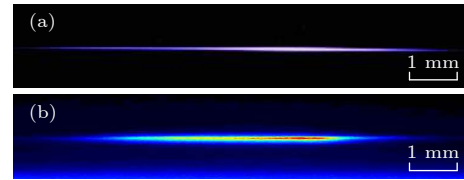


图 4 (a) 甲烷/空气预混火焰中飞秒激光诱导成丝单反相机拍摄照片; (b) ICCD 成像图
Fig. 4. (a) Digital camera photo and (b) ICCD camera image of femtosecond laser-induced filaments in a pre-mixed CH₄/air flame.

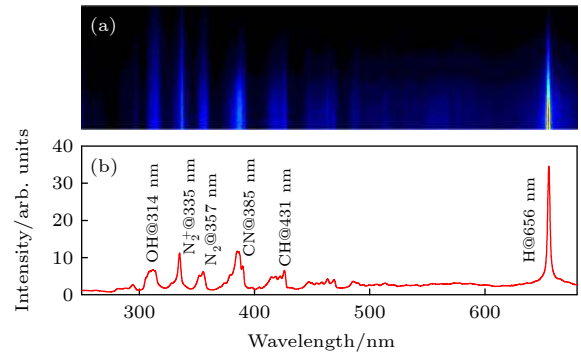


图 5 (a) 甲烷/空气预混火焰中燃尽区飞秒激光成丝的发射光谱成像; (b) 发射光谱
Fig. 5. (a) Emission spectral image and (b) spectral curve of femtosecond laser-induced filament in the burned region of a pre-mixed CH₄/air flame.

4.2 温度测量

实验在 5 种不同的已知温度下进行, 根据文献^[28] 通过控制燃空当量比获得不同的温度, 具体信息如表 2 所列. 图 6 为不同温度下, 利用 ICCD

拍摄的飞秒激光在燃烧场燃尽区不同温度下的光丝长度, 实验中所用激光能量为 5 mJ, 传播方向自左向右, 成像信号为 100 幅图片累加结果, 成像信噪比为 337. 从图 6 中可以看出, 随着温度的降低, 光丝的长度明显变长. 为了便于定量计算光丝长度, 截取成像图的信号区域, 对该部分进行纵向积分处理, 得到沿激光传播方向上的信号空间分布, 如图 7 所示.

表 2 不同条件下燃烧场的温度信息
Table 2. Flame temperatures with different equivalence ratios.

燃空当量比	温度/K
0.8	1630
0.9	1724
1.0	1818
1.1	1913
1.2	2007

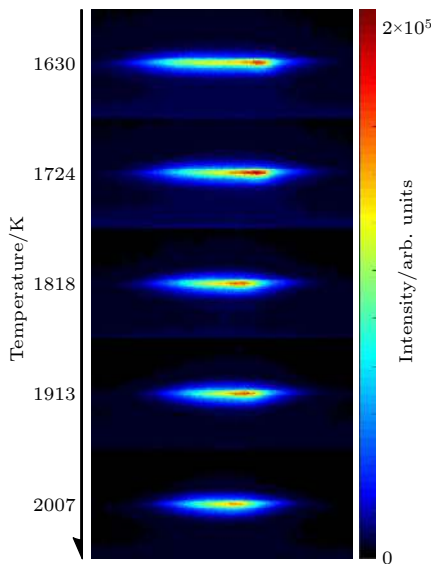


图 6 甲烷/空气预混火焰中基于飞秒激光成丝现象测温效果
Fig. 6. Temperature measurement based on femtosecond laser-induced filaments in premixed CH₄/air flames.

图 7 中不同的颜色代表着不同温度下获得的光丝信号强度的空间分布线型, 从图 7 可以看出, 不同温度下, 信号峰值的大小基本一致, 但是成丝的空间分布随温度变化. 这是由于温度升高, 粒子数密度降低, 从而导致激光克尔自聚焦效应减弱, 飞秒激光丝长变短. 我们将线型的半高全峰宽定义为光丝的长度, 并建立光丝长度与温度之间的关系曲线.

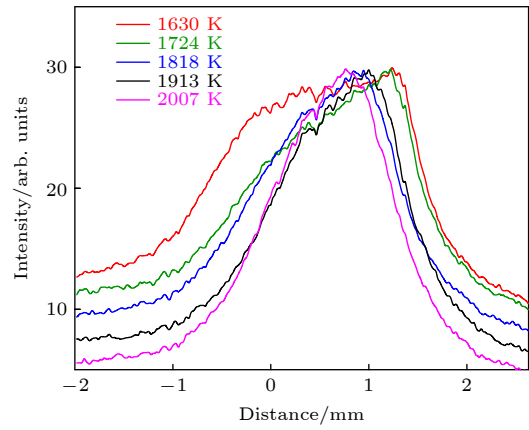


图 7 不同温度下甲烷/空气预混火焰燃尽区信号空间分布曲线
Fig. 7. Spatial distributions of filament in the burned region of premixed CH₄/air flames with different temperatures.

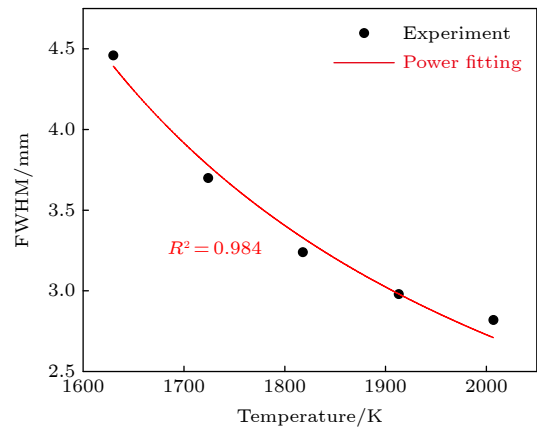


图 8 飞秒激光成丝长度与温度的关系
Fig. 8. Relation between the length of femtosecond laser filaments and temperature.

图 8 中黑色圆点代表实验测量的数据, 利用 (8) 式对实验数据点进行幂函数拟合. 红色实线代表幂函数拟合的结果, 其拟合度 R^2 为 0.984, 拟合系数 $A = -4.44 \pm 0.38$, $B = 1.62 \pm 0.13$. 在温度为 2007 K 时可算得系统的测量误差为 ± 25 K, 测量精度约为 1.2%. 当温度从 1630 K 变化到 2007 K 时, 成丝长度由 4.5 mm 变化到 2.8 mm, 变化了约 38%, 这说明丝长对于温度变化十分敏感. 实验中利用标准板 (每个小格 1 mm, 每个大格 1 cm) 对成像图的尺寸进行了标定. 可算得一个像素对应的实际空间尺寸为 37 μm . 实际成像系统的空间分辨率是通过空间分辨标靶 (USAF 1951) 测量. 在本实验条件下, 系统的空间分辨率为 50 μm , 对应相机约为 1.4 个像素. 根据拟合公式 (8), 在燃烧场温度为 2007 K 时光丝长度改变 50 μm , 对应

燃烧场温度变化 17 K, 即 ICCD 相机的测温分辨率为 17 K. 目前, 我们采用的 ICCD 相机的空间分辨力极限可达到 10 μm 左右, 通过优化, 测温分辨率可进一步提高, 而激光器的能量波动可能会对测量精度造成一定的影响. 目前该技术适用于均匀的燃烧场温度测量, 在常温至高温未燃气体环境下, 该方法仍然具有很好的应用潜力.

5 结 论

本文利用飞秒激光成丝实现了燃烧场中温度的测量. 实验采用基频为 800 nm 的飞秒激光器作为光源, 通过聚焦透镜入射到甲烷/空气预混层流火焰, 在火焰燃尽区形成一条稳定的等离子体通道. 通过将等离子体信号空间分布线型的全高半峰宽定义为飞秒光丝的长度, 并与温度建立联系. 根据理论推导公式, 通过幂函数拟合得到定标曲线, 根据该曲线, 可以实现温度测量. 本文验证了基于飞秒光丝长度测量温度的可行性, 并获得了较好的测量精度, 为燃烧场温度测量提供新的诊断方法. 目前实验仅在甲烷/空气预混层流火焰中进行, 在常温至高温未燃流场温度测量也具有很大的应用潜力.

参考文献

- [1] Feng Y X, Huang Q X, Liang J H, Wang F, Yan J H, Chi Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 134702 (in Chinese) [冯玉霄, 黄群星, 梁军辉, 王飞, 严建华, 池涌 2012 物理学报 **61** 134702]
- [2] Wei Z, Huang Q 2020 *Food Hydrocolloids* **98** 105314
- [3] Pramanik S, Ravikrishna R V 2020 *Exp. Therm. Fluid Sci.* **110** 109926
- [4] Xu Z, Tian X, Zhao H 2017 *Proc. Combust. Inst.* **36** 4443
- [5] Krishnan S, Kumfer B M, Wu W, Li J C, Nehorai A, Axelbaum R L 2015 *Energy Fuels* **29** 3446
- [6] Zeng H, Ou D, Chen L, Li F, Yu X 2018 *Opt. Eng.* **57** 26106
- [7] Xu Z Y, Liu W Q, Liu J G, He J F, Yao L, Ruan J, Chen J Y, Li H, Yuan S, Geng H, Han R F 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 234204 (in Chinese) [许振宇, 刘文清, 刘建国, 何俊峰, 姚路, 阮俊, 陈玖英, 李哈, 袁松, 耿辉, 阚瑞峰 2012 物理学报 **61** 234204]
- [8] Song J L, Hong Y J, Wang G Y, Pan H 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 240702 (in Chinese) [宋俊洪, 洪延姬, 王广宇, 潘虎 2012 物理学报 **61** 240702]
- [9] Whiddon R, Zhou B, Borggren J, Alden M, Li Z S 2015 *Rev. Sci. Instrum.* **86** 93107
- [10] Malmqvist E, Borggren J, Alden M, Bood J 2019 *Appl. Opt.* **58** 1128
- [11] Qu P B, Guan X W, Zhang Z R, Wang S, Li G H, Ye J F, Hu Z Y 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 123301 (in Chinese) [瞿谱波, 关小伟, 张振荣, 王晟, 李国华, 叶景峰, 胡志云 2015 物理学报 **64** 123301]
- [12] Luers A, Sahlberg A, Hochgreb S, Ewart P 2018 *Appl. Phys. B-Lasers O.* **124** 1
- [13] Yuen F T C, Gülder Ö L 2009 *Proc. Combust. Inst.* **32** 1747
- [14] Butterworth T D, Amyay B, Bekerom D V D, Steeg A V D, Minea T, Gatti N, Ong Q, Richard C, Kruijdsdijk C, Smits J T, Bavel A P, Boudon V, Rooij G J 2019 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **236** 106562
- [15] Ren X Y, Tian Z S, Sun L J, Fu S Y 2014 *Acta Phys. Sin.* **16** 164201 (in Chinese) [任秀云, 田兆硕, 孙兰君, 付石友 2014 物理学报 **16** 164201]
- [16] Cantu L M L, Grohmann J, Meier W, Aigner M 2018 *Exp. Therm. Fluid Sci.* **95** 52
- [17] Lowe A, Thomas L M, Satija A, Lucht R P, Masri A R 2019 *Proc. Combust. Inst.* **37** 1383
- [18] Nishihara M, Freund J B, Glumac N G, Elliott G S 2018 *Plasma Sources Sci. Technol.* **27** 35012
- [19] Roy S, Kulatilaka W D, Richardson D R, Lucht R P, Gord J R 2009 *Opt. Lett.* **34** 3857
- [20] Théberge F, Liu W, Simard P T, Becker A, Chin S L 2006 *Phys. Rev. E* **74** 36406
- [21] Li B, Zhang D Y, Li X F, Gao Q, Zhu Z F, Li Z S 2018 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **51** 295102
- [22] Gao Q, Zhang D Y, Li X F, Li B, Li Z S 2019 *Sens. Actuators, A* **287** 138
- [23] Li B, Zhang D Y, Gao Q, Li Z S 2020 *Exp. Fluids* **61** 33
- [24] Couairon A, Mysyrowicz A 2007 *Phys. Rep.* **441** 47
- [25] Liu Y, Durand M, Chen S, Houard A, Prade B, Forstier B, Mysyrowicz A 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 55003
- [26] Couairon A 2003 *Appl. Phys. B-Lasers O.* **76** 789
- [27] Nibbering E T J, Grillon G, Franco M A, Prade B S, Mysyrowicz A 1997 *J. Opt. Soc. Am. B: Opt. Phys.* **14** 650
- [28] Rabenstein F, Leipertz A 1997 *Appl. Opt.* **36** 6989

Temperature measurement in combustion flow field with femtosecond laser-induced filament*

Li Shuai-Yao¹⁾ Zhang Da-Yuan¹⁾ Gao Qiang^{1)†}
Li Bo¹⁾ He Yong²⁾ Wang Zhi-Hua²⁾

1) (State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

2) (State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

(Received 18 June 2020; revised manuscript received 13 July 2020)

Abstract

Laser-based diagnostic techniques are critical nonintrusive methods of measuring the in-situ temperature in combustion flow fields. Developing temperature measurement techniques with high accuracy and precision is of great significance for studying the combustion. At present, nanosecond (ns) lasers are commonly used in these methods. However, the researches based on femtosecond (fs) lasers are relatively few. Here, we develop a thermometry technique for combustion fields based on fs laser-induced filament. When the fs laser propagates in an optical medium, a long uniformly distributed plasma channel (also named filament) will be generated. The clamped intensity inside the filament is high enough to generate excited atoms/molecules through fs laser-induced photochemical reactions. Subsequently, the excited atoms/molecules release fluorescence signals. The length of the filament can be measured by imaging the fluorescence signal with an ICCD camera, which is evaluated by the full width at half maximum (FWHM) of the spatial distribution of the filament emission signal. Based on theoretical analysis, the experimental data of the filament length are fitted with a power function, and the result is satisfactory compared with the R -squared measure of goodness (R^2) of 0.984. This indicates that the filament length is correlated well with the temperature of the combustion field. A monotonic quantitative relationship between the filament length and the temperature can be established by a calibration process, and then the temperature of the combustion field can be measured. When the temperature changes from 1630 to 2007 K, the length of the filament shortens by 38%. This indicates that the filament length is sensitive to the temperature of the flow field. When the temperature is 2007 K, the absolute uncertainty of the measurement is ± 25 K, and the relative uncertainty is about 1.2%. The spatial resolution of the measurement system is 50 μm , which was determined by a USAF 1951 Target. Based on the spatial resolution, the measurement precision can arrive at 17 K. Although, at present, this temperature measurement technique based on femtosecond laser-induced filament is used only in laminar premixed flames, it has potential applications in temperature measurements ranging from room temperature to combustion temperatures.

Keywords: femtosecond laser, filamentation, temperature

PACS: 42.65.Hw, 42.65.Jx, 47.15.-x, 52.38.Hb

DOI: 10.7498/aps.69.20200939

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51806149, 91741205) and the Open Fund Project of State Key Laboratory for Clean Energy Utilization in Zhejiang University, China (Grant No. ZJUCEU2019011).

† Corresponding author. E-mail: qiang.gao@tju.edu.cn