

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2019.03.008

基于可调谐半导体激光吸收光谱技术的 甲烷 / 空气预混平焰炉温度测量

彭于权^{1,2}, 阚瑞峰¹, 许振宇¹, 夏晖晖¹, 聂伟^{1,2}, 张步强^{1,2}, 裴晓凡¹

(1 中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院环境光学与技术重点实验室 安徽 合肥 230031;

2 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026)

摘要: 燃烧场温度的测量对于燃烧诊断具有重要意义。开展了基于可调谐半导体激光吸收光谱 (Tunable diode laser absorption spectroscopy, TDLAS) 的在线测温方法研究, 基于双光束分时扫描技术, 实现了双激光器协同工作与燃烧产物水汽 7154.35 cm^{-1} 和 7467.77 cm^{-1} 两条吸收谱线的同时测量, 并利用双线积分吸光度比值关系完成温度的精确反演, 满足燃烧场温度在线检测应用需要。开展了针对甲烷 / 空气预混平焰炉火焰温度的实时检测实验研究, 并与热电偶进行了测温对比分析, 两种方法的测量具有较好的一致性, 相对误差小于 3.8%, 验证了 TDLAS 技术对燃烧场温度非侵入式快速测量的可行性和可靠性。

关键词: 可调谐半导体激光吸收光谱; 水汽; 温度; 平焰炉; 吸光度

中图分类号: O433.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-6141(2019)03-0228-07

Temperature Measurement of CH₄/Air Premixed Flat Flame Burner Based on Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy

PENG Yuquan^{1,2}, KAN Ruifeng^{1*}, XU Zhenyu¹, XIA Huihui¹, NIE Wei^{1,2},
ZHANG Buqiang^{1,2}, PEI Xiaofan¹

(1 Key Laboratory of Environmental Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2 University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Temperature measurement is significant for combustion diagnosis. An on-line temperature measurement method based on tunable diode laser absorption spectroscopy(TDLAS) has been developed, which achieves dual laser cooperative work and simultaneous measurement of two absorption lines (7154.35 cm^{-1} and 7467.77 cm^{-1}) of combustion product H₂O by dual beam time dividing scanning strategy. The accurate

基金项目: Supported by National Key Research and Development Program of China (国家重点研发计划, 2016YFC0201100)

作者简介: 彭于权 (1991 -), 男, 四川内江人, 研究生, 主要从事燃烧场温度和组分浓度的激光光谱测量等的研究。

E-mail: yqpeng@aiofm.ac.cn

导师简介: 阚瑞峰 (1977 -), 男, 博士, 辽宁锦州人, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学与光谱学测量方法等的研究。

E-mail: kanruifeng@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2018-01-26; **修改日期:** 2018-04-04

inversion of the temperature is realized by two-line integral absorbance ratio, which meets the application needs of on-line temperature detection of the combustion field. The experimental research on real-time detection of flame temperature in CH₄/air premixed flame furnace was carried out, and the results were compared with the thermocouple measurement, which shows TDLAS and thermocouples have good consistency with relative error less than 3.8%. The feasibility and reliability of non-intrusive and rapid temperature measurement of the combustion field based TDLAS technology have been verified.

Key words: tunable diode laser absorption spectroscopy; water vapor; temperature; flat flame furnace; absorbance

1 引言

温度作为燃烧过程的重要参数,是燃烧效率和污染物产生的一个指示标志。燃烧环境温度的在线测量对于燃烧诊断、污染控制具有重要的研究意义^[1-3]。

温度测量方法分为接触式和非接触式。接触式测温主要有热电偶、温度传感器等测量方式,其成本较低,但响应速度慢,测量过程中会因测量环境扰动而无法准确测量出真实温度,并且在超高温等极端环境下的测量会受到限制。非接触式测量主要以光学方法为主,可分为辐射测温^[4-5],相干反斯托克斯拉曼散射(Coherent anti-Stokes raman scattering, CARS)^[6-7],激光诱导荧光(Laser-induced fluorescence, LIF)^[8]和吸收光谱技术(Absorption spectroscopy, AS)^[9-11]等。其中,辐射测温具有测温范围广等优点,但易受到背景辐射影响;CARS具有高灵敏度和高空间分辨率,适合于点测和台架试验,但系统相对复杂,成本较高;LIF具有高空间分辨等优点,但信号易受分子密度和信号猝灭等因素影响,且准确性依赖于后期的温度标定。可调谐半导体激光吸收光谱技术(Tunable diode laser absorption spectroscopy, TDLAS)具有非接触、抗干扰能力强、响应快速、结构简单等优点,且能同时测量温度、浓度、流速等参数,适合燃烧流场诊断研究。

本文针对燃烧在线检测应用需要,基于TDLAS测温原理,研究了基于分时扫描的双波长检测技术,利用双线测温方法实现了温度的在线检测,通过对甲烷/空气(CH₄/Air)预混平焰炉火焰温度的在线检测实验与热电偶测温的对比分析,验证了该方法的可行性。

2 温度测量原理和谱线选取

2.1 TDLAS 温度测量原理

TDLAS技术采用窄线宽可调谐半导体激光器作为探测光源,通过温度和驱动电流调谐激光器输出的波长,使其覆盖目标气体的单条或多条气体吸收线,利用获得的特征吸收光谱信息来反演测量目标的特性参数,如温度、浓度和压强。

TDLAS温度测量的方法有两种:双线测温,高斯展宽^[10]。其中,高斯展宽方法依赖于光谱展宽参数的精确测量,精度的提高受到限制。因此,选取TDLAS双线测温方法,采用同一目标物质的两条吸收谱线线强比值来反演温度,具有高灵敏度和高准确度等优点。

TDLAS技术基于Beer-Lambert吸收定律:当一束频率为 ν 、强度为 I_0 的探测光经过气体吸收后的透射光强 I_t 为

$$I_t = I_0 \exp[-S(T)\phi(\nu)PxL], \quad (1)$$

式中 $S(T)$ 是吸收谱线的线强,单位 $\text{cm}^{-2}\text{atm}^{-1}$; $\phi(\nu)$ 是积分面积归一化吸收线形函数(整个频域上积分为1),单位 cm ; P 是测量环境压力,单位 atm ; x 是物质浓度(目标气体与总气体的体积比); L 是吸收光程,单

位 cm。其中, 吸收谱线的线强 $S(T)$ 是温度 T (单位 K) 的函数, 随温度变化的关系为

$$S(T) = S(T_0) \frac{Q(T_0) T_0}{Q(T) T} \exp \left[-\frac{hcE''}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \left[1 - \exp \left(-\frac{hc\nu_0}{kT} \right) \right] \left[1 - \exp \left(-\frac{hc\nu_0}{kT_0} \right) \right]^{-1}, \quad (2)$$

式中 Q 为分子总配分函数, h 为普朗克常数, c 为光速, k 为玻尔兹曼常数, E'' 为分子跃迁低态能级值。

由式 (2) 可知线强主要受配分函数和低态能级值的影响, 且在大部分情形下最后两项乘积几乎保持不变, 近似为 1。相应的积分吸光度 A 为 (压力、浓度均匀的情况)

$$A = \int_{-\infty}^{+\infty} -\ln \left(\frac{I_t}{I_0} \right) d\nu = S(T) P x L. \quad (3)$$

当气体介质均匀时, 沿同一光路测量的两条吸收谱线经历的气体温度、浓度和光程均相同, 积分吸光度比值即为线强之比。

假设有 1、2 两条吸收线谱线, 积分吸光度之比为

$$R(T) = \frac{A_1}{A_2} = \frac{S_1(T)}{S_2(T)} = \frac{S_1(T_0)}{S_2(T_0)} \exp \left[-\frac{hc}{k} (E_1'' - E_2'') \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right], \quad (4)$$

可以看出, 双线测温主要是通过测量两条吸收谱线的积分吸光度的比值来反推温度, 且两条吸收谱线的低态能级值之差越大, 测温灵敏度越高。

2.2 谱线选取

TDLAS 技术中关键部分是选取光谱谱线, 适合的光谱谱线可以提高探测的灵敏度和精度, 从而提升系统的整体性能。水汽作为大多数燃烧过程的产物, 是一种理想的目标气体, 并且在近红外波段有大量较强的吸收跃迁谱线。因此选取水汽的谱线作为测温谱线, 选取谱线的原则如下^[12]

- 1) 吸收线在所测温度范围内拥有足够的线强, 从而对温度具有较高的敏感度;
- 2) 所选谱线周围没有过多邻近吸收线的干扰, 两条谱线的吸收线强的比值在测温范围内是温度的单调函数;
- 3) 两条吸收谱线低态能级值之差足够大, 由式 (4) 可知低态能级值之差越大对温度的灵敏度越高。

依据上述原则, 结合 HITRAN^[12] 光谱数据库选出水汽的两条吸收谱线: 7154.35 cm^{-1} 和 7467.77 cm^{-1} , 其线强采用相关文献的标定值^[13-14], 具体参数如表 1 所示。

表 1 双线测温选取的谱线参数 (296K)

Lines(cm^{-1})	Low state energy(cm^{-1})	line strength($\text{cm}^{-2} \cdot \text{atm}^{-1}$)
7154.35	1789.0426	3.71×10^{-4}
7467.77	2551.4822	1.27×10^{-5}

测温选取的两条吸收谱线在 $T=1600 \text{ K}$, $P=1 \text{ atm}$, $x=0.05$, $L=10 \text{ cm}$ 条件下的吸光度模拟曲线如图 1 所示。

可看出两条吸收线在高温下有较强的吸收能力, 满足测量信噪比 (测量系统平均噪声水平为 1.5 % 左右) 要求, 并且不与周围的谱线重叠。

所选两条测温谱线的线强与线强比值随温度 (500~2500 K) 的变化曲线如图 2 所示。

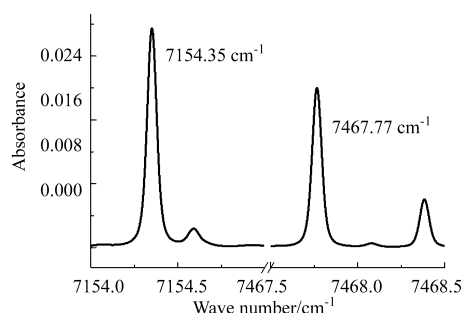


图 1 吸光度模拟曲线

Fig.1 Simulation curve of absorbance

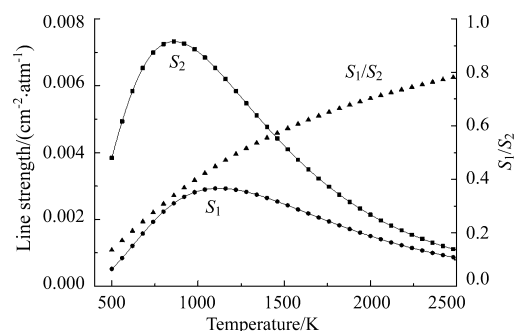


图 2 谱线线强和线强之比随温度的变化

Fig.2 Variation of line strength and line strength ratio with temperature

从图中可知两条吸收谱线在中高温段内有较强的线强, 从而可以实现对该温度范围内的温度测量。同时, 线强比值与温度在此范围内符合单调变化规律, 满足温度反演唯一性要求。此外, 选取的谱线集中在 $1.3\sim 1.4\ \mu\text{m}$ 之间, 不仅有成熟的商用 DFB 激光器供选择, 而且探测的激光信号可通过光纤传输, 有利于远距离探测, 提高系统稳定性和降低成本。

3 实验装置

实验采用甲烷 / 空气预混平焰炉作为温度测量对象, 其燃料和氧气在进入燃烧区域之前经过了充分的预混合, 因此能够产生一维特征稳定的标准火焰 (火焰温度和燃烧产物浓度具有高度的时间和空间均匀性)^[11], 广泛地应用于物理化学燃烧的研究和诊断技术的标定校准。实验通过控制进气的当量比 (equivalence ratio) 来控制燃烧状况, 模拟出不同状态下的燃烧温度。当量比是表示可燃混合气中燃料量与空气量配合比例的一个参数, 当量比为 1, 则表示完全燃烧, 大于 1, 表示可燃混合气中所含实际空气量少于所必需的理论空气量, 即空气量不足。反之, 空气量过剩。TDLAS 测温系统结构如图 3 所示。

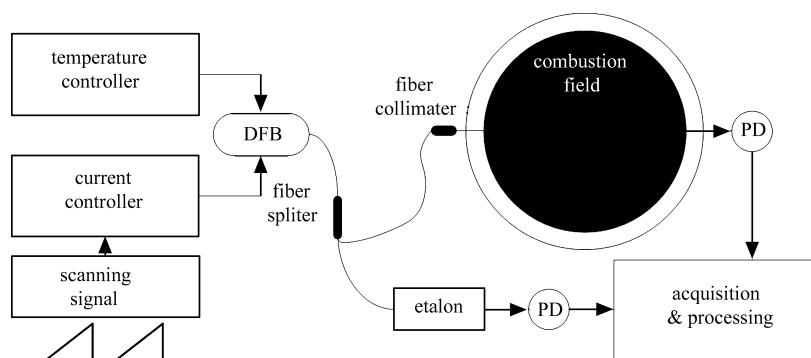


图 3 TDLAS 平焰炉测温系统示意图

Fig.3 Schematic of TDLAS temperature measurement system for flat flame burner

实验采用 $1339\ \text{nm}$ 和 $1398\ \text{nm}$ 两支 DFB 激光器作为探测光源, 其具有线宽窄 ($< 3\ \text{MHz}$)、出光线性良好、工作稳定等优点。在温度控制的基础上, 电流驱动电路对两支激光器加载 $500\ \text{Hz}$ 的分时扫描锯齿信号, 使激光器输出的波长和强度随扫描信号变化而变化, 覆盖检测所需的吸收谱线。两支激光器输出的激光先合束后经分束器分为两路, 一路为测量光路, 由光纤准直器准直发射, 穿过待测区域, 进入探测器; 另一路经过干涉计之后直接进入探测器, 用于波长标定。工控机采集到光谱信号, 处理得到吸光度比值,

从而反演出温度信息。

针对甲烷 / 空气预混平焰炉的温度测量, 测量光线沿径向平行于炉面穿过测量燃烧区域, 选取的测量高度距离炉面 5 mm, 吸收光程为 11 cm。平焰炉在给定的区域内相对稳定且测量区域比较短, 可近似认为温度场均匀, 且外界用 N_2 做了隔离处理, 排除环境中水汽的干扰, 可认为只有测量区域内的水汽吸收。

双线测温需要扫描两条吸收谱线, 一般需要两支激光器才能实现。因此, 针对多波长扫描的问题, 采用了双光束分时扫描技术。两支激光器在温度控制的基础上, 分别采用相位差为 180° 的锯齿分时扫描信号进行驱动, 实现一个激光器工作的同时另一个关断, 在一个周期内交替工作, 分时输出对应波长的激光, 并耦合进同一光路, 实现多波长探测的目标。分时扫描的光强信号 (燃烧当量比为 1) 和波长标定的干涉信号如图 4 所示。

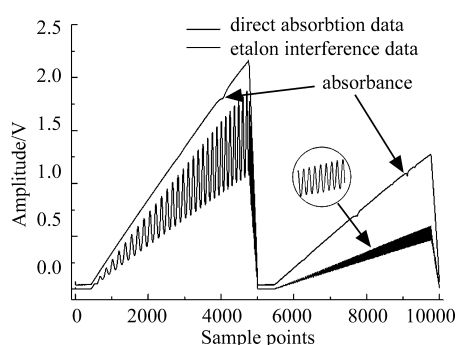


图 4 直接吸收信号和标准具信号

Fig.4 Direct absorption data and etalon data

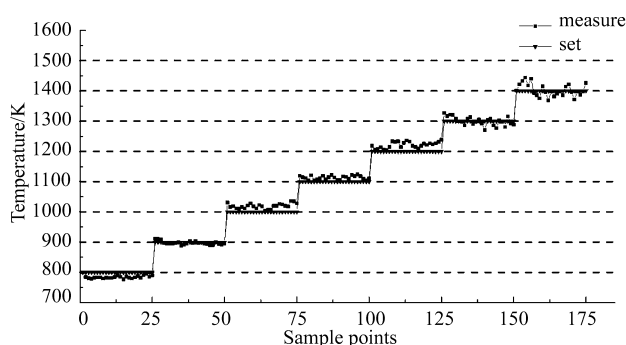


图 5 TDLAS 高温管式炉测温标定实验结果

Fig.5 Calibration results of TDLAS temperature measurement in high temperature tube furnace

从图 4 可知, 采集到的分时扫描光强信号可在时域中分开, 因此可以对其分别处理, 实现多波长探测的目的。从图中光强信号上可以看到实验所选取的两条吸收谱线的吸收和其他吸收谱线距离较远, 干扰可以忽略。不同的激光器对电流的响应不同, 因此具有不同的输出光强和扫描范围。

实验中一路激光通过标准具 ($L=5$ cm, $FSR=0.07$ cm^{-1}) 产生干涉信号, 用来作为波长标定, 将时域信息与波数对应, 从而计算出吸收谱线的积分吸光度。

4 实验结果和讨论

4.1 TDLAS 高温管式炉测温验证实验

为了进一步确定 TDLAS 测温系统的稳定性, 需要在实验室高温管式炉上进行测温验证实验, 验证 TDLAS 测温方法的可靠性。高温管式炉可以设定一个温度、浓度和压力相对恒定的封闭测量区域, 可用于测温验证实验。实验设置了 7 个温度台阶: 800~1400 K, 每隔 100 K 一个台阶。利用 TDLAS 技术在不同温度台阶下进行温度测量, 结果如图 5 所示。

由图 5 可知, 由 TDLAS 系统测量的温度与高温管式炉的设定温度最大偏差在 50K 以内。同时, 在高温区域结果波动较大, 这是选取的谱线在高温阶段的测温灵敏度有所降低所导致的。

4.2 TDLAS 平焰炉温度测量

在高温管式炉测温验证实验的基础上, 采用 TDLAS 测温方法按照图 3 搭建的系统对平焰炉进行温度测量。实验主要针对平焰炉在不同当量比燃烧状态下进行温度测量, 测量高度距炉面 5 mm。

实验中为了确保燃烧场达到稳定状态, 需要燃烧进行一定时间再开始采集信号。图 6 为平焰炉当量比

为 1 时采集到的吸光度曲线, 并采用 Voigt 线型拟合情况。从拟合的残差 ($<1.5\%$) 结果可知拟合结果相对较好, 从而可以准确地计算出对应谱线的积分吸光度。实验中采集了七种 (0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3) 当量比下的吸收光谱信号, 计算出相应的吸光度比值, 反演出对应的燃烧温度。

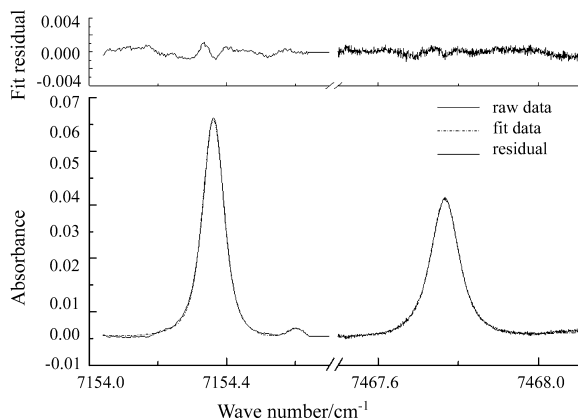


图 6 当量比 1.0 下测量吸光度曲线拟合结果

Fig.6 Fitting results of the absorbance curve at equivalence ratio of 1.0

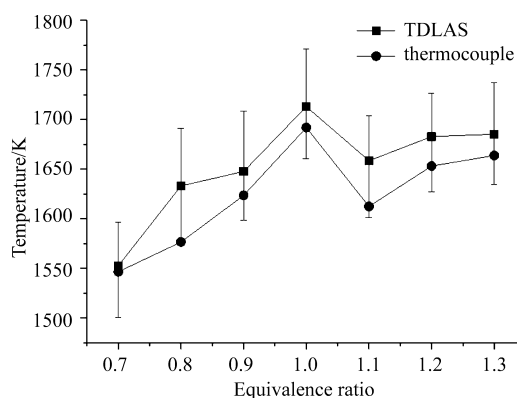


图 7 TDLAS 和热电偶对平焰炉温度测量结果

Fig.7 Temperature measurement results of flat flame furnace by TDLAS and thermocouple

实验过程中同时采用热电偶进行对比温度测量。因为热电偶侵入火焰测量会干扰燃烧场并与外界产生热交换, 使测量值存在误差。因此, 实验采用了四种不同尺寸 (热电偶头直径: 0.50, 0.64, 0.95, 1.27 mm) 的外露型热电偶对同一区域进行测量, 并且对所测量的温度值根据辐射校正公式外推计算出测量场的真实温度^[14-15]。两种方法测量结果如图 7 所示。

从图中可以看出两种测量方法测出的温度随当量比变化具有较好的一致性, 相对误差小于 3.8%, 在温度测量验证试验的波动范围之内。两种方法均在完全燃烧时 (即当量比为 1) 温度测量值最大, 在当量比最小时温度最低, 因为此时燃料较少, 并且多余的空气会带走燃烧热量。TDLAS 技术温度测量值整体相对于热电偶测量值偏高, 这是热电偶辐射校正外推法带来了一定的误差造成的。上述实验验证了 TDLAS 技术作为一种非侵入式的温度测量技术的准确性和可靠性。

5 结 论

研究了基于 TDLAS 技术的双线测温方法, 利用双光束分时扫描技术, 实现了对水蒸气的 7154.35 cm^{-1} 和 7467.77 cm^{-1} 两条吸收谱线的同时测量, 满足双线测温要求。针对燃烧场温度的测量问题, 首先介绍了谱线选取方法并选取出适合的测温谱线对; 其次, 对 TDLAS 温度测量技术进行验证实验, 测温误差小于 50 K; 最后, 开展了平焰路火焰温度在线检测实验研究, 并与热电偶测量结果进行对比分析, 两者误差小于 3.8%。结果表明, TDLAS 技术可以实现对燃烧场温度的非侵入式测量, 具备快速和可靠等优点, 可以为燃烧诊断提供有力的依据, 满足燃烧过程优化应用需要。

参考文献:

- [1] Hanson R K, Davidson D F. Recent advances in laser absorption and shock tube methods for studies of combustion chemistry [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2014, 44: 103-114.
- [2] Xu Zhenyu, Liu Wenqing, Kan Ruifeng, et al. Temperature measurements based on tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(23): 234204(in Chinese).

- 许振宇, 刘文清, 阚瑞峰, 等. 基于可调谐半导体激光器吸收光谱的温度测量方法研究 [J]. 物理学报, 2012, **61**(23): 234204.
- [3] Ma L H, Lau L Y, Ren W. Non-uniform temperature and species concentration measurements in a laminar flame using multi-band infrared absorption spectroscopy [J]. *Applied Physics B*, 2017, **123**(3): 1-9.
- [4] Gardner J L, Jones T P, Davies M R. A six-wavelength radiation pyrometer [J]. *High Temperatures High Pressures*, 1981, **13**: 459-466.
- [5] Dai Jingmin, Shi Yiguo, Kang Weimin, *et al.* Multispectral true temperature measurement for ablative materials [J]. *Journal of Astronautics*, 1996, **17**(3): 25-30(in Chinese).
戴景民, 石义国, 康为民, 等. 烧蚀材料的多光谱真温测量方法 [J]. 宇航学报, 1996, **17**(3): 25-30.
- [6] Eckbreth A C, Dobbs G M, Stufflebeam J H, *et al.* CARS temperature and species measurements in augmented jet engine exhausts [J]. *Applied Optics*, 1984, **23**(9): 1329-1340.
- [7] Zhang Lirong, Hu Zhiyun, Zhang Zhenrong, *et al.* Temperature measurement in stable combustion field with one-dimensional used CARS [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(12): 2035-2038(in Chinese).
张立荣, 胡志云, 张振荣, 等. 一维非稳腔空间增强探测 CARS 技术对稳态燃烧场温度的测量 [J]. 强激光与粒子束, 2006, **18**(12): 2035-2038.
- [8] Schulz C, Sick V. Tracer-LIF diagnostics: quantitative measurement of fuel concentration, temperature and fuel/air ratio in practical combustion systems [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2005, **31**(1): 75-121.
- [9] Webber M E, Wang J, Sanders S T, *et al.* In situ combustion measurements of CO, CO₂, H₂O and temperature using diode laser absorption sensors [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2000, **28**(1): 407-413.
- [10] Xu Zhenyu. *Research on Temperature Measurement and 2D Distribution for Transient Combustion Process by Infrared Absorption Spectroscopy* [D]. Hefei: Doctorial Dissertation of Hefei Institute of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, 2012(in Chinese).
许振宇. 瞬态燃烧过程红外激光光谱温度场测量与重构方法研究 [D] 合肥: 中国科学院合肥物质科学研究院博士论文, 2012.
- [11] Li Fei, Yu Xilong, Chen Lihong, *et al.* Temperature and water vapour concentration measurements of CH₄/Air premixed flat flame based on TDLAS [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2009, **23**(2): 40-44(in Chinese).
李飞, 余西龙, 陈立红, 等. TDLAS 测量甲烷 / 空气预混平面火焰温度和 H₂O 浓度 [J]. 实验流体力学, 2009, **23**(2): 40-44.
- [12] Gordon I E, Rothman L S, Hill C, *et al.* The HITRAN2016 molecular spectroscopic database [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2017, **203**: 3-69.
- [13] Zhou X, Jeffries J B, Hanson R K. Development of a fast temperature sensor for combustion gases using a single tunable diode laser [J]. *Applied Physics B*, 2005, **81**(5): 711-722.
- [14] Zhang Guangle. *Research on Measurement Method for One-Dimensional Temperature Non-Uniformity Based on Multiple-Line* [D]. Hefei: Doctorial Dissertation of University of Chinese Academy of Sciences, 2016(in Chinese).
张光乐. 基于多吸收线 TDLAS 的一维温度不均匀性测量方法研究 [D]. 合肥: 中国科学院大学博士论文, 2016.
- [15] Shaddix C R. Correcting thermocouple measurements for radiation loss: a critical review [R]. Sandia National Labs, CA(US), 1999.