1000 ~ 1900 K 范围内 TDLAS 测高温标定方法设计及实验验证

杨秋临[1,2]，李 欣[1,2]，黄漫国[1,2]，刘德峰[1,2]，李 飞[3]，陈晓明[4]
(1. 航空工业北京长城航空测控技术研究所，北京 101111；2. 状态监测特种传感技术航空科技重点实验室，北京 101111；
3. 中国科学院 力学研究所，北京 100190；4. 中国航发沈阳发动机研究所，辽宁 沈阳 110015)

摘要： 针对航空发动机对燃烧尾焰温度测试的需求，开展基于吸收光谱原理的可调谐半导体激光器吸收光谱(TDLAS)测温系统研究。在实验室环境中采用辐射升温法创造高温气体恒温区，完成温度标定系统及标定流程设计。根据 TDLAS 测温系统 1000 ~ 1900 K 温度范围的温度标定，对比分析各个温度点标定过程中信噪比的变化过程，证实了标定方法的可行性。对标定过程中信噪比恶化提出修正措施。

关键词： 吸收光谱；温度测试；标定实验；可调谐半导体激光器；航空发动机
中图分类号： TP274+.5；O433.1 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000 - 8829(2020)07 - 0008 - 06
doi： 10.19708/j.ckjs.2020.04.227

Design and Experiment Verification of TDLAS High Temperature Calibration Method at 1000 ~ 1900 K Temperature Range

YANG Qiu-lin[1,2], LI Xin[1,2], HUANG Man-guo[1,2], LIU De-feng[1,2], LI Fei[3], CHEN Xiao-ming[4]
(1. AVIC Beijing Changcheng Aeronautic Measurement and Control Technology Research Institute, Beijing 101111, China;
2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Special Condition Monitoring Sensor Technology, Beijing 101111, China;
3. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China;
4. Shenyang Engine Research Institute of AECC, Shenyang 110015, China)

Abstract: In order to meet the requirements of aero-engines for the temperature measurement of combustion tail flames, a tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) temperature measurement system based on the principle of absorption spectroscopy is developed. In the laboratory environment, the radiant heating method was used to create a constant gas high temperature zone, and the designs of the temperature calibration system and calibration process were completed. According to the temperature calibration of the TDLAS temperature measurement system in the temperature range of 1000 ~ 1900 K, the variation process of the signal-to-noise ratio at each temperature point during the calibration process was compared and analyzed to verify the feasibility of the calibration method. With further attempts, corrective measures were taken for the deterioration of the signal-to-noise ratio during the calibration process.

Key words: absorption spectroscopy; temperature measurement; calibration experiment; tunable diode laser; aero-engines

收稿日期： 2020 - 01 - 23
基金项目： 国防基础科研计划资助(JCKY2016205B016)
作者简介： 杨秋临(1992—)，男，白族，硕士，助理工程师，主要研究方向为航空特种传感技术。

引用格式： 杨秋临，李欣，黄漫国，等. 1000 ~ 1900 K 范围内 TDLAS 测高温标定方法设计及实验验证[J]. 测控技术，2020，39(7)：8 - 13.
YANG Q L, LI X, HUANG M G, et al. Design and Experiment Verification of TDLAS High Temperature Calibration Method at 1000 ~ 1900 K Temperature Range[J]. Measurement & Control Technology, 2020, 39(7): 8 - 13.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

基于可调谐半导体激光器吸收光谱(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy,TDLAS)的温度测试技术是一种非接触式测试技术[1],可以应用于航空发动机的燃烧室高温气流诊断中。相对于传统的接触式热电偶测温方法,非接触式测量避免了对流场的干扰。目前存在的几种利用光谱进行非接触式测试方法包括基于自发拉曼光谱(Spontaneous Raman Spectroscopy,SRS)[2]、激光诱导荧光(Laser Induced Fluorescence,LIF)[3]、相干反斯托克斯拉曼光谱(Coherent Anti-stroke Raman Spectroscopy,CARS)[4]和吸收光谱(Absorption Spectroscopy,AS)[5]的4种技术。对于高温测量,自发拉曼光谱法以其高精度和测温范围大成为主流的温度测试手段,被广泛应用于表面温度测量中,可以满足极高温段的温度测试需求,但是由于其对于测试环境的要求极高,所以在实验室中较为常见。对于发动机温度测试而言,发射光谱法测试的可行测试对象为尾气中的固体颗粒辐射。由于炭烟颗粒在发动机中含量变化大,所以在温度不变的情况下依然有较大的辐射量变化,使得测试精度无法保证。

相较之下,TDLAS 温度测试的优势体现在双谱线测试的情况下,光程、浓度、透光度对测试结果影响较小,因此更加适用于恶劣的测试环境。同时在过去10～15年中,随着近红外可调谐激光二极管的工艺提升,高强度、可调谐范围广[6-7]、窄线宽、相干性[8]、方向性、体积小、便于操作、价格低廉、单模特性优秀等优点都得到了长足的发展。目前 TDLAS 气体分析广泛应用于天然气开采、大气环境监测、工业过程监测、流场诊断等场景中[10]。

在航空航天发动机中,高温环境下的燃气成分、浓度等状态量的测量对于了解发动机内部的燃烧情况非常重要,同时也是燃烧组织和结构优化的重要依据。在已知 TDLAS 温度测试系统优势的情况下,尝试将其简单的测试系统结构和精确的定量测试能力应用于发动机尾气测试中。

目前国内 TDLAS 温度测试处在实验室研发阶段,仍有若干项关键技术有待突破,如环境适应性、测量的光学结构可靠性、电子学系统长期稳定性、算法高效性、设备小型化与智能化、测量结果准确性等。其中高温标定技术是 TDLAS 测试准确度、精度和多环境适应性的关键。光学设备高温标定方法的类似研究已经在高温发射谱有较新进展,实现了1473 K以下温度场的建立,完成了辐射量标定[9],而在吸收光谱测量中尚未出现进展。本文将展示在高温炉中尝试进行高温吸收光谱标定试验的结果,并从中找到可行的改进措施,优化标定试验方法。

本文将从吸收光谱原理出发,介绍 TDLAS 温度测试的原理。同时给出标定试验的设备组成和使用方法,通过对比分析试验中的各个标定温度点采集的光谱数据解释干扰的来源,并据此给出避免干扰的可行的方法以及判断系统可标定最高温度的方法。

1 TDLAS 测温原理

在多数燃烧过程中,有大量的水蒸气产生,基于吸收光谱法,以水蒸气为目标气体通过 Beer-Lambert 原理实现对燃烧尾气温度的测量[5,11]:

$$I(t) = I_0(t)\exp[-S(T)NLP\phi(v)] \tag{1}$$

式中,I 为出射光强;I_0 为入射光强;出射与入射光强间存在的衰减关系由吸收谱线强度 $S(T)$、气体浓度 N、光程长度 L、气体压强 P 和线性函数 $\phi(v)$ 决定。$S(T)$ 是温度的函数,且不同波长的吸收谱线强度随温度变化线性变差,同时受到光程水分浓度压强等其他因素的影响,所以通过对两个不同波长处吸收谱线做比值可以消除无关因素的影响,得到温度与吸收谱线强度的单调函数来进行温度反演,即为双线测温法。图1为在不同温度下两条 H_2O 吸收线的强度及比值随温度变化的曲线[12-13]。

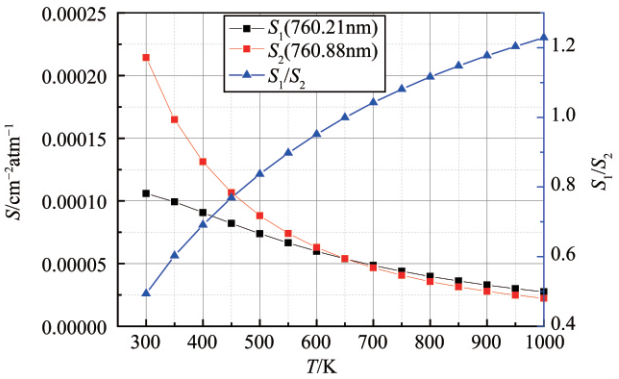


图1 两条谱线的线强及比值与温度变化关系(HITRAN 数据)

由吸收谱线强度随温度变化的关系可得,对具有不同的低态能级能量 E'' 的谱线,其线强对温度的依赖不同,在实际测量中需要选择具有较大低态能级能量差的吸收谱线作为目标测量谱线。在测量过程中,将分别覆盖两个目标吸收谱线的光束经同一路径穿过测量区域。通过计算该两条谱线积分吸光度的比值 $R(T)$,可消除气体浓度、压力、光程等共同参数的影响,最终得到仅与温度相关的吸收谱线强度的比值,其表达式为[14]

$$R(T) = \frac{H_2}{H_2'} = \frac{S_1(T)}{S_2(T)} = \frac{S_1(T_0)}{S_2(T_0)}\exp\left[-\frac{hc}{k}(E''_2 - E''_1)\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \tag{2}$$

式中,H_2 为二次谐波幅值;$S(T)$ 为线强度与温度的关系函数;T_0 为参考温度;T 为实际温度;k 为玻尔兹曼常数;h 为普朗克常数;c 为光速。由于所选吸收线波

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

长差异不大，式(2)中忽略了比值接近于 1 的受激辐射修正项，由此可通过两条吸收谱线的积分吸光度比值，反演得到温度值[15]，如式(3)所示：

$$T=\frac{\frac{hc}{k}\left(E''_2-E''_1\right)}{\ln\frac{H_2}{H'_2}+\ln\frac{S_2(T_0)}{S_1(T_0)}+\frac{hc}{k}\frac{E''_2-E''_1}{T_0}} \tag{3}$$

TDLAS 测量系统由中心波长为 1392 nm 和 1343 nm 的分布式反馈激光器(Distributed Feedback，DFB)、激光器温控模块、电流控制模块、信号发生器、探测器、数据采集卡和信号处理软件等组成。首先利用激光器控制模块调节激光器的工作温度和驱动电流，信号发生器产生的 10 Hz 扫描电流加到激光器的电流驱动板上，使激光器输出激光的波长在一定范围连续变化，由于波长扫描过程中伴随着线性的光强变化，故光信号强度可以反映中心波长、扫描强度与时间的关系，如图 2 所示[16]，一低频锯齿波信号和高频正弦信号线性叠加组成光强调制信号。最后由探测器测量激光的光强变化情况，将其转化为电信号由数据采集卡再转化为数字信号输入到软件中，通过计算机进行光谱分析，并按照所述的修正方法对得到的数据温度进行反演运算和最终结果显示。

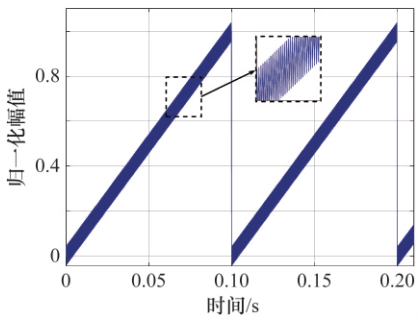


图 2　归一化扫描信号图

2　标定设备及标定方法

由于实际燃烧环境的不稳定因素过多，使用燃烧室环境对 TDLAS 设备进行标定会带来诸多不可控因素的影响。所以为了确保标定温度的精确，需要建立一个稳定、均匀且可调的温度环境对测温设备进行标定。为了达到这个目标，提出了如图 3 所示的温度标定系统图。该系统使用锯齿波信号与小幅度正弦信号作为波长扫描信号来控制激光器发出光信号。为了保证激光控制器、激光器和探测器不受热端部件的影响，让光信号经过 10 m 光纤后再从管式高温炉的一端入射另一端出射，过程中激光通过输入和输出端的准直器完成准直。出射激光通过准直器进入 10 m 光纤后再经过光电探测器转换为电流信号。此时由于光信号在空气中发生的散射和吸收，光功率衰减，所以在转换为电信号后，首先经过前置放大器放大，再通过锁相放大器提取二次谐波。二次谐波信号经过模数转换模块采集之后经过数据处理得到温度读数。

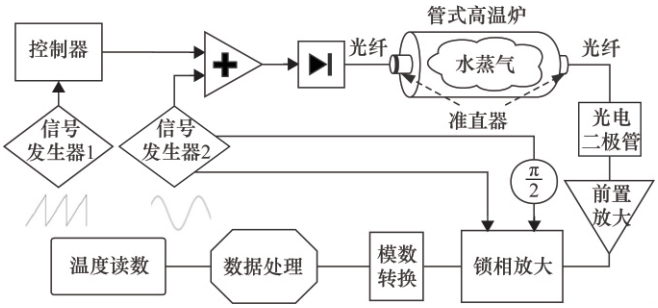


图 3　温度标定系统图

其中高温炉为三段式加热，目的是在炉管中部创造出一个温度均匀的控温区间，采用耐高温的蓝宝石窗口填入炉管两端以缩短两侧的低温气体区域，如图 4 所示，X 为炉管截面测试点距轴心距离，Y 为管径方向距离。两端通过石棉作为填充保证平均升温效率，进一步降低两侧与中部最高温温差。这样可以使得测量目标水分子集中在炉管中央长为 40 mm 内的温度区间，在该区间上可以近似认为温度均匀。

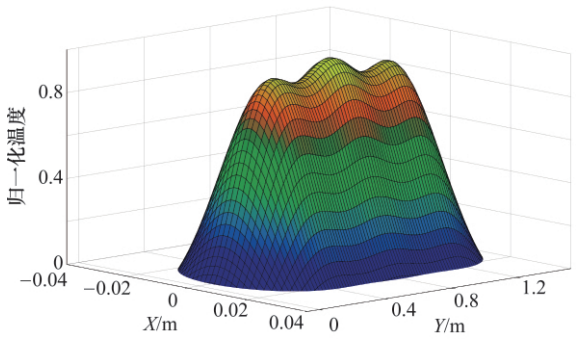


图 4　炉管内温度分布图

管内加入注水管，在高温试验过程中控制管内水蒸气浓度。根据 Beer-Lambert 定律可知，在利用两条吸收谱线求解温度过程中，气体浓度和光程分量被消除，所以水分浓度值不会影响测量温度值。但由于系统存在背景辐射噪声和电噪声，当测量高温气体时，过低的光强吸收率会使得吸收峰被噪声淹没，此时向炉腔内通入少量水提高光强吸收率，从而达到提高信噪比的目的。充入水蒸气后高温炉腔内温度经历一段时间后达到稳定，此时即可取值作为标定点。

对于炉管两端准直器采用气冷方式，向光学镜头部吹高纯氮气降低热端部件温度，同时减少腔外空气中水分对试验的影响。并且采用滤光片降低高温炉管发热产生背景辐射的影响，炉管端部准直部分如图 5 所示。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

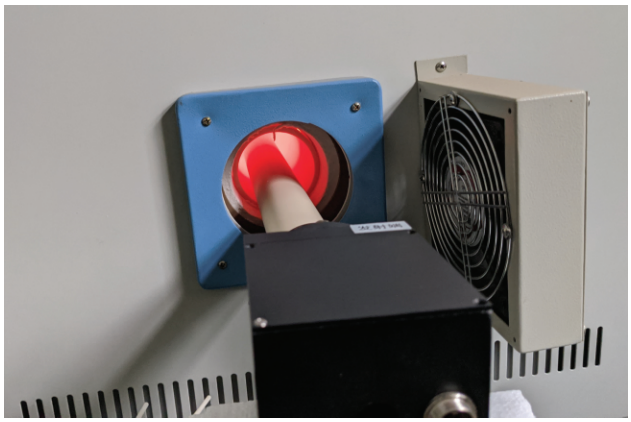
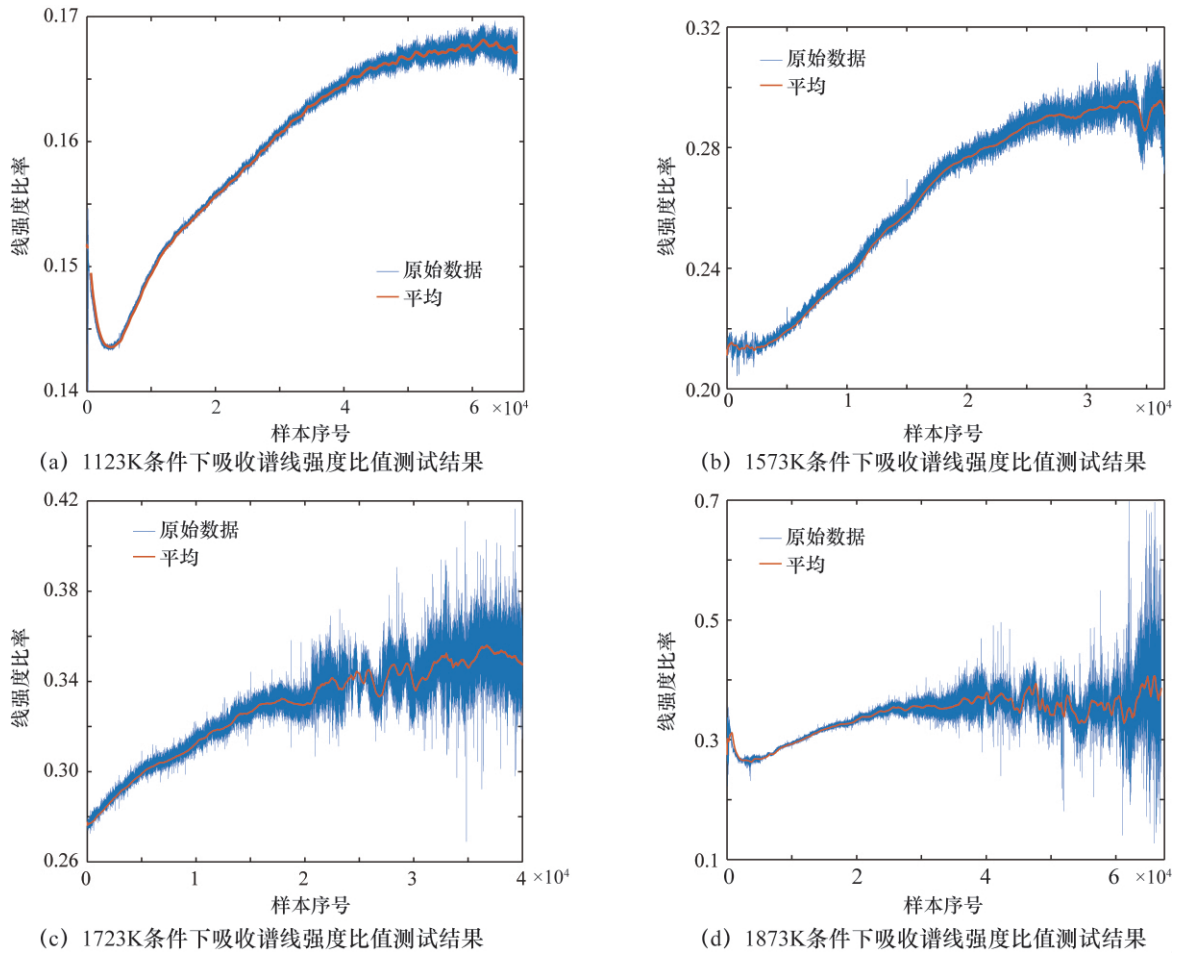


图 5　准直器端实物图

3　结果及分析

使用高温管式炉对 1023～1873 K 温度范围的温度点进行标定，每 50 K 进行一次实验，每次实验历时 1 h。每次实验首先将炉温升至待标定温度，再通过注水管向高温炉内加水，注水量随标定温度的升高而升高。1523 K 以下时每次实验注水约 20 ml，1523 K 以上时根据注水后平稳阶段的持续时间适量增加注水量，1873 K 时注水量约 80 ml。由于该方法测试结果为光路上气体线平均温度，注入低温水会使测得炉内平均气体温度下降，而两个吸收谱线强度和信噪比显著提升，在注水完成后吸收谱线强度与信噪比达到极大点，此时 TDLAS 测试系统读数与高温炉显示温度差距大，需要等待炉内水分子升温并达到平衡，温度上升时两吸收谱线强度之比如图 6 所示。图中数据分别为实时两条谱线强度比率值以及该比率值平均值。均值采用气体传感器常用的移动平均方法，能够以最快速度排除接收信号中的高频抖动，使用低通滤波可以得到相似结果。考虑到管内压力，炉管未完全密封，此时随着温度上升，管内高温水分子逐渐扩散至空气中，此时信噪比随着水分流失而逐渐升高，相对噪声功率变化如图 7 所示。可以看出在加水初期噪声功率有最小值，而当测试温度逐渐趋于稳定后噪声功率明显提高。对趋势稳定的吸收谱线强度比值求平均值即可获得该温度下的标定点。如果此时继续实验会发现光强吸收率继续下降，由于水分不足，如果使用平均值点作为标定点，噪声导致的测量误差会超过能接受的最低误差范围 －20～20 K，判断此时错过最佳的标定时机。如果在信噪比过低时测温读数尚未到达稳定区间，说明注水量不足，需要注水后重新开始此温度的实验。



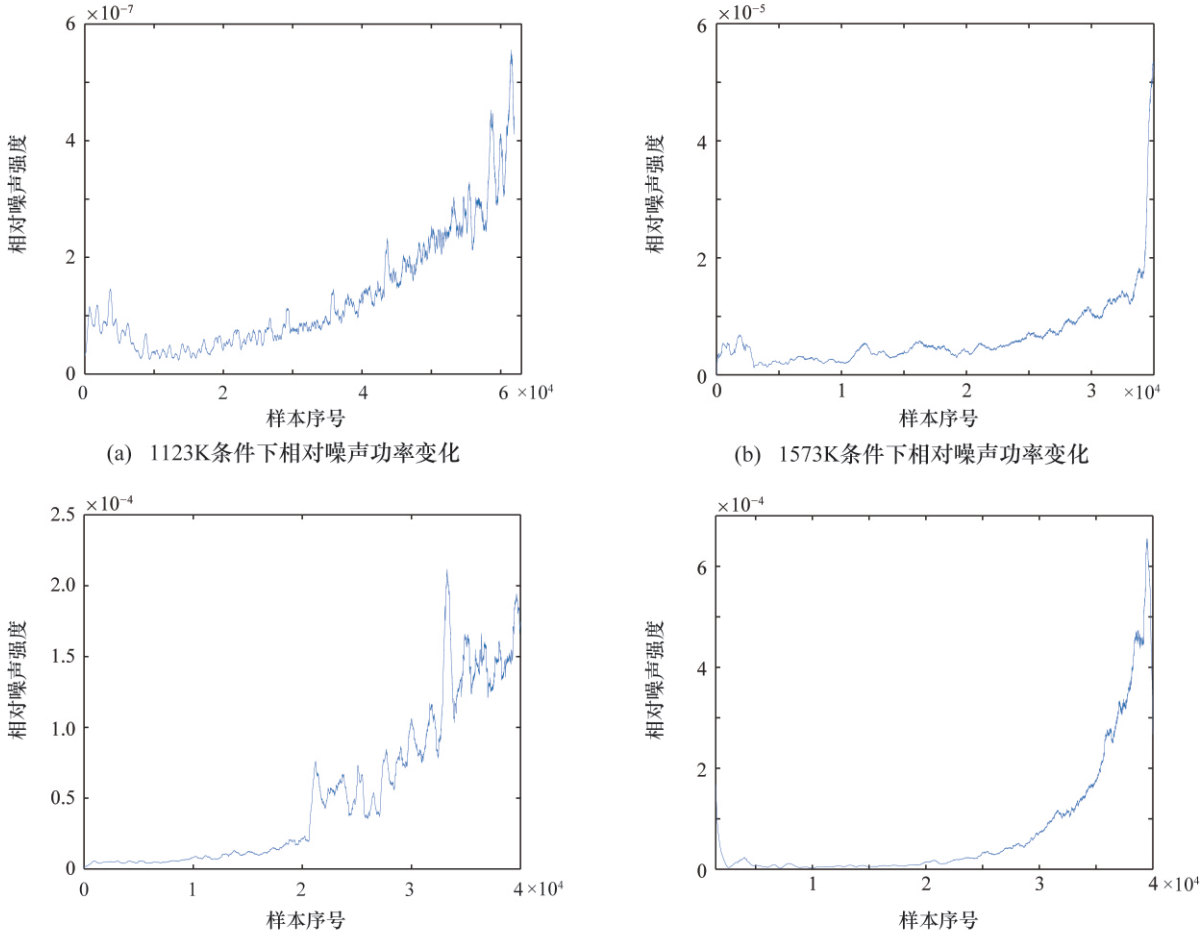
(a) 1123K条件下吸收谱线强度比值测试结果　(b) 1573K条件下吸收谱线强度比值测试结果

(c) 1723K条件下吸收谱线强度比值测试结果　(d) 1873K条件下吸收谱线强度比值测试结果

图 6　温升时两吸收谱线强度比值测试结果

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

在图 6 所示的 4 个温度点的标定实验中可以看出，在注水初期信噪比都处于较高水平，而随着采样点个数增加即测试时间推移，信噪比都出现了明显的降低。由于在试验过程中变化的因素只有腔内水蒸气浓度，据此推断影响信噪比的因素是水蒸气浓度，并且可以推测测得吸收谱强度比值随时间推移逐渐升高至稳定的过程是重新注入水分的升温过程。从 4 个温度点的对比中可以看出，随着温度上升，信噪比下降速度明显加快。由于标定腔不是密封腔体，所以在高温状态下水分运动更加剧烈，更快散发至空气中，造成信噪比下降加速。随着炉内水分均升温到炉温时，测得吸收谱线强度比值也随之趋于平稳，但在高温状态下稳定时的信噪比要低于低温的稳定状态信噪比，如图 7 所示。所以系统在低温状态有较低的测量误差。



(a) 1123K条件下相对噪声功率变化　(b) 1573K条件下相对噪声功率变化

(c) 1723K条件下相对噪声功率变化　(d) 1873K条件下相对噪声功率变化

图 7　温升时相对噪声功率变化

经过对每个温度点的反复测试，得到标定点结果如表 1 所示，将离散标定点作拟合可以得到如图 8 绿线所示的标定曲线，拟合产生的残差如表 1 与图 9 所示。可以看出：低温段噪声功率在 10^{-7} 量级，高温段噪声功率在 10^{-3} 量级，高温具有的最大测量误差为总量程的 2.6%；而拟合误差在 10^{-3} 量级，拟合误差为总量程的 2.8%；在测量最高 1873 K 时具有最大测量误差 ±19 K。

表 1　标定点数据表

温度/K	线强度比率	残差 (10^{-3})	温度/K	线强度比率	残差 (10^{-3})
1023	0.136	−2.623	1473	0.266	−1.040
1073	0.149	−1.439	1523	0.280	−2.188
1123	0.167	3.798	1573	0.300	2.957
1173	0.180	3.232	1623	0.310	−1.417
1223	0.193	2.006	1673	0.330	4.832
1273	0.204	−1.739	1723	0.340	1.848
1323	0.221	0.142	1773	0.350	−0.227
1373	0.237	0.790	1823	0.360	−1.249
1423	0.245	−6.605	1873	0.370	−1.077

4　结束语

在管式高温炉上对 1023 ~ 1873 K 范围内的 TDLAS 气体温度仪器进行了标定实验。对各个温度点的标定过程进行记录，对 1123 K、1573 K、1723 K 和 1873 K

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

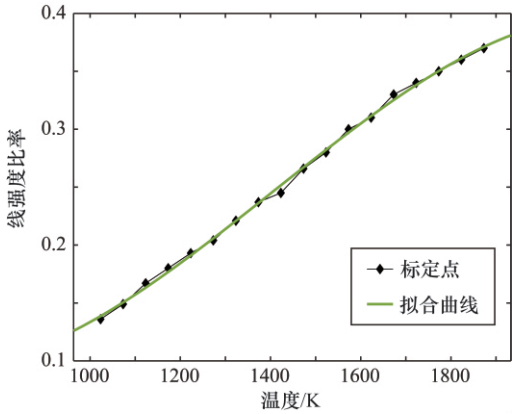


图 8 标定曲线拟合

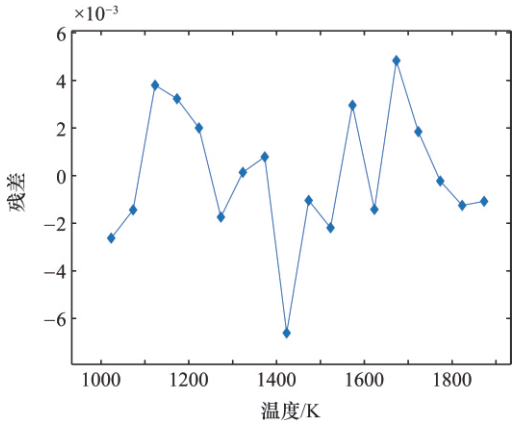


图 9 拟合误差

四个温度点的标定过程进行了对比分析，发现在升温过程中腔内水浓度是影响测试结果的信噪比的主要因素。试验过程中注水的方法能够在一定温度范围内解决信噪比随水浓度降低而降低的问题，当温度超过 1873 K 温度上限时，由于腔内水分在温度达到稳定前就降到较低水平，信噪比无法满足标定精度的需求。由此确定在该条件下能标定的最高温度即为此温度。分析了各个温度点的拟合误差，发现拟合误差和噪声最大值在同一量级，可以确定二者同时决定了系统的最大误差，最大拟合误差出现在 1423 K，而最大噪声误差出现在 1873 K。通过适当的拟合，将总体误差控制在 19 K 以内，满足燃烧室温度测试的需求。

参考文献：

[1] 李宁. 基于可调谐激光吸收光谱技术的气体在线检测及二维分布重建研究 [D]. 杭州: 浙江大学，2008.

[2] 耿乙迦，程鹏，赵冰，等. 用于燃烧场诊断的自发拉曼光谱检测仪器 [J]. 光谱学与光谱分析，2018，38(S1)：219 - 220.

[3] FU J，TANG C，JIN W，et al. Effect of preferential diffusion and flame stretch on flame structure and laminar burning velocity of syngas Bunsen flame using OH-PLIF [J]. International Journal of Hydrogen Energy，2014，39(23)：12187 - 12193.

[4] SEEGER T，GAO Y，KLIEWER C，et al. Time-resolved picosecond pure-rotational coherent anti-Stokes Raman spectroscopy for flame diagnostics (Invited) [C]//27th AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference. 2010.

[5] REID J，LABRIE D. Second-harmonic detection with tunable diode lasers comparison of experiment and theory [J]. Applied Physics B，1981，26：203 - 210.

[6] HUGI A，TERAZZI R，BONETTI Y C，et al. External cavity quantum cascade laser tunable from 7.6 to 11.4 μm [J]. Applied Physics Letters，2009，95(6)：061103.

[7] MAULINI R，BECK M，FAIST J，et al. Broadband tuning of external cavity bound-to-continuum quantum-cascade lasers [J]. Applied Physics Letters，2004，84(10)：1659 - 1661.

[8] WYSOCKI G，CURL R F，TIFTEL F K，et al. Widely tunable mode-hop free external cavity quantum cascade laser for high resolution spectroscopic applications [J]. Applied Physics B，2005，81(6)：769 - 777.

[9] ZHANG K H，LIU Y F. Modified two-temperature calibration method for emissivity measurements at high temperatures [J]. Applied Thermal Engineering，2020，168：114854.

[10] 聂伟，阚瑞峰，杨晨光，等. 可调谐二极管激光吸收光谱技术的应用研究进展 [J]. 中国激光，2018，45(9)：9 - 29.

[11] SUR R，SUN K，JEFRIES J B，et al. Scanned-wavelength-modulation-spectroscopy sensor for CO，CO_2，CH_4，and H_2O in a high-presure enginering-scale transport-reactor coal gasifier [J]. Fuel，2015，150：102 - 111.

[12] ROTHMAN L S，GORDON I E，BABIKOV Y，et al.，The HITRAN2012 molecular spectroscopic database [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer，2013，130：4 - 50.

[13] TAN Y，KOCHANOV R V，ROTHMAN L S，et al. Introduction of water-vapor broadening parameters and their temperature-dependent exponents into the HITRAN database：Part I—CO_2，N_2O，CO，CH_4，O_2，NH_3，and H_2S [J]. Journal of Geophysical Research：Atmospheres，2019，124(21)：11580 - 11594. doi：10.1029/2019JD030929.

[14] XIA H H，KAN R F，XU Z Y，et al. Measurements of axisymmetric temperature and H_2O concentration distributions on a circular flat flame burner based on tunable diode laser absorption tomography [C]//International Symposium on Optoelectronic Technology and Application. 2016. doi：10.1117/12.2246293.

[15] 聂伟，阚瑞峰，许振宇，等. 基于 TDLAS 技术的水汽低温吸收光谱参数测量 [J]. 物理学报，2017，66(20)：97 - 102.

[16] 王汝林，王咏涛. 红外检测技术 [M]. 北京：化学工业出版社，2006.

□

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net