

基于可调谐半导体激光器吸收光谱 的温度测量方法研究*

许振宇 刘文清 刘建国 何俊峰 姚路 阮俊 陈玖英
李晗 袁松 耿辉 阚瑞峰†

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

(2012年4月9日收到; 2012年5月5日收到修改稿)

介绍了基于半导体激光器作光源的吸收光谱测温技术研究和开发集成的系统, 利用 H_2O 在 $1.4 \mu\text{m}$ 附近的吸收线对的线强比值来反演温度. 介绍了该系统在实验室管式高温上的标定和开放炉管的测量验证, 结果显示各设置温度下测量温度波动平均在 50 K 左右. 之后在 CH_4 /空气预混平焰炉上进行进一步验证, 发现在吸收线 7153.7 cm^{-1} 长波一侧出现了 HITRAN08 中未给出的几条 H_2O 吸收和该吸收线重叠. HITEMP 中在这些波长上有对应的吸收线给出, 但对另一条选用的吸收 7154.354 cm^{-1} , 给出的可对应吸收线中心频率和测量不一致. 根据实验测量结果和 HITRAN/HITEMP 的对比, 对选择吸收线对的位置和线强等参数继续采用实验室标定结果, 并引入 HITEMP 中给出的这些高温下表现出来的吸收线参数, 在平焰炉不同当量比状态下做了测量对比.

关键词: 吸收光谱, 温度测量, 平焰炉

PACS: 42.62.-b, 07.07.Df

1 引言

燃烧是当前和未来很长时间内能量转换采用的主要形式, 其主要应用包括工业煤力发电和供热、发动机燃烧等. 为提高燃烧效率和控制污染的排放, 对燃烧的优化控制以及新型燃烧器的开发等都需要实时的燃烧参数测量. 温度、燃烧组分和浓度以及排放中的 NO_x 的准确测量将为这些研究提供支撑.

近年来, 激光光谱技术已经成为自然科学研究中的不可或缺的基本工具, 在环境、医学、工业等领域都有了广泛的应用. 由于快速非侵入测量特性, 激光光谱技术用于燃烧监测在国内外都涌现了大量研究和实际应用验证, 主要包括相干反斯托克斯拉曼散射 (CARS)^[1,2]、激光诱导荧光 (LIF)^[3-5] 和吸收光谱技术 (AS)^[6-10]. LIF 为不完全定量测

量, 扩展的应用平面激光诱导荧光 (PLIF) 可以进行燃烧场温度、组分的纵断面成像, 常用来做流场结构分析^[4,5]; CARS 为点式测量, 适用于温度和主要稳定组分测量^[11]. 采用半导体激光器作光源的吸收光谱技术 (TDLAS)^[6,7,10], 系统实现相对简单, 便于小型化, 可扩展同时进行温度、组分、流速测量和快速时间响应以及系统的良好环境适应性, 具有巨大的实际环境应用潜力. 直接吸收和波长调制技术的 TDLAS 燃烧监测应用, 已经在实验室和工业锅炉、发动机等多种实际环境中进行了验证, 并形成了一些燃烧诊断的产品^[12]. TDLAS 测量为视线路径积分测量, 利用多吸收线和预设路径分布模型或者分区段的方法可以得到测量路径上的一维分布信息^[13]; 结合断面重建 CT 技术, 可以获得燃烧场的二维温度、组分分布^[14,15]. H_2O 是碳氢燃料的主要燃烧产物之一, 并且在近红外和中红外波段均存在大量的吸收带, 是燃烧温度测量的首选气

* 中国科学院战略性先导科技专项 (批准号: XDA05040102) 和国家自然科学基金 (批准号: 61108034) 资助的课题.

† E-mail: kanruifeng@aiofm.ac.cn

体. 本文介绍了 TDLAS 测温的原理和开发的测温系统, 利用 H_2O 在 $1.4 \mu\text{m}$ 附近的两条吸收线线强比值测温, 详细描述了实验室标定处理和管式电加热炉及平焰炉燃烧测量验证. 在平焰炉验证时, 更高温下出现了一些 HITRAN2008^[16] 中的未给出吸收线, 最终确认为 H_2O 的吸收线, 给出了测量结果与 HITRAN, HITEMP^[17] 的对比和处理.

2 温度测量原理

TDLAS 技术采用窄线宽可调谐的半导体激光器作光源, 通过调谐激光器波长覆盖目标气体的单根或几根气体吸收线, 利用获得的特征吸收光谱来提取气体的一些特性参数, 如温度、密度和压强. 根据 Beer-Lambert 吸收定律, 频率为 ν 强度为 I_0 的入射光经过气体吸收后的透射光强为

$$I(\nu) = I_0(\nu) \exp[-S_i(T)\phi(\nu - \nu_{0i})P\chi L], \quad (1)$$

其中 $S_i[\text{cm}^{-2} \cdot \text{atm}^{-1}]$ 为吸收线线强, 是温度 T [K] 的函数 ($1 \text{ atm} = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$); ϕ [cm] 为积分面积归一化的吸收线形函数, 是频率和温度的函数; P [atm] 为总压, χ 为目标吸收气体占总气体的摩尔数比或者体积比, $P\chi$ 即目标气体的分压; L [cm] 为吸收光程长. 这里假设沿光路路径气体温度、压强及组分浓度均匀分布, 对于更一般的非均匀分布, 为路径的积分结果

$$I(\nu) = I_0(\nu) \exp\left(-\int_0^L P\chi(x)S_i[T(x)] \times \phi_\nu(\nu - \nu_{0i})dx\right). \quad (2)$$

吸收线线强 S 为温度的函数, 随温度变化关系为

$$S(T) = S(T_0) \frac{Q(T_0)}{Q(T)} \exp\left[-\frac{hcE''}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \times \left[1 - \exp\left(-\frac{hcv_0}{kT}\right)\right] \times \left[1 - \exp\left(-\frac{hcv_0}{kT_0}\right)\right]^{-1}, \quad (3)$$

其中 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'' 为跃迁低态能级. 可以看出线强的温度依赖主要影响因素是配分函数和低态能级 (玻尔兹曼分布的体现), 上式最后两项乘积接近 1, 而且在大部分情形下几乎保持不变. 配分函数可以采用 HITRAN 数据库^[16] 的结果, 给

出了分子在 70—3000 K 范围内总配分函数表, 应用时一般通过按温度分段的多项式近似或者用插值的方式重新计算. 分段多项式方式一般将温度分为三段: $70 \text{ K} < T < 405 \text{ K}$, $400 \text{ K} < T < 1500 \text{ K}$, $1500 \text{ K} < T < 3005 \text{ K}$, 每个温度段表示为温度的 3 阶多项式

$$Q(T) = a + bT + cT^2 + dT^3, \quad (4)$$

多项式系数可以从 HITRAN 数据库查到. 插值方式常采用拉格朗日插值法^[18].

TDLAS 温度测量分为三种方式, 即高斯展宽、双线测温、玻尔兹曼图法. 高斯展宽法利用气体的多普勒展宽随温度的变化, 后两者本质上都是利用气体分子在某能级上的布居数随温度的变化特性来反推计算温度. 因为实际分子吸收线展宽为多种展宽因素综合作用的结果, 准确分离出高斯展宽的贡献比较困难, 因而高斯展宽法一般用在高温低压这种多普勒展宽占优的环境下.

双线 TDLAS 测温技术是最常采用的方式, 一般选用同一气体的两条具有不同的跃迁低态能级的吸收线. 由 (3) 式可以比较容易地看出, 不同的低态能级对应不同的温度响应变化关系. 因此取两条吸收的线强比值可以消去配分函数, 只剩下对低态能级差的温度依赖项

$$R(T) = \frac{S_1(T)}{S_2(T)} = \frac{S_1(T_0)}{S_2(T_0)} \exp\left[-\frac{hc}{k}(E''_1 - E''_2) \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right]. \quad (5)$$

通过测量获得吸收线强的比值即可反推出温度, 所以 TDLAS 双线测温的任务即通过带吸收信息的测量光强信号来准确导出吸收线强比值. 采用直接吸收技术时, 通过参考光路或者选取测量透射光强信号的“无吸收”区域多项式拟合无吸收光强 I_0 , 计算吸光度 $-\ln(I/I_0)$, 然后在频域上积分, 即可获得与吸收线形无关的积分吸光度

$$A_i = \int_{-\infty}^{+\infty} -\ln\left(\frac{I(\nu)}{I_0(\nu)}\right) d\nu = P \int_0^L \chi(x)S_i[T(x)] dx. \quad (6)$$

因此当气体介质均一时, 上式中的积分项可以直接移到积分符号外, 而且因为沿同一光路测量的两条吸收线经历的气体温度和浓度相同, 吸光度比值即

为线强比

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{P\chi LS_1(T)}{P\chi LS_2(T)} = \frac{S_1(T)}{S_2(T)} = R(T). \quad (7)$$

对于更一般的情况,用吸光度比值作为线强比值测量的温度为路径平均意义下的一个等效温度值

$$\begin{aligned} \frac{A_1}{A_2} &= \frac{P \int_0^L \chi(x) S_1[T(x)] dx}{P \int_0^L \chi(x) S_2[T(x)] dx} \\ &= \frac{S_1(\bar{T})}{S_2(\bar{T})} = R(\bar{T}). \end{aligned} \quad (8)$$

3 实验装置

实验采用蝶形封装的DFB激光器,出射激光用光纤分束器分为2路,一路直接经过环形干涉计(FSR = 315 MHz)由探测器PD1接收,用于做波长标定;另一路用单模光纤传输到需要测试的现场,经准直器准直后发射穿过待测试区域,由透镜收集到PD2接收.PD1和PD2的光电流信号经放大和调理后,由上位机控制采集卡进行采集和后处理.实验室高温炉的实验装置如图1所示.

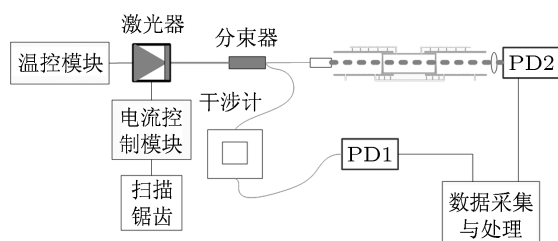


图1 实验装置示意图

激光器波长扫描为电流调谐方式,激光器工作温度固定.调制波形采用锯齿,使周期内起始时间段激光器电流处于出光阈值以下,用作(特别是燃烧环境下)背景光辐射、探测器和电子学噪声等造成直流偏移量的本底参考,扫描重复频率10 kHz.DFB激光器被调谐扫描过1.4 μm附近的一对H₂O吸收线,即7153.722 cm⁻¹和7153.748 cm⁻¹(吸收线1)与7154.354 cm⁻¹(吸收线2).其中吸收线1由两根重叠在一起的吸收线组成,因为两根吸收线具有相同的跃迁低态能级(见表1),即有相同的温度响应特性,作为一根吸收线处理不会对温度反演造成任何影响,这一合并吸收线的总线强即为两者的线强之和.选择H₂O作目标气体是因为它是碳氢燃料燃烧的主要产物,而且在很宽的波长范围内

具有吸收带,提供了大量可供选择的吸收线,对于通信波段商用DFB激光器的使用很便利.

4 实验结果和讨论

首先在如图1所示的管式高温加热炉上做了温度测量的吸收线强比值标定,因为管式加热炉仅在中间一段区域温度相对恒定,向两侧温度逐渐递减.实验所用高温炉的温度控制为实时反馈控制,反馈的温度测量值由位于炉膛中间的热电偶提供,因此设置温度反映的实际是炉膛中央的温度.根据这一加热特性设计的标定吸收池总长度为0.9 m,中间段长度为15 cm,与两侧隔离开,作为温度标定的恒温参考(图1).线强比值标定时,两侧腔内通入干燥N₂吹扫,去除非恒温区的吸收干扰.标定完成之后分别在高温炉上使用开放炉管和在不平焰炉上做了测量验证.这里给出了测量验证的结果和数据处理过程的描述.

管式高温上某一次测量处理后的吸光度曲线如图2所示.PD2测量得到的信号,首先用锯齿扫描周期中不出光部分作参考扣除辐射背景等本底的直流偏移,得到真实的激光经气体吸收衰减后的光强信号I(见(1)式或(2)式).选择I中无气体吸收部分做多项式拟合获得无吸收的光强基线I₀,同时根据PD1探测到的环形干涉计干涉条纹信号和其自由谱范围标定出各采样点的相对频率,即可通过 $-\ln(I/I_0)$ 计算出如图2所示的吸光度曲线,图中横坐标为以cm⁻¹为单位的相对频率.

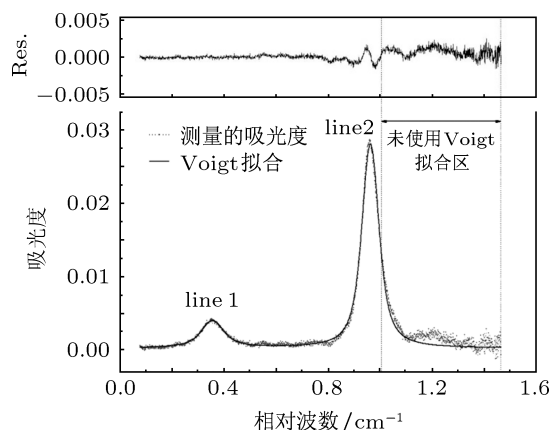


图2 测量吸光度曲线,Voigt拟合和残差结果

同时对两条吸收线做线形拟合,可以获得吸收线的中心频率、积分吸光度和展宽等信息,这里采用Voigt线形拟合^[19,20].由于吸收线2往更高频

率的一侧附近有另外两条吸收线 (中心频率分别为 7154.574 cm^{-1} 和 7154.595 cm^{-1}) 和吸收线 2 部分重叠在一起, 因此拟合时在吸收线 2 右侧仅选择靠近中心的部分数据点归入拟合范围. 采用这种方式消除干扰对吸收线 2 的拟合, 而不是考虑一起拟合所有吸收峰, 是为了减少待拟合的参数, 使拟合速度更快并且比较稳健, 拟合结果和残差如图中所示. 图 2 中可以看到右侧的吸光度信号噪声幅值相对要大些, 这是因为右侧波长对应的锯齿扫描电流的小电流部分, 激光器出光光强较弱所造成的处理得到的吸光度信号噪声波动幅度变大. 假设将探测到的光强信号描述为 $I = I_0 \exp(-abs_i) + I_{\text{noise}}$, 那么吸光度可以表示为

$$-\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = abs_i - \ln\left[1 + \frac{I_{\text{noise}}}{I_0} \exp(abs_i)\right] \approx abs_i - r + r^2/2, \quad (9)$$

其中 $r = I_{\text{noise}} \exp(abs_i)/I_0$, 当 r 很小时上式中的近似成立. 从上式可以看出, 对于相同幅度的这种加型噪声, 弱的激光出光光强对应更大的吸光度噪声幅度水平.

利用拟合得到的两条吸收线的吸光度值可以按 (8) 式计算得到其比值, 从而反推算出温度. 根据 (5) 式有

$$\bar{T} = \frac{\left(\frac{hc}{k}\right)(E_2'' - E_1'')}{\ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right) + \ln\left(\frac{S_2(T_0)}{S_1(T_0)}\right) + \left(\frac{hc}{k}\right)\left(\frac{E_2'' - E_1''}{T_0}\right)}. \quad (10)$$

管式高温炉最高设定温度为 $1200 \text{ }^\circ\text{C}$, 用图 1 所示的气体池完成线强比值的标定后, 将高温炉炉管替换为中空开放炉管做连续测量验证试验, 测量结果如图 3 所示. 测试结果在高温炉降温过程中进行, 高温炉温度设定为在一个设定温度维持 15 min , 然后降温到下一设定温度值再保持设定值 15 min . 温度台阶设定为 $100 \text{ }^\circ\text{C}$, 测试中温度从 $900 \text{ }^\circ\text{C}$ 一直降低到 $300 \text{ }^\circ\text{C}$ 共计 7 个台阶. 设定温度台阶和测量温度以及两者的差异如图 3 所示, 每个温度台阶取 400 次的连续测量值. 从图 3 中可以看出除 $300 \text{ }^\circ\text{C}$ 的温度台阶出现了两个毛刺外, 每个温度台阶测量的最大波动幅度在 50 K 左右, 测试的 7 个温度台阶的标准差最大约为 15 K . 因为测量温度为整个炉管路径平均意义上的等效温度值, 高温炉炉管两侧逐渐降低的温度段使得测量的温度低于设定温度即炉管中心温度值. 测量结果和设

定温度值相对比, 两者的差值呈现随设定温度降低而减小的趋势, 在 $300 \text{ }^\circ\text{C}$ 的温度台阶达到最小, 测量平均值偏低 17 K , 这一温差趋势是由高温炉的加热特性引起的.

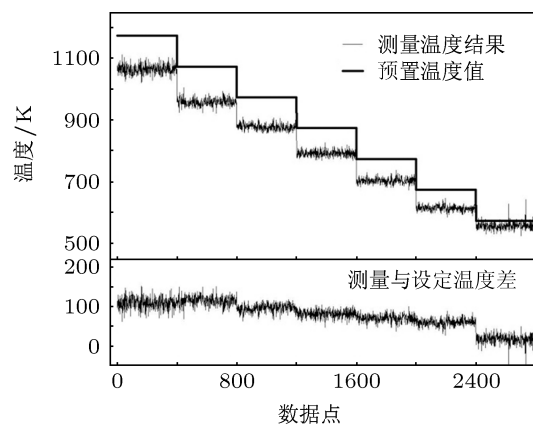


图 3 高温炉开放炉管温度设定和测量结果

对上述 TDLAS 系统, 根据用高温炉标定结果, 编写上位机软件来做采集和在线实时温度处理, 在平焰炉上做进一步的验证测量实验. 平焰炉为 $\text{CH}_4/\text{空气}$ 预混, 燃烧炉的预混气出口尺寸为 $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$. 初始测试实验中保持空气流量不变, 通过流量计设置为 30 slm , 改变 CH_4 流量控制获得不同当量比状态, 实验测试当量比状态范围从 $0.7-1.0$. 温度测量沿平焰炉炉面的一个轴向进行, 光束单次穿过燃烧区域由探测器接收, 温度测量结果较理论计算值偏高, 且温度波动较剧烈. 通过测试时保存的原始光强信号和吸光度信号看, 因吸收光程短, 并且所选择吸收线的线强较弱, 使测量吸收信噪比不佳. 同时, 在吸收线 1 上总叠加了一些“干扰”, 使得吸收线 1 采用单个吸收峰的 Voigt 线形拟合处理存在收敛困难 (同时线形拟合迭代时间显著增加), 因此拟合积分吸光度波动较大. 这一积分吸光度的波动甚至错误, 是测量温度偏高和波动较大的原因. 为研究这些“干扰”, 增大了 DFB 的波长调谐范围, 并重新调节光路, 利用平面反射镜 M1, M2 增加两次反射以增加光程提高信噪, 光路安排如图 4 所示.

调节光程完成后重新进行了测量. 对比平焰炉上测量吸光度和利用 HITRAN08 模拟的 H_2O 吸收截面, 发现测量结果中包含一些 HITRAN08 中未给出的吸收, 即前面所遇到的“干扰”, 如图 5 所示, 测量对应 $\text{CH}_4/\text{空气}$ 当量比 $\phi = 1.0$. 为方便比较, 图中已经按吸收线 2 的中心频率将标定的相

对频率转换为绝对频率,可以看出测量到的 line1, 7153.1 cm⁻¹附近的吸收和 HITRAN08 数据库给出的吸收线中心频率位置均吻合.

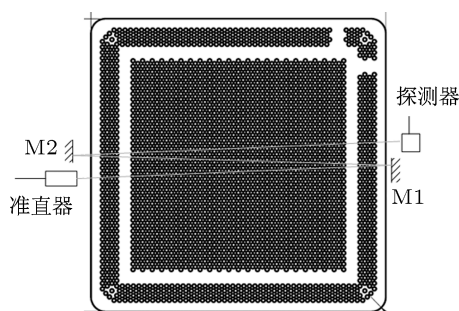


图4 平焰炉测量光路示意图

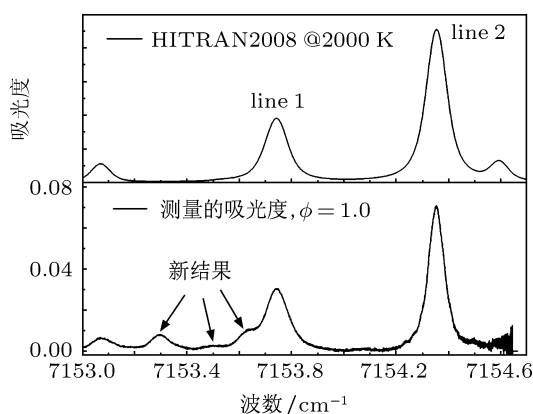


图5 HITRAN 模拟水汽吸收和平焰炉当量比 1.0 下测量的吸光度

在不同当量比状态的重复试验中,均观察到这些吸收线.对燃烧产物中可能存在的其他产物 CO₂, CO, CH₄ 等,通过查找 HITRAN08 数据库和实验比较,在波段的吸收相对 H₂O 弱几个量级,不存在干扰.初步确认为 H₂O 本身的吸收,这些吸收的跃迁低态能级可能较高,线强在低温下很小,相对可以忽略,而在高温下线强增大才表现出来.查找 2000 K 下高温数据库 HITEMP2010^[17] 给出的在该波长范围内的吸收线强,与 HITRAN 进行比较,如图 6 所示,吸收线强和低态能级值见表 1,图 6 的下图同时给出模拟的吸光度结果. HITEMP 数据库中给出 7153.7 cm⁻¹ (line 1) 长波一侧的吸收,即图 6 中标记为 1 到 5 的吸收线,与平焰炉实验中观察到的吸收位置相对应. HITEMP 给出的 line 1 两侧较强的 7 条标记吸收在 HITRAN 中没有给出; line 1 和 7153.1 cm⁻¹ 则采用和 HITRAN 相同的参数; line 2 在 HITEMP 中没有包含,而可以与 line 2 相对应的为在 7154.47 cm⁻¹ 给出两条重

叠在一起的吸收线(如图 6 中 line 2.2 和表 1 加粗字体标志所示),它们的跃迁低态能级相同且和 HITRAN 的 line 2 基本一致,但 HITEMP 给出的跃迁属于 2ν₃ 带,而 HITRAN 给出的 line 2 属于 ν₁ + ν₃ 带.根据实验测量的吸收线之间的间隔,选择保留采用 HITRAN 中 line 2 的吸收线频率位置和实验测量的线强等参数,同时加入 HITEMP 给出的这 7 条较强的吸收线做光谱处理.

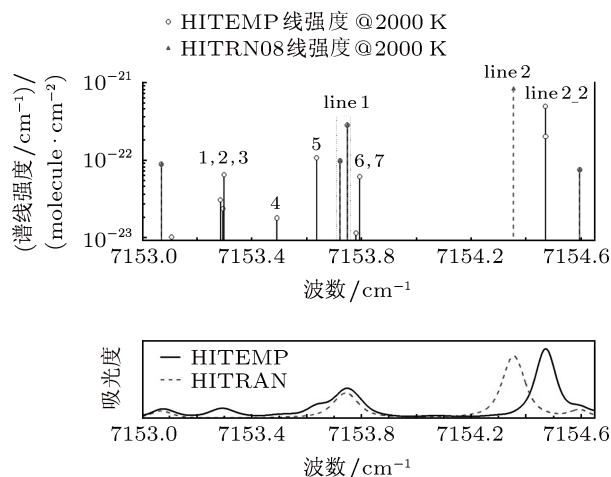


图6 2000 K 下 HITRAN/HITEMP 在 1.4 μm 附近吸收线对比

表 1 HITRAN2008 和 HITEMP2010 数据库在实验选择吸收线附近波段对比

ν ₀	HITRAN2008		HITEMP2010	
	S@2000 K	E''	S@2000 K	E''
7153.2857			3.06×10 ⁻²³	3175.4414
7153.2948			2.366×10 ⁻²³	3101.1238
7153.2991			6.479×10 ⁻²³	3141.0459
7153.4916			1.781×10 ⁻²³	2756.4153
7153.6367			1.068×10 ⁻²²	4918.2349
7153.722	9.737×10 ⁻²³	2552.8796	同 HITRAN	
7153.7484	2.818×10 ⁻²²	2552.8572	同 HITRAN	
7153.7797			1.148×10 ⁻²³	5654.78
7153.7934			6.093×10 ⁻²³	4992.1216
7154.3544	8.342×10 ⁻²²	1789.0428		
7154.4706			6.042×10⁻²²	1788.9998
7154.4710			2.014×10⁻²²	1788.9998

对新观察到的吸收采用 HITEMP 的线强值,重新测量的结果如图 7 所示,试验中保持空气流量不变,CH₄/空气当量比 φ 从 1.0 按 0.1 递减到 0.7,之后同时减小 CH₄ 和空气流量但仍保持当量比为 0.7 做一次测量.图中的理论计算结果为按当量比计算

的达到平衡态的绝热温度. 试验中状态 1 空气流量控制结果未达到设定值, 实际当量比略高于 1.0. 测量结果和理论计算值的差异源于几个方面: 1) 直接采用 HITEMP 线强引入的偏差; 2) 实际测量中测量位置和炉面的高度保持固定, 而不同燃烧状态的计算理论最高温度点对应不同高度; 3) 火焰到平焰炉的热传递和火焰的辐射损耗. 从火焰到燃烧炉的热传递和火焰前缘与炉面的距离有关, 热传递随该距离减小而增加. 这一距离随流速增加而增加, 随燃烧速率增加而减小. 因此实际的测量温度随当量比从 0.7 到 1.0 逐渐增加, 但与计算绝热温度的差异也变大了. 两次不同流量的当量比为 0.7 的状态, 测量结果在同一水平, 也验证了测量的重复性和准确性.

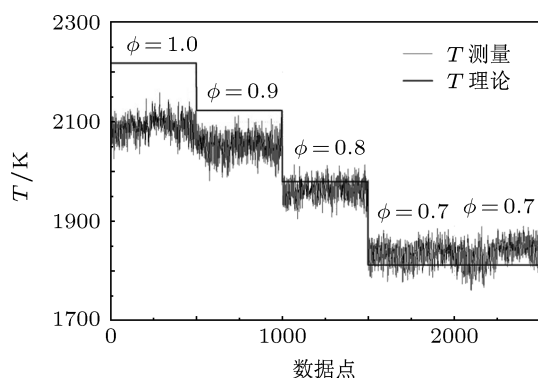


图 7 温度反演修正的平焰炉温度测量结果

5 总结

本文介绍了基于吸收光谱的 TDLAS 测温系统, 系统采用单个 DFB 激光器扫描 $1.4 \mu\text{m}$ 附近的 H_2O 吸收线, 利用两条具有不同跃迁低态能级的吸收线线强比值随温度的变化来反演温度. 因为测量的吸收为路径积分结果, 测量温度为路径

平均意义下的温度, 介绍了测温原理和数据处理过程. 首先在实验室管式高温炉上做了标定, 然后在开放炉管下做了测量验证, 各设置温度台阶内的测量温度最大波动范围均在 50 K 以内, 并和高温炉设置符合很好. 之后在更高温度的平焰炉上做了测试, 发现在更高温下, 7153.7 cm^{-1} 的吸收线上叠加了一些干扰吸收. 增大 DFB 的扫描范围并利用反射镜增加光程后, 多个状态下测量并对比 HITRAN/HITEMP 数据库, 确定这些吸收为 H_2O 本身的吸收, 这些吸收的跃迁低态能级均比较大, 在低温下线强很小, 高温下线强变大明显. 对 7153.7 cm^{-1} 吸收线, 同时考虑这些吸收线并采用 HITEMP 的线强; 而对于选用的另外一条吸收 HITEMP 给出的位置和测量不符合, 采用实验室测量标定结果. 同时考虑这些“新”吸收线后, 在平焰炉上不同当量比状态下做了验证. 测量温度和理论绝热平衡态温度的差异由于实际火焰到平焰炉的热传导和火焰的热辐射引起, 不同当量比状态温度的稳定测量验证了该 TDLAS 测温系统的性能和应用的适应能力. 进一步的实验将采用热电偶同时测量平焰炉火焰温度及其分布, 以便进行更详细的比较.

本文介绍的 TDLAS 温度测量系统实现了实时在线的温度检测, 在管式加热炉和 $\text{CH}_4/\text{空气}$ 预混平焰燃烧炉上的应用验证了其应用潜力. TDLAS 利用气体吸收特性测温, 为光学非侵入测量, 也不需要引入额外的探针粒子, 因而对流场完全无干扰, 同时其快速的时间响应和测量准确性, 可实现燃烧的瞬态过程监测. TDLAS 系统可以扩展测量多种组分浓度及其良好的系统环境适应能力, 使其成为实际、恶劣环境下燃烧监测的理想工具. 这里介绍的系统已经在发动机出口上做了初步的验证, 也将是后续应用研究工作的重要内容.

- [1] Tedder S A, O'Byrne S, Danehy P M, Cutler A D 2005 *The 43rd Aerospace Sciences Meeting and Exhibit* Reno NV, January 10–13, 2005 p0616
- [2] Hu Z Y, Zhang Z R, Liu J R, Guan X W, Huang M S, Ye X S 2004 *High Power Laser and Particle Beams* **16** 19 (in Chinese) [胡志云, 张振荣, 刘晶儒, 关小伟, 黄梅生, 叶锡生 2004 强激光与粒子束 **16** 19]
- [3] Guan X W, Liu J R, Huang M S, Hu Z Y, Zhang Z R, Ye X S 2005 *High Power Laser and Particle Beams* **17** 173 (in Chinese) [关小伟, 刘晶儒, 黄梅生, 胡志云, 张振荣, 叶锡生 2005 强激光与粒子束 **17** 173]
- [4] Hanson R K, Seitzman J M, Paul P H 1990 *Appl. Phys. B* **50** 441
- [5] Yoo J, Mitchell D, Davidson D F, Hanson R K 2010 *Exp. Fluids* **49** 751
- [6] Liu J T C, Rieker G B, Jeffries J B, Gruber M R, Carter C D, Mathur T, Hanson R K 2005 *Appl. Opt.* **44** 6701
- [7] Allen M G 1998 *Meas. Sci. Technol.* **9** 545
- [8] Furlong E R, Baer D S, Hanson R K 1998 *Proc. Combust. Inst.* **27** 103
- [9] Sanders S T, Baldwin J A, Jenkins T P, Baer D S, Hanson R K

- 2000 *Proc. Combust. Inst.* **28** 587
- [10] Mattison D W, 2006 *Ph. D. Dissertation* (California: Stanford University)
- [11] Wang L 2005 *Combustion Diagnostics* (1st En.) (Beijing: National Defence Industry Press) p101 (in Chinese) [汪亮 2005 燃烧实验诊断学 (第 1 版)(北京: 国防工业出版社) 第 101 页]
- [12] <http://www.zolotech.com/>
- [13] Liu X, Jeffries J B, Hanson R K 2007 *AIAA* **45** 411
- [14] Lindstrom C, Tam C J, Givens R, Davis D, Willanms S 2008 *Proc. SPIE* **6814** 68140W
- [15] Givens R N 2008 *M. S. Dissertation* (Ohio: Air Force Institute of Technology)
- [16] Rothman L S, Gordon I E, Barbe A, Chris Benner D, Bernath P F, Birk M, Boudon V, Brown L R, Campargue A, Champion J P, Chance K, Coudert L H, Dana V, Devi V M, Fally S, Flaud J M, Gamache R R, Goldman A, Jacquemart D, Kleiner I, Lacombe N, Lafferty W J, Mandin J Y, Massie S T, Mikhailenko S N, Miller C E, Moazzen-Ahmadi N, Naumenko O V, Nikitin A V, Orphal J, Perevalov V I, Perrin A, Predoi-Cross A, Rinsland C P, Rotger M, Šimečková M, Smith M A H, Sung K, Tashkun S A, Tennyson J, Toth R A, Vandaele A C, Vander Auwera J 2009 *Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **110** 533
- [17] Rothman L S, Gordon I E, Barber R J, Dothe H, Gamache R R, Goldman A, Perevalov V I, Tashkun S A, Tennyson J 2010 *Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **111** 2139
- [18] Fischera J, Gamache R R, Goldman A, Rothman L S, Perrind A 2003 *Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **82** 401
- [19] Wells R J 1999 *Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **62** 29
- [20] Xu Z Y, Liu W Q, Kan R F, Zhang Y J, Liu J G, Zhang S, Shu X W, Geng H, He Y, Tang Y Y 2010 *Spectrosc. Spect. Anal.* **30** 2201 (in Chinese) [许振宇, 刘文清, 阚瑞峰, 张玉钧, 刘建国, 张帅, 束小文, 耿辉, 何莹, 汤媛媛 2010 光谱学光谱分析 **30** 2201]

Temperature measurements based on tunable diode laser absorption spectroscopy*

Xu Zhen-Yu Liu Wen-Qing Liu Jian-Guo He Jun-Feng Yao Lu Ruan Jun
Chen Jiu-Ying Li Han Yuan Song Geng Hui Kan Rui-Feng[†]

(Key Laboratory of Environmental Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics of Chinese Academy of Sciences,
Hefei 230031, China)

(Received 9 April 2012; revised manuscript received 5 May 2012)

Abstract

The thermometry based on absorption spectroscopy and developing of a temperature sensor is introduced, in which temperature is retrieved by measuring line strength ratio between a pair of absorptions of water vapor near 1.4 μm . The temperature sensor is first calibrated on a tubular furnace and then used to verify measurement results with the heating tube whose both sides are open, an average fluctuation of about 50 K is obtained at each temperature setpoint. Some new absorption lines of H_2O near one absorption (centered at 7153.7 cm^{-1}) of the selected line pair are observed during demonstration measurements for CH_4/air flat flame burner. These absorption lines overlapping with 7153.7 cm^{-1} , are not listed in HITRAN08 database while HITEMP data give absorption information about these wave number positions. But line center of the other absorption (centered at 7154.354 cm^{-1}) in HITEMP seems different from our measurement and HITRAN database. A combination of our calibrated results from tubular furnace and line parameters of new features from HITEMP is chosen and some results measured at different equivalence ratios on the burner are shown here.

Keywords: absorption spectroscopy, temperature measurement, flat flame burner

PACS: 42.62.-b, 07.07.Df

* Project supported by the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. XDA05040102), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61108034).

[†] E-mail: kanruifeng@aiofm.ac.cn