

# 可调谐二极管激光吸收光谱测量真空环境下气体温度的理论与实验研究\*

蓝丽娟<sup>1)</sup> 丁艳军<sup>1)</sup> 贾军伟<sup>2)</sup> 杜艳君<sup>1)</sup> 彭志敏<sup>1)†</sup>

1)(清华大学热能系, 电力系统与发电设备控制与仿真国家重点实验室, 北京 100084)

2)(北京东方计量测试研究所, 北京 100086)

(2013年12月19日收到; 2014年1月6日收到修改稿)

真空环境不仅会导致热电偶等温度传感器表面材料解吸, 而且其传热机理也与常压不同, 因此采用常压下校准和溯源的温度传感器测量真空环境下气体温度存在诸多不确定性问题. 为此, 本文利用可调谐二极管激光吸收光谱技术(TDLAS)测量真空环境下气体温度, 探索TDLAS温度测量技术在真空环境下的应用前景. 在模拟热真空实验过程中, 首先将真空气室浸没于恒温槽中, 然后利用TDLAS测量真空气室中气体温度, 同时利用一等标准铂电阻测量恒温槽的温度. 试验结果表明: TDLAS和一等标准铂电阻测量得到的气体温度和恒温槽温度具有高度的一致性, 两者之间的误差在恒温槽温度稳定时不超过 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ .

**关键词:** 可调谐二极管激光吸收光谱, 温度测量, 真空环境, 波长调制法

**PACS:** 33.20.Ea, 42.55.Px, 42.65.-k

**DOI:** 10.7498/aps.63.083301

## 1 引言

随着我国航空航天、等离子体、热真空处理等技术的飞速发展, 真空环境实验已成为一项非常重要的实验验证工作, 其中真空环境下气体温度的测量是上述研究领域的关键测量技术<sup>[1-4]</sup>. 到目前为止, 热真空实验一般还是采用传统的接触式温度测量技术, 其中热电偶温度测量系统应用十分普遍, 如在地面模拟空间热环境实验中, 主要采用热电偶、铂电阻和热敏电阻作为传感器进行温度测量<sup>[5,6]</sup>. 传统的接触式温度传感器在实际测量中存在诸多问题<sup>[7]</sup>, 如连接测量点和信号处理单元的电缆噪声会对测量产生不利影响, 传感器及其连接线路会干扰温度场, 实验中需要数量庞大的传感器测量温度场, 真空环境会导致传感器表面材料出现解吸现象等. 另外, 上述传感器的校准和溯源工作一般是在常压下进行, 其测量的是平动温度, 即经典热力学温度, 其温度高低反映分子的热运动速率.

与常压不同, 在真空环境尤其是高真空环境下, 由于分子数密度减小, 对流和热传导作用微弱, 此时对工件和传感器起升温作用的主要是辐射, 而辐射反映的是分子振-转热分布情况(对应振-转动温度)<sup>[8,9]</sup>, 因此热电偶等温度传感器在真空环境下应用存在溯源性问题.

考虑到真空和常压环境下温度的差别, 近些年来, 可调谐二极管激光吸收光谱技术(tunable diode laser absorption spectroscopy, TDLAS)在气体温度测量中得到广泛应用<sup>[10-14]</sup>, 该技术利用低能级分子吸收特定频率的激光光子跃迁到高能级的特征, 通过分析被气体分子吸收后的激光强度得到气体分子的振-转温度, 而由能量均分定理和分子各自由度平衡理论可知, 除了一些瞬态过程, 如激光诱导等离子体、放电等离子体、飞行器载入等, 振-转温度和平动温度一般时刻保持平衡且数值相等, 因此, 通过TDLAS技术测温真空环境下气体分子的振-转温度在理论上可解决溯源性问题. 另

\* 国家自然科学基金(批准号: 51206086, 51176085)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: [apspect@mail.tsinghua.edu.cn](mailto:apspect@mail.tsinghua.edu.cn)

外, 该技术还具有非接触性、高灵敏度、可测量光路平均温度等优点. 但问题在于: 随着真空度的提高, 气体分子数密度减少, 使得气体对激光的吸收作用很弱, 目前 TDLAS 技术的测量环境压力一般在数千 Pa 以上<sup>[15]</sup>, 较少涉及更高真空环境下气体温度的测量.

基于上述原因, 本文借助于中国航天科技集团提供的标准恒温槽和真空系统, 利用 TDLAS 技术测量 Pa 量级真空环境下气体分子的振-转温度, 并将其与恒温槽的温度进行对比, 研究 TDLAS 技术在真空环境下应用的可行性和测量精度, 为真空环境下气体温度测量提供实验数据和技术手段.

## 2 测量原理

当一束频率为  $\nu$  的单色光穿过长度为  $L$  的气体介质时, 分子的特征吸收谱线会对激光产生吸收作用, 透射光强  $I_t$  和入射光强  $I_0$  之间满足 Beer-Lambert 吸收定律:

$$\frac{I_t}{I_0} = \exp[-\alpha(\nu)] = \exp[-PS(T)\varphi(\nu)XL], \quad (1)$$

式中,  $P$ [atm] 为气体总压;  $S(T)$ [ $\text{cm}^{-2}\cdot\text{atm}^{-1}$ ] 为谱线的线强度, 其大小仅与温度  $T$  有关;  $X$  为待测气体浓度;  $L$ [cm] 为有效吸收光程;  $\varphi(\nu)$ [cm] 为吸收线型函数;  $\alpha(\nu)$  为吸收率函数.

TDLAS 技术经过多年的发展, 形成了直接吸收和波长调制两种主要测量方法<sup>[16-18]</sup>, 其中直接

吸收法在测量中容易受到颗粒物浓度、激光强度波动、基线拟合误差的影响, 尤其是在弱吸收条件下存在较大的测量误差, 如峰值吸收为 1.0% 的弱吸收测量中, 1.0% 的基线拟合误差可能会引起 100% 的测量误差. 波长调制法在测量过程中通过对目标信号进行高频调制, 而非目标信号由于没有经过调制在后续的谐波检测过程中被除去, 因此可以有效地抑制测量系统中背景信号的干扰, 提高气体温度的测量精度和灵敏度<sup>[19]</sup>. 考虑到真空环境下气体分子对激光吸收较弱的特点, 本文利用波长调制法测量真空环境下气体分子的振-转温度. 波长调制法首先将激光器通过低频电流调制, 将其以低频  $\nu_1$  扫描吸收谱线, 同时注入一个高频正弦调制信号(频率为  $\omega$ ), 经过调制后的激光瞬时频率  $\nu$  和强度  $I_0$  分别为

$$\begin{cases} \nu = \nu_1 + a \cos(\omega t), \\ I_0 = I_1 + \Delta I_1 \cos(\omega t + \psi_1), \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $\nu_1$  和  $I_1$  分别为激光平均扫描频率和光强,  $a$ [ $\text{cm}^{-1}$ ] 和  $\Delta I_1$  分别为频率和光强调制幅度,  $t$  为时间,  $\psi_1$  为激光强度调制与频率调制之间的相位差. 因此 (1) 式可写为

$$\begin{aligned} \frac{I_t}{I_0} &= \exp[-PS(T)\varphi(\nu)XL] \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} A_k \cdot \cos(k\omega t), \end{aligned} \quad (3)$$

其中

$$\begin{cases} A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \exp[-PS(T)XL\varphi(\nu)] d\theta, \\ A_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \exp[-PS(T)XL\varphi(\nu)] \cos(k\theta) d\theta \quad (k = 1, 2, \dots). \end{cases} \quad (4)$$

将激光瞬时强度  $I_0$  代入到 (3) 式中, 通过锁相放大器可得到二次谐波表达式如下:

$$S_{2f} = G \left[ \bar{I}_0 A_2 + \frac{\Delta I_1}{2} (A_1 + A_3) \cos(\psi_1) \right], \quad (5)$$

其中  $G$  为测量系统的光电放大系数<sup>[20]</sup>.

在实际测量中, 一般采用谱线中心频率处二次谐波峰值进行温度测量, 在谱线中心频率  $\nu_0$  处, 奇数次傅里叶系数为零, 即  $A_1 = A_3 = 0$ , 上式可化简为

$$\begin{aligned} S_{2f}(\nu_0) &= G \bar{I}_0 A_2(\nu_0) \\ &= \frac{G \bar{I}_0}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \exp[-PS(T)XL\varphi(\nu_0) \\ &\quad + a \cos \theta] \cos(2\theta) d\theta. \end{aligned} \quad (6)$$

为了消除光电放大系数和激光强度等因素的影响, TDLAS 一般采用两条谱线的二次谐波峰值比值测量气体温度:

$$R = \frac{S_{2f}(\nu_0)_1}{S_{2f}(\nu_0)_2} = \frac{A_2(\nu_0)_1}{A_2(\nu_0)_2}, \quad (7)$$

式中,  $S_{2f}(\nu_0)$  为锁相放大器得到的实验测量值, 而  $A_2(\nu_0)$  是根据 (4) 式计算得到的理论值. 在测温过程中, 首先通过谱线对光谱常数和气体参数计算出  $A_2(\nu_0)_1/A_2(\nu_0)_2$  比值与温度的关系曲线, 然后将其与实验测量值  $S_{2f}(\nu_0)_1/S_{2f}(\nu_0)_2$  进行比较, 进而确定气体温度. 但由 (4) 式可知, 计算时需要已知

气体总压、待测气体浓度、吸收光程和吸收线型函数,而在实际测量中,上述参数往往是未知的或待测量的,因此理论计算  $A_2(v_0)_1/A_2(v_0)_2$  比值存在困难. 本文考虑到在真空环境下,由于分子数密度很小,气体分子对激光的吸收一般较弱,如当峰值吸收率小于5.0%时,我们已推导出<sup>[21]</sup>

$$A_2(v_0) \approx -\frac{PS(T)LX}{\pi} \times \int_{-\pi}^{\pi} \varphi(v_0 + a \cos \theta) \cos(2\theta) d\theta. \quad (8)$$

由光谱理论可知,在真空环境下,当气体总压小于100 Pa时,碰撞引起的 Lorentzian 增宽一般可以忽略,此时谱线对的吸收线型函数可采用 Gaussian 函数进行描述:

$$\varphi(v) = \frac{1}{\Delta v} \left( \frac{\ln 2}{\pi} \right)^{1/2} \times \exp \left[ -\ln 2 \left( \frac{v - v_0}{\Delta v} \right)^2 \right], \quad (9)$$

式中,  $\Delta v$  为多普勒线宽,其计算表达式如下:

$$\Delta v = 3.581 \times 10^{-7} v_0 \sqrt{T/M}, \quad (10)$$

式中,  $M$  为待测气体分子的摩尔质量,  $T$  为绝对温度,当两条谱线中心频率间隔很小时(如相对误差小于1.0%),可认为谱线对的吸收线型函数完全相同. 因此将(8)式代入(7)式中,可消除气体总压、浓度、吸收光程和吸收线型函数不确定性带来的影响.

$$R = \frac{S_{2f}(v_0)_1}{S_{2f}(v_0)_2} \approx \frac{S(T)_1}{S(T)_2} = \frac{S(T_0)_1}{S(T_0)_2} \exp \left[ -\frac{hc}{k} (E_1 - E_2) \times \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right], \quad (11)$$

式中,  $T_0$  为参考温度,一般取296 K;  $S(T_0)$  为参考温度下谱线的线强度;  $h$  和  $k$  分别为普朗克和玻尔

兹曼常数;  $c$  为光速;  $E_1$  和  $E_2$  分别为两条谱线的低能级能量.

由(11)式可知,任意温度下的线强度比值可通过参考温度下的线强度计算得到,也可通过查阅 HITRAN 数据库或实验室标定实验得到. 另外,测温灵敏度  $x$  可采用下式进行描述<sup>[10]</sup>:

$$x = \frac{dR/R}{dT/T} = \left| \frac{E_1 - E_2}{T} \right|, \quad (12)$$

即谱线对的低能级差别越大,测温灵敏度越高,而对于选定的谱线对,其测温灵敏度随着温度增加而降低.

### 3 谱线对选择

考虑到本文研究的真空度(10 Pa)和温度范围(-50—100 °C),测温谱线对需要具有下述特征:较大的能级差和线强度,两条谱线相邻且互相独立,同一激光可同时扫描两条谱线. 因此本文选取  $C_2H_2$  分子  $6558 \text{ cm}^{-1}$  附近处谱线进行真空环境下气体温度测量实验,图1(a)为 HITRAN2008 数据库给出的 296 K 时谱线的线强度<sup>[22]</sup>. 在实际测量中,谱线存在各种增宽,图1(b)计算了典型工况条件下吸收率函数分布情况,计算所采用的气体总压、温度、 $C_2H_2$  浓度和吸收光程分别为 10 Pa, 296 K, 99.9% 和 64 cm.

实验选取谱线对 A 和 B,其光谱常数如表1所示. 根据光谱常数可计算出谱线对线强度随温度的变化关系如图2(a)所示. 随着温度升高,谱线 A 的线强度逐渐减小,而 B 的线强度逐渐增大,在 97.17 °C 时相等. 图2(b)中实线和虚线分别为谱线对线强度比值和测温灵敏度与温度的关系曲线,随着温度升高,线强度比值和测温灵敏度逐渐减小.

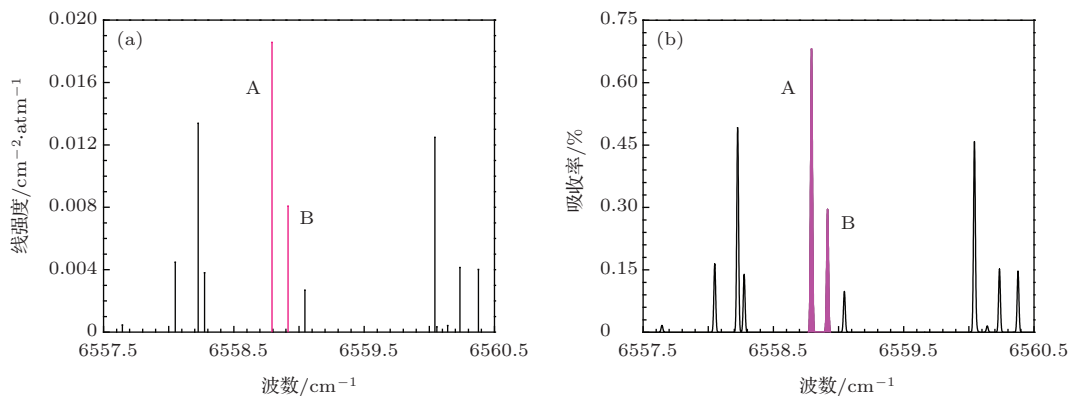


图1  $C_2H_2$  分子  $6558 \text{ cm}^{-1}$  附近处谱线的线强度及典型工况条件下吸收率函数分布情况

表1 谱线对 A 和 B 的光谱常数 (296 K)

谱线对	频率 $\nu_0/\text{cm}^{-1}$	低能级 $E/\text{cm}^{-1}$	线强度 $S/\text{cm}^{-2}\cdot\text{atm}^{-1}$	增宽系数/ $\text{cm}^{-1}\cdot\text{atm}^{-1}$	
				自身增宽 $\gamma_{\text{self}}$	空气增宽 $\gamma_{\text{Air}}$
A	6558.7925	0	$1.857 \times 10^{-2}$	0.1183	0.197
B	6558.9156	858.5429	$8.063 \times 10^{-3}$	0.0845	0.150

由 (7) 式可知, 当采用二次谐波峰值比值测温时, 首先需要计算  $A_2(\nu_0)_1/A_2(\nu_0)_2$  比值与温度的关系曲线, 但计算比值时需要已知诸多光谱常数和气体参数. 本文针对真空环境, 对 (4) 式进行了简化, 并推导出在谱线对二次谐波峰值比值与线强度比值近似相等 (吸收率  $< 5.0\%$ , 气体总压  $< 100 \text{ Pa}$ ). 为了验证该推导过程的可靠性和精度, 图 3(a) 利用 (4) 式计算了不同温度条件下谱线对的二次谐波信号, 计算所采用的气体总压、 $\text{C}_2\text{H}_2$  浓度、吸收光程和调制深度分别为  $10 \text{ Pa}$ ,  $99.9\%$ ,

$64 \text{ cm}$  和  $0.0155 \text{ cm}^{-1}$ . 与线强度随温度变化趋势相同, 谱线 A 和 B 的二次谐波峰值分别随着温度升高减小和增大, 其峰值比值采用 “●” 标记在图 3(b) 中, 其中黑色曲线为谱线对的线强度比值. 二次谐波峰值比值与线强度比值之间的相对误差如图 3(c) 中 “●” 所示, 其误差在  $-50 \text{ }^\circ\text{C}$  时达到最大 ( $-0.49\%$ ). 实验中如果利用测量得到的二次谐波峰值比值在线强度比值曲线上插值, 引起的温度测量误差如图 3(c) 中 “☆” 所示, 即测量得到的温度略高于真实值, 但误差不超过  $0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ .

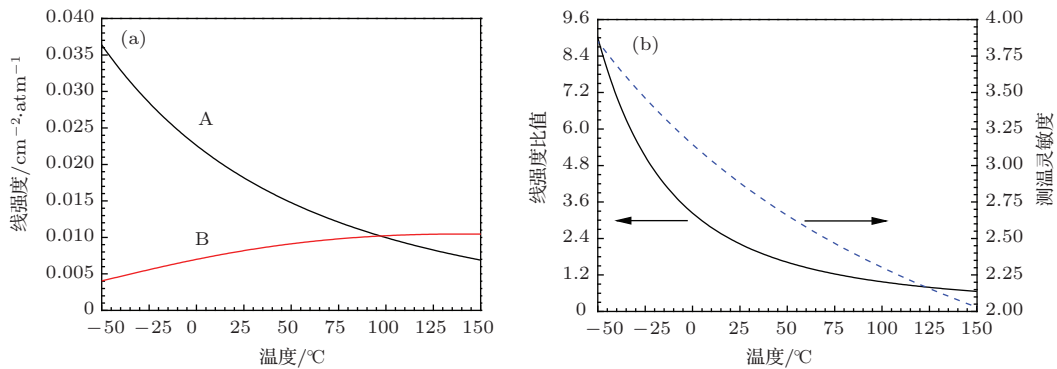


图2 谱线对线强度及其比值与温度的关系曲线

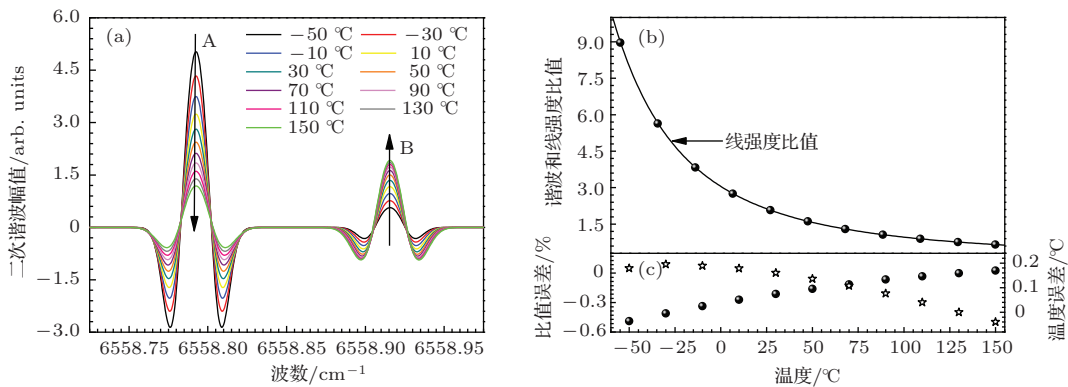


图3 (网刊彩色) 谱线对二次谐波信号随温度的变化及其温度测量误差

#### 4 温度测量实验

实验方案如图 4 所示, 其中恒温槽为稳定热源, 可提供连续变化的恒定温度场, 根据实验需要可

选取酒精和水作为热源介质, 其温度范围分别为  $-80\text{—}5 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $5\text{—}95 \text{ }^\circ\text{C}$ , 温度不确定度为  $0.05 \text{ }^\circ\text{C}$ , 恒温槽的温度采用一等标准铂电阻 (测温范围为  $-200\text{—}300 \text{ }^\circ\text{C}$ , 不确定度为  $0.02 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 进行测量. 真空气室采用比热容高的紫铜铸造, 极限真空可达

到 $10^{-4}$  Pa 量级, 渗透率为 $4.0 \times 10^{-4}$  Pa·L/s. 在测温时, 首先将真空气室浸没于恒温槽中, 利用抽气系统将其压力抽至极限真空, 然后充入浓度为 99.9% 的  $C_2H_2$  气体, 根据实验要求将压力抽至需要的真空度 (如 10 Pa), 并确保真空中气体温度和恒温槽温度达到平衡. 在测温过程中, 信号发生器 (AFG 3021B) 产生的低频锯齿波和锁相放大器 (SR 830) 产生的高频正弦调制信号经加法器迭加后加载在激光器控制单元 (ITC 4001), 驱动激光器 (日本 NEL 公司, 型号 NLK1S5AAA, 中心波长 1432 nm, 调谐范围 $\pm 1.0$  nm) 产生特定频率的激光. 输出激光经透镜 (Thorlabs F280FC-1550) 准直后入射到真空气室中, 通过全反射棱镜返回并被光电探测器 (PDA50B-EC) 接收, 有效吸收光程为

64 cm.

将探测器接收到的信号输入到锁相放大器中进行二次谐波检测, 利用 Labview 软件对谐波信号进行分析和计算, 得到谱线对二次谐波峰值比值; 然后将测量得到的谐波峰值比值在线强度比值曲线上插值, 得到真空气中气体分子的振-转温度; 最后将其与一等标准铂电阻测量得到的恒温槽温度进行比较, 分析真空环境下 TDLAS 技术测量气体温度的可靠性和精度, 图 5 为某个工况条件下实验采集到的谱线对二次谐波信号.

在第一组实验中, 将真空气室中充入 99.9% 的  $C_2H_2$  气体且保持压力为 10 Pa 不变, 恒温槽温度分别设定为 15.0 和  $-20.0$  °C, 并利用一等标准铂电阻对恒温槽温度进行测量. 当恒温槽温度场达到平衡

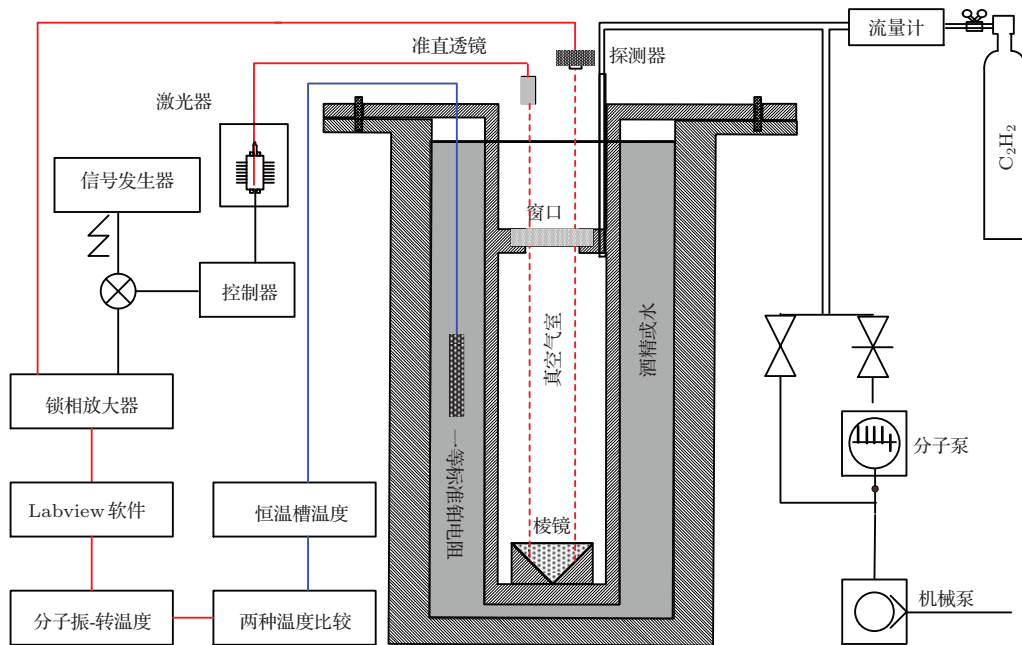


图 4 TDLAS 技术测量真空环境下气体温度的实验方案

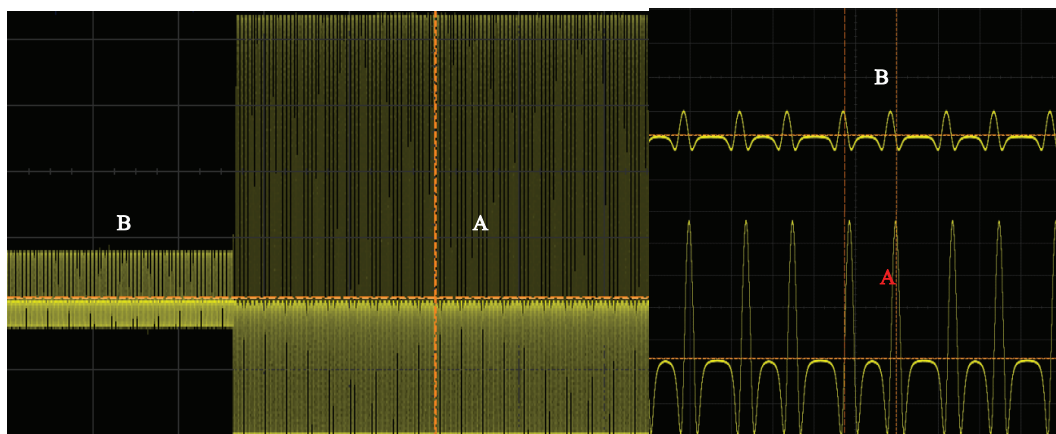


图 5 某工况下实验采集到的谱线对二次谐波信号

后 ( $\pm 0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), 利用 TDLAS 测量真空气室中  $\text{C}_2\text{H}_2$  分子的振-转温度. 测量结果如图 6 所示, 测量持续时间约为 20 min. 图 6 中“☆”表示 TDLAS 测量得到的  $\text{C}_2\text{H}_2$  分子振-转温度, 而一等标准铂电阻测量得到的恒温槽温度及其标准差标记在图中. 通过分析图 6(a) 和 (b) 中 TDLAS 测温数据可得到  $\text{C}_2\text{H}_2$  气体的平均温度和标准差分别为  $15.12$  和  $0.10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-19.84$  和  $0.09\text{ }^{\circ}\text{C}$ . TDLAS 测量得到的气体温度比恒温槽的温度约高  $0.1\text{--}0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 其主要原因是该温度为通过谱线对二次谐波峰值比值在线强度比值曲线上插值获得. 而由图 3(c) 可知, 此时 TDLAS 测量得到的温度在  $15.0$  和  $-20.0\text{ }^{\circ}\text{C}$  时会比实际温度偏高  $0.17$  和  $0.19\text{ }^{\circ}\text{C}$ . 另外, 在图 6 中, TDLAS 测温数据离散度达到  $\pm 0.25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 其主要原因是因为本文实验采用的 TDLAS 测量系统未集成化且电路噪

声较大, 与此同时, 恒温槽在加热或制冷过程中存在强烈的振动导致测量系统不稳定.

在第二组实验中, 为了研究 TDLAS 在真空环境下测温精度、响应速度以及压力变化对测量结果的影响, 在实验中通过改变恒温槽的温度, 利用 TDLAS 和一等标准铂电阻分别测量真空气室中气体温度和恒温槽温度, 同时增大气室的渗透率, 使得测量过程中气体总压由  $10\text{ Pa}$  逐渐增大, 但  $\text{C}_2\text{H}_2$  气体分压不变 ( $9.99\text{ Pa}$ ). 图 7 为实验测量得到的气体和恒温槽温度, 整个测量过程持续  $400\text{ min}$  左右, 气体总压由  $10\text{ Pa}$  逐渐增大到  $85\text{ Pa}$ , 恒温槽温度由  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  逐渐变化到  $-48\text{ }^{\circ}\text{C}$ . 图 7 中“☆”和“○”分别表示 TDLAS 和一等标准铂电阻测量得到的气体和恒温槽温度, 两种方法测量得到的温度变化趋势一致且数值近似相等.

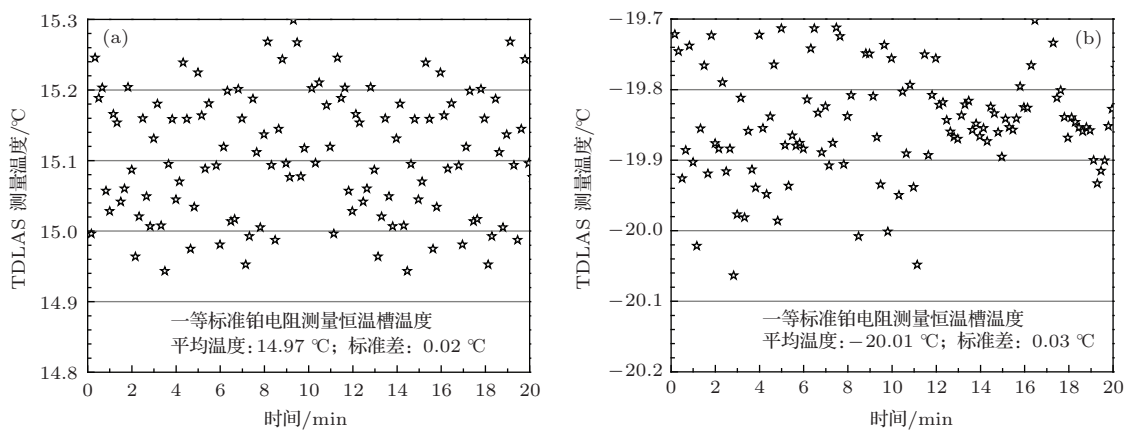


图 6 恒温槽温度不变时 TDLAS 测量得到的  $\text{C}_2\text{H}_2$  分子振-转温度

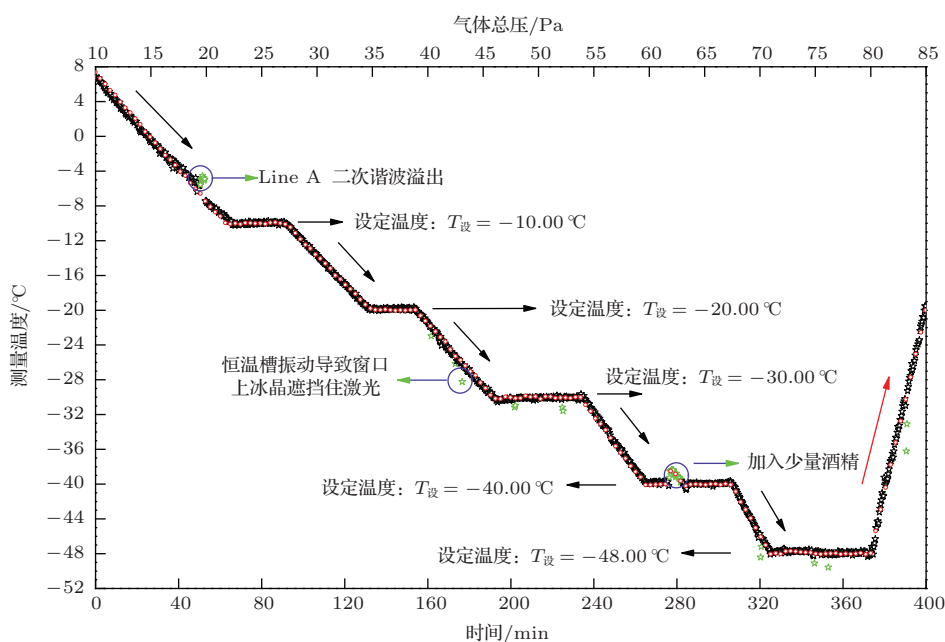


图 7 恒温槽温度变化时 TDLAS 和一等标准铂电阻测量得到的温度

图8为局部放大图,其中图8(a)和(c)是恒温槽温度不变时两种方法测量得到的结果(设定温度分别为 $-10.0$ 和 $-48.0$  °C),TDLAS和一等标准铂电阻测量得到的平均温度及其标准差分别采用“☆”和“○”标记在图中.与图6相似,由于光路振动和电路噪声等因素影响,TDLAS测量结果离散度较大,其平均值略高于恒温槽的温度.图8(b)和(d)分别是恒温槽温度降低和升高时两种方法测量

得到的结果,除个别异常点外,两者之间的误差一般在 $\pm 0.5$  °C范围内.但图8(b)的误差相对较小,其原因可能是:降温过程持续的时间长,真空室中的气体温度和恒温槽温度更接近于平衡状态,而升温速度约为降温的5倍,气体温度和恒温槽温度有可能未达到平衡;另外,恒温槽升温和降温的工作方式不同,系统稳定性也会发生变化,从而导致较大的离散度和温度测量误差.

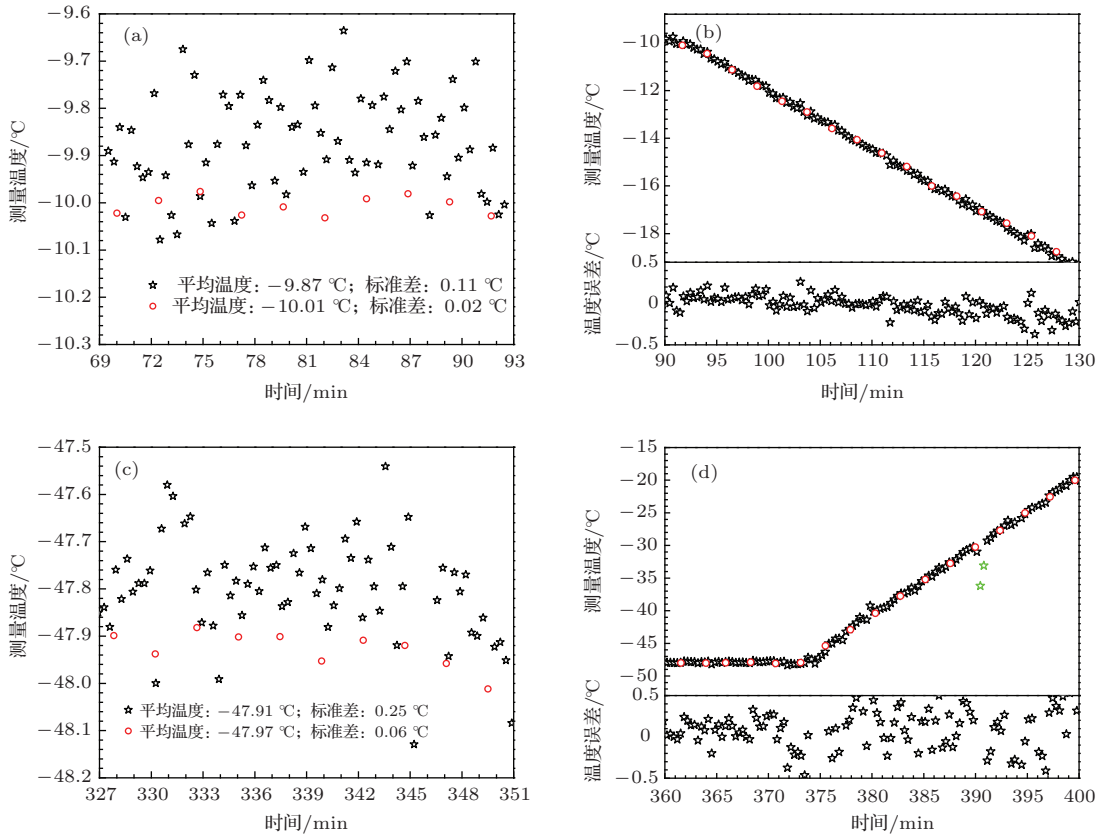


图8 恒温槽温度变化时 TDLAS 和一等标准铂电阻测量得到的温度及其误差

## 5 结 论

考虑到传统的热电偶等温度传感器测量真空环境下气体温度存在溯源性问题,如传感器表面材料出现解析、辐射传热取代对流和热传导占主导因素等,本文利用 TDLAS 技术测量真空环境下气体分子的振-转温度.实验结果表明:当气体对激光吸收率大于 2‰ 时,利用 TDLAS 技术可以测量真空环境下气体分子的振-转温度,且测量得到的气体温度与恒温槽温度相近,同时具有很高的响应速度,预期可以解决真空环境下气体温度测量溯源性问题.需要指出的是,本文是关于 TDLAS 技术测量真空环境下气体温度的初步研究,所采用的测

量方案在实际应用中存在下述问题:首先,光路不稳定性和电路噪声会导致测量结果离散度较大;其次,如果真空度进一步提高,分子数密度减少使得气体对激光的吸收作用很弱,从而导致温度测量误差甚至出现错误的结果;再次,在实际热真空试验中气体成分并不能随意选择,如本文实验采用的  $C_2H_2$  气体在很多热真空实验中并不存在.为此,我们在热电偶等传感器思想启发下,在接下来的研究中拟将  $C_2H_2$  气体封装成传感器形式,利用其测量更高真空度下的气体温度.

感谢中国航天科技集团五一四所提供的恒温槽等仪器设备.

## 参考文献

- [1] Nabil M, Khodadadi J M 2013 *Int. J. Heat Mass Trans.* **67** 301
- [2] Çakmak H M, Çetinkara H A, Kahraman S, Bayansal F, Tepe M, Güder H S, Çipiloğlu M A 2012 *Superlattice Microst.* **51** 421
- [3] Zhou H J, Chen X M, Yang B, Li L, Dai Y N 2012 *Chin. J. Vacuum Sci. Technol.* **32** 896 (in Chinese) [周厚军, 陈秀敏, 杨斌, 李亮, 戴永年 2012 真空科学与技术学报 **32** 896]
- [4] Lin M Y, Chen E T, Zhou B, Xu B 2006 *Chin. J. Vacuum Sci. Technol.* **26** 530 (in Chinese) [林美英, 陈儿同, 周冰, 徐波 2006 真空科学与技术学报 **26** 530]
- [5] Liu R, Zhou Z N, Yin Y L, Yang L, Zhang T L 2012 *Thermochim. Acta* **537** 13
- [6] Liu Q 2006 *Vacuum Cryogenic* **12** 238 (in Chinese) [刘强 2006 真空与低温 **12** 238]
- [7] Guo G 2009 *Spacecraft Environment Engineering* **26** 33 (in Chinese) [郭赣 2009 航天器环境工程 **26** 33]
- [8] Peng Z M, Ding Y J, Zhai X D 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 104702 (in Chinese) [彭志敏, 丁艳军, 翟晓东 2011 物理学报 **60** 104702]
- [9] Peng Z M, Ding Y J, Zhai X D, Yang Q S, Jiang Z L 2011 *Chin. Phys. Lett.* **28** 044703
- [10] Cai T D, Jia H, Wang G S, Chen W D, Gao X M 2009 *Sensor Actuat. A: Phys.* **152** 5
- [11] Farooq A, Jeffries J B, Hanson R K 2009 *Appl. Phys. B* **96** 161
- [12] Teichert H, Fernholz T, Ebert V 2003 *Appl. Opt.* **42** 2043
- [13] Li F, Yu X L, Gu H B, Li Z, Zhao Y, Ma L, Chen L H, Zhang X Y 2011 *Appl. Opt.* **50** 6697
- [14] Liu X, Jeffries J B, Hanson R K, Hinckley K M, Woodmansee M A 2006 *Appl. Phys. B* **82** 469
- [15] Kan R F, Liu W Q, Zhang Y J, Liu J G, Dong F Z, Gao S H, Wang M, Chen J 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1927 (in Chinese) [阚瑞峰, 刘文清, 张玉钧, 刘建国, 董凤忠, 高山虎, 王敏, 陈军 2005 物理学报 **54** 1927]
- [16] Farooq A, Jeffries J B, Hanson R K 2008 *Appl. Phys. B* **90** 619
- [17] Rieker G B, Jeffries J B, Hanson R K 2009 *Appl. Opt.* **48** 5546
- [18] Peng Z M, Ding Y J, Che L, Yang Q S 2012 *Opt. Express* **20** 11976
- [19] Che L, Ding Y J, Peng Z M, Li X H 2012 *Chin. Phys. B* **21** 127803
- [20] Liu J T C, Jeffries J B, Hanson R K 2004 *Appl. Phys. B* **78** 503
- [21] Peng Z M, Ding Y J, Che L, Li X H, Zheng K J 2011 *Opt. Express* **19** 23104
- [22] <http://cfa-www.harvard.edu/hitrans/>



# Theoretical and experimental study of measuring gas temperature in vacuum environment using tunable diode laser absorption spectroscopy\*

Lan Li-Juan<sup>1)</sup> Ding Yan-Jun<sup>1)</sup> Jia Jun-Wei<sup>2)</sup> Du Yan-Jun<sup>1)</sup> Peng Zhi-Min<sup>1)</sup>†

1) (State Key Laboratory of Power Systems, Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

2) (Beijing Orient Institute for Measurement and Test, Beijing 100086, China)

( Received 19 December 2013; revised manuscript received 6 January 2014 )

## Abstract

Measuring the temperature in vacuum environment is more complex than in atmospheric environment. For example, high vacuum will cause the thermocouple sensor surface desorption, and the mechanism of heat transfer is also different. Therefore, there are some uncertainties if the thermocouple is used to measure the gas temperature in vacuum condition. In the present paper, tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) is employed to measure the gas temperature and also explore the application prospect of TDLAS temperature measurement technology in vacuum environment. During the thermal vacuum experiments, the vacuum gas cell is immersed in the thermostatic bath, and the gas temperature is determined by TDLAS. Meanwhile, a standard Pt-resistance is used to measure the thermostatic bath temperature. The results show that the temperatures of the gas and thermostatic bath are highly consistent with each other, and the difference between the two temperatures is less than  $\pm 0.2$  °C when the thermostatic bath is stable.

**Keywords:** tunable diode laser absorption spectroscopy, temperature measurement, vacuum environment, wavelength modulation spectroscopy

**PACS:** 33.20.Ea, 42.55.Px, 42.65.-k

**DOI:** 10.7498/aps.63.083301

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51206086, 51176085).

† Corresponding author. E-mail: [apspect@mail.tsinghua.edu.cn](mailto:apspect@mail.tsinghua.edu.cn)