

文章编号 1004-924X(2018)08-1862-08

可调谐二极管激光吸收光谱技术测量 低温流场水汽露点温度

聂伟^{1,2}, 许振宇^{1*}, 阚瑞峰^{1*}, 阮俊¹, 姚路¹, 王斌³, 张步强^{1,2}, 何亚柏¹

(1. 中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所, 安徽合肥 230031;

2. 中国科学技术大学, 安徽合肥 230026;

3. 中国空气动力研究与发展中心, 四川绵阳 621000)

摘要:露点温度是表征气体状态的一个重要参数, 针对低温环境的低露点温度精确、快速、连续、原位测量的迫切需要, 提出了可调谐二极管激光吸收光谱(TDLAS)技术对水汽露点温度测量的方案。首先与安徽省气象局的冷镜式露点仪一起对比测量标准温湿度箱内的露点温度, 验证波长为 1 381 nm 的 TDLAS 系统露点温度测量的可行性及精度, 然后结合一套开放式的测量装置, 进行低温度环境(最低温度 100 K)水汽露点温度原位测量。得到了实时的露点温度值, 其中 TDLAS 露点测量结果与冷镜式露点仪测量结果一致性较好(相差小于 1 K), TDLAS 测量的时间分辨率为 0.83 s, 远远快于冷镜式露点仪的时间响应速度。对于更低气体温度的露点测量, 获得了与气体温度变化趋势相同的露点温度, 同时得到了随着环境温度降低, 水汽逐渐趋向饱和的结论。

关键词:可调谐二极管激光吸收光谱技术; 露点温度; 饱和蒸汽压; 水汽

中图分类号: O433.1; O657.38 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20182608.1862

Measurement of low water vapor dew-point temperature based on tunable diode laser absorption spectroscopy

NIE Wei^{1,2}, XU Zheng-yu^{1*}, KAN Rui-feng^{1*}, RUAN Jun¹,

YAO Lu¹, WANG Bin³, ZHANG Bu-qiang^{1,2}, HE Ya-bai¹

(1. 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;

3. China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

* Corresponding author, E-mail: kanrui Feng@aiofm.ac.cn; zyxu@aiofm.ac.cn

Abstract: The dew-point temperature is an important parameter of gas. Moreover, there is an urgent need for developing techniques that can facilitate the accurate, rapid, continuous, and direct measurement of low dew point temperatures. In this regard, an approach based on Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS) was developed. Firstly, our TDLAS hygrometer was compared with a chilled mirror hygrometer at Anhui Provincial Meteorological Bureau. Secondly, a free-path measurement ap-

收稿日期: 2018-04-09; 修订日期: 2018-06-13.

基金项目: 中国科学院科技创新基金资助项目(No. CXJJ-16M267); 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(No. 11602292)

paratus was designed with an optical pathlength of approximately 3.8 m, and it was used to directly measure very low dew-point temperatures in a cryogenic chamber. Dew-point temperatures were obtained by standard formula. The results from TDLAS were compared with chilled mirror hygrometer. The maximum deviation is less than 1 K. In addition, the time resolution of the TDLAS system was determined to be approximately 0.83 s, which is shorter than the chilled mirror hygrometer. Through this experiment, we demonstrated that TDLAS technology was feasible to measure dew-point temperature at low temperatures.

Key words: Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy(TDLAS); dew-point temperature; saturated vapor pressure; water vapor

1 引 言

露点温度是指当气体被等压冷却到饱和状态时,露或其它状态的冷凝物形成并达到相平衡时的气体温度。一般情况下,气体温度在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上时称为露点温度,气体温度在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下时称为霜点温度^[1,10]。这里按照习惯统称为露点温度,它可以用来表征混合气体湿度的大小。露点温度与气体温度无关,但气体温度越接近露点温度,气体的相对湿度越大,当相对湿度达到 100% 时,露点温度与气体温度相等。低温水汽露点温度的测量和控制对航空航天、半导体、气象、考古、石油化工、医疗、电力等领域都具有重要作用^[1],例如,对低温风洞流场露点温度实时测量,能够防止流场水汽凝结影响风洞模拟实验结果的准确性^[2];对高层大气(对流层和平流层)的低温露点温度(或称湿度)进行测量,有利于大气分析模型建立、卫星遥感以及卷云对地球辐射的影响研究^[3-6]。

测量湿度的传统方法主要有毛发湿度计、干湿球法、阻容法、冷凝法、重量法、电子式湿度计等。其中毛发湿度计原理简单,但精度较差^[7];干湿球法和阻容法受到原理限制,不适合低湿环境露点的精确测量^[8];冷凝法和重量法存在测试时间较长,不能在线连续监测;电子式湿度计线性不好,只能测量较小的湿度区域^[9]。近年来,国内外发展了各种湿度测量方法。赵振刚等人^[10]发展了一种基于 555 多谐振荡式电路检测的电容型纳米管湿度传感器。罗毅等人^[11]研究了具有蛇形加热器的平板夹心电容式湿度传感器及其工艺制备方法,并设计了电路用于高空湿度测量。Michał Marzecki 等人^[12]提出了多层喷墨打印露点湿度计。虽然当前露点测量方法较多,但都难以满足低温流场水汽露点精确、连续、在线测量的

要求。当前,低温流场露点温度的连续在线测量一般采用露点传递标准的冷镜式露点仪进行^[13-14],而冷镜式露点仪在实际测量露点温度中存在以下问题:(1)冷镜式露点仪采用从待测环境中抽取低温气体进行测量的方式,必然会带来传输气体的管路对气体中水汽的吸脱附效应,使测量结果产生误差,甚至错误;(2)冷镜式露点仪的镜面容易受到污染以及过冷水等的影响;(3)在低湿测量时,冷镜式露点仪响应较慢(例如,露点温度低于 $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$,响应时间可能达到 20 min,甚至更久);(4)对于混合气体中有气体的露点温度比水汽更高时(例如甲烷和水汽混合,甲烷的露点温度高于水汽),最终测量得到的不是水汽的露点温度;(5)一般露点仪标定都是在常温常压的实验室完成,对于非常温常压的实际工业应用环境而言,测量精度很难保证。

针对当前冷镜式露点仪在露点测量中存在的问题,人们发展了基于激光光谱的方法来实现低湿环境水汽含量的精确、快速测量,主要包括:激光诱导荧光光谱法(Laser Induced Fluorescence Spectrum, LIFS)^[15]、光腔衰荡光谱法(Cavity Ring Down Spectroscopy, CRDS)^[16]、傅里叶红外光谱法(Fourier Transform Infrared spectrometer, FTIR)^[17]以及可调谐二极管激光吸收光谱法(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS)^[5,6,18-20]。其中,TDLAS 方法具有结构简单、成本较低、响应速度快、精度高、非侵入、免标定、环境适应性强、易于小型化等优势,非常适合不同环境露点温度的实时测量及工程化应用^[21-22]。

本文介绍了吸收光谱露点温度测量的原理,进行了 TDLAS 与传统露点测量装置(冷镜式露点仪)对比测量标准温湿度箱中水汽露点温度的实验,最后进行了极低露点温度测量实验,实验结

果验证了 TDLAS 技术测量露点温度的可行性,从而为测量气体露点/霜点温度,尤其是快速原位测量极端环境下的露点/霜点温度提供技术参考。

2 TDLAS 露点测量原理

水汽分子与激光发生相互作用后,分子内部运动状态(例如转动态)发生改变,激光泵浦使水汽分子从低态能级跃迁到高态能级使得激光能量衰减,通过探测激光能量的衰减程度(即透过率)来度量水汽分子对激光的吸收强度,光强透过率与气体温度、压力、组分浓度以及跃迁几率等有关。分子近红外吸收具有“指纹吸收”特性,即不同气体分子只对特定波长的激光有较强的吸收,所以可以通过测量特定波长的激光穿过待测气体后获得特定气体的透过率。反演计算气体的温度、压力、组分浓度等物理参数。TDLAS 技术采用可快速调谐、窄线宽(<5 MHz)的半导体激光器,通过调谐扫描一段频率范围内(包含整个气体吸收线)的气体透过率变化,获得高分辨率的吸收光谱,以分析相应气体的物理状态。对于确定波长的激光,通过均匀吸收介质后,激光强度随吸收介质的厚度呈指数衰减,这种衰减可由 Beer-Lambert 定律来描述,即:

$$I_t(\nu) = I_0(\nu) \exp(-k_i L), \quad (1)$$

其中: $I_0(\nu)$ 和 $I_t(\nu)$ 分别为入射光强和经气体吸收后的透射光强, ν 为入射光频率, L 为有效吸收光程, k_i 为吸收系数。对于单一跃迁 i , 吸收系数可表示为:

$$k_i = P \cdot x_j \cdot S_i(T) \cdot \phi(\nu - \nu_0), \quad (2)$$

其中: P 为气体池内总压; x_j 为气体中目标组分 j 的体积分数; $\phi(\nu - \nu_0)$ 为线型函数,它在全频域内积分值为 1, 即 $\int_{-\infty}^{+\infty} \phi_i d\nu = 1$; $S_i(T)$ 为跃迁 i 在温度 T 下的线强。

$$S_i(T) = S_i(T_0) \frac{Q(T_0)}{Q(T)} \left(\frac{T_0}{T} \right) \exp \left[-\frac{hcE'_i}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \times \left[1 - \exp \left(-\frac{hc\nu_0}{kT} \right) \right] \times \left[1 - \exp \left(-\frac{hc\nu_0}{kT_0} \right) \right]^{-1}, \quad (3)$$

其中: h 为普朗克常数, k 为玻尔兹曼系数, c 为真空光速, ν_0 为吸收线的中心频率, $S(T_0)$ 为参考温度 ($T_0 = 296$ K) 下的线强, $Q(T_0)$ 和 $Q(T)$ 分别是参考温度和实验温度下的配分函数。

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

其中系数 a, b, c, d 的值参考 HITRAN 数据库(见表 1)。

表 1 $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$ 配分函数多项式系数

Tab. 1 Polynomial coefficients of $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$ partition function

温度区间/K	a	b	c	d
$70 < T < 405$	-4.4441	0.2768	$1.2536\text{E-}3$	$-4.8938\text{E-}7$
$400 < T < 1500$	-94.327	0.8190	$7.4005\text{E-}5$	$4.2437\text{E-}7$
$1500 < T < 3005$	-1172.7	2.9261	$-1.330\text{E-}3$	$7.4356\text{E-}7$

水汽吸收光谱吸光度定义为:

$$\alpha = -\ln \frac{I_t(\nu)}{I_0(\nu)} = k_i L = P \cdot x_j \cdot L \cdot S(T) \cdot \phi(\nu - \nu_0). \quad (5)$$

积分吸光度为:

$$A = \int_{-\infty}^{+\infty} \alpha d\nu = P \cdot x_j \cdot L \cdot S(T). \quad (6)$$

由式(6)可以看出,获得风洞流场中水汽光谱的积分吸光度,即可获得水汽分压为:

$$e = P \cdot x_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{A}{S(T)L}, \quad (7)$$

其中 e 为饱和水蒸汽压。

空气中水蒸气凝结时对应的水汽分压为饱和蒸汽压,而饱和蒸汽压为严格的温度单值函数(Murphy-Koop 公式)^[23]。

$$\ln(e) = 9.550426 - 5723.265/T_d + 3.53068 \ln(T_d) - 0.00728332 T_d, \quad (8)$$

其中 T_d 为压力露点温度。实际测量中,首先需要根据等混合比将所测量的水汽压转换成一个大气压下的水汽分压,然后修正非纯气体露点温度与饱和水汽压间的关系^[24]。

$$e' = e \cdot f_w(T_d, P_d) \cdot \frac{P_t}{p_d}, \quad (9)$$

其中 e' 为修正后的水汽分压, f_w 为增强因子, p_d , p_t 分别为饱和水汽分压及混合气体总压。最后再根据修正后的饱和水蒸汽压与露点温度间的关系计算得出大气压露点温度。

3 实验过程及结果

3.1 水汽吸收线的选择

在测量光程一定的情况下,水汽吸收线的选择对最低露点温度测量起到决定性作用,所选水

汽吸收线的线强越强,其可探测的最低露点温度越低。选用 $7\,242.371\text{ cm}^{-1}$ 和 $7\,243.075\text{ cm}^{-1}$ 的吸收线进行实验,其线参数采用实验室标定的结果^[25]。计算所选吸收线线强随温度的变化及在不同饱和水蒸气压下两吸收线吸光度的峰值情况,结果如图 1 所示。

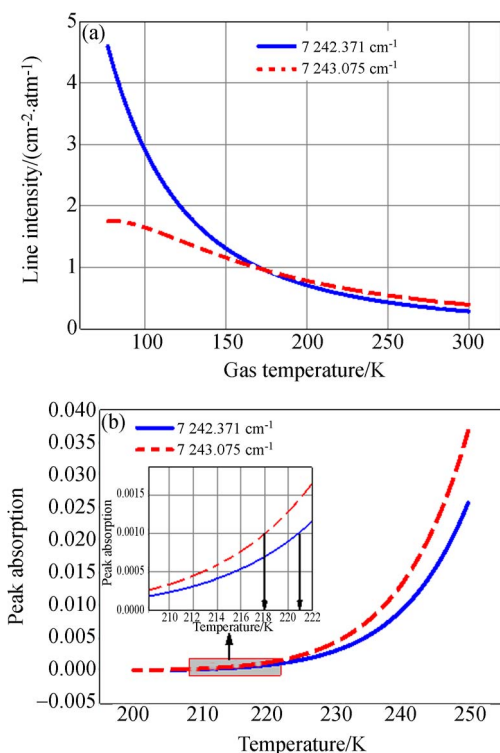


图 1 (a)线强与温度的关系;(b)模拟的两条水汽吸收光谱在不同露点温度下吸光度峰值

Fig. 1 (a) Relationship between line strength and temperature; (b) Simulated absorbance peak of two water vapor absorption spectra at different dew-point temperatures

由图 1 (a) 可以看出, $100 \sim 350\text{ K}$ 内, $7\,242.371\text{ cm}^{-1}$ 吸收线线强随温度的降低迅速增大,而 $7\,243.075\text{ cm}^{-1}$ 吸收线随着温度的降低线强先增大后逐渐减小。图 1 (b) 为相对湿度为 100% 时,模拟的不同露点温度下 3.8 m 光程水汽的吸收光谱峰值,按照 TDLAS 直接吸收测量方式的吸光度检测限 1×10^{-3} 估计,当气体温度为室温 ($30\text{ }^\circ\text{C}$) 时,3.8 m 光程系统的最低露点测量值约为 $-55\text{ }^\circ\text{C}$ 。但是由于温度降低,线强增大,实际能测量的最低露点温度应低于 $-55\text{ }^\circ\text{C}$ 。

3.2 TDLAS 露点温度测量精度验证

用安徽省气象局的标准温湿度箱及标准冷镜

式露点仪进行实验,实验装置如图 2 所示。

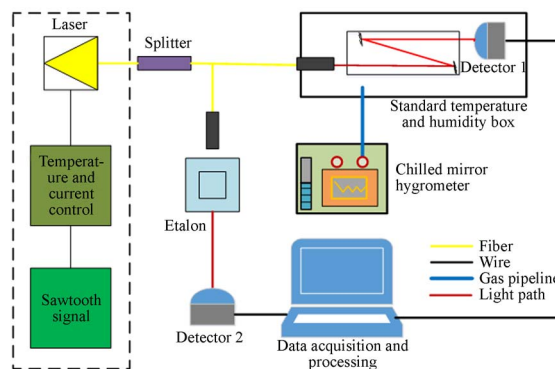


图 2 露点测量实验装置

Fig. 2 Experimental devices for dew-point measurement

激光器由温度和电流模块控制波长调谐输出,利用锯齿波电流快速扫描实现电流调谐,激光器出光后经过分束器分为两束:一束经标准具产生干涉信号用于光谱波长标定;另一束经准直后进入待测环境中与待测气体发生相互作用,两束光信号最终都由光电探测器(InGaAs)接收,光电探测器将光信号转换为电信号后经跨导放大电路转换为电压信号由采集卡采集。激光准直器和水汽吸收信号探测器 1 均置于标准温湿度箱(伟思富奇 T/C 4-340, Volume 335 L)中,这有利于排除外界空气中水汽对实验的干扰。控制温湿度箱产生不同露点温度的水汽,采用气象局冷镜式露点仪(GE optical 111H)和 TDLAS 系统进行连续露点测量,测量获得温湿度箱整个工作过程中的水汽吸收光谱,采用 Voigt 线型模型进行拟合(图 3),获得积分吸光度值,最后计算得到整个过程的露点温度(图 4 和图 5)。

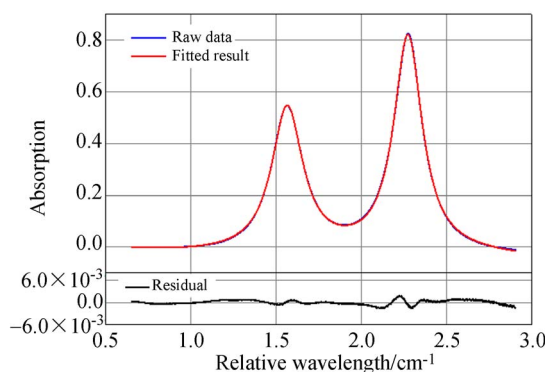


图 3 Voigt 线型模型拟合结果

Fig. 3 Spectral fitting results of Voigt model

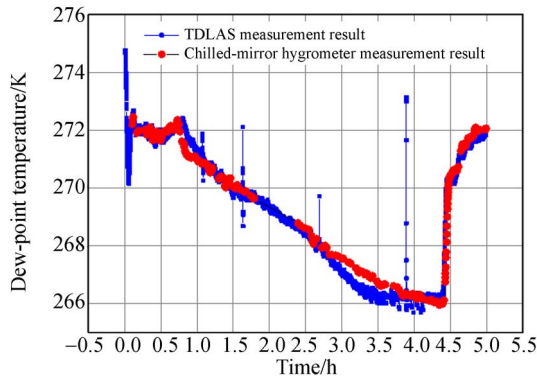


图 4 温度不变时改变相对湿度的测量结果(测量结果瞬间增大的时刻恰好对应手动调节相对湿度的时刻)

Fig. 4 Measurement results for keeping temperature constant and changing relative humidity (The moment of the instantaneous increase of the measurement results exactly corresponds to the time when the relative humidity is adjusted manually)

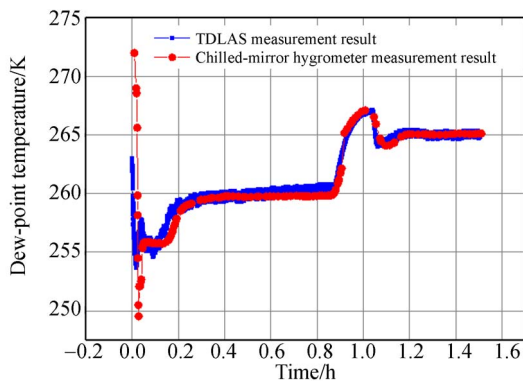


图 5 相对湿度不变时改变温度的测量结果

Fig. 5 Measurement results with constant relative humidity and changing temperature

对比结果(图 5)显示,在温湿度箱工作稳定后,TDLAS 测量结果与标准冷镜式露点仪测量结果一致性较好,整个测量过程两者测量结果的差值小于 1 K。同时 TDLAS 系统也检测到了温湿度箱在相对湿度调节瞬间的露点温度变化(图 5(a)的跳变点),说明 TDLAS 露点测量具有较高的时间响应速度。通过对比实验较好地验证了 TDLAS 低温露点测量具有良好的可行性及精。

3.3 极低温环境露点温度的测量

由于安徽省气象局的标准温湿度箱正常工作时的能达到的低温温度较高,不能满足更低温度露

点测量,所以利用中国空气动力研究与发展中心的低温平台(温度范围:室温—100 K)进行水汽露点温度测量实验。整体实验装置与安徽省气象局实验相似,只是把激光准直器及探测器改放至低温平台内部(图 6)。



图 6 实验低温平台内部开放光路结构

Fig. 6 Open optical structure in experimental cryogenic platform

设置低温平台从室温降至 100 K 然后升温至室温,降温和升温过程都设置两个温度台阶,每个温度台阶保持 45 min 左右。激光器及其驱动、采集系统都置于外界空气中,通过低温光纤将激光传输进入低温腔。

由于低温下水汽浓度较低,背景吸收对水汽浓度测量的影响较大。系统的背景水汽吸收将使测量结果偏大(例如,对于 100 cm 的 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的露点温度环境,1 mm 的空气柱背景水汽(浓度为 2%)吸收将使测量结果偏大 51.41%)。所以,对 TDLAS 系统背景吸收的测量和去除,是对低温露点精确测量的前提。

由于存在背景吸收,实际测量的吸光度应是待测环境中实际水汽吸收和背景水汽吸之和, $\alpha_{\text{measurement}} = \alpha_{\text{offset}} + \alpha_{\text{actual}}$ 。因为空气从室温逐渐降低至 100 K 的过程中,相对湿度逐渐增加,假设最终到 100 K 时水蒸气达到饱和状态(露点温度与气体温度相等,水汽浓度约为 13×10^{-9}),模拟获得此时水汽吸收的吸光度 α_{actual} ,如图 7(a)所示。将准直器和探测器直接放入 100 K 的极低温环境,其他部分置于空气中(与实际测量方式相同),测量透射信号后得到吸收光谱信号 $\alpha_{\text{measurement}}$,如图 7(b)所示。获得 TDLAS 在 100 K 时的总吸光度值(实际测量吸光度)与模拟的 100 K 时水汽吸光度之差即为 TDLAS 的背景吸收值。

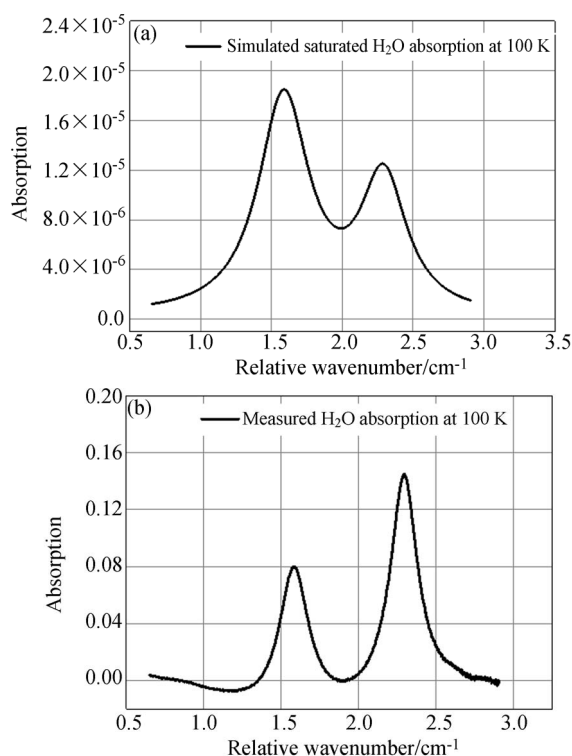


图 7 (a)模拟的气体 100 K 时饱和水蒸气的吸光度;
(b)气体 100 K 时测量得到的总吸光度

Fig. 7 (a) Simulated absorbance of saturated water vapor at 100 K; (b) Measured water vapor absorbance at 100 K

背景吸收的去除方法有两种:一是对背景吸光度进行拟合获得积分吸光度,用实际测量得到的积分吸光度减去背景吸收的积分吸光度得到实际吸收的积分吸光度,然后再计算得到露点温度;二是通过获得的总吸光度直接减去背景吸收的吸光度,然后拟合得到实际的积分吸光度用于露点温度计算。考虑方法一需要经过两次拟合,拟合误差更大,所以本文采用方法二进行背景扣除。

低温平台工作过程中连续对内部水汽进行测量,结合背景扣除获得低温腔内温度变化过程实际的露点温度,测量结果如图 8 所示。图 8 中有一段时间 TDLAS 没有测量数据,这是因为温度降低,气体中所含的水汽含量急剧减小,超过了

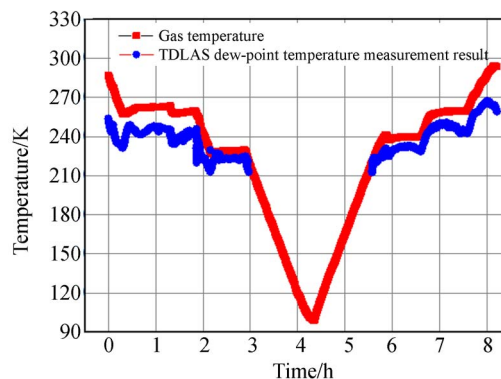


图 8 低温平台露点温度测量结果

Fig. 8 Results of dew-point temperature measurement in low temperature platform

TDLAS 所能探测的最低浓度(如图 1 所示)。但是 TDLAS 测量得到的露点温度与低温腔内的气体温度保持相同的变化趋势,这与实际相符。温度越低,露点温度与气体温度相差越小,说明温度降低过程中,低温腔内水汽相对湿度逐渐变大,气体中水汽逐渐趋于饱和,测量得到的最低露点温度约为 $-63\text{ }^{\circ}\text{C}$,与模拟结果相符。

4 结 论

针对传统露点温度测量设备存在的精度不高、响应速度慢、环境适应性不强等问题,本文发展了 TDLAS 水汽露点温度测量方法,通过选择合适的水汽吸收线,提出了两种背景吸收扣除方法。与安徽省气象局的冷镜式露点仪同时测量低温露点温度并对比,测量结果具有较好的一致性,同时,TDLAS 方法也显示出了比冷镜式露点仪更快的时间响应速度。对于更低温度环境(室温 \sim 100 K)露点的测量,计算得到了与气体温度变化趋势相同的露点温度,同时当气体水汽含量不变时,温度越低,相对湿度越大,水汽越接近饱和。本实验研究验证了 TDLAS 低温露点温度测量的可行性及优势,为今后利用可调谐二极管激光吸收光谱技术进行极端低温环境下的露点检测提供参考。

参考文献:

[1] CHEN Z, LU C. Humidity sensors: a review of materials and mechanisms [J]. *Sensor Letters*,

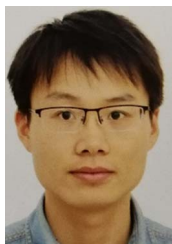
2005, 3(4): 274-295.

[2] PARYZ R. Recent developments at the NASA langley research center national transonic facility [J]. *49th AIAA Aerospace Sciences Meeting In-*

- cluding the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, 2011.
- [3] BUCHHOLZ B, KÜHHOLZ B, SMIT H G J, *et al.*. Validation of an extractive, airborne, compact TDL spectrometer for atmospheric humidity sensing by blind intercomparison[J]. *Applied Physics B*, 2012, 110(2): 249-262.
- [4] SKROTZKI J, CONNOLLY P, SCHNAITER M, *et al.*. The accommodation coefficient of water molecules on ice-cirrus cloud studies at the AIDA simulation chamber [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, 13(8): 4451-4466.
- [5] SARGENT M R, SAYRES D S, SMITH J B, *et al.*. A new direct absorption tunable diode laser spectrometer for high precision measurement of water vapor in the upper troposphere and lower stratosphere[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2013, 84(7): 074102.
- [6] THORNBERRY T D, ROLLINS A W, GAO R S, *et al.*. A two-channel, tunable diode laser-based hygrometer for measurement of water vapor and cirrus cloud ice water content in the upper troposphere and lower stratosphere [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2015, 8(1): 211-224.
- [7] QI Z M, HONMA I, ZHOU H. Humidity sensor based on localized surface plasmon resonance of multilayer thin films of gold nanoparticles linked with myoglobin[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(12): 1854-1856.
- [8] MADSEN H B, JENSEN C R, BOYSEN T. A comparison of the thermocouple psychrometer and the pressure plate methods for determination of soil water characteristic curves [J]. *Journal of Soil Science*, 1986, 37(3): 357-362.
- [9] STEKELENBURG F K, LABOTS H. Measurement of water activity with an electric hygrometer [J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 1991, 26(1): 111-116.
- [10] 赵振刚, 刘晓为, 王鑫, 等. 基于 555 多谐振荡器检测的碳纳米管湿敏传感器[J]. *光学 精密工程*, 2011, 19(1): 118-123.
- ZHAO ZH G, LIU X W, WANG X, *et al.*. Carbon nanotube sensors based on 555 multivibrators [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(1): 118-123. (in Chinese)
- [11] 罗毅, 施云波, 杨昆, 等. 用于探空仪的加热式湿度传感器及测量电路[J]. *光学 精密工程*, 2014, 22(11): 3050-3060.
- LUO Y, SHI Y B, YANG K, *et al.*. Humidity sensor for radiosonde and its measuring circuit [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(11): 3050-3060. (in Chinese)
- [12] MARZECKI M, JACHOWICZ R, TARAPATA G. Multilayer inkjet printed dew point hygrometer [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2018, 264: 76-83.
- [13] HEINONEN M, ANAGNOSTOU M, BELL S, *et al.*. Investigation of the equivalence of national dew-point temperature realizations in the $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ range [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2011, 33(8-9): 1422-1437.
- [14] HEINONEN M, ZVIZDIC D, SESTAN D. Intercomparison of the dew-point temperature realizations at LPM and MIKES in the range from $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2011, 33(8-9): 1451-1457.
- [15] KARDOS V J, SONEK G J. A dewpoint temperature sensor based on Nd^{3+} -doped fiber fluorescence [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1995, 7(10): 1198-1200.
- [16] ABE H, KITANO H. Development of humidity standard in trace-moisture region: Characteristics of humidity generation of diffusion tube humidity generator [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2006, 128(1): 202-208.
- [17] VOGELMANN H, SUSSMANN R, TRICKL T, *et al.*. Intercomparison of atmospheric water vapor soundings from the differential absorption lidar (DIAL) and the solar FTIR system on Mt. Zugspitze [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2011, 4(5): 835-841.
- [18] BUCHHOLZ B, AFCHINE A, KLEIN A, *et al.*. HAI, a new airborne, absolute, twin dual-channel, multi-phase TDLAS-hygrometer: background, design, setup, and first flight data [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2017, 10(1): 35-57.
- [19] WEI Y, CHANG J, LIAN J, *et al.*. Study of a distributed feedback diode laser based hygrometer combined Herriot-gas cell and waterless optical components [J]. *Photonic Sensors*, 2016, 6(3): 214-220.
- [20] ZHANG K, LIU S, CHEN S, *et al.*. Optical humidity detection based on tunable diode laser ab-

- sorption spectroscopy [J]. *SPIE*, 2017: 102561Q.
- [21] 姚路,刘文清,阚瑞峰,等.小型化 TDLAS 发动机测温系统的研究及进展[J].*实验流体力学*, 2015, 29(1):71-76.
- YAO L, LIU W Q, KAN R F, *et al.*. Research and development of a compact TDLAS system to measure scramjet combustion temperature [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2015, 29(1): 71-76. (in Chinese)
- [22] 袁松,阚瑞峰,何亚柏,等.基于可调谐半导体激光光谱大气 CO₂ 监测仪[J].*中国激光*, 2014, 41(12):170-175.
- YUAN S, KAN R F, HE Y B, *et al.*. Tunable diode laser spectroscopy system for carbon dioxide monitoring [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(12): 170-175. (in Chinese)
- [23] MURPHY D M, KOOP T. Review of the vapour pressures of ice and supercooled water for atmospheric applications[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2005, 131(608): 1539-1565.
- [24] GREENSPAN L. Functional equations for the enhancement factors for CO₂-free moist air[J]. *J. Res. NBS: A Phys. Chem.*, 1976, 80A(1): 41-44.
- [25] 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):91-96.
- NIE W, KAN R F, XU ZH Y, *et al.*. Measuring spectral parameters of water vapor at low temperature based on tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(20): 91-96. (in Chinese)

作者简介:



聂伟(1989—),男,江西宜春人,博士研究生,2013年于内蒙古师范大学获得学士学位,主要研究方向为激光光谱技术及其应用。E-mail: wnie@aiofm.ac.cn

通讯作者:



阚瑞峰(1977—),男,辽宁锦州人,研究员,博士生导师,2000年于长春光学精密机械学院获得学士学位,2003年于中科院安徽光学精密机械研究所获得硕士学位,2006年于中科院合肥物质科学研究院获得博士学位,主要从事激光光谱高灵敏检测方法与应用技术的研究。E-mail: kanruifeng@aiofm.ac.cn

通讯作者:



许振宇(1986—),男,安徽亳州人,副研究员,2007年于安徽大学获得学士学位,2013年于中科院安徽光学精密机械研究所获得博士学位,主要从事激光光谱技术及其在流场诊断中的应用研究。E-mail: zyxu@aiofm.ac.cn