

# 激光吸收光谱系统中气室的高精度温控设计

杨曦<sup>1\*\*</sup>, 孙鹏帅<sup>2</sup>, 庞涛<sup>2</sup>, 夏滑<sup>2</sup>, 吴边<sup>2</sup>, 徐启铭<sup>3</sup>, 张志荣<sup>1,2,4,5\*</sup>, 舒志峰<sup>6</sup>

<sup>1</sup> 中国科学技术大学环境科学与光电技术学院, 安徽合肥 230026;

<sup>2</sup> 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;

<sup>3</sup> 台湾云林科技大学环境安全工程系, 台湾 云林 64002;

<sup>4</sup> 中国科学院安徽光学精密机械研究所光子器件与材料安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230031;

<sup>5</sup> 先进激光技术安徽省实验室, 安徽 合肥 230037;

<sup>6</sup> 合肥师范学院物理与材料工程学院, 安徽合肥 230601

**摘要** 在使用可调谐二极管激光吸收光谱技术(TDLAS)技术进行气体检测时,气体环境的温度变化会影响气体的吸收谱线强度、吸收线型及气体分子数密度,进而影响气体浓度的测量结果。设计了高精度温度控制箱体,并用其控制吸收池所处环境的温度。首先,利用CFD仿真软件模拟了目标温控箱形状、半导体致冷器位置及气流矢量等参数对箱体内部温度分布的影响;其次,利用仿真结果对温控箱的设计及加工进行优化;最后完成了温度控制箱体的制作,其可为气体吸收池提供均匀稳定的温度场。温度控制箱体的可调控制温度范围为32~50℃时,控制精度可达0.01℃,并能长期保持稳定。通过标准CO<sub>2</sub>气体浓度检测实验,对温度稳定性进行了验证。上述结果证明,利用CFD仿真优化温控装置参数,可获得均匀稳定的温度场,减小环境温度对测量结果的影响,有效提高气体浓度测量的准确度和稳定性。

**关键词** 光谱学; 计算流体力学; 温度控制箱体; 可调谐二极管激光吸收光谱

中图分类号 O433.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1230001

## High Precision Temperature Control Design of Gas Cell in Laser Absorption Spectroscopy System

Yang Xi<sup>1\*\*</sup>, Sun Pengshuai<sup>2</sup>, Pang Tao<sup>2</sup>, Xia Hua<sup>2</sup>, Wu Bian<sup>2</sup>, Xu Qiming<sup>3</sup>,  
Zhang Zhirong<sup>1,2,4,5\*</sup>, Shu Zhifeng<sup>6</sup>

<sup>1</sup> School of Environment Science and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

<sup>2</sup> Key Lab of Environmental Optics & Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

<sup>3</sup> Department of Safety Health and Environmental Engineering, Yunlin University of Science and Technology, Yunlin, Taiwan 64002, China;

<sup>4</sup> Anhui Provincial Key Laboratory of Photonic Devices and Materials, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

<sup>5</sup> Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, Heifei, Anhui 230037, China;

<sup>6</sup> School of Physics and Materials Engineering, Heifei Normal University, Heifei, Anhui 230601, China

**Abstract** Tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) is often used for gas concentration detection. However, the change of ambient temperature affects the absorption line strength, absorption line type, and gas

收稿日期: 2020-01-14; 修回日期: 2020-02-22; 录用日期: 2020-03-16

基金项目: 国家自然科学基金(11874364,41877311,41775128)、中国科学院对外合作重点项目(GJHZ1726)、国家重点研发计划(2017YFC0805004)、安徽省重点研究与开发计划项目(201904c03020005, 1804a09020097)、安徽省科技重大专项(18030901054)、安徽省高校自然科学研究重大项目(KJ2017ZD56)、安徽省高校优秀青年人才支持计划重点项目(gxyqZD2018072)

\* E-mail: zhangzr@aiofm.ac.cn; \*\* E-mail: 826274673@qq.com

molecular number density and thus results in measurement errors. We designed a high precision temperature control box to control the ambient temperature where the gas cell is located. First, the effects of parameters such as the shape of the temperature control box, thermoelectric cooler position, and airflow vector on the temperature distribution inside the box were simulated using the CFD simulation software. Second, with the help of the simulation results, we optimized the design and processing of the temperature control box. Finally, we completed the fabrication of the temperature control box which can provide a uniform and stable temperature environment for the gas cell. The temperature adjustment range of this box is 32-50 °C, the control accuracy can reach 0.01 °C, and a long-term stability is realized. Temperature stability was verified by the CO<sub>2</sub> gas concentration detection experiment. Therefore, using CFD simulation to optimize the parameters of the temperature control device, one can obtain a stable and uniform temperature control system, reduce the influence of ambient temperature on the measurement results, and effectively improve the accuracy and stability of gas concentration measurements.

**Key words** spectroscopy; computational fluid dynamics; temperature control box; tunable diode laser absorption spectroscopy

**OCIS codes** 300.6360; 300.1030; 280.6780

## 1 引 言

近年来环境问题日益严峻,大气污染问题尤为突出,空气中有害气体的含量不断上升,对人们健康造成威胁。我国污染气体来源主要有工业生产排放、化石燃料的燃烧、汽车尾气的排放等。稳定可靠的气体在线监测技术可准确快速地测量空气中的有害气体浓度,方便环保部门监督并有效控制有害气体的排放。可调谐二极管激光吸收光谱(TDLAS)技术具有高灵敏度、高光谱分辨率、快速响应和非侵入式测量的特性,作为一种重要的痕量气体检测方法已得到广泛应用<sup>[1-5]</sup>。在TDLAS检测系统中,压强一定的情况下,气体吸收线型只与温度有关。当温度变化时,吸收谱线强度随之发生改变,直接影响二次谐波信号线型与幅值,因此引起测量误差<sup>[6-8]</sup>。在实际的测量过程中,引起的测量误差往往容易被忽视,最终导致真实值和测量值之间产生差异。以CO<sub>2</sub>为例,通过HITRAN数据库查询可知,当温度由296 K变化为297 K时,1579.57 nm处的吸收谱线强度的变化幅度为0.58%。温度的变化同样会引起吸收池材料发生形变进而影响光路,光强会随温度发生不规则变化,最终影响测量结果。

在温度变化对测量结果的影响及修正方面,已经有科研人员进行了相关研究。张志荣等<sup>[9]</sup>分析与讨论了实验所得的数值拟合修正公式和基于HITRAN数据库参数得到的理论修正公式,论证了TDLAS方法对气体实时在线检测的温度修正的可行性。束小文等<sup>[10]</sup>分析了温度对吸收谱线强度的影响及HCl的二次谐波信号与温度的变化关系,得到了一个经验公式并验证了该经验公式的合理性。李峥辉等<sup>[11]</sup>利用直接吸收法,在常温以及变温工况下对体积分数为10%~20%的CO<sub>2</sub>进行了测量,分

析了温度变化对浓度测量结果的影响,并建立了温度修正关系式。依据上述分析可知,大多研究集中在分析温度与测量结果的关系,并给出了温度修正方法以期提高浓度测量精度,但温度修正方法的修正效果受环境因素的影响,模型参数与实际参数会有差别,比如测量系统的背景噪声会随温度的变化而改变。以上研究未从本质上考虑控制测量腔体内部温度的方法。

计算流体力学(CFD)结合了近代流体力学、数值数学和计算机科学。CFD以电子计算机为工具,应用各种离散化的数学方法,对流体力学的各类问题进行数值实验、计算机模拟和分析研究,从而解决各种实际问题<sup>[12-13]</sup>。因此,本文针对温度影响测量结果这一常见情况,首先利用CFD仿真软件模拟温控箱内部的温度分布情况,通过改变温控箱的形状、内部的加热制冷单元以及能量传导方向等参数,得到了均匀稳定温度场的仿真控制系统。基于上述仿真结果,完成了高精度温控箱体的制作和测试。为了验证温控箱温度控制的效果,以体积分数为 $5.05 \times 10^{-4}$ 的CO<sub>2</sub>气体测量为例,结合波长调制法,进行了连续的温控箱温度和气体浓度测量。测试结果表明,该温度控制箱可为吸收池提供均匀稳定的温度场,从根本上消除温度变化对测量结果的影响。

## 2 实验原理

### 2.1 CFD软件计算原理

CFD方法是用计算数学的方法,对流场的控制方程进行离散处理,在一系列网格节点上求其离散数值解。流场控制的基本定律是质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律,它们分别导出连续性方程、动量方程和能量方程。

CFD 数值模拟一般有以下流程:明确工作目标,建立所研究问题的物理模型,确定待分析几何体的空间影响区域;建立整个几何体与其所影响的空间区域,即计算区域的 CAD 模型,将几何体的外表面和整个计算区域进行空间网格划分;设置物理问题如物理模型、材料属性、域属性、边界条件等;定义求解器如数值格式、收敛控制等,选择适当算法,设定具体的控制求解过程和精度条件,对所分析的问题进行求解;对模拟结果进行分析。

有限体积法又称控制体积法,是将计算区域划分为网格,并使每个网格点周围有一个互不重复的控制体积,将待解的微分方程对每个控制体积进行积分,从而得到一组离散方程。有限体积法从具有流体运动积分形式的守恒方程出发来建立离散方程。三维对流扩散方程的守恒型微分方程为

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u\phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v\phi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w\phi)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}\left(K\frac{\partial\phi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K\frac{\partial\phi}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K\frac{\partial\phi}{\partial z}\right) + S_{\phi}, \quad (1)$$

式中: $\rho$  为质量浓度; $t$  为时间; $u, v, w$  为流速在  $x, y, z$  方向的三个分量; $K$  为分子扩散系数; $S_{\phi}$  为单位时间单位体积空间内化学反应生成的组分的量; $\phi$  是对流扩散物质函数。

CFD 求解器基于有限体积法,将计算域离散化为一系列控制体积,在这些控制体上求解质量、动量、能量、组分等。将偏微分方程组离散为代数方程组,用数值方法求解代数方程组以获取流场解。通用守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho\phi dV + \oint_A \rho\phi V dA = \oint_A \Gamma_{\phi} \nabla\phi dA + \int_V S_{\phi} dV, \quad (2)$$

式中: $V$  为体积; $A$  为面积; $\Gamma_{\phi}$  为广义扩散系数; $\nabla$  为那勃勒算子。

## 2.2 TDLAS 气体检测原理

根据 Lambert-Beer 吸收定律,激光器发出强度为  $I_0$ , 频率为  $\nu$  的单体激光,通过长度为  $L$  的吸收介质后,在接收端的强度为

$$I(\nu) = I_0(\nu) \exp[-PS(T)g(\nu)CL], \quad (3)$$

式中: $P$  为气体压强; $S(T)$  为吸收谱线强度; $T$  为温度; $C$  为吸收气体的分子数浓度。

$g(\nu)$  是归一化的线型函数,即

$$\int_{-\infty}^{+\infty} g(\nu) d\nu = 1. \quad (4)$$

大部分气体检测技术中心将 TDLAS 与波长调

制技术相结合来提高系统检测灵敏度。一般情况下  $PS(T)g(\nu)CL \ll 1$ , 对(1)式进行傅里叶展开,二次谐波信号的关系式可表示为  $I_{2f}$ , 即

$$I_{2f} \propto I_0(\nu)PS(T)g(\nu)CL. \quad (5)$$

当测量系统中的压强  $P$  保持不变时,气体的吸收线型只与温度有关。二次谐波峰值与浓度成正比,但是由于温度的变化,二次谐波的线型会变化,反演出的浓度结果就存在误差。 $S(T)$  是温度的函数,当测量气体氛围的温度发生变化时,吸收谱线强度  $S(T)$  也发生相应的变化,引起二次谐波峰值的变化,最终导致系统测量的误差。

## 3 温控箱设计

### 3.1 初步设计思想

利用测量气体吸收池的体积及测量系统,可确定温度控制箱体(温控箱)的体积。温控箱分为内箱、隔热保温层和外箱三个部分:内箱由导热系数较好的不锈钢板制作而成,主要作用是放置吸收池等相应部件,箱体内部导热良好,可产生稳定的温度场;在内箱与外箱之间,加入导热系数很小的纳米气凝胶毡材料以隔热保温,需要注意的是该材料在内外箱之间紧密贴合且填充充实,不存在空隙;外箱由铝板制作而成,主要起固定作用,且最外层用高亮铝箔纸封严,以尽量减少气体与外界的热交换。内箱的温度控制部分包括:用于温控箱加热和制冷的双向半导体致冷器(TEC)、散热片、扰流风扇、温控电路等。为保证 TEC 高效率工作,需加快它与外界环境的热交换,因此 TEC 外部配置散热片及散热风扇。温控箱要求箱内温度场均匀稳定,且达到稳定的时间越快越好,故依据气流方向及均匀性模拟等要求,将内箱的箱体设计成类似“凸”字型的样式,这有利于气流扩散,具有加快传热并减少温度死角的优点。温控箱结构如图 1 所示。

### 3.2 仿真实验

温控箱的主要性能参数包括温度的均匀性、稳定性和达到设置温度所需的时间。通过上述分析可知,虽然引入扰流风扇可以加速空气流动,加快箱体内部温度场达到均匀和稳定,但是风扇位置的摆放以及风向是一个重要的考虑因素,直接决定了系统的性能参数。箱体的形状也对箱体内部层流有重要影响,因此采用设计思想中的“凸”型无死角的设计方法进行模拟。本文通过 CFD 软件对温控箱在不同控制参数条件下进行仿真,并借助仿真结果对模型进行优化,为后续的硬件设计提供支持。首先,依



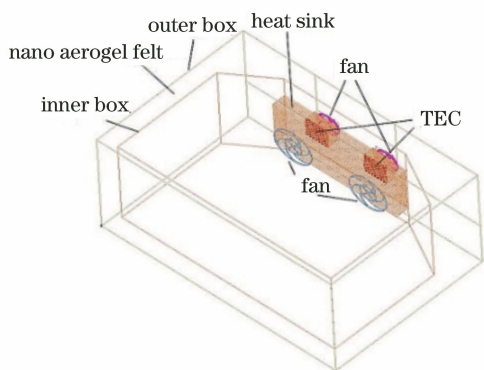


图 1 温控箱内部结构示意图

Fig. 1 Internal structural diagram of temperature control box

据前面的设计思想建立温控箱的三维模型,包括加热单元、散热片、扰流风扇、散热风扇、壁面(箱体)等。其次,将计算区域划分为网格。然后,在不考虑辐射换热条件下进行求解设置:设置边界条件如风扇风速风向等;设置热源功率,选择湍流模型;设置 N-S 方程离散格式、迭代因子、单双精度、迭代步数及残差数值等。最后进行求解。

### 3.2.1 无倒角无风扇

为验证箱体形状对温度均匀性的影响,最常见的是无倒角的“方形”设计思路。图 2 所示为箱体无倒角无风扇情况下的温度分布仿真图。从图 2 可看出,该情况下温度扩散非常慢,并且随着时间的增加,温度的分布仍然是不均匀的,在热源近距离处温度高,远距离处温度低,形成了梯度分布。此时温度分布不利于气体检测吸收腔体内部的温度设定及稳定。

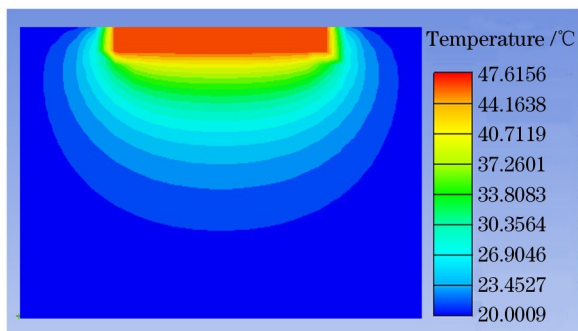


图 2 无风扇温度仿真结果

Fig. 2 Temperature simulation results without fan

### 3.2.2 无倒角有风扇

扰流风扇的风向会影响箱体内部温度和流场的分布情况。因此,本文对两种风扇的风向进行分析,如图 3 所示。风向 1 即风扇风向朝向箱体内部时,箱体内部温度场的仿真结果如图 4(a)所示,加热片

附近为输出热源控制源,相对无风扇情况,箱内温度随着时间的增加而分布更加均匀。对应的流场仿真结果如图 4(b)所示,此时流场速度较快,温控箱中心区域流场速度达到  $4.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以上,风直接吹向箱体内部的气体吸收腔体,使温控箱内环境稳定性变差,造成吸收腔体的随风振动,不利于系统的稳定性。风向 2 即风扇风向朝向散热片,温度仿真结果如图 5(a)所示,温度箱内部温度更加均匀稳定,且传热效果更好,温控效率得到提高。对应的流场仿真结果如图 5(b)所示,箱内流场速度较慢且速度相对恒定,大部分区域在  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以下,流场对吸收池的影响较小。但气流在遇到箱体拐角时,流速大大减小,严重影响温度的传递,如图 5(b)圈内部分,因此考虑对箱体进行倒角处理。

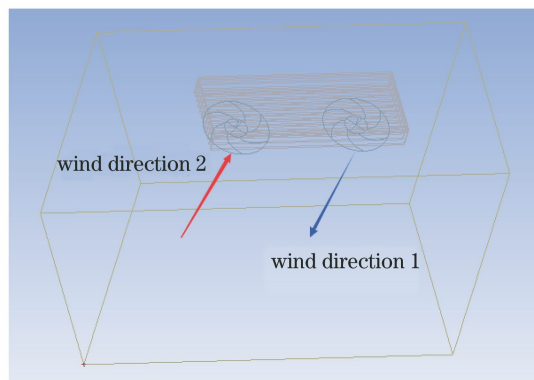


图 3 风扇风向

Fig. 3 Fan wind direction

### 3.2.3 倒角有风扇

对箱体进行倒角处理,风扇风向为风向 2,温度仿真结果如图 6(a)所示,箱内温度均匀分布,传热效率高,与无倒角情况相比,在热源功率相同的情况下,箱内温度较高。对应的流场仿真结果如图 6(b)所示,箱体倒角处理有利于气流流动,气流扩散更快且沿箱壁稳定扩散,箱内流场速度大部分在  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以下,流场对吸收池影响较小,满足实验要求。因此,参考此方案制作温控箱。

### 3.2.4 箱体温控检测点的选取

温控箱的稳定性主要取决于保温效果和温度反馈控制点的选取。内箱体壁面的材质对温度传热的影响最大,因此通过设定不同的传热系数进行仿真,选取温控箱内均匀分布的 7 个位置点进行温度记录,7 个温度记录点位置如图 7 所示。利用仿真结果,统计出箱体稳定后各点的温度数值,结果如图 8 所示。可以看出,7 个温度记录位置点的温差均不超过  $0.25 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,在不同的传热系数下均能得到均匀稳

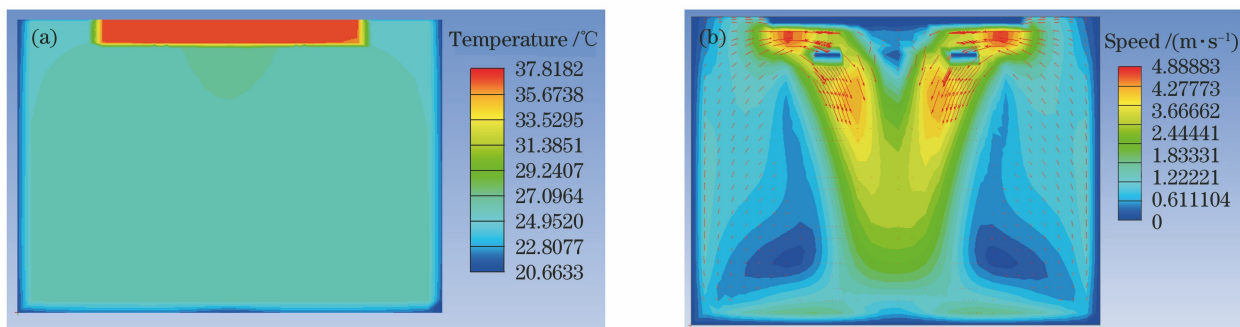


图 4 风向 1 情况下的仿真结果。(a)温度;(b)流场

Fig. 4 Simulation results for wind direction 1. (a) Temperature ; (b) flow-field

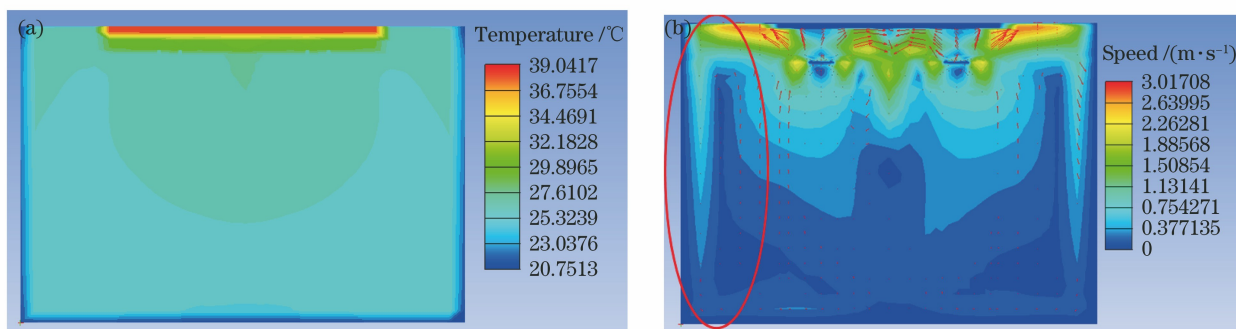


图 5 风向 2 情况下的仿真结果。(a)温度;(b)流场

Fig. 5 Simulation results for wind direction 2. (a) Temperature; (b) flow-field

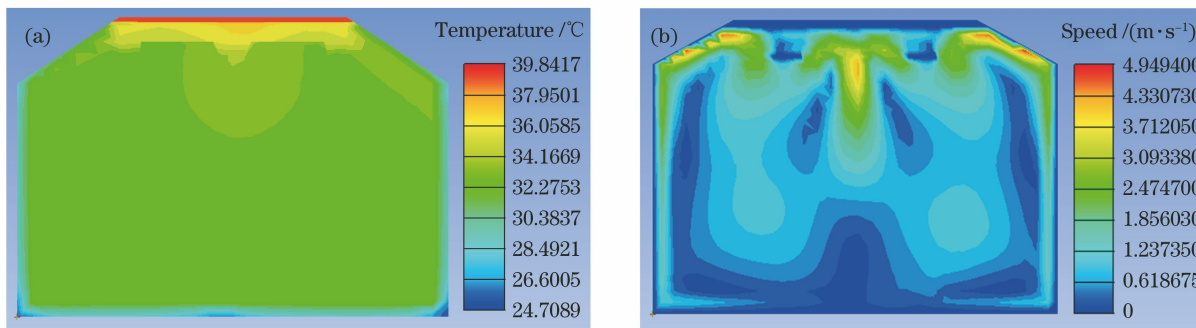


图 6 有倒角时在风向 2 情况下的仿真结果。(a)温度;(b)流场

Fig. 6 Simulation results for wind direction 2 with box chamfer. (a) Temperature; (b) flow-field

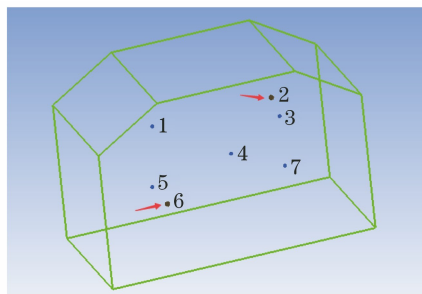


图 7 7 个温度记录点位置

Fig. 7 Seven temperature recording points

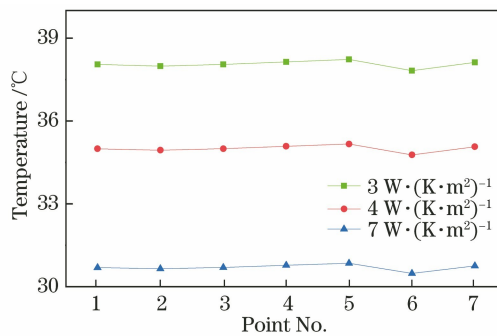


图 8 不同传热系数下记录点的温度

Fig. 8 Recording point temperatures under different heat transfer coefficients

定的温度场,但最终的温度有较大差别,说明传热系数越小的箱体,温控效率越高。

基于仿真结果,选取最优的箱体形状、风扇扰流方向以及隔热材料,得到温度场均匀性良好、温差较小且满足设计要求的温控系统。选取温差最大的两个点作为温控温度反馈点,即选择点 2 和点 6 作为反馈点,如图 7 箭头指示点所示。在实际情况下,高精度温控电路的应用可使箱内温度场更加均匀稳定,满足实验要求。因此,按照上述分析,箱体的温控系统使用 STM32 单片机作为核心控制单元,采用 PID 控制算法,以 TEC 为控温元件,以 Pt100 铂电阻作为测温元件,测定箱内 1/3 位置处与 2/3 位置处两点温度并取平均值作为反馈温度,差值作为反映温度均匀性的参数。温控箱实物如图 9 所示。

## 4 实验部分

### 4.1 实验装置及过程

搭建的 TDLAS 气体检测温控实验系统如



图 9 温控箱实物

Fig. 9 Real picture of temperature control box

图 10 所示。信号发生器、激光器驱动和分布式反馈激光器(DFB 激光器)组成光源部分,激光通过光纤耦合进气体吸收池,吸收池装配在温控箱内且经气管连接至箱外以实现进气与出气,温控电路和温控箱组成温控部分,光电探测器被封装在气体吸收池内,光电探测器、放大电路、锁相电路、采集卡组成了信号采集与处理部分,通过计算机进行数据处理。

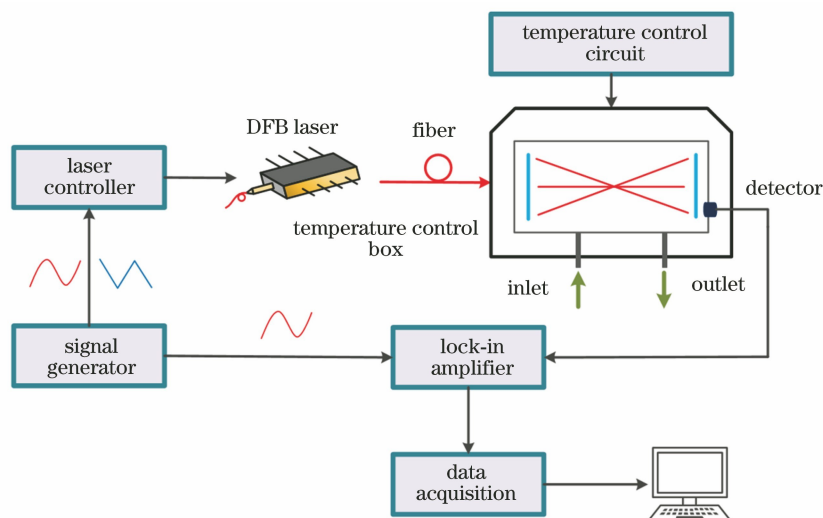


图 10 TDLAS 气体检测温控实验系统示意图

Fig. 10 Schematic of TDLAS gas detection temperature control experimental system

以体积分数为  $5.05 \times 10^{-4}$  的  $\text{CO}_2$  标准气体为实验用气,光源使用中心波长为 1580 nm 的 DFB 激光器,在 HITRAN 数据库上查询 1580 nm 附近的吸收谱线,考虑无其他气体干扰且  $\text{CO}_2$  吸收谱线强度较强,最终选取波长在 1580.0395 nm 处的吸收谱线。使用课题组研制的高精度温控电路板和电流驱动板控制激光器波长。利用信号发生器产生的锯齿扫描信号和正弦调制信号对激光进行调制,调制光通过光纤被耦合进光程为 20 m 的气体吸收池,光电探测器接收光信号并将其转化为电信号,电信号经前置放大电路放大后进入锁相电路。信号发生器给出一路参考信号,锁相电路对参考信号进行解调,

得到的二次谐波信号包含浓度信息,通过采集卡采集数据并将其输送至计算机进行处理,本文采用最小二乘法反演出  $\text{CO}_2$  气体浓度。温控箱可调温度范围为  $32 \sim 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ,在不同设定温度下连续测量箱内温度,并分别测量不同温度下的  $\text{CO}_2$  浓度。

### 4.2 结果与讨论

考虑到气体测量过程中的水汽凝结温度,设定温控箱温度分别为  $36, 38, 40, 42 \text{ }^\circ\text{C}$ ,运行温控系统。每设定一个温度,温控系统温度需经一定时间才能达到设定值,因此,  $30 \sim 40 \text{ min}$  时即温控箱温度稳定后开始记录数据,连续记录 1 h,结果如图 11 所示。



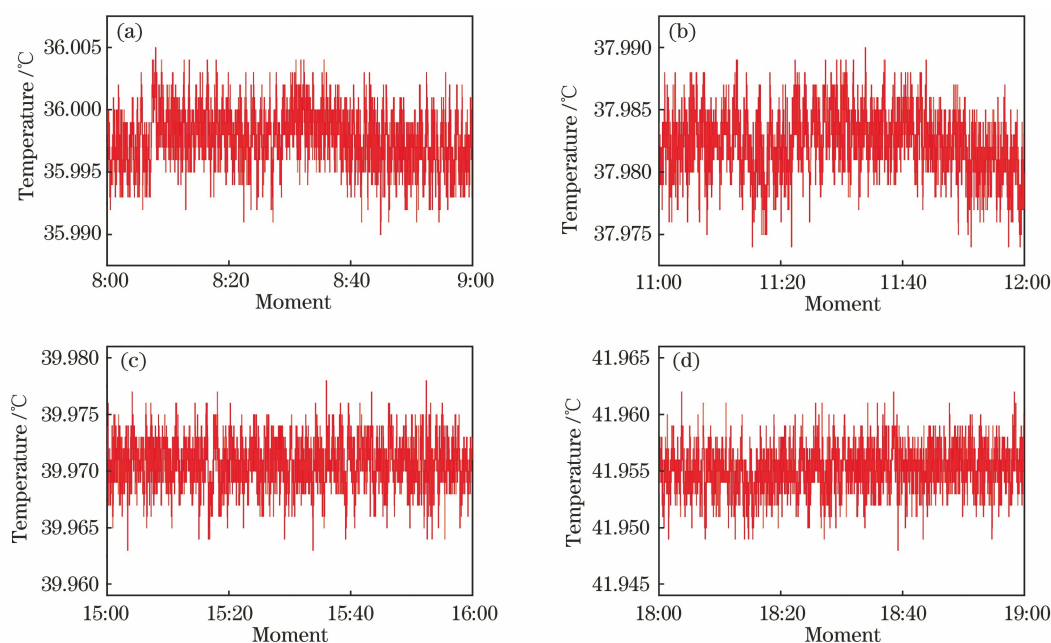


图 11 不同设定温度下温控箱内 1 h 的温度曲线。(a) 36 °C ;(b) 38 °C ;(c) 40 °C ;(d) 42 °C

Fig. 11 Temperature curves in temperature control box within one hour under different setting temperatures.

(a) 36 °C ; (b) 38 °C ; (c) 40 °C ; (d) 42 °C

分析实验数据可知,温度设定在 36, 38, 40, 42 °C 时,温度变化最大偏差分别不超过 0.01, 0.026, 0.038, 0.05 °C, 温度标准差分别为 0.0023, 0.0026, 0.0021, 0.0021 °C, 且测定两点的温度差不超过 0.1 °C, 温度场均匀分布, 温度控制效果良好, 满足实验要求。

实验通过充入 N<sub>2</sub> 对吸收池进行吹扫以避免其他气体干扰, 然后充入体积分数为  $5.05 \times 10^{-4}$  的 CO<sub>2</sub> 气体。为了避免过快流速影响光路及吸收信号, 气体以 200 mL · min<sup>-1</sup> 的流速匀速通过样品池, 充气过程中保持气路畅通, 20 min 后停止充气, 封闭气管。在室温下测量了 CO<sub>2</sub> 气体浓度, 二次谐波信号如图 12 所示。二次谐波信号的信噪比定义为

$$R_{\text{SNR}} = \frac{A_s}{A_b}, \quad (6)$$

式中:  $A_s$  为信号幅值;  $A_b$  为背景幅值。计算得到二次谐波信号的信噪比为 64.5, 系统灵敏度为  $7.8 \times 10^{-6}$ 。

在室温下连续测量了 1 h, CO<sub>2</sub> 浓度如图 13(a) 所示, 同时记录了室温变化情况, 结果如图 13(b) 所示。

室温变化范围为 25.8~26.9 °C, 最高温度与最低温度相差 1.1 °C。分析数据得到, 室温下 CO<sub>2</sub> 浓度测量标准差为  $1.25 \times 10^{-5}$ , 测量结果有较大波动。

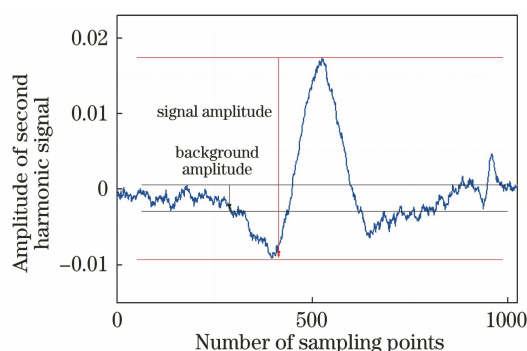


图 12 二次谐波信号

Fig. 12 Second harmonic signal

设定温控箱温度分别为 36 °C 和 40 °C, 30~40 min 时即温控箱稳定后, 考虑到气体温度与温控箱内的温度差, 再等待 30 min, 在这段时间内气体与箱内环境进行热交换, 温度差减小, 然后开始记录实验数据。借助 Labview 软件在线采集并处理数据, 在不同温度下连续测量 1 h, CO<sub>2</sub> 气体浓度值如图 14 所示。

测量结果表明, 进行温控后 CO<sub>2</sub> 浓度测量结果稳定, 36 °C 时浓度测量标准差为  $9.5 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $5 \times 10^{-4}$ , 40 °C 时浓度测量标准差为  $1.1 \times 10^{-5}$ , 平均值为  $5.2 \times 10^{-4}$ ; 温度箱在不同温度下均可得到稳定的测量结果, 在温度改变 4 °C 时, 浓度变化  $2.06 \times 10^{-5}$ , 因此温度对测量结果的准确性有明显的影响。测量结果与温度有关, 吸收谱线强度随着

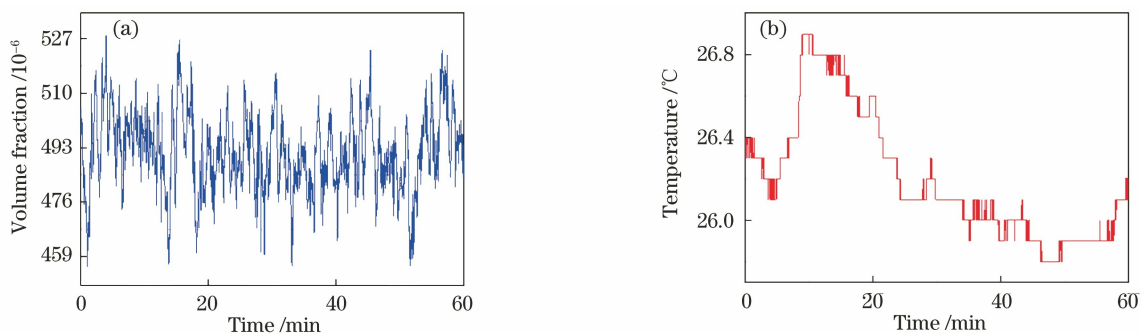


图 13 室温下的 CO<sub>2</sub> 浓度与室温变化情况。(a) 室温下的 CO<sub>2</sub> 浓度; (b) 室温  
Fig. 13 CO<sub>2</sub> concentration at room temperature and change of room temperature.  
(a) CO<sub>2</sub> concentration at room temperature; (b) room temperature

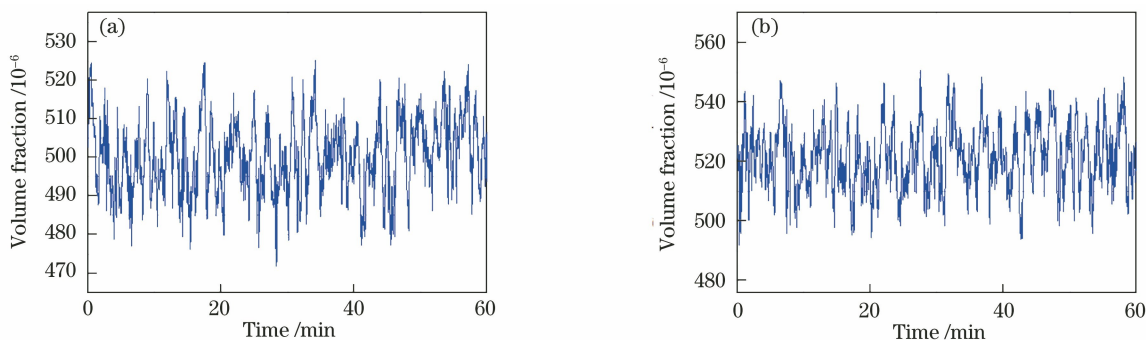


图 14 不同温度下的 CO<sub>2</sub> 浓度。(a) 36 °C; (b) 40 °C  
Fig. 14 CO<sub>2</sub> concentrations under different temperatures. (a) 36 °C; (b) 40 °C

温度的升高而改变,而利用最小二乘法反演浓度时标定值选用温度为 296 K 时的谱线吸收强度,因此测量值相对于  $5.05 \times 10^{-4}$  标准气体均有偏移,但同一温度下测量值较稳定,验证了温控箱可提高测量结果的稳定性。

## 5 结 论

针对 TDLAS 气体检测系统中温度对测量结果的影响,利用 CFD 仿真软件,优化了温控箱的形状、TEC 位置及气流矢量等参数,获得了温控箱内部稳定均匀的温度场,为设计提供了思路和方案,针对特定的吸收池,设计并加工了温控箱。基于 TDLAS 气体检测系统,完成了 CO<sub>2</sub> 浓度测量实验,计算得到该系统的灵敏度为  $7.8 \times 10^{-6}$ 。对温控箱效果进行了实验验证,在不同温度下测量了  $5.05 \times 10^{-4}$  CO<sub>2</sub> 标准气体的浓度。实验数据表明,在温控情况下,气体浓度测量结果稳定,测量结果标准差不超过  $1.1 \times 10^{-5}$ 。温控箱内部温度测量结果表明,温控箱控制精度可达 0.01 °C,两点温度差不超过 0.1 °C,且温度场稳定后波动较小,满足气体检测系统的要求。温控箱对保障 TDLAS 气体测量系统稳定性具

有积极的意义。所设计的温控箱只采集了箱内两点温度进行反馈,为了温控箱性能的提升未来可以进行多点输入控制,并对控制算法进一步优化,在保温隔热方面也可以进行改进。

## 参 考 文 献

- [1] Schiff H I, MacKay G I, Bechara J. The use of tunable diode laser absorption spectroscopy for atmospheric measurements[J]. *Research on Chemical Intermediates*, 1994, 20(3/4/5): 525-556.
- [2] Dong F Z, Kan R F, Liu W Q, et al. Tunable diode laser absorption spectroscopic technology and its applications in air quality monitoring [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2005, 22(3): 315-325.  
董凤忠, 阚瑞峰, 刘文清, 等. 可调谐二极管激光吸收光谱技术及其在大气质量监测中的应用[J]. *量子电子学报*, 2005, 22(3): 315-325.
- [3] Schiller C L, Locquiao S, Johnson T, et al. Atmospheric measurements of HONO by tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2001, 40(3): 275-293.
- [4] Xia H, Liu W Q, Zhang Y J, et al. An approach of open-path gas sensor based on tunable diode laser



- absorption spectroscopy[J]. Chinese Optics Letters, 2008, 6 (6): 437-440.
- [5] Zang Y P, Nie W, Xu Z Y, et al. Measurement of trace water vapor based on tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(11):1130004.  
臧益鹏, 聂伟, 许振宇, 等. 基于可调谐二极管激光吸收光谱的痕量水汽测量[J]. 光学学报, 2018, 38 (11): 1130004.
- [6] Chen H, Ju Y, Han L, et al. Effects of temperature of laser shell on background signals for trace gas detection in TDLAS[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(6): 1670-1674.  
陈昊, 鞠昱, 韩立, 等. TDLAS 痕量气体检测中激光器管壳温度对背景信号的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(6): 1670-1674.
- [7] Jia L Q, Liu W Q, Liu J G, et al. Effects of temperature and pressure changes on the second harmonic inversion results [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(12): 1215004.  
贾良权, 刘文清, 刘建国, 等. 温度和压强变化对二次谐波反演结果的影响[J]. 中国激光, 2014, 41 (12): 1215004.
- [8] Chen Z, Tao S H, Du X J, et al. Accurate calculation of spectral line profiles by considering influence of varying pressure and temperature in a gas [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33 (2): 312-315.  
陈舟, 陶少华, 杜翔军, 等. 温度和压强的变化对谱线线型峰值的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(2): 312-315.
- [9] Zhang Z R, Wu B, Xia H, et al. Study on the temperature modified method for monitoring gas concentrations with tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62 (23): 234204.  
张志荣, 吴边, 夏滑, 等. 基于可调谐半导体激光吸收光谱技术的气体浓度测量温度影响修正方法研究[J]. 物理学报, 2013, 62(23): 234204.
- [10] Shu X W, Zhang Y J, Kan R F, et al. An investigation of temperature compensation of HCL gas online monitoring based on TDLAS method[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(5): 1352-1356.  
束小文, 张玉钧, 阚瑞峰, 等. 基于 TDLAS 技术的 HCl 气体在线探测温度补偿方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(5): 1352-1356.
- [11] Li Z H, Yao S C, Lu W Y, et al. Study on temperature correction method of CO<sub>2</sub> measurement by TDLAS[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(7): 2048-2053.  
李峥辉, 姚顺春, 卢伟业, 等. TDLAS 测量 CO<sub>2</sub> 的温度影响修正方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(7): 2048-2053.
- [12] Zhong Y J, Du J Y, Zhang X M. CFD technology and application in modern industry [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2003, 31(3): 284-289.  
钟英杰, 都晋燕, 张雪梅. CFD 技术及在现代工业中的应用[J]. 浙江工业大学学报, 2003, 31(3): 284-289.
- [13] Zhao X Y, Su M M, Zhang C H, et al. CFD techniques for design of fluid machinery [J]. Fluid Machinery, 2000, 28(3): 22-25.  
赵兴艳, 苏莫明, 张楚华, 等. CFD 方法在流体机械设计中的应用[J]. 流体机械, 2000, 28(3): 22-25.