

# 基于可调谐半导体激光吸收光谱技术的纳米孔陶瓷光程增强特性研究

张浩<sup>1,2</sup>, 王玲<sup>1,2</sup>, 胡建东<sup>1,2</sup>, 胡思奇<sup>3,4</sup>, 段正<sup>3,4\*</sup>

<sup>1</sup>河南农业大学机电工程学院, 河南 郑州 450002;

<sup>2</sup>河南省农业激光技术国际联合实验室, 河南 郑州 450002;

<sup>3</sup>上海微小卫星工程中心, 上海 201203;

<sup>4</sup>中国科学院微小卫星创新研究院, 上海 201203

**摘要** 基于多孔散射介质具有独特的光程增强特性, 纳米孔陶瓷材料可以作为一种潜在的微型气体吸收室, 应用于可调谐半导体激光吸收光谱技术(TDLAS)气体传感中。为了探索纳米孔陶瓷介质自身物理参数对光程增强特性的影响, 采用 TDLAS 技术开展了纳米孔陶瓷中氧气的吸收光谱测量实验, 并研究了陶瓷介质厚度和孔隙率对光程增强系数的影响。实验结果表明, 厚度和孔隙率与有效光程增强系数都是正相关的, 其中厚度与有效光程增强系数成正比, 孔隙率与有效光程增强系数呈指数规律变化, 该研究结果为陶瓷介质光程增强机理研究提供了实验依据。因此, 优化陶瓷材料的物理参数可以提高其光程增强系数, 进而设计一种适用于 TDLAS 现场检测应用的纳米孔陶瓷微型气室。

**关键词** 光谱学; 可调谐半导体激光吸收光谱; 散射; 光程增强; 纳米孔陶瓷

中图分类号 O433

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1630002

## Optical Pathlength Enhancement of Nanoporous Ceramics Using Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy

Zhang Hao<sup>1,2</sup>, Wang Ling<sup>1,2</sup>, Hu Jiandong<sup>1,2</sup>, Hu Siqi<sup>3,4</sup>, Duan Zheng<sup>3,4\*</sup>

<sup>1</sup>College of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, Henan, China;

<sup>2</sup>Henan International Joint Laboratory of Laser Technology in Agriculture Sciences, Zhengzhou 450002, Henan, China;

<sup>3</sup>Shanghai Engineering Center for Microsatellites, Shanghai 201203, China;

<sup>4</sup>Innovation Academy for Microsatellites of Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201203, China

**Abstract** The strong scattering of light transported through nanoporous ceramic media can be used to form a miniature gas sensing absorption chamber by adopting the tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS). To explore the effect of the physical parameters of ceramics on the optical pathlength enhancement, TDLAS was utilized to measure the spectral absorption characteristics of oxygen inside the ceramics and to study the effect of the thickness and porosity of ceramics on the pathlength enhancement coefficient. The experimental results show that the pathlength enhancement coefficient is linearly correlated to thickness and exponentially correlated to porosity, which provides experimental explanation for the pathlength enhancement mechanism. In conclusion, the physical parameters of ceramics can be optimized to improve the pathlength enhancement coefficient and form a miniature gas cell suitable for in-situ TDLAS applications.

**Key words** spectroscopy; tunable diode laser absorption spectroscopy; scattering; optical pathlength enhancement; nanoporous ceramics

## 1 引言

可调谐半导体激光吸收光谱(TDLAS)技术是一种

快速、高灵敏、高分辨率的气体浓度无损检测技术, 该技术通过窄带宽和波长可调的激光实现气体分子选择性吸收的测量, 从而精准地获取被测气体的浓度、温度和

收稿日期: 2021-06-23; 修回日期: 2021-06-28; 录用日期: 2021-06-29

基金项目: 河南省自然科学基金(202300410197)、河南省高等学校青年骨干教师(2020GGJS046)、河南农业大学科技创新基金(KJCX2018A09)、国家自然科学基金面上项目(32071890)

通信作者: \*duanz@microsat.com

压力等参数。目前 TDLAS 技术已经被广泛应用于大气痕量气体监测、环境污染气体监测、生物医学诊断、燃烧过程诊断分析和机动车尾气检测等领域中<sup>[1-8]</sup>。在 TDLAS 系统中,尤其对于微量气体的弱吸收进行检测时,需要长光程气体吸收室来增强光程,提高探测最低检测限<sup>[9]</sup>。目前常用的气室为赫里奥特吸收池(Herriott cell)和怀特池(White cell)等,但是这些吸收池价格较贵,而且体积较大,限制了 TDLAS 系统的现场检测应用。

考虑到气体吸收谱线比固体或液体的吸收谱线窄了约 10000 倍<sup>[10]</sup>,气体吸收谱线很容易从固/液体的光谱中提取出来,因此 TDLAS 技术也被应用于多孔散射介质(如水果、陶瓷、人体鼻窦腔等)中的气体检测,即所谓的散射介质中气体吸收光谱(GASMAS)技术<sup>[11-17]</sup>。Svensson 等<sup>[18]</sup>利用 TDLAS 技术研究不同材料纳米陶瓷介质中的气体吸收光谱特性,结果表明,陶瓷介质的强光散射性可以使其产生高达 750 倍的光程增强因子(即光在介质中的平均路程与其实际厚度比值),而且不同材料陶瓷介质的光程增强因子是不一样的;Yang 等<sup>[19]</sup>利用 TDLAS 技术研究气体与氧化铝( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )气凝胶介质的相互作用,结果表明,纳米孔气凝胶介质也可以产生高达 300 倍的光程增强因子;Lin 等<sup>[20]</sup>利用氧化铝陶瓷的光程增强特性初步证明了陶瓷材料可以作为一种微型气体吸收室用于甲烷气体测量研究。多孔散射介质较强的光散射性使得其具有明显的光程增强特性,这使得多孔介质可以作为一种微型气室应用于 TDLAS 系统中。纳米孔陶瓷的优异性能,如耐高温、高强度、高硬度、优良抗氧化性、耐磨性和耐腐蚀性等,使其成为现代工业发展重要的结构材料,因此陶瓷介质可以作为一种优选的微型气室材料,用于气体检测的小型化 TDLAS 仪器集成研制中。实际上,陶瓷介质的光程增强特性与其自身物理参数(如材料、厚度,尺寸,孔隙率等)也是有关系的,但是该方面的研究却鲜有报道。为了实现陶瓷材料微型气室的工业化应用,需要深入理解陶瓷介质光程增强的影响因素。本文采用 TDLAS 技术分别研究厚度和孔隙率这两种物理参数对陶瓷介质光程增强特性的影响,并建立两者之间的关联模型,为陶瓷介质光程增强机理的进一步研究提供实验依据。

## 2 实验装置与测量原理

### 2.1 实验装置

所采用的实验测量装置如图 1 所示。以波长为 760 nm 的分布反馈式激光二极管(LD-0760-0100, Toptica)作为光源,通过调节电流和温度控制器(LCD 201C 和 TED 200C, Thorlabs)得到合适的吸收谱线(即真空波长为 760.445 nm 的氧气吸收谱线)。电流控制器外接三角波和正弦波调制信号,其中低频的三角波(5 Hz)用来线性扫描激光波长得到所选谱线的吸收光谱,而高频正弦波(10295 Hz)用来对激光进行波

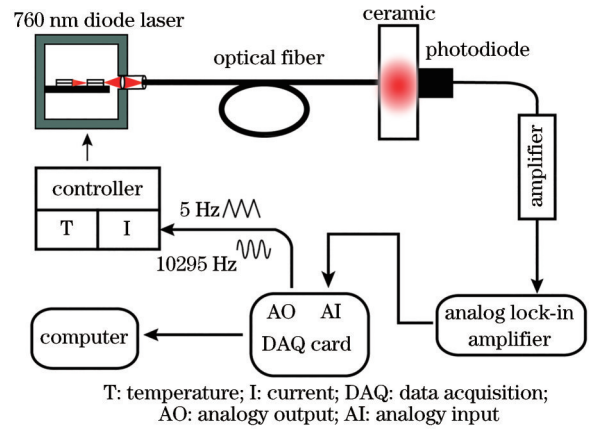


图 1 基于 TDLAS 的纳米孔陶瓷内氧气检测实验装置  
Fig. 1 Experimental set-up for oxygen detection in nano-porous ceramics based on TDLAS

长调制,提高探测灵敏度和信噪比。将波长调制的振幅设置为吸收谱线线宽的 2.2 倍,使得二次谐波信号最优化。调制后的激光通过一根 600  $\mu\text{m}$  的多模光纤传输到样品,随后样品散射光被有效面积为 3.6 mm  $\times$  3.6 mm 的光电二极管(SM05PD1A, Thorlabs)接收并转换为电信号,经过低噪声电流放大器(DLPCA-200, Femto)后,利用数据采集卡(NI6120, National Instruments)进行在线采集和后续处理。

### 2.2 测量原理

由于正弦波对激光的高频调制,样品信号不仅包括调制频率的基频信号,还包括调制频率的谐波信号。本实验组采用模拟锁相放大技术提取出二次谐波信号,并将采集得到的二次谐波信号除以直接测量信号(即没有气体吸收的信号)对二次谐波信号进行归一化处理。经过归一化的二次谐波信号与探测器所接收到的光子数无关,只取决于气体本身的吸收特性。

根据 TDLAS 的测量原理,若所测量气体的光程是已知的,气体的浓度可以直接由比尔-朗伯吸收定律求得。但是当样品为多孔散射介质(如纳米孔陶瓷)时,介质的强散射效应使得光通过介质的光程是不确定的,此时不能直接使用比尔-朗伯定律来计算气体的浓度。为了实现气体浓度的量化,等效平均光程( $L_{\text{eq}}$ )的概念被提出并用于气体平均吸收光程的估计。 $L_{\text{eq}}$ 的定义可以表述为:当光通过样品得到的吸收信号与光通过一定距离的空气所得到的吸收信号相同时,把光在空气中的距离称为等效平均光程<sup>[20]</sup>。根据定义,利用 Levenberg-Marquardt 非线性拟合方法将光通过样品得到的吸收信号与光通过一定距离的空气得到的吸收信号进行拟合,得到的拟合方程<sup>[21]</sup>为

$$S_{\text{sample}}(t) = p_0 + p_1 \times t + p_2 \times t^2 + \alpha \times S_{\text{air}}(t - t_0), \quad (1)$$

式中: $S_{\text{sample}}$ 和 $S_{\text{air}}$ 分别为光通过样品和空气时测量所得氧气的归一化二次谐波信号(即样品信号和参考信号);二次多项式 $p_0 + p_1 \times t + p_2 \times t^2$ 用来补偿样品信

号和参考信号之间的基线差异,  $p_0, p_1, p_2$  为二次多项式的系数;  $t_0$  用来补偿样品信号和参考信号之间由于温度和电流变化而引起的漂移;  $t$  为光在样品中通过的时间。此时等效平均光程可以表示为

$$L_{eq} = \alpha \times L_{air}, \quad (2)$$

式中:  $L_{air}$  为光在空气中通过的路程;  $\alpha$  为拟合系数。

根据等效平均光程的定义和比尔-朗伯定律, 可以得到

$$L_{eq} \times C_{air} = \bar{L}_s \times C_s, \quad (3)$$

式中:  $C_{air}$  和  $C_s$  分别是空气中和样品中氧气的浓度;  $\bar{L}_s$  为光在样品中通过的平均光程。由式(3)可知, 在  $C_{air}$  和  $\bar{L}_s$  一定的情况下,  $C_s$  正比于等效平均光程。当纳米陶瓷孔隙中的气体为空气时, 有  $C_s = C_{air}$ , 此时  $\bar{L}_s = L_{eq}$ 。

### 3 实验结果与讨论

#### 3.1 等效平均光程测量

实验所选取的氧化铝 ( $Al_2O_3$ ) 陶瓷购买于洛阳欣珑陶瓷有限公司, 样品由  $0.5 \mu m$  粒径大小的氧化铝颗粒烧制而成。所用陶瓷样品共分为两种, 一种是孔隙率分别为 45% 和 70% 的两组陶瓷片, 每组包括 5 个样品, 其圆形横截面直径为 10 cm, 厚度分别为 5, 10, 15, 20, 25 mm; 另一种是圆形横截面直径为 15 mm 和厚度为 5 mm 的一组陶瓷片, 其孔隙率分别为 30%, 40%, 50%, 60%, 80%。测量过程中, 每个样品测量 3 次求平均。测量所得 1000 mm 距离空气中氧气的吸收信号作为参考信号, 则测量所得样品中氧气的二次谐波吸收信号如图 2 所示, 该样品为直径为 100 mm、厚度为 5 mm 和孔隙率为 70% 的陶瓷样品, 其中虚线为测量所得信号, 实线为根据式(1)进行非线性拟合所得的理想信号。

根据式(1)对参考信号和测量信号进行拟合, 可以得到拟合系数  $\alpha$ , 通过式(2)计算可以得到等效平均光程

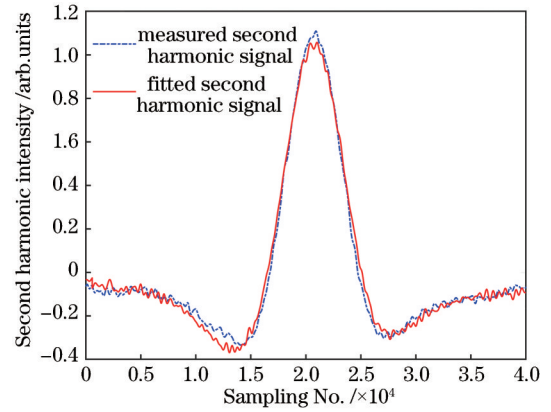


图 2 测量所得 70% 孔隙率、100 mm 直径和 15 mm 厚度陶瓷样品中氧气的二次谐波吸收信号

Fig. 2 Measured second harmonic absorption signal of oxygen in ceramic sample with a porosity of 70%, a diameter of 100 mm, and a thickness of 15 mm

$L_{eq}$ , 图 2 样品的等值平均光程为 211.57 mm, 表明等效平均光程远远大于其自身厚度 (15 mm)。多孔纳米陶瓷对光的强散射作用使得光在陶瓷介质中通过的光程远远大于其自身的厚度, 这种现象被称为多孔纳米陶瓷的光程增强效应。为了表征光程增强效果, 本实验组提出了等效光程增强系数  $K_{eq}$ , 即光在陶瓷介质中通过的等效平均光程与陶瓷厚度的比值,  $K_{eq} = \frac{L_{eq}}{D}$ 。

#### 3.2 探测位置的优化研究

由于光在介质中的散射效应, 实际测量所得的  $L_{eq}$  值很大程度上取决于探测位置。为了研究探测位置对测量结果的影响, 选取孔隙率为 70%、直径为 100 mm 和厚度为 20 mm 的氧化铝陶瓷样品作为测试样品, 通过改变入射激光和探测器的相对位置, 测量不同位置陶瓷样品中氧气的  $L_{eq}$  值。探测方式如图 3(a) 所示, 由于移动激光光源出射位置或探测器位置都可以改变

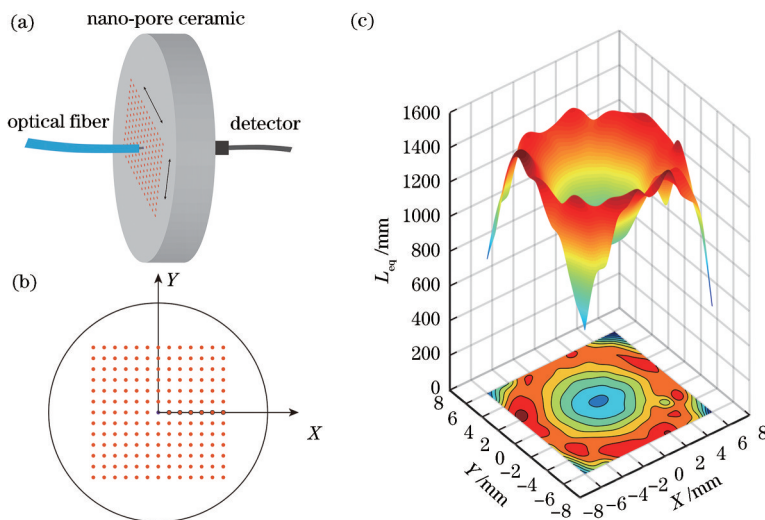


图 3 探测位置的优化。(a) 探测方式; (b) 激光入射点分布; (c) 测量所得等效平均光程的空间分布

Fig. 3 Optimization of detection position. (a) Detection geometry; (b) distribution of laser shooting position; (c) spatial distribution of measured  $L_{eq}$



相对探测位置,本实验组保持探测器的位置固定不变,通过移动激光的入射位置,获得不同探测位置的  $L_{eq}$  值。激光的入射位置排布如[图 3(b)]所示,呈现方形阵列,每行和每列均包括 13 个点,每两个位置点之间的距离为 5 mm。选取中心点位置的坐标为(0,0),从中心点出发分为 X 轴和 Y 轴,共计 169 个点。在不同激光入射位置处测量所得等效平均光程的空间分布如[图 3(c)]所示,从图中可以看出,  $L_{eq}$  随着探测距离的改变而变化。当激光位于中心点时,  $L_{eq}$  值最小,当激光入射位置有较小的变动时,测量的  $L_{eq}$  产生了很大的变化。因此,为了避免位置偏移而造成较大的  $L_{eq}$  变动所引起的误差,实验中激光入射位置选取在中心点。此外,从等值线图中可以看出,两个对称位置入射点得到的  $L_{eq}$  值之间还是存在一定差异的,这主要是由于纳米孔陶瓷介质的非均匀性,使得光从两个对称位置入射时通过介质传输到探测器的平均时间(ns 数量级)不同。

### 3.3 光程增强系数与厚度的关系

图 4 为不同厚度相同孔隙率陶瓷的等效平均光程和等效光程增强系数。从[图 4(a)]可以看出,对于孔隙率分别为 45% 和 70% 的陶瓷样品,其等效平均光程

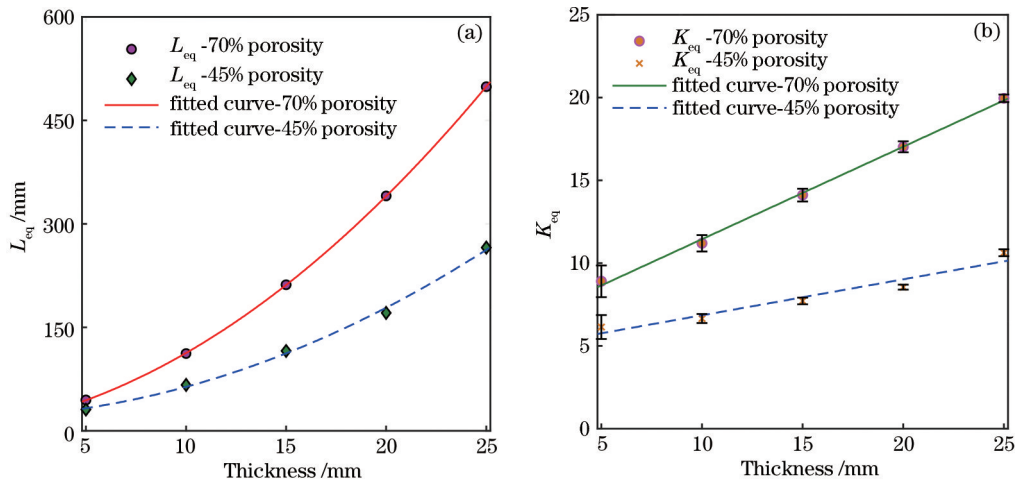


图 4 不同厚度相同孔隙率陶瓷的等效平均光程和等效光程增强系数。(a)等效平均光程;(b)等效光程增强系数

Fig. 4  $L_{eq}$  and  $K_{eq}$  of ceramic samples with same porosity and different thicknesses. (a)  $L_{eq}$ ; (b)  $K_{eq}$

两种不同孔隙率陶瓷样品的等效光程增强系数如表 1 和[图 5(a)]所示。从中可以看出,纳米孔陶瓷介质的光程增强效应非常显著,而且光程增强系数随着厚度的增加而增加。通过线性函数对原始数据进行拟合,得到的两条拟合直线的决定系数( $R^2$ )分别为 0.9421(45% 孔隙率)和 0.998(70% 孔隙率),即等效光程增强系数  $K_{eq}$  与厚度  $D$  近似呈现线性关系。此外,

表 1 两种孔隙率不同厚度陶瓷样品的等效光程增强系数

Table 1 Equivalent pathlength enhancement coefficient of ceramics with different thickness and different porosity

Thickness $D$ /mm	5	10	15	20	25
$K(70\%)$	8.9	11.2	14.1	17.0	20.0
$K(45\%)$	6.1	5.9	7.7	8.5	10.6

$L_{eq}$  均随着厚度的增加而呈现非线性增加。如 Somesfalean 等<sup>[22]</sup>所述,基于辐射传输方程的扩散近似理论,在较弱吸收的情况下,光在散射介质中传输的平均时间与样品厚度的平方近似于成正比。对于均匀介质(折射率为  $n_s$ ),由于光在介质中传输的速度基本不变(即  $v = \frac{c}{n_s}$ ),光在介质中传输的平均光程与样品厚度平方应该也近似于成正比,即  $L_{eq} \propto D^2$ 。

通过二次函数对原始数据进行拟合,两条拟合曲线的决定系数( $R^2$ )分别为 0.9973(45% 孔隙率)和 1(70% 孔隙率),即等效平均光程  $L_{eq}$  与厚度近似呈现二次函数规律变化。实验结果与理论计算有所偏差,其根本原因在于 Somesfalean 等所述的扩散方程求解过程只适用于无限大平面的均匀介质。实际上,当介质的厚度远远小于其截面积时,也可以近似将该介质看作无限大平面介质。但是本研究的陶瓷样品不满足这一条件,而且陶瓷介质的不均匀性也会导致测量结果与理论之间存在一定误差。此外,从[图 4(a)]中还可以看出,孔隙率越大,其拟合曲线越趋近于理论关系(即平方关系)。

从[图 5(b)]中还可以看出,对于不同孔隙率的陶瓷样品,在相同厚度时,高孔隙率介质比低孔隙率介质的等效平均光程和等效光程增强系数都增加了将近 2 倍。

### 3.4 光程增强系数与孔隙率的关系

光在不同孔隙率陶瓷介质中的等效平均光程和等效增强系数也是不一样的。对于多孔纳米陶瓷介质,其折射率不仅取决于陶瓷材料本身(折射率为  $n_m$ ),还与孔隙中的空气(折射率为  $n_a$ )有关,此时介质的有效折射率<sup>[22]</sup>  $n_s = (1-p)n_m + pn_a$ ,其中  $p$  为陶瓷介质的孔隙率。光在介质中的平均光程则可以表示为  $L_s = \frac{c}{(1-p)n_m + pn_a} \langle t \rangle$ ,其中  $\langle t \rangle$  为光在介质中传输的平均时间,即介质孔隙率影响光在介质中的传输特性。

为了得到两者的定量关系,选取孔隙率分别为 30%, 40%, 50%, 60%, 80% 的陶瓷样品进行吸收光谱测量,测量结果如 [图 5(b)] 所示,等效平均光程随着孔隙率的增加而增加,尤其当孔隙率高于 60% 时,等效平均光程发生急剧增加。如 Mei 等<sup>[23]</sup>所述,对于高孔隙率的介质,其对光的散射特性发生了较大变化。因此, [图 5(b)] 中  $L_{eq}$  的增加主要是由于陶瓷介质散射系数的增加而引起的。通过指数函数对原始数据进行拟合,得

到的决定系数( $R^2$ )为 0.9934,即等效平均光程与孔隙率近似呈现指数规律变化。由于所选陶瓷样品的厚度均为 5 mm,陶瓷样品的光程增强系数与孔隙率也近似于指数函数变化,即孔隙率对光程增强系数的影响比较大,而且随着孔隙率的增加,光程增强系数呈指数增大。因此,选用陶瓷材料作为微型气体吸收室时,需要充分考虑介质孔隙率对光程增强特性的影响。

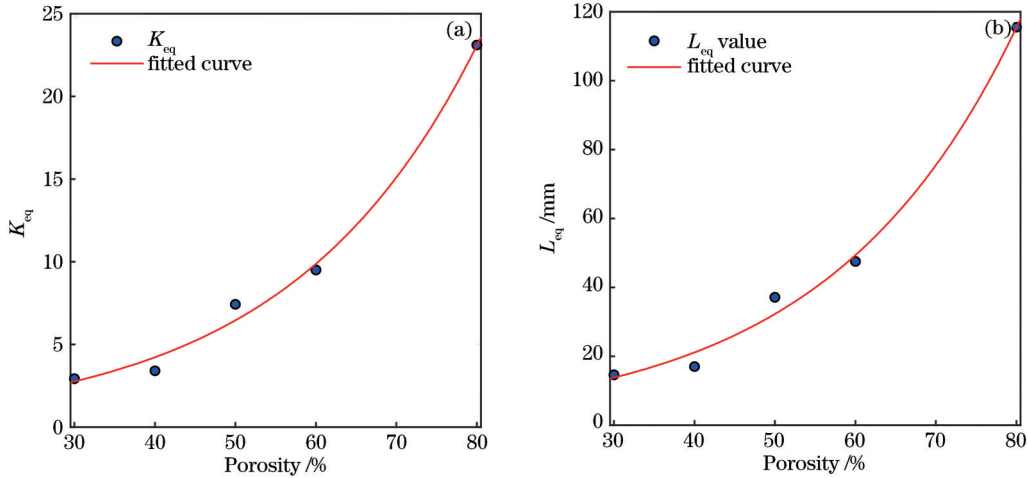


图 5 相同厚度陶瓷的等效平均光程和光程增强系数与孔隙率之间的关系。(a)光程增强系数;(b)等效平均光程  
Fig. 5  $L_{eq}$  and  $K_{eq}$  of ceramic samples with the same thickness as a function of porosity. (a)  $K_{eq}$ ; (b)  $L_{eq}$

### 3.5 陶瓷微型气室的验证性研究

为了验证陶瓷微型气室在实际气体检测中的可行性,本实验组开展了陶瓷样品的气体(氧气)传输特性研究。首先将 70% 孔隙率厚度分别为 5, 10, 15, 20, 25 mm 的陶瓷样品在充满氮气的密封塑料袋中放置 48 h,使得陶瓷纳米孔隙中完全被氮气填充;随后将陶

瓷样品拿出,立即开展 TDLAS 实验测量。[图 6(a)] 为不同厚度陶瓷样品等效平均光程随时间的变化特性,很显然,气体吸收信号随时间指数增加,最终趋近于稳定,表明此时陶瓷孔隙已经完全被空气填充。此外,从 [图 6(a)] 还可以看出,在稳定状态时,归一化等效平均光程  $L_{eq}$  与陶瓷厚度的关系与上述结果是一致的。

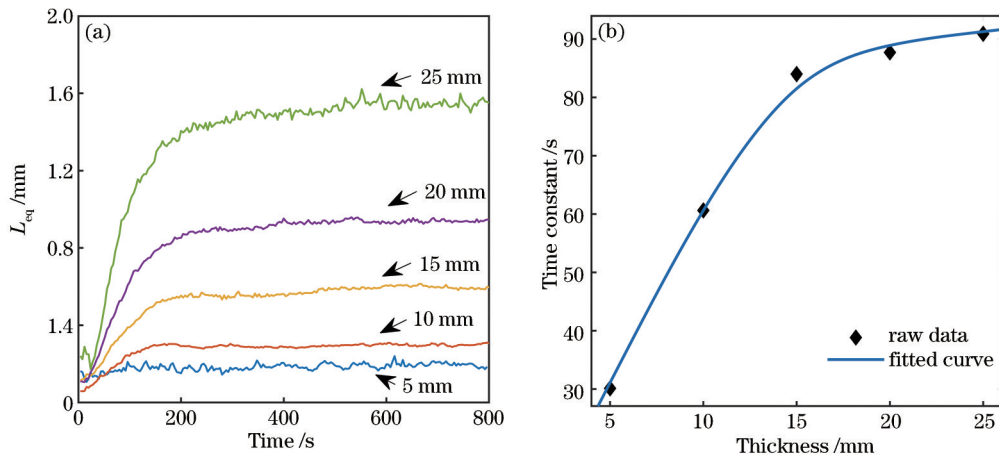


图 6 70% 孔隙率不同厚度陶瓷样品实验结果。(a)氧气的传输特性;(b)气体传输时间常数与厚度的关系  
Fig. 6 Experimental results of ceramic samples with 70% porosity and different thickness. (a) Oxygen transport characteristics; (b) relationship between gas transmission time constant and thickness

归一化等值平均光程随时间的变化趋势满足:  
$$L_{eq}(t) = A - B \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$
 其中  $\tau$  是气体扩散的时间

常数,  $A$  和  $B$  为常数。对原始数据进行指数拟合可以得到气体扩散的时间常数,不同厚度陶瓷样品的时间常数如 [图 6(b)] 所示。从图中可以看出,随着陶瓷厚

度的增加,时间常数逐渐增加,并最终趋近于稳定。在本研究中,90 s内即可以实现陶瓷样品中环境气体的完全填充。因此,纳米孔陶瓷材料可以用于高效地收集环境气体,实现长光程气体的吸收测量。

上述研究主要是针对氧气的检测,为了进一步说明该陶瓷微型气室在其他气体检测中的可行性,本实验组将图 1 所示 TDLAS 测量系统的 760 nm 激光器更换为 937 nm 激光器,通过调节温度和电流使得激光器出射激光的中心波长为 937.405 nm,以实现水蒸气吸收的测量。将 45% 和 70% 孔隙率、厚度为 20 mm 的陶瓷样品在充满氮气的密封塑料袋中放置 48 h,使得陶瓷纳米孔隙中完全被氮气填充;随后将陶瓷样品拿出,开展水蒸气的 TDLAS 实验测量,结果如图 7 所示。水蒸气的测量结果与氧气相似,只是气体传输的时间常数不同,45% 和 70% 孔隙率陶瓷的时间常数分别为 185 s 和 75 s。因此,该陶瓷微型气室可以用于不同气体浓度的测量。

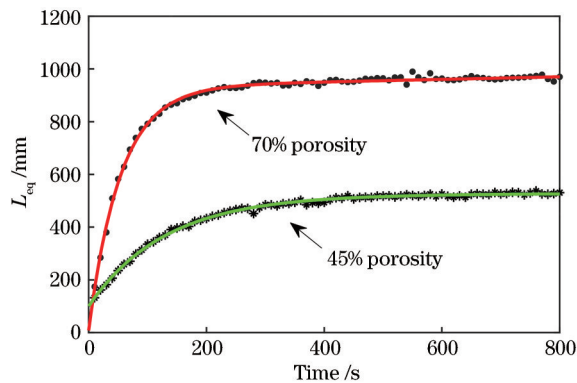


图 7 45% 和 70% 孔隙率、20 mm 厚度陶瓷样品中水蒸气的传输特性

Fig. 7 Water vapor transport in 20 mm thickness of ceramic samples with 45% and 70% porosity

## 4 结 论

介绍了 TDLAS 用于纳米孔陶瓷介质中气体检测时等效平均光程和气体浓度计算的理论基础,基于陶瓷样品等效平均光程与其自身厚度的数值关系,提出了等效光程增强系数  $K_{eq}$  的概念,并通过实验研究了两种陶瓷材料物理参数(即厚度和孔隙率)对等效光程增强系数  $K_{eq}$  的影响。对于相同孔隙率和不同厚度的陶瓷介质,等效平均光程  $L_{eq}$  与厚度  $D$  近似呈现二次函数规律关系,而等效光程增强系数  $K_{eq}$  与厚度  $D$  近似呈现线性关系;对于相同厚度和不同孔隙率的陶瓷介质,等效平均光程  $L_{eq}$  和等效光程增强系数  $K_{eq}$  均随着孔隙率增加均近似呈现指数增长趋势。最后,通过研究陶瓷样品中的气体传输特性,对陶瓷微型气室在实际气体检测中的可行性进行了验证研究。实验结果表明,陶瓷介质的厚度和孔隙率与等效光程增强系数都是正相关的,而且孔隙率对等效光程增强系数的影响是较为

显著的。基于上述研究结果,在今后的工作中本实验组会综合考虑各物理参数对光程增强系数的影响,通过优化物理参数设计出一种具有较高光程增强效应的陶瓷微型长光程气体吸收室,并将其应用于小型化 TDLAS 系统的研制中,以实现 TDLAS 系统的现场检测应用。

## 参 考 文 献

- [1] 李传亮, 蒋利军, 邵李刚, 等. 基于 TDLAS 平衡差分技术的 CO 气体检测[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(10): 3165-3169.  
Li C L, Jiang L J, Shao L G, et al. The detection of CO based on TDLAS combined with balanced difference detection technology[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, 37(10): 3165-3169.
- [2] 姚路, 刘文清, 刘建国, 等. 基于 TDLAS 的长光程环境大气痕量 CO 监测方法研究[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0215003.  
Yao L, Liu W Q, Liu J G, et al. Research on open-path detection for atmospheric trace gas CO based on TDLAS [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(2): 0215003.
- [3] 丁武文, 孙利群, 衣路英. 基于可调谐半导体激光器吸收光谱的高灵敏度甲烷浓度遥测技术[J]. 物理学报, 2017, 66(10): 100702.  
Ding W W, Sun L Q, Yi L Y. High sensitive scheme for methane remote sensor based on tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(10): 100702.
- [4] 王鑫, 荆聪蕊, 侯凯旋, 等. 基于 TDLAS 技术的人体呼气末 CO<sub>2</sub> 在线检测[J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0311002.  
Wang X, Jing C R, Hou K X, et al. Online detection of human-exhaled end-tidal carbon dioxide using tunable semiconductor absorption spectroscopy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0311002.
- [5] Huang Q B, Xu X M, Li C J, et al. Self-calibration wavelength modulation spectroscopy for acetylene detection based on tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. Chinese Physics B, 2016, 25(11): 114202.
- [6] 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): 204204.  
Nie W, Kan R F, Xu Z 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): 204204.
- [7] 张倚成, 韩永康, 周亚, 等. 基于机器学习对火焰温度场和 CO<sub>2</sub> 浓度场的同步重建[J]. 光学学报, 2020, 40(23): 2312003.  
Zhang Y C, Han Y K, Zhou Y, et al. Machine-learning-based reconstruction of flame temperature and CO<sub>2</sub> concentration fields[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(23): 2312003.
- [8] 肖兵, 梁瑛琳. 基于 TDLAS 的汽车尾气测量系统[J]. 传感技术学报, 2008, 21(12): 2078-2083.  
Xiao B, Liang Y L. Tunable diode laser absorption

- spectroscopy for sensing of vehicle emissions[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2008, 21(12): 2078-2083.
- [9] 杨曦, 孙鹏帅, 庞涛, 等. 激光吸收光谱系统中气室的高精度温控设计[J]. 光学学报, 2020, 40(12): 1230001.  
Yang X, Sun P S, Pang T, et al. High precision temperature control design of gas cell in laser absorption spectroscopy system[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(12): 1230001.
- [10] Andersson M, Grönlund R, Persson L, et al. Laser spectroscopy of gas in scattering media at scales ranging from kilometers to millimeters[J]. Laser Physics, 2007, 17(7): 893-902.
- [11] Zhang H, Huang J, Li T Q, et al. Studies of tropical fruit ripening using three different spectroscopic techniques[J]. Journal of Biomedical Optics, 2014, 19(6): 067001.
- [12] Huang J, Zhang H, Lin H Y, et al. Gas exchange in fruits related to skin condition and fruit ripening studied with diode laser spectroscopy[J]. Journal of Biomedical Optics, 2016, 21(12): 127007.
- [13] Zhang H, Huang J, Li T Q, et al. Optical detection of middle ear infection using spectroscopic techniques: phantom experiments[J]. Journal of Biomedical Optics, 2015, 20(5): 057001.
- [14] Huang J, Zhang H, Li T Q, et al. Assessment of human sinus cavity air volume using tunable diode laser spectroscopy, with application to sinusitis diagnostics[J]. Journal of Biophotonics, 2015, 8(11/12): 985-992.
- [15] Zhang H, Svanberg S. Laser spectroscopic studies of gas diffusion in alumina ceramics[J]. Optics Express, 2016, 24(3): 1986-1998.
- [16] 张浩, 林惠莺, 李天祺, 等. 散射介质中的气体吸收光谱技术对食品包装中氧气含量的光学无损检测[J]. 光学学报, 2016, 36(2): 0230005.  
Zhang H, Lin H Y, Li T Q, et al. Non-invasive optical detection of oxygen content in food packages using gas in scattering media absorption spectroscopy[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(2): 0230005.
- [17] Chen D L, Li W S, He W, et al. Laser-based gas absorption spectroscopy in decaying hip bone: water vapor as a predictor of osteonecrosis[J]. Journal of Biomedical Optics, 2019, 24(6): 065001.
- [18] Svensson T, Adolfsson E, Lewander M, et al. Disordered, strongly scattering porous materials as miniature multipass gas cells[J]. Physical Review Letters, 2011, 107(14): 143901.
- [19] Yang L, Somesfalean G, He S L. Laser absorption spectroscopy of oxygen confined in highly porous hollow sphere xerogel[J]. Optics Express, 2014, 22(3): 2584-2594.
- [20] Lin H Z, Gao F, Ding Y J, et al. Methane detection using scattering material as the gas cell[J]. Applied Optics, 2016, 55(28): 8030-8034.
- [21] Svensson T, Andersson M, Rippe L, et al. VCSEL-based oxygen spectroscopy for structural analysis of pharmaceutical solids[J]. Applied Physics B, 2008, 90(2): 345-354.
- [22] Somesfalean G, Sjöholm M, Alnis J, et al. Concentration measurement of gas embedded in scattering media by employing absorption and time-resolved laser spectroscopy[J]. Applied Optics, 2002, 41(18): 3538-3544.
- [23] Mei L, Somesfalean G, Svanberg S. Optical characterization of micro-porous ceramics using tunable diode laser[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8570: 857000.