

基于调谐二极管激光吸收光谱的燃气管道泄漏探测研究

张启兴, 王进军, 刘炳海, 蔡霆力, 乔利锋, 张永明*

中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 安徽 合肥 230027

摘要 根据可调谐二极管激光吸收光谱及谐波探测的原理, 建立以分布反馈式半导体激光器为可调谐光源, 利用多次反射池进行点式采样的实验装置。基于甲烷分子 1 653.7 nm 附近的吸收线, 实验研究二次谐波信号对甲烷浓度的响应线性, 并实现空气中甲烷本底含量的测量。研究结果表明可调谐二极管激光气体检测技术可为城市燃气管道泄漏探测提供了一种灵敏度高、抗干扰能力强的有效手段。

关键词 可调谐二极管激光; 多次反射池; 波长调制; 甲烷; 泄露探测

中图分类号: X93; O433 **文献标识码**: A **DOI**: 10.3964/j.issn.1000-0593(2009)08-2017-04

引言

城市燃气具有易燃、易爆和有毒的特点, 一旦发生泄漏, 极易造成中毒、火灾、爆炸等恶性事故。因此, 研究城市燃气管道泄漏检测技术, 最大限度地减少损失和对环境的污染, 保证城市燃气管网的安全运行具有十分重要的意义。

通过在地面上检测泄漏气体的直接检测法, 无需开挖覆土, 是使用最为广泛的一类方法。由于城市燃气管道一般掩埋在地下 2~3 m 深处, 泄漏的燃气扩散至地表时浓度已经很低, 且环境中往往存在干扰气体, 因此直接检测法对使用的气体传感器有很高的要求。目前国内外主要采用化燃烧、电化学以及半导体式气体传感器, 同时结合气相色谱分析的方法来实现燃气泄漏检测。但上述传感器普遍存在以下问题: 容易受到表面污染, 需要定期更换, 而且对气体的选择性比较差。色谱分析虽然解决了传感器的交叉敏感问题, 但取样复杂, 速率慢, 影响检测效率。

近红外可调谐二极管激光吸收光谱技术利用室温下工作的固态二极管激光器的波长调谐特性, 获得待测气体特征吸收谱线的吸收光谱, 从而对待测气体进行定量分析^[1-4]。相对于传统气体传感技术, 具有高选择性、高灵敏度、快速响应等优点, 在燃气管道泄漏检测中极具应用前景^[5, 6]。

1 技术原理

1.1 近红外吸收光谱

收稿日期: 2008-03-28, 修订日期: 2008-06-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(50776084)资助

作者简介: 张启兴, 1983 年生, 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室在读博士研究生

*通讯联系人 e-mail: zhangym@ustc.edu.cn

根据 Lambert-Beer 定律, 频率为 ν 的激光通过含有待测气体的样品池后, 透射系数为

$$\tau = \left(\frac{I}{I_0} \right)_{\nu} = \exp[-\phi(\nu)SLN] \quad (1)$$

I_0 为入射光强; I 为透射光强; L 为吸收光程, cm; N 为气体分子数浓度, $\text{molecules} \cdot \text{cm}^{-3}$; S 是待测气体分子位于频率 ν 处的吸收线线强, $\text{cm}^{-1} \cdot (\text{molecules} \cdot \text{cm}^{-2})^{-1}$, 反映的是吸收的强弱; $\phi(\nu)$ 是归一化的线型函数, cm, 反映谱线线型的展宽, 即吸收谱线在一定宽度频率范围内的分布。在大气压力下, 谱线展宽以碰撞加宽为主, 一般用洛伦兹函数描述

$$\phi(\nu) = \frac{1}{\pi} \frac{\gamma}{(\nu - \nu_0)^2 + \gamma^2} \quad (2)$$

ν_0 是谱线的吸收中心频率, γ 是线型的半宽度 (Half-width at half maximum)。大气压力下气体分子吸收线的半宽一般在 GHz 量级, 而目前近红外可调谐二级管激光 (tunable diode laser, TDL) 的光谱半宽可以达到 MHz 级别, 因此可以实现气体分子单一吸收谱线的检测。利用 TDL 检测气体时, 吸收谱线的选择十分重要, 要求满足以下条件: 谱线中心频率必须与 TDL 的中心波长相适应; 谱线不能位于多种气体吸收的交叉谱带, 否则容易产生交叉干扰; 尽量选择线强较大的谱线, 以提高检测灵敏度。

1.2 波长调制及二次谐波检测

泄漏检测中, 气体分子吸收通常很弱 ($S\phi(\nu)LN \ll 1$), 可近似认为

$$\tau(\nu) = \frac{I(\nu)}{I_0(\nu)} = e^{-\phi(\nu)SLN} \approx 1 - \phi(\nu)SLN \quad (3)$$

为提高检测灵敏度,规避激光器的 $1/f$ 噪声,采用波长调制光谱技术提取微弱的吸收信号。在波长调制光谱中,利用 TDL 输出激光频率与注入电流的线性关系,通常在 TDL 的注入直流电流上叠加一个高频正弦调制信号和低频锯齿扫描信号。设调制信号的频率为 ω , 则输出激光的瞬时频率可表示为

$$\nu(t) = \nu_c(t) + a \cos \omega t \quad (4)$$

式(4)中 $\nu_c(t)$ 为随扫描锯齿信号缓慢变化的中心频率(以目标气体吸收线中心频率 ν_0 为中心), a 为调制幅度。透射系数可用余弦傅立叶级数展开

$$T(\nu_c(t) + a \cos \omega t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} H_n(\nu_c, a) \cos n\omega t \quad (5)$$

利用(3)式中的近似,透射系数的 N 阶谐波分量可用下式表示

$$H_n(\nu_c, a) = -\frac{SLN}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \phi(\nu_c + a \cos \omega t) \cos(n\omega t) d\omega t \quad (6)$$

偶次谐波分量的峰值位于吸收线中心,而奇次谐波分量的峰值相对于吸收线的中心有一个偏移,并且各次谐波分量的幅值随谐波次数的增加而减小。基于以上原因,在波长调制光谱中通常采用二次谐波分量作为检测信号^[7]。忽略幅度调制的影响^[8,9],由(6)式可以看出透射光强的二次谐波信号与吸收气体浓度成正比

$$I_{2f} \propto H_2(\nu_c, a) I_0 \propto N \quad (7)$$

2 系统设计

利用可调谐二极管激光进行燃气泄漏探测具有灵敏度高无干扰等优势,在测量方式上,一般分为两类,即遥感和点采样。相对于遥感探测,采用多次反射池可以增加光程,进一步提高灵敏度;同时点采样方式可提供更精确的位置分辨信息。而以上两点对快速准确实现燃气管道泄漏检测非常重要,因此本文采用小型怀特式多次反射吸收池结合吸气泵进行点式采样。

设计的系统装置如图 1 所示。检测光源采用线宽低于 2 MHz 的分布反馈式激光器(NL K1U5EAAA, NTT)。信号发生器(33 220 A, Agilent)产生的扫描锯齿信号和锁相放大器(SR830, Stanford)产生的调制正弦信号经加法器电路叠加后,送入激光器控制器(LDC3724B, IL X LightWave)的调制输入端。系统使用 PIN 型 InGaAs 光电二极管作为探测器,锁相放大器将探测器产生的信号解调后输出二次谐波信号,由 12 位 A/D 采集卡采集至计算机进行在线处理。

在光路设计上,改进的小型怀特式^[10]多次反射吸收池(White cell)是系统设计的关键。吸收池的容积为 1.5 L,池体材料为玻璃,底部用不锈钢底座固定。通过设计两组角镜使最大反射次数达到 102 次,反射率大于 98%,改变球面镜角度可以调节反射次数,实现光程从 0.56~28.56 m 的不连续调节。同时,在吸收池的入光口和出光口前方均设有准直透镜组以改善光束质量。另外,作为探测光源的 DFB 激光器发射的是红外光,为方便吸收池的光路调节,系统采用一带光纤输出的红光激光器作为光路调整时的光源,其与 DFB

激光器可通过 FC/PC 光纤适配器方便地切换。多次反射吸收池的进气口通过管道与前端采样装置连接,通过与吸收池出气口连接的微型吸气泵进行连续采样,流量范围为 14~17 L·min⁻¹,改变吸气泵直流电机的驱动电压可连续调节流量。

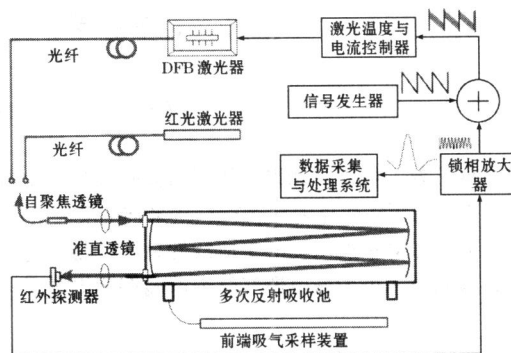


Fig 1 Schematic diagram of the system

3 实验研究

天然气由于其清洁高效等特点在城市燃气中占据越来越重要的比重。甲烷是天然气的主要成分,对甲烷的检测在城市燃气管道泄漏探测中具有十分重要的意义。参考 HITRAN^[11]数据库,甲烷位于 1 653.7 nm 附近的 R3 线是 2 μ m 以内甲烷分子最强的吸收线(见图 2),且其他大气中常见干扰分子在此频率上的吸收远远小于甲烷分子的吸收。因此,基于该吸收线进行甲烷的可调谐二极管激光检测实验研究。

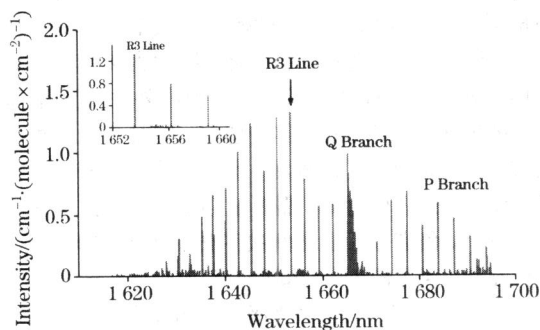


Fig 2 Line positions and strengths of the 2 1/2 band of methane

3.1 二次谐波检测

如图 3 所示,频率为 10 Hz 的锯齿波信号使激光输出波长扫过气体吸收线。锯齿波幅度为 0.7 V,对应的波长扫描范围为 ± 0.14 nm,可以获得完整的吸收线型。对于实验中所有的谐波信号,都调节锁相放大器的相位使之幅度达到最大,避免相位角的不同对谐波信号的影响(锁相积分常数为 3 ms)。为降低系统噪声,采集 10 次二次谐波信号平均后得到作为浓度反演用的吸收信号。对于多次反射吸收池产生的 F-P 干涉条纹,通过扣除背景的方法来消除。图 4 为处理后的不同吸收强度下的二次谐波信号,可以发现信号两侧基本对称,说明激光器的剩余幅度调制影响较小。

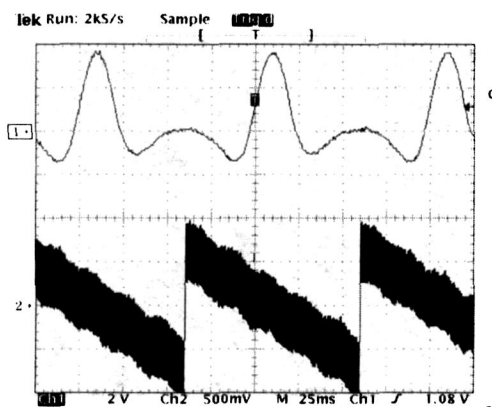


Fig. 3 Waveform of second harmonic signal and modulation signal

1: 2f signal; 2: Modulation signal

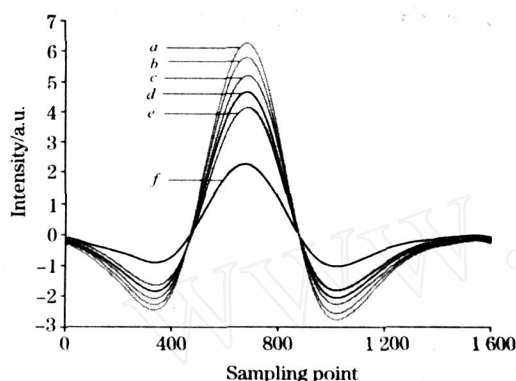


Fig. 4 Second harmonic signals of methane at different concentrations

a: 221.43; b: 435.71; c: 514.29; d: 585.71
e: 657.14; f: 735.71 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-1}$

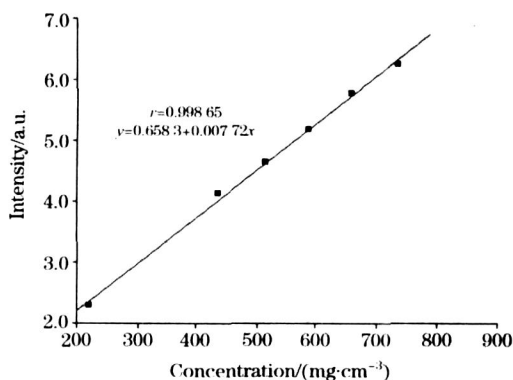


Fig. 5 The linearity of the intensity of the second harmonic signals with the concentrations

■: Data point; —: Linear fit of data point

3.2 响应线性和空气中甲烷本底测量

使用锯齿波信号扫描确保激光器输出波长完全覆盖吸收峰,因此在浓度反演算法设计上,直接利用二次谐波的峰值 P_{2f} 来表征气体的浓度。在标定程序上,利用在同一吸收池中

充入已知标准气体的浓度 N_0 获得的二次谐波峰值信号 P_{2f}^0 来标定待测气体的浓度 N_x ,最大程度上消除由于探测器等硬件参数不同引入的误差

$$N_x = N_0 \times \frac{P_{2f}}{P_{2f}^0} \quad (8)$$

实验中利用甲烷工业标准气体和高纯氮气配制了一组已知浓度的气体。使用的配气系统基于高精度的质量流量计 (SFC4000, Sensirion), 配制后的混合气体压力为 1 atm, 怀特池的光程调节为 15.12 m。图 5 为图 4 中不同浓度下的二次谐波信号强度与配制气体浓度之间的线性关系,线性相关性达 0.998 65,表明完全可用(8)式中的方法来计算浓度值。

正常情况下,空气中含有微量的甲烷气体,实际的燃气泄漏检测存在环境本底。图 6 中曲线 b 是通过扣除背景信号的方法得到的实验室内空气中甲烷的二次谐波信号,对比图 6 中的标准气体浓度的二次谐波信号,可以看出利用扣除背景的方法来消除曲线 c 所示的干涉条纹的影响是非常有效的。图 6 中扣除背景后的信号仍具有较高的信噪比,表明系统的检测限低于环境本底值。因此系统可以响应由泄漏造成的空气中甲烷含量的微小改变,极大地提高了燃气管道泄漏检测的灵敏度。

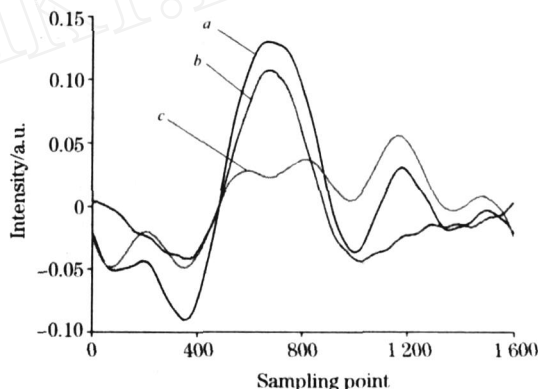


Fig. 6 The second harmonic signal of the methane in the air

a: Signal of methane in air;

b: Signal of methane in air (background signal subtracted);

c: Background signal

5 结 语

基于可调谐二极管激光吸收光谱的城市燃气管道泄漏探测技术能快速有效地实现泄漏检测。实验结果表明,对甲烷的检测限低于空气中甲烷含量的本底值,大大地提高了检测灵敏度;孤立吸收线探测使得可以避免其他气体的干扰,提高了检测的选择性。对于城市环境中存在其他甲烷干扰源的问题,可利用可调谐二极管检测燃气中其他组分,如乙烷等,来排除干扰。另外,借助于随光纤通信发展而已比较成熟的光纤光学技术及廉价的辅助设备,近红外可调谐二极管激光检测的成本在不断下降。可以预见,基于可调谐二极管吸收光谱的气体传感技术将成为燃气管道泄漏探测中的有力技术手段。

参 考 文 献

- [1] Reid J , Labrie D. Appl. Phys. B. 1981 , 26 : 203.
- [2] Werle P. Spectrochimica Acta Part A. 1998 , 54 : 197.
- [3] Allen M G. Measurement Science and Technology 1998 , 9 : 545.
- [4] Uehara K , Tai H , Kimura K. Sensors and Actuators B. 1997 , 38-39 : 136.
- [5] Frish M B , White M A , Allen M G. Proc. SPIE , 2001 , 4199 : 19.
- [6] Iseki T , Tai H , Kimura K. Measurement Science and Technology , 2000 , 11 : 594.
- [7] Arroyo M P , Hanson R K. Appl. Opt. , 1993 , 32(30) : 6104.
- [8] Li H , Rieker G B , Liu X , et al. Appl. Opt. , 2006 , 45(5) : 1052.
- [9] KAN Rui-feng , LIU Wen-qing , ZHANG Yur-jun , et al (阚瑞峰 , 刘文清 , 张玉钧 , 等) . Spectroscopy and Spectral Analysis (光谱学与光谱分析) , 2006 , 26(3) : 392.
- [10] Doussin J F , Dominique R , Patrick C. Appl. Opt. , 1999 , 38(19) : 4145.
- [11] Rothman L S , et al. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer , 2005 , 96 : 139.

Gas Pipeline Leak Detection Based on Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy

ZHANG Qi-xing , WANG Jin-jun , LIU Bing-hai , CAI Ting-li , QIAO Li-feng , ZHANG Yong-ming *

State Key Laboratory of Fire Science , University of Science & Technology of China , Hefei 230027 , China

Abstract The principle of tunable diode laser absorption spectroscopy and harmonic detection technique was introduced. An experimental device was developed by point sampling through small multi-reflection gas cell. A specific line near 1 653. 7 nm was targeted for methane measurement using a distributed feedback diode laser as tunable light source. The linearity between the intensity of second harmonic signal and the concentration of methane was determined. The background content of methane in air was measured. The results show that gas sensors using tunable diode lasers provide a high sensitivity and high selectivity method for city gas pipeline leak detection.

Keywords Tunable diode laser ; Multi-reflection cell ; Wavelength modulation ; Methane ; Leak detection

(Received Mar. 28 , 2008 ; accepted Jun. 29 , 2008)

* Corresponding author