

文章编号: 1007-5461(2006)04-0537-05

便携式天然气泄漏遥感探测的研究

樊 宏, 高晓明, 王 霞, 黄 腾,
黄 伟, 李晓芸, 曹振松, 张为俊

(中国科学院安徽光学精密机械研究所环境光谱学实验室, 安徽 合肥 230031)

摘 要: 传统的天然气管道泄漏检测技术效率低、速度慢, 难以满足实际应用的需要。近年来以近红外二极管激光吸收光谱为基础的光学传感器由于具有灵敏度高、体积小、重量轻和无需维护等优点而得到了广泛的应用。实验以可调谐二极管激光吸收光谱和谐波探测技术为基础, 开展便携式天然气管道泄漏遥感探测技术的研究。其中使用多种常见物质作散射体, 模拟野外现场背景, 进行气体泄漏的探测, 并获得较好的探测极限。整套系统仅重 5 kg, 具有良好的便携性。

关键词: 激光技术; 便携式探测仪; 波长调制; 天然气; 可调谐二极管激光

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A

1 引 言

随着天然气工业的发展, 管道输送在国民经济中的地位越来越重要, 特别是长距离输送管道的优势更是明显。但是由于管内气体的不断冲刷, 温度、压力、振动、季节变化、地质变化等导致管道的老化、锈蚀, 再加上突发性自然灾害以及人为破坏等, 使天然气输送管道不可避免地会发生密封失效的问题, 如不及时处理, 密封失效的程度将会扩大造成管道破裂和泄漏。天然气的主要成分是甲烷, 泄漏不仅造成能源浪费、经济损失、污染环境^[1], 而且天然气易燃易爆, 危及人身安全, 甚至造成灾难事故, 使得对天然气泄漏的遥感探测显得尤为重要。

近年来由于可调谐二极管激光的发展, 以近红外二极管激光吸收光谱为基础的光学传感器得到了广泛的应用^[2~5], 在 1.2~1.8 mm 波段的二极管激光器具有毫瓦单模激光输出, 并工作在室温下, 可以通过光纤输出, 具有快的电调谐性和窄线宽, 可以实现高分辨率和高灵敏度光谱测量。在国内关于天然气管道泄漏检测技术近年来有了一些文章报道^[6,7], 但还没有关于便携式天然气管道泄漏仪器的报道。本文针对现今此类探测设备体积大、移动性差的缺点, 深入开展便携式探测仪的研究, 采用近红外二极管激光吸收光谱和谐波探测技术, 对实现此类小型化探测仪具有普遍的现实意义。

2 测量原理

使用近红外吸收光谱技术在目标区域寻找泄漏源, 当激光束指向目标气体管道时, 如果存在甲烷泄漏, 光束就会部分被吸收, 如图 1 所示, 通过检测透过泄漏气团再由气团后的地物散射返回的激光检测出吸收信号, 可以计算出反射物体和探测器之间的甲烷积分浓度(甲烷浓度和深度的乘积, 单位为 ppm·m)。我们在实验中采用的是波长调制光谱技术和谐波探测的方法, 相对于直接吸收测量的好处是: 激光功率的 1/f 噪声主要在低频, 而在较高的谐波频率处进行探测, 噪声较小, 因而提高了探测信噪比。

基金项目: 安徽省自然科学基金(03045301)和国家高科技发展计划激光技术领域基金(2004AA825100)资助项目

收稿日期: 2005-04-14; **修改日期:** 2005-04-26

E-mail: fh1168@126.com

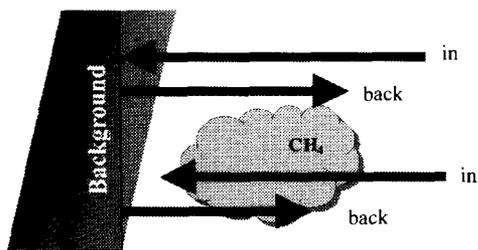


Fig.1 Sketch of measurement principle for remote sense of gas-leak

当激光在中心频率 ν 处以频率 ω_m 调制时, 其瞬时频率是

$$\nu = \nu_0 + \delta\nu \cos \omega_m t, \quad (1)$$

其中 $\delta\nu$ 是调制振幅 (典型具有吸收线宽量级), 它的选择主要确定正弦调制信号的幅度, 继而决定激光频率的扫描范围。通过气体样品后的光强度的变化符合 Beer-Lambert 定律 [8,9]

$$I(\nu) = I_0(\nu)e^{-\sigma L\rho}, \quad (2)$$

其中 $I_0(\nu)$ 和 $I(\nu)$ 分别是激光输入光强和透射光强, σ 为气体样品的吸收截面, L 为吸收样品的光学长度, ρ 为样品的密度。

用余弦 Fourier 序列表示如下

$$\alpha(\nu_0 + \delta\nu \cos \omega_m t) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n(\nu_0) \cos n\omega_m t. \quad (3)$$

调制振幅足够小的情况下, 傅里叶分量可表示成

$$A_n(\nu_0) = \frac{I_0 2^{1-n} N L}{n!} \delta\nu^n \left. \frac{d^n \sigma}{d\nu^n} \right|_{\nu=\nu_0}, \quad (4)$$

其中 N 次谐波探测信号 (或傅里叶分量) 的强度正比于吸收线型 $\sigma(\nu)$ 的 n 阶微商, 在高压条件 (通常样品压力超过 50τ) 下, 碰撞加宽占主要, 以 Lorentzian 线型表示

$$\sigma_L(\nu) = \left(\frac{1}{\pi}\right) \frac{\gamma_L}{(\nu - \nu_0)^2 + \gamma_L^2}, \quad (5)$$

其中 γ_L 是 Lorentzian 加宽的谱线半宽度 (HWHM), 由此得到 Lorentzian 线型的二次谐波理论拟合表达式

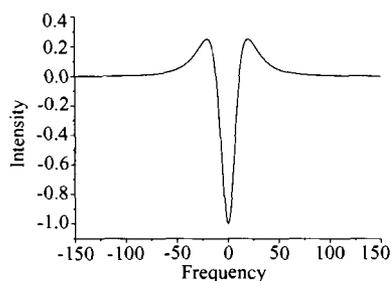


Fig.2 2f harmonic signals of methane molecule

$$A_2(\nu_0) = \frac{I_0 N L \gamma_L}{2\pi} \delta\nu^2 \frac{3(\nu - \nu_0)^2 - \gamma_L^2}{[(\nu - \nu_0)^2 + \gamma_L^2]^3}. \quad (6)$$

图 2 给出了二次谐波探测曲线。

单个谐波分量 A_n 可以用锁相放大器来测量, 并且从 (6) 式可以看出二次谐波信号的幅度直接正比于组分浓度 N , 在其它参数不变的情况下, 用已知浓度的气体进行系统定标后, 就可以通过测量到的二次谐波信号的幅度来推算被测气体的浓度。

3 实验装置

实验装置示意图如图 3 所示。它是由二极管激光器、激光控制器 (高精度激光器电流控制器、高精度激光器温度控制器、激光频率调制电路等)、光发射和接收系统、工控机、显示器以及软件组成。由于使用的是集成的 DFB 二极管激光器, 体积小、重量轻, 连同激光控制器可全部安装在工控机内, 使得整套系统与传统的探测仪相比体积大大缩小, 整套重量仅有约 5 kg, 具有很好的便携性。

作为以激光吸收光谱为基础的气体光学探测的激光光源, 应当具有单模、线宽远小于分子谱线线宽、激光频率能够扫描通过甲烷分子的一条强吸收谱线 (该吸收谱线处无其它气体吸收) 等特点, 才能够获得高灵敏度探测, 对于远距离遥测还必须要求有足够大的激光功率。因此我们选择二极管激光器的中心波长位于 CH_4 的 $2\nu_3$ 带 R(3) 支 ($\lambda = 1.6537 \mu\text{m}$) [6,7]。激光调制灵敏度 $\sim 0.03 \text{ cm}^{-1} \text{ mA}^{-1}$, 功率为 10 mW, 扫

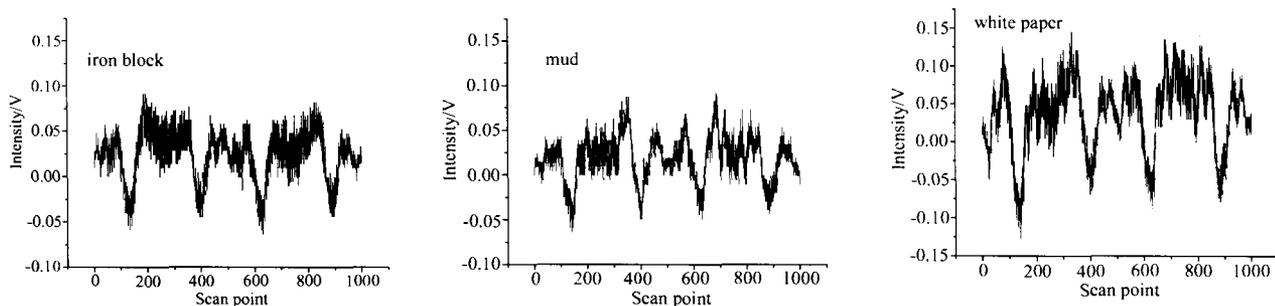


Fig.5 $2f$ harmonic signals of methane molecule with different background

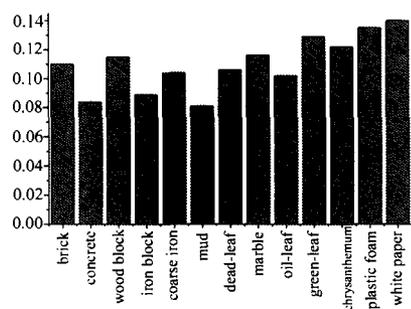


Fig.6 The relationship between signal intensity and reflector

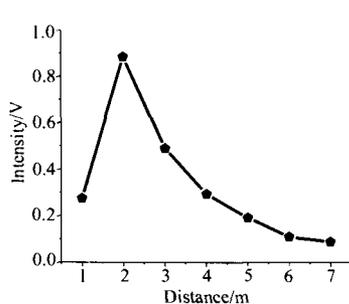


Fig.7 Intensity of detect signal with different distance

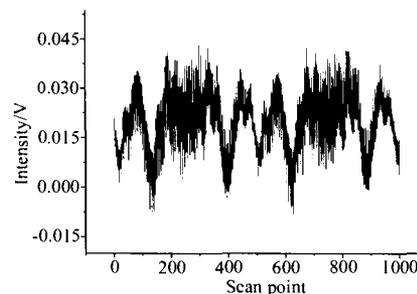


Fig.8 Absorption signal of 0.1% CH_4 under 7 m distance

对于不同散射体和不同距离对测量的信号幅度变化的影响, 可以通过软件进行补偿和修正。

5 探测极限

根据信号强度与距离的关系, 在实验室内我们以 7 m 距离下可测得的探测极限作为本遥感探测系统的探测极限。甲烷与空气的混合比为 0.1% 的样品气体, 10 cm 长的样品池, 在 7 m 距离下测得的信号如图 8 所示。从图 8 中仍可以清楚地看到吸收信号, 信噪比约为 1.3, 此时的积分浓度为 200 ppm·m, 由此可以估算出在 7 m 远处我们的探测极限要 <200 ppm·m。甲烷气体的爆炸极限是与空气的混合比约为 5%, 而我们的便携式遥感探测系统可探测到的极限远远低于这一爆炸极限, 完全可以满足工矿企业对甲烷泄漏的监测要求。

6 结论

设计和建立了一套便携式近红外二极管激光天然气管道泄漏检测装置, 对不同散射体进行了测量, 并分析了距离与探测信号强度的关系, 具有较好的探测极限, 加上其体积小, 便携性强, 非常适合现今对天然气泄漏的检测要求, 具有广阔的发展前景, 为仪器的进一步小型化奠定了基础。该系统还可以广泛应用于其它气体分子探测, 如水汽、 CO_2 、 CO 、 NH_3 等。

参考文献:

- [1] Abdul Hameed V N. Malhotra. Detection of leaks from process pipes [J]. *Pipes & Pipelines International*, 1999, 45: 23-33.

- [2] Werlea P, Slemra F, Maurera K, *et al.* Near-and mid-infrared laser-optical sensors for gas analysis [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2002, 37: 101-114.
- [3] Li Hong. Optical fiber sensor system of detecting gas concentration by light absorption method [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics* (量子电子学报), 2002, 19(4): 354-357 (in Chinese).
- [4] Ding Lei, Liu Wenqing, Zhang Yujun, *et al.* Investigation on remote measurement of automobile emission CO and CO₂ by non-dispersion infrared absorption method [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics* (量子电子学报), 2003, 20(4): 459-464 (in Chinese).
- [5] Drasek W Von, *et al.* Multifunctional industrial combustion process monitoring with tunable diode lasers [C] // *Proc., SPIE*, 2000, 4201: 133-141.
- [6] Lancaster D G, Richter D, Curl R F, *et al.* Real-time measurements of trace gases using a compact difference-frequency based sensor operating at 3.5 mm [J]. *Appl. Phys. B*, 1998, 67: 339-342.
- [7] Yin Wangbao, Zhao Jianming, Ma Weiguang, *et al.* Research on the remote sensing of methane with hannonic detection employing single laser [J]. *Chinese Journal of Lasers* (中国激光), 2003, 30(10): 928-932 (in Chinese).
- [8] Reid J, *et al.* High sensitivity point monitoring of atmospheric gases employing tunable diode lasers [J]. *Appl. Opt.*, 1978, 17: 1806-1810.
- [9] Gustafsson J, Axner O. Theoretical investigation of the temperature dependence of the 2*f*-wavelength modulated diode-laser absorption signal [J]. *Spectrochimica Acta Part B*, 1998, 53: 1827-1831.

Study on portable remote sensor of methane leakage

FAN Hong, GAO Xiao-ming, WANG Xia, HUANG Teng,
HUANG Wei, LI Xiao-yun, CAO Zhen-song, ZHANG Wei-jun

(Laboratory of Enviromental Spectroscopy, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: The leakage of natural gas is not only economic loss, also the fountain of dangerous. Optical sensors based on NIR tunable diode laser absorption spectroscopy were widely used because of high sensitivity, small volume and less maintenance. A portable remote sensor of natural gas pipeline leakage was reported with wavelength modulation and harmonic signals detection technology. With many materials as reflector used and field locale background simulated, the detection of gas leakage was preformed and better detection limit was got. The sensor is portable with only 5 kg weight.

Key words: laser technology; portable sensor; wavelength modulation; natural gas; tunable diode laser

作者简介: 樊 宏 (1980, 1 -), 女, 中国科学院安徽光机所硕士研究生, 主要从事气体泄漏遥感探测的研究, 已发表论文数篇。