

文章编号: 0258-7025(2006)03-0405-03

激光遥测甲烷气体最低可探测浓度

王铁云^{1,2}, 张 雷², 董 磊², 窦海鹏², 贾锁堂²

(¹ 长治学院电子信息与物理系, 山西 长治 046011; ² 山西大学物理电子工程学院, 山西 太原 030006)

摘要 对一种使用单一激光源遥感检测甲烷方案的最低可探测的路径-积分浓度进行了理论分析和实验研究, 该方案主要采用了频率调制及谐波探测技术。通过理论计算得出了最低可探测甲烷的路径-积分浓度大约为 8.7×10^{-8} m。实验中测得该探测系统的探测灵敏度为 8.43×10^{-6} m/mV, 甲烷最低可探测路径-积分浓度为 4.2×10^{-7} m。结果表明该探测系统具有较高的探测灵敏度, 完全满足对矿井瓦斯的实时监测要求。

关键词 光谱学; 气体检测; 最低可探测甲烷浓度; 遥感检测; 瓦斯

中图分类号 TN 247; TN 249 **文献标识码** A

Minimum Detection Limit for Methane with Single Laser Remote Sensing

WANG Tie-yun^{1,2}, ZHANG Lei², DONG Lei², DOU Hai-peng², JIA Suo-tang²

(¹ Department of Electronics Information and Physics, Changzhi University, Changzhi, Shanxi 046011, China)
(² College of Physics and Electronics Engineering, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

Abstract This article carried theoretical analysis and experimental research on the scheme of remote sensing the minimum detection limit concentration for methane gas using a single laser source. In this project, the frequency-modulation (FM) and harmonic detection (HD) technologies are adopted. It is obtained through the theoretical calculation that the minimum detection limit concentration for methane gas was about 8.7×10^{-8} m. Simultaneously the experimental sensitivity of the detection system and the minimum measurable path-integrated concentration were measured to be 8.43×10^{-6} m/mV and 4.2×10^{-7} m respectively. This results show that the remote sensing system owns a super-high sensitivity and it can satisfy the need of monitoring methane in the coal mine.

Key words spectroscopy; gas detection; minimum detection limit for methane; remote sensing detection; gas

1 引 言

甲烷是矿井瓦斯的主要成分, 约占 83% ~ 89%。特大煤矿瓦斯爆炸所造成的生命财产的损失使人们对它的破坏力产生了更深刻的认识。因此, 对于煤矿、垃圾填埋场等特殊场所的甲烷气体进行现场遥感监测将具有十分重要的意义。目前, 国内外用于矿井瓦斯检测的传感器类型主要有催化燃烧型、热传导型以及光学干涉型等。催化燃烧型量程范围一般为 0~4% CH₄, 最高不超过 10% CH₄; 光学干涉型瓦斯传感器则易受其他气体的干扰和环境因素的影响, 如当气样中氧气体积分数降至 1.02%

时, 仪器检测误差达 3.45%。另外还有半导体敏感型、酶和生物敏感型、电化学直接氧化型等等, 但其都有各自的不足而难以用于井下现场监测。而利用红外光谱吸收技术对瓦斯进行稳定、精确的测量成为目前国内外研究的发展趋势。

本文提出了一种使用单一二极管可调谐激光源, 利用频率调制和谐波探测技术进行遥感检测甲烷的方案^[1]。该方案采用开腔样品池结构和光收、发同轴结构, 以地形靶的反射光作为检测信号, 可实现一定区域的甲烷遥感实时现场监测^[2]。对该遥感检测方案的探测灵敏度进行了理论分析和实验研究。

收稿日期: 2005-05-25; 收到修改稿日期: 2005-11-07

基金项目: 山西省自然科学基金(20041037)资助项目。

作者简介: 王铁云(1956—), 男, 山西晋城市人, 长治学院电子信息与物理系副教授, 山西大学硕士研究生, 主要研究方向为激光光谱学。E-mail: wty3299@163.com

2 理论最小可测量甲烷浓度计算

进行遥感检测甲烷的实验装置原理图如图 1 所示。根据参考文献[3]的分析,被探测区域的甲烷路径-积分浓度 C_R 可确定为

$$C_R = K(P_{2f}/P_{1f})/[2\sigma_0 H_2(\nu_0)], \quad (1)$$

其中, P_{1f} , P_{2f} 分别为出射激光经过探测区域经反射靶反射汇集在光电探测器 PD 上的接收信号中的一次谐波分量光功率和二次谐波分量光功率,它们分别可由两台锁相放大器(图 1 中的 PSD-1 和 PSD-2)检测获得; σ_0 为被测量气体分子在激光频率 ν_0 上的吸收系数; $H_2(\nu_0)$ 为调制吸收系数的第二次傅里叶系数; K 为比例系数。(1)式表明,只要测得回波光束中的一次谐波分量功率和二次谐波分量功率即可确定探测区域的气体浓度。

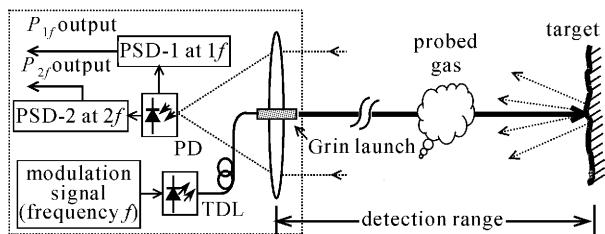


图 1 利用频率调制和谐波探测技术进行遥感检测气体原理图

Fig.1 Sketch of measurement principle for remote sensing of gas by use of frequency modulation and harmonic detection technology

一般情况下,激光的散射噪声和光电转换器的噪声决定了一个激光探测系统的最小可探测浓度。由于在该方案中采用了频率调制及二次谐波探测技术,在较小的光学吸收下,二次谐波信号 $2f$ 远比一次谐波信号 $1f$ 小。因此,光电转换器的噪声和激光器的强度调制噪声将成为影响本系统最小可探测浓度的主要因素。在使用调制频率为 $f = 10$ kHz 的情况下,光电转换器的噪声主要是 $2f = 20$ kHz 以下的白噪声。为估算最小可探测浓度,仅考虑 $2f$ 信号成分。若设 I_s 为光电探测器 PD 中 $2f$ 信号电流,则

$$I_s = sP_{2f}, \quad (2)$$

式中 s 为光电转换器 PD 的转换灵敏度。根据(1)式可得

$$I_s = s[K_2 P_{1f} \sigma_0 H_2(\nu_0) \times 2C_R]. \quad (3)$$

由于光电探测器 PD 的噪声电流主要由探测器的散粒噪声、热噪声和激光器的强度调制噪声及频率调制噪声等组成^[4],若设 I_N 为光电探测器 PD 中 $2f$ 成分的噪声电流,则

$$I_N = [2q(sP_{1f} + I_{\text{dark}})\Delta f + 4k_B T \Delta f / R_{\text{sh}} + (sP_{1f})^2 \Delta f (S_{\text{d/I}} + S_{\text{FM}})]^{1/2}, \quad (4)$$

式中 I_{dark} 为光电探测器 PD 的暗电流; k_B 为玻尔兹曼常数; T 为元件温度, R_{sh} 为光电探测器 PD 等效并联电阻值, Δf 为测量系统的频带宽度, $S_{\text{d/I}}$ 为激光强度调制噪声的功率谱密度,一般取 10^{-12} Hz^{-1} ^[4], S_{FM} 为激光频率调制噪声的功率谱密度,一般取 10^{-21} Hz^{-1} ^[4]。当锁相放大器的时间常数取 Δt 时,(4)式可改写为

$$I_N = \left[\frac{2q(sP_{1f} + I_{\text{dark}}) + 4k_B T / R_{\text{sh}} + (sP_{1f})^2 (S_{\text{d/I}} + S_{\text{FM}})}{2\Delta t} \right]^{1/2}, \quad (5)$$

最小可探测浓度发生在信噪比为 $I_s/I_N = 1$ 情况下。设最小可探测浓度为 C_R^{min} ,则

$$C_R^{\text{min}} = \frac{1}{2K_2 \sigma_0 H_2(\nu_0)} \left\{ \left[\frac{2q}{sP_{1f}} + \frac{2qI_{\text{dark}} + 4k_B T / R_{\text{sh}}}{(sP_{1f})^2} + S_{\text{d/I}} + S_{\text{FM}} \right] \frac{1}{2\Delta t} \right\}^{1/2}. \quad (6)$$

当使用 G8605-23 光电探测器(HAMAMATSU 公司, $s = 0.9 \text{ AW}^{-1}$, $R_{\text{sh}} = 200 \text{ M}\Omega$, $I_{\text{dark}} = 2.5 \text{ nA}$)作光电转换器时,取 $H_2(\nu_0) = 0.343$ ^[3], $\sigma_0 = 3.8 \times 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{m}^{-1}$ ^[3,5], $T = 300 \text{ K}$, $\Delta t = 100 \text{ ms}$, $f = 10 \text{ kHz}$, $K_2 = 1$,由(6)式可得到接收功率与理论可探测甲烷最小浓度之间的关系如图 2 所示。由此可知最小可探测甲烷路径-积分浓度大约为 $8.7 \times 10^{-8} \text{ m}$ 。

3 实验最低可探测甲烷浓度测量

为了获得最低可探测甲烷浓度测量值,将一个长度为 300 mm,直径为 25 mm,两端装有 HB850 玻璃窗的铜管做样品池放在激光出射端和地形靶之间的探测光程中,分别将标准体积浓度为 0, 100×10^{-6} , 500×10^{-6} , 1000×10^{-6} 的甲烷标准气(以氮气作平衡气,气压为 101.325 kPa)导入样品池,然后分别测得相应的 P_{2f}/P_{1f} 。由于回波信号基本不通过样品池,因此,样品池中对应于这些标准体

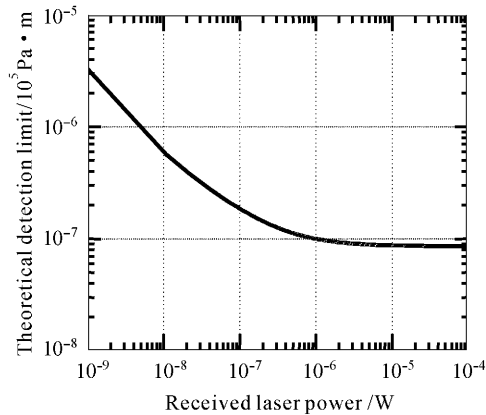


图 2 $K_2 = 1$ 时理论探测极限与接收功率的关系

Fig. 2 Theoretical detection limit at $K_2 = 1$ for methane versus the received laser power

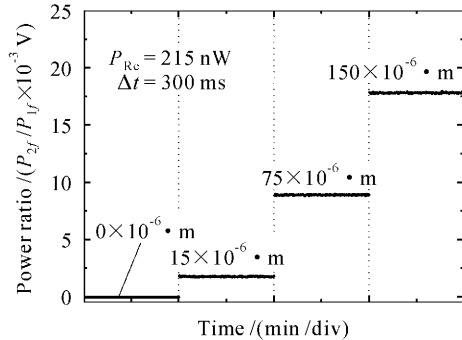


图 3 在甲烷样品气体路径-体积浓度分别为 0 , 15×10^{-6} m, 75×10^{-6} m, 150×10^{-6} m 时探测器的输出, 计算出探测灵敏度为 8.43×10^{-6} m/mV

Fig. 3 Detector outputs for methane path-integrated concentration of 0 , 15×10^{-6} m, 75×10^{-6} m, and 150×10^{-6} m. The detecting sensitivity is 8.43×10^{-6} m/mV

积浓度的路径-积分浓度 $C_R = 0.3c/2$, 即分别为 0 , 15×10^{-6} m, 75×10^{-6} m, 150×10^{-6} m。图 3 显示

了在这些不同样品路径-积分浓度下测得的相应的 P_{2f}/P_{1f} 值, 据此计算出该探测系统的探测灵敏度为 8.43×10^{-6} m/mV。

通过实测, 该甲烷探测实验电子测量系统的最小可分辨 P_{2f}/P_{1f} 输出约为 5×10^{-5} V 左右, 由此可估计出实验最低可探测路径-积分浓度为 4.2×10^{-7} m, 这个实验值约为最小理论可探测浓度的 5 倍。

4 结 论

详细讨论了利用单一激光源, 使用频率调制光谱及谐波探测技术对甲烷进行遥感检测时的最低可探测甲烷路径-积分浓度的理论计算方法及实验方法。从分析结果得出该遥感检测的探测灵敏度为 8.43×10^{-6} m/mV, 探测系统具有较高的探测灵敏度, 完全满足对矿井瓦斯的实时监测要求。

参 考 文 献

- 1 Wangbao Yin, Weiguang Ma, Lirong Wang *et al.*. Research on the distributed optical remote sensing of methane employing single laser source [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(2):86~88
- 2 Jack S. Margolis. Measured line positions and strengths of methane between 5500 and 6180 cm^{-1} [J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(19):4038~4051
- 3 Yin Wangbao, Zhao Jianming, Ma Weiguang *et al.*. Research on the remote sensing of methane with harmonic detection employing single laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(10):928~932
尹王保, 赵建明, 马维光 等. 单激光源谐波遥感探测甲烷研究 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(10):928~932
- 4 L. S. Rothman, R. R. Gamache, R. H. Tipping *et al.*. The HITRAN molecular database: editions of 1991 and 1992 [J]. *Quantum Spectrosc. Radiat Transfer*, 1992, **48**(5-6):469~507
- 5 Jiang Jianping. Semiconductor Laser [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2000. 122~126
江剑平. 半导体激光器 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2000. 122~126