

差分光学吸收光谱法精确测量煤矿瓦斯浓度

周孟然^{1,2}, 汪世美²

(1. 安徽理工大学 电气工程系, 安徽 淮南 232001; 2. 中国科学院 安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要: 差分吸收光谱技术被广泛应用于测量大气中微量元素的浓度, 并利用最小二乘法来反演待测气体的浓度, 该方法是利用激光器发出激光并接收, 在传输中, 由于瓦斯气体分子在一定波段对光有吸收特性, 使光谱具有了瓦斯的特性, 在通过与光源发出的光进行比较, 反演瓦斯气体在矿井中的浓度。它能实现在线自动监测。

关键词: 差分光学吸收光谱; 瓦斯; 在线监测

中图分类号: TH744. 12 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253 - 2336 (2004) 03 - 0001 - 03

Accurately measurement of mine gas density with differential optical absorption spectrometry

ZHOU Meng-ran^{1,2}, WANG Shi-mei²

(1. Department of Electric Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;

2. Anhui Institute of Optical and Fine Machinery, China Academy of Science, Hefei 230031, China)

Abstract: The technology of differential optical absorption spectrometry has been widely applied to measure the density of the microelements in atmosphere. The method is to use laser instrument to emit and receive the laser. During the transmission, due to gas molecule has sorption characteristics to light in certain wave band, so the spectrum has gas characteristics. In comparison with the light from the light source, the gas can reversibly be calculated the density of the gas in mine. This technology can be used for an on line auto monitoring and measurement.

Key words: differential optical absorption spectrometry Technology; gas; on line monitoring and measurement

随着煤矿开采技术手段的不断改进和开采规模的扩大及开采深度的不断延伸, 煤层瓦斯涌出量越来越大, 高瓦斯矿井越来越多, 安全上的隐患也越来越多。瓦斯事故特别是重、特大瓦斯事故在煤矿事故中所占的比例也越来越高^[1~5]。因此不把瓦斯事故控制住, 就不能实现全国煤矿安全生产状况的稳定好转, 也就无法保障煤炭工业的持续健康发展。

煤矿瓦斯监测是我国当前煤矿安全生产监督管理的重中之重^[6]。建设一个系统的、全面的煤矿瓦斯实时监测系统, 可以对煤矿安全生产进行分级管理及进行有效监管、预防和减少安全生产事故的发生。

开发瓦斯灾害实时监测技术及装备, 研制具有

自动调校功能的瓦斯浓度监测传感器, 是预防瓦斯事故的重要防线和保障措施。当作业区瓦斯接近爆炸的临界点时, 监测监控设备及时发出警报, 从而采取果断措施做到防患于未然。

通过对煤矿重大瓦斯煤尘爆炸事故预防与监控技术的研究, 开发出煤矿瓦斯灾害预测系统, 可实现对高瓦斯突出危险性的矿井进行区域性预测和瓦斯灾害的超前预测。

使用可调谐二极管激光吸收光谱 (TDLAS) 技术测量气体分子的吸收成为公认的高灵敏度测量方法。用可调谐二极管激光 (TDL) 研究气体分子的孤立吸收线的吸收时, 二极管激光器一般的线宽可达 10^{-4}cm^{-1} , 远小于气体分子的吸收线宽, 二极管激光器具有很窄的线宽, 可以获得很高的选

择性及前所未有的分辨率。

由于二极管激光器电流调制的特点, 便于各种调制方式的运用, 对气体分子的孤立吸收线进行检测可以大大提高测量灵敏度。

本项目将率先在国内展开可调谐半导体激光吸收光谱技术对煤矿瓦斯进行实时定量在线监测。目前, 甲烷浓度的检测主要是气相色谱法 (GC - FID), 由于这种方法至少需要几分钟才能提供一个数据, 所以不能进行连续监测。使用单频的激光光谱法监测瓦斯的化学成分是一种全新的方法, 本项目研究适合于我国煤矿瓦斯监测要求的在线、实时、快速的光学遥感技术和自动监测设备, 以填补国内在该领域的技术空白, 缩短我国与发达国家在该领域的技术差距, 实现煤矿瓦斯自动监测设备的研制开发和生产的技术先导, 推动我国光机电一体化精密环境监测仪器新兴产业的形成。

1 差分光学吸收光谱简介

在差分光学吸收光谱系统中, 光的发射和接收单元可以作为分开的 2 部分, 即光源在某一位置发出平行光, 而接收器在离光源几米至几百米的地方, 光的发射和接收单元也可以合并起来作为一个整体, 而在几米至几百米以外的地方放置一角反射镜将光源发出的光沿原路反射回去, 再由接收器接收。对于前一种情况, 测量距离是光源和接收器之间的距离; 而后一种情况, 测量距离则是光源和接收器之间距离的 2 倍。差分光学吸收光谱方法测量大气污染的主要优点为:

(1) 在同一波段可以同时测量几种不同气体的浓度, 使用一台装置, 通过转动光栅使仪器工作在不同的波段, 就可以测量几乎所有的大气污染气体。

(2) 气体浓度的测量下限非常低, 由于该种方法的测量极限主要取决于气体的差分吸收截面, 所以对于某种气体只要选择合适的测量波段, 就可以测出低于 $1 \times 10^{-3} \text{ mg/m}^3$ 的浓度。

(3) 测量范围宽, 差分光学吸收光谱方法的测量范围是光源和接收器之间或接收器和角反射镜之间整个光路上气体的平均浓度, 所以测量结果比点测量仪器所得的结果更具有代表性。

2 系统框图组成

差分光学吸收光谱系统是收发一体的, 反射镜

是一石英的角反射镜。整个仪器主要包括: 激光光源、发射和接收系统、激光器的温度控制系统和电流控制系统、光学系统、锁相放大器及其数据采集系统。系统框图如图 1 所示。

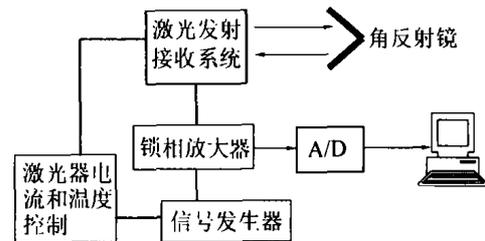


图 1 测量系统框图组成

对于瓦斯化学成分甲烷气体的测量, 选用波长为 $1.65 \mu\text{m}$ 的二极管激光, 通过甲烷 $2\nu_3$ 带 R (3) 线的吸收对甲烷气体浓度进行检测。采用波长调制, 利用二次谐波 ($2f$) 探测, 来提高 TDLAS 系统的探测灵敏度。谐波信号与吸收气体的浓度 N 成正比, 通过检测谐波信号可以得到气体浓度。在这里只讨论二次谐波即 $2f$ 信号。

进行 $2f$ 检测时, 二极管激光器发出的光通过样品池, 经角反射镜入射到探测器, 探测器的信号进入锁相放大器, 其输出的 $2f$ 信号被采集到计算机。信号发生器同时产生锯齿波扫描信号与正弦波调制信号, 通过激光器电流控制器对激光发射的光的波长进行调制, 当进行直接吸收探测时, 激光器的波长只被锯齿波扫描, 而不被正弦波调制, 探测器的信号不通过锁相放大器而直接送入计算机。

3 数据处理的原理

由于所测气体在大气中的含量非常低, 而且是同时测量几种被测气体, 它们之间会相互影响, 这给数据处理带来很大的困难, 数据处理方法选择的恰当与否, 直接影响着测量精度。

差分光学吸收光谱方法的测量原理是: 当一束强度为 I_0 的光, 经过长度为 L 的距离传输后, 其强度变为 I , I 和 I_0 之间的关系可由 Beer - Lambert 定律得出:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp\left(-\sum_{i=1}^n \sigma_i(\lambda) N_i L\right) \quad (1)$$

式中 λ ——波长;

$\sigma_i(\lambda)$ ——所测第 i 种气体的分子吸收截面;

N_i ——第 i 种气体的浓度。

将式 (1) 两边取对数可得:

$$\ln[I_0(\lambda)/I(\lambda)] = \sum_{i=1}^n \sigma_i(\lambda) N_i L \quad (2)$$

式 (2) 的左边是通过测量可以得到的已知量, 对于右边, 一般情况下在同一波段同时测量 3 种气体, 即 $i=1, 2, 3$ 。3 种气体的吸收截面 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 也是已知量, 对式 (2) 来说有 3 个未知量 N_1 、 N_2 、 N_3 。

测量时所选波段的宽度一般为 10 nm, 在这个宽度内共测量 400 个点的数据, 这样就可以有 400 个方程, 由于方程的个数大于未知量的个数, 称由这 400 个方程所组成的方程组为超定方程组, 可以通过最小二乘法来解该超定方程组。所谓最小二乘法就是找出最佳的 N_1 、 N_2 、 N_3 , 使得式 (3) 为最小, 即

$$\sum_{j=1}^{400} \left| \ln[I_0(\lambda_j)/I(\lambda_j)] - \sum_{i=1}^3 \sigma_i(\lambda_j) N_i L \right|^2 \quad (3)$$

式中的 $j=1, 2, \dots, 400$ 对应于相应的数据点, 这时的 N_1 、 N_2 、 N_3 就可以认为是方程组的解。为此即可反演气体浓度。

4 结 语

该项目应用可调谐二极管激光吸收光谱技术对煤矿瓦斯气体进行在线、实时、快速监测的研究。采用对注入激光器的电流调制实现对激光的波长调制, 实验研究波长调制的最佳参数, 同时利用相干检测, 测量吸收光谱的导数光谱, 提高测量的灵敏

度。用可调谐二极管激光研究气体分子的孤立吸收线的吸收, 消除其它气体干扰。本项目研究适合于我国煤矿瓦斯监测要求的在线、实时、快速的光学遥感技术和自动监测设备, 以填补国内在该领域的技术空白, 缩短我国与发达国家在该领域的技术差距, 实现煤矿瓦斯自动监测设备的研制开发和生产的技术先导, 推动我国光机电一体化精密环境监测仪器新兴产业的形成。该研究对于在煤矿中的推广具有广阔的前景。

参考文献:

- [1] 白春华. 冀辉煤矿“12.4”瓦斯爆炸事故原因与教训 [J]. 煤矿安全, 1998 (10).
- [2] 刁文庆, 谢一矿“6.23”特大瓦斯爆炸事故瓦斯超限隐患-欠风量分析 [J]. 煤炭技术, 1998 (2).
- [3] 周军民. 耿村煤矿“1.25”特大瓦斯爆炸原因及防范措施 [J]. 煤矿安全, 2001 (3).
- [4] 刘青峰, 赵文伟. 国有煤矿 5 起特大瓦斯爆炸事故的原因及教训 [J]. 劳动保护, 2001 (7).
- [5] 周心权, 吴兵, 徐景德. 煤矿井下瓦斯爆炸的基本特性 [J]. 中国煤炭, 2002 (9).
- [6] 陈永利, 陈利军. 煤矿安全监控系统 [J]. 煤矿自动化, 2001 (1).

作者简介: 周孟然 (1965-), 男, 硕士, 安徽理工大学副教授, 现在中国科学院安徽光学精密机械研究所攻读博士学位, 主要从事计算机控制及激光应用方面的研究。

收稿日期: 2003-12-17; 责任编辑: 王宗禹

(上接第 7 页)

由工程应力和水压引起的应力强度因子叠加后引起的总应力强度因子为对临界应力强度因子的研究认为, 1 号、2 号、3 号应力监测孔处岩体的临界应力强度因子分别为 $3.672 \text{ MN}/\sqrt{\text{m}^3}$ 、 $3.584 \text{ MN}/\sqrt{\text{m}^3}$ 、 $3.650 \text{ MN}/\sqrt{\text{m}^3}$ 。与图 10 对比, 在监测的过程中, 应力强度因子一直小于临界应力强度因子, 根据断裂力学应力强度因子断裂判据, 当裂纹尖端的实际应力强度因子达到或超过临界应力强度因子时, 裂纹就会发生失稳扩展而导致裂纹体的断裂。

由此判断监测孔 1 号、2 号、3 号都不会发生裂纹扩展, 即不会发生底板突水, 没有发出突水预报。9103 工作面的开采实践过程中, 没有发生突

水, 证明预测准确。

参考文献:

- [1] 孙广忠. 工程地质与地质工程 [M]. 北京: 地震出版社, 1993.
- [2] 许学汉, 王杰. 煤矿突水预报研究 [M]. 北京: 地质出版社, 1991.
- [3] 阿特金森 B K (英). 岩石断裂力学 [M]. 北京: 地震出版社, 1992.
- [4] 陆毅中. 工程断裂力学 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1987.

作者简介: 郑纲 (1968-), 男, 山东泗水人, 高级工程师, 长安大学博士研究生, 主要从事煤矿底板突水预测及矿井防治水研究工作。

收稿日期: 2003-11-10; 责任编辑: 曾康生