

doi: 10.3788/gzxb20154401.0112002

# 基于红外技术的气体浓度检测方法研究

刘永平<sup>1</sup>, 王霞<sup>2</sup>, 李帅帅<sup>2</sup>, 胡玲<sup>2</sup>

(1 安徽省煤炭科学研究院, 合肥 230001)

(2 北京理工大学 光电学院 光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

**摘 要:**依据 Lambert-Beer 定律, 推导出检测气体浓度的数学模型, 得出了测量和参考探测器输出电压与气体浓度的函数表达式, 表达式中的二个常数的数值取决于气室长度、气体吸收系数、探测器的电压探测率, 经零点和满量程标准气样的标定, 可确定这二个常数的数值, 实现对仪器的标定。根据仪器零点随温度变化的关系, 得到零点与温度函数表达式, 用于零点温度补偿以及对零点温度补偿系数的计算; 量程温度补偿方法是通过引入量程温度补偿因子, 对测量和参考探测器输出电压与气体浓度的函数表达式进行修正, 修正后的函数表达式用于量程温度补偿, 也能对量程温度补偿因子中的补偿系数进行计算。矿用红外甲烷传感器采用本文的标定方法和温度补偿方法, 在不同的环境温度下, 对标准气样进行检测, 其检测结果符合红外甲烷传感器标准所规定的基本误差。

**关键词:** 红外技术; 测量模型; 标定; 温度补偿

中图分类号: TH741

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)01-0112002-7

## Gas Concentration Detection Method Based on Infrared Absorption Spectroscopy Technology

LIU Yong-ping<sup>1</sup>, WANG Xia<sup>2</sup>, LI Shuai-shuai<sup>2</sup>, HU Ling<sup>2</sup>

(1 Coal Science Research Institute of Anhui Province, Hefei 230001, China)

(2 Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education of China, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** According to the Lambert-Beer law, we derived mathematical model to measure the target gas concentration, and deduced the function which could be used for characterizing the relationship of the output voltage of the two detectors and the target gas concentration. The aim of calibration process is to determine the values of those two constants which depend on the length of the chamber, the gas absorption coefficient and the detector voltage detectivity in the above expression. Secondly, according to the feature of the measurements' zero point changes with current temperature, the relationship between zero point and temperature was formulated. It can be used for zero temperature compensation and correlation of coefficient calculation. The scale temperature compensation method is the way to revise the function expression of the output voltage of the two detectors and the target gas concentration by introducing scale temperature compensation factor. The corrected function expression is used for compensating scale temperature and calculating the compensation coefficient of scale temperature compensation. Finally, the calibration and temperature compensation method above was applied to coal mine non-dispersive infrared methane transducer and the test results of standard gas samples testing under various ambient temperatures conform to the requirements in infrared methane sensor standard.

**Key words:** Infrared technology; Measurement model; Calibration; Temperature compensation

**OCIS Codes:** 120.0120; 300.6340; 280.4788; 120.6810

基金项目: 安徽省科技攻关计划重大科技专项项目(No. 08010202057)和北京市自然科学基金重点项目(No. 4121002)资助

第一作者: 刘永平(1964—), 男, 研究员、正高级工程师, 主要研究方向为红外技术在煤矿中的应用。Email: lyyp@126.com

通讯作者: 王霞(1972—), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为光电检测技术、光电成像技术、红外与微光夜视等。Email: angelniu@bit.edu.cn

收稿日期: 2014-06-04; 录用日期: 2014-09-02

<http://www.photon.ac.cn>

## 0 引言

气体检测仪器的应用领域广泛,覆盖了工农业生产、环境监测、国防、航空航天、家庭生活等各个领域.红外气体检测仪器是当今主流的气体检测仪之一.红外气体检测技术是一种非直接接触式的实时监测的气体检测技术,具有选择性强、性能稳定、灵敏度高、动态测量范围大、设备受外界干扰小、使用寿命长等优点.在用于监测易燃易爆气体、二氧化碳气体方面,具有不可替代的优势,得到了越来越广泛的重视与应用<sup>[1-2]</sup>.

常见的光学气体检测技术有非色散红外(Non-Dispersive Infrared, NDIR)、分光光度测量法、可调谐激光器光谱技术(TDLS)、声光光谱(PAS)技术等.其中,宽波段、非分散红外气体传感器结构最简单、性能稳定、反应迅速、精确度高,适用于轻巧手持设备,具有巨大的商业价值<sup>[3-4]</sup>.2002年,英国 Heriot-Watt 大学的 J G Crowder 等人通过优化装置的光学结构,使探测器浸入到超表面透镜中,从而减少探测器的面积而增加了探测器的辐射接收面积.实验结果显示,在室温下对 NO<sub>2</sub> 气体进行浓度检测时分辨率为 2ppm<sup>[5]</sup>.2009年,西班牙巴塞罗那大学 J. Fonollosa 等研发检测乙烯(C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)气体浓度的装置应用于水果的存储过程,仪器的最小可检测乙烯浓度为 30 ppm<sup>[6]</sup>.俄罗斯 Ioffe 物理技术研究所的 S. Aleksandrov 等人采用 LED 与 InSe 光电二极管组成“光对”用于甲烷气体探测,其最小可检测甲烷浓度为 170ppm<sup>[7]</sup>.这些实验室中取得研究成果已经大大超出了工业检测标准的精度要求.他们所采用的均是非色散红外(NDIR)气体浓度检测技术.可见,国内对红外气体探测装置的研究与改良仍然有巨大的进步空间.

红外气体检测装置在设计、使用过程中为保证测量精度,需考虑对仪器进行定期或不定期的调校、标定,为弥补温度变化造成的测量误差,需对仪器进行温度补偿<sup>[8]</sup>.本文研究了一种简便、有效的基于红外光谱吸收技术的气体浓度检测方法,一方面可提高红外气

体检测仪器研发、生产中的效率;另一方面可提高仪器的测量精度及更好地进行温度补偿.该方法应用于矿用红外甲烷传感器,经实验测量证明,具有较高的检测精度.

## 1 红外气体检测的基本原理与技术

### 1.1 气体红外检测原理

#### 1.1.1 气体选择性吸收光谱

红外辐射的本质是电磁辐射,与可见光相同,红外辐射也具有波粒二象性.在研究红外辐射与传播路径中的气体相互作用时,要考虑其粒子性.不同频率的辐射光子有着相应的光子能量.光子能量与辐射频率的对应关系为

$$E = h\nu \quad (1)$$

式中: $E$ 为光子能量, $h$ 为普朗克常量, $\nu$ 是红外辐射的辐射频率.

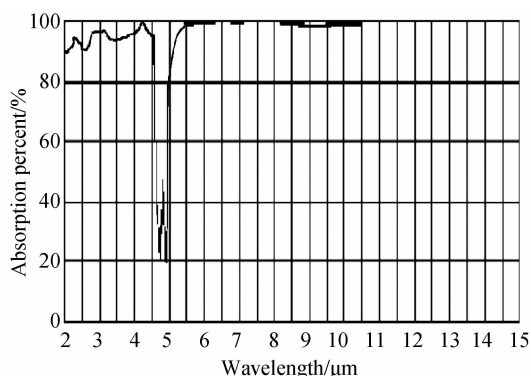
红外辐射与气体分子相互作用时,气体分子吸收红外辐射能量引起自身振动能级和转动能级的变化.只有当辐射光子能量与气体能级差相一致时才会发生强烈的吸收过程.

$$E_1 - E_2 = h\nu \quad (2)$$

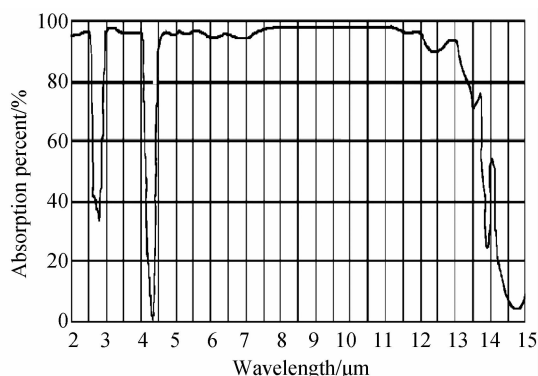
式中: $E_1$ 、 $E_2$ 为较高能级和较低能级(即跃迁前后的能级)能量; $h$ 为普朗克常量, $4.136 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$ ;  $\nu$ 为红外辐射的辐射频率.

当辐射光子能量  $E$  等于气体分子的两个能级之差  $E_1 - E_2$  时,气体分子会吸收辐射光线并引起相应的能级跃迁.由于不同的分子对应的能级结构是不同的,因此,不同气体对红外辐射的吸收具有频率选择性.大部分非对称双原子和多原子气体分子对特定频率红外辐射呈现强烈的吸收,即具有自己的特征吸收频率<sup>[9]</sup>.这类分子有:甲烷(CH<sub>4</sub>)、氨气、CO、CO<sub>2</sub>、NO、SO<sub>2</sub>、碳氢化合物和水蒸气等.

特征吸收波长是指吸收峰值处对应的辐射波长,又叫中心吸收波长.从图 1 可以看出,CO 的特征吸收波长出现在 4.65  $\mu\text{m}$  处;CO<sub>2</sub> 的特征吸收波长为 2.7  $\mu\text{m}$ 、4.26  $\mu\text{m}$ 、14.5  $\mu\text{m}$ ;CH<sub>4</sub>(甲烷)的特征吸收波



(a) CO absorption spectra



(b) CO<sub>2</sub> absorption spectra

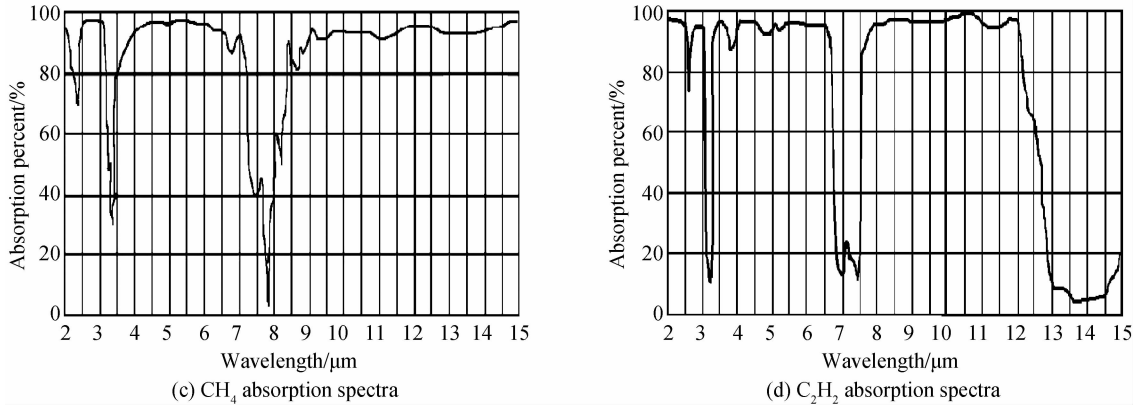


图1 四种常见气体的红外吸收光谱<sup>[10-11]</sup>

Fig. 1 The infrared absorption spectrum of four common gases

长为 2.3 μm、3.4 μm; C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> (乙烯)的特征吸收波长为 2.6 μm、3.3 μm、7 μm、14 μm;红外吸收曲线并不是单纯的锐线,而是呈现出不连续的一段较窄的吸收带.

1.1.2 朗伯-比尔(Lambert-Beer)定律

气体对红外辐射的吸收遵循朗伯-比尔定律<sup>[12]</sup>为

$$\frac{I}{I_0} = \exp(-kLc) \quad (3)$$

式中,  $I$  为红外辐射被气体吸收后的能量;  $I_0$  为红外辐射的初始能量;  $k$  为气体吸收系数;  $L$  为辐射通过气体层的厚度;  $c$  为被测气体的浓度.

由式(3)可知,通过测量红外辐射的初始能量  $I_0$  和红外辐射被气体吸收后的能量  $I$ ,就能检测出气体浓度  $c$ . 实际应用中往往是在混合气体中,检测某一组分气体(或潜在气体)的浓度,该气体称为目标气体. 混合气体中的其它组成成分称为背景气体. 通过量化红外辐射在目标气体吸收谱段的衰减,同时排除背景气体对红外辐射吸收的影响,可以计算目标气体的浓度. 单光源双探测器检测技术<sup>[13]</sup>是实现此测量过程的常用技术之一.

1.2 单光源双探测器检测技术

单光源双探测器检测技术是红外气体检测仪器常用的检测技术,如图2所示,光源的红外辐射经混合气体吸收后,分别到达参考探测器和测量探测器. 目标气体对参考探测器所接收到的相应频率的红外辐射不吸收,只吸收测量探测器所接收到的相应频率的红外辐射. 相应地,背景气体对参考探测器和测量探测器所接收到的对应频率的红外辐射均不产生(或存在很小的)吸收作用<sup>[14]</sup>.

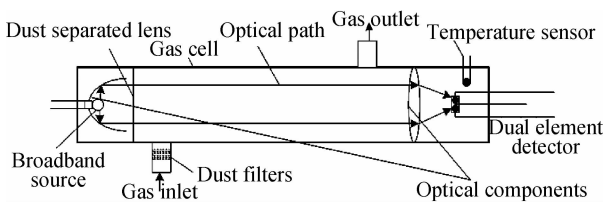


图2 单光源双探测器检测技术

Fig. 2 Single-source dual-detector detection technology

通过参考探测器测得的辐射强度信息和光源的发光特性,可推得没有目标气体时测量探测器所应接收到辐射能量,参考探测器与测量探测器实际测量值的差值,便是目标气体对红外辐射的吸收量. 这种差分测量方法可以消除光源功率不稳定对测量结果造成的影响,提高检测灵敏度和装置的可靠性.

2 气体浓度测量模型

本节针对单光源双探测器检测技术推导气体浓度测量的数学模型. 对于测量探测器,其接受到的光强信号为  $I_{11}$ ,对应光源在该谱段的辐射光强为  $I_{10}$ ,有

$$\frac{I_{11}}{I_{10}} = \exp(-k_{11}Lc_1) \times \exp(-k_{12}Lc_2) = \exp[-(k_{11}c_1 + k_{12}c_2)L] \quad (4)$$

式中:  $k_{11}$  为(测量光路)目标气体在该谱段的平均吸收系数;  $k_{12}$  为(测量光路)背景气体在该谱段的平均吸收系数,即

$$k_{11}c_1 + k_{12}c_2 = -\frac{1}{L}(\ln I_{11} - \ln I_{10}) \quad (5)$$

对于参考探测器,其接受到的光强信号为  $I_{21}$ ,对应光源在该谱段的辐射光强为  $I_{20}$ ,有

$$\frac{I_{21}}{I_{20}} = \exp(-k_{21}Lc_1) \times \exp(-k_{22}Lc_2) = \exp[-(k_{21}c_1 + k_{22}c_2)L] \quad (6)$$

式中:  $k_{21}$  为(参考光路)目标气体在该谱段的平均吸收系数;  $k_{22}$  为(参考光路)背景气体在该谱段的平均吸收系数.

该参考光路对应谱段内,目标气体不吸收红外辐射,目标气体在该谱段的平均吸收系数  $k_{21} \approx 0$ ,背景气体在参考光路谱段与测量光路谱段的平均吸收系数与测量探测器中对应波段的吸收系数相差不多,则  $k_{22} \approx k_{12}$ .

$$k_{12}c_2 = -\frac{1}{L}(\ln I_{21} - \ln I_{20}) \quad (7)$$

$I_{10}$  与  $I_{20}$  分别为光源在相应检测谱段的辐射强度,在仪器使用前可以加以测量、纠正,辐射强度几乎相

等.由此可知,单光路差分检测方法通过两个探测器的同时使用,可以精确测量气室中目标气体的浓度  $c_1$ .式(5)式(7)联立,可得

$$c_1 = -\frac{1}{k_{11} \times L} [(\ln I_{11} - \ln I_{21}) + b] \quad (8)$$

式中  $b$  为常数,其值为  $(\ln I_{20} - \ln I_{10})$ ,  $I_{10}$ 、 $I_{20}$  分别为测量光路、参考光路中光源在相应谱段的辐射光强.  $I_{11}$ 、 $I_{21}$  分别为测量探测器与参考探测器表面接收到的辐射能量,参考探测器和测量探测器输出的电压分别为

$$u_r = I_{21} R_r \quad (9)$$

$$u_m = I_{11} R_m \quad (10)$$

式中,  $R_r$ 、 $R_m$  分别是参考探测器和测量探测器的电压探测率.

将式(8)中的  $c_1$  记作  $c$ ,最终化简得到,目标气体浓度  $c$  与参考探测器输出电压  $u_r$  和测量探测器输出电压  $u_m$  的关系为

$$c = -A \ln(u_m/u_r) + B \quad (11)$$

式中:  $A$  与气室长度和气体吸收系数有关的常数,  $B$  还与探测器的电压探测率有关的常数.

由式(11)可知,当目标气体的浓度  $c=0$ ,参考探测器输出电压为  $u_r$ 、测量探测器输出电压为  $u_m$ ,则

$$B = A \ln(u_m/u_r) \quad (12)$$

则式(11)为

$$c = -A \ln\left(u_m/u_r \times \frac{u_r}{u_m}\right) \quad (13)$$

仪器检测气体浓度时,气体浓度可看作自变量,而参考探测器和测量探测器输出的电压可看作因变量,故等式改写为

$$u_m/u_r = u_{m_0}/u_{r_0} \exp\left(-\frac{c}{A}\right) \quad (14)$$

式中,  $u_{m_0}$ 、 $u_{r_0}$  分别为目标气体浓度为 0 时测量探测器与参考探测器的输出电压,  $A$  为与气室长度和气体吸收系数有关的常数.

由数学模型的推导过程可知道,为了提高测量精度,还应注意:1)参考光路对应谱段的选取应满足目标气体在该谱段的吸收率低,即平均吸收系数  $k_{21} \approx 0$ ;2)背景气体在参考光路谱段的平均吸收系数与测量光路谱段的平均吸收系数相差不多,即  $k_{22} \approx k_{12}$ .通常情况下,背景气体对相应谱段的辐射不吸收.

$u_m/u_r$  随被测气体浓度  $c$  变化关系如图 3 所示.被测气体浓度  $c$  为 0 时,  $\frac{u_m/u_r}{u_{m_0}/u_{r_0}} = 1$ ;随着被测气体浓度  $c$  的增加,  $\frac{u_m/u_r}{u_{m_0}/u_{r_0}}$  下降,呈指数关系.被测气体浓度  $c$  较小时,指数曲线下降速率大,相对的测量精度就高;被测气体浓度  $c$  较大时,指数曲线逐渐平坦,相对的测量精度与分辨率就低.

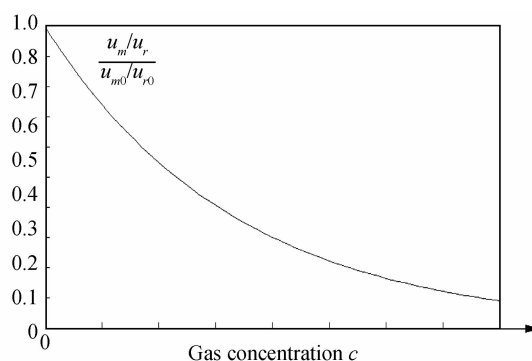


图 3  $u_m/u_r$  随待测气体浓度  $c$  变化趋势  
Fig. 3  $u_m/u_r$  Change trend with the test gas concentration

### 3 标定及温度补偿

由于红外探测器受温度的影响或本身性能的下降,气室污染、光路中光学元件分光、聚光效率下降,特征吸收波长的干涉滤光片受温度或污染产生中心波长偏移、带宽变化、透射比下降,仪器在使用一段时间后,测量精度达不到设计的要求,这就需要对仪器进行标定.

对仪器进行标定及温度补偿,一是对式(14)中常数  $u_{m_0}$ 、 $u_{r_0}$  和  $A$  进行标定,二是在工作温度范围内,对常数  $u_{m_0}$ 、 $u_{r_0}$  和  $A$  受温度的影响进行补偿,即温度补偿.

#### 3.1 零点标定和量程(精度)标定

由式(14)可知,当  $c=0$  时,测量计算得到的  $u_{m_0}/u_{r_0}$  的值,就代表了检测气体的零点,记为  $a_0$

$$a_0 = u_{m_0}/u_{r_0} \quad (c=0) \quad (15)$$

当  $c$  为某一已知浓度的气样,一般取仪器测量气体浓度的上限,也就是满量程值,如:  $c=c_s$  时,测量计算得到的  $u_{m_s}/u_{r_s}$  的值,此时

$$\frac{u_{m_s}}{u_{r_s}} = a_0 \exp\left(-\frac{c_s}{A}\right) \quad (c=c_s) \quad (16)$$

由式(16)就可计算得到  $A$  值,记为  $A_s$ ,这样,式(14)则为

$$u_m/u_r = a_0 \exp\left(-\frac{c}{A_s}\right) \quad (17)$$

通过标定得到了  $a_0$ 、 $A_s$ ,就可对检测  $u_m/u_r$  的值按式(17)进行计算,得到目标气体的浓度值.

#### 3.2 温度补偿

显然,式(17)中的  $a_0$ 、 $A_s$  值是在某一温度  $T_0$  时的值,仪器在工作温度范围内,不同温度下,其零点标定和量程(精度)标定值,也是随温度有变化的,当仪器测量误差随温度变化超过允许误差时,应对测量值进行温度补偿.

温度影响可以引起零点漂移,也就是式(17)中  $a_0$  值要在不同的温度下进行修正,保证在  $c=0$  的情况下,零点稳定.温度影响也可以引起测量误差加大,也

就是式(17)中  $A_s$  值要在不同的温度下进行修正,在  $c$  为一定浓度气体的情况下,测量的浓度值应在允许误差范围内.因此,温度补偿有零点温度补偿和量程温度补偿.温度补偿的实质就是对式(17)在温度  $T_0$  下的常数  $a_0$ 、 $A_s$ ,在温度  $T_i$  时进行修正后,再按式(17)计算被测气体的浓度.

### 3.2.1 零点温度补偿

在  $c=0$ 、 $T=T_0$  的情况下,

$$a_0 = u_{m_0}/u_r \quad (c=0, T=T_0) \quad (18)$$

在  $c=0$ 、 $T=T_i$  的情况下,

$$a_i = \frac{u_{m_i}}{u_r} \quad (c=0, T=T_i) \quad (19)$$

如使用钽酸锂热释电红外探测器,其输出电压随温度的变化近似线性关系,温度对放大电路输出电压的影响也近似线性关系.如式(18)、(19),温度  $T_0$  时,为  $a_0$ ,温度  $T_i$  时,为  $a_i$ ,其关系如图4.

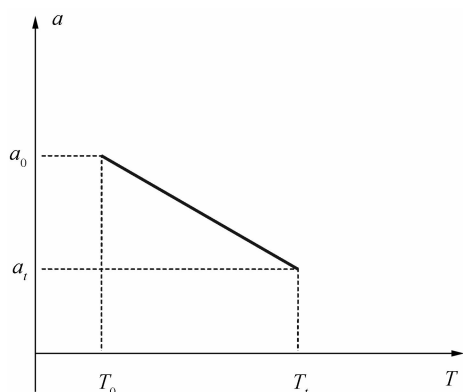


图4 温度对零点影响示意图

Fig. 4 Schematic temperature effect on zero point

零点温度补偿就是要将  $T_0$  时测量到的  $a_0$  值,补偿为在实时温度  $T_i$  时的  $a_i$  值,图4所示的直线斜率为

$$k_0 = \frac{a_i - a_0}{T_i - T_0} \quad \text{或} \quad a_i = a_0 + k_0(T_i - T_0) \quad (20)$$

式中,  $k_0$  是零点温度补偿系数.式(20)就是零点温度补偿和零点温度补偿系数标定的计算公式.

零点温度补偿方法是:已知实时温度  $T_i$ 、零点温度补偿系数  $k_0$ 、温度  $T_0$  时的  $a_0$ ,按式(20)计算得到温度  $T_i$  时的  $a_i$  值,就是对零点进行温度补偿.

零点温度补偿系数标定方法是:已知温度  $T_0$  时测量的  $a_0$  值与温度  $T_i$  时测量的  $a_i$  值,按式(20)计算得到零点温度补偿系数  $k_0$ .

当选用的探测器受温度影响,其  $a_i$  与温度变化成非线性关系时,可实测温度  $t$  变化时所对应的  $a_i$ ,得到  $a_i$  与温度  $t$  的函数关系或  $a_i$  与温度  $t$  对应的数值表,可用同样方法进行零点温度补偿.

### 3.2.2 量程温度补偿

对某一浓度气体进行检测,需要对这一浓度的温度影响进行补偿,所有检测仪器都有一个测量范围,也

就是量程,因此对气体测量范围的上限,即最大量程受温度的影响进行补偿,称为量程温度补偿.零点温度补偿和量程温度补偿,从测量范围的下限到上限进行温度补偿,就涵盖了整个测量范围的温度补偿.

经零点温度补偿后,式(17)就为

$$u_m/u_r = a_i \exp\left(-\frac{c}{A_s}\right) \quad (21)$$

式中,  $a_i$  就是在温度  $T_i$  时,由  $a_0$  值经零点温度补偿后得到的.

被测气体的吸收系数随温度的变化有变化;窄带干涉滤光片受温度的影响,中心波长和透射比也有变化.为补偿在温度  $T_0$  和  $T_i$  时,对同一浓度气体检测造成的误差,引入一个量程温度补偿因子  $k_s \frac{T_i - T_0}{T_0}$ ,用于补偿温度对  $A_s$  的影响,其补偿因子的作用,是在某一被测气体浓度的情况下,将温度  $T_i$  时测量到的  $u_m/u_r$  补偿为温度  $T_0$  时的  $u_m/u_r$ .

在实时温度  $T_i$  时,检测并计算得到  $u_m/u_r$ ,采用式(22)进行量程温度补偿,即

$$u_m/u_r = a_i \exp\left(-\frac{c}{A_s}\right) \times \left(1 - k_s \frac{T_i - T_0}{T_0}\right) \quad (22)$$

式中:  $k_s$  是量程补偿系数,  $T_0$ 、 $T_i$  的单位是热力学温度.

量程温度补偿方法是:已知实时温度  $T_i$  时实测  $u_m/u_r$  值、温度  $T_0$  值、由温度  $T_0$  时的  $a_0$  经式(20)温度补偿为实时温度  $T_i$  时的  $a_i$  值、温度  $T_0$  时的  $A_s$  值、 $k_s$  值,按式(22)计算得到的浓度  $c$  值,就是温度补偿后的实测的目标气体的浓度数值.

量程温度补偿系数的标定方法是:已知在温度  $T_i$ 、浓度为  $c$  测量到的  $u_m/u_r$  值、 $a_i$ 、 $T_i$ 、 $A_s$ ,按式(22)计算得到量程补偿温度系数  $k_s$ .

## 4 测试

将气体浓度测量模型、标定及温度补偿方法用于矿用红外甲烷传感器,在不同的环境温度下,对标准气样进行检测.

### 4.1 温度 $T_0$

设定温度  $T_0$  的环境,包括传感器、气样等的温度为  $T_0$ .传感器在  $T_0$  温度下,充分预热.

#### 4.1.1 零点气样

在气室中通入浓度为零(气室充满  $N_2$ )的标准气样,3 min 后记录显示器显示的零点值或输出信号,以后每隔 1 min 记录零点值,共 4 次,取算术平均值.

#### 4.1.2 量程气样

在气室中通入浓度为量程数值的标准气样,3 min 后记录显示器显示的数值或输出信号,以后每隔 1 min 记录数值,共 4 次,取算术平均值.

4.1.3 其他气样

在气室中分别通入几个量程范围内的标准气样,3分钟后记录显示器显示的数值或输出信号,以后每隔1分钟记录数值,共4次,取算术平均值.

4.2 温度  $T_i$

设定温度  $T_i$  的环境.如4.1所述的同样方法,在

气室中分别通入浓度为零、量程数值、几个量程范围内的标准气样.

4.3 测量结果与计算

在温度  $T_0$ 、温度  $T_i$  的情况下,通入标准气样,记录显示值或输出信号.计算显示值与标准气样误差,判断是否超过了允许误差范围,如表1.

表1 测量记录与计算  
Table 1 Measurement and calculation record

Ambient temperature	Standard gas concentration values (%CH <sub>4</sub> )	Displayed value(%CH <sub>4</sub> )	Measurement error	Permission error range [15]	Qualified/unqualified
$T_0$ Thermometer:13℃ Temperature tensor:13℃	0	0.00	0.00%CH <sub>4</sub>	±0.06%CH <sub>4</sub>	qualified
	0.40	0.35	0.05%CH <sub>4</sub>	±0.06%CH <sub>4</sub>	qualified
	1.52	1.60	-0.08%CH <sub>4</sub>	±0.09%CH <sub>4</sub>	qualified
	3.46	3.65	-0.19%CH <sub>4</sub>	±0.21%CH <sub>4</sub>	qualified
	5.43	5.60	-0.17%CH <sub>4</sub>	±0.33%CH <sub>4</sub>	qualified
	$c_s=9.36$	9.40	-0.04%CH <sub>4</sub>	±0.56%CH <sub>4</sub>	qualified
$T_i$ Thermometer:33℃ Temperature tensor:33℃	0	0.05	-0.05%CH <sub>4</sub>	±0.06%CH <sub>4</sub>	qualified
	0.40	0.40	0.00%CH <sub>4</sub>	±0.06%CH <sub>4</sub>	qualified
	1.52	1.45	0.07%CH <sub>4</sub>	±0.09%CH <sub>4</sub>	qualified
	3.46	3.35	0.11%CH <sub>4</sub>	±0.21%CH <sub>4</sub>	qualified
	5.43	5.55	-0.12%CH <sub>4</sub>	±0.33%CH <sub>4</sub>	qualified
	$c_s=9.36$	9.50	-0.04%CH <sub>4</sub>	±0.56%CH <sub>4</sub>	qualified

注:“允许误差”是传感器技术参数中的规定的测量误差数值,表中的“允许误差”是“AQ 6211-2008《煤矿用非色散红外甲烷传感器》”所规定的红外甲烷传感器的基本误差.

将表1的数值绘制于图5中,图5中的横坐标为标准气样CH<sub>4</sub>气体浓度,图5中显示了表2的红外甲烷传感器的温度分别为13℃和33℃实测标准气样的数值,红外甲烷传感器的检测结果符合“AQ 6211-2008《煤矿用非色散红外甲烷传感器》”所规定的红外甲烷传感器的基本误差,也就是采用本文所述的对气体浓度的检测方法能够精确测量到CH<sub>4</sub>气体浓度,其显示误差在“允许误差”范围内.

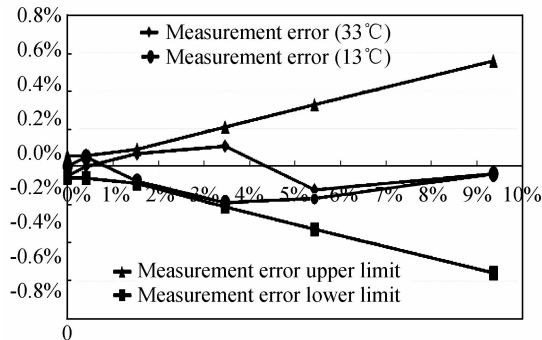


图5 测量计算结果

Fig. 5 Measurement and calculation record

5 结论

依据气体吸收红外辐射遵循朗伯-比尔定律的原理,以单光源双探测器红外气体检测技术为基础,推导

出红外检测气体浓度的数学模型,提出了红外检测气体浓度的标定方法和温度补偿方法,将该方法用于矿用红外甲烷传感器进行实际测量,具有较好的测量精度.

参考文献

- [1] LIU Yong-ping. The application of infrared technology in monitoring the temperature and gas in the coal mines[J]. *Infrared Technology*, 2000, **22**(4): 59-62. 刘永平. 红外技术在煤矿井下测温 and 测气中的应用[J]. 红外技术, 2000, **22**(4): 59-62.
- [2] LIU Yong-ping, HUANG Cun-xin. The structure and optical system design of mining infrared gas sensor[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2013, **24**(2): 012004. 刘永平, 黄存新. 矿用红外气体传感器的结构及光学系统的设计与实现[J]. 硅酸盐通报, 2009, **28**(2): 400-404.
- [3] YU Xin, GAO Zong-li, SONG Nan, et al. Design and experiment of pocket Infrared gas detector[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(1): 58-63. 于鑫, 高宗丽, 宋楠, 等. 袖珍式红外瓦斯检测仪的设计与实验[J]. 光子学报, 2014, **43**(1): 58-63.
- [4] JANE H, RALPH P T. Optical gas sensing: a review[J]. *Measurement Science and Technology*, 2013, **24**(1): 012004.
- [5] CROWDER J G, HARDAWAY H R and ELLIOTT C T. Mid-infrared gas detection using optically immersed, room-temperature, semiconductor devices[J]. *Measurement Science and Technology*, 2002, **13**(6): 882-884.
- [6] ALEKSANDROV S, GAVRILOV G, KAPRALOV A, et al. Portable optoelectronic gas sensors operating in the mid-IR spectral range ( $\lambda = 3-5 \mu\text{m}$ )[C]. SPIE, 2002, **4680**: 188-194.
- [7] FONOLLOSA J, RUBIO R, HARTWIG S, et al. Design and

- fabrication of silicon-based mid infrared multi-lenses for gas sensing applications[J]. *Sensors and Actuators B*, 2008, **132**(2):498-507.
- [8] LIU Yong-ping, GUO Shi-zhai, DONG Kang-ning, *et al.* Research and manufacture of mine-used infrared methane transducer[J]. *Coal Mine Modernization*, 2009, **93**(6):67-70.  
刘永平,郭世寨,董康宁,等. 矿用红外甲烷传感器的研制[J]. *煤矿现代化*, 2009, **93**(6):67-70.
- [9] ZHANG Xian-jie, YU Zhen-hong, LI Rong-rong, *et al.* Study of spectrum absorption about CH<sub>4</sub> sensor based on the infrared detection method[J]. *Infrared Technology*, 2014, **36**(6):508-511.  
张显杰,余震虹,李蓉蓉,等. 基于红外检测的甲烷传感器中光谱吸收理论的研究[J]. *红外技术*, 2014, **36**(6):508-511.
- [10] 王森. 在线分析仪器手册[M]. 刘哲,宋辉,等. 北京:化学工业出版社,2008:39-41.
- [11] ROTHMAN L S, GORDON I E, BABIKOV Y, *et al.* The HITRAN2012 molecular spectroscopic database[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2013, **130**(1):4-50.
- [12] WANG Zhuo, CAO Jia-nian, ZHANG Keke, *et al.* Optical low-concentration methane gas sensor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(2):255-256.  
王琢,曹家年,张可可,等. 光学式低浓度甲烷气体传感器的研究[J]. *光子学报*, 2011, **40**(2):255-256.
- [13] LIU Yong-ping, ZHANG Jun-li, JING Li-tao, *et al.* Research on infrared gas detection technology using dual-source and dual detector[J]. *Coal Mine Modernization*, 2013, **115**(4):74-76.  
刘永平,张军利,靖立涛,等. 双光源双探测器红外气体检测技术的研究[J]. *煤矿现代化*, 2013, **115**(4):74-76.
- [14] PETER W, FRANZ S, KARL M, *et al.* Near- and mid-infrared laser-optical sensors for gas analysis[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2002, **37**(2-3):101-114.
- [15] AQ 6211-2008, 煤矿用非色散红外甲烷传感器[S]. 北京:煤炭工业出版社,2009.