

## 引入无量纲模型及弯曲系数的三波段红外测温优化研究

石东平, 吴超, 李孜军, 贾楠, 潘伟

(中南大学资源与安全工程学院, 湖南长沙 410083)

**摘要:** 以红外辐射基本理论为基础, 将红外温度测量同被测物发射率相分离, 构建未涉及发射率的红外三波段测温向量组, 解决红外测温结果同发射率耦合度低的问题。进一步优化三波段向量组, 提出无量纲发射率模型及适宜波段条件。通过对发射率线性函数进行优化, 引入弯曲指数  $n$ , 拓展发射率函数的应用范围。适宜波段条件的提出则保证了三波段测温向量组结果的精确性。对四个硫化矿样本应用三波段测温法同传统红外测温法进行实验测温对比研究, 分析结果表明: 三波段测温法同真实温度吻合度较常规红外测量好, 且相对误差明显小于传统红外测温, 验证了三波段测温法的可用性及精确性。三波段测温法在保证测量精度的同时拓宽了普通单波段红外热像仪的应用范围, 保证了硫化矿自燃红外预测数值精度。

**关键词:** 三波段; 发射率; 红外测温; 无量纲模型; 弯曲系数

**中图分类号:** TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0204006

## Optimized tri-wavelength infrared temperature measurement introducing dimensionless model and bending coefficient

Shi Dongping, Wu Chao, Li Zijun, Jia Nan, Pan Wei

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** Based on the basic theory of infrared radiation, infrared tri-wavelength vectors group altering low coupling between emissivity and infrared temperature measurement was derived to isolate the object emissivity and infrared temperature measurement. In order to optimize the tri-wavelength vectors group, a non-dimensional emissivity model was established and the most suitable wavelength range was identified. Aiming at optimizing the linear function of emissivity, the bending index  $n$  was introduced. The appropriate wavelength range to guarantee exactness of result of tri-wavelength vectors group was presented. The tri-wavelength measurement was demonstrated in a laboratory experiment with four sulfide ore samples. The results show that the fitting of tri-wavelength measurement with true temperature is better than that of common infrared temperature measurement. The fractional error of tri-wavelength measurement significantly is less than the common. The availability and accuracy of tri-wavelength measurement are verified. The tri-wavelength measurement ensures the measurement accuracy as well as expands the scope of common thermal infrared imager application and ensures the numerical accuracy of infrared prediction in the spontaneous combustion of sulfide ores.

**Key words:** tri-wavelength; emissivity; infrared thermometry; dimensionless model; bending coefficient

收稿日期: 2015-06-10; 修订日期: 2015-07-20

基金项目: 国家青年自然科学基金(51304238); 湖南省研究生科研创新项目(CX2013B080)

作者简介: 石东平(1988-), 女, 博士生, 主要从事红外热像技术方面的研究。Email: 526223151@qq.com

导师简介: 吴超(1952-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事安全科学研究。Email: wuchao\_csu@126.com

## 0 引言

红外热像技术凭借非接触式测量、测温范围广泛等诸多优点,已广泛应用于石化、建筑、矿山、消防等行业。红外热像技术通过接收被测物表面热辐射通量获取红外图像,其测量精度受被测物发射率影响。发射率受测量方向、被测物性质、表面粗糙度等诸多因素影响,即使同一物质在不同情况下发射率也不尽相同。在实验室环境下测量发射率投入较高,过程较久。因此,发射率的未知性成为严重制约红外热像技术发展的瓶颈<sup>[1]</sup>。

为避免发射率影响测温,现已提出双波及多波测量法等。但双波法主要适用于灰体物质,而多波法由于计算波长过多,运算结果拟合性较差。文中在双波法的基础上,提出了适用于普通单波段红外热像仪的三波段测温法,将红外温度测量同被测物发射率分离,实现无需发射率测量的三波段计算模型<sup>[2]</sup>。

尤其在金属矿山领域,因高硫矿极易自燃,预防自燃工作形式严峻,采用红外热像技术进行非接触式温度测量可有效进行自燃预测。但由于井下环境复杂,硫化矿石发射率较难获得,阻碍了红外热像技术在硫化矿自燃预测领域的应用。使用无需发射率测量的三波段模型,可准确探测井下矿石温度,在保证测量精度的同时拓宽了普通单波段红外热像仪的应用范围。

## 1 红外热像仪测温原理

红外热像仪接收到的总能量为被测物体辐射能量、被测物反射周围环境物体辐射能量及大气辐射能量三者之和。

$$W(\lambda, T) = W_r(\lambda, T) + W_{sur}(\lambda, T) + W_a(\lambda, T) = \varepsilon\tau W_{obj} + (1-\varepsilon)\tau W_{sur} + (1-\tau)W_{am} \quad (1)$$

式中:  $W(\lambda, T)$  为红外热像仪接收总能量;  $\varepsilon\tau W_{obj}$  为被测物体辐射能;  $(1-\varepsilon)\tau W_{sur}$  为环境反射辐射能;  $(1-\tau)W_{am}$  为大气辐射能;  $\varepsilon$  为被测物发射率;  $\tau$  为大气透射率。

被测物表面辐射亮度为:

$$L_l = e_l L_{bl}(T_0) + r_l L_{bl}(T_U) = e_l L_{bl}(T_0) + (1-a_l) L_{bl}(T_U) \quad (2)$$

式中:  $\varepsilon_l L_{bl}(T_0)$  为被测物表面光谱辐射亮度;  $\rho_l L_{bl}(T_U)$  为反射环境光谱辐射亮度;  $T_0$  为被测物表面温度;  $T_U$

为环境温度;  $\varepsilon_\lambda$  为被测物发射率;  $\rho_\lambda$  为表面反射率;  $\alpha_\lambda$  为表面吸收率。

红外热像仪辐射测温通用基本公式可表示为<sup>[3]</sup>:

$$f(T_0') = \tau_a [\varepsilon f(T_0) + (1-\alpha) f(T_U)] + (1-\tau_a) f(T_a) \quad (3)$$

被测物实际温度为:

$$f(T_0) = \frac{1}{\varepsilon\tau_a} [f(T_0') - \tau(1-\alpha)f(T_U) - (1-\tau_a)f(T_a)] \quad (4)$$

## 2 三波段红外热像仪测温

公式(3)中,被测物真实温度受物体表面发射率、大气透射率、表面吸收率、环境温度、大气温度、物体表面温度辐射温度的影响,因大部分红外热像测量为短距离测量,可取  $\tau_a=1$ 。公式(4)即变为:

$$f(T_0) = \frac{1}{\varepsilon} [f(T_0') - (1-\alpha)f(T_U)] \quad (5)$$

其中未知量为  $f(T_0)$ 、 $\varepsilon$ 、 $\alpha$ 。对于连续辐射的物体,发射率  $\varepsilon(\lambda, T) |\lambda - \lambda_0| < \delta$ 。在波长为  $|\lambda - \lambda_0| < \delta$  时,根据泰勒公式,可展开为:

$$\varepsilon(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda_0, T) + \varepsilon'(\lambda_0, T)(\lambda - \lambda_0) + \frac{1}{2} \varepsilon''(\lambda_0, T)(\lambda - \lambda_0)^2 + \dots + \frac{1}{n!} \varepsilon^{(n)}(\lambda_0, T)(\lambda - \lambda_0)^n + O_n(\lambda) \quad (6)$$

其中,余项  $O_n(\lambda) = \frac{1}{(n+1)!} \varepsilon^{(n+1)}(\varepsilon, T)(\lambda - \lambda_0)^{(n+1)}$ 。

定义无量纲波长  $\Lambda = (\lambda - \lambda_{\min}) / (\lambda_{\max} - \lambda_{\min})$ , 其中  $\lambda_{\max}$  为红外热像仪响应波段上限值,  $\lambda_{\min}$  为红外热像仪响应波段下限值。

$$\varepsilon(\lambda, T) = a_0(\lambda, T) + a_1(\lambda, T)\Lambda \quad (7)$$

同样,反射率和吸收率也可表示为:

$$\rho(\lambda, T) = b_0(\lambda, T) + b_1(\lambda, T)\Lambda \quad (8)$$

$$\alpha(\lambda, T) = c_0(\lambda, T) + c_1(\lambda, T)\Lambda \quad (9)$$

则公式(4)可表示为:

$$f(T_0') = \tau_a [\varepsilon f(T_0) + (1-\alpha) f(T_U)] + (1-\tau_a) f(T_a) \quad (10)$$

将公式(7)代入公式(10)中,由于有 3 个未知数,需构建向量组,见公式(11)(12):

$$\begin{bmatrix} f_1(T_0') \\ f_2(T_0') \\ f_3(T_0') \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \Lambda_1 \\ 1 & \Lambda_2 \\ 1 & \Lambda_3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} f_1(T_0) \\ f_2(T_0) \\ f_3(T_0) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & \Lambda_1 \\ 1 & \Lambda_2 \\ 1 & \Lambda_3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} f_1(T_U) \\ f_2(T_U) \\ f_3(T_U) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} f_1(T_0') \\ f_2(T_0') \\ f_3(T_0') \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \Lambda_1 \\ 1 & \Lambda_2 \\ 1 & \Lambda_3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} f_1(T_0) \\ f_2(T_0) \\ f_3(T_0) \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & \Lambda_1 \\ 1 & \Lambda_2 \\ 1 & \Lambda_3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} f_1(T_U) \\ f_2(T_U) \\ f_3(T_U) \end{bmatrix} \quad (12)$$

将被测物体视为漫反射体,即可认为  $1-\varepsilon(\lambda, T)=\rho(\lambda, T)$ , 即  $1-a_0(T)+a_1(T)\Lambda=b_0(T)+b_1(T)\Lambda$ 。

矩阵可进一步简化为:

$$\begin{bmatrix} f_1(T_0') \\ f_2(T_0') \\ f_3(T_0') \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \Lambda_1 \\ 1 & \Lambda_2 \\ 1 & \Lambda_3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} f_1(T_0) \\ f_2(T_0) \\ f_3(T_0) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & \Lambda_1 \\ 1 & \Lambda_2 \\ 1 & \Lambda_3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} f_1(T_U) \\ f_2(T_U) \\ f_3(T_U) \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中:  $f_1(T_0)=f_2(T_0)=f_3(T_0)$ ;  $f_1(T_U)=f_2(T_U)=f_3(T_U)$ 。向量组中有  $a_1, a_0, f(T_0)$  3 个未知数, 对矩阵进行转置和变形, 即可在被测物发射率未知的情况下, 计算出被测物的温度<sup>[4-5]</sup>。

### 3 三波段测温优化处理

为确保三波段测温法计算精度及普适性, 对三波段测温法进行优化处理, 提出适用情况, 进一步完善测温方程。

#### (1) 完善发射率无量纲波长模型

$$\varepsilon(\lambda, T)=a_0(\lambda, T)+a_1(\lambda, T)\Lambda$$

该式为线性发射率模型, 只可表示窄波段区间范围。在实际应用中, 发射率曲线往往偏离现行关系而存在一定弯曲度。因此引入弯曲指数  $n$ , 将线性发射率模型可优化为:

$$\varepsilon(\lambda, T)=a_0(\lambda, T)+a_1(\lambda, T)\Lambda^n \quad (14)$$

当引入弯曲指数  $n$  后, 发射率模型线性关系可优化为曲线关系, 拓展发射率无量纲波长模型的使用范围<sup>[6-7]</sup>, 见图 1。

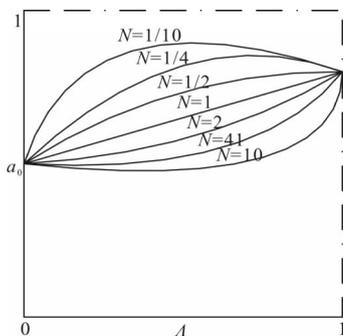


图 1 受弯曲系数影响的发射率模型曲线

Fig.1 Emissivity model curve effected by bending coefficient

#### (2) 三波段求解向量方程适宜波段条件

$$\varepsilon(\lambda, T)=a_0(\lambda, T)+a_1(\lambda, T)\Lambda=a_0(1-m)\Lambda \quad (15)$$

式中:  $m=a_0(\lambda, T)/a_1(\lambda, T)\Lambda$ 。将公式(10)代入公式(15)中对向量组进行变形, 向量组可变形为:

$$\begin{bmatrix} [f_1(T_0')-f_1(T_U)]/[f_1(T_0)-f_1(T_U)] \\ [f_2(T_0')-f_2(T_U)]/[f_2(T_0)-f_2(T_U)] \\ [f_3(T_0')-f_3(T_U)]/[f_3(T_0)-f_3(T_U)] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \Lambda_1 \\ 1 & \Lambda_2 \\ 1 & \Lambda_3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

从公式(16)可看出: 三波段求解函数为向量组形式, 若需获得最佳求解情况, 需满足条件  $\Lambda_1 \neq \Lambda_2 \neq \Lambda_3$ , 即  $\Lambda_1 \cap \Lambda_2 = \phi, \Lambda_1 \cap \Lambda_3 = \phi, \Lambda_2 \cap \Lambda_3 = \phi$ 。

## 4 实验验证

### 4.1 实验设计

#### 4.1.1 实验目的

以硫化矿为样本, 对传统单波段红外热像仪应用三波段测量法。对比单波段、三波段及真实测温结果, 验证三波段红外测温法的可行性和精确性, 为将三波段测量法应用于硫化矿自燃温度预测提供理论依据。

#### 4.1.2 实验仪器

SC7300 红外热像仪、CENTER 可记录测温仪、HANBA 程式高温试验箱等。

#### 4.1.3 实验技术路线

对比传统单波段红外热像仪需在红外热像仪前加置不同波段滤光片, 用来选取所需辐射光段, 得到 3 个非相关性响应波段。3 个响应波段分别为  $1\sim 5 \mu\text{m}$ 、 $7.3\sim 7.5 \mu\text{m}$ 、 $10.7\sim 10.8 \mu\text{m}$ 。用 3 个波段分别进行红外热像仪的测量, 实现构建三波段矩阵求解。将三波段计算温度、同样本实际温度(CENTER 可记录测温仪测得温度)和单波红外热像仪温度(波段为  $3.7\sim 11.5 \mu\text{m}$  进行对比, 分析误差为前文理论提供验证<sup>[8]</sup>。

#### 4.1.4 实验步骤

(1) 针对上述实验方法, 为验证三波段测量法在预测硫化矿温度方面的精确性及预测硫化矿自燃的可行性, 选取 4 个硫化矿石样本进行实验, 样本编号为: 1#、2#、3#、4#。应用双温度对比法, 在矿样表面涂发射率为  $\varepsilon_r$  的涂料, 在不同温度  $T_1, T_2$  下测量, 应用公式  $\varepsilon=\varepsilon_r(T_2^n-T_1^n)/(T_2^n-T_1^n)$  测得 4 个样本的发射率分别为 0.87、0.92、0.95、0.97。

(2) 使用 HANBA 程式高温试验箱对样本进行加热,从环境温度 25℃ 梯度加热至 120℃。在升温过程中进行多次均匀测量,测量内容包括:T1 可记录测温仪测量样本实际温度测量、T2 单波段红外热像仪常规测量(发射率已根据实际调节)、T3 加载滤光片的三波段测量,在每次测量之前都要重新对红外热像仪进行标定。

(3) 将三波段测量带入公式(16)进行计算,其中环境温度为 25℃,计算三波段测温法所得温度。

(4) 对所测得的 3 组温度进行数值分析。

#### 4.2 实验分析

按照上述实验步骤进行实验,以 1# 样本为例,图 2~4 为在 3 个不同波段下(1~5 μm 波段、7.3~7.5 μm、10.7~10.8 μm) 测得的 1# 矿样红外图像,图 5 为 1# 矿样单波段红外图像,图 6~8 表示三波段计算温度、实际温度、红外测量温度三者随着被测样本温度增加的变化趋势及相对误差分析。图 2~5 中取标注点 1(像素位置为 X=150, Y=150)的温度进行分析,分别为 73.46℃、75.62℃、75.38℃、115.86℃,此时样品 CENTER 可记录测温仪温度为 120.41℃,三波段计算温度为 117.69℃。分析此样本三波段计算温度相对真实温度误差为 2.26%,相对单波段温度相对误差为 3.78%。

从上述实验分析可以得出:图 6~9 为样本测温结果(真实温度、单波段红外温度、三波段红外温度)随温度变化曲线图。三波段红外温度结果与单波段红外温度结果相对差别不大,主要原因是:三波段计算温度值中的波段温度同样来源于红外热像仪,同单波段测温结果仅从温度走向上看差别不大,需进一步进行误差分析。

图 10~13 为单波段红外温度同三波段温度相对



图 2 1~5 μm 波段红外图像

Fig.2 1-5 μm wavelengths infrared image

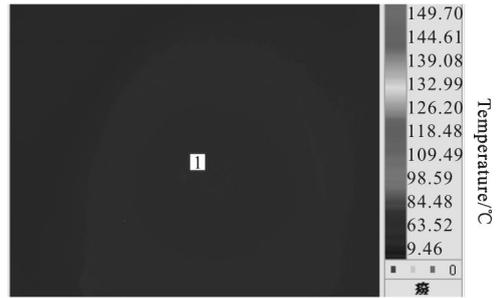


图 3 7.3~7.5 μm 波段红外图像

Fig.3 7.3-7.5 μm wavelengths infrared image

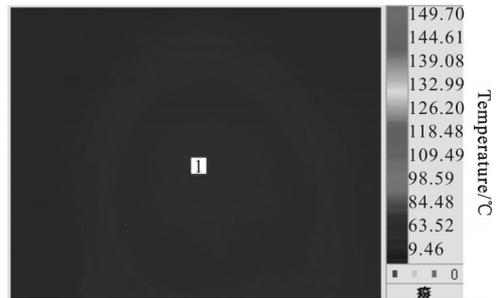


图 4 10.7~10.8 μm 波段红外图像

Fig.4 10.7-10.8 μm wavelengths infrared image

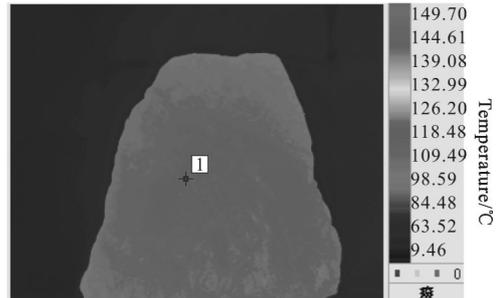


图 5 单波段红外图像

Fig.5 Single band infrared image

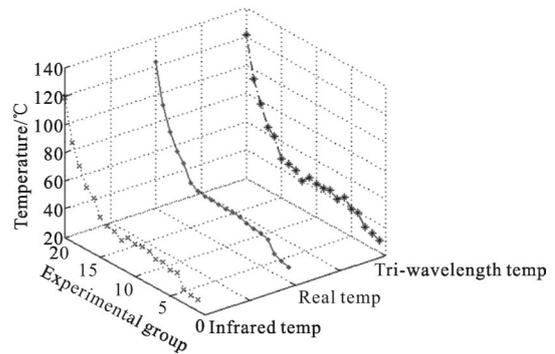


图 6 1# 样本真实温度、红外温度、三波段温度对比

Fig.6 Comparison of real temperature, infrared temperature and tri-wavelength temperature in 1# sample

误差分析对比图。1#~4# 矿样单波段红外温度最大相对误差分别为 14.86%、13.97%、13.92%、25.54% ,

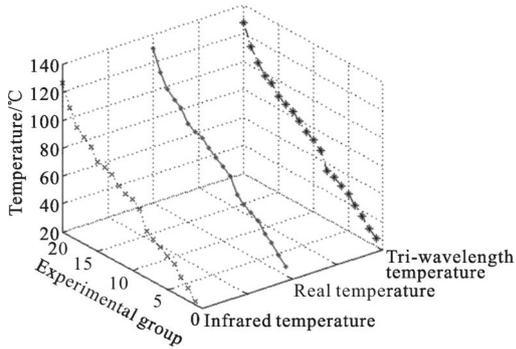


图 7 2# 样本真实温度、红外温度、三波段温度对比

Fig.7 Comparison of real temperature , infrared temperature and tri-wavelength temperature in 2# sample

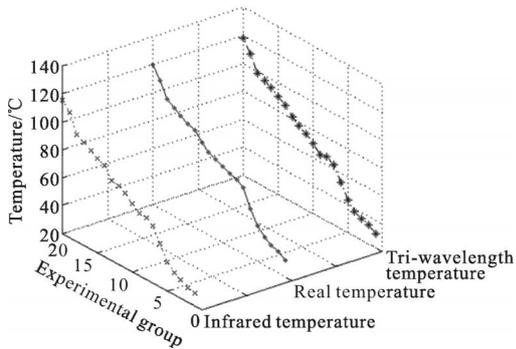


图 8 3# 样本真实温度、红外温度、三波段温度对比

Fig.8 Comparison of real temperature , infrared temperature and tri-wavelength temperature in 3# sample

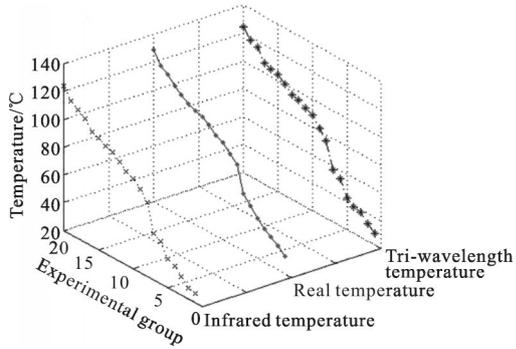


图 9 4# 样本真实温度、红外温度、三波段温度对比

Fig.9 Comparison of real temperature , infrared temperature and tri-wavelength temperature in 4# sample

最小相对误差分别为 3.03%、1.99%、1.79%、3.07%；1#~4# 矿样三波段红外温度最大相对误差分别为 16.08%、6.39%、10.23%、14.62%，最小相对误差为 1.52%、1.39%、1.1%、0.6%。随着温度的升高，红外测量温度、三波段计算温度同实际温度之间相对误差都趋向于变小。分析结果表明：三波段计算温度值相较于红外测温值更接近于实际温度，相对误差值较

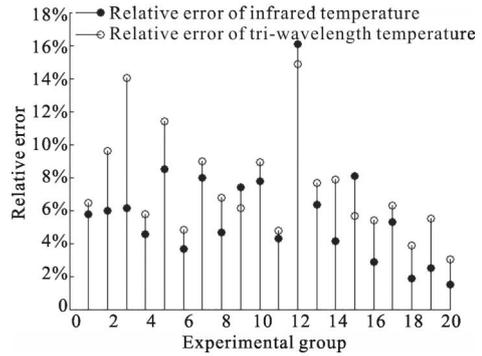


图 10 1# 样本相对误差分析图

Fig.10 Relative error analysis of 1# sample

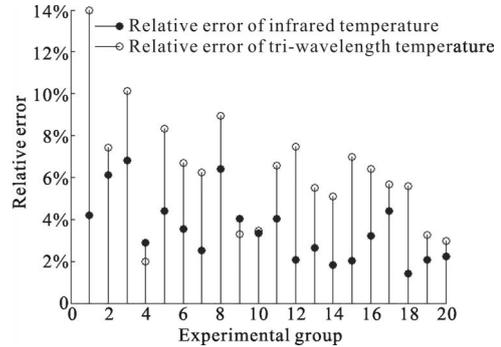


图 11 2# 样本相对误差分析图

Fig.11 Relative error analysis of 2# sample

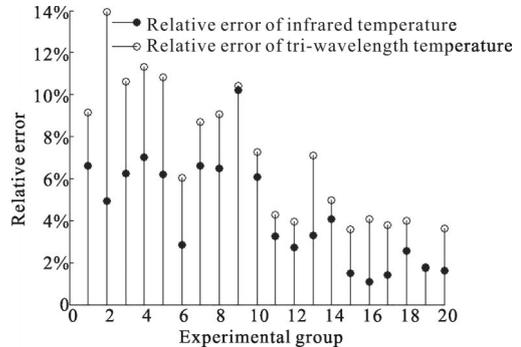


图 12 3# 样本相对误差分析图

Fig.12 Relative error analysis of 3# sample

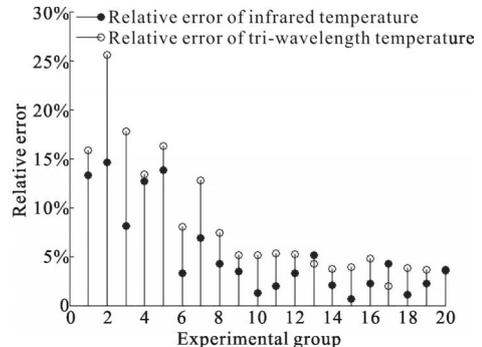


图 13 4# 样本相对误差分析图

Fig.13 Relative error analysis of 4# sample

小;证明三波段计算方法较红外直接测温更精准。

## 5 结 论

文中理论推导出无需被测物发射率的三波段测量方法,对三波段测量向量组进行优化,给出三波段方法的应用范围及最佳测量区段,并通过 4 个硫化矿样本实验,对三波段测温理论结果给予验证。结果表明:

(1) 三波段法无需获取被测物发射率即可进行温度测量;通过构建 3 个向量组求解,可在未知发射率情况下,根据红外热像温度及环境温度求出实际温度。

(2) 通过对波长进行无量纲处理,使发射率函数中的参数具有同发射率相同的无量纲特性,可更方便获取被测物表面辐射特性;同时对发射率线性函数进行优化,参数  $n$  的加入,拓展了发射率函数的应用范围。

(3) 通过理论推导三波段方法的最优波段区间,提出波段适用范围,为实际应用做出指导。

(4) 使用硫化矿样,进行实验研究。通过三波段测温法及传统红外测温的相对误差比较分析,证明该方法相较于传统红外测温精确性更高,且无需被测物发射率参数,有利于推广红外测温技术在硫化矿自燃火灾预测方面的广泛应用。

(5) 理论上,三波段测量方法对物质广泛适用。但文中仅针对硫化矿样本进行三波段测量方法验证,需进一步采取其他物质进行推广研究,验证可靠性。

### 参考文献:

- [1] Yang Zhen, Zhang Shicheng, Yang Li. Altering spectrum method in temperature measurement using infrared imager[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(6): 1432-1437. (in Chinese)  
杨桢, 张士成, 杨立. 变谱法在红外热像仪测温中的应用[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(6): 1432-1437.
- [2] Cheng Xiaofang, Fu Tairan, Fan Xueliang. The principle of primary spectrum pyrometry [J]. *Science in China Series G*, 2004, 34(6): 639-647. (in Chinese)  
程晓舫, 符泰然, 范学良. 谱色测温原理 [J]. 中国科学 G 辑, 2004, 34(6): 639-647.
- [3] Li Yunhong, Ma Rong, Zhang Heng, et al. Dual waveband colorimetric temperature accurate measurement technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44 (1): 27-34. (in Chinese)  
李云红, 马蓉, 张恒, 等. 双波段比色精确测温技术[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(1): 27-34.
- [4] Shu Rui, Zhou Yangping, Lu Chunlian. Best detection wavelength bands selection method based on multispectral radiation differenceY [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(8): 2506-2512.
- [5] Cheng Xiaofang, Fu Tairan, Wang Anquan. Tri-waveband method for temperature measurement of the object with monotonic emissivity property[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2003, 23(4): 641-646. (in Chinese)  
程晓舫, 符泰然, 王安全. 具有单调发射率表现的三波段温度测量方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2003, 23(4): 641-646.
- [6] Yang Zhen, Zhang Shicheng, Yang Li. Infrared temperature measurement technology on lambertian based on the dual temperature and dual-band method [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2013, 34 (11): 2132-2135. (in Chinese)  
杨桢, 张士成, 杨立. 基于双温双波段法的郎伯体红外测温技术[J]. 工程热物理学报, 2013, 34(11): 2132-2135.
- [7] Yang Zhen, Zhang Shicheng, Yang Li. Calculation of infrared temperature measurement on non-lambertian objects [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(8): 2093-2098. (in Chinese)  
杨桢, 张士成, 杨立. 非朗伯体红外测温计算研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(8): 2093-2098.
- [8] Li Zijun, Shi Dongping, Wu Chao, et al. Infrared thermography for prediction of spontaneous combustion of sulfide ores[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, 22: 3095-3101.