

## 基于反射温度补偿及入射温度补偿的红外测温影响分析

石东平, 吴超, 李孜军, 潘伟

(中南大学资源与安全工程学院, 湖南长沙 410083)

**摘要:** 以红外辐射理论及红外热像仪测温原理为基础, 为解决环境高温物体对红外测温的影响, 提出反射温度补偿和入射温度补偿两种方法。分析了两种温度补偿方法的理论可行性和实际操作方案并具体进行实验测温对比。对4个硫化矿样本分别应用两种补偿方法同未经补偿的红外测温进行实验测温对比研究, 分析结果显示: 经过温度补偿后, 相对误差明显小于未经补偿的红外测温, 且反射温度补偿法较入射温度补偿法更为精确, 验证了两种温度补偿方法的可用性及精确性。两种补偿方法在保证测量精度的同时拓宽了普通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:** 红外热像仪; 环境高温物体; 反射温度补偿; 入射温度补偿

**中图分类号:** TN215    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1007-2276(2015)08-2321-06

## Analysis of the influence of infrared temperature measurement based on reflected temperature compensation and incidence temperature compensation

Shi Dongping, Wu Chao, Li Zijun, Pan Wei

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

**Abstract:** Based on the basic theory of infrared radiation and principles of temperature measurement using infrared imager, two methods of temperature compensation were proposed, reflected temperature compensation and incidence temperature compensation, in order to ensure environmental temperature object has less of an effect on infrared measurement. The theoretical analysis proved its feasibility and the operation program was put forward and used in production. The compensation measurements were demonstrated in a laboratory experiment with four sulfide ore samples. The results show that the fitting of compensation measurement with true temperature is better than that of common infrared measurement. The fractional error of reflected compensation measurement significantly is less than the incidence. The theoretical analysis and experiment result indicate the feasibility of the proposed methods. The compensation measurements ensure the measurement accuracy as well as expand the scope of common thermal infrared imager application and ensure the numerical accuracy of infrared prediction in the spontaneous combustion of sulfide ores.

**Key words:** infrared thermometry; environmental temperature object; reflected temperature compensation; incidence temperature compensation

收稿日期: 2014-12-16; 修订日期: 2015-01-18

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(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, 主要从事安全科学方面的研究。Email: wuchao\_csu@126.com

## 0 引言

红外热像技术凭借非接触式测量、测温效率高、分辨率高等优点,已广泛应用于电气、石化、消防、建筑、矿山等领域。红外热像技术测量结果除受发射率、大气透射率、背景环境等因素影响,还受环境高温物体的影响。红外热像仪通过接收被测物表面热辐射通量获取红外图像,若周围环境存在高温物体,则高温物体的部分热辐射通量也会被计入被测物体红外图像中,影响测量结果。

为避免环境高温物体对测温精度的影响,国内外相关学者已对此进行了研究。美国材料与试验协会(ASTM E)针对反射温度补偿方法制定了相应的标准<sup>[1]</sup>;张健等对环境高温物体红外测温误差影响进行了分析<sup>[2]</sup>;杨楨等提出了反射温度补偿法对红外测温进行补偿计算<sup>[3]</sup>。虽然目前对环境高温物体测温补偿修正方法有一定的研究,但还有待继续深入。文中在前人工作的基础上着重分析补偿计算的测温原理及测温方法,并通过实验验证补偿计算的有效性和适用性。

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,存在高温热源,影响测温精度,阻碍了红外热像技术在硫化矿自燃预测领域的应用。常见的遮蔽高温物的方法并不适用,因此提出两种高温物体补偿计算方法,可减小误差,提高红外热像仪的测温精度<sup>[4]</sup>。

## 1 测温基本原理及高温物体影响分析

红外热像仪通过接收被测物表面辐射来确定其温度。其接收的有效辐射包括被测物自身辐射、环境反射辐射和大气辐射三部分。考虑环境存在高温物体,则红外热像仪的辐射照度为:

$$E_{\lambda} = A_0 d^{-2} [\tau_{\alpha\lambda} \varepsilon_{\lambda} L_{b\lambda}(T_0) + \tau_{\alpha\lambda} (1 - \alpha_{\alpha\lambda}) L_{\lambda}(T_u) + \varepsilon_{\alpha\lambda} L_{b\lambda}(T_a) + \tau_{\alpha\lambda} F_{h-o} (1 - \alpha_{h\lambda}) L_{b\lambda}(T_h)] \quad (1)$$

式中: $E_{\lambda}$ 为总辐射照度; $A_0$ 为热像仪最小张角目标可视面积; $d$ 为被测物同热像仪间的距离; $\tau_{\alpha\lambda}$ 为大气透射率; $\varepsilon_{\lambda}$ 为被测物发射率; $\varepsilon_{\alpha\lambda}$ 为大气辐射率; $\alpha_{\alpha\lambda}$ 为被测物表面吸收率; $\alpha_{h\lambda}$ 为邻近高温物体辐射吸收率; $L_{b\lambda}$ 为辐射亮度; $T_0$ 为被测物温度; $T_u$ 为环境温

度; $T_a$ 为大气温度; $T_h$ 为高温物体温度; $F_{h-o}$ 为环境高温物体到被测物之间的夹角。

根据参考文献[5],红外热像仪辐射测温通用基本公式可表示为:

$$f(T_0') = \tau_{\alpha} [\varepsilon f(T_0) + (1 - \alpha_{\alpha\lambda}) f(T_u) + F_{h-o} (1 - \alpha_{h\lambda}) f(T_h)] + \varepsilon_{\alpha} f(T_a) \quad (2)$$

$$f(T) = \int R L_{b\lambda}(T) d\lambda = \int R (C_1/\pi) \lambda^{-5} [\exp(C_2/\lambda T) - 1] d\lambda \quad (3)$$

式中: $T_0'$ 为热像仪指示温度; $T_0$ 为被测物实际温度; $T_u$ 为环境温度; $T_a$ 为大气温度; $T_h$ 为高温物体温度。 $R$ 为探测器光谱响应度<sup>[6]</sup>。在常见红外工作波段内, $f(T) = cT^n$ 。

则被测物实际温度为:

$$f(T_0) = (1/\varepsilon) [(1/\tau_{\alpha}) f(T_0') - (\varepsilon_{\alpha}/\tau_{\alpha}) f(T_a) - (1 - \alpha_{\alpha\lambda}) f(T_u) - F_{h-o} (1 - \alpha_{h\lambda}) f(T_h)] \quad (4)$$

$$T_0 = \{ (1/\varepsilon) [(1/\tau_{\alpha}) T_0'^n - (\varepsilon_{\alpha}/\tau_{\alpha}) T_a^n - (1 - \alpha_{\alpha\lambda}) T_u^n - F_{h-o} (1 - \alpha_{h\lambda}) T_h^n] \}^{1/n} \quad (5)$$

对公式(5)进行微分可得:

$$dT_0/T_0 = (1/n\varepsilon) T_0^n \{ -[(1/\tau_{\alpha}) T_0'^n - (\varepsilon_{\alpha}/\tau_{\alpha}) T_a^n - (1 - \alpha_{\alpha\lambda}) T_u^n - F_{h-o} (1 - \alpha_{h\lambda}) T_h^n] d\varepsilon/\varepsilon - (1 - \alpha_{h\lambda}) T_h^n dF_{h-o} + T_u d\alpha_{\alpha\lambda} + F_{h-o} T_h^n d\alpha_{h\lambda} - (1/\tau_{\alpha}) T_a^n d\varepsilon_{\alpha} + (\varepsilon_{\alpha}/\tau_{\alpha}^2) d\tau_{\alpha} - (1/\tau_{\alpha}^2) \cdot T_0^n d\tau_{\alpha} + (n/\tau_{\alpha}) T_0'^n dT_0'/T_0' - n(1 - \alpha_{\alpha\lambda}) T_u^n dT_u/T_u - (n\varepsilon_{\alpha}/\tau_{\alpha}) T_a^n dT_a/T_a - n(1 - \alpha_{h\lambda}) F_{h-o} T_h^n dT_h/T_h \} \quad (6)$$

在实际测量时,被测物常满足灰体性质,因此 $\varepsilon = \alpha_{\alpha\lambda} = \alpha_{h\lambda} = \alpha$ ,且在近距离测量时 $\tau_{\alpha} = 1$ ,不考虑大气影响,则公式可简化为:

$$T_0 = [(1/\varepsilon) [T_0'^n - (1 - \varepsilon) T_u^n - F_{h-o} (1 - \varepsilon) T_h^n]]^{1/n} \quad (7)$$

$$dT_0/T_0 = (1/n\varepsilon) T_0^n \{ -[T_0'^n - (1 - \varepsilon) T_u^n - F_{h-o} (1 - \varepsilon) T_h^n] d\varepsilon/\varepsilon - (1 - \varepsilon) T_h^n dF_{h-o} + T_u d\alpha_{\alpha\lambda} + F_{h-o} T_h^n d\alpha_{h\lambda} - T_0^n d\tau_{\alpha} + n T_0'^n dT_0'/T_0' - n(1 - \varepsilon) T_u^n dT_u/T_u - n(1 - \varepsilon) F_{h-o} T_h^n dT_h/T_h \} \quad (8)$$

由上式可知,在近距离测量不考虑大气影响且被测物接近灰体时,红外热像仪获取的被测物真实温度受环境高温物体温度、环境高温物体同被测物之间的位置、环境温度等的影响。通过相应的补偿计算即可降低测量误差,提高红外热像仪精度。

## 2 红外温度补偿方法及步骤

为减小环境高温物体对红外热像仪测温造成误

差影响,文中提出反射补偿法入射补偿法两种办法<sup>[7-8]</sup>。

### 2.1 反射补偿法

反射补偿法的具体操作步骤如下:

- (1) 将红外热像仪的辐射系数调整为 1.0。
- (2) 合理放置红外热像仪,使红外热像仪可有效观测样本温度。
- (3) 将反射镜平行放置于被测样本前方,放置位置见图 1。多次试验,反复记录反射镜表面温度,取平均值即为在此条件下样本的反射温度。
- (4) 将反射镜移去,直接获取被测样本的温度。环境温度设定值为第(3)步所得平均值。此情况下温度即为反射补偿后的样本温度。

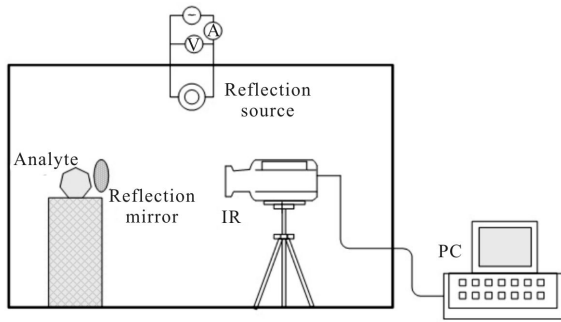


图 1 反射补偿法

Fig.1 Reflected compensation method

反射镜作用于红外热像仪的辐射照度同样符合公式(2),其变形为:

$$f(T_f') = \tau_{\alpha} [\varepsilon_1 f(T_f) + (1 - \alpha_{\alpha\lambda}) f(T_u) + F_{h-o} (1 - \alpha_{h\lambda}) f(T_h)] + \varepsilon_{\alpha\lambda} f(T_a) \quad (9)$$

$$T_f^n = \tau_{\alpha} [\varepsilon_1 T_f^n + (1 - \alpha_{\alpha\lambda}) T_u^n + F_{h-o} (1 - \alpha_{h\lambda}) T_h^n] + \varepsilon_{\alpha\lambda} T_a^n \quad (10)$$

式中: $T_f$ 为反射温度补偿下的反射镜实际温度; $T_f'$ 为其红外温度; $\tau_{\alpha}$ 为大气透射率; $\varepsilon_1$ 为反射镜发射率, $\varepsilon_{\alpha\lambda}$ 为大气辐射率; $\alpha_{\alpha\lambda}$ 为反射镜表面吸收率; $\alpha_{h\lambda}$ 为邻近高温物体辐射吸收率; $T_a$ 为大气温度; $T_h$ 为高温物体温度, $F_{h-o}$ 为环境高温物体到被测物之间的夹角。

通常情况下不考虑波段影响, $\alpha_{\alpha\lambda} = \alpha_{h\lambda} = \alpha_1 = \varepsilon_1$ , $\varepsilon_{\alpha\lambda} = 1 - \tau_{\alpha}$ ,近距离测量时, $\tau_{\alpha} = 1$ 。由于反射镜同被测物平行,可近似认为 $F_{h-o} = F_{h-o}$ ,反射镜温度可视为同环境温度相同。则公式(10)可变为:

$$T_f^n = \tau_{\alpha} [T_u^n + F_{h-o} (1 - \varepsilon_1) T_h^n] + (1 - \tau_{\alpha}) T_a^n \quad (11)$$

$$T_f^n = T_u^n + F_{h-o} (1 - \varepsilon_1) T_h^n \quad (12)$$

对于不考虑高温物体影响时:

$$T_0 = [(1/\varepsilon) [T_0^n - (1 - \varepsilon) T_u^n - F_{h-o} (1 - \varepsilon) T_h^n]]^{1/n} \quad (13)$$

$$T_0 = [(1/\varepsilon) [T_0^n - (1 - \varepsilon) T_u^n]]^{1/n} \quad (14)$$

当反射温度补偿后,可将反射温度视为环境温度,即:

$$T_0 = [(1/\varepsilon) [T_0^n - (1 - \varepsilon) T_f^n]]^{1/n} \quad (15)$$

$$T_0 = \{ (1/\varepsilon) [T_0^n - (1 - \varepsilon) T_u^n - (1 - \varepsilon) (1 - \varepsilon_1) F_{h-o} (1 - \alpha_{h\lambda}) T_h^n] \}^{1/n} \quad (16)$$

上式与公式(13)相比计算更加精简,仅增加了 $(1 - \varepsilon_1)$ 项,其中 $\varepsilon_1$ 取值决定于反射镜材料。若 $\varepsilon_1 \rightarrow 0$ ,则同公式(7)一致。

### 2.2 入射温度补偿法

入射补偿法的具体操作步骤如下:

- (1) 将红外热像仪的辐射系数调整为 1.0。
- (2) 合理放置红外热像仪,使红外热像仪可有效观测样本温度。将红外热像仪对准被测样本,并聚焦于样本,见图 2(a)。测量在此情况下的入射和反射角度。
- (3) 将红外热像仪位置移至同反射源反射线平行位置,反复测量,记录平均值。此平均值为样本的反射温度,见图 2(b)。
- (4) 若样本表面为漫反射,则要保证入射角和反射角小于  $45^\circ$ 。
- (5) 用红外热像仪直接获取被测样本的温度。环境温度设定值为第(3)步所得平均值。此情况下测得温度即为角度补偿后的样本温度。

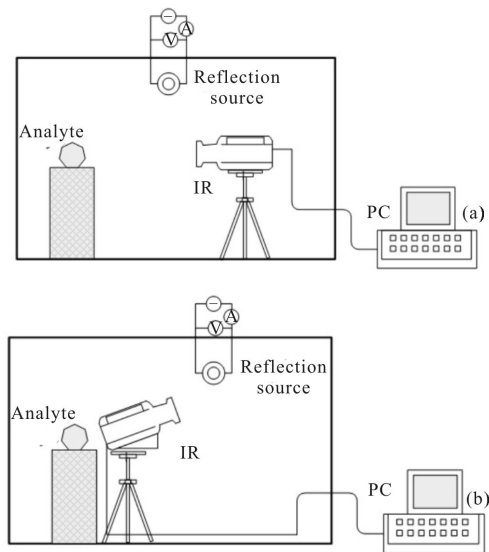


图 2 入射补偿法

Fig.2 Incidence compensation method

红外热像仪直接测量邻近高温物体同样符合公

式(2),其变形为:

$$f(T_r') = \tau_a[\varepsilon_2 f(T_r) + (1 - \alpha_{a\lambda})f(T_u)] + \varepsilon_{a\lambda} f(T_a) \quad (17)$$

$$T_r'^n = \tau_a[\varepsilon_2 T_r^n + (1 - \alpha_{a\lambda})T_u^n] + \varepsilon_{a\lambda} T_a^n \quad (18)$$

式中:  $T_r$  为入射温度补偿下邻近高温物实际温度;  $T_r'$  为其红外温度;  $\tau_a$  为大气透射率;  $\varepsilon_2$  为高温物发射率;  $\varepsilon_{a\lambda}$  为大气辐射率;  $\alpha_{a\lambda}$  为高温物吸收率;  $T_a$  为大气温度。通常情况下不考虑波段影响,  $\alpha_{a\lambda} = \varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_{a\lambda} = 1 - \tau_a$ , 近距离测量时,  $\tau_a = 1$ 。则公式(18)可变为:

$$T_r'^n = \varepsilon_2 T_r^n + (1 - \varepsilon_2) T_u^n \quad (19)$$

当入射温度补偿后, 可将  $T_r'$  温度视为环境温度, 则:

$$T_0 = \{ (1/\varepsilon) [T_0'^n - (1 - \varepsilon)(\varepsilon_2 T_h^n + (1 - \varepsilon_2) T_u^n)] - (1 - \varepsilon) \cdot F_{h-o}(1 - \alpha_{h\lambda}) T_h^n \}^{1/n} \quad (20)$$

$$T_0 = \{ (1/\varepsilon) [T_0'^n - (1 - \varepsilon)(1 - \varepsilon_2) T_u^n - (1 - \varepsilon) \cdot (\varepsilon_2 - F_{h-o}(1 - \varepsilon)) T_h^n] \}^{1/n} \quad (21)$$

上式与公式(16)相比,  $T_u$  项前增加了  $(1 - \varepsilon_2)$ ,  $T_h$  项前系数变化, 其中  $\varepsilon_2$  取值决定于高温物材料。因在实际应用中, 高温物体材料不可人为改变, 公式(21)较公式(16)误差较大。

因此在温度补偿过程中, 反射温度补偿较入射温度补偿结果更接近于实际情况。

### 3 实验验证及误差对比

#### 3.1 实验设计

实验目的: 以硫化矿作样本, 针对环境高温物体对红外测温的影响, 应用反射温度补偿和入射温度补偿法进行补偿计算。对比反射补偿法、入射补偿法、真实测温温度和未补偿温度, 验证温度补偿法的可行性和精确性, 为将温度补偿法应用于硫化矿井下环境提供理论依据。

实验仪器: SC7300 红外热像仪、CENTER 可记录测温仪、HANBA 可程式高温试验箱、反射镜等。

实验步骤:

(1) 针对上述实验方法, 为验证两种补偿方法抵御高温物体影响的可行性和测量精度, 选取 4 个硫化矿石样本进行实验, 样本编号为: a、b、c、d。在实验室条件下, 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 可程式高温试验箱对样本进行加热, 从环境温度 25 °C 梯度加热至 120 °C。在升温过程中进行多次测量, 测量内容包括可记录测温仪测量样本实际温度  $T_1$ 、未经补偿的红外热像仪常规测量温度  $T_2$  (发射率已根据实际调节)。

(3) 应用 2.1 节和 2.2 节实验步骤分别进行反射温度补偿和入射温度补偿。将两种测量方法所得的温度作为环境温度  $T_u$  代入公式 (16)、(21) 进行计算, 得到反射温度补偿法所得温度  $T_3$  和入射温度补偿法所得温度  $T_4$ 。

(4) 对测得的 4 组温度进行数值分析。

#### 3.2 实验分析

按照上述实验步骤进行实验, 图 3~图 5 分别表示样本 b 的未补偿红外温度、反射法补偿温度和入射法补偿温度测得的矿样红外图像, 图 6~图 13 为实际温度、未补偿红外温度、反射法补偿温度和入射法补偿温度随着被测样本温度增加的变化趋势及相对误差分析。图 3~图 5 中取标注点 1 (像素位置为  $X=170, Y=150$ ) 的温度进行分析, 分别为 141.8 °C、121.8 °C、128.3 °C, 此时样品 CENTER 可记录测温仪温度为 116.4 °C。分析该样本未经补偿温度相对真实温度误差为 21.8%, 反射补偿相对误差为 4.6%, 入射补偿相对误差为 10.2%。

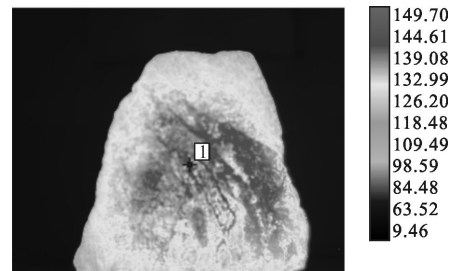


图 3 未经补偿红外图像

Fig.3 Uncompensated infrared image

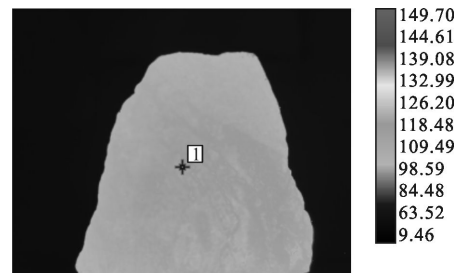


图 4 反射法补偿红外图像

Fig.4 Reflected compensation infrared image

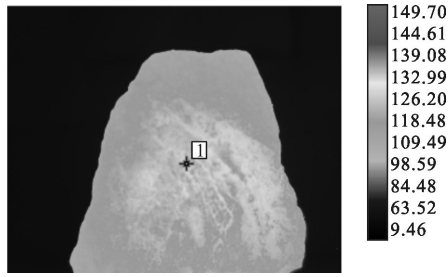


图 5 入射法补偿红外图像

Fig.5 Incidence temperature compensation infrared image

图 6~图 9 为样本测温结果(真实温度、未补偿红外温度、反射法补偿温度和入射法补偿温度)随温度变化的曲线。未补偿红外温度距真实温度差别较大。反射法补偿温度和入射法补偿温度结果相对差别不大,需进一步进行误差分析。

图 10~图 13 为未补偿红外温度、反射法补偿温度和入射法补偿温度三者之间相对误差分析对比图。a、b、c、d 4 个样本未补偿红外温度最大相对误差分别为 113.55%、137.45%、124.73%、107.08%，最小相对误差分别为 29.85%、21.82%、37.79%、22.31%；4 个样本反射法补偿温度最大相对误差分别为 36.65%、61.57%、85.12%、45.23%，最小相对误差为 4.62%、4.64%、7.12%、5.98%；4 个样本入射法补偿温度最大相对误差分别为 53.78%、72.14%、89.63%、51.08%，最小相对误差为 9.41%、7.97%、10.08%、9.47%。分析结果表明:随着温度的升高,未补偿红外温度、反射法补偿温度和入射法补偿温度同实际温度之间的相对误差都趋向于变小。两种补偿方法都有效降低了测量的相对误差,反射法温度较入射法更接近于真实温度,相对误差最小。

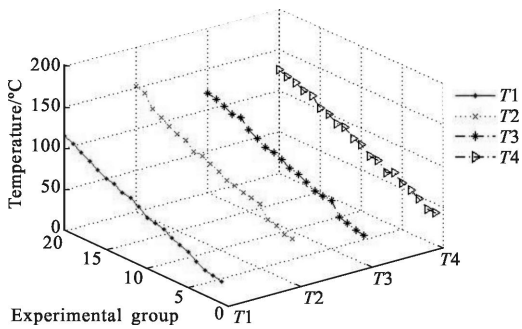


图 6 a 样本 T1、T2、T3、T4 温度对比

Fig.6 Comparison of T1,T2,T3,T4 temperature in a sample

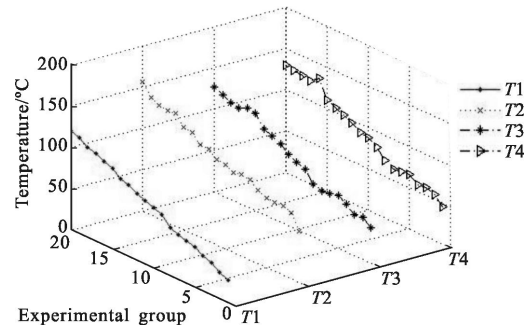


图 7 b 样本 T1、T2、T3、T4 温度对比

Fig.7 Comparison of T1,T2,T3,T4 temperature in b sample

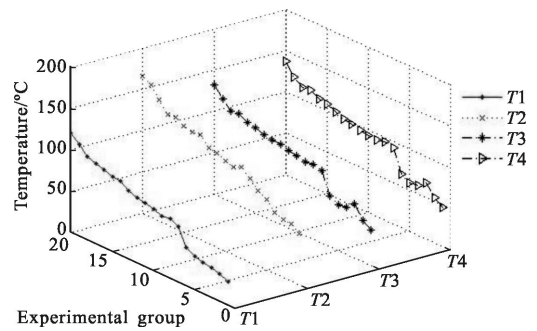


图 8 c 样本 T1、T2、T3、T4 温度对比

Fig.8 Comparison of T1,T2,T3,T4 temperature in c sample

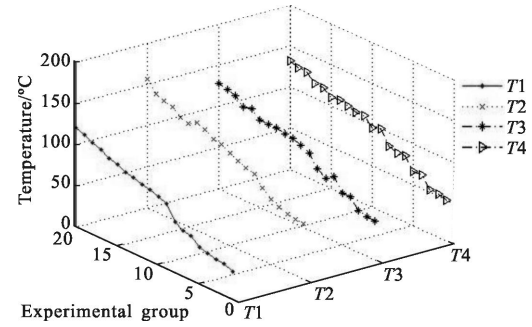


图 9 d 样本 T1、T2、T3、T4 温度对比

Fig.9 Comparison of T1,T2,T3,T4 temperature in d sample

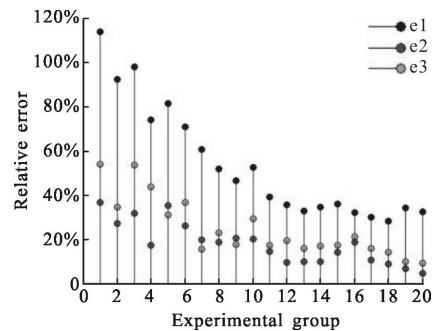


图 10 a 样本相对误差分析图

Fig.10 Relative error analysis of a sample

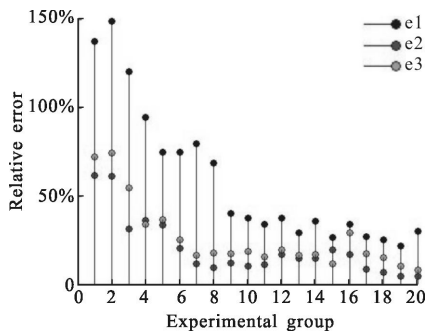


图 11 b 样本相对误差分析图

Fig.11 Relative error analysis of b sample

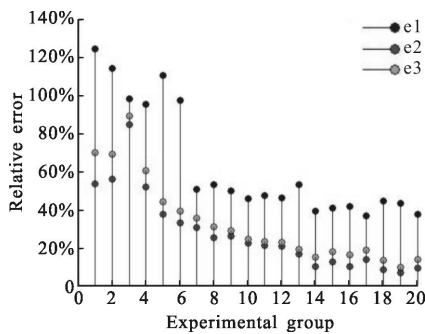


图 12 c 样本相对误差分析图

Fig.12 Relative error analysis of c sample

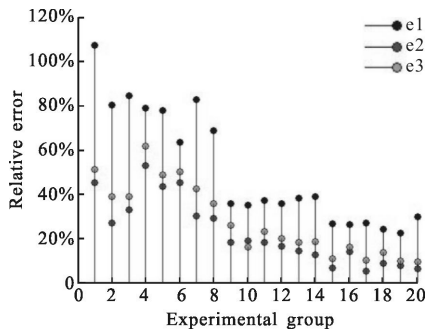


图 13 d 样本相对误差分析图

Fig.13 Relative error analysis of d sample

## 4 结论

通过上述分析,可以得出以下结论:

(1) 文中针对环境高温物体对红外测温造成影响的问题构建了两种补偿方法,并对其进行理论分析,验证了反射温度补偿和入射温度补偿的理论可行性,可在存在高温环境物体情况下降低红外测温误差。

(2) 提出了反射补偿法和入射补偿法的具体操作方法及步骤,为实际应用做出指导,为更方便地获取被测样本红外温度提供操作依据。

(3) 使用硫化矿样进行实验研究。通过反射温度补偿法测温、入射温度补偿法测温及传统红外测温的相对误差比较分析,证明补偿后误差相较于传统红外测温低,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。

(4) 通过实验对比分析,反射温度补偿法较入射温度补偿法测温更精确。但在实际操作中,反射温度补偿法较入射温度补偿法复杂。在实际应用中应根据具体情况进行方法选择。

## 参考文献:

- [1] ASTM E1862-1997. Standard practice for measuring and compensating for reflected temperature using infrared imaging radiometers [S]. 2014.
- [2] Zhang Jian, Yang Li, Liu Huikai. Effect of environmental object on infrared temperature measurement [J]. *Infrared Technology*, 2005, 27(5): 419-422. (in Chinese)  
张健, 杨立, 刘慧开. 环境高温物体对红外热像仪测温误差的影响[J]. 红外技术, 2005, 27(5): 419-422.
- [3] Yang Zhen, Yang Li. Calculation and error analysis of infrared temperature measurement using reflected temperature compensation[J]. *Optical Technique*, 2008, 34(S1): 154-159. (in Chinese)  
杨桢, 杨立. 反射温度补偿法对红外测温的补偿计算与误差分析[J]. 光学技术, 2008, 34(S1): 154-159.
- [4] 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.
- [5] Yang Zhen, Zhang Shicheng, Yang Li. Reflected temperature compensation method and its experimental verification [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18 (9): 1959-1964. (in Chinese)  
杨桢, 张士成, 杨立. 反射温度补偿法及其实验验证[J]. 光学精密工程, 2010, 18(9): 1959-1964.
- [6] Tian Changhui, Yang Baiyu, Cai Ming, et al. Effect of atmospheric background on infrared target detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 439-441. (in Chinese)  
田昌会, 杨百愚, 蔡明, 等. 大气背景对红外目标探测的影响[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(2): 439-441.
- [7] Fan Jinxiang, Yang Jianyu. Development trends of infrared imaging detecting technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3145-3152. (in Chinese)