

# 连铸坯表面发射率的测量研究

王 鹏 谢 植 胡振伟\*

东北大学信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819

**摘要** 铸坯表面发射率是影响铸坯表面温度测量的一项重要物理参数。利用辐射能比较测量发射率的方法,研制了一套高温铸坯发射率测量装置,其主要由加热系统、角度旋转系统、温度检测系统、真空控制系统以及背景辐射屏蔽系统等5部分组成。利用该装置测量了GCr15钢在不同角度、不同温度及不同氧化程度下的表面发射率。研究表明:角度增加对发射率的影响具有先增大后减小的变化规律;发射率会随着氧化程度的加深而变大,并且发射率极值点所对应的角度逐渐减小;随着温度的增加,发射率会随之增大,但是当温度超过1000℃后,其对发射率的影响较小。当温度为1000℃以上时,深度氧化的GCr15钢发射率的最大不确定度为0.0205。

**关键词** 测量; 铸坯发射率; 氧化层; 辐射测温; 不确定度

中图分类号 O432

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0412001

## Research on Measurement of the Surface Emissivity of Casting Billets

Wang Peng Xie Zhi Hu Zhenwei

College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China

**Abstract** Surface emissivity of casting billets is an important parameter that affects the temperature measurement on the billets. In this paper, an experimental apparatus is established by the method of radiation energy comparison. The apparatus consists of a heating system, an angle rotating system, a temperature detection system, a vacuum control system and a background radiation shielding system. The emissivity of GCr15 steel at different angles, temperatures and oxidations is measured by this apparatus. Research shows that emissivity increases first and then decreases with the increase of the angle. Emissivity increases with the increasing oxidation, and the angel of the maximum emissivity is gradually reduced. In addition, emissivity increases with the increasing temperature but the influence of the temperature is limited once the temperature is over 1000℃. At last, the measurement uncertainty is analyzed and the maximum emissivity uncertainty of the deep oxidized GCr 15 steel is 0.0205 when the temperature is above 1000℃.

**Key words** measurement; emissivity of casting billet; oxide film; radiation thermometry; uncertainty

**OCIS codes** 120.6780; 120.5630; 120.6780; 120.6810

## 1 引 言

铸坯表面温度是动态调节二冷配水与铸坯拉速的一项关键的反馈参数,其测量的准确与否,会对铸坯的质量产生重要的影响。目前,在测量铸坯表面温度时大多采用辐射测温法<sup>[1-2]</sup>,经常使用的测量仪器有单波长点测温度计、比色温度计及全波长辐射温度计等。但是这些仪器测得的不是物体的真实温度,分别只是亮度温度、颜色温度以及辐射温度。若要精确地得到铸坯表面的真实温度,就需要将铸坯发射率的准确值输入测温仪器或者知道发射率在特定环境下的变化规律。但是被测铸坯的发射率会随着其测量角度、表

收稿日期: 2015-09-29; 收到修改稿日期: 2015-11-09

基金项目: 国家自然科学基金(61273178)、教育部中央高校基本科研业务专项(N130304005)

作者简介: 王 鹏(1988—),男,博士研究生,主要从事金属光谱发射率及温度测量方面的研究。

E-mail: wangp816@gmail.com

导师简介: 谢 植(1957—),男,博士,教授,主要从事红外辐射测温方面的研究。E-mail: xiezhi@ise.neu.edu.cn

\*通信联系人。E-mail: huzhenwei@ise.neu.edu.cn

面温度、氧化状况、粗糙度等因素产生剧烈变化<sup>[3-5]</sup>。而目前在连铸生产过程中使用的辐射测温仪都仅仅是选择几个发射率的经验数值,这样便会给铸坯表面测温引入较大的原理性误差。所以,设计装置对铸坯表面的发射率进行准确测量,对辐射测温的准确性至关重要。

目前,人们先后提出了量热法、反射法、能量比较法等方法去测量铸坯等金属表面的光谱发射率。例如,日本的 Touchi 等<sup>[6-7]</sup>在近年来系统地研究了钢的表面极化角发射率问题,并制作了多套不同实验装置,主要研究不同角度下极化发射率的变化情况,其间也有关于氧化层和温度的影响。Wen C D<sup>[8]</sup>应用多光谱辐射测温法测量了 6 种不同的钢材在加热温度为 700K、800K 和 900K 时的发射率,并建立了最佳的发射率模型。Yajima 等<sup>[9]</sup>采用分离黑体法建立了一套高温环境中可实现同时测量全光谱发射率和光学常数的测量系统。但是至今为止,测量角度的控制以及背景辐射的屏蔽始终是准确测量发射率所亟待解决的问题。

本文基于能量比较法,设计并搭建了一套高温钢坯发射率测量装置。利用独特的角度旋转系统和背景辐射屏蔽系统,分别在不同的测量角度、不同的温度,对不同氧化情况的 GCr15 钢试样进行了发射率的实验研究,并分析了各因素对试样发射率的影响,为实际连铸生产中发射率的选择提供了一个重要的参考依据。

## 2 发射率的测量原理

利用能量比较法测量铸坯表面的光谱发射率,即在同一温度和同一波长下,用试样表面的辐射能与黑体空腔的辐射能作对比,那么被测铸坯表面的光谱发射率可以表示为

$$\varepsilon_{\lambda} = \frac{E_{\lambda,c}}{E_{\lambda,b}}, \quad (1)$$

式中,  $E_{\lambda,c}$  为试样表面的辐射能,  $E_{\lambda,b}$  为试样黑体空腔的辐射能,  $\lambda$  为测量波长,  $\lambda = 0.78 \mu\text{m}$ 。

在试样中心钻一个长径比大于 10 的圆孔作为黑体空腔,令  $T_b$  表示 CCD 测温仪测得的黑体空腔温度,即试样的真实温度;  $T_s$  表示 CCD 测温仪测得试样表面的亮度温度。根据普朗克公式,试样表面的辐射能  $E_{\lambda,c}$  和试样黑体空腔的辐射能  $E_{\lambda,b}$  分别为

$$E_{\lambda,c} = \frac{c_1}{\lambda^5 [\exp(c_2/\lambda T_s) - 1]}, \quad (2)$$

$$E_{\lambda,b} = \frac{c_1}{\lambda^5 [\exp(c_2/\lambda T_b) - 1]}, \quad (3)$$

式中,  $c_1$  是第一辐射常数,  $c_1 = 2\pi hc^2 = 3.7415 \times 10^8 (\text{W} \cdot \mu\text{m}/\text{m}^2)$ ,  $c_2$  是第二辐射常数,  $c_2 = hc/K_B = 1.43879 \times 10^4 (\mu\text{m} \cdot \text{K})$ 。温度  $T$  可以由 CCD 测温仪测得的灰度值求得:

$$G(\lambda, T) = K \cdot \frac{\varepsilon(\lambda, T)}{\exp[C_2/(\lambda T)]}, \quad (4)$$

式中  $K$  为仪表系数,实验之前已在黑体炉上标定获取,  $K = 1.1437 \times 10^9$ 。

因此,被测铸坯表面的光谱发射率可表示为

$$\varepsilon_{\lambda} = \frac{E_{\lambda,c}}{E_{\lambda,b}} = \frac{\frac{c_1}{\lambda^5 [\exp(c_2/\lambda T_s) - 1]}}{\frac{c_1}{\lambda^5 [\exp(c_2/\lambda T_b) - 1]}}. \quad (5)$$

## 3 发射率的测量实验

### 3.1 实验装置

测量装置主要由加热系统、角度旋转系统、温度检测系统、真空控制系统以及背景辐射屏蔽系统等 5 部分组成,其系统构成如图 1 所示。

加热系统选择电加热炉,热源为镍铬热阻丝,额定功率 10 kW,电压 220 V,最大加热温度能够达到 1200 °C,试样的样品室选择耐高温石英管。

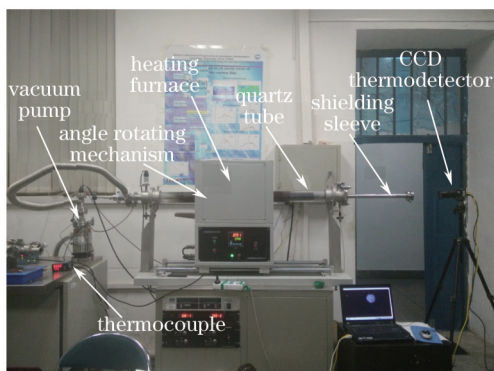


图1 发射率测量装置图

Fig.1 Emissivity measuring apparatus

真空系统由机械泵和分子泵相级联组成,在实验的过程中,样品室的气压始终能够保持在 $3.2 \times 10^{-2}$  Pa以下。温度检测系统由 CCD 测温仪和热电偶组成。CCD 测温仪为 OK-AM1460,加单色滤光片后,其测量波长为 $(0.78 \pm 0.01) \mu\text{m}$ ,测温范围为 $800 \text{ }^\circ\text{C} \sim 1300 \text{ }^\circ\text{C}$ 。经辽宁省计量院校准后,测温相对误差小于 0.50%,满足实验的测量要求。

角度旋转系统使用的是一个齿轮齿条的传动机构,由于试样的测量温度在 $850 \text{ }^\circ\text{C} \sim 110 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间,因此齿轮齿条均采用高熔点的金属钨制成,实物图如图 2 所示。齿条长度为 55 mm,齿轮齿条结构可以实现齿条移动 1 mm,角度变化 $5.2^\circ$ 。齿条通过长度为 100 cm 的拉杆连接后可以与炉外的移动端进行直行程移动,最大测量角度达到 $87^\circ$ 。

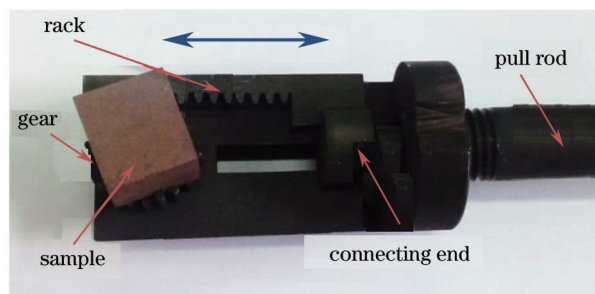


图2 角度旋转机构实物图

Fig.2 Physical graph of angle rotating mechanism

另外,在齿轮的上表面加工了一个尺寸为 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的正方形槽,用于放置待测试样。测量光路图如图 3 所示。

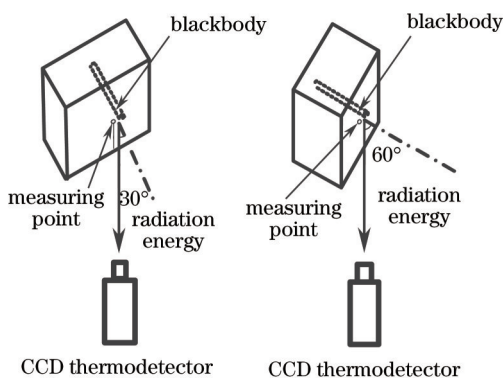


图3 不同测量角度的光路图

Fig.3 Optical path of different measuring angles

由于试样处于石英管的加热区,周围的背景热辐射会对测量结果产生严重干扰,因此需要用屏蔽装置对其进行屏蔽。屏蔽套筒使用 316 型耐高温不锈钢制成,为了能够在测量时完全屏蔽加热区的热辐射,外径

制成 $\Phi 55$  mm,长度制成 394.6 mm。移动轴使用 304 型不锈钢,外径 $\Phi 30$  mm,长度为 525 mm,如图 4 所示。由于实验时试样温度在 850 °C 以上,为了避免屏蔽套筒温度过高对发射率测量造成影响,试样转动的过程中屏蔽套筒被拉到加热区外。仅当测量角度选好且温度稳定在测量点时,将套筒推至试样周围屏蔽周围背景辐射,记录下此刻的数据后马上再将套筒拉回非加热区。另外,屏蔽套筒内部涂有高吸收率(大于 0.95)的涂料硅铝酸盐,因此其内部反射造成的影响亦可忽略。



图 4 屏蔽系统机械实物图

Fig.4 Physical graph of the shield system

实验试样所采用的铸坯为 GCr15 钢。试样的形状均是 20 mm×20 mm×15 mm 的立方体。为了满足黑体空腔条件,试样中心的空腔直径为 1 mm,深度为 12 mm。

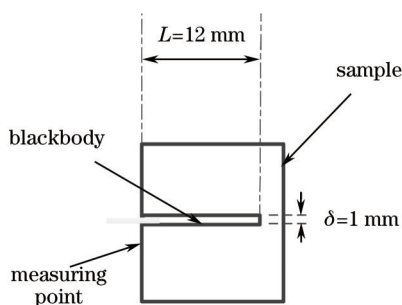


图 5 试样示意图

Fig.5 Schematic of the sample

另外,为了更好地模拟工业现场的铸坯情况,试样在实验之前先进行氧化处理,分别得到了 4 种不同的氧化情况 GCr15 钢试样。

### 3.2 实验过程

实验之前,首先需要用真空泵对石英管抽真空,避免高温试样被空气氧化,排除实验时试样的氧化对发射率测量的影响。当石英管内压强小于 $3.2 \times 10^{-2}$  Pa 时,开启加热炉温控系统对试样进行加热。当热电偶测得的温度稳定在实验温度点时,将屏蔽套筒从观察窗的一端快速移至试样处,从而屏蔽由加热区产生的背景热辐射对 CCD 测温仪所产生的干扰。由于 CCD 测温仪可以连续采集试样表面的热图像<sup>[10]</sup>,这样就可以得到屏蔽套筒移至试样周围瞬间时,试样表的面亮度温度,避免了温度场变化对测量结果造成的影响。最后,基于发射率的测量原理,分别计算得到了 GCr15 钢在不同情况下的表面发射率。

## 4 实验结果及分析

### 4.1 测量角度对 GCr15 钢发射率的影响

在 1050 °C 时,针对 GCr15 钢试样进行了不同角度下发射率的测量实验,每隔 3.75° 测一次。为了减小测量的随机误差,每种相同的实验重复 6 次,得到的 6 次发射率测量结果与角度的关系如图 6 所示。

根据上述的曲线可以明显地发现:在测量角度为 50° 以下时,每次 GCr15 钢表面发射率测量值的波动范围均小于 0.02。而在 50°~71.25° 之间,发射率随着测量角度的增大而变大,且在 71.25° 时达到最大值,该极值的发射率为 0.615(6 次测量平均值),比 50° 以下的发射率大了 0.17。在 71.25° 以后,发射率的值迅速减小,接近 90° 时发射率值达到最小。此实验结果也与本课题组<sup>[11]</sup>由经典电磁波理论所推导出来的仿真结果相吻合。

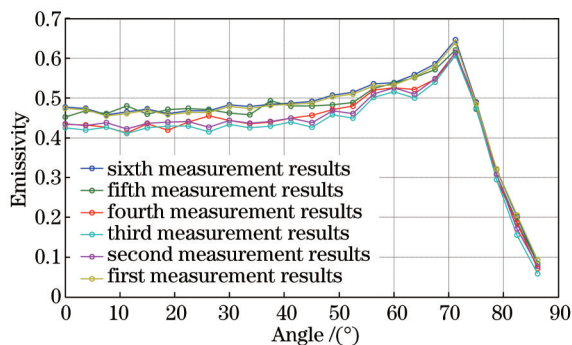


图 6 1050 °C时 GCr15 钢表面发射率与测量角度的关系

Fig.6 Relationship between emissivity and angel of GCr15 steel at 1050 °C

#### 4.2 不同氧化程度对 GCr15 钢发射率的影响

图 7 为 4 块不同氧化程度的 GCr15 钢试样放大 400 倍的金相显微镜图片。由图中的比例尺可以得到其氧化层厚度分别为 0, 5.3, 15.6, 26.7  $\mu\text{m}$ 。

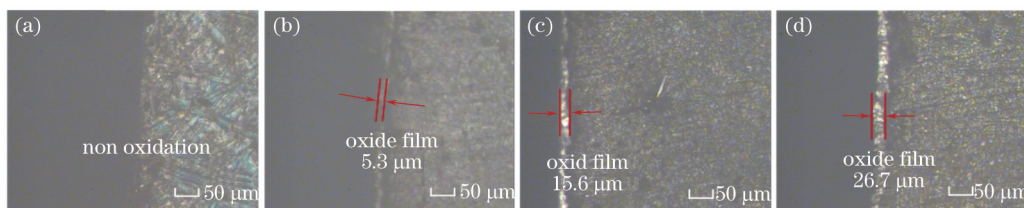


图 7 不同氧化层厚度的 GCr15 钢金相显微镜图片。(a) 试样 I; (b) 试样 II; (c) 试样 III; (d) 试样 IV

Fig.7 Metallurgical microscope pictures of the GCr15 steel with different oxide films.

(a) Sample I; (b) sample II; (c) sample III; (d) sample IV

图 8 表示的是该 4 块试样在 1050 °C 时的发射率测量结果。从图 7 中可以看到,随着氧化层厚度的增加,发射率极大值所对应的角度明显变小,其角度在 63.75° 左右,并且发射率先增大再迅速减小趋势逐渐减弱。

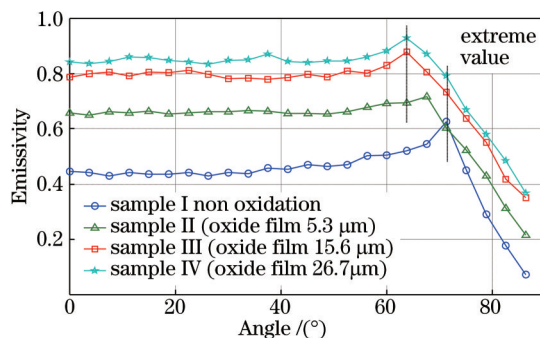


图 8 0°~90°范围内不同氧化程度对 GCr15 钢表面发射率的影响

Fig.8 Effect of different oxidation degrees on the emissivity of GCr15 steel with angels 0°~90°

另外,一旦试样被氧化,发射率迅速变大,这是因为试样的辐射能会在试样表面和氧化层之间会有多次反射,从而增强了辐射能的干扰效应。另外,在氧化初期,试样的发射率也会随着氧化层厚度增加而变大(试样 II 和试样 III),这是由于随着氧化的深入,氧化层表面的粗糙度会随之变大,辐射能在表面的凹槽内反射的次数也就会越多,因此发射率会随之增大。当试样深度氧化时(试样 IV),氧化层厚度对发射率的影响明显减弱。此时,GCr15 钢发射率的极大值为 0.902,所对应的角度为 63.75°。

连铸坯生产线上,辐射测温仪安装在不同位置处测得的铸坯温度是不同的,而铸坯在到达二冷区末端的时间一般大于 8 min,并且经历喷淋水之后,已经达到“深度氧化”的程度。因此,发射率会在测量角度为 63.75° 附近达到极值,之后便迅速减小。在这一位置,辐射测温仪表对 GCr15 铸坯表面的温度测量是较为准确的,且测得的温度最接近真实温度,而此后随着发射率的急剧变化,表面温度测量的准确性将会大大降低。

### 4.3 不同温度对 GCr15 钢发射率的影响

图 9 显示的是氧化层厚度为 26.7 μm 的试样在 63.75° 处的发射率随温度的变化规律。图中曲线是 6 次相同实验测量结果的平均值。

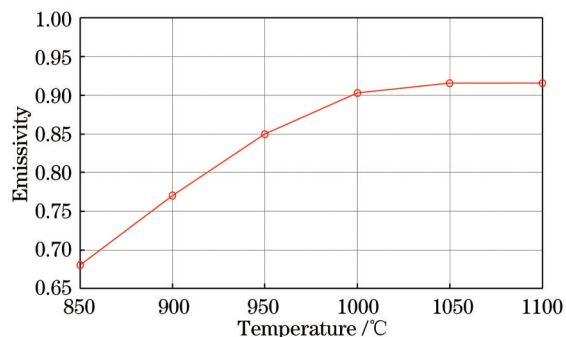


图 9 不同温度对 GCr15 钢表面发射率的影响

Fig.9 Effect of different temperatures on the emissivity of GCr15 steel surface

从图 9 中可以看出,在 850 °C~1000 °C 之间,试样的表面发射率几乎呈直线方式增加,发射率变化的范围为 0.680~0.902。这是由于金属的电阻率随温度的增加而增加,由 Hagen-Rubens 关系<sup>[12]</sup>,进而可以得到法向光谱发射率随温度的增加而变大。而当温度在 1000 °C~1100 °C 范围内时,发射率增加的趋势逐渐减慢,其对温度测量的影响也随之减小。由于 GCr15 轴承钢在二冷区末端测温点附近的温度在 1040 °C~1070 °C 之间变化,因此,在实际现场进行铸坯测温时,温度变化对发射率的影响可以忽略不计。

## 5 不确定度分析

发射率的合成不确定度可由 A 类和 B 类分量的方和根合成,即

$$u(\varepsilon_\lambda) = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}, \quad (6)$$

式中 A 类不确定度分量  $u_A$  可以表示为

$$u_A = t_p \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\varepsilon_{\lambda i} - \bar{\varepsilon}_\lambda)^2}{n(n-1)}}, \quad (7)$$

式中  $n$  为测量次数,  $\varepsilon_{\lambda i}$  为发射率的测量数据,  $\bar{\varepsilon}_\lambda$  为  $\varepsilon_\lambda$  的平均值,  $t_p$  为置信系数。

以 1050 °C 时氧化层厚度为 26.7 μm 的试样为例。测量次数  $n=6$ , 置信概率  $p=0.683$ , 查表得置信系数  $t_p = 1.09$ 。由(7)式计算后得到  $u_A = 0.0164$ 。

当仅考虑仪器误差的情况下,且置信概率大于等于 0.68 时,发射率 B 类分量的表征值为<sup>[13]</sup>

$$u_B = \Delta_m / \sqrt{3}, \quad (8)$$

式中  $\Delta_m$  为仪器最大允许误差,在进行发射率测量实验时,仪器误差主要的来源为 CCD 测温仪的温度误差和黑体空腔与真实温度的误差,即

$$\Delta_m = \varepsilon_\lambda - \varepsilon'_\lambda = \frac{\frac{c_1}{\lambda^5 [\exp(c_2/\lambda T_s) - 1]}}{\frac{c_1}{\lambda^5 [\exp(c_2/\lambda T_b) - 1]}} - \frac{\frac{c_1}{\lambda^5 \{ \exp[c_2/\lambda(T_s \pm \Delta T_s)] - 1 \}}}{\frac{c_1}{\lambda^5 \{ \exp[c_2/\lambda(T_b \pm \Delta T_b + \Delta T'_b)] - 1 \}}}. \quad (9)$$

经辽宁省计量院校准后,CCD 测温仪测温相对误差小于 0.50%,黑体空腔有效发射率为 0.9980。当黑体温度  $T_b = 1050.0$  °C 时,试样表面亮度温度  $T_s = 1039.2$  °C,因此,CCD 测温仪引起的温度误差  $\Delta T_s$  和  $\Delta T_b$  分别为 5.20°C 和 5.25°C,黑体空腔测得的温度与试样真实温度的误差  $\Delta T'_b$  为 -2.1°C。由(9)式计算得到  $\Delta_m$  最大值为 0.0201,再利用(8)式得到  $u_B = 0.0116$ 。

最终,由(6)式计算得到此种情况发射率的不确定度  $u(\varepsilon_\lambda) = 0.0202$ 。同理,分别计算了此试样其他温度

点的发射率标准不确定度,结果如图 10 所示。

从图 10 可以得出,随着温度的增加,发射率的不确定度逐渐减小并趋于稳定。因此,该测量装置在高温段测量发射率会比低温段时更加准确。

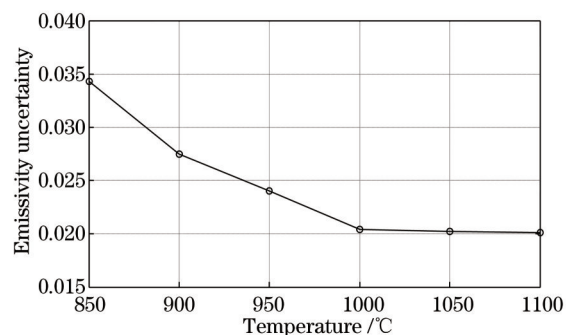


图 10 不同温度下的发射率不确定度

Fig.10 Emissivity uncertainty at different temperatures

## 6 结 论

研究了 GCr15 钢的表面发射率随角度、氧化层厚度、温度的变化关系。通过对比这几组实验结果可以发现:1) GCr15 钢表面发射率随着测量角度的增加具有先增大后减小的变化趋势;2) 发射率会随着氧化程度的加深而变大,并且发射率极值点所对应的角度逐渐减小。在该角度下进行温度测量的结果较为接近真实温度;3) 随着温度的增加,发射率会随之增大,但是当温度超过 1000 °C 后,其对发射率的影响较小。因此在实际连铸测温时温度对发射率的影响可以忽略;4) 此发射率测量装置的在高温段的最大不确定度小于 0.0205,测量结果真实可信。

## 参 考 文 献

- 1 Bai Haicheng, Zhang Yuzhong, Hu Zhenwei, *et al.*. Research on the measuring instrument for surface temperature field of casting billet [J]. Chinese J Scientific Instrument, 2012, 33(6): 1392-1399.  
白海城, 张育中, 胡振伟, 等. 铸坯表面温度场测量仪的研究[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(6): 1392-1399.
- 2 Campo L D, Perez-Saez R B, Esquisabel X, *et al.*. New experimental device for infrared spectral directional emissivity measurements in a controlled environment[J]. Review of Scientific Instruments, 2006, 77(11): 113111.
- 3 Campo L D, Perez-Saez R B, Tello M J, *et al.*. Armco iron normal spectral emissivity measurements[J]. International Journal of Thermophysics, 2006, 27(4): 1160-1172.
- 4 Liu Yufang, Hu Zhuangli, Shi Deheng. An experimental apparatus for emissivity measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(3): 772-776.  
刘玉芳, 胡壮丽, 施德恒. 一种测量发射率的实验装置[J]. 光学学报, 2010, 30(3): 772-776.
- 5 Liu Huasong, Ji Yiqin, Zhang Feng, *et al.*. Dispersive properties of optical constants of some metallic oxide thin films in the mid-infrared regions[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0831003.  
刘华松, 季一勤, 张 锋, 等. 金属氧化物薄膜在中波红外光谱区内光学常数色散特性[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0831003.
- 6 Tohru I, Tohru F, Shigenobu W. Emissivity modeling of metals during the growth of oxide film and comparison of the model with experimental results[J]. Applied Optics, 2003, 42(13): 2317-2326.
- 7 Tohru F, Tohru I. Experimental apparatus for radiometric emissivity measurements of metals[J]. Review of Scientific Instruments, 2000, 71(7): 2843-2847.
- 8 Wen C D. Investigation of steel emissivity behaviors examination of multispectral radiation thermometry (MRT) emissivity models[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53(9-10): 2035-2043.
- 9 Yajima T, Yamaguchi Y. Geological mapping of the Francistown area in northeastern Botswana by surface temperature and spectral emissivity information derived from advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) thermal infrared data[J]. Ore Geology Reviews, 2013, 53(8): 134-144.
- 10 Zhang Lijuan, Yang Jinhua, Jiang Yutong, *et al.*. Research on target image matching algorithm for binocular CCD ranging[J]. Laser &

- Optoelectronics Progress, 2014, 51(9): 091002.  
张丽娟, 杨进华, 姜雨彤, 等. 基于双目 CCD 测距的目标图像匹配算法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(9): 091002.
- 11 Chen Liang, Xie Zhi, Hu Zhenwei, *et al.*. Influence of oxide skin thickness on photoemissivity of polarizing angle from surface of continuous casting billets[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2009, 30(9): 2029–2031.  
陈 亮, 谢 植, 胡振伟, 等. 氧化层厚度对铸坯表面偏振角发射率的影响[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2009, 30(9): 2029–2031.
- 12 Ke Weina, Zhu Dingqiang, Cai Guobiao. Simulation and analysis of spectral emissivity of metals[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2010, 31(11): 2139–2045.  
柯维娜, 朱定强, 蔡国飙. 金属光谱发射率的仿真与分析[J]. 航空学报, 2010, 31(11): 2139–2045.
- 13 Peng Shijun, Miao Erlong. Sub-micron precision measurement of radius of curvature and uncertainties analysis[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0512001.  
彭石军, 苗二龙. 亚微米高精度曲率半径测量及其不确定度分析[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0512001.

栏目编辑: 何卓铭