

3 种碳钢的光谱发射率对比研究

张飞麟, 陈少康, 于坤, 刘玉芳

(河南师范大学 物理与材料科学学院, 河南 新乡 453007)

摘要:利用搭建的能量对比法光谱发射率测量装置,对 3 种典型的低碳钢 310、中碳钢 45# 和高碳钢 T10 的光谱发射率进行了测量.实验结果表明:合金成分会对钢的发射率产生不同程度的影响,并且这种影响在氧化前后是不同的.对于未氧化的钢,碳质量分数越高,光谱发射率会越大.3 种钢的发射率相差不超过 0.05.氧化后 3 种钢的光谱发射率随波长的变化趋势相同,但是光谱发射率值比氧化前大.因为钢成分中的 Al、Cr、Ni 等成分会抑制钢氧化膜的生长,使得 45# 钢的光谱发射率值比 310 钢和 T10 钢大.氧化后 310 和 T10 钢的表面由原来的银白色变成了淡蓝色,45# 钢变成了紫黄色,钢表面颜色也会对光谱发射率产生影响.

关键词:碳钢;光谱发射率;合金成分;氧化

中图分类号:TB96

文献标志码:A

钢是目前应用最广泛的金属之一.由于其优良的特性,如高强度、高硬度、良好的延展性、导热性等,钢材在建筑桥梁,工程机械,汽车轮船,航空航天,电子电气等领域有着广泛的应用.

在钢材的生产和加工过程中,温度的精确测量和控制直接决定钢材的品质和特性.目前测量钢水的温度主要用热电偶和红外测温仪.热电偶虽然测量值比较准确,但是属于易耗品,成本较高,并且不能起到长时间监测的作用^[1-2].红外测温仪通过测量物体表面的辐射能得到物体的表面温度,具有非接触、抗干扰能力强、测量上限高,可实时测量等优点,是替代热电偶测温的有力工具^[3].目前,红外测温仪的测量精度主要受制于光谱发射率的影响,由于测量对象的光谱发射率往往随温度而变化,因此,光谱发射率数据的准确性是决定测温精度的关键.在钢的生产和加工过程中,钢的光谱发射率是随着加工温度、表面形貌以及掺杂成分等不断变化的.钢光谱发射率的多变性为辐射测温的精确测量带来困难.因此,对钢的光谱发射率进行系统研究将有助于提高辐射测温技术在钢铁冶炼和加工行业的测量精度.

近年来,不少中外研究人员测量了多种钢的光谱发射率,如文献[4-7]研究了不同种类的钢在不同温度和波长下的光谱发射率特性.然而,由于钢的型号众多,钢材中除主要化学成分铁以外,还含有少量的碳、硅、锰、磷等元素.这些元素不仅会影响钢的性能,而且会影响其光谱发射率特性.此外,不同的冶炼方法、退火温度等也会导致钢的光谱发射率出现一些差异.因此,不同类型的钢的光谱发射率会存在一些差异.这给钢的光谱发射率实际应用带来困难.

按照含碳质量分数划分,钢可以分为低碳钢、中碳钢和高碳钢^[8].为了研究这 3 种类型的钢的光谱发射率,本文选择低碳钢 310、中碳钢 45#、高碳钢 T10 作为研究对象,利用搭建的光谱发射率测量装置对 3 种钢的光谱发射率进行对比研究.

1 实验装置和原理

搭建的光谱发射率测量装置如图 1 所示.测量装置主要由 4 个部分组成:样品加热炉、黑体加热炉、光学反射系统和傅里叶红外光谱仪.样品加热炉和黑体加热炉均采用电阻丝加热和 PID 控温.样品炉和黑体炉的

收稿日期:2017-03-23;修回日期:2017-05-01.

基金项目:国家自然科学基金(61675065;61475043;61627818)

作者简介:张飞麟(1990-),男,河南许昌人,河南师范大学硕士研究生,研究方向为光谱发射率测量技术.

通信作者:于坤,E-mail:yukun@htu.edu.cn.

外壳均安装有水冷系统. 样品腔可以抽真空或充入惰性气体, 样品的温度利用两根 K 型热电偶测量. 光学反射系统由两个镀金平面镜和两个有效焦距为 250 mm 的 90° 的离轴抛物面镜组成, 其中平面镜 M_2 安装在一个电动平移台上, 可以在位置 1 和位置 2 之间来回移动. 当 M_2 处在位置 1 时, 黑体发出的辐射被直接反射进傅里叶红外光谱仪, 当 M_2 处在位置 2 时, 黑体发出的辐射被阻挡, 此时样品发出的辐射经过 M_1 的反射进入傅里叶红外光谱仪. 傅里叶红外光谱仪利用 KBr 分束器和 DTGLaS 探测器能够测量 $1.3 \sim 27 \mu\text{m}$ 范围内的红外辐射强度. 测量装置的测量不确定度优于 5% [9].

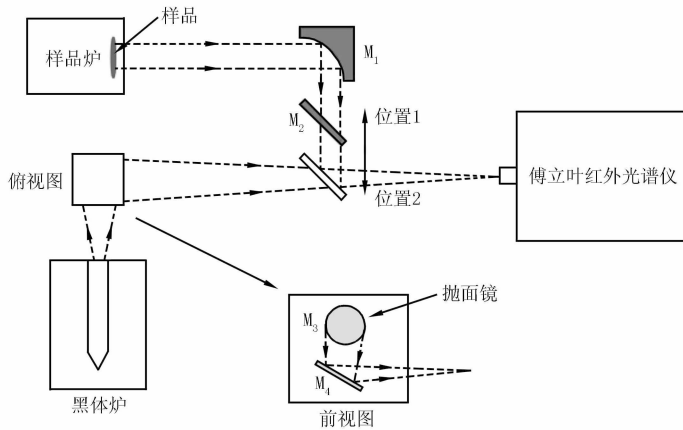


图1 基于傅里叶红外光谱仪的发射率测量装置

测量装置基于能量对比法, 在同样的条件下, 通过测量样品的辐射强度和黑体的辐射强度之比, 计算出光谱发射率

$$\epsilon(\lambda, T) = \frac{L_S(\lambda, T)}{L_{BB}(\lambda, T)}, \quad (1)$$

式中, $L_S(\lambda, T)$ 和 $L_{BB}(\lambda, T)$ 分别为在相同温度和波长下样品的辐射强度和黑体的辐射强度. 考虑到实际测量时存在杂散辐射, 光谱仪实际测得的信号强度

$$S_{\text{meas}} = R(\lambda)[L_{\text{targ}}(\lambda, T) + L_0(\lambda)], \quad (2)$$

式中, $R(\lambda)$ 为光谱仪的响应系数, $L_{\text{targ}}(\lambda, T)$ 为所测目标的实际辐射强度, $L_0(\lambda)$ 是所有外来杂散辐射的总和 [10]. 假定实验装置温度是恒定的, $R(\lambda)$ 和 $L_0(\lambda)$ 可以看作与温度无关的常数, 通过标定可以得到其数值 [11]. 因此, 公式(1)可以写为

$$\epsilon(\lambda, T) = \frac{S_{S, \text{meas}}(\lambda, T) - R(\lambda)L_0(\lambda)}{S_{BB, \text{meas}}(\lambda, T) - R(\lambda)L_0(\lambda)}, \quad (3)$$

式中, $S_{S, \text{meas}}(\lambda, T)$ 和 $S_{BB, \text{meas}}(\lambda, T)$ 分别为光谱仪实际测量的样品和黑体的信号强度.

2 实验过程

待测对象为 3 种典型的钢材: 低碳钢 310, 中碳钢 45# 和高碳钢 T10. 将待测样品加工成 6 个直径为 13 mm、厚度为 1 mm 的圆片, 然后用砂纸将样品表面打磨至光滑, 并用丙酮和无水酒精冲洗去除表面的油污、灰尘等, 之后, 将待测样品放在真空马弗炉内退火 3 h, 以消除表面应力对其光谱发射率的影响. 钢的成分用 X 射线荧光光谱仪 (ZSX Primus II) 检测 (不包括非金属), 结果见表 1. 样品分成 2 组, 每组包含 3 种型号的钢.

为了防止样品氧化, 实验开始前, 样品腔提前通入氩气, 将第 1 组的 3 个样品依次被加热到 473 K、573 K、673 K、773 K、873 K、973 K. 在黑体达到同样的温度时, 用傅里叶红外光谱仪分别测量对应的辐射光谱, 计算得到光谱发射率值. 第 2 组样品也在氩气环境下加热到同一温度点, 在达到热平衡后, 样品腔被均匀通入空气并维持 30 min, 然后测量光谱发射率值.

表1 3种钢的成分

型号	质量分数/%										
	C	Al	Si	P	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Nb	Mo
310	0~0.08	0.247 5	0.473 8	0.044 1	17.890 1	0.857 3	68.092	9.788 7	0.295 6	0.034 4	2.089 1
45#	0.42~0.50	0.022 5	0.110 5	0.014 8	—	0.398 2	99.429 3	—	—	—	—
T10	0.95~1.04	0.143 9	0.738 5	0.024 3	23.647 7	1.162 4	56.933 9	16.437 3	0.208 8	0.044 9	—

3 结果分析

3.1 钢氧化前的光谱发射率

从图2中可以看出,在同一温度下3种钢的光谱发射率值相差很小,分布规律也非常相似.由于水蒸气和二氧化碳对红外辐射的吸收,在一些波长位置,如 $4.3\ \mu\text{m}$ 位置出现了吸收峰.在473 K、573 K、673 K温度点,由于近红外波段红外辐射非常微弱,探测信号信噪比较低,因此光谱发射率出现了较大波动.整体来看,钢的发射率随着波长的增大而减小,随着温度升高而增大.这与其他研究人员关于钢材发射率的测量所得的结果是一致的^[12-13].在研究的几个温度点,光谱发射率值相差很小.

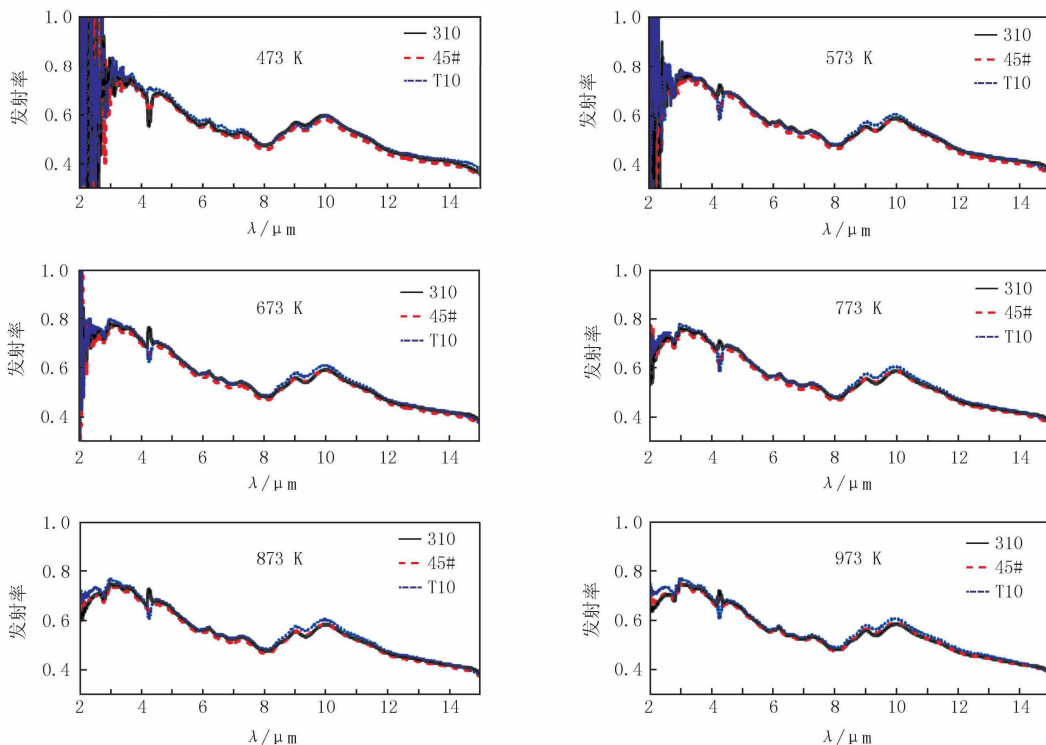


图2 3种钢氧化前的光谱发射率随波长的分布

从图2可以看出,T10钢的光谱发射率略微大于45#钢和301钢,45#钢与310钢的光谱发射率相差很小,光谱发射率值相差不大于0.05. T10钢属于高碳钢,碳质量分数高达0.95%,45#钢属于中碳钢,碳质量分数在0.42%~0.45%之间,310钢碳质量分数小于0.08%.这些碳在钢里面以单质和化合物两种状态存在^[14],碳在钢里面的单质形态就是石墨.石墨的发射率要远大于铁的发射率.而一些碳化物是具有复杂结构的间隙化合物,如 Fe_3C 是亚稳态,性质很不稳定.这些碳化物和单质碳的存在将会增大钢的发射率.此外,这3种钢均含有Al、Cr、Ni等金属成分.这些元素以固溶体或碳化物的形态存在,也会影响钢的发射率^[15].虽然45#钢的碳质量分数要高于310钢,但结果显示,这两种钢的发射率差别很小,其光谱发射率的差异不大于0.01.从表1可以看出,45#钢的铁质量分数达到了99.43%,远远大于310钢.45#钢合金元素较少,而310中含有多种合金化合物,如AlN、FeCr、 Cr_3C_2 、 Cr_7C_3 、CrN等.合金化合物的发射率往往大于金属的

光谱发射率. 这些合金化合物的存在会增大钢的发射率.

3.2 钢氧化后的发射率

从图 3 中可以看出在 473 K、573 K、673 K、773 K、873 K 时, 45# 钢的光谱发射率都明显大于另外两种钢的发射率, 而 310 和 T10 钢的发射率分布几乎一致. 在 973 K 时, 3 种钢的光谱发射率分布在 $3\sim 10\ \mu\text{m}$ 差别很小, 其差值不大于 0.01, 只有在 $2\sim 3\ \mu\text{m}$ 时光谱发射率相差明显. 从图 3 中可以看出 45# 钢的光谱发射率最大, T10 钢次之, 310 钢最小. 由此可见, 温度较高时氧化对钢发射率性质的影响显著. 在实际的氧化过程中, 由于成分不同其氧化过程也是不同的^[16]. 从表 1 可以看出, 310 和 T10 钢都含有相当的 Al、Cr、Ni 等金属元素. 这些金属会在氧化过程中生成连续的, 致密的, 牢固附着于基底上的氧化薄膜, 从而阻碍钢氧化的进一步发生, 而 45# 钢中几乎不含这些金属元素, 因此从理论上讲, 45# 钢的氧化程度要大于 310 和 T10 钢. 实验也表明 45# 钢的发射率要大于另两种钢. 另外钢在高温加热过程中会出现脱碳现象^[17], 即钢中的碳与空气中的氢或氧发生作用生成甲烷或一氧化碳. 这就使得高碳钢 T10 表面的单质碳溢出, 因此 T10 钢也并没有表现出如氧化前一样的高发射率. 在 973 K 时, 由于氧化进行较为充分, 3 种钢的表面氧化物成分及厚度可能非常接近, 因此它们的发射率分布接近一致. 实验结束之后, 钢表面的颜色也发生了变化. 310 和 T10 钢由原来的银白色变为淡蓝色, 45# 钢变为紫黄色. 可能这也是 310 和 T10 钢发射率分布一致, 而 45# 钢发射率要明显较大的原因.

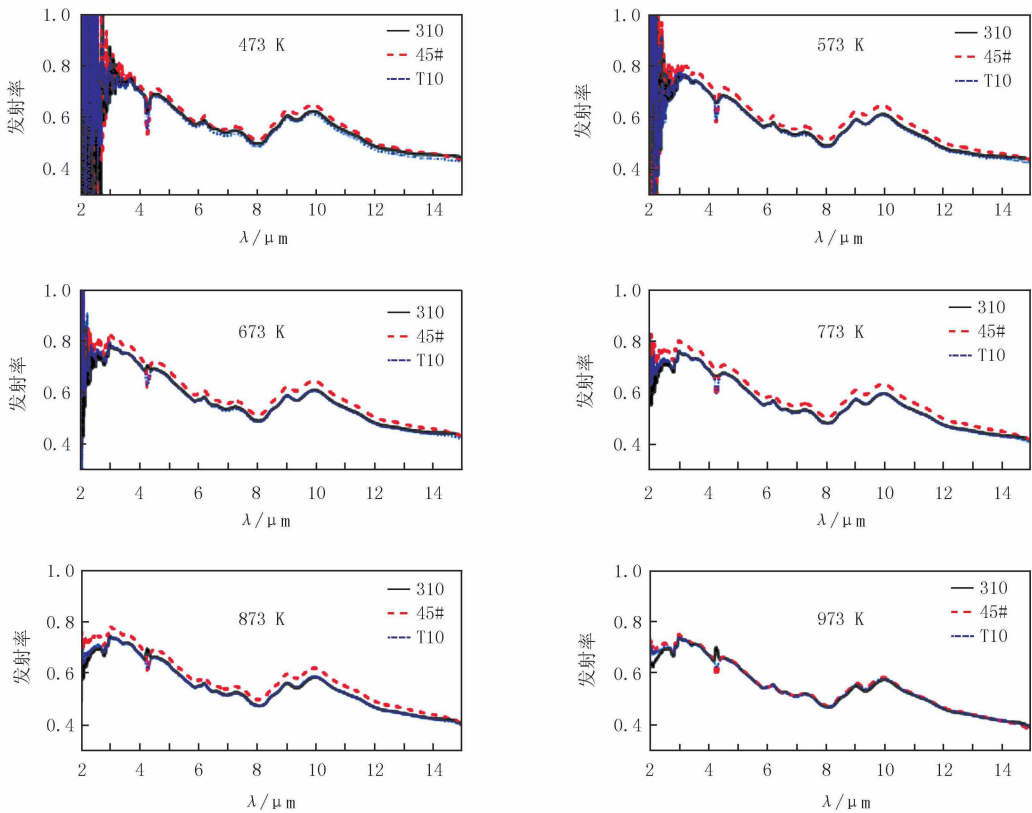


图3 3种钢氧化后的发射率随波长的分布

3 种钢的发射率在 573 K 和 773 K 时氧化前后的对比如图 4 所示, 可以看出氧化之后 3 种钢的发射率随波长的分布趋势较氧化前没有变化, 但 3 种钢的发射率在长波范围均大于氧化前的发射率值. 对比 3 种钢的发射率在氧化前后的变化发现, 45# 钢氧化前后发射率增大的更加明显, 而 310 和 T10 钢氧化前后变化比较小, 并且在短波范围氧化后发射率反而比氧化前要小.

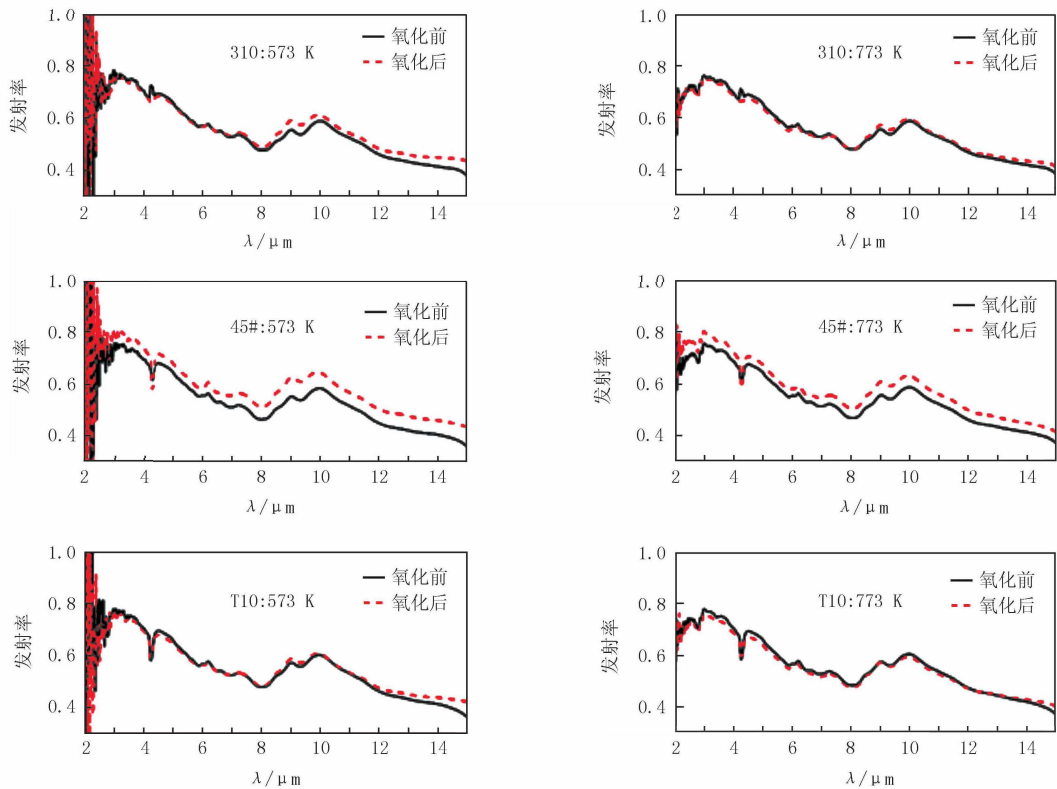


图4 3种钢在573 K和773 K时氧化前后的发射率分布对比

4 结 论

通过对3种典型的低碳钢310、中碳钢45#和高碳钢T10的光谱发射率进行测量,研究了3种钢的光谱发射率变化规律。研究表明:钢的成分对其光谱发射率有一定的影响,碳和合金化合物质量分数高的钢,其发射率就大,但3种钢发射率的差异不大于0.05。当钢表面未发生氧化时,高碳钢的光谱发射率大于中碳钢和低碳钢,中碳钢和低碳钢的光谱发射率的差异不大于0.01。当钢表面发生氧化后,3种钢的光谱发射率随波长的变化趋势相同,但是光谱发射率比氧化前大,并且45#钢氧化前后发射率增大的更加明显。

参 考 文 献

- [1] 唐磊,吴海滨,仓亚军,等. 红外辐射测温在管式工业炉上的应用 [J]. 红外技术, 2016, 38(7): 612-616.
- [2] 曾小信,邱立运. 热电偶测温采集精度的影响因素及优化方法 [J]. 自动化与仪表, 2016, 31(9): 37-40.
- [3] 戴景民. 辐射测温的发展现状与展望 [J]. 自动化技术与应用, 2004, 23(3): 1-7.
- [4] WEN Changda. Study of steel emissivity characteristics and application of multispectral radiation thermometry (MRT) [J]. J Mater Eng Perform, 2011, 20(2): 289-297.
- [5] WEN Changda. Investigation of steel emissivity behaviors; Examination of Multispectral Radiation Thermometry (MRT) emissivity models [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2010, 53(9/10): 2035-2043.
- [6] RESCHAB H, CAGRAN C, HAFOK M, et al. Normal Spectral Emissivity of Steel HS2-9-1-8 at 684.5 nm [J]. Int J Thermophys, 2011, 32(11/12): 2735-2740.
- [7] MESSAS N, SAMET H, BROCCCHI J, et al. Determination of Steel Emissivity for the Temperature Prediction of Structural Steel Members in Fire [J]. J Mater Civ Eng, 2013, 25(2): 167-173.
- [8] 陈家祥. 钢铁冶金学 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1990.
- [9] ZHANG Feng, YU Kun, ZHANG Kaihua, et al. An emissivity measurement apparatus for near infrared spectrum [J]. Infrared Physics & Technology, 2015, 73: 275-280.
- [10] Pérez-Sáez Raúl B, CAMPO L D, TELLO M J. Analysis of the Accuracy of Methods for the Direct Measurement of Emissivity [J]. Int J

- Thermophys, 2008, 29(3): 1141-1155.
- [11] Cai Jing, Yang Yongjun, Liao Li, et al. Material Spectral Emissivity Measurement Based on Two Reference Blackbodies [J]. Int J Thermophys, 2015, 36(12): 1-9.
- [12] Campo L D, Pérez-Sáez R B, Tello M J, et al. Armco Iron Normal Spectral Emissivity Measurements [J]. Int J Thermophys, 2006, 27(4): 1160-1172.
- [13] WEN Changda. Study of Steel Emissivity Characteristics and Application of Multispectral Radiation Thermometry (MRT) [J]. J Mater Eng Perform, 2011, 20(2): 289-297.
- [14] 梁钰, 余群英. 钢及合金中碳的 X 射线荧光光谱分析讨论 [J]. 冶金分析, 2000, 20(2): 25-29.
- [15] CAO G, WEBER S J, MARTIN S O, et al. Spectral emissivity of candidate alloys for very high temperature reactors in high temperature air environment [J]. J Nucl Mater, 2013, 441(1/2/3): 667-673.
- [16] CHEN R Y, YEUN W Y D. Review of the High-Temperature Oxidation of Iron and Carbon Steels in Air or Oxygen [J]. Oxidation of Metals, 2003, 59(5/6): 433-468.
- [17] BAUD J, FERRIER A, MANENC J, et al. The oxidation and decarburizing of Fe-C alloys in air and the influence of relative humidity [J]. Oxidation of Metals, 1975, 9(1): 69-97.

Comparative Study on Spectral Emissivity of Three Kinds of Carbon Steel

Zhang Feilin, Chen Shaokang, Yu Kun, Liu Yufang

(College of Physics and Materials Science, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

Abstract: The spectral emissivity of three typical low carbon steels 310, medium carbon steels 45 and high carbon steels T10 were measured by a self-designed spectral emissivity measurement apparatus. The experimental results showed that different compositions have effects on the emissivity of steel before and after oxidation. For unoxidized steel, the higher the carbon content, the greater the spectral emissivity, and the difference of spectral emissivity of three kinds of steel was less than 0.05. Varying trend with wavelength in the spectral emissivity of three kinds of steel after oxidation was the same as that before oxidation, but the spectral emissivity value was larger than that before oxidation. The existences of Al, Cr, Ni in the steel will inhibit the growth of the steel oxide film, thus the spectral emissivity of 45 # steel was slightly larger than that of 310 and T10 steel. During the oxidation process, the color of 310 and T10 steel surface changes from silvery white into light blue, while the 45 # steel into coppery. And these changes in surface color may also affect the spectral emissivity.

Keywords: Carbon steel; spectral emissivity; alloy composition; Oxidation

[责任编辑 杨浦]