

65Mn 钢的光谱发射率研究

朱遵略,高岳

(河南师范大学 物理与材料科学学院,河南 新乡 453007)

摘要:在 800~1 100 K 的温度范围内,采用单波长测温方法,利用自行研制的实验装置,在空气中测量研究了 16 个不同温度下 65Mn 钢的光谱发射率随测量时间的变化情况.研究表明光谱发射率的共振与 65Mn 钢的表面氧化情况密切相关.由表面氧化导致光谱发射率的不确定性为 5.7%~14.6%,相应的温度误差为 6.2~11.1 K.通过建模拟合,同时也得到了光谱发射率随加热时间变化的解析表达式,模拟计算结果与实验结果符合较好.

关键词:65Mn 钢;发射率;氧化层;红外辐射理论

中图分类号:O433

文献标志码:A

光谱发射率是红外测量领域的重要物理量之一.要利用热辐射方法准确获得物体表面的准确温度,无论是单波长还是多波长测温方法,都必须对材料的光谱发射率进行深入研究^[1].由于光谱发射率在测量过程中受到测量角、温度、波长、样品表面情况等诸多因素的影响^[2],研究工作具有很强的必要性和挑战性.到目前为止,众多科研工作者已经针对测量角、样品表面光滑情况及波长等因素对材料的光谱发射率的影响进行了较为深入、全面的研究^[3-17],但却较少涉及材料加工过程中表面氧化对光谱发射率的影响.1999 年,Kobayashi 等人^[18]在实验上观察研究了冷轧钢表面氧化过程中光谱发射率随时间的变化情况,并且估算出包括波长变化、表面氧化等诸多因素所导致的光谱发射率的不确定度为 5%~10%,但却没有单独给出材料表面氧化的具体影响.2000 年,Furukawa 和 Iuchi 等人^[19]在特殊实验条件下粗略测量了波长为 1.55 μm 情况下冷轧钢的氧化对光谱发射率的影响.随后,Iuchi 等人^[20]利用建模方法模拟计算了波长分别为 1.3 μm 、1.5 μm 和 3.4 μm 情况下冷轧钢氧化时光谱发射率的共振情况,其结果与前期的实验结果^[19]基本吻合.尽管如此,在一般环境下,材料表面氧化对光谱发射率的定量影响,表面氧化对发射率的单一影响以及对测温结果的不确定度等问题都值得进一步研究.

由于 65Mn 钢具有硬度高、淬透性和切削性较好等优点,其被广泛应用于航空航天、汽车、医疗等诸多领域.因为它具有较强的过热敏感性和回火脆性,因此在加工过程中对温度的精度要求较高,故对 65Mn 钢的光谱发射率进行系统深入研究意义重大.本文利用课题组研发的实验装置^[21-26],首次对多个行业中广泛应用的 65Mn 钢在 800~1 100 K 温度下光谱发射率进行了测量研究,不仅讨论了材料表面氧化对发射率及温度测量的影响,同时也计算出了这种影响所产生的温度误差.为了有效充分利用实验的数值结果,拟合得到了光谱发射率随时间变化的解析函数.这些研究结果为相关红外辐射测温技术提供了数据和理论支持.

1 装置与理论简介

图 1 是测量装置原理图.红外辐射由 InGaAs 光电二极管探测器测量,并由光接收系统进一步转变为数字信号.样品由涡流加热器加热到给定的温度,样品温度通过两个紧密焊接在样品表面上的 R 型铂铑热电偶测量.

收稿日期:2019-01-14;修回日期:2019-03-21.

基金项目:国家自然科学基金(61275132;61177092)

作者简介(通信作者):朱遵略(1974-),男,河南孟津人,河南师范大学教授,主要研究方向为原子与分子物理、光学等,
E-mail:zl-zhu@htu.cn.

光谱发射率

$$\epsilon_\lambda = \frac{P_2}{P_1}, \tag{1}$$

其中 P_1 和 P_2 是波长 λ 和温度 T 相同时分别来自样品表面和黑体的辐射.根据辐射理论,黑体辐射

$$P_1 = \frac{\pi^2}{4} \left(\frac{D}{f'}\right)^2 \tau_0 A \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_\lambda L_{\lambda,T} d\lambda, \tag{2}$$

D 和 f' 分别为光接收系统的孔径和焦距; τ_0 是大气的透射率; A 是探测器的敏感单位面积; λ_1 和 λ_2 是用于选择光谱带的光接收系统的光谱极限; τ_λ 是光接收系统的总透射率.

根据普朗克定律,(2)式可改写为

$$P_1 = \frac{\pi^2}{4} \left(\frac{D}{f'}\right)^2 \tau_0 A \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_\lambda 2\pi hc^2 \lambda^{-5} \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda KT}\right) - 1 \right]^{-1} d\lambda, \tag{3}$$

h 是普朗克常量; c 是光速; k 是玻尔兹曼常数. $\Delta\lambda$ (大约 20 nm) 是光接收系统中干涉滤光片的带宽.由于带宽很窄, τ_λ 近似为常数.故(3)式可以简写为

$$P_1 = C \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda KT}\right) - 1 \right]^{-1}, \tag{4}$$

其中,

$$C = \frac{\pi^3}{2} \left(\frac{D}{f'}\right)^2 \tau_0 A \tau_\lambda hc^2 \lambda^{-5} \Delta\lambda, \tag{5}$$

(5)式中, $D, f', A, \tau_\lambda, \lambda$ 和 $\Delta\lambda$ 是系统参数.由于测量环境相对稳定,因此 τ_0 也是恒定值.故(5)式表示的 C 仅取决于实验装置.如果得到样品表面温度 T ,根据(4)式可得到 P_1 ,然后根据(1)式即可得到辐射率 ϵ_λ .

实验前,样品表面必须打磨平整,去除材料表面原有的氧化膜.探测器测量区域是圆形,直径是 5 mm.样品距离探测器是 1 m.R 型铂铑热电偶丝的直径是 0.5 mm.通过 2 个热电偶的测量温度判断样品表面温度是否均匀.为减小误差,样品最终温度取 2 个热电偶的测量平均值.实验中样品通常在 6 min 内从室温达到给定温度,且能维持在给定值.实验期间,样品暴露在空气中.为了更准确地测量氧化过程对实验结果的影响,实验中把从室温到给定温度的时间的一半列入总的加热时间.在实验过程中从 800 K 到 1100 K 每 20 K 测量一次.在每个温度下重复测量 3 组样品.最终结果取各个温度下 3 组样品的平均值.在全部的实验中,光谱发射率在开始加热的最初的 180 min 每 1 min 记录 1 次,之后的 120 min 每 2 min 记录 1 次,最后 60 min 每 5 min 记录 1 次.每组样品的测量遵循了同样的过程.

2 测量结果及分析

为了验证测量设备的稳定性和实验的重复性,在 920 K 温度下,对 65Mn 钢样品进行了 3 次重复测量.图 2 展示了 3 个样品光谱发射率的测量结果和它们的平均测量值.从图 2 中可以看到,不同样品的光谱发射率测量结果具有相同的规律和走势.

为了全面研究 65Mn 钢表面氧化对光谱发射率的影响,在 800~1 100 K 的温度范围内,1.5 μm 的波长下,分别在 16 个温度点对 65Mn 钢的光谱发射率进行测量.图 3 展示了 840 K,920 K,940 K,980 K,1 020 K

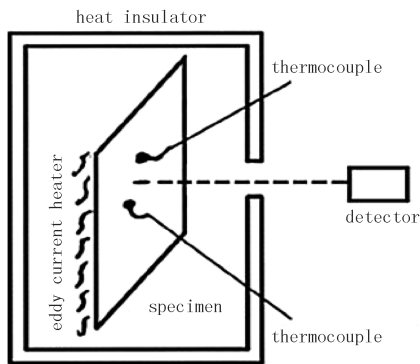


图 1 测量装置原理图
Fig.1 Schematic diagram of measuring device

和 1 060 K 温度点下的测量结果.对比各温度点下的测量结果,可以得到以下结论:1)不同的温度下测量得到的光谱发射率都有共振峰存在;2)加热约 20 min 后,光谱发射率迅速增加;3)大约从 100 min 开始,测量曲线趋于平缓,测量结果趋于稳定.

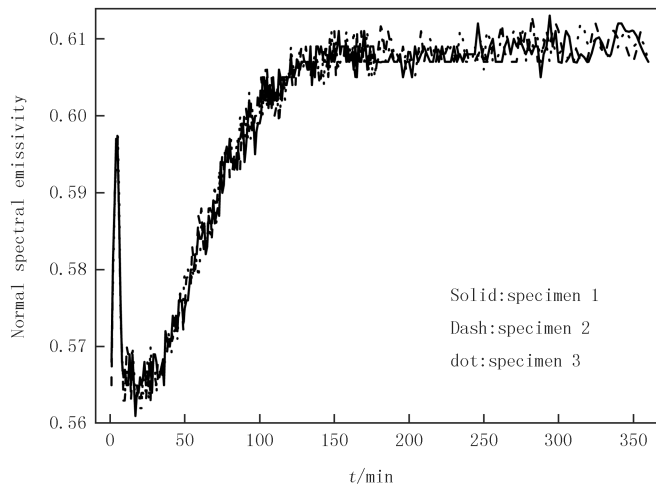


图2 920 K 温度下 3 组 65Mn 钢测量结果及其平均值

Fig.2 Measurement Results and Average Value of Three Groups of 65Mn steel at 920 K

对于图 2 中所各不同温度下光谱发射率的共振峰的存在,可以从光线的相干理论得到完美诠释.当 65Mn 钢材料被加热过程中,随着时间的增加,被测材料表面的氧化层会逐渐增厚.钢氧化层的折射率要大于 65Mn 钢本身.根据光线的相干理论,当 65Mn 钢表面氧化层的厚度 d 和入射光的波长 λ 之间满足^[27] $d = \frac{n}{2}\lambda$ 时(其中 n 为整数),来自 65Mn 钢材料表面和来自氧化层表面的光线将相互干扰增强,出现最大值.当然,如果来自不同表面的光线满足^[27] $d = \frac{2n-1}{4}\lambda$ 时,光线会相互干扰减弱,出现最小值.因此说,光谱发射率共振峰的出现是表面氧化辐射和底面辐射发生了干涉影响的结果.从图 3 也可以发现在不同的温度测量点下,共振峰的强度和位置基本相同.

测量过程中,所有实验条件均保持不变.故 65Mn 钢表面氧化对光谱发射率的影响非常明显.根据实验数据,在 800 K,820 K,840 K,860 K,880 K,900 K,920 K,940 K,960 K,980 K,1 000 K,1 020 K,1 040 K,1 060 K,1 080 K 和 1 100 K 的温度下,样品表面氧化所引起的发射率变化分别约为 0.068 0, 0.064 6,0.064 4,0.087 0,0.064 6,0.080 0,0.068 2,0.044 0,0.058 6,0.059 4,0.040 8,0.040 0,0.038 2, 0.037 6,0.047 2 和 0.041 2.进一步研究表面氧化对光谱发射率所产生的影响,图 4 给出了测量相对误差的变化情况.

65Mn 钢表面氧化对温度测量所导致的误差可以通过(8)式^[28]

$$\Delta T = \frac{c_2}{\lambda} \ln^{-1} \left\{ \left(1 + \frac{\Delta \epsilon_\lambda}{\epsilon_\lambda} \right) \left[\exp \left(\frac{c_2}{\lambda T} - 1 \right) \right] + 1 \right\} - T \quad (8)$$

得到.在 800 K,820 K,840 K,860 K,880 K,900 K,920 K,940 K,960 K,980 K,1 000 K,1 020 K,1 040 K, 1 060 K,1 080 K 和 1 100 K 的温度下,65Mn 钢表面氧化对温度测量所导致的误差分别为 8.2 K,7.7 K, 8.5 K,10.4 K,8.8 K,11.1 K,9.2 K,6.5 K,8.4 K,9.4 K,6.2 K,6.7 K,6.5 K,6.5 K,8.2 K 和 7.3 K.

经过以上分析可知 65Mn 钢表面氧化对光谱发射率、温度测量等的影响与其他合金材料^[23-24] 和不锈钢材料^[21-22,25-26] 完全类似.对 65Mn 钢来说,由表面氧化产生的光谱发射率的误差大约是 5.7%~14.6%,对应的温度测量误差大约是 6.2~11.1 K,两者均大于多种不锈钢和铝材料.其原因是 65Mn 钢表面氧化氮化过程均较强,而其他不锈钢和铝材料表面氧化较强,氮化较弱.

为了得到光谱发射率随加热时间的函数关系, 通过建模分析比较, 最终确认函数关系

$$\epsilon_{\lambda} = a_1 + a_2(t/\text{min}) + a_3 \ln(t/\text{min}) + a_4 \exp(-a_5(t/\text{min})) \quad (9)$$

较为合适, 其中变量 t 为加热时间, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 分别是拟合参数. 经过拟合运算, 表 1 中列出了 6 个温度点下参数 a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 的数值及平均方根误差 E_{RMSE} 和拟合相关系数 R . 为了便于与实验值比较, 将拟合曲线画于图 3 中. 对比之后发现, 分析模型能很好地再现实验曲线, 共振峰, 快速氧化、氮化过程和缓慢浸透过程.

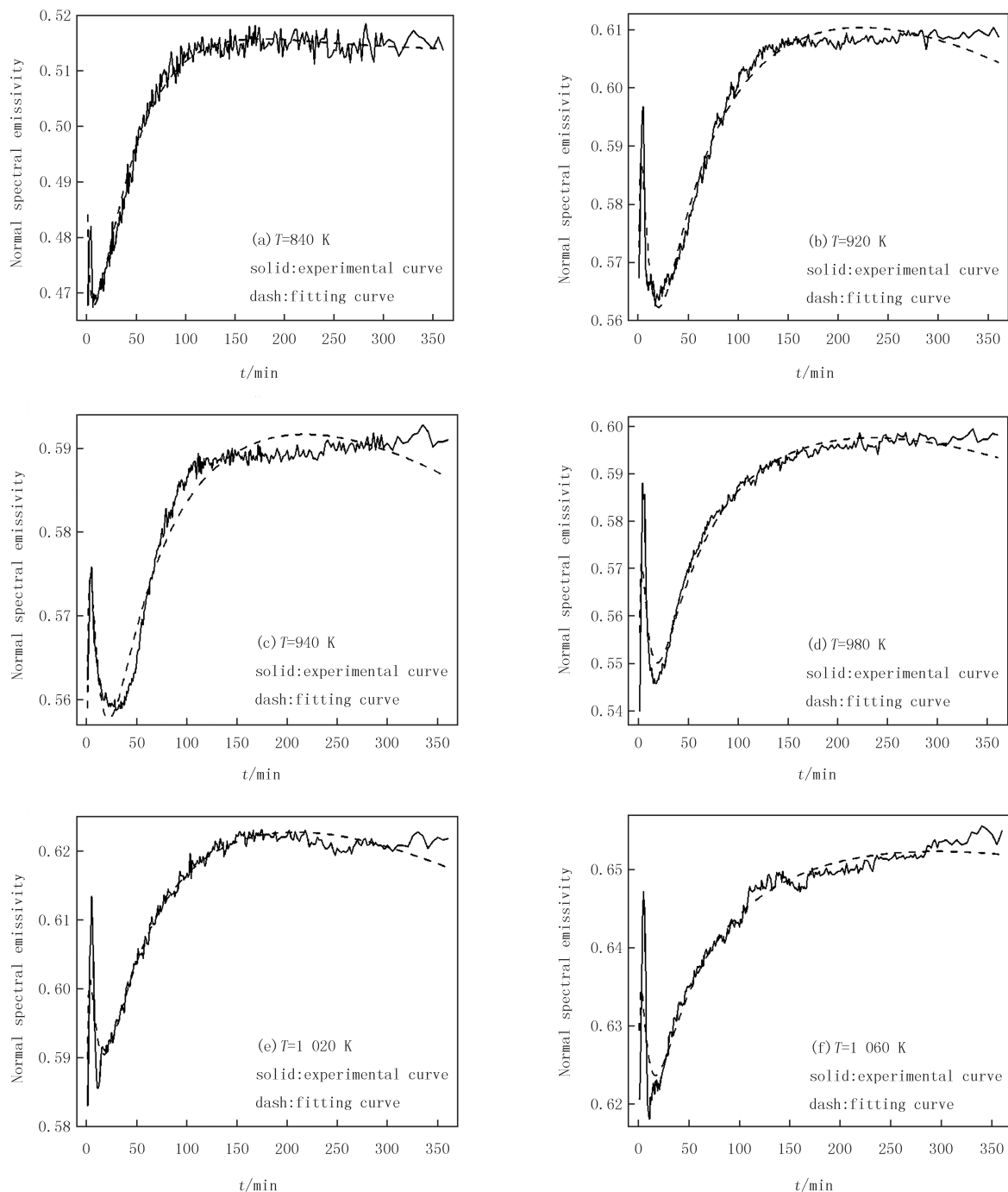


图 3 不同温度下 65Mn 钢光谱发射率的变化曲线

Fig.3 Curve of spectral emissivity of 65Mn steel at different temperatures

表1 在不同温度下,65Mn光谱发射率随时间的变化曲线的拟合参数

Tab.1 Fitting parameters of the curves describing the normal spectral emissivity of 65Mn as a function of heating time at a certain temperature

T/K	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	E_{RMSE}	R
840	0.589 7	0.000 038	-0.015 1	-0.108 03	-0.022 02	0.002 3	0.987
920	0.413 8	-0.000 200	0.044 6	0.174 94	-0.111 19	0.002 3	0.989
940	0.443 0	-0.000 156	0.033 9	0.128 85	-0.103 43	0.002 1	0.982
980	0.420 2	-0.000 169	0.039 8	0.153 81	-0.118 88	0.003 0	0.981
1 020	0.498 8	-0.000 137	0.028 6	0.102 96	-0.121 28	0.001 9	0.983
1 060	0.562 1	-0.000 065	0.019 2	0.076 93	-0.132 75	0.002 2	0.970

3 结 论

本文研究了 65Mn 钢在 800~1100 K 的温度范围内,1.5 μm 的波长下表面氧化对光谱发射率的影响.研究表明,65Mn 钢光谱发射率随加热时间而增加.样品表面氧化层的生长对光谱发射率的影响主要表现在加热开始的 200 min 内.之后,随着氧化饱和,光谱发射率的增长变得缓慢.共振峰出现在开始加热 20 min 左右.由表面氧化产生的光谱发射率误差为 5.7%~14.6%,对应的温度测量误差为 6.2~11.1 K.以上结果表明,利用红外辐射技术测定金属材料的准确温度时需考虑样品表面氧化等影响.

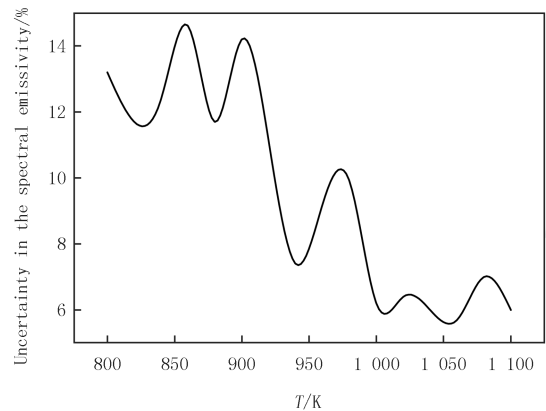


图4 65Mn 钢光谱发射率的相对误差变化曲线

Fig.4 Relative error curve of spectral emissivity of 65Mn steel

参 考 文 献

- [1] Hanssen L M, Mekhontsev S N, Khromchenko V B. Infrared spectral emissivity characterization facility at NIST[C]//Thermosense XX-VI.[s.l.:s.n.],2004:1-13.
- [2] Chrzanowski K. Problem of determination of effective emissivity of some materials in MIR range[J]. Infrared physics & technology, 1995, 36(3):679-684.
- [3] Ma C, Bedford R, Gaertner A. Calculation of the spectral dependence of the radiance temperature of the high-stability tungsten strip lamp [J]. Review of scientific instruments, 2001, 72(12):4469-4471.
- [4] Sabuga W, Todtenhaupt R. Effect of roughness on the emissivity of the precious metals silver, gold, palladium, platinum, rhodium, and iridium[J]. High Temperatures High Pressures(UK), 2001, 33(3):261-269.
- [5] Sade S, Katzir A. Spectral emissivity and temperature measurements of selective bodies using multiband fiber-optic radiometry[J]. Journal of Applied Physics, 2004, 96(6):3507-3513.
- [6] Wen C D, Mudawar I. Emissivity characteristics of roughened aluminum alloy surfaces and assessment of multispectral radiation thermometry (MRT) emissivity models[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47(17/18):3591-3605.
- [7] Wen C D, Mudawar I. Emissivity characteristics of polished aluminum alloy surfaces and assessment of multispectral radiation thermometry (MRT) emissivity models[J]. International journal of heat and mass transfer, 2005, 48(7):1316-1329.
- [8] Del Campo L, Pérez-Sáez 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.
- [9] Wen C D, Mudawar I. Modeling the effects of surface roughness on the emissivity of aluminum alloys[J]. International journal of heat and mass transfer, 2006, 49(23/24):4279-4289.
- [10] Cagran C P, Hanssen L M, Noorma M, et al. Temperature-resolved infrared spectral emissivity of SiC and Pt-10Rh for temperatures up to

- 900 °C[J].International Journal of Thermophysics,2007,28(2):581-597.
- [11] Deemyad S,Silvera I F.Temperature dependence of the emissivity of platinum in the IR[J].Review of scientific instruments,2008,79(8):086105.
- [12] Shuker P,Melchior A,Assor Y,et al.IR pyrometry in diamond anvil cell above 400 K[J].Review of Scientific Instruments,2008,79(7):073908.
- [13] 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.
- [14] Wen C D,Lu C T.Suitability of multispectral radiation thermometry emissivity models for predicting steel surface temperature[J].Journal of Thermophysics and Heat Transfer,2010,24(3):662-665.
- [15] Reschab H,Cagran C,Hafok M,et al.Normal spectral emissivity of steel HS2-9-1-8 at 684.5 nm[J].International journal of thermophysics,2011,32(11/12):2735-2740.
- [16] Wen C-D.Study of steel emissivity characteristics and application of multispectral radiation thermometry (MRT)[J].Journal of materials engineering and performance,2011,20(2):289-297.
- [17] 张飞麟,陈少康,于坤,等.3种碳钢的光谱发射率对比研究[J].河南师范大学学报(自然科学版),2017,45(4):47-52.
- [18] Kobayashi M,Otsuki M,Sakate H,et al.System for measuring the spectral distribution of normal emissivity of metals with direct current heating[J].International journal of thermophysics,1999,20(1):289-298.
- [19] Furukawa T,Iuchi T.Experimental apparatus for radiometric emissivity measurements of metals[J].Review of scientific instruments,2000,71(7):2843-2847.
- [20] Iuchi T.Modeling of Emissivities of Metals and their Behaviors during the Growth of an Oxide Film[C]//AIP Conference Proceedings.[s.l.;s.n.],2003:717-722.
- [21] Shi D,Zou F,Wang S,et al.Effect of surface oxidization on the spectral emissivity of steel 304 at the elevated temperature in air[J].Infrared Physics & Technology,2014,66:6-12.
- [22] Shi D,Zou F,Wang S,et al.Spectral emissivity modeling of steel 201 during the growth of oxidation film over the temperature range from 800 to 1100 K in air[J].Infrared Physics & Technology,2014,67:42-48.
- [23] Shi D,Zou F,Wang S,et al.Effect of Surface Oxidization on the Spectral Normal Emissivity of Aluminum 3A21 at the Wavelength of 1.5 μm Over the Temperature Range from 800 K to 910 K[J].International Journal of Thermophysics,2015,36(4):747-759.
- [24] Shi D,Zou F,Zhu Z,et al.Modeling the Normal Spectral Emissivity of Aluminum 1060 at 800-910 K During the Growth of Oxide Layer [J].Journal of Materials Engineering and Performance,2015,24(4):1718-1725.
- [25] Shi D,Zou F,Zhu Z,et al.Modeling the effect of surface oxidation on the normal spectral emissivity of steel 316L at 1.5 μm over the temperatures ranging from 800 to 1100 K in air[J].Infrared Physics & Technology,2015,71:370-377.
- [26] Shi D,Zou F,Zhu Z,et al.Effect of surface oxidization on the normal spectral emissivity of straight carbon steel at 800-1100 K in air[J].ISIJ International,2015,55(3):697-705.
- [27] Del Campo L,Pérez-Sáez R,González-Fernández L,et al.Kinetics inversion in isothermal oxidation of uncoated WC-based carbides between 450 and 800 °C[J].Corrosion Science,2009,51(4):707-712.
- [28] Pujana J,Del Campo L,Pérez-Sáez R,et al.Radiation thermometry applied to temperature measurement in the cutting process[J].Measurement Science and Technology,2007,18(11):3409.

Spectral emissivity of 65Mn steel

Zhu Zunlue,Gao Yue

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

Abstract: In the temperature range of 800-1100 K, the spectral emissivity of 65Mn steel at 16 different temperatures was measured by air in a self-developed experimental device using single-wavelength temperature measurement method. The results show that the spectral emissivity is closely related to the surface oxidation of 65Mn steel. The uncertainty of the spectral emissivity caused by surface oxidation is 5.7%-14.6%, which results in a temperature error of 6.2-11.1K. Through the modeling and fitting, the analytical expression of the spectral emissivity with the heating time is also obtained. The simulation results are in good agreement with the experimental results.

Keywords: 65Mn steel; emissivity; oxide layer; infrared radiation theory