

文章编号: 0253-2239(2010)03-0772-05

# 一种测量发射率的实验装置

刘玉芳 胡壮丽 施德恒

(河南师范大学物理与信息工程学院, 河南 新乡 453007)

**摘要** 基于基尔霍夫定律, 研制了一种采用双光路对比法测量中、高温物体发射率的实验装置。该装置由样品加热系统、信号检测与处理系统以及显示系统三部分组成。用该装置测量了两种标准不锈钢样品(光滑钢片和粗糙钢片)在不同温度下的发射率, 并采用最小二乘法将测量数据拟合成解析函数。分析了该装置的发射率测量不确定度随温度的变化关系。结果表明, 在 800 K~1100 K 内, 光滑钢片发射率的最大不确定度为  $\sigma_\epsilon = 4.26 \times 10^{-3}$ , 由此引起的测温不确定度为  $\sigma_T = 0.497$  K,  $\sigma_T/T = 0.0611\%$ ; 粗糙钢片发射率的最大不确定度为  $\sigma_\epsilon = 3.80 \times 10^{-3}$ , 由此引起的测温不确定度为  $\sigma_T = 0.415$  K,  $\sigma_T/T = 0.0507\%$ 。

**关键词** 光学测量; 发射率; 辐射测温; 拟合; 不确定度

中图分类号 O432.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103003.0772

## An Experimental Apparatus for Emissivity Measurement

Liu Yufang Hu Zhuangli Shi Deheng

(College of Physics & Information Engineering, Henan Normal University, Xinxiang, Henan 453007, China)

**Abstract** Based on the Kirchhoff's law, an experimental apparatus for emissivity measurement at intermediate and high temperatures is developed, in which the double-light-path contrast measurement technique is used. The apparatus consists of three parts: the sample heating system, the signal detection and processing system, and the display system. With this apparatus, the emissivities of two standard samples (polished steel and roughened steel) are measured at different temperatures. The emissivity data of these two samples are fitted to the analytical function with the least-squares method. The measurement uncertainty of this experimental apparatus is analyzed. As a result, over the temperature range from 800 K to 1100 K, the largest emissivity uncertainty of the polished steel is  $\sigma_\epsilon = 4.26 \times 10^{-3}$ , and the corresponding uncertainty of temperature measurement is  $\sigma_T = 0.497$  K,  $\sigma_T/T = 0.0611\%$ ; the largest emissivity uncertainty of the roughened steel is  $\sigma_\epsilon = 3.80 \times 10^{-3}$ , the corresponding uncertainty of temperature measurement is  $\sigma_T = 0.415$  K,  $\sigma_T/T = 0.0507\%$ .

**Key words** optical measurement; emissivity; radiation thermometry; fitting; uncertainty

## 1 引言

发射率是表征物质表面辐射本领的物理量<sup>[1]</sup>, 在辐射测温<sup>[2~6]</sup>、遥测<sup>[7]</sup>、热传导<sup>[8]</sup>和光学常数计算<sup>[9]</sup>等领域具有重要应用价值, 对揭示材料的热辐射特性<sup>[10]</sup>、提高加热效率<sup>[2]</sup>以及寻找节能新途径等也有重要意义。

以辐射测温为例。温度对钢、铁产品的生产质量影响很大, 要提高钢、铁产品的质量并降低废品率, 必须在生产过程中实时测量并严格控制各个生

产环节的温度。由于在钢、铁产品的生产过程中被测对象往往都是运动着的, 因此只能采用非接触式辐射测温仪才能测量其温度。但是这种辐射测温仪准确测温的前提, 就是要准确知道钢、铁的发射率<sup>[4,11]</sup>。但目前由于发射率数据的缺乏, 生产线上测温仪所使用的发射率都只能选择有限的几个点靠标定法解决的。由于钢、铁等测量对象(尤其是铸铁)的发射率随温度变化较大, 实际上已在测温仪中引入了较大的原理性测温误差<sup>[12]</sup>。

收稿日期: 2009-05-18; 收到修改稿日期: 2009-06-24

基金项目: 国家自然科学基金(60577050、60777012、60977063)资助课题。

作者简介: 刘玉芳(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事技术光学及原子分子动力学等方面的研究。

E-mail: yf-liu@henannu.edu.cn

本文研制了一种采用双光路对比法测量发射率的实验装置。该装置用两个探测器分别测量待测目标和黑体在同温、同波长下的两路辐射能,利用其比值确定样品在该温度下的发射率。利用该装置测量了两种标准不锈钢样品(光滑钢片、粗糙钢片)的发射率,并根据测量结果分析了发射率的测量精度对温度测量精度的影响。结果表明,用该装置测量得到的发射率值具有很高的精度。

## 2 发射率测量原理

由黑体辐射公式,温度为  $T$  的黑体在波长  $\lambda$  处的单色辐出度是

$$L_{\lambda} = 2\pi hc^2 \lambda^{-5} [\exp(\frac{hc}{\lambda k T}) - 1]^{-1}, \quad (1)$$

式中  $h$  为普朗克常数,  $c$  为光速,  $k$  为玻尔兹曼常数。

相同温度下,实际物体的单色辐出度比黑体的小。实际物体单色辐出度  $L'_{\lambda}$  与同温度、同波长下黑体单色辐出度  $L_{\lambda}$  之比称之为光谱发射率<sup>[4]</sup>,可表示为

$$\epsilon_{\lambda} = \frac{L'_{\lambda}}{L_{\lambda}}. \quad (2)$$

显然,只要测出  $L'_{\lambda}$  以及  $L_{\lambda}$ ,就可以计算出物体的光谱发射率  $\epsilon_{\lambda}$ 。

探测器接收到的黑体的辐出度  $P_1$  为<sup>[13]</sup>

$$P_1 = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{f'}\right)^2 \tau_0 A \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{\lambda} L_{\lambda} d\lambda, \quad (3)$$

式中  $D$  为通光口径,  $f'$  为光学系统的焦距,  $\tau_0$  为大气的传播系数,  $A$  为探测器的灵敏元面积,  $\tau_{\lambda}$  为光学系统对波长为  $\lambda$  的光的总透射率。将(1)式代入(3)式,得到

$$P_1 = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{f'}\right)^2 \tau_0 A \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{\lambda} 2\pi hc^2 \lambda^{-5} [\exp(\frac{hc}{\lambda k T}) - 1]^{-1} d\lambda. \quad (4)$$

在极窄的波段 ( $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = 10 \text{ nm}$ ) 内,可以认为  $\tau_{\lambda}$  与波长无关,由(4)式有

$$P_1 = \frac{\pi^2}{2} \left(\frac{D}{f'}\right)^2 \tau_0 A \tau_{\lambda} hc^2 \lambda^{-5} [\exp(\frac{hc}{\lambda k T}) - 1]^{-1} \Delta\lambda. \quad (5)$$

据此可以导出

$$T = \frac{hc}{\lambda k} \left\{ \ln \left[ 1 + \frac{\pi^2}{2} \left(\frac{D}{f'}\right)^2 \tau_0 A \tau_{\lambda} hc^2 \lambda^{-5} \Delta\lambda \frac{1}{P_1} \right] \right\}^{-1}. \quad (6)$$

显然,只要探测器测出黑体的辐出度  $P_1$ ,就可以利用(6)式得到黑体的温度  $T$ 。

另一个探测器接收到样品的辐出度  $P_2$  为

$$P_2 = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{f'}\right)^2 \tau_0 A \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{\lambda} L'_{\lambda} d\lambda, \quad (7)$$

在极窄的波段 ( $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = 10 \text{ nm}$ ) 内,(3)式和(7)式可表示为

$$P_1 = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{f'}\right)^2 \tau_0 A \tau_{\lambda} L_{\lambda} \Delta\lambda, \quad (8)$$

$$P_2 = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{f'}\right)^2 \tau_0 A \tau_{\lambda} L'_{\lambda} \Delta\lambda. \quad (9)$$

由(2)式,(8)式和(9)式得

$$\epsilon_{\lambda} = \frac{P_2}{P_1}. \quad (10)$$

显然,只要两个探测器分别测出同条件下黑体的辐出度  $P_1$  和样品的辐出度  $P_2$ ,就可以得出样品的发射率  $\epsilon_{\lambda}$ 。

## 3 系统描述

### 3.1 仪器结构与工作过程

装置由样品加热系统、信号探测与处理系统以及显示系统三部分组成,其原理结构如图1所示。

工作时,控制单元控制黑体炉的温度与加热时间。一个红外测温仪通过样品中间的小孔接收黑体

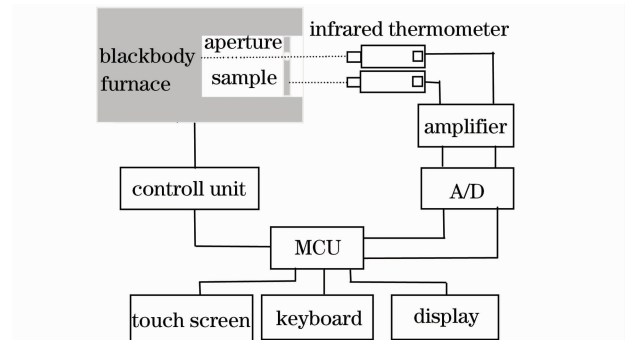


图1 实验装置框图

Fig. 1 Block diagram of experimental apparatus

发出的红外辐射,另一个则接收被测样品发出的红外辐射,图2为其采集红外辐射的原理结构简图。两个探测器将接收的信号分别经放大器放大、模/数(A/D)转换器模数转换后送入微处理器(MCU)进行数据处理,分别计算出黑体的温度和待测样品在波长为 $\lambda=1.5\ \mu\text{m}$ 时的发射率,并将测量数据在显示器上显示。由于样品在黑体炉内,故样品的温度始终和黑体的温度相同。

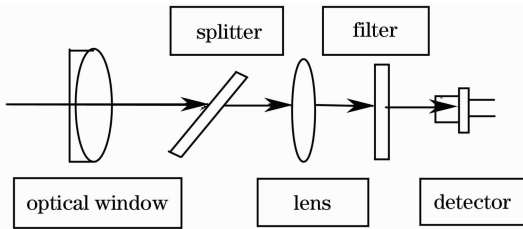


图2 探测器系统的原理结构简图

Fig. 2 Principle and structure of the detector system

### 3.2 黑体腔的有效发射率

黑体腔的有效发射率的表达式为<sup>[14]</sup>

$$\epsilon_0 = \epsilon \left[ 1 + (1 - \epsilon) \left( \frac{A'}{S_t} - \frac{A'}{S_0} \right) \right] \left[ \epsilon \left( 1 - \frac{A'}{S_t} \right) + \frac{A'}{S_t} \right]^{-1}, \quad (11)$$

式中 $\epsilon$ 为腔壁材料的发射率, $A'$ 为腔孔面积, $S_t$ 为腔壁面积, $S_0$ 为球形腔孔的面积。本实验装置中黑体腔腔壁材料为硅碳材料,在温度为800 K~1100 K内,其发射率在0.9以上<sup>[15]</sup>,计算时可取 $\epsilon = 0.9$ ,柱形腔的长度 $l$ 与腔孔半径 $R$ 之比 $l/R = 4$ ,查表<sup>[14]</sup>得 $A'/S_t = 0.097$ , $A'/S_0 = 0.040$ 。将上述数据代入(11)式,计算得到黑体腔的有效发射率 $\epsilon_0 = 0.995$ ,接近于1,故可视黑体腔的辐射为标准黑体辐射。

### 3.3 方向调节

测量前先按下两个测温仪后的激光发射按钮,通过调节方向水平调节架上两个测温仪的高度与水平方向,使发出的一路激光正好垂直入射到待测样,另一路则穿过样品的小圆孔垂直入射到黑体腔的底部,即可确保实验装置测量的发射率是样品的法向发射率。

## 4 测量结果与拟合

### 4.1 测量结果

用该装置测量了两种标准不锈钢样品(光滑钢片和粗糙钢片)的发射率,测量结果如图3所示。利用测量数据分析了温度、表面状态对发射率的影响,结果如下:1)温度从800 K增加到1100 K的过程中,两种样品的发射率逐渐增大,范围在0.550~0.770之间,这与以前研究者<sup>[16,17]</sup>对不锈钢样品的发射率的研究结果是相近的。2)刚开始测试时,两样品的发射率随温度的增加迅速增大,说明在起初加热过程中样品表面的氧化情况大大增加了样品的发射率。3)在同等条件下,粗糙钢片的发射率明显大于光滑钢片的发射率。显然这种发射率的增大是由样品表面粗糙度的增大造成的,这与对其他材料的研究结果<sup>[18~20]</sup>是一致的。

响,结果如下:1)温度从800 K增加到1100 K的过程中,两种样品的发射率逐渐增大,范围在0.550~0.770之间,这与以前研究者<sup>[16,17]</sup>对不锈钢样品的发射率的研究结果是相近的。2)刚开始测试时,两样品的发射率随温度的增加迅速增大,说明在起初加热过程中样品表面的氧化情况大大增加了样品的发射率。3)在同等条件下,粗糙钢片的发射率明显大于光滑钢片的发射率。显然这种发射率的增大是由样品表面粗糙度的增大造成的,这与对其他材料的研究结果<sup>[18~20]</sup>是一致的。

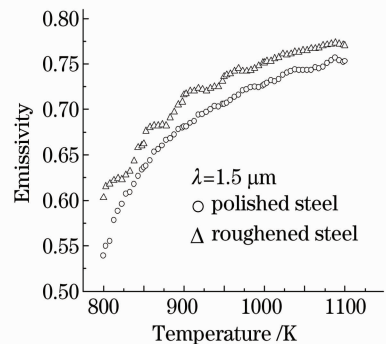


图3 两样品在不同温度下的发射率

Fig. 3 Emissivity of two samples at different temperatures

### 4.2 曲线拟合

拟合光滑钢片和粗糙钢片的发射率曲线。经反复探究,可认为这两种钢片的发射率随温度变化的模型可用下式表达:

$$\epsilon_\lambda = a + b \ln(T + c), \quad (12)$$

式中 $a, b, c$ 为拟合参数。采用最小二乘法<sup>[21]</sup>对实验数据进行拟合,得到的结果分别如表1、表2所列,其拟合曲线分别如图4、图5所示。

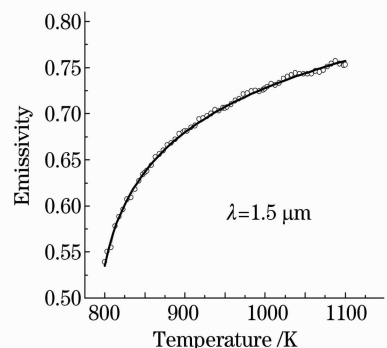


图4 光滑钢的发射率拟合曲线

Fig. 4 Fitting curve for the emissivity of the polished steel

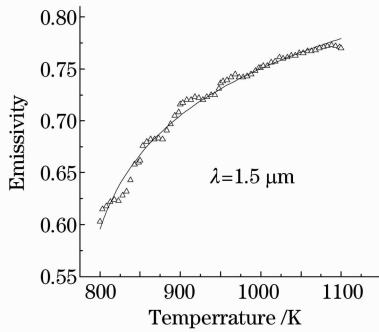


图5 粗糙钢的发射率拟合曲线

Fig. 5 Fitting curve for the emissivity of the roughened steel

表1 光滑钢片的发射率曲线拟合参数

Table 1 Fitting parameters of the emissivity for the polished steel

$a$	$b$	$c$	$R'$
0.30337	0.07874	-780.99265	0.99815

表2 粗糙钢片的发射率曲线拟合参数

Table 2 Fitting parameters of the emissivity for the roughened steel

$a$	$b$	$c$	$R'$
0.30374	0.08174	-764.42346	0.98543

故光滑钢片和粗糙钢片的发射率随温度变化的关系可分别用如下两方程表示：

$$\epsilon_{\lambda} = 0.30337 + 0.07874 \ln(T - 780.99265), \quad (13)$$

$$\epsilon_{\lambda} = 0.30374 + 0.08174 \ln(T - 764.42346). \quad (14)$$

从表1、表2可以看出，其相关系数  $R'$  分别为0.99815和0.98543，均接近于1，可见其拟合精度是相当高的。

## 5 精度分析

### 5.1 发射率的测量精度

在每一温度点下对两标准样品的发射率均进行7次测量，计算出每一温度点下发射率的测量不确定度<sup>[22]</sup>，图6、图7给出了两样品的发射率测量不确定度随温度的变化关系。从两图6、图7可以得出如下两点结论：1) 本装置的发射率测量不确定度很小，最大不超过0.0045；2) 随着温度的增加，发射率的测量不确定度逐渐趋于定值、且越来越小。说明该装置在高温下测量发射率时比低温更加准确，结果也更加可靠。

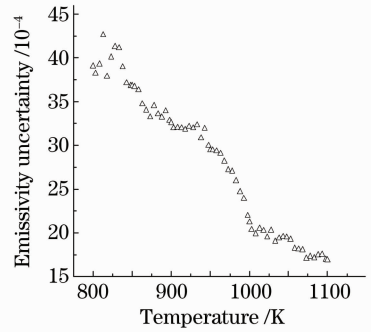


图6 光滑钢片的发射率测量不确定度

Fig. 6 Emissivity uncertainty of the polished steel

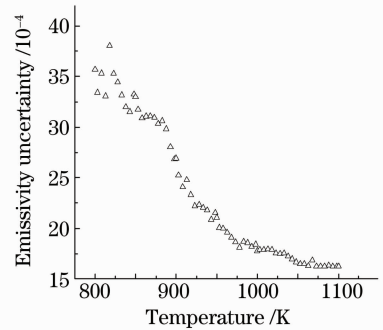


图7 粗糙钢片的发射率测量不确定度

Fig. 7 Emissivity uncertainty of the roughened steel

### 5.2 温度的测量精度

为了说明发射率的测量精度对温度测量精度的影响，下面将已测得的发射率  $\epsilon_{\lambda}$  代入(7)式去计算温度  $T$  的测量不确定度。在极窄的波段 ( $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = 10 \text{ nm}$ ) 内，由(1)式和(7)式有

$$P_2 = \frac{\pi^2}{2} \left( \frac{D}{f'} \right)^2 \tau_0 A \epsilon_{\lambda} \tau_{\lambda} h c^2 \lambda^{-5} \left[ \exp\left( \frac{hc}{\lambda k T} \right) - 1 \right]^{-1} \Delta\lambda, \quad (15)$$

据此可以导出

$$T = \frac{hc}{\lambda k} \left\{ \ln \left[ 1 + \frac{\pi^2}{2} \left( \frac{D}{f'} \right)^2 \tau_0 A \tau_{\lambda} h c^2 \lambda^{-5} \Delta\lambda \frac{\epsilon_{\lambda}}{P_2} \right] \right\}^{-1}. \quad (16)$$

由不确定度传递公式<sup>[22]</sup>，估算温度  $T$  的不确定度可表示为

$$\sigma_T = \sqrt{\left( \frac{dT}{d\epsilon_{\lambda}} \right)^2 \sigma_{\epsilon}^2}, \quad (17)$$

由(16)式可以导出

$$\frac{dT}{d\epsilon_{\lambda}} \approx \frac{\lambda k T^2}{hc} \frac{1}{\epsilon_{\lambda}}, \quad (18)$$

将(18)式代入(17)式中，化简后有

$$\sigma_T \approx \frac{\lambda k T^2}{hc} \sqrt{\left( \frac{\sigma_{\epsilon}}{\epsilon_{\lambda}} \right)^2}, \quad (19)$$

或

$$\frac{\sigma_T}{T} \approx \frac{\lambda k T}{hc} \sqrt{\left(\frac{\sigma_\epsilon}{\epsilon_\lambda}\right)^2}. \quad (20)$$

根据测量结果, 当  $T = 813 \text{ K}$  时, 测得光滑钢片  $\epsilon_\lambda = \bar{\epsilon}_\lambda = 0.591$ , 此时的发射率测量不确定度最大 ( $\sigma_\epsilon = 4.26 \times 10^{-3}$ ), 取  $\lambda = 1.5 \mu\text{m}$ , 将相关数据代入 (19) 和 (20) 式, 可得  $\sigma_T \approx 0.497 \text{ K}$ , 即  $\sigma_T/T \approx 0.0611\%$ ; 当温度  $T = 818 \text{ K}$  时, 测得粗糙钢片  $\epsilon_\lambda = \bar{\epsilon}_\lambda = 0.639$ , 此时发射率测量不确定度最大 ( $\sigma_\epsilon = 3.80 \times 10^{-3}$ ), 由此可得  $\sigma_T \approx 0.415 \text{ K}$ ,  $\sigma_T/T \approx 0.0507\%$ . 因此本装置的测温精度是相当高的, 这也间接地说明了本装置所测得的发射率数据精度也是较为可靠的。

## 6 结 论

研制了一种采用双光路对比法测量待测目标的发射率随温度变化的实验装置。利用该装置可以测量各种材料(主要是金属材料)在不同温度下的发射率。对两种不锈钢样品的发射率和测量温度的不确定度分析表明, 该装置测量发射率的精度比较高。

## 参 考 文 献

- 1 R. B. Pérez-Sáez, L. del Campo, M. J. Tello. Analysis of the accuracy of methods for the direct measurement of emissivity[J]. *Int. J. Thermophys.*, 2008, **29**: 1141~1155
- 2 Leire del Campo, R. B. Pérez-Sáez, M. J. Tello. New experimental device for infrared spectral directional emissivity measurements in a controlled environment [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2006, **77**(11): 113111~113118
- 3 M. Shimogori, H. Yoshizako, Y. Shimogori *et al.*. Characterization of coal ash emissivity in high temperature atmospheres [J]. *JSME Int. J. B-Fluid. T.*, 2006, **49**(2): 265~270
- 4 T. Furukawa, T. Iuchi. Experimental apparatus for radiometric emissivity measurements of metals [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2000, **71**(7): 2843~2847
- 5 Shi Deheng, Liu Yufang, Chen Yuke *et al.*. A high-precision optic fiber colorimeter using pyroelectric detector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(4): 542~547  
施德恒, 刘玉芳, 陈玉科等. 一种高精度光纤测温系统工作波长的优化设计[J]. *光学学报*, 2004, **24**(4): 542~547
- 6 Shi Deheng, Huang Guoqing, Liu Yufang. Working wavelength optimization of a practical real-time temperature measurement system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(6): 545~550  
施德恒, 黄国庆, 刘玉芳. 一种实用化实时测温系统的工作波长的最优设计[J]. *中国激光*, 2003, **30**(6): 545~550
- 7 B. R. da Luz, J. K. Crowley. Spectral reflectance and emissivity features of broad leaf plants: prospects for remote sensing in the thermal infrared (8.0~14.0  $\mu\text{m}$ ) [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2007, **109**(4): 393~405

- 8 R. Lopes, L. M. Moura, D. Baillis *et al.*. Directional spectral emittance of a packed bed: correlation between theoretical prediction and experimental data[J]. *J. Heat Transfer*, 2001, **123**(2): 240~248
- 9 R. M. Sova, M. J. Linevsky, M. E. Thomas *et al.*. High-temperature infrared properties of sapphire, AlON, fused silica yttria and spinel [J]. *Infrared Physics of Technology*, 1998, **39**(4): 251~261
- 10 Jingmin Dai, Xinbei Wang, Guibin Yuan. Fourier transform spectrometer for spectral emissivity measurement in the temperature range between 60 and 1500  $^{\circ}\text{C}$  [J]. *J. Phys. : Conf. Ser.*, 2005, **13**: 63~66
- 11 B. Müller, U. Renz. Development of a fast fiber-optic two-color pyrometer for the temperature measurement of surfaces with varying emissivities [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2001, **72**(8): 3366~3374
- 12 A. Schonbohm, R. Gasper, D. Abel. Inductive reheating of steel billets into the semi-solid state based on pyrometer measurements [J]. *Semi-Solid Processing of Alloys and Composites*, 2006, **116/117**: 734~737
- 13 Shi Deheng, Huang Guoqing, Liu Yufang *et al.*. Optimization of a practical real-time temperature measurement system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(11): 1394~1401  
施德恒, 黄国庆, 刘玉芳等. 一种实用化实时测温系统的优化设计[J]. *光学学报*, 2003, **23**(11): 1394~1401
- 14 Zhang Jianqi, Fang Xiaoping. Infrared Physics[M]. Xian: Xidian University Press, 2004. 81~82  
张建奇, 方小平. 红外物理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004. 81~82
- 15 Robert Siegel, John R. Howell. Thermal Radiation Heat Transfer [M]. Cao Yuzhang trans., Beijing: Science Press, 1990. 104  
R. 西格尔, J. R. 豪厄尔. 热辐射传热[M]. 曹玉璋译, 北京: 科学出版社, 1990. 104
- 16 Akihiko Otsuka, Kazuo Hosono, Ryohei Tanaka *et al.*. A survey of hemispherical total emissivity of the refractory metals in practical use[J]. *Energy*, 2005, **30**: 535~543
- 17 W. Bauer, W. Gräfen, M. Rink. Spectral emissivities of heat-treated steel surfaces [J]. *Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry*, 2003, **7**: 807~812
- 18 T. Iuchi. Modeling of emissivities of metals and their behaviors during the growth of an oxide film [J]. *Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry*, 2003, **7**: 717~722
- 19 C. D. Wen, I. Mudawar. Emissivity characteristics of roughened aluminum alloy surfaces and assessment of multispectral radiation thermometer (MRT) emissivity models[J]. *Int. J. Heat Mass Tran.*, 2004, **47**(17/18): 3591~3605
- 20 L. del Campo, R. B. Pérez-Sáez, M. J. Tello *et al.*. Armc iron normal spectral emissivity measurements[J]. *Int. J. Heat Mass Tran.*, 2006, **27**(4): 1160~1172
- 21 Xu Jiancheng, Xu Qiao, Chen Jianping. Spatial-carrier phase-shifting algorithm based on least-squares iteration [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4): 592~596  
徐建程, 许乔, 陈建平. 基于最小二乘迭代的空载波相移算法[J]. *中国激光*, 2008, **35**(4): 592~596
- 22 Zhang Zhidong, Huai Peng, Zhan Yong. University Physics Experiment[M]. Beijing: Science Press, 2007. 28~33  
张志东, 怀鹏, 展永. 大学物理实验[M]. 北京: 科学出版社, 2007. 28~33