

文章编号:1000-582X(2011)05-059-06

连铸热坯表面温度可见光谱 CCD 辐射测温方法

欧阳奇^{a,b}, 赵立明^b, 温良英^a, 陈登福^a, 张健^b

(重庆大学 a. 材料科学与工程学院; b. 重庆市冶金工程重点实验室, 重庆 400044)

摘要:针对连铸坯表面测温现状和存在的问题,建立了双色法(R、G)与单色法(B)相结合的实时测温模型。采用可见光面阵 CCD 图像传感器进行铸坯表面图像采集,实验研究了不同光圈(F)与积分时间下的 R(红)、G(绿)、B(蓝)三基色值随温度的变化规律和动态响应区间。利用计算机图像处理技术建立了连铸热坯表面二维温度场与 RGB 的关联关系,实现了连铸热坯表面温度场的在线测量。通过控制 CCD 传感器光积分时间以提高 CCD 传感器的动态响应范围,为实现连铸坯表面温度场在线测量提供了理论基础和技术支撑。

关键词:温度测量;连铸;CCD 相机;温度分布;图像处理

中图分类号:TF538.6

文献标志码:A

CCD radiation temperature measurement method for hot continuous casting billet surface

OUYANG Qi^{a,b}, ZHAO Li-ming^b, CHEN Deng-fu^a, WEN Liang-ying^a, ZHANG Jian^b

(a. College of Materials Science and Engineering; b. Chongqing Key Laboratory of Metallurgical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: According to the present research status and existing problems of hot continuous billet surface temperature non contact measurement technology, a real time temperature measurement model, which combines two-color(R,G) and monochrome (B) of surface radiation image, is established. The surface image is collected through tricolor charge coupled device (CCD) sensor, at the same time, the temperature dynamic response range of CCD can be improved by controlling integrated time and setting different apertures. Through computer image process technology, multi-point temperature can be measured simultaneously, and 2-D temperature field distribution on continuous casting billet surface can be realized. It is proved by theory and application that the model and method can provide a theory and technology support for realizing surface temperature field on-line measurement for continuous casting billet.

Key words: temperature measurement; continuous casting; CCD cameras; temperature distribution; image processing

连铸坯表面温度是连铸过程中的一个重要参数,是优化拉坯速度、确定二次冷却强度、判断液相穴深度等的重要判据之一,连铸坯表面温度的准确

测量与控制,对提高铸坯质量具有重要意义^[1]。矫直点温度在线测量可监控铸坯矫直温度是否避开脆性温度区间;二冷区铸坯温度的回升对内部裂纹的

收稿日期:2010-11-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50674109)

作者简介:欧阳奇(1971-),男,重庆大学副教授,博士,主要从事冶金过程检测与控制、冶金过程数值模拟等方面研究,
(E-mail) yangqi@cqu.edu.cn.

产生有着很大的影响,通过温度实时测量可监控连铸坯的冷却速度,是减少表面裂纹缺陷的有效手段,并可防止鼓肚产生^[2-3],同时,连铸二冷区铸坯表面温度场准确测量可为连铸二冷动态配水提供温度反馈信号。目前,炼钢-连铸过程中的温度测量主要以热电偶接触式和红外非接触式为主,2种方法各有优缺点。热电偶测温方法相对简单、可靠、测量精度高,但需要充分热交换从而导致时间延迟和操作误差,无法及时提供连铸动态配水的温度信号;而红外测温方法无需与被测件接触、量程范围广、不受温度上限限制、不破坏被测物体的温度场、反应速度快等,实际应用中,红外方法易受环境因素、铸坯表面自身发射率等因素的影响,该方法主要以单点准确测量研究为主^[4]。随着高温铸坯热送热装及直接轧制(CC-DR)技术工艺的不断发展,对铸坯温度控制也提出了更高要求,在单点准确测量的基础上有必要致力于研究表面二维温度场的实时监测方法。近些年,国内外学者已开展了相关的理论和实验研究:北京科技大学的王欣等采用红外测温仪对连铸坯表面温度测量进行了实验研究^[5];沈阳理工大学陈亮等提出了铸坯表面温度线阵 CCD 辐射测量法^[6];北

京航空航天大学刘玉英从辐射换热机理出发,建立了有参与性介质影响时辐射测温问题的物理模型与数学模型^[7];德国 Wolfgang Glitscher 研究了中间包钢水热电偶接触测量方法,并分析了连铸过程中温度控制对铸坯质量的影响^[8];文献^[9]采用建立数学传热模型计算铸坯表面温度,对连铸二冷动态配水模型作了相关研究。笔者在前人研究的基础上,针对高温铸坯表面温度场 CCD 辐射测量存在的问题和技术难点,提出了基于 CCD 光积分时间控制,双基色与单基色相结合的实时测温模型,并通过实验研究了 CCD 辐射图像的三基色值随温度的变化规律以及不同光积分时间下的动态响应区间分布,文中建立的测温模型扩大了可见光 CCD 测温的动态响应区间,并为连铸坯二维温度场的准确测量提供了理论基础和技术支撑。

1 实验方法与装置

1.1 实验装置

实验装置主要由电阻加热炉、温控单元、计算机、CCD 探测器、热电偶及温度采集模块等组成,如图 1 所示。

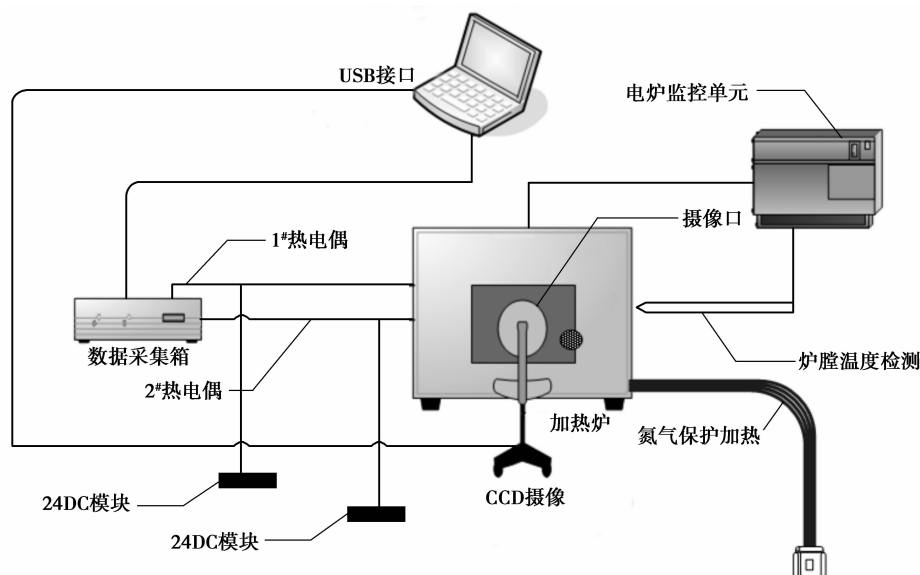


图 1 实验装置示意图

通过电阻加热炉对连铸坯试样进行加热,升温速率由控制仪表控制,温控范围为 600~1 100 ℃。升温过程中向炉内通入氮气对铸坯进行保护加热,以降低连铸坯表面氧化率。铸坯表面标定的热电偶温度信号经温度变送器送入 USB 采集器采集,高温铸坯表面图像通过 USB 接口的工业摄像机获取。

1.2 连铸坯表面温度检测

铸坯表面温度的准确测量是三基色测温进行实时标定的前提。通过检测铸坯升温过程中表面温度的变化,对 R、G、B 三基色进行量化分析。在铸坯表面焊接 K 分度热电偶,温度信号经温度变送器送至 USB 采集器。表面辐射图像经 USB 接口工业摄像机获取,并将热电偶温度信号和图像 R、G、B 三基色

值进行实时存储。铸坯表面热电偶安装方法如图 2 所示。

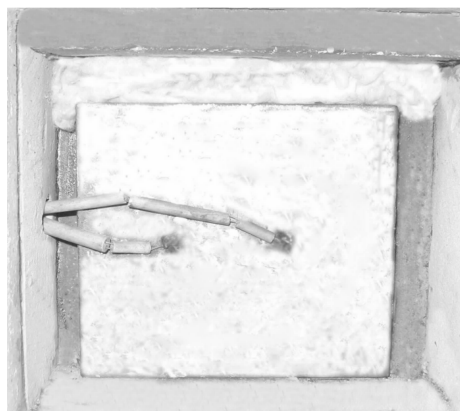


图 2 热电偶安装图

1.3 连铸坯辐射图像 RGB 采集

连铸坯表面辐射图像采集过程中,需控制 CCD 不同光圈和光积分时间,以防止 CCD 出现饱和和输出导致“图像发白”现象。不同的光圈和光积分时间下图像的饱和温度程度不同。F8、F3 光圈及不同光积分时间的铸坯表面辐射图像,如图 3 所示。

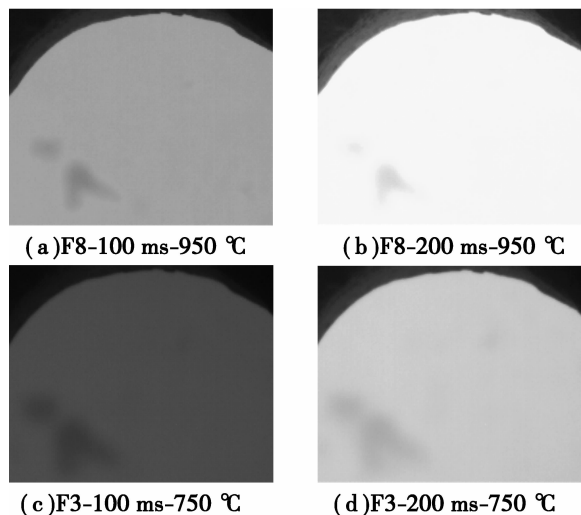


图 3 不同成像条件下的表面辐射图像

由图 3 可知,固定一定的光圈数,调节 CCD 光积分时间,R、G、B 饱和温度值会随之改变。铸坯在 950 °C 高温下图像三基色值未出现饱和,当积分时间调节为 200 ms 时将出现 R 值饱和,温度到达 1 050 °C 时,将出现 G、B 值依次饱和现象,全饱和时将显示为白色高亮度图像。因此,利用三基色值测温时应根据不同测温范围实时设定光积分时间和光圈,以建立图像 RGB 值与温度相对应的测量模型。

调节 CCD 光圈和积分时间来提取铸坯表面 R、

G、B 三基色值,当影响光谱相应的光学镜头透过率、光敏材料的量子效率、进光量等因素不变时,跟踪不同积分时间下各基色值的饱和温度,分析 R、G、B 三基色值测温的动态响应区间和最佳拟合曲线。图 4 给出了不同光圈数(F3、F8)与积分时间(100 ms、200 ms)组合下的 R、G、B 单色值随温度的变化规律。

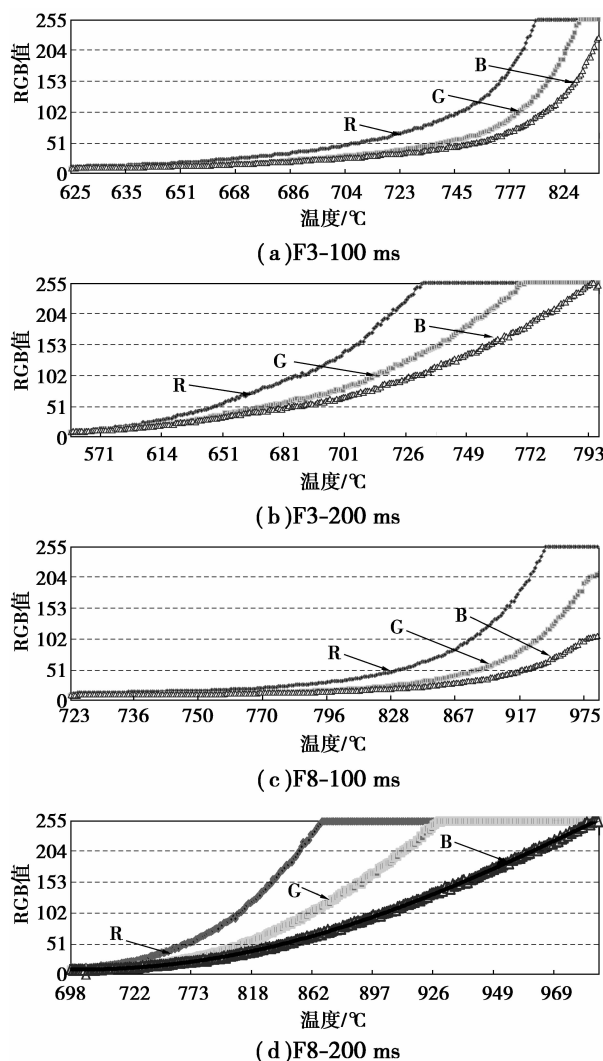


图 4 不同条件下 RGB 三基色值随温度变化曲线

由图 4 可知,一定光圈数不同积分时间 CCD 对铸坯表面颜色变化的感光灵敏度不同,曲线在不同温度段的变化梯度与光积分时间有关。因此,针对不同的温度测量范围,应选择合适 CCD 光积分时间,例如,温度测量范围为 700~1 000 °C 时,可用图 4(d)B 基色值与温度的拟合关系进行测量。对高温铸坯进行测量,应缩短 CCD 积分时间以满足 950 °C 以上的测量要求。在温度测量区间较大的情况下,若用单色法,应根据不同温度段控制相应的积分时间分段拟合以达到高温测量的要求。

2 建立测温模型

通过上面实验可知,用彩色三基色值的变化规律进行测温时,随温度升高,铸坯表面 R、G、B 单色值的动态响应区间随之改变。若用单色或双色测温法都不能得到较宽的动态响应曲线范围,因此,为增加彩色三基色测温方法的准确性,笔者提出采用单色值与双色值相结合的测温模型来增大单个积分时间内的动态测量响应范围。

2.1 理论基础

对于一般物体辐射,其辐射能及其光谱分布由 Planck 辐射定律描述为^[10-11]:

$$E(\lambda, T) = \varepsilon_\lambda \frac{C_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]}, \quad (1)$$

式中: C_1 为 Planck 第一辐射常数; C_2 为 Planck 第二辐射常数; $E(\lambda, T)$ 为单色辐射强度; T 为绝对温度; ε_λ 为单色辐射率; λ 为波长,其中,

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= 2\pi hc^2 = 3.724 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2 \\ C_2 &= \frac{hc}{k} = 1.4388 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

物体的单色辐射率与波长和温度的关系函数^[12]:

$$\varepsilon_\lambda = f(\lambda, T), \quad (3)$$

式中: c 为电磁波在真空中的传播速度, 2998 m/s ; h 为 Planck 常数, $6.026 \times 10^{-31} \text{ J} \cdot \text{s}$; k 为波耳茨曼常数, $1.380 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ 。

可知,物体辐射的光谱分布是物体温度和辐射率的单值函数。在可见光波段内,根据三基色原理可把光谱分布描述为 R、G、B 三基色值的“混合效果”颜色。物体的色彩取决于物体本身辐射的光谱成分,即单值取决于物体的温度和辐射率^[13]。

当 $C_2/(\lambda T) \gg 1$ 或者 $hc/k \gg \lambda T$ 时, Planck 公式可表示为^[14]:

$$E_0(\lambda, T) = \frac{C_1}{\pi} \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T}}. \quad (4)$$

当温度 $T < 3000 \text{ K}$ 和波长 $\lambda < 800 \text{ nm}$ 时,能很好地满足 $C_2/(\lambda T) \gg 1$, 因此,笔者用维恩公式代替普朗克公式计算。

2.2 单色与双色测温模型

在一定光学系统中,对遵守 Planck 辐射定律的一般物体,在高温下发出彩色光时,其色系数 B 定义为如下公式^[15]:

$$B = k \int_{380}^{780} \bar{b}(\lambda) \varepsilon_\lambda \frac{C_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]} d\lambda, \quad (5)$$

式中: $\bar{b}(\lambda)$ 为 CIE1931 标准色度; k 为比例系数^[16]。

可知, B 基色值的大小与物体自身的辐射光谱有关,因此,可通过对物体颜色系数的测量,并根据最小二乘法拟合上述方程,可计算出温度和辐射率的对应数值关系,如图 5 所示。

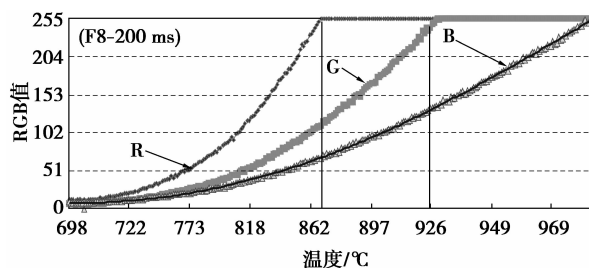


图5 RGB 三基色值饱和和区间

当光圈数为 F8, 积分时间为 200 ms 时,铸坯表面 B 基色值与温度的经验关系式为:

$$T = 9 \times 10^{-8} \times B^4 - 5 \times 10^{-5} \times B^3 + 0.0087 \times B^2 + 0.9761B + 683.8, \quad (6)$$

式中: T 为实测温度/ $^{\circ}\text{C}$; B 为蓝色基值;拟合系数 $R=0.9995$ 。

根据 R、G 单色值变化规律以及比色测温原理,选取 R 与 B 基色值所代表波长 λ_R 和 λ_G 作为推导依据,并选取波长分别为 700 nm 和 547 nm,因此,被测物体同一点发出的单色辐射能 S_R 与 S_G 的比值为^[17-18]:

$$\frac{S_R}{S_G} = \frac{E_0(\lambda_R, T)}{E_0(\lambda_G, T)} = \frac{\lambda_G^5}{\lambda_R^5} \exp\left[-\frac{C_2}{T} \left(\frac{1}{\lambda_R} - \frac{1}{\lambda_G}\right)\right]. \quad (7)$$

由式(7)得温度 T 为^[19]:

$$T = \frac{-C_2 \left(\frac{1}{\lambda_R} - \frac{1}{\lambda_G}\right)}{\ln\left[\frac{S_R}{S_G} \cdot \frac{\lambda_R^5}{\lambda_G^5}\right]}. \quad (8)$$

当改变 CCD 积分时间时,其 R、G、B 三基色值所代表波长的单色图像辐射亮度也随之改变,因此将其代表波长的辐射亮度定义为如下函数关系^[20]:

$$\begin{cases} E_0(\lambda_R, T) = f_1(\tau)R \\ E_0(\lambda_G, T) = f_2(\tau)G \end{cases}, \quad (9)$$

式中: τ 为积分时间; f_1 与 f_2 是以积分时间为自变量的函数,因此,根据式(7)、(8)、(9)可得^[21-22]:

$$\frac{S_R}{S_G} = \frac{f_1(\tau)R}{f_2(\tau)G}, \quad (10)$$

令 $\frac{f_1(\tau)}{f_2(\tau)} = k_\tau$, 温度 T 为:

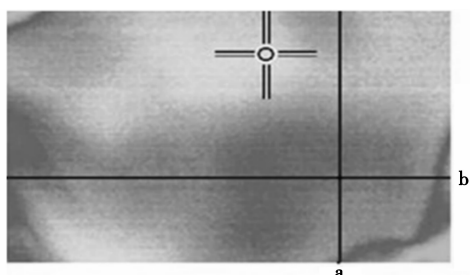
$$T = \frac{-C_2 \left(\frac{1}{\lambda_R} - \frac{1}{\lambda_G}\right)}{\ln\left[k_\tau \frac{R}{G} \cdot \frac{\lambda_R^5}{\lambda_G^5}\right]}, \quad (11)$$

测量过程中,当温度达到一定界限时,R、G、B

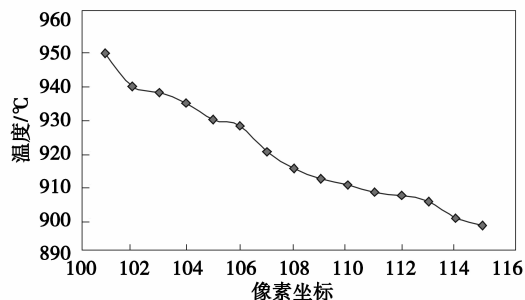
三基色值会依次出现饱和现象,如图 5 所示,R、G 值的饱和温度点分别为 867 °C 与 922 °C,因此在积分时间固定的情况下,利用双色与单色相结合的方式增加测温的动态响应区间,即

$$\begin{cases} \text{式(11)} & T < 867\text{ }^{\circ}\text{C} \\ \text{式(6)} & T \geq 867\text{ }^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (12)$$

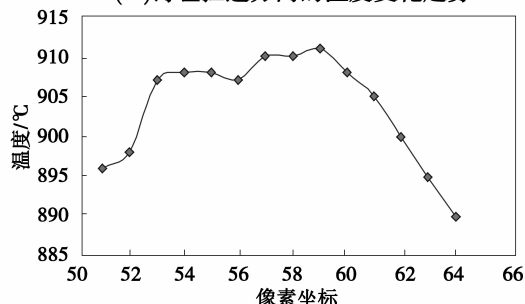
此时,温度测量的动态响应区间为 733~979 °C。



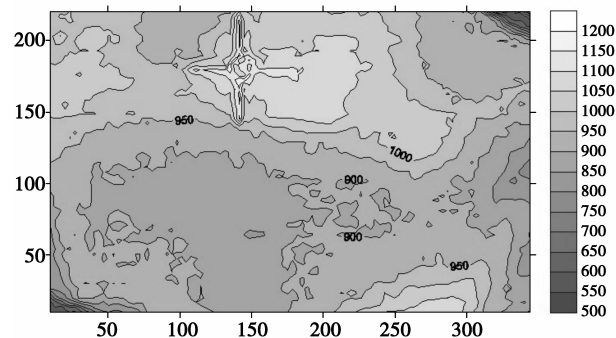
(a)铸坯表面 CCD 辐射图像



(b)铸坯拉速方向上的温度变化趋势



(c)铸坯宽度方向上的温度变化趋势



(d)铸坯表面温度场分布图

图 6 连铸热坯表面温度场分布

面阵彩色 CCD 对物体表面温度进行测量时,得到的是被测物体的二维温度场信息,利用计算机图

像处理技术,扫面一帧图像各像素的 R,G,B 值并利用上述测温模型可得到物体表面各点的温度分布情况,可知,沿拉速方向铸坯表面温度逐渐降低,铸坯宽度方向温度分布呈现两边低、中间高的温度分布趋势。

3 结 语

1)通过控制 CCD 光圈和积分时间,可防止高温铸坯表面辐射图像的过饱和现象。

2)建立了基于积分时间控制的双色法与单色法相结合的彩色 CCD 测温模型,扩大了连铸坯表面温度测量的动态响应区间和测量范围,并实现了铸坯表面二维温度场的在线测量。

参考文献:

[1] LOUHENKILPI S, LAITINEN E, NIEMINEN R. Real-time simulation of heat transfer in continuous casting[J]. Metallurgical and Materials Transactions B,1993,24(4):685-693.

[2] BAILLIS D, SACADURA J F. Thermal radiation properties of dispersed media: theoretical prediction and experimental characterization [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2000,67(5): 327-363.

[3] 王欣,刘青,王先勇,等. 连铸坯表面温度实时数据采集系统[J]. 炼钢,2009,25(5):59-65.
WANG Xin, LIU QING, WANG XIAN-YONG, et al. Research on slab surface temperature data real time acquisition system [J]. Steelmaking, 2009, 25 (5): 59-65.

[4] 王宏静,王军,岳尔斌. 红外双色测温仪在连铸坯表面测温中的应用[J]. 宽厚板,2000,6(2):34-36.
WANG HONG-JING, WANG JUN, YUE ER-BIN. Applying infrared double-wave temperature indicator to the continuously cast slab surfaces temperatures indicating[J]. Wide and Heavy Plate, 2000, 6 (2): 34-36.

[5] 王欣,刘青,王先勇,等. 连铸坯表面温度实时数据采集系统[J]. 炼钢,2009,25(5):59-65.
WANG XIN, LIU QING, WANG XIAN-YONG, et al. Research on slab surface temperature data real time acquisition system [J]. Steelmaking, 2009, 25 (5): 59-65.

[6] 陈亮,谢植,杨青川. 基于线阵 CCD 铸坯表面温度测量装置的设计[J]. 沈阳理工大学学报,2005,24(2): 10-12.
CHEN LIANG, XIE ZHI, YANG QING-CHUAN. Design of a temperature measurement equipment for

- testing the temperature on the surface of casting blank based on the line array CCD [J]. Transaction of Shenyang Ligong University, 2005, 24(2): 10-12.
- [7] 刘玉英, 张欣欣. 基于辐射换热理论研究水雾对红外辐射测温仪的影响[J]. 红外技术, 2008, 30(10): 602-605.
- LIU YU-YING, ZHANG XIN-XIN, Investigation on the effects of water fog on infrared radiation pyrometer based on the radiation heat transfer theory[J]. Infrared Technology, 2008, 30(10): 602-605.
- [8] GLITSCHER W, KENDALL M, Thermocouple- based continuous temperature measurement systems in continuous casting[J]. Stahl und Eisen, 2008, 128(9): 87-92.
- [9] LIU W H, XIE Z, JI Z P, et al. Dynamic water modeling and application of billet continuous casting[J]. Journal of Iron and Steel Research: International, 2008, 15(2): 14-17.
- [10] WEN L Y, BAI C G, OUYANG Q, et al. Flame radiant image numeralization for pulverized coal combustion in BF raceway [J]. Journal of Chongqing University: English edition, 2005, 4(4): 195-198.
- [11] Hater M. Results from a curved mould continuous casting machine pipe and plate steel[C]//Open Hearth Proceedings, AIME, 1973. [S. l.]: Transducer and Microsystem Technologies, 2008: 24-28.
- [12] 李亦楠, 于洋, 陈亮. 基于 MWNN 的铸坯表面多光谱辐射测温方法研究[J]. 沈阳理工大学学报, 2006, 25(2): 59-63.
- LI YI-NAN, YU YANG, CHEN LIANG. An experimental study of multi-spectra radiation-thermometry on the billet surface based on the MWNN [J]. Transactions of Shenyang Ligong University, 2006, 25(2): 59-63.
- [13] JIAO L C, PAN J, FANG Y W. Multi-wavelet neural network and its approximation properties [J]. IEEE Transaction on Neural Network, 2001, 12(5): 1060-1066.
- [14] 李志宏, 穆怀萍, 姜凡, 等. 多波长可视化测温系统标定的实验研究[J]. 计量学报, 2007, 28(2): 129-133.
- LI ZHI-HONG, MU HUAI-PING, JIANG FAN, et al. The calibration and experiment research of multiple wavelength visual method flame temperature instrumentation system [J]. Acta Metrologica Sinica, 2007, 28(2): 129-133.
- [15] HUANG Y, YAN Y, RILEY G. Vision-based measurement of temperature distribution in a 500-kW model furnace using the two-colour method [J]. Measurement, 2000, 28(3): 175-183.
- [16] 孙元, 彭小奇, 李晟, 等. CCD 辐射测温的动态范围研究[J]. 传感器与微系统, 2008, 27(2): 24-28.
- SUN YUAN, PENG XIAO-QI, LI SHENG, et al. Research on dynamic range of CCD radiation temperature measurement [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2008, 27(2): 24-28.
- [17] 孙元, 彭小奇, 李晟, 等. CCD 辐射测温的动态范围研究[J]. 传感器与微系统, 2008, 27(2): 24-28.
- SUN YUAN, PENG XIAO-QI, LI SHENG, et al. Research on dynamic range of CCD radiation temperature measurement [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2008, 27(2): 24-28.
- [18] 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): 419-424.
- ZHANG JIAN, YANG LI, LIU HUI-KAI. Effect of environment Object on Infrared Temperature Measurement [J]. Infrared Technology, 2005, 27(5): 419-424.
- [19] 杭庆彪, 陈乐, 刘瑞祥. 红外辐射相对温度测量法的新研究[J]. 红外技术, 2009, 31(6): 315-318.
- HANG QING-BIAO, CHEN LE, LIU RUI-XIANG. New research on the method of thermal measurement with temperature reference [J]. Infrared Technology, 2009, 31(6): 315-318.
- [20] 黄龙祥, 沈湘衡, 宋江涛. 基于热像仪的物体波段发射率的测量[J]. 激光与红外, 2009, 39(2): 159-163.
- HUANG LONG-XIANG, SHEN XIANG-HENG, SONG JIANG-TAO. Measure target wide band emissivity with thermal imager [J]. Laser and Infrared, 2009, 39(2): 159-163.
- [21] MADDING R P. Emissivity measurement and temperature correction accuracy considerations [C]// In: Proceedings of SPIE Conference on Thermosense XXI, Oriando, Florida, April, 1999. [S. l.]: SPIE, 1999: 393-401.
- [22] 欧阳奇, 陈登福, 温良英. 基于机器视觉的发光体断面温度辐射测量方法[J]. 过程工程学报, 2008, 8(S1): 260-265.
- OUYANG QI, CHEN DENG-FU, WEN LIANG-YING. Radiation temperature measurement method for luminous body section based machin vision [J]. The Chinese Journal of Processing Technology, 2008, 8(S1): 260-265.