

基于多信息融合铸坯温度场测量方法及影响因素分析

马交成¹, 刘 军², 王 彪³

(1. 东北大学机械工程与自动化学院, 辽宁沈阳 110819; 2. 东华理工大学核工程与地球物理学院, 江西南昌 330013;
3. 东北大学秦皇岛分校资源与材料学院, 河北秦皇岛 066004)

摘 要: 连铸生产过程中, 铸坯内部温度场无法实时测量, 表面温度难于准确测量, 而稳态传热模型不能模拟实际工艺参数频繁变化的浇注过程, 本文建立了实时凝固传热模型, 并对模型的影响因素进行了分析. 考虑到铸坯表面随机剥离的氧化铁皮对其测温的干扰, 研究建立了基于面阵的 CCD 测温系统, 并结合数值分析方法, 消除了铸坯表面氧化铁皮对测温的干扰, 还原铸坯表面真实温度, 使测量的铸坯表面温度波动在 $\pm 10^\circ\text{C}$ 范围内. 通过采用 CCD 面阵测温、射钉测厚以及数值分析方法, 实现了基于多信息融合的铸坯温度场在线测量, 为二冷配水动态优化和铸坯温度场闭环控制提供了基础.

关键词: 连铸; 模型; CCD 测温仪; 测温

中图分类号: TF777 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2015)08-1616-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.08.022

A Temperature Field Measurement Method of Billet Based on Multi-Information Fusion and the Analysis of Influencing Factors

MA Jiao-cheng¹, LIU Jun², WANG Biao³

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China;
2. School of Nuclear Engineering and Geophysics, East China Institute of Technology, Nanchang, Jiangxi 330013, China;
3. School of Resources and Materials, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract: In the continuous casting process, the internal temperature of billet is difficult to be measured real-time and the surface temperature is difficult to be measured accurately. The steady-state heat transfer models can't be used for simulation the actual casting operations which vary frequently. A real-time heat transfer model was developed, especially the influencing factors of model were analyzed. Considering the interference of scales which strip randomly on the billet surface to the temperature measurement, the CCD (charge coupled device) surface temperature measurement system was developed. Combined with numerical analysis method, the real temperatures of billet were restored. The impact of scales was effectively eliminated and the fluctuation of measured surface temperature within the range of $\pm 10^\circ\text{C}$. The temperature field measurement of billet was realized based on multi-information fusion of CCD temperature measurement system, measured shell thickness and numerical analysis method. This provides the basis that the surface temperatures take into account to closed-loop control and dynamic optimization water distribution.

Key words: continuous casting; model; CCD thermometer; temperature measurement

1 引言

连铸生产过程中, 铸坯二次冷却是决定内部质量的关键环节, 其铸坯表面温度是确定二次冷却强度、优化二冷控制的关键参数. 常常由于不合理的浇注工艺和二冷配水制度导致铸坯内部产生质量缺陷, 为了消除铸坯

内部缺陷, 必须对其凝固过程进行控制^[1~3]. 若能对铸坯表面温度进行测量, 并将测量的温度反馈到连铸二冷控制系统进行工艺优化, 便可以实现二冷配水动态优化和铸坯温度场闭环控制, 这对于连铸二冷控制、减少铸坯内部裂纹、提高连铸自动化水平均具有重要意义. 由于受铸坯二冷区高温、水蒸气以及铸坯表面的水膜和

随机剥离的氧化铁皮等因素的影响,使得基于传统的接触式测温方法难以对运动的铸坯进行温度测量,而目前普遍采用的红外单点测温仪只能提供单点的温度值,无法克服铸坯表面随机剥离的氧化铁皮对测量结果造成的干扰^[4,5].特别是铸坯内部温度无法实时测量.不同学者建立了很多凝固传热模型,并对连铸二冷工艺参数进行了优化^[1,2],但是这些传热模型都是模拟离线稳态下的铸坯温度场.在实际生产过程中,由于受设备、流程和实际生产条件等因素的影响,其过热度和拉速等工艺参数处于动态变化过程中,使得基于稳定条件下建立的传热模型满足不了实际生产的要求^[6].

本文在分析连铸生产过程中浇注工艺条件频繁变化特性的基础上,建立了铸坯实时凝固传热模型,并对模型网格划分对其计算结果的影响进行了分析.通过 CCD 面阵测温仪及数字分析方法,有效的消除了随机剥离的氧化铁皮对测温的干扰,还原了铸坯表面真实温度,实现了铸坯表面温度的可靠测量.考虑到铸坯表面换热系数难以直接测量,研究利用遗传算法对铸坯二冷各段的换热系数进行了有效辨识.通过传热模型的在线验证,实现了基于多信息融合的铸坯温度场测量,为二冷配水动态优化和铸坯温度场闭环控制提供了基础.

2 实时传热模型

连铸数学模型用于描述热传递和铸坯的凝固过程.因为钢的高能量、低传导和高的拉坯速度,这就导致热传递在拉坯方向与侧面方向相比可以忽略.因而可以用下面的二维非稳态凝固方程(1)描述^[1~3].

$$\rho(T)c(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(k(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k(T)\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \dot{q} \quad (1)$$

为了对模型进行求解,同时考虑到铸坯表面强制冷却导致其靠近表面处温度梯度较大和铸坯的对称性,只对铸坯断面的四分之一进行计算.其模型的网格划分及边界条件如图 1 所示,根据控制容积法能量守恒原理式(1)可以转化为式(2),对于公式(2)时间采用后

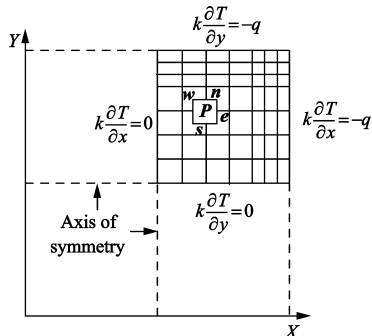


图1 网格划分及边界条件

向欧拉法,空间采用中心差分公式得到离散化式(3),离散化后的方程求解过程采用交替方向隐式法进行分别对其 x 和 y 方向进行求解,在每一方向分别化为追赶法求解三对角矩阵^[7].

$$\int_s^n \int_w^e \int_t^{t+\Delta t} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dt dx dy = \int_t^{t+\Delta t} \int_s^n \int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dy dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \int_s^n \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) dy dx dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \int_s^n \dot{q} dx dy dt \quad (2)$$

$$\rho c_{pe} (T_P - T_P^0) \Delta x \Delta y = \left[\lambda_e \frac{T_E - T_P}{(\delta x)_e} - \lambda_w \frac{T_P - T_W}{(\delta x)_w} \right] \Delta y \Delta t + \left[\lambda_n \frac{T_N - T_P}{(\delta y)_n} - \lambda_s \frac{T_P - T_S}{(\delta y)_s} \right] \Delta x \Delta t \quad (3)$$

(1) 初始条件:

$$T = T_0 \quad (4)$$

其中 T_0 为浇铸温度

(2) 边界条件:

结晶器区^[1,3]:

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = a - b\sqrt{t} \quad (5)$$

二冷区内:

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_{\text{war}}) + \varepsilon \sigma (T^4 - T_{\text{air}}^4) \quad (6)$$

空冷区中:

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = \varepsilon \sigma (T^4 - T_{\text{air}}^4) \quad (7)$$

式中: k 为热传导 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$); c 为比热 ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$); ρ 为密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); \dot{q} 为因凝固发生相变释放的潜热; T_{war} 表示冷却水温度; T_{air} 表示周围环境温度; ε 表示铸坯表面发射率; σ 表示斯蒂芬-波尔兹曼常数 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$); $\Delta x, \Delta y$ 分别为 x 方向和 y 方向网格; Δt 为模型的层间隔; P 为求解的中心节点; E, S, N, W 代表与其相邻的节点; h 表示对流换热系数 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)^[8], 其表达式如下:

$$h = \frac{1570 w^{0.55} (1 - 0.0075 T_{\text{war}})}{\alpha} \quad (8)$$

式中: w 为水流密度, T_{war} 为铸坯表面冷却水的温度, α 为其冷却段相关的系数,必须对其进行有效辨识.

为了实现铸坯动态温度场的实时测量,本文从建模的角度,通过把铸坯划分为多个切片,每个切片划分为有限微小单元.从弯月面到矫直点跟踪每个单元,将其初始温度、浇注速度、冷却水量等初始条件和生产过程所处的位置与单元的温度场相关联,从而使每个单元与时间相关,从稳态模型转变为实时动态模型.同时,为了计算实际浇注过程中的铸坯实时温度场,必须对实际现场的浇注工艺参数进行实时采集.采样间隔

要足够小,才能及时更新现场工艺数据,准确反映出铸坯温度场的变化.但采样间隔也不能太小,其值的选取还必须兼顾模型计算时间,要大于模型的计算时间,留有一定的余量.

3 铸坯表面温度测量及二冷换热系数的参数辨识

连铸实时传热模型的正确与否对铸坯温度场的计算、坯壳的厚度、液相穴的长度、矫直点的温度,以及拉速和水量的动态优化控制至关重要,因此必须对模型进行实时验证.由于利用射钉测厚无法对铸坯进行实时测量,且坯壳厚度对铸坯表面温度不敏感,所以本研究主要采用铸坯表面测温对模型进行实时验证,并进行了少量的稳态条件下的射钉测厚.

采用传统的红外测温仪,由于其是单点测量,受铸坯表面随机剥离的氧化铁皮干扰,其测量温度波动可达 100°C ^[4,9].为了消除温度波动而采用的时间滤波导致测温的滞后和偏差.本研究通过 CCD 面阵测温仪的高分辨率检测到铸坯表面 1mm 直径范围的细微变化,从剥离氧化铁皮之间的缝隙中检测铸坯表面温度,有效地克服了氧化铁皮对测温的干扰,从而实现铸坯表面温度的稳定可靠测量.图 2 显示了 CCD 摄像机测温的系统框架结构.

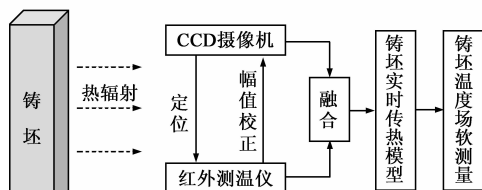


图2 CCD摄像机测温系统

由于二冷换热系数难于直接测量,为了保证传热模型的准确性,本文采用遗传算法对二冷各段的换热系数进行了辨识.考虑到铸坯表面温度和坯壳厚度测量的误差,进行了如下限制:

测量的坯壳厚度和模型计算厚度偏差限定在 2mm 范围内.

$$|H^{\text{cal}} - H^{\text{meas}}| \leq 2 \quad (9)$$

测量的铸坯表面温度和模型计算温度限定在 10°C 范围内.

$$|T^{\text{cal}} - T^{\text{meas}}| \leq 10 \quad (10)$$

通过减少测量值和模型计算值间的偏差作为目标函数:

$$F(\alpha) = \sum_{i=1}^n \frac{|H_i^{\text{cal}} - H_i^{\text{meas}}|}{H_i^{\text{meas}}} w_i^H + \sum_{i=1}^m \frac{|T_i^{\text{cal}} - T_i^{\text{meas}}|}{T_i^{\text{meas}}} w_i^T + P(\alpha) \quad (11)$$

式中: w_i^H , w_i^T 分别是测厚和测温的加权, $P(\alpha)$ 针对不符

合测量值和计算值限定的惩罚函数.

基因算法的辨识过程如下^[1]:

(a)初始化,产生二冷换热系数族群;(b)根据产生的二冷换热系数,通过模型计算铸坯温度场,并计算目标函数;(c)修改不符合约束条件的二冷换热系数;(d)产生新的基因群;(e)计算目标函数,如果目标函数 $F(\alpha) \rightarrow 0$,结束,输出二冷各段换热系数,否则转 b.

4 讨论

本研究针对某实际钢厂方坯连铸机,其弧型半径为 10m,结晶器长度为 0.85m,二冷喷淋各段长度分别为:足辊段长 0.32m,二冷一段长 1.95m,二冷二段长 5.69m,空冷段长 6.89m.浇注钢种为 Q235,铸坯断面为 $150 \times 150\text{mm}$.由于受设备等条件限制,其浇注过程中钢水过热度的波动导致拉速、二冷水量经常发生频繁变化.为了研究频繁变化浇注条件下,铸坯温度场动态分布情况及模型的可靠性,对其模型网格划分及 CCD 测温的影响因素进行了实例分析.

4.1 模型网格划分影响实例

为了研究该模型网格划分过程中,网格划分变化对模型计算结果的影响,分别采用截面为 10×10 , 20×20 , 30×30 , 40×40 网格数进行计算,其铸坯温度和坯壳厚度分别如图 3 和图 4.从图中可以看出,采用 30×30 的网格数目能很好的满足计算准确性.

为研究纵向层间距对模型计算结果的影响,分别采

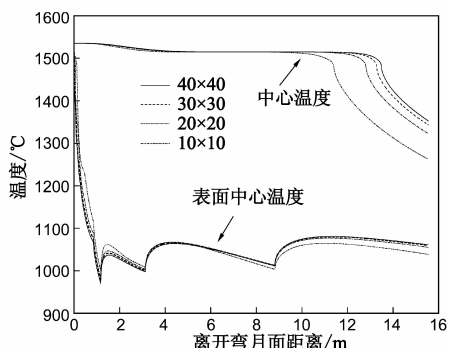


图3 不同网格条件下铸坯温度

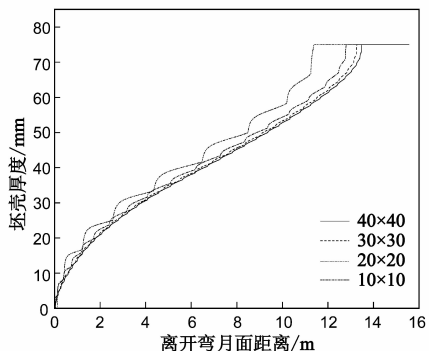


图4 不同网格条件下的坯壳厚度

用层间距为 0.001m、0.005m、0.01m 对模型进行了求解,其铸坯温度和坯壳厚度分别如图 5 和图 6。从图中可以看出,采用 0.01m 的层间距已能很好的满足精度要求。

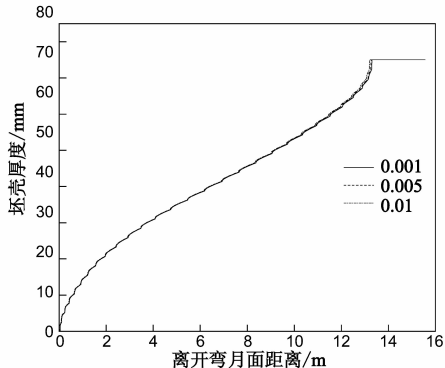


图5 不同时间步长下的温度变化

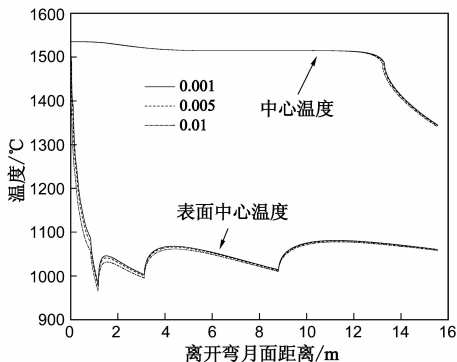


图6 不同时间步长下的坯壳厚度变化

4.2 CCD 铸坯表面测温影响实例

铸坯表面温度范围在 700 ~ 1200℃,且铸坯自身的辐射强度比周围环境要强的多,周围环境通过铸坯表面反射的能量对测温的影响,经过滤光片后可以忽略不计。对于测量仪器中光学传感器和电路技术带来的误差,可以将这一部分的误差降低或者采取补偿措施来消除,因此误差主要来源可能是由于铸坯表面发射率或随机剥离氧化皮的影响,但是经过理论和工业现场检验发现,在二冷出口处,铸坯表面的氧化层的发射率波动并不剧烈。主要是由于随机剥离的氧化皮导致了传热方式发生改变(如图 7 所示),从而导致铸坯表面温度测量的剧烈波动。通过 CCD 面阵摄像机采集到铸坯表面温度分布数据(如图 8 所示),无法获取剥离的氧化层下铸坯表面的真实温度,故结合数值分析方法对 CCD 采集到的铸坯表面温度数据进行温场重建,还原铸坯表面真实温度,图 9 是结合数值分析方法还原的铸坯真实表面温度分布,从中可以看出,如果采用传统的单点红外测温仪,会导致测量温度波动很大,为了消除温度波动而采用的均值滤波,导致测温的滞后和偏差,而且并不能消除氧化铁皮对测温的干扰,而本研究方法可以有效的消除氧化铁皮对测温的干扰,而且响应

及时、温度波动小。

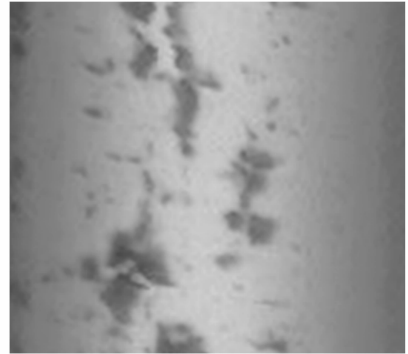


图7 铸坯表面氧化铁皮分布

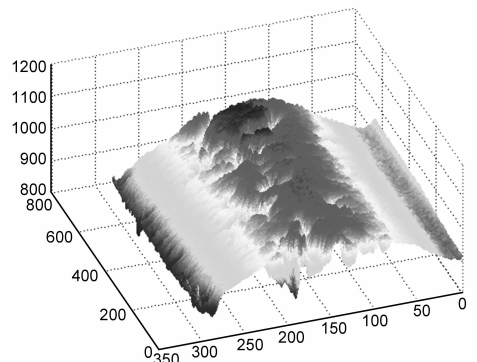


图8 铸坯表面温场分布

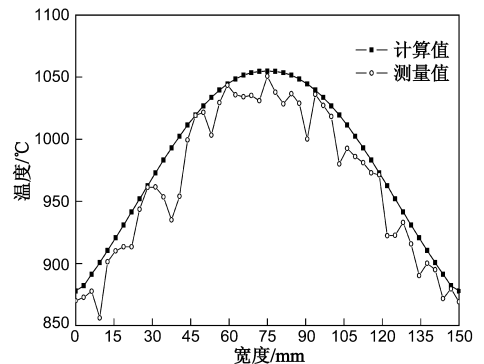


图9 铸坯宽度方向温度重建

对建立的实时传热模型,通过稳定条件下测温 and 测厚,用遗传算法对二冷各段换热系数进行辨识,其二冷各段换热系数 α 分别为 3.68, 4.17 和 4.49。图 10 是测量值以及换热系数辨识后的模型计算值对比,从中可以看出模型计算值和测量值能够很好的吻合。

为了测试和验证实时传热模型的动态性能,在实际浇注过程中,通过模型的在线运行和实测数据进行了对比。图 11 是实际浇注过程中,在空冷段 12.51m 处对模型表面温度的计算值和测量值进行了对比,从中可以看出,模型计算值和实测值能够很好的吻合且能及时响应。从而实现了基于多信息融合的铸坯温度场

在线测量,为把铸坯温度信号引入二冷动态配水,实现铸坯二冷配水闭环控制提供了基础。

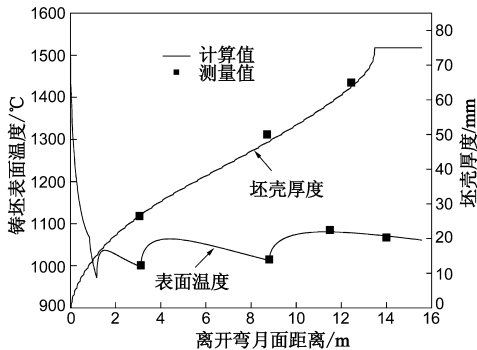


图10 参数辨识后模型计算值与测量值对比

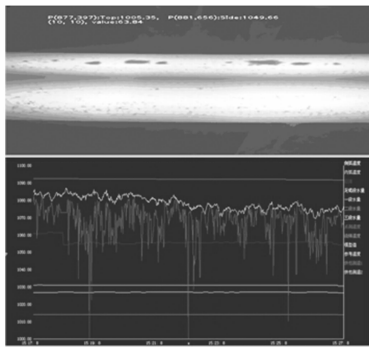


图11 表面测温及铸坯温度软测量现场应用界面

5 结论

本文建立了连铸坯实时凝固传热模型和铸坯二冷换热系数辨识方法,并针对模型的网格划分对其影响进行了实例分析.通过 CCD 面阵测温系统及结合数值分析方法,可以有效地消除铸坯表面随机剥离的氧化铁皮对测温的干扰,使得测量点温度波动范围在 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 内.通过采用 CCD 表面测温、射钉测厚以及数值分析方法,实现了基于多信息融合的铸坯温度场在线测量,为把铸坯温度信号引入连铸二冷动态配水,实现铸坯二冷配水闭环控制提供了基础。

参考文献

- [1] C A Santos, et al. Mathematical modeling and optimization strategies (genetic algorithm, and knowledge base) applied to the continuous casting of steel[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2003, 16(5-6): 511-527.
- [2] Wang H M, Li G R. Mathematical heat transfer model research for the improvement of continuous casting slab temperature[J]. ISIJ International, 2005, 45(9): 1291-1296.
- [3] Ma J C, et al. Simulation and application of dynamic heat transfer model for the improvement of continuous casting process [J]. Material Science and Technology, 2009, 25(5): 636-639.

- [4] Meriaudeau F. Real time multispectral high temperature measurement: Application to control in the industry[J]. Image and Vision Computing, 2007, 25(7): 1124-1133.
- [5] Sutter G, et al. An experimental technique for the measurement of temperature fields for the orthogonal cutting in high speed machining[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2003, 43(7): 671-678.
- [6] S Louhenkilpi, et al. 3D steady state and transient simulation tools for heat transfer and solidification in continuous casting [J]. Material and Science Engineering A, 2005, 413: 135-138.
- [7] J I Ramos. A finite volume method for one-dimensional reaction-diffusion problems[J]. Applied Mathematical and Computation, 2007, 188(1): 739-748.
- [8] Mizikar EA. Spray cooling investigation for continuous casting of billets and blooms[J]. Iron Steel Engineering, 1970, 47: 53-60.
- [9] Liu Jun, et al. New solution to surface temperature of casting slab measurement based on preceded reflect and multi-wavelength[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2012, 19(8): 12-16.
- [10] 郑德忠,周颖慧.单 CCD 数字滤光温度场测量[J].电子学报, 2009, 37(12): 2774-2777.
Zheng Dezhong, Zhou Yinghui. Digital filtering for temperature field measurement using a single CCD camera[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(12): 2774-2777. (in Chinese)
- [11] 刘军,胡振伟,等.一种新的连铸中间包钢水液位测量方法[J].电子学报, 2010, 38(5): 1196-1200.
Liu Jun, et al. New solution to molten steel level measurement in continuous casting tundish [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(5): 1196-1200. (in Chinese)

作者简介



马交成 男, 1979 年生于山西省夏县. 东北大学机械工程与自动化学院讲师. 研究方向为复杂过程参数检测、建模及优化控制.

E-mail: majiaocheng@163.com



刘军 男, 1981 年生于江西省安福县. 东华理工大学核工程与地球物理学院教师. 研究方向为冶金参数检测、图像处理、核数据处理等.

E-mail: jun_liu_2003@163.com