

# 基于遗传算法的板坯连铸凝固模型表面喷雾冷却优化研究

王海霞<sup>1</sup>, 王军<sup>2</sup>

(1. 长春职业技术学院 工程技术分院, 长春 130000; 2. 长春大学 材料工程学院, 长春 130000)

**摘要:** 目的 对连续铸造过程中凝固模型表面喷雾冷却进行优化, 实现表面温度的最优冷却。方法 分析板坯的连铸工艺过程, 推导板坯连铸的凝固模型, 获得热传递方程式, 对冷却过程的边界条件进行约束。对凝固模型进行仿真验证, 与基准温度变化曲线进行比较。结合具体实例确定冷却过程中需要优化的目标对象, 采取遗传算法搜索最优解, 对相关参数进行仿真。结果 和优化前相比, 优化后板坯凝固过程中单位时间内温度变化波动较小, 水流量密度最大值约为  $35 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。结论 优化后的板坯连铸过程中单位时间内喷雾冷却温度变化均匀, 喷水量较少, 能避免板坯连铸凝固模型表面裂纹的产生, 提高产品的质量, 效果较好。

**关键词:** 凝固模型; 优化; 遗传算法; 板坯连铸; 冷却; 温度; 仿真

**中图分类号:** TF777 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)02-0194-05

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.02.031

## Study of Spray Cooling in Process of Continuous Slab Casting Based on Genetic Algorithm

WANG Hai-xia<sup>1</sup>, WANG Jun<sup>2</sup>

(1. School of Engineering Technology, Changchun Vocational Institute of Technology, Changchun 130000, China,

2. School of Materials Engineering, Changchun University, Changchun 130000, China)

**ABSTRACT:** **Objective** To optimize spray cooling of solidification model surface in the process of continuous casting so as to realize the optimal cooling surface temperature. **Methods** The analysis of the continuous slab casting process was conducted, the solidification model of continuous slab casting was deduced and the heat transfer equations were given to constraint boundary conditions of cooling process. The model of solidification simulation was verified and compared with the reference temperature change curve. In combination with a practical example, the target object needed to be optimized was determined during the cooling process. The genetic algorithm was adopted to search the optimal solution, and the relevant parameters were simulated. **Results** Compared with before simulation, the temperature fluctuation per unit time was small during the solidification process of slab after optimization and the maximum water flow density was about  $35 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ . **Conclusion** The fluctuation of spray cooling temperature was evenly in

收稿日期: 2015-12-04; 修订日期: 2015-12-25

Received: 2015-12-04; Revised: 2015-12-25

基金项目: 国家自然科学基金(50906102)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (50906102)

作者简介: 王海霞(1980—), 女, 硕士, 讲师, 主要研究方向为机械材料加工。

Biography: WANG Hai-xia(1991—), Female, Master, Lecturer, Research focus: mechanical process of materials.

通讯作者: 王军(1965—), 男, 教授, 主要研究方向为材料加工技术。

Corresponding author: WANG Jun(1965—), Male, Master, Professor, Research focus: materials processing technology.

the optimized process of continuous slab casting in unit time and the water quantity was less, avoiding cracks on the surface of slab caster solidification model and improving the quality of the products, which achieved better effects.

**KEY WORDS:** solidification model; optimization; genetic algorithm; continuous slab casting; cooling; temperature; simulation

钢铁产业是国民经济的基础性产业,在社会发展中应用非常广泛,钢铁质量受生产加工和使用过程中各工艺因素影响<sup>[1-2]</sup>。连续铸造是钢铁生产中的重要环节,连续铸造装备与技术的改进和提高对于带动冶金行业发展特别重要。因此,优化钢铁产业与产品构造,对社会的发展有着重要的促进作用。可以说,连续铸造技术水平在某种程度上能够代表一个国家钢铁行业的发展水平。连续铸造技术经过多年的发展,目前已经渗透到各个行业,成为特别重要的铸造技术。和以往的模铸相比,连续铸造技术不但缩短了整个生产加工流程、提高了生产效率、改善了产品质量,而且还降低了生产成本。因此,在国家铸造产业中占有重要的地位。

随着国内连续铸造技术的快速发展以及自动化控制设备的改进,连续铸造的冷却优化方法也在不断改进和完善,很多研究人员对板坯连续铸造过程中的喷雾冷却展开了研究。程常桂、靳星等<sup>[3-4]</sup>等通过对铸件毛坯横断面建立热传导模型,利用仿真方式对比分析不同的冷却喷嘴类型和位置对铸件毛坯质量的影响;高文江<sup>[5]</sup>和 Lubomír Klimes<sup>[6]</sup>通过高温状态下板坯变形变化曲线,得到最优的二次冷却温度,避免了铸件二次冷却过程裂纹的产生;李艳磊、Subhasis Chaudhuri 等<sup>[7-8]</sup>通过数学方法找到最小凝固单元,通过检测换热强度,实时控制冷却水量,达到优化板坯连铸件的质量控制;张亚竹等<sup>[9-11]</sup>构建了测量连续铸造二次喷雾冷却过程中各点温度变化的实验装置,并根据温度变化曲线,求得表面的热流密度分布。以上研究都存在对板坯连铸表面和中心的温度控制不合理的情况,直接影响产品质量,需要对板坯连铸表面和中心温度进行更加精准的控制。目前,遗传算法在材料加工中的应用取得较大的进展,特别在航空宇航制造方面,丁玲等<sup>[12]</sup>针对复合材料离散化的特点,利用遗传算法对蜂窝夹层结构蒙皮的铺层进行优化,得到了较好的优化效果;史旭东等<sup>[13]</sup>为达到减轻机翼结构重量目的,针对复合材料铺层变量较多且计算复杂的问题,利用遗传算法实现对较多复合材料铺层和复合材料机翼结构尺寸的优化设计。据此,本文对板坯的连铸过程进行分析,构建凝固的数学模型,对喷雾区域的边界条件进行约束,并进行仿真验证。通过定义质量标准和资源标准的目标函数,采取遗传算

法确定优化的参数,对温度变化和水流量的密度进行了仿真。结果表明,优化后可以有效实现铸坯温度冷却均匀,降低水的消耗。

## 1 板坯连铸过程

加热炉熔化流出来的钢水经过精炼炉再次处理以后,通过模具将钢水铸造成各种类型、各种规格的钢坯。板坯连铸过程从打开钢包钢水倒到中间包作为缓冲。然后,钢液通过浸没注入喷嘴注入模具。模具中的钢液水平是由一个流量和铸造速度之间的显示控制器进行管理。通过初步冷却,钢液不断固化,从模具墙的对流和钢的传导传热,以最优的速度将凝固壳从模具拉出,通过喷淋冷却进行二次降温。实心的钢(铸坯)的表面温度在切割成板坯前将在空气中自然冷却(辐射冷却和自由对流)。二次降温控制主要为了使铸件流体在二次冷却区域的表面温度变化过程和凝固速度都在可以操作的范围内,最终使铸件毛坯温度更符合在二次冷却区域的表面温度要求的工艺要求,使得铸件在设计范围内逐渐发生凝固。

## 2 凝固模型

### 2.1 模型表述

不稳定状态的热传导的控制方程<sup>[14]</sup>见式(1),给出的热通量假设如下:1)热通量的热导率是恒定的且有内热生成;2)热通量从中心到表面单向的沿垂直方向可以忽略的。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) + \dot{q} \quad (1)$$

式中: $T$ 为温度,K; $t$ 为时间,s; $\rho$ 为材料密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ; $c$ 为比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ; $k$ 为热传导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ; $x$ 为笛卡尔坐标; $\dot{q}$ 为潜热源的热通量, $\text{W}/\text{m}^3$ 。

式(1)由中心有限差分格式进行估计如下:

$$\rho c \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} = k \frac{(T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n)}{\Delta x^2} + \dot{q} \quad (2)$$

式中: $T_i^n$ 为在时间 $n$ 的点 $i$ 的温度;在液态和固态之间的相变期间生成了潜热,可描述为 $\dot{q} = \rho L (\partial f_s / \partial t)$ ;  $L$ 为融化的潜热; $f_s$ 为固体摩擦系数。由于 $f_s$ 仅随温

度而变化,可以写入式(3):

$$\dot{q} = \rho L \frac{\partial f_s}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

通过替换式(2)中的 $\dot{q}$ ,比热容可以写成 $c' = c - L(\partial f/\partial T)$ ,表示比热补偿的潜热。

式(2)常用热阻表述,元素*i*的热阻定义为 $R_i = \Delta x_i / k_i A_i$ 。其中: $A_i$ 是热通量范围有 $A_i = \Delta x \times \Delta x$ 。接下来,节点之间的电阻如图1所示。

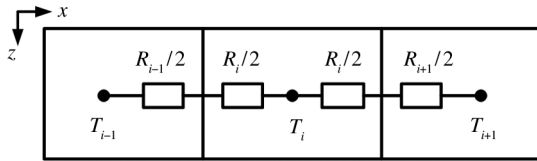


图1 每个元素的电阻

Fig.1 Resistance of each element

电阻可以定义如下:

$$R_{i,i-1} = \frac{\Delta x_i}{2k_i A_i} + \frac{\Delta x_{i-1}}{2k_{i-1} A_i} \quad (4)$$

$$R_{i,i+1} = \frac{\Delta x_i}{2k_i A_i} + \frac{\Delta x_{i+1}}{2k_{i+1} A_i}$$

因为定义了 $C_t = A_i \Delta x \rho c'$ ,式(2)是乘以 $A_i$ 和 $\Delta x$ ,最后可以写成式(5):

$$T_i^{n+1} = \left( \frac{\Delta t}{C_t R_{i,i-1}} \right) T_{i-1}^n + \left\{ 1 - \frac{\Delta t}{C_t R_{i,i-1}} - \frac{\Delta t}{C_t R_{i,i+1}} \right\} \times T_i^n + \left( \frac{\Delta t}{C_t R_{i,i+1}} \right) T_{i+1}^n \quad (5)$$

式中: $\Delta t$ 取决于铸造速度,铸造速度 $V = \Delta x / \Delta t$ 。由于系统的条件稳定性, $\Delta t$ 比较小。

## 2.2 边界条件

液态金属中的湍流通过定义一个有效热传导率为 $k_e = k_1 \times A$ 进行确定。当 $t=0$ ,半月板上的一片的温度曲线设定等于浇铸温度( $T_p$ )。板坯中心线上的元件之间的热通量可以忽略,因此,当在中点位置时, $k(\partial T/\partial x) = 0$ 。在不同区域的板坯的外表面的热通量,当在起始位置时,模具、喷雾冷却和空气冷却定义为 $-k(\partial T/\partial x) = P$ ,这里 $P$ 代表输出。

模具边界输出条件如下:

$$P_1 = 2 \times (8.5 \times 10^5 e^{-0.386t} + 4 \times 10^3 t - 3.6 \times 10^4) \quad (6)$$

喷雾区域边界输出条件如下:

$$\begin{cases} P_2 = h_s (T - T_w) \\ h_s = \frac{175 W^{0.55} [1 - 0.35 (T_w - 265.5)]}{\alpha} \end{cases} \quad (7)$$

自然冷却边界条件输出条件如下:

$$P_3 = \sigma \tau (T^4 - T_1^4) \quad (8)$$

式中: $t$ 为模具中的停留时间; $s$ ;  $h$ 为传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$ ;  $T_w$ 为水温, $K$ ;  $T_1$ 为大气温度, $K$ ;  $W$ 为喷雾冷却通量, $L/(m^2 \cdot s)$ ;  $\alpha$ 为机器相关校对因子;  $\sigma$ 为常数;  $\tau$ 为辐射系数。

## 2.3 模型验证

对模型进行验证,以铸造钢锭(碳的质量分数为0.1%),速度0.65 m/min作为案例进行研究。由于板坯是对称的,仅在一半厚度的板坯上进行仿真。仿真参数如下:液相线和固相线温度分别为1530℃和1490℃;熔化热为 $2.9 \times 10^5$  J/kg;浇铸温度为1650℃;密度为 $7.85 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>;热传导率为240 W/(m·K);模具长度为0.72 m;流量为1.2 L/s。仿真结果如图2所示。从仿真结果可知,随着板坯距离的增加,冷却温度逐渐降低。本文设计的与基准参考的误差比较小,效果较好。

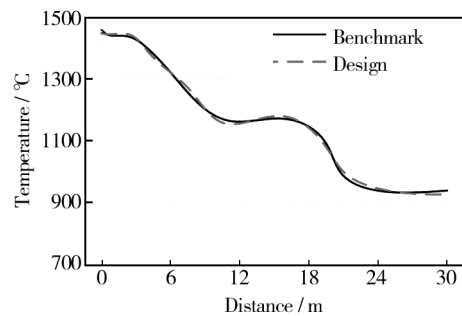


图2 仿真模型结果

Fig.2 Results of the simulation model

## 3 目标函数规格

大规模定制生产成功的关键因素是必须考虑质量和资源约束。对于质量,需要满足铸造条件和冶金标准,而资源约束需要减少水流量。实际上,质量和资源之间的权衡是必要的且经常发生。最后的决定取决于公司的政策和当前市场情况。

### 3.1 质量标准

为避免爆破,模具出口处的外壳厚度要比最小值大。为了简化起见,最小外壳厚度应考虑温度,大约为板坯厚度一半的8%。因此,子目标函数方程式<sup>[15]</sup>如下所示:

$$J_1 = \max[0, T_{8\%} - T_s] \quad (9)$$

式中: $T_{8\%}$ 是板坯厚度一半的8%温度; $T_s$ 是固相线温度。

为避免内部和横向开裂,钢材在矫正点前必需完全凝固。在矫正点的铸坯的中心温度( $T_c$ )必需低于固相线温度。因此,子目标函数见式(10):

$$J_2 = \max[0, T_c - T_s] \quad (10)$$

为避免因弯曲延性较低而导致横向面开裂,在矫正点的铸坯表面温度( $T_s$ )应保持在较低延性区之外,低碳钢为间隔 700 ~ 900 °C。因此子目标函数见式(11):

$$J_3 = \begin{cases} \max[0, T_s - T_u] & T_s \geq T_u \\ \max[0, T_l - T_s] & T_s \leq T_l \end{cases} \quad (11)$$

式中: $T_u$  和  $T_l$  分别为低延性区的上下限。

为避免中途表面开裂,重熔温度造成凝固前端的拉伸效应的发展必需被限制在 100 °C。因此,子目标函数见式(12):

$$J_4 = \sum_{i=1}^n \max[0, \Delta T_z - \Delta T_{\max}] \quad (12)$$

式中: $n$  为喷雾区的数量。

### 3.2 资源标准

通常,每个喷淋区的水流量的上下界在质量改进上只考虑物理约束。然而,水流量在连铸中也是最小化的。因此,流量的总和用作子目标函数,见式(13)。

$$J_5 = \sum_{i=1}^n W_i \quad (13)$$

目标函数是每个子目标函数中的标准化数值的总和,并受罚函数权重的影响,见式(14):

$$J_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n \frac{J_i - J_{i \min}}{J_{i \max} - J_{i \min}} P_i \quad (14)$$

## 4 最优化分析

本文采用遗传算法<sup>[16-17]</sup>进行质量和资源的最优化。首先产生一个初始种群,在种群中对参数值进行计算,然后进行相互比较,选择出最佳控制参数,最后进行验证是否满足条件,遗传算法的流程如图3所示。遗传算法优化的参数选择如下:表征方式采用二进制,群体大小为 80,最大迭代次数为 50,交叉值概率为 0.8,  $T_{8\%} = 1508$  °C,  $T_c = 1480$  °C,  $T_s = 988$  °C。仿真结果如图4、图5所示。

从图4中可以看出,优化以后的板坯在冷却过程中,板坯温度变化均匀,温差较小,保证了板坯在冷却过程中受力均匀,避免了断裂,保证了连续铸造的质量。从图5中可以看出,优化以后的水流量密度分布相对均匀,在冷却过程中能够保证板坯均匀冷却。同

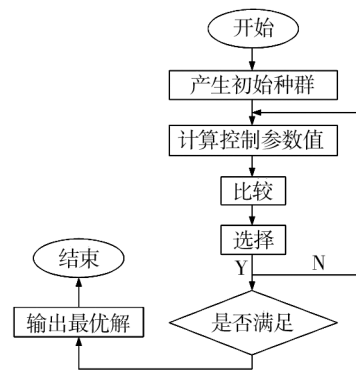


图3 遗传算法流程图

Fig. 3 The flow chart of genetic algorithm

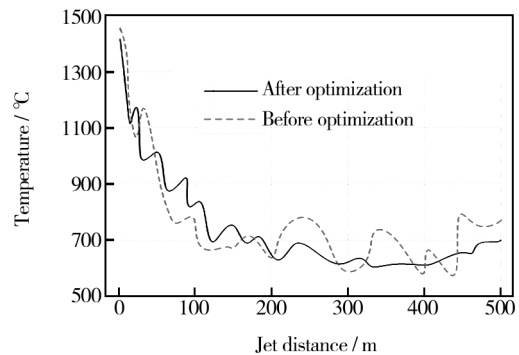


图4 板坯表面温度仿真曲线

Fig. 4 The simulation curve of slab surface temperature

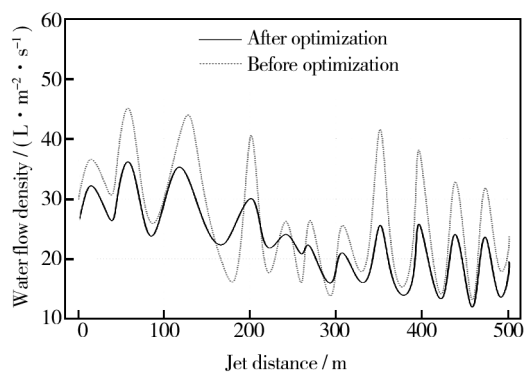


图5 水流密度仿真曲线

Fig. 5 The simulation curve of current density

时,单位时间里用水量较少,节约了资源。

## 5 结语

本文的板坯连铸过程的二次冷却是基于凝固模型进行的。采取对边界条件的约束,对仿真模型进行了验证。同时,通过目标函数确定了优化对象,采用遗传算法进行优化。研究结果表明,优化以后的板坯



温度变化均匀,耗水量较少,冷却效果较好,为板坯连铸二次冷却的研究提供了参考。

### 参考文献

- [1] 赵勇,郭瑞光,牛林,等. DTAB 和甘氨酸对钢铁表面氟铁酸盐转化膜耐蚀性的影响[J]. 表面技术,2014,43(3): 15—19.  
ZHAO Yong, GUO Rui-guang, NIU Lin, et al. Effects of DTAB and Glycine on the Corrosion Resistance of Potassium Fluoferrite Conversion Coating on the Surface of Steel [J]. Surface Technology, 2014, 43(3): 15—19.
- [2] 刘梦兰,向可友,王建,等. PRO-pH<sub>x</sub> 酸活剂在电镀零件酸洗中的应用研究[J]. 表面技术,2015,44(11): 134—137.  
LIU Meng-lan, XIANG Ke-you, WANG Jian, et al. Application of PRO-pH Acid Active Agent in Pickling of Electroplating Parts[J]. Surface Technology, 2015, 44(11): 134—137.
- [3] 程常桂,万文成,车芳,等. 宽板坯连铸二冷区喷嘴冷却特性研究[J]. 武汉科技大学学报:自然科学版,2010,33(5): 453—457.  
CHENG Chang-gui, WAN Wen-cheng, CHE Fang, et al. Experimental Study on Nozzles Cooling Characteristics in the Secondary Cooling Zone of Wide Slab Caster[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology: Natural Sciences, 2010, 33(5): 453—457.
- [4] 靳星,陈登福,龙木军,等. 连铸二冷区喷嘴布置方式优化方法[J]. 重庆大学学报,2011,34(1): 54—58.  
JIN Xing, CHEN Deng-fu, LONG Mu-jun, et al. An Optimization Method for the Nozzle Arrangement in Secondary Cooling Zone of Continuous Casting [J]. Journal of Chongqing University, 2011, 34(1): 54—58.
- [5] 高文江,邓如厅,沈厚发. 基于瞬态传热数学模型的板坯连铸二冷优化[J]. 热加工工艺,2014,43(21): 91—94.  
GAO Wen-jiang, DENG Ru-ting, SHEN Hou-fa. Secondary Cooling Optimization for Slab Continuous Casting Based on Mathematical Model of Transient Heat Transfer [J]. Hot Working Technology, 2014, 43(21): 91—94.
- [6] LUBOMÍR K, JOSEF A. A Rapid GPU-based Heat Transfer and Solidification Model for Dynamic Computer Simulations of Continuous Steel Casting[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 226(12): 2—13.
- [7] 李艳磊,王南,孟彩茹,等. 板坯连铸二冷动态配水控制研究[J]. 铸造技术,2015,36(1): 141—146.  
LI Yan-lei, WANG Nan, MENG Cai-ru, et al. Research on Dynamic Water Distribution Control of Secondary Cooling Section in Slab Continuous Casting[J]. Foundry Technology, 2015, 36(1): 141—146.
- [8] SUBHASIS C, RAJEEV K, KUNTAL P, et al. Design and Implementation of an Automated Secondary Cooling System for the Continuous Casting of Billets[J]. ISA Transactions, 2014, 49(1): 122—128.
- [9] 张亚竹,赵增武,胡强,等. 基于反传热计算的连铸气雾喷射冷却传热测量研究[J]. 铸造技术,2015,36(2): 386—388.  
ZHANG Ya-zhu, ZHAO Zeng-wu, HU Qiang, et al. Study on Heat Transfer Measurement during Continuous Casting Spray Cooling Process Based on Inverse Heat Transfer Calculation[J]. Foundry technology, 2015, 36(2): 386—388.
- [10] WANG Zhao-feng. Inverse Problem-coupled Heat Transfer Model for Steel Continuous Casting[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(1): 44—49.
- [11] WANG Xu-dong. Mold Transient Heat Transfer Behavior Based on Measurement and inverse Analysis of Slab Continuous Casting[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(9): 1811—1818.
- [12] 丁玲,孙辉,贾宏光,等. 应用遗传算法优化设计机翼复合材料蜂窝夹层结构蒙皮[J]. 光学精密工程,2014,22(12): 3272—3279.  
DING Ling, SUN Hui, JIA Hong-guang, et al. Optimization Design of Composite Wing Skin with Honeycomb Sandwich by Genetic Algorithm[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(12): 3272—3279.
- [13] 史旭东,陈亮,张碧辉,等. 基于遗传算法的大展弦比复合材料机翼结构优化设计[J]. 航空工程进展,2015(1): 110—115.  
SHI Xu-dong, CHEN Liang, ZHANG Bi-hui, et al. Structural Optimization Design of High Aspect Ratio Composite Wing Based on Genetic Algorithm[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2015(1): 110—115.
- [14] YONGSOO K. Modeling and Response Time Analysis of the Level 2 System for a Continuous Steel Casting Process[J]. Control Engineering Practice, 2015, 44: 118—124.
- [15] VASILE B. Mathematical Model of Solidification Process in Steel Continuous Casting Taking into Account the Convective Heat Transfer At Liquid-solid Interface[J]. Computational Materials Science, 2014, 94(6): 3—6.
- [16] SANTOS C A. 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(9): 513—523.
- [17] EDYTA H. Restoration of the Cooling Conditions in a Three-dimensional Continuous Casting Process Using Artificial Intelligence Algorithms[J]. Applied Mathematical Modelling, 2015, 39(8): 4797—4807.