

文章编号:1000-582X(2008)12-1365-06

基于遗传算法的板坯连铸二冷配水优化方法

郑 忠^a, 占贤辉^a, 罗小刚^b

(重庆大学 a. 材料科学与工程学院; b. 生物工程学院, 重庆 400030)

摘 要:为提高板坯高效连铸二冷水的动态控制水平,在满足生产实时性要求的传热模型基础上,引入遗传算法对二冷区各段水量进行编码,并根据板坯连铸配水所遵循的冶金准则确定多目标优化的适应度函数,该遗传算法与冶金准则、传热模型集成的优化配水方法避免了经验方法的适应性不足,改进了传统优化方法在解决多目标优化非线性求解时搜索效率低下的问题。从攀钢炼钢厂板坯连铸过程的仿真计算和现场测试结果可以看出,优化后的配水方案较优化前相比,水量可节约 2%,同时配水沿着拉坯方向水量逐渐递减,符合铸坯质量控制的要求。

关键词:板坯连铸;二冷;遗传算法;多目标优化;配水

中图分类号:TF085;TF777.1

文献标志码:A

Using a genetic algorithm to optimize secondary cooling water distribution in slab casting

ZHENG Zhong^a, ZHAN Xian-hui^a, LUO Xiao-gang^b

(a. College of Materials Science and Engineering; b. College of Bioengineering, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

Abstract: A genetic algorithm was used for coding the volume of cooling water in the secondary cooling zone based on the heat transfer model in real-time production. This was done to improve the dynamic control of the secondary cooling water in high-efficiency continuous casting. The fitness function of multi-objective optimization in the algorithm is in accordance with the distribution of metallurgical criteria. The genetic algorithm was integrated with the metallurgical criteria and the heat transferring model to optimize the water distribution. These steps increase the distribution adaptability and improve its efficiency compared to the traditional optimization methods of solving multi-objective optimization and other non-linear problems. Simulation using the process data of the No. 2 slab caster in the Steelmaking Plant of Panzhihua Iron and Steel and on-site testing were carried out. The results show that the optimized distribution saves 2% of water than without optimization, while water distribution along the slab to the water gradually decreases in accordance with requirements for slab quality control.

Key words: steel slab continuous casting; secondary cooling; genetic algorithm; multiobjective optimization; water distributing

高效连铸过程中的二次冷却控制水平与铸机产量和铸坯质量密切相关,有研究表明铸坯质量如内

部裂纹、表面裂纹、鼓肚和形状缺陷、中心偏析等形成的原因主要是由于二次冷却区冷却制度的不合

收稿日期:2008-07-10

作者简介:郑忠(1963-),女,重庆大学教授,博士生导师,主要从事冶金过程模拟及优化等研究,(Tel)023-65111651;
(E-mail)Zhengzh@cqu.edu.cn

欢迎访问重庆大学期刊网 <http://qks.cqu.edu.cn>

理,形成冷却不均匀^[1-2]。

凝固传热数学模型是连铸过程控制的基础。通常根据钢种的高温力学性能及质量要求和铸机实际情况,结合传热模型制定相应的二次冷却控制制度,形成静态乃至动态的经验水表方法,难以适应生产新钢种,以及工艺调整和改变的要求。目前,将人工智能优化算法如遗传算法(genetic algorithm,GA)、启发式搜索等与凝固传热数学模型相结合来寻找最优连铸控制参数,已逐渐成为提高连铸生产效率和产品质量的一种可行途径。Santos等^[3-4]在最大拉速和冶金准则限定下建立了基于有限差分凝固传热方程和遗传算法结合的智能模型,并采用启发式搜索方法寻优,减少了水量消耗并可获得较小的温度渐变;Kaisa^[5]采用遗传算法与人机交互的方式,将目标函数和专家的经验结合后转化为 scalar-valued 优化问题来优化连铸二冷段冷却水的控制,取得了很好的效果;Chakraborti等在二冷配水中采用有限体积方法求解传热方程并用遗传算法进行优化,在提高拉速、改善坯壳厚度方面效果显著^[6],并且对凝固传热方程用遗传算法优化二冷和辐射区的参数,改进了搜索效率,提高连铸机参数的预测计算准确性^[7]。Alizadeh等^[8]通过引入一个新的纵向传热系数,建立了连铸结晶器局部传热模型,可以用于生产的在线控制。陈志凌^[9]等人使用启发式GA优化算法对方坯二冷换热系数和拉速进行优化,满足了生产需要。

笔者以建立板坯连铸二冷水量动态控制的优化模型为目标,基于传热模型与遗传算法的结合构建模型。该模型建立在经生产现场测试校核能满足实时性和精度要求的凝固传热模型的基础上,以连铸机的生产条件、生产品种类别和冶金准则为基础建立多目标函数,按重要程度设定权重系数,化多目标为单目标,并以此构建遗传算法的适应度函数,引入遗传算法进行优化,最终可获得板坯连铸机在多种拉速下的二冷水量分配。

1 连铸板坯温度场计算模型

1.1 凝固传热方程

以板坯连铸过程为对象,考虑工业现场的实时控制要求,将板坯内部的凝固传热按一维等效导热问题处理,并建立相应的一维板坯凝固传热数学模型。模型假设为:1)忽略连铸坯沿拉坯方向和铸坯断面沿宽面方向的热量传导;2)连铸机同一冷却段均匀冷却;3)忽略凝固冷却收缩引起的铸坯尺寸变化;4)两相区的比热容用等效比热代替;5)铸坯内固

相区和液相区的对流传热用等效导热系数表示,将对流传热过程等效成传导传热过程。

根据连铸板坯凝固传热的特点,基于以上假设,沿连铸板坯厚度方向 x 的一维传热微分方程为

$$\rho C_e \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_e \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (1)$$

1.2 定解条件

1.2.1 初始条件

以铸坯的浇铸温度作为凝固传热的开始温度:

$$T = T_c; (x \geq 0, t = 0) \quad (2)$$

式中 T_c 为浇注温度,℃。

1.2.2 边界条件

铸坯中的热量是在连续运动过程中通过铸坯表面传递出去的,由于铸坯依次通过结晶器、二冷区和空冷区,各冷却区具有不同冷却特点,故边界条件也各不相同。

1)结晶器。结晶器的边界条件采用第二类边界条件描述,即

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = q_x = A - B\sqrt{t} \quad (3)$$

式中: q_x 为结晶器瞬时平均热流密度, W/m^2 ; A 、 B 为经验常数; λ 为导热系数, $W/(m \cdot K)$ 。

2)二冷区。二冷区的传热采用第三类边界条件,即铸坯在二冷区各段的边界导热由对应段冷却水的传热系数 h_i 以及向环境的辐射传热确定,即

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = h_i(T_b - T_w) + \varepsilon \sigma [(T_b + 273)^4 - (T_a + 273)^4] \quad (4)$$

式中: h_i 为连铸坯二冷区 i 段的内外弧表面和冷却水之间的综合传热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; T_b 为铸坯表面温度,℃; T_w 为冷却水温度,℃; T_a 为环境温度(空气温度),℃。

3)辐射冷却区。空冷区按辐射边界处理,即

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \varepsilon \sigma [(T_b + 273)^4 - (T_a + 273)^4] \quad (5)$$

式中: σ 为玻尔兹曼常数, $5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot k^4)$; ε 为铸坯表面的黑度系数(其值约为 0.8)。

1.3 模型的应用测试

凝固传热数值计算模型以混合隐式差分算法(C-N差分算法)构建,采用追赶法(TDMA算法)对传热模型进行数值求解^[10]。根据生产现场连铸板坯的实时浇铸温度、水量、拉速等参数作为模型的动态输入参数,进行模型的参数调整与应用测试。以模型计算的实时表面温度与现场在该时刻所测得的温度在给定的误差范围内作为评价依据^[11],主要通过调整并校核稳定生产时多种拉速情况下钢种连

铸过程对应的传热系数,确定传热系数的计算公式,对传热模型的可靠性进行验证。

2 基于 GA 算法的板坯连铸二冷配水优化模型的建立

以校验后的凝固传热数值计算模型为基础,结合遗传算法构成连铸二冷水量分配优化模型。优化模型结构及传热模型与遗传算法的关系如图 1 所示。

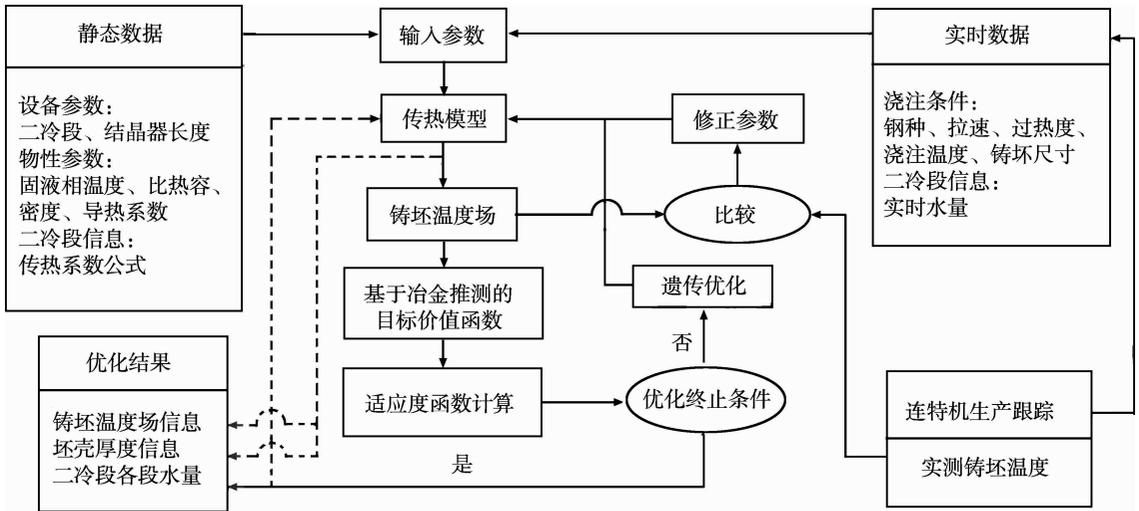


图 1 基于传热模型与遗传算法相结合的优化模型结构图

2.1 基于冶金准则的优化目标设计

基于遗传算法的优化是以适应度函数为依据,利用遗传操作,通过对种群中个体适应度函数值的搜索来实现的。因此,基于冶金准则的目标函数的设计将直接影响优化过程与结果。按冶金准则和相关约束设计的目标价值函数表示如下。

2.1.1 目标表面温度

根据生产工艺的要求确定铸坯表面目标温度 $T_{m,i}$, 实际表面温度 $T_{b,i}$ 应该充分接近这个目标温度, 希望以下函数值尽可能小, 即

$$f_{1,i}(Q_i) = (T_{m,i} - T_{b,i})^2. \quad (6)$$

2.1.2 冷却段的水量消耗

从节能的角度出发, 希望整体冷却水量越少越好。即 $Q = \sum_1^n Q_i$ (i 表示任一冷却段, n 为总的冷却段数) 应达到最小值, 在模型优化时将各段水量作为相应的目标水量, 即

$$f_{2,i}(Q_i) = Q_i. \quad (7)$$

2.1.3 液芯长度

为避免铸坯凝固前沿在应力作用下产生裂纹, 铸坯的液芯长度 (L_m) 必须在矫直点 (L_d) 之前完全凝固, 即

示。优化模型以冶金准则构建目标价值函数, 并以此形成遗传算法优化时的适应度函数。以板坯铸机的各段水量信息构建遗传算法的个体, 按经验配水关系生成各段水量初始解, 通过 GA 算法寻找价值函数最大值, 从而获得满足各冶金准则的二冷段水量分配。将优化后的水量再代入传热模型, 可得出铸坯温度场、坯壳厚度等信息。模型可实现二冷水量分配和铸坯温度场的整体优化。

$$f_{3,i}(Q) = (\text{Max}(0, L_m - L_d))^2. \quad (8)$$

2.1.4 表面温度的回升速率和冷却速度限制

铸坯表面温度的波动易产生热应力, 引发质量问题, 铸坯表面温度回升会导致凝固前沿热应力增大而产生内部裂纹; 而铸坯冷却速度过快, 则会促进裂纹的扩展, 或使铸坯表面处于低延性阶段, 在热应力及机械应力的作用下产生新的裂纹而恶化铸坯质量。因此, 设定铸坯沿拉坯方向 z 的表面回温速率上限 C_P ($^{\circ}\text{C}/\text{m}$) 和冷却速率上限 C_N ($^{\circ}\text{C}/\text{m}$),

$$f_{4,i}(Q) = \left(\frac{\partial T_{i,\tau}}{\partial z} - C_P \right)^2, \quad (9)$$

$$f_{5,i}(Q) = \left(\frac{\partial T_{i,\tau}}{\partial z} - C_N \right)^2. \quad (10)$$

一般在二次冷却区的 C_P 应控制在 $100^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 以内; 而最大的冷却速度 C_N 应为 $200^{\circ}\text{C}/\text{m}$ [12]。

2.1.5 其他约束性条件

为避免横裂纹, 矫直时应避开钢种脆性温度区, 二冷弱冷时高于脆性温度, 强冷时低于脆性温度 T_{bmin} , 通常 T_{bmin} 取 900°C [13]; 此外为了保证铸坯在二冷区支撑辊之间形成的鼓肚量最小, 在整个二冷区应限定铸坯表面温度 T_{bmax} 在 1100°C [14] 以下。

另外为保证工艺设备的安全, 冷却水量应控制在设

备限制的配水量 $Q_{\max,i}$ (L/min) 之下^[12]。

$$T_{i,r} > T_{\text{bmin}}, \quad (11)$$

$$T_{i,r} < T_{\text{bmax}}, \quad (12)$$

$$Q_i < Q_{\max,i}. \quad (13)$$

由于以上各目标函数的单位不同及目标数量差异较大,则需要将各目标函数值进行归一化处理使 $f_{k,i} \in [0,1], k = 1,2,\dots,5$, 并根据其对铸坯质量影响大小的程度选取不同的加权系数 $\lambda_i (\sum_1^5 \lambda_i = 1)$, 然后将多目标函数 $f_{k,i}$ 转化为单目标函数之后对个体价值函数进行评价, 即

$$f_i(Q) = \min_{Q_i \in Q_{\min,i}} \sum_{k=1}^5 \lambda_{k,i} f_k(Q_i), \quad (14)$$

遗传算法的适应度函数将依据此目标函数选取。

2.2 初始水量分配原则

二冷水在二冷区的分布要求是使铸坯表面温度在出坯方向均匀下降, 水量分配需根据钢种、铸坯尺寸、拉速等因素确定。

2.2.1 总水量的确定

由于不同的钢种有不同的裂纹敏感性, 而裂纹敏感性是直接和冷却强度相对应的, 所以通常二冷水量的确定为

$$Q = a \times b \times v \times \rho \times \delta, \quad (15)$$

式中: Q 为二冷水量, L/min; $a \times b$ 为铸坯断面, m^2 ; v 为铸机拉速, m/min; ρ 为钢密度, kg/m^3 ; δ 为冷却强度, L/kg。

2.2.2 水量分配

由于铸坯在二冷段的凝固速度与时间的平方根成反比, 同样, 二冷区各段冷却水量也按时间的平方根的倒数成比例地递减, 当拉速一定时, 拉坯时间与铸坯长度成正比。二次冷却水量可根据不同钢种的经验比水量确定, 各段的冷却水量与各段中点到弯月面的距离的平方根成反比^[7], 可表示为

$$Q_1 : \dots : Q_i : \dots : Q_n = \frac{1}{\sqrt{H_1}} : \dots : \frac{1}{\sqrt{H_i}} : \dots : \frac{1}{\sqrt{H_n}},$$

$$Q = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n, \quad (16)$$

式中: $Q_1 \sim Q_n$ 为二冷各段的冷却水流量, L/min; $H_1 \sim H_n$ 为各段中点至结晶器液面的距离, m。

2.3 基于遗传算法的多目标优化问题求解算法

遗传算法在二冷配水优化方面的遗传操作流程如图 2 所示。

在遗传算法中, 采用二进制编码, 可根据各段水量实数值的大小和精度设计二进制数的位数。遗传编码方式如图 3, 每一个个体由所有段的水量值构成。初始化种群时, 为保证搜索效率, 要使每个个体

尽可能均匀分布于解空间且满足约束条件, 并基于公式(15)进行水量分配的初始化, 然后采用随机数生成满足约束条件的新个体, 参加遗传操作。

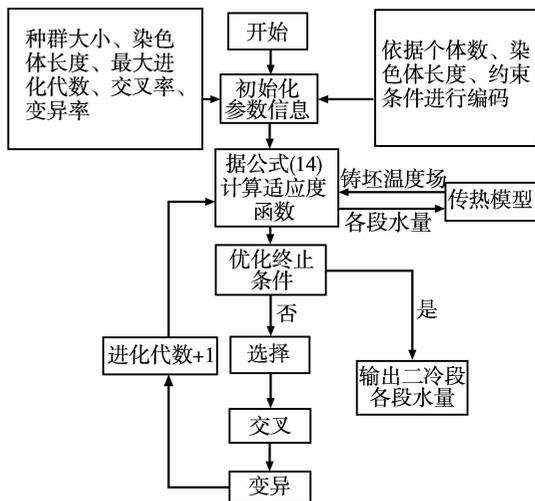


图 2 遗传操作流程

个体	第1段水量	第2段水量	...	第 <i>i</i> 段水量	...	第 <i>n</i> 段水量
1	10...11	10...10		00...11		01...10
2	00...01	10...01		11...11		10...00
⋮	⋮	⋮		⋮		⋮
种群大小	11...11	10...11		10...10		10...01

图 3 遗传编码方式

GA 优化策略就是寻找最佳的 Q_i , 使得适应度函数最大。适应度函数是遗传算法进化搜索的依据, 它直接影响算法的收敛速度以及能否找到最优解。选用的适应度函数为

$$f = C_{\max} - \left(\sum_{i=1}^N f_i(Q) \right), \quad (17)$$

式中 C_{\max} 是一个足够大的正数。

遗传操作中, 选择运算采用竞争法产生后代。交叉运算将随机选中的双亲进行非均匀多点交叉操作, 产生新的个体。变异运算采用随机非均匀变异, 产生新的个体, 保证遗传算法的全局搜索, 同时保证种群的多样性。定义 P_c 作为交叉操作的概率 (Crossover Rate), 定义参数 P_m 作为变异操作的概率 (Mutation Rate)。

3 仿真计算与应用测试

以攀钢炼钢厂的板坯连铸过程为对象, 进行基于遗传算法的连铸二冷配水优化模型方法的现场测试的检验。

用实时生产数据校正传热系数公式,在调整好模型参数的基础上,依据实际生产数据对所建立的模型进行仿真优化。设备参数如下:铸机的二冷区共 8 段,即 $N=8$,结晶器长度为 0.9 m,二冷总长度为 29 m。

遗传算法运行参数如表 1。

表 1 GA 参数

参数名称	参数值
种群大小	30
染色体长度	128
最大进化代数	100
交叉率	0.80
变异率	0.05
个体数	8

物性参数:钢种为 Stb32,比热容固相时为 670 J/(kg·K),液相时为 840 J/(kg·K);密度液态时 $\rho=7\ 090\text{ kg/m}^3$,固态时 $\rho=7\ 400\text{ kg/m}^3$,两相区时 $\rho=7\ 250\text{ kg/m}^3$;导热系数固相时 λ 为 29.4 W/(m·K),液相时 λ 为 117.4 W/(m·K)。A 取值为 2 680 000, B 取值为 369 600。

浇注条件:浇注温度 1 550 °C;过热度为 35 °C;液相温度为 1 533 °C;固相温度为 1 517 °C;拉速为 1.31 m/min;铸坯尺寸为 1 080 mm×200 mm;冷却水温度 $T_w=25\text{ °C}$ 。

凝固传热模型的应用和参数校核时,在生产现场的连铸板坯表面测温装置采用的是 Raytek Marathon 系列双色红外高温测温仪,按模型的计算温度与实测温度控制在 20 °C 之内,进行模型的参数调整的确定。

公式(6)–(10)各目标函数的权重分别为:0.4、0.3、0.1、0.1、0.1。遗传算法对水量分配的仿真结果示例如表 2。从表中可以看出优化后的配水呈逐段减少的趋势(以水流密度统计),分配更趋于合理,减少了诱发铸坯产生内裂纹的应力因素^[15],这与冶金准则对改善铸坯冷却过程和提高产品质量的要求相吻合,且最后一段水量的减少避免了铸坯出二冷区之后引起较大的回温。优化后的水量较优化前的

水量可减少 2%,水量节能得到体现。用优化后的水量计算出的二冷各段的平均温度、出口温度如表 3 所示,优化前后温度场分布如图 4,从表 3 和图 4 可以看出,笔者根据冶金准则所设计的优化目标得到体现,铸坯的冷却与回温速率均得到有效控制,如第 5 段、第 6 段,优化后温度波动更平缓,表面最大冷却速率由 64 °C/m 降至 61 °C/m,表面最大温度回升速率由 75 °C/m 降至 51 °C/m,优化后公式(6)计算的值为 90,较优化前计算值 89 有所提高。该方法为提高铸机控制水平和改善铸坯质量提供了理论依据和控制手段。

表 2 优化前后水量对比

二冷区段	水量/(L·min ⁻¹)		
	初始分配水量	优化前	优化后
第 1 段	386	522	406
第 2 段	296	353	155
第 3 段	230	356	404
第 4 段	175	339	378
第 5 段	141	277	162
第 6 段	120	219	132
第 7 段	101	238	121
第 8 段	84	222	131
总水量/L	1 533	2 526	1 889

表 3 优化前后温度对比

二冷区段	目标温度	温度/°C			
		平均温度		出口温度	
		优化前	优化后	优化前	优化后
第 1 段	1 060	1 069	1 072	1 053	1 055
第 2 段	1 040	1 043	1 045	1 013	1 014
第 3 段	1 030	1 017	1 017	995	994
第 4 段	1 020	1 039	1 038	1 015	1 015
第 5 段	1 010	1 026	1 011	1 020	1 003
第 6 段	1 000	987	996	970	985
第 7 段	980	991	1 006	975	992
第 8 段	960	993	1 007	960	974

说明:目标温度取值为攀钢实际生产设定的 Stb32 钢种的温度。

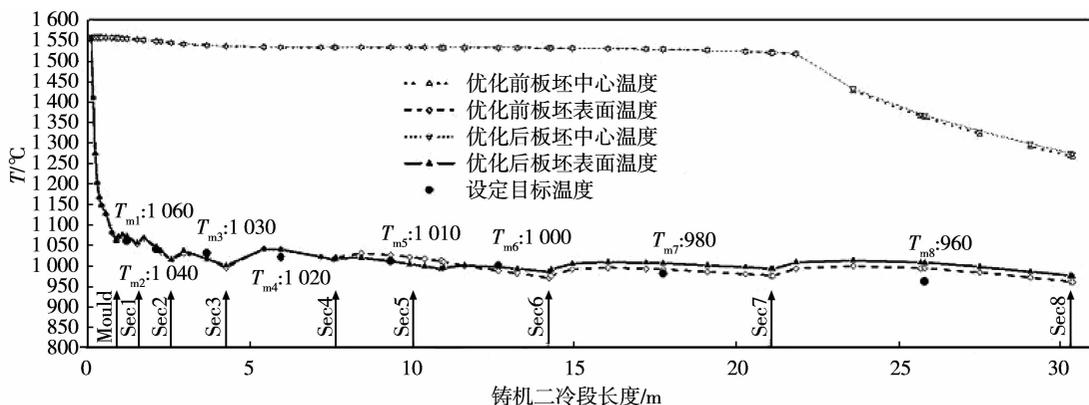


图4 优化前后表面温度对比

4 结 语

1)从满足板坯连铸生产现场实时控制的要求出发,建立板坯一维导热的凝固传热数值计算模型;结合遗传算法构建连铸二冷水分配的优化算法,依据冶金准则建立多目标优化的价值函数,并以此得到遗传优化的适应度函数。该优化模型能快速进行水量的优化分配计算,并使铸坯各段的温度更趋近于目标温度。

2)从攀钢炼钢厂板坯连铸过程的应用测试表明:在满足冶金准则的约束条件下,可以优化二冷段的水量分配,优化后的水量较优化前的水量减少2%,用优化的水量仿真计算得到的表面温度与目标温度差异缩小,而且回温和冷却速率也更趋于合理,较好地满足了冶金准则对改善铸坯冷却过程和提高产品质量的要求。

3)该优化板坯连铸水量分配的模式方法,可为钢厂进一步完善和优化二冷配水制度提供一种新的技术手段。

致谢:感谢四川托日信息工程公司和攀钢提钒炼钢厂提供项目及工作支持。

参考文献:

[1] MOK W Y, JUNG Y T, JIN S D. New criterion for internal crack formation in continuously cast steels[J]. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2000, 31(8): 779-794.

[2] 朱国泰,王新华,于会香,等. 连铸板坯三角区裂纹的影响因素[J]. *北京科技大学学报*, 2004, 26(1):42-44.
ZHU GUO-TAI, WANG XIN-HUA, YU HUI-XIANG, et al. The factors affect triangle-zone cracking in continuous cast slabs[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2004, 26(1):42-44.

[3] SANTOS C A, CHEUNG N, GARCIA A. Application of a solidification mathematical model and a genetic algorithm in the optimization of strand thermal profile along the continuous casting of steel[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2005, 20: 421-434.

[4] SANTOS C A, SPIM J A, IERARDI M C F, et al. The use of artificial intelligence technique for the optimization of process parameters used in continuous casting of steel[J]. *Applied Mathematical Modeling*, 2002, 26(11):1077-1092.

[5] KAISA M. Using interactive multiobjective optimization in continuous casting of steel[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2007(22): 585-593.

[6] CHAKRABORTI N, SURESH K. A heat transfer study of the continuous caster mold using a finite volume approach coupled with genetic algorithms[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2003, 12(4): 430-435.

[7] CHAKRABORTI N, GUPTA R S P, TIWARIT K, et al. Optimization of continuous casting process using genetic algorithms studies of spray and radiation cooling regions[J]. *Ironmaking and Steelmaking*, 2003, 30(4): 273-278.

[8] ALIZADEH M, JAHROMI A J, ABOUALI O. New analytical model for local heat flux density in the mold in continuous casting of steel [J]. *Computational Materials Science*, 2008, 34(5):1-6.

[9] 陈志凌,赵景环,张国贤. 连铸温度场数值模拟及冷却水参数优化[J]. *钢铁研究学报*, 2006, 18(2):11-14.
CHEN ZHI-LING, ZHAO JING-HUA, ZHANG GUO-XIAN. Numerical simulation of temperature field of continuous casting and optimization of cooling water parameter [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2006, 18(2):11-14.

(下转第 1380 页)

- [7] TZELEPI A, BEZERIANOS T, BODIS W I. Functional properties of sub-bands of oscillatory brain waves to pattern visual stimulation in man [J]. Clin Neurophysiol, 2000, 111(2): 259-269.
- [8] LI Z Y, YU J H, XIANG T Y, et al. Extracting and analyzing sub-signals in heart period signal [J]. Proc of the Third International Conference on Wavelet Analysis and Its Application, 2003, 1(1): 309-315.
- [9] AHMEDA S M, ABO Z M. A new hybrid algorithm for ECG signal compression based on the wavelet transformation of the linearly predicted error [J]. Med Eng Phys, 2001, 23(2): 117-126.
- [10] 聂能, 尧德中, 谢正祥. 生物医学信号数字处理技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 5-6.
- [11] 谢正祥, 陈良迟, 卢耘, 等. 医学信号数字处理技术及应用[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1992: 66-67.
- [12] 黄静霞, 许慰玲, 沈民奋. 基于小波包分解的不同状态下脑电信号分析[J]. 北京生物医学工程, 2004, 23(1): 47-50.
HUANG JING-XIA, XU WEI-LING, SHEN MIN-FEN. Analysis of different functional states EEG signal based on wavelet packet decomposition [J]. Beijing Biomedical Engineering, 2004, 23(1): 47-50.
- [13] 张仁龙, 马文丽, 姚文娟, 等. 基于小波包变换对脑电信号的分析 and 处理[J]. 电子测量技术, 2006, 30(3): 22-24.
ZHANG REN-LONG, MA WEN-LI, YAO WEN-JUAN, et al. Analysis and processing of EEG signal based on wavelet packet transform [J]. Electronic Measurement Technology, 2006, 30(3): 22-24.
- [14] 王兆源, 周龙旗. 脑电信号的分析方法[J]. 第一军医大学学报, 2000, 20(2): 189-190.
WANG ZHAO-YUAN, ZHOU LONG-QI. EEG signal analysis method [J]. Journal of First Military Medical University, 2000, 20(2): 189-190.
- [15] 谢松云, 张振中, 杨金孝, 等. 脑电信号的若干处理方法研究与评价[J]. 计算机仿真, 2007, 24(2): 326-330.
XIE SONG-YUN, ZHANG ZHEN-ZHONG, YANG JIN-XIAO, et al. Research and evaluation on some EEG processing methods [J]. Computer Simulation, 2007, 24(2): 326-330.
- [16] JUNG T P, MAKEIG S, STENSMO M, et al. Estimating alertness from the EEG power spectrum [J]. IEEE Transaction on Biomedical Engineering, 1997, 44(1): 60-69.

(编辑 李胜春)

(上接第 1370 页)

- [10] 郑忠, 胡燕. 连铸坯凝固传热过程的数学模型分析[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2006, 29(10): 100-104.
ZHENG ZHONG, HU YAN. Advance in mathematic model of solidification heat transfer process in continuous casting [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2006, 29(10): 100-104.
- [11] 娄娟娟, 包燕平, 刘建华, 等. 连铸异型坯凝固过程的数值模拟[J]. 北京科技大学学报, 2005, 27(2): 173-175.
LOU JUAN-JUAN, BAO YAN-PING, LIU JIAN-HUA, et al. Numerical simulation of solidification process in continuous beam blank casting [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2005, 27(2): 173-175.
- [12] 孟红记, 郑鹏, 武荣阳, 等. 基于改进 PSO 算法的连铸二冷过程优化仿真[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(4): 866-869.
MENG HONG-JI, ZHANG PENG, WU RONG-YANG, et al. Optimization and simulation of continuous casting secondary cooling based on enhanced PSO algorithm [J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(4): 866-869.
- [13] 蔡开科. 连续铸钢原理与工艺[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994: 270.
- [14] 张建立, 周晓敏, 刘天玉, 等. 基于改进粒子群算法的板坯二冷制度优化[J]. 铸造技术, 2007, 28(2): 248-250.
ZHANG JIAN-LI, ZHOU XIAO-MIN, LIU TIAN-YU, et al. Optimize secondary cooling system in the continuous cast slab based on a new modified particle swarm algorithm [J]. Foundry Technology, 2007, 28(2): 248-250.
- [15] 张富强, 李超, 姜振生, 等. 连铸板坯中心裂纹和三角区裂纹的成因及防止[J]. 钢铁, 2004, 39(10): 20-23.
ZHANG FU-QIANG, LI CHAO, JIANG ZHEN-SHENG, et al. Formation mechanism and prevention of centerline and triangle-zone cracking in continuous cast slabs [J]. Iron and Steel, 2004, 39(10): 20-23.

(编辑 张 革)