

·控制理论应用·

合金钢矩形坯铸机动态二冷配水在线控制系统的设计与应用

韩占光¹, 崔立新^{1,2}, 曾智¹, 张家泉¹, 钱亮², 戴欣²,
周干水², 刘平³, 肖强³, 吕长海³, 陈民³, 王建³

(1. 北京科技大学 冶金与生态工程学院, 北京 100083; 2. 中冶连铸技术工程股份有限公司;
3. 莱钢钢铁集团有限公司)

摘要:采用坯龄模型和多模型控制器的先进控制策略设计了莱钢合金钢矩形坯连铸机动态二冷配水在线控制系统。该系统融合了 L1、L2 级“联锁保护措施”和数据“诊断和处理”功能, 提供用户自由制定工艺接口功能, 支持用户增加新钢种和修订相应的二冷工艺。上线质量跟踪及冶金效果分析表明, 在线控制系统运行准确、稳定, 有效避免了铸坯表面裂纹、中间裂纹及中心裂纹等缺陷的产生, 提高了铸坯的中心致密度和等轴晶率。

关键词:矩形坯铸机; 动态控制; 二次冷却; 合金钢

中图分类号: TF777. 2; TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7059 (2009) 02-0012-05

Design and application of secondary cooling water dynamic control system for bloom caster of alloy steel

HAN Zhan-guang¹, CUI Li-xin^{1,2}, ZENG Zhi¹, ZHANG Jia-quan¹, QIAN Liang², DAI Xin²,
ZHOU Gan-shui², LIU Ping³, XIAO Qiang³, LYU Chang-hai³, CHEN Min³, WANG Jian³

(1. School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. CCTEC Engineering Co., Ltd.; 3. Laigang Group Co., Ltd.)

Abstract: Secondary cooling water dynamic control system for bloom caster of alloy steel in Laigang was designed based on residence time model and advanced control strategy of multiple model controller. In the system, interlock protection system of L1 and L2 and data diagnosis and processing functions were included. The control system also offers technological interface for adding new steel grade in production and/or revising secondary cooling parameters by user. Quality track and metallurgical effect analysis show that operation of the control system was precise and stable, no surface crack, mid-crack and center crack were in bloom, and center soundness and equiaxed crystallinity of bloom were improved.

Key words: bloom caster; dynamic control; secondary cooling; alloy steel

莱钢钢铁集团有限公司银前区合金钢矩形坯连铸机主要浇铸优质钢和合金钢, 用以轧制高强度圆钢及无缝钢管等对内部质量和压缩比要求严格的钢种。二次冷却是整个矩形坯连铸生产过程中的一个重要环节, 连铸坯内部裂纹、表面裂纹、鼓肚和中心偏析等缺陷的形成与二次冷却都有着

紧密的联系^[1]。

为了满足企业与用户对产品质量与生产效率日益提高的要求, 北京科技大学与中冶连铸技术工程股份有限公司依据莱钢合金钢矩形坯连铸机装备特点, 基于连铸坯凝固传热基本原理和自动控制原理, 研发了莱钢合金钢矩形坯连铸机动态

收稿日期: 2008-09-23; 修改稿收到日期: 2009-12-08

作者简介: 韩占光 (1982-), 男, 安徽亳州人, 博士研究生, 主要从事现代连铸工艺新技术研究。

二冷配水在线控制系统。该系统将冶金工艺与自动控制集于一体,涉及到计算机、自动控制系统和在线检测等技术,融合了铸坯热跟踪与水量优化系统、控制及通信系统以及温度控制反馈系统。在实际生产中,模型中涉及到的计算和比较工作均由计算机完成,能实时优化二冷区水量,显示铸坯温度场、凝固进程和检测铸机生产设备状态,在保证连铸生产率的同时,提高铸坯质量。

1 铸机背景

莱钢合金钢矩形坯连铸机是莱钢集团实现年产120万t合金钢的重点配套项目,主要生产45[#]、45B、40Cr和20CrMnTiH等合金钢,为特钢厂轧制高质量棒材提供精品坯料。

铸机于2008年5月投产,采用全弧形R12m,六机六流,方圆坯兼用结构,主要生产断面为:180mm×220mm,260mm×300mm,Φ200mm。采用蝶式、单臂独立升降的大包回转台,整体式结晶器,液压多配方结晶器振动机构,动态二冷配水和动态轻压下L2(过程控制级)控制系统等。

铸机具备以下特点:(1)优化的中间罐设计;(2)结晶器液面自动控制装置;(3)结晶器外置式电磁搅拌技术;(4)结晶器自动加渣;(5)扇形段及拉矫机等框架本体实现通水冷却防止变形,拉矫机及切后辊道减速机采用水冷方式;(6)扇形I段内外弧及侧辊为密排辊设计,可有效防止铸坯鼓肚变形,改善铸坯内部质量;(7)扇形I段可快速更换,提高铸机作业率;(8)空冷区保温罩保温;(9)拉矫机全程实现辊缝自动远程控制。可以说该套铸机不仅配备了成熟可靠的设备作保障,也配备了优化、完善的工艺及在线控制系统。

2 动态二冷配水在线控制系统

合金钢导热性能差,连铸时如采用强冷会增大铸坯的内外温差,产生热应力,增加铸坯内裂的危险性,但冷却强度不足,将造成凝固坯壳偏薄,尤其是铸坯在高温下冷却强度低时,坯壳将发生蠕变而产生鼓肚,导致枝晶间杂质富集的钢液向液相穴芯部移动,形成中心碳偏析;另外合金钢还具有较强的裂纹敏感性,在连铸过程中铸坯易产生表面裂纹。因此针对莱钢合金钢矩形坯连铸机的产品、设备和工艺特点,制定合理的冷却制度是提高生产率和保证产品质量的关键。

莱钢合金钢矩形坯连铸机动态二冷配水在线控制系统不仅充分考虑了合金钢的凝固特性,而

且采用多模型控制器的水量优化控制策略,同时也融合了故障自动修复、报警和切换功能,减少了人工参与控制的环节,提高了设备和控制模型的智能化程度,达到真正意义的在线全自动控制。

2.1 基本架构

动态二冷配水在线控制系统根据铸坯冷却历程并且结合温度场计算动态调节二冷水量,尽可能使铸坯表面温度按照符合冶金规律的冷却曲线均匀冷却,以达到控制铸坯组织和内部质量的目的。

L2级动态配水在线控制系统主要由动态热跟踪模型、动态优化配水模型、工艺参数数据库和OPC通信模块四部分组成,动态热跟踪模型是整个控制系统的基础,接收生产过程数据并计算动态优化配水所需的铸坯温度场热信息;动态优化配水模型是控制系统的核心,利用铸坯温度场热信息并根据不同钢种的生产工艺合理优化二冷区水量;控制系统通过OPC通信模块与基础自动化级控制系统进行数据交互。

2.2 L2系统特点

莱钢合金钢矩形坯连铸机二冷动态配水在线控制系统采用面向对象的程序设计语言VC++6.0编制而成,窗口式设计,用户界面友好、直观、简洁。该控制系统主要具有以下特点。

2.2.1 坯龄模型思想

铸坯温度场动态热跟踪模型采用“坯龄模型”来实现对铸坯从结晶器钢水弯月面到模型控制区终点进行全程的温度场实时跟踪^[2]。如图1所示(图中,v为拉速方向),将铸坯从结晶器弯月面到

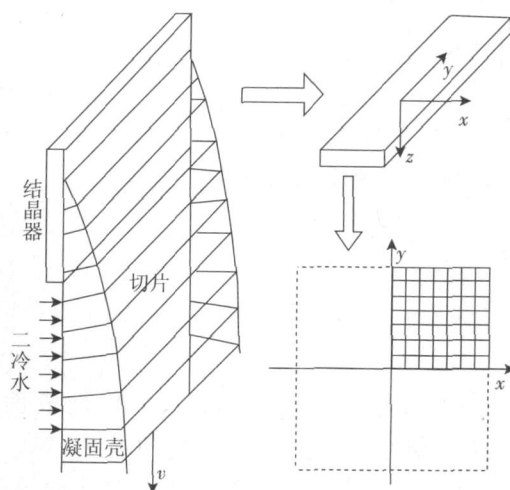


图1 切片划分示意图

Fig.1 Discretization of bloom casting strand and grid generation of tracing slice

模型控制区末端等分为若干个切片,每个切片都是独立的信息单元,这些信息包括切片的“寿命”、位置、中包温度、温度场以及凝固进程等。

对于每个切片,以铸坯宽度方向为 x 轴,厚度方向为 y 轴,铸坯运动方向为 z 轴,建立切片坐标系。考虑到铸坯几何与冷却条件的对称性,取断面 $1/4$ 为研究对象。对于每个切片忽略沿拉坯方向上的传热,在限定的条件下,就可得到该切片的凝固传热微分方程:

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

式中, ρ 为密度, kg/m^3 ; c 为比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; T 为温度, $^\circ\text{C}$; t 为时间, s ; k 为铸坯的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

方程的初始条件:

$t=0$ 时,结晶器中钢水温度等于浇铸温度,即:

$$T(x, y, 0) = T_c \quad (2)$$

方程的边界条件:

(1) 铸坯中心

铸坯的传热是关于中心轴对称的,其中心对称轴的传热边界可视为绝热边界,即

$$\begin{cases} k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=D_1/2, t \geq 0} = 0 \\ k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=D_2/2, t \geq 0} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中, D_1, D_2 为铸坯边长, m 。

(2) 铸坯表面

$$\begin{cases} -k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0, t \geq 0} = q_w \\ -k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0, t \geq 0} = q_w \end{cases} \quad (4)$$

式中, q_w 为表面热流,其表达式为

$$\text{结晶器 } q_w = A - B\sqrt{t} \quad (5)$$

$$\text{二冷区 } q_w = h(T_b - T_w) \quad (6)$$

$$\text{空冷区 } q_w = \varepsilon \sigma [(T_b + 273)^4 - (T_0 + 273)^4] \quad (7)$$

上述式中, A, B 为实验常数; T_b 为铸坯表面温度, $^\circ\text{C}$; h 为铸坯与冷却水之间传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; T_w 为冷却水温度, $^\circ\text{C}$; ε 为铸坯表面黑度; σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; T_0 为环境温度, $^\circ\text{C}$ 。

式 (1) 和初始条件式 (2), 边界条件式 (3) ~

(7) 构成了切片的非稳态凝固传热的数学模型, 模型采用有限差分法进行求解。

在实际生产过程中, 由于实际拉速、中包钢水过热度、各冷却区的实际水量等因素的变化, 使得切片在不同时刻具有不同的信息。通过动态跟踪每个切片在不同时刻下的“寿命”位置等信息, 确定出每个切片在不同时刻下的凝固传热微分方程边界条件, 对每个切片的凝固传热微分方程进行周期性求解, 就可以动态地描述每个切片在不同时刻、不同位置下的温度场。由于每个切片温度场的变化都可代表该切片所处位置铸坯温度场的变化, 因而将所有切片串起来, 就可以动态描述整个铸流的温度场分布。

2.2.2 多模型控制策略

动态二冷优化配水模型采用“多模型控制”的先进控制策略来实现不同生产条件下的水量优化。如图 2 所示, 首先构造多个子模型来覆盖整个被控对象的动态特性, 针对每个子模型设计相应的控制器, 并根据各子模型输出误差和当前实际对象误差的某一性能指标来评价各个子模型与被控对象的匹配程度, 然后选取最为匹配的子模型所对应的控制器作用于系统。

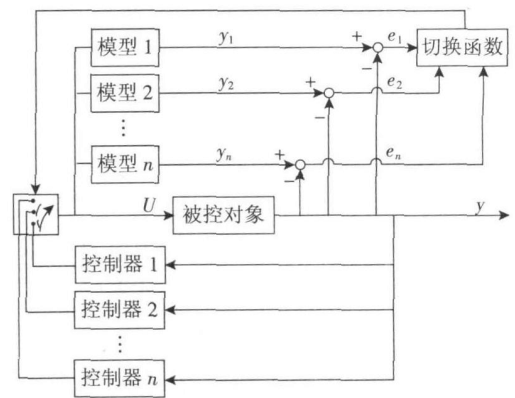


图 2 多模型控制结构图

Fig. 2 Control structure diagram for multiple model control
U—控制器输出; e—模型误差; y—结果输出

动态二冷配水控制系统的建立基于动态优化模型集算法。按照铸坯当前工况下凝固终点的位置构造局部模型集, 采用多个固定模型构成的多模型自适应控制器来实现性能较好的自适应控制。优化配水模型由多个控制器联合控制, 每个控制器均采用当前应用于生产的先进控制策略, 比如基于中包连续测温的浇铸温度前馈配水策略^[3]、基于拉速模型消除热滞后影响的控制策略、基于目标表面

温度的数据库水表控制策略、基于模糊自适应 PD 算法的控制策略以及基于斜率法的自更正控制策略等,以达到最佳的水量优化效果。

为充分发挥各个控制器的优点,避免控制器切换时产生的轻微振荡,作以下约定。

(1)模型足够多以覆盖被控对象参数不确定区域,即每个固定模型所稳定工作区域的集合能够覆盖实际工况中可能的所有参数不确定区域。

(2)控制器的切换实行“软切换”,即采用多个局部模型控制器输出的加权求和的形式来实现切换过程平滑过渡,避免切换阶跃或震荡。

(3)当被控对象处于固定模型集分界区域时,在误差允许的范围内,按加权值处理。

(4)在同一局部模型集中,对于模型误差均在误差允许范围内的,按加权值处理。

(5)当调节出现不满足设定的目标表面温度或设定的冷却回温范围等冶金准则时,屏蔽多模型控制的输出结果,采用有效拉速和基础水表的配水方式来设定水量。

(6)当系统出现阶跃或者震荡时,屏蔽多模型控制的输出结果,采用有效拉速和基础水表的配水方式来设定水量。

实际生产过程中,动态二冷配水控制模型周期性采集工艺参数,应用控制系统中的计算模块计算铸坯各段的凝固温度场和凝固进程,辨识当前工况下控制系统的模型集,依据控制准则和约定俗成的规则,动态选择控制器,以便达到最佳的控制效果。

2.2.3 连锁保护措施

在生产过程中,有时候难免出现人为失误(破坏)和不可预知因素(L2控制计算机死机或关闭)等意外事件的发生,导致L2控制系统瘫痪。为确保动态二冷配水在线控制系统的稳定性、自适应性,L2控制系统采取L1(基础自动化级)PLC水表控制和L2动态控制连锁保护措施,又融合L1,L2控制系统自由切换和应急切换系统,以满足复杂的现场需要和保证生产的顺利进行。

莱钢合金钢矩形坯铸机控制系统时刻检测L2控制系统的运行状态,当发现L2控制系统异常时,自动切换到L1进行控制,若L2控制系统故障修复后,又自动切换到L2控制系统。

连铸生产过程中,根据所浇铸的钢种或工艺不同,或者有时出现设备故障而不得已手动控制

时,可能不需要L2控制,这就要求控制系统有单独控制功能,即要有L1,L2控制系统自由切换功能,以便操作人员自由选择。控制系统在综合各操作状况的基础上,设置了动态二冷配水的各流单独控制和总体控制、动态轻压下各流单独控制和总体控制、各流二冷回路水量单独控制以及各流每架拉矫机单独控制等功能,避免因部分设备出现故障而影响生产。

2.2.4 其他特点

为了防止仪表或者网络通信不正常和设备本身工作不正常等情况下产生的虚假数据影响模型的准确性,L2控制系统包含了“数据诊断与处理”功能模块,该模块能正确识别当前数据是否在正常的范围内,如果出现异常数据,模块根据数据的类型以及数据对模型准确性的影响程度进行相应处理。

L2控制系统还采用“数、表、线、形相结合”的形式来直观反映连铸过程中工艺参数和铸坯纵切面上的温度和凝固坯壳厚度分布。操作工或工艺人员可以在监控界面上清晰地看到各铸流的温度场和凝固进程、各冷却区出口表面温度和坯壳厚度、设定水量和实际水量的直方图以及铸坯的液芯长度等重要信息。控制系统也对生产中的过程数据进行全程记录,方便工艺人员对铸坯质量状况及影响因素作离线分析,同时提供控制系统的数据库管理工具等辅助管理工具,用户可以自由制定工艺接口,并增加新钢种和修订相应的二冷工艺等。

3 应用效果分析

莱钢合金钢矩形坯连铸机L2动态配水在线控制系统自2008年6月一次热试成功起一直投入使用,全程参与在线控制。为了验证控制系统的准确性和稳定性、工艺制定的合理性及合金钢冶金效果,北京科技大学、中冶连铸与莱钢集团自热试开始跟踪了1000多炉合金钢(主要钢种包括45[#],45B,S45C,40Cr以及20CrMnTiH)的铸坯质量及轧材质量状况,其中包含断面180mm×220mm,断面260mm×300mm以及两者混断面浇铸的情况,热酸低倍、硫印、偏析分析及顶锻试验表明,铸坯质量较好,轧材满足质量要求。

3.1 红外测温验证

根据现场实际条件,在各流铸坯进拉矫机前安装经校验后的红外测温仪,测温仪的精度是

0.5%,实际测温 and 模型计算的数据周期存储于历史数据库中,随机抽查一组连续生产 2 h 的数据进行比对,如图 3 所示。

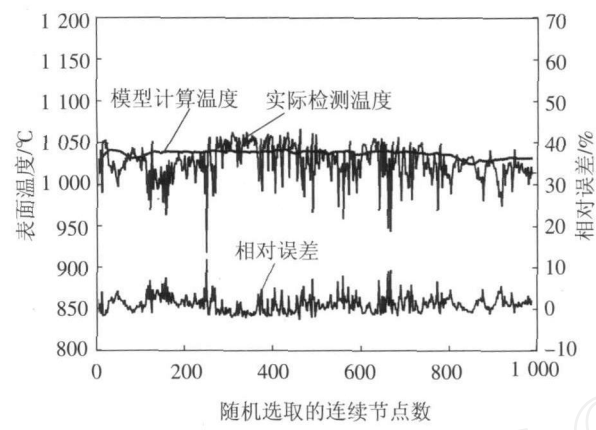


图 3 模型计算温度与实测温度的比较

Fig. 3 Surface temperatures measured in-site vs calculated

在该段时间内,二冷动态配水控制系统能根据实际生产状况动态调整水量,保证进拉矫机时铸坯的表面温度均在预先设定的目标表面温度附近,避免了铸坯鼓肚和表面裂纹等缺陷的产生。监测温度的波动是受铸坯表面振痕和随机残留的氧化铁皮等因素的影响造成的,其中实际表面温

度应以峰值为准。从图 3 中可以看出,模型计算温度与实测峰值温度基本接近,其相对误差基本小于 3.0%,满足工艺要求。

3.2 铸坯冶金效果

为了检验二冷动态配水技术的实际应用效果,针对不同浇铸钢种和浇铸断面对铸机进行大量的取样跟踪并检验铸坯质量,根据酸浸坯样可以看出,铸坯表面及内部质量良好,无表面裂纹、中间裂纹及中心裂纹等缺陷,铸坯内部致密度较好,等轴晶率最大达 61.3%,轧材经顶锻检验也全部合格。

图 4 为实际生产过程中,在断面 180 mm × 220 mm,浇铸钢种 45[#],拉速范围 1.1~1.7 m/m in,过热度 30~35 °C 和二冷水动态控制等工况条件下,随机对铸坯取样的横剖和纵剖图(上排为横剖图,下排为纵剖图)。从坯样的酸洗情况来看,横剖和纵剖的铸坯都比较好,铸坯内部枝晶比较细密,致密度较好,基本无裂纹缺陷产生,但某些坯样仍存在内部疏松和中心线偏析等缺陷。从取样的炉次相对应的轧材(分别轧制 Φ 45 mm, Φ 50 mm)来看,一次顶锻和一次低倍检验全部合格,产品质量完全符合要求,轧材低倍评级见表 1。

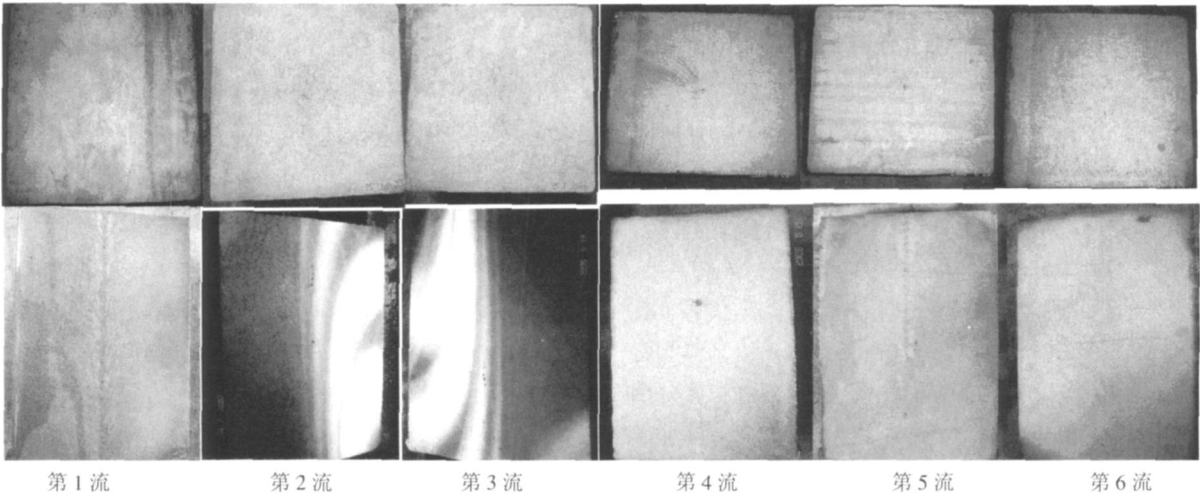


图 4 横剖和纵剖的酸浸坯样

Fig. 4 Acid etched billet castings

表 1 轧材低倍评级

Table 1 Macrostructure assess of rolled products

轧材直径 Φ/mm	一般疏松 级	中心疏松 级	一般偏析 级	中心偏析 级
45	0.5	0.5	0.5	1.0
50	0.5	1.0	0.5	0

(下转第 23 页)

“空料位”方式。“空料位”的具体距离将由“数学模型”即“二级系统在线控制模型”自动给出,待回到正常生产条件下再根据实际生产条件调用其对应的优化炉温制度。

4 结束语

该座常化炉于 2007 年 9 月 18 日开始第 1 次烘炉进行无负荷调试,9 月 26 日成功地完成了第 1 批钢板的顺利出炉。经实际生产检验,控制系统运行稳定,温度跟踪最大误差为 1.47%,各项性能指标已达到预期工艺设计要求。特别是本项目所应用的辊底式常化炉数学模型及其在线优化计算机控制系统为国内外同类生产线提供了可供借鉴的成功案例,对提高中厚板的成品质量和收得率有着重要的参考价值。

参考文献:

- [1]李 静,王 京,温 治,等. 辊底式热处理炉自动控制系统设计 [C]//2005 年中国钢铁年会会议论文集. 北京:冶金工业出版社,2005
- [2]李 静,王 京,温 治,等. 中厚板辊底式热处理炉

自动控制系统设计与应用 [J]. 钢铁, 2006 (6): 52-55

LI Jing, WANG Jing, WEN Zhi, et al. Design and application of automation system on roller hearth heat treatment furnace [J]. Iron and Steel, 2006 (6): 52-55

- [3]牛 珏,温 治,王俊升,等. 大型辊底式连续热处理炉计算机优化控制系统 [J]. 钢铁, 2007 (2): 72-74

NIU Jue, WEN Zhi, WANG Jun-sheng, et al. Computer control system for optimizing heating of large continuous roller hearth heat treatment furnace [J]. Iron and Steel, 2007 (2): 72-74

- [4]牛 珏,温 治,王俊升,等. 中厚板辊底式热处理炉摆动加热模型的灰色多目标决策 [J]. 材料热处理学报, 2007, 28 (1): 140-143

NIU Jue, WEN Zhi, WANG Jun-sheng, et al. Grey multi-criteria decision of swing heating model for thick steel plate roller hearth heat treating furnace [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2007, 28 (1): 140-143

- [5]王俊升. 辊底式连续热处理炉数学模型及计算机优化控制系统 [D]. 北京:北京科技大学, 2005

[编辑:魏 方]

(上接第 16 页)

为进一步提高铸坯质量,减轻铸坯内部疏松及中心线偏析等内部缺陷,在应用动态二冷配水的同时,采用动态轻压下,由动态二冷水控制模型准确给出铸坯凝固末端位置,具有动态辊缝调节功能的拉矫机按给定值对铸坯实施压下,以补偿钢水凝固造成的收缩,从而达到减轻中心宏观偏析、增加中心等轴晶率和提高内部致密度的效果。

4 结论

(1)莱钢合金钢矩形坯连铸机的 L2 级动态配水在线控制系统采用面向对象的程序设计语言 VC++ 6.0 编制而成,窗口式设计,用户界面友好,运行稳定,能够实时准确地在线计算铸坯凝固过程温度场,有效地动态优化配水。

(2)在线控制系统充分考虑了合金钢的凝固特性,采用了完善、先进的控制策略,减少了人工参与控制的环节,提高设备的智能化程度,同时也提供了用户自由制定工艺接口,支持用户增加新钢种和修订相应的二冷工艺等功能。

(3)质量跟踪及冶金效果分析表明,在线控制系统在莱钢合金钢连铸质量保证方面起到了重要

作用,有效地避免了表面裂纹、中间裂纹及中心裂纹等缺陷的产生,在一定程度上提高了中心致密度,增大了中心等轴晶区。为进一步提高铸坯质量,减轻铸坯内部疏松及中心线偏析等内部缺陷,在应用动态二冷配水控制系统的同时,应采用与之相配套的动态轻压下技术。

参考文献:

- [1]Herbert L Gilles. The making, shaping and treating of steel, 11th edition casting volume [M]. [S 1]: The AISE Steel Foundation, 2003
- [2]王国新,韩占光,钱宏智,等. 国产大方坯动态轻压下铸机二级控制模型特点与应用 [C]//2007 中国钢铁年会论文集 4 北京:冶金工业出版社, 2007: 87-88
- [3]刘文红,谢 植,纪振平,等. 连铸二冷配水先进控制策略的研究及应用 [J]. 钢铁研究学报, 2007, 19 (9): 59-62
- LIU Wen-hong, XIE Zhi, JI Zhen-ping, et al. Study and application of advanced control strategies for continuous casting secondary cooling [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2007, 19 (9): 59-62

[编辑:夏 宁]