

·控制理论应用·

常化炉过程控制系统的研究与应用

李 静¹,王 京¹,郝春辉¹,张勇军¹,李小占¹,温 治²

(1. 北京科技大学 高效轧制国家工程研究中心,北京 100083; 2 北京科技大学)

摘要:根据常化炉的结构和控制特点,采用交替方向隐式差分格式的算法,建立钢板导热模型、炉膛传热模型、钢板氧化烧损模型和炉膛热平衡模型,开发了在线数学模型并提出了优化摆动加热策略。经过仿真和实际应用验证,该数学模型能够反映现场实际常化炉的热处理过程,可以投入在线控制系统使用。为国内外同类生产线提供了可供借鉴的成功案例。

关键词:常化炉;过程控制;数学模型;摆动加热

中图分类号: TF061.2; TP273⁺.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7059(2009)02-0017-07

Research and application of process control system for roller hearth normalizing furnace

LI Jing¹, WANG Jing¹, HAO Chun-hui¹, ZHANG Yong-jun¹, LI Xiao-zhan¹, WEN Zhi²

(1. National Engineering Research Center for Advanced Rolling Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. University of Science and Technology Beijing)

Abstract: According to structure and control characters of roller hearth normalizing furnace, using algorithm with alternating direction implicit difference schemes, slab heat conduction model, heat transfer model in furnace, slab oxidation ignition loss model and thermal balance model in furnace were set up, on-line mathematical model was developed, and optimization swing heating strategy was presented. Simulation and actual application show that the mathematical model could reflect actual heating treatment process of roller hearth normalizing furnace in site, and could be used in on-line control system. It also provides a successful reference case for domestic and foreign similar production lines.

Key words: roller hearth normalizing furnace; process control; mathematical model; swing heating

0 概述

本常化热处理线是利用国内自主设计和研制技术新建的热处理线工程。热处理线主要包括一座常化炉、ACC控冷装置、矫直机、翻板机和冷床等设备。其中作为热处理线的核心——常化炉是利用国内自行开发的先进技术、结合现场工艺特点而设计制造的,主要用于中厚板的正火、淬火、回火处理。主要加热钢种有碳素结构钢、优质碳素结构钢、低合金结构钢、低合金高强度结构钢、压力容器板、锅炉板、桥梁板、汽车大梁板、工程机

械用板、管线板、厚度方向性能板等。

1 常化炉的结构特点

整个炉子全长 70 m,炉内宽 3.5 m,炉膛高度 1.2 m。炉子钢结构采用分段预制模块式结构,使炉子结构合理,性能优越。在每个模块区域内布置 8 个烧嘴,传动侧与非传动侧交错布置。每个炉节分上下 2 个温度控制段,整个炉子共有 10 个炉节,20 个温度控制段^[1]。炉子的燃气种类为高、转、焦混合煤气。炉子的空气管道系统,依靠 2 台助燃风机提供系统所需的助燃和引射空气。炉内

收稿日期: 2008-10-21;修改稿收到日期: 2009-01-12

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划(2006BAE03A06)

作者简介:李 静(1973-),女,河北涿州人,副研究员,博士研究生,主要从事控制理论与控制工程的研究工作。

排出的烟气,在每个烧嘴的烟气出口处吸入周围的空气,使烟气降低到一定温度后通过汇总烟道由排烟机排出厂外。

整个常化炉共由 102 根无水冷却的炉辊组成。每根辊子均由 1 台交流变频电机经减速机和中间联轴器驱动,辊道采用电气单独传动,交流变频调速。根据热处理钢板的厚度可任意调整炉底辊的速度。

2 控制系统特点

采用国内外先进的常化炉仪控及电控系统,控制系统包括 L2 级过程自动化, L1 级基础自动化和 L0 级数字传动,同时为与将来 L3 级生产过程控制的联网预留了接口。其主要特点有^[2]: (1) 采用脉冲燃烧烧嘴和优化控制算法,实现温度自动控制功能,从而为提高成品的质量和收得率奠定了坚实的基础; (2) 控制系统的冗余设计与应用,充分保障了仪控系统传动系统的高度可靠性; (3) 实现全炉钢板位置自动跟踪及修正,实际跟踪误差不大于 0.5%; (4) L2 级系统参与在线控制,其模型预报具有很高的命中率。

3 过程自动化级控制系统的研究

常化炉控制系统的主要任务和功能是保证正火、回火、淬火及固熔处理后钢板的产量和质量。过程自动化级成功地开发了以中厚板常化炉数学模型为基础的计算机优化控制系统,其主要任务是应用适当的数学模型,将计算输出的最佳设定值送到基础自动化级,实现相应的控制和数据功能。主要包括模型设定及优化、温度跟踪、加热保温时间设定、辊速设定、炉温设定、摆动加热控制、钢板温度出炉反馈控制、数据库管理等系统。

3.1 模型及验证

3.1.1 数学模型的基本条件

钢板在炉内加热过程中,涉及到燃料的燃烧、气体的流动和传热传质、氧化、脱碳等复杂的物理化学过程,还与许多影响因素有关,主要有以下几个方面:炉膛尺寸、炉墙的热特性、钢板尺寸、钢板的热物性、燃料的种类及供热量、空气、燃料预热温度及空燃比、炉气热特性、炉气运动、钢板运动等。然而,由于目前检测设备不足,炉内钢板温度分布的实时检测无法实现,要弄清钢板温度与被控量炉温的内在联系,必须依靠建立常化炉数学模型来求解,采用常化炉内可检测的热状态参数,来计算加热过程中的钢板温度分布,并以此为基

础实现常化炉的优化控制^[3]。为了对钢板在炉内的加热过程进行较为客观的描述,需要进行适当的简化:

(1) 炉温分布不随时间变化,认为炉膛内介质温度在所分区段内均匀一致,并且忽略沿炉长方向各个区段间的辐射换热;

(2) 钢板在炉内匀速运动,忽略沿钢板长度方向的导热。由于钢板间隙放置,因此,可将钢板的内部传热近似认为无限长扁坯上、下及两侧四面受热的二维不稳态导热,并认为两侧面的受热条件相同;

(3) 忽略钢板表面的氧化铁皮对传热的影响;

(4) 炉墙内表面及钢板表面黑度视为常数;

(5) 近似认为炉温与炉气温度相等。

3.1.2 数学模型的建立

通过合理必要的假设,建立钢板导热模型、炉膛传热模型和炉膛热平衡模型等基础模型。以导热模型为例加以介绍。

炉温优化最根本的目的是运用合理的加热制度加热钢板,使其达到热处理所要求的温度分布,因此炉内钢板热过程是主要的研究对象。钢板内部导热服从傅里叶方程,建立钢板内部导热数学模型如下:

(1) 控制方程

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

(2) 定解条件

1) 几何条件: 钢板尺寸,长 \times 宽 \times 高 = $x \times y$;

2) 物性条件: 采用变物性参数。密度、比热容和热导系数均随温度变化;

3) 初始条件: $t = 0, t(0, x, y) = t_0(x, y)$;

4) 边界条件: $x = 0, \frac{\partial t(t, 0, y)}{\partial x} = 0; x = \frac{a}{2},$

$$\frac{\partial t(t, \frac{a}{2}, y)}{\partial x} = q_s; y = 0, (t) \frac{\partial t(t, x, 0)}{\partial y} = q_1;$$

$$y = b, (t) \frac{\partial t(t, x, b)}{\partial y} = q_0.$$

上述式中, ρ 为钢板密度, kg/m^3 ; c_p 为钢板比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; λ 为钢板导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$; q_0 为钢板上表面的热流密度, W/m^2 ; q_1 为钢板下表面的热流密度, W/m^2 ; q_s 为钢板侧表面热流密度, W/m^2 ; a 为钢板横断面宽度, m ; b 为钢板横断面高

度, m。

3.1.3 数学模型的数值求解方法

控制方程离散化的任务是在网格划分的基础上,在求解区域内将控制方程的微分形式转化为代数形式,以便于计算机数值求解。其实质是利用积分区域内有限数目的离散点上的不连续函数值取代函数定义域内的连续函数值。控制方程离散化是计算机数值求解的必要条件^[4]。

本文依据炉内钢板加热的实际情况,对研究

断面进行了网格划分,并分别采用显式和交替隐式两种格式对方程(1)进行了离散。对隐式格式离散方程组的求解采用逐线迭代的 TDMA 法。

(1) 网格生成

空间网格生成技术是控制方程离散化的基础,网格划分关系到离散化控制方程的难易,关系到求解离散方程的收敛性、经济性和准确性。本项目采用的是移动坐标系,并根据实际情况对炉内被加热的钢板进行网格划分,如图 1 所示。

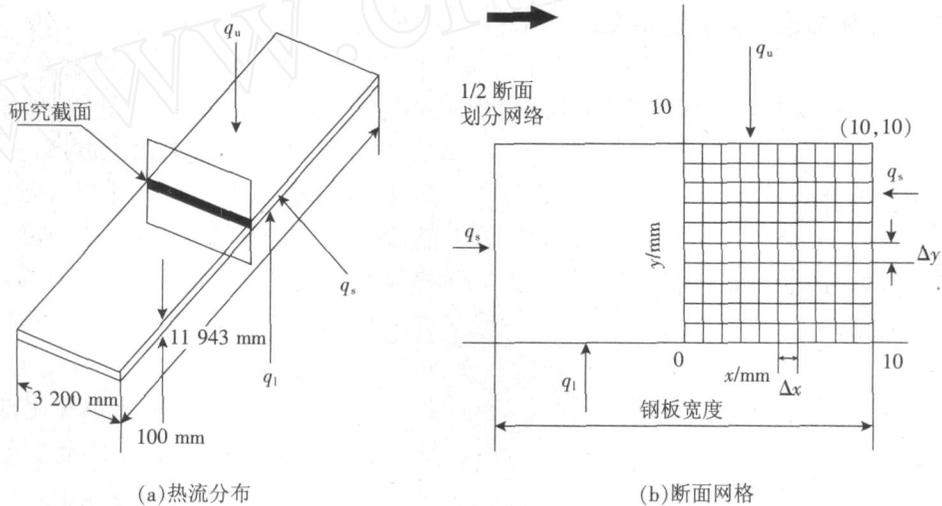


图 1 钢板在炉内表面的热流分布以及断面网格划分示意图

Fig. 1 Surface heat flow distribution and sectional grid division sketch map of plate in furnace

(2) 差分格式的选取

常化炉数学模型控制方程离散化的方法通常采用的是控制容积法,属于有限差分法的范畴。差分格式主要包括显式、隐式和交替隐式格式三种。其中,显式差分格式的优点是每个节点方程都能独立求解,整个计算过程十分简单。但是,显式差分格式的稳定性 and 收敛性受到时间步长 Δt 和空间步长 $\Delta x(\Delta y)$ 的制约。隐式差分格式的二维隐式格式无条件稳定,消除了对时间步长的限制,但是隐式差分在每一个时间层上需要解一个五对角的 $(N - 1) \cdot (M - 1)$ 个未知量的代数方程组 (M 为 x 方向的网格点数; N 为 y 方向的网格点数),五对角方程组的求解需要经过迭代进行,计算工作量很大。而交替隐式差分格式能够将五对角方程组转换成一维系统的三对角方程组,从而采用追赶法 (TDMA) 求解。交替隐式对于给定的时间步长,可以导出两组有限差分方程,这些方程是显式和隐式项的混合。前半时间步长, x 方向各项是隐式格式, y 方向各项是显式格式;而在下半

时间步长, x 方向各项是显式格式, y 方向各项是隐式格式。综上所述,本控制算法采用显式和交替隐式差分格式。

3.1.4 数学模型数值仿真系统

常化炉数学模型数值仿真系统是一套研究中厚板连续及摆动热处理加热过程最优控制的计算机仿真系统软件,由北京科技大学开发。软件可以动态模拟常化炉钢板在炉内加热升温的全过程,直观地反映钢板在炉内连续及摆动运行情况,能够模拟实际生产,对不同加热工艺下的炉辊速度和炉区温度进行寻优运算,确定出最佳辊速和各炉区的最佳温度等热工参数,优化钢板加热过程^[5]。

常化炉数学模型数值仿真系统主要包括以下功能模块:

- (1) 燃料特性、钢板尺寸、材质、入炉温度等参数设定模块;
- (2) 热处理工艺、运行制度、炉温制度等设定模块;

(3) 钢板在炉内运行动画显示模块及各典型点温度动态实时曲线显示模块;

(4) 钢板连续或摆动加热时各区炉温优化结果输出模块;

(5) 钢板连续或摆动加热时头部和尾部点在各区运行时间及各典型点温度输出模块;

(6) 钢板连续或摆动加热时头部和尾部点所经过各区热平衡及炉膛总热平衡输出模块;

(7) 钢板连续或摆动加热时头部点和尾部点钢板各典型点温度曲线输出模块;

(8) 不同热处理工艺下钢板连续或摆动加热优化结果数据库模块。

辊底式常化炉数学模型仿真计算框图如图 2 所示。

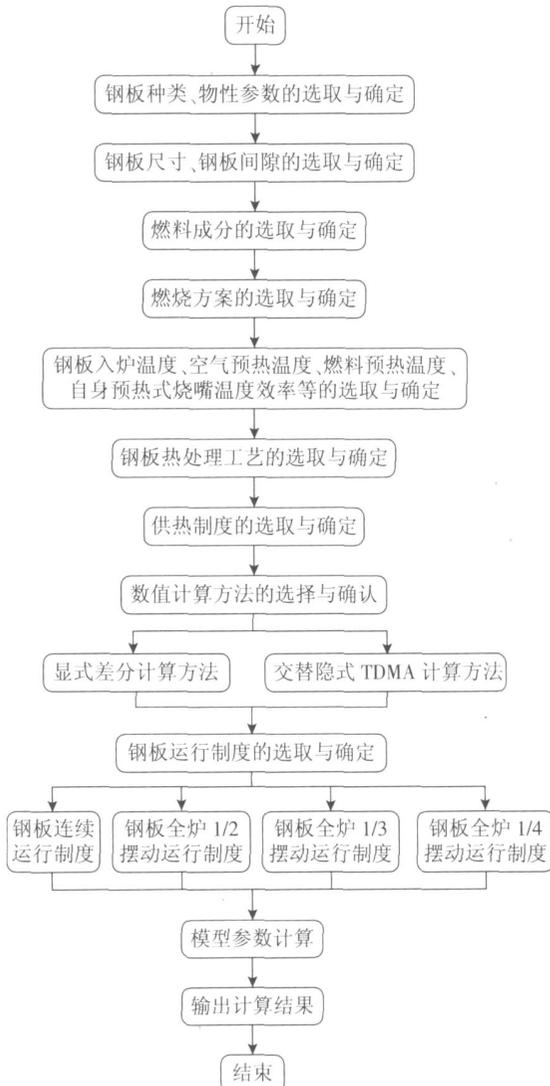


图 2 数学模型仿真计算框图

Fig. 2 Calculation block diagram of mathematical model simulation

3.1.5 在线数学模型的验证

采用“温度跟踪法”,采集大量现场数据进行跟踪记录,验证该数学模型用于在线控制的可行性。其中在线温度跟踪是常化炉数学模型优化加热控制系统的重要组成部分,在离线模型的基础上,建立用于在线计算钢板温度的数学模型,对炉内钢板进行在线温度跟踪,为炉温优化设定和加热质量管理提供依据。

根据实际炉长以及实际生产钢板规格特点,确定炉内最多可装 20 块钢板,因此建立 20 个独立模块,并对应程序的 20 个存储区^[1]。当存储区内有数据,即有真实的一块钢板在炉内时,模型自动调用这块钢板的所有属性,并周期调用模型对炉内所有钢板的当前时刻温度进行计算。钢板的属性包括:钢种、热处理工艺、长、宽、厚、在炉内位置、钢板中心点温度、表面平均温度、断面温差、目标温度、总加热时间、剩余加热时间和辊速等参数。在实际中根据现场需要,在线的温度显示既可以是平均温度,也可以是断面温度,由于炉温在加热段是均衡的,故钢板头部和尾部及中间的断面温度基本是一致的,因此在此所叙述的断面温度为钢板中间的模型计算温度值。

(1) 验证条件

在线数学模型的验证条件如表 1 所示。

(2) 验证结果

基于上述验证条件,将数学模型计算结果与现场跟踪记录结果进行对比,可总结出表 2 数据。

由验证结果得出如下结论:

(1) 模型计算出炉温度最大绝对误差为 6 (<10),最大相对误差为 0.88% ($<5\%$),完全符合精度要求。

(2) 模型预报最佳辊速与实际使用辊速最大相差 0.02 m/min,符合工艺要求。

(3) 模型计算在炉时间:正火工艺下比现场经验值略低一些,但相差都在 10 min 以内,现场使用在炉时间稍微长一些,是因为考虑到一些复杂因素因而人为增大了在炉时间,以确保钢板满足出炉要求;回火工艺下由于考虑到钢板内部晶相的成长变化需要一定的保温时间,故实际执行的在炉时间与模型计算的完全相同。

(4) 本项目提出的摆动策略是切实可行的。

3.2 超厚钢板摆动加热策略的仿真优化

由于辊速直接决定着产量高低,所以首先选

表 1 验证条件

Table 1 Condition verification of mathematical model

项目	工艺和规格	
	正火 (930 ±10) 70 mm ×2 650 mm ×12 000 mm	回火 (690 ±10) 70 mm ×2 000 mm ×13 500 mm
入炉温度 /	22	
燃料种类	天然气	
预热温度 /	22	
温度效率 /%	75	

表 2 数学模型预报计算结果与现场跟踪记录结果对比表

Table 2 Comparison between the result of mathematical model prediction calculation and field tracing record

项目	工艺和规格	
	正火 (930 ±10) 70 mm ×2 650 mm ×12 000 mm	回火 (690 ±10) 70 mm ×2 000 mm ×13 500 mm
出炉温度 / (模型计算 /跟踪测量)	929/926	692/686
辊速 / (m/m in) (模型计算 /实际使用)	0.62 /0.60	0.53 /0.52
在炉时间 /min (模型预报 /实际使用)	112/118	210/208
摆动策略 (模型推荐 /实际使用)	连续加热 /连续加热	1/3摆动加热 /1/3摆动加热

取最大辊速进行优化计算,以极限炉温制度确定最大辊速。辊速的确定涉及钢板的规格(主要是厚度)、温升系数、在炉加热保温时间、钢板运行制度等。辊速设定要尽可能保证钢板采用连续运行制度。当连续运行不能满足最低辊速限制时,才采用摆动运行制度。

对于厚度超过 70 mm 的钢板,连续运行制度不能达到热处理工艺要求的出钢要求,因此必须延长钢板的在炉时间,但是空腹炉辊又不能停止转动,必须通过摆动加热满足出钢要求。选择不同的摆动方案,其最终目标是一定的,在保证钢板质量和产量的前提下,实现最小的燃料消耗和氧化烧损。分别针对正火、回火工艺,处理不同材质和不同规格钢板时进行了仿真优化计算,得到最大辊速时的最佳炉温制度,并在实际应用中得到进一步验证。

项目提出了 1/2, 1/3, 1/N 全炉摆等一系列摆动仿真优化策略,现以 1/2 全炉摆动加热方式为例,研究钢板在炉内加热的优化加热工艺^[5]。同时,由于钢板的上述运动特点,导致其头部点和尾部点的运动区域不同,因此它们的温升曲线也不同,图 3 所示为钢板头部点和尾部点在不同运动区域的炉温曲线、钢板表面温度及断面温差分布曲线。要保证钢板在一定的在炉时间内加热达到出钢要求,必须使在低温区停留时间较长的尾部点满足工艺要求。其中,横坐标为沿炉长方向的炉节长度分布,如数值 7.2 表示每个炉节长度 7.2 m,

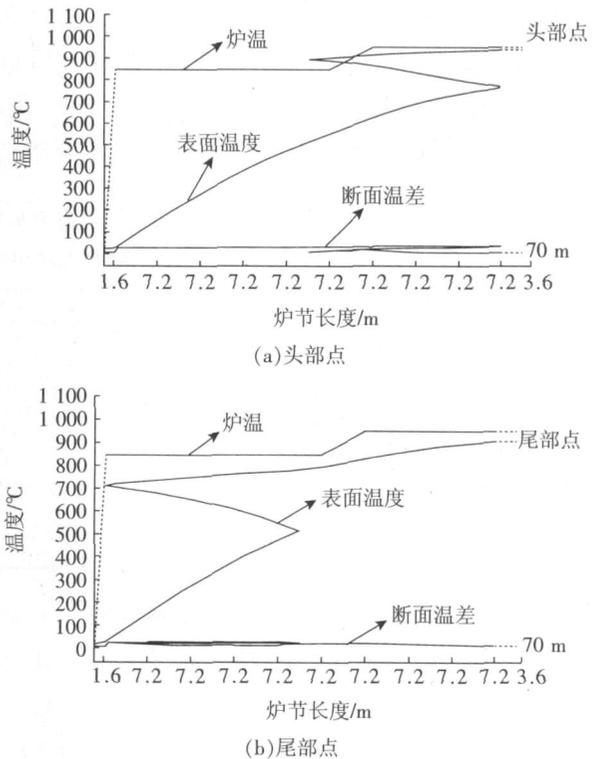


图 3 头、尾部点运动区域炉温及钢温分布

Fig. 3 Furnace temperature curve of head and tail point movement area and steel temperature distribution

共 9 个炉节,第 10 炉节为 3.6 m。头部有 1.6 m 的不供热段。

因此,要保证钢板在一定的在炉时间内加热达到出钢要求,必须兼顾在低温区停留时间较长的尾部点满足工艺要求。据此,本项目对超厚钢

板在不同辊速下进行了大量仿真,优化炉温计算。

3.2.1 辊速为 1.0 m/min 时炉温的优化

首先选取最大辊速进行优化计算,设置辊速为 1.0 m/min,改变炉温制度,衡量炉子与钢板各项指标随炉温制度的变化见表 3。通过表 3 可看出:辊速一定时,采取不同的炉温制度均可能使

钢板满足出炉标准,但随着炉温的升高,钢板表面温度升高,同时引起氧化烧损增大、标耗增加、热效率降低,故选取正好能达到工艺要求的炉温制度是最节能的。因此对于辊速为 1.0 m/min 时,优化得到的最优炉温,加热段和保温段的炉温设定分别为 940,950。

表 3 辊速为 1.0 m/min 时炉温的优化

Table 3 Furnace temperature optimization when roller speed is 1.0 m/min

指标	加热段和保温段的炉温制度					
	935		950		940	
	头部点	尾部点	头部点	尾部点	头部点	尾部点
表面最低出炉温度 /	932.81	928.23	933.39	930.41	934.53	934.53
钢板断面最大温差 /	4.45	5.53	4.31	5.02	4.04	4.04
氧化烧损 /%	0.60	0.58	0.60	0.59	0.60	0.60
标耗 / (kJ/t)	33.70	32.18	33.76	33.47	33.83	33.00
炉膛热效率 /%	53.02	52.53	52.94	52.48	52.83	52.35
产量 / (kg/h)	31 663.86					

3.2.2 辊速为 0.8 m/min 时炉温的优化

为比较在不同辊速下得到优化结果的优缺点,尝试进行辊速为 0.8 m/min 时炉温的优化。表 4 为在 0.8 m/min 的辊速下,衡量炉子与钢板的

各项指标随炉温制度变化而变化的情况。

3.2.3 辊速优化结果比较

(1) 在不同辊速下,可计算出不同的炉温制度,各项指标也不尽相同,但都能达到工艺要求。

表 4 辊速为 0.8 m/min 时炉温的优化

Table 4 Furnace temperature optimization when roller speed is 0.8 m/min

指标	加热段和保温段的炉温制度					
	880		950		890	
	头部点	尾部点	头部点	尾部点	头部点	尾部点
表面最低出炉温度 /	942.29	926.28	942.83	930.24	943.89	936.38
钢板断面最大温差 /	2.15	5.89	2.01	5.06	1.75	3.59
氧化烧损 /%	0.63	0.58	0.63	0.59	0.64	0.61
标耗 / (kJ/t)	34.74	31.61	34.83	32.27	34.98	33.4
炉膛热效率 /%	52.1	51.82	51.95	51.77	51.7	51.59
产量 / (kg/h)	25 446.23					

(2) 各项指标中氧化烧损、标耗的变化不大,可不予考虑。产量与经济效益直接挂钩,不同辊速下产量相差很大,故生产实际中对正火工艺、尺寸为 10 000 mm × 2 600 mm × 100 mm 钢板、采用 1/2 摆动方案时推荐辊速为 1.0 m/min,加热段和保温段的炉温设定分别为 940,950。

3.3 钢板变工况优化控制策略

在实际生产中不可能永远保持生产同一规格、同一钢种和同一热处理工艺的钢板,即变工况的情况在实际生产中是不可避免的。变工况情况相当复杂,一般包括:同一热处理工艺但不同的钢板规格(主要是钢板厚度有较大变化)、同一规格但不同的热处理工艺(如正火工艺改为高温回火

工艺)、热处理工艺和钢板规格同时改变等几种典型的变工况情况。对于这些特殊生产工况,在保证满足热处理工艺制度所要求的温度水平和实现最大产量的前提下采取的优化控制策略是:

(1) 就“高”不就“低”原则。在同一热处理工艺条件下当钢板规格(厚度)变化不大时,可采取“较厚钢板对应的优化炉温制度”作为“混装阶段”的优化炉温制度,待回到正常生产条件下再根据实际生产条件调用对应的优化炉温制度。

(2) “空料位”原则。在同一热处理工艺条件下当钢板规格(厚度)变化较大时;同规格但热处理工艺有变化(正火改回火、回火改正火等)时;热处理工艺和钢板规格都有明显变化的情况下采取

“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.
LU 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]