

· 控制理论应用 ·

# 基于目标钢温的加热炉在线动态优化控制

杨业建<sup>1</sup> 姜泽毅<sup>1</sup> 张欣欣<sup>1</sup> 陈万里<sup>2</sup>

(1. 北京科技大学 机械工程学院 北京 100083; 2. 北京神雾热能技术有限公司)

**摘要:** 由于鄂城钢铁有限责任公司宽厚板厂步进式加热炉无法很好地适应钢种和实际生产条件的变化, 因此造成钢坯出炉温度无法精确满足轧线的要求。针对该问题, 本文建立了步进式板坯加热炉数学模型, 通过优化计算得到钢坯的理想升温曲线和相应的炉温制度, 提出了基于各段目标钢温的在线炉温动态优化控制策略, 建立了带有钢温负反馈的在线优化控制系统, 实现了对出炉钢温的精准控制, 同时达到了一定的节能效果。在实际应用中使开轧温度的命中率提高了12个百分点, 吨钢燃料消耗降低了10 m<sup>3</sup>。

**关键词:** 加热炉; 优化; 炉温制度; 目标钢温; 在线控制

**中图分类号:** TF061; TP392 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7059(2012) 01-0019-06

## On-line dynamic optimization control of heating furnace based on target billet temperature

YANG Ye-jian<sup>1</sup> , JIANG Ze-yi<sup>1</sup> , ZHANG Xin-xin<sup>1</sup> , CHEN Wan-li<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Beijing Shenwu Thermal Energy Technology Co., Ltd.)

**Abstract:** Because the walking beam heating furnace in Heavy Plate Plant of Echeng Iron & Steel Co., Ltd. can't adapt to variation of steel grade and practical production conditions very well, discharging billet temperature can't meet the requirement of rolling line accurately. To solve this problem, a mathematic model for walking beam slab reheating furnace was established. Through optimizing calculation, ideal rising temperature curve of slab and corresponding furnace temperature pattern were obtained. On-line dynamic optimization control strategy of furnace temperature based on target billet temperature of every heating section was proposed. On-line optimizing control system with billet temperature negative feedback was built. Precise control of discharging billet temperature was achieved and energy saving effect was obtained. In practical application, hit rate of rolling temperature was increased by 12 percentage points, and fuel consumption per ton steel was decreased by 10 m<sup>3</sup>.

**Key words:** heating furnace; optimization; furnace temperature pattern; target billet temperature; on-line control

## 0 引言

随着轧制技术的发展和完善, 热轧产品的种类和规格日益繁多, 对轧机控制精度的要求越来越高, 生产节奏变化也越来越频繁, 这些都对加热炉的钢温控制精度和出钢时效性提出了更高的要求。

传统的以炉温为目标的控制技术已经逐渐难以适应轧制节奏变化和温度控制精度发展的要求。

近年来, 加热炉二级过程控制系统已逐渐应用于现代钢铁企业的生产控制中, 取得了良好的

收稿日期: 2011-03-21; 修改稿收到日期: 2011-09-21

基金项目: 教育部科学技术研究重点资助项目 (107008)

作者简介: 杨业建 (1980-) 男, 山东东营人, 博士研究生, 主要研究方向为加热炉模型和热轧区段调度管理。

效果。加热炉二级过程控制具有钢坯位置跟踪、炉温跟踪、炉温优化等功能<sup>[1]</sup>,其中炉温优化是二级过程控制的核心功能,它主要是根据钢种、规格和生产节奏变化,动态调整炉温,实现对钢坯升温过程的精确控制。准确的加热炉数学模型和炉温优化策略是炉温优化功能实现的基础。目前,对于加热炉数学模型的研究已经比较成熟<sup>[2-5]</sup>,炉温优化策略的研究逐渐成为国内外学者研究的热点。例如: Ashok 等人<sup>[3]</sup>基于前馈-反馈原理研究了炉温设定值的动态补偿;王中杰等人<sup>[4]</sup>提出了一种基于生产目标的加热炉优化设定控制方法;吴小芳等人<sup>[5]</sup>提出了基于前馈补偿的加热炉炉温动态优化控制策略,这些学者的研究都属于在线控制策略。然而,随着铸轧工序生产连续性和热送热装比的提高,经常出现冷、热坯混合装炉和生产节奏频繁波动等复杂生产状况,现有的这些在线控制策略已经难以同时适应冷热混装和变节奏生产控制的精度要求。

本文通过加热炉数学模型优化计算,得到钢坯理想升温曲线和对应的炉温制度,提出了基于各段目标钢温和生产节奏预测的在线炉温动态优化控制策略。该策略于2010年5月在武汉钢铁集团鄂城钢铁有限责任公司宽厚板厂步进式加热炉上成功应用,实现了带有钢温负反馈的炉温优化控制,取得了良好的控制效果。

## 1 加热炉数学模型

在实际钢坯加热过程中,无法实现钢坯表面和中心温度的在线连续测量,能够直接测量和控制的是加热炉各段炉温,钢坯表面温度由炉温和炉内的换热环境决定,钢坯中心温度由其表面温度和热物性决定。本文将加热炉数学模型纳入加热炉在线控制系统中,实现对钢温的控制。加热炉数学模型的作用是:离线优化计算得到钢坯在典型工况下的理想升温曲线及相应的炉温制度;在线控制时,根据在线检测的各段炉温和钢坯位置等信息,由加热炉数学模型以适当的频率进行计算,确定炉内每块钢坯的温度分布,从而跟踪加热过程中钢坯的表面和中心温度,为加热炉的在线动态优化提供依据。

根据步进式加热炉的特点,采用以下简化条件建立数学模型:

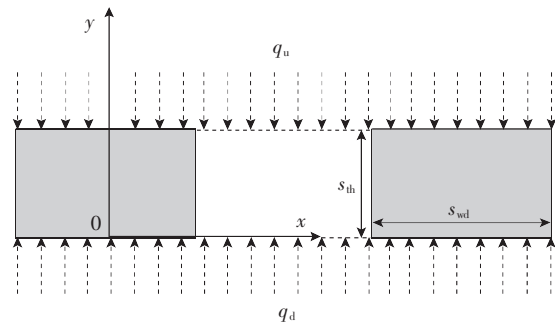
(1) 忽略沿炉宽方向的温度不均匀性,沿炉长方向的炉温根据热电偶采样值线性分布;

(2) 忽略炉气及炉衬沿炉长方向温度不均匀引起的纵向辐射传热;

(3) 忽略沿钢坯长度方向上的导热;

(4) 炉衬按辐射绝热面处理,炉衬及钢坯表面视为灰表面,炉气视为温度均匀的灰介质。

计算坐标如图1所示,其中  $x$  轴和  $y$  轴分别表示钢坯宽度和厚度方向坐标。



$q_u$  和  $q_d$ —钢坯上下表面热流密度,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;

$s_{th}$  和  $s_{wd}$ —钢坯厚度和宽度,  $\text{m}$ 。

图1 计算坐标示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the coordinate

考虑钢坯宽度和厚度方向传热的非稳态二维导热模型可表述为

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (1)$$

$$0 \leq x \leq \frac{s_{wd}}{2} \quad 0 \leq y \leq s_{th} \quad 0 \leq \tau \leq t$$

初始条件为

$$T(x, y, \tau) |_{\tau=0} = T_0$$

边界条件为

$$x=0, \frac{\partial T}{\partial x} = 0; x = \frac{s_{wd}}{2}, -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = q_s$$

$$y = s_{th}, -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = q_u; y = 0, \lambda \frac{\partial T}{\partial y} = q_d$$

其中  $q_u = \sigma \cdot \varphi_{CF,u} (T_f^4 - T_{s,u}^4)$

$$q_d = \sigma \cdot \varphi_{CF,d} (T_f^4 - T_{s,d}^4)$$

$$q_s = q_u \varphi_{uc} + q_d \varphi_{dc}$$

上述式中  $\rho$  为钢的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $c_p$  为钢的比热容,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $T$  为温度变量,  $\text{K}$ ;  $\tau$  为时间变量,  $\text{s}$ ;  $\lambda$  为钢的热导率,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $t$  为钢坯总加热时间,  $\text{s}$ ;  $T_0$  为钢坯入炉温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $q_s$  为钢坯侧表面的热流密度,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $\sigma$  为黑体辐射常数,  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ;  $\varphi_{CF,u}$ ,  $\varphi_{CF,d}$  分别为上下表面的总括热吸收率;  $T_f$  为炉温,  $\text{K}$ ;  $T_{s,u}$ ,  $T_{s,d}$  分别为钢坯上下表面温度;  $\varphi_{uc}$ ,  $\varphi_{dc}$  分别为钢坯间隔上下表面

对侧表面的角系数。

由总括热吸收率法确定的上下表面热流密度及侧表面热流密度为板坯导热计算提供边界条件<sup>[6-8]</sup>。利用有限差分方法可以求得板坯加热过程温度的变化规律。

## 2 热工制度优化

热工制度优化是在钢坯加热过程数学模型基础上,通过优化计算得到冷装钢坯在理想加热条件下的升温曲线和相应的炉温制度,为加热炉的在线控制提供基础。热工制度优化所需的时间较长,无法在线实现,只能采用离线优化方式。在热工制度优化过程中需要考虑钢坯加热的工艺限制如钢坯最大许用应力、出炉温度和断面温差以及加热过程的能耗;同时,也要考虑加热炉各控制段的加热能力等硬件限制。

步进式加热炉按炉温分布,其炉膛沿长度方向分为预热段、多个加热段和均热段。在预热段,钢温较低,多数钢处于弹性状态。对于具有较高塑性的一般普碳钢,其升温速度主要由加热段的供热能力决定;对于合金钢(包括不锈钢),应考虑温度应力对钢材的破坏,不能产生过大温差。钢坯的许用应力计算如下:

$$\sigma_f = \frac{T_s - T_c}{1.05} a_1 E \leq \sigma_{\max} \quad (2)$$

式中  $\sigma_f$  和  $\sigma_{\max}$  为许用应力和最大许用应力,Pa;  $T_s$  和  $T_c$  分别为钢坯表面和中心温度,K;  $a_1$  为钢坯线膨胀系数,1/K;  $E$  为弹性模量,Pa。

确定钢坯出炉温度是得到钢坯理想升温曲线的首要条件,出炉温度一般根据终轧温度和除鳞、加工以及运送过程的热损失来确定,见式(3)

$$T_{\text{out}} = T_{\text{AC3}} + \Delta T_{\text{wd}} + \Delta T_{\text{roll}} + \Delta T_{\text{tran}} \quad (3)$$

式中  $T_{\text{out}}$  为钢坯理想出炉温度,℃;  $T_{\text{AC3}}$  为加热时钢由共析铁素体全部转变为奥氏体的终了温度;  $\Delta T_{\text{wd}}$  为钢坯经过高压水除鳞时的温降,℃;  $\Delta T_{\text{roll}}$  为钢坯轧制加工过程的温度变化,℃;  $\Delta T_{\text{tran}}$  为钢坯辊道运输过程中的温降,℃。

由于加热炉工艺限制,出炉板坯存在断面温差,因此在优化过程中,需要控制表面温度和中心温度,其要求如式(4)和式(5)所示。

$$|T_{s \text{ out}} - T_{\text{out}}| \leq \Delta T_{s \text{ max}} \quad (4)$$

$$T_{s \text{ out}} - T_{c \text{ out}} \leq \Delta T_{sc \text{ max}} \quad (5)$$

式中  $T_{s \text{ out}}$  为钢坯出炉表面温度,℃;  $\Delta T_{s \text{ max}}$  为钢坯出炉表面温度允许最大偏差,℃;  $T_{c \text{ out}}$  为钢坯出

炉中心温度,℃;  $\Delta T_{sc \text{ max}}$  为钢坯出炉断面温差最大值,℃。

钢坯加热过程离线优化的目标是:在满足加热工艺的前提下,在设定加热时间内,如果钢坯表面温度对加热时间的积分值最小,则加热过程的燃料消耗为最小<sup>[9-10]</sup>,可描述为

$$J = \min \int_0^L T_s(l) dl \quad (6)$$

式中  $J$  为优化目标值;  $T_s(l)$  为加热过程中钢坯表面温度函数;  $l$  为炉长,m。

在离线优化过程中,使用式(1)模拟钢坯加热过程,从而得到加热过程中钢坯的表面温度和中心温度以及钢坯出炉表面温度和中心温度,以式(6)为优化目标,式(2)~(5)为约束条件,通过调节各段炉温设定值进行寻优。本文采用遗传算法求解该问题,其中解的编码采用由各段炉温按顺序组成的向量表示一种炉温制度,由现有的两种炉温制度作为父代,产生新的炉温制度,再作为子代进行寻优。遗传算法将父代中的某段炉温以一定概率保留到子代中进行遗传变异运算。运算时以式(6)作为适应值函数,选择机制为将适应值最好的前几个个体直接复制到新一代种群中,剩余个体根据种群规模按照随机通用采样的方法<sup>[11]</sup>确定是否复制到新一代种群,求解中允许父代种群参与竞争以保证算法收敛<sup>[12]</sup>;停止条件为算法运行到预先设定的迭代次数或连续若干次迭代没有更好的解出现时算法停止,取当前种群最优解输出。

现有加热炉为分段控制模式,步进式加热炉的加热段可以强化加热,提高加热速度,减少钢坯的氧化和脱碳,使炉子具有较高的生产率。均热段则使钢坯断面上的温度比较均匀从而保证钢坯的加热质量,因此本文所提出的在线动态优化控制策略同样采用分段优化的方式,将各个控制段出口钢坯表面温度作为该段的钢温控制目标值。本文涉及到的步进式加热炉由预热段、加一段、加二段、加三段和均热段组成。其中,预热段为无烧嘴区,利用加一段燃烧产生的向后流动的烟气实现缓慢加热钢坯的功能。因此,该加热炉实际控制段为加一段、加二段、加三段和均热段。

图2为规格10 900 mm × 1 250 mm × 180 mm、钢种Q235的钢坯采用上述优化方法得到的理想升温曲线,各段优化炉温与钢温控制目标值如表1所示。

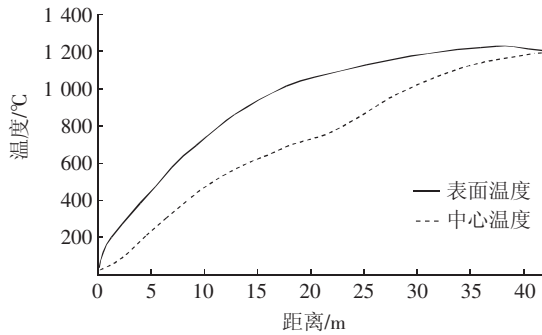


图2 Q235 钢种理想升温曲线

Fig. 2 Optimization heating curve of Q235

表1 各加热段钢温控制目标值

Table 1 Target billet temperature of each heating section

段名	控制对象	钢温控制目标值/℃	优化炉温/℃
加一段	表面温度	727	1 003
加二段	表面温度	968	1 235
加三段	表面温度	1 140	1 285
均热段	表面温度	1 200	1 265

### 3 在线炉温优化

在实际生产中,由于钢坯冷热混装和加热炉生产节奏的变化,因此钢坯不能完全按照理想升温曲线加热。在设定各加热段炉温时,在线控制模块需要在离线优化数据的基础上,周期地根据加热炉数学模型跟踪计算得到的钢坯当前温度分布重新设定各段炉温,实现动态控制,以适应生产状况变化。

#### 3.1 炉温决策方法

由于加热炉炉温为分段控制模式,因此采用分段炉温优化的方式。针对钢坯在各控制段出口温度达到各段钢温控制目标值的目的,通过预测钢坯在当前控制段剩余时间内的生产节奏作为加热炉目前所采用的生产节奏,建立在线炉温优化设定模型。

取钢坯表面一个体积为  $dV$ , 外表面为  $dF$  的微元, 则温度为  $T_{1m}$  的该微元从当前位置加热到移出该控制段(温度为  $T_{2m}$ ), 其微元体的焓变化  $dh$  为

$$dh = \rho \cdot c_p \cdot dV \cdot (T_{2m} - T_{1m}) \quad (7)$$

该微元通过外表面  $dF$  所吸收的热量(采用总括热吸收率法)  $dQ$  为

$$dQ = dF \cdot \sigma \cdot \varphi_{CF} \cdot (T_f^4 - T_{1m}^2 \cdot T_{2m}^2) \cdot L/v_s \quad (8)$$

根据能量平衡可知  $dQ = dh$ , 即

$$\rho \cdot c_p \cdot dV \cdot (T_{2m} - T_{1m}) = dF \cdot \sigma \cdot \varphi_{CF} \cdot$$

$$(T_f^4 - T_{1m}^2 \cdot T_{2m}^2) \cdot L/v_s \quad (9)$$

由式(9)可知,在理想加热条件下该微元从炉内某位置到当前控制段末尾所吸收的热量为

$$\rho \cdot c_p \cdot dV \cdot (T_{2s} - T_{1s}) = dF \cdot \sigma \cdot \varphi_{CF} \cdot (T_{fs}^4 - T_{1s}^2 \cdot T_{2s}^2) \cdot L/v_s \quad (10)$$

由式(9)可知,实际生产情况下该微元从炉内该位置到当前控制段末尾所吸收的热量为

$$\rho \cdot c_p \cdot dV \cdot (T_2 - T_1) = dF \cdot \sigma \cdot \varphi_{CF} \cdot (T_f^4 - T_1^2 \cdot T_2^2) \cdot L/v \quad (11)$$

上述式中,  $T_{1s}$  为理想加热条件下钢坯在炉内当前位置的表面温度,℃;  $T_{2s}$ ,  $T_{fs}$  为理想加热条件下钢坯在当前控制段的钢温控制目标值和理想加热条件下该段的炉温,℃;  $T_1$  为实际生产情况下钢坯在炉内当前位置的表面温度,℃;  $T_2$ ,  $T_f$  为实际生产情况下钢坯在当前控制段末尾的表面温度和该段的实际炉温,℃;  $L$  为该段的长度, m;  $v_s$  为理想加热条件下的步进速度(本文采用钢坯在炉内前进的距离与所用时间的比值作为步进速度), m/s;  $v$  为实际生产情况下的步进速度, m/s。

依据在线炉温优化设定策略,可知

$$T_2 = T_{2s} \quad (12)$$

由式(10)~(12)可得

$$\frac{v_s}{v} \cdot \frac{T_{2s} - T_{1s}}{T_{2s} - T_1} = \frac{T_{fs}^4 - T_{1s}^2 \cdot T_{2s}^2}{T_f^4 - T_1^2 \cdot T_{2s}^2} \quad (13)$$

则实际生产情况下的炉温设定为

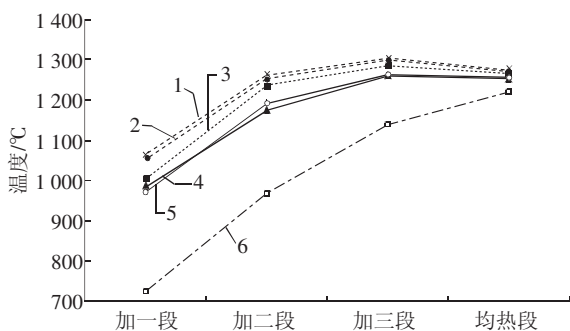
$$T_f = \left[ \frac{v}{v_s} \cdot \frac{T_{2s} - T_{1s}}{T_{2s} - T_1} \cdot (T_{fs}^4 - T_{1s}^2 \cdot T_{2s}^2) + T_1^2 \cdot T_{2s}^2 \right]^{1/4} \quad (14)$$

约束条件:  $T_{\min} < T_f < T_{\max}$

式中,  $T_{\max}$  和  $T_{\min}$  分别为该段炉温设定的上、下限值,℃。

在实际生产中,加热炉经常会改变生产节奏来适应轧机生产情况的变化。图3为不同生产节奏下离线优化炉温设定值与式(14)计算值的对比结果。

从图3中可以看出,通过式(14)计算出来的炉温设定值与通过离线数学模型优化出来的结果进行比较,发现:对于加一、加二段,虽然两种方法计算结果相差稍大,一般在15℃范围内,但是对于低温段的在线控制,该误差在工艺要求允许范围内。对于高温段(即加三、均热段),两种方法计算结果比较接近,一般在5℃以内,它们均可以实现钢坯温度的精确控制。虽然离线优化结果比较



1—快速加热(165 min) 离线优化炉温; 2—快速加热(165 min) 公式计算; 3—标准加热(180 min) 炉温; 4—慢速加热(210 min) 离线优化炉温; 5—慢速加热(210 min) 公式计算; 6—目标钢温。

图3 不同生产节奏下的炉温设定值

Fig 3 Temperature settings of furnace at varied working rhythm

精确,但是该方法计算量大,运行时间长,很难适应在线要求。而式(14)计算简便,误差又在在线控制允许范围内,因此完全可以在实际生产中在线使用。

### 3.2 短待轧时的炉温设定

短待轧大部分是由于轧线临时故障造成的,一般来说短待轧所需时间都比较短(小于1 h),如果故障时间较长则需要加热炉进行保温操作<sup>[13]</sup>,不在本文考虑的范围内。

在实际生产过程中,短待轧时一般会采取降温操作,但降温幅度不会太大,可以认为是一种特殊的变节奏生产,进而采用上文所提出的炉温决策方法进行炉温设定。这种情况下的步进节奏需

要考虑待轧时间的影响,其等效步进速度为

$$v = \frac{l_s - x_1}{\frac{l_s - x_1}{v_{s1}} + \tau_1} \quad (15)$$

式中  $l_s$  为当前控制段的长度, m;  $x_1$  为钢坯在当前控制段内已经步进的长度, m;  $v_{s1}$  为短待轧前所用的步进速度, m/s;  $\tau_1$  为预计待轧时间, s。

### 3.3 钢温对炉温设定的反馈

在实际生产中,各个控制段内每块钢坯的实际温度与理想升温曲线之间一般存在一定偏差,因此实际应用中,还要在式(14)计算的炉温设定值基础上,根据钢温偏差做适量的反馈修正,包括炉内钢温反馈和轧制温度反馈。反馈计算表达式为:

$$T_{spi} = T_{sp0} + \Delta T_i + \Delta T_{fk} \quad (16)$$

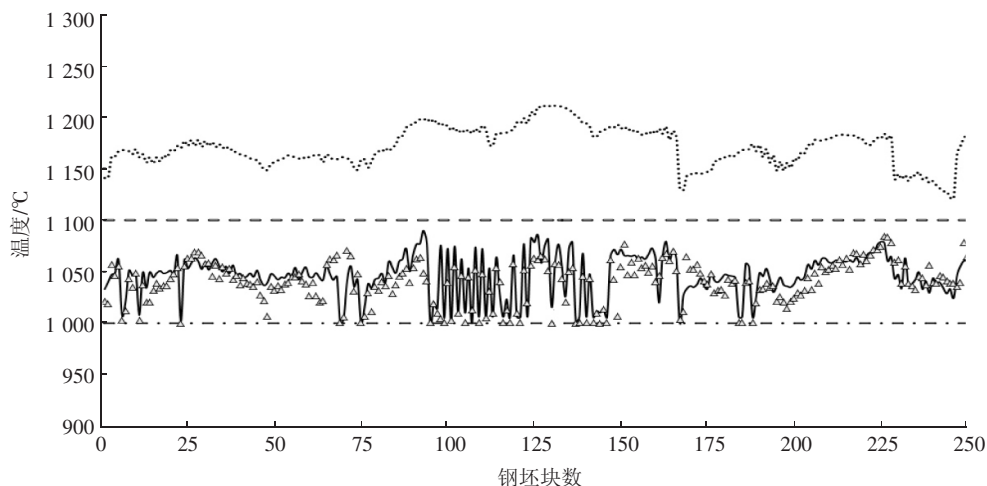
约束条件:  $T_{\min} < T_{spi} < T_{\max}$ ,  $|T_{spi} - T_0| < \Delta T_{\max}$

式中  $T_{spi}$  为第  $i$  段炉温优化设定值, °C;  $T_{sp0}$  为该段炉温理想设定值, °C;  $\Delta T_i$  为该段钢坯温度的数学模型计算反馈值, °C;  $\Delta T_{fk}$  为轧制温度反馈, °C;  $T_0$  为当前实测炉温, °C;  $\Delta T_{\max}$  为允许的最大炉温调节量, °C。

## 4 实际运行效果

将本文所述的模型和控制策略应用在鄂钢宽厚板厂加热炉上,取得了很好的控制效果,它不仅对加热炉的热工操作起到了良好的指导作用,而且为轧机提供了准确的温度参数,大大提高了轧制程序参数设定的精确性。

图4为加热炉连续出炉的250块钢坯的出炉



..... 出炉温度计算值; — 开轧温度计算值; △ 开轧温度测量值; ---- 开轧温度下限; -.-.- 开轧温度上限。

图4 开轧温度计算值与测量值分布图

Fig. 4 Distribution of calculation and measurements of start rolling temperature

温度模型计算值、轧机入口处钢坯温度计算值和辐射高温计测量值的分布曲线。其中轧机入口处钢坯温度计算值是在钢坯出炉温度模型计算值的基础上考虑高压水除鳞和辊道运输散热的情况下<sup>[14]</sup>计算得到。

由图 4 可以看出本文所采用的在线动态优化控制策略效果良好,250 块钢坯的开轧温度都在开轧温度范围内且相对集中在开轧温度范围中线附近,具有良好的控制效果。

通过对连续生产的 250 块钢坯温度的计算值和测量值进行统计,分析得出:误差绝对值不超过 5℃的钢坯有 54 块,占 21.6%;误差绝对值在 5~10℃的钢坯有 69 块,占 27.6%;误差绝对值在 10~15℃的钢坯有 78 块,占 31.2%;误差绝对值在 15~20℃的钢坯有 49 块,占 19.6%,可以看出模型计算准确,其平均误差绝对值仅为 10.6℃。

由生产统计数据得知,二级控制系统的炉温优化控制模块投入使用后,开轧温度的命中率由 84% 提高到了 96%,提高了 12 个百分点。吨钢燃料消耗降低了 10 m<sup>3</sup>,节能效果显著。

表 2 为实际生产中某次短待轧 30 min 时采用本文控制策略各加热段的炉温设定情况。受此次短待轧影响的钢坯的开轧温度均位于开轧温度范围的中线附近,控制效果良好。

表 2 短待轧时的炉温设定

Table 2 Furnace temperature settings at short rolling delay

名称	钢坯位置 /mm	已经在炉 时间/min	原有炉温 /℃	待轧炉温 /℃	降温幅度 /℃
加一段	7 875	31.0	1 003	966	37
加二段	17 250	67.8	1 235	1 198	37
加三段	27 750	109.0	1 285	1 258	27
均热段	39 400	154.8	1 265	1 254	10

由表 2 可知,短待轧时采用本文提出的炉温决策方法,其降温幅度能够满足正常生产的需求。在短待轧时,降低炉温,即可以降低能耗,又可以减少钢坯的氧化和脱碳,具有良好的节能降耗效果。

### 5 结束语

加热炉二级控制系统在线炉温优化的重点在于获得钢坯理想升温曲线和相应的炉温制度以及基于钢温和生产状况的炉温动态修正方法。本文根据钢坯加热工艺要求,综合考虑加热炉能力限制,建立了二维加热炉数学模型,进而获得了钢坯理想升温曲线和相应的炉温制度;另外,还构建了

在线炉温优化设定模型,提出了短待轧的炉温优化策略和钢坯温度对炉温设定的反馈优化策略,从而完整地实现了加热炉二级过程控制系统的在线动态优化控制功能。本文提出的模型和优化策略在实际应用中取得了良好的效果,实现了对出炉钢温的精准控制,在实际应用中使开轧温度的命中率提高了 12 个百分点,平均误差绝对值仅为 10.6℃,同时达到了一定的节能效果,吨钢燃料消耗降低了 10 m<sup>3</sup>。

### 参考文献:

[1] 卫恩泽,彭燕华. 板坯加热炉控制技术现状及发展[J]. 冶金自动化,2010,34(3):6-9.  
WEI En-ze, PENG Yan-hua. Status and prospect of control technology for slab reheating furnace[J]. Metallurgical Industry Automation, 2010, 34(3):6-9.  
[2] 崔苗,陈海耿,徐立,等. 考虑炉气非灰辐射特性的蓄热式加热炉数学模型研究[J]. 系统仿真学报,2009,21(17):5 345-5 348.  
CUI Miao, CHEN Hai-geng, XU Li, et al. Mathematical model considering non-gray radiation properties of gas in regenerative reheating furnace[J]. Journal of System Simulation, 2009 21(17):5 345-5 348.  
[3] Acharya A D, Chattopadhyay S. Reheat furnace temperature control and performance at Essar Steel[J]. Iron and Steel Engineer, 1998, 75(11):31-36.  
[4] WANG Zhong-jie, CHAI Tian-you, GUAN Shou-ping, et al. Hybrid optimization set-point strategy for slab reheating furnace temperature[J]. Proceedings of the American Control Conference, 1999(6):4 082-4 086.  
[5] 吴小芳,李少远. 基于前馈补偿的加热炉炉温设定值优化[J]. 控制工程,2008,15(1):35-38.  
WU Xiao-fang, LI Shao-yuan. Set-point optimization of reheating furnace temperature based on feed forward compensation[J]. Control Engineering of China, 2008, 15(1):35-38.  
[6] Ge L.S. Application study of complex control algorithm for regenerative furnace temperature[J]. Journal of Control Theory and Applications, 2004 2(2):205-207.  
[7] Evans D M, Belame A R, Bovan M R, et al. Reheat furnace supervisory control system at Ipsco Inc. [J]. AISE Steel Technology, 2000, 77(7):33-36.  
[8] 姜泽毅,张欣欣,董补全,等. 环形加热炉传热数学模型的研究[J]. 钢铁,2000,35(3):56-59.  
JIANG Ze-yi, ZHANG Xin-xin, DONG Bu-quan, et al. Study on mathematical model of heat transfer for rotary furnace

(下转第 52 页)



的问题;(6)在一定电压挡位下,取得最大弧功率时的功率因数大于0.707,但实际应用时也要考虑到此时的视在功率及设定电流不能超过变压器的容许范围;(7)弧流越小则热效率越高、功率因数越大,热效率越高,但过小的弧流容易断弧;(8)选择优化的功率设定点时需要考虑到二次短网特性参数、变压器铭牌参数及冶炼操作时的造渣厚度。

#### 参考文献:

- [1]孙彦广,王代先,陶白生,等.智能钢包精炼炉控制系统[J].冶金自动化,1999,23(6):9-12.

(上接第24页)

- [J]. Iron and Steel, 2000, 35(3):56-59.
- [9]陈友文,孟庆国,柴天佑,等.理想加热曲线对轧线温度的自适应[J].物理测试,2005,2(23):26-28.  
CHEN You-wen, MENG Qing-guo, CHAI Tian-you, et al. Adaptation of ideal heating curve to mill temperature [J]. Physics Examination and Testing, 2005, 2(23):26-28.
- [10]安月明,温治.连续加热炉优化控制目标函数的研究进展[J].冶金能源,2007(2):53-55.  
AN Yue-ming, WEN Zhi. Evolvement of the study on the optimal control objective function of reheating furnace [J]. Energy for Metallurgical Industry, 2007(2):53-55.
- [11]Baker J. Adaptive selection methods for genetic algorithms[C]//Proc of the 1st Int Conf on Genetic Algorithms. Hillsdale: L Erlbaum Associates Inc, 1985: 101-111.
- [12]徐宗本,聂赞坎,张文修.父代种群参与竞争遗传算法

SUN Yan-guang, WANG Dai-xian, TAO Bai-sheng, et al. An intelligent ladle furnace control system [J]. Metallurgical Industry Automation, 1999, 23(6):9-12.

- [2]南条敏夫.炼钢电弧炉设备与高效益运行[M].李中祥,译.北京:冶金工业出版社,2000.
- [3]沈才芳.电弧炉炼钢工艺与设备[M].北京:冶金工业出版社,2001.
- [4]陶百生.土耳其ERDEMIR钢厂120 t LF过程自动化[J].冶金自动化,2011,35(增刊2):569-573.
- [5]胡志刚,赵彦华,孙玉虎,等.LF电气特性和供电曲线的研究[C]//2007中国钢铁年会论文集.成都:中国金属学会,2007:959. [编辑:魏方]

几乎必然收敛[J].应用数学学报,2002,25(1):167-175.

- XU Zong-ben, NIE Zan-kan, ZHANG Wen-xiu. Almost sure strong convergence of a class of genetic algorithms with parent-offsprings competition [J]. Acta Mathematicae Applicatae Sinica, 2002, 25(1):167-175.
- [13]曹萍,张荣明,陈海耿.连续加热炉待轧策略研究[J].材料与冶金学报,2008,7(3):229-232.  
CAO Ping, ZHANG Rong-ming, CHEN Hai-geng. Strategy of rolling delay on reheating furnace [J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2008, 7(3):229-232.
- [14]武志平,韩静涛.CSP工艺衔接区温度行为分析[J].华北工学院学报,2004,25(1):75-78.  
WU Zhi-ping, HAN Jing-tao. Analyses on the performance of temperature in the linking region of CSP technology [J]. Journal of North China Institute of Technology, 2004, 25(1):75-78.

[编辑:魏方]

(上接第30页)

- stability [J]. IEE Proceedings: Control Theory and Applications, 1992, 139(4):349-362.
- [6]Kouvaritakis B, Cannon M. Nonlinear predictive control theory and practice [M]. London: The Institution of Electrical Engineers, 2001:131-173.
- [7]Clarke D W, Mohtadi C, Ruffs P S. Generalized predictive control (Part I) [J]. The Basic Algorithm Automatica, 1987, 23(2):137-160.
- [8]ZHENG Yi, LI Y, WANG S, et al. Distributed model predictive control for plant-wide hot-rolled strip laminar cooling process [J]. Journal of Process Control, 2009, 19(9):1427-1437.
- [9]ZHAO Yu, SU Hong-ye, CHU Jian, et al. Multivariable

control performance assessment based on generalized minimum variance benchmark [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2010, 18(1):92-100.

- [10]户丹,于军琪,郭春燕.选矿分级泵池液位的模糊控制算法研究[J].金属矿山,2007,36(9):102-105.
- [11]王伟.广义预测控制理论及应用[M].北京:科学出版社,1998.
- [12]张嘉英,席东民,胡琳静.广义预测控制在锅炉燃烧控制系统中的应用[J].热力发电,2011,29(2):56-59.
- [13]袁著祉.递推广义预测自校正控制器[J].自动化学报,1989,15(4):348-351.  
YUAN Zhu-zhi. Recursive generalized predictive STC [J]. Acta Automatica Sinica, 1989, 15(4):348-351.

[编辑:薛朵]