

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2013.11.008

转炉-连铸区段精细化控制节能潜力研究

冯 凯^{a,b}, 徐安军^{a,b}, 汪红兵^c, 贺东风^{a,b}

(北京科技大学 a. 冶金与生态工程学院; b. 高效钢铁冶金国家重点实验室;
c. 计算机与通信工程学院, 北京 100083)

摘 要:针对转炉-连铸区段钢水温度和操作时间不同控制精度所蕴含节能潜力的问题, 建立基于生产实践的钢水温度和操作时间精细化控制模型, 提出相应的计划额外能耗和实绩额外能耗的概念和计算方法。并以某钢厂生产钢种 SPHC-W 的生产实绩数据为例, 对目前钢水温度和操作时间控制水平的节能潜力进行计算, 得到计划潜在温度损失为 7.25 °C, 实绩潜在温度损失特征值为 10.10 °C。进一步分析, 得知在现有控制水平下, 温度控制精度提高 1 °C, 实绩潜在温度损失特征值降低 0.33 °C, 时间控制精度提高 1 min, 计划潜在温度损失降低 1.76 °C, 实绩潜在温度损失降低 1.62 °C。

关键词:炼钢; 节能潜力; 精细化控制; 钢水温度; 操作时间; 过程控制

中图分类号: TF741.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2013)11-044-07

Energy-saving potential research of precise control on BOF-CC section

FENG Kai^{a,b}, XU Anjun^{a,b}, WANG Hongbing^c, HE Dongfeng^{a,b}

(a. School of Metallurgy and Ecology Engineering; b. State Key Laboratory of Advanced Metallurgy;
c. School of Computer and Communication Engineering, University of Science and
Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: To evaluate the energy-saving potential under different control precisions of molten steel temperature and operation time in BOF-CC section, a precise control model based on production practices is established. And a calculation method of planning extra temperature loss and production process temperature loss of the precise control model is proposed. Taking a steel plant production data of SPHC-W as an example, the energy-saving potential under existing control of molten steel temperature and operation time is calculated. The planning extra potential temperature loss is 7.25 °C and the production process potential temperature loss eigenvalue is 10.10 °C. For further analysis under existing control the level, when the control accuracy of molten steel temperature is increased by 1 °C, the production process potential temperature loss eigenvalue can be reduced by 0.33 °C. When the control accuracy of operation time is increased by 1 min, the planning extra potential temperature loss can be reduced by 1.76 °C and the production process potential temperature loss eigenvalue can be reduced by 1.62 °C.

Key words: steelmaking; energy-saving potential; precise control; molten steel temperature; operation time; process control

收稿日期: 2013-06-02

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划重大项目(2006BAE03A07); 中央高校基本科研业务费(FRF-TP-12-086A)

作者简介: 冯凯(1988-), 男, 北京科技大学博士研究生, 主要从事钢铁制造流程能源优化和钢包管理等研究,
(E-mail) fengkai-show@163.com。

随着炼钢厂自动化水平的不断提高和相关管理系统的完善,转炉-连铸区段的过程控制越来越受到炼钢的重视,并从不同的角度对钢水的过程控制进行研究^[1]。相关研究主要集中在炼钢-连铸区段的合理生产调度及重计划方面^[2-4],如唐秋华等^[5]构建基于柔性 Jobshop 的炼钢-连铸调度系统模型和数学模型以及基于最小松弛时间的调度规则,郑忠等^[6-8]提出采用正向时间并行顺推算法与反向基于遗传算法和时间并行倒推的混合优化算法进行炉次计划重计划的方法及基于蚁群算法的作业计划编制方法,俞胜平等^[9-12]采用虚拟现实技术研究计划动态调度和炼钢连铸生产流程建模,于港等^[13]提出针对出钢延迟的动态调度策略和算法。在转炉-连铸区段过程控制的其他方面,徐安军等^[14]提出了炼钢厂的钢水温度-时间优化匹配系统开发总则和结构设计,并建立了相应的软、硬件系统;刘青等^[15]提出炼钢厂运行优化的理论框架与控制方法,并在炼钢系统的运行原则与控制策略、炼钢系统过程时间参数和温度参数的解析与优化等方面做了深入分析。

对于炼钢-连铸区段的过程控制研究,目前主要集中在相关参数优化匹配和影响因素控制方面,即对所谓的“标准参数”在一定的工艺和设备约束条件下进行的分析、调整和组合优化,而这种“标准参数”本身却是生产实绩的统计结果,缺乏深入的解析。通过生产过程控制水平的提高,实现对“标准参数”本身的优化即为精细化控制。当前对于精细化控制往往被人忽视,对于精细化控制所蕴含的节能潜力也很少有人研究,而工序内及工序间传搁过程对钢水温度和时间控制精度问题造成能源消耗,同样值得关注。笔者旨在通过评价不同控制精度下相对的节能潜力,为炼钢厂生产调度部门提高控制水平和管理水平提供方向和理论依据。

1 精细化控制模型的建立

以某钢厂生产钢种 SPHC-W 的典型流程:BOF-RH-CC 为例,对该流程中各个工序及工序间传搁过程的钢水温度 and 操作时间控制情况进行分析。由于实际生产过程事实上是对生产计划的执行情况,钢水温度 and 操作时间的控制情况无法在实际生产过程中直接得到体现,而在安排生产计划时,不但要考虑实际生产过程中相关统计数据的期望,而且要充分考虑到方差的存在,即控制精度的存在,这样,钢水温度 and 操作时间的控制情况是蕴含在生产计划中,并通过实际生产过程得到间接的体现,从而

体现出不同的节能潜力。笔者将依照此思路对精细化控制的节能潜力进行研究。

1.1 基于生产实践的条件假设

根据实际操作情况,基于“转炉设定高于液相线温度的出钢温度以满足转炉-连铸区段的过程温降,精炼工序实现温度微调,精炼-连铸传搁过程时间调节保证正常开浇时间”的操作要求,针对转炉-连铸区段精细化控制模型设定以下前提假设:

1) 精炼工序可以精准控制钢水温度,能够准确达到设定温度,实现钢水温度上的控制和调节。

2) 在约束条件内,精炼工序的结束时间可以准确控制,且精炼-连铸传搁过程可以精准地控制过程时间,实现操作时间上的控制和调节。

3) 实际控制过程的目标是保证开吹-开浇的作业时间完全符合计划作业时间以保证铸机的拉速的稳定,同时尽可能保证中间包温度命中率,即转炉-连铸区段的过程温降尽可能与计划过程温降相符合。

4) 各个工序及工序间传搁过程的钢水温度 and 操作时间控制存在波动,该波动符合正态分布,且控制精度可以由波动的标准差来表示。

1.2 基于条件假设的标准参数设定

对于典型流程:BOF-RH-CC,工艺上各个工序及工序间传搁过程的标准控制参数如下:

$T_{\text{BOF}}^{\varnothing}$ 为转炉标准出钢温度;

$\Delta T_{\text{BOF-RH}}^{\varnothing}$ 为转炉-精炼传搁过程标准过程温降;

$\Delta T_{\text{RH}}^{\varnothing}$ 为精炼过程标准钢水温降;

$\Delta T_{\text{RH-CC}}^{\varnothing}$ 为精炼-连铸传搁过程标准过程温降;

$t_{\text{BOF}}^{\varnothing}$ 为转炉工序标准作业时间;

$t_{\text{BOF-RH}}^{\varnothing}$ 为转炉-精炼标准传搁时间;

$t_{\text{RH}}^{\varnothing}$ 为精炼工序标准作业时间;

$t_{\text{RH-CC}}^{\varnothing}$ 为精炼-连铸标准传搁时间;

v 为钢水镇静过程标准温降速率。

工艺标准参数的确定主要来自历史实绩数据的期望统计。

通过工艺标准参数可以得到:

转炉-连铸区段标准钢水温降为

$$\Delta T^{\varnothing} = \Delta T_{\text{BOF-RH}}^{\varnothing} + \Delta T_{\text{RH}}^{\varnothing} + \Delta T_{\text{RH-CC}}^{\varnothing}, \quad (1)$$

开吹-开浇标准作业时间为

$$t^{\varnothing} = t_{\text{BOF}}^{\varnothing} + t_{\text{BOF-RH}}^{\varnothing} + t_{\text{RH}}^{\varnothing} + t_{\text{RH-CC}}^{\varnothing}. \quad (2)$$

各个工艺标准参数的控制精度可以用标准差表示:

δ_{BOF} 为转炉工序终点钢水温度控制精度标准差;

$\delta_{\text{BOF-RH}}$ 为转炉-精炼区段钢水温降控制精度标

准差;

δ_{RH-CC} 为精炼-连铸区段钢水温降控制精度标准差;

ϵ_{BOF} 为转炉工序操作时间控制精度标准差;

ϵ_{BOF-RH} 为转炉-精炼操作时间控制精度标准差;

ϵ_{RH} 为精炼工序操作时间控制精度标准差。

其中,传搁过程钢水温降控制精度主要受钢包状态稳定性及过程吹氩等因素影响,鉴于控制假设条件,精炼工序的钢水温度控制精度标准差为 0,精炼-连铸区段操作时间控制精度标准差为 0。

1.3 基于标准参数的生产计划排产

在实际生产排产中,主要考虑时间节奏的匹配以保证生产计划的顺利执行。为了保证实际生产过程中绝大多数炉次的开吹-开浇时间控制与计划安排一致,则在安排生产计划时就需要充分考虑各个工序及工序间传搁过程的时间波动,如转炉补吹、天车调度集中等问题,而这种很难预知的问题只能通过加入一定的冗余时间作为缓冲时间来解决,这样即使工序及区段的时间控制存在波动时,依然可以保证整体时间在计划的时间范围内,保证炉次的正常开浇。

各个工序及区段的计划时间除了必要的标准时间外,还需要充分考虑各个工序及区段传搁过程时间的波动情况,并通过工序间传搁过程对相关工序的时间波动进行调节和控制,即以转炉-精炼传搁过程加入时间冗余来调整转炉工序和转炉-精炼传搁过程的时间波动,以精炼-连铸传搁过程加入时间冗余来调整整个流程的时间波动。

生产计划中各个工序及工序间传搁过程的时间如下:

转炉计划工艺冶炼时间 $t_{BOF} = t_{BOF}^{\emptyset}$;

转炉-精炼传搁过程计划时间 $t_{BOF-RH} = t_{BOF-RH}^{\emptyset} + [f(\epsilon_{BOF}) + f(\epsilon_{BOF-RH})] \times \alpha$;

精炼计划工艺冶炼时间 $t_{RH} = t_{RH}^{\emptyset}$;

精炼-连铸传搁过程计划时间 $t_{RH-CC} = t_{RH-CC}^{\emptyset} + f(\epsilon_{RH})$;

α 为转炉工序与转炉-精炼区段作为连动控制过程,二者时间控制精度的冗余叠加系数,根据生产条件和实绩水平设定,取值越大,表明转炉-精炼传搁过程的操作时间刚性越强,对操作时间的控制越严格,一般为 $[0, 1]$;

$f(\epsilon)$ 为在考虑时间波动的情况下,为了保证 $\omega\%$ 以上的炉次都在计划要求范围内,所加入的冗余值,是标准差 ϵ 的函数。即依据假设条件 4,充分

考虑所有炉次可能存在的时间波动分布比例的情况下,保证 $\omega\%$ 以上的炉次有充分的冗余时间使其能按计划继续生产, $\omega\%$ 依据生产实绩的考核指标而设定,相应的 $f(\epsilon)$ 则可以根据正态分布情况求得。

在实际冶炼过程,钢水温度控制的波动在一定范围内并不会影响生产计划的执行,所以在排产过程中不考虑钢水温度控制精度的温度,故而生产计划的温度制度只需考虑由于冗余时间的加入而导致额外温降即可。则:

转炉计划出钢温度为 $T_{BOF} = T_{BOF}^{\emptyset} + v \times \{ [f(\epsilon_{BOF}) + f(\epsilon_{BOF-RH})] \times \alpha + f(\epsilon_{RH}) \}$;

转炉-精炼传搁过程计划温降为 $\Delta T_{BOF-RH} = \Delta T_{BOF-RH}^{\emptyset} + v \times [f(\epsilon_{BOF}) + f(\epsilon_{BOF-RH})] \times \alpha$;

精炼工序计划温降为 $\Delta T_{RH} = \Delta T_{RH}^{\emptyset}$;

精炼-连铸传搁过程计划温降为 $\Delta T_{RH-CC} = \Delta T_{RH-CC}^{\emptyset} + v \times f(\epsilon_{RH})$ 。

笔者以单个炉次的排产所考虑的控制波动为主要因素,对于为了连铸备包而导致传搁时间延长,由于其具有不可缩短的性质,计入该炉次的标准时间内。

转炉-连铸区段计划钢水温降为

$$\Delta T = \Delta T_{BOF-RH}^{\emptyset} + \Delta T_{RH}^{\emptyset} + \Delta T_{RH-CC}^{\emptyset} + v \times \{ [f(\epsilon_{BOF}) + f(\epsilon_{BOF-RH})] \times \alpha + f(\epsilon_{RH}) \}, \quad (3)$$

开吹-开浇计划作业时间为

$$t = t_{BOF}^{\emptyset} + t_{BOF-RH}^{\emptyset} + t_{RH}^{\emptyset} + t_{RH-CC}^{\emptyset} + [f(\epsilon_{BOF}) + f(\epsilon_{BOF-RH})] \times \alpha + f(\epsilon_{RH}). \quad (4)$$

由于时间控制精度而导致冗余时间的加入,使计划钢水温降比标准钢水温降多出的部分,计为计划潜在温度损失:

$$\Delta T_{\text{计划}} = \Delta T - \Delta T^{\#} = v \times \{ [f(\epsilon_{BOF}) + f(\epsilon_{BOF-RH})] \times \alpha + f(\epsilon_{RH}) \}. \quad (5)$$

1.4 基于生产计划的生产实绩

实际生产过程按照生产计划执行,但是由于各种未知或不可测因素的影响,不论是时间控制,还是钢水温度控制,都无法按照计划数据 100% 的执行,总会在一定的范围内产生不可预知的波动,是依照正态概率分布的随机性取值,在实际生产中表现为某个炉次的实绩值与标准值之间的差值,可以用控制精度标准差来表示,记为 $g(\delta)$ 或 $g(\epsilon)$ 。则:

转炉工序实际操作时间 $t'_{BOF} = t_{BOF}^{\emptyset} + g(\epsilon_{BOF})$;

转炉-精炼实际传搁时间 $t'_{BOF-RH} = t_{BOF-RH}^{\emptyset} + g(\epsilon_{BOF-RH})$;

精炼工序实际操作时间: $t'_{RH} = t_{RH}^{\emptyset} + g(\epsilon_{RH})$ 。

为了满足假设条件 3,则:

精炼-连铸实际传搁时间

$$t'_{RH-CC} = t - t'_{BOF} - t'_{BOF-RH} - t'_{RH} = \\ t'_{RH-CC} + f(\epsilon_{RH}) + [f(\epsilon_{BOF}) + f(\epsilon_{BOF-RH})] \times \\ \alpha - [g(\epsilon_{BOF}) + g(\epsilon_{BOF-RH}) + g(\epsilon_{RH})], \quad (6)$$

并隐含限制条件,精炼-连铸实际传搁时间要大于 0。

转炉实际出钢温度 $T'_{BOF} = T_{BOF} + g(\delta_{BOF})$,

转炉-精炼传搁过程实际温降为

$$\Delta T'_{BOF-RH} = \Delta T_{BOF-RH} + v \times g(\epsilon_{BOF-RH}) + g(\delta_{BOF-RH}),$$

精炼-连铸传搁过程实际温降为

$$\Delta T'_{RH-CC} = \Delta T_{RH-CC} + v \times (t'_{RH-CC} - t_{RH-CC}) + \\ g(\delta_{RH-CC}) = \Delta T_{RH-CC} + v \times \{f(\epsilon_{RH}) + \\ [f(\epsilon_{BOF}) + f(\epsilon_{BOF-RH})] \times \alpha - [g(\epsilon_{BOF}) + \\ g(\epsilon_{BOF-RH}) + g(\epsilon_{RH})]\} + g(\delta_{RH-CC}).$$

为了满足假设条件 3,则:

精炼工序实际温降为

$$\Delta T'_{RH} = \Delta T - g(\delta_{BOF}) - \Delta T'_{BOF-RH} - \\ \Delta T'_{RH-CC} + g(\delta_{RH-CC}) = \\ \Delta T_{RH} - g(\delta_{BOF}) - g(\delta_{BOF-RH}) + \\ v \times [g(\epsilon_{BOF}) + g(\epsilon_{RH})]. \quad (7)$$

1.5 基于生产实绩的节能潜力评价

若 $\Delta T'_{RH} > \Delta T_{RH}$,则在精炼工序需要加入调温废钢进行额外的降温;若 $\Delta T'_{RH} < \Delta T_{RH}$,则在精炼工序需要进行化学升温处理,这两种方式都会造成不必要的温度损失,所以用二者之差定义温度控制水平,即:

$$F_{\Delta T_{RH}} = \Delta T'_{RH} - \Delta T_{RH} = \\ v \times [g(\epsilon_{BOF}) + g(\epsilon_{RH})] - \\ [g(\delta_{BOF}) + g(\delta_{BOF-RH})]. \quad (8)$$

$F_{\Delta T_{RH}}$ 为正值,即是调温废钢需要降低温度; $F_{\Delta T_{RH}}$ 为负值,其绝对值即是化学升温需要提升的温度。

实际生产过程与标准参数下理想过程相比,钢水额外的温度损失及弥补这部分损失所付出的代价,计为实际潜在温度损失。实际潜在温度损失不但包括计划潜在温度损失和生产实绩与计划相比额外降温,还包括弥补额外温降所造成温度损失所付出的代价。

则实际潜在温度损失为

当 $F_{\Delta T_{RH}} \geq 0$ 时,

$$\Delta T_{\text{实绩1}} = \Delta T_{\text{计划}} + g(\delta_{BOF}) = \\ v \times \{[f(\epsilon_{BOF}) + f(\epsilon_{BOF-RH})] \times$$

$$\alpha + f(\epsilon_{RH})\} + g(\delta_{BOF}); \quad (9)$$

当 $F_{\Delta T_{RH}} < 0$ 时,

$$\Delta T_{\text{实绩2}} = \Delta T_{\text{计划}} + g(\delta_{BOF}) + |F_{\Delta T_{RH}}| = \\ v \times \{[f(\epsilon_{BOF}) + f(\epsilon_{BOF-RH})] \times \alpha + \\ f(\epsilon_{RH})\} + 2g(\delta_{BOF}) + g(\delta_{BOF-RH}) - \\ v \times [g(\epsilon_{BOF}) + g(\epsilon_{RH})]. \quad (10)$$

由于 $g(\delta)$ 或 $g(\epsilon)$ 是一种随机变量,随着每个炉次冶炼的不同而取值不同,以上方法仅可以计算单个炉次的实际潜在温度损失,对该控制水平下的潜在温度损失并无法进行计算,无法得到提高控制水平后的平均节能潜力,此处需要用特殊概率取值作为特征值的方法,近似代替实际潜在温度损失的统计结果。方法如下。

由于温度和控制时间的控制精度符合正态分布,其期望值已经作为标准参数表现为工艺上标准控制参数,故控制精度的波动正负取值各有 50% 的概率,则各取正负范围内的期望值为特征值,即其概率分布函数为 25% 和 75% 的自变量取值为一个参数的正负波动的特征值,即概率分布函数为 25% 的自变量取值为概率分布函数负方向上的期望值,概率分布函数为 75% 的自变量取值为概率分布函数正方向上的期望值,以这两个值分别代表正负波动情况。这是一个粗略的特征代替方法,如果区间继续细分,如负方向取概率分布为 12.5%、25%、37.5% 的自变量取值,正方向取概率分布为 62.5%、75%、87.5% 的自变量取值,则其特征值的组合更接近真实的正负波动情况,但作为不同精度控制的比较,正负波动范围各取一个特征值基本可以表征不同精度控制下节能潜力的差异。

将各个参数的特征值分别组合计算实际潜在温度损失,最后通过取代数平均值的方式得到该控制水平下的实际潜在温度损失特征值,即可作为实际潜在温度损失的统计结果的代表,若正负区间无限细分,即可得到趋近于真实控制水平的实际潜在温度损失。

2 精细化控制节能潜力实例计算

以某钢厂 2011 年 1 月 1 日到 2012 年 2 月 25 日生产钢种 SPHC-W 的 1 165 炉生产实绩数据,应用精细化控制节能潜力精细化模型对其进行实例计算。通过实绩生产数据统计,得到基本的生产实绩统计数据如表 1。

表 1 生产实绩统计结果

工序过程	温度 (温降) 期望/ ℃	温度 (温降) 方差	温度 (温降) 标准差	作业 时间 期望/ min	作业 时间 方差	作业 时间 标准差
转炉工序	1 680	69	8.31	20	9	3.00
转炉-精炼	52	98	9.90	17	13	3.61
精炼工序	41	168	12.96	32	26	5.10
精炼-连铸	35	34	5.83	24	70	8.37
开吹-进站				38	18	4.24

根据钢种 SPHC-W 的操作规程和实际生产情况,设定相关参数:

静置温降速率 $v=0.4\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$;

冗余叠加系数 $\alpha=0.6$;

炉次排产计划合格率 $\omega\%=95.45\%$ 。

依据假设条件 4,钢水温度和操作时间的波动控制情况符合正态分布,则不同概率取值下的 f 与标准差的关系如下:

根据 $\omega\%$ 得到的冗余值标准差倍率 $f(x)=2x$;

波动 25% 特征值标准差倍率 $f(x)=-0.6745x$;

波动 75% 特征值标准差倍率 $f(x)=0.6745x$ 。

由于各个工序及工序间传搁过程钢水温度的控制精度无法实际测量,只能通过实绩统计数据近似得到。运用实绩统计数据间接计算各个区段和工序的温度控制精度,除了基于数学模型的假设前提外,还需要假定:各个实绩温度参数的标准差是相应的温度控制精度标准差与相关的时间控制标准差乘以静置温降速率线性叠加得到的,则依据表 1 中所统计的实绩数据,根据该假定可以得到各个区段和工序的温度控制精度如下:

$$\delta_{\text{BOF}} = 8.31 - (4.24 + 5.10) \times 0.4 = 4.57;$$

$$\delta_{\text{BOF-RH}} = 9.90 - 3.61 \times 0.4 = 8.46;$$

$$\delta_{\text{RH-CC}} = 5.83 - 8.37 \times 0.4 = 2.48。$$

根据钢水温度和操作时间控制精度标准差,计算相应的冗余值和正负波动特征值结果如表 2。

表 2 钢水温度和操作时间的冗余值和正负波动特征值

工序过程	温度(温 降)冗余 值/℃	作业时 间冗余 值/min	温度(温降) 波动特征 值/℃	作业时间 波动特征 值/min
转炉工序	9.14	6.00	-3.08	3.08
转炉-精炼	16.91	7.21	-5.70	5.70
精炼工序	0	10.20	0	0
精炼-连铸	4.97	0	-1.68	1.68

根据数学模型中计算计划潜在温度损失的公式,可以到该时间控制水平下的计划潜在温度损失为 $7.25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

将各个参数的正负特征值分别组合,计算实绩潜在温度损失,计算过程如表 3。

表 3 实绩潜在温度损失计算过程

转炉工 序温度 波动特 征值/℃	转炉- 精炼温 降波动 特征值/℃	转炉作 业时间 波动特 征值/min	精炼作 业时间 波动特 征值/min	温度 控制 水平/ ℃	实绩潜 在温度 损失/℃
-3.08	-5.70	-2.02	-3.44	6.60	4.17
-3.08	-5.70	-2.02	3.44	9.35	4.17
-3.08	-5.70	2.02	-3.44	8.22	4.17
-3.08	-5.70	2.02	3.44	10.97	4.17
-3.08	5.70	-2.02	-3.44	-4.81	8.97
-3.08	5.70	-2.02	3.44	-2.06	6.22
-3.08	5.70	2.02	-3.44	-3.19	7.36
-3.08	5.70	2.02	3.44	-0.44	4.60
3.08	-5.70	-2.02	-3.44	0.44	10.33
3.08	-5.70	-2.02	3.44	3.19	10.33
3.08	-5.70	2.02	-3.44	2.06	10.33
3.08	-5.70	2.02	3.44	4.81	10.33
3.08	5.70	-2.02	-3.44	-10.97	21.30
3.08	5.70	-2.02	3.44	-8.22	18.55
3.08	5.70	2.02	-3.44	-9.35	19.69
3.08	5.70	2.02	3.44	-6.60	16.93

求取各个参数特征值的实绩潜在温度损失的平均值,可以得到该控制水平下的实绩潜在温度损失特征值为 $10.10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

3 精细化控制节能潜力的计算

若在现有基础上,所有参数的期望及相关设定不变的情况下,将“实绩统计数据”中的温度控制精度标准差减小 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、作业时间控制精度标准差减小 1 min 以及二者同时减小 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 1 min 3 种情况,运用精细化控制节能潜力数学模型计算相应的计划潜在温度损失和实绩潜在温度损失的特征值,结果如表 4。

表 4 不同控制水平下潜在温度损失情况

不同控制水平	计划潜在温度损失/ $^{\circ}\text{C}$	实绩潜在温度损失特征值/ $^{\circ}\text{C}$
现有控制水平	7.25	10.10
所有实绩统计温度控制精度提高 1°C	7.25	9.77
所有实绩统计时间控制精度提高 1 min	5.49	8.48
实绩统计数据精度均提高 1 标准单位	5.49	8.14

从表 4 可以看出,实绩统计结果中温度控制精度的提高,对计划潜在温度损失没有影响,在现有控制水平下,温度控制精度提高 1°C ,实绩潜在温度损失特征值降低 0.33°C ;而时间控制精度提高 1 min,计划潜在温度损失降低 1.76°C ,实绩潜在温度损失降低 1.62°C ,并且二者同时降低时,在潜在温度损失方面表现出可叠加性。

可见,提高生产过程中钢水温度和操作时间的控制精度,可以有效降低生产过程中的温度损失,减少不必要的能源消耗,同时,时间控制精度的提高对潜在温度损失的影响,明显要高于温度控制精度的提高所带来的影响,加强时间控制是精细化控制的主要方面。

4 结 论

1) 基于生产实践,建立转炉-连铸区段钢水温度和操作时间精细化控制模型,提出计划额外能耗和实绩额外能耗的概念和计算方法,用于评价不同控制精度下所蕴含的节能潜力。

2) 以某钢厂生产钢种 SPHC-W 的生产实绩数据为例,运用精细化控制模型对目前钢水温度和操作时间控制水平的节能潜力进行计算,得到计划潜在温度损失为 7.25°C ,实绩潜在温度损失特征值为 10.10°C 。

3) 运用精细化控制模型进一步分析,得知在现有控制水平下,温度控制精度提高 1°C ,实绩潜在温度损失特征值降低 0.33°C ;时间控制精度提高 1 min,计划潜在温度损失降低 1.76°C ,实绩潜在温度损失降低 1.62°C ,加强时间控制是精细化控制的主要方面。

参考文献:

[1] 殷瑞钰. 钢铁制造过程的多维物流控制系统[J]. 金属

学报,1997,33(1):29-38.

YIN Ruiyu. The multi-dimensional mass-flow control system of steel plant process [J]. Acta Metallurgica Sinica, 1997, 33(1): 29-38.

[2] 孙亮亮,刘炜,柴天佑. 基于深度优先搜索算法的连铸过程调度方法的研究[J]. 控制理论与应用,2010,27(12):1705-1710.

SUN Liangliang, LIU Wei, CHAI Tianyou. Scheduling continuous casting process by in-depth priority search algorithm [J]. Control Theory & Applications, 2010, 27(12): 1705-1710.

[3] 蒋国璋,孔建益,李公法,等. 面向 ISPKN 钢铁流程生产计划与调度系统研究[J]. 武汉科技大学学报:自然科学版,2008,31(1):59-63.

JIANG Guozhang, KONG Jianyi, LI Gongfa, et al. Iron and steel production planning and scheduling system based on ISPKN [J]. Journal of Wuhan University of Science & Technology: Natural Science Edition, 2008, 31(1): 59-63.

[4] 朱道飞,郑忠,高小强. 炼钢-连铸作业计划的遗传优化模型[J]. 钢铁,2008,43(7):26-31.

ZHU Daofei, ZHENG Zhong, GAO Xiaoqiang. Optimization model based on genetic algorithms for production planning of steelmaking and continuous casting process [J]. Iron and Steel, 2008, 43(7): 26-31.

[5] 唐秋华,陈伟明,蒋国璋,等. 基于 JIT 的炼钢-连铸生产调度模型研究[J]. 武汉科技大学学报:自然科学版,2008,31(1):78-82.

TANG Qiuhua, CHEN Weiming, JIANG Guozhang, et al. Modeling of steelmaking-continual casting production scheduling based on JIT [J]. Journal of Wuhan University of Science & Technology: Natural Science Edition, 2008, 31(1): 78-82.

[6] 郑忠,朱道飞,高小强. 钢厂炼钢连铸生产调度及重计划方法[J]. 重庆大学学报:自然科学版,2008,31(7):820-824.

ZHENG Zhong, ZHU Daofei, GAO Xiaoqiang. An approach of production scheduling and replanning in a steelmaking-continuous casting plant [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2008, 31(7): 820-824.

[7] 郑忠,朱道飞,高小强. 基于蚁群算法的炼钢-连铸作业计划编制方法[J]. 北京科技大学学报,2009,31(4):504-510.

ZHENG Zong, ZHU Daofei, GAO Xiaoqiang. Production planning based on an ant colony algorithm

- for steel making and continuous casting [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2009, 31(4):504-510.
- [8] 郑忠,朱道飞,高小强,等. 炼钢连铸生产计划调度一体化的仿真优化模型[J]. 重庆大学学报, 2010, 33(3): 108-113.
ZHENG Zhong, ZHU Daoifei, GAO Xiaoqiang, et al. Optimal model on integrated production planning and scheduling of steelmaking and continuous casting process [J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(3):108-113.
- [9] 俞胜平,庞新富,柴天佑,等. 加工时间不确定的炼钢连铸生产调度问题研究[J]. 控制与决策, 2009, 24(10): 1467-1472.
YU Shengping, PANG Xinfu, CHAI Tianyou, et al. Research on production scheduling for steelmaking and continuous casting with processing time uncertainty [J]. Control and Decision, 2009, 24(10):1467-1472.
- [10] 俞胜平,王秀英,郑秉霖,等. 基于变约束规划模型的炼钢连铸动态调度[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(7): 771-776.
YU Shengping, WANG Xinfu, ZHENG Binglin, et al. Dynamic scheduling for steelmaking and continuous casting based on the programming model with varying constraints [J]. Control Theory & Applications, 2009, 26(7):771-776.
- [11] 俞胜平,吕瑞霞,庞新富,等. 基于虚拟现实的炼钢连铸调度仿真系统[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2009, 40(Sup1):277-283.
YU Shengping, LV Ruixia, PANG Xinfu, et al. Simulation system of scheduling for steelmaking and continuous casting based on virtual reality [J]. Journal of Central South University :Science and Technology, 2009, 40(Sup1):277-283.
- [12] 庞新富,俞胜平,张志宇,等. 炼钢-连铸生产优化重调度方法[J]. 系统工程学报, 2010, 25(1):98-103.
PANG Xinfu, YU Shengping, ZHANG Zhiyu, et al. Optimal rescheduling method for steelmaking-continuous casting [J]. Journal of Systems Engineering, 2010, 25(1):98-103.
- [13] 于港,田乃媛,徐安军. 炼钢-连铸区段生产调度与计算机仿真[J]. 北京科技大学学报, 2009, 31(9): 1183-1188.
YU Gang, TIAN Naiyuan, XU Aanjun. Computer-aided simulation of steelmaking-continuous casting production scheduling [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2009, 31(9): 1183-1188.
- [14] 徐安军,田乃媛,许中波,等. 炼钢厂钢水温度-时间优化匹配系统开发[J]. 钢铁研究, 1997(3):3-6.
XU Aanjun, TIAN Naiyuan, XU Zhongbo, et al. Development of molten steel temperature-time optimization matching system in steelmaking plant[J]. Research on Iron & Steel, 1997(3): 3-6.
- [15] 刘青,田乃媛,殷瑞钰. 炼钢厂的运行控制[J]. 钢铁, 2003, 38(9):14-18.
LIU Qing, TIAN Naiyuan, YIN Ruiyu. Running control for steelmaking workshop [J]. Iron & Steel, 2003, 38(9): 14-18.

(编辑 张 苹)