

· 系统与装置 ·

日照 1 580 mm 热连轧机层流冷却控制系统

宋 勇, 苏 岚, 荆丰伟

(北京科技大学 高效轧制国家工程研究中心, 北京 100083)

摘要:日照 1 580 mm 热连轧机层流冷却控制系统分为过程自动化和基础自动化两级。过程自动化计算阀门开启数目及位置设定值,并根据测量的卷取温度不断修正模型精度,其功能模块包括有限差分温度模型、预设定、带钢段跟踪、测量值处理、动态设定、模型自适应等。基础自动化根据过程自动化的设定值开启或关闭阀门,同时实时收集各测量值并上传给过程自动化,其功能模块包括带钢头尾跟踪、阀门开闭延时处理、测量值收集等。自系统投入运行以来,工作稳定,带钢全长卷取温度控制误差为 ± 18 的命中率可达 96.43%。

关键词:热轧带钢;层流冷却;卷取温度控制;有限差分温度模型

中图分类号: TG334.9 **文献标志码:** B **文章编号:** 1000-7059 (2009) 02-0024-04

Laminar cooling control system for 1 580 mm hot strip mill in Rizhao Iron & Steel Co.

SONG Yong, SU Lan, JING Feng-wei

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

Abstract: Laminar cooling control system for 1 580 mm hot strip mill in Rizhao Iron & Steel Co. consists of process automation and basic automation. Process automation calculates amount and position of opening valves, and corrects model precision continually according to measuring value of coiling temperature. Function module of process automation includes finite difference temperature model, pre-setup, segment tracking, measuring value processing, dynamic setup and model self-adaption etc. Basic automation executes open or close of valves according to setpoint from process automation, gathers and sends measuring values to process automation. Function module of basic automation includes head and tail tracking, valve delay of open and close, and measuring value collection etc. Since the system was put into operation, working was stable, hitting rate of strip whole length cooling temperature was 96.43% when temperature error was within ± 18 .

Key words: hot strip; laminar cooling; coiling temperature control; finite difference temperature method

日照钢铁有限公司 1 580 mm 热连轧机生产线于 2006 年年底建成投产,设计年产量 200 万 t,产品厚度规格 1.2 ~ 20.0 mm,宽度规格 700 ~ 1 350 mm,最大轧制速度为 19.8 m/s。其层流冷却系统为低压管式层流冷却(如图 1 所示),布置在 F7 后输出辊道的上方和下方。冷却区段总计分成 18

个区,前 16 个为粗调区,后 2 个为精调区。每个粗调区由 4 组集管组成,每个精调区由 8 组集管组成,精调区单组集管冷却能力是粗调区的一半。在每个冷却区段之间均设有侧喷水喷嘴组,依次交叉布置,分别从传动侧或操作侧侧喷水,以除去带钢上表面的积水,提高冷却效率。在最后

收稿日期: 2008-07-01;修改稿收到日期: 2008-11-13

基金项目: 国家科技支撑计划 (2006BAE03A06)

作者简介: 宋 勇 (1974-),男,湖南湘潭人,助理研究员,硕士,主要从事轧钢自动化系统设计与控制策略和模型开发工作。

一个精调区段末端的出口侧喷扫水之后还设有 1 组压缩空气扫水喷嘴,用于扫去带钢上残余积水。在精轧机组出口和层流冷却出口分别安装有 1 个高温计,用于检测开冷温度(即终轧温度)和卷取温度。冷却区总长度为 86.4 m,有效冷却宽度为 1 580 mm。冷却水水压为 0.07 MPa,总水量约为 $9\,600\text{ m}^3/\text{h}$ 。

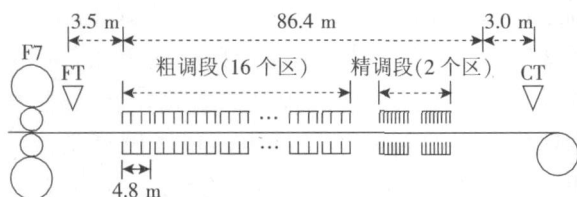


图 1 层流冷却系统设备布置

Fig. 1 Arrangement of laminar cooling equipment

1 控制系统模块结构设计

日照 1 580 mm 热连轧机生产线自动控制系统由北京科技大学高效轧制国家工程研究中心负责设计、编程、安装和调试。其中,层流冷却控制系统分为过程自动化和基础自动化两级,模块结构如图 2 所示。过程自动化的主要任务是根据冷却模型和冷却入口带钢参数计算出合适的阀门开启数目及位置,并不断根据测量的卷取温度修正模型以提高控制精度,功能模块包括有限差分温度模型、预设定、带钢段跟踪、测量值处理、动态设定(前馈控制)、模型自适应(闭环控制)等。基础自动化级的主要任务是按照过程自动化的设定值开启和关闭指定阀门,实时收集并向过程自动化级发送带钢速度、厚度、温度、集管开启状态等测量

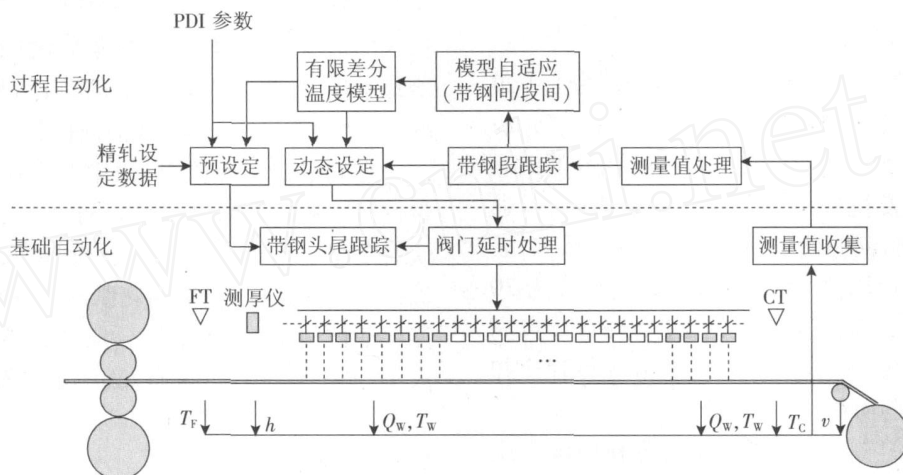


图 2 层流冷却控制系统模块结构

Fig. 2 Module structure of laminar cooling control system

T_F —终轧温度, h —带钢厚度, Q_W —冷却水量, T_W —冷却水温, T_C —卷取温度, v —带钢速度

值,功能模块有带钢头尾跟踪、阀门开闭延时处理、测量值收集。

2 过程自动化级控制功能

2.1 有限差分温度模型

层流冷却控制系统根据模型预测的带钢卷取温度设定和调整冷却水量,因此卷取温度的预测精度决定了控制系统的水平。影响带钢卷取温度的因素多而复杂^[1-2],特别是带钢在整个冷却过程中温降幅度大,冷却水与高温带钢表面的换热机理复杂且变化剧烈。实践表明,传统的统计回归模型或基于平均温降所推导的机理模型简化较多^[3-5],因此很难达到理想的预报精度。而采用温度场数值解法的有限差分模型可以比较细致地考虑换热边界条件、厚度方向热传导、带钢热物性

参数与带钢温降之间的关系等,因此将其应用到卷取温度控制系统中具有比较明显的优势^[3]。

考虑到热轧带钢冷却工艺和设备的特点以及在线控制的实时性要求,本控制系统采用一维显式有限差分温度模型,即只考虑带钢厚度方向的热传导:

内部节点 $T_{N+1}^n = f(T_{i+1}^n + T_{i-1}^n) + (1 - 2f) T_i^n$

$$\text{边界节点 } T_B^{n+1} = 2f(T_{i-1}^n + B T_{\text{env}}) + (1 - 2f - \alpha) T_i^n$$

$$\text{其中, } f = \frac{(\lambda / \rho_c) \Delta \tau}{(\Delta x)^2}, B = \frac{\alpha \cdot \Delta x}{\lambda}$$

式中, T_i^n 为带钢厚度方向节点 i 在第 n 时间步时的温度; T_{env} 为环境温度; λ 为带钢热传导系数; ρ 为带钢密度; c 为带钢比热容; $\Delta \tau$ 为时间步长; Δx_i

为空间步长; α 为带钢表面换热系数, 由带钢表面在冷却过程中的边界条件决定, 带钢在层流冷却区域主要有空冷时辐射换热和水冷时对流换热两种情况。

辐射换热系数计算如下:

$$\alpha_r = \frac{(T_{\text{strip}} + 273)^4 - (T_{\text{env}} + 273)^4}{T_{\text{strip}} - T_{\text{env}}} \varepsilon \sigma$$

式中, T_{strip} 为带钢表面温度; ε 为黑度系数, 它与带钢的表面状态 (如氧化铁皮、光洁度等) 有关, 上表面取 0.85, 下表面取 0.7; σ 为黑体辐射常数, 其值为 $5.67 \times 10^{-5} \text{ kW} / (\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

水冷对流换热系数计算如下:

$$\begin{aligned} \text{上表面 } \alpha_w &= K_a \cdot \left(\frac{q_{\text{top}}}{W} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot e^{(k_1 T_{\text{strip}} + k_2 L + k_3)} \cdot K_{wt} \\ \text{下表面 } \alpha_j &= K_a \cdot \left(\frac{q_{\text{bot}}}{A} \right)^{\frac{5}{4}} \cdot e^{(k_4 T_{\text{strip}} + k_5)} \cdot K_{wt} \end{aligned}$$

式中, K_a 为模型自适应系数; q_{top} , q_{bot} 分别为上下集管的冷却水流量; W 为层冷设备宽度, 取 1.58 m; $k_1 \sim k_5$ 分别为上下表面的影响系数, 表示带钢表面节点的温度及位置对热交换能力的影响, 可通过试验数据进行回归确定; K_{wt} 为水温影响系数, 表示冷却水水温对热交换能力的影响, 当水温为 30 时, 其值为 0.75; L 为沿带钢长度方向, 节点离上集管中心位置 (驻点) 的距离; A 为下集管冷却水喷射到带钢的面积。

已知任一时刻的温度分布, 则可利用该有限差分温度模型计算带钢各节点经历时间间隔 Δt 后的温度。虽然显示差分格式的形式简单、运算迅速, 但其运算过程必须满足收敛判式 $f \leq \frac{1}{2}$ (内部节点) 和 $f \leq \frac{1}{2(1+B)}$ (边界节点)。因此, 在选取时间步长、空间步长时需要对算法稳定性、精度、效率综合权衡考虑。具体做法是, 先根据带钢的厚度规格选择单元节点的数量, 从而得到单元节点的间距 (即空间步长 Δx), 然后再根据不同的边界条件选取不同的时间步长 Δt , 使得计算量不至于太大, 又可满足算法的收敛性要求。一般来说, 当节点处于水冷条件下时所取的时间步长要比空冷小。

2.2 预设

预设模块是在精轧 F1 咬钢时正式启动计算, 带钢在冷却区入口的参数 (比如带钢速度、厚度、入口温度等) 来自精轧设定计算的结果。考虑

到从发出阀门开启指令到冷却水落到带钢表面有一段延迟时间, 因此预设定计算完成后立即将设定结果发送到基础自动化, 以便基础自动化能提前开启设定的阀门。

由于有限差分温度模型只能根据带钢入口数据和集管开启模式组态来预报卷取温度, 因此需要调用温度模型进行多次尝试迭代, 才能计算出满足目标卷取温度要求的集管开启模式组态。为了减少尝试迭代次数, 预设定模块先采用传统的统计温度模型预估计出粗略的集管开启数量, 作为迭代计算的初始集管组态。现场测试结果表明, 采用此方法可将迭代次数减少为 2~3 次。

2.3 带钢段跟踪

段跟踪模块的主要任务是进行带钢分段, 并实时跟踪每段带钢在冷却区中的位置及其经过冷却区的情况, 包括其经过各集管时的运行速度和冷却水量, 并根据设定要求的目标温度和冷却速率, 启动动态设定计算 (即前馈控制功能)。

在确定带钢分段时, 段跟踪模块综合考虑了带钢运行的长度间隔和时间间隔。当轧制速度较快时采用定长度间隔, 而轧制速度较慢时采用定周期间隔。这样, 当带钢轧制速度变化很大时, 既能保证控制精度, 使带钢分段的长度间隔不致于太大, 又不至于时间间隔太短, 导致前馈启动过于频繁。

2.4 测量值处理

对基础自动化发送来的各种测量数据 (包括带钢厚度、速度、终轧温度和卷取温度), 必须先经过测量值处理模块处理后, 才能用于设定计算和模型自适应。测量值处理模块的主要任务如下:

(1) 剔除那些超限的不合理数据和不符合统计规律太过于分散的数据。

(2) 对测量值进行滤波处理, 滤掉那些“噪音”数据 (由于测量环境、手段以及电磁干扰等原因, 实际测量数据中不可避免地包含了一些不真实的信息)。

(3) 对测量值进行统计处理, 计算其平均值、标准差、置信度等。

为了使同一周期内发送来的各测量点温度能与各带钢段正确对应, 测量值处理模块中设计了一个缓冲队列。先将每个周期发送的这些测量数据保存到一个队列中, 并分别记录每个测量值在带钢上的位置坐标 (离带钢头部的距离), 动态设

定模块只需根据每个带钢段的起始位置就能从测量值队列中找到其对应的数据了。

2.5 动态设定

根据带钢段跟踪模块和测量值处理模块收集整理出的带钢分段的相关信息,动态设定模块对带钢全长范围进行周期前馈修正,以补偿每段带钢的终轧温度、厚度、速度的波动。动态设定模块采用的原理和方法与预设定类似,即通过调用有限差分模型预测卷取温度偏差来确定所需修正的集管开启数目。同理,为了减少尝试迭代次数,动态设定是直接在前一控制周期设定的集管组态的基础上增减开启集管数。

2.6 模型自适应

为了提高模型的精度,需要在测得实际的卷取温度后,根据实测值与模型计算值之间的偏差对模型中换热系数进行修正。模型自适应分为带钢内段间自适应和带钢之间的自适应。

每个带钢分段经过冷却区出口高温计时,都会启动一次带钢内的段间自适应。自适应模块先根据该带钢段的测量值和跟踪信息调用温度模型重新预测其卷取温度,然后通过与实测的卷取温度比较来调整换热系数修正因子,即模型自适应系数。新的自适应系数可用于随后启动的动态设定,以提高那些后续还未经过层流冷却区的带钢段的动态调节精度,形成闭环控制。

带钢之间的模型自适应是在带钢尾部最后一段离开冷却区出口高温计时被跟踪模块启动,以各带钢段自适应系数的平均值作为本块带钢的实测自适应值,按照指数平滑法计算下一块钢预设定时所使用的模型自适应系数。

带钢头部和尾部在输出辊道上运行时,由于带钢失去了张力的作用,冷却水在带钢表面覆盖的情况会发生改变,特别是在薄带钢且板形较差的情况下更为明显。因此,控制系统中对每块带钢设有三个自适应系数,分别对应带钢的头部、本体和尾部。在进行带钢之间的自适应时,需根据段的起始位置确定带钢头部、本体和尾部所包含的带钢段,并分别求出这些段的自适应系数平均值,然后独立更新。

3 基础自动化级控制功能

3.1 带钢头尾跟踪

带钢头尾跟踪模块由精轧机组的负荷继电器信号启动。根据轧机的出口速度和扫描周期积

分,计算带钢头部(或尾部)离精轧 F1 的距离,并与各阀门的位置坐标进行比较。考虑每个阀门的开启延迟时间 t_d 和带钢速度 v ,若带钢头部(或尾部)离每个阀门的距离 ΔL 满足 $\Delta L \leq (t_d, v)$,则需要根据预设定值的要求及时开启相应的阀门(头部到达时),或者将已经开启的阀门及时关闭(尾部离开时)。

3.2 阀门延时处理

从阀门的开启指令发出到冷却水稳定地落在钢板表面上存在一定延迟时间,同样从阀门关闭后冷却水水量减小也需一定时间,一般集管开闭延迟时间大约为 $1 \sim 2$ s。在调试时,可通过 HMI 设置每个阀门的开启延迟时间和关闭延迟时间。在带钢穿带和抛钢时,阀门延时处理模块可根据所存储的阀门开闭延迟时间和带钢头尾的跟踪位置,提前开启和关闭过程自动化所指定的阀门。

对于动态设定所指定的阀门开闭指令,基础自动化则需要先进行缓存,然后按照过程自动化的段跟踪结果延迟动作,以便动态调整的水量能正确地作用到对应的带钢段上。

3.3 测量值收集

对于带钢的终轧温度、厚度、速度、卷取温度、水温等测量值,基础自动化每 20 ms 从 AI 模板上采集一次,当收集到 5 个后进行滤波,然后将滤波处理过的结果传送给过程自动化,因此过程自动化每 100 ms 将接收到一组经过一次滤波后的测量值。为了保证实时性,一次滤波采用的方法是去掉最大值和最小值后取平均值。对于集管开启状态的收集,基础自动化直接每 100 ms 采集一次,然后随其他测量值一起发送给过程自动化。

4 结束语

该系统于 2007 年 9 月投入所有功能,运行非常稳定。图 3 是控制误差为 ± 18 时的带钢全长

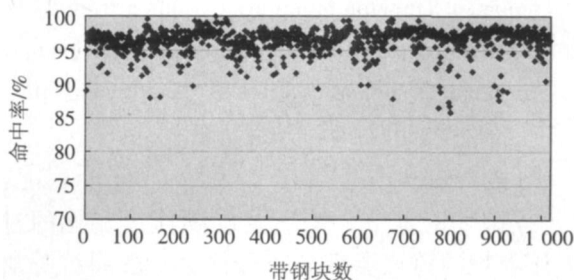


图 3 带钢全长命中率统计结果

Fig. 3 Hitting rate statistic of whole-length strip

(下转第 32 页)

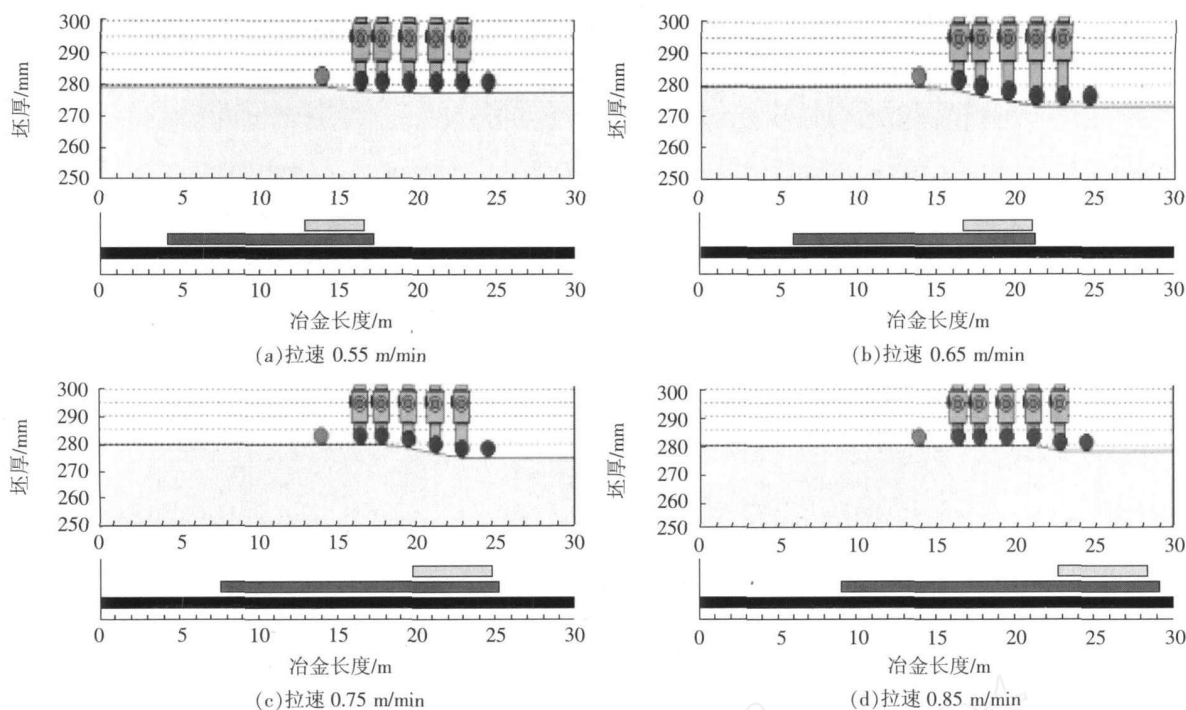


图 4 动态仿真系统的应用

Fig. 4 Application of the dynamic simulation system

□ 适合压下的区域; ■ 钢种凝固区域; ■ 钢种

系统开发的风险与成本具有重要意义。

参考文献:

- [1] 蔡开科. 连铸二冷区凝固传热及冷却控制 [J]. 河南冶金, 2003, 11(1): 3-7.
CAI Kai-ke. Solidification heat-transfer and cooling control

in the continuous casting secondary cooling zone [J]. Henan Metallurgy, 2003, 11 (1): 3-7.

- [2] 王国新. 国产大方坯动态 [C] // 2007 中国钢铁年会议论文集 4. 北京: 冶金工业出版社, 2007: 87-88

[编辑: 夏 宁]

(上接第 27 页)

卷取温度命中率, 数据来源是日照 1 580 mm 热连轧机 2007 年 9 月 25 ~ 28 日的大生产数据 (不去除带钢头部, 不区分规格、首卷钢), 钢卷的厚度范围为 5.0 ~ 11.7 mm, 共计 1 014 块, 平均命中率为 96.43%。现场应用效果表明, 本控制系统的功能完善, 控制精度高, 具有很好的推广前景。

参考文献:

- [1] 孙一康. 带钢热连轧的模型与控制 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.
[2] 陈礼斌, 王维东. 板带层流冷却控制技术评述 [J]. 河北冶金, 2003 (3): 39-43.
CHEN Li-bin, WANG Wei-dong. Review of plate and strip laminar-flow control cooling [J]. Hebei Metallurgy, 2003 (3): 39-43.
[3] 王 萍, 黄贞益, 尹桂全, 等. 热轧带钢层流冷却温度

控制模型的应用分析 [J]. 钢铁研究学报, 2007, 19 (4): 31-34, 61.

WANG Ping, HUANG Zhen-yi, YN Gui-quan, et al. Application analysis of temperature control models of laminar cooling for hot rolled strip [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2007, 19 (4): 31-34, 61.

- [4] 彭良贵, 于 明, 王昭东, 等. 热轧带钢层流冷却数学模型述评 [J]. 轧钢, 2003, 20 (6): 25-29.

PENG Liang-gui, YU Ming, WANG Zhao-dong, et al. Discussion on mathematical models of laminar cooling system used in hot strip mill [J]. Steel Rolling, 2003, 20 (6): 25-29.

- [5] 郑 轲. 热轧带钢卷取温度控制数学模型 [J]. 鞍钢技术, 2000 (4): 35-38.

ZHENG Ke. Mathematical model on coiling temperature control of hot rolled strip steel [J]. Angang Technology, 2000 (4): 35-38.

[编辑: 沈黎颖]