

热轧带钢轧后冷却控制系统优化

李海军¹, 江 潇², 李旭东¹, 王国栋¹

(1. 东北大学 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819; 2. 首钢迁钢热轧作业部, 河北 迁安 064400)

摘 要: 为提高热轧带钢超快冷出口温度和卷取温度控制精度, 针对超快冷生产调试过程中出现的问题, 对轧后冷却控制系统进行了优化. 针对超快冷出口纵向温度偏差较大的问题, 提出超快冷换热系数多点自学习方法; 采用有限差分方法, 分析带钢超快速冷却后的返红现象, 并在此基础上提出一种超快冷出口返红补偿方法; 提出了对进入冷却区的带钢样本段进行温度再计算的方法, 来消除速度波动对轧后冷却温度控制精度的影响. 现场应用结果表明, 优化后超快冷出口温度和卷取温度控制精度均明显提高.

关 键 词: 热轧带钢; 超快冷; 返红; 卷取温度; 自学习

中图分类号: TG 334.9

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2015)03-0364-05

Optimization of Cooling Control System on the Run-out Table of Hot Strip Mill

LI Hai-jun¹, JIANG Xiao², LI Xu-dong¹, WANG Guo-dong¹

(1. State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Shougang Qiangang Hot Strip Plant, Qian'an, 064400, China. Corresponding author: LI Hai-jun, E-mail: lihj@ral.neu.edu.cn)

Abstract: In order to guarantee high control accuracy of ultra-fast cooling zone delivery temperature and coiling temperature, the run-out table cooling control system was optimized according to the major problems emerging from the tuning process of ultra-fast cooling. Aiming at the longitudinal temperature fluctuations after ultra-fast cooling, a new self-learning method for the heat transfer coefficients of ultra-fast cooling was proposed. The strip surface re-reddening phenomenon after ultra-fast cooling process was simulated with the finite difference method, based on which a compensation for strip surface re-reddening was added to run-out table cooling control system. In order to eliminate the influence of strip conveying velocity fluctuations on temperature, the strip conveying velocity diagram and temperature were recalculated for all strip segments which had entered the cooling sections, as soon as a new strip segment came to the measuring point of finish mills delivery temperature (FDT). With the methods mentioned above, the new run-out table cooling control system are optimized and field application showed that the strip temperature control accuracy are improved obviously.

Key words: hot strip mill; ultra-fast cooling; re-reddening; coiling temperature; self-learning

为了降低生产成本, 实现产品“减量化”生产, 首钢迁钢与东北大学合作, 于2012年10月进行了2 160 mm热轧轧后冷却设备改造, 拆除原层流冷却入口4组集管, 在相应位置增设3组超快速冷却^[1-3]设备, 轧后冷却控制系统也作了相应的改造. 改造后新增的东北大学L2级轧后冷却

控制系统与原SIEMENS层流冷却控制系统采用了并行方案. 自投产以来, 东北大学轧后冷却控制系统运行稳定, 但随着生产产品的增多, 在生产调试过程中也逐渐暴露出一些问题, 主要体现在如下几个方面: ①超快冷出口纵向头部、中部和尾部温度存在偏差; ②带钢经超快速冷却后, 在层流冷

却区存在返红现象,影响了卷取温度控制精度;③精轧机架间冷却水不参与终轧温度控制,为保证终轧温度,通常速度波动较大,进而影响卷取温度控制精度. 本文针对生产调试过程中出现的上述问题,对轧后冷却温度控制系统进行了改进优化,显著提高了轧后冷却的温度控制精度.

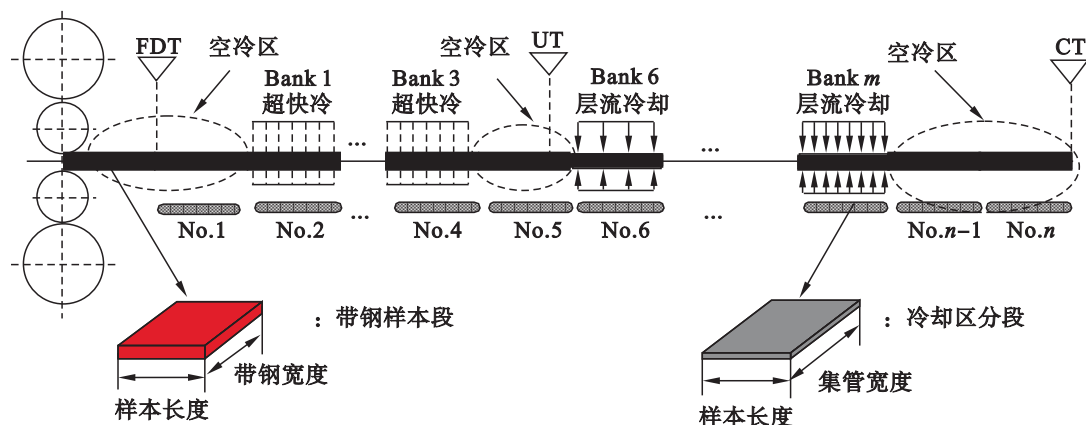


图1 带钢样本及冷却区划分方法

Fig. 1 Schematic of division method for strip segments and cooling sections

每当一个新的带钢样本段到达精轧机出口高温计,轧后冷却温度控制系统根据实测的精轧出口温度、速度、加速度、超快冷出口目标温度、目标卷取温度等,调用温度计算模型,确定该带钢样本段所需的集管开启状态.

1.2 轧后冷却区带钢换热过程及模型

带钢在轧后冷却区的换热过程十分复杂,其中包括:热辐射、空气对流散热、水冷对流散热和带钢与辊道之间的热传导及相变潜热等^[5-7]. 工程应用过程中,为了简化计算,通常仅考虑热辐射和水冷对流散热,而其他方式的散热都纳入到热辐射散热系数中统一考虑,如下式所示:

$$\frac{dt}{d\tau} = -\frac{2\varepsilon\sigma}{c_p\rho h}[(t+273)^4 - (t_a+273)^4] - \frac{\alpha_w}{c_p\rho h}(t-t_w) \quad (1)$$

式中: dt 为带钢温降, $^{\circ}\text{C}$; $d\tau$ 为冷却时间, s ; ε 为带钢热辐射系数; σ 为史蒂芬-波尔兹曼常数, $5.69 \times 10^{-11} \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^{\circ}\text{C}^4)$; c_p 为带钢比热, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$; α_w 为水冷对流换热系数, $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^{\circ}\text{C})$; ρ 为带钢的密度, kg/m^3 ; h 为带钢厚度, m ; t 为带钢表面温度, $^{\circ}\text{C}$; t_a 为环境温度, $^{\circ}\text{C}$; t_w 为冷却水温度, $^{\circ}\text{C}$.

2 轧后冷却温度控制系统优化方法

2.1 提高超快冷出口纵向温度均匀性的方法

为了保证终轧温度控制精度,精轧机组通常

1 轧后冷却控制系统概述

1.1 轧后冷却温度控制基本方法

按“定长”将带钢分为若干样本段,并按相同的长度将冷却区划分为 n 个区域^[4],如图1所示.

需要进行提速轧制,因此带钢头部、中部和尾部各样本段通过超快速冷却区的换热系数及冷却时间存在较大的差异. 为了消除超快冷出口纵向温度变化趋势,提高超快冷出口的温度控制精度,本文在系统原有的带钢中间本体水冷换热系数自学习的基础上,增加了带钢头部及尾部的水冷换热系数自学习功能. 各位置的水冷换热系数学习值可按式(2)进行计算^[8]:

$$Z_M = \frac{\ln\left(\frac{t_{UT}^{\text{act}} - t_w}{t_0^{\text{act}} - t_w}\right) + \sum_{j=\text{air}} \frac{\alpha_{Aj} \tau_j}{c_p \rho h}}{\ln\left(\frac{t_{UT}^{\text{cal}} - t_w}{t_0^{\text{cal}} - t_w}\right) + \sum_{j=\text{air}} \frac{\alpha_{Aj} \tau_j}{c_p \rho h}} \quad (2)$$

式中: Z_M 为水冷换热系数学习值; t_{UT}^{act} 和 t_{UT}^{cal} 分别为超快冷出口实测温度和计算温度, $^{\circ}\text{C}$; t_0^{act} 和 t_0^{cal} 分别为冷却区入口实测温度和计算温度, $^{\circ}\text{C}$; t_w 为冷却水温度, $^{\circ}\text{C}$; α_{Aj} 为第 j 冷却区的空冷换热系数,可根据热辐射定律推导获得, $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^{\circ}\text{C})$; τ_j 为带钢通过第 j 冷却区的时间, s ; 其他参数同式(1).

2.2 超快冷返红分析及补偿方法

热轧带钢在轧后的超快速冷却过程中,由于表面骤冷,带钢厚度方向表面和中心会形成较大的温度梯度,在快速冷却结束后的短时内,由于带钢内部热传导作用,会出现已经被冷却的表面温度再次升高的现象,现场称为“返红”^[9]. 采用一维有限差分法,结合现场超快冷生产实际数据,对不同钢种及厚度规格的产品返红进行了模拟计

算,以厚度为 13.5 mm 的 Q345 产品为例,计算结果如图 2 所示.从图中可以看出在超快冷集管出口处,带钢表面和中心温差达到最大,高达 140 ℃;在超快冷出口测温点,返红不充分,带钢表面和中心仍存在约 35 ℃ 的温差.

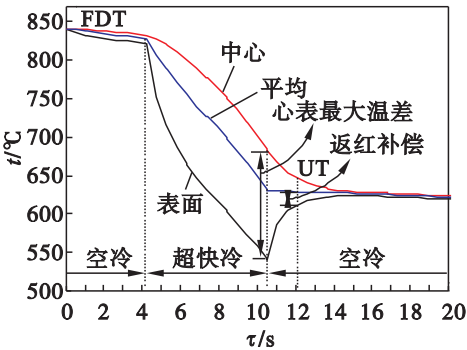


图 2 超快冷返红模拟计算曲线
Fig. 2 Simulated results of strip surface temperature rise after ultra-fast cooling

由于带钢在超快冷出口测温点返红进行的不充分,带钢的表面温度会明显低于带钢的平均温度.在这样的情况下,以超快冷出口实测表面温度作为后续层流冷却区的入口温度,会造成模型中的层流冷却换热系数明显低于实际值.考虑到超快冷出口测温点带钢返红进行的不充分,所以将图 2 中超快冷出口测温点位置带钢平均温度与表面温度的差值作为返红补偿值,与超快冷出口温度模型计算值加合,作为层流冷却的入口温度.超快冷出口温度返红补偿值与钢种及产品厚度有关,通常钢种需求的冷却速率越大、产品越厚返红

补偿值越大.

2.3 速度波动条件下的轧后冷却温度控制

影响带钢轧后冷却温度的因素包括带钢的材质、厚度、速度、板形,冷却水的水量、水压及水温,终轧温度等^[10-11].其中带钢速度具有很强的时变性,速度的波动不但影响带钢样本段通过冷却区的时间,而且还会影响冷却集管的水冷换热系数.由于现场精轧机架间冷却水不参与终轧温度的控制,主要通过调速的方法来确保终轧温度控制精度,所以带钢在冷却区的实际运行速度曲线和精轧预设定的速度通常存在较大的差别.当实际速度和预定速度偏差较大时,通常仅通过温度反馈控制已经无法满足温度控制精度要求.

为了消除速度波动的影响,除了对 FDT 位置的带钢新样本段进行计算外,对于已经进入冷却区的带钢样本段,同步进行速度的更新及温度的再计算.如图 3 所示,以带钢样本段 s_k 为例,将样本段 s_k 通过任意 No. j 冷却区速度表示为 $v_{k,j}$.如图 3a 所示,当样本段 s_k 到达 FDT 位置时,计算 s_k 通过各冷却区的速度 $v_{k,j}(j=1,2,\cdots,n)$,并以 FDT 实测温度为初始值,计算 s_k 在各冷却区的温度及达到目标温度所需的冷却集管组态;如图 3b 所示,下一时刻样本段 s_{k+1} 到达 FDT 位置,样本段 s_k 到达 No. 1 冷却区,由于带钢各样本的速度具有同步性,所以用样本段 s_{k+1} 过各冷却区的速度来更新 s_k 通过各冷却区的速度,即 $v_{k,j} = v_{k+1,j-1}(j=2,3,\cdots,n)$,并以前一时刻 No. 1 冷却区出口温度计算值作为初始值,重新计算 s_k 在后续各冷却区的温度及达到目标温度所需的冷却集

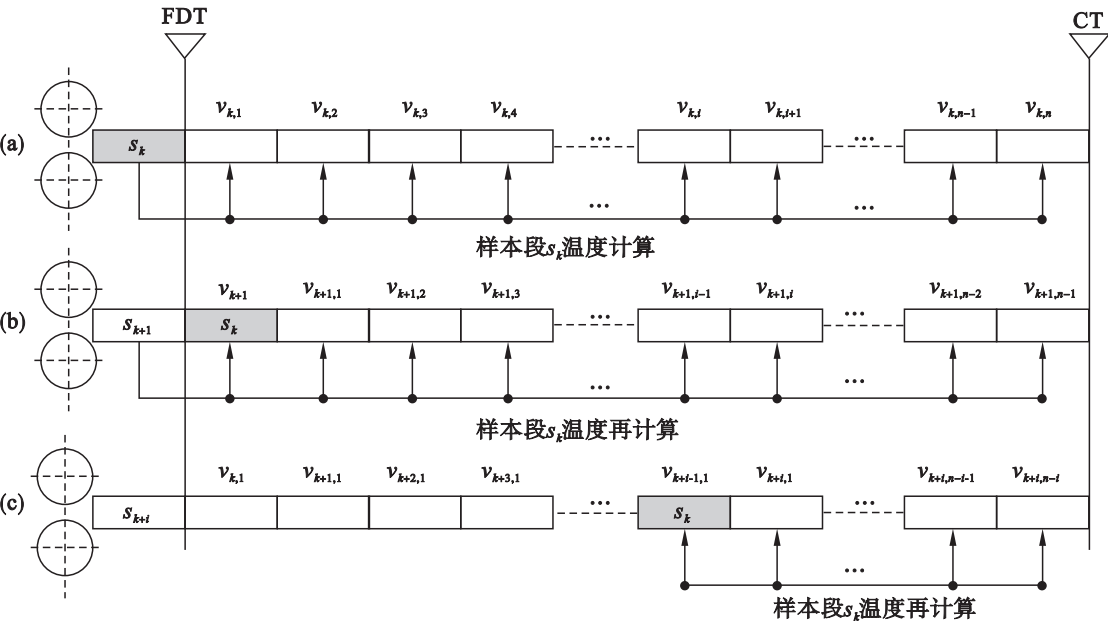


图 3 速度波动条件下的轧后冷却温度计算方法
Fig. 3 Strip temperature calculation method on the condition of speed fluctuation on run-out table

管组态;以此类推,直到样本段 s_k 出了冷却区为止. 如图 3c 所示,样本段 s_{k+i} 到达 FDT 位置,样本段 s_k 到达 No. i 冷却区,从图中不难看出,样本段 s_k 在 No. 1 ~ No. i 冷却区,温度计算所用的速度为 $v_{k+j,i}(j=0,1,\cdots,i-1)$,基本代表了带钢在不同时刻的实际运行速度.

3 现场应用及效果

应用上述方法,对迁钢 2 160 mm 热轧轧后冷却控制系统进行了优化,优化后超快冷出口温度和卷取温度控制精度均明显提高,以基于超快冷生产的减量化 Q345 产品为例,超快冷出口温度 $\pm 30^\circ\text{C}$ 偏差,平均控制精度由优化前的 86.4% 提高到了 93%,卷取温度 $\pm 20^\circ\text{C}$ 偏差,平均控制精度由优化前的 89% 提高到了 94.5%. 图 4 给出优化前后轧后冷却控制系统控制效果对比曲线,其中钢种为 Q345,成品厚度均为 11.75 mm,超快冷出口目标温度 620°C ,目标卷取温度 580°C .

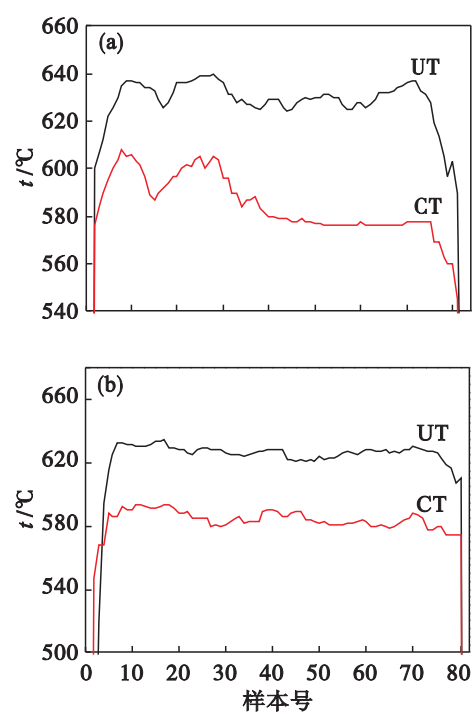


图 4 优化前后温度控制效果的对比

Fig. 4 Comparison of control results between before and after optimization

(a) —优化前;(b) —优化后.

从图 4a 可以看出,超快冷出口温度 UT 和卷取温度 CT 在全长范围内波动较大,尤其是头部明显超差;而图 4b 中,优化后的轧后冷却控制系统超快冷出口温度和卷取温度控制的精度都明显提高.

4 结 论

- 1) 为了降低生产成本,迁钢 2 160 mm 热轧线采用超快冷技术对轧后冷却系统进行了升级改造. 本文介绍了升级改造后的轧后冷却温度控制的基本方法,分析了轧后冷却控制系统在生产调试过程中出现的主要问题.
- 2) 针对超快冷出口温度波动大的问题,提出了带钢头部、中间本体及尾部多点自学习方法,有效地提高了超快冷出口温度控制精度.
- 3) 采用有限差分法,对轧后超快冷过程的返红问题进行了分析,结果表明在超快冷出口测温点,带钢表面和中心仍存在较大的温差. 在模拟分析计算的基础上,提出了一种超快冷出口返红补偿方法,以提高卷取温度控制精度.
- 4) 分析了速度波动对轧后冷却温度控制的影响,采用对进入冷却区的带钢样本段进行温度再计算的方法来提高速度波动条件下的卷取温度控制精度.
- 5) 采用上述方法,对轧后冷却控制系统进行了优化,现场应用结果表明,优化后超快冷出口温度和卷取温度控制精度均明显提高.

参考文献:

[1] Tian Y, Tang S, Wang B X , et al. Development and industrial application of ultra-fast cooling technology [J]. *Science China:Technological Sciences*,2012,55 (6) :1566 – 1571 .

[2] 王国栋. 以超快速冷却为核心的新一代 TMCP 技术[J]. *上海金属*,2008 , 30 (2) :1 – 5 .
(Wang Guo-dong. The new generation TMCP with the key technology of ultra fast cooling [J]. *Shanghai Metals*,2008 , 30 (2) :1 – 5 .)

[3] 王国栋. 新一代控制轧制和控制冷却技术与创新的热轧过程[J]. *东北大学学报: 自然科学版*,2009 , 30 (7) :913 – 922 .
(Wang Guo-dong. New generation TMCP and innovative hot rolling process [J]. *Journal of Northeastern University : Natural Science*,2009,30(7) :913 – 922.)

[4] 刘伟崑,李海军,王昭东,等. 热轧带钢轧后冷却过程控制系统软件体系结构设计[J]. *轧钢*,2011,28(3) :47 – 50 .
(Liu Wei-wei, Li Hai-jun, Wang Zhao-dong, et al. Design and application of cooling control system of hot rolled strip [J]. *Steel Rolling*,2011,28(3) :47 – 50.)

[5] Liu E Y, Peng L G, Yuan G, et al. Advanced run-out table cooling technology based on ultra fast cooling and laminar cooling in hot strip mill [J]. *Journal of Central South University*,2012,19(5) :1341 – 1345 .