

# 热轧带钢 X80 超快冷出口温度高精度控制方法

李旭东<sup>1</sup>, 袁 国<sup>1</sup>, 江 潇<sup>2</sup>, 王国栋<sup>1</sup>

(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. 首钢迁钢公司, 河北 迁安 064400)

**摘 要:** 针对 X80 管线钢超快冷生产过程, 基于传热学基本理论, 建立了超快冷温度控制模型. 通过对带钢超快冷过程温度场模拟, 开发了 X80 管线钢超快冷控制策略, 得出超快冷以均匀模式开启初始组态并采用正向增开策略有利于超快冷精度的提高及带钢芯表温差的减小. 针对工艺条件波动对控制精度的影响, 开发了超快冷自适应系统, 实现了带钢超快冷出口温度实时及卷间修正. 现场应用取得良好效果, 为控冷工艺的实施提供支撑.

**关 键 词:** 温度控制精度; 热轧带钢; 超快冷; 控制策略; 自适应系统

中图分类号: TG 335.11

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2015)10-1431-05

## High Precision Outlet Temperature Control Methods of Ultra Fast Cooling for X80 Hot-Rolled Strips

LI Xu-dong<sup>1</sup>, YUAN Guo<sup>1</sup>, JIANG Xiao<sup>2</sup>, WANG Guo-dong<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Rolling & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Shougang Qiangang Company, Qianan 064400, China. Corresponding author: LI Xu-dong, E-mail: lixudonggo@163.com)

**Abstract:** According to the rolling process of X80 pipeline steels and the basic theories of heat transfer, a cooling control model of ultra-fast cooling (UFC) was established. A UFC control strategy of X80 pipeline steel was developed by simulating the temperature field of UFC process for the steel strip. The results showed that the uniform mode starting initial configuration and the use of forward additional strategies were benefited for the high UFC control precision and low temperature deviation between the steel centre and surface. To deal with influences of the technological condition fluctuations, an adaptive system of UFC was developed to correct temperature deviation in real-time and that between steel coils at UFC outlet. A satisfied result was achieved in field practice, which provided technology supports for the implementation of controlled cooling process.

**Key words:** control precision of temperature; hot-rolled strips; ultra-fast cooling (UFC); control strategy; adaptive system

近年来,超快速冷却技术开发与应用成为热轧带钢的研究热点,尤其在管线钢生产开发方面,超快速冷却技术可明显提高带钢厚度方向组织均匀性,显著改善带钢板形,在降低微合金用量的同时稳定带钢拉伸性能、提高落锤及焊接等性能<sup>[1-4]</sup>. 热轧管线 X80 的冷却工艺特点是将精轧出口带钢快速冷却至动态相变点,并配合层流冷却以实现带钢控制冷却过程. 超快冷出口温度作

为超快速冷却终止点,在超快冷技术应用过程中作用关键<sup>[5]</sup>. 因此,实现超快冷出口温度的高精度控制对 X80 管线钢的高品质生产具有重要意义.

## 1 产线布置概况

首钢迁钢 2160 生产线超快冷设备布置于精

收稿日期: 2014-03-07

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAF04B01).

作者简介: 李旭东(1987-),男,河北唐山人,东北大学博士研究生; 王国栋(1942-),男,辽宁大连人,东北大学教授,博士生导师,中国工程院院士.

轧机组与层流冷却之间,上下共 30 组集管;层冷部分分为粗冷区和精冷区,粗冷区每 4 对集管为

一组,精冷区每 8 对集管为一组,精轧出口、超快冷出口及层冷出口均配有测温仪,如图 1 所示。

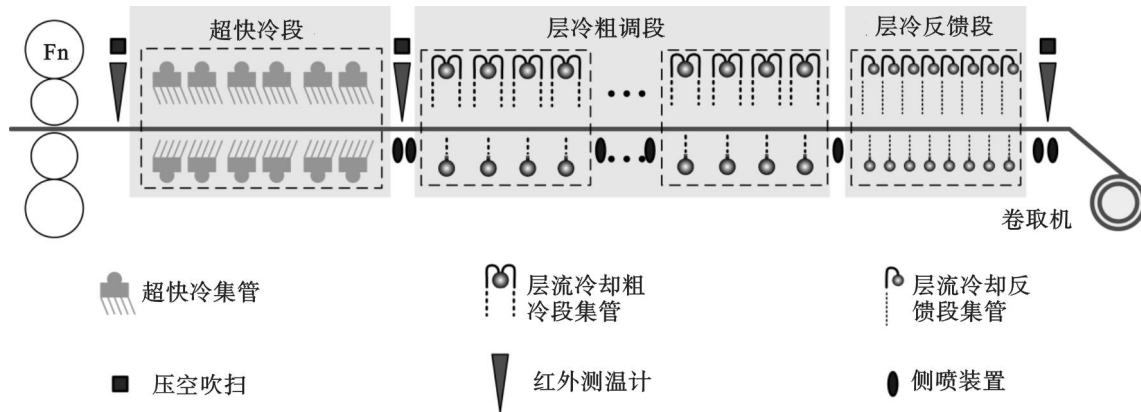


图 1 冷却线布置图

Fig. 1 Cooling equipment arrangement

超快冷设计总水量为  $8\,000\text{ m}^3/\text{h}$ , 对于厚度为  $3\text{ mm}$  的钢板, 瞬时冷速能够达到  $300\text{ }^\circ\text{C}/\text{s}$  以上. 对于厚度为  $18.4\text{ mm}$  钢板, 带钢超快冷过程中, 降温能够达到  $400\text{ }^\circ\text{C}$  以上, 为管线钢的生产创造了有利条件.

## 2 超快冷冷却策略的开发

基于传热学基本理论, 建立基础换热模型, 可依据各工艺参数实测值, 计算超快冷组态并得出带钢超快冷出口温度计算值. 实现超快冷出口温度的高精度控制, 需紧密结合 X80 超快速冷却过程温降大的特点, 以开发超快冷冷却策略. 超快冷冷却策略主要包括超快冷基础组态的设定与超快冷增开集管组态的设定两部分.

### 2.1 基础换热模型的建立

带钢轧后冷却是一个复杂的传热过程, 主要涉及空冷对流换热、水冷对流换热、热辐射散热、带钢与辊道热传导换热及带钢内部相变潜热等<sup>[6-8]</sup>. 本文采用基于 Newton 公式<sup>[9]</sup>的对流换热温降模型, 并将其他换热形式均归结为空冷及水冷对流换热, 建立如下对流换热模型:

$$\frac{dt}{d\tau} = -\frac{2\alpha_a}{c(t)\rho\delta}(t-t_a) - \frac{2\alpha_w}{c(t)\rho\delta}(t-t_w). \quad (1)$$

(空冷对流换热)(水冷对流换热)

式中:  $t$  为带钢表面温度,  $^\circ\text{C}$ ;  $\tau$  为时间,  $\text{s}$ ;  $c$  为带钢比热,  $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$ ;  $\rho$  为带钢密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\delta$  为钢板厚度,  $\text{m}$ ;  $t_a$  为环境温度,  $^\circ\text{C}$ ;  $t_w$  为冷却水水温,  $^\circ\text{C}$ ;  $\alpha_a$  为空冷对流换热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ;  $\alpha_w$  为水冷对流换热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ .

$$\alpha_a = \varepsilon \cdot \sigma \cdot [(t + 273.15)^4 + (t_a + 273.15)^4]. \quad (2)$$

其中:  $\varepsilon$  为黑度系数;  $\sigma$  为斯蒂芬-波尔兹曼常数, 取  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)$ .

$$\alpha_w = f_w \cdot f_p \cdot f_v \cdot f_l \cdot f_b \cdot \alpha_i. \quad (3)$$

其中:  $f_w$  为水温修正因子;  $f_p$  为水压修正因子;  $f_v$  为速度修正因子;  $f_l$  为自学习修正因子;  $f_b$  为反馈修正因子;  $\alpha_i$  为基准水冷换热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ . 其中, 水温修正因子、水压修正因子及速度修正因子统称为换热系数修正因子.

### 2.2 超快冷基础组态的设定

超快冷集管开启根数相同的条件下, 超快冷集管开启位置的不同对超快冷出口温度实测值及带钢芯表温差影响明显. 为确定超快冷集管组态对带钢温度场的影响, 采用有限差分的方法, 对带钢超快冷过程中温度场进行了模拟. 模拟过程中, 将超快冷部分依据集管排布, 分为 30 个冷却区, 超快冷集管的开启与关闭分别对应水冷与空冷. 结合现场实测数据, 利用反算法确定超快冷水冷对流换热系数为  $12\,000 (\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K})$ , 空冷对流换热系数为  $100 (\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K})$ . 图 2 给出了超快冷集管开启位置对带钢温度的影响规律.

图 2a 采用前段集中开启模式, 设定组态为  $\{1111111111\}$ ,  $\{1111100100\}$ ,  $\{1001001001\}$  (1 表示集管开启, 0 表示集管关闭); 图 2b 采用均匀开启模式, 设定组态为  $\{1101101101\}$ ,  $\{1011011011\}$ ,  $\{0110110110\}$ ; 图 2c 采用后段集中开启模式, 设定组态为  $\{1001001001\}$ ,  $\{0010011111\}$ ,  $\{1111111111\}$ .

由图 2 知超快冷集管开启根数相同的情况下, 超快冷集管前段集中开启, 有利于减小 UFC-T 波动幅度, 但不利于带钢厚度方向冷却均匀性. 超快冷集管后段集中开启, 不利于带钢厚度方向

冷却均匀性及 UFC-T 控制精度. 综合考虑带钢芯表温差及 UFC-T 控制精度, 设定超快冷初始

组态以均匀模式开启.

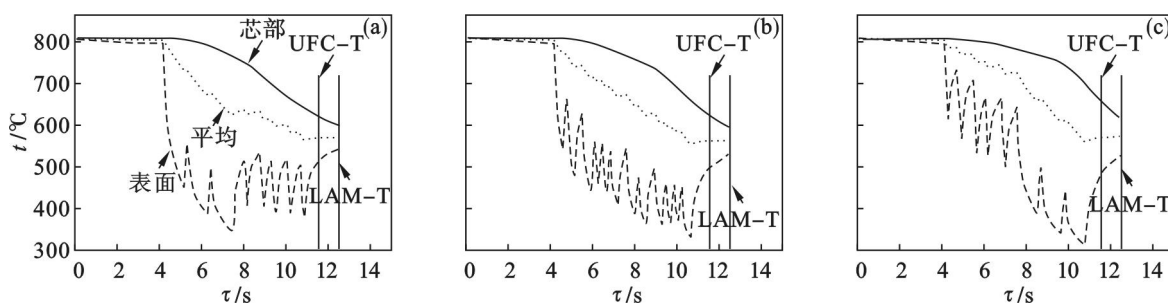


图 2 带钢厚度方向温度分布

Fig. 2 Temperature field along steel thickness

(a) 前段集中开启; (b) 均匀开启; (c) 后段集中开启.

### 2.3 超快冷集管增开策略

大型热连轧线精轧过程通常采用升速轧制. 采用合理的开启策略处理超快冷集管的增开过程意义重大, 超快冷增开集管的过程: 超快冷保持当前组态条件下, 随带钢速度的增加, 超快冷出口温度呈上升趋势, 当带钢速度达到临界值时, 超快冷增开一组集管, 超快冷出口温度下降. 集管增开后

的超快冷出口温度与目标值的偏差应小于或等于集管增开前的偏差. 随带钢速度的上升, 依次循环, 实现超快冷集管的增开过程.

超快冷增开过程中, 集管位置的不同会直接影响带钢超快冷出口温度及带钢厚度方向温度分布. 图 3 给出了带钢不同轧制速度下, 超快冷集管增开位置与温度的关系.

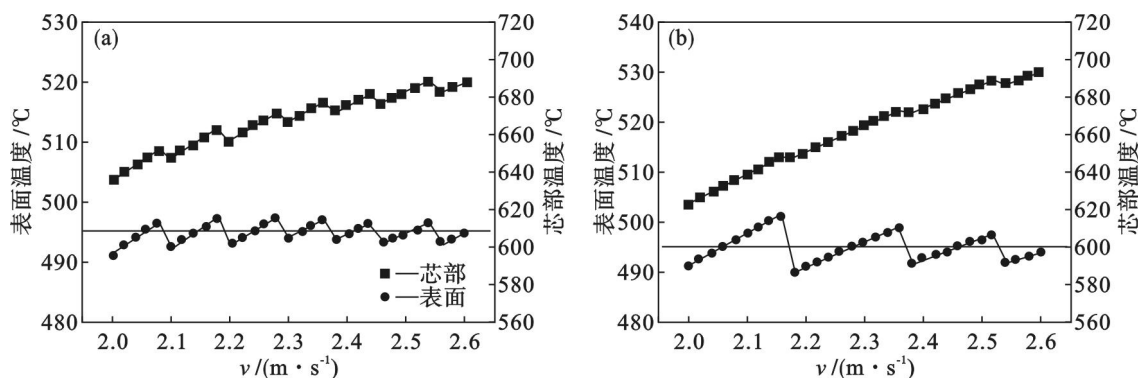


图 3 超快冷集管增开过程对带钢温度分布影响

Fig. 3 Effects of additional open process of UFC header jets on strip temperature distribution

(a) 正向开启; (b) 逆向开启.

由图 3 可知, 随带钢速度的增加, 采用正向增开策略, 有利于控制精度的提高及带钢厚度方向的温度均匀性.

## 3 超快冷自适应系统的开发

带钢超快速冷却过程中, 带钢表面质量、测温环境等因素对控制精度的影响不容忽视. 为缓解甚至排除上述因素的干扰, 进一步提高控制精度, 实现带钢生产过程中的自动化、智能化, 开发了超快冷自适应系统. 自适应系统主要包括自学习及反馈两部分.

### 3.1 自学习功能的开发

自学习的基本原理是根据当前钢温度实测值

与预测值的偏差, 采用相应的修正算法, 得出自学习系数, 通过对模型中的换热系数的修正提高温度的控制精度.

采用分段控制方法, 将超快冷部分依定长  $l$  离散成  $s$  个冷却区, 同时将带钢依  $l$  离散成  $n$  个样本段, 通过对带钢样本的微跟踪, 得出带钢各样本段温度实测值与预测值的偏差. 结合其他工艺参数, 计算出带钢当前样本自学习系数, 具体计算方法如下.

$$f_{ik} = \frac{\ln\left(\frac{t_u^m - t_w}{t_f^m - t_w}\right) + \sum_{i=\text{aircooling}} \frac{-2\alpha_i^c \alpha_i^c}{c(t)\rho\delta}}{\ln\left(\frac{t_u^c - t_w}{t_f^c - t_w}\right) + \sum_{i=\text{aircooling}} \frac{-2\alpha_i^c \alpha_i^c}{c(t)\rho\delta}} \quad (4)$$

式中:  $f_{ik}$  为带钢第  $k$  个样本自学习系数;  $t_u^m$  为超快冷出口温度实测值,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_f^m$  为开冷温度实测值,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_u^c$  为超快冷出口温度预测值,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_f^c$  为开冷温度预测值,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\frac{-2\alpha_i^c \alpha_i^c}{c(t)\rho\delta}$  为空冷换热修正系数计算值。

采用 3 点自学习方式, 取带钢特定位置的多样本段分别作为头、中、尾自学习区。为保证自学习系数的稳定性及收敛性, 基于有效性判断, 自学习系统对自学习区的多个样本段瞬时学习系数进行平滑处理, 分别得出带钢头、中、尾自学习系数。具体流程见图 4。

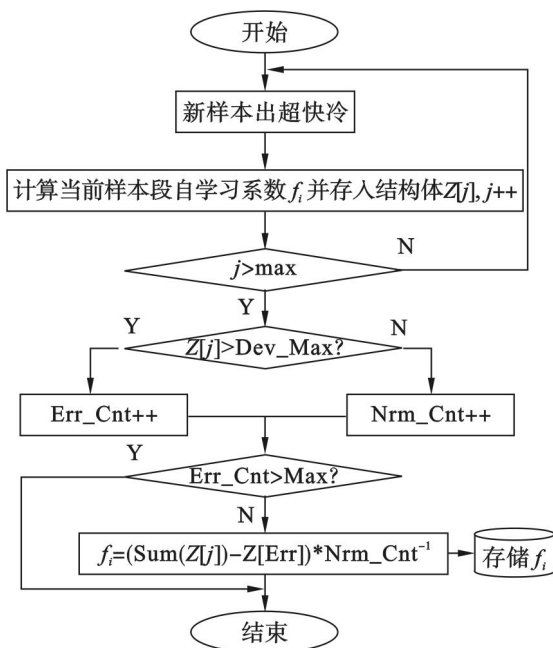


图 4 自学习参数平滑处理流程

Fig. 4 Flow chart for smooth processing of self-learning parameters

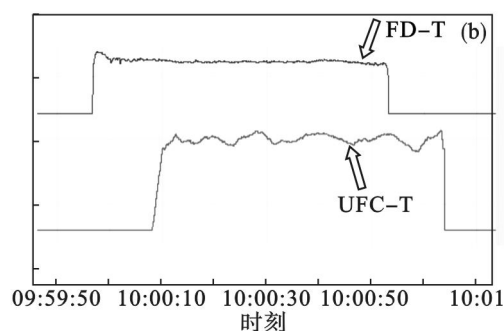
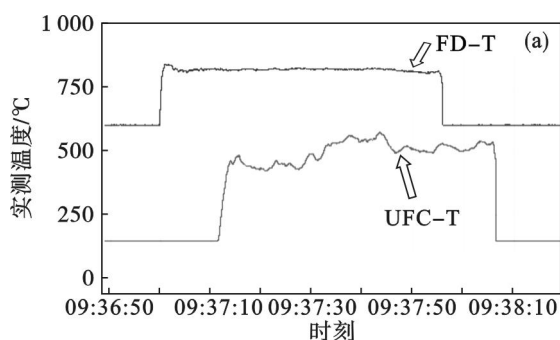


图 5 优化前后 UFC-T 实测曲线对比

Fig. 5 Comparison of measured UFC-T curves before and after optimization

(a)—改进前; (b)—改进后。

## 5 结 论

基于传热学基本理论, 建立了 X80 管线钢超快冷基础换热模型, 结合超快冷阀门的开闭, 实现超快冷出口温度的精确计算; 研究了超快冷开启策略对带钢 UFC-T 波动及芯表温差的影响规

## 3.2 反馈功能的开发

自学习功能利用当前钢换热系数计算偏差, 修正下卷钢换热系数的计算过程, 而当前钢换热系数的实时修正, 则通过反馈功能完成。反馈功能的基本原理是通过超快冷出口温度预测值与实际值的偏差, 实时修正带钢换热系数, 保证冷却区及未出轧机带钢温度的控制精度。修正模型为

$$t_f^m - t_u^m = \sum_{\text{water}} \int_0^{t_{wi}} \frac{-2\alpha_w^m}{c(t)\rho\delta} dt + \sum_{\text{air}} \int_0^{t_{ai}} \frac{-2\alpha_a^m}{c(t)\rho\delta} dt. \quad (5)$$

式中:  $\alpha_w^m$  为水冷对流换热系数实际值;  $\alpha_a^m$  为空冷换热系数实际值。

此处假设:  $\alpha_a^m = \alpha_a^c$ , 即空冷换热系数实际值等于计算值, 则求得水冷换热系数实测值  $\alpha_w^m$ 。

$$f_b = \frac{\alpha_w^m}{\alpha_w^c}. \quad (6)$$

式中:  $f_b$  为反馈修正系数, 用于实时修正超快冷水冷换热系数。

## 4 现场应用效果

基于上述措施, X80 超快冷出口温度  $\pm 20^{\circ}\text{C}$  命中率得到显著提高。图 5 给出了改进前后的 UFC-T 实测曲线对比结果。

由图 5 可知, 改进前超快冷出口温度呈现明显波动状态, 一方面降低了 UFC-T 控制精度, 同时不利于后续层流冷却对卷取温度的控制; 改进后, 超快冷出口温度控制精度大幅提高, 为现场稳定生产提供了有力保障。

律, 开发了 X80 管线钢超快冷冷却策略, 实现了带钢升温轧制过程中, 超快冷出口温度的高精度控制; 采用自学习与反馈协同应用的自适应系统, 实现 X80 超快冷出口温度的实时修正及卷间修正; 将上述成果应用到实际生产, 结果表明, X80 的 UFC-T 控制精度得到显著提高, 为稳定生产提供了支撑。

(下转第 1440 页)