

变速轧制下超快冷系统工艺温度在线实时修正策略

李振垒, 陈冬, 袁国, 王国栋
(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)

摘 要: 结合某现场超快速冷却系统, 具体分析了带钢运行速度变化对轧后冷却过程换热系数与冷却时间的影响规律. 根据速度运行机制, 开发了速度在线修正计算策略, 实现了轧后冷却区带钢速度计算值与实际值的吻合; 并在此基础上开发的工艺温度在线循环计算策略, 消除了速度波动对温度控制的影响, 提高了温度控制精度. 将该温度在线实时修正策略应用于现场, 实现了超快冷出口温度与卷取温度的精确控制, 工艺温度命中率在 96% 以上, 有效消除速度对温度波动的影响, 完全满足新产品、新工艺的工业化试制及大批量生产.

关 键 词: 热轧板带钢; 超快速冷却; 温度控制; 速度在线修正; 温度在线修正

中图分类号: TG 335.42 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2019)01-0037-06

On-Line Correction Strategy for Processing Temperature in Ultra-fast Cooling System Under Variable Velocity Rolling

LI Zhen-lei, CHEN Dong, YUAN Guo, WANG Guo-dong
(State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.
Corresponding author: LI Zhen-lei, E-mail: tsenlylee@163.com)

Abstract: Based on the ultra-fast cooling system of a certain plant, the effect of various velocity of hot-rolled strip on the transfer coefficient and cooling time was analyzed. According to the velocity mechanism during producing, on-line corrected control strategy of velocity was developed and the calculated velocity is accurately matched the measured value. Based on the above strategies above, an on-line correction strategy for processing temperature was developed to eliminate the influence of velocity fluctuation on temperature deviation so that the accuracy to control processing temperature was improved. By proposing such on-line correction strategy to an on-site operation, the ultra-fast cooling delivery temperature and coil temperature can be well controlled, the temperature deviation affected by velocity fluctuation is effectively eliminated, and the hit rate of process temperature is more than 96%, which lays solid foundation for new product development and mass industrialized production.

Key words: hot-rolled strip; ultra-fast cooling; temperature control; on-line velocity correction; on-line temperature correction

在建立生态化钢铁轧制技术体系, 实现“绿色制造与制造绿色”的背景下, 新一代 TMCP 应用到常规热轧板带钢新产品成分设计中, 通过减少化学成分含量, 深度挖掘钢材潜能, 逐步形成成熟的绿色制造工艺^[1]. 超快冷技术是新一代 TMCP 技术的核心, 在其应用过程中, 实现对超快冷设备出口温度 (UFCT) 与卷取温度 (CT) 的精确控制, 对采用减量化的化学成分或工艺控制路线生产高性能产品和提高产品质量具有重要意义^[2-3].

在低成本产品生产过程中, 大多数热连轧生产线都采用升速轧制工艺^[4-6], 带钢表面换热特性及其通过各冷却段运行时间差别较大, 在带钢变速运行时, 系统需要对带钢各样本段实现工艺温度的精确控制^[7-9]. 变速轧制过程中, 若不充分考虑速度波动对温度的影响, 在速度增加或降低

时,若反馈段调节能力有限,容易使带钢的工艺温度突然升高或降低,造成一定长度的带钢工艺温度超出工艺允许的温度波动范围,致使产品性能无法满足力学性能需求;尤其是在高品质钢生产过程中,对工艺温度控制精度要求更高,为了实现工艺温度的高精度控制,需要深入研究影响温度控制精度的关键因素,以保证产品质量和产品合格率。本文主要结合现场,研究超快冷生产过程中速度变化对换热系数和冷却时间的影响,开发速度和工艺温度在线修正策略,以消除速度波动对温度精度控制影响。

1 速度变化对温度的影响

热轧带钢正常生产时,带钢实时运行速度时变性很强,随时间变化较大^[10-11]。自带钢头部在精轧机末机架穿带到带钢尾部卷取完成期间,遍历带钢头部低速穿带、加速运行、高速轧制、尾部爬行减速等过程^[7,12]。

1.1 速度变化对换热系数的影响

带钢在超快速冷却过程中,水冷换热系数如式(1)所示^[2,7]。当带钢的厚度 h 、带钢起始冷却温度 T 、冷却水温度 T_{aw} 、冷却水压 P_{ap} 均为固定值时,简化后的换热系数如式(2)所示。

$$\alpha_{wac} = \alpha \cdot A_1 \cdot \frac{Q_{sum}}{BL} \cdot \exp(-A_2 \cdot (T - T_{aw})) \cdot \left(\frac{h}{h_0}\right)^{A_3} \cdot \left(\frac{T_0}{T_{aw}}\right)^{B_1} \cdot \left(\frac{v_{av}}{v_0}\right)^{B_2} \cdot \left(\frac{P_{ap}}{P_0}\right)^{B_3} \quad (1)$$

$$\alpha_{wac} \propto A \cdot \left(\frac{v_{av}}{v_0}\right)^B \quad (2)$$

式中: α_{wac} 为等效水冷换热系数; v_{av} 为带钢在冷却区实际运行速度, m/s; v_0 为运行速度基准值, m/s; A 为水冷换热系数调节因子; B 为速度影响参数; L 为带钢冷却样本长度, m; h_0 , T_0 和 P_0 分别为厚度、温度和压力基准值。

选取国内某热轧生产线正常生产时的钢种 Q345B, 厚度分别为 7.5 ~ 9.0 mm 和 15.75 ~ 17.75 mm。带钢运行速度对水冷过程中换热系数影响因子为 f , 则 f 与带钢实际运行速度关系如图 1 所示。

换热系数 α_{wac} 与带钢运行速度 v 呈幂函数减少的趋势, 当带钢速度一致时, 冷却过程中水冷换热系数与带钢运行速度随 B 的变化呈指数函数关系。因此, 通过精确计算带钢各样本段在轧后冷却区各微元冷却段下的实际运行速度及实际冷却时间, 消除因速度偏差对温度控制造成的波动, 保证带钢各样

本段温度的控制精确。

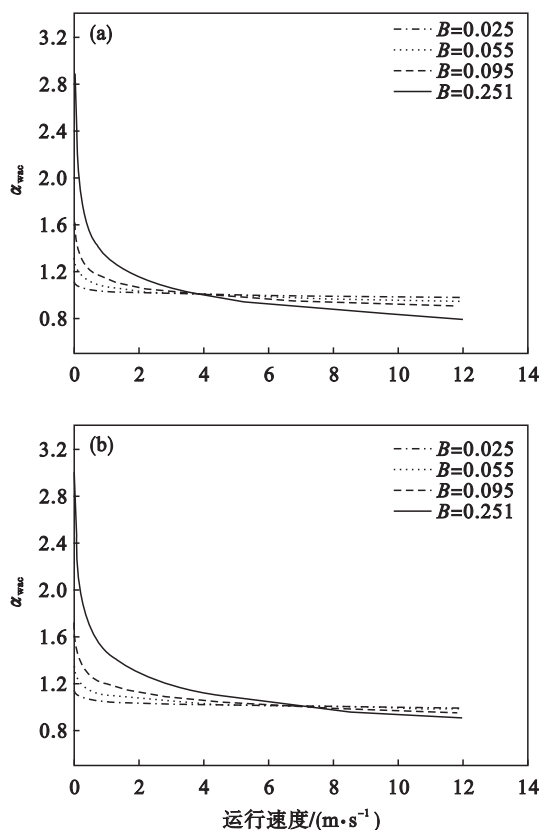


图 1 带钢运行速度对水冷换热的影响

Fig. 1 Effect of the velocity of hot-rolled strip on water heat transfer

(a)— $v_0 = 4.5$ m/s; (b)— $v_0 = 7.5$ m/s.

1.2 速度对带钢冷却时间的影响

在轧后冷却区运行的带钢, 令 $t_{i,j}$ 为带钢第 i 样本经过第 j 冷却单元的运行时间, 则 $t_{i,j}$ 计算公式为

$$t_{i,j} = \frac{2L}{v_{i,j} + v'_{i,j}} \quad (3)$$

式中: $v_{i,j}$ 为样本 i 在轧后冷却第 j 冷却入口带钢速度, m/s; $v'_{i,j}$ 为样本 i 在轧后冷却第 j 冷却区出口速度, m/s。

选取国内某热轧现场实际生产的热轧产品 M3A32, 带钢厚度为 4.5 mm, 穿带速度为 8.0 m/s, 带钢实时速度与样本在冷却区运行时间如图 2a 所示。图 2b 所示为带钢第 3, 30, 60 和 90 样本实时运行速度及在各冷却区的冷却时间。其中, 样本号是根据样本长度(指定长度)将带钢自头部开始到尾部结束, 以样本长度划分带钢, 带钢头部第一个指定长度为样本 1, 向带钢尾部依次编号。冷却区是将终轧温度(FDT)至 CT 之间冷却段长度, 以样本长度将其划分为若干冷却段, CT 处冷却区为第 1 冷却区, 向 FDT 方向依次编号。

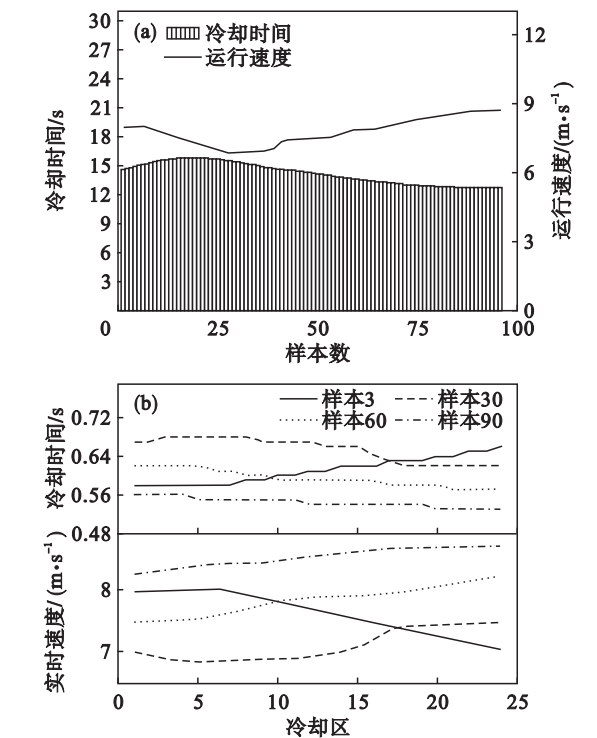


图 2 冷却时间与速度关系
Fig. 2 Relationship between cooling time and velocity
(a)—运行速度与冷却时间关系;
(b)—样本实时速度及冷却时间.

热轧带钢在冷却区运行过程中速度越大时,运行时间越短.在带钢钢种、厚度确定的前提下,轧后冷却区各冷却微元长度保持一致,因此,为了实现带钢长度方向温度的高精度计算,消除速度大小变化对温度精度的影响,系统需要精确计算带钢通过各微冷却单元的有效运行时间,为控制冷却模型温度的精确计算提供准确的数据源.

2 在线修正策略

在对带钢长度方向温度进行控制时,需要精确计算带钢在轧后冷却区实际水冷时间和空冷时间,因此,需要计算带钢在各微元冷却区的实际运行历程,即时间-速度-距离(TVD)曲线;根据带钢每个样本*i*在轧后冷却区的实际TV D曲线,获取每个样本*i*经过轧后各微元冷却区*j*的运行速度和时间,结合轧后冷却区冷却集管开启状态,精确计算实际水冷和空冷时间.

2.1 速度在线修正计算

为了确保带钢长度方向温度控制精度,依据带钢厚度规格不同,选择合适的样本长度 L_s ,厚度越大, L_s 越小;根据所选择的样本长度 L_s ,在计算过程中将轧后有效冷却区以样本长度 L_s 平均划分*j*($j=1,2,\dots$)个微元冷却区.令带钢头端经过FDT的距离除以 L_s 为样本号*i*($i=1,2,\dots$),样本*i*头端开始进入冷却区*j*的速度为 $v_{i,j}$,样本*i*尾端离开微元冷却区*j*的速度为 $v'_{i,j}$,样本*i*自头端进入微元冷却区*j*至尾端离开的时间为 $t_{i,j}$.为了精确计算样本*i*在轧后冷却区的有效水冷时间和空冷时间,需要精确计算 $t_{i,j}$,依据 $t_{i,j}$ 及相关模型参数计算各样本*i*由终轧温度(FDT)冷却到目标终冷温度所需要的冷却水量.

如图3所示,在线循环修正设定计算过程中,根据精轧设定数据和带钢实测速度等信息,实时计算带钢在轧后冷却区的TV D曲线,并根据速度

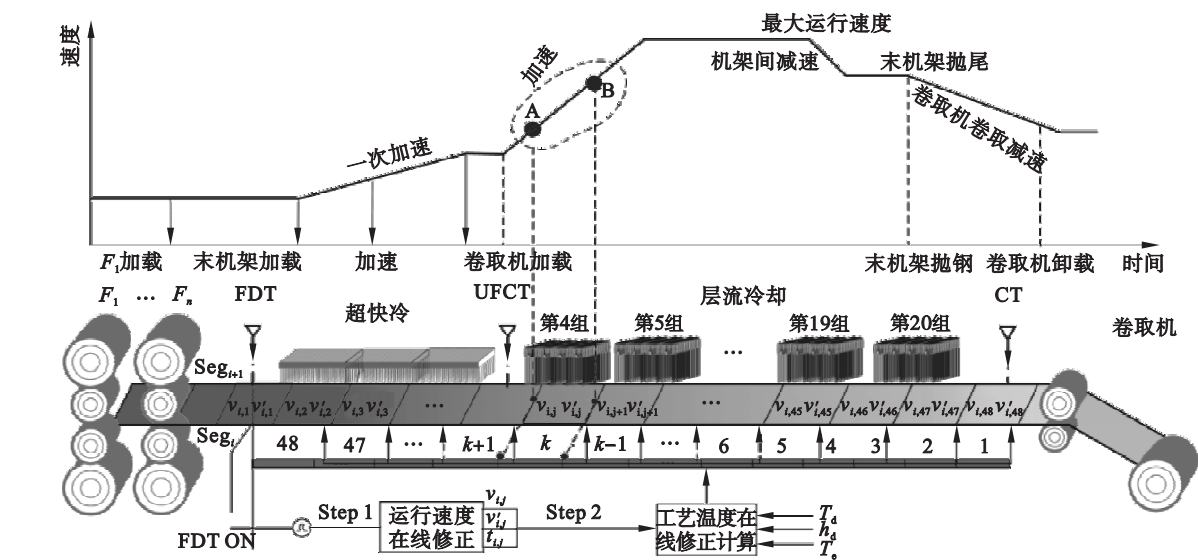


图 3 在线修正计算
Fig. 3 On-line correction calculation

变化对TV D曲线进行修正.选取厚度为5.75 mm的带钢,根据厚度所属层别,微元冷却区为48,根据TV D曲线,实时计算 $v_{i,j}$, $v'_{i,j}$ 和 $t_{i,j}$.

2.2 工艺温度实时修正策略

为了实现温度的精确控制,以带钢样本头端经过 FDT 时为新增样本触发时刻,每当带钢头端经过 FDT 一个样本距离时,模型首先触发带钢样本速度实时修正计算,并对已进入冷却区所有样本 i 经过每个微元冷却区 j 的运行信息 $v_{i,j}$, $v'_{i,j}$ 和 $t_{i,j}$ 进行更新. 依据接收到的钢种属性、实测厚度 h_d 、开始冷却温度 T_d 、目标终冷温度 T_c , $v_{i,j}$, $v'_{i,j}$ 和 $t_{i,j}$ 等信息,对在冷却区所有带钢样本 i 的温度再

次计算,根据计算后的控制信息,对在冷却区的带钢样本控制信息进行更新,之后依据带钢位置跟踪,将控制信息依次发送给执行系统.

随着带钢样本数量的不断更新,速度在线修正策略和工艺温度实时修正策略实时交替计算,直到带钢尾端离开 FDT,计算终止. 带钢样本 i 在轧后冷却区内工艺温度实时修正策略循环进行更新,主要计算步骤如图 4 所示.

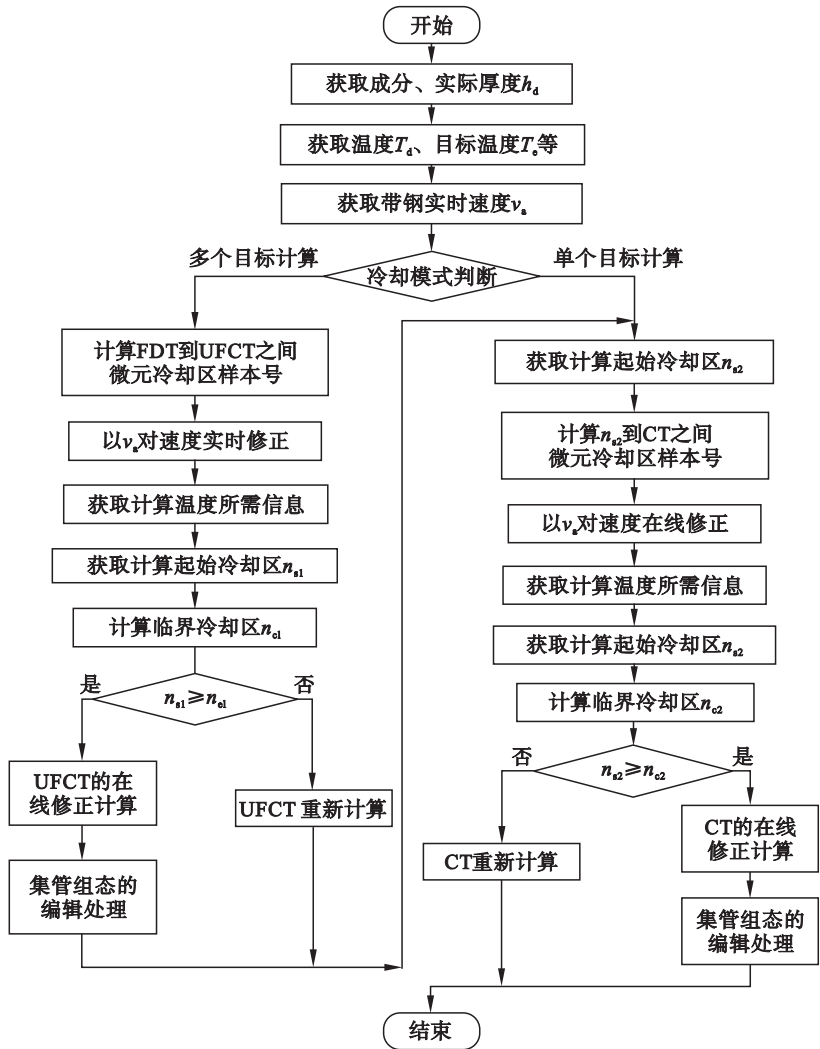


图 4 温度实时修正策略
Fig. 4 On-line correction strategy for temperature

1) 数据层别的划分及冷却模式的确定. 根据接收到 PDI (primary data input) 信息及 FSU (finish mill set up) 信息,将待进入冷却区的带钢进行层别的划分,获取带钢冷却工艺参数所在层别的物性参数. 并根据工艺要求,判断单目标控制模式(只控制 CT 的精度)还是多个目标控制模式(同时对 UFCT 和 CT 进行温度控制). 系统为单目标控制模式时,计算转步骤 3);系统为多个目标控制模式时,计算流程转步骤 2).

2) UFCT 和 CT 的实时修正计算. 首先,对 UFCT 进行修正计算;根据带钢实际速度,对 FDT 到 CT 之间带钢所有样本 i 的运行状态重新计算,根据再计算的数据,判断临界点 n_{c1} ;以 FDT 为开冷温度,UFCT 为终冷温度,对 FDT 至临界冷却区 n_{c1} 之间的带钢样本进行温度的实时修正计算,带钢样本号每更新一次,速度与温度实时修正计算一次;其次,对 CT 进行修正计算,首先确定 CT 临界冷却区 n_{c2} ,对 UFCT 和 n_{c2} 之间的带钢样本

进行实时修正计算,根据样本数量的变化,实时对 CT 进行修正计算;之后,对计算 UFCT 和 CT 的冷却组态进行统一编辑处理,根据带钢位置的跟踪,对冷却内有效样本的控制信息进行实时修正更新,实现 UFCT 和 CT 的高精度控制。

3) CT 的实时修正计算. 首先,对 FDT 到 CT 之间所有样本的速度运行信息进行实时修正计算,根据修正后的信息,查找临界点 n_{c2} ,对处于临界点与 FDT 之间的样本 i 进行再计算,并对计算后的组态进行更新修正;之后,依据带钢跟踪信息,对处在 FDT 和 n_{c2} 之间所有样本的控制信息(集管开启组态)进行逐次修正,实现对 CT 的高精度控制。

3 应用效果

在实际生产过程中,采取 TVD 曲线计算算法及实时修正策略,有效消除因速度波动对工艺温度控制精度造成的波动. 在变速轧制下,首先对速度采用在线修正计算,修正带钢各样本在各微元冷却区下的运行速度;其次,对样本的温度实时修正计算,并不断更新样本控制信息. 典型厚度带钢计算速度与实测速度对比如图 5a 所示,某钢厂生产低合金 Q345B 时的实际温度控制曲线如图 5b 所示。

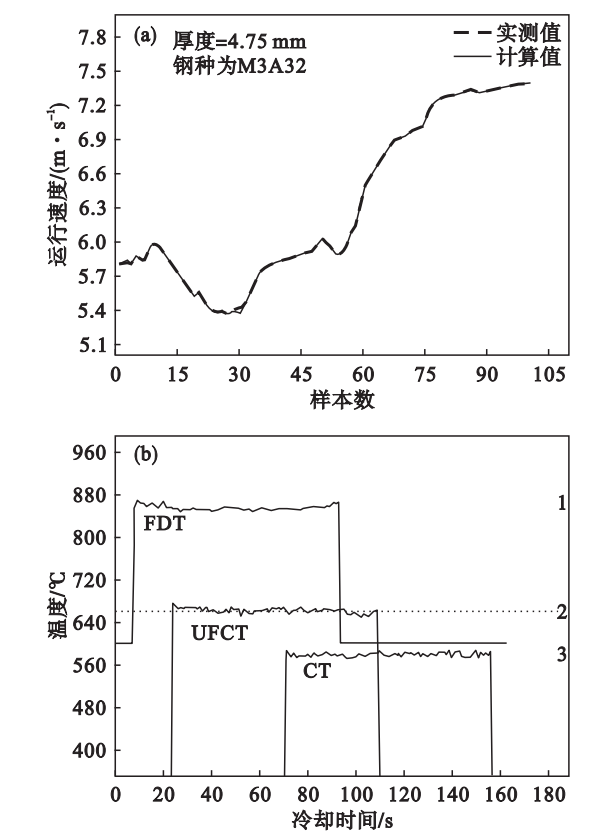


图 5 速度及温度曲线
Fig. 5 Curves of velocity and temperature
(a)—速度曲线; (b)—温度曲线。

该控制策略实现了轧后冷却工艺温度的精确控制,带钢长度方向 UFCT $\pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度命中率约 96.5%;带钢长度方向卷取温度 CT $\pm 18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 命中率约 96.1% 以上,系统运行稳定,为热轧板带钢品种开发提供了技术支持与保障. 采用该控制策略后,轧后冷却工艺温度控制精度平均提高 1% ~ 2%,尤其是在速度波动较大时,效果更佳。

4 结 论

1) 本文针对带钢轧制速度变化范围大、时变性较强,对温度控制精度影响大的问题,采用开发的速度在线修正计算策略,确保带钢各样本 i 通过轧后各微元冷却区 j 的计算速度与带钢实测速度一致,精确计算带钢各样本经过轧后冷却区的实际冷却时间,为温度的在线修正计算提供了可靠数据源。

2) 开发的工艺温度实时修正策略,采用实时修正带钢各样本控制信息,消除了因带钢计算速度与实际速度的偏差对各样本段工艺温度控制精度的影响,实现了轧后冷却工艺温度的精确控制及系统的稳定运行,为产品的开发提供了技术保障。

参考文献:

[1] 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.)

[2] Li Z L, Li H J, Yuan G, et al. Research and application of ultra-fast cooling system and velocity controlled strategy for hot rolled strip [J]. Steel Research International, 2015, 86(5): 478-488.

[3] Li Z L, Yuan G, Han Y, et al. Research on radial direction temperature change law of coil and control strategy for ultra-fast cooling [J]. Metallurgical Research and Technology, 2015, 112(1): 1-12.

[4] Zheng Y, Li S Y, Wang X B. Distributed model predictive control for plant-wide hot-rolled strip laminar cooling process [J]. Journal of Process Control, 2009, 19(1): 1427-1437.

[5] Lawrence W J, MacAlister A F, Reeve R J. Online modeling and control of strip cooling [J]. Ironmaking and Steelmaking, 1996, 23(1): 74-78.

[6] Wang J, Wang G D, Liu X H. Hot strip laminar cooling control model [J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2004, 11(5): 13-17.

[7] 李振奎. 基于超快速冷却的热轧带钢轧后冷却系统与策略研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2015.
(Li Zhen-lei. Research of cooling control system and control strategy after rolling based on UFC for hot rolled strip [D].

Shenyang:Northeastern University,2015.)

- [8] Xing G,Ding J,Chai T, et al. Hybrid intelligent parameter estimation based on grey case-based reasoning for laminar cooling process [J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*,2012,25(2) :418 – 429.
- [9] Wang B X,Chen X L,Tian Y, et al. Calculation method of optimal speed profile for hot plate during controlled cooling process [J]. *Journal of Iron and Steel Research, International*,2011,18(5) :38 – 41.
- [10] Guo R M. Modeling and simulation of run-out table cooling control using feedforward-feedback and element tracking

system [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1997,33(2) :304 – 311.

- [11] Edalatpour S,Saboonchi A,Hassanpour S. Effect of phase transformation latent heat on prediction accuracy of strip laminar cooling [J]. *Journal of Materials Processing Technology*,2011,211(11) :1776 – 1782.
- [12] Li H J,Li Z L,Guo Y, et al. Development of new generation cooling control system after rolling in hot rolled strip based on UFC [J]. *Journal of Iron and Steel Research, International*,2013,20(7) :29 – 34.

(上接第 36 页)

- [3] Feng Q X,Li L F,Yang W Y, et al. Microstructures and mechanical properties of hot-rolled Nb-microalloyed TRIP steels by different thermo-mechanical processes [J]. *Materials Science and Engineering:A*,2014,605:14 – 21.
- [4] Fu B,Yang W Y, Lu M Y, et al. Microstructure and mechanical properties of hot-rolled C-Mn-Al-Si TRIP steels with and without Nb based on dynamic transformation[J]. *Materials Science and Engineering:A*,2012,536:265 – 268.
- [5] Jun H J,Park S H, Choi S D, et al. Decomposition of retained austenite during coiling process of hot rolled TRIP-aided steels[J]. *Materials Science and Engineering:A*,2004, 379:204 – 209.
- [6] Park H S,Seol J B, Lim N S, et al. Study of the decomposition behavior of retained austenite and the partitioning of alloying elements during tempering in CMnSiAl TRIP steels[J]. *Materials and Design*,2015,82;

173 – 180.

- [7] Sugimoto K I,Usui N,Kobayashi M, et al. Effect of volume fraction and stability of retained austenite on ductility of TRIP-aided dual-phase steels[J]. *ISIJ International*,1992,32 (12) :1311 – 1318.
- [8] Dijk N H, Butt A M, Zhao L, et al. Thermal stability of retained austenite in TRIP steels studied by synchrotron X-ray diffraction during cooling [J]. *Acta Materialia*, 2005, 53: 5439 – 5447.
- [9] Godet S,Jacques P J. Beneficial influence of an intercritically rolled recovered ferritic matrix on the mechanical properties of TRIP-assisted multiphase steels[J]. *Materials Science and Engineering:A*,2015,645:20 – 27.
- [10] Hosseini S M K, Abbass Z H, Steve Y. Effect of austenite deformation in non-recrystallization region on microstructure development in low-silicon content TRIP-assisted steels[J]. *Materials Science and Engineering:A*,2014,618:63 – 70.