

# 包钢 CSP 生产线后段超快冷系统水压控制方法

石建辉<sup>1</sup>, 袁国<sup>1</sup>, 张勇<sup>2</sup>, 王国栋<sup>1</sup>

(1. 东北大学 轧制技术与连轧自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819;

2. 包头钢铁有限责任公司 薄板坯连铸连轧厂, 内蒙古 包头 014010)

**摘 要:** 为了保证 CSP 热轧双相钢后段超快速冷却生产的稳定及产品组织的均匀性, 需实现带钢生产过程中冷却水压力的高精度控制. 结合包钢 CSP 后置超快冷设备和工艺特点, 针对带钢冷却过程中集管压力波动问题, 分别设计了动力泵压力闭环与溢流阀模糊控制的联合控制法及动力泵压力闭环与溢流阀压力闭环联控控制法. 实际应用效果表明, 采用该控制方案, 带钢冷却过程中头尾段集管压力控制在  $0.85 \pm 0.05$  MPa, 带钢中间段集管压力控制在  $0.85 \pm 0.01$  MPa, 实现了低成本热轧双相钢后段超快冷过程供水压力的高精度控制, 很好地满足了该厂 CSP 热轧双相钢的生产需求.

**关键词:** CSP; 超快速冷却; 水压; 干头; 干尾; 控制方法

中图分类号: TG 335.5 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2015)04-0474-05

## Hydraulic Pressure Control Method in Rear Ultra-Fast Cooling System of Baotou CSP Production Line

SHI Jian-hui<sup>1</sup>, YUAN Guo<sup>1</sup>, ZHANG Yong<sup>2</sup>, WANG Guo-dong<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. Compact Strip Production Plant, Baotou Steel Co., Ltd., Baotou 014010, China. Corresponding author: SHI Jian-hui, E-mail: sjh051208@126.com)

**Abstract:** In order to ensure stable production and uniform microstructure of hot-rolled dual phase in CSP rear ultra-fast cooling (UFC), the high-precision control of the cooling water pressure should be achieved in strip production process. For the problem of the pressure fluctuation in the cooling process of strip, the methods which united power pump closed-loop control and valve fuzzy control, and interlocked power pump closed-loop control and valve closed-loop control were designed by binding technology and equipment features of Baotou CSP rear ultra-fast cooling system. It was found that the head-tail control range of collector pipe pressure is  $0.85 \pm 0.05$  MPa, and the middle control range of collector pipe pressure is  $0.85 \pm 0.01$  MPa in the actual application. The high-precision control of the cooling water pressure is achieved in low-cost hot-rolled dual phase cooling process of the rear UFC system, and it satisfies the production requirement of hot-rolled dual-phase steel.

**Key words:** compact strip production(CSP); ultra-fast cooling; water pressure; uncooled head; uncooled tail; control method

基于超快速冷却技术在减量化生产中的积极作用,超快速冷却技术得到了快速发展<sup>[1-4]</sup>,目前后置式超快冷系统已成为开发生产低成本热轧双相钢的最重要技术手段.后置式超快速冷却设备配置,充分利用了超快速冷却具有的相变强化手

段<sup>[5]</sup>,并结合层流冷却,通过 CSP 热轧带钢生产过程的合理轧后冷却路径控制<sup>[6]</sup>,实现低成本高性能热轧带钢双相钢产品系列级别及规格的稳顺生产,进而不断丰富和完善系列化、特色化的热轧带钢双相钢产品,增强企业的市场竞争力.与常规

收稿日期: 2014-03-04

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAF04B01).

作者简介: 石建辉(1985-),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.

冷却控制方式不同,超快速冷却技术采用有压水对带钢进行冷却,为了保证超快速冷却条件下冷却路径的精准控制<sup>[7-9]</sup>,在带钢冷却过程中需要保证供水压力的稳定性及控制精度<sup>[10]</sup>.

超快冷供水压力和集管流量有极强的耦合性,在 CSP 热轧后段超快冷工艺中,供水压力和流量的影响因素主要有两方面:一方面是在带钢冷却过程中由于轧制速度、水温和初始温度等因素的变化,超快冷集管的组态需要调整,当带钢温度偏高时,集管开启数量会增加,进而总流量增加导致供水压力降低,反之会导致流量减少,压力升高;另一方面根据后置超快冷的工艺特点为了保护卷取设备,保证正常的卷取,后段超快冷还要实现干头、干尾(即头部尾部不冷却),超快冷集管需在短时间内全部打开或关闭,这时供水压力会产生较大的波动,给管道设备造成较大的冲击.

由于供水压力的稳定性是实现带钢温度精确控制的重要前提,因此需要对热轧后段超快冷供水压力和流量的耦合控制方法进行深入研究.根据后段超快冷工艺的特点并结合包钢 CSP 生产线超快冷系统升级改造项目工作,开发出一种供水系统和轧线溢流管道联合控制的压力控制方法,采用该控制方法能够同时满足供水压力和集管流量的控制精度和稳定性,取得了满意的应用效果,很好地满足了包钢系列 C-Mn 低成本热轧双相钢的开发生产需求.

### 1 干头、干尾的位置跟踪控制方法

后段超快速冷却设备安装在常规层流冷却设备出口,经过后段超快速冷却的带钢直接进入卷取机;另外由于后段超快速冷却工艺的特点,带钢在超快冷出口的温度需控制在 250℃ 以下,冷却到此温度下带钢的强度和硬度较高,不易卷取机的卷取.

基于以上原因,在普通卷取机的设备情况下,为了保障设备安全,减少废钢率,热轧带钢需在干头、干尾的控制方式下进行冷却.图 1 为干头、干尾冷却的位置跟踪控制方法.具体的控制原理如下:首先在带钢的头部和尾部位置跟踪准确的前提下,7#精轧机机架中心线(F7)为位置跟踪的零位置,每根集管的开启时刻为带钢头部的实际空间位置( $H$ )大于该集管到 F7 的距离( $W$ )与干头长度设定值( $a$ )之和( $A$ );而每根集管的关闭时刻为带钢的尾部实际空间位置( $T$ )大于该集管到 F7 的距离( $W$ )与干尾长度设定值( $b$ )的差值( $B$ );

同时考虑到阀门开启或关闭动作有延时滞后问题,为了提高干头和干尾实际长度的控制精度,增加了阀门的延时补偿功能模块 TB. 该控制方法根据判断预计算组态中需开启集管的相对位置与带钢的头部和尾部的空间跟踪位置关系,实现冷却集管的逐渐开启或关闭,进而实现带钢干头、干尾实际冷却长度的高精度控制.

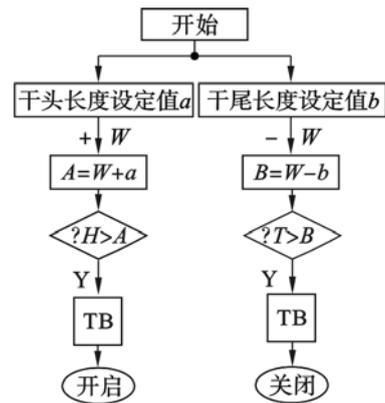


图 1 干头、干尾控制方法  
Fig. 1 Control method of uncooled head and uncooled tail

### 2 后置超快冷供水压力控制方法

某厂 CSP 热轧后置超快速冷却系统的泵站供水系统配备了 3 个动力泵,其中 2 个工频泵(一用一备),1 个变频泵.轧线主供水集管设计有 3 组溢流管路,每组溢流管路安装 1 个手动阀门和 1 个流量调节阀门.根据 CSP 后段超快速冷却轧制工艺的特点,带钢的整个冷却过程分为 4 个工况,根据这 4 个工况以及该厂的设备和工艺技术特点分别设计了 3 种控制方式,如图 2 所示.

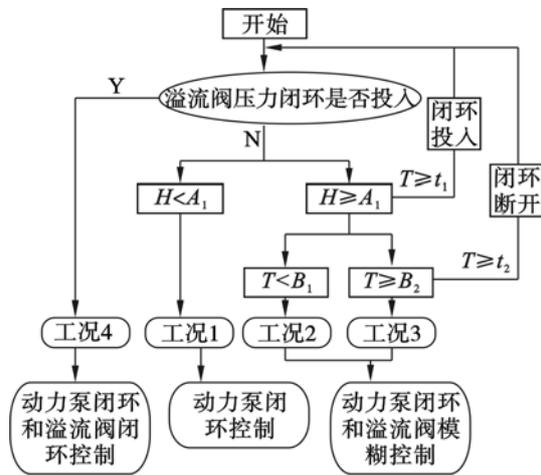


图 2 后置超快冷压力控制工况图  
Fig. 2 Pressure control method in rear ultra-fast cooling

2.1 动力泵压力闭环单独控制

工况 1 的情况下超快冷区域无带钢,轧线主供水集管的溢流阀一直保持特定的开口度不调节.在不同的工艺要求下溢流阀设定不同的开口度,此工况中集管的压力由泵站单独控制,工艺所需水流量由溢流阀调节,溢流阀开口度与工艺流量的关系如表 1 所示.

表 1 溢流阀开口度与工艺流量的关系  
Table 1 Relationship of opening degree and process flows

流量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	溢流阀开口度/%	
	使用 2 个管路	使用 3 个管路
2 500	28	20
3 000	35	24
3 500	41	29
4 000	48	35
4 500	55	42

2.2 动力泵压力闭环和溢流阀模糊控制的联合控制

工况 2 和工况 3 采用动力泵压力闭环和溢流阀开环联合控制,首先供水系统根据工艺流量要求确定动力泵的开启个数  $N$ ,超快冷压力控制系统根据动力泵开启个数  $N$  及溢流管可使用个数  $U$  来确定溢流阀初始开口度设定值  $K$ .当带钢头部  $H$ (尾部  $T$ ) 到达第一根开启集管的开启(关闭)位置  $A_1$ ( $B_1$ ) 时,溢流阀根据此刻的带钢速度  $S$  采用不同速度  $V$  逐渐关闭(打开),直到溢流阀开口度减小(增大)达到目标开口度  $K'$  后保持不变,此过程中泵站一直保持压力闭环控制.此控制方法根据不同工艺条件下带钢速度的不同共设计了 4 种速度范围,分别为  $[0 \sim 3 \text{ m/s}]$ ,  $[3 \sim 6 \text{ m/s}]$ ,  $[6 \sim 9 \text{ m/s}]$  和  $[9 \text{ m/s} \sim \infty]$ .根据这 4 种速度范围分别设定 4 种开启(关闭)的速度,同时同一速度范围内根据溢流阀瞬时的开口度情况也设定了多种变化速度,如图 3 所示.

2.3 动力泵压力闭环和溢流阀压力闭环的联锁控制

工况 4 时轧线集管压力变化的主要原因是超快冷系统为了满足带钢的温度控制要求,对集管开启数量进行微量调节所引起的.在实际生产中,由于该厂供水系统泵站离轧线集管距离较远,当集管压力偏差小于 0.05 MPa 时,单纯依靠动力泵的压力闭环控制已不能满足控制要求,主要表现为调节速度慢,滞后时间较长,而且压力波动偏差小问题越明显.因此设计了溢流阀压力闭环与动力泵压力闭环联锁控制的方法,当压力偏差大

于 0.05 MPa 时,集管压力仍由泵站单独控制;当压力偏差小于 0.05 MPa 时,根据溢流管的使用个数  $U$  及相应的初始开口度  $K$ ,增益值  $P$  和积分时间  $I$  等情况,溢流阀压力闭环控制也参与调节,如图 4 所示.

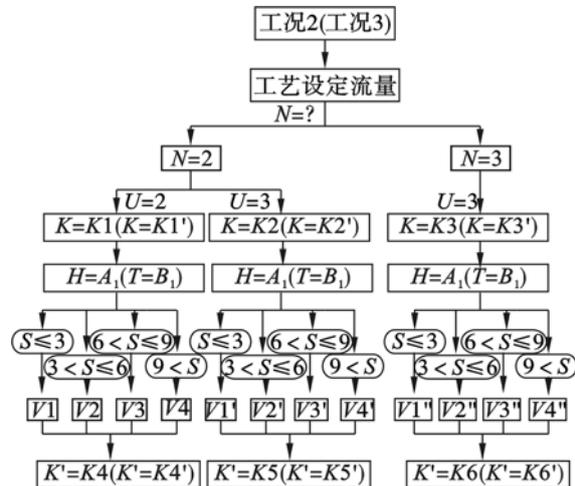


图 3 动力泵压力闭环和溢流阀模糊控制流程图  
Fig. 3 Joint control method between pressure closed-loop of power pump and open-loop of valve

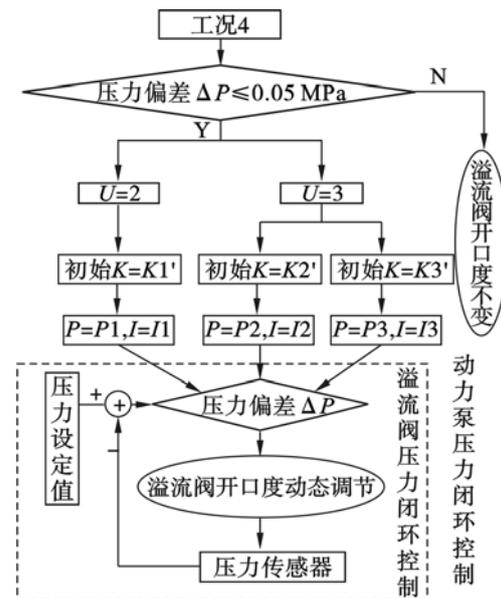


图 4 动力泵压力闭环和溢流阀压力闭环的控制流程图  
Fig. 4 Integrated control method between pressure closed-loop of power pump and closed-loop of valve

3 实际应用效果

针对 CSP 生产线后段超快冷控制系统的控制要求,并结合该厂超快速冷系统的设备和工艺特点,分别对动力泵单独控制方法和动力泵与溢流阀综合控制方法,在该厂进行了多次调试及实际生产应用,得到了这两种控制方式下带钢冷却

过程的压力变化规律,对比分析了两种控制方式下的控制效果.

### 3.1 动力泵单独控制效果

在动力泵单独控制方式下,带钢的干头及干尾冷却段压力波动较大,干头冷却时的最低压力值在 0.7 MPa 左右,在干尾冷却时的最高压力值在 1.0 MPa 左右,最大波动范围为 0.3 MPa 左右,对相关冷却设备造成了很大冲击.由现场测试的多条压力变化曲线总结出在该控制方式下带钢头部的压力波动调节时间为 35 s,带钢的中间段冷却过程中压力波动的调节时间为 15 s,因此在动力泵单独压力闭环的控制下暴露出了带钢头部及尾部压力波动大、达到平衡的调节时间长,同时在带钢中间段冷却压力波动小的情况下,控制系统压力调节也较滞后.图 5 为该控制方式下单卷钢冷却过程中的压力变化曲线.

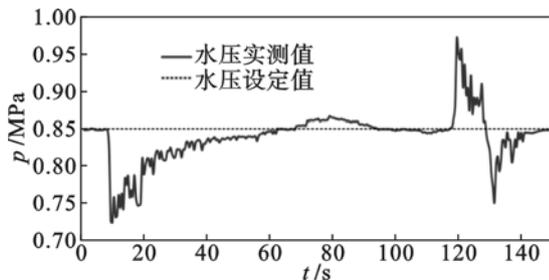


图 5 动力泵单独控制压力变化曲线  
Fig. 5 Pressure curves of individual control by power pump

### 3.2 动力泵和溢流阀综合控制效果

经过对该厂 CSP 生产线热轧双相钢的多次生产轧制调试,在动力泵压力闭环和溢流阀模糊控制的方式下,带钢的干头和干尾冷却段集管内压力基本控制在 0.82 ~ 0.87 MPa 之间;在动力泵压力闭环和溢流阀闭环控制的连锁控制方式下,带钢中间段的冷却过程中集管压力值控制在 0.84 ~ 0.86 MPa 之间,所以在动力泵和溢流阀综

合控制方式下,整卷带钢的冷却过程中压力控制精度较高、稳定性较好.带钢冷却过程中压力变化曲线如图 6 所示.

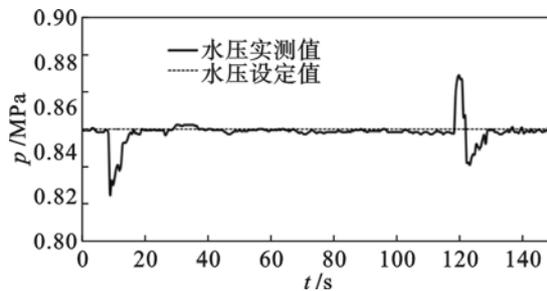


图 6 动力泵和溢流阀综合控制压力变化曲线  
Fig. 6 Pressure curves of integrated control by power pump and relief valve

在该控制方式下热轧双相钢超快冷出口温度的控制精度也达到了较高水平,后段超快冷出口带钢全长(不含干头干尾部分)温度在目标温度  $\pm 20^\circ\text{C}$  范围内的命中率达 92% 以上.图 7 为在动力泵和溢流阀综合控制方式下生产 DP590 (11 mm) 时带钢的冷却温度变化趋势图,图中 FDT 为精轧机出口温度,MT 为中间温度,UFCT 为超快冷出口温度,虚线为目标温度.

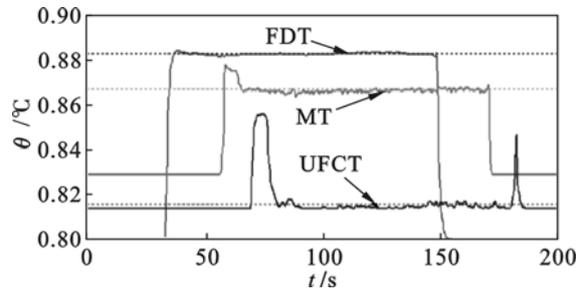


图 7 DP590 (11 mm) 的温度变化曲线  
Fig. 7 Temperature curves of DP590 (11 mm)

同时在该控制方式下生产出的热轧双相钢产品组织均匀性好、软硬相组织清晰、比例匹配、强度合理.图 8 为在该控制方式下生产出的 DP540

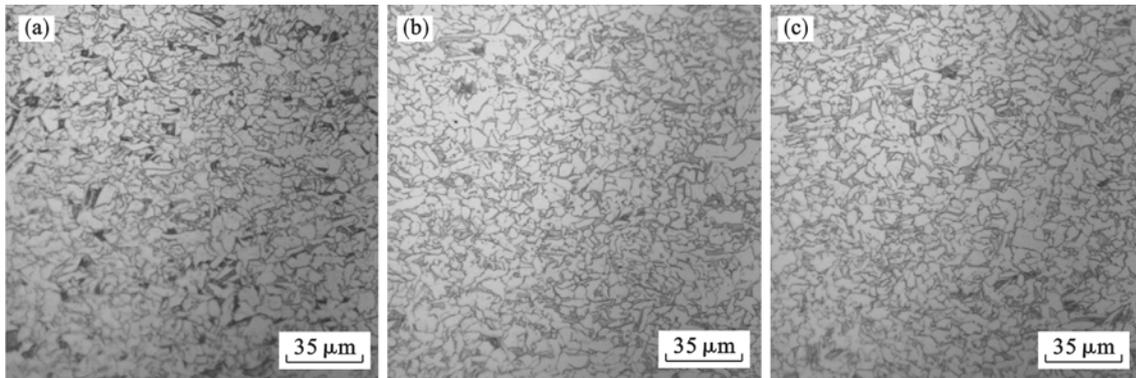


图 8 升级改造后的双相钢显微组织  
Fig. 8 Microstructures of dual-phase steel after upgrading  
(a)—头部; (b)—中间; (c)—尾部.

(6 mm) 双相钢显微组织图. 该厂升级改造后的 CSP 后段超快冷系统进一步提升了热轧双相类产品生产质量稳定性, 丰富和完善了高强度、厚规格产品的开发与生产, 截止目前已完成低成本双相钢生产近 3 000 t.

## 4 结 论

1) 根据 CSP 热轧线后置超快冷系统生产工艺要求及设备特点, 设计了带钢干头、干尾冷却的位置跟踪控制方法, 开发出了 CSP 后置超快冷动力泵闭环控制与溢流阀模糊控制联合及动力泵闭环控制与溢流阀闭环控制联锁的综合压力控制方法.

2) 开发出的 CSP 后置超快冷动力泵和溢流阀综合压力控制方法很好地解决了带钢干头、干尾冷却时集管压力波动较大的问题, 保证了生产的稳定, 集管压力波动范围控制在  $0.85 \pm 0.05$  MPa.

3) 开发出的 CSP 后置超快冷动力泵和溢流阀综合压力控制方法满足了 CSP 后置超快冷的压力控制和工艺要求, 带钢中间段的整个冷却过程中集管压力控制在  $0.85 \pm 0.01$  MPa, 温度控制精度高, 系统稳定, 产品组织均匀、比例匹配, 很好地满足了 CSP 热轧双相钢的生产要求.

### 参考文献:

- [1] 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): 1-4.

(上接第 460 页)

### 参考文献:

- [1] Veillette R J, Medanic J V, Perkins W R. Design of reliable control system [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1992, 37(3): 770-784.
- [2] Yang Y, Yang G H, Soh Y C. Reliable control of discrete-time systems with actuator failure [J]. *IEE Proceedings Control Theory Applications*, 2000, 147(4): 428-432.
- [3] Yang G H, Wang J L, Soh Y C. Reliable  $H_{\infty}$  design for linear system [J]. *Automatica*, 2001, 37(3): 717-725.
- [4] Boukas E K. Stochastic switching systems: analysis and design[M]. Berlin: Springer, 2005.
- [5] Shi P, Boukas E K, Agarwal R K. Kalman filtering for continuous-time uncertain systems with Markovian jumping parameters [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1999, 44(8): 1592-1597.
- [6] Xu S Y, Chen T, Lam J. Robust  $H_{\infty}$  filtering for uncertain Markovian jump systems with mode-dependent time-delays [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2003, 48(5): 900-907.
- [7] Karan M, Shi P, Kaya C Y. Transition probability bounds for the stochastic stability robustness of continuous and discrete-time Markovian jump linear systems [J]. *Automatica*, 2006, 42(12): 2159-2168.

(Wang Guo-dong. The new generation TMCP with the key technology of the ultra-fast cooling [J]. *Shanghai Metals*, 2008, 30(2): 1-4.)

- [2] Hiroshi K. Production and technology of iron and steel in Japan during 2005 [J]. *ISIJ International*, 2006, 46(7): 939-958.
- [3] Simon P, Fishbach J P, Riche P. Ultra-fast cooling on the run-out table of the hot strip mill [J]. *Revue de Metallurgie*, 1996, 93(3): 409-415.
- [4] Lucas A, Simon P, Bourdon G, et al. Metallurgical aspects of ultra-fast cooling in front of the down-coiler [J]. *Steel Research*, 2004, 75(2): 139-146.
- [5] 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.)
- [6] 王国栋, 刘相华, 孙丽钢, 等. 包钢 CSP “超快冷” 系统及 590MPa 级 C-Mn 低成本热轧双相钢开发 [J]. 钢铁, 2008, 43(3): 49-52. (Wang Guo-dong, Liu Xian-ghua, Sun Li-gang, et al. Ultra-fast cooling on Baotou CSP line and development of 590 MPa grade C-Mn low-cost hot-rolled dual phase steel [J]. *Iron and Steel*, 2008, 43(3): 49-52.)
- [7] Park C J. Dynamic temperature control with variable heat flux for high strength steel [J]. *International Journal of Control Automation and System*, 2012, 10(3): 659-665.
- [8] Park C J, Yoon K S, Lee C H. Advanced temperature control of high carbon steel for hot strip mills [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2010, 24(5): 1011-1016.
- [9] Yu Q B, Wang Z D, Wang Z Y, et al. Improvement of the prediction method for strip coiling temperature [J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2003, 10(4): 75-78.
- [10] 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.

- [8] Xiong J L, Lam J, Gao H J, et al. On robust stabilization of Markovian jump systems with uncertain switching probabilities [J]. *Automatica*, 2005, 41(5): 897-903.
- [9] Xiong J L, Lam J. Fixed-order robust  $H_{\infty}$  filter design for Markovian jump systems with uncertain switching probabilities [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2006, 54(4): 1421-1430.
- [10] Zhang L X, Boukas E K. Stability and stabilization of Markovian jump linear systems with partly unknown transition probabilities [J]. *Automatica*, 2009, 45(2): 463-468.
- [11] Zhang L X, Boukas E K, Lam J. Analysis and synthesis of Markovian jump linear systems with time-varying delays and partially known transition probabilities [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2008, 53(10): 2458-2464.
- [12] Zhang L X, Boukas E K.  $H_{\infty}$  control for discrete-time Markovian jump linear systems with partly unknown transition probabilities [J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2009, 19(9): 868-883.
- [13] Zhang L X, Boukas E K. Mode-dependent  $H_{\infty}$  filtering for discrete-time Markovian jump linear systems with partly unknown transition probabilities [J]. *Automatica*, 2009, 45(6): 1462-1467.
- [14] Wang G L, Zhang Q L, Sreeram V. Partially mode-dependent  $H_{\infty}$  filtering for discrete-time Markovian jump systems with partly unknown transition probabilities [J]. *Signal Processing*, 2010, 90(2): 548-556.