短流程CSP生产线超快冷控制系统的开发与应用

王晓晖[1],利成宁[1],李振垒[1],薛 越[2],袁 国[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. 内蒙古包钢钢联股份有限公司薄板坯连铸连轧厂,内蒙古 包头 014010)

摘 要: 文章基于短流程CSP生产线,开发了适合热轧双相钢的超快冷控制系统,并且实现了该控制系统的工业应用。结果表明: 采用动力泵压力闭环和溢流阀模糊PID控制的方式实现对供水压力的控制; 采用调节阀模糊控制的方式实现对集管流量的控制; 采用对实际带钢速度与程序扫描周期乘积的累加来实现对带钢位置的跟踪。6.0 mm厚度热轧带钢的冷却速率为190~210 ℃/s,11.0 mm厚度热轧带钢的冷却速率为100~120 ℃/s,中间温度控制在(670±10) ℃,卷取温度控制在目标值±30 ℃,很好地满足了产品需求。

关键词: 短流程; 热轧双相钢; 超快冷; 控制系统; 开发应用
中图分类号: TP23 **文献标识码**: B **文章编号**: 1009-5438(2020)04-0032-05
DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2020.04.009

Development and Applications of Ultra Fast Cooling Control System for CSP Production Line with Short Process

Wang Xiao-hui[1], *Li Cheng-ning*[1], *Li Zhen-lei*[1], *Xue Yue*[2], *Yuan Guo*[1], *Wang Guo-dong*[1]

(1. *State Key Laboratory of Rolling and Automation of Northeastern University, Shenyang* 110819, *Liaoning*, *China*;
2. *CSP Plant of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region*, *China*)

Abstract: In the paper, it is introduced the ultra fast cooling control system suitable for hot-rolled dual phase steel is developed based on the CSP production line with short process and its industrial applications are realized. The results showed that the control of water supply pressure was realized with the pressure closed-loop of power pump and fuzzy PID control of relief valve; the control of flow for header was realized with the fuzzy control of control valve; the tracking of position of strip steel was realized with the accumulation of product of actual speed of strip steel and scan period of program. The cooling rate of hot-rolled strip steel with thickness of 6.0 mm was 190~210 ℃/s, the cooling rate of hot-rolled strip steel with thickness of 11.0 mm was 100~120 ℃/s, the medium temperature was controlled at (670±10) ℃ and the coiling temperature was controlled at target value ±30 ℃, which well met the product requirements.

Key words: short process; hot-rolled dual phase steel; ultra fast cooling; control system; development and application

收稿日期: 2020-03-27

作者简介: 王晓晖(1990-),男,山东省枣庄市人,博士,现从事先进常规流程热轧工艺与装备技术的开发与应用工作。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

目前在热轧带钢的生产过程中，超快冷技术可以实现冷却路径的灵活控制，进而成为热轧带钢组织调控的有效手段[1]。冷却过程是热轧带钢生产流程中的关键环节，而且冷却温度主要受钢板厚度、轧制速度、冷却水量等影响，为了准确控制热轧带钢的冷却温度，需要具有较高精度的控制系统进行匹配[2]。在热轧带钢冷却温度的控制过程中，超快冷的集管组态会不断发生变化，这将引起超快冷的供水管路产生波动，因此供水压力和集管流量成为需要控制的重要因素[3-10]。

不同于常规流程热轧生产线，短流程 CSP 生产线的轧制速度相对稳定，热轧带钢冷却温度的控制方法也会有所差异，因而需要对 CSP 生产线的控制系统进行深入的研究[1-2]。为了充分发挥超快冷在高品质热轧带钢品种开发中的优势，包钢与东北大学携手，在其 CSP 生产线上建立超快冷装置，并且利用该装置实现了高品质热轧带钢的稳定生产。本文依托短流程 CSP 生产线，开发了针对热轧双相钢的超快冷控制系统，并且介绍了该控制系统的应用情况。

1　超快冷装备概况

轧后冷却系统设备布置如图 1 所示。短流程 CSP 生产线轧后冷却系统为采用层流冷却和超快冷相结合的组合冷却系统，整个轧后冷却系统布置在精轧机和卷取机之间，沿轧线方向依次为常规层流冷却设备和新增超快冷设备。为了满足特定厚度规格热轧双相钢的生产要求，通过控制供水压力、集管流量和位置跟踪调整冷却速率和实际温度。

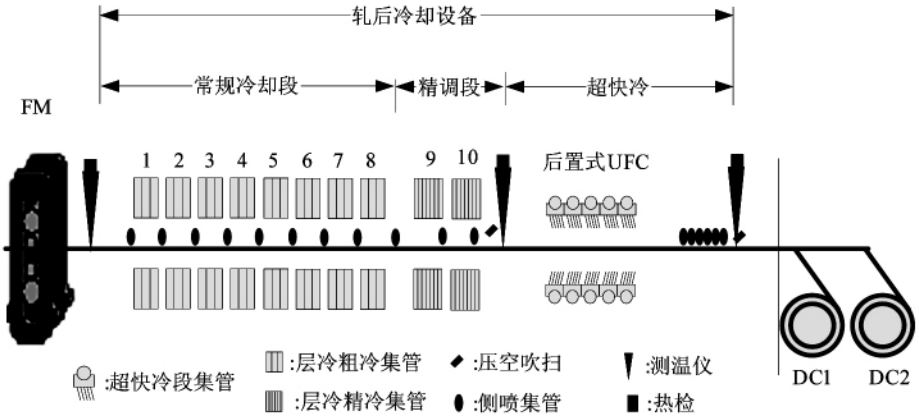


图 1　轧后冷却系统设备布置图

文中将热轧带钢经过层流冷却与空冷后的表面温度记为中间温度，中间温度对热轧双相钢组织性能的影响包含层流冷却和空冷对组织性能的共同影响。通过控制热轧带钢经过层流冷却与空冷后的中间温度来控制铁素体的百分含量，利用超快冷使未转变奥氏体全部转化为马氏体，最终获得铁素体和马氏体的双相组织。

2　超快冷控制系统的开发

结合短流程 CSP 生产线现状，根据生产热轧双相钢的工艺要求，开发出由层流冷却系统和超快冷系统组成的轧后冷却控制系统。控制系统根据设定的中间温度以及卷取温度，通过冷却模型自动控制层流冷却和超快冷的集管组态，实现了对层流冷却和超快冷的共同控制。

2.1　供水压力

由于超快速冷却工艺对供水压力的要求较高，要求对供水压力的控制具有较高的稳定性。超快冷供水压力是通过动力泵和溢流阀共同协调控制的，动力泵始终采用压力闭环的方式进行供水压力的控制，溢流阀采用模糊控制和压力闭环的方式进行相应的调节。溢流阀对供水压力的调节是通过调节溢流管路上溢流阀的开口度来实现的。减少溢流阀的开口度可以降低供水管路的溢流水量，提高供水压力，增加溢流阀的开口度可以提高供水管路的溢流水量，降低供水压力。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

超快冷供水压力的控制方法如图2所示。当溢流阀开口度减小到目标设定值K后，采用动力泵压力闭环和溢流阀压力闭环的方式进行供水压力的控制。当溢流阀开口度刚减小到K时，超快冷供水压力的实际值与设定值之间的偏差较大，采用较大的增益值及较小的积分时间进行PID闭环控制，使供水压力快速调节到设定值附近；当超快冷供水压力的实际值与设定值之间的偏差较小时，采用较小的增益值及较大的积分时间进行PID闭环控制，防止供水压力调节过程中出现压力振荡的问题。

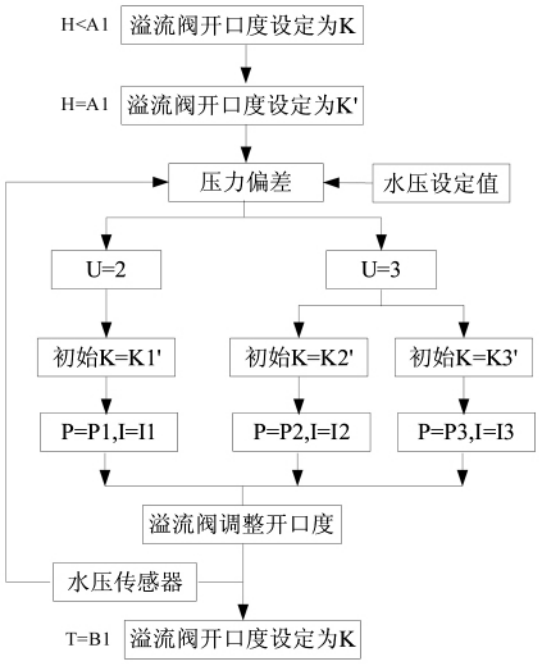


图2 超快冷供水压力的控制方法

2.2 集管流量

超快冷控制系统采用模糊控制的方式进行集管流量的控制，先根据标定好的调节阀开口度与集管流量关系曲线，采用插值法通过设定集管流量计算出设定开口度，当供水压力满足集管流量动态调节条件后再进行集管流量的闭环调节。当调节阀开口度处于不同的范围时，开口度调节量的大小对集管流量的影响是不同的。为了实现集管流量的高精度控制，需要根据调节阀的特性和流量偏差的大小进行集管流量的控制。

超快冷集管流量的控制方法如图3所示。根据不同类型集管的调节阀开口度和集管流量之间的关系，采用模糊控制的方法对集管流量进行控制。通过超快冷集管的调节阀开口度与集管流量关系曲线和设定流量采用插值法计算出调节阀的设定开口度，当供水压力稳定在0.85 MPa左右时，根据调节阀开口度范围和集管流量偏差范围动态调节阀门开口度大小，实现集管流量的高精度控制。

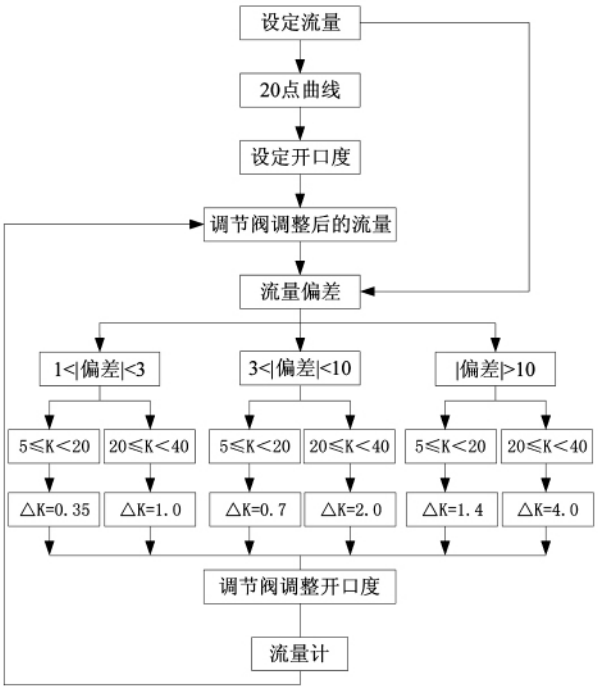


图3 超快冷集管流量的控制方法

2.3 位置跟踪

带钢位置跟踪是指带钢头部从精轧机出口高温计FDT开始直到带钢尾部离开卷取机前高温计CT整个过程带钢头尾位置的计算，是对终轧温度、中间温度、卷取温度等重要参数进行控制的基础。该功能主要包括计算带钢的头尾位置及带钢的样本号，并提供给过程自动化模型的自学习使用。

超快冷位置跟踪的控制方法如图4所示。基础自动化通过对实际带钢速度与程序扫描周期的乘积的累加实现对带钢头部位置的计算，通过同样的方式实现对带钢尾部位置的计算，只是在F7机架甩钢之前带钢速度是从精轧机F7获得，而F7机架甩钢之后带钢速度是从卷取机获得，在计算带钢尾部位置的时候带钢头部位置也一直进行累加，当带钢完全进入卷取机时，带钢头部位置和带钢尾部位置同

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

时清零。带钢的样本号则是通过带钢头部位置除以设定的样本号长度获得的。



图 4　超快冷位置跟踪的控制方法

3　超快冷控制系统的应用

根据上述理论设计结果，确定热轧双相钢冷却过程供水压力、集管流量、位置跟踪的控制方法。将所开发的控制系统应用到热轧双相钢的生产实践中去，计算冷却速率并且检测实际温度。

3.1　冷却速率

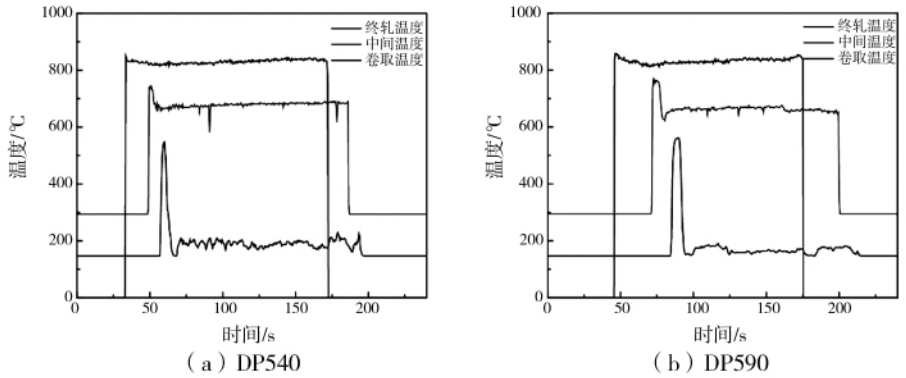
不同厚度热轧带钢的冷却速率如表 1 所示。在冷却强度方面，超快冷系统冷却强度大，一般水量条件下，冷却速率即可达到常规层流冷却的 3 ~ 5 倍以上。超快冷系统的高冷却速率为经济地实现热轧双相钢生产过程的马氏体相变控制提供了工艺手段。在冷却均匀性方面，超快冷系统投产后，冷却后带钢板形和卷形良好，实现了热轧双相钢生产过程的良好板形控制。

表 1　不同厚度热轧带钢的冷却速率

带钢厚度/mm	冷却速率/(℃ · s^{-1})
6.0	190 ~ 210
11.0	100 ~ 120

3.2　实际温度

不同厚度热轧带钢的实际温度如图 5 所示。在轧后冷却控制系统上，开发的热轧双相钢自动控制系统过程工艺参数控制精度高，生产连续稳定，实现了对超快冷出口温度的精确控制，进而实现了新增超快冷与原有层流冷却设备、工艺以及带钢整个冷却历程的温度全面控制，为提高产品生产过程的组织性能稳定性提供了有力支撑。



(a) DP540　　(b) DP590

图 5　不同厚度热轧带钢的实际温度

4　结论

(1) 研究了热轧带钢冷却过程的控制方法，采用动力泵压力闭环和溢流阀模糊 PID 控制的方式实现对供水压力的控制，采用调节阀模糊控制的方式实现对集管流量的控制，采用对实际带钢速度与程序扫描周期乘积的累加来实现对带钢位置的跟踪。

(2) 将所开发的控制系统应用到热轧双相钢的

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

生产实践中去,6.0 mm厚度热轧带钢的冷却速率为190~210 ℃/s,11.0 mm厚度热轧带钢的冷却速率为100~120 ℃/s,中间温度控制在(670±10) ℃,卷取温度控制在目标值±30 ℃。

参 考 文 献

[1] 贾瑞杰,张玮,张帅.超快冷系统改造及双相钢冷却工艺优化[J].包钢科技,2017,43(5):29-33.

[2] 石建辉,袁国,江连运,等.CSP超快冷带钢头尾冷却控制方法的研究与应用[J].轧钢,2015,32(6):8-11.

[3] 吕卫东,程杰锋,唐广波,等.控制冷却技术的发展及其在热轧钢管过程的应用[J].上海金属,2015,37(2):45-48.

[4] 陈小林,王国栋,田勇,等.中厚板超快速冷却条件下的温度模型[J].钢铁,2013,48(10):46-49.

[5] Xiong Z P, Kostryzhev A G, Stanford N E, et al. Effect of deformation on microstructure and mechanical properties of dual phase steel produced via strip casting simulation [J]. Materials Science and Engineering A, 2016, 651: 291-305.

[6] Scott C P, Fazeli F, Amirkhiz B S, et al. Structure-properties relationship of ultra-fine grained V-microalloyed dual phase steels [J]. Materials Science and Engineering A, 2017, 703: 293-303.

[7] Sun J J, Jiang T, Wang Y J, et al. Ultrafine grained dual-phase martensite/ferrite steel strengthened and toughened by lamella structure [J]. Materials Science and Engineering A, 2018, 734: 311-317.

[8] Ashrafi H, Shamanian M, Emadi R, et al. A novel and simple technique for development of dual phase steels with excellent ductility [J]. Materials Science and Engineering A, 2017, 680: 197-202.

[9] Kamp A, Celotto S, Hanlon D N. Effects of tempering on the mechanical properties of high strength dual-phase steels [J]. Materials Science and Engineering A, 2012, 538: 35-41.

[10] Adhikary M, Chakraborty A, Das A, et al. Influence of annealing texture on dynamic tensile deformation characteristics of dual phase steel [J]. Materials Science and Engineering A, 2018, 736: 209-218.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net