

RAL · NEU 研究报告 No.0021

热轧板带钢新一代 TMCP 工艺 与装备技术开发及应用

REZHA BANDAIGANG XINYIDAI TMCP GONGYI YU ZHUANGBEI JISHU KAIFA JI YINGYONG

轧制技术及连轧自动化国家重点实验室
(东北大学)

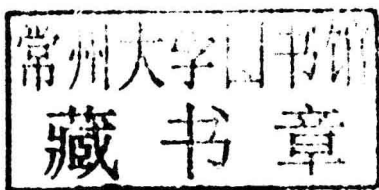


冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

• NEU 研究报告 No. 0021

热轧板带钢新一代 TMCP 工艺与 装备技术开发及应用

轧制技术及连轧自动化国家重点实验室
(东北大学)



北京
冶金工业出版社
2015

内 容 简 介

本书基于国家“十二五”支撑计划“钢铁行业绿色制造关键技术集成应用示范”项目(项目编号:2012BAF04B00)课题“热轧板带钢新一代TMCP装备及工艺技术开发与应用”(课题编号:2012BAF04B01),依托首钢迁钢2160mm热连轧超快速冷却系统开发与研究项目,以及课题组承担的包钢CSP生产线后置超快速冷却系统开发与研究等项目,介绍了以超快速冷却为核心的新一代控轧控冷(NG-TMCP)工艺原理、超快速冷却技术的最新研究进展及其在热轧板带钢生产中的工业应用。本书涵盖了热轧板带钢新一代TMCP技术工艺原理、成套装备与关键技术、自动化控制系统、产品工艺技术以及典型产品工业化应用实践等内容。

本书可供从事材料加工工程专业与热轧钢铁材料品种开发等领域的科研人员及工程技术人员学习与参考。

图书在版编目(CIP)数据

热轧板带钢新一代TMCP工艺与装备技术开发及应用/轧制技术及连轧自动化国家重点实验室(东北大学)著. —北京:冶金工业出版社,2015.12

(RAL·NEU研究报告)

ISBN 978-7-5024-7109-5

I. ①热… II. ①轧… III. ①带钢—热轧—生产工艺—研究
IV. ①TG335.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第311775号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷39号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcs@cnmp.com.cn

策 划 任静波 责任编辑 卢敏 夏小雪 美术编辑 彭子赫

版式设计 孙跃红 责任校对 卿文春 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-7109-5

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷
2015年12月第1版,2015年12月第1次印刷

169mm×239mm;7印张;109千字;91页

47.00元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街46号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

研究项目概述

1. 研究项目背景与立题依据

21 世纪以来，人类与环境的关系日益受到广泛的关注和重视，建设资源、能源与环境相互协调的新型工业化已经成为我国钢铁工业当今发展的主题，也是支撑国民经济可持续发展的必由之路。“十二五”期间，“节能减排”和“绿色制造”成为我国钢铁行业发展的主旋律。“绿色制造，制造绿色”已经成为我国钢铁工业转型发展过程中最迫切的需求和任务。

轧制工艺技术作为钢铁生产工艺流程的重要环节，在产品的形状尺寸精度控制和组织性能调控方面都起到至关重要的作用。尤其是控轧控冷作为热轧领域组织调控的核心工艺技术，通过细晶强化、析出强化、相变强化等强化手段的综合作用机制，可进一步挖掘热轧工艺的潜力，采用节约型的合金成分设计和减量化的生产制造方法，开发出具有良好力学性能、使用性能的高品质板带钢产品。这对于实现热轧钢材生产的节能降耗，提升后续产品使用性能，推动热轧产品绿色化生产具有重大意义。

以开发钢铁材料绿色制造技术为核心的热轧钢材新一代 TMCP 装备及工艺技术，通过节约型成分设计、减量化工艺生产，减少热轧板带钢产品对合金元素的过度依赖和资源的过度消耗，可实现热轧板带钢产品的降本增效、提质增效开发生产。东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室（简称“东北大学 RAL”）作为国内基于超快速冷却为核心的新一代 TMCP 工艺技术的提出者、倡导者，以及科研实践的先行者，自 2004 年起历经 10 余年研发，从热轧板带钢超快速冷却技术工艺应用及工程化需求出发，开发出成熟完善的热轧板带钢超快速冷却技术、成套装备及产品工艺技术。该项技术目前应用于涟钢、首钢迁钢、包钢、首钢京唐、鞍钢、沙钢、山钢日照精品基地等

钢铁企业，实现了我国热轧板带钢领域自主特色的超快速冷却技术的成功突破和推广应用。

以超快速冷却为核心的新一代 TMCP 技术在热轧板带钢、中厚板、棒线材等领域成功得到了快速推广应用，获得了政府、行业及企业的广泛认同与支持。国家工信部、发改委、科技部相继将新一代控轧控冷技术列为《产业关键共性技术发展指南（2011 年）》原材料工业钢铁领域五项关键共性技术之一；《钢铁行业“十二五”发展规划》重点领域和任务以及新工艺、新装备、技术创新和工艺技术改造的重点内容；《“十二五”产业技术创新规划》促进钢铁行业可持续发展予以大力推广的应用技术；《2013 年产业振兴和技术改造专项重点专题》冶金工业关键产品、工艺开发应用及升级改造的重点工艺技术。同时，该项技术相继列为发改委“钢铁、有色、石化行业低碳技术创新及产业化示范工程”以及科技部“十二五”科技支撑计划“钢铁行业绿色制造关键技术集成应用示范项目”立项实施。2011 年，由东北大学联合国内钢铁企业、科研院所联合申报的“热轧板带钢新一代 TMCP 装备及工艺技术开发与应用”项目被列入国家科技部“十二五”科技支撑计划项目“钢铁行业绿色制造关键技术集成应用示范”，标志着 RAL 提出及开发的热轧板带钢新一代 TMCP 装备及工艺技术获得政府高度认可。

现场实践及工业化应用表明，由东北大学 RAL 学术带头人王国栋院士提出和倡导的基于超快速冷却的新一代 TMCP 工艺技术，在开发成分节约型的低成本高性能热轧板带钢新工艺、新产品方面成效显著。目前，基于以超快速冷却为核心的新一代 TMCP 工艺理念开发低成本高性能钢铁材料，已成为国内热轧板带钢企业的广泛共识。

2. 研究进展与成果

(1) 新一代 TMCP 关键技术研究进展及创新点。随着新一代 TMCP 组织调控原理研究的深入及新一代 TMCP 技术的提出，东北大学 RAL 采用倾斜喷射冷却方式，开发出高强度均匀化冷却技术，实现了热轧板带钢超快速冷却技术在核心机理上的突破。在此基础上，开发出满足热轧板带钢超快速冷却需求的超快速冷却喷嘴结构及喷嘴配置技术、数学模型及自动化控制系统、

成套装备技术等系列关键技术，在节约型高性能产品开发应用方面取得了满意的应用效果。

1) 新一代 TMCP 组织调控原理及超快速冷却机理研究进展。超快速冷却技术在热轧板带钢产品组织调控及性能控制方面的作用机理研究主要进展为：

① 采用超快速冷却，通过适当的减量化成分设计以及热轧过程与超快速冷却工艺的合理匹配，可获得细化的铁素体、珠光体及贝氏体组织，实现细晶强化。或者在合金成分不变的条件下，可适度提高终轧温度，减轻对轧制过程“低温大压下”的过度依赖。

② 热轧后的超快速冷却，可抑制微合金元素析出相在高温区析出，通过调节终冷温度，并配合适当的等温处理（缓冷），使得更多的微合金元素在铁素体或贝氏体中析出，进而获得大量细小析出相，有效提高微合金元素的析出强化效果。

③ 利用超快速冷却多样的冷却路径控制手段，通过 UFC-F、UFC-B、UFC-M 等工艺控制，实现对铁素体（F）、贝氏体（B）、马氏体（M）、铁素体-贝氏体（F-B）、铁素体-马氏体（F-M）等组织的灵活调控，进而获得显著的组织强化效果。

2) 热轧板带钢超快速冷却系统成套装备及控制系统。依托该项目，实现了对热轧板带钢超快速冷却系统成套装备技术的全面升级，主要取得了以下进展：

① 开发出满足大型热轧板带钢超快速冷却系统的具有多种阻尼系数的整体狭缝式高性能射流喷嘴、高密度快冷喷嘴及其配置技术，实现了冷却介质流量的合理分布以及喷嘴沿轧线方向的合理配置，从而保证了高温板带钢冷却过程中宽向、纵向的冷却均匀性，解决了热轧板带钢高冷速、高冷却均匀性的核心技术难题。

② 开发出大型热轧板带钢超快速冷却成套装备，其中包括超快速冷却保护机构、倾翻设备、冷却介质流量快速设定控制、轧线方向流量分区域控制以及软水封等技术，成功解决了超快速冷却技术的工程应用技术难题，实现了超快速冷却成套装备技术的全面升级，如图 1 所示。由东北大学 RAL 开发的热轧板带钢产线超快冷系统，具有极高的冷却强度，冷却速率可达常规层流冷却的 2~5 倍以上，加密冷却系统的 1.5~2 倍以上，如图 2 所示。

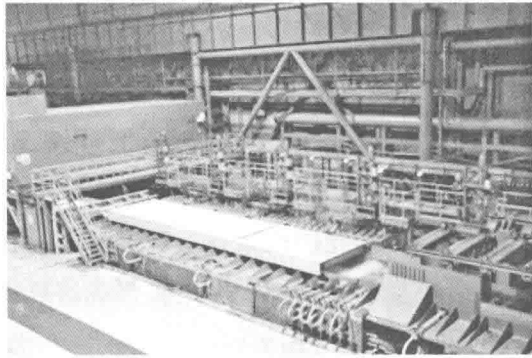


图1 开发的热轧板带钢超快速冷却装备

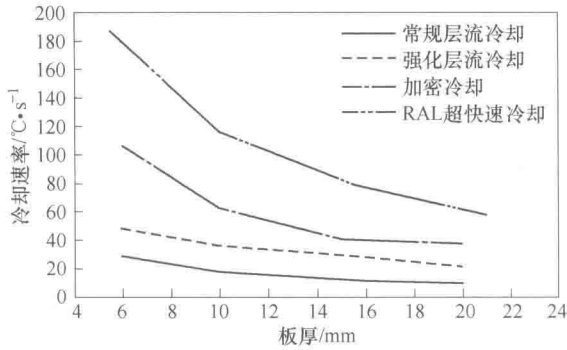


图2 超快冷系统与其他冷却系统冷却速率对比

③ 开发出基于超快速冷却工艺、面向升速轧制的新一代轧后冷却控制系统，实现了超快速冷却与原有层流冷却设备、工艺以及板带钢冷却过程中温度控制的无缝衔接；系统解决了新型轧后冷却系统应用过程中的工艺自动化控制等问题。尤其是在轧后冷却控制系统上，新增模型控制系统实现了对超快速冷却出口温度的精确控制，进而实现了超快速冷却与原有层流冷却设备、工艺以及板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。新增超快速冷却自动化控制系统温度控制效果，如图3所示。

3) 热轧板带钢低成本减量化产品组织调控理论及工艺技术。系统研究了热轧板带钢产品基于超快速冷却为核心的新一代TMCP技术开发使用过程中的关键工艺和组织调控原理，综合利用细晶强化、析出强化以及相变强化等

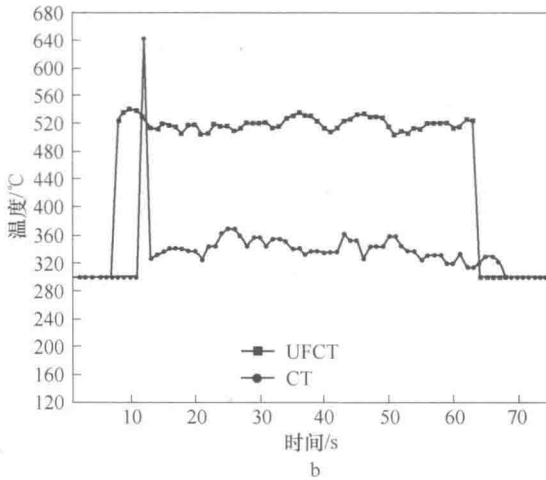
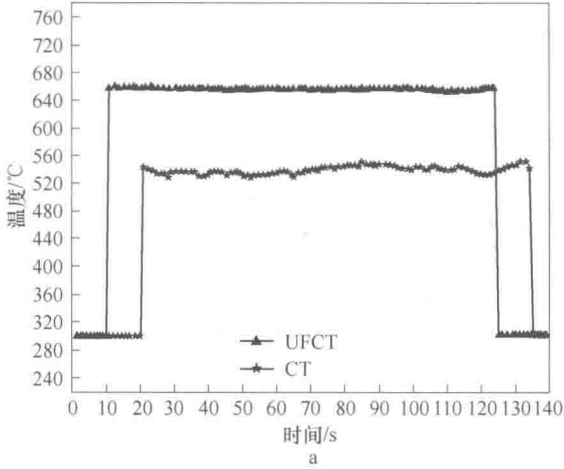


图3 超快速冷却自动化控制系统温度控制效果

a—3.95mm 规格 Q345B 钢; b—18.4mm 规格 X80 管线钢

机制，开发出满足工业化大批量连续稳定生产的“资源节约型、工艺节能减排型”UFC-F、UFC-B、后置UFC-DP类等热轧板带钢轧后冷却工艺技术。该技术应用于普碳低合金钢、高钢级管线钢、双相等典型带钢产品的大批量工业化生产，在降本增效、提质增效等方面体现出重要作用。

基于前段式超快冷工艺，在保持或提高钢板材料塑韧性和使用性能的前提下，普碳低合金钢Mn含量节约20%~50%，吨钢成本降低20~80元；典型规格高级别管线钢节约贵重金属Mo、Ni、Cu等30%以上，吨钢

成本降低 150 ~ 300 元，降本增效显著。同时，应用超快冷技术，在提高厚规格管线钢低温冲击韧性等方面体现出显著优势，解决了传统层流冷却工况下低温韧性不稳定的突出难题。生产实践表明，超快冷技术在开发厚规格热轧板带管线钢以及特色化的管线钢产品方面体现出巨大的工艺潜力和独特优势。

基于后段式超快冷工艺的组织调控技术，采用 C-Mn 系成分即可生产出 3.0 ~ 11.0mm 全厚度系列经济型热轧双相类板带钢产品，为推动我国低成本高性能热轧双相类带钢产品的开发生产做出了重要贡献。同时，基于超快速冷却装备及工艺，在新一代析出强化型热轧双相钢及在线直接淬火配分钢（DQ&P 钢）的开发与工业化生产方面，已体现出良好的工艺潜力，对工业化生产的实现将有望起到重要的推动作用。

(2) 技术研发历程及推广应用。2004 年起，东北大学 RAL 历经了试验、中试等超快速冷却技术开发过程，开发了相关的原型试验装置、工业化中试设备以及工业化成套技术装备，形成了涵盖工艺原理、机械装备、自动控制、减量化产品工艺技术在内的系统完整的成套技术、专利和专有技术。

2004 年，东北大学 RAL 已利用自主研发的实验研究平台，开发出实验室超快速冷却原型试验装置，如图 4 所示。同时，针对普通 C-Mn 钢、HSLA 钢等进行了系列热力模拟实验、热轧实验研究，为进一步的工业产线规模的装备技术开发做了充分的技术储备。2004 年年底，依托包钢 CSP 短流程生产

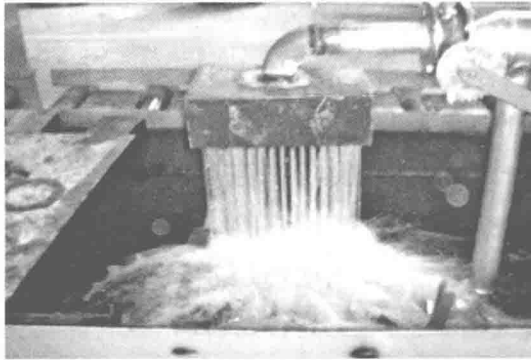


图 4 超快速冷却原型试验装置

线，合作开发出超快速冷却简易实验装置，安装于层流冷却和卷取机之间（见图5），并结合原有层流冷却系统，以C-Mn钢为原料，开发生产出540MPa、590MPa级的低成本双相钢。

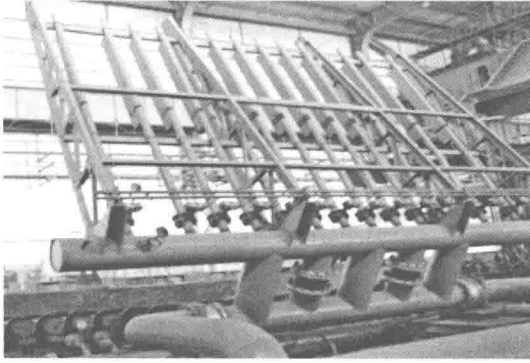


图5 包钢CSP短流程线超快速冷却中试装置

2008年，东北大学RAL依托湖南华菱涟源钢铁有限公司产品质量提升技改工程轧钢项目轧后冷却系统工程，合作开发出国内首套2250mm热轧板带钢超快速冷却工业化装备，该设备采用前置式布置方式，即安装在精轧机和层流冷却设备之间。2009年，涟钢CSP生产线新增超快速冷却系统，同样采用前置式布置方式。

2012年，东北大学RAL与首钢迁钢合作，开展国家“十二五”科技支撑计划“钢铁行业绿色制造关键技术集成应用示范”项目“热轧板带钢新一代TMCP装备及工艺技术开发与应用”课题研究与攻关。依托首钢迁钢2160mm热连轧生产线，通过全面升级优化超快速冷却装备关键技术，形成了装备一流、成熟完善的具有自主知识产权和自身特色的热轧板带钢超快速冷却系统——ADCOS-HSM（Advanced Cooling System-Hot Strip Mill），如图6所示。

2013年，东北大学RAL与包钢合作，对CSP短流程生产线原超快速冷却简易试验装置进行升级改造，全新装备东北大学RAL开发的成熟完善的后置式超快速冷却系统，如图7所示。该项目旨在提高产品性能，实现经济型热轧双相钢系列产品的大批量连续稳定生产。目前，包钢已开发出产品覆盖

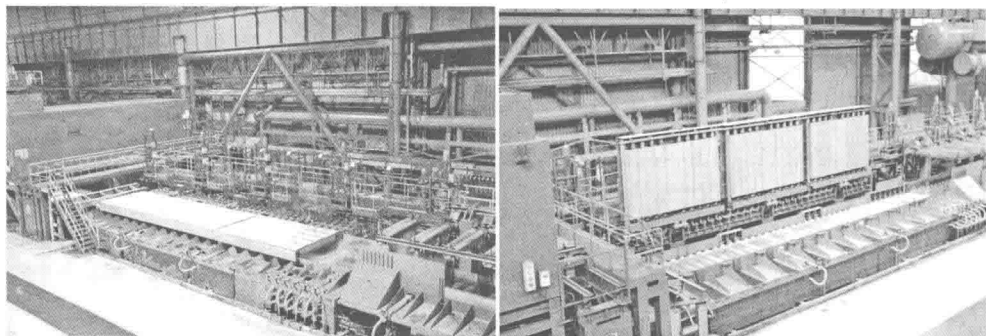


图6 首钢迁钢 2160mm 热连轧生产线超快速冷却系统

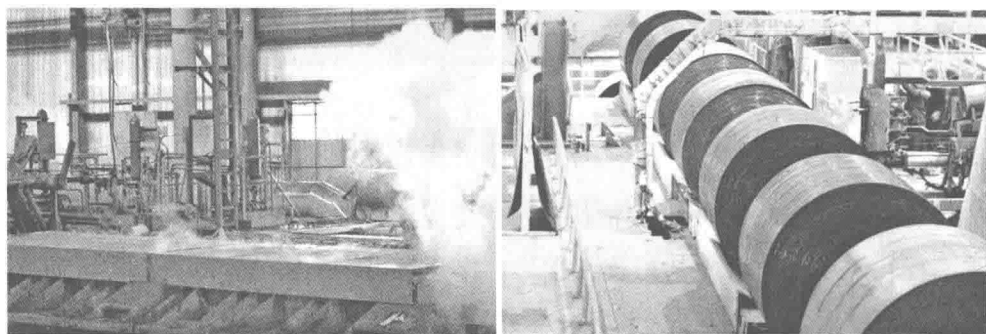


图7 包钢 CSP 短流程生产线超快速冷却设备及批量化生产产品

3.0 ~ 11.0mm 厚度规格的 540 ~ 700MPa 级别的热轧 F-M 双相钢及 F-B 双相钢，并已成为我国热轧双相钢全系列厚度规格产品的最主要供货商。

2014 年，东北大学 RAL 与首钢京唐签订合同，在京唐 2250mm 热连轧生产线新增超快冷系统，并进行节约型高性能热轧板带钢的开发。2015 年，东北大学 RAL 与沙钢合作，将在沙钢 1700mm 热连轧生产线增设超快冷系统，用于减量化普碳钢及管线钢的开发与生产。同年，东北大学 RAL 与山钢集团合作，将在山钢集团新建的日照钢铁精品基地 2050mm 热轧生产线上装备超快速冷却系统，进行低成本高性能管线钢、双相钢等产品品种的开发与生产。

截至目前，已推广应用至涟钢、首钢迁安、包钢、首钢京唐、鞍钢、沙钢、山钢日照精品基地等多家钢铁企业，获得企业及行业的广泛认同和支持。

3. 论文、专利及获奖

论文:

(1) Li Chengning, Yuan Guo, Ji Fengqing, Kang Jian, Devesh Misra, Wang Guodong. Mechanism of microstructural control and mechanical properties in hot rolled plain C-Mn steel during controlled cooling[J]. ISIJ International, 2015, 55(8): 1721 ~ 1739.

(2) 康健, 袁国, 张贺, 王国栋. 低碳 Si-Mn 钢直接淬火-等温配分工艺中组织演变[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2015, 36(1): 24 ~ 28.

(3) Li Zhenlei, Yuan Guo, Han Yi, Wang Xueqiang, Qu Wuguang, Wang GuoDong. Research on radial direction temperature change law of coil and control strategy for ultra-fast cooling[J]. Metallurgical Research and Technology, 2015, DOI: 10.1051/metal/2015002.

(4) 袁国, 利成宁, 孙丹丹, 康健, 王国栋. 热轧双相钢的发展现状及高强热轧双相钢的开发[J]. 中国工程科学, 2014, 16(2): 39 ~ 45.

(5) Jiang Lianyun, Yuan Guo, Li Zhenlei. Research on ultra-fast cooling heat transfer coefficient affecting law for hot strip mill[J]. Material Science Forum, 2014, 788: 346 ~ 350.

(6) 江连运, 袁国, 李振垒. 热连轧线超快速冷却泵站与轧线联合控制方法[J]. 冶金自动化, 2014, 38(2): 44 ~ 47.

(7) 江连运, 袁国, 吴迪. 热轧板带钢轧后高强度冷却过程的换热系数分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2014, 35(5): 676 ~ 680.

(8) 袁国, 康健, 张贺, 李云杰, 胡虹玲, 王国栋. Q & P 工艺理念在热轧先进高强度钢中的应用研究[J]. 中国工程科学, 2014, 16(1): 59 ~ 65.

(9) 赵金华, 王学强, 赵林, 唐帅, 袁国, 邸洪双. 迁钢 2160mm 超快速冷却工艺下 X70 管线钢减量化工艺研究及应用[J]. 河南冶金, 2014, 22(3): 18 ~ 20.

(10) Li Zhenlei, Li Haijun, Yuan Guo, Wang Guodong, Wang Xueqiang.

Research and application of ultra-fast cooling system and velocity controlled strategy for hot rolled strip[J]. Steel Research International, 2014, 85: 1 ~ 11.

(11) 李振垒, 江连运, 袁国, 王国栋. 热轧板带钢超快速冷却供水系统压力控制技术与应用[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2013, 34(9): 1252 ~ 1256.

(12) Li Zhenlei, Yuan Guo, Wang Zhaodong, Wang Guodong, Wang Xueqiang, Zhang Xiaolin, Dong Lijie. Application and research of advanced temperature control strategy based on ultra-fast cooling system for hot rolled strip[C]. The 9th International Rolling Conference and the 6th European Rolling Conference, 2013, 158: 1 ~ 8.

(13) 李振垒, 胡啸, 李海军, 袁国, 王昭东, 王国栋. 热轧板带钢超快速冷却模型及自适应控制系统的研究和开发[J]. 钢铁, 2013, 48(2): 44 ~ 48.

(14) Li Haijun, Li Zhenlei, Yuan Guo, Wang Zhaodong, Wang Guodong. 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.

(15) Yuan Guo, Li Zhenlei, Li Haijun, Wang Zhaodong, Wang Guodong. Control and application of cooling path after rolling for hot strip based on ultra fast cooling[J]. Journal of Central South University, 2013, 20(7): 1805 ~ 1811.

(16) Tang S, Liu Z Y, Wang G D, et al. Microstructural evolution and mechanical properties of high strength microalloyed steels: Ultra Fast Cooling (UFC) versus Accelerated Cooling (ACC) [J]. Materials Science and Engineering A, 2013, 580: 257 ~ 265.

(17) 江连运, 李振垒, 袁国. 热连轧线超快速冷却系统供水压力和集管流量控制方法研究[C]. 第九届中国钢铁年会论文集. 北京, 2013.

(18) 利成宁, 袁国, 周晓光, 王国栋. 分段冷却模式下热轧双相钢的组织演变及力学性能[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2013, 34(6): 810 ~ 814.

(19) 利成宁, 袁国, 周晓光, 康健, 李振垒, 王国栋. 汽车结构用热轧双

相钢的生产现状及发展趋势[J]. 轧钢, 2012, 29(5): 38 ~ 42.

(20) 袁国, 李海军, 王昭东, 王国栋. 热轧板带钢新一代 TMCP 技术的开发与应用[J]. 中国冶金, 2013(4): 21 ~ 26.

(21) 李振垒, 李海军, 王昭东, 王国栋. 热轧板带钢的超快速冷却控制系统[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2012, 33(10): 1436 ~ 1452.

(22) Kang J, Wang C, Wang G D. Microstructural characteristics and impact fracture behavior of a high-strength low-alloy steel treated by intercritical heat treatment[J]. Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, 2012, 553: 96 ~ 104.

(23) Li Chengning, Yuan Guo, Zhou Xiaoguang, Ji Fengqin, Kang Jian, Wang Guodong. Effect of process parameters on microstructure evolution and properties of hot-rolled dual phase steel containing Nb and Ti[C]. Asia Steel International Conference 2012 (Asia Steel 2012), Beijing.

(24) Kang Jian, Wang Zhaodong, Yuan Guo, Wang Guodong. Controlled cooling process and mechanical property of 590MPa grade structural steel with low yield ratio[J]. Advanced Materials Research, 2011, 261 ~ 263: 740 ~ 743.

(25) 康健, 王昭东, 袁国, 王国栋. 轧后超快速冷却终冷温度对 780MPa 级建筑用钢屈强比的影响[J]. 机械工程材料, 2011, 35(11): 1 ~ 4.

(26) Tang Shuai, Liu Zhengyu, Wang Guodong. Development of High Strength Plates with Low Yield Ratio by the Combination of TMCP and Inter-Critical Quenching and Tempering [J]. Steel Research International, 2011, 82(7): 772 ~ 778.

(27) Kang Jian, Yuan Guo, Wang Zhaodong. Control of yield ratio based on ultra fast cooling and mechanical behaviors of high strength aseismic steel[J]. Advanced Materials Research, 2011, 228 ~ 229: 505 ~ 508.

(28) 康健, 王昭东, 王国栋, 袁国, 周晓光. 780MPa 级低屈强比高层建筑用钢的生产工艺研究[J]. 钢铁, 2010, 7(45): 71 ~ 75.

(29) 康健, 王国栋, 袁国, 周晓光. 建筑用高强度低屈强比钢板的冷却工艺[J]. 材料热处理学报, 2010, 31(11): 79 ~ 84.

(30) Yuan Guo, Kang Jian, Wang Zhaodong, Wang Guodong. Effect of heat

treatment on microstructure and mechanical properties of HSLA plate steel[C]. 10th International Conference on Steel Rolling, ICSR. Beijing, China. 2010. 9. 15 ~ 2010. 9. 17.

专利:

(1) 袁国, 利成宁, 康健, 王国栋, 姬凤芹, 刘洛甫. 一种一钢多级的热轧钢板及其制造方法 (发明专利-授权), 2015, 中国, 201310621228. 8.

(2) 袁国, 潘瑛, 唐士贵, 薛越, 利成宁, 康健. 一种基于 CSP 工艺的厚规格热轧双相钢制造方法 (发明专利-实审), 2015, 中国, 201510053339. 2.

(3) 袁国, 利成宁, 康健, 李振垒, 王国栋. 一种厚规格热轧双相钢板及制造方法 (发明专利-实审), 2014, 中国, 201410414629. 0.

(4) 袁国, 石建辉, 郭杰, 从振华, 江连运, 李振垒, 王黎筠, 王国栋, 刘长久. 一种热轧板带钢轧后超快速冷却区的辊道 (实用新型专利-授权), 2014, 中国, 201410323268. 9.

(5) 袁国, 石建辉, 江连运, 李振垒, 王黎筠, 王国栋. 热轧板带钢冷却设备 (外观专利-授权), 2014, 中国, 201430236687. X.

(6) 袁国, 石建辉, 郭杰, 从振华, 江连运, 李振垒, 王黎筠, 王国栋, 刘长久. 一种热轧板带钢轧后超快速冷却区的辊道 (发明专利-实审), 2014, 中国, 201420375682. X.

(7) 袁国, 王昭东, 王国栋, 王黎筠, 韩毅, 徐义波. 一种产生扁平射流的冷却装置及制造方法 (发明专利-授权), 2013, 中国, 201110191884. X.

(8) 王昭东, 袁国, 田勇, 王丙兴, 李勇, 韩毅, 王黎筠, 王国栋. 一种基于超快速冷却技术的轧后冷却系统及该系统的应用方法 (发明专利-授权), 2013, 中国, 201110201555. 9.

(9) 王昭东, 康健, 袁国, 王国栋. 一种 780MPa 级低屈强比建筑用钢板及其制造方法 (发明专利-授权), 2012, 中国, 201010561371. 9.

(10) 袁国, 王昭东, 王国栋, 王黎筠, 韩毅, 徐义波. 一种生产扁平射流的冷却装置 (实用新型专利-授权), 2012, 中国, 201120240767. 3.

(11) 袁国, 王昭东, 田勇, 王丙兴, 李勇, 韩毅, 王国栋, 王黎筠. 一种

超快速冷却技术的轧后超快速冷却装置（实用新型专利-授权），2012，中国，201120256381.1.

(12) 袁国, 王昭东, 王国栋, 王黎筠, 李海军, 韩毅, 徐义波. 热轧板带钢生产线用轧后超快速冷却系统的成套装置（实用新型专利-授权），2012，中国，201120254365.9.

(13) 王昭东, 袁国, 王国栋, 王黎筠, 韩毅, 徐义波. 一种可形成高密度喷射流的冷却装置及制造方法（发明专利-授权），2012，中国，201110191865.7.

(14) 袁国, 李俊峰, 王国栋, 廖志, 王昭东, 王慎德, 王黎筠, 成小军, 韩毅, 龙明建, 刘旭辉, 杨辉. 一种用于热轧板带钢生产线的轧后冷却系统（发明专利-授权），2012，中国，201010221518.X.

获奖:

(1) 非等温碳分配条件下热轧 DQ&P 工艺研究. 2015, 辽宁省教育厅: 大学生创新实验计划优秀论文.

(2) 热轧板带钢新一代 TMCP 技术及应用. 2013, 中国金属学会: 中国冶金科学技术奖一等奖.

(3) 500 ~ 700MPa 低成本热轧双相钢的研究与开发. 2012, 辽宁省教育厅: 辽宁省优秀硕士学位论文.

4. 项目完成人员

主要完成人员	职 称	单 位
王国栋	教授	东北大学 RAL 国家重点实验室
袁 国	教授	东北大学 RAL 国家重点实验室
王昭东	教授	东北大学 RAL 国家重点实验室
李海军	副教授	东北大学 RAL 国家重点实验室
王黎筠	高工	东北大学 RAL 国家重点实验室
唐 帅	副教授	东北大学 RAL 国家重点实验室
康 健	博士后	东北大学 RAL 国家重点实验室

续表

主要完成人员	职 称	单 位
李振垒	博士后	东北大学 RAL 国家重点实验室
江连运	博士生	东北大学 RAL 国家重点实验室
李旭东	博士生	东北大学 RAL 国家重点实验室
石建辉	博士生	东北大学 RAL 国家重点实验室
利成宁	博士生	东北大学 RAL 国家重点实验室
赵金华	博士生	东北大学 RAL 国家重点实验室
王晓晖	博士生	东北大学 RAL 国家重点实验室
李 明	高工	迁钢公司
余 威	高工	迁钢公司
江 潇	高工	迁钢公司
刘文斌	高工	迁钢公司
赵 林	高工	迁钢公司
牛 涛	高工	首钢技术研究院
李晓磊	工程师	迁钢公司
王学强	工程师	迁钢公司
郭 杰	工程师	迁钢公司
赵春光	工程师	迁钢公司
杨要兵	工程师	迁钢公司
高 伟	工程师	迁钢公司
董立杰	工程师	迁钢公司
辛艳辉	工程师	迁钢公司
吴新郎	工程师	迁钢公司
周 娜	工程师	迁钢公司
潘 瑛	高工	包钢集团
唐贵士	高工	包钢集团
王建刚	高工	包钢集团
薛 越	高工	包钢集团
张大治	高工	包钢集团
任东升	工程师	包钢集团
张 玮	工程师	包钢集团
刘海涛	工程师	包钢集团