

RAL · NEU 研究报告 No.0009

热轧中厚板新一代 TMCP 技术研究与应用

REZHA ZHONGHOUBAN XINYIDAI TMCP JISHU YANJIU YU 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

RAL · NEU 研究报告 No. 0009

热轧中厚板新一代 TMCP 技术研究与应用

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
2014

内 容 简 介

本书全面介绍了热轧中厚板新一代 TMCP 工艺及其核心超快速冷却技术。内容包括射流冲击换热原理、换热过程温度场解析模型、多功能冷却装备、高精度冷却路径控制系统、冷却工艺控制策略及温度场解析、基于新一代 TMCP 工艺的高品质节约型产品研发等。

本书可供从事轧钢工艺及冶金自动化工作的工程技术人员、科研人员阅读,也可供高等院校材料成型及自动化专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

热轧中厚板新一代 TMCP 技术研究与应用/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, 2014. 11

(RAL·NEU 研究报告)

ISBN 978-7-5024-6793-7

I. ①热… II. ①轧… III. ①热轧—中板轧制—研究
②热轧—厚板轧制—研究 IV. ①TG335.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 248448 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 yjchs@cnmp.com.cn

责任编辑 卢 敏 李培禄 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 978-7-5024-6793-7

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;北京百善印刷厂印刷

2014 年 11 月第 1 版, 2014 年 11 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 10.75 印张; 169 千字; 158 页

36.00 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 yjgy.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. 研究项目背景与立项依据

我国钢铁工业面临着产能巨大与资源匮乏、能源消耗高和环境负荷重之间的矛盾，采用以“资源节约、节能减排”为特征的钢铁材料的绿色制造已成为钢铁行业关注的重点。传统 TMCP（控制轧制与控制冷却）技术在提高钢材的强度、韧性等方面起到了重要的作用，但是由于采用“低温大压下”和“微合金化”，必然造成钢材成本的提升和资源的消耗。从整个的钢铁流程来看，要将节能减排技术应用到烧结、炼铁、炼钢和轧钢等工序中，广泛推广先进工艺技术，增加高技术含量、高附加值产品的比重。其中，轧钢过程主要以新技术、新工艺和新产品的开发来实现节约能源、降低成本的目标。

以东北大学王国栋院士为代表的轧钢工作者采用“适当控轧+超快速冷却+接近相变点温度停止冷却+后续冷却路径控制”，通过降低合金元素使用量，结合常规轧制或适当控轧，并尽可能提高终轧温度，实现资源节约型、节能减排型的绿色钢铁产品制造过程，其核心是超快冷技术与装备。这种新的技术在 2007 年被系统提出，命名为“新一代控制轧制和控制冷却工艺（NG-TMCP）”，并且立即引起行业的关注。近年来，以超快冷为核心的新一代的 TMCP 技术，采用冷却速度可调、可以实现极高冷却速度、冷却均匀的控制冷却系统，综合采用细晶强化、析出强化、相变强化等多种强化机制，对钢材的相变过程进行控制，可以明显提高钢材的性能，充分挖掘钢铁材料的潜力。生产实践证明，以新一代 TMCP 工艺技术为特征的创新轧制过程可以明显提高钢材的性能，减少合金元素的用量，降低钢材的生产成本，在节省资源和能源、减少排放方面可以发挥重要作用，具有极为广阔的应用前景。

2. 研究进展与成果

自新一代 TMCP 工艺理论提出以来，东北大学轧制技术及连轧自动化国



国家重点实验室对新一代 TMCP 工艺及其核心超快速冷却技术进行了多年的基础理论和中试试验研究。在此基础上，课题组积极开展了超快速冷却系统在中厚板领域的研发和应用。在国内钢铁企业的大力支持下，通过自主创新，成功开发出涵盖产品工艺、材料、机械、液压、电气、自动化、计算机控制等领域的一体化中厚板轧后先进冷却系统。2009 年，依托河北敬业集团 3000mm 中板生产线，国内首套超快速冷却装备开发成功。2010 年，以首秦 4300mm 和鞍山钢铁集团公司 4300mm 宽厚板生产线为代表的新一代中厚板轧后超快速冷却系统（ADCOS-PM）投产运行。2012 年，以南京钢铁集团 2800mm 中板厂为代表的第二代轧后超快速冷却系统投入使用。此后，该系统先后在南京钢铁集团 4700mm 宽厚板生产线、新余钢铁集团有限公司 3800mm 中厚板生产线、广东省韶关钢铁集团有限公司 3450mm 炉卷轧机生产线中得到推广和使用。依靠以超快速冷却技术为核心的新一代 TMCP 工艺，多种高品质节约型中厚板产品得到开发、生产和利用。

项目研发所取得的创新成果如下：

(1) 深入研究探索射流冲击换热机理，创新性地采用倾斜式射流冲击冷却方法，成功开发出系列多重阻尼的大型整体超宽射流喷嘴，实现高温钢板在水冷条件下的极限冷却能力以及高冷却强度条件下的良好冷却均匀性。

(2) 对设备、液压、电气自动化系统等冷却装备成套系列关键技术集成创新，成功开发出具有常规加速冷却能力、超快速冷却能力和直接淬火能力的多功能一体化成套中厚板轧后先进冷却系统。

(3) 成功开发出一整套中厚板轧后冷却工艺数学模型和品种完善的工艺数据库，涵盖高强低合金钢、低碳贝氏体钢、马氏体钢等，建立多功能冷却系统控制平台，实现了以工艺过程控制为核心的全自动控制。

(4) 建立新一代 TMCP 工艺体系，综合利用细晶强化、相变强化和析出强化等多种强化手段，显著提升产品性能，结合 ACC、UFC 和 DQ 工艺开发出高品质节约型中厚板产品，缩短生产工序，提高生产效率，实现了一系列产品的成本减量化。

目前，采用新一代 TMCP 技术已经完成高等级船舶用钢、高强低合金钢、管线钢、高强工程机械用钢、石油储罐用钢、耐磨钢以及国防工业工程用钢等一系列低成本高品质产品的开发和生产。新一代 TMCP 技术通过研究热轧

钢铁材料超快速冷却条件下的材料强化机制、工艺技术以及产品全生命周期评价技术,采用以超快冷为核心的可控无级调节钢材冷却技术,综合利用固溶、细晶、析出、相变等钢铁材料强化手段,实现钢材主要合金元素用量节省 30% 以上,实现钢铁材料性能全面提升,大幅度提高冲击韧性,节约钢材使用量 5%~10%,提高生产效率 35% 以上,节能贡献率 10%~15%,具有广阔的产业化前景。

3. 论文与专利

论文:

- (1) 王国栋. 新一代 TMCP 技术的发展 [J]. 轧钢, 2012, 29 (1): 1~8.
- (2) 王国栋. 新一代 TMCP 的实践和工业应用举例 [J]. 上海金属, 2008, 30 (3): 1~4.
- (3) 王国栋, 姚圣杰. 超快速冷却工艺及其工业化实践 [J]. 鞍钢技术, 2009, 6: 1~5.
- (4) 王丙兴, 田勇, 袁国, 王昭东, 王国栋. 改善中厚板轧后超快冷均匀性的措施及其应用 [J]. 钢铁, 2012, 47 (6): 51~54.
- (5) 王丙兴, 胡啸, 王昭东, 王国栋. ADCOS-PM 工艺下中厚板冷却速度控制方法 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2012, 33 (4): 509~512.
- (6) 付天亮, 赵大东, 王昭东, 王国栋, 闫金龙. 中厚板 UFC-ACC 过程控制系统的建立及冷却策略的制定 [J]. 轧钢, 2009, 26 (3): 1~6.
- (7) 付天亮, 邓想涛, 王昭东, 崔栋梁. 超快速冷却工艺对中低碳钢组织性能的影响 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2010, 31 (3): 370~373.
- (8) 付天亮, 王昭东, 袁国, 王国栋, 崔栋梁. 中厚板轧后超快冷综合换热系数模型的建立及应用 [J]. 轧钢, 2010, 27 (1): 11~15.
- (9) 胡啸, 苑达, 王丙兴, 田勇, 王昭东, 王国栋. 中厚板轧后超快速冷却系统流量调节技术 [J]. 钢铁, 2012, 47 (5): 45~48.
- (10) 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.
- (11) Chen J, Lv M Y, Tang S, Liu Z Y, Wang G D. Influence of cooling paths on microstructural characteristics and precipitation behaviors in a low carbon V-Ti mi-

croalloyed steel [J]. Materials Science & Engineering A, 2014, 594: 389~393.

(12) Tian Y, Tang S, Wang B, Wang Z, Wang G. Development and industrial application of ultra-fast cooling technology [J]. SCIENCE CHINA Technological Sciences, 2012, 55 (6): 1566.

(13) Wang B, Liu Z, Zhou X, Wang G, Misra R D K. Precipitation behavior of nanoscale cementite in 0.17% carbon steel during ultra fast cooling (UFC) and thermomechanical treatment (TMT) [J]. Materials Science & Engineering A, 2013, 588: 167~174.

(14) Wang Bin, Liu Zhenyu, Zhou Xiaoguang, Wang Guodong, Misra R D K. Precipitation behavior of nanoscale cementite in hypoeutectoid steels during ultra fast cooling (UFC) and their strengthening effects [J]. Materials Science & Engineering A, 2013, 575: 189.

(15) Tang S, Liu Z Y, Wang G D, Misra R D K. Microstructural evolution and mechanical properties of high strength microalloyed steels: ultra fast cooling (UFC) versus accelerated cooling (ACC) [J]. Materials Science & Engineering A, 2013, 580: 257.

(16) 李凡, 衣海龙, 陈军平, 刘振宇, 王国栋. 超快冷技术在鞍钢 Q550 工程机械用钢生产中的应用 [J]. 轧钢, 2011, 28 (5): 7~8.

(17) Chen Xiaolin, Wang Guodong, Tian Yong, Wang Bingxing, Yuan Guo, Wang Zhaodong. An on-line finite element temperature field model for plate ultra fast cooling process [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2014, 21 (5): 481~487.

(18) 刘振宇, 唐帅, 周晓光, 衣海龙, 王国栋. 新一代 TMCP 工艺下热轧钢材显微组织的基本原理 [J]. 中国冶金, 2013, 23 (4): 10~16.

(19) 王丙兴, 苑达, 李勇, 王昭东. 中厚板控制冷却系统中的实测温度处理方法 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2012, 33 (9): 1282~1285.

(20) 胡啸, 苑达, 王丙兴, 王昭东, 王国栋. 中厚板轧后超快速冷却控制系统的开发与应用 [J]. 轧钢, 2013, 30 (1): 52~55.

(21) Wang Bingxing, Xie Qian, Wang Zhaodong, Wang Guodong. Fluid flow characteristics of single inclined circular jet impingement for ultra-fast cooling [J].

Journal of Central South University, 2013, 20: 2960~2966.

(22) 李家栋, 付天亮, 李勇, 田勇, 王昭东, 王国栋. 多补偿复合型超快冷水压控制策略的建立及应用 [J]. 轧钢, 2013, 30 (3): 48~52.

(23) Wang Bingxing, Chen Xiaolin, Tian Yong, Wang Zhaodong, Wang Jun, Zhang Dianhua. Calculation method of optimal speed profile for hot plate during controlled cooling process [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2011, 18 (5): 38~41.

专利:

(1) 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, 2012, 中国, ZL201110191865.7.

(2) 袁国, 王昭东, 王国栋, 王黎筠, 李海军, 韩毅, 徐义波. 一种产生扁平射流的冷却装置及制造方法, 2012, 中国, ZL2201110191884.X.

(3) 王昭东, 袁国, 田勇, 王丙兴, 李勇, 韩毅, 王黎筠, 王国栋. 一种基于超快冷技术的轧后冷却系统及该系统的应用方法, 2012, 中国, ZL201110201555.9.

(4) 王丙兴, 田勇, 王昭东, 袁国, 王国栋, 李勇, 韩毅. 用于改善中厚板轧后超快冷冷却均匀性的方法, 2012, 中国, ZL201110312196.4.

(5) 李勇, 王昭东, 田勇, 王丙兴, 袁国, 王国栋, 韩毅, 胡啸. 一种加快超快冷变频泵水压系统稳定速度的方法, 2012, 中国, ZL201110388054.6.

(6) 王丙兴, 王君, 张殿华, 胡贤磊, 王昭东, 刘相华, 王国栋. 中厚板层流冷却链式边部遮蔽装置控制方法, 2009, 中国, ZL200910010734.7.

(7) 李勇, 王昭东, 袁国, 韩毅, 王国栋, 王超. 一种用于中厚板辊式淬火过程的温度在线测量装置, 2012, 中国, ZL201110388020.7.

(8) 王昭东, 谢谦, 王丙兴, 田勇, 王国栋, 韩毅, 李勇, 付天亮. 一种中厚板在线多功能冷却装置, 审查中, 中国, ZL201410121528.4.

(9) 王丙兴, 胡啸, 王昭东, 王国栋, 李勇, 韩毅, 田勇. 一种中厚板在线冷却装置及控制方法, 审查中, 中国, ZL201410121555.1.

(10) 王丙兴, 张田, 王昭东, 王国栋, 田勇, 韩毅, 李勇. 一种中厚板轧后超快速冷却装置, 审查中, 中国, ZL201310693318.8.

4. 项目完成人员

姓 名	职 称	单 位
王国栋	教授（院士）	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
王丙兴	讲师	东北大学 RAL 国家重点实验室
田 勇	副教授	东北大学 RAL 国家重点实验室
袁 国	副教授	东北大学 RAL 国家重点实验室
付天亮	讲师	东北大学 RAL 国家重点实验室
韩 毅	工程师	东北大学 RAL 国家重点实验室
李 勇	讲 师	东北大学 RAL 国家重点实验室
王黎筠	高级工程师	鞍钢集团设计研究院
高俊国	高级工程师	东北大学 RAL 国家重点实验室
张福波	副教授	东北大学 RAL 国家重点实验室
李家栋	讲 师	东北大学 RAL 国家重点实验室
赵大东	讲师	辽宁科技大学
刘振宇	教授	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
周晓光	副教授	东北大学 RAL 国家重点实验室
衣海龙	副教授	东北大学 RAL 国家重点实验室
王 斌	博士后	东北大学 RAL 国家重点实验室
张志福	工程师	东北大学 RAL 国家重点实验室
徐义波	工程师	东北大学 RAL 国家重点实验室
胡 啸	博士	东北大学 RAL 国家重点实验室
苑 达	博士	东北大学 RAL 国家重点实验室
陈小林	博士	东北大学 RAL 国家重点实验室
谢 谦	博士	东北大学 RAL 国家重点实验室
张 田	博士	东北大学 RAL 国家重点实验室
郑明军	工程师	东北大学 RAL 国家重点实验室
熊 磊	工程师	东北大学 RAL 国家重点实验室
宋国智	工程师	东北大学 RAL 国家重点实验室
曲武广	工程师	东北大学 RAL 国家重点实验室
毕 然	工程师	东北大学 RAL 国家重点实验室
赵天龙	工程师	东北大学 RAL 国家重点实验室
武志强	工程师	东北大学 RAL 国家重点实验室
郭喜涛	硕士	东北大学 RAL 国家重点实验室
赵永畅	硕士	东北大学 RAL 国家重点实验室

5. 报告执笔人

王丙兴、田勇、王昭东、王国栋。

6. 致谢

热轧中厚板新一代 TMCP 技术的研究、开发与应用，前后历经 10 余年时间。作为新一代 TMCP 工艺技术的开创者和领路人，王国栋院士勇于创新、追求卓越，带领课题研究团队不断克服研究过程中遇到的各类难题。王院士身体力行、求真务实的精神是新一代 TMCP 工艺技术能够迅速从理论知识转化为科技生产力的最强推动力。课题实施期间，实验室领导的关心、指导和帮助，为研究工作提供了很大的支持。实验室多位老师、研究生和工程师的勇于奉献、艰苦工作和尽职尽责的科研精神为课题不断取得突破和工程项目顺利实施提供了有效保障。

热轧中厚板新一代 TMCP 技术的开发与应用得到了河北敬业钢铁有限公司、鞍山钢铁集团公司、首秦金属材料有限公司、河北普阳钢铁有限公司、南京钢铁集团有限公司、福建三钢闽光股份有限公司、江西新余钢铁集团有限公司、广东韶钢松山股份有限公司等钢铁企业领导和专家的信任和大力支持，在项目实施过程中得到了现场工程技术人员的理解与配合。

再次感谢所有为自主创新热轧中厚板新一代 TMCP 技术开发做出贡献的人们。

目 录

摘要	1
1 绪论	3
1.1 引言	3
1.2 国内外超快速冷却技术研究现状	4
1.3 中厚板超快速冷却难点及关键技术	5
1.4 课题背景、研究目标和研究内容	7
2 高温钢板射流冲击冷却换热机理研究	9
2.1 高温钢板水冷换热基本原理	9
2.1.1 沸腾换热原理	9
2.1.2 沸腾换热过程中的气泡状态	10
2.1.3 层流冷却换热机理	10
2.1.4 垂直射流冲击冷却换热机理	12
2.1.5 倾斜射流冲击冷却换热机理	14
2.2 射流冲击换热特性研究	15
2.2.1 Re 和 Pr 计算	15
2.2.2 Nu 计算及射流换热特性分析	16
2.3 射流冲击换热数学模型的建立	17
3 中厚板超快速冷却条件下的温度场解析模型	19
3.1 导热微分方程	19
3.2 相变潜热计算方法	20
3.2.1 相变开始温度计算	21



3.2.2	相变转变量计算	23
3.2.3	相变潜热计算	24
3.3	钢板热物性参数处理	26
3.3.1	确定热导率	26
3.3.2	确定钢板密度	27
3.3.3	确定热扩散率	27
3.4	钢板内部导热有限元解析模型的建立	28
3.4.1	有限单元网格划分	30
3.4.2	时间步长确定	30
3.5	换热系数模型的建立	31
3.6	厚向平均温度处理方法	31
3.7	瞬时冷却速度计算模型的建立	33
4	中厚板多功能冷却装备研发	34
4.1	湍流射流的控制方程和标准 $k-\varepsilon$ 模型	34
4.1.1	湍流射流的控制方程	34
4.1.2	标准 $k-\varepsilon$ 模型	36
4.2	整体狭缝式喷水系统的结构设计	39
4.2.1	整体狭缝式喷嘴设计	39
4.2.2	狭缝倾斜射流冲击流体流动规律分析	39
4.3	阵列式高密快冷喷嘴的结构设计	44
4.3.1	高密快冷喷嘴设计	44
4.3.2	圆形倾斜射流冲击流体流动规律分析	45
4.4	超快速冷却整体装备的开发与集成	59
4.4.1	上冷却区域内集管配置	59
4.4.2	上下集管对称布置配置	61
4.4.3	挡水辊切分冷却单元	63
4.4.4	上下水量配比控制	64
4.4.5	残水控制	64
4.4.6	液压多缸同步保护系统设计	65

4.4.7	超快速冷却装备的整体集成	65
5	高精度冷却路径控制系统研发	67
5.1	控制系统组成	67
5.1.1	基础自动化控制系统	67
5.1.2	过程自动化控制系统	68
5.1.3	冷却工艺参数优化窗口	75
5.1.4	超快冷系统与相关系统的无缝衔接	76
5.2	超快速冷却系统关键控制技术	76
5.2.1	压力-流量耦合快速高精度控制	76
5.2.2	高精度钢板位置微跟踪技术	81
5.2.3	纵向均匀性自动控制技术	82
5.2.4	横向均匀性自动控制技术	84
5.2.5	实测温度检测与处理	85
5.2.6	冷却路径控制	91
6	冷却工艺策略及温度场分析	95
6.1	各冷却工艺参数下温度场模拟分析	95
6.1.1	不同厚度规格条件下温度场分析	96
6.1.2	不同水流密度条件下温度场分析	98
6.2	各冷却策略下温度场模拟分析	100
6.2.1	通过式冷却模式	100
6.2.2	特殊冷却模式	105
7	中厚板超快速冷却技术的应用	107
7.1	超快冷技术应用概况	107
7.1.1	鞍钢厚板 4300mm 轧机轧后快速冷却系统	107
7.1.2	首秦中厚板厂 4300mm 轧后冷却系统	108
7.1.3	南钢 2800mm 轧后超快速冷却设备研制及工艺开发	109
7.1.4	三钢 3000mm 中厚板厂轧后超快速冷却系统	111

7.1.5	南钢 4700mm 宽厚板工程控制冷却装置	113
7.1.6	新余 3800mm 超快冷设备技术集成与工艺创新项目	114
7.1.7	韶钢板材部 3450mm 生产线增设超快速冷却系统工程	115
7.2	超快冷系统实际应用效果	117
7.2.1	终冷温度高精度控制	117
7.2.2	冷却速率大范围无级调节	117
7.2.3	良好板形控制	118
7.2.4	良好表面质量控制	119
7.2.5	多彩的在线热处理工艺	119
8	基于新一代 TMCP 工艺的节约型高品质产品研发	122
8.1	新一代 TMCP 工艺 UFC-F 的应用	122
8.1.1	低成本 Q345 系列产品	122
8.1.2	低成本 Q460q 系列产品工业试制	126
8.1.3	低成本船板 AH36 的试制	126
8.2	新一代 TMCP 工艺中 UFC-B 的应用	128
8.2.1	管线钢的超快冷工艺开发	128
8.2.2	工程机械用钢的超快冷工艺开发	136
8.2.3	水电钢的超快冷工艺开发	145
8.2.4	储罐用钢的超快冷工艺开发	148
8.3	新一代 TMCP 工艺中 UFC-M (DQ) 的应用	149
9	结论	152
	参考文献	154

摘 要

钢铁工业作为我国当前工业化发展进程中的重要支柱产业，对国民经济建设和发展的贡献很大。以“资源节约、节能减排”为特征的钢铁材料的绿色制造技术已成为钢铁行业关注的重点，也是实现钢铁工业可持续发展的关键要素之一，更是我国钢铁工业发展的必然趋势。90%以上的钢铁产品需要进行热轧工序，新一代TMCP技术可以综合运用细晶强化、析出强化、相变强化等强化机制，充分挖掘工艺潜力，实现热轧产品的低成本、减量化生产。本课题围绕新一代TMCP工艺的核心——超快速冷却技术展开研究工作，重点解决以下关键理论和技术难题：

(1) 研究射流冲击冷却换热规律，提高冷却能力与效率。开发新型喷射冷却核心装置，使其冷却能力达到传统层流冷却装置的2~5倍，能够实现中厚钢板的超快速冷却，同时实现换热能力大范围连续调整，满足产品不同冷却强度的工艺需求。

(2) 板形问题是轧后冷却技术的瓶颈问题，冷却均匀性决定了产品的成材率及使用性能。因此如何确保在极限冷速条件下钢板厚向、横向和纵向全方位的冷却均匀性是决定其能否实现良好工业化应用的关键所在。在中厚板生产中，应充分发挥预矫直机对来钢板形的平整作用，并结合射流冲击冷却技术特点，极大改善冷却过程中钢板的均匀性，同时增强冷却水与热轧钢板之间的换热效率。

(3) 研发成套新型轧后冷却装置全面取代冷却强度低、冷却均匀性差的层流冷却装置。新型ADCOS-PM装备通过调整供水压力和集管流量，能够实现冷却能力的连续大范围调整以及ACC/UFC/DQ等冷却工艺。

(4) 中厚板轧后冷却过程中将发生复杂的相变，冷却过程中对温度路径的控制可以实现对材料相变过程的有效调控，从而得到所需材料性能。建立了高精度自动化控制系统，实现对终冷温度、冷却速度以及冷却路径等核心冷却工艺参数的高精度控制，以满足中厚板产品品种繁多、生产节奏快、冷



却工艺窗口狭窄的产品生产需求。

(5) 根据新一代 TMCP 技术的优势和特征, 针对热轧中厚板产品的使用需求, 探索新一代 TMCP 技术的强化机理, 以满足传统 TMCP 工艺产品、新一代 TMCP 工艺产品以及 DQ 工艺产品的生产需要。发展新一代 TMCP 技术条件下的组织性能预测并优化理论框架与方法, 最终实现“成分节约型、工艺减量化”中厚板产品的生产。

关键词: 新一代 TMCP 技术; 中厚板; 控制冷却; 射流冲击换热; 超快速冷却; 冷却均匀性; 节约型减量化

1 绪 论

1.1 引言

钢铁工业作为我国当前工业化发展进程中的重要支柱产业，对国民经济建设和发展的贡献很大。因此持续稳定地生产低成本、高质量的钢铁产品与掌握石油、粮食等战略资源具有同等重要的地位。进入 21 世纪，能源问题已经成为一个全球性的话题。同样地，我国钢铁工业也面临着行业巨大产能与资源自给、能源消耗、环境负荷之间的矛盾所带来的严峻挑战。采用资源节约型的成分设计，大力发展节约型、高性能及可协助下游用户实现绿色制造的钢材品种，节省资源用量和降低能源消耗，减少对合金元素的过度依赖、节能减排、获得性能优良且环境友好的热轧钢铁产品，已成为钢铁行业实现以“资源节约、节能减排”为目标的钢铁材料的绿色制造所关注的重点，也是实现钢铁工业可持续发展的关键要素之一，更是我国钢铁工业发展的必然趋势^[1-3]。从整个的钢铁生产流程来看，要将节能减排技术应用到烧结、炼铁、炼钢和轧钢等工序中，广泛推广先进工艺技术，增加高技术含量、高附加值产品的比重。其中，轧钢过程主要以新技术、新工艺和新产品的开发来实现节约能源、降低成本的目标。

控制轧制和控制冷却^[4-6]是 20 世纪轧制技术最伟大的成果之一，对于高性能钢铁材料的开发和生产具有十分重要的意义。目前，TMCP 技术在高强度板带钢生产领域得到了广泛应用。控制冷却技术^[7-15]是 TMCP 技术的重要组成部分，它通过改变轧后冷却条件来控制相变和碳化物的析出行为，从而改善钢板组织和性能。热轧钢板轧后快速冷却，可以充分挖掘钢材潜力，提高钢材强度，改善其塑性和焊接性能。轧后冷却技术为钢铁材料的进步做出了巨大贡献，而超快速冷却技术^[16-20]的开发，更是丰富了轧后冷却工艺的控制手段，有利于直接生产高性能产品，缩短生产流程，降低能源消耗。