

RAL · NEU 研究报告 No.0020

新一代 TMCP 条件下热轧钢材 组织性能调控基本规律及典型应用

XINYIDAI TMCP TIAOJIANXIA REZHA GANGCAI ZUZHIXINGNENG TIAOKONG JIBEN GUIULU JI DIANXING 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. 0020

新一代 TMCP 条件下热轧钢材 组织性能调控基本规律及典型应用

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

本研究报告介绍了东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室在以超快速冷却技术为核心的新一代 TMCP 条件下组织性能调控基本规律及应用方面的最新进展。报告主要介绍了新一代 TMCP 条件下的奥氏体组织细化和奥氏体应变诱导析出控制技术,以及新一代 TMCP 的细晶强化、析出强化和相变强化控制技术,最后介绍了典型工业化应用情况。

本报告可供冶金、材料、机械、交通、能源等部门的科技人员及高等院校有关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

新一代 TMCP 条件下热轧钢材组织性能调控基本规律
及典型应用/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 978-7-5024-7116-3

I. ①新… II. ①轧… III. ①热轧—钢筋—研究
IV. ①TG335.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 316522 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 yjcb@cnmp.com.cn

策 划 任静波 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 978-7-5024-7116-3

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; 8.75 印张; 137 千字; 121 页

51.00 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

当代社会发展所面临的主要矛盾是资源枯竭与经济的可持续发展。我国钢铁产业的发展目前正面临资源匮乏（如铁矿石 60% 以上依赖进口）、环境和自然生态不堪重负等严重问题，“资源节约、环境友好、性能质量优良”即资源节约型高性能钢铁产品的开发是当前钢铁技术发展必须解决的一个主要问题。如何通过工艺技术、关键装备和生产流程的优化和创新，最大限度发挥轧制、轧后冷却和热处理等生产环节对钢铁材料强韧化机制和性能的调控作用，尽量减少对合金元素的消耗，减轻环境负荷，是实现钢铁材料本身的节约化和“产品生产-使用-循环”全生命周期的减量化的基础。

控制轧制与控制冷却（Thermomechanical Control Process, TMCP）工艺是保证钢材强韧性的核心技术。它的基本冶金学原理是，在再结晶温度以下进行大变形来实现奥氏体晶粒的细化和加工硬化，轧后采用加速冷却，实现对处于硬化状态的奥氏体相变进程的控制，获得晶粒细小的最终组织。实现这种工艺的前提是提高钢中微合金元素含量或进一步提高轧机能力。此外，传统 TMCP 技术生产高强钢厚板时，需要提高钢中合金元素含量或进行轧后离线热处理，否则无法突破强度和厚度规格的极限。热轧钢铁材料的相变主要在轧后冷却过程中完成，它是调控最终组织性能的主要手段。因此，为实现节约型高性能钢材的生产，必须对轧后冷却技术进行创新以实现冷却路径和冷却速率的优化控制，使成分简单的钢铁材料能够具备满足多样化要求的性能指标。

为弥补传统控制冷却技术的不足，国外先进钢铁企业相继开发出了热轧板带和中厚板轧后超快速冷却技术（Ultra Fast Cooling-UFC、CLC- μ 或 Super-OLAC）。它们的共同特点是，与传统层流冷却相比，可有效打破汽膜，实现对热轧钢板进行高效率、高均匀性的冷却，3mm 厚钢板冷却速度可达

400℃/s, 50mm 厚中厚板冷却速度可达 20℃/s, 超快冷条件下的冷却速度是传统层流冷却条件下的 2 倍以上, 在实现高冷却速度的同时, 可避免因冷却不均匀而产生的残余应力, 大幅提高热轧钢板在实际应用中的性能, 而材料成本和生产过程中的各类消耗则大幅度降低。超快速冷却技术不仅丰富轧后冷却路径控制手段, 而且会产生很多新的钢材强韧化机理。因此, 开展超快速冷却条件下的热轧钢材各种物理冶金学规律的深入研究, 将对钢材生产产生重大意义, 采用传统 TMCP 来提高钢材性能的技术理念正在被应用轧后超快速冷却的新一代 TMCP 技术所取代。然而, 由于国外轧钢领域对新技术一向采取严密封锁的政策, 而国内这方面又缺乏必要的研究准备, 导致在发挥新一代 TMCP 技术优势来调控钢材组织性能方面还没有相应的理论支撑, 为实现轧后钢板的显微组织的精细控制带来了困难。因此, 开展以超快速冷却为核心的新一代 TMCP 条件下钢材显微组织结构演变机理和精细控制的研究既有理论意义又有紧迫的现实意义。

2. 研究进展与成果

我国正处在后工业化进程中, 钢铁工业作为支柱性产业, 对促进国民经济的发展具有重要作用。但与发达国家相比, 我国钢铁行业在资源节约和环境友好的工艺技术与产品的研发及应用均明显落后, 高技术含量、高附加值产品比例明显偏低。因此, 迫切需要开发并应用资源节约型高品质钢材。

热轧结构钢占钢材总量的 80% 以上, 广泛应用于国民经济的各个领域, 而控制轧制和控制冷却技术是保证热轧钢材强韧性的核心, 因此是钢铁生产流程中最具创新活力的领域之一, 也是实现资源节约型高品质钢材开发和应用的基础。长期以来, 传统 TMCP 技术一直以“添加微合金元素和低温大压下”为核心, 但其提升钢材性能的空间已受到极大限制。

为了进一步发掘钢材潜力、克服传统 TMCP 的局限性, 日本、美国及德国等工业发达国家开始研发并应用以轧后超快速冷却技术为核心的控轧控冷(新一代 TMCP) 技术。但有关新一代 TMCP 下的物理冶金原理尚不明确, 这成为进一步提升钢材品质的主要障碍。另外, 发达国家的钢铁企业均将 TMCP 技术视为企业生存的命脉而加以保护。因此, 我国钢铁行业为真正实现资源节约型高品质产品的生产, 必须开发具有自主知识产权的相关技术。

(1) 通过系统研究以超快冷为核心的新一代 TMCP 控制技术, 明确了新一代 TMCP 工艺条件下的物理冶金学原理, 开发出具有自主知识产权的新一代 TMCP 生产技术体系。

1) 系统阐述了新一代 TMCP 工艺在细化组织中的作用规律及机理。在奥氏体向铁素体相变过程中, 增大过冷度可以细化铁素体/珠光体晶粒。连续冷却相变时, 冷却速率的高低影响相变时过冷度的大小, 冷却速率越大, 过冷度越大, 因此增加相变过程中的冷却速率, 充分发挥超快冷在相变区过程中细化晶粒的作用, 可以大幅度提高钢材的强韧性。

2) 对比研究了常规层流冷却工艺和 UFC 工艺条件下的沉淀析出规律, 阐明了新一代 TMCP 工艺在细化沉淀粒子中的作用规律及机理。

在新一代 TMCP 中, 使用超快冷技术可抑制碳氮化物在高温奥氏体中的沉淀析出, 使更多的微合金元素在奥氏体中保持固溶状态, 进入到铁素体相变温度范围内, 形成尺寸在 2~10nm 的微细弥散析出相, 可以大幅度提高钢材的强韧性。

3) 研究了新一代 TMCP 条件下奥氏体状态演变规律与调控方法研究, 提出了与轧后超快速冷却相适应的最优控制轧制工艺。

系统研究了控轧控冷工艺参数对奥氏体组织细化的影响规律, 阐明了超快速冷却调控奥氏体状态的机理。研究发现, 轧后采用超快速冷却, 为适当提高轧制温度提供了可能性, 缩短了轧制过程中的待温时间, 使轧制时间节约 2~4min; 避免了低温大压下, 使轧制力降低 34%~46%; 并且减少了微合金元素的应变诱导析出。

4) 开发出可实现高强度与高韧性最佳组合的贝氏体相变控制技术, 阐明了超快速冷却提高热轧钢材强韧性的机理。

采用超快速冷却, 可有效细化 M/A 岛、促进大取向差板条贝氏体的形成、抑制碳的配分、提高大角晶界比例。采用“超快速冷却→400℃→空冷”的冷却路径, 可获得高强度, 其屈服强度高达 876MPa, 韧脆转变温度低于 -60℃。

(2) 采用节约型成分设计路线, 合金元素的用量与常规产品相比降低 20%以上, 综合运用新一代 TMCP 生产技术, 系统研究了节约型低合金、船板、高强工程机械用钢、高性能桥梁用钢和建筑用钢的超快冷工艺, 并成功



推广应用于海洋工程用钢、高等级管线用钢、水电和储油罐用钢等钢种。

通过与国内外同类产品的合金成本、生产工艺技术先进性及产品使用性能指标对比,本项目所开发的新技术实现了高精度、稳定化控制,所开发的新产品实现了节约型和减量化,产生了显著的经济效益,具有很强的市场竞争力。

3. 论文、专利、鉴定及获奖情况

论文:

(1) Liu Z, Tang S, Cai X, et al. Precipitation strengthening of micro-alloyed steels thermo-mechanically processed by ultra fast cooling [M]. 2012: 706~709, 2320~2325.

(2) 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.

(3) Chen J, Tang S, Liu Z, et al. Strain-induced precipitation kinetics of Nb (C, N) and precipitates evolution in austenite of Nb-Ti micro-alloyed steels [J]. Journal of materials science, 2012, 47 (11): 4640~4648.

(4) Chen J, Tang S, Liu Z, et al. Effects of cooling process on microstructure, mechanical properties and precipitation behaviors of niobium-titanium micro-alloyed steel [J]. Acta metallurgica sinica, 2012, 48 (4): 441~449.

(5) Wang B, Liu Z, Zhou X, et al. Effect of cooling path on the hole-expansion property of medium carbon steel [J]. Acta metallurgica sinica, 2012, 48 (4): 435~440.

(6) Yi H, Xu Y, Liu Z, et al. Influence of cooling rate on the microstructures and properties of a Nb-Ti-Mo steel [M]. 2012: 14~17, 152~154.

(7) Chen J, Li F, Liu Z Y, et al. Influence of deformation temperature on gamma-alpha phase transformation in Nb-Ti microalloyed steel during continuous cooling [J]. ISIJ international, 2013, 53 (6): 1070~1075.

(8) Chen J, Tang S, Liu Z, et al. Influence of molybdenum content on trans-

formation behavior of high performance bridge steel during continuous cooling [J]. *Materials & design*, 2013, 49: 465~470.

(9) Chen J, Tang S, Liu Z, et al. Microstructural characteristics with various cooling paths and the mechanism of embrittlement and toughening in low-carbon high performance bridge steel [J]. *Materials science and engineering A*, 2013, 559: 241~249.

(10) Tang S, Liu Z Y, Wang G D. 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.

(11) Wang B, Liu Z, Zhou X, et al. Calculation of transformation driving force for the precipitation of nano-scaled cementites in the hypoeutectoid steels through ultra fast cooling [J]. *Acta metallurgica sinica*, 2013, 49 (1): 26~34.

(12) Wang B, Liu Z, Zhou X, et al. Improvement of hole-expansion property for medium carbon steels by ultra fast cooling after hot strip rolling [J]. *Journal of iron and steel research international*, 2013, 20 (6): 25~32.

(13) Wang B, Liu Z, Zhou X, et al. Precipitation behavior of nanoscale cementite in 0.17% carbon steel during ultra fast cooling(UFC) and thermomechanical treatment (TMT)[J]. *Materials science and engineering A*, 2013, 588: 167~174.

(14) Wang B, Liu Z, Zhou X, et al. Precipitation behavior of nanoscale cementite in hypoeutectoid steels during ultra fast cooling (UFC) and their strengthening effects [J]. *Materials science and engineering A*, 2013, 575: 189~198.

(15) Chen J, Lv M Y, Tang S, et al. Microstructure, mechanical properties and interphase precipitation behaviors in V-Ti microalloyed steel [J]. *Acta metallurgica sinica*, 2014, 50 (5): 524~530.

(16) Chen J, Lv M Y, Tang S, et al. Low-Carbon bainite steel with high strength and toughness processed by recrystallization controlled rolling and ultra fast cooling (RCR plus UFC)[J]. *ISIJ international*, 2014, 54 (12): 2926~2932.

(17) Chen J, Lv M Y, Tang S, et al. Influence of cooling paths on microstructural characteristics and precipitation behaviors in a low carbon V-Ti microalloyed steel [J]. *Materials science and engineering A*, 2014, 594: 389~393.



(18) Wang B, Liu Z, Feng J, et al. Precipitation behavior and precipitation strengthening of nanoscale cementite in carbon steels during ultra fast cooling [J]. Acta metallurgica sinica, 2014, 50 (6): 652~658.

(19) Yi H, Long L, Liu Z, et al. Investigation of precipitate in polygonal ferrite in a Ti-microalloyed steel using TEM and APT [J]. Steel research international, 2014, 85 (10): 1446~1452.

(20) Yi H, Xu Y, Sun M, et al. Influence of finishing cooling temperature and holding time on nanometer-size carbide of Nb-Ti microalloyed steel [J]. Journal of iron and steel research international, 2014, 21 (4): 433~438.

(21) Zhou X, Liu Z, Song S, et al. Upgrade rolling based on ultra fast cooling technology for C-Mn steel [J]. Journal of iron and steel research international, 2014, 21 (1): 86~90.

(22) Ji F Q, Li C N, Tang S, et al. Effects of carbon and niobium on microstructure and properties for Ti bearing steels [J]. Materials science and technology, 2015, 31 (6): 695~702.

(23) Zhou X, Wang M, Liu Z, et al. Precipitation behavior of Nb in steel under ultra fast cooling conditions [J]. Journal of Wuhan university of technology-materials science edition, 2015, 30 (2): 375~379.

(24) 王国栋, 吴迪, 刘振宇, 王昭东. 中国轧钢技术的发展现状和展望 [J]. 中国冶金, 2009, 12: 1~14.

(25) 王国栋, 刘振宇. 新一代节约型高性能结构钢的研究现状与进展 [J]. 中国材料进展, 2011, 12: 12~17, 33.

(26) 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, 04: 10~16.

(27) 刘振宇, 周砚磊, 狄国标, 王国栋. 高强度厚规格海洋平台用钢研究进展及应用 [J]. 中国工程科学, 2014, 02: 31~38.

(28) 刘振宇, 陈俊, 唐帅, 王国栋. 新一代舰船用钢制备技术的现状与发展展望 [J]. 中国材料进展, 2014, Z1: 595~602, 629.

(29) 刘振宇, 唐帅, 陈俊, 叶其斌, 王国栋. 海洋平台用钢的研发生产

现状与发展趋势 [J]. 鞍钢技术, 2015, 01: 1~7.

(30) 王国栋, 刘相华, 朱伏先, 刘振宇, 杜林秀, 刘彦春. 新一代钢铁材料的研究开发现状和发展趋势 [J]. 鞍钢技术, 2005, 04: 1~8.

(31) 王斌, 周晓光, 刘振宇, 王国栋. 超快速冷却对中碳钢组织和性能的影响 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2011, 01: 48~51.

(32) 刘振宇, 王国栋. 热轧钢材氧化铁皮控制技术的最新进展 [J]. 鞍钢技术, 2011, 02: 1~5, 40.

(33) 谢章龙, 陈俊, 刘振宇, 王国栋. 直接双相区热处理工艺参数对 9Ni 钢组织性能的影响 [J]. 材料热处理学报, 2011, 05: 68~73.

(34) 卢敏, 周晓光, 刘振宇, 王国栋, 狄国标. 冷却工艺对 X80 级抗大变形管线钢组织性能的影响 [J]. 材料热处理学报, 2011, 07: 83~88.

(35) 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, 05: 7~8, 50.

(36) 周晓光, 卢敏, 刘振宇, 王国栋. 超快冷对 X80 管线钢屈强比的影响 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2012, 02: 199~202.

(37) 王斌, 刘振宇, 周晓光, 王国栋. 轧后冷却路径对中碳钢扩孔性能的影响 [J]. 金属学报, 2012, 04: 435~440.

(38) 陈俊, 唐帅, 刘振宇, 王国栋. 冷却方式对 Nb-Ti 微合金钢组织和性能及沉淀行为的影响 [J]. 金属学报, 2012, 05: 441~449.

(39) 李凡, 衣海龙, 刘振宇, 王国栋. 超快冷工艺下工程机械用 550MPa 级钢的组织与性能 [J]. 机械工程材料, 2012, 04: 34~36.

(40) 周晓光, 刘振宇, 吴迪, 王国栋. 超快速冷却终止温度对 X80 管线钢组织和性能的影响 [J]. 机械工程材料, 2012, 10: 5~7, 100.

(41) 周晓光, 刘振宇, 吴迪, 王国栋. 控制冷却对 C-Mn 钢力学性能的影响 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2010, 03: 362~365.

(42) 唐帅, 刘振宇, 王国栋. 低屈强比 590/780MPa 建筑用钢 DL-T 工艺研究 [J]. 轧钢, 2010, 01: 6~10.

(43) 胡恒法, 王国栋, 刘振宇, 贾涛. 钢材柔性化生产技术的开发与应
用 [J]. 钢铁, 2010, 07: 52~56.

(44) 唐帅, 刘振宇, 王国栋, 何元春. 高层建筑用钢板的生产现状及发



展趋势 [J]. 钢铁研究学报, 2010, 10: 1~6, 11.

(45) 衣海龙, 徐洋, 徐兆国, 刘振宇, 王国栋. 低成本 780MPa 级热轧高强钢的组织与性能 [J]. 机械工程材料, 2010, 12: 37~39.

(46) 王斌, 刘振宇, 周晓光, 王国栋. 超快速冷却条件下亚共析钢中纳米级渗碳体析出的相变驱动力计算 [J]. 金属学报, 2013, 01: 26~34.

(47) 杨浩, 周晓光, 刘振宇, 王国栋. Nb 在超快冷条件下的低温析出行为 [J]. 钢铁, 2013, 01: 75~81.

(48) 陈俊, 唐帅, 刘振宇, 王国栋. 超快冷终冷温度对桥梁钢组织性能的影响 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2013, 04: 524~527.

(49) 周晓光, 王猛, 刘振宇, 吴迪, 王国栋. 超快冷对 X70 管线钢组织和性能的影响 [J]. 材料热处理学报, 2013, 09: 80~84.

(50) 刘振宇, 王斌, 王国栋. 纳米级渗碳体强韧化节约型高强钢研究 [J]. 鞍钢技术, 2013, 06: 1~7.

(51) 贾涛, 魏娇, 冯洁, 张维娜, 刘振宇, 王国栋. 低碳钛、钒微合金钢中的相间析出 [J]. 中国工程科学, 2014, 01: 88~92.

(52) 衣海龙, 徐洋, 刘振宇, 王国栋. 超快冷+层流冷却工艺对 Mn-Ti 钢组织与性能影响 [J]. 材料热处理学报, 2014, 03: 122~126.

(53) 陈俊, 吕梦阳, 唐帅, 刘振宇, 王国栋. V-Ti 微合金钢的组织性能及相间析出行为 [J]. 金属学报, 2014, 05: 524~530.

(54) 陈俊, 唐帅, 刘振宇, 王国栋. 低 Ni, Cr, Cu 和 Mo 高性能桥梁钢的动态再结晶行为 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2014, 07: 960~963, 968.

(55) 王斌, 刘振宇, 冯洁, 周晓光, 王国栋. 超快速冷却条件下碳素钢中纳米渗碳体的析出行为和强化作用 [J]. 金属学报, 2014, 06: 652~658.

(56) 周晓光, 王猛, 刘振宇, 杨浩, 吴迪, 王国栋. 超快冷条件下含 Nb 钢铁素体相变区析出及模型研究 [J]. 材料工程, 2014, 09: 1~7.

(57) 周晓光, 曾才有, 杨浩, 刘振宇, 吴迪, 王国栋. 超快冷条件下 X80 管线钢的组织性能 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2014, 09: 2972~2976.

专利:

(1) 刘振宇, 唐帅, 陈俊, 王国栋. 一种低屈强比高性能桥梁钢及其制备方法 [P]. 辽宁: CN104711490A, 2015-06-17.

(2) 刘振宇, 李凡, 周晓光, 王勇, 杨浩, 陈军平, 王国栋, 乔馨, 张朝锋, 叶启斌. 一种 355MPa 级船板钢的超快冷制备方法 [P]. 辽宁: CN102965575A, 2013-03-13.

(3) 刘振宇, 王斌, 周晓光, 王国栋. 一种利用纳米渗碳析出提高中低碳钢强度的方法 [P]. 辽宁: CN103343207A, 2013-10-09.

(4) 刘振宇, 蔡晓辉, 周晓光, 王国栋. 一种前置式超快冷制备热轧双相钢的方法 [P]. 辽宁: CN102605251A, 2012-07-25.

(5) 刘振宇, 李会, 蔡晓辉, 杨峰, 周晓光, 廖志, 王国栋, 周明伟, 成小军, 刘旭辉. 一种 600MPa 级热轧双相钢及其制备方法 [P]. 辽宁: CN102703815A, 2012-10-03.

(6) 刘振宇, 周砚磊, 王国栋. 屈服强度 500MPa 级海洋平台结构用厚钢板及制备方法 [P]. 辽宁: CN102127719A, 2011-07-20.

(7) 刘振宇, 谢章龙, 杨哲, 王国栋. 一种低碳 9Ni 钢厚板的制造方法 [P]. 辽宁: CN101215668, 2008-07-09.

(8) 刘振宇, 唐帅, 孙庆强, 刘相华, 王国栋. 一种 590MPa 级低屈强比低碳当量建筑用钢板的制造方法 [P]. 辽宁: CN101260495, 2008-09-10.

(9) 刘振宇, 周晓光, 卢敏, 王国栋, 吴迪. 一种低屈强比 X80 级管线钢及其制造方法 [P]. 辽宁: CN101768703A, 2010-07-07.

(10) 刘振宇, 狄国标, 王月香, 刘相华, 王国栋. 一种低 Si 低 Mn 含 Nb、Ti 细晶化热轧双相钢及其生产工艺 [P]. 辽宁: CN100445409C, 2008-12-24.

(11) 唐帅, 刘振宇, 沈鑫珺, 陈俊, 张向军, 王国栋. 一种止裂性能优异的厚钢板及其制造方法 [P]. 辽宁: CN104694850A, 2015-06-10.

(12) 陈俊, 刘振宇, 唐帅, 王国栋. 一种采用超快速冷却控制奥氏体组织的优化控制轧制方法 [P]. 辽宁: CN104232868A, 2014-12-24.

(13) 衣海龙, 刘振宇, 吴迪, 王国栋. 屈服强度 1100MPa 级工程机械用非调质态热轧带钢及制备方法 [P]. 辽宁: CN102943204A, 2013-02-27.

(14) 衣海龙, 刘振宇, 吴迪, 王国栋. 一种抗拉强度 580MPa 级铁素体



贝氏体热轧双相钢及其制备方法 [P]. 辽宁: CN102943205A, 2013-02-27.

(15) 衣海龙, 刘振宇, 徐洋, 吴迪, 王国栋. 屈服强度高于 900MPa 的非调质态热轧带钢及其制备方法 [P]. 辽宁: CN102703824A, 2012-10-03.

(16) 衣海龙, 刘振宇, 田勇, 吴迪, 王国栋. 一种钛微合金钢纳米析出物的控制方法 [P]. 辽宁: CN104148410A, 2014-11-19.

成果鉴定:

(1)

项目名称: 鞍钢节约型高性能中厚板 UFC-TMCP 工艺技术开发及应用

组织鉴定单位: 辽宁省科学技术厅

完成单位: 鞍钢股份有限公司、东北大学

鉴定时间: 2013 年 6 月

(2)

项目名称: 首钢 4300mm 宽厚板生产线超快冷系统开发与应用

组织鉴定单位: 中国钢铁工业协会

完成单位: 首钢总公司、东北大学

鉴定时间: 2012 年 3 月

(3)

项目名称: 高品质节约型热轧钢材生产技术与装备的研发及应用

组织鉴定单位: 中国钢铁工业协会

完成单位: 华菱涟源钢铁有限公司、东北大学

鉴定时间: 2012 年 12 月

成果获奖:

(1)

项目名称: 首钢 4300mm 中厚板生产线超快冷系统开发及新一代 TMCP 的应用

授奖单位: 北京市科学技术奖励工作办公室

完成单位: 首钢总公司、东北大学、秦皇岛首秦金属材料有限公司

获奖时间及等级: 2012 年北京市科学技术进步一等奖

(2)

项目名称: 高品质节约型热轧钢材生产技术与装备的研发及应用

授奖单位：湖南省科学技术厅

完成单位：华菱涟源钢铁有限公司、东北大学

获奖时间及等级：2014 年湖南省科学技术进步一等奖

4. 项目完成人员

主要完成人	职 称	单 位
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
陈 俊	博士后	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
曹光明	副教授	东北大学 RAL 国家重点实验室
李成刚	高级实验师	东北大学 RAL 国家重点实验室
蔡晓辉	副教授	东北大学 RAL 国家重点实验室

5. 报告执笔人

刘振宇、唐帅、陈俊。

6. 致谢

在本项研究工作过程中，除了课题组成员的努力工作之外，还得到了实验室领导、同事，以及各合作企业的相关领导和工程技术专家的帮助和支持，这对于项目的顺利实施和完成起到重要的推动作用。

轧制技术及连轧自动化国家重点实验室王国栋院士对项目的研究工作从宏观方向的把握和具体实验的开展进行都给予了耐心的指导和悉心的帮助，王院士还特别关心课题组年轻人成长；在实验和现场试制的关键时刻始终给予了充分的肯定和热情的鼓励，使我们这些弄潮儿克服了一个又一个困难，进入了科研的海洋。

衷心感谢实验室王昭东教授、袁国副教授在超快冷冷却装备和工业调试过程中给予的指导和关心，感谢田勇副教授、王丙兴副教授、李海军副教授、付天亮副教授等给予的帮助和支持。

我们也特别感谢合作企业的相关领导和工程技术人员。衷心感谢鞍钢股份有限公司的李凡、丛津功、陈军平、黄松、王小强、王勇、王超等领导专家的大力支持；衷心感谢湖南涟源钢铁的李俊峰、廖志、王慎德、刘旭辉、李建华等领导专家的大力支持；衷心感谢首钢白学军、姜中行、何元春、王根矾、马长文、沈开照、于海波、狄国标等领导专家的大力支持。向所有对本项目给予帮助和支持的领导和工程技术人员表示由衷的感谢！

最后，我们还要感谢实验室的老师：崔光洙、田浩、王佳夫、张维娜、薛文颖、吴红艳、冯盈盈，办公室张颖、李钊、杨子琴、沈馨、孟丽娟、王凤辉、谷文建等对本项研究工作及本团队多年来的帮助与支持！

目 录

摘要	1
1 新一代 TMCP 技术概述	3
1.1 引言	3
1.2 新一代 TMCP 技术	3
1.2.1 新一代 TMCP 技术特点	3
1.2.2 新一代 TMCP 技术优势	3
1.2.3 超快速冷却技术概述	5
2 奥氏体组织演变规律	8
2.1 引言	8
2.2 轧制和冷却参数对奥氏体组织细化行为的影响规律	8
2.2.1 实验材料及方法	8
2.2.2 实验结果及讨论	9
2.3 阶梯试样轧制过程中奥氏体组织演变规律	29
2.3.1 实验材料及方法	29
2.3.2 实验结果及讨论	31
3 奥氏体中应变诱导析出规律	37
3.1 引言	37
3.2 计算模型	37
3.2.1 $1/A_r$ 法	37
3.2.2 积分能量法	38
3.2.3 P_s 模型概述	39

3.2.4	P_r 模型概述	42
3.2.5	可加性法则	42
3.3	实验材料及方法	42
3.4	结果及讨论	43
3.4.1	$1/A_r-t$ 曲线和 PTT 曲线	43
3.4.2	CCP 曲线的计算	45
3.4.3	等温过程中的析出行为	46
3.4.4	冷却路径对析出行为的影响	49
4	基于新一代 TMCP 的细晶强化	53
4.1	引言	53
4.2	铁素体晶粒细化	54
4.3	珠光体片层间距细化	55
5	基于新一代 TMCP 的沉淀强化	60
5.1	引言	60
5.2	Nb-Ti 微合金钢中的析出行为	60
5.3	V-Ti 微合金钢中的析出行为	64
5.3.1	等温温度对 V-Ti 微合金钢组织性能演变规律的影响	64
5.3.2	冷却路径对 V-Ti 微合金钢组织性能演变规律的影响	73
5.4	碳素钢中渗碳体析出行为	78
5.4.1	热力学计算	79
5.4.2	实验材料及方法	81
5.4.3	实验结果及讨论	81
6	基于新一代 TMCP 的贝氏体相变强韧化	89
6.1	引言	89
6.2	实验材料及方法	89
6.3	实验结果及讨论	91
6.3.1	不同冷却路径下实验钢的显微组织特征	91