

轧制技术的创新与发展

——东北大学 RAL 研究成果汇编

Innovation and Development of Rolling Technology

——A Compilation of Achievements from RAL of Northeastern University

王国栋 等编著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

轧制技术的创新与发展

——东北大学 RAL 研究成果汇编

王国栋 等编著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2015

内 容 简 介

本书共6篇,主要包括:概况;热轧钢铁材料新一代TMCP技术,其中涵盖控轧控冷技术,中厚板、热轧板带钢、装备及技术、H型钢、螺纹钢棒材、轴承钢棒材的装备与工艺技术、调控热轧钢材显微组织基本原理等;大热输入焊接用中厚板生产技术、9Ni钢研发技术、减酸洗钢和免酸洗钢研发技术、节约型不锈钢制备技术、低合金耐磨钢开发、Q960/Q1100研发,低硅含磷TRIP钢开发、高级管线钢研发,低成本高强汽车板研发;薄带连铸工艺凝固组织控制、无取向硅钢及取向硅钢研究、中温加热高磁感取向硅钢研究以及轧制过程自动化、信息化技术,先进实验研究设备与中试平台等。

图书在版编目(CIP)数据

轧制技术的创新与发展:东北大学RAL研究成果汇编
/王国栋等编著. —北京:冶金工业出版社, 2015. 1

ISBN 978-7-5024-6766-1

I. ①轧… II. ①王… III. ①轧制—科技成果—汇编
—中国 IV. ①TG33

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第244643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

策划编辑 任静波 责任编辑 程志宏 任静波 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 978-7-5024-6766-1

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

2015年1月第1版,2015年1月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16;20.75印张;1彩页;502千字;317页

79.00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)



东北大学多功能宽厚钢板辊式淬火成套技术装备实现薄规格钢板高平直度淬火等多项技术突破，荣获 2014 年国家科技进步二等奖

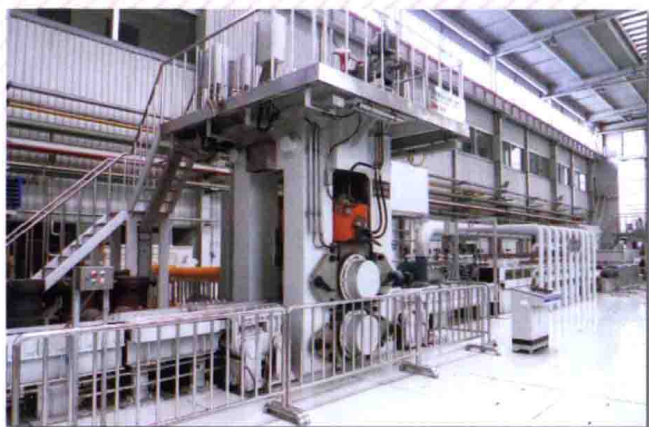


自主开发的现代化大型板带钢连续热处理线成功应用到宝钢、酒钢等企业，荣获中国机械工业科学技术一等奖等 5 项省部级奖



真空制坯复合轧制装备与技术生产特厚钢板，填补了国内利用连铸坯生产特厚板工艺空白，荣获冶金行业科技进步二等奖

东北大学 RAL
的系列热轧板带钢
超快冷技术装备，
已成功应用于华菱
涟钢、首钢迁钢、
包钢、首钢京唐等
的生产线



550mm 高刚度控轧控冷热轧实验机组



450mm 高精度液压张力冷 - 温轧实验轧机



新一代 TMCP
技术在中厚板
生产中的应用
(5000mm 宽厚板
轧机)

序

自 20 世纪末期以来，世界钢铁总产量快速增长，钢铁行业取得了巨大的进步。其中，我国钢铁工业已经基本完成工业化，实现了机械化、电气化和自动化，产量已经占世界钢铁总产量的一半。我国钢铁工业的飞速发展支撑了国内经济的腾飞，同时也促进了国际经济的繁荣。然而，伴随我国钢铁工业的高速发展，在满足国民经济急需的过程中，资源、能源及环境的限制问题也逐渐凸显出来，矿石、合金元素等资源大量依赖进口，高污染、高排放等环境问题已严重危及社会发展和人民生活，钢铁材料的潜力亟待深入挖掘，高新产品技术升级换代迫在眉睫。

面对这种严峻局面，钢铁工业的可持续发展已经成为我国钢铁工作者乃至全社会共同关心的问题。为此，我们必须大胆创新，努力转变发展方式，走新型工业化的发展道路，让我国的钢铁企业健康发展。这就要求工业化的技术体系向生态化的技术体系转变。

生态化技术体系的核心是减量化、低碳化、数字化。我们应依据生态化技术体系的特点，针对面临的资源、能源、环境等问题，加强技术创新，实现“绿色制造，制造绿色”这一生态化、绿色化的大计方针。所谓生态化、绿色化，即节省资源和能源；减少排放，环境友好，易于循环；产品低成本，高质量、高性能。

轧制技术的生态化、绿色化特征在轧制过程创新与轧制产品研发上具体体现在四个方面，即：“高精度成形；高性能成性；减量化成分设计；减排放清洁工艺”。今天比以往任何时候都更需要突出现代钢铁技术生态化、绿色化特征，着力围绕“高精度成形、高性能成性、减量化成分设计、减排放清洁工艺”开展创新研究，解决一批前沿、战略问题和关键、共性问题，推进我国轧制技术的发展。在世界轧制技术的发展中，留下中国人的印记，将是我国轧制科技工作者长期、艰巨而光荣的任务。

从全球钢铁工业来看，创新发展战略是把握未来钢铁工业工艺、技术、产

品发展方向的关键，特别是在当前全球钢铁业处于低迷的情况下，应进一步加强科技创新、实现可持续发展，以便在全球钢铁业竞争中处于优势地位。东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室（The State Key Laboratory of Rolling and Automation，简称 RAL）作为工程类国家重点实验室，以冶金行业钢铁产业关键共性技术应用基础研究为重点，实现金属材料轧制技术领域工艺、装备、产品乃至产品服务的系统创新，坚持从制造向服务转变、从粗放向可持续转变、从同质竞争向差异竞争转变的创新发展战略转变路线，科研学术成果全面进入国民经济主战场，科研工作推进至国际前沿领域。二十余年来，RAL 秉承“开放、流动、联合、竞争”的运行机制，以国民经济需求为导向，面向钢铁材料及有色金属材料轧制技术领域，置身前沿，躬身实践；面向国民经济主战场，一步一个脚印，扎扎实实，取得了一系列具有自主知识产权的科研创新成果，走出了一条具有鲜明特色的国家重点实验室建设发展之路。

本书紧密围绕 RAL 实验室近年来的科研创新与发展之路，详细介绍了轧制技术领域重大关键共性技术以及国际轧制技术发展前沿的基础性、前瞻性、战略性轧制工艺理论、技术及装备应用。内容包含了热轧钢铁材料新一代 TMCP 技术、高性能、低成本、减量化钢材品种开发、先进工艺技术、轧制过程自动化、信息化技术及先进实验研究设备与中试平台等核心技术的研究成果。期望本书能够在我国研发先进工艺技术和装备、优化生产工艺流程，降低能源资源消耗、保护生态环境，实现绿色制造，优化、调整产品结构，开发高端钢材，支撑海洋、交通、能源等战略新兴产业的绿色化发展等方面发挥积极作用，为我国钢铁工业自主创新、技术改造、转型发展提供参考。

我国钢铁轧制行业已经步入后工业化时代，资源、能源、环境与产品方面的压力凸显，转型发展势在必行。我们必须按照中央的指示，乘新一轮技术革命和产业变革与我国经济社会转型发展历史性交汇的大好时机，通过学科交叉、行业协同，实现创新驱动发展，大力开发生态化的钢铁轧制生产技术，着力解决一批关系我国钢铁轧制工业健康发展的关键共性问题、前沿技术问题，建立生态化的钢铁轧制技术体系，大力推行减量化、低碳化、数字化，实现我国钢铁轧制行业的平衡、协调、可持续发展。

前 言

轧制技术及连轧自动化国家重点实验室 (RAL) 已经开放运行 20 年了。在此 20 年的建设和发展过程中, RAL 努力提高我国轧制工艺技术及装备水平, 为我国轧制技术整体追赶世界先进乃至达到领先水平, 进行了大量基础性、前瞻性、战略性应用基础研究及高层次人才培养的工作。通过工艺、装备与产品的自主创新, RAL 开发了热轧钢铁材料新一代 TMCP (控轧控冷)、薄带连铸、板坯复合轧制特厚板等一批重要的工艺技术与装备以及大线能量焊接用中厚板、9Ni 钢、低合金耐磨钢、高等级硅钢等高性能、低成本、减量化钢材品种。轧制过程自动化、信息化技术和现代轧制技术研发创新平台作为轧制技术创新发展的两翼, 逐渐成熟并发挥着重要作用, 取得了丰硕成果。

本书结合国内外金属材料领域的发展趋势, 针对轧制技术及连轧自动化国家重点实验室开展的轧制领域前沿性、探索性、战略性的工艺、装备、产品重大课题以及科研成果进行了介绍。本书共分为 6 篇, 其中第 1 篇: 第 1.1 章由袁国执笔, 第 1.2 章由姜宇飞执笔; 第 2 篇: 第 2.1 章~第 2.3 章由袁国执笔, 第 2.4 章~第 2.6 章由赵宪明、吴迪执笔, 第 2.7 章由唐帅执笔; 第 3 篇: 第 3.1 章由朱伏先执笔, 第 3.2 章~第 3.4 章由刘振宇执笔, 第 3.5 章~第 3.6 章由王昭东执笔, 第 3.7 章由许云波执笔, 第 3.8 章由高秀华执笔, 第 3.9 章由杜林秀执笔; 第 4 篇: 第 4.1 章由曹光明执笔, 第 4.2 章和第 4.3 章由刘海涛执笔, 第 4.4 章和第 4.5 章由许云波执笔, 第 4.6 章由骆宗安执笔, 第 4.7 章~第 4.9 章由刘振宇执笔; 第 5 篇 (第 5.1 章~第 5.4 章) 由张殿华执笔; 第 6 篇: 第 6.1 章~第 6.3 章由李建平执笔, 第 6.4 章由花福安执笔, 第 6.5 章和第 6.6 章由骆宗安执笔。全书由王国栋、袁国主编, 康健参加了部分章节内容的整理工作。在写作过程中, 作者注重对以往创新性科研成果进行归纳与总结, 尽其可能为读者及现场技术人员提供详尽的参考。

本书涵盖了轧制技术领域的工艺、装备与自动化、产品等多方面内容, 汇

目 录

第 1 篇 概 况

1.1 自主创新结硕果，助推钢铁行业技术进步	3
1.1.1 继承和发扬老一辈科学家扎实严谨的科学精神，敢于实践、善于实践， 注重学科交叉，注重装备开发，奠定了 RAL 优良学术基础	4
1.1.2 RAL 的建设起步（1991—1995）：跟踪国际先进技术，攀登巨人的肩膀， 消化吸收再创新，实现实验室科研工作快速发展	4
1.1.3 RAL 的快速发展（1996—2005）：依托重大基础研究和工程项目，RAL 科研 开始进入国民经济主战场，成果创新、转化、工程化取得突破	5
1.1.4 RAL 的全面发展（2005—2009）：RAL 在行业中提供系统解决方案，承担 大型工业化成套装备建设、钢铁材料产品研发以及大规模中试基地建设等 综合性科研开发等项目，全面跨入国民经济主战场	5
1.1.5 RAL 进入技术创新新阶段（2009—现在）：瞄准世界轧制技术前沿，厚积 薄发，自主创新结硕果，科研工作助力行业发展和技术进步，以成为行业 技术发展的引领者为己任，开创“绿色钢铁轧制技术”的新时代	6
1.1.6 二十年发展谱华章，工作定位成就了 RAL 轧制技术领域技术创新的 “国家队”	7
1.1.7 建设国际领先的轧制技术协同创新基地，开发节能减排的绿色轧制工艺、 技术和产品，致力于成为新一代轧制技术的全球领跑者将是 RAL 发展目标 和未来愿景	9
1.1.8 实验室简介	10
1.2 领航钢铁轧制技术创新发展的“人才雁阵”	
——记轧制技术及连轧自动化国家重点实验室学术骨干群体	11
1.2.1 重学风，在实践中培养人才，探寻创新之路	11
1.2.2 搭舞台，让年轻人担当主角	12
1.2.3 抓特色，练就“一招绝”创 RAL 品牌	14
1.2.4 促合作，协同创新解决行业关键共性问题	16
1.2.5 聚人才，齐心协力谱写创新篇章	20
1.2.6 夯基础，厚积薄发引领轧制技术发展	22

1.2.7 结语	25
----------------	----

第2篇 热轧钢铁材料新一代TMCP技术

2.1 热轧钢铁材料新一代TMCP(控轧控冷)技术	29
2.1.1 TMCP工艺技术的发展、基本原理	29
2.1.2 新一代TMCP技术的源起与基本原理	30
2.1.3 新一代TMCP核心装备技术——超快速冷却系统	32
2.1.4 新一代TMCP技术实现低成本高性能热轧钢铁材料工业化大批量开发 生产目标	34
2.2 中厚板新一代TMCP装备及工艺技术	34
2.2.1 传统层流冷却技术的开发、实践及再认识	35
2.2.2 新一代中厚板控制冷却装备应具备的特征、功能	39
2.2.3 基于超快速冷却的中厚板新一代TMCP装备及工艺技术开发的重点与 关键技术	41
2.2.4 基于超快速冷却的新一代TMCP装备及工艺技术开发实践	46
2.3 热轧板带钢新一代TMCP装备及工艺技术	54
2.3.1 热轧板带钢轧后超快速冷却技术发展与应用	55
2.3.2 热轧板带钢新一代TMCP装备及工艺技术开发难点与关键技术	59
2.3.3 热轧板带钢新一代TMCP装备及工艺技术开发历程及工业实践	63
2.4 H型钢新一代TMCP装备及工艺技术	74
2.4.1 超快速冷却系统的结构	75
2.4.2 H型钢超快速冷却控制系统	77
2.4.3 大H型钢超快速冷却系统的应用	80
2.4.4 结语	82
2.5 螺纹钢棒材新一代TMCP装备及工艺技术	83
2.5.1 棒线材超快速冷却装备及工艺技术	84
2.5.2 基于超快速冷却工艺的热轧带肋钢筋产品的性能检验	86
2.5.3 超快速冷却热轧带肋钢筋生产工艺推广应用情况	90
2.5.4 结语	90
2.6 轴承钢棒材新一代TMCP装备与工艺技术	90
2.6.1 网状碳化物对产品质量的影响	91

2.6.2 轴承钢轧制工艺研究	92
2.6.3 轴承钢超快速冷却组织性能研究	92
2.6.4 超快速冷却过程的温度场分析	93
2.6.5 轴承钢超快速冷却设备开发	95
2.6.6 快速冷却的应用	96
2.6.7 结语	98
2.7 采用新一代 TMCP 调控热轧钢材显微组织的机理	98
2.7.1 基于新一代 TMCP 的细晶强化机理	99
2.7.2 基于新一代 TMCP 的析出强化机理研究	105
2.7.3 基于新一代 TMCP 的相变强化机理研究	115
2.7.4 结语	121

第 3 篇 高性能、低成本、减量化钢材品种开发

3.1 大热输入焊接用中厚钢板生产工艺技术	125
3.1.1 国外大热输入焊接用钢的发展	125
3.1.2 国内大热输入焊接用钢的研究现状	126
3.1.3 大热输入焊接用钢技术开发的难点与工业实践	127
3.2 9Ni 钢研发及工业化规模生产	131
3.2.1 9Ni 钢成分设计	132
3.2.2 9Ni 钢的组织演变	133
3.2.3 9Ni 钢韧化因素分析	135
3.2.4 9Ni 工业化生产	138
3.2.5 结语	139
3.3 减酸洗钢和免酸洗钢研发及工业化生产	139
3.3.1 氧化铁皮控制技术开发难点与关键技术	140
3.3.2 氧化铁皮控制技术的推广与应用	143
3.3.3 结语	147
3.4 节约型不锈钢制备技术创新	147
3.4.1 高韧性铁素体不锈钢中厚板研制开发	147
3.4.2 消除表面吕德斯带	148
3.4.3 提高铁素体不锈钢成型性能的轧制技术开发	148
3.4.4 铁素体不锈钢热轧黏辊机理研究及消除技术	149

3.4.5 双相不锈钢的 TMCP 生产技术开发	150
3.4.6 结语	151
3.5 低合金耐磨钢的开发	151
3.5.1 合金与组织设计	151
3.5.2 低成本耐磨钢的研究与开发	152
3.5.3 高韧性型耐磨钢的研究与开发	153
3.5.4 高耐磨性耐磨钢的研究与开发	154
3.5.5 结束语	155
3.6 高级别结构用调质钢板 Q960/Q1100 的研制与开发	155
3.6.1 成分和组织设计	156
3.6.2 成品的典型组织及性能	157
3.6.3 薄规格板形及性能的控制	157
3.6.4 焊接性能	158
3.6.5 疲劳性能	159
3.6.6 结束语	160
3.7 高性能低硅含磷 TRIP 钢的开发	160
3.7.1 概述	160
3.7.2 新颖的成分设计	161
3.7.3 热轧 TRIP 钢	162
3.7.4 冷轧 TRIP 钢	164
3.7.5 结论	166
3.8 高级别管线钢研发及工业化生产	166
3.8.1 管线钢落锤撕裂 (DWTT) 性能控制技术	168
3.8.2 抗 HIC 管线钢研制开发	169
3.8.3 抗大变形管线钢研发	170
3.8.4 超高强管线钢的研发	171
3.8.5 结语	172
3.9 低成本系列热轧高强汽车板的研究开发及应用	173
3.9.1 国外热轧超高强汽车板的成分设计及工艺路线	173
3.9.2 国内热轧超高强汽车板的成分设计及工艺路线	174
3.9.3 新一代低成本热轧汽车板的组织性能控制技术及工业实践	176
3.9.4 结语	180

第 4 篇 先进工艺技术

4.1 薄带连铸工艺装备及凝固组织控制	183
4.1.1 薄带连铸的产品定位	183
4.1.2 薄带连铸的工艺流程和关键设备	184
4.1.3 薄带连铸过程的凝固组织控制	186
4.1.4 小结	190
4.2 薄带连铸无取向硅钢科研新进展	190
4.2.1 薄带连铸生产无取向硅钢的优势	190
4.2.2 薄带连铸无取向硅钢的主要研究进展	191
4.2.3 薄带连铸无取向硅钢下一阶段的工作设想	195
4.3 薄带连铸取向硅钢研究进展	196
4.3.1 薄带连铸的特点	196
4.3.2 薄带连铸生产取向硅钢的优势	197
4.3.3 薄带连铸取向硅钢需攻克的关键问题及 RAL 的研究进展	197
4.3.4 薄带连铸取向硅钢的研发目标	200
4.4 中温加热高磁感取向硅钢生产技术研究	201
4.4.1 概述	201
4.4.2 降低铸坯加热温度的技术	201
4.4.3 中温板坯加热工艺开发高磁感取向硅钢的难点与关键技术	203
4.4.4 结束语	206
4.5 冷轧板快速热处理技术的研发	206
4.5.1 概述	206
4.5.2 超快速退火的组织、织构的柔性化控制技术	208
4.5.3 结论及展望	212
4.6 连铸坯复合轧制特厚钢板的技术开发与应用	212
4.6.1 项目背景	212
4.6.2 特厚钢板的国内外研究现状	213
4.6.3 连铸坯复合轧制技术工艺的介绍	214
4.6.4 真空制坯复合轧制技术的展望	216
4.7 热轧带钢无酸洗冷轧还原退火热镀锌技术的研发	217
4.7.1 热轧氧化铁皮控制技术研发	218

4.7.2	氧化铁皮免酸洗直接冷轧工艺技术研发	219
4.7.3	热轧带钢表面氧化铁皮的氢气还原机理研究	221
4.7.4	无酸洗冷轧还原热镀锌板试制效果	223
4.7.5	结语	224
4.8	热轧集约化生产技术——规模化与个性化冲突的解决之道	224
4.8.1	集约化生产技术系统	224
4.8.2	集约化生产技术的发展展望	228
4.9	高速列车不锈钢车厢板的柔性化退火生产技术开发	228
4.9.1	柔性退火工艺及性能控制	230
4.9.2	结论	232

第5篇 轧制过程自动化、信息化技术

5.1	中厚板轧制生产线自动化系统	235
5.1.1	中厚板模型设定功能	235
5.1.2	中厚板轧制节奏控制	238
5.1.3	中厚板轧制过程软测量技术	239
5.1.4	中厚板纵向变截面钢板的轧制技术	241
5.2	热连轧轧制生产线自动控制系统	243
5.2.1	前言	243
5.2.2	系统开发和应用平台	243
5.2.3	主要数学模型	244
5.2.4	基础自动化	251
5.2.5	前景展望	252
5.3	冷连轧轧制生产线自动控制系统	253
5.3.1	冷连轧自动控制系统的开发难点与关键技术	254
5.3.2	冷连轧自动控制系统的推广应用	259
5.3.3	结语	260
5.4	冷轧板形控制核心技术自主研发与工业应用	262
5.4.1	概述	262
5.4.2	板形控制模型	262
5.4.3	分布式板形控制计算机系统	265
5.4.4	冷轧带钢板形控制核心技术工业应用与实际效果	267
5.4.5	结论	268

第 6 篇 先进实验设备研发与中试平台

6.1 现代轧制过程中试研究创新平台	273
6.1.1 中试研究平台创新与发展	273
6.1.2 中试实验设备功能定位	275
6.2 热轧中试技术与实验设备	276
6.2.1 热轧实验机组主要功能与特点	276
6.2.2 高刚度热轧实验轧机	277
6.3 冷轧-温轧技术与实验设备	287
6.3.1 冷轧-温轧实验轧机	287
6.3.2 主要功能与特点	288
6.3.3 温轧工艺技术工业化探索	298
6.4 连续退火、热成型技术与实验设备	300
6.4.1 高强钢连续退火和涂镀技术	300
6.4.2 冷轧板超快速退火的组织、织构的柔性化控制技术	300
6.4.3 CAS-300 型带钢连续退火模拟实验机	302
6.4.4 多功能退火实验研究装备	302
6.4.5 CAS-120 型多功能退火模拟实验机	304
6.4.6 工业化高端汽车用先进高强钢研究与制备技术	305
6.4.7 点焊冲击实验机研制	305
6.5 MMS 热力模拟实验机	306
6.5.1 项目背景	306
6.5.2 MMS 热力模拟实验机介绍	307
6.5.3 MMS 热力模拟实验机的创新性成果和主要性能指标	308
6.6 热浸镀模拟实验机	310
6.6.1 项目背景	310
6.6.2 热浸镀模拟实验机的国内外现状	311
6.6.3 热浸镀模拟实验机的试验功能与主要性能指标	312
6.6.4 结束语	315
6.6.5 致谢	316
参考文献	317

第①篇

概 况



