

RAL · NEU 研究报告 No.0010

中厚板连续热处理 关键技术研究与应用

ZHONGHOUBAN LIANXU RECHULI GUANJIAN 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. 0010

中厚板连续热处理 关键技术研究与应用

轧制技术及连轧自动化国家重点实验室

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2014

内 容 简 介

本书全面介绍了中厚板连续热处理关键技术, 主要内容包括中厚板连续固溶炉的脉冲燃烧、加热预测、最优化控制、无结瘤高效节能生产等关键技术, 以及高温钢板高强度冷却换热机理、淬火过程板材高冷却速度、高冷却均匀性控制技术和薄规格高强度板材淬火过程的板形控制及较厚规格钢板冷却强度和组织均匀性控制等。

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

中厚板连续热处理关键技术研究与应用/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. 12
(RAL·NEU 研究报告)
ISBN 978-7-5024-6790-6

I. ①中… II. ①轧… III. ①中板轧制—连续热处理—研究
②厚板轧制—连续热处理—研究 IV. ①TG335.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014) 第 276051 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 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 978-7-5024-6790-6

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 12 月第 1 版, 2014 年 12 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 12 印张; 187 千字; 175 页

46.00 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. 研究项目背景与立题依据

我国是世界第一产钢大国，目前中厚板年产量已达 7000 余万吨。但与此同时，我国部分高附加值中厚板产品仍依赖进口，其中绝大多数是热处理产品，而中低档次普通中厚板产品过剩严重。在全球绿色经济发展、能源和资源潜在危机的形势下，为了实现钢铁工业的可持续发展，高附加值中厚板产品势必向高强度、耐腐蚀、轻量化、长寿命等方向发展。

工程机械行业广泛应用的低合金耐磨钢和高强度工程机械用钢均需采用调质处理工艺生产。低合金耐磨钢由于合金含量低，综合性能良好，生产灵活方便等优点被广泛应用于工作条件恶劣，要求强度高、耐磨性好的工程、采矿、建筑、农业、水泥、港口、电力以及冶金等机械产品上，如推土机、装载机、挖掘机、自卸车、球磨机及各种矿山机械、抓斗、堆取料机、输料弯曲结构等。据统计，在工业发达国家，每年机械装备及其零件的磨损所造成的经济损失达到国民经济总产值的 4% 左右，而我国每年因磨损造成的损失高达 GDP 的 4.5% 左右，超过 10000 亿元人民币。因此，解决磨损和延长机械设备及其部件的使用寿命一直是工业界人士在设计、制造和使用各种机械设备时所需要考虑的首要问题。2012 年，科技部高品质特殊钢科技发展“十二五”专项规划中明确将工程机械用耐磨钢作为待开发的高品质特殊钢七大关键材料之一，足以体现了我国对耐磨钢铁材料的重视。

高级别结构用调质钢板的应用越来越广泛，受到了科技界和工程界的高度重视，对钢材的强度以及高强度条件下的韧性要求越来越高。由于该类钢的强度极高，韧塑性尤其难以保证，同时，该类钢板制造的结构件大部分以

焊接的方式连接,且需要承受复杂多变的周期载荷,因此该类钢材还要求具有良好的焊接性能、较高的疲劳极限和较好的冷成型性。据统计采用液压支架单台使用高强度结构钢 Q960 比 Q690 能够节约钢材 15t,重量减约 20%。因此,研制与开发高级别的结构用调质钢板对于相关装备的减重及提高使用寿命、降低原材料消耗等均具有重要意义。

中厚板连续热处理生产线的设备及工艺因其产品性能、板形平直度的高标准,其研发的学科综合性,涉及热处理工艺与设备、机械设计与制造、金属材料、自动控制及仪表、液压控制等多个学科领域,长期以来,我国都是依赖进口,但进口设备中的辊底式热处理炉的极限热处理温度局限于 1000℃ 以下,难以适应核电用钢、双相钢等高品质特殊钢产品 1000℃ 以上的高温热处理加热需要。与常规辊底式热处理炉相比,1000℃ 以上的高温辊底式热处理炉由于加热温度高,在烧嘴负荷、炉辊冷却、炉衬结构、炉体密封性等设备设计难度和炉气均匀性、温度精度、炉压等热工过程的控制难度都要增大很多,很难实现高精度加热的需求,因此钢铁行业高温热处理多采用室式高温固溶炉等炉型。但室式炉的生产效率低,能耗大,自动化程度低,使用寿命较短,难以配置辊式淬火机设备进行连续热处理生产,限制了热处理生产厂产能最大化和高品质热处理钢板的研发。

辊式淬火机是板带材热处理线的核心工艺装备,常规的辊式淬火机(淬火厚度范围为 10 ~ 120mm)及其核心淬火工艺技术被德国 LOI 公司、美国 DREVER 公司、日本 IHI 公司等少数国外公司长期垄断。尽管日本 IHI 公司具备供货能力,但除鞍山厚板厂从日本住友金属和歌山厂以引进二手设备形式获得一套外,日本出于种种考虑,并不向我国大陆钢铁企业提供中厚板辊式淬火设备。而且因美国某公司在国内实际应用效果不佳,德国 LOI 公司已成为 2006 年前我国中厚板企业新上辊式淬火设备的唯一供货商,形成了事实上的技术垄断。而实际上,德国公司、美国公司已垄断国际市场 40 余年,进口设备采用的垄断捆绑供货,价格高昂,供货周期长,已成为我国钢铁企业实现产品结构调整的巨大障碍。

此外,进口设备不具备高品质薄规格板材的生产能力,薄规格低合金高强度板材淬火工艺对淬火过程的冷却均匀性要求极高,淬火过程的板形控制难度很大,是公认的国际性难题。之前仅有瑞典等国外一两家企

业能够实现薄规格调质钢板的批量供货，但产品供货周期长，价格极其昂贵，生产技术完全保密，处于垄断地位，极大地阻碍了热处理行业的整体发展，严重制约了重大装备制造国产化进程。因此，开发满足极限薄规格高强钢板均匀性淬火需求的辊式淬火机装备及工艺技术，是科技自主创新，实现热处理高端产品国产化的根本途径。以华菱集团湘潭钢铁公司为例，2008 年年底该公司从国外某公司高价引进 3800mm 辊式淬火机设备，并完成了厚度大于 12mm 的板材淬火工艺调试。但在后续的实际生产过程中，该进口设备仅能满足厚度规格 16mm 以上板材的连续稳定淬火生产，已无法满足公司薄规格高等级调质板的工艺开发和产品升级的需要。

因此，打破国外垄断，自主研制大型中厚板热处理线关键装备、技术及高等级热处理产品已迫在眉睫。同样，只有自主研制才能有效提高中厚板热处理装备国产化水平，拓宽中厚板热处理规格及品种生产范围，提高产品质量，满足快速发展的国民经济建设需要。

2. 研究进展与成果

本项目自主开发的首套国产化辊式淬火机装备于 2006 年成功在太钢投产，目前已推广至宝钢、太钢、新钢、南钢等 13 条中厚钢板大型现代化热处理线（含改造湘钢进口设备 1 套），国内市场占有率升至 44%，基于国产化装备生产的薄规格中厚钢板产品、高等级不锈钢中厚钢板固溶处理产品均占全国产量的 70% ~ 80%。在国内高端淬火装备国际竞标中，凭借技术优势，中标率由零提高到 60%。同时，基于研发的辊式淬火装备技术，项目组在宝钢特钢成功开发出国产首条大型现代化辊底式固溶热处理线，并推广至酒钢，为国内中厚板行业装备升级和产业结构调整奠定了坚实基础。

研究开发的高端品种板已成功应用到国家战略石油天然气储备、核电水电主装备、大型工程/矿用机械、大型特殊用途船舶及海工装备等国家重点工程项目，以及中国石油、中国石化、中海油、三一重工、中联重科、北方重工、张煤机、郑煤机等行业骨干企业，并批量出口到英国、西班牙、澳大利亚等十余个国家，应用到美国 Caterpillar（全球最大工程机械供应商）、瑞士 CVACEROSAG（全球最大特殊钢材采购商）等著名公司产品上。

研究项目的完成解决了长期以来制约我国高端中厚钢板热处理生产技术及装备的难题,突破了进口同类装备生产钢板的厚度下限,使我国成为除瑞典 SSAB 外掌握 4~10mm 极限薄规格高强调质钢板生产技术的国家。以殷瑞钰院士、左铁镛院士等组成的鉴定委员会认为:本项目成果“突破了国内外板材淬火厚度下极限,实现 4~10mm 极限薄规格钢板批量化生产,优于国外进口先进设备生产的实物水平”,“整体上达到了国际先进水平,完全可以替代进口”,部分产品及其生产工艺“具有首创性,总体上达到国际领先水平”。相关成果被《世界金属导报》列为 2013 年世界钢铁工业十大技术要闻之一。

项目成果获行业和省级一等奖 4 项、国家重点新产品 3 项、发明专利 10 项、软件著作权 3 项,在国内外学术期刊发表论文 20 多篇。项目的完成,填补了多项国内空白,打破了国外垄断,提升了我国高端热处理产品的技术水平和生产能力;有力地支撑了我国大型工程机械装备、能源战略储备、国防军工等行业的发展,经济效益显著。

3. 论文与专利

论文:

(1) 王国栋,刘相华,等.我国中厚板行业如何直面 WTO[J].轧钢,2002,19(2):3~5.

(2) 王国栋,刘相华.日本中厚板生产技术的发展 and 现状(二)——随中国金属学会代表团访问日本观感之二[J].轧钢,2007,24(3):1~5.

(3) 王国栋.认清形势,自主创新,调整结构,保持增长——论轧钢行业 2009 年的任务[J].轧钢,2009,26(1):1~5.

(4) 王昭东,曲锦波.松弛法研究微合金钢碳氮化物的应变诱导析出行为[J].金属学报,2000,36(6):618~621.

(5) 王昭东,邓想涛,曹艺,等.新型低成本超高强低合金耐磨钢研究及其工业化应用[J].钢铁,2010:61~64.

(6) 袁国,韩毅,王超,等.中厚板辊式淬火机淬火过程的冷却机理[J].材料热处理学报,2010:148~152.

(7) 袁国, 王国栋, 王黎筠, 等. 中厚板辊式淬火机淬火过程的温度场分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2010, 31(4): 527 ~ 530.

(8) Li Yong, Li Jiadong, Liu Yujia, et al. Analysis and optimization of heat loss for water-cooled furnace roller[J]. Journal of Central South University of Technology, 2013, 20(8): 2158 ~ 2164.

(9) 李勇, 曹世海, 王昭东, 等. 中厚板特殊钢热处理线的新发展和新技术[J]. 冶金设备, 2013(5): 40 ~ 48.

(10) 李家栋, 李勇, 王昭东, 等. 中厚板加热过程在线控制应用软件的开发[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2010: 1108 ~ 1112.

(11) 李家栋, 王昭东, 李勇, 等. 辊底式高温固溶炉在线数学模型的开发及应用[J]. 钢铁, 2011, 46(2): 86 ~ 90.

(12) Li Jiadong, Wang Zhaodong, Li Yong, Luo Zheng, Wang Guodong. Application of the pulse combustion control in the roller hearth heat-treatment furnace [C]. Proceedings of the Fourth Baosteel Biennial Academic Conference, Shanghai, 2010, K96 ~ K99.

(13) Li Jiadong, Li Yong, Zhao Dadong, Fu Tianliang, Wang Zhaodong, Wang Guodong. Research of the optimal heating in heat-treatment process based on grey asynchronous particle swarm optimization [J]. Journal of Iron and Steel Research (International), 2012, 19(12): 1 ~ 7.

(14) 付天亮, 李勇, 王昆, 等. 冷却方式对特厚钢板淬火温度均匀性的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2013(11): 1575 ~ 1579.

(15) 付天亮, 王昭东, 李勇, 等. 中厚板淬火热弹性马氏体相变潜热模型[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2013(12): 1734 ~ 1738.

(16) 付天亮, 李远明, 李勇, 等. 中厚板辊式淬火机 Fuzzy-PID 喷水控制系统研究[J]. 轧钢, 2012, 29(3): 46 ~ 50.

(17) 付天亮, 袁国, 王昭东, 等. 修正淬火系数法预测中低碳钢淬透性及其应用[J]. 钢铁研究学报, 2009, 21(4): 47 ~ 51.

(18) 付天亮, 赵大东, 王昭东, 等. 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.

(19) 付天亮, 王昭东, 袁国, 等. 临钢淬火机过程控制系统的开发及应

用[J]. 冶金自动化, 2008, 32(2): 38~42.

(20) Fu Tianliang, Wang Riqing, Wang Zhaodong, et al. Construction and application of quenching critical cooling rate model[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2010, 17(3): 40~45.

(21) Wang Chao, Wang Zhaodong, Han Yi, Deng Xiangtao, Wang Guodong. Study of uniform quenching technology of NM450 wear-resistant steel[J]. Revue de Métallurgie, 2013, 110(5): 331~339.

(22) Wang Chao, Wang Zhaodong, Yuan Guo, et al. Heat transfer during quenching by plate roller quenching machine[J], Journal of Iron and Steel Research International, 2013, 20(5): 1~5.

(23) Wang Chao, Li Jiadong, Yuan Guo, Wang Zhaodong, Wang Guodong. Prediction of microstructure and mechanical properties of plate in roller quenching[J]. Advanced Materials Research, 2011(328~330): 462~465.

(24) 王超, 袁国, 王昭东, 等. XGCF62 钢板辊式淬火工艺开发与应用[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2011(7): 968~971.

(25) 王超, 王昭东, 李广阔, 等. 超宽狭缝式喷嘴流场数值模拟和射流速度凸度控制[J], 轧钢, 2013(2): 6~9.

(26) Wang Chao, Wang Zhaodong, Yuan Guo, Wang Guodong. Development of equipment and technology in plate quenching line [C]. 第二届亚洲钢铁大会论文集. 北京: 冶金工业出版社, 2012: 6~17.

(27) 王超, 袁国, 王昭东, 等. 薄规格板材辊式淬火机装备及工艺技术开发[C]. 第八届中国钢铁年会论文集. 北京: 冶金工业出版社, 2011: 6~17.

(28) 王超. 华菱涟钢实现国内最薄规格辊式淬火板连续稳定生产[N]. 世界金属导报, 2011(20): 6.

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) 王昭东, 袁国, 邓想涛, 李勇, 田勇, 王国栋. 高韧性超高强度耐

磨钢板及其生产方法, 2010, 中国, ZL201010200002. 7。

(3) 王昭东, 袁国, 付天亮, 王黎筠, 王国栋, 韩毅, 李勇. 一种薄规格中厚板离线热处理汽雾冷却系统, 2012, 中国, ZL201110388052. 7。

(4) 王国栋, 王昭东, 王黎筠, 袁国, 田勇, 李勇, 付天亮, 韩毅. 一种中厚板热处理强风冷却系统, 2012, 中国, ZL201110419299. 0。

(5) 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, ZL201110191884. X。

(6) 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。

(7) 李勇, 付天亮, 王昭东, 袁国, 王国栋, 韩毅, 田勇. 一种中厚板辊式淬火机自动控制系统, 2012, 中国, ZL201110388062. 0。

(8) 付天亮, 王昭东, 袁国, 王国栋, 李勇, 韩毅. 一种中厚板淬火工艺的控制方法, 中国, ZL201110388064. X。

(9) 王昭东, 王超, 韩毅, 袁国, 王国栋. 一种喷水装置宽向流量均匀性在线测量装置, ZL201210108835. X。

(10) 张福波, 王贵桥, 王昭东, 袁国, 韩毅, 吴迪, 张殿华. 一种实现辊式淬火机液压多缸高精度同步控制系统, ZL200810012695. X。

(11) 软件著作权. 中厚板辊式淬火机模型控制系统, 2013SR070045。

(12) 软件著作权. 中厚板辊式淬火机过程控制系统, 2013SR069330。

(13) 软件著作权. 过程通讯中间件平台软件, 2012SR007201。

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
王昭东	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
李 勇	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
付天亮	讲 师	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

续表

主要完成人员	职 称	单 位
王 超	博士后	东北大学 RAL 国家重点实验室
邓想涛	博 士	东北大学 RAL 国家重点实验室
王黎筠	高级工程师	东北大学 RAL 国家重点实验室
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
赵大东	博 士	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
郑明军	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

5. 报告执笔人

李勇、王超、李家栋、付天亮、邓想涛、王昭东、王国栋。

6. 致谢

中厚板连续热处理关键技术的研究、开发与应用,至今已近 10 年时间。王国栋院士早在 10 年前就提出高品质、高附加值中厚板关键工艺、技术和装备研究的必要性和紧迫性,在王国栋院士远见卓识的指引下,王昭东老师带领课题研究团队不断克服研究过程中遇到的各类难题,相继攻克淬火过程板材高冷却速度、高冷却均匀性控制技术、薄规格高强度中厚板淬火过程的板形控制以及较厚规格钢板冷却强度和组织均匀性控制技术及中厚板连续固溶炉的脉冲燃烧、加热预测、最优化控制、无结瘤高效节能生产等关键技术,研发出中厚板系列多功能辊式连续淬火机、大型特殊钢板材高温无结瘤辊底式固溶炉装备和工艺控制系统。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取得不断突破和工程项目顺利实施提供了有效保障。

感谢本钢集团、宝钢特钢事业部、酒钢不锈钢集团、南钢中厚板卷厂、宝钢罗泾厚板厂、新钢宽厚板厂及湘钢宽厚板厂等企业的各位相关技术人员对本报告提供的数据及建议。

本研究报告的顺利完成，得益于来自东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室热处理课题组全体成员的辛勤投入以及各合作单位的有利支持。

值此报告付梓之际，再次对所有为自主创新研发中厚板连续热处理技术做出贡献的单位和个人表示诚挚的感谢！

目 录

摘要	1
1 研究背景及意义	3
1.1 研究背景及研究必要性	3
1.2 中厚板热处理生产工艺要素	5
1.3 中厚板热处理加热装备技术概况	6
1.3.1 热处理炉特点	6
1.3.2 热处理炉分类	7
1.4 中厚板淬火技术的发展历史	10
1.4.1 在线热处理技术	11
1.4.2 离线热处理技术	13
2 中厚板连续热处理工艺和品种的研发	19
2.1 低成本工程机械用高强度耐磨钢板开发	19
2.2 高强度结构用调质钢板开发	23
2.3 高品质不锈钢热处理工艺及品种开发	24
3 大型特殊钢板材高温辊底式固溶炉关键技术研发与应用	26
3.1 特殊钢热处理技术原理及要求	26
3.2 高温固溶炉脉冲燃烧的时序控制	28
3.2.1 脉冲燃烧控制原理	28
3.2.2 脉冲燃烧的时序控制模型研究	33
3.2.3 脉冲燃烧时序控制的稳态温度偏差分析	37
3.2.4 新型复合式脉冲燃烧时序控制模型建立	41



3.2.5 脉冲燃烧时序控制模型的测试及应用	44
3.3 基于总括热吸收率法的钢板加热模型	50
3.3.1 炉膛内热交换分析	51
3.3.2 总括热吸收率的实验研究	54
3.3.3 炉膛温度计算模型	59
3.3.4 基于总括热吸收率法的钢板加热模型的建立	59
3.3.5 钢板加热模型的验证及应用	62
3.4 中厚板热处理加热过程的优化	64
3.4.1 稳态加热过程的优化目标分析	64
3.4.2 基于灰色异步粒子群算法的稳态加热优化	67
3.4.3 热处理加热优化模型的应用	75
3.5 辊底炉炉辊的改进及热损分析和控制优化	76
3.5.1 辊底炉存在的问题及解决方法	76
3.5.2 炉辊传热计算模型	78
3.5.3 热损失分析和优化控制	83
3.5.4 现场使用情况	86
3.6 中厚板高温固溶炉控制系统的开发	86
3.6.1 高温固溶炉控制系统构成	87
3.6.2 高温固溶炉自动加热功能的设计	88
3.6.3 钢板加热过程优化控制系统的设计	95
3.7 中厚板高温固溶加热技术的应用	104
3.7.1 高温固溶炉工艺技术概况	104
3.7.2 热工模型及控制系统的实际应用效果	107
4 中厚板均匀化辊式淬火技术及装备的研发与应用	113
4.1 辊式淬火技术的控制要素及研究综述	113
4.1.1 辊式淬火技术核心工艺要素	113
4.1.2 中厚板辊式淬火关键技术研究综述	114
4.2 具有高冷却强度及冷却均匀性的淬火系统喷嘴优化设计	117
4.2.1 高温钢板水冷过程的局部换热区描述	117

4.2.2 淬火喷水系统的结构设计	118
4.2.3 缝隙喷嘴射流流场的有限元模拟	125
4.3 高效淬火工艺换热过程研究分析	129
4.3.1 钢板辊式淬火过程换热机理	130
4.3.2 淬火时表面综合换热系数的求解原理	131
4.3.3 逆求解法计算淬火时表面综合换热系数	131
4.3.4 基于工业生产实际的钢板辊式淬火实验	133
4.3.5 表面综合换热系数计算结果	138
4.4 薄规格板材均匀化辊式淬火技术及变形控制策略	139
4.4.1 薄规格板材均匀性冷却过程的关键影响因素	139
4.4.2 薄规格钢板辊式淬火过程变形数值模拟	143
4.4.3 薄规格板材淬火变形的实验结果及其分析	146
4.4.4 薄规格板材淬火过程变形控制策略	149
4.5 辊式淬火机工艺自动控制系统的开发	153
4.5.1 基础自动化控制系统	153
4.5.2 人机界面功能	155
4.5.3 工艺过程自动化控制系统	155
4.6 中厚板辊式淬火技术的现场应用	161
4.6.1 中厚板辊式淬火机设备技术参数	161
4.6.2 淬火钢板品种及规格	162
4.6.3 淬火后钢板性能指标	163
4.6.4 淬火后钢板板形控制结果平直度	167
参考文献	170

摘 要

本书以中厚板连续热处理线关键装备及工艺技术研发项目为背景,以特殊钢板材连续热处理、极限规格板带材淬火为研究对象,对高等级中厚板热处理工艺技术及产品、大型特殊钢板材热处理核心装备技术、高品质极限规格辊式淬火技术及多功能辊式淬火机进行了研究,开发了相应的关键装备及工艺技术,现场应用取得了良好效果。研究内容和主要成果如下:

研究分析了中厚板离线热处理工艺的技术优势,介绍了本项目研究开发的高附加值调质钢板,包括低成本工程机械用高强度耐磨钢、高强度结构用调质钢和高品质不锈钢等。

以特殊钢板材热处理线为研究对象,分析了现代化大型特殊钢板材连续生产线的需求。针对热处理中的燃烧、加热及表面质量控制等关键技术问题进行研究,建立了中厚板热处理涉及的脉冲燃烧、加热预测、最优化控制、无结瘤生产等全体系控制技术,开发了一键式全自动固溶炉控制系统,在自主研发的现代化大型特殊钢板材连续热处理生产线上实现了高效节能、精确均匀加热。在此基础上,结合自主开发的多功能辊式淬火机及均匀化淬火技术,开发出系列奥氏体不锈钢、双相不锈钢新产品,稳定实现4~70mm厚不锈钢板连续生产。

本研究阐明了高温钢板高强度冷却换热机理,利用有限元数值模拟及实验室中试平台,开发出系列多功能射流喷嘴,解决了淬火过程板材高冷却速度、高冷却均匀性等难题。系统进行了影响薄规格板材均匀淬火的因素分析、对钢板辊式淬火过程及形变位移量的模拟计算以及工业试验分析,提出基于对称性冷却技术及淬火参数高精度控制技术的淬火过程薄板板形控制策略。解决了薄规格高强度钢板淬火过程的板形控制以及较厚规格钢板冷却强度和组织均匀性控制等难题,开



发出 4 ~ 10mm 极限薄规格钢板的高平直度淬火工艺, 突破了国外的长期技术封锁。

关键词: 中厚板; 脉冲燃烧; 最优化加热; 无结瘤加热; 辊式淬火; 淬火应力场; 板形; 有限元分析