

RAL · NEU 研究报告 No.0030

热轧板带钢快速冷却 换热属性研究

REZHA BANDAIGANG KUAISU LENGQUE HUANRE SHUXING YANJIU

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
www.cnmp.com.cn

RAL · NEU 研究报告 No. 0030

热轧板带钢快速冷却 换热属性研究

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

内 容 简 介

本书全面介绍了热轧板带钢先进快速冷却技术及其换热原理,内容包括射流冲击换热原理、汽雾喷射换热原理、钢板内部温度演变规律、板带钢温度场解析模型、新一代 TMCP 工艺研发和应用等。

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、工程热物理专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

热轧板带钢快速冷却换热属性研究/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, 2019. 1

(RAL·NEU 研究报告)

ISBN 978-7-5024-7976-3

I. ①热… II. ①轧… III. ①带钢—热轧—冷却—
换热—研究 IV. ①TG335.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 275934 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 978-7-5024-7976-3

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;固安华明印业有限公司印刷

2019 年 1 月第 1 版, 2019 年 1 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 15.25 印张; 236 千字; 224 页

54.00 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

控制轧制和控制冷却 (TMCP, Thermo-mechanical Control Process) 技术作为改善钢材综合力学性能的重要技术已经广泛应用于板带钢生产领域, 在晶粒细化、组织强化以及组织均匀化等方面发挥了重要作用, 对于高性能钢铁材料的开发和生产具有十分重要的意义。这其中传统层流冷却技术的作用巨大, 直至目前仍被国内外大多数钢铁企业所采用。然而, 以层流冷却水为特征的传统加速冷却装置存在冷却机理上的不足, 高温钢板与冷却水之间大量存在冷却效率低下的过渡沸腾、膜态沸腾等不稳定换热方式。换热系数较小的膜态沸腾换热区域远大于换热能力较强的核状沸腾区以及冲击射流换热区域。层流冷却无法突破冷却能力低、冷却均匀性差的瓶颈。如何击破钢板表面与冷却水之间的汽膜, 减少不稳定换热的存在、增大射流冲击换热区域是提高冷却能力和改善冷却均匀性的关键。开发新型冷却技术取代以层流冷却技术为特征的传统加速冷却技术成为 TMCP 技术发展的迫切需求。为此, 国内外学者围绕具有高强度均匀化特点的超快速冷却技术及其所采用的射流冲击换热原理开展了一系列研究。目前, 东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室所研发的具有超快速冷却功能的轧后先进冷却系统已经得到国内多家热轧板带材生产企业的使用和认可, 取得了重要成果。但深入挖掘和探索先进冷却技术的换热机理, 对于提升冷却水换热效率, 改善冷却均匀性以及终冷温度、冷却速度等工艺参数高精度控制具有重要的指导作用。

2. 研究进展与成果

本课题结合热轧板带材先进快速冷却工艺特点, 采用数值分析与实验研究相结合的方式, 对倾斜射流冲击换热规律、空气增压汽雾喷射换热规律、温度场演变规律、温度场解析模型和快冷装置关键技术进行系统深入研究。

(1) 针对缝隙射流冲击换热属性进行研究, 获得了静止和运动条件下的缝隙射流换热区域分布和演变规律。运动状态下采用倾斜射流冲击换热方式, 可以提高再润湿同步性, 再润湿前沿呈一条直线, 热流密度曲线间距均匀分布, 可满足板带钢高强度均匀冷却的需求。在 $0^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 范围内, 倾角增大有利于换热能力提升, 热流密度峰值增幅 $12.8\%\sim 13.2\%$ 。

(2) 针对单束圆形喷嘴射流冲击换热属性进行研究, 结果表明倾斜角度对单束圆形喷嘴射流冲击换热能力有着显著影响, 顺向流区域内的热流密度、换热系数以及再润湿速度均有所增加。在此基础上, 研究获得了喷嘴结构、开冷温度、水温、射流方向等参数变化对换热特性的影响规律。

(3) 针对多束流体射流冲击换热行为进行研究, 获得了多束流体射流冲击冷却过程的流体结构和换热区域分布。喷嘴间平行流相互冲击飞溅, 形成干涉区和液滴飞溅区, 促进热流密度和换热系数增强。增加流速有助于提高冷却强度, 改善冷却均匀性。在实验室和现场条件下开展多束射流实验研究, 随流速的增加平均换热系数有所增加, 但增幅逐渐减小。

(4) 探究纳米流体空气增压汽雾喷射换热机理, 研究获得其导热能力、润湿规律等流体属性以及汽雾喷射流体结构分布, 进而研究其沸腾换热机理, 汽雾喷射条件下的再润湿行为、换热区域分布与演变规律等换热机理, 掌握了纳米颗粒和表面活性剂添加对流体流动特性以及换热行为作用规律。

(5) 建立了射流冲击沸腾换热条件下的平均换热系数理论模型, 针对超大热载荷边界条件下的对流导热耦合问题建立快速有限元解析模型。相关成果为热轧板带钢超快冷、淬火工艺技术装备改进、控制系统模型优化以及冷却工艺调优提供理论支持, 已在多个超快冷和淬火机项目中得到应用。

3. 论文与专利

该项目实施过程中, 在国内外学术期刊发表论文 20 余篇, 申请国家专利 10 余项。

论文:

(1) Wang Bingxing, Lin Dong, Zhang Bo, et al. Local Heat Transfer Characteristics of Multi Jet Impingement on High Temperature Plate Surfaces [J]. ISIJ International, 2018, 58 (1): 132~139.

(2) 张田, 田勇, 王丙兴, 王昭东, 王国栋. “温控-形变” 轧制工艺对厚板变形渗透性的影响 [J]. 轧钢, 2018, 34 (1) : 6~9.

(3) Zhang T, Xiong L, Tian Y, et al. A Novel 1.5D FEM of Temperature Field Model for an Online Application on Plate Uniform Cooling Control [J]. Isij International, 2017, 57 (4).

(4) Wang Bingxing, Dong Fuzhi, Wang Zhaodong, RDK Misra, Wang Guodong. Microstructure and mechanical properties of Nb-B bearing low carbon steel plate: Ultrafast cooling versus accelerated cooling [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science Edition), 2017, 32 (3) : 619~624.

(5) 韩毅, 贾维维, 张田, 王丙兴, 王昭东. 中厚板轧后冷却圆形喷嘴射流冲击行为分析 [J]. 轧钢, 2017, 34 (1) : 9~12.

(6) 王丙兴, 熊磊, 张田, 王昭东, 王国栋. 道次间冷却对厚板控制轧制变形行为的影响 [J]. 钢铁, 2017, 52 (9) : 60~65.

(7) 王丙兴, 董福志, 王昭东, 王国栋. 超快冷条件下 Mn-Nb-B 系低碳贝氏体高强钢组织与性能研究 [J]. 材料工程, 2016, 44 (7) : 26~31.

(8) Wang B, Lin D, Xie Q, et al. Heat transfer characteristics during jet impingement on a high-temperature plate surface [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 100 : 902~910.

(9) Wang B, Guo X, Xie Q, et al. Heat transfer characteristic research during jet impinging on top/bottom hot steel plate [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2016, 101 : 844~851.

(10) Xie Q, Wang B, Wang Y, et al. Experimental investigation of high-temperature steel plate cooled by multiple nozzle arrays [J]. Isij International, 2016.

(11) Zhang T, Xie Q, Wang B, et al. A novel variable scale grid model for temperature self-Adaptive control: an application on plate cooling process after rolling [J]. Steel Research International, 2016, 87 (9) : 1213~1219.

(12) Xie Q, Wang B, Wang Z, et al. Heat transfer coefficient and flow characteristics of hot steel plate cooling by multiple inclined impinging jets [J]. Isij International, 2016, 56 (12).



(13) 王国栋, 王昭东, 刘振宇, 王丙兴, 袁国. 基于超快冷的控轧控冷装备技术的发展 [J]. 中国冶金, 2016, 26 (10): 9~17.

(14) 谢谦, 林冬, 王丙兴, 王昭东, 王国栋. 中厚板在线冷却过程冷却参数数据分析 [J]. 轧钢, 2016, 33 (6): 16~18.

(15) Hu X, Wang B X, Wang Z D, et al. Self-learning factor prediction of the heat transfer coefficient based on a dynamic fuzzy neural network for ultra-fast cooling [J]. Metallurgical Research & Technology, 2015, 112 (2): 201.

(16) Xie Q, Wang B, Wang Z, et al. The effect of jet angle and initial plate temperature during jet impingement heat transfer process in ultra-fast cooling technology [J]. Steel Research International, 2015, 86 (5): 489~494.

(17) Wang B, Wang Z D, Wang B X, et al. The relationship between microstructural evolution and mechanical properties of heavy plate of Low-Mn steel during ultra fast cooling [J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 2015, 46 (7): 2834~2843.

(18) Zhang T, Wang B, Wang Z, et al. Side-surface shape optimization of heavy plate by large temperature gradient rolling [J]. Transactions of the Iron & Steel Institute of, 2015, 56 (1).

(19) 韩毅, 贾维维, 梁雄, 王丙兴. 基于 ANSYS Fluent 的超快冷设备管路的优化设计 [J]. 中国冶金, 2015, 25 (7): 24~27.

专利:

(1) 王丙兴, 张田, 武志强, 谢谦, 田勇, 王昭东, 王国栋, 李勇, 韩毅. 一种提高超快冷温度模型精度和自学习效率的控制方法 [P]. 2015, 中国, ZL201510411489.6.

(2) 王丙兴, 王昭东, 贾维维, 韩毅, 田勇, 张志福, 王国栋. 多腔体流量可控喷淋集管 [P]. 2015, 中国, ZL201510427213.7.

(3) 王丙兴, 王昭东, 贾维维, 韩毅, 田勇, 张志福, 王国栋. Flow controllable spray header with multi-chamber [P]. 2015, 英国, GB2529072.

(4) 王昭东, 王丙兴, 吴俊宇, 张田, 田勇, 韩毅, 付天亮, 李勇, 王国栋. 应用道次间冷却工艺控制轧制的即时冷却系统及冷却方法 [P].

2015, 中国, ZL201510524358.9.

(5) 王昭东, 王丙兴, 吴俊宇, 张田, 田勇, 韩毅, 付天亮, 李勇, 王国栋. 应用道次间冷却工艺控制轧制的即时冷却系统及冷却方法 [P]. 2015, 中国, US14/838818.

(6) 王丙兴, 田勇, 贾维维, 张志福, 韩毅, 王昭东, 王国栋. 中厚板冷却系统头尾快速遮蔽装置、遮蔽系统及屏蔽方法 [P]. 2015, 中国, ZL201510822852.3.

(7) 韩毅, 王昭东, 王丙兴, 田勇, 付天亮, 李勇, 王国栋. 一种中厚板轧后冷却喷水系统 [P]. 2015, 中国, ZL201520527130.

(8) 韩毅, 王昭东, 王丙兴, 田勇, 付天亮, 李勇, 王国栋. 一种中厚板轧后冷却喷水系统. 2015, 德国, DE20 2015104565.

(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 [P]. 2014, 中国, ZL201410121555.1.

(10) 王昭东, 赵大东, 付天亮, 李勇, 李家栋, 王国栋, 田勇, 王丙兴. 一种用于中厚板热处理生产线的过程控制方法和系统 [P]. 2014, 中国, ZL201410018402.4.

(11) 王昭东, 田勇, 王丙兴, 韩毅, 张志福, 贾维维, 徐义波, 王国栋. 一种中厚板轧后冷却系统的边部遮蔽装置 [P]. 2014, 中国, ZL201410115760.7.

(12) 韩毅, 王丙兴, 王昭东, 贾维维, 宋国智, 王国栋, 田勇, 李勇. 一种中厚板超快冷设备的供水系统 [P]. 2014, 中国, ZL201410199940.8.

(13) Wang Z, Wang B, Wu J, et al. Cooling method and on-line cooling system for controlled rolling with inter-pass cooling process [P]. 2018, US10, 065, 226B2.

4. 项目完成人员

主要完成人	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

续表

主要完成人	职 称	单 位
王丙兴	副教授	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
韩毅	高级实验师	东北大学 RAL 国家重点实验室
李勇	副教授	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
李海军	副教授	东北大学 RAL 国家重点实验室
付天亮	副教授	东北大学 RAL 国家重点实验室
王斌	讲师	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
谢谦	讲师	安徽工业大学
张田	讲师	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
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
林冬	硕士	东北大学 RAL 国家重点实验室
王宇	硕士	东北大学 RAL 国家重点实验室
张博	硕士	东北大学 RAL 国家重点实验室
刘志学	硕士	东北大学 RAL 国家重点实验室
周佳阳	硕士	东北大学 RAL 国家重点实验室
夏越	硕士	东北大学 RAL 国家重点实验室
倪乾峰	硕士	东北大学 RAL 国家重点实验室

5. 报告执笔人

王丙兴、谢谦、张田、王斌、田勇、王昭东、王国栋。

6. 致谢

本研究旨在探究新一代 TMCP 工艺关键核心超快速冷却技术和淬火技术的换热原理。课题实施期间，东北大学王国栋院士对课题研究工作和研究内容给予了悉心指导。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。衷心感谢实验室领导和师生所给予的无私帮助和大力支持。

本研究工作获得了国家自然科学基金青年科学基金项目（51404058）和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目（N150704005）、国家重点研发计划项目（2016YFB0300602、2017YFB0305103）的资助。项目成果应用于鞍钢、首钢京唐、江苏沙钢、江苏南钢、江西新钢、广东韶钢、河北中普（邯郸）、福建三钢等钢铁企业。衷心感谢企业领导和专家的信任和大力支持，衷心感谢项目实施过程中现场工程技术专家的配合。

目 录

摘要	1
1 板带钢先进快速冷却技术研究现状	3
1.1 引言	3
1.2 板带钢快速冷却技术分类	4
1.3 控制冷却技术的研究与发展	9
1.3.1 传统板带钢冷却装备	10
1.3.2 新型射流冲击冷却技术	13
1.4 快速冷却技术换热原理研究现状	17
1.4.1 射流冲击换热原理研究现状	17
1.4.2 汽雾冷却换热原理研究现状	20
2 板带钢高温壁面换热基本原理研究	24
2.1 板带钢热加工（热处理）过程中的换热行为	24
2.1.1 热传导	24
2.1.2 热辐射	25
2.1.3 对流换热	26
2.2 沸腾换热基本原理	26
2.2.1 沸腾换热原理	26
2.2.2 射流冲击钢板表面冷却区域研究	31
2.2.3 沸腾气泡特征的研究	33
2.3 射流（层流）冲击换热基本原理	35
2.3.1 垂直射流冲击冷却换热机理	36
2.3.2 倾斜射流冲击冷却换热机理	38

2.3.3	射流冲击换热特性研究	39
2.3.4	射流冲击换热数学模型的建立	45
2.4	气雾冲击换热基本原理	48
2.4.1	空气增压汽雾冷却换热模型研究	49
2.4.2	临界液滴尺寸模型研究	51
2.5	钢板内部导热基本原理	53
2.5.1	导热微分方程	53
2.5.2	钢板热物性参数处理	55
3	倾斜狭缝射流换热特性研究	57
3.1	多功能冷却实验平台构建	57
3.2	静止状态下狭缝式射流冲击沸腾换热研究	59
3.2.1	狭缝射流冲击换热基本属性研究	60
3.2.2	倾角对换热属性的影响	64
3.3	运动状态下狭缝射流冲击换热属性研究	66
3.3.1	运动过程条件下的狭缝射流冲击基本换热特征	66
3.3.2	倾角对换热属性的影响	67
3.3.3	相对运动速度对换热属性的影响	70
3.4	狭缝射流冲击冷却换热数值分析	71
3.4.1	努赛尔数计算及射流冲击换热区域特性分析	71
3.4.2	单束倾斜射流冲击流体属性数值分析	73
3.4.3	多束狭缝射流冲击流体属性数值分析	76
4	圆形喷嘴射流冲击换热原理研究	78
4.1	单束射流冲击换热过程	78
4.1.1	单束圆形倾斜射流换热属性	79
4.1.2	单束圆形倾斜射流的数值分析	86
4.2	单束圆形射流冲击换热属性的主要影响因素	88
4.2.1	喷嘴结构对换热属性的影响	88
4.2.2	开冷温度对换热属性的影响	88

4.2.3	水温对换热属性的影响	90
4.2.4	上下表面换热特性异同	92
4.3	射流冲击冷却过程中局部区域换热特性研究	94
4.3.1	局部区域流体属性和换热规律分析	95
4.3.2	工艺参数对局部换热规律的影响	97
4.3.3	局部换热系数与表面温降分析	101
5	多束圆形射流冲击换热原理研究	103
5.1	多束圆形射流换热基本规律研究	103
5.1.1	不同流速下多束射流冲击规律研究	104
5.1.2	冷却过程流体属性数值模拟和影像分析	106
5.1.3	温度和热流密度分析	109
5.2	多束圆形喷嘴倾斜射流冲击流体属性和换热特征研究	111
5.2.1	静止条件下多束倾斜射流流体属性研究	111
5.2.2	相对运动速度对换热属性的影响	114
5.2.3	倾角对换热属性的影响	118
5.3	超快冷工艺装备优化和模型开发	121
6	空气增压气雾冷却换热原理研究	129
6.1	实验平台简介	129
6.2	纳米流体的制备	131
6.2.1	接触角与表面润湿之间的关系	133
6.2.2	不同纳米流体的接触角对比	134
6.3	不同体积分数及不同类别纳米粒子对换热过程的影响	137
6.3.1	热流密度曲线的分析	137
6.3.2	热流密度峰值的分析	141
6.3.3	换热区域内平均热流密度与表面温度分析	143
6.4	表面活性剂对纳米流体换热过程的影响	144
6.4.1	热流密度曲线的分析	144
6.4.2	热流密度曲线峰值的分析	147

6.4.3	换热区域内平均热流密度与表面温度分析	150
7	快速冷却条件下的板带钢内部温度演变规律研究	152
7.1	开冷温度对厚度方向换热的影响	152
7.1.1	不同开冷温度下钢板厚度方向的温降分析	152
7.1.2	不同开冷温度下的热流密度曲线分析	155
7.1.3	不同开冷温度下的换热系数分析	158
7.2	不同流量对厚度方向换热的影响	159
7.2.1	不同流量下钢板厚度方向的温降曲线	159
7.2.2	不同流量下的热流密度曲线分析	161
7.2.3	不同流量下的换热系数分析	163
7.3	不同冷却强度下喷嘴间距的影响	164
7.3.1	不同喷嘴间距狭缝射流冲击基本换热特性	165
7.3.2	不同喷嘴间距下热流密度分析	167
7.3.3	不同喷嘴间距下的换热系数分析	170
7.4	不同冷却强度下运动速度的影响	171
7.4.1	不同运动速度下厚度方向的温降曲线	171
7.4.2	不同运动速度下的热流密度分析	174
7.4.3	不同运动速度下的换热系数分析	176
8	板带钢在线冷却快速温度解析模型的开发	178
8.1	板带钢温度场快速解析模型开发	178
8.1.1	钢板内部导热有限差分解析模型的建立	178
8.1.2	钢板内部导热有限元解析模型的建立	181
8.1.3	钢板内部 1.5D 解析模型的开发	183
8.2	换热系数模型的建立	186
8.2.1	射流冲击冷却条件	186
8.2.2	层流冷却条件	187
8.2.3	气雾冷却条件	189
8.3	厚向平均温度处理方法	193

8.4 瞬时冷却速度计算模型的建立	195
9 板带钢先进快速冷却技术的开发和应用	196
9.1 基于超快冷的新一代 TMCP 技术的开发和应用	196
9.1.1 板带钢超快冷技术开发	196
9.1.2 组织调控机理及强韧化机制	199
9.1.3 产品应用	201
9.2 “温控-形变”耦合控轧技术的开发和应用	202
9.3 板带钢辊式淬火技术的开发和应用	205
9.4 薄规格钢板气雾冷却技术的开发和应用	207
10 结论	209
参考文献	211

摘 要

控制轧制和控制冷却 (TMCP, Thermo-mechanical Control Process) 技术作为改善钢材综合力学性能的重要技术已经广泛应用于板带钢生产领域, 在晶粒细化、组织强化以及组织均匀化等方面发挥了重要作用, 对于高性能钢铁材料的开发和生产具有十分重要的意义。开发新型冷却技术取代以层流冷却技术为特征的传统加速冷却技术成为 TMCP 技术发展的迫切需求。为此, 本课题结合国家自然科学基金青年科学基金项目 (51404058) 和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (N150704005), 针对射流冲击和气雾喷射换热基础开展研究工作, 为实现高强均匀高效换热提供理论支撑。主要研究工作如下:

(1) 针对缝隙射流冲击换热属性进行研究, 获得了静止和运动条件下的缝隙射流换热区域分布和演变规律。运动状态下采用倾斜射流冲击换热方式, 可以提高再润湿同步性, 再润湿前沿呈一条直线, 热流密度曲线间距均匀分布, 可满足板带钢高强度均匀冷却的需求。在 $0^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 范围内, 倾角增大有利于换热能力提升, 热流密度峰值增幅 $12.8\% \sim 13.2\%$ 。

(2) 针对单束圆形喷嘴射流冲击换热属性进行研究, 研究结果表明倾斜角度对单束圆形喷嘴射流冲击换热能力有着显著影响, 顺向流区域内的热流密度、换热系数以及再润湿速度均有所增加。在此基础上, 研究获得了喷嘴结构、开冷温度、水温、射流方向等参数变化对换热特性的影响规律。进而研究获得喷射流体间的相互作用规律, 及其对换热规律的影响。

(3) 针对多束圆形喷嘴射流冲击换热属性研究, 分析了流体射流冲击冷却过程的流体结构和换热区域分布。喷嘴间平行流相互冲击飞溅, 形成干涉区和液滴飞溅区, 促进热流密度和换热系数增强。增加流速有助于提高冷却强度, 改善冷却均匀性。在实验室和现场条件下开展多束射流实验研究, 随流速的增加平均换热系数有所增加, 但增幅逐渐减小。

(4) 研究了纳米流体空气增压气雾喷射换热机理, 对其导热能力、润湿

规律等流体属性以及气雾喷射流体结构分布进行了量化分析,进而掌握其沸腾换热机理,气雾喷射条件下的再润湿行为、换热区域分布与演变规律等换热机理,阐明了纳米颗粒和表面活性剂添加对流体流动特性以及换热行为作用规律。

(5) 结合本书研究结果建立了射流冲击沸腾换热条件下的平均换热系数理论模型,并针对超大热载荷边界条件下的对流导热耦合问题建立快速有限元解析模型。相关成果为热轧板带钢超快冷、淬火工艺技术装备改进、控制系统模型优化以及冷却工艺调优提供理论支持,已在多个超快冷和淬火机项目中得到应用。

关键词: 板带钢, 快速冷却, 射流冲击, 气雾喷射, 换热原理, 冷却均匀性