



高效轧制国家工程研究中心先进技术丛书

热轧钢材的组织性能控制 ——原理、工艺与装备

Microstructure and Property Control of Hot Rolled Steels
— Principle, Process and Equipment

■ 余伟 蔡庆伍 宋勇 孙蓊泉 编著



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

高教轧制国家工程研究中心先进技术丛书

热轧钢材的组织性能控制 ——原理、工艺与装备

余伟 蔡庆伍 宋勇 孙蓟泉 编著



北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2016

内 容 简 介

本书共 12 章, 其中 1~7 章介绍了钢材的性能检测方法、强韧化机理、奥氏体组织演变、过冷奥氏体相变、微合金元素的溶解与析出、钢材热轧过程的传热与控制及热变形抗力的物理冶金理论; 8~12 章阐述了物理冶金方法在中厚板、带钢、棒线材、异型材、钢管热轧生产中的开发与应用, 以及物理冶金原理与计算机应用技术的结合。

本书可供相关专业技术人员了解国内外物理冶金理论与工程技术的最新进展, 也可以作为材料成型与控制专业本科生及研究生的选修教材。

图书在版编目(CIP)数据

热轧钢材的组织性能控制: 原理、工艺与装备/余伟等
编著. —北京: 冶金工业出版社, 2016. 10

(高效轧制国家工程研究中心先进技术丛书)

ISBN 978-7-5024-7373-0

I. ①热… II. ①余… III. ①热轧—钢铁冶金—研究
IV. ①TG335. 11

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 244697 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

责任编辑 李培禄 美术编辑 吕欣童 版式设计 吕欣童

责任校对 卿文春 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7373-0

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

2016 年 10 月第 1 版, 2016 年 10 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 27.25 印张; 656 千字; 415 页

80.00 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 yjgybs.tmall.com

(本书如有印装质量问题, 本社营销中心负责退换)

《高效轧制国家工程研究中心先进技术丛书》 编辑委员会

主 任 唐 荻

副主任 张勇军 何安瑞 陈雨来

委 员 (按姓氏笔画为序)

米振莉 杨 荃 余 伟 宋 勇 张 飞

邵 健 武会宾 周 鹏 徐 科 郭 强

崔 衡 程知松

顾 问 刘文仲 王 京 蔡庆伍 侯建新

— 序 言 —

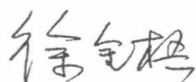
高效轧制国家工程研究中心（以下简称轧制中心）自1996年成立起，坚持机制创新与技术创新并举，采用跨学科的团队化科研队伍进行科研组织，努力打破高校科研体制中以单个团队与企业开展短期项目为主的科研合作模式。自成立之初，轧制中心坚持核心关键技术立足于自主研发的发展理念，在轧钢自动化、控轧控冷、钢种开发、质量检测等多项重要的核心技术上实现自主研发，拥有自主知识产权。

在立足于核心技术自主开发的前提下，借鉴国际上先进的成熟技术、器件、装备，进行集成创新，大大降低了国内企业在项目建设过程的风险与投资。以宽带钢热连轧电气自动化与计算机控制技术为例，先后实现了从无到有、从有到精的跨越，已经先后承担了国内几十条新建或改造升级的热连轧计算机系统，彻底改变了我国在这些关键技术方面完全依赖于国外引进的局面。

针对首都钢铁公司在搬迁重建后产品结构调整的需求，特别是对于高品质汽车用钢的迫切需求，轧制中心及时组织多学科研发力量，在2005年9月23日与首钢总公司共同成立了汽车用钢联合研发中心，积极探索该联合研发中心的运行与管理机制，建组同一个研发团队，采用同一个考核机制，完成同一项研发任务，使首钢在短时间内迅速成为国内主要的汽车板生产企业，这种崭新的合作模式也成为体制机制创新的典范。相关汽车钢的开发成果迅速实现在国内各大钢铁公司的应用推广，为企业创造了巨大的经济效益。

实践证明，轧制中心的科研组织模式有力地提升了学校在技术创新与服务创新方面的能力。回首轧制中心二十年的成长历程，有艰辛更有成绩。值此轧制中心成立二十周年之际，我衷心希望轧制中心在未来的发展中，着眼长远、立足优势，聚焦高端技术自主研发和集成创新，在国家技术创新体系中发挥应有的更大作用。

高效轧制国家工程研究中心创始人

 教授

2016年9月

— 序 言 二 —

高效轧制国家工程研究中心成立二十年了。如今她已经走过了一段艰苦创新的历程，取得了骄人的业绩。作为当初的参与者和见证人，回忆这段创业史，对启示后人也是有益的。

时间追溯到1992年。当时原国家计委为了尽快把科研成果转化为生产力（当时转化率不到30%），决定在全国成立30个工程中心。分配方案是中科院、部属研究院和高校各10个。于是，原国家教委组成了评审小组，组员单位有北京大学、清华大学、西安交通大学、天津大学、华中理工大学和北京科技大学。前5个单位均为教委直属，北京科技大学是唯一部属院校。经过两年的认真评审，最初评出9个，评审小组中前5个教委高校当然名列其中。最终北京科技大学凭借获得多项国家科技进步奖的实力和大家坚持不懈的努力，换来了评审的通过。这就是北京科技大学高效轧制国家工程研究中心的由来。

二十年来，在各级领导的支持和关怀下，轧制中心各任领导呕心沥血，带领全体员工，克服各种困难，不断创新，取得了预期的效果，并为科研成果转化做出了突出贡献。我认为取得这些成绩的原因主要有以下几点：

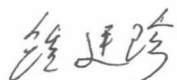
（1）有一只过硬的团队，他们在中心领导的精心指挥下，不怕苦，连续工作在现场，有不完完成任务不罢休的顽强精神，也赢得了企业的信任。

（2）与北科大设计研究院（甲级设计资质）合为一体，在市场竞争中有资格参与投标并与北科大科研成果打包，有明显优势。

（3）有自己的特色并有明显企业认知度。在某种意义上讲，生产关系也是生产力。

总之，二十年过去了，展望未来，竞争仍很激烈，只有总结经验，围绕国民经济主战场各阶段的关键问题，不断创新、攻关，才能取得更大成绩。

高效轧制国家工程研究中心轧机成套设备领域创始人

 教授

2016年9月

— 序 言 三 —

高效轧制国家工程研究中心走过了二十年的历程，在行业中取得了令人瞩目的业绩，在国内外具有较高的认知度。轧制中心起步于消化、吸收国外先进技术，发展到结合我国轧制生产过程的实际情况，研究、开发、集成出许多先进的、实用的、具有自主知识产权的技术成果，通过将相关核心技术成果在行业里推广和转移，实现了工程化和产业化，从而产生了巨大的经济效益和社会效益。

以热连轧自动化、高端金属材料研发、成套轧制工艺装备、先进检测与控制为代表的多项核心技术已取得了突出成果，得到冶金行业内的一致认可，同时也培养、锻炼了一支过硬的科技成果研发、转移转化队伍。

在中心成立二十周年的日子里，决定编辑出版一套技术丛书，这套书是二十年中心技术研发、技术推广工作的总结，有非常好的使用价值，也有较高的技术水准，相信对于企业技术人员的工作，对于推动企业技术进步是会有作用的。参加本丛书编写的人员，除了具有扎实的理论基础以外，更重要的是长期深入到生产第一线，发现问题、解决问题、提升技术、实施项目、服务企业，他们中的很多人以及他们所做的工作都可以称为是理论联系实际典范。

高效轧制国家工程研究中心轧钢自动化领域创始人

孙一康 教授

2016 年 9 月

— 序 言 四 —

我国在“八五”初期，借鉴美国工程研究中心的建设经验，由原国家计委牵头提出了建立国家级工程研究中心的计划，旨在加强工业界与学术界的合作，促进科技为生产服务。我从1989年开始，参与了高效轧制国家工程研究中心的申报准备工作，1989~1990年访问美国俄亥俄州立大学的工程中心、德国蒂森的研究中心，了解国外工程转化情况。后来几年时间里参加了多次专家论证、现场考察和答辩。1996年高效轧制国家工程研究中心终于获得正式批准。时隔二十年，回顾高效轧制国家工程研究中心从筹建到现在的发展之路，有几点感想：

(1) 轧制中心建设初期就确定的发展方向是正确的，而且具有前瞻性。以汽车板为例，北京科技大学不仅与鞍钢、武钢、宝钢等钢铁公司联合开发，而且与一汽、二汽等汽车厂密切联系，做到了科研、生产与应用的结合，促进了我国汽车板国产化进程。另外需要指出的是，把科学技术发展要适应社会和改善环境写入中心的发展思路，这个观点即使到了现在也具有一定的先进性。

(2) 轧制中心的发展需要平衡经济性与公益性。与其他国家直接投资的科研机构不同，轧制中心初期的主要建设资金来自于世行贷款，因此每年必须偿还100万元的本金和利息，这进一步促进轧制中心的科研开发不能停留在高校里，不能以出论文为最终目标，而是要加快推广，要出成果、出效益。但是同时作为国家级的研究机构，还要担负起一定的社会责任，不能以盈利作为唯一目的。

(3) 创新是轧制中心可持续发展的灵魂。在轧制中心建设初期，国内钢铁行业无论是在发展规模上还是技术水平上，普遍落后于发达国家，轧制中心的创新重点在于跟踪国际前沿技术，提高精品钢材的国产化率。经过了近二十年的发展，创新的中心要放在发挥多学科交叉优势、开发原创技术上面。

轧制中心成立二十年以来，不仅在科研和工程应用领域取得丰硕成果，而且培养了一批具有丰富实践经验的科研工作者，祝他们在未来继续运用新的机制和新的理念不断取得辉煌的成绩。

高效轧制国家工程研究中心汽车用钢研发领域创始人

王光建 教授

2016年9月

— 序 言 五 —

1993 年末，当时自己正在德国斯图加特大学作访问学者，北京科技大学压力加工系主任、自己的研究生导师王先进教授来信，希望我完成研究工作后返校，参加高效轧制国家工程研究中心的工作。那时正是改革开放初期，国家希望科研院所不要把写论文、获奖作为科技人员工作的终极目标，而是把科技成果转移和科研工作进入国家经济建设的主战场为己任，因此，国家在一些大学、科研院所和企业成立“国家工程研究中心”，通过机制创新，将科研成果经过进一步集成、工程化，转化为生产力。

二十多年过去了，中国钢铁工业有了天翻地覆的变化，粗钢产量从 1993 年的 8900 万吨发展到 2014 年的 8.2 亿吨；钢铁装备从全部国外引进，变成了完全自主建造，还能出口。中国的钢材品种从许多高性能钢材不能生产到几乎所有产品都能自给。

记得高效轧制国家工程研究中心创建时，我国热连轧宽带钢控制系统的技术完全掌握在德国的西门子，日本的东芝、三菱，美国的 GE 公司手里，一套热连轧带钢生产线要 90 亿元人民币，现在，国产化的热连轧带钢生产线仅十几亿元人民币，这几大国际厂商在中国只能成立一个合资公司，继续与我们竞争。那时国内中厚板生产线只有一套带有进口的控制冷却设备，而今 80 余套中厚板轧机上控制冷却设备已经是标准配置，并且几乎全部是国产化的。那时中国生产的汽车用钢板仅仅能用在卡车上，而且卡车上的几大难冲件用国外钢板才能制造，今天我国的汽车钢可满足几乎所有商用车、乘用车的需要……这次编写的 7 本技术丛书，就是我们二十年技术研发的总结，应当说工程中心成立二十年的历程，我们交出了一份合格的答卷。

总结二十年的经验，首先，科技发展一定要与生产实践密切结合，与国家经济建设密切结合，这些年我们坚持这一点才有今天的成绩；其次，机制创新是成功的保证，好的机制才能保证技术人员将技术转化为己任，国家二十年前提出的“工程中心”建设的思路和政策今天依然有非常重要的意义；第三，坚持团队建设是取得成功的基础，对于大工业的技术服务，必须要有队伍才能有成果。二十多年来自己也从一个创业者到了将要离开技术研发第一线的年纪了，自己真诚地希望，轧制中心的事业、轧制中心的模式能够继续发展，再创辉煌。

高效轧制国家工程研究中心原主任

 教授

2016 年 9 月

前 言

物理冶金是钢铁材料加工领域重要的理论基础，在钢材加工领域得到广泛应用。研究物理冶金技术的主要目的是简化生产工艺流程，充分发掘钢材的潜能，改善钢材的综合性能，开发钢材新品种，实现先进钢铁材料的绿色制造。

从钢材的使用性能和服役性能要求出发，通过对钢材热轧加工过程的物理冶金原理和新方法研究，分析钢材在生产过程中的组织变化、相变规律以及组织与性能之间的关系，结合材料设计的新理念，充实和形成了物理冶金理论和工程应用技术，为新工艺和先进钢铁材料开发提供参考依据。

本书共 12 章，其中 1~7 章介绍了钢材的性能检测方法、强韧化机理、奥氏体组织演变、过冷奥氏体相变、微合金元素的溶解与析出、钢材热轧过程的传热与控制及热变形抗力的物理冶金理论；8~12 章阐述了物理冶金方法在中厚板、带钢、棒线材、异型材、钢管热轧生产中的开发与应用，以及物理冶金原理与计算机应用技术的结合。

本书主要由北京科技大学高效轧制国家工程研究中心余伟编写，何春雨编写第 6 章，孙蓟泉编写第 7 章，宋勇编写第 12 章。蔡庆伍参加了部分章节的编写、校对工作。董恩涛参加了本书的文字编辑工作。

本书汇集了作者们多年来的科研成果，蔡庆伍、程知松、武会宾、胡水平等为本书提供了宝贵的技术资料，在此表示衷心感谢。本书也尽可能地收集整理了国内外在物理冶金理论及工程应用领域多年来的研究开发成果与生产实践资料，充实本书内容，力求更全面地展示物理冶金在工程技术领域的应用效果。

本书可以作为相关专业科技人员的参考书，了解国内外物理冶金理论与工程技术的发展。本书也可以作为材料成型与控制专业的选修教材，开阔学生专业视野，深化本专业的基础知识，掌握基础理论与应用相结合的前沿技术和基

本方法，增强运用基础理论知识去分析和解决实际问题的能力。

由于我们专业知识有限，编写时间仓促，书中一定存在某些不足之处，诚恳希望读者予以指正。

编著者

2016 年 8 月

目 录

1 钢材的力学性能及评价方法	1
1.1 钢的拉伸性能	1
1.1.1 拉伸应力-应变曲线	1
1.1.2 拉伸与均匀变形	2
1.2 钢的韧性和冲击试验	3
1.2.1 钢的韧性	3
1.2.2 钢的韧性评价方法	4
1.3 钢的蠕变性能	6
1.3.1 蠕变曲线	6
1.3.2 持久强度极限	7
1.3.3 持久塑性	8
1.3.4 应力松弛	9
1.4 钢的疲劳性能	9
1.4.1 钢的疲劳失效与应力状态	9
1.4.2 应力循环与 $S-N$ 曲线	10
1.4.3 钢的疲劳性能评价	11
1.4.4 疲劳的影响因素	11
参考文献	12
2 钢的强化和韧化机理	14
2.1 钢的强化机制	14
2.1.1 固溶强化	14
2.1.2 位错强化	16
2.1.3 沉淀强化	18
2.1.4 细晶强化	19
2.1.5 相变强化	21
2.2 钢的增塑和韧化机制	22
2.2.1 钢的增塑机制	23
2.2.2 钢的韧化机制	26
2.2.3 钢的韧化方法	28

参考文献	31
3 钢的奥氏体组织演变与控制	33
3.1 高温变形奥氏体的再结晶	33
3.1.1 动态回复和动态再结晶	33
3.1.2 静态再结晶的控制	37
3.1.3 再结晶区域图	43
3.2 奥氏体变形储能及控制	44
3.3 低温奥氏体的形成与控制	48
3.3.1 低温奥氏体组织控制	48
3.3.2 残余奥氏体的稳定性	53
参考文献	55
4 热变形奥氏体的动态相变与控制	57
4.1 过冷奥氏体相变及测试方法	57
4.1.1 热分析法	58
4.1.2 差示扫描量热法	58
4.1.3 声发射法	58
4.1.4 电阻法	59
4.1.5 热膨胀法	59
4.2 变形奥氏体的铁素体相变	60
4.2.1 变形对奥氏体向铁素体 ($\gamma \rightarrow \alpha$) 转变的影响	60
4.2.2 变形奥氏体的相变动力及形核	62
4.2.3 热变形对 $\gamma \rightarrow \alpha$ 相变温度的影响	64
4.2.4 铁素体的变形与再结晶	67
4.3 变形奥氏体的珠光体相变	70
4.3.1 珠光体形核和珠光体形貌参数	70
4.3.2 珠光体的形核与长大	71
4.3.3 变形条件下的珠光体相变温度	72
4.4 变形奥氏体的贝氏体相变	74
4.4.1 贝氏体结构及形核	75
4.4.2 贝氏体的相变动力	77
4.4.3 典型低碳贝氏体钢的连续冷却相变	79
4.4.4 贝氏体相变与 MA 组织控制	81
4.5 变形奥氏体的马氏体相变	82
4.5.1 马氏体相变温度的影响因素	82
4.5.2 马氏体组织形态	84

4.5.3 马氏体形态与力学性能的关系	85
参考文献	87
5 微合金元素的溶解与析出控制	90
5.1 微合金元素化合物特征	90
5.2 微合金元素的高温溶解	91
5.3 微合金元素的析出及控制	94
5.3.1 微合金元素的析出动力学	94
5.3.2 轧制过程中的析出	98
5.3.3 冷却过程中的析出	100
5.3.4 时效过程中的析出	102
5.4 析出物的长大	105
5.5 微合金元素及其在钢中的作用	106
5.5.1 阻止加热时奥氏体晶粒长大	106
5.5.2 抑制形变奥氏体的再结晶	107
5.5.3 强韧化作用	108
参考文献	113
6 轧制过程传热学与冷却控制	115
6.1 传热过程物理现象	115
6.1.1 冷却传热现象	115
6.1.2 水冷时的换热现象	116
6.1.3 汽水混合冷却	117
6.1.4 相变与相变潜热	117
6.2 对流换热系数及测量方法	118
6.2.1 分析方法	118
6.2.2 实验方法	119
6.2.3 数值解法	119
6.3 不同冷却方式与对流换热系数	119
6.3.1 气雾冷却	119
6.3.2 层流冷却	120
6.3.3 缝隙喷射冷却	132
6.3.4 柱状流喷射冷却	138
6.4 不均匀冷却与残余应力	141
6.4.1 残余应力的测量	141
6.4.2 温度-相变-应力的耦合	142
6.4.3 热轧残余应力的控制	161

6.5 各种冷却装置及其应用	162
6.5.1 先进冷却装置的技术特征	163
6.5.2 钢材高效控冷技术的应用	167
参考文献	171
7 金属塑性变形抗力的研究	172
7.1 金属变形抗力研究概况	172
7.1.1 变形抗力的概念与一般行为	172
7.1.2 金属塑性变形抗力的影响因素	172
7.1.3 金属塑性变形抗力研究概况	176
7.1.4 现有的金属变形抗力数学模型	178
7.2 金属塑性变形抗力的研究方法	179
7.2.1 实验方法	180
7.2.2 试验设备和试验方案	181
7.2.3 静态软化率的研究	182
7.3 典型钢种变形抗力研究案例	183
7.3.1 X80 管线钢	183
7.3.2 X120 管线钢	187
7.3.3 SPHC 热轧带钢	191
7.3.4 95CrMo 工具钢	196
参考文献	204
8 中厚板生产中的组织与性能控制	205
8.1 中厚板生产工艺流程	205
8.1.1 一般中厚板工艺流程	205
8.1.2 特殊中厚板工艺流程	205
8.1.3 中厚板生产常用工序功能	205
8.1.4 组织与性能控制关键工序	208
8.2 典型中厚板品种的组织与性能控制	210
8.2.1 高强度管线钢中厚板	210
8.2.2 桥梁用中厚钢板	215
8.2.3 高层建筑用钢	218
8.2.4 船舶及海洋工程用钢	223
8.2.5 锅炉容器钢板	229
8.3 中厚板的组织性能控制新工艺	235
8.3.1 中间冷却 (IC) 与高效控制轧制	235
8.3.2 温度梯度轧制 (GTR)	240

8.3.3 直接淬火 (DQ)	247
8.3.4 间断直接淬火 (IDQ) 与直接淬火分配 (DQP)	253
8.3.5 在线热处理 (HOP)	256
8.3.6 弛豫析出控制 (RPC)	260
8.3.7 常化控制冷却 (NCC)	261
参考文献	267
9 热轧带钢的组织性能控制	269
9.1 热轧带钢生产工艺流程及特点	269
9.1.1 常规带钢热连轧工艺流程	269
9.1.2 薄板坯连铸连轧工艺流程	271
9.1.3 薄带铸轧工艺流程	274
9.2 带钢热轧过程的组织控制	276
9.2.1 加热铸坯的组织控制	276
9.2.2 热轧带钢生产过程的控制轧制	278
9.3 热轧带钢的控制冷却及相变控制	282
9.3.1 带钢轧后控制冷却工艺	282
9.3.2 冷却工艺对组织性能的影响	284
9.4 典型热轧带钢组织与性能控制应用	288
9.4.1 热连轧 TRIP 钢的组织与性能控制	288
9.4.2 热轧管线钢带的组织性能控制	291
参考文献	293
10 组织性能控制在型钢生产中的应用	295
10.1 棒材及钢筋的组织性能控制	295
10.1.1 热轧棒材工艺及设备布置	295
10.1.2 棒材热轧过程的温度控制	298
10.1.3 热轧轴承钢棒材的组织控制	302
10.1.4 传统棒材生产线的控制轧制	311
10.1.5 热轧钢筋的组织性能控制	313
10.2 线材的组织性能控制	324
10.2.1 线材生产的温度控制	324
10.2.2 线材在线热处理工艺	335
10.3 异型材的组织性能控制	338
10.3.1 H 型钢的组织性能控制	338
10.3.2 钢轨的在线热处理	343
参考文献	348

11 热轧无缝钢管的组织性能控制	350
11.1 热轧无缝钢管的用途及性能要求	350
11.2 热轧无缝钢管的控制轧制	351
11.2.1 热轧无缝钢管变形规律研究方法	351
11.2.2 无缝钢管再结晶型控制轧制模拟研究	355
11.3 热轧无缝管的组织性能控制应用	360
11.3.1 轧后快速冷却工艺	360
11.3.2 轧后直接淬火	364
11.3.3 在线常化工艺	377
参考文献	383
12 热轧钢材的组织性能预报与控制	385
12.1 加热过程的组织演变	385
12.1.1 奥氏体的形核与晶粒长大	385
12.1.2 影响奥氏体晶粒尺寸的主要因素	385
12.1.3 奥氏体晶粒长大模型	386
12.2 轧制过程中的组织演变	388
12.2.1 动态回复与再结晶	388
12.2.2 静态回复与再结晶	391
12.2.3 微合金元素的影响	393
12.3 轧后冷却过程的组织演变	399
12.3.1 相变平衡温度计算模型	399
12.3.2 相变孕育期计算模型	403
12.3.3 相变转变量计算模型	404
12.4 室温组织与力学性能关系模型	407
12.4.1 固溶强化模型	408
12.4.2 析出强化模型	408
12.4.3 位错强化模型	409
12.4.4 细晶强化模型	409
12.5 热轧钢材组织性能预报与控制系统及应用	410
12.5.1 热轧钢材组织性能预报模型构成	410
12.5.2 组织性能在线预报系统构成与应用	412
参考文献	415