



高效轧制国家工程研究中心先进技术丛书

高品质热轧板带钢 理论基础及品种开发

High Quality Hot Rolled Plate and Strip Theory and
Material Development

■ 唐荻 武会宾 编著

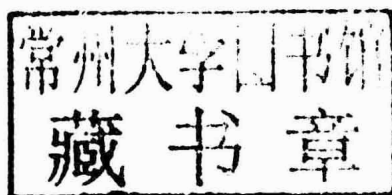


冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

高教轧制国家工程研究中心先进技术丛书

高品质热轧板带钢 理论基础及品种开发

唐 荻 武会宾 编著



北 京

冶金工业出版社

2016

内 容 简 介

物理模拟技术是高附加值钢铁品种开发的重要科学方法和工程手段。本书在简要介绍物理模拟的方法及材料学基本理论的基础上,重点介绍了一些典型高品质热轧板带钢的成分、工艺、性能特点,以及部分高品质钢的应用技术,钢种包括高强工程机械钢、船板及海洋工程用钢、高性能管线钢、压力容器用钢、高性能桥梁钢、塑料模具钢、石油套管钢以及核电用钢等。

本书可供从事物理模拟实验、钢种开发、工艺设计、生产技术人员使用,也可作为大专院校相关专业师生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

高品质热轧板带钢理论基础及品种开发/唐荻,武会宾
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 978-7-5024-7339-6

I. ①高… II. ①唐… ②武… III. ①带钢—热轧—生产
工艺—研究 IV. ①TG335.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第244688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 李 臻 美术编辑 吕欣童 版式设计 杨 帆 彭子赫

责任校对 禹 蕊 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7339-6

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;21.75印张;523千字;330页

72.00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)

《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

徐金松 教授

2016年9月

— 序 言 —

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的典范。

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 —

热轧板带钢是钢铁产品的主要品种之一，广泛应用于工程机械、船舶及海洋工程、油气管线、建筑等领域。在物理冶金理论基础上，利用物理模拟手段，分析钢铁材料在生产过程中的热变形行为及其对微观结构与性能的影响规律，从而为高品质热轧板带钢工业化大生产过程中的成分优化和组织调控技术提供理论依据和技术支撑。

本书共分10章，第1章介绍了物理模拟的基本概念、相似理论基础等热轧板带钢的物理模拟基础。第2章介绍了钢铁材料的强化机理、合金元素在钢中的作用、常见的组织类型及特点、控轧控冷以及热处理工艺等热轧板带钢的理论基础。第3章至第10章分别介绍了8个领域的典型高品质热轧板带钢的成分、工艺、组织、性能特点，主要包括高强工程机械及耐磨钢、船板及海洋工程用钢、高性能管线钢、压力容器用钢、高性能桥梁钢、塑料模具钢、石油套管钢以及核电用钢。

本书主要由北京科技大学高效轧制国家工程研究中心唐荻和武会宾编写，孙蓓泉承担了第2章中物理模拟的相似理论基础的编写，张鹏程承担了第5章高性能管线钢的编写以及本书的文字编辑工作，吴华杰参加了第6章压力容器用钢的校对工作。

本书汇集了中心多位老师及研究生们多年来的科研成果，蔡庆伍、余伟、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！巨彪、许立雄、牛刚、曹嘉明、董陈、董波、龚娜、其布日、张达、智强、王卫兵、吴滔等多名研究生为本书的文字编辑工作做出了贡献，在此一并表示感谢！

本书的编写侧重于展示北京科技大学高效轧制国家工程研究中心在该领域的部分技术内容，因此可能会有很多该领域的技术精华未被录入。本书可以为从事物理模拟实验、钢种开发、工艺设计、生产工作的科研人员和技术人员提供技术参考，也可作为大专院校材料加工工程专业师生的参考用书。

由于我们专业知识有限，编写时间仓促，书中一定存在一些不足之处，诚恳希望读者予以指正。

编著者

2016年8月30日

目 录

1 热轧板带钢的物理模拟基础	1
1.1 物理模拟的基本概念	1
1.2 物理模拟的相似理论基础	2
1.2.1 相似的一般概念	2
1.2.2 相似三定理	2
1.2.3 相似准数的推导方法	3
1.2.4 塑性加工物理模拟中的相似条件	4
1.2.5 物理模拟方法概述	5
1.2.6 Gleeble 热模拟系统及其应用	5
1.2.7 平面压缩模拟系统特点及应用	6
1.2.8 热轧试验机中试模拟及应用	7
1.3 物理模拟技术的典型应用	7
1.3.1 连铸领域	8
1.3.2 热变形领域	8
参考文献	11
2 热轧板带钢的理论基础	12
2.1 钢铁材料的强韧化机理	12
2.1.1 钢铁材料的强化机理	12
2.1.2 钢铁材料的韧化机理	16
2.2 合金元素在钢铁材料中的作用	18
2.2.1 钢中的五大元素	18
2.2.2 钢中的气体元素	22
2.2.3 钢中的微合金元素	23
2.2.4 钢中的低熔点元素	26
2.3 传统钢铁材料的组织类型及特点	28
2.3.1 高温转变组织	29
2.3.2 中温转变组织	31
2.3.3 低温转变组织	32
2.3.4 常见的低碳钢组织	35
2.4 控制轧制与控制冷却工艺	39
2.4.1 控制轧制	40
2.4.2 控制冷却	42
2.5 热处理工艺	43

2.5.1	钢的退火与正火	44
2.5.2	钢的淬火与回火	47
参考文献		48
3	高强工程机械及耐磨钢	50
3.1	高强工程机械及耐磨钢发展概况	50
3.1.1	高强工程机械用钢发展概况	50
3.1.2	高强耐磨钢的国内外发展概况	52
3.2	1000MPa 级超高强工程机械用钢的成分组织调控	54
3.2.1	1000MPa 级超高强工程机械用钢的相变规律	54
3.2.2	轧制工艺对实验钢组织和性能的影响	57
3.2.3	热处理工艺对实验钢组织和性能的影响	59
3.3	高强耐磨钢的成分设计及组织性能调控	64
3.3.1	高强耐磨钢的成分体系	64
3.3.2	耐磨钢组织性能的调控	65
3.3.3	工艺对耐磨钢组织性能的影响	67
3.3.4	耐磨钢短流程制备工艺探索	67
3.3.5	高强耐磨钢的应用性能	70
参考文献		72
4	船板及海洋工程用钢	74
4.1	船板及海洋用钢国内外发展概况	74
4.1.1	船体结构用钢	74
4.1.2	海洋工程装备用钢	75
4.1.3	货油舱用耐蚀钢	77
4.2	船板及海工钢相关标准	78
4.2.1	超高强船板钢和海工钢标准要求	78
4.2.2	货油舱上甲板服役环境和耐蚀性标准要求	78
4.3	耐蚀 E36 级船板钢成分、工艺及性能	81
4.3.1	合金元素对上甲板全周期腐蚀的影响	81
4.3.2	货油舱下底板环境腐蚀行为	89
4.3.3	夹杂物对货油舱下底板腐蚀行为的影响	95
4.4	F40 级船板钢成分、组织、工艺及性能	98
4.4.1	F40 级船板钢高温变形行为	98
4.4.2	F40 级船板钢连续冷却转变规律	103
4.4.3	F40 级船板钢实验轧制	107
4.5	E690 海洋平台钢的成分、工艺、组织及性能	114
4.5.1	TMCP 工艺对 E690 海洋平台钢组织性能的影响	114
4.5.2	回火温度对 TMCP + T 和 RQ + T 工艺性能的影响	119

4.5.3 二次裂纹扩展	125
参考文献	130
5 高性能管线钢	133
5.1 高性能管线钢的国内外发展概况	133
5.2 X80 管线钢热送热装及冷装模拟研究	133
5.2.1 热装温度对材料晶粒尺寸的影响	141
5.2.2 热装温度对 Nb、V、Ti 微合金元素碳氮化物固溶和析出的影响	141
5.3 抗大变形管线钢	143
5.3.1 轧后弛豫阶段铁素体形核及晶粒长大的微观机制	146
5.3.2 不同弛豫时间内的晶界取向分析	147
5.3.3 X80 级抗大变形管线钢塑性变形机理研究	150
5.4 耐蚀管线钢	154
5.4.1 X80 管线钢抗 H ₂ S 腐蚀研究	154
5.4.2 X80 管线钢抗 CO ₂ 腐蚀研究	159
5.5 耐磨管线钢	166
5.5.1 组织类型对冲蚀磨损特性的影响	166
5.5.2 组织类型对磨粒磨损特性的影响	170
参考文献	176
6 压力容器用钢	179
6.1 压力容器用钢的国内外发展概况	179
6.2 690MPa 级石油储罐钢的成分设计及组织调控	182
6.2.1 不同成分 690MPa 级石油储罐钢的性能	182
6.2.2 调质工艺对 690MPa 级石油储罐用钢组织性能的影响	184
6.2.3 焊接热输入线能量对实验钢性能的影响	190
6.3 LNG 储罐用钢的成分设计及组织调控技术	194
6.3.1 9Ni 钢的成分、组织及工艺	194
6.3.2 热处理工艺对 9Ni 钢组织与性能的影响	197
6.3.3 9Ni 钢的低温性能	202
6.3.4 9Ni 钢的低温断裂机理	207
参考文献	212
7 高性能桥梁钢	215
7.1 桥梁用钢的发展概况	215
7.2 Q500qE 桥梁钢的成分设计及组织调控技术	219
7.2.1 Q500qE 桥梁钢的实验室研制	219
7.2.2 Q500qE 的韧脆转变温度	220
7.2.3 回火温度对 Q500qE 桥梁钢力学性能的影响	221

7.2.4 回火温度对组织结构的影响	221
7.3 桥梁钢的疲劳行为	224
7.3.1 Q500qE 桥梁钢的高周疲劳行为研究	224
7.3.2 Q500qE 桥梁钢的低周疲劳行为研究	229
参考文献	234
8 塑料模具钢	237
8.1 模具钢概述	237
8.1.1 塑料模具钢国内外发展概况	237
8.1.2 预硬型塑料模具钢的分类	239
8.1.3 预硬型塑料模具钢性能要求	241
8.1.4 预硬型塑料模具钢组织	241
8.2 合金元素对预硬型塑料模具钢的影响	241
8.3 预硬型塑料模具钢工艺优化	250
8.4 预硬型塑料模具钢应用性能研究	253
8.4.1 温度场数值模拟分析	253
8.4.2 实验室冷却物理模拟	257
8.5 预硬型塑料模具钢耐磨性试验研究	260
8.5.1 摩擦磨损试验	260
8.5.2 磨损形貌分析	263
8.5.3 摩擦磨损系数分析	263
参考文献	265
9 高强 ERW 的套管用钢	268
9.1 ERW 套管钢的国内外发展概况	268
9.1.1 ERW 石油套管钢发展概况	268
9.1.2 石油套管钢标准要求	268
9.2 Q125 级 ERW 石油套管钢成分设计及相变规律研究	270
9.2.1 成分设计及制备	270
9.2.2 相变规律研究	270
9.3 热处理对 Q125 级 ERW 石油套管钢组织和性能的影响	278
9.3.1 热处理实验过程及结果	278
9.3.2 工艺参数对性能的影响	281
9.4 Q125 钢的包辛格效应	290
9.4.1 Q125 钢轧制态包辛格效应	290
9.4.2 热处理工艺对包辛格效应的影响	294
9.5 ERW 焊接区腐蚀机理	296
参考文献	299

10 核电用钢	302
10.1 核电用钢国内外发展概况	302
10.1.1 裂变核电用钢的发展	302
10.1.2 聚变核电用钢的发展	302
10.2 裂变堆用 SA533B 钢的热模拟研究	304
10.2.1 SA533B 钢的变形抗力	304
10.2.2 SA533B 钢的动态再结晶规律研究	308
10.2.3 SA533B 钢的相变规律研究	311
10.2.4 热处理工艺对 SA533B 钢组织性能的影响	312
10.2.5 SA533B 钢的高温拉伸组织性能	315
10.3 RAFM 钢热模拟研究	315
10.3.1 RAFM 钢的变形抗力	315
10.3.2 RAFM 钢的动态再结晶规律	318
10.3.3 RAFM 钢的动态相变规律研究	319
10.3.4 轧制和热处理工艺对 RAFM 钢力学性能和微观组织的影响	320
参考文献	329

1.1 物理模拟的基本概念

物理模拟 (Physical Simulation) 是一个内涵十分丰富的广义概念, 也是一种重要的科学方法和工程手段。通常, 物理模拟是指缩小或放大比例, 或简化条件, 或采用替代材料, 用试验模型来代替原型的研究。例如, 新型飞机设计的风洞试验, 塑性成型过程中的密栅云纹法技术, 电路设计中的拓扑结构与试验电路, 以及宇航员的太空环境模拟试验舱等, 均属于物理模拟的范畴。

物理模拟是以相似理论为基础的实验分析方法, 将物理模拟和数值模拟结合, 是塑性成型规律及其理论研究的有力手段。塑性成型物理模拟一般包括两方面, 一是模拟研究塑性成型过程的物理化学现象和性能; 二是模拟研究塑性成型过程中位移、应变和应力等力学数学内容, 主要研究不同的约束条件、加载方式或不同工艺方法下, 变形金属内的应力、应变特征和金属流动规律等。常用的方法有机械式的网格法、层状材料法等; 光学式的云纹法、光塑性法、光敏涂层法、全息法等。

材料加工是材料科学与技术的一大分支, 包括凝固、锻造、挤压、轧制、拉拔、冲压、焊接等。对材料和热加工工艺来说, 物理模拟通常指利用小试件, 借助于某试验装置再现材料在制备或热加工过程中的受热, 或同时受热与受力的物理过程, 充分而精确地暴露与揭示材料或构件在热加工过程中的组织与性能变化规律, 评定或预测材料在制备或热加工时出现的问题, 为制定合理的加工工艺以及研制新材料提供理论指导和技术依据。物理模拟试验分为两种, 一种是在模拟过程中进行的试验, 另一种是模拟完成后进行的试验。

对材料的组织与性能来说, 它不仅与其成分有关, 而且与其加工工艺有很大的关系。优化其工艺参数, 不仅可以提高材料的性能, 而且可以减少合金的含量, 减少后续工序, 降低成本。对钢铁材料来说, 就是将控制轧制与形变热处理结合起来, 利用形变后奥氏体组织结构的变化获得要求的组织与性能, 是一种形变和相变结合的强化工艺。近几十年来, 物理模拟已逐渐在材料科学与工程领域得到应用, 从而推动材料学科的研究由“经验”分析走向“科学”, 由“定性”分析走向“定量”分析。模拟技术的应用, 不仅能预测某特定工艺所得到的参量的最终结果, 而且能显示出工艺过程的变化情况, 使人们对工艺过程的变化规律能有更深入的了解, 从而可使人们制订工艺不只单凭经验而是建立在更为科学、更为可靠的基础上, 从而大大减少试制的费用和周期。利用现代物理模拟技术, 用少量试验即可代替过去一切都需要大量重复性实验方法, 不但可节省大量人力、物力, 还可通过模拟技术研究目前尚无法采用直接实验进行研究的复杂问题。

1.2 物理模拟的相似理论基础

物理模拟是通过具有某种重要特征的客体来代替真实的过程或现象, 其中被代替的真实过程或物理现象称为原型, 用以代替原型的客体称为模型。物理模拟除对尺寸较小的工件可用实物进行直接实验外, 通常都必须选择适当的模型来进行模拟实验。在模拟实验中, 相似理论是指导模拟实验、分析实验结果, 并将实验结果推广应用于实际的基本理论。

1.2.1 相似的一般概念

相似理论是模型实验的理论基础, 借助于相似理论来指导模拟实验。模拟实验应包括三个方面的内容: 首先是设计实验方案, 包括选择模型材料、决定模型几何尺寸、确定实验步骤等; 其次是测量有关参数; 最后将实验数据进行处理, 利用获得的实验结论, 指导实际工艺的制订。

物理量蕴于现象之中。现象的相似是通过多种物理量的相似来表现的。表示现象特征的各种物理量, 一般说来不是孤立的、互不关联的, 而是处在为自然规律所决定的一定关系之中, 所以各种相似常数的大小, 是不能随意选择的, 由于在许多情况下这种关系表现为数学方程的形式, 当现象相似时, 这些方程具有同一的形式, 因而各相似常数间存在着某种数学上的约束关系, 或数学联系。

模型实验, 首先必须使模型和原型保持相似, 所谓相似, 是指一个物系中的现象其全部物理量(如尺寸、力、速度及时间等)的数值, 与第二个系统中相对应的诸物理量必须成比例。两个现象物理相似是指现象的物理本质相同, 且各对应点上和各对应瞬间与该现象有关的各同名物理量分别保持相同的比例, 亦即各对应点上与该现象相关的各同名物理量保持相似。

1.2.2 相似三定理

由于相似现象中的各有关物理量必须服从一定的物理定律, 它们之间受一定的关系方程约束, 因此各有关相似常数之间也存在一定关系。相似三定理是相似理论的基础, 它们分别说明相似现象具有什么性质, 个别现象的研究结果如何推广到所有相似现象上去, 以及满足什么条件现象才相似。

相似第一定理: 以现象彼此相似为前提, 研究彼此相似现象具有的性质, 所以也称相似正定理。

相似第一定理可以表述为: 彼此相似的现象其相似准数的数值相同。这一结论是根据彼此相似的现象具有的性质得出的。根据物理相似的概念, 彼此相似的现象在各对应点上和各对应瞬间的同名物理量分别保持相同的比例, 且必然是同一性质的现象, 服从于同一规律, 描述各个量之间关系的方程组文字上完全相同。要保持两现象相似, 称为相似准数的无量纲综合数群都等于同一数值, 即相似准数相等, 并由此规则选择模型试验中各物理量的比例。因此, 在相似研究中的一个重要问题, 就是确定相似准数。

相似第二定理: 关于物理量之间函数关系结构的定理。它说明应把模型试验结果整理成什么形式的关系式, 就能推广到其他相似现象上去。