



高效轧制国家工程研究中心先进技术丛书

# 汽车用先进高强板带钢

Advanced High Strength Strip Steel for Automobile

■ 唐荻 赵征志 米振莉 刘强 编著



冶金工业出版社  
[www.cnmp.com.cn](http://www.cnmp.com.cn)

高教轧制国家工程研究中心先进技术

# 汽车用先进高强板带钢

唐 荻 赵征志 米振莉 刘 强 编著

北 京  
冶 金 工 业 出 版 社  
2016

## 内 容 简 介

汽车用先进高强度钢是钢铁产品中的高附加值产品,具有品种多、产量大、技术含量高的特点。本书主要介绍了先进高强度钢的冶金材料学基础、各品种先进高强度钢的特点与生产工艺、先进高强度钢的最新研发进展,以及高强度钢用户技术的新进展与新挑战等。

本书可供从事板带轧制生产技术人员或者汽车用钢品种研发人员使用,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

汽车用先进高强板带钢/唐荻等编著. —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 978-7-5024-7352-5

I. ①汽… II. ①唐… III. ①汽车—金属材料—带钢  
IV. ①U465.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 240927 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](http://www.cnmp.com.cn) 电子信箱 [yjcbbs@cnmp.com.cn](mailto:yjcbbs@cnmp.com.cn)

责任编辑 李培禄 陈慰萍 美术编辑 吕欣童 版式设计 杨 帆 彭子赫

责任校对 李 娜 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7352-5

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; 31.5 印张; 761 千字; 484 页

99.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 [tougao@cnmp.com.cn](mailto: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](http://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 —

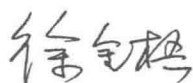
高效轧制国家工程研究中心（以下简称轧制中心）自1996年成立起，坚持机制创新与技术创新并举，采用跨学科的团队化科研队伍进行科研组织，努力打破高校科研体制中以单个团队与企业开展短期项目为主的科研合作模式。自成立之初，轧制中心坚持核心关键技术立足于自主研发的发展理念，在轧钢自动化、控轧控冷、钢种开发、质量检测等多项重要的核心技术上实现自主研发，拥有自主知识产权。

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

 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 —

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 —

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 —

高效轧制国家工程研究中心的汽车用钢团队是北京科技大学压力加工系原主任王先进教授一手创建起来的。1984年王先进教授从加拿大进修归国，提出了组建汽车用钢专门研发团队；提出中国钢铁工业要搞钢材深加工，并且组织成立了国内最初的学术组织——中国金属学会轧钢分会深加工学术委员会；促成国家主管部门在“七五”时期立项，进行汽车板技术攻关，并且组织了以北京科技大学王先进教授为负责人，联合鞍钢、武钢、一汽、二汽、中科院金属所、钢研院、北航参加的攻关队伍。今天回想起这些事情，看到今天汽车用钢研发在国内的火爆，看到今天各钢铁企业都在进行产品深加工的布局，看到国家今天在大力提倡组织“共性技术协同创新中心”，不能不使人感慨那时王先进教授思想的超前，这才是大师的风范和眼光。

后来王老师因病过早地离开了科研第一线，可以告慰王老师的是，王老师创建的这支队伍在过去的二十年里，依然在汽车用钢研发的第一线努力工作，并且取得了不俗的业绩。国内批量生产汽车板的企业宝钢、鞍钢、武钢、首钢、邯钢、马钢、涟钢，以及攀钢、柳钢、新余、济钢、酒钢、莱钢、安阳等都和我们在汽车板研发方面有密切合作。尤其是我们与首钢建立的汽车用钢联合研发中心，创造了“同一个目标，同一个队伍，同一个机制，同一个任务”的“四同一”合作机制，走出了新时代校企合作、高校为国家经济建设服务的新模式，更为首钢汽车板快速发展做出了贡献。

在服务企业的同时，我们也在国家的支持下对于高强韧汽车钢基础研究、对于新一代汽车用钢的研发倾注了很大的力量，本书涉及的内容就是高效轧制国家工程研究中心汽车用钢团队近十余年来在未来汽车用钢发展方面所做的部分生产实践和实验室研究工作的总结。

本书由唐荻教授主编并负责全书统稿。参加编写工作的有：唐荻教授（第1、5章）、赵征志教授（第2、4、9章）、米振莉教授（第6、11章）、赵爱民

教授（第3、7章）、孙蓟泉教授（第11章）、崔衡副教授（第2章）、江海涛副教授（第8章）、陈银莉副教授（第9章）、刘强博士（第10章）、苏岚博士（第11章）、段晓鸽博士（第8章）。参加本书实验和文字编辑工作的还有轧制中心的研究生：杨鸿铭、梁驹华、孙绍恒、李震、何青、徐梅、郭辉、杨永刚、梁江涛、李枫、薛建忠、喻智晨和苏晓伟等。

仅以此书献给我的恩师王先进教授！

唐 荻  
2016年9月

# 目 录

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| 1 现代汽车产业发展和先进高强度板带钢 .....        | 1  |
| 1.1 现代汽车产业发展及其对车身用钢的要求 .....     | 1  |
| 1.1.1 汽车车身的典型构造及各类成型件的特点 .....   | 2  |
| 1.1.2 汽车轻量化发展对新型汽车用钢的需求 .....    | 5  |
| 1.1.3 汽车安全标准对新型汽车用钢的要求 .....     | 7  |
| 1.2 汽车用先进高强度板带钢的特点和发展现状 .....    | 11 |
| 1.2.1 先进高强度钢的种类 .....            | 11 |
| 1.2.2 高强度钢板发展方向和使用面临的挑战 .....    | 14 |
| 参考文献 .....                       | 16 |
| 2 先进高强度钢的冶金材料学基础 .....           | 18 |
| 2.1 先进高强度板带钢的材料设计原理 .....        | 18 |
| 2.1.1 先进高强度板带钢的设计准则 .....        | 18 |
| 2.1.2 先进高强度板带钢的基体组织及强韧化手段 .....  | 19 |
| 2.1.3 极具潜力的组织——亚稳残余奥氏体 .....     | 22 |
| 2.1.4 合金元素在不同钢中的作用 .....         | 24 |
| 2.2 先进高强度钢的冶炼工艺控制 .....          | 26 |
| 2.2.1 成分控制 .....                 | 26 |
| 2.2.2 铸坯(锭)质量控制 .....            | 29 |
| 2.2.3 全流程洁净度控制 .....             | 42 |
| 2.3 板带轧制工艺及先进热处理技术 .....         | 54 |
| 2.3.1 连铸坯热送热装工艺 .....            | 54 |
| 2.3.2 热轧带钢温度控制 .....             | 56 |
| 2.3.3 轧制规程优化 .....               | 60 |
| 2.3.4 连续退火及热镀锌技术 .....           | 65 |
| 参考文献 .....                       | 67 |
| 3 高强度 IF 钢及烘烤硬化钢 .....           | 73 |
| 3.1 高强度 IF 钢 .....               | 73 |
| 3.1.1 高强度 IF 钢的发展 .....          | 73 |
| 3.1.2 高强度 IF 钢的特点及强化机制 .....     | 76 |
| 3.1.3 几种高强度 IF 钢的生产工艺及组织性能 ..... | 82 |

|                              |            |
|------------------------------|------------|
| 3.2 烘烤硬化钢                    | 91         |
| 3.2.1 烘烤硬化钢的特点               | 91         |
| 3.2.2 烘烤硬化钢机理                | 94         |
| 3.2.3 烘烤硬化钢的工艺性能和应用          | 96         |
| 参考文献                         | 104        |
| <b>4 双相钢</b>                 | <b>108</b> |
| 4.1 双相钢的概述                   | 108        |
| 4.1.1 国内外双相钢的研发概况            | 109        |
| 4.1.2 双相钢的化学成分及合金化原理         | 110        |
| 4.1.3 双相钢的组织特征               | 111        |
| 4.1.4 双相钢的性能特点               | 112        |
| 4.2 冷轧双相钢                    | 112        |
| 4.2.1 合金元素及工艺参数对冷轧双相钢组织性能的影响 | 112        |
| 4.2.2 冷轧双相钢退火过程中的相变规律        | 125        |
| 4.2.3 超高强度冷轧 DP 钢            | 131        |
| 4.2.4 冷轧双相钢的形变特点及断裂机制        | 139        |
| 4.3 热镀锌双相钢                   | 143        |
| 4.3.1 热镀锌双相钢的简介              | 143        |
| 4.3.2 合金元素及热镀锌工艺对双相钢组织性能的影响  | 144        |
| 4.3.3 退火过程中铁素体再结晶与奥氏体形成的演变规律 | 150        |
| 4.3.4 典型热镀锌双相钢的镀层结构          | 154        |
| 4.4 热轧双相钢                    | 158        |
| 4.4.1 生产工艺对中温卷取型热轧双相钢组织性能的影响 | 158        |
| 4.4.2 冷却工艺对低温卷取型热轧双相钢组织性能的影响 | 161        |
| 4.4.3 Si 含量对组织性能的影响          | 164        |
| 4.4.4 控轧控冷工艺参数对组织演变的影响       | 165        |
| 4.5 深冲双相钢                    | 169        |
| 4.5.1 工艺参数对深冲双相钢组织性能的影响      | 169        |
| 4.5.2 合金元素及工艺参数对织构的影响        | 176        |
| 4.5.3 连续退火过程中的组织与织构演变规律      | 180        |
| 参考文献                         | 186        |
| <b>5 相变诱导塑性钢</b>             | <b>188</b> |
| 5.1 相变诱导塑性钢概述                | 188        |
| 5.1.1 相变诱导塑性钢的特点与发展历程        | 188        |
| 5.1.2 相变诱导塑性钢的化学成分及其合金化原理    | 189        |
| 5.1.3 相变诱导塑性钢的制备工艺及其组织特征     | 190        |
| 5.1.4 相变诱导塑性钢的性能特点           | 191        |

|                                              |            |
|----------------------------------------------|------------|
| 5.2 冷轧相变诱导塑性钢 .....                          | 193        |
| 5.2.1 TRIP 钢的组织演变过程及碳原子的积聚 .....             | 193        |
| 5.2.2 合金元素对相变动力学及残余奥氏体的影响 .....              | 194        |
| 5.2.3 冷轧相变诱导塑性钢组织性能的优化 .....                 | 198        |
| 5.2.4 冷轧相变诱导塑性钢形变特点与断裂机制 .....               | 210        |
| 5.3 热镀锌相变诱导塑性钢 .....                         | 222        |
| 5.3.1 热镀锌 TRIP 钢的成分与工艺参数优化 .....             | 223        |
| 5.3.2 热镀锌 TRIP 钢的组织特征 .....                  | 225        |
| 5.3.3 热镀锌 TRIP 钢的涂镀性与镀层控制 .....              | 225        |
| 5.4 热轧相变诱导塑性钢 .....                          | 229        |
| 5.4.1 热轧 TRIP 钢的一般生产工艺 .....                 | 229        |
| 5.4.2 热轧 TRIP 钢组织性能的优化 .....                 | 229        |
| 参考文献 .....                                   | 234        |
| <b>6 孪晶诱导塑性钢及其发展 .....</b>                   | <b>240</b> |
| 6.1 TWIP 钢的发展情况 .....                        | 240        |
| 6.2 合金元素在 TWIP 钢中的作用 .....                   | 241        |
| 6.3 TWIP 钢中的层错能 .....                        | 241        |
| 6.4 TWIP 钢的强化效应与孪生诱导塑性 .....                 | 242        |
| 6.4.1 TWIP 钢的强化效应 .....                      | 242        |
| 6.4.2 TWIP 钢的孪生诱导塑性机理 .....                  | 243        |
| 6.5 Fe-Mn-3Si-3Al 系 TWIP 钢的生产工艺及相关技术研究 ..... | 243        |
| 6.5.1 化学成分对 Fe-Mn-3Si-3Al 系 TWIP 钢的影响 .....  | 243        |
| 6.5.2 生产工艺对 Fe-Mn-3Si-3Al 系 TWIP 钢的影响 .....  | 249        |
| 6.6 Fe-Mn-C 系 TWIP 钢的生产工艺及相关技术研究 .....       | 253        |
| 6.6.1 生产工艺对 Fe-Mn-C 系 TWIP 钢组织和性能的影响 .....   | 253        |
| 6.6.2 Fe-Mn-C 系 TWIP 钢的用户技术研究 .....          | 261        |
| 6.7 TWIP 钢的变形和强韧化机理研究 .....                  | 267        |
| 6.7.1 TWIP 钢变形织构的形成及演变规律 .....               | 267        |
| 6.7.2 孪晶诱导强塑性机制 .....                        | 268        |
| 参考文献 .....                                   | 272        |
| <b>7 中锰钢 .....</b>                           | <b>274</b> |
| 7.1 中锰钢的特点与发展 .....                          | 274        |
| 7.1.1 中锰钢的特点 .....                           | 274        |
| 7.1.2 中锰钢的发展 .....                           | 275        |
| 7.2 中锰钢的制备 .....                             | 277        |
| 7.2.1 中锰钢的化学成分体系和连续冷却相变规律 .....              | 277        |
| 7.2.2 中锰钢的制备工艺 .....                         | 278        |

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 7.3 热轧中锰钢 .....                  | 279 |
| 7.3.1 热轧中锰钢的关键制备技术 .....         | 279 |
| 7.3.2 升温阶段的微观组织演变 .....          | 280 |
| 7.3.3 临界区保温阶段的微观组织演变 .....       | 285 |
| 7.4 冷轧中锰钢 .....                  | 288 |
| 7.4.1 一段式罩式退火冷轧中锰钢 .....         | 288 |
| 7.4.2 一段式连续式退火冷轧中锰钢 .....        | 294 |
| 7.4.3 二段式罩式退火冷轧中锰钢 .....         | 294 |
| 7.4.4 退火过程中的组织演变规律 .....         | 303 |
| 7.5 中锰钢的力学性能与形变微观机理 .....        | 305 |
| 7.5.1 中锰钢的力学性能 .....             | 305 |
| 7.5.2 中锰钢的形变微观机理 .....           | 307 |
| 参考文献 .....                       | 309 |
| 8 淬火配分钢 .....                    | 312 |
| 8.1 冷轧 Q&P 钢的特点与发展现状 .....       | 312 |
| 8.1.1 Q&P 钢概述 .....              | 312 |
| 8.1.2 Q&P 钢中碳分布及残余奥氏体 .....      | 314 |
| 8.1.3 Q&P 钢的发展现状 .....           | 316 |
| 8.2 冷轧 Q&P 钢的生产工艺和组织演变过程 .....   | 317 |
| 8.2.1 Q&P 钢的生产工艺及其对力学性能的影响 ..... | 317 |
| 8.2.2 Q&P 钢的组织演变过程 .....         | 321 |
| 8.3 Q&P 钢中残余奥氏体及碳扩散机理研究 .....    | 326 |
| 8.3.1 Q&P 工艺对残余奥氏体量的影响 .....     | 327 |
| 8.3.2 残余奥氏体的分布 .....             | 328 |
| 8.3.3 配分过程中碳扩散机理研究 .....         | 329 |
| 8.4 冷轧 Q&P 钢的形变特点及其微观机理 .....    | 333 |
| 8.4.1 冷轧 Q&P 钢的形变特点 .....        | 333 |
| 8.4.2 残余奥氏体含量对形变的影响 .....        | 335 |
| 8.4.3 残余奥氏体的机械稳定性 .....          | 335 |
| 8.4.4 Q&P 钢变形过程中的微观组织变形行为 .....  | 336 |
| 参考文献 .....                       | 340 |
| 9 热成型钢 .....                     | 343 |
| 9.1 热成型钢概述 .....                 | 343 |
| 9.1.1 热成型钢的化学成分 .....            | 344 |
| 9.1.2 热成型钢的显微组织和力学性能 .....       | 345 |
| 9.1.3 热成型钢的现状与发展 .....           | 346 |
| 9.1.4 热成型技术的关键技术与设备 .....        | 347 |

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| 9.1.5 热成型技术的发展 .....               | 350 |
| 9.2 热成型钢的成分设计和相变规律 .....           | 351 |
| 9.2.1 成分设计和相变点理论计算 .....           | 351 |
| 9.2.2 连续冷却过程中的相变规律 .....           | 353 |
| 9.3 热成型钢的关键制备工艺及组织性能 .....         | 354 |
| 9.3.1 卷取温度对热成型钢组织和性能的影响 .....      | 354 |
| 9.3.2 不同退火工艺下热成型钢的组织 and 性能 .....  | 356 |
| 9.4 热成型工艺的影响因素 .....               | 361 |
| 9.4.1 热成型关键工艺参数的影响 .....           | 362 |
| 9.4.2 冷却方式的影响 .....                | 368 |
| 9.4.3 淬火方式的影响 .....                | 372 |
| 9.4.4 热成型钢中的残余奥氏体 .....            | 373 |
| 9.5 典型热成型零部件的组织与性能 .....           | 376 |
| 9.5.1 显微组织 .....                   | 377 |
| 9.5.2 力学性能 .....                   | 377 |
| 9.6 热成型钢的氢致断裂敏感性 .....             | 380 |
| 9.6.1 充氢电流密度的影响 .....              | 380 |
| 9.6.2 不同热成型工艺的影响 .....             | 383 |
| 参考文献 .....                         | 385 |
| 10 高强度钢的新进展 .....                  | 388 |
| 10.1 无碳化物贝氏体钢 .....                | 388 |
| 10.1.1 TBF 钢的概念与性能特点 .....         | 388 |
| 10.1.2 国内外研究现状 .....               | 388 |
| 10.1.3 TBF 钢的组织特征 .....            | 389 |
| 10.1.4 合金元素对组织性能的影响 .....          | 390 |
| 10.1.5 TBF 钢的制备工艺与组织演变过程 .....     | 391 |
| 10.2 含 Al 低密度高强度钢 .....            | 392 |
| 10.2.1 概述 .....                    | 392 |
| 10.2.2 Fe-Mn-Al 钢 .....            | 393 |
| 10.2.3 Fe-Al 钢 .....               | 394 |
| 10.2.4 生产和使用低密度钢板的问题 .....         | 395 |
| 10.3 退火马氏体基 Q&P 钢 .....            | 396 |
| 10.3.1 Q&P 钢的发展历程与工艺原理 .....       | 396 |
| 10.3.2 退火马氏体基 Q&P 钢的工艺、组织与性能 ..... | 396 |
| 10.4 退火马氏体基相变诱导塑性钢 .....           | 399 |
| 10.4.1 传统 TRIP 钢组织及其 TRIP 效应 ..... | 399 |
| 10.4.2 TAM 钢的工艺原理与组织构成 .....       | 400 |
| 10.4.3 TAM 钢的实验制备及其组织性能 .....      | 400 |

|                                |            |
|--------------------------------|------------|
| 参考文献                           | 404        |
| <b>11 汽车用高强度钢板成型技术</b>         | <b>406</b> |
| 11.1 汽车用高强度钢板成型概述              | 406        |
| 11.1.1 汽车轻量化带来的板类零件成型挑战        | 406        |
| 11.1.2 汽车用高强度钢板成型特点            | 409        |
| 11.1.3 汽车高强度钢成型解决方案            | 414        |
| 11.2 汽车用高强度钢板的成型性能评价           | 417        |
| 11.2.1 钢板塑性与成型性指标              | 417        |
| 11.2.2 汽车用高强度钢板的成型过程组织演变与成型性分析 | 427        |
| 11.2.3 高强度钢成型理论                | 441        |
| 11.3 汽车板深加工技术进展                | 447        |
| 11.3.1 激光拼焊板与连续变截面板技术          | 447        |
| 11.3.2 内高压成型技术                 | 454        |
| 11.3.3 热冲压成型技术                 | 460        |
| 11.3.4 冷弯成型技术                  | 464        |
| 11.3.5 其他成型技术                  | 475        |
| 参考文献                           | 480        |