



国家出版基金项目

“十二五”国家重点出版物出版规划项目

中国战略性新兴产业——新材料

关键钢铁材料

中国材料研究学会组织编写

丛书主编◎黄伯云

著者◎尚成嘉

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE



国家出版基金项目

“十二五”国家重点出版物出版规划项目

中国战略性新兴产业——新材料

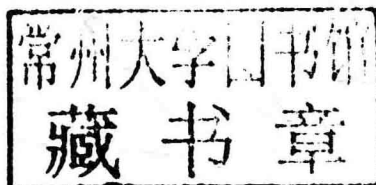
关键钢铁材料

中国材料研究学会组织编写

丛书主编 黄伯云

丛书副主编 韩雅芳

著 者 尚成嘉



中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

内 容 简 介

“中国战略性新兴产业——新材料”丛书是中国材料研究学会组织编写的,被新闻出版广电总局批准为“十二五”国家重点出版物出版规划项目,并获2016年度国家出版基金资助。丛书共16分册,涵盖了新型功能材料、高性能结构材料、高性能纤维复合材料等16种重点发展材料。本分册为《关键钢铁材料》。

本书在总结国内外关键钢铁材料实验研究结果及生产与应用情况的基础上,对现有关键钢铁材料进行了系统梳理。结合作者多年从事研发与应用的成果和经验,针对其强化机理和性能要求,详细论述了关键钢铁材料的微合金化原理和热处理工艺及强化机理,揭示了生产过程中的关键技术原理。

本书内容系统、全面、新颖,适合作为从事钢铁研究开发和工程化应用的科技人员和工程技术人员参考,也可供相关的高校师生、政府工作人员、企业人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国战略性新兴产业.新材料.关键钢铁材料/尚成嘉著. —北京:中国铁道出版社,2017.12

ISBN 978-7-113-23966-4

I. ①中… II. ①尚… III. ①新兴产业-产业发展-研究-中国②钢-金属材料-产业发展-研究-中国③铁-金属材料-产业发展-研究-中国 IV. ①F121.3②TG141

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 269721 号

书 名: 中国战略性新兴产业——新材料
关键钢铁材料
作 者: 尚成嘉 著

策 划: 李小军
责任编辑: 李小军 许 璐 徐盼欣
封面设计: **MX** DESIGN
STUDIO
责任校对: 张玉华
责任印制: 郭向伟

读者热线: (010) 63550836

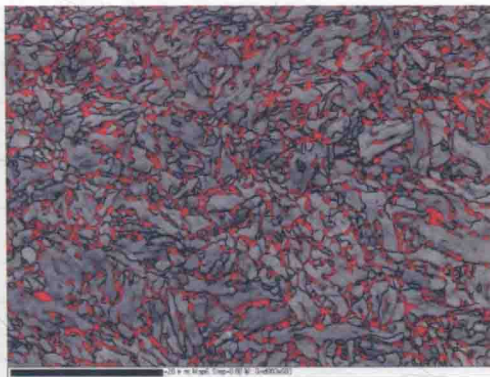
出版发行: 中国铁道出版社 (100054, 北京市西城区右安门西街 8 号)
网 址: <http://www.tdpress.com/51eds/>
印 刷: 中煤(北京)印务有限公司
版 次: 2017 年 12 月第 1 版 2017 年 12 月第 1 次印刷
开 本: 787 mm×1092 mm 1/16 印张: 9.25 彩插: 2 字数: 199 千
书 号: ISBN 978-7-113-23966-4
定 价: 48.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书,如有印制质量问题,请与本社教材图书营销部联系调换。电话:(010) 63550836
打击盗版举报电话:(010) 51873659



(a)

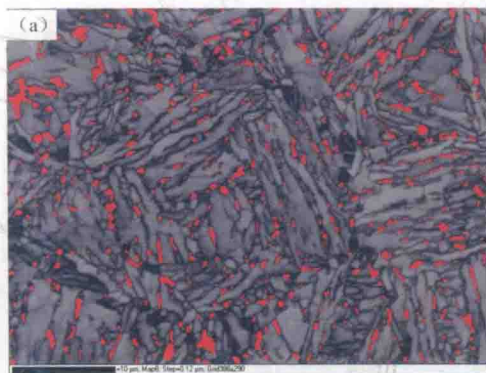


(b)

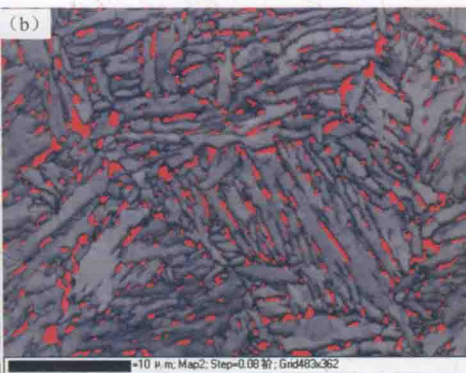
EBSD 表征临界退火和回火阶段的残余奥氏体

(a) 第一步临界退火后空冷至室温; (b) 第二步临界回火后空冷至室温。

图中红色区域代表残余奥氏体, 黑色代表取向差小于 5° 的晶界



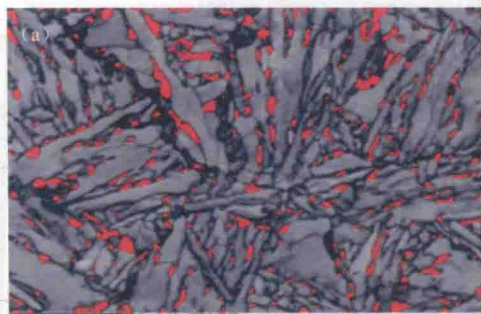
(a)



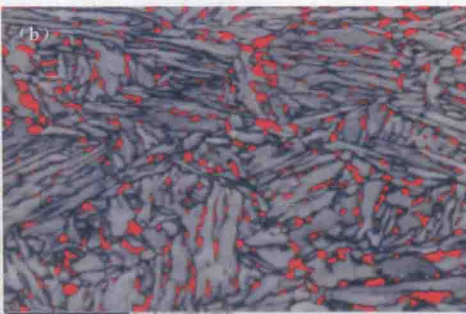
(b)

0.23C-1.32Si-1.83Mn 钢经 (a) 300 °C 等温和 (b) 400 °C 等温

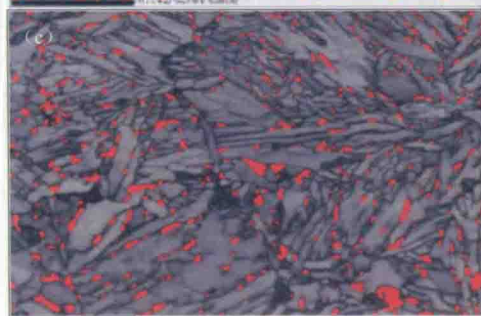
处理之后组织的 EBSD 表征 (红色组织为残余奥氏体)



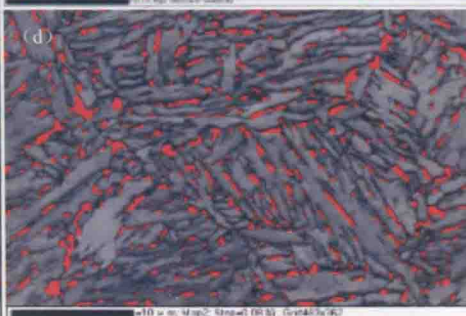
(a)



(b)



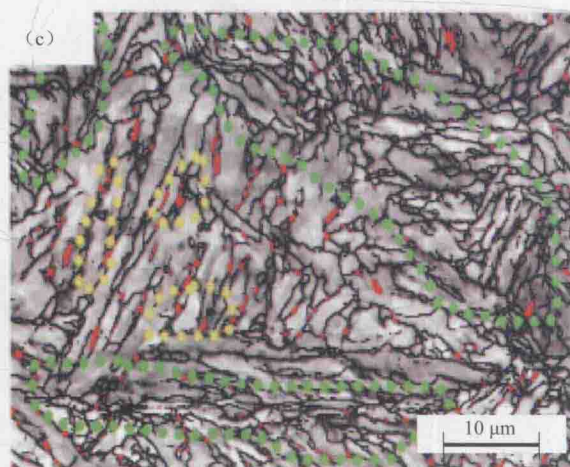
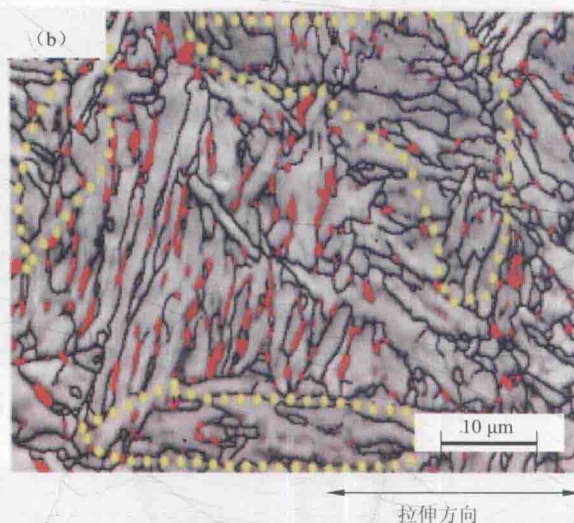
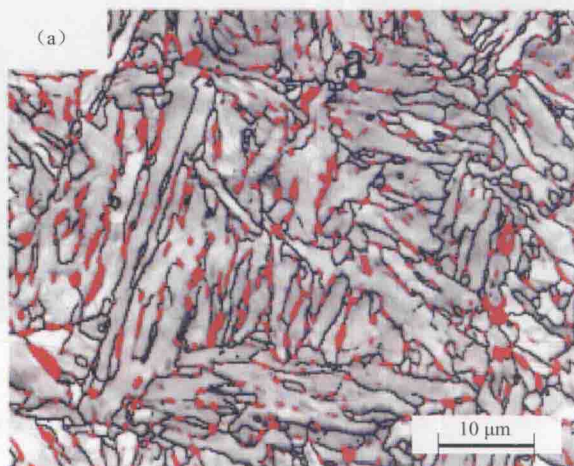
(c)



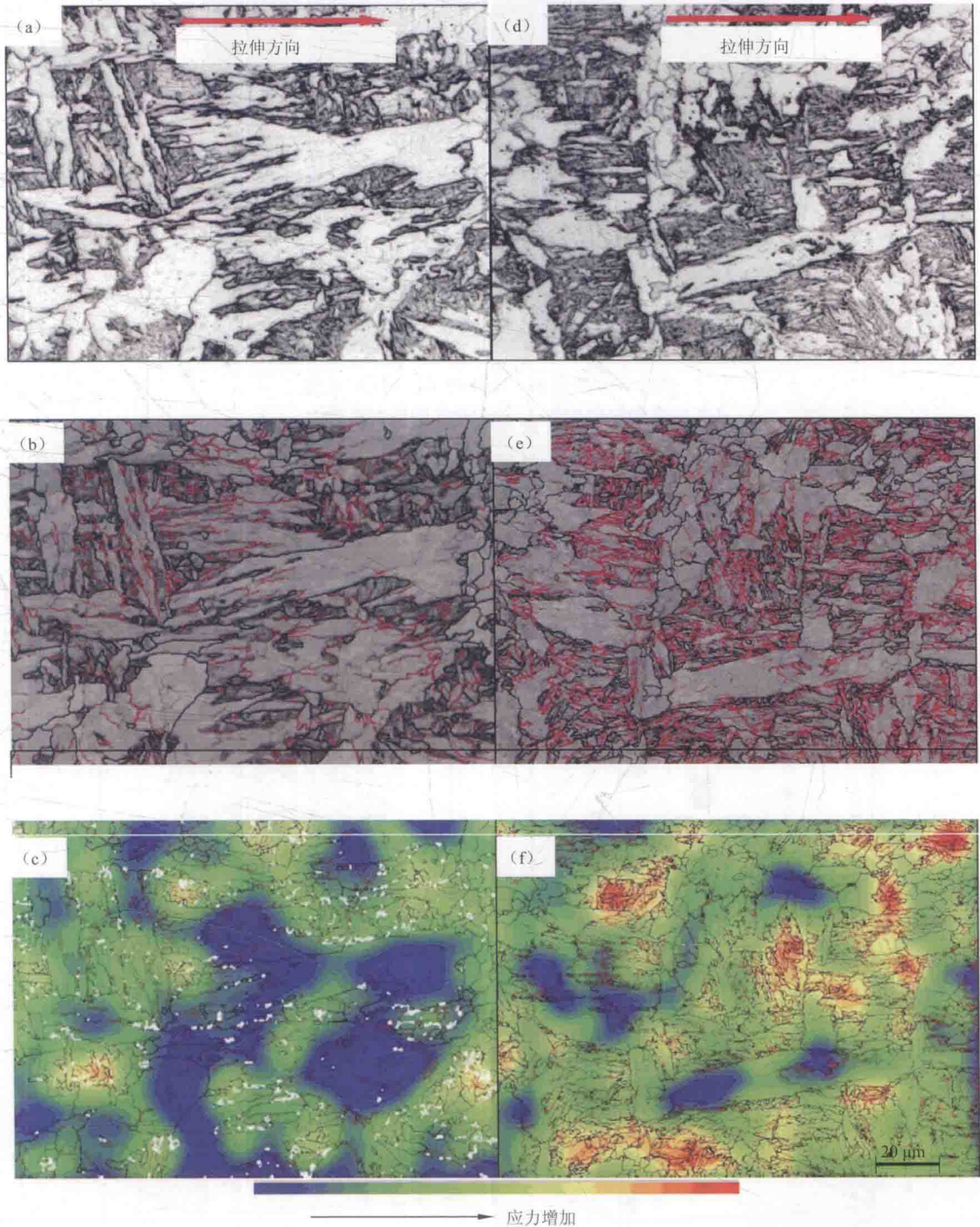
(d)

0.23C-1.32Si-1.83Mn 钢分别在 350 °C 等温 (a) 8 min、(b) 15 min, 以及 400 °C 等温

(c) 8 min、(d) 15 min 的 EBSD 组织形貌 (图中红色组织为残余奥氏体)



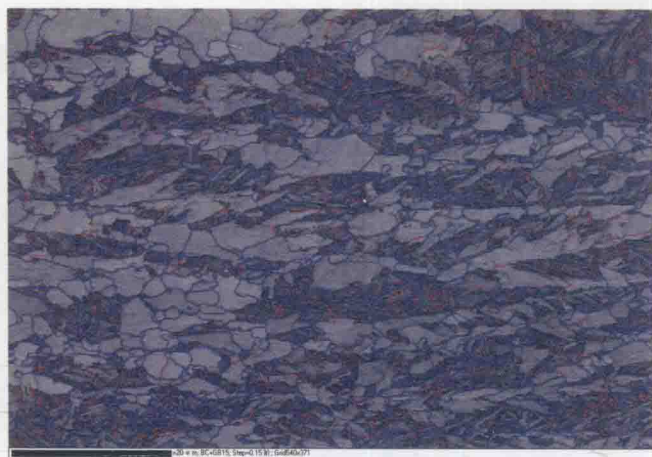
不同拉伸应变下残余奥氏体的原位 EBSD 形貌(红色为残余奥氏体)
(a)未变形;(b)应变 $\epsilon=2\%$; (c)应变 $\epsilon=12\%$



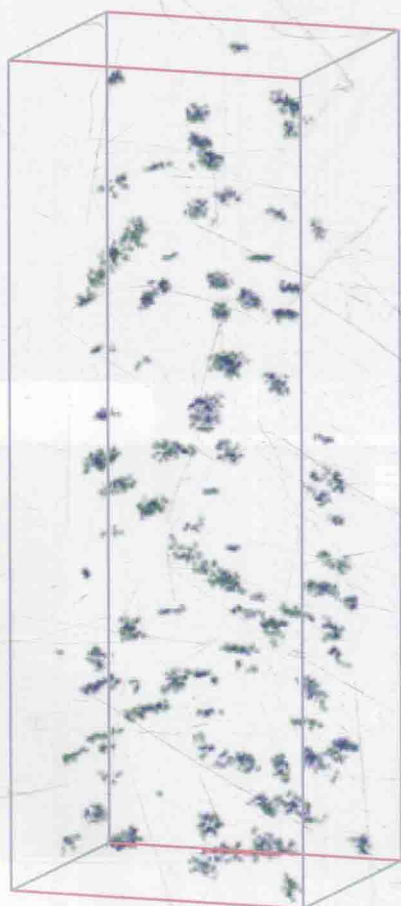
X80 管线钢预拉伸变形试样的微观组织及 EBSD 实验结果

(a)、(d)为微观组织观察；(b)、(e)为 BC 图(红线代表取向差 $\leq 10^\circ$)；

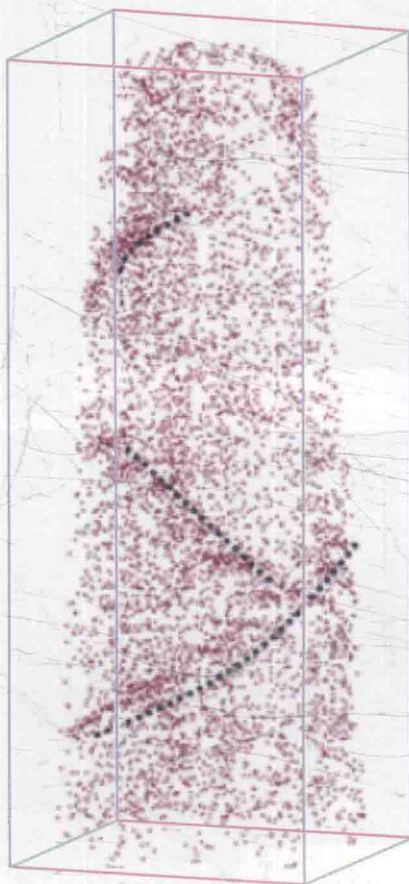
(c)、(f)为应力云图；(a)和(b)、(c)和(d)、(f)和(e)总变形分别为 0.5%和 10%



多相 X80 管线钢 EBSD 的 Kikuchi 衬度图
(红线代表取向差角 $< 5^\circ$, 蓝线代表取向差角 $\geq 15^\circ$)



(a)



(b)

含 0.08Nb 钢经 700 $^\circ\text{C}$ 回火 4 min 后实验的三维原子探针分析结果
(a)Nb(绿色)-C(蓝色)团簇;(b)C 原子沿位错线偏聚形成的 Cottrell 气团

“中国战略性新兴产业——新材料”丛书

编 委 会

- 主 任：黄伯云（中国工程院院士、中国材料研究学会名誉理事长）
- 副 主 任：韩雅芳（教授、中国材料研究学会副理事长兼秘书长）
田京芬（中国铁道出版社社长、全国新闻出版行业领军人才）
- 编 委：李元元（中国工程院院士、中国材料研究学会理事长）
魏炳波（中国科学院院士、中国材料研究学会副理事长）
周 玉（中国工程院院士、中国材料研究学会副理事长）
谢建新（中国工程院院士、中国材料研究学会常务副理事长）
郑有炘（中国科学院院士、南京大学教授）
李 卫（中国工程院院士、北京钢铁研究总院教授级高级工程师）
潘复生（中国工程院院士、中国材料研究学会副理事长）
姚 燕（教授、中国材料研究学会副理事长）
罗宏杰（教授、中国材料研究学会副理事长）
韩高荣（教授、中国材料研究学会副理事长）
唐见茂（教授、中国材料研究学会常务理事、咨询专家）
张新明（教授、俄罗斯工程院院士、俄罗斯宇航科学院院士）
朱美芳（教授、中国材料研究学会常务理事）
张增志（教授、中国材料研究学会常务理事兼副秘书长）
武 英（教授、中国材料研究学会常务理事兼副秘书长）
赵永庆（教授、中国材料研究学会理事）
李贺军（教授、中国材料研究学会理事）
杨桂生（教授、中国材料研究学会理事）
吴晓东（清华大学材料学院副研究员）

吴 玲(教授、国家新材料行业生产力中心主任)

尚成嘉(北京科技大学教授、中国材料研究学会理事)

徐志康(浙江大学教授)

杨 辉(浙江大学教授)

姜希猛(深圳清华大学研究院研究员)

赵 静(中国铁道出版社总编办主任)

责任编辑:唐见茂

丛书主编:黄伯云

丛书副主编:韩雅芳

序

新材料是高技术和现代产业的基础和先导，对培育和发展战略性新兴产业、国家重大工程项目的建设以及可持续发展都具有重要的支撑和保证作用。在我国政府大力支持下，我国新材料在产业规模、技术进步、创新能力、应用水平等方面均取得了重大进展，自主的产业体系初步形成，具备了良好的发展基础。同时，从全球高新技术和新兴产业的发展前景看，新材料的基础地位和先导作用也越来越重要。

“中国战略性新兴产业——新材料”丛书是为贯彻落实国务院 2010 年颁布的《关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定》（国发〔2010〕32 号）而组织编著出版的。在国发〔2010〕32 号文中，新材料被列为我国七种重点发展的产业之一，其总体目标定位是：“大力发展稀土功能材料、高性能膜材料、特种玻璃、功能陶瓷、半导体照明材料等新型功能材料。积极发展高品质特殊钢、新型合金材料、工程塑料等先进结构材料。提升碳纤维、芳纶、超高分子量聚乙烯纤维等高性能纤维及其复合材料发展水平。开展纳米、超导、智能等共性基础材料研究。”本丛书由中国材料研究学会负责组织编著、中国铁道出版社出版，并成功入选“‘十二五’国家重点出版物出版规划项目”，获得 2016 年度国家出版基金资助。这是论述我国新材料发展战略的第一部系统性科技系列著作，代表了当代新材料发展的主流，对推动我国战略性新兴产业和可持续发展都具有重要的现实意义和深远的指导意义。

本丛书从发展国家战略性新兴产业的高度出发，重点选择了国发〔2013〕32 号文件鼓励的高性能结构材料、特种功能材料和高性能纤维及其复合材料，全面系统阐述了发展这些重点新材料的产业背景及战略意义，系统地论述了这些新材料的理论基础和应用技术、我国取得的最新研究成果、应用方向及发展前景，针对性地提出了我国发展这些新材料的主要方向和任务，分析了存在的主要问题，提出了相应的对策和建议，是我国近年来在新材料领域内具有领先水平的科技著

作丛书。丛书最大的特点是体现了一个“新”字：介绍和论述了我国材料领域取得的最新研究成果、开发的最先进材料品种和最新制造技术，所著内容代表当代全球新材料发展方向和主流。丛书既具有较高的学术性和技术先进性，同时对我国新材料产业发展也具有重要的参考价值。

中国材料研究学会是全国一级学术团体，具有资源、信息和人才的综合优势，多年来在促进材料科学进步、开展国内外学术交流、承接政府职能转移、提供新材料产业发展决策咨询、开展社会化服务等方面做了大量的、卓有成效的工作，为推动我国新材料发展发挥了重要作用。参加本丛书编著的作者都是我国从事相关材料研究和开发的一流的科研单位和院校、一流的专家学者，拥有数十年的科研、教学和产业开发经验，并取得了国内领先的科研成果，创作态度严谨，从而保障了本套丛书的内容质量。

本丛书的编著和出版是近年来我国材料研究领域具有足够影响的一件大事。我们希望，本丛书的出版能对我国新材料技术和产业发展产生较大的助推作用，也热切希望广大材料科技人员、产业精英、决策机构积极投身到发展我国新材料研发的行列中来，为推动我国新材料产业又好又快的发展做出更大贡献！

中国材料研究学会名誉理事长

中国工程院院士



2016年6月

前 言

“中国战略性新兴产业——新材料”丛书由中国材料研究学会组织编写,被新闻出版广电总局批准为“十二五”国家重点出版物出版规划项目,并获 2016 年度国家出版基金资助。

根据国务院《关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定》,新材料被列为我国战略性新兴产业之一。该丛书定位为:从战略性新兴产业的高度,着重论述新材料在国民经济和国防建设重大工程和项目中的地位 and 作用、技术基础、最新研究成果、应用领域及发展前景。其特点在于体现一个“新”字,即在遵守国家有关保密规定的前提下论述当代新材料最先进的工艺和最重要的性能。它代表当代全球新材料发展主流,对实现可持续发展具有重要的现实意义和深远的指导意义。丛书共 16 分册,涵盖了新型功能材料、高性能结构材料、高性能纤维复合材料等 16 种重点发展材料。本分册为《关键钢铁材料》。

钢铁工业是国民经济和社会发展的支柱产业,传统能源、海洋、现代交通、新能源等高端装备制造与重大工程的各个方面均离不开钢铁材料。目前,中国已经成为世界制造大国,但距离世界制造强国还有很长一段距离。发展关键钢铁材料是中国通往制造强国道路上坚实的基石。

随着经济发展方式的转变,下游产业转型升级和战略性新兴产业发展将对钢材品种和质量提出更高和更苛刻的要求。为了满足科技发展与工业生产要求,需要对关键钢铁材料的强化理论、韧化理论、塑性理论及加工制备等方面的关键共性技术进行深入研究,以促进关键钢铁材料的发展与应用。

为此,本书在总结国内外关键钢铁材料实验研究结果及生产与应用情况的基础上,对现有关键钢铁材料进行了系统梳理。结合作者多年从事研发与应用的经验,针对其强化机理和性能要求,详细论述了关键钢铁材料的微合金化原理和热处理工艺及强化机理,揭示了生产过程中的关键技术原理。

本书第 1 章概述战略性新兴产业与钢铁工业的关系、钢铁工业发展战略、关键钢铁材料的需求及创新发展所面临的主要问题。第 2 章论述钢铁材料的强化理论、韧化理论和塑性理论,并结合具体工艺和材料组织结构进行解释说明。第 3 章首先简述低合金钢的

发展和第三代低合金钢的目标与技术路线,然后论述亚临界热处理调控低合金钢中多相组织和残余奥氏体及残余奥氏体对韧性的影响,最后详细论述中温等温处理过程中温度和时间对残余奥氏体、组织调控、钢的力学性能和塑性的影响,还对第三代低合金钢的发展做了展望。第4章对第三代管线钢多相组织在线调控技术、微观力学行为、应变硬化行为、塑性变形微观机制、力学性能、拉伸性能及形变时效敏感性进行详细论述。第5章介绍高铁车轮钢的微合金化技术,重点论述中碳钢铌微合金化技术及铌微合金化对先共析转变、相变动力学、热处理过程中奥氏体形核和长大的影响。第6章介绍回火时间和回火温度对贝氏体中纳米 NbC 析出及性能的影响,并简述纳米渗碳体调控及纳米渗碳体对于强韧性、耐磨性的影响。

本书的主要内容来源于作者指导的博士和硕士研究生的研究结果及在工业中的实验和工业化生产代表性数据,在此谨向勤奋努力的学生、团结奉献的同事以及合作的企业表示衷心感谢!

本书在著述过程中参考和引用了一些单位和学者专家的研究成果、资料和图片,在此谨致谢意。

由于著者水平有限,书中难免存在疏漏和不足之处,恳请读者批评指正。希望本书能够在推动关键钢铁材料的生产和应用方面发挥积极作用。

著 者

2017年9月

目 录

第 1 章 战略性新兴产业与钢铁工业	1
1.1 战略性新兴产业	1
1.2 钢铁工业的创新发展战略	2
1.2.1 世界钢铁发展状况	2
1.2.2 我国钢铁工业的现状	4
1.3 钢铁材料产业创新发展战略	4
1.3.1 国家产业升级的必要性	4
1.3.2 先进制造业发展需求	6
1.3.3 钢铁工业创新发展的必要性	7
1.4 关键钢铁材料的需求与挑战	8
1.4.1 海洋工程用钢	8
1.4.2 石油开采与储运用钢	9
1.4.3 现代交通用钢	9
1.4.4 重大装备用钢	10
1.4.5 创新发展面临的主要问题	11
第 2 章 关键钢铁材料的材料设计	13
2.1 钢铁材料的基因	13
2.2 钢铁材料的强化理论	14
2.2.1 固溶强化	15
2.2.2 细晶强化	16
2.3 韧化理论	18
2.4 塑性理论	19
参考文献	25
第 3 章 创新的低合金钢体系	28
3.1 第三代低合金钢概念与思路	28
3.1.1 低合金钢的发展及 TRIP 效应	28

3.1.2 第三代低合金钢的目标与技术路线	29
3.2 利用亚临界处理调控低合金钢中多相组织及残余奥氏体	31
3.2.1 利用亚临界热处理调控残余奥氏体的原理	31
3.2.2 亚临界热处理过程中的析出相	33
3.2.3 残余奥氏体对韧性的影响	37
3.3 亚稳奥氏体中温等温处理对残余奥氏体的调控	40
3.3.1 等温处理过程中温度变化对残余奥氏体的影响	40
3.3.2 第二类低合金钢中温等温时间对转变过程中的组织调控	44
3.3.3 中温等温转变处理后钢的力学性能	47
3.3.4 残余奥氏体对塑性的影响	48
3.4 第三代低合金钢的展望	50
参考文献	50
第4章 第三代管线钢	53
4.1 第三代管线钢多相组织在线调控技术	53
4.1.1 多相组织调控机理	54
4.1.2 多相组织调控实验验证	57
4.2 多相组织管线钢微观力学行为	60
4.2.1 SHA 模型简述	60
4.2.2 多相组织的定量统计	60
4.2.3 微观应变分布	61
4.3 多相钢的应变硬化行为	63
4.3.1 微观组织和力学性能	63
4.3.2 修正 C-J 分析	65
4.3.3 修正 C-J 分析结果与微区变形行为的关系	66
4.3.4 贝氏体体积分数对应力比的影响	68
4.4 多相钢塑性变形微观机制	72
4.4.1 拉伸塑性变形过程中的应力分布	72
4.4.2 拉伸塑性变形过程中的应变行为	73
4.5 第三代多相组织管线钢	76
4.5.1 抗变形 X80 管线钢力学性能及组织	76
4.5.2 X80 管线钢拉伸性能	79
4.5.3 抗变形 X80 管线钢冲击断裂行为	80
4.5.4 X80 多相组织管线钢形变时效敏感性	82
4.6 X90 多相组织管线钢	85

4.7 X100 多相组织管线钢	91
4.7.1 X100 成分设计和组织观察	91
4.7.2 14.8mmX100 钢板及钢管性能	92
4.7.3 X100 级别管线钢的应变敏感性	94
参考文献	97
第 5 章 高铁车轮钢的微合金化技术	102
5.1 高铁车轮钢的组织及工艺特点	102
5.2 高铁车轮断裂韧性与组织的关系	104
5.3 中碳钢 Nb 微合金化技术	106
5.3.1 Nb 在钢中的析出行为	106
5.3.2 Nb 在钢中的析出热力学	107
5.3.3 中碳车轮钢的 Nb 析出	108
5.4 Nb 微合金化对中碳钢先共析转变的影响	113
5.5 Nb 微合金化对中碳钢相变动力学的影响	114
5.6 Nb 微合金化对热处理过程奥氏体形核和长大的影响	117
5.7 Nb 对扩大高铁车轮热处理窗口的作用	121
参考文献	123
第 6 章 纳米析出相的强化与韧化技术	125
6.1 贝氏体中的纳米析出强化	125
6.1.1 回火温度对纳米 NbC 析出及性能的影响	126
6.1.2 回火时间对纳米 NbC 析出及性能的影响	128
6.2 纳米渗碳体调控及性能	130
6.2.1 纳米渗碳体调控	130
6.2.2 纳米渗碳体与强韧性	135
6.2.3 磨损性能	135
参考文献	136

第1章 战略性新兴产业与钢铁工业

1.1 战略性新兴产业

战略性新兴产业是以重大技术突破和重大发展需求为基础,对经济社会全局和长远发展具有重大引领带动作用,知识技术密集、物质资源消耗少、成长潜力大、综合效益好的产业。涉及节能环保、新一代信息技术、生物、高端装备制造、新能源、新材料、新能源汽车等方面。

2008年世界金融危机以后,世界强国更加注重实体经济的发展,分别提出了先进制造业发展计划(美国)和工业4.0(德国)。我国提出中国制造2025和“互联网+”的创新概念。在新一轮产业革命,新兴产业正在成为引领未来经济社会发展的重要力量,世界主要国家纷纷调整发展战略,大力培育新兴产业,抢占未来经济科技竞争的制高点。

我国工业化、城镇化快速推进,城乡居民消费结构加速升级,国内市场需求快速增长,为战略性新兴产业发展提供了广阔空间;我国综合国力大幅提升,科技创新能力明显增强,装备制造业、高技术产业和现代服务业迅速成长,为战略性新兴产业发展提供了良好基础;世界多极化、经济全球化不断深入,为战略性新兴产业发展提供了有利的国际环境。我国战略性新兴产业应大力提升自主创新发展能力,突破关键核心技术,健全标准体系;投融资体系、市场环境、体制机制政策等要适应战略性新兴产业快速发展的要求。要加强宏观引导和统筹规划,明确发展目标、重点方向和主要任务,采取有力措施,强化政策支持,完善体制机制,促进战略性新兴产业快速健康发展。

发展战略性新兴产业的基本原则应以市场需求为导向,加强供给侧结构性改革,坚持自主创新,加强原始创新、集成创新和引进消化吸收再创新;通过坚持突出科技创新和新兴产业发展方向,选择最有基础、最有条件的重点方向作为切入点和突破口,明确阶段发展目标,集中优势资源,促进重点领域和优势区域率先发展。

钢铁工业是国民经济的支柱产业,传统能源、海洋、现代交通、新能源等高端装备制造与重大工程的各个方面均离不开钢铁材料。我国未来战略性新兴产业的发展离不开钢铁材料。同时,钢铁工业也是战略性新兴产业的一部分。例如,我国已经成为世界制造大国,产品种类和体量在国际市场占有重要地位,然而,高端装备制造技术及所依托的材料还在很大程度上依赖进口,甚至掌控在少数发达国家。即使有些关键装备我国能够满足自己需求,但是想要在国际装备制造业中打开局面、得到认可还需假以时日,其中关键零部件材料的制造技术还得不到市场的认可。因此,为了我国战略性新兴产业的发展,围绕重大装备与重大工程关键材料与零部件,应着力发展关键钢铁材料战略性新兴产业。显然,与关键材料和关键零部件相关的创新