



“十三五”
国家重点图书

海洋工程材料丛书
Series
on Materials
for Marine Engineering

Steels for Marine Applications 海洋工程钢铁材料

王国栋 主编
尚成嘉 刘振宇 副主编



化学工业出版社



“十三五”
国家重点图书

海洋工程材料丛书

Series
on Materials
for Marine Engineering

Steels
for Marine Applications

海洋工程钢铁材料

王国栋 主 编
尚成嘉 刘振宇 副主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

《海洋工程钢铁材料》是国家出版基金项目“海洋工程材料丛书”的分册之一。

本书全面论述了海洋工程用钢的材料体系、基本理论和工艺技术原理,低合金钢的力学性能、服役性能(特别是耐海洋大气腐蚀性能)、焊接性能等共性问题;同时也就低合金高强度钢在舰船、海洋工程领域的发展沿革、新需求与挑战和相关最新研发进展,以及对不锈钢在海洋工程领域的发展、重点应用领域和产品特点作了相关阐述。

本书旨在为海洋工程用钢相关的产品研发人员、工程设计者和用户提供参考,也可作为相关领域开展研究工作及研究生选题的依据和指导。

图书在版编目(CIP)数据

海洋工程钢铁材料/王国栋主编. —北京:化学工业出版社, 2016. 6
(海洋工程材料丛书)
ISBN 978-7-122-26853-2

I. ①海… II. ①王… III. ①海洋工程-钢-金属材料②海洋工程-铁-金属材料 IV. ①P75

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 082343 号

责任编辑: 窦臻 晁景岩
责任校对: 吴静

文字编辑: 李玥
装帧设计: 尹琳琳

出版发行: 化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 装: 三河市航远印刷有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 18¼ 彩插 2 字数 427 千字 2017 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 89.00 元

版权所有 违者必究

“海洋工程材料丛书”

编委会

顾问：徐匡迪^{院士} 周济^{院士} 干勇^{院士} 王曙光

主任：周廉^{院士}

副主任：丁文江^{院士} 薛群基^{院士} 翁宇庆^{院士} 周伟斌

委员：(按姓名汉语拼音排序)

才鸿年^{院士} 蔡斌 常辉 陈建敏 陈祥宝^{院士} 陈蕴博^{院士}

丁文江^{院士} 窦臻 方志刚 高从堦^{院士} 宫声凯 韩恩厚

何季麟^{院士} 侯保荣^{院士} 黄国兵 蹇锡高^{院士} 李贺军 李鹤林^{院士}

李晓刚 李仲平^{院士} 李宗津 刘敏 刘振宇 马朝利

马伟明^{院士} 马运义 阮国岭 尚成嘉 沈晓冬 苏一航

宿彦京 唐明述^{院士} 屠海令^{院士} 王国栋^{院士} 王景全^{院士} 王向东

王一德^{院士} 翁宇庆^{院士} 吴有生^{院士} 徐芑南^{院士} 薛群基^{院士} 杨雄辉

曾恒一^{院士} 张金麟^{院士} 赵解扬 肇研 周克崧^{院士} 周廉^{院士}

周守为^{院士} 周伟斌 朱英富^{院士} 左家和

编委会办公室

主任：李贺军 马朝利 常辉 贾豫冬

成员：(按姓名汉语拼音排序)

陈俊 邓桢桢 丁洁 丁陵 杜伟 冯余其 李伟峰

陶璇 王帅 王媛 徐克 姚栋嘉 余启勇 眭景岩

《海洋工程钢铁材料》

编委会

主 任 王国栋^{院士}

副主任 尚成嘉 刘振宇

委 员 (按姓名汉语拼音排序)

陈蕴博 ^{院士}	程学群	楚觉非	高 珊	郭 晖	李秀程	刘东升
刘清友	刘振宇	麻庆申	毛新平 ^{院士}	尚成嘉	苏 航	王国栋 ^{院士}
王 华	王辉绵	王学敏	翁宇庆 ^{院士}	吴开明	谢建新 ^{院士}	杨善武
张俊旭	张中武	周 廉 ^{院士}				

秘 书 陈 俊

编写人员名单

主 编 王国栋^{院士}

副 主 编 尚成嘉 刘振宇

参加编写人员 (按姓名汉语拼音排序)

陈 俊	程学群	董文卜	郭 晖	李 莎	李秀程	刘振宇
潘 涛	任淑彬	尚成嘉	苏 航	王国栋 ^{院士}	王辉绵	王学敏
吴开明	杨善武	张中武				

序

进入 21 世纪以来,材料特别是新材料已被视为新技术革命的基础和先导。海洋材料长期以来并未被纳入新材料体系范畴,发展速度远远落后于航空、航天材料。21 世纪是海洋的世纪,人类生存和发展越来越依赖于海洋。党的十八大后,建设海洋强国成为重要国策,海洋工程装备及海洋材料作为拓展海洋空间、开发海洋资源的物质前提,是实施海洋科技创新、建设海洋生态文明的物质基础,是提升海洋国防实力、维护海洋权益的物质保障。发展好我国的海洋材料,对实现海洋强国目标将产生重要的积极作用。

海洋的重要性主要体现在三个方面。首先,海洋经济是国民经济的重要组成部分,而海洋经济的发展离不开海洋资源的开发和利用,海洋资源的合理利用能够实现海洋经济的可持续发展。其次,海洋安全是国土安全的重要支撑,因此维护海洋安全至关重要,是国家海洋发展战略的重要组成部分。再次,海洋面积之大,海洋中物质、生物之多及自然现象之复杂,其重要性不亚于陆地及空天,对海洋的科学研究有助于人们认识海洋、了解自然。鉴此,海洋不仅已成为人类赖以生存、社会借以发展、濒海国家持续安泰昌盛的战略发展空间和基地,而且已成为当今世界军事和经济竞争的重要领域,军事竞争的焦点日益转向争夺海上控制权。

海洋资源主要有海洋矿产资源、海水资源、海洋生物资源、海洋旅游资源等。对海洋资源的利用包括海洋交通运输、海洋油气矿业、海洋渔业及生物资源、风力发电、潮汐发电、海水淡化等。海洋材料包括对这些海洋资源开发利用的工程装备(各种离岸、近岸工程建设以及勘探开采油气矿物资源所需的机械工程装备、海洋交通运输装备等)用材料。

海洋材料也包括涉及海洋安全的军用舰船(如航空母舰、护卫舰、潜艇等)和执法船用材料,以及用于各种海洋科学研究的装备和仪器(如海洋考察船、极地科考船、深海装备、海底电缆等)用材料。

2013—2014 年,中国工程院分别启动了“中国海洋工程材料研发现状及发展战略初步研究”“中国海洋工程中关键材料发展战略研究”两个咨询项目,中国工程院化工、冶金与材料工程学部联系机械、环境、能源等学部 30 余位院士,组织了全国 200 余位海洋工程领域的专家、学者,历时两年多的时间完成了咨询项目,对海洋工程材料领域的共性问题、关键技术和特殊应用领域进行了深入的调查和研究,为建立我国海洋工程材料完善的科学体系提供咨询建议,使“一代海洋材料,一代海洋装备”的理念更加深入人心,被誉为至理名言。以此为基础,本项目组组织国内材料领域的众多知名专家、学者,编撰了这套“海洋工程材料丛书”。丛书凝聚了 200 余位科学家和工程技术专家的群体智慧。

海洋材料应是海洋中各种工程装备应用材料的总称,是指能适应海洋恶劣的环境、抵抗海水和生物体的侵蚀、能满足各类海洋工程装备应用需求的环保的可持续发展的材料。 本套丛书内容除了包括海洋工程装备范畴的海洋资源利用开发等涉及的材料,还包括海洋安全、海洋科学研究涉及的材料。

丛书紧扣国家海洋强国的战略需求,从“材料”“腐蚀防护”“工程装备”三个层面,总结和梳理了改革开放 30 年来我国海洋材料及应用方面的基础理论积累、重大研究和应用成果,重点突出了关键技术,介绍了国内外在该领域的先进技术、装备和理论研究,并展望了海洋材料和材料技术的发展趋势。 丛书共有十一个分册,分别是《中国海洋工程材料发展战略咨询报告》《海洋工程钢铁材料》《海洋工程钛金属材料》《海洋工程有色金属材料》《海洋工程聚合物基复合材料》《海洋工程水泥与混凝土材料》《船舶装备与材料》《海洋石油装备与材料》《海水资源综合利用装备与材料》《海洋工程材料腐蚀行为与机理》《海洋工程材料和结构的腐蚀与防护》。 其中,海洋工程装备材料的腐蚀与防护是解决海洋工程材料应用的核心技术,除在各材料分册有关章节予以描述之外,《海洋工程材料和结构的腐蚀与防护》及《海洋工程材料腐蚀行为与机理》分册又对海洋腐蚀的特点、腐蚀机理、材料防腐要求等方面进行了专门论述。 这套丛书另一个突出亮点是材料与海洋工程装备应用的结合,专设三个分册分别叙述了船舶装备、海洋石油钻井平台及海水综合利用等几个主要海洋工程领域的发展现状、发展趋势以及对各种材料的需求。

丛书内容颇为广泛,具有较强的创新性、理论性和实用性,较好地反映了海洋工程材料及应用的全貌,文字深入浅出,简洁明了,系统介绍了相关材料的特点和应用,能为读者从不同应用范围、不同材料及技术等角度了解海洋工程材料提供很好的帮助,具有较高的学术水平和应用价值。 本丛书增强了材料科学与应用的结合,必将对推动我国海洋材料的发展起到积极的作用。

希望本丛书的出版,能够对从事船舶、海洋工程基础及应用研究、生产单位的科技工作者系统地了解 and 掌握本领域的发展现状和未来,在重大工程和装备的选材设计、制备加工、防护技术、服役安全等方面提供理论支撑和技术指导,对进一步开展创新研究工作有所帮助,同时也可以作为广大材料专业的本科生及研究生的参考教材。

中国工程院院士



2016 年 3 月

前言

21 世纪是海洋的世纪。海洋在发展国家经济及维护国家主权安全方面的作用更加突出。党的十八大提出了“提高海洋资源开发能力，坚决维护国家海洋权益，建设海洋强国”的发展战略。发展海洋工程装备是实现这一伟大战略的基础。

海洋服役环境复杂苛刻，对海洋工程用关键钢结构材料的力学性能、焊接性能、耐腐蚀性能及抗疲劳性能等有着极为严格的要求。为了满足海洋工程建设项目的需要，需要对新一代钢铁材料的冶金质量与加工制备等方面的关键共性技术进行深入研究，并开展服役性能的系统评价，以促进高性能海洋工程用钢的发展与应用。

为此，本书在总结国内外海洋工程用钢（海工钢）实验研究结果及生产与应用情况的基础上，对现有海工钢进行了系统梳理。结合作者多年从事研发与应用的经验，针对其独特的组织特点与性能要求，详细介绍了海洋工程用钢铁材料的物理冶金规律，揭示了生产过程中的关键技术原理，明确了海工钢发展的方向。

本书第 1 章概述海洋工程用钢的特点、主要分类及发展趋势。第 2 章论述了海洋工程用钢的材料设计和组织调控基本原理，给出了典型合金元素在钢铁材料中的作用规律，可作为海洋工程用钢设计的参考；论述了组织细化理论及其对力学性能的影响规律，同时说明了钢铁材料的基本相变规律及其在开发海洋工程用钢中的应用。第 3 章首先从炼钢的洁净度出发，论述了夹杂物控制机理，其次指出了连铸坯的主要缺陷及控制方法，然后重点论述了控制轧制和控制冷却的基本原理、以超快速冷却为特征的新一代控制轧制和控制冷却条件下热轧钢材组织性能调控基本规律，还介绍了海洋工程用钢的典型热处理工艺。第 4 章强调了海洋工程用钢在服役过程中的腐蚀特征及相关防护策略。第 5 章对材料的焊接性能、焊接热循环、焊缝和焊接热影响区的组织转变、针状铁素体的形核和长大规律、常用焊接材料、焊接工艺和高效焊接等方面进行了详细论述。第 6 章详细介绍了船体结构钢的材料体系、特殊要求船体结构钢及新型舰船用钢。第 7 章介绍了海洋平台用钢的发展现状及趋势，重点介绍了控制轧制和控制冷却工艺及热处理工艺对海洋平台用钢组织性能的影响规律，还介绍了厚规格钢板厚向组织性能均匀性控制技术。第 8 章介绍了海洋工程用不锈钢钢筋、板材、钢管及粉末冶金特殊不锈钢。第 9 章介绍了海洋工程用钢的腐蚀评价及寿命预测，为海洋工程装备的设计及选材提供了依据。

本书由王国栋主编，第 1 章由尚成嘉、王辉绵编写，第 2 章由尚成嘉、李秀程、郭晖编写，第 3 章由刘振宇、陈俊、尚成嘉编写，第 4 章由杨善武编写，第 5 章由吴开明编写，第 6 章由苏航、张中武、潘涛编写，第 7 章由刘振宇、尚成嘉、王学敏编写，第 8 章由王辉绵、

董文卜、任淑彬、李莎编写，第9章由程学群编写。

本书是在中国工程院“中国海洋工程关键材料发展战略研究”重大咨询项目的支持下完成的。在本书的编写过程中得到了东北大学、北京科技大学和钢铁研究总院等单位及各钢铁企业的大力支持，在此表示衷心的感谢。本书中涉及的较多研究成果取材于我国多个国家重点基础研究发展规划（973计划）和高技术研究发展计划项目（863计划），在此向所有默默奉献的科技人员致以崇高谢意。

由于本书涉及多学科交叉，且材料科学正在以日新月异的速度向前发展并不断涌现新的成果，因此本书对新成果的总结难免会有疏漏；加之编者的水平有限，定会有不足和偏颇之处。这些都敬请广大读者批评指正。

编 者

2016. 6

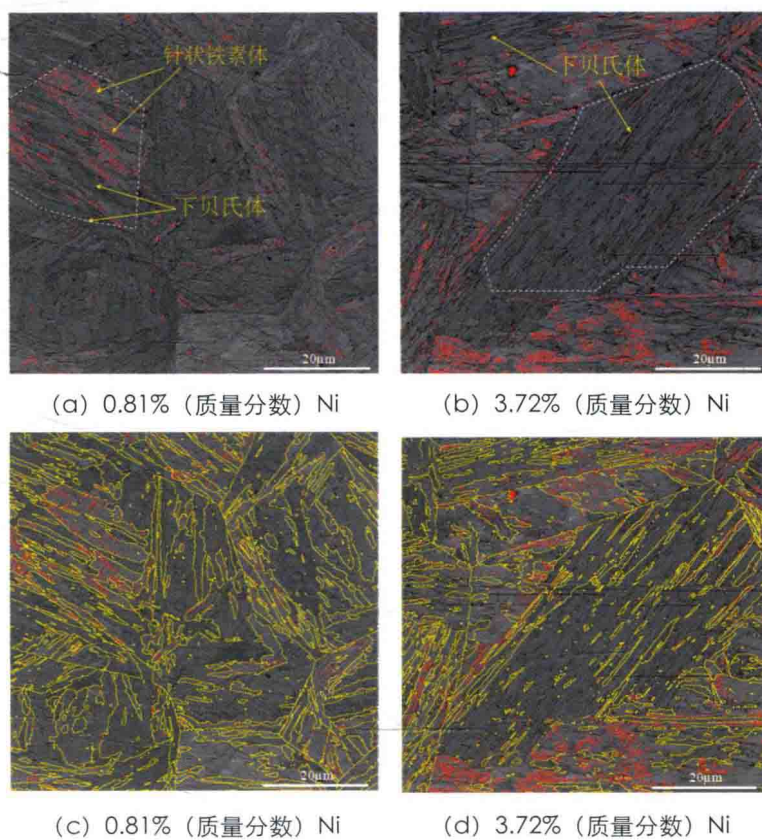


图 2-8 实验钢菊池带质量图

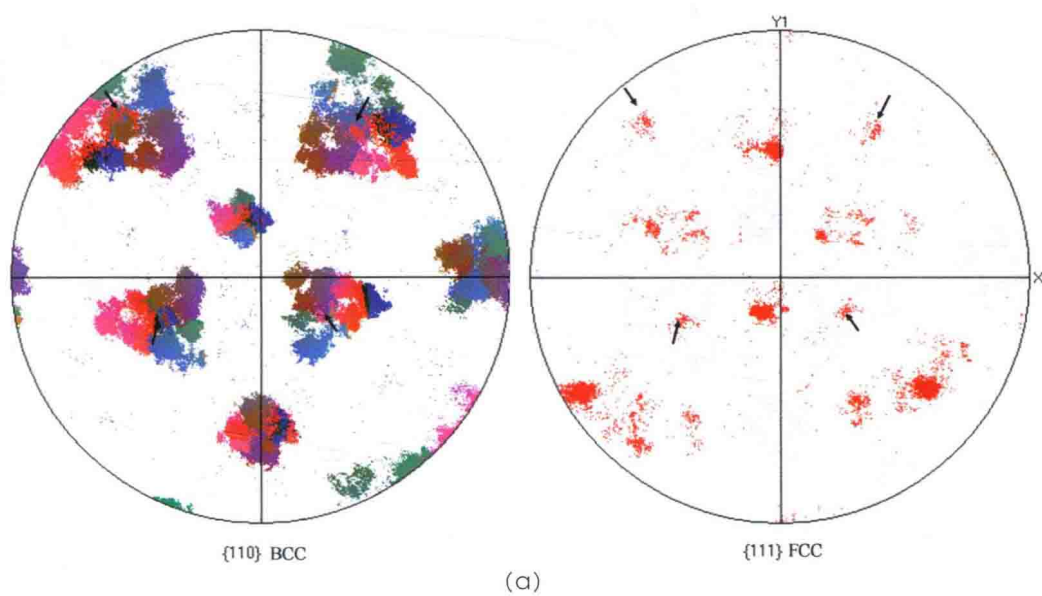
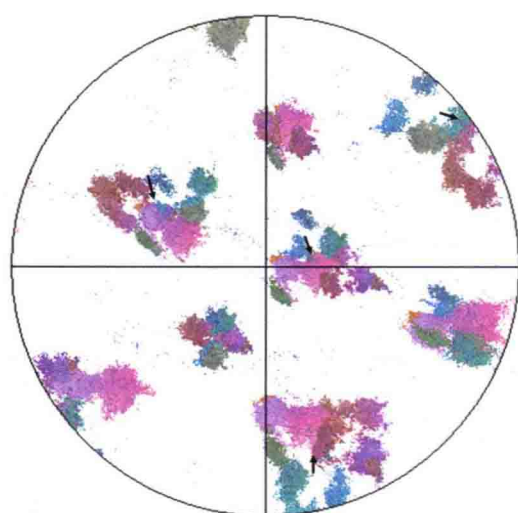
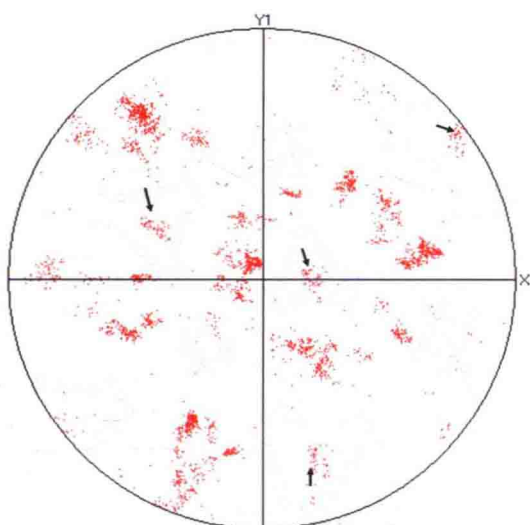


图 2-9

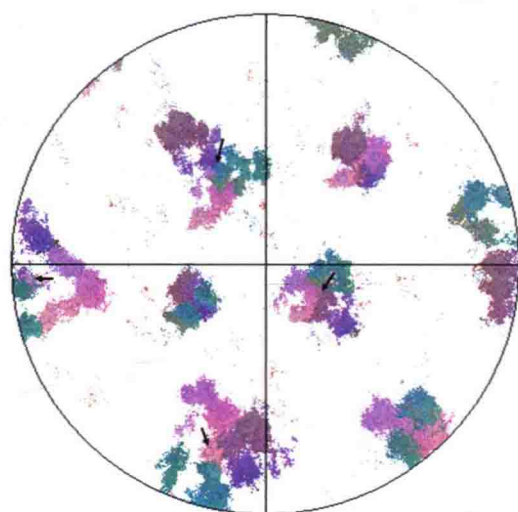


{110} BCC

(b)

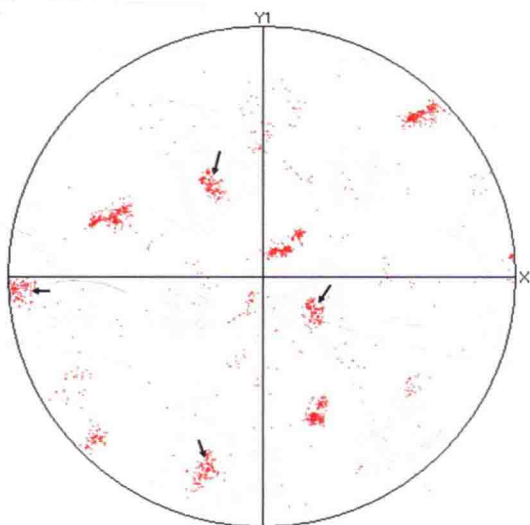


{111} FCC

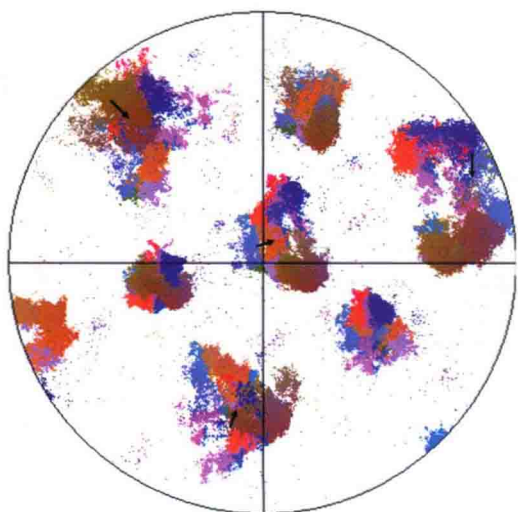


{110} BCC

(c)

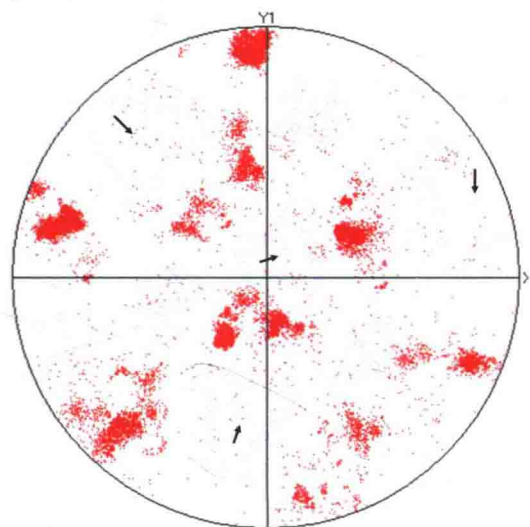


{111} FCC



{110} BCC

(d)



{111} FCC

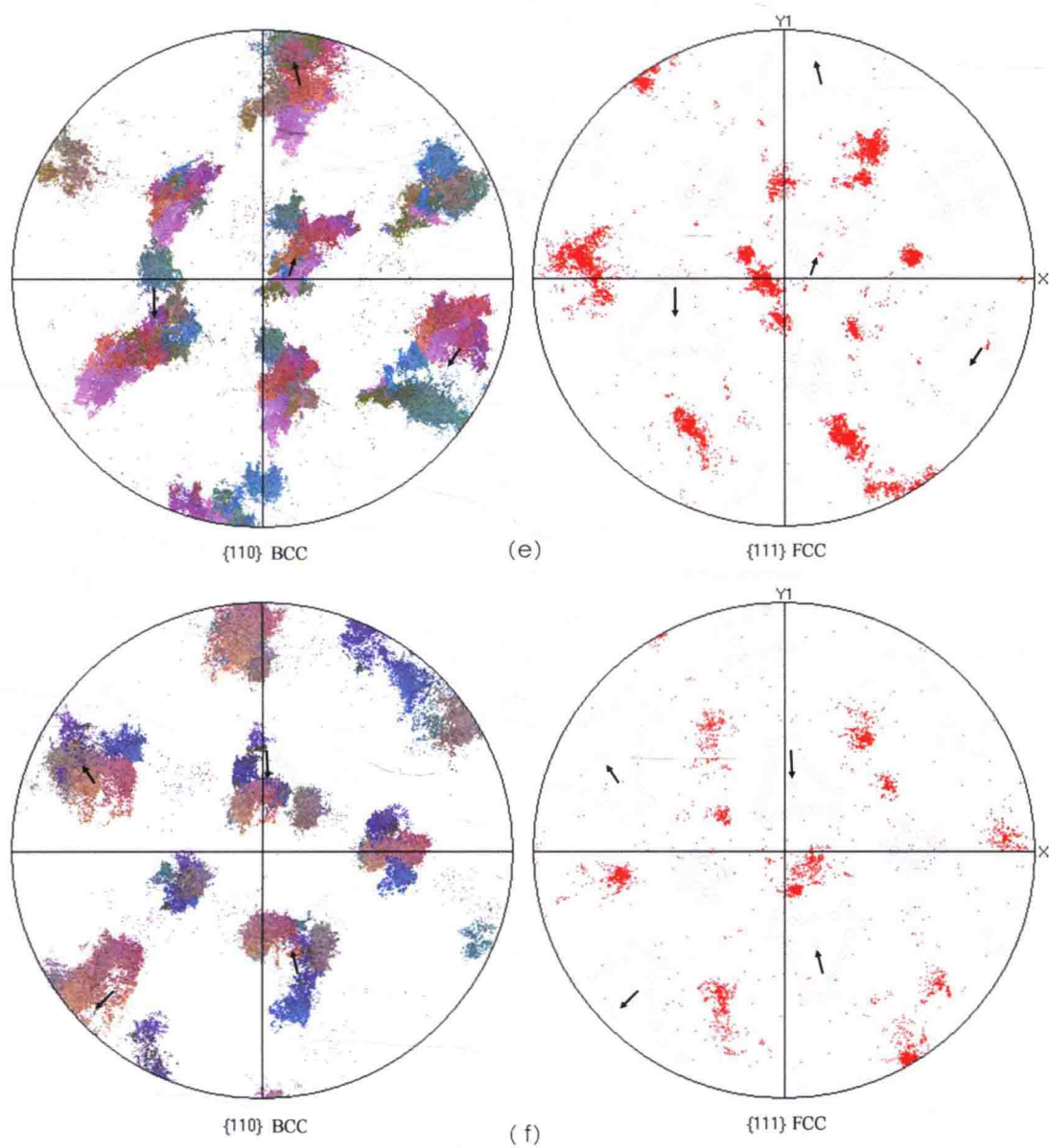


图 2-9 实验钢所选原奥氏体晶粒内的取向分布及误标奥氏体判定

(a) , (b) , (c) 0.81% (质量分数) Ni
(d) , (e) , (f) 3.72% (质量分数) Ni

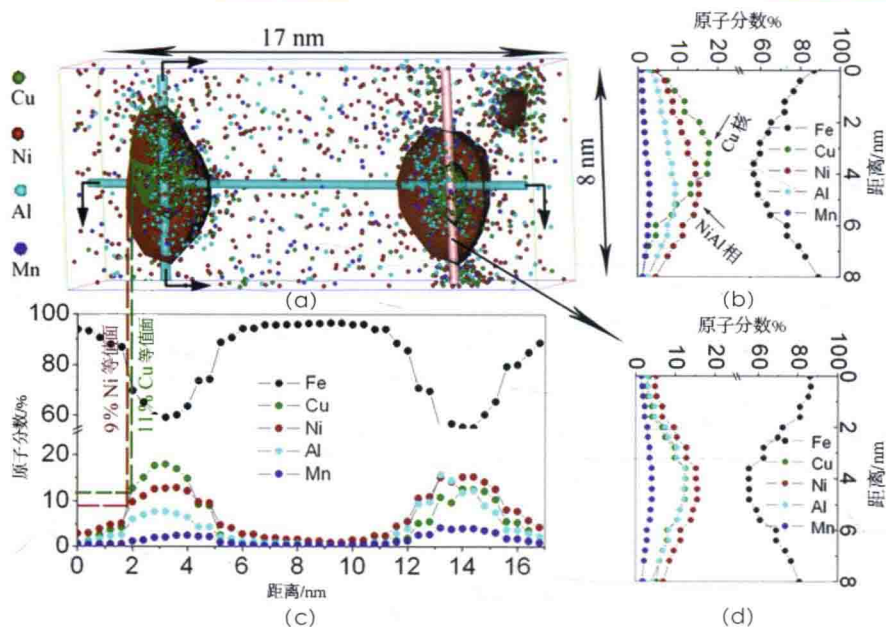


图 6-24 利用三维原子探针表征技术获得的纳米相中的原子分布图和成分分布

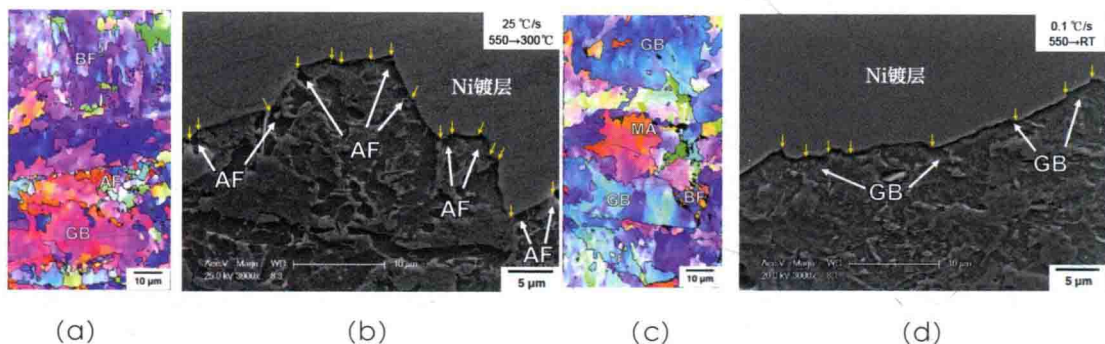


图 7-4 不同冷速钢板的 EBSD 结果和裂纹扩展路径

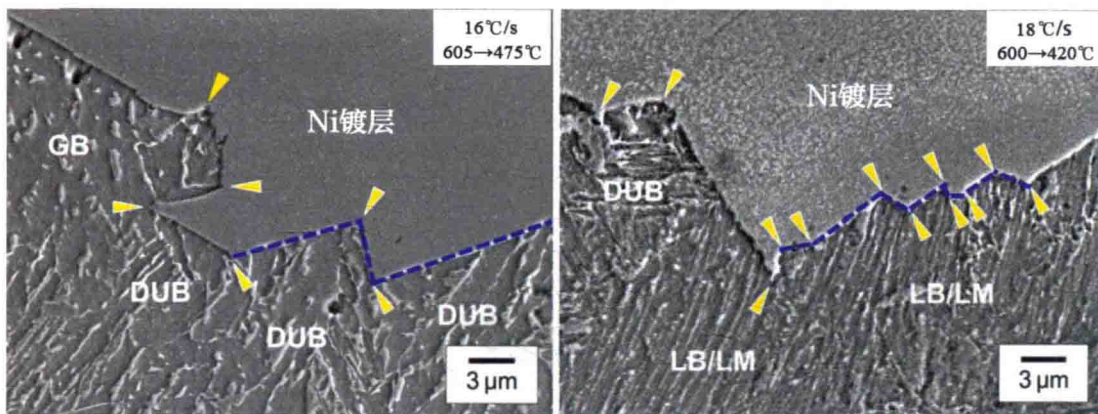


图 7-8 不同显微组织的裂纹扩展路径

目录

第 1 章 海洋用钢总论

1.1 概述	1
1.2 海洋用钢的分类	2
1.2.1 海洋平台用钢	2
1.2.2 船舶用钢	3
1.2.3 桥梁与基础设施用钢	4
1.3 海洋用低合金高强度钢的性能	5
1.3.1 低合金钢材料体系	6
1.3.2 低合金钢力学性能的要求	6
1.3.3 低合金钢焊接性要求	8
1.3.4 低合金钢的疲劳与环境失效	9
1.4 海洋用不锈钢的性能	11
1.4.1 不锈钢概述	12
1.4.2 海洋工程用超级不锈钢	13
1.4.3 海洋工程用不锈钢关键性能指标	14
1.5 海洋用钢的发展展望	17
参考文献	19

第 2 章 海洋工程用高强度低合金钢的材料设计

2.1 合金设计	22
2.1.1 Nb 的微合金化理论	22
2.1.2 V 的析出	25
2.1.3 微 Ti 处理的作用	26
2.1.4 Mn 的作用与应用	28
2.1.5 Ni 的作用	29
2.1.6 利用 Cu 析出强化厚规格钢板	33
2.1.7 利用 B 控制相变	34
2.2 组织细化理论与组织调控	35
2.3 组织控制与组织细化	38
2.3.1 铁素体-珠光体组织向低碳贝氏体组织转变	38
2.3.2 低碳贝氏体组织的强化与韧化原理	39
2.3.3 低碳贝氏体钢的中温转变组织类型	40
2.3.4 中温转变组织细化的物理冶金原理	41

参考文献 43

第 3 章 海洋工程用低合金钢冶金制备技术

3.1 夹杂物控制 47

3.1.1 镇静钢中氧化物夹杂控制 48

3.1.2 钢中硫化物夹杂控制 49

3.1.3 含 Nb 钢中 Nb 碳化物和 Nb 氮化物控制 49

3.2 无缺陷连铸坯的生产 53

3.2.1 连铸坯表面裂纹 53

3.2.2 夹杂缺陷 58

3.2.3 连铸坯的其他缺陷 60

3.3 控轧控冷原理 60

3.3.1 热变形过程中的再结晶行为 61

3.3.2 合金元素和第二相质点对再结晶行为的影响 65

3.4 新一代控轧控冷技术 67

3.4.1 新一代控轧控冷技术的科学内涵 67

3.4.2 超快速冷却技术 68

3.4.3 新一代控轧控冷条件下热轧钢材组织性能调控基本规律 69

3.5 热处理技术 79

3.5.1 常规热处理工艺 79

3.5.2 热处理关键设备 80

3.5.3 一般热处理工艺概述 82

参考文献 84

第 4 章 低合金钢在海洋环境中的腐蚀特征

4.1 海洋大气腐蚀特征与耐候钢的发展 90

4.1.1 钢铁材料大气腐蚀的一般机制 90

4.1.2 钢的大气腐蚀产物 91

4.1.3 环境因素对钢铁材料大气腐蚀行为的影响 94

4.1.4 耐候钢及其抗大气腐蚀机理 94

4.1.5 耐候钢在海洋大气中的腐蚀行为 101

4.1.6 低碳贝氏体耐候钢的腐蚀行为 103

4.2 海水腐蚀与阴极保护 106

4.2.1 海水腐蚀 106

4.2.2 阴极保护 109

参考文献 112

第 5 章 海洋工程用钢的焊接

5.1 钢铁材料的可焊接性	119
5.1.1 碳当量	119
5.1.2 冷裂纹敏感性	120
5.2 焊接热循环	120
5.2.1 焊接热循环的定义	121
5.2.2 焊接热循环的主要参数	121
5.2.3 焊接热循环作用下的组织转变特征	122
5.3 焊缝组织的形成与转变	123
5.3.1 低碳钢焊缝的固态相变组织	123
5.3.2 低合金钢焊缝的固态相变组织	124
5.4 焊接热影响区及其组织转变	127
5.4.1 焊接热影响区的组织分布	127
5.4.2 焊接热影响区(HAZ)韧性劣化的成因	128
5.5 焊缝与焊接热影响区中的针状铁素体	130
5.5.1 针状铁素体的形核机制	130
5.5.2 针状铁素体形核的影响因素	133
5.5.3 针状铁素体的形貌特征	135
5.5.4 针状铁素体的晶体学取向关系	136
5.5.5 针状铁素体的相变特点	137
5.5.6 针状铁素体的转变机制	138
5.6 海洋工程用钢的高效焊接技术	139
5.6.1 大线能量焊接用钢的需求	140
5.6.2 大线能量焊接用钢的成分设计	140
5.6.3 氧化物冶金技术	145
参考文献	148

第 6 章 船体结构钢

6.1 船体结构钢概述	156
6.2 船体结构钢材料体系	158
6.3 特殊要求船体结构钢	162
6.3.1 高止裂性能船体钢	162
6.3.2 可大线能量焊接船体钢	164
6.3.3 耐腐蚀船体钢	166
6.4 军用舰船用钢	169
6.4.1 国外舰船用钢	169
6.4.2 国外新一代舰船用钢的研究	172

6.4.3 Cu 沉淀硬化舰船钢的发展与冶金原理	177
6.4.4 舰船用钢的发展趋势	185
参考文献	186

第 7 章 海洋平台用钢

7.1 海洋平台用钢发展现状及其显微组织特征	189
7.1.1 海洋平台用钢的发展现状	189
7.1.2 海洋平台用钢的显微组织特征及其对韧性的影响	190
7.2 TMCP 海洋平台用钢的成分设计	195
7.3 TMCP 海洋平台用钢的组织设计	196
7.3.1 连续冷却过程转变	196
7.3.2 等温过程中的组织转变	201
7.4 TMCP 工艺参数研究	205
7.4.1 三个级别钢的再结晶特点	205
7.4.2 TMCP 工艺及轧态组织	208
7.4.3 强化效果分析	210
7.5 大厚度钢板的组织性能均匀性	212
7.5.1 厚度方向的组织均匀性	213
7.5.2 Cu 的析出特点	215
7.5.3 厚度方向的力学性能	217
7.6 回火对组织及性能均匀性的影响	222
参考文献	225

第 8 章 海洋工程用不锈钢

8.1 不锈钢钢筋	227
8.1.1 不锈钢钢筋的主要品种	228
8.1.2 不锈钢钢筋关键性能指标	229
8.1.3 不锈钢钢筋的使用性能	231
8.1.4 不锈钢钢筋全寿命周期成本分析	233
8.1.5 不锈钢钢筋应用实例	234
8.1.6 国内外技术研究现状	236
8.1.7 未来发展	237
8.2 不锈钢板材及其在海洋中的应用	237
8.2.1 高耐候铁素体不锈钢	238
8.2.2 奥氏体不锈钢	243
8.3 海洋工程用不锈钢管	244
8.3.1 油井管用不锈钢品种	244