

“十二五”国家重点图书

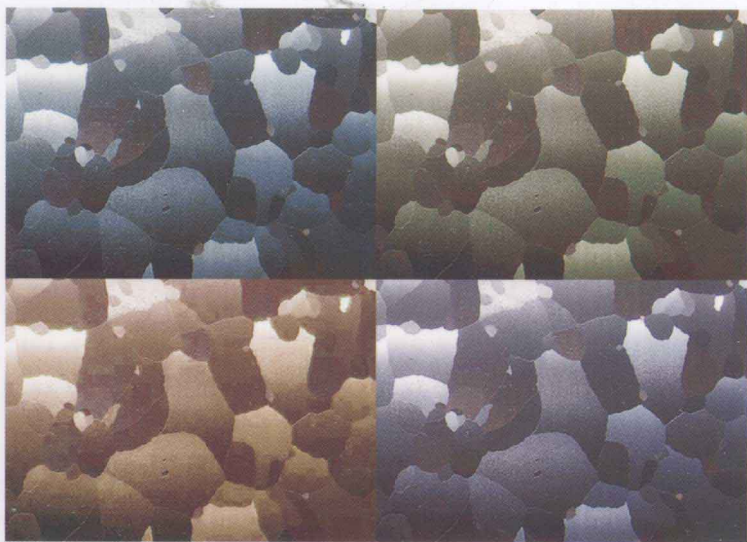


特殊钢 丛书

Special Steel Book Series

电工钢

何忠治 赵宇 罗海文 编著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

“十二五”国家重点图书

特殊钢丛书

电 工 钢

何忠治 赵 宇 罗海文 编著

北 京
冶金工业出版社

内 容 简 介

本书是《特殊钢丛书》之一,详细介绍了电工钢的发展历史,有关铁磁学和金属学基础理论知识和电工钢基本特性,重点论述了冷轧电工钢生产工艺以及化学成分对其组织性能的影响、电工钢新技术、新工艺和新品种研发等,具体内容包括:铁磁学基础和影响电工钢磁性的冶金因素,冷轧、再结晶和晶粒长大,热轧硅钢,冷轧无取向低碳低硅电工钢,冷轧无取向硅钢,冷轧取向硅钢,特殊用途电工钢等。在内容组织和结构安排上,力求理论联系实际,切合生产需要,突出实用性、先进性,为读者提供一本实用的技术著作。

本书可供冶金、机械、电力行业的技术人员以及从事电工钢研究、生产和应用等方面的工程技术人员与管理人员阅读,也可供大专院校有关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

电工钢/何忠治,赵宇,罗海文编著. —北京:冶金工业出版社, 2012.5 (2012.9 重印)

“十二五”国家重点图书
(特殊钢丛书)

ISBN 978-7-5024-5895-9

I. ①电… II. ①何… ②赵… ③罗… III. ①电工钢
IV. ①TM275

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 089509 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjcs@cnmip.com.cn

策 划 曹胜利 张 卫 责任编辑 张登科 美术编辑 李 新

版式设计 孙跃红 责任校对 王贺兰 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5895-9

三河市双峰印刷装订有限公司印刷; 冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销
2012 年 5 月第 1 版, 2012 年 9 月第 2 次印刷

169mm×239mm; 42.75 印张; 833 千字; 664 页

125.00 元

冶金工业出版社投稿电话: (010)64027932 投稿邮箱: tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话: (010)64044283 传真: (010)64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号 (100010) 电话: (010)65289081 (兼传真)

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

《特殊钢丛书》

编辑委员会

主 编 徐匡迪

编 审 刘嘉禾 杨树森

编 委 (按姓氏笔画为序)

马绍弥 王一德 王洪发 王剑志 兰德年

刘正东 刘 宇 刘 苏 刘振清 孙开明

李士琦 李正邦 李依依 李国忠 李鹤林

张晓刚 陈 列 陈国良 陈思联 林慧国

洪及鄙 钱 刚 殷国茂 董学东 董 瀚

谢 蔚

《特殊钢丛书》序言

特殊钢是众多工业领域必不可少的关键材料,是钢铁材料中的高技术含量产品,在国民经济中占有极其重要的地位。特殊钢材占钢材总量比重、特殊钢产品结构、特殊钢质量水平和特殊钢应用等指标是反映一个国家钢铁工业发展水平的重要标志。近年来,在我国社会和经济快速健康发展的带动下,我国特殊钢工业生产和产品市场发展迅速,特殊钢生产装备和工艺技术不断提高,特殊钢产量和产品质量持续提高,基本满足了国内市场需求。

目前,中国经济已进入重工业加速发展的工业化中期阶段,我国特殊钢工业既面临空前的发展机遇,又受到严峻的挑战。在机遇方面,随着固定资产投资和汽车、能源、化工、装备制造和武器装备等主导产业的高速增长,全社会对特殊钢产品的需求将在相当长时间内保持在较高水平上。在挑战方面,随着工业结构的提升、产品高级化,特殊钢工业面临着用户对产品品种、质量、交货时间、技术服务等更高要求的挑战,同时还在资源、能源、交通运输短缺等方面需应对日趋激烈的国内外竞争的挑战。为了迎接这些挑战,抓住难得发展机遇,特殊钢企业应注重提高企业核心竞争力以及在资源、环境方面的可持续发展。它们主要表现在特殊钢产品的质量提高、成本降低、资源节约型新产品研发等方面。伴随着市场需求增长、化学冶金学和物理金属学发展、冶金生产工艺优化与技术进步,特殊钢工业也必将日新月异。

从20世纪70年代世界第一次石油危机以来,工业化国家的特殊钢生产、产品开发和工艺技术持续进步,已基本满足世界市场需求、资源节约和环境保护等要求。近年来,在国家的大力支持下,我国科研院所、高校和企业的研发人员承担了多项国家科技项目工作,在特殊钢的基础理论、工艺技术、产品应用等方面也取得了显著成绩,特别是近20年来各特钢企业的装备更新和技术改造促进了特殊钢行业进步。为了反映特

殊钢技术方面的进展,中国金属学会特殊钢分会、先进钢铁材料技术国家工程研究中心和冶金工业出版社共同发起,并由先进钢铁材料技术国家工程研究中心和中国金属学会特殊钢分会负责组织编写了新的《特殊钢丛书》,它是已有的由中国金属学会特殊钢分会组织编写《特殊钢丛书》的继续。由国内学识渊博的学者和生产经验丰富的专家组成编辑委员会,指导丛书的选题、编写和出版工作。丛书编委会将组织特殊钢领域的学者和专家撰写人们关注的特殊钢各领域的技术进展情况。我们相信本套丛书能够在推动特殊钢的研究、生产和应用等方面发挥积极作用。本套丛书的出版可以为钢铁材料生产和使用部门的技术人员提供特殊钢生产和使用的技术基础,也可为相关大专院校师生提供教学参考。本套丛书将分卷撰写,陆续出版。丛书中可能会存在一些疏漏和不足之处,欢迎广大读者批评指正。

《特殊钢丛书》编委会主编
中国工程院院长

徐匡迪

2008 年夏

前 言

电工钢的发展已有一百多年的历史,它是制造电机、变压器铁芯以及各种电器元件最重要的金属功能材料之一。

电工钢,特别是取向硅钢的制造工艺和设备复杂,成分控制严格,制造工序长,而且影响性能的因素多,因此,常把取向硅钢产品质量看做是衡量一个国家特殊钢制造技术水平的重要标志,并获得特殊钢中“艺术产品”的美称。

近年来,我国电力工业发展迅速,从而带动了我国冷轧电工钢的科研和工业生产快速发展,各种新技术、新工艺和新品种研发成果不断出现。但因电工钢生产涉及很高的技术含量,在市场竞争日益激烈的情况下,各企业生产技术保密性很强,且公开出版的电工钢书籍很少,因此,对这些技术和经验的系统提炼和总结意义重大。

为了全面和系统地总结近年来世界上电工钢生产的先进技术、优秀科研成果和成功的生产经验,进一步促进我国电工钢生产技术和装备水平的全面提高,在中国金属学会特殊钢分会的组织下,作者在参考了已出版的有关书籍和大量最新技术资料的基础上,结合近年来在生产、科研第一线获得的众多成果及大量生产实践经验,编撰了本书,奉献给读者,希望能对我国电工钢行业的发展有所裨益。

本书除参考公开出版和发表的有关书籍和论文外,还大量介绍了公开发表的有关专利技术公报。引用的论文到2010年,引用的专利公报到2008年6月。

本书共分8章,第1~3章介绍了电工钢的发展历史以及有关铁磁学、金属学基础理论知识和电工钢基本特性等;第4章介绍了热轧硅钢;第5~8章以较大篇幅系统介绍了各类冷轧电工钢。

本书第1、2、3、5、6、7、8章由何忠治、赵宇、罗海文编写,第4章由上海矽钢公司原总工程师丁其生编写。

本书在编写过程中,得到了中国金属学会电工钢分会,武汉钢铁公司方泽民、何礼君、裴大荣等,太原钢铁公司王一德,上海矽钢公司马崇光,宝山钢铁公司陈易之等,以及在电工钢方面长期协作的同事们的大力支持和帮助,在此表示衷心的感谢。另外,林慧国、阵卓等同志对本书的编辑出版工作给予帮助与指导,在此一并致谢。

由于作者水平有限,书中不妥之处,敬请读者批评指正。

作 者

2012年3月

目 录

1 概论	1
1.1 电工钢发展历史	1
1.1.1 热轧硅钢发展阶段 (1882 ~ 1955 年)	1
1.1.2 冷轧电工钢发展阶段 (1930 ~ 1967 年)	2
1.1.3 高磁感取向硅钢发展阶段 (1961 ~ 2008 年)	4
1.1.4 中国电工钢的发展	8
1.2 电工钢板产量和品种分类	11
1.2.1 电工钢板产量	11
1.2.2 电工钢板品种分类	14
1.3 铁和铁-硅合金的特性	15
1.3.1 相图	15
1.3.2 物理性能和力学性能	16
1.3.3 磁性	20
1.4 对电工钢板性能的要求	24
1.4.1 铁芯损耗 (P_T) 低	24
1.4.2 磁感应强度 (B) 高	25
1.4.3 对磁各向异性的要求	25
1.4.4 冲片性良好	26
1.4.5 钢板表面光滑、平整和厚度均匀	27
1.4.6 绝缘薄膜性能好	28
1.4.7 磁时效现象小	30
参考文献	32
2 铁磁学基础和影响电工钢磁性的冶金因素	34
2.1 铁磁学基础	34
2.1.1 铁磁性物质的基本特点	34
2.1.2 铁磁性物质的能量和有关的基本现象	37
2.1.3 磁畴结构	43

2.1.4 技术磁化过程	48
2.1.5 在交变磁场中的磁化	50
2.2 影响电工钢磁性的冶金因素	53
2.2.1 影响磁感应强度的因素	53
2.2.2 影响铁芯损耗的因素	55
参考文献	74
3 冷轧、再结晶和晶粒长大	77
3.1 冷轧	77
3.1.1 塑性形变基础	77
3.1.2 形变晶体的微观结构	79
3.1.3 冷轧储能	81
3.1.4 冷轧织构	82
3.2 回复	89
3.2.1 驱动力	89
3.2.2 物理和力学性能的变化	90
3.2.3 回复动力学	91
3.2.4 多边形化	91
3.3 再结晶(初次再结晶)	93
3.3.1 再结晶晶核形成机理	93
3.3.2 再结晶动力学	97
3.3.3 晶界迁移率	99
3.3.4 影响再结晶的因素	99
3.3.5 第二相质点的作用	101
3.4 晶粒长大	101
3.4.1 晶粒形状和晶粒长大的能量变化	102
3.4.2 晶粒长大动力学	103
3.4.3 晶粒长大理论	104
3.4.4 溶质原子与第二相质点对晶粒长大的影响	105
3.4.5 自由表面对晶粒长大的影响	107
3.4.6 择优取向对晶粒长大的影响	108
3.4.7 应变诱发晶界移动	108
3.5 再结晶织构	108
3.5.1 再结晶织构形成理论	108
3.5.2 低碳钢再结晶织构	109

3.6 二次再结晶	111
3.6.1 二次再结晶动力学	111
3.6.2 二次再结晶发展条件和抑制剂的作用	112
3.6.3 第二相质点的固溶度	113
3.6.4 第二相质点的析出形态和弥散分布状态	118
3.6.5 热轧板组织不均匀性对二次再结晶发展的影响	124
3.6.6 二次再结晶机理	131
3.7 动态回复和再结晶	145
3.7.1 动态回复	145
3.7.2 动态再结晶	145
3.8 三次再结晶	146
3.9 晶界偏聚	147
3.9.1 晶界偏聚力能学	148
3.9.2 晶界偏聚热力学	150
3.9.3 晶界偏聚动力学	151
3.9.4 溶质晶界偏聚的作用	152
3.9.5 晶界结构对溶质晶界偏聚的影响	157
3.9.6 电工钢中的晶界偏聚	157
参考文献	164
4 热轧硅钢	171
4.1 概述	171
4.2 化学成分和冶炼对性能的影响	173
4.2.1 化学成分的影响	173
4.2.2 浇铸的影响	175
4.2.3 炼钢炉型的选择	176
4.3 叠轧和退火工艺	176
4.3.1 生产工艺流程	176
4.3.2 叠轧工艺要点	176
4.3.3 退火工艺	179
参考文献	182
5 冷轧无取向低碳低硅电工钢	183
5.1 概述	183
5.2 化学成分对性能的影响	186

5.2.1	硅的影响	187
5.2.2	碳的影响	187
5.2.3	锰的影响	188
5.2.4	磷的影响	188
5.2.5	硫的影响	188
5.2.6	铝的影响	189
5.2.7	氮的影响	190
5.2.8	氧的影响	190
5.2.9	钛的影响	191
5.2.10	锆的影响	192
5.2.11	钒的影响	192
5.3	通用的制造工艺	193
5.3.1	铁水脱硫	193
5.3.2	转炉炼钢	193
5.3.3	真空处理	194
5.3.4	连铸	194
5.3.5	热轧	195
5.3.6	冷轧	196
5.3.7	退火	197
5.3.8	绝缘涂层	198
5.4	半成品制造工艺	198
5.5	新品种的进展	200
5.5.1	高锰钢	200
5.5.2	含稀土 (REM) 钢	202
5.5.3	含锑或锡钢	204
5.5.4	含硼钢	207
5.5.5	含镍钢	208
5.5.6	高磷钢	209
5.5.7	高硫钢	209
5.5.8	美国其他新产品	210
5.6	制造工艺的进展	210
5.6.1	废钢的利用	210
5.6.2	纯净度和氧化物夹杂的影响和控制	211
5.6.3	碳化物、氮化物和硫化物形态的影响和控制	214
5.6.4	铸坯加热、热轧和卷取工艺的改进	218

5.6.5 热轧板预退火 (箱式炉) 和常化 (连续炉)	227
5.6.6 酸洗、冷轧和退火工艺的改进	230
5.6.7 半成品工艺的改进	235
5.6.8 绝缘涂层的改进	241
5.6.9 冲剪加工对磁性的影响	253
5.6.10 铁芯组装方法的改进	257
5.6.11 铸坯直接热轧法	259
5.6.12 薄铸坯直接冷轧法	259
5.7 步进式微电机用的电工钢的进展	260
5.8 小变压器和镇流器用的电工钢的进展	263
参考文献	268
6 冷轧无取向硅钢	279
6.1 概述	279
6.2 化学成分对性能的影响	282
6.2.1 铝的影响	282
6.2.2 锰的影响	282
6.2.3 碳的影响	283
6.2.4 硫的影响	283
6.2.5 磷的影响	283
6.2.6 氮的影响	284
6.2.7 氧的影响	284
6.2.8 钛、锆、钒和铌的影响	284
6.3 通用的制造工艺	285
6.3.1 冶炼	285
6.3.2 真空处理	285
6.3.3 连铸	285
6.3.4 热轧	286
6.3.5 常化	287
6.3.6 酸洗	287
6.3.7 冷轧	288
6.3.8 退火	289
6.3.9 绝缘涂层	290
6.4 防止产品瓦楞状缺陷的方法	290
6.4.1 调整成分法	290

6.4.2 低温浇铸和电磁搅拌法	291
6.4.3 控制铸坯加热和热轧法	292
6.4.4 热轧板常化法	294
6.5 防止内氧化层和内氮化层方法	294
6.5.1 退火前钢板表面涂料	296
6.5.2 控制退火气氛和露点 (<i>d. p.</i>)	297
6.5.3 钢中加锡或锑	298
6.5.4 冷轧板表面光滑	298
6.6 日本高牌号的制造工艺	298
6.6.1 川崎钢公司制造工艺	298
6.6.2 新日铁公司制造工艺	303
6.6.3 日本钢管公司制造工艺	304
6.6.4 住友金属公司制造工艺	306
6.7 新品种的制造工艺	308
6.7.1 降低硅和铝量	308
6.7.2 含锑或锡钢	309
6.7.3 低硅高铝锰钢	315
6.7.4 含硼钢	318
6.7.5 含铬钢	319
6.7.6 加稀土、钙、镁钢	320
6.7.7 高磷钢	322
6.8 新工艺的进展	322
6.8.1 废钢的利用	322
6.8.2 降低钢中残余钛和锆含量方法	323
6.8.3 连铸工艺	324
6.8.4 氧化物夹杂和析出物的控制	325
6.8.5 加热: 热轧和卷取工艺	327
6.8.6 常化或预退火工艺	332
6.8.7 酸洗工艺	334
6.8.8 冷轧工艺	334
6.8.9 退火工艺	340
6.8.10 绝缘涂层	348
6.8.11 薄铸坯热轧工艺	348
6.8.12 薄铸坯直接冷轧工艺	349
参考文献	350

7 冷轧取向硅钢	358
7.1 概述	358
7.1.1 变压器铁芯中磁通密度和铁损的分布	360
7.1.2 变压器噪声	361
7.1.3 应力对铁损和磁致伸缩的影响	362
7.1.4 温度对磁性和磁致伸缩的影响	364
7.1.5 普通取向硅钢 (CGO) 与高磁感取向硅钢 (Hi-B) 的 性能比较	365
7.2 化学成分对取向硅钢性能的影响	368
7.2.1 碳	368
7.2.2 硅	370
7.2.3 锰和硫	371
7.2.4 铝和氮	372
7.2.5 磷	375
7.2.6 铜	375
7.2.7 锡和锑	377
7.2.8 钼	382
7.2.9 硼	383
7.2.10 铬	383
7.2.11 镍	383
7.2.12 钛、铌、钒	383
7.3 制造工艺	384
7.3.1 铁水脱锰	384
7.3.2 冶炼	385
7.3.3 真空处理	388
7.3.4 连铸	390
7.3.5 加热	393
7.3.6 热轧	402
7.3.7 常化	409
7.3.8 冷轧	413
7.3.9 脱碳退火	422
7.3.10 涂 MgO 隔离剂	430
7.3.11 高温退火	438
7.3.12 平整拉伸退火和涂绝缘膜	451

7.3.13 绝缘涂层	453
7.4 细化磁畴技术	459
7.4.1 刻痕对降低铁损的影响 (刻痕效应)	459
7.4.2 不耐热细化磁畴法	460
7.4.3 耐热细化磁畴技术	466
7.5 进一步降低铁损技术	484
7.5.1 提高取向度	485
7.5.2 表面光滑技术	491
7.5.3 钢板减薄到 0.15mm 和 0.20mm 厚	496
7.6 降低铸坯加热温度技术	499
7.6.1 1150 ~ 1200℃ 低温加热	499
7.6.2 1200 ~ 1300℃ 加热	522
7.7 不加抑制剂工艺	531
7.7.1 冶炼	535
7.7.2 加热和热轧	535
7.7.3 常化	537
7.7.4 冷轧	537
7.7.5 脱碳退火	537
7.7.6 隔离剂	539
7.7.7 最终退火	539
7.8 薄铸坯 (30 ~ 70mm 厚) 热轧工艺	540
7.9 薄铸坯 (2.0 ~ 3.0mm) 直接冷轧工艺	542
7.10 连续炉高温退火工艺	548
参考文献	549
8 特殊用途电工钢	571
8.1 冷轧无取向硅钢薄带	571
8.1.1 3% Si 钢	571
8.1.2 Fe - Si - Cr 钢	574
8.1.3 0.5% ~ 2% Si 钢	575
8.2 冷轧取向硅钢薄带	575
8.2.1 概述	575
8.2.2 制造工艺	576
8.2.3 以高磁感取向硅钢为原始材料的制造工艺	580
8.2.4 以表面能作驱动力发展二次再结晶制造工艺	581

8.3 高转速电机转子材料	586
8.3.1 概述	586
8.3.2 新日铁公司	587
8.3.3 川崎 (JFE) 公司	591
8.3.4 住友金属公司	594
8.4 高硅钢	594
8.4.1 概述	594
8.4.2 特性	595
8.4.3 用途	601
8.4.4 制造方法	601
8.5 磁屏蔽和电磁铁用的电工钢板	623
8.5.1 概述	623
8.5.2 热轧电工钢厚板	624
8.5.3 冷轧电工钢材	638
8.6 (110)[001]取向低碳低硅电工钢	646
8.7 (100)[001]立方织构取向硅钢	649
8.7.1 概述	649
8.7.2 制造方法	649
8.8 易切削硅钢	657
参考文献	658