

TM275
2153

161671

特 殊 钢 丛 书

电 工 钢

上 册

何忠治 编著

冶 金 工 业 出 版 社

1996

内 容 简 介

本书全面介绍了电工钢发展史；基本特性；有关铁磁学和金属学的基本理论知识；各类电工钢的化学成分、制造工艺、性能和用途；国外新品种、新工艺发展状况和最新研制成果以及生产过程和产品的检测技术。书后列有国内外电工钢牌号、性能和对照表。本书供从事电工钢研究和生产的科技人员，各种家用电器、电机、变压器和有关其他电器元件制造行业的设计人员以及有关的高等院校师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电工钢/何忠治编著. — 北京: 冶金工业出版社, 1997.3
(特殊钢丛书)

ISBN 7-5024-2026-6

I. 电… II. 何… III. 电工钢 IV. TM275

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 00232 号

出版人 卿启云 (北京沙湾嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

北京昌平百善印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

1997 年 3 月第 1 版; 1997 年 3 月第 1 次印刷

850mm × 1168mm 1/32; 36.125 1/32 印张; 0 插页; 950 千字; 1154 页; 1-2000 册

75.00 元 (上下两册) 95.00 元 (精装)

《特殊钢丛书》编辑工作委员会

(按姓氏笔画为序)

主任委员 刘嘉禾 杨 栋

委 员	马绍弥	王建英	王洪发
	关玉龙	刘福魁	那宝魁
	杨昌乐	范小媛	林慧国
	侯树庭		

秘 书 长 林慧国

序

特殊钢是钢铁工业的一个重要领域。特殊钢的品种繁多，性能各异，质量要求高，应用范围广，从经济建设、国防建设到日常生活用品都与特殊钢有密切关系，因而通常把特殊钢品种、质量、产量作为衡量一个国家钢铁工业科学技术和工业化水平的重要尺度。

当前，我国的四化建设和改革开放正向深广方向发展，中共中央和国务院作出关于加强科学技术进步的决定，广大职工积极要求掌握科学技术专业知识。在这样的形势下，中国金属学会特殊钢专业学会发起并组织编写一套具有自己特色的《特殊钢丛书》，是有时代意义的。

本套丛书将分卷撰写，陆续出版。由中国金属学会特殊钢专业学会及其 15 个专业学术委员会组织国内冶金与材料界的知名专家教授参加编写这套《特殊钢丛书》，因此具有一定的权威性。编写这套丛书是为了介绍中国特殊钢工业的发展情况和科学研究成果以及国外在这方面的进展情况，总结和整理国内老一辈专家们的丰富学识和实践经验。这套《特殊钢丛书》将重点介绍特殊钢的现代生产工艺技术、特殊钢各大钢类钢种的性能特点和应用指南。为特殊钢生产、科研和使用部门的科技人员在职学习提供素材，为有关大专院校师生提供教学参考。

组织编写特殊钢方面的系列图书，在国内尚属首次，在国外也不多见，难免存在疏漏和不足之处，欢迎指正。期望这套《特殊钢丛书》能在普及提高科学知识、合理生产和合理使用钢材方面发挥积极作用。

《特殊钢丛书》编委会

前 言

电工钢已有近百年的历史，它是制造电机、变压器和镇流器铁芯以及各种电器元件用以节能的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作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”美称。我国在电工钢的科学研究和工业生产方面取得了较大的发展，但现在国内的电工钢产品仍以热轧硅钢片为主，只有武汉钢铁公司独家生产冷轧电工钢。而热轧硅钢片早在 60 年代欧美和日本已停止生产，毫无疑问，冷轧电工钢是我国今后的发展方向。希望本书的出版能为我国冷轧电工钢的发展作出一些贡献。

电工钢制造技术保密性强，公开出版的电工钢书籍只有前苏联和日本各两本，并且都是 1980 年以前出版的，欧美等国和我国迄今还未见到专著。本书是由中国金属学会特殊钢专业学会组织编写的《特殊钢丛书》之一。在编写本书时，除参考公开发表的重要论文外，还大量介绍了公开发表的专利技术公报。所引用的论文到 1994 年底为止，引用的专利公报到 1993 年底为止。

本书共分 9 章，第 1 章至第 3 章介绍电工钢的发展历史以及有关铁磁学、金属学和电工钢基本特性的基础理论知识；第 4 章介绍热轧硅钢；第 5 章至第 8 章以较大篇幅系统介绍各类冷轧电工钢；第 9 章介绍电工钢的检测技术。此外，书末的附录中介绍了电工钢的牌号和性能数据。本书的第 3 章“晶界偏聚”一节由赵宇和何忠治编写，第 4 章“热轧硅钢”由上海矽钢片厂总工程师丁其生编写，其余各章由何忠治编写。

本书编写期间取得电工钢学术委员会，武汉钢铁公司方泽民、何礼君、斐大荣等，太原钢铁公司王一德，上海矽钢片厂马崇光和宝山钢铁公司陈易之等在电工钢领域中长期共同协作的同

事们的支持和帮助，在此表示感谢。特殊钢专业学会秘书长林慧国以及肖文涛、于亚丽、王征林、陈菡等同志为本书的编辑出版工作给予的帮助，在此也一并致谢。

由于作者水平所限，书中存在的问题、缺点和错误在所难免，敬请读者批评指正。

何忠治

1995年5月

常 用 符 号

B —磁感应强度, T
 B_1 —100A/m 磁场下磁感应强度, T
 B_3 —300A/m 磁场下磁感应强度, T
 B_8 —800A/m 磁场下磁感应强度, T
 B_{25} —2500A/m 磁场下磁感应强度, T
 B_{50} —5000A/m 磁场下磁感应强度, T
 B_m —设计 (或工作) 最大磁感应强度, T
 B_r —剩余磁感应强度 (简称剩磁), T
 B_s —饱和磁感应强度, T
 B_r/B_s —矩形比
 b —柏氏矢量
 E —弹性模量, N/mm² 或 MPa
 E_d —退磁能, J/m³
 E_{ex} —磁交换能, J/m³
 E_H —静磁能, J/m³
 E_k —磁晶各向异性能, J/m³
 E_u —感生各向异性能, J/m³
 E_s —磁弹性能, J/m³
 f —频率, Hz
 G —切变模量, N/mm² 或 MPa
 H —磁场强度, A/m
 H_c —矫顽力, A/m
 HB —布氏硬度
 HRB —洛氏硬度
 HV —维氏硬度
 I —激磁电流, A
 K_1 —磁晶各向异性常数, J/m³
 $2L$ —畴壁间距, mm
 M —磁化强度, A/m
 P_T —总铁芯损耗或交变铁芯损耗 (简称铁损), W/kg
 P_{10} —1.0T 磁感应强度下的铁损, W/kg

P_{13} —1.3T 磁感应强度下的铁损, W/kg
 P_{15} —1.5T 磁感应强度下的铁损, W/kg
 P_{17} —1.7T 磁感应强度下的铁损, W/kg
 P_h —磁滞损耗, W/kg
 P_c —涡流损耗, W/kg
 P_a —反常涡流损耗 (简称反常损耗), W/kg
 P_R —转动损耗, W/kg
 P_H —高频损耗或谐波损耗, W/kg
 R —电阻, Ω
 R_a —表面粗糙度或表面光滑度, μm
 T_c —居里温度, $^{\circ}C$
 V_1 —激磁电压 (初级电压), V
 V_2 —感应电压 (次级电压), V
 α —[001] 晶向对轧向在轧面上的偏离角
 β —[001] 晶向对轧面的倾角
 γ —畴壁能, J/m³
 γ_b —晶界能, J/m²
 γ_s —表面能, J/m²
 δ —磁畴宽度, mm
 ε —伸长率, %
 η —反常因子, $\frac{P_c + P_a}{P_c}$
 λ_s —饱和磁致伸缩
 μ —磁导率
 μ_0, μ_i —起始磁导率
 μ_m —最大磁导率
 μ_{15} —1.5T 磁感应强度时的磁导率
 μ_B —玻尔磁子数或磁矩数, A $\cdot$ m²
 ρ —电阻率, $\mu\Omega \cdot cm$
 $\sigma_{0.2}$ —屈服强度, N/mm² 或 MPa
 σ_b —抗拉强度, N/mm² 或 MPa

目 录

前 言

常用符号

第1章 概 论	1
1.1 电工钢板的发展 历史	1
1.1.1 热轧硅钢发展阶段 (1882 ~1955)	1
1.1.2 冷轧电工钢发展阶段 (1930~1967)	2
1.1.3 高磁感取向硅钢发展阶段 (1961~ 1994)	6
1.1.4 中国电工钢板的发展	9
1.2 电工钢板产量和品种分类	13
1.2.1 电工钢板产量	13
1.2.2 电工钢板品种分类	15
1.3 铁和铁-硅合金的特性	16
1.3.1 相图	17
1.3.2 物理性能和力学性能	19
1.3.3 磁性	22
1.4 对电工钢板性能的要求	28
1.4.1 铁芯损耗低	29
1.4.2 磁感应强度高	30
1.4.3 对磁各向异性的要求	31
1.4.4 冲片性良好	31
1.4.5 钢板表面光滑、平整和厚度均匀	33
1.4.6 绝缘薄膜性能好	34
1.4.7 磁时效现象小	36
参考文献	39
第2章 铁磁学基础和影响电工钢磁性的冶金因素	41
2.1 铁磁学基础	41
2.1.1 磁学的基本参量	41
2.1.2 物质的磁性	43
2.1.3 铁磁性物质的基本特点	48
2.1.4 铁磁性物质的能量和有关的基本现象	53
2.1.5 磁畴结构	61

2.1.6	技术磁化过程	67
2.1.7	在交变磁场中的磁化	77
2.2	影响电工钢磁性的冶金因素	82
2.2.1	影响磁感应强度的因素	82
2.2.2	影响铁芯损耗的因素	84
	参考文献	107
第3章	冷轧、再结晶和晶粒长大	110
3.1	冷轧	110
3.1.1	塑性形变基础	110
3.1.2	形变晶体的微观结构	114
3.1.3	冷轧的储能	118
3.1.4	冷轧织构	120
3.2	回复	130
3.2.1	驱动力	131
3.2.2	物理和力学性能的变化	131
3.2.3	回复动力学	132
3.2.4	多边形化	134
3.3	再结晶(初次再结晶)	137
3.3.1	再结晶晶核形成机理	138
3.3.2	再结晶动力学	144
3.3.3	晶界迁移率	147
3.3.4	影响再结晶的因素	148
3.3.5	第二相质点的作用	150
3.4	晶粒长大	152
3.4.1	晶粒形状和晶粒长大的能量变化	152
3.4.2	晶粒长大动力学	155
3.4.3	晶粒长大理论	157
3.4.4	溶质原子与第二相质点对晶粒长大的影响	158
3.4.5	自由表面对晶粒长大的影响	161
3.4.6	择优取向对晶粒长大的影响	162
3.4.7	应变诱发晶界移动	162
3.5	再结晶织构	163
3.5.1	再结晶织构形成理论	163
3.5.2	低碳钢再结晶织构	164
3.6	二次再结晶	167

3.6.1	二次再结晶动力学	167
3.6.2	二次再结晶发展条件和抑制剂的作用	168
3.6.3	第二相质点的固溶度	171
3.6.4	第二相质点的析出形态和弥散分布状态	176
3.6.5	热轧板组织不均匀性对二次再结晶发展的影响	184
3.6.6	二次再结晶机理	196
3.7	动态回复和再结晶	223
3.7.1	动态回复	223
3.7.2	动态再结晶	223
3.8	三次再结晶	225
3.9	晶界偏聚	226
3.9.1	晶界偏聚力能学	227
3.9.2	晶界偏聚热力学	229
3.9.3	晶界偏聚动力学	231
3.9.4	溶质晶界偏聚的作用	232
3.9.5	晶界结构对溶质晶界偏聚的影响	240
3.9.6	电工钢中的晶界偏聚	242
	主要参考书目	252
	参考文献	252
第4章	热轧硅钢	258
4.1	概述	258
4.2	冶炼和化学成分对性能的影响	261
4.2.1	化学成分的影响	261
4.2.2	浇铸的影响	264
4.2.3	炼钢炉型的选择	265
4.3	叠轧和退火工艺	266
4.3.1	生产工艺流程	266
4.3.2	叠轧工艺要点	266
4.3.3	退火工艺	269
4.4	对今后改进的意见	273
4.4.1	品种和质量的改进	273
4.4.2	在线检测工作	274
	参考文献	275
第5章	冷轧无取向低碳低硅电工钢	276
5.1	概述	276

5.2 化学成分对性能的影响	280
5.2.1 硅的影响	280
5.2.2 碳的影响	280
5.2.3 锰的影响	281
5.2.4 磷的影响	281
5.2.5 硫的影响	284
5.2.6 铝的影响	284
5.2.7 氮的影响	286
5.2.8 氧的影响	287
5.3 通用的制造工艺	287
5.3.1 铁水脱硫	288
5.3.2 转炉炼钢	288
5.3.3 真空处理	289
5.3.4 连铸	290
5.3.5 热轧	290
5.3.6 冷轧	294
5.3.7 退火	295
5.3.8 绝缘涂层	299
5.4 半成品制造工艺	300
5.5 新品种的进展	302
5.5.1 以硼代铝的含硼钢	302
5.5.2 高锰钢	306
5.5.3 含铋或锡钢	314
5.5.4 其他新产品	321
5.6 新工艺的进展	325
5.6.1 纯净度和氧化物夹杂的影响和控制	325
5.6.2 碳化物、氮化物和硫化物形态的影响和控制	329
5.6.3 铸坯加热、热轧和卷取工艺的改进	336
5.6.4 热轧板预退火(箱式炉)和常化(连续炉)	349
5.6.5 一次冷轧和退火工艺的改进	357
5.6.6 二次冷轧和退火工艺的改进	369
5.6.7 绝缘涂层和焊接性的改进	377
5.7 步进式微电机用的电工钢的进展	391
5.8 小变压器和镇流器用的电工钢的进展	397
参考文献	402

第 6 章 冷轧无取向硅钢	409
6.1 概述	409
6.2 化学成分对性能的影响	413
6.2.1 铝的影响	413
6.2.2 锰的影响	415
6.2.3 碳的影响	415
6.2.4 硫的影响	415
6.2.5 磷的影响	416
6.2.6 氮的影响	416
6.2.7 氧的影响	416
6.2.8 钛、锆、钒和铌的影响	416
6.3 通用的制造工艺	417
6.3.1 冶炼	418
6.3.2 真空处理	418
6.3.3 连铸	418
6.3.4 热轧	420
6.3.5 常化	421
6.3.6 冷轧	421
6.3.7 退火	423
6.3.8 绝缘涂层	427
6.4 防止产品瓦垅状缺陷的方法	427
6.4.1 调整成分法	428
6.4.2 低温浇铸和电磁搅拌法	430
6.4.3 控制铸坯加热和热轧法	433
6.4.4 热轧板常化法	437
6.5 防止内氧化层和内氮化层方法	437
6.5.1 退火气氛中加 H_2S 或 SO_2	440
6.5.2 采用酸洗等方法去掉内氧化层	440
6.5.3 退火前钢板表面涂料	441
6.5.4 控制退火气氛和露点(d.p.)	443
6.5.5 钢中加锡或铋	443
6.5.6 冷轧板表面光滑	444
6.5.7 二段退火工艺控制气氛和露点	444
6.6 S6—S8 高牌号硅钢的制造工艺	448
6.6.1 川崎钢铁公司制造工艺进展情况	448

6.6.2	新日铁公司制造工艺进展情况	462
6.6.3	日本钢管公司制造工艺进展情况	469
6.6.4	住友金属公司制造工艺进展情况	478
6.6.5	S6-S8无取向硅钢与取向硅钢制造的汽轮发电机定子铁芯的性能对比	482
6.7	其他新品种的制造工艺	485
6.7.1	含硼钢	485
6.7.2	含铋或锡钢	488
6.7.3	含铬和铜防锈钢	491
6.7.4	含锆钢	492
6.7.5	0.60~0.65mm厚3%Si钢	492
6.7.6	横立方织构无取向硅钢	493
6.7.7	连续退火的取向硅钢	493
6.7.8	包层(复合)无取向硅钢	494
6.8	新工艺的进展	495
6.8.1	降低钢中残余钛和锆含量的方法	495
6.8.2	连铸工艺	496
6.8.3	加热、热轧和卷取工艺	503
6.8.4	常化或预退火工艺	512
6.8.5	冷轧工艺	514
6.8.6	退火工艺	524
6.8.7	绝缘涂层	538
	参考文献	539
	第7章 冷轧取向硅钢	546
7.1	概述	546
7.1.1	变压器铁芯中磁通密度和铁损的分布	549
7.1.2	变压器噪音	551
7.1.3	应力对铁损和磁致伸缩的影响	551
7.1.4	温度对磁性和磁致伸缩的影响	553
7.1.5	普通取向硅钢(GO)与高磁感取向硅钢(Hi-B)的性能比较	553
7.1.6	降低装配因子和改善横向磁性方法	558
7.1.7	降低设计 B_m ,合理选用牌号	560
7.2	化学成分对性能的影响	562
7.2.1	碳的影响	562

7.2.2	硅的影响	564
7.2.3	锰和硫的影响	567
7.2.4	铝和氮的影响	568
7.2.5	磷的影响	571
7.3	制造工艺	573
7.3.1	铁水脱锰	575
7.3.2	冶炼	575
7.3.3	真空处理	580
7.3.4	连铸	580
7.3.5	加热和热轧	584
7.3.6	常化	598
7.3.7	冷轧	605
7.3.8	中间退火	616
7.3.9	脱碳退火	625
7.3.10	涂 MgO 隔离剂	643
7.3.11	高温退火	655
7.3.12	平整拉伸退火和涂绝缘膜	679
7.4	表面涂层对磁性的影响	688
7.4.1	硅酸镁(Mg_2SiO_4)玻璃膜底层	688
7.4.2	应力涂层	693
7.5	新品种的进展	694
7.5.1	含铜 G O 钢和含铜及锡的 AlN+MnS 方案 Hi-B 钢	694
7.5.2	含钼的 MnSe (或 MnS)+Sb 方案 Hi-B 钢	709
7.5.3	含铬、钛、铌、锌、锆和镍的取向硅钢	712
7.5.4	$\leq 0.23\text{mm}$ 厚的新产品	716
7.6	新工艺的进展	768
7.6.1	连铸	768
7.6.2	热轧	770
7.6.3	铸坯直接热轧法	775
7.6.4	薄铸坯直接冷轧法	776
7.6.5	铸坯感应加热工艺	782
7.6.6	降低铸坯加热温度工艺	796
7.6.7	MnSe+Sb 方案的改进工艺	842
7.6.8	防止热轧带边裂的方法	846
7.6.9	特殊热轧工艺	853

7.6.10	冷轧工艺的改进	855
7.6.11	隔离涂层工艺的改进	860
7.6.12	温度梯度炉高温退火	862
7.6.13	表面磨光工艺	866
7.7	细化磁畴技术	872
7.7.1	刻痕对降低铁损的影响(刻痕效应)	872
7.7.2	机械加工法	873
7.7.3	激光照射法	875
7.7.4	其他方法	882
7.7.5	耐热细化磁畴技术	889
参考文献		931
第8章 特殊用途的电工钢		956
8.1	冷轧取向硅钢薄带	956
8.1.1	概述	956
8.1.2	制造工艺	957
8.1.3	新产品和新工艺	961
8.2	冷轧无取向硅钢薄带	973
8.3	电磁开关用冷轧硅钢	974
8.4	高硅钢	975
8.4.1	概述	975
8.4.2	特性	976
8.4.3	用途	985
8.4.4	制造方法	987
8.5	磁屏蔽和电磁铁用的电工钢板	1006
8.5.1	概述	1006
8.5.2	热轧电工钢厚板	1008
8.5.3	冷轧电工钢材	1032
8.6	低铁损高磁感 3%Si 取向硅钢薄带(三次再结晶法)	1037
8.6.1	概述	1037
8.6.2	一般制造方法	1039
8.6.3	原始钢带中杂质的影响	1039
8.6.4	冷轧	1042
8.6.5	初次再结晶和二次再结晶	1044
8.6.6	三次再结晶	1048
8.6.7	细化磁畴	1059

8.6.8	绝缘涂层	1065
8.6.9	高频铁损	1065
8.7	高速电机转子材料	1067
8.7.1	概述	1067
8.7.2	热轧板	1069
8.7.3	冷轧板	1069
8.7.4	快淬硅钢板	1071
8.8	(110) [001] 取向低碳低硅电工钢	1072
8.8.1	概述	1072
8.8.2	最近工作	1074
8.9	(100) [001] 立方织构取向硅钢	1080
8.9.1	概述	1080
8.9.2	制造方法	1081
8.9.3	最近工作	1084
8.10	易切削硅钢	1092
	参考文献	1093
第 9 章	电工钢的检测	1101
9.1	主要生产工序的检测	1101
9.1.1	冶炼	1101
9.1.2	铸坯	1102
9.1.3	退火	1102
9.1.4	MgO 涂层	1102
9.1.5	绝缘涂层	1103
9.2	成品检测	1103
9.2.1	磁性测量	1103
9.2.2	磁时效检验	1103
9.2.3	尺寸、形状和表面检验	1103
9.2.4	反复弯曲检验	1104
9.2.5	绝缘涂层附着性和层间电阻检验	1104
9.2.6	叠片系数检验	1104
9.2.7	力学性能试验	1104
9.2.8	硬度检验	1104
9.2.9	低倍检验	1104
9.2.10	晶粒尺寸检验	1104
9.3	在线检测的进展	1105

9.3.1	无取向电工钢在连续炉最终退火的控制	1105
9.3.2	无取向电工钢半有机涂层的控制	1106
9.3.3	取向硅钢脱碳退火后晶粒尺寸和氧化膜的控制	1107
9.3.4	取向硅钢在平整拉伸线上检查晶粒尺寸	1107
9.4	若干特殊的检验方法	1108
9.4.1	取向硅钢中 MnS 和 AlN 分析方法	1108
9.4.2	连续退火前碱洗去油后钢带表面残余钠测定法	1108
9.4.3	退火后钢带氧化膜中氧和 $\text{Fe}_2\text{SiO}_4/\text{SiO}_2$ 比值分析法	1108
9.4.4	玻璃膜与基体的界面光滑度测定法	1109
9.4.5	内氧化层厚度测定法	1109
9.4.6	成品钢板滑动摩擦系数和滑动性测定法	1110
9.4.7	成品表面脱皮发生率测定法	1111
9.4.8	无取向电工钢半有机涂层特性的检查	1111
9.4.9	MgO 活性度的测定方法	1112
9.4.10	成品钢带剪切性测定法	1112
9.4.11	漏磁磁通密度测定法	1112
	参考文献	1113
附 录	电工钢的牌号和性能	1114
附表 1	我国热轧硅钢薄钢板 (GB 5215-85)	1114
附表 2	我国冷轧电工钢带(片) (GB 2521-88)	1115
附表 3	我国晶粒取向硅钢薄带 (GB 11255-89)	1116
附表 4	我国家用电器用热轧硅钢薄钢板 (YB 4002-90)	1117
附表 5	日本冷轧电工钢带(片)	1117
附表 6	前苏联电工钢板	1119
附表 7	国内外冷轧电工钢牌号对照	1122
附表 8	上海矽钢片厂生产的 0.5mm 厚热轧电机钢板的牌号和磁性	1125
附表 9	武汉钢铁公司生产的冷轧电工钢带的牌号和磁性	1128