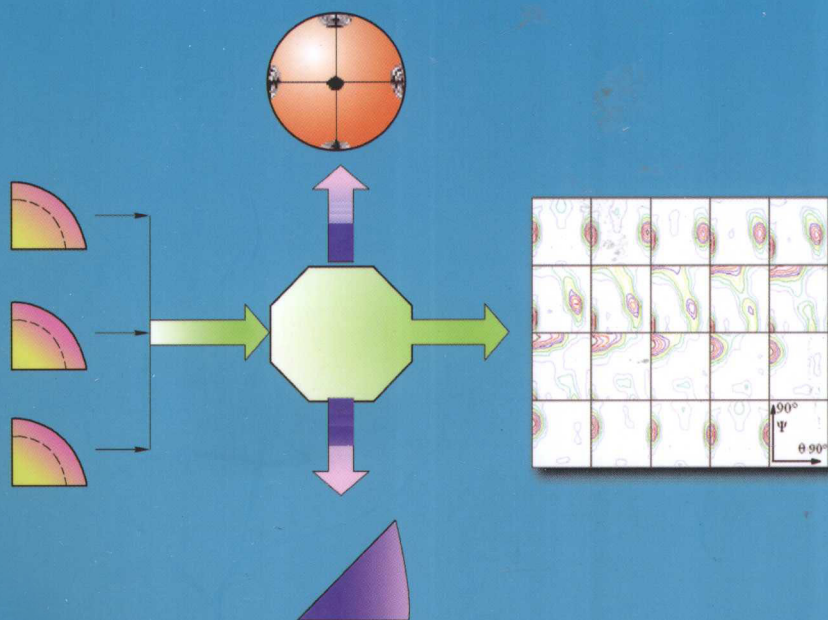


WUQUXIANG GUIGANG DE
ZHIGOU YU CIXING

无取向硅钢的 织构与磁性

张正贵 王大鹏 编著



 冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

内 容 提 要

本书从织构与磁性的基本知识入手,介绍了织构的基本概念及表达方法、材料磁性基本原理,系统全面地论述了无取向硅钢在热轧、常化、同步和异步冷轧、再结晶退火等工艺过程中织构的演变过程,同时还详尽地分析了硅含量、热轧温度、异步轧制速比、退火工艺等对织构的影响规律。根据磁性唯象理论阐述织构与磁性的定量关系,完成了磁性计算的计算机程序,这对从事硅钢研究和生产人员具有重要的参考价值。

本书适合于从事硅钢研究开发和生产的科技人员参考使用,也可供高校相关专业教师、研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

无取向硅钢的织构与磁性/张正贵,王大鹏编著.
—北京:冶金工业出版社,2012.6
ISBN 978-7-5024-5925-3

I. ①无… II. ①张… ②王… III. ①硅钢—织构
②硅钢—磁性 IV. ①TG142.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 084717 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 yjchs@cnmip.com.cn

责任编辑 程志宏 美术编辑 李 新 版式设计 孙跃红

责任校对 禹 蕊 责任印制 张祺鑫

ISBN 978-7-5024-5925-3

北京百善印刷厂印刷;冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销

2012 年 6 月第 1 版, 2012 年 6 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 11 印张; 266 千字; 167 页

36.00 元

冶金工业出版社投稿电话: (010)64027932 投稿信箱: 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)

前 言

无取向硅钢主要用于制造各种大、中、小型电机以及发电机的铁芯。一个国家的发电量 60% ~ 70% 都是由电机消耗掉的，电机工作效率的稍许提高将可节省大量能源，产生明显的经济和社会效益。随着机电制造业迅猛发展及该行业技术进步的需求，机电制造业对冷轧无取向硅钢产品的磁特性的追求也日趋高涨，不仅追求铁损更低同时要求磁感更高，不断对冷轧无取向硅钢磁性提出了更高的要求。从节能的角度出发，提高磁感、降低铁损一直是硅钢研究领域的重要课题，硅钢百余年的发展史就是不断努力降低铁损的历史。

硅钢是一种高附加值的钢材品种，制造技术被严格保密，各国技术封锁严重，其研究成果鲜有公开和系统发表，可供参考和借鉴的文献非常少，所以，国内外硅钢生产企业缺乏交流，重复研究多，系统研究少。在硅钢研究与生产方面，日本研究水平较高，研究的广度和深度都领先于世界，并以专利形式加以保护。目前，国内硅钢研究与生产主要集中在少数几大钢铁公司及中国钢研科技集团公司、东北大学、北京科技大学、沈阳大学、沈阳航空航天大学等，国内公开出版的硅钢书籍最新的还是于 1997 年出版的。

本书在不同形变量及速比下，采用异步轧制方法对无取向硅钢进行轧制的同时，采用同步轧制方法，在不同形变量下进行轧制，以便进行对比研究。将得到的冷轧样品在气氛保护条件下进行再结晶退火。利用 X 射线衍射技术测定各样品的宏观组织，借助 ODF 分析方法系统考察了热轧板组织、同步和异步轧制的无取向硅钢薄板的冷轧组织和再结晶组织，利用光学显微镜进行金相组织观察，利用单板测试仪测定铁损及磁感应强度，并利用无取向硅钢组织数据，根据磁性理论进行模拟计算。

本书共分 7 章，第 1 章介绍硅钢发展历史及发展趋势、硅钢的生产工艺、

硅钢磁性的影响因素、异步轧制方法；第2章介绍金属材料织构的基础理论知识；第3章介绍金属材料的磁性基础知识；第4章~第7章较详尽地介绍了热轧组织与织构和异步轧制对组织及织构的影响、再结晶退火工艺对再结晶组织及织构的影响、无取向硅钢磁性的定量计算。此外，附录给出了磁性计算程序。

在本书编写过程中，得到了东北大学王福教授、刘沿东教授、中国科学院金属研究所陈家坚研究员、沈阳大学王建明教授的热情指导和帮助，同时还得到沈阳航空航天大学武保林教授、沈阳大学牛建平教授、任传富副教授的支持与帮助，沈阳大学图书馆陈丽华老师为本书提供和整理了大量参考资料，武钢硅钢研究所祝晓波高级工程师也提供了一些实验用材料，对此作者一并表示衷心的感谢。作者还要感谢冶金工业出版社，感谢他们在编校中精益求精、严谨细致的敬业精神，为本书的顺利出版付出了辛勤劳动。本书的出版得到沈阳大学的资助。

虽然我们为本书的编写付出最大努力，但由于作者水平所限，存在的不足或错误，敬请读者批评指正。

作 者
2012年3月

目 录

1 引言	1
1.1 硅钢的应用与分类	1
1.1.1 硅钢的应用	1
1.1.2 硅钢片的分类	1
1.2 硅钢的发展概况	2
1.2.1 热轧硅钢发展阶段	2
1.2.2 冷轧硅钢发展阶段	3
1.2.3 我国硅钢的发展	4
1.3 铁硅合金的性能	6
1.3.1 相图	6
1.3.2 硅钢的物理性能和力学性能	6
1.3.3 磁性	6
1.4 对硅钢性能的要求	7
1.5 冷轧无取向硅钢的制造工艺	8
1.5.1 铁水预脱硫	8
1.5.2 冶炼	8
1.5.3 真空处理	8
1.5.4 连铸	9
1.5.5 热轧	9
1.5.6 常化	9
1.5.7 冷轧	10
1.5.8 退火	10
1.5.9 绝缘涂层	10
1.6 影响无取向硅钢性能的因素	10
1.6.1 化学成分对硅钢性能的影响	11
1.6.2 生产工艺参数对硅钢性能的影响	13
1.6.3 组织对硅钢性能的影响	13
1.7 降低硅钢铁损的途径	15
1.8 异步轧制	15
1.9 研究现状与发展趋势	18
参考文献	22
2 金属材料的织构	26
2.1 晶体的各向异性与织构	26

2.1.1	晶体的各向异性	26
2.1.2	晶体的织构	26
2.1.3	织构的类型	28
2.1.4	织构与力学性能的各向异性	28
2.1.5	织构与磁各向异性	29
2.2	织构的表示法	29
2.2.1	晶体学指数表示法	30
2.2.2	极图表示法	30
2.2.3	反极图表示法	36
2.2.4	三维取向分布函数表示法	37
2.3	织构的测定方法	43
2.3.1	X射线衍射测试分析—极图的测绘	43
2.3.2	中子衍射织构分析	52
2.3.3	背散射电子取向分析	55
	参考文献	59
3	硅钢材料的磁性基础	62
3.1	磁学参量	62
3.1.1	磁矩 m	62
3.1.2	磁偶极矩 p	62
3.1.3	磁化强度 M	62
3.1.4	磁极化强度 J	62
3.1.5	磁场强度 H	63
3.1.6	磁感应强度 B	63
3.1.7	磁导率 μ	63
3.2	物质的磁性	63
3.2.1	完全铁磁性	64
3.2.2	亚铁磁性	65
3.2.3	弱磁性	65
3.2.4	反铁磁性	66
3.3	磁各向异性	66
3.3.1	磁晶各向异性	67
3.3.2	感生磁各向异性	69
3.3.3	磁晶各向异性性能的唯一象理论	69
3.3.4	磁晶各向异性性能的计算与数学模型的建立	71
3.3.5	单晶性能参数的确定	72
3.4	磁畴结构	73
3.4.1	磁畴和畴壁的产生	73
3.4.2	磁畴壁种类	75
3.4.3	不均匀物质的磁畴	76

3.5 技术磁化过程·····	78
3.6 在交变磁场中的磁化·····	80
参考文献·····	82
4 无取向硅钢热轧织构与显微组织·····	83
4.1 概述·····	83
4.1.1 热轧过程塑性变形分析·····	84
4.1.2 动态回复与动态再结晶·····	85
4.1.3 热轧后的组织与性能·····	87
4.1.4 终轧温度对磁性的影响·····	88
4.2 试验方法·····	88
4.2.1 实验材料·····	88
4.2.2 热轧取样方法·····	88
4.2.3 金相组织观察·····	89
4.2.4 织构的测试·····	89
4.3 温度对热轧织构的影响·····	90
4.3.1 热轧板头部织构沿厚度的变化·····	90
4.3.2 热轧板尾部织构沿厚度的变化·····	94
4.3.3 分析与讨论·····	99
4.4 硅含量对织构的影响·····	101
4.4.1 低硅热轧板织构沿厚度的变化·····	101
4.4.2 硅含量对热轧硅钢织构的影响·····	101
4.5 热轧硅钢的显微组织·····	102
4.5.1 高硅无取向硅钢热轧板组织·····	102
4.5.2 低硅无取向硅钢的热轧组织·····	103
4.5.3 热轧组织的分析与讨论·····	104
4.6 本章小结·····	105
参考文献·····	105
5 无取向硅钢冷轧织构与显微组织·····	107
5.1 多晶体的塑性变形·····	107
5.1.1 多晶体的塑性变形过程·····	107
5.1.2 形变晶体的微观结构·····	107
5.1.3 冷轧储能·····	108
5.1.4 冷轧织构·····	109
5.2 冷轧试验方法·····	110
5.3 形变量对冷轧织构及显微组织的影响·····	110
5.3.1 不同形变量下的同步冷轧织构及显微组织·····	110
5.3.2 不同形变量下的异步冷轧织构及显微组织·····	113
5.4 异步轧制织构沿厚度的变化·····	120

5.5 异步轧制速比对冷轧织构及组织的影响	122
5.6 分析与讨论	124
5.7 本章小结	125
参考文献	126
6 无取向硅钢再结晶织构与组织	128
6.1 概述	128
6.2 金属的再结晶与再结晶织构	128
6.2.1 一次再结晶核心的形成机理	129
6.2.2 晶界迁移	130
6.2.3 再结晶织构机理	130
6.2.4 再结晶织构与晶界特征分布	132
6.3 再结晶退火试验方法	133
6.4 不同退火温度的再结晶织构及组织	134
6.4.1 不同温度退火后的再结晶织构	134
6.4.2 不同温度退火后的显微组织	136
6.5 不同退火时间的再结晶织构及组织	139
6.6 无取向硅钢织构的演变	140
6.6.1 常化材料及冷轧样品的织构	140
6.6.2 再结晶退火织构	141
6.7 分析与讨论	142
6.8 本章小结	145
参考文献	146
7 无取向硅钢的磁性	148
7.1 概述	148
7.2 磁性测量方法	149
7.3 不同退火温度下的硅钢磁性	149
7.4 退火时间对无取向硅钢磁性的影响	151
7.5 异步轧制速比对无取向硅钢磁性的影响	153
7.6 无取向硅钢磁性的定量计算	154
7.6.1 软件的编制与数模的处理	154
7.6.2 无取向硅钢磁性预测	155
7.7 分析与讨论	160
7.8 本章小结	162
参考文献	163
附录	164
附录 A 计算源程序	164
附录 B 程序部分界面	167
附录 C 程序框图	167

1 引 言

1.1 硅钢的应用与分类

1.1.1 硅钢的应用

硅钢俗称矽钢片，是一种含碳量很低的软磁材料，它包括硅含量低于 0.5% 的电工钢和硅含量为 0.5% ~ 4.5% 的硅钢两类，一般厚度在 1mm 以下。硅钢和其他钢种的主要区别，是钢中的硅含量较高，是电力、电子和军事工业不可缺少的重要软磁合金，主要用于各种电动机、发电机和变压器的铁芯及其他电器部件，在磁性材料领域中产量和用量最大，目前，还没有可替代材料。电工钢板的制造技术和产品质量是衡量一个国家特殊钢生产和科技发展水平的重要标志之一。硅钢的生产工艺复杂，制造技术严格，国外的生产技术都以专利形式加以保护，视为企业的生命。

1.1.2 硅钢片的分类

硅钢片按硅含量可分为低硅钢（含硅 0.8% ~ 1.8%）、中硅钢（含硅 1.8% ~ 2.8%）、较高硅钢（含硅 2.8% ~ 3.8%）及高硅钢（含硅 3.8% ~ 4.8%）四类硅钢片。

按轧制方法和用途可分为热轧硅钢片和冷轧硅钢片。

按晶粒取向又可分为取向硅钢板和无取向硅钢板。

热轧硅钢片是将 Fe-Si 合金用电炉熔融，进行反复热轧成薄板，最后在 800 ~ 850℃ 退火后制成。热轧硅钢片主要用于发电机的制造，故又称热轧电机硅钢片，但其可利用率低，能量损耗大，近年相关部门已强令要求淘汰。

热轧硅钢板用 DR 表示，按硅含量的多少分成低硅钢（含 $\text{Si} \leq 2.8\%$ ）、高硅钢（含 $\text{Si} > 2.8\%$ ）。表示方法：DR + 铁损值（用 50Hz 反复磁化和按正弦形变化的磁感应强度最大值为 1.5T 时的单位重量铁损值）的 100 倍 + 厚度值的 100 倍，如 DR510-50 表示铁损值为 5.1、厚度为 0.5mm 的热轧硅钢板。家用电器用热轧硅钢薄板的牌号用 JDR + 铁损值 + 厚度值来表示，如 JDR540-50。

冷轧硅钢包括冷轧无取向硅钢和冷轧取向硅钢。冷轧无取向硅钢片最主要的用途是用于电机制造，故又称冷轧电机硅钢。其含硅为 0.5% ~ 3.0%，经冷轧至成品厚度，供应态多为 0.35mm 和 0.5mm 厚的钢带。与热轧硅钢相比，其厚度均匀，尺寸精度高，表面光滑平整，从而提高了填充系数和材料的磁性能。

冷轧无取向硅钢片的表示方法：由公称厚度（扩大 100 倍的值）+ 代号 W + 铁损保证值（在频率为 50Hz，波形为正弦的磁感峰值为 1.5T 的单位重量铁损值扩大 100 倍后的值）。如 50W470 表示厚度为 0.5mm、铁损保证值为小于或等于 4.7 的冷轧无取向硅钢带。

无取向硅钢又可分为中低牌号无取向硅钢和高牌号无取向硅钢。高牌号无取向硅钢是

指 50W400 以上的各个牌号, 主要用于制造大、中型水力、火力、风力发电机。

冷轧取向硅钢最主要的用途是用于变压器制造, 所以又称冷轧变压器硅钢。与冷轧无取向硅钢相比, 取向硅钢的磁性具有强烈的方向性; 在易磁化的轧制方向上具有优越的高磁导率与低损耗特性。取向钢带在轧制方向的铁损仅为横向的 $1/3$, 磁导率之比为 $6:1$, 其铁损约为热轧硅钢带的 $1/2$, 磁导率为热轧硅钢的 2.5 倍。

冷轧取向硅钢分为一般取向硅钢和高磁感取向硅钢。冷轧取向硅钢的表示方法: 由公称厚度 (扩大 100 倍的值) + 代号 Q 或 G (Q 表示一般取向, G 表示高磁感取向) + 铁损保证值 (将频率 50Hz、最大磁通密度为 1.7T 时的铁损值扩大 100 倍后的值)。如 30Q130 是一般取向硅钢, 表示厚度为 0.3mm、铁损保证值为小于或等于 1.3 的冷轧取向硅钢; 30QG100 是高磁感取向硅钢, 表示厚度为 0.3mm、铁损保证值为小于或等于 1.0 的冷轧取向硅钢。

冷轧电工钢与热轧硅钢相比有以下优点:

- (1) 具有表面平整光滑, 厚度均匀, 叠片系数高;
- (2) 铁损低磁感高;
- (3) 钢板利用率高, 冲片性好;
- (4) 表面有绝缘膜, 便于用户使用;
- (5) 应力对磁性能的影响小。

(6) 用冷轧代替热轧制造电机或变压器, 其重量和体积可减少 25%, 可减少变压器电能消耗量 45% ~ 50%, 且变压器工作性能更可靠。

1.2 硅钢的发展概况

1.2.1 热轧硅钢发展阶段

硅钢是一种含碳量很低的软磁材料, 主要应用于电力、机械、家电、军工等行业, 是变压器、发动机和电动机铁芯的主要材料。取向硅钢是经过二次再结晶过程而产生出来的, 主要用作变压器等的铁芯, 而无取向硅钢主要用于发电机和电动机等的铁芯。软磁材料要求低的铁损及高的磁感应强度, 材料的结构与组织对材料的磁性能有很大的影响。

铁的磁导率比空气的磁导率高几千到几万倍, 铁芯磁化时磁通密度高, 可产生远比外加磁场更高的磁场。普通热轧低碳钢板是工业上最早应用的铁芯软磁材料。1886 年美国 Westinghouse 电器公司首先用杂质含量约为 0.4% 的热轧低碳钢板制成变压器叠片铁芯, 1890 年已广泛使用 0.35mm 厚热轧低碳钢薄板制成电机和变压器铁芯。低碳钢的电阻率 (ρ) 低, 铁芯损耗 (P_T) 大; 碳和氮含量高, 磁时效严重。

1882 年英国哈德菲尔特 (R. A. Hadfield) 开始研究硅钢, 1898 年发表了关于 4.4% Si - Fe 合金的磁性结果的论文。1900 年哈德菲尔特与巴雷特 (W. F. Barreel) 等发表了 2.5% ~ 5.5% Si - Fe 合金具有良好磁性的研究结果的论文。1902 年德国古姆利奇 (E. Gumlich) 指出, 加硅使铁的电阻率明显增高, 涡流损耗 (P_e) 和磁滞损耗 (P_h) 降低, 磁导率 (μ) 增高, 磁时效现象减轻。1903 年美国取得哈德菲尔特专利使用权, 同一年美国和德国开始生产热轧硅钢板, 将原始碳含量从约 0.2% 逐渐降到 0.1% 以下和硅含量提升到约 4.5% 后, 磁性进一步提高。1905 年美国 (英国在 1906 年) 已大规模投入生

产, 在很短时间内全部代替了普通碳钢板制造电机和变压器, 其铁损比普通低碳钢低一半以上, 1901~1924 年美国延森 (T. D. Yensen) 等研究了硅钢力学性能以及杂质和晶粒尺寸等因素对磁性的影响, 其成果对改善热轧硅钢产品质量起了重要作用。在 1906~1930 年期间, 是生产厂与用户降低热轧硅钢板成本, 改进产品质量和提高产量的阶段。美国生产的 0.35mm 厚 4% Si 热轧硅钢最高牌号的铁损 $P_{10/50}$ 不断降低, 1912 年 $P_{10/50} \approx 1.45 \text{ W/kg}$ 。1950 年前后美国 Armco 钢公司采用热轧硅钢板经约 1% 压下率平整后焊在一起, 在连续炉退火和涂磷酸镁绝缘膜的新工艺生产 Dimax 系列牌号, 改善了冲片性和磁性 ($P_{10/50} < 0.90 \text{ W/kg}$)。1954 年按此工艺生产约 50 万吨产品^[1]。

1.2.2 冷轧硅钢发展阶段

此阶段主要是冷轧普通取向硅钢 (GO) 板的发展阶段。1930 年美国高斯在 1926 年本多光太郎等已发表的铁单晶体磁各向异性实验结果的启发下, 采用冷轧和退火方法开始进行大量实验, 探索晶粒易磁化方向 $\langle 001 \rangle$ 平行于轧制方向排列的取向硅钢带卷制造工艺。当时美国 General Electric 电器公司已提出成卷硅钢产品的要求。1933 年高斯采用两次冷轧和退火方法制成沿轧向磁性高的 3% Si 钢, 1934 年申请专利并公开发表。当时他用 X 射线检查, 错误地认为这种冷轧材料是无取向的。直到 1935 年, 博佐思 (R. M. Bozorth) 用 X 射线检查才证实这种材料具有 $\{110\} \langle 001 \rangle$ 织构, 其 $\{110\}$ 晶面平行于轧制平面, 易磁化方向 $\langle 001 \rangle$ 晶向平行于轧制方向, 沿轧向磁化时磁性高, 而横向为较难磁化的 $\langle 110 \rangle$ 方向, 所以也称单取向或 Goss 取向冷轧硅钢。同一年 Armco 钢公司按高斯专利技术与 Westinghouse 电器公司合作组织生产。随后 Allegheny Ludlum (ALC) 钢公司与 General Electric 电器公司合作也开始生产。1939 年 Armco 钢公司的主要制造工艺是: $\leq 0.02\% \text{ C}$ 和 2.9%~3.3% Si 板坯经 1200°C 加热和热轧到 2.7mm 厚, 热轧带在箱式炉 $760^\circ\text{C} \times (24 \sim 36) \text{ h}$ 预退火进行部分脱碳, 两次冷轧到 0.35mm 厚和连续炉 1010°C 中间退火, 干涂 MgO (隔离剂) 和在罩式炉 H_2 环境下 $1200^\circ\text{C} \times 60 \text{ h}$ 叠片退火。该产品磁性较低, 而且由于残余碳含量较高 ($\leq 0.015\%$), 磁时效严重。随后 Armco 钢公司采用快速分析微量碳等技术和不断改进制造工艺及设备, 产品质量逐步提高, 并申请了一系列专利。通过卡特等人工作, Armco 钢公司在冷轧和退火等后工序制造工艺日臻完善, 但产品平均磁性仍不稳定。1946 年 Armco 钢公司的利特曼 (M. F. Littmann) 等发现板坯经 1370°C 以上高温加热可明显提高产品的磁性, 晶粒粗大。当时他们认为是因为高温加热使钢组织和碳、硫等元素分布更均匀。1951 年, 大家都认识到: (1) 在初次再结晶织构中必须存在有 $(110)[001]$ 组分, 它是在每次退火中累加而成的。 $(110)[001]$ 初次晶粒在最终高温退火时作为二次晶核, 通过二次再结晶发展成强的 $(110)[001]$ 织构。(2) 钢中必须存在有利杂质元素作为抑制剂来阻碍初次晶粒长大, 促使二次再结晶发展。1958 年梅也 (J. E. May) 等发表 MnS 第二相质点可强烈阻碍初次晶粒长大的论文, 弄清 MnS 抑制剂对生产取向钢的重要性。板坯高温加热的作用就是使板坯中存在的粗大 MnS 固溶, 然后在热轧过程中再以细小弥散状析出 MnS 质点来加强抑制初次晶粒长大。Armco 钢公司在掌握 MnS 抑制剂和板坯高温加热这两个前工序制造工艺后, 制造取向硅钢的专利技术已基本完善, 产品磁性大幅度提高且磁性稳定, 这一过程先后约花费 20 年时间。1959 年开始生产 0.30mm 厚产品, 1963 年生产 0.27mm 厚产品。

1934 ~ 1940 年间延森和鲁德 (W. E. Ruder) 等研究了杂质元素和晶粒尺寸等因素对冷轧硅钢性能的影响。1941 ~ 1960 年间邓恩 (C. G. Dunu) 等详细研究了不同位向 3% Si - Fe 单晶体的冷轧和退火织构, 并提出 3% Si - Fe 多晶体中 (110)[001] 织构形成的取向生核和择优 (选择性) 长大机理。

Armco 钢公司长期垄断了世界冷轧取向硅钢的生产。普通取向硅钢 (GO) 产量约 80% 都是按 Armco 专利生产的, 其他 20% 也是采用类似的二次冷轧法生产的 (如前苏联); 1957 年西德阿什姆斯 (F. Assmus) 等人公开发表了制造 (100)[001] 立方织构 (也称双取向) 3% Si 钢薄带方法及其磁性的论文, 并申请了专利。其特点是轧向和横向的磁性都高, 45℃ 方向为 <110> 方向, 磁性低。他们用纯净 3% Si - Fe 合金经几次冷轧和高温退火制成 0.05mm 立方织构薄带。随后美国沃尔特 (J. L. Walter) 等用柱状晶扁锭经冷轧和退火也试制成这种材料。1959 ~ 1962 年邓恩和沃尔特、德塔特 (K. Detert) 以及科勒等人研究了立方织构形成机理, 证明: (1) (100)[001] 晶粒是依靠不同晶面的表面能量差作为驱动力, 通过二次再结晶而长大。(2) 最终高温退火时气氛中存在微量 O₂ 或 H₂S 或 SO₂ 气体可使 (100) 晶面的表面能量降到最低, 促使形成立方织构。在 1957 ~ 1970 年期间公布的立方织构硅钢专利技术和发表的论文近百篇, 但都因为制造工艺复杂, 成材率低和成本过高而一直未正式生产。立方织构硅钢的磁致伸缩值很高, 制成的变压器噪声也较大。

20 世纪 50 年代末, 由于氧气顶吹转炉和钢水真空处理等冶炼技术的发展, 低碳钢中碳、氮和氧可分别降到 0.005% 以下, 磁时效明显减轻, 磁性也大幅度提高。1960 年美国开始大量生产小于 0.5% Si 的冷轧低碳电工钢板。为改善热加工性和冲片性, 提高了钢中锰和磷的含量。美国用这种材料制造当时正在蓬勃发展的家用电器中微电机 (容量小于 1kW) 和工业用微电机和小型电机。同时大量生产半成品 (不完全退火状态交货) 产品, 用户冲片后再进行完全退火, 磁性进一步提高。随后其他国家也陆续大量生产低碳电工钢产品和半成品产品。

1.2.3 我国硅钢的发展

1952 年, 我国自太原钢铁公司生产热轧硅钢片开始, 电工钢从无到有经历了半个多世纪的发展。直到 1974 年武钢引进日本新日铁的冷轧电工钢生产专利和成套工艺设备, 使我国电工钢生产进入一个崭新的阶段。

一个国家硅钢产量和使用量与其发电量的增长大致成正比关系。通过几十年来的高速发展, 我国的用电量和发电量都迅速增长, 总装机容量和发电量均已居世界第二; 致使硅钢需求持续上升。目前, 我国电工钢生产还处在一个冷热并存、逐渐淘汰热轧电工钢的局面。长期以来, 我国冷轧电工钢市场被国外占有, 自 1998 年起, 国内太钢、宝钢、鞍钢冷轧硅钢相继投产, 使这一局面得到了改变。

1.2.3.1 热轧硅钢生产现状

目前世界上只有我国等极少数几个国家还在生产热轧电工钢, 主要生产厂有上海等近 20 家, 其生产能力 120 万吨/年。

热轧电工钢的品种主要是含硅 2.6% 的电机钢, 也有少量含硅 4.4% 的变压器钢, 主

要用途为家用电机、微电机和部分中型电机、低压电器及仪表用电源变压器等。由于热轧电工钢的生产过程污染环境,劳动强度大,综合性能差等问题,国外工业发达国家早已淘汰了热轧硅钢的生产,但我国热轧硅钢至今还是中小电机的主导铁芯材料。主要原因:首先是电机标准相对落后,其次冷轧电工钢的产量还不能满足市场需求,价格偏高,在日益竞争激烈的市场中,电机的制造成本是优先考虑的问题^[2]。

1.2.3.2 冷轧电工钢生产现状

经过几十年的发展建设,我国冷轧电工钢生产取得了较大进步。从世界范围看,我国冷轧电工钢的生产技术、设备、品种结构、实物质量达到世界先进水平,与法国、德国、意大利等国家水平相当,高于俄罗斯,但与代表世界最高水平的日本相比还有一定的差距。

目前国内冷轧取向电工钢仅有武钢、宝钢、鞍钢等少数几家大型钢铁企业能够生产,但质量水平与国际先进水平差距非常大。2007 年以前,武钢是我国唯一一家能生产取向硅钢的钢厂,其他寥寥几个企业,只能生产普通硅钢。由于取向硅钢价格高,利润丰厚,吸引着企业的注意力。国内企业纷纷加大投入,其中宝钢步伐最快,2008 年试产成功,生产出第一卷取向硅钢;2009 年,宝钢的取向硅钢产能规模已达 10 万吨,当年实现产品销量 8.89 万吨。2009 年,鞍钢的硅钢生产线投入生产,2010 年全面投产后,鞍钢的两条硅钢生产线年总产量 30 万吨,其中取向硅钢 20 万吨,高牌号无取向硅钢 10 万吨;2009 年,武钢生产硅钢 100 万吨,取向硅钢 35 万吨。2010 年,我国冷轧取向硅钢的生产量为 53.5 万吨,进口取向硅钢为 26.3 万吨,出口取向硅钢为 1.22 万吨,取向硅钢的表观消费量为 78.6 万吨左右。目前,我国取向硅钢的产能在 107 万吨。

冷轧无取向电工钢的生产近几年得到飞跃发展,生产企业非常多,除了武钢、宝钢、鞍钢、太钢外,首钢、通钢、涟钢、重钢、新钢、本钢等也相继投产了冷轧硅钢。马钢冷轧硅钢完全投入生产,年产硅钢片 40 万吨。2010 年 5 月,通钢冷轧硅钢 CA-1 机组投产,具备了硅钢生产能力。本钢年产 20 万吨的无取向硅钢项目于 2010 年底投产。进军硅钢的不只是国企,民营企业也开始染指硅钢项目,2010 年 5 月,天津一家企业投资建设年产 130 万吨的冷轧硅钢生产基地。目前,无取向硅钢的产能在 1133 万吨,但大多数生产的是中低牌号冷轧无取向电工钢,因为中低牌号无取向电工钢生产技术的门槛和技术含量相对较低,而高牌号无取向硅钢仅有武钢、宝钢、鞍钢、太钢能够生产,产能不超过百万吨。

我国虽然成为世界冷轧无取向电工钢产量大国,但由于大多数企业只能生产技术门槛低相对较低的中低牌号,因此技术含量和附加值较低。我国冷轧电工钢的出口量在逐渐增加,但出口产品主要集中在低附加值的中低牌号,高端产品的生产能力薄弱。高牌号无取向硅钢仍需要进口,2011 年 1~4 月,我国从日本进口的无取向硅钢为 12.8 万吨。

借着“十二五”开局和电工钢行业“以冷代热”进程加快的东风,2012 年以来,不少企业纷纷投资改造或新建冷轧硅钢生产线,随着首钢、涟钢、本钢、攀钢等以及一批民营企业新上项目逐步进入市场,国内市场竞争日趋白热化。据预测,根据目前的潜在产能,到 2013 年左右,随着武钢硅钢改造,宝钢 30 万吨取向硅钢二、三期项目建设、鞍钢 20 万吨取向硅钢一期完善和二期项目建设,以及涟钢电工钢合资项目的完成,届时我国

冷轧硅钢产能将完全实现自给, 电工钢市场将更加活跃, 价格也将出现频繁波动, 产品质量稳定性、性价比等要素将成为市场竞争的新标杆。

1.3 铁硅合金的性能

1.3.1 相图

纯铁在 910°C 时发生 $\alpha \rightarrow \gamma$ 相变, 在约 1394°C 时发生 $\gamma \rightarrow \delta$ 相变。加入硅以后, 可使 Fe-C 相图中 γ 区缩小。在纯 Fe-Si 合金中, $\text{Si} > 1.7\%$ 时无 γ 相变。硅在 α -Fe 中的溶解度能达到 4% , $\text{Si} > 4.5\%$ 时, 产生脆性的 Fe_3Si 金属间化合物 (DO_3 型有序相) 和 B2 型有序相 (FeSi)。低于 540°C 时 B2 有序相共析分解为 DO_3 有序相和 α -Fe 无序相。图 1-1 为含硅 3.25% 的 Si-Fe 合金的 Fe-C 相图。含 $\text{C} < 0.025\%$ 时在任何温度下加热都为单一 α 相而不发生相变。这对采取高温退火制造取向硅钢和 3% Si 高牌号无取向硅钢极为重要, 因为高温无相变有利于通过二次再结晶发展 $(110)[001]$ 取向和促使无取向硅钢晶粒长大, 从而明显提高磁性。

1.3.2 硅钢的物理性能和力学性能

随硅含量的增高, 铁的点阵常数和密度减小; 电阻率是各向同性的, 随硅含量的增加, 电阻率明显提高, 其他一些重要的磁性能也发生了变化^[3], 如图 1-2 所示。硅是提高铁的电阻率的最有效元素, 铁中加硅的一个重要目的就是提高电阻率 (ρ) 值和降低涡流损耗 (P_e) 值。随硅含量增高, 铁的屈服强度和抗拉强度明显提高, 硬度也提高, 而伸长率和面收缩率当 $\text{Si} > 2.5\%$ 时急剧下降。

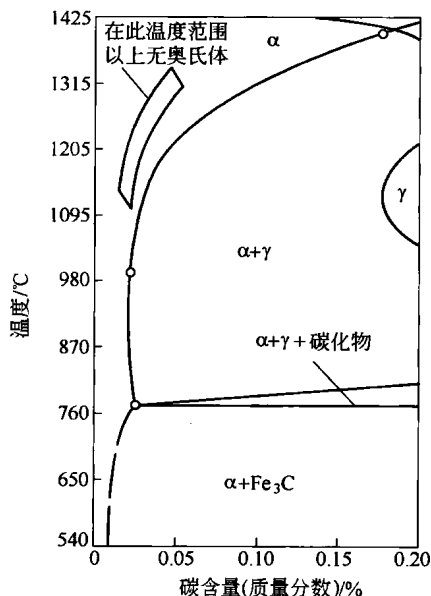


图 1-1 含硅 3.25% 的 Si-Fe 合金的铁碳相图

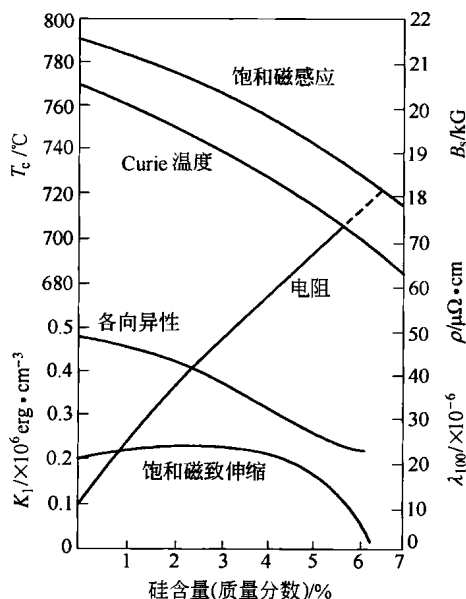


图 1-2 硅含量对铁的物理性能的影响

1.3.3 磁性

铁磁性材料的磁性分组织不敏感磁性 (也称固有磁性或内禀磁性) 和组织敏感磁性。

1.3.3.1 组织不敏感磁性

当化学成分和温度不改变时, 这些磁性参量不随材料的组织的改变而变化。这些参量主要有饱和磁感应强度 (B_s)、居里温度 (T_c)、磁晶各向异性 (K_1)、饱和磁致伸缩 (λ_s)。图 1-3 为 3% Si-Fe 单晶体的三个主要晶轴的磁化曲线。 $\langle 100 \rangle$ 晶轴为易磁化方向, $\langle 111 \rangle$ 晶轴是难磁化方向, $\langle 110 \rangle$ 晶轴介于两者之间。

1.3.3.2 组织敏感磁性

组织敏感磁性参量主要有起始磁导率 (μ_0)、最大磁导率 (μ_m)、矫顽力 (H_c)、磁滞损耗 (P_h)、涡流损耗 (P_e)、铁损 (P_T) 和不同磁场下的磁感应强度。这些磁性参量除与化学成分和温度有关外, 还受下列一些组织因素的影响: 如晶粒取向、晶粒尺寸、晶体缺陷、析出物和夹杂物、内应力等。另外钢板的厚度、表面粗糙度、辐射和外加应力等对它们也有影响。这些因素主要影响了磁畴结构和磁化行为。

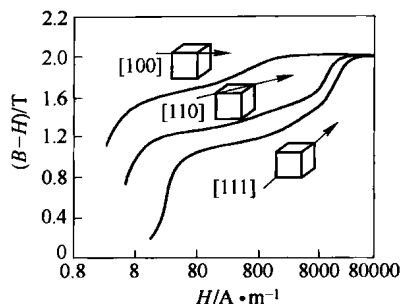


图 1-3 3% Si-Fe 单晶体的三个方向的磁化曲线

1.4 对硅钢性能的要求

硅钢片的性能好坏不仅直接关系到电能的损耗, 而且关系到电机、变压器等产品的性能、体积、重量和材料的节约。

(1) 铁芯损耗 (P_T) 低。铁损 (P_T) 是指硅钢片使用时的能量损耗, 是由于铁芯在交变磁场下被磁化时磁通变化受到各种阻碍而消耗的电能。包括磁滞损耗 (P_h)、涡流损耗 (P_e) 和反常涡流损耗 (P_a) 三部分。无取向硅钢的铁损以 P_h 为主, 约占 60% ~ 80%, 所以降低铁损的关键是降低 P_h , 通常用 $P_{17/50}$ 或 $P_{15/50}$, 分别表示 50Hz 的频率下磁化到 1.7T 和 1.5T 时的铁损测定值。冷轧无取向硅钢的铁损比硅含量相同的热轧硅钢低 10% ~ 20%。

(2) 磁感应强度 (B) 高。磁感应强度代表材料的磁化能力, 是指在外磁场作用下能被磁化的程度, 单位为 T。硅钢磁感高, 意味着其磁化能力强, 铁芯的激磁电流降低。电机和变压器功率不变时, 磁感应强度高, 设计时可提高最大磁感 B_m , 减小铁芯体积, 减轻重量, 同时节省电工钢板、导线、绝缘材料和结构材料。影响无取向硅钢磁感应强度的主要因素是成分和晶体结构。Si、Al、Mn 可使磁感应强度降低; 夹杂物、杂质的增加及晶粒尺寸增大, (100) 组分减弱和 (111) 组分加强都会使磁感应强度降低。

(3) 对磁各向异性的要求。电机是在运转状态下工作, 铁芯是用带齿圆形冲片叠成的定子和转子组成, 要求电工钢板为磁各向异性, 因此用冷轧无取向硅钢制造。

(4) 冲片性良好。用户使用硅钢片时冲剪工作量很大, 因此要求它有良好的冲片性能。硅钢片表面光滑、平整和厚度均匀, 可以提高铁芯的叠片系数, 即铁芯的有效利用空间。叠片系数高, 铁芯中空气间隙就小, 从而减小激磁电流。

(5) 钢板表面光滑、平整和厚度均匀。要求电工钢表面光滑、平整和厚度均匀, 准确的尺寸精度, 极小的同板厚度差, 主要是为了提高铁芯的叠片系数。叠片系数高意味着

铁芯体积不变时,电工钢板用量增多而有更多的磁通密度通过,有效利用空间增大,空气间隙减少,使激磁电流减小。

(6) 绝缘薄膜性能好。为防止铁芯叠片间发生短路而增大涡流损耗,冷轧电工钢板表面涂一层薄层无机盐或无机盐+有机盐的半有机绝缘膜。要求膜的厚度均匀、有好的耐热性、层间电阻高、附着性好、冲片性好等。

(7) 磁时效现象小。冷轧无取向硅钢作为电机转子铁芯材料,具有良好的磁性能和工艺性能。磁时效是指无取向硅钢在服役过程中,磁性能下降的现象。硅钢在热加工过程中容易造成碳、氮等时效析出原子过饱和固溶于基体中。铁芯在长期运转时,硅钢板温度上升,特别是在温度升高达 $50 \sim 80^{\circ}\text{C}$ 时,促使固溶在基体中过饱和的碳、氮析出,钢中碳和氮原子以细小弥散的碳化物和氮化物析出,使 H_c 和 P_T 增高^[4]。时效析出的碳化物、氮化物等粒子对磁畴壁有钉扎作用是造成磁时效的重要原因。钢中铝含量较高时, AlN 颗粒析出尺寸较大、数量小,对磁时效影响较小^[5]。Morish^[6] 指出当碳化物颗粒的直径接近磁畴壁的厚度时,碳化物的钉扎作用最强。因此,要求硅钢产品中碳和氮的含量均小于 0.0035% 。

1.5 冷轧无取向硅钢的制造工艺

冷轧无取向硅钢的制造工艺为:铁水预脱硫→冶炼→真空处理→连铸(或模铸→开坯)→热连轧→酸洗→常化→冷轧(或一次冷轧→中间退火→临界变形冷轧)→成品退火和涂绝缘膜。

1.5.1 铁水预脱硫

无取向硅钢的生产对高炉铁水的要求是铁水温度不低于 1300°C ;铁水中 S 不大于 0.03% ;铁水中的 Si $0.3\% \sim 0.6\%$ 。在高炉内降低铁水中硫需要提高渣碱度和增大渣量,降低铁水的生产效率。现在一般采用外脱硫,当前最常用的铁水脱硫方法是机械搅拌法(KR)和喷吹法,我国目前使用的是喷吹法。铁水脱硫的优点是效率高和脱硫剂利用率高且脱硫速度快以及费用低,高炉、转炉、炉外精炼每脱除 1kg 硫,其费用分别约为铁水脱硫的 2.5 倍、16 倍和 6 倍。常用脱硫剂有碳化钙系脱硫剂、石灰系脱硫剂、金属镁脱硫剂。铁水经预脱硫后,使 $\text{S} < 0.003\%$,避免产生 MnS 降低磁性。

1.5.2 冶炼

在冶炼过程中,随硅量提高,出钢温度约降低 10°C ,因为真空处理后加入硅铁量多,钢水温度升高。连铸法浇注时间长,出钢温度比模铸法约高 20°C 。如 1.5% Si 钢连铸温度为 $1670 \sim 1680^{\circ}\text{C}$,模铸时为 $1650 \sim 1660^{\circ}\text{C}$ 。钢水中氧量控制在 $(600 \sim 900) \times 10^{-4}\%$,以便在真空处理时将碳降到 0.005% 以下。

1.5.3 真空处理

沸腾钢水经真空处理,通过碳和氧的化学反应同时进行脱碳和脱氧,使碳降到 0.005% 以下,氧降到 0.005% 以下。处理时间约为 20min ,大于 2% Si 钢的钢水温度控制在 1570°C (连铸法)或 1560°C (模铸法)。

1.5.4 连铸

硅钢的连铸采用连铸 + 电磁搅拌技术, 经电磁搅拌后等轴晶占 55% ~ 70%, 这样能有效地减轻表面缺陷。一般采用圆弧形连铸机浇铸, 连铸坯表面和板厚中心区为细小等轴晶区, 中部等轴晶区中心线位于铸坯下半部, 即下半部的柱状晶区窄。电磁搅拌作用原理是, 搅拌器通过电流在铸坯上产生趋肤电流, 其电流方向垂直于铸坯纵断面。电流和感应磁场的作用是产生电磁力, 使铸坯中未凝固的钢水产生旋转运动, 由层流变为紊流, 加速传热和对流, 从而增加等轴晶的比例, 同时促进夹杂物聚集上浮, 减轻铸坯中心疏松和偏聚。

1.5.5 热轧

铸坯装炉前在大于 150℃ 进行表面清理, 然后放在保温坑中保温和缓冷。铸坯在加热炉中要缓慢加热, 特别是在 700 ~ 800℃ 以下更是如此, 加热温度为 $1200^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$ 。采用二次冷轧时, 加热温度可提高到 1250 ~ 1300℃, 便于热轧, 而且使终轧温度提高。热轧板晶粒粗化可改善 B_{50} , 但对 P_{15} 不利。对高牌号来说主要是降低 P_{15} , 因此即使采用二次冷轧法, 加热温度仍控制在 1200℃。开轧温度为 $1180^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$, 终轧温度为 $850^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$ 。1250 ~ 1300℃ 加热时终轧温度是 $850^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$, 卷取温度是 $600^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$ 。

热轧工艺对硅钢冷轧织构有显著的影响。热轧时终轧温度越高, 冷轧后 (100)[011] 织构就越强, 有利于硅钢磁性能的提高, 冷轧板的织构有继承性。冷轧无取向硅钢的热轧加工过程及其所产生的热轧组织对其成品的性能有重要的影响, 有时会超过成分波动的影响^[7]。提高无取向硅钢热轧加热温度可以提高热轧板的晶粒尺寸和成品中 Goss 织构量, 进而提高成品磁感应强度^[8]。同时, 提高终轧温度可促进热轧板的再结晶, 使铁损降低、磁感应强度提高。提高卷取温度则能增加成品中有利织构组分, 改善磁性^[9]。在低牌号无取向硅钢的热轧过程中会发生奥氏体与铁素体之间的相变, 使热轧组织的形成过程更为复杂。奥氏体区热轧比奥氏体与铁素体两相区热轧有利于获得较粗大的热轧组织, 因而高温热轧和热轧板高温退火配合可以促进成品有利织构的形成, 降低铁损并提高磁感应强度^[10]。热轧板晶粒尺寸对无取向硅钢的织构和磁性能有显著的影响。增加热轧板晶粒尺寸降低了成品退火时的形核率并导致成品晶粒尺寸增大, 促使冷轧变形过程中形成更多的剪切带, 促进成品退火时形成高斯织构和降低 γ 纤维织构的强度, 并最终导致磁性能提高^[11]。

1.5.6 常化

大于 2% Si 钢采用一次冷轧工艺时, 热轧板必须常化, 主要目的是使热轧板组织更均匀, 使再结晶晶粒增多, 防止瓦状缺陷。同时使晶粒和析出物粗化, 加强 (100) 和 (110) 组分以及减弱 (111) 组分, 磁性明显提高, 特别是 B_{50} 值。一般常化制度是 $(800 \sim 1000)^{\circ}\text{C} \times (2 \sim 5)\text{min}$ 。钢中原始含碳量高, 常化时还可脱碳。热轧板常化温度升高, 冷轧板退火后的再结晶晶粒也增大, 对磁性有利的高斯织构组分增强, 铁损降低, 磁感应强度上升。但当温度超过 1000℃ 时, 由于固溶相的弥散析出, 阻碍了成品再结晶晶粒的长大, 晶粒反而细化, 铁损增加^[12]。在冷轧无取向硅钢薄带生产过程中, 常化工艺