

卢凤喜 王 浩 刘国权 编著

国外冷轧硅钢生产技术

GUOWAI LENGZHA GUIGANG SHENGCHAN JISHU



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

. 013033855

TG142.21
02

国外冷轧硅钢生产技术

卢凤喜 王浩 刘国权 编著



TG142.21
02

北京
冶金工业出版社
2013



228888810

内 容 简 介

硅钢板的制造技术和产品质量已成为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。本书对国外诸多硅钢专利进行了解析,以成分、工艺、组织、性能为主线,介绍了国外冷轧硅钢的先进生产技术,旨在为硅钢生产技术人员提供一定的技术支持和帮助,启发他们的思路,协助他们更好地解决硅钢生产中遇到的实际问题。

本书可作为从事硅钢生产、研究的技术人员的参考用书,也可作为大中院校冶金和材料相关专业师生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

国外冷轧硅钢生产技术/卢凤喜,王浩,刘国权编著. —北京:
冶金工业出版社, 2013. 3

ISBN 978-7-5024-6157-7

I. ①国… II. ①卢… ②王… ③刘… III. ①冷轧硅钢—
生产技术—介绍—国外 IV. ①TG142. 21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 041295 号

出 版 人 谭学余

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 常国平 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 王贺兰 责任印制 张祺鑫

ISBN 978-7-5024-6157-7

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 北京印刷一厂印刷

2013 年 3 月第 1 版, 2013 年 3 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 24 印张; 580 千字; 374 页

79.00 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

硅钢是在工业纯铁基础上发展起来的一类铁硅二元合金，是电力、电子和军事工业不可缺少的重要软磁合金，占磁性材料总量的90%~95%。硅钢也是产量最大的金属功能材料，主要用作各种电动机、发电机和变压器的铁芯。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，被视为企业的生命。硅钢板的制造技术和产品质量已成为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。

新开发某一硅钢产品，主要通过调整成分和工艺来获得理想的组织和最终产品性能。本书从成分和工艺两方面入手，通过对国外诸多硅钢专利的解析，介绍了国外冷轧硅钢的先进生产技术，旨在为硅钢生产人员提供一定的技术支持和帮助，启发他们的思路，协助他们更好地解决硅钢生产中遇到的实际问题。因此，本书主要适用于硅钢生产的技术工作者。

全书主要按硅钢生产的工序排列撰写，引用文献截至2009年。全书共分7章，第3.2节由卢鹏编写，第5.2节由姚昌国编写，第6.3节由王爱华编写，其余由卢凤喜、王浩、刘国权编写。全书由卢凤喜、王浩与刘国权共同统稿。

在编写过程中，自始至终得到方泽民、黎世德、裴大荣、陈卓、张新仁、谢晓心等专家学者的指导和支持。湛剑提供了有关硅钢的许多数据，在此，一并表示衷心感谢。

由于编者水平所限，书中难免会有疏漏或错误之处，敬请读者批评指正。

编 者
2012年12月

冶金工业出版社部分图书推荐

书 名	定价(元)
特殊钢丛书	
电工钢	125.00
钢铁结构材料的功能化	139.00
中国 600℃ 火电机组锅炉钢进展	69.00
现代电炉炼钢工艺及装备	56.00
无取向硅钢的织构与磁性	36.00
机械装备失效分析	180.00
高强度紧固件用钢	65.00
模具钢	28.00
合金结构钢	34.00
微合金非调质钢	28.00
特殊钢钢丝	59.00
铁素体不锈钢	79.00
先进钢铁材料技术丛书	
钢的微观组织图像精选	60.00
建筑用钢	115.00
钢铁材料中的第二相	75.00
双相钢——物理和力学冶金(第2版)	79.00
钢中非金属夹杂物	150.00
钢中夹杂物与钢的性能及断裂	99.00



目 录

1 硅钢生产概况	1
1.1 硅钢简介	1
1.1.1 硅钢的发展历程	2
1.1.2 硅钢的性质	3
1.1.3 硅钢的使用性能	6
1.2 硅钢连铸薄板坯生产	7
1.2.1 薄板坯连铸连轧工艺	7
1.2.2 用薄板坯生产高磁性硅钢的技术特点	9
1.2.3 用薄板坯生产高磁性硅钢的生产工艺	11
1.3 硅钢连铸薄带坯生产	16
1.3.1 用连铸薄带方法生产无取向硅钢板	16
1.3.2 双辊连铸硅钢薄带	21
2 硅钢热轧生产技术	24
2.1 低温、中温板坯加热	24
2.1.1 降低取向硅钢板坯加热温度的措施	24
2.1.2 中温板坯加热	34
2.2 高温板坯加热	34
2.2.1 加热炉温度控制	35
2.2.2 连续热轧设备系统	37
2.2.3 电磁感应加热系统及工艺	38
2.2.4 高温板坯加热条件	39
2.2.5 高磁感取向硅钢高温加热热轧	40
2.3 热轧边裂问题	41
2.3.1 边裂的影响因素	41
2.3.2 边裂的控制措施	44
2.3.3 表面缺陷控制措施	57
2.3.4 川崎热轧板边裂解决方法	69
2.4 无抑制剂取向硅钢生产技术	75
2.4.1 无抑制剂生产取向硅钢的原理	75
2.4.2 钢板成分及工艺要求	80

2.4.3 薄膜附着性	83
3 硅钢冷轧及退火	89
3.1 冷轧	89
3.1.1 一次冷轧	89
3.1.2 冷连轧	89
3.2 快速加热和脱碳退火	93
3.2.1 快速加热和脱碳退火的原理和作用	93
3.2.2 退火设备及工艺	95
3.2.3 退火过程的影响因素	107
3.2.4 其他退火相关问题	112
4 MgO 涂层、最终高温退火及绝缘涂层	121
4.1 MgO 涂层	121
4.1.1 MgO 涂层质量	121
4.1.2 改善薄膜涂层反应性	122
4.1.3 MgO 中添加不同元素和化合物	125
4.2 最终高温退火	130
4.2.1 稳定高生产率的生产技术	131
4.2.2 防止最终高温退火塌卷和底部变形	138
4.2.3 改善退火隔离剂及其涂布方法	140
4.3 绝缘涂层	149
4.3.1 绝缘薄膜涂层形成方法	150
4.3.2 新日铁改善绝缘薄膜涂层质量的方法	150
4.3.3 绝缘涂层对磁性的影响	152
5 高磁感 Hi-B 取向硅钢生产技术	160
5.1 细化磁畴、降低铁损	160
5.1.1 机械刻痕	160
5.1.2 激光处理	163
5.1.3 蚀刻处理	169
5.2 国外高磁感取向硅钢的生产	171
5.2.1 日本技术简介	171
5.2.2 韩国浦项的生产技术	185
5.2.3 德国蒂森克虏伯公司的生产技术	188
5.2.4 美国 AK 钢铁公司的生产技术	192
5.2.5 国内主要变压器厂高磁感取向硅钢使用情况	193
5.2.6 JFE、新日铁、浦项、俄罗斯质保书举例	196

6 高速高效硅钢生产技术	202
6.1 高牌号无取向硅钢的生产	202
6.1.1 高牌号无取向硅钢生产概况	202
6.1.2 高效酸洗	206
6.1.3 纵横方向磁性平衡问题	208
6.1.4 高强高频无取向硅钢	210
6.2 中低牌号无取向硅钢板的生产	212
6.2.1 小型电动机用无取向硅钢板	212
6.2.2 汽车电子部件用硅钢板	214
6.2.3 开发电动汽车驱动电机用硅钢板	221
6.3 半工艺无取向硅钢的生产	226
6.3.1 半工艺无取向硅钢的生产特点	226
6.3.2 低铁损半工艺无取向硅钢的生产	231
6.3.3 高强度无取向硅钢的生产	233
6.3.4 低噪声无取向硅钢的生产	235
6.3.5 高磁感无取向硅钢板的生产	238
6.3.6 加工性好的无取向硅钢板的生产	244
6.3.7 铁损与磁感	245
6.4 6.5% 硅钢轧制生产	246
6.4.1 6.5% 硅钢的主要特性	246
6.4.2 JFE 超级铁芯的应用	249
6.4.3 日本 JFE 典型工艺及生产状况	252
6.5 高成材率生产方法	257
6.5.1 浦项取向硅钢生产方法	257
6.5.2 川崎取向硅钢生产方法	262
6.5.3 川崎高磁感硅钢生产方法	264
6.5.4 无取向硅钢高成材率	270
6.5.5 新日铁取向硅钢生产方法	274
6.6 无取向硅钢高效生产方法	281
6.6.1 川崎无取向硅钢生产方法	281
6.6.2 35W210 无取向硅钢片生产方法	289
6.6.3 提高剪裁性的措施	292
6.6.4 添加铈对无取向硅钢的影响	298
7 薄规格硅钢的生产技术	304
7.1 新日铁的薄规格硅钢生产技术	304
7.1.1 0.15mm 以下薄材生产技术	304
7.1.2 添加铈的薄规格硅钢生产技术	321

7.1.3 低温板坯加热生产薄规格硅钢技术	324
7.2 JFE (川崎、日本钢管) 的薄规格硅钢生产技术	326
7.2.1 具有优良表面性能的含钼薄规格硅钢	326
7.2.2 脱碳退火改善薄规格硅钢涂层特性的生产技术	330
7.2.3 超低铁损薄规格取向硅钢板的生产技术	333
7.2.4 磁性稳定的薄规格取向硅钢板的生产技术	339
7.2.5 净化退火短时间、低成本生产取向硅钢技术	344
7.3 浦项的薄规格硅钢生产技术	350
7.3.1 硫偏析问题及解决方案	350
7.3.2 低温板坯加热生产高磁感取向硅钢板技术	352
7.3.3 氢对薄规格 3% Si-Fe 择优长大和磁感的影响	356
参考文献	359

1 硅钢生产概况

1.1 硅钢简介

硅钢是在工业纯铁基础上发展起来的一类铁硅二元合金，它是电力、电子和军事工业不可缺少的重要软磁合金，占磁性材料总量的 90% ~ 95%，也是产量最大的金属功能材料，主要用于制作各种电动机、发电机和变压器的铁芯。

硅钢在电工用钢中占有极为重要的地位，是发展电力和电信工业的基础材料之一。硅钢的需求量与电能消耗量、国民生产总值、发电量的增长率均成正比。硅钢的生产工艺复杂、制造技术严格，国外的硅钢生产技术都以专利形式加以保护，被视为企业的生命。据《中国材料工程大典》记载，若按发电量计算，每增加 $100\text{kW} \cdot \text{h}$ 电能就需相应增加 1kg 硅钢片用以制造发电机、电动机和变压器。因此，硅钢是国民经济中不可缺少的主要材料。硅钢板的制造技术和产品质量已成为衡量一个国家特殊钢生产技术和科技发展水平的重要标志之一。

根据生产工艺，硅钢片可分为热轧硅钢片和冷轧硅钢片：

(1) 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 $800 \sim 850^\circ\text{C}$ 退火后制成。热轧硅钢片主要用于发电机的制造，所以又称为热轧电机硅钢片，但其可利用率低、能量损耗大，近年相关部门已强烈要求淘汰。

(2) 冷轧硅钢片包括冷轧无取向硅钢片、冷轧取向硅钢片和高磁感冷轧取向硅钢片。

1) 冷轧无取向硅钢片最主要的用途是用于发电机制造，所以又称为冷轧电机硅钢片。其硅含量为 0.5% ~ 3.0%，经冷轧至成品厚度，供货多为 0.35mm 和 0.5mm 厚的钢带。冷轧无取向硅钢片的饱和磁感应强度 B_s 高于取向硅钢；与热轧硅钢片相比，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。

2) 冷轧取向硅钢片最主要的用途是用于变压器制造，所以又称为冷轧变压器硅钢片。与冷轧无取向硅钢相比，冷轧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。冷轧取向硅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，磁导率为热轧硅钢带的 2.5 倍。

3) 高磁感冷轧取向硅钢片都为单取向钢片，主要用于电信与仪表工业中的各种变压器、扼流圈等电磁元件的制造。其应用场合有两个主要特点：一个特点是小电流，即弱磁场条件下，要求材料在弱磁场范围内具有高的磁性能，即高的 μ_0 值和高的 B 值；另一个特点是使用频率高，通常都在 400Hz 以上，甚至高达 2MHz。为减小涡流损耗和交变磁场下的有效磁导率，一般使用 0.05 ~ 0.20mm 的薄带。

表 1-1 总结了硅钢的不同分类方法。其中，无取向硅钢片的产量约占硅钢总产量的 80%，采用热轧和冷轧两种工艺均可生产。相对于热轧无取向硅钢片，冷轧无取向硅钢片具有磁感应强度高、铁损低、冲剪加工性能及表面质量好等诸多优点，所以冷轧无取向硅

钢片已逐步取代热轧硅钢片。晶粒取向硅钢片则均为冷轧硅钢片。

表 1-1 硅钢的分类

分类依据	硅 钢 类 别		
化学成分	低硅钢: $w(\text{Si}) = 0.8\% \sim 1.8\%$	中硅钢: $w(\text{Si}) = 1.8\% \sim 2.8\%$	高硅钢: $w(\text{Si}) = 3.8\% \sim 7.0\%$
生产工艺	冷 轧 硅 钢		热 轧 硅 钢
组织结构	无取向硅钢:热轧硅钢、冷轧无取向硅钢		晶粒取向硅钢:普通取向硅钢、高磁感取向硅钢
产品厚度	一般硅钢片:常用厚度为 $0.3 \sim 0.5\text{mm}$		薄硅钢片(冷轧):厚度为 $0.025 \sim 0.2\text{mm}$
用 途	电机(发电机、电动机)用硅钢片		变压器(电力工业、电信工业等)用硅钢片

下面简述一下硅钢的发展历程、性质和使用性能^[1]。

1.1.1 硅钢的发展历程

1.1.1.1 热轧硅钢

普通热轧低碳钢板是工业上应用最早的铁芯软磁材料。1886 年,美国西屋(Westinghouse)电器公司开始用热轧低碳钢板制作变压器叠片铁芯;到 1890 年,0.35mm 厚的热轧低碳钢板已广泛用于制造电机和变压器。这类低碳钢电阻率低,铁芯损耗大,磁时效严重。

1882 年,英国哈德菲尔特开始研究硅钢。1903 年,美国和德国开始生产热轧硅钢片,钢中碳的质量分数从 0.2% 逐渐降到 0.1% 以下,硅的质量分数逐步提高到 4.5%,磁性进一步提高。1905 年,美国已大量生产硅钢,硅钢在很短时间内全面取代了普通低碳钢板来制造电机和变压器。1906~1930 年,这一阶段是生产厂与用户对热轧钢板成本、性能和电机、变压器设计制造改革方面统一认识、改进产品质量和提高产量的阶段。

1.1.1.2 冷轧硅钢

1930 年,美国人高斯(N. P. Goss)研制冷轧取向硅钢取得成功。1934 年,高斯采用两次冷轧和退火工艺制成磁性沿轧制方向较高的硅钢,其硅的质量分数约为 3%。1935 年,美国阿姆柯(Armco)公司开始按高斯专利生产冷轧硅钢,后用 X 射线检查证实这种材料具有 $\{110\}\langle 100 \rangle$ 织构,其 $\{110\}$ 晶面平行于轧制平面,易磁化方向 $\langle 100 \rangle$ 晶向平行于轧制方向。这种硅钢沿轧制方向磁化时磁性高,而横向较难磁化,所以被称为单取向硅钢或高斯取向硅钢。此后,美国长期垄断了冷轧取向硅钢的市场,至 20 世纪 50 年代,主要工业发达国家陆续引进阿姆柯专利。

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,硅钢中的有害元素碳、氮和氧的质量分数均可降到 0.005% 以下,磁时效明显减轻,磁性也大幅度提高。

1.1.1.3 高磁感取向硅钢

1953 年,日本新日铁的田口悟等发现硅的质量分数为 3% 的硅钢按照某种特定工艺生产可获得更为优异的晶粒取向度和磁性,这种工艺被命名为 Hi-B 生产工艺,并于 1961 年引进美国阿姆柯专利的基础上开始试生产含有 $\text{AlN} + \text{MnS}$ 有利夹杂物的高磁性的取向硅钢。之后,又通过控制硅钢晶粒的 $[001]$ 方向与钢带轧向仅有 $2^\circ \sim 3^\circ$ 的偏离以及细化磁畴、降低铁损等措施,使 Hi-B 硅钢性能进一步提高。此后,1968 年,新日铁正式生产

Z8H 牌号硅钢, Hi-B 硅钢生产专利先后卖给美国、联邦德国、中国、比利时、法国、英国等国家。1979 年, 新日铁又开始生产厚度为 0.27mm 的 Z6H 牌号的 Hi-B 硅钢。日本在 1961 年引进美国阿姆柯专利的基础上用了 15 年时间研制新工艺, 开发出了 Hi-B 专利, 在冷轧电工钢产品质量、制造技术和装备、开发新产品和新技术、科研及测试技术等各方面都超过了美国, 在世界上处于绝对领先的地位。

1.1.1.4 冷轧无取向硅钢

在冷轧无取向硅钢方面, 从 1978 年川崎和新日铁公司采用顶底复吹转炉和三次脱硫工艺冶炼出杂质质量分数极低的纯净钢水后, 陆续生产出 H8(RM8) 和 H7(RM7) 高牌号含硅 3% 的无取向硅钢。随后又生产出 NC-M3 和 NC-M4 更高牌号的无取向硅钢, 基本解决了无取向硅钢铁损与磁感应强度这两个参数相互矛盾的问题。

目前, 我国是主要工业国家中为数不多的仍使用热轧硅钢片的国家之一, 这严重制约着我国机电工业的发展, 增加了能源消耗。硅钢的“以冷代热”是一个国家建立起强大电力工业、机械制造业和现代化冶金工业的重要标志, 其优点包括^[1]:

(1) 提高社会资源的利用。用热轧硅钢片生产铁芯, 成材率仅为 75% ~ 78%; 而使用相应牌号的冷轧硅钢片生产铁芯成材率约为 90%, 加工过程中金属消耗可减少 15%, 大大提高了资源利用率。

(2) 使用成卷的冷轧硅钢片可使铁芯制造过程实现高速化、连续化, 并提高劳动生产率, 在中小型、微型电机制造行业, 特别是家用电器电机制造行业效果更为明显。

(3) 淘汰热轧硅钢片, 可以消除其生产过程中产生的沥青、油烟等污染, 将操作工人从高温、高劳动强度中解放出来。

(4) 大幅度减少社会能源消耗。用冷轧硅钢取代热轧硅钢制造电机, 每 10kt 材料每年节电约 1 亿度, 折合标煤约 40kt, 并能减少 CO₂、SO₂ 等有害气体的排放, 减轻对环境的污染。

1.1.2 硅钢的性质

工业纯铁 (Armco 铁) 中铁的质量分数为 99.6% ~ 99.8%, 纯铁 (氢气净化铁、碳基和电解铁) 中铁的质量分数为 99.9%, 高纯铁 (区域提纯铁) 中铁的质量分数不小于 99.99%, 其主要杂质元素为碳、硫、氧、氮、磷、硅和锰。

1.1.2.1 铁和铁硅合金的特性

铁的居里温度 A_2 为 770℃。纯铁 $\alpha \rightarrow \gamma$ 相变温度 A_3 为 910℃, $\gamma \rightarrow \delta$ 相变温度 A_4 为 1400℃。铁硅二元系相图如图 1-1 所示。硅在钢中为封闭奥氏体相区元素、非碳化物形成的元素。铁硅二元系中硅的质量分数增加, A_3 点温度升高, A_4 点温度下降。硅的质量分数超过 2.5% 时, 奥氏体区封闭消失, 即不发生 $\alpha \rightarrow \gamma$ 相变; 硅的质量分数超过 4.5% 时, 出现有序相 Fe₃Si 和 FeSi。

1.1.2.2 碳元素对硅铁相图的影响

碳元素对硅铁相图的影响如图 1-2 所示。铁硅合金中少量的碳能明显扩大 $\alpha + \gamma$ 两相区。碳的质量分数小于 0.025% 的 3.25% 铁硅合金在任何温度下都为单一的 α 相, 不会发生相变。因此, 可采用高温退火发生二次再结晶、制造取向硅钢和高牌号无取向硅钢。

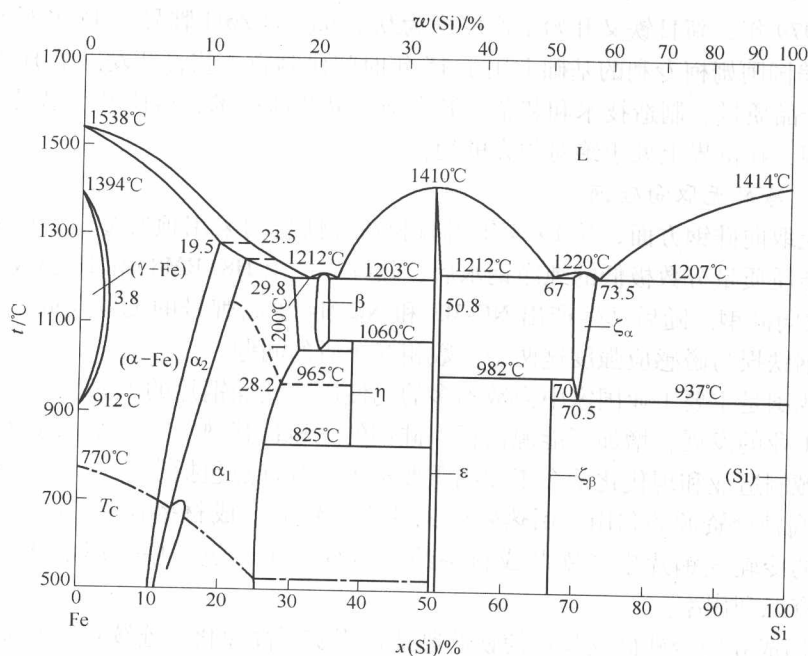


图 1-1 铁硅二元系相图

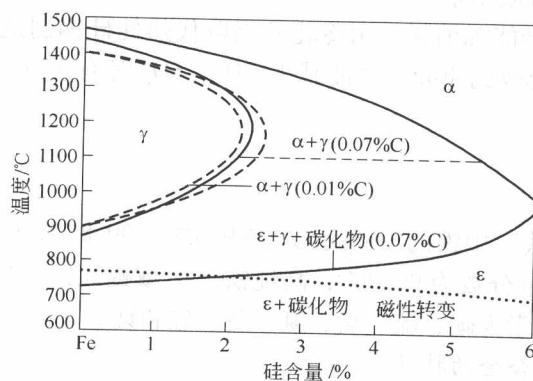


图 1-2 碳元素对硅铁相图的影响

1.1.2.3 硅钢的主要物理性质

A 密度

高纯铁的点阵常数为 28.664nm ，密度为 7.865g/cm^3 。硅的质量分数增高，铁的点阵常数和密度减小。在硅的质量分数为 5% 附近产生 Fe_3Si 有序转变，点阵常数和密度有转折点，如图 1-3 所示。硅钢的实际密度 (g/cm^3) 与硅和铝的质量分数有关，可按下列经验公式计算：

$$\rho = 7.865 - 0.065[w(\text{Si}) + 1.7w(\text{Al})]$$

B 电阻率

高纯铁的电阻率 $\rho_0 = 10.1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ，工业纯铁 $\rho_0 = 12 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ 。硅铁合金的电阻率是各向同性的。硅钢的电阻率与硅和铝的质量分数有关，可按经验公式 $\rho_0 = 12 + 11w(\text{Si})$ 或 $\rho_0 = 13.25 + 11.3w(\text{Si} + \text{Al})$ 计算。硅钢中硅的质量分数对其电阻率和其他固有物理性质的影响如图 1-4 所示。

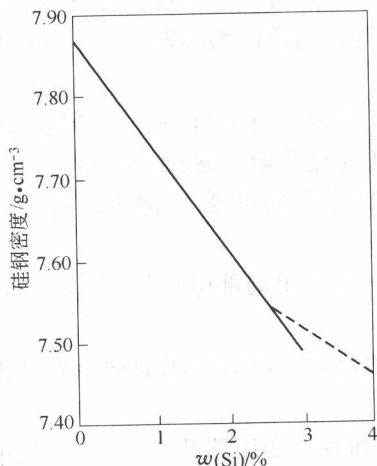


图 1-3 硅质量分数与硅钢密度的关系

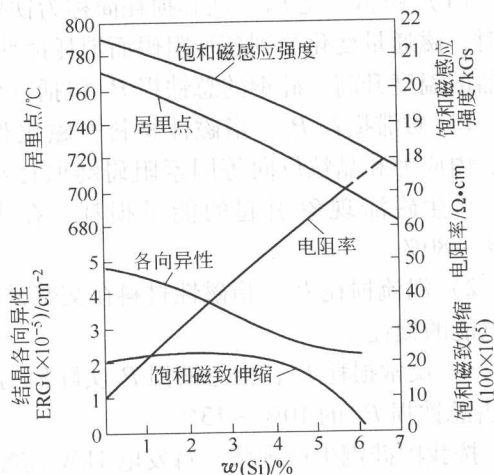


图 1-4 硅的质量分数对硅磁性等物理性质的影响

1.1.2.4 硅钢的主要力学性能

铁的弹性模量 E 和切变模量 G 为各向异性， $[111]$ 晶向的 E 值比 $[100]$ 晶向 E 值约大 1 倍。硅钢的屈服强度 R_m 和抗拉强度 R_{cl} 随硅的质量分数增加而增大。如图 1-5 所示，在硅的质量分数为 3.5% ~ 4.5% 处达到最大值。硅的质量分数大于 2.5% 时，伸长率 δ 和断面收缩率 ψ 急剧下降。硅的质量分数大于 4.5% 时，屈服强度和抗拉强度也急剧下降，伸长率和断面收缩率迅速降为零。

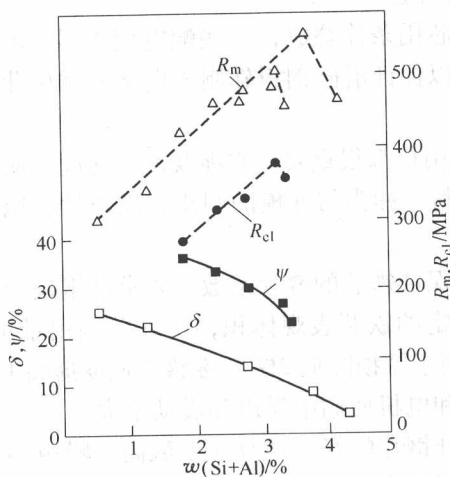


图 1-5 $w(\text{Si} + \text{Al})$ 对硅钢力学性能的影响

硅钢的硬度随硅的质量分数增加而增高，如图 1-6 所示。硅的质量分数大于 4.5% 的硅钢既硬又脆，不能进行冷加工，这是热轧硅钢

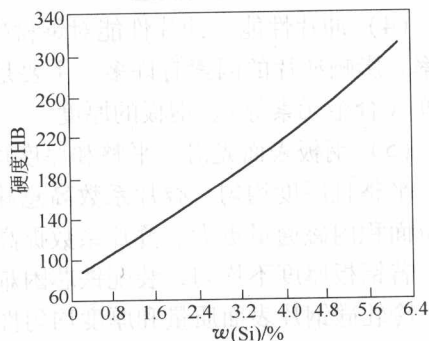


图 1-6 硅钢中硅的质量分数对其硬度的影响

板硅的质量分数上限设定为 4.5%，而冷轧硅钢硅的质量分数上限设定为 3.3% 的重要原因。

1.1.3 硅钢的使用性能

硅钢的使用性能包括电磁性能和工艺性能等多项指标，主要有：

(1) 铁芯损耗 P_T 。铁芯损耗简称为铁损，其单位为 W/kg ，是指铁芯于交变磁场中磁化时，磁通量变化受到各种阻碍而消耗掉部分电能。这种损耗使铁芯发热，引起电机和变压器的温度升高。硅钢的总铁损 P_T 包括三部分：

1) 磁滞损耗 P_h ，指磁性材料在磁化和反磁化过程中，由于材料中夹杂物、晶体缺陷、内应力和晶粒位向等因素阻碍畴壁移动，使磁通变化受阻，磁感应强度落后磁场强度，产生磁滞现象引起的能量损耗。在中低牌号的无取向低碳硅钢中， P_h 占 P_T 的 75% ~ 80%。

2) 涡流损耗 P_e ，指磁性材料在交变磁化过程中，感生出局部电动势而引起涡流所造成电能的损耗。

3) 反常损耗 P_a ，指总铁损 P_T 实际值与 $P_h + P_e$ 值之差。高牌号无取向冷轧硅钢中的 P_a 占总铁损 P_T 的 10% ~ 13%。

按我国硅钢生产现状，每发电 1kW 需配备发电机和各种变压器共 $9kV \cdot A$ ，其中变压器用钢占全部电工材料的 20% ~ 30%。若用 100kt 冷轧硅钢代替热轧硅钢生产变压器，每年可节约约 $2 \times 10^8 kW \cdot h$ ，相当于 $2.34 \times 10^5 kW$ 发电机全年的发电量总和。

(2) 磁感应强度 B 。磁感应强度是铁芯单位截面面积上通过的磁力线数，也称为磁通密度，代表材料的磁化能力，单位为 T。使用磁感应强度高的硅钢片，铁芯质量可相应减少。一般变压器铁芯约占设备总质量的 1/3 ~ 1/2。冷轧硅钢片的磁感应强度比热轧硅钢片的高 20% ~ 30%，变压器铁芯体积和质量也相应减少 30%。

(3) 磁各向异性。电机转子在运转状态下工作，铁芯是用带齿圆形冲片叠成的定子和转子组成的，要求硅钢板为磁各向同性，一般要求纵横向铁损差值小于 8%、磁感差值小于 10%，因此适合用无取向冷轧硅钢或热轧硅钢制造。

变压器在静止状态下工作，大中型变压器铁芯用条片叠成，一些配电变压器、电流和电压互感器以及脉冲变压器等用卷线铁芯制造，以保证沿硅钢板轧制方向下料和磁化，因此一般用冷轧取向硅钢制造。

(4) 冲片性能。冲片性能对钢材生产厂家和用户都很重要，它涉及冲片速度、质量和效率。影响冲片的因素有许多，主要是冲模的材料、冲头与冲模的间距、润滑性、钢板的硬度（合金元素等）、钢板的厚度。

(5) 钢板表面光滑、平整和厚度均匀。为了保证铁芯的叠片系数，要求硅钢板表面光滑、平整且厚度均匀。叠片系数高意味着对于一定的铁芯表观体积，实际硅钢用量更多、单位面积内磁通量更大。叠片系数提高 1%，相当于铁损降低 2%，磁感应强度提高 1%。

若钢板厚度不均匀，装配铁芯困难，变压器和电机使用中噪声和震动增大。

冷轧硅钢片表面质量和厚度均匀性都比热轧硅钢片的好，且叠片系数高、噪声和震动较小。例如，0.35mm 厚硅钢片的叠片系数，冷轧硅钢片为 97% ~ 98%，热轧硅钢片为 92% ~ 94%。

(6) 绝缘薄膜性。为防止铁芯叠片间短路而增大涡流损耗, 现代冷轧硅钢片表面涂有特殊性能的半有机绝缘膜。

(7) 磁时效效应。铁磁材料的磁性随使用时间而恶化的现象称为磁时效现象, 特别是当铁芯长期在 $50 \sim 80^{\circ}\text{C}$ 工作时, 磁时效效应更为明显。对磁时效影响最大的元素是钢中的碳和氧。

1.2 硅钢连铸薄板坯生产

薄板坯连铸连轧技术是 20 世纪 90 年代初开发成功的生产热轧板卷的一项短流程工艺, 是继氧气转炉炼钢、连续铸钢之后钢铁工业重要的革命性技术之一, 对产品的组织结构产生了显著影响, 进而导致了产品性能的优化。例如, 薄板坯连铸连轧技术由于快速冷却, 铸坯的偏析程度减小, 组织更均匀, 碳的偏析程度极大降低, 薄板坯原始的铸态组织晶粒比传统板坯更细、更均匀。在生产工序流程方面, 薄板坯连铸铸坯经均热炉均热后直接进入精轧机组, 与传统流程相比既节约了二次加热的能源, 又可以简化工序、提高生产效率。总的来讲, 薄板坯连铸连轧工艺具有铸态组织好、热轧组织均匀细小、温度均匀、节约能源及成材率高等一系列特点, 薄板坯连铸连轧技术也因此获得了快速发展。近些年国内外投产了多条薄板坯连铸连轧机组, 已经能够稳定生产普通商用级及部分结构用、冲压用冷轧和镀锌等产品。据资料报道, 国内外利用薄板坯连铸连轧生产硅钢的厂家有美国的 Nucor Crawfordsville、意大利的 AST、德国的 TKS、墨西哥的 Hylsa、西班牙的 ACB 以及中国的本溪钢铁公司等, 其中只有 TKS 和 AST 实现了薄板坯连铸连轧批量生产电工钢产品, 生产的主要是中低牌号的无取向硅钢。

1.2.1 薄板坯连铸连轧工艺

薄板坯连铸连轧工艺包括连铸、均热、热轧、层流冷却和卷取。典型的薄板坯连铸连轧工艺有: CSP (compact strip production); ISP (inline strip production); FTSRQ (flexible thin slab rolling for quality); TSP (tippins samsung proces)。薄板坯连铸连轧工艺的技术特征是: 最大限度的短流程、最有效的节能和最均匀的薄板坯温度, 其主要技术特点如下:

- (1) 流程短, 设备少, 投资小, 工艺简单, 不设粗轧机;
- (2) 生产周期短, 从炼钢到生产出钢卷大约 1.5h, 实现低成本生产;
- (3) 成材率较高, 与普通生产工艺相比, 成材率提高约 10% 以上;
- (4) 产品质量高, 由于薄板坯的冷却速度远大于普通厚板坯的冷却速度, 因此可降低二次枝晶的间距, 减少枝晶间的偏析。冷却速度越大, 铸态晶粒越小, 可有效地改善枝晶组织、微观偏析和析出相。

铸造出的薄板坯不需再加热而直接进入 4 机架以上的精轧机进行精轧, 生产成热轧板。通过全工序精确的工艺控制, 加快运行节奏, 可得到最佳温度状态, 实现节能。

我国马钢和武钢已经引入了 CSP 装备用来生产硅钢。CSP 的主要工艺流程大致为转炉—钢包精炼炉—薄板坯连铸机—均热炉—热连轧机—层流冷却—卷取。从连铸机拉出的板坯厚度为 $50 \sim 90\text{mm}$, 经过多机架精轧机, 可轧成厚度为 $0.8 \sim 18\text{mm}$ 的热轧板。图 1-7 所示为 CSP 装置示意图^[2]。

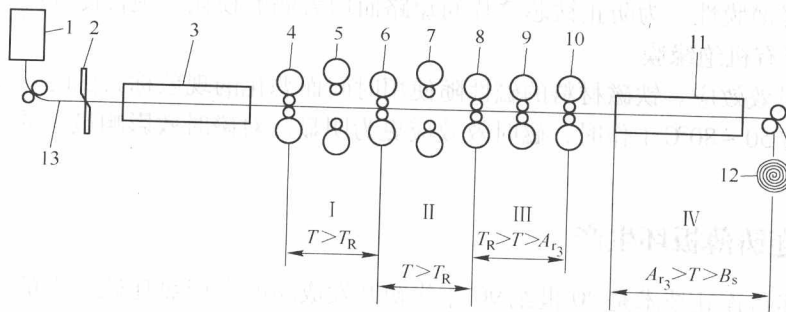


图 1-7 CSP 装置示意图

1—连铸机；2—板坯剪切机；3—均热炉；4—对板坯变形的第一机架轧机，压下率为 50%，变形温度为 1080℃；5—第二机架轧机，也是传动轧机；6—第三机架轧机，是对板坯变形的第二轧机，压下率为 40%、变形温度为 1030℃；7—第四机架轧机，也是传动轧机；8—第五机架轧机，是对板坯变形的第三轧机，压下率为 30%、变形温度为 900℃；9—第六机架轧机，是对板坯变形的第四轧机，压下率为 25%、变形温度为 840℃；10—第七机架轧机，是对板坯变形的第五轧机，压下率为 15%、变形温度为 800℃；11—层流冷却，冷却到 600℃，即刻卷取；12—地下卷取机；13—板坯；

I—第一次轧制变形与第二次轧制变形的时间周期，在此期间形成初次再结晶，在此期间的温度 T 要高于该钢所测定的 T_R 温度；II—第二次轧制变形与第三次轧制变形的时间周期，在此期间形成二次再结晶，在此期间的温度 T 要高于该钢所测定的 T_R 温度；III—第三次轧制变形与奥氏体固化的时间周期，在此期间的温度 T 要控制在小于 T_R 温度，但大于 A_{r3} 温度；

IV—最终变形之后的冷却与多晶形转变之间的时间周期，在此期间的温度 T 要控制在小于 A_{r3} 温度，但大于 B_s 温度

CSP 工艺流程生产无取向硅钢具有如下优势：

(1) 节能、成材率高。薄板坯连铸后的板料在 1000℃ 左右，采用热送热装，装入加热炉，省略了板坯冷却下来再加热的过程，减少了切边量，提高了成材率。

(2) 温度均匀。CSP 在轧制过程中温度均匀，出炉后的薄板坯与空气接触时间短，不容易被氧化，产生的氧化铁皮少。并且，CSP 在连轧前采用辊底式隧道炉，坯头、坯尾温差小，最终切头、切尾也少。

(3) 热轧组织均匀。由于冷却速度大，CSP 铸坯组织微观偏析小，热轧板的组织均匀。

此外，CSP 铸态组织好，尤其是在高硅和低碳的硅钢中，连轧几乎不发生铁素体→奥氏体相变。硅的质量分数在 2% ~ 4% 上部的铁素体在 1380 ~ 1270℃ 变化；最左侧的单一奥氏体在 890 ~ 1440℃ 变化，中间部分是奥氏体 + 铁素体双相区域，温度在 740 ~ 1450℃ 变化，超过 6% Si-Fe 为单一铁素体区域。

通过快速冷却，钢液的快凝增加了形核的过冷度，使临界晶核尺寸减小，形核率和生长速度随着过冷度的增大而增大，因此细化了晶粒组织。CSP 生产无取向硅钢的热轧板组织为等轴晶铁素体，等轴晶尺寸为 30μm 左右，热轧板中发现大量的链条状夹杂物。

相对于 CSP 生产工艺，无取向硅钢的传统生产工艺大致为：首先制造成板坯，然后加热，进行热轧，经历铁素体相区向奥氏体相区转变和奥氏体相区向铁素体相区转变的相变过程。在炼钢炉中倒入高炉炼铁脱硫后的铁水→冶炼→真空处理→连铸→电磁搅拌→热连