

◀ 变压器制造技术丛书 ▶

变压器铁心制造工艺

变压器制造技术丛书编审委员会 编

机械工业出版社

变压器制造技术丛书

变压器铁心制造工艺

变压器制造技术丛书编审委员会 编



机械工业出版社

变压器铁心是变压器的核心，它的制造质量直接影响到变压器的技术性能、经济指标和运行的安全可靠程度，因此它的制造技术和质量控制十分重要。

本书共分六章：第一章 变压器铁心制造的基本知识；第二章 铁心片的制造；第三章 铁心卷制成形处理；第四章 铁心的结构；第五章 铁心的选片和叠装；第六章 国内外铁心制造“四新”成果简介。附录中列出了国内外硅钢片和非晶合金材料的常用牌号、性能和参数，以供查阅。

本书可供从事变压器制造的工程技术人员及操作工人阅读，也可供从事变压器工厂设计人员和大专院校有关专业的师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

变压器铁心制造工艺/变压器制造技术丛书编审委员会

编. —北京：机械工业出版社，1998. 4

(变压器制造技术丛书)

ISBN 7-111-06077-6

I. 变… II. 变… III. 变压器-铁心-生产工艺 IV. TM4
05

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 01353 号

出版人：马九荣 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑：崔世荣 版式设计：张世琴 责任校对：张莉娟

封面设计：姚毅 责任印制：王国光

机械工业出版社京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1998 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·16.5 印张·395 千字

0 001—4000 册

定价：23.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

《变压器制造技术丛书》编审委员会名单

主 任	熊观银			
副 主 任	杨师和	邢瑞祥		
委 员	邢瑞祥	朱哲滨	钱敬明	魏春华
	杨师和	张金琢	王 勉	王显文
	熊观银	王承志	李宪霞	杭小民
主 编	魏春华	王显文	王承志	
本书编者	顾选能	汪蓓蓓		
本书审者	王显文			

EA001/00

前 言

《变压器制造技术丛书》是为适应变压器行业技术发展的迫切需要，满足变压器行业操作工人的专业培训和工程技术人员的业务学习参考要求，同时满足社会不同文化层次读者的需要，根据原国家机械委电器局制定的变压器行业《工人技术等级标准》和工程技术人员继续教育的要求，受全国变压器行业职工教育研究会的委托，由沈阳变压器有限责任公司、保定天威集团、西安变压器厂等单位组织有实践经验的工程技术人员，参照《变压器专业工种技术工人培训教材》（内部发行），结合目前国内外变压器发展的最新技术，对原书作了大量的删减、补充和修改后编写而成的。新编的《变压器制造技术丛书》共分八册：

- 第一册 绝缘材料与绝缘件制造工艺
- 第二册 变压器绕组制造工艺
- 第三册 变压器铁心制造工艺
- 第四册 变压器装配工艺
- 第五册 变压器处理工艺
- 第六册 变压器试验
- 第七册 变压器油箱制造工艺
- 第八册 干式变压器制造工艺

本套书以操作工人为主要读者对象，同时照顾工程技术人员继续教育的需要和全国变压器行业各厂家的通用性，内容从原 35~220kV 电力变压器，扩大为 35~500kV 的各类变压器，包括从小型配电变压器到大型五柱铁心变压器；从传统的常规心式变压器到性能较优越的壳式变压器。在技术水平方面，除介绍国际 80 年代水平的内容外，还考虑到今后的发展，介绍了一些具有 90 年代甚至跨世纪水平的最新技术，以满足不同读者的需要。

由于编著者来自不同工厂、不同岗位，因此在掌握内容的深度和广度上不尽相同，各册书之间的水平和尺度免不了有所差别，也免不了存在一些局限性和片面性，甚至有错误之处，恳请有关专家、学者和广大读者提出宝贵意见，以便今后再版时进一步完善。

由于各企业工艺条件不同，在制造方法上也不完全相同，本套书中所述的工艺方法、工艺参数及具体操作规定和要领仅供参考，望不要生搬硬套本套书内容并代替各厂现行技术文件。

在编写本套书过程中，承蒙机械工业部教育司、机械工业出版社和编写厂家所在省市的上级领导给予的大力支持和指导，在此表示感谢。对原《变压器专业工种技术工人培训教材》的组织者和全体作者，以及承担本套书编写任务的厂家和编印过程中做了大量工作的同志表示谢意。

变压器制造技术丛书编审委员会

1997 年 12 月

编者的话

变压器铁心是变压器的核心，它的制造质量直接影响到变压器的性能和运行的可靠性。本书较详细地介绍了铁心片加工和铁心的叠装所涉及到的基本理论和基础知识、加工方法、加工设备、操作要点、测量方法、质量控制和相应的具体措施。

本书共分六章：第一章介绍了变压器铁心片加工和铁心的叠装所涉及到的基本理论和基础知识；第二章介绍了铁心片加工工艺，包括剪切原理、纵剪和横剪生产线的组成、操作方法、精度调整以及硅钢片的绝缘、退火、压毛、涂漆和烘干；第三章介绍了卷制铁心的基本知识及其成形、退火、浸渍的方法、所用设备、质量要求和保证措施；第四章介绍了铁心的结构、种类、截面、绝缘与接地、温升与散热以及其他附件；第五章介绍了铁心的选片和叠装，详细介绍了铁心的叠片形式、各类叠片图、叠装工具、叠装方法、叠装质量的控制和检验以及质量问题的判断和处理；第六章简要介绍了国内外有关铁心制造方面“四新”成果的应用概况。

本书由顾选能主编。第一章由顾选能编写；第二章由汪蓓蓓和顾选能合编；第三章由顾选能编写；第四章和第五章由汪蓓蓓编写；第六章由顾选能编写。参加本书编写的还有北京变压器厂王从宁、陈孝慈，沈阳变压器厂赵卫赤等；保定变压器厂刘钰还为本书提供了有关非晶合金变压器的部分宝贵资料，韩钟、甘巍、邸双奎、王维征、尹晓南等协助编者做了大量工作，在此一并表示感谢。

由于编者水平所限，再加上时间仓促，错误在所难免，请读者和专家批评指正。

编者

1997年3月6日

目 录

前言

编者的话

第一章 变压器铁心制造的基本知识	1
第一节 硅钢片的化学成分、内部结构与电磁性能、物理力学性能的关系	1
第二节 国内外常用硅钢片的牌号、规格、性能及选用	4
第三节 新型导磁材料及其应用	6
第四节 变压器铁心的结构与片形	9
第五节 铁心填充系数、叠装系数和工艺系数的定义及计算方法	19
第六节 气动工作原理及其在冲剪设备上的应用	23
第七节 液压传动原理、系统组成和随动系统	27
第八节 脉冲数字电路及其应用	37
第九节 电子计算机及其在冲剪设备上的应用	45
第十节 冲模、刀具的材质及其选择原则	55
第十一节 刃磨和修磨用砂轮材质的种类和选择原则	58
第十二节 评定冲剪质量的指标及达标措施	60
复习思考题	62
第二章 铁心片的制造	63
第一节 冲剪的种类和定义	63
第二节 冲裁力和剪力的计算及加工设备的选择	64
第三节 纵剪	68
第四节 横剪	90
第五节 成卷硅钢片的套裁	136
第六节 冲剪质量的控制	137
第七节 硅钢片的表面绝缘和退火	145
第八节 硅钢片的压毛、涂漆和烘干	146
复习思考题	155
第三章 铁心卷制成形处理	156
第一节 铁心卷制成形处理的基本知识	156
第二节 硅钢片卷制成形	162
第三节 硅钢片退火	169
第四节 卷制铁心的浸渍与粘合	176
第五节 卷制铁心的切开	178
第六节 卷制铁心的应用现状和前景	180
复习思考题	180
第四章 铁心的结构	182

第一节	铁心的作用和分类	182
第二节	铁心的结构及典型结构件	186
第三节	铁心的温升与散热	199
第四节	铁心的其他附件	200
复习思考题		204
第五章 铁心的选片和叠装		206
第一节	铁心的叠片形式和叠片图	206
第二节	铁心叠装用的工装工具	210
第三节	铁心片的预叠	214
第四节	铁心的叠装	216
第五节	铁心叠装的质量和检验方法	225
第六节	铁心叠装的质量问题及故障	227
复习思考题		231
第六章 国内外铁心制造“四新”成果简介		232
第一节	激光技术及其在铁心制造中的应用	232
第二节	阶梯接缝及其应用	233
第三节	铁心自动叠装生产线	235
第四节	采用非晶合金制造变压器铁心	236
第五节	铁心片的专业化生产	242
附录		244
附录 A	无取向硅钢带(片)国内外标准对照	244
附录 B	取向硅钢带(片)国内外标准对照	245
附录 C	国产冷轧无取向硅钢带与热轧硅钢带的电磁性能对照	246
附录 D	国外冷轧取向硅钢带电磁性能	246
附录 E	日本取向硅钢带新旧牌号对照	247
附录 F	日本无取向硅钢带新旧牌号对照	247
附录 G	日本硅钢带的电磁性能及机械特性	248
附录 H	高导磁取向类与冷轧取向类硅钢片力学性能对照	248
附录 I	意大利冷轧取向硅钢带电磁性能	248
附录 J	前苏联冷轧取向硅钢带电磁性能	248
附录 K	国产取向钢电磁性能和工艺特性	249
附录 L	国产无取向钢电磁性能和工艺特性	250
附录 M	电信用冷轧取向硅钢带(片)的牌号及电磁性能	251
附录 N	国产冷轧取向硅钢带的典型电磁性能	251
附录 O	国产冷轧取向硅钢带的典型力学性能	251
附录 P	国产硅钢带(片)表面绝缘涂层特性	251
附录 Q	绝缘涂层的典型单面层间电阻值	252
附录 R	硅钢带(片)尺寸允许偏差	252
附录 S	各国硅钢片电磁性能比较	253
参考文献		253

第一章 变压器铁心制造的基本知识

第一节 硅钢片的化学成分、内部结构与电磁性能、物理力学性能的关系

一、硅钢片的化学成分及其与各种性能的关系

变压器的工作原理是基于电磁感应定律。图 1-1 所示为变压器的工作原理图。如给绕组 1 施以交变电压 U_1 ，则沿此绕组便产生交变电流，这个电流在变压器的铁心中建立交变磁通 Φ ，交链变压器的两个绕组，从而使两个绕组产生电磁耦合作用。磁通 Φ 随着时间作周期性变化时，绕组 1 中便感应出自感电动势，绕组 2 中则感应出互感电动势；如果绕组 2 接上任意受电器 3，则沿绕组 2 和受电器 3 所形成的电路(2→3)中通过电流，这就把绕组 1 所吸取的电能转换为受电器 3 中被利用的电能。

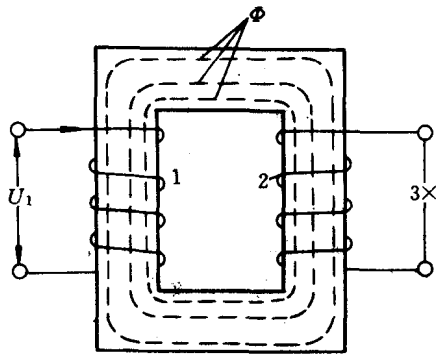


图 1-1 变压器的工作原理图

当绕组中的电流作周期性变化时，铁磁材料的磁偶极子的排列也随着作周期性变化，并产生磁滞现象，而磁滞现象所产生的损耗叫做磁滞损耗。由交变磁通在铁磁材料中形成的感应涡流所产生的损耗，叫做涡流损耗。铁磁材料在磁通变化时，总是要产生磁滞损耗和涡流损耗的，因而会发热。如果采用一般含碳、硫的普通薄铁板作铁心，则磁滞损耗很

大，且因电阻率小，也会产生较大的涡流。为了减少磁滞损耗和涡流损耗，1900 年出现了热轧硅钢片；1934 年出现了经多次冷轧退火，而且具有方向性的低损耗冷轧硅钢片；1968 年采用特殊无机绝缘涂层，得到了高导磁冷轧硅钢片和硅钢带。现代变压器的铁心就是采用这些冷轧硅钢片制成的。

1. 冷轧硅钢片的化学成分

冷轧硅钢片中的化学成分是质量分数分别为 3%~5% 的硅、0.06% 的碳、0.15% 的锰、0.03% 的磷、0.25% 的硫。铝的质量分数为硅的质量分数的 1.7 倍，其余为铁。这些元素在硅钢片中的作用是：

(1) 碳(C) 会增大钢板的磁滞损耗，故应尽量减少。

(2) 硅(Si) 可以减弱碳的不良作用，即减少磁滞损耗，同时又可提高磁导率和电阻率，延长因长期使用带来的磁性变坏的老化作用。

(3) 硫(S) 会使硅钢产生热脆，增加磁滞损耗，同时会导致晶粒细化，降低磁通密度。

(4) 锰(Mn) 能促使钢中产生相变，对脱碳和脱硫不利，因而导致磁通密度降低。

钢中存在的杂质元素都是非磁性或弱磁性物质，它们的存在，造成晶格歪扭、错位、空位和

内应力等,因而磁化困难。

2. 硅钢片的物理性能与硅含量的关系

硅钢片的物理性能和硅的质量分数之间的关系见表 1-1。

表 1-1 硅钢片的物理性能与硅的质量分数之间的关系

硅含量/ %	密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	热导率/ $\text{W} \cdot (\text{cm} \cdot \text{K})^{-1}$	电阻率/ $(\Omega \cdot \text{cm})^2 \cdot \text{m}^{-1} \text{①}$	电阻温度系数/ $^{\circ}\text{C}^{-1}$	比热容/ $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$
1	7.8	0.46	0.22	0.0025	0.1278
2	7.75	0.32	0.34	0.0015	—
3	7.65	0.25	0.46	0.0010	—
4	7.60	0.20	0.58	0.0008	0.1333

① $1\Omega \cdot \text{cm}^2/\text{m}=1.0 \times 10^{-4}\Omega \cdot \text{m}$ 。

二、硅钢片的类别和内部结构与各种性能的关系

硅钢片按硅含量的多少可分成四类:低硅钢(硅的质量分数为 0.8%~1.8%)、中硅钢(硅的质量分数为 1.8%~2.8%)、较高硅钢(硅的质量分数为 2.8%~3.8%)及高硅钢(硅的质量分数为 3.8%~4.8%)。

硅钢片按轧制方法,可分成热轧硅钢片和冷轧硅钢片两种。热轧硅钢片,是将含硅的钢材经热轧机和相应的热处理制成的一种硅钢片。采用热轧硅钢片叠装的铁心,磁通密度大于 1.45T 时,其空载损耗和空载电流明显增加。冷轧硅钢片,是由冷轧机制成的,它具有较小的单位损耗、较小的励磁容量和较高的磁通密度。允许设计的磁通密度高达 1.89T。

硅钢片按晶粒取向性可分成两大类:一类为取向硅钢片,它的结晶排列有一定规律和方向,见图 1-2;另一类为无取向硅钢片,它的结晶排列无一定规律,也无一定方向,见图 1-3。

从图 1-5 可知,在 $[100]$ 轴方向上磁通密度(又称磁感应强度) B 随着磁场强度 H 的变化能达到最大值,因此是磁化最容易的轴向。钢片的 $[110]$ 面与轧面、 $[100]$ 轴与轧向的偏离越小,取向度越高,产生的磁滞损耗越低。

研究指出:对硅钢片施加拉应力,往往在 90° 时磁畴减少,而在 180° 时磁畴增加,这种磁畴结构的改变会使铁损减少。同样,取向性好的材料,其磁致伸缩要比取向性差的硅钢片小得多。而磁致伸缩是变压器产生噪声的主要原因,其取向性越好,磁致伸缩越小,噪声也就

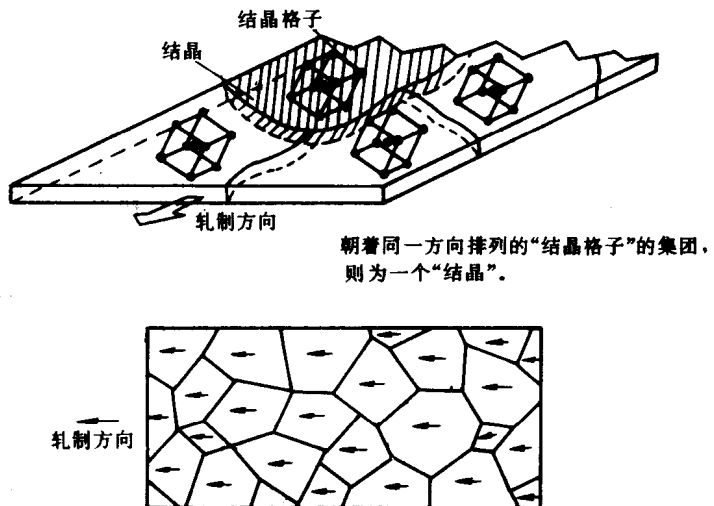


图 1-2 取向性硅钢片的结晶排列

越小。由此可知，取向性好的试样在沿轧向的拉应力作用下，改善磁性的效果就大，若能施加这种拉应力，就有希望大幅度提高硅钢片的性能。

试验表明，硅钢片表面涂层拉应力越大，铁损降低得就越明显。

我们以高导磁（HI-B）硅钢片为例，沿着垂直和轧制两个方向，对硅钢片作铁损和磁致伸缩以及有无表面涂层时的特性试验，可以得出表 1-2 的结果。

由表 1-2 可知：轧制方向的磁致伸缩均比垂直方向的小。而在垂直方向上磁致伸缩和铁损，在有涂层时又比无涂层时大。

在变压器铁心装配加工过程中，硅钢片难免因受到弯曲而产生拉应力和压应力。因此必须考虑由于弯曲等作用，沿轧制方向产生压应力而使磁致伸缩量提高。

综上所述可见，取向性是决定硅钢片性能的重要指标。SI-Fe 合金晶粒因晶轴的方向不同，容易磁化的程度也不同；而最容易磁化的方向是〔100〕方向，我们要得到最好磁性的硅钢片，应使易磁化轴尽可能与轧制方向一致。硅钢片性能的好坏用它在相同磁场强度下的磁通密度值和单位铁损来表征。同一磁场强度（即单位长度的安匝数）下，磁通密度值越大，硅钢片的磁性就越好；在同样频率、同样磁通密度时，单位铁损值(W/kg)越小，硅钢片的性能就越好。

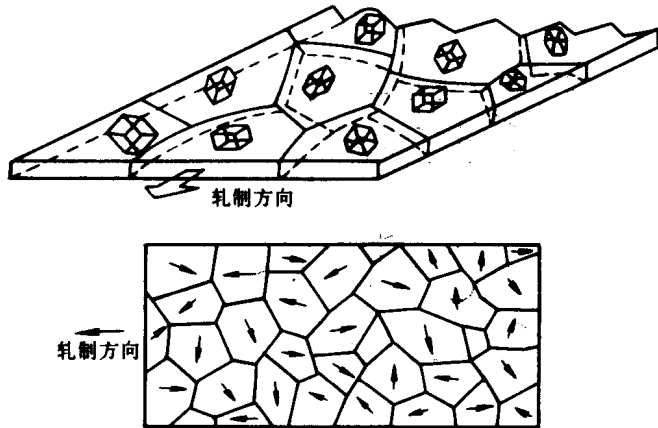


图 1-3 无取向性硅钢片的结晶排列

要得到最好磁性的硅钢片，应使易磁化轴尽可能与轧制方向一致。硅钢片性能的好坏用它在相同磁场强度下的磁通密度值和单位铁损来表征。同一磁场强度（即单位长度的安匝数）下，磁通密度值越大，硅钢片的磁性就越好；在同样频率、同样磁通密度时，单位铁损值(W/kg)越小，硅钢片的性能就越好。

表 1-2 沿垂直和轧制方向对硅钢片作铁损、磁致伸缩及有无涂层的试验结果

沿硅钢片垂直方向(C方向)试验结果						
	拉应力/MPa(无涂层时)					有涂层时
	0	1.1	2.3	3.3	4.7	
$P_{10/50}$	1.25	1.08	0.92	0.86	0.87	1.80
$\Delta L/L(\times 10^{-6})$ ($1.0\text{Wb}/\text{m}^2$ 时)	+8.9	+7.8	+5.3	+2.2	+0.7	+10.7
沿硅钢片轧制方向(L方向)试验结果						
$P_{17/50}$	1.31	1.27	1.23	1.17	1.11	1.15
$\Delta L/L(\times 10^{-6})$ ($1.7\text{Wb}/\text{m}^2$ 时)	+1.7	+0.4	-0.2	-0.3	-0.3	-0.2

由此可见，硅钢片的成分、内部结构，与电磁性能、物理力学性能均有密切关系，故要求剪切时必须做到：

- 1) 正确用料，分类存放，不得混用。
- 2) 注意区分硅钢片轧制方向。

- 3) 操作时轻拿、轻放，不可敲打、弯折。
- 4) 随时消除毛刺，及时整修换刀（模）。
- 5) 注意保持片料表面平整、光滑，切勿磕碰、划伤。

为了更清楚地阐述取向性对电磁性能、物理力学性能的关系，在此先简单介绍一下铁的结晶格与磁化曲线，图 1-4 为铁的晶格与磁化容易轴 $[100]$ 示意图。图 1-5 为结晶轴方向上的磁化特性曲线。

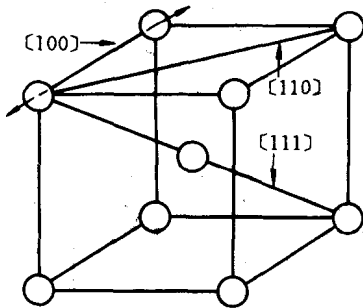


图 1-4 铁的晶格磁化容易轴 $[100]$ 示意图
 $[100]$ 、 $[110]$ 、 $[111]$ 表示结晶格子的轴方向(棱、面对角线及体心对角线等)的记号

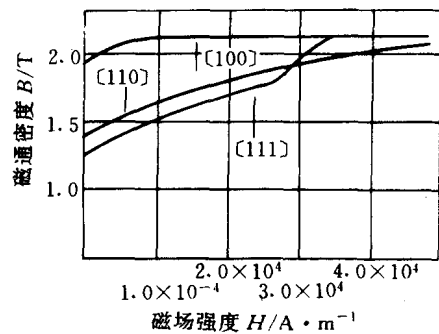


图 1-5 结晶轴方向上的磁化特性曲线

第二节 国内外常用硅钢片的牌号、规格、性能及选用

变压器采用什么样性能的硅钢片，一般要从磁通密度、磁滞损耗、涡流损耗、加工性能以及制造成本等方面去考虑，现简述如下。

一、磁通密度的选择因素

1. 硅钢片的材质

由于硅钢片有磁饱和现象，磁通与产生磁通的电流之间不是按线性关系变化的。因此，磁通密度的上限应选在饱和点以下。为提高磁通密度应尽可能选用饱和点高的硅钢片。

2. 变压器的运行特点

选择磁通密度时，不但要考虑变压器正常运行情况，也要考虑过电压或故障运行时的要求。在正常运行时，既要考虑电力变压器电压超过相应分接电压值的 5%，即过励磁 5% 时，在额定容量下能否连续运行，也要考虑电压超过 10% 时空载运行以及在电感性负载下相电压的变化率。总之，磁通密度值的选取要有不同程度的降低。

3. 铁心温升

变压器铁心的磁通密度越高，铁心温升也越高。磁通密度值的选取一定要考虑到温升的要求。

在 50Hz 时，磁通密度值一般可按表 1-3 选用。

表 1-3 各类变压器磁通密度参考值

变压器类型		磁通密度值/T			
		冷轧硅钢片		热轧硅钢片	
电力变压器		1.60~1.89		≤1.45	
试验变压器		1.40~1.50		1.20~1.30	
干式变压器		每柱容量/kVA			—
		5 以下	5~20	25 及以上	
		1.1~1.3	1.2~1.4	1.4~1.5	
干式	移圈调压器	—			1.15~1.4
油浸式		—			1.3~1.6
平衡电抗器(150Hz)		1.0		—	

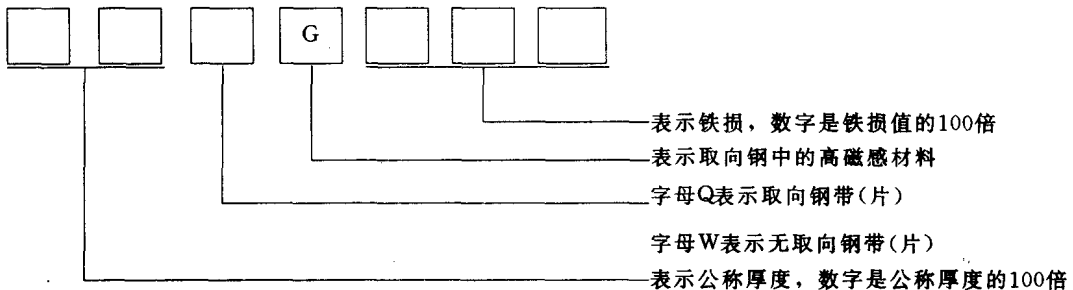
二、硅钢片类别的选择

硅钢片按加工方法分为热轧和冷轧两种，两者在性能上有明显区别，现将两者性能比较列于表 1-4。

表 1-4 冷轧与热轧硅钢片性能比较

冷 轧	热 轧
1. 磁饱和点较高,在 1.89T 左右	1. 磁饱和点较低,只有 1.45T 左右
2. 在相同磁通密度及相同频率下,单位损耗小,只需较小励磁容量,因为晶粒取向性好	2. 单位损耗大,励磁容量较大
3. 硅钢片的材质硬度高,使用的冲模寿命短	3. 材质硬度低,冲剪性能好
4. 方向性强,当磁力线方向与硅钢片轧制方向一致时,损耗最小;垂直时,损耗最大。为了减少变压器角部损耗,故做成斜接缝,或采用环形铁心	4. 方向性不十分明显,可不做成斜接缝
5. 机械加工中的冲剪、压毛及运输中的磕碰,极易影响其性能,退火后更为敏感	5. 机械加工对其性能影响不大,无需退火

为了便于选用国产硅钢片，现将其牌号意义注释如下：



国产硅钢带(片)的牌号及其使用对象见表 1-5。

表 1-5 国产硅钢带（片）的牌号及使用对象

品种及标准	无取向硅钢带（片）		取向硅钢带（片）	
	35W230~50W310	35W300~50W350	27QG100~35QG135	30Q130~35Q165
GB2521—96				
大型电机	√	√	√	√
中小型电机	√	√		
大型变压器			√	√
中小型变压器			√	√
配电变压器	√	√	√	√
调压器	√	√	√	√
电抗器及磁放大器	√	√	√	√
中频变压器				√
互感器			√	
电视机、收音机变压器	√	√	√	√
无线电广播变压器			√	√
焊接变压器	√	√	√	

三、硅钢片厚度的选择

前面已经讲过，硅钢片有两种损耗，一为磁滞损耗，二为涡流损耗。

磁滞损耗，随着硅钢片的材质系数、磁通密度、磁通变化频率及体积的增大而增加。

涡流损耗，随着硅钢片的电导率、片厚的平方值、磁通密度及体积的增大而增加。

由此可知，片材的厚薄对涡流损耗的影响较大。因此，要求用薄的硅钢片来叠装铁心。

涡流的磁场会减弱主磁场。由于铁心的中部所交链的涡流回路数量最多，所以中心部分的去磁作用也就最明显。结果是沿边缘的磁通多于中间的磁通，形成所谓的“集肤效应”。采用薄硅钢片，不仅可有效地减少涡流，而且能降低集肤效应的不良影响。硅钢片越薄，其效果越好。但是硅钢片越薄，加工这种硅钢片的工艺越复杂，成本越昂贵。在铁心制造中，硅钢片越薄，加工越困难，而且硅钢片间绝缘所占尺寸相对增加，使叠片系数下降，造成磁通密度增高。因此，硅钢片也不宜过薄。综上所述，目前变压器采用的硅钢片厚度一般为0.23~0.35mm。

四、国内外常用硅钢片的牌号、规格和性能对比

为了便于选用或代用，现将国内目前常用的国内外硅钢片的牌号、规格以及性能列于书后附录，以供对比参考。

第三节 新型导磁材料及其应用

一、新型导磁材料

变压器磁路系统除了前述由硅钢片叠装组成外，1960年美国加利福尼亚工科大学P·杜瓦兹教授首先从金和硅合金中发现另一种导磁的材料——非晶合金。这种合金具有超软磁性。首次研究成的非晶合金为铁硼非晶合金（Fe₈₀B₂₀）。将这种熔化的金属喷射到一个转速为10km/h的底盘上，足以使这种合金的冷却速度超过106°C/s，从而形成固态非晶合金。因

为这个过程是连续的，因而可以最终生产出一定长度的卷料来。其工艺过程见图 1-6。

按图 1-6 的冷却工艺所制成的非晶合金带，其晶粒结构与硅钢片的晶粒结构相似（见图 1-7）。

研究发现，这种非晶合金的晶粒结构不仅具有磁性，而且与硅钢片相比有较低的单位损耗（在 60Hz 与 1.5T 时，单位损耗为 0.44W/kg）。掺入碳后还可提高饱和磁通密度。1979 年美国阿联德公司研制出牌号为 2605SC 的非晶合金 ($\text{Fe}_{81}\text{B}_{13.5}\text{Si}_{3.5}\text{C}_2$)，商品名为金属玻璃。用此非晶合金制成的铁心，具有较低的空载损耗，约为高导磁晶粒取向硅钢片的 20%~25%。但是它的饱和磁通密度、单位损耗、单位励磁容量有较高的温度敏感性。为了克服这种敏感性，阿联德公司又试制成牌号为 2605SZ 的非晶合金 ($\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$)，后者比前者有了明显改善。目前，这两种牌号的非晶合金已应用于配电变压器的生产。根据资料介绍，非晶合金的主要基本元素为铁 (Fe)、镍 (Ni)、钴 (Co)、硅 (Si)、硼 (B)、碳 (C) 等，已有铁基、铁镍基和钴基三大类。现将常用的几种非晶合金材料的物理性能及单位损耗列于表 1-6，以供选用。

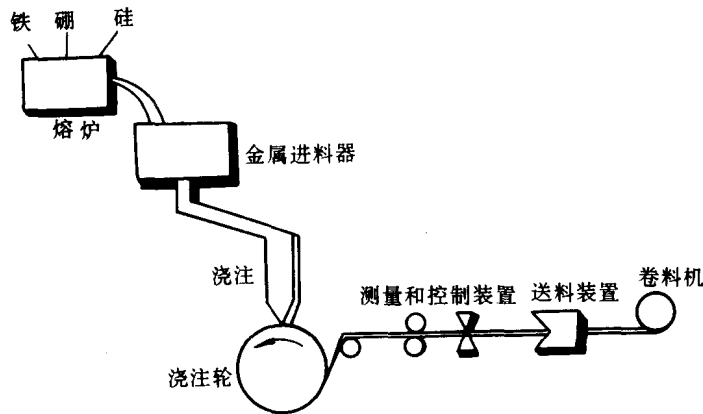


图 1-6 非晶合金速冷制带工艺流程

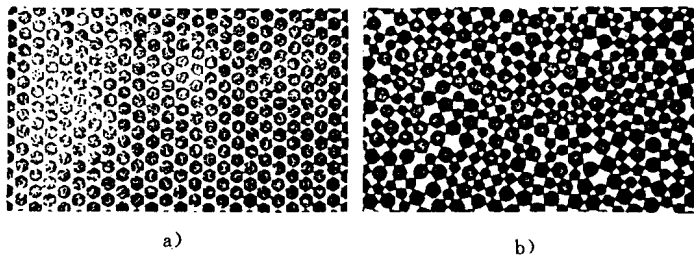


图 1-7 导磁材料晶粒结构示意图

a) 硅钢片 b) 非晶合金

二、非晶合金退火工艺

目前国外非晶合金的主要生产厂家要数美国的阿联德公司和日本的东芝公司了。他们的退火工艺参数异同点比较见表 1-7。

三、非晶合金的应用

非晶合金在变压器中的应用，起始于 70 年代，至今已有 20 年，但因种种原因，其中最重要的原因是它的规格、厚度和宽度受到制造设备的限制，因此产量小、费用高；此外，允许的磁通密度还没有硅钢片高，故体积大。所以，还有很多问题尚待解决，详见本书第六章第四节。

表 1-6 非晶合金材料物理性能及单位损耗

非晶合金牌号	化学成分(质量分数)	饱和磁通密度/ T	矫顽力/ $A \cdot m^{-1}$	剩磁/ T	磁致伸缩 $\Delta L/L \times 10^{-6}$	最大磁导率/ $H \cdot m^{-1}$	居里温度/ $^{\circ}C$	结晶温度/ $^{\circ}C$	密度/ $g \cdot cm^{-3}$	拉应力/ MPa	硬度 HV	电阻率/ $\mu\Omega \cdot cm$	单位损耗	
													$W \cdot kg^{-1}$	60Hz, 1.4T 时/ 20kHz, 0.2T 时/ $mW \cdot cm^{-3}$
2605SC	Fe81B13.5Si3.5C2	1.61	3.2	1.42	30	300 000	370	480	7.32	>700	1050	125	0.3	300
2605SZ	Fe78B13Si9	1.56	2.4	1.3	27	500 000	415	550	7.18	>1500	900	130	0.23	
2605S-3A		1.41	4.8	0.28	20		358	535	7.29	>1500	1000	130		
2605Co	Fe67Co18B14Si	1.80	4.0	1.6	35	250 000	415	430	7.56	>1500	1020	130	0.55	
2826MB	Fe40Ni38Mo4B18	0.88	1.2	0.7	12	600 000	353	410	8.02	>1400	1070	160	—	200
Co 基	Fe79B16Si5	1.58	8.0		27		405					125	1.2	58
Co 基	Co67Ni3Fe4Mo2B12Si12	0.72	0.4		0.5		340					135		43
传统硅钢片		2.03	24	1.5	9		730	—	7.65	320	210	45	0.9	
电力铁心片	Fe78B13Si9 高温高压固结	1.58	2.4	1.2			415	535	7.18	1500	900	130	0.25	

注：加碳后可提高饱和磁通密度，故 2605SC 的饱和磁通密度较 2605SZ 高。

表 1-7 美、日两国公司非晶合金卷制铁心退火工艺参数比较

序号	退火工艺参数	美国阿联德公司	日本东芝公司
1	要求环境: 气氛 外磁场强度	氮气 800A/m	氮气 200A/m
2	达到温度均匀的工艺方法	采用在铁心内、外径及下部放置绝热体,使受热与散热都均匀	采用该公司发明的高频励磁退火工艺,应用铁心自身发热,并在铁心上安装合适的隔热材料结构,使受热均匀
3	温度控制	1. 为消除急冷引起的应力,宜在 310°C 以上 2. 为降低损耗,根据卷制铁心直径的大小,约在 340~410°C	1. 消除应力采用 400°C 2. 为降低损耗,根据直径大小,约在 380~420°C,保持 30min
4	所需时间	视铁心大小而定	在 400°C 和 200A/m 外磁场强度下,保持 30min 左右
5	退火后冷却速度	$\geq 3^\circ\text{C}/\text{min}$	$\geq 3^\circ\text{C}/\text{min}$
6	所需卷制拉应力	拉力过大,磁特性下降;拉力过小,卷绕不紧,故宜采用可变拉应力	

第四节 变压器铁心的结构与片形

一、基本概念

1. 电场强度

电场作用于电荷的力与这个电荷量的比值,就是这点的电场强度。换句话说,电场强度的数值就等于电场作用于单位电荷的力。

用 F 代表力, Q 代表电荷量, E 代表电场强度,可得到:

$$E = F/Q$$

在国际单位制中,力 F 的单位用 N ,电量 Q 用 C 。又因为 $1N = 1J/m$, $1V = 1J/C$, 因此

$$E = N/C = J/m \cdot C = V/m$$

电场强度是矢量,电场的方向可用电力线表示。

2. 磁通密度

带有电流的导体,它的四周环绕着磁场,磁场是物质的一种形式。

在磁场内,磁针或带有电流的线圈的轴静止时所指的方向,规定为磁场的方向。磁场的方向可用磁力线来表示。它有南(S)、北(N)极之分。

电流和磁场的方向服从于右手法则。

磁场的特性是具有方向性,其中有个量(矢量)叫做磁通密度。当一段导线中电流的方向与磁通密度矢量互相垂直时,作用于这段导线上的力具有最大值,此时有下列关系:

$$F = ILB \quad \text{或} \quad B = F/IL$$

式中 B ——磁通密度(T);

F ——磁场力(N);

I ——电流(A);