

仪表及电工用精密合金译文集

硅 鋼 片

周光地主編

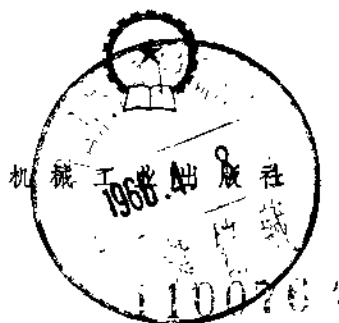
机械工业出版社

73/175
257
31

仪表及电工用精密合金译文集

硅 鋼 片

周 光 地 主 编



仪表及电工用精密合金译文集

硅 鋼 片

周 光 地 主 編

*

机械工业出版社出版 (北京苏州胡同141号)

(北京市书刊出版业营业许可出字第117号)

中国工业出版社第四印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 • 各地新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ 印张 $16 \frac{11}{16}$ • 插页 1 • 字数 433 千字

1966年2月北京第一版 • 1966年2月北京第一次印刷

印数 0,001—2,570 • 定价(科七)2.80 元

*

统一书号: 15033 • 3711

序

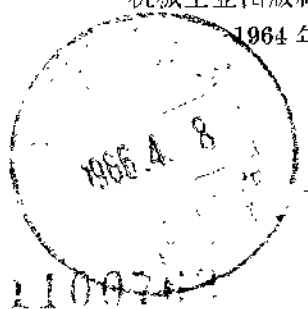
为了配合我国经济建设的发展，提高仪表及电工用精密合金制造的技术水平，机械工业出版社决定组织出版仪表及电工用精密合金译文集，以帮助中级的研究人员、工程技术人员和大专教师了解本专业的情况和今后发展方向；为他们系统地提供国外有价值的技术经验和理论知识，以促进这方面科学研究课题的解决，并推进生产和教学工作。

在挑选国外文献时，一般具有如下几个特征：一是系统性。系统性包含两个涵意：1. 从历史观点按时间先后选择各个发展阶段的文献；2. 全面地介绍各国各学派代表人物的论点或各国的生产经验，帮助读者了解本专题的全面情况。二是代表性。即把内容大同小异或论点相同的选其最有价值、最全面的一、二篇；也就是从大量文献资料中进行比较、分析，取其精华，使读者用最少的时间读到最优秀和最有用的东西。三是理论性。我们组织译文集的意图主要不在于给读者提供解决问题的特效药方，而是引进国外技术文献后，读者在吸取别人的经验和研究成果的基础上触类旁通，结合自己具体条件，创造性地加以运用。

我们组织出版这种译文集还没有经验，希望读者们给予大力支持，并提出宝贵意见。

机械工业出版社

1964年8月



前 言

硅鋼片是电机、电器、电訊工业的主要磁性材料，是鋼鐵工业中产量相当大的一种特殊鋼。它在工业上虽然早已得到广泛应用，可是至今仍然繼續不断地发展着极其重要的新品种。六、七十年以来，硅鋼片得到冶金、物理、电工等工作者的很大重视，对它的結構理論、性能特点、制造工艺等都进行了不遺余力的研究，使硅鋼片的面貌日益丰富多彩。

粗略地讲，从 1900 年問世以后，它使电机及变压器的結構及特性，发生一次革命性的变革。到 1935 年出现冷軋硅鋼片，进入一个新的阶段，当时应用磁畴观察的研究技术，和冷軋、保护气中退火等新工艺，获得变压器行业十分欢迎的品种。至 1957 年又进入另一大发展阶段。在研究微量杂质的作用、压延对織构的影响及二次再結晶过程等的基础上，并采用电子显微鏡及 X 光試驗工具，以及真空熔炼、軋薄技术、真空退火等新工艺及新装备，使具有理想单晶特性的立方織构硅鋼片，从 1957 年在實驗室发现之后，就迅速在工业中試行生产。

十年来，根据对硅鋼片結構及工艺特性間关系的了解，还在工业生产中大量制造出弱方向性的冷軋硅鋼带来代替热轧硅鋼片，它的特性較热轧片有所提高，而且具备自动化連續生产的条件，以及在自动装备中加工使用的条件。

本文集首先全面叙述硅鋼片的发展进程、一般制造工艺过程，目前世界各国的主要系列及质量对比、发展趋向等；其次介紹各种測磁方法及供研究試驗和生产檢驗用的測磁装置，着重接近应用条件下对鉄損及磁滯迴綫的研究，如交变場中的磁化曲綫及旋轉場中的鉄損等，作为电机、电器設計的参考；然后概述材料的組成与結構，闡明气体、非金属夹杂物以及晶体缺陷在硅鋼

中形成复杂结构，妨碍磁化过程；并重点论述晶粒取向问题，从单晶的各向异性，多晶的磁畴观测，以至冷轧取向硅钢片。

在分论中，按材料的应用范围大致分五部分，根据国内生产及科研的现实意义或当前世界上的潮流，分清各部分内容的侧重点。弱结构的冷轧硅钢片是适应电机应用条件而发展出来的品种，它的磁性在各个方向上相差很少，和热轧片相似，但它的磁性、平正度、韧性等都比热轧片好；因此较多地推荐它的性能，以便于广泛采用。对于变压器硅钢片，按我国生产发展的要求，着重介绍一些新工艺，对重要工序各选一两篇。在弱电用的多品种硅钢片方面，特别提出初导磁率、矩形磁滞回线、及高频等特性良好的品种，它们常常分别利用高纯度、磁场热处理及轧薄来实现。对冷轧硅钢片的磁性的方向性、磁畴观测及二次再结晶机理，三十年来进行了很多研究工作；从研究试制的需要出发，除介绍方向性的形成机理及实验根据以外，并说明如何创造条件来保证良好的方向性。六、七年来，双取向硅钢片的文章盛极一时，为此着重选择几篇关于形成机理的文章，如表面能的作用，附带说明样品特性、制备技术及研究方法，作为开展研究工作的参考。

书末附录约十年来对硅钢片的论文索引约八百篇，较细致地分为约五十类，并以译名刊出，供读者作进一步钻研的线索。

主 編

目 录

序 前言

第一篇 总 論

一、硅钢片发展概况	1
电工鋼片的发展方向	1
硅鋼片与硅鋼带	15
二、磁性測量及接近应用条件的主要特性	42
电工鋼片在試驗室和生产中的測量	42
关于按照新标准測量电工鋼磁特性的問題	58
电工鋼片磁性的方向性及其測量	65
旋轉磁通产生的鉄心損失	78
在直流磁場和交变磁場中測得的电工鋼磁化曲線的比較	81
在高磁通密度下电工鋼片的鉄損	88
三、材料的組成与结构	110
硅鋼的磁性及金相結構的进展	110
变压器鋼中非金属杂质的研究及其对交变磁化鉄損的影响	118
磷对电机鋼的組織和性能的影响	132
硅鋼单晶的磁性	149
硅鋼单晶的磁畴图	157
晶体取向的完善度及磁畴結構对于能量損失的相依关系	199
論鉄磁材料的磁化过程	204

第二篇 分 論

四、冷轧电机鋼的特性	213
冷轧电机硅鋼带	213
冷轧弱織沟电工鋼的性能	227

0.35 毫米冷轧电机钢	231
生产冷轧弱磁结构电工钢的简化工艺	236
五、变压器钢的新工艺	250
对电弧炉熔炼变压器钢工艺的研究	250
真空熔炼对变压器钢性能的影响	250
电工硅钢真空熔炼过程的研究和杂质对性能的影响	260
冷轧制度对变压器钢磁性能的影响	272
硅钢的加热过程、加热设备和方法的讨论	279
低铁损的热轧变压器钢	295
六、弱电用硅钢片的特性	304
高频元件用极薄硅钢片	304
硅钢片的磁滞及涡流损失随片厚的变化	318
具有(110)[001]结构的高纯度3%硅钢卷铁心的磁性	322
3%到9%硅钢带的磁场退火	326
七、方向性硅钢片的形成条件	333
冷轧变压器硅钢片	333
硅钢单晶体的冷轧、初次再结晶和二次再结晶结构	347
硅钢的形变和再结晶	363
对变压器钢二次再结晶动力学的研究	376
高纯度硅钢中(110)[001]取向晶粒的成长—— 一种少有的二次再结晶方式	380
杂质对硅钢中(110)[001]结构的温度关系的影响	393
八、双取向硅钢片的形成机理	397
论立方结构硅钢片	397
硅钢中再结晶的立方取向	415
控制退火气氛成分促进3%硅-铁立方晶粒的成长	436
论硅钢中立方结构形成时表面能的作用	440
用电子显微镜研究高纯度硅铁(100)[001]晶 体经冷轧及退火后的结构	448
立方结构变压器钢的磁性	476
硅钢片 文献分类索引	482

第一篇 总 論

一、硅鋼片发展概况

电工鋼片的发展方向

G. Rassmann

对于电工鋼片的发展趋势，不久以前 Reinboth 曾从电工技术的观点进行了論述，这种鋼每年的用量在一百万吨以上，包括在发电机、电动机和变压器中使用的电机鋼片及变压器鋼片，其含硅量为 4.5% 以下。因而有必要从金属学方面考虑如何进一步改善磁性的方式及工艺，以满足电工制造业的要求，就是要求在較微弱磁場下，鋼片能达到高的磁感强度，而鉄損率又要尽量低。同时还有一些附加技术条件，特别是使片材具有低脆性和光滑平整的表面，以便获得高的填充系数。

在硅鋼单晶中存在着易磁化及难磁化方向，这是改进电工鋼片磁性的主要依据。在多晶体鋼片中，如果有适当的晶粒取向，也可以表现出同样的特性。要获得这种取向性，可以通过适当的二次再結晶，从而在鋼片中形成(110)面平行軋制面、[001]向平行于軋制方向的織构。因为在硅鋼单晶中，[001]向是易磁化方向，所以鋼片在軋制方向显示出最佳的特性。

織构度与性能

图 1 表示有織构及无織构硅鋼片的磁化曲綫，并繪出符合电工技术要求的 DIN 标准及 TGL 规定的相应的变动范围。下半部

是无織构鋼片的磁化曲綫，一般是經過热轧制造成的。試驗室样品所能达到的性能比較好，但好得并不太多。按照 DIN46400 标准(曲綫 *a*)所要求的最低值只画出了曲綫的一部分，而在 Reinboth 的文章中[1]，对于磁場大于 7.5 At/cm 的部分，数据也不全。这些数据还不能代表完全各向同性的硅鋼片，因为它们也具有有一定程度的微弱織构度，还会在磁感值中反应出来。

当具有織构时，軋制方向为易磁化方向，它的磁感强度就比各向同性硅鋼片提高很多。目前在工业中大量生产的織构鋼，还只能是(110)面平行于軋制面，〔001〕向平行于軋制方向。这种简单的織构使磁性只具有一个择优取向。大量工业生产的最佳織构硅鋼片的磁化曲綫(曲綫 *d*)处于 TGL 规定 015 的变动范围的中間位置。曲綫 *f* 是 Dresden 特殊金属材料研究所(FMS)的試驗曲綫，这种織构硅鋼片具有最高的磁感应和很低的矫頑力。在大量生产成品的性能数据与試驗样品数据之間，还存在着很大距离，

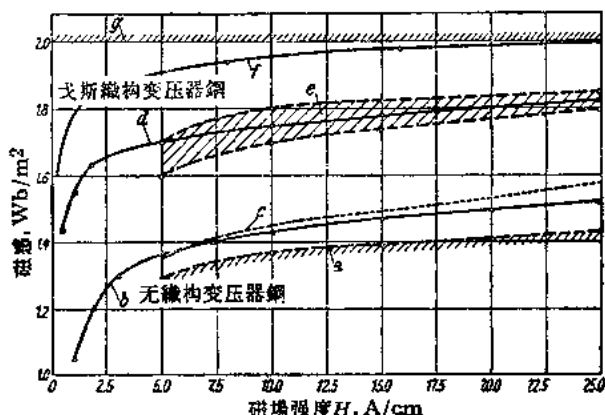


图 1 有織构及无織构硅鋼片的磁化曲綫：

a—DIN 46400 标准中 IV 1.0 类鋼的最低值；*b*—无織构鋼的最佳值；*c*—Reinboth 的要求值；*d*—Goss 織构变压器鋼；*e*—TGL 015 条件中的范围；*f*—FMS 实验值；*g*—飽和磁化。

因此在提高产品性能方面还有很大的潜力。但是試驗样品的数据已經达到难以再显著提高的地步，它在磁場强度才 25At/cm 时，即已趋近饱和磁感强度。

除高磁感值以外，还要求低鉄損率。图 2 說明織构度如何影响磁感值 B_{20} 及鉄損率 P_{15} 。曲綫繪出在 900°C 、 1000°C 及 1300°C 三个温度退火后的性能。在这个退火温度范围内，磁感值 B_{20} 只随織构度改变，与退火温度无关；可是鉄損率 P_{15} 一方面决定于織构度，而尤其重要的是受退火温度的影响。这是由于，当提高退火温度时，减少了磁滞损失，也就是减少了鉄損率；可是織构形式及磁化曲綫的形状，在退火温度高于 900°C 时，已經不再有明显的变化。

图 2 也繪出 Reinboth 提出的电工技术对簡單取向及无方向性变压器鋼片的磁感值及鉄損率所要求的条件。根据此条件，若要織构鋼片达到磁感值的要求，最少須具有 80% 以上織构度，若使弱織构鋼片达到鉄損率的要求，必須在 1100°C 以至 1300°C 退火。高磁感与很低鉄損率只能在織构度接近 100% 时才能实现。

如上所述，对各向同性变压器鋼片所要求的性能，也不能用无織构鋼来满足要求。从图 2 可以看出，必須使織构度約为 20% 时，在 $900\sim 1300^\circ\text{C}$ 范围内退火后，才能达到要求的磁感值。同

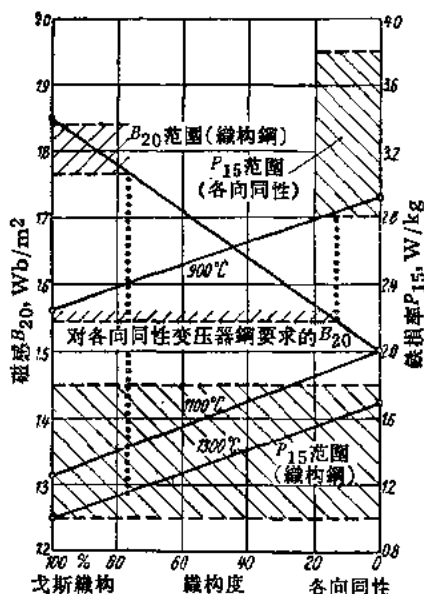


图 2 电工鋼中織构度对鉄損率 P_{15} 及磁感值 B_{20} 的影响。

样，可以用弱織构鋼片在 900°C 附近退火以达到对鉄損率的要求。

按以上的分析，要了解織构鋼片的性能，必須知道它与織构度、材料成分及制造工艺等之间的关系。早在 1935 年，Goss 发现 $(110)[001]$ 織构的形成条件，需要一定的冷加工变形及热处理。必要的工艺过程，大約說来是：将 2 厘米厚的热轧片經過两次冷加工变形，先軋到 0.7 厘米，再軋到 0.35 厘米，在两次軋制之間，在 900°C 上下进行退火；最終退火溫度高于 1000°C ，通常在真空中，或在氩气中进行。以这套工艺来形成 $(110)[001]$ 織构的效果，也还要看热轧板材的状态及成分。这一点，在图 3 的例子中表示得很清楚。这是真空熔炼的 3% 硅鋼的織构度及晶粒度对于最終退火溫度的依賴关系。因此一方面热轧板材直接起作用，另一方面还有在后阶段加工工艺中的渗氮处理。即使原始織构度最多只有 60%；經過約 950°C 的最后退火，渗氮使織构度上升到 100%。在織构度上升时，晶粒也同时显著长大，如图 4 中照片所示，这种晶粒的长大是有选择性的。因为 $(110)[001]$ 取向的晶粒具有生长能力，且优先成长，最后使所有的晶体都轉变

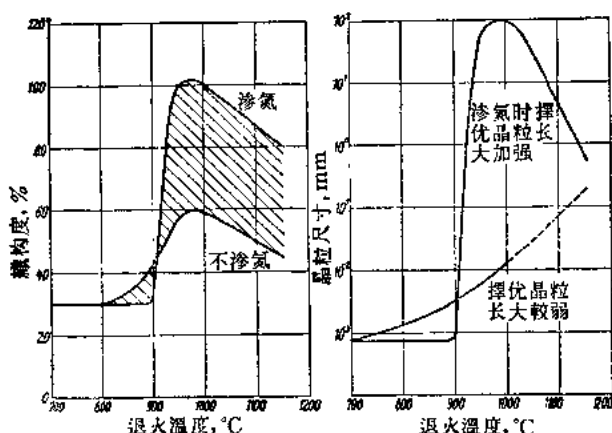


图 3 改进織构度的可能性(退火時間 6 小时)。

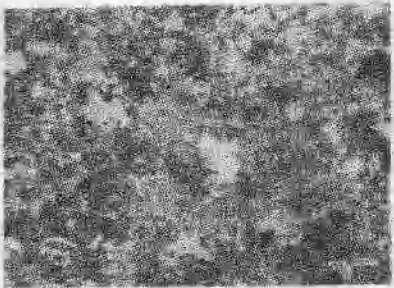
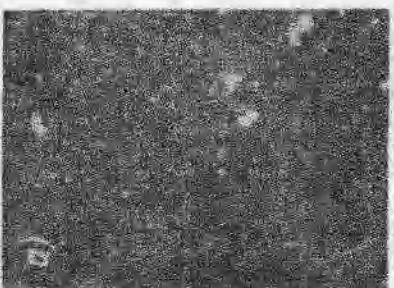
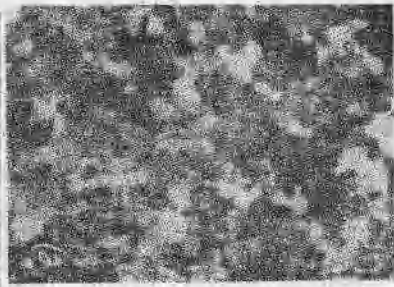
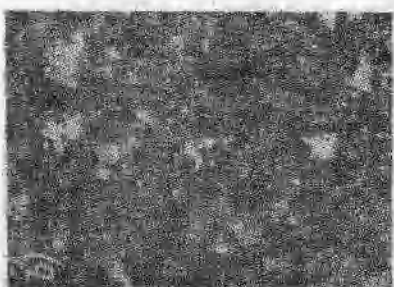
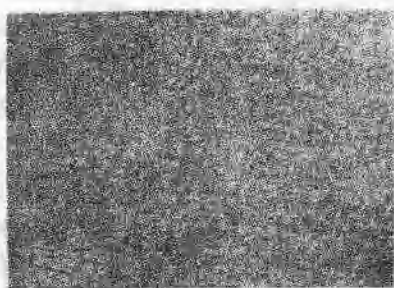
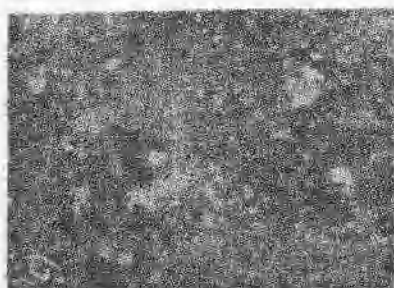
成(110)[001]織构,就得到100%的織构度。这个結果,可以从氮化處理得到加强,这时在晶粒边界上形成不均匀的化合物,为具有选择性的晶粒成长創造条件。在此情况下是氮化物发生作用;而在目前大量生产的織构鋼片中,可能是硫化錳起着重要的作用。

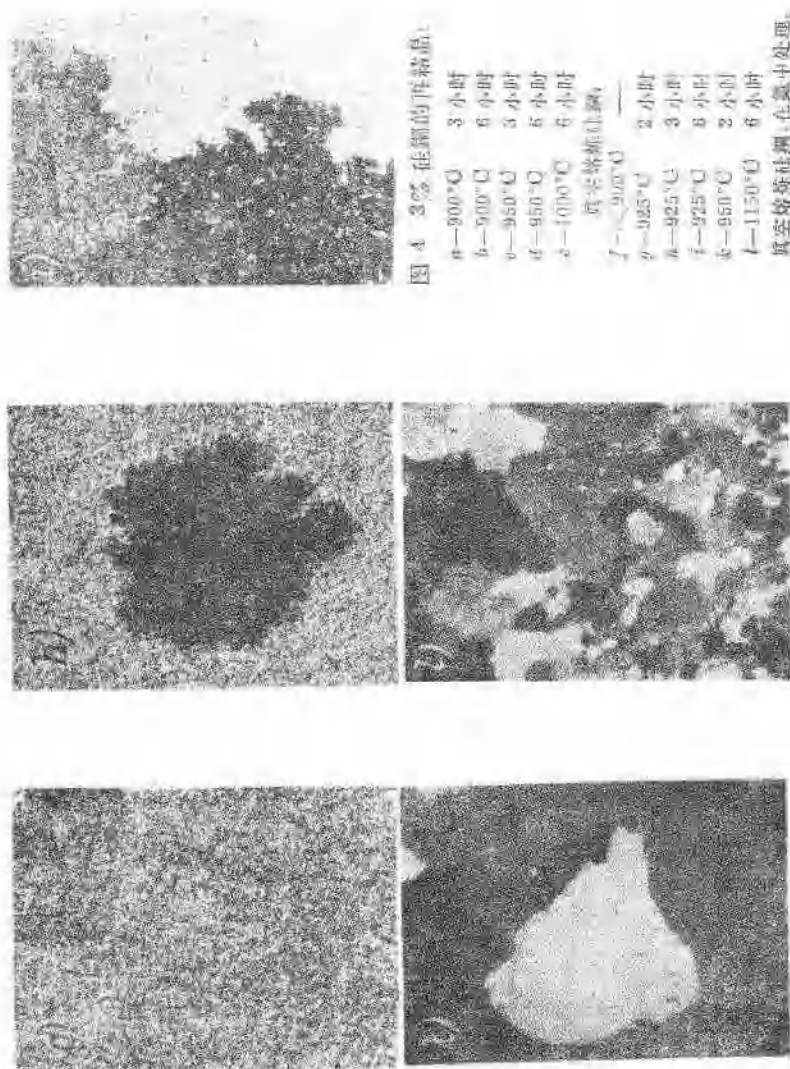
除上述单織构[●]以外,近几年来还出現立方織构硅鋼片,它在軋制方向和与之垂直的方向上都有优良的磁性。这种鋼片,在使用上当然很有好处。立方織构的成长同样是通过晶粒长大,可是这时扩张晶粒边界的动力,不是晶粒边界能,而是表面能。在厚度为0.05毫米以下的条带中,特別容易形成立方織构。与其它取向相比,(100)[001]織构优先长大的动力,不同于上节所述情况,而主要是由于在一定退火条件下,在硅鋼表面吸附着的外来原子促使(100)[001]織构开始形成,并帮助这种晶粒繼續长大〔2〕。对于大量生产立方織构鋼片的问题,目前还难确定。

图5及图6表示无織构、(110)織构及(100)織构等三种硅鋼片的矫頑力及鉄損率的方向性变化情况。无織构鋼片的矫頑力約为0.28At/cm,与方向无关。立方織构鋼片在軋制方向及橫向上的矫頑力均为0.1At/cm。(110)織构鋼片的矫頑力在軋制方向上也約为0.1At/cm。可是在〔111〕方向上,也就是对軋制方向傾斜 54° 的方向上,矫頑力上升到0.3At/cm;而在与軋制方向相垂直的方向上,也就是〔110〕方向上,矫頑力还稍微小一点。鉄損率的方向性变化也与此很相似。这是由于略呈矩形的磁滞迴綫所对应的損失,是与矫頑力成正比而增长的。值得注意的是,在軋制方向上,立方織构鋼片的鉄損率大于单取向鋼片。对出現这种现象的原因了解得还不太清楚,似乎是立方織构鋼片中晶粒的大小与单取向鋼片中的是有所差别的。

在图2中已經表明,用織构度約为20%的鋼片,可以满足

● 单織构或单取向指(110)[001]織构。——譯者





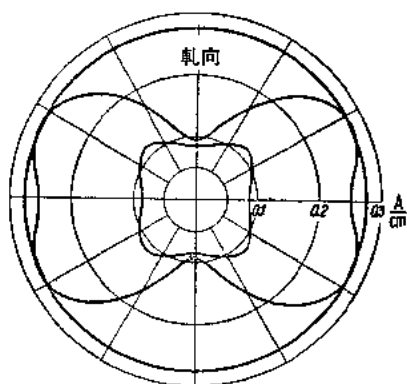


图 5 不同織构硅鋼片中矫頑力随方向的变化。

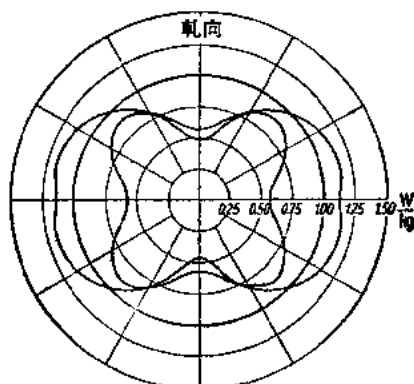


图 6 不同織构硅鋼中铁損率随方向的变化。

Reinboth 为无織构变压器鋼片提出的磁性数据的要求。图 3 又表明采用适当的工艺以形成(110)[001]織构，在 900°C 以下退火后，可以得到約 30% 的織构度。这就是說，对于无織构变压器鋼片性能所提出的要求，如果采用織构鋼片，经过同样的工艺，

即在 900°C 以下最后退火之后，可以得到解决。同时，按电工技术所要求，在与軋制方向傾斜不同程度的各个方向上的磁性数据，与平均数值的差别不应超过 10%。图 7 是冷軋变压器鋼片，在 900°C 最后退火之后的鉄損率 P_{10} 及磁感值 B_{15} 的方向性。在軋制方向上，磁感值超过了要求的条件，同时鉄損率也比要求的数值

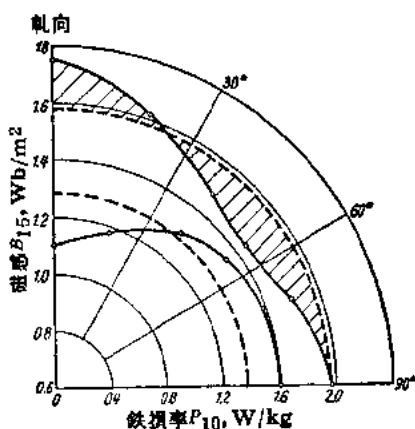


图 7 冷軋变压器鋼中 B_{15} 及 P_{10} 随方向的变化(900°C 最后退火)。

低。可是这些数值与平均值之間的差別大于 10%。为了真正满足电工技术的要求，还有必要再测定热轧片的磁性的方向性，需要使在各个方向上的性能数据与平均值之間的差別都不超过 10%，这些差值随着磁感强度的绝对值而不同。

鉄 損 率

在磁化过程中出现的交变磁化鉄損率，可以分为磁滯損失与渦流損失。磁滯曲綫所包围的面积給出在每一交变磁化周期中的磁滯損失，在一些磁感强度下磁化曲綫約为矩形时，磁滯損失与矫頑力成正比。如果成分的任何改变使矫頑力降低时，磁滯損失必定相应的下降，鉄損率也由此得到改善。例如图 8 举出碳含量对鉄損率 P_{10} 的影响。可以看出若要单纖构鋼片的鉄損率低到 $P_{10}=0.5 \text{ W/kg}$ ，碳含量必须少于 0.006%。图 9 是鉄損率与矫

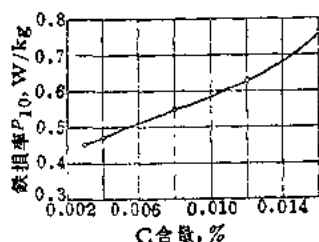


图 8 纖构硅鋼片的鉄損率与碳含量的关系。

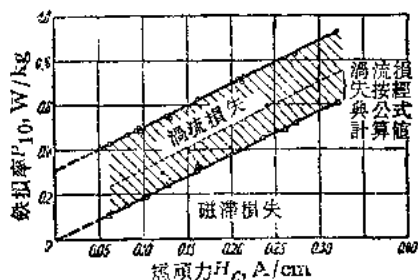


图 9 纖构硅鋼片的鉄損率和矫頑力之間的关系。

頑力之間的相应关系。这个图也同时表明渦流損失与矫頑力毫无关系，所以当鋼材从熔炼方面逐步改进时，渦流損失在总的鉄損率中所占的比重就显得越来越大。当鋼片的鉄損率 P_{10} 为 0.4 W/kg 时，渦流損失約达总鉄損率的 75%。图中表示出渦流損失的測定值比按照經典公式所計算的数值高出相当多。按照計算应该是

$$P_e = \frac{1.643 \times 10^{-16} s^2 f^2 B_m^2}{\delta \rho} \text{ W/kg}$$