

内 部

硅钢片参考资料

(十)

1975

太原钢铁公司科技处

目 录

高磁感取向硅钢片的发展	(1)
电工钢板	(12)
节省能量的取向硅钢片	(17)
3 % Si—Fe 薄板初次晶界抑制作用的破坏	(24)
在 3 % Si—Fe 钢片中 MnS 沉淀粗化的动力学	(31)
多晶(110)[001] 3 % Si—Fe 板的转矩特性	(40)
硅钢及其应用	(52)
硅钢的生产方法	(59)
取向铁与钢及其制造方法	(67)
低氧取向硅钢的制造方法	(78)
取向硅钢的制造方法及其改进	(83)
单取向硅钢薄板的制造方法	(86)
硅钢的生产	(90)
取向硅钢工艺的改良	(93)
具有优良磁性的单取向硅钢片的制造方法	(100)
中间退火对变压器钢组织的影响	(104)
制造择优取向硅钢的热处理	(107)
用退火改善硅钢的电磁性能	(109)
含硒的硅钢	(111)
用表面超声波测定硅钢薄板晶粒尺寸	(115)
滚剪电工钢板	(118)

高磁感取向硅钢片的发展

一、前言

曾经认为，原来的取向硅钢片用二次冷轧法生产，性能的改善似乎达到了极限。但是，最近由于发明了与过去不同的生产工艺，具有优良磁化特性、铁损和磁致伸缩的取向硅钢片已经成功地大量生产了。这种新产品，对外部应力也具有比老产品难以劣化的特性。由此，使变压器的铁损、励磁特性显著提高，变压器噪音降低了。

本文想就这种用新工艺生产的取向硅钢片的发展经过，其工艺特点，和性能特点详细地加以叙述。最后简单地谈一下硅钢片今后的发展。

二、早期取向硅钢片的研究

这个时期的研究工作几乎已被人们忘却了。但是，这个时期的忘我热情和努力，无疑问是今天HiB的基础，同时这种传统一直继承下来。

1934年，高斯发表了二次冷轧法专利，在美国已进行了工业性生产。日本由于当时处于战争时期，关于取向硅钢片的技术情报直到1951年还什么也没有得到。在战争期间，八幡制铁所虽试图进行冷轧试验，但没有得出成果，因此委托北大的茅诚司教授进行研究。1942年的下半年，茅教授去到八幡，作各种冷轧压下率，用于冰冷却的低温轧制等多种试验，沿轧制方向、横向、以及轧向与横向间 15° 地方剪片，作成小条状试料。

试料到后，茅教授立即开始进行研究。主要是在 H_2 气氛下作 $1300^\circ C$ 以下各种温度的退火试验，测定试料的磁性。当时的磁性测量是使用冲击电流计法，这在当时虽然是最先进的方法了，但测定一个试料仍需要2—3小时，试验做了六个多月。

1943年10月茅教授转到东大，该项研究工作也移到了东大。当时的研究结果是：不管怎么样，高温最终退火是绝对必要的。移到东大之后，首先作了一台处理50Cm的爱卜斯坦试料（当时如果没有这种试料就不能测铁损）的退火炉。在理工学研究所（现宇宙所）的配合下，在这里作了一台使用Mo棒的能在 $1300^\circ C$ 下进行 H_2 退火的真空炉。茅教授由于学术会议发展等科学行政问题逐渐地脱身了，试验以田岗忠美为主进行。战后，田口悟参加进来。作成能对10Kg铁心进行退火的炉子。该研究一直持续到1952年初。如何改善取向度是当时首要的问题，可是如何脱炭，表面如何处理，在当时却是难题。

另一方面，电气学会有个硅钢片委员会，试图进行取向硅钢片的试制。因为不能做高

温最终退火，采用了使晶粒容易成长的调质轧制法作了试验，在高砂铁工厂处理了宽度为200~300mm的50Kg以下的小卷，主要供日立龟户工厂试制卷铁心变压器。

1952年，八幡制铁所正式制定出生产宽幅取向硅钢片的计划，以带钢轧机进行轧制。同时改造不用的炉子，在现场设置了H₂退火炉。

三、高磁感取向硅钢片的发明经过

1952年初田口悟转往八幡，继续在户畑工厂制作了月产为30吨的试验设备。年终用这个设备开始进行试验。当时用20吨电炉冶炼，但成分合格率很低。特别是由于Al的影响很大，二次再结晶状况因铝含量而变化，所以强烈希望控制熔炼Al的成分。研究了含铝量和处理条件，发现Al在0.02%时用一次冷轧法可以得到好的取向度。特别是含C 0.05%、Si 2.94%、Al 0.02%、N 0.0062%的249号试样，得到稳定而十分良好的取向度，从而磁性也很好。1953年中，坂仓昭参加了研究，虽然努力控制Al在0.02%左右，但在当时的技术条件下是不可能的，不得不抛开这个工艺，决定仍采用普通的二次冷轧法生产。但是，249号试样的梦影尚在，加Al形成AlN的一次冷轧法，20年来，我们一直把它作为最重要的研究项目，继续在生产现场和试验室进行成分和处理工艺条件的研究。这项研究直到现在还在继续进行，在试料仓库里已集存了大约6000种热轧板料。

从1956年开始，又进行了(100)面与板面相吻合的立方织构硅钢片简称(双取向)的研究。这时，美国阿姆可公司、G·E公司等发表了双取向，从此双取向的研究盛行起来。因为含Al的材料能得到双取向，所以关于加铝的研究大规模开始了，但一次冷轧法的研究也在平行进行。

因为双取向钢片的磁致伸缩很差，做成变压器后噪音大，而且制造成本高，所以在一般变压器和电机上不能使用。日本当时几乎不生产飞机和其它飞翔体，双取向失去了特殊的用向，所以对双取向不抱多大希望了（现今在飞机发电机上少量使用了双取向）。在双取向的研究中，对一次冷轧法做了大量的研究，了解到，热轧板退火对双取向是有效的，故对一次冷轧法也进行了热轧板退火的研究。

1961年HiB开始出现。但当时的HiB是非常不稳定的。经过进一步研究，得出取向硅钢片确实可以用一次冷轧法的判断，而HiB性能的提高是有指望的之后，1964年才开始了现场试验。

一边进行现场试验，一边用已往收集的很多热轧板试料作进一步的研究。作为这些研究的成果之一，是在1965年查明通过控制热轧板的退火温度、冷却条件，稳定了HiB的生产，提高了取向度。

这个时期，二次再结晶不充分的部分还经常出现，尽管取向好，而铁损还不太好。由于含有Al，钢板最终退火后表面上难以生成玻璃状薄膜，而依靠表面张力降低铁损的效果不大，这是铁损恶化的一个原因。将对玻璃薄膜的形成最为重要的MgO粉，加以改进，使薄膜得到根本改善。随着薄膜质量的提高，磁性也提高了。成分的改善，熔炼

方法的改善, 和热处理条件的改善, 逐步地提高了成材率和质量。

四、高磁感取向硅钢片的工艺特点

表 1 列出了生产工艺上的差别。原来的工艺, 是采用两次冷轧法并以 MnS 作为晶粒长大的促进剂生产的。即在炼钢时加入 Mn、S, 开坯热轧后经两次冷轧、一次中间退火轧成最终厚度, 脱炭退火后通过最终高温退火使晶粒长大。产品的性能在 800A/m 的磁场下 B_8 为 1.82Wb/m^2 , [100] 轴与轧向的偏离角平均约为 7° 。

表 1. HiB 在制造上的特点

	HiB	原 来 的 方 法
生 产 要 点	AlN, 一次强冷轧	MnS, 二次冷轧法
工 艺 过 程	冶 炼 (3%Si, Al, N) 开 坯 热 轧 高温退火 (AlN 析出) 一次强冷轧 脱炭退火 最终退火	冶 炼 (3%Si, Mn, S) 开 坯 热 轧 退 火 一次冷轧 中间退火 二次冷轧 脱炭退火 最终退火
专 利 文 献	特许第246065号 第493331号	高斯USP1965559 (1934) ARMCO USP2599340 (1952)
成 品 特 性	$0.30\text{ W}17 = 1.12\text{W/Kg (M2H)}$ $B_8 = 1.92\text{Wb/m}^2$	$0.30\text{ W}17 = 1.32\text{W/Kg (M5)}$ $B_8 = 1.82\text{Wb/m}^2$
经 济 效 果	电力损失之减少 (15%) 日 本 14亿KWH 世 界 168亿KWH	现在每年电力损失 (指变压器) 日 本 93亿KWH 世 界 1120亿KWH

与此相反, HiB 是以 AlN 作为晶粒长大的促进剂, 采用一次冷轧法生产。即在炼钢时加 Al、N, 开坯热轧后进行 AlN 析出退火, 随后以一次强冷轧轧成最终厚度, 然后进

行脱炭和最终退火。产品 B_s 为 $1.92W_b/m^2$ ，〔100〕轴与轧制方向偏离角平均在 3° 以内。工艺上有两个大的差别：一是采用一次强冷轧。而原来认为取向硅钢片用一次冷轧法生产是不可能的，事实上目前世界各国都是用二次冷轧法生产。二是采用AIN。AIN向来被认为是有害的东西，这是因为AIN不只是对晶粒成长有害，而且AIN是针状析出对磁性也是有害的。但是，有效地利用AIN所具有的有益特性，排除了原来认为是有害的重要因素，由于这样，与一次冷轧相配合，成功地获得了性能优良的HiB。

AIN的一个特性是呈方向性析出。针状AIN虽是最密的六方晶格，可是由于在体心立方晶格的母材〔100〕面或〔120〕面上，存在〔101〕 $\frac{1}{2}$ AIN〔120〕 α 或〔12.2〕 $\frac{1}{2}$ AIN〔122〕 α 的关系，针状AIN进行成长。AIN之所以具有这种析出方向性，是因为它的能量稳定的缘故。如果别的晶粒向这种析出物长大，在这种情况下也会得到该种晶粒的稳定性析出物，当然晶粒也就能够长大。这是AIN对晶粒长大有选择作用的理由。AIN在起了帮助晶粒选择长大的作用之后，将其去除，就是说，在最终退火中虽然 1000°C 以上会发生二次再结晶，出现具有很大特点的异常晶成长，但在 1100°C 以上AIN分解扩散，被表面上形成的玻璃状薄膜所吸收。

作为晶粒长大促进剂的AIN和原来的MnS所表现的现象是不同的，为说明这一点，现在列举一些用单晶体作的AIN对再结晶现象的作用效果的实验例子。将3%Si的〔001〕〔100〕单晶体在〔100〕方向上冷轧70~80%，退火时AIN呈现了显著的效果。当有 1μ 以下的针状AIN时，主要出现的是吞食〔113〕〔301〕一次再结晶组织，而与初期组织相同的〔100〕〔100〕粗大二次再结晶组织。而在没有这种AIN时，出现的就只限于一次再结晶组织。AIN晶体与 α 铁晶体存在着特定的组织关系，这种〔001〕〔100〕单晶体一旦冷轧，AIN也就随同 α 铁形成不同的配置，由此生成一次再结晶，然而当粗大的二次再结晶发展时，AIN与该晶体再次成为保持特定关系的状态。也就是说，可以认为AIN在二次再结晶之际，不仅有抑制一次再结晶晶粒长大和促进二次再结晶长大的作用，同时还有调整二次再结晶组织的作用。MnS等就没有这种现象。当含Si量3%的〔001〕〔hKL〕单晶体进行交叉轧制时，其再结晶情况由于AIN而显示出特异的现象。在以50%的压下率进行冷轧，接着在横向以50%的压下率交叉轧制情况下，含有 1μ 或 1μ 以下的AIN者通过二次再结晶开始形成〔001〕〔hKL〕，可是没有AIN者，就只有一次再结晶，而没有二次再结晶。另外，把〔001〕〔110〕单晶体从 1350°C 淬火，当 0.1μ 以下的极细小AIN大量存在时，若进行交叉轧制然后退火，那么，在 $950\sim 1000^\circ\text{C}$ 就会有粗大的一次再结晶晶粒成长。这种组织，和含有 1μ 或 1μ 以下AIN的〔001〕〔100〕单晶体在交叉冷轧后的一次再结晶组织是一样的。这就表示AIN不仅有调节二次再结晶的作用，也有调节一次再结晶成长的作用。将含有0.028%酸中可溶性Al含Si3%的〔001〕〔100〕单晶体在 1300°C 退火后水淬，在〔100〕方向上冷轧，在 550°C 退火40小时后，如果提高到 1200°C 就可获得粒度为 $0.5\sim 1.0\text{mm}$ 的〔111〕〔110〕一次再结晶组织。 550°C 退火，析出非常微细的AIN。〔011〕〔100〕一次再结晶晶粒从钢板表

面开始发展,而 $\{111\}$ $\langle 110 \rangle$ 一次再结晶晶粒从钢板的中心部位发展,该晶粒吞食 $\{011\}$ $\langle 100 \rangle$ 晶粒而成长成。这样细小的AlN,对一次再结晶产生很大的影响。在没有这种AlN的情况下,具有 $\{111\}$ 面的一次再结晶没有长大。说明这种作为晶粒长大促进剂的AlN析出物,不仅对二次再结晶晶粒长大有特别的抑制效果,而且对一次再结晶组织也有影响,与MnS等具有不同的性质。HiB就是利用了这种AlN来提高取向度的产品。

五、高磁感取向硅钢片的性能

(1) 取向硅钢片的特点:

取向硅钢片技术上所要求的主要特性是,工频下的高磁感导磁率、铁损和磁致伸缩。众所周知,高磁感下的导磁率差不多完全是由 $\{011\}$ $\langle 100 \rangle$ 的取向度决定的, B_0 是它的衡量标志。铁损与许多因素有关,据知,主要因素是钢片厚度、硅含量、晶粒取向度、夹杂、内部应力和晶粒大小。含硅量大约应为3%,夹杂物和内部应力要尽量减小。在同一厚度下,如果晶粒尺寸相同,那么取向度越好,铁损就越小。但是取向度一改善,通常晶粒就变大,晶粒一大,涡流损失就增加,当达到某种程度时,铁损反而增加。所以,取向度与晶粒大小是相互关联的,一般认为,有一个铁损最小的适当配合关系。如果取向度、晶粒大小相同,那么钢片越薄,则由于涡流损耗的减少铁损值便越低。但是,钢板薄到某种程度时,磁滞损耗增加。由此总铁损减少的比例就变小,乃至开始增加铁损。曾发现:这种晶粒大小和板厚的限制可以因为有表面薄膜对钢片产生张力作用而得到缓和,这种缓和作用,取向度越高效果越大。为此,通过使取向度提高以及采用对钢板张力较大的表面薄膜,可使铁损大幅度改善。磁致伸缩是变压器产生噪音的主要原因,而磁致伸缩在技术上可通过控制磁化过程得到改善。正如从磁畴理论所了解的那样,180°磁畴移动产生的磁化与磁致伸缩没有关系,因此如果能用180°磁畴移动进行磁化,那么磁致伸缩就可以变小。取向度越好,表面薄膜张力越大,则这个效果就越显著。这些正是HiB可以得到原来的技术所达不到的优良性能的原因。

铁损大致分为磁滞损失和涡流损失两部分。作为影响这些损失的主要因素是磁滞损失,主要依赖于取向度、材料纯度和内部应力;而涡流损失依赖于电阻率、钢板厚度、磁畴大小以及对钢板产生的张力。

(2) 取向度和磁滞损耗:

图1是表示老产品晶粒取向的极图。如图所示 $\langle 100 \rangle$ 轴与轧制方向的偏离度是很差的,而HiB的偏离度却是非常好的。取向度可以用 B_0 这个指标表示,前者 B_0 为 $1.82 W_b/m^2$, HiB的 B_0 为 $1.92 W_b/m^2$ 。如果取向好 B_0 提高,则如图2所示磁滞损耗也显著减小。图中是表示0.35mm钢板的情况,当 B_0 从 $1.82 W_b/m^2$ 提高到 $1.92 W_b/m^2$ 时,磁滞损耗 $W_{h17/50}$ 降低了 $0.16 W/kg$ 。获得晶粒取向使 B_0 提高,这是取向硅钢片铁损减少的首要因素。取向度一旦改善,就可显示出磁性提高的效果。

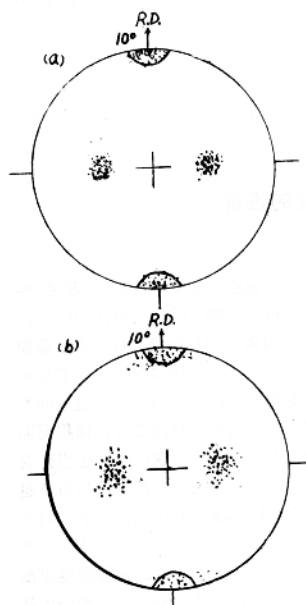


图1 (100) 极图
(a) HiB的方位中心
(b) 老产品

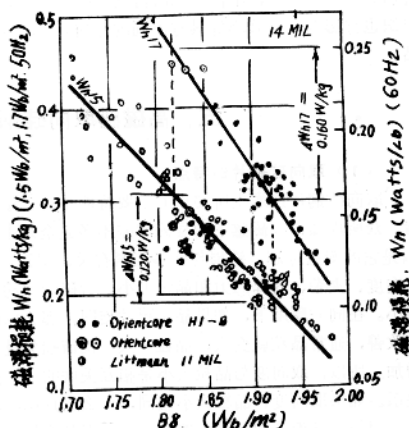


图2 B_s 与磁滞损耗的关系

(3) 取向度和张力效果:

若在去掉表面薄膜的试料上加以张力及压应力,在加张力的情况下 90° 磁畴减少, 180° 磁畴增加,磁畴结构的变化使铁损减少,而在加压应力的情况下, 90° 磁畴增加,铁损增加。但是,这种变化却随着钢片取向程度的不同而显著不同。如图3所示,取向好而 $B_s = 1.925 W_b/m^2$ 的产品,通过加张力铁损降低的多,而通过加压应力铁损增大的比较少。磁致伸缩也显著地呈现了这种现象。图4是 $B_s = 1.7 W_b/m^2$ 时的磁致伸缩,取向为 $B_s = 1.94 W_b/m^2$ 的产品加张力磁致伸缩成为负值,绝对值小,而加压应力磁致伸缩增加的较少。因为磁致伸缩是变压器产生噪音的主要原因,所以希望磁致伸缩要小,难于受应力劣化。取向度越好,就越可能达到这个要求。根据这个结果,说明取向度好的钢片在轧制方向上带张力情况下对磁性有较大的改善效果。如果能给予这样的张力,磁性就会大幅度提高。

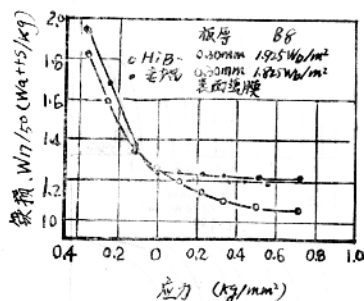


图3 外应力对铁损的影响

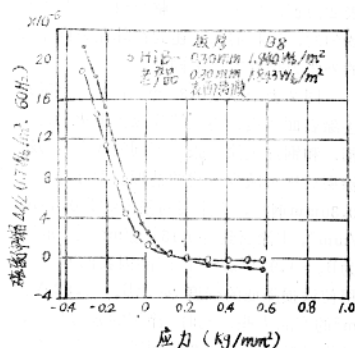


图4 磁致伸缩所受外应力的影响

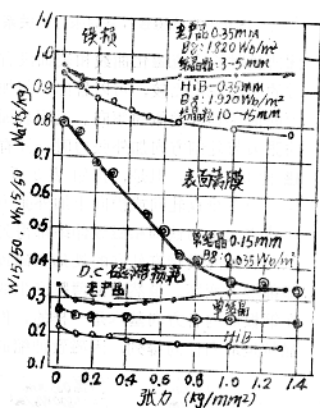


图5 在轧制方向有张力情况下铁损和磁滞损耗的关系

畴壁的干与情况。

(4) 表面薄膜对磁性的影响作用:

作为在工业上利用外张力作用的手段,有用表面薄膜加张力的方法。高温下铜片表面上生成的薄膜由于与钢板的热膨胀差而使铜片产生张力,能使磁性获得改善。片

图5表示在轧制方向有张力情况下铁损和磁滞损耗的关系。为了参考,同时列出了(011) [100] 单晶体 (0.15mm , $B_s = 2.03\text{W}_b/\text{m}^2$) 的 [100] 方向上的特性。取向好的产品铁损减小幅度大。 $B_s = 1.92\text{W}_b/\text{m}^2$ 的铜片因加张力而引起的铁损值降低,大部分是因涡流损失的减少造成的。而 $B_s = 1.82\text{W}_b/\text{m}^2$ 的产品加张力铁损降低的不多,这种行为几乎与磁滞损耗的行为是一样的。另外单晶体铁损降低的非常显著,但因张力而引起磁滞损耗的变化很小,几乎都是涡流损失的减少所形成的。

图6详细描述了直流磁滞损耗同张力的关系,这里表示了在张力下的磁化过程中晶粒界、板面上的磁极反

表面薄膜产生的张力在整个板面上基本上是均匀的, 这和前面所述的在轧制方向上加的外张力是有本质不同的。

图7表示厚度0.3mm的产品, 经酸洗去除表面薄膜, 再经消除应力退火后的铁损, 和钢片上涂以张力不同的A涂层及B涂层后铁损减少变化的情形。对于厚度为0.30mm钢片, A涂层的张力约为0.40Kg/mm², B涂层约为0.15Kg/mm²。取向为 $B_8 = 1.92W_b/m^2$ 的产品因表面薄膜作用使铁损降低的程度要比 $B_8 = 1.82W_b/m^2$ 的产品大些, 同时涂层的张力越大, 铁损降低越多。图8是两种产品在带有表

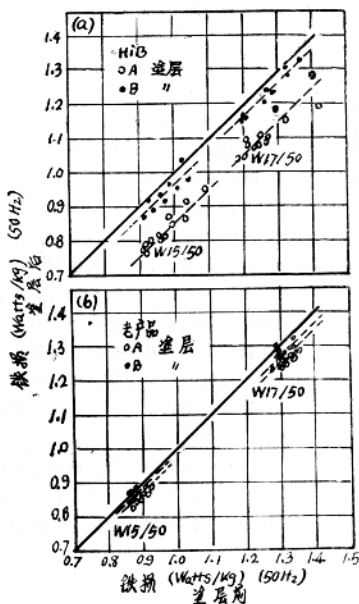


图7 表面涂层对铁损的影响作用

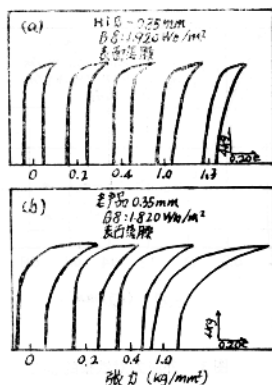


图6 直流磁致损耗同张力的关系

面薄膜时的直流磁化曲线和表面没有薄膜时的曲线变化比较, 可以看出, 与加外张力的情况具有类似的倾向。说明表面薄膜的张力与轧制方向加外张力时一样有改善磁性的作用。但是, 正如表2所示那样, 当在垂直轧向或横向上加外张力时, 在该方向上的铁损和磁致伸缩都得到改善, 而表面薄膜垂直轧向的铁损和磁致伸缩却都增大变坏。虽然表面薄膜产生的张力在钢板面内各方向基本是一样的, 但由于晶粒是取向性的排列, 因磁致伸缩的异向

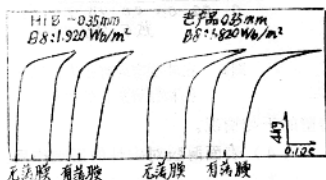


图8 表面涂层对直流磁滞曲线的影响

性不能产生与外张力加于轧向时同样的效果这是可以理解的。但是，它与外张力的改善作用比较接近，这是值得玩味的。

表 2. 表面涂以薄膜后对于 L 方向和 C 方向特性的影响

(a) 垂直方向 (c 方向)

	涂 层 张 力 (Kg/mm ²)					薄 膜 的 效 果
	0	0.11	0.23	0.33	0.47	
W10/50	1.25	1.08	0.92	0.86	0.87	1.80
$\delta L/L \times 10^{-6}$ (1.0Wb/m ²)	+8.9	+7.8	+5.3	+2.2	+0.7	+10.7

(b) 轧制方向 (L 方向)

W17/50	1.31	1.27	1.23	1.17	1.11	1.15
$\delta L/L \times 10^{-6}$ (1.7Wb/m ²)	+1.7	+0.4	-0.2	-0.3	-0.3	-0.2

(5) 应力敏感性:

如果变压器上应用的取向钢片的主要性能指标按应力敏感性大小依次排列，那么排列次序是：①磁致伸缩、②有效励磁伏安数、③铁损。对磁致伸缩的影响是最敏感的。虽然为了降低磁致伸缩水平通过表面薄膜产生弹性面张力其本身是没有必要的，但是考虑到变压器铁心实际装配工艺中的应力，就有必要降低应力敏感性。

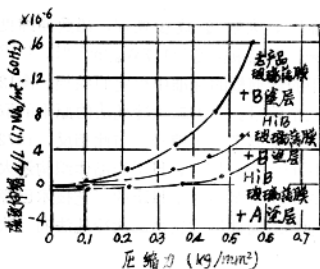


图 9 表面涂层对应力敏感性的影响

应力敏感性小，弹性面张力大的表面薄膜产品应力最不敏感。

加在钢板上的应力大致可分为拉应力和压应力。钢板轧制方向上的压应力会使磁致伸缩变坏。实际上由于弯曲存在着一个面上产生压应力的问题。如果钢板表面上的压应力是均等的就不是什么问题了，而实际上它是不均一的，在长度方向由于弯曲等原因有产生压应力而引起磁致伸缩劣化的危险。

图 9 表示老产品和 HiB 产品磁致伸缩的压缩特性。说明取向好的产品

如上所述, 如果改善取向硅钢片的取向度使 B_0 提高, 那么和表面张力效果结合起来就可以得到具有十分良好性能的硅钢片。

(6) 高磁感取向硅钢板在变压器上的应用效果

现在HiB正在向世界上20多个国家70多个电器制造厂输出, 图10是根据这些电气制造厂的报告整理的。首先是就主要的铁损指标来说, 从大到60万KVA的超大型变压器, 到小至10KVA的卷铁心变压器, 大体上由于材料性能的提高使变压器铁损相应减少了15%。据报告励磁电力可省一半。此外噪音平均低4~5呋(噪音单位), 最好的情况低了8呋。

HiB由于取向度高, 在轧制方向上的铁损显著降低, 但横向铁损差一些, 所以在叠装铁心变压器时, 需考虑铁心的装配, 为此, 制作模型变压器进行了研究。在直接缝(90°接缝)情况下反而比用老产品的性能差, 但是几乎所有变压器都是采用45°斜接缝, 这样横向铁损较差这一点就可以忽视。人所共知, 三相变压器中央接合部分产生旋转磁场, 所以三相变压器的铁损比单相变压器要大, 但是由此产生的铁损增大HiB和老产品几乎是一样的。这个结果和变压器实际生产情况似乎是完全一致的。

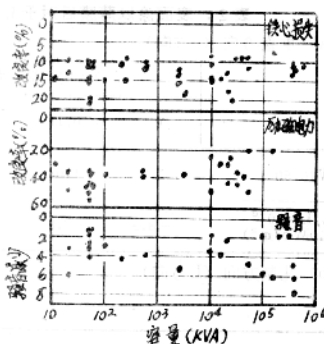


图10 变压器特性的改进

六、结 语

随着技术的进步, 硅钢片将向进一步提高 B_0 , 大幅度减少铁损, 磁致伸缩更加小的方向发展。图11表示了具有代表性磁性指标。当磁束密度为 $1.7 \text{ W}_b/\text{m}^2$ 时, HiB比老产品的铁损约改善了15%。表3是欧美所使用的硅钢板的标准中规定的铁损。图12是特性提高的经过和今后的设想。现在提高了约三个牌号。采用二次冷轧法的原来的取向硅钢板最高牌号是M₄(0.28), 10年间其性能只提高了半个牌号。与此相反, 1972年生产的HiB产品MiH(0.28mm)正趋近于MOH水平。同时, HiB的晶体结构还大有改善的余地, 工业性生产 B_0 将达到平均为 $1.95 \text{ W}_b/\text{m}^2$ 的水平。HiB的工艺技术已经向美国的阿姆公司、西德的ATH公司等输出, 世界取向硅钢片正由二次冷轧法向一次冷轧法的HiB过度。

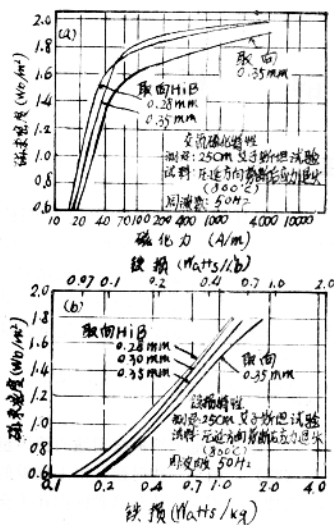


图11 (a)高磁感取向硅钢板和老产品的磁化特性比较

(b)高磁感取向硅钢板和老产品的铁损比较

表3. 取向硅钢板的铁损规格 (W17/50 : w/kg)

牌 号	0.28mm	0.30mm	0.35mm		
原取 来向 的性	M 6	—	—	(1.56)	
	M 5	(1.37)	(1.40)	(1.42)	牌 号
	M 4	(1.28)	(1.30)	1.37	M 4 H
		1.21	1.23	1.28	M 3 H
		1.15	1.17	1.22	M 2 H
		1.09	1.11	1.16	M 1 H
		1.03	1.05	—	M 0 H
		0.97	—	—	MT H
					HiB

译自《日本金属学会会报》(日) 74、1月号

王国斌 译 王 熙 校

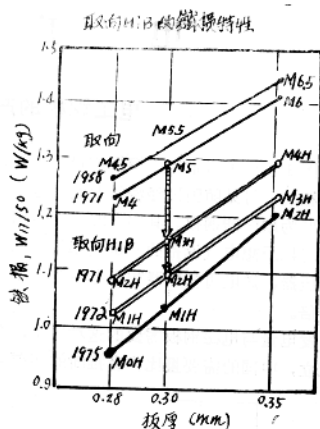


图12 铁损的改善

电 工 钢 板

电工钢板的产量变迁及用量

图1示出了日本电工钢板产量的变迁和发电量推移的比较。发电量与国民生产总值密切相关,可见随国民经济的发展,电工钢板的生产亦随之发展。电工钢板的总产量中有25%为取向硅钢板。其中有30%左右出口。由于出口的比率不是逐年急剧地变化的,因此可以予想电气设备的产量大体与发电量成比例。例如,如果发电厂增加,发电厂用的变压器,送电用变压器和配电用变压器就得增加,其增加的变压器容量约为发电容量的6倍。

发电量与电磁钢板需要的这种关系,在外国也是成立的,但是在发展中国家里不一定成立,中国的需要量比作者推断的还要多些。

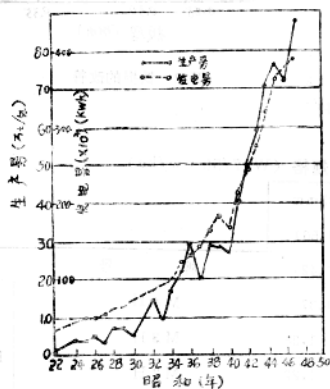


图1 日本电工钢板的生产推移

左右是使用非取向硅钢板。其它静止器中如荧光灯镇流器和开关控制器等,它们都使用非取向电工钢板。

图2为电工钢板按用途的使用量(略)。稍早一些时候,电工钢板的需要变化不大,估计这种倾向还会改变。

本文据笔者的计算,若将交流电动机家庭用的部分一起考虑,其90%消费于50马力以下的电动机,1马力以下的约占6.6%。包括家庭用的洗涤器和电冰箱用马达。这说明了小型电动机用材料的需要量很大,对材料制造厂来说是重要的领域。

另外,除透平发电机使用取向硅钢板外,其它旋转机已全部使用非取向电工钢板。在静止器中,如电力变压器,因为有铁损问题,所以使用取向硅钢板。但在变压器中约有15%左右

品 种 的 改 变

图3示出了新日铁电磁钢板质量的变化，川崎制铁厂亦生产电工钢板，其质量也有着同样的变化。

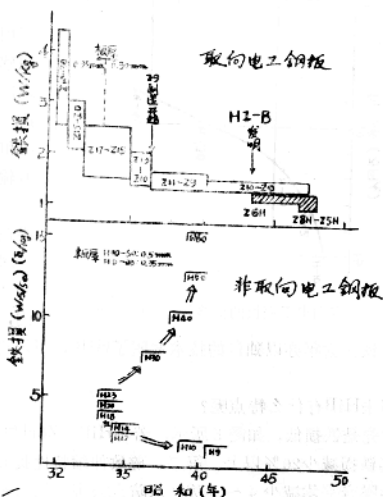
如图所示，在取向电工钢板中，铁损 ($W/17.50 = 17000$ 高斯下50周波的铁损) 逐渐地下降是很明显的。这是由于有关人员的努力结果，关于图中H1B的发展后面将要叙述。

非取向电工钢板有两个倾向，即铁损减少的方向和增加的方向。取向电工钢板向着高级化的方向发展，而非取向电工钢板则有意地向低级化倾向发展。作为电工钢板，没有铁损应该是理想的，在变压器和大型旋转机中，最受欢迎的是铁损小的高级钢板。但是，对家庭用的小型电动机而言，即使铁损高些，而价格便宜，这对经济地进行设计是合适的。因此出现了上述那样的两种倾向，就非取向电工钢而言，图中所示的各等级可按用途灵活运用。

在透平发电机和通讯用电源变压器中需一部分低级的取向电工钢板，但数量不多，所以在设备制造方面，现在已经没有过去那样的Z—15以下的低级品，而目前差不多全部制造Z—10以上的高级品。

日本自1967年以来无取向热轧硅钢板已不再生产了。这是由于冷轧钢板质量的提高，热轧钢板生产操作条件恶化的缘故。在欧洲，虽然还遗留一些，但是，估计在数年内热轧硅钢板将被淘汰。

图中没有示出，但从1963年就开始制造非取向电工钢板的半成品了。其制造的方法如下：电机制造厂将冲压钢板退火处理而获得H—30左右铁损的材料，退火前必须考虑到冲压性能的机械特性，退火后尽管机械硬度有所降低，但铁损之类的磁性还是良好的。在材料制造厂中，因可以省略最终退火道工序故价格便宜，但对用户来说，必须



具备退火处理的技术。

上面我们概述了品种的变化，而价格是这种变动的主要原因，图4示出了价格和铁损的关系。

技术变动因素及今后的需要动向

1. 变压器用电工钢板

(HiB的出现)

新日铁经过多年的研究成功地发明了用普通高斯法不能获得的低铁损、高磁感密度的取向电工钢板（商品名称为取向HiB），并于1968年起开始工业生产。这个技术已提供给美国的阿姆可公司和西德的ATH公司，产品已向欧美各国输出。

占变压器大部份需要量的电力变压器在日本国内得到好评，过去的取向电工钢板已逐渐为HiB代替，去年这种倾向尤为强烈，可以预料，在今后几年之内，80%的取向电工钢板将达到HiB

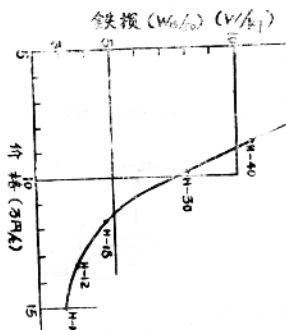


图4 非取向电工钢板的价格例子 (0.5mm厚)

化。川铁在去年亦以独自的技术发明了HiB，可以说日本的电工钢板已名列于世界前茅。

那末HiB有什么特点呢？

首先是铁损低，如图5所示，若将HiB的Z6H与一般取向电工钢板的Z-9相比较，其铁损减少20%以上。第二，磁致伸缩特性提高，变压器的噪音减少。在实际的变压器中噪音平均减少4~5分。从防止公害的问题来看，低的噪音很受重视，所以这个效果在日本尤其引人注意。第三，具有高的磁通密度，并因此而减少了励磁电流。将上述特征综合起来便有可能使变压器的设计磁通密度得以提高，并有可能使其达到小型化，由于电工钢板质量的高级化，其单价的提高也是相宜的。在大型变压器设计中，若将磁通密度降低1千高斯，则噪音可降低3分。而在这点上，对HiB来说是一个很大的优点。将设计磁通密度降低一千高斯，等于增加约6%的铁心材料，即使将单价定为20万日元/吨，却增加了1.2万日元/吨的材材费。可见HiB是经济的。

这里附带说一下，在欧美已有评价变压器铁损的经济标准。例如，铁损每降低1000瓦/吨的变压器，购入价格可增加15万日元（这是电力公司的评价）。

例如，若以美国那样的60赫考虑，变压器的铁损一般为2千瓦/吨。将这些变压器HiB化而使铁损能减少20%，则为15万日元/千瓦 $\times$ 0.4千瓦/吨=6万日元/吨，即使

材料费增加 6 万日元也是好的。如果单价提高数千日元到 1 万日元，当然使用 HiB 是经济的。

评价铁损虽然根据国家资源问题来考虑。但在日本也认为是应当采用的制度，希望得到大家的协助。也听到过这样的说法，说由于进行这样的铁损评价而担心变压器的可靠性降低。然而目前对于制造输出变压器，应当考虑到这种情况，如果考虑使用最高级的电工钢板，我想可靠性也许不会有别的问题吧。

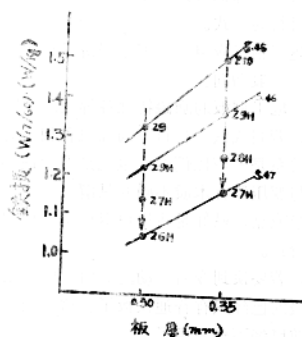


图 5 HiB 的铁损

对于大型变压器用电工钢板，最近有取消消除应力退火的倾向。过去必须由用户对取向电工钢板进行消除应力退火，而最近，材料生产厂处理技术的进步，尽管迭片铁心有缝隙和剪切应力，铁损也几乎没有增加，因此可以完全取消消除应力退火。不充分退火（如箱式退火）特性反而更好些。因此，在世界的变压器制造厂中，根据自己的判断决定采用或不采用退火。我们认为省略消除应力退火是有利的，但近年来噪音变得严重起来，故消除应力退火对于磁致伸缩特性是有效的。（可以说是 3 分左右的效应）。现在的问题是为什么有效还不清楚。将来，当材料制造厂的技术更加完善时，几乎完全可以供给取消残余应力那样的材料，如果真是这样的话，现在还是必须进行消除应力退火。此外，对于像卷绕铁心那样强变形加工工件，消除应力退火当然是不可缺少的。

2. 感应电机和铁心材料

大部分交流电机用电工钢板都制造感应电机，如图 3 所示，这里想考察一下这个领域内低级化的倾向。

关于三相感应电机，在近藤氏的论文（电学志、78839）中所提出的基本的经济设计方法，与变化器不同的有趣之处是：所用铁心材料越少，所需的铜材料也越少。单相感应电机被大量用于民用，若从上述那样的电工钢板的使用量来考虑，包括 1 马力以下者，对于我们是重要的。但没有像三相感应电机那样的理论的经济设计法。作者曾推想了一个可以近似地说明过去日本国内用户使用材料变迁的较好的评价公式，并由此可设出下列实验式：

$$F \approx x + 1.4Z$$

式中，F 表示小型电机用电工钢板的优值、x 为铁损、Z 为标准价格。即使铁损增