

内 部

硅钢片参考资料

(十一)

1978

太原钢铁公司科技处

目 录

硅钢片的最新发展	(1)
取向硅钢的退火方法 (专利)	(16)
低氧低硅迭片钢 (专利)	(26)
高导磁率立方棱取向硅钢及其制造方法 (专利)	(32)
用加入硼和氮的方法生产取向硅钢片 (专利)	(37)
含铜高导磁率硅钢在静态气氛中的冷却方法 (专利)	(45)
加硼和硼化物的硅钢片制法 (专利)	(48)
电工钢的绝缘涂层 (专利)	(59)
美国取向电工钢标准	(68)
美国无取向电工钢标准 (全工艺型)	(75)
美国无取向电工钢标准 (半工艺型)	(83)
德国标准 DIN46400 第一部分	(91)
德国标准 DIN46400 第二部分	(103)
德国标准 DIN46400 第三部分	(112)

硅钢片的最新发展

一、序 言

欧美国家开始生产硅钢片是以美国为中心显著发展起来的。日本的生产技术发展很慢，为此从1952年起，开始从美国引进技术。同时，这个时期生产设备方面的技术也有了很大的发展，从而使日本自己有可能生产类似的产品，产量逐年增加，质量也不断提高。特别是近十年来的发展尤其显著。这个时期其他国家硅钢片的质量几乎处于停滞状态，而日本却在取向硅钢中发展了世界上首创的高磁感取向硅钢片；在无取向硅钢片上发明了具有良好表面绝缘的产品，适应了各种用途的需要。下面谈谈这些方面的发展情况。

二、硅钢片的发展概况

磁性材料中采用硅这一元素从1900年就已开始。1903年德国首先在工业性生产上使用。1903年哈德菲尔德的专利发表了，美国获得了这个专利的使用权，也开始了硅钢片的工业性生产。到1906年，硅含量提高到了3%。在生产技术上，由于Si含量的增加，碳含量的降低，退火温度的提高，以及炼钢技术的发展，使硅钢片的质量不断得到提高。当时硅钢片几乎全部是热轧的，但从电机钢开始逐渐变为生产冷轧钢带，于是铁芯冲片能够用连续冲床进行冲片了。热轧变压器硅钢片发展了含硅高达5%的产品。这些钢片退火时采用片间涂隔离层并在1100°C以上的氮气保护气氛中进行长时间退火的工艺，使铁损大大降低。

冷轧取向硅钢片的出现是硅钢生产上划时代的发展。1934年高斯发表了制造取向硅钢片的专利，这是一种包括中间退火的两次冷轧法。这种方法是以前美国阿姆柯公司为中心发展起来的。在高斯专利中，成品退火是连续退火，这使铁损恶化，因此后来采用了高温长时间的罩式退火。在热处理过程中脱碳是非常必要的。于是发展了在湿氢气气氛中进行连续退火的方法。进行成卷钢带退火必须在钢片间涂以隔离剂，于是发展了成品退火时钢带表面涂布MgO粉使其与脱C退火时生成的氧化层作用生成玻璃状薄膜的生产技术。此外，这种生产工艺的一个很大的特点是在热轧时采用高温加热坯料，以提高取向度，使产品的性能更趋于稳定。这些工艺技术的出现，使取向硅钢片有了很大的进步，从而取代了作为变压器主要材料的热轧硅钢片，阿姆柯公司把生产取向硅钢片的专利于

1950年提供给阿拉根尼公司, 1953年提供给了合众国钢铁公司。1952年起首先向国外提供热轧硅钢片的专利, 接着开始提供取向硅钢的专利。从此, 世界上80%的取向硅钢片均采用了阿姆柯的生产工艺。其他20%的产品也采用类似的生产方法。

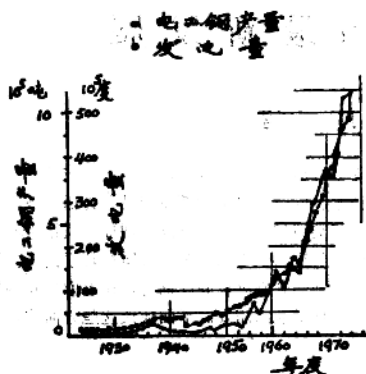


图1 日本的电工钢产量及发电量

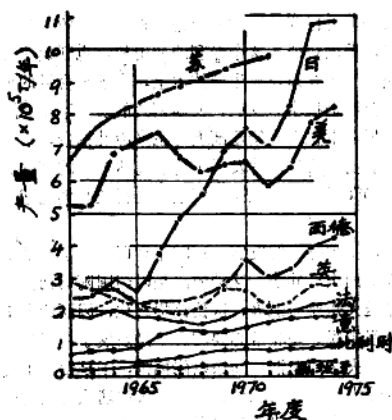


图2 各国电工钢产量

虽然取向硅钢片取得了显著的发展, 但从1960年起变化就不大了, 处于一种稳定状态, 技术上停滞不前。这种钢片最大的变化是新日铁的商业名称为“Hi-B”的高磁感取向硅钢片的出现。1964年它开始进行工业性试验, 1968年正式出售产品。并且于1971, 1972, 1974和1975年分别向阿姆柯公司, 西德奥古斯特·蒂森公司, 法国协交公司和比利时考克里尔公司, 伯利恒钢公司提供了专利许可证。川崎钢铁公司的高磁感取向硅钢片RGH, 也在1973年研制成功, 1974年开始出售产品, 并向瑞典司拉哈姆公司提供专利许可证。

图1是日本硅钢片产量的变化情况, 它随着发电量的变化而增长。图2是主要硅钢片生产国产量的变化情况, 在过去20年中日本的增涨量是很显著的。美国由于小型电机大量使用着与普通碳素钢板类似的钢板, 相当于日本的S30—S60低牌号产品, 使用很少, 所以产量不太多。

最近, 硅钢片的发展, 在取向硅钢方面出现了高磁感取向硅钢片, 而无取向硅钢片没有发展新的品种, 主要发展的是家庭小电机用的低牌号产品及与之相适应的绝缘薄膜。

三、无取向硅钢片

在无取向硅钢片中，一般把含Si0.5%以上的作为中级与高级牌号产品，0.5%以下的为低牌号产品。另外，因为作为家庭电器的小电机铁芯，铁损可以稍大些，故采用不含硅的、价格便宜电磁钢板来制造；也使用与普通碳素钢板几乎一样的产品制造，冲片后由用户进行退火处理。日本由于低牌号硅钢片生产很多，普通钢板使用极少，而在美国则大量被使用。根据用户使用条件的不同，产品可分为全工艺产品和冲片后由用户进行退火以发挥其磁性的半工艺产品（半成品）两种。高牌号产品铁损要求越高，则含硅量越高，从而磁感就降低。低牌号产品由于含硅量很少或者不含硅，其磁感高。通常，对低牌号产品，用户为了节省加工费用，使用厚度0.5%的产品，或者根据情况使用更厚一些的产品。中等牌号的产品大部分较厚，厚度0.35%的也有。要求铁损低的高牌号产品则生成0.35%或0.5%厚度的产品。

1) 无取向硅钢片的发展过程

如图3所示，日本的冷轧无取向硅钢片是从JIs标准中的S23到S18这些中等牌号开始生产的，以后逐步发展了低牌号与高牌号产品。小型电机尽管铁损稍差些，由于希望磁感较高，并且价格便宜，因而出现了含有少量硅的S30以下牌号的产品。而大型电机或小型变压器则要求低铁损的材料，因此生产了S11, S14这些牌号，直到出现JIs中还未规定的H10, H4这类高牌号产品。

越是高牌号产品，其Si含量越高，电阻率越大，而铁损就越低，但缺点是饱和磁感强度降低了。

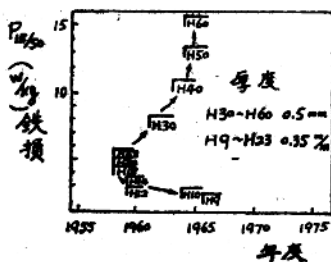


图3 日本无取向电工钢牌号情况

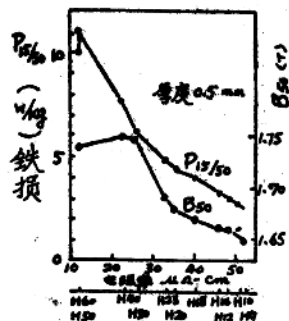


图4 无取向电工钢不同牌号的典型电磁性能

图4是H₁₀（即JIs中的S₁₀）至H₄全工艺产品各个牌号的相应电阻率与对应的典型

铁损值 $W_{15/50}$ (1.5T及50HZ时的铁损)及磁感强度 B_{50} (5000A/m时的磁感强度)的互相关系。 H_{80} , H_{60} 比 H_{50} 含硅量少,所以饱和磁感强度高。然而,由于其磁化性能差,所以在5000A/m时的磁感强度并不比 H_{50} 高。对小电机而言,磁感强度显得重要,因此采用低牌号钢片较为合适。对于要求铁损为主的大电机而言,则应采用高牌号的钢片。无取向硅钢片的低、中、高牌号产品,根据特性用途的不同都是很需要的产品。半工艺产品(半成品),通常把用户在750°C 2小时退火后的磁性能作为标准值,日本主要使用的是厚度为0.5% S_{50} 和同种规格的 HS_{50} 。

为适应各种用途,还发展了其他的无取向硅钢片。有些电器在高频状态下使用,为此生产了0.15%及0.2%的薄规格无取向硅钢片;高速电机要求机械强度,因此,生产了抗张强度达60kg/mm²的高强度无取向硅钢带;还有耐磨性能好的磁力开关用的无取向硅钢量等。

2) 加工性能的改善

小型电机用的低牌号产品的进步及这种产品绝缘薄膜的发展是近年来的一项重要成就。这种产品尽管铁损稍有增加,但却具有高的磁感强度,良好的好工性,并且价格便宜,这是所希望的。所谓绝缘薄膜,顾名思义,主要是为了增加铁芯迭层间的绝缘。然而小型电机只要有轻微的绝缘电阻就行了,除此之外还要求薄膜具有冲切性,焊接性,退火时防止粘结,耐腐蚀性等性质。过去的绝缘薄膜采用的是磷酸盐,铬酸盐等无机盐薄膜。由于树脂的发展,特别是水溶性树脂或者水分散系树脂的发展,把这种材料和无机盐配合,特别是和铬酸盐配合,发明了加工性与耐热性都好的半有机薄膜。这种薄膜与过去的薄膜相比,其冲切性非常之好,也充分具备作为无机盐特点的耐热性能,并且对“氟里昂”气体的耐腐蚀也很好。由于以上这些优点,在低牌号产品上几乎都采用了这种绝缘薄膜。

冲切性能虽然也受钢板机械性能和表面氧化层的影响,可是薄膜的影响是十分显著的。如图5所示,薄膜对冲切性能有很大的作用。在该试验中,当以5%圆孔进行冲切试验时,根据薄膜种类不同,当毛刺达到50 μ 时的冲切次数在10万次到300万次之间变化。但由于实际冲切铁芯的形状复杂,没有这么大的差别,然而薄膜的改进,对冲切性能的改善是很明显的。日本小型电机的定子外圈大多采用焊接方法固定,转子采用铝合金压铸,通过改善钢中的焊接性及切削性,使加工性能有了很大的提高。

四、取向硅钢片

图6是在1.5特斯拉(1.5Wb/m²), 50赫芝时取向硅钢片铁损变化的情况。可见,采用两次冷轧法的取向硅钢片,铁损明显地降低了,直到1960年左右始终在不断地进步。可是60年以后,几乎看不到变化了。然而,高磁感取向硅钢片Hi-B的出现,却再次使性能发生了显著的变化。

图7是日本硅钢牌号级别变化的情况。以1.7特斯拉及50赫芝时的铁损值表示。

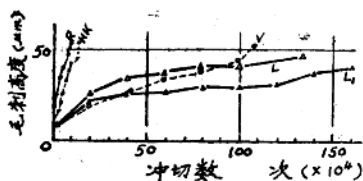


图5 涂层对冲切性能的影响

材料: H₁₀, 0.5%厚 R, HK——无机涂层
L, L₁——半有机涂层 V——有机涂层
5%直径工具钢模, 340次/分, 5%间隙。

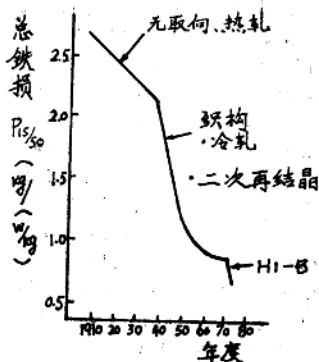


图6—不同年代工业电工钢铁损的最低值

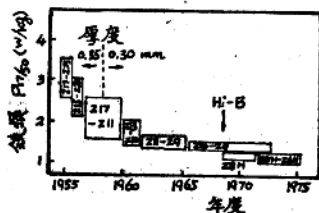


图7—日本晶粒取向电工钢工业牌号总损耗的改善。

取向硅钢除了很少一部分用于制造发电机外, 绝大部分用来制造变压器。用铁损低的硅钢片可以制造损耗小的变压器。为此, 使用低铁损的高牌号硅钢片是适宜的。较高牌号的产品除了用于出口及价格便宜这些特点外, 其存在的价值已经越来越少了, 它们已被高牌号产品所取代。

铁在不同结晶方向上被磁化的能力是不同的, 其中〔001〕轴是易磁化方向, 〔111〕轴是磁化较困难的方向, 〔011〕轴是中等易磁化方向。取向硅钢片由于其轧制方向平行于〔001〕轴, 而具有〔110〕、〔001〕取向的晶粒, 因而使磁性提高及铁损降低, 出现了划时代的进步。铁损主要包括磁滞损耗与涡流损耗, 它们主要受到下面这些重要因素的影响。

磁滞损耗	{	结晶方向
		钢板纯度 (夹杂物, 析出物)
涡流损失	{	内应力
		电阻率 (Si含量)
		钢板厚度
		钢板表面张力 (表面薄膜)
		磁畴大小 (晶粒度)

以前的产品,是通过提高纯净度,降低内应力来改善磁滞损耗,通过提高Si含量增加电阻率,减少板厚,细化晶粒等方面的努力来改善涡流损失。其结果虽然产品性能的提高很显著,但一般认为Si含量达到3.25%在生产上已到了极限,而且钢板纯净度的提高,内应力的减少及板厚的减薄等也几乎没有改进的余地了。但是,高磁取向硅钢片通过晶粒取向度的划时代改善,使磁滞损耗大大降低;用表面绝缘薄膜产生的张应力效果则减少了涡流损耗,从而使铁损进一步获得了改善。

由于硅钢片是迭装使用的,必须厚度均匀,板型平整。另外,近来变压器的噪音问题已成为一个重要问题。减少噪音的一个重要因素就是必须使硅钢片减少磁致伸缩。

取向硅钢片的厚度通常是0.35mm, 0.30mm及0.28mm。减薄板厚则涡流损失减少,使铁损降低,但却使变压器铁芯的加工组装机时增加。美国和欧洲用0.28mm硅钢片制作卷铁芯及对铁损要求严格的迭装铁芯,用0.30mm钢片作一般铁芯。日本一般用0.30mm的作卷铁芯,0.35mm的用于迭装铁芯。

1) 生产工艺特点

过去各国都采用两次冷轧法生产取向硅钢片。表1表示它的生产工艺。两次冷轧法用MnS作为抑止剂,也就是在炼钢时添加Mn和S,经过铸锭,热轧和具有中间退火的两次冷轧轧成成品厚度,然后通过脱C退火及最终退火使晶粒长大。在这种情况下,把板坯加热到高温使MnS固溶,热轧后使MnS弥散分布,以抑制一次再结晶的成长而促使二次再结晶长大,然后,在长时间高温退火中再使MnS扩散为表面上形成的玻璃状薄膜所吸收而不损害磁性。最后,在进一步拉伸退火时,涂以无机绝缘薄膜。川崎钢铁公司用MnSe代替MnS作为抑制剂。如图8(b)的(100)极图所示,各晶粒的易磁化轴

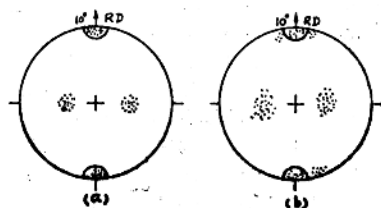


图8—取向硅钢中的(100)取向织构图
a) HiB取向硅钢 b) 一般取向硅钢

[001]与轧制方向的偏离角度在 10° 以内的占75%;平均偏离角为 7° 。这个取向度与800A/m(约等于10奥斯特)时的磁感强度 B_1 相对应,取向度越好, B_1 值越大。 B_1 一般为1.82特斯拉。虽然两次冷轧法大力提高了取向度,但是 B_1 达到1.83特斯拉时已过了头,要取得更高的取向度,在工业上几乎是不可能的。

为此,只好通过减薄厚度来降低铁损。美国曾一度试生产0.23mm厚的产品,但因为工业生产中成本增高和难以得到预期的低铁损而行不通了。作为两次冷轧法的工业产品0.28mm的成品,是目前性能最好的产品。两次冷轧法的生产工艺尽管将来还要加以研究,但一般认为改善的余地已经不太大,这种方法大致上已经完善了。表1列出了日本硅钢片JIS性能的标准值。

表1, 工艺过程和铁损最佳值

工 艺 过 程	Hi-B			一 般 取 向		
	炼钢 (Al, N)	板坯	热轧	炼钢 (Mn, S)	板坯	热轧
	常化处理			退火		
	冷轧			冷轧		
	↓			退火		
	脱C			冷轧		
	罩式炉退火			脱C		
				罩式炉退火		
铁损 保证 值 (P17/50 W/kg)	牌 号	0.30 mm 米	0.35mm 米	IIIs牌号	0.30 mm 米	0.35mm 米
				G12	—	1.83
				G11	1.62	1.66
				G10	1.47	1.51
				G 9	1.33	
	Z9H	—	1.37			
	Z8H	1.22	1.26			
	Z7H	1.13	1.17			
	Z6H	1.05				

米: 仅指HiB—和一般粒粒取向的电工钢片。

与此相反, 高磁感取向硅钢板Hi-B是用AIN作为抑止剂, 采用一次冷轧法生产的。正如表1所示, 其生产工艺是: 炼钢时添加Al和N, 铸锭, 热轧后进行AIN的析出退火, 接着通过一次强冷轧到成品厚度, 然后进行脱炭和成品退火。过去认为取向硅钢片是不可能用一次冷轧法生产, 同时认为AIN是有害的。但是AIN的良好特性, 配合以一次冷轧法可以使取向度明显提高。AIN在1100°C以上时溶解, 扩散而被玻璃薄膜所吸收。这种产品的取向度如图8(a)所示, 其[001]轴平行轧制方向的程度很高, 偏离角10°以内的占100%, 而平均为3°。B₉₀值达1.92特斯拉, 比以往的产品的1.82特斯拉有了大幅度的提高。在高温下形成的玻璃状薄膜是一种陶瓷性物质, 其热膨胀系数非常小。因而在钢板冷却时对钢板产生一种张力。再在其上涂以无机盐薄膜仍能产生同样的效果。这种张力效应虽然对B₉₀为1.82特斯拉的取向钢片的铁损降低不很显

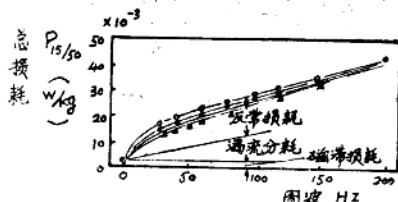


图9 3%Si晶粒取向钢片不同张应力对每个磁化周期中铁损值的影响, 磁场强度为1.7T表面经化学抛光。

$B_8 = 1.99T$

厚度: 0.28mm

晶粒直径: 14mm

图例 ○—○ 0 kg/mm²

·—· 0.6 kg/mm²

×—× 1.2 kg/mm²

△—△ 1.8 kg/mm²

的涡流损耗, 它以热的形式散失。这种损耗与板厚、频率及最大磁感强度各自的平方成正比, 而与电阻率成反比。因此, 每周的损耗与频率成正比。反常涡流损耗是与畴壁移动有关的一种涡流损耗, 它与畴壁移动的平方成正比。因为畴壁移动速度与磁化频率成正比, 所以每周的反常涡流损耗与频率成正比。但是在30赫兹以下的低频状态下磁畴数依据频率变化的这种比例关系消失了。由于在同样频率下速度与畴壁移动的距离成正比, 所以磁畴尺寸越大速度就越快, 从而涡流损失就增加。但是磁畴尺寸大时畴壁数减少, 所以, 反常涡流损耗不是和磁畴尺寸的平方成正比, 而是与磁畴尺寸成比例。反常涡流损耗在50、60赫兹情况下约占铁损的50%。随着取向硅钢片的改进, 反常涡流损耗所占的比例增大了。为了降低这种损耗, 减少磁畴尺寸是很重要的。为此, 随着取向度提高, 亦即 B_8 值的提高而增大张力效应是很重要的。

①取向度与磁滞损耗

取向度可以用 B_8 这一特性来表现。如图10所示, 当 B_8 提高时磁滞损失就显著减少。该图是板厚为0.35mm的情况, 当 B_8 由1.82特斯拉时的磁滞损失 $W_{H17}/50$ (是真

著, 可是对 B_8 为1.92特斯拉的产品降低铁损的效果却十分显著, 这是由于取向度提高的复合作用有效地使铁损降低的结果。这种产品的铁损值列于表1。

2) 磁性

图9是铁损分离的典型例子, 表示在1.7特斯拉下每周的铁损与频率的关系。一般认为磁滞损耗之值与频率成比例, 而每周的磁滞损耗是一定的。古典的涡流损耗是材料中均匀磁化情况下的

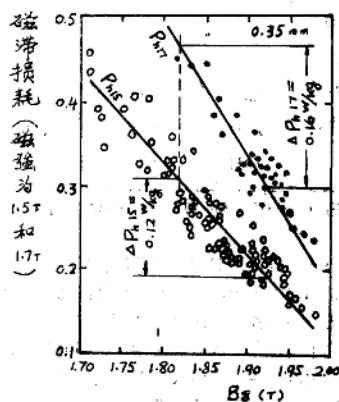


图10—晶粒取向硅钢片 B_8 值对磁滞损耗的影响。

流磁滞损失的50倍)减少了0.16W/kg。改善晶粒取向使 B_8 值提高,这是降低铁损的首要原因。

②取向度与张力效应

如果在取掉表面薄膜的试料上加以张应力和压应力,那么在加张应力的情况下,由于 90° 磁畴减少 180° 磁畴增加,磁畴结构发生变化,铁损减少了;而在加压应力的情况下, 90° 磁畴增加铁损也增大。可是随着取向度的不同,变化情况大不相同。如图11所示,取向性好、 $B_8 = 1.925$ 特斯拉的产品,因张力而使铁损减少很多,并且当加上压应力时铁损的增加也少。

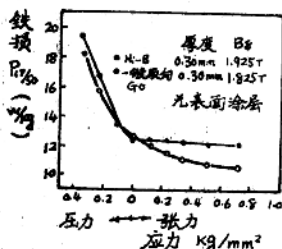


图11—沿轧向的应力对Hi-B及取向G.O.材料总铁损的影响。

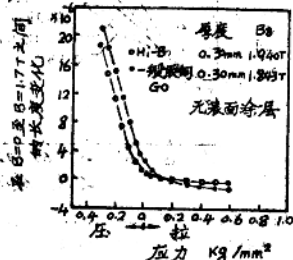


图12—Hi-B和一般取向硅钢沿轧向的应力对磁致伸缩的影响。

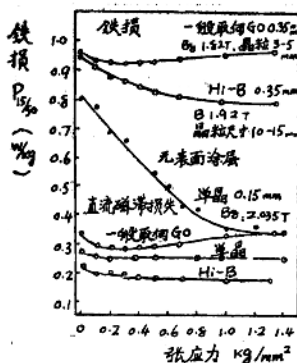


图13—晶粒取向电工钢张力与总铁损及直流磁滞损耗的依赖关系受取向度的影响。

这种现象在磁致伸缩上也表现的很确实,图12是 $B = 1.7$ 特时的磁致伸缩。取向度好、 $B_8 = 1.94$ 特的钢片在张应力下其磁致伸缩为负值,绝对值小,在压应力下磁致伸缩增加的少。磁致伸缩被认为是变压器噪音的主要原因,所以希望磁致伸缩要小,要难以产生应变劣化。取向度越好就越能满足这一要求。这个结果说明取向度好的钢片在轧向上受张力磁性改善的效果大。因此,假如能够给以这种张力,那么就可以期望电磁特性大幅度提高。

图13表示在轧向上张力作用下的铁损与直流磁滞损耗的关系。为了便于参考,图13同时列出(110) [001]单晶体(厚0.15mm, $B_8 = 2.035$ T) [001]方向上

的性能。取向度高的钢片铁损减少的多。 $B_s = 1.92T$ 这种钢片因张力而产生的铁损降低大部份是涡流损耗的降低,而 $B_s = 1.82T$ 的钢片张力使铁损降低的少,这和磁滞损失的规律差不多相同。至于单晶体,张力使其磁滞损耗变化很小,几乎都是涡流损耗的减少,铁损降低非常显著。

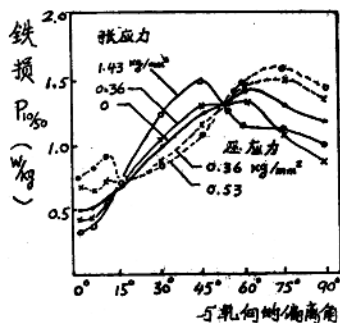


图14—Hi—B产品 ($B_s = 1.95$, 厚度0.27mm, 无表面涂层) 应力对铁损的影响和钢片取向的关系。

向外加的张力本质上是不同的。但是对于 (110) [001] 结构而言, 与轧制方向上的外

图14是从与轧向成不同角度并在该方向上取试料, 磁化时磁场强度为1特斯拉的铁损变化曲线。试料是取向度高 $B_s = 1.95$ 特的钢片, 并去掉了表面绝缘薄膜。与轧向偏离 10° 以外的试料, 平行于磁化方向的张力几乎没有使铁损降低, 而偏离角在 15° 以上时张力使铁损增加。这就说明如果取向度不好, 就不能指望通过张力效应使铁损减少。另外, 55° 方向相当于 [111] 轴方向, 张力不会引起铁损的变化。

在工业生产中可以靠表面薄膜产生张力。表面薄膜形成的张力在钢板内部是均匀的张力这和上述沿轧制方

表2 在Hi—B垂直于轧制方向上不同张应力与表面涂层对铁损和磁致伸缩的影响

(a) 顺轧制方向						
总铁损 $P_{17/50}$ (W/kg)	相应的张力 (kg/mm ²)					表面
	0	0.11	0.23	0.33	0.47	涂层
	1.31	1.27	1.27	1.17	1.11	1.15
$\delta L/L \times 10^{-6}$ (0T~1.7T)	+1.7	+0.4	-0.2	-0.3	-0.3	-0.2
(b) 垂直轧制方向						
总铁损 $P_{1.0/50}$ W/kg	1.25	1.08	0.92	0.86	0.87	1.80
$\delta L/L \times 10^{-6}$ (0—1.07)	+8.9	+7.8	+5.3	+2.2	+0.7	+10.7

加张力具有类似的效果,使轧制上的铁损与磁致伸缩得到改善。如表2所示,当在轧制方向与垂直于轧制方向上外加张力时,铁损与磁致伸缩都得到改善,可是表面薄膜促使轧制方向上磁性改善,而垂直轧制方向上铁损与磁致伸缩都大为恶化。 B_s 为1.92T的材料,表面薄膜引起的铁损和磁致伸缩改善,与外张力引起的改善显示了同样程度的效果。

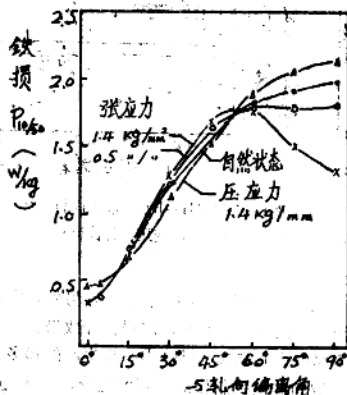


图15—Hi—B产品在轧向不同夹角向上的铁损 ($B_s=1.29T$, 有涂层)

图15是在具有表面薄膜情况下与轧向成不同角度的各个方向上磁场为1.0特斯拉时的铁损值。随着与轧制方向偏离角的增大,铁损增大。外加张力虽然使垂直轧向的铁损降低,可在偏离轧向10°以内薄膜已经使铁损降低了,所以外加张力后铁损没有什么变化。

这种由表面薄膜产生的张力效应,取向度越好,薄膜引起的张力越大,其效果越显著。为此,在玻璃状薄膜上再涂以张力效果大的无机系薄膜(S_2 薄膜)可进一步提高效果。

③应变敏感性

如果相对变压器特别重要的取向硅钢片特性按应变敏感性大小顺序排列,则为:磁致伸缩有效励磁伏安,和铁损。以磁滞伸缩最为敏感。为减小磁滞伸缩,虽然表面薄膜产生的弹性面张力本身不是那么必要,可是考虑到变压器铁芯实际组装加工过程中的应变,钝化其应变敏感性是必要的。

加在钢板上的应变大体上可分为拉伸应变和压缩应变。钢片轧制方向上的压缩应变使磁致伸缩变坏。实际上弯曲所造成的板面压缩应变是有问题的。假如对钢板表面的压缩是均等的,那么就不是一个问题了,可是实际上是不均匀的。令人担心的是由于弯曲等原因使钢片在长度方向上发生了压缩应变,从而使磁致伸缩恶化。

图18是老产品与Hi—B产品磁致伸缩的压缩特性。可见,取向性好的产品应变敏感性小,弹性面张力大的涂层产品应变敏感性特别迟钝,质量良好。

如上所述,高磁感取向硅钢片,通过改善取向度提高了 B_s 特性,与表面薄膜产生的张力效应相结合,获得了具有非常好的磁性能产品。

3.4 高磁感取向硅钢片在变压器上实际应用的效果。

目前取向硅钢片Hi—B在国内外都被广泛地采用,图12是根据各个电机制造厂的报告绘制的。首先就重要的铁损特性而言,从大至60万KVA的超大型变压器到小至10KV

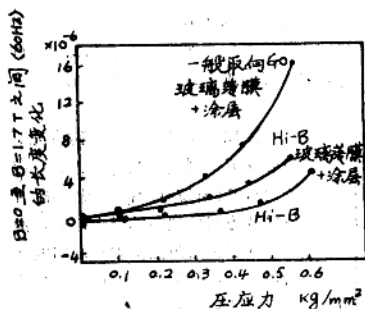


图16—晶粒取向硅钢片(0.3mm)的取向度和表面涂层对压力作用与磁致伸缩的依赖关系。

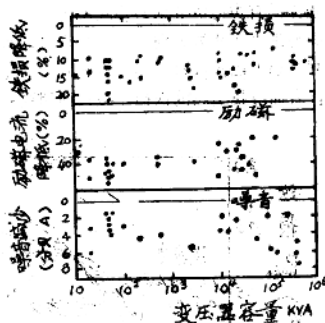


图17—采用Hi-B及一般取向材料按相同的设计制作的变压器特性比较。

A的卷铁芯变压器，由于材料性能的提高，其损耗大体降低了15%左右。另外，励磁电流减少了一半。其次噪音平均降低4—5分，而最大降低8分，取得良好效果。

根据最近日本电机企业发表的资料，用厚度为0.35%的Hi-B产品生产的10多台从500至1000MVK的三相变压器与使用原来的取向硅钢片制作的变压器比较，其铁损减少了10%，励磁电力减少了约40%，变压器噪音减少了4—7分。

4) 高磁感取向硅钢片的进步与未来的发展。

铁损的改善是由于 B_2 值提高，薄膜的张力作用、减小板厚，提高纯度，增加Si含量或使晶粒度减小等方面达到的。

图18是铁损与板厚的关系。可以看出当取向度提高， B_2 值达到1.925或1.935特时，那么铁损的降低和厚度减小成正比。取向度与板厚对铁损的影响非常明显。

图19是钢板纯度对铁损的影响。虽然MnS或AlN在最终退火时被去除，可是由于 SiO_2 及 Al_2O_3 这类夹杂物的残余，给铁损带来很坏的影响。图中的A、B、C是采用不同熔炼方法生产的钢，其中A微小夹杂物少，铁损好。图20是铁损与 B_2 的关系，由此可见，晶粒大小对铁损有影响。

图21是Si含量对铁损的影响关系。厚度较厚的0.35%产品影响最大，而板厚减薄时Si的影响减小。

针对上述这些目标进行努力的结果，在试生产中得到的P17/56的典型特性列于表3。

正如已经阐明的，如果在取向度好的钢板上加以轧向张力，则可使铁损显著地减小。更大的张力可通过在钢板表面上划痕的办法生成。划痕附近受到强烈的压缩，而在远离划痕处则受到强的张力。垂直轧向的划痕对减小铁损最为有效。

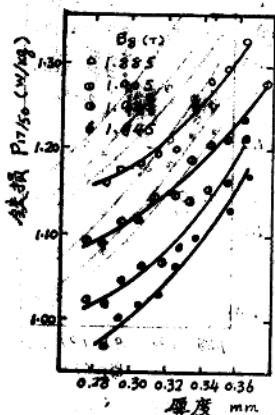


图18—厚度对铁损的影响(1.7T时)

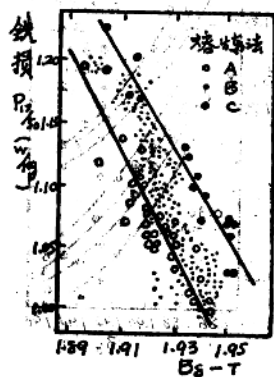


图19—熔炼方法对铁损的影响

图22是三种不同的取向硅钢片在垂直轧向的方向上以0.0%间隔施加划痕的结果。虽然在没有划痕的情况下 $B_g = 1.98T$ 的钢片张力也可使铁损剧减,但如果在这种取向度好的钢片上加以划痕, $M17/50$ 值则可达 $0.8M/Kg$ 以下,如果再对这种钢片施加张力,则 $M17/50$ 达到了 $0.58M/Kg$ 。这个值仅是目前高磁感取向硅钢片铁损的一半。可见,如果能提高取向度,增强张力效应,那么磁畴宽度就会变窄,反常涡流损失就会减小,从而得到了这么低的铁损值。实验室获得这样的铁损值,岂不是说明将来发展的余地仍然很大吗?

表3 在实验室条件下最新研制的Hi-B产品的铁损典型值

板 厚	铁损典型值	P17/50
0.35mm		1.13W/kg
0.30mm		0.98W/kg
0.28mm		0.95W/kg

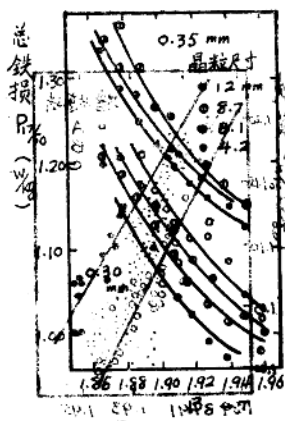


图20—导磁率对铁损的影响 (1.7T)

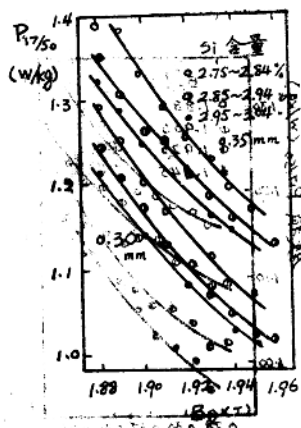


图21—Si含量对铁损的影响

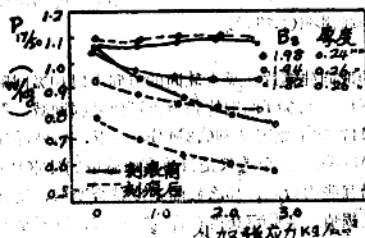


图22—表面刻痕对3%Si晶粒取向钢片铁损的影响。

试样表面经化学抛光，然后在垂直轧制方向上刻痕，

间距10mm，表面光洁度均 $\leq 10\mu$ 。

五 特种硅钢片

作为特殊用途的硅钢片，有在高频下使用的极薄硅钢片和(100)面平行于轧面的双取向硅钢片。

1) 极薄硅钢片

将冷轧取向硅钢片的成品经过酸洗、冷轧，进行连续退火，表面涂层后可制成极薄硅钢片。主要生产0.1, 0.05及0.025%厚的产品。美国阿姆柯公司已生产多年，但从1973

年起停止了生产。在日本极少量地生产一些0.1%及0.05%的产品。

2) 双取向硅钢片

1957年阿苏姆斯等人发表论文以后, 顿时引起全世界研究人员的密切注视。它是利用晶面的表面能差, 在二氧化硅纯净状态下进行高温退火, 发生二次再结晶而获得(100)面的一种方法。如果〔001〕轴顺轧向排列, 那么与轧向垂直方向上的〔010〕轴也是易磁化轴, 因此称为双取向硅钢片。这种制造方法是阿姆柯公司发明的, 厚度0.30%, 含Si 3%具有(100)面的硅钢片已进行工业化生产。每月生产10至20吨, 在727飞机的发电机铁芯等方面使用, 可是1973年已停止生产。另外, 伐克斯梅尔泽公司也曾极少量地生产, 但是现在也已停止了生产。这种钢片必须采用特殊的成品退火, 生产成本高。此外双取向硅钢片的主要用途是作变压器铁芯, 而变压器噪音的主要产生原因是磁致伸缩。这种钢片的磁滞伸缩性能变坏, 是其本质性的缺点。双取向磁钢片虽然在技术上取得了成功, 但是在工业生产上却失败了。目前已经停止了研究。

六 结 束 语

近来日本硅钢片在质量上和生产数量上都有了显著的进步。特别是高磁感取向硅钢片是世界首创的, 受到很高的评价。这种产品在将来可望有更大的发展。

译自《铁与钢》(日)1976年No.7

王家振译

王照校