

《硅钢技术》增刊—2

内部学习资料
注意保存

电 工 钢 板

工 学 博 士

田 口 悟

武汉钢铁公司硅钢片厂

1981.8.

电 工 钢 板

高凤岐 邵 壮 译

江苏工业学院图书馆
藏书章

内 容 简 介

本书为高磁感硅钢片(HI-B)发明者日本田口 悟博士(新日本钢铁公司八幡厂)所著,印行于1979年12月。书中列举了各国硅钢片发展的全过程和今日达到的技术水平,并通过理论和实践从技术上和经济上展望未来。可供我国有关人员借鑑之处甚多,当然,如能对照专利和技术诀窍阅读,将会收到事半功倍之益。

本书前4章由武钢硅钢片厂邵壮译出,第5章由武钢科技处高凤岐译出,译后互相校对。由于时间紧,经验少,如有错误,希望读者批评指正。

電 磁 鋼 板

昭和54年12月10日 印刷発行

著者 田 口 悟

発行 新日本製鐵株式会社 技術サービス部

東京都千代田区大手町2-6-3(新日鐵ビル)

印刷: 有限会社 八幡孔版

北九州市八幡東区西本町1-15

TEL (093) 661-4343

致 读 者

凡公开翻印、出版和引用本书者请按武钢科技处1980年4月5日发出的紧急通知中的规定办理，今将该紧急通知附在下面。

关于《电磁钢板》一书保密问题的紧急通知

主送：二炼钢厂、初轧厂、热轧厂、硅钢片厂、钢研所、总调度室、外办。

日本硅钢专家田口 悟先生来我公司进行技术交流，赠送我公司《电磁钢板》一书26本，业已发至各有关单位。该书属于专利范围内的资料，应严格按冶金部“专利资料的使用管理办法”管理，特别是不得公开翻印出版和引用，以防向第三国泄密。

望各单位接到本通知后认真检查一次，并通知有关人员对此书的使用要严格遵守“专利资料的使用管理办法”的各项规定。

武钢科技处（公章）

一九八〇年四月五日

抄报：湖北省金属学会

抄送：武汉钢铁设计院

目 录

I 概 论	1
1.1 绪 言	1
1.2 硅钢片的发展	1
1.3 硅钢片的物理性能	3
II 无取向硅钢片	10
2.1 无取向硅钢片的发展	10
2.1.1 热轧硅钢片的开发	10
2.1.2 冷轧无取向硅钢片的开发	12
2.2 无取向硅钢片的生产方法及其特性	14
2.2.1 生产方法	14
2.2.2 磁 性	16
2.2.3 生产方法及其特性	22
2.3 无取向硅钢片的基本特点	26
III 取向硅钢片	39
3.1 取向硅钢片的发展	39
3.2 取向硅钢片的生产方法	40
3.2.1 高斯的二次冷轧法的专利	41
3.2.2 生产方法的改善	41
3.3 取向硅钢片的各种问题	44
3.3.1 二次冷轧法的界限	44
3.3.2 来自使用上的各种问题	47
IV 高磁感取向硅钢片	50
4.1 HI-B的研究开发经过	50
4.1.1 成功前夕的研究	50
4.1.2 HI-B的发明	51
4.1.3 HI-B的开发	52

4.2	HI-B的生产方法	53
4.2.1	以氮化铝作抑制剂的一次冷轧法	53
4.2.2	HI-B生产方法的改进	56
4.3	其他高磁感取向硅钢片	59
4.3.1	R G H	59
4.3.2	含硼硅钢片	61
4.3.3	质子同步加速器用取向硅钢片	64
4.4	磁化机理	65
4.5	磁性的特点	76
4.5.1	提高取向性与磁性的关系	76
4.5.2	展望未来	86
4.6	加工上的各种问题	94
4.7	变压器的特性	99
4.7.1	从变压器上取得的实践数据	99
4.7.2	模型变压器试验	99
V	轧制和再结晶	106
5.1	不含抑制剂情况下的轧制和再结晶	107
5.2	再结晶的机理	112
5.3	含有抑制剂情况下的轧制和再结晶	117
5.4	立方织构	129
	参考文献	131
	附表	135
	后记	148

I 概 论

1.1 绪 言

于欧美开始生产的硅钢片，不久就以美国为中心取得显著发展。由于我国（日本）的生产技术非常落后，从1952年前后开始引进美国技术。还有，因为从那时以后设备等有关技术也迅速发展起来，所以，我国（日本）也能够独自开发类似的产品，并且产量有所增加，质量也有所提高。尤其1965年以后的进步更加显著。在国外，硅钢片在质量方面已达到稳定状态，几乎没有什么可观的变化。但，我国（日本）于这个时期在取向硅钢片方面，开展了领先于世界的高磁感取向硅钢片。并且在无取向硅钢片方面，开发了优异的表面绝缘涂层。已经可以满足各种用途的需要。

1.2 硅钢片的发展

1900年于英国，巴莱特、布朗、哈德菲尔德¹⁾三人发现，如果加硅就能改善磁性。在哈德菲尔德的试验中，磁性只比普通碳素钢稍好。于德国官理希²⁾发现加硅有利于增加电阻率，并且指出硅钢片是一种大有希望的产品。结果，德国于1903年生产出硅钢片。接着美国取得哈德菲尔德专利的许可证³⁾而开始生产。硅钢片通过加硅，与碳素钢比较起来，它能够提高导磁率、减少磁滞损失、增加电阻率，而且减少了涡流损失。还由于时效而减少了磁性恶化。生产初期有许多困难，从降低含碳量以后开始有了巨大进步，并且逐渐地增加了含硅量。尽管生产上有困难、价格昂贵，可是仍然在很短时间内就取代了过去的碳素钢板。美国于1905年已商品化，英国从1906年开始商业性生产。在板厚0.35毫米、磁感1.0忒斯拉、50周时的铁损 $W_{10/15}$ 为1.75~3.5瓦/公斤，这已经降到碳素钢板的一半以下。

后来质量逐渐提高，于1925年铁损降到1.25瓦/公斤。进而继续发展，高牌号的含硅量增加到4.5~5%并且涂布退火隔离剂进行叠层，在氮气保护气体中于1100°C高温下进行长时间退火来减少铁损。生产出铁损在0.9瓦/公斤以下的高质量产品，用来作高级变压器。以上这些都是用热轧方法生产的热轧硅钢片。但，随着冷轧钢带轧制技术的进步，由旋转电机用的热轧硅钢片开始逐渐地转变成用冷轧方法生产的冷轧硅钢片。退火由罩式炉退火转变成成为连续退火。结果，由钢板转变成成为钢带，所以就能够使用连续冲片机对铁芯材料进行连续冲片。

在硅钢片的发展上，划时代的产品是取向硅钢片。1934年高斯（Goss）发表了生产方法的专利⁴⁾。这是一种包括中间退火在内的2次冷轧法，是以美国的阿姆柯公司为中心发展起来的。由于在高斯的专利中最终退火是连续退火，所以铁损不好，因而采用了高温长时间的罩式炉退火。在处理工艺中必须进行脱碳，因此开发了一种在湿氢中经

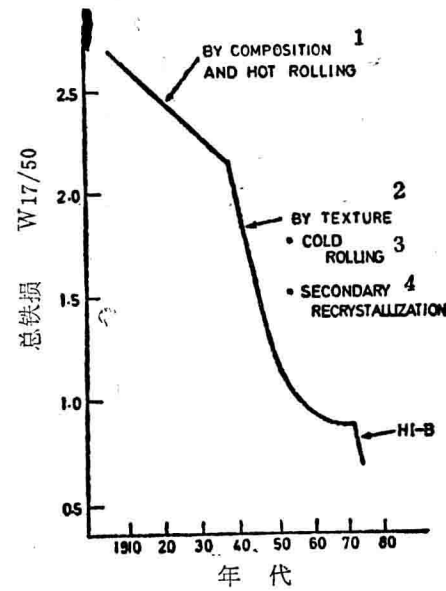
过连续退火来脱碳的方法。在以钢卷状进行退火时必须涂布退火隔离剂。因此开发一种涂布氧化镁粉末后，通过与在最终退火中由脱碳退火生成的氧化层之间的作用，使之生成玻璃质薄膜的技术。还有，该生产方法的最大特徵是在热轧前通过在中温中加热板坯来提高取向性，并且使产品磁性稳定下来。由于开发了如此多种多样的技术，才使取向硅钢片发展起来，从而取代了热轧硅钢片主要用于变压器。阿姆柯公司由1950年左右对国外提供热轧硅钢片的许可证，接着又开始提供取向硅钢片的许可证。因此，取向硅钢片占世界的80%左右是按着阿姆柯的技术生产的。另外的20%也是用类似的生产方法的。

取向硅钢片取得了显著进步，但从1960年左右就没有什么大的变化而持续一种稳定的状态，在技术上似乎也认为已经到了顶点。而使它产生巨大变化的是，由田口、坂仓等人发明的，由新日铁命名为 ORIENTCORE · HI-B 的高磁感取向硅钢片。于1964年开始工业性生产试验，1968年开始正式销售。1971年向阿姆柯公司、1972年向西德的ATH、1974年向法国的夏琼公司和比利时的柯克利尔公司、1975年向英国的BSC分别提供了许可证。川崎制铁于1973年发表了RGH高磁感取向硅钢片。从1974年开始销售，并于同年向瑞典的斯拉哈马公司提供了许可证。

图1-1为在1.5忒斯拉（15.000高斯）、50周下的铁损降低的情况。图中表示，因用2次冷轧法出现了取向硅钢片铁损显著减少，这种发展一直继续到1960年左右，以后几乎看不到什么变化。可是，从图中可以看出，由于高磁感取向硅钢片HI-B的出现，再次发生了显著变化。

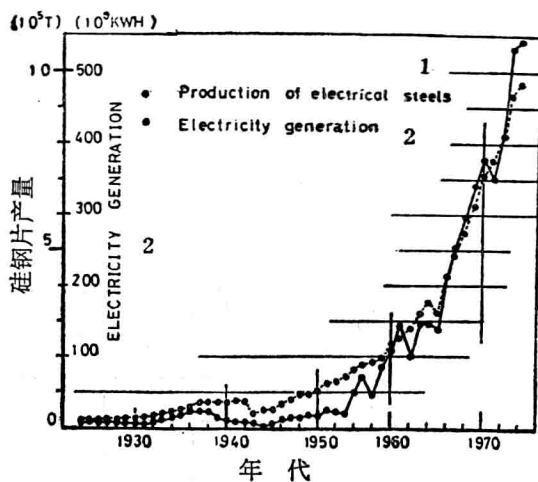
图1-2为我国（日本）硅钢片产量的演变。它是随着发电量的演变而增长的。图1-3为主要国家产量的演变。在过去10年间我国（日本）的增长率极其显著。美国的情况，由于在小型电动机上大量使用与普板相同的工业纯铁板，相当于我国（日本）那种低牌号的S30~S60的就用得非常少，所以整个产量不太多。

最近硅钢片的进步，在取向硅钢片方面出现了高磁感取向硅钢片，但在无取向硅钢片方面没有开发出新品种，主要开发一些家庭电器等小型电动机用的低牌号的产品以及它们的绝缘涂层。



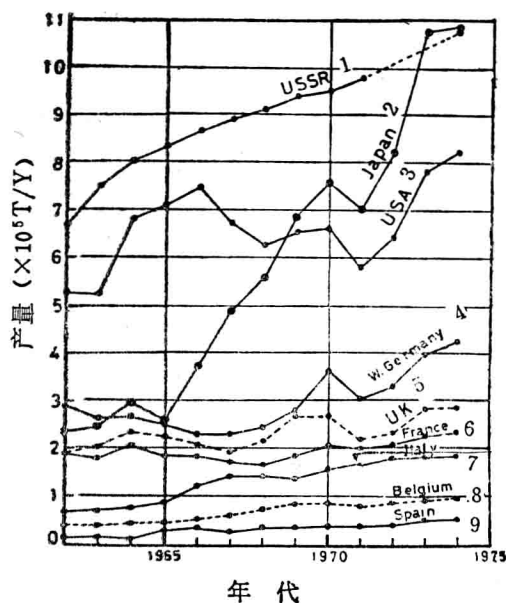
1—热轧和控制成分 2—织 构
3—冷 轧 4—二次再结晶

图1-1 工业用硅钢片逐年的最低铁损



1—硅钢片产量 2—发电量

图 1-2 日本硅钢片的产量变化, 随发电量的增加而增加



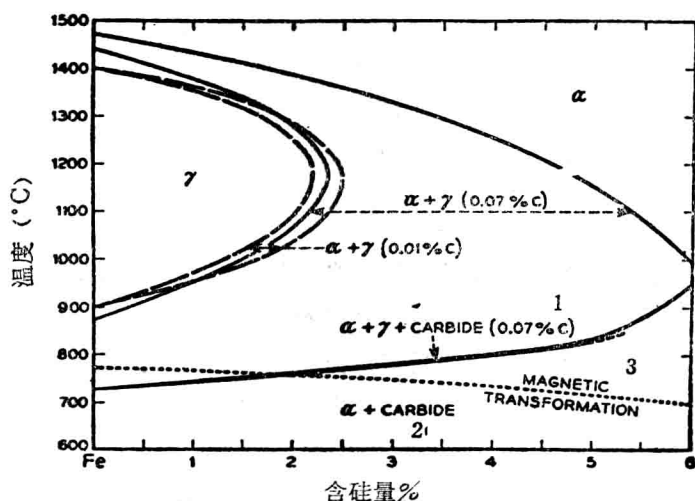
1—苏联 2—日本 3—美国
4—西德 5—联合国 6—法国
7—意大利 8—比利时 9—西班牙

图 1-3 各国硅钢片的产量

1.3 硅钢片的物理性能

关于其基本性能, 包卓茨(R、M、Bozorth)在铁磁学一书中作过详细阐述。

(相 图) 硅铁合金在含硅量约相当于33%的硅铁的范围, 就是铁磁性材料: 作硅钢片使用的含硅量, 热轧硅钢片达5%, 冷轧硅钢片取代热轧硅钢片由于轧制上的限制, 不能超过3.5%。纯度高时, 硅超过2.5%就不存在晶格转变的 γ 相。可是当含有少量碳时, 就扩大了 $\alpha + \gamma$ 的领域。图1-4为相图。于生产硅钢片时, 在使磁性发挥的最终退火中, 如果于 γ 相的温度领域内进行退火时, 至少磁性会变得很坏, 所以必须以 γ 相



1— $\alpha + \gamma + \text{碳化物}$ (0.07% C) 2— $\alpha + \text{碳化物}$ 3—磁性转变

图 1-4 微量碳对铁-硅相图 α 、 γ 相界线的影

以下的温度进行退火。如果含碳量高 $\alpha + \gamma$ 的领域就扩大了，并且影响合适的温度范围。冷轧无取向硅钢片依靠短时间的连续退火来使它发挥磁性，但含硅量越高的就越能够用高温进行退火。取向硅钢片依靠高温长时间罩式炉退火来使它发挥磁性，所以就必须超过不存在 γ 相的2.5%以上。

(物理特性) 如图1-5所示，用X射线试验结果，硅铁合金的晶格常数是与硅含量成正比的。在硅高的范围内构成有序晶格的 Fe_3Si 相当于14.35% 硅。含硅量减少并于

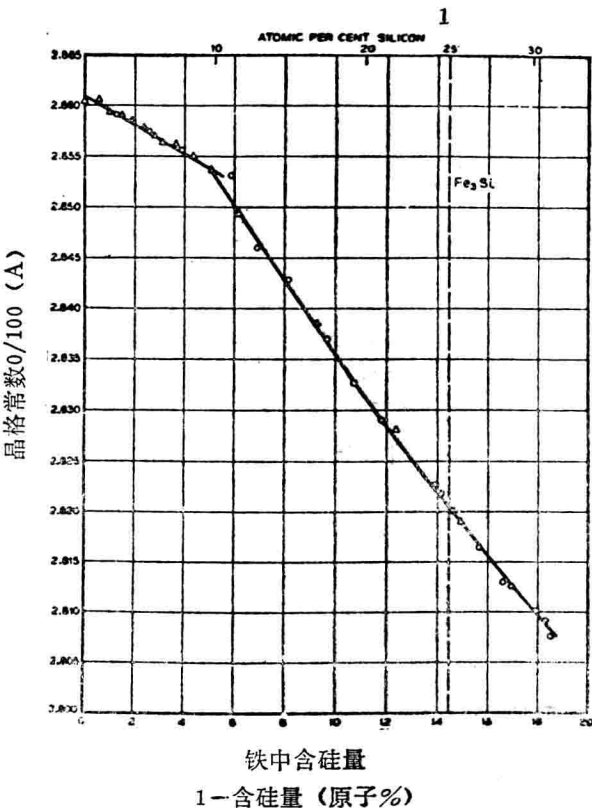


图 1-5 富铁侧硅铁合金的晶格常数，在 5 %硅处拐弯

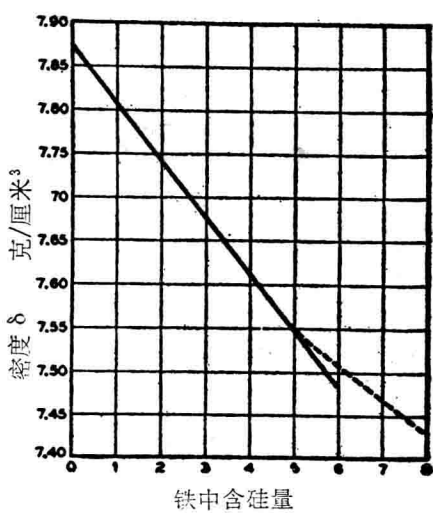
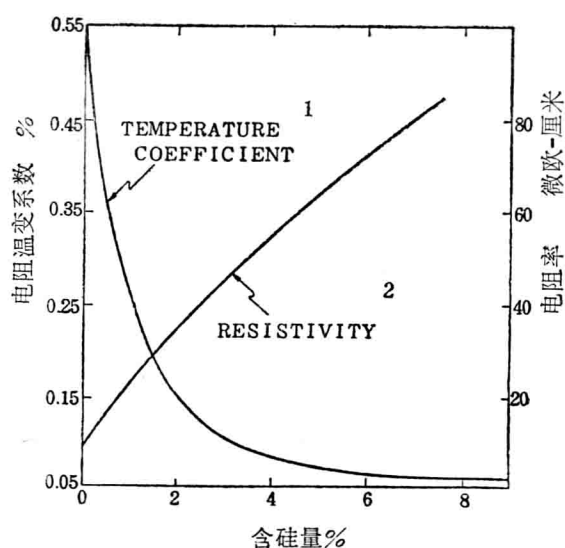


图 1-6 富铁侧硅铁合金密度，拐弯处与图1-5相对照

5 %硅的地方就变成无序晶格的状态，因此在晶格常数变化上便出现拐弯现象。工业用硅钢片之所以几乎没有磁场冷却效果，是因为它几乎没有有序晶格。图1-6为根据晶格常数计算的密度。与直接测定的密度值非常一致。实际的硅钢片，其铁损是根据重量计算的每个单位体积之值。所以，为方便起见，在习惯上对一定的含硅范围定出下列标准密度。

0 ~ 0.5% 硅	密度 7.85克/厘米 ³
> 0.5 ~ 2.0% 硅	7.75克/厘米 ³
> 2.0 ~ 3.5% 硅	7.65克/厘米 ³

电阻率直接与涡流损失有关，所以对硅钢片的铁损很重要。当含硅量增加时，电阻率就迅速增加。通过加硅会提高电阻率是官理希发现的，并且已成为硅钢片工业性生产的线索，图 1-7 为官理希测定的结果⁸⁾。电阻率随着温度系数减少而增大。从图中可以看出纯铁的温度系数为 $0.0055/^{\circ}\text{C}$ ，而 2% 硅则降至 $0.0015/^{\circ}\text{C}$ 。图 1-8 为岩森(Yensen)的测定值和卡松 (Corson) 的高硅的测定值。



1—电阻温度系数 2—电阻率

图 1-7 硅铁合金的电阻率和电阻率的温度系数

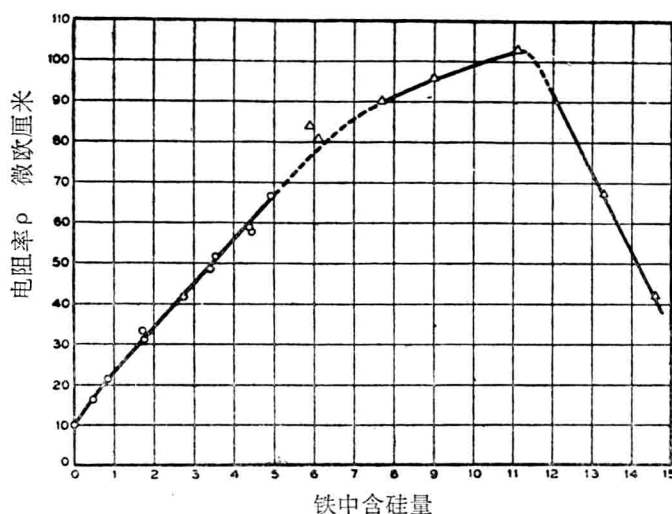
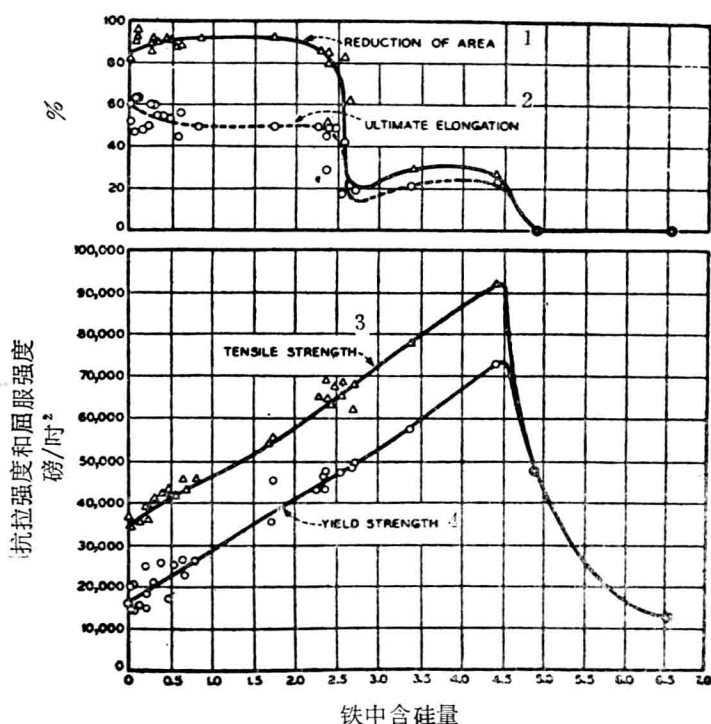


图 1-8 富铁侧铁硅合金的电阻率

抗拉强度和屈服点随着含硅量的增加而增加。在常温下当含硅量超过 2.5% 时延伸性就迅速变坏，含硅量在 3.5% 以上时工业上难以冷轧，含硅量超过 5% 延伸性几乎等于零，不能作一般工业产品使用。图 1-9 为岩森对较高纯度的 7% 硅的测定结果⁹⁾。其他研究人员的结果于 2.6% 没有产生迅速变化，所以一般认为岩森测定的结果可能是由于某种夹杂造成的。图 1-10 为含硅量和布氏硬度之间的关系，这是由岩森测定的¹⁰⁾。铁为 86，而含 4% 硅可达 220。



1—断面收缩率 2—极限延伸率 3—抗断强度 4—屈服强度

图 1-9 退火后硅铁合金的某些机械性能

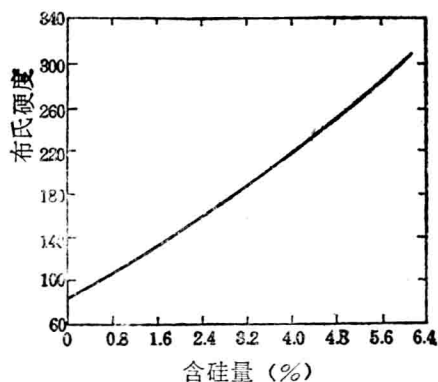


图 1-10 硅铁合金的布氏硬度

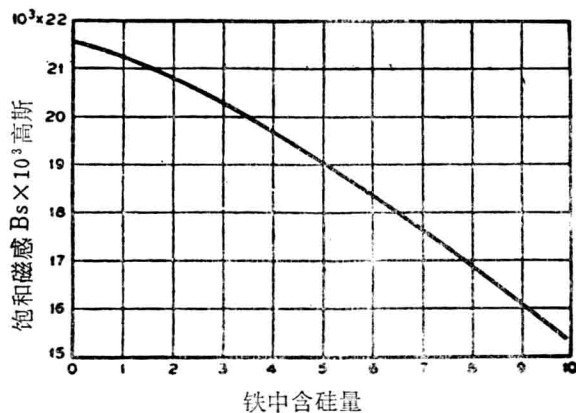
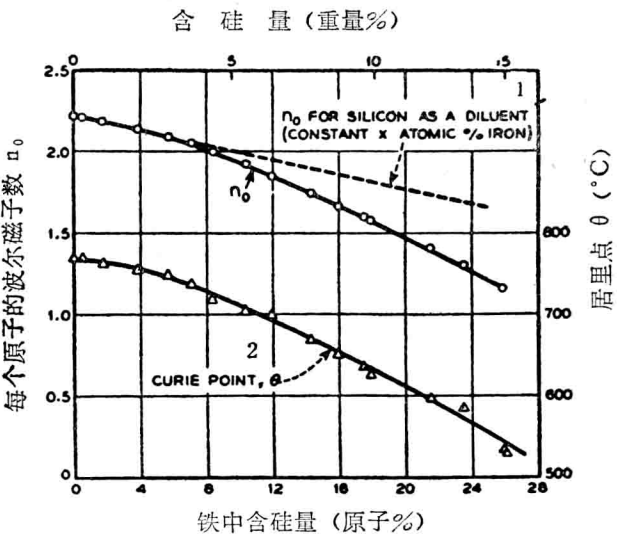


图 1-11 饱和磁感值与成分之间的关系，试样含有0.1~0.3%碳、约0.1%锰

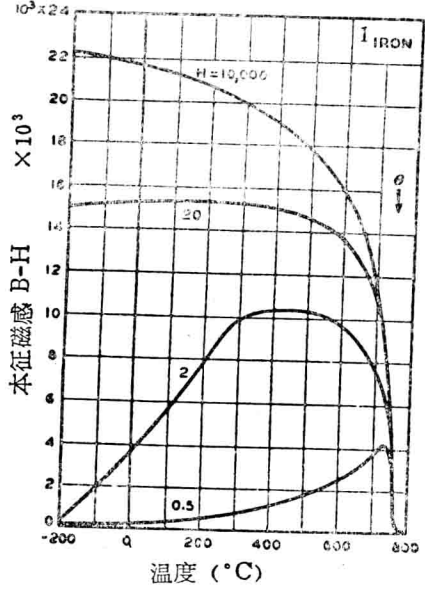
(饱和磁通密度与居里点) 如图 1-11 所示，饱和磁通密度随含硅量的增加而下降。图 1-12 为每一原子的自旋磁效率——玻尔磁子 (Bohr magneton) n_0 。虚线为假设只含有硅时的计算值，但从图中可看出，实际上铁原子的磁效率随含硅量的增加而减少。

强磁性材料，当温度上升时其饱和磁通密度就下降，最后失掉强磁性，今将纯铁的情况示于图 1-13。硅钢也有类似的倾向。失掉强磁性的温度为居里点，它与含硅量之间的关系示于图 1-12。



1—淡化状态下硅的 n_0 。(常数 $\times$ 铁原子%)
2—居里点 θ

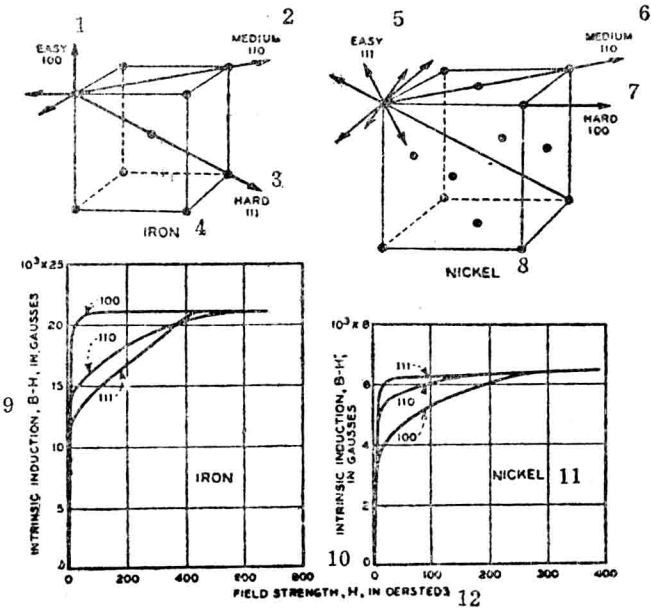
图 1-12 硅铁合金的波尔磁子数和居里点



1—铁

图 1-13 在高磁场强度下磁感随温度提高而连续下降，在低磁场强度下随温度提高起初磁感增加，随后再下降（纯铁数据）

(磁各向异性) 铁根据其晶轴取向不同，磁化特性也不同。本多、茅¹¹⁾于1926年曾发表过他们制成铁的单晶体，并测定了其三个主轴向的磁性。如图1-14所示， $[001]$ 轴为易磁化轴， $[111]$ 轴为难磁化轴。硅钢



1—易磁化轴 2—较易磁化轴 3—难磁化轴 4—铁 5—易磁化轴 6—较易磁化轴 7—难磁化轴 8、11—镍 9、10—本征磁感 $B-H$ (高斯) 12—磁场强度 H (奥斯特)

图 1-14 单晶铁和单晶镍的磁性及其晶体结构

的情况也与铁相同，将含硅量 3.8% 的单晶体的测定值示于图 1-15(2)。

这种磁各向异性，是一种根据铁磁性材料的内部能面向内部磁化晶轴的方向不同而产生变化的现象。属于立方晶系的结晶，设其有关立方体各棱的内部磁化方向的余弦为 $(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$ 时，就可以将各向异性能 E_k 作为该函数来表示。

$$E_k = K_1 (\alpha_1^2 \alpha_2^2 + \alpha_2^2 \alpha_3^2 + \alpha_3^2 \alpha_1^2) + K_2 \alpha_1^2 \alpha_2^2 \alpha_3^2 + \dots$$

K_1, K_2 叫作各向异性常数，铁在常温下则为：

$$K_1 = 4.2 \times 10^5 \text{ 尔格/厘米}^3$$

$$K_2 = 1.5 \times 10^5 \text{ 尔格/厘米}^3$$

该值随着含硅量的增加而缩小。

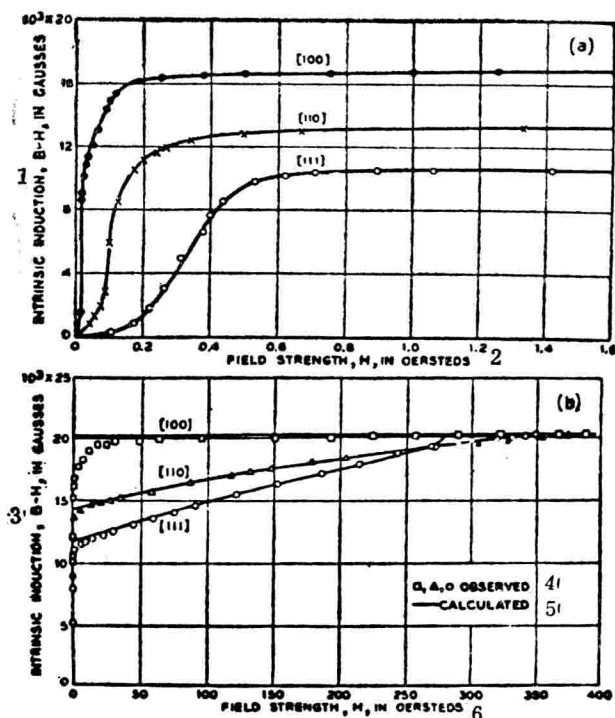
将欲测定的物质的单晶体圆片吊在磁场中时，磁转矩就作用于圆片上。设每单位体积中该磁转矩为 L 时，则为

$$L = \frac{\partial E_k}{\partial \theta}$$

因此，在圆片内对 L 测定一整周时，就能够求出 $E_k(\theta)$ 的函数形式。在 (100) 面上，设来自 [100] 轴的角度为 θ 时，

$$L_{100} = -K_1 (\sin 4\theta) / 2$$

在 (110) 面上设来自 [100] 轴的角度为 θ 时，



1、3—本征磁感 $B=H$ (高斯) 2、6—磁场强度 H (奥斯特) 4—实测值 5—计算值

图 1-15 在 3.8% 硅铁单晶体中不同晶粒取向的磁化曲线

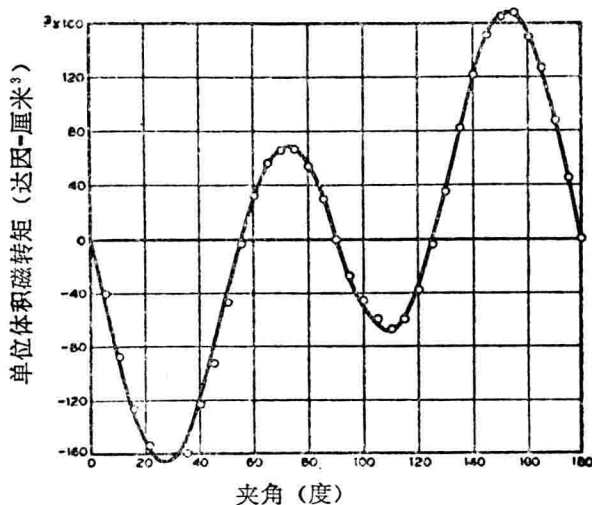
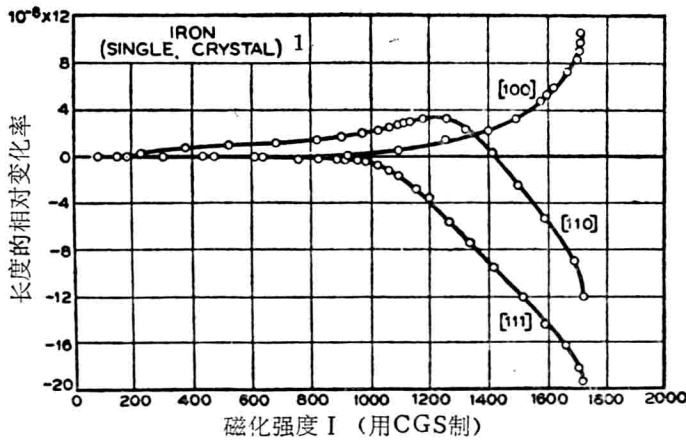


图 1-16 单晶硅铁圆片 (110) 面上的磁转矩曲线 (外加的磁场强度为 5800 奥斯特，曲线是根据 $K_1=287000$ $K_2=100,000$ 理论值绘制的)

$$L_{110} = -K_1 (2\sin 2\theta + 3\sin 4\theta) / 8 \\ + K_2 (\sin 2\theta - 4\sin 4\theta - 3\sin 6\theta) / 64$$

图 1-16 为 (110) 面的硅铁单晶的磁转矩曲线。根据磁转矩曲线的测定可立即知道各向异性常数，但从上述单晶的主要轴的磁化特性也可以计算出该常数。还可以利用磁转矩曲线的测定推算出该材料的各向异性的程度如何。

(磁致伸缩) 随着磁化而进行长度伸缩就是磁致伸缩，磁致伸缩与晶粒取向有依赖关系。图 1-17 为单晶铁的磁致伸缩的测定结果¹³⁾。磁致伸缩的值随着硅钢的含硅量不同而产生变化。图 1-18 为两个主要轴向的饱和磁致伸缩 λ_{100} 、 λ_{111} 与含硅量之间的关系。磁致伸缩随含硅量的增加而减少，在含硅量 6% 附近最小，但 λ_{100} 、 λ_{111} 不会同时等于零。



1—铁 (单晶体)

图 1-17 单晶铁的磁致伸缩，根据茅、高木的数据

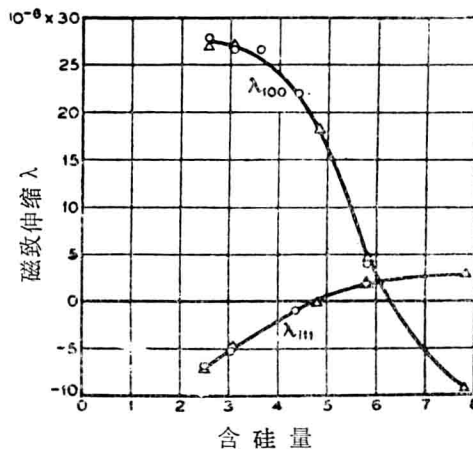


图 1-18 硅铁合金单晶体的磁致伸缩

II 无取向硅钢片

2.1 无取向硅钢片的发展

现在, 硅钢片在我国 (日本) 是由新日本制铁和川崎制铁两公司生产的。八幡制铁所于1924年开始生产硅钢片。从战争 (二次大战) 中开始一直到战后, 我国的技术发展处于停顿状态, 可是在这个期间美国的技术却取得了显著进步。我国与国外比较起来相当落后。1951年开始由阿姆柯公司引进技术, 从1952年底开始已经能够生产高硅热轧硅钢片 Supercore T₉₀, 于是变压器的特性得到显著提高。然而, 当时硅钢片是用热轧方法生产的, 所以产品都是成张的, 无法对小型电机用铁芯等进行连续冲片。因此, 于1954年通过引进技术而开始生产热轧硅钢焊接钢带 Die-litecore E₂₃、E₂₀、E₁₈、E₁₄、E₁₂, 从此就能够适应于连续冲片了。不久以后就开始用冷轧方法生产无取向硅钢带, 于是热轧硅钢带便被冷轧的产品所取代。高硅热轧硅钢片 Supercore 作为热轧硅钢片一直在继续生产, 到开发了高牌号的冷轧无取向硅钢片 H₁₀、H₉以后, 于1967年停止生产。下面主要谈谈新日铁的硅钢片的发展历史。

2.1.1 热轧硅钢片的开发

八幡制铁所于1924年在德国工程师的指导下开始生产热轧硅钢片以来, 生产B、C、D的旋转电机用的各种牌号, 接着从1928年开始生产T级变压器用的各种牌号。B、C、D的铁损W_{10/50}为2.46、2.26、1.35瓦/公斤, T级为1.20瓦/公斤。战后 (二次大战) 查阅美国情报, 得知所生产的T级其W_{10/50}为0.90瓦/公斤级, 于是我们就设法提高材质。可是, 实质上生产出的T级只达到W_{10/50}为1.20瓦/公斤。由于1951年引进阿姆柯的技术, 才得以生产出最高级的产品, 从1953年开始生产销售W_{10/50}为0.90瓦/公斤的高硅热轧硅钢片 Supercore T₉₀。

一旦掌握了由阿姆柯引进的技术内容, 就会认为那是极为简单的。然而那却是解决实际问题的巧妙的技术的积累。当时八幡制铁所用电炉冶炼硅钢。其作业程序如下: 装入生铁块和废钢并通电, 待其熔毕加入铁矿石进行氧化精炼, 脱碳, 待降碳充分后就进行排渣, 加铝和硅铁合金, 使钢水镇静后加入石灰、萤石、焦炭等造还原渣并进行所谓的还原精炼, 进行脱硫等, 使温度上升, 待接近出钢温度时, 按着成分目标进一步追加硅铁合金, 出钢。为了命中成分目标要估计钢水量或收得率来加硅铁合金, 但总是波动很大, 作为硅钢主成分的含硅量, 在每次出钢时总有所波动。可以进行热轧的含硅量的上限为5%, 认为含硅量越多特性就越好而提高含硅量的话, 往往会失败的。

在阿姆柯的技术中, 通过使用之字形流槽的倒包 (reladling) 法就轻而易举地解决了命中成分目标问题。影响含硅量的是, 钢水的实际数量和硅铁合金中硅的收得

率。硅铁合金中硅的收得率由于氧化的程度不同而有所变化，但极少量才是通过与钢中或空气中的氧起反应而氧化的，其大部分是通过与钢渣相接触而氧化的。因而，掌握钢水量，并于出钢时不使钢水与钢渣接触的话，收得率就会稳定下来。

运用之字形流槽的倒包法，不在炉中调整成分，而是在低碳沸腾的状态下向第一钢包出钢。这时只加入硅铁合金、锰铁合金使钢达到半镇静程度。接着将该第一钢包吊到之字形流槽上进行浇注。钢水沿着坡度很大的流槽顺畅地往下流，就在这流动的途中加硅铁合金。钢水边将硅铁合金卷进去边向下方流去，流进放在之字形流槽下方的第二钢包。虽然在第一钢包中同时装有钢渣和钢水，但当钢渣将从第一钢包流出时压棒工就关掉塞棒，所以钢渣就进不了第二钢包。实际上，在第二钢包的内侧作有记号，当钢水达到需要量时就关掉第一钢包的塞棒而停止浇注，由于在第一钢包中剩有若干钢水，所以不会发生钢渣混进钢中的事故。第二钢包的钢水量只限于硅钢专用，并且硅砖的损耗少，所以应根据上次开坯的实际称量，重新在钢水需要量的位置上作上记号，当钢水到达该处时就关掉第一钢包的塞棒。以后在第四炼钢厂的 120 吨平炉上正式开始批量生产，这时的误差，与 120 吨相比大致在 1 ~ 2 吨的范围内就合适了。因而，既没有发生过因与钢渣起反应而降低硅铁合金的收得率，又能够准确地达到 T_0 。含硅量 4.6% 的最佳命中，除事故外，几乎没有发生过超过 5.0% 的情况。

硅钢性能好坏取决于种种条件。其中，成分如何是所有条件的基础，十分重要。硅钢成分虽以硅为主，但除了硅以外，碳、锰、磷、硫、铝、氮，还有镍、钛、铬、铜等元素也会对材料有所影响。过去，只是注意到碳、锰、硫等，但对由硅铁合金带入的铝、钛等元素不太留心，曾经使用过夹杂多的硅铁合金。关于类似铝那种影响晶粒长大的元素，也没有作为成分之一而加以控制，而是使含在硅铁合金中的铝自然地进入钢中，或者以调整钢锭头部形状为目的而加铝。这样就使钢中的含铝量增加了。

众所周知，当含有微量的铝与氮相结合形成氮化铝并构成微细弥散相，在退火时能够抑制晶粒长大。但，如果加入量多到某种程度时反而会具有加速晶粒长大的性质。因此，现在无取向硅钢一般加 0.25 % 左右的铝。然而，罩式炉退火时铝与氧的亲合力强，容易在钢中或其表层形成氧化物，所以更加有害。在阿姆柯的技术中，用罩式炉进行最终退火的高硅热轧硅钢片 Supercore 不加铝，用连续炉进行最终退火的焊接钢带 Dielitecore 就加铝。而且，铝具有一种使二氧化硅系夹杂熔点降低并凝聚起来浮在钢水表面上的作用。 T_0 。（4.5% 硅）这种高硅热轧硅钢片 Supercore 磁性虽好，但成品的脆性非常大。虽然含碳量越低磁性越好，可是一旦脱碳之后硅钢片就更加发脆了。为了解决磁性与脆性这两个问题，阿姆柯公司采取了一种虽然使钢中含碳但又不使它对磁性有害的方法。过去热轧硅钢片的含碳量虽然是降到 0.05 ~ 0.06 % 左右才出钢，但却反而要将 T_0 的目标含碳量提高到 0.08 %。为确保该值，常常在出钢时向钢水中加焦炭等以进行增碳。这种经过热轧、酸洗等通常工艺处理后，用罩式炉进行 $1080^{\circ}\text{C} \times 20$ 小时的退火来取得磁性，但于冷却时要进行 $550^{\circ}\text{C} \times 10$ 小时的均热。通过这种