

内 部

硅钢片参考资料

(八)

1972

山西太原钢铁公司革委会生产组

目 录

1. 铁和铁硅合金	(1)
2. 硅钢的氧化镁—氧化铬涂层 (专利)	(12)
3. 单取向硅钢板 (带) 的制造方法 (专利)	(17)
4. 硅钢板薄带中退火织构的形成	(22)
5. 含氮硅铁的二次再结晶 (专利)	(25)
6. 硅铁合金电工钢片的改进 (专利)	(27)
7. 冷轧钢带和薄板的改进 (专利)	(28)
8. 具有 (100) 织构硅钢的制造方法 (专利)	(31)
9. 立方体角织构电工钢板的生产方法 (专利)	(34)
10. 面内无取向的立方体面织构磁性 钢板的制造方法 (专利)	(37)
11. 硅钢中的平面立方织构	(42)
12. 冷轧前变压器钢织构状态对二次再结晶 和棱形织构发展的影响	(45)
13. 全苏电工钢与电工合金物理和金相学会议	(49)
14. 斜双取向磁性钢板的制造方法 (专利)	(51)
15. 具有 (100) [hkl] 织构的磁性钢板 (专利)	(55)

铁 和 硅 铁 合 金

I、引 言

现今世界上所用的大部份软磁材料的重要性是与电力的生产和应用相关的。半个世纪以来，发电量每十年增长一倍，每年复合增长率略超过7%。这些材料有很广泛的用途——从制作新型国际加速器用的巨大磁铁到制作只有几克重的小型继电器和脉冲变压器，——然而，这种材料大半是用在发电机和电动机的转子与定子上以及变压器上。

有关软磁材料的性质与用途的较完全的近代评论已由斯坦吕作出。别斯多尔和维纳叙述了软磁材料的发展历史，瓦尔特1963年就硅铁作了一个类似的总结。最近克拉哈姆就磁性材料晶体结构的发展作了极佳的评论，而唐普逊特别论述了各种软磁合金的发展。

本文重点放在金属铁磁材料上，特别论述了占现今工业上所用磁性材料大部份的铁和硅铁合金。1970年美国电工钢的总产量约一百万吨，这个数字包括日益迅速取代某些低硅合金的低碳钢。本文追溯了冶金和工艺上的一些发展，这些发展为工业上重要的铁和硅铁合金提供了优质品种和某些特性。

要估价改进这些材料的意义及它们的用途，就必须了解它们的基本性质。下文将讨论这些基本性质以及实际材料的生产和特性。

II、基 本 因 素

软磁材料在直流电气设备中的重要性能是用磁化曲线来描述的。它要求软磁材料的饱和磁感 B_s 应尽可能高。

“软”这个术语是在本世纪初采用的，那时，人们观察到永磁铁在物理上易于“硬化”，而越容易磁化的材料实际上就越“软”。例如，虽然软磁材料与永磁铁包含有同样的基本现象，然而，评价标准则一般是相反的。软磁材料应在最低的磁化力下达到 B_s 。材料的性能是用导磁率 $\mu = B/H$ 来测定、 μ 值应当大。普通的测量点相应于较低的磁感（ $B = 1000$ ），而最大导磁率（通常 B 接近于7000高斯）则相当于较高的磁化力（ $H = 10$ 奥）。

在交流电的场合下，要求了解 $B-H$ 磁滞迴线，它代表每磁化一周的能量消耗。给定材料的迴线面积的指标最好用宽度或矫顽力 H_c 表示。在理想的情形下磁滞迴线应很

窄，这样磁化时的能量损失是最低的。然而，若要获得高导磁率值和低磁滞损失，这实际上就意味着要求任何设备内的空气隙应最小。

磁滞损失 P_h 与频率 f 成正比：

$$P_h = K(A_h) f \dots \dots \dots (1)$$

A_h 是磁滞回线的面积。

然而，这只是在交流磁化时总损失的一部份，因为在磁通量改变时，材料内将感应出涡流。而涡流则产生一反抗磁通量初始变化的磁场。假设在整个厚度 t 上的磁通密度是均匀的，则薄板内的涡流损失如下：

$$P_e = \frac{\pi^2 t^2 B^2 f^2}{\rho^2} \text{ 尔格} \cdot \text{厘米}^{-2} / \text{S} \dots \dots \dots (2)$$

此式中， B 为最大磁感； ρ 是体积电阻率。

实际上，正如下面要谈到的，磁通量在材料内不是均匀的，因此，用此式所算出的值太小，因为它忽略了难于考虑进去的不规则因素。即使在60赫下使用，涡流损失通常也构成总铁损的主要部份。在高频下，涡流损失进一步增加，并且，磁通量在相反磁场的作用下倾向于被限制在表面层上。波佐尔兹据理论研究用下式估算磁场所贯穿的“表皮层”的 S ：

$$S = \frac{5030}{\sqrt{\mu f / (\rho \times 10^{-9})}} \dots \dots \dots (3)$$

其中 S 是表面至表面下面某处的距离，该处的场强为表面场强的 $1/e$ ，而磁通量比表面磁通量滞后 1 弧度。

为改进磁性，致力于增加体积电阻率或应用薄迭片使涡流损降至最小。铁素体的电阻率为铁的 10^4 — 10^6 倍，而且，对此类材料来说，不存在涡流损失问题。然而，由于它们的饱和磁感较低以及因居里点低造成的温度敏感性，而限制了它们在普通电动机和变压器中的应用。加入铝或硅可改善铁的电率，并且，这些合金轧制成薄板时，可使涡流损失降至可接受的水平。

涡流不仅产生于各迭片之内，而且也产生于作为一个整体的铁芯内。因此，必须为各迭片的表面提供足够的绝缘性。基本的变压器方程式给出了每磁化一周的电压均方根值：

$$\frac{E}{N} = 444 f B A 10^{-8} \dots \dots \dots (4)$$

当与 (2) 综合考虑时可看出，涡流损失与每磁化一周的电压的平方成正比。所以，额定功率高的大铁芯要求有高的有效表面绝缘电阻，而不管铁芯各迭片本身的涡流损失如何低。

A. 经济性

据波佐尔兹在1953年的计算，那时发电机和变压器的功率损失给使用单位造成价值0.30兆美元的经济损失。电力的增加使此值在1970年增至1兆美元。米尔奎在1965估计

1970的损失值约0.65兆美元。此损失的一小部份可用良好的材料挽回，而读者也就可据此了解到减少持续使用设备的铁损的真正动机了。此经济因素在生产优质电工钢方面起重要作用，并允许优质材料有较高的成本。降低新型动力发生装置基本费是减少铁损值的另一动机。即使在间断操作的设备（例如，冷冻电动机）上使用质量较好的电工钢也是恰当的，然而在这种情形下初始成本是决定性因素。

B. 机械因素

对大多数设备来说，强度等机械性能是无关紧要的。在大型转子中的迭片应有足够高的弹性模数，以便能抵抗所产生的高离心力而不使迭片严重变形。不仅要轧制成钢带的坯料应有足够的塑性，而且，在制造铁芯中进行冲压、剪切和弯曲时，也要求所用材料有良好的塑性。表面涂层可能有害于冲压性，现在已设计出一种有利于延长冲模寿命的特殊的无摩擦绝缘涂层。

III、材 料

变压器中最早使用的软磁材料是优质的锻铁。按现代的标准来说，这种材料含有许多杂质。这类材料碳含量高，呈现严重的时效现象，1900年哈德菲尔德往铁中加入硅，作了重要的改进。美国1905年开始在工业上用热迭轧法生产硅铁。用较高的含硅量和较好的退火操作，使这类材料的铁损不断降低。

有(110)[001]织构的晶粒取向硅铁1939年开始投入工业生产，此后获得的进展主要是改进晶粒取向的结果。这个进程一直持续到现在。

似乎没有另一种元素可实际上完全取代铁合金中的硅。锆的行为与硅极相似，而且，当其数量达6%时，依然可使铁合金保持良好的塑性。本作者已生产出了含锆2.7%的单取向锆铁，其磁性与硅铁极相似。当然，锆乃是极昂贵的。

铝铁也极类似于硅铁。铝的成本较高，这是不能用它取代电工钢中的硅的主要原因。此外，铝铁对因氮化造成的性能损坏很敏感。在许多方面，铝铁与硅铁很相似，也可在实验上获得菱形织构和立方织构。菲勒姆对铝铁合金作了很全面的估价。

许多评论都忽略了在所谓的无取向硅钢上所获得的不引人注目、而确实是重要的进展。这些进展就是用更经济的方法去除掉碳和其他杂质。在此同时焊接也获得了进展，可把有极佳机械性能（诸如表面光滑、平整和最小的厚度波动）的热轧板焊接成连续带卷。热迭轧现在在世界上已很少用，并正在被冷轧所取代。

现简单说一下工业上生产铁和硅铁合金的普通操作工艺。纯铁是用生铁和废钢作原料，在氧气转炉或在吨位为100吨以上的电炉内冶炼的。借助于与氧起反应及用合适的渣，将碳、锰、硫和磷降低至低水平。接着，把钢水倒入盛钢桶内，并根据需要在注入5吨锭模之前加入合金化元素。将钢锭热轧成 ≤ 2.5 毫米厚后，冷轧至最终厚度。材料的再结晶退火可用连续或箱式退火。在含15%水蒸汽的氢中825°C连续退火时，可去除掉薄带中的碳。

A. 铁

作为第一批软磁材料的铁，因其数量多并有极佳的磁性，所以仍然是现今重要的软磁材料。含杂质最少的铁有最大的饱和磁感和最大的导磁率。用区域炉、氢或真空炉冶炼电解铁或者烧结羰基铁可获得高纯度。纯铁板在干氢中退火时可进一步减少碳、硫、氮和氧等少量杂质。1937年西索菲等把单晶体放在纯干氢中1300°C退火后，获得极高的导磁率。当然，这种极纯的材料在工业上应用是相当昂贵的。工业纯铁（阿姆克铁）的冶炼条件可保证去除碳和锰，但金属处于高度的氧化状态。然而，氧化物夹杂是大颗粒的，它对磁性影响不大。标准分析列于表 I。把存在的总杂质的数量降至最低时，可易于获得高至21500高斯的饱和磁感（见表 I）。

表 I 标准化学成份 (%)

材 料	处理形式	Si	C	Mn	P	S	O	N	Al
磁性纯铁锭	轧制薄板	0.003	0.015	0.030	0.005	0.025	0.15	0.007	0.003
低碳钢 (SAE1008)	轧制薄板	0.005	0.08	0.40	0.020	0.025	0.05	0.007	0.005
低碳钢	脱 碳	0.005	<0.01	0.40	0.020	0.025	0.05	0.007	0.005
冷轧M 36	完全处理	2.2	<0.01	0.25	0.015	0.01	0.01	0.01	0.3
冷轧M 22	完全处理	2.8	<0.01	0.25	0.015	0.01	0.01	0.01	0.3
热轧M15	完全处理	3.3	<0.01	0.25	0.015	0.01	0.01	0.01	0.3
(100)[001]取向	完全处理	3.2	<0.01	0.07	0.010	<0.002	<0.0	30.001	0.002

注：百分数是重量百分数。

表 II 标准磁性 α

	B (高斯)	密 度 (克/厘米 ³)	P (微欧 厘米)	He (B m=10 干高斯(奥))	导磁率 (H=1)	导 磁 率 (H=10)	铁损 0.36 毫米	P 15/60 0.47毫米	(瓦/公 斤) 0.63毫米
软 钢									
(0.2%C 正火)	21400	7.85		4.0					
铸 造 纯									
铁 锭	21500	7.85	10.7	0.85	3500	1500	—	—	
2 毫 米 纯									
铁 板	21500	7.85	10.7	1.11	1800	1575	—	—	(13.32)
2 毫 米									
电 磁 铁	21500	7.85	12	1.02	2750	1575	—	—	

续 前

低 碳 钢

(脱碳后)	21400	7.85	12.6	0.9	2000	1530	8.15	9.26	11.46
取 向 铁	21500	7.85	10.7	0.4	7400	1925	4.41	5.29	8.59
冷轧 M 36b	20400	7.75	41	0.45	9400	1485	—	3.86	4.74
冷轧 M 22b	19800	7.65	49	0.39	8100	1450	—	3.64	4.32
冷轧 M 15b	19700	7.65	53	0.35	7800	1390	2.76	—	—
(110)[001] 3.2%硅 铁	20300	7.65	48	0.07	16000	1820	1.39	—	—
(100)[001] 3.29%硅 铁	20300	7.65	48	0.07	14000	1600	2.20	—	—

a. 这些数值是试样进行了与该材料相适应的完全退火后测得的。

b. 艾伯斯坦试样是50%按轧向切下，50%按横向切下的。

当以锻件或铸件形式应用时，则在退火时晶粒组织有小的变化并产生净化，而消除应力可使最大导磁率有些改进。热轧或冷轧薄板在退火时，因再结晶和晶粒长大使导磁率和矫顽力获得改善。在干氢中，在高于 $\alpha-\gamma$ 相变点的温度（910°C）退火时，可获得较粗大的晶粒；退火还可在高至1100°C下进行，这样可借助于碳、硫、氮和氧的去除而获得额外的改进。然而，这种操作是困难的和费钱的。通常在接近800°C下进行退火。最重要的杂质是碳，它以碳化铁的形式沉淀而引起磁时效。在湿氢中退火可使碳含量降至0.002%。然而，最终退火必须在干氢中进行，以避免产生脆性。

多年来已经了解到，使碳根本不溶解于铁就可消除磁时效。近来，这个原则已用于生产“稳定”的铁。借助于在溶化状态下进行处理的一些方法，可有效地生产出低碳和低氧含量的铁，残余下的碳和氮分别与钛和铝结合成稳定的化合物，这样就可完全消除磁时效。铁锭和稳态电磁铁的标准磁性列于表 I，此表还列出了其他有关材料的磁性，好作比较。这些材料的磁性与表 1 所示的那些成份有关。

工业用的磁性铁是无晶粒取向的。然而，杜思和瓦尔特借助于在875°C（此温度低于 $\alpha-\gamma$ 转变温度）退火时产生二次再结晶（以表面能作策动力）的方法，生产出0.064毫米厚的单取向纯铁。戈勒获得有极佳单取向的厚0.23—0.64毫米的工业纯铁。其方法是：先把固态硫加入氧化镁涂层中以抑止一次晶粒长大，而后在上述温度范围内进行二次再结晶。用此法生产的取向铁的导磁率和铁损值也列于表 2 中。在应用纯铁的大多数场合下，要求磁通量有一个以上的方向，因此，迄今晶粒取向纯铁似乎没有什么特殊优点。

B. 低碳钢

在过去 5—10年间，每年用几十万吨的普通冷轧低碳钢带作磁性材料，其磁性良好，成本低于低硅铁合金。用它的主要目的是使中级或低级功率设备的生产成本降至最低。所涉及到的冶金学问题主要是属于铁—碳系方面的，而所获得的性能与低硅电工钢

的性能相近。当生产厂供给的材料含碳量较高时，则要求用户在合适的气氛中对加工零件进行退火，以便将碳进一步降至0.01以下。

自然要提出如下的问题：为什么要用低碳钢代替工业纯铁。低碳钢有较高的锰含量（见表1），它使低碳钢冷轧后较易于再结晶，而且，锰可使体积电阻率略有增加（见表2）。低碳钢通常以残存的冷加工状态供货，以便有良好的冲压特性。脱碳的需要限制了迭片的尺寸，因为要求在允许的时间内能把成垛迭片的碳除去。

C. 无取向冷轧电工钢

与纯铁或低碳钢相比，无取向冷轧电工钢构成了铝含量不同的硅铁合金系。一般说来，随着硅含量的相应变化，任何厚度的这些材料在 $H = 1$ 奥时都有渐增的较高导磁率，并且，在磁感为10或15千高斯时有较低的铁损。

迟至1920年，大多数硅铁合金都以板迭形式热轧。某些低硅材料用冷轧，但是，直至1930年才开始普遍用冷轧来生产3%Si的材料。某些硅钢仍然继续用热轧生产，因为，此法可获得极佳的在低磁感下的磁性，同时也由于（热轧）迭片有极均匀的成垛特性——这对大型旋转机械是一个极重要的因素。然而可预料，随着冷轧硅铁特性的改善，这些热轧品种将被淘汰。

铁损随着硅含量的增加而降低，这主要是由于较高的体积电阻率使涡流损失降低了；同时也由于磁滞而损失减少了。类似地，也生产了硅含量相同而厚度不同的品种。薄的材料有较低的电涡流损失，然而，一定迭片高度所能达到的磁感则因填充系数低而降低了。因此，只要操作温度不因铁损高而过高，则硅含量低，厚度较薄的材料可获得较高的操作磁感。一般而言，在50或60赫下操作的电动机或小型变压器上，使用厚度大于0.63毫米或小于0.35毫米的材料都是不实际的。有些设备要在频率为400赫下操作，这导致了厚0.13—0.18毫米的无取向3%硅钢的发展。

除了上述的硅或铝以及厚度等因素外，影响磁性的主要因素是碳含量和晶粒尺寸。大约自1945年以来，材料生产厂多半用连续退火的方法进行再结晶和晶粒长大退火，取代了过去的成垛箱式退火。“完全处理”的材料是指那些已获得最终性能的供给用户的钢带，用户只需消除冲压应力。消除应力是在温度低至725°C下完成的。对尺寸大的迭片来说，冲压应力的影响不太大，用不着进行这类退火。

然而，半加工材料则要求较高的处理温度（接近815°C），以便脱碳和促进晶粒长大，使磁性获得改善，在更高的温度下处理时，可因晶粒进一步长大而使性能获得某些额外的改善，然而，一些实际的因素——包括成本及各迭片之间的粘结——把退火温度限制在875°C左右，借助于脱碳来控制和改善磁性是用户的任务。然而，不论生产厂还是用户都要受温度和成本的限制，这就是说，除了碳外，其他杂质通常是不能用退火处理除去的，并且，它们取决于初始冶炼时所达到的成份。

自1946年以来，美国钢铁学会已为各类硅铁合金的铁损上限定出标准。现代的P60/15上限值及近似的总合金含量列于表Ⅱ。所加入的合金多半是硅，有时用铝作为合金化的一部份，因为，铝可促进晶粒长大，并且可获得较高的电阻率，而又不受脆

性的严重威胁。例如勒季斯已叙述了3%Si—2%Al合金的工艺处理和性能。无取向硅钢的某些重要导磁率值可与列于表Ⅱ中的纯铁和取向硅铁相媲美。

表Ⅱ 无取向硅铁损上限值 (P60/15—瓦/公斤)

钢 种	名义含量	0.36毫米	完全处理 ^a 0.48毫米	0.63毫米	半 处 理 0.48毫米	0.63毫米
M—4 7	1	—	10.14	12.68	7.74	9.26
M—4 5		—	7.65	7.71	6.79	7.74
M—4 3		5.95	6.44	7.41	5.89	6.75
M—3 6	2	4.74	5.25	6.26	4.78	5.51
M—2 7		4.23	4.72	5.40	4.47	4.96
M—2 2	3	3.90	4.34	4.92	4.16	4.63
M—1 9		3.60	4.10	4.85		
M—1 5	3.5	3.20	3.75	—		
M—1 4 C	4.7	2.89	—	—		

a. 艾伯斯坦试样是50%沿轧向、50%沿横向切下。

b. 这里用的伯斯坦试样是在脱碳气氛中840°C退火了12时的试样；其50%沿轧向50%沿横向切下的。

c. 这种品种在美国已不再制造。

实际上，“无取向”这个术语总是要使人误解的。“无取向”就是要求薄板平面内的磁性接近各向同性，特别是要求轧向与横向的性能趋近于一致。然而，这未必意味着不存在织构。即便就是因不存在二次晶粒长大而防止了严重织构化，也不可避免要存在一些织构。通常，无取向晶粒的直径约为0.1毫米。用某些工艺处理方法，例如，在最终退火前进行小压下率的轧制（平整轧制），可获得一些较大的晶粒。铁损最少的高硅钢的平均晶粒尺寸，在最终退火（在板退热轧后进行）后可达1毫米左右，横向热轧易于产生〈001〉方向和最佳导磁率方向与轧向或45°角的织构。冷轧易于产生〈100〉方向与轧向和横向的偏差处于25°内的织构，并且，这种织构在轧向上有稍好的导磁率。

IV、晶 粒 取 向 硅 钢

A、菱形织构

具有强晶粒织构的硅铁的硅含量限制在3.2%左右。最小含硅量必须约为2.2%，这样才能保证不存在 α — γ 相变，并从而允许在1100—1200°C进行晶粒长大和纯净化的热处理。硅含量较多的优点是可获得较多的电阻率，然而，磁感饱和值与塑性则相应降低

了并难于获得强织构。因此，必须综合考虑硅含量。获得 (110) [001] 织构的主要工艺步骤，自高斯早期工作以来，没有发生多大变化。(110)[001] 织构是通过晶粒的前突然长大(所谓二次再结晶)而发展的。通常应用的这种工艺包括两次冷轧，每次冷轧前钢带都要先退火，使材料产生再结晶。在氢气中1100—1200°C进行最终箱式退火之前，要根据柯莱特和杰克逊提出的方法进行最终厚度带材的脱碳退火。在最终退火时，要在钢带上涂上氧化镁，以防止粘结并形成玻璃状绝缘涂层。1930年左右生产的早期工业晶粒取向硅钢的厚度约为0.32毫米，其特征是晶粒织构一般都较弱，而导磁率仅为1650。然而，与那时用的热轧的4.75%硅钢相比，则表明有了显著的改进。30年前菱形织构硅钢的导磁率之所以获得改进，其主要原因是平均晶粒取向达到了较完善的程度，铁损获得改进的原因是：(001)方向更接近于沿轧向排列，此外，同样也由于具有较低涡流损失的较薄材料达到了同样程度的取向。通常应用的名义厚度是0.36、0.3、0.28毫米。1968年0.23毫米厚的材料也成为可用的了。美国近几年来也定出了单取向硅钢工业品种的铁损上限值标准，其样式与无取向硅钢的标准样式相仿。表Ⅳ示出了工业上用的各种厚度优质硅钢在15千高斯和17千高斯下的铁损上限值。一般说来，在 $H=10$ 时这些品种的导磁率为1820。

要在厚度小于0.25毫米的材料中获得菱形织构变得益加困难，因为这种材料不大有利于二次再结晶。吕特曼已解决了此问题，他对至少已经冷轧了60%的单取向钢带进行迅速的一次再结晶，而发展了织构类似于菱形织构的厚0.025—0.15毫米的工业材料。这种薄材料的磁滞损失是较高的，但是，由于有良好的晶粒取向和低的涡流损失，其在400赫下的铁损是极低的。另外一些人则想出了更有效利用抑止剂的方法来制做0.05—0.18毫米厚的3%单取向硅铁。菲特勒的方法是用氮化钒夹杂作抑止剂，而果勒则是把硫加入物涂敷至钢带表面上，以加强 MnS 夹杂的作用。在这些情况下，抑止剂是在最终退火时才除去，以获得2—10毫米直径的晶粒。0.15毫米厚的材料目前正在用后一种方法生产，其磁性列于表Ⅳ中，已报道的单取向3%硅铁的最低铁损值(P15/60)为0.55瓦/公斤，这是瓦尔特在0.025毫米的实验室环状铁芯试样上获得的，瓦尔特是用表面能晶粒长大的方法获得导磁率为1880 ($H=10$ 奥)的强织构材料的。

除了致力于通过改进取向而降低单取向硅铁的铁损外，也把精力放在提高电阻率上。例如，已有人建议寻找应用较高硅含量的途径了！加入镍可使4%硅铁有良好的塑性。而把硅扩散进3.25%织构硅铁中，可获得硅含量 $\leq 6.3\%$ 的取向硅铁。

表Ⅳ 晶粒取向3.2%硅铁的铁损限

品 种	厚度 (毫米)	P15 : 60 瓦/公斤	P17 : 60 瓦/公斤	P15 : 400 瓦/公斤
M—6	0.36	1.46	2.28	
M—5	0.3	1.30	1.98	
M—4	0.28	1.19	1.71	
M—3	0.23			
	0.15			16.63
	0.10			14.33

B、立方织构

自从报道了获得立方织构3%硅铁以来，十五年过去了，然而，这种材料的生产几乎没有显露出多大的发展迹象。已经提出了繁多的生产立方织构铝铁和硅铁的方法（有些已获得专利），然而，大多数工艺受到各种实际条件的限制。已经利用了各种方法来生产立方织构，然而，在公开发表的刊物上并不总是公布的，霍勒曼叙述了一种用晶粒取向铜锭作原始材料和仅包括一次再结晶的方法。果勒和吕特曼发展了一种生产立方织构线圈的工艺，这个工艺包括用表面能促进（100）晶粒二次再结晶的退火。在这种情形下，二次（001）晶粒的方向是由影响一次再结晶的那些因素决定的。塔古基等利用氮化铝抑止剂和特殊的横向冷轧方法。

现在美国已很有限地生产出了具有弱立方织构的0.3毫米厚的3%硅铁。在轧向与横向的导磁率都约为1100（ $H=10$ 奥）。由于晶粒粗大（20毫米直径）以及（001）杂乱排列，轧向的铁损值高至2.25瓦/公斤。因此，这样的立方织构材料仅能在要求各方向上都有好导磁率和低铁损的场合下使用。这个工艺过程要求很纯的合金和严格控制的退火条件。而这是很难办到的，并且成本昂贵。因此，在工业上这种产品对现代技术没有吸引力。

V、应 用

A、直流电

由于纯铁便宜和磁性良好，因此，在直流电的场合下，实际上没有把它取代掉。纯铁因电阻率低而不适用于作迭片织构，因此在大多数场合下都是用较厚的板或片。诸如继电器、制动器，柱塞极靴和框架等零件在制造时需要成型、机械加工甚至锻造。虽然变形和应力不影响饱和磁感，然而，即使是在18千高斯下它们也对导磁率有影响。因此，必须进行消除应力的退火，并同时可借助于去碳和晶粒长大改善磁性。如果用低碳钢取代纯铁，则这一点是特别重要的。如果主要要求磁性稳定和无时效，则可用稳态（电磁）铁。在要求有较均匀的导磁率时，有时要用粉末铁。

B、交流电

无取向硅铁的性能几乎是连续地获得改进的，从合金含量（Mn）为0.4%的低碳钢开始，直至最终发展成含硅量（或Si+Al）为4%的合金。低合金类有高的饱和磁感和高铁损，其成本较低，而高合金品种则与此相反。若单从磁性的角度来考虑，则材料的选择应综合估量两个相反的因素，较高的磁通量（这可用较少合金和较厚迭片来实现）和较低的铁损。正如奥尔逊所述，成本和制造因素通常决定了材料的选择。对小型或中型电动机，用合金含量低的较厚迭片可降低设备的生产成本。然而，由于铁损高将引起严重的热损耗，因此，也可考虑用较好的材料。即使对在操作的整个周期中间断使用的设备来说，使用较好的材料也是合适的，因为由于铁损低可降低功率损失和减少设备的容量。

对大型发电机来说，低铁损是主要因素。除了热轧的3.5%硅铁外，还可用单取向3.2%硅铁，就磁通量方向而言把它制成迭片较合适。据认为立方织构硅铁是发电机最理想的材料。然而，这种硅铁的织构使两个方向上的弹性模量都很低，而且，其晶粒粗大，这些因素给获得无缺陷迭片造成了机械方面的困难。直到现在，经济上的考虑排除了在发电机上使用立方织构硅铁。

对变压器来说，成本是主要因素，并且，在许多情况下，应用磁性良好的材料是有很大的经济诱惑力。一些变压器结构可充分发挥单取向3.2%硅铁在轧向上磁性优良的特性。在磁感接近17高斯下的场合下，晶粒取向良好的材料的优点显得更突出，而在这种磁感下铁损值更值得注意。在整个世界上，单取向硅铁现在几乎是功率和分配变压器的独一无二的材料。

对60赫的用途来说，所用的最薄材料的厚度是0.23毫米。在400赫下使用时（这对飞机来说是普通的频率），厚0.1—0.15毫米的材料给出极佳的性能。在各向同性成为重要因素的场合下，可应用无取向的薄的3%硅铁。薄的晶粒取向材料可卷成卷铁芯或冲压成迭片供变压器使用。脉冲或多频设备所用的最薄材料的厚度是0.025毫米。

飞机和宇宙飞行器的需要创造了工业上用的第一批立方织构3.2%硅铁，在这些场合下，减轻重量的需要允许用成本很高的材料。然而，对变压器用途来说，用这种材料是不实际的，因为在立方织构变压器的轧向上的铁损和导磁率比不上单取向的好。

IV、发展趋势

在下图中用曲线描述了铁损逐渐降低的情况：1955年前的数据是伯约斯搜集的，1970年的数据是作者加上的。最早的材料是不纯的铁，1900年后的显著变化代表了加入硅的结果。自1936年后的进展反映了单取向3.2%硅铁的取向程度所获得的完善，并且，也同时反映了用冶炼和退火不断降低夹杂的情形。铁损的降低也与厚度的减少有关。1970年的数据代表了厚0.23毫米的材料的铁损。

现在大多数取向材料的厚度是0.28—0.30毫米，并且，即使在60赫用途的场合下，也仍然有使用更薄材料的趋势。为了节省铁芯材料和铜，期望建造更多的在400或800赫下使用的设备，在这种场合下用0.1—0.15毫米厚的单取向硅铁更合适些。

据塔古基和莎卡古拉的报道，菱形织构类型硅铁晶粒取向的进一步改善可改善磁性，特别是可改善17千高斯下的磁性。获得强棱取向的优点是：它足以克服稍低硅含量（2.9—3.0%）和晶粒粗大的有害作用，用较高硅含量可降低涡流损失，然而，在高磁感下的磁性则受低饱和磁感的危害。

是否能解决在生产低铁损、强立方织构硅铁时所存在的一些问题，现在仍然是个谜，较好的了解磁性现象有助于找出降低铁损—特别是降低晶粒粗大材料的铁损的途径。

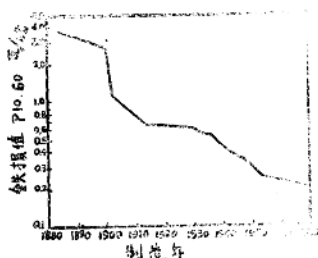


图1 工业变压器材料的铁损逐年变化情况

的进步，现在在改进磁性方面已获得显著进展，可以预料这个进程将持续下去。

译自IEEE Transaction on magnetics, VOLMag-7, No march 1971

不管今后几年会获得什么进展，晶粒取向硅铁的生产特征和方法以及成本仍然是很重要的因素。

无取向硅铁的特性与取向硅铁的特性之间存在着显著差异，然而，如果需要是可以缩小差异的。

不用期望在软磁材料的发展上会出现突变，因为除了在极特殊的情况下，没有更好的材料可取代铁和硅铁合金。然而，通过冶金方面

硅钢的氧化镁——氧化铬涂层(专利)

本专利是有关硅钢退火隔离物，它主要由氧化镁组成并附加有氧化铬。本专利还将叙述用此退火隔离物生产磁性优良并有良好抗氧化性玻璃底层的硅钢的工艺过程。

“硅钢”此术语包括取向和无取向的硅钢，其成份是： $2-4\% \text{Si}$ ；初始含碳量 $\leq 0.040\%$ ；硫（或硒） $\leq 0.03\%$ ； $0.02-0.4\text{Mn}$ ； $<0.40\%$ 铝；其余是铁以及在碱性平炉，电炉或其他各类氧气转炉冶炼的硅钢中所常见的磷、铜等杂质。

“玻璃底层”这个术语是指在硅钢表面所形成的涂层，该涂层是硅钢表面的二氧化硅和退火隔离物中的氧化镁反应而形成的。此玻璃底层的组成很复杂，但可想而知它是由大量的镁硅酸盐同氧化镁和钢中的各种杂质化合而成的。

以 往 的 生 产 工 艺

各种生产硅钢板的工艺过程是人们所熟知的。初始冶炼成份，生产工艺的特性和顺序以及其他的工艺因素将依赖于最终产品所要求的性质。然而，一般生产硅钢的工序包括：硅钢的热轧，清除铁磷、冷轧至最始厚度和最终退火。通常工序中还包括脱碳的退火。

在应用硅钢的许多场合中，要求最终产品的表面薄膜或玻璃底层应具有绝缘性、抗氧化性或抗渗碳性能。例如，具有玻璃底层的硅钢常常用来制做一些磁性装置的铁芯。

虽然，用个别的工艺处理使硅钢表面获得较好的玻璃状涂层是属于本专利的范围，然而，本行的专家们早知道，把提供玻璃状涂层的工序当作整个生产过程的一个环节，即：这样一种涂层的获得应在不妨碍成品达到所要求的磁性的前提下，才是较合适的和较廉价的生产方法。

在高温退火期间，获得玻璃状底层的操作与涂敷前钢表面予先形成的二氧化硅层和用的退火隔离物有关。二氧化硅膜一般是在脱碳期间产生的。在最后的高温退火处理时，二氧化硅膜和氧化镁涂层起反应，在钢的表面上生成镁硅酸盐玻璃底层。

正如美国专利2,354,123中指出的，长期以来，人们已经了解到，氧化镁隔离物在合适的条件下将在硅钢的表面形成玻璃状薄膜。该专利的方法是在予先氧化的硅钢片上涂上含有二氧化硅附加物的氧化镁退火隔离物。美国专利2,394,097指出，可把一些氧化剂，诸如氢氧化钙、金属碳酸盐或其他氢氧化物附加在含有二氧化硅的氧化镁退火隔离物中，这样，就可免去予氧化硅钢的必要性。这些专利代表了以另外的途径解决在硅钢表面上形成附加玻璃状底层的问题。

但是，至今为止，硅钢片经过最终退火后，往往呈现变色的现象，一般是属于“氧化型”。这种变色特别易在接近边缘处出现，而形成所谓的“氧化边”。这种“氧化边”现象大伴是硅钢片上存在有氧化皮（主要是氧化铁）所造成的。如果在钢仍处于高温时，就从退火炉中取出，而使钢暴露于周围空气的氧气中，则在最终退火终了时，将产生大量的边缘氧化。因此，人们仍然认为，使硅钢冷却到 537°C 以下的温度时，再从退火炉中取出是必要的。

所以，这种玻璃状薄膜通常有足够的绝缘性能。然而，最终退火后的退火（如在变压器制造厂等单位进行的应力退火）将严重损害磁性，因为这些操作往往是在大气中或在易于氧化和增碳的条件下进行的。经过这类随后退火处理的产品，常常出现氧化皮，而恰好处在表面下的硅则发生内氧化。此外，经常发生增碳，并且碳以细小的颗粒沉淀，其结果加大了瓦特损失，从而使磁性恶化（即工艺中所谓的磁时效）。

然而，业已发现，如果将氧化铬（ Cr_2O_3 ）加入氧化镁隔离物中，就可形成附加的二氧化硅，而二氧化硅与氧化镁起反应后，就在硅钢表面生成一种较连续的硅酸盐薄膜。这样，就可形成良好的玻璃状底层，其特点是大大消除了“氧化边”并可更好地防止硅钢的氧化和渗碳。本专利的操作为随后根据需要再涂附加绝缘层，提供了良好的表面。正如美国专利2,501,846所指出的，可涂上附加的绝缘层。

过去，把各类的化合物（包括 Cr_2O_3 ）与其他成分相结合，而在硅钢的表面形成涂层。例如，在美国专利2,144,425中指出，可用 Cr_2O_3 作为色素而与磷酸盐粘合剂起反应。当稍后用烧结法涂敷上磷酸盐涂层时，建议用氧化铬作为中性填充料。约含55% Cr_2O_3 和45% CaO 的涂层，和一般氧化镁涂层相比，具有良好的电特性。另外，铬酸酐还可以和氧化镁配合使用（其配比为2.4份的 Cr_2O_3 ：1份的 MgO ），做铁芯的绝缘漆。然而，本专利限于在氧化镁涂层中精确地加入少量的氧化铬（ Cr_2O_3 ），至于所要加入的其他成份只是极少量的氧化钙以及在生产晶粒取向硅钢时所需要的极少量的晶粒长大抑制剂。至于在进一步应用另一些涂层成份或者进行一种特殊后处理时，未必对本专利操作生产的涂层性质有影响，它不属于本专利范围内所考虑的问题。

具体例子的叙述

作为范例，本专利叙述了在硅钢生产过程中最终退火之前，即在发展最终磁性之前，退火隔离物是如何涂敷到硅钢片上的。众所周知，退火隔离物的使用是与要求形成玻璃状涂层的工序相关的。

这里所说的氧化镁隔离物是指已经部分地或完全地水合成氢氧化镁的氧化镁。在本专利的一范例中，氧化镁是以水浆的形式涂敷至硅钢片上，形成了化合水不超过12%的涂层（正如美专利2,906,645中指出的）。

在最终退火期间，氧化镁隔离物有若干作用。它可防止各相邻硅钢片之间或者带卷各圈之间的粘结现象。它可促进钢的脱硫，并且，它与钢起反应在钢材表面上形成硅酸

镁或玻璃状涂层。业已发现，把氧化铬加入氧化镁隔离物中，有助于改善成品表面的玻璃状涂层的质量以及成品的磁性，而又不致妨碍氧化镁隔离物的其他作用。

虽然，用不着拘泥于理论，但是，可以确信，在最终退火期间氧化铬与钢中的硅起反应而生成铬金属和二氧化硅。铬扩散进硅钢内，而所形成的附加二氧化硅与氧化镁反应在硅钢表面形成一较连续的硅酸盐玻璃状薄膜。这层外加的保护性玻璃状涂层可显著地减少或消除表面的氧化型变色或者氧化边。这样，就可允许在较高温度下，从退火炉中取出硅钢片。这种玻璃状涂层在随后的矫直退火，消除应力等退火后，依然保持了完整性。这种玻璃状涂层呈现出较良好的抗氧化和防渗碳的性质，并且为随后根据要求涂敷附加的绝缘涂层提供了较连续的、均匀的表面。最后，正如下面的例子所示出的，硅钢本身也呈现出较良极的磁性。

加入氧化镁隔离物中的 Cr_2O_3 的最佳量是受若干因素支配的，这包括隔离物涂层的重量，所使用氧化镁粉的类型以及在涂敷氧化镁之前各种工艺处理的性质。

Cr_2O_3 的加入量约为氧化镁隔离物重量的1%—20%。最佳的范围是1%—15%。这些数值是对每平方米的硅钢表面上有9.2克退火隔离物的情形而言的。

此外还发现，在隔离物中含有高浓度的氧化铬（即高于15%）时，在显微镜下可观察到硅钢表面变的粗糙，并且，也将产生低劣的层间电阻。若 Cr_2O_3 的浓度过低（即低于5%），则没有可能产生连续的玻璃状涂层。

在退火隔离物加入氧化钙可带来某些好处。然而， CaO 的应用受到某些限制。因为，氧化钙易于和空气中的或其他来源的二氧化碳化合生成碳酸钙。而在随后的高温退火中，碳酸钙将分解成氧化钙和碳气。这种碳气本身要分解，使硅钢增碳，造成不良的硅钢磁时效等现象。因此，渗碳就成了使用 CaO 的主要障碍。然而，如果加入适量的 CaO ，使其不致损害磁性，那末，加入 CaO 还是有某些益处的。所以，根据需要，本专利加入重量为隔离物的0.1%—1%的 CaO 。这样，即有助于改进玻璃状涂层的层间电阻，而又不致造成有害的磁时效。

当试图用晶界能机理来控制所生产硅钢的最终取向时，则可根据美国专利3,333,992，在退火隔离物中加入一次晶粒长大的抑止剂（例如硫、硒及它们的化合物）。

在本专利的操作中， Cr_2O_3 粉末以及根据需要而加入的 CaO 或晶粒长大抑止剂，都可在涂敷硅钢之前，与干氧化镁或氧化镁浆液相混合。或者，在钢带上涂敷了氧化镁后，再把氧化铬涂到钢带的上部。前一种方法较好，因为它较便于控制。

例 1

经脱碳的，厚度为0.3毫米的钢样品，涂敷上含有0~100%氧化铬（ Cr_2O_3 ）的氧化镁。样品在干氢中1205°C箱式退火24小时。在退火处理后，把过剩的涂层隔离物从表面除去，然后检验样品的磁性和抗氧化性。在频率为60赫/秒、磁感为15000和17000高斯下测定铁损值。导磁率是在磁场强度为10奥特下测定的。

正如表 I 所示出的, 加入 1%—20% 氧化铬的样品与不加氧化铬或其加入量大于 20% 的样品相比, 较有利于磁性。可达到低铁损、高导磁率以及绝对值大的负的磁致伸缩的目的。表面电阻率可用富兰克林测试器测量, 对这类硅钢来说, 电阻率应小于 0.40 安培。当加入 1%—15% Cr_2O_3 时, 可改进表面电阻率。当 Cr_2O_3 的加入量超过 15% 继续增加时, 将使表面电阻率逐渐降低。

表 I

MgO 中的 Cr_2O_3 (%)	铁损 (瓦特/公斤)		导磁率 (H—10)	磁致伸缩 (15 千高斯)	富兰克林安培值
	P 15 : 60	P 17 : 60			
0	1.12	1.64	1825	-74	0.39
1	1.10	1.62	1838	-93	0.19
2	1.10	1.61	1838	-94	0.15
5	1.09	1.61	1840	-97	0.15
10	1.07	1.55	1837	-99	0.18
15	1.06	1.54	1839	-102	0.29
20	1.07	1.56	1835	-101	0.35
25	1.06	1.52	1838	-100	0.48
50	1.15	1.64	1822	-104	0.51
100	1.25	1.77	1803	-40	0.57

每个样品的各小钢带材都在空气中 788°C 加热 30 分钟, 以便确定表面玻璃状涂层的抗氧化能力。 Cr_2O_3 含量为 0% 和 100% 的样品产生强例的氧化。当 Cr_2O_3 的加入量直至 5% 时, 氧化的激烈程度降低, 而当样品涂敷上 16%—20% Cr_2O_3 时就基本上消除了氧化。

表 I

带卷 №	附加物	铁损 瓦/公斤		导磁率 H—10	磁致伸缩 15 千高斯
		P 15 : 60	P 17 : 60		
1	无	1.12	1.61	1830	-16
2	10% Cr_2O_3	1.12	1.58	1835	-76
3	10% Cr_2O_3 + 1/4% CaO	1.09	1.59	1840	-70

这些结果表明, 把 Cr_2O_3 加入氧化镁中, 可在钢表面上形成一种极佳的玻璃状涂层。此良好的玻璃状涂层可更好地使硅钢免于产生不利的表面反应, 并且还提高了硅钢的磁性。