

248619

金属学与热处理文集

第 1 輯

冷轧砒钢片的热处理与性能

冶金工業部鋼鐵研究院 譯

冶金工业出版社

14
0;0

金屬学与热处理文集

第1輯

冷軋矽鋼片的热处理与性能

冶金工業部鋼鐵研究院 譯

冶金工業出版社

金属学与热处理文集第1輯

冷轧硅鋼片的热处理与性能

冶金工業部鋼鉄研究院 譯

編輯：謝淑蓮 設計：周 广 童煦菴 校對：馬泰安

冶金工業出版社出版(北京市紅市口甲45號)

北京市書刊出版業營業許可證出字第093號

北京西四印刷厂印 新华書店發行

1959年5月第1版

1959年5月北京第一次印刷

印數 3,000册

850×116mm×1/32×16,400字×印張6張

統一書號 15062·1663 定價 0.80元

前 言

矽鋼片是电机工業、電訊工業、国防工業以及精密仪表制造工業中不可缺少的材料。它对国民經济具有重大的意义，特别是在目前全国大躍進之际，党中央提出全国电气化、全民办电的任务后，矽鋼片显得更加重要了。由于矽鋼片供不应求，今年产量計划翻一番，全国各地根据 上洋結合的方針，各处都將生产矽鋼片。

我們編譯“矽鋼片譯叢”的目的，是为了將最近国外有关这方面較重要的資料介紹給从事于矽鋼片生产的以及使用这种材料的同志，希望能对他们的工作有些帮助。这一冊的重点偏重于有关冷轧变压器和冷轧电机鋼的資料，其中共包括廿篇文章。

第一篇是綜合性文章，作者叙述了变压器鋼片的最近發展情况，介紹了热轧、半冷轧和冷轧矽鋼片，着重的說明冷轧变压器鋼的特性，退火对磁性的影响以及再結晶纖構的形成等問題，最后也簡單地介紹了立方纖構矽鋼片。

第二篇是关于冷轧变压器鋼的性能、發展情况以及在电机方面的应用。

第三篇到第七篇的主要內容是冷轧变压器鋼的冷加工和再結晶纖構的研究，其中包括冷轧、中間退火和最后退火时纖構的变化情况。

第八篇到第十三篇是有关冷轧变压器鋼的化学成分、冷轧变形以及其他生产工艺方面的一些問題。

第十四篇到第十八篇介紹了冷轧电机鋼的生产工艺方面的一些資料，这种具有低晶粒取向的矽鋼片最近在苏联已引起了很大的注意。

第十九篇是矽鋼片高溫退火时所采用的塗料对磁性的影响，这是有关塗料問題很重要的一篇參考材料。

第二十篇介紹了整張鋼板測量矽鋼片磁性的裝置及測量方法。

此外有兩篇苏联的最近資料較具体地介紹了冷軋變壓器鋼的生產工藝，已在期刊上刊登，現介紹如下：

1. А. И. 別雅柯夫：冷軋變壓器鋼的生產。見鋼鐵譯叢 1957 年 7 期，35 頁。

2. И. И. 舍弗捷里：冷軋變壓器鋼的生產，見國際新技術通訊（黑色冶金），1957 年 4 期，32 頁。

出版者的話

在党的社会主义总路綫光輝照耀下，我国冶金工業获得空前的發展。冶金工作者对各專業的圖書資料的要求日益增長。为了满足金屬学及热处理工作人員的需要及弥补圖書之不足，我社今后將出版一套“金屬学与热处理文集”。

这一套文集包括金屬学及各种鋼的热处理和鋼的性能，按不同內容，分冊出版。

本書介紹冷軋矽鋼片的热处理与性能，適合矽鋼片的生產、使用和研究人員閱讀。

本書由冶金工業部鋼鐵研究院戴礼智、何志治、張信鈺、王建綱、史通、孙学範、周宗全、張傳历及張新华同志譯校。

目 录

第一篇	变压器鋼的發展和生产現狀	G. 勒斯曼	1
第二篇	新的磁性材料和它对于工業發展的重要性	K. 薛克斯都司	26
第三篇	鉄和鉄矽合金中冷軋及再結晶纖構的研究	K. B. 格里高洛夫, Г. П. 勃洛欣, Э. A. 柯尔宗, М. Я. 扎庫特涅尔	33
第四篇	冷軋变压器鋼退火时的纖構形成	Л. B. 米罗諾夫	48
第五篇	論最后退火时加热速度和冷却速度对冷軋变压器鋼获得再結晶纖構的影响	B. B. 德魯日宁, B. A. 柯罗列娃	57
第六篇	中間退火对冷軋和再結晶纖構的影响	K. B. 格利高罗夫, Г. П. 勃洛欣	67
第七篇	聚集再結晶对初次再結晶纖構的影响	K. B. 格利高罗夫, Г. П. 勃洛欣, Э. A. 柯尔宗	74
第八篇	变压器鋼冷軋变形性的研究	Г. П. 舒宾, B. A. 沙布林, Н. И. 拉普金	80
第九篇	晶粒取向矽鋼片	N. P. 戈斯	86
第十篇	杂质对冷軋 3 % 矽鋼再結晶纖構的影响	J. D. 法斯特	96
第十一篇	冷軋变压器鋼	A. Л. 高利德曼, E. C. 切尔諾勃洛夫金娜, P. M. 格罗勃曼	98
第十二篇	冷軋变压器鋼生产时的脫碳	A. И. 別雅科夫, A. A. 聶費多夫	108

- 第十三篇 冷轧变压器鋼試样邊緣的加工硬化对电磁性能的影响..... А. И. 別雅科夫 110
- 第十四篇 低組織冷轧电工鋼
..... А. А. 拉斯托尔吉也夫, А. А. 諾費多夫 117
- 第十五篇 1.0 毫米厚的冷轧电工用鋼
А. И. 別雅科夫, А. А. 諾費多夫, М. С. 西馬柯娃 134
- 第十六篇 冷轧电机鋼卷的热处理
..... М. И. 柯洛夫, А. И. 捷列霍娃 139
- 第十七篇 冷轧电机鋼..... Н. И. 拉普金, Н. Ф. 杜布洛夫 157
- 第十八篇 重結晶对低碳鋼和电机鋼組織的影响
..... К. В. 格里高洛夫,
..... Г. П. 勃洛欣, М. Я. 扎庫特涅尔 165
- 第十九篇 寻找提高变压器鋼質量的化学活性塗料
..... Н. И. 拉普金 171
- 第二十篇 在整張鋼板上測定电机鋼或变压器鋼电磁性能的裝置..... А. Д. 索柯洛夫, Р. И. 雅努斯 183

变压器鋼的發展和生产現狀

G. 勒 斯 曼

热轧鋼片的性能——冷轧后的影响——具有絨
構的冷轧鋼片——退火温度和退火气氛对磁性
的影响——再結晶与絨構的形成。

鉄-矽合金用作电机和变压器材料約有 50 年。目前世界矽鋼年产量大約为 80—100 万吨。显然，这种鋼片的性能和生产工艺的每一进展都具有極其重大的經濟意义。

下面將概略地叙述热轧和冷轧变压器鋼片的性能，并將在生产工艺上所获得的数值与試驗室的数据作一对照，以便为今后的發展提供依据。

1. 变压器鋼片种类和性能的概述

表 1 綜述了 0.35 毫米厚的变压器鋼片的磁性。

按照矽鋼的生产工艺可分为三类：

- 1) 热轧鋼片；
- 2) 热轧后經過冷轧的鋼片*；
- 3) 冷轧鋼片。

热轧鋼片的性能几乎沒有方向性，但半冷轧鋼片具有弱的磁性和机械性能的各向異性，而冷轧鋼片則具有强的磁性和机械性能的各向異性。上述的这种各向異性仅在一个方向上能获得最好

* 此类鋼片我們称为“半冷轧”鋼片——譯者註。

0.35 毫米厚的变压器钢片的磁性

种 类	铁心损失*, 瓦/公片			磁 感*			P _横 : P _纵	所获得之磁好值			附 註	
	P _{1.0}	P _{1.5}	P _{1.7}	B ₅	B ₁₀	B ₂₅		B ₃₀₀	P ₁₀	B ₁₀		H _C
热 轧 N 1.5 Si~3.9 N 1.1 C $\leq$ 0.07 N 1.0 Si 4.3	1.3	3.3	—	12300	13400						1100°C 氢气温火	
	1.1	2.7	—	12500	13500	14500	18500	0.65	14300	0.18		
	1.0	2.5		12900	13700	/						
按照 Hesselbach bzw. Mühlhans												
半 冷 轧	0.851	—	—	—	159001	—	—	1.13:0.81 (Mühlhans)	0.68	15300	0.17	1100°C 氢气温火
	—	—	—	—	—	—	—					
	1.19	—	—	—	154009							
苏联、美国、民主德国												
冷 轧 Si~3%	0.7	1.6	2.3	—	16300	—	—	1.5:0.7	0.42	18500	0.08	1170°C 氢气温火
	—	—	—	—	—	—	20000	—				
	0.45	1.0	1.8	—	18000			1.2:0.45				

* 按照德国工业标准 45 400.

的性能，因此应用这种鋼片制造变压器时必须考虑鉄心的構造。

表1首先指出冷轧鋼片的鉄損最好，同样对于特別是在低磁場內能达到的磁感也是如此。將这三类鋼片的生产平均值和試驗室得出的数值作一比較，便可看出热轧鋼片的鉄心損失还可大大改善，而在試驗室內得出的冷轧鋼片的最好值与生产值則相差無几。

因此对热轧鋼片來說想在生产上进一步發展，就要求根本改变生产工艺，而对冷轧鋼片只要求保証良好值和降低工艺上的費用。

为了指出所要求采取的方法，必須說明磁性和材料之間的关系。

2. 材料和磁性

按照現在的概念，一种鉄磁材料是由單个的自發磁化区（磁疇）所組成。它們最初的排列与外界不發生磁的效应。一旦外磁場产生作用时，單区的自發磁化便逐渐趋向于磁場方向。这种过程产生在开始磁化时以及通常的磁感与外界磁場强度的关系曲綫圖中形成新的曲綫*，如果在循环磁化时則形成磁帶迴綫。

促使自發磁化方向的改变，基本上有两种可能性：

1) 疇壁移动：

由于两个磁疇之間的壁（Bloch 壁）的移动，使对于外磁場不适当取向的磁疇消失，因此一个磁疇便依靠它的鄰近磁疇而生長。

2) 轉动过程：

如果自發磁化对于外磁場的不适当取向沒有能因为疇壁的移动而使感应增加，那么代替疇壁移动便要發生轉动过程。在磁疇

* 此曲綫，現通称为“起始磁化曲綫”——譯者註。

体积不改变的情况下,自發磁化的方向便向外磁场的方向內轉动。

在轉动过程中所需的能量比壁移动所需的能量大,因此当外磁场发生作用时总是壁移动首先进行。自發磁化和产生壁移或轉动过程所必需的能量等等,都可归到材料数据上面,从而便可找出材料和磁性之間的关系。

决定材料的数据,特別对磁性有影响的是:

- 1) 化学成份 (原子量、原子特性及其排列决定磁饱和 $4\pi I$, 晶格能 k , 和饱和磁致伸縮 λ)。
- 2) 組織內所含“相”量及性能 (均匀組織大多产生軟磁性,相反的不均匀組織則产生硬磁性)。
- 3) 晶体結構缺陷 (晶粒边界、位錯、外原子的插入等能使矯頑力增加、磁滯損失升高以及磁感降低)。
- 4) 晶体取向 (鑄造組織、軋制組織和再結晶組織产生磁的各向異性)。
- 5) 磁畴的排列 (晶粒取向, 应力分佈等决定自發磁化方向的分佈和磁滯迴綫的形式)。

3. 由鉄-矽合金制造的电工鋼片

鉄-矽合金相圖指出一个被包圍的 γ -区, 含矽 $> 2.5\%$ 的合金沒有相变, 在热处理时所产生 $\alpha \rightarrow \gamma$ 相变扰乱了相宜的变压器片組織之形成, 所以具有較好性能的矽鋼片均使用含矽量大于 2.5% 。由于碳作为鋼中杂质存在, 其含量大概有 $0.02 \sim 0.07\%$, 因而 γ -区的界限, 以及無相变合金均向着較高矽含量方面移动。

含矽量增加, 磁饱和降低, 而机械性能也变坏, 因此含矽量大于 4.5% 的鋼片在制造变压器时很难应用。含 6% 矽的單晶体經過磁场处理后可以达到特別高的磁感 ($H_{max} = 4 \times 10^6$ 高斯/奥)。虽然已經能成功地將此类合金加工成鋼片, 但是此种成份的合金

并未获得工业上的应用。

3.1. 热轧电工钢片

关于冶炼方面的影响已由 Fellcht 和 Kutschier [1] 叙述过, 此外, 最后热处理对这种材料的磁性是特别重要的。下文谈到作者本人的研究结果。首先研究了一般成份的热轧矽钢片经过最后退火温度后磁性的影响。退火是在电炉内进行的(图1)。

铁损值是指对于 600° — 900°C 的退火温度范围而言。退火前热轧钢片的纵向和横向*的 P_{10} 各为 3.5 和 3.7 瓦/公斤。退火温度在 600° 和 700°C 间 P_{10} 从 2.5 瓦/公斤左右下降到 1.1 瓦/公斤(纵向)和 1.3 瓦/公斤(横向)。从 700° 到 800°C 铁损变化不大,

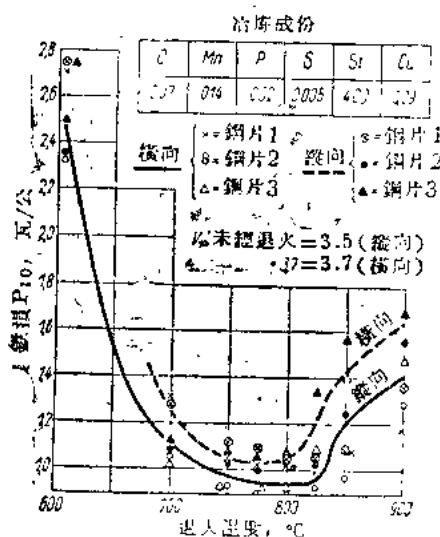
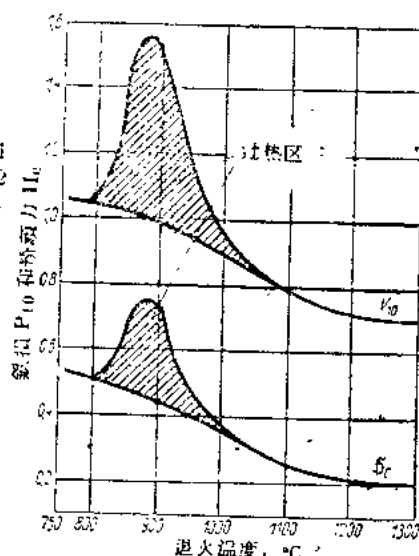


图1 热轧钢片 P_{10} 与退火温度的关系



* 钢片的纵向即为钢片的轧制方向; 钢片的横向即与钢片轧制方向成 90° 的方向——译者注。

而最好鉄損值为 0.9 瓦/公斤。当加热温度升高到 900°C 时, P_{10} 为 1.4 (縱向) 和 1.6 (橫向)。超过退火温度 800° 鉄損的增加現象称为变压器鋼片过热現象。但这并非在每一情况下都如此。这种現象的产生与多相析出的發生有关, 或者与一种由于含碳过高所引起的 $\alpha\rightarrow\gamma$ 相变有关。

圖 2 是热轧矽鋼片几种試驗在 750°C 到 1300°C 在氬气內加热后的研究結果。 P_{10} 和 H_c 与退火温度的关系具有类似的傾向。在过热区鉄損的增加是 H_c 增加的原因。如果鉄損增加原因是由于退火时所产生的 $\alpha\rightarrow\gamma$ 相轉变, 或是由于多相析出的形成的話, 則凡是不会發生这两种現象的材料就不会發生 H_c 增加的現象。此点能通过下列試驗加以証明。即在真空內再次熔化軟鉄, 含碳量由原来的 0.05% 降到 0.004%。以相同的工艺处理 (热轧), 將这种重新經過真空熔化的和沒有經過真空再熔化的

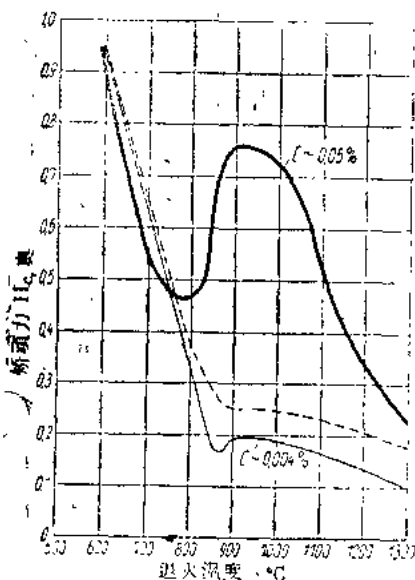


圖 3 不同純度純鉄的 H_c 与退火温度的关系

鋼片同时进行最后退火处理。所获得的 H_c 与退火温度关系見圖 3。

沒有經過真空再熔煉的鋼片在 900°C 时产生劇烈的上升, 而經過真空再熔的鋼片却完全沒有产生 H_c 的上升片。这对热轧鋼片工艺改善的意义就在于最后热处理时在加热到 800°C 之前碳含量不得大于 0.002%, 否則对于鋼片磁性不利的再結晶就会产生。但現在这种条件还不能滿足, 因为通常在最后

退火后热轧钢片的碳含量常在0.04%到0.06%之间。

圖2指出在氫气內退火，溫度增加到1200~1300°C时，热轧钢片的鉄損 P_{10} 也可能达到0.7瓦/公斤。

通过熔煉或退火工艺的措施，含碳量的下降以及退火溫度的增高，热轧变压器钢片能改善它的磁性。此外鉄損的下降，磁感的升高在电机工業上也是很有意义的。这可由晶粒具有一定的取向来达到。此时在所有晶粒內易磁化方向須与外磁場的方向相符。此类材料在这样方向內表示出一种矩形磁滯迴綫。通过冷轧工艺能得到晶粒取向钢片（下面将要叙述）。经过合适的热轧工艺也可达到一定程度的晶粒取向，如图4所示。这里特别大的晶粒具有(110)平面平行于軋面和[001]方向沿着軋向約有30°的漫散。

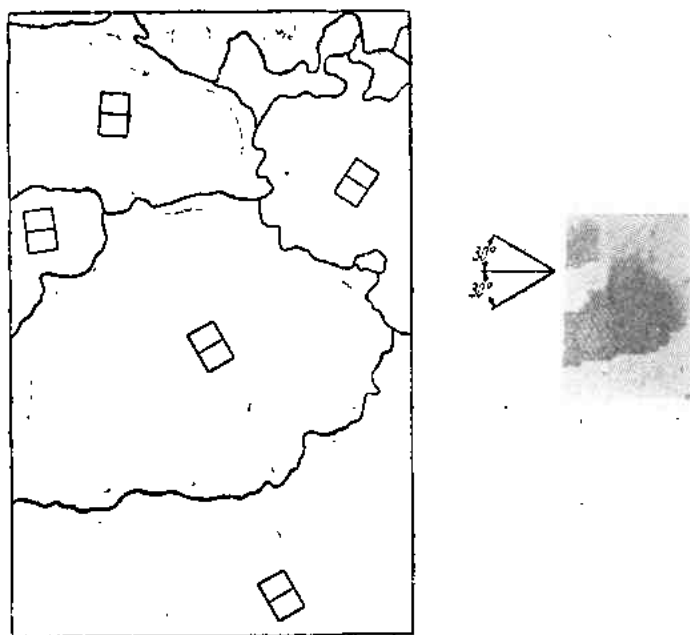


圖4 具有大晶粒的热軋鋼片

3.2. 半冷轧电工鋼片

按照美国[2]資料，在最后热处理前的半冷轧鋼片的磁性較热轧鋼片有所改善。

3% 矽鋼 热轧到 0.5 毫米厚，再冷轧到 0.35 毫米，在最后退火后产生了一种弱的織構，在縱向上和橫向上的鉄損比例为 0.8:1.3，在縱向上的磁感 $B_{10}=15900$ 高斯。根据表 1，这种数值是热轧鋼片所达不到的。上述方法乃代表一种进步。

下面我們作了一系列的試驗，对于含矽 3.1% 和 4.5% 合金，研究了 0.5 毫米冷轧到 0.35 毫米的影响。热轧鋼片进行或不进行退火。最后退火溫度在 800 到 1300° 間。下列各种不同方法处理的鋼片都在氫气中退火：

- 1) 热轧 0.5 毫米鋼片；
- 2) 热轧 0.35 毫米鋼片；
- 3) 从 0.5 毫米冷轧到 0.35 毫米鋼片；
- 4) 热轧 0.5 毫米鋼片，在 750°C 氫气退火 5 小时，冷轧到 0.35 毫米；
- 5) 热轧 0.5 毫米鋼片，在 750°C 氫气退火 5 小时，再在 1130°C 退火 3 小时，冷轧到 0.35 毫米。

在最后退火后，两种合金所达到的磁感（在 10 安/厘米）和 H_c 如表 2 和表 3 所示。

对于 3.1% 矽鋼，冷轧的影响表现在磁感 B_{10} 的升高。在低温最后退火后情况下比高温的要显著。与 0.35 毫米热轧鋼片相比較， B_{10} 大約从 14000 升高到 15350 高斯。在热轧和冷轧之間的中間退火影响不大。在最后退火后所能达到的 H_c 主要是由退火溫度决定，其它的預先处理影响較小。仅在 1130°C 中間退火情况下，即使最后退火溫度較低（880°C）， H_c 也比在其它預

半冷轧变压器钢片从 0.5 毫米冷轧到 0.35 毫米对 B_{10} 和 H_C 的影响

表 2

最后退火 温度 $^{\circ}\text{C}$ (氩气)	Fe-Si(3.1%Si) 在最后退火前的工艺制度						750 $^{\circ}\text{C}$, 5小时 氩气, 从 0.5 毫米冷 轧到 0.35 毫米		750 $^{\circ}\text{C}$, 5小时 加1130 $^{\circ}\text{C}$, 3小 时氩气从 0.5 毫米冷轧到 0.35毫米	
	热轧0.5毫米		热轧0.35毫米		从0.5毫米冷 轧到0.35毫米		B_{10}	H_C	B_{10}	H_C
	B_{10}	H_C	B_{10}	H_C	B_{10}	H_C				
800 6h	15100	0.44	13850	0.49	15150	0.53	15350	0.49	15050	0.51
850 6h	14100	0.51	13850	0.45	15150	0.46	15100	0.43	15100	0.35
1000 6h	14100	0.36	14400	0.35	15150	0.40	15100	0.36	14850	0.32
1150 6h	14900	0.34	14000	0.27	14950	0.24	14900	0.28	14800	0.24
1300 6h	13800	0.27	13400	0.25	14600	0.29	14750	0.29	14400	0.35

 B_{10} —磁感 10 安/厘米。半冷轧变压器钢片从 0.5 毫米冷轧到 0.35 毫米对 B_{10} 和 H_C 的影响

表 3

最后退火 温度 $^{\circ}\text{C}$ (氩气)	Fe-Si(4.5%Si) 在最后退火前的工艺制度						750 $^{\circ}\text{C}$, 5小时 氩气, 从 0.5 毫米冷 轧到 0.75 毫米		750 $^{\circ}\text{C}$ 5小时加 1130 $^{\circ}\text{C}$ 3小时 氩气从 0.5毫 米冷轧到0.35 毫米	
	热轧0.5毫米		热轧0.35毫米		从0.5毫米冷 轧到0.35毫米		B_{10}	H_C	B_{10}	H_C
	B_{10}	H_C	B_{10}	H_C	B_{10}	H_C				
800 6h	14600	0.35	13800	0.39	15000	0.55	14900	0.40	14400	0.30
880 6h	14450	0.33	13900	0.36	14950	0.32	14550	0.34	13000	0.31
1000 6h	14300	0.32	14100	0.30	14950	0.36	15000	0.33	14300	0.22
1150 6h	13950	0.22	13750	0.28	14900	0.21	14850	0.24	14100	0.24
1300 6h	13850	0.25	13800	0.23	14450	0.25	14200	0.24	14100	0.22

 B_{10} —磁感 10 安/厘米。