

精密合金

(译文集)

中国科学技术情报研究所

一九七一年十二月



75.5
678

精 密 合 金

(译 文 集)

中国科学技术情报研究所

一九七一年十二月

中国科学技术情报研究所
精 密 合 金
(譯文集)

1971年12月出版 定价: 2.00元

编辑者: 北 京 冶 金 试 验 厂
出版者: 中国科学技术情报研究所
印刷者: 北 京 市 印 刷 二 厂
总发行处: 新华书店北京发行所
订购处: 全 国 各 地 新 华 书 店

(只限国内发行)

毛主席语录

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

我们一定要有无产阶级的雄心壮志，敢于走前人没有走过的道路，敢于攀登前人没有攀登过的高峰。

我们必须打破常规，尽量采用先进技术，在一个不太长的历史时期内，把我国建设成为一个社会主义的现代化的强国。

我们能够学会我们原来不懂的东西。我们不但善于破坏一个旧世界，我们还将善于建设一个新世界。

目 录

软 磁 材 料

1. 软磁金属材料的基础、性能和制造问题	1
2. 现代电技术和电子学中用的新软磁合金	11
3. 新研制的软磁合金	16
4. 方向有序及其对金属固溶体磁性能的影响	22
5. 镍铁基软磁合金	31
6. 功率电子学中由软磁材料绕制的带状铁心	41
7. 脉冲变压器用新材料	44
8. 制取恒导磁材料的方法	48
9. 软磁合金薄带在横向磁场中的热磁处理	51
10. 47HK 合金的使用试验	54
11. Fe-Ni 合金的磁场处理	56
12. 对新的高导磁50 Ni-50Fe合金的某些见解	64
13. 磁场回火对二元和含钼的50~65%镍铁合金的影响	69
14. 对等温磁场处理后镍含量介于50和65%之间的高导磁铁镍合金的进一步研究	75
15. Ni 含量介于50和60%之间的软磁 Fe-Ni 合金的最新研究成果	79
16. 各向异性和原子有序对含50和60% Ni 的铁镍合金的直流磁滞回线的影响	85
17. 坡莫合金的冶金学和磁性控制	94
18. 高导磁矩形磁滞回线磁性合金的制造方法	98
19. 制造高导磁矩形磁滞回线镍铁合金的方法	103
20. 成份和冷却速度对Mumetal 初始导磁率的影响	107
21. 硅对 4Mo 坡莫合金的低磁感下导磁率的影响	109
22. 脱氧元素对镍铁合金变形和磁性能的影响	111
23. 精密合金极薄带	114
24. 晶粒取向的 2~6% Al-Fe 合金板的制法	120
25. 改进低铝的 Fe-Al 合金性能的方法	122
26. 低剩磁和低矫顽力 Fe-Al 合金片或条的制取方法	124
27. 低剩磁高 Al 含量 Fe-Al 合金的制取方法	127
28. 采用渗铝法制取 Fe-Al 合金薄带	130
29. Fe-Co、Fe-V、Fe-Al 二元合金磁性与温度的关系	132
30. Fe-Al-C 系合金的结构和性能的研究	136
31. 高磁饱和 Fe-Co 合金	142
32. 真空感应炉中重熔对 $K_{50}\Phi_2$ 和 IO_{16} 合金塑性的影响的研究	145
33. 生产工艺对超帕明杜尔合金磁性的影响	149

34. 改善软磁 Fe-Co-V 合金性能的方法	154
35. 方向性硅钢板的进展, 特性及未来	157
36. 铁和铁合金中 (110) <001> 织构产生的原因和条件	160
37. 固溶退火对 3 % Si-Fe 合金选择性晶粒长大的作用	165
38. 采用一次冷轧法生产单取向硅钢	169
39. 电工硅钢片磁场热处理的方法和设备	173
40. 高磁感应强度的单取向硅钢片的制法	176
41. 提高硅钢片塑性和脱碳速度的方法	182
42. 6.5 % Si-Fe 合金的冷轧与磁性	184
43. 富铁的铁硅铝三元系合金的结构	190
44. 高导磁 Fe-Si-Al 合金的热处理	194
45. 高导磁 Co-Fe-Al-B 合金	196
46. Sendust (Fe-Si-Al) 板加工技术和性能	198
47. 添加 Mo 和 Ti 的高导磁 Fe-Si-Al 合金	200
48. Fe-Si-Al 无取向电工钢板	202

永 磁 材 料

49. 永磁材料的最近情况	204
50. 高磁能积 AlNiCo 合金的最近进展	210
51. 添加元素对 AlNiCo 的影响	213
52. Ticonal 2000 型永磁合金的研究	217
53. 高性能永久磁铁	223
54. 添加微量 Ti 对 AlNiCo 合金柱状结晶的影响	228
55. 磁场处理对于热处理过程中 ЮНДК ₃₅ T ₅ 合金性能的影响	231
56. 以钴和稀土为基的永磁铁的发展	234
57. 磁能积为 $20 \times 10^6 \text{ G} \cdot \text{Oe}$ 的钐钴磁铁	243
58. $(BH)_{\max}$ 为 $18.5 \times 10^6 \text{ G} \cdot \text{Oe}$ 的永磁材料	246
59. $(BH)_{\max}$ 超过 $12 \times 10^6 \text{ G} \cdot \text{Oe}$ 的 Co ₅ RE 型铸造永磁	248
60. 锰铝永磁合金	249
61. 锰铝系合金的磁性能	262
62. 添加元素对锰铝永磁合金性能的影响	266
63. 锰铝合金的热处理和磁性	286
64. 铁钴钒永磁合金的制造方法	274

半 硬 磁 材 料

65. 半硬磁材料的现状	276
66. Fe-Mn 系半硬磁材料及其应用设计	282
67. Fe-Mn-Ti 可变形永磁材料	287

68. 冷加工的Fe-Mn系半硬磁合金	296
69. 铸造Fe-Mn系半硬磁合金	301

弹性、膨胀、双金属材料

70. 铁钴镍三元系的实用相图和平衡的出现	308
71. 机械共振器用锰镍铜合金	315
72. 无磁弹性合金	317
73. 恒弹性合金	319
74. 不含钴的封接合金	321
75. 可伐合金带的再结晶织构	323
76. Uniseal52玻璃封接合金	325
77. 热敏双金属的爆炸结合	327

电 热 电 阻 材 料

78. 回火处理对具有K效应的Ni-Cr-Si合金电性能的影响	329
79. 精密电阻用镍合金	333
80. 镍基合金电阻丝	335
81. Fe-Cr-Al系电热合金的研究	337
82. 15Cr-3Al-Fe系电阻材料的研究	347
83. 电工和电子技术中应用的Monel 401合金	355

其 它

84. 具有特殊物理性能的特殊钢和合金带冷轧的特点	357
---------------------------------	-----

1103185

软磁金属材料的基础、性能和制造问题

H. Fahlenbrach

提 要

数十年来,软磁金属材料在强电技术中具有重大的实际意义,但在当前,在通讯技术中也可以与铁氧体竞相比美。软磁材料在磁化和反复磁化时,磁畴壁发生移动。夹杂和点阵缺陷乃是这种壁移的阻力,因此制造时应尽可能使之减少。此外,优良的软磁材料具有非常小的微观各向异性(在磁畴内)。通过织构化和磁场处理,材料中的磁畴可以发生取向,致使其磁化方向都在实际上可以利用的空间方向上。因此,在一般情况下能使剩磁和最大导磁率增高。最近,用含55%和65% Ni之间的 Fe-Ni 合金,经过长时间等温磁场处理,出人意料之外地得到在技术上有重大意义的高初始导磁率。本文也讨论了纯铁、Fe-Si、Fe-Al、Fe-Ni、Fe-Co 等较老的常见软磁金属材料。

1. 引 言

软磁和硬磁材料构成了在实践中具有重要意义的两类强磁性(铁磁性和亚铁磁性)材料,这类材料在电技术中尤其重要。软磁材料的特点是:

1) 在尽可能小的外磁场 (H) 中有尽可能大的磁感应值 (B) 或磁矩值 (I), 它们直接关系到磁化能力之大小。

2) 在断开或移去外磁场时, 磁感应或磁矩尽可能完全消失。

3) 由继电器的工作可以特别明显地看出第二种特性。为了满足第一种要求, 磁化曲线 $B(H)$ 或 $I(H)$ 要有很大的斜度, 也就是说要求有很大的导磁率 $\mu = \frac{B}{H}$ 。如图 1 所示, 为了实现第二种要求, 材料的矫顽力 H_c 应当非常小。

图 1 示出“真正剩磁相等 ($I_{r1} = I_{r2}$) 但矫顽力很不相等 ($H_{c1} > H_{c2}$) 的材料 1 和 2 的磁滞回线的退磁曲线。如果由 $I-H$ 坐标系的原点出发向右画初始磁化曲线直到磁饱和, 由那

儿使磁场减小, 然后换向, 便可得到如图 1 的曲线 1 (1') 和 2 (2') 那样的曲线。使磁场超越 H_c 直到负的磁饱和以后, 又使之作相反变化, 即得到一闭合的磁滞回线。

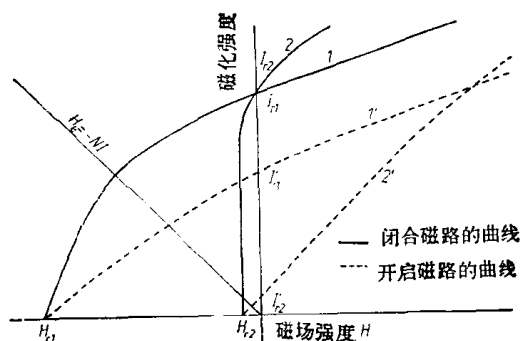


图1. 退磁对磁滞回线, 尤其是剩磁的影响

如果材料形状为没有极的闭合磁路时, 则出现图 1 中之实曲线 (图10中的环形铁心情况大致如此)。但对继电器(永磁铁的情况近似), 其工作方式要求有在铁心元件两端有自由的磁极。所谓退磁场 H_c 便由这些极发出, 其大小与磁矩值和叫做退磁因子的乘积成正比, $H_c =$

$-NI$ 。不难看出在图1中用一直线(兹称为剪切直线)示出 $H_c = -NI$ 。如果从实线的 H 值减去由剪切直线确定的 H_c 值作为真实磁化场,则为得到相等的 I 值所需的磁场自然就必须更高,这时材料1和2的相同继电器形状的铁心的退磁曲线则转变为具有自由磁极的继电器铁心的虚线所示的退磁曲线1'和2'。同时也看到, I'_{r2} 比 I'_{r1} 小得多,也就是说在继电器断开之后,矫顽力 H_{c2} 较小的材料2具有较小的剩磁 I'_{r2} 。同样也可以理解用机械振动来使软磁材料退磁的情况,也就是说材料的矫顽力越小,退磁越容易。软磁材料和永磁材料一样,矫顽力有相当大的实际意义,但是占次要地位,因为在高矫顽场强中工作是罕见的。

当前,在最佳软磁和最佳永磁材料之间,它们的矫顽力和导磁率相差很大,达6—7个数量级。如后面将要讨论的含75%Ni和其他元素的软磁Fe-Ni合金(SUPERMALLOY, HYPERM* Maximum等)和含55~65%Ni的新材料并经等温磁场处理以后, H_c 值仅有千分之几奥(1奥 $\cong 0.8$ 安/厘米),而由钴和稀土钐制成的 $SmCo_5$ 永磁合金的矫顽力 $H_c > 10000$ 奥。

软磁材料和现代的永磁材料一样,由于种种原因,也分成金属和合金以及氧化物(主要是铁氧体)两大类,本文只讨论软磁金属材料。但应当知道:1.软磁氧化物乃是电阻率比金属高得多、因而涡流损耗比金属小得多的半导体。2.在铁氧体中,由于亚铁磁性决定了它的磁性原子(或离子)构成的磁畴的结构与铁磁材料的很不相同,因而其饱和磁化强度比铁磁性金属小得多(见图2中的结构形式),由此可知,由于第1种特点,所用频率越高,铁氧体的价值越大,因为涡流损耗与频率的平方成比例。由于第2种特点,在强电技术中铁氧体并不重要。

软磁材料在电机的某些实际应用当中是在直流磁场中工作,但主要是在交流磁场中工作。这时被反复磁化,并出现所谓铁损。从能量角度考虑,铁损要尽可能小。铁损为磁滞损耗

(与磁滞回线的面积成正比,因而也与频率成正比)、上述涡流损耗(除与频率的平方和电阻率的倒数成正比例外,也与带厚的平方成正比)和剩余损耗的总和。对于金属材料,由此联想到电源变压器用Fe-Si合金作铁心,由于要求很小涡流损耗,在50赫工业频率时就不得不使用薄片、0.50或0.35毫米厚的带了。在频率更高时,带厚有时必须比几个微米还要小,在这种情况下,就非采用涡流损耗极小的软磁铁氧体不可了。

因此,对于软磁金属材料,要求其反复磁化损耗小(尤其是电源变压器中用Si钢带制作铁心时),矫顽力小(在直流电机和电磁铁中大块形状的纯铁和其他材料)和导磁率高(在通讯技术中,尤其是铁镍合金)。

2. 软磁材料的微观基础

讨论的基础是这样—一个早已被证实的事实——即磁畴的存在。如图2箭头所示,在磁畴中原子磁矩是取向的,图中箭头的长短表示原子磁矩的相对大小。对于铁磁性(图2a),磁畴中的原子磁矩沿一个方向取向。磁畴都是饱和磁化的。对于反铁磁性(图2b),迄今没有实际意义,在磁畴中同样大小的原子磁矩相互抵消。在铁氧体中存在的所谓亚铁磁性是反铁磁性的特殊情况,磁畴由不同大小的两类原子价、磁矩反向排列而成,所以磁化得比铁磁性的弱。由此可以说明为什么铁氧体的饱和磁化强度较小。

软磁材料的磁畴之间存在分界或壁区,在这些区域中磁化方向由畴连续地过渡到其相邻畴。如图3的大块材料的示意图所示,其情况如下:磁化方向由图面旋转出来。人们称之为布洛赫壁。对于极薄的铁磁性蒸发薄膜,认为与涅尔壁有关,在这些壁中磁化方向沿薄膜平面旋转。当前人们正在为使这种蒸发膜用在计数技术方面而努力。

在机械振动、高温退火或振幅逐渐减少的交流磁场中退磁后产生的宏观无磁状态,如图

4 用箭头在 $I=H=0$ 的 4 个同样大小的畴中示出的那样，材料中的磁畴作无择优分布，以使其磁矩互相抵消，因而对外没有磁极化或磁感应。人们容易理解，这样一种对外的无磁状态可以用完全不同方式造成，通常有三种途径。

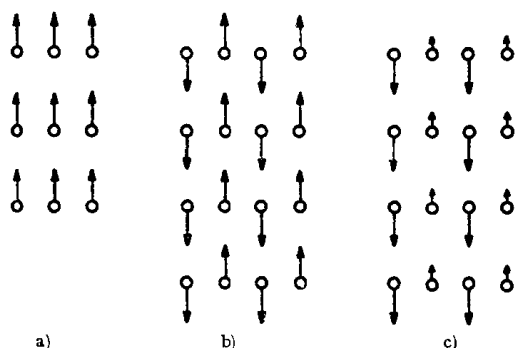


图2. 不同种类的磁性的模型

a) 铁磁性 b) 反铁磁性 c) 亚铁磁性

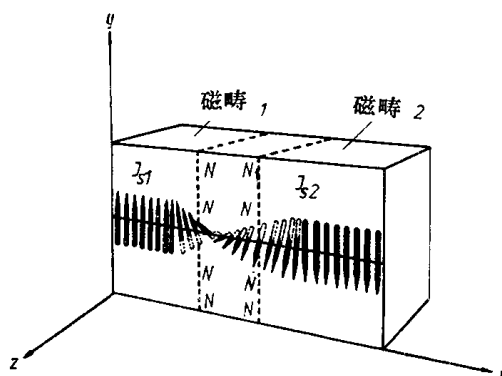


图3. 180°布洛赫壁示意图

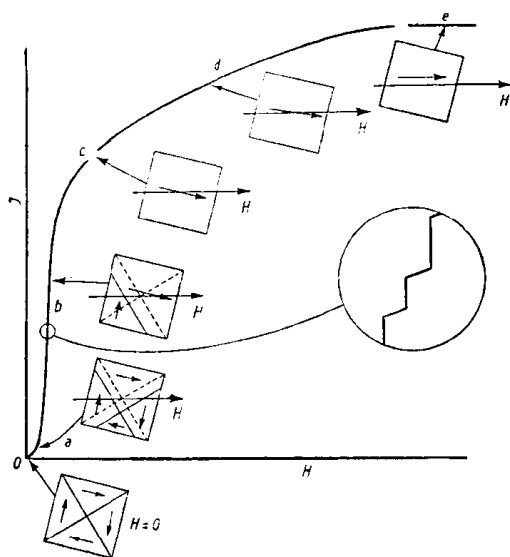


图4. 用布洛赫壁移和旋转过程对磁化曲线上各段落进行示意图解。

以前曾经详细谈到过，这种宏观无磁状态一般具有极不相同的初始导磁率。

图 4 进一步表示出 4 个磁畴在外磁场 H 的影响下，在磁化曲线的 a、b、c、d 和 e 五个点上的变化情况。直到 c 点以前，磁场的作用在于：磁化方向与磁场方向夹角最小的上部磁畴靠牺牲其他 3 个而长大，而其他的畴通过一种壁移（对比实的分界线）而被消耗掉。在 c 和 e 之间（磁饱和状态），由于磁化方向（箭头方向）转向 H 方向，在图 4 的曲线出现 I 缓慢增加的情况。这样一种磁化基本过程叫作旋转过程。在当代永磁铁中旋转过程占主要地位，而对于软磁材料的磁化和反复磁化则以壁移为主。

在磁场强度非常小时，也即是说大约在曲线的 a 点上这种壁移变化进程是可逆的，在去掉磁场 H 以后，壁又重新准确地回到其原始部位。在中等磁场强度下（请对比曲线的 b 点），出现不可逆壁移，即巴克豪森跳变。壁由一处跳到其他处（因而出现图 4 中旁边的波形图，与巴克豪森跳变密切相关的非连续的磁感应变化通过相应的电压变化指示出来）。

借助图 5 可以通过一个园球在山峰中滚动很容易将各种壁移形象地表达出来。只要这种滚动从 A 点出发还未到达谷底 A 和 B 之间的第一道山梁（山脊），在去掉推动力时园球就又回到 A。这可能与可逆壁移有类似之处。如果越过山脊，则园球不可逆地向 B 滚去，或者更普遍的情况是在去掉力之后向相邻的谷底滚去。不可逆壁移过程也与此近似，当前对这种壁移过程也像对所谓巴克豪森噪声一样正在大

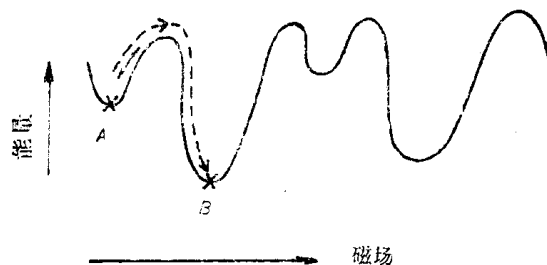


图5. 布洛赫壁位置的位能

A = 布洛赫壁的原始状态

←→ 可逆壁移

---→ 向位置 B 的巴克豪森跳跃

力进行研究, 因为通过这种研究对强磁性物质内部结构的了解将更加透彻。

3. 夹杂和点阵缺陷对软磁性能的影响

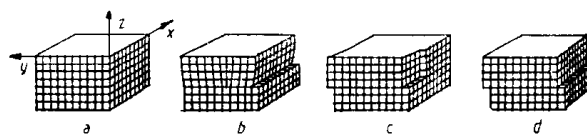
对于各种工业磁性材料, 其最有利的生产条件与上述物理基础的关系极为密切。当前人们得知, 单畴之间的壁固着在小的夹杂或晶体点阵中其他结构缺陷上。点阵缺陷也可能是位错, 在过去几年中用位错解释材料的机械性能很有积极意义。如图6所示, 有时是在冷变形(轧制、拉拔)时产生的, 在足够高温下退火时又重新恢复。因为布洛赫壁的活动性与在第一段中所定义的导磁率直接成正比, 因此在制取优良软磁材料时必须格外小心, 使夹杂, 尤其是整个进入晶格点阵中的不溶解的夹杂和其他点阵缺陷减少或消除。为此, 下述工作程序很重要:

1. 所用材料尽可能纯, 但也应考虑经济效果(价格)

2. 在熔炼或烧结软磁材料时, 必须使渗入材料中的夹杂由气氛或由坩埚还原到最低限度。对当前最佳软磁材料, 如当前初始导磁率最高的坡莫合金, 为了避免使氧进入材料中, 要采用真空熔炼。材料在进行熔炼时, 在原料中加入所谓脱氧剂, 以便使氧发生化学结合并使形成的氧化物进入渣中。残留的氧化物的尺寸达到布洛赫壁的厚度时尤其有害, 例如在用镁脱氧时有可能形成 MgO , 容易出现上述情况。在脱氧时要绝对免除细小的氧化物夹杂。

3. 软磁材料生产的最后工序是终退火。这一工序对制取优良软磁材料很重要。在温度较低时(约 $800^{\circ}C$), 变形时产生的点阵缺陷消失, 恢复原始状态。(图6)。这些点阵缺陷是机械内应力的策源地, 所以终退火也称之为消除应力退火。最佳软磁金属材料的最终退火在达 $1300^{\circ}C$ 之极高温度下和较纯气氛中进行, 大多数情况下采用纯氢。此间, 一些特别有害的夹杂经过点阵中随温度增高强烈(成指数)增加的原子迁移(称之为扩散)由材料中跑到材料表面。

在表面上, 这种夹杂经过与炉气氛的反应化合成气体并随炉气被排除。碳含量高时对磁性特别有害。软磁材料的C含量在最终退火时可降到1/1000%以下, 而在铸态时C含量为 $n/100\%$, C与氢气气氛中的 O_2 发生反应从而形成CO或 CO_2 。分别根据材料的种类和形状来选择氢气的氧含量乃是最终退火的艺术, 使氧含量正好够材料脱C, 但又不使氧气进入材料或材料表面。氧由氢气中的湿度来控制。因此可以理解, 对于大块的具有良好磁性能的纯铁制成的继电器部件是在用水蒸气饱和的氢气中退火, 反之, 对于含有易氧化元素含量的合金, 应尽量降低湿度。*



a) 原始状态 b) 刃型位错 c) 螺旋位错 d) 最终状态

图6. 塑性变形时点阵位错的产生

美国的 Yensen 和 Cioffi 早先曾指出不溶解的夹杂对磁性极为有害, 因此在制造时应当注意。当前如果利用日益进展的技术, 将工业原材料的纯度进一步提高, 或者在更高温度下最终退火, (成本稍高), 还会得到一些出乎意料的好结果。最近, 含36~50%Ni的软磁Fe-Ni合金的实例就证明了这种情况。30多年来, 这种材料的初始导磁率都在3000~5000 G/Oe左右, 但最近由于采取了一些提高纯度的措施, 其实际导磁率 μ_5 达到20000 G/Oe或更高。只有借助我们对整个Fe-Ni系的广泛研究, 才能理解这样一种疏忽: 即为什么几十年来, 从实用观点来看, 含70~80%Ni的坡莫合金纯度改善后并没有导致软磁性能的改善, 只是Ni含量较低的合金导磁率才出人意料地增高。

4. 微观各向异性的影响

一般认为磁各向异性是指不同空间方向上

* ① 利用湿氢脱炭通常是在终退火初期进行(约 $800^{\circ}C$), 退火开始一段时间, 最后再升温或后一段时间退火时, 利用干氢。

② 即使湿氢脱炭, 也不能排除 $C+2H_2 \rightarrow CH_4$ 的反应, 不完全是炭、氧反应——译者注。

磁性不同。一般来说,与各空间方向上性能一样的各向同性状态相比,平均来看材料不发生变化。有些空间方向,即所谓易磁化方向磁性要好得多,而其他则相应地变坏。我们必须分清畴当中的一种微观磁各向异性和整个材料中的一种宏观各向异性。图3和4中用箭头标示出的磁畴中的磁化方向常常是指磁各向异性能最低的方向。因为在图5的形象化图示中,这样的各向异性能被平均斜度和山峰结构的高度所决定,因此很容易理解(和永磁铁相反),优良的软磁材料应具有小的磁各向异性。在当代软磁材料中主要讨论晶体各向异性和应力各向异性。后者与磁致伸缩即强磁性材料在磁场中的长度变化成正比。上述两种各向异性对软磁性能有很大影响,有两种最好的软磁金属材料(含78.5%Ni的坡莫合金和含约6%Al、9%Si、其余为Fe的“Sendust”合金)的晶体各向异性和磁致伸缩几乎同时等于零。但可惜“Sendust”太脆,因此不能轧成薄带。但因涡流损耗过大*,所以在实际上没有得到应用。而坡莫合金在通讯技术中有重要意义。应当指出,若干年来,由于化学成分的变化和热处理的改进而获得迅速进展,表现在这两种各向异性进一步同时减小。为此,俄国的Puzei对晶体各向异性进行了测量,美国贝尔实验室的Bozorth对有关磁致伸缩进行了测量。

这样可以理解化学成分对“高导磁”铁镍合金的导磁率的巨大影响。化学成份与额定值偏离0.1~0.2%,导磁率即大大恶化。用烧结材料所作的试验清楚地证明了这点,烧结时成分能控制得很准。因此可以认为,粉末冶金法比熔炼法在保证成分质量方面有优越性。然而采用烧结制法制粉成本高(羰基粉末)。根据英国人的研究,要在1300°C长时间最终退火才能达到所需最高值。烧结时产生的松孔对磁性非常有害,在以后锻造、轧制时也不能完全消除。应当指出,采用熔炼方法虽然成分稍有差异,但经过500°C左右的低温热处理(效果一样)和通过对不同炉号采用不同冷速处理可以弥补其影响。

5. 宏观各向异性的影响

在制造时通过采取某种措施,可以使材料的所有磁畴发生取向,从而使磁化方向与以后使用时从技术上可以利用的空间方向一致,因此称之为宏观各向异性,因为在工件的不同方向上有不同的磁化曲线。单晶体是具有宏观各向异性的最简单的代表,这些单晶体整个样品是由一个晶体构成的。图7示出软磁纯铁和似永磁铁元素钴的这种单晶体的在明显晶体方向上的初始磁化曲线。磁畴中的磁化方向(纯铁的立方边棱 $\langle 100 \rangle$,钴的六角轴 $\langle 0001 \rangle$)也是具有最陡直磁化曲线和最大导磁率的宏观易磁化方向,并具有矩形磁滞回线(图中没有绘出)。

5.1. 织 构

通过培养单晶体方法来大量制造软磁材料太浪费。所幸,当前已经掌握一些使一般的、多晶状态的晶粒发生取向的方法,如冷轧-退火法,其取向程度与单晶体很接近。一般称之为晶粒取向或织构,通过冷变形并随后退火,使晶体在空间方向上的各向同性分布遭到破坏,当前,软磁材料只掌握两种很强的织构,其各向异性可与单晶体相比。即图8所示之戈斯织构和立方织构(当然只有在立方晶系的合金中才能产生),只有这样的晶系才是软磁性的,因为其晶体各向异性小。

当前,戈斯织构的好坏对晶粒取向铁磁合金的磁性起决定性作用。在带平面上,只有轧向是立方边棱方向,因此与纯铁一样,轧向是具有陡直磁化曲线的择优方向。通过下述工艺流程得到这些织构:

热轧后冷轧到半厚左右,然后在900°C左右中间退火,再次进一步冷轧到半厚左右,最后在1100°C以上退火。在轧向上,含约3%Si的晶粒取向Fe-Si合金在10000G(V_{10})之反复磁化损耗下降到0.4瓦特/公斤,而以前最好的热轧的和各向同性的硅钢片的反复磁化损

* 译者注: Sendust 在20°C时的电阻率为 $80\mu\Omega\cdot\text{cm}$, 因此与铁氧体相比,涡流损耗过大。

耗为1瓦特/公斤。对于制取总铁损低的晶粒取向程度很高的变压器钢带，下述认识很重要：戈斯织构是在二次再结晶时产生的（一次再结晶以后晶粒重新形成），为了获得尽可能完善的晶粒取向，从900°C左右的一次再结晶（在较低温度）向二次再结晶（在较高温度）的过渡要求尽可能缓慢。当前，通过加入夹杂（加入MnS时最多）来实现这种延缓。MnS的优点是在高温下在形成了良好的戈斯织构以后分解成Mn和S。S和C一样对磁性有害，它在表面上与氢气氛发生反应形成气体并挥发掉。Mn在晶体点阵中溶解掉，因此对磁性无害。

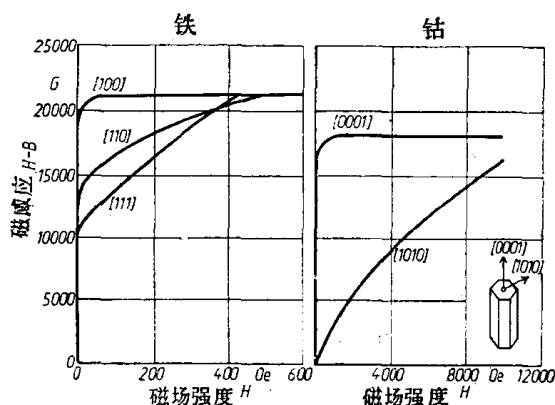


图7. 铁和六方结构钴在不同结晶学方向上的磁化曲线

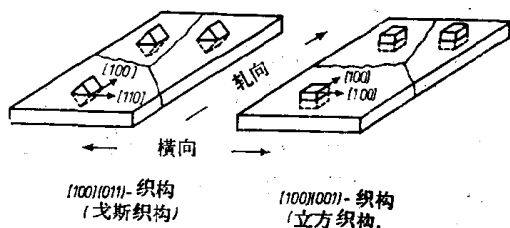


图8. 板中技术上最重要的晶粒取向的示意图

图8右边示出了在适当材料中的立方织构的晶粒取向情况：在轧制并退火的带中，轧向和横向均为立方边棱，因此都是易磁化方向。这样一种立方织构在含约50%Ni的软磁铁镍合金中早就发现。其形成工艺是：大压下量冷轧（压下率90%或更高），随后在1050~1100°C之温度下进行相当关键性的最终退火。以前，这种具有矩形磁滞回线和高磁饱和的合金（约16000G）具有相当重要的实用价值，主要用在磁放大器中。由于硅半导体的发展，这种用途已经大大落后。

过去几年中，德国某些磁性材料工业实验室中，除了对含约3%Si的Fe-Si合金的戈斯织构进行研究之外，也发现了立方织构。Fe-Si合金是体心立方结晶的（即单位立方体空间上的中点也为原子占据），而Fe-Ni合金则为面心立方的（即单位立方体的界面中心为原子占据）。以前人们认为，只有在面心立方的金属和合金中才能产生立方织构。对于在立方取向（立方织构）中Fe-Si晶粒产生的取向“表面能”起了重要的作用。表面必须很清洁，尤其不能有氧化物。尽管这种织构有相当大的优点，但迄今由于有某些困难，还未得到实际应用。

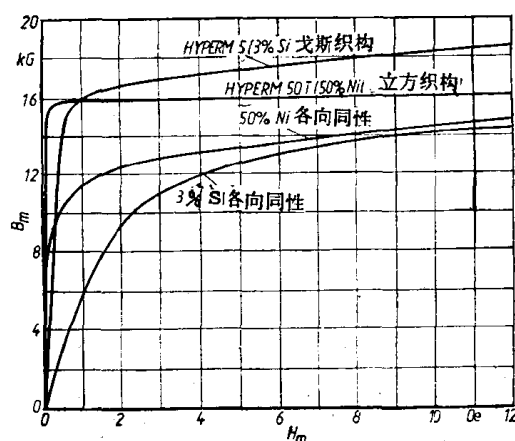


图9. 晶粒取向对50%Fe-Ni合金和3%Si-Fe合金磁化曲线的影响

Fe-Ni合金的立方织构比变压器钢中的戈斯织构的织构度要大得多，也就是说沿一个空间方向上晶粒的取向理想得多，因此，各向异性Fe-Ni合金的初始磁化曲线比Fe-Si合金的要陡直得多，矩形性强。图9中各向异性的HYPERM50T和HYPERM5（3%Si）显示出这种情况。由于产生织构，这两类材料当中任何一种的磁化曲线都比各向同性材料的陡直。由当前线圈或变压器铁心的形状对比也可看出立方织构比戈斯织构有进一步的优越性（图10）。戈斯织构在带平面上只有一个易磁化方向，所以只有环形铁心（左图）、C形铁心（中

* 译者注：即MnS质点阻止在较低温度发生二次再结晶，使二次再结晶在高温下MnS溶解后进行，这样二次再结晶形成良好的戈斯织构。

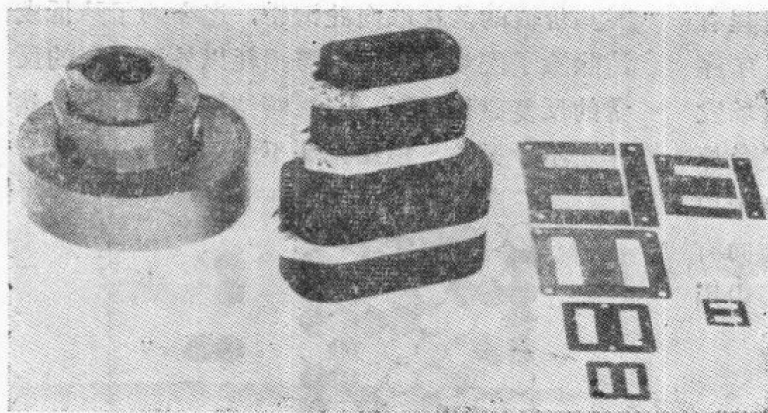


图10. 软磁合金的铁心形状 (环形铁心、C形铁心和冲压截片)

图)或直的,但装成一个磁路的方形条片才能发挥磁性优越性,因为只有在上述情况下在使用时磁通方向才可能与轧向同向。由带冲压的E-E、E-I和M形的铁心元件(图10右)具有更大的经济意义,因为这种铁心形状可以装入简单的线圈中,而且与直的条片不同,这种铁心形状由于可以将元件相互重叠,因此可以使退磁性很强的空气隙大大减少。因为这种方形的冲压截片使磁通导入两个互相垂直的方向,只有具有两个互相垂直的择优取向的立方织构才能发挥作用,因此当前大力研究立方织构是可以理解的。同样,对于Fe-Si变压器钢片,若要将戈斯织构硅钢带用作类似的冲片,则需将其宽度大大增大,以使磁性不好的方向(横向)上的冲片的磁通截面大大增大。

5.2. 方向有序

软磁合金和钴铁氧体中产生宏观磁性各向异性的另一种方法是磁场热处理。大约30多年前,美国贝尔实验室首先用含65%Ni的Fe-Ni合金进行了实验并获得最大值。首先要在居里点以上进行磁场冷却,从而(和具有立方织构的合金一样)可以得到陡直的初始磁化曲线和矩形磁滞回线。因为立方织构的磁性能较好而且生产成本低得多,所以磁场冷却没有得到充分利用。只是在几年以前,德累斯顿(东德)的Raßman和Wich对含50%Ni的Fe-Ni合金在居里温度以下几十度于磁场中进行较长时间的热处理,不仅使 μ_m 增高,而且使 μ_0 也大大增高以后,这种处境才彻底改变(见6.4章)。

图11示出Fe-Co-V(49%Fe, 49%Co, 2%V)合金采用磁场冷却时(沿磁通方向和垂直于磁通方向)产生的影响。这种合金由于饱和磁化强度特别高(约24000G),而被用在电话机膜片上。最近几年对能获得矩形和恒导磁磁滞回线(后者具有低剩磁用于脉冲方面)的中等Ni含量的Fe-Ni合金的研究兴趣日益增高,因为一些新材料的磁化曲线很陡直,而且矫顽力很小(见6.4章)。

目前,根据L. Neel和Taniguchi的理论,经过磁场处理产生宏观各向异性是由于原子对取向的结果。人们称这种取向为方向有序或取向超结构(如图12下图所示)。图中同时示出的具有等数成立方点阵的两类原子(白色和黑色的,如Fe和Ni)的合金。上述探讨只限于黑色原子对。上图为无规则原子分布,沿竖直和水平方向上有等数的原子对未经过处理的情况大都如此。中图示出了两种原子在点阵位

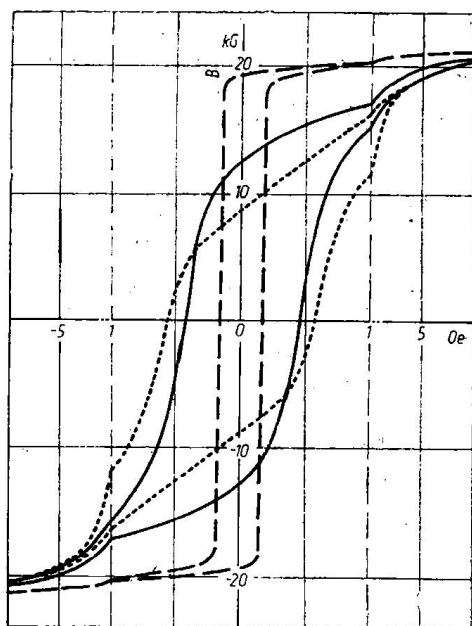


图11. 加和不加磁场处理情况下HYPERM Co50的直流磁滞回线

——HYPERM Co50
 - - - - -HYPERM Co50 T₁(纵向磁场)
HYPERM Co50(横向磁场)

置中的最佳有序分布情况。人们称之为远程有序和超结构，如 FeNi。而下图中的方向有序是一种各向异性的近程有序。热处理时磁场发生作用的竖直方向(择优方向)上的20个黑色原子对与水平方向上的不可避免而存在的9个原子对形成对照。由这些图也可以得知，方向有序只能在铁磁性合金中，而不能在纯金属中出现。

6. 常见软磁材料

表1 汇列出这些材料的典型性能、使用形状和用途举例。

6.1. 纯 铁

当前，大量纯铁在电技术中用于直流方面，尤其是被用于继电器元件以及其他电磁铁的铁心。在这些用途中，它的较小的矫顽力和很高的磁饱和值（只有较贵重的 Fe-Co 合金才能超过它）被利用。铁属于直流技术中主要磁性材料之一。纯铁的电阻率较低（约为 $0.1 \Omega \text{mm}^2/\text{m}$ ），因此在交流反复磁化时将造成相当大的涡流损耗。所以，在交流技术中不能用纯铁。通过烧结羰基粉矫顽力可达 0.5Oe 以下（ $H_c \sim 0.20 \text{Oe}$ ），或采用区域熔炼法矫顽力可以进一步降低（ $H_c \sim 0.1 \text{Oe}$ ）。

6.2. Fe-Si 合金

从商业角度出发（至少从销售额大小来看）这类材料在包括未曾讨论的铁氧体在内的软磁材料当中是最重要的。这种电机和变压器钢的 Si 含量在 $4.5\% \text{Si}$ 以下，有磁各向同性的和各向异性的两种，都用在较强的磁场和各种电机中。当前，除了大力研究立方织构硅钢片之外，还一如既往地研究 Si 含量较高的 Fe-Si 合金，尤其是研究 $6.5\% \text{Si}$ 钢。因为在此含量下，有害的微观各向异性应当趋近零（参见第4段）。由于变压器在反复磁化时磁致振荡会引起很强的干扰噪音，所以磁致伸缩减少还别有意义。和制取 Sendust 合金时一样，经常遇到的主要困难是由于硅含量增高，合金变脆，因此难以加工成薄带或薄片。对于很有

实用价值的晶粒取向硅钢带，迄今为了降低或消除除了宏观的反复磁滞损耗以外还存在的反常的反复磁化损耗（与磁畴结构有关），虽然作了不少努力，但结果并不令人满意。

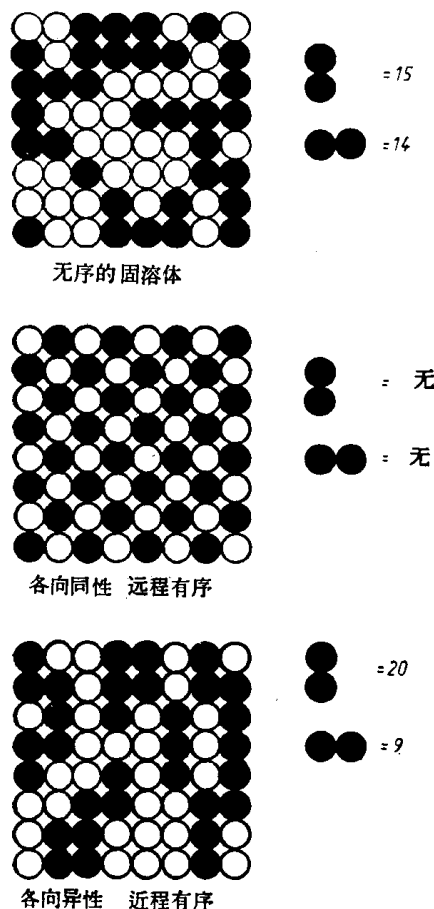


图12. 晶体点阵中合金的不同原子有序化状态

6.3. 含16%Al的 Fe-Al 合金

这种材料由于它的耐磨强度很大而引人注目。表1中列出其特性。由于 Al 和 Si 有近似特点，所以这种材料也难以进行冷轧。开轧温度必须有几百度（ $^{\circ}\text{C}$ ）。

6.4. Fe Ni 合金

抛开最近新研制的中等 Ni 含量的一些 Fe Ni 合金不论，可以将这种合金分为三类（见表1）。在实践中， $36\% \text{Ni-Fe}$ 合金在传输语言和音乐时要求很小的非线性失真时得到应用，在约 5 和 100 毫奥之间的较小磁场下其导磁率与磁场强度无关。这种特点是通过在 900°C 或低于 900°C 之较低温度下进行最终退火得到的，通过降低最终退火温度可以显著改善恒导

表1. 常见软磁金属材料

材 料	典 型 性 能	使 用 形 状	用 途 示 例
純 铁	$H_c \leq 0.5, 0.8, 1.0$ 或 1.5 Oe 高 J_s	較厚的、鍛造的、軋制的、拉拔的或液压的元件	直流电机的铁心, 优先用于电磁铁的极头, 继电器元件, 磁屏蔽的罩和包皮。
铁—硅 (0.4~4.5%Si)	高磁感下低铁損, 大 μ_m	带状 (极除外) 和卷环铁心条带	电机, 馬达 (各向同性), 具有戈斯结构的铁心用于电源变压器
	强磁場下磁感大, 优良的机械性能, 尤其是强度大	鍛件, 铸件	用于大的直流电机中
铁—鋁 (16%Al)	高 μ_0 高硬度和高电阻	非常小的冲压元件	磁声傳輸中放音头和拾音头的铁心元件
36% Ni	恒 μ	冲压元件	非线性失真因数小的变压器
50% Fe Ni	大 J_s , 低 H_c	环形铁心, 冲压元件, 屏蔽壳	变流器, 故障电流开关, 磁放大器, 磁場屏蔽
含 Cu, Mo 或 Cr 的 70~80% Ni Fe 合金	μ_0 极大, μ_m 极大 J_s 低	环形铁心, 冲压元件, 屏蔽壳	变压器铁心, 线圈铁心, 磁場屏蔽
Fe Co (49%Fe, 49%Co, 2%V)	J_s 极大, 高磁場下高磁感	磁铁的复合极头薄的圓片	极头芯, 电话膜片

磁性 (界于约2000和400G/Oe之间), 但同时使导磁率值降低, 含约50%Ni的二元 Ni-Fe 合金 (最多的是48%Ni) 在 Ni 含量介于约 30 和 100%Ni 之间的可逆 Fe-Ni 合金系列中, 饱和磁化强度是最高的。

含约 70%Ni 的坡莫合金在当前软磁 Fe-Ni 合金系中是最重要的一组。在过去10至20年当中, 由于充分利用了由理论基础所确定的一些发展原则而得到超过 100000G/Oe 的初始导磁率。这就要改变化学成分。尤其是由于选用了含 Mo、Cr 或 Cu 的三元和四元合金, 加上与成分相应的适当热处理, 其微观各向异性最小, 而且消除了对磁性有害的夹杂, 从而获得很高导磁率。

图13绘出了克虜伯生产的或研制的坡莫合金的技术初始导磁率 μ_5 与 Ni 含量的关系。为了进行对比也绘出了20年前就已经由 Bozorth 绘制的含约 78%Ni 的二元 Fe-Ni 合金的曲线。在 70 和 80%Ni 之间, 在图 13 中发现克虜伯材料 HYPERM 766 (铜坡莫)、HYPERM 800、HYPERM 900 和 HYPERM 最大 (超坡莫) 的

导磁率增高。对于含 36%Ni 和 50%Ni 的 Fe-Ni 合金, 图 13 表明 (用 X 为标记), 以前的

Bozorth 曲线与当前 Ni 含量中等的、纯度大大改善的合金根本无法相比。在实验室条件下以及在生产的最高值当中 (HYPERM 52) μ_5 值很有可能超过 20000G/Oe。在 50 赫时, 0.2 毫米的 HYPERM 53 (55 % Ni, 余量是 Fe) 的 μ_5 值超过 50000 G/Oe, 直流测量值高 1 倍,

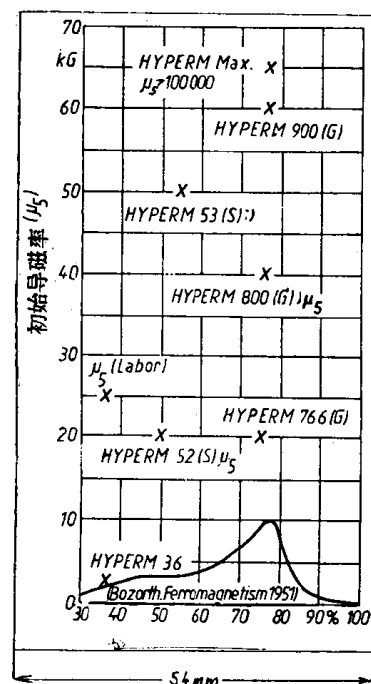


图13. 二元铁镍合金的初始导磁率与 Ni 含量的关系 (G=保证值, S=峰值)

譯者注: 图13之纵座标应是 KG/Oe。

Bozorth曲线的值仅为3000G/Oe, 反映了在等温磁场处理的基础上克虜伯发展的初始阶段。后来, 试验材料 HYPERM VS125 (65%Ni, 3 %Mo, 余为Fe)的 μ_5 值超过 100000G/Oe。对于等温长时间磁场处理, 看来证实了65%Ni的以前的最高值的磁场冷却结果。对于 VS125以及HYPERM53和52, 图14示出了对于实际应用颇有价值的导磁率磁场强度曲线, 与HYPERM 900相比, 和 HYPERM VS125的值完全相等。但 Ni 含量中等的新材料的导磁率的值在 5 毫奥以下随着磁场强度的下降比HYPERM900下降得显然严重得多。另一方面, 由于新材料的饱和磁化强度较高, 在较大磁场情况下导磁率比坡莫合金大得多。因此, 这种新材料在变压器、故障电流开关以及中等磁场强度下的类似用途方面得到应用。与以前成分近似的一些代表性牌号相比, 新材料的重要意义在于初始导磁率高。

在磁场处理以后所达到的这种高的初始导磁率是很反常的, 因为以前发现用这样的处理 (同时也根据理论上的预言) 除了产生矩形磁滞回线和很大的最大导磁率之外, 初始导磁率却较低 (与磁场处理之前之各向同性状态相比)。在克虜伯公司, 在直流磁滞回线中 (见图15) 也发现一种上述反常现象 (50%Ni-Fe合金尤其显著)。Ni含量为58和60%时(图15中未绘出), 磁场处理使磁滞回线造成有规则的变陡 (是方向有序引起的), 而 50/50%NiFe 则引起剩磁出人意料之外的降低, 同时在图15中只有在 0.25Oe 以上之磁场中在较高之磁感应值处才看出预期的曲线变陡的情况, 所述剩磁反常可能是由于在 Grenoble 发现的硬磁性 FeNi 超结构的极小的岛引起的, 由于矫顽力的值很大, 不能参与反复磁化, 因此 (见图1或大块铁心的情况) 必须像空气隙一样起退磁性作用。

对上述新材料除了所述初始导磁率高之外, 也应提及其他重要性能。在横向磁场中的磁场处理使材料即使在交流磁场中也具有非常低的剩磁, 而且除此之外又产生很大的 (脉冲)

导磁率, 因而材料的这种演变在实践当中已经用于脉冲场中。

6.5. 铁钴合金

表1最后一行中列出了在美国称为巨明杜尔的材料, 其主要成分是 49%Co、49%Fe、2 %V。由于 Co 含量很高, 其工业意义肯定不大。但在反应堆或宇宙航行方面, 由于工作温度高, 其处境则大大改观。Fe-Co 合金是饱和磁化强度和居里点比铁高的唯一软磁材料。若不含 V 或 Cr 合金就很脆。在较高温度下, 由于超结构的形成或消除, Fe-Co 合金要出现原子有序化或无序化过程。含约 25%Co 的 Fe-Co 合金, 经过有序化过程磁性能不发生变化, 因此 (但其软磁性能较差) 在温度稳定性方面比坡明杜尔显然优越得多。

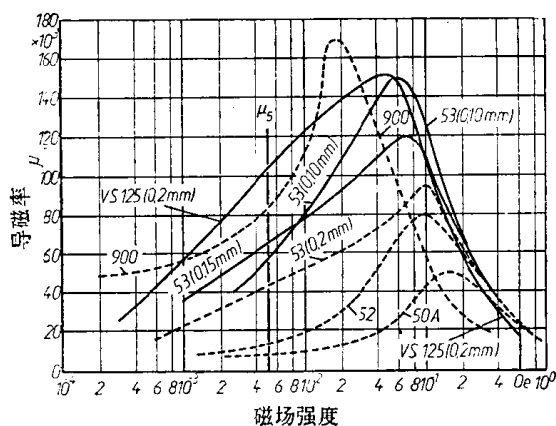


图14. HYPERM 类 (-----) 和新研制的材料 (——) 的50赫芝导磁率, 用卷环铁心测得。

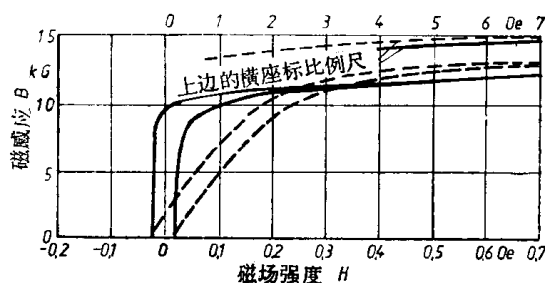


图15. 50%Ni-Fe 合金的直流磁滞回线
——在下述退火后: 1250°C 5 小时/
500°C/空冷。
-----在410°C追加20 小时磁场回火
空冷

译自 Technische Mitteilungen Krupp, Werks
berichte, 1970, 3 期85—95页