

磁鋼与磁合金

孙 廷 烈 編著

本書对各种硬磁材料和軟磁材料的性能及影响性能的因素作了比較扼要的归纳和分析，可供冶金与試驗研究人員参考。

磁鋼与磁合金

孙廷烈 編著

冶金工业出版社出版（地址：北京市灯市口甲45号）

北京市书刊出版业营业許可証出字第 093 号

冶金工业出版社印刷厂印 新华書店发行

— * —

1960 年 2 月 第一版

1960 年 2 月北京第一次印刷

印数 3,620 册

开本 $787 \times 1092 \cdot 1/32$ · 40,000字 · 印张 $2 \frac{2}{32}$ ·

— * —

統一書号 15062 · 2036 定价 0.26元

目 录

第一章 硬磁材料 (鉄磁性材料)	1
§ 1. 淬火硬化型磁鋼	2
(1) 碳鋼	2
(2) 錳鋼	4
(3) 鉻鋼	8
(4) 鈷鋼	10
(5) 鋁鋼 (MΓ 鋼)	12
§ 2. 析出 (沉淀) 硬化型磁合金	14
(1) Alnico系合金	15
(2) 其他析出类型磁合金	23
§ 3. 有序格子型磁合金	28
§ 4. 磁畴微粒子磁合金	28
第二章 軟磁合金 (高導磁率合金)	32
§ 1. 純鉄	33
§ 2. 矽鋼片	33
(1) Si含量的影响	31
(2) 加工工艺与性能	39
(3) 其他成份与磁性的关系	47
§ 3. Fe—Ni 系合金	49
(1) Ni含量对Fe—Ni合金的影响	50
(2) 軋制問題	56
(3) 高導磁率問題	59
参考文献	60

第一章 硬磁材料 (鉄磁性材料)

这一类材料均作为耐久磁石使用，如用于各种电工仪表、发电机、电子回路等等。由于它们都是在磁通迴路上有空隙加上原子热振动以及机械振动等作用的条件下使用，所以耐久磁性材料的磁迴曲线面积愈大，使用时间愈久。因此，一般耐久磁性材料对退磁曲线的要求是很重要的。如图1所示，实际上都以 $(BH)_{max}$ 值为比较标准。该值愈大即磁能愈大，愈能耐久使用。如图1所示，由 B_r , H_c 如引出垂直虚线，就很容易求出 $(BH)_{max}$ 值。所以一般都是通过实验求出其退磁曲线，加以比较，以寻求最大磁能的材料。经过多年来对多种合金研究的结果证明，提高 B_r 值应从磁性异向性的提高着手。目前人们正利用冷加工、磁场处理等手段来提高材料的磁性异向性。至于 H_c 值的提高是通过以内部应力、夹杂物（非磁性的）阻止磁壁的移动来实现的。

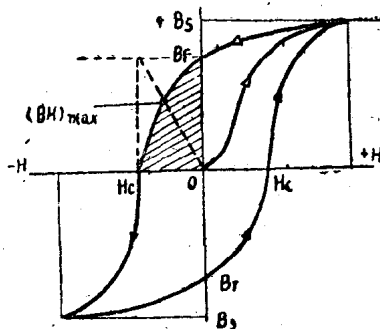


图 1

过去和目前使用的硬磁材料，从使用范围来分类，对使用者极为方便。但从金属学观点来分类，对理解它们的内部规律和特点即较为合适。以下即据此将硬磁材料分类，并加以讨论。

§ 1. 淬火硬化型磁钢

1. 碳 钢

利用淬火硬化钢来提高磁性由来已久，约在 1880 年以前，首先是将碳钢作为耐久磁钢使用。如众所知，一般碳钢的平衡组织在 768°C 以下的温度范围内是磁性材料，且随 C% 的增加， H_c 值增大 [1]；同时如图 2,3 所示，随着组织形状的改变，其磁性也有所不同，如粒状珠光体比片状珠光体具有较低的 H_c 值，而增加退火后的冷却速度，使珠光体细化后，也能使 H_c 值提高。

在淬火状态下， H_c 值也随着碳含量的增加而增大，Br 值则显著减小。如图 4 所示，淬火温度升高，则 H_c 值先上升而后减低，因此，选择适当的含碳量并采取适宜的热处理以求得较大的磁能 $(BH)_{\max}$ 值是可能的。由实验证明，碳含量愈高，淬火温度愈高，则淬火后剩余奥氏体愈多，它是非磁性组织。这一点说明，提高 H_c 值与非磁性组织的量及形状有极大的关系。非磁性夹杂的存在同样会有影响。目前说来，碳钢的 $(BH)_{\max}$ 值是较小的。如：0.9% C 钢，

$(BH)_{\max} = 0.15 \times 10^6$ 高斯奥斯特， $Br = 9500$ 高斯， $H_c = 50$ 奥斯特；1.2%~1.5% C 钢， $(BH)_{\max} = 6500 \sim 7500$ 高斯， $H_c = 60 \sim 70$ 奥斯特等。除去剩余奥氏体量及形状、非

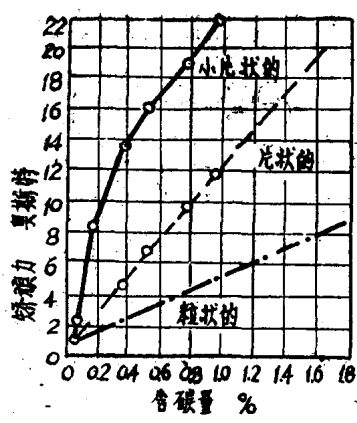


图 2 片状和粒状珠光体的磁性

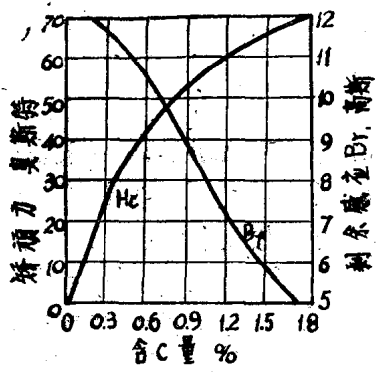


图 3 淬火碳钢的磁性与含碳量的关系

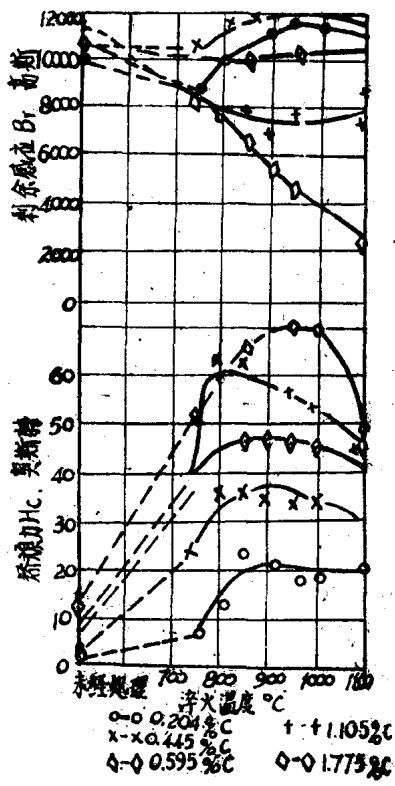


图 4 淬火温度对水淬碳钢试样的剩余感应和矫顽力的影响

磁性夹杂等有影响外，晶粒大小与内应力等也对磁性密切相关。

目前除要求较小的磁能以外，很少用碳钢作为耐久磁钢使用。为使碳钢具有较好的磁能，В.С. Месъкин, Б. Е. Сохин [1] 提出下列的热处理工艺（对1.27% C钢）：

（a）从 A_{c3} 以上温度油中淬火，以保证 Fe_3C 完全溶解；

（b）在 500° 回火，形成具有较细的 Fe_3C 的索氏体组织；

（c）加热至 A_{c1} 以上 $30\sim 50^\circ C$ ，在该温度下短时间保温后淬火，使共析 Fe_3C 溶解而剩余 Fe_3C （二次 Fe_3C ）不溶解，它被保留下来。

按此可得含 $0.8\sim 0.85\% C$ 的马氏体，Br可达9000~9500高斯左右。由于碳钢的磁能较小，提高受到限制；同时在淬火工艺上也受限制，形状复杂时，极难保证质量，因而碳钢远远不能满足实际上的需要。

2. 钨 钢

由于碳钢的磁性极不稳定，热处理又有局限性，故约在1873年Jamin在碳钢中加入了钨 [2]，从而改善了磁性。钨钢即是由由此发展起来的。最近使用的钨钢成分为： $0.7\% C$ ， $0.3\% Cr$ ， $6\% W$ ；其 $Br=10500$ 高斯， $H_c=66$ 奥斯特， $(BH)_{max}=0.3\times 10^6$ 高斯·奥斯特。此类钢直到1914年以前在磁性方面一直是领先的。就Fe—W的金相关系而言，由图5 [3]，[4]可知它仍为一种淬火硬化型的合金。但当有碳存在时，平衡图形状则应有改变。

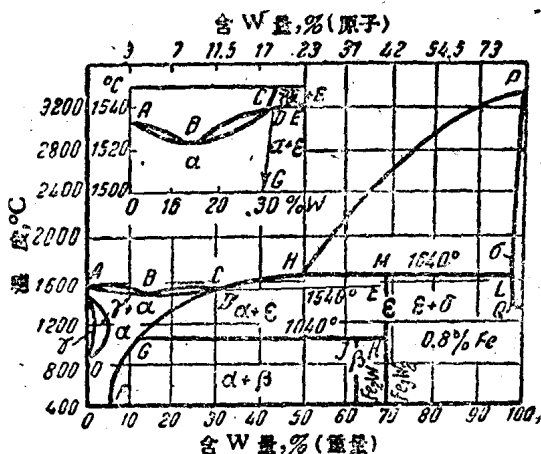


图 5 Fe—W 平衡图

关于钨的作用，根据Я.М.Довгалеvский〔1〕著作可知，在1935年以后进行了大量的研究工作。从磁性看来，以含0.6~0.65% C，5~5.5% W的钢为例，淬火温度如在800~950°之间，则几乎不影响磁性。此时， B_r 约11000高斯， H_c 约65奥斯特。但是，在该温度下的保温时间对磁性的影响却很大（如图6所示）。随着保温时间的增长， H_c 逐渐降低。此现象从图7〔4〕可知， $(Fe, W)_{23}C_6$ 化合物随回火时间的增加，如在140小时后，大部分转变为WC。另一方面如图8所示，回火温度的影响表明，直到900°C以上的回火， H_c 值的下降，这是碳化物出现的证明。碳化物从马氏体和奥氏体分解出来，奥氏体量减少，而 H_c 值下降。根据文献〔4〕，碳化物出现与否，对固溶体的含

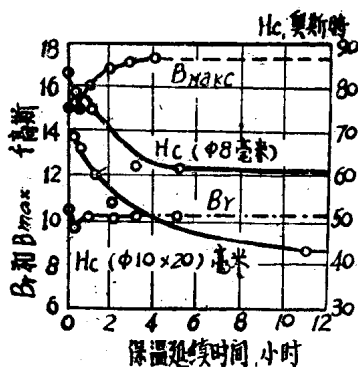


图 6 錫鋼的磁性與淬火溫度時的保溫延續時間的影響

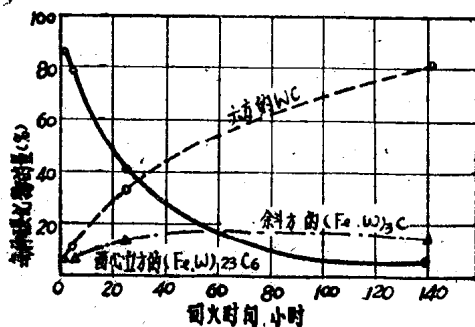
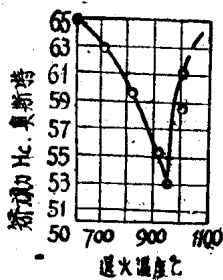


图 7 含0.5C及5%W的鋼中从1150°C淬火並在700°回火在不同時間內碳化物的成分及类型的变化

图 8 淬火錫鋼的屈服力與退火溫度的关系



碳量有巨大影响,它的溶解与淬火温度有关。B.С. Мещкин [1] 在 950°C 以下試驗了淬火温度对磁性的影响,对6%W的鋼來說,这显然是太低了。因而他的结果是磁性与淬火温度无关。根据文献[5]的結論, 850°C 淬火剩余奥氏体量仅有13%量,达不到 $\frac{1}{3}$ 的量,当然磁性不好。因为奥氏体量占 $\frac{1}{3}$ 时,可以不再回火,磁性仍然很好。正因为W含量与C量有关,碳化物形成与溶解、淬火温度差異、回火温度差異等等总和因素又較多,加入少量的Cr大有好处。如图9所示,可以在油中淬火,降低临界冷却速度。总之該鋼磁性的好坏

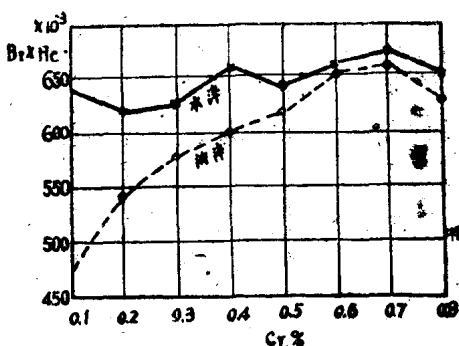


图 9 Cr 对 W 鋼淬火磁性的影响

是与碳化物的控制正确与否有极大关系。仅就 EB6, EB6A [1] 鋼种热处理举例于下 (化学成分: 0.68~0.78% C, 0.3~6.5% W, 5.5~6.5% W):

1) $1200\sim 1250^{\circ}\text{C}$ 常化。

2) $500\sim 600^{\circ}\text{C}$ 下預热, 再在 $820\sim 860^{\circ}\text{C}$ 下加热后, 水

或油中淬火。

这样磁性尚不稳定，再在 100°C 水中作时效处理。

3. 铬 鋼

在1885年 T. Hopkinson 为改善碳鋼的磁性，加入了铬，因而获得铬鋼。在1914—1918年間，德国因缺乏錳的資源，在1917年由 E. Gumlich 繼續研究作出含 $1.0\sim 1.1\% \text{C}$ 及 $6\% \text{Cr}$ 的铬鋼〔6〕以代替錳鋼。铬鋼的磁性較錳鋼稍微差些，但价格較廉，故被采用。据文献〔1〕所載， $\text{Cr}\%$ 与磁性的关系如图10所示。由图可見，含铬为 $5.5\sim 6\%$ 时，磁性最好。淬火溫度的影响如图11所示，在 850° 时磁性最好；溫度再高，則磁性急剧下降。根据〔5〕著者的結論可以看到，在 950°C 以上淬火时，奥氏体量大为减少，而馬氏体的含碳量过多，因而 Br 下降。如 $\text{Cr}\%$ 过多奥氏体量将趋过多，同时 Br 也减小。为了加工，在退火时要充分注意到碳化物的析出和分解，故在淬火时要考虑淬火溫度及保温時間，以求得适宜的热处理工艺。具体的热处理工艺举下列資参考应用（见表1）。

根据〔1〕，进行二重热处理可以获得較高的磁性。其工艺如下：

（1）在 $1050\sim 1100^{\circ}\text{C}$ 加热，透烧后保温5分鐘，于油中或空气中冷却；

（2）于 850°C 透烧后保温10分鐘，油中冷却。

这样处理的目的在于，使碳化物溶解并保証有适当量的剩余奥氏体，从而获得适当含碳量的馬氏体及最好的磁性。

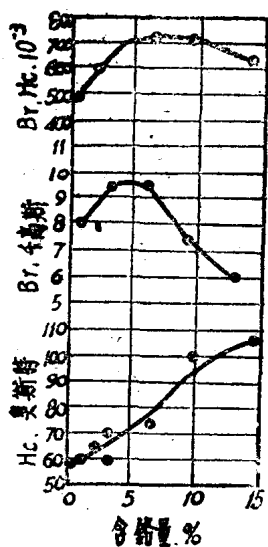


图 10 铬钢 (1~1.2%)
最大磁性的变化与含铬量
的关系

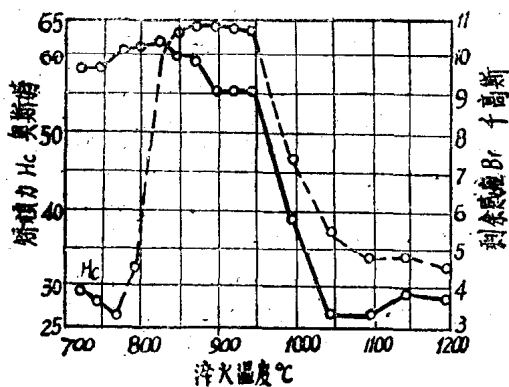


图 11 淬火时铬钢的磁性变化与温度的关系

表 1

鋼 号	成 分	热 处 理 工 艺
—	0.9%C; 3.5%Cr	825~850°C, 保温5~10分鐘, 水中或油中淬火〔7〕
EX 2	0.95~1.1%C; 1.3~1.6%Cr	1. 在 1000°C (EX 2) 或 1050°C (EX 3, EX 3A) 常化
EX 3	0.9~1.1%C; 2.8~3.8%Cr	2. 預热到 500~600°C, 最后加热到 850°C, 保温 10~15 分鐘而后油中淬火〔1〕

4. 鈷 鋼

在永久磁鋼的发展过程中, 鈷的作用直到1916年才被发现和利用。关于鈷的作用, 首先由本多高木作了研究, 并完成了磁性极佳的磁鋼, 命名为KS鋼。当时的成分是: 0.8~1.0%C; 1.5~3% Cr; 5~9% W; 30~40% Co, 余为Fe〔7〕。其磁性为 $H_c = 200 \sim 260$ 奥斯特, $Br = 7800 \sim 11500$ 高斯。它比碳鋼、鎢鋼和鉻鋼的磁性要超过好多倍, 并且是当时最好的磁鋼。由于在鎢鋼的基础上加入鈷改善了鎢鋼的磁性, 故使其 $(BH)_{max}$ 高达 $0.95 \sim 1.0 \times 10^6$ 高斯·奥斯特左右。直到今天为止, 鈷鋼仍是淬火硬化型磁鋼中磁能最大的一个鋼种。

鈷含量的变化与磁性的关系如下表 2 所示〔2〕。

关于鈷的作用, 根据文献〔4〕, 〔5〕, 〔1〕, 〔7〕, 〔8〕的實驗和說明可归納如下:

首先, 鈷对鉄的作用是扩大 r -区, 并与碳不形成碳化

表 2

化 学 成 分 (%)					H _c	Br, 高斯	(B _H) _{max} × 10 ⁶ 高斯·奥斯特
C	Cr	W	Co	Fe	奥 斯 特		
0.7~1.0	3~5	5~8	30~40	余量	200~260	10000~12000	0.9~0.10
0.7~1.0	3~5	5~8	13~18	余量	140~180	9000~9500	0.6~0.65
0.7~1.0	3~5	5~8	8~12	余量	120~150	8500~9000	0.5~0.6
0.7~1.0	3~5	5~8	4~7	余量	100~120	8000~9000	0.45~0.5
0.7~1.0	3~5	5~8	1~4	余量	85~100	8000~9000	0.36~0.38

物。在淬火时能产生较多的剩余奥氏体，增加 H_c 值。钴含量与 H_c 的关系是线性函数。其次，钴能使钢中的碳石墨化。为防止石墨化并保证钢中马氏体（磁性组织）有适当的含碳量，因而加入 Cr, W, Mo, V 等元素以使含碳的奥氏体与马氏体稳定下来，并增高钢的淬透性。有过剩的或析出的碳化物，可以弥散奥氏体及马氏体，更加增高其 H_c 值。

由于上述道理，在热处理时，为保证良好的磁性，对热处理的工艺过程要求很严格。据 [5] 著者的实验和理论计算，钴量在 25~36% 左右时，一次淬火完全可以满足获得 1/3 的非磁性组织的要求，并且磁性最好。如果考虑到晶粒大小、碳化物弥散程度等因素，当然可以提高一步。为此，在常化后进行中间退火（750~800°C），然后再最后淬火。例如：

EBK30 (0.7~0.85% C, 5.0~6.0% Cr, 5.5~

6.5% W, 29.0~32.0% Co 钢为 Fe) [1]

(1) 在 1200° ± 15°C 保温 15 分钟然后常化；

(2) 在 700°C 保温 30 分钟后缓冷（使碳化物析出微细些）；

(3) 在 $950^{\circ}\pm 10^{\circ}$ ，保溫10分鐘于油中冷却。

該种鋼可以在 $1000\sim 1100^{\circ}\text{C}$ 軋制成材，在 950°C 保溫5~10分鐘油中淬火。

根据 Co% 的多少，鈷鋼可分为低鈷鋼(5~7%Co)，中鈷鋼(15~20%Co) 及高鈷鋼(30~40%Co) 三种。

5. 鋁鋼 (MT鋼)

此类鋼种在苏联早有研究，但进一步的深入探討是在1945年由三島、牧野〔7〕所完成。該鋼的成分为：2.0%C，8%Al，余为Fe。其磁性約为 $H_c=200$ 奧斯特， $Br=6000$ 高斯， $(BH)_{max}=0.45\times 10^6$ 高斯·奧斯特。从 H_c 值来看，相当于中鈷鋼，而大于鉻鋼三倍〔9〕(1)。从节约Ni、Co等貴重元素來說，是值得推广的一种磁鋼。现将热处理对此鋼的影响介紹如下〔9〕(2)。

試样大小： $\phi 10\times 50\sim 60$ 毫米，成分：8%Al, 2.0%C；

于 1200°C 保溫20分鐘，油淬火，并于 $0\sim 600^{\circ}\text{C}$ 回火(保溫1小时)时，其 H_c 及Br值的变化如下图12所示。由图可見，随着回火溫度的提高， H_c 下降，Br及Bs值却上升，而且漸趋于飽和(淬火时Bs值約为4300高斯， 400°C 回火則上升到16500高斯)。另外，从硬度与回火溫度的关系(图13)表明，在 $300\sim 350^{\circ}\text{C}$ 时，硬度有一个高峰，此乃因奥氏体一部分轉变为回火馬氏体所致。从奥氏体量的增減而言，淬火时65%左右的奥氏体在 300° 回火后減少到33%，因而磁能达到最大值。該鋼因含鋁較多故不易加工，要鑄造成型。若經退火則可进行鉗眼工作。由于較高溫度退火，其磁性較更稳定。

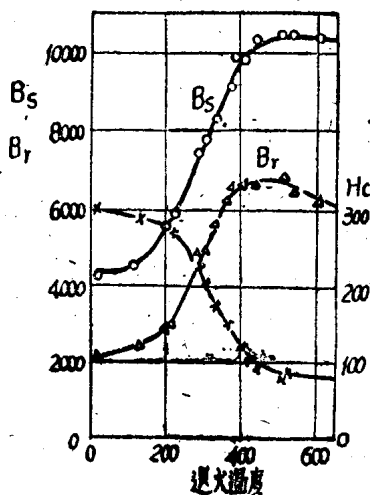


图 12 从1200°C淬火后,退火温度对MT鋼磁性的影响

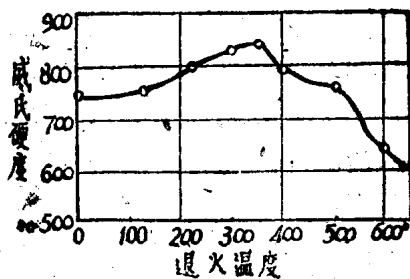


图 13 从1200°C淬火后,退火温度对MT鋼威氏硬度的影响

§ 2. 析出（沉淀）硬化型磁合金

早在 1889—1890 年，J. Hopkinson 就开始了系統研究 Fe—Ni 合金的工作。此后，許多人研究了第三元素对 Fe—Ni 合金磁性的影响，从而在 1913 年由 G. E. Elmen, H. D. Aronld 完成了 79—Permalloy, 45—Permalloy 等高导磁率的軟磁合金。在研究第三元素的影响当中，三島終于在 1931 年发现 Al 元素的作用〔10〕；它对提高 H_c 值有突出的效果，因而成为当时最大磁能的合金，并命名为 MK 磁石。当时的成分〔2〕为：Ni25%，Al12%，鋼为 Fe。磁化后的磁性为：Br=6900 高斯， $H_c=475$ 奥斯特，这比当时高钴鋼的 H_c 值还要大 2~3 倍，并且还研究了以 Co 代替一部分 Ni 来提高 H_c 值的磁合金，命名为 MK2。与此同时，于 1934 年，本多等又相繼創造了新的 KS 鋼，即 Fe—Ni—Co—Ti 高 H_c 鋼。其磁性为：Br=7500 高斯， $H_c=830$ 奥斯特左右， H_c 值被进一步显著地提高了。这些以 Fe—Ni—(Al~Co) 为基的高磁能高矫頑力的合金开始被各国重視并加以研究和利用。这些发现和研究就成为以后各种各样的 Fe—Ni—Al—Co 系磁性合金的基础。在这一类合金的发展过程中，應該提到 1938 年 Oliver 和 Shedden 二人的磁場处理的应用。当时，他們将 Alnico2 用磁場冷处理提高了 Br 值約 20%〔2〕。軟磁的磁性異向性在硬磁方面的应用給近代硬磁合金的发展打开了寬濶的道路。

作为析出硬化型磁合金，还应提到于 1931 年被 W. K. ster 所发现的 Fe—Co—W 及 Fe—Co—Mo 系〔11〕的 Köster-合金。它們是利用从 α -固溶体析出非磁性相而增加 H_c 值的磁