



永久磁铁用合金

Я. М. 多甫加列夫斯基 著

夏承達 蔡 謙 譯

冶金工业出版社

永久磁鐵用合金

Я.М. 多甫加列夫斯基 著

夏承遠 蔡謙 譯

冶金工業出版社

本書闡述永久磁鐵的制造工艺以及用于制造永久磁鐵材料的特性，並簡明地敘述了磁性材料的試驗方法。

本書供在生产和使用精密合金工作的工程師之用，也是研究本門科學和工藝的良好參考資料。

Я.М. Довгалеvский

СПЛАВЫ ДЛЯ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

Металлургиздат (Москва—1954)

永久磁鐵用合金

夏承遠 蔡謙 譯

編輯：馬鴻鈞 設計：趙香荅、魯芝芳 責任校對：馬泰安

1958 年 7 月第一版

1958 年 7 月北京第一次印刷 5,000 冊

850×1168 • 1/32 • 120,000字 • 印張 $5\frac{2}{32}$ • 定價 (10) 1.00 元

冶金工業出版社印刷廠印

新華書店發行

書號 0821

冶金工業出版社出版 (地址：北京市燈市口甲 45 號)

北京市書刊出版業營業許可証出字第 093 號

目 录

第一章 永久磁铁试验方法的原理及其应用	5
1. 合金最重要的磁特性	5
2. 合金磁性的测量方法	8
3. 永久磁铁的计算原理	24
4. 永久磁铁的磁化	27
5. 永久磁铁用合金的分类	29
第二章 马氏体钢	31
1. 碳素钢	31
2. 钨钢	34
3. 铬钢	40
4. 钴钢	42
5. 马氏体钢的机械加工	45
第三章 铁—镍—铝系基的合金	48
A. 工业上最重要的附加铜、硅、钴、钛的铁镍铝合金	53
1. 铝镍型合金（铁—镍—铝）	53
2. 固定杂质对于合金性质的影响	57
3. 含铜的铝镍型合金（铁—镍—铝—铜）	57
4. 铝镍硅型合金（铁—镍—铝—硅）	60
5. 铝镍钴型合金（铁—镍—铝—钴）	60
6. 加钛的合金	72
7. 磁场热处理特性	76
B. 铸造磁铁的制造工艺	77
8. 配料	77
9. 磁性合金的熔炼	79
10. 浇注	81
11. 造型	82
12. 浇注系统的选择	83
13. 用金属模子铸造	88
14. 拆箱和起出铸件	90
15. 废料和生产回收料的利用	91

16. 磁鉄的热处理和磁場热处理	91
17. 磁鉄的机械加工	96
18. 磁鉄的电火花加工	97
19. 磁鉄的安裝	99
20. 磁鉄的缺陷。防止及消除廢品方法	103
B. 鉄鎳鋁基体合金的时效	106
Г. 檢查鑄造永久磁鉄質量的方法	110
1. 宏觀檢驗和显微檢驗	110
2. 化学分析	110
第四章 金屬陶瓷磁鉄	115
1. 金屬陶瓷磁鉄, 即燒結磁鉄	115
2. 氧化磁鉄	121
3. 金屬可塑磁鉄 (压制磁鉄)	122
4. 作永久磁鉄用的新材料	111
第五章 塑性变形合金	133
1. α -鉄基合金	133
2. 鉄錳鈦和鉄鈷鈰合金	140
3. 鉄銅鎳和鈷銅鎳合金	143
第六章 非鉄基体合金	150
參考資料	153
附录	155

第一章 永久磁鐵試驗方法的原理及其應用

1. 合金最重要的磁特性

對永久磁鐵，要求它在有關的電機機械和儀器工作系統的極內空間建立足夠大的磁通。磁通量決定於永久磁鐵材料的磁性，即它的剩餘磁化（剩餘感應 B_r ）以及磁鐵截面 S 。截面越大，磁通量也越大，因為磁通 $B = B_r S$ 。

剩餘感應量 B_r 和矯頑力 H 是由表示感應和磁場強度的關係的磁滯曲線來決定（圖 1）。

這種量是當磁鐵試驗時在閉路中決定。當然，實際上被使用的任何磁鐵都是在開路中工作的。所以，事實上我們的工作是跟在開路中（視在剩餘感應）決定的剩餘感應量發生關係的，這種感應比在閉路中的剩餘感應小。視在剩餘感應根據磁鐵

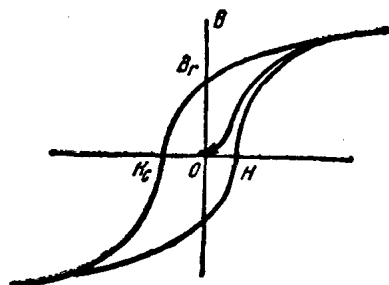


圖 1

磁化曲線和磁滯迴線

的形狀和各部分的比例而

定。磁鐵離開閉路形狀（環）越大，和磁鐵厚度（截面）對其長度的比率越大，則降低該形狀和大小的磁鐵視在剩餘感應量之退磁因素作用也越大。

圖 2 表示從 B_r 到 H_c 的磁滯迴線部分。 α 角（所謂切角）決定視在剩餘感應量 B ，此角的正切（ $\tan \alpha$ ）決定該形狀和大小的磁鐵退磁因素。

顯然，當使用同一種具有 B_r 和 H_c 的數值磁性合金時，等於 $\tan \alpha_2$ 的退磁因素磁鐵，其視在剩餘感應比 $\tan \alpha_1$ 的退磁因素的磁

鉄为小。

視在剩余感应量也根据合金的矯頑力的大小而定。从图 3 可以看出，同一剩余感应而不同矯頑力的合金所制相同形状和大小的磁铁，合金的矯頑力大者，它的視在剩余感应也大 ($B_2 > B_1$ ，因为 $H_{c2} > H_{c1}$)。

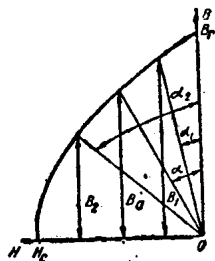


圖 2

磁铁的視在剩余感应

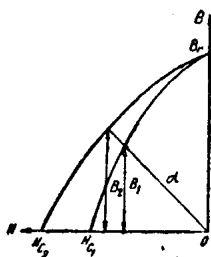


圖 3

磁铁的視在剩余感应
与矯頑力的关系

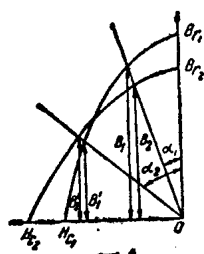


圖 4

視在剩余感应在不同
剩余感应和矯頑力时
与退磁因素的关系

有时，能在剩余感应較小、但矯頑力較高的合金上获得更高的視在剩余感应 (图 4)。这种情况呈现在帶有較大退磁因素的磁铁上。如果退磁因素相当小，那末 $B_2 < B_1$ 。就在較大的退磁因素的情况下，即使 $B_{r2} < B_{r1}$ ，显然， $B'_2 > B'_1$ 。

根据上述，可以作出結論：矯頑力越高，則“視在剩余感应”也越高。 $B_{max} \cdot H_c$ 的乘积能表征合金的磁能。然而真正的特性是 $(B \cdot H)_{max}$ ，即可变的 B_d 和 H_d 的乘积数值，这数值在所研究部分是最大的 (图 5)。

$B_d H_d$ 乘以 $\frac{1}{8\pi}$ 即得出作用于磁場中的 1 立方公分磁铁的磁力，尔格/厘米³。在 $H=0$ 及 $H=H_c$ 之間， $\frac{BH}{8\pi}$ 有其最大值，因为这二点的 $\frac{BH}{8\pi}$ 均等于 0。

为要更好地經濟使用该类合金中的磁铁，它应该有这样的大小和構造，即使其視在剩余感应 B_d 与 $\frac{BH}{8\pi}$ 有最大值 ($B_d H_d$) 的那一点相合。当磁極間的空隙增大时，退磁系数会增大，視在剩余感应会减少。另一方面，当空隙减小时，退磁系数也减少；視

在剩余感应这时虽增大了，却因磁極間空隙太小而不能全部給利用上。有时不是用 $\left(\frac{BH}{8\pi}\right)_{\text{МАКС}}$ 以尔格/厘米³为單位，而是 $(BH)_{\text{МАКС}}$ 以高斯·奥斯特为單位。显然，第二个数值和第一个是成比例的。

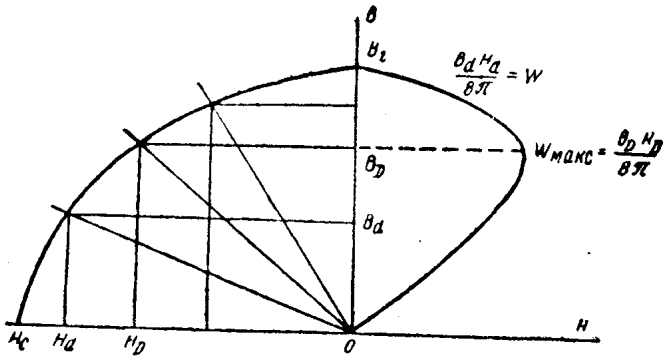


圖 5

退磁曲綫和磁能曲綫

除此表征合金磁特性 $[B_r, H_c, \left(\frac{BH}{8\pi}\right)_{\text{МАКС}}]$ 的基本数值外，設計者注意到所謂廻复曲綫。假定，我們有一塊磁鉄，其剩余感应定为縱坐标 OA (图6)。在电磁机构退磁場的影响下或在溫度循环、振动等等的影响下，磁鉄的工作点 A 会移到和較小的剩余感应 (縱坐标 OM_1) 相适应的 M 位置。

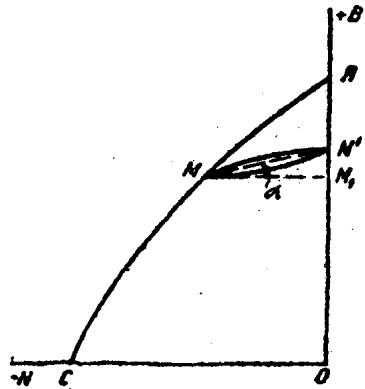


圖 6

磁鉄的剩余感应在外作用时的变化 (回復曲綫)

当退磁場解除后，磁鉄不回到所定 A 点位置而在一个新位置 (M' 点) 了。如果我們循环地改变在 $M-M'$ 之間的退磁場，那末感应也將随部分的磁滯廻綫 MM' 而变化。因此，在退磁場

变化时，磁鉄沿廻复曲綫变换其本身的感应。可以近似地計算这部分廻綫的面积接近于零，並且变化是沿着接連廻綫頂点的直綫 MM' 进行。用 $\frac{M'M}{MM_1} = \frac{\Delta B}{\Delta H} = \operatorname{tg} \alpha$ 的比例表示的直綫的斜率称为磁鉄廻复系数或可逆的磁导率 (μ_r)。

永久磁鉄产生的磁能在某种因素的影响下，或只經過一段時間，可能起变化。这种現象称之为时效。組織时效和磁时效是不同的。組織时效通常在溫度和時間的影响下發生，是不可逆的。它联系到合金組織的变化，在某些場合，已时效的磁鉄可用热处理方法，使它在組織上恢复磁性。磁时效联系到冲击、振动、溫度循环等等影响下磁通的可逆的变化（减小）。当再次磁化时，磁鉄重新得到初磁性。

2. 合金磁性的測量方法

当試驗和檢查永久磁鉄和磁合金时，磁性的測量是最重要的。这种測量一般不外乎測定測量对象的磁性（磁通、磁矩、磁势等等）或永久磁鉄本身材料的磁特性（作磁滯图；測定剩余感应和矯頑力等等）。此外，制成的磁鉄可仅作簡單的工場測量（測定分离力、感应等），也可作特殊測量（測量磁場强度，測定磁鉄的溫度系数）。

現在我們研究几种实用上最重要和最普通的磁性測量法。

借助冲击电流計^①和磁通計測定磁通。

冲击电流計接在包围着被測量的磁通的回路上（綫圈）。当回路繞組（綫圈）內磁場变化时，会产生一定的电动势。在 τ 時間內，即磁通变化进行的时间內，电量 Q 便通过回路；电量 Q 可以如下的比例求得：

$$Q = \int_0^{\tau} i d\tau,$$

① 冲击电流計的論述和原理參看 И. В. 安契克 (Антик), Е. И. 康多尔斯基 (Кондорский), Е. П. 奧斯得罗夫斯基 (Островский) В. А. 薩基可夫 (Сажиков) « 磁的測量 », 苏联联合科技出版社 (ОНТИ) 1939.

式中 i = 流过繞組的电流。

回路內流过的电，引起电流計可动部分的偏轉。应该使用仅具有較大的慣性矩和自然振盪周期較大的冲击电流計。在該場合，电流計可动系統（反光鏡）之偏度在冲击終了之后开始。

流过电流計的电量：

$$Q = C_e \alpha,$$

式中 α = 电流計上反光鏡的偏度值；

C_e ——称为冲击常数的系数。

大家都知道，起感应的电动势等于：

$$e = - \frac{n d\Phi}{d\tau},$$

式中 Φ ——横断綫圈的磁通量；

n ——綫圈匝数。

电流强度的瞬时值，

$$i = \frac{e}{r} = \frac{n d\Phi}{d\tau} \frac{1}{r},$$

式中 r ——綫圈（繞組）和电流計組成的回路电阻。

因此，

$$Q = \int_0^{\Phi} n \frac{d\Phi}{d\tau} \frac{1}{r} d\tau = \frac{n\Phi}{r}.$$

但是因为 $Q = C_e \alpha$ ，所以 $\frac{n\Phi}{r} = C_e \alpha$ 和 $\Phi = \frac{C_e r}{n} \alpha$ 。

因为冲击常数 C_e ，冲击回路电阻 r ，綫圈匝数 n 都是常数，所以电流計上反光鏡的偏度 α 和磁通量 Φ 成比例。

冲击常数 C_e 以下列方法来确定。取互感系数 L 等于 0.01 亨利的感应綫圈。把一次綫圈 I 連接在电源上，而二次綫圈 II 連接到刻有分度的冲击电流計 G 上。当一次綫圈中通以电流 I 时，二次綫圈就产生电动势

$$e = -L \frac{dI}{d\tau}.$$

二次回路中經电流計在 τ 秒內所流过的电量，

$$Q = \int_0^{\tau} i d\tau。$$

可是因为 $i = \frac{e}{r}$ ，所以 $Q = C_{\theta}\alpha - \frac{LI}{r}$ 及 $C_{\theta} = \frac{LI}{ra}$ 。

因此，如果讓以安培表示的电流 I 經過綫圈的一次回路，那末当以亨利表示 L 和以欧姆表示 r 时，我們能获得以庫倫表示的冲击常数 C_{θ} 。一般將其以微庫倫表示之。

$$C_{\theta} = \frac{LI}{ra} \times 10^6 \text{ 微庫倫。}$$

如測量的磁通以馬克士威計之，那末須將此公式乘以 100，即：

$$\Phi = \frac{C_{\theta} r}{n} \alpha \times 10^8 \text{ 馬克士威。}$$

用磁通計的測量 磁通計是改进的冲击电流計，它能作長時間的、而不像一般冲击电流計那样短時間的觀察。磁通計也是根据用冲击法測量流过电流計綫圈架上的电流这一原理來構造的。

具有較大慣性矩的可动綫圈架是懸掛在实际上沒有彈性卷曲的細絲綫上。放在補助磁鉄極和軟鉄所制圓筒之間空隙內的磁通計綫圈架，在若干电量流过綫圈架上时，由于电流跟磁場的電動力的相互作用而轉移了。磁通計綫圈架能較長時間地停留在这种狀態下。架上連着一根輕指針，指針即沿着用馬克士威為單位刻度的分度盤而轉動。

磁通量計算是用与冲击电流計相同的公式來進行，不过 C_{θ} 在这些公式上已代表磁通計的“常数”。借助磁通計的技术測量磁通量，虽較冲击电流計稍不灵敏，然進行得迅速而可靠。在另一方面，冲击电流計的路綫圖，虽也保證較大的測量准确性，但頗笨重，需要較長的測量時間並還有其它很多缺点。冲击裝置的工程圖以后在制定磁化曲綫和磁滯迴綫時再進行研究。

測量磁矩是經常進行的，例如，按照 ГОСТ * 4402—48 標準驗收磁鐵。

磁力計上初充磁場 H_1 是以特殊補助磁鐵所建立。當用試驗磁鐵建立的新附加磁場 H_2 重疊在這外磁場時，補助磁鐵便按合成磁場的方向建立起來。知道了初充磁場 H_1 值與新磁場重疊所成的角度和磁鐵的偏向角後，能算出 H_2 磁場強度值。如果初充磁場 H_1 和擾動磁場 H_2 互相重疊成直角，則問題解決就更簡單。那末合成磁場的，因而也就是懸掛補助磁鐵的向量轉角

$$\varphi = \arctg \frac{H_2}{H_1}。$$

磁矩 M_M 用下式測定之：

$$M_M = IV,$$

式中 I ——磁化強度；

V ——磁化物質的體積。

當測定 I 和 M_M 時，根據下列位置。

位於該磁化物體外部任何一點上的磁場強度（如果這一點在磁體軸上時），可以按下列公式測定之，

$$H_2 = \frac{2M_M}{r^3} \left(1 + \frac{p}{r^2} \dots \dots \right),$$

式中 r ——從該磁化物體中心到研究點的距離；

M_M ——該物體的磁矩；

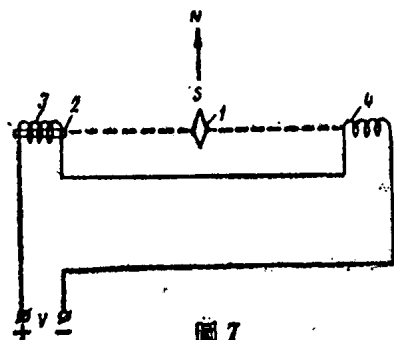
p ——依據該物體磁化特性的分布係數。

要測量在該初充磁場 H_1 強度的磁矩 M_M ，須把該磁化物體（在我們的條件下測量永久磁鐵）安置在離開可動磁鐵的已知距離上，使其軸照原來樣垂直。然後就磁力計求得可動磁鐵的偏向角，按公式算出 M_M 和 I 。修正係數 P 是用兩次試驗方法在兩個已知數 r 下測定之，進而組成二項方程式的系來決定 M_M 和 P 。

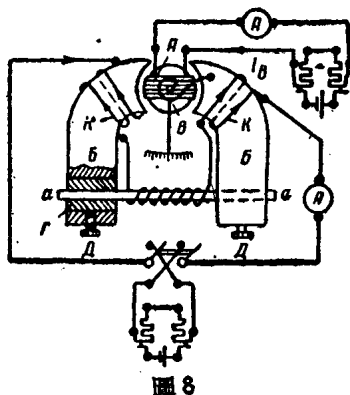
最簡單的磁強計裝置簡圖如圖 7，可動（補助的）磁鐵 I 懸掛在線上，但在沒有磁化該物體時，卻確定在地磁場的方向上。

* 即國定全蘇標準——譯者。

所試驗的試樣 2 放在磁化綫圈 3 里面。为了抵消磁化綫圈本身的影响，跟可动磁鉄 1 的相反方向，裝个补偿綫圈 4；借助于可动磁鉄位置上的綫圈 4，建立了等量的但对綫圈 3 磁場方向相反位置的磁場。



磁力計簡圖〔1〕



用电动法測定磁特性的裝置
簡圖〔1〕

測量是用把試樣放入磁化綫圈 3 之內的方法来进行。按照可动磁鉄的偏向角 φ 和上列諸公式算出磁矩。

測定永久磁鉄的合金磁特性目前有三种方法：电动法，冲击法和感应法。

电动法是在于測量电流通过的和放在被磁化試樣建立之磁場內的綫圈架的轉角。其裝置（图 8）是由帶有圓柱形孔的軟磁鋼軛 B 所組成。補助电流 I_0 流过的可动綫圈 A 是位于軸上的凹壁內。綫圈环绕着軟鋼制的固定鉄心 B 旋轉至某些角度。將試樣 $a-a$ （棍長 20~30 公分，截面約 0.25 平方公分）插入磁化綫圈內並用鉄軸瓦 I 和螺釘 A 夾住在軛內，在軛上裝二个通过电流的补偿綫圈 K 。补偿綫圈的电流与磁化电流一起保証在沒有試樣時等于零的磁場强度。

當試樣插入磁化綫圈內並夾住后，便接通了电流（电源供給可利用 6~12 伏的蓄電池）。試樣起磁化作用並閉合磁通。磁通量按下列公式測定：

$$\Phi = C_1 B S,$$

式中 S ——試样截面；

B ——試样內的感应；

C_1 ——冲击常数。

由于磁通 Φ 和电流 I_b 的互相作用建立起力矩 $M = C_2 \Phi I_b$ ，因此綫圈迴轉某些角度。

从測电儀器的理論上知道彈簧 α 的旋轉角和反作用矩 M ，彼此关系如下：

$$M = w\alpha,$$

式中 w ——表征彈簧的常数。

这样，有了：

$$M = w\alpha \text{ 及 } C_2 \Phi I_b = w\alpha$$

或

$$C_2 C_1 B S I_b = w\alpha。$$

得出：

$$\alpha = \frac{C}{w} B S I_b。$$

如果在測量时補助电流保持不变，那末綫圈 A 的轉角 α 跟試样中的感应成直綫的比例变化。所以在一定截面的試样下，可以將儀器的刻度盤刻成感应單位。至于截面不同的試样使用同一刻度时，必須維持 $S I_b$ 的乘积不变。

类似的仪表久已被广泛地采用了，例如用开普西尔(Кенсель)仪器。这种仪器可以迅速进行測量，毋須另加計算。这点在大量試驗时很重要，这是其主要优点。然而測量的准确度極不大，因为跟存在的空隙有关系。补偿綫圈在不同的磁場强度下不能完全执行其使命，因为磁化綫圈的漏磁場及軛鉄的磁場不能始終跟磁化电流严密地成为比例。利用“差異曲綫”可以作某些更正。

使用这种方法时，試样的性質（要知道这种真实的磁化曲綫可以用其他更精确的方法来測定）是在电动法的仪器中測量，並繪成磁化曲綫。兩根磁化曲綫用同一比例尺繪制（图 9）。借助

这些感应 B_1 值的曲线，可以求得磁场强度 H_2 和真实的磁场强度之间的差异。算出不同感应值的标准值后便获得称为差异曲线的标准曲线 OA 。

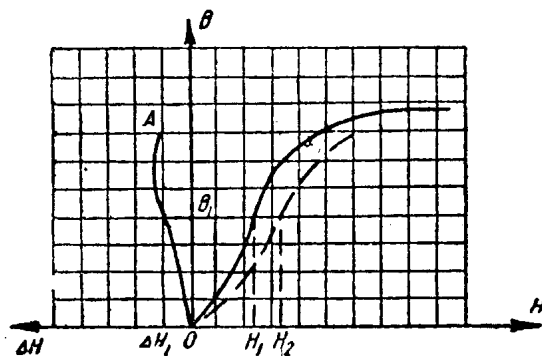


圖 9

差异曲线 [1]

虽然利用差异曲线后测量的准确性可有若干地提高，但是仍不算高。最近为了提高电动法测量的准确性，作了某些改进。

1. 将一个特殊的指示器（例如，磁针）与试样放在一起；这样，当试样附近的外磁场等于零时及试样内的感应将等于剩余感应时，便建立了转矩。然而这个转矩跟切断电流的转矩并不相符。

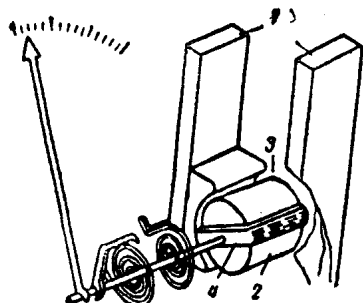


圖 10

檢查永久磁鐵的 Реманенц-мессер
簡圖 [1]

2. 如果在试样附近装置一个磁场强度的特殊测量器，可以获得更大的测量的准确性；在这种情形下，磁场强度可准确地测量，而不必按磁化电流计算。

当检查大量永久磁铁时，普遍地采用所谓 реманенц-мессер 的仪器（图10）。这种

仪器也是根据电动法原理的。当测定视在剩余感应时，永久磁铁在电磁铁内磁化，並放在疊片 1 上，使磁路閉合。要加强磁通，用一个鉄制圓筒 2 放置在环形空隙 3 中。在这个空隙內，放置一个可动綫圈 4。置于仪器刻度盤附近的直流电沿此綫圈通过。

試驗磁铁的磁通經過鉄片 1（軛）作用于綫圈 4，跟綫圈 4 連系的指針的偏度与磁铁的視在剩余感应成比例。

用冲击法来测定永久磁铁合金的磁特性是最新型的方法之一。借此可获得磁化和磁滯曲綫。

試用冲击装置和测量方法的簡图为例〔2〕。試样最好是椭圆形或圓形（环），这样能使磁化均匀。因为通常永久磁铁不是这种形状，所以对于磁化的均匀性，我們常借鉄軛和磁铁本身之助構成閉磁路。这可保証試样在其長度的整个的截面內是同一感应。这样的机构称为磁导計。

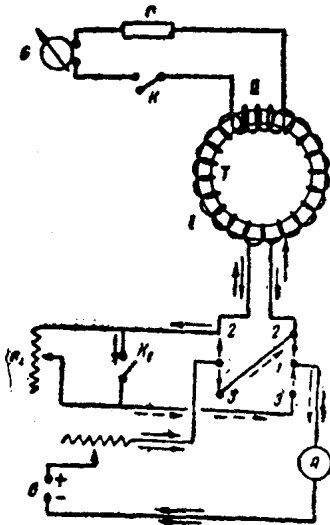


圖 11

冲击装置簡图〔2〕

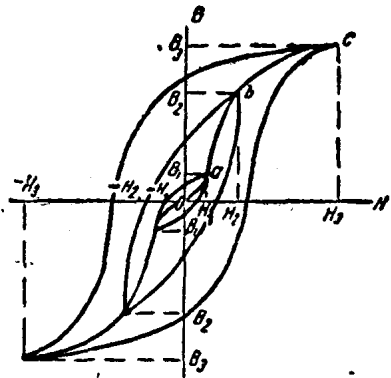


圖 12

用整流方法構成磁化曲綫
簡图〔2〕

冲击装置簡图（图 11）是两个电路的，試样 T 用通过直流电（从电源 B）的方法經一次磁化綫圈 I 而磁化。这电路也有安

培計 A 、双刀双擲开关 $2-1-3$ 、开路开关 K_1 和变阻計 R_1 。二次（冲击的）綫路由二次（冲击的）綫圈 II 、一套电阻 r 、开关 K 及冲击电流計 G 所組成。

以端鈕 2 和 3 交叉連接的方法产生电流方向的变化。当刀閘在 1—2 位置上时，电流向指示实綫箭头的方向流动，而在 1—3 位置时，則向虛綫箭头的方向流动。因为一对端鈕（左 3，右 2）短路連接，而另外一对（右 3，左 2）經過变阻器，所以能得到在实綫箭头方向的电流比相反方向的（按虛綫箭头）来得大。为了在不同的电流方向时，使綫圈 I 能获得相同的电流，端鈕（左 2，右 3）用开关 K_1 短路連接。

用整流方法（图 12）可以获得最准确的磁化曲綫。其要点如下。使电流流入綫圈 I （见图 11），則預先使用开关 K_1 短路並用开关 K 开啓冲击綫路。然后以不变电流量来改变电流的方向。这种情况是用开关从 1—2 位置轉換到 1—3 位置来进行。須进行数次轉換，以便試样 T 的磁化性能得以稳定。由于每次轉換的結果，試样的感应按磁場 $+H_1$ 及 $-H_1$ 之間的磁滯廻綫而变化（图 12）。接着用开关 K 將冲击綫路閉合，將刀閘从 1—3 位置轉換到 1—2 位置。这时試样的感应从 $+B_1$ 变化到 $-B_1$ 。显然，当磁場强度为 H_1 时，冲击电流計上的反光鏡产生了和二倍的感应（ $2B_1$ ）相应的偏度。

感应 B_1 （高斯）以下式計算

$$B = \frac{C_g r \times 10^3}{nS} \alpha,$$

式中 C_g ——电流計的冲击常数；

r ——冲击綫路的电阻（在包括电流計电阻）；

n ——綫圈 II 的匝数；

S ——試样 T 的截面积；

α ——电流計上反光鏡的偏度。

把 $\frac{\alpha}{2}$ 放在公式中代替 α ，因为 α 符合二倍感应（ $2B_1$ ）。

获得在曲綫上 B_1 点后，冲击綫路开啓了，在一次綫路上借变阻