

1 主题内容与适用范围

本标准规定了永磁(硬磁)材料磁性试验方法。
本标准适用于铝镍钴永磁、铁氧体永磁、铁铬钴永磁、稀土永磁及其它永磁材料。

2 引用标准

GB 2900.4 电工名词术语 电工合金

3 术语

3.1 退磁曲线 demagnetization curve

饱和磁滞回线的第二象限或第四象限部分。这部分由剩磁 B_r ($B_r = J_r$) 和矫顽力 H_{CB} 或内禀矫顽力 H_{CI} 限定(见图 1)。

3.2 最大磁能积 $(BH)_{max}$ maximum BH product

退磁曲线上,磁通密度(磁感应强度)和相应的磁场强度乘积的最大值。 $(BH)_{max}$ 点的坐标用 (B_d, H_d) 表示(见图 1)。

3.3 回复线和回复磁导率 recoil line, recoil permeability

永磁材料的回复线,是指退磁曲线上某点在回复状态时的局部磁滞回线,回复线的平均斜率与磁性常数 μ_0 的比值定义为回复磁导率(见图 1)。

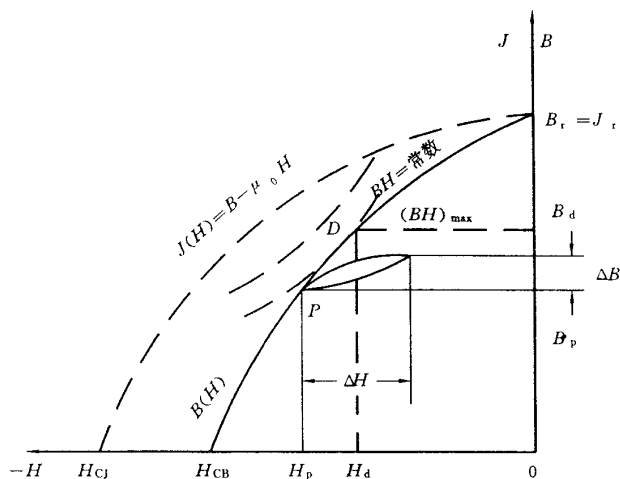


图 1 退磁曲线和回复线

回复磁导率 μ_{rec} 按(1)式计算:

$$\mu_{rec} = \frac{1\Delta B}{\mu_0\Delta H} \dots\dots\dots(1)$$

式中： $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m；

ΔB —— 回复线两个端点的磁通密度之差，T；

ΔH —— 回复线两个端点的磁场强度之差，A/m。

4 单位制

采用国际单位制(SI)，详见附录 A。

5 内禀矫顽力 H_{CJ} 小于或等于 600 kA/m 永磁材料的测量

5.1 磁化装置

5.1.1 磁化装置由磁轭、极头和磁化绕组组成。磁轭、极头和试样构成闭合磁路(见图 2)。

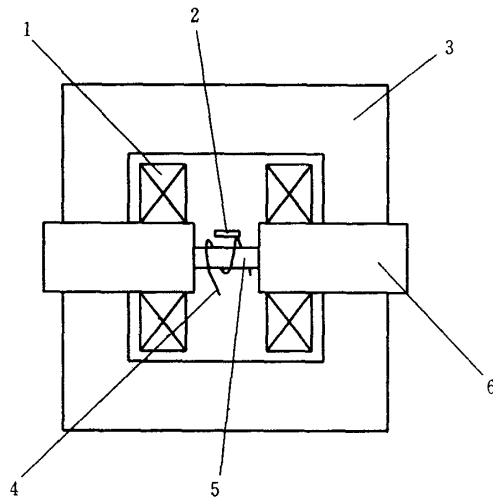


图 2 磁化装置

1—磁化绕组；2—磁场探测器；3—磁轭；4— B (或 J)测量线圈
5—试样；6—极头

5.1.2 磁轭和极头应由矫顽力不大于 100 A/m 的软磁材料制成，其结构应对称。为了减小因磁通迅速变化而产生的涡流，磁轭推荐用叠片铁心构成，极间距离在一定范围内连续可调。

极面应为平面，表面粗糙度参数 R_a 值为 $3.2 \mu\text{m}$ ，两极面应平行并与磁场方向垂直。

5.1.3 磁化绕组的位置应尽量靠近试样并互相对称，其轴线与极头轴线一致。

5.1.4 磁化电源：磁化电源应具有足够的容量，在测量时，磁化电源调节器，应能在整个测量范围内连续而平稳地改变磁场。磁化电流的不稳定度不超过 0.1%/min。

5.1.5 磁化装置应能产生使试样磁化到饱和的磁化场，其值随永磁材料的种类而变化，并与晶粒的取向有关。饱和磁化场强度 H_{max} 的选择通常与内禀矫顽力有关。即

$$H_{max} = KH_{CJ}$$

系数 K 根据永磁材料的种类而变化，一般在 3 到 5 之间。部分永磁材料的饱和磁化场强度见附录 B，其中所列的饱和磁化场强度 H_{max} 是这样得到的：当磁化场强度由某一值增加 50% 时，试样的 B_r 和 H_{CB} (或 H_{CJ}) 增加均不超过 1%，该磁场值就被认为是这种永磁材料的最低饱和磁化场强度值。

5.1.6 两极面间的磁化场，在试样、 B 测量线圈和磁场探测器所占有的整个空间内应足够均匀。因此，

极面几何尺寸必须满足(2)、(3)式:

$$D \geq d + 1.2 L \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$D \geq 2.0 L \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中: D ——圆形极面直径或矩形极面的最短边长, m;

L ——极间距离, m;

d ——垂直于磁场方向均匀区的最大尺寸, m。

工作时,极头中的磁通密度应比其饱和磁通密度低得多,以保证极面近似于磁等位面。实用上,对于电工纯铁极头的磁通密度应小于 1 T,对于含钴 35%~50%的铁钴合金极头的磁通密度应小于 1.2 T。

当满足上述条件时,在极面间的磁场均匀区内,磁场强度的变化不超过 1%。

5.2 试样

5.2.1 试样取矩形(或圆形)截面的柱体,为了使试样均匀磁化,其尺寸由 5.1.6 条限定,试样长度应大于 5 mm。

5.2.2 试样两端面应磨削到互相互行,平行度不超过公差等级 9 级,端面垂直于轴线,垂直度不超过公差等级 9 级,表面粗糙度参数 R_a 值为 $3.2 \mu\text{m}$,以减小气隙(见 5.4.2 条)。

5.2.3 试样横截面积沿整个长度方向应保持一致,其偏差不得超过它的最小横截面的 1%,试样尺寸的测量误差不得超过 0.2%。

5.2.4 试样不应有外部和内部缺陷。例如:缺口、掉边、裂纹、砂眼和气孔等。

5.2.5 对于各向异性的永磁材料,在测量其磁性时,试样的磁化方向应与材料的易磁化方向一致。

5.2.6 对于温度系数较大的材料,例如:铁氧体永磁材料,在测量时试样温度变化不应超过 $\pm 3^\circ\text{C}$ 。

5.2.7 试样放置于磁化装置两极面间的磁场均匀区内(见 5.1.6 条)。试样的欲磁化方向应与磁场方向一致。

5.3 磁通密度的测量

5.3.1 磁通密度的变化量,由一个测量线圈连接感应电压时间积分器来测量。

5.3.2 测量线圈为均匀的单层,紧紧地绕于试样中部并对称于试样两端面。

为了消除由测量线圈引线而产生的附加感应电压,引线应绞合在一起。

5.3.3 感应电压时间积分器,可以是冲击检流计,磁通计,电子积分器或其它自动装置。

5.3.4 磁通密度的变化量由(4)式计算:

$$\Delta B = B_2 - B_1 = \frac{1}{NS} \int_{t_1}^{t_2} U dt \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中: B_2 —— t_2 瞬间的磁通密度, T;

B_1 —— t_1 瞬间的磁通密度, T;

S ——试样的横截面积, m^2 ;

N ——测量线圈的匝数;

$\int_{t_1}^{t_2} U dt$ ——感应电压的积分, $\text{V} \cdot \text{s}$ 。

考虑到测量线圈中包括空气磁通,这个磁通密度变化量应该修正,修正后的磁通密度变化量 ΔB_{corr} 由(5)式计算:

$$\Delta B_{\text{corr}} = \frac{1}{NS} \int_{t_1}^{t_2} U dt - \mu_0 \Delta H \frac{(S_1 - S)}{S} \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中: ΔH ——引起磁通密度变化 ΔB 的磁场强度变化量, A/m;

S_1 ——测量线圈的有效横截面积, m^2 。

5.3.5 磁通密度的测量误差不应超过 2%。

5.4 磁场强度的测量

5.4.1 磁场强度用磁场探测器配合相应的仪器测量,即通过测量线圈连接 5.3.1 条所述的积分器或霍尔探头配合电测仪器测量。磁场探测器的常数应预先校准,其引出线绞合在一起。

5.4.2 除了按 5.2.7 条的要求放置试样外,为了减小由气隙 δ (见图 3)而引起的测量磁场的误差(估算方法见附录 C),应将试样夹紧。

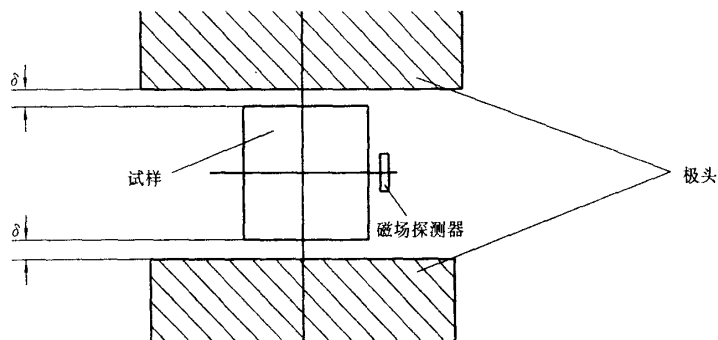


图 3 空气间隙

5.4.3 只有当试样表面的磁场强度矢量平行于试样侧面时,在试样表面直接测得的磁场强度才等于试样内部的磁场强度。因此为了获得试样内部的磁场强度,磁场探测器的位置必须满足 5.1.6 条的要求,尽量靠近试样并且对称于试样两端面,其轴与试样磁化方向一致。

5.4.4 磁场强度的测量误差不应超过 2%。

5.5 退磁曲线的测量

5.5.1 用冲击检流计的测量过程

5.5.1.1 对于具有叠片磁轭的磁化装置,将试样在大于附录 B 规定的 H_{max} 下,磁化到饱和磁状态 B_{max} ,并进行磁锻炼以保证试样磁状态稳定。然后,切断磁化电流,按第 5.3 条便可测得磁通密度变化量 ΔB (见图 4a)。

$$\Delta B_1 = B_{max} - B'_r \quad \dots\dots\dots (6)$$

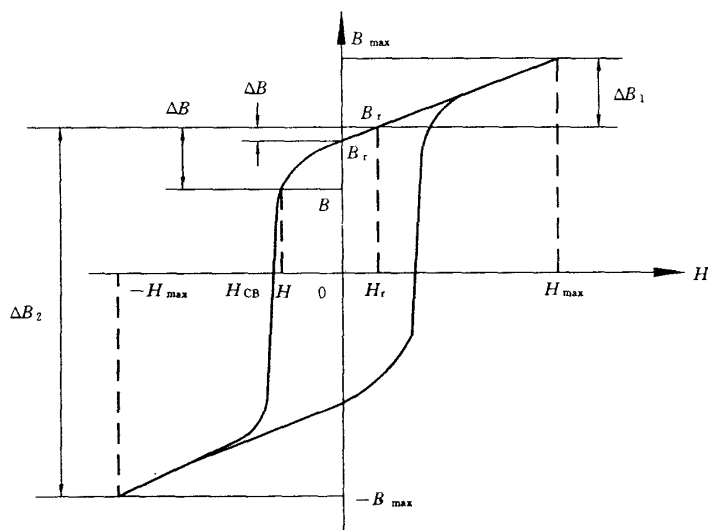


图 4a 饱和磁滞回线

由于极头和磁轭存在剩磁,尽管这时磁化电流为零,但磁轭和极头产生的剩余磁场强度 H_r 不等于 0,因而 B'_r 不等于 B_r 。 H_r 按第 5.4 条测得。再将磁化场跃变到 $-H_{\max}$ 测得 ΔB_2 。

$$\Delta B_2 = B'_r + B_{\max} \dots\dots\dots(7)$$

由式(6)和(7)可得:

$$B'_r = 1/2(\Delta B_2 - \Delta B_1) \dots\dots\dots(8)$$

当 H_r 等于 0 时, B'_r 等于 B_r 。当 H_r 不等于 0 时, B_r 可由退磁曲线上求得。

测量退磁曲线上任一点的 B 和 H 时,试样均应先磁化到饱和点 (B_{\max}, H_{\max}), 并进行磁锻炼。切断磁化电流,磁状态处于 B'_r, H_r 点,然后使磁化场跃变到测量点的磁化场强度 $-H$, 同时测得磁通密度变化量 ΔB , 该点的 B 由(9)式计算:

$$B = B'_r - \Delta B \dots\dots\dots(9)$$

重复上述过程,测出各点的 B 和 H 值,退磁曲线便可描绘出来。

5.5.1.2 对于具有非叠片磁轭的磁化装置,为了减小由于涡流和电感引起的非瞬时误差,推荐采用如下测量程序:通过产生 H_{\max} 的最大磁化电流换向来测得 B_{\max} (见图 4b)

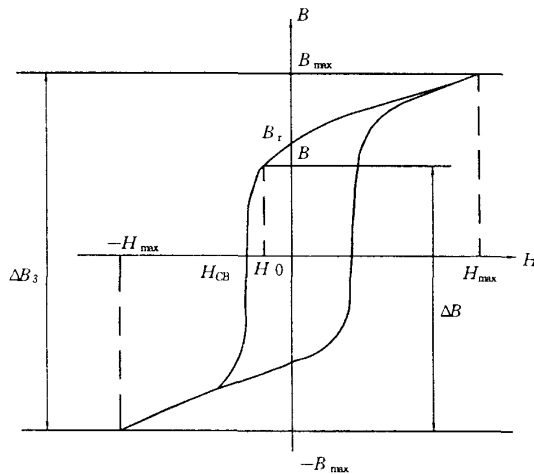


图 4b 饱和磁滞回线

在此应注意磁化电流在两个方向上的误差值应小于 1%。 B_{\max} 由(10)式计算:

$$B_{\max} = \frac{1}{2} \Delta B_3 \dots\dots\dots(10)$$

退磁曲线上任一点的 B 和 H 的测量,先将试样在 H_{\max} 下磁锻炼,然后将磁化电流调节到测量点磁场的相应值,按第 5.4 条测得其磁场强度 H , 再使磁化电流跃变到它的最大值(相应于 $-H_{\max}$ 点),同时测得磁通密度变化量 ΔB , 该点的磁通密度按(11)式计算:

$$B = \Delta B - B_{\max} \dots\dots\dots(11)$$

依次测出各点的 B 和 H , 退磁曲线便可描绘出来。

5.5.2 用电子积分器的测量过程

5.5.2.1 把空的 B 测量线圈和磁场探测器,置于杂散场小于 0.1 kA/m 的空间,仔细调整电子积分器和磁场测量仪到零位,此时 X-Y 记录仪落笔在坐标原点。然后把试样放入 B 测量线圈,并按 5.4.2 条在磁化装置中夹紧。同时,磁场探测器按 5.4.3 条置于两极面之间。

以高于附录 B 中所列的饱和磁化场强度值,将试样磁化后,使磁化电流单调减小到零。由于磁化装置的剩磁,一般记录笔还位于第一象限。再改变磁化电流方向,慢慢增加磁化电流使退磁曲线通过 H_{CB}

或 H_{C1} 点(见图 5)。这时 X-Y 记录仪记录下退磁曲线上各点的磁通密度值和相应的磁场强度值。

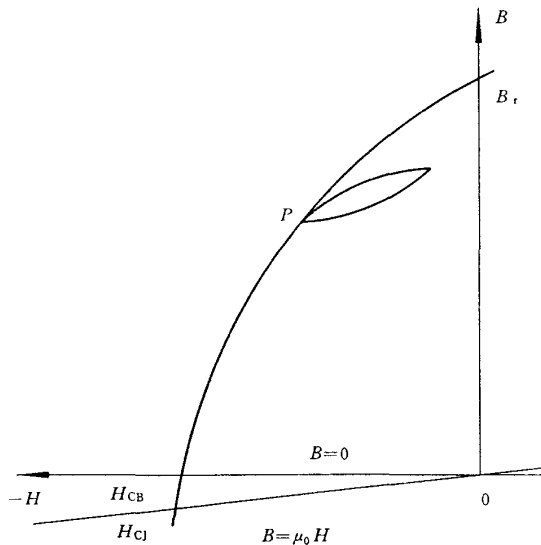


图 5 用电子积分器描绘的退磁曲线和回复线

对于磁通密度和磁场强度之间存在较大滞后现象的材料,磁场强度的变化速度应该足够慢,为了保证准确的积分,电子积分器的时间常数应该足够大,零点漂移应该足够小。

5.5.2.2 剩磁 B_r 的确定:描绘出退磁曲线后,取退磁曲线与 B 轴交点的磁通密度值(见图 1)。

5.5.2.3 矫顽力 H_{CB} 或内禀矫顽力 H_{C1} 的确定:退磁曲线与 B 等于零直线交点的磁场强度值为 H_{CB} ,与 B 等于 $\mu_0 H$ 直线交点的磁场强度值为 H_{C1} (见图 5)。

5.5.2.4 通过磁化电流的自动扫描,也可以描绘出整个磁滞回线,该磁滞回线的对称中心,即 $B(H)$ 曲线的坐标原点,从而可求得剩磁 B_r 和矫顽力 H_{CB} 。

5.6 最大磁能积 $(BH)_{\max}$ 的确定

最大磁能积 $(BH)_{\max}$ 由退磁曲线上相应的 B 和 H 乘积的最大值确定,或者用退磁曲线与等磁能曲线相切的方法确定。

5.7 回复磁导率 μ_{rec} 的测定

5.7.1 冲击检流计的测量过程:根据需要取退磁曲线上某一点 P 作为回复线的基点(见图 1),然后选比 P 点绝对值小 ΔH 的磁场强度值,并围绕 ΔH 变换磁场,以使磁状态稳定。再按第 5.3 条和第 5.4 条分别测得 ΔB 值和相应的 ΔH 值, μ_{rec} 按(1)式计算。

5.7.2 用电子积分器的测量过程:按 5.2.2 条操作,当记录笔到达所需要的 P 点时,改变磁化场的变化方向,使其变化量为 ΔH 后再将记录笔回到 P 点,即得到回复线。由回复线的平均斜率,求得回复磁导率 μ_{rec} (见图 5)。

一般 μ_{rec} 沿退磁曲线不是常数,所以应标明相应的 H_p, B_p 和 ΔH 值。

5.8 试验装置的校准

5.8.1 试验装置应定期进行校准。试验装置所用的电流表,标准互感线圈,磁场探测器, J 测量线圈等,应定期送计量部门检定。

5.8.2 为了保证永磁材料磁参数测量的准确一致,采用国家计量部门检定的标准试样,对各个磁性参数的测量结果进行对比。标准试样应定期送计量部门检定。

5.9 试验报告

试验报告按需要可包括如下内容:

- 试样材料的牌号,几何尺寸;
- 所用仪器的类型;
- 饱和磁场强度 H_{max} 值;
- 剩磁 B_r ;
- 矫顽力 H_{CB} 或内禀矫顽力 H
- 最大磁能积 $(BH)_{max}$ 值及坐标 B_d 值和 H_d 值;
- 回复磁导率 μ_{rec} 值及 H_p 、 B_p 、 ΔH 值;
- 测量参数的不确定度;
- 测量时的环境温度;
- 对于磁各向异性的试样,标明磁化方向。

6 内禀矫顽力 H_{CJ} 大于 600 kA/m 永磁材料的测量

6.1 磁化场

对于内禀矫顽力大于 600 kA/m 的稀土永磁试样,从原始磁状态,用 $H_1 \approx 1 \sim 1.5 H_{CJ}$ 的磁场,就可以磁化到接近饱和,要测量退磁曲线,得到第二象限的数据并再磁化到最初的极性,则需要 $H_2 \approx 1.5 \sim 3 H_{CJ}$ 的磁场值。要完整地表征真正对称的磁化状态,则需要更高的 $H_3 \approx 3 \sim 5 H_{CJ}$ 的磁场值。

6.2 J 线圈

J 线圈采用绝缘良好的细软铜线,均匀地绕在无磁的线圈骨架上。磁通测量线圈和磁场补偿线圈应串联反接,根据电磁铁极面的大小和试样尺寸,可以采用同心形或双心形(见图 6)。

磁通测量线圈和磁场补偿线圈应满足如下关系:

$$N_1 A_1 - N_2 A_2 = 0 \quad \dots\dots\dots (12)$$

式中: N_1 —— 磁通测量线圈的匝数;

A_1 —— 磁通测量线圈的横截面积, m^2 ;

N_2 —— 磁场补偿线圈的匝数;

A_2 —— 磁场补偿线圈的横截面积, m^2 。

如果不满足上述关系时,可以用计算的方法进行修正。

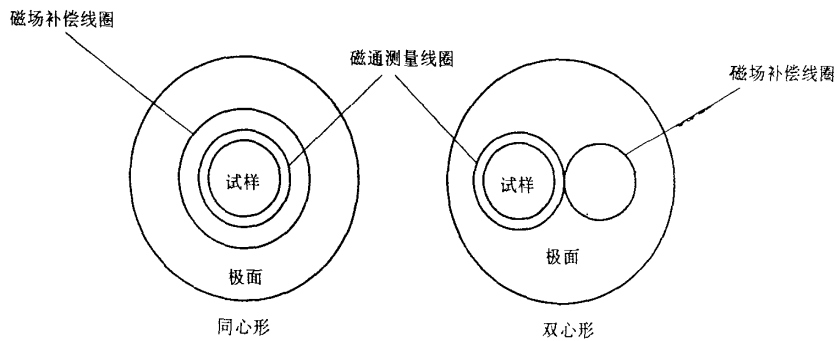


图 6 J 测量线圈

6.3 测量方法

除下述内容外,第 5 章中的内容一般仍有效。

6.3.1 测量前,用脉冲磁化器或超导螺线管磁化试样,最大磁化场强度至少为该材料内禀矫顽力 H_{CJ} 的 3~5 倍。测量用的磁化装置,其极头应有锁紧机构,以防止在高磁场下产生的机械力挤碎试样。

6.3.2 把空的 J 测量线圈和磁场探测器,置于杂散场小于 0.1 kA/m 的空间,仔细调整测量装置的零

点漂移,待测量装置稳定后,放下 X-Y 记录仪的笔,定出 $J(H)$ 曲线的坐标原点(0,0)。然后,把试样放入 J 测量线圈,注意试样的充磁方向,应与测量时磁化方向一致,按 5.4.2 条在磁化装置中夹紧。同时,将磁场探测器按 5.4.3 条置于两极面之间。

6.3.3 按照图 7,已充磁试样的磁状态设为 R 点,将试样装入两极头间,夹紧后的磁状态设为 Q 点,然后接通磁化电源,磁化试样,其磁化状态到达 A 点,此点即作为开始记录的起点。通常 A 点的磁场强度在 200 kA/m 以上。

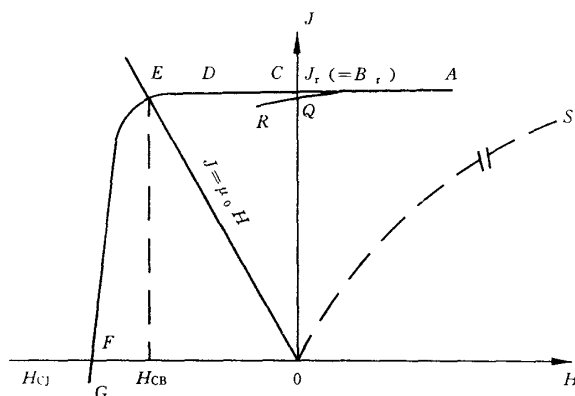


图 7 退磁曲线测量顺序

6.3.4 按照 ACDGF 的顺序,单调改变磁场,X-Y 记录仪便描绘出退磁曲线。

6.3.5 描绘完退磁曲线后,抬起 X-Y 记录仪的笔,调节磁化电源,使磁场回到零,从 J 测量线圈中取出试样。

6.3.6 也可以采用后定坐标原点的测量过程,即描绘完退磁曲线后,将磁场探测器移到杂散场小于 0.1 kA/m 的空间,同时将 J 测量线圈也移至杂散场小于 0.1 kA/m 的空间并从中取出试样,这时 X-Y 记录仪的笔便回到 $J(H)$ 曲线的坐标原点(0,0)。

6.3.7 剩磁 J_r 的确定:描绘出退磁曲线后,取退磁曲线与 J 坐标轴交点的磁极化强度值。

6.3.8 矫顽力 H_{CB} 和内禀矫顽力 H_{CJ} 的确定:取退磁曲线与 H 坐标轴交点的磁场强度值为 H_{CJ} ,与 $J = -\mu_0 H$ 直线交点的磁场强度值为 H_{CB} (见图 7)。

6.4 在实际工作中,如果需要 $B(H)$ 曲线可根据公式 $B = J + \mu_0 H$,由 $J(H)$ 曲线换算成 $B(H)$ 曲线,也可把 J 测量线圈换成 B 测量线圈,按照上述方法描绘出 $B(H)$ 曲线。但是,试样与 B 测量线圈之间的气隙要足够小,以减少测量误差。

6.5 试验报告

参照第 5.9 条。

附录 A
有关磁学量的 SI 单位
(补充件)

表 A1

量	名称	符号
磁通(量)	韦[伯]	Wb
磁场强度	安[培]每米	A/m
磁通密度	特[斯拉](韦[伯]每平方米)	T(Wb/m ²)
磁能积	焦[尔]每立方米	J/m ³
磁导率	亨[利]每米	H/m

国际单位制(SI)和电磁单位制(CGSM)的换算关系为:

$$1\text{Wb} = 10^8\text{Mx} \quad 1\text{A/m} = 4\pi \times 10^{-3}\text{Oe}$$

$$1\text{T} = 10^4\text{Gs} \quad 1\text{J/m}^3 = 4\pi \times 10\text{Gs} \cdot \text{Oe}$$

附录 B
部分永磁材料最低饱和磁化场强度
(补充件)

表 B1

材料牌号或种类	H_{\max} (kA/m)	说明
LN10	200	
LN8	240	
LNG13	240	
LNG20	240	
LNG32	240	
LNG40	240	
LNG52	240	
LNGT32	400	
LNGT56	400	
LNGT72	400	
铁氧体永磁	1 100	
FeCrCo	240	
SmCo5	3 200	初始饱和场
Sm2Co17	3 200	初始饱和场
PrSmCo5	2 400	初始饱和场
Ce(CoCuFe)5	1 600	初始饱和场
Sm2(CoCuFeZr)17	1 600	初始饱和场
Nd-Fe-B	3 000	初始饱和场

附 录 C
气隙对测量误差的影响
(补充件)

试样和极面间的气隙 δ 应尽可能小。由于气隙而产生的测量磁场的最大相对误差可按(C1)式估算:

$$\frac{\Delta H}{H} = - \frac{2\delta B}{\mu_0 L' H} \dots\dots\dots (C1)$$

式中: B —— 退磁曲线上给定点磁通密度, T;

H —— 退磁曲线上给定点磁场强度, A/m;

L' —— 试样长度, m;

δ —— 试样和极头表面的气隙, m;

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m。

当靠近 $(BH)_{\max}$ 点的磁场测量误差 $\Delta H/H$ 不大于 1% 时, 各种材料的最大气隙 δ 为:

铝镍钴永磁 $\delta = 0.00025 L'$

铁氧体永磁 $\delta = 0.005 L'$

稀土永磁 $\delta = 0.003 L'$

当上述气隙要求不能满足时, 磁场探测器应尽量靠近试样表面, 其尺寸应尽可能小, 一般磁场探测器的长度不大于试样长度的三分之一, 厚度不超过 3 mm。在这种情况下, δ 可适当放宽。

附加说明:

本标准由中华人民共和国机械电子工业部提出。

本标准由机械电子工业部桂林电器科学研究所归口。

本标准由机械电子工业部桂林电器科学研究所负责起草。

本标准主要起草人李光武、张福民。