铁磁材料的磁滞回线和基本磁化曲线

铁磁材料按特性分硬磁和软磁两大类，铁磁材料的磁化曲线和磁滞回线，反映该材料的重要特性，也是设计选用材料的重要依据。

【实验目的】

1、 掌握用磁滞回线测试仪测绘磁滞回线的方法。
2、 了解铁磁材料的磁化规律，用示波器法观察磁滞回线，比较两种典型铁磁物质的动态磁化特性。
3、 测定样品的基本磁化特性曲线(B_m-H_m 曲线)，并作μ—H 曲线。
4、 测绘样品在给定条件下的磁滞回线，估算其磁滞损耗以及相关的 H_c ，B_r ，B_m ，和[H B]等参数。

【实验仪器】

TH-MHC 型智能磁滞回线测试仪，示波器。

【实验原理】

铁磁物质是一种性能特异，用途广泛的材料。铁、钴、镍及其众多合金以及含铁的氧化物（铁氧体）均属铁磁物质。其特征是在外磁场作用下能被强烈磁化，故磁导率 μ 很高。另一特征是磁滞，即磁化场作用停止后，铁磁质仍保留磁化状态，图 1 为铁磁物质的磁感应强度 B 与磁化场强度 H 之间的关系曲线。

图中 1 的原点 O 表示磁化之前铁磁物质处于磁中性状态，即 B＝H＝O，当磁场 H 从零开始增加时，磁感应强度 B 随之缓慢上升，如线段 oa 所示，继之 B 随 H 迅速增长，如 ab 所示，其后 B 的增长又趋缓慢，并当 H 增至 H_S 时，B 到达饱和值 B_S，oabs 称为起始磁化曲线。图 1 表明，当磁场从 H_S 逐渐减小至零，磁感应强度 B 并不沿起始磁化曲线恢复到“O”点，而是沿另一条新的曲线 SR 下降，比较线段 OS 和 SR 可知，H 减小 B 相应也减小，但 B 的变化滞后于 H 的变化，这现象称为磁滞，磁滞的明显特征是当 H＝O 时，B 不为零，而保留剩磁 B_r。

当磁场反向从 O 逐渐变至－H_D 时，磁感应强度 B 消失，说明要消除剩磁，必须施加反向磁场，H_D 称为矫顽力，它的大小反映铁磁材料保持剩磁状态的能力，线段 RD 称为退磁曲线。

图 1 还表明，当磁场按 HS→O→HD→-HS→O→HD′→HS 次序变化，相应的磁感应强度 B 则沿闭合曲线 SRDS′R′D′S 变化，这闭合曲线称为磁滞回线。所以，当铁磁材料处于交变磁场中时（如变压器中的铁心），将沿磁滞回线反复被磁化→去磁→反向磁化→反向去磁。在此过程中要消耗额外的能量，并以热的形式从铁磁材料中释放，这种损耗称为磁滞损耗，可以证明，磁滞损耗与磁滞回线所围面积成正比。

当初始态为 H＝B＝O 的铁磁材料，在交变磁场强度由弱到强依次进行磁化，可以得到面积由小到大向外扩张的一簇磁滞回线，如图 2 所示，这些磁滞回线顶点的连线称为铁磁材料的基本磁化曲线，由此可近似确定其磁导率 $\mu = \frac{B}{H}$，因 B 与 H 非线性，故铁磁材料的 μ 不是常数而是随 H 而变化（如图 3 所示）。铁磁材料的相对磁导率可高达数千乃至数万，这一特点是它用途广泛的主要原因之一。

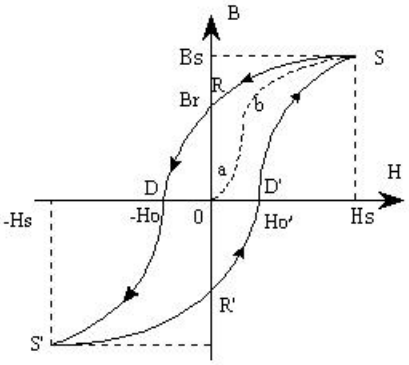

图 1 铁磁质起始磁化曲线和磁滞回线

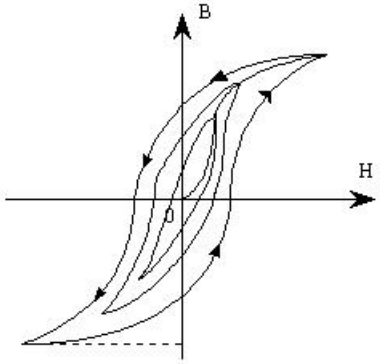

图 2 同一铁磁材料的一簇磁滞回线

可以说磁化曲线和磁滞回线是铁磁材料分类和选用的主要依据，图 4 为常见的两种典型的磁滞回线，其中软磁材料的磁滞回线狭长、矫顽力、剩磁和磁滞损耗均较小，是制造变压器、电机、和交流磁铁的主要材料。而硬磁材料的磁滞回线较宽，矫顽力大，剩磁强，可用来制造永磁体。

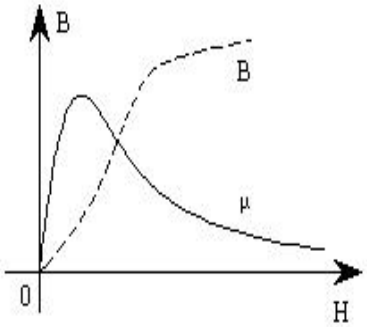

图 3 铁磁材料μ与 H 并系曲线

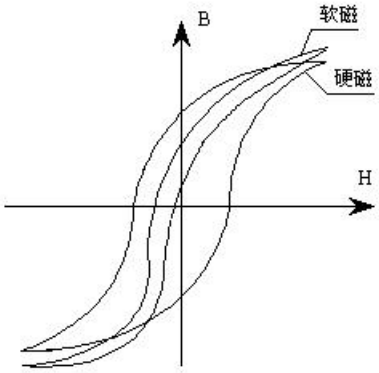

图 4 不同铁磁材料的磁滞回线

观察和测量磁滞回线和基本磁化曲线的线路如图五（TH/KH—MHC 型磁滞实验仪面板上）所示。

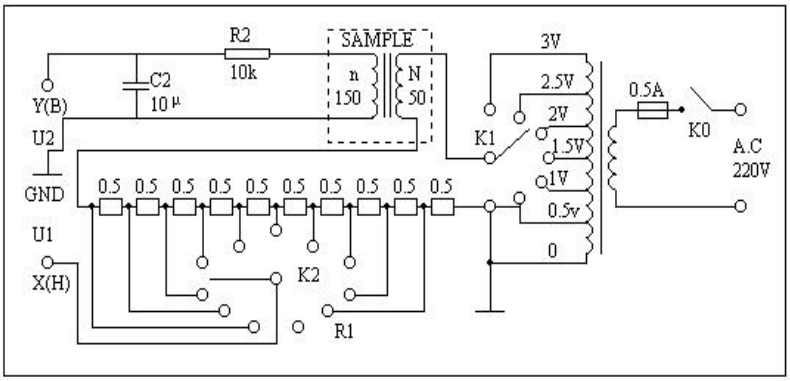

图 5　实验线路

待测样品为 EI 型矽钢片，N 为励磁绕组，n 为用来测量磁感应强度 B 而设置的绕组。R_1 为励磁电流取样电阻，设通过 N 的交流励磁电流为 i，根据安培环路定律，样品的磁化场强

$$H = \frac{Ni}{L}$$　　L 为样品的平均磁路

$$\because\ i = \frac{U_1}{R_1}$$

$$\therefore\ H = \frac{N}{LR_1} \cdot U_1 \qquad (1)$$

（1） 式中的 N、L、R_1 均为已知常数，所以由 U_1 可确定 H。

在交变磁场下，样品的磁感应强度瞬时值 B 是测量绕组 n 和 R_2C_2 电路给定的，根据法拉第电磁感应定律，由于样品中的磁通 φ 的变化，在测量线圈中产生的感生电动势的大小为：

$$\varepsilon_2 = n\frac{d\varphi}{dt}$$

$$\varphi = \frac{1}{n}\int \varepsilon_2 dt \qquad (2)$$

$$B = \frac{\varphi}{S} = \frac{1}{nS}\int \varepsilon_2 dt$$

S 为样品的截面积。

如果忽略自感电动势和电路损耗，则回路方程为

$$\varepsilon_2 = i_2R_2 + U_2$$

式中 i_2 为感生电流，U_2 为积分电容 C_2 两端电压设在 Δt 时间内，i_2 向电

容C_2的充电电量为Q，则

$$U_2 = \frac{Q}{C_2}$$

$$\therefore \varepsilon_2 = i_2 R_2 + \frac{Q}{C_2}$$

如果选取足够大的R_2和C_2，使$i_2 R_2 >> \frac{Q}{C_2}$，则

$$\varepsilon_2 = i_2 R_2$$

$$\because \ i_2 = \frac{dQ}{dt} = C_2 \frac{dU_2}{dt}$$

$$\therefore \varepsilon_2 = C_2 R_2 \frac{dU_2}{dt} \qquad (3)$$

由（2）、（3）两式可得

$$B = \frac{C_2 R_2}{ns} U_2 \qquad （4）$$

上式中C_2、R_2、n和S均为已知常数。所以由U_2可确定B_0

综上所述，将图5中的U_1和U_2分别加到示波器的“X输入”和“Y输入”便可观察样品的B－H曲线；如将U_1和U_2加到测试仪的信号输入端可测定样品的饱和磁感应强度B_S、剩磁R_r、矫顽力H_D、磁滞损耗〔BH〕以及磁导率μ等参数。

【实验内容】

1. 电路连接：选样品1按实验仪上所给的电路图连接线路，并令R_1＝2.5Ω，“U选择”置于O位。$\boldsymbol{U_H}$和$\boldsymbol{U_B}$（即U_1和U_2）分别接示波器的“X输入”和“Y输入”，插孔⊥为公共端。

2. 样品退磁：开启实验仪电源，对试样进行退磁，即顺时针方向转动“U选择”旋钮，令U从0增至3V，然后逆时针方向转动旋钮，将U从最大值降为O，其目的是消除剩磁，确保样品处于磁中性状态，即B＝H＝0，如图6所示。

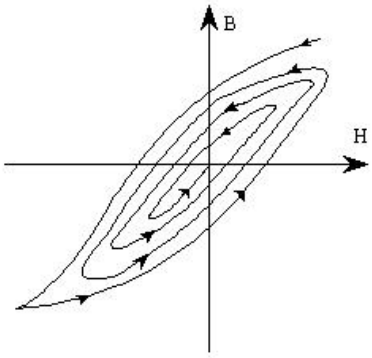

图 6　退磁示意图

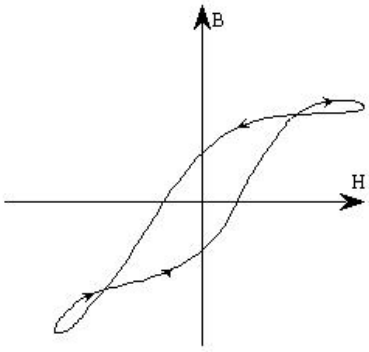

图 7 U_2 和 B 的相位差等因素引起的畸变

3.观察磁滞回线：开启示波器电源，令光点位于坐标网格中心，令 U＝2.2V，并分别调节示波器 x 和 y 轴的灵敏度，使显示屏上出现图形大小合适的磁滞回线（若图形顶部出现编织状的小环，如图 7 所示，这时可降低励磁电压 U 予以消除）。

4. 观察基本磁化曲线，按步骤 2 对样品进行退磁，从 U＝0 开始，逐档提高励磁电压，将在显示屏上得到面积由小到大一个套一个的一簇磁滞回线。这些磁滞回线顶点的连线就是样品的基本磁化曲线，借助长余辉示波器，便可观察到该曲线的轨迹。

5. 观察、比较样品 1 和样品 2 的磁化性能。

6. 测绘 μ－H 曲线：仔细阅读测试仪的使用说明（见附录），接通实验仪和测试仪之间的连线。开启电源，对样品进行退磁后，依次测定 U＝0.5，1.0…3.0V 时的十组 H_m 和 B_m 值，作 μ～H 曲线。

7. 令 U＝3.0V，R_1＝2.5Ω测定样品 1 的 B_m，B_r H_c 和［BH］等参数。

8. 取步骤 7 中的 H 和其相应的 B 值，用坐标纸绘制 B－H 曲线（如何取数？取多少组数据？自行考虑），并估算曲线所围面积。

以上磁滞回线基本实验内容均可以由 TH－MHC 型智能磁滞回线测试仪完成，该智能磁滞回线测试仪除可以完成磁滞回线基本实验内容外，还具有与 PC 机数据通讯的功能。用配带的串行通讯线将测试仪后面板上的 RS-232 串行输出口与 PC 机的一个串行口相连接，在 PC 机中运行 PCCOM.EXE 程序，计算机就可以读取测试仪采集的数据信号，将实验数据保存在硬盘里，并可以在计算机显示屏上显示磁滞回线和其他曲线，详细使用说明参见附录Ⅱ。

【实验数据与处理】

表一　　基本磁化曲线与μ－H 曲线

测试条件：　U=　　R_1=

U（V）	H×10^4 安/米	B×10^2 特斯拉	μ＝B/H 享利/米
0.5			
1.0			
1.2			
1.5			
1.8			
2.0			
2.2			
2.5			
2.8			
3.0			

表二.B-H 曲线　　H_D=　　B_r=　　B_m=　　[BH]=

测试条件：　U=　　R_1=

NO	H×10^4A/m	B × 10^2T	NO	H × 10^4A/m	H × 10^2T	NO	H × 10^4A/m	B × 10^2T

【思考题】

1、如果不退磁，我们做实验会有什么后果？

2、示波器显示的磁滞回线是真实的 H-B 曲线？如果不是，为什么可以用它来描绘磁滞回线？

注意事项

1、 由于本实验的附录部分是实验仪的使用说明，因此，实验前应仔细阅读。

2、 测试仪上的数位键，数据键用来样品参数设定，实验前已确定好，请勿乱动。

3、 对于示波器的使用，请参照课本示波器实验讲义。