

实验十一 磁性材料基本特性的研究

磁性材料在电力、通讯、电子仪器、汽车、计算机和信息存储等领域有着十分广泛的应用。磁滞回线和居里温度是表征磁性材料的两个基本特性。磁滞回线反映磁性材料在外磁场中的磁化特性，而居里温度则是磁性材料由铁磁性转变为顺磁性的相变温度。

本实验通过对软磁铁氧体材料居里温度及动态磁滞回线的测量，加深对这一磁性材料基本特性的理解。

【实验目的】

1. 了解磁性材料的磁滞回线和磁化曲线概念，加深对铁磁材料的主要物理量矫顽磁力、剩磁和磁导率的理解；
2. 利用示波器观察并测量磁化曲线与磁滞回线；
3. 测定所给定的铁磁材料的居里温度。

【实验原理】

1. 磁化性质

一切可被磁化的物质叫作磁介质。磁介质的磁化规律可用磁感应强度 B 、磁化强度 M 、磁场强度 H 来描述，它们满足以下关系

$$B = \mu_0(H + M) = (\chi_m + 1)\mu_0 H = \mu_r \mu_0 H = \mu H \quad (1)$$

式中， $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m 为真空磁导率， χ_m 为磁化率， $\mu_r = \chi_m + 1 = B/\mu_0 H$ 为相对磁导率，是一个无量纲的系数。 $\mu = \mu_r \mu_0$ 为绝对磁导率。对于顺磁性介质，磁化率 $\chi_m > 0$ ， μ_r 略大于 1；对于抗磁性介质， $\chi_m < 0$ ，一般 χ_m 的绝对值在 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 之间， μ_r 略小于 1；而铁磁性介质的 $\chi_m \gg 1$ ，所以， $\mu_r \gg 1$ 。

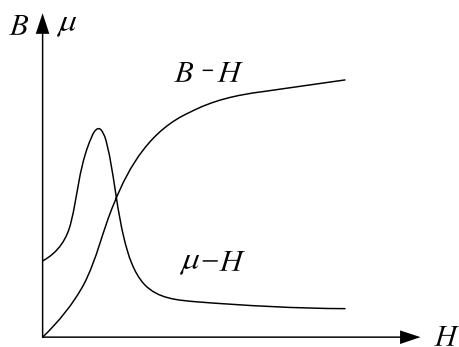


图1 磁化曲线和 $\mu \sim H$ 曲线

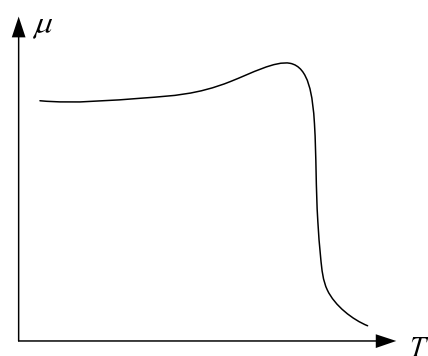


图2 $\mu \sim T$ 曲线

对非铁磁性的各向同性的磁介质, H 和 B 之间满足线性关系, $B = \mu H$, 而铁磁性介质的 μ 、 B 与 H 之间有着复杂的非线性关系. 一般情况下, 铁磁质内部存在自发的磁化强度, 当温度越低自发磁化强度越大. 图 1 是典型的磁化曲线 (B - H 曲线), 它反映了铁磁质的共同磁化特点: 随着 H 的增加, 开始时 B 缓慢的增加, 此时 μ 较小; 而后便随 H 的增加 B 急剧增大, μ 也迅速增加; 最后随 H 增加, B 趋向于饱和, 而此时的 μ 值在到达最大值后又急剧减小. 图 1 表明了磁导率 μ 是磁场 H 的函数. 从图 2 中可看到, 磁导率 μ 还是温度的函数, 当温度升高到某个值时, 铁磁质由铁磁状态转变成顺磁状态, 在曲线上变化率最大的点所对应的温度就是居里温度 T_C .

2. 磁滞性质

铁磁材料除了具有高的磁导率外, 另一重要的特性是磁滞现象. 当铁磁材料磁化时, 磁感应强度 B 不仅与当时的磁场强度 H 有关, 而且与磁化的历史有关, 如图 3 所示. 曲线 OA 表示铁磁材料从没有磁性开始磁化, B 随 H 的增加而增加, 称为磁化曲线. 当 H 值到达某一个值 H_S 时, B 值几乎不再增加, 磁化趋于饱和. 如使得 H 减少, B 将不再沿着原路返回, 而是沿另一条曲线 ACA' 下降, 当 H 从 $-H_S$ 增加时, B 将沿着 $A'CA$ 曲线到达 A 形成一闭合曲线. 其中当 $H = 0$ 时, $|B| = B_r$, B_r 称为剩余磁感应强度. 要使得 B_r 为零, 就必须加一反向磁场, 当反向磁场强度增加到 $H = -H_C$ 时, 磁感应强度 B 为零, 达到退磁, H_C 称为矫顽力. 各种铁磁材料有不同的磁滞回线, 主要区别在于矫顽力的大小, 矫顽力大的称为硬磁材料, 矫顽力小的称为软磁材料.

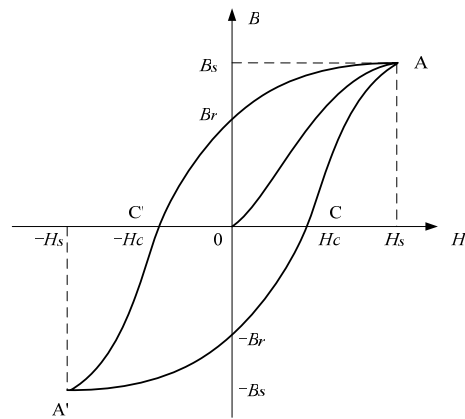


图 3 磁化曲线和磁滞回线

3. 用示波器测量动态磁化曲线和磁滞回线

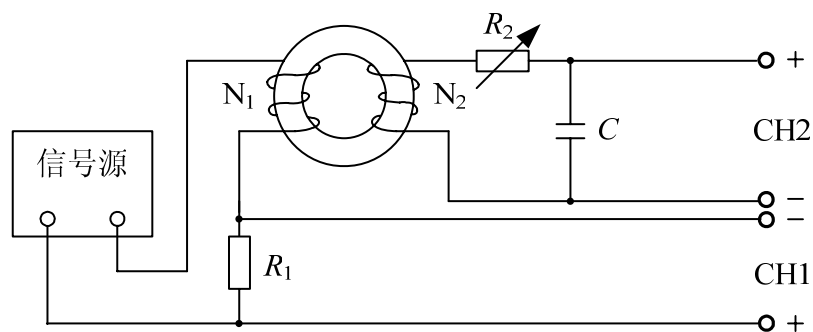


图 4 用示波器测量动态磁化曲线和磁滞回线的电路图

图 4 为用示波器测量动态磁化曲线和磁滞回线的电路图. 本实验研究的是闭合状的铁磁圆环样品, 铁磁样品平均磁路为 L , 励磁线圈的匝数为 N_1 , 若励磁电流为 i_1 时, 在样品内根据安培环路定律, 有

$$HL = N_1 i_1 \quad (2)$$

则示波器 X 轴偏转板输入电压

$$U_{R_1} = R_1 i_1 = \frac{R_1 L}{N_1} H \quad (3)$$

式中的 R_1 、 L 、 N_1 均为常数，这表明 X 轴输入电压的大小 U_{R_1} 与磁场强度 H 成正比。

设样品的截面积为 S ，根据电磁感应定律，在匝数为 N_2 的次级线圈中，感应电动势为

$$\varepsilon_2 = -N_2 S \frac{dB}{dt} \quad (4)$$

考虑带次级线圈的匝数 N_2 较少，自感电动势可忽略，在 R_2 、 C 所构成的回路中适当的选取 R_2 、 C 值使得 $R_2 \gg 1/\omega C$ ，则

$$\varepsilon_2 = R_2 i_2 \quad (5)$$

将 $i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du_C}{dt}$ 代入 (5) 式，并利用 (4) 式可得

$$U_C = -\frac{N_2 S}{R_2 C} B \quad (6)$$

上式表明 Y 轴输入的大小 U_C 与磁感应强度 B 成正比。

4. 用交流电桥测量居里温度

铁磁材料的居里温度可用任何一种交流电桥测量。交流电桥种类很多，如麦克斯韦电桥、欧文电桥等，但大多数电桥可归结为如图 4 所示的四臂阻抗电桥，电桥的四个臂可以是电阻、电容、电感的串联或并联的组合。调节电桥的桥臂参数，使得 CD 两点间的电位差为零，电桥达到平衡，则有

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_4} \quad (7)$$

若要上式成立，必须使复数等式的模量和辐角分别相等，于是有

$$\frac{|Z_1|}{|Z_2|} = \frac{|Z_3|}{|Z_4|} \quad (8)$$

$$\varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3 \quad (9)$$

由此可见，交流电桥平衡时，除了阻抗大小满足（8）式外，阻抗的相角还要满足（9）式，这是它和直流电桥的主要区别。

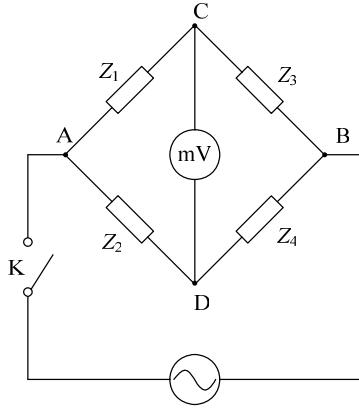


图5 交流电桥的基本电路

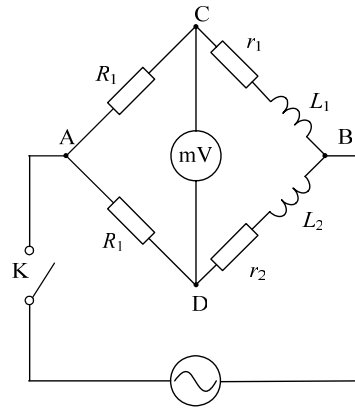


图6 RL 交流电桥

本实验采用如图5所示的 RL 交流电桥，在电桥中输入电源由信号发生器提供，在实验中应适当选择较高的输出频率， ω 为信号发生器的角频率。其中 Z_1 和 Z_2 为纯电阻， Z_3 和 Z_4 为电感（包括电感的线性电阻 r_1 和 r_2 ），其复阻抗为

$$Z_1 = R_1, Z_2 = R_2, Z_3 = r_1 + j\omega L_1, Z_4 = r_2 + j\omega L_2 \quad (11)$$

当电桥平衡时有

$$R_1(r_2 + j\omega L_2) = R_2(r_1 + j\omega L_1) \quad (12)$$

实部与虚部分别相等，得

$$r_2 = \frac{R_2}{R_1} r_1, \quad L_2 = \frac{R_2}{R_1} L_1 \quad (13)$$

选择合适的电子元件相匹配，在未放入铁氧体时，可直接使电桥平衡，但当其中一个电感放入铁氧体后，电感大小发生了变化，引起电桥不平衡。随着温度的上升到某一个值时，铁氧体的铁磁性转变为顺磁性， CD 两点间的电位差发生突变并趋于零，电桥又趋向于平衡，这个突变的点对应的温度就是居里温度。可通过桥路电压与温度的关系曲线，求其曲线突变处的温度，并分析研究在升温与降温时的速率对实验结果的影响。

由于被研究的对象铁氧体置于电感的绕组中，被线圈包围，所以当放入硅油中加热时，若加温速度过快，则硅油温度将与铁氧体实际温度不同（加温时，铁氧体温度低于油温，降温时，铁氧体温度高于油温），这种滞后现象在实验中必须加以重视。只有在动态平衡的条件下，磁性突变的温度才精确等于居里温度。

【仪器设备】

数字万用表，铂电阻温度计，加热装置，实验接线板，功率函数信号发生器，双踪示波器，被测样品和实验配件等。

【实验内容】

1. 在信号源频率（1 KHz ~ 2 KHz）一定条件下，观察 R_2 阻值不同时样品的磁化过程；
2. 选择合适的 R_2 值，测量此时的饱和磁滞回线；
3. 作磁滞回线图，同时计算这一条件下的样品参数（如 H_c 等）；
2. 用电桥法测量铁氧体的居里温度 T_C 。

【注意事项】

1. 测量过程中，需保持示波器的灵敏度 S_x 和 S_y 不变。

【参考资料】

- [1] 程守珠，江之永．普通物理学（第五版）．北京：高等教育出版社，1998
- [2] 赵凯华，陈熙谋．电磁学．北京：人民教育出版社，1980
- [3] 谢行怒，康士秀，霍剑青．大学物理实验（第二册）．北京：高等教育出版社，2001