



实验报告

姓名:黄德勇 学号:222023319210132 专业班级:材料物理3班 成绩:

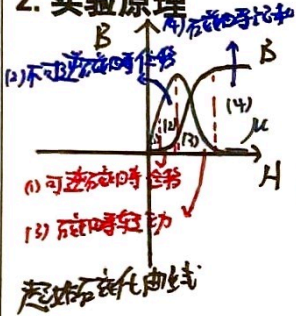
实验课程	材料物理性能学		
实验名称	用示波器观测铁磁材料的磁化曲线和磁滞回线		
实验时间		实验地点	

一、实验预习

1. 实验目的

- 掌握磁滞回线和磁化曲线的概念,加深对铁磁性材料主要物理量,矫顽力、剩磁和磁导率的理解.学会用示波器法观测基本磁化曲线和磁滞回线.
- 根据磁滞回线回线确定磁性材料的饱和磁感应强度 B_s , 剩磁 B_r 和矫顽力 H_c 的数值.研究不同频率下动态磁滞回线的区别.改变不同磁性材料,比较磁性材料的特性.

2. 实验原理



(1) 磁化曲线

铁磁性材料的磁导率 μ 不是常数,而是随磁感应强度 B 变化的非线性函数,即 $\mu = f(H)$. 从去磁状态 ($H=0, B=0$) 出发, 单调增加磁感应强度, 当 H 增大到一定值 H_s 后, B 几乎不再增加, 称为磁饱和. 从初始磁化到饱和磁化的这段曲线称为起始磁化曲线.

(2) 磁滞回线

铁磁性材料磁化饱和后, 若减小磁感应强度, B 的减小过程并不沿起始磁化曲线退回. 当 $H=0$ 时, B 仍保持一定数值 B_r , 称为剩磁 B_r . 要使得 B 降为零, 必须施加一个大小为 H_c 的反向磁感应强度, 称为矫顽力 H_c . 如此反复 $B-H$ 关系形成封闭的磁滞回线, B 的变化始终滞后于 H 的变化, 这种现象称为磁滞现象.

将各点 (磁化曲线的顶点) 连成的曲线即为基本磁化曲线. 测量前须先退磁 (使 $H=0, B=0$), 方法是通以交变电流同时减小励磁电流到零, 使材料磁化沿逐渐收缩的环路曲线回原点.

(3) 示波器测量原理

实验电路中在圆环状磁性样品上绕励磁线圈 N_1 匝, 和测量线圈 N_2 匝, N_1 通以交变电流 i_1 时, 由安培环路定律:

$$i_1 = \frac{HL}{N_1} \Rightarrow U_{R1} = \frac{L}{N_1} i_1 = \frac{L}{N_1^2} H$$

将 R_1 两端电压接示波器 X 轴, 则 X 方向反映外磁感应强度 H 的大小. 且在 N_2 串联上电阻 R_2 与电容 C 构成积分电路, 当满足 $R_2 \gg \frac{1}{\omega C}$ 时, 有电容的两端电压为:

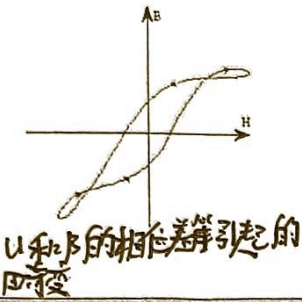
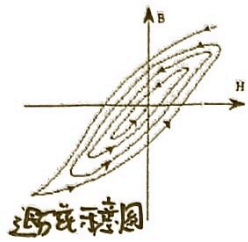
$$U_C = \frac{N_2 S}{C R_2} B$$

将 U_C 接示波器 Y 轴, 则 Y 方向偏转量反映磁感应强度 B 的大小.

用于示波器测 $B-H$ 曲线的实验线路图 由此, X、Y 轴转量均在示波器荧光屏上描绘出 $B-H$ 曲线 (磁滞回线)

各物理量换算关系: $H = \frac{N_1 S x}{L} x$, $B = \frac{C R_2 S y}{N_2 S} y$, 其中 S_x, S_y 分别为示波器 X、Y 方向的偏转因数 (单位: V/格), x, y 为荧光屏上的读数 (格). 且磁导率定义为 $\mu = \frac{B}{H}$ 起始磁率为 $H=0$ 时磁化曲线斜率对应的磁导率: $\mu_i = \lim_{H \rightarrow 0} \frac{dB}{dH}$

3. 实验内容



- (1) 观测样品1在不同频率交流信号(50Hz和150Hz)下的磁化曲线和磁滞曲线。
- (2) 观测样品2在50Hz交流信号下的磁化曲线和磁滞回线,并与样品1进行比较。
- (3) 由磁滞回线读取饱和磁感应强度 B_s , 剩磁 B_r , 矫顽力 H_c 的数值。
- (4) 丈量基本磁化曲线各点(顶点)坐标, 绘制 B-H 图并计算磁导率 μ , 绘制 μ -H 曲线。

二、实验过程

1. 实验装置

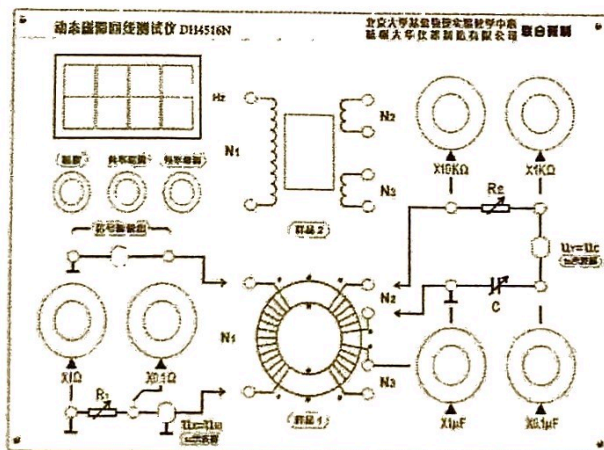
DH4516N型动态磁滞回线测试仪(含功率信号源,可调标准电阻 R_1, R_2 , 标准电容 C , 接口电路);示波器。

样品参数:

样品1(锰锌功率铁氧体,圆形罗兰环): $L = 0.130m$, $S = 1.24 \times 10^{-4}m^2$, $N_1 = N_2 = N_3 = 150$ 匝。

样品2(EI型硅钢片): $L = 0.075m$, $S = 1.20 \times 10^{-4}m^2$, $N_1 = N_2 = N_3 = 150$ 匝。

2. 实验装置示意图



实验线路按实验原理中的电路图接线,即:

R_1 串联于励磁回路 N_1 , 其两端电压 $U_x = U_{R1}$, 接示波器 X 输入端; N_2 回路中串联 R_2 与 C , 电容两端电压 $U_y = U_C$ 接示波器 Y 输入端, 示波器工作于 X-Y 方式, X、Y 输入均选 DC 方式。

3. 实验步骤

- ① 按实验装置示意图接线, 注意信号源、 R 、 S 、 C 的一端已共接地, 不可与其他接线端相连, 否则会造成短路。
- ② 逆时针调节幅度调节旋钮至底, 使信号输出最小; 调节显示方式为 X - Y 方式。
- ③ 接通示波器电源, 适当调节示波器光亮度, 预热 10 分钟。
- ④ 将示波器光点调整到屏幕中心, 调节频率为 500Hz 。
- ⑤ 退磁: 单调增加励磁电流至磁滞回线顶点 X 方向, 读数为 ± 0.0 格 (饱和), 再单调减小励磁电流至零, 完成退磁。
- ⑥ 测磁滞回线: 调节至饱和状态, 记录磁滞回线在 X 坐标分别为 -5.00 至 $+5.00$ 格点的 Y 坐标 (上支 Y_1 和下支 Y_2)。
- ⑦ 测基本磁化曲线: 退磁后, 单调增加励磁电流, 依次记录磁滞回线顶点 X 方向读数为 0.40 、 0.800 、...、 0.50 格时对应的方向读数。
- ⑧ 调节频率到 150.00Hz , 重复步骤 ⑤~⑦, 比较磁滞回线形状的变化。
- ⑨ 换用样品 2, 在 50Hz 下重复测量, 与样品 1 比较。

4. 实验现象记录和数据记录

基本实验参数 (DH4516 样品1, 硅铁铁合金体罗三环)

$R_1 = 1.0 \Omega$, $R_2 = 10 k \Omega$, $C = 1 \mu F$, 匝数 $N_1 = N_2 = 150$ 匝, 平均石蕊路长度 $L = 0.130 m$

X偏转因数 $S_x = 1.00 V/格$, Y偏转因数 $S_y = 0.100 V/格$. 铁芯截面积 $S = 1.24 \times 10^{-4} m^2$

H、B换算系数:

$$H = \frac{N_1 \cdot S_x}{L \cdot R_1} \cdot X = \frac{150 \times 1.00}{0.130 \times 1.0} \cdot X = 1154 X \text{ (A/m, X单位:格)}$$

$$B = \frac{C R_2 \cdot S_y}{N_2 \cdot S} \cdot Y = \frac{1 \times 10^{-6} \times 10 \times 10^3 \times 0.100}{150 \times 1.24 \times 10^{-4}} \cdot Y = 53.8 Y \text{ (A/m, Y单位:格)}$$

即每格 $H = 1154 A/m$; $B = 53.8 mT$.

样品1的各特征点坐标(格): [50Hz]

特征点	X/格	Y/格	H (A/m)	B (mT)
正向饱和点a (右上极值)	+3.0	+2.0	+3462	+107.6
上支剩磁点 (H=0, 上支)	0	+1.6	0	+86.1
上支矫顽力点 (B=0, 上支)	+0.8	0	+923	0
负向饱和点b (左上极值)	-2.5	-2.0	-2885	-107.6
下支剩磁点 (H=0, 下支)	0	-1.6	0	-86.1
下支矫顽力点 (B=0, 下支)	-0.8	0	-923	0

基本实验参数 (DH4516 样品2, EI型硅铁钢片)

$R_1 = 2.0 \Omega$, $R_2 = 10 k \Omega$, $C = 1 \mu F$, X偏转因数 $S_x = 5.0 V/格$, Y偏转因数 $S_y = 200 mV/格$

$L = 0.075 m$, $S = 1.20 \times 10^{-4} m^2$, $N_1 = N_2 = 150$ 匝.

H、B换算系数:

$$H = \frac{N_1 S_x}{L R_1} X = \frac{150 \times 5.00}{0.075 \times 2.0} X = 5000 X \text{ (A/m, X单位:格)}$$

$$B = \frac{C R_2 S_y}{N_2 S} Y = \frac{1 \times 10^{-6} \times 10^4 \times 0.200}{150 \times 1.20 \times 10^{-4}} Y = 111.1 Y \text{ (mT, Y单位:格)}$$

样品2的各特征点坐标(格): [50Hz]

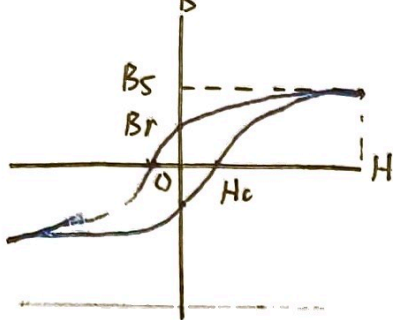
特征点	X/格	Y/格	H (A/m)	B (mT)
正向饱和点a	+3.0	+2.0	+1731	+107.6
上支剩磁点 (H=0)	0	+1.6	0	+86.1
上支矫顽力 (B=0)	+0.8	0	+462	0
负向饱和点b	-2.3	-2.0	-1444	-107.6
下支剩磁点 (H=0)	0	-1.6	0	-86.1
下支矫顽力	-0.8	0	-462	0

祝 5.14

三、分析讨论

1. 实验结果与分析

样品1 (软磁体) 的磁滞回线

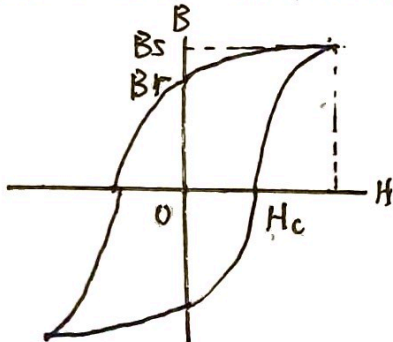


两种频率结果的对比

特征量	50Hz	150Hz	变化趋势
B_s (mT)	107.6	96.8	降低
B_r (mT)	86.1	80.7	降低
H_c (A/m)	462	635	增大
相对回线面积	较小	较大	增大
回线形状	较细长	变得有“微胖”	更宽

- H_c 随频率变大: 150Hz时铁动力从462变到635A/m, 是因为频率升高后, 磁畴运动的惯性效应增强, 需要更大的反向磁场才能使畴壁越过钉扎中心, 动态矫顽力大于静态值。
- 回线面积增大: 高频下每个周期内涡流损耗 $\propto f^2$ 增大, 加上磁滞损耗本身 $\propto f$, 导致150Hz的回线围成的面积明显大于50Hz, 意味着每周期铁芯损耗变大, 这正是功率铁芯需要在特定频率范围使用的原因。

样品2 (硬磁体) 的磁滞回线



两种频率结果的对比

特征量	50Hz	150Hz	变化趋势
B_s (mT)	~222	~61	急剧下降
B_r (mT)	~167	-	-
H_c (A/m)	~9000	-	-
相对回线面积	胖的够	近似椭圆	严重畸变
回线形状	大	瘦	大幅减小

150Hz硅钢片回线蜕变为椭圆的原因: 硅钢片是金属导体, 电阻率低 (约 $10^{-7} \Omega \cdot m$ 量级), 当频率升高后, 涡流损耗 $P_e \propto f^2 B^2$ 急剧增大, 涡流产生的反向场强烈阻碍磁通变化即楞次定律, 等效上使材料内部实际感受到的磁场强度大幅小于施加的外场, 在150Hz时涡流效应几乎完全主导, B-H关系变为非线性 (类似高损耗电感), 因此回线呈椭圆形而非典型的磁滞回线

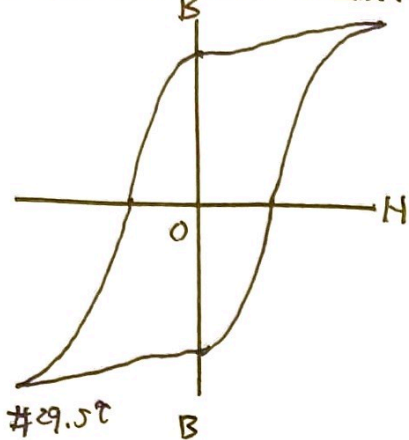
与样品1和样品2的对比分析

	铁磁材料 (样品1)	硅钢片 (样品2)
电阻率	$10^0 \sim 10^2 \Omega \cdot m$ (半绝缘级)	$\sim 10^{-7} \Omega \cdot m$ (金属量级)
涡流	较小	显著
频率	高频 (kHz ~ MHz)	工频 (50/60Hz)
典型应用	开关电源变压器、滤波器等	电力变压器、电机铁芯

样品1在150Hz下回线仅保持细长的形状; 样品2回线几乎消失, 铁导体因电阻高而适用于高频, 硅钢片因涡流大只适用于工频。

2. 问题提出与讨论

什么是材料的居里温度？当温度升高时磁滞回线如何变化？



在居里温度以下，铁磁性材料内部存在自发磁化，交换作用使相邻原子磁矩趋于平行排列，形成磁畴，材料具有较高磁导率，B-H关系呈非线性有磁滞回线。

当温度上升到 T_c (居里温度) 时，热能 $k_B T$ 与自发交换能 J_{ex} 相当，于是：

$$k_B T_c \sim 2J_{ex}$$

热扰动瓦解自发磁化过程，材料发生铁磁体到顺磁体的二级相变且为连续相变：

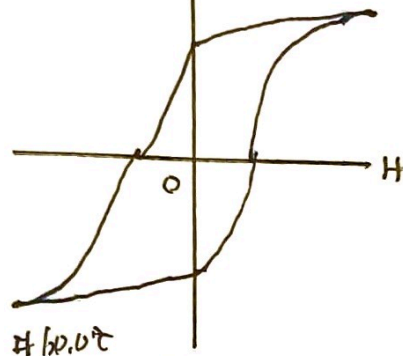
① 自发磁化强度 $M_s \propto (T_c - T)^\beta \rightarrow 0$

一般 $\beta \approx 0.5$ 均场，在下面的实验中为约 0.33。

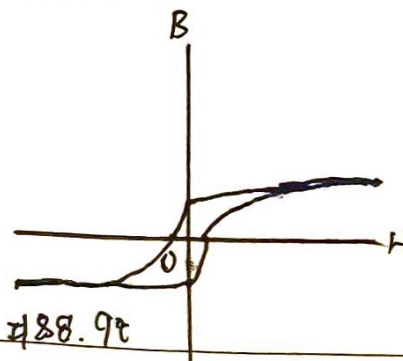
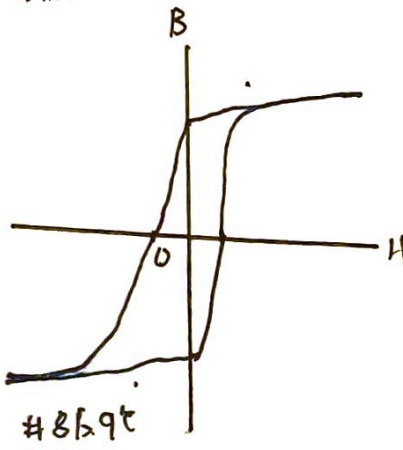
② 磁滞回线下降至 $\mu_0 H_c$ 。

③ 磁感应力线图中的感生电动势 $E_{ind} \propto \mu_0 \frac{dH}{dt} \rightarrow$ 接近零。

由 IVD-II 中的温度与 E_{ind} ，绘出 B-H 曲线，有以下数据：



温度 T (°C)	感生电动势 (mV)	示波器的曲线形状	磁体判断
29.5	1961	清晰而稍扁回线	铁磁性
60.0	1880	仍为完整磁滞回线	铁磁性
82.0	1209	回线明显变窄	铁磁性减弱
86.9	287	回线开始收缩	向顺磁过渡
104.0	≈ 0	完全退化为小平线	顺磁性



指导教师签名:

日期:

四、其它

备注：

1. 第四部分（其它）由教师自行规定填写内容，可为课程大纲设置但本实验报告前三部分未包含在内的学习任务。
2. 若本课程不涉及其它内容，教师不需要在第四部分后的“指导教师签名”处签名。

A large, empty rectangular box with a thin black border, occupying most of the page. It is intended for the main content of the document.

指导教师签名:

日期: