

## 材料科学基础实验报告

实验名称： 磁性材料基础测量

学 号： 22301056      姓 名： 王俊杰      班 级： 22 材物

合作者： 无      桌 号：           

指导教师： 李继玲

实验日期：           

### 实验考核

项目	实验预习	实验过程	分析与讨论	总评
评价				

## 第一部分 静态磁化特性

### 1 实验目的

- 掌握测量铁磁材料磁滞、动态磁滞回线和基本磁化曲线的原理和方法，加深对铁磁材料基本磁性参量的理解
- 学习用电子积分器测量磁感应强度
- 学会根据磁性材料的磁性曲线确定其矫顽力、剩余磁感强度、饱和磁感强度，磁滞损耗、磁滞损耗等磁化参数
- 学习测量磁性材料磁导率  $\mu$  的一种方法，了解磁性材料的主要特性
- 声明：本次实验是在已经了解磁化电流不应超过 0.8 A 的前提下，已经结合了先前实验同学的经验，想尝试找到饱和磁化电流的基础下，以保证安全为首要目的，将电流缓慢试探性提高接近 1 A，事实证明，1 A 仍不能达到饱和。

### 2 实验原理

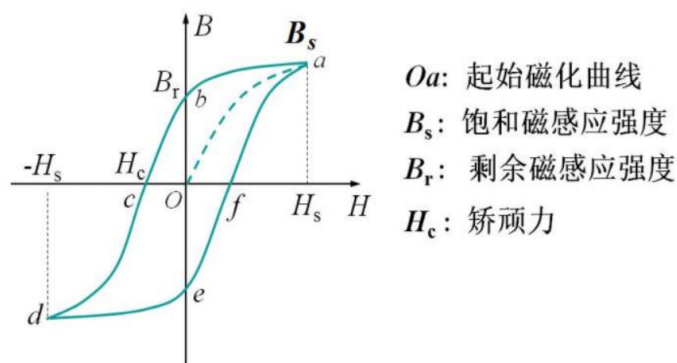
铁磁材料应用广泛，从常用的永久磁铁、变压器铁芯到录音、录像、计算机存储用的磁带、磁盘等都采用各种特性的铁磁材料。铁磁材料多数是铁和其他金属元素或者非金属组成的合金以及某些包含铁的氧化物（铁氧体），他们除了具有高的磁导率外，另一个重要的磁性特点就是磁滞。铁磁材料的磁滞回线和磁化曲线表征了磁性材料的基本磁化规律，反应了磁性材料的基本参数。对铁磁材料的应用和研制有重要意义。由于磁性材料的磁化过程很复杂，影响磁性材料磁化特性的因素有很多，如：掺杂、结构、温度等。在多数场合无法用解析式来定量描述  $H-B$  之间的关系，只能通过实验测定它。本实验中，将待测的磁性材料做成闭合环状，上面均匀地绕两组线圈。给其中一组线圈通电流  $I$ ，使其产生强度为  $H$  的磁化场，这组线圈称为初级线圈。当初级线圈中的电流发生变化时，在另外一组线圈即次级线圈中，将产生感应电动势  $\varepsilon$ ，用电子积分器测出  $\varepsilon$ ，经计算可以得到  $B$ ，根据  $H-B$  的对应关系可以绘出它们的曲线。

#### 2.1 初始磁化曲线

研究磁性材料的磁化规律，通常是通过测量磁化场的磁感强度  $H$  与磁感应强度  $B$  的关系来进行的。磁化曲线也叫  $B-H$  曲线，即表示物质中的磁场强度  $H$  与所感应的磁感应强度  $B$  之间关系的曲线。铁磁材料的磁化过程非常复杂， $B$  和  $H$  的关系如图1所示。将处在未磁化状态的磁性材料( $H=0$ 、 $B=0$ )加以磁化，当逐渐增加磁场强度  $H$  时，磁感强度  $B$  也随之增加而非线性增加，经过一段急剧增加的过程后又缓慢下来，当  $H$  增大到一定值  $H_s$  后， $B$  增加十分缓慢或者基本不再增加，这时磁化就达到了磁饱和。到达磁饱和的  $H_s$  和  $B_s$  分别称为饱和磁场强度和饱和磁感应强度(对应图1-1中的a点)。从未磁化到饱和磁化， $H$  和  $B$  对应的关系曲线称为初始磁化曲线或者起始磁化曲线。如图1-1中  $Oa$  所示。

#### 2.2 磁滞回线

磁性材料还有一个重要的特性，那就是磁滞。磁滞是指  $B$  的变化滞后于  $H$  的变化。如图1-1所示，当磁性材料的磁化达到饱和之后，如果使  $H$  单调减小， $B$  不沿原路沿  $aO$  返回，而是沿一条新



的路线(沿abc)下降。当  $H$  减小到 0,  $B$  并不为 0, 而是到达  $B_r$ , 说明此时铁磁材料中仍然保留有一定的磁性, 这种现象称为磁滞效应,  $B_r$  称为剩余磁感强度, 简称剩磁。要消除剩磁使  $B=0$  就得加一个反向的磁化场, 直到反向磁化场到达  $H_c$ ,  $B$  才恢复为零。 $H_c$  被称为矫顽力。如果继续增加反向的磁化场使  $H$  继续增加, 铁磁材料将被反向磁化直至达到反向饱和, 此后减小磁化场  $H$  直至 0, 再沿正方向增加  $H$  至饱和, 曲线回到  $a$  点。由此得到一条  $H-B$  的闭合曲线, 这条关于原点对称的闭合曲线, 称为该材料的磁滞回线。如图1-1所示。实验表明, 经过反复的磁化后, 铁磁材料达到稳定的磁化状态,  $B-H$  的量值关系形成一个稳定的闭合“磁滞回线”, 通常以这条曲线来表示铁磁材料的磁化性质。

## 2.3 基本磁化曲线

当从初始状态( $H=0$ ,  $B=0$ )开始周期性地改变磁场强度 $H$ 的幅值时, 在磁场由弱变强单调增加过程中, 可以得到一系列面积由小到大的稳定的磁滞回线, 如图1-2所示, 其中最大面积的磁滞回线称为极限磁滞回线, 把图1-2中原点 $O$ 和各个磁滞回线的顶点  $a_1, a_2$  等连成曲线, 此曲线即为铁磁材料的基本磁化曲线。不同的铁磁材料其基本磁化曲线是不相同的。根据基本磁化曲线可以近似确定铁磁材料的磁导率  $\mu$ 。从基本磁化曲线上一点到原点  $O$  连线, 其斜率  $\mu = B/H$  定义为这种磁化状态下的磁导率。

## 2.4 测量原理

测量电路如讲义图 1-3 所示, 图中  $A$  为环状磁性材料,  $N_1$ 、 $N_2$  分别为绕在其上的初、次级线圈的匝数;  $M$  为互感器;  $R_0$  是取样电阻, 阻值为  $1\ \Omega$ ; 电子积分器用于测量  $B$ , 由运算放大器等构成。 $K_1$ , 电流换向开关;  $K_2$ , 选择测量开关;  $K_3$ , 复位按钮开关;  $E$ , 可调电源。

磁化场  $H$  和磁感应强度  $B$  表示为:

$$H = \frac{N_1 U_x}{L R_0} \quad (1)$$

$$B = \frac{\tau U_0}{S N_2} \quad (2)$$

实验时只要单调、缓慢地改变磁化电流  $I_0$ , 计算机就可以同步画出与  $H \sim B$  关系相对应的  $U_x \sim U_0$  曲线。 $U_0$ 、 $U_x$  的大小可以分别从计算机所绘的曲线上求得。

# 3 实验仪器

静态磁特性参数测量仪, 直流电源, 计算机

## 4 实验过程

- 1. 开启电脑，运行静态磁性测量仪应用程序，并熟悉各种操作功能；
- 2. 测量初始磁化曲线：包括手动退磁和测绘曲线两个步骤
- 3. 测量磁滞回线
- 4. 测量基础磁化曲线

## 5 实验数据

### 5.1 实验仪器

表 1: 实验仪器各项参数

内径	外径	高度	$N_1$	$N_2$	$\tau$	$L$	$S$
30 mm	50 mm	20 mm	2	52	0.0101	125.66 mm	400 mm <sup>2</sup>

### 5.2 数据处理

根据实验数据可绘制如下图形。

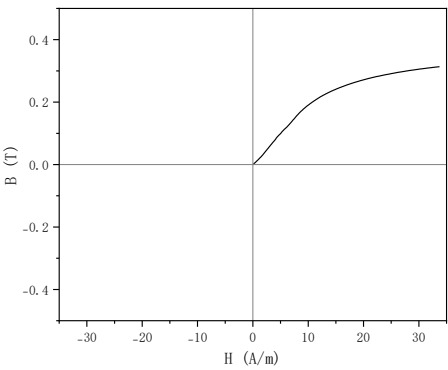


图 1: 初始磁化曲线

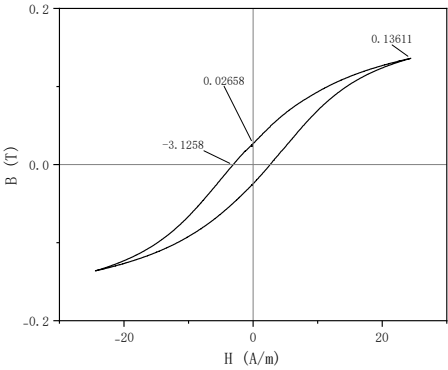


图 2: 磁滞回线

## 6 结果分析

从图像中可以读出：在 0.8 A 的电流条件下，饱和磁感应强度  $B_s = 0.13611$  T，剩余磁感强度  $B_r = 0.02658$  T，矫顽力  $H_c = -3.1258$  A m<sup>-1</sup>

### 6.1 误差分析

#### 6.1.1 系统误差

- 1. 环境：实验当天的温度、湿度所带来的误差。

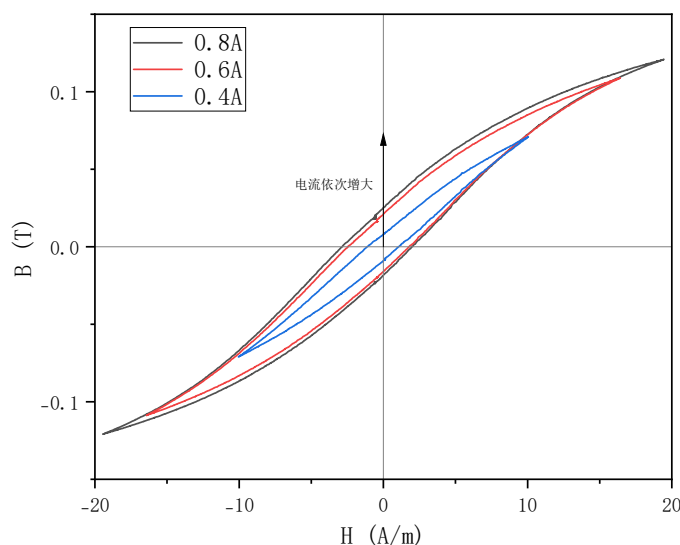


图 3: 基本磁化曲线

2. 仪器本身精度的影响，如仪器本身测量和取点可能存在的系统误差。
3. 铁磁体的形状可以对其磁滞回线产生复杂的影响，这取决于几何形状、尺寸、边界效应以及材料内部的不均匀性等因素。铁磁体中的孔洞、裂缝或不均匀性也可能影响磁滞回线。这些不均匀性会导致磁场分布不均匀，从而影响磁滞回线的形状和特性。

### 6.1.2 偶然误差

1. 在对数据进行四舍五入和拟合分析时，可能会产生偶然误差。
2. 在读取最大电流值时，可能会由于目测而产生读取数据的误差。

### 6.1.3 有关减小误差的改进方案

1. 可以使用测量精度更高的仪器来减小仪器所带来的测量误差。
2. 数据处理过程中，尽可能用测量数据直接代入总计算式进行整体运算，减小对中间数据四舍五入所带来的误差。

## 7 思考题

### 7.1 测量初始磁化曲线时，为何没有出现 B-H 的饱和区？

测量初始磁化曲线时没有出现 B-H 的饱和区主要是由于所加的外加磁场强度不足以使全部磁畴转向外磁场方向。在实验中通常采用较小的磁场强度范围和较低的频率，以避免对样品造成不可逆的磁化。本次实验所使用的最大电流为 0.8 A，因此测量时所提供的磁场强度可能不足以使材料磁化强度达到饱和状态。要使初始磁化曲线出现 B-H 饱和区，可以通过增加线圈的匝数或增大电流的强度来增加磁场强度，从而达到 B-H 饱和区的部分。

## 7.2 实验中为何多次强调要单调地改变电流？否则会出现什么样的结果？

在测量磁滞回线时，强调要单调地改变电流是为了确保测量结果的准确性和可重复性。如果电流改变不单调，即存在来回变化或突变，可能会导致以下问题：

1. 不可逆磁化: 在材料中引入不可逆的磁化，导致测量结果不准确。这是因为在不可逆磁化的情况下，磁化曲线的形状会发生变化，导致磁滞回线的形状不稳定。
2. 额外的磁场分量: 来回变化的电流可能导致材料中存在额外的磁场分量，这会使测量结果产生误差。
3. 磁场历史效应: 如果电流改变不单调，可能会使材料的磁场历史效应变得复杂，从而使得测量结果难以解释和分析。

## 7.3 根据从初始磁化曲线上求出的 $B$ 和 $H$ ，能否绘出磁导率 $\mu$ 与 $H$ 关系的曲线？（ $\mu = dB/dH \approx \Delta B/\Delta H$ ）

可以，根据  $\mu = dB/dH$ ，我们可以在初始磁化曲线上取出所有求得的  $B$  和  $H$ ，并通过逐级做差计算出  $dB$  和  $dH$  并计算  $\mu$ ，进而绘制出磁导率  $\mu$  与  $H$  关系的曲线，绘制结果如图 4 所示。由图可知，磁化率呈现先上升后下降并逐渐趋于平缓的趋势，这与实验事实相符，反映了磁畴逐渐全部转换到外磁场方向最终保持不变的状态。

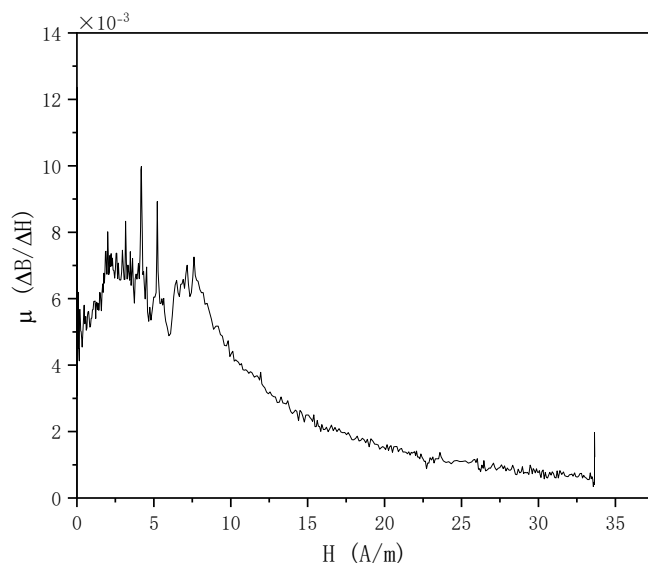


图 4: 磁化率变化曲线

## 第二部分 交流磁化率

### 1 实验目的

- 理解磁化率的基本概念并了解物质磁性的分类

- 观察铁磁性转变及转变温度（居里温度）
- 测量不同铁磁样品的交流磁化率随温度的变化曲线
- 掌握测量不同铁磁样品的交流磁化率

## 2 实验原理

在给定的外界条件(T为常数)下, 若材料各向异性, 且  $M \propto H$ , 则磁化强度  $M$  和磁化率  $\chi$  的关系为  $M = \chi H$ 。它的大小反映了物质磁化的难易程度, 可正、可负, 决定于材料的不同磁性类别。磁化率有三种表示形式,  $\chi_V$  表示单位体积(每  $\text{cm}^3$ )的磁化率,  $\chi_A$  表示每摩尔的磁化率,  $\chi_g$  表示单位质量(每 g)的磁化率, 它们之间的关系为:

$$\chi_A = \chi_V V = \chi_g A = \frac{\chi_A A}{\delta} \quad (3)$$

式中,  $A$  为原子量,  $V$  为每摩尔的体积,  $\delta$  为比重。磁体根据物质的磁化率大小和符号大致分为: 抗磁性、顺磁性、反铁磁性、铁磁性和亚铁磁性。在外磁场作用下, 抗磁性材料产生与其方向相反的磁矩, 顺磁性材料产生方向相同的微弱磁性, 遵循居里定律或居里-外斯定律。反铁磁性材料在一定温度下表现出与顺磁性相似的磁性, 但在临界温度以上其磁化率降低并趋于定值, 称为奈耳温度。铁磁性材料在小磁场下能被磁化到饱和, 具有非线性的磁化强度和磁场关系, 并在磁化过程中出现磁滞现象, 其磁性随温度变化, 居里温度是其特征参数。亚铁磁性材料与铁磁性相似, 但磁化率较低, 内部磁结构与反铁磁性相同。

磁性物质具有自发性的磁偶极矩, 在外加磁场下, 物质中的磁偶极方向会因外界磁场作用而倾向沿着外加磁场方向。而当外加磁场是交变磁场且交流频率不太高时 (一般在微波频率以下), 磁偶极的方向可随着此外加交变磁场, 做来回周期性振荡, 此即交流磁化率的物理原因, 交流磁化率  $\chi$  可表示为:

$$\chi(\omega) = \chi'(\omega) + i\chi''(\omega) \quad (4)$$

交流磁化率测量方法主要有两类:一是交流互感电桥, 如哈特森电桥。二是自感法, 即测量样品在线圈中引起的电感变化。本实验采用自感法。

## 3 实验仪器

锁相放大器、锁相波形发生器和加热炉、待测样品、计算机等

## 4 实验过程

1. 连接设备并启动软件
2. 测量系统偏置
3. 加热样品
4. 调整本底电压
5. 控制升温速率, 测量降温
6. 数据处理

## 5 数据处理

1. 绘制出的温度、实部电压、虚部电压随时间变化曲线如图 5。

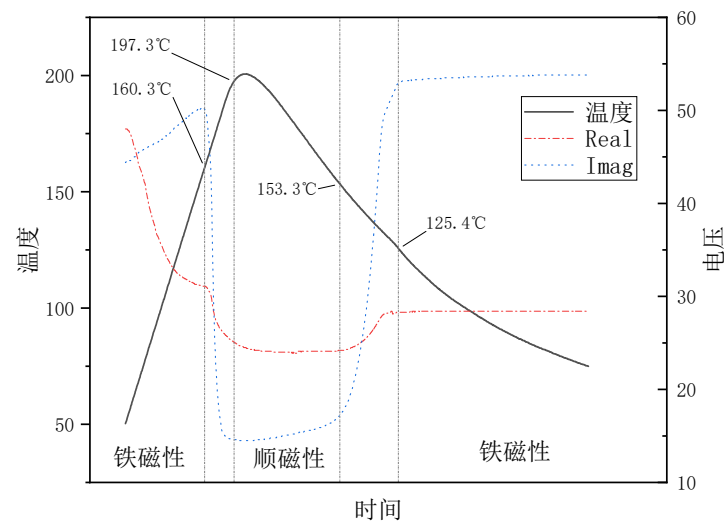


图 5: 各物理量随时间变化图

2. 绘制出的实部电压、虚部电压随温度变化曲线如图 6。

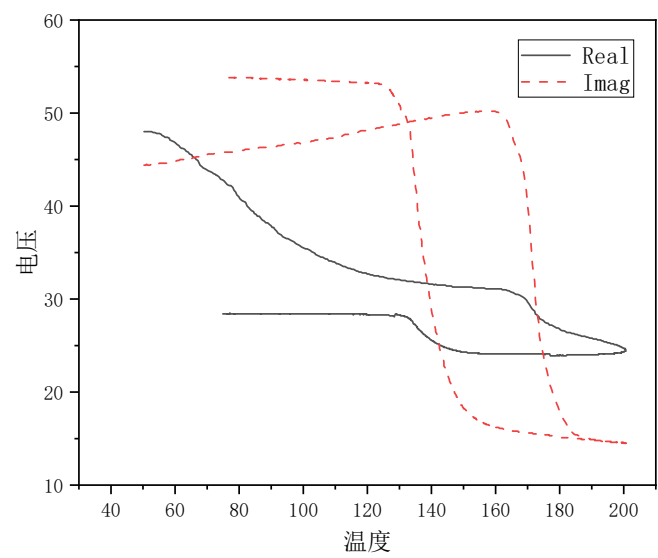


图 6: 实部电压、虚部电压随温度变化曲线



3. 绘制出的磁化率随温度变化曲线如图 7。其中磁化率  $\chi_g = CV(T)$ ， $C$  为互感电桥的常数。

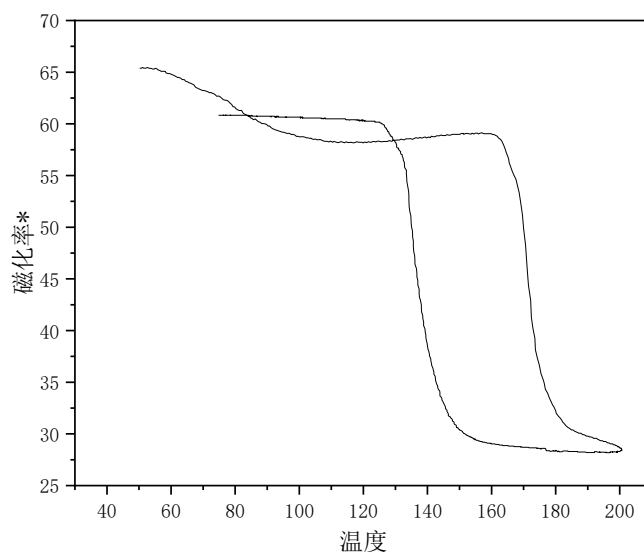


图 7: 磁化率随温度变化曲线

## 6 结果分析

### 6.1 图像分析

1. 由图 5 可以看出，在一定时间段内，实部和虚部的绝对值都减小，形成一个类似于凹槽的形状。这个时间段体现了由铁磁体向顺磁体转化时，电压值的变化。电压值变小说明这一过程中磁导率是下降的。
2. 由图 6 可以看出，在温度到达一定的值时，铁磁体会转变成为顺磁体，使得磁导率下降，电压值减小。同时可以发现，转变过程中，相同温度下降温曲线电压值的绝对值小于升温曲线，说明降温时的转变温度低于升温，体现了铁磁性转变的迟滞性。
3. 由图 7 可以读出，居里温度  $T_c = 165^\circ\text{C}$ ，即将转化为顺磁体的磁导率约为 60。

### 6.2 误差分析

#### 6.2.1 系统误差

1. 材料：铁磁体材料存在各向异性，可能会对实验造成一定的影响。
2. 环境：实验当天的温度、湿度所带来的误差。
3. 仪器：仪器本身精度的影响，如仪器本身测量和取点可能存在的系统误差。
4. 电磁屏蔽：实验仪器的网罩可能无法完全电磁屏蔽，周围的磁场会影响实验结果。

## 7 思考题

### 1. 铁磁性转变应是怎样的曲线，陡峭与否与哪些因素有关？

答：(a) 铁磁性转变曲线在本实验中是指磁化率和温度的关系曲线，即  $\chi$ -T 曲线。当升高温度时，铁磁性材料的磁性会发生，这个温度称为居里温度 ( $T_c$ )。在  $T_c$  以下，铁磁性材料表现出铁磁性，而在  $T_c$  以上则表现出顺磁性。因此，在相变时，即温度在居里温度附近，铁磁性转变曲线会有一个陡峭的突变，而在其他地方，曲线应该是一条水平的直线。

(b) 影响曲线陡峭的因素主要有以下几点：

- i. 材料的磁性质：不同的铁磁材料具有不同的磁性质，例如饱和磁化强度和矫顽力。这些参数会影响铁磁性转变曲线的形状和陡峭程度。例如，高饱和度的材料通常具有更为陡峭的转变曲线。
- ii. 晶格结构和微观结构：晶格结构的对称性、晶体缺陷、晶粒尺寸等因素都会影响到磁性转变的形状和陡峭程度。

### 2. 为什么必须缓慢加热试样？

答：因为试样在  $T_c$  时的  $\chi$ -T 曲线会非常陡峭，这意味着突变区间很短。仪器取点是有最小分度的。因此，加热试样过快会导致无法准确测出突变区间中间的温度。除此之外，缓慢加热还可以使样品受热更加均匀，避免产生局部过热的现象。