

材料科学基础实验报告

实验名称: 磁性材料基础测量: 静态磁化特性和交流磁化率

学 号: 22301079 姓 名: 张展铭 班 级: 22 材化

合作者: _____ 桌 号: _____

指导教师: _____

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				

实验内容一 铁磁性材料的静态磁性测量

【实验目的】

1. 掌握测量软磁材料起始磁化曲线、磁滞回线、基本磁化曲线的方法，并学会根据磁性材料的磁性曲线确定其关键参数，如矫顽力、剩余磁感强度、饱和磁感强度，磁滞损耗；
2. 学习用电子积分器测量磁感应强度；
3. 加深对绘图工具运用的熟练程度；
4. 理解铁磁材料的磁性特性，了解在实际应用中的选择和设计方案。

【实验原理】

铁磁材料具有高磁导率和磁滞两大特性。磁滞回线和磁化曲线是表征材料的磁性特性的重要手段。本实验将磁性材料制成闭合环，并在其上均匀缠绕两组线圈。通过给其中一组通入电流产生磁化场，以在另一组中产生感应电动势，进而使用电子积分器测量得到磁感应强度和磁化曲线，从而研究材料的磁化规律。

1. 初始磁化曲线是描述磁性材料从未经磁化状态开始，逐渐增加磁场强度 H 而产生磁感应强度 B 的曲线。如图 1 所示，该曲线展现了磁性材料在初始磁化过程中的非线性响应特性。

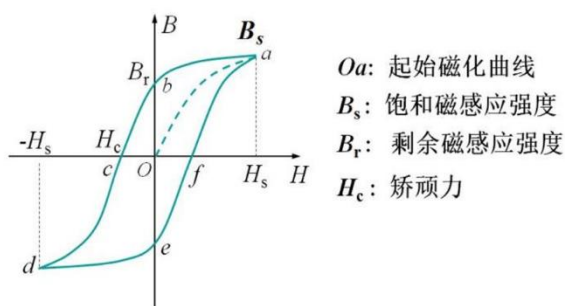


图 1 初始磁化曲线和磁滞

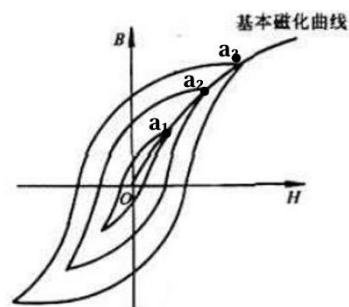
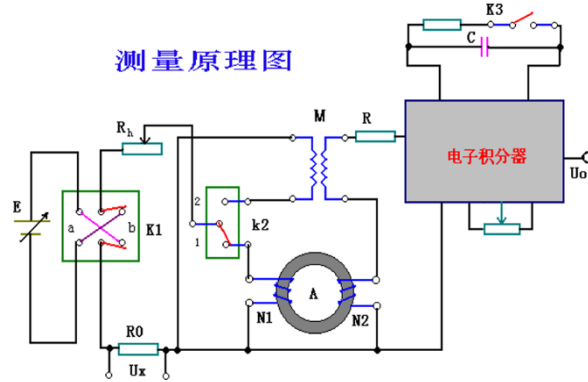


图 2 基本磁化曲线

2. 磁滞是指磁场强度 H 变化时，磁感应强度 B 的滞后变化，即当磁化达到饱和，减小磁场强度 H 至 0 时，磁感应强度 B 会保留一定的值（剩余磁感强度 B_r ）。此时需施加反向磁场至 B 恢复为零，该过程的反向磁场强度称为矫顽力 H_c 。铁磁材料经过多次磁化形成的稳定的闭合曲线称为磁滞回线。

3. 基本磁化曲线是指将图 2 中原点 0 和各个磁滞回线的顶点 a_1, a_2 等连接后形成的曲线。不铁磁材料其基的基本磁化曲线不相同，根据基本磁化曲线可以近似确定铁磁材料的磁导率 $\mu = \frac{B}{H}$ 。



4. 测量原理图如下所示：

① H 的测量

由测量原理图可知，磁化场 H 可表示为：

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

② B 的测量

对电容 C 放电使积分器在 0 时刻的输出电压为 0，进而测量电子积分器的输出电压：

$$U_0 = -\frac{\int U_i dt}{RC} \quad (2)$$

单调改变流过 N1 中电流 I_0 ，此时在 N2 中产生的感应电动势大小为：

$$\varepsilon = -N_2 S \frac{dB}{dt} \quad (3)$$

在正式测量之前将样品退磁，使 $B_0=0$ 后对式 3 积分，可以得到：

$$U_0 = \frac{N_2 S \int dB}{RC} = \frac{N_2 S (B - B_0)}{\tau} = \frac{N_2 S B}{\tau} \quad (4)$$

③ τ 的确定

M 产生的电动势为：

$$\varepsilon_1 = -M \frac{dI}{dt} \quad (5)$$

对 ϵ_1 积分并化简得:

$$\tau = \frac{MU_{XM}}{R_0 U_0 M} \quad (6)$$

将 (6) 代入 (4) 中, 可以得到:

$$B = \frac{MU_{XM}U_0}{N_2 S R_0 U_0 M} \quad (7)$$

【实验仪器】

静态磁特性参数测量仪, 直流电源, 计算机。

【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。首先, 必须对环状磁性材料进行手动退磁, 逐次减小手动退磁电流, 直到达到仪器输出最小值。然后按照指定接线图进行测量, 通过调节电流逐步增大, 计算机绘出材料的初始磁化曲线, 曲线上点的坐标即为 (U_x, U_0) , 保存数据;

3. 测量磁滞回线:

调节“平衡”按钮, 确保读数基本不变, 然后点击软件上的“记录”按钮, 逐步增大电流直至达到饱和, 松开电流按钮, 自动减小电流至零, 按 K1 电流换向开关改变电流方向后再次测量, 最终得到封闭的磁滞回线并保存数据;

4. 测量基础磁化曲线:

控制调节电流按钮, 周期性地改变磁化电流, 得到一系列面积由小到大的稳定的磁滞回线, 然后绘制出铁磁材料的基础磁化曲线。

【实验数据】

1. 环形线圈的参数: 内径: 34 mm 外径: 50 mm

2. 初级、次级线圈的参数: 匝数 N1: 4 mm N2: 45 mm τ : 0.0100

【数据处理】

1. 根据环形内圈参数可以算出：环形线圈的平均周长 $L=131.95\text{mm}$ ，横截面积 $S=120\text{mm}^2$

2. 初始磁化曲线图像如下：

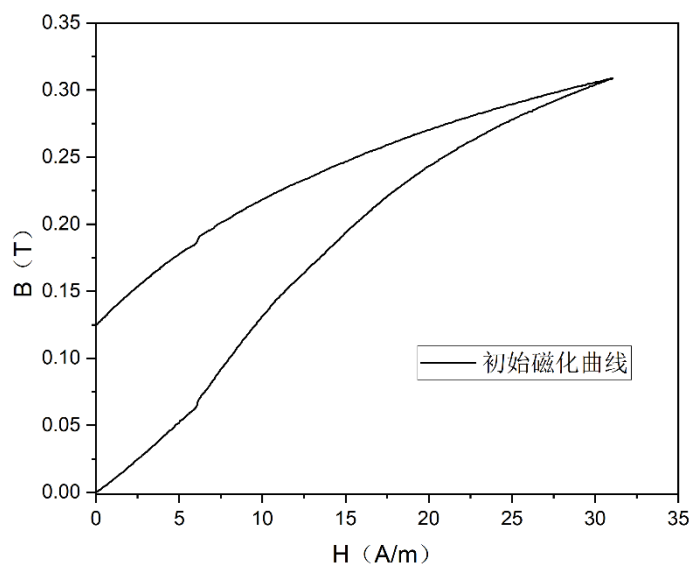


图 1 初始磁化曲线

3. 磁滞回线图像如下：

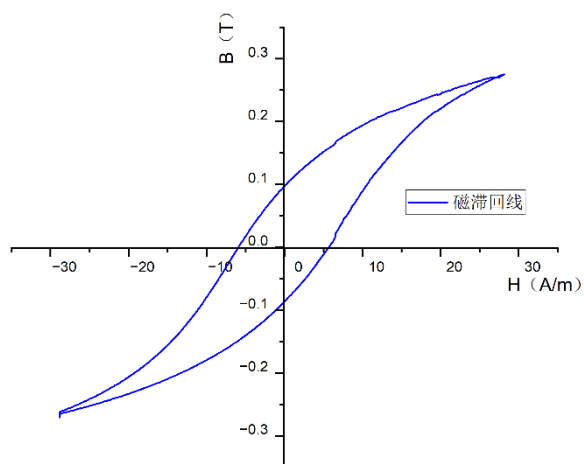


图 2 磁滞回线

4. 基本磁化曲线图像如下:

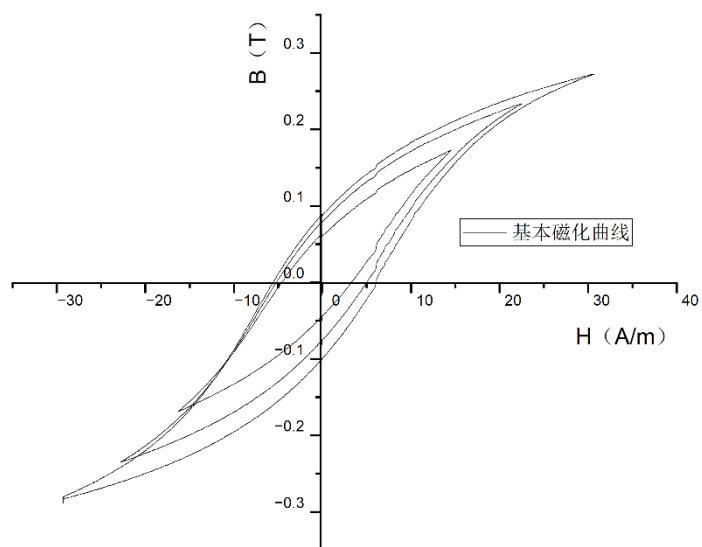


图 3 基本磁化曲线

5. 线性拟合结果如下:

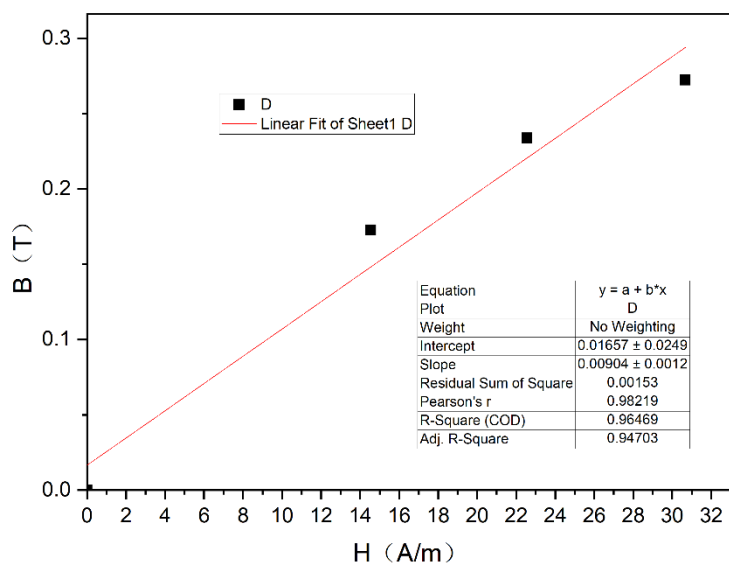


图 4 线性拟合

【结果分析】

1. 数据分析

通过上述图像可以读出：在 0.8A 的电流条件下，饱和磁感强度 $B_s=0.275\text{T}$ ，剩

余磁感强度 $B_r 0.125$ ，矫顽力 $H_c = -6.31 \text{ A/m}$ 。

2. 误差分析

(1) 系统误差

①环境：实验当天的温度、湿度所带来的误差。

②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。

③材料：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。例如，较大的铁磁体通常具有更大的磁化强度和更大的磁滞回线面积。这是因为更大的体积需要更大的磁场来完全磁化。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。

(2) 偶然误差

①读数：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。

②计算：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。

(3) 有关减小误差的改进方案

①仪器：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计算：本实验在数据处理过程中，尽可能用测量数据直接代入总计算式进行整体运算，减小了对中间数据四舍五入所带来的误差。

【思考题】

1. 测量初始磁化曲线时，为何没有出现 $B-H$ 的饱和区？

答：饱和区是指当外加磁场足够大时，材料的磁化强度趋于饱和，达到一个最大值，不再随着磁场的增加而增加。在饱和区，几乎全部磁畴都已经转向外磁场方向，磁化曲线趋于平缓，不再显示出线性关系。而我们在测量初始磁化曲线时，出现不了 $B-H$ 饱和区的最主要原因是所加的外加磁场强度不足以使全部磁畴转向外磁场方向。实验通常采用的是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，并且某些磁性材料可能具有较高的矫顽力，即需要较大的磁场才能使其磁化方向发生反转。本次实验所使用的最大电流为 0.8 A ，因而测量时所提供磁场强度可能不足以使材料磁化强度达到饱和状态。若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者增大电流的强度，进而增

大磁场强度，从而实现 B-H 饱和区的部分。

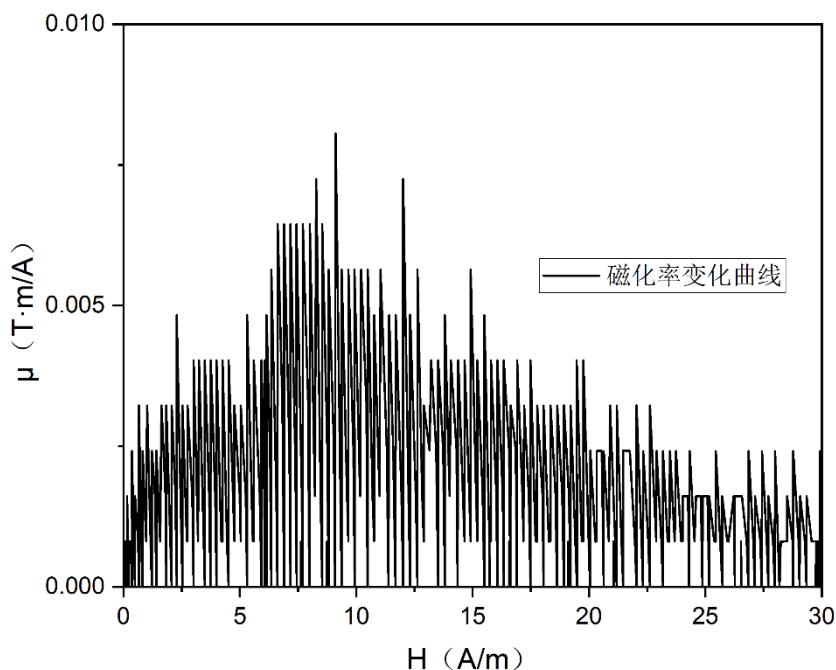
2. 实验中为何多次强调要单调地改变电流？否则会出现什么样的结果？

答：在实验中多次强调要单调地改变电流，主要是为了避免出现磁滞效应，确保测量结果的准确性和可靠性。磁滞效应是指当磁场减小到零时，磁感应强度并不会降为零，而是会保留一定的剩磁。如果在实验中电流不是单调地改变，可能会由于磁滞效应而导致磁滞环的形成：如果在实验中电流方向改变的那一段时间内，磁场不是单调地减小或增加，而是来回变化，可能会在一定区域内形成一个小的磁滞环。这会使测量结果出现不连续和不平滑的曲线，极大影响磁滞回线的测量。

3. 根据从初始磁化曲线上求出的 B 和 H，能否绘出磁导率 μ 与 H 关系的曲线？

($\mu = dB/dH \approx \Delta B/\Delta H$)

答：能，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 ΔB 和 ΔH 并计算 μ ，进而绘制出磁导率 μ 与 H 关系的曲线，绘制结果如下图所示：



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。

实验内容二 铁磁性材料交流磁化率测量

【实验目的】

1. 理解磁化率的基本概念并了解物质磁性的分类;
2. 观察铁磁性转变及转变温度 (居里温度) T_c ;
3. 测量不同铁磁样品的交流磁化率随温度的变化曲线;
4. 掌握测量不同铁磁样品的交流磁化率。

【实验原理】

1. 在给定的外界条件 ($T = \text{常数}$) 下, 若材料各向异性, 且 M/H , 则磁化强度 M 和磁化率 χ 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。

2. 磁化率有三种表示形式, χ_v 表示单位体积 (每 cm^3) 的磁化率, χ_A 表示每摩尔的磁化率, χ_g 表示单位质量 (每克) 的磁化率, 它们之间的关系为:

$$\chi_A = \chi_v V = \chi_g A = \frac{\chi_A A}{\delta}$$

式中, A 为原子量, V 为每摩尔的体积, δ 为比重。

3. 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。

4. 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 14 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。

5. 交流磁化率 χ 可表示为：

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

6. 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，示意图如下：

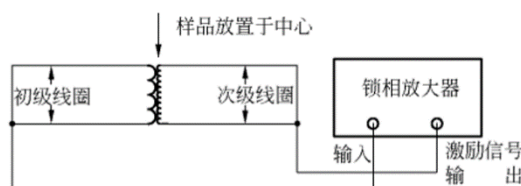


图 2-2 互感式单对线圈测量交流磁化率的示意图

7. 当感应线圈所在空间的磁性发生变化时，由电磁感应定律有：

$$\varepsilon = \frac{d\phi}{dt} = -NS \frac{db}{dt}$$

式中 S 为线圈的面积， N 为线圈的匝数。

对 ε 作时间积分得：

$$B = -\frac{1}{NS} \int \varepsilon dt$$

故由积分电路输出的信号即正比于总的磁感应强度 B 。

【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。

【实验过程】

1. 连接设备并启动软件：将锁相放大器、锁相波形发生器和加热炉连接至计算机，并确保它们之间的连接正确，在电脑上打开“交流磁化率记录软件”，选择相应的温度和锁相放大器的串口号；

2. 测量系统偏置：在没有样品的情况下，点击“开始”按钮，测量系统本身的直流偏置，并记录实测电压的实部和虚部值；
3. 加热样品：将待测样品插入加热炉，将温度设置到目标温度 300°C ，点击开始并启动加热炉升温；
4. 调整本底电压：在数据稳定后，调整本底电压以使实部和虚部曲线得到较好的显示，重新开始测量并观察输出电压随温度的变化；
5. 控制升温速率，测量降温：在出现磁性转变点后，尽快停止升温以避免降温过程耗时过久，然后逐渐降温，记录降温过程中的磁性转变点，并在稳定后停止数据采集；
6. 数据处理：保存实验数据，计算样品真实电压，即有样品的实测电压减去系统本身偏置的实测电压。

【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下：

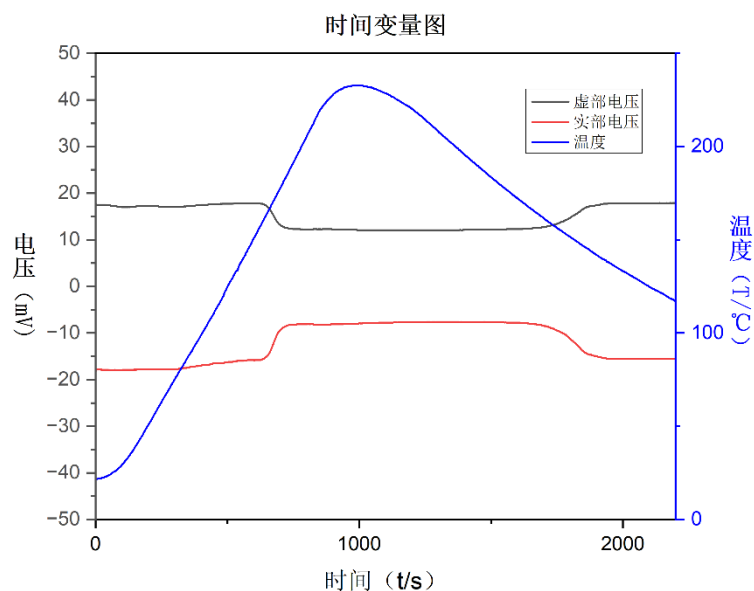


图 1 时间变量图

2. 绘制出的实部电压、虚部电压随温度变化曲线如下:

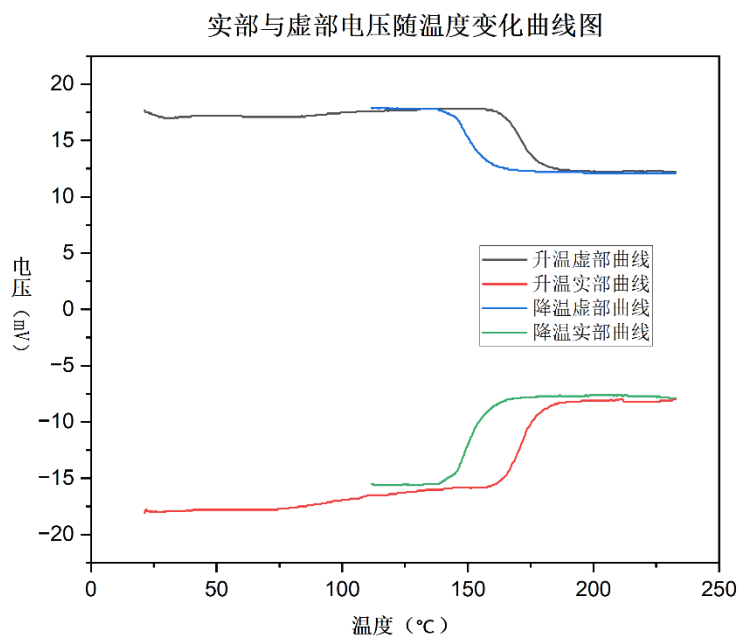


图 2 实部与虚部电压随温度变化曲线图

3. 绘制出的总电压随温度变化曲线如下:

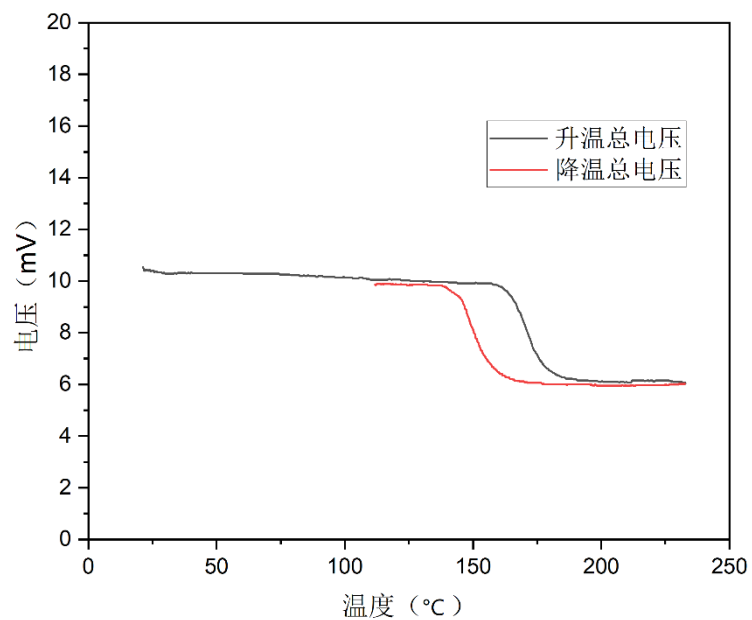


图 3 总电压随温度变化曲线图

4. 磁化率 $\chi_g = CV(T)$, 故 χ_g -T 图只需在图 3 的基础上将 y 轴乘以互感电桥的常数 C 便可以得出, 图的形状与趋势与图 3 一致, 在此便不做赘述。

【结果分析】

1. 图像分析

(1) 由图 1 可以看出, 在一定时间段内, 实部电压增大, 虚部电压减小, 两者的绝对值都减小, 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, 电压值的变化趋势, 由电压值变小可以看出, 这一过程中磁导率是下降的。

(2) 由图 2 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。同时我们也可以发现, 在转变过程中, 相同温度下降温曲线电压值的绝对值小于升温曲线, 这反映了材料在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 4 可以读出, 居里温度 $T_C = 159.1^\circ\text{C}$, 即将转化为顺磁体的电压为 9.86mV , 所以由 $\chi_g = CV(T)$ 可以推得磁导率约为 $(9.86\text{C})\text{emu/g}$ 。

2. 误差分析

(1) 本次实验主要的误差在于系统误差:

- ①环境: 实验当天的温度、湿度所带来的误差。
- ②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。
- ③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) 有关减小误差的改进方案:

- ①仪器: 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。

【思考题】

1. 铁磁性转变应是怎样的曲线, 陡峭与否与哪些因数有关?

答:

(1) 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 χ -T 曲线。当升高到一定温度时, 铁磁性材料可能会经历从顺磁到铁磁的相变, 这个温度称

为居里温度 (TC)。在 TC 以下, 铁磁性材料表现出铁磁性, 而在 TC 以上则表现出顺磁性。因此, 在相变前后, 即 TC 前后, 铁磁性转变曲线应是较为平缓的, 而在 TC 时磁化率会有一个非常明显的变化, 在图上表示为一条非常陡峭的曲线。

(2) 影响曲线陡峭的因素主要有以下两点:

①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, 高磁饱和度的材料通常具有更为陡峭的转变曲线。

②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。

此外, 如温度的变化、应力和压力的变化等都会对材料本身结构造成一定的影响, 进而影响材料的性质和曲线的陡峭程度。

2. 为什么必须缓慢加热试样?

答: 因为试样在 TC 时的 $\chi-T$ 曲线会非常陡峭, 这意味着突变区间很短, 温度的变化范围较小。而仪器是按一定的时间间隔来取点作图的。因此, 加热试样过快会导致仪器难以精确取点, 进而测量不到突变的区间或使测量误差变得非常大。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。