

交流磁化率的测量

詹文山

(中国科学院物理研究所)

一、前言

交流磁化率的测量已有很长的历史,过去大都用来作为低温温度计和用来决定超导材料的超导转变温度等.近十年来由于自旋玻璃现象的发现,交流磁化率的测量又成为研究自旋玻璃的重要方法.交流磁化率测试方法主要有两类:(1)交流互感电桥,如哈特森(Hartshorn)^[1,2,3,4]电桥;(2)自感法^[5],即测量样品在线圈中引起的电感变化.其中交流互感电桥方法使用的很普遍,并且随着电子技术的发展,它的测量灵敏度和测试精度都有很大提高.灵敏度可达到 10^{-8}emu ,相对精度达到 0.1%.我们制作的互感电桥灵敏度为 $2.56 \times 10^{-6}\text{emu}/\mu\text{V}$.用锁相放大器检测时,可以检测 $0.1\mu\text{V}$ 信号,因此最高分辨率为 $2.56 \times 10^{-7}\text{emu}$,其相对精度为 1%.

二、交流互感电桥的基本原理

图 1 表示了一个典型的互感电桥,它可以直接测量互感系数 M .为了得到桥路的平衡条件,最简单的是利用回路的电流法.当指示器里没有电流时,

$$\begin{cases} (R_1 + j\omega L_1)I_1 = -j\omega M_1 I_0, \\ (R_2 + j\omega L_2)I_1 = -j\omega M_2 I_0, \end{cases} \quad (1)$$

其中 ω 为交流信号的圆频率 ($\omega = 2\pi f$).由方程(1)可得到

$$-j\omega M_2(R_1 + j\omega L_1)$$

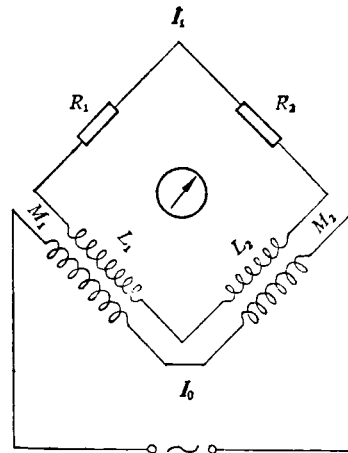


图 1 交流互感电桥原理图

$$= -j\omega M_1(R_2 + j\omega L_2); \quad (2)$$

平衡条件为

$$M_1/M_2 = R_1/R_2 = L_1/L_2, \quad (3)$$

因此改变电阻 R_1 和 R_2 ,便可保持下列条件:

$$M_1/M_2 = R_1/R_2. \quad (4)$$

如果把其中一个互感 M_2 用可变互感代替,而且额定值与未知量 M_1 相当,则可以用更简单的线路来代替,如图 2(a) 所示.由于互感线圈本身有线电阻,样品有损耗,所以实际线路如图 2(b) 所示,这就是哈特森电桥的原理图.在图 2(b) 所示的线路中 M_1 由一个初级绕组和两个对称的反向串接的次级绕组所组成.这是专为测量物质磁化率所设计的.在没有样品 S 时, $M_1 = 0$.当样品 S 放入到一个次级绕组中时, M_1 将有 ΔM 的变化.调可变互感 M_2 和可变电阻 r ,可使桥路再次平衡.

任何一种物质的交流磁化率 χ 可表示为

$$\chi(\omega) = \chi'(\omega) + i\chi''(\omega), \quad (5)$$

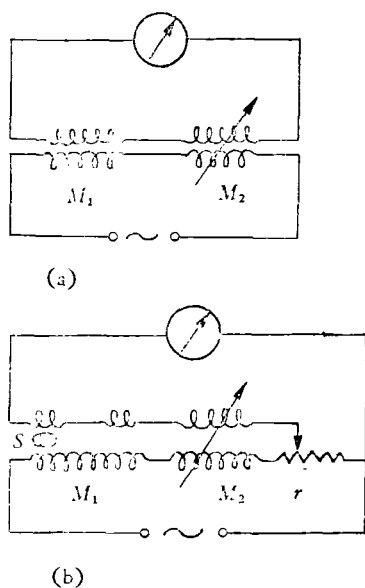


图2 (a) 简单互感桥
(b) 哈特森桥

$\chi'(\omega)$ 是交流磁化率的实数部分, 它正比于线圈的电感或互感的变化。在 $\omega = 0$ 时, $\chi'(\omega) = \chi_0$ 称为静磁磁化率。在用低频测试时, $\chi'(\omega)$ 近似等于 χ_0 。 $\chi''(\omega)$ 是交流磁化率的虚数部分, 它正比于材料的交流损耗。在交流互感电桥测试中, 有样品和没有样品时的互感的变化都正比于 $\chi'(\omega)$; 电阻的变化正比于 $\chi''(\omega)$:

$$\Delta M \sim \chi'(\omega); \Delta r \sim \chi''(\omega). \quad (6)$$

三、交流互感电桥的设计与制作

1. 测试互感线圈的设计

图3表示了一个典型的测试线圈。在没有样品时, 由于两个次级线圈与初级线圈的互感相等, 而又是反向串联, 因此输出为零。但把样品放到其中一个次级线圈中, 使得两个次级线圈与初级线圈之间的互感不再相等, 产生

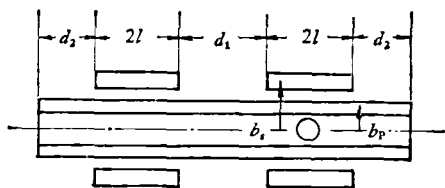


图3 测试线圈的设计

$\Delta M^{[6]}$:

$$\Delta M = 16\pi^2 n_p n_s \chi f_s f_p, \quad (7)$$

其中

$$f_s = l / (b_s^2 + l^2)^{3/2} + (d_1 + l) / [2(b_s^2 + (d_1 + l)^2)^{3/2} - (d_1 + 3l) / 2(b_s^2 + (d_1 + 3l)^2)^{3/2}]; \quad (8)$$

$$f_p = \frac{1}{2} \{ (d_1 + l) / [b_p^2 + (d_2 + l)^2]^{3/2} + (d_1 + d_2 + 3l) / [b_p^2 + (d_1 + d_2 + 3l)^2]^{3/2} \}, \quad (9)$$

其中 n_p, n_s 分别为初级和次级线圈单位长度的匝数, χ 是样品磁化率, 用 CGS 单位制。 f_s, f_p 分别为几何因子。我们设计的线圈尺寸为:

$2l = 1.5\text{cm}, d_1 = 2\text{cm}, d_2 = 1\text{cm}, b_p = 0.76\text{cm}, b_s = 0.45\text{cm}, n_p = 533 \text{ 匝/cm}, n_s = 7333 \text{ 匝/cm}$ 。由公式(7), 我们可以计算出一克莫尔盐放入线圈中引起的互感变化为 $\Delta M = 4.77\text{mH/T}$ 。

[每克莫尔盐的磁化率为

$$9500 \times 10^{-6} \frac{\text{emu/g}}{T},$$

T 是绝对温度]。计算得到该测试线圈的灵敏度为 $2 \times 10^{-6} \text{emu}/\mu\text{H}$ 。

2. 线圈的制作

线圈骨架全部用尼龙做成。初级线圈用 $\phi 0.15\text{mm}$ 的高强度漆包线绕成, $n_p = 533 \text{ 匝/cm}$, 自感 $L_p = 23\text{mH}$, 线圈直流电阻

$$R_p = 115.8\Omega.$$

次级线圈用 $\phi 0.06\text{mm}$ 高强度漆包线绕成, $n_s = 7333 \text{ 匝/cm}$, 自感 $L_s = 367.5\text{mH}$, 线圈直流电阻 $R_s = 2625\Omega$ 。用交流电桥测量这两个线圈的自感, 使它们相等。将它们反向串联后, 装入初级线圈中, 在初级线圈中加入交流信号, 检测次级线圈的输出, 调节初、次级线圈之间的相对位置, 使输出为零, 并用螺钉固定。初、次级线圈绕成后必须浸入绝缘漆, 使线圈中每匝线圈位置固定。

3. 交流互感电桥桥路的设计与检测回路

交流互感电桥的检测方法有两种, 第一种方法是指零法, 即在测试线圈中不放样品, 通过

调节可变互感 M_2 和可变电阻 r 使桥路平衡, 输出电流为零, 然后把样品放入测试线圈中, 这时桥路失去平衡, 再通过 M_2 和 r 的调节使桥路重新平衡. 从 M_2 和 r 的两次读数求得改变值 ΔM_2 和 Δr , 并由公式(6)分别求得样品的交流磁化率 $\chi'(\omega)$ 和 $\chi''(\omega)$. 这种方法要求有精密的可变互感器和精密的可变电阻. 对指零系统只要求有高的灵敏度. 第二种方法是偏差读出法. 它是用一个高灵敏, 高精度的线性放大器来直接读出因样品放入引起的偏差信号. 这个偏差信号正比于 ΔM 的变化. 这种方法对可变互感器和可变电阻器要求不高, 但是分辨不出样品交流磁化率的实部 $\chi'(\omega)$ 和虚部 $\chi''(\omega)$. 自从锁相放大器问世以来, 这个问题已得到解决. 由于信号在电感上的和电阻上的位相差为 90 度, 我们可以通过改变锁相放大器上的相位来分别读出互感 M 和电阻 r 的变化即 ΔM 和 Δr . 我们采用了偏差读出法, 具体的线路表示在图 4 中. M_1 是测试互感线圈, M_2 为可变互感器. R_1 和 R_2 组成一个分压回路, 这样做便于细调互感, 使桥路容易平衡; 为了调节电阻使桥路平衡, R_3 和 R_4 也组成一个分压回路; R_5 是取样电阻, 它用于测量初级回路中的电流, 计算初级线圈产生的交变磁场; T_1 和 T_2 分别为隔离变压器.

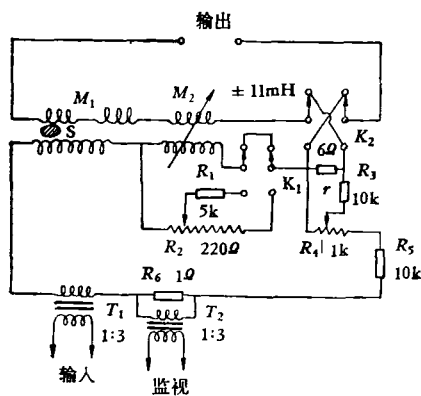


图 4 交流互感电桥的电路图

桥路检测采用了锁相放大器. 锁相放大器在使用中要求尽可能的减少周围信号的干扰, 以利于降低噪音, 提高信噪比, 因此在桥路制作

中各元件之间必须采用屏蔽线连接, 而且要注意地线的连接和安装.

4. 温度控制系统

温度控制系统示于图 5. 该装置可以从 2K 测到 300K. 温度控制是通过夹层空间的抽空和加热实现的. 为了能使样品冷却到液氮和低于液氮温度, 必须使样品空间和夹层空间都通入一定的氦气, 冷却由线圈支撑杆, 引线等传导来的热量. 在升温时可适当地抽去夹层空间的氦气, 使温度能升到 300K. 为了减少因热传导引起的温度升高, 线圈的支撑杆和样品的提拉杆要用导热系数小的材料做成, 我们分别用德银管和尼龙做成.

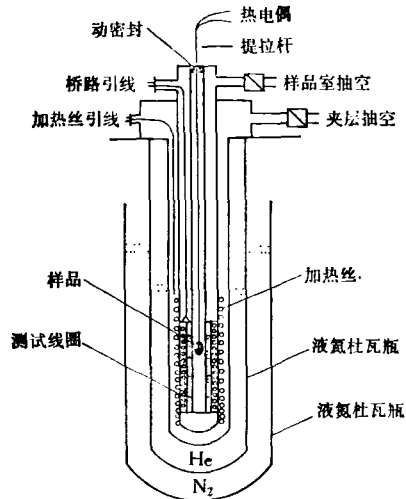


图 5 测试装置图

温度测量是采用含铁热电偶, 电偶安装在提拉杆中, 电偶头接近或甚至可以直接接触样品表面. 电偶的电动势用 $0.1\mu\text{V}$ 数字电压表测量, 温度测量可以精确到 0.02 度. 4.2K 以下采用减压法, 4.2K 以上用干电池电流加热, 为了避免加热线圈产生磁场影响测量, 加热炉丝用双线并绕, 做成无感加热线圈.

5. 测试步骤

(1) 正确调整锁相放大器. 通过微调可变互感器来确认测量的信号是电感的变化, 或是电阻的变化. 如果测量的是电感变化, 那么略微改变互感 M_2 , 放大器输出信号变化就很大,

反应很灵敏;如果测量的是电阻变化,那么放大器输出信号对互感的改变很迟钝。

(2) 把样品放入测试线圈中,调节可变互感器 M_2 使放大器输出为零,然后改变 90 度相位,调节电阻 R_4 使输出为零,反复调节直至改变和不改变 90 度相位时输出都为零,表示桥路已经调节平衡了。如果改变 90 度相位后,调节电阻 R_4 输出反而增大,那末把开关 K_2 搬到相反方向后,再调节 R_4 使输出为零。由于测温电偶置于提拉杆中,因此为了能准确测量温度,在样品置于线圈中时调桥路平衡。

(3) 把 X-Y 记录仪的笔置于零点,然后把样品提拉出线圈,记录下偏差信号,该输出电压正比于样品的 $\chi'(\omega)$,如果改变 90 度相位,记录的输出电压正比 $\chi''(\omega)$ 。

四、校准和测量误差分析

由于该装置采用的是偏差读出法,因此为了得到磁化率的绝对值,必须要用标准样品进行校准。我们选用莫尔盐 $(\text{NH}_4)_2\text{Fe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 作为标准样品。莫尔盐的磁化率为

$$\chi_g = \frac{9500 \times 10^{-6}}{T + 1} \text{ emu/g}, \quad (10)$$

T 是绝对温度。

校准的方法是测量莫尔盐在不同温度下锁相放大器的输出电压 V , 然后根据测量温度并

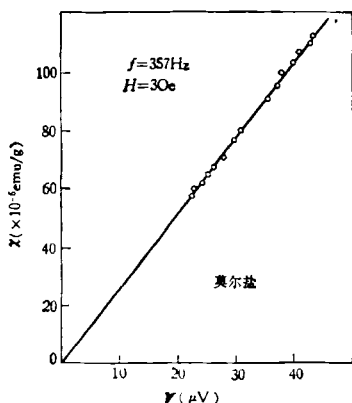


图 6 交流互感电桥的校准曲线
测量频率为 357Hz; 测量磁场为 30e

按(10)式计算磁化率 χ 。画出磁化率与输出电压的关系曲线。实验结果表示在图 6 中。从图 6 可以得到磁化率 χ 与输出电压 V 成线性的关系,并由直线的斜率得到该互感电桥的常数 $C = 2.562 \times 10^{-6} \text{ emu/g}/\mu\text{V}$ 。然后,我们在不放入样品时改变可变互感器 M_2 的互感为 $500 \mu\text{H}$ 得到锁相放大器的输出电压为 $600 \mu\text{V}$ 。因此我们计算出每克莫尔盐引起的互感变化为 $3.1 \text{ mH}/\text{T}$, 与测试互感线圈的设计值 $4.77 \text{ mH}/\text{T}$ 相接近。图 6 所示的校准曲线是在交流磁场 $H = 30\text{e}$ 下测得,如果测试样品的磁化率 χ 与磁场无关,那末还可以通过增大交流磁场来提高测试灵敏度。

该测量装置采用提拉样品的偏差读出法,因此避免了放大器和记录仪零点漂移所引起的误差,同时也避免了每次调节桥路平衡的偏差所带来的测量误差。在测量时,由于温度变化引起桥路中测试线圈阻抗的变化,从而引起初级线圈中电流的变化,也就是激励磁场的变化,因此测量过程中要经常监视和调整初级回路中的电流,保持它的稳定。在磁化率绝对值测量时,测量样品的形状和体积大小将引起误差。因此标准样品与测试样品在形状和体积上应尽可能一致,或者采用较小的样品以减少体积效应。

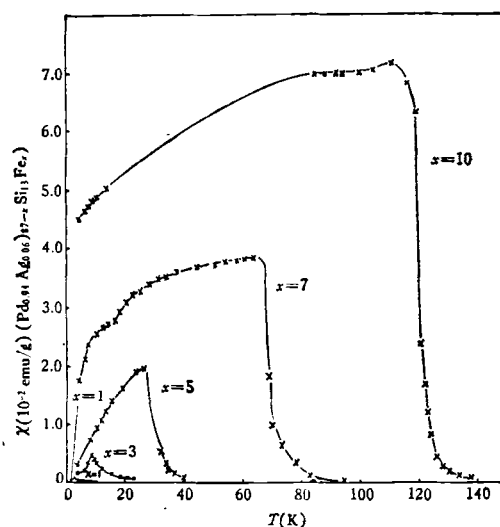


图 7

志的大力协助表示感谢。

五、应用实例

我们利用该装置测量了 $(Pd_{0.94}Ag_{0.06})_{87-x}Si_{13}Fe_x$ 非晶态薄带的低温磁化率(见图7)。在 $x = 1$ 和 3 时表现了典型的自旋玻璃特性,即磁化率随温度的变化出现极大的尖峰。在 $5 \leq x < 10$ 是典型的混磁特性,即在该成份范围内出现顺磁到铁磁再到自旋玻璃态的转变。在 $x > 10$ 时表现为典型的铁磁性,即顺磁到铁磁的转变。

在设备制作和调试过程中得到孙树伟和沈保根同

参 考 文 献

- [1] F. R. Mckim and W. P. Wolf, *J. Sci. Instrum.*, **34** (1957), 64.
- [2] E. Maxwell, *Rev. Sci. Instrum.*, **36** (1965), 553.
- [3] J. P. Burger and D. S. McLachlan, *Solid state Commun.*, **13** (1973), 1563.
- [4] J. S. Philo and W. M. Fairbank, *Rev. Sci. Instrum.*, **48** (1977), 1529.
- [5] 小林はなぶ, 田沼静一, 低温(实验物理学讲座15), 田沼静一编集, 共立出版株式会社, 东京, (1974), 342.
- [6] 应用物理实验技术ハンドブック, 日本应用物理学会编, オーム社, (1971), 362.

等离子体谱线时间-空间特性测量

张 广 秋

(中国科学院等离子体物理研究所)

一、序 言

测量等离子体中工作气体及杂质谱线的时间-空间特性,对研究聚变等离子体中的杂质行为及其控制是非常重要的^[1,2]。近年来,不少装置在这方面作了许多工作并取得了一些重要结果^[1,3-6]。然而在大部分装置中,每一条谱线的空间分布剖面是通过数十次放电获得的。每次放电只能提供面发光度与弦高关系图(即空间分布剖面)中的一个点。还有少数装置可以在一次放电中得到谱线时间-空间分布剖面,但是空间分辨能力差。一般为2—5cm。在这个范围内不同部位等离子体面发光度可以相差2—10倍。

为了在同一次放电中精确得到等离子体谱线的时间-空间特性,我们研制了一个等离子体谱线快速扫描系统。将本系统用于直管脉冲放电装置,得到了满意的结果;用于HT-6 TOKAMAK装置,也得到了初步的结果。

二、仪器描述

1. 物理要求

假设等离子体中发光离子约束时间为 τ_z , 扫描系统每扫过等离子体柱面一次的时间为 τ_s , 光电倍增管响应时间为 τ_p , 扫描系统在扫描速度方面应满足

$$\tau_p \ll \tau_s < \tau_z, \quad (1)$$

对一般中小型 TOKAMAK 装置的等离子体而言, τ_z 约为几个毫秒^[7], 通常 $\tau_p < 100\text{ns}$ 。这样在设计时只需考虑 $\tau_s < \tau_z$ 就可以了。本扫描系统的目的是用于测量 TOKAMAK 等离子体中的光谱现象, 因此取 $\tau_s < 1.5\text{ms}$ 就可以了。

扫描系统的空间分辨能力取决于单色仪入射狭缝宽度和信号的时间积分效应。在满足(1)式的条件下, 后者的影响可以忽略不计。假设扫描系统中单色仪入射狭缝宽度为 H , 所对应等离子体柱弦长为 η , 则光电接收系统中收到的信号反应了长度为 η 的一段弦上面发光度