

# 测定高温超导材料的转变温度 实验报告

姓名：吴晨聪 学号：2022010311 实验日期：2024年4月23日 实验台号：9

## 一. 实验目的

超导材料具有零电阻和完全抗磁性两个基本特性，高温超导材料是指转变温度超过液氮温度的超导材料。本实验通过测定高温超导材料的转变温度，加深对超导材料两个基本特性的认识：

1. 用四引线法测量高温超导样品的电阻—温度特性，观察零电阻现象。
2. 用电磁感应法测量超导样品对互感线圈感应电压的影响，通过得到的感应电压—温度特性，了解完全抗磁性。

## 二. 实验仪器

1. 稳压稳流直流电源（艾德克斯 IT6333A/B，CH1：60V/3A，CH2：60V/3A，CH3：5V/3A）
2. 信号发生器（泰克 AFG1062，双通道，60 MHz，采样率 300 MS/s）
3. 5位半数字万用表（Fluke F8808A）
4. 4位半数字万用表（胜利 Victor 8145B/C）
5. 手持数字万用表（胜利 VC9806+，四位半）
6. 液氮罐（3L）
7. 测试头，测试头接线盒（超导样品、感应线圈、铂电阻温度计）
8. 电阻板，装有 10 个串联的  $1\text{ k}\Omega$  电阻和 10 个串联的  $100\ \Omega$  电阻
9. 双刀双掷换向开关，导线（0.5m 长，双香蕉插头， $\geq 9$  根），BNC-香蕉头导线1根

## 三. 数据处理

### A. 万用表测量导线/引线电阻及超导样品电阻

1. 数字万用表两条测试导线电阻： $R_{\text{testwire}} = 0.035\Omega$
2. 超导盒与样品间的引线电阻： $R_{\text{wire}} = 0.460 - 0.045 = 0.415\Omega$
3. 四引线法测量室温下超导样品电阻 $R_{\text{Super}}$

电源CH3：工作模式 恒流，输出电压 $U_{\text{CH3}} = 582\text{mV}$ ，输出电流 $I_{\text{CH3}} = 1000\text{mA}$

超导样品上的电压 $U_{\text{Super}} = 0.677\text{mV}$ ，样品电压 $R_{\text{Super}} = 0.677\text{m}\Omega$

4. 思考：测试导线电阻、引线电阻、超导样品电阻量级比较！

由此可见，超导样品电阻与引线电阻、测试电阻相差3个数量级，所以用四线法测量超导样品电阻是十分必要的。当然四线法的电流引线应该在电压引线之外，否则电流引

线的接触电阻对测量结果的影响也会十分大，增加超导电阻的测量误差。

## B. 电流换向法消除乱真电势的影响

1. 测量电压  $U_{Meas1} = 0.588mV$ ,  $U_{Meas2} = -0.578mV$ , 电流  $I = 1000mA$

乱真电势  $U_{Spur} = -0.005mV$ , 样品电压  $U_{Super} = 0.583mV$ , 样品电压  $R_{Super} = 0.662m\Omega$

2. 思考：乱真电势与样品上电压的数量级比较！

由此乱真电势与样品电压相差3个数量级，在一定的误差范围内可以忽略不计。

## C. 铂电阻温度计测量温度

1. 计算限流电阻值  $R$

限流电阻满足  $60V/R = 1mA$ , 则：

$$R = 10V/1mA = 10k\Omega$$

查表可知从 77K 至室温 23° C 范围内铂电阻最值  $R_{max} = 108.96\Omega$ ,  $R_{min} = 21.12\Omega$  所以实际工作电流在77K~室温范围内铂电阻工作电流的变化：

$$I_{min} = \frac{10V}{R_{min} + R} = 0.989mA$$

$$I_{max} = \frac{10V}{R_{min} + R} = 0.998mA$$

最大偏差约为  $\Delta I = 0.009mA$  可以忽略。

2. 计算室温 (23°C) 时铂电阻上的电压：

查表得，室温约为23°C时  $R_t = 108.96\Omega$

$$U_{t-calc} = \frac{R_t}{R_t + R} \times 10V = 107.786mV$$

3. 室温下铂电阻上的电压测量值  $U_{t-real} = 108.74mV$

4. CH1工作模式恒压，输出电压  $U_{CH1} = 9.994V$ ，输出电流  $I_{CH1} = 1mA$

## D. 电磁感应法测超导样品对感应电压的影响

信号源设置：输出波形 恒压，频率  $f = 700Hz$ ，幅度  $V_{pp} = 3620mV$

线圈感应电压：  $U_m = 20.00mV$

## E. 样品超导转变温度测量

查阅铂电阻随温度变化数据表可知，铂电阻电压  $U_{t=-150^{\circ}\text{C}} = 39.910\text{mV}$ ， $U_{t=-170^{\circ}\text{C}} = 39.910\text{mV}$ 。铂电阻每升高一度电阻值大概变化  $0.4\Omega$ ，则温度变化  $2^{\circ}\text{C}$ 、 $0.2^{\circ}\text{C}$  所对的铂电阻电压  $\Delta U_t$  分别为  $0.8\text{mV}$ 、 $0.08\text{mV}$ 。

首先利用液氮对超导样品进行降温，因为降温过程太快，所以并不记录数据。当样品两端电压降到与乱真电势相差不大的时候，说明样品已经完全进入超导态，这时再次利用电流换向法测量样品两端电压大小，乱真电势：

$$U_{\text{spur}} = (U_{\text{Meas1}} + U_{\text{Meas2}})/2 = 0.000\text{mV}$$

$$U_{\text{Super}} = (U_{\text{Meas1}} - U_{\text{Meas2}})/2 = 0.000\text{mV}$$

$$R_{\text{Super}} = 0$$

实际测得乱真电势几乎为 0，而此时样品进入超导态电阻近似为 0，已经超出了电压标的最小测量范围，所以实际测量值为 0。

然后将样品从液氮中拿出进行升温，整理得到升温过程中铂电阻电压  $U_t$ 、超导样品电压  $U_{\text{Super}}$  及线圈感应电压  $U_m$  的数据如下表（在  $U_t = -150^{\circ}\text{C}$  附近开始记录数据。在  $U_{\text{Super}}$  相对  $U_m$  变化较缓慢的阶段记录数据间隔取  $\Delta t = 2^{\circ}\text{C}$ ，在变化较快的阶段记录数据间隔取  $\Delta t = 0.2^{\circ}\text{C}$ ）

表1 升温过程数据记录表

$U_t(\text{mV})$	25.05	26.04	27.03	28.05	29.04	30.07	31.07	32.06	33.31	34.07
$U_{\text{Super}}(\text{mV})$	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.003	0.004	0.005
$U_m(\text{mV})$	18.52	18.58	18.67	18.76	18.89	19.06	19.24	19.44	19.79	20.06
$U_t(\text{mV})$	35.03	35.11	35.18	35.27	35.35	35.44	35.52	35.60	35.68	35.77
$U_{\text{Super}}(\text{mV})$	0.007	0.007	0.008	0.009	0.009	0.010	0.012	0.013	0.014	0.016
$U_m(\text{mV})$	20.51	20.54	20.60	20.66	20.70	20.78	20.89	20.95	21.04	21.75
$U_t(\text{mV})$	35.85	35.94	36.02	36.11	36.19	36.29	36.35	36.44	36.52	36.61
$U_{\text{Super}}(\text{mV})$	0.019	0.025	0.031	0.044	0.063	0.092	0.123	0.138	0.167	0.175
$U_m(\text{mV})$	21.26	21.40	21.52	21.66	21.75	21.78	21.80	21.81	21.82	21.83
$U_t(\text{mV})$	36.68	36.77	36.84	36.92	37.02	38.03	39.09	40.08	41.05	42.09
$U_{\text{Super}}(\text{mV})$	0.186	0.197	0.201	0.204	0.205	0.211	0.217	0.223	0.228	0.234
$U_m(\text{mV})$	21.83	21.84	21.86	21.87	21.88	22.20	22.18	22.16	22.13	22.11

选取在超导转变温度附近约  $\pm 10^{\circ}\text{C}$  范围内的铂电阻电压  $U_t$ 、超导样品电压  $U_{\text{Super}}$ 、线圈感应电压  $U_m$  的数据，计算相不同温度  $t$  下的铂电阻阻值  $R_t$ 、及利用乱真电压修正后的超导样品电阻  $R_{\text{Super}}$ 。

$$R_t = \frac{U_t}{I_{CH1}}, \quad t = \frac{-A + \sqrt{A^2 - 4B(1 - 0.01R_t)}}{2B}, \quad R_{Super} = \frac{U_{Super} - U_{Spur}}{I_{CH3}}$$

从而绘制出在升温过程中的超导样品电阻以及线圈感应电压随温度的变化关系  $R_{Super}$ - $t$  曲线、 $U_m$ - $t$  曲线：

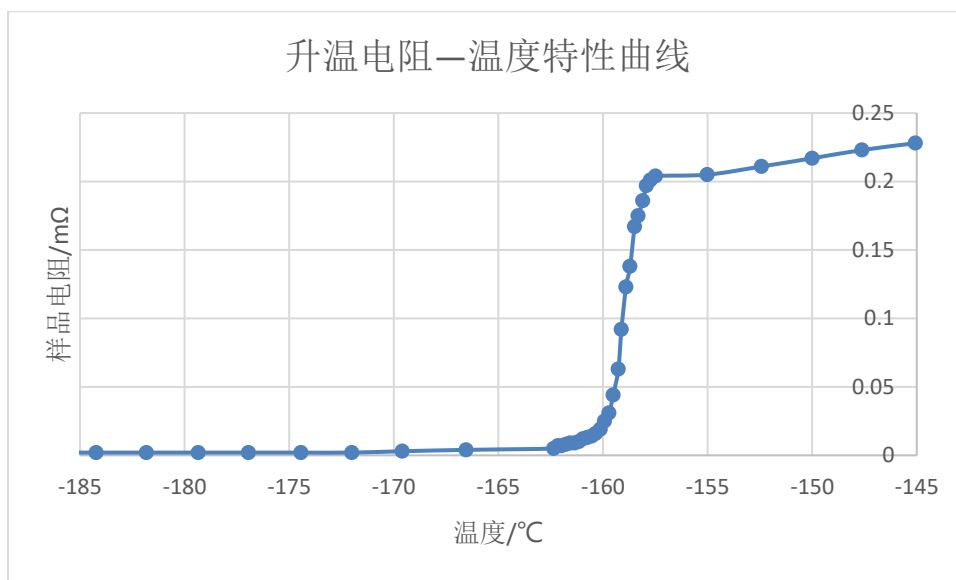


图1 超导样品电阻随温度的变化关系

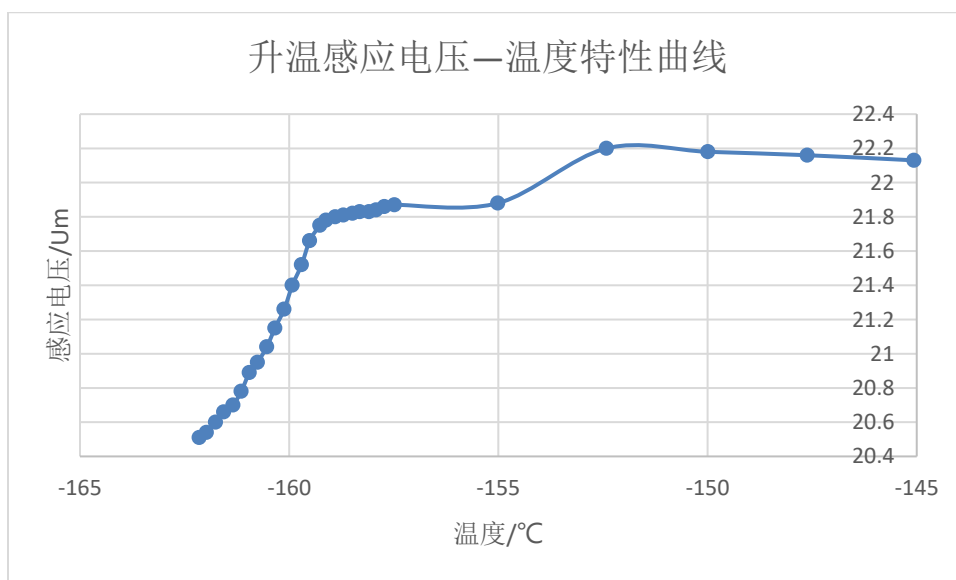


图2 线圈感应电压随温度的变化关系

$T_c^0$  为完全转变温度， $T_c^{onset}$  为起始转变温度， $T_c$  为转变温度亦即中点转变温度， $\Delta T$  为转变宽度（指样品导电率从 90% 降到 10% 的温度间隔）。因为当超导样品的形状不发生太大的改变时，超导样品的电阻值和材料的导电率呈正比，所以可以通过测量超导样品的电阻值的变化来确定超导样品的转变温度和转变宽度。

从升温曲线中可以读出

$$T_c = -164.8\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_c(10\%) = -165.5\text{ }^{\circ}\text{C}, T_c(90\%) = -162.4\text{ }^{\circ}\text{C}$$

则

$$\Delta T = 3.1\text{ }^{\circ}\text{C}$$

#### 四. 实验总结

1. 对于电阻阻值较小的样品，四引线法是十分必要的，可以消除电流引线的接触电阻，并减小较长导线电阻以及电压表内阻对测量结果的影响，提高测量的准确性。
2. 如果测试仪器和材料的温度间有较大的区别，需要考虑温差电动势的影响，而电流换向法可以消除乱真电势的影响，使得测量结果更加准确。
3. 通过铂电阻温度计可以测量温度，但是需要注意电流不能超过5mA，所以需要串联一个限流电阻，来获得电源比较稳定的低电流，而不是直接输出低电流。
4. 通过电磁感应法可以测量超导样品对感应电压的影响，从而了解不同相的转变温度，对  $R_{\text{Super}} - t$  曲线进行一个补充。但单独从感应电压的变化来判断样品的转变温度是不准确的，需要结合超导样品电阻的变化来确定。
5. 由于实验测量仪器精度的限制，对于较小的电流和超导样品电阻的测量会有较大的误差，而且在超导状态下根本无法得出真实值。

#### 五. 思考题

1. 一个中空的超导圆管样品，转变温度为  $T_c$ 。在温度高于  $T_c$  时，对圆管施加外磁场。而后将温度降低到转变温度  $T_c$  以下。在分析样品的磁感应强度和感应电流情况。撤掉外磁场后，样品的磁感应强度和感应电流如何变化？

在温度高于  $T_c$  时施加磁场，超导体还没有进入超导态，故超导体内有磁场，也有感应电流，但由于  $\mu_r$  接近1，磁感应强度与外界接近，磁感应强度小；

降温进入超导态后，产生完全抗磁性， $\mu_r$  变成0，感应电流变大，磁感应强度变成0；

撤掉外磁场后，超导体内部磁感应强度仍然为0，但感应电流消失。

#### 六. 原始数据记录

姓名: 吴晨阳, 学号: 2022010311, 实验组号: 单三日晚K, 实验台号: 9, 实验日期: 2024.4.24

电源输出设置: CH1: 10 V/ 0.005 A; CH3: 1 V/ 1 A

### A、万用表测量导线/引线电阻及超导样品电阻

1. 数字万用表两条测试导线电阻:  $R_{\text{testwire}} = 0.035 \Omega$
2. 超导盒与样品间的引线电阻:  $R_{\text{wire}} = 0.460 - 0.045 = 0.415 \Omega$
3. 四引线法测量室温下超导样品电阻  $R_{\text{Super}}$

电源 CH3: 工作模式 恒流 (恒压或恒流), 输出电压  $U_{CH3} = 582$  mV, 输出电流  $I_{CH3} = 1000$  mA  
超导样品上的电压  $U_{\text{Super}} = 0.677$  mV, 样品电阻  $R_{\text{Super}} = 6.77 \times 10^{-4} \Omega$

4. 思考: 测试导线电阻、引线电阻、超导样品电阻量级比较!

### B、电流换向法消除乱真电势的影响

1. 测量电压  $U_{\text{Meas1}} = 0.588 \text{ mV}$ ,  $U_{\text{Meas2}} = -0.578 \text{ mV}$ , 电流  $I = 1000 \text{ mA}$  (电源屏显示值)  
 乱真电势  $U_{\text{Spur}} = -0.005 \text{ mV}$ , 样品电压  $U_{\text{Super}} = 0.583 \text{ mV}$ , 样品电阻  $R_{\text{Super}} = 6.62 \times 10^{-4} \Omega$
2. 思考: 乱真电势与样品上电压的数量级比较!

### C、铂电阻温度计测量温度

1. 限流电阻  $R = 10k \Omega$ , 在  $77K$ -室温范围铂电阻工作电流的变化  $0.009$  mA
2. 计算室温 ( $23^{\circ}C$ ) 时铂电阻上的电压:  $U_{\text{cal}} = 101.786$  mV
3. 室温下铂电阻两端的电压测量值:  $U_{\text{meas}} = 108.74$  mV
4. 电源 CH1: 工作模式 恒压 (恒压或恒流), 输出电压  $U_{\text{CH1}} = 9.994$  V, 输出电流  $I_{\text{CH1}} =$  mA

#### D、电磁感应法测超导样品对感应电压的影响

信号源设置：输出波形 正弦波，频率  $f = \underline{700}$  Hz，幅度  $V_{pp} = \underline{3620}$  mV  
线圈感应电压： $U_m = \underline{20.00}$  mV

### E、样品超导转变温度测量

1. 查附表 1 预估: 铂电阻电压  $U_{t=150^{\circ}\text{C}} = \underline{39.886}$  mV,  $U_{t=170^{\circ}\text{C}} = \underline{31.770}$  mV
2. 降温测量

参考：在  $U_{-150^{\circ}\text{C}}$  附近开始记录数据。在  $U_{\text{super}}$  相对  $U_i$  变化较缓慢的阶段记录数据间隔取  $\Delta t \approx 2^{\circ}\text{C}$ ，在变化较快的阶段记录数据间隔取  $\Delta t \approx 0.1^{\circ}\text{C}$

—55—

$U_i/\text{mV}$								
$U_{\text{Super}}/\text{mV}$								
$U_m/\text{mV}$								

电压  $U_{\text{Meas1}} = 0.002$  mV,  $U_{\text{Meas2}} = 0.002$  mV, 电流  $I = 1000$  mA (电源屏幕显示值)

电压  $U_{\text{Meas1}} = 0.002$  mV,  $U_{\text{Meas2}} = 0.002$  mV, 电流  $I = 0.000$  mA, 电阻  $R_{\text{Super}} = 0.000$   $\Omega$   
 乱真电势  $U_{\text{Spur}} = 0.000$  mV, 样品电压  $U_{\text{Super}} = 0.000$  mV, 样品电阻  $R_{\text{Super}} = 0.000$   $\Omega$

$U_i/\text{mV}$	25.05	26.04	27.03	28.05	29.04	30.07	31.07	32.06	33.31	34.07
$U_{\text{Super}}/\text{mV}$	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.003	0.004	0.003
$U_m/\text{mV}$	18.52	18.58	18.61	18.76	18.89	19.06	19.24	19.44	19.79	20.06

0.008										
$U_i/\text{mV}$	35.0	35.1	35.18	35.27	35.35	35.44	35.52	35.60	35.68	35.78
$U_{\text{Super}}/\text{mV}$	0.007	0.007	0.008	0.009	0.009	0.010	0.012	0.013	0.014	0.01
$U_m/\text{mV}$	20.51	20.64	20.60	20.66	20.70	20.78	20.89	20.95	21.04	21.1

$U_i/\text{mV}$	35.35	35.44	35.02	36.11	36.19	36.26	36.35	36.44	36.52	36.61
$U_{\text{super}}/\text{mV}$	0.09	0.085	0.031	0.044	0.063	0.092	0.123	0.138	0.167	0.175
$U_m/\text{mV}$	21.26	21.40	21.52	21.66	21.75	21.78	21.80	21.81	21.82	21.83

36.68	36.77	36.84	36.92	37.02	38.03	39.09	40.68	41.65	42.69
0.186	0.197	0.201	0.204	0.205	0.211	0.217	0.223	0.228	0.234
21.83	21.84	21.86	21.87	21.88	22.20	22.18	22.16	22.13	22.11

苏孝栋

204P. 4-2P

(9)