



# 国外超导技术

第二辑

上海市电器科学研究所编译

上海科学技术情报研究所



**国外超导电技术**

(第二辑)

上海市电器科学研究所编译

\*

**上海科学技术情报研究所出版**

新华书店上海发行所发行

上海商务印刷厂印刷

\*

开本: 787×1092 1/16 印张: 8.25 字数: 200,000

1975年10月第1版 1975年10月第1次印刷

印数: 1—4,700

代号: 151634·253 定价: 1.00元

(只限国内发行)

73.102  
111

# 前 言

《国外超导电技术》共分两辑。第一辑已于1972年5月出版。内容包括：超导电及其应用，和超导材料的制造。本辑为第二辑。内容包括：超导材料的特性测定，低温测试技术，和超导线圈的设计、充电与保护共三个部分。

在第一部分的超导材料的特性测定方面，报道了超导材料基本特性的测定方法，包括临界温度  $T_c$ ，和  $4.2^\circ\text{K}$  时临界电流密度  $J_c$  对磁场强度  $H$  的特性曲线。另外，对于超导材料交流损耗的电气测量法，也作了介绍。

第二部分的低温测试技术包括在深低温条件下测量磁场，温度，和液氮面的各种方法。在磁场测定方面，报导了四种较常用方法。其中探测线圈法简单易行，磁电阻效应法及霍耳效应法可连续测读，便于在工业上使用。核磁共振法精度高，适用于仪器校正及磁场稳定等方面。在温度测定方面，介绍了五种常用温度计。它们各有特点，如气体温度计与蒸气压温度计的构造简单，电阻温度计使用方便，热电偶温度计的测温接头微小，反应快，磁性温度计则适用于  $1^\circ\text{K}$  以下。在液氮面测定方面，先介绍一种最简易的热振荡法，其次是可作连续指示的炭电阻法与超导体法，和精度较高的电容法。最后介绍一种可在强磁场中使用的蒸气压法。

在超导材料的应用中，以超导线圈最为普遍，故在第三部分中，对于它的设计，充电与保护作了综合报道。在超导线圈的设计方面，介绍一种图表法，可快速求出线圈中磁场，线圈尺寸与超导导线长等。在超导线圈的充电方面，分析比较了引入线与磁通泵两种方法的优缺点，和求出最佳引入线尺寸的方法。在超导线圈的保护方面，介绍了并联电阻，振荡回路与变压器三种移能方法，提出把后两种方法结合使用，可获得较好效果。同时还介绍了三种失超检出与电流转换方法。近年来超导电技术发展较快，以上资料中可能有些已经过时，但对于原理上的阐明，则尚有一定参考价值。

在本辑的编译过程中和第一辑一样，得到了上海科技大学等兄弟单位的指导和帮助，在此表示衷心感谢，并殷切希望读者对专辑中的错误和不当之处提出宝贵意见。

编 者

# 目 录

## 一、超导材料的特性测定

1. 临界温度 $T_c$ 的测定方法 .....	1
1) 温度控制 .....	1
2) 温度测定 .....	4
3) $N-S$ 转变点检出 .....	4
2. $J_c-H$ 特性曲线的测定方法 .....	10
1) 一般要求 .....	11
2) 线圈模拟法 .....	12
3) 冻结磁场法 .....	14
4) 连续记录法 .....	15
5) 长线临界电流分布测定法 .....	16
6) 脉冲法 .....	19
3. 交流损耗的电气测量法 .....	28
1) 超导薄膜材料中的交流损耗测量法 .....	28
2) 超导带材的交流损耗测量法 .....	32
3) 超导线圈中的交流损耗测量法 .....	38

## 二、低温测试技术

1. 磁场测定 .....	43
1) 探测线圈法 .....	43
2) 磁电阻效应法 .....	44
3) 霍尔效应法 .....	46
4) 核磁共振法 .....	52
2. 温度测定 .....	61
1) 气体温度计 .....	63
2) 蒸气压温度计 .....	63
3) 电阻温度计 .....	64
4) 热电偶温度计 .....	69
5) 磁性温度计 .....	70
3. 液氮面测定 .....	71
1) 热振荡法 .....	72
2) 炭电阻法 .....	72
3) 超导体法 .....	73
4) 电容法 .....	78

5) 蒸气压法.....	83
<b>三、超导线圈的设计、充电与保护</b>	
<b>1. 圆筒形超导线圈的设计</b> .....	<b>86</b>
1) 几何尺寸及公式.....	86
2) 设计步骤.....	88
3) 示范计算.....	88
4) 电流密度的改变.....	93
<b>2. 超导线圈的充电</b> .....	<b>95</b>
1) 引入线法.....	95
2) 磁通泵法 .....	104
<b>3. 超导线圈的保护</b> .....	<b>113</b>
1) 移能方法 .....	113
2) 失超检出与电流转换方法 .....	121

# 一、超导材料的特性测定

临界温度  $T_c$ 、临界磁场  $H_c$  及临界电流密度  $J_c$  是超导材料的三项主要特性。在实际应用中，希望这三项参数都愈大愈好。从图 1 中可看出，它们规定着材料超导状态的范围。

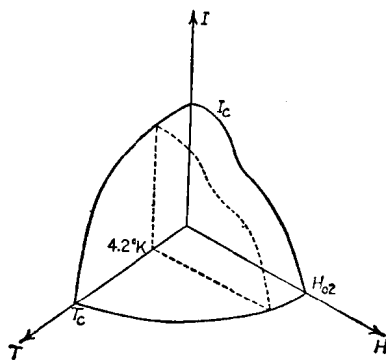


图 1 超导材料的  $T_c, H_{c2}, I_c$  [1]

在这一  $T, H, I$  的三度空间内，包含着以  $T_c, H_{c2}$  与  $I_c$  为坐标的许多点子的空间曲面代表着材料从常导向超导转变（简称  $N-S$  转变）的一个界面，必须把材料分别保持在这界面以内的温度、磁场与电流的条件下，才能显示其超导性。但此曲面仅是理论上的一个概念，实际使用起来则并不方便。故一般都是测定其  $T_c$  值、 $T=4.2^\circ\text{K}$  时的  $I_c-H$  特性曲线，及其  $H_{c2}$  值，作为材料检验与线圈设计之用。最近超导材料在交流方面的使用愈来愈受到重视，故材料的交流损耗也看作是一项基本性能。本章将选载以上这些参数的几种测量方法。它们在精确、快速、简便或价廉等方面各有其可取之处，可供建立我国自己的试验条件时参考。

## 1. 临界温度 $T_c$ 的测定方法

在超导材料的  $T_c$  测定中，主要包括温度控制、温度测定与  $N-S$  转变点检出这样三部

分，要求都能达到一定的精度。现分述如下：

### 1) 温度控制：

在  $20^\circ\text{K}$  以下的温度范围内，可使用液氢（沸点  $20.26^\circ\text{K}$ ，三重点  $13.8^\circ\text{K}$ ）与液氦（沸点  $4.2^\circ\text{K}$ ）作为致冷剂。通过抽气减压，液氢的使用温度可从  $20.26^\circ\text{K}$  降低至  $13.8^\circ\text{K}$ ，液氦可从  $4.2^\circ\text{K}$  降至  $1.0^\circ\text{K}$ 。液氢价廉，容易取得，是其优点。但液氢中由于核自旋方向不同，存在着正氢与仲氢两种状态。在正-仲变换时将产生温度变化。另外，氢有爆炸危险。故在精密测定中与安全措施上须特别注意。液氦操作温度低，且较安全，是其优点，但目前价格昂贵，较为稀缺。一般在适当的恒冷器内使用液氮作冷却剂时，可获得  $20^\circ\text{K} \sim 4.2^\circ\text{K}$  的温度范围。这是通过液氮槽的冷却作用与内加热器的发热作用之间的平衡，把温度保持在  $4.2^\circ\text{K}$  以上任一温度下，并可改变加热器的发热量以调整此平衡温度 [2]。

倘要获得  $4.2^\circ\text{K}$  以下的温度，简单的方法是对液氮抽气减压，可把温度降至  $2.17^\circ\text{K}$ 。在这以下时，因一般液氮（用  $\text{He}^4$  表示）的蒸气压低，而且要产生超流体现象，使蒸发困难，温度停止下降，须使用大容量排气泵，才能获得约  $1^\circ\text{K}$  温度。但若使用另一种同位素  $\text{He}^3$ （沸点  $3.2^\circ\text{K}$ ）以替代液  $\text{He}^4$ ，则因它不会发生超流体现象，而且蒸气压也高得多，故可容易通过抽气减压，把温度降至  $0.3^\circ\text{K}$  左右。这种  $\text{He}^3$  在天然氦气中仅含  $10^{-5} \sim 10^{-4}\%$ ，现在从核反应堆中比较容易获得，但价格还是很贵。上述减压降温法有一个优点，即通过测定其蒸气压，能同时精确地测出其温度 [2]。

$0.3^\circ\text{K}$  以下的温度则须用绝热去磁法来

获得。但最近利用  $\text{He}^4\text{-He}^3$  混合液可把温度下降至  $0.02^\circ\text{K}$  左右。此法的装置比较简单,冷却能力较大,已受到人们重视<sup>[3]</sup>。

以下介绍几种可能采用的控温器方式:

(1) 铜块式控温器<sup>[2]</sup> 此器的略图示于图 2。为了使试样室(直径 40 毫米,高度 70 毫米)的温度均匀,在一只纯铜制圆筒内放着铜块,在其周围粘附着试样与锗(Ge)测温体。在试样室底部装着 4 根 1 毫米直径铜线,浸在液氮内,通过其热传导作用进行温度调节。

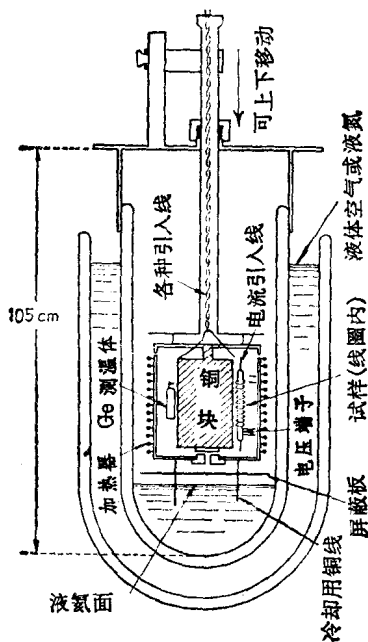


图 2 铜块式控温器略图<sup>[2]</sup>

试样可上下移动。先把它浸入液氮中,使其内部充满着液氮。然后把试样室连续向上提升至适当位置。这时,由于调节了通过铜线从试样室向液氮的热传导、液氮面以上空间内的温度梯度和用无感法缠绕在圆筒外面的锰铜电阻线中的加热电流,可使试样室内的温度以适当的匀速缓慢上升。一般试样室温度以  $0.3\sim 0.4^\circ/\text{分钟}$  的速度上升。试样室内的温度均匀度,在  $8^\circ\text{K}$  至  $12^\circ\text{K}$  范围内为  $\pm 0.05^\circ\text{K}$  以内。这种控温器适宜于  $8^\circ\text{K}$  至  $20^\circ\text{K}$  之间的  $T_c$  测定。

(2) 活性炭式控温器<sup>[4]</sup> 图 3 为这种控温器的断面图。活性炭筒直径 3 厘米,长度 10 厘米左右,用薄铜皮制。其上部通至漏泄考克  $V_1$ , 底部张着金属网。加热器①作活性炭加热用,②作蒸发液氮用,都是用细锰铜电阻线绕制,具有约 200 毫瓦功率。测定物全部埋在活性炭中。因活性炭筒中存在着较大温度梯度,故测定物须用厚铜板包围起来,使温度均匀化。首先把液氮充满至活性炭上面约 20 厘米处。此时,液氮面向控温器底部下沉,直至有数公升左右的液氮在活性炭的冷却中被消耗气化,也即此时的活性炭具有数公升液氮的冷却能力。

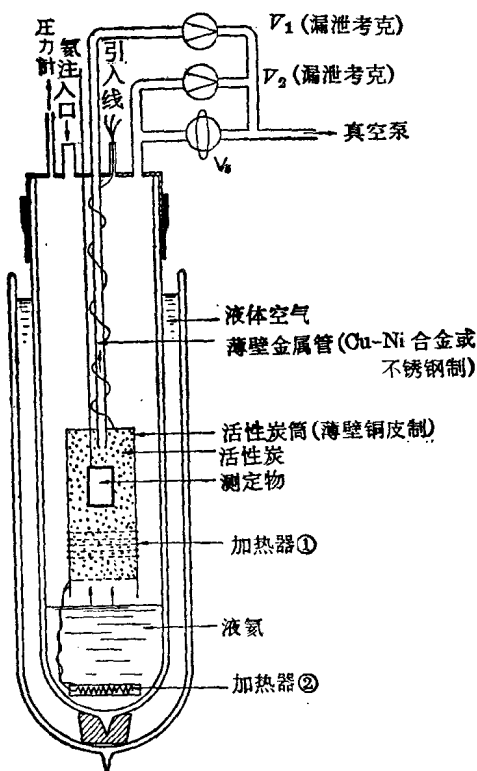


图 3 活性炭控温器断面图

如果要把此控温器用于  $4.2^\circ\text{K}$  以下的实验时,可把此液氮进行减压蒸发。由于吸附在活性炭中的低温氮气的退吸附作用,吸收热量,产生冷却作用,它与从控温器外部泄入的热量,或加热器的发热量取得平衡,使保持在所需温度上。此时不能忘记把图中的漏

泄考克  $V_1$  关闭。当  $4.2 \sim 1^\circ\text{K}$  之间的实验做完后, 用加热器 ② 使液氮面下降至活性炭筒的下端部位。于是把  $V_2$ 、 $V_3$  关闭, 用  $V_1$  与加热器 ① 进行温度控制。使用这种控温器时, 试验温度须从低温侧开始, 依次向高温侧上升。因吸附了氮气的活性炭, 其热容量很大, 测定物的温度上升非常缓慢, 故能获得精密的温度控制。它适用于  $4.2^\circ\text{K}$  至  $20^\circ\text{K}$  之间。但若温度已升至  $20^\circ\text{K}$ , 则不可能再回复至液氮温度了。

根据经验, 从液氮面位于活性炭筒的底部时开始, 中间经过了充分多的次数测定, 到达  $20^\circ\text{K}$  时, 经历了 5 小时左右。这仅是一个例子, 具体情况随着控温器设计与测定条件的不同而异。但在此温度范围内, 可做到在任一规定温度下, 保温 10 分钟至 1 小时左右。此时必须经常操作漏泄考克  $V_1$  以增减氮的退吸附量。在温度的稳定度方面,  $20^\circ\text{K}$  以下时, 如加注意, 可达到  $0.001^\circ\text{K}$  的精度。但在  $20^\circ\text{K}$  以上, 则由于氮已贫乏, 将降至  $0.01^\circ\text{K}$  左右。只要控温器底部还有剩余液氮, 或活性炭已充分地吸足了氮气, 则即使在  $60^\circ\text{K}$  左右以上, 温度控制还有可能。但若液氮和吸附氮都已用完, 则温度控制将不可能, 活性炭筒的温度将均匀上升。

这种控温器的构造简单, 使用方便, 且可正确控制温度。但其缺点为不能从高温侧依次向低温侧变化试验温度。使温度控制顺利进行的关键在于很好发挥漏泄考克的功能。对于这种漏泄考克, 一般气体漏泄阀颇为适用。

图 4 所示为使用此控温器控制温度的一

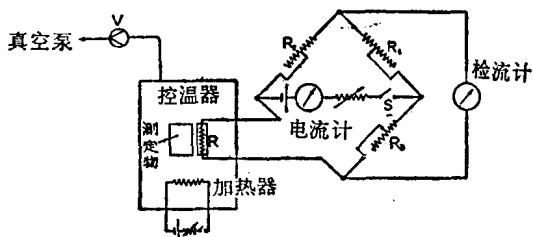


图 4 活性炭式控温器控制温度举例<sup>[4]</sup>

个具体例子。把预先进行分度的电阻温度计  $R$  与测定物很好地热接触, 装入控温器中, 来监视温度。  $R_1$ 、 $R_2$  与  $R_3$  为四转盘可变电阻器, 与  $R$  接成一套惠斯登电桥。当温度稳定在规定值  $T^\circ\text{K}$  以后, 在  $R(T) = R_2 R_3 / R_1$  的关系下, 增减各个电阻, 使电桥平衡, 检流计读数为零。于是以此作为标准, 操作漏泄考克  $V$  与加热器以保持电桥平衡。从灵敏度方面来看, 流经电桥的电流大一些好。但过大时,  $R$  上的焦耳热损耗将干扰着测定温度。以常温值为几十欧的炭电阻为例, 其阻值在  $10^\circ\text{K}$  时约为几百欧, 通入电流以几个微安至几十微安为宜。这时, 在  $20^\circ\text{K}$  以下, 可获得  $0.001^\circ\text{K}$  的稳定度。这样的稳定化操作还有可能进一步改为漏泄考克的自动化操作。

(3) 铜棒式控温器<sup>[5]</sup> 这是一种很简便的方法, 它可把温度在  $4.2 \sim 10^\circ\text{K}$  范围内变化, 具有  $0.1^\circ\text{K}$  以内的精度。一般造成温度波动的原因有两方面: 一是测定物的热容量太小, 二是受到发热体向液氮热传导率急剧变化区域的影响。为了消除这些因数, 使用一支 8 毫米直径, 50 毫米长的铜棒, 在其中心附近, 开出一条小槽, 把  $1/8$  瓦-100 欧炭电阻大体上去掉一些表面绝缘, 埋在此槽中; 在它上面, 无电感地 (即先把线对折后再绕) 绕上约 20 厘米长超导线 (试样), 上面缠绕着 2 毫米厚的塑料带, 再把锰铜电阻线以约 0.5 毫米间隔沿着 50 毫米长度均匀地绕在它上面, 再用塑料带绕至 1 毫米厚度。最后用真空密封胶涂布整体, 加以固定 (厚度约 1 毫米)。因为用了铜棒, 提高了测定物的热容量, 同时均匀温度的部分可大为增加。另外, 通过塑料带与密封胶, 可防止液氮从微弱的核式沸腾向剧烈的膜式沸腾转化, 避免了由此产生的热传导率的急剧变动。这样, 可基本上把温度波动压缩至  $0.1^\circ\text{K}$  以内 (在  $4.2^\circ\text{K}$  至  $10^\circ\text{K}$  的整个范围内)。

以上三种控温器中, 除第 1 种适宜于一



般 $T_c$ 测量外,第2种的特点是保温时间长,控温精度高,而第3种则构造简单,体积小,它们可使用于一些特殊情况。

### 2) 温度测定:

关于温度测定,将在以后详述,这里简单提一下。在 $15^{\circ}\text{K}$ 至 $4.2^{\circ}\text{K}$ 的温度范围内,测定精度高的温度计较少。锗测温体在 $20^{\circ}\text{K}$ 以下的整个温度范围内,感度高而再现性好,但其缺点为价格高。炭阻温度计在再现性方面比锗差,但价格低廉,而且可简单地校正。其温度可从电阻值中用经验公式求出,一般得到广泛的使用。可用一般炭电阻产品,其中有的再现性较好,颇为适用。至于其他种类的温度计,可参阅第二、2节。

### 3) $N-S$ 转变点检出:

超导体有两种性能不同于其他金属,即电阻的消失与磁通从体内排出。故在临界温度 $T_c$ 下, $N-S$ 转变点的检出可在原理上利用这两个特点,分别采用电阻与电感这样两种方法。电阻法是根据试样电阻下降为零来检出 $N-S$ 转变点,而电感法则根据试样从常磁性转入完全抗磁性来检出转变点。两法相比,以电感法具有较多优点。第一,在电阻法中,超导转变宽度主要取决于测量电流值。它随着电流上升而增大,从而减低了 $T_c$ 测定的精度。第二,当材料内部有几种不同 $T_c$ 的相时,电阻法仅能测出其中最高的一个 $T_c$ ,其余更低的 $T_c$ 则不能测出。但电感法可把各相的 $T_c$ 分别测出,并能估计各相的大致含量。往往电阻法测得电阻为零时,电感法则还能进一步测出,仅其中一小部分是在超导状态下。第三,电感法可测量任何形状的试样,而电阻法则必须使用线带材。下面将分别介绍电阻法和三种不同方式的电感法,即:频率法、电感电桥法与谐振电桥法。

(1) 电阻法<sup>[6]</sup> 测定回路如图5所示。这是一般四端子电阻测定回路。在锗(Ge)测温体与试样中通入恒定电流,把它们上面的电压降分别通过直流放大器送入XY记录仪

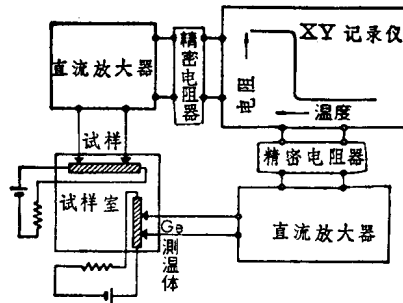


图5 电阻法测定 $T_c$ 的回路<sup>[6]</sup>

仪的 $X$ 轴与 $Y$ 轴,自动记录出试样电阻随温度的变化曲线。在到达 $T_c$ 时,电阻突降至零。 $XY$ 记录仪上的指示值,可通过电位差计与精密电阻器进行标定。使用此法时,试样温度可确定在 $\pm 0.05^{\circ}\text{K}$ 以内的精度上,试样的测定长度为35毫米,电压端子是两片刀刃,压在试样上面。

在 $4.2^{\circ}\text{K}$ 附近的深低温下,试样与测温体的热容量都非常小,仅需微小热量就能使温度升高。故测量电流应尽可能减小,以降低电阻上的损耗发热。还有从常温下引入深低温区的接线应尽量减细,以减少热量导入。因测量电流小,检出电压必将微弱,一般仅数微伏至数毫伏,故必须在热电势小的回路中进行测量。

(2) 频率法<sup>[6,7]</sup> 所用测定回路如图6所示。这是一个电子管振荡器回路。试样插在线圈 $L$ 中,线圈 $L$ 与电容器 $C$ 构成了此振荡器的 $L-C$ 槽路。它们决定着振荡频率。当试样在临界温度 $T_c$ 下从常导转入超导时,磁通从试样体内排出,使 $L$ 产生变化,振荡频率

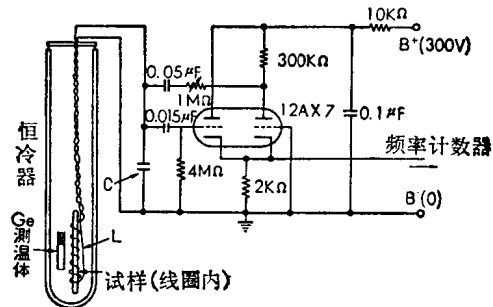


图6 频率法 $T_c$ 测定回路<sup>[6]</sup>

也即随着变化。可把输出信号接至频率计数器以测出这一变化。所用电子管为孪生三极管(如美国牌号 6SL7, 或 12AX7 等), 即在同一玻壳内有两只三极管。 $L-C$  槽路接在左管的栅极回路内。左管栅极上的信号, 经过左管放大后, 出现于它的  $2k\Omega$  阴极电阻上, 再输入至右侧第二级电子管的栅极上, 经过右管第二级放大后的信号分别出现于  $\sim 300k\Omega$  屏极电阻与  $\sim 2k\Omega$  阴极电阻上。通过  $1M\Omega$  电阻与  $0.05\mu F$  电容, 把屏极电阻上的部分信号正反馈至左管的栅极, 即此反馈信号刚好与左管栅极上的原信号同相, 起着增强作用, 使回路发生振荡。但同时阴极电阻上的信号又对左管栅极进行负反馈, 即它在左管栅极上起着部分抵消原信号的作用。此负反馈虽减低了放大倍数, 但同时也减低各种变动因数的影响, 从而显著提高频率稳定性, 有助于频率的精密测定。振荡器的振幅可通过  $1M\Omega$  反馈电阻与屏极电压来调节。

线圈的电感  $L$  是同它内部磁通所占空间的断面积  $A$  成正比的, 而此断面积  $A$  等于线圈与试样间的空隙, 加上磁通透入试样表面的深度  $\Delta\lambda$ 。在常导状态下, 此  $\Delta\lambda$  相当于高频下集肤效应所规定的数值, 而在超导状态下, 则磁通基本上都被排出体外, 其透入深度将比集肤效应小很多(估计约小两个数量级)。故此时的电感变化  $\Delta L$  将如下式所示:

$$\text{电感变化 } \Delta L = \text{总电感 } L \times \frac{\text{透入深度变化 } \Delta\lambda \times \text{试棒圆周}}{\text{磁通所占总面积}} \quad (1)$$

从上式可知, 要获得高灵敏度,  $A$  应尽量缩小, 也即把线圈尽量紧靠试样。但实际上有一定限度。一是不能把线圈直接绕在试样上, 以避免试样表面受到应力而使  $\Delta\lambda$  改变。二是这样的电感值将过小, 使  $Q$  值 ( $Q = \omega L / R$ ,  $\omega$  为角频率) 过低, 造成振荡不稳定, 甚至有可能不起振荡。一般可采用 2 毫米直径试样, 把长 20 毫米左右的线圈(共约 860 圈)绕在玻璃管上, 套在试样外面。这样, 线圈与试

样间的空隙将在 1 毫米以上。线圈位于试棒中部, 两端留出一定距离, 以消除末端效应。用蜡把试棒固定在玻璃管上, 以防止移动, 但仍留着空隙, 让液氮能在线圈与试棒间流通。

振荡频率一般采用 100 至 300 千周。它不能选得过高, 以保证集肤深度比透入深度大得多。从测得的  $N-S$  转变时的电感变化中, 可用式(1)求出集肤深度  $\Delta\lambda$ , 它约为 0.7 毫米。这样可获得约 10% 的频率变化。线圈与试样间的杂散电容估计可达 50 微微法, 与一般采用的调谐电容  $C$  的数值 0.072 微法左右相比, 则小于 0.1%, 故它对频率变化的影响可忽略不计。在另一方面, 振荡频率又不能选得过低, 因要求能用频率计数器在短时间内以高的精度测出频率。如果计数器每 10 秒钟内记下周波数, 则测得的频率可精确至 0.1 周/秒。以 100 千周的频率计算, 则可达百万分之一(1ppm)的精度。如果温度保持恒定, 振荡器频率一般可在 1 小时以内保持这样高的稳定性。

图 7 表示锡晶体棒在线圈中的  $N-S$  转

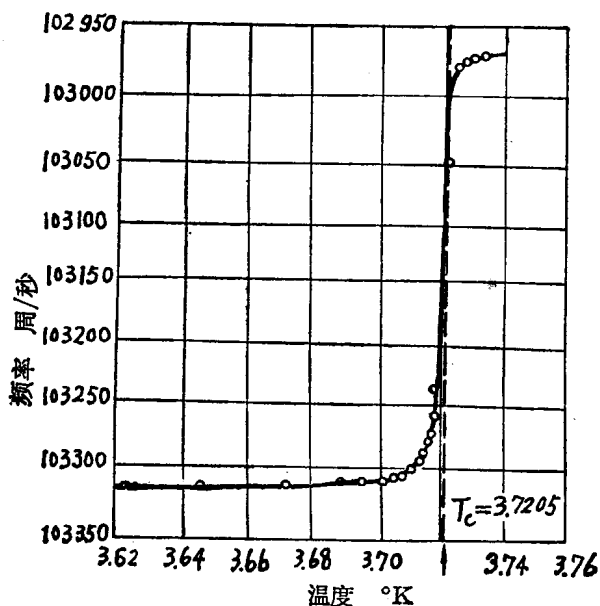


图 7 锡晶体从常导至超导转变时振荡器频率的变化<sup>[7]</sup>

变曲线。从其敏锐的转变中，可测出  $T_0 = 3.7205^\circ\text{K}$ ， $T_0$  取在转变曲线的中心点上，测量精度约为  $0.0005^\circ\text{K}$ 。

(3) 电感电桥法(测定  $T_0$  与超导相含量)<sup>[8]</sup> 所用回路如图 8 所示。这是把一个交流信号(频率 1 千周/秒)加至一台由试样线圈,  $L_2$  和电阻  $R_1$  与  $R_2$  所组成的电桥上。把出现于 AA 点之间的交流电压通过一只放大器, 接至一只直流电压表。另外还有一个经过相检出器整流后的单向半波信号也送入此表中。两者混合在一起, 使直流电压表接收着一个比例于电桥信号的直流电压。(显然, 这里的相检出器是原作者利用手边现成的仪器, 而不是一定要采用这种方法来把交流信号变为直流的, 又图中右侧二极管应向左。)

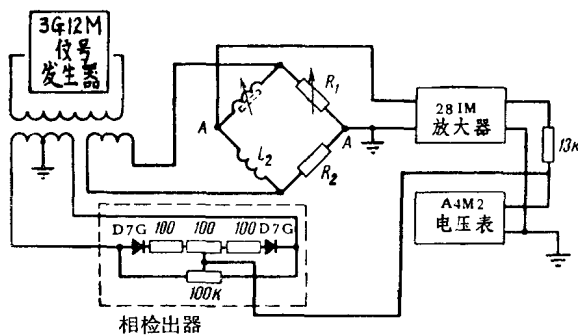


图 8 测定  $T_0$  用装置的回路<sup>[8]</sup>

把试样放在试样线圈内。当试样转入常导状态时, 导磁率  $\mu$  在一定温度范围内, 从 0 变为接近于 1。因试样线圈的电感值比例于  $\mu$  值, 故来自 AA 点的信号也比例于  $\mu$  值。当试样在超导状态下时, 调节电阻  $R_1$  使电桥平衡。当试样转入常导状态时, 将出现不平衡信号。若发生器交流峰值电压为 20 伏, 则不平衡信号将从 0 上升至 2 伏左右, 故可容易地测读出来。

此装置采用一种气体温度计, 以测量温度, 如图 9 所示。试样与感应线圈放置在一只铜罐内的铜夹具上。通过蒸发使液氮面下降以变化温度。温度的变化速率约为 0.15 度/分钟。此法的温度测定误差, 可推导如下:

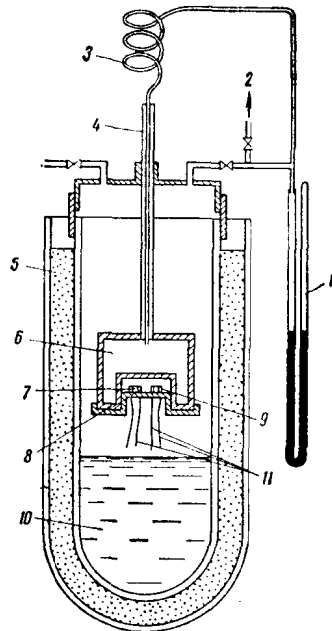


图 9 气体温度计示意图<sup>[8]</sup>

1—压力计 2—真空泵 3—毛细管 4—移动棒 5—液氮 6—气体温度计 7—试样 8—测量线圈 9—补偿线圈 10—液氮 11—接线

设  $T_x$  为被测温度,  $V_b$  为铜罐体积,  $V_{ds}$  为闲体积, 即在毛细管与压力计中的气体体积, 其温度  $T > T_x$  (如等于  $300^\circ\text{K}$ ),  $P_x$  为在温度  $T_x$  下的压力计读数,  $P_{4.2}$  为在  $4.2^\circ\text{K}$  温度下的压力计读数, 则因:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

当不考虑闲体积  $V_{ds}$  时,

$$\frac{P_x V_b}{T_x} = \frac{P_{4.2} V_b}{4.2} \quad (1)$$

$$T_x = \frac{4.2}{P_{4.2}} P_x$$

设已知  $P_{4.2}$  及  $P_x$ , 则可算出温度  $T_x$ 。当考虑闲体积时, 把  $T_x$  改为  $T'_x$ , 则:

$$\frac{P_x V_b}{T'_x} + \frac{P_x V_{ds}}{300} = \frac{P_{4.2} V_b}{4.2} + \frac{P_{4.2} V_{ds}}{300}$$

$$\frac{P_x V_b}{T'_x} = \frac{P_{4.2}}{4.2} \left[ V_b + \frac{4.2}{300} V_{ds} \left( 1 - \frac{P_x}{P_{4.2}} \right) \right] \quad (2)$$

式(1)除以式(2)减 1:

$$\frac{T'_x}{T_x} - 1 = \frac{\Delta T'}{T_x} = \frac{V_b}{V_b + \frac{4.2}{300} V_{ds} \left( 1 - \frac{P_x}{P_{4.2}} \right)} - 1 \quad (3)$$

图 10 表示  $P_{4.2}=170$  毫米水银柱、 $V_0=47(\pm 8)$  厘米<sup>3</sup> 及  $V_{as}=6(\pm 2)$  厘米<sup>3</sup> 时的  $\Delta T$  对  $T_c$  的关系曲线。可看出最大偏差约为  $T=17.8^\circ\text{K}$  时的  $0.2^\circ\text{K}$ 。这样的精度对于试验新合金的  $T_c$  与研究宏观现象已很足够。试验误差是在计算误差限度以内 (1~2%)。用此方法在不同时间内测得的 Pb 与 V-Ga 合金的转变曲线示于图 11。

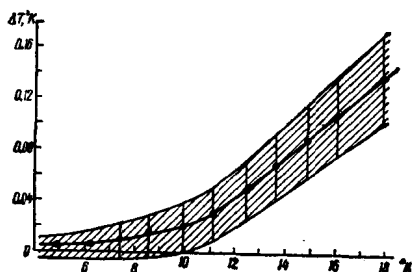


图 10 气体温度计测定温度中的系统误差对温度的关系<sup>[8]</sup>

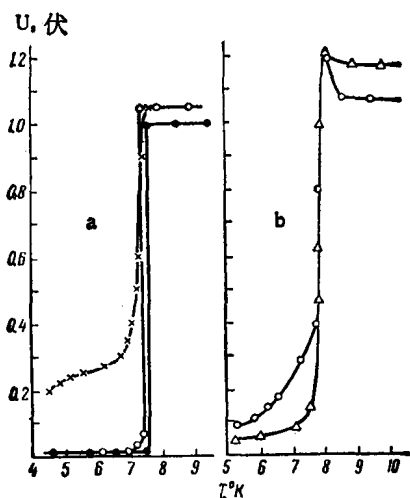


图 11 在不同时间内测得的 Pb(a) 与 V-23%Ga 合金(b)的临界曲线<sup>[8]</sup>

此装置开始时每灌一次液氮可测 6 只试样。经改进后试样数目可增至 10 只。感应线圈绕在内径 4 毫米、高度 5 至 6 毫米的纸质管子上, 每只绕 500 圈。这样的装置与方法都比较简单, 且测得结果的再现性也较好。

上述方法还能显示出试样中超导相的含量。在测定不同厚度的 V-Ga 与 V-Si 扩散

层  $T_c$  时, 获得了不同的信号强度, 它随超导相的含量变化。此时所用试样是一束 10 至 20 根 0.2 毫米直径、10 至 12 毫米长的线材。这种线束中的 V-Ga 或 V-Si 超导相的体积可从公式  $V=n \cdot h \cdot 2\pi r \cdot l$  中算出, 其中  $n$  为试样中线的根数,  $h$  为层厚,  $r$  为线的半径,  $l$  为其长度。此体积在  $(0.63 \sim 151) \times 10^{-4}$  厘米<sup>3</sup> 范围内, 而试样总体积为  $(31 \sim 300) \times 10^{-4}$  厘米<sup>3</sup>, 即超导相在试样中所占比例为总体积的 2~50% 之间。钒心线在  $5.3^\circ\text{K}$  以上已变为非超导相。当试样上的镀层厚度为 1 微米的最小值时, 超导相体积仅占 2%, 超导层的  $T_c$  仍能清晰地测出, 且得到具有再现性的结果 (在试验误差限度内)。随着层厚的增大, 相应的信号强度也增大。

曾在形状完全等同的一些特制试样上验证本装置对超导相含量的显示能力。这些试样中含有不同比率的同一种超导相。此超导相用电子束熔化铌制成, 其直径为 2.5 毫米, 长度 6 毫米 ( $V=270 \times 10^{-4}$  厘米<sup>3</sup>)。把这种铌含量分别为 2 与 50 体积% (体积%为按体积计算的%, 下同) 的试样进行测量。这些铌试样放在测量线圈内孔中的铜块内。含  $5.4 \times 10^{-4}$  厘米<sup>3</sup> 体积 (2%) 的试样在电桥上测得的信号值为 0.07 伏。但本装置可能测出的最小信号为 0.01 伏。故还能测出比上述含量更小的超导相  $T_c$ 。若把输入信号增高至 20 伏, 则装置灵敏度还可提高。如图 12

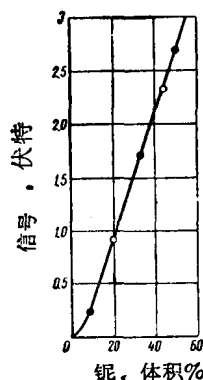


图 12 信号值对 Nb 在试样中体积%的关系<sup>[8]</sup>

所示,电桥上的信号随超导相含量的增大而增大。当含量超过5体积%时,具有一个线性关系。当含量微小时则偏离于此线性关系。显然,这同测定  $T_c$  与计算铌体积时的试验误差有联系。

在以上试验中是把密实体积的铌放在试样中。但在实际的合金中,超导相是弥散分布在试样整个体积中的。为了模拟这种情况,用细的铜与铌粉混合在一起,做成  $270 \times 10^{-4}$  厘米<sup>3</sup> 体积的试样。其中的铌含量相当于20%与40%。这些试样的相应信号值都刚好落在图12的关系曲线上。因此,上述方法可用来定量地测出超导相在合金中的体积%。但输出信号不仅与超导相的比率有关,还和此相在常导状态下的剩余电阻有关。故设试样中有几种相存在,则信号对体积间的关系就不那么简单。须另用标定曲线来确定相的体积比率。故从一个超导合金系统转入另一个时,须注意到这一点。用这种方法确定合金中超导相体积比率的误差不会大于5~10%。

因此上述测定  $T_c$  的方法还可用于超导合金的理化分析。在两种超导金属或化合物的系统中,当形成了一种连续系列的固溶体时,将产生  $T_c$  的平滑变化。而在每一相转变的边缘处,则在相应的  $T_c$  对合金成分的关系曲线上,有一个形状上的突变。如 Nb-Ti, V-Ti, 与 W-Os 系就有这种现象。有迹象表明,超导特性对于合金成分的变化主要同溶解度变化有联系。在某些合金中,除了一种主要超导相以外,往往还有少量其他具有不同  $T_c$  的超导相,这时的转变曲线将产生扩散现象。这种现象在 V-Si 与 V-Ga 系的完全平衡合金中可以看到。设合金中的几种超导相,它们的含量是可相比拟的,则转变曲线上将出现转折点,或在某些情况下,出现特有的阶跃现象。这些阶跃上的温度即相当于各个超导相的  $T_c$ 。

为了验证这种现象,用铅、铌与钒的粉末

均匀混合,压成试样,其中每种金属占有规定的体积。这些试样的转变曲线上清晰地出现了相当于纯金属  $T_c$  的阶跃(图13)。混合试样的转变曲线基本上与多相 V-Ga 合金并无不同之处,仅是后者的阶跃清晰度较差,可能是由于合金中某些微细不均匀性所造成的。

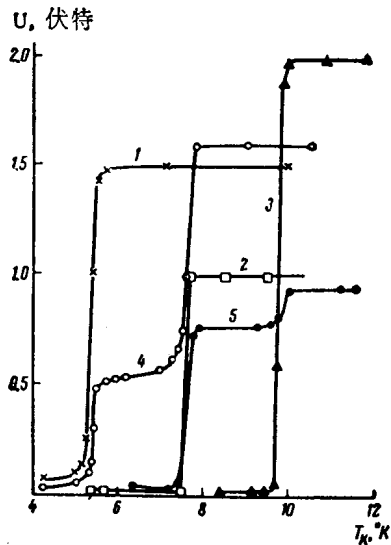


图13 钒、铅、铌和这些金属粉末的混合物压块的转变曲线。1) 电解铌; 2) 铅; 3) 电子束熔化铌; 4) 40%V 与 60%Pb (混合物); 5) 20%Nb 与 80%Pb (混合物)。<sup>[8]</sup>

(4) 谐振电桥法<sup>[9]</sup> 在前述的频率法中,有一个振荡器频率不稳定问题。其原因可能是由于线圈浸在液氮浴中,当抽气降压冷却,液氮翻腾泡沫时,改变了线圈周围的介质常数。故在本方法中使用一种平衡电桥以显著减低这种翻泡影响。并可利用线圈的电感与损耗两方面变化以增高检出灵敏度,使能检出1毫克以下试样中的超导性。

所用设备包括一只振荡器,一只并联谐振电桥回路和一只检出放大器。振荡器对电桥回路供给1伏、100千周/秒频率的信号。设放在电桥的试验线圈中的试样转入超导状态时,电桥将失去平衡,使在接至检出器输入端处出现一个信号。检出器放大了这个信号。把放大后的输出作为温度的函数,标绘

出来,以显示试样的超导转变。

装置中所用振荡器为一台 260A 型 Booton Q 值表中的一个部分。任何能供给 1 伏输出、20~200 千周/秒频率的稳定振荡器都能使用。对其稳定性进行校验,要求能保持电桥零值信号小于 0.1 毫伏。一个  $\pm 18$  周/秒的频率稳定度已能适用于这一目的。另外,还校验了振幅变化对电桥零值输出的影响。当电桥输入从 0.1 伏变化至 1 伏时,未发现有何移动。

电桥回路如图 14 所示。它含有两套并联谐振回路,它们的构造完全相同。线圈绕在 0.25 吋直径胶木管上,用 40 号漆包铜线绕了 250 圈,线圈长 0.4 吋。把线圈调谐至约 100 千周/秒,使用 2 只 2700 微微法银膜云母片式电容器进行调谐。图 15 表示线圈和电容器的相对位置,两只线圈与两只 2700 微微法电容器装在恒冷器内部,直接浸在深低温液浴中,或需在较高一点温度时,则放在液浴上面。其他部件则装在恒冷器外面的控制箱中。电桥两侧的构造相同,以消除杂散

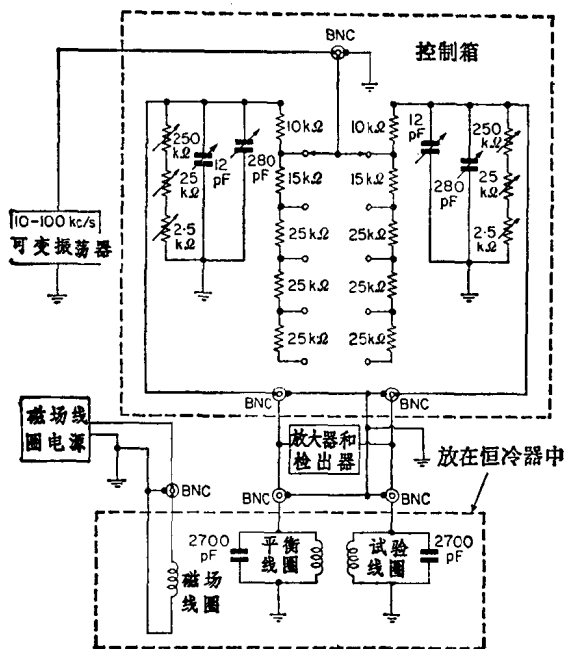


图 14 测定  $T_c$  用电桥回路<sup>[9]</sup>  
(BNC 为插入式接头)

电容效应。这种杂散电容将使振荡频率漂移,造成系统的不平衡。

因电桥在桥臂相等时最灵敏,故在控制箱中有一套转换回路,它能使两电阻臂的阻抗同并联谐振回路中的阻抗相等。

放大器与检出器分别为 Tektronic 53/54D 型插入式差动放大器和 Tektronic 545 型示波器。其灵敏度为 1 毫伏/厘米,使能获得一个小于 0.1 毫伏的平衡状态。若在示波器前面加一只前置放大器,则灵敏度还可提高。但示波器的灵敏度对于现在目的已能满足,它从一只 150 微克锡试样中获得了 4.5 毫伏的不平衡信号。

磁场线圈用 4 层 0.010 吋直径的铍钴合金线绕制。线圈底盘具有 1 吋外径, 0.8 吋内径, 4 吋长度。其作用为保证在电桥的两

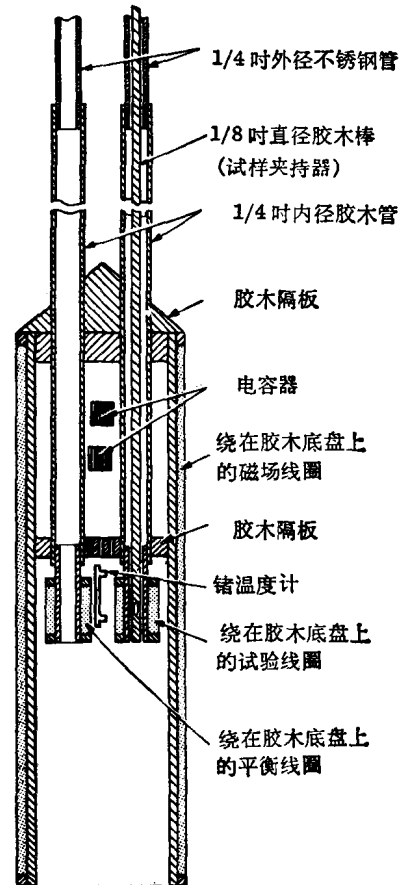


图 15 图 14 中电桥的线圈与电容器<sup>[9]</sup>

只线圈处有一个均匀磁场。当试样转入超导状态时,将把磁通从其体内排出,在线圈中感应出电压,以增强电桥的反应。在线圈内部测得的磁场强度为 180 奥/安。因铌锆线在 12.5°K 左右是超导性,故当液浴在此温度以下时,将不会由于磁场线圈中的电流而在液浴中散发热量。送入磁场线圈中的任何交流电流将在两只电桥线圈中产生磁场,故磁场线圈的电源应是纯粹直流。

当一个非磁性导体被放在线圈内的交变磁场中时,将使线圈的电感与损耗产生变化。电感的变化是由于集肤效应,即高频交变磁场不能完全透入导体所造成的。透入深度(集肤深度)  $D = K \left( \frac{\rho}{\mu f} \right)^{1/2}$ , 其中  $\rho$  为该导体的电阻率,  $\mu$  为导磁率,  $f$  为交变磁场的频率,  $K$  为常数。而线圈的电感  $L = C \frac{N^2 A}{l}$ , 其中  $C$  为常数,  $N$  为圈数,  $A$  为线圈断面积,  $l$  为线圈长度。因交变磁场不能透入导体内部,使线圈的有效断面积  $A$  减小,电感  $L$  因而也减小。线圈  $Q$  值  $= \frac{\omega L}{R}$ , 其中  $\omega$  为角频率 ( $2\pi f$ ),  $R$  为回路电阻。当试样在常导状态时,交变磁场将在其中产生涡流。这些涡流在试样中产生  $i^2 R$  损耗,反映为  $R$  的增加,从而产生一个相应的回路“ $Q$ ”值的降低。当试样在超导状态下,则试样中的感应电流将不再产生  $i^2 R$  损耗,回路电阻减小,使回路“ $Q$ ”值增高。以上两种效应都能造成电桥不平衡,使在检出回路中出现一个信号。这时应调节可变电容器以补偿电感变化,调节可变电阻器以补偿“ $Q$ ”值变化,使系统达到平衡。

图 16 表示两条用本装置测得的典型超导转变曲线。所用的钽为高纯度晶体棒状钽,它显示出一个尖锐的转变点。所用的锡为 99.9999% 纯度,但曾把它加热,做成小球珠。因加热可能引起某些氧化作用和应力,故造成较宽的转变过程。若把 150 微克的锡

以扁平的片状放入装置中,则试样转入超导时所产生的不平衡信号为 4.5 毫伏。开始是把此电桥平衡至小于 0.1 毫伏。此装置很稳定,小于 0.1 毫伏的平衡状态可保持长达 5 小时之久。当此装置用于液氮浴中,从 4°K 冷却至 1°K 时,即使在高的抽气速率下,平衡度变化保持在 0.2 毫伏以下。

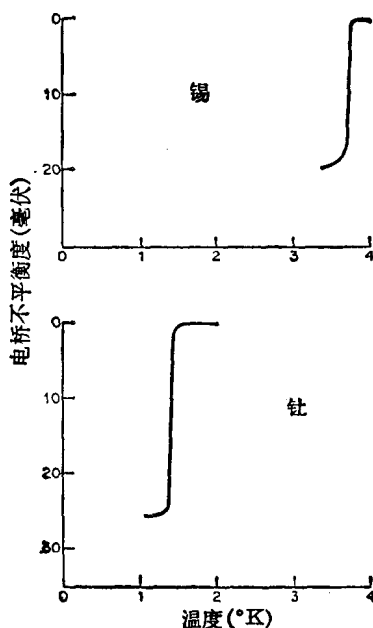


图 16 锡与钽的超导转变<sup>[9]</sup>

## 2. $J_c-H$ 特性曲线的测定方法

因临界电流密度  $J_c$  是随着所处磁场的强弱而变化的,故须测出  $J_c$  对  $H$  的整条关系曲线,才有实用意义。测定短线试样临界电流的装置,概略地示于图 17。图中所示为测定 4.2°K 时的  $J_c-H$  特性曲线的情况。如果要测定 4.2°K 以外温度下的特性,则须增加适当的温度调节装置。另外,图中表示外部磁场与电流垂直 ( $H \perp I$ ) 情况下的  $J_c-H$  特性测定。但有时还需要测定两者平行 ( $H \parallel I$ ) 时的特性。还有在带状试样的情况下,当  $H \perp I$ , 但与带面成一角度,则往往须测定  $J_c-H$  特性对此角度的函数。此时须采取与此相适应的方式来安装试样。在下面将首先

介绍测定此曲线时的一般要求。除此以外，为了快速与简便地测得精确数据，还采取了一些特殊方法，现逐一介绍如下：

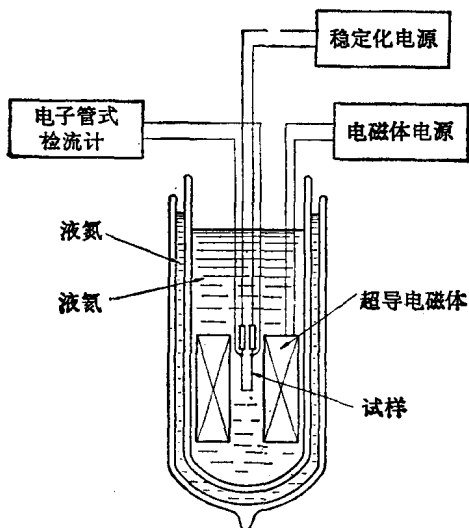


图 17 短线试样临界电流特性的测定装置<sup>[10]</sup>

### 1) 一般要求<sup>[10]</sup>：

(1) 电磁体 这是用来对试样施加适当磁场的，可分为普通铜线电磁铁与超导电磁体两种类型。超导电磁体与普通电磁铁相比，在产生同一磁场时，体积可显著缩小，因它没有电力损耗，可使用小型小容量电源，且不需要大型冷却水设备。但超导电磁体容易产生突然失超现象，操作时须特别注意。

此外，使用电磁铁时所应注意的问题是磁场的测定。对此后面还要详述，这里主要提出这样两点，即：一般电磁铁中的铁具有磁滞现象；故在同一电流值下，不一定就出现同一磁场，每次测定时，最好用核磁共振式磁场

计等来核对是否有误。另外，即使在超导体中，由于线材的硬超导性，也将显示出少量的磁滞现象留下了残余磁场，须加注意。

(2) 电源 临界电流测定用的电源须具备如下条件：要有足够大的电流容量，随时间的稳定度高，纹波含量要少，电流可作线性变化，同时，为了保护试样，当试样转入常导产生电压时，要能自动断开电流。一般使用的电源如图 18 中所示的方块图。

在电源回路方面，须用较大电流容量的整流器，而以锗或硅等半导体整流器较为适用。临界电流  $I_c$  对于小量纹波的影响很敏感，在进行磁通跳跃等测定时，纹波的存在成为致命伤，故整流后必须通过滤波器获得直流的充分平滑化。也可采用蓄电池作为电源，以获得根本不含纹波的纯粹直流。但大电流蓄电池的体积庞大，且须定期充电，电压又不能连续变化，是其不便之处。

稳定化回路的作用是检测输出电流，把此信号与基准比较，将两者间的差额放大，使其操作控制部分，反过来控制输出电流，以消除此差额。一般使用低频大功率晶体管，把它们串联后，插入回路中。通过变化其基极电流，以控制发射极-集电极间的电流。由于在电流下发热，须使用散热板进行强制冷却。

在试验电缆与绞线等大电流容量的超导线时，可使用电动机直流发电机组等。电动机发电机的交流侧与直流侧之间只有机械上的连结，在电压上不需要有一定的联系。通过发电机的磁场调整，直流电压可在较宽广的

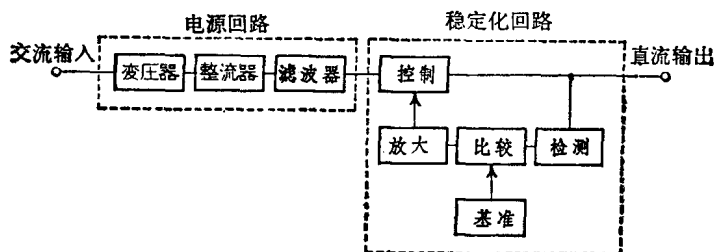


图 18 直流稳定化电源回路方块图<sup>[11]</sup>



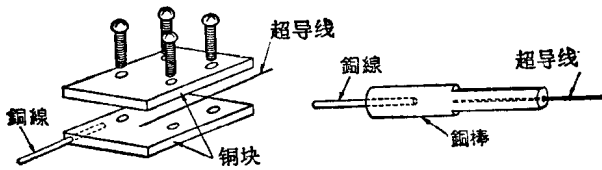


图 19 S-N 接头举例<sup>[12]</sup>

范围内变化, 较为方便。

(3) 引入线 为了节约每次试验中所使用的液氮量, 应尽量减少向低温槽流入的热量, 极力避免不必要的液氮蒸发, 如果供给电流用引入线过粗过短, 则从常温向低温的热流入量将增大。又若相反, 用得过细过长, 则电阻增大, 电流的发热量也增大, 故须注意选用适当尺寸。但在测定  $I_0$  时, 电流从零连续变化至  $I_0$ , 又须采用各种不同的变化速度, 加上通电时间与停电时间的比率不是一定的, 故难以严格选定最适宜的引入线尺寸。但有一个很有效的方法是利用回收的蒸发氮气来预冷引入线, 可显著减少流入液氮中的热量。为此目的, 可改用方线, 使断面积不变而能增大表面积, 以提高预冷效果。因低温部位的铜电阻小, 仅为常温值的一百几十分之一, 故其截面可减细。但在接近常温处则须相应加粗。

(4) S-N 接头与分流器 对于超导线与引入线的连接部分(S-N 接头) 必须加以充分注意。这是因为连接部分不良所引起的超导破坏, 同达到  $J_c$  时的超导破坏, 两者不易区分, 从而使测得的数据混淆不清。故 S-N 接头须有充分能力让试样临界电流顺利通过。常用的方式如图 19 所示, 或用铜块夹紧, 或在铜棒中打孔, 用钢预加钎焊, 再把经过超声波钎焊后的线插入, 加以钎焊, 然后把铜棒压扁。这样, 在 0.25 毫米直径的线上可容易地流过 200 安培左右的电流。

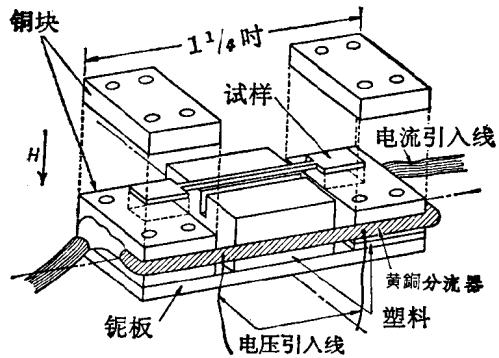


图 20 试样保护用分流器<sup>[12]</sup>

当超导性破坏时, 试样上将产生电阻。如果让大电流照样流过, 则试样有烧损危险。故如图 20 所示的例子, 把黄铜分流器与试样并联, 当超导性被破坏时, 电流可经分流器流过。为此, 分流器电阻必须选用比超导材料在常导状态下的电阻小得多的数值。

(5) S-N 转变的检出 当到达临界电流时, 试样中将出现电阻和产生电压。在临界电流小的情况下, 如果电流变化是缓慢进行的, 则电压也将缓慢出现, 电流-电压特性将具有可逆性。但另一方面, 在  $10^4$  安培/厘米<sup>2</sup> 以上的大临界电流的情况下, 即使出现了微小的电阻, 由于电力损耗增大, 将使温度急剧上升, 超过了临界温度  $T_c$ , 使电压急剧而又不可逆地上升。因此, 用一般电流表难以测得正确的  $I_0$ 。这时, 如果在 X-Y 记录仪上描绘出电流-电压特性, 则数据中的误差小, 而且测定容易。

以上是测定临界电流时的一般要求, 下面将介绍几种具有不同特点的试验方法。

## 2) 线圈模拟法<sup>[12, 13, 14]</sup>:

用铌锆合金线绕成的超导线圈, 其运行特性(即  $J_c-H$  特性)比从短试样上测得的特性低得多。这种现象叫做“退化”。其原因尚未完全理解, 它对线圈(特别是大型线圈)设计带来了困难, 因不能根据短试样数据来预测绕成线圈后的特性。

在测量短试样时可采用两种方式对试样施加磁场与电流。一种是把磁场保持恒