

高温超导复合材料界面电阻对临界 电流密度 J_c 测量的影响

马 昆 沙 健 王劲松 焦正宽 张其瑞

浙江大学物理系, 杭州 310027

孙玉平 杜家驹

中国科学院固体物理所, 合肥 230031

叶 斌 周 敏 曾 荣 周贻茹

有色金属研究总院, 北京 100088

1993年2月25日收到

以银套管 Bi 系高温超导带为例, 讨论了界面电阻和派生的电流分流效应对 J_c 测量值可能产生的影响, 着重指出, J_c 测量值与失超判据的选择、电流、电位引线之间距离和分流长度的相对大小有关. 为获得正确的测量结果, 应将电位引线设置在非分流区内.

一、引 言

在实际的超导材料内, 存在着超导-正常导体(稳定化材料)界面. 由于在材料制备过程中不可避免地会引入氧化膜、夹杂物等, 所以, 在该界面处有一非零(有时是高值)的电阻和热阻层.

这一界面电阻和热阻将对 J_c 值的测量结果以及未来超导磁体的稳定性产生重要的影响^[1], 界面效应可能是高温超导磁体稳定化“链条”上最薄弱的环节^[2]. 通过改善加工工艺降低界面电阻, 是材料工作者面临的任务之一.

本文以银套管法 Bi 系高温超导带为例, 讨论界面电阻在三种不同场合下, 对 J_c 测量的影响. 并将高温超导材料与常规超导材料中电流分流效应作了比较, 指出在高温超导材料中这一效应的影响更加显著, 应予以格外的关注.

二、界面效应和分流长度

正如一切流体一样, 直流电流将沿导体各种可能的路径中电阻最小的路径通过. 考虑图 1 所示的由界面分开的超导体和良导体构成的复合带(或线).

在界面电阻(亦称接触电阻)为零的极端场合下, 无疑地, 通电时电流将直接进入电阻为零的超导体(如图 1(a)所示). 在另一极端场合下, 即界面为绝缘层时, 电流无法进入超导体, 基本上从银层通过.

实际上界面处存在一有限电阻率的导电层. 这时, 从正常金属(如银)施加电流时,

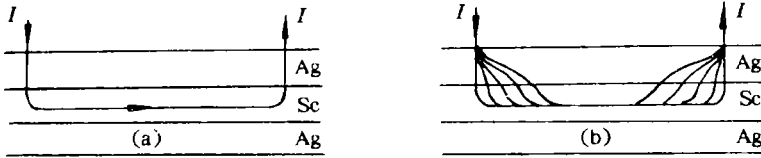


图 1 在无限小界面电阻(a)和有限界面电阻(b)场合下, 电流的分布

电流不是直接地而是逐渐地过渡到超导层中(如图 1(b)所示). 在不同的截面上电流密度是不均匀的, 具有一定的分布形态.

为方便起见, 首先应引入表征界面电阻的相应物理量.

假定, 在整个超导体的周长 P 上, 有一层均匀的界面物质, 其厚度为 δ , 电阻率为 ρ_i , 则单位长度的界面电阻为

$$R_i = \rho_i \delta / P \quad (\Omega \cdot \text{cm}) \quad (1)$$

由于界面(过渡)层的几何形态和电阻率往往是未知的, 所以更方便地采用可从实验上加以确定的量, 即所谓分流长度(也称过渡长度) l_t .

过渡长度的物理意义是: 由于有限界面电阻的存在, 当电流施加到正常金属内, 它并不是立即而是逐步地过渡到超导体内, 在长度 l_t 上正常金属上的电流值下降至初始值的 $1/e$. 不难推导出

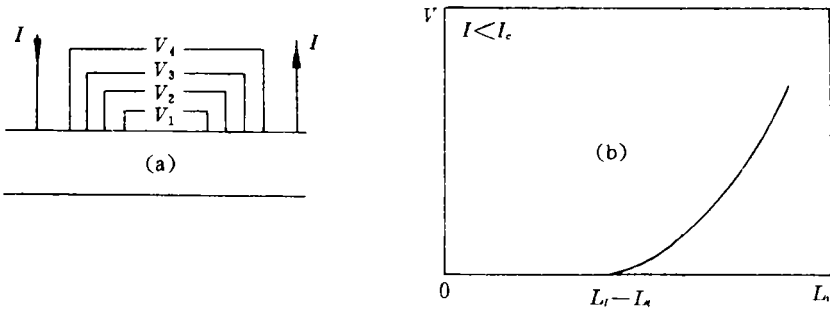


图 2 分流长度 l_t 的测量 (a) 电位引线的设置; (b) $V \propto l_t$ 关系曲线

$$l_t = \sqrt{\frac{R_i}{\rho/A}} \quad (2)$$

式中, ρ/A 为正常金属的线电阻 (Ω/cm); A 为正常金属的模截面积 (cm^2).

可以通过文献[3]所示的方法或图 2 本文所采用的方法即通过几组附加的电位引线, 测出沿导体长度方向上的电位分布, 求出 l_t .

三、高温和常规超导材料中界面电阻效应的比较

计及高温超导材料的某些特性, 予期界面电阻效应比常规超导体更加显著.

1. 在常规超导材料发展的初期, 例如, Kunzler 法制备的 Nb_3Sn 以及股间充焊料

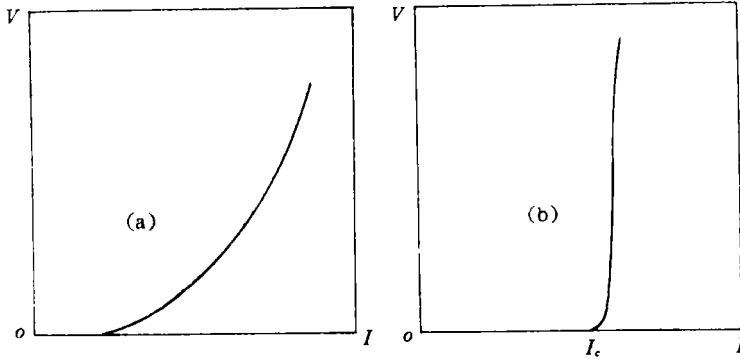


图3 加工工艺对V-I特性的影响

- (a) 存在高阻界面时, V-I 曲线的“爬坡”现象;
- (b) 高质量 Nb-Ti 线的 V-I 曲线

(Ag-Sn 合金)的多股电缆和 V_3Ga 多股线的 J_c 测量中都曾发现界面电阻导致在 V-I 特性曲线上的“爬坡”现象,如图 3(a)所示.

所谓“爬坡”现象是指在远低于真实的临界电流值以下就出现电阻,在物理上有别于达到临界态以后的磁通流动(flux flow)引起的流阻电压(如图 3(b)).

“爬坡”现象的起始点与界面电阻大小和测量仪器的灵敏度有关,而前者取决于材料的制备工艺.这一效应给 J_c 值的确定带来困难.

在用更先进的工艺制备的 Nb-Ti 多丝复合线内,由于经过反复、交替的形变和热处理,在超导体和正常金属之间达到了冶金结合.所以,界面电阻降低 2-3 个量级,对 J_c 的测量影响不大,V-I 特性曲线上“爬坡”现象已不复存在.甚至在高铜-超比、高稳定性的超导复合材料(Stekly 稳定化参量 $\alpha < 1$)中,如图 3(a)所示,将发生稳态的磁通流动.

相反,在高温超导复合材料中,涉及的金属(Ag)和陶瓷类超导体间的界面效应;加之,通常采用粉末冶金工艺,所以在界面处将形成高阻的氧化物、夹杂层.

有人测量出 Ag 套管 Y 系材料的界面电阻率(77K)约为 $1\mu\Omega \cdot cm$,比在实用化常规超导材料中界面电阻率最高的 V_3Ga (4.2K)还高两个量级^[3].

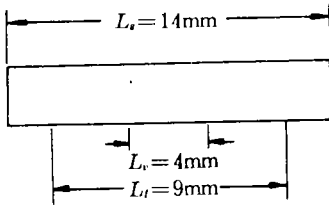


图4 Ag套管Bi系材料 J_c 测量样品的尺寸和电流、电位引线间距的典型值

2. NbTi, Nb_3Sn 等常规超导材料用于测量 J_c 的样品长度约 20cm,而国内在高温超导材料的 J_c 测量中,样品长度只 2cm 左右,典型情况如图 4 所示.对于常规超导材料,由于测量样品较长,电流、电位引线可以在较大的范围内变化,从而可以避免分流区;而国内目前的高温超导材料 J_c 测量中,电位引线常设置在分流区内,正如下面将谈到的,将对 J_c 测量值有较大的影响.

3. 目前高温超导材料在 77K 下的 J_c 值通常比 NbTi, Nb_3Sn 等在 4.2K 下相应值低 1-2 个数量级,所以,在高温超导体内分流效应对 J_c 值的影响,将造成更大的相对误差.

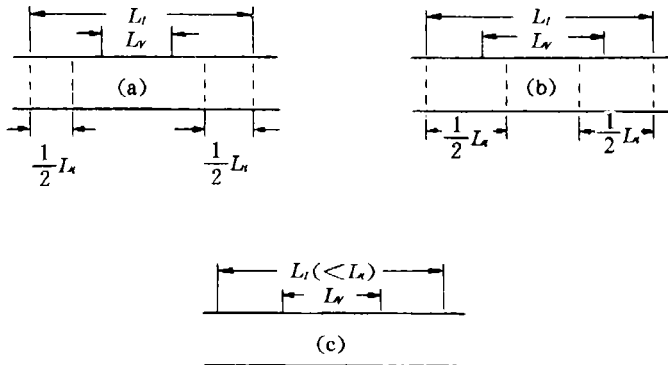


图 5 电流引线设置的三种情况

(a) 不在分流区；(b) 部分在分流区；(c) 全部处在分流区

4. 作为稳定化材料的良导金属(Cu、Ag)，在 4.2K 下的室温-低温电阻比(RRR 值)约为 100—200；为 77K 下高温超导体材相应值(~10)有 10—20 倍。

分流效应的影响主要取决于界面电阻与正常金属电阻比，综观上述影响因素，显然，在高温超导材料内，分流效应的影响将更加显著。

目前高温超导体的 J_c 测量尚无标准化，沿用 $1\mu\text{V}/\text{cm}$ 的常规判据，未必合理。

四、分流效应对 J_c 测量值的影响

界面电阻以及派生的分流效应对高温超导材料的 J_c 测量将产生影响，致使 J_c 值与电流、电位引线的设置和失超判据的取值密切相关。

我们分以下几种情况进行分析。

1. 如图 5(a)所示，当满足 $l_l < l_i$, $l_v < l_i - l_i$ 时，即保证电位引线处于无分流区。如果失超判据取得合理，足以能反映出超导体正常态刚刚成核，从超导体向正常金属的分流过程可以忽略不计时，

$$J_{c\text{测量}} \approx J_{c\text{真实}} \tag{3}$$

2. $l_l > l_i$, $l_v > l_i - l_i$ ，即电位引线部分处于分流区时

$$V_{\text{测量}} = I(R'_i + R_N) \tag{4}$$

式中， R'_i 为跨入电位引线区的界面电阻； R_N 为超导体正常区上的电阻。

当失超判据取值太低，在极端场合下，即使 $R_N = 0$ ，超导体仍处于超导态，便可能达到判据值。这时， $IR'_i \geq V_{\text{判据}}$ 。

$$J_{c\text{测量}} < J_{c\text{真实}} \tag{5}$$

但在较大的失超判据下

$$J_{c\text{测量}} \approx J_{c\text{真实}}$$

可见，在这种场合下， J_c 测量值灵敏于失超电压判据的取值。

3. 当 $l_l > l_i (> l_v)$ 时，即电位引线整个设置在分流区内。这时在电压测量范围内，电流分成两路

$$I = I_{N_0} + I_c \tag{6}$$

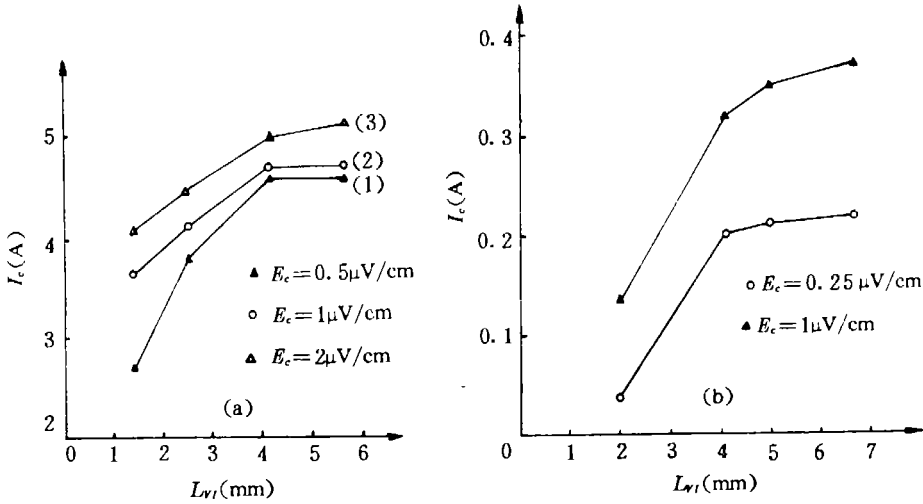


图6 Ag包套样品临界电流与电流、电位线间距的关系

式中, I_{Ag} 、 I_s 分别为在银层和超导层内的电流值。在通常情况下, 如果失超电位判据取值合理, 即能真实的反映一失超过程, 则

$$J_{c\text{测量}} > J_{c\text{真实}}$$

华崇远^[4]讨论了裸超导体用银片保护, 中间施银胶时, 当焊接质量不高时; 当电流、电位引线分别置于超导体、银层和并联时, 测出的 J_c 值有时相差数倍, 甚至十余倍。

五、实验结果与讨论

图6(a)、(b)是在两种不同工艺制备的Bi系银包套样品上所获得的结果。坐标横轴 l 是电流引线与电压引线之间的距离, l 的改变是通过转换样品上不同的电压引线所获得。实验均在液氮温度下进行。

由图6(a)可见, 随判据不同, 临界电流可产生大至100%的差别。图6(a)中1, 2曲线后端出现 I_c 的平台区, 说明此时电压与电流引线之间距离足够大, 避开了分流长度, 这验证了前面(四)中所述第一种情况, 即 $l_v < l_i - l_s$ 。在 $l_v < 4\text{mm}$ 时 $I_c(l)$ 曲线有明显坡度, 这是(四)中第二种情况, 即 $l_v < l_i - l_s$ 。所测电压包含了分流的贡献。 I_c 受分流现象影响严重。由此也可大致判断该样品分流长度近似为6—8mm之间; 不过此分流长度不是前文(二)中所严格定义的分流长度, 而是与仪器测量灵敏度有关的分流长度。随着电场判据提高至 $2\mu\text{V}/\text{cm}$ (如曲线3), $I_c(l)$ 无平台区出现, 这并不意味着(二)中定义的分流长度变化, 而是随着电流的增大, 银层中分流值也随之增大, 它对固定灵敏度的仪表影响也变大了。在固定判据如 $0.5\mu\text{V}/\text{cm}$ 时, J_c 在不同 l 值相差可达约40%。

图6(b)是用不同工艺做成的Bi系银包套旧样所测曲线。可以看出(a)、(b)曲线反映的物理现象是相同的, 而(b)中采用 $0.25\mu\text{V}/\text{cm}$ 电场判据时 I_c 在不同 l 值最大可差5倍, $1\mu\text{V}/\text{cm}$ 时相差可达2倍, 比(a)中现象更加明显。 I_c 的低值估计与样品焊接次数较多有关, 而且样品对在室温和液氮温区热循环的承受能力也有待于进一步研究。

六、结 论

界面电阻和派生的分流效应对银包套 J_c 的测量值将产生明显的影响。 J_c 的测量值与失超判据的选择，电流、电位引线间距和分流长度的相对大小有关。后者又由材料的制备工艺和银层厚度、质量以及 $\rho(B, T)$ 所决定。为获得正确的测量结果，应将电位引线设置在非分流区之区。本文主要讨论了在电流进入超导体的过程。对失超后 $V-I$ 曲线的特性将另文讨论。

[1] 阿里托夫等(焦正宽、张其瑞译)，超导磁体系统的稳定化。国防工业出版社(1982)。

[2] S. L. Wipf, *Cryogenics*, 31 (1991), 936.

[3] 清藤雅宏等，日立评论，71 (1989)，673.

[4] 华崇远，私人通讯 (1991)。

THE INFLUENCE OF THE INTERFACE RESISTANCE OF HIGH T_c SUPERCONDUCTING COMPOSITES TO THE MEASUREMENT OF J_c

Ma Kun, Sha Jian, Wang Jinsong, Jiao Zhengkuan, Zhang Qirui

Department of Physics, Zhejiang University, Hangzhou, 310027

Sun Yuping, Du Jiaju

Institute of Solid Physics, Academia Sinica, Hefei, 230031

Ye Bin, Zhou Min, Zeng Rong, Zhou Yiru

General Research Institute for Non-Ferrous, Beijing 100088

(received 25 February, 1993)

ABSTRACT

With silver-sheathed Bi-Sr-Ca-Cu-O tapes as an example, the possible influence of the interface resistance and of the derivative current shunting effect on the measurement of J_c was discussed. It was pointed out that the experimental data of J_c are related to the choice of the electric field criterion and the distance between the current leads and voltage leads with respect to the shunting length. In order to obtain the true value of J_c . The voltage leads should not be set within the shunting area.