

银包套 Bi(2223) 带材临界电流密度的 低温强磁场特性*

韩谷昌 韩汉民 王智河 王顺喜 刘小宁 刘智民

(中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

奚正平 周 康

(西北有色金属研究院, 宝鸡 721014)

(1994年6月6日收到)

较详细地研究了银包套 Bi(2223) 带材在低温强磁场下的传输临界电流密度 (J_c) 特性. 实验结果表明, Bi(2223) 带材在一定的磁场下 J_c 随温度的变化有两个不同的区域. 在低于某一温度 $T_{c2}(H)$ 后, $J_c(T)$ 由零开始按 $J_c \propto (1 - T/T_{c2})^n$ 指数形式增加; 而温度远低于 T_{c2} 后, $J_c(T)$ 则随温度的降低线性增加, $J_c(T)$ 的线性关系可由传统磁通蠕动理论理解, 而在 T_{c2} 附近的 $J_c(T)$ 指数变化机制仍不清楚. 本文采用点阵熔化概念和磁场引起的颗粒超导电性对这一结果进行了很好的解释, 并进一步推论出, Bi(2223) 带材之所以能获得较高的 J_c 是由于其晶粒间的连接形成 Josephson 邻近效应结的结果, 在一定温度以下, 这些结可能形成强耦合甚至转变成邻近效应超导体.

PACC: 7460J

1 引 言

高温超导体的大规模实际应用有赖于具有优良高场临界电流密度特性的长线材的成功制备. 技术上有兴趣的应用(如超导磁体)要求在一定的磁场下 J_c 仍高于 $10^4 - 10^5 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$, 限制高 T_c 超导体 J_c 的主要障碍是颗粒(或晶粒)间的弱连接和晶粒本身的弱钉扎. 前者导致 J_c 在极低的磁场下迅速下降至无法容忍的值, 后者则引起高温下磁通点阵的不稳定, 产生所谓“巨磁通蠕动”. 弱连接问题已发展了诸如 MTG^[1], QMG^[2], PMP^[3] 等工艺得以解决. 然而这些工艺都需要熔化生长过程, 不易进行长线材的生产. “粉末装管法”看来是一最有希望的工艺, 目前国际上采用该工艺已获得 $J_c(77\text{K}, 0\text{T}) = 6.9 \times 10^4 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$, 而在 4.2 K, 26 T 下 J_c 仍高于 $10^4 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$. 国内 $J_c(77\text{K}, 0\text{T})$ 亦可达 $3 \times 10^4 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 以上. 然而受低温强磁场设备的限制, 对 J_c 的低温强磁场特性研究仍然较少. 本实验室已于 1990 年成功地建成了 20 T 强磁场装置, 加上本所丰富的液氮资源, 为开展这项研究提供了必要的条件. 本文报道利用 0—10 T 水冷磁体进行研究的

* 国家超导技术联合研究开发中心资助的课题.

结果。

2 实验方法

本实验磁场由一额定磁场为 10 T 的水冷磁体提供,磁体孔径为 $\Phi 50\text{mm}$, 低温条件由一净孔径为 $\Phi 28\text{mm}$ 的变温恒温器获得,温度可在 4.2—300 K 间调节。样品采用“粉末装管法”工艺制备,详细制备工艺见文献[4]。临界电流采用四引线法测量。为避免引线接头发热和烧毁样品,电流以三角波的形式可在短时间内(几秒至几分钟)升到最高值,样品失超后由开关人为切断电流。失超电压判据选为 $1\mu\text{V}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。

3 结果与讨论

样品在 77 K, 0 T 下的临界电流密度为 $2.6 \times 10^4 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$, 其磁场特性已有许多报道^[5],这里仅给出两点说明: 1. 在 77 K, $J_c(H)$ 基本上是可逆的,表明弱连接效应已不显著。2. J_c 在很低的磁场下,迅速下降;在 3—4 T 降到零。伏安特性分析表明,这种差的 $J_c(H)$ 特性主要是由于样品缺少强的钉扎中心,巨磁通蠕动引起 J_c 的迅速下降。随着温度的降低,磁通蠕动的效应应减弱。由传统 Anderson 和 Kim^[6] 磁通理论可知, J_c 按下式增加:

$$J_c = J_{c0}[1 - (kT/U)\ln(E_c/a_0QB)], \quad (1)$$

式中 J_{c0} 为不发生磁通运动时的临界电流密度, U 为钉扎势能, E_c 为临界电流密度的

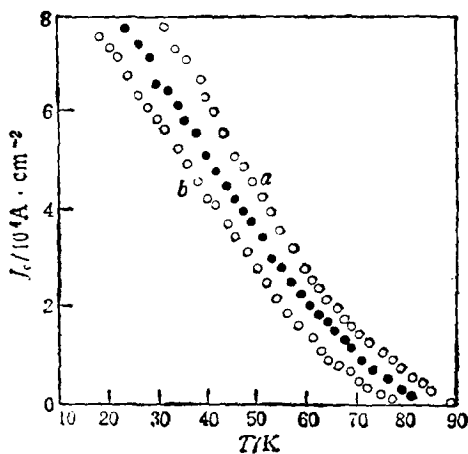


图 1 在 0.5, 1.0, 2.0 T 磁场下,临界电流密度与温度的关系 a 为 0.5 T; ● 为 1.0 T; b 为 2.0 T

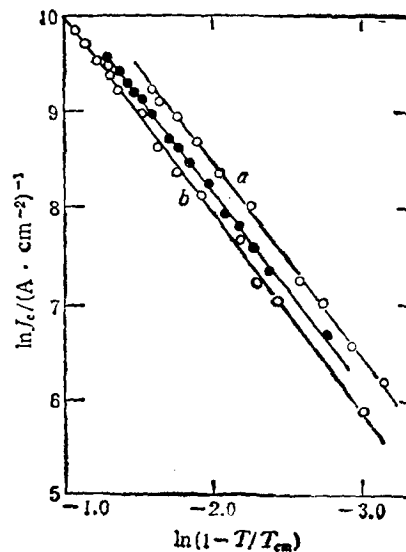


图 2 在双对数坐标中, T_{cm} 附近的 J_c 与 $(1 - T/T_{cm})$ 关系 图注同图 1

电压判据, a_0 为磁通点阵间隔常数, Q 为磁通线试图越过钉扎势垒的频率, (1) 式明显

地预言了 $J_c(T)$ 的线性关系。为了了解 J_c 随温度的变化规律,在几个恒定的磁场(直到 8 T)中,测量了样品的临界电流密度随温度的变化规律。为画图清晰,图 1 仅给出 0.5, 1, 2.0 T 时的 $J_c(T)$ 关系,由图 1 不难看出,在温度较高时,在可测量范围内 $J_c = 0$, 只有当温度低于一定值 T_{cm} 后, J_c 才开始迅速升高,最后当 T 远低于 T_{cm} 后, J_c 按(1)式所预言的那样,随温度线性升高。

在 T_{cm} 附近明显观察到 $J_c(T)$ 的非线性,其机制较复杂,一般认为,在 $T > T_{cm}$ 温区,超导体处于磁通液体状态,因此 $J_c = 0$ 。在 T_{cm} 附近发生从磁通液体向 Abrikosov 磁通格子的转变。温度低于 T_{cm} 后,正如 Daeumling 等^[7]指出的那样磁场可能减弱甚至抑制样品中超导电性较弱的部分,使这部分形成弱的 Josephson 连接。尽管我们的样品具有很好的织构和择优取向,但由于样品的多晶性,这种弱的 Josephson 结很可能在颗粒的边界形成。可以认为正是这种磁场引起的弱连接导致了 $J_c(T)$ 的非线性变化。弱连接的临界电流密度与温度的关系比较复杂,一般地,对于 SIS 绝缘结 $I_c \propto (1 - T/T_c)$, 而对于 SNS 超导邻近效应结 $I_c \propto (1 - T/T_c)^2$ 。为了解磁场引起的弱连接特征,图 2 以双对数的形式给出了 J_c 随 $(1 - T/T_{cm})$ 的变化关系,之所以选 T_{cm} 而不是选 T_c 。是因为高于 T_{cm} 时晶粒本身处于磁通液体状态,无法负载任何无阻电流,只有

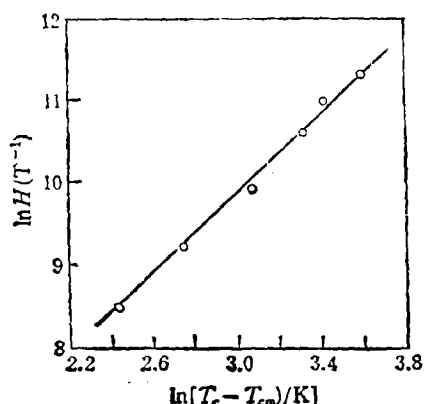


图 3 $\ln H$ 与 $\ln(T_c - T_{cm})$ 关系 说明 T_{cm} 为不可逆(或点阵熔化)温度

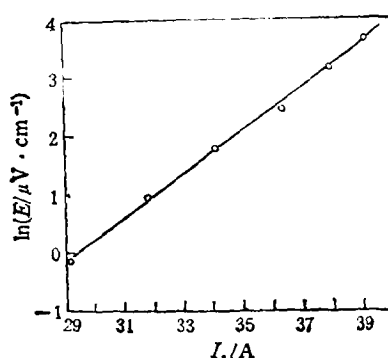


图 4 在 44 K, 0.5 T 的 I_c 与 $\ln E$ 关系 表明低电压区伏安特性的磁通蠕动行为

当温度低于 T_{cm} 后,晶粒才具有负载能力。稍后,将看到 T_{cm} 基本满足 $H \propto (T_c - T_{cm})^n$ 这一不可逆线或称点阵熔化线关系。从图 2 不难看出, J_c 随 $(1 - T/T_{cm})^n$ 的规律变化,可以算得 n 的值约为 2。从 $n = 2$ 这个结果来看,这一样品中由磁场引起的颗粒边界弱连接主要是超导邻近效应结。随着温度的降低这种结可以形成很强的耦合,甚至转变为邻近效应超导体,使其临界电流密度高于由磁通蠕动所确定的值。因此,在较低温度下,样品的 $J_c(T)$ 具有磁通蠕动所决定的性质。这一性质也说明,和大块材料的情况不同,银包套 Bi(2223) 带颗粒间较易形成这种强的 SNS 连接,从而使 J_c 值大幅度提高,虽然银是否进入颗粒边界仍不十分清楚,但至少可以说银有利于改善 Bi(2223) 颗粒间连接,使 J_c 得以改善。为了进一步改善 J_c ,对银的作用进行更深入的研究,将是一项很有意义的工作。

为进一步了解 T_{cm} 的物理意义, 图 3 给出 $\ln H$ 与 $\ln(T_c - T_{cm})$ 间的关系。这里 T_c 为零场下的零电阻温度(取为 107 K), 由图 3 可见, $H \propto (T_c - T_{cm})^m$, $m = 2.3$ 左右。指数因子 m 高于通常不可逆线所对应的 1.5, 这可能是由于 Bi 系超导体较弱的钉扎性质引起的。因此, 可以认为 T_{cm} 对应于磁通液体向磁通点阵的转变温度。

低温下, 临界电流主要由磁通蠕动决定, 这一性质可由伏安特性得到进一步的证实。按(1)式, 磁通蠕动引起的电压与电流特性满足 $J_c \propto \ln E$ 关系, 这里 J_c 表示流经 Bi(2223) 超导膜本身的电流, 对于银包套样品应扣除流经银片的电流。图 4 给出 0.5 T, 44 K 下低电场区 J_c 与 $\ln E$ 的关系曲线。这种线性的 J_c 与 $\ln E$ 关系, 在其他温度和磁场也同样被观察到^[5], 这进一步说明由电压判据 ($1 \mu V \cdot cm^{-1}$) 确定的 J_c 主要是由磁通蠕动所决定的。

图 5 给出几个温度下的 $J_c(H)$ 关系特性, 可以看出, 在低场区临界电流密度随磁场的变化比高场区激烈。温度越低, $J_c(H)$ 特性越好。高场区, J_c 在测量范围内几乎不随磁场变化。值得一提的是, 当温度低于 51 K 后, 即使在 8 T 的磁场下, J_c 仍高于 $10^4 A \cdot cm^{-2}$, 说明这种线材有望在中等磁场范围内利用 LN 作冷剂而得到应用。

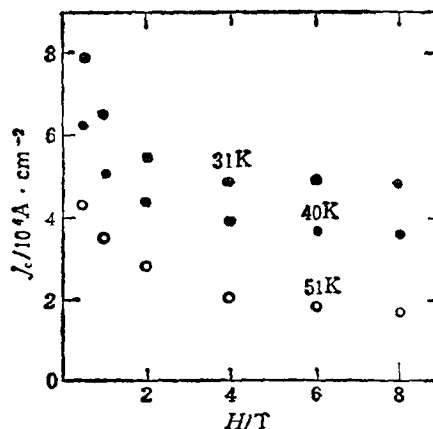


图 5 在几个温度下, 临界电流密度的磁场特性

- [1] S. Jin, T. H. Tiefel, R. C. Sherwood, R. B. Van Dover, *Phys. Rev.*, **B37**(1988), 7850.
- [2] M. Marakami, S. Gotoh, N. Koshizuka, S. Tanaka, T. Matsushita, S. Kambe, K. Kitazawa, *Cryogenics*, **30**(1990), 396.
- [3] L. Zhou *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.*, **3**(1990), 490.
- [4] 奚正平、周廉, 低温物理学报, **15**(1993), 240.
- [5] Guchang Han *et al.*, *Appl. Phys.*, **A57**(1993), 363.
- [6] P. W. Anderson, Y. B. Kim, *Rev. Mod. Phys.* **36** (1964), 39.
- [7] M. Daeumling, J. M. Seuntjens and D. C. Larbalestier, *Nature (London)*, **346**(1990), 332.

THE J_c CHARACTERISTICS OF Bi-2223 SILVER-SHEATHED TAPES AT LOW TEMPERATURE AND HIGH MAGNETIC FIELDS

HAN GU-CHANG HAN HAN-MIN WANG ZHI-HE WANG SHUN-XI

LIU XIAO-NING LIU ZHI-MIN

(*Institute of Plasma Physics, Academia Sinica, Hefei 230031*)

XI ZHENG-PING ZHOU LIAN

(*Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Baoji 721014*)

(Received 6 June 1994)

ABSTRACT

Transport critical current density J_c of a silver-sheathed Bi-2223 tape was studied at low temperature and high magnetic field ranges. It was found that for a fixed field $J_c(T)$ contains two different parts: $J_c(T)$ first increased exponentially from zero in a form of $J_c \propto (1 - T/T_{cm})^n$ after temperature was reduced to a value of T_{cm} and then at temperatures well below T_{cm} , $J_c(T)$ dependence becomes linear. This linear $J_c(T)$ nature may be interpreted from conventional flux creep theory. However, mechanism of nonlinear $J_c(T)$ dependence near T_{cm} is still not clear. In this paper, we offer an explanation of this effect by using the concept of flux lattice melting and field-induced granularity. It is concluded that the field-induced Josephson junctions are dominated by SNS proximity-effect junctions. At low temperatures, this type of junctions may be well coupled or even become proximity-effect superconductor, which may be a reason why silver-sheathed Bi-system tapes have higher J_c values.

PACC: 7460J