

$\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 超导体磁通 钉扎能的分布*

丁世英 史可信 曾朝阳 余 正 施智祥 邱 里

南京大学物理系, 固体微结构实验室, 南京, 210008

1990 年 7 月 30 日收到

描述一种测量高温超导体磁通钉扎能 U_0 及其分布的新方法。此方法主要之点是测量磁化后样品的零场临界电流随时间的变化。利用这一方法测量 $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 的 U_0 值分布 ($T = 78\text{K}$)。根据所得结果, 对已报道的 U_0 值的分散性提出一种新解释。

PACC: 7460J; 7460G

一、引 言

高温超导体的磁通钉扎机制目前还不清楚。例如有关 YBaCuO 的磁通钉扎能 U_0 , 文献报道的实验值就比较分散 (从小于 0.1eV 到大于 1eV)。已使用的测量方法包括剩余磁化强度弛豫^[1], 直流电阻率^[2], 交流磁化率^[3], 微波吸收^[4], 力学振动^[5]或转动^[6], 用铁磁性超细微粒缀饰技术^[7]和磁通跳跃^[8]。要使高温超导体的强电应用能以液氮作冷剂, 其临界电流密度 J_c 不仅应当很高, 而且可能是决定于钉扎能的大小而不是象低温超导体那样决定于钉扎力 (钉扎能的梯度)。所以高温超导体钉扎能的研究具有特殊的重要性。目前, 高温超导体 J_c 研究的首要问题之一是钉扎能的测定。这就要求人们尽可能多地寻找新的测量方法, 以便将不同方法所得结果相互核对, 增加可靠性。本文提出一种钉扎能的新的测量方法: 磁化样品的零外场临界电流的弛豫法。这一方法的本质仍是测定样品的剩余磁通密度随时间的变化。但是在探测原理和简便易行方面有新特色, 因而仍是一种独立的方法。利用这一方法, 我们测定了烧结的 $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 的钉扎能及其分布, 并且作了适当的讨论。

二、实验方法与结果

根据 Anderson-Kim 的磁通蠕变理论, 钉扎能 U_0 可由下式表示 (设由样品形状决定的常数为 α):

* 国家超导技术联合研究中心资助的课题。

$$U_0 = \frac{\alpha k T R \mu_0 F_p}{B |dB/d \ln t|},$$

式中 k 是玻耳兹曼常数, μ_0 是真空导磁率, R 是样品在垂直于磁通密度 B 方向的平均尺寸, F_p 是钉扎力密度^[9]. 此公式的推导见文献[10]. 根据本式, 测定 U_0 的关键是测 $B=B(t)$.

我们测定 $B(t)$ 的方法与现有的各种方法不同. 我们认为在磁场中冷却到 78 K 而进入超导态(以下简称场冷)的样品的磁通密度与外场相同. 测量得场冷的超导样品的 $I_c(B)$ 曲线, 就得到 $B(I_c)$ 曲线(见图 1). 再将此样品由室温开始场冷至 78 K, 这时它进入了超导态. 撤去外场, 因钉扎效应, 样品中捕获有磁通(即样品有剩余磁通). 立即测量此样品的临界电流与时间的关系, 得到 $I_c(t)$ (见图 2). I_c 随 t 变化反映了样品中的剩余磁通密度 B 因热激活磁通蠕动而随 t 减少. 将 $I_c(t)$ 和图 1 的 $B(I_c)$ 结合便得

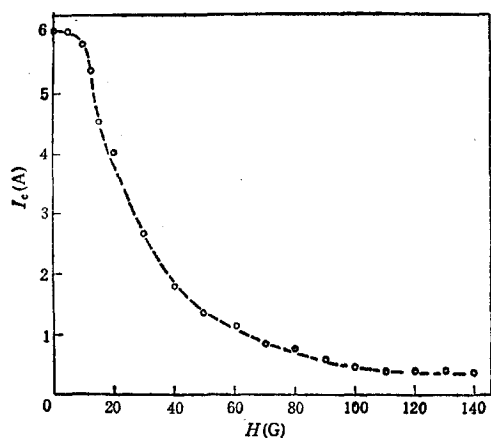


图 1 样品在磁场中冷却到 78 K 测得的 $I_c(H)$ 曲线

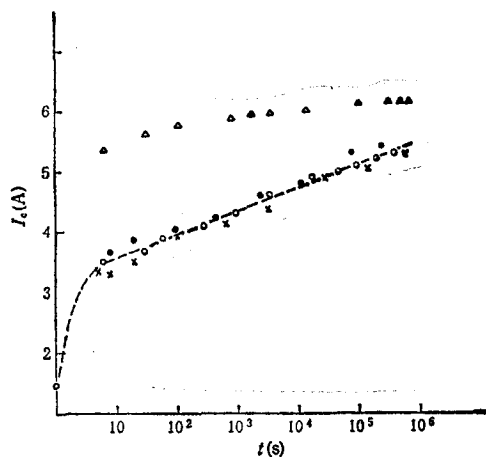


图 2 经不同外场磁化后的零场 $I_{c0}(t)$ 随时间 t 的变化关系 磁化场的值: Δ 为 150 G; $\bullet$ 为 1350 G; $\times$ 为 1470 G; $\circ$ 为 1700 G

到 $B(t)$ (见图 4). 采用这种测量零场临界电流弛豫 $I_c(t)$ 的方法测量 $B(t)$, 本质上是一种电测法. 一般说, 电测法比磁测法

简便易行, 精度也较高. 本实验所达到之精度反映在后面给出的各测量值中.

本实验中使用的样品是用烧结法制备的, 其名义组分为 $Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_y$. 样品是块状的, 其零电阻转变温度为 116 K. X 射线衍射实验表明样品只有 $Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_y$ 的谱线, 表示在这样的精度下, 样品是单相的.

I_c 的测量采用标准四引线法. I_c 判据为 $1 \mu V/cm$.

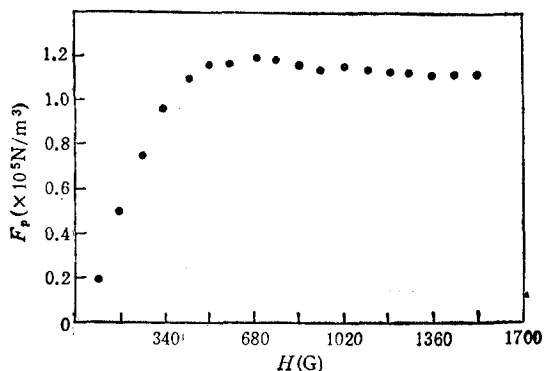


图 3 用磁滞迴线法测得的晶粒内钉扎力密度与外场的关系 $T = 78 K$

图 1 中每个 I_c 值(圈)都是在室温下先加磁场后再将样品冷至 78 K (场冷)测得的. 测量时磁场是存在的. 因烧结样品的磁屏蔽能力很小,图 1 也可近似地看作是 $I_c(B)$ 曲线.

图 2 是 $T = 78 \text{ K}$ 时经不同外场(即磁化场)磁化后样品的零外场临界电流 I_{c0} 随时间的变化关系. 由图 2 可见,在外场存在时 I_{c0} 很小,撤去外场后的短时间内, I_{c0} 迅速上升,随着时间增加, I_{c0} 上升速度变慢. 只有对小的磁化场(例如小于图 2 中的 150 G),在实验时间范围内 I_{c0} 才能回复到未磁化时的最大值 6 A.

还测量了 $T = 78 \text{ K}$ 时样品的低场磁滞迴线,使用文献 [9] 中的方法,由所测量的磁滞迴线可以得到烧结样品的晶粒内钉扎力 F_p . 图 3 就是 F_p 与外场的关系.

三、讨 论

图 2 给出磁化后多晶 $\text{Ti}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 样品的零外场临界电流随时间增加而增加的实验结果,它的物理意义是明显的. 虽然外磁场已经撤去,但磁化使样品中俘获了磁通. 因此样品中实质上仍有磁通,图 2 的 $I_{c0}(t)$ 仍是有磁通密度存在的临界电流,所以 $I_{c0}(t)$ 小于图 1 中的 $I_c(0)$. $I_c(0)$ 只受一个比外场小得多的自场作用. 由于热激活的帮助,被俘获在样品中的磁通线(磁通量为 Φ_0) 将以一定速率逃逸出去,使被俘获的磁通随时间增加而减少. 根据图 1, 临界电流将逐渐增加. 从图 1 和图 2 很容易得到样品磁通密度 B 随时间的变化,其结果示于图 4.

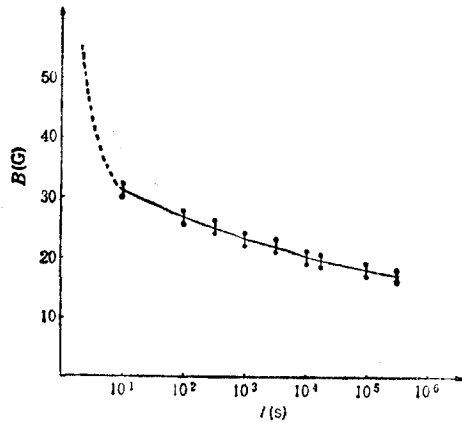


图 4 剩余磁通密度 B 随时间 t 的变化. 磁化场 H 的值为 1350, 1470 和 1700 G; 实线为 B 的平均值; 亚铃号为 3 个 H 值对应的 B 值误差范围; $T = 78 \text{ K}$

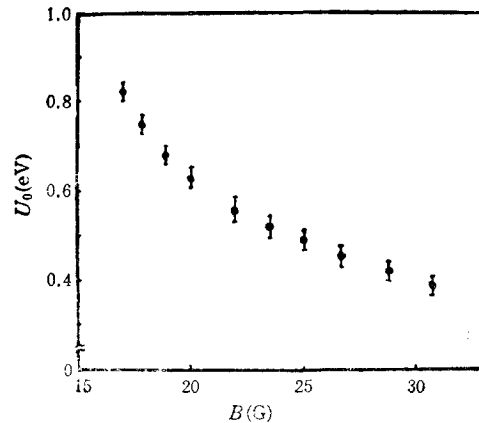


图 5 U_0 与剩余磁通密度 B 的关系 $T = 78 \text{ K}$

为了求 U_0 值,除用图 3 和图 4 的数据外,尚须知道 α . 如磁场和柱状样品的轴线平行, $\alpha = \pi/3^{[10]}$; 若磁场和薄板样品的宽面平行并垂直于长度方向,则 $\alpha = 1^{[1]}$. 本实验的样品为 $3 \text{ cm} \times 0.15 \text{ cm} \times 0.15 \text{ cm}$ 的长方条,需考虑退磁因数后决定 α . 在图 5 中给出由图 3、图 4 的数据及 $\alpha = 0.98$ (经退磁因数校正)经前式计算而得到的 U_0 值. 须注

意,这里的 $U_0(B)$ 是 U_0 与剩余磁通密度 B 的关系,而不是 U_0 与磁化外场的关系。图 5 说明,我们的 TlBaCaCuO 样品的 U_0 值不止一个,而是存在一个分布。

从物理上看, U_0 值有一个分布是自然的。因为 U_0 反映了磁通线与晶体缺陷相互作用的性质和强度。晶体缺陷的种类、大小等的不同自然会产生不同的 U_0 值。这些 U_0 不同的钉扎中心的存在,就使样品在磁化后捕获磁通,并在外场撤消后具有剩余磁通密度。在热激活的帮助下,剩余磁通首先大量地从 U_0 小的钉扎中心逃逸,这表现为 $|dB/d\ln t|$ 在弛豫开始时 (t 小) 较大。然后,从 U_0 较大的钉扎中心处逃逸的磁通线的比例就增加,尽管单位时间内逃逸的磁通的绝对量是减少的。当测量时间足够长时,所逃逸的磁通是如此之少,以至在两次测量中仪器已探测不出差别。这表现为 $|dB/d\ln t| \approx 0$ 。按这样的理解,图 4 和图 5 所示的实验结果是很自然的。

Hagen 等人最先指出, YBaCuO 的钉扎能 U_0 存在分布^[11]。

钉扎能存在分布,给 U_0 值(在文献报道中)的分散提供一种可能的解释(或理解)。例如,丁世英等人用磁通跳跃方法测得 $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 的 U_0 为 0.9 eV ^[8]。由于磁通跳跃测量只有在磁通蠕动可忽略时才能够进行(或实现),所以这种方法测得的结果相当于本实验中 t 很大时 (B 很小时) 的 U_0 , 所以偏大。相反,用磁阻法,即测量不同外磁场中 $R(T)$ 曲线展宽的方法测得的 TlBaCaCuO 样品的 U_0 比较小^[2], 这也比较自然。因为用直流电阻 $R(T)$ 测量法确定的 U_0 应当相当于本方法中 $t \rightarrow 0$ 时的 U_0 值即 $B \sim H$ 的值。在图 5 中,若把 B 外推到 1000 G 以上,则 U_0 也应当很小。曹效文等人^[12]测量了 TlBaCaCuO 块样品的平均钉扎能 $\bar{U}_0$ 与外场的关系(用磁化强度弛豫法),与本实验相近的温度和外场下,他们测得 $\bar{U}_0$ 约为 0.3 eV , 与图 5 中 U_0 的平均值相互印证。前已指出,钉扎能是晶体微结构敏感量,一般与具体样品相关,不同的样品不会完全相同。但在同种方法制备的同种超导体中不应当有很大差别。

四、结 语

我们测量了 $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 烧结块样品的临界电流随时间的变化。样品在测量前先用场冷方法在一定外场中磁化,再测量零外场时的 $I_c(t)$ 。还测量了场冷的临界电流与磁场的关系及样品的低场钉扎力。根据磁通蠕动理论,由这些测量结果给出钉扎能 U_0 的分布。这一分布中包括着已报道的 TlBaCaCuO 钉扎能 U_0 的平均值。根据这一分布,还提出对已报道的高温超导体用不同方法测得 U_0 的分散性的一种新解释。

- [1] K. A. Muller, M. Takashige and J. G. Bednortz, *Phys. Rev. Lett.*, **58**(1987), 1143.
- [2] T. T. M. Palstra, B. Betlogg, L. F. Schneemeyer and J. V. Vaszak, *Phys. Rev. Lett.*, **60**(1988), 1662.
- [3] P. H. Kes, J. Aarts, J. van der Berg, C. J. van der Beck, J. A. Mydosh, *Superconductor Science and Technology*, **1**(1989), 242.
- [4] S. Gregory, G. T. Rogers, T. Vancatean, X. D. Wu, A. Inam and D. Dutta, *Phys. Rev. Lett.*, **59**(1987), 1548.
- [5] A. Gupta, P. Esquinazi, H. F. Braun, E. H. Brandt, *Physica C* **162—164**(1989), 667.
- [6] S. S. Yan, S. C. Liang, H. Ma, Q. R. Feng, Y. X. Sun, Y. Gao, H. Zhang, *Solid State Commun.*, **70**(1989), 553.
- [7] P. L. Gammel, D. J. Bishop, G. J. Dolan, J. R. Kwo, C. A. Murray, L. F. Schneemeyer and J. V.

- Vaszcak, *Phys. Rev. Lett.*, 59(1987), 2592.
- [8] S. Y. Ding, Z. Yu, X. Ma and L. Qiu, *J. Less-Common. Metals*, 164-165(1990), 1330.
- [9] 颜家烈等, 低温物理学报, 5(1990), 352.
- [10] H. Ullmaier, Irreversible Properties of Type II Superconductors, Springer Tracts in Modern Phys., 76, (1975), p. 103.
- [11] C. W. Hagen and R. Griessen, *Phys. Rev. Lett.*, 62(1989), 2857.
- [12] X. W. Cao, S. L. Huang, F. Y. Zhang, H. H. Wen, X. Y. Long, H. T. Peng, Z. W. Qi, Y. S. Wu, W. J. Zhang, X. L. Mao, H. B. Liu and Y. H. Zhang, Progress in High Temperature Superconductivity, Vol. 22, Eds. by Z. X. Zhao et al., Singapore, World Scientific, (1989), p. 246.

TIME DEPENDENT CRITICAL CURRENT AT ZERO FIELD FOR SINTERED $\text{Ti}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ SUPERCONDUCTOR

DING SHI-YING SHI KE-XIN ZENG CHAO-YANG YU ZHENG

SHI ZHI-XIANG QIU LI

Department of Physics, and Laboratory of Solid Microstructure, Nanjing University, Nanjing, 210008

(Received 30 July 1990)

ABSTRACT

A new method determining the distribution of flux pinning energy U_0 is described. The method is mainly the measurement of time dependent zero field critical current for sintered high temperature superconductor magnetized in applied field. By means of this method, the U_0 distribution of $\text{Ti}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ at 78K is obtained. Based on the experimental result, the dispersion of reported U_0 is discussed.

PACC: 7460J; 7460G