

YBa₂Cu₃O_{7-δ} 不可逆线与钉扎势的关联

金 新 张贻瞳 陆瑞熙 姚希贤

南京大学物理系, 固体微结构物理国家实验室, 南京, 210008

刘奉生 牟慧麟 吴晓祖 周 廉

西北有色金属研究院, 宝鸡, 721014

1991年1月31日收到

本文分别测量了熔融结构 YBa₂Cu₃O_{7-δ} 高温超导体不可逆线与钉扎势 U_0 。发现该样品的不可逆线在温区 72—85K 范围内呈指数形式 $B^* - e^{-T^*/T_c}$ 函数关系。而且在温度 77K, 不可逆线并不能与磁测量临界电流密度 $J_c = 0$ 相对应。我们认为高温超导体的不可逆线的函数形式与样品的钉扎势紧密关联。

PACC: 7460G; 7460J; 7460E

一、引 言

Müller, Takashige 和 Bednorz^[1] 最先报道了在 La₂CuO₄:Ba 多晶中观察到类似于金属自旋玻璃态中的 de Almeida-Thouless 线, 这就是在以后文献中普遍采用的高温超导体磁相图上的不可逆线。其基本形式为

$$B^* = B_0 \left(1 - \frac{T^*}{T_c} \right)^{3/2}, \quad (1)$$

这里 B^* 和 T^* 为磁感应强度 B 和温度 T 在 B - T 平面上描述不可逆线的两个相对应的参量, T_c 为转变温度, B_0 为常数。

Yeshurun 和 Malozemoff^[2] 其后在 YBa₂Cu₃O_{7-δ} 单晶中又观察到与(1)式同样的结果。他们采用磁通钉扎模型对该曲线作了新的解释, 并且认为高温超导体的不可逆线与样品临界电流密度 J_c 的值等于零相对应。

de Rango 等人^[3] 在 Bi_{2-x}Pb_xSr₂Ca₂O₁₀ 中观察到不可逆线有别于(1)式的结果。他们发现在样品 T_c (110K) 附近, 不可逆线仍类似于(1)式, 然而当温度 $T < 80K$ 时, 不可逆线呈指数形式。即 $B^* - e^{-T^*/13.3}$ 。他们认为超导体的邻近效应是这种指数形式不可逆线的物理机制。

Civale 等人^[4] 用质子对 YBa₂Cu₃O_{7-δ} 单晶进行辐照研究, 发现在 YBa₂Cu₃O_{7-δ} 晶体中的辐照损伤能使样品的磁滞回线比辐照前磁化强度数值展宽一个数量级以上。然而该样品辐照前后的不可逆线却几乎不变。这一实验结果展示出研究不可逆线与钉扎机制的关联是一个值得重视的课题。

针对上述分歧较大的诸结果, 我们选用了钉扎效应比单晶强的熔融结构 YBa₂Cu₃O_{7-δ},

样品进行了研究。其样品的制备工艺已在文献[5]中报道。实验中发现：熔融结构样品当外磁场与其 c 轴垂直时，不可逆线在 72—85K 温度范围内与文献[3]所报道的指数形式类似。在 B - T 平面上不可逆线在 77K 的点 (B^* , T^*) 并不对应于磁测量所得到的临界电流密度 $J_c = 0$ 。根据对本文所用样品钉扎势的测量，其数值比单晶或多晶体高出一倍，这可能就是不可逆线产生差别的主要物理原因。

二、实验方法与结果

本文采用熔融结构扁平矩形样品，尺寸为 $2.5 \times 1 \times 0.3 \text{ mm}^3$ ，其 c 轴垂直于样品平面。

样品的不可逆线是通过测量其在零磁场冷却和磁场冷却两种情况下的直流磁化率随温度的依赖关系确定的，具体测量方法见文献[1]。在测量过程中，保持外磁场与样品 c 轴垂直。样品磁化率的测量采用牛津公司生产的 SS-80 超导磁化率/磁强计，其测量灵敏度为 10^{-13} A/m ，精度为 0.1%。

我们在不同外磁场下所测得的磁场冷却和零磁场冷却的几组典型的磁化率随温度的变化曲线如图 1 所示。其物理特征也与文献[1]所介绍的一致。在每一固定外磁场 B^* 下，零磁场冷却曲线只能升温到相应的 T^* 以上才和磁场冷却曲线相重合。

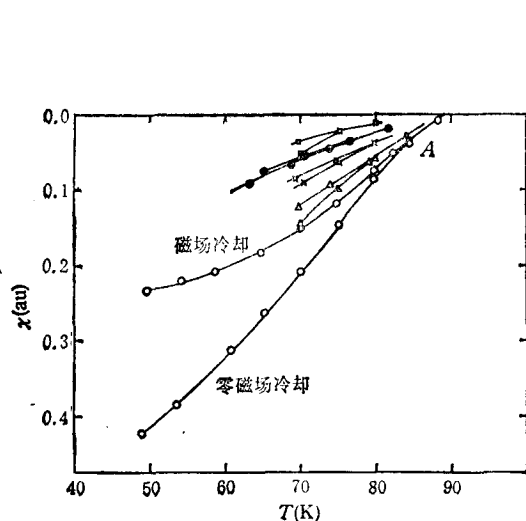


图 1 在不同外磁场下， $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 熔融结构样品零磁场冷却与磁场冷却几组典型曲线

○ 为 $B = 0.0317 \text{ T}$ ；△ 为 $B = 0.0807 \text{ T}$ ；× 为 $B = 0.1999 \text{ T}$ ；● 为 $B = 0.4999 \text{ T}$ ；□ 为 $B = 1.40008 \text{ T}$

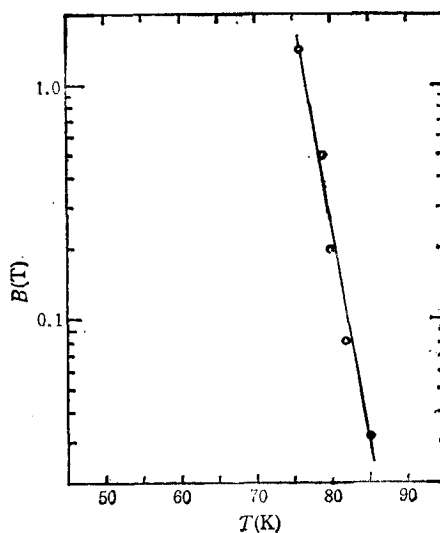


图 2 据图 1 在不同外磁场下所得零磁场冷却和磁场冷却曲线的汇合点 (B^*T^*) 在 B - T 坐标系的不可逆线 B 采用对数坐标

根据不同外磁场下所得诸数据 (见图 1 (B^*T^*)), 在 B - T 坐标系中可得到不可逆线, 如图 2 所示。

从图 2 可以看出, 不可逆线在 72—85K 温度范围内呈指数形式。用最小二乘法拟合实验结果, 得

$$B^* = 3.90802 \times 10^{14} e^{-\frac{T^*}{39.92468 T_c}} \quad (2)$$

这里 B 单位为 T , T^* 单位为 K , $T_c = 91K$.

为了讨论高温超导体不可逆线与临界电流与钉扎势的关联, 我们又用振动样品磁强计测量了该样品在 $77K$ 的磁滞回线与磁弛豫. 在测量中仍保持样品的 c 轴与外磁场垂直. 本文采用的振动样品磁强计外磁场最大可到 $2.3T$, 灵敏度为 $10^{-8}A/m$. 在测量磁滞回线时, 为了避免样品磁矩衰减的影响, 外磁场扫描速度控制在 $10mT/s$, 所得结果如图 3 所示.

为了研究该样品钉扎势随外磁场的依赖关系, 测量了该样品外磁场垂直于 c 轴时的磁弛豫, 即在某固定外磁场下(增场情况)样品磁化强度随时间的衰减. 图 4 为典型的实验结果. 从图 4 可见, 在 $77K$ 该样品从几秒到近 1000 秒范围内, 其磁化强度随时间呈对数型衰减.

因为实验时所用样品厚度 d 很小, 而外磁场又平行于样品平面, 其退磁因子约为 0.006 , 所以本文忽略该项修正, 并且用外磁场平行于无穷大平板的公式近似处理. 在 SI 单位制中

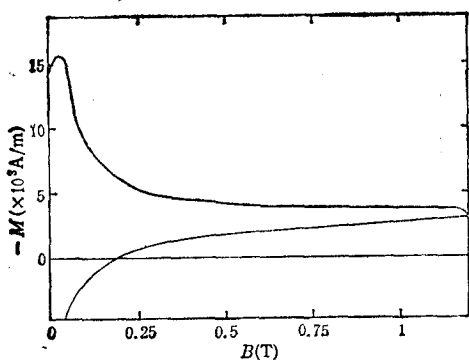


图 3 熔融结构样品在 $77K$ 时的磁滞回线

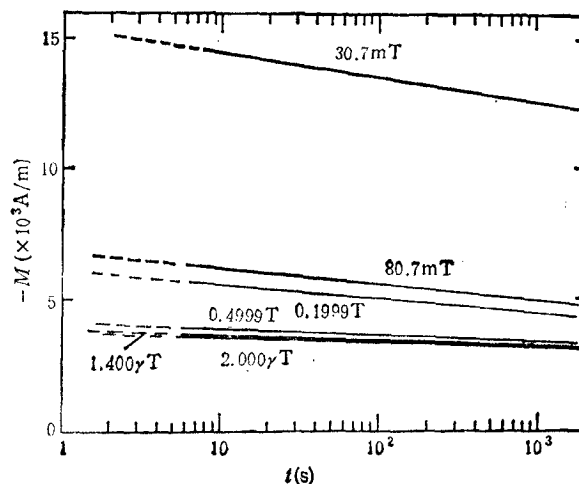


图 4

$$J_c = \frac{2(M^- - M^+)}{d} \quad (3)$$

$$\frac{dM}{d \ln t} = \frac{J_c d}{4} \frac{kT}{U_0} \quad (4)$$

以上两式中, M 为磁化强度, M^+ 和 M^- 分别为在图 3 中磁滞回线上增场和退场时样品的磁化强度, t 为 M 的弛豫时间.

利用(3)和(4)式, 可求得样品的临界电流密度 J_c 和钉扎势 U_0 随外磁场的变化关系, 其结果如图 5 和图 6 所示.

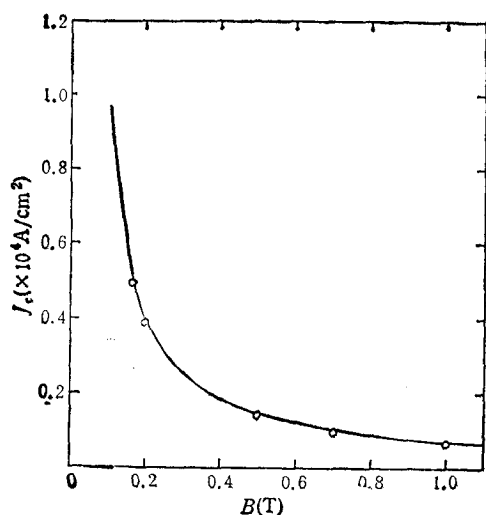


图5 据图3实验结果,利用(3)式计算出的临界电流密度 J_c 随外磁场的变化规律

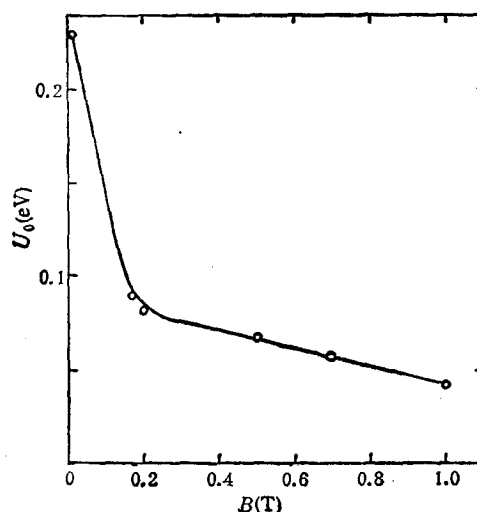


图6 利用(3)和(4)式,以及图4所得结果,求得样品钉扎势 U_0 随外磁场的变化规律

三、讨 论

从图6可见,本文所采用的熔融织构样品在低场时钉扎势 U_0 大于 0.2 eV, 而单晶或多晶样品仅为 0.1 eV^[2] 数量级。这可能就是本文所得不可逆函数形式与其它作者不同的物理机制。

本文所得不可逆函数形式,与 de Rango 等人^[1]用 Bi 系多晶样品所得的函数形式一致,但是他们没有同时报道他们所用样品的钉扎效应的强弱。本文所采用的样品钉扎势要大于 de Rango 所采用的样品。因为他们的不可逆线呈指数形式在远离 T_c 处成立,而本文所得不可逆线的指数形式在接近 T_c 处成立。在磁相图上,本文所得不可逆线更接近于 B_{c2} 曲线。

根据图2,当 $T^* = 77\text{K}$ 时,此处相应的 $B^* = 906.1\text{mT}$ 。然而根据图5,当 $B = 906.1\text{mT}$ 时,其临界电流密度 $J_c = 800\text{A/cm}^2$ 。可见在 77K 这个特定点,本文所得不可逆线相应点其 $J_c \neq 0$ 。这与文献[2]所讨论的结果不一致。本文认为现有解释不可逆线的三个物理图象,即超导玻璃态效应, $J_c = 0$, 和邻近效应可能都没有接触到高温超导体存在不可逆线的物理本质。从本文结果分析,高温超导体存在不可逆线与样品钉扎效应直接相关。

根据以上实验研究,得到如下结论:

1. 高温超导体不可逆线函数形式与样品钉扎势紧密关联。
2. 高温超导体不可逆线在磁相图上的位置并不对应样品临界电流密度 $J_c = 0$ 。

[1] K. A. Muller, M. Takashige and L.G. Bednorz, *Phys. Rev. Lett.*, 58(1987), 1143.

[2] Y. Yeshurun and A.P. Malozemoff, *Phys. Rev. Lett.*, 60(1988), 2202.

- [3] P. de Rango, B. Giordanengo, J. L. Genicon, P. Lejay, A. Sulpice, R. Tourner, *Physica*, **B165 & 166**(1990), 1141.
- [4] L. Civale, A. D. Marwick, M. W. McElfresh, T. K. Worthington, A. P. Malozemoff and F. H. Holtzberg, *Phys. Rev. Lett.*, **65**(1990), 1164.
- [5] Liu Fengshong, Mou Huilin, Wang Tiandog, Zhou Lian and Wu Xiaozu, *Progress in High-Temperature Superconductivity*, Vol. 22, World Scientific, (1989), p.14.

CORRELATION BETWEEN THE IRREVERSIBILITY LINE AND PINNING POTENTIAL IN HIGH- T_c SUPERCONDUCTOR

$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$

JIN XIN ZHANG YI-TONG LU RUI-XI YAO XI-XIAN

*Department of Physics, National Laboratory of Solid State Microstructure,
Nanjing University, Nanjing, 210008*

LIU FENG-SHENG MOU HUI-LIN WU XIAO-ZU ZHOU LIAN

Northwest Institute for Non-Ferrous Metals, Baoji, 721014

(Received 31 January 1991)

ABSTRACT

We have studied the irreversibility line and pinning potential U_0 of high- T_c melt-textured $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ samples and found that the irreversibility line takes an exponential form $B^* = e^{-T/T_c}$ over the temperature range of 72—85K, whereas the corresponding magnetic measurement at 77K gave a nonvanishing critical current density. It is shown in the present paper that the functional expression of irreversibility line and pinning potential U_0 of samples are closely associated.

PACC: 7460G; 7460J; 7460E