

$\text{Bi}_{0.8}\text{Pb}_{0.2}\text{SrCaCuO}_y$ 超导体中磁通 运动引起的内耗峰

张进修 曾文光 杜仲廉 林光明 梁凯峰 林志成

中山大学物理系, 广州, 510275

1989年11月1日收到

在线性增加磁场的条件下, 用变频倒扭摆测量了配比成份为 $(\text{Bi}_{0.8}\text{Pb}_{0.2})\text{SrCaCu}_2\text{O}_y$ 的试样在超导态时磁化过程中的低频内耗. 测量温度为 95 K, 试样处于零电阻状态, 所用频率为 0.5—5 Hz. 在内耗-场强 H 曲线上观测到内耗峰, 它有如下特点: 1) 峰高随加场速率 $\dot{H}$ 的增大而增大, 但随测量频率的增大而降低; 2) 峰值处的场强为 4—6 mT; 3) 当 $\dot{H}$ 由非零值突然改变至零时, 磁化过程特征内耗消失; 4) 试样处于正常态时, 上述特征内耗消失. 认为超导体在磁化过程中的上述特征内耗是量子磁通的运动所引起的.

PACC: 6240; 7460G; 7470V

一、引 言

对高 T_c 超导体中量子涡旋线(磁通)特性的研究, 既涉及 1986 年以来发展起来的高 T_c 超导陶瓷的基本特性, 又涉及如何提高临界电流强度 J_c , 以获得能实际应用的高 T_c 超导材料的重要问题, 因而受到人们的重视^[1]. 但是, 以往对超导材料中(包括金属材料和陶瓷材料)量子磁通的研究, 主要是通过静态的钉扎效应来提高对磁通的钉扎力并从而达到提高 J_c 的目的^[2]. 由于量子磁通的钉扎和跳跃是一个动态过程, 因而最接近实际情况的研究方法, 应该是研究磁化过程中钉扎点作用在运动磁通上的动态阻力. 作为一种类比, 正如对晶体中位错的钉扎所引起的强化效应一样, 最好的方法应该是研究在范性形变过程中位错所受的平均摩擦阻力. 因此需要发展和建立一种测量并计算出作用在运动磁通上的粘滞阻力的方法.

本文部分作者发展了一种研究并计算范性形变过程中运动位错所受阻力的方法^[3,4], 后来又将它用于研究相变过程中的相界面运动以及畴界在外场作用下运动时所受阻力的情况^[5-7], 已取得一定的成功. 其中的关键就是要找到这些广义缺陷在运动时所引起的一种特征内耗. 本文是将这一方法推广用于高 T_c 超导体中量子磁通所受阻力的研究和计算, 并报道已观测到的这种特征内耗.

二、实验方法与试样

所用主要实验仪器为强迫振动真空倒扭摆 (MFIFA-1 型, 中国科学院固体物理研究

所产品),所用的测量频率为 0.5—5Hz. 该仪器由 IBM-PC 计算机按预定程序进行温控和内耗测量,并实时作图和打印数据. 为了能在线性增加磁场的条件下测量内耗,在该仪器的夹层杜瓦筒(不锈钢制)外部绕上线圈,超导试样则刚好处在纵向均匀磁场的中部. 将夹层杜瓦筒浸入液氮并打开夹层底部的进液口让液氮进入夹层,再在夹层上方抽空即可使试样降温至 80K 左右. 内耗测量的精度为 1.0%.

试样是用分析纯的 Bi_2O_3 , SrCO_3 , CaCO_3 , CuO , 及 PbO 粉末按 $(\text{Pb}_{0.2}\text{Bi}_{0.8})\text{Sr}_1\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_y$ (1112) 的成份配制的. 混合粉末在 820℃ 预烧 3h 并经球磨后,再压制成 $1.5 \times 6 \times 60 \text{ mm}^3$ 的片条状试样,烧结工艺为 840℃ 保温 45h, 零电阻温度为 98K (测量时所用电流为 1mA).

通过改变夹层外部所绕线圈中的电流即可改变试样中轴向磁场强度. 本实验采用线性增加磁场强度的程序,所用加场速率均经标定,其最大加场速率为 0.6mT/s. 为了研究横向磁场的影响,还可在试样上通以恒定的直流电流,所用的电流最大为 2mA (超导态时).

为了保证在超导态的每次测量时,试样的初始状态相同,每次加场实验后均使试样上升至正常态 (110K), 然后降温至超导态的同一温度 (95K), 以排出全部残留磁通, 同时进行线性加场和内耗测量, 这样就能保证超导态试样在每次加场实验前均处于残留磁通为零的初始态.

测量内耗时所用的应变振幅为 1×10^{-5} , 所用频率为 0.5—5.0Hz.

三、实验结果

图 1 给出试样在烧成后的交流磁化率和电阻随温度的变化曲线. 由图 1 可见, 1112 试样是两相结构, 高温超导相的起始超导转变点为 105K, 至 97K 已完成超导转变, 低温超导相的起始超导转变点为 90K, 至 80K 时完成转变. 电阻温度曲线亦显示出两相的两个转变点, 其零电阻为 97K. 由于该试样存在两个超导相, 所以在 95K 恒温测量时, 所得结果反映的是高温超导相中量子磁通的运动特征.

图 2 给出在施加固定磁场

$$H = 1.5\text{mT}$$

时, 试样从超导态至室温时的内

耗-温度曲线, 所用同时测量的两个频率为 0.1Hz 和 5Hz. 可见在这一温区没有弛豫内耗峰出现. 但两个频率的内耗温度曲线在约 115K 处相交, 当温度高于 115K 时, 低频内耗曲线在上方, 但在 115K 时转变至低频内耗曲线处在下方. 这种超导态和正常态试样

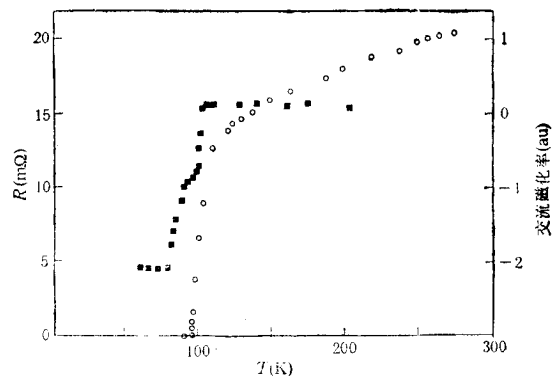


图 1 1112 试样的电阻 R -温度 T (○) 及交流磁化率-温度 T (■) 关系

内耗对频率响应的反转原因还值得进一步研究。

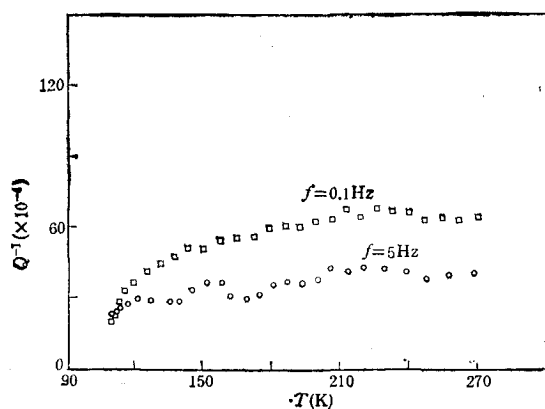


图2 1112 试样在施加固定磁场时,测量频率对 Q^{-1} - T 曲线的影响
 $H = 1.5 \text{ mT}$; $f_1 = 0.1 \text{ Hz}$; $f_2 = 5.0 \text{ Hz}$

图3给出磁场变化率 $\dot{H}$ 对磁化过程内耗的影响。其中3(a)给出试样为超导态 ($95 \pm 0.5 \text{ K}$)、测量频率为 1 Hz 时的 Q^{-1} - H 曲线。由图3(a)可见,当 $\dot{H} = 0$ 时 (即将 H 固定于某一定值测量内耗,然后再升至更高的固定 H 值测量内耗), Q^{-1} - H 曲线处在 2.1×10^{-3} 至 2.2×10^{-3} 的水平。当

$$\dot{H} = 0.25 \text{ mT/s}$$

时,在 $H \sim 4.6 \text{ mT}$ 处出现内耗峰,峰高为 0.5×10^{-3} ; 当 $\dot{H} = 0.6 \text{ mT/s}$ 时,内耗峰出现在 $H \sim 4.4 \text{ mT}$ 处,

峰高增至 0.8×10^{-3} 。图3(b)则给出试样为正常态 ($110 \pm 1.5 \text{ K}$), 测量频率为 0.5 Hz

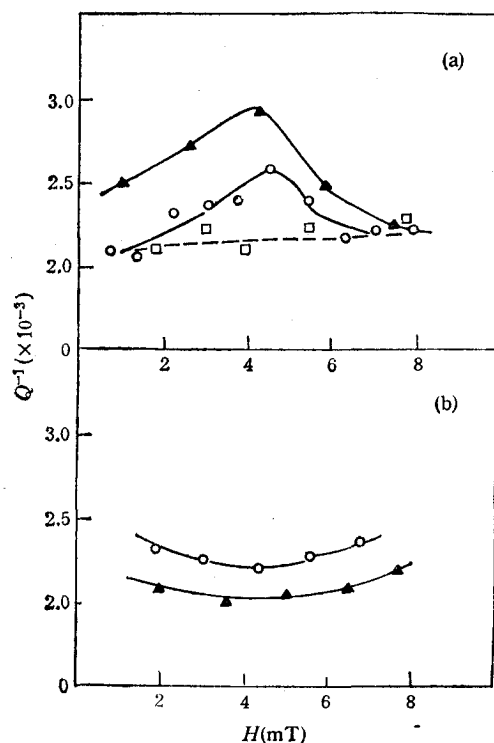


图3 磁场速率 $\dot{H}$ 对1112试样 Q^{-1} - H 曲线的影响
(a) 超导态 $T = 95 \pm 0.5 \text{ K}$; $f = 1 \text{ Hz}$; $I = 0$; $\blacktriangle$ 为 $\dot{H} = 0.6 \text{ mT/s}$; $\circ$ 为 $\dot{H} = 0.25 \text{ mT/s}$; $\square$ 为 $\dot{H} = 0$;
(b) 正常态 $T = 110 \pm 1.5 \text{ K}$; $f = 0.5 \text{ Hz}$; $I = 0$;
 $\blacktriangle$ 为 $\dot{H} = 0.42 \text{ mT/s}$; $\circ$ 为 $\dot{H} = 0$

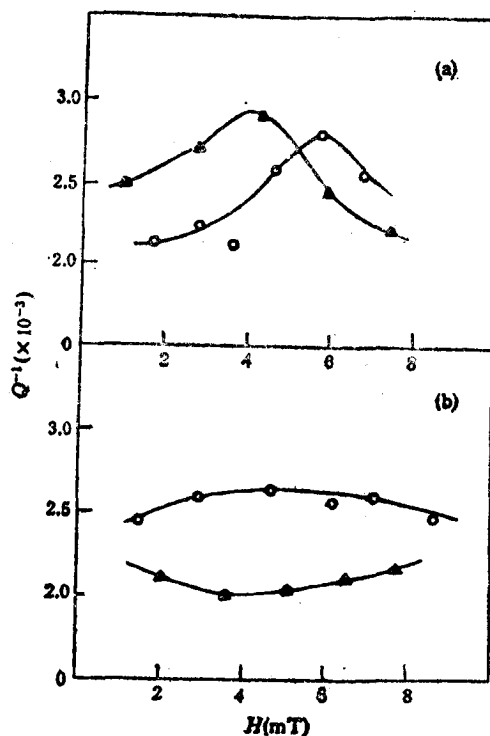


图4 测量频率 f 对1112试样在磁化过程中 Q^{-1} - H 曲线的影响
(a) 超导态 $T = 95 \pm 0.5 \text{ K}$; $I = 0$; $\dot{H} = 0.6 \text{ mT/s}$; $\blacktriangle$ 为 $f = 1 \text{ Hz}$; $\circ$ 为 $f = 5 \text{ Hz}$;
(b) 正常态 $T = 110 \pm 1 \text{ K}$; $I = 0$; $\dot{H} = 0.6 \text{ mT/s}$;
 $\blacktriangle$ 为 $f = 0.5 \text{ Hz}$; $\circ$ 为 $f = 5 \text{ Hz}$

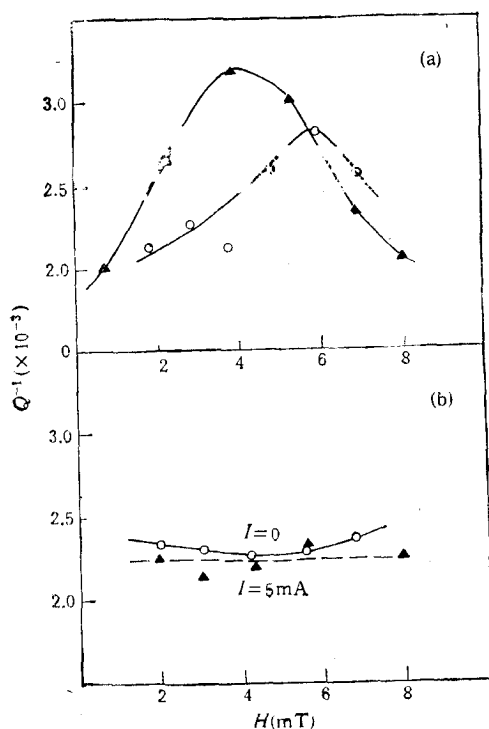


图5 试样电流对 1112 试样在磁化过程中 Q^{-1} - H 曲线的影响
(a) 超导态 $T = 95 \pm 0.5 \text{ K}$; $f = 5 \text{ Hz}$; $\dot{H} = 0.6 \text{ mT/s}$;
(b) 正常态 $T = 112.5 \pm 0.5 \text{ K}$; $f = 0.5 \text{ Hz}$; $\dot{H} = 0$;
▲ 为 $I = 5 \text{ mA}$; ○ 为 $I = 0$

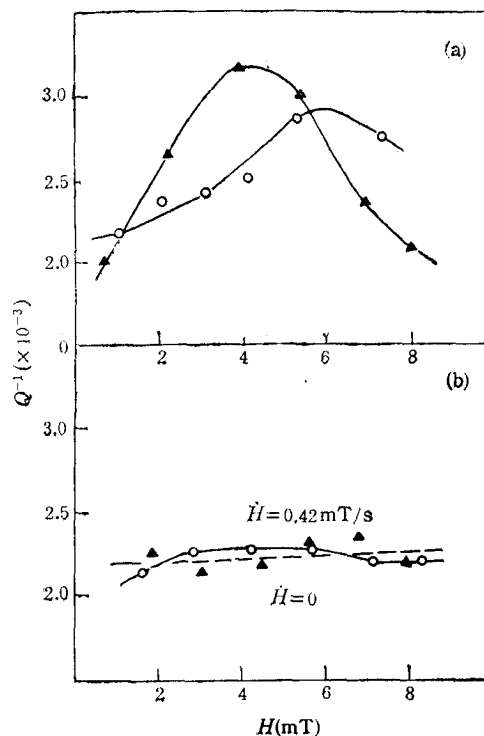


图6 存在试样电流时, $\dot{H}$ 对 Q^{-1} - H 曲线的影响
(a) 超导态 $T = 95 \pm 0.5 \text{ K}$; $f = 5 \text{ Hz}$; $I = 2 \text{ mA}$; ▲ 为 $\dot{H} = 0.6 \text{ mT/s}$; ○ 为 $\dot{H} = 0.25 \text{ mT/s}$;
(b) 正常态 $T = 110 \pm 1.5 \text{ K}$; $f = 0.5 \text{ Hz}$; $I = 5 \text{ mA}$

时的 Q^{-1} - H 曲线. 由图 3(b) 可见, 在 $\dot{H} = 0$ 和 $\dot{H} = 0.42 \text{ mT/s}$ 时均未出现内耗峰, 且 $\dot{H}$ 值不为零时的内耗值反而低于 $\dot{H} = 0$ 时的内耗值.

图 4 给出测量频率对磁化过程内耗的影响. 其中图 4(a) 给出试样为超导态 ($95 \pm 0.5 \text{ K}$), $\dot{H} = 0.6 \text{ mT/s}$ 时的 Q^{-1} - H 曲线, 可见 $f = 1 \text{ Hz}$ 时的内耗峰要高于 $f = 5 \text{ Hz}$ 时的内耗峰. 图 4(b) 则给出试样为正常态 ($110 \pm 1 \text{ K}$) 时的相应曲线, 由图 4(b) 可见, 正常态在动态磁场时对频率的响应行为与超导态相反, 低频时的内耗曲线比高频时要低.

图 5 给出试样中存在电流(即存在横向磁场)时对磁化过程内耗的影响. 图 5(a) 是试样为超导态 ($95 \pm 0.5 \text{ K}$), $f = 5 \text{ Hz}$, $\dot{H} = 0.6 \text{ mT/s}$ 时的测量结果. 可见 $I = 2 \text{ mA}$ 的偏磁场使内耗峰升高并使内耗峰移向更低 H 处. 图 5(b) 则给出正常态 ($110 \pm 1.5 \text{ K}$) 时的相应结果, 可见其内耗处在同一水平, 偏磁场存在与否对 Q^{-1} - H 曲线基本上没有影响.

图 6 给出存在偏磁场时 ($I = 2 \text{ mA}$), $\dot{H}$ 对 Q^{-1} - H 的影响. 图 6(a) 所示是超导态 ($95 \pm 0.5 \text{ K}$) 试样在 $f = 5 \text{ Hz}$ 时的测量结果, 可见 $\dot{H} = 0.6 \text{ mT/s}$ 时的内耗峰 (1.2×10^{-3}) 明显高于 $\dot{H} = 0.25 \text{ mT/s}$ 时的内耗峰 (0.8×10^{-3}), 且 $\dot{H}$ 的增大使内耗峰移向了低

场。试样为正常态时, 偏场($I = 5\text{mA}$) 的存在及 $\dot{H}$ 的变化对其内耗曲线无实质性影响(图 6(b)).

由图 3—图 6 的结果可总结如下:

1) 在试样处于超导态时, 磁化过程中出现内耗峰, 峰高随磁场变化率 $\dot{H}$ 的增大而升高, 随测量频率的增大而下降, $\dot{H} = 0$ 时, 该特征内耗峰消失; 2) 横向磁场的存在使磁化过程内耗峰升高并使内耗峰移向低频; 3) 当试样处于正常态时, 上述磁化过程的特征内耗峰消失.

四、 讨 论

上节所描述的超导体在磁化过程中的特征内耗与部份作者在铁磁体磁化过程中^[8,9], 无扩散马氏体在相变过程中^[10-12], 以及金属在范性形变过程中的特征内耗^[3,4,13,14]十分相似, 它们都具有内耗与加场速率、测量频率的同样依赖关系, 而且当加场速率(包括磁场、力场、温度-热力势场)为零时, 该特征内耗消失. 这种特征内耗都是材料中的缺陷(磁畴壁、相界面、位错)运动时所引起来的, 是运动过程的特征.

Kumakura 等人曾报道过 1112 试样在 77K 时的下临界场 H_{c1} 为 4.5mT ^[15]. 1112 试样在 95K 时在更低的外场下即有磁通侵入是可能的. 因此, 本文所观测到的这种超导态试样在磁化过程中才出现的特征内耗, 也应该是磁通侵入后的运动过程所引起来的. 从本文的结果来看, 内耗曲线的抬头点处在非常低的场强处 ($< 1\text{mT}$), 可见, 在温度为 97K 时, 1112 试样在外场小于 1mT 时即有磁通开始侵入. 因此, 提高这种超导体的 H_{c1} 值是十分重要的问题.

只要找到了超导体中磁通运动所引起的内耗峰及测量了内耗对磁场变化率 $\dot{H}$ 、测量效率 f 等的依赖关系之后, 就可以从磁通的运动方程求解并计算出磁通在运动过程中所受阻力 ΔG_R 随外场的变化关系^[5,7]. 阻力 ΔG_R 实际就是钉扎力的平均值, 因此, 本文的结果可为定量研究磁通钉扎力提供一个新方法.

国家超导研究开发中心及广东省科学技术委员会资助的课题.

- [1] M. J. Ferrari, M. Johnson, F. C. Wellstood, J. Clarke, P. A. Rosenthal, R. H. Hammond and M. R. Beasley, *Appl. Phys. Lett.*, **53**(8) (1988), 695.
- [2] 章立源、张金龙、崔广霖, 超导物理, 电子工业出版社, 第八章.
- [3] J. X. Zhang, *J. de Physique*, **42** (1981), C5-399.
- [4] 张进修, 中山大学学报(自然科学版), **20**(2) (1982), 1.
- [5] J. X. Zhang, W. G. Zeng, *Proceeding of Intern. Conf. on Internal Friction and Ultrasonic Attenuation in Solids*, Beijing, (1989).
- [6] 张进修、李雯均, 物理学报, **36**(1987), 847; *Chinese Physics*, **8**(1988), 308.
- [7] 张进修、曾文光, 中山大学学报(自然科学版), 待发表.
- [8] 张进修、曾文光、伍建民, 中山大学学报(自然科学版), **23**(1984), 109.
- [9] 曾文光、张进修、林浩清, 物理学报, **35**(1986), 1377.
- [10] 张进修、罗来忠, 物理学报, **37**(1988), 353.
- [11] 张进修、李江宏, 物理学报, **37**(1988), 363.
- [12] K. F. Liang, Z. C. Lin and J. X. Zhang, 同[5].

- [13] 张进修, 曾文光, 中山大学学报(自然科学版), **25**(4)(1986), 21.
[14] 张进修, 黄元士等, 中山大学学报(自然科学版), **26**(1)(1987), 58.
[15] H. Kumakura, K. Takahashi, D. R. Dietderich, K. Togano and H. Maeda, *Appl. Phys. Lett.*, **52**(24) (1988), 2064.

INTERNAL FRICTION PEAK DUE TO MOVING FLUX IN $\text{Bi}_{0.8}\text{Pb}_{0.2}\text{SrCaCuO}_y$ SUPERCONDUCTOR

ZHANG JIN-XIU ZHENG WEN-GUANG DU ZHONG-LIAN LIN GUANG-MING

LIANG KAI-FENG LIN ZHI-CHENG

Department of Physics, Zhongshan University Guangzhou, 510275

(Received 1 November 1989)

ABSTRACT

The low-frequency internal friction in the magnetization process, where magnetic field increases linearly, is measured for $(\text{Bi}_{0.8}\text{Pb}_{0.2}\text{SrCaCuO}_y)$ in superconducting state by using a frequency variable inverted torsion pendulum system. Experimental conditions are as follows: measure temperature: 95 K, at which specimen is in resistance-free state; frequency: 0.5 Hz to 5 Hz. The characteristics of internal friction (IF) peak observed in curve of IF vs magnetic field strength H are as follows.

1. The peak height increases with an increasing of $\dot{H}$ (variance rate of magnetic field) but decreases as frequency increasing.
2. Magnetic field strength at which IF peak appears is 4—6 mT.
3. When $\dot{H}$ falls down to zero from a given value suddenly, IF peak disappears.
4. IF peak mentioned above disappears also when specimen turns to normal state.

It is considered that, the eigen-IF of superconductor mentioned above during magnetization process stems from motion of quantum flux.

PACC: 6240; 7460G; 7470V