

# YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> 超导管内磁场与外磁场的关系

徐凤枝 杨冲然 陈 烈 陈肖兰

(中国科学院物理研究所)

柴 璋 李碧钦

(中国科学技术大学研究生院)

1988年10月4日收到

本文报道了当外磁场  $H_e$  较低时 ( $H_e < 4H_{cm}$ , 其中  $H_{cm}$  是超导管的最大捕获磁场), 超导管的内磁场  $H_i$  与时间及外磁场的关系可表示为  $H_0 + B_0(\ln t + 1 - \exp(-t/\tau))$ , 式中  $B_0 \ln t$  与磁通蠕动有关,  $B_0(1 - \exp(-t/\tau))$  与外磁场引起的磁通扰动有关. 扰动随时间很快衰减.  $H_0$ ,  $B_0$  及  $1/\tau$  随外磁场增加, 在  $H_e > H_{cm}$  时, 这几个量增加较大. 当直流外磁场  $H_e < 1/2 H_{cm}$  时, 超导管可将其完全屏蔽, 对交流场不能完全屏蔽, 但其屏蔽效果仍优于最好的金属屏蔽筒.

## 一、引 言

迄今已有不少作者讨论了氧化物超导环的持续电流随时间的衰减<sup>[1-6]</sup>. 在外磁场中将超导环冷到  $T_c$  以下, 去外磁场, 在超导环中会感应出持续电流. 作者<sup>[3]</sup>曾对它做过长时间的观测, 发现它随时间按  $\ln t$  规律衰减, 并由此得到 YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> 超导体的电阻率上限小于  $2 \times 10^{-18} \Omega \cdot \text{cm}$ . 在零场中将超导环冷到  $T_c$  以下, 再加外磁场. 对第 I 类超导体, 当  $H_e < H_c$  时, 超导环上感应的持续电流抵消了外磁场, 使环内磁场不变. 对第 II 类超导体, 当  $H_{c1} < H_e < H_{c2}$ , 超导环感应的持续电流由于磁通蠕动按  $\ln t$  规律衰减<sup>[12]</sup>, 环内磁场按  $\ln t$  规律增加. 对于如氧化物超导体的自旋玻璃体<sup>[7-11]</sup>, 当  $H_e < H_{c1}$  时, 磁通通过弱连接穿透进环, 并在外磁场的作用下向环内运动, 引起环内磁场的增加. 文献[4, 5]给出了外磁场连续缓慢增加时, 超导管内、外磁场的关系. 实际上给出的曲线仅是一个相当好的近似, 它们是时间的函数.

本文中讨论突然加外磁场  $H_e$  时, 管内磁场随时间的变化及与外磁场的关系, 并与缓慢增加外磁场的结果进行比较.

## 二、实验结果和讨论

我们使用的超导管是由烧结好的 YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> 粉末加压成型再二次烧结而成. 粉末和超导管的  $T_c$  都是 90.5K. 管的内、外径及高分别为 1.8cm, 2.4cm 和 2.0cm. 管内磁场用 F1.104 型 Förster 奥斯特计探测, 灵敏度为  $1 \times 10^{-4} \text{G}$ , 最大可测磁场为 10G. 超

导管固定在奥斯特计探头上,测量过程中探头与样品相对位置不变。外磁场由  $\phi 5.5\text{cm}$ , 长  $20\text{cm}$  的螺线管提供。螺线管外有多层坡莫合金筒,筒中心处的场小于  $10^{-3}\text{G}$ , 超导体就放在此处。

在零场下将样品冷到  $77\text{K}$ , 在平行于超导体轴线方向上缓慢加外磁场,用 X-Y 记录仪记录内磁场  $H_i$  与  $H_o$  的关系,如图 1 中实线所示。当  $H_o$  从零开始增加时,在开始的一段,几乎测不出场的变化。当  $H_o$  大于  $1\text{G}$ ,可测出  $H_i$  随  $H_o$  线性增加,直到  $H_o = 1.5\text{G}$ 。此时,  $H_o$  减小到零,  $H_i$  亦退到零,即无捕获磁通,测得的  $H_i$  是由于超导体不够长,从上下两端漏进部分磁通所致。当  $H_o$  大于  $1.5\text{G}$ ,  $H_i$ - $H_o$  曲线斜率增加,但仍近似为直线。  $H_o$  退到零,管内有剩余磁场,它是超导体的捕获磁场  $H_r$  (trapped field)。  $H_o$  不

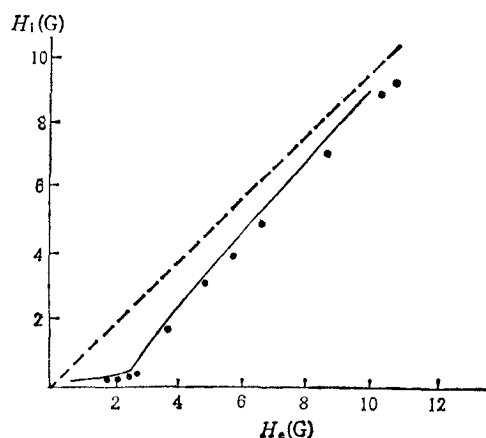


图 1 超导体的内磁场  $H_i$  与外磁场  $H_o$  的关系 管为正常态时用断线表示; 外磁场连续缓慢增加时用实线表示;突然加外磁场时,  $10\text{min}$  后的  $H_i$  值用圆点表示

表 1 (1)式中各系数与外磁场的关系

| $H_o(\text{G})$ | $H_i^*(\text{G})$ | $H_o(\text{G})$ | $B_o \times 10^{-3}(\text{G})$ | $\tau$ | $H_r^{**}(\text{G})$ |
|-----------------|-------------------|-----------------|--------------------------------|--------|----------------------|
| 2.49            | 0.122             | 0.113           | 1.30                           | 400    | 0.08                 |
| 2.74            | 0.160             | 0.139           | 2.89                           | 250    | 0.11                 |
| 2.99            | 0.343             | 0.195           | 20.10                          | 200    | 0.31                 |
| 3.15            | 1.19              | 1.08            | 17.86                          | 85     | 1.1                  |
| 3.32            | 1.37              | 1.22            | 19.26                          | 65     | 1.3                  |
| 3.49            | 1.60              | 1.46            | 18.28                          | 65     | 1.5                  |
| 4.15            | 2.46              | 2.32            | 20.46                          | 65     | 2.1                  |
| 4.56            | 2.92              | 2.77            | 19.77                          | 60     | 2.1                  |
| 5.56            | 3.17              | 2.97            | 28.33                          | 55     | 2.7                  |
| 6.46            | 4.64              | 4.42            | 30.40                          | 50     | 2.8                  |
| 8.30            | 7.19              | 6.93            | 34.49                          | 37     | 3.0                  |
| 9.96            | 9.20              | 8.98            | 30.86                          | 30     | 3.0                  |
| 10.38           | 9.38              | 9.14            | 33.19                          | 30     | 3.0                  |

\* 为  $10\text{min}$  时管内的磁场。

\*\* 为突然去掉  $H_o$  时,超导体的捕获磁场。

同, 捕获磁场  $H_i$  也不同, 见表 1. 当  $H_e$  大于 8.3G 时,  $H_i$  大致相同, 约为 3G, 记作  $H_{rm}$ . 此实验结果与 Gyorgy 等人<sup>[4]</sup> 的实验相似. 在实验过程中注意到, 尽管  $H_e$  变化十分缓慢,  $H_i$  仍没有达到稳定值, 即  $H_e-H_i$  曲线与时间有关.

下面讨论如果外磁场从零突然变到  $H_e$ , 管内磁场随时间的变化. 当外磁场小于 1.5G 时, 在我们的实验精度下, 测不出  $H_i$  的变化.  $H_e$  处在大于 1.5G、小于 2.7G 之间时,  $H_i(t)$  随时间增加,  $H_e$  越大,  $H_i(t)$  变化的速率越快. 当  $H_e > 3G (\approx H_{rm})$ ,  $H_i(t)$  在开始的前两分钟内变化很快, 逐渐变缓. 管内的磁场  $H_i(t)$  随时间的变化可以近似地用下式表示:

$$H_i(t) = H_0(H_e) + B_0(H_e)[\ln t + 1 - \exp(-t/\tau)], \quad (1)$$

式中  $H_0$ ,  $B_0$  及  $1/\tau$  都是  $H_e$  的函数, 随  $H_e$  增加而增加.  $H_0$  表示在开始的瞬间外磁场进到管内的值,  $B_0$  正比于管内磁场的变化速率,  $\tau$  值的意义在下面将给予讨论. 将实验测得的  $H_i(t)$ ,  $t$  值代入 (1) 式, 用数字逼近法求出  $H_0$ ,  $B_0$  及  $\tau$  值. 为了清楚, 将不同  $H_e$  值所对应的  $H_0$ ,  $B_0$  及  $\tau$  值列在表 1 中. 将每个  $H_e$  所对应的  $H_i(10\text{min})$  画入图 1. 注意到突然改变  $H_e$  所对应的  $H_i$  值明显小于连续缓慢增加  $H_e$  所对应的值. 下面将讨论. 从表 1 看出,  $H_0$  与  $H_i(10\text{min})$  的变化规律一样, 即先随  $H_e$  缓慢增加, 当  $H_e > H_{rm}$  时, 有较快的增加.  $1/\tau$  与  $H_0$  相似, 在  $H_e > H_{rm}$  时, 增加较大,  $B_0$  在 2.99G 处(小于  $H_{rm}$ ) 已增大 7 倍.

图 2 给出几组不同  $H_e$  值, 实验点与按 (1) 式计算的曲线比较. 当  $H_e$  较低时(图 2 中

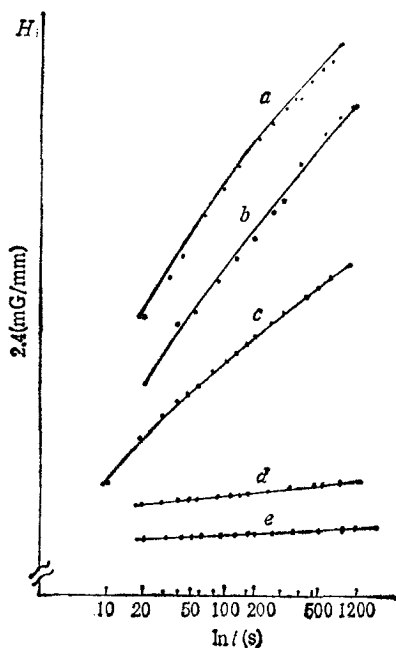


图 2  $H_i$  与  $\ln t$  的关系图 实线为按 (1) 式的计算曲线; 圆点为实验点; 外磁场  $H_e$  值从曲线 a 到 e 分别为: 10.38G, 6.47G, 3.32G, 2.99G 和 2.47 G; 低场时计算与实验符合得相当理想

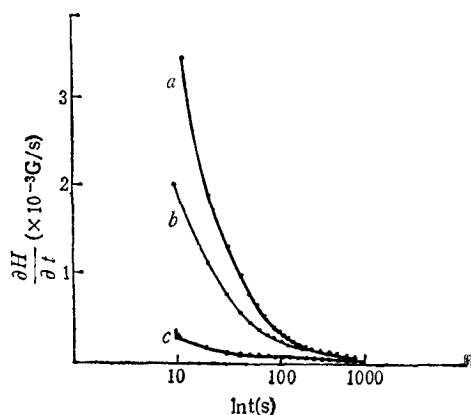


图 3 不同外磁场, 超导管内磁场变化速率  $\partial H_i / \partial t$  与时间  $\ln t$  的关系 曲线 a, b, c 的外磁场分别为 8.3G, 3.32G, 2.74G

曲线  $c, d, e$ ), 实验点全部落在计算曲线上. 当  $H_e = 10.38\text{G}$  时, 在曲线的两端有  $10\text{mG}$  的误差, 它仍在实验误差范围内. 说明(1)式较好地描绘了实验过程.

正象许多作者指出的那样<sup>[7-11]</sup>, 氧化物超导体属于超导自旋玻璃体, 颗粒之间由弱连接耦合在一起, 当外磁场远小于  $H_{c1}$  时, 磁通线就可以通过弱连接穿透进入超导体内. 称此时的  $H_e$  为  $H_{c1}^a$ . 由于弱钉扎, 在外磁场稍大于  $H_{c1}^a$  时, 磁通线可以沿着垂直于电流流动方向蠕动. 称此时的  $H_e$  为  $H_{c1}^b$ . 在本实验中,  $H_{c1}^b = 1.5\text{G}$ . 按蠕动模型, 超导管上感应的持续电流在开始阶段按  $\ln t$  衰减. 在管外有外磁场时, 管内磁场应按  $\ln t$  增加. 由于  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  材料高的  $T_c$  及弱钉扎<sup>[13]</sup>, 磁通线除了蠕动之外, 还会有别的运动, 这种运动类似于一种扰动, 是亚稳态. 它随时间衰减, 逐渐趋于平衡态. 亚稳态的衰减可以用  $\exp(-t/\tau)$  描写. 其中  $\tau = L/R$  为扰动恢复时间,  $L$  为超导管的电感. 我们所用的超导管的电感  $L \approx 1 \times 10^{-9}\text{H}$ .  $R$  为与扰动相应的磁阻.  $\tau$  与外磁场有关, 见表 1,  $\tau$  取  $400-30$ , 则  $R$  为  $2 \times 10^{-12}-3 \times 10^{-11}\Omega \cdot \text{cm}$ . 这说明, 在低场范围,  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  对交流干扰虽然不能完全屏蔽, 但其效果已优于最好的金属屏蔽筒. 对(1)式求微分, 得到管内场的变化速率

$$\frac{\partial H_i(t)}{\partial t} = B_0[1/t + 1/\tau \exp(-t/\tau)]. \quad (2)$$

将不同  $H_e$  所对应的  $B_0, \tau$  值代入(2)式作图, 如图 3 所示.  $t$  小时, 对不同  $H_e$ , 速率相差很大. 随着  $t$  的增加, 差别越来越小.  $\tau$  与最初几十秒的速率关系密切. 在本实验中, 当  $H_e = 3\text{G}$  时(近似等于  $H_{im}$ ),  $\tau$  有一个突变, 称它为  $H_{c1}^c$ , 它是磁通扰动的阈值点. 当  $H_e > H_{c1}^c$  时, 磁场使钉扎在超导体内的磁通除蠕动外, 还产生一种扰动, 使开始时的磁通运动变快很多. 扰动随时间按指数衰减. 即突然加外磁场  $H_e$ ,  $3\text{min}$  后测得的  $H_i$  与  $30\text{min}$  后测得的  $H_i$  相差不大. 而缓慢改变  $H_e$ , 在整个测试过程中, 几乎一直保持着内磁场增加的高速率. 所以图 1 中连续测试点大于分别测试点.

由于测量仪器的限制, 我们选取的超导管的捕获磁场  $H_{im}$  为  $3\text{G}$ . 不同的  $H_{im}$ , 将会对应不同的  $H_{c1}^a, H_{c1}^b$  及  $H_{c1}^c$ .

### 三、结 论

在我们所讨论的低场范围内 ( $<10\text{G}$ ), 在  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  超导管外突然加外磁场  $H_e$ , 若  $H_e < H_{c1}^a (\approx 1\text{G}, \ll H_{c1})$ , 则超导管对  $H_e$  完全屏蔽. 若  $H_e > H_{c1}^b (\approx 1.5\text{G})$ , 则通过弱连接穿透进超导体内的磁通线将运动, 使管内磁场随时间增加.  $H_i$  与时间的关系可以用公式  $H_i(t) = H_0(H_e) + B_0(H_e)(\ln t + 1 - \exp(-t/\tau))$  描写. 其中  $H_0, B_0$  及  $1/\tau$  随  $H_e$  增加. 当  $H_e > H_{c1}^c (\approx H_{im})$  时, 三个量都有一个大的增加.  $H_0$  为外加磁场的最初瞬间进入超导管的场,  $B_0$  正比于  $H_i$  增加的速率,  $\ln t$  与磁通蠕动有关,  $(1 - \exp(-t/\tau))$  是与外磁场引起的磁通扰动有关. 扰动使外磁场在最初十几秒内很快进入超导管内, 随着  $t$  的增加, 扰动引起的速率的增加迅速趋于零. 扰动使超导管呈现  $10^{-12}-10^{-11}\Omega \cdot \text{cm}$  的交流磁阻.  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  超导管对交流干扰虽不能完全屏蔽, 但其屏蔽效果仍优于最佳正常金属.

- [1] M. K. Wu, J. R. Ashburn, C. T. Torng, P. H. Hor, R. L. Meng, L. Gao, Z. J. Huang, Y. A. Wang and C. W. Chu, *Phys. Rev. Lett.*, **58**(1987), 908.
- [2] F. C. Wellstood, M. J. Ferrari, J. Clarke, A. M. Stacy, A. Zettl and M. L. Cohen, *Phys. Lett.*, **A122**(1987), 61.
- [3] W. J. Yeh, L. Chen, F. Z. Xu, B. K. Bi and P. R. Yang, *Phys. Rev.*, **B36**(1987), 2414.
- [4] E. M. Gyorgy, G. S. Grade, D. W. Johnson Jr., L. C. Feldmen, D. W. Murphy and W. W. Rhodes, R. E. Howard, P. M. Mankiewich and W. J. Skocpol, *Appl. Phys. Lett.*, **52**(1988), 328.
- [5] E. Tjukanov, R. W. Cline, R. Krahm, M. Hayden, M. W. Reynolds, W. N. Hardy and J. P. Carolan, R. C. Thompson, *Phys. Rev.*, **B36**(1987), 7244.
- [6] J. C. Macfarlane, R. Driver, R. B. Roberts, E. C. Horrigan, *Cryogenics*, **28**(1988), 303.
- [7] C. Ebner and D. Stroud, *Phys. Rev.*, **B31**(1985), 165.
- [8] K. A. Muller, M. Takashige and J. G. Bednorz, *Phys. Rev. Lett.*, **58**(1987), 1143.
- [9] A. C. Mota, A. Pollini and P. Visani, K. A. Muller and J. G. Bednorz, *Phys. Rev.*, **B36**(1987), 4011.
- [10] M. Tuominen, A. M. Goldman, and M. L. Mecartney, *Phys. Rev.*, **B37**(1988), 548.
- [11] P. H. Hor, R. L. Meng, C. W. Chu, and M. K. Wu, *Appl. Phys. Communi.*, **7**(1987), 123.
- [12] P. W. Anderson, *Phys. Rev. Lett.*, **9**(1962), 309.
- [13] David R. Nelson, *Phys. Rev. Lett.*, **60**(1988), 1973.

## THE RELATIONSHIP BETWEEN INTERNAL AND EXTERNAL MAGNETIC FIELD IN $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ TUBE

XU FENG-ZHI YANG PEI-RAN CHEN LIB CHEN XIAO-LAN

(Institute of Physics, Academia Sinica)

CHAI ZHANG LI BI-QING

(Graduate School, University of Science and Technology of China, Beijing)

### ABSTRACT

In this paper, we report the time dependence of the magnetic field inside a  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  tube, when switching on a field  $H_e$  outside the tube after a zero field cooling the tube into a superconducting state. In our experiment  $H_e$  is smaller than  $4H_{rm}$ , where  $H_{rm}$  is the trapped field of the tube. The dependence can be expressed as  $H_i(t) = H_0 + B_0(\ln t + 1 - \exp(-t/\tau))$ , where  $H_0$ ,  $B_0$  and  $1/\tau$  are functions of  $H_e$ , and they keep rising when  $H_e > H_{rm}$ . We suggest that the term of  $\ln t$  is caused by flux lines creeping, while  $(1 - \exp(-t/\tau))$  results from flux lines fluctuating, which is a short time effect. The shielding effect of  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  tubes is perfect for low dc field ( $< H_{rm}/2$ ), and better than the best normal metal for ac magnetic noise.