

Anderson 磁通蠕动模型和超导体中不可逆线*

冯双久* 韩宇峰

(电子科技大学信息与材料工程学院, 微波测试中心 成都 610054)

【摘要】 基于 Anderson 磁通蠕动模型, 分析了超导体中的磁通弛豫过程。发现了当钉扎势与热激发能的比值减小到一定值之后, 超导体就会发生从磁性不可逆性向磁性可逆性的转变; 不可逆线对应的是超导体中临界态消失的一条曲线。

关键词 磁通蠕动; 不可逆线; 临界态

中图分类号 O511

高温超导体的发现, 不仅实现了人们对超导临界温度突破的梦想, 而且由于实验研究揭示了高温超导体中的一些不同于传统超导体的奇异特性, 使我们对超导体各方面的性质有了更深入的理解和认识。一些可以成功地解释传统超导体性质的理论模型是否适应于高温超导体, 是人们很感兴趣的问题, Anderson 热激发磁通蠕动模型是一个典型的例子^[1]。该模型所预言的超导体的磁化强度随时间对数呈线性衰减的规律用以描述传统超导体的磁弛豫性质是准确的, 但对于高温超导体就不再适用^[2,3], 因此将它应用于高温超导体之前应作适当的修正^[4]。但 Anderson 模型的基本思想完全适应于高温超导体, 只是在一般的理论处理过程中忽略了某些因素, 使其不仅大大缩小了适应范围, 而且也丢失了一些很有意义的结论。实际上超导体中所谓的“不可逆线”的存在是 Anderson 模型的一个必然结果, 本文将从 Anderson 模型的基本思想出发说明不可逆线产生的原因。

1 概述

不可逆线首先被发现于 La-Ba-Cu-O 系超导体中^[2], 随后的实验研究发现不可逆线的存在是高温氧化物超导体的一个共有特性^[3], 并且在传统的合金超导体中也发现存在不可逆线。所谓的“不可逆线”, 实际上就是在超导体的 H-T 相图上将其划分为磁性可逆区和磁性不可逆区的分界线, 在不可逆线之上的高温高场区, 超导体的磁性质显示可逆性; 而在不可逆线之下的低温低场区, 它的磁性质是不可逆的。围绕不可逆线的产生机制, 人们做了大量的理论与实验工作, 但至今对其产生机制仍无一个定论。综合所有的对不可逆线的解释, 可以将它们分成两大类: 1) 基于磁通蠕动模型的解释^[3], 认为不可线对应的是超导体中磁通钉扎的解钉扎线; 2) 基于磁通线结构的相变模型^[6,7], 认为不可逆线所对应的是磁通线结构发生熔化的相变温度。最近报道的实验结果表明^[8], 在 Bi 系超导材料中可以将不可逆线与磁通格子熔化线区分开来, 这一结果显示不可逆线的产生机制有可能与磁通线结构的相变模型无关。

理想的 II 类超导体的磁性质是可逆的, 如果在其中引入有效的磁通钉扎中心, 那么磁通线在超导体中的运动将受到钉扎中心的阻碍作用而不再作近似自由的运动了, 在磁性质上就显示出不可逆性。这种磁性质的不可逆性可由 Bean 提出的临界态模型来描述^[9]。在高温高场的情况下, 由于

* 1998 年 4 月 19 日收稿

* 男 32 岁 硕士 讲师

热激发能 kT 远大于磁通钉扎势, 钉扎中心对磁通线运动的阻碍作用非常小而可以忽略时, 此时的磁通线运动又可以看作是近似自由运动, 超导体中不存在临界态, 因而它的磁性质是可逆的。

2 理论分析

标记 $U_0(T)$ 为不存在磁通密度梯度时的磁通钉扎势垒的高度; 当存在这种梯度时, 钉扎势垒沿梯度方向发生倾斜, 以 $\Delta U_0(T)$ 标记存在磁通密度梯度时钉扎势垒两侧的增高和降低。在传统的处理过程中, 由于假设 $U_0(T) \geq kT$, 因而沿着磁通密度梯度的方向磁通跳跃过程对磁通蠕动速率的影响是被忽略的。而我们所讨论的范围包括 $U_0(T) \leq kT$ 的情况, 因此这个方向磁通跳跃过程的影响不能忽略。考虑此因素, 由 Anderson 模型所给出的磁通蠕动速率为

$$v = v_0 \exp\left(-\frac{U_0(T)}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{\Delta U_0(T)}{kT}\right) - \exp\left(-\frac{\Delta U_0(T)}{kT}\right) \right] \quad (1)$$

式中 v_0 是超导体中不存在磁通钉扎中心时的磁通蠕动速率。

按照 Tinkhan 的处理方法^[10], 根据临界态模型, 引入温度为 0 和 T 时的临界钉扎力密度 $f_c(0)$ 和 $f_c(T)$, 由式(1)得

$$v_{\min} = v_0 \exp\left(-\frac{U_0(T)}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{f_c(T)U_0(0)}{kTf_c(0)}\right) - \exp\left(-\frac{f_c(T)U_0(0)}{kTf_c(0)}\right) \right] \quad (2)$$

式中 v_{\min} 是实验中可测到的最小磁通蠕动速率, $U_0(0)$ 为 $T=0$ K 时的磁通钉扎势。式(2)即为临界钉扎力密度 $f_c(T)$ 的表达式。因为无法给出 $f_c(T)$ 显函数形式, 图 1 为其数值计算结果。由于钉扎势 $U_0(T)$ 对温度的依赖关系是未知的, 图中以 $U_0(T)/kT$ 为横坐标, 以 $U_0(0)f_c(T)/kTf_c(0)$ 为纵坐标作图。由图 1 可知, 随着 $U_0(T)/kT$ 的减小, $U_0(0)f_c(T)/kTf_c(0)$ 也是单调减小的, 当

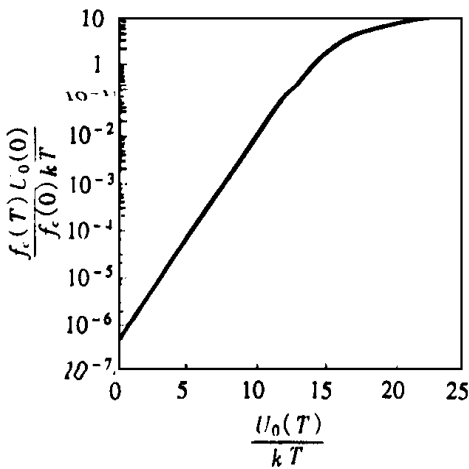


图 1 $f_c(T)$ 对温度的依赖关系

v_{\min}/v_0 确定后, $f_c(T)$ 存在一个理论极限最小值 f_{cL} 。取 $v_{\min}/v_0 = 10^{-6}$, 得到 $U_0(0)f_{cL}/kTf_c(0) \approx 5 \times 10^{-7}$ 。实际上在得到 f_{cL} 时令 $U_0(T)/kT = 0$, 即此时超导体中不存在有效磁通钉扎中心, 因此 f_{cL} 不再有临界钉扎力密度的意义, 只是给出了 $f_c(T)$ 随 $U_0(T)/kT$ 变化的一个最小理论限制, 实际中是无法达到的。而在实验中所测量到的最小临界钉扎力密度 f_{cm} 大于 f_{cL} 。从 $f_c(T) = f_{cm}$ 可以定出一个温度 T_d 。在 $T > T_d$ 的区域, $f_c(T)$ 小于 f_{cm} , 因此超导体中的钉扎中心对磁通线的钉扎作用可以忽略, 此时超导体中不存在临界态, 它的磁性质是可逆的。在 $T < T_d$ 的区域, $f_c(T)$ 大于 f_{cm} , 表明钉扎作用不能忽略, 超导体的磁性质是不可逆的。因此 T_d 是一个特征温度, 在此点超导体自低温下存在临界态转变到高温下不存临界态, 在磁性质上即发生由不可逆向可逆的转变, 也就是说

T_d 就是解钉扎温度, 它所对应的是实际中所观察到的不可逆线。以上的讨论没有考虑到钉扎势 $U_0(T)$ 同时也是外加磁场 H 的函数, 因此 T_d 也是依赖于 H 的, 这样就可以从 $f_c(T) = f_{cm}$ 给出不可逆线的表达式了。综上所述, Anderson 模型从理论上预言了不可逆线的存在, 而它所对应的即是超导体中临界态消失的一条曲线。

3 讨论

由上述分析可知,不可逆线是与磁通钉扎的强弱相关的,如果钉扎势 $U_0(T)$ 大,那么不可逆线应向高温高场区移动,这是与实验结果相一致的^[11]。由于在超导临界温度 T_c 时有 $U_0(T)=0$,因此对于任何的非理想 II 类超导体,不可逆线都是存在的。对于钉扎特别强的超导体,不可逆线可能与上临界场 H_{c2} 线非常接近而难以区分。另外,不可逆线的位置与 f_{cm} 选择有关, f_{cm} 选得越小,不可逆线就越向高温高场区移动,但在 v_{min} 给定时, f_{cm} 的减小不能小于 f_{CL} 。因此最小磁通钉扎力密度的选择影响不可逆线的位置,不可逆线实际上并非是一条曲线,而是一个有一定宽度的区域。

由于不可逆线对应的实际上是弱钉扎极限的情况,因此在讨论磁通线蠕动时,沿着磁通密度梯度方向的磁通线跳跃对磁通蠕动速率的影响不能忽略。从式(2)可以看出,等号右边方括号内的两项差的结果在 $f_c(T) \rightarrow 0$ 时也是趋近于零的,相向的磁通跳跃的效应几乎相互抵消,忽略其中之一这样所产生的误差是相当大的,将会使不可逆线的位置向低温低场的方向推进,很难与实验结果相吻合。这里取 $v_{min}/v_0=10^{-6}$ 为例, $U_0(0)f_{cm}/kTf_c(0)$ 也取为 10^{-6} ,从图 1 的计算结果中可以知道,此时 $U_0(T)/kT \approx 1$;而如果忽略了沿磁通密度梯度方向的磁通跳跃,则得到 $U_0(T)/kT \approx 14$,很显然这两者间的差别是不容忽视的。由计算结果还可知,在磁通钉扎比较弱的情况下,随着 $U_0(T)/kT$ 的线性下降, $U_0(0)f_c(T)/kTf_c(0)$ 是以指数形式下降的,因此弱钉扎存在的温度区域较窄,而且并不如想象的那么弱。这是我们的这种解释与一般的不可逆线的解钉扎机制的不同之处,即在不可逆线附近,并不存在 $kT \gg U_0(T)$ 的关系,而只是存在 $kT \approx U_0(T)$ 。这一结果表明,对归一化磁化弛豫率 $S(T)$ 曲线在中间区出现平台的解释有可能需要修正^[12]。

参 考 文 献

- 1 Anderson P W. Theory of flux creep in hard superconductors. *Phys Rev Lett*, 1962, 9(7): 309~311
- 2 Muller K A, Takshige T, Bodnoz J G. Flux trapping and superconductive glass state in $\text{La}_2\text{CuO}_{4-y}$. *Ba. Phys Rev Lett*, 1987, 58(11): 143~146
- 3 Blatter G, Feigel'man M V, Geshkenbein V B *et al.* Vortices in high-temperature superconductors. *Rev Mod Phys*, 1994, 66(4): 125~138
- 4 Wang Z, Shi D. Effect of flux avalanches on activation energy in type-II superconductors: evidence for self-organized criticality. *Phys Rev*, 1993, B48(6): 4208~4211
- 5 Yeshurun Y, Malozemoff A P. Giant flux creep and irreversibility in an Y-Ba-Cu-O crystal: an alternative to the superconducting-glass model. *Phys Rev Lett*, 1988, 60(21): 2202~2205
- 6 Nelson D R. Vortex entanglement in high- T_c superconductors. *Phys Rev Lett*, 1988, 60(19): 1973~1976
- 7 Fisher M P A. Vortex-glass superconductivity: a possible new phase in bulk high- T_c oxides. *Phys Rev Lett*, 1989, 62(12): 1415~1418
- 8 Majer D, Zeldov E, Konczykowski M. Separation of the irreversibility and melting lines in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ crystals. *Phys Rev Lett*, 1995, 75(6): 1166~1169
- 9 Bean C P. Magnetization of high-field superconductors. *Rev Mod Phys*, 1964, 36(1): 31~39
- 10 Tinkham M 著, 邵惠民, 张其瑞译. 超导电性导论. 北京: 科学出版社, 1985
- 11 Civale L, Marwick A D, Worthington T K *et al.* Vortex confinement by columnar defects in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ crystals: enhanced pinning at high field and temperature. *Phys Rev Lett*, 1991, 67(5): 648~651
- 12 Malozemoff A P, Fisher D A. universality in the current decay and flux creep of Y-Ba-Cu-O high temperature superconductors. *Phys Rev*, 1990, B42(10): 6784~6786

Anderson's Flux Creep Model and Irreversibility Lines in Superconductors

Feng Shuangjiu Han Yufeng

(Institute of Informational Materials Engineering, The Center of Microwave Test, UEST of China Chengdu 610054)

Abstract Based on Anderson's flux creep model, the process of flux relaxation in superconductors is analyzed in this paper. It is found that the transition of magnetic reversible property to magnetic irreversibility in superconductors can be predicted when the ratio of pinning potential to thermal excitation energy decreases to a certain value. The irreversibility line correlates to the disappearance of critical state in superconductors.

Key words flux creep; irreversibility line; critical state

编辑 黄莘

·科研成果介绍·

高分辨率、高亮度新型全色显示技术

主研人员: 成建波 林祖伦 杨开愚 周敏 黄国高 冉启钧

高分辨率、高亮度新型全色显示技术是在人工单晶材料铝石榴石衬底上, 利用液相外延生长技术, 生长上厚度为几微米的含有多种不同稀土杂质的单晶石榴石薄膜。该薄膜在电子束能量的激发下, 分别发出红、绿、兰三基色光, 利用光学系统的空间混色原理, 实现全彩色显示。该项目的研制成功, 填补了我国显示技术的一大空白, 具有巨大的社会、经济效益, 为我国扭转显示器件靠进口的被动局面做出了重大贡献。

可植入干涉型光纤应力传感器及其阵列研究

主研人员: 唐海 唐明光 赵占朝

该项目从理论上建立了两个数学模型, 把干涉型光纤传感器的反射光强同内应变和温度变化联系在一起进行处理, 得出了传感器周围材料温度、应力变化对传感器性能影响的解析表达式; 其次从理论模型出发, 建立了埋入式全光纤 Mach-Zhender 干涉仪和 F-P 干涉仪。从技术上解决了植入光纤对待测材料的影响及光纤在待测材料中的滑移等关键技术难题, 将光纤埋入玻璃钢和水泥块中进行了试验。其成果对用光纤传感器实验材料和大型结构的特性具有指导意义。

·科 卞·