

高温超导材料的抗磁比率

阎守胜

(北京大学物理系, 北京 100871)

你经常测量高温超导材料的抗磁比率, 测得正确吗? 抗磁比率大的样品一定好, 小的一定不好吗?

除去零电阻特性外, 超导体最重要的特性是完全抗磁性, 或称迈斯纳效应。因此, 在高温超导电性的研究中, 人们经常要对材料的抗磁程度, 即迈斯纳比率进行测量。一般认为它标志着材料的好坏, 表征材料中超导相所占的体积比。本文就其测量方法, 以及它在多大程度上反映了材料的品质等问题进行一些介绍和讨论。

一、完全抗磁性

完全抗磁性即迈斯纳效应是指在转变温度以下超导体内部保持磁感应强度

$$B = 0. \quad (1)$$

根据定义材料磁化率即为样品磁化强度 M 和磁场 H 的比率。如采用 $B = H + 4\pi M$ 的表达形式, 则完全抗磁性相当于磁化率

$$\chi = -1/4\pi. \quad (2)$$

材料的抗磁性可通过磁化率的测量确定。如符号为负, 则有抗磁性。如此时绝对值小于 $1/4\pi$, 则称为部分抗磁。抗磁比率相当于所测磁化率与 $(-1/4\pi)$ 的比值。

二、零场冷却 (ZFC) 样品

问题的复杂性首先来源于样品的冷却方式。在样品冷却过程中不加磁场, 称做零场冷却方式 (zero-field-cooled, 常简称为 ZFC)。进行磁化率测量时, 先要加一个小的磁场 H , 然后测量在这个磁场作用下样品的磁化强度 M 。由于磁场有一个从零到 H 的突然变化, 样品在超导态的完全抗磁性产生于在样品表面很薄的一层内感生出的超流电流, 其方向和大小恰好在样品内完全屏蔽了外场的作用, 即产生的磁场与外场大小相等方向相反。假如仅样品表面

层具有超导电性, 内部是正常的, 甚至是空心的, 得到的结果均相同。因此, 尽管这种零场冷的直流磁化率测量给出的抗磁比率通常很高, 接近于 1, 但它并不真实地反映材料中超导相所占的体积比。这是一种屏蔽效应, 得到的结果称为屏蔽比率。在不少文献中, 人们用这种测量方法说明超导电性的存在。必须注意, 这只反映样品表面层的性质。

三、加场冷却 (FC) 样品

在 T_c 以上样品内部已有磁场进入。当冷却到 T_c 以下时, 样品中的超导区把磁场排出, 表现出抗磁性, 在测量时不再附加额外的磁场。一般认为加场冷却 (field-cooled, 简称为 FC) 所得到的磁化率反映了样品中超导相的多少。如测得的磁化强度为 M_{FC} , 相应的磁场强度为 H , 则样品的抗磁比率为

$$(M_{FC}/H)/(-1/4\pi) = -4\pi M_{FC}/H, \quad (3)$$

这个比率通常远小于 1。这种零场冷却和加场冷却结果的差别, 对氧化物超导体是普遍的、基本的现象, 直接与很短的相干长度相关, 这方面的讨论已超出本文范围。

四、交流 (ac) 磁化率的测量

磁化率亦可用交流方法测量。由于测量时

磁场是交变的，因而和直流磁化率测量的零场冷情况相同，抗磁性主要来源于样品表面层中感生的超流电流的屏蔽作用，所得磁化率和 $(-1/4\pi)$ 的比值给出屏蔽比率，不能作为材料中超导相多少的度量。

五、退磁因子

超导体的迈斯纳效应，相当于在磁场 H 的作用下，超导体具有和磁场方向相反的磁矩 $4\pi M$ ，从而体内 $B = 0$ 。体内磁矩等效于在样品端部出现磁荷（图1）。端部的磁荷在空间及

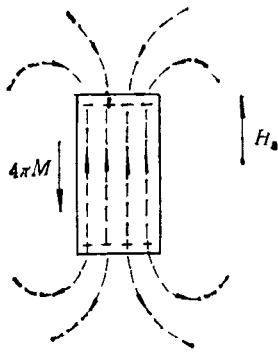


图1 在外场 H_0 的作用下，样品的磁矩产生附加场（由虚线表示）

样品内部产生附加磁场，使样品内的实际磁场不同于外加场 H_0 。对于超导材料， $4\pi M$ 的方向可以和外加场方向相反（图1），这时体内真实磁场 H 要大于外加场。通常引进一退磁因子 D 来描述这种修正，

$$H = H_0 - 4\pi DM \quad (4)$$

D 的数值依赖于样品的形状，为 ≤ 1 的正数。如果样品为细长条，并顺着外场方向， D 的数值很小；如果样品为扁片又与外场垂直，则外加磁场与样品真实感受到的磁场差别很大；对椭球状样品， D 的数值可从手册上查到。

在前述磁化率的测量中，作为样品磁化强度与磁场强度的比值，其中磁场强度应为样品真实感受到的，而不是外加场 H_0 。通常按 $\chi = M/H_0$ 计算，结果要加以修正。对于样品具有完全抗磁性（即 $H = -4\pi M$ ）的情形，用

公式(4)可得到 $H = H_0/(1 - D)$ ，这样实际的抗磁比率为

$$-4\pi M_{FC}/H = -4\pi M_{FC}(1 - D)/H_0 \quad (5)$$

要小 $(1 - D)$ 倍。如果不做这种修正，常常会得到大于 1 的不合理的抗磁比率。

由于氧化物超导材料的单晶多半呈片状， C 轴与片平面垂直。在做磁场平行于 C 轴的测量时，退磁因子的修正是很大的，必须加以考虑。

非椭球状样品的退磁因子可参照尺寸相近的椭球的数值确定。可以对样品作零场冷却，以及低场磁化率或交流磁化率测量。对高质量的样品，抗磁比率应为 1，而实际测得的应大于 1。乘以 $(1 - D)$ 将其修正到 1，所用 D 即为该样品的退磁因子的实际值。和与其尺寸相近的椭球样品比，若数值相近，即可采用。如相差太远，则可能有其它问题，如样品屏蔽比率太差等。

六、磁通钉扎

氧化物超导材料属第 II 类超导体。在上、下临界磁场之间（即 H_{c2} 和 H_{c1} 之间）的状态称为混合态，磁场以磁通线的形式进入超导体。每个磁通线有一正常态的芯子，周围有超流环流，总的磁通量是一个磁通量子。

当超导材料结构上有缺陷时，磁通线在超导材料中不同位置上能量不同。自然，它总是愿意呆在能量低的位置上。这种位置常称做钉扎中心，它对磁通线起钉扎作用，妨碍磁通线在热激活或其它原因下的运动。

七、场冷样品中的 $B(r)$

磁通钉扎效应的存在使问题复杂化。问题在于进入样品的磁场，在加场冷却到 T_c 以下时，并不能完全被排除出体外。

图 2(a)，在超导材料的 $H-T$ 相图中给出加场冷却样品的过程。样品从正常态冷却，经过混合态，然后冷却到某一温度，如液氮温度，

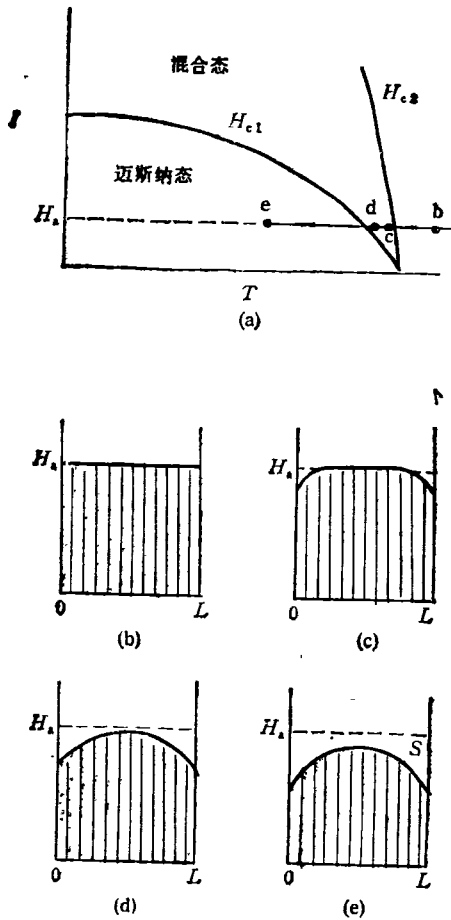


图2 (a) 在 $H-T$ 相图中给出加场冷却样品的过程;
 (b), (c), (d) 和 (e) 给出相应点样品内 B 的分布
 (样品为厚度 L 的平板, 外加场为 H_a , 虚线
 下的白区表示逃出的磁通量)

这时的平衡态为迈斯纳态。图 2(b), (c), (d) 和 (e) 给出当有磁通钉扎效应时样品中磁感应强度 B 随位置的变化。假如样品是厚度为 L 的平板, 外场 H_a 与板面平行。在图 2(a) 中的 b 点, 样品内的 B 处处与外场相等, $B(r) = H_a$ (图 2(b))。当样品被冷却, 进入混合态区 c 点时, 由于此时外场小于该温度下的上临界场, 样品中的磁通线数要减少。由于钉扎作用的存在, 只有表面附近的磁通线得以逃出, 体内 $B(r)$ 的分布如图 2(c) 所示。冷到 d 点时, 这时已很接近 H_{c1} , 体内只应有少量的磁通线, 但此时的分布如图 2(d)。冷到 e 点, 体内应完全无磁通线存在, 但实际上如图 2(e) 所示, 还有不少由于钉扎作用而冻结下来的磁通线存在。

八、钉扎的存在使抗磁比减小

实际测得的抗磁比率相当于排出磁通量数和样品在正常态时体内总磁通量的比值, 即

$$f_M = S / (H_a \cdot L), \quad (6)$$

式中 S 是图 2(e) 中排出磁通部分所占的面积。从 (6) 式可见, 抗磁比的大小首先依赖于磁通钉扎的强弱。从应用的角度, 钉扎力强的样品, 临界电流密度高, 质量好, 但这时抗磁比反而小。如以此论样品的好坏, 这属于差的样品。其次, 抗磁比的大小依赖于样品的尺寸, 与 L 成反比。同样质量的单晶样品, 尺寸大的抗磁比小, 实际上做尺寸大的单晶要困难得多。钉扎的存在确实带来一些和人们直觉相反的结果。

九、不同种类样品的抗磁比

在 1990 年 8 月召开的第 19 届国际低温物理会议的高温超导卫星会(在英国的剑桥召开)上, 日本东京大学的 Kitazawa 报告了他们对于不同种类样品抗磁比的测量结果, 大致如图 3 所示。图中横轴表示加场冷却时磁场的大小。从图中可看出, 粉末样品的抗磁比最高, 因为颗粒尺度小, 体内磁通线易于排出。单晶样品抗磁比最小, 特别是尺度大时。附加场高时, 多晶样品行为与粉末样品类似。这是因为磁场破坏了晶粒之间的弱连接, 使之实际上相当于粉末样品。低场时行为与单晶样品相似。

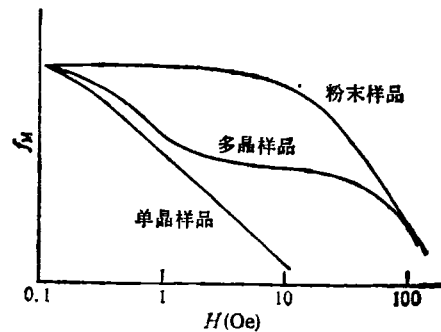


图3 不同种类样品的抗磁比率示意。

十、怎样才能得到正确的抗磁比

从前面的讨论可见,要得到正确的抗磁比,需要做下列工作:

- (1) 加场冷却样品;
- (2) 做直流磁化率测量;
- (3) 对样品的形状因素进行修正,即考虑

样品的退磁因子;

(4) 用尽可能小的附加场,减少磁通钉扎的附加影响。

如果不能满足这些条件,则对所得抗磁比进行分析时,要考虑本文所述各种因素的影响。不能简单地把抗磁比的大小和样品质量及超导相的体积比相联系,认为抗磁比大的样品质量好,小的就不好。

1991年第4期《物理》内容预告

知识和进展

原子分子物理发展的若干前沿和我国发展原子分子物理的建议(王忠烈);

簇离子物理(张志三);

材料物理的新进展——纳米固体材料(朱星);

扫描隧道显微镜(STM)及其在生命科学中的应用(李民乾);

从物理学看光合作用(范义积);

用飞秒脉冲探测半导体(陈辰嘉等编译);

电磁力和弱力的统一(丁亦兵编译)。

物理学和经济建设

光电子学和光电子产业专题系列介绍:新颖的量子阱红外探测器(陈正豪);

平板显示及应用专题系列介绍:电致发光显示(钟国柱);

光纤传感物理及其应用(廖延彪);

具有广阔应用前景的热等离子体处理(陈熙)。

物理学史和物理学家

挖掘与开拓——关于在物理教学中引入物理学史的几点看法(赵凯华);

J/ψ 粒子的发现(许国材等)。

《物理》订阅办法

最近编辑部收到一些单位和个人来函,询问《物理》订阅办法,现介绍如下:

1. 请按预订期刊的时间到当地邮局联系预订。预订时只需将我刊的邮发代号2-805告诉邮局即可。在邮局可订全年,也可订半年或一个季度。

2. 如果贵单位(或个人)在邮局漏订,可向科学出版社发行处期刊科联系补订或破(季度)订。如您想补订某一期,您必须在该期出版的上个月20日前与科学出版社发行处期刊科联系补订(价格与邮局订价相同),可将钱从邮局或银行直接寄发行处期刊科。

科学出版社发行处期刊科地址:北京朝阳门内大街137号。邮政编码:100707。开户银行:中国工商

银行北京东四分理处,帐号:461220-58。

3. 各省市物理学会需要预订某期《物理》,可在该期出版的上个月20日前与科学出版社发行处期刊科联系预订。预订不到的可与本刊编辑部联系。本刊编辑部将及早向各省市物理学会寄送每期内容预告(我刊每期刊登下期内容预告)。

本刊编辑部地址:北京603信箱《物理》编辑部。邮政编码:100080。联系人:冯禄生。电话:283154。

我们热情欢迎科研单位、学校、企业界(包括工厂和公司)订阅《物理》。

本刊编辑部