

Nb-Ti 超导体的声发射

焦正宽 陈灼民 丁立人

(中国科学院等离子体物理研究所)

王恩跃 王 谦 郑志钦

(中国西南物理研究所)

1983 年 4 月 1 日收到

提 要

本文通过实验研究了 Nb-Ti 超导单芯裸线、多芯复合线在干绕和湿绕两种条件下, 经历不同的励磁过程的声发射 (AE) 行为. 发现导线的运动和磁通跳跃是声发射的主要源, 而通常的磁通流动不出现可测的声发射, 湿绕时导线移动的启动力比干绕提高一个数量级. 如果导线发生宏观移动或完全磁通跳跃之前分别经历着一系列微滑移或不完全的磁通跳跃, 则声发射技术有可能作为磁体猝灭的一种检测手段.

一、引 言

超导磁体的监测是一个具有理论和实际意义的课题. 通常采用的电磁测量法有明显的局限性, 电压信号可以是电阻或电感引起的, 有时同时包含着两种成分, 可测电压信号的出现比较迟, 往往来不及采取必要的安全措施. 一般情况下, 无法判断出猝灭最先出现的部位和引起猝灭的原因, 相比之下, 声发射不是电磁性信号, 故不受电磁噪声的影响, 它覆盖很宽的频谱, 灵敏度高. 最近几年有人试图将声发射这一新技术用于超导磁体的监测, 已取得了一些令人鼓舞的结果: 它有可能用于磁体猝灭的预报^[1,2]; 受质结构(包括超导磁体)的应力探测^[3]; 研究磁体的锻炼效应^[4]; 诊断猝灭的部位^[5]; 引起磁体猝灭的扰动源^[6,7]以及超导磁体结构材料在不同温区的力学行为^[8]. 但这些工作还是初步的, 有些结果还有争议. 例如, 关于引起声发射的内禀原因, 有人认为磁通流动可以造成可测的声发射, 有人则认为除了大量的磁通瞬时脱钉——磁通跳跃能产生可测的声发射外, 通常的磁通流动是仪器无法检测的, 这两种看法都有自己的实验事实. 为了弄清磁体的猝灭是否可以通过声发射技术进行预报, 我们设计了几组实验, 以期了解磁体内产生声发射的可能原因以及用于磁体猝灭预报的可能性.

二、实验方法

采用以下四种样品:

样品 A: $\phi 0.5\text{mm}$, 长 96cm 的多芯 Nb-Ti 复合线“干绕”在样品架内。

样品 B: $\phi 0.5\text{mm}$, 长 64cm 的多芯 Nb-Ti 复合线无感双绕在样品架凹槽内, 用 703 硅橡胶浇灌加固(“湿绕”)。

样品 C: $\phi 0.5\text{mm}$, 长 500cm 的多芯复合线与漆包线一起并绕。超导线上焊有电位引线 and 加热器 (H_2)。加热器用 $\phi 0.2\text{mm}$, 长 20cm 锰铜丝绕制, 电阻值为 3Ω 。样品用 703 硅橡胶加固。

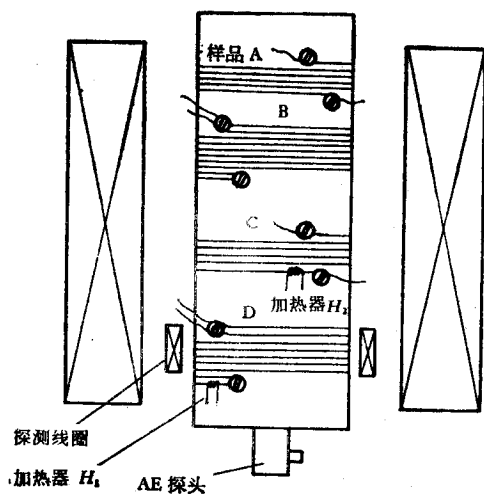


图 1

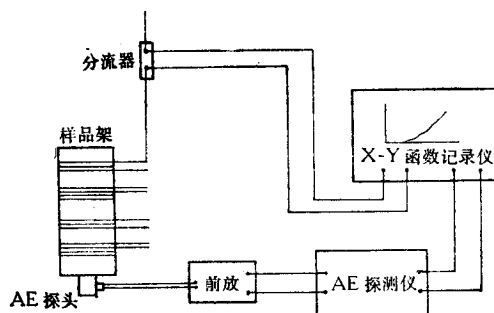


图 2

样品 D: 单芯 Nb-Ti 裸超导导线, $\phi 0.2\text{mm}$, 长 90cm 无感双绕在样品架凹槽中, 在样品中心(即双绕倒折处)绕有加热器 (H_1)。加热器用 $\phi 0.1\text{mm}$, 长 10cm 的锰铜丝双绕无感绕制, 电阻值为 5.5Ω 。超导线上焊有电位引线, 样品外面绕有探测线圈。

样品 A, B, C, D 同轴地绕在玻璃钢棒上, 置于口径 90mm 的 Nb-Ti 超导磁体内, 样品布置如图 1 所示。

声发射测量与电流测量同步进行, 测量线路如图 2 所示。

三、实验结果和讨论

1. 为了判断声发射的起源, 对“干绕”(A)和“湿绕”(B)样品, 在有、无背景场两种场合下进行电流扫描, 并进行相应的声发射测量, 其结果如下:

1) “干绕”样品在无背景场情况下, 当电流低于某一范围时, 基本无声发射; 当电流达到 30—35A 范围时, AE 突增, 并一直持续到 45A 左右。退流时, 一开始就有声发射, 当电流退至 45A 左右时, 声发射突增(见图 3)。

2) “湿绕”样品在无背景场情况下进行电流扫描, 基本无声发射, 如图 4 所示。

3) “干绕”和“湿绕”样品在有背景场情况下, 给样品升流, 当背景场增加时, 开始明显出现声发射的样品电流阈值降低(见表 1)。

基于干绕样品在一定的电流范围以下不出现声发射, 湿绕样品在该实验的电流扫描范围 ($0 \rightarrow 60 \rightarrow 0$) 内无声发射以及多丝复合线内一般不会出现磁通跳跃, 所以, 可以得出如下结论:

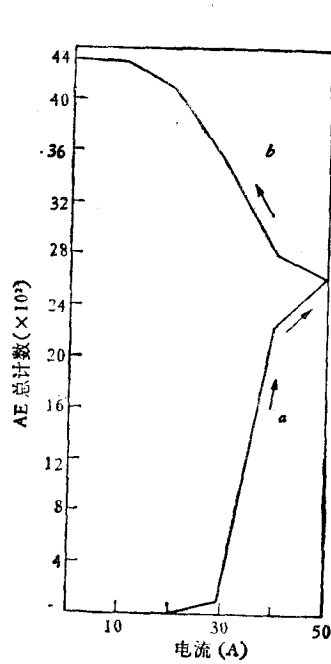


图 3

a 为升电流; b 为降电流;
AE 仪器 57dB

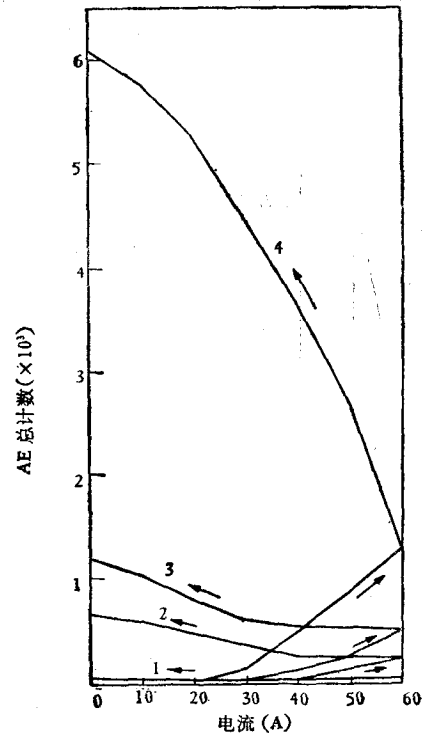


图 4

1 为 0T; 2 为 0.72T; 3 为 1.05T;
4 为 1.40T; AE 仪器 47dB

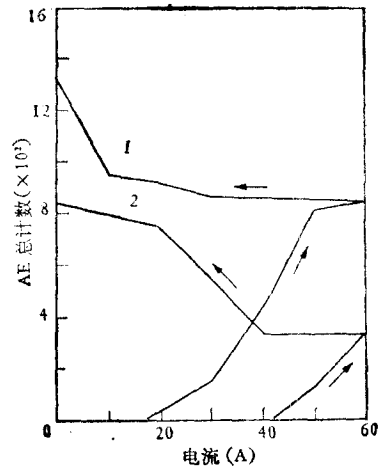
表 1

样品	特征	绕制方式	背景场 (kGs)	明显出现声发射		$I \times B$ (N/m)
				样品电流 (A)	背景+自场 (kGs)	
A		干绕	0.52	25	0.72	1.8
			1.04	15	1.16	1.74
			2.08	10	2.16	2.16
B		湿绕	7.02	37—42	3.67	29.3
			10.5	30	7.34	32.3
			14.0	22	14.05	31.2

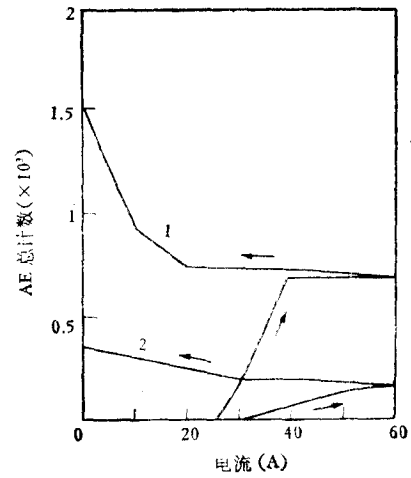
(1) 在零场下,扫描电流伴生的磁通运动不产生声发射;

(2) 声发射源主要来自导线的运动.

由表 1 还可以看出,干绕样品在不同的背场和载流下,明显出现 AE 的 $I \times B$ 值处于相同的量级下 (1.8—2.16N/m); 而湿绕样品之间在三个背景场数值下, $I \times B$ 值也处于相同的量级 (29.3—31.2N/m). 但湿绕样品出现声发射的 $I \times B$ 值约为干绕样品的 15 倍. 由这两组数据可以得出如下结论: 多芯 Nb-Ti 复合线在零场下进行电流扫



(a) 1 为样品 A 0.1T; 2 为样品 B 0.7T



(b) 1 为样品 A 0.1T; 2 为样品 B 0.1T

图 5 样品 A, B 在相同和不同背场下的声发射 AE 仪器 47dB

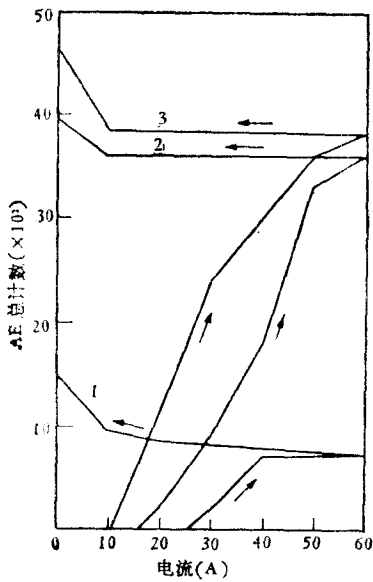
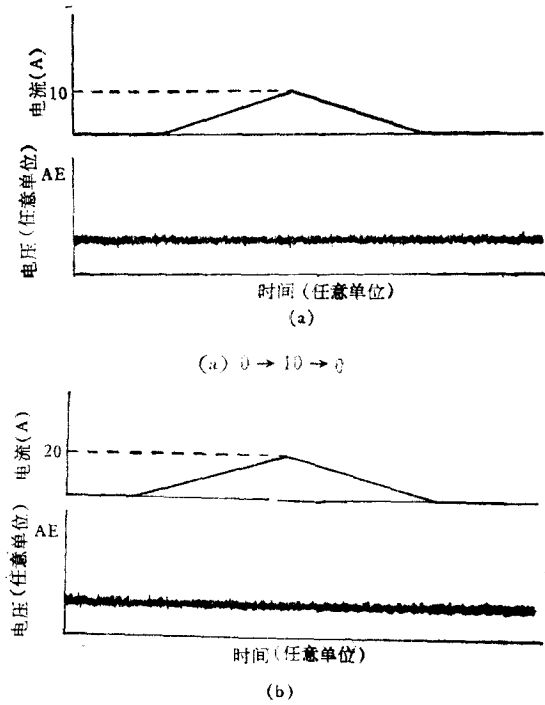


图 6 样品 A 在不同背场下的声发射

1 为 1.04kGs; 2 为 2.08kGs; 3 为 4.16kGs; AE 仪器 47dB



(a) 0 → 10 → 0

(b) 0 → 20 → 0

图 7

描,由于无磁通跳跃,引起声发射的主要源是导线的运动,而且湿绕样品引起导线移动的电磁力比干绕高一个数量级以上. 按此计算,湿绕样品在零场下为观察到声发射应载 200A 的电流,故在我们的实验中没能观察到声发射. 由此可以证明,采用适当的浸渍工艺对于克服磁体的机械退化效应是行之有效的,而声发射技术有可能作为不同工艺下抗电磁力大小的诊断手段.

在不同的背场下进行电流扫描,其声发射总计数如图4—6所示。比较图5的曲线

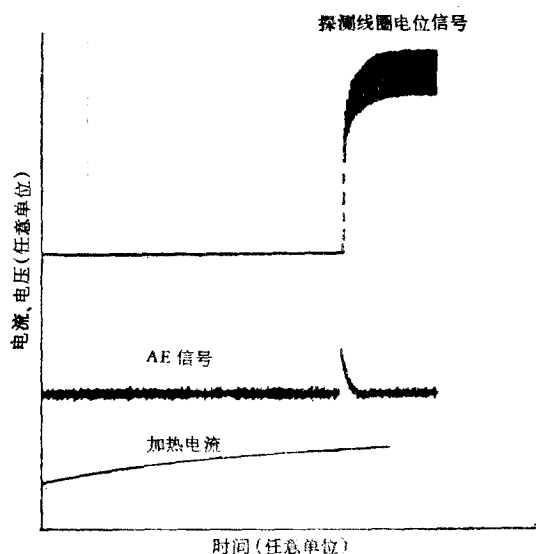


图8 样品D猝灭过程的声发射

1, 2 并注意到曲线1在更低的场强下,可以看出湿绕样品的声发射总数比干绕样品的低得多。

2. 将样品D(单芯裸线)在零场下进行 $0 \rightarrow 10 \rightarrow 0$ 和 $0 \rightarrow 20 \rightarrow 0$ 的电流扫描,没观察到声发射(图7)。其原因是单芯裸线的内禀性质是容易产生磁通跳跃,但根据文献[9]的分析,出现磁通跳跃的必要条件为 $H_{sf} > H_{f,j}$ (Nb-Ti 在 4.2K 下的 $H_{f,j} \approx 1000\text{Gs}$ [9]), $H_{sf} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I}{R} = 20I(\text{Gs})$, 所以,在 10A 和 20A 下,其 H_{sf} 分别为 200Gs 和 400Gs, 低于 $H_{f,j}$, 因此,不会出现磁通跳跃引起的声发射。

3. 样品D在零场下载流 20A, 加热器触发引起超导猝灭,由于热扩散需要一定的时间,加热器接通之后约 1.72s 后出现声发射,正常态电阻引起的电位信号也随之出现,而且在电位增长即正常态区扩展的过程中,声发射趋于消失(图8)。

基于声发射信号的触发是由于加热造成的这一实验事实,可以认为在这里声发射是由磁通跳跃引起的。由于单芯超导导线不满足绝热稳定判据,在热脉冲下产生磁通跳跃(将不均匀的磁场分布抹平),从而引起猝灭。但在正常区传播过程,声发射明显下降,这再一次证明磁通向导体内穿透的流动过程一般不产生可测的声发射。

4. 样品D在 1.6T 的背景场下,给样品升流,在初次升流时,样品在 2—3A 下猝灭,同时在升流过程就有声发射,猝灭过程声发射趋于消失(图9(a)),考虑到样品是单芯裸线,外场为 1.6T,由此判断出超导体是在经历了一系列不完全的磁通跳跃(从而有声发射)之后,引起完全的磁通跳跃造成超导猝灭。

重新升流时锻炼至 10A 样品猝灭,第三次升流又锻炼至 12A 下猝灭。其声发射特征大体与图 9(a) 相同(见图 9(b), (c))。这表明声发射技术可以用来进行锻炼效应机制的研究。

5. 样品D在不载流的情况下进行磁场扫描,发现在升场过程和降场过程有一系列间距约相等的声发射(见图10),这可以基于第二类超导体在磁化过程的 Bean 模型加以解释[9],每次声发射经历着一次磁通跳跃。

6. 样品C在零场下给样品通 60A 的电流,用加热器触发使超导猝灭,观察整个过程的声发射特征(见图11)。实验发现 1) 在猝灭开始时有反常的(频度不高幅值较大)的声发射; 2) 在正常区传播过程(电位信号逐渐增大,图11的 a, b) 声发射趋于频繁; 3) 在正常区维持阶段(电位信号值恒定,图11的 b, c) 出现间隔较宽幅值较大的声发射; 4) 切断电源后一段时间内,声发射仍间断出现。加热器触发超导猝灭的瞬间出现声发射,可以解释

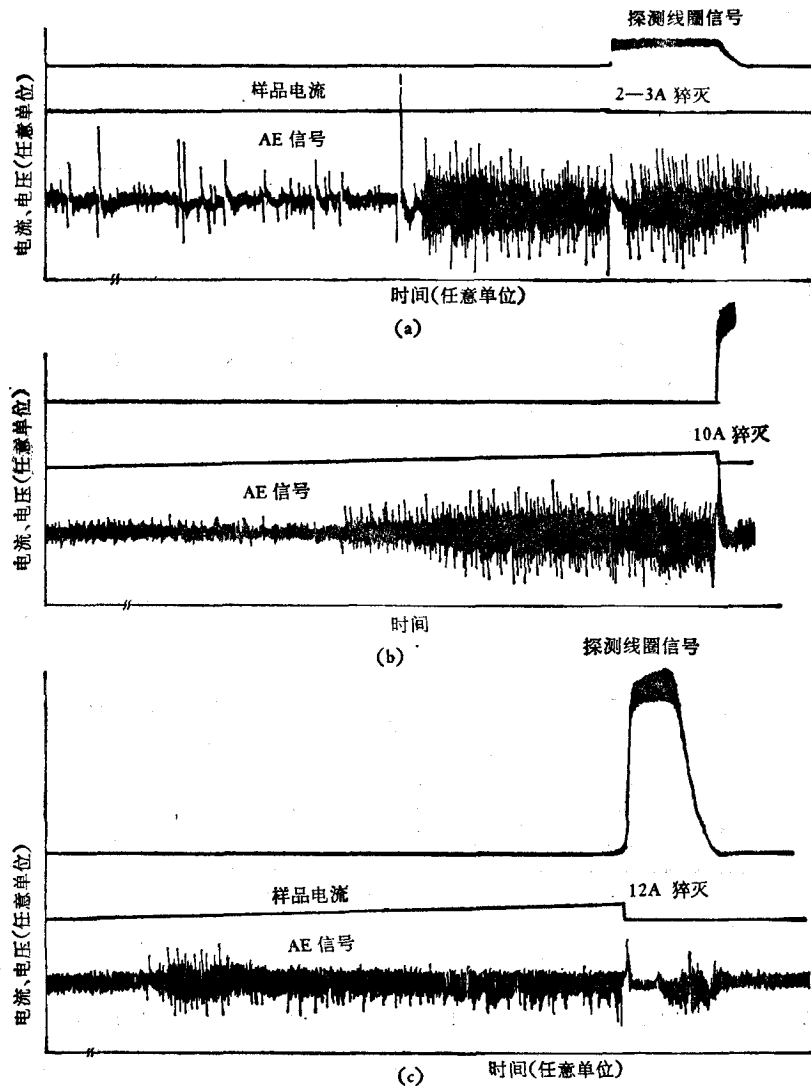


图 9

为伴随着宏观屏蔽电流的衰减,大量磁通线瞬态地穿透到超导体内从而出现明显的声发射;随着正常区的传播,当正常区成长到一定阶段致使焦耳热功率增大,热效应引起的次级效应,如导线的松弛,运动……又引起新的声发射.由于热效应要求一定的扩散时间(弛豫效应),所以,即使切断电源仍有间断的声发射.

7. 在 5.5kGs 外场下给样品 C 升电流,发现在超导猝灭前夕 ($\Delta\tau = 0.25\text{s}$) 开始出现频繁的声发射,猝灭起始点伴有声发射尖峰(图 12 的 A 点),在猝灭过程中声发射趋于消失.从电位曲线 $U(t)$ 上可以看出,正常区的传播速度在 C 点发生了突变,这是热效应所致.超导电性恢复后又继续升流,当电流达到一定值后又出现频繁的声发射,到 25A 猝灭,发生猝灭瞬间又出现声发射尖峰,猝灭传播过程 (a—b) 无声发射.

当样品 C 载 20A 电流,升外场引起猝灭,其声发射特征与上述相似.

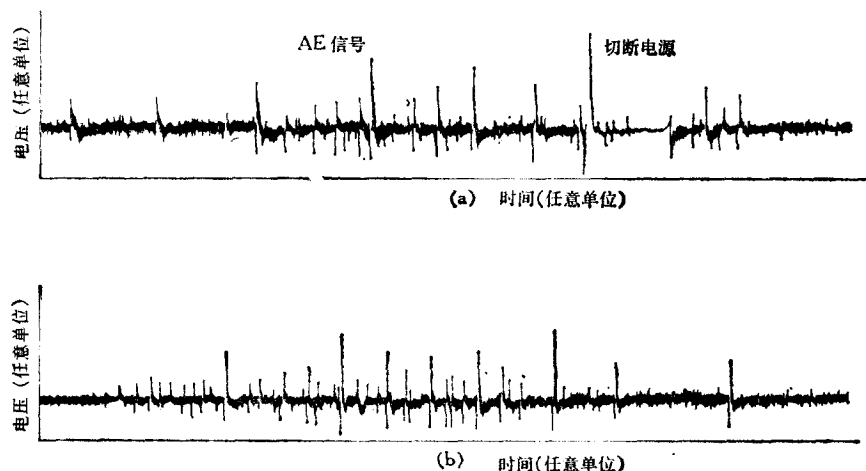


图 10
(a) 升场 (b) 降场

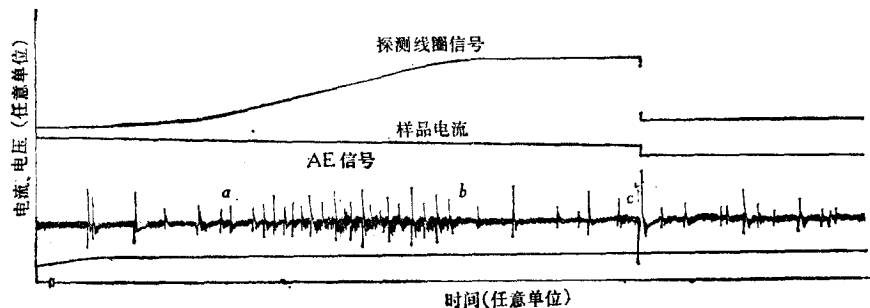


图 11

基于这一实验事实, 看出声发射可以预报猝灭(在超导猝灭前 0.25s 到 6.6s 左右); 因 $B = 5.5\text{kGs}$, $I = 25\text{A}$, $I \times B = 14.1\text{N/m}$, 可以认为猝灭前夕的声发射是导线发生宏观运动之前的微滑移^[7]引起的. 我们认为, 声发射能否预报猝灭取决于发生超导猝灭的机理. 对于在导线宏观位移前伴有一系列微滑移的过程或在完全磁通跳跃之前伴有一系列不完全磁通跳跃的情况下是可以预报的.

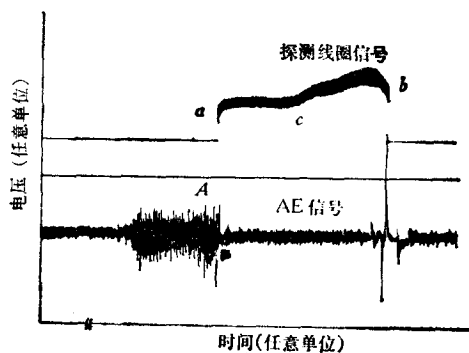


图 12 样品 C 猝灭过程的声发射

四、结 论

1. 基于上述实验事实可以得出, 导线的移动和磁通跳跃是磁体产生声发射的主要源, 而通常的磁通运动不产生可测的声发射;
2. 干绕和湿绕样品明显出现声发射的电磁力大小相差一个数量级以上. 因此有可能作为磁体内导线发生位移的临界电磁力的检测手段;

3. 声发射能否用于磁体猝灭预报取决于产生声发射的机制。实验表明,在导线发生宏观大移动之前经历一系列微滑移过程或在完全磁通跳跃之前经历一系列不完全磁通跳跃的情况,声发射可以在秒级提前预报猝灭。

本实验是在中国西南物理研究所进行的,感谢王魁武等同志的帮助。李保增、韩汉民等同志参加过部分工作。

参 考 文 献

- [1] H. Nomura *et al.*, *Cryogenics*, 17(1977), 8.
- [2] H. Nomura *et al.*, *Cryogenics*, 20(1980), 283.
- [3] N. Tamada *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 41(1)(1982), 36.
- [4] 焦正宽等,低温物理, 2(1980), 280.
- [5] O. Tsukamoto *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 40(6)(1982), 538.
- [6] O. Tsukamoto *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 38(1981), 718.
- [7] O. Tsukamoto *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 39(2)(1981), 172.
- [8] 王恩跃、焦正宽等,低温物理, 5(1983), 192.
- [9] 吴杭生、管惟炎、李容成,超导电性,科学出版社, (1979), 147页.

ACOUSTIC EMISSION IN Nb-Ti SUPERCONDUCTORS

JIAO ZHENG-KUAN CHEN ZHUO-MIN DING LI-REN
(*Institute of Plasma Physics, Academia Sinica, Hefei*)

WANG EN-YUE WANG QIAN ZHENG ZHI-QIN
(*Southwestern Institute of Physics, Leshan, Sichuan, China*)

ABSTRACT

In this paper, we present experimental results of acoustic emission in bare Nb-Ti single core superconductor and multifilamentary superconducting composite, which have undergone different excitation procedure in Si-rubber potted and dry modes.

We have found that AE signals are chiefly generated by conductor motion or flux-jumping, but not by flux motion. The starting driving force for motion in Si-rubber potted sample is an order of magnitude higher than that in dry sample.

Acoustic emission technique is a possible means for monitoring magnet quench as conductor goes through a series of microslip (or incomplete flux jump) before macromotion.