

在工频外磁场下高温超导体的交流损耗^{*}

王金星 杨仕钟 何砚发 杨超伟

(东北大学物理系, 沈阳 110006)

段镇忠 冯 勇 张平祥 周 廉

(西北有色金属研究院, 西安 710016)

(1998 年 4 月 29 日收到)

在工频外磁场条件下, 研究了不同工艺的 Bi-2223/Ag 带和 Cu 位元素替代的 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3-x\text{Sn}_x\text{O}_y$ 超导体的交流损耗. 实验结果表明: 在单芯 Bi-2223/Ag 带中, 热处理时间、温度及超导芯厚度的增加都将增加 Bi-2223 相的含量, 因而导致磁滞损耗增加. 将单芯带细分成 19 芯 Bi-2223/Ag 带能减少磁滞损耗, 但另一方面, 超导芯间的耦合增加了银基体的涡流损耗, 因此 19 芯带的损耗只比单芯带减少 20% 左右. 在 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3-x\text{Sn}_x\text{O}_y$ 超导体中, Sn 部分替代 Cu 减小了 211 相粒子的平均尺度, 同时增加 211 相与 123 相间的相界, 这导致钉扎力增加和熔化温度降低, 这些都可使交流损耗降低.

PACC: 7460G; 7460J; 7470V

1 引 言

高温超导体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}/\text{Ag}(\text{Bi-2223}/\text{Ag})$ 带材的临界电流密度 J_c 在 77 K, 0 T 和 4.2 K, 20 T 下分别超过 5×10^8 和 10^9 A/m^2 , 柔性 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 涂层膜复合导体的临界电流密度也达到 10^9 A/m^2 (77 K, 0 T), 这些都表明高温超导体有希望用于运行在液氮温区的电力系统和液氮温区的超导磁体中. 但是, 电力系统中的高温超导电缆、发电机、变压器和限流器等都是在工频下运行, 就连直流超导磁体的励磁和退磁也属于交流. 在高温超导复合导体中, 由于不可逆磁通运动产生的磁滞损耗和在基体中的涡流损耗将是上述未来应用冷却系统的主要热负载, 因此将高温超导体的交流(ac)损耗减小到可接受的 10^{-6} W/cm^2 量级是有决定性意义的, 目前这些 ac 损耗比允许值约高 2 个数量级.

基于 Lan-Bean 近似(假定临界电流密度 J_c 与磁场无关), 当交变外磁场振幅 $H_m < H_p$ (H_p 为完全穿透场)时, 高温超导体中的磁滞损耗 $P_h \propto H_m^3$; 当 $H_m > H_p$ 时, $P_h \propto H_m$. 而在所有磁场范围内, 基体中的涡流损耗 $P_e \propto \left(\frac{dB}{dt}\right)^2$. 目前, 由于多种因素, 如掺杂、晶粒间弱连接、表面粗糙、粉末装管法(PIT)带中的“腊肠”以及基体材料电阻率等都十分强烈地影响着 ac 损耗, 因此人们还不能用理论公式准确地计算出 ac 损耗数值. 许多作者测量

^{*} 国家自然科学基金(批准号:19474010)、国家超导技术联合研究发展中心(批准号:CD010104)资助的课题.

并研究了不同类型的高温超导体的 ac 损耗:烧结的 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 圆棒^[1]、Y 位元素替代的 $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ ($\text{RE} = \text{Gd}, \text{Dy}, \text{Er}, \text{Eu}$ 和 Y) 块材^[2]、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 圆线^[3]、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y/\text{Ag}$ 带^[4]、掺 Ag 的 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ ^[5,6]、Bi-2223/Ag 带^[7,8]、 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ (Bi-2212) 单晶^[9] 和 Bi-2212/Ag 线^[10] 等. 然而, 不同工艺的 Bi-2223/Ag 带和 Cu 位元素替代的 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3-x\text{Sn}_x\text{O}_y$ 超导体的 ac 损耗研究还未见报道. 本文给出了这两方面的研究结果, 同时也研究了掺 Pb 和不同芯数对 Bi-2223/Ag 带 ac 损耗的影响.

2 实 验

2.1 样品制备

所有的 Bi-2223/Ag 带都是采用 PIT 法制备的^[11], 但是处理工艺、芯数和掺 Pb 量有所不同, 详情见表 1. 表 1 中 T 为热处理温度, t 为热处理时间, N 为超导芯数, d 为带的厚度, x 为掺 Pb 量.

表 1 Bi-2223/Ag 带样品特征

样品编号	E1	E2	E12	F12	A	F	A2	I2
$T/^{\circ}\text{C}$	835	830	E1 + E2	E1 + E2	832	832	830	830
t/h	150	150			250	250	150	250
N	1	1	1	1	1	1	19	19
d/mm	0.3	0.3	0.3	0.25	0.15	0.15	0.3	0.3
x	0	0	0	0	0.3	0.34	0	0
$J_c/\text{kA}\cdot\text{cm}^{-2}$	2.5	4	3	4.5	5.5	5	3	3.5

$\text{YBa}_2\text{Cu}_3-x\text{Sn}_x\text{O}_y$ ($x = 0, 0.05, 0.06$) 超导体样品是采用粉末熔化法 (PMP) 制备的, 在原始粉末中用 Sn 部分替代 Cu 制成绿色的 211 相, 其具体的制备步骤见文献[12].

2.2 ac 损耗的测量

超导体 ac 损耗的能流密度可以用坡印廷矢量 $\mathbf{S}$ 描述,

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}, \tag{1}$$

其中 $\mathbf{E}$ 和 $\mathbf{H}$ 分别为超导样品表面处的电场和磁场. 对(1)式在磁场的完整一个周期内取平均, 可以获得超导样品每单位面积的平均功率损耗 P ^[13]:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{S} \cdot \mathbf{t} \, dt = \frac{1}{lT} \int_0^T H_m \sin(\omega t) \frac{d\phi}{dt} \, dt, \tag{2}$$

其中 T 为交变磁场周期, l 为样品的周长. (2) 式只包含可以直接测量的量 $H(t) = H_m \sin(\omega t)$ 和 $\frac{d\phi}{dt}$, ϕ 为穿透进样品的总磁通, $H(t)$ 为 50 Hz 交变磁场. 基于这种原理的互特计技术测量框图如图 1 所示, 螺线管磁体置于液氮中, 交变电流源通过调谐电容器加到磁体上, 产生 0.2 T 交变磁场 $H(t) = H_m \sin(\omega t)$, 这个磁场信号从与磁体串联的标准电阻获得. 在磁场中心对称地放置两个完全相同的小线圈, 一个探测线圈里放置待测超导样

品,另一个作为补偿线圈.这两个小线圈串联反接给出待测量 $\frac{d\phi}{dt}$,同时消除杂散电压.上述两个信号分别经过移相和放大后,由数据采集和处理系统给出 ac 损耗与外磁场关系 P - H 曲线.我们研制的这种 ac 损耗测试仪的精度为 10^{-8} W/cm^2 ,当进行小信号测量时,分辨率可达 10^{-9} W/cm^2 .

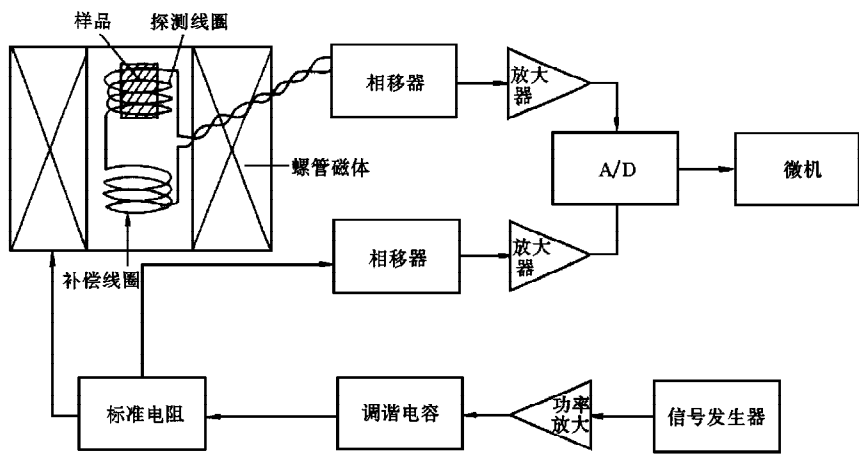


图1 高温超导体的 ac 损耗测量框图

3 结果与讨论

3.1 Bi-2223/Ag 带材的 ac 损耗

测量的 ac 损耗结果如图 2 所示,各种 Bi-2223/Ag 带的每单位表面积 ac 损耗 P 与工频外磁场振幅 H_m 的关系曲线都可分为三段.第一段对应于 $H_m < H_{c1}$ (H_{c1} 为超导体的下

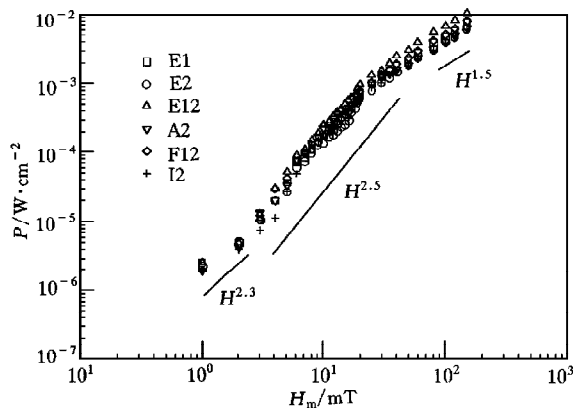


图2 Bi-2223/Ag 带的 ac 损耗 P 与工频外磁场的关系

临界磁场, 大约为 3 mT), $P \propto H_m^{2.3}$, 这种损耗主要是表面损耗, 由超导体的表面粗糙度、空隙和杂质等缺陷决定. 第二段对应于 $H_{c1} < H_m < H_p$ (H_p 大约为 30 mT), $P \propto H_m^{2.5}$. 按 Bean 模型, 不完全穿透场的磁滞损耗 P 应当与 H_m 的三次方成比例, 但实验结果表明 P 与 H_m 的 2.5 次方成比例, 这意味着穿进超导体内的磁通不可逆运动产生的磁滞损耗和 Ag 基体内涡流损耗有同样贡献 (涡流损耗与 H_m 的平方成比例). 第三段对应于 $H_m > H_p$, 磁通完全

穿透超导体, $P \propto H_m^{1.5}$. 按 Bean 模型, 完全穿透场下的磁滞损耗 P 应当与 H_m 的一次方成比例, 现在 P 是与 H_m 的 1.5 次方成比例, 同样说明磁滞损耗和 Ag 基体中涡流损耗有相同贡献.

3.2 不同工艺对 ac 损耗的影响

对于 Bi-2223/Ag 单芯带(图 3), 当热处理温度从 E1 的 835℃ 降低到 E2 的 830℃ 时, 损耗可降低约 21%; 当热处理时间从 E1 和 E2 的 150 h 增加到 E12 的 300 h, ac 损耗增加约 50%. 在单芯带中, 热处理时间和温度的增加都将增加 Bi-2223 相的含量, 因此导致磁滞损耗增加.

将两种 19 芯带 A2 和 I2 相比较(图 4)看出, 当热处理时间增加时, ac 损耗并没有增加, 这时因为在多芯带中小的芯尺度限制了 Bi-2223 相晶粒的长大, 所以在 A2 与 I2 之间热处理时间从 150 h 增加到 250 h 时, ac 损耗(磁滞损耗)没有多大变化.

3.3 超导芯尺度和芯数对 ac 损耗的影响

从图 3 中的单芯带 E12 与 F12 的比较看出, 当超导芯厚度 d 从 0.3mm 减小到 0.25 mm 时, ac 损耗(主要是磁滞损耗)减少了 33% 左右, 这是超导芯厚度减小导致 Bi-2223 相减少的缘故.

从图 4 中的 19 芯带 A2, I2 同单芯带 E2 的比较看出, 将单芯带细分成多芯带能减少磁滞损耗. 但另一方面, 芯间的耦合增加了 Ag 基体的涡流损耗, 因此 19 芯带的损耗只比单芯带减少 20% 左右.

3.4 掺 Pb 对 Bi-2223/Ag 带 ac 损耗的影响

图 5 为掺 Pb 的 $\text{Bi}_{2-x}\text{Pb}_x\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}/\text{Ag}$ ($x=0, 0.3, 0.4$) 带样品的 ac 损耗实验结果. 从图 5 可以看到, 掺 Pb 样品的 ac 损耗比不掺 Pb 的低, 在所测量的磁场范围(0.6—170 mT)内, 掺 Pb 样品的 ac 损耗为不掺 Pb 样品的 1/3—1/4. 同时, 掺 Pb 量对损耗也有

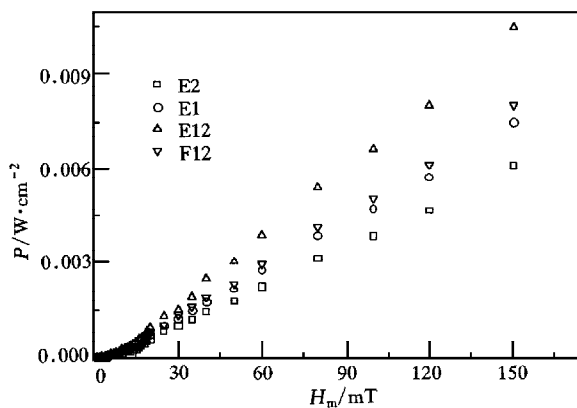


图 3 不同工艺和不同超导芯尺寸的单芯带 ac 损耗

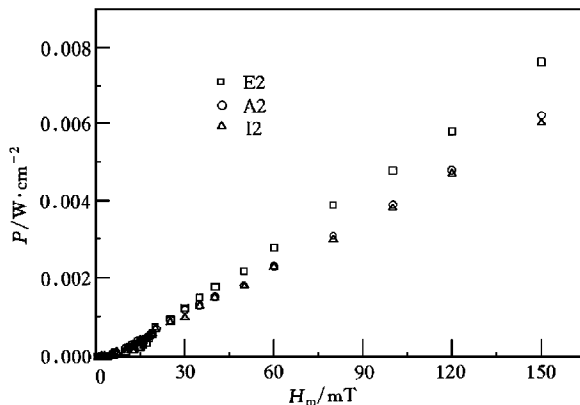


图 4 不同工艺的多芯带 ac 损耗和多芯带与单芯带 ac 损耗的比较

影响, Pb 含量 $x=0.3$ 的样品呈现好的低损耗特性, 当 x 从 0.3 增加到 0.34 时, ac 损耗也增加. 在制备 Bi-2223/Ag 带中已表明, 用 Pb 部分替代 Bi 能有效地得到 110 K 的 2223 相. 添加 Pb 使高 T_c 的 2223 相的最佳烧结温度降低到约 845℃, Pb 至少可看作一种助熔剂. 掺 Pb 也能促进高 T_c 相生长和使 2223 相稳定. 另一方面, 掺 Pb 改进了弱连接同时增加了磁通钉扎. 以上这些因素都使掺 Pb 样品呈现出低损耗性能.

3.5 掺 Sn 的 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3-x\text{Sn}_x\text{O}_y$ 超导体的 ac 损耗

图 6 给出了 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3-x\text{Sn}_x\text{O}_y$ ($x=0, 0.05, 0.06$) 超导体的 ac 损耗. 从图 6 可以看出, 掺 Sn 样品的 ac 损耗比不掺 Sn 的低得多. 还可进一步看到, Sn 含量 $x=0.05$ 样品的 ac 损耗比 $x=0.06$ 样品的小. 如文献[12]指出的那样, 掺 Sn 对 Y 系超导体微结构有重要影响, Sn 部分替代 Cu 能减小 211 相粒子平均尺度, 同时增加 211 相与 123 相间的相界, 这可能导致钉扎力和临界电流密度的增加. 另外, 掺 Sn 也能降低 Y 系超导体的熔化温度. 这些都能使 ac 损耗降低, 当然应当仔细控制掺 Sn 的量.

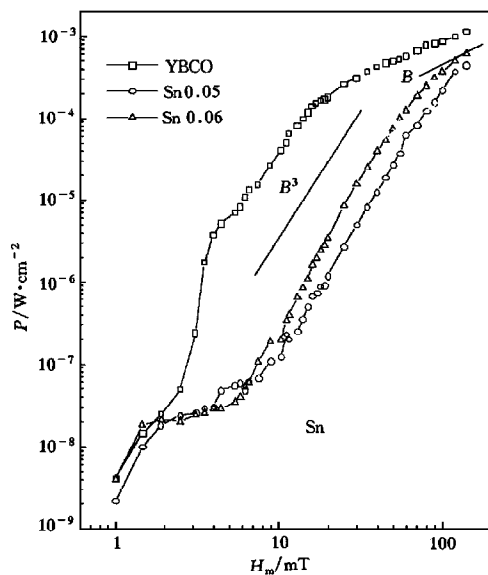
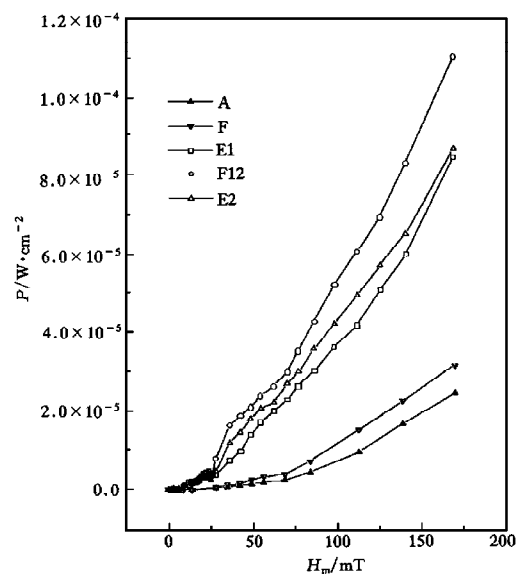


图 5 掺 Pb 与不掺 Pb 的 Bi-2223/Ag 带 ac 损耗的比较

图 6 掺 Sn 的 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3-x\text{Sn}_x\text{O}_y$ 超导体的 ac 损耗

- [1] J. Orehostky, M. Garber, Y. Xu *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **67**(1990), 1433.
- [2] Yuanhui Xu, Weiyuan Guan, K. Zeibig. *Appl. Phys. Lett.*, **54**(1989), 1699.
- [3] M. Basso, L. Lambardi, S. Marini *et al.*, *Appl. Supercond.*, **2**(1994), 71.
- [4] K. N. Mirchandani, K. K. Das, B. Kumar, *J. Supercond.*, **6**(1993), 387.
- [5] K. M. Reilly, *J. Supercond.*, **5**(1992), 25.
- [6] C. W. Yang, Y. Q. Shan, J. N. Deng, *et al.*, *Physica, C* **282-287**(1997), 2647.
- [7] S. Zannella, L. Lansak, M. Majoros *et al.*, *Physica, C* **205**(1993), 14.
- [8] J. Orehostsky, K. Reilly, M. Muenaga *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **60**(1992), 252.
- [9] Y. Yamaguchi, D. H. Ha, F. Iga *et al.*, *J. Supercond.*, **7**(1994), 291.

- [10] S. Zannella, J. Tenbrink, K. Heine *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **57**(1990), 192.
- [11] Z. Z. Duan, L. Zhou *et al.*, *Functional Materials* (Chemical Industry Press, Beijing, 1996), p. 287 (in Chinese).
- [12] Y. Feng, L. Zhou, *Physica, C* **202**(1992), 298.
- [13] J. X. Wang, P. X. Zhang *et al.*, *Acta Physica Sinica*, **44**(1995), 943 (in Chinese).

STUDY ON AC LOSSES OF HIGH T_c SUPERCONDUCTORS IN 50 Hz APPLIED MAGNETIC FIELD *

WANG JIN-XING YANG SHI-ZHONG HE YAN-FA YANG CHAO-WEI

(Department of Physics, Northeastern University, Shenyang 110006)

DUAN ZHEN-ZHONG FENG YONG ZHANG PING-XIANG ZHOU LIAN

(Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 720016)

(Received 29 April 1998)

ABSTRACT

AC losses of Bi-2223/Ag tapes prepared by different processes and $\text{YBa}_2\text{Cu}_{3-x}\text{Sn}_x\text{O}_y$ bulk materials substituted partially by Sn for Cu have been investigated in a sinusoidal magnetic field $H(t)$ with the frequency of 50 Hz at 77 K. The experimental results showed that the appropriate decrease of temperature and time of the heat treatment can reduce AC losses in the monofilamentary tape. The reduction of thickness can also reduce AC losses. The subdivision of monofilamentary tape into multifilamentary tape will suppress the hysteresis loss. On the other hand, the coupling of interfilaments will increase the eddy current loss in Ag matrix. So the AC losses of the tape with 19 filaments are only about 20% less than the monofilamentary tape. The AC loss of Sn-added sample is lower than that of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$. The content of Sn influences the dissipation characteristics of the $\text{YBa}_2\text{Cu}_{3-x}\text{Sn}_x\text{O}_y$. The AC loss of $\text{YBa}_2\text{Cu}_{2.95}\text{Sn}_{0.05}\text{O}_y$ is lower than that of $\text{YBa}_2\text{Cu}_{2.94}\text{Sn}_{0.06}\text{O}_y$. The addition of Sn has an important effect on the microstructure of the Y-system superconductor. The partial substitution of Sn for Cu can reduce the average size of $\text{Y}_2\text{BaCuO}_5(211)$ particles and increase the boundaries between 211 and 123 phase. In addition, Sn can also lower the melting temperature of the Y-system superconductor. All of these lead to the increase of pinning-force and J_c , hence the AC loss is decreased.

PACC: 7460G; 7460J; 7470V

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 19474010) and by the National High Technology Development Program of China (Grant No. CD 010104).