

# 高阻值合金基体材料对 Bi-2223 高温超导带材交流损耗影响的实验研究

张奕黄, 方进, 张永

(北京交通大学电气工程学院, 北京市海淀区 100044)

## EFFECT OF HIGHER-RESISTIVITY ALLOY MATRIX MATERIALS ON AC LOSSES IN Bi-2223/AG TAPES

ZHANG Yi-huang, FANG Jin, ZHANG Yong

(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Haidian District, Beijing 100044, China)

**ABSTRACT:** With the rapid development of research and preparation of high temperature superconducting material, the applications of high temperature superconducting material to transformers, current limiters, cables, motors and energy storage systems are accelerated. AC losses of HTS material is one of the key factors, which exerts an influence on applications of HTS material. AC losses in multi-filamentary HTS tapes are affected by various parameters. Among them, the effective matrix resistivity is expected to have an important influence. In order to study the effect of higher-resistivity matrix materials on the AC losses, six Bi-2223/Ag tapes with different alloy matrix have been prepared. The effect of alloy matrix on AC magnetic field loss is investigated in 77K. It has been found that at lower frequency the magnetic losses per cycle are reduced by the application of a high resistivity alloy matrix materials. We also report on the effect of higher-resistivity alloy matrix on the decay time constant of coupling current.

**KEY WORDS:** Electric power technology; Magnetic loss; Bi2223/g tapes; Alloy matrix; Decay time constant of coupling current

**摘要:** 飞速发展的高温超导材料的研究和制备, 加速了高温超导材料在变压器、限流器、电缆、同步电机和储能磁体等方面的应用。影响高温超导材料应用的关键因素之一是它的交流损耗。在多芯高温超导带材中, 交流损耗依赖于各种参数。其中, 基体的有效电阻率对带材的交流损耗有重要影响。为了研究高阻值基体材料对带材交流损耗的影响, 该文制备了 6 种具有不同阻值的基体材料的带材。在 77K 下, 研究了高阻值基体材料对 Bi-2223 带的交流损耗的影响。结果发现, 在较低频率下, 通过引进高阻值基体材料, 可有效地减少带材的交流外场损耗。同时也研究了高阻值基体材料电阻率对耦合损耗时间常数的影响。

**关键词:** 电工; 磁场损耗; Bi-2223 带材; 合金基体; 耦合损耗时间常数

## 1 引言

近年来, 高温超导材料的研究和制备取得飞速发展, 加速了高温超导材料在超导变压器、限流器、超导电缆、同步电机和超导储能磁体等方面的应用<sup>[1-3]</sup>。影响高温超导材料应用的关键因素之一是它的交流损耗<sup>[4]</sup>。只有带材的损耗极低时(大约为 0.3-0.5mW/Am), 才能体现出它的优越性。所以国际上一直重视带材交流损耗的研究工作<sup>[5-8]</sup>。世界上已经广泛开展了减少 Bi2223 带材交流损耗的研究工作<sup>[5-8]</sup>。但这些研究很多停留在对实验室样品的研究上。为了加速 Bi2223 带材的应用, 本文选择了大电流商品带进行研究。对合金基体对交流磁场损耗的影响进行理论分析和实验研究, 探寻其物理机制, 为低损耗的高温超导带材的设计和分析提供实验依据。

## 2 交流损耗的实验研究及分析

### 2.1 实验样品和方法

本实验共设计制作了不同合金基体材料的 6 个样品带, 所有样品的长度均为 1.5cm。样品参数如表 1 所示。

本文通过交流磁化仪测量在外磁场下的超导样品中的交流磁化率, 再经计算得出外磁场下的交流磁场损耗<sup>[9]</sup>。放入背景磁场中的探测线圈和补偿线圈通过反串组成一个探测线圈组, 通过调整探测线

表 1 样品参数  
Tab. 1 Sample parameters

样品	A	B	C	D	E	F
芯线数	61	61	61	61	61	61
带材内部基体材料	Ag-Sb	Ag-Sb	Ag-Au	Ag-Au	Ag-Au	Ag
带材外部基体材料	Ag-Ni-Mg	Ag-Sb	Ag-Ni-Mg	Ag-Au	Ag-Sb	Ag-Ni-Mg
带材截面/mm <sup>2</sup>	4.12×0.225	4.12×0.22	4.28×0.22	4.32×0.225	4.23×0.23	4.23×0.23
带芯线区域截面/μm <sup>2</sup>	410×15.2	411×15.1	420×15.0	422×14.0	415×15.4	414×15.3
临界电流/A	16	7.2	87	83	90	87
h/%	35.4	35.6	35.0	35.2	35.5	35.0

圈和补偿线圈的匝数，实现在无样品放入时，探测线圈组对外输出的电压接近零（非零部分可作为背景电压），当放入样品时，线圈中有电压输出，该电压与样品的磁化率成正比，通过计算可以得到样品的磁化率。再由样品的磁化率的虚部  $c''$ ，通过公式  $Q = c'' \pi B_0^2 / m_0$  得到在样品的外场损耗  $Q$ 。在完成了测量装置的校准后，利用图 1 所示的交流磁化率测量装置测量 Bi2223 带材的交流磁化率。利用该装置测量样品交流磁化率的原理如下：为了测量在 77K 不同磁场下的 Bi2223 带材的交流磁化率，首先通过锁向放大器输出一个正弦交流信号，经过功率放大器后产生一个正弦交流电对磁体输电，通过调节锁向放大器的输出电压，可以产生不同的输出电流，相应地，在磁体中就产生不同的磁场。测量中，首先利用锁向放大器测量无感电阻两端的电压  $V_1 = V_{11} + jV_{12}$ ，利用锁向放大器的 Autophase 功能，使  $V_{12} = 0$ ，就有  $V_1 = V_{11}$ ，再测量探测线圈组的两端电压  $V_2 = V_{21} + jV_{22}$ ，其中  $V_{21}$  是与损耗相关的电压信号。测量的具体步骤为：在放入样品之前，测量无感电阻两端的电压  $V_1 = V_{11e}$ ，再测量探测线圈组的两端电压  $V_2 = V_{21e} + jV_{22e}$ 。然后放入样品，测量无感电阻两端的电压  $V_1 = V_{11s}$ ，再测量探测线圈组的两端电压  $V_2 = V_{21s} + jV_{22s}$ 。即可得到校正后与样品磁矩相关的电压为

$$V_{21se} = V_{21s} - V_{21e} V_{11s} / V_{11e} \quad (1)$$

$$V_{22se} = V_{22s} - V_{22e} V_{11s} / V_{11e} \quad (2)$$

这里测量了空线圈时的无感电阻两端的电压和探测线圈组的两端电压，目的是消除由于补偿线圈没有完全补偿的外界杂散场在探测线圈组两端产生的杂散信号，在减去这些杂散信号电压后，探测线圈组的两端电压就可以表示由样品磁矩在探测线圈组的两端产生电压。则可得到样品的交流磁化率为

$$c = \frac{R_s (V_{22se} - jV_{21se})}{2\pi f K_{ih} V_s S_{mf} (0,0) V_{11s}} = c' - jc'' \quad (3)$$

式中  $c'$  是交流磁化率的实部； $c''$  为交流磁化率的虚部； $R_s$  为无感电阻的阻值； $K_{ih}$  为磁体常数（计算可得）； $V_s$  为样品的体积； $f$  为交流磁场的频率； $S_{mf}(0,0)$  是与磁体结构相关的常数，由探测线圈中磁链/样品磁矩得出，表示样品单位磁矩在探测线圈中产生的磁链， $S_{mf}(0,0)$  由直径为 4mm 的软铁球作为标准样品（它的  $c' = 3$ ）进行测量标定得出。本文中的测量的交流损耗是垂直外场损耗（交流磁场和带材宽面垂直）。

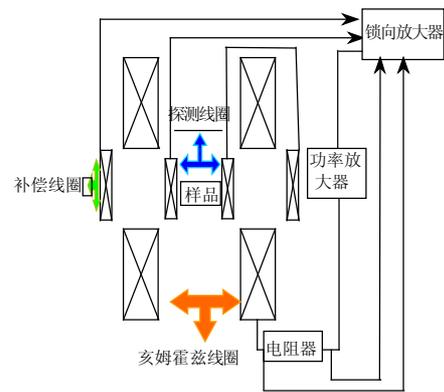


图 1 高温超导体交流磁化率测量装置示意图

Fig. 1 Schematic arrangement to measure AC magnetic susceptibility of HTS

## 2.2 有效合金基体电阻率对耦合损耗时间常数的影响

为研究合金基体对 Bi2223 带材交流磁场损耗的影响，首先测量了不同基体带材的有效电阻率和耦合损耗时间常数。得到了 Ag、Ag-Mg-Ni、Ag-Au 和 Ag-Sb 共 4 种合金的电阻率，见表 2。

表 2 Ag、Ag-Mg-Ni、Ag-Au 和 Ag-Sb 的电阻率

Tab. 2 Resistivity of Ag、Ag-Mg-Ni、Ag-Au and Ag-Sb

合金基体样品	电阻率/(mΩ×10 <sup>-8</sup> )	有效电阻率/(mΩ×10 <sup>-8</sup> )
Ag	0.27	0.078
Ag-Mg-Ni	0.62	0.1798
Ag-Au	5.04	1.4616
Ag-Sb	8.57	2.4853

合金基体（内部合金基体材料）的电阻率  $r_m$  可由下式计算得到<sup>[10]</sup>：

$$r_e = r_m \frac{1-h}{1+h} \quad (4)$$

式中  $h$  为超导部分占芯线区域横截面积的百分比，可通过截面图像分析得出。结果列在表 1 中。

当超导芯线没有表面镀的电阻层时，有效电阻率  $r_e$  可由式(4)计算得出，本实验中样品即如此。但是由于所选择的材料合金电阻率  $r_m$  大，所以基体的有效电阻率  $r_e$  也可以被有效的增大。从表 2 中可看到合金基体的有效电阻率  $r_e$  远大于纯银基体的电

阻率。

笔者通过实验来确定带材的耦合损耗时间常数。理论上,每周期单位体积的耦合损耗为<sup>[11]</sup>

$$Q_c = \frac{\pi B_m^2 w n t}{2 m_0 (1 + w^2 t^2)} \quad (5)$$

其中,角频率  $w = 2\pi f$ ;  $t$  为耦合损耗时间常数,当最大损耗所对应的频率为  $f_m = 1/2\pi t$  时,  $Q_c$  取极大值,从  $Q_c$  的极大值处可求出  $t$ 。因此可得到耦合损耗时间常数  $t$  为

$$t = \frac{1}{2\pi f_m} \quad (6)$$

图2中为在磁场远小于穿透场的条件下,测量出的6个不同合金基体样品的交流磁场损耗函数  $G = m_0 Q / 2B_0^2$  随频率变化的关系图,这时的损耗主要是耦合损耗<sup>[12]</sup>。由图2中最大损耗所对应的频率为  $f_m$ , 经式(6)计算得到6个不同合金基体样品的耦合损耗时间常数,结果见表3。

表3 样品A~F耦合损耗时间常数的测量结果

Tab. 3 Experimental results on decay time constant of coupling current of sample A-F

样品号	A	B	C	D	E	F
耦合电流衰减时间常数/ms	4.98	5.28	5.62	5.20	5.24	14.54
穿透场 $B_p$ /mT	3.83	0.85	12.89	11.13	13.21	11.99

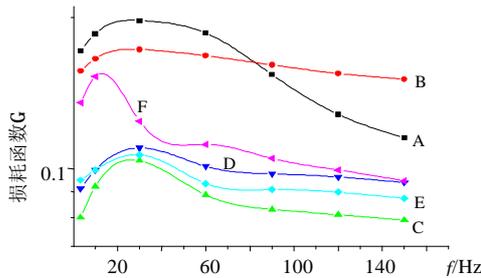


图2 交流磁场损耗函数G随频率变化的关系图

Fig. 2 Frequency dependence of the total perpendicular magnetic field loss function G

在样品A~F中,多芯采用合金基体时,耦合损耗时间常数  $t$  比多芯为银基体的样品F小的多。可见在垂直场下,耦合损耗时间常数  $t$  可通过使用合金基体而减小。关于这点可以理解为<sup>[12]</sup>

$$t \propto (1 - N_z) l^2 / r_e \quad (7)$$

其中  $l$  为样品长度;  $N_z$  为芯线区域的退磁系数;  $r_e$  为基体的有效电阻率,对6个样品而言,  $N_z$  几乎相同,但是由于  $r_e$  明显不同,会造成耦合损耗时间常数  $t$  的不同,对于样品A~E来说,由于采用了合金基体,  $r_e$  较大,所以  $t$  较小。而对于样品F而言,  $r_e$  较小,所以  $t$  较大。这就解释了表3中样品F耦合损耗时间常数  $t$  较大的原因。从式(7)可知  $t$

和  $r_e$  成反比,但从表2和表3的数据可看到,虽然  $t$  随  $r_e$  的增大而减少,但不是严格的反比关系。例如,样品C和样品F相比较,样品C芯线区域的电阻率是样品F的18倍,但是样品F耦合损耗时间常数仅仅是样品C的2.6倍。这可能是用式(4)计算  $r_e$  不够准确的缘故。事实上, Bi2223带内部超导材料和基体材料之间的连接很复杂,可能需要对式(4)作进一步的修正才能用来计算  $r_e$ ,从而得到正确的  $r_e$  值。虽然本文不能得到  $t$  和  $r_e$  成反比的定量关系,但实验数据显示,当基体的电阻率增加时,可以减少耦合损耗时间常数  $t$ ,从而减少耦合损耗。

### 2.3 有效合金基体电阻率对交流外磁场损耗的影响

在本文研究的带材中,因为带的外部基体采用了高阻值的合金材料,所以在所研究的频率范围内,外层的涡流损耗会很小。因此外场损耗主要由耦合损耗和磁滞损耗组成。

从上分析可以知道,选择不同材料作为超导带材的基体可以提高基体的有效电阻率  $r_e$ ,可有效地减少耦合损耗时间常数  $t$ ,从而减小耦合损耗。同时,实验中发现,外场下的磁滞损耗也减小了。原因是当耦合增强时,会使芯线耦合在一起,使芯线的有效宽度  $c_f$  和有效厚度  $d_f$  增加,这时,外场下的磁滞损耗增大了。所以增大基体有效电阻率可以减少芯线之间的耦合,从而减少带材的磁滞损耗。这一点还可以从下面对带材外场交流损耗测量结果中得到证实。

图3为在  $f=30\text{Hz}$  下6个样品垂直磁场与外磁场的关系曲线。图4是由图3通过  $Q = c'' \pi B_0^2 / m_0$  计算得到。

从图3中看可以看出,在30Hz条件下,当  $B_0 \leq 0.3\text{mT}$  时,交流磁场损耗  $Q \propto B_0^2$ ,这时总损耗中耦合损耗占主要成分;当  $0.3\text{mT} \leq B_0 \leq B_p$  时,样品F的损耗  $Q \propto B_0^3$  (样品C~E的损耗  $Q \propto B_0^{2.6} \sim B_0^{2.8}$ ),这时总损耗中磁滞损耗占主要成分(在  $B_0 \leq B_p$  时磁滞损耗  $Q_h \propto B_0^3$ );当  $B_0 \geq B_p$  时,交流磁场损耗  $Q \propto B_0^{1.4}$ ,样品处于部分耦合状态(当  $B_0 \geq B_p$  时在  $Q \propto B_0^1$  时样品处于完全耦合状态)<sup>[13]</sup>。

在从图4可以看出,在30Hz条件下,当磁场达到某一值时,交流磁化率的虚部  $c''$  的值最大,由该磁场可以确定带材的穿透场强  $B_p$ <sup>[14]</sup>。各样品的穿透场强  $B_p$  见表3。

从图3、图4可以看出,在  $0.3\text{mT} \leq B_0 \leq B_p$  时,银合金基体材料的带C~E损耗较小,而具有纯银基

体材料的带 F 损耗较大。分析如下：实验中，当  $0.3\text{mT} \leq B_0 \leq B_p$  时，在交流磁场损耗中，磁滞损耗占主要成分。同时，具有较大电阻率银合金基体材料的带 C~E 的耦合损耗时间常数  $t$  较小，具有较小电阻率纯银基体材料的带 F 的耦合损耗时间常数  $t$  较大，带 F 的芯线在较强的耦合下芯线的有效尺寸增大，就会增大磁滞损耗，所以，得到在  $0.3\text{mT} \leq B_0 \leq B_p$  和  $f = 30\text{Hz}$  情况下，有高阻值合金基体材料的带 C~E 有较小损耗的结论。

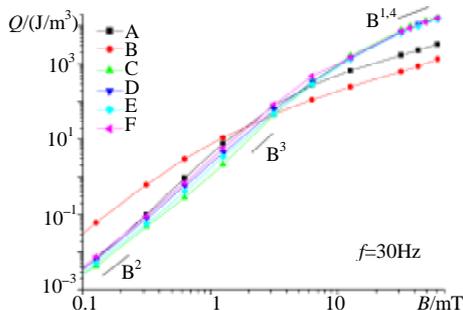


图 3 在 30 Hz 下，6 个样品 A~F 的垂直磁场损耗对外磁场的依赖性

Fig. 3 The AC external field amplitude dependence of the 30 Hz perpendicular magnetic field losses of samples A-F

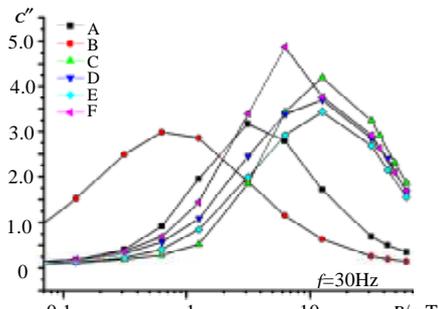


图 4 对应于图 3 的交流磁化率的损耗分量  $c''$  对外磁场的依赖性

Fig. 4 Corresponding to data in Fig. 3, lossy component  $c''$  of the AC complex susceptibility as a function of the AC external field amplitude  $B_0$

图 5 为在 270 Hz 下，6 个样品 A~F 的垂直磁场损耗对外磁场的依赖关系。从图 5 中可看出，在

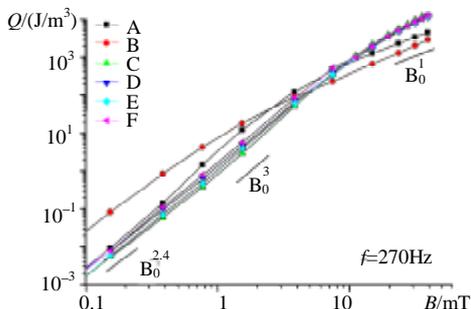


图 5 在 270 Hz 下，6 个样品 A~F 的垂直磁场损耗对外磁场的依赖性

Fig. 5 The AC external field amplitude dependence of the 270 Hz perpendicular magnetic field losses of sample A-F

270Hz 条件下，当  $B_0 \leq 0.3\text{mT}$  时，样品 C~E 的交流磁场损耗  $Q \propto B_0^{2.4}$ ，这时总损耗中耦合损耗占主要成分，而样品 F 的交流磁场损耗  $Q \propto B_0^{2.8}$ ；当  $0.3\text{mT} \leq B_0 \leq B_p$  时，样品 C~F 的交流磁场损耗  $Q \propto B_0^3$ ，这时总损耗中磁滞损耗占主要成分。当  $B_0 \geq B_p$  时，样品 C~F 的交流磁场损耗  $Q \propto B_0^1$ ，样品处于完全耦合状态。

在图 5 中，在  $B_0 \leq 0.3\text{mT}$  和  $f = 270\text{Hz}$  时，带 C~E 的交流磁场损耗  $Q \propto B_0^{2.4}$ ，说明带材芯线部分被耦合，可以从带的合金基体的有效电阻率来分析这一结果。从表 2 中，可以看出 Ag-Au 和 Ag-Sb 合金基体的有效电阻率分别是 Ag 电阻率的 18.73 和 31.86 倍。因此带中的耦合电流将大大减少，从而得到在较高频率下，带材仍然不会被完全耦合并有效地减少高温超导带材中的交流损耗。从图 3~图 5 中也可清楚地看到这一点。带 F 的合金基体是纯 Ag，在  $B_0 \leq 0.3\text{mT}$  和  $f = 270\text{Hz}$  时，交流磁场损耗  $Q \propto B_0^{2.8}$ ，可以看出交流磁场损耗具有磁滞性质（磁滞损耗在低场下  $Q \propto B_0^3$ ），说明带 F 几乎被完全耦合了，这时，多芯带的损耗行为和一个单芯带相同，因此带 F 的损耗比带 C~E 的损耗要大。当  $0.3\text{mT} \leq B_0 \leq B_p$  时，样品 C~F 的交流磁场损耗  $Q \propto B_0^3$ ，F 带的斜率和其它样品几乎相同，这时样品 C-F 都已经完全耦合，高阻值材料在降低耦合方面的作用不大，当  $0.3\text{mT} \leq B_0 \leq B_p$  时，在高频下（270Hz），样品 F 的损耗较大，主要是由于超导带的外壳和内部正常基体的电阻率较低形成的，低的电阻率会造成较大的涡流损耗和较大的耦合损耗（由于低的电阻率会造成样品 F 较大的耦合损耗时间常数），所以在高频下（270Hz），要减少损耗必须还要采取扭绞芯线的方法。

从图 3~图 5 还可看到，在相同的磁场情况下，样品 A 和样品 B 的损耗和样品 C~F 的损耗相比较，在小磁场下较大，但在高磁场下较小。这是很奇特的现象。可以从样品 A 和样品 B 的合金基体材料的电阻率和临界电流这两个量来分析这一现象：样品 A 和样品 B 的基体是 AgSb 合金，电阻率为  $8.57 \times 10^{-8} \text{m}\Omega$ ，比银的电阻率高 20 倍以上，所以在低场下耦合电流将受到抑制，同时样品 A 和样品 B 的临界电流比其它样品临界电流小得多，这可能是采用 AgSb 合金材料作为 A 和 B 样品的内部芯线时，这种材料在加工过程中影响了超导相的生成，从而减小了带材的临界电流。小的临界电流有增加带材磁滞损耗的趋势。所以在低磁场下，带材的磁滞损耗比其它样品大得多。因此在低场下，由耦合损耗

和磁滞损耗相加而得到的样品A和B的外场损耗会很大。

在图3、图4中,当频率为30 Hz,样品A和B在40 mT(远大于穿透场)附近时,没有完全耦合(可以看作在大于穿透场时,在40 mT附近,对于C~F带有 $Q \propto B_0^1$ ,但样品A和B斜率和C~F带的斜率不同,不满足 $Q \propto B_0^1$ ,所以没有完全耦合)。在图5中,当频率为270 Hz,样品A和B在40 mT(远大于穿透场)附近时,完全耦合(可以看作大于穿透场时,样品A和B斜率和C-F样品几乎相同,所有样品都有 $Q \propto B_0^1$ 的关系)。可见,在高场和高频下,耦合将加强,高阻值的基体去耦作用不明显。而在较低频率下,样品A和B的电阻率很高,去耦作用明显,而其它带(C~F带)在高场下,几乎耦合成一个大尺寸的单芯带,因此,在高场下低频下,样品A和B的损耗比其它样品损耗低。这就解释了图3、图4中样品A和B在低场下损耗较高,在高场下损耗较低的原因。因此在较强的交变磁场下,如果频率不太高的情况下,选择样品A和B可以有效地减少交流损耗。

### 3 结论

在外磁场下,高温超导带材的交流损耗主要由耦合损耗和磁滞损耗组成,当采用高阻值的合金基体材料时,可以同时减少这两种损耗,这一点可以从在30 Hz和270 Hz的测量结果中得到证实。同时也看到,当磁场和频率都很高时,几个样品的损耗几乎相同,所以在高频率和强交变磁场条件下,合金基体在减少交流损耗的作用在降低,实际应用中必须结合带材芯线扭绞的方法,可以更有效地减少高温超导带材中的交流磁场损耗。同时还应注意到,当选择不同的材料做内部芯线时,临界电流有很大变化,所以在选择材料时,既要保证带材有小的损耗,同时也要求带材有一个大的临界电流,以保证高温超导带材有整体性能的提高。另外也应注意到,在较强的交变磁场下,如果频率较小时,临界电流不太高的样品A和B,可以有效减少交流损耗,因此它们可以用在低频较强磁场设备上。

### 参考文献

- [1] 徐德鸿, 正田英介. 超导储能装置用GTO PWM 电流型变流器模块方阵[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(2): 124-130.  
Xu Dehong, Eisuke Masada. GTO PWM current converter array for superconducting magnetic energy storage[J]. Proceedings of the

- CSEE, 1998, 18(2): 124-130.  
[2] 叶林, 林良真. 超导故障限流器在电力系统中的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(7): 1-8.  
Ye Lin, Lin Liangzhen. Superconducting fault current limiter application in electric power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(7): 1-8.  
[3] 王付胜, 刘小宁. 饱和铁心型高温超导故障限流器数学模型的分析与参数设计[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 135-139.  
Wang Fusheng, Liu Xiaoning. Model analysis of a high temperature superconducting fault current limiter and its parameter design[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 135-139.  
[4] 方进, 翁佩德, 陈灼民, 等. 运行温度对NbTi管内电缆导体瞬态稳定性的影响的实验研究与分析[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(4): 113-118.  
Fang Jin, Weng Peide, Chen Zhuomin et al. Experimental research and analysis of the influence of operating temperature on NbTi CICC transient stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(4): 113-118.  
[5] Majorols M, Glowacki B A, Compbel A M. Transport ac losses and screening properties of Bi-2223 multifilamentary tapes covered with magnetic material [J]. Physica C, 2000, 338(4): 251-262.  
[6] Glowacki B A, Majorols M. A method for decreasing transport ac losses in multifilamentary and multistrap superconductors [J]. Supercond. Sci. Technol. 2000, 13(7): 971-973.  
[7] Zhang P X, Inada R, Kuno et al. Reduction in alternating-current transport losses of a (Bi, Pb)<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub> multifilamentary tape-form conductor by introduction of resistive barriers[J]. Supercond. Sci. Technol. 2000, 13(11): 1505-1508.  
[8] Maeda H, Inaba T, Sato M P X et al. Critical current density and A. C. losses of Ag-sheathed Bi 2223 tapes with Sr-V-O barriers [J]. Physica C, 2001, 357-360(2): 1230-1233.  
[9] Fang J, Luo X M, Chen D X et al. Supercond[J]. Sci. Technol. 17 2004, 17(10): 1173-1179.  
[10] Bernd Seeber. Handbook of applied superconductivity[M]. 1998, 205.  
[11] Wilson M N, Superconducting magnets[M]. Clarendon Press Oxford, 1983, 159.  
[12] Kwasnitza, K Clerc S, Flukiger R et al. Geometry dependence of 50 Hz alternating magnetic field losses in superconducting multifilament Bi(2223)/Ag tapes[J]. Physica, C355, 2001, 355(6): 325-334.  
[13] Witz G, Su X D, Kwasnitza K et al. Physica AC losses in Bi,Pb(2223) multifilamentary wires with square cross-section[J]. Physica C, 2003, 384 (2): 334-344.  
[14] Fang J, Luo X M, Chen D X et al. AC magnetic losses in Bi-2223/Ag tapes with different aspect ratios[J]. Physica C, 2004, 412-414(2): 1134-1138.

收稿日期: 2005-10-08。

作者简介:

张奕黄 (1947-), 男, 硕士, 教授, 主要从事电动汽车的电机及其控制系统、牵引系统的研制、以及对电机和电工材料的电磁特性及损耗进行理论和实验研究;

方进 (1963-), 男, 博士, 讲师, 主要从事超导磁体、超导电缆及超导电器的设计制作以及超导材料的电性能进行理论和实验研究。