

# 不同合金基体 Bi2223 带材传输损耗的测量和分析

方进<sup>1</sup>, 丘明<sup>2</sup>, 张永<sup>1</sup>, 宋秀华<sup>3</sup>

(1. 北京交通大学电气工程学院, 北京市海淀区 100044; 2. 中国科学院电工研究所应用超导重点实验室, 北京市海淀区 100080; 3. 北京英纳超导技术有限公司, 北京市海淀区 100176)

## AC Transport Losses Measurement and Analysis of Bi-2223/Ag Tapes With Different Alloy Matrix

FANG Jin<sup>1</sup>, QIU Ming<sup>2</sup>, ZHANG Yong<sup>1</sup>, SONG Xiu-hua<sup>3</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Haidian District, Beijing 100044, China; 2. Key Lab of Applied Superconductivity, Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Haidian District, Beijing 100080, China; 3. Innova Superconductor Technology Co. Ltd., Haidian District, Beijing 100176, China)

**ABSTRACT:** The reduction of AC losses can be achieved by twisting of the tapes, alloying of the sheath or introducing a resistive barrier between the filaments. In order to study the effect of higher-resistivity matrix materials on the AC transport losses, six Bi2223 tapes with different alloy matrix have been prepared. Ag-alloy matrix resistivities of six samples were measured and the effect of Ag-alloy matrix on AC transport loss of Bi2223 tapes was investigated in 77 K. It was found that Ag-alloy matrix could decrease AC transport current losses for  $I_0 < I_c$ . The  $n$  values of six samples were measured and the effect of tensile stress of variably sheathed BSCCO tapes on the  $n$  values was investigated in 77 K. Meanwhile, the dependence of AC transport losses on the  $n$  values was also investigated.

**KEY WORDS:** AC transport loss; Bi2223 tapes; alloy matrix;  $n$  values; tensile stress

**摘要:** 减少交流损耗可以通过带材的扭绞、铠装层采用合金材料或在芯线之间引进一个电阻层来实现。为了研究高阻值基体材料对交流传输损耗的影响, 准备了6个具有不同合金基体的Bi2223带材。在77 K下, 测量了6个样品基体的电阻率, 研究了Ag合金基体对Bi-2223带材交流传输损耗的影响。研究发现, 在 $I_0 < I_c$ 条件下, Ag合金基体能够减小交流传输损耗。在77 K下, 测量了6个样品的 $n$ 值, 研究了各种铠装的BSCCO带的抗拉强度对 $n$ 值的影响。同时, 研究了交流传输损耗对 $n$ 值的依赖性。

**关键词:** 交流传输损耗; Bi2223带材; 合金基体;  $n$ 值; 抗拉强度

基金项目: 国家863高技术基金项目(2002AA306113)。

The National High Technology Research and Development of China (863 Programme) (2002AA306113).

## 0 引言

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已得到迅速发展<sup>[1-3]</sup>。考虑到超导体中要通入交流传输电流, 其交流传输损耗大小直接关系到超导带材应用的经济效益, 所以国际上一直重视带材交流传输损耗的研究工作。世界上已经广泛开展了减少Bi2223带材交流传输损耗的研究工作<sup>[4-7]</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, 笔者制作了具有实用价值的较大临界电流的样品带进行研究。目前, 已经完成了样品设计、测量及分析等一系列研究工作。探索了交流传输损耗与带材的合金基体材料电阻率、应力和 $n$ 值之间的联系。通过研究合金基体对带材交流传输损耗影响, 探寻其物理机制, 为低损耗高温超导带材的研制提供实验依据。

## 1 实验

### 1.1 Bi2223带样品

共设计制作了不同合金基体的6个Bi2223样品带, 其参数如表1所示, 样品1的截面如图1所示。用通常的四引线法对临界电流进行测量, 临界电流的电场判据是 $E=1 \mu\text{Vcm}^{-1}$ 。样品的 $n$ 值同样可以由测量曲线所得。



图1 Bi-2223带的截面图  
Fig. 1 Cross-section of Bi-2223/Ag tapes

表 1 样品参数  
Tab. 1 Sample parameters

样品	样品 1	样品 2	样品 3	样品 4	样品 5	样品 6
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
超导比 η/%	35.4	35.6	35.0	35.2	35.5	35.0
样品 n 值	16	18	29	22	21	25

## 1.2 实验装置及实验方法

在测量中, 利用锁相放大器, 采取四点接线法来测量交流传输损耗。测量线路框图如图 2(a)所示, 图中锁相放大器为正交型锁相放大器, 它既作为电压与电流的测量仪器, 又作为交流电流的信号源。利用锁相放大器内置的振荡器, 将正弦交流信号通过音频功率放大器和低压变压器输出交流电流到超导样品上, 选择 Rogowski 线圈 1 的输出电压作为比较信号<sup>[8]</sup>。同时利用 Rogowski 线圈 1 可以测量出交流电流。超导样品带上的 Rogowski 线圈 2 可以产生感性电压, 可以抵消样品中的感性电压, 提高阻性电压的测量精度。

当样品通入正弦交流电时, 在样品两端的电压中, 有两部分组成, 一部分是阻性电压, 它与电流的乘积即为损耗功率; 另一部分为感性电压, 不产生损耗, 又称无功电压。这两部分电压位相差 90°。在实验中, 使用锁相放大器来测量样品两端的电压, 利用 Rogowski 线圈的输出信号作为参考信号(可看成是纯电感信号), 锁相放大器可以区分出样品上的阻性电压, 从而得到传输损耗的大小<sup>[9-11]</sup>。

一般电路中电流的有效值  $I_{\text{rms}}$  可以由 Rogowski 线圈 1 精确测量得出, 方法是首先对 Rogowski 线圈 1 进行标定, 让已知电流通过电路, 找到电流和 Rogowski 线圈 1 两端电压之间的关系, 在以后测量中, 测量出 Rogowski 线圈 1 两端电压, 就可以得到电路中的电流大小。

阻性电压的有效值  $U''_{\text{rms}}$  可由锁相放大器测量确定, 测量原理如下: 在测量中, 如果以同一电路中 Rogowski 线圈 1 的电压作为参考信号, 这时  $\phi=0$ , 与之同相的为感性电压, 与之相差 90°的为阻性电压。由以上分析可看出, 利用锁相放大器中参考信号道的移相器, 可将交流阻抗中电阻压降与电感压降分开, 分别以  $x$  分量和  $y$  分量表示。因此, 在测

量时, 通过调相将 Rogowski 线圈 1 产生的参考信号(纯电感电压信号)调到  $x$  轴上, 以此为参考, 将样品两端的电压分成  $x$  分量和  $y$  分量。其中  $y$  分量与参考信号相位相差 90°, 该分量为阻性电压有效值  $U''_{\text{rms}}$ , 每周单位长度交流传输损耗可以表示为

$$Q_l = (lf)^{-1} I_{\text{rms}} U''_{\text{rms}} \quad (1)$$

式中:  $f$  为电流频率;  $I_{\text{rms}}$  为传输电流的有效值;  $U''_{\text{rms}}$  为阻性电压的有效值;  $l$  为样品测量段长度。

为了精确测量交流损耗, 将电压测量回路改成“8”字形回路, 如图 2(b)所示, 这样可有效消除外来磁场变化在回路中所产生的感应电压。同时, 将测量电压的引线双绞及将待测样品中点接地以消除外来信号对测量的影响。

对于超导基体的电阻率, 采取四点法进行测量, 测量时让稳流稳压源产生的直流电流通过一段样品的基体材料, 测量出该段基体材料两端的电压, 然后由电压与电流的比值确定基体材料的电阻率。超导带的抗拉强度由拉(张)力测试系统——拉(张)力测定仪(Instron-5565, 最大负荷为 5 kN) 测量。

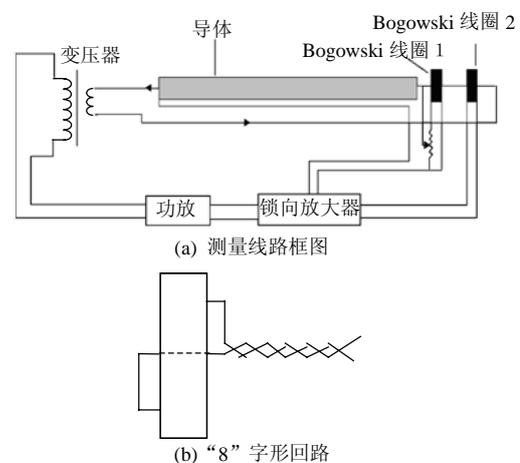


图 2 高温超导带材交流传输损耗测量装置示意图  
Fig. 2 Schematic arrangement to measure AC transport losses of HTS tapes

## 2 交流传输损耗的分析

超导带材在通以交变电流时,在基体中的超导芯线将在其周围产生自场,当传输电流小于超导材料的临界电流时,自场在超导芯中产生磁滞损耗,同时在基体中产生涡流损耗。当传输电流接近或大于超导材料的临界电流时,除磁滞损耗和涡流损耗外,在超导芯中,由于出现流阻而产生磁通流动损耗;当传输电流大于超导材料的临界电流时,在基体中,由于基体电阻而产生欧姆损耗。Norris计算了椭圆(椭圆模型)和矩形几何截面(带状模型)超导单芯超导带材的磁滞损耗(单位长度每循环损耗)如下<sup>[12]</sup>:

$$Q_h = \frac{\mu_0 I_c^2}{2\pi} [2(1-F)\ln(1-F) + (2-F)F] \quad (2)$$

$$Q_h = \frac{\mu_0 I_c^2}{\pi} [(1+F)\ln(1+F) + (1-F)\ln(1-F) - F^2] \quad (3)$$

式中:  $F = I_m / I_c$ ,  $I_c$ 为临界电流;  $I_m$ 为运行电流的幅值。

当  $I_m < I_c$  时,由式(4)、(5)可以推导出2个近似表达式:

$$Q_h \approx \frac{\mu_0 I_m^3}{\pi I_c^2} \propto I_m^3, \text{ 椭圆模型} \quad (4)$$

$$Q_h \approx \frac{\mu_0 I_m^4}{6\pi I_c^2} \propto I_m^4, \text{ 带状模型} \quad (5)$$

Norris 方程中的椭圆和带状几何形状带材传输损耗与传输电流的峰值有近似立方和四次方的关系,和临界电流的平方成反比。

式(2)、(3)适用于单芯带材,对单芯带的测量结果接近 Norris 方程中的椭圆模型。在实验研究中发现,多芯带测量结果和单芯带的测量结果比较接近,都处在 Norris 方程中的椭圆和带状模型之间,接近 Norris 方程中的椭圆模型。

H. Ishii等人给出基体中每个循环的涡流损耗<sup>[13]</sup>为

$$Q_e = \frac{\pi \omega \mu_0^2 I_m^2 d^3}{\rho_e L} \quad (6)$$

式中  $I_m$ 、 $d$ 、 $L$  和  $\rho_e$  分别为传输电流的峰值、包套的厚度、外层芯的周长和包套的有效电阻率。

在  $I_m \approx I_c$  时,超导体的磁通钉扎力很弱,磁力线将很容易流进和流出超导体,这样就产生磁通流动占优势的损耗。这时损耗随电流的增大上升很快,表达式为

$$Q_f \propto I_m^q \quad (7)$$

式中:  $Q_f$ 为磁通流动损耗;  $q = n + 1$ ;  $n$ 为反应带材直流特性的一个参数,远大于1。

当  $I_m > I_c$  时,部分电流分流进入银基体中,引起欧姆损耗,可以表示为

$$Q_r \propto \rho_{Ag} I_m^2 \quad (8)$$

式中:  $Q_r$ 为银基体中的欧姆损耗;  $\rho_{Ag}$ 为银基的电阻率。

此外,由于材料的不均匀性,将出现不同的  $n$  值,由此而引起的附加损耗  $Q_{add}$  大小由式(14)决定,这样可得交流传输损耗为

$$Q = Q_h + Q_e + Q_f + Q_r + Q_{add} \quad (9)$$

当  $I_m < I_c$  时,交流传输损耗为

$$Q = Q_h + Q_e + Q_{add} \quad (10)$$

从式(14)可以看出,随着  $n$  值的增大,附加损耗将减小,可见,提高  $n$  值可以有效的减小交流传输损耗。

## 3 测量结果和讨论

### 3.1 临界电流、基体电阻率和 $n$ 值

超导样品的临界电流和基体电阻率对交流传输损耗有直接影响,为了研究不同基体材料的交流传输损耗,首先对6个样品的临界电流和超导带的基体电阻率进行测量,采取四点法测量样品的临界电流和基体电阻率,测量结果如图3、4所示。样品1临界电流的测量曲线如图3所示。当样品中通入直流电流增加时,如果样品两端的电压达到  $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ ,这时样品的电流为临界电流。测量的样品1的长度为5 cm,对应临界电流的电压为  $5 \mu\text{V}$ ,得到样品1的临界电流为16 A。用相同的方法得到样品2~6的临界电流,如表1所示。

高温超导材料具有缓变的  $E$ - $J$  特性,这种特性可用  $n$  值来描述。 $n$  值可由下面方法求得<sup>[14]</sup>: 采用电场强度判据  $E_{c1} = 0.1 \mu\text{V}/\text{cm}$  和  $E_{c2} = 1 \mu\text{V}/\text{cm}$  获得带材的临界电流  $I_{c1}$  和  $I_{c2}$ , 通过式(11)得到  $n$  值:

$$n = \frac{\log E_{c2} - \log E_{c1}}{\log I_{c2} - \log I_{c1}} \quad (11)$$

6个样品的  $n$  值如表1所示。 $n$  值是反映带材均匀性的参数,反映了钉扎中心的分布,对交流损耗有明显的影晌(见3.2节)。

对样品基体的电阻率测量结果如图4所示。从图4可以得到 Ag-Sb 的电阻,然后由电阻  $R$  的大小,并利用公式  $R = \rho_m L / S$  得到 Ag-Sb 的电阻率  $\rho_m$ 。

用相同的方法得到 Ag、Ag-Mg-Ni 和 Ag-Au 的电阻率。4 个合金的电阻率如表 2 所示。

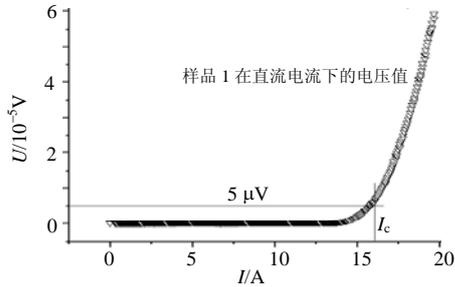


图 3 在 77 K 下，样品 1 临界电流的测量结果  
Fig. 3 Experimental result of the critical current of sample 1 at 77 K

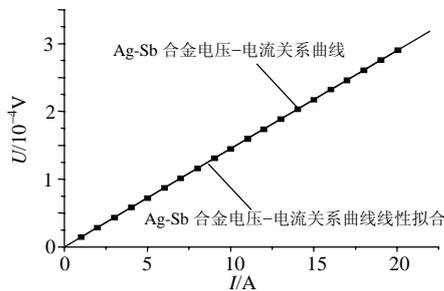


图 4 Ag-Sb 合金基体材料两端电压与电流的关系  
Fig. 4 Voltage of Ag-Sb alloy matrix materials as a function of current

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

样品合金基体名称	电阻率/(10 <sup>-8</sup> Ω·m)	有效电阻率/(10 <sup>-8</sup> Ω·m)
Ag	0.27	0.078
Ag-Mg-Ni	0.62	0.179 8
Ag-Au	5.04	1.461 6
Ag-Sb	8.57	2.485 3

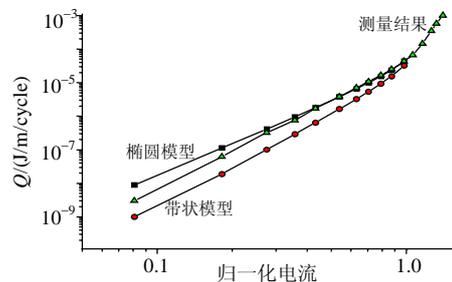
影响带材损耗的参数为基体的有效电阻率  $\rho_e$ ，它由基体材料电阻率  $\rho_m$  和芯线区域的超导成份  $\eta$  决定，如式(12)、(13)所示。这里有 2 种情况，第 1 种情况发生在当超导芯线的表面镀有电阻层时，有效电阻率  $\rho_e$  由式(13)计算得出。可以看出，基体的有效电阻率较大，对减少耦合时间常数是很有利的，可以减少耦合损耗。第 2 种情况是，当芯线和周围基体有良好电接触时，基体的有效电阻率  $\rho_e$  由式(12)给出。这种情况发生在当超导芯线和基体之间没有电阻层的情况下，可以看出，这时基体的有效电阻率较小。笔者研究的几个超导样品属于第 2 种情况，在超导芯线和基体之间没有电阻层，但是由于选择了合金电阻率  $\rho_m$  大的材料，所以基体有效电阻率  $\rho_e$  也可以被有效的增大。所以从表 2 中可以看到合金基体有效电阻率  $\rho_e$  远大于纯银基体的电阻率。

$$\rho_e = \rho_m(1 - \eta)/(1 + \eta) \quad (12)$$

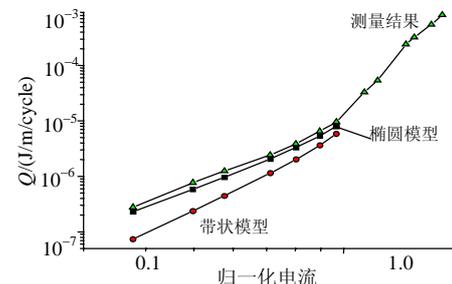
$$\rho_e = \rho_m(1 + \eta)/(1 - \eta) \quad (13)$$

### 3.2 交流传输损耗与临界电流、基体有效电阻率和 n 值关系

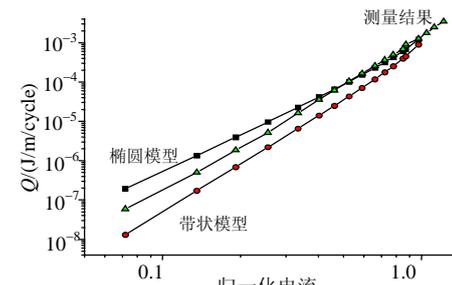
在 77 K 下，对带材在 45 Hz 下的交流传输损耗进行了测量，测量结果如图 5 所示。图中采用了交流传输损耗  $Q$  和归一化电流  $i = I_m / I_c$  作为坐标的纵轴和横轴。所测量的交流传输损耗位于 Norris 椭圆模型和带状模型计算的结果之间或附近，并靠近 Norris 椭圆模型。关于这一点可以从图 1 Bi-2223 带截面图的形状来理解。从图 1 可以看出，样品截面的形状接近于椭圆，所以样品测量结果靠近 Norris 椭圆模型。



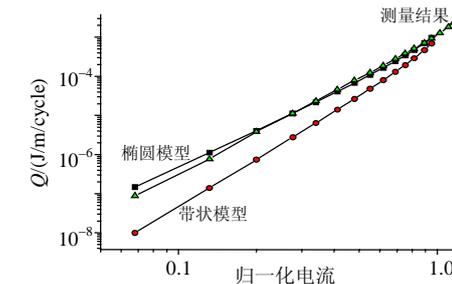
(a) 样品 1,  $I_c=16$  A



(b) 样品 2,  $I_c=7.2$  A



(c) 样品 3,  $I_c=87$  A



(d) 样品 4,  $I_c=83$  A

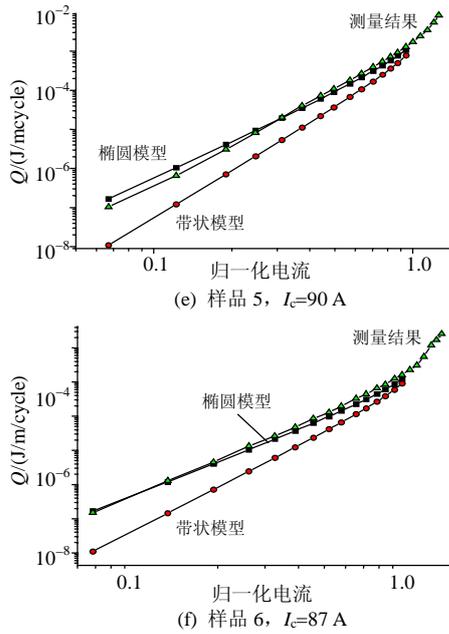


图5 在  $T=77\text{ K}$ ,  $f=45\text{ Hz}$  下, 测量的交流传输损耗  
Fig. 5 AC transport loss measured at  $T=77\text{ K}$  and  $f=45\text{ Hz}$

为比较6个样品的损耗大小, 将图5中所测6个样品的交流传输损耗集中示于图6。从图6可以观察到, 在相同的  $I_m$  时, 样品1和2的交流传输损耗较大。关于这一点可以理解如下: 样品的截面接近于椭圆, 在电流小于临界电流时, 利用式(4)来分析样品的磁滞损耗。从式(4)可以知道, 当传输电流一定时, 在单位长度上每周的磁滞损耗和临界电流平方成反比, 样品1和2的临界电流较小, 分别为16和7.2 A, 而样品3~6的临界电流分别是87、83、90和87 A。所以, 在相同电流下, 样品1和2的磁滞损耗较大。同时, 注意到样品1和2的  $n$  值较小, 由此引起的附加损耗较大。由于内部基体材料采用了Ag-Sb合金, 它的电阻率最大, 由式(6)可以知道, 样品1和2内部基体中每个循环的涡流损耗最小, 但通过计算分析可以知道, 在运行电流小于临界电流时, 传输损耗由磁滞损耗、涡流损耗和附加损耗形成, 磁滞损耗是主要成分, 因此样品1和2的交流传输损耗最大。

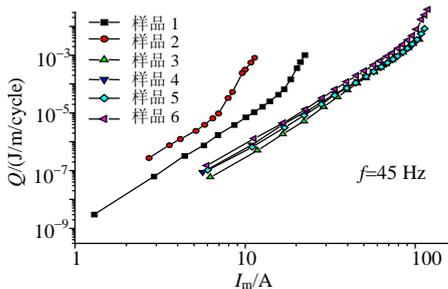


图6 样品1~6的交流传输损耗的比较  
Fig. 6 Comparison of AC transport losses of samples 1~6

样品3~6的临界电流相差不大, 其中样品6损耗最大。为了更具体的比较几个样品的交流传输损耗, 表3给出从20~80 A 电流下各样品的交流损耗。

表3 45 Hz 下, 不同传输电流下4个样品交流传输损耗的比较

Tab. 3 Comparison of AC transport losses of four samples for different transport currents at 45 Hz  $J/m$

$I_m/A$	样品3 损耗	样品4 损耗	样品5 损耗	样品6 损耗
20	$3.54 \times 10^{-6}$	$7.18 \times 10^{-6}$	$5.50 \times 10^{-6}$	$8.49 \times 10^{-6}$
30	$1.86 \times 10^{-5}$	$2.93 \times 10^{-5}$	$2.58 \times 10^{-5}$	$4.05 \times 10^{-5}$
40	$6.07 \times 10^{-5}$	$8.13 \times 10^{-5}$	$7.43 \times 10^{-5}$	$1.24 \times 10^{-4}$
50	$1.49 \times 10^{-4}$	$1.73 \times 10^{-4}$	$1.62 \times 10^{-4}$	$2.77 \times 10^{-4}$
60	$3.05 \times 10^{-4}$	$3.31 \times 10^{-4}$	$3.24 \times 10^{-4}$	$5.48 \times 10^{-4}$
70	$5.61 \times 10^{-4}$	$5.86 \times 10^{-4}$	$5.85 \times 10^{-4}$	$9.99 \times 10^{-4}$
80	$1.07 \times 10^{-3}$	$9.83 \times 10^{-4}$	$9.89 \times 10^{-4}$	$1.74 \times 10^{-3}$

由表3可见, 在电流幅值  $I_m$  较小(20 A)、中等(50 A)和较大(80 A, 该值接近临界电流)情况下, 对样品3~6进行比较如下: 在  $I_m=20\text{ A}$  时, 和样品6比较, 样品3~5的交流传输损耗分别下降58.3%、15.4%和35.2%; 在  $I_m=50\text{ A}$  时, 和样品6比较, 样品3~5的交流传输损耗分别下降46.2%、37.5%和41.5%; 在  $I_m=80\text{ A}$  时, 和样品6比较, 样品3~5的交流传输损耗分别下降38.5%、43.5%和43.2%。以上分析可以看出, 除个别点外, 在相同的电流下, 样品3损耗最小, 样品6损耗最大, 且样品6交流传输损耗明显高于样品3~5。和样品6比较, 样品3~5的交流传输损耗减小的百分比在15%~60%之间。可见, 在内部芯线区域具有合金基体的样品3~5与内部芯线区域是银的样品6进行比较, 明显降低了交流传输损耗。

关于这一点, 可以从6个样品具有不同的内外基体材料来进行分析, 样品6的内管为银, 样品3~5的内管为合金, 这里内外基体合金材料有AgSb合金、AgMgNi合金和AgAu合金。AgMgNi合金的电阻率比纯Ag大2倍。AgAu和AgSb合金的电阻率比纯Ag大10倍以上, 大的电阻率减小了芯线之间的耦合, 有效减小了涡流损耗。耦合损耗时间常数  $\tau$  可以由  $\tau \propto (1 - N_z)l^2 / \rho_e$  得到。其中,  $l$  为样品长度;  $N_z$  为芯线区域的退磁系数;  $\rho_e$  为基体的有效电阻率。对6个样品而言,  $N_z$  几乎相同, 样品6的  $\rho_e$  小, 耦合损耗时间常数  $\tau$  会较高, 强的耦合会把多芯带材耦合成单芯带, 由此会增大带材的磁滞损耗。因此, 样品6的磁滞损耗将大于样品3~5的磁滞损耗。样品6的  $\rho_e$  小, 由式(6)得到的基体中每个周期的涡流损耗将较大。由于样品6的  $n$  值为25, 处于平均值,

引起的附加损耗不大。在电流幅值小于临界电流时, 样品 6 具有的较高的涡流损耗和磁滞损耗会使样品 6 具有较高总损耗。通过分析可以知道, 6 个样品内外基体选择不同材料, 必然在内外基体材料之间、内部基体材料和超导材料之间的接触面上出现应力, 会对超导带电性能带来很大影响<sup>[15-18]</sup>, 从而必然对损耗带来影响。所以, 不同基体材料带材之间损耗的差异, 一部分来自基体之间的电阻率的不同, 另一部分来自于不同材料之间应力的不同。在下一步研究中, 笔者将对应力对损耗的影响进行深入研究, 深入探索 6 号样品的损耗较高的原因。

样品 3 的交流损耗最小, 而样品 4 和 5 的内部芯线也和样品 3 一样, 采用了 AgAu 合金, 它的损耗却比样品 3 的交流传输损耗大。这可以从它们外管材料的不同来分析, 由于样品 3、4 和 5 的临界电流比较接近, 从式(4)可以知道其磁滞损耗接近。样品 4 和 5 的内部芯线也和样品 3 一样是 AgAu 合金, 涡流损耗也基本相同。它们损耗的不同可以从带材的机械性能来分析。为了研究带材机械性能对损耗的影响, 测量出不同材料结合时所产生的抗拉强度, 测量结果如图 7 所示。

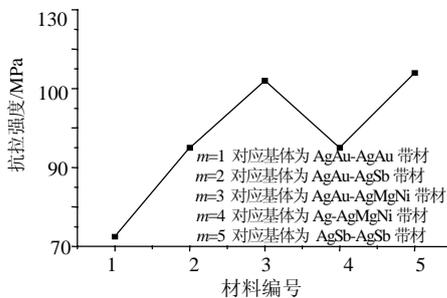


图 7 室温下各种铠装的BSCCO带的抗拉强度的测量结果  
Fig. 7 Tensile stress of variably sheathed BSCCO tapes measured at room temperature

从图 7 可知, 样品 3 内外的材料分别是 AgMgNi 和 AgAu, 它们形成的带抗拉强度为 112 Mpa, 样品 4 内外的材料分别是 AgAu 和 AgAu, 它们形成的带抗拉强度为 72.5 MPa, 样品 5 内外的材料分别是 AgAu 和 AgSb 合金, 它们形成的带的抗拉强度为 95 MPa。由此可见, 样品 3 的带抗拉强度高, 在带的轧制中可以更有效的保护芯线, 所以这样得到的样品 3 带的均匀性好, 这也解释了样品 3 对应  $n$  值的测量值高的原因, 如表 1 所示。高的  $n$  值对应超导材料的均匀性好, 对应不均匀性而产生的附加损耗较小, 关于这一点解释如下: 已有研究得出, 在  $I_0 < I_c$  条

件下产生不利的磁流通电阻<sup>[19]</sup>。因此, 低的  $n$  值趋于增加交流传输损耗。可以理解为由于在超导体内存在热激发磁通蠕动, 电流和电场的关系为  $E(J) = E_c (J^{n-1} / J_c^n) J$ 。式中:  $E(J)$  为电场强度;  $J$  为电流密度;  $J_c$  为临界电流密度;  $E_c = 1 \mu \text{V/cm}$  为临界电流的判据。在正弦交变电流  $I(t) = I_0 \sin \omega t$  下有附加损耗  $P$  增加到总损耗中<sup>[20]</sup>:

$$P = \int_0^{2\pi/\omega} E[I(t)]I(t)dt = E_c I_m i^n \cdot \int_0^{2\pi/\omega} \sin^{n+1} \omega t dt = E_c I_m f(i)g(n) \quad (14)$$

式中:  $i = I_m / I_c$ ;  $f(i) = i^n$ ;  $g(n) = \int_0^{2\pi/\omega} \sin^{n+1} \omega t dt$ 。

假设  $I_m$  不变而  $n$  值增加,  $f(i)$  和  $g(n)$  将随  $n$  值增加而减小。因此损耗功率  $P$  随  $n$  值增加而减小。样品 3 的  $n$  值为 29, 样品 4 和 5 的  $n$  值分别为 22 和 21, 因此, 样品 3 的  $n$  值较大, 损耗较小, 样品 4 和 5 的  $n$  值较小损耗较大。综合样品 3~5 的磁滞损耗、涡流损耗和不同  $n$  值引起的附加损耗(这 3 种损耗之和形成了交流传输损耗), 可以得到样品 3 的交流传输损耗最小。

## 4 结论

(1) 提高临界电流可以减少交流传输损耗。样品 1 和 2 的临界电流较小, 同样品 3、4、5 和 6 的比较发现, 在相同的运行电流下, 样品 1 和 2 的交流损耗较大。

(2) 增加基体的电阻率, 减小芯线之间的耦合, 可以减少损耗。样品 3、4、5 采用了合金基体, 损耗比样品 6 小。同时, 选择不同的合金基体材料, 会改变带的机械性能, 从而对损耗产生很大影响, 该项研究仍然需要深入研究。

(3) 提高内、外合金基体材料的抗拉强度, 从而提高超导材料的  $n$  值, 减小交流传输损耗。特别是样品 3, 内部采用了 AgAu, 外部采用了机械强度大的 AgMgNi 合金, 利用外包套好的机械性能, 保护带材, 使之有较大的  $n$  值, 从而具有较小的交流传输损耗。总之通过采用合金基体可以减少损耗, 是减少交流传输损耗的有效方法之一, 但是要进一步减少交流损耗, 还必须配合其它方法, 使损耗可以更大幅度地降低。

## 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(in Chinese).
- [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 applications in electric power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(7): 1-8(in Chinese).
- [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 designment [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 135-139(in Chinese).
- [4] Majoros 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.
- [5] Glowacki B A, Majoros M. A method for decreasing transport ac losses in multifilamentary and multistrip superconductors[J]. Superconductor Science Technology, 2000, 13(7): 971-973.
- [6] Zhang P X, Inada R Kuno, Oota A, et al. Reduction in alternating-current transport losses of a  $(\text{Bi}, \text{Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  multifilamentary tape-form conductor by introduction of resistive barriers[J]. Superconductor Science Technology, 2000, 13(10): 1505-1508.
- [7] Maeda H, Inaba T, Sato M, et al. Critical current density and ac losses of Ag-sheathed Bi 2223 tapes with Sr-V-O barriers[J]. Physica C, 2001, 357-360(2): 1230-1233.
- [8] Flesher S, Cronis L T, Conway GE, et al. Measurement of the ac Power loss of  $(\text{Bi}, \text{Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  Composite tapes using the transport technique [J]. Applied Physics Letters, 1995, 67(21): 3189-3191.
- [9] Darmann F, Zhao R, Caughey G M, et al. AC losses of filamentary HTS twisted filament round wires and flat tapes[J]. IEEE Transaction on Applied Superconductivity, 1999, 9(2): 789-793.
- [10] Friend C M, Huang Y B. Self-field ac losses of twisted multifilamentary  $(\text{Bi}, \text{Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}/\text{AgAu}$  tapes[J]. Applied Physics Letters, 2000, 76(26): 3983-3985.
- [11] Muller K H, Lesile K W. Self-field AC loss of Bi-2223 superconducting tapes[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 1997, 7(2): 306-309.
- [12] Norris W T. Calculation of hysteresis losses in hard superconductors carrying ac: isolated conductors and edges of thin sheets[J]. Journal of Physics D Applied Physics, 1970, 3(2): 489-507.
- [13] Ishii H, Hirano S, Hara T, et al. The ac losses in  $(\text{Bi}, \text{Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  silver-sheathed superconducting wires[J]. Cryogenics, 1996, 36(9): 697-703.
- [14] Gen Nishijima, Takashi Ogura, Tetsuji Okamura, et al. Flux flow state in  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  FILms on Ag tapes[J]. Fifteenth International Conference on Magnet Technology, Beijing, China, 1997.
- [15] Savvides N, Herrmann J, Reilly D, et al. Effect of strain on ac power loss of Bi-2223/Ag superconducting tapes[J]. Physica C, 1998, 306(1): 129-135.
- [16] Eckelmann H, Quilitz M, Oomen M, et al. AC losses in multifilamentary Bi\_2223/tapes with an interfilamentary resistive carbonate barrier[J]. Physica C, 1998, (310): 122-126.
- [17] Navarro R. Silver alloys used in composite BSCCO tapes : development of electrical and mechanical properties during manufacture[J]. Superconductor Science Technology, 2000, 13(2): 147-170.
- [18] Osamura K, Sugano M, Wada T, et al. Mechanical properties of Ag/Bi2223 composite superconductor [J]. Adv. Cryog. Eng. Mater, 2000, 46(1): 639-645.
- [19] Lshizuka M, Tanaka Y, Maeda H. Magnetic field and temperature dependence of critical current density in Hf-doped Bi-2223/Ag-Cu alloy sheathed tapes[J]. Physica C, 2000, 329(4): 258-266.
- [20] Oomen M P. AC losses in superconducting tapes and cables [D]. Netherlands: University of Twente, 2000.



方进

收稿日期: 2007-12-28。

作者简介:

方进(1963—), 男, 副教授, 博士, 参加了国家科技部 863 超导电缆研制的项目, 主要研究方向为超导磁体、超导电缆、超导电机、超导限流器及超导磁悬浮装置的设计、制作与研究, 同时进行超导材料制作及对超导材料的电性能进行理论和实验研究, fangseer@sina.com;

丘明(1968—), 男, 副研究员, 博士, 参加了国家科技部 863 超导电缆研制的项目, 主要研究方向为超导电机、超导磁悬浮系统及高温超导带材设计、制作与研究, 同时对超导电缆、超导电机和超导带材的电性能进行理论和实验研究。

(责任编辑 王剑乔)