

# Bi2223/Ag 带双饼线圈失超电压耦合补偿测试

张京业 陈敬林 许爱霞  
张勇 陈治友 王福堂 丁立人 高秉钧

(中国科学院等离子体物理研究所强磁场实验室 合肥 230031)

**摘要** 为排除双饼线圈两端的自感电压对其失超信号的影响, 把它降低到测量所允许的范围内, 本文介绍双饼线圈外加补偿线圈的耦合测试原理和在此基础上制成的  $I_c$  测试装置。分别对研制的 9 个高温超导双饼线圈的  $I_c$  进行测试, 获得非常好的实验结果, 为将 9 个双饼线圈组合成磁体提供了依据。

**主题词** Bi2223/Ag HTS 双饼线圈 补偿线圈 耦合测试 电压测量

## 1 引言

载流超导体中的电场通常表示为:  $E = E_C(I_t/I_C)^n$ , 式中  $E_C$  为临界电场, 是  $I_t$  达到临界电流时的值, 实用中通常取  $E_C = 1 \mu\text{V}/\text{cm}$ ;  $n$  为指数, 报道的 Bi2223/Ag 带的  $n$  值在 8~16 之间。这表明 Bi2223/Ag 带并非完全超导体, 在  $I_t < I_C$  时, 导体中即已存在损耗。因此, 根据导体的耗散机制, 长度为  $l$ 、载电流  $I_t$  的超导体, 其电阻损耗电压为:  $V = l E_C(I_t/I_C)^n$ 。  $V-I_t$  曲线称为超导体的伏安特性曲线, 它的测量在确定超导临界电流  $I_C$  和研究超导特性中处于显著重要地位。超导线圈在励磁过程(图 1), 线圈两端的电压  $U_{AB}$  可表示为

$$U_{AB} = V + L \frac{dI}{dt} + V_r \quad (1)$$

式中  $V$  为电阻耗散电压, 电流从  $0 \rightarrow I_C$  时, 该电压从  $0 \rightarrow V_C$ ;  $LdI/dt$  为线圈升流过程的自感电压;  $V_r$  为各种随机电磁、热过程产生的偏移电压。

测定超导线圈的  $V-I$  特性, 首要的是用电路方法从  $U_{AB}$  中消去  $LdI/dt$ 。线圈升流过程中,  $LdI/dt$  通常远高于  $V$ , 特别是  $LdI/dt$  随时间变化不定的情况下, 不能用简单的方法从  $U_{AB}$  的测量结果中消去  $LdI/dt$ 。消除  $V_r$ , 针对其产生

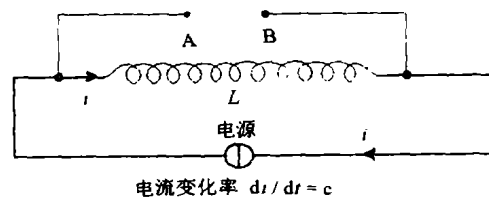


图1 双饼线圈直接励磁电路

的特殊条件,有的需要消除和限制其产生的源,有的可对结果进行修正,消除其影响。

本文介绍 Bi2223/Ag 双饼 HTS 线圈(内径 70 mm, 外径 150 mm, 匝数 360)的  $V-I$  特性测试中,外加补偿线圈消除自感电压的方法和结果。

## 2 耦合补偿测试原理

自感系数为  $L_1$ ,  $L_2$  的两个线圈间的互感系数为  $M$ , 线圈中的电流分别  $i_1$ ,  $i_2$ , 则两个耦合线圈中的磁通链分别为

$$\Psi_1 = L_1 i_1 \pm M i_2 \quad (2)$$

$$\Psi_2 = L_2 i_2 \pm M i_1 \quad (3)$$

“+”表示电流从耦合线圈的同名端流入,“-”表示电流从耦合线圈的异名端流入。每个耦合线圈两端的感应电压分别为

$$u_1 = d\Psi_1/dt = L_1 \frac{di_1}{dt} \pm M \frac{di_2}{dt} \quad (4)$$

$$u_2 = d\Psi_2/dt = L_2 \frac{di_2}{dt} \pm M \frac{di_1}{dt} \quad (5)$$

若励磁电流由耦合线圈的同名端流入并令  $i_2$  恒为 0, 则有:

$$u_1 = d\Psi_1/dt = L_1 \frac{di_1}{dt} \quad (6)$$

$$u_2 = d\Psi_2/dt = M \frac{di_1}{dt} \quad (7)$$

若把耦合线圈的同名端短接(如图 2 所示), 则另一端两线圈之间的电压为

$$u_{AB} = u_1 - u_2 = (L_1 - M) \frac{di_1}{dt} \quad (8)$$

在图 2 中若  $L_1$  为高温超导双饼线圈, 电流为  $i_1$ ,  $L_2$  为外加补偿耦合线圈, 根据式 (8) 可知, 在  $L_1$  与  $M$  相等时, A, B 间的耦合电压为 0, 这样可以消除双饼线圈的感应电压对其失超电压信号的干扰。在实际操作中很难做到  $L_1$  与  $M$  完全相等, 但可以使

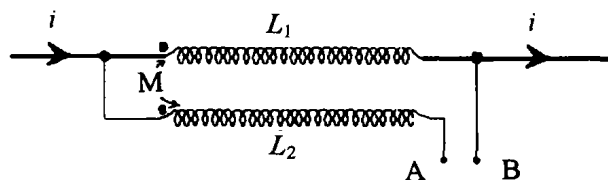


图 2 同名端短接耦合消减电路示意图

二者很接近, 这样可以把 A, B 间的感应电压减小到在现有励磁电源的励磁速率下比线圈失超电压小一个量级的范围内, 以满足测量双饼线圈失超电压信号的要求。

## 3 实验装置

由以上的论述可以得出, 双饼线圈外加补偿线圈的耦合测试法, 关键是使补偿线圈与双饼线圈间的互感  $M$  与双饼线圈自感  $L_1$  尽量接近, 两者之差的绝对值越小越好。因为  $M$  与  $L_1$ ,  $L_2$  之间满足:

$$M = k \sqrt{L_1 L_2} \quad (0 < k \leq 1) \quad (9)$$

其中  $k$  为耦合系数, 它的大小与耦合线圈的形状、大小、匝数以及相对位置有关。在  $k$  等

于1时称为无漏磁,若 $L_1$ 与 $L_2$ 相等,则 $M$ 与 $L_1$ 相等,这种情况只有超导线圈与补偿线圈两线平行并绕,两线圈完全耦合时才能实现。外加补偿线圈是部分耦合, $k$ 值小于1。为了达到 $M$ 接近于 $L_1$ 的目的,可以通过调节 $k$ 与 $L_2$ 的值来实现。

从增大 $L_2$ 的角度考虑,因为补偿线圈中的电流为0,所以它可以用较细的铜漆包线绕制,很容易把补偿线圈的 $L_2$ 值做的比双饼线圈的 $L_1$ 值大。因为各双饼线圈的参数有差异(如表2所示),所以要在 $L_2$ 一定的条件下保证 $k$ 值在一定范围内可调,以保证在每个双饼线圈的测试时, $M$ 值都接近于 $L_1$ 。这样根据式(8),在电流变化率一定的情况下,A,B间感应电压可以降低到允许的范围内。

为满足 $k$ 在较大范围内变化,补偿线圈的形状、结构要合理。补偿线圈做好后,其形状、自感系数等不可改变,可以通过调节两线圈的相对位置来改变 $M$ 值的大小。充分考虑到以上因素,补偿线圈的平均半径与双饼线圈的平均半径相等,其长度不宜太大;补偿线圈用直径为0.2 mm的铜漆包线绕制,它与双饼线圈的参数如表1所示。

由表1可得:

$$\sqrt{L_1 L_2} = 0.0492 H \approx 3L_1$$

所以 $k$ 值的调节范围很宽。

耦合线圈系统装置如图3所示,通过耦合线圈间距调节螺杆,调节两线圈间距 $d$ 来调节两线圈间的耦合系数 $M$ ,使A,B间的耦合感应电压减小到测试允许的范围内。

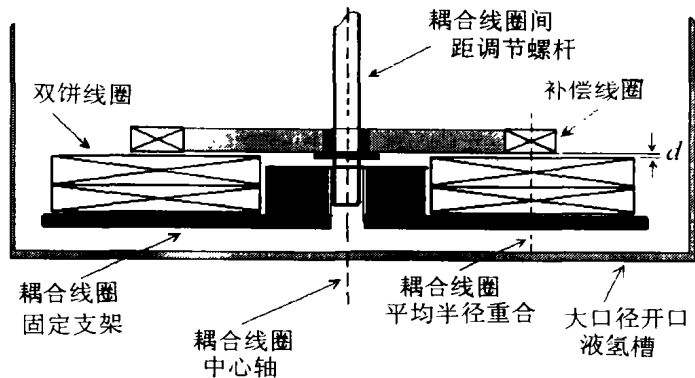


图3 双饼线圈外加补偿耦合线圈实验系统安装示意图

表1 补偿线圈与双饼线圈的参数对比

	$R_i/\text{mm}$	$R_o/\text{mm}$	$(R_i + R_o)/2$	$H/\text{mm}$	匝数	$L/H$
双饼线圈	35	75	110	9.0	360	0.015
补偿线圈	50	60	110	5.0	900	0.1614

注:表中双饼线圈的参数是9个双饼参数的平均值

采用该装置,在实验过程不用把耦合线圈从液氮中取出就可以通过调节螺杆很方便地进行调节。所以装置不仅方便还可以使耦合精度提高,便于准确测试双饼线圈的失超信号。

除图3所示的装置外,实验系统还需要的主要仪器有4V/100A稳流源、100A/75mV电流分流器、XY函数记录仪、失超保护电阻等。双饼线圈外加补偿线圈的耦合测试法的实验电路如图4所示。

#### 4 测试结果

9个Bi2223/Ag带高温超导双饼线圈的具体参数如表2所示,采用以上所建立的实验系

统分别对它们的性能进行了测试。失超判据采用  $E_c = 1 \mu\text{V}/\text{cm}$ ，图 5 是 1# 双饼线圈在三个较小励磁速率下的实验曲线。1# 双饼线圈所用超导带总长  $L$  为 120.2 m，那么它的失超电压  $U_c$  为 12.02 mV。令耦合感应电压为  $U_L$ ，它等于实验曲线上水平段的电压值。测试电压为  $U$ ，则  $U_c = U - U_L = E_c L$ 。由图 5 可以看出，耦合感应电压  $U_L$  小于 0.5 mV，比双饼线圈失超电压小 2 个量级，并且  $I$ - $V$  曲线光滑而平稳。可见双饼线圈外加补偿线圈耦合测试法成功地把双饼线圈的自感电压减小到测量允许范围内，并且各种随机电磁、热过程的偏移电压  $V_r$  得到了有效消除。

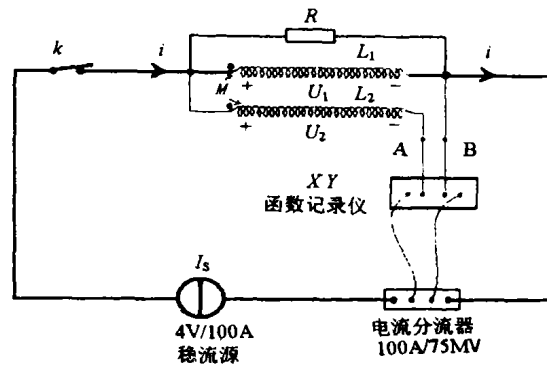


图 4 双饼线圈外加补偿线圈耦合测试电路示意图

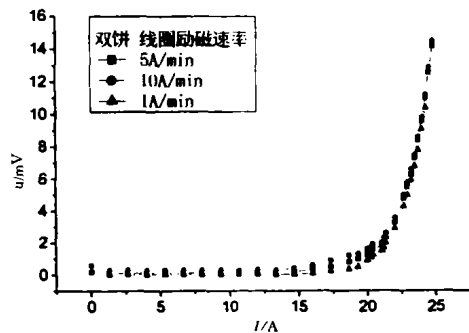


图 5 77 K 时 1# 双饼线圈用外加补偿线圈耦合测试法测得的  $I$ - $V$  曲线

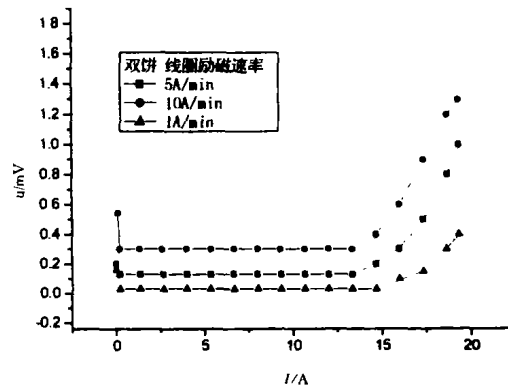


图 6 1# 双饼外加补偿线圈耦合测试法耦合效果曲线

图 6 是对图 5 中电压的放大，显示了不完全补偿的情况。根据式 (8) 耦合感应电压与电流变化率呈正比，图 6 的三条曲线很好地符合这一规律。图 7 给出了 1#，5#，6# 双饼线圈在励磁速率为 10 A/min 时的  $I$ - $V$  曲线，由表 2 得它们的失超电压分别为 12.02，12.91，12.95 mV，耦合感应电压均不大于 0.5 mV。图 8 是图 7 电压的放大，由它可以得出这三个双饼线圈在同一励磁速率下的耦合感应电压大小不等，说明它们与补偿线圈间的耦合程度有差异。

调节双饼线圈和补偿线圈的耦合程度，可以降低耦合感应电压，特别是以很大的励磁速率励磁时，在测试前应反复试调  $d$  的大小，直到满足测试要求为止。

利用上述测试和分析方法，我们成功地测试了 9 个高温超导双饼线圈的临界电流值 (见表 2)，为磁体的组装提供了依据。磁体安装时，将根据  $I_c$  测量结果，选择各个双饼正确的安装位置，使磁体达到最好性能。

表2 Bi2223/Ag带双饼线圈参数以及测试结果

序号	$R_i/mm$	$R_o/mm^*$	$H/mm$	匝数 <sup>*</sup>	带长/m <sup>*</sup>	$L \times 10^{-2}$	$I_c/A$
1 <sup>#</sup>	35	75.3	9.8	347	120.2	1.426	24.5
2 <sup>#</sup>	35	75.3	9.7	348	120.5	1.436	23.7
3 <sup>#</sup>	35	73.4	8.4	360	122.9	1.533	16.5
4 <sup>#</sup>	35	73.9	8.3	375	128.3	1.690	16.9
5 <sup>#</sup>	35	74	8.4	377	129.1	1.706	19.0
6 <sup>#</sup>	35	73.8	8.5	379	129.5	1.722	18.9
7 <sup>#</sup>	35	72.8	8.3	358	121.2	1.536	18.4
8 <sup>#</sup>	35	76.5	9.7	348	121.9	1.443	24.9
9 <sup>#</sup>	35	77.5	9.8	353	124.8	1.488	25.3

\*注: 因双饼线圈中的两个单饼匝数有差异, 双饼外半径为每个双饼中两个单饼外半径的平均值; 1<sup>#</sup>, 2<sup>#</sup>, 8<sup>#</sup>, 9<sup>#</sup>双饼用宽带绕制, 其余5个用窄带绕制。

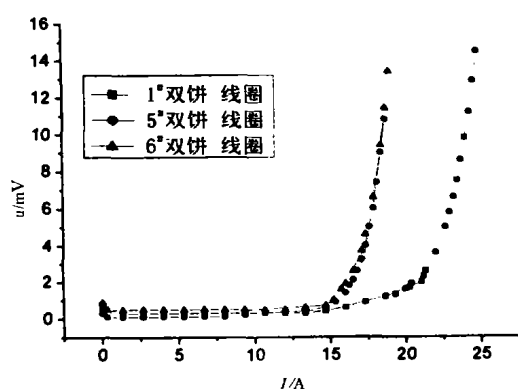


图7 1<sup>#</sup>, 5<sup>#</sup>, 6<sup>#</sup>双饼线圈耦合测试  
I-V曲线 (励磁速率均为 10 A/min)

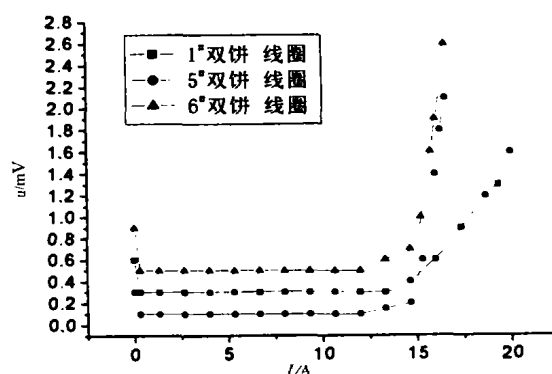


图8 1<sup>#</sup>, 5<sup>#</sup>, 6<sup>#</sup>双饼线圈在励磁速率为 10 A/min 时的耦合感应电压曲线

## U<sub>C</sub> SURVEY OF THE BI2223/AG DOUBLE-PANCAKE

Zhang Jingye Chen Jinglin Xu Aixia Zhang Yong  
Chen Zhiyou Wang Futang Ding Liren Gao Bingjun

(High Magnetic Field Laboratory, Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

**ABSTRACT** For reducing the effect of the self-induced voltage of the double-pancake coil to a minimum value on its dissipation voltage measurement, the principles of the compensation circuit were introduced. A equipment for testing the  $I_c$  of the HTS coils was built. And the critical current of the nine pancakes were measured. The basis for combining the nine double-pancakes into a magnet was provided by the result.

**KEYWORDS** Bi2223/Ag tape; HTS double-pancake; compensation coil; coupling measurement; voltage measurement