

## HTS 磁体性能实验研究

张京业 陈敬林 许爱霞 张勇 陈治友 刘智民 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:系统介绍 HTS 实验磁体的液氮、液氦实验和固氮浸渍实验,获得 78.6~4.2K 不同温度下磁体的伏~安特性曲线和  $I_c \sim T$  曲线,在很宽的范围内研究了 HTS 实验磁体性能。

关键词:HTS 磁体 Bi2223/Ag 超导带 固氮浸渍 径向磁场 交流损耗

## 1 引言

按照小型 HTS 实验磁体的设计方案<sup>[1]</sup>,采用北京英纳超导公司生产的 Bi2223/Ag 超导带(5 根超导带的参数见表 1),绕制成功 9 个双饼线圈,并对他们的性能在液氮下进行了测试。按照各双饼线圈的性能测试结果和磁体的设计方案,完成了实验磁体的组装,各双饼线圈之间采用有阻焊接技术连接,磁体参数如下:

磁体内径(mm):70;磁体外径(mm):150.6(上),148(中),154(下);高(mm):84;匝数:3245;导体长度(m):1118;自感系数(H):0.68;运行温度(K):20;运行电流/20K(A):96.5;中心场  $B_0$  (T):2.94;最大场  $B_{max}$  (T):3.34;最大径向场  $B_{Rmax}$  (T):1.39;储能(kJ):3.17。

表 1 实验磁体所用 Bi2223/Ag 超导带的参数表  
( $I_c$  为短样 77K,自场下的测试值)

	临界电流(A)	尺寸(mm×mm)	长度(m)
1	48	3.77×0.19	260
2	46	3.78×0.19	260
3	47	3.65×0.19	260
4	63	4.39×0.23	250
5	63	4.34×0.23	250

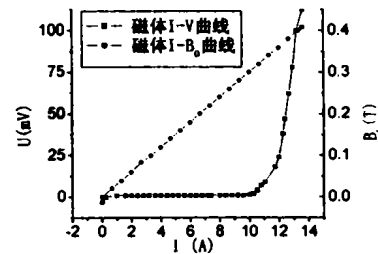


图 1 77.3K HTS 磁体的  $I-V$ 、 $I-B_0$  曲线

为测试磁体性能,验证 HTS 实验磁体的设计方法和绕制工艺的可行性,进行 HTS 实验磁体的性能实验,包括液氮浸泡实验、液氮浸泡实验和固氮浸渍实验。实验采用 Bi2223/Ag 带双饼线圈失超电压耦合补偿测试法<sup>[2]</sup>,有效消除感应电压和随机偏移电压对测试信号的影响,准确、方便的测得磁体两端以及磁体中各双饼线圈的失超电压。用该测试方法成功测试了磁体从 4.2K~78.6K 之间不同运行温度下磁体的伏-安特性曲线和  $I_c - T$  曲线等。

## 2 HTS 磁体低温实验

## 2.1 HTS 磁体液氮实验

有中间抽头的补偿线圈固定在 HTS 实验磁体内孔中,测中心场的霍尔固定在磁体中心。磁体系统置于  $\varnothing 200$  的实验杜瓦中,液氮浸没磁体,用耦合补偿测试法测试磁体和磁体中各双饼线圈的  $I-V$  曲线<sup>[2]</sup>,同时测磁体的  $I-B_0$  曲线(如图 1 所示)。在 77.3K、失超判据为  $1\mu\text{V}/\text{cm}$  时,磁体的  $I_c$  为 13.5A,中心磁场  $B_0$  为 0.41T,对应磁体常数  $k_0 = 0.03015\text{T}/\text{A}$ 。

测磁体中各双饼线圈两端电压  $V$  随磁体运行电流  $I$  的变化关系,得其  $I-V$  曲线。串联各双饼线圈的临界电流有较大差异,为避免损坏磁体,最大运行电流定为 16A(不能高出磁体的临界电流 13.5A 太多)。以

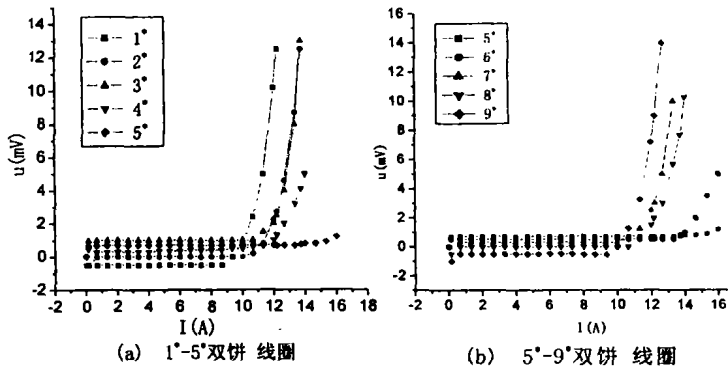


图 2 77K HTS 磁体中 5°-9° 双饼线圈的 I-V 曲线

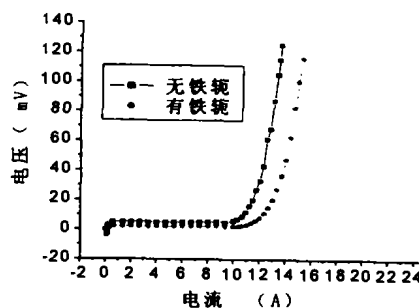


图 3 磁体两端加铁轭前后磁体的 I-V 曲线

10A/min 的速率励磁,依次测各双饼线圈的 I-V 曲线(如图 2 所示)。磁体中各双饼线圈的临界电流  $I_c'$  与组装前各自的临界电流  $I_{c0}$ 。见表 2。通过比较知,随磁体运行电流的增大,各双饼线圈失超的先后顺序以磁体的中平面成对称分布,磁体两端的双饼线圈临界电流下降幅度最大(50%以上),由两端到磁体中平面,双饼线圈临界电流的退化幅度逐渐减小,并以磁体中平面对称。所以,磁体中双饼线圈临界电流退化率沿磁体轴向的分布与磁体最大径向场的分布吻合<sup>[1]</sup>。这说明磁体中双饼线圈临界电流的退化是垂直于超导带面的径向场引起的。

表 2 77K HTS 磁体中各双饼线圈的  $I_c'$  与它们安装成磁体前各自  $I_c$  的对照表

双饼序号	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°
磁体中各双饼线圈的 $I_c'$ (A)	12.2	13.7	13.5	14	16	16	13.7	14.3	12.4
双饼线圈 $I_{c0}$ (A)	24.5	23.5	18.9	16.9	16.5	18.4	19	24.9	25.3
$I_c$ 下降(%)	50.2	41.7	28.6	—	—	—	27.9	42.6	51

表 3 77K 磁体两端有、无铁轭时各双饼线圈的  $I_c$

双饼线圈序号		1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	
磁体是否	无	$I_c$ (A)	12.2	13.7	13.5	14	16	16	13.7	14.3	12.4
	状态	失超	失超	失超	超导	超导	超导	失超	失超	失超	
有铁轭	有	$I_c$ (A)	14.9	15.7	15	15.9	16.3	16.7	14	15.5	14.5
	状态	失超	失超	失超	失超	失超	失超	失超	失超	失超	
$I_c$ 提高百分比(%)			22%	14.6%	11%	—	—	—	2.1%	8.4%	16.9%

在 HTS 磁体两端安装铁轭,改变径向场在磁体中的分布<sup>[3]</sup>,然后测磁体和各双饼线圈的临界电流。磁体加铁轭前后的 I-V 曲线如图 3 所示。加铁轭后磁体失超电流为 15.2A,提高了 1.7A(12.6%);两种情况下各双饼线圈的临界电流列于表 3。可见,磁体两端加铁轭后,各双饼线圈的临界电流有大提高,并且由两端到磁体中平面,各双饼线圈临界电流提高的百分比逐渐减小,使各双饼线圈的临界电流值间的差异大幅度减小,各双饼线圈的失超电流趋于一致。

实验证明,77K 时导致磁体失超的主导因素是径向磁场,通过 HTS 实验磁体两端的铁轭改变磁场分布,以减小垂直于超导带面的径向磁场,磁体的失超电流提高 12.6%。

### 2.2 HTS 磁体液氮浸泡实验

磁体的液氮浸泡实验方法同上,测磁体和各双饼线圈的 I-V 曲线、磁体  $I_{c,p} - B_0$  曲线及其快速励磁实

验。4.2K、励磁速率为 1A/s 时磁体的  $I-V$ 、 $I-B_0$  曲线如图 4 所示。在失超判据  $1\mu\text{V}/\text{cm}$  下磁体的失超电流为 106.7A, 约是 77.3K 磁体临界电流的 8 倍; 磁体中心场为 3.376T, 最大场  $B_{max}$  为 3.69T。

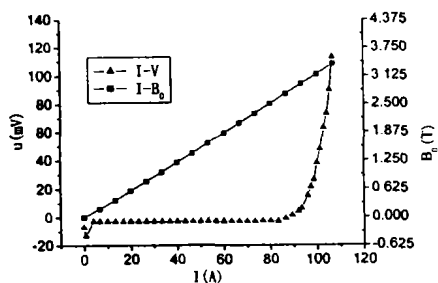


图 4 用磁体内置补偿线圈耦合测试法测试磁体的  $I-V$ 、 $I-B_0$  曲线

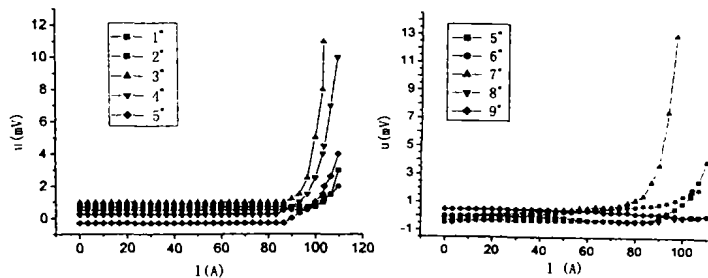


图 5 4.2K HTS 磁体中各双饼线圈的  $I-V$  曲线

图 5 给出了磁体中各双饼线圈的  $I-V$ 。为避免损坏磁体, 最大运行电流定为 110A。4.2K 和 77K 磁体中各双饼线圈的测试结果列于表 4 中。由测试结果知, 4.2K 磁体中最先失超的 3\*、7\* 两个窄带双饼线圈, 临界电流分别为 105A 和 96A; 处于最大径向场位置的 1\*、9\* 和 2\*、8\* 四个宽带双饼线圈在磁体运行电流增加到 110A 时, 还没有或刚开始出现失超转变区; 4\* 双饼线圈所处径向场很小, 但在运行电流为 110A 失超, 与它处于关于磁体中平行对称位置的 6\* 双饼线圈在 110A 才刚出现失超转变区; 在径向几乎为零处的 5\* 双饼线圈在 110A 时出现了失超转变区。

表 4 HTS 磁体中双饼线圈的失超顺序

磁体双饼序号	1*	2*	3*	4*	5*	6*	7*	8*	9*	
磁体中各双饼线圈的 $I_c$ (A)	液氮	12.2 失超	13.7 失超	13.5 失超	14 超导	16 超导	16 超导	13.7 失超	14.3 失超	12.4 失超
	液氮	110 超导	110 超导	105 失超	110 失超	110 超导	110 超导	96 失超	110 超导	110 超导
$I_c$ (A)(77K, 组装前)	24.5	23.5	18.9	16.9	16.5	18.4	19	24.9	25.3	

表 5 磁体励磁电流源参数表

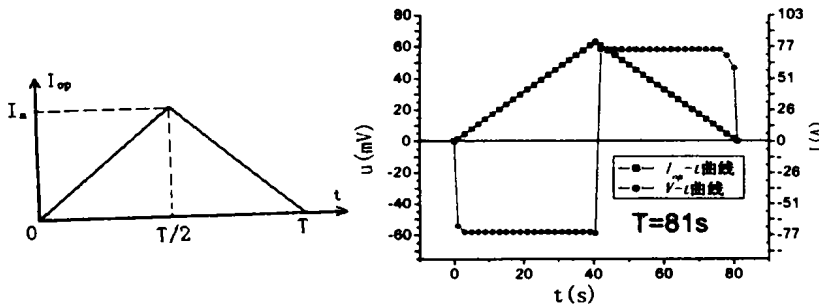
励磁序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$T$ (s)	81	80	40	40	22	20	12.6	10.8	7.8	5.1
$I_a$ (A)	81	85	85	88	91	88	85	82	83	82
$2I_a/T$ (A/s)	2	2.1	4.25	4.4	8.27	8.8	13.49	15.19	21.28	31.16

所以, 在 4.2K 时磁体中各双饼线圈的失超顺序与磁体中最大径向场的分布规律不同, 因为 Bi2223 超导带在 4.2K 的不可逆场高达 40T 以上, 磁体所产生的场远小于不可逆场, 临界电流对径向场的敏感程度下降, 导致磁体失超的主要因素在更大程度上取决于超导带的性能。

磁体的快速励磁实验是利用输出波形如图 6(a)所示的可控电流源进行的。励磁周期为  $T$ , 幅值为  $I_a$ , 电流变化率为:  $dI_{op}/dt = \pm 2I_a/T$ 。一个周期后切断电源, 待磁体完全冷却后进行下一次励磁。根据图 4, 完全没有出现转变区的运行电流为 80A, 故把励磁电流的幅值  $I_a$  定为 80A 左右。 $T$  从 81s 开始逐渐减小(见表 5), 至磁体产生显著焦耳热为止。在励磁过程中, 测磁体的  $I-t$ 、 $V-t$  曲线, 并观察杜瓦回气管壁的结霜情况。

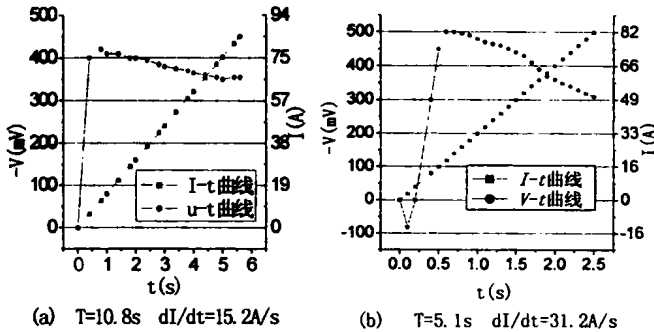
电流幅值  $I_a$  为 81A,  $T$  为 81s 时磁体的  $V-t$ 、 $I-t$  曲线见图 6(b)。可见, 在  $0 \sim T/2$  和  $T/2 \sim T$  的范围内, 磁体端压基本为常数, 主要是未完全补偿的感应电压, 在  $t = T/2$  时感应电压反向。

图 7 给出了  $0 \sim T/2$  内  $T$  分别为 10.8s 和 5.1s 时磁体的  $I \sim t$ 、 $-V \sim t$  曲线。由图可见, 随励磁速率的增大,  $-V \sim t$  曲线逐渐倾斜, 励磁速率越大, 倾斜角度越大; 且回气管壁结霜量随励磁速率的增大迅速增



(a) 磁体励磁电源的输出波形 (b) 励磁的  $I \sim t, V \sim t$  曲线

图 6 4.2K 磁体励磁的电源输出波形(a)和励磁周期为 81 秒时磁体两端的  $I \sim t, V \sim t$  曲线(b)



(a)  $T=10.8s$   $dI/dt=15.2A/s$  (b)  $T=5.1s$   $dI/dt=31.2A/s$

图 7 4.2K 励磁速率分别为 15.2A/s 和 31.2A/s 时,  $0 \sim T/2$  范围内磁体的  $I \sim t, -V \sim t$  曲线

$$\bar{P}(T) = Q_c + Q_h T^{-1} + bT^{-2} \tag{1}$$

设磁体损耗电压为  $V_q(t)$ , 则在一个励磁周期内, 磁体的平均损耗功率可表示为:

$$\bar{P}(T) = \frac{Q}{T} = \int_0^T V_q(t) I_{op}(t) dt \tag{2}$$

$V_q(t)$  可以从磁体的  $-V \sim t$  曲线中分离出来, 即:  $V_q(t) = V - L \cdot \frac{2I_a}{T}$ ,  $L$  为磁体未完全补偿电感。因此, 式(2)可用来计算磁体损耗。根据图 7(a) ( $T/2=5.4s$ ) 和(b) ( $T/2=2.5s$ ) 曲线的计算结果:  $T=10.8s$  时,  $Q=36.8J$ ,  $\bar{P}(T)=3.4W$ ;  $T=5.1s$  时,  $Q=114.3J$ ,  $\bar{P}(T)=22.4W$ 。

### 2.3 HTS 磁体固氮浸渍实验<sup>[5]</sup>

为获得 20~77K 的运行温度, 进行磁体的固氮浸渍实验, 在没有制冷机的情况下, 采用氮冷系统获得固态氮。磁体系统的温度~时间曲线如图 8 所示, 经过 30 小时磁体系统由 77.3K 冷却到 20K 的 G 点, 实现了实验所需温度。从 G 点开始让系统自然回温, 并进行磁体性能测试。经过 87 小时系统从 20K 回温到 78.6K (因液氮中混有部分液空导致液氮沸点升高)。在 20~78.6K 的不同温度测磁体  $I \sim V$  曲线(如图 9 所示), 进而获得从 4.2K~78.6K 磁体临界电流随温度的变化曲线  $I_c \sim T$  (见图 10)。由图 9 可以看出, 磁体的失超电流随温度的升高逐渐减小, 磁体的失超转变区也逐渐变窄。Bi2223/Ag 带导体  $E = E_0 (J/J_c)^n$  中的  $n$  指数在 80K 左右存在最大值, 随温度的降低逐渐减小<sup>[6]</sup>; 随磁场的增大,  $n$  指数减小<sup>[7]</sup>。所以随磁体运行温度的升高,  $n$  指数增大, 转变区逐渐变窄。

加, 说明 HTS 磁体系统产生的焦耳热逐渐增多。

在励磁过程中产生交流损耗, 包括磁滞损耗  $Q_h$ 、耦合损耗  $Q_c$  和涡流损耗  $Q_{ed}$  三部分。若幅值  $I_a$  恒定, 在所测频率范围内, 每个励磁周期的磁滞损耗为定值, 而  $Q_c$  和  $Q_{ed}$  与电流变化率成正比, 即  $Q_c + Q_{ed} = bf$  ( $b$  为常数)。此外, 励磁过程中载流导体还有静态损耗  $Q_h$ , 包括接头损耗和指数损耗。故励磁周期过程中产生的平均损耗功率  $\bar{P}(T)$  为<sup>[4]</sup>:

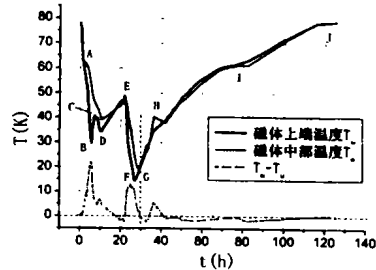
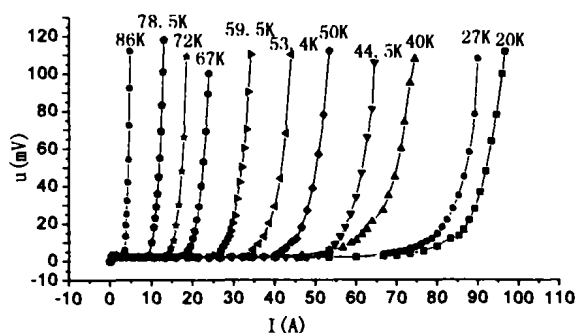
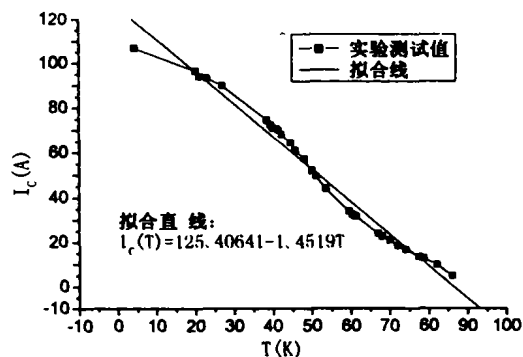


图 8 HTS 磁体系统的降、升温曲线

图 9 HTS 磁体在不同温度下的  $I - V$  曲线图 10 实验测试 HTS 磁体的  $I_c - T$  关系

### 3 总结

进行了 HTS 实验磁体的液氮实验、液氦实验和固氮浸渍实验,在很宽的温度范围内对磁体的性能进行测试,获得 78.6~4.2K 不同温度下的伏~安特性曲线和磁体电流对温度变化的  $I_c \sim T$  曲线,在 4.2K 进行了磁体的快速励磁实验,在 77.3K 和 4.2K 测试了磁体中各双饼线圈伏~安特性曲线,对导致磁体失超的主导因素进行了初步探讨。

### 参 考 文 献

- [1] 张京业,许爱霞,陈敬林. 低温物理学报, 2003, (2): 141-146
- [2] 张京业,陈敬林等. Bi2223/Ag 带双饼线圈失超电压耦合测试. 低温工程
- [3] Savvides N, et al. IEEE Trans. Appl. Supercond., 1999, (9): 2609-2612
- [4] Chris M Friend, et al. IEEE Trans. Appl. Supercond., 1999, (9): 1165-1168
- [5] 许爱霞,张京业等. 固氮冷却的 HTS 磁体, 第七届全国超导学术研讨会
- [6] Wang Zhengdao, et al. Cryogenics, 2000, 40: 681-683
- [7] Kumakura H, et al. Cryogenics, 1998, 38: 163-167

### Performance Experimental Studies of HTS Magnet

Zhang Jingye, Chen Jinglin, Xu Aixia, Zhang Yong, Chen Zhiyou, Liu Zhimin, Wang Futang, Ding Liren, Gao Bingjun  
(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, 230031)

**Abstract:** A HTS magnet with a central field of 2.9T at 20K wound with Bi2223/Ag tapes were studied experimentally in this paper. The experiments with the HTS magnet dipped in liquid nitrogen, in liquid helium and impregnated with solid nitrogen were carried out. The performances of the HTS magnet were studied in a wide range of temperatures with the  $V - I$  curves at different temperature from 4.2K to 78.6K and that of the critical currents of the magnet verses the operating temperatures.

**Keywords:** HTS magnet, Bi2223/Ag tape, Solid nitrogen impregnated, The max. radical magnet field, AC. losses

**作者简介:**张京业,男,1976年生。中国科学院等离子体物理研究所强磁场工程与技术专业硕士研究生。主要从事高温超导磁体技术等方面的研究。