

国产 MOCVD-YBCO 带材高温超导线圈研制与磁场温度特性研究

丁发柱 张京业 谭运飞 陈治友 董泽斌 张慧亮 商红静 许文娟 张贺 屈飞  
高召顺 周微微 古宏伟

Development of a 4 T (46 K) 100 mm high-temperature superconducting coil made of homemade MOCVD-YBCO coated conductors

Ding Fa-Zhu Zhang Jing-Ye Tan Yun-Fei Chen Zhi-You Dong Ze-Bin Zhang Hui-Liang Shang Hong-Jing Xu Wen-Juan Zhang He Qu Fei Gao Zhao-Shun Zhou Wei-Wei Gu Hong-Wei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 068401 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20171491

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20171491>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I6>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[1.5 T 关节磁共振成像超导磁体的设计、制作与测试](#)

Design, fabrication and test of superconducting magnet for 1.5 T dedicated extremity magnetic resonance imaging system

物理学报.2017, 66(24): 248401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.248401>

[插入二氧化铈薄膜提高 MOD-YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> 厚膜超导性能的研究](#)

Enhanced superconducting properties in MOD-YBCO thick films with CeO<sub>2</sub> interlayer

物理学报.2016, 65(9): 097401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.097401>

[25T 超导磁体优化中线圈数量影响分析](#)

Effects of different coil combinations on the optimal design of a 25 T superconducting magnet

物理学报.2016, 65(5): 058401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.058401>

[超导磁悬浮支承系统干扰力矩及漂移误差分析](#)

Analysis of magnetic disturbance torque and drift error in a superconducting suspension system

物理学报.2015, 64(1): 018403 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.018403>

# 国产MOCVD-YBCO带材高温超导线圈研制 与磁场温度特性研究\*

丁发柱<sup>1)2)3)</sup> 张京业<sup>1)2)</sup> 谭运飞<sup>4)</sup> 陈治友<sup>4)</sup> 董泽斌<sup>1)2)3)</sup>  
张慧亮<sup>1)2)3)</sup> 商红静<sup>1)2)3)</sup> 许文娟<sup>1)2)3)</sup> 张贺<sup>1)2)</sup> 屈飞<sup>1)2)</sup>  
高召顺<sup>1)2)</sup> 周微微<sup>1)2)</sup> 古宏伟<sup>1)2)3)†</sup>

1)(中国科学院电工研究所, 北京 100190)

2)(中国科学院应用超导重点实验室, 北京 100190)

3)(中国科学院大学, 北京 100049)

4)(中国科学院强磁场科学中心, 合肥 230031)

(2017年6月29日收到; 2018年1月4日收到修改稿)

超导磁体的场强与超导材料的载流能力、磁体口径和低温环境有密切关系. 为了在中高温区域实现高磁场强度的超导磁体, 采用国产第二代高温超导带材, 成功绕制出内直径为100 mm的高温超导线圈. 该超导线圈在77, 65, 55和46 K不同温区下进行了性能测试, 其最大运行电流分别为65, 147, 257和338 A, 对应的中心磁场强度分别为0.78, 1.77, 3.1和4.08 T. 所研制的超导线圈的中平面上磁场基本一致.

**关键词:** 高温超导磁体, 钇钡铜氧带材

**PACS:** 84.71.Ba, 74.78.Fk

**DOI:** 10.7498/aps.67.20171491

## 1 引言

基于零电阻和完全抗磁性的超导材料发展的超导磁体与常规磁体相比具有磁场强度高、损耗小、重量轻、体积紧凑等优点. 随着超导磁体技术的发展, 超导磁体在医疗器械、大科学工程、能源和交通运输、电力工业和国防领域等方面获得了广泛的应用. 目前, 在某些大型应用场合如高能加速器、高能粒子探测器、核聚变装置等方面, 超导磁体的应用已较为普遍, 而且在一些特定领域超导磁体几乎是唯一的选择<sup>[1]</sup>. 超导磁共振成像更是超导磁体在工业应用中的代表. 此外, 现在的科研工作往往要求一些极端条件如高磁场强度、均匀性好等的环境

下来研究材料及微观粒子的特性, 超导磁体的发展为这些科研工作提供了很好的保障.

超导磁体根据所使用的超导材料不同可以分为低温超导磁体和高温超导磁体. 目前能够应用或可能大规模应用的超导材料包括NbTi, Nb<sub>3</sub>Sn, MgB<sub>2</sub>, BiSrCaCuO和YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub>(YBCO)等材料. NbTi和Nb<sub>3</sub>Sn超导材料的临界转变温度都不高于25 K, 由它们绕制的超导磁体大都运行在20 K以下的温度环境, 属于低温超导磁体. 由临界转变温度高于25 K的MgB<sub>2</sub>, BiSrCaCuO和YBCO超导材料绕制的磁体为高温超导磁体. 与低温超导磁体相比, 高温超导磁体运行温度高、低温系统简单、运行费用低、温度裕度大、稳定性好, 具有低温超导磁体所不可比拟的优越性. 目

\* 国家高技术研究发展计划(批准号: 2014AA032702)、国家自然科学基金(批准号: 51577180, 51577181)、北京市自然科学基金委面上项目(批准号: 2152035)和中国科学院青年创新促进会(批准号: 2016128)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: guhw@mail.iee.ac.cn

前多采用制冷机直接冷却超导磁体,可以极大地简化系统的复杂性,使系统紧凑并避免使用液氦浸泡冷却磁体带来的问题.而且,现行的 Gifford-McMahon (GM) 制冷机在 4—5 K 的温度下仅仅能够提供 1—1.5 W 的制冷量.另一方面,高温超导装置运行于较高的温度 ( $\geq 20$  K) 下,此时材料的热导率和比热都已提高,这使得装置的稳定性问题容易得以解决.在运行温度大于 20 K 时,经济实用的单级 GM 机也能够提供数十瓦的冷量.这样高温超导磁体就有可能承受因交流谐波或快速励磁产生的更大的热负荷.同时较高的运行温度可简化低温容器的设计和减少制造费用.所以,开展高温超导磁体的研究不仅对于尖端高能物理实验领域的研究有重要意义,并且对推动超导磁体的工业化应用也极具价值.

尽管 Bi 系带材和 Y 系带材的临界转变温度都高于 77 K,但在 77 K 下 Bi 系带材的不可逆场只有 0.2 T,而 Y 系超导材料的不可逆场可以达到 5—7 T<sup>[2-4]</sup>,远高于 Bi 系超导材料,突破了第一代高温超导带材只能用于弱磁场的限制,可全面满足高温区(液氮温区)、强磁场的强电领域应用,大大推动超导电力技术实用化进程.尤其是近 10 年来第二代高温超导带材的研究取得了突飞猛进的进展,国内外至少有 4 家制备出千米级的高温涂层导体<sup>[5-7]</sup>.国内苏州新材料研究有限公司联合中国科学院电工研究所、东北大学等科研机构,于 2016 年所制备出的单根长度达 1130 m 的带材的最小超导临界电流达 570 A/cm (77 K, 自场),带材的制作水平标识参数(单根长度与临界电流的乘积)达 644100 A·m.此外,通过在 YBCO 超导薄膜中引入钉扎中心,不管是原位生长法(如脉冲激光沉积法)还是非原位生长法(如化学溶液法)制备 YBCO 薄膜的临界电流密度有了大幅提升<sup>[8-14]</sup>.随着第二代高温超导带材的快速发展,包括美国超导公司、日本国际超导研究中心、韩国电气工程与科学研究所、中国电力科学院和中国科学院电工研究所等国内外主要研究机构最近几年已经开始对基于 YBCO 高温超导带材的超导磁体进行研制<sup>[15-17]</sup>.2013 年,美国麻省理工学院 Francis Bitter 磁体实验室采用 YBCO 超导膜研制出便携式的核磁共振(NMR)超导磁体<sup>[18,19]</sup>.美国阿贡国家实验室采用 SuNAM 公司的第二代高温超导带材研制出波荡器

磁体,比 NbTi 磁体具有更高的工程电流密度,所要求的制冷系统更为简单、成本更低<sup>[20]</sup>.2016 年,韩国 SuNAM 公司联合美国麻省理工学院 Francis Bitter 磁体实验室研制出直径为 35 mm、场强为 26.4 T (4.2 K) 全 ReBCO 带材高温超导磁体<sup>[21]</sup>.中国科学院电工研究所王秋良等<sup>[22]</sup>采用美国超导公司(AMSC)和韩国 SuNAM 公司的第二代高温超导带材于 2017 年研制出含有 10 T 钇钡铜氧高温超导内插磁体的 25 T 全超导磁体.

由以上结果可见,基于第二代高温超导带材研发的无论是 NMR 磁体、波荡器磁体还是高场磁体都具有独特的优势,已经成为超导电力装置领域近年来研究的重点.但上述超导磁体都是采用国外极少数厂商或科研机构的第二代高温超导带材,在带材价格和知识产权上都受制于人,对推动我国涂层导体的实用化和高温超导电力技术方面影响有限,尤其是对国产超导磁体等超导电力装置在军事领域的应用限制更为明显.为此,我们在国内苏州新材料研究有限公司研发的第三代高温超导带材超导性能的基础上,经过优化设计研制了高温超导线圈,并在不同温区对其性能进行了测试.

## 2 国产二代高温超导线圈设计

### 2.1 第二代高温超导带材的性能研究

低温超导磁体的设计方法、技术已经比较成熟,它的许多设计方法可以在高温超导磁体的设计上直接应用.然而,由于高温超导体的许多特性,如导体的形状、结构、机械性能、热稳定性和强各向异性等明显不同于低温超导体,其临界电流特性亦不相同.并且在待使用的磁场和温度范围内,对第二代高温超导带材的临界电流密度( $J_c$ )进行实验测量,也是为获得设计所需要的  $J_c(B, T)$  可采用的一种方法.苏州新材料研究有限公司研发的第三代高温超导带材结构包括哈氏合金、隔离层、种子层、离子束辅助沉积 (IBAD) 的 MgO 模板层、LaMnO<sub>3</sub> 匹配缓冲层、超导层和保护层.图 1(a) 为在千米带材上采用 IBAD 技术沉积 MgO 过程中不同位置的高能电子衍射 (RHEED) 图谱.从图 1(a) 可以看出,整根带材中 IBAD-MgO 层具有良好的双轴织构.在千米级长带上 LaMnO<sub>3</sub> 缓冲层面内织构小于 5.5°,面外织构小于 2.1°,如图 1(b) 所示.

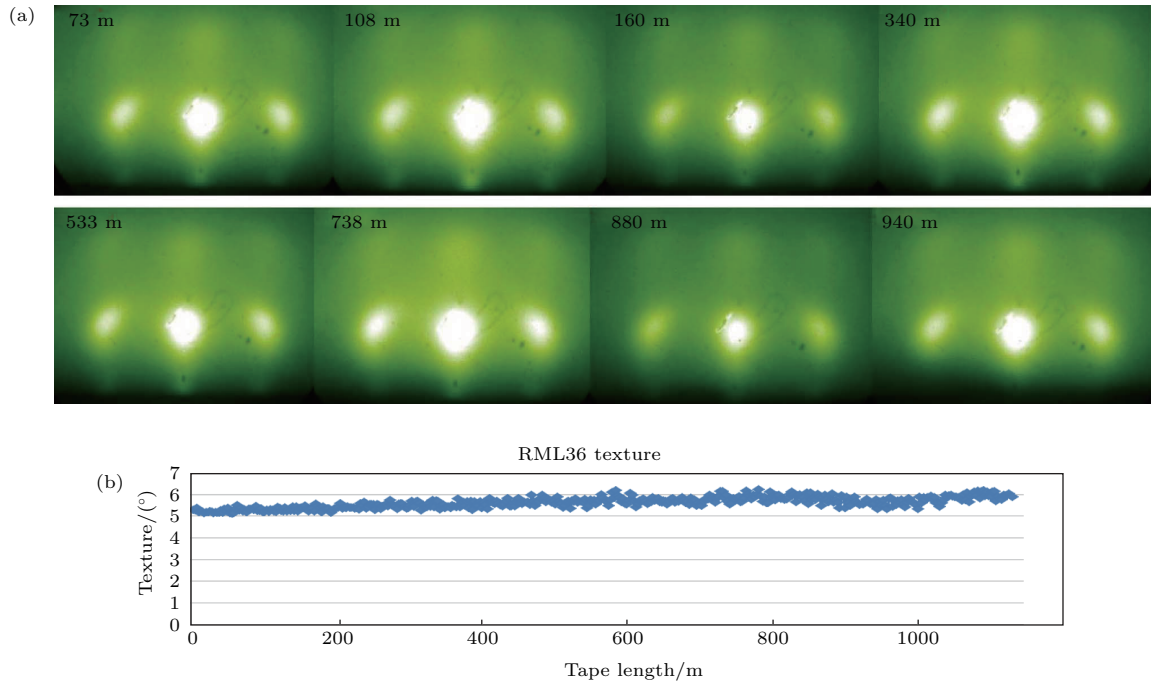


图1 第二代高温超导带材的微观结构 (a) IBAD 技术沉积 MgO 过程中不同位置的 RHEED 图谱; (b) 千米级长带上 LaMnO<sub>3</sub> 缓冲层面内织构度

Fig. 1. Microstructure of second generation tapes: (a) RHEED patterns of IBAD-MgO tapes in different positions; (b) the in-plane texture of kilometers LaMnO<sub>3</sub> tapes.

首先采用四引线法对第二代高温超导带材进行了临界电流的测量, 在 77 K 下临界电流为 380 A. 采用综合物性测量系统中直流磁强计, 通过感应的方法测试出超导样品在外加磁场垂直带材 ( $H//c$ ) 方向、升降磁场的情况下对磁场的响应情况, 从而就得到了相应样品的磁滞回线. 根据公式

$$J_c = \frac{20\Delta m}{n \cdot a \cdot b \cdot a \left(1 - \frac{a}{3b}\right)},$$

其中  $n$  为薄膜的厚度;  $a, b$  分别为薄膜样品的宽度和长度 ( $b > a$ ),  $\Delta m$  为在同一磁场下磁化强度的

差值. 计算得到 YBCO 高温超导带材在不同温度和磁场下的临界电流密度, 如图 2 所示. 随着温度的降低, 无论在自场还是在高场下 YBCO 涂层导体的临界电流密度增大. 而随着磁场强度的增加, YBCO 涂层导体的临界电流密度下降, 尤其是磁场强度大于 1 T 时, 其临界电流密度急剧下降.

### 2.2 高温超导线圈设计

高温超导磁体的优化设计是指在满足磁体的规格及性能要求的前提下, 尽量减少超导带材的使用量, 提高超导带材的利用率, 使超导磁体的体积最小, 带材用量最少. 磁体的规格和性能要求就是高温超导磁体优化设计的约束条件, 这些约束条件一般包括磁体的磁场、超导材料的临界特性和磁体的磁场均匀度等. 要设计的高温超导线圈的规格要求为: 内直径为 100 mm, 中心磁场达到 4.0 T 以上, 运行温度为 45 K, 所使用的 YBCO 高温超导带材 (包括绝缘在内) 宽 12.2 mm. 为达到磁体的设计要求, 在对 YBCO 高温超导带材性能研究的基础上, 进行了超导磁体的电磁有限元建模、优化与结构设计, 并完成了磁体的方案设计. 经过一系列优化和算法, 整个磁体由大小相同的十个双饼线圈同轴排列而成, 每两个双饼线圈之间增加绝缘板,

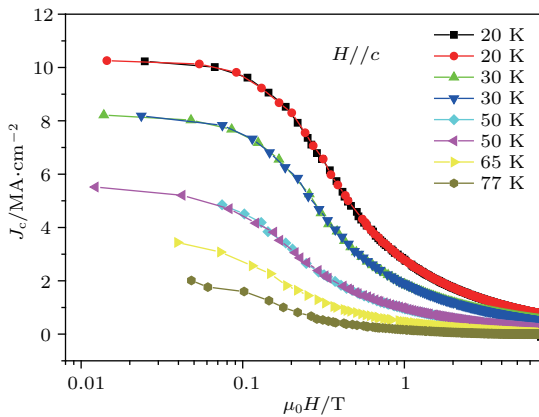


图2 绕制磁体所使用的第二代高温超导带材在液氮温区的临界电流密度

Fig. 2. Critical current density for YBCO coated conductor for superconducting magnet.



材质为厚度 1 mm 的 G10 玻璃钢, 沿径向均布 36 条宽 8 mm 的冷却通道. 图 3 是优化设计后的高温超

导磁体图片, 在 45 K 中心磁场 4 T 时的励磁电流为 321 A. 超导线圈参数如表 1 所列.

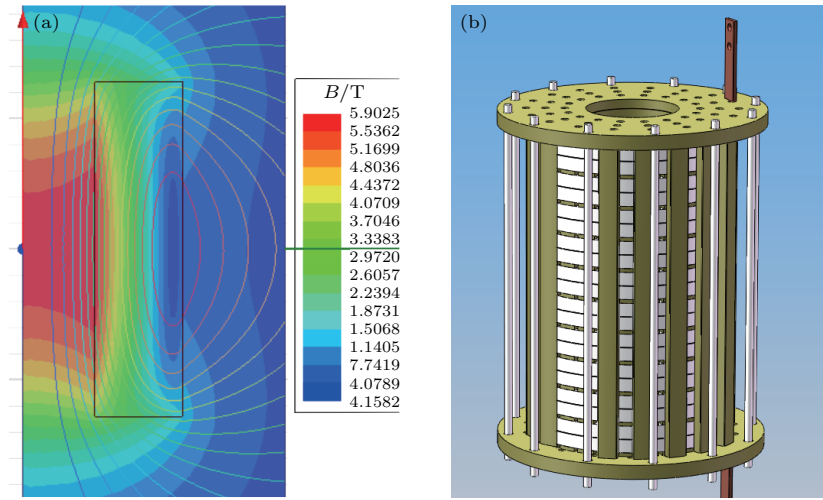


图 3 优化设计后高温磁体图 (a) 在 321 A 时磁体内部磁场分布图 (中心场 4 T@45 K); (b) 高温超导磁体三维效果图  
Fig. 3. Optimized design of high temperature magnet diagram: (a) Magnetic field distribution of magnets at 321 A; (b) three-dimensional schematic diagram of high temperature superconducting magnets.

表 1 4 T 高温超导线圈的设计参数表  
Table 1. Design parameters of 4 T HTS coil.

芯筒内径	芯筒外径	骨架内径	骨架外径	单饼数	双饼长度	双饼数量	总匝数	磁体总高度	电感	运行电流	运行温度	中心磁场强度
94 mm	100 mm	100 mm	230 mm	165 匝	160 m	10 个	3290 匝	359 mm	0.50 H	321 A	45 K	4 T

### 3 国产二代高温超导线圈的研制

#### 3.1 双饼线圈的研制

由于目前使用的 YBCO 高温超导线材都是带状, 因此用高温超导带材绕制的磁体大都采用饼式结构线圈. 本文的高温超导线圈采用双饼线圈的形

式, 与单饼线圈相比, 用单根超导线绕制的双饼线圈可以使磁体内的非超导连接数减少近一半, 有利于减少磁体内部的热干扰以提高磁体稳定运行能力. 将测试完的 YBCO 高温超导带材进行双饼的绕制, 从带材的中间开始绕起, 绕制完毕后采用添加氧化铝粉的环氧进行真空浸渍.

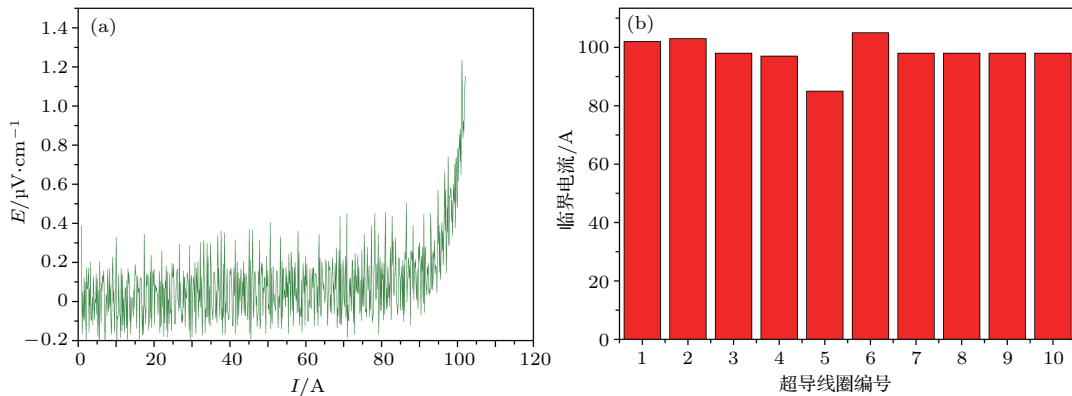


图 4 双饼线圈的临界电流 (a) 第一个双饼线圈的 I-V 曲线; (b) 所有 10 个双饼线圈的临界电流  
Fig. 4. Critical current of double-pancake superconducting coil: (a) I-V curve of first superconducting coil; (b) critical current of all ten double-pancake superconducting coils.

采用四引线法在 77 K 液氮温度下对绕制完成的 10 个高温超导双饼线圈进行性能测试. 采用国际判据  $E_c = 1 \mu\text{V}/\text{cm}$ , 通过高温超导双饼线圈的电流以每秒 0.5 A 的速率增加, 通过采集双饼线圈的电流以及电压, 得到如图 4 所示的测量曲线. 测得此 10 个高温超导双饼线圈在 77 K 液氮温度下的平均临界电流为 98 A, 与绕制线圈前的超导带材临界电流 380 A 相比, 临界电流降低 74.5%. 根据磁体设计, 单个双饼线圈在 77 K 液氮温度、100 A 运行电流下最大磁场 0.76 T、最大径向磁场 0.42 T, 按照 YBCO 带材在液氮温区的  $B-I$  特性曲线计算, 临界电流在 95—102 A 之间, 与所测数据吻合. 为了研究线圈中超导带材临界电流下降的原因, 对比了焊接前后 YBCO 超导带材的临界电流, 发现焊接后的 YBCO 带材临界电流保持不变. 并且对绕在骨架上的单匝 YBCO 超导带材的临界电流也进行了测量, 与绕制前的带材临界电流基本一致. 综合以上情况可以说明焊接带材和超导线绕制成超导线圈过程中机械形变不是引起临界电流下降的主要原因, 而影响高温超导线圈性能的主要因素可能

是线圈的自身磁场.

### 3.2 高温超导磁体的装配

在对每一组双饼线圈的临界电流测试完成后, 对高温超导线圈进行了连接、组装和固定. 图 5 是采用第二代高温超导带材绕制的超导线圈图片, 线圈的实测参数如表 2 所列.



图 5 采用第二代高温超导带材绕制的磁体实物图  
Fig. 5. The picture of high-temperature superconducting magnet using by YBCO tapes.

表 2 4 T 高温超导线圈的实测参数表  
Table 2. Measured parameters of 4 T HTS coil.

芯筒内径	芯筒外径	骨架内径	骨架外径	单饼数	双饼长度	双饼数量	总扎匝数	磁体总高度	电感	运行电流	运行温度	中心磁场强度
94 mm	100 mm	100 mm	236 mm	165 匝	160 m	10 个	3290 匝	359 mm	0.51 H	338 A	46 K	4.08 T

### 3.3 高温超导线圈的性能测试

为了测试 YBCO 高温超导线圈在 77, 65, 55 和 46 K 温度下的临界电流, 采用液氮冷却固氮的方式获得测试所需的低温环境. 首先采用液氮冷却并校正温度计, 在液氮浸泡线圈 1.5 h 完全冷却后, 线圈上部、中部和下部的温度显示分别为 75, 70 和 78 K, 表明上、中、下部温度计误差分别为 -2, -7 和 +1 K. 修正后首先在温度 77 K 时进行线圈的临界电流性能测试实验. 77 K 温区励磁实验结束后, 先采用减压降温方法使得温度降至 65 K, 再次进行励磁实验, 然后再采用液氮继续冷却, 利用冷却盘管换热将液氮冷却至固氮. 降温过程中分别在 55 K 温区和 46 K 温区进行励磁实验测试临界电流. 采用 CRYOGENIC SMS240C 超导电源和 1 kA

DC 超导股线样品电源以 0.2—1.5 A/s 的速率对超导线圈励磁通电, 检测磁体两端的电压信号, 以  $1 \mu\text{V}/\text{cm}$  判据作为临界电流判据. 为保护磁体安全, 在超导磁体中局部区域出现超导-正常态转变, 观测到磁体的端电压有明显上升时, 即停止对磁体继续通电, 并安全下降电流, 因而得到的最大测试电流并未达到磁体的临界电流标准 ( $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ ). 磁体在 77, 65, 55 和 46 K 温度下的最大运行电流测试结果如图 6 所示 (电压恒定为  $LdI/dt$  时会引发感应电压, 在判断失超时应减掉该电压). 从图中可以看出, YBCO 超导线圈在 77, 65, 55 和 46 K 下的电流测试过程中均未探测到不可逆的电压变化, 因而超导线圈没有发生失超现象. YBCO 高温超导线圈在 77, 65, 55 和 46 K 温度下的运行电流分别为 65, 147, 257 和 338 A.

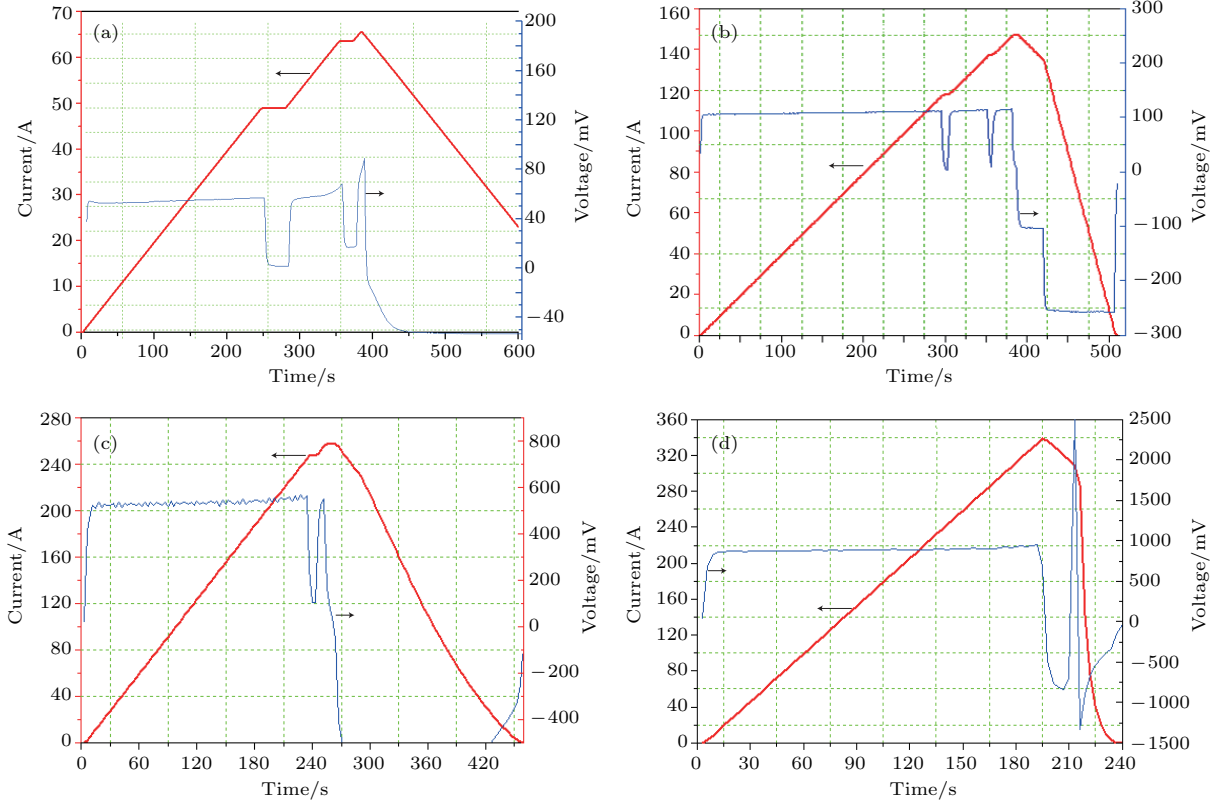


图6 高温超导磁体在不同温区的  $I$ - $V$  曲线 (a) 77 K; (b) 65 K; (c) 55 K; (d) 46 K

Fig. 6. The  $I$ - $V$  curves of high-temperature superconducting magnet at different temperature: (a) 77 K; (b) 65 K; (c) 55 K; (d) 46 K.

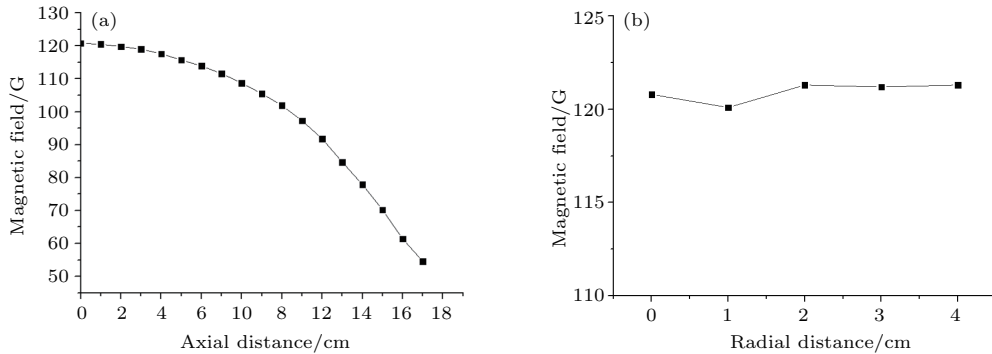


图7 高温超导磁体的磁场分布 (a) 磁场沿磁体中心轴向分布; (b) 磁场沿磁体中心平面径向的分布

Fig. 7. Magnetic field distribution of high-temperature superconducting magnets: (a) Along axial direction; (b) along radial direction.

采用手持式高斯计在负载1 A的条件下对YBCO高温超导磁体的磁场分布进行了测试,结果如图7所示.所绕制的高温超导磁体中心磁场强度为120.8 G ( $1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T}$ ),在超导磁体轴向方向距中心位置1, 5, 9, 13和17 cm的磁场强度分别为120.5, 115.7, 105.5, 84.7和54.6 G.在超导磁体径向方向距中心位置1, 2, 3和4 cm的磁场强度分别为120.1, 121.3, 121.2和121.3 G.在高温超导磁体中平面上磁场基本一致.

根据该高温超导磁体负载1A电流对应的磁场强度为120.8 G,可计算得到高温超导磁体在77, 65, 55和46 K温度下的中心磁场强度分别为0.78, 1.77, 3.1和4.08 T.

#### 4 结论

本文成功研制出国内首台基于国产第二代高温超导带材的高温超导线圈.高温超导线圈的内

直径为 100 mm, 高度为 359 mm, 中心磁场强度在 46 K 下达到 4.08 T, 并且在高温超导线圈中平面上磁场基本一致. 基于该高温超导线圈产生的强磁场不但可以改变材料的磁学性质, 制备高择优取向的新材料, 而且在强磁场新材料合成、化学反应和晶体生长等具有重要应用价值.

## 参考文献

- [1] Wang Q L 2007 *High Magnetic Field Superconducting Magnet* (Beijing: Science Press) pp118–128 (in Chinese) [王秋良 2007 高磁场超导磁体科学 (北京: 科学出版社) 第 118—128 页]
- [2] Xu A, Delgado L, Khatri N, Liu Y, Selvamanickam V, Abraimov D, Jaroszynski J, Kametani F, Larbalestier D C 2014 *APL Mater.* **2** 046111
- [3] Xu A, Jaroszynski J, Kametani F, Larbalestier D 2015 *Appl. Phys. Lett.* **106** 052603
- [4] Rizzo F, Augieri A, Angrisani Armenio A, Galluzzi V, Mancini A, Pinto V, Rufoloni A, Vannozzi A, Bianchetti M, Kursumovic A, MacManus-Driscoll J L, Meledin A, van Tendeloo G, Celentano G 2016 *APL Mater.* **4** 061101
- [5] Selvamanickam V, Kesgin I, Guevara A, Shi T, Yao Y, Zhang Yao, Zhang Y X, Majkic G 2010 *Progress in Research and Development of IBAD-MOCVD Based Superconducting Wires* (Washington D.C.: Applied Superconductivity Conference)
- [6] Moon S H 2013 *SuNAM Developed New Process Named RCE-DR: the Practical Highest Throughput Process* (Genova: European Conference on Applied Superconductivity)
- [7] Iijima Y, Adachi Y, Igarashi M, Kakimoto K, Fujita S, Daibo M, Ohsugi M, Takemoto T, Nakamura N, Kurihara C, Machida K, Hanyu S, Kikutake R, Nagata M, Tatano F, Itoh M 2014 *Development for Mass Production of Homogeneous RE123 Coated Conductors by Hot-wall PLD Process on IBAD Template Technique* (Charlotte: Applied Superconductivity Conference)
- [8] Haugan T, Barnes P N, Wheeler R, Meisenkothen F, Sumption M 2004 *Nature* **430** 867
- [9] MacManus-Driscoll J L, Foltyn S R, Jia Q X, Wang H, Serquis A, Civale L, Maiorov B, Hawley M E, Maley M P, Peterson D E 2004 *Nat. Mater.* **3** 439
- [10] Gutiérrez J, Llordes A, Gazquez J, Gibert M, Roma N, Ricart S, Pomar A, Sanditmenge F, Mestres N, Puig T, Obradors X 2007 *Nat. Mater.* **6** 367
- [11] Coll M, Ye S, Rouco V, Palau A, Guzman R, Gazquez J, Arbiol J, Suo H, Puig T, Obradors X 2013 *Supercond. Sci. Technol.* **26** 015001
- [12] Selvamanickam V, Xu A, Liu Y, Khatri N D, Lei C, Chen Y, Galstyan E, Majkic G 2014 *Supercond. Sci. Technol.* **27** 055010
- [13] Ding F Z, Gu H W, Zhang T, Wang H Y, Qu F, Qiu Q Q, Dai S T, Peng X Y, Cao J L 2014 *Appl. Surf. Sci.* **314** 622
- [14] Zhao R, Li W W, Lee J H, Choi E M, Liang Y, Zhang W, Tang R J, Wang H Y, Jia Q X, MacManus-Driscoll J L, Yang H 2014 *Adv. Funct. Mater.* **24** 5240
- [15] Weijers H W, Markiewicz W D, Voran A J, Gundlach S R, Sheppard W R, Jarvis B, Johnson Z L, Noyes P D, Lu J, Kandel H, Bai H, Gavrillin A V, Viouchkov Y L, Larbalestier D C, Abraimov D V 2014 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **24** 4301805
- [16] Iwasa Y, Bascuñán J, Hahn S, Voccio J, Kim Y, Lécresse T, Song J, Kajikawa K 2015 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **25** 4301205
- [17] Fujita S, Satoh H, Daibo M, Iijima Y, Itoh M, Oguro H, Awaji S, Watanabe K 2015 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **25** 8400304
- [18] Gagnon B, Hahn S, Park D K, Voccio J, Kim K, Bascuñá J, Iwasa Y 2013 *Physica C* **486** 26
- [19] Kim S B, Kimoto T, Hahn S, Iwasa Y, Voccio J, Tomita M 2013 *Physica C* **484** 295
- [20] Kesgin I, Kasa M, Ivanyushenkov Y, Welp U 2017 *Supercond. Sci. Technol.* **30** 04LT01
- [21] Yoon S, Kim J, Cheon K, Lee H, Hahn S, Moon S H 2016 *Supercond. Sci. Technol.* **29** 04LT04
- [22] Zhu G, Liu J H, Cheng J S, Feng Z K, Dai Y M, Wang Q L 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 058401 (in Chinese) [朱光, 刘建华, 程军胜, 冯忠奎, 戴银明, 王秋良 2016 物理学报 **65** 058401]



# Development of a 4 T (46 K) 100 mm high-temperature superconducting coil made of homemade MOCVD-YBCO coated conductors\*

Ding Fa-Zhu<sup>1)2)3)</sup> Zhang Jing-Ye<sup>1)2)</sup> Tan Yun-Fei<sup>4)</sup> Chen Zhi-You<sup>4)</sup> Dong Ze-Bin<sup>1)2)3)</sup>  
 Zhang Hui-Liang<sup>1)2)3)</sup> Shang Hong-Jing<sup>1)2)3)</sup> Xu Wen-Juan<sup>1)2)3)</sup> Zhang He<sup>1)2)</sup>  
 Qu Fei<sup>1)2)</sup> Gao Zhao-Shun<sup>1)2)</sup> Zhou Wei-Wei<sup>1)2)</sup> Gu Hong-Wei<sup>1)2)3)†</sup>

1) (*Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

2) (*Key Laboratory of Applied Superconductivity, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

3) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

4) (*High Magnetic Field Laboratory, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China*)

( Received 29 June 2017; revised manuscript received 4 January 2018 )

## Abstract

The second-generation high-temperature superconductor (2G HTS) is a good candidate for high field magnet due to its high critical temperature  $T_c$ , high critical current density  $J_c$ , and high irreversibility field  $H_{irr}$ . This paper presents the design and development of a 4.08 T (46 K) coil made of homemade 2G HTS. In order to meet the design requirement of HTS coil, the electromagnetic finite element modeling and optimization are carried out on the basis of the research of the properties of  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  (YBCO) tapes. And the design scheme of HTS coil is completed. Then the HTS coil with an inner diameter of 100 mm is successfully constructed according to the scheme. It consists of a stack of 10 double-pancakes with the same outer diameter wound with YBCO tapes. The diameter and height of the HTS coil are 236 and 359 mm, respectively. A total of 1600 meters of YBCO tape are used to wind this HTS coil. We measure the  $I$ - $V$  curves of superconducting coil at different cryogenic temperatures. First, liquid nitrogen is used to cool the HTS coil to 77 K, and then the temperature is reduced to 65 K by the decompression cooling method. The cooling coil containing liquid helium is used to exchange heat and cool the solid nitrogen to obtain much lower cryogenic temperature. The maximum operating currents of the HTS magnet at 77, 65, and 55 K are 65, 147, and 257 A, respectively, corresponding to the center magnetic field of 0.78, 1.77, and 3.1 T. At 46 K, the HTS coil with an inner diameter of 100 mm generates a 4.08 T field at the center. And the magnetic field of superconducting coil is basically uniform in the medium plane. The results demonstrate a strong potential of home-made YBCO magnet for direct current high-field applications.

**Keywords:** high temperature superconducting magnets,  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  coated conductors

**PACS:** 84.71.Ba, 74.78.Fk

**DOI:** 10.7498/aps.67.20171491

\* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2014AA032702), the National Nature Science Foundation of China (Grant Nos. 51577180, 51577181), the Beijing Natural Science Foundation, China (Grant No. 2152035), and the Youth Innovation Promotion Association of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. 2016128).

† Corresponding author. E-mail: [guhwh@mail.iee.ac.cn](mailto:guhwh@mail.iee.ac.cn)