

基于第二代高温超导带材的磁体研究进展与挑战*

阎伟华¹ 蔡传兵^{1,2,†} 周迪帆¹

(1 上海大学理学院物理系 上海市高温超导重点实验室 上海 200444)

(2 上海上创超导科技有限公司 上海 201401)

2019-05-22收到

† email: cbcai@shu.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20191105

Progress and challenges in the development of magnets based on second-generation high-temperature superconducting tapes

YAN Wei-Hua¹ CAI Chuan-Bing^{1,2,†} ZHOU Di-Fan¹

(1 Shanghai Key Laboratory of High Temperature Superconductors, Physics Department, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

(2 Shanghai Creative Superconductor Technologies Co. Ltd., Shanghai 201401, China)

摘要 随着第二代高温超导(2G-HTS)带材技术的进步和性价比的提高,世界各地的科研机构纷纷展开了基于 $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (RE123)带材的磁体研制。RE123带材具有极高的载流能力和在场性能,能产生低温超导(LTS)磁体不能达到的强磁场(>24 T)。然而,RE123磁体依然面临着诸多挑战,如磁体的工艺技术、带材的机械性能及性价比等都还需要进一步的提升与优化。文章首先介绍了用于磁体绕制2G-HTS带材,包括其成材工艺、在场性能及应力应变影响等;其次讨论了超导磁体研制的重要技术问题,包括RE123线圈技术、磁体失超保护、屏蔽电流效应及交流损耗等;最后对国内外2G-HTS磁体的研究进展进行了总结,包括磁体的设计方案、技术特点和运行情况等。

关键词 高温超导体, 超导磁体, 第二代高温超导带材, 成材工艺, 线圈技术, 磁体建造

Abstract The continuous improvements in quality and cost effectiveness of second-generation high-temperature superconducting (2G-HTS) tape has greatly encouraged research institutes worldwide to develop magnets based on $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (RE123) tape. Different from low temperature superconducting wire, these RE123 tapes exhibit higher current carrying capacity and in-field performance, and hence can generate magnetic fields greater than 24 T, which cannot be achieved with the wire. However, 2G-HTS tape faces a few practical challenges, such as hysteresis and screening problems, mechanical strength, and costs, so further research and optimization of material and magnet design are required. This article first describes the 2G-HTS tape used for magnet winding, including material manufacture, in-field performance, and stress-strain effects. Second, the main issues in the fabrication of these magnets are discussed, including coil design, quench protection, screening current effects, and hysteresis losses. Finally, the recent progress of some leading research institutes are summarized, including the design, technical characteristics and operation performance of 2G-HTS magnets.

Keywords high-temperature superconductors, superconducting magnets, second-generation high-temperature superconducting tapes, manufacturing process, coil technology, magnet construction

* 国家自然科学基金(批准号: 51572165, 11174193)、国家重点研发计划(批准号: 2016YFF0101701)资助项目; 中国科学院先导项目(批准号: XDB25020200); 上海市科学技术委员会项目(批准号: 16521108400)

1 引言

铜氧化物高温超导体能在液氮温度下实现超导性能展现了超导体巨大的应用潜力，其中超导磁体是一个重要的应用方向^[1]。超导磁体的发展使得超高磁场的获得与以前相比更加容易，且可能达到铜线圈无法达到的磁场强度，这对科学技术的发展有着极其重要的意义。超高磁场能为科学研究提供极端环境，为科学家们在物理、生物、化学、材料、医学和工程等领域取得进一步的发展甚至是全新的发现提供条件，从而令人们对于物质世界的认识不断加深。

如今世界上磁场最高的稳态磁体为美国高场实验室(NHMFL)研制，由14 T的高温超导内插磁体和31 T的电阻磁体混合而成，其中心场能达到45 T^[2]。但是电阻式磁体需要庞大的电源与水冷系统，运行过程中的功率消耗极大，系统维护极为困难，且占地面积极大。而对于制造工艺已经比较成熟的LTS磁体，由于LTS线材的临界电流密度(J_c)在高场下会急剧下降，由NbTi线绕制的磁体在1.8 K的温度下只能得到12 T极限磁场，Nb₃Sn磁体在4.2 K温度下能得的最大磁场为24 T^[3]。目前，得到更强磁场的发展趋势是使用高低温超导混合磁体，这样可以极大地降低系统的构建和

运行成本。如图1所示，Nb₃Sn在场载流能力高于NbTi，而HTS在场载流能力又高于LTS，因此，高低温超导混合磁体的形式通常为最外层使用NbTi线圈提供一个较小背景场，中间层由Nb₃Sn线圈提供一个较大的背景场，最后内部再由HTS线圈在高场背景下共同产生一个高的中心目标场。

内部的HTS磁体通常被称为内插磁体，当前用来绕制内插磁体的商用HTS导线主要有三类，分别为Bi2223带材、RE123带材和Bi2212圆线。通过传统的粉末套装和拉丝工艺制备的Bi2212圆线和Bi2223带材被称为第一代高温超导体，而基于薄膜外延和双轴织构技术形成的RE123涂层导体被称为第二代高温超导体^[6]。与LTS线材不同，HTS线/带材的临界温度通常在液氮温区以上，在相同的低温下，HTS的载流能力比LTS大，能提供更大的 J_c 。且几种常见的HTS材料的上临界磁场理论值均在100 T以上，这使得HTS磁体可以产生LTS磁体所不能达到的高磁场^[7]。采用Bi2212圆线也可以制造内插磁体，目前的工艺技术还不够成熟，其存在液氮温区 J_c 低、成材空洞率高、机械性能较差等挑战，且价格难以下降，限制了其发展前景。内插线圈目前主要还是采用RE123带材或Bi2223带材来进行绕制，Bi2223带材工艺成熟，临界温度高，载流能力良好，内部为多丝结构，其屏蔽电流较小，适合用于绕制对磁场均匀度要求较高的磁体，如核磁共振谱仪(NMR)磁体。但Bi2223带材为银包套材料，成本也很难进一步下降；而RE123带材由于其在高场下具有更高的载流能力，其基底能提供较大的机械强度，更适宜用做高场超导磁体的内插部分，且材料成本较低，具有很好的应用前景。

本文首先对用于磁体绕制的RE123带材作了介绍，包括带材的制造工艺、在场性能及应力应变影响等，提出如何在成材工艺及线圈绕制上，减小磁场和应力应变对 J_c 的影响；之后重点介绍了超导磁体中的技术问题，如RE123线圈技术、磁体失超保护、屏蔽电流效应及交流损耗等，并

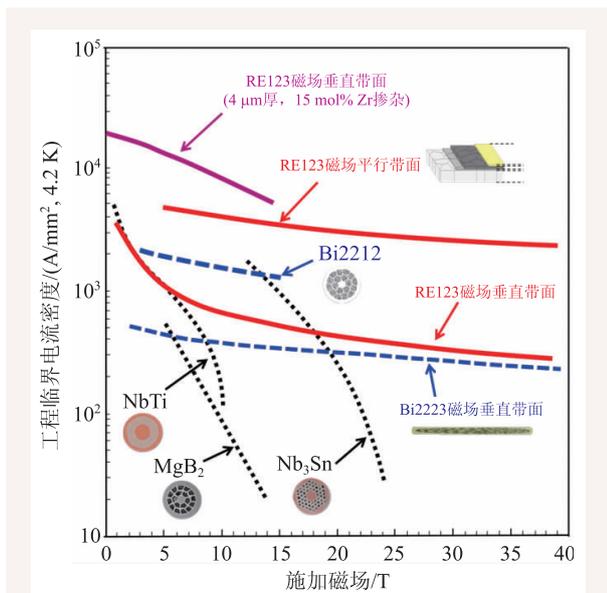


图1 各类商业化超导导线/带材的在场工程临界电流密度^[4, 5]

就各种问题提出的解决方案作了说明；最后以国内外高场磁体领域的几个主要研究机构为对象，总结其在2G-HTS磁体方面所做的研究工作，包括磁体的设计方案、技术特点及运行情况等。

2 强磁体用2G-HTS带材

2.1 多种技术路线的带材成材工艺

高温超导材料中的大角度晶界易形成弱连接，极大地削弱带材的 J_c ^[8]，因此RE123带材的发展主要围绕着如何实现材料的织构化，提高 J_c 。多年来，全球各大研究机构已经在工业水平上实施了多种方法来消除弱连接，其中基于双轴织构和超导薄膜外延技术的运用是比较普遍的。由于RE123超导层为陶瓷材料，延展性差，采用传统的粉末套管法难以制备成材，所以通常采用涂层技术的外延生长，一个RE123带材的典型结构有金属基底、缓冲层、超导层及顶部的银保护层。基于超导薄膜外延生长和缓冲层双轴织构技术发展而来的超导带材，由于其高度的面内和面外晶粒织构消除了电流的弱连接，以及其岛状生长机制而形成的大量位错缺陷，为超导体提供了有效的磁通钉扎中心，使得带材的 J_c 和不可逆场都有明显提高^[9]。因此，缓冲层的双轴织构形成和超导薄膜的外延生长至关重要。表1列出了2G-HTS带材各种技术路线与典型生产单位。

缓冲层在涂层导体中主要有两个作用：一是阻止基底中金属原子向超导层的扩散及超导层中的氧向基底的扩散；二是为超导层的外延生长提供织构衬底，它要求衬底必须为双轴织构，且与超导层的晶格匹配良好。目前主要有三种工艺路线来建立缓冲层的双轴织构，分别是：轧制辅助双轴织构(Rolling-Assisted Biaxially Textured Substrate, RABiTS)、离子束辅助沉积(Ion Beam-Assisted Deposition, IBAD)和基底倾斜沉积(Inclined Substrate Deposition, ISD)。

超导层是超导带材的核心层，它的质量优劣将直接关系到带材的性能，目前工业上应用比较广泛的四种制备工艺为属于化学法的金属有机物沉积(MOD)及金属有机物化学气相沉积(MOCVD)和属于物理法的脉冲激光沉积(PLD)及反应电子束共蒸发(RCE)。其中，MOD和RCE为异位工艺法，而PLD和MOCVD为原位工艺法。

目前，2G-HTS带材的实用化发展主要有以下几个方向：性能、长度及价格。其中性能的发展旨在提高超导带材的临界电流(I_c)，这是特色也是最终目标。世界上多个制造商利用不同的工艺技术均能够获得千米级超导带材^[10-13]，但当需要更长的超导带材，就要对其进行拼接，而接头的发热可能会导致带材失超，所以长而均匀的带材制备对超导应用是至关重要的。如今，超导面临大规模市场应用的一个重要障碍就是其价格较高，需要发展新的工艺或者新的超导结构来降低生产成本，提高生产量，最终降低市场价格。

对于超导磁体的建造，选择合适的制备工艺制造而成的带材是一个复杂的决定。实际上，带材制造商不可能满足各个超导应用领域对超导带材各项性能参数的要求，有的对带材长度有要求，如超导电缆应用等；有的对电流载流能力有要求，如高温超导电流引线等；有的对机械性能有要求，如本文提出的超导磁体等。这些要求的侧重点不同，可能选择不同的超导体。总之，超导应用潜力巨大，但要完全发挥超导特性的优势，还需要与各个应用领域专业和独特的设计相结合。

表1 2G-HTS带材各种技术路线与典型单位

| 金属基带 | 缓冲层(织构路线) | 超导层(外延工艺) | | 典型单位 |
|--|---|-----------|-------|----------------------|
| RABiTS-NiW (织构) | Epi-CeO ₂ 、YSZ or LaZrO ₃ | MOD | | AMSC、d-NANO |
| Hastelloy or Stainless Steel (非织构) | IBAD(or ISD)-MgO (or GZO)/epi-MgO/ LaMnO ₃ or CeO ₂ | 异位法 | MOD | SCSC |
| | | | RCE | SuNAM、THEVA |
| | | 原位法 | PLD | Fujikura、SST、SuperOx |
| | | | MOCVD | SuperPower、SAMRI |

注：SCSC—上海上创超导；SST—上海超导；SAMRI—苏州新材料研究所

2.2 各向异性和磁场对带材 J_c 的影响

RE123 带材的 J_c 不仅与外磁场强度的大小有关系, 还与外磁场和带材表面的夹角有关系^[14]。

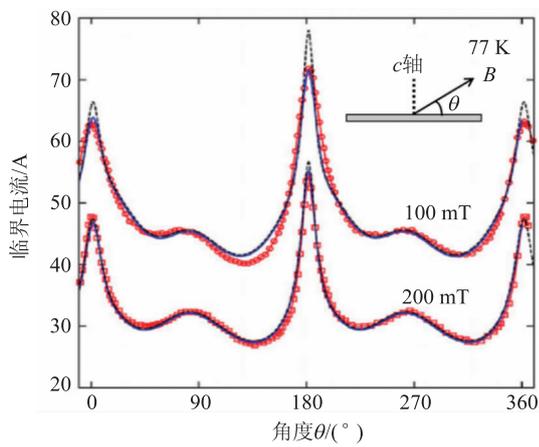


图2 磁场对临界电流的影响^[14]

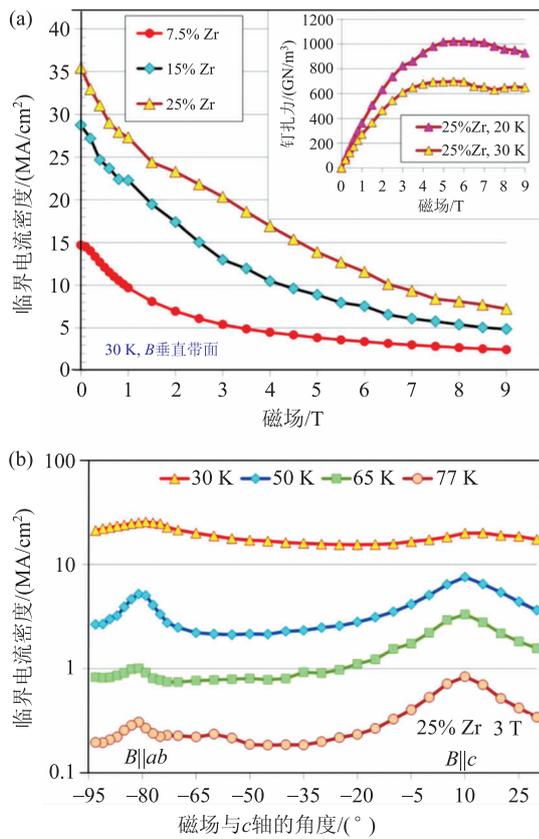


图3 人工磁通钉扎中心对 J_c 的影响^[15] (a) 不同摩尔百分比的 Zr 掺杂提高 J_c ; (b) Zr 掺杂改善磁场各向异性

一般情况下, J_c 随着磁场强度的增大而减小, 对于确定的磁场强度, 当磁场平行于带表面时 ($H // ab$ 面), J_c 最大, 当磁场垂直于带表面时 ($H // c$ 轴), J_c 最小(图2)。这种现象主要源自于 RE123 层状结构 Cu—O 面之间的本征钉扎, 此外, 也还与其他面内的缺陷有关。带材的磁场各向异性对磁体设计带来了极大的影响, 因为在磁体中, 不同位置的导体受到的磁场强度及其与磁场的方向都是不同的, 这样导致 J_c 在磁体中的分布是不均匀的, 磁体会存在一个临界电流, 在进行设计时, 需要考虑安全裕度。

为了减小磁场的影响, 通过引入人工磁通钉扎中心来降低带材 J_c 在磁场中的衰退及磁场各向异性^[15](图3)。由于铜氧化物超导体的相干长度较短, 要获得有效的磁通钉扎中心, 人工引入的异质二次相尺寸必须在纳米量级^[16]。近年来研究比较多的是 $BaZrO_3$ 和 Gd_2O_3 这类的晶格常数、晶胞类型及热膨胀系数与 RE123 相接近的钙钛矿氧化物, 它们通常不会引起大的织构畸变, 且尺寸为纳米量级。不同制造工艺引入的钉扎中心结构也是有所区别的, PLD 和 MOCVD 工艺能形成各向异性的沿着 c 轴方向生长的一维纳米棒(直径约 5 nm, 长度大于 100 nm), 通过纳米棒和涡流之间的相互作用, 增强了磁场平行于 c 轴时的弱钉扎; MOD 技术能引入分布式的零维纳米点(10—50 nm), 形成一个各向同性的钉扎区域。而对于难以实现自组装一维二次相结构的 MOD、RCE 工艺, 其中的关键在于二次相颗粒尺度的细化。另外, 通过离子辐照技术, 可以在导体里产生纳米柱状缺陷, 能提高 MOD、RCE 等异位法带材的磁通钉扎^[17]。

2.3 应力应变对带材 J_c 的影响

由于 RE123 超导层属于陶瓷材料, 本征特性易碎, 带材在受到应力产生应变时, 其性能会有所衰减(图4)。为了保证带材的超导性, 导体应力应变需保持在临界极限以下。带材在磁体中会受到各种应力, 其中主要的有: 绕制带材时的弯曲应力; 环向的电磁应力; 由于不同材料热收缩的

不匹配而导致的热应力，特别是在环氧树脂浸渍的线圈中容易产生。

与机械强度相对各向同性的Bi2223相比，RE123带材的机械强度为各向异性，这与带材的结构密切相关，Bi2223的结构为超导细丝嵌套在银基质中，而RE123为层状结构，具有极大的纵横比。在轴向方向，RE123带材的张应力大于700 MPa，约为Bi2223导体的3倍，这是由于RE123带材基底一般为哈氏合金或不锈钢材料，能提供较大的机械强度。已知RE123带材为层状结构，在横向(厚度)方向不是一个整体，导致这个方向的应力极易使带材分层。如图5所示，带材的横向张应力低至10—100 MPa，而对于带材的解理或剥离应力，更是小于1 MPa，因此在线圈中要尽量避免解理或剥离应力。

对于改善应力应变对导体或线圈的影响，有多种方法被提出：选择合适的基底或稳定剂，由于它们和超导层不同的热收缩，对超导层产生一个预压力，这样可以提高导体的不可逆变极极限^[19, 20]；在带材边缘加上层压铜带和焊角，能显著提高带材的抗分层强度^[21]；对于环氧浸渍的线圈，可以在带材表面加上一层聚合物绝缘层，能减小热应力，消除线圈性能退化^[22]；绕制线圈时，通过共绕不锈钢带等来加强机械强度，但这样会牺牲线圈的工程临界电流密度^[23]。

3 基于2G-HTS带材的磁体设计

3.1 RE123线圈技术

根据线圈的绕制方法，可以分为层绕式(LW)和双饼式(DP)。其中层绕式是带材从里到外一层一层的缠绕，一般需要足够长的带材以完成至少一层的缠绕。而双饼式为两个饼线圈上下依次排列，每个饼从带材中间开始，分别向上和向下由内到外地径向螺旋缠绕，在两个饼的内侧形成一个侧向弯曲的连续过渡区而没有接头(图6)。磁体的组装就是由一个一个的双饼线圈依次叠加，并对相邻的两个双饼在最外层进行拼接。通常双饼

式需要的带材长度比层绕式少得多，而目前对于长带材的生产仍然是一个挑战，所以双饼技术常用于超导磁体的制造，且双饼的模块化和可扩展

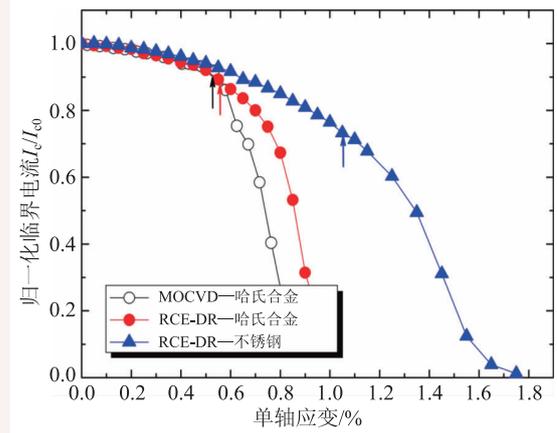


图4 临界电流与单轴应变的关系^[18]

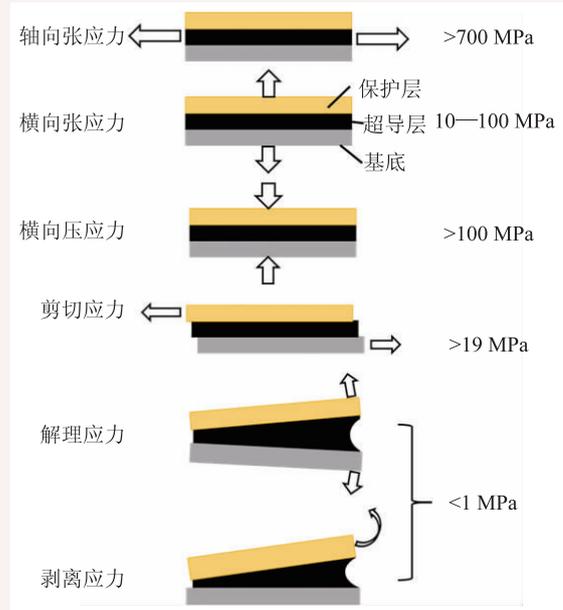


图5 RE123带材的各种应力强度^[3]

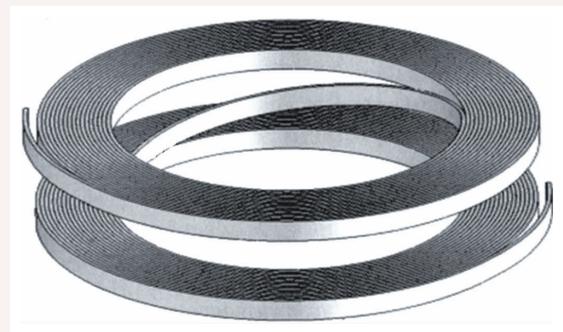


图6 双饼线圈结构示意图^[24]

性也是一个极有吸引力的特征。

根据线圈有无浸渍物可以分为干绕和湿绕，其中干绕为线圈不经过浸渍物固化，而湿绕则要通过浸渍物固化，如环氧树脂、石蜡等(图7)。在20世纪70年代，机械扰动仍然是LTS磁体过早失超的主要原因^[25]，由于磁体没有经过固化处理，导体之间有空隙存在，当磁体运行时在电磁力的作用下导体发生移动摩擦，导致磁体失超。经过浸渍物固化以后，将有空隙的线圈变成了一个坚固的整体结构，消除了导体移动。而对于RE123带材绕制的线圈，由于其大的温度裕度，机械扰动释放的能量还不至于导致失超，美国高场实验室等已经利用干绕技术进行RE123磁体制造^[22]。线圈通过浸渍固化还有其他一些益处：可以防止带材移动而产生的应力集中；可以增强绕组内的有效热导率，这对于具有温度梯度的线圈是非常重要的，如传导冷却线圈。

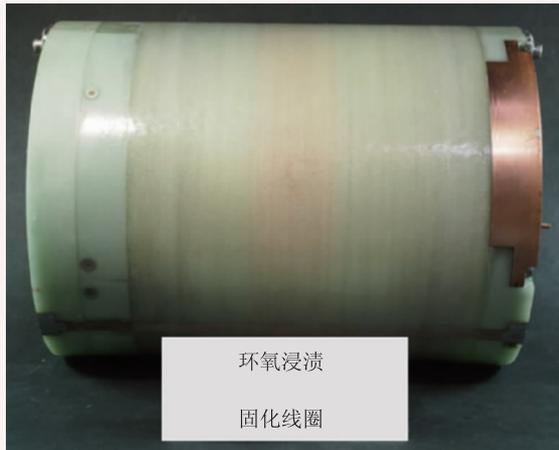


图7 环氧浸渍的线圈^[26]

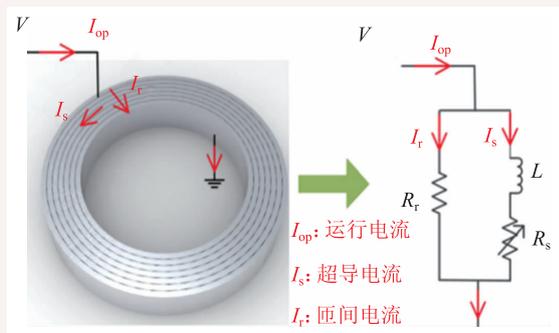


图8 非绝缘等效电路图^[33]

对于环氧树脂浸渍的线圈，由于线圈支架、环氧树脂和HTS导体之间的热收缩系数的不匹配，会在导体上下边缘附近产生热应力，日本理化研究所(RIKEN)发现在一个相对较小的饼线圈中，这个热应力足以引起超导带的分层现象^[27]。对于浸渍线圈性能退化这种问题，目前已提出多种技术方法来解决：提高带材本身的机械强度，特别是带材边缘的抗剥离和解理强度，其中剥离和解理应力是线圈退化最关键的应力模式；选择合适的浸渍物，如石蜡、油脂及氰基丙烯酸酯等这类具有弱粘合强度的材料^[28, 29]，在冷却时由于小的热应力这类材料易碎，避免了大的热应力发生在导体上；改善导体与浸渍物之间的界面环境，在导体表面施加聚合物皮层^[22, 30]，如聚酯热缩管、电沉积聚酰亚胺等可以使导体与浸渍物去除机械耦合，有效消除线圈性能退化。

根据带材是否绝缘可以分为绝缘绕制和非绝缘绕制。其中绝缘绕制又分为两种绝缘方法：一是直接对带材进行绝缘处理，如在带材表面缠绕聚酰亚胺薄膜或如前文描述的施加聚合物皮层等^[22, 30, 31]；二是通过在绕制饼状线圈过程中共绕不锈钢带或经过绝缘化处理的带子，研究已经表明，共绕不锈钢裸带，由于其低的电导率，能提供匝与匝之间的电绝缘^[32]。经过绝缘绕制的超导线圈必须要采用主动失超保护系统来进行保护。非绝缘绕制一般采用双饼结构，为直接用裸带绕制线圈，尽管非绝缘线圈其匝间没有绝缘材料，但在低温下合金或不锈钢基带等金属材料与超导层相比，它们的电阻率均高出几个数量级，因此带材在稳定载流时，电流将在超导层中进行流动。一旦线圈局部出现失超现象，本来流经超导层的电流可以经过电阻更小的匝间金属层进行分流，避开处于电阻极大的非超导态超导层^[33]，从而防止失超区域的继续扩大，非绝缘等效电路图如图8所示。本质上非绝缘绕制的磁体是自稳定的，不需要主动失超保护系统，而一般采用被动保护系统。此外，非绝缘绕制除了带材本身没有其他材料占用线圈空间，提高了线圈的整体工程电流密度，因此在HTS磁体领域受到广泛关注。

但对于非绝缘线圈，存在着一个充放电时间延迟^[34] (图9)，分析原因为由于线圈的自感，部分运行电流通过匝间接触流动，从而导致了线圈的充放电延迟效应。

由于超导带材长度的限制以及双饼线圈组装磁体时的需要，超导接头都是必须的。对于超导接头的要求，是电阻低、容易制作及稳定可靠。超导接头的制作技术可以分为超导拼接与非超导拼接，其中超导拼接为将两个带材的超导层面对面处理，使得两个超导层进行再结晶生长成为一个完整的超导体^[35]。非超导拼接为用常导材料作为连接介质对两个带材进行拼接，根据接头技术非超导拼接又可分为钎焊法、银扩散法和机械压接法。目前运用比较广泛的为钎焊法，该方法工艺最为简单，兼容性较强。根据焊接接头的结构形状可以分为搭接接头和桥接接头^[36]，如图10所示，搭接为两个超导带超导端面直接对接，桥接为用另一个超导带对需要焊接的两个超导带进行桥接联通。接头电阻和多个因素有关，如超导带的层状结构材料、带材厚度、焊料的选择、表面清洁度、接触均匀性及焊接时用的压力等，都会对接头电阻产生影响。通过增加接触面积，优化拼接界面，非超导接头电阻可低至几 $n\Omega$ ^[37]。

3.2 磁体的结构设计

一般来说，各向同性的圆导线是绕制磁体的理想选择，因为圆线的性能不受磁场方向的影响，且在进行磁体的结构设计和制造时，可以借鉴已经比较成熟的 LTS 磁体技术，如 MRI 和 NMR 磁体。

而对于层状结构的 RE123 带材，在磁体设计方面，需要考虑多个因素，如磁体本身的几何形状(内外径、高度)、外磁场情况及磁体的运行情况(温度、励磁速率)等，这些都会对带材的 J_c 产生影响。在高场超导磁体中，最关键的区域是磁体的上下两端，这里自场的径向分量最大，对带材的影响也最大，因此，磁体的运行电流通常由两端线圈的负载线来决定^[38](图11)。目前，已经

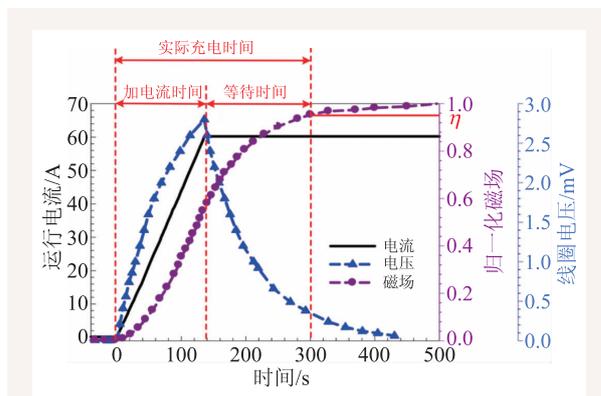


图9 线圈充电过程^[34]

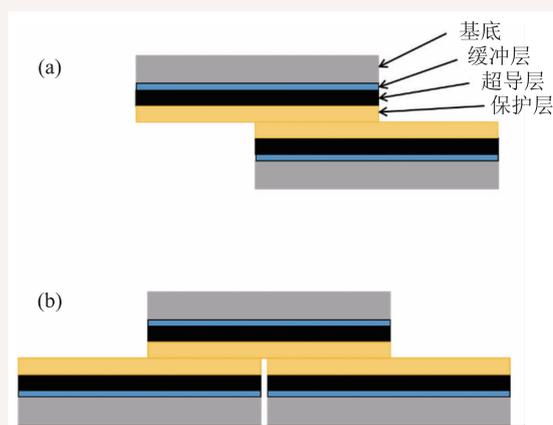


图10 非超导接头 (a)搭接接头; (b)桥接接头

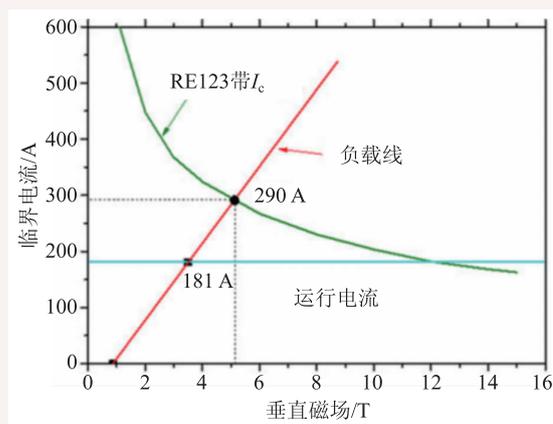


图11 端部线圈的负载线决定运行电流^[38]

提出了一些结构设计来减小两端磁场的影响，MIT 提出多宽度绕组技术^[39]，如图12所示，这种方法适用于双饼线圈组装的磁体，该技术对双饼线圈的导体宽度进行分级，具体为利用不同宽度的带材绕制线圈，最后组装磁体时，将最窄的线

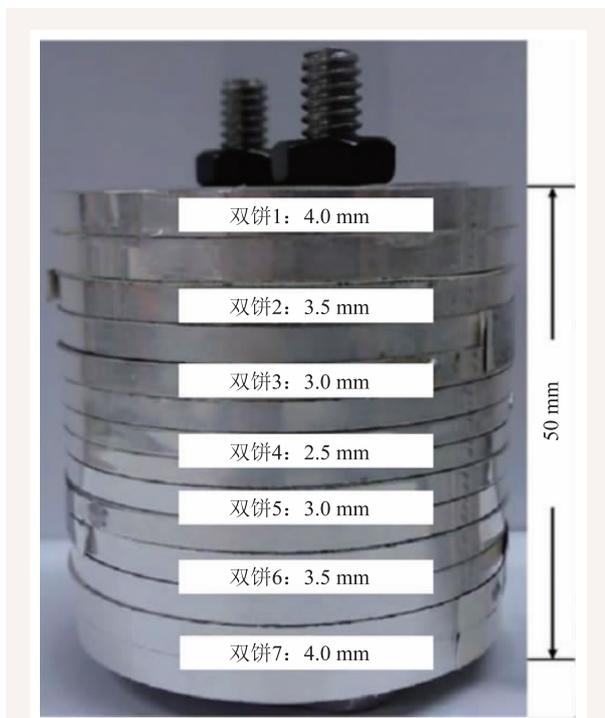


图12 多宽度绕组实物图^[39]

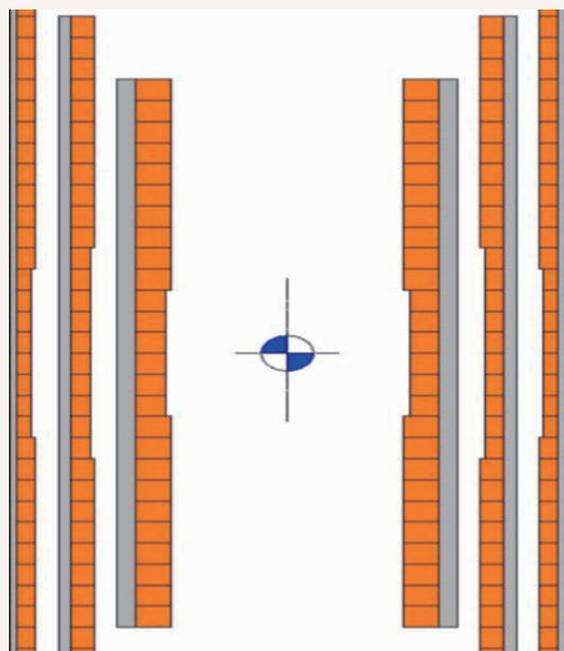


图13 MIT内插磁体沟槽结构示意图^[40]

圈放在磁体中间平面，最宽的线圈放在磁体上下两端，通过减小径向场最大的上下两端线圈的电流密度来增加安全裕度。相对于单宽度绕组，多宽度绕组设计还可以减少线材的用量；中国科学院电工研究所提出对磁体上下两端的线圈进行双

绕^[38]，具体为同时用两根带材绕制线圈，使得电流密度减少50%，这样会明显减小磁体上下两端的径向磁场，提高运行裕度。

为了增加中心磁场均匀性，MIT还提出了沟槽绕制技术^[40]，沟槽绕制为在磁体内径的中间或中间平面附近出现凹槽状的结构，即中间部分线圈的内径比其他线圈大，而所有线圈的外径保持一致(图13)。通过沟槽绕制技术，可以缩短磁体的长度，减少带材的用量，并提高磁场的均匀度。

3.3 磁体的失超保护

磁体在运行过程中可能由于局部导体的退化或某点的温度过高而导致带材的失超，伴随着失超将会引发诸多的问题，如过电压、高温、低温介质的蒸发等，这些问题都会对磁体的稳定性造成严重的影响，甚至导致整个磁体的损坏，所以对磁体进行失超保护是必要的。

磁体的失超本质是一个能量的转换过程，当失超发生时，磁体的电磁能转换为热能。通常，磁体失超是从线圈上的某一点开始的，其产生的热量接着通过热传递向磁体的其他地方扩散，如果磁体储存的能量过大，热量还来不及扩散，就会对带材造成烧损。所以失超保护的实质就是防止失超点的产生及当失超发生后，将失超点产生的热量快速消散掉以防止局部过高温的产生。

对于磁体的失超保护，首先要对失超进行检测，失超检测方法有多种，如电压检测、光纤检测、超声波检测及低温介质的流速检测等^[41-43]，目前运用比较广泛的是电压检测。最简单的电压检测法为直接测量磁体匝间的电压，但对每匝线圈都安装电压传感器是繁复的，所以可以将磁体进行分段，检测各部分的电压变化来进行失超判断。此外，还可以用桥路法或多段桥路法来提高检测精度。

在检测到有失超现象后，可以通过不同的保护措施来对磁体进行保护，根据保护方式可以分为主动失超保护和被动失超保护。主动失超保护为当磁体失超时，快速将磁体的能量转移到磁体外部，并通过电阻元器件将能量消耗掉。主动失

超保护经常用到加热器^[44]，当检测到失超后，位于磁体中的加热器被激活并迅速将线圈与电源断开，并将储存的能量释放到转储电阻中，然后在磁体容许的温度内，耗散掉储存的能量，电路图如图 14 所示。对于失超传播速度较慢的 RE123 线圈，失超感应加热器通常是必要的，NHMFL 在建造 32 T 磁体时就用了多个加热器对磁体进行保护^[45](图 15)。被动失超保护为当磁体失超时，使正常区域快速扩散到整个磁体，以防止失超点的局部温升过高。目前有多种方法被提出，如增加线圈绕组间的热导率、增加铜稳定层的厚度及提高失超传播速度等，能明显改善局部温度的分布。非绝缘线圈是一个自保护系统，通常不需要主动失超保护。

4 磁体的屏蔽电流效应与交流损耗

屏蔽电流最早是在 1960 年由 Nb₃Sn 带或单丝的 NbTi 导线绕制的 LTS 磁体上发现的^[46]，这些磁体表现为中心场减小，放电以后仍然有大的剩磁，以及在稳定运行电流下出现大的磁场漂移。屏蔽电流原理是超导体的磁化和磁通蠕动，通常对磁体来说是有害的，它对磁体的空间场均匀性和时间场稳定性进行扰动，极大地影响磁场质量，特别是对于要求比较严格的 NMR 或 MRI 磁体。但在 1970 年，多丝的 LTS 导线被制造出来以后，磁体的屏蔽电流效应受到极大的抑制，与以前的 LTS 磁体相比基本可以忽略，所以理想的磁体绕制材料多为多丝结构^[47]。而 RE123 带材与早期的 LTS 导体相似，其超导层为平面的单丝结构，因此 RE123 磁体的屏蔽电流效应极为显著。

RE123 磁体的屏蔽电流产生的基本机制为当磁体进行励磁时，磁场的径向分量穿透带材宽面，在带材面上感应一个电流环路，这就是屏蔽电流。屏蔽电流产生机制如图 16 所示。在线圈中心，屏蔽电流将产生一个磁场，叫做屏蔽场，其对中心磁场的质量有巨大影响，屏蔽场随交变电流的变化如图 17 所示。发现屏蔽场随施加电流的变化表现为一个磁滞回线，在电流增加的充电过程中，屏蔽场的绝对值表现为先增加，到达一个

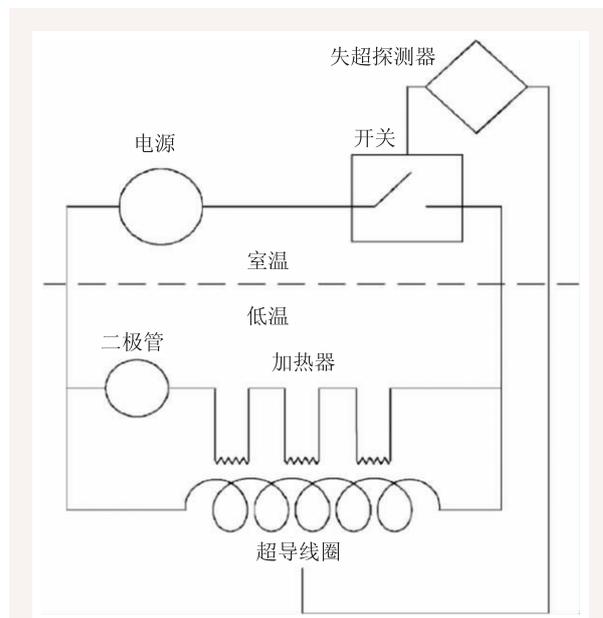


图 14 加热器失超保护原理电路图^[44]

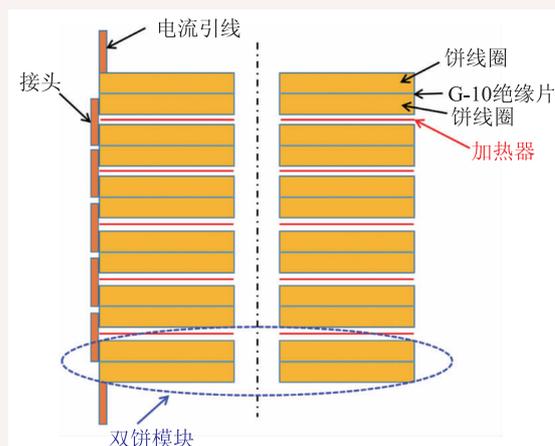


图 15 NHMFL 磁体中的加热器位置示意图^[45]

峰值后再减小；在电流减小的放电过程中，屏蔽场的绝对值先减小，然后再反向增加，电流为 0 时仍然有剩磁存在。这种磁滞现象可以用 Bean 模型进行解释，当电流刚开始增加，产生的磁通逐渐穿透超导带两端，穿透深度随着磁场强度的增加而增加，导致屏蔽场的增加；一旦当磁通完全穿透超导带，屏蔽场趋近于饱和不再增加；当电流继续增加，局部的高磁场导致 J_c 降低，且传输电流的增加对屏蔽电流进行了抵消，导致屏蔽场逐渐降低。由于超导体的磁通钉扎效应，当电流为 0 时，仍然有部分磁通被固定在超导体里面，导致了剩磁的存在。需要注意的是这个剩磁高达

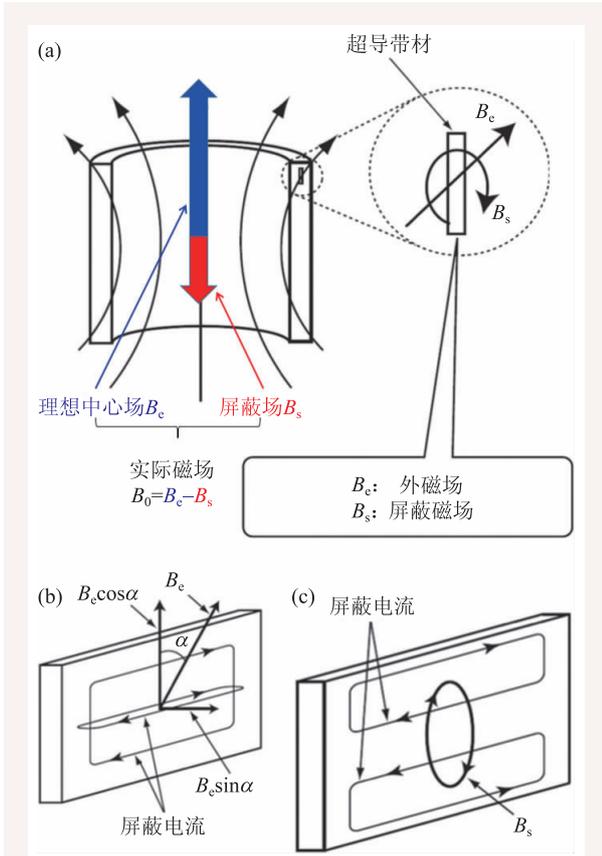


图16 屏蔽电流产生机制图^[48] (a)外磁场穿透超导带产生屏蔽场；(b)垂直于带材的磁场分量感应出屏蔽电流；(c)屏蔽电流产生屏蔽场

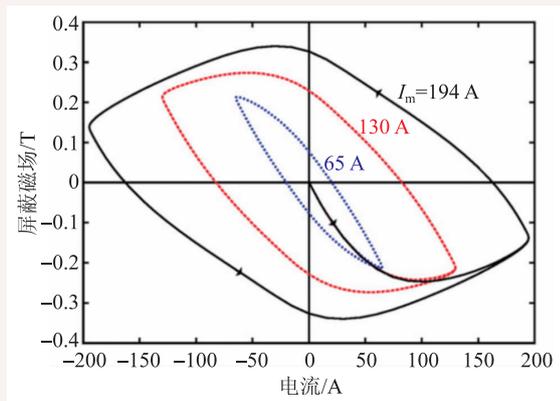


图17 屏蔽磁场随电流的变化情况^[49]

330 mT，相对于 7.3 T 的最大中心场其占比例达到了 4.5%，这对 NMR 磁体或加速器磁体来说是很大的^[49]。

稳定电流下磁场的漂移也是影响中心场质量的重要因素。当对磁体充电达到最大电流以后，

保持最大电流稳定运行，发现中心场会随着时间的变化而出现正向的漂移，经过一个小时的稳恒电流保持，中心场在 6 T 的背景场下增加了 100 mT，大约是 1.7% 的漂移，这对 NMR 磁体或加速器磁体来说也是很大的。而对于中心场的正向或负向漂移，则取决于屏蔽场在磁滞回线中的具体位置^[50]。

如今，已有多种技术方法被提出来用于减小屏蔽电流效应：将导体细丝化，屏蔽电流回路减少，屏蔽场降低^[51]；利用过电流反转法，即先施加一个超过运行电流的过电流，然后再减小至运行电流，利用这种方法能抑制磁体蠕动，稳定磁场漂移^[52]；在达到运行电流时，对磁体进行降温处理，电流密度增加，磁通蠕动受到抑制，可以减小小磁场漂移^[53]。

当磁体稳恒运行时，超导带材表现为零电阻，磁体没有损耗；但当磁体通时变或交变电流时，会产生变化的磁场，此时磁体就会出现损耗，这种损耗就是交流损耗。从宏观角度来说，交流损耗是由超导体中变化的磁场感应出了电场，产生焦耳热；从微观角度来说，交流损耗是由磁场穿透超导带材时量子化磁通线的粘滞运动导致的。交流损耗的存在会降低超导磁体的运行稳定性与安全裕度，且交流损耗的大小将决定着制冷剂的消耗量，这将关系到磁体的运营成本与安全性，所以交流损耗是磁体设计时需考虑的一个重要参数，减小交流损耗也是超导电力应用的一个重要研究课题。对于磁体的交流损耗研究，目前多用有限元方法对其进行仿真计算，考虑超导体高度非线性的 $E-J$ 关系及带材临界电流密度的磁场各向异性，利用以下公式对交流损耗进行计算。

$$Q = \iint E \cdot J dv dt ,$$

其中 E 为电场， J 为电流密度， v 为磁体体积， t 为时间。

计算发现对于饼状线圈组成的磁体中，交流损耗从中部的线圈向两端的线圈逐渐增大，且上下两端附近的线圈贡献了绝大部分的交流损耗，而中间线圈的交流损耗贡献几乎为零，而已知磁体上下两端径向场最大，中间为零，由此磁体的

交流损耗来源被认为主要是磁化损耗^[54]。

5 基于 2G-HTS 带材的磁体研究进展

目前全球多个研究机构已经陆续开展了直流 HTS 磁体项目，其中包括高低温超导混合磁体、电阻与高温超导混合磁体、全二代高温超导磁体、传导冷却高温超导磁体等。下面将对近年来国内外各研究机构全超导磁体项目进行介绍，具体情况见表 2。

5.1 美国高场实验室 (NHMFL)

2017 年 12 月，NHMFL 成功研制出了中心磁场为 32 T^[23, 45, 55]、冷孔直径为 32 mm 的全超导磁体。该磁体为高低温超导混合磁体，将 HTS 磁体内插在 LTS 磁体中，外部的 LTS 磁体为牛津公司提供，由最外层的两个 NbTi 线圈和中部的三个 Nb₃Sn 线圈组成，共同为内插的 HTS 磁体提供一个 15 T 的背景场，内插的 HTS 磁体在液氦环境下贡献 17 T 的中心场(图 18)。外部的 LTS 磁体有独立供电系统，也有失超保护系统，该失超保护系统由一个二极管—电阻网络被动保护和一个带有失超检测的主动保护组成，LTS 磁体的失超保护系统还可以被来自内部 HTS 磁体的失超信号触发。

内插的 HTS 磁体由内外两层线圈组成，每层由多个双饼堆叠而成，每个双饼由 SuperPower

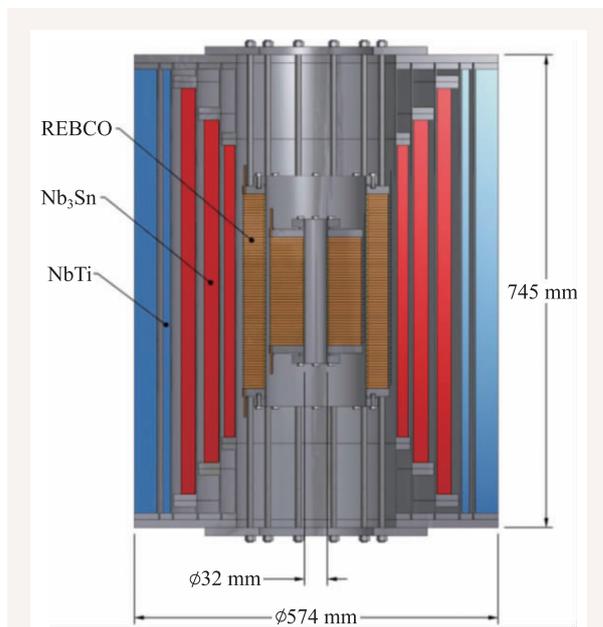


图 18 NHMFL 32 T 全超导磁体结构示意图^[23]

公司提供的 RE123 带材绕制。双饼线圈的制造方法为干绕，并通过共绕溶胶凝胶绝缘的不锈钢带来进行绝缘和加强机械强度。目前，相比于之前 27.6 T 的最大场全超导磁体，该 32 T 磁体打破了全超导磁体的世界纪录并作出了更大的提升。

5.2 韩国超导公司 (SuNAM)

2015 年，韩国著名 HTS 带材生产公司与麻省理工学院 FBML 联合研制了一款全 2G-HTS 磁体，其中 FBML 负责磁体的电磁设计和机械分析，SuNAM 负责磁体的制造。该磁体冷孔中心

直径为 35 mm，在 4.2 K、242 A 的运行电流下能产生 26.4 T 中心场，这是迄今为止全 2G-HTS 磁体产生磁场的最高纪录^[56]。

磁体由 26 个双饼线圈组成，每个线圈采用无绝缘绕制，绕制带材为具有不锈钢基底的 RE123 带，磁体结构非常紧凑，且不需要主动失超保护。磁体采用多宽度绕组方法，将宽带绕组放在磁体上下两端，以减小径向场最大处线圈的电

表 2 内插 RE123 线圈的全超导磁体研究进展

| 研究机构 | 中心磁场/T | 内插线圈磁场/T | RE123 带材运行电流/A | 绕制方式 | 内直径/mm |
|-----------|--------|-------------|----------------|-------|--------|
| 美国 NHMFL | 32 | 17 | 177 | 双饼绝缘 | 34 |
| 韩国 SuNAM | 26.4 | 26.4 | 242 | 双饼非绝缘 | 35 |
| 日本 RIKEN | 27.6 | 内 6.5 外 4.1 | 285 | 层绕 | 40 |
| 日本 HFLSM | 24.6 | 10.6 | 188 | 双饼绝缘 | 52 |
| 日本 NIMS | 24 | 6.8 | 321 | 层绕 | 50 |
| 中国科学院 IEE | 25.7 | 10.7 | 194.5 | 双饼非绝缘 | 32 |
| 美国 FBML | 30.5 | 18.8 | 251 | 双饼非绝缘 | 54 |

注：NIMS——日本国立材料研究所

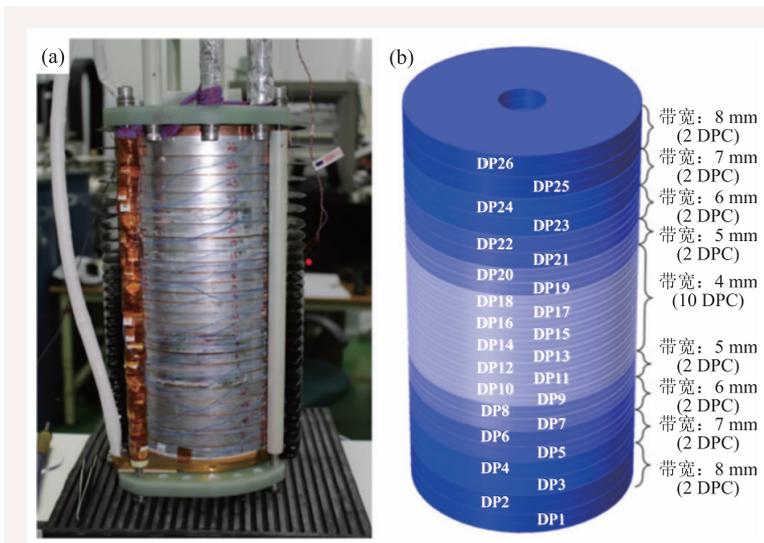


图19 SuNAM内插磁体^[56] (a)实物图; (b)双饼线圈组成结构示意图

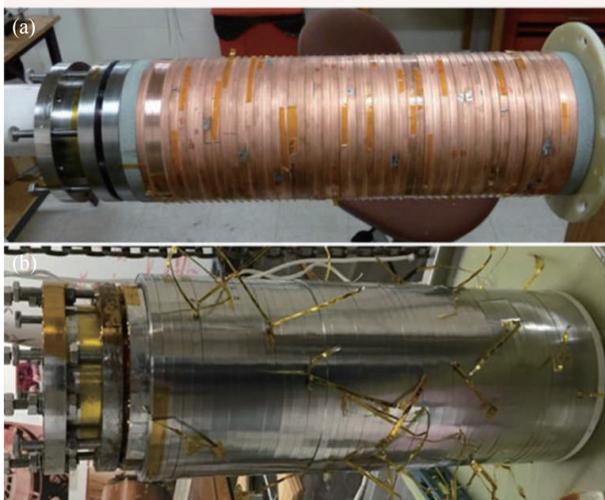


图20 MIT最内层线圈实物图^[24] (a)无绑扎; (b)不锈钢绑扎

流密度来提高安全裕度,极大地提高了磁体中间绕组带材的利用率。利用10 cm长的GdBCO带对相邻的两个双饼进行拼接,在77 K和4.2 K温度下,平均接头电阻分别为62 nΩ和52 nΩ。由于没有背景场,在磁体最大场26.4 T时的环向应力仅为286 MPa,约为RE123带材95% I_c 时保留应力的一半,表明还有极大的安全裕度,磁体实体和结构如图19所示。

5.3 麻省理工学院高场实验室(MIT FBML)

MIT FBML实验室目前正在进行1.3 GHz (30.5 T)NMR磁体的研制。该方案最初为700 MHz

LTS/600 MHz HTS(Bi2223/RE123)的组合,但由于2011年12月600 MHz HTS内插磁体的意外被盗,将原方案变成了600 MHz LTS/700 MHz HTS (Bi2223/RE123)的组合,后来考虑到最新的超导材料性能及线圈绕制技术的发展,最终将方案定为500 MHz LTS/800 MHz RE123(18.8 T)的组合^[24, 57-59]。

随着磁体方案的变化,FBML也提出了许多具有实用性的创新技术,其中主要包括非绝缘绕制技术和沟槽绕制技术。为了减小带材受到的应力集中,内插RE123磁体分为3层,最内层线圈通过不锈钢绑扎,实物图如图20所示。其中由内到外三个线圈场贡献分别为8.7 T、5.6 T、4.5 T,并分别于2016年、2017年、2018年完成制造然后组装在一起,最近的测试发现,在液氮中施加251.3 A的运行电流能产生17.9 T的中心场,但在运行5分钟后磁体失超,最终的失超原因尚未确定。

5.4 日本理化研究所(RIKEN)

2016年,RIKEN考虑使用HTS线圈来制造一个紧凑的1.3 GHz核磁共振(NMR)磁体(30.5 T),为了保证NMR的磁场高均匀性,采用层绕技术来对线圈进行绕制。为了验证该工艺的可行性,设计了一个28 T的高低温混合超导磁体,磁体结构示意图如图21所示。外部的LTS磁体由NbTi线圈和Nb₃Sn线圈串联组成,冷孔直径为130 mm,在4.2 K温度下提供17 T的背景场。内插的HTS磁体由RE123线圈和Bi2223线圈串联组成,两种HTS线圈都采用层绕技术,并浸渍石蜡^[60]。

在没有外场的情况下,浸泡在液氮中的HTS磁体能产生13 T的中心场。但在有背景场下,当中心场达到25 T时,RE123线圈出现严重的性能退化,发现是在接头处出现了带材的分层现象,这是由于电磁力导致的在接头处的应力集中,引起了带材上的剥离和解理应力。还发现最外层的导体由于轴向的电磁力而在轴向方向上发生了移

动和变形。基于这些问题，RIKEN改进制造工艺并又建造了一个RE123线圈，第一个改进为去除线圈内部的接头并将其安装在顶部的法兰上；第二个改进为在线圈最外层缠绕更多的捆绑层，以防止导体移动。改进后的磁体在285 A的运行电流下能产生27.6 T的中心场，其中RE123线圈贡献6.5 T，Bi2223线圈贡献4.1 T，但是在磁场从27.6 T上升到28 T的这个过程中，RE123线圈中间部分出现过早电压，线圈失超并导致带材烧坏。改进后的失超现象表明电磁力导致的RE123线圈性能的退化仍然没有得到有效解决，所以RIKEN放弃了原来的RE123线圈方案，将内插的HTS磁体改为全Bi2223带材绕制。

5.5 日本东北大学高场实验室(HFLSM)

日本东北大学HFLSM实验室自2013年开始，一直进行着25 T传导冷却超导磁体的研制^[61-64]。传导冷却不需要低温介质，直接通过制冷机对磁体进行降温，具有操作方便，能够长期运行等优势。该25 T磁体室温孔径为52 mm，包括一个14 T的LTS背景磁体和一个11 T的HTS内插磁体，LTS磁体由外部的NbTi线圈和中间的Nb₃Sn线圈组成，HTS磁体有两种方案，一个为GdBCO线圈，另一个为Bi2223线圈。GdBCO线圈由56个单饼组成，浸渍环氧，为了防止分层现象，匝间共绕包裹聚四氟乙烯的聚酰亚胺带进行绝缘，并在饼线圈之间安装铝板增加热传导；Bi2223线圈由38个双饼组成，带材通过Ni合金进行机械加强，部分线圈进行环氧浸渍以减小最大环向应力，浸渍线圈采用和GdBCO线圈同样的方法进行绝缘处理。对于传导冷却磁体，保持冷头制冷功率与磁体热负荷之间的平衡是至关重要的，而磁体包括多种热负荷，如电流引线的漏热、辐射漏热、焦耳热及交流损耗等，所以磁体的冷却系统设计变得复杂。HFLSM实验室为了解决该问题，采用两台4 K/GM制冷机和两台GM/JT制冷机分别冷却HTS磁体和LTS磁体，还采用两台单级GM制冷机来对电流引线和热辐射屏进行单独

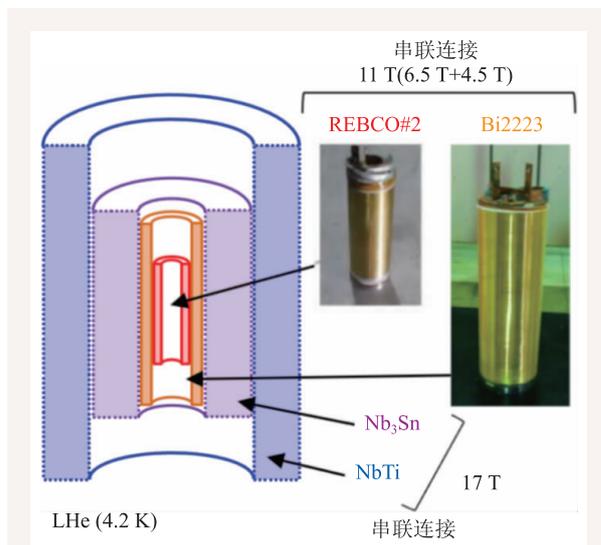


图21 RIKEN磁体结构示意图^[60]

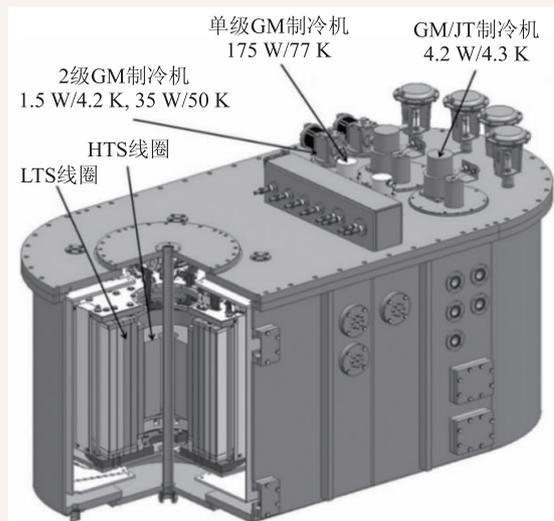


图22 传导冷却超导磁体结构示意图^[63]

冷却(图22)。

在测试运行中，经过164小时的降温，LTS磁体和HTS磁体分别从室温降到4.3 K和4.6 K。然后对两个磁体进行励磁，在没有背景场下，GdBCO线圈在132.6 A的运行电流下能产生10.15 T的中心场，但在14 T的背景场下，线圈在运行电流为124.6 A时失超，中心场为23.61 T；Bi2223线圈在零场下运行电流为204.7 A时能产生11.48 T的中心场，在14 T的背景场下，当运行电流为187.8 A时，能产生24.57 T的中心场。这是当前传导冷却全超导磁体能产生的最高磁场。

下一步, HFLSM 实验室将在 25 T 传导冷却超导磁体的基础上进行升级, 计划 30 T 磁体的研制, 该 30 T 磁体仍用 25 T 磁体的 LTS 线圈和冷却系统, 但将 Bi2223 线圈换成 RE123 线圈。RE123 线圈由双饼组成, 每个双饼为两根带材共绕而成, 不进行绝缘处理。该磁体室温孔径设计为 32 mm, 内插 RE123 线圈的研制将于 2020 年完成。

5.6 中国科学院电工研究所(CAS—IEE)

中国科学院电工研究所 2012 年开始对 25 T 全超导磁体进行研制^[38, 65-67], 该磁体作为极端条件实验科学设备, 由 15 T LTS 磁体和内插 10 T HTS 磁体组成, 室温孔径为 32 mm。HTS 线圈由双饼组成, 采用非绝缘干绕技术, 双饼之间通过 G10 片绝缘, 绕制带材为 SuNAM 公司提供的通过不锈钢加强的 RE123 带。HTS 线圈最初计划由 16 个双饼组成, 在液氮测试中发现一个双饼的 n 值偏低, 最终在组装 HTS 磁体时去除了该双饼。初步测试, 在 77 K、自场下, 当运行电流为 32 A 时, HTS 线圈能产生 1.62 T 的中心场; 而在 4.2 K、自场下, HTS 线圈在运行电流为 213 A 时能产生 11.2 T 的中心场; 最后在液氦环境下对整个磁体进行测试, 发现在 15 T 背场下, HTS 能产生 9 T 的中心场, 即冷孔中心场为 24 T。

在上述测试中发现, 有 4 个双饼拼合接头出现明显的电阻增大, 5 个双饼出现不同程度的过早失超, 这些双饼大部分位于 HTS 线圈上下两端。分析原因可能为: 预加载的轴向力不足, 当

励磁时产生的轴向力使双饼之间的空隙发生变化, 损坏双饼拼合接头; 拼合接头工艺不够完善, 产生应力集中(剪切应力), 损坏接头; 上下两端极大的垂直场降低了带材的运行裕度, 出现过早失超。

为解决这些问题, 电工研究所又利用 SuperPower 公司的带材绕制了 10 个双饼线圈, 其中 4 个为用两根带材进行双绕。在进行 HTS 磁体组装时, 选择前面测试中性能较好的 10 个 SuNAM 双饼放于磁体中间, 接着将双绕的 4 个 SuperPower 双饼分别放于磁体上下两端以提高运行裕度, 剩余的 6 个 SuperPower 双饼再分别放入空缺的位置(图 23)。此外, 为了防止双饼拼合接头的损坏, 在 HTS 磁体最外层用不锈钢带进行多层捆绑, 以防止外层带材间的相互移动。经测试, 在 4.2 K 和 15 T 背景场下, 当运行电流为 181.6 A 时 HTS 磁体成功产生 10 T 中心场, 使得冷孔中心磁场达到 25 T。最后, 将磁体运行电流减小到 170 A 后再加电流进行励磁, 发现当中心场为 25.7 T 时磁体失超, 此时运行电流为 194.5 A。下一步, 电工研究所计划进行 30 T 超导磁体的研制, 该磁体将由 15 T 的 LTS 磁体和 15 T 的 RE123 磁体组成。

6 总结

第二代高温超导带材由于其低温下极高的载流能力和优异的机械性能, 对于高场磁体的制造有着不可替代的作用。近年来, 随着制备工艺的改进和人工钉扎的引入, 第二代高温超导带材的在场性能得到了显著的提升, 这对其在磁体的应用是至关重要的。由于带材的各向异性及较弱的抗剥离强度, 在线圈绕制和磁体结构设计时, 为了发挥出超导的大载流优势同时避开带材的易分层等弱点, 发展了大量的实用性技术, 如双饼线圈、非绝缘绕制、多宽度绕组等方案, 这对磁体的性能和稳定性都有极大的提高。目前, 尽管高温超导带材的磁体应用在应力、失超保护及屏蔽电流效应等方面面临着诸多问题, 但随着对高温超导特性和制备工艺的深入理解, 以及更多更优

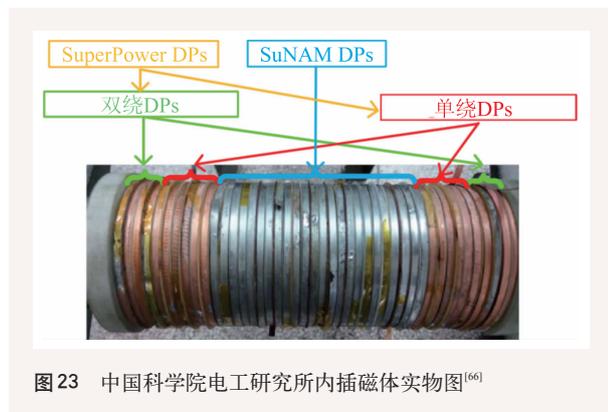


图 23 中国科学院电工研究所内插磁体实物图^[66]

越的实用性技术被提出来, 高温超导磁体终将会成为强磁场世界的重要一员, 推动各个学科领域的发展与新发现。

致谢 感谢郭艳群、李敏娟、曾志刚、刘志勇、鲁玉明、白传易、范峰等老师给予的宝贵意见; 感谢与池长鑫博士、彭永强同学的有益讨论。

参考文献

- [1] Wu M K, Ashburn J R, Torng C J *et al.* Phys. Rev. Lett., 1987, 58:908
- [2] Bird M D, Bole S, Eyssa Y M *et al.* IEEE Trans. Appl. Supercond., 2000, 10(1):439
- [3] Maeda H, Yanagisawa Y. IEEE Trans. Appl. Supercond., 2014, 24(3):4602412
- [4] <https://nationalmaglab.org/magnet-development/applied-superconductivity-center/plots>
- [5] Goran M, Rudra P, Xu A X *et al.* Supercond. Sci. Technol., 2018, 31:10LT01
- [6] 蔡传兵, 潘成远, 刘志勇 等. 物理学进展, 2007, 27:467
- [7] Iwasa Y. Cryogenics, 1996, 36(10):885
- [8] Graser S, Hirschfeld P J, Kopp T *et al.* Nature Physics, 2010, 6(8):609
- [9] 蔡传兵, 池长鑫, 李敏娟 等. 科学通报, 2019, 64(08):827
- [10] Selvamanickam V, Chen Y, Xiong X *et al.* IEEE Trans. Appl. Supercond., 2009, 19(3):3225
- [11] Lee J H, Mean B J, Kim T J *et al.* IEEE Trans. Appl. Supercond., 2014, 24(5):6900505
- [12] Selvamanickam V, Chen Y, Kesgin I *et al.* IEEE Trans. Appl. Supercond., 2011, 21(3):3049
- [13] Oh S S, Kim H S, Ha H S *et al.* Progress in Superconductivity and Cryogenics, 2013, 15(4):001
- [14] Pardo E *et al.* Supercond. Sci. Technol., 2011, 24(6):065007
- [15] Selvamanickam V, Gharahcheshmeh M H, Xu A *et al.* Appl. Phys. Lett., 2015, 106(3):032601
- [16] Chen Y, Selvamanickam V, Zhang Y *et al.* Appl. Phys. Lett., 2009, 94(6):062513
- [17] Eley S, Leroux M, Rupich M W *et al.* Supercond. Sci. Technol., 2017, 30(1):015010
- [18] Shin H S, Dedicataria M. Supercond. Sci. Technol., 2013, 26(5):055005
- [19] Shin H S, Kim K H, John R *et al.* Supercond. Sci. Technol., 2005, 18(12):S364
- [20] Shin H S, Dedicataria M. Supercond. Sci. Technol., 2012, 25(5):054013
- [21] Laan D C, Ekin J W, Clickner C C *et al.* Supercond. Sci. Technol., 2007, 20(8):765
- [22] Yanagisawa Y, Sato K, Piao R *et al.* Physica C: Supercond., 2012, 476:19
- [23] Markiewicz W D, Larbalestier D C, Weijers H W *et al.* IEEE Trans. Appl. Supercond., 2012, 22(3):4300704
- [24] Bascunan J, Michael P, Hahn S *et al.* IEEE Trans. Appl. Supercond., 2017, 27(4):4300504
- [25] Maeda H, Tsukamoto O, Iwasa Y. Cryogenics, 1982, 22(6):287
- [26] Hornung F, Eisele M, Klaeser M *et al.* IEEE Trans. Appl. Supercond., 2017, 27(4):4300604
- [27] Yanagisawa Y, Nakagome H, Takematsu T *et al.* Physica C: Supercond., 2011, 471(15—16):480
- [28] Mizuno K, Ogata M, Nagashima K. IEEE Trans. Appl. Supercond., 2013, 23(3):3600104
- [29] Jin X, Matsuda T, Yanagisawa Y *et al.* IEEE Trans. Appl. Supercond., 2014, 24(3):4600104
- [30] Trociewitz U, Canassy M, Hannion M *et al.* Appl. Phys. Lett. 2011, 99(20):202506
- [31] Uglietti D, Choi S, Kiyoshi T. Physica C: Supercond., 2010, 470(20):1749
- [32] Gupta R, Anerella M, Ganetis G *et al.* IEEE Trans. Appl. Supercond., 2011, 21(3):1884
- [33] Wang Y, Song H, Xu D *et al.* Supercond. Sci. Technol., 2015, 28(4):045017
- [34] Wang Y, Song H. Supercond. Sci. Technol., 2016, 29(7):075006
- [35] Park Y, Shin H J, Kim Y G *et al.* IEEE Trans. Appl. Supercond., 2013, 23(3):6600804
- [36] Zhou F, Cheng J, Xu Y *et al.* IEEE Trans. Appl. Supercond., 2014, 24(5):6900405
- [37] Chang K S, Jo H C, Kim Y J *et al.* IEEE Trans. Appl. Supercond., 2011, 21(3):3005
- [38] Liu J, Wang L, Qin L *et al.* IEEE Trans. Appl. Supercond., 2018, 28(4):4301005
- [39] Hahn S, Kim Y, Park D K *et al.* Appl. Phys. Lett., 2013, 103(17):173511
- [40] Bascunan J, Hahn S, Kim Y *et al.* IEEE Trans. Appl. Supercond., 2014, 24(3):4300904
- [41] Turenne M, Johnson R, Hunte F *et al.* 23rd IEEE/NPSS Symp. on Fusion Engineering, 2009. 544
- [42] Marchevsky M, Xie Y Y, Selvamanickam V. Supercond. Sci. Technol., 2010, 23(3):034016
- [43] Tsukamoto O, Maguire J F, Bobrov E S *et al.* Appl. Phys. Lett. 1981, 39(2):172

- [44] Markiewicz W D. IEEE Trans. Appl. Supercond., 2008, 18(2): 1333
- [45] Weijers H W, Markiewicz W D, Voran A J *et al.* IEEE Trans. Appl. Supercond., 2014, 24(3): 4301805
- [46] Anderson A C, Sarwinski R J. Rev. Sci. Instrum., 1963, 34(3): 298
- [47] Critchlow P R, Gregory E, Zeitlin B. Cryogenics, 1971, 11(1): 3
- [48] Amemiya N, Akachi K. Supercond. Sci. Technol., 2008, 21(9): 095001
- [49] Pardo E, Souc J, Frolek L. Supercond. Sci. Technol., 2015, 28(4): 044003
- [50] Koyama Y, Takao T, Yanagisawa Y *et al.* Physica C, 2009, 469(13): 694
- [51] Kesgin I, Majkic G, Selvamanickam V. Physica C: Supercond., 2013, 486: 43
- [52] Yanagisawa Y, Nakagome H, Koyama Y *et al.* Physica C, 2009, 469(22): 1996
- [53] Yanagisawa Y, Kominato Y, Nakagome H *et al.* Adv. Cryogenic Eng., 2011, 1434: 1372
- [54] Xia J, Bai H Y, Lu J *et al.* Supercond. Sci. Technol., 2015, 28(12): 125004
- [55] Weijers H W, Markiewicz W D, Gavrilin A V *et al.* 2016, 26(4): 4300807
- [56] Yoon S, Kim J, Lee H *et al.* Supercond. Sci. Technol., 2016, 29(4): 04LT04
- [57] Bascunan J, Hahn S, Park D K *et al.* IEEE Trans. Appl. Supercond., 2012, 22(3): 4302104
- [58] Bascunan J, Hahn S, Kim Y *et al.* 2013, 23(3): 4400304
- [59] Michael P C, Park D, Choi Y H *et al.* 2019, 29(5): 4300706
- [60] Yanagisawa Y, Kajita K, Iguchi S *et al.* IEEE/CSC & ESAS Superconductivity News Forum (global edition), 2016
- [61] Awaji S, Watanabe K, Oguro H *et al.* IEEE Trans. Appl. Supercond., 2014, 24(3): 4302005
- [62] Awaji S, Oguro H, Watanabe K *et al.* Supercond. Sci. Technol., 2016, 29(5): 055010
- [63] Hanai S, Tsuchihashi T, Ioka S *et al.* IEEE Trans. Appl. Supercond., 2017, 24(4): 4602406
- [64] Awaji S, Watanabe K, Oguro H *et al.* Supercond. Sci. Technol., 2017, 30(6): 065001
- [65] Wang Q, Dai Y, Ni Z *et al.* IEEE Trans. Appl. Supercond., 2013, 23(3): 4300905
- [66] Liu J H, Wang Q L, Dai Y M *et al.* IEEE/CSC&ESAS Superconductivity News Forum (global edition), 2017
- [67] Liu J H, Wang Q L, Dai Y M *et al.* IEEE Trans. Appl. Supercond., 2017, 27(4): 4600705

读者和编者

订阅《物理》得好礼

——超值回馈《岁月留痕》
——《物理》四十年集萃

为答谢广大读者长期以来的关爱和支持，《物理》编辑

户名：中国科学院物理研究所
帐号：112 501 010 400 056 99
(请注明《物理》编辑部)
咨询电话：010-82649470；82649277
Email: physics@iphy.ac.cn

部特推出优惠订阅活动：向编辑部连续订阅2年《物理》杂志，将获赠《岁月留痕——《物理》四十年集萃》一本。该书收录了1972年到2012年《物理》发表的40篇文章，476页精美印刷，定价68元，值得收藏。

希望读者们爱上《物理》!

订阅方式(编辑部直接订阅优惠价180元/年)

(1) 邮局汇款

收款人地址：北京市中关村南三街8号中科院物理所，100190

收款人姓名：《物理》编辑部

(2) 银行汇款

开户行：农行北京科学院南路支行

