

YBCO 超导体的电工学应用研究进展

肖立业^{1,†} 古宏伟¹ 王秋良¹ 张国民¹ 刘建华¹ 邱清泉¹ 张志丰¹
郭文勇¹ 张京业¹ 张东¹ 赵勇² 丘明³ 焦玉磊⁴

(1 中国科学院电工研究所 中国科学院应用超导重点实验室 北京 100190)

(2 西南交通大学物理科学与技术学院 成都 610031)

(3 中国电力科学研究院 北京 100192)

(4 北京有色金属研究总院 北京 100088)

2017-07-25 收到

† email: xiao@mail.iee.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20170806

Research progress of YBCO superconductor in large-scale application

XIAO Li-Ye^{1,†} GU Hong-Wei¹ WANG Qiu-Liang¹ ZHANG Guo-Min¹
LIU Jian-Hua¹ QIU Qing-Quan¹ ZHANG Zhi-Feng¹ GUO Wen-Yong¹
ZHANG Jing-Ye¹ ZHANG Dong¹ ZHAO Yong² QIU Ming³ JIAO Yu-Lei⁴

(1 Key Laboratory of Applied Superconductivity, Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(2 School of Physical Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

(3 China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

(4 Beijing General Research Institute for Non-Ferrous Metal, Beijing 100088, China)

摘要 超导体具有一些完全区别于传统电工导体和电工磁性材料的电磁特性, 因而在电工学领域具有广泛的应用价值。自从1987年发现高温超导体以来, 高温超导体的电工学应用研究得到了快速的发展。YBCO超导材料具有比BSCCO超导材料更加优越的电工学应用性能, 因而随着YBCO超导材料逐渐实现小批量供货, 近年来有关YBCO超导体的电工学应用研究得以广泛的开展。文章重点介绍国内外在YBCO材料(包括块材和带材)及其在电力技术和磁体技术等方面的应用研究进展, 以此纪念YBCO超导体发现30周年。

关键词 YBCO块材, YBCO带材, 超导电力技术, 超导磁体技术

Abstract With some special electromagnetic properties different from the traditional conductors and magnetic materials, the superconductor has many potential applications in electrical engineering. Since the discovery of high T_c superconductor (HTS) in 1987, it has achieved significant progress in the application research of HTS in electrical engineering. Because YBCO superconductor shows better properties than BSCCO superconductor for electrical engineering application, recent application research of HTS for electrical engineering is focused on YBCO worldwide, and also achieved rapid progress. In this paper, we will review the recent research progress of YBCO superconductor in electrical engineering, commemorating the 30th anniversary of the discovery of YBCO superconductor.

Keywords YBCO bulk, YBCO tape, superconducting power technology, superconducting magnet technology

1 引言

超导体具有零电阻、高密度载流能力、完全抗磁性(迈斯纳效应)、超导态—正常态转变等电磁特性, 这些特性使得它完全区别于传统电工导体和电工磁性材料, 因而在电工学领域具有广泛的应用价值(表 1^[1])。

表 1 超导电工学主要方向及应用领域

研究方向		应用领域
超导电力技术	超导电力电缆	高效大容量电力输送
	超导限流器	输电网的安全稳定性
	超导储能系统	电力质量调节和电网稳定性
	超导变压器	高效大容量电力变压器
	超导电动机	船舶电力推进
	超导发电机	大型发电机和同步调相机
超导磁体技术	强磁场磁体	粒子物理和核物理类的大科学工程、核磁共振、磁分离技术、磁性扫雷技术、高性能的材料制备、作物育种等
	磁悬浮技术	磁悬浮列车和磁悬浮推进、飞轮、轴承和高精度陀螺仪等

1987年及其后多年发现了系列液氮温度以上的高温超导体(主要包括YBCO、BSCCO、TBCCO、HgBCO等), 引起了世界范围内对高温超导体电工学应用研究的广泛兴趣。20世纪90年代中后期以来, 基于BSCCO的高温超导带材(主要包括BSCCO-2223和BSCCO-2212两种)逐渐形成了小批量生产的能力, 使得超导电力技术研究得到了飞速的发展。目前, 超导电力电缆、超导限流器、超导储能系统、超导变压器等已经全面实现了示范运行^[2], 超导电动机和超导发电机样机也研制成功; 同时, 首座超导变电站也研制成功并投入电网进行示范运行^[3]。

YBCO带材潜在的制备成本更低、机械强度高、且在液氮温度具有更高的不可逆场(图 1), YBCO块材在磁悬浮领域亦具有重要应用价值, 因而YBCO超导体比BSCCO更具电工学应用价值。今年恰逢YBCO超导体发现30周年, 因此本文重点介绍近年来YBCO超导体的电工学应用研究进展。

2 YBCO块材和带材的研究进展

2.1 YBCO高温超导块材

YBCO超导体是一种陶瓷材料, 用常规陶瓷烧结工艺制备的YBCO超导体是由许多细小的晶粒组成, 在整体上表现为弱连接的颗粒超导性; YBCO超导体又是一种各向异性材料, 结晶取向无规则的烧结体不可能具有高临界电流密度(J_c), 而且 J_c 在磁场下急剧下降, 无法达到实际应用的要求。1988年, AT&T贝尔实验室的S. Jin等人^[4]报导了一种称为熔融织构生长(MTG)工艺制备

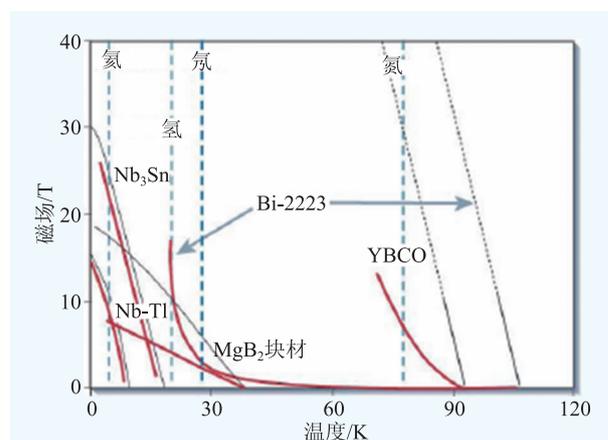


图 1 几种超导材料的上临界场(虚线)和不可逆线(实线)的示意图



图 2 TSMTG法制备的YBCO块材样品

YBCO 超导块材的方法,用该方法制备的 YBCO 超导块材的密度大于烧结材料,减少了弱连接,同时显示出明显的 c 轴择优取向, J_c 比烧结材料要高出 1—2 个数量级,在 77 K 温度和自场条件下达到 10^4 A/cm² 的量级,而且 J_c 随外场的变化不大。在此基础上,一系列改进的熔化生长工艺相继被报导,生长“单畴”超导块材成为发展方向。

在晶体生长的过程中,为了抑制自发成核和控制结晶取向得到 c 轴取向的单畴材料,在改进的熔融织构生长工艺的基础上使用了顶部籽晶技术,形成了顶部籽晶熔融织构生长技术(TSMTG),利用籽晶的晶体取向引导材料生长,使之生成具有完整 c 轴取向的单畴 YBCO 超导块。图 2 为采用顶部籽晶技术生长的 YBCO 超导块材。

TSMTG 法具有工艺过程相对简单、可实现批量化制备且单畴块材成品率较高等优点。目前,TSMTG 法制备的直径达 30 mm 的 YBCO 单畴块材,77 K 下的磁通俘获场达到 0.7—0.9 T,少数可以达到 1.2 T。这类超导单畴材料已经实现商用化,在批量化制备以及应用方面以德国 ATZ 公司规模较大。我国单畴高温超导块材的主要研制单位包括北京有色金属研究总院、上海大学以及陕西师范大学等。北京有色金属研究总院采用 TSMTG 制备方法进行批量化生产,年生产能力 500 块以上(直径为 30 mm 的 YBCO 单畴超导块材)。

2.2 YBCO 高温超导带材

可以采用将 YBCO 超导体沉积到镍合金或者不锈钢基带上的方法来制备 YBCO 带材,具有潜在的低成本优势,且在液氮温度的不可逆场较 BSCCO 高,因而在电工学领域比 BSCCO 带材更具潜在应用价值。2004 年 7 月美国 SuperPower 公司宣布制备出长 100 m、临界电流(I_c)达 70 A 的 YBCO 超导带材,标志着 YBCO 带材制备工艺的长度瓶颈得以突破,揭开了 YBCO 超导带材飞速发展的序幕。

YBCO 高温超导带材基本架构是由金属合金基带、种子层、阻挡层、帽子层、稀土钡铜氧超导层、保护层以及稳定层等构成,是一种多层结构。在 YBCO 带材的制备中,如何得到具有双轴织构特性的 YBCO 超导层是关键技术之一。围绕织构特性的来源、传递和加强,目前国内外形成了主要的三条技术路线:(1)美国橡树岭国家实验室提出的轧制辅助双轴织构基带(RABiTS)路线^[5],即通过大变形量的轧制加工,并进行高温退火获得具有双轴织构特性的 Ni 合金基带;(2)由日本 Fujikura 公司 Iijima 等提出^[6],并由美国洛斯阿拉莫斯国家实验室等进一步发展的离子束辅助沉积(IBAD)路线^[7],即在非织构的基带上采用离子束轰击,迫使沉积的氧化物薄膜取向生长以获得双轴织构氧化物薄膜的方案;(3)Bauer 等提出、以德国 Theva 公司为主发展的在氧化物薄膜沉积时,使非织构基带与沉积源以某一角度倾斜布置,使氧化物薄膜获得织构取向的方法,即倾斜基片沉积(ISD)路线^[8-10]。在基带上获得双轴织构特性之后,几乎各种薄膜沉积方法,如蒸发、溅射、脉冲激光沉积、化学溶液沉积、化学气相沉积等,都可以成功制备出延续双轴织构特性的氧化物过渡层。而主要制备 YBCO 层的方法则有金属有机气相沉积(MOCVD)、金属有机沉积法(MOD)、脉冲激光沉积(PLD)、蒸发(Evaporation)等方法。这些方法都能制备出性能优良的 YBCO 带材,但各自具有不同特点。

目前国际上至少有 4 家单位都制备出了长度超过 1000 m、 I_c 超过 300 A/cm 的带材(即带材宽度为 1 cm 时,其临界电流可达 300 A)。美国 SuperPower 公司采用 IBAD-MgO + MOCVD 路线制备的 YBCO 超导带材,其结构如图 3 所示。他们首先将商用的 Hastalloy 基带进行电化学抛光,表面粗糙度(RMS)达到 2 nm 以下,然后溅射沉积非晶的 Al₂O₃ 阻挡层和非晶的 Y₂O₃ 种子层,再采用 IBAD 沉积约 10 nm 的 MgO 织构层,接着溅射生长 30 nm 的 MgO 外延薄膜,在 MgO 薄膜上再生长 30 nm 的 LaMnO₃ 模板层,最后用 MOCVD 方法沉积超导层薄膜。目前该公司报道他们已经能够制备出

1400 m的YBCO超导带材，但并没有给出其临界电流。该公司制备的1065 m长的YBCO超导带材的最小临界电流达到了282 A/cm。

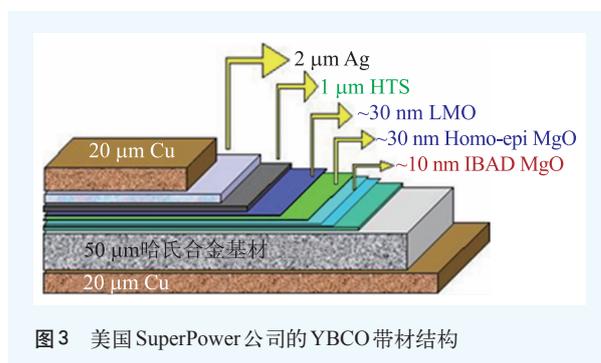
日本Fujikura公司采用IBAD技术以5 m/h的速率沉积 $Gd_2Zr_2O_7$ (GZO)，然后采用PLD在10 m/h的速率下沉积 CeO_2 缓冲层和YBCO超导层。该公司2011年度制备出了长度为816.4 m、平均临界电流为572 A/cm的YBCO涂层导体，其 $I_c \times L$ 值高达466981 Am，创造了当时的世界记录。美国超导公司采用RABiTS+MOD技术路线制备YBCO涂层导体，在75 μm 轧制辅助双轴织构的NiW合金基带上，采用反应溅射法分别沉积厚度为75 nm的 Y_2O_3 种子层、75 nm的钇稳定性氧化锆(YSZ)缓冲层和75 nm的 CeO_2 帽子层，最后采用MOD法制备厚度为0.8 μm 的YBCO薄膜，其制备的YBCO带材的最大长度为520 m、 I_c 达300 A/cm。

近年来，韩国在YBCO超导带材方面发展突飞猛进，Sunam公司2014年宣布在不锈钢衬底上制备出的千米级带材，临界电流达到600 A/cm以上， $I_c \times L$ 的值达到了618770 Am。日本Showa公司采用RABiTS+MOD技术路线也制备出了长度超过500 m、 I_c 大于300 A/cm的YBCO带材。

2011年以来，苏州新材料研究所、上海超导、上创超导等专注于YBCO超导带材制备技术的民营企业先后成立。由于民营企业的介入，我国在YBCO带材的研发和产业化方面取得了快速发展。2014年，苏州新材料研究所研制出我国第一根千米长YBCO超导带材， I_c 达到280 A/cm；2016年制备出的1130 m长YBCO带材， I_c 达到570 A/cm，进入到国际先进行列。

3 YBCO块材的应用研究进展

YBCO块材的一个重要应用是磁悬浮系统。YBCO超导块材和永磁体组成的磁浮系统的基本原理是，利用YBCO超导块材的迈斯纳效应及其与永磁体电磁相互作用的轴对称模型。YBCO是非理想的第二类超导体，块材进入超导混合态后，具有不完全的迈斯纳效应，磁通又可以部分



穿透、以磁通量子涡旋形式存在于YBCO超导块内部，并被超导体内的钉扎中心所钉扎，形成由镜像磁场(基于迈斯纳效应)产生的悬浮力，以及由“冻结”磁场形成的电磁感应。这个磁感应使得被悬浮的状态在一定的范围被“冻结”，任何偏离被“冻结”的运动都依楞次定律被电磁感应力所平衡，表现出既具有悬浮力，也具有吸引力(如图4的左侧或右侧所示)。总之，它将阻止任何破坏这种被“冻结”的磁场平衡状态的运动。所以这种产生于迈斯纳效应以及超导体内磁通钉扎特性的悬浮系统不仅具有自动悬浮特性，还具有自动导向特性；不仅可以上下悬浮，在一定的范围内还可以侧挂、倒挂、或以任意角度悬挂或悬浮。通过YBCO超导块材与永磁体组成的轴对称系统和平移对称系统，可以广泛应用于磁浮轴承、飞轮储能、磁浮列车等领域。

3.1 磁浮轴承和飞轮储能

YBCO超导块材与永磁体组成的磁浮轴承的基本原理如图4所示。在临界温度下，块材进入超导混合态后，由于钉扎中心的存在，磁通线被钉扎中心阻滞，当超导体俘获了足够的磁通时，便使转子自由悬浮在某一位置上；同时块材特有的磁通钉扎能力阻止俘获磁通运动，保证侧向稳定性，从而实现了转子的稳定悬浮。

超导磁浮轴承按照块材与永磁体的排放结构，分为轴向和径向两种类型：轴向型(图4)和径向型(图5)。在轴向型中，YBCO块材与永磁体之间的悬浮力指向转轴的方向，其优点是结构简

单, 制作相对容易。轴向轴承以波音公司和阿贡实验室联合开发的样机最具代表性^[11, 12], 如图6所示。巴西里约热内卢大学提出了一种轴向磁化型永磁转子^[13], 拼接的永磁弧段轴向磁化(图7), 相邻两磁环之间同极相配以提高轴向磁通梯度, 从而提高悬浮力和刚度。

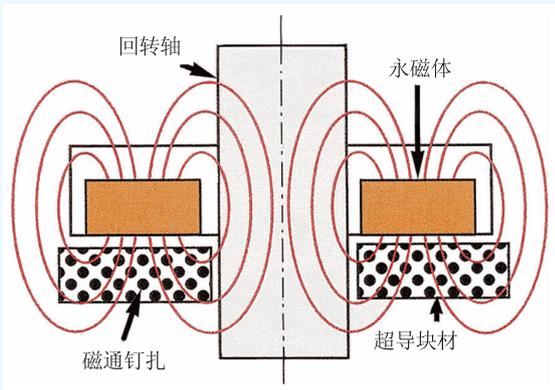


图4 超导块材磁轴承的基本原理

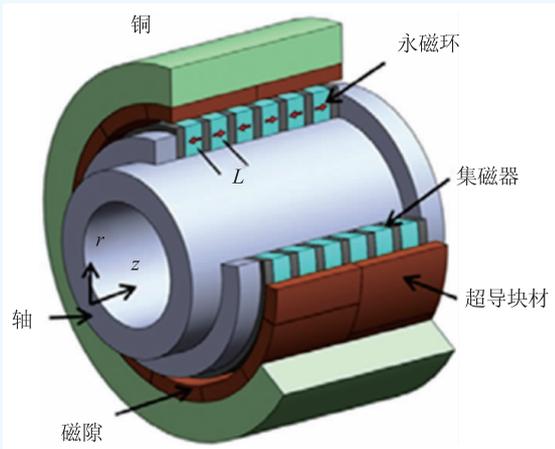


图5 径向型超导磁轴承

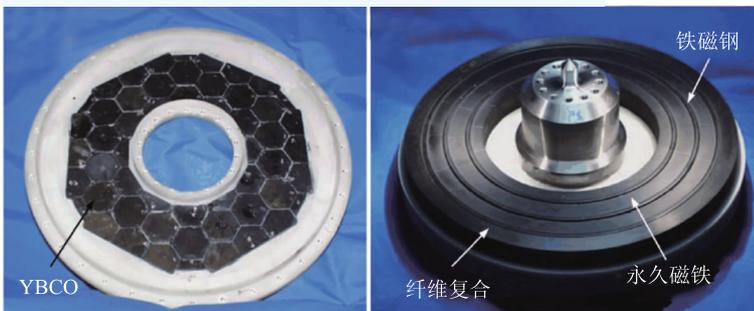


图6 波音公司开发的轴向超导磁轴承

在径向型中, YBCO块材与永磁体之间的悬浮力指向转子径向, 其优点是结构很紧凑, 并且可以在不改变主轴大小的情况下通过沿轴向增加定子中块材的数量来提高承载能力。德国ATZ公司2001年研制出采用径向型YBCO超导磁浮轴承的激光检测仪^[14], 之后2009年研制出了采用55块YBCO超导块材的径向超导轴承, 基本代表了径向型超导磁轴承的发展水平。

超导飞轮储能的基本原理是利用电动机将悬浮的飞轮转子驱动到高速旋转状态, 电能转变为机械能储存。需要时, 飞轮减速, 电动机作发电机运行, 实现机械能到电能的转换, 这样就通过飞轮的加速和减速, 完成了能量的储存与释放。图8给出了超导飞轮储能的装置示意图。超导飞轮储能系统主要由超导磁浮轴承、飞轮转子、电动机/发电机、电力电子转换装置和真空/安全保护装置构成。超导磁浮轴承是超导飞轮储能系统的核心部件, 作用是支撑飞轮转子并保证其无摩擦高速稳定旋转。

波音公司与阿贡实验室合作研制5 kWh/100 kW的超导飞轮储能系统已经完成样机实验^[11, 12]。日本非常重视超导飞轮储能系统的研发, 其中ISTEC最具有代表性, 已在进行10 kWh/400 kW等级飞轮样机组装试验。德国的ATZ公司在2005年与MagnetMotor公司合作提出了5 kWh/250 kW等级的超导飞轮储能设计方案^[14]。清华大学设计的第一代0.3 kWh的小型飞轮系统, 发电功率为200 W, 第二代飞轮系统储能量为5 kWh。2011年1月, 英利自主研发出1 kWh超导飞轮储能样机, 同年9月, 国内首台20 kWh超导磁浮飞轮储能样机也在英利下线。

3.2 基于YBCO块材的超导磁悬浮列车

基于YBCO块材的超导磁悬浮列车, 通过YBCO超导块材和永磁轨道相互作用产生的悬浮力和导向力沿行驶方向在永磁导轨上方稳定行驶, 对比于电磁悬浮(EMS)列车和电动悬浮(EDS)

列车^[15, 16], 该类型的超导磁悬浮列车不需要复杂的控制系统, 静态或动态均能实现稳定的悬浮和导向, 属于被动悬浮, 运行时节能环保, 结构上更加简单。

目前, 这方面研究主要集中在中国、巴西、德国和日本等国家^[17-21]。1996年, 中国科学院与德国研究小组首次建立了超导磁浮模型车, 在3 m的环形轨道上其运行速度达到6 km/h。2000年西南交通大学研究了载人高温超导磁浮车(图9)^[17]。该车采用YBCO超导块材和NdFeB永磁轨道, 并用长定子直线电机做驱动。由于线路太短, 加之该研究主要是尝试研究载人悬浮的可行性, 因此该车仅在15.6 m的直线轨道上实现了以 1 m/s^2 的加速度运行。

2005年, 德国IFW研究所开发了SupraTrans高温超导载人磁浮车样机(图10), 样机在7 m长的直线轨道上实现了1 m/s的演示速度。该车采用了异步感应直线驱动, 将电源和电气设备集中在车上, 自重170 kg、载重350 kg、车载电源为47 F的超级电容器储能系统, 并采用变频技术将直流电转换成交流电给异步感应直线电机供电^[19]。

2006年, 日本国家先进工业科学技术研究所搭建了一个直径12 m、长度38 m的环形试验轨道^[20], 该磁悬浮系统采用磁极对顶方式增强表面磁场, 并在双磁性轨道之间铺设直线电机进行驱动。由于有较长的直线电机驱动, 该原型车在环形轨道上实现了约37 km/h的稳定运行速度, 并就空气条件下速度的衰减与能耗特性进行了研究。

作为巴西高温超导磁浮车研究项目MagLev-Cobra的重要组成部分, 2013年, 巴西里约热内卢联邦大学在校园内开始建设一条户外直线永磁轨道, 用以开发全尺寸的高温超导磁浮列车技术, 并深化相关的基础研究^[21]。2015年轨道建成, 全长200 m, 两端落差2.5 m, 坡度为1.3%。磁浮列车包括4个模组, 每个模组1.5 m长, 车辆总自重2吨, 载客30人。车辆的悬浮高度随载客人数和引直电机的吸引力而变化, 悬浮的平均高度为15 mm(图11)。列车采用4种方式制动, 包

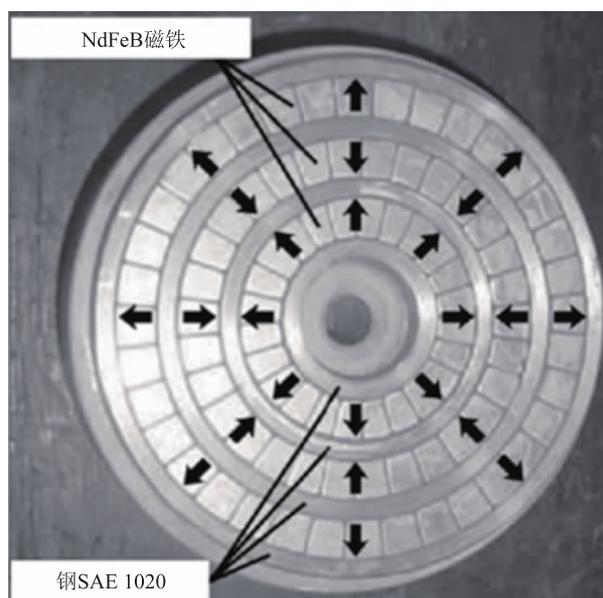


图7 巴西里约热内卢大学提出的轴向磁化型永磁转子

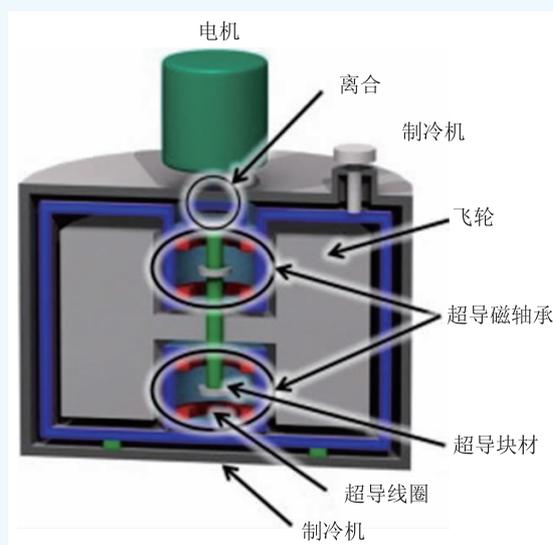


图8 超导飞轮储能系统的结构图



图9 西南交通大学研究的载人高温超导磁浮试验车



图10 德国 IFW 研究所研制的 SuperRapid 高温超导磁浮车

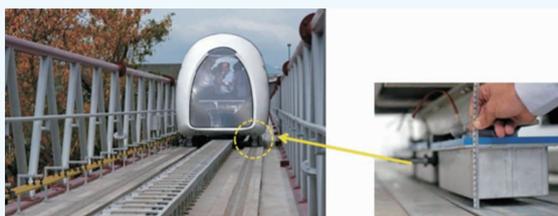


图11 运行中的 MagLev-Cobra 高温超导磁浮车, 平均悬浮高度为 15 mm



图12 首个载人的真空管道高温超导磁浮车系统

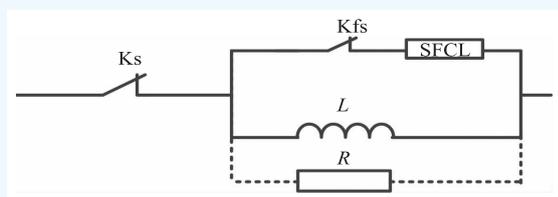


图13 电阻型超导限流器原理结构

括再生自动、耗散制动、DC 强制制动以及机械制动。测试结果表明, 列车运行的速度达到约 7 km/h。

2011 年, 西南交通大学超导中心首次将高温超导磁浮车技术与真空管道相结合, 建立了直径为 3 m 的环形永磁轨道, 并将轨道密封在真空管道之中^[22]。磁浮车运行最大速度达 24 km/h, 并首次测试了高温超导磁浮车在不同真空环境下的速度衰变曲线和能耗关系。2014 年, 西南交通大学建立了载人的真空管道高温超导磁浮车试验线, 该线路为直径达 6.5 m 的跑道形永磁轨道, 采用间歇的直线电机驱动(即仅在轨道的一小部分布置了直线电机), 非载人时的最高运行速度达 50 km/h, 载人时的运行速度达 25 km/h(图 12)。

4 YBCO 带材在超导电力技术中的应用研究进展

4.1 超导限流器

超导限流器(superconducting fault current limiter, SFCL)可分为电阻型和电感型两大类, 其中, 电阻型 SFCL 利用超导带材在过流时失超产生的电阻进行限流。电感型 SFCL 主要包括桥路型、饱和铁心型、屏蔽铁心型等, 超导线圈作为励磁或限流电感使用, 主要利用超导带材高密度无阻载流能力。

近年来, 国内外主要围绕利用 YBCO 开展电阻型 SFCL 的研究。电阻型 SFCL 的典型电路结构如图 13 所示, 其基本工作原理是: 正常运行时, 电流通过主断路器 K_s 、快速断路器 K_{fs} 和 SFCL, 整个电流通路的损耗很小。一旦发生短路故障, 故障电流将很快超过 SFCL 的临界电流, SFCL 呈现较大的电阻, 从而使短路电流得到有效的抑制。同时, 与 SFCL 并联的电抗器 L 或电阻器 R 分担部分电流, 快速断路器 K_{fs} 会快速断开以避免 SFCL 温升过高并造成低温容器内压力过高, 此后由并联电抗器 L 或并联电阻器 R 限流直至主断路器 K_s 断开。

2005年,西门子公司基于YBCO薄膜研制了一台1 MVA的电阻型SFCL样机,在直流系统下的短路测试将原本预计最大为150 kA、上升速率为12 kA/ms的短路故障电流成功限制到2.73 kA^[23]。2007年,西门子公司与美国超导公司(AMSC)合作,利用YBCO带材研制了一台容量为2.25 MVA的电阻型SFCL,并在德国柏林大功率电器设备研究所完成了测试^[24]。2013年,Nexans公司研制了基于YBCO带材的电阻型SFCL,样机的参数为12 kV/2300 A^[25],如图14为Nexans公司研制的12 kV超导限流器,下一步计划是研制110 kV的限流器。

2012年,美国超导公司基于YBCO超导带材研制了一台115 kV/1.2 kA电阻型SFCL,该限流器在加拿大完成测试^[26],如图15所示。Super-Power公司研制的电阻型SFCL采用模块化的方案,其设计的15 kV/2 kA SFCL采用了3个限流模块,而138 kV/1700 A的单相限流器则采用了14个模块^[27]。

为解决直流输电和直流电网的故障开断瓶颈问题,2012年,中国科学院电工研究所提出了200 kV/1.5 kA电阻型超导直流限流器的概念设计,并于2016年完成10 kV/400 A/2 Ω电阻型超导直流限流器的研制及短路冲击测试,该超导直流限流器样机如图16所示。2016年,中国科学院电工研究所又完成10 kV/300 A电阻型交流超导限流器模块的稳态通流和短路冲击试验,并在此基础上,完成了220 kV/1.5 kA电阻型交流超导限流器的技术攻关和设计方案。

4.2 超导变压器

超导变压器是用超导绕组替代常规变压器的铜绕组,也就是用超导线/带取代铜导线,并附加超导绕组运行所必须的低温运行环境,其原理与常规变压器相同。

近年来,随着YBCO超导带材性能的不断提高和商用带材性能的逐步完善,以YBCO带材为主要材料的高温超导变压器研究也逐渐展开。从2004年开始,韩国采用YBCO带材完成了



图14 Nexans公司研制的12 kV电阻型限流器



图15 美国超导公司115 kV/800 A电阻型限流器样机



图16 10 kV/400 A电阻型超导直流限流器样机

60 MVA/154 kV/23 kV 三相高温超导变压器的设计, 2007年又完成100 MVA/154 kV/23 kV 三相高温超导变压器的设计工作^[28, 29]。基于YBCO带材的失超特性, 德国提出限流变压器的概念, 并完成60 kVA/1 kV/0.6 kV 单相高温超导限流变压器样机的设计和研制, 并于2010年成功完成了变

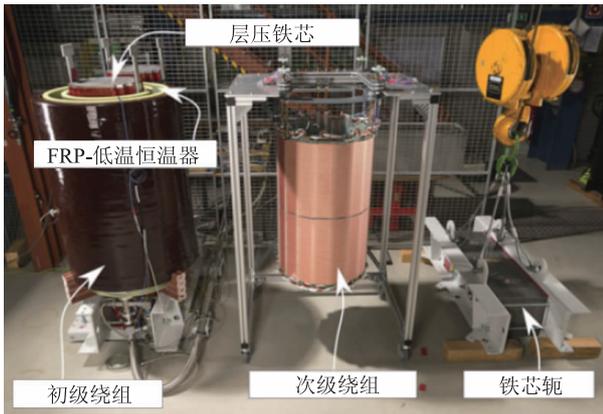


图17 德国MVA级高温超导限流变压器



图18 日本2 MVA/66 kV/6.9 kV高温超导变压器实验现场

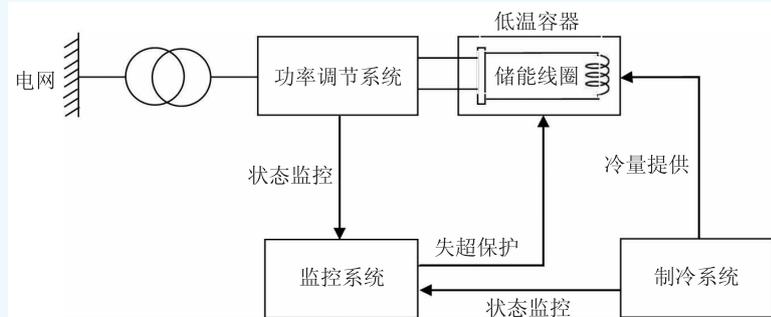


图19 超导储能系统的原理结构

压、限流与恢复特性等实验^[8], 2016年, 德国又完成了MVA级限流变压器的研制(图17)^[30]。2011年至今, 日本多家单位联合完成了三相2 MVA/66 kV/6.9 kV YBCO高温超导变压器的研制(图18)^[31]。2016年, 俄罗斯采用YBCO带材完成了1 MVA/10 kV/0.4 kV 超导变压器的研制, 解决了12 mm宽带多带并联均流的问题, 为低压侧大电流绕组的研制提供新的技术途径^[32]。

4.3 超导储能系统

超导储能(SMES)利用超导电感线圈无损耗地储存电能, 并通过电力电子换流器与外部系统快速交换功率, 其原理结构如图19所示。由于超导带材具有零电阻和电流密度高的特点, 且超导电感直接储存电磁能, 这就使得超导储能系统具有快速大功率响应的优点, 从而可用于提高电力系统暂态稳定性和改善供电品质。

超导电感储能线圈是超导储能系统的核心部件, 主要有螺管型和环形结构型两种结构。螺管线圈的设计, 大多使用矩形截面结构, 其结构简单, 但超导带材的利用率相对较低。很多研究者都在分析如何改变线圈的结构, 一种思路是采用阶梯形截面结构^[33, 34]。相比于矩形截面结构, 阶梯形截面结构在优化设计方面比较复杂, 但是采用阶梯形结构可以减小垂直于带材的磁场分量, 从而能提高线圈的临界电流, 最终提高其储能量和稳定裕度。阶梯形截面结构可以分为内阶梯截面结构和外阶梯截面结构。在不同温区, 磁场对YBCO超导带材临界电流的影响有所不同, 文献

[34]通过研究发现, 在20 K温区, 采用内阶梯截面结构更省带材。

超导储能线圈端部和中部的磁场不同, 且由于高温超导带材各向异性的原因, 使得超导储能线圈端部区域的超导带材临界电流较低, 因而中部区域带材的载流能力则没有充分利用。针对这个问题, 文献[35, 36]应用BSCCO带材和YBCO带材构造组合线圈结构, BSCCO

超导线圈位于组合绕组中部，YBCO超导线圈位于组合绕组端部。采用组合线圈结构可有效利用现有商用BSCCO带材临界电流高和YBCO带材在外场下临界电流退降小的特点，提高了超导储能线圈的性能。中国科学院电工研究所于2016年研制成功的1 MJ超导限流—储能系统，其线圈就是采用这种方式(图20)。该超导限流—储能系统在甘肃省玉门市风力发电场并入电网进行试验运行，接受了频繁充放电的考验，证明其具有良好的性能。

采用螺管型结构时，超导储能线圈的外部磁场呈轴对称状分布，漏磁较大。为了降低储能线圈的空间漏磁，通常采用环形结构型线圈^[37]。日本九州电力公司完成了2 GJ超导储能线圈的设计，该设计基于YBCO线圈模块化环形结构，如图21所示^[38]。韩国、印度也分别对2.5 MJ、4.5 MJ环形结构高温超导储能磁体进行了概念设计^[39, 40]。

5 YBCO带材在高场超导磁体中的应用研究进展

高磁场是重要的科学实验条件之一，对发现和认识新现象以及揭示新规律具有重要作用。为此，科学家和磁体工程师们一直以来都在努力建造具有更高磁场的磁体。当今世界最先进的强磁场实验装置的磁场最高可达45 T，由水冷线圈(34 T)和超导线圈(11 T)共同提供磁场。但其中的水冷线圈需要庞大的电源和水冷系统，运行功耗超过20 MW，系统维护困难，还有占地面积大等诸多问题^[41]。

采用低温超导材料NbTi和Nb₃Sn所能产生的最高磁场限制在~23 T(1.8 K)，且需要运行在超流氦条件，运行费用也较高^[42]。由于高温超导体在低温下具有很高的不可逆场，采用高温超导和低温超导相结合的方式产生25 T以上的恒定磁场，就成为当前发展高场磁体的重要方式，从而降低系统建设

和运行成本。YBCO带材在高场下具有较高的临界电流密度和良好的机械性能^[43]，很适合于建造这类高场超导磁体。如图22所示，临界场最低的NbTi线圈用作外层线圈，而临界场最高的YBCO线圈用作内层线圈(也称为内插磁体)，这样的混合超导磁体就可以产生高于25 T的磁场。

目前，磁场最高的高温超导内插磁体，是由美国高场实验室Hahn团队制作的YBCO层绕内插磁体，它在31 T的水冷磁体背景场中产生了9.17 T的磁场，其中心磁场达到了40.17 T，绕组的工程电流密度达到905 A/mm²^[44]，如图23所



图20 1 MJ超导限流—储能系统的高温超导储能线圈

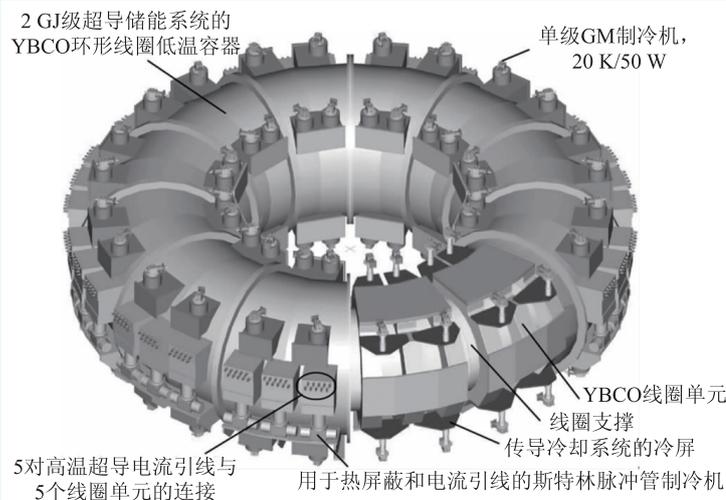


图21 日本2 GJ环形结构型超导储能线圈概念设计图

示。虽然这不是全超导磁体，但它却证明了YBCO带材在高场磁体中的应用潜力。此外，美国高场实验室设计的32 T- ϕ 34 mm全超导磁体，已在液氦条件下产生了27 T的中心磁场，其中内插YBCO线圈产生了12 T的磁场，15 T的背景场则由从牛津仪器采购的低温超导磁体产生^[45]。

日本理化技术研究所(RIKEN)在研制30.5 T NMR磁体过程中，为了获得高均匀度的磁场，首先设计了一个由17 T/ ϕ 130 mm的低温超导磁体和11 T高温超导磁体组成的28 T全超导磁体，其中高温超导内插磁体由内YBCO线圈和外BSCCO-

2223线圈组成，在测试中，BSCCO-2223线圈产生了6.5 T的中心磁场、YBCO线圈产生4.1 T的中心磁场，使得磁体的中心磁场达到了27.6 T，这是目前由全超导磁体产生的最高磁场^[46]。

麻省理工学院FBML实验室目前正在计划建造30.5 T NMR超导磁体^[47-50]。其最初的方案是先建造一个14.1 T的高温超导内插磁体，该高温超导内插磁体由内层的YBCO线圈和外层的BSCCO-2223线圈构成，然后通过跟低温超导磁体组合来实现30.5 T。但随着YBCO内插磁体技术的进步，FBML实验室已决定将最初的14.1 T的高温超导磁体内插磁体的磁场提高到18.8 T，且全部由YBCO线圈提供磁场。为了减小超导带材所受应力，最终将内插磁体分为三层。目前最内层线圈已组装测试完毕，在液氦无背景场条件下产生了8.78 T的中心场，运行电流255 A，达到了设计的要求^[51]。

SuNAM公司是韩国一家生产YBCO超导带材的企业，目前也在进行YBCO超导磁体技术的开发。由美国麻省理工学院FBML实验室设计、SuNAM建造的YBCO磁体，在液氦条件产生了26.4 T的中心磁场，这是目前单个高温超导磁体产生的最高磁场世界纪录^[52, 53]。

中国科学院电工研究所自2012年开始开发25 T高场超导磁体^[54-56]。磁体计划采用15 T低温超导磁体作背景磁体，由内插高温超导磁体产生10 T的中心场。初步建造的由15个双饼组成的模型线圈，在15 T的背场环境下产生了9 T的中心磁场，最高磁场达到了24.3 T^[57, 58]。此后，对该内插磁体进行了完善并更换了部分线圈，使得内插磁体在15 T的背场中稳定产生了10.7 T中心磁场，中心磁场达到了25.7 T^[59]。25.7 T高场全超导磁场的实现标志着我国在研制高场内插磁体技术方面走到了世界前列。

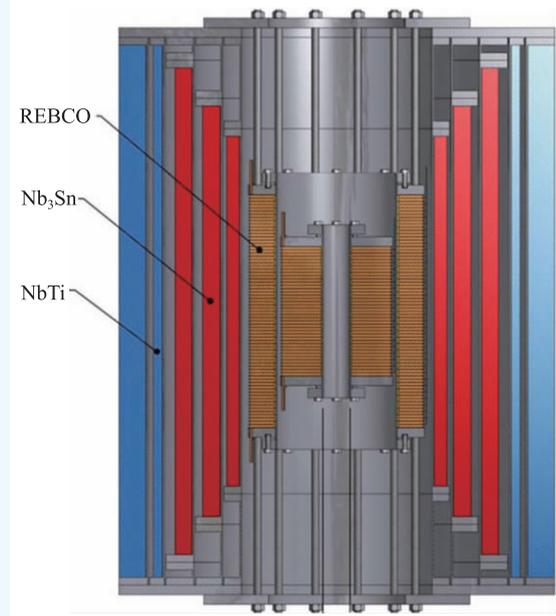


图22 由NbTi线圈、Nb₃Sn线圈和YBCO线圈组成的混合超导磁体

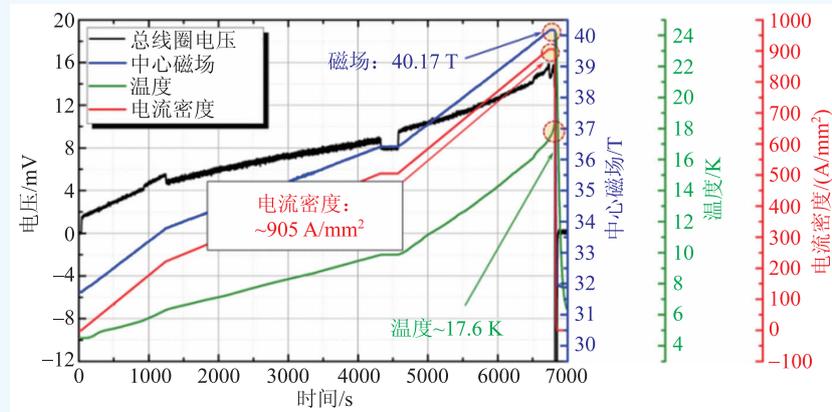


图23 YBCO线圈在31 T的背景场中产生了9.17 T的磁场(中心磁场达到了40.17 T)

6 总结与展望

YBCO 超导体发现 30 年以来, 实用化 YBCO 块材和带材的制备技术取得显著进展, 国内外均已形成小批量供货的能力。YBCO 块材和带材在磁浮轴承和飞轮储能、超导限流器、超导变压器、超导电感储能和高场超导磁体方面的应用研究在世界范围内广泛开展, 部分电力应用研究工作已经进入示范试验阶段, 为进一步促进 YBCO 超导体向现实应用奠定了坚实的基础。

YBCO 超导体在电力方面的应用, 受超导材料价格贵、其运行所需低温制冷条件的可靠性及运行维护等多种因素的制约, 取代传统技术仍然

有一定的困难。但在特殊应用场合, 传统技术无成熟产品能够替代, 如用于直流输电网的超导直流限流器等, 或者如在自身已经具备低温环境的应用中(如液氮泵), 采用超导磁浮轴承和超导电机等就具有先天优势, 这些都是值得关注的发展方向。发展超高场超导磁体系统, YBCO 超导带材是一个重要的选择, 可望通过发展内插 YBCO 线圈, 获得 25—30 T 及以上的超高磁场。今后, 应重点探索 YBCO 超导体在电工学方面的新应用, 为促进 YBCO 超导体的现实应用寻找新的途径。

致谢 感谢余修勇同学在整理参考文献格式方面给予的帮助。

参考文献

- [1] 肖立业, 林良真, 龚领会. 电气工程大典第八卷: 电力系统工程——超导电力技术篇. 中国电力工业出版社, 2010 年 1 月
- [2] 肖立业. 科学通报, 2015, 60(25): 2367
- [3] Xiao L Y, Dai S T, Lin L Z *et al.* IEEE Trans. Appl. Supercond., 2012, 22(3): 5000104
- [4] Jin S Y, Tiefel T H, Sherwood R C *et al.* Appl. Phys. Lett., 1988, 52: 2074
- [5] Goyal A, Norton D P, Buda J D *et al.* Appl. Phys. Lett., 1996, 69: 1795
- [6] Iijima Y, Tanabe N, Kohno O *et al.* Appl. Phys. Lett., 1992, 60: 769
- [7] Wu X D, Foltyn S R, Arendt P N *et al.* Appl. Phys. Lett., 1995, 67: 2397
- [8] Hasegawa K, Fujino K, Mukai H *et al.* Appl. Supercond., 1996, 4: 487
- [9] Ma B, Koritala R E, Fisher B L *et al.* Physica C, 2004, 403: 183
- [10] Prusseit W, Nemetschek R, Semerad R *et al.* Physica C, 2003, 392: 801
- [11] Day A C, Strasik M, McCrary K E *et al.* Superconductor Science and Technology, 2002, 15(5): 838
- [12] Strasik M, Hull J R, Mittleider J A *et al.* Superconductor Science and Technology, 2010, 23(3): 034021
- [13] Sotelo G G, de Andrade R, Ferreira A C. IEEE Trans. Appl. Supercond., 2009, 19(3): 2083
- [14] Werfel F N, Floegel-Delor U, Rothfeld R *et al.* IEEE Trans. Appl. Supercond., 2001, 11(1): 1737
- [15] Gottzein E, Brock K H, Schneider E *et al.* Automatica, 1977, 13: 205
- [16] Kusada S, Igarashi M, Nemoto K *et al.* IEEE Trans. Appl. Supercond., 2007, 17: 2111
- [17] Wang J, Wang S, Zeng Y *et al.* Physica C, 2002, 378: 809
- [18] Zhao Y, Wang J S, Wang S Y *et al.* Physica C, 2004, 412-414: 771
- [19] Schultz L, de Haas O, Verges P *et al.* IEEE Trans. Appl. Supercond., 2005, 15: 2301
- [20] Okano M, Iwamoto T, Furuse M *et al.* J. Phys. Conf. Ser., 2006, 43: 999
- [21] Mattos L S, Rodriguez E, Costa F *et al.* IEEE Trans. Appl. Supercond., 2016, 26: 3600704
- [22] Ma J, Zhou D, Zhao L *et al.* J. Mod. Transport., 2013, 21: 200
- [23] Kraemer H P, Schmidt W, Utz B *et al.* IEEE Trans. Appl. Supercond., 2005, 15(2): 1986
- [24] Kraemer H P, Schmidt W, Wohlfart M *et al.* Journal of Physics: Conference Series, 2008, 97(1): 012091
- [25] Stemmler M, Merschel F, Noe M *et al.* T&D Conference and Exposition, 2014 IEEE PES, 2014
- [26] Kraemer H P, Schmidt W, Cai H *et al.* Physics Procedia., 2012, 36: 921
- [27] Lambes J C, Hazelton D, Duval J *et al.* IEEE Trans. Appl. Supercond., 2011, 21(3): 1206
- [28] Lee C, Soek B Y. IEEE Trans. Appl. Supercond., 2005, 15(2): 1867
- [29] Lee S W, Hwang Y I, Lim H W *et al.* IEEE Trans. Appl. Supercond., 2007, 17(2): 1943



Advent 研究材料

为了研究发展和工业界，
提供一种快速、
有效率的包括金属、合金、
高分子的目录邮件订单服务。
从铝到锆



advent-rm.com

研究金属A-Z

金属和合金,从铝到锆

[30] Berger A, Noe M, Kudymow A *et al.* IEEE Trans. Appl. Supercond., 2011, 21(3): 1384

[31] Iwakuma M, Sakaki K, Tomioka A *et al.* IEEE Trans. Appl. Supercond., 2015, 25(3): 5500206

[32] Vysotsky V S, Fetisov S S, Zubko V V *et al.* IEEE Trans. Appl. Supercond., 2017, 27(3): 5500105

[33] Noguchi S, Yamashita H, Ishiyama A. IEEE Trans. Appl. Supercond., 2003, 13: 1856

[34] Sun Q, Zhang Z F, Lin L Z *et al.* IEEE Trans. Appl. Supercond., 2012, 22: 5700404

[35] Zhu J, Bao X, Yang B *et al.* IEEE Trans. Appl. Supercond., 2014, 24: 1

[36] 辛昭昭, 张京业, 张润理 等. 低温与超导, 2015, 43(8): 1

[37] Higashikawa K, Nakamura T, Shikimachi K *et al.* IEEE Trans. Appl. Supercond., 2007, 17(2): 1990

[38] Hayashi H, Hirano N, Nagaya S *et al.* IEEE Trans. Appl. Supercond., 2009, 19(3): 2012

[39] Choi J H, Cheon H G., Cho J W *et al.* IEEE Trans. Appl. Supercond., 2010, 20(3): 1344

[40] Bhunia U, Akhter J, Nandi C *et al.* Cryogenic., 2014, 63: 186

[41] den Ouden A, Wulffers C A, Hussey N E *et al.* IEEE Trans. Appl. Supercond., 2016, 26(4): 4301807

[42] Panel S R. Final report of NSF panel on large magnetic fields. National Academy of Science report, 1988

[43] Song H, Brownsey P, Zhang Y *et al.* IEEE Trans. Appl. Supercond., 2013, 23(3): 4600806

[44] Hahn S *et al.* https://nationalmaglab.org/images/magnet_development/asc/searchable_docs/science_highlights/april2016_asc_40_2_t.pdf, 2016

[45] <https://nationalmaglab.org/news-events/news/maglab-claims-record-with-novel-superconducting-magnet>, 10 June, 2015

[46] Yanagisawa Y, Kajita K. IEEE/CSC & ESAS Superconductivity News Forum (Global Edition), 2016

[47] Bascunan J, Hahn S, Dong K P *et al.* IEEE Trans. Appl. Supercond., 2012, 22(3): 4302104

[48] Bascuñán J, Hahn S, Kim Y *et al.* IEEE Trans. Appl. Supercond., 2013, 23(3): 4400304

[49] Bascunan J, Hahn S, Kim Y *et al.* IEEE Trans. Appl. Supercond., 2014, 24(3): 4300904

[50] Bascuñán J, Hahn S, Lecrevisse T *et al.* IEEE Trans. Appl. Supercond., 2016, 26(4): 4300205

[51] Qu T, Michael P C, Bascuñán J *et al.* IEEE Trans. Appl. Supercond., 2017, 27(4): 4600605

[52] Yoon S, Kim J, Cheon K *et al.* Supercond. Sci. Technol., 2016, 29: 1

[53] Lee H. A 26.4 T one-body HTS magnet wound with no-insulation multi-width GdBCO tape. 24th Int. Conf. Magnet Technology., Seoul, Korea, 2015

[54] Wang Q, Dai Y, Ni Z *et al.* IEEE Trans. Appl. Supercond., 2013, 23(3): 4300905

[55] Wang Q, Liu J, Song S *et al.* IEEE Trans. Appl. Supercond., 2015, 25(3): 4603505

[56] Liu J, Song S, Wang Q *et al.* IEEE Trans. Appl. Supercond., 2016, 26(3): 4303405

[57] Liu J, Dai Y, Li L. Cryogenics., 2016, 79: 79

[58] Liu J, Wang Q, Dai Y *et al.* IEEE/CSC ESAS Supercond. News Forum (global edition), 2016

[59] Liu J, Wang Q, Dai Y *et al.* IEEE/CSC ESAS Supercond. News Forum (global edition), 2017