

稳态强磁场磁体技术研究进展

匡光力

中国科学院合肥物质科学研究院强磁场科学中心, 合肥 230031

摘要 稳态强磁场是前沿科学研究所需的一种十分重要的手段。强磁场在科学研究中的应用,对物理、化学、材料、生命科学等多学科的发展起到了巨大的推动作用。产生稳态强磁场的方式主要有3种,水冷磁体、超导磁体和混合磁体。水冷磁体励磁速度快、磁场强,但运行能耗巨大;超导磁体电功率低、体积和质量较小,但目前可产生出的最高磁场不及水冷磁体;混合磁体用超导线圈替代水冷磁体的外层线圈,从而可以用比单独水冷磁体更低的能耗产生更高的磁场。介绍了3种磁体技术,回顾了其发展过程,探讨了磁体技术的未来发展路径。

关键词 强磁场;水冷磁体;超导磁体;混合磁体

磁场在人类生产生活中普遍存在并有着广泛的应用,从古代的罗盘,到如今的发电机、电动机等电力装备,以及手机、电脑等电子设备,无不与磁场有关。在科学研究中,磁场更是一种十分重要的手段。利用磁场,人们可以研究物质的磁性变化规律,进而探索其内在的相互作用;通过测量材料的电阻随磁场变化产生的振荡,可以获取材料的电子能带结构和费米面信息;利用物质在磁场中的核磁共振效应、电子磁共振效应,即核自旋、电子自旋在磁场中发生能级劈裂并在射频电磁场的作用下发生能级间的共振跃迁现象,可以对近生理条件下的生物大分子的结构和功能进行解析,研究生化反应中的电子传递过程,进而深入理解生命活动中的物

理化学机制。而磁场越强,这些测量的灵敏度和分辨率就越高。从微观角度看,物质中原子的核自旋、电子自旋、轨道磁矩都可受到磁场的作用而发生状态改变,因此当施加较强磁场时,物质的各种量子态都可能被调控,甚至被诱导出全新的物态和新奇的效应,从而可以发现新现象,认识新规律。例如,对二维电子系统在垂直方向施加强磁场,体系的霍尔电导率会出现量子化的平台,这就是量子霍尔效应,这种新效应的发现引起了凝聚态物理学理论的一次深刻变革;在超导机制研究中,利用强磁场可以抑制超导态,从而揭示隐藏在超导态下的反常物理行为;在材料制备和化学合成过程中施加强磁场,可以改变相的生长方式、排列方向或诱发

收稿日期:2023-08-01;修回日期:2023-09-13

作者简介:匡光力,研究员,研究方向为核聚变工程与等离子体物理、强磁场科学技术,电子信箱:kuang_gl@ipp.ac.cn

引用格式:匡光力. 稳态强磁场磁体技术研究进展[J]. 科技导报, 2023, 41(19): 66-75; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.19.007

新的化学反应,从而获得新材料。可以说,强磁场是开展前沿科学研究必不可少的一种极端实验环境。因此,发达国家都纷纷大力发展强磁场技术和强磁场装置,为前沿研究创造条件。强磁场在科学研究中的应用,对物理、化学、材料、生命科学等多学科的发展起到了巨大的推动作用。规模最大的美国国家强磁场实验室每年产出的高水平论文高达400余篇。中国的稳态强磁场实验装置在建成后短短几年就助力用户首次发现外尔轨道导致的三维量子霍尔效应、在少层黑磷中发现了新奇量子霍尔态、首次揭示自旋-轨道-宇称耦合超导新机制、合成出新型取向阴离子交换膜、揭示日光照射改善学习记忆的分子及神经环路机制等。

强磁场根据其持续时间的长短可分为脉冲强磁场和稳态强磁场。脉冲强磁场的场强高,但持续的时间比较短,只有秒到毫秒、甚至微秒的时间,此外,由于磁场变化速率较快,对一些高精密度测量会产生不利影响,因此脉冲强磁场下可开展的研究受到了一定的限制。稳态强磁场的场强可在小时量级甚至更长的时间内保持恒定,对于实验时间较长或测量精度要求较高的科学研究至关重要。

产生稳态强磁场的磁体主要有3种:水冷磁体(resistive magnet)、超导磁体(superconducting magnet)和混合磁体(hybrid magnet)。水冷磁体,又称电阻性磁体,是用有电阻的导体制成的螺线管磁体,由于存在电阻,所以在通入大电流时会产生巨大热量,需要用高速流动的去离子水进行冷却,因此被称为水冷磁体。在超导磁体出现之前,水冷磁体是产生稳态强磁场的唯一途径。水冷磁体励磁速度快,使用相对便捷,但尺寸大、能耗高,运行成本比较昂贵。超导磁体是用零电阻的超导材料绕制而成的磁体,因为线圈导体的电阻为零,所以可以长时间无损耗地承载电流,磁体所需的电功率低;同时超导材料可以有很高的电流密度,使得磁体的体积和质量与水冷磁体相比大大减小,因此,超导磁体在工业、医疗和科研上应用十分广泛,例如,磁控直拉单晶硅生长炉、核磁共振成像仪、多功能物性测量系统、高能粒子加速器等装置都使用了超导磁体。但由于超导材料临界参数的限制,超导磁体的最高场

强目前还处于30 T级,产生更高的磁场仍然离不开水冷磁体。然而水冷磁体产生和维持强磁场需要耗费巨大的电功率,因此在超导磁体技术发展起来之后,人们提出了用超导磁体取代水冷磁体的大尺寸外层线圈的技术方案。这种将大口径超导磁体套装在水冷磁体的外围组成的混合磁体,不仅可以大幅降低磁体运行时产生的消耗,同时也意味着可以用相对小的代价产生更高的磁场。

1 水冷磁体

磁场可由螺旋电流产生,磁场越高,单位体积内所需电流越强。而水冷磁体存在电阻,通入大电流时产生的热量若未被带走,则可以轻易将磁体烧毁。另外,磁场与电流的相互作用会使磁体承受高达 10^7 N的强大电磁力,这对磁体的材料与结构是巨大的考验。因此,水冷磁体技术发展的关键在于如何解决线圈电流密度不断提升所带来的线圈冷却问题,以及高应力和结构稳定性问题。高场水冷磁体主要有Bitter磁体和多螺旋磁体2种技术路线。

1.1 Bitter磁体

早期的水冷磁体是用导线紧密绕制而成的,其散热能力弱,可以承受的应力小,因而可产生的磁场较低。1936年,美国麻省理工学院教授Francis Bitter发明了一种新型磁体线圈:将铜质导体片和绝缘片加工成环状,并在上面冲出冷却用的圆孔,导体片沿径向开有一个切缝,绝缘片则开有一个扇形切口。导体片与绝缘片交替叠放,所有冷却孔上下对齐,导体片切缝与绝缘片的扇形切口的一侧对齐,并依次沿环向旋转,相邻导体片在绝缘片的扇形开口处形成电接触。这样,将数百个导体片与绝缘片沿轴向紧固后,便形成一个螺旋管线圈,这就是Bitter线圈(图1)。这样的设计大大缩短了线圈的水流通道长度,冷却能力得以大幅提升^[1]。同时,电磁力造成的径向应力不再像密绕水冷磁体那样作用在强度较低的绝缘材料上,因而线圈可以承受更大的应力。利用这一新技术,水冷磁体的最高磁场首次达到10 T。Bitter磁体的特点是结构简单、整体性好,产生磁场的效率高。

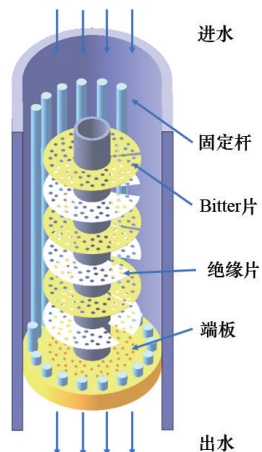


图1 Bitter线圈

由于Bitter线圈的电流密度分布与半径成反比,随着Bitter磁体最高磁场的提升,Bitter导体片内侧的电流密度显著增加,这导致导体片内需要越来越密集的冷却孔直至无法实现。另外,Bitter线圈是刚性厚线圈,在应力分析时可看作各向同性的中空圆柱体,每一体积元承受的电磁力会使导体产生一个小的径向位移,从而产生环向应力。同时径向应力被传递,这种传递的径向应力将在内半径处产生最大的环向应力。这种高功率密度和高应力问题给Bitter磁体的发展带来了极大的限制,Bitter磁体的磁场水平长时间徘徊在20 T以下。

20世纪60年代,美国麻省理工学院Montgomery提出了径向冷却Bitter技术,他在导体片上沿径向蚀刻出短而光滑的沟槽,使水流通道从轴向改为了径向^[2]。这种径向的水流通道冷却面大,使线圈可以承受更大的功率密度;同时,通过改变导体沿轴向的厚度,使线圈有了更高的载流效率和均匀度。径向冷却Bitter线圈改善了高功率密度问题,但未解决高应力问题。

20世纪90年代,Gao等^[3]在美国国家强磁场实验室对轴向冷却Bitter线圈的冷却孔进行了创新性地改进。他们在前人的长条冷却孔思路基础上,使用了更为细长的长条孔替代圆形孔,这一方面使得在同样的水流截面积下,冷却孔的周长大大增加,从而显著地提升了冷却面积,另一方面大大降低了冷却孔附近的应力集中;更为重要的是,这些长条冷却孔在Bitter盘上的布局采用的是移位式的交错

排列而不是成直线的规则排列,使得径向电磁力被分解传递,进而极大地降低了Bitter导体的应力水平。这种被称为Florida-Bitter的新技术很好地解决了原Bitter线圈的高热功率和高应力问题,换言之,在同样的热功率和应力水平下,Florida-Bitter线圈可承载更大的电流,因而能产生更高的磁场。采用Florida-Bitter技术,美国国家强磁场实验室于1996年将水冷磁体的磁场水平提高至33 T^[4]。此后,随着性能更好的铜银合金的应用,水冷磁体最高磁场的纪录不断被打破。2014年,荷兰奈梅亨强磁场实验室在32 mm孔径中产生37.5 T^[5];2015年,中国科学院强磁场科学中心在32 mm孔径中产生38.5 T^[6];2017年,美国国家强磁场实验室创造了目前最高的41.4 T^[7]。

Bitter磁体一般由多个Bitter线圈套装组成,各个线圈之间通常采取串联的连接方式。部分Bitter磁体的中心线圈采用并联连接模式,这一模式将总电流分流到2个线圈,因此单个线圈、单个Bitter片上承载了更少的电流,相应的单片电磁力总和也会减小,这有利于线圈在电磁力作用下的结构稳定。同时并联模式由于去除了中心线圈的固定杆孔,减小了线圈间间隙,进一步提升了线圈的载流面积,因此对提升磁场亦有裨益。

Bitter型线圈最常用的导体材料为特硬态无氧铜,由于经过硬化处理,其强度相较于退火铜提升了1倍,而电导率只下降3%左右。25 T以下水冷磁体线圈都可以采用特硬态无氧铜。25 T以上通常外层大线圈使用特硬态无氧铜,中心线圈则采用强度更高的材料,如弥散铜、铜银合金(Cu-24wt% Ag)等。Bitter导体片的加工方式主要有化学腐蚀、模具冲压、激光加工工艺,这3种工艺在加工精度上依次增强。加工精度影响Bitter型线圈轴向冷却通道的一致程度和表面平整度,对线圈的冷却效果都有较为重要的影响。

Bitter型磁体所需的绝缘片材料需要具有较高的弹性模量和摩擦系数。目前常用的绝缘片材料已由聚酰亚胺薄膜发展为聚酰亚胺层压板,后者的弹性模量高于前者1个量级,采用聚酰亚胺层压板的线圈刚度更好。同时聚酰亚胺层压板表面覆铜,

去铜后绝缘表面会有规则的凹痕纹路,因此有较高的粗糙度和摩擦系数,有利于提高线圈径向电磁力下的结构稳定性。

1.2 多螺旋磁体

另一种水冷磁体技术路线是多螺旋磁体(poly-helix magnet)。多螺旋磁体是由多个单层的螺旋线圈同轴嵌套而成,在机械结构上相互连接,但线圈间相互绝缘。单个螺旋线圈是通过线切割的方式将高强度高电导的圆筒形材料进行轴向螺旋分割并填充绝缘材料制成。嵌套的螺旋线圈间留有一定缝隙,一个作用是作为磁体轴向冷却的水流通道,另一个作用为保证线圈间的绝缘^[8]。这种高密度的分离结构不仅消除了径向电磁力的传递,且使电流密度沿径向分布更为理想,可以达到更高的工程电流密度;另外,各个薄线圈的冷却是线圈内、外径的2个圆柱面,其冷却面积大,因而冷却效果好,可允许的功率密度高。1960年加州大学伯克利分校的Giauque和Lyon利用多螺旋技术建成了一台10 T磁体;澳大利亚国立大学Carden设计的50 mm孔径多螺旋磁体于1971年产生了29.3 T磁场,但该场强仅能维持几秒钟,且消耗的功率达到30 MW^[9];1980年代,法国强磁场实验室的Hans Schneider-Muntau对多螺旋磁体技术进行了改进和发展,将50 mm孔径水冷磁体的性能提高到了10 MW功率下可产生25 T磁场的水平^[8]。目前法国强磁场实验室多采用内侧多螺旋型和外侧Bitter型线圈相结合的技术路线。但由于多螺旋线圈使用的圆筒形材料强度低于Bitter线圈使用的环形片状材料,因此高场水冷磁体线圈主流仍是采用Bitter型结构。

2 超导磁体

超导磁体由多种材料组成,在强电磁力作用下的力学行为复杂。研究和发高性能的超导磁体系统需要考虑电磁场、应力场和温度场相互作用,以及多尺度的多物理场非线性耦合特性,是一项涉及电磁、机械、力学、热学和电气等多学科、多领域的极具挑战性的工作。

尽管在超导现象被发现后不久,人们就提出了制备超导磁体的设想^[10],但直到20世纪50年代具有较高的上临界磁场的第II类超导体被发现,这一想法才得以真正实现。1954年,Yntema等^[11]使用铌线研制成功中心磁场0.71 T的超导磁体;1961年,美国贝尔实验室的Kunzler等^[12]利用Nb₃Sn线研制出8.8 T超导磁体。此后,随着各种磁体稳定性理论与方法的提出及材料工艺的发展,使用低温超导材料的超导磁体制造已达到了工业化规模。但由于受到超导材料临界参量的制约,低温超导磁体所能产生的最高磁场只能达到20 T量级。

随着20世纪80年代高温超导体被发现,高温超导线材开始用于产生更高的稳态磁场。2014年,美国Brookhaven国家实验室、瑞士ABB公司、美国SuperPower公司等几家单位合作研制的使用YBCO高温超导线材的储能磁体,采用多个超导螺管线圈组合,场强达到25 T^[13];2015年,韩国Su-NAM公司成功测试了一台完全由GdBCO带材绕制的超导磁体,中心场强达到26 T^[14];德国Bruker公司研制成功了28.2 T的核磁共振磁体,标志着高温超导磁体即将实现商业化应用^[15]。内插高温超导磁体的复合超导磁体可以产生更高的磁场,美国国家强磁场实验室建成的由低温超导材料和高温超导材料构成的全超导磁体最高场强达到32 T^[16],中国科学院电工研究所王秋良院士团队创造了32.35 T的全超导磁体场强世界纪录^[17]。随着材料技术、磁体技术的不断发展,高温超导磁体的大规模应用指日可待。

2.1 低温超导材料

尽管目前已经发现的超导材料种类数以千计,但综合考虑其电磁性能、机械性能,并结合加工工艺成熟度、制造成本等因素,真正能用于磁体制造的只有少数几种,其中最常用的是NbTi和Nb₃Sn。NbTi是一种合金,其上临界磁场为12 T,由于具有良好的加工塑性和很高的强度,同时其原材料及制造成本远低于其他超导材料,因此10 T以下的磁体通常采用NbTi绕制。商业市场上的NbTi股线大多为嵌在高纯无氧铜或铝、铜镍合金等材料上复合形成的Nb-Ti/Cu多芯复合线,其超导丝数量为500~5000个,超

导丝直径范围为 5~50 μm , 稳定基材铜的含量占整个股线截面的 50%~70%。制造 NbTi/Cu 多芯复合线的基本工艺过程包括合金制备、多芯复合体组合与加工、多芯超导线热处理等^[18]。

10 T 以上的磁体则一般采用上临界磁场可达 27 T 的 Nb₃Sn 材料。Nb₃Sn 是一种脆性的化合物, 必须采用先绕制线圈后反应热处理的特殊加工方法。商业用 Nb₃Sn 线材的制备工艺主要有青铜法 (bronze process)、内锡法 (internal-tin process)、粉末管装法 (PIT) 等^[19]。

青铜法是最早的 Nb₃Sn 股线制作生产方法, 它将铌棒插入一个富锡青铜中, 青铜外环绕高导铜稳定基体, 在高导铜稳定基体和青铜之间置入钽作为阻挡层, 防止在反应热处理过程中青铜中的锡扩散到高导铜中。通过拉伸加工制成多芯铌/青铜复合线材, 最后通过反应青铜中的锡向铌芯扩散生成 Nb₃Sn 超导材料。青铜法的优点是: 可以获得较小有效丝径 ($\leq 5 \mu\text{m}$) 的股线, 股线的制作过程相对简单。缺点是: 在股线的制作过程中, 青铜会发生加工硬化, 因而需要经过多次退火步骤; 由于在铜中含有少量的锡 (16%), 严重制约了 Nb₃Sn 的成相总量; 此外, 它的非铜临界电流密度在 4.2 K、12 T 的条件下, 只能达到 1000 A/mm² ^[20]。

内锡法包括 MJR (modified jelly roll) 法和 RRP (rod restack process) 法。MJR 法是将铌制成带状和青铜轧在一起, 然后放入铜管内进行拉伸和挤压, 最后通过反应热处理生成 Nb₃Sn。该方法是由 McDonald 在 1980 年发明的, 专利由牛津仪器公司拥有, 造价较高。它的临界电流密度可以达到 2900 A/mm²。为了进一步提高临界电流密度, 并更好地利于大规模生产, MJR 逐渐被 RRP 法取代。RRP 法是将环绕铜的锡棒嵌入到铌管中然后再置于铜管中, 将这种坯料拉拔到所需的直径, 最后经反应热处理生成 Nb₃Sn 超导材料。它的优点是具有较高的 Sn/Cu 比, 能够产生富锡 A15 层, 载流能力强, 非铜临界电流密度可以达到 3000 A/mm²; 此外在拉伸过程中不需要类似于青铜法的中间退火过程。该方法的缺点是在热处理过程中可能出现细丝桥接现象, 有效丝径较大, 高达 50 μm 以上^[21-22]。

粉末管装法是将铌锡嵌入铌或铌合金管中, 然后对铌管用防扩散材料处理, 最后压制在高纯铜基体中。这种股线可以获得较高的临界电流密度和较小的有效丝径, 其非铜临界电流密度可达 2500 A/mm², 有效丝径可达 35 μm , 同时该方法制作的线材相比内锡法生产的材料也具有更优秀的机械性能。该方法的主要缺点是 NbSn₂ 粉末需要特殊的复杂方法获得, 且均匀细小的 Cu 粉和 Nb 管的价格昂贵, 所以其造价较其他方法都更高^[23]。

2.2 高温超导材料

目前可选用的高温超导线材主要有 YBa₂Cu₃O_{7-x} (YBCO) 带材、Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8-x} (Bi2212) 圆线、(Bi,Pb)₂Sr₂Ca₂Cu₃O_{10-x} (Bi2223) 带材等。由于 YBCO 超导晶粒间的结合较弱, 采用传统的粉末套管法难以克服晶界弱连接问题, 所以通常采用涂层技术的外延生长技术。YBCO 带材一般由基层、缓冲层、超导层和保护层等多层结构组成。基层一般采用镍基合金、哈氏合金、不锈钢带等柔软的金属基带, 既有足够高的机械强度以提供可靠的支撑, 又具有柔性便于卷绕批量生产。缓冲层的主要作用是作为超导层外延生长的织构基底, 并阻挡金属基底与超导层之间的元素扩散。常用的缓冲层材料主要有二氧化铈、氧化钪、氧化钇、钛酸锶等氧化物。目前主要有 3 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有 4 种制备工艺: 金属有机物沉积 (MOD)、金属有机物化学气相沉积 (MOCVD)、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。为避免空气对 YBCO 氧含量的影响, 在 YBCO 表面还需沉积一层保护层。YBCO 带材具有载流能力高、机械性能好等优点, 是目前制造高温超导磁体的首选材料, 同时它也具有生产工艺复杂、材料性能均一性差、载流和机械性能各向异性的弱点^[24-25]。

Bi2212是唯一可制成圆线且在低温高场下具有高载流性能的铜氧化物超导材料。Bi2212材料主要采用较为经济实用的粉末套管法制备。1999年,日本昭和电缆公司将单芯或多芯的带材组合后,采用对称旋转排列的方法装入合金管中拉拔成EOSAT线材,这种线材不仅较好地克服了带材性能的各向异性,而且临界电流密度可达 800 A/mm^2 (4.2 K, 10 T)^[26]。随着Bi2212制备技术的定型,近些年的工作主要集中在工艺的理解、优化和完善上,在该过程中线材的性能也取得了长足的进步,2017年报道的最好临界电流密度已达到 1000 A/mm^2 (4.2 K, 5 T),并且实现了千米长线的制备^[27]。2011年,美国国家强磁场实验室发现熔融热处理后在超导芯丝中形成的气泡和孔洞是Bi2212线材载流性能进一步提升的主要障碍,随后采用高压熔融热处理有效消除了气泡和孔洞,大幅提高了线材的临界电流密度,例如,在100 bar压力下进行高压热处理后,线材的临界电流密度提升至 2500 A/mm^2 (4.2 K, 20 T)。线材经冷等静压或孔型轧制后,经较低的氧分压气氛下熔融热处理同样也可提高超导芯丝的致密度^[28]。Bi2212线材制备工艺比较简单,容易实现线材的工业化生产,同时具有与 Nb_3Sn 和 NbTi 相似的圆线结构,比较容易制成各种形状的内插线圈。但Bi2212由于材料、生产规模等因素,价格一直居高不下,同时该材料在使用过程中,需要在高压富氧的环境下进行热处理,这给材料的应用带来了一定困难。

Bi2223高温超导带材同样采用粉末套管法进行制作。但由于Bi2223的成相属于固相反应,反应过程中不能生成织构,因此通过轧制和银层诱导形成织构是材料获得高织构度的关键。所以目前的技术水平上,Bi2223只能做成多芯带材。此外,Bi2223制备过程中对金属包套的要求非常高,一方面,金属包套需要具有良好的加工性能,保证多芯结构的获得;另一方面,金属包套需要有一定的化学稳定性,不能在高温条件下与Bi2223发生反应;最重要的是,由于Bi2223热处理过程中需要氧气参与反应,因而金属包套需要同时具备抗氧化能力和一定氧穿透能力。经过大量的研究,金属Ag及

合金成为了最合适的金属包套,为了进一步提高强度,后续研究大多选择AgMgNi或AgMn合金作为Bi2223带材制备的最主要包套材料^[29-30]。正是由于Ag包套的选择,Bi2223超导材料制备成本较高,这成为限制Bi2223高温超导应用的最主要因素。

2.3 线圈绕制方式

小口径超导磁体通常采用密绕方式制作,即用单根超导线材绕制超导线圈。具体绕制方式可分为层绕和饼绕2种:层绕即线圈首先沿轴向绕制完一层后再绕制下一层,目前的圆形超导线多采用该种绕制方式;饼绕即沿径向绕制多个单饼或双饼线圈,然后沿轴向组装到一起,超导带材一般采用该种绕制方式。在绕制过程中,根据环氧浸渍的方法不同,又分为湿绕和干绕的方式,如果采用湿绕方式,需要在线圈绕制过程中,不断刷涂环氧树脂,实现整个线圈固化;如果采用干绕方式,则在线圈绕制完成后,将线圈置于真空浸渍炉中,实现超导线圈环氧固化。在固化材料的选择上除了环氧树脂外,也可采用石蜡等材料^[31-32]。

依据超导线材是否包绕绝缘材料,超导磁体可分为绝缘磁体和无绝缘磁体,一般的超导磁体都为绝缘磁体,采用的绝缘材料包括聚酰亚胺薄膜、玻璃丝带和尼龙等材料。为了解决YBCO高温超导带材失超保护的问题,近年来提出了无绝缘YBCO高温超导线圈方案,从而增加超导线圈失超时超导带材之间的分流,避免局部温度过高造成超导线圈的损坏^[33]。

3 混合磁体

混合磁体的概念由Wood和Montgomery于20世纪60年代提出。1972年,美国麻省理工学院磁体实验室(FBNML)建成了世界上第1台混合磁体,在33 mm室温孔中产生20.2 T磁场^[34]。随着技术的不断发展,混合磁体产生的磁场越来越强。1977年FBNML实验室建成30 T混合磁体^[8];1981年,法国Grenoble强磁场实验室的30 T混合磁体研制也获得成功^[35];1994年,FBNML实验室的Hybrid III混合磁体将场强提高到了35 T^[34];1996年日本驻波

磁体实验室的混合磁体在 52 mm 孔径中产生 35.5 T 磁场^[36]; 1999 年, 美国国家强磁场实验室建成的混合磁体产生了 45 T 的世界最高稳态磁场^[37]。2016 年, 美国国家强磁场实验室建成了世界首台 36 T/48 mm 串联混合磁体, 与传统混合磁体的外超导磁体与内水冷磁体相互独立不同, 该磁体把水冷磁体与超导磁体串联起来, 采用一套直流电源进行供电, 这样做的好处是可利用超导线圈的大电感降低电流纹波, 提高磁场的品质。此外, 该磁体是高均匀度磁体, 可开展核磁共振研究。中国于 2016 年建成国内首台 40 T 级混合磁体, 于 2022 年稳定地产生 45.22 T 稳态磁场, 打破了美国保持 23 年之久的世界纪录, 成为目前世界上可开展科学实验的最高稳态磁场。

混合磁体中处于外围的超导磁体口径大、磁场强, 因此其机械应力问题(正比于磁体口径、场强及电流密度的乘积)比小口径超导磁体更为突出, 采用超导股线密绕方式难以解决。此外, 外超导磁体与内插水冷磁体之间存在强磁耦合, 并且需要考虑内插水冷磁体正常励/退磁过程导致的额外交流损耗, 以及内水冷磁体发生事故和掉电时产生的交流损耗、电压、故障力等, 因此, 混合磁体的外超导磁体通常采用管内电缆导体(cable-in-conduit-conductor, CICC)^[38-40]技术制作。管内电缆导体是将多股超导股线通过多级扭绞的方式制成电缆, 然后将电缆穿入不锈钢管再压制成特定形状的导体。CICC 导体具有以下主要优点。(1) 采用扭绞形式的电缆大大降低了交流损耗和磁通跳跃引起的导体临界电流密度下降, 导体的载流性能高。通过改变导体参数配置(不同数量的超导股线、电缆形式和导体形状等)可设计出超大电流导体。(2) CICC 导体的冷却方式是将超流氦通入不锈钢管内部, 大大提高了超导股线与低温冷却介质的热交换面积, 可以提供给超导磁体很大的抗热扰动稳定性; 这种被称为迫流冷却的冷却方式与浸泡式冷却方式相比, 可以很好地控制磁体失超时的氦气压力, 并且所需低温冷却介质更少。(3) 导体外部的不锈钢铠甲极大地加强了导体的机械性能, 解决了强磁场下的高应力问题。(4) 导体的电绝缘性能在导体外部

实现, 不会与冷却介质直接接触, 因此绝缘电压可以设计得很高。(5) CICC 导体具有整体性好的特点, 使得磁体绕制工艺大大简化。

CICC 导体技术解决了常规超导体通电情况下交流损耗高、载流能力小和机械强度低等问题, 是大型超导磁体的首选方案。美国国家强磁场实验室与中国科学院强磁场科学中心的 45 T 级混合磁体的外超导磁体均采用了 CICC 技术。

对于混合磁体的内插水冷磁体, 由于运行时外超导磁体产生的高背景磁场的存在, 内插水冷磁体与单独水冷磁体相比要承受更大的电磁力, 在 40~45 T 的磁场区间电磁力平衡问题也更为突出。国际上在运行的 2 台 45 T 级混合磁体的内插水冷磁体均采用了 Florida-Bitter 技术路线。Bitter 片在切缝处的径向电磁力不平衡会导致 Bitter 片间相互错位, 引起冷却水路堵塞, 造成严重的换热问题; 电磁力不平衡还会导致 Bitter 片与固定杆相互挤压造成应力集中, 致使 Bitter 片破裂。为了提高径向电磁力的平衡能力, 从而提高线圈结构稳定性, 美国国家强磁场实验室和中国科学院强磁场科学中心都提出了各自的解决方案。美国国家强磁场实验室采用高场线圈并联技术, 通过并联将大电流分流到 2 个线圈, 从而降低单个线圈中 Bitter 片的径向电磁力, 使得 Bitter 片间的摩擦力足够平衡径向电磁力。中国科学院强磁场科学中心提出了全新的“电磁力精细剖分”技术, 通过改变 Bitter 片上孔型排布和 Bitter 片厚度, 使得相同厚度的单匝中含有更多的 Bitter 片, 从而降低单片上的电磁力, 达到电磁力和片间摩擦力平衡的目的。同时, 还提出了全新的“电流密度分级加压”技术, 通过在线圈两端使用多匝电流密度较低的厚匝形成数值可观的轴向累加电磁力, 提升高电流密度区 Bitter 片接触面间的正压力, 实现摩擦力的提升, 进而提升整个线圈抵抗径向电磁力的能力。液压紧技术也被应用到中国的 45 T 级混合磁体, 以进一步提升线圈的力学稳定性。

4 稳态强磁场磁体技术展望

随着基础科学研究的深入及中国各行业对稳

态磁场需求的提升,人们对于磁体的要求在向更高磁场、更大口径、更好的均匀度与更高稳定度的方向发展。由于高场水冷磁体运行时能耗太大,同时,近年来高温超导材料的性能不断得到提升,采用高温超导材料的高温超导磁体技术将是未来稳态强磁场技术的重点发展方向。研发出既有高临界参数又具备良好的力学性能和机械加工性能的新型高温超导线材,或通过新型加工制备技术提高现有高温超导材料的性能,是推动高温超导磁体技术发展的关键。在磁体设计方面,由于超导材料的载流特性、几何结构复杂及使用条件的特殊性,需要发展高级数值分析技术来确定和优化磁体结构。对于大口径高温超导磁体,研发出适合于高温超导线材的新型导体结构同样是高温超导磁体技术的重要课题。此外,由于高温超导磁体失超传播速度比低温超导磁体低1~2个数量级,如何有效地对高温超导磁体进行失超保护仍是尚未解决的难题,利用光纤、霍尔、电容和声波等探测技术可能是高温超导磁体失超保护技术取得突破的关键。

基于稳态强磁场在中国基础研究及国民经济中的重要作用,建议加大对稳态强磁场磁体技术发展的支持,以及对稳态强磁场装置建设的投入,以满足中国在基础科学研究、大科学装置建设、高端医疗装备制造等领域对稳态强磁场的迫切需求。

参考文献(References)

- [1] Herlach F, Perenboom J A. Magnet laboratory facilities worldwide: An update[J]. *Physica B: Condensed Matter*, 1995, 211(1-4): 1-16.
- [2] Bitter F. Water cooled magnets[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1962, 33(3): 342-349.
- [3] Gao B, Schneider-Muntau H J, Eyssa Y, et al. A new concept in Bitter disk design[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1996, 32(4): 2503-2506.
- [4] Bird M, Bole S, Eyssa Y, et al. Design of a poly-Bitter magnet at the NHMFL[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1996, 32(4): 2542-2545.
- [5] Wijnen F J, Wieggers S A, Van Velsen J M, et al. Construction and performance of a 38-T resistive magnet at the Nijmegen High Field Magnet Laboratory[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2016, 26(4): 1-5.
- [6] Gao B, Ding L, Wang Z, et al. Water-cooled resistive magnets at CHMFL[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2016, 26(4): 1-6.
- [7] Toth J, Bole S. Design, construction, and first testing of a 41.5 T all-resistive magnet at the NHMFL in Tallahassee [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2017, 28(3): 1-4.
- [8] Schneider-Muntau H J. Generation of very high continuous fields by polyhelix and polyhelix hybrid magnets[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1982, 18(6): 1565-1570.
- [9] Carden P. Testing the ANU 30 T high field magnet at Canberra[J]. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 1972, 5(7): 667.
- [10] Kamerlingh Onnes H. Report on the researches made in the Leiden Cryogenic Laboratory between the Second and Third International Congress of Refrigeration[J]. *Communications From the Kamerlingh Onnes Laboratory of the University of Leiden*, 1913, 34(55): 55-70.
- [11] Yntema G. Niobium superconducting magnets[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1987, 23(2): 390-395.
- [12] Kunzler J E, Buehler E, Hsu F, et al. Superconductivity in Nb_3Sn at high current density in a magnetic field of 88 kgauss[J]. *Physical Review Letters*, 1961, 6(3): 89.
- [13] Gupta R, Anerella M, Joshi P, et al. Design, construction, and testing of a large-aperture high-field HTS SMES coil[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2016, 26(4): 1-8.
- [14] Yoon S, Kim J, Cheon K, et al. 26 T 35 mm all-GdBa₂Cu₃O_{7-x} multi-width no-insulation superconducting magnet[J]. *Superconductor Science and Technology*, 2016, 29(4): 04LT04.
- [15] Wikus P, Frantz W, Kümmerle R, et al. Commercial gigahertz-class NMR magnets[J]. *Superconductor Science and Technology*, 2022, 35(3): 033001.
- [16] Weijers H W, Markiewicz W D, Gavrillin A V, et al. Progress in the development and construction of a 32-T superconducting magnet[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2016, 26(4): 1-7.
- [17] Liu J, Wang Q, Qin L, et al. World record 32.35 tesla direct-current magnetic field generated with an all-superconducting magnet[J]. *Superconductor Science and Technology*, 2020, 33(3): 03LT01.
- [18] 马衍伟. 超导材料科学与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2022: 91-92.

- [19] Godeke A. A review of the properties of Nb_3Sn and their variation with A15 composition, morphology and strain state[J]. *Superconductor Science and Technology*, 2006, 19(8): R68.
- [20] Abdyukhanov I, Vorobieva A, Dergunova E, et al. The RRR parameter of the ITER type bronze-route Cr-Coated Nb_3Sn strands after different heat treatments[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2011, 22(3): 4802804.
- [21] Kim J, Sim K, Jang K, et al. Effects of Cr diffusion on RRR values of Cr-plated Nb_3Sn strands fabricated by internal-tin process[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2008, 18(2): 1043–1046.
- [22] Barzi E, Zlobin A V. Research and development of Nb_3Sn wires and cables for high-field accelerator magnets[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2016, 63(2): 783–803.
- [23] Godeke A, Den Ouden A, Nijhuis A, et al. State of the art powder-in-tube niobium-tin superconductors[J]. *Cryogenics*, 2008, 48(7/8): 308–316.
- [24] Senatore C, Alessandrini M, Lucarelli A, et al. Progresses and challenges in the development of high-field solenoidal magnets based on RE123 coated conductors[J]. *Superconductor Science and Technology*, 2014, 27(10): 103001.
- [25] Macmanus-Driscoll J L, Wimbush S C. Processing and application of high-temperature superconducting coated conductors[J]. *Nature Reviews Materials*, 2021, 6(7): 587–604.
- [26] Motowidlo L, Galinski G, Ozeryansky G, et al. Dependence of critical current density on filament diameter in round multifilament Ag-sheathed $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ wires processed in O_2 [J]. *Applied Physics Letters*, 1994, 65(21): 2731–2733.
- [27] Okada M, Tanaka K, Wakuda T, et al. A new symmetrical arrangement of tape-shaped multifilaments for Bi-2212/Ag round-shaped wire[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 1999, 9(2): 1904–1907.
- [28] Larbalestier D C, Jiang J, Trociewitz U A, et al. Isotropic round-wire multifilament cuprate superconductor for generation of magnetic fields above 30 T[J]. *Nature Materials*, 2014, 13(4): 375–381.
- [29] Ikeda Y, Ito H, Shimomura S, et al. Phase diagram studies of the $\text{BiO}_{1.5}\text{-PbO-SrO-CaO-CuO}$ system and the formation process of the "2223(high- T_c)" phase[J]. *Physica C: Superconductivity*, 1991, 190(1/2): 18–21.
- [30] Sato K I, Kobayashi S I, Nakashima T. Present status and future perspective of bismuth-based high-temperature superconducting wires realizing application systems [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2011, 51(1R): 010006.
- [31] Wilson M N. *Superconducting Magnets*[M]. New York: Oxford University Press, 1987.
- [32] Iwasa Y. *Case studies in superconducting magnets design and operational issues*[M]. New York: Springer Press, 2009.
- [33] Hahn S, Park D K, Bascunan J, et al. HTS pancake coils without turn-to-turn insulation[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2010, 21(3): 1592–1595.
- [34] Foner S. High-field magnets and high-field superconductors[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 1995, 5(2): 121–140.
- [35] Schneider-Muntau H. A 30 tesla hybrid magnet with 5 cm bore: A French-German project[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1981, 17: 1783–1785.
- [36] Inoue K, Kiyoshi T, Kosuge M, et al. First test operation of 40 tesla class hybrid magnet system[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1996, 32(4): 2450–2453.
- [37] Bird M, Bole S, Dixon I, et al. The 45 T hybrid insert: Recent achievements[J]. *Physica B: Condensed Matter*, 2001, 294: 639–642.
- [38] Muzzi L, De Marzi G, Di Zenobio A, et al. Cable-in-conduit conductors: Lessons from the recent past for future developments with low and high temperature superconductors[J]. *Superconductor Science and Technology*, 2015, 28(5): 053001.
- [39] Uglietti D, Sedlak K, Wesche R, et al. Progressing in cable-in-conduit for fusion magnets: From ITER to low cost, high performance DEMO[J]. *Superconductor Science and Technology*, 2018, 31(5): 055004.
- [40] Uglietti D. A review of commercial high temperature superconducting materials for large magnets: From wires and tapes to cables and conductors[J]. *Superconductor Science and Technology*, 2019, 32(5): 053001.

Review and perspective of steady high field magnet technology

KUANG Guangli

High Magnetic Field Laboratory of Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China

Abstract Steady high magnetic field is a very important tool for frontier researches. Many advanced countries have developed high field magnet technologies and built high magnetic field facilities to create research conditions. The applications of high magnetic field on scientific researches have promoted the development of many disciplines, such as physics, chemistry, material science, bioscience, etc. There are three kinds of steady magnets, namely water-cooled magnets, superconducting magnets and hybrid magnets. Water-cooled magnets can create very high magnetic field rapidly, but with large power consumption. Superconducting magnets have much lower power consumption and the volume and weight of the magnets are much smaller. However, the maximum field of current superconducting magnets is not as high as that of the water-cooled magnets. Hybrid magnets use superconducting coils to replace the outer coils of a water-cooled magnet. So they can create a higher field with lower power consumption compared to water-cooled magnets. This paper briefly introduces the above magnet technologies, reviews their development history and discusses their development perspectives.

Keywords high magnetic field; resistive magnets; superconducting magnets; hybrid magnets ●



(责任编辑 王微)