

实用化超导线带材简介

陈震宇 张胜楠

(西北有色金属研究院, 超导材料研究所 710016)

自1911年发现超导电性以来,新型超导材料探索、超导机理研究以及实用化超导材料制备及其应用技术开发等,成为了超导学研究的几个重要方向,并在百余年的进程中,逐渐发展成超导物理、超导材料、超导电工、超导电子等学科。其中,超导材料的研究是衔接超导物理和超导应用的桥梁。一方面,新型超导材料的探索可以为深入理解超导机理提供充分的数据支撑;同时,实用化超导材料的制备则可以为超导应用提供材料基础。近年来,随着材料制备技术和装备的不断升级,实用化超导材料制备能力得到了长足的进步。超导材料已经在包括电力能源、医疗装备、交通运输、大科学装置等方面都实现了许多重要的应用。

截至目前,人类已经发现的具有超导电性的物质有上万种,包括元素单质、合金、化合物以及有机物等。但是,可以实现实际应用的超导材料种类则仅有不足十种。根据实用化超导材料的临界温度 T_c ,一般将实用化超导材料分为以NbTi超导线材、Nb₃Sn超导线材为代表的低温超导材料(Low Temperature Superconductor, LTS)和以Bi₂Sr₂CaCu₂O₈(Bi-2212)超导线材、Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O₁₀(Bi-2223)超导带材、REBa₂Cu₃O₇(简称为REBCO,其中RE为稀土元素)涂层导体、MgB₂超导线材以及铁基超导线材为代表的高温超导材料(High Temperature Superconductor, HTS)。每种材料基于其化学性质的不同,需要使用不同的制备方法,最终呈现的性质和应用领域也各不相同。本文将重点介绍现有的几种实用化超导材料的研究进展,并对其发展做出展望。

一、超导材料的基本特性

1911年,荷兰莱顿大学的昂内斯团队^[1]发现金

属汞在4.2 K温度条件下电阻会突然降为零,这一物理发现被称为“超导现象”,电阻为零时的温度被称为超导临界温度(T_c),“零电阻效应”也成为超导材料最重要的判据之一。

超导材料的零电阻效应可以使超导电缆实现近乎无损耗的电流传输,减少能量浪费、避免热量堆积,从而显著提升输电过程的安全性。超导材料有一个承载电流密度的上限值,被称为临界电流密度(J_c),一旦传输的电流超过该上限,超导材料会瞬时恢复到有电阻的正常态。

1933年,德国物理学家沃尔特·迈斯纳(Walther Meissner)团队^[2]发现当超导体在磁场中被冷却到 T_c 以下时,磁场就会从超导体中完全排出。这种抗磁现象被称为迈斯纳效应(Meissner effect),也被称为完全抗磁性。研究表明超导材料所能承受的磁场强度有限,一旦超过某个阈值,磁场会进入到超导体内部,超导体将恢复到有电阻的正常态而不再超导,这个阈值被称为临界磁场(H_c)。零电阻效应和迈斯纳效应为超导材料在强电应用领域提供了重要基础和保障。

1962年,英国剑桥大学的约瑟夫森(B. D. Josephson)等^[3]提出了超导材料的又一个重要性质:“超导隧道效应”(又称为约瑟夫森效应)。该效应可以理解为:当两个超导体A和B中间隔着一层极薄的绝缘体,在不施加外加电压的情况下就会因相位差的形成而产生“超导隧道电流”,即库珀电子对可以从A穿过绝缘体进入到B中。约瑟夫森效应是目前超导材料在电子器件领域中应用的基石。

二、实用化超导线带材的产业化发展

自超导现象发现百余年来,尽管已经有上万种

超导材料被陆续发现,但从实际应用角度来看,不仅需要考虑到材料的 T_c 、 H_{c2} 和 J_c 这三个参数是否能够达到应用要求,还要看材料是否能够制备成线带材、块材或薄膜的形式,因此目前有希望实现产业化应用的超导材料种类仍然较少。下面将对一些已经实现产业化应用和极具产业化潜力的超导材料进行相应的介绍。

(一) 低温超导材料NbTi和Nb₃Sn的产业化发展现状

1. NbTi超导材料

1961年,Hulm团队^[4]发现了NbTi合金具有超导电性,其晶格结构为一种单相 β 型固溶体,其 T_c 为10.2 K,在4.2 K条件下, H_{c2} 可以达到12.0 T。3年后,美国西屋(Westhouse)电力公司生产出了第一根NbTi超导线,长度达到384 m,线径为0.635 mm,该超导线材在4.2 K,3 T的条件下临界电流达到了1240 A,这项工作证明NbTi超导材料确实具有较强的实用化潜力。由于NbTi作为合金,具有良好的加工性能,目前制备NbTi线材的方法通常是先通过熔炼法制成合金,然后直接采用集束拉拔工艺制备成铜基多芯复合超导线材,最后通过控制时效热处理的冷加工工艺,将 β 单相合金转变为 $\alpha+\beta$ 两相合金的结构,其中弥散析出的 α 相可以作为强磁通钉扎中心,实现NbTi合金在磁场中 J_c 的显著提升。目前,NbTi线材的 J_c 在4.2 K,5 T条件下可以达到3700 A/mm²。

近年来,NbTi超导线材因为其制备工艺成熟、性价比高、稳定性强等优势,已经广泛应用于各种液氦温区服役的聚变堆磁体、核磁共振成像仪(MRI)、核磁共振波谱仪(NMR)和大型粒子加速器等设备的制造中。即使随着技术的发展,对磁体磁场强度的要求越来越高,目前大部分的磁体仍然采用NbTi线材进行背景场磁体的制备,因此,NbTi占据了超导材料产业90%以上的市场。

NbTi超导材料的国外生产商包括德国布鲁克(Bruker)公司、英国诺尔达(Luvata)公司、日本超导技术公司(JASTEC)和美国阿勒格尼技术公司(ATI)

等。在国内,西部超导材料科技股份有限公司(简称西部超导公司)经过多年技术积累,成为国内唯一一家可以同时商业化生产NbTi铸锭以及超导线材的企业,掌握了高均匀合金熔炼、多组元复合体塑性变形和磁通钉扎性能的控制技术。截至目前,西部超导已经成功完成了我国承担的国际热核聚变实验堆(ITER)计划项目中超导线材的供货任务,并正在为我国紧凑型聚变能实验装置(BEST)提供超导线材。此外,除了聚变堆加速器等大科学装置用NbTi超导线材,西部超导还在积极开发包括MRI用高铜比NbTi线材、开关线用高绝热稳定性NbTi线材以及量子计算机用NbTi同轴电缆等各种不同结构的NbTi超导线材,相应产品成功填补了国内空白,并且部分产品已经占领了国际市场^[5]。超导线材的结构设计很大程度上取决于其应用需求,如图1所示为几种不同结构的NbTi线材截面照片,它们被分别用于不同的领域中^[6]。

2. Nb₃Sn超导材料

Nb₃Sn是典型的A15型晶体结构金属间化合物。1954年,Matthias团队^[7]在Nb₃Sn体系中发现了超导电性,其 T_c 约为18 K, H_{c2} 可达25 T。Nb₃Sn在高场下的 J_c 很高(例如,在4.2 K,15 T条件下,Nb₃Sn超导线的 J_c 可以达到1000 A/mm²以上)^[8],这使其可以填补NbTi超导线材与昂贵且尚制备技术未成熟的高温超导材料之间的性能空白。目前,大部分10 T以上超导磁体的制备都采用NbTi线材制备背景场,而使用Nb₃Sn线材制备高场内插线圈,最终实现磁场强度的提升。

由于Nb₃Sn为化合物,脆性较大,不能简单地采用集束拉拔的方法进行制备。因此,研究人员开发了多种方法制备Nb₃Sn超导线材。其中应用最多的两种制备方法为内锡法和青铜法。因两种方法制备的Nb₃Sn中Sn含量有一定的差异,因此两种Nb₃Sn线材具有不同的性能特点(两种制备方法及其典型线材截面特征如图2所示)。内锡法制备的Nb₃Sn超导线材具有较高的 J_c ,但由于芯丝耦合严重,其交流损耗相对较高;青铜法制备的Nb₃Sn超导

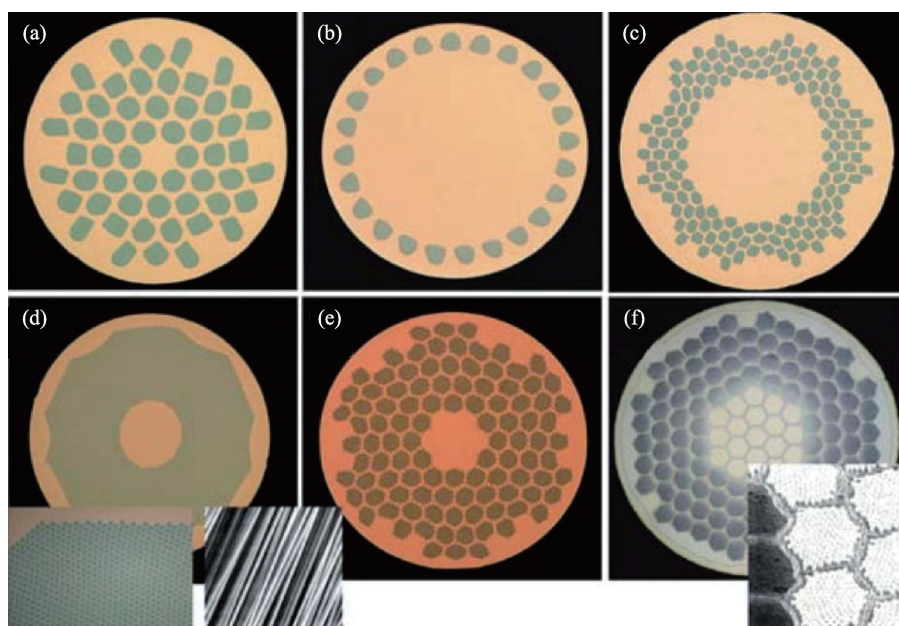


图1 (a)用于核磁共振(NMR)设备;(b)用于磁共振成像(MRI)设备;(c)用于聚变堆导体;(d)用于大型强子对撞机(LHC);以及(f)用于提供脉冲场的NbTi线材横截面照片^[6]

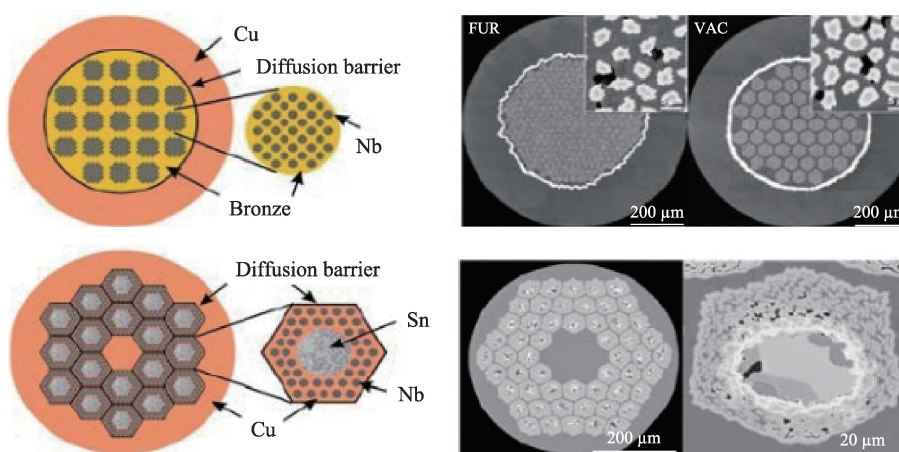


图2 青铜法(上)和内锡法(下)的工艺路线及典型横截面照片

线材 J_c 适中,但受益于芯丝一般不会发生耦合,其交流损耗较低。因此这两种工艺制备得到的 Nb_3Sn 线材在不同的应用领域拥有各自的优势^[5]。

国际上从事 Nb_3Sn 超导线材研发和生产的企业主要包括美国牛津超导公司、日本JASTEC公司、古河电气工业株式会社以及中国的西部超导公司等。美国牛津公司^[9]生产的内锡法 Nb_3Sn 超导线材拥有目前商用超导线中最高 J_c 值,其在4.2 K、12 T条件下 J_c 可达3000 A/mm²。日本JASTEC公司和

古河电气工业株式会社则聚焦采于青铜法制备 Nb_3Sn 超导线材,他们通过开发高强度 Nb_3Sn 超导线材并突破了相关配套加工和热处理技术,实现了增强型先反应后绕制 Nb_3Sn 超导线材的制备,有效提高了超导磁体制造的便捷性、稳定性和安全性。在国内,西部超导开发了具有自主知识产权的万芯级难变形青铜法技术用于制备 Nb_3Sn 线材,同时也设计出了高 J_c 、低损耗内锡法 Nb_3Sn 线材导体结构,目前西部超导制备的 Nb_3Sn 超导线材综合性能和稳

定性均达到国际领先水平。

(二) 铜基高温超导带材的发展

1. $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ 超导材料

$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ (简称 Bi-2212) 是一种钙钛矿结构的材料, 晶体结构为层状结构, 包括两个铜氧层作为超导层, 其 T_c 约为 85 K, H_{c2} 非常高, 可以达到 100 T 以上。尽管其临界温度高于液氮温度 77 K, 但是 Bi-2212 在 77 K 的载流性能较差, 而在低温、高场下具有优异的载流性能, 研究人员在液氮温区 45 T 磁场条件下测量 Bi-2212 的工程临界电流密度 (J_e) 仍能保持 266 A/mm^2 [10,11], 这表明 Bi-2212 线材非常适合于超高磁场条件下的应用。此外 Bi-2212 是目前唯一一种可以制备成各向同性圆线的铜氧化物高温超导体, 因此被认为是 25 T 以上高场磁体制备的最具应用前景的高温超导材料之一。

Bi-2212 超导线材一般采用粉末装管 (PIT) 法进行制备, 即首先将烧结后具有一定相组成的前驱体粉末装入金属包套中, 经过旋锻、拉拔加工后获得单芯线材, 再经过集束组装、旋锻、拉拔后获得具有一定芯丝构型, 并且各向同性的圆线。这种圆线结构与低温超导材料类似, 在实际使用过程中, 可以采用基于低温超导材料开发的绞缆或磁体绕制技术。此

外, 与其他高温超导材料相比, Bi-2212 可以实现近千芯结构的制备, 因此, 其交流损耗较小, 是制备管内电缆导体、卢瑟福电缆和螺线管线圈的理想材料。

1988 年德国真空熔炼公司率先成功制备出了 Bi-2212 线材, 其 J_e 在 4.2 K, 零场条件下达到了 550 A/mm^2 ; 1999 年, 日本日立公司开发出 J_e 高达 800 A/mm^2 (4.2 K, 10 T) 的 Bi-2212 超导线材; 2011 年, 美国国家高场实验室 [12] 通过高压熔融热处理工艺, 在高效消除芯丝中的气泡和孔洞后, 线材性能获得了大幅度提升 (图 3)。从图 3(b) 和 (c) 中可以看出随着气氛压力从 1 bar 增加到 100 bar, 线材截面形貌获得了明显的优化。

目前已有多家公司和研究机构具备 Bi-2212 线材的批量化制备能力, 包括美国牛津仪器公司 (BOST)、欧洲耐克森 (Nexans) 公司、日本昭和电线电缆株式会社和中国西北有色金属研究院等。其中, 西北有色金属研究院研制的线材在 4.2 K, 14 T 磁场下的 J_e 达到 760 A/mm^2 [13], 接近国际领先水平。

2. $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ 超导材料

1987 年, Maeda 等人发现了 T_c 大于 100 K 的超导材料 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ (简称 Bi-2223), 这是目前临界温度 ($T_c \sim 110 \text{ K}$) 最高的实用化高温超导材料。Bi-2223 的晶体结构与 Bi-2212 相似, 具有三个铜氧层, 但由

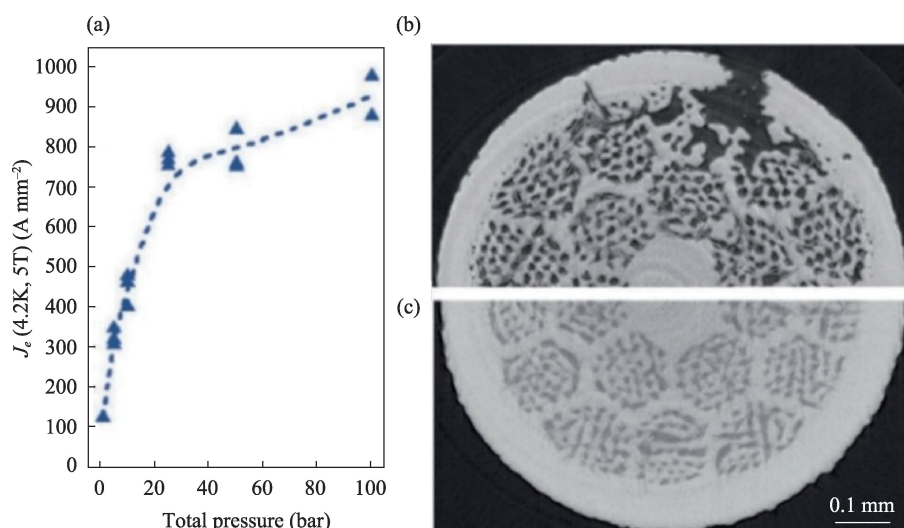


图3 (a) Bi-2212 超导线材工程电流密度 J_e (4.2 K 和 5 T) 随烧结过程中气氛压力的变化曲线; (b) 烧结气氛压力为 (b) 1 bar 和 (c) 100 bar 线材横截面的 X 射线断层扫描照片 [12]

于其 c 轴长度极大,使其超导电性具有明显的各向异性,因此实际应用时往往需要制备成扁带的结构。

Bi-2223 是首个实现批量化制备的实用化高温超导材料,其制备工艺同样为 PIT 法,但是由于 Bi-2223 粉末的流动性较差,因此一般采用一次组装的工艺,制备 100 芯左右的线材,之后采用平辊轧制,获得扁带的结构。

由于其在 77 K 液氮温区具有良好的载流性能, Bi-2223 带材可以应用于液氮环境下的发电机、传输电缆、分流电压器、故障电流限制器、电动机和储能装置等设备中。2014 年,德国埃森市挂网运行了 1 km 长的超导电缆,其中就是用到了大量的 Bi-2223 超导带材,自开始运行以来,实现了长期稳定的运行。我国也成功研制了世界上第一台超导变电站并进行了并网实验,成功证实了该材料在电网中长期稳定运行的能力。

美国超导公司通过对 Bi-2223 化学组分和工艺的精确控制以及后退火技术的开发,在国际上率先实现了在 77 K 自场条件下传输电流 100 A 的突破,曾一度处于领先地位。随后在 2004 年,日本住友电气工业株式会社(简称住友电工)开发出可用于千米长带制备的可控高压热处理技术,将 Bi-2223 带材的临界电流迅速提升至 250 A 以上,目前,其批量化提供的千米带材在 77 K 自场的临界电流稳定在 200 A 以上。之后美国超导公司关停了 Bi-2223 带材的生产线,国际上只有日本住友电工成为 Bi-2223 带材的垄断级供应商。国内主要的 Bi-2223 带材研究单位有北京英纳超导技术有限公司和西北有色金属研究院两家。目前,国内 Bi-2223 带材的载流性能基本稳定在 150 A 左右,仍与日本住友生产的带材性能间存在较大差距。表 1 展示了 Bi-

2223 超导带材生产的主要厂商及其技术水平。

3. $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 涂层导体

$\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, 简称为 REBCO, 其中 RE 代表稀土元素, 目前应用最为广泛的是 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, 简称 YBCO。YBCO 超导体是第一个被发现的 T_c 超过 77 K 的高温超导体。YBCO 超导体晶粒间结合较弱, 这使得使用传统的粉末装管工艺难以实现有效的晶粒间连接, 因而通过薄膜外延生长技术进行长带制备(如图 4 所示), REBCO 涂层导体也被称为第二代高温超导带材。目前商业化的 REBCO 超导带材往往采用由金属基带、缓冲层、REBCO 超导层、保护层等构成的复合多层结构。REBCO 涂层导体具有极高的综合性能, 使其成为目前许多高温超导应用项目的关键材料。

在二十多年的技术攻关下, 研究人员开发出了金属有机沉积(MOD)、脉冲激光沉积(PLD)、金属有机化学气相沉积法(MOCVD)和反应电子束共蒸发-沉积(RCE-DR)工艺等制备技术。韩国 SuNAM 公司开发的反应电子束共蒸发-沉积反应(RCE-DR)技术, 可实现高生产效率(360 m/h)下制备 4 mm 的宽带材。日本藤仓公司(Fujikura)则采用了激光脉冲沉积(PLD)技术, 在离子束辅助沉积(IBAD)的 $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 缓冲层上制备出 YBCO 超导层, 带材生产规模达到了千米级。美国 SuperPower 公司是国际上首家制备

表 1 全球范围内 Bi-2223 超导带材生产的主要厂商及其技术水平

单位	技术水平 (77 K, 自场)
日本住友电工公司	100~2000 m, $J_c > 200 \text{ A/mm}^2$
美国超导公司	100~1000 m, $J_c > 150 \text{ A/mm}^2$
德国布鲁克公司	100~2000 m, $J_c > 100 \text{ A/mm}^2$
北京英纳超导技术有限公司	100~2000 m, $J_c > 120 \text{ A/mm}^2$
西北有色金属研究院	100~2000 m, $J_c > 110 \text{ A/mm}^2$

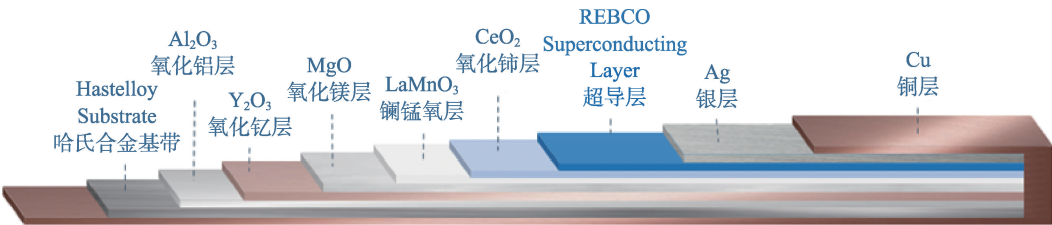


图 4 REBCO 超导带材结构示意图

出千米级REBCO超导带材的公司,其采用MOCVD法在IBAD-MgO/哈氏合金缓冲层上制备出了临界电流为300 A(4.2 K, 18 T)的千米级超导带材。

我国的上海超导科技股份有限公司、上海上创超导科技有限公司和东部超导科技(苏州)有限公司分别采用PLD、MOD和MOCVD技术先后实现了千米级REBCO超导带材的生产^[14,15],使我国在第二代高温超导带材的产业化和应用方面达到国际先进水平。我国自主开发的涂层超导材料,目前已经在上海和深圳的超导电缆项目、30 T以上超导磁体项目中实现了实际应用。

(三) MgB₂线材的发展

2001年,日本青山学院的秋光纯(J. Akimitsu)教授团队^[16]发现了MgB₂的超导电性,其 T_c 约为39 K。MgB₂是一种金属间化合物超导体,具有相干长度大、晶界不存在弱连接、质量轻、材料成本低、加工性能好等优点。MgB₂超导材料可以工作在制冷机温度范围内(10~20 K),因此可以使超导应用摆脱复杂且昂贵的液氮冷却系统。MgB₂超导体可用于磁共振成像(MRI)系统、特殊电缆、风力发电电机以及空间系统驱动电机等领域。

目前以PIT工艺和连续粉末填装与成形工艺(CTFF)为代表的第一代MgB₂线材制备技术已经进入了产业化阶段。意大利的艾森超导(ASG Superconductors)公司采用先位法PIT工艺制备了12~37芯Cu/Ni基MgB₂多芯线材,在20 K, 1.2 T的临界电流密度可达1000 A/mm²。美国的Hyper Tech公司采用CTFF工艺制备出单根长度大于3 km的Monel/Cu/Nb基多芯MgB₂线材,其临界电流密度在25 K, 1 T达到2000 A/mm²。日本的日立(Hitachi)公司和韩国的三东(Sam Dong)公司也已形成千米级MgB₂线材的生产能力。目前国内,西北有色金属研究院和西部超导公司能够制备千米量级长度的19芯及37芯结构MgB₂长线,其 J_c 在20 K, 1 T下达到250 A/mm²,与国际先进水平基本持平,如图5所示。

为了改善PIT工艺带来的MgB₂线材致密度极低这一问题(粉末状管法制备的MgB₂线材中MgB₂密度

只能达到理论密度的50%左右),意大利的Giunchi团队通过液态镁渗透技术制备出了高致密度的MgB₂线材。而日本研究团队将这种技术称为中心镁扩散(Inner Magnesium Diffusion, IMD)技术,其也被称为MgB₂的第二代制备技术。高致密度的MgB₂芯丝结合C掺杂工艺使IMD工艺制备线材的 J_c 值接近于PIT工艺的3倍。目前具备IMD长线工艺制备能力的单位主要包括美国的Hyper Tech公司、中国的中科院电工所和西北有色金属研究院,其中西北有色金属研究院制备的600米IMD线材在4.2 K, 4 T条件下 J_c 超过7000 A/mm²,居国际领先水平。

(四) 铁基超导线材

2008年,日本东京工业大学Hosono教授^[17]在F掺杂的LaFeAsO体系中检测到了26 K的超导电性,开启了高温超导材料研究的一个全新领域。这一次,中国团队从一开始就在铁基超导材料探索工作中占据了重要地位,率先发现了50 K以上铁基高温超导体,缔造了铁基超导材料56 K的临界温度世界纪录。虽然铁基超导材料的 T_c 小于铜基超导材料,然而更大的临界场 H_c 、更小的各向异性以及更低的制备成本,使其同样在高场磁体应用领域具有较大的应用前景。自铁基超导体被发现以来,研究人员已相继发现了上百种铁基超导材料,这些超导体的晶体结构均为层状,都含有Fe和氮族(P, As)或

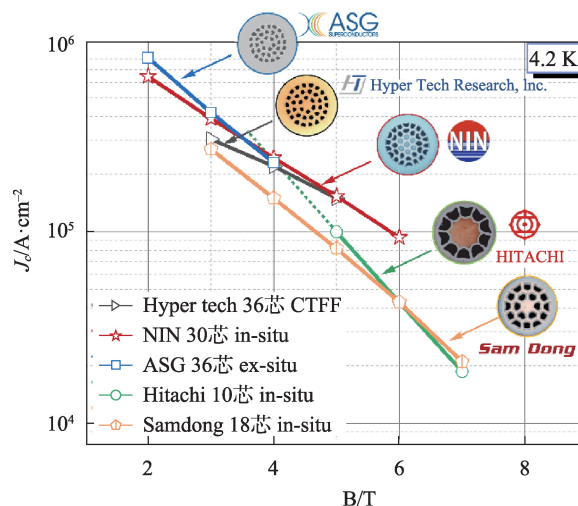


图5 PIT工艺制备商业化MgB₂线材的超导性能

硫族元素(S, Se, Te)组成的超导层,其中,Fe离子为上下两层正方点阵排列方式,氮族或硫族离子层被夹在Fe离子层间。按照导电层以及为导电层提供载流子的载流子库层交叉堆叠方式和载流子库层的不同形成机制,主要分为1111体系(如SmOFeAsF, NdOFeAsF等)、122体系(如BaKFeAs, SrKFeAs等)、111体系(如LiFeAs)、11体系(如FeSe和FeSeTe)以及1144相等为代表的新型结构超导体等体系。铁基超导体具有极高的上临界场(100~250 T)、较低的各向异性($1 < \gamma_H < 2$, 122体系)、较强的磁通钉扎能力等优势,是新型实用化超导材料开发的重要方向。中国科学院电工研究所马衍伟研究员团队采用PIT法通过控制轧制织构和元素掺杂,在2014年制备出临界电流密度达到 $1\,000\text{ A/mm}^2$ (4.2 K, 10 T)的铁基超导带材(短样),使铁基超导带材性能达到了实用化的门槛。经过长线制备技术的探索,2017年他们制备出了国际上首个百米级铁基超导长线, J_c 达到了 130 A/mm^2 (4.2 K, 10 T),且表现出极好的均匀性(如图6所示)^[18]。目前,马衍伟研究员团队制备的铁基超导线材短样在4.2 K, 10 T条件下, J_c 已经超过了 $2.2 \times 10^5\text{ A/cm}^2$,百米长线 J_c 也已经达到 $6.6 \times 10^4\text{ A/cm}^2$ 。此外,该团队也成功制备了20 T背景场下产生1 T以上磁场的高场内插线圈^[19]。他们制备的铁基超导线材已经成功在高场内插线圈、大尺寸跑道型线圈等方面获得成功应用。

三、展望

随着科技水平的日益提高和超导材料实用化场景的进一步丰富,国际上对超导材料的开发和应用提出了更高和更全面的要求。

大科学装置普遍需要较大的磁场环境,如新一代环形正负电子对撞机及超级质子对撞机(CEPC/SPPC)磁场水平达到国际最高水平20 T、中国聚变工程试验堆(CFETR)磁场水平达到15 T、欧洲环形对撞机(FCC)磁场水平达到15 T。而在新型强电应用方面,用于脑科学研究的MRI需要15 T以上超导磁体系统、NMR需要30 T以上超导磁体系统、高电

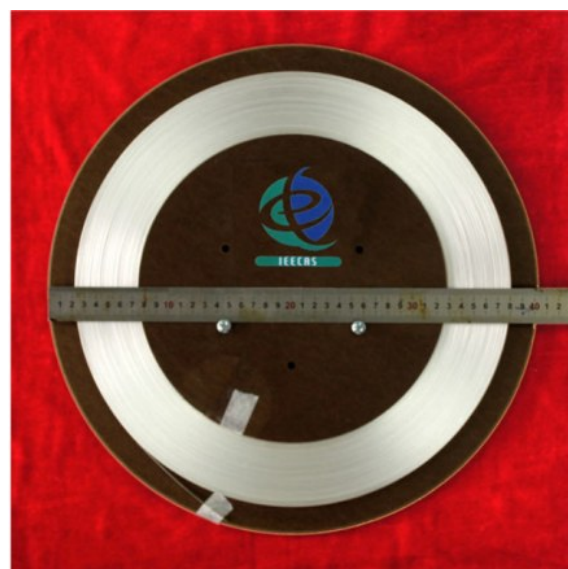


图6 中科院电工所制备的国际上首根百米级铁基超导线材^[18]

压等级电网需要新型超导限流器和变压器、舰船推进系统需要40 MW以上超电机,以上需求都超过超导技术的现有水平也远超常见低温超导材料性能极限,这也给 T_c 更高、性能更好的高温超导材料提供了实用化契机。在制造高场磁体时,如果磁场强度仍在低温超导材料的性能范围内,出于性价比、稳定性和技术成熟度而言,低温超导仍是最优选择。当所需的磁场强度超出低温超导材料的性能极限时,为了降低超导磁体的成本,可以考虑以高温超导磁体作为中心磁体,将低温超导磁体与高温超导磁体结合使用,前者可以为后者提供背景磁场。未来如何将传统的低温超导材料如NbTi、Nb₃Sn与实用化铜基高温超导材料结合起来,提供更强大的磁场,制造更稳定的磁体设备将成为一个重要课题。可以预见NbTi、Nb₃Sn仍将于未来相当长的时间内在聚变、高场磁体、NMR以及加速器领域扮演重要角色。

对于Bi系超导材料而言,Ag或Ag合金包套不仅抬升了Bi系超导线材的成本,也使线材的机械性能相对较弱。因此降低成本,提高性价比,提高机线带材的机械性能是Bi系超导材料产业化进行快速推进的关键所在。可以预见,当以上问题得到解决后,Bi系超导材料有极大潜力在超导储能装置、

超导变压器、超导输电电缆等领域起到主导作用。

对于REBCO涂层导体而言,成本和稳定性是限制其产业化应用的重要挑战。REBCO的高成本的原因在于长带的成品率低以及极低的超导层占比。REBCO中超导层仅占整个带材横截面的百分之几,而作为对比,Bi系PIT线带材中超导芯丝占比达到20%~40%。尽管如此,REBCO因为其优异的性能,仍被广泛认为将会在电力电缆、发电机、变压器、高场磁体制造等方面承担关键作用。

MgB₂的低成本和质量轻等优势使其及与一些特殊应用场景十分契合,例如意大利ASG公司成功制备出全球第一台MgB₂超导MRI,可以大幅度降低常规MRI设备的制造和使用成本。美国HyperTech公司采用低交流损耗的MgB₂线材开发出全超导型10 MW规格风电电机,电机重量由非超导型的350吨降低至50吨左右,这极大降低了电机的运

输和维护成本。MgB₂制备的超导屏蔽装置和全电动飞机马达转子可以使设备质量大幅度降低,MgB₂设备轻量化的特点也符合空天及太空装置的需求。

对于铁基超导材料而言,自2008年开始,经过不断地发展已经取得了巨大的研究进展,正在快速进入实用化阶段。目前研究人员已经能够制备百米长度量级的铁基超导线材,为其在强电领域的应用提供了重要保障。122和1111体系的铁基超导材料 T_c 介于38~55 K之间,远高于常规的低温超导材料,即使在20 K左右的温度下上临界场也仍高达70 T。结合铁基超导材料在高场下 J_c 较大,制备成本不高等优势,研究人员普遍认为其有望成为4.2~30 K温区范围内最重要的实用化超导材料并用于高场磁体的开发和应用。

图7展示了实用化超导材料一些主要的强电应用场景。

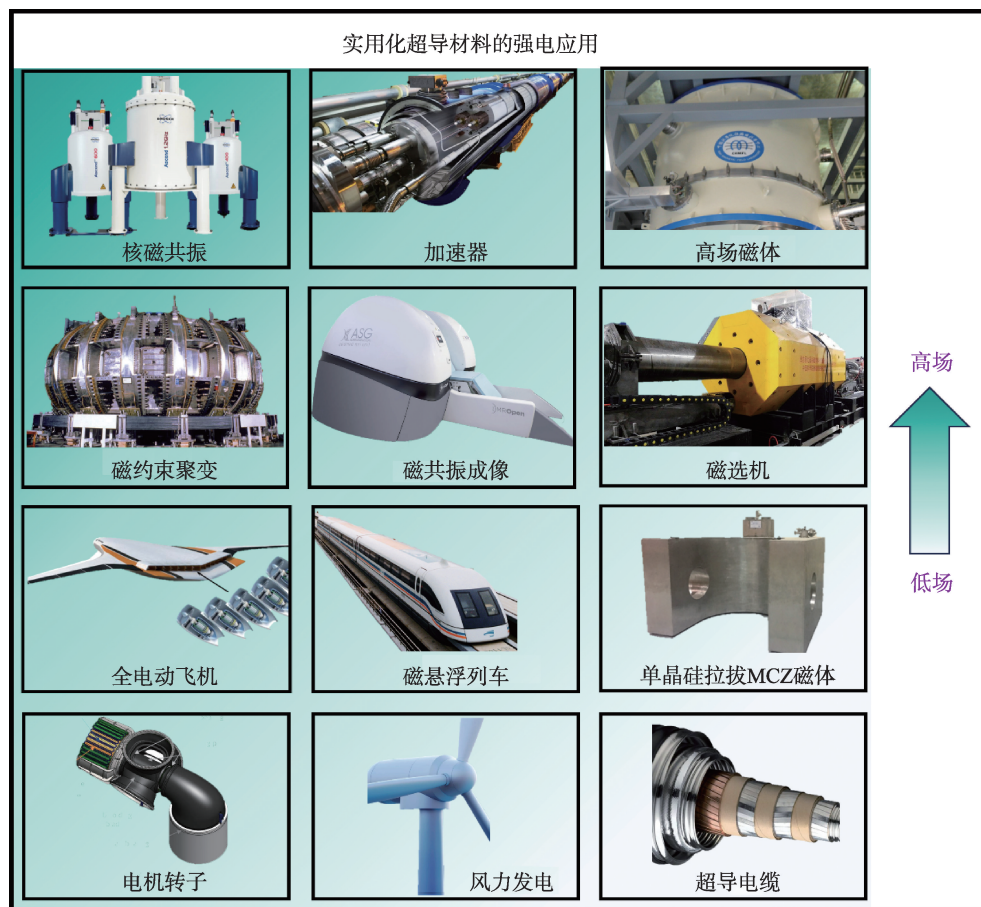


图7 实用化超导材料在强电领域的主要应用场景

从图7中可以看出,实用化超导材料的应用范围涵盖了大科学装置、医学检测、药物研发、屏蔽辐射、能源、工业、交通以及电子信息等关系国计民生和社会进步的重要领域。目前实用化超导材料距离其预测得到的理论性能极限仍有较大的距离,磁通钉扎性能的优化和载流能力的提升仍是实用化超导材料面临的首要问题。此外,降低制造、安装、使用和维护成本、提升性价比也成为超导材料是否能够实现大规模应用的先决条件。超导线带材的批次稳定性、机械性能、交流损耗及服役寿命也均是超导材料实用化进程中面对的关键挑战。在可以预见的未来,伴随着超导应用技术的进一步发展和人类生活条件改善的需求增加,实用化超导材料仍将在以上重要领域持续发挥无可替代的作用。

参考文献

- [1] H. K. Onnes. The Superconductivity of Mercury[J]. *Comm Phys Lab Univ Leiden*, 1911, 122, 122-124.
- [2] N. Cartwright, T. Shomar and M. Suárez. The tool box of science: Tools for the building of models with a superconductivity example [J]. *Poznan Studies in the Philosophy of the Sciences and the Humanities*, 1995, 44, 137-149.
- [3] B. D. Josephson. Possible New Effects in Superconductive Tunneling[J]. *Physics Letters*, 1962, 1(7), 251-253.
- [4] J. K. Hulm and R. D. Blaugher. Superconducting Solid Solution Alloys of the Transition Elements[J]. *Physical Review*, 1961, 123, 1569.
- [5] 中国工程院化工、冶金与材料工程学部, 中国材料研究学会. 中国新材料产业发展报告(2020) [M]. 北京: 化学工业出版社有限公司, 2020.
- [6] P. Seidel(ed.). *Applied Superconductivity: Handbook on Devices and Applications*. John Wiley & Sons, 2015.
- [7] B. T. Matthias, T. H. Geballe, S. Geller, and E. Corenzwit, Superconductivity of Nb_3Sn [J]. *Physical Review*, 1954, 95(6), 1435.
- [8] J. A. Parrell, M. B. Field, Y. Zhang and S. Hong. Advances in Nb_3Sn Strand for Fusion and Particle Accelerator Applications[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2005, 15, 1200-1204.
- [9] M. B. Field, J. A. Parrell, Y. Zhang, M. Meinesz, and S. Hong. Internal Tin Nb_3Sn Conductors for Particle Accelerator and Fusion Applications[C]//*AIP Conference Proceedings*. American Institute of Physics, 2008, 986(1): 237-243.
- [10] J. Jiang, G. Bradford, S. I. Hossain, M. D. Brown, J. Cooper, E. Miller, Y. Huang, H. Miao, J. A. Parrell, M. White and A. Hunt, High-Performance Bi-2212 Round Wires Made with Recent Powders[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2019, 29(5): 6400405.
- [11] T. M. Shen, L. G. Fajardo. Superconducting Accelerator Magnets Based on High-Temperature Superconducting Bi-2212 Round Wires[J]. *Instruments*, 2020, 4(2): 17.
- [12] D. C. Larbalestier, J. Jiang, U. A. Trociewitz, F. Kametani, C. Scheuerlein, M. Dalban-Canassy, M. Matras, P. Chen, N. C. Craig, P. J. Lee, and E. E. Hellstrom, Isotropic Round-Wire Multifilament Cuprate Superconductor for Generation of Magnetic Fields above 30 T[J]. *Nature materials*, 2014, 13(4): 375-381.
- [13] 金利华, 李成山, 郝清滨. Bi-2212 线材的制备技术 [J]. *物理*, 2020, 49(11): 755-762.
- [14] 蔡传兵, 杨召, 郭艳群. 新型电力传输材料—REBaCuO 高温超导涂层导体 [J]. *物理*, 2020, 49(11): 747-754.
- [15] H. M. Zhang, H. L. Suo, L. Wang, L. Ma, J. H. Liu, Z. L. Zhang and Q. L. Wang. Database of the Effect of Stabilizer on the Resistivity and Thermal Conductivity of 20 Different Commercial RE-BCO Tapes[J]. *Superconductor Science and Technology*, 2022, 35(4): 045016.
- [16] J. Nagamatsu, N. Nakagawa, T. Muranaka, Y. Zenitani and J. Akimitsu. Superconductivity at 39 K in Magnesium Diboride [J]. *Nature*, 2001, 410, 63-64.
- [17] Y. Kamihara, W. Takumi, H. Masahiro, and H. Hosono. Iron-based Layered Superconductor $\text{La}[\text{O}_{1-x}\text{F}_x]\text{FeAs}$ ($x=0.05-0.12$) with $T_c=26$ K. *Journal of the American Chemical Society*, 2008, 130(11): 3296-3297.
- [18] X. Zhang, H. Oguro, C. Yao, C. Dong, Z. Xu, D. Wang, S. Awaji, K. Watanabe and Y. Ma, Superconducting Properties of 100-m Class $\text{Sr}_{0.6}\text{K}_{0.4}\text{Fe}_2\text{As}_2$ Tape and Pancake coils[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2017, 27(4), 1-5.
- [19] C. Dong, Q. Xu, Y. Ma. Towards high-field applications: high-performance, low-cost iron-based superconductors[J]. *National Science Review*, 2024, 11, 122.