

# 强电用超导材料的发展现状与展望

张平祥<sup>1,2</sup>, 闫果<sup>2</sup>, 冯建情<sup>1</sup>, 马衍伟<sup>3</sup>, 朱佳敏<sup>4</sup>, 陶伯万<sup>5</sup>, 蔡传兵<sup>6</sup>

(1. 西北有色金属研究院, 西安 710016; 2. 西部超导材料科技股份有限公司, 西安 710018; 3. 中国科学院电工研究所, 北京 100190; 4. 上海超导科技股份有限公司, 上海 200135; 5. 电子科技大学电子科学与工程学院, 成都 610054; 6. 上海上创超导科技有限公司, 上海 201400)

**摘要:** 超导材料具有常规材料不具备的零电阻、完全抗磁性等宏观量子现象, 是典型的量子材料。在强电应用领域, 使用超导材料可以实现常规技术无法实现的超强磁场、大容量储能等诸多颠覆性技术, 因此, 强电用超导材料制备技术一直是国际高技术竞争前沿。本文通过梳理国内外强电用超导材料及其制备技术的发展现状, 系统分析和阐明了包括低温超导材料 NbTi、Nb<sub>3</sub>Sn 和高温超导材料 YBCO 涂层导体、Bi-2223 带材、Bi-2212 线材以及 MgB<sub>2</sub> 线材等实用化超导材料在强电应用领域的发展趋势。分析我国强电用超导材料发展存在的问题, 我国需要以开发出面向不同强电应用需求的高性能超导材料体系为基础, 实现超导材料和强电应用产品的协同发展, 推动强电用超导材料制备技术和应用技术的创新水平提升和产业化规模。研究建议, 通过国家层面组织“产学研用”联合攻关, 实现低温超导材料产业升级, 突破高温超导材料批量化制备关键技术的发展思路, 实现强电用超导材料的快速发展和应用。

**关键词:** 低温超导材料; 高温超导材料; 超导线带材; 制备技术

**中图分类号:** TM26 **文献标识码:** A

## Development Status and Prospects of Superconducting Materials for Electric Power Applications

Zhang Pingxiang<sup>1,2</sup>, Yan Guo<sup>2</sup>, Feng Jianqing<sup>1</sup>, Ma Yanwei<sup>3</sup>, Zhu Jiamin<sup>4</sup>,  
Tao Bowan<sup>5</sup>, Cai Chuanbing<sup>6</sup>

(1. Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China; 2. Western Superconducting Technologies Co., Ltd., Xi'an 710018, China; 3. The Institute of Electrical Engineering of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 4. Shanghai Superconducting Technology Co., Ltd., Shanghai 200135, China; 5. School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China; 6. Shanghai Creative Superconductor Technologies Co., Ltd., Shanghai 201400, China)

**Abstract:** Superconducting material is a typical quantum material that features unique zero-resistance and Meissner effects. With the introduction of superconducting materials, numerous disruptive technologies in electric power applications, such as ultra-strong magnetic fields and large-capacity power transmission, can be realized, which makes the fabrication technique of large-current-capacity

收稿日期: 2022-11-05; 修回日期: 2022-12-25

通讯作者: 张平祥, 西北有色金属研究院教授, 中国工程院院士, 主要研究方向为超导材料与应用技术; E-mail: pxzhang@c-nin.com

资助项目: 中国工程院咨询项目“我国先进有色金属材料发展战略研究”(2022-XZ-20)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

superconducting materials the frontier field worldwide. This study summarizes the development status of superconducting materials for electric power application as well as their fabrication techniques, and clarifies the development trends of several practical superconducting materials, including low-temperature superconducting materials (e. g., NbTi and Nb<sub>3</sub>Sn) and high-temperature superconducting materials (e.g., YBCO coated conductors, Bi-2223 tapes, Bi-2212 wires, and MgB<sub>2</sub> wires). Considering the problems existing in the development of the superconducting materials for electric power application in China, it is imperative to establish a high-performance superconducting material system that satisfies varied electric power application requirements to achieve the integrated development of superconducting materials and electric power application products and to promote the innovation and industrial scale of these materials and applications. Furthermore, we suggest that the integrated development of production, education, research, and application should be promoted in the national level to upgrade the low-temperature superconducting material industry and achieve breakthroughs in batch production of high-temperature superconducting materials, thereby realizing the rapid development of superconducting materials for electric power application.

**Keywords:** low-temperature superconducting materials; high-temperature superconducting materials; superconducting wires and tapes; fabrication technique

## 一、前言

超导材料具有常规材料不具备的零电阻、完全抗磁性等宏观量子现象，是典型的量子材料。基于超导材料而发展起来的超导技术已成为21世纪具有战略意义的高新技术，在电力能源、医疗装备、交通运输、科学研究及国防军工等方面都有重要的应用价值和前景。根据应用过程中超导材料承载能量的差异，一般将超导材料的应用分为强电应用和弱电应用两大类。其中，超导强电应用主要基于超导材料的零电阻效应和完全抗磁性，通过在超导材料中加载大电流，可以实现大电流运输、强磁场等颠覆性技术。超导弱电应用也叫超导电子应用，是基于超导材料的约瑟夫森效应实现弱磁场探测或量子计算等方面的应用。

超导强电应用技术，可实现常规技术无法实现的超强磁场、大容量输电储能等诸多颠覆性应用。近年来，我国面向强电应用的多种超导材料研发和产业化取得了突破，有力促进了超导强电应用技术的快速发展，在电力、生物医学、交通和工业及大科学工程等诸多重点领域开始实现示范应用，取得了一批有国际影响的成果<sup>[1,2]</sup>，对于引领我国相关技术领域发展起到了坚实的技术支撑作用。同时，相关领域发展过程中以无法替代和节能减排为核心的新型超导应用技术需求也不断涌现<sup>[3]</sup>，发展能耗低、环境友好的超导材料及应用技术对我国国民经济、人民生命健康和高质量发展具有重要的战略意义。而在此过程中，高性能超导材料的批量化制备是实现超导技术突破的关键基础。本文梳理了目前主要的强电用超导材料发展现状，对强电用超导材料发展趋势进行深入分析，进而对未来强电用超导材料

的发展方向提出建议和展望。

## 二、强电用超导材料进展

自1911年超导电性发现以来，已发现的超导材料有上千种，但基于载流性能、热稳定性、成材能力等综合性能的筛选，具有实用化前景的超导材料并不是很多。通常根据各种材料超导临界转变温度( $T_c$ )以及超导电性的形成机理，将现有的几种实用化超导材料分为低温超导材料和高温超导材料两大类。一般将 $T_c < 25$  K的超导材料称为低温超导材料，目前已实现商业化的主要为NbTi ( $T_c = 9.5$  K)和Nb<sub>3</sub>Sn ( $T_c = 18$  K)这两种典型的实用化低温超导材料； $T_c \geq 25$  K的超导材料称为高温超导材料，目前具有实用价值的高温超导材料有：铋系超导体(Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8</sub>和Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>10</sub>)、REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub>超导体(RE=Y, Gd等稀土元素)、二硼化镁(MgB<sub>2</sub>)和铁基超导体等。下面将分别对这几种实用化超导材料的特性和研究、应用现状进行介绍。

### (一) 低温超导材料

#### 1. NbTi超导材料

NbTi超导材料为单相 $\beta$ 型固溶体，其上临界磁场( $H_{c2}$ )在4.2 K约为12 T。NbTi超导体一般采用熔炼方法加工成合金，再使用集束拉拔工艺将其加工成以铜为基体的多芯复合超导线，最后通过结合时效热处理的冷加工工艺，获得由 $\beta$ 单相合金转变为具有强钉扎中心的两相( $\alpha + \beta$ )合金的结构，其中 $\alpha$ 析出相作为钉扎中心提高材料的临界电流密度。20世纪90年代初，NbTi超导线材临界电流密度已达3000 A/mm<sup>2</sup> (5 T, 4.2 K)。同时，NbTi超

导线材性价比高、性能稳定，使其成为目前液氦温区使用最广泛的低温超导材料，被广泛应用于核磁共振成像仪（MRI）、核磁共振波谱仪（NMR）和大型粒子加速器的制造。在目前的实用化超导材料中，NbTi 超导线材由于具有优异的中低磁场超导性能、良好的机械性能和加工性能，在实践中获得了大规模应用，因此具有非常大的市场份额，其用量占整个超导材料市场的90%以上。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，西部超导材料科技股份有限公司（简称西部超导）是目前国内唯一的NbTi 超导线材商业化生产企业，通过对高均匀合金熔炼、多组元复合体塑性变形和磁通钉扎性能的控制研究，掌握了低温超导长线制备的核心技术并实现了产业化，顺利完成了我国承担国际热核聚变实验堆（ITER）计划项目超导线材供货任务。此外，西部超导也突破了MRI用高铜比NbTi 线材制造关键技术，MRI用NbTi 线材产能达到1000 t/a，产品填补国内空白并占领国际市场<sup>[4]</sup>。

### 2. Nb<sub>3</sub>Sn 超导材料

Nb<sub>3</sub>Sn是一种典型的具有A15型晶体结构的金属间化合物，具有较高的超导转变温度 $T_c$ （~18 K），上临界磁场 $H_{c2}$ 可以达到27 T。Nb<sub>3</sub>Sn超导线材的制备方法主要有内锡法和青铜法，其中内锡法Nb<sub>3</sub>Sn超导线材临界电流密度更高，但是由于芯丝耦合严重，其交流损耗也随之增高；青铜法Nb<sub>3</sub>Sn超导线材临界电流密度适中，但是由于芯丝通常不耦合，其交流损耗较低。因此这两种线材拥有不同的应用领域<sup>[4]</sup>。

国际上Nb<sub>3</sub>Sn超导线材主要由德国Bruker公司、日本JASTEC公司和古河电气工业株式会社以及我国的西部超导公司进行研发并批量化生产。德国Bruker公司研发及生产的内锡法Nb<sub>3</sub>Sn超导线材是目前临界电流密度最高的商用超导线，其临界电流密度在4.2 K，12 T下最高达到3000 A/mm<sup>2</sup>。青铜法Nb<sub>3</sub>Sn导线的主要生产厂商为日本JASTEC公司和古河电气工业株式会社，其研制的先反应后绕制的青铜法Nb<sub>3</sub>Sn超导线材和高机械性能的增强型青铜法Nb<sub>3</sub>Sn超导线材，有效提高了超导磁体制造的便捷性、稳定性和安全性。西部超导开发出具有自主知识产权的万芯级难变形青铜法Nb<sub>3</sub>Sn线材和

高临界电流密度、低损耗内锡法Nb<sub>3</sub>Sn线材导体设计、加工和热处理技术，目前制备的Nb<sub>3</sub>Sn超导线材综合性能和稳定性均达到国际领先水平。

## （二）高温超导材料

### 1. Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8</sub> 超导材料

Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8</sub>（简称Bi-2212）材料在低温、高磁场下具有优异的电流承载性能，是高场下（>25 T）最具有应用前景的高温超导材料之一。Bi-2212线材的制备工艺相对简单，可采用粉末装管法经过旋锻、拉拔加工成具有各向同性圆形截面的线材。Bi-2212的圆线结构使其更容易实现多芯化和电缆绞制，从而降低交流损耗，相比其他矩形截面的高温超导材料，更有利于制备管内电缆导体、卢瑟福电缆和螺线管线圈。

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，主要包括美国牛津仪器公司（B-OST）、欧洲耐克森（Nexans）公司、日本昭和电线电缆株式会社和西北有色金属研究院等。B-OST研制的Bi-2212线材的工程临界电流密度（ $J_c$ ）在液氦温区45 T磁场下仍能保持266 A/mm<sup>2</sup><sup>[5,6]</sup>，这表明Bi-2212线材非常适合于超高磁场条件下的应用。西北有色金属研究院研制的线材在4.2 K，14 T磁场下的 $J_c$ 达到760 A/mm<sup>2</sup><sup>[7]</sup>。

### 2. Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>10</sub> 超导材料

Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>10</sub>（简称Bi-2223）高温超导材料是目前临界转变温度（ $T_c=108\sim110$  K）最高的实用化高温超导材料。Bi-2223晶体结构为层状，超导电性具有强烈的各向异性，实际使用时以扁形带材为主。Bi-2223带材采用粉末装管法经过旋锻、拉拔、轧制和热处理加工成带材，是首先实现批量化制备的实用化高温超导材料。目前Bi-2223带材已经成功应用于液氮下运行的发电机、传输电缆、分流电压器、故障电流限制器、电动机以及储能装置等设备中。特别是在德国埃森（Essen）市挂网运行的超导电缆，成功证实了该类材料在电网中长期稳定运行的能力。

美国超导公司基于其对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，一度处于领跑地位。但2004年日本住友电气工业株式会社开发出可控高压热处理技术，将其带材的载流性能

从 100 A 左右, 迅速提升到 250 A 以上。国内开展 Bi-2223 带材的主要研究单位为北京英纳超导技术有限公司和西北有色金属研究院。目前, 国内 Bi-2223 带材的载流性能基本稳定在 100 A, 与日本住友电气工业株式会社带材差距较大。

### 3. REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> 涂层导体

REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> (简称为 REBCO, 其中 RE 表示稀土元素) 涂层导体也被称为第二代高温超导带材, 其通过柔性金属基带上的薄膜外延和双轴织构技术发展而来, 解决了陶瓷性铜氧高温超导体的晶界弱连接和机械加工难等问题, 是当前液氮温区运行下电磁性能较为优越的实用化高温超导材料。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。由于 REBCO 涂层导体具有极高的综合性能, 使其成为目前高温超导材料产业化的热门研究方向。

经过 20 多年的研究, 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) 工艺等成为主流制备技术。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 4 mm 宽带材 360 m/h 的高生产效率。日本藤仓公司 (Fujikura) 首先采用可编程逻辑器件 (PLD) 技术在离子束辅助沉积 (IBAD) 的 Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 缓冲层上制备出 YBCO 超导层, 并实现了千米级带材生产, 近年来该公司的 IBAD-MgO 缓冲层也取得了千米级快速制备<sup>[8]</sup>。美国 SuperPower 公司是国际上首家制备出千米级 REBCO 超导带材的公司, 其在 IBAD-MgO/哈氏合金缓冲层上采用 MOCVD 制备出了临界电流 ( $I_c$ ) 达到 300 A/cm 的千米级超导带材<sup>[9]</sup>。我国的上海超导科技有限公司, 上海超导科技股份有限公司和苏州新材料研究所有限公司分别采用 MOD、PLD 和 MOCVD 技术各自先后实现了千米级 REBCO 超导带材的生产<sup>[10,11]</sup>, 使我国在第二代高温超导带材的产业化和应用方面与世界同步。

### 4. MgB<sub>2</sub> 超导材料

MgB<sub>2</sub> 是 2001 年发现的超导转变温度为 39 K 的金属间化合物超导体, 具有相干长度大、晶界不存在弱连接、材料成本低、加工性能好等优点。尽管其临界温度较低, 但是 MgB<sub>2</sub> 超导材料可以工作在制冷机温度范围内 (10~20 K), 因此可以摆脱复杂

昂贵的液氮冷却系统。MgB<sub>2</sub> 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。

意大利的艾森超导 (ASG Superconductors) 公司采用先位法粉末装管工艺制备出 12~37 芯 Cu/Ni 基 MgB<sub>2</sub> 多芯线材, 在 20 K, 1.2 T 的临界电流密度 ( $J_c$ ) 可达 1000 A/mm<sup>2</sup>。美国的 Hyper Tech 公司采用连续粉末填充与成形工艺制备出单根长度大于 3 km 的 Monel/Cu/Nb 基多芯 MgB<sub>2</sub> 线材, 其  $J_c$  值在 25 K, 1 T 达到 2000 A/mm<sup>2</sup>。日本的日立 (Hitachi) 公司和韩国的三东 (Sam Dong) 公司已形成千米级 MgB<sub>2</sub> 线材的生产能力<sup>[12]</sup>。西部超导材料科技股份有限公司和西北有色金属研究院能够制备千米量级长度 19 芯及 37 芯结构的 MgB<sub>2</sub> 长线, 其工程临界电流密度 ( $J_e$ ) 在 20 K, 1 T 下达到 250 A/mm<sup>2</sup>。

### 5. 铁基超导材料

自 2008 年铁基超导体被发现以来, 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) 或硫族元素 (S, Se, Te), 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。铁基超导体具有上临界场极高 (100~250 T)、各向异性较低 ( $1 < \gamma_H < 2$ , 122 体系)、本征磁通钉扎能力强等许多明显的优势。自 2008 年以来, 中国团队率先发现系列 50 K 以上铁基高温超导体并创造 55 K 的临界温度世界纪录<sup>[13]</sup>。中国科学院电工研究所采用粉末装管法通过控制轧制织构和元素掺杂, 在 2013 年制备出临界电流密度达到 170 A/mm<sup>2</sup> (4.2 K, 10 T) 的铁基超导线材, 证明了铁基超导材料在强电应用上的巨大潜力。经过工艺优化后, 2018 年他们将百米长线的临界电流密度提高至 300 A/mm<sup>2</sup> (4.2 K, 10 T), 目前已经开始超导磁体制备研究<sup>[14]</sup>。

## 三、强电用超导材料的发展趋势

强电应用技术的发展不断对超导材料提出新的

要求，是超导材料发展的根本动力。未来10年，国内外超导强电应用对超导材料的基本要求已经明确，决定着超导材料的技术发展趋势。

### （一）重大需求分析

随着科技的进步，国际上前沿技术领域对超导材料和应用技术提出了更高、更全面的要求，主要体现在以下方面。

在传统超导应用方向上，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，这些大科学装置将需要高性能低温和高温超导材料近20 000 t，并且超导材料的载流性能水平比目前国际实验室最高水平要提高一倍左右，更高性能的超导材料批量化制备技术在国际范围内将面临全面创新和产业化的挑战。因此，如何在现有涂层导体结构、多芯线带材结构之外，开发更多基于新成分、新结构的高性能高温超导线材，或针对现有成分和结构，通过与其他材料研究领域的学科交叉，提出新型加工制备技术，获得更高性能的超导材料，将是突破现有技术瓶颈，进一步推进超导材料实际应用的关键。

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以上超导电机，这些需求都超过超导技术的现有水平。未来国际上这些新的发展方向也为我国超导材料产业发展提供了新的契机，我国亟待现有研发和产业化基础上，全面整合资源，系统开发核心超导技术，全面实现产业化，满足国内外相关应用的迫切需求。同时，在超导线材强化、线圈绕制或电缆绞制等许多方面都期待更方便有效的技术突破。此外，在与超导应用相关的绝缘技术、制冷技术等许多方面，也都存在着一定的技术壁垒，亟待突破。

### （二）发展趋势

近年来，国际上低温超导材料仍以NbTi、Nb<sub>3</sub>Sn为主，通过对现有制备技术相关机理的深入研究，商品化低温超导材料的综合性能将不断提高。而以Bi-2223带材和REBCO涂层导体为代表的高温超导

材料也已经开始进入商业化阶段，其中Bi-2223带材虽然受到高压热处理等具有较高难度的技术限制，目前仅有日本住友电气工业株式会社一家供应商，但该公司多品类产品的开发，特别是高机械强度HT-NX系列带材的开发，有效地推动了Bi-2223高温超导带材在高场磁体等领域的发展，进一步扩大了该产品的市场。而REBCO涂层导体近年来更是基于其较高的载流性能，受到了美国、欧洲、中国、日本、韩国等国家和地区的广泛关注。各国相关企业纷纷开发多种新型制备技术，实现材料载流性能、机械性能以及成品率的提高和成本的降低，使其在智能电网和高场磁体等领域都实现了成功的示范性应用。综合上述分析可以看出，高温超导材料未来的发展趋势都将是通过优化现有技术、开发新型材料制备技术以及新型线材结构，在提高材料载流性能、机械性能以及热稳定性的同时，进一步降低成本，从而实现更高性能、更高稳定性、更高性价比带材的批量化制备。未来重点发展方向主要包括以下几方面。

#### 1. 新型高性能低温超导线材制备及产业化

在NbTi线材方面，开发超大规格NbTi合金锭真空自耗熔炼和棒材大变形量锻造技术，结合覆铜挤压技术，大幅度降低NbTi原材料制造成本。进一步开发磁通钉扎调控技术，大幅度提高NbTi超导线材临界电流、磁滞损耗和剩余电阻率等关键性能指标。在Nb<sub>3</sub>Sn(Al)线材方面，发展CuNb强化、超高Sn含量锡源引入、纳米粒子细化晶粒、快速加热淬火等系列新型制备技术，全面提升Nb<sub>3</sub>Sn(Al)线材高场下应用特性并大幅降低制造成本，满足高场磁体制造要求。

#### 2. 高性能REBCO高温超导带材制备及产业化

研发出千米级能传输1000 A以上临界电流的（77 K，自场）的第二代高温超导长带材，解决千米级带材工艺的稳定性、重复性和均匀性，并大幅降低生产成本。针对超导电缆、超导磁体、超导限流器、超导变压器、超导电机等系列超导电力产品对第二代高温超导带材性能的不同要求，建立起相应的工艺流程，生产出一系列满足各类超导电力器件不同要求的多规格第二代高温超导带材。到2025年超导带材年产量将达到1000 km，超导带材载流能力将达到500~1000 A，全面实现超导带材产业化，并实现装备完全自主化。

### 3. 高性能Bi系高温超导线材制备及产业化

在Bi-2223方面,研发长带高压热处理技术,可进一步提高带材超导载流能力和成品率,提高Bi系带材性价比,降低成本。发展提高带材 $J_c$ 、提高机械强度和经济的制造工艺,将长带性能提高到200 A (77 K, 自场)以上,力争产品进入国际市场;在Bi-2212线材方面,开发出高性能Bi-2212线材的制备技术,并形成产能达到300 km/a的Bi-2212长线的规模化制备能力,实现超高场磁体的材料国产化,促进我国超高场磁体和大电流线材技术的发展。

### 4. 铁基超导线材制备及强场应用

针对铁基超导带材的规模应用需求,以粉末装管技术为框架,以促进铁基超导材料实际应用为目标,开展低成本、高性能的铁基超导线材制备工艺研究。阐明影响线带材临界传输性能的内在机制,制备出高性能线带材。在铁基超导线材的均匀性、热稳定性、机械强度等方面获得突破,解决高性能铁基超导线材实用成材技术基础问题。

## 四、我国强电用超导材料发展存在的问题

当前我国强电用超导材料发展存在的主要问题包括以下几点。

### (一) 产业化能力不足

我国已经成为国际超导材料和应用技术研发的重要力量。多年来我国在超导材料基础研究方面一直处于国际先进水平,然而在产业化及应用方面与发达国家还有较大差距。目前我国在高性能低温超导材料、超导电力技术等方面开始达到国际先进水平,但是由于产业化相对滞后、“产学研用”结合不紧密、创新链和产业链不完整,导致我国在超导材料与超导应用技术研究发展方面,特别是高温超导材料的规模化制备和高端医疗设备、分析仪器、科研装备等超导强电应用领域存在明显差距,导致相关材料和装备仍主要依赖进口。

### (二) 产业链对自主创新的支撑不完善

近年来,国际上超导强磁场装备的磁场水平不断提升,已越来越多地应用于大科学装置、高端仪器装备和科学研究等重要领域,对关键的原材料

—— $Nb_3Sn$ 超导线材在临界电流密度、机械强度、单根长度等方面都提出了更高的要求。但是超导强磁场装备产品长期被美国、日本和德国相关企业垄断,例如采用10 T以上超导磁体制造的600 MHz以上NMR被德国Bruker和日本电子株式会社(JEOL)垄断,我国相关装备全部依赖进口,导致我国 $Nb_3Sn$ 超导线材研发和产业化缺乏需求支撑,影响材料技术的创新能力提升。

### (三) 低温材料与技术的成熟度低

超导材料目前以核磁共振成像、大科学工程为代表的的应用主要在液氦温区。我国是氦气资源匮乏的国家,必须从国外进口,面临“卡脖子”的局面。摆脱液氦限制的主要途径是采用制冷机,但是由于制冷机核心技术长期被美国、日本、欧洲等国家和地区垄断,我国相关技术和装备虽获得一定进展,但是尚未形成完整产业体系,长期运行可靠性尚未解决,目前仍主要依赖进口。

总体来看,“十四五”期间,我国面临着提高整体研发水平,提升自主创新能力,追赶世界领先水平的重要任务。必须将基础研究、材料制备、应用技术融合发展,集中开发自主知识产权的超导材料工程化、产业化核心制备技术,推动超导材料应用技术发展,带动冶金、低温、医疗、交通等相关产业的技术升级,将有力促进我国超导材料工程化、产业化制备技术开发,形成以企业为主体、市场为导向、“产学研”相结合的技术创新体系,为我国超导材料的市场开发和工程化应用提供有力的技术支撑。

## 五、强电用超导材料发展建议

面对我国超导材料和超导技术应用的现状,必须将基础研究、材料制备、应用技术融合发展,集中开发具有自主知识产权的超导材料工程化、产业化核心制备技术,推动超导材料应用技术发展,带动冶金、低温、医疗设备、交通运输等相关产业的技术升级,有力促进我国超导材料工程化、产业化制备技术开发,形成以企业为主体、市场为导向、“产学研”相结合的技术创新体系,为我国超导材料的市场开发和工程化应用提供有力的技术支撑。建议在创新型国家建设战略框架内,为《落实国家

中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020年）》中提出的将高温超导技术列为国家重大战略需求的计划，针对超导技术中的关键材料和关键应用，通过“产学研用”联合攻关，实现低温超导材料产业升级换代，突破高温超导材料批量化制备关键技术，开发出面向电力、能源、医疗和国防应用的超导电工装备，实现超导材料、超导强电和超导弱电产品协同发展和规模化应用，打造并形成一个基于超导材料及其应用技术的战略性新兴产业。

### （一）通过重大工程引领超导材料全面发展

我国超导材料及应用产业发展应体现国家意志，并与经济社会发展需求、国家安全需求、可持续发展紧密结合，体现全局性、战略性、前瞻性。超导技术及应用技术（包括低温超导和高温超导的研究与开发）应持续列入国家科技与产业发展计划。要突出以超导应用带动超导材料和相关技术进步的发展重点，坚持“有所为，有所不为”的原则；体现可持续发展、军民结合、走新型工业化道路的原则。要重点建设国家级研究项目和产业化基地，要立足于世界科技前沿、以自主创新为主导，在超导科学技术涉及的医疗和大科学工程、面向节能减排、工业技术应用、军事等方面部署若干重大项目，从而起到带动全局的作用。

### （二）形成实用化超导材料体系

坚持新材料探索、超导机理、实用化材料性能提升并重，发展低温超导材料新技术，包括新型MRI/NMR用高性能NbTi和Nb<sub>3</sub>Sn线材批量化制备技术，完成低温超导产品升级换代，提高材料的性价比，积极参与国际市场竞争；进一步提高Bi系线带材的临界电流和应用性能、降低制造成本，带动我国超导材料的应用发展；大力发展第二代高温超导带材的制造技术，满足强电应用要求，并形成规模化产业；真正形成我国自主知识产权超导材料体系，全面满足超导应用需求，形成完整的低温超导和高温超导材料产业。

### （三）全面发展超导应用技术产业化

坚持超导材料产业化技术工艺、应用技术并重的原则，抢占国际超导应用技术制高点。加速我国超导应用技术成果的产业化，以应用研究促进基础研

究的发展，以产业化开发为目标提高超导应用技术对社会经济发展的贡献能力。加快我国超导应用产业化的步伐，发展我国自己的核磁共振人体成像仪、超导电机、超导电缆、超导磁悬浮列车以及超导磁体装置在污水处理、选矿、高质量单晶制备和国防等特种领域的应用项目，为国民经济建设服务。

#### 参考文献

- [1] Wang Q L, Liu J H, Zheng J X, et al. Progress of ultra-high-field superconducting magnets in China [J]. *Superconductor Science and Technology*, 2022, 35(2): 023001.
- [2] 蒋晓华, 薛芑, 黄伟灿, 等. 14 T 全身超导MRI磁体的技术挑战—大规模应用强场超导磁体未来十年的发展目标之一 [J]. *物理学报*, 2021, 70(1): 160–169.  
Jiang X H, Xue P, Huang W C, et al. Technology challenges of 14 T whole-body superconducting MRI magnets —A target of high-field superconducting magnet technology for large scale applications in next decade [J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(1): 160–169.
- [3] Paidpilli M, Selvamanickam V. Development of RE-Ba-Cu-O superconductors in the U.S. for ultra-high field magnets [J]. *Superconductor Science and Technology*, 2022, 35(4): 043001.
- [4] 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.  
Department of Chemical, Metallurgical and Material Engineering, Chinese Academy of Engineering, Chinese Materials Research Society. Development of advanced materials industry in China: Annual report (2020) [M]. Beijing: Chemical Industry Press Co., Ltd., 2020.
- [5] Jiang J, Bradford G, Hossain S I, et al. High-performance Bi-2212 round wires made with recent powders [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2019, 29(5): 6400405.
- [6] Shen T M, Fajardo L G. Superconducting accelerator magnets based on high-temperature superconducting Bi-2212 round wires [J]. *Instruments*, 2020, 4(2): 17.
- [7] 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.  
Jin L H, Li C S, Hao Q B. Progress in the fabrication of Bi-2212 wires [J]. *Physics*, 2020, 49(11): 755–762.
- [8] MacManus-Driscoll J L, Wimbush S C. Processing and application of high-temperature superconducting coated conductors [J]. *Nature Reviews Materials*, 2021, 6: 587–604.
- [9] 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.
- [10] 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.  
Cai C B, Yang Z, Guo Y Q. The new power transmission material—REBaCuO high-temperature superconducting coated conductor [J]. *Physics*, 2020, 49(11): 747–754.

- [11] Zhang H M, Suo H L, Wang L, et al. Database of the effect of stabilizer on the resistivity and thermal conductivity of 20 different commercial REBCO tapes [J]. *Superconductor Science and Technology*, 2022, 35(4): 045016.
- [12] Yao C, Ma Y W. Superconducting materials: Challenges and opportunities for large-scale applications [J]. *iScience*, 2021, 24: 102541.
- [13] 张现平, 马衍伟. 铁基超导线带材研究现状及展望 [J]. *物理*, 2020, 49(11): 737–746.
- [14] 樊帆, 张现平, 徐中堂, 等. 铁基超导薄膜研究进展 [J]. *科学通报*, 2021, 66(19): 2416–2429.
- Fan F, Zhang X P, Xu Z T, et al. Recent development of iron-based superconducting films [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2021, 66(19): 2416–2429.