

文章编号: 2096-3424(2025)01-0001-08

DOI: 10.3969/j.issn.2096-3424.2024.110

上海高温超导磁体相关技术发展现状与对策建议

杨晓君¹, 赵跃², 陈红光³, 金之俭²

(1. 上海科学院 上海集成电路技术与产业促进中心, 上海 201203; 2. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240; 3. 上海市科学学研究所, 上海 200031)

摘要: 近年来, 紧凑型可控核聚变产业受到各国政府和社会资本的广泛关注, 是重点培育发展的未来能源产业。高温超导磁体作为聚变装置的核心部件, 相关技术得到了快速发展。上海市政府长期支持高温超导产业的发展, 已形成了超导材料、磁体以及制冷设备的完整产业链, 在全国占有优势地位。综述了高温超导磁体及相关技术、知识产权和标准化工作情况, 介绍了上海市相关单位在科研和工程化方面取得的重要成果, 并提出了相应的对策建议。

关键词: 可控核聚变; 高温超导磁体; 上海发展现状; 对策建议

中图分类号: TM26 **文献标志码:** A

Development status and countermeasures of high-temperature superconducting magnet technology in Shanghai

YANG Xiaojun¹, ZHAO Yue², CHEN Hongguang³, JIN Zhijian²

(1. Shanghai Integrated Circuit Technology and Industry Promotion Center, Shanghai Academy of Science & Technology, Shanghai 201203, China; 2. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 3. Shanghai Institute for Science of Science, Shanghai 200031, China)

Abstract: In recent years, the compact controlled nuclear fusion industry has attracted widespread attention from governments and social capital worldwide, emerging as a key focus of future energy industry. As the crucial components of fusion devices, high-temperature superconducting magnets have witnessed rapid technological advancements. The Shanghai Municipal Government has long supported the development of the high-temperature superconducting industry, establishing a comprehensive industrial chain encompassing superconducting materials, magnets, and cooling systems, thereby securing an advantageous position nationwide. This paper reviews current progress in high-temperature superconducting magnet technologies, along with associated intellectual property landscapes and standardization initiatives. It documents critical scientific breakthroughs and engineering applications achieved by Shanghai-based institutions, while proposing

收稿日期: 2024-12-09

作者简介: 杨晓君(1991-), 工程师, 主要研究方向为科技管理和产业研究。E-mail: billy@icc.sh.cn

通信作者: 陈红光(1973-), 副研究员, 主要研究方向为产业创新机制、路径和政策研究。E-mail: chenhg@siss.sh.cn

引文格式: 杨晓君, 赵跃, 陈红光, 等. 上海高温超导磁体相关技术发展现状与对策建议 [J]. 应用技术学报, 2025, 25(1): 1-8.

Citation: YANG Xiaojun, ZHAO Yue, CHEN Hongguang, *et al.* Development status and countermeasures of high-temperature superconducting magnet technology in Shanghai[J]. Journal of Technology, 2025, 25(1): 1-8.



recommendations to address current challenges and guide future advancements in the field.

Key words: controlled nuclear fusion; high-temperature superconducting magnets; development status in Shanghai; countermeasures

近年来,随着高温超导技术的不断突破,采用高温超导磁体的紧凑型可控聚变装置显示出巨大的潜力,促使原来 30~50 年预期的国际合作超级项目演变为 10 年预期的风投热点,推动美英等国将聚变上升到国家战略,规划 2040 年左右实现聚变发电。2024 年,美国能源部(Department of Energy, DOE)发布《2024 年聚变能源战略》,为美国能源部科学办公室负责的“聚变能源科学计划”(fusion energy science program, FES)提供更多支持^[1]。2023 年,日本将核聚变能源作为国家产业政策的支柱,并将“聚变能源创新战略”作为国家项目大力推进^[2]。据全球聚变工业协会(fusion industry association, FIA)统计,截至 2024 年 7 月,全球共有 50 余家私营聚变公司,前后获得总额超过 70 亿美元的投资^[3]。我国在该方向也积极布局,先后成立了中国聚变能源有限公司和聚变新能(安徽)有限公司等,加入聚变领域的国际竞争。

聚变超导磁体用于产生和稳定聚变反应所需的高磁场,是商用可控核聚变的关键部件之一,其成本占比高、技术难度大。2023 年 12 月,中国工程院、科睿唯安公司、高等教育出版社联合发布《全球工程前沿 2023》报告,将其列为能源与矿业工程领域 Top12 工程研究前沿,并指出未来 5 年内完成高温超导聚变堆应用可行性研究,2033 年前后进行高温超导聚变电站的建设。本文围绕聚

变用超导带材和磁体的国内外发展概况、上海发展现状及重要成果、专利和标准情况等 3 个方面展开介绍,并结合上海市前期布局和基础,提出上海发展高温超导产业的政策建议。

1 国内外发展概况

随着全球核聚变商业化进程加速,高温超导磁体及相关技术快速发展,主要分为面向聚变强场磁体的高温超导带材及批量化制备技术、大电流高温超导体以及高鲁棒性高温超导磁体技术。

1.1 高温超导带材发展概况

如图 1 所示,稀土钡铜氧化物(rare earth barium copper oxide, REBCO)带材,即第二代高温超导带材(简称二代带材)经过 30 多年的技术发展,形成了一种典型的多层复合结构。二代带材因其具有高超导转变温度、高载流能力、高不可逆场以及采用廉价的生产原料等优势,是产生强磁场或应用在强磁场环境中的关键材料之一。受聚变磁体需求的驱动,美国政府高度重视超导带材的批量制造。2023 和 2024 年,DOE 相继投入 9 000 万美元致力于高性能超导带材的本土化制造,其目标是实现带材的高性能、低成本、高效产出及原材料的高利用率等^[4]。

目前,REBCO 带材超导层镀膜技术主要包括脉冲激光沉积(pulsed laser deposition, PLD)、金

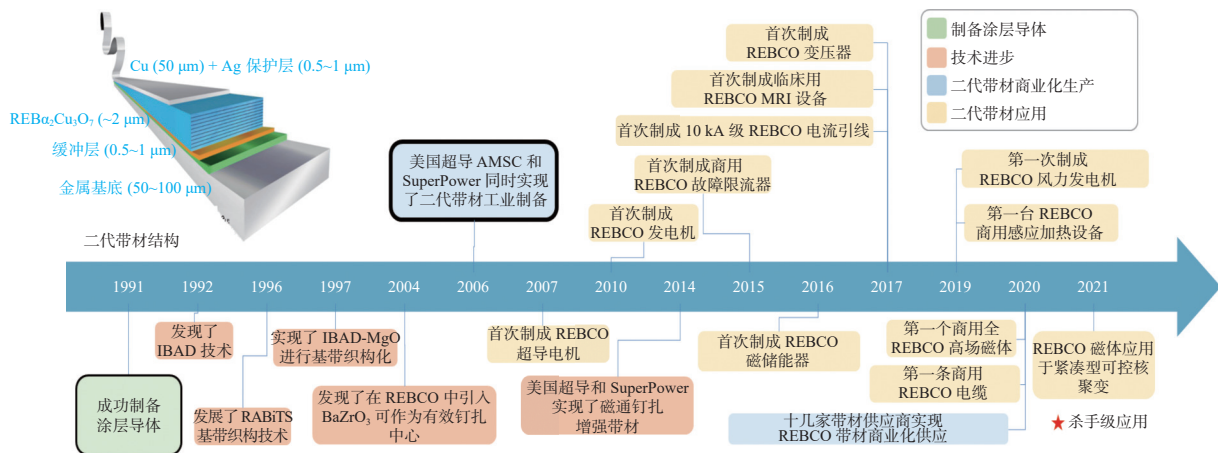


图 1 REBCO 带材的结构及其发展史

Fig. 1 Structure and developmental history of REBCO tape materials

属有机化学气相沉积(metal organic chemical vapor deposition, MOCVD)、金属有机盐沉积(metal organic deposition, MOD)以及反应共蒸发(reactive co-evaporation, RCE)4种。缓冲层镀膜技术主要包括离子束辅助沉积(ion beam assisted deposition, IBAD)和倾斜衬底沉积(inclined substrate deposition, ISD)2种。表1列出了主流带材生产商及其采用的技术路线。截至2023年底,全球二代带材年产能可达上万千米,但仍难以满足市场需求。

表1 全球主要带材生产商及其使用的生产技术

Tab. 1 Global major tape manufacturers and their production technologies

公司名称	国别	生产技术
Faraday Factory Japan	日本/美国	IBAD+PLD
Fujikura	日本	IBAD+PLD
上海超导科技股份有限公司	中国	IBAD+PLD
SuperPower - Furukawa	美国	IBAD+MOCVD
Theva	德国	ISD+RCE
SuNAM	韩国	IBAD+RCE
上海上创超导科技有限公司	中国	IBAD+MOD
东部超导科技(苏州)有限公司	中国	IBAD+MOCVD
High Temperature Superconductors	美国	IBAD+PLD
MetOx Technologies	美国	IBAD+MOCVD
Sumitomo Electric Industries	日本	IBAD+MOD
SWCC Showa	日本	IBAD+MOD
甚磁科技(上海)有限公司	中国	IBAD+PLD

为了满足聚变强磁场复杂苛刻的应用条件,

提升超导带材的载流能力和力-电综合性能也是业界关注的热点。前者,主要采用缺陷工程的策略抑制二代带材载流能力随磁场衰减。后者,采用优化超导带材拓扑结构的策略,克服带材的多层结构弱点。此外,通过技术升级、量产、关键原材料降本等方案,大幅提升超导带材的性价比也是业界重点关注的问题。

1.2 高温超导体发展概况

聚变强场磁体往往需要承载数万安培甚至更高的电流以产生强大磁场,为此研究人员开发了高温超导复合导体(由高温超导材料和常规导体材料组成),作为大型超导磁体的基本绕制单位。

为满足聚变强场磁体的需求,研究人员通过结构优化,如堆叠、扭绞、换位等方式对高温超导材料进行组合,以提升载流能力和机械特性。如图2所示,在工程化实施的可行性与成本效益的双重驱动下,聚变技术所采用的导体拓扑结构主要包括:①以堆叠扭绞型(twisted stacked-tape cable, TSTC)和真空压力浸渍、绝缘、部分换位、挤压和辊压成型(vacuum pressure impregnated, insulated, partially transposed, extruded and roll-formed, VIPER)导体为代表的堆叠型导体;②以Roebel导体为代表的编织型导体;③以圆芯式(conductors on round core, CORC)导体为代表的多层螺旋型导体^[5-8]。

表2列出了该领域全球主要研发机构,目前研究热点集中在复合导体的电磁仿真以及样件载

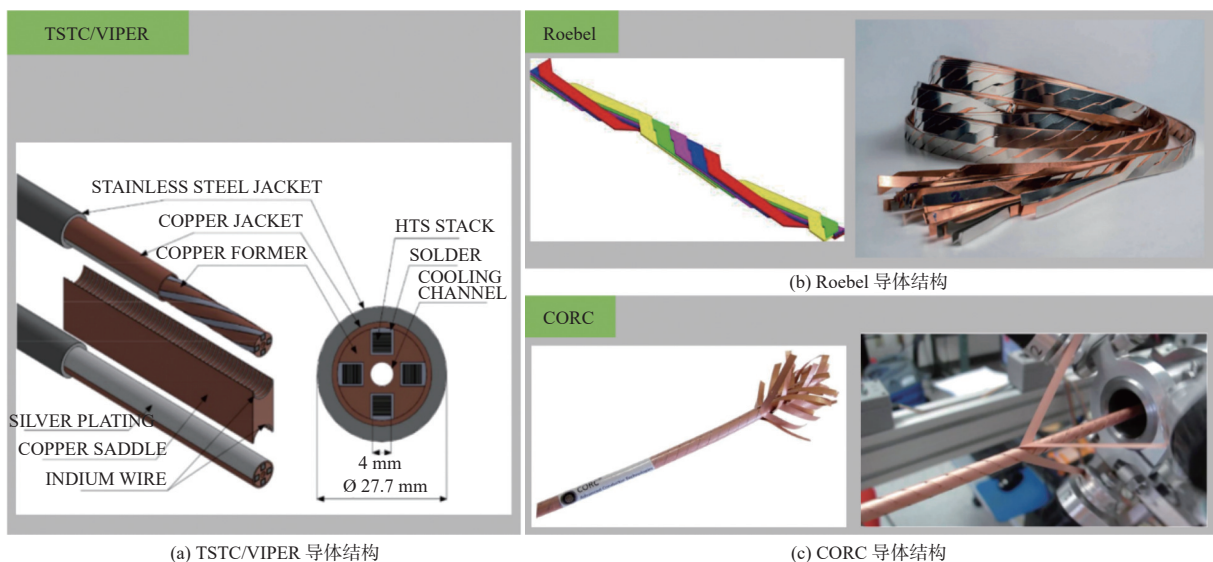


图2 高温超导体结构

Fig. 2 Structure of high-temperature superconducting conductors

表 3 近 5 年中国高温超导产业相关政策汇总

Tab. 3 Summary of policies related to China's high temperature superconductor industry in the past five years

发布时间	政策名称	发布单位	主要内容
2024年2月	《上海核电产业高质量发展行动方案(2024—2027年)》	上海市经济和信息化委员会、上海市发展和改革委员会、上海市科学技术委员会等	推动紧凑型磁约束高温超导托卡马克装置、双锥对撞惯性约束激光核聚变、磁-惯性约束核聚变等技术研发。突破大尺寸、高电流密度、强磁场的高温超导磁体关键技术
2024年1月	《关于推动未来产业创新发展的实施意见》	工业和信息化部等七部门	未来材料领域,推动有色金属、化工、无机非金属等先进基础材料升级,发展高性能碳纤维、先进半导体等关键战略材料,加快超导材料等前沿新材料创新应用
2023年8月	《前沿材料产业化重点发展指导目录(第一批)》	工业和信息化部、国有资产监督管理委员会	稀土钽铜氧超导材料、“铜系”超导材料、“钇系”铜基超导材料、“铋系”超导材料、MgB ₂ 超导材料、Nb ₃ Sn超导线材、超导同轴缆材等高性能超导材料,被列入第一批目录
2022年1月	《“十四五”现代能源体系规划》	国家发展和改革委员会、国家能源局	支持受控核聚变的前期研发,积极开展国际合作
2021年12月	《“十四五”原材料工业发展规划》	工业和信息化部	提出实施超导材料前瞻布局行动,强化应用领域的支持和引导
2021年12月	《上海市先进材料产业发展“十四五”规划》	上海市经济和信息化委员会	推进超导材料制造业创新中心、上海超导产业基地建设,推动超导电缆“样品”转“产品”,加快核聚变、磁浮交通等应用技术开发,培育新发展动能
2021年6月	《夯实基础 推动本市先进材料产业高质量发展三年行动计划(2021—2023年)》	上海市经济和信息化委员会、上海市发展和改革委员会、上海市科学技术委员会等	重点聚焦高温超导、石墨烯、增材制造等高精尖新材料和颠覆性技术创新,依托各类研发与转化功能型平台,持续促进创新成果转化,全力构筑先发优势,抢占未来产业竞争制高点
2020年12月	《鼓励外商投资产业目录(2020年版)》	国家发展和改革委员会	鼓励高温超导材料、高场强超导型磁共振成像设备外商的投入

超导应用技术等领域,累计支持经费近 3 亿元。“十四五”以来,高温超导作为未来产业中“未来材料+未来能源”的交叉技术,属于新质生产力的典型领域。2023 年,上海市科学技术委员会专题研究制定了高温超导技术领域专项行动计划,连续 2 年发布《“科技创新行动计划”超导专项申报指南》,持续助力高温超导前沿技术的创新和工程化。

创新主体层面,上海已形成国内最完备的高温超导创新集群。经过近 20 年的持续培育和发展,上海高温超导产业创新环节基本齐全,孵化了一批科技创新型企业。其中,上海超导科技股份有限公司(以下简称上海超导)、上海上创超导科技有限公司(以下简称上创超导)、甚磁科技(上海)有限公司(以下简称甚磁科技)3 家公司研制高温超导带材;上海翌曦科技发展有限公司(以下简称翌曦科技)研制聚变强场磁体,能量奇点能源科技(上海)有限公司(以下简称能量奇点)研制高温超导紧凑型核聚变装置;上海国际超导科技有限公司(以下简称国际超导)、上海电缆研究所(以下简称上海电缆所)、中天集团上海超导技术有限公司等研制超导电缆;国网上海市电力公司(以下简称上海电力)使用超导电缆输电;上海铂铍制冷科技有限公司(以下简称铂铍科技)、同济大学、上海科技大学等研制低温制冷机。上海已经完成了包括超导带材、超导磁体、配套制冷机、电力应用和核聚变应用的全产业链布局。

关键技术层面,上海高温超导技术处于国际

第一梯队。上海超导采用 PLD 技术路线,实现了第二代高温超导材料的超高速批量化制备,通过全自主设计产线(见图 4),解决了国产带材批量化制备大面积高速动态精准控温难、高速镀膜下膜层均匀性及稳定性质量控制难等问题。上创超导采用 MOD 技术路线,突破了薄膜高质量外延生长和长带连续化批量制备等技术瓶颈,解决了超导层厚度效应和磁通钉扎控制等问题,是世界上第 2 家具有千米级、低成本、化学法高温超导带材制造能力的企业。翌曦科技发明了光纤柔性限位方法、自适应原位校准技术、同步多元可控牵引方法等创新技术,攻克了光纤超导复合导体制备技术难题,显著提高了光纤与超导缆线结构的兼容性,实现了百米级内封光纤高温超导 CORC



图 4 上海超导带材生产线

Fig. 4 Tape production line of Shanghai Superconductor Technology Company

复合导体连续制备。铂钽科技采用单级、多级高频脉冲管制冷技术,突破了 25 kW 以上输出功率线性压缩机研制、大尺寸回热器内部不可逆损失机制准确评估和有效抑制等技术瓶颈,解决了单台千瓦级以上回热式制冷机超大制冷能力、高能量转化效率等难题。

创新成果层面,上海高温超导领域涌现出一批重要的标志性成果。在超导带材方面,上海超导研制的高温超导带材性能优异^[11],已批量供应美国 CFS 公司和英国 TE 公司的聚变装置。该公司牵头承担的第二代高温超导带材项目,首次成为工业和信息化部的发展专项。上创超导实现了低成本化学法千米级第二代高温超导带材的规模化制备,并建成了千米级超导带材金属基带、缓冲层和超导层生产线^[12]。在超导体和磁体方面,上海交通大学建成国内首条高电流密度集束缆线自动化生产线^[13],牵头承担了国家磁约束核聚变能发展研究专项项目。在超导聚变装置方面,能量奇点自研建造的高温超导托卡马克装置“洪荒 70”实现了等离子体放电,初步验证了该技术路线的工程应用的可行性^[14]。如图 5 所示,在超导应用技术方面,上海多年来在高温超导领域的技术积累支撑了多项重大示范工程项目。2021 年,国

际超导、上海电缆所、上海电力等单位联合攻关,采用全国产超导材料和核心部件,建成了世界首条 35 kV 的千米级超导电缆示范工程^[15],多个指标国际领先,目前已连续安全稳定运行 3 年。2023 年,历经 10 年的技术创新与积累,世界首台兆瓦级高温超导感应加热装置在黑龙江正式投用^[16],该装置由联创光电牵头、北京交通大学和上海超导联合攻关,上海超导参与了前期研发并提供全部带材产品;同年,由中车长客和上海交通大学联合研制的国内首套高温超导电动悬浮全要素试验系统正式发布^[17],迄今已完成 100 余次悬浮运行,标志着我国在高温超导电动悬浮领域实现重要技术突破。

创新生态层面,上海交通大学联合中国科学院合作创办的 *Superconductivity* 期刊,是应用超导领域国内唯一的英文期刊。上海超导、上创超导等单位已牵头制定临界电流和力学性能测试相关国家标准 3 项。依托长三角超导产业链联盟,每年定期举办长三角超导产业发展高峰论坛。国际电工委员会“架空电导体”技术委员会秘书处、全国电线电缆标准化技术委员会设立在上海电缆研究所有限公司,为超导电缆的标准制修订提供良好的平台。

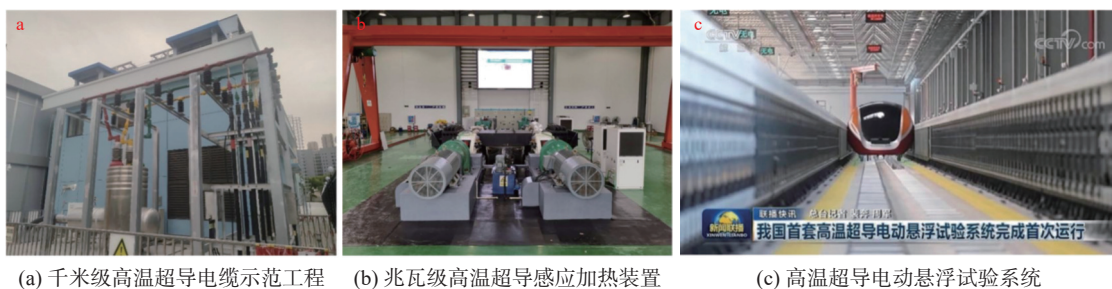


图 5 高温超导示范工程

Fig. 5 High temperature superconductivity demonstration project

3 专利和标准情况

在专利布局方面,以“二代高温超导”为检索关键词,使用“智慧芽”软件针对国内发明专利进行检索,从专利申请和授权数量来看,共有 520 项专利申请,其中 345 项得到授权,处于实质审查阶段或公开的专利 175 项。从专利申请的时间分布来看,自 2005 年至今共经历 2 个高峰:2011 年因超导带材实现国产化,申请量首次激增;当前该领域正处于第 2 个高峰阶段,专利申请数量呈现持续增长趋势。从专利申请来源省份分布来看,上海领先于其他省市,占全国申请比例的 40%;而上

海专利申请数量的前 3 名分别为上海超导、上海交通大学以及上创超导。具体分布如图 6 所示。

如图 7 所示,按应用领域分类,可以发现该领域的核心专利主要分布在二代高温超导材料生产以及磁体应用 2 个方向。前 5 名的应用领域词条中,“超导磁体/线圈”排名第 2,另外有 3 项涉及材料生产装备工艺,分别为“真空蒸发镀膜”“溅射镀膜”以及“离子注入镀膜”。其余的应用领域还包括各类先进应用方法、测试方法以及工艺优化策略等。

在标准制定方面,随着各类示范应用和商业化项目落地,高温超导产业亟需标准化来规范市场。表 4 汇总了国内外相关机构制定的高温超导

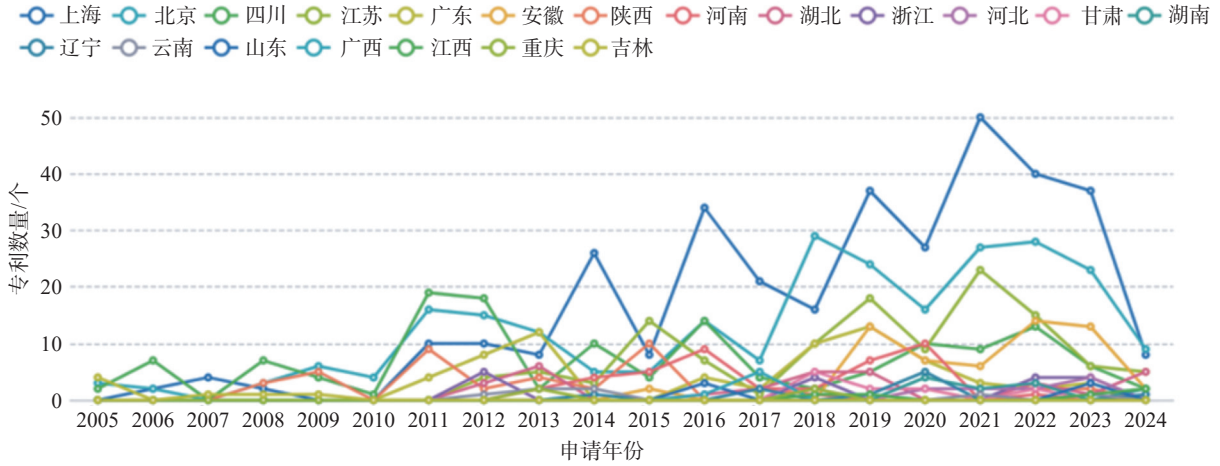


图 6 历年各省市“二代高温超导”专利申请量趋势图

Fig. 6 Trend chart of patent applications for “2G high temperature superconductor” in various provinces/cities over the years

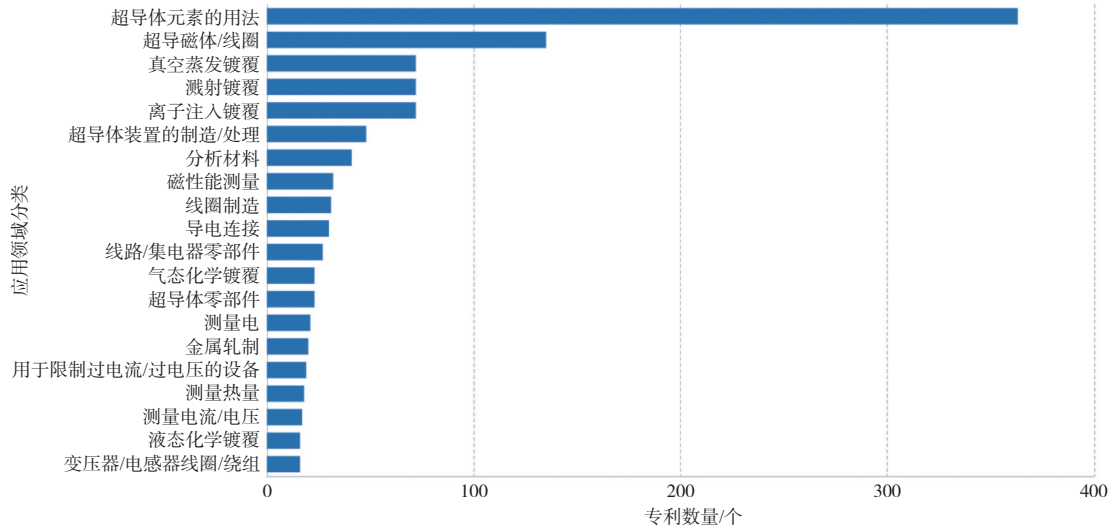


图 7 “二代高温超导”专利应用领域分布图

Fig. 7 Distribution map of patent application fields for “2G high temperature superconductor”

领域标准。近年来,在全国超导标准化技术委员会的指导下,材料性能的测试标准已初步形成共识,上海相关单位牵头制定多项国家标准,但目前

尚无国内单位牵头或参与国际标准的制定,难以掌握话语权。此外,在超导磁体这一关键核心部件方面,相关测试平台和标准尚未建立完善,在一

表 4 高温超导相关国际、国家、行业和团体标准

Tab. 4 International, national, industry and group standards related to HTS

标准号	标准名称	牵头起草单位	发布日期
IEC 61788—25:2018	超导电性—第二十五部分:机械特性测量—REBCO线材的室温拉伸	德国卡尔斯鲁厄理工学院	2018-08-29
IEC 61788—26:2020	超导电性—第二十六部分:临界电流测量—RE-Ba-Cu-O复合超导体的直流临界电流测量	日本国立材料科学研究所	2020-06-11
IEC 63075:2019	额定电压在6 kV 到 500 kV 的超导交流电力电缆及其附件 - 测试方法及要求	法国耐克森公司	2019-02-05
GB/T 41640—2022	临界电流测量 第二代高温超导长带临界电流及其沿长度方向均匀性测量	上海上创超导科技有限公司	2022-10-12
GB/T 41641—2022	力学性能测量 REBCO带材室温拉伸试验方法	上海超导科技股份有限公司	2022-10-12
GB/T 39843—2021	电子学特性测量 大面积超导膜的局域临界电流密度及其分布	上海大学	2021-03-09
JB/T 14389—2023	高温超导电缆技术要求	上海电缆研究所有限公司、上海国际超导科技有限公司	2023-12-29
T/CES 046—2020	高温超导带材磁化临界电流均匀性磁路法测试系统规范	广东电网有限责任公司	2020-10-26
T/CES 067—2021	基于磁路法的高温超导带材临界电流均匀性测试方法	广东电网有限责任公司	2021-09-28
T/CEEIA 306—2018	额定电压6 kV($U_m=7.2$ kV)到35 kV($U_m=40.5$ kV)低温绝缘高温超导电力电缆及附件—试验方法和要求	上海电缆研究所有限公司	2018-08-09

一定程度上阻碍了其下游的推广应用。

4 对策建议

(1) 加大政策保障。发挥市级财政拨款的各类专项计划资金作用,加强对高温超导关键技术攻关支持力度。强化对高温超导关键技术、创新企业和核心团队的支撑保障;引导社会风险资本投入,保障产业资金供给。

(2) 优化科研组织。鉴于高温超导领域技术创新难度大、前期研发投入高等实际情况,发挥有组织科研优势,探索采用长周期支持、里程碑管理、赛马制等机制的支持方式,支撑从基础研究到产业应用全链条的攻关任务实施,促进产学研协同发展。

(3) 加强标准建设。针对目前高温超导材料和关键部件缺乏统一的检测标准,引导鼓励具备标准化工作经验的单位积极参与国际/国家标准制修订与应用,以技术标准促进科技成果转化应用,强化科技与标准交互融合。

(4) 引进创新人才。支持创新型企业、龙头企业等载体,用好外籍人才认定标准、引进渠道和支持措施,集聚一批引领国际科技前沿的高温超导领军人才。加大高温超导领域青年人才培养力度,引导头部企业深度对接高校,协同开展技术攻关。

(5) 培育创新平台。培育发展高温超导领域全国重点实验室、技术创新中心等机构,支撑重大原始创新发现与技术供给。衔接国家战略布局,为国家重大攻关项目提供配套,加快推进聚变强场高温超导磁体市级重大专项立项。

参考文献:

- [1] 伍浩松, 张焰. 美能源部发布《2024 年聚变能战略》[J]. 国外核新闻, 2024 (7) : 1-2.
- [2] HOLLAND A. Government policy for the fusion energy economy-lessons from the Fusion Industry Association's first two years [J]. *Journal of Fusion Energy*, 2023, 42 (1) : 14.
- [3] FIA. The global fusion industry in 2024: fusion companiesurvey [EB/OL]. (2024-07) [2024-12-09]. <https://www.fusionindustryassociation.org/wp-content/uploads/2024/07/2024-annual-global-fusion-industry-report.pdf>.
- [4] 闫泽坤, 万勇. 美国能源部推动高性能超导体开发及生产 [EB/OL]. (2024-01-26) [2024-12-09]. http://www.casid.cn/zkcg/ydkb/kjqykb/2023/kjqykb2312/202401/t20240126_6972281.html.
- [5] HARTWIG Z S, VIEIRA R F, SORBOM B N, *et al.* VIPER: an industrially scalable high-current high-temperature superconductor cable [J]. *Superconductor Science and Technology*, 2020, 33 (11) : 11LT01.
- [6] TAKAYASU M, CHIESA L, BROMBERG L, *et al.* HTS twisted stacked-tape cable conductor [J]. *Superconductor Science and Technology*, 2012, 25 (1) : 014011.
- [7] VAN DER LAAN D C. YBa₂Cu₃O_{7-δ} coated conductor cabling for low ac-loss and high-field magnet applications [J]. *Superconductor Science and Technology*, 2009, 22 (6) : 065013.
- [8] KAR S, LUO W B, YAHIA A B, *et al.* Symmetric tape round REBCO wire with J_c (4.2 K, 15 T) beyond 450 A mm⁻² at 15 mm bend radius: a viable candidate for future compact accelerator magnet applications [J]. *Superconductor Science and Technology*, 2018, 31 (4) : 04LT01.
- [9] WHYTE D G, LABOMBARD B, DOODY J, *et al.* Experimental assessment and model validation of the SPARC toroidal field model coil [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2024, 34 (2) : 0600218.
- [10] ZHANG X T, SHAO L J, GAO P, *et al.* Strain analysis and preliminary test of an all-superconducting high-field magnet generating 32.4 T direct-current magnetic field [J]. *Superconductor Science and Technology*, 2024, 37 (12) : 125003.
- [11] ZHU J M, TONG M L, CHEN S K, *et al.* Online perception on the performance of YBCO tapes via intelligent video-aided PLD system [J]. *Physica C: Superconductivity and its Applications*, 2022, 598: 1354066.
- [12] HUANG R T, CHEN J, LIU Z Y, *et al.* Artificial flux pinning in MOD-REBCO coated conductors with thick superconducting layer [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2024, 34 (3) : 6600505.
- [13] ZHOU X, SHENG J, YE H S, *et al.* Study on performance degradation of multi-layer spiral superconducting cable under bending load [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2024, 34 (5) : 4803306.
- [14] LI Z Y, PAN Z C, ZHANG Q J, *et al.* Development and construction of magnet system for world's first full high temperature superconducting Tokamak [J]. *Superconductivity*, 2024, 12: : 100137.
- [15] 韩云武, 黄崇祺, 宗曦华. 高温超导电缆应用场景与产业发展 [J]. *中国工程科学*, 2024, 26 (4) : 198-209.
- [16] WANG X, DAI S T, MA T, *et al.* Design and operating characteristics analysis of HTS magnets for dipole-type DC induction heating [J]. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 2024, 37 (2) : 311-324.
- [17] 谭富星, 李凯, 于淼, 等. 超导电动悬浮试验线悬浮系统设计及验证 [J]. *机车电传动*, 2024 (3) : 13-18.

(编辑 陈 红)