DOI 10.15302/J-SSCAE-2024.04.023

高温超导电缆应用场景与产业发展

韩云武[1*]，黄崇祺[2]，宗曦华[1]

（1. 上海国际超导科技有限公司，上海 200444；2. 上海电缆研究所有限公司，上海 200093）

摘要：高温超导电缆具有容量大、损耗低、自限流、环境友好等突出优点，是解决城市电网升级难题、实现高效率电力传输、赋能大容量电力应用的新兴解决方案，探讨相关产业发展兼具基础研究与工程应用价值。本文剖析了高温超导电缆的技术特点与应用要素，凝练了超级开关站、大电流专线、数据中心供电、基于新能源的电解铝与电解水制氢、集中型充电站、城市轨道交通、大容量直流电网等高温超导电缆的应用场景；从国际、国内两方面总结了高温超导电缆的研制及应用进展，尤其是全面梳理了我国的关键产品研制、关键技术研究、工程项目实施情况。进一步探讨了加强运维技术、攻克大型制冷机技术、降低工程整体造价、与传统电网设施的耦合、形成收益共享机制等高温超导电缆产业未来发展挑战，并针对性地提出了发展建议。相关内容可为高温超导电缆产业高质量发展研究提供参考。

关键词：高温超导电缆；高温超导带材；制冷机；智能化监控；应用场景；示范线路

中图分类号：R-1　　**文献标识码：**A

Application Scenarios and Industrial Development of High-Temperature Superconducting Cables

Han Yunwu[1*], Huang Chongqi[2], Zong Xihua[1]

(1. Shanghai International Superconductor Technology Co., Ltd., Shanghai 200444, China;
2. Shanghai Electric Cable Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200093, China)

Abstract: High-temperature superconducting (HTS) cables, with their prominent advantages of large capacity, low loss, current self-limit, and environment friendliness, are a new promising solution for addressing the challenges regarding urban power grid upgrades, large-capacity power applications, and efficient power transmission. Exploring the development of related industries has both basic research and engineering application values. This study analyzes the technical characteristics and application elements of HTS cables and summarizes the application scenarios of HTS cables, including super switch stations, high-current-dedicated lines, data center power supply, electrolytic aluminum and electrolytic water hydrogen production using new energy, centralized charging stations, urban rail transit, and large-capacity direct-current power grids. Moreover, this study summarizes the development and application progress of HTS cables from both international and domestic perspectives, comprehensively reviewing the key product development, key technology research, and engineering project implementation in China. Further exploration was conducted on future development challenges, including strengthening operation and maintenance technologies, overcoming large-scale refrigeration technologies, reducing overall project costs, coupling with traditional power grid facilities, and forming a profit sharing mechanism. Targeted development suggestions are also proposed. This study is expected to provide references for the high-quality development of HTS cables.

Keywords: high-temperature superconducting cable; high-temperature superconducting tapes; refrigerating machine; intelligent monitoring; application scenario; demonstration line

收稿日期：2024-01-05；**修回日期：**2024-07-19

通讯作者：*韩云武，上海国际高温超导科技有限公司高级工程师，研究方向为高温超导电缆产业化应用技术；E-mail: hanyunwu@secri.com

资助项目：上海市促进产业高质量发展专项（沪PT-2023-001）；上海市2023年度“科技创新行动计划”项目（23511102100）

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

一、前言

高温超导电缆具有容量大、损耗低、自限流、环境友好等突出优点，在应对新能源激增对电网带来的重大挑战、支撑能源互联网建设等方面有着显著优势。在城市电网中使用高温超导电缆，能够降低输电碳排放、节约地下管廊空间、提升输电容量、改善安全可靠性。发达国家高度重视高温超导电缆技术研究与应用，实施了一系列研究计划项目[1~4]。2019 年，美国联邦能源监管委员会批准了弹性电网（REG）项目，开始建设基于高温超导电缆的城市电网；2020 年，欧洲提出了 SuperLink 项目，着力攻关 12 km 长度级别的高温超导电缆工程建设技术，随后提出了 SuperRail 项目，探索高温超导电缆在轨道交通中的应用；2020 年，韩国提出了超导平台供电概念。各国在攻关高温超导电缆关键应用技术并探索新应用模式的同时，稳步推进超导材料、大型制冷机等方面的共性关键技术研究[5~9]。

在我国，城市用电需求激增、土地资源供应趋紧，合理规划土地资源、提升电网输送容量和供电效率成为亟待解决的问题。城市中心区域用电负荷不断增长，对供电稳定性和安全性的要求越来越高，末端枢纽变电站之间的输电电缆成为城市电力安全供应的“瓶颈”环节，亟需应用中低电压等级的大容量传输设备以增强供电能力。在很多城市，故障电流已接近传统设备的极限，也会随着用电需求的增长而进一步上升，需要采用新型方案予以应对[10,11]。《工业和信息化部等七部门关于推动未来产业创新发展的实施意见》（2024 年）提出，加快高温超导材料的创新应用。《新型电力系统发展蓝皮书》（2023 年）指出，开展新型输电组网技术创新突破，推进电力与其他能源输送深度耦合协同。未来，低频输电、高温超导直流输电等在规模化应用后，有望发展为输电 – 输气一体化的“高温超导能源管道”。

当前，随着高温超导材料、低温制冷、产业应用技术的快速进步，高温超导电缆稳步实现从实验室研发到商业化应用的转变。国外已有多组高温超导电缆投入电网示范和商业化运行。我国高温超导电缆产业实现了关键材料和设备的国产化开发、产业链上下游协同发展，但仍面临需求牵引不足、配套技术发展滞后等挑战。为此，本文围绕高温超导电缆，总结技术特点与关键要素，归纳代表性应用场景，梳理研制及应用进展，剖析未来发展挑战，提出产业发展建议，以为高温超导电缆产业高质量发展及其赋能电力传输行业等研究提供参考。

二、高温超导电缆的技术特点与应用要素

（一）高温超导电缆的技术特点

1.“零电阻”与低损耗

高温超导电缆采用超导材料作为导体，具有无阻传输电流的能力，在传输直流电流时电阻可以完全忽略。在传输交流电流时，交变磁场引发磁滞损耗、涡流损耗、耦合损耗，造成高温超导电缆的交流损耗。尽管如此，高温超导电缆的交流损耗远低于传统电缆，如传输数千安培交流电流的损耗仅为瓦级。

2. 大容量

高温超导电缆的输电能力主要取决于电缆的临界电流和损耗水平。一般认为，交流超导电缆的输电容量为传统电缆的 4~9 倍；直流超导电缆没有交流损耗，输电容量为传统电缆的 10 倍以上。随着超导材料技术的持续进步，高温超导电缆输电容量仍有显著的增长空间。

3. 自限流

在高温超导电缆的正常运行过程中，超导材料处于“零电阻”状态，以极低的损耗传输电能。一旦电网系统发生短路等故障，流经高温超导电缆的电流超过临界值，高温超导电缆会失去超导特性（电阻急剧增大），起到限制故障电流的作用。高温超导电缆的自限流能力能够有效限制故障电流在电网中的传播，成为构建超安全电网[11]的关键支撑。

4. 电磁屏蔽与独立热场

高温超导电缆采用超导材料作为屏蔽层或者通过三相同轴等设计，理论上可以完全消除电缆对外产生的外部磁场。高温超导电缆配有良好绝热性能的真空杜瓦，运行于低温环境，不对外部散热且对外部环境温度变化并不敏感。高温超导电缆不会对外部环境产生电磁和热方面的影响，这与传统电缆因电磁力和热场叠加等因素而无法密集敷设，载流能力随着环境温度上升而降低[12]等形成鲜明的对比。因此，高温超导电缆可以采用密集敷设方式（适应狭窄的地下空间），为电网扩容提供便利的工

程实施条件。

5. 多接口综合系统

高温超导电缆工程一般由电缆系统、制冷系统、监控系统等构成，是一个多接口的综合系统；整个系统运行涉及电能的传输，冷能、热能的传输，信息流的传输。冷能接口用于保障高温超导电缆维持其低温运行状态的冷能需求，可与液化天然气（LNG）运输等场景耦合。高温超导电缆输电损耗、漏热负荷等都由制冷机带走，制冷机成为高温超导电缆系统最主要的能耗设备，相应能耗以热能形式由冷却水带走，故热能接口可与热水应用耦合。高温超导电缆监控系统采集工程运行参数和状态参数，各类参数信息经信息流接口汇聚到监控系统；信息流接口可与电网调度、人工智能大模型耦合，为高温超导电缆乃至电网的运行状态评估与控制提供便利条件。

（二）高温超导电缆的应用要素

1. 高温超导带材

高温超导电缆采用的高温超导带材主要有两种：$Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$超导带材，也称第一代高温超导带材；$REBa_2Cu_3O_{7-x}$超导带材，也称第二代高温超导带材。两种带材均具有较高的临界转变温度（约110 K、90 K），都可在液氮温度下实现超导性能（临界电流密度可达10^5 A/cm^2、10^6 A/cm^2[13]）。高临界电流密度的材料是实现高温超导电缆大容量、低损耗特性的基础。高温超导材料决定了高温超导电缆的性能及成本，相应成本占比为30%~40%。目前，第二代高温超导带材具有成本和性能上的更大潜力，是高温超导电缆技术研究的重点内容；进一步提升高温超导带材的临界电流性能、制备工艺稳定性是研究的重要方向。

2. 大型制冷机

高温超导电缆运行在液氮温区，需要有匹配的制冷设备维持低温工作环境。长度为数千米的高温超导电缆工程，冷量需求一般为数十千瓦，如上海市1.2 km国产化高温超导电缆工程的设计制冷量为12 kW。虽然高温超导电缆自身损耗远小于传统电缆，但由于制冷机的工作效率影响而使电缆自身损耗放大约15~20倍，叠加抵消漏热损耗所需的制冷损耗，明显削弱了高温超导电缆的节能优势。大型制冷设备作为高温超导电缆工程的关键设备之一，其制冷效率、运行稳定性对高温超导电缆工程的节能水平、安全可靠性产生直接影响；相应成本约占高温超导电缆工程的30%。2002年，美国能源部即论证提出了高温超导电缆应用所需的制冷机技术目标[14]。

3. 智能化监控技术

高温超导电缆需要稳定的液氮循环来维持正常运行，从而引入了数量众多的运行参数。智能化监控技术是确保高温超导电缆工程安全稳定运行的关键支撑技术，将参数繁多的表观劣势转化为利于精细控制的应用优势，为挖掘高温超导电缆工程更多的应用价值创造了条件。

4. 高性能真空杜瓦

高温超导电缆尽管自身的损耗远小于传统电缆，但运行于液氮温区、与外部环境存在极大的温差而引起的漏热，仍然给系统带来显著的热负荷。为此，高温超导电缆工程需要配备各类真空杜瓦，如电缆外部的柔性绝热套、液氮循环管路、冷箱、泵箱等。真空杜瓦采用高真空、多层超级绝热材料等，以降低液氮与外部环境之间的热量传输。以上海市1.2 km国产化高温超导电缆工程为例，即便在满负荷状态下，因漏热导致的热负荷仍占系统总热负荷的66%[15]；这部分热负荷在高温超导电缆空载情况下仍然存在，需要通过制冷系统带走。提升真空杜瓦的绝热性能一直是高温超导电缆产业的重点研究内容，以变密度间隔材料设计、新型间隔材料设计、支撑结构优化等为代表[16~19]。

三、高温超导电缆的应用场景

（一）超级开关站

大型城市的中心电网较多存在负荷密度高、通道资源有限的突出矛盾，致使区域供电紧张。一般采用布点开关站的方式扩展220 kV变电站的供电范围，但普通开关站受限于进线的输送容量不足、出线的仓位有限，难以适应实际用电需求。利用高温超导电缆提升开关站的进线容量，可在负荷中心区域建设超级开关站，作为市郊220 kV变电站中低压母线的扩展。1个超级开关站（见图1）可替代4~5个传统开关站，具备高压变电站的等效功能，从而压缩对中心城区的空间需求，提升供电设施建设的可实施性。建设超级开关站，可将大型城市的高压 / 超高压

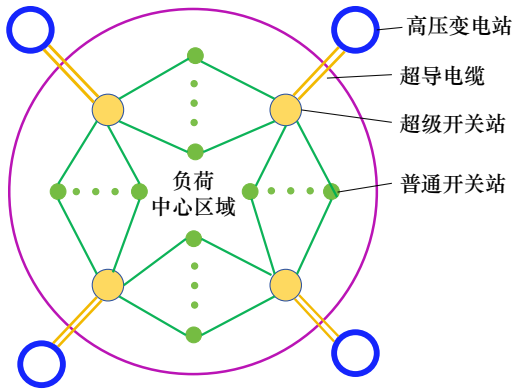

图1 高温超导电缆支持城市电网中超级开关站建设

变电站外移，甚至能够节省一至两级高压变电站，从而大幅降低输电损耗、节省昂贵的城市土地资源、规避高压变电站建设环境影响评价。

（二）大电流专线

对于金属冶炼工厂、大型化工厂、大型空分厂等大型电力用户，一般采用较高的电压等级接入，再经用户变电站转变为较低电压来为厂区供电。若采用高温超导电缆构建大电流专线，即可直接从高压变电站的低电压出线端以大电流、低电压方式为用户供电（见图2）；用户侧可减少2台降压变压器，降低投资和输电能耗。大电流专线还可用作大型发电站的大电流母线，利用低损耗、大容量特点来减少输电损耗并节约通道空间[20]。

高能耗行业的节能减排需求为高温超导电缆应用提供了较好的机遇。例如，钢铁行业的冶炼碳排放量占全国总碳排放量的15%[21]，直接原因在于冶炼过程以高炉–转炉长流程为主。加快发展电炉冶炼的短流程炼钢是降低冶炼碳排放的有效手段，这为具有大容量、低损耗优势的高温超导电缆提供了行业应用机会。值得一提的是，大型冶炼厂一般配有空分厂，空分厂的液氮副产品可用于高温超导电缆工程的制冷，从而节省制冷机的应用能耗，综合性降低高温超导电缆的应用成本。

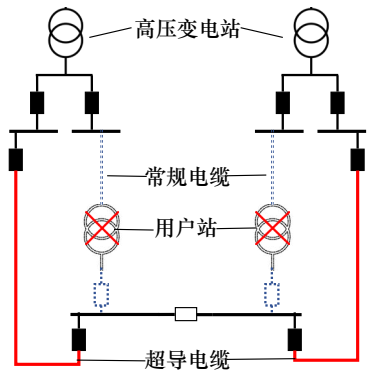

图2 高温超导电缆用于大用户供电

（三）数据中心供电

我国数据中心产业发展迅速，整体用电量的年均增速超过10%，2023年的总耗电量为2.962×10^{11} kW·h[22]；主流的供配电系统采用2N双母线架构的交流不间断电源集中供电方案。若采用直流高温超导电缆供电（见图3），将逆变单元前置以远离机房，即可充分利用高温超导电缆的大容量、无阻特性，降低输电损耗并简化供电结构，也为风电/光伏发电直流并入、储能系统直接并入等提供了便利条件。

（四）基于新能源的电解铝与电解水制氢

电解铝是高耗能产业，我国2021年的电解铝行业碳排放量为4.38×10^{8} tCO_2，约占全社会碳排放总量的5%[23]。为了降低电解铝的碳排放量，优化能源结构、提高清洁能源的应用占比、采用大电流电解槽、发展新材料和新工艺等是可行的方式。《减污降碳协同增效实施方案》（2022年）提出，2030年电解铝使用可再生能源比例将提高至30%。相关企业研发了分布式光伏直流接入电解铝母排技术，减少了逆变、整流等过程中的电能损耗，成功应用于电解铝生产。铝电解槽大型化进展良好，当前的主力型号为500 kA、600 kA、660 kA规格。通常，槽平均电压约为4 V，其中母线电压约为200~300 mV；鉴于电流基数极高，减少母线电压损失将降低铝电解过程的能耗[24-27]。利用高温超导电缆的“零电阻”优势，将有效降低母线电

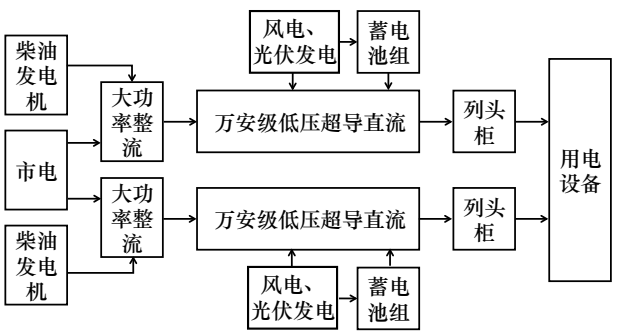

图3 采用直流高温超导电缆的数据中心供电方案

压损失；利用高温超导电缆的极高载流能力，将显著缩小母线的尺寸，如1根直径<200 mm的直流高温超导电缆可替代数十万平方毫米的金属母排。

2021年，全球氢气总消费量为9.4×10^7 t，其中电解水制氢的占比仅为0.1%，未来发展空间广阔[28]。可再生能源与氢能具有天然的互补优势，国内“三北”地区风、光资源尤其丰富，发展“风光氢储”对于地区新能源开发、新型储能建设极具价值[29]，发展新能源制氢也有良好的潜力。商业化的制氢技术主要有碱性电解水制氢、质子交换膜电解水制氢，都是通过直流电流驱动促使水分子的氢原子与氧原子分离，制氢效率在很大程度上取决于电流的大小；这为大容量、“零电阻”的直流高温超导电缆提供了适宜的应用场景。

大容量高温超导直流电缆将新能源电力接入电解铝、电解水制氢车间（见图4），既可以大幅降低输电损耗，又能够精简变压、整流、逆变等过程，利于提升效率并节约投资。

（五）集中型充电站

电动汽车充电行为具有随机性、间歇性，聚集性充电会导致局部地区的负荷紧张并加重配电网负担。建设集中型充电站，可集中控制充电功率，不仅具有更高的土地利用率、设备利用率，而且可通过主动干预充电时间等方式制定电网友好型充电方案。集中型充电站可以作为电网的辅助服务设施，基于电池到电网模式开展电池与电网的能量交互，增强电网的稳定性和可靠性；与风电、光伏发电等可再生能源结合，促进清洁能源利用并降低碳排放[30–33]。集中充电设备意味着更大的充电功率和充电电流，采用传统电缆一般需要多根并联，存在占地多、损耗高的问题。若采用直流高温超导电缆供电，1根电缆即可承载数万安培的直流电流，输送能力相当于数十根常规电缆，将节约供电通道并降低输电损耗。

图4　直流高温超导电缆的电解应用场景

（六）城市轨道交通

城市轨道交通多采用直流驱动列车。传统的馈电电缆带有电阻，一般每隔4~9 km需设置专门的变电站以应对电压降问题。若采用直流高温超导电缆（见图5），可消除电压降，显著降低对变电站的需求，节约土地资源并降低输电损耗。日本早在2010年就启动相关研究，2019年开发了310 m长的样缆并在实际线路上进行运行试验[34,35]。

（七）大容量直流电网

电解冶金、电解水制氢、数据中心、大型充电站、轨道交通、第五代移动通信（5G）基站等直流用电场景增多，以光伏电站为代表的直流电源容量不断增大，以电化学储能为代表的储能技术快速发展，在此背景下构建直流电网、省去大量交/直流转换环节的价值逐步显现[36]。风电、光伏发电是我国实现“双碳”目标的重要依托，但存在间歇性、波动性、单机容量小等不足；采用直流方式并通过较大范围的汇集，可在一定程度上克服上述不足，同时减少调相需求和投资规模。以电解铝、数据中心为代表的直流负荷快速增加，采用传统电网意味着直流电源也需要通过“逆变–升压–降压–整流”等转换过程才能最终为直流负荷供电。作为储能主力类型之一的电化学储能也以直流方式进行电能存储。若采用直流高温超导电缆，不仅可以完全无阻地传输电流，而且传输容量是相同体积传统电缆的数十倍，无需大量的电压变换环节。

四、高温超导电缆研制及应用进展

（一）国际高温超导电缆研究及应用进展

高温超导因其“零电阻”特性获得了普遍关注，发展相应的电力电缆也是工程关注点。1987年，临

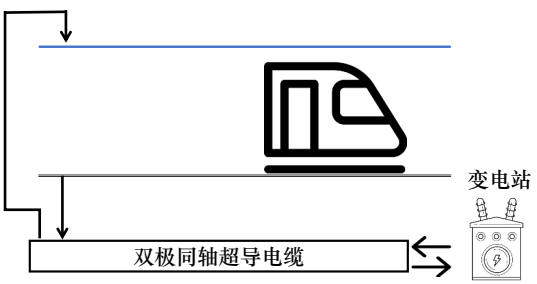

图5　轨道交通用直流高温超导电缆系统

界温度高于液氮温度的高温超导材料被发现，引发了高温超导电缆的研究热潮。发达国家重视高温超导电缆应用研究，建立了一批实验线路和示范运行线路，逐步验证了高温超导电缆的理论优点，推动了电缆制造、工程建设、制冷、监控等技术进步[37]。具体地，高温超导电缆研究机构与电网用户联合推动了一系列示范项目（见表1），促成了工程制造成本显著下降、工程电缆长度不断增加、工程选址趋近核心电网、工程经济效益及可靠性稳步提升。

美国能源部在1988年启动电力系统高温超导计划，在1993年制定高温超导伙伴计划，在2003年发布Grid 2030计划，持续推进高温超导电缆技术及应用；将高温超导技术列为电力网络未来30年发展的关键技术之一[1]，并支持工业部门实施了诸多工程项目。2021年，芝加哥REG项目建成1根200 m、12 kV、62 MVA的三相同轴高温超导电缆；后续计划采用高温超导电缆将3个变电站连接成环网，用于构建自适应电网系统以提升电网的稳定性[5,38-43]。

日本的高温超导电缆研究始于20世纪90年代，得到SuperGM、Super-ACE等超导电力技术项目支持；积极推动第二代高温超导带材、高温超导电缆等研究，2002年开发了100 m、66 kV、1 kA的三芯统包高温超导电缆并完成试验测试。2011年开发了275 kV、3 kA的单芯结构高温超导电缆，2015年建成500 m直流高温超导电缆（将光伏电站的电能输送至数据中心），2019年开发了310 m馈电电缆（用于轨道交通供电研究）[2,35,44,45]。

韩国在2001年制定了为期10年的高温超导电力应用技术发展规划。2004—2011年，先后开发了30 m、100 m、410 m等长度的高温超导电缆实验线路。2015年，在济州岛完成100 m、80 kV的直流高温超导电缆示范工程建设。2019年，完成首条千米级高温超导电缆示范工程[3]。

欧洲在1998年启动高温超导电力联接、Super3C等研究计划，完成多个试验线路研究和超导材料开发。2013年，德国埃森市建设了世界上首根千米级高温超导电缆挂网线路（配备高温超导限流器）[46,47]。2022年，耐克森公司承建首条火车站高温超导电缆项目，安装两根60 m长的直流高温超导电缆并持续运行，这是商业轨道交通线路中首次使用直流高温超导电缆[7]。

（二）国内高温超导电缆产业整体进展

我国密切跟踪并高度重视高温超导电缆产业发展，通过多个国家级科技项目提供研究支持。上海市等地积极响应国家部署，精准培育高温超导电缆产业发展要素。目前基本形成了覆盖材料生产、低温制冷、电缆集成、电缆应用的完整产业链；除了大型制冷机，主要关键材料和设备均实现国产化，技术水平处于国际前列。

1. 关键产品研制

第二代高温超导带材因其更好的降本潜力、更高的性能成为发展重点，国内商业化制备方法包括物理法（PLD）、化学法（MOD）、气相外延生长法（MOCVD），目前3种方法的总产能约为4000 km/a。非对称辐射辅助传导加热技术的PLD带材制造工艺的应用，使带材在高速镀膜条件下保持良好的临界电流和均匀性。基于溶胶氟含量调控、减压烧结技术的MOD带材制造工艺，显著缩短了低温热解和高温晶化时间，促成了高温超导层的高效外延

表1　全球主要高温超导电缆示范工程项目

国家	时间/年	电缆制造企业	项目选址	关键参数	运行情况
美国	2006	住友电气工业株式会社	奥尔巴尼	三芯统包，350 m、34.5 kV、0.8 kA	停运
美国	2006	Ultera公司	哥伦布	三相同轴，200 m、13 kV、3 kA	停运
美国	2008	耐克森公司	长岛	单芯，600 m、138 kV、3 kA	停运
韩国	2011	LS电缆有限公司	利川	三芯统包，410 m、22.9 kV、1.26 kA	停运
日本	2012	住友电气工业株式会社	横滨	三芯统包，240 m、66 kV、2 kA	停运
俄罗斯	2012	俄罗斯电缆研究所	莫斯科	单芯结构，200 m、20 kV、1.5 kA	停运
韩国	2014	LS电缆有限公司	济州岛	直流，单芯结构，500 m、80 kV、3.125 kA	停运
德国	2014	耐克森公司	埃森	三相同轴，1 km、10 kV、4 kA	在役
韩国	2019	LS电缆有限公司	Shigal	三芯统包，1 km、22.9 kV、1.26 kA	在役
美国	2021	耐克森公司	芝加哥	三相同轴，200 m、12 kV、3 kA	在役

生长。基于厚膜技术将高温超导薄膜厚度从1.2 μm增长到3.2 μm，77 K温度下的自场临界电流达1000 A/12 mm，改善了材料性价比[48]。不同稀土替代技术、不同比例掺杂工艺、大长度高温超导材料稳定制备工艺的应用，实现了基于高比例掺杂工艺的大长度产业化生产，在20 K、10 T垂直场下的临界电流达1350 A/cm。应用基于30 μm薄基带的高温超导带材[49]，解决了高温超导基带技术难题。

经过20多年的研究，我国全面掌握了高温超导电缆制造技术，如上海国际高温超导科技有限公司建成国内首个高温超导电缆中试生产基地，完成全套生产装备国产化开发（见图6）。自主开发了带状导体绞制、低温绝缘绕包、超级绝热管制备等方面的关键设备，形成了大长度高温超导电缆导体与真空绝热套一体化生产工艺，适应大长度高温超导电缆生产需求。构建了覆盖高温超导材料、电缆工艺、电缆系统的研究测试体系，为保障高温超导电缆应用质量提供了扎实保障。加强应用适配、用户友好的方案设计和发明，如在绝热管全长度上布置带有分子吸附功能的间隔条结构，有效降低电缆漏热并提升真空寿命[50]。针对城市地下电网的窄通道、接头间的收缩补偿难题，开发了高温超导电缆双弧冷缩补偿机构，解决了工程长度这一瓶颈问题[51]。

也要注意到，中船鹏力（南京）超低温技术有限公司、中科力函（深圳）低温技术有限公司、江苏克劳特低温技术有限公司、上海铂钺制冷科技有限公司等企业尽管能够开发较大冷量的吉福德–麦克马洪循环制冷机、脉管制冷机、斯特林制冷机[52,53]，但相关产品的制冷效率相比高温超导电缆应用所需的30%相对卡诺效率[14]仍有较大的距离。大型的液氮温区逆布雷顿制冷机尚未有国内产品。

2. 关键技术研究

在施工技术方面，国网上海市电力公司、上海送变电工程有限公司联合建立了高温超导电缆施工模拟试验场，据此开发了“牵–输–送”一体化高温超导电缆安装敷设技术（见图7）[54]，较好解决了城市复杂狭窄通道内的高温超导电缆施工难题。

在运行控制技术方面，国网上海市电力公司等企业提出了高温超导电缆的继电保护配置方案、故障后快速恢复供电方案，将保护配置方案中的电气量保护作为高温超导电缆本体的保护（以纵联差动保护为主保护，阶段式过电流以及阶段式零序电流保护为电气量后备保护），以非电气量保护作为高温超导电缆冷却系统的保护[55,56]。

上海国际高温超导科技有限公司基于宝钢高温超导电缆示范工程的众多数据，验证了深度学习方法对高温超导电缆故障预测及系统诊断的有效性[57]，为进一步解决高温超导电缆系统参数繁多、故障诊断难度大等技术难题，提升高温超导电缆系统的智能性和安全可靠性提供了方法借鉴。

3. 工程项目实施

2004年，云南省昆明市、甘肃省白银市分别建设了1条室温绝缘超导电缆示范线路。2012年，河南中孚实业股份有限公司应用了电解铝用直流高温超导电缆。2013年，宝山钢铁股份有限公司建设了国内首条冷绝缘高温超导电缆示范线路[58~60]。2021年，我国建设了两条高温超导电缆工程：广东省深圳市挂网的10 kV、43 MVA三相同轴高温超导电缆工程，用于深圳平安大厦供电；上海市挂网的35 kV、133 MWA三芯高温超导电缆工程，为徐汇区约4.9万户居民供电[43,61]。

2021年，上海市建成了世界上首条运行于大型城市中心电网、长度为千米级的高温超导电缆工

图6　高温超导电缆绝缘生产线

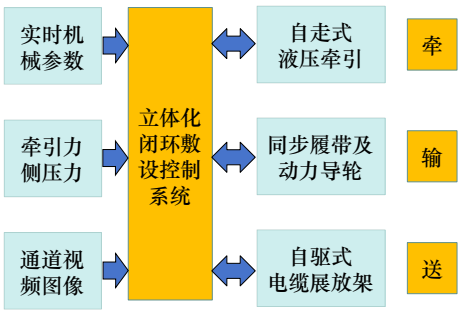

图7　“牵–输–送”一体化高温超导电缆敷设系统

程，供电范围覆盖大型医院、天文台、金融机构、地铁等重要用户以及众多的居民区。该工程设计了进线备自投装置，一旦高温超导电缆退出运行，即切换至热备用电缆为系统供电；配备了3套相互备用的制冷机（见图8）[61,62]，构建了基于专家诊断、5G的智能监控系统，无人值守的智能运行控制系统，实现了实时故障识别、远程报警、备份投切等功能，切实增强了工程运行的稳定性和安全性。该工程连续稳定运行超过950 d，经历了严寒和酷暑的考验，最大负载电流达2160 A，充分验证了高温超导电缆在提升电网输电能力方面发挥的关键作用。此外，该工程节约了70%的地下管廊空间，解决了城市电网升级难题，被视为近十年电网核心技术突破的标志性成就。

五、高温超导电缆产业未来发展挑战

（一）加强运维技术

高温超导电缆虽然成功进入核心电网运行，但运行经验偏少的问题并未缓解。电网是重要的基础设施，对安全性、可靠性具有很高的要求，如国网上海市电力公司对电网的可靠性要求为99.999 9%。高温超导电缆容量大，主要用于关键的主干线路，这对高温超导电缆运维技术提出了极高要求。高温超导电缆在电网中的运行经验仍然匮乏，尤其缺少关于各类突发、特殊电网运行事件的运行响应经验。

虽然高温超导电缆本体处在绝热密封的液氮环境中，环境稳定、风险较小、运维需求较低，但制冷系统涉及制冷机、液氮泵、冷水机等，配套设备和运行参数繁多，需要较高水平的运维技术保障。大电流专线、数据中心供电、电解铝等潜在应用场景尚处于开发初期，运行经验几乎空白，对推广应用高温超导电缆构成了直接挑战。

（二）攻克大型制冷机技术

制冷机直接影响高温超导电力设备的采购和运行成本，也在很大程度上决定高温超导电缆工程的安全性和可靠性[63]。高温超导电缆工程主要采用液氮温区的大型制冷机，相关产品在我国长期依赖进口，自主可控方面的“瓶颈”效应明显[64]。另外，国际高温超导电缆工程采用的制冷机技术指标（见表2），相较2002年提出的目标值仍有不小的差距。制冷机的技术理论较为成熟，无法实现预期的技术指标，主要原因是制冷机产业没有形成规模。

（三）降低工程整体造价

高温超导电缆工程的造价成本主要涉及高温超导电缆本体、制冷系统、控制系统等。高温超导电缆经过多年发展成本已有明显下降，但仍远高于传

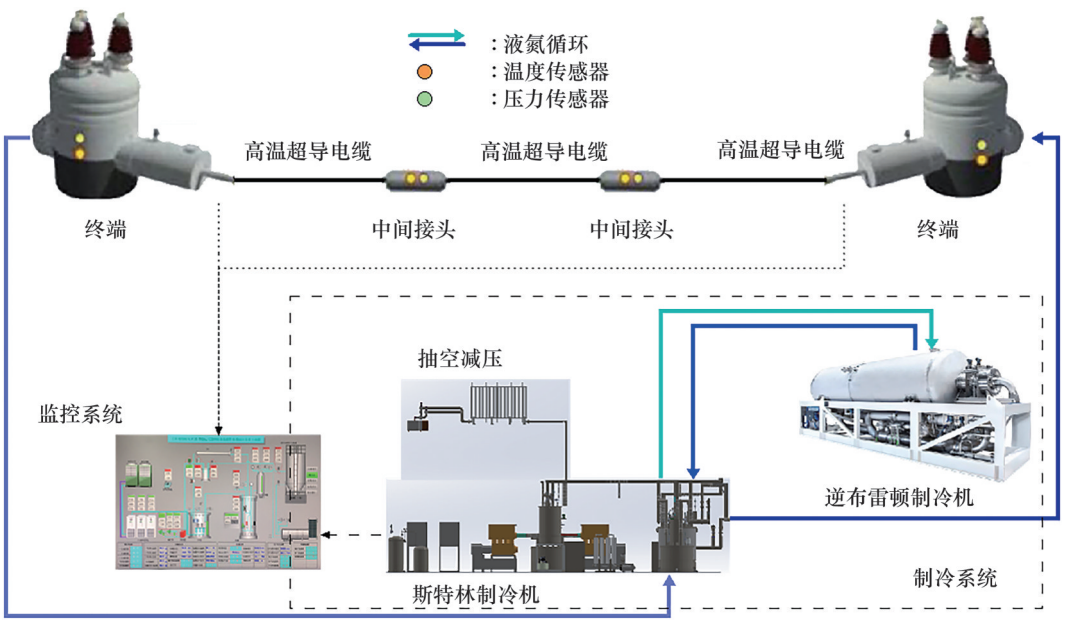

图8　上海市某高温超导电缆工程液氮制冷系统

表2　国际高温超导电缆工程中制冷机技术指标

厂商	类型和型号	冷量/kW	相对卡诺效率/%	免维护时间/h
法国液化空气集团	逆布雷顿，TBF175	9.5	16.01	43 800
日本大阳日酸株式会社	逆布雷顿，NeoKelvin	10	19.33	35 040
日本前川制作所	逆布雷顿，BratonNeO	5.1	26.94	30 000
斯特林低温有限公司	斯特林，SPC-4	3.6	25.71	6000

统电缆（约是交联聚乙烯电缆的10倍）。高温超导电缆本体的成本取决于高温超导带材。高温超导带材当前的批量生产价格约为150~200美元/(kA·m)，而高温超导带材大规模应用于电力行业的成本临界点仅是50美元/(kA·m)[65]。制冷系统成本主要取决于制冷机，而制冷机成本短期内没有下降迹象；推动大型制冷机技术国产化、产品型号标准化、市场销售规模化后，相关成本才有明显的降低空间[65]。控制系统约占高温超导电缆工程整体造价的10%，智能化、模块化、标准化是后续降本增效研究的重要方向。

（四）与传统电网设施的耦合

现有的电网结构与设施主要基于传统的电缆技术特性构建，因而引入高温超导电缆后存在通道设计、容量分配、变电站建设和调度控制等方面的耦合问题。现有的电网地下通道建设主要反映散热、防火的需求，而对高温超导电缆大伸缩补偿、冷媒通道（尤其是大长度工程中的冷媒中继）等的需求考虑不足。现有的大容量变电设备一般没有专门的大电流引出接口，变电站内也没有用于连接高温超导电缆的大电流仓位。在电网调度控制方面，现有的调度系统主要考虑发电站、电网、储能的运行情况，用户负荷的预测情况，鲜有关于输电设备（电缆）运行情况的数据。高温超导电缆在传统电缆电气量数据的基础上，增加了冷媒（液氮）的非电气量数据，为实时精准观测电缆健康状态、调节电缆输电能力创造了条件。与电网调度系统的深度耦合，将进一步发挥高温超导电缆输电系统的智能化优势。

（五）形成收益共享机制

当前，高温超导电缆工程建设成本仍然明显高于传统电缆，尤其是在固定资产采购成本方面，这部分成本一般由电网运营企业承担。尽管高温超导电缆可以有效节约地下管廊空间等宝贵资源，但电网运营企业在一定程度上仍缺乏推广应用的动力。面向高温超导电缆工程的高性能、高投入特点，短期内可由政策性资金提供支持，以示范工程形式推进高温超导电缆应用，展示高温超导电缆工程优势，或由化工、冶金等大型用户采购，用于自有微电网建设，实现受益主体与投资主体相统一；长远考虑，应积极探索覆盖电网、市政、用户等的新型收益共享机制，更好推动高温超导电缆的工程应用与产业发展。

六、高温超导电缆产业发展建议

高温超导电缆可以赋能电网并构建绿色节能的“超级动脉”，赋能数据中心和新能源产业并促进提质增效，也将带动整个高温超导产业的稳健发展，促成战略方向上的创新技术群。经过数十年的发展积累，超导材料、制冷设备、超导电缆制备、工程施工、运行维护等高温超导电缆产业要素取得了明显进步，电网建设、大用户供电、新型电力应用供电等高温超导电缆应用场景不断涌现。高温超导电缆的发展也带动了高温超导带材在高温超导磁体、紧凑型可控核聚变、高温超导电机等方面的应用水平；大型制冷机得益于LNG运输领域的需求牵引开始降低价格，国内的相关产品研制也在稳步推进。

高温超导材料技术是高温超导电缆产业发展的基础要素，需继续研究高温超导材料制造工艺，以技术进步降低材料成本、改善工程应用性价比。协同推进高温超导电缆、可控核聚变、高温超导磁体等应用研究，形成“横向协调、纵向深化”的产业发展环境。高温超导基础理论方面仍有较大的发展空间，需把握前沿并深入研究，更好支撑新型高温超导材料开发。

大型制冷机是高温超导电缆产业的关键部件。

需加大国产化研发投入，尽快构建大冷量、高效率、高可靠、长寿命制冷机的自主技术体系。扩大国产大型制冷机在高温超导、气体液化、LNG运输等领域的应用范围，驱动制冷技术的迭代升级。

深化基于高温超导电缆的多类型综合能源系统应用研究。高温超导电缆是集成电力输送、制冷维持、智能监控的综合系统，进一步与LNG输运场景形成冷能耦合[66]，与空分设备进行冷能、电能的交互，与数据中心开展信息、能源的交互，有望显著降低高温超导电缆工程的整体能量损耗，凸显节能降碳的固有优势。

建议实施积极的产业政策，支持高温超导电缆在城市电网中推广应用，为大型城市高质量发展筑牢电力供应基础。探索高温超导电缆在新技术领域的应用，从城市规划、土地开发等角度探索工程建设新机制，形成收益共享新模式。形成市场需求与产业技术互促的发展格局，推动高温超导电缆产业高质量发展。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: January 5, 2024; **Revised date:** July 19, 2024

Corresponding author: Han Yunwu is a senior engineer from Shanghai International Superconducting Technology Co., Ltd. His major research field is industrialization application technology of high-temperature superconducting cable. E-mail: hanyunwu@secri.com

Funding project: Shanghai Special Project for Promoting High Quality Industrial Development (沪 PT-2023-001); Shanghai 2023 Science and Technology Innovation Action Plan Project (23511102100)

参考文献

[1] United States Department of Energy Office of Electric Transmission and Distribution. “Grid 2030”: A national vision for electricity’s second 100 years [R]. Washington DC: United States Department of Energy Office of Electric Transmission and Distribution, 2003.

[2] Masuda T, Ashibe Y, Watanabe M, et al. Development of a 100 m, 3-core 114 MVA HTSC cable system [J]. Physica C: Superconductivity, 2002, 372: 1580–1584.

[3] Ryu K S, Jo Y S, Park M. Overview of the development of the advanced power system by the applied superconductivity technologies programme in Korea [J]. Superconductor Science and Technology, 2006, 19(3): S102–S108.

[4] Paasi J, Herrmann P F, Verhaege T, et al. Superconducting power link for power transmission and fault current limitation [J]. Physica C: Superconductivity, 2001, 354(1/2/3/4): 1–4.

[5] Allais A, West B, Frentzas F, et al. Recent superconducting cable installation in Chicago paves the way for a resilient electric grid (REG) [C]. Rome: 27th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2023), 2023.

[6] Prusseit W, Bach R. The Munich superlink project [J]. Transformers Magazine, 2021, 8(S5): 38–43.

[7] Allais A, Saugrain J M, West B, et al. SuperRail—World-first HTS cable to be installed on a railway network in France [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2024, 34(3): 1–7.

[8] Lee C, Son H, Won Y, et al. Progress of the first commercial project of high-temperature superconducting cables by KEPCO in Korea [J]. Superconductor Science Technology, 2020, 33(4): 044006.

[9] Mimura T, Masuda T, Yaguchi H, et al. Recent progress of the high-temperature superconducting cable project in Japan [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1293(1): 012066.

[10] 国网上海市电力公司. 超导电缆在城市电网中的应用 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2021.
State Grid Shanghai Electric Power Company. Application of superconducting cables in urban power grid [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2021.

[11] McCall J. 超级安全电网(SSG)技术 [J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(12): 8–10, 15.
Mccall J. Secure super grids [J]. Power System and Clean Energy, 2009, 25(12): 8–10, 15.

[12] 马国栋. 电线电缆载流量 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
Ma G D. Ampacity of wire & cable [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003.

[13] 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.

[14] Gouge M J, Demko J A, McConnell B W, et al. Cryogenics assessment report [R]. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory, 2002.

[15] Han Y W, Zong X H, Xie W. Cooling system for China’s 35 kV/2.2 kA/1.2 km high-temperature superconducting cable achieves two-year successful operation [J]. Superconductivity, 2024, 10: 100100.

[16] Huang Y H, Wang B, Zhou S H, et al. Modeling and experimental study on combination of foam and variable density multilayer insulation for cryogen storage [J]. Energy, 2017, 123: 487–498.

[17] Wang B, Huang Y H, Li P, et al. Optimization of variable density multilayer insulation for cryogenic application and experimental validation [J]. Cryogenics, 2016, 80: 154–163.

[18] Neumann H. Concept for thermal insulation arrangement within a flexible cryostat for HTS power cables [J]. Cryogenics, 2004, 44(2): 93–99.

[19] Dye S A, Tyler P N, Mills G L, et al. Wrapped multilayer insulation design and testing [J]. Cryogenics, 2014, 64: 100–104.

[20] Adachi K, Ohnishi H, Hironaga R, et al. Design of 22 kV 10 kA HTS triaxial superconducting bus [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(4): 1–4.

[21] 姚同路, 吴伟, 杨勇, 等. “双碳”目标下中国钢铁工业的低碳发展分析 [J]. 钢铁研究学报, 2022, 34(6): 505–513.
Yao T L, Wu W, Yang Y, et al. Analysis on low-carbon development of China’s steel industry under “dual-carbon” goal [J]. Jour-

nal of Iron and Steel Research, 2022, 34(6): 505–513.

[22] 王文, 罗秋菊, 吴学渊, 等. 雄安城市计算中心中压AC直转通信DC+磷酸铁锂电池储能系统的应用探索 [J]. 建筑科学, 2023, 39(1): 84–92.
Wang W, Luo Q J, Wu X Y, et al. Application exploration of medium voltage AC direct communication DC+lithium iron phosphate battery energy storage system in Xiongan Urban Computing Center [J]. Building Science, 2023, 39(1): 84–92.

[23] 韩正英, 曹樱. 再生铝应用与发展前景分析 [J]. 有色金属加工, 2023, 52(3): 6–7, 17.
Han Z Y, Cao Y. Analysis on application and development prospect of recycled aluminum [J]. Nonferrous Metals Processing, 2023, 52(3): 6–7, 17.

[24] 光伏发电直流接入电解铝生产用电获重大突破 [J]. 铝加工, 2023 (3): 43.
Significant breakthrough in direct current connection of photovoltaic power generation to electrolytic aluminum production [J]. Aluminum Fabrication, 2023 (3): 43.

[25] 邱传武. 600 kA大型铝电解槽稳定运行实践分析 [J]. 有色冶金节能, 2019, 35(4): 31–36.
Qiu C W. Practice analysis on stable operation of large aluminum electrolytic cell with 600 kA [J]. Energy Saving of Nonferrous Metallurgy, 2019, 35(4): 31–36.

[26] 张琨, 王旋. 降低铝电解槽母线系统压接压降的探讨 [J]. 有色冶金节能, 2018, 34(2): 18–22.
Zhang K, Wang X. Discussion on reducing contact voltage of aluminum reduction cells busbar system [J]. Energy Saving of Nonferrous Metallurgy, 2018, 34(2): 18–22.

[27] 曹志成, 桂卫华, 谢永芳. 超导电缆在铝电解系列上的应用 [J]. 中国科技信息, 2011 (19): 100, 102.
Cao Z C, Gui W H, Xie Y F. Application of superconducting cable in aluminum electrolysis series [J]. China Science and Technology Information, 2011 (19): 100, 102.

[28] 陈颖. 电解水制氢技术的研究现状及未来发展趋势 [J]. 太阳能, 2024 (1): 5–11.
Chen Y. Research status and future development trend of hydrogen production by water electrolysis [J]. Solar Energy, 2024 (1): 5–11.

[29] 李政, 陈思源, 董文娟, 等. 碳约束条件下电力行业低碳转型路径研究 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12): 3987–4000.
Li Z, Chen S Y, Dong W J, et al. Low carbon transition pathway of power sector under carbon emission constraints [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 3987–4000.

[30] 高赐威, 张亮. 电动汽车充电对电网影响的综述 [J]. 电网技术, 2011, 35(2): 127–131.
Gao C W, Zhang L. A survey of influence of electrics vehicle charging on power grid [J]. Power System Technology, 2011, 35(2): 127–131.

[31] 朱继忠, 何晨可, 陈婧韵, 等. 综合能源系统环境下电动汽车充换电设施规划综述 [J]. 南方电网技术, 2022, 16(1): 14–32.
Zhu J Z, He C K, Chen J Y, et al. Overview of electric vehicle charging and swapping facilities planning under the environment of integrated energy system [J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(1): 14–32.

[32] 杨亚璨, 宾涛. 电动汽车集中型充电站选址定容模型 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2024 (3): 204–212.
Yang Y Z, Bin T. Electric vehicle centralized charging station siting and capacity modeling [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2024 (3): 204–212.

[33] 薛飞, 雷宪章, 张野飚, 等. 电动汽车与智能电网从V2G到B2G的全新结合模式 [J]. 电网技术, 2012, 36(2): 29–34.
Xue F, Lei X Z, Zhang Y B, et al. A brand-new approach of connecting electrical vehicles with smart grid from vehicle-to-grid mode to battery-to-grid mode [J]. Power System Technology, 2012, 36(2): 29–34.

[34] Tomita M, Fukumoto Y, Suzuki K, et al. Development of prototype DC superconducting cable for railway system [J]. Physica C: Superconductivity and Its Applications, 2010, 470: 1007–1008.

[35] Tomita M, Fukumoto Y, Ishihara A, et al. Train running test transmitted by superconducting feeder cable and study as an example of line in Japan and France [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2020, 30(2): 1–7.

[36] 徐龙威, 孙媛媛, 马钊, 等. 低压直流供用电系统电压等级研究 [J]. 供用电, 2022, 39(8): 1–14.
Xu L W, Sun Y Y, Ma Z, et al. Study on voltage level in low voltage direct current supply and utilization system [J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(8): 1–14.

[37] 郑健, 宗曦华, 韩云武. 超导电缆在电网工程中的应用 [J]. 低温与超导, 2020, 48(11): 27–31, 50.
Zheng J, Zong X H, Han Y W. Application of superconducting cable in power grid [J]. Cryogenics & Superconductivity, 2020, 48(11): 27–31, 50.

[38] Sinha U K, Lindsay D T, Hughey R L, et al. Development and test of world's first industrial high temperature superconducting (HTS) power cable [C]. Columbus: 2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2001.

[39] Weber C S, Reis C T, Dada A, et al. Overview of the underground 34.5 kV HTS power cable program in Albany, NY [J]. IEEE Transactions on Appiled Superconductivity, 2005, 15(2): 1793–1797.

[40] Demko J A, Nielsen C T, Sauers I, et al. Triaxial HTS cable for the AEP bixby project [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2007, 17(2): 2047–2050.

[41] Maguire J, Folts D, Yuan J, et al. Development and demonstration of a fault current limiting HTS cable to be installed in the con Edison grid [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2009, 19(3): 1740–1743.

[42] Maguire J F, Schmidt F, Hamber F, et al. Development and demonstration of a long length HTS cable to operate in the long island power authority transmission grid [J]. IEEE Transactions on Appiled Superconductivity, 2005, 15(2): 1787–1792.

[43] Wang Z, Lyu Z N, Yu P, et al. Research status of high temperature superconducting power cable [C]. Changchun: 2022 IEEE International Conference on Electrical Engineering, Big Data and Algorithms (EEBDA), 2022.

[44] Mukoyama S, Yagi M, Yonemura T, et al. Model cable tests for a 275 kV 3 kA HTS power cable [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2011, 21(3): 976–979.

[45] Yamaguchi S, Ivanov Y, Watanabe H, et al. Construction and 1st experiment of the 500 meter and 1000 meter DC superconducting

power cable in Ishikari [J]. Physics Procedia, 2016, 81: 182–186.

[46] Tixador P. Development of superconducting power devices in Europe [J]. Physica C: Superconductivity and Its Applications, 2010, 470(20): 971–979.

[47] Herzog F, Kutz T, Stemmle M, et al. Cooling unit for the Ampa City project—One year successful operation [J]. Cryogenics, 2016, 80: 204–209.

[48] 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): 3343334.

[49] Jiang G Y, Zhao Y, Zhu J M, et al. Recent development and mass production of high J e 2G-HTS tapes by using thin hastelloy substrate at Shanghai superconductor technology [J]. Superconductor Science and Technology, 2020, 33(7): 074005.

[50] 韩云武, 黄逸佳, 陈志越, 等. 真空容器用的间隔条: CN111412384A [P]. 2020-07-14.
Han Y W, Huang Y J, Chen Z Y, et al. Spacer bars for vacuum packagings: CN111412384A [P]. 2020-07-14.

[51] 张大义, 王天龙, 田祥, 等. 一种超导电缆冷缩补偿机构、方法和超导电缆系统: CN116130165B [P]. 2023-06-27.
Zhang D Y, Wang T L, Tian X, et al. A superconducting cable cold shrink compensation mechanism, method and superconducting cable system: CN116130165B [P]. 2023-06-27.

[52] Li J Q, Tan J, Zha R, et al. Investigation of a coaxial stirling-type pulse tube cryocooler with the cooling capacity of 600 W at 77 K [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 502: 012032.

[53] Xue R J, Tan J, Zhao B J, et al. Thermodynamic characteristics of a single-stage stirling-type pulse tube cryocooler capable of 1220 W at 77 K with two cold fingers driven by one linear compressor [J]. Energy, 2023, 278: 127968.

[54] 徐坤, 于天刚, 蔡俊杰, 等. 常规路径公里级35 kV高温超导电缆的牵放施工 [J]. 建筑施工, 2022, 44(3): 572–575.
Xu K, Yu T G, Cai J J, et al. Conventional path kilometre level 35 kV high temperature superconducting cable traction construction [J]. Building Construction, 2022, 44(3): 572–575.

[55] 陈妍君, 邓孟华, 王斌, 等. 上海超导电缆继电保护策略及方案 [J]. 电力与能源, 2023, 44(4): 340–343, 363.
Chen Y J, Deng M H, Wang B, et al. Strategy and scheme of Shanghai superconducting cable relay protection technology [J]. Power & Energy, 2023, 44(4): 340–343, 363.

[56] 李洁, 刘宜平, 史越, 等. 标准化助力第二代高温超导带材产业化 [J]. 中国标准化, 2021 (S1): 87–93.
Li J, Liu Y P, Shi Y, et al. Standardization supports the industrialization of the second-generation high temperature superconducting taps [J]. China Standardization, 2021(S1): 87–93.

[57] Zhang X Z, Xie W, Zheng J, et al. Research on fault prediction and diagnosis of superconducting system based on deep learning [C]. Shenyang: 2021 IEEE 4th International Conference on Automation, Electronics and Electrical Engineering (AUTEEE), 2021.

[58] 侯波, 叶锋, 吴娟, 等. 35 kV/2 kA 高温超导电缆系统现场安装、调试和运行缺陷分析 [J]. 低温与超导, 2006, 34(4): 293–298.
Hou B, Ye F, Wu J, et al. The analysis of 35 kV/2 kA HTS cable system site installation, trial and operation fault [J]. Cryogenics & Superconductivity, 2006, 34(4): 293–298.

[59] 滕玉平, 肖立业, 戴少涛, 等. 10.5 kV/1.5 kA高温超导电缆绝缘设计及加工 [J]. 电线电缆, 2005 (2): 19–21, 24.
Teng Y P, Xiao L Y, Dai S T, et al. Design and process of the insulation system for a 10.5 kV, 1.5 kA HTS cable [J]. Wire & Cable, 2005 (2): 19–21, 24.

[60] 魏东, 宗曦华, 徐操, 等. 35 kV 2000 A低温绝缘高温超导电力电缆示范工程 [J]. 电线电缆, 2015 (1): 1–3, 5.
Wei D, Zong X H, Xu C, et al. Demonstration project of 35 kV 2000 A cold dielectric high temperature superconductive power cable system [J]. Wire & Cable, 2015 (1): 1–3, 5.

[61] Zong X H, Han Y W, Huang C Q. Introduction of 35 kV kilometer-scale high-temperature superconducting cable demonstration project in Shanghai [J]. Superconductivity, 2022, 2: 100008.

[62] 陈妍君, 邓孟华, 周佳卿, 等. 备自投装置在上海超导电缆中的应用 [J]. 电气应用, 2022, 41(7): 17–21.
Chen Y J, Deng M H, Zhou J Q, et al. Application of automatic switchover device in superconducting cable project in Shanghai [J]. Electrotechnical Application, 2022, 41(7): 17–21.

[63] 毕延芳, 洪辉, 信赢. 高温超导电力应用的低温冷却系统及制冷机 [J]. 中国科学: 技术科学, 2013, 43(10): 1101–1111.
Bi Y F, Hong H, Xin Y. Cryogenic cooling system and refrigerator for high temperature superconducting power application [J]. Scientia Sinica Technologica, 2013, 43(10): 1101–1111.

[64] 刘立强. 大型氦低温制冷机研制进展 [J]. 真空与低温, 2020, 26(6): 471–475.
Liu L Q. Development of large helium cryo-plants [J]. Vacuum and Cryogenics, 2020, 26(6): 471–475.

[65] 李威. 高温超导体发展前景 [J]. 世界科学, 2023 (8): 11–13.
Li W. Development prospect of high temperature superconductors [J]. World Science, 2023 (8): 11–13.

[66] 张国民, 陈建辉, 邱清泉, 等. 超导直流能源管道的研究进展 [J]. 电工技术学报, 2021, 36(21): 4389–4398, 4428.
Zhang G M, Chen J H, Qiu Q Q, et al. Research progress on the superconducting DC energy pipeline [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(21): 4389–4398, 4428.