

储热储冷多场景应用专刊



储热储冷技术全球发展态势分析

汤 匀^{1,2}, 朱书骏³, 柯旺松⁴, 周 洪^{1,2}, 陈 伟^{1,2,5,6}

(¹中国科学院武汉文献情报中心, 湖北 武汉 430071; ²科技大数据湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430071; ³中国科学院工程热物理研究所, 北京 100190; ⁴国网湖北省电力有限公司信息通信公司, 湖北 武汉 430077; ⁵中国科学院大学经济与管理学院, 北京 100190; ⁶中国科学院科技战略咨询研究院, 北京 100190)

摘要: 储热储冷技术是实现能源时空转移、提升系统灵活性与效率的关键技术, 对推动能源转型与工业建筑脱碳至关重要。本文通过分析全球主要国家/地区的战略布局、技术分类特点、2016—2025年专利态势及典型应用场景, 系统揭示了该技术的发展规律。研究发现: 全球已形成战略共识, 但发展路径各具特色, 美国侧重市场驱动, 欧盟强化法规引导, 中国则以国家工程推动规模化发展; 技术层面, 显热、潜热与热化学储热各具优势且互补发展; 专利分析表明, 中国在申请总量上占优, 但高价值专利占比偏低, 技术研发聚焦于系统载体、材料性能与应用场景三大热点; 技术应用已深度渗透电力、工业、建筑等领域, 并拓展至数据中心等特殊场景, 价值实现路径清晰。综上, 储热储冷技术是实现碳中和目标的关键支撑, 未来应重点突破材料瓶颈、深化系统集成、创新商业模式, 以加速其商业化进程。

关键词: 储热储冷; 专利分析; 应用场景; 技术发展; 能源转型

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.1176

中图分类号: G 350

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 03-1119-15

An analysis of global development trends in thermal energy storage technology

TANG Yun^{1,2}, ZHU Shujun³, KE Wangsong⁴, ZHOU Hong^{1,2}, CHEN Wei^{1,2,5,6}

(¹National Science library (Wuhan), Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, Hubei, China; ²Hubei Key Laboratory of Big Data in Science and Technology, Wuhan 430071, Hubei, China; ³Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; ⁴State Grid Hubei Information and Communication Company, Wuhan 430077, Hubei, China; ⁵School of Economics and Management, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; ⁶Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)

Abstract: Thermal energy storage (TES) technology is a key enabler for spatiotemporal energy transfer and for enhancing the flexibility and efficiency of energy systems, playing a crucial role in advancing the energy transition and decarbonizing industrial and building sectors. This study systematically reveals the development patterns of TES by analyzing global strategic layouts, technical classifications, patent trends from 2016 to 2025, and typical

收稿日期: 2025-12-30; 修改稿日期: 2026-01-31。

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项“煤炭清洁燃烧与低碳利用”战略研究与专项总体课题(XDA29010500), 中国科学院文献情报能力建设专项“基于智能分析模型的能源领域重大科技问题研究”(E4KZ471001), 中国科学院特别研究助理项目(E1KZ141001)。

第一作者: 汤匀(1990—), 女, 博士, 副研究员, 研究方向为能源战略情报研究, E-mail: tangy@mail.whlib.ac.cn; 通信作者: 陈伟, 研究馆员, 研究方向为情报理论与应用、先进能源科技情报研究, E-mail: chenw@mail.whlib.ac.cn。

引用本文: 汤匀, 朱书骏, 柯旺松, 等. 储热储冷技术全球发展态势分析[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(3): 1119-1133.

Citation: TANG Yun, ZHU Shujun, KE Wangsong, et al. An analysis of global development trends in thermal energy storage technology[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(3): 1119-1133.

application scenarios. The findings indicate that a global strategic consensus has been reached, albeit with distinct national pathways: the United States focuses on market-driven mechanisms, the European Union strengthens regulatory guidance, while China promotes large-scale deployment through national engineering projects. Technologically, sensible, latent, and thermochemical heat storage each possess unique advantages and exhibit complementary development. Patent analysis reveals that China leads in the total number of patent applications but holds a lower proportion of high-value patents. R&D activities are concentrated in three main areas: system architecture, material and performance innovation, and application scenario expansion. TES applications have been widely adopted in sectors such as power systems, industry, and buildings, and are extending to emerging areas like data centers, demonstrating clear value realization pathways. In conclusion, TES is a critical technology for achieving carbon neutrality, and future efforts should prioritize breakthroughs in material science, deeper system integration, and innovative business models to accelerate its commercialization.

Keywords: thermal energy storage; patent analysis; application scenarios; technology development; energy transition

热储能技术是指将热能以显热、潜热或热化学等形式储存,并在需要时释放的技术。该技术覆盖了从低温到高温的宽广区间,在能源、工业及建筑等领域的跨季节储热场景中应用广泛。国际能源署(IEA)在《电力 2025》^[1]报告中强调热,热能存储与氢能同为提供长周期灵活性的关键技术,对提升高比例可再生能源电力系统的适应能力至关重要。其另一份报告《工业低温热能电气化是否具有竞争力》^[2]中也指出,工业低温热的电气化,结合热泵与储热技术,已成为全球工业和建筑脱碳的重要路径;储热系统被视为工业余热回收、电网调峰及分布式热管理等多个应用场景的关键技术组成。为此,针对多应用场景的不同温度热能需求,开发多温区、高性能的材料体系,不仅是实现储热储冷系统集成创新的核心基础,更是大幅提升整体能源利用效率、降低脱碳成本,并最终推动可再生能源成为主力热源的关键技术突破口。基于此,本文首先梳理全球主要国家/地区的战略规划,进而分析储热储冷技术的分类及特点,随后通过专利数据揭示技术研发态势,最后探讨其在各领域的典型应用场景,旨在全面呈现该技术的发展规律与未来趋势。

1 全球主要国家/地区储热储冷战略规划布局

当前,在全球应对气候变化与保障能源安全的

双重目标下,储热储冷领域正进入多元技术路线并行推进、应用场景加速扩张的关键阶段。供热与制冷的脱碳进程对实现净零排放目标具有重要影响,此外热储能能够在电力、工业和建筑等终端用能领域显著提升系统灵活性,促进高比例可再生能源消纳与季节性用能平衡,是构建新型能源体系的重要支撑技术之一。在此背景下,全球主要经济体围绕材料、装备、系统、场景开展全方位布局,储热储冷已逐步从辅助技术走向能源系统深度脱碳的核心环节,图1为储热储冷技术全球主要国家/地区战略布局。

1.1 美国

美国储热储冷战略正从研发扶持向规模化商业部署加速演进,其核心是通过政策激励与市场机制双重驱动,将储热确立为构建低成本、高可靠清洁电网的关键支柱。在战略规划层面,2021年7月,美国能源部提出“长时储能攻关”计划^[3],目标是在未来十年内,将数百吉瓦的清洁能源引入电网,将储能时间超过10小时的系统成本降低90%。该计划强调储热等多元技术路线,涵盖熔融盐、相变材料、热化学储热、地质储热(GeoTES)等,并视其为实现2035年100%清洁电力目标的关键支撑。2022年5月,美国能源部宣布根据《两党基础设施法案》拨款,四年内共资助5.05亿美元,专门用于长时储能技术开发与示范,储热技术被列为重点支持方向之一^[4]。该法案支持包括“阿拉斯加铁路带

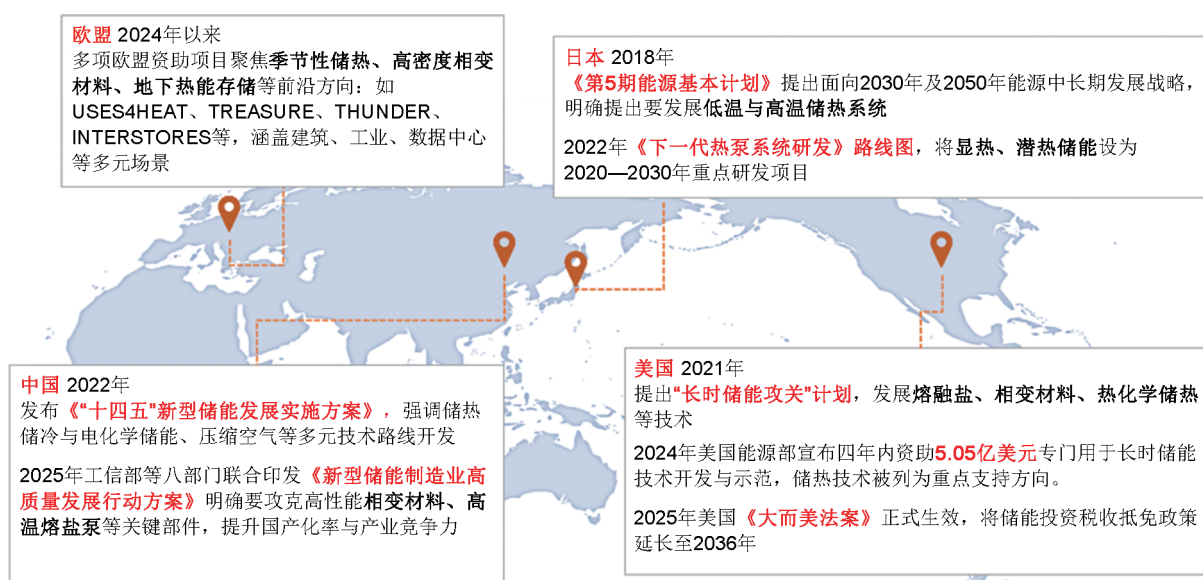


图1 储热储冷技术全球主要国家/地区战略布局

Fig. 1 Strategic landscape of thermal energy storage and cooling technology in major countries/regions worldwide

热泵储能项目(POLAR)”^[3]等在内的多个储热示范项目，推动跨季节与高寒地区储热技术落地。2024年2月，美国能源部(DOE)再次通过《两党基础设施法案》拨款7500万美元，专门支持七个前沿的长时储能示范项目，其中多个聚焦储热技术，旨在验证其在真实电网环境中的经济性与可靠性。2025年美国《大而美法案》正式生效，将储能投资税收抵免政策延长至2036年，明确储热储冷项目可享受最高达40%的投资税收抵免，为商业示范与规模化部署提供长期政策窗口。在应用规模与技术示范方面，美国正从单一的光热发电配套，向多元电网服务与工业应用快速拓展。据美国能源部2024年发布的报告，全美已规划和在运的非抽水蓄能长时储能项目中，储热技术占比显著，其中熔融盐储热技术因在已投运光热电站(如新月沙丘、伊万帕)中的成熟应用，成为当前部署的主力。

1.2 欧盟

欧盟的储热储冷战略以系统集成与供热脱碳为核心导向，正从鼓励性政策转向带有强制性目标的法规驱动，旨在构建一个高度一体化、可再生能源主导的区域能源系统。欧盟的战略实施具有鲜明的法规与市场双轮驱动特征。在《欧洲绿色协议》和“REPowerEU”计划的框架下，2024年生效的《建筑能效指令(EPBD)》修订案要求所有新建筑从2030年起实现零碳排放，并大力推动现有建筑改造，

这为建筑集成储热储冷系统创造了巨大的强制性市场。在项目资助方面，2024年以来多项欧盟资助项目聚焦季节性储热、高密度相变材料、地下热能存储等前沿方向，如 USES4HEAT^[4]、TREASURE、THUNDER、INTERSTORES等^[5]，涵盖建筑、工业、数据中心等多元场景；而欧洲能源研究联盟(EERA)则通过储热联合计划(Joint Programme on Thermal Energy Storage)^[6]，联合产学研资源，推进储热材料、系统集成与标准制定，目标是到2030年实现大规模商业化部署。在应用规模上，欧盟凭借全球领先的区域供热网络，已成为大规模跨季节储热技术的领导者。根据欧洲供热与制冷协会(Euroheat & Power)2024年报告，欧盟范围内已投入运营的大型跨季节储热项目超过50个，总储热容量持续增长。

1.3 日本

日本的储热储冷战略紧密围绕能效极限提升与分布式能源管理展开，其特点是以精细化标准引领市场，以技术创新应对资源约束，最终服务于全社会的深度脱碳与能源安全。日本战略实施依赖“国家目标-研发路线图-行业标准”协同体系。早在2018年日本颁布《第5期能源基本计划》^[7]，提出了面向2030年及2050年的能源中长期发展战略，将储热列入实现2030年温室气体减排26%、2050年减排80%的关键技术之一，明确提出要发

展低温与高温储热系统，以提升供热灵活性和峰谷调节能力。与此配套，日本新能源产业技术综合开发机构(NEDO)发布《下一代热泵系统研发》路线图^[8]，将显热储存、潜热储存、化学储能划分为2020—2030年的重点研发项目，目标在2030年实现小型高温蓄热与多温度型蓄热的商业化。行业组织如日本热泵与储热中心(HPTCJ)则致力于制定和推广储热储冷与热泵系统集成与技术标准，以规范市场、引导消费^[9]。在应用规模上，日本侧重于在商业建筑和分布式能源节点中大规模部署中小型储冷储热装置。根据日本冷冻空调工业协会(JRAIA)2024年统计数据，冰蓄冷、水蓄热等系统在新建大型商业综合体中的渗透率已超过40%。

1.4 中国

中国的储热储冷战略体现为国家工程驱动与全产业链培育的规模化发展路径，核心目标是通过快速的技术迭代和成本下降，使其成为支撑新型电力系统与工业节能的确定性基础设施。中国的战略推进呈现“顶层规划-重大示范-产业政策”联动效应。继2022年《“十四五”新型储能发展实施方案》^[10]强调储热储冷与电化学储能、压缩空气等多元技术路线并重以来，2024年国家能源局进一步

组织“熔盐储热辅助煤电灵活性改造”试点项目，探索将传统煤电机组转变为深度调峰与备用电源的新模式。2025年工业和信息化部等八部门联合印发《新型储能制造业高质量发展行动方案》^[11]，明确从制造端发力，攻克高性能相变材料、高温熔盐泵等关键部件，提升国产化率与产业竞争力。此外，作为国家战略科技力量，中国科学院率先布局并持续推动储热储冷领域的核心技术研发与集成示范。特别是通过部署“战略性先导科技专项”，组织下属工程热物理研究所、过程工程研究所等优势单位，在高温储热材料、系统集成及工程应用方面取得了一系列突破性成果，为我国在该领域的战略布局提供了坚实的科技支撑。在应用规模上，中国已成为全球光热发电配套储热和清洁供暖储热最大的增量市场。根据国家能源局2024年一季度新闻发布会数据，全国已建成太阳能热发电项目总装机约590 MW，均配置4小时以上熔盐储热系统；位于青海、甘肃等地的多个吉瓦级光热光伏一体化基地正在建设中。在北方清洁供暖领域，基于固体电蓄热、相变材料等技术的储热项目已推广至数百万户居民。

全球主要国家/地区储热储冷典型应用案例如表1所示。

表1 全球主要国家/地区储热储冷典型应用案例

Table 1 Typical application cases of thermal energy storage technology in major countries/regions worldwide

国家/地区	项目/地区	关键技术	创新点
美国	新月沙丘(Crescent Dunes)光热电站 ^[12]	采用熔盐作为传热和储热介质，实现超过10小时的储热时长	美国首个商业化运行的熔盐塔式光热电站
丹麦	Hyme 熔融氢氧化盐储能厂 ^[13]	开发以熔融氢氧化盐作为储热介质的蒸汽发生器，利用可再生能源加速实现去碳化	全球首座熔融氢氧化盐储能厂
丹麦	Vojens 池式储热系统 ^[14]	大型地下水池储热(200000 m ³)，配合70000 m ² 平板集热器，形成跨季节的太阳能热供给，年供热量约49 MWth	全球规模最大的池式储热设施
荷兰	Eindhoven 大型地下热储存 ^[15]	采用“罐中罐”的双罐设计理念，实现跨季度储热	全球规模最大的地下热能储存系统之一
加拿大	加拿大Drake Landing 住宅社区 ^[16]	采用季节性地下热能储存，将800块屋顶太阳能集热器通过地下37 m深的热井把热量储存在土壤中，冬季直接取用	北美首个大规模季节性储热示范项目，在2011—2012年获Energy Globe世界奖
澳大利亚	澳大利亚“恒星计划”虚拟电厂 ^[17]	通过智能控制，统一调度数万台电热水器的储热与用电时间	全球首个大规模将住宅热水器联网组成虚拟电厂
中国	中国辽河油田世界首座电热熔盐储能注汽试验站 ^[18]	采用独创研制的蒸汽发生系统，将综合效率从熔盐储能发电系统的35%提高到90%以上	世界首次将电热熔盐技术应用油田生产注汽系统
中国	甘肃酒泉瓜州70万千瓦“光热储能+”项目 ^[19]	采用能耐受565℃高温的熔盐作为储能介质，通过“光能热储”一体化模式，构成了一个总规模达70万千瓦清洁能源集群	全球首个“双塔一机”光热储能电站

2 储热储冷技术分类及技术特点

在全球战略共识与差异化路径的驱动下，储热储冷技术呈现出多元化的发展态势。要深入理解各国的战略布局与产业现状，首先需要对储热储冷的

技术路线及其特点进行系统梳理。典型储热技术主要可分为显热储热、潜热储热、热化学储热等^[20]，储冷技术与储热对应，同样分为显冷、潜冷和冷化学三类，以储热技术为例，各自适用于不同的场景并具有相应特点，总结如图2所示。

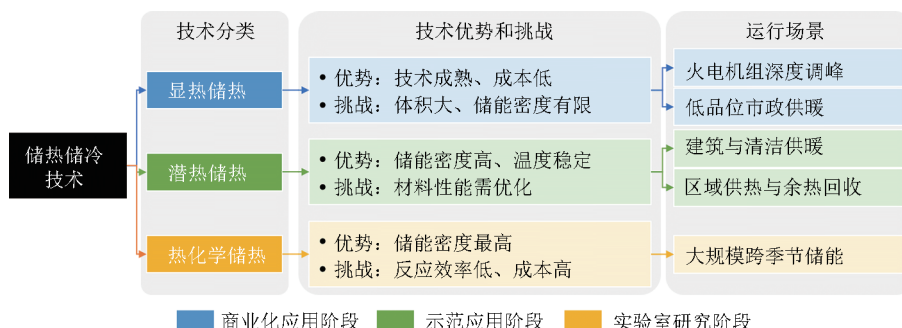


图2 典型储热储冷技术分类及特点

Fig. 2 Classification and characteristics of thermal energy storage technologies

2.1 显热储热技术

显热储热技术利用材料(如热水、熔盐、固体材料)的比热容和温度变化实现热量存储，过程中仅发生温度变化而无相变或化学反应，相对来说具有更低廉的成本及更高的技术成熟度。常见的储热介质包括液态(如水、导热油、熔盐、液态金属)和固态材料(如岩石、砂砾)。液态介质传热性能好但成本较高，固态介质则更适用于大规模应用。显热储热适用于技术成熟度要求高、成本敏感的短期储能场景(如小时至日周期)，例如火电机组深度调峰、低品位市政供暖等领域^[21]。

在火电机组深度调峰领域，典型技术包括热水罐和熔盐储热。热水罐和电极锅炉是最早应用于火电深度调峰的技术，已在多个电厂完成示范。该方式工艺简单、对原有系统改动小，但存在占地面积大等问题，同时储热温度较低导致释放热能难以满足高参数工业蒸汽需求，需与其他技术互补使用。熔盐储热技术通过高效储存和释放热能，显著提升机组的灵活性和调峰能力。典型应用的熔盐包括太阳盐(硝酸钠与氯化钠混合物)、HITEC盐(三元硝酸盐混合物)。在熔盐储热与火电机组耦合过程中，通过合理选择抽汽点和放热阶段抽取点，降低汽化潜热阶段的能量损失，提升往返效率。江苏国信靖江发电有限公司示范工程2022年12月投运，采用煤电机组耦合熔盐储热技术，最低发电负荷降至25%。宿州电厂2023年开工建设1110 MWh熔盐

储热项目，用于深度调峰。河北龙山电厂2024年12月投运全国首套600 MW机组抽汽熔盐储能项目，调峰能力达400 MWh，机组爬坡能力提升1.5倍^[22]。

在利用固体材料储热方面，目前较为成熟的技术路线包括填充床与蓄热砖储热等，这些技术自20世纪80年代起在欧美国家工程化应用，技术体系完善，尤其在低温太阳能和电锅炉领域已实现规模化应用。华电新疆发电有限公司在新疆昌吉地区建设安装的固体电蓄热机组即属于此类成熟技术，可实现深度调峰60 MW的电负荷^[23]。与之不同的是，固体颗粒技术路线目前被视为前沿技术方向，其来源广泛与成本低廉，且具有良好高温热稳定性，并与金属材料高度相容、无腐蚀性等特点，同时固体颗粒储热兼具放热稳定和储热温度高等优势，是极具有潜力的安全可靠、长时大容量的储热技术，但当前尚未完全商业化应用。

显热储热技术的主要局限性在于储能密度低且自放热问题突出。显热储热技术正朝着规模化、低成本化方向发展，未来将重点解决储能密度低和热损问题，同时探索新型复合材料(如纳米流体)以提升性能。

2.2 潜热储热技术(相变储热)

潜热储热技术利用相变材料在相变过程中吸收/释放热量，其储能密度高且温度近乎恒定。潜热储热技术可以进一步细分为以下类别^[24-25]：固-液

相变储热,通过材料的熔化与凝固过程储存/释放热量,是最常见的技术类型,典型材料包括石蜡类、盐类(如硝酸钠)等;固-固相变储热,通过晶体结构的有序-无序转变实现储热,避免液态相变材料的泄漏风险,典型材料包括某些高分子聚合物和金属合金;液-气相变储热,利用物质在气液相变时的潜热进行储热,但因需高压或低温条件,实际应用较少。潜热储热技术适合需要较高储能密度和稳定温度输出的中期储能场景(如小时至周周期)。在建筑节能领域,相变材料常与建筑材料(如墙体、地板)混合使用,利用其相变潜热特性增强围护结构的热惯性,以实现被动式温控。在太阳能跨季节储热领域,潜热储热系统被用于大规模太阳能供热项目,例如区域供暖或工业供热。在工业余热回收领域,结合高温热泵技术,将工业废水中的低温余热转化为高温蒸汽,提升能源利用率。

在建筑与清洁供暖领域,潜热储热已开展一系列工程示范。在中国科学院战略性先导科技专项的支持下,中国科学院过程工程研究所采用长寿命、高储热密度的水合盐相变材料,为北京冬奥会赛区山地建成小体积、模块化相变储热示范工程,有效解决了极寒气候下复杂结构山地建筑的清洁供暖储热难题^[26]。在区域供热与余热回收方面,英国伯明翰大学牵头建成世界首套利用复合相变材料的大型示范装置,用于消纳风电并供暖,验证了相变储热在低成本、大规模区域供热中的技术可行性,为后续商业化部署提供了重要参考^[27]。

总体看来,当前潜热储热技术正处于从工程示范向商业化过渡阶段,但整体技术成熟度仍低于显热储热。存在热损失大和材料成本问题。未来需重点突破材料成本优化、热稳定性提升及规模化系统集成。例如,开发复合相变材料以增强导热性,或结合人工智能优化系统控制策略^[28]。

2.3 热化学储热技术

热化学储热技术通过化学反应(如分解/合成)储存热量,储能密度较高,可实现远距离能量传输。常用的热化学储热技术采用不同类别的化学反应体系:金属氢氧化物体系,利用氢氧化物加热分解与水化合时的热效应进行储能;碱土金属氧化物/碳酸盐体系,通过氧化物与二氧化碳的可逆反应或氢氧化物分解反应实现储能。金属氢化物体系利用金属与氢气的可逆反应(如 Mg/H_2 体系)储存能量。热

化学储热具备高储能密度、低热损失、灵活温区调控的特点。主要适用场景针对大规模跨季节储能需求(日至月周期),尤其适用于中高温场景($573\sim 1473\text{ K}$)储能密度较高(可达显热储热的 $8\sim 10$ 倍),可实现常温无损存储,但工艺复杂、投资高^[29-30]。

目前热化学储热技术处于实验室研究阶段,尚未商业化,在工业余热回收、太阳能热发电昼夜连续供能、建筑供暖中的跨季节储能等场景下具备应用潜力,仍需解决反应效率、催化剂寿命等关键问题。前沿的研究方向包括掺杂(如 Li^+ 、 Na^+)、结构调控(多孔载体复合)提升循环稳定性、开发大规模固定床/流化床反应器等,解决传热效率瓶颈、与光伏、风电耦合,构建“可再生能源+TCES”一体化系统等^[31]。

3 储热储冷技术专利态势与研发热点分析

上述技术路线各具特色,其研发热度和商业化路径也引起了全球范围内的广泛竞争与布局。为了量化评估各类技术的发展现状与创新活力,本部分将利用专利数据进一步揭示其发展态势。通过 Incopat 专利数据库,获得了全球储热储冷技术相关专利数据集,数据采集时间段为 2016—2025 年,共得到相关专利 139100 条,经过简单同族合并后共 100155 项。

3.1 专利申请数量趋势分析

从储热储冷技术近十年专利申请数量的年度变化情况来看(图 3),2016—2025 年该领域专利申请量呈现“稳步增长—快速增长—波动调整”的发展态势,反映出技术从积累期向高速发展期演进,后期因技术成熟、市场因素或专利申请量存在一定的“滞后性”而出现阶段性调整,具体分析如下:

(1) 2016—2019 年,稳步增长阶段:这段时期全球专利申请量从 8500 项左右逐步增长至约 10000 项,年均增速平缓。这一阶段技术处于初步发展或积累期,研发投入和行业关注度逐步提升,但尚未形成大规模技术突破或市场爆发,专利数量增长相对温和,反映储热储冷技术仍在夯实基础、探索应用场景(如早期数据中心散热、工业余热回收等)。

(2) 2020—2023 年,快速增长阶段:这一时期全球申请量快速攀升至约 13000 项并维持高位,

年均增速显著加快, 凸显其在能源转型中的战略地位(如平抑可再生能源波动、提升系统能效), 吸引企业加大研发投入。

(3) 2024—2025年, 波动调整阶段: 这一阶段, 全球专利申请量2024年略降至约11500项, 2025年骤降至约4500项(需注意2025年数据可能受统计滞后性影响)。这一波动可能源于前期技术高速发展后, 核心技术趋于成熟, 专利申请从“增量创新”转向“存量优化”。同时, 受到经济环境、政策节奏变化(如部分区域储能补贴调整)可能导致研发投入短期收紧。

综上所述, 储热储冷技术近十年仍处于蓬勃发展阶段, 专利申请量的阶段性变化, 直观反映了该领域从“技术积累”到“产业爆发”再到“成熟调整”的发展脉络, 为预测未来技术方向和产业布局提供了关键参考。

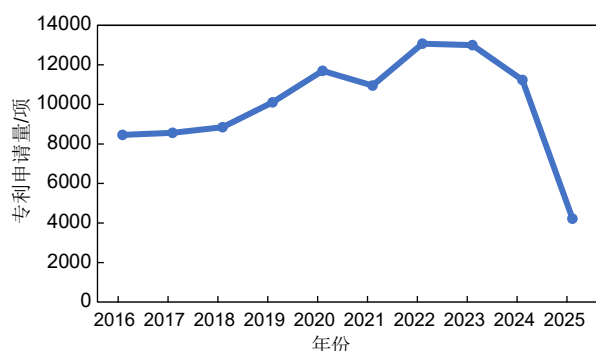


图3 2016—2025年储热储冷技术相关专利申请数量年度分布

Fig. 3 Annual distribution of patent application quantity related to thermal energy storage technology from 2016 to 2025

3.2 专利申请国家分布情况

2016—2025年全球储热储冷技术专利申请的国家分布呈现显著的不均衡性(图4), 反映出不同国家在技术研发、产业布局与市场驱动下的差异化特征。其分布格局可从总量规模、高价值专利占比两个维度展开分析。

(1) 从专利申请数量看, 中国以80453项的绝对优势位居全球首位, 是第二位日本(6014项)的13倍以上, 显示出中国在储热储冷技术研发中的规模优势。日本、韩国、美国分别以6014项、4532项、2723项位列第二至第四, 构成“第二梯队”; 德国(1512项)、法国(762项)及以下国家专利

数量均低于2000项, 属于“第三梯队”。这种分布与中国在“双碳”目标下的政策支持(如储能技术研发激励)、庞大市场规模(数据中心散热、工业余热回收等应用场景)以及企业研发投入增加密切相关, 体现了技术与产业需求的强关联性。

(2) 高价值专利数量与总专利数量的比值(高价值占比)是衡量技术质量的核心指标。数据显示, 中国高价值专利19855项, 占比约24.7%; 美国1502项, 占比约55.2%; 韩国1967项, 占比约43.4%; 日本1882项, 占比约31.3%。尽管中国专利总量领先, 但高价值占比低于美国、韩国、日本, 反映出中国在技术原创性和高端化方面仍有提升空间。美国、韩国、日本的高价值占比高, 源于其长期的技术积累(如相变材料、跨行业能源耦合等领域的原创性研究)、研发投入强度(企业主导的协同创新)以及产业对高价值技术的需求(如高端制造、精密温控场景), 这些技术更易形成高价值的专利布局。

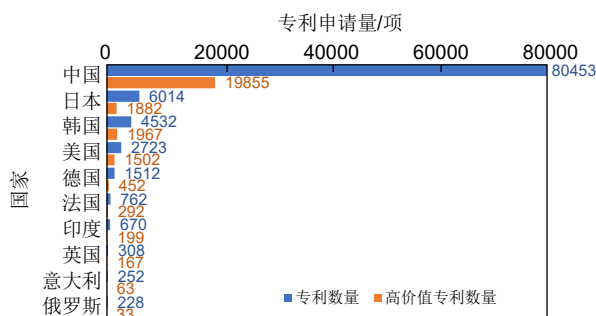


图4 2016—2025年储热储冷技术相关专利申请TOP10国家情况

Fig. 4 TOP 10 countries for patent applications related to thermal energy storage technology from 2016 to 2025

3.3 专利申请机构分布情况

2016—2025年全球储热储冷技术专利权人分布呈现“中国主导、企业引领、产学研协同”的格局(表2), 结合专利数量与高价值专利占比, 可从国家分布、机构类型及技术创新质量三个维度展开分析:

(1) 从国家分布来看, 中国机构占据绝对主导地位。在TOP 20专利权人中, 中国机构占据15席, 专利申请总量超2.5万项, 高价值专利超1.1万项, 反映中国在储热储冷技术研发与产业应用中的核心地位。日韩企业(LG、三星、三菱、东芝、

松下)共5席，专利总量约3000项，高价值专利约1300项，虽技术原创性较强，但规模远低于中国企业。

(2) 从机构类型来看，主要是企业引领。在TOP 20专利权人中，主要以家电和能源企业为核心驱动力。中国家电企业(海尔、美的、格力)以3850项、2579项、2461项的专利数量位居前三，高价值专利占比分别达37.0%、36.7%、36.1%，反映其在储热储冷技术(如家电热管理、冷链温控)的产业化优势。能源企业(国家电网、中国华能)及韩国LG、日本三菱等也布局该领域，但数量与高价值专利占比低于中国家电企业，说明中国家电企业在储热储冷技术的市场转化与技术创新上更具竞争力。此外，高校方面，中国高校(西安交通大学、清华大学、浙江大学)与科研院所(中国科学院、西安热工研究院)共9席，专利总量超3000项，高价值专利占比超40%(如中国科学院263项占42.6%、西安交大261项占40.9%)，体现产学研协同创新

模式。高校侧重基础研究(如相变材料、热管理机理)，科研院所聚焦工程应用(如能源系统耦合)，共同推动技术从实验室到产业化的转化。值得注意的是，中国科学院作为中国科研院所的代表，其专利布局不仅数量可观(618项)，且高价值专利占比高达42.6%，位居前列。这充分体现了中国科学院在基础理论创新和前沿技术探索方面的深厚积累与战略引领作用。

(3) 从技术创新质量来看，头部企业技术原创性突出。海尔(37.0%)、LG(57.2%)、三星(42.1%)的高价值专利占比显著高于行业平均，反映其在材料科学、系统集成等原创性技术上的优势；高校(中国科学院42.5%、西安交大40.9%)的高价值专利占比也较高，说明基础研究的原创性成果向高价值专利转化效率高。而部分企业(如中国建筑集团40项占17.7%)或科研机构(如天津大学68项占28.3%)占比偏低，反映技术原创性或产业应用深度有待提升。

表2 储热储冷技术TOP20专利权人专利申请与高价值专利统计情况

Table 2 Patent application and high-value patent statistics of TOP20 assignees in thermal energy storage technology

排序	国家	专利权人	专利申请数量/项	高价值专利申请数量/项	高价值专利占比/%
1	中国	青岛海尔	3850	1426	37.0%
2	中国	美的集团	2579	946	36.7%
3	中国	格力集团	2461	888	36.1%
4	韩国	LG集团	1192	682	57.2%
5	日本	三菱公司	769	211	27.4%
6	中国	国家电网	683	209	30.6%
7	中国	西安交通大学	638	261	40.9%
8	中国	西安热工院	621	214	34.5%
8	中国	中国科学院	618	263	42.6%
10	中国	中国华能	560	165	29.5%
11	中国	海信公司	489	148	30.3%
12	韩国	三星集团	416	175	42.1%
13	日本	东芝公司	372	105	28.2%
14	日本	松下集团	322	90	28.0%
15	中国	清华大学	310	128	41.3%
16	中国	浙江大学	287	122	42.5%
17	中国	东南大学	270	95	35.2%
18	中国	天津大学	240	68	28.3%
19	中国	中国能源建筑集团	238	81	34.0%
20	中国	中国建筑集团	226	40	17.7%

3.4 专利技术方向情况

国际专利分类(IPC)是国际通用的、标准化的专利技术分类体系，蕴含着丰富的专利技术信息。

通过对储热储冷技术专利的IPC进行统计分析，可以准确、及时地获取该领域涉及的主要技术主题和研发重点。本次分析的储热储冷技术专利中，共涉

及超过 500 个 IPC 分类号，其中 TOP15 的 IPC 分类号及其申请情况如表 3 所示，可以看出，储热储冷技术专利申请主要集中在以下方面：

（1）以空调系统为核心载体的储冷应用场景。F24F5/00(空调系统或设备，10654 项)是储冷技术的核心应用方向，专利数量远超其他类别，反映储冷技术在建筑温控、工业制冷等领域的产业化需求旺盛。空调系统作为储冷技术的典型应用终端，其专利布局涵盖系统设计、温控算法、能效优化等维度，体现了储冷技术从“基础研究”向“场景应用”的转化逻辑。

（2）以蓄热设备为重点研发对象的储热技术。F28D20/00(一般蓄热设备或装置，9213 项)是储热技术的核心载体，涵盖显热、潜热等多种储热形式，专利数量仅次于空调系统，凸显储热在能源系统中的战略地位。其中，F28D20/02(利用潜热的一般性蓄热装置或设备，5158 项)作为储热技术的创新热点，相变材料(PCM)等潜热技术凭借高储热密度、温度稳定性等优势，在长时储能、跨季节调峰等场景具有广泛应用潜力，其专利数量占比超 55%，反映技术原创性与产业化需求的结合。

（3）系统优化与组件设计。F25D29/00(冷冻设备控制或安全装置的布置或安装，8492 项)、F25D23/00(冷冻设备一般结构特征，6510 项)及 F25B49/02(用于压缩式机器、设备或系统，5932 项)等方向专利数量突出，反映技术向系统优化和组件设计方向延伸。

整体来看，储热储冷技术的 IPC 分布既反映了储冷在建筑与工业领域的规模化应用需求，也凸显了储热技术在能源系统中的基础地位，同时通过组件技术的创新推动系统效率提升，为技术迭代与产业落地提供了方向指引。

3.5 专利技术热点分析

图 5 展示了 2016—2025 年储热储冷技术专利关键词的词云分布，高频词汇直观反映了该领域的技术研发热点与核心方向。从词云中可见，“储能系统”“储热系统”“换热效率”“相变材料”等关键词突出明显，结合技术发展脉络，可将其归纳为以下三大研发热点：

（1）底层发展逻辑：词云中“储能系统”“储热系统”为核心词汇，二者是储热储冷技术的核心载体。储能系统聚焦跨能源耦合、长时储能等方

表 3 2016—2025 年全球储热储冷领域发明专利主要技术方向(基于 IPC 小组前 15 位)

Table 3 Main technical directions of invention patents in the global thermal energy storage technology field (2016—2025) (based on the top 15 IPC groups)		
IPC 分类号	释义	专利族数量/项
F24F5/00	空调系统或设备	10654
F28D20/00	一般蓄热设备或装置	9213
F25D29/00	冷冻设备控制或安全装置的布置或安装	8492
F25D23/00	冷冻设备一般结构特征	6510
F25B49/02	用于压缩式机器、设备或系统	5932
F25D11/00	制冷机械，如家用冰箱相关联的独立可移动装置	5758
F28D20/02	利用潜热的一般性蓄热装置或设备	5158
F25D17/06	用强制循环的冷却流体循环装置	4720
F25B41/20	流体循环装置阀的布局	4454
F25D23/02	冷冻设备门的结构特助	4371
F25B43/00	分离或提纯气体或液体的装置	3913
F28D21/00	热交换设备	3822
F25D11/02	带有不同温度的冷却设备	3812
F25D31/00	其他冷却或冷冻设备	3753
F25B41/40	流体循环系统中的管路装置	3581

向，解决可再生能源波动问题；储热系统涵盖显热、潜热等储热形式，应对能源时间错配。二者共同构成技术发展底层逻辑，反映储热储冷技术从单一储热向综合能源系统的升级。

（2）材料与性能创新：“相变材料”“蓄冷材料”“换热效率”是词云中显著的关键词，体现材料创新与性能优化的协同作用。相变材料(PCM)凭借高储热密度、温度稳定性，成为长时储能、跨季节调峰的核心材料；蓄冷材料则聚焦低温储冷场景(如疫苗冷链)；换热效率则是储热储冷系统的技术瓶颈，专利布局涵盖热交换器设计、流体循环优化等方向，旨在提升能量转换效率。三者共同推动储热储冷技术的迭代，是技术发展的关键支撑。

（3）应用场景拓展：“储藏室”等词汇的出现，表明储热储冷技术的应用场景不再局限于传统的电力系统和工业余热利用，而是向冷链物流、建筑节能等多元领域拓展。相关专利布局聚焦于低温储冷(如疫苗冷链的精准温控维持)以及高性能绝热材料(以满足医疗、建筑等领域的差异化需求)。

综上所述，三大研发热点分别从底层逻辑、材料性能、应用拓展三个维度，清晰呈现储热储冷技

术发展的全链条。随着专利技术的不断积累与成熟, 储热储冷技术已走出实验室, 在多个关键场景中实现了规模化应用。



图5 2016—2025年储热储冷技术相关专利关键词词云情况

Fig. 5 Keyword word cloud of patents related to thermal energy storage technology from 2016 to 2025

4 储热储冷应用场景分析

储热储冷技术作为实现能量时空转移、提升能源系统灵活性与效率的关键载体, 其应用已渗透至能源生产、转换、输配与消费的全链条。国际可再生能源署 (IRENA) 《Innovation Outlook: Thermal Energy Storage》^[32]明确将储热储冷技术划分为电力、工业、建筑三大应用领域, 并强调跨季节、多能互补等集成应用。而中关村储能产业技术联盟 (CNESA)等权威机构进一步将其细分到清洁供暖、工业蒸汽、余热回收、火电灵活性改造、综合能源服务等具体场景。结合前文对技术原理与专利热点的分析, 可见技术创新正直接赋能产业落地。因此, 本文重点从电力系统、工业领域、建筑城镇、特殊场景及综合集成五个维度(图6), 系统揭示储热储冷技术在不同场景下的驱动因素、发展现状与典型案例。

4.1 电力系统与可再生能源

全球能源转型的核心矛盾在于可再生能源的波动性与电力系统实时平衡的刚性要求之间的矛盾。IEA明确指出, 当风电和光伏发电占比超过15%~20%时, 系统对超过8小时甚至数日的长时储能需求将呈指数级增长, 以解决其间歇性、反调峰特性带来的系统平衡与容量充裕性挑战^[33]。为满足上述对大规模、长周期灵活调节能力的刚性需求, 储热储冷技术凭借其大容量、低成本和长寿命的优势, 成为填补这一技术空白的关键解决方案。

熔盐储热是已实现吉瓦时级商业化部署的主流长时储能技术之一, 但并非唯一路径。例如, 以热



图6 储热储冷技术五大应用场景示意图

Fig. 6 Schematic diagram of five application scenarios for thermal energy storage technology

水为介质的显热储热技术也已实现吉瓦时级的工程应用, 如华能北京热电厂投运的“电热协同”热水储罐, 其储热容量达4500 GJ(约1.25 GWh), 可为区域提供连续6~7小时的稳定供热^[34]。以西班牙 Gemasolar 电站为例, 其配备15小时熔盐储热系统, 年发电时间可达6500小时以上, 容量因子超过75%, 堪比基荷火电^[35]。新兴的固体颗粒储热技术, 如美国可再生能源实验室领导的“Enduring”项目, 使用低成本陶瓷颗粒在高于1000℃下工作, 目标是将储能成本降至15美元/kWh以下, 为更长周期储能提供了可能路径^[36]。此外, 固体电蓄热装置在火电机组深度调峰等领域也已形成规模化应用, 单机规模可达260兆瓦×7小时^[37]。

这些大规模储热储冷技术的成熟与应用, 其根本意义在于它们能够将本身难以调度的可再生能源, 转化为高价值的可控资产, 从而在电力市场中创造明确的经济信号。储热技术的应用场景已从太阳能光热发电, 扩展至火电灵活性改造、压缩空气储能系统配套等多元领域, 显著提升了电力系统的调节能力与可再生能源消纳水平。在美国 PJM 等电力市场中, 配备储热的光热电站可通过同时参与能量市场与容量市场获得稳定收益。研究表明, 在可再生能源渗透率高的地区, 储热时长从6小时增至12小时可使其电力价值提升25%~40%^[38]。

4.2 工业领域

2025年, 国际能源署《Energy Efficiency 2025》^[39]报告中明确指出, 工业部门是全球能源需

求的最大单一部门, 约占全球最终能源消费的40%左右, 其中过程供热约占工业能源的74%, 且大量中低温(150~400℃)余热未被利用。工业深度脱碳面临燃料替代、余热资源化及工艺稳定性三大重要挑战^[20]。面对工业热能的多元化与高品质需求, 单一储热技术难以应对, 这驱动了针对不同温区、热源形态和应用场景的差异化技术路径发展。

针对不同温区, 技术呈现差异化应用。对于蒸汽系统, 蒸汽蓄热器是成熟技术, 可助力锅炉实现高达80%的负荷调节范围。在更高温度区间(>500℃), 如钢铁行业, 高温复合相变材料和热化学储热正从示范走向应用。最新研究显示, 采用基于金属氧化物的热化学储热系统回收高温废气, 可将工业炉的燃料效率提升10%以上^[39]。在食品加工等低温领域, 相变储热已用于精确控制巴氏杀菌温度曲线。这些针对特定场景的技术发展, 正进一步向系统集成方向演进。例如, 在水泥、冶金等行业, 通过集成中低温余热回收与储热系统, 可将间歇性废热转化为稳定热源, 直接回用于生产流程或区域供热, 这标志着储热技术从单一设备节能向系统级能源协同优化的关键转变。2024年中国能源研究会发布的《面向双碳目标的新型智慧供热发展蓝皮书》^[40]指出, 这种系统化应用正是实现工业供热从“以热定产”向“以储优产”智慧模式转型的核心, 通过储热解耦刚性供需, 为工业流程大规模接入可再生能源奠定了技术基础。

这些精准匹配工业流程的技术应用, 直接作用于生产过程的能耗与碳排放核心环节, 其价值因而能够被清晰量化和捕捉。例如, 我国2024年投产的甘肃玉门“光热+光伏+风电”多能互补示范项目, 采用二元熔盐($\text{NaNO}_3+\text{KNO}_3$)作为高温储热介质, 配备8h熔盐储热系统, 实现了内部收益率(IRR)超过17%, 投资回收期约7年, 年碳减排135.3万吨^[41]。

4.3 建筑与城镇

关键在于实现供热电气化并与波动性可再生能源发电协同, 同时降低对峰值电网容量的需求^[42]。这一需求决定了建筑领域的储热储冷技术必须兼顾与建筑本体的高度集成、适应分散化能源结构, 并满足终端用户的经济性与舒适性要求。

为此, 所选用的储热储冷技术方案与应用规模紧密相关。在单体建筑层面, 微胶囊相变材料

(MPCM)掺入石膏板或混凝土中, 可显著平滑室内温度波动并延迟热负荷峰值。基于数值模拟和实验验证的结果显示, 针对典型住宅建筑, 年度能耗降低9%~18%, 而在高峰时段的空调负荷削减可达30%~35%^[43]。在区域层面, ATES(利用地下含水层)和BTES(钻孔阵列)在瑞典、挪威、芬兰等国已广泛部署, 形成季节性热能调节的核心技术^[44]。例如, 丹麦Høje Taastrup区域能源系统采用岩石介质的钻孔储热(BTES), 配合太阳能集热器在夏季储热, 冬季释放供热, 能够满足约50%以上的冬季供热需求, 在当地的供热结构中占据重要比例^[45]。在全球实践的基础上, 储热技术在构建低碳城镇供热系统中的作用愈发凸显。特别是在中国推进清洁供暖的背景下, 相变储热模块与热泵耦合、利用低谷电的固体蓄热等技术, 正广泛应用于建筑节能改造, 有效替代散煤燃烧。未来的城镇智慧能源系统将呈现“多热源联网、分布式储热”的架构, 其中广泛分布的储热单元将成为协调多方热源、匹配多元化用户需求、提升整个系统灵活性与韧性的关键枢纽^[40]。

从微观的材料集成到宏观的系统工程, 储热技术的多层应用共同改变了建筑能源消费的时空特性, 从而催生出多元化的价值实现渠道。对用户, 通过利用峰谷电价差直接节约电费; 对电网, 聚合的储热资源可作为虚拟电厂提供需求响应; 对环境, 可大幅降低建筑碳排放。欧盟“热力路线图”研究指出, 大规模部署区域储热是2050年实现建筑零碳供热成本最低的路径^[46]。

4.4 特殊场景与新兴应用

数据中心、移动电子设备、生物医疗冷链等场景对热管理提出了极高功率密度(>100 W/cm²)、极端温度精确控制(±0.5℃)或极小空间集成的极限要求^[47-48]。如此苛刻的性能边界, 远超传统储热技术的设计范畴, 从而成为驱动材料科学和热设计前沿创新的电力来源。

这些需求驱动了颠覆性技术创新。在数据中心, 针对AI芯片的爆发式热流密度, 两相浸没式相变液冷成为前沿方案, 有研究表明, 该技术可使AI芯片散热能力比传统风冷高两个数量级^[49]。在医疗冷链运输中, 采用生物基相变材料的被动保温箱, 可在约2℃处实现稳定的热调节, 同时集成抗菌和抗氧化特性, 提升产品安全性, 与传统泡沫相比,

碳足迹降低了25%^[50]。此外,相关专利申请中“真空绝热体”和“精确温控”技术的快速增长(详见第3.5节),直接支撑了浸没式液冷等前沿方案的落地。

在这些以性能为首要目标的领域,技术的成功应用不仅解决了特定痛点,更验证了新材料和新原理的极限潜力,扮演了技术孵化器的角色,其验证的高性能材料(如高导热复合材料)和微型化设计理念,未来有望降维渗透至消费电子等大规模民用市场。

4.5 跨领域与综合集成

碳中和目标的实现要求电、热、气、交通等多能源系统进行一体化规划与协同运行,以追求全系统经济性与碳排放量最优。为此,储热储冷技术不再只是被动储存热量,而是主动调节电力与热力两个子系统之间的能量流动,实现跨时间尺度(从小时到日)的灵活缓冲^[51]。

为此,在此场景下可集成的应用技术包括:①电-热深度耦合,在“Power-to-Heat-to-Power”循环中,过剩电力通过电阻或热泵转化为热储存,必要时再通过热机发电。例如,哈尔滨工业大学研究表明,基于热泵的电转热和基于热机的热转电组合,虽往返效率受技术路线影响,但在特定配置下,其整体往返效率可达到40%~50%,这使其成为极具竞争力的长时储能方案之一,尤其是在解决可再生能源的季节性消纳问题上^[52]。②工业-城市共生,瑞典斯德哥尔摩10000户家庭的年度供暖需求由数据中心余热和热泵提供^[53],实现了跨行业的高效能源复用。

储热储冷设备在能源网络中充当了跨能源品种、跨时间尺度的缓冲与调度枢纽作用,通过智慧能源管理平台实现多主体协同,提升整个能源基础设施的利用率和投资效率。例如,天津大学研究人员多主体博弈优化模型证明,合理配置热储能,可以显著提高可再生能源就地消纳率,并降低系统总运行成本^[54]。

5 总结与展望

5.1 总结

(1) 全球战略共识形成,发展路径各具特色。储热储冷技术已被美国、欧盟、日本、中国等主要经济体提升至国家战略高度,视为实现能源系统脱

碳与灵活性的关键技术。美国侧重于通过政策激励与市场机制推动长时储能商业化;欧盟以法规驱动供热脱碳与系统集成;日本聚焦于能效提升与分布式能源管理;中国则依托国家工程驱动,正快速形成全产业链的规模化发展优势。

(2) 技术路线明确,研发活跃但不均衡。技术层面,显热、潜热、热化学储热各具特点且互补发展,分别满足不同温区与时长的储能需求。结合2016—2025年的专利分析,全球储热储冷技术经历了从稳步增长到快速爆发,再到近期波动调整的发展周期,表明技术正从积累期迈向成熟期。中国在专利申请总量上占据绝对主导地位,体现了巨大的研发投入与市场潜力,但在高价值专利占比上仍落后于美国、日本和韩国,反映出在技术原创性与高端化方面尚有提升空间。以空调系统为代表的储冷应用和以相变材料为核心的储热技术是当前创新最活跃的领域。

(3) 应用场景多元化,价值实现路径清晰。储热储冷技术的应用已深度渗透至能源系统的各个环节。在电力系统中,它作为长时储能的关键方案,将波动性可再生能源转化为可控资源;在工业领域,它通过精准匹配不同温区的热能需求,实现深度节能与降碳;在建筑与城镇中,它从单体材料集成到区域能源系统,重塑了能源消费的时空特性;在数据中心、医疗冷链等特殊场景中,它驱动了前沿热管理技术的突破;在跨领域集成中,它充当了多能源系统协同的“柔性枢纽”。这些多元化的应用场景为储热储冷技术提供了明确的经济价值与碳减排价值。

5.2 展望

面向碳中和的宏伟目标,储热储冷技术将迎来更广阔的发展机遇,同时也面临更高要求。综合前文对全球战略布局、技术分类、专利态势及应用场景痛点的多维分析表明,尽管显热与潜热技术已逐步成熟,但热化学储热仍受制于材料性能瓶颈,且专利热点聚焦于“储能系统”与“换热效率”,揭示了技术从单体材料向深度系统集成演进的必然趋势。同时,全球主要经济体的差异化路径及典型场景的经济性分析指出,单纯的技术攻关亟需通过商业模式创新与市场机制完善来实现从“政策驱动”向“市场驱动”的跨越。此外,国际经验也凸显了加强标准合作与构建全球化产业生态的战略必要

性。基于上述研判,未来应重点关注以下方向:

(1) 突破材料科学瓶颈,夯实技术基础。当前,材料性能仍是制约储热储冷技术经济性与效率的核心因素。未来应着力研发低成本、高能量密度、长循环寿命的新一代储热材料,特别是适用于超高温($>1000^{\circ}\text{C}$)的热化学储热材料、具有高导热性能的复合相变材料,以及适用于生物医疗等领域的绿色环保蓄冷材料。同时,需攻克高温熔盐泵、高效换热器等关键部件的制造技术,提升国产化率与系统可靠性。

(2) 深化“储能+”系统集成,迈向智慧化与精细化。未来的储热储冷技术将不再是孤立的设备,而是深度融入能源互联网的智能终端。应大力发展“储热储冷+人工智能”的融合技术,利用数字孪生、大数据预测和智能优化算法,实现对储热储冷系统的精准预测、协同调度与需求响应。此外,应探索储热储冷与可再生能源、氢能、碳捕集等多能源系统的深度耦合模式,构建多能互补的综合能源系统,最大化系统整体能效与经济效益。

(3) 创新商业模式与市场机制,激活产业内生动力。为推动储热储冷技术从“政策驱动”向“市场驱动”转变,亟需建立能够充分体现其多维价值(如容量价值、调峰价值、碳减排价值)的电力市场与热力市场机制。探索将储热储冷纳入容量市场、辅助服务市场,并开发基于碳交易的收益模式。同时,推广合同能源管理、储能租赁等多元化商业模式,降低用户初始投资门槛,加速技术的商业化落地。

(4) 加强国际标准与合作,构建全球化产业生态。随着储热储冷技术的全球化应用,统一的技术标准、测试规程和安全规范至关重要。未来应加强国际交流与合作,共同推动储热储冷技术标准的制定与互认,消除贸易壁垒,促进全球产业链的协同发展。通过共享技术成果与示范项目经验,加速储热储冷技术在全球范围内的规模化部署,为全球能源转型贡献中国力量。

参考文献

- [1] IEA. Electricity 2025[EB/OL]. [2025-02-14]. <https://www.iea.org/reports/electricity-2025>.
- [2] IEA. Can low-temperature heat in factories be electrified competitively[EB/OL]. [2025-12-09]. <https://www.iea.org/commentaries/can-low-temperature-heat-in-factories-be-electrified-competitively>.
- [3] DOE. Award Wednesdays[June 20, 2024][EB/OL]. [2024-06-20]. <https://www.energy.gov/oced/articles/award-wednesdays-june-20-2024>.
- [4] Euroheat & Power. Innovative underground thermal energy storage projects highlighted at USES4HEAT General Assembly[EB/OL]. [2024-05-27]. <https://www.euroheat.org/news/innovative-underground-thermal-energy-storage-projects-highlighted-at-uses-4-heat-general-assembly>.
- [5] Euroheat & Power. Webinar: Optimising Energy Systems: Innovations in Thermal Energy Storage Technologies[EB/OL]. [2024-11-26]. <https://www.euroheat.org/data-insights/reports/webinar-optimising-energy-systems-innovations-in-thermal-energy-storage-technologies>.
- [6] EERA. White paper launch: Industrial thermal energy storage[EB/OL]. [2022-12-13]. <https://www.eera-set.eu/events/3572:white-paper-launch-industrial-thermal-energy-storage.html>.
- [7] 経済産業省. 第5次エネルギー基本計画[EB/OL]. [2018-07-03]. http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/180703.pdf.
- [8] NEDO. 次世代型ヒートポンプシステム研究開発[EB/OL]. [2017-11-17]. <https://www.nedo.go.jp/content/100579662.pdf>.
- [9] Spherical Insights. Japan heat pump market insights forecasts to 2033[EB/OL]. [2024-11]. <https://www.sphericalinsights.com/reports/japan-heat-pump-market>.
- [10] 中华人民共和国中央人民政府. 国家发展改革委 国家能源局关于印发《“十四五”新型储能发展实施方案》的通知[EB/OL]. [2022-01-29]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/22/content_5680417.htm.
- [11] 中华人民共和国中央人民政府. 工业和信息化部等八部门关于印发《新型储能制造业高质量发展行动方案》的通知[EB/OL]. [2025-02-10]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202502/content_7004135.htm.
- [12] 太阳能光热产业技术创新战略联盟. 命运多舛的美国首座商业化熔盐塔式光热电站有望重新投运[EB/OL]. [2021-08-30]. <http://www.cnste.org/news/detail/7687.html>.
- [13] 太阳能光热产业技术创新战略联盟. 全球首座熔盐储能厂在丹麦落成[EB/OL]. [2024-06-24]. <http://www.cnste.org/news/detail/9319.html>.
- [14] Solar Heat Europe. Solar district heating with the largest pit thermal storage globally[EB/OL]. [2024-12-18]. <https://solarheateurope.eu/casestudy/solar-district-heating-with-the-largest-pit-thermal-storage-globally/>.
- [15] Académie des technologies. Le stockage intersaisonnier de chaleur: un atout pour Le climat et La souveraineté[EB/OL]. [2024-02-16]. <https://www.academie-technologies.fr/wp-content/uploads/2024/02/Rapport-STES.pdf>.
- [16] Energy Manager Canada. Drake Landing Solar Community sets world record for energy efficiency[EB/OL]. [2021-10-30]. <https://www.energy-manager.ca/drake-landing-solar-community-sets-world-record-for-energy-efficiency-1611/>.
- [17] ARENA. SA SMART NETWORK Project[EB/OL]. [2024-05-10]. <https://arena.gov.au/assets/2024/06/Rheem-SA-Smart-Network>

- Project-Final-Report.pdf.
- [18] 太阳能光热产业技术创新战略联盟. 世界首座一辽河油田电热熔盐储能注汽试验站在辽河油田竣工[EB/OL]. [2023-12-07]. <http://www.cnste.org/news/detail/8799.html>.
- [19] 央视网. 甘肃酒泉:全球首个“双塔一机”光热电站全系统试运行[EB/OL]. [2025-10-10]. <https://energy.cctv.com/2025/10/10/ARTI5ToAXux5oQKejRAyUsvy251010.shtml>.
- [20] 陈海生, 李泓, 徐玉杰, 等. 2024 年中国储能技术研究进展[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(6): 2149-2192. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0553.
- CHEN H S, LI H, XU Y J, et al. Research progress on China's energy storage technology in 2024[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(6): 2149-2192. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0553.
- [21] 高明娟, 宋国良, 宋维健, 等. 高温烟气加热固体颗粒储热技术研究进展[J/OL]. 储能科学与技术, <https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0943>.
- GAO M Q, SONG G L, SONG W J, et al. Research progress on high-temperature flue gas heating solid particle thermal energy storage technology[J/OL]. Energy Storage Science and Technology, <https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0943>.
- [22] 闫亚龙, 张进华, 黄艳, 等. 火电机组深度调峰背景下储热技术应用现状及进展[J]. 洁净煤技术, 2025, 31(S1): 495-506. DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.25021001.
- YAN Y L, ZHANG J H, HUANG Y, et al. Current status and progress of heat storage technology application under background of deep peak shaving of thermal power units[J]. Clean Coal Technology, 2025, 31(S1): 495-506. DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.2502 1001.
- [23] 赵培卿, 侯文豪. 固体电蓄热技术应用于电厂深度调峰[J]. 中国新技术新产品, 2019(23): 36-37. DOI: 10.3969/j.issn.1673-9957.2019.23.019.
- ZHAO P Q, HOU W H. Application of solid electric heat storage technology in deep peak shaving of power plant[J]. China New Technologies and New Products, 2019(23): 36-37. DOI: 10.3969/j.issn.1673-9957.2019.23.019.
- [24] HONG Y X, SHI Y, LI F, et al. Energy storage and heat transfer characteristics of multiple phase change materials in a rectangular cavity with different layouts of T-shaped fins[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2024, 159: 108068. DOI:10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.108068.
- [25] 陈秋宇, 李文涛, 李竺豫, 等. 中高温热化学储热材料研究进展[J]. 热力发电, 2024, 53(6): 12-20. DOI:10.19666/j.rfd.202403033.
- CHEN Q Y, LI W T, LI Z Y, et al. Research progress on thermochemical heat storage materials for medium to high temperature applications[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(6): 12-20. DOI:10.19666/j.rfd.202403033.
- [26] 中国科学院过程工程研究所. 过程工程等“科技成果助力北京冬奥”入选中国科学院 2021 年度科技创新亮点成果[EB/OL]. (2021-01-12). https://ipe.cas.cn/xwdt/tpxw/202201/t20220112_6339782.html
- [27] University of Birmingham. The world's first commercial composite Phase Change Material plant for curtailed wind power[EB/OL]. (2019-02-08). <https://www.birmingham.ac.uk/news-archive/2019/the-worlds-first-commercial-composite-phase-change-material-plant-for-curtailed-wind-power>
- [28] MA D D, SUN Y X, MA S, et al. Study on the working medium of high temperature heat pump suitable for industrial waste heat recovery[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 236: 121642. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2023.121642.
- [29] 杨蕊, 乔洋, 周奕锟, 等. 热化学储能材料的制备及其在跨季节储能中的应用进展研究[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(11): 4199-4221. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0381.
- YANG R, QIAO Y, ZHOU Y K, et al. Research on the preparation of thermochemical energy storage materials and application in cross-season energy storage[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(11): 4199-4221. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0381.
- [30] MORGENSTERN L, OHMSTEDT S, TALEBI E, et al. Pilot-scale investigation of high-temperature thermochemical energy storage based on the material system $\text{CaO}/\text{Ca}(\text{OH})_2$ in a bubbling fluidized bed[J]. Powder Technology, 2024, 440: 119775. DOI: 10.1016/j.powtec.2024.119775.
- [31] 张叶龙, 李龙, 于民华, 等. 钙基热化学储热技术研究进展[J/OL]. 化工进展. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2025-0915>.
- ZHANG Y L, LI L, YU M H, et al. Research progress of calcium-based thermochemical heat storage technology[J/OL]. Chemical Industry and Engineering Progress, <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2025-0915>.
- [32] IRENA. Innovation Outlook: Thermal energy storage[EB/OL]. (2020-11-30). <https://www.irena.org/publications/2020/Nov/Innovation-outlook-Thermal-energy-storage>
- [33] IEA. Net Zero by 2050: A roadmap for the global energy sector [EB/OL]. (2021-05-18). <https://www.iea.org/events/net-zero-by-2050-a-roadmap-for-the-global-energy-sector>
- [34] 中国能源新闻网. 华能北热电热协热热水罐储热灵活性改造工程完工投运 [EB/OL]. (2026-01-21). https://cpnn.com.cn/qiye/fadianPD2023/202601/t20260120_1861188.html
- [35] GIL A, MEDRANO M, MARTORELL I, et al. State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1—Concepts, materials and modellization[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(1): 31-55. DOI: 10.1016/j.rser.2009.07.035.
- [36] NREL. Economic long-duration electricity storage by using low-cost thermal energy storage (ENDURING)[EB/OL]. (2024-07-24). https://www.renewableenergymagazine.com/energy_saving/nrel-awarded-2-8m-from-arpae-to-20181127.
- [37] 孙立本, 张少成, 许冰, 等. 66kV 固体电蓄热装置在火电机组深度调峰中的应用[J]. 华电技术, 2018, 40(7): 38-39, 42. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1951.2018.07.011.
- SUN L B, ZHANG S C, XU B, et al. Application of 66 kV solid electric heat storage device in vigorous peak-load regulation of thermal power units[J]. Huadian Technology, 2018, 40(7): 38-39, 42. DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2018.07.011.

- [38] FORRESTER J. The value of CSP with thermal energy storage in providing grid stability[J]. *Energy Procedia*, 2014, 49: 1632-1641. DOI:10.1016/j.egypro.2014.03.172.
- [39] RAHBARI H R, ELMGAARD B, BELLOS E, et al. Thermochemical technologies for industrial waste heat recovery: A comprehensive review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2025, 215(C): DOI: 10.1016/j.rser.2025.115598.
- [40] 中国能源新闻网. «面向双碳目标的新型智慧供热发展蓝皮书»发布[EB/OL]. (2025-01-06). https://www.cpn.cn/news/ydylnyh/202501/t20250106_1764596.html
- [41] 中国能建中电工程. 全球在建装机容量最大熔盐线性菲涅尔光热电站并网[EB/OL]. (2024-09-20). http://www.nwepdi.ceec.net.cn/art/2024/9/20/art_12337_2514553.html
- [42] IEA. The future of cooling[EB/OL]. (2018-05-14). <https://www.iea.org/reports/the-future-of-cooling>
- [43] ISMAIL A, WANG J L, ABIODUN SALAMI B, et al. Microencapsulated phase change materials for enhanced thermal energy storage performance in construction materials: A critical review[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 401: 132877. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2023.132877.
- [44] MAROJEVIĆ K, KUREVIJA T, MACENIĆ M. Challenges and opportunities for aquifer thermal energy storage (ATES) in EU energy transition efforts—An overview[J]. *Energies*, 2025, 18(4): DOI:10.3390/en18041001.
- [45] IEA. IEA-ES task 39 brochure large thermal energy storages for district heating[EB/OL]. (2024-02-22). https://iea-es.org/task-39/wp-content/uploads/sites/21/IEA-ES_Task39_WPA_Deliverable_A0b_Task_brochure%E2%80%93Use_cases.pdf.
- [46] CONNOLLY D, LUND H, MATHIESEN B V, et al. Heat Roadmap Europe: Combining district heating with heat savings to decarbonise the EU energy system[J]. *Energy Policy*, 2014, 65: 475-489. DOI:10.1016/j.enpol.2013.10.035.
- [47] IEEE. IEEE heterogeneous integration roadmap[EB/OL]. (2023-03-01) https://eps.ieee.org/images/files/HIR_2023/ch20_thermalfinal.pdf.
- [48] DIACONU B, CRUCERU M, ANGHELESCU L, et al. Latent heat storage systems for thermal management of electric vehicle batteries: Thermal performance enhancement and modulation of the phase transition process dynamics: A literature review[J]. *Energies*, 2023, 16(6): DOI:10.3390/en16062745.
- [49] YAO J, HU Z W, YEN C H, et al. Two-phase immersion cooling system with integrated condenser for power module cooling in EV applications[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 278: 127226. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2025.127226.
- [50] BANIASADI H, ABIDNEJAD R, CRUZ C D, et al. Sustainable multifunctional foams for cold-chain packaging: Stabilizing polyethylene glycol with cellulose and pomegranate peel for antibacterial protection and temperature control[J]. *Sustainable Materials and Technologies*, 2025, 43: e01312. DOI: 10.1016/j.susmat.2025.e01312.
- [51] ROTH A, GAETE-MORALES C, KIRCHEM D, et al. Power sector benefits of flexible heat pumps in 2030 scenarios[J]. *Communications Earth & Environment*, 2024, 5: 718. DOI: 10.1038/s43247-024-01861-2.
- [52] FU X L, LI D Y, WANG H J, et al. Multi-objective optimization of guide vane closure scheme in clean pumped-storage power plant with emphasis on pressure fluctuations[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 55: 105493. DOI:10.1016/j.est.2022.105493.
- [53] AMIL C, YILMAZOĞLU M Z. The importance of hydrogen for energy diversity of Turkey's energy production: 2030 projection [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(45): 19935-19946. DOI:10.1016/j.ijhydene.2022.03.274.
- [54] ZHANG L, PAN D, WANG B, et al. Multi-agent game operation of regional integrated energy system based on carbon emission flow [J]. *Frontiers in Energy Research*, 2024, 11: 1333907. DOI: 10.3389/fenrg.2023.1333907.