

储热储冷多场景应用专刊



全球储热技术科学知识图谱与前沿趋势分析

周 洪¹, 罗伊默², 丁晓芹¹, 李永亮³, 宋文吉⁴

(¹中国科学院武汉文献情报中心, 湖北 武汉 430071; ²湖南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410082; ³伯明翰大学化学工程学院, 英国 伯明翰 B15 2TT; ⁴中国科学院广州能源研究所, 广东 广州 510640)

摘 要: 储热技术通过解决热能供需在时间、空间及强度上的不匹配问题, 已成为提高能源系统灵活性和可再生能源消纳能力的关键。基于对近三万篇文献的系统性综述与科学知识图谱分析, 梳理了储热领域的研究进展、应用脉络与发展趋势。研究发现, 储热技术领域研究规模持续快速增长, 已形成“材料—系统—应用”多层递进的知识体系, 呈现出以中国、美国和欧洲为主导的差异化布局。研究前沿围绕高性能、智能化和系统融合展开, 重点聚焦以热化学储热、钙循环为代表的长时储能技术, 以 MXene 基复合材料、磁场调控为代表的智能响应材料, 以综合能源系统、卡诺电池为核心的多能耦合集成, 以及机器学习赋能的储热全链条优化。为推动储热技术规模化应用, 亟需在材料、系统与市场层面协同创新, 突破关键技术瓶颈, 以支撑未来能源系统的安全高效运行。

关键词: 储热; 显热储热; 潜热储热; 热化学储热; 科学知识图谱

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0096

中图分类号: TK 11

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 03-1039-15

Scientific knowledge mapping and emerging trend analysis of global thermal energy storage technologies

ZHOU Hong¹, LUO Yimo², DING Xiaoqin¹, LI Yongliang³, SONG Wenji⁴

(¹National Science Library (Wuhan), Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, Hubei, China; ²College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China; ³School of Chemical Engineering, the University of Birmingham, Edgbaston B15 2TT, Birmingham, UK; ⁴Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China)

Abstract: Thermal energy storage (TES) has emerged as a critical technology for enhancing the flexibility of energy systems and the integration capacity of renewable energy sources by addressing mismatches in the temporal, spatial, and intensity dimensions of energy supply and demand. This study conducted a comprehensive review and analysis of nearly 30000 scholarly publications using systematic review and scientometric knowledge mapping methodologies to delineate the research progress, application landscape, and development trends in the TES field. The investigation reveals that research activity in TES has experienced sustained and rapid growth, evolving into a multi-layered knowledge architecture

收稿日期: 2026-01-29; 修改稿日期: 2026-02-25。

基金项目: 国家自然科学基金 (52478089)。

第一作者: 周洪 (1987—), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为技术创新、战略情报, E-mail: zhouh@mail.whlib.ac.cn; 通信作者: 宋文吉, 博士、研究员、博士生导师, 研究方向为大规模储能技术, E-mail: songwj@ms.giec.ac.cn。

引用本文: 周洪, 罗伊默, 丁晓芹, 等. 全球储热技术科学知识图谱与前沿趋势分析[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(3): 1039-1053.

Citation: ZHOU Hong, LUO Yimo, DING Xiaoqin, et al. Scientific knowledge mapping and emerging trend analysis of global thermal energy storage technologies[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(3): 1039-1053.

structured around "Materials-Systems-Applications." A distinct global research landscape has materialized, characterized by a tripartite leadership comprising China, the United States, and Europe, each exhibiting unique strategic focuses and developmental trajectories. The current research frontier is primarily concentrated on the pursuit of high performance, system intelligence, and deep integration. Key areas of intense focus include: (1) long-duration energy storage technologies, notably thermochemical heat storage and calcium looping (CaL) cycles; (2) intelligent responsive materials, such as MXene-based composite materials and those whose properties can be modulated by magnetic fields; (3) multi-energy coupled integration, with core applications in integrated energy systems (IES) and Carnot batteries; and (4) machine learning (ML)-enabled optimization across the entire TES chain, from material discovery to system design and operational control. To propel the large-scale application of TES technologies, concerted innovation across material, system, and market dimensions is urgently required. Future efforts must prioritize overcoming key technical bottlenecks, such as enhancing material cyclability and energy density for long-term storage, improving the efficiency and intelligence of system integration, and developing robust market mechanisms and policy frameworks. This study provides a systematic, data-driven overview that can serve as a foundational reference for researchers, policymakers, and industry stakeholders navigating the evolving landscape of thermal energy storage.

Keywords: thermal energy storage; sensible heat storage; latent heat storage; thermochemical heat storage; scientific knowledge mapping

在全球能源结构向绿色低碳转型与碳中和目标深入推进的背景下, 储热(TES)技术作为一种高效、灵活的能源时空调节手段, 正日益展现出其重要的战略价值^[1]。该技术以储热材料为媒介, 将太阳能光热、工业余热、低品位废热等热能加以储存, 并在需求时段释放, 从而有效解决能源供给与需求在时间、空间和强度上的不匹配问题^[2-3]。储热能够显著提高能源综合利用效率, 促进可再生能源的大规模并网与消纳, 增强电力系统的稳定性与灵活性, 并在工业节能、建筑供暖与制冷、电网调峰及区域能源系统构建等多个关键领域发挥着核心支撑作用, 是推动能源体系清洁化、低碳化和智能化进程中不可或缺的关键技术^[4]。

为系统梳理储热技术的研究脉络与发展趋势, 本文采用BERTopic主题模型与科学知识图谱相结合的方法, 对储热技术在建筑、工业、电力等多场景中的应用路径展开分析。该组合方法融合了BERTopic模型的结构化主题聚类优势与科学知识图谱的演进脉络可视化能力, 实现了从宏观趋势到微观主题的挖掘, 有效规避了传统综述的主观性局限。研究基于Web of Science数据库, 围绕储热

技术、材料及场景等关键词构建检索式, 于2025年11月20日完成检索, 经数据清洗后得到29751篇有效文献作为计量分析样本。通过分析全球研究趋势、主题分布与主要机构布局, 本文旨在总结材料创新、系统集成、多能耦合与智慧优化等前沿方向, 以期对储热技术的规模化应用与可持续发展提供参考。

1 储热技术分类及应用场景分析

储热技术依据储能机制可分为显热储热(SHS)、潜热储热(LHS)和热化学储热(TCHS)三大类, 如图1所示。显热储热通过介质温度变化储热, 成本低但储能密度有限; 潜热储热依托相变材料的相变过程储热, 储能密度高、近似等温, 但导热性能通常较差; 热化学储热基于可逆化学反应, 储能密度最高、热损失极小, 适合长期储能, 但技术复杂且成本较高。三类技术各具特点, 构成了储热技术体系的基础, 并在工业应用前沿呈现出深度融合与创新态势。例如, 高温熔盐显热储热应用于钢铁、化工等行业的余热回收与绿电消纳; 复合相变材料的突破推动潜热储热在工业蒸汽供给和中温场景中的

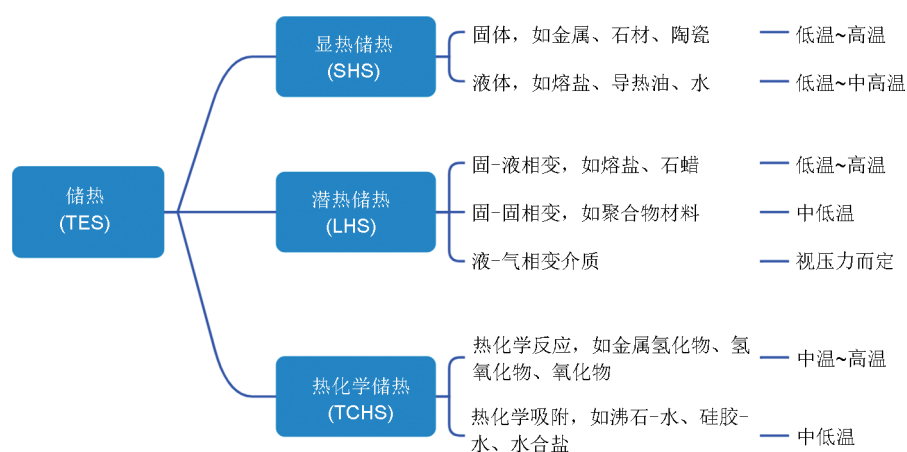


图1 储热技术的分类体系及其典型材料

Fig. 1 Classification of thermal energy storage technologies and their typical materials

规模化落地；热化学储热则在跨季节长时储能和工业高温工艺电气化脱碳中展现出巨大潜力。

从研究热度与分布来看，储热技术已全面涵盖能源、工业、建筑、交通、生活及特种环境等领域。基于论文数量的分析揭示了清晰的梯次分布格局(图2)，其中电力系统与可再生能源领域的研究体量最大(12262篇)，而潜热储热(5506篇)是主导技术路线，尤以聚光太阳能发电场景最为集中；建筑领域(8257篇)次之，研究聚焦于空间供暖/制冷的节能与舒适性需求，潜热储热(4521篇)与显热储热(2373篇)并重发展；工业领域(4245篇)位居第三，以潜热储热(2777篇)为重点，中低温余热回收(2187篇)当前研究较多；交通、生活及特种环境等领域的论文数量相对较少，但覆盖了电池热管理、智能纺织、食品冷链等众多新兴细分方向，展现出持续扩展的应用前景。

在具体技术路线和材料选择上，不同应用场景呈现出显著的差异化特征，如表1所示。电力系统与可再生能源中，光热发电主要采用熔盐、混凝土

等介质的显热储热以实现大规模能量缓存，光伏板冷却则多选用有机相变材料的潜热储热以提升效率，而热化学储热凭借其高能量密度和长时储能能力，在卡诺电池、碳捕集等高温或长周期储能场景中展现出独特优势。建筑领域，区域供热与跨季节储能依赖于地下土壤、水体等大型显热储热系统，而空间温控与生活热水则更多采用相变材料等潜热储热技术，两者常结合使用以构建高效复合系统。工业余热回收重点结合显热与潜热技术处理中低温废热，高温过程热管理则可能拓展至热化学储热。在交通及新兴生活领域，技术选型进一步精细化，例如电池热管理倾向使用潜热储热以保证温度均匀性，车厢供暖则采用显热储热以降低能耗，智能纺织、医疗热疗等领域则根据特定温控需求选用定制化的相变或热化学材料。总体而言，实际应用中的技术选型与组合，紧密围绕特定场景的热能规模、温度区间、空间条件及经济性约束，旨在构建多层次、高效率的热能管理解决方案。

表1 储热技术的应用场景				
Table 1 Application scenarios of thermal energy storage technologies				
应用场景	具体应用方向	主要储热技术类型	典型材料	场景中的主要作用与价值
电力系统与可再生能源	聚光太阳能发电	SHS, LHS, TCHS	熔盐、混凝土、流体化颗粒(SHS)；高温熔盐、金属合金(LHS)；钙循环、金属氢化物(TCHS)	解决太阳能间歇性问题，实现昼夜/多云天气下持续发电，提升电站容量因子和调度能力。
	光伏发电	LHS	石蜡、脂肪酸等有机相变材料(用于光伏板背面)	冷却光伏板，提高光电转换效率，同时可收集余热用于热水供应。
	卡诺电池	SHS	火山岩、高温熔盐	将富余电力转化为热能大规模存储，在用电高峰时再发电，实现电力调峰。

续表				
应用场景	具体应用方向	主要储热技术类型	典型材料	场景中的主要作用与价值
工业	工业余热发电	SHS	蒸汽蓄热器	回收不连续、波动的工业废热，用于稳定发电。
	碳捕集过程	SHS, TCHS	利用连铸坯显热、流体化床换热 (SHS); 钙循环(TCHS)	提供碳捕集溶剂再生或吸附剂脱附所需的热能，利用废热，降低碳捕集能耗。
	碳捕集与储能耦合	TCHS	钙循环与CSP集成系统	利用太阳能同时完成储热和碳捕集(生成CaCO ₃)，实现减排与储能效果。
	中低温余热回收	SHS, LHS	余热蒸汽/热水回收：大型水/导热油储热罐、PCM储热换热器；流程工业：利用PCM回收间歇性废热，用于预热物料	提高能源利用效率。回收并储存工业过程中排放的中低温废热，用于自身工艺预热或区域供热，直接节能。
	高温过程热管理	SHS, LHS, TCHS	钢铁/玻璃/陶瓷行业：高温熔融盐储热、耐火砖/陶瓷储热体、化学储热	实现高温热能的时间平移与品位维持。储存间歇性的高温余热或太阳能，在需要时提供稳定的高温热源。
	空间供暖/制冷	SHS, LHS	地下水、土壤、岩石床(SHS)；相变材料石膏板、墙体(LHS)	利用建筑围护结构或主动系统存储太阳能或夜间冷能，减少供暖/制冷能耗，平抑室内温度波动。
建筑	生活热水	SHS, LHS, TCHS	热水箱(SHS)；相变材料储热单元(LHS)；沸石、水合盐吸附系统(TCHS)	高效存储太阳能或低谷电，按需提供稳定热水，降低对化石燃料或峰值电力的依赖。
交通	区域供热/跨季节储热	SHS	大型地下水池、含水层、土壤储热	将夏季太阳能储存，用于冬季供暖，实现能源的跨季节调配。
	电动汽车电池热管理	SHS, LHS	空气/液冷系统(SHS)；石蜡/复合相变材料(LHS)	保证电池包在最佳温度范围工作，防止过热与热失控，提升电池寿命、安全性和低温启动性能。
	电动汽车车厢热管理	SHS	高温冷却液储热罐	利用电网电力预加热储热介质，减少行驶中电池的供暖能耗，延长续航里程。
	内燃机冷启动与余热利用	LHS, TCHS	赤藓糖醇、水合盐(LHS)；CaO/H ₂ O吸附反应(TCHS)	预热发动机和三效催化剂，减少冷启动阶段的燃料消耗和污染物排放。
生活	智能纺织	LHS	微胶囊化正十八烷、脂肪酸共晶物	在服装中集成相变材料，根据环境温度吸收或释放热量，实现人体热舒适调节。
	医疗保健	LHS	月桂酸-硬脂酸共晶物、赤藓糖醇-NaOH复合材料	用于可控药物释放、热疗(如皮肤热疗)，利用相变温区实现精准温度控制。
	食品冷链	LHS	水、共晶溶液、水合盐、聚氨酯相变材料	在冷藏运输和包装中作为冷媒，稳定维持低温环境，减少能耗，保障食品品质。
	自加热食品	TCHS	沸石、Mg-Fe合金	通过触发化学反应(如吸附、金属氧化)释放热量，无需外部能源即可加热食品。
特种环境	特种装备温控	多种类型	航天器热控：使用PCM维持精密仪器温度；军事装备：用于单兵冷却或电子设备热缓冲	在极端或特殊环境下维持关键系统的温度稳定。保障设备在恶劣热环境下的可靠运行。

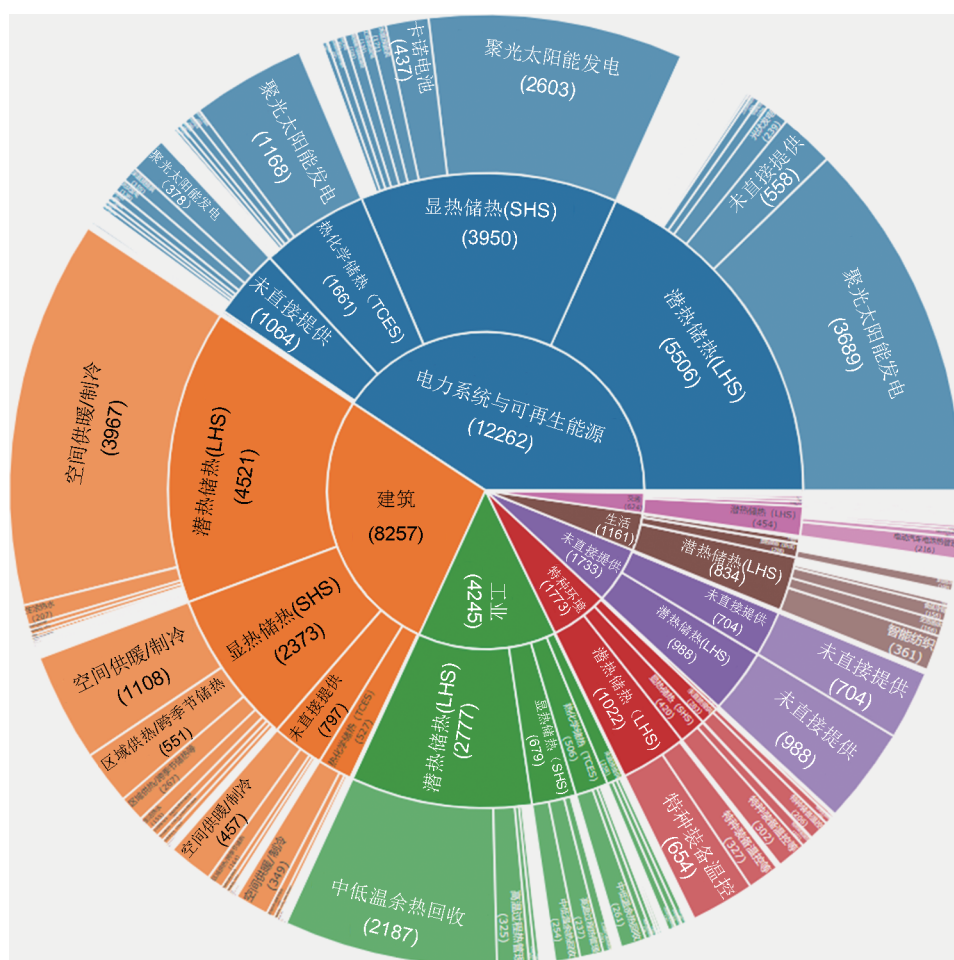


图2 应用场景—储热技术类型—具体应用方向的层级论文数量分布

Fig. 2 Hierarchical distribution of the number of papers by application scenario, thermal energy storage technology type, and specific application direction

2 全球储热技术研究的主题分布

储热技术研究呈现快速增长态势，其演进历程与全球能源转型需求高度相关，可分为四个阶段，如图3所示。萌芽期(1999年以前)，年均发文量低于百篇，受早期能源危机驱动，主要聚焦于显热储水等基础理论研究；积累期(2000—2009年)，在可再生能源政策激励下，年均发文量突破百篇，研究重心逐步转向相变材料及系统初步集成；快速增长期(2010—2019年)，光热发电商业化推进及重大科研计划支持，年均发文量跃升至千篇规模，高温储热与系统优化成为研究热点；爆发期(2020—2025年)，在全球碳中和目标与长时储能需求的双重推动下，年均发文量已逾两千篇并保持强劲增长态势。整体而言，该领域持续增长，尤其在2010年后增长斜率显著上升，相关研究已从早期的基础

科学探索，逐步演进为支撑可再生能源规模化并网和工业系统低碳转型的关键核心技术领域。

为系统梳理全球储热领域的知识结构与研究脉络，本文采用BERTopic主题模型对相关论文摘要进行挖掘，构建了如图4所示的主题图。图中每个点代表一篇论文，点的位置由UMAP算法依据文本相似性确定，点距越近则主题相关性越高，点距越远则主题差异越大，不同颜色代表由HDBSCAN聚类划分的不同主题。分析显示，各主题依其研究内容与关联性，在主题图中呈现出以“材料—系统—应用”为主线的递进式知识体系。图下方聚集了以材料研发为核心的基础研究集群，图中部则延伸至单元器件与系统集成层面，图上方及外围分布着面向不同场景的多元化应用主题，这一空间布局直观揭示了储热技术从基础材料突破，经系统技术支持，最终走向场景落地的演进路径。

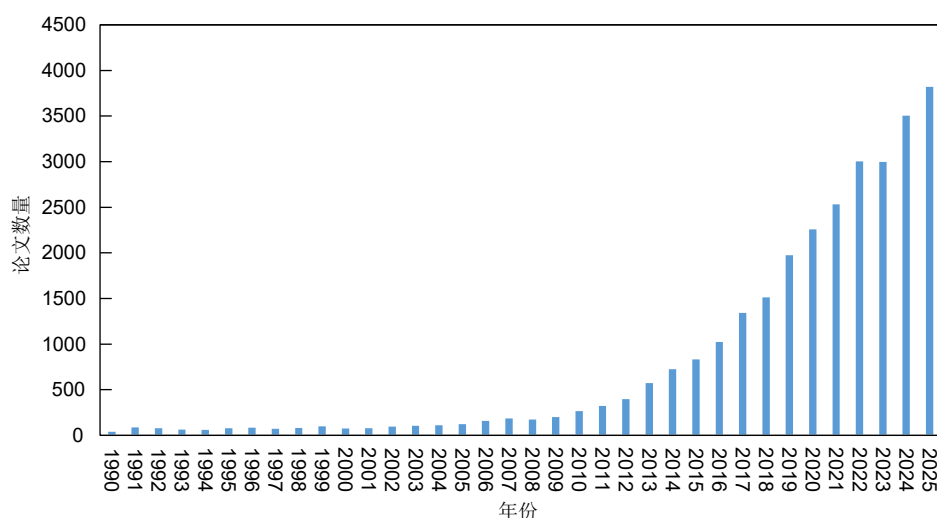


图3 储热技术研究论文的趋势分析

Fig. 3 Trend analysis of research papers on thermal energy storage technologies

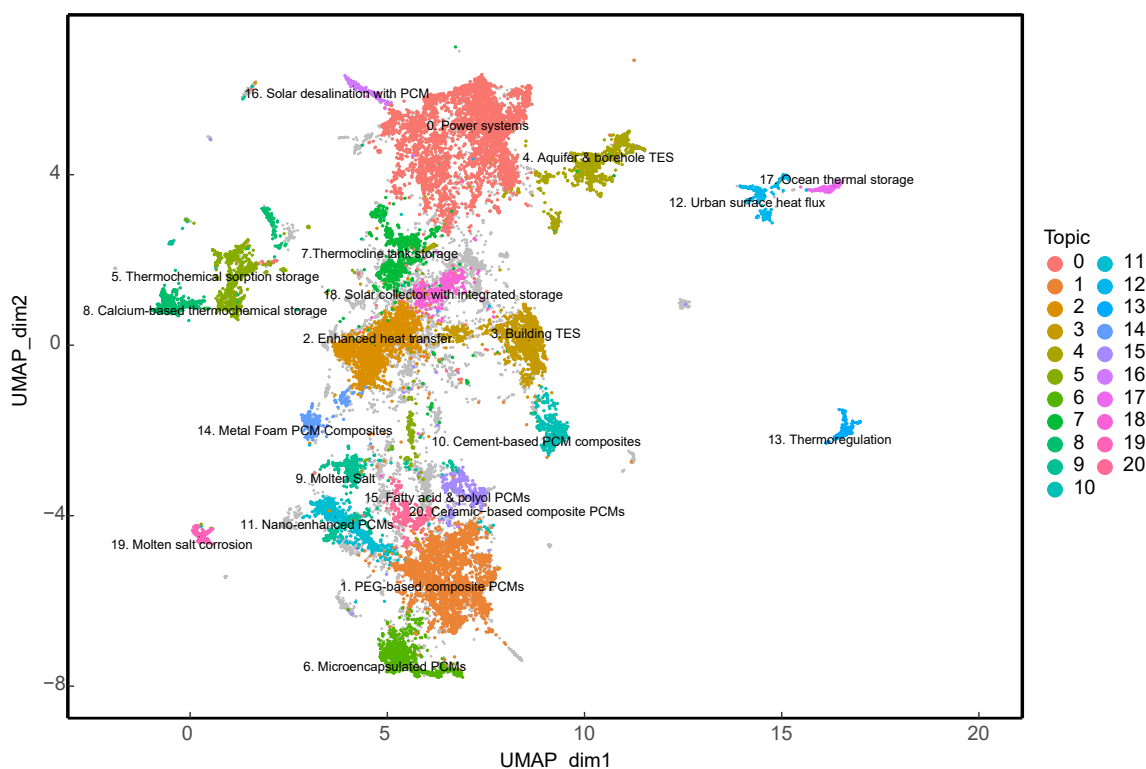


图4 储热技术研究论文的主题图分析

Fig. 4 Topic map analysis of research papers on thermal energy storage technologies

在核心材料研究集群(位于主题图下方), 聚集了多个主题紧密关联的研究方向, 共同构成了储热技术发展的材料基础。其中, PEG基复合相变材料(主题1)、纳米增强相变材料(主题11)与相变微胶囊(主题6)在知识空间中邻近, 形成了通过化学复合、纳米改性与微封装等技术提升有机相变材料性能的核心研究脉络。相邻的金属泡沫复合相变材料

(主题14)与陶瓷基复合相变材料(主题20)则侧重于利用多孔骨架结构解决材料的封装与传热强化问题。同时, 熔盐(主题9)作为高温显热储热工质的代表, 与钙基热化学储热(主题8)等主题共同聚焦于高温及热化学储热材料的热物性、反应动力学及长期可靠性, 与之密切相关的熔盐腐蚀防护(主题19)研究则致力于提升系统耐久性。此外, 脂肪酸

与多元醇相变材料(主题15)作为有机相变材料体系的重要分支,致力于开发中低温储热应用中的高性能共晶材料。上述材料层的研究为储热技术的整体发展奠定了基石,其突破方向直接牵引着系统层面的技术路径选择。

在单元、器件与系统技术层(主要位于图中中部),研究从材料体系延伸至工程传热、器件设计与系统集成。翅片强化相变传热(主题2)作为发文量极高的主题,位于材料集群与系统集群之间,凸显了传热强化技术在衔接材料本征特性与器件实际性能中的关键作用。斜温层单罐储热(主题7)与太阳能集热储热一体化(主题18)标志着研究向储热单元结构优化和光热系统耦合设计的深入。吸附式热化学储热(主题5)作为重要的前沿储热技术,致力于开发高能量密度、适于长期存储的新一代系统解决方案^[9]。这一层次的研究进展,决定了材料层面的创新成果能否有效转化为可工程化的技术方案。

在多元化应用交叉层(分布于图上方及外围),

储热技术与外部领域广泛融合,主题分布相对分散,体现了其广泛的外延应用价值。其中,电力系统(主题0)作为规模最大的独立聚类,突出反映了储热在可再生能源消纳与电网灵活调节中的关键地位。在建筑与城市领域,建筑储热(主题3)、相变混凝土(主题10)与城市地表热通量(主题12)共同构成了从建筑构件到城市尺度的热能管理技术链。含水层与钻孔储热(主题4)和太阳能海水淡化(主题16)代表了储热在跨季节储能及水-能联供等特定场景下的规模化应用探索,海洋热储存(主题17)关注自然水体作为巨规模储热介质的潜力。此外,人体热生理调控(主题13)体现了储热技术向生物热管理领域的渗透,展现了其极强的学科交叉性。上述应用主题的多样性,印证了储热技术作为基础支撑技术在“双碳”背景下的广泛适用。

整体来看,2000年以来储热领域各研究主题的发文量普遍呈现增长趋势,但不同主题的兴起时间、增长幅度与持续性存在差异,如图5所示。以

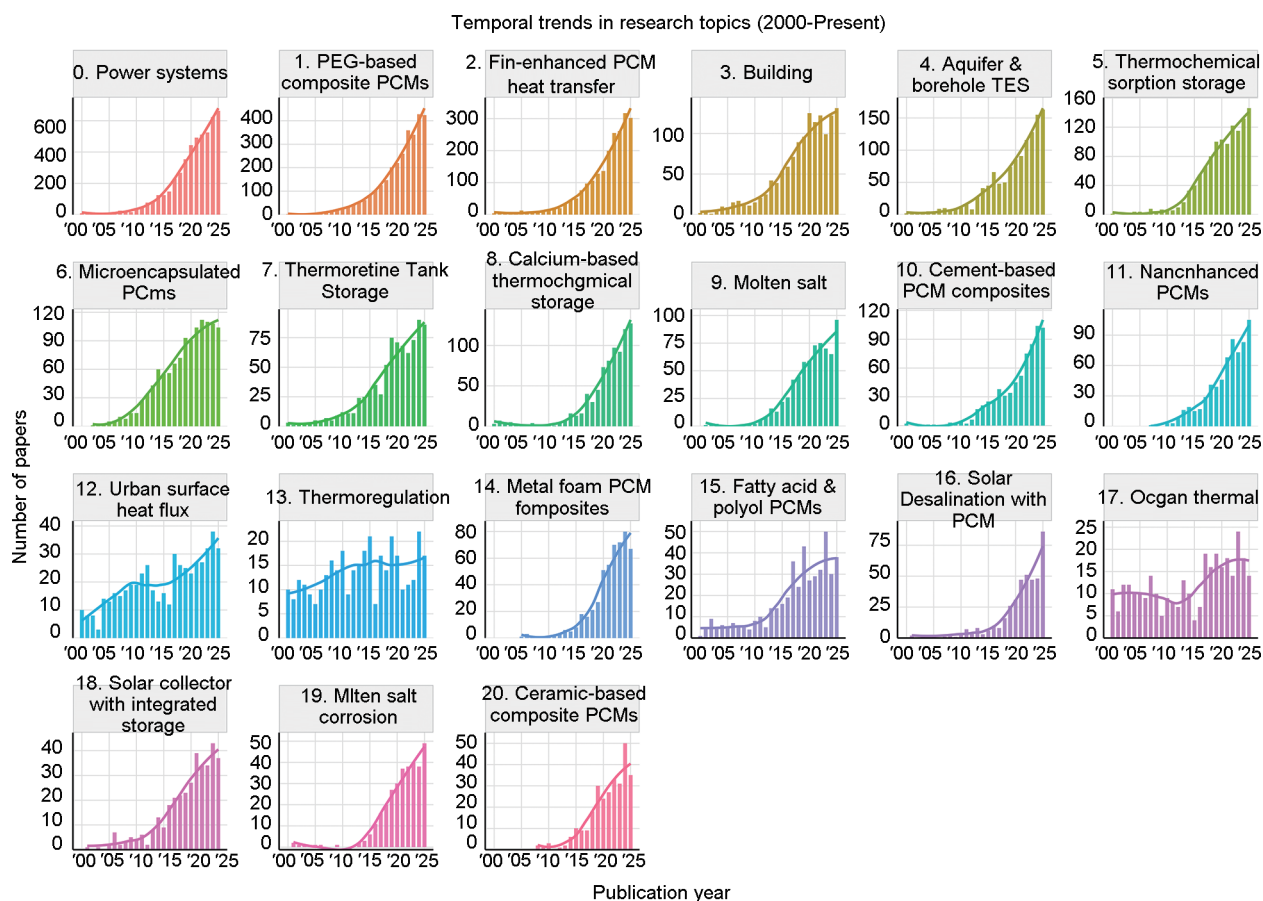


图5 储热技术研究论文的主题趋势分析

Fig. 5 Topic trend analysis of research papers on thermal energy storage technologies

电力系统(主题0)、PEG基复合相变材料(主题1)等为代表的一批主题自早期便持续活跃,并始终保持强劲增长,构成了领域的核心主线。进入2010年后,以吸附式热化学储热(主题5)、斜温层单罐储热(主题7)、钙基热化学储热(主题8)、熔盐(主题9)等为代表的面向高温、高能量密度及系统集成研究方向迅速兴起。近年来,含水层与钻孔储热(主题4)、太阳能海水淡化(主题16)等面向特定场景的交叉应用主题也呈现出明显的上升趋势。相比之下,主题13(人体热生理调控)与主题17(海洋热储存)增长态势相对平缓,研究规模与影响力尚未形成显著突破,尚未成为领域的主流增长极。这一趋势结构整体映射出该领域研究从基础材料与传热,向系统集成与前沿技术,再向多元化、场景化应用纵深发展的演进路径。

3 全球储热技术研究的机构布局

储热技术研究整体呈现出以中国机构为主导、

欧美传统科研强国持续发力、新兴国家逐步跟进的多元协同发展格局,主要机构如表2所示。中国方面,中国科学院以983篇的发文量位居全球首位,总被引次数(32419次)和H指数(88)等学术指标较高;西安交通大学、上海交通大学、华北电力大学、清华大学、浙江大学、华南理工大学等多所高校亦进入全球前列,显示出中国在储热材料、系统集成及工程应用方面形成的规模化研究力量,例如,上海交通大学篇均被引48.81次、篇均使用72.07次,显示出高质量研究与应用转化并重的特征。美国能源部(DOE)作为国家级科研管理机构,引领并推动了高温储热、热化学储能等方向的系统布局与发展。欧洲方面,德国亥姆霍兹联合会、德国航空航天中心(DLR)以及法国国家科学研究中心(CNRS)等机构依托其在能源与工程领域的长期积累,在储热基础研究与技术开发中发挥了关键作用。此外,印度理工学院系统、埃及知识库(EKB)等机构也体现了发展中国家在储热应用与研究领域的积极参与。

表2 储热技术研究论文的主要发表机构

Table 2 Main publishing institutions of research papers on thermal energy storage technologies

序号	机构	论文数量	总被引次数	篇均被引次数	总使用次数	篇均使用次数	H指数
1	中国科学院 (Chinese Academy of Sciences)	983	32419	32.98	67434	68.60	88
2	西安交通大学 (Xi'an Jiaotong University)	628	20351	32.41	31936	50.85	75
3	法国国家科学研究中心 (Centre National de la Recherche Scientifique, CNRS)	490	20600	42.04	22294	45.50	71
4	埃及知识库 (Egyptian Knowledge Bank, EKB)	472	15394	32.61	10374	21.98	68
5	印度理工学院系统 (Indian Institute of Technology System, IIT System)	471	11579	24.58	11573	24.57	54
6	德国亥姆霍兹联合会 (Helmholtz Association)	465	17763	38.20	19269	41.44	71
7	美国能源部 (United States Department of Energy, DOE)	443	17290	39.03	17864	40.33	68
8	印度国家理工学院系统 (National Institute of Technology System, NIT System)	423	10061	23.78	8286	19.59	52
9	中国科学院大学 (University of Chinese Academy of Sciences, CAS)	380	11414	30.04	24752	65.14	58
10	上海交通大学 (Shanghai Jiao Tong University)	377	18403	48.81	27171	72.07	70
11	华北电力大学 (North China Electric Power University)	376	9697	25.79	18566	49.38	54
12	清华大学 (Tsinghua University)	327	13278	40.61	20676	63.23	65
13	浙江大学 (Zhejiang University)	314	6590	20.99	14065	44.79	38
14	华南理工大学 (South China University of Technology)	308	17674	57.38	34281	111.30	78
15	莱里达大学 (Universitat de Lleida)	290	14884	51.32	11515	39.71	64

主要机构的研究主题布局各有侧重,如图6所示。大型国立科研机构,如中国科学院、美国能源部、德国亥姆霍兹联合会主导全面布局与战略前沿攻关;顶尖大学(尤以中国工科强校为代表)在核心技术与系统集成中扮演中坚力量;而众多高校则在各自擅长的材料创新或细分应用场景中深化研究,共同推动了储热领域知识与技术体系的发展。

以中国科学院为代表的综合性科研机构,研究覆盖了从核心材料到多元应用的储热技术各关键环节。其在PEG基复合相变材料(主题1)、电力系统(主题0)等多个核心主题上均表现突出,同时也在城市地表热通量调控、相变微胶囊制备及吸附式热化学储热等前沿与交叉方向上开展较多研究。以西安交通大学、浙江大学、华北电力大学及清华大学

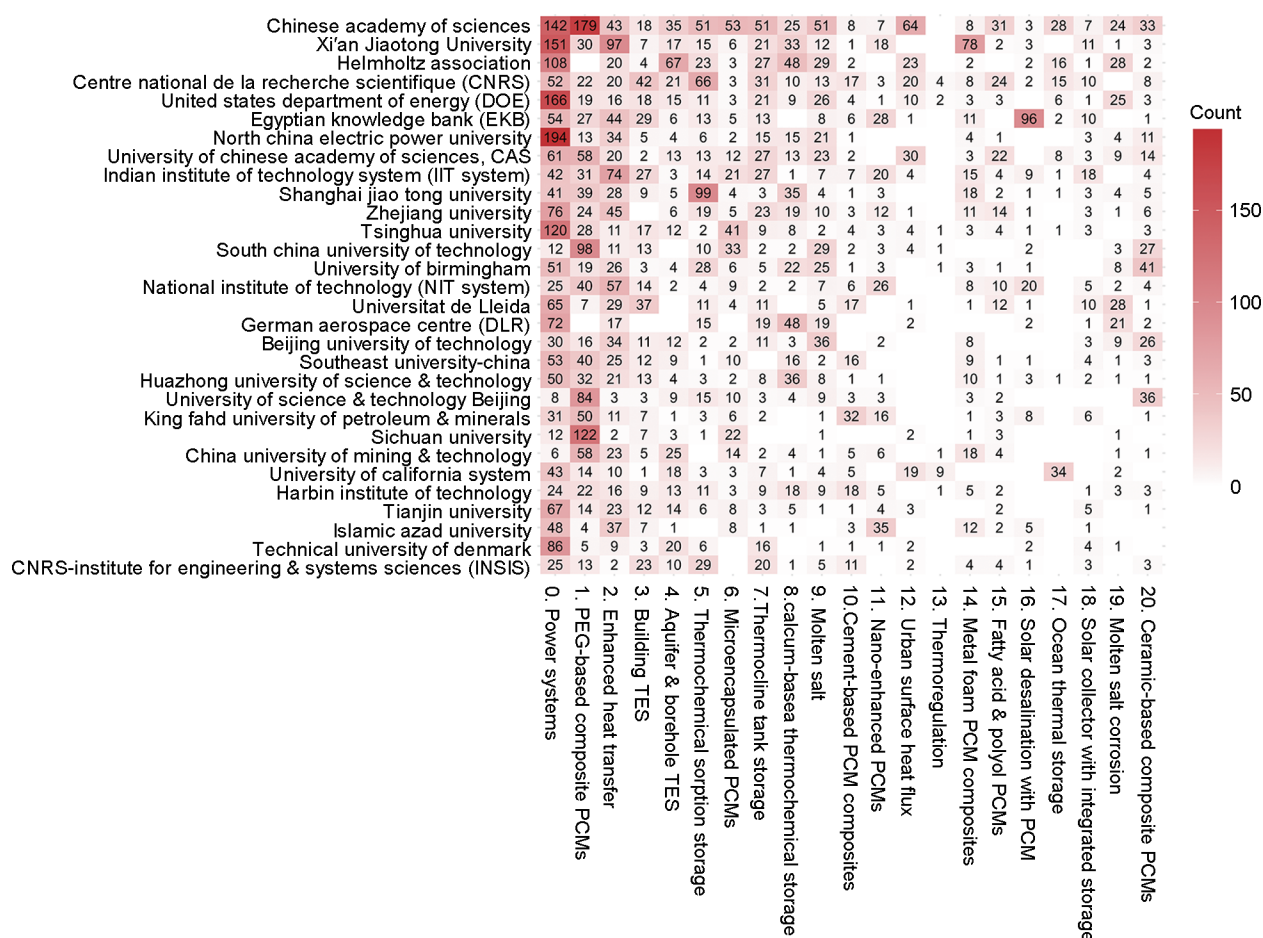


图6 储热技术研究主题图分析

Fig. 6 Topic map analysis of thermal energy storage research topics

为代表的中国高校，在能源电力与工程热物理领域形成了鲜明的研究特色，在电力系统(主题0)这一最大的应用领域均具有极强的研究实力。其中，西安交通大学在翅片强化传热(主题2)开展较多研究，并积极布局金属泡沫复合相变材料(主题14)等前沿方向。

美国与欧洲的顶尖科研机构则展现出面向未来能源系统的差异化战略布局。美国能源部的研究高度聚焦于熔盐(主题9)及其相关的熔盐腐蚀(主题19)等高温储热核心技术，旨在支撑聚光太阳能发电等国家重大战略产业。德国亥姆霍兹联合会则在推进含水层与钻孔储热(主题4)、钙基热化学储热(主题8)等大规模、前沿性储热技术上投入巨大；法国国家科学研究中心亦在吸附式热化学储热(主题5)领域深耕多年。

一批机构在特定主题上形成了全球性的特色与专长。例如，上海交通大学在吸附式热化学储热

(主题5)上成果突出；华南理工大学在PEG基复合相变材料(主题1)上研究集中；印度理工学院系统在翅片强化传热(主题2)技术领域较为活跃。埃及知识库(EKB)在太阳能海水淡化(主题16)上的研究高度集中，产量远超其他机构，这与其所处地区的水资源短缺问题紧密相关，区域资源禀赋与特定社会需求对科研方向形成强力牵引。

4 全球储热技术研究前沿与未来趋势分析

突现词图谱通过识别特定时段内关键词频率的爆发性增长(即突现强度)，揭示领域内研究热点的动态演变与新兴前沿，如图7所示。2010—2015年的研究焦点集中在“熔盐”“相变材料”“聚光太阳能”等基础材料。2015—2020年，研究前沿呈现多元化与交叉融合趋势，一是向材料细化和功能化拓展，“纳米流体”“氮化硼”等高性能复合材料

成为热点；二是与系统集成紧密衔接，“综合能源系统”“能源柔性”“光热转换”“热电联供/冷”等表明研究从单一技术向智慧能源系统集成的转变。2020 年以来，“热化学储热”“钙循环”“磁热效应”等前沿主题强度持续攀升，特别是以“热化学

储热”为代表的高能量密度技术，以“钙循环”为典型的高温长时储能路径，以及结合“磁热效应”等新型物理场调控的智能储热材料，共同勾勒出储热技术向更高能量密度、更长周期存储、更智能可控方向突破的前沿图景。

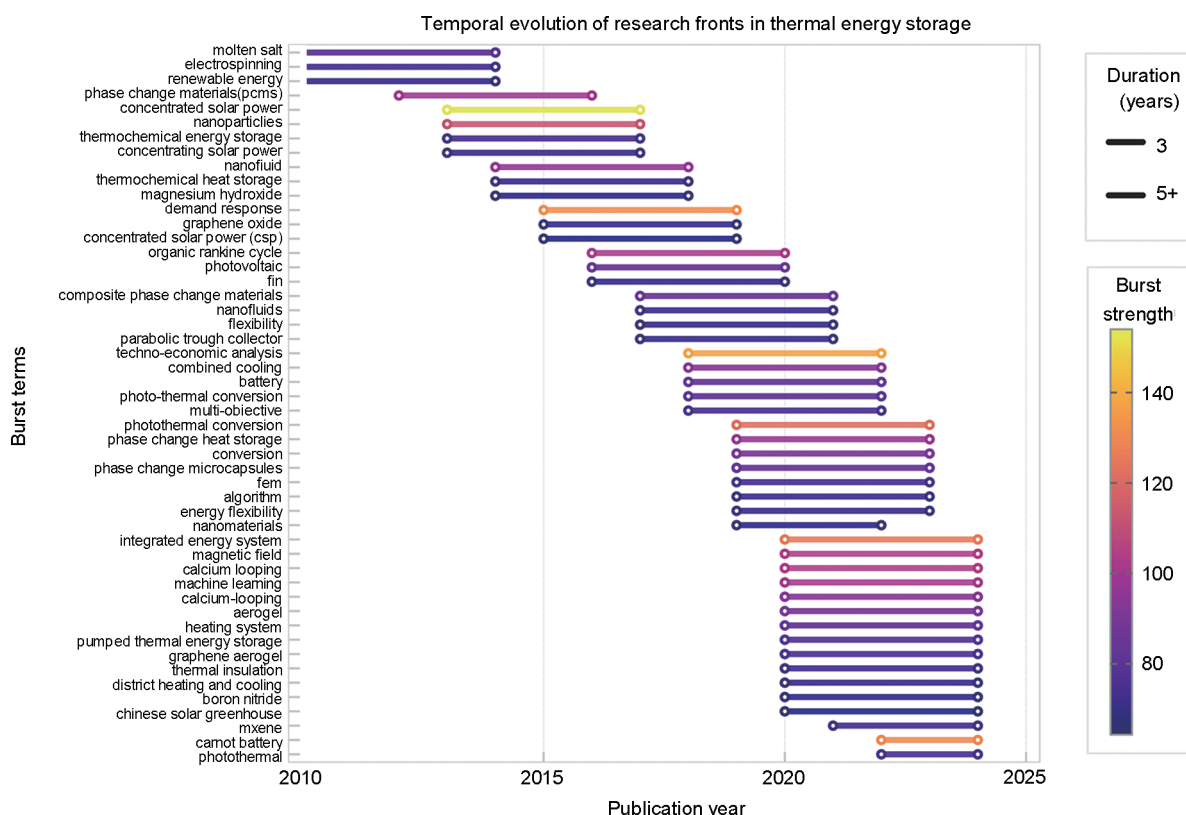


图 7 储热技术研究的突现词分析

Fig. 7 Burst term analysis of thermal energy storage research

结合突现词分析和代表性文献梳理研究前沿，涵盖从材料创新(如MXene基复合相变材料、磁场辅助储能)到系统集成(如综合能源系统、卡诺电池)，从多能耦合(如光热协同、钙循环)到智慧优化(如机器学习辅助经济与性能优化)等多维度发展方向。一是技术性能突破，聚焦于提升能量密度与储能周期，热化学储热与钙循环体系成为前沿方向；二是材料功能集成，通过MXene基复合相变材料与磁场辅助调控等技术，实现材料在光热、磁热等多场耦合下的智能响应；三是系统融合创新，推动储热与综合能源系统深度融合，卡诺电池等正拓展多能耦合应用场景；四是全链条智能化，人工智能技术正全面渗透于储热系统的材料设计、运行优化与协同控制。

钙循环技术作为高温热化学储热的核心路径，

当前研究前沿聚焦于提升材料的光热吸收、循环稳定性与反应动力学性能，并推动系统向太阳能直接驱动与规模化集成方向发展^[6]。以南京航空航天大学、西安交通大学、西班牙塞维利亚大学为代表的研究机构正通过多元素掺杂(如Mn、SiC、Al、Mg、Ce等)或复合改性策略，开发高光吸收、抗烧结的钙基复合材料，并结合原位表征与密度泛函理论(DFT)揭示微观增强机制^[7-9]。华中科技大学、浙江大学等机构致力于优化溶胶-凝胶、燃烧合成等材料制备工艺，提升材料循环储能密度^[10-11]。在系统集成层面，南京航空航天大学、英国伯明翰大学等正探索流化床反应器中太阳能直接辐照下的钙循环储能过程，以缓解局部过热并强化传质^[12]，塞维利亚大学、山东大学等则推进钙循环与氢氧化钙储热系统或制氢过程的耦合^[13-14]。未来趋势将更注重

多尺度材料设计、光-热-化协同调控,以及面向规模化应用的系统优化与成本控制,推动钙循环储能在光热电站与工业减排中的实际应用。

MXene基复合相变材料的研究前沿正从单一的光热转换向多源驱动(光/磁/电热)、多功能集成与结构精细化设计方向快速演进。以华南理工大学、华中科技大学、北京化工大学等为代表的研发团队,开发基于MXene气凝胶、海绵等多孔骨架的高负载、防泄漏相变复合材料,并聚焦于太阳能海水淡化这一应用场景,通过MXene的高效光热效应与相变材料的储热能力相结合,实现了在间歇光照下的持续稳定蒸发^[15-16]。前沿研究进一步向能量转换与功能一体化拓展,北京科技大学、广东工业大学等机构通过将MXene与 Fe_3O_4 等磁性纳米粒子复合,实现了太阳能与磁能的双重驱动与存储,光热转换效率最高达97.7%,并同步集成了优异的电磁屏蔽与微波吸收功能^[17-19]。未来趋势将更加注重多维结构精准调控、智能化响应,以及面向实际工程场景的规模化制备与长效稳定性探索,推动MXene基相变材料从高性能实验室样品走向柔性电子热管理、建筑节能及工业余热回收等应用^[20]。

磁场辅助储热的前沿研究聚焦于其与纳米流体、相变材料及多物理场的智能耦合调控,旨在突破传统储热材料的传热极限与可控性瓶颈。例如,广东工业大学、印度理工学院等机构通过非均匀磁场与磁性纳米颗粒(如 Fe_3O_4)的协同作用,实现了对相变材料熔化凝固界面及纳米颗粒分布的精准调控,揭示了磁场对纳米增强相变材料非牛顿流体行为的关键影响机制^[21-22]。同时,研究进一步探索了磁场-超声波-多孔介质等多场耦合策略,证明其对多元纳米流体(如三元纳米流体 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CuO-Cu/H}_2\text{O}$)的传热与储热性能具有显著协同增强效应,例如莫希-乌丁伊斯兰大学、费萨尔大学等机构的数值模拟表明,在多场耦合作用下系统热效率可提升超过200%^[23-24]。在器件与应用层面,伊朗伊斯兰阿扎德大学、马赞德兰大学等通过优化磁场布置,使相变材料熔化速率提升40%,并提出了磁控可逆储能单元的设计概念^[25]。未来趋势将更侧重于跨尺度实验验证、人工智能驱动的磁控策略优化以及环保型磁性纳米流体的开发,以推动磁热调控技术在可再生能源存储、高端制造热管理等领域的工业化应用。

光热的研究前沿正聚焦于多材料、多尺度集成

与多效应协同,以实现太阳能的高效捕获、转换、存储与按需管理。国内外机构,如中国科学院(广州能源所、兰州化学物理所等)、武汉理工大学、北京科技大学、南昌大学等,正致力于开发高性能光热功能材料与系统^[26-28],其核心包括构建具有光催化与光热协同效应的新型催化剂(如 $\text{Ag/MoS}_2\text{@Fe-CS}$ 气凝胶)以提升污染物降解效率;设计以MXene、石墨烯、碳纳米管等为骨架的定型相变复合材料(如 $\text{MXene@Fe}_3\text{O}_4\text{-MA}$ 、 PEG/PVA-rGO),通过增强光吸收与导热路径,将光热转换效率提升至90%以上,并集成磁热、电磁屏蔽等多功能;以及开发基于气凝胶、水凝胶和微胶囊的智能热管理器件(如双层水凝胶蒸发器、热致变色相变涂层),实现全天候海水淡化、可穿戴温控纺织品和自适应防/除冰等应用^[29-30]。未来趋势将更强调材料与器件的智能化、集成化与可持续性,例如通过动态共价键(如硼酸酯)赋予相变材料超稳定力学性能,利用热致变色与相变储能耦合实现光热效率的自调节,并进一步探索光-热-磁-电等多能量形式的协同转换与存储。

综合能源系统的研究前沿正深刻认识到储热技术是解锁系统灵活性、提升经济性与实现深度低碳化的关键核心。国内顶尖机构,如华北电力大学、清华大学、湖南大学及欧洲的杜伦大学、皇家理工学院等,正致力于开发先进的规划与运行优化方法。前沿探索主要聚焦于三个层面^[31-33],一是系统级协同规划,将储热与电、氢等储能进行容量-选址-运行的联合优化,以最经济方式平抑可再生能源波动与多能负荷差异,如华北电力大学对“电-热”混合储能系统的选址定容研究^[34];二是运行级灵活性提升,深度利用热网管道热惯性(“虚拟储热”)与建筑热质量等分散式储热特性,并与电锅炉、热泵、热电联产机组灵活耦合,以缓解以热定电约束,提升风电、光伏的消纳能力,如清华大学、华北电力大学对热网动态模型与多时间尺度调度的研究^[35-37];三是增强韧性,将储热作为关键应急热源,与天然气、氢能等多能源耦合,以应对极端天气或故障下的能源供应中断^[38]。未来趋势将更侧重储热的智能化与集成化,通过人工智能实现储热与电池在建筑级IES中的实时自适应优化,以及推动储热从“隐性”的缓冲单元向主动参与市场交易、提供多重辅助服务的智能资产演进^[39-40]。

卡诺电池作为一类基于热泵循环与热机循环耦合的大规模电能储存技术,近年来已成为储热领域重要的前沿研究方向,正从基础循环构型向系统集成化、材料高端化与调控智能化方向全面演进。在材料层面,东京科学大学、南京工业大学等机构将卡诺电池与钙基、水合盐等热化学储热技术结合,推动能量密度与储能时长显著提升^[41-42]。在系统层面,以中国科学院、西安交通大学为代表的研究聚焦于与低品位工业余热的深度集成,通过多热源协同管理实现系统往返效率的突破^[43];欧洲团队如德国纽伦堡大学则致力于有机闪蒸循环、二氧化碳跨临界循环等新型热力路径开发,以提升宽温区运行性能^[44]。同时,面向工程应用的技术经济性分析与智能调控成为关键趋势,浙江大学、根特大学等通过热经济建模与机器学习优化,评估其在光伏消纳与电网调峰中的成本与可行性^[45-46]。未来,卡诺电池的研究将更加注重与氢能、燃料电池等系统的多能耦合,并向材料定制化、设计智能化与商业规模化方向发展,旨在成为支撑高比例可再生能源新型电力系统的长时储能核心方案。

以机器学习、大语言模型为代表的人工智能技术正深刻驱动储热技术发展,从数据驱动辅助,快速转向物理信息融合与全生命周期智能设计^[47-48]。例如,清华大学、香港科技大学等正聚焦于构建基于机器学习的模型预测控制框架,通过集成负荷与可再生能源预测,优化含相变材料或冰储冷的区域供冷系统,以提升能效与经济性^[49-50];西安交通大学、哈立法大学等团队则利用 LSTM、图神经网络等工具,精准预测相变材料在复杂强化结构中的瞬态行为,并融合分子模拟进行新型储热材料的高通量智能筛选^[51-52]。前沿探索更侧重于发展融合物理机理的神经网络和集成智能优化算法的代理模型,以实现储热单元结构与系统的自动化设计。未来趋势将关注数字孪生驱动的集成能源系统协同调度、跨区域储热输配优化,以及基于强化学习的自适应控制,最大化储热在高比例可再生能源系统中的灵活性与经济价值^[53-54]。

尽管储热领域发展迅速,但仍存在技术空白,高参数材料与长周期系统亟待集中攻关。首先,超高温储热材料存在商业化空白,现有熔融盐体系的工作温度上限(约 565℃)制约了光热发电效率提升与高温工业应用,下一代超高温熔盐、金属/陶瓷

基相变复合材料及以钙循环为代表的热化学储热系统,其长期循环稳定性、腐蚀控制及成本问题尚未完全解决,距离大规模商业应用仍有显著差距。其次,热化学储热技术整体处于成熟度空白,该技术虽具备能量密度高、热损失极低的突出优势,尤其适合长时储能,但绝大多数体系仍停留在实验室或原型阶段,面临反应动力学、材料衰减与系统集成等多重挑战。再次,低成本、高可靠性的规模化跨季节储热技术存在应用空白,尽管含水层储热等技术已有示范,但能在全中国范围广泛部署、兼具极高经济性与可靠性的超大规模解决方案尚未形成,这需要材料、地下工程与系统设计的协同创新。

5 结论与展望

在全球能源结构向绿色低碳转型的进程中,储热技术展现出日益重要的战略价值。本研究发现,自 2010 年以来,该领域研究规模持续快速增长,形成了从以纳米增强相变材料、熔盐体系及热化学材料为代表的基础材料创新,到以翅片强化传热和斜温层储罐技术为核心的单元与器件开发,再到覆盖电力系统调峰、建筑节能调控、工业余热回收以及海水淡化等多场景应用的多层知识体系。全球研究力量呈现多元化格局,中国、美国和欧洲构成三大主导区域,分别聚焦于规模化工程应用、高温熔盐等战略技术布局以及热化学储能、含水层储热等前沿长时储能系统;印度、埃及等国家也在海水淡化等特定应用方向形成了特色研究。尽管全球储热技术发展迅速,但在迈向大规模商业化应用的过程中,仍面临一系列材料、系统、经济性及集成应用方面的核心瓶颈与挑战。

在材料层面,核心问题体现在性能、稳定与成本三方面,长期热稳定性、高导热性、抗腐蚀性 & 低成本是突破的关键。一是关键物性与长期稳定性不足,中高温相变材料(如熔盐)在反复热循环中易发生分解与性能衰减,影响系统可靠性与寿命;其普遍存在的腐蚀性也限制了严苛工况下的应用。二是导热与封装难题突出。高潜热材料(如石蜡)往往导热系数低,导致储/放热功率受限。尽管通过引入石墨骨架等可大幅提升导热率,却增加了材料复杂度与成本;而对于金属相变材料,其相变泄漏问题则对微胶囊封装工艺提出了极高要求。三是成本与可持续性制约。高性能材料往往价格高昂,推动

研究者探索如利用兰炭灰等工业固废作为复合骨架,以期在保障性能的同时降低成本、提升资源化利用水平。

在系统与经济性层面,降低初始投资、延长循环寿命、优化全生命周期成本是商业化推广的核心。储热系统,特别是相变储热系统,因涉及高性能材料与复杂结构,其初始投资成本通常高于传统系统,构成市场推广的主要障碍。同时,材料的循环稳定性直接决定了系统的更换频率,若无法实现数千甚至上万次稳定循环,将导致全生命周期度电成本偏高。此外,系统集成与运维日趋复杂,尤其在风光储等多能互补场景中,需协调多种设备并优化运行策略,这对系统设计与调度算法提出了极高要求。

在集成应用方面,储热技术虽为消纳波动性风光电力提供了关键路径,但仍面临源荷动态匹配与长期存储的挑战。一方面,可再生能源出力与热负荷需求在时序上存在错配,系统的容量与功率配置需在成本、效率与消纳能力间取得精细平衡,往往需借助多目标优化算法求解最优方案。另一方面,为实现太阳能跨季节储存以应对冬季供暖,大规模长期储热技术仍需克服热损失大、储热密度要求高及地下储热装置投资巨大等难题,其经济性与可靠性有待进一步通过示范工程验证。

为推动储热技术从示范应用迈向大规模商业化应用,需围绕材料、系统、应用及支撑体系展开系统性创新,布局向高温、集成化、长时储能倾斜。在材料层面,重点攻关高性能、低成本储热材料,包括开发适用于光热发电与高温工业的新型熔盐、陶瓷基相变材料及热化学储热材料,并利用工业固废制备定型相变材料以降低成本。同时发展兼具储热与热管理、热电转换等功能的多功能复合材料。在系统与装备层面,应通过跨尺度建模与人工智能优化储热系统设计,研发高效紧凑的换热器等关键部件,并推动储热模块标准化、模块化,以提升可靠性并降低部署成本。在应用层面,着力推进储热在工业余热回收与可再生能源供热中的集成,探索跨季节储热商业模式,并深化储热与热泵、风光发电及储电的协同,构建多能互补系统。此外,需完善储热全产业链标准体系与测试平台,建立开放共享的材料物性与案例数据库,并加强跨学科人才培养与国际合作,共同构建健康的技术生态,支撑储

热成为未来高比例可再生能源系统中的关键调节环节。

参考文献

- [1] SUN M Y, LIU T Z, WANG X L, et al. Roles of thermal energy storage technology for carbon neutrality[J]. Carbon Neutrality, 2023, 2(1): 12. DOI:10.1007/s43979-023-00052-w.
- [2] 汪翔, 陈海生, 徐玉杰, 等. 储热技术研究进展与趋势[J]. 科学通报, 2017, 62(15): 1602-1610. DOI:10.1360/N972016-00663.
- [3] WANG X, CHEN H S, XU Y J, et al. Advances and prospects in thermal energy storage: A critical review[J]. Chinese Science Bulletin, 2017, 62(15): 1602-1610. DOI:10.1360/N972016-00663.
- [4] MAHLIA T M I, SAKTISAHDAN T J, JANNIFAR A, et al. A review of available methods and development on energy storage; technology update[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 33: 532-545. DOI:10.1016/j.rser.2014.01.068.
- [5] ALI H M, REHMAN T U, ARICI M, et al. Advances in thermal energy storage: Fundamentals and applications[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2024, 100: 101109. DOI: 10.1016/j.pecs.2023.101109.
- [6] 马鸿坤, 纪明希, 丁玉龙. 中低温吸附式热化学储热研究现状与进展[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(12): 4436-4451. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0909.
- [7] MA H K, JI M X, DING Y L. Current status and advances in the low-to-medium temperature sorption-based thermochemical heat storage[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(12): 4436-4451. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0909.
- [8] DA Y, ZHOU J L. Multi-doping strategy modified calcium-based materials for improving the performance of direct solar-driven calcium looping thermochemical energy storage[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2022, 238: 111613. DOI: 10.1016/j.solmat.2022.111613.
- [9] LI B Y, LI Y J, DOU Y H, et al. SiC/Mn Co-doped CaO pellets with enhanced optical and thermal properties for calcium looping thermochemical heat storage[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 423: 130305. DOI:10.1016/j.cej.2021.130305.
- [10] LIU H, ZHANG J S, WEI J J. Mn and Mg synergistically stabilized CaO as an effective thermochemical material for solar energy storage[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2023, 252: 112202. DOI:10.1016/j.solmat.2023.112202.
- [11] MEDINA-CARRASCO S, VALVERDE J M. The Calcium Looping process for energy storage: Insights from *in situ* XRD analysis[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 429: 132244. DOI:10.1016/j.cej.2021.132244.
- [12] LUO T, LUO C, SHI Z W, et al. Optimization of sol-gel combustion synthesis for calcium looping CO₂ sorbents, part I: Effects of sol-gel preparation and combustion conditions[J]. Separation and Purification Technology, 2022, 292: 121081. DOI: 10.1016/j.seppur.2022.121081.
- [13] CHAI F Y, ZHU P W, XU H R, et al. Mn and Al co-modified CaO-based composites from various calcium precursors for

- thermochemical energy storage: High energy storage density and excellent solar absorption ability[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2024, 269: 112761. DOI:10.1016/j.solmat.2024.112761.
- [12] ZHENG H B, LIU X L, XUAN Y M, et al. Efficient direct solar-driven thermochemical energy storage of $(\text{AlMgFeMn})\text{O}_x\text{CaCO}_3$ pellets in a fluidized bed reactor[J]. *Energy Conversion and Management*, 2023, 285: 116990. DOI: 10.1016/j.enconman.2023.116990.
- [13] CARRO A, CHACARTEGUI R, ORTIZ C, et al. Integration of calcium looping and calcium hydroxide thermochemical systems for energy storage and power production in concentrating solar power plants[J]. *Energy*, 2023, 283: 128388. DOI: 10.1016/j.energy.2023.128388.
- [14] ZHANG C X, LI Y J, YANG L G, et al. Analysis on H_2 production process integrated $\text{CaO}/\text{Ca}(\text{OH})_2$ heat storage and sorption enhanced staged gasification using calcium looping[J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 253: 115169. DOI:10.1016/j.enconman.2021.115169.
- [15] ZHENG Z H, LIU H, WU D Z, et al. Polyimide/MXene hybrid aerogel-based phase-change composites for solar-driven seawater desalination[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 440: 135862. DOI:10.1016/j.cej.2022.135862.
- [16] LIU H, TIAN D L, ZHENG Z H, et al. MXene-decorated magnetic phase-change microcapsules for solar-driven continuous seawater desalination with easy salt accumulation elimination[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 458: 141395. DOI:10.1016/j.cej.2023.141395.
- [17] GAO Y, TANG Z D, CHEN X, et al. Magnetically accelerated thermal energy storage within Fe_3O_4 -anchored MXene-based phase change materials[J]. *Aggregate*, 2023, 4(1): e248. DOI: 10.1002/agt2.248.
- [18] CAO Y, ZENG Z H, HUANG D Y, et al. Multifunctional phase change composites based on biomass/MXene-derived hybrid scaffolds for excellent electromagnetic interference shielding and superior solar/electro-thermal energy storage[J]. *Nano Research*, 2022, 15(9): 8524-8535. DOI:10.1007/s12274-022-4626-6.
- [19] QUAN B Q, WANG J Z, LI Y, et al. Cellulose nanofibrous/MXene aerogel encapsulated phase change composites with excellent thermal energy conversion and storage capacity[J]. *Energy*, 2023, 262: 125505. DOI:10.1016/j.energy.2022.125505.
- [20] WENG M M, LIN J H, YANG Y J, et al. MXene-based phase change materials for multi-source driven energy storage, conversion and applications[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2024, 272: 112915. DOI:10.1016/j.solmat.2024.112915.
- [21] XU W B, HUANG T J, HUANG S M, et al. Regulation mechanism of magnetic field on non-Newtonian melting and energy storage performance of metal foam composite nano-enhanced phase change materials[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2023, 200: 123501. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123501.
- [22] KUMAR A, SAHA S K, KUMAR K R, et al. Study of melting of paraffin dispersed with copper nanoparticles in square cavity subjected to external magnetic field[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 50: 104338. DOI:10.1016/j.est.2022.104338.
- [23] ADNAN, ASHRAF W. Thermal efficiency in hybrid $(\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CuO}/\text{H}_2\text{O})$ and ternary hybrid nanofluids $(\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CuO-Cu}/\text{H}_2\text{O})$ by considering the novel effects of imposed magnetic field and convective heat condition[J]. *Waves in Random and Complex Media*, 2025, 35(4): 8029-8044. DOI:10.1080/17455030.2022.2092233.
- [24] LI H X, ZHUANG Y J, FENG J C. Multi-scale experimental analysis on the coupled effects of ultrasonic field and magnetic field on the melting and energy storage performances for hybrid nano-enhanced phase change materials[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 84: 110801. DOI:10.1016/j.est.2024.110801.
- [25] ALI RABIENATAJ DARZI A, MOUSAVI S M. Enhancement of charging and discharging of phase change material in annular thermal energy storage unit by applying magnetic field[J]. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 2023, 83(6): 609-625. DOI:10.1080/10407782.2022.2102315.
- [26] LIU C, ZHANG G W, ZHANG H, et al. Construction of $\text{Ag}/\text{MoS}_2@\text{Fe-CS}$ aerogel as excellent PMS activator via synergistic photocatalysis and photothermal effects[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 455: 140814. DOI: 10.1016/j.cej.2022.140814.
- [27] GAO Y, CHEN X, JIN X, et al. Multifunction integration within magnetic CNT-bridged MXene/CoNi based phase change materials[J]. *eScience*, 2024, 4(6): 100292. DOI: 10.1016/j.esci.2024.100292.
- [28] GU X B, DONG K J, PENG L H, et al. Round-the-clock interfacial solar vapor generator enabled by form-stable phase change materials with enhanced photothermal conversion capacity[J]. *Energy Conversion and Management*, 2023, 277: 116634. DOI: 10.1016/j.enconman.2022.116634.
- [29] ZHENG Z H, LIU H, WANG X D. Double-layered hydrogels based on phase change material and pen ink for continuous and efficient solar-driven seawater desalination[J]. *Desalination*, 2024, 574: 117276. DOI:10.1016/j.desal.2023.117276.
- [30] ZHANG J, ZHANG Y, WU S L, et al. Weavable coaxial phase change fibers concentrating thermal energy storage, photothermal conversion and thermochromic responsiveness toward smart thermoregulatory textiles[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 483: 149281. DOI:10.1016/j.cej.2024.149281.
- [31] QIN Y X, LIU P, LI Z. Multi-timescale hierarchical scheduling of an integrated energy system considering system inertia[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 169: 112911. DOI:10.1016/j.rser.2022.112911.
- [32] LI Y, ZOU Y, TAN Y, et al. Optimal stochastic operation of integrated low-carbon electric power, natural gas, and heat delivery system[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2018, 9(1): 273-283. DOI:10.1109/TSTE.2017.2728098.
- [33] YOU M L, WANG Q, SUN H J, et al. Digital twins based day-ahead integrated energy system scheduling under load and renewable energy uncertainties[J]. *Applied Energy*, 2022, 305: 117899. DOI:10.1016/j.apenergy.2021.117899.

- [34] YAN R J, WANG J J, HUO S J, et al. Flexibility improvement and stochastic multi-scenario hybrid optimization for an integrated energy system with high-proportion renewable energy[J]. *Energy*, 2023, 263: 125779. DOI:10.1016/j.energy.2022.125779.
- [35] QIN Y X, LIU P, LI Z. Multi-timescale hierarchical scheduling of an integrated energy system considering system inertia[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 169: 112911. DOI:10.1016/j.rser.2022.112911.
- [36] WANG J J, DENG H D, QI X L. Cost-based site and capacity optimization of multi-energy storage system in the regional integrated energy networks[J]. *Energy*, 2022, 261: 125240. DOI: 10.1016/j.energy.2022.125240.
- [37] WANG Y L, LIU C, QIN Y M, et al. Synergistic planning of an integrated energy system containing hydrogen storage with the coupled use of electric-thermal energy[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(40): 15154-15178. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.12.334.
- [38] REN H B, JIANG Z P, WU Q, et al. Integrated optimization of a regional integrated energy system with thermal energy storage considering both resilience and reliability[J]. *Energy*, 2022, 261: 125333. DOI:10.1016/j.energy.2022.125333.
- [39] BRANDI S, GALLO A, CAPOZZOLI A. A predictive and adaptive control strategy to optimize the management of integrated energy systems in buildings[J]. *Energy Reports*, 2022, 8: 1550-1567. DOI:10.1016/j.egyr.2021.12.058.
- [40] SRITHAPON C, MÅNSSON D. Predictive control and coordination for energy community flexibility with electric vehicles, heat pumps and thermal energy storage[J]. *Applied Energy*, 2023, 347: 121500. DOI:10.1016/j.apenergy.2023.121500.
- [41] ZAMENGO M, YOSHIDA K, MORIKAWA J. Numerical evaluation of a Carnot battery system comprising a chemical heat storage/pump and a Brayton cycle[J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 41: 102955. DOI:10.1016/j.est.2021.102955.
- [42] LI W, ZHANG L J, DENG Y J, et al. Thermo-economic assessment of a salt hydrate thermochemical energy storage-based Rankine Carnot battery system[J]. *Energy Conversion and Management*, 2024, 312: 118564. DOI: 10.1016/j.enconman.2024.118564.
- [43] ZHANG M Y, SHI L F, HU P, et al. Carnot battery system integrated with low-grade waste heat recovery: Toward high energy storage efficiency[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 57: 106234. DOI:10.1016/j.est.2022.106234.
- [44] EPPINGER B, STEGER D, REGENSBURGER C, et al. Carnot battery: Simulation and design of a reversible heat pump-organic Rankine cycle pilot plant[J]. *Applied Energy*, 2021, 288: 116650. DOI:10.1016/j.apenergy.2021.116650.
- [45] LI W, ZHANG L J, WANG Q W, et al. Techno-economic evaluation of a Rankine Carnot battery coupling air-source energy and salt hydrate thermochemical heat transformer[J]. *Energy Conversion and Management*, 2025, 339: 119966. DOI: 10.1016/j.enconman.2025.119966.
- [46] TASSENOY R, COUVREUR K, BEYNE W, et al. Techno-economic assessment of Carnot batteries for load-shifting of solar PV production of an office building[J]. *Renewable Energy*, 2022, 199: 1133-1144. DOI:10.1016/j.renene.2022.09.039.
- [47] MEHRAJ N, MATEU C, CABEZA L F. Use of artificial intelligence methods in designing thermal energy storage tanks: A bibliometric analysis[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 97: 112794. DOI:10.1016/j.est.2024.112794.
- [48] PENG Z, OHLSON TIMOUDAS T, WANG Q. Building ontologies for 4-5GDHC: A critical evaluation and modeling experiments on building-side components[J]. *Journal of Building Engineering*, 2025, 114: 114204. DOI:10.1016/j.jobee.2025.114204.
- [49] TANG H, YU J, GENG Y, et al. Optimization of operational strategy for ice thermal energy storage in a district cooling system based on model predictive control[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 62: 106872. DOI:10.1016/j.est.2023.106872.
- [50] ZHOU Y K, ZHENG S Q, HENSEN J L M. Machine learning-based digital district heating/cooling with renewable integrations and advanced low-carbon transition[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024, 199: 114466. DOI:10.1016/j.rser.2024.114466.
- [51] XIAO T, LIU Z G, LU L, et al. LSTM-BP neural network analysis on solid-liquid phase change in a multi-channel thermal storage tank[J]. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2023, 146: 226-240. DOI:10.1016/j.enganabound.2022.10.014.
- [52] AMINI TOOSI H, DEL PERO C, LEONFORTE F, et al. Machine learning for performance prediction in smart buildings: Photovoltaic self-consumption and life cycle cost optimization[J]. *Applied Energy*, 2023, 334: 120648. DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.120648.
- [53] YOU M L, WANG Q, SUN H J, et al. Digital twins based day-ahead integrated energy system scheduling under load and renewable energy uncertainties[J]. *Applied Energy*, 2022, 305: 117899. DOI:10.1016/j.apenergy.2021.117899.
- [54] ZHOU Y K, ZHENG S Q, HENSEN J L M. Machine learning-based digital district heating/cooling with renewable integrations and advanced low-carbon transition[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024, 199: 114466. DOI:10.1016/j.rser.2024.114466.