

文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-13

doi: 10.12465/issn.0253-4339.20260811001

低碳建筑中的热储能技术综述:从应用到优化

赵恒昕^{1,2} 李诗莹^{1,2} 吴一凡^{1,2} 林波荣^{1,2} 侯汪蓝^{1,2}

(1 清华大学建筑学院 北京 100084; 2 清华大学生态规划与绿色建筑教育部重点实验室 北京 100084)

摘要 在“双碳”目标与建筑领域低碳转型背景下,热储能技术是破解能源供需时空错位、提升建筑用能柔性的重要技术路径。鉴于热储能技术在建筑节能领域的应用潜力,本文系统回顾了其在建筑应用的发展现状、应用挑战及优化方向,梳理了3类热储能技术的分类体系,并从围护结构集成与暖通系统耦合两大应用维度,全面总结热储能技术的研究进展与节能效果。在此基础上,进一步归纳了基于材料、结构改进与基于外场调控的性能强化方法,并结合本团队研究提出新型相变热二极管储能屋顶与移动式供冷储能末端2类创新方案。最后总结当前技术规模化应用的瓶颈,展望未来发展方向,为建筑热储能技术的研究与工程应用提供理论参考。

关键词 低碳建筑;热储能技术;相变材料;热二极管;移动式末端

中图分类号: TK02; TU201.5

文献标识码: A

Review of Thermal Energy Storage Technologies in Low-Carbon Buildings: From Application to Optimization

Zhao Hengxin^{1,2} Li Shiyang^{1,2} Wu Yifan^{1,2} Lin Borong^{1,2} Hou Wanglan^{1,2}

(1. School of Architecture, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Key Laboratory of Eco-Planning & Green Building, Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract

Significance Against the backdrop of global carbon peaking and carbon neutrality goals, the building sector faces an urgent demand for low-carbon transformation. Heating, ventilation, and air-conditioning (HVAC) systems account for more than 60% of the building energy consumption, accompanied by a prominent temporal-spatial mismatch between energy supply and demand. Thermal energy storage (TES) technologies, which allow for the storage and release of thermal energy on demand, represent a pivotal solution to mitigate this mismatch and enhance the energy flexibility of buildings. However, the existing literature mainly focuses on the basic classification and conventional applications of TES while lacking a systematic summary of advanced-performance optimization systems and interdisciplinary innovative application schemes in building scenarios. To fill this research gap, the present study conducted a comprehensive review of the development status, application challenges, and optimization pathways of TES technologies in building applications, thereby providing valuable theoretical references for related research and engineering practices.

Progress This paper elaborates on the classification and working mechanisms of three mainstream TES technologies: sensible heat storage, latent heat storage, and thermochemical storage. Water-based sensible heat storage is widely deployed owing to its technological maturity and low cost; however, it is constrained by its low energy density and considerable space occupation. Latent heat storage utilizing phase-change materials (PCM) features high energy density and a nearly isothermal charging-discharging process, thus emerging as a research hotspot in building energy storage. Thermochemical storage boasts of ultrahigh energy density and negligible heat loss during long-term storage, although most relevant technologies are still in the laboratory research stage.

收稿日期:2026-08-11;修回日期:2026-09-06;录用日期:2026-09-07 责任编辑:王亚薇

基金项目:国家自然科学基金项目(52608189,52508123,52425801)、博士后创新人才支持计划(BX2026253)、中国博士后科学基金项目(2026T190438)资助。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52608189, No. 52508123, No. 52425801), the National Postdoctoral Program for Innovative Talents (No. BX2026253), and the China Postdoctoral Science Foundation (No. 2026T190438).)



移动阅读

Conclusion and Prospect TES technologies have demonstrated remarkable application value in building energy conservation and power grid demand response, serving as core enablers for the low-carbon transformation of the building sector. Nevertheless, the large-scale engineering deployment of TES is still hindered by multiple bottlenecks: the intrinsically low thermal conductivity of PCMs restricts the heat charge-discharge rate; the integration adaptability between TES systems and existing building energy systems remains inadequate; and there is a lack of comprehensive evaluation covering full life-cycle economic and environmental benefits.

Keywords low-carbon building; thermal energy storage technology; phase-change materials; thermal diode; mobile terminal

全球气候变化与能源供需结构失衡已成为制约人类社会可持续发展的两大核心挑战。自工业革命以来,全世界对化石能源的长期高度依赖,不仅导致煤炭、石油等不可再生资源储量日趋枯竭^[1],更伴随大量温室气体排放,诱发高温热浪、强降雨等极端天气事件频发,全球生态系统稳定性与社会经济运行秩序均面临严峻挑战。在此背景下,推动能源结构向清洁低碳、安全高效的方向转型,已成为世界各国能源战略布局的主要方向^[2]。

在我国“双碳”目标的引领下,能源体系低碳转型进程持续加速^[3]。建筑领域作为全球能耗与碳排放的三大重点领域之一,其降碳成效直接决定了“双碳”目标的实现进度。现有研究表明,全球建筑行业终端能源消耗量占全社会总能耗的三分之一以上^[4],随着全球城市化进程的不断推进,预计至2050年建筑领域能耗与碳排放占比将突破50%^[5]。在建筑的各项能耗中,供暖、通风与空调系统是最主要的能耗来源,占比高达60%以上^[5],是建筑领域推进低碳节能的关键。与此同时,全球气候变暖及城市热岛效应持续加剧,使得建筑能源供给在时间、空间分布上的差异问题愈发明显,能源供需压力持续加大^[6]。在我国既有建筑规模庞大、新建建筑持续增长的背景下,探索高效低碳的建筑节能技术,对推动建筑领域低碳化、助力“双碳”目标实现具有重要意义与应用价值。

从建筑用能特征来看,电力等能源的使用呈现显著的峰谷波动特征。热储能技术可以通过储能介质在能量富余时段吸收并储存热能或冷能,在能源需求高峰时段释放能量^[7-8],从而实现能量的时空转移,有效解决能源供需在时间、温度或地理位置方面的诸多不匹配问题。深入探索与优化热储能技术,为破解建筑能耗难题、实现能源供需动态匹配提供了可行的解决方案。按照储能机理的不同,热储能技术可分为显热储能、潜热储能与热化学储能三大类^[9]。与电化学储能相比,面向建筑场景的热储能技术兼具能量存储与冷热供给的双重属性:主动式储能结构可与建筑暖通空调系统结合,被动式储能技术可直接集成于建筑围护结构之中,无需额外占用

建筑空间。因此,推动热储能技术在建筑领域的规模化应用,不仅可有效提升可再生能源消纳率、降低建筑运行能耗,还能挖掘建筑侧柔性负荷调节潜力、助力电网削峰填谷,具有显著的节能效益与经济价值^[10]。

综上所述,为探明先进热储能技术的发展脉络,明确其在建筑场景中的应用效果与提升路径,本文对热储能技术在建筑节能领域的国内外研究进展进行了全面梳理与归纳总结。首先,本文梳理了热储能技术的分类体系与作用机理,对比阐明了不同技术路线的性能特征与适用场景;其次,按照围护结构集成与暖通系统耦合2种应用形式,深入研究了热储能技术在建筑领域的应用效果与节能潜力;在此基础上,进一步探讨了建筑场景下热储能技术的性能优化方法与前沿技术路径,并结合本团队研究成果提出了新型建筑热储能应用系统方案;最后,总结了当前热储能技术规模化工程应用面临的瓶颈与挑战,并结合建筑领域节能降碳的发展需求对未来研究方向进行了展望。本综述旨在为热储能技术在建筑领域的技术研究与工程应用提供理论参考与实践借鉴。

1 热储能技术分类与基本原理

热储能技术通过储能介质实现能量的存储与定向释放,可有效解决能源供需在时间、空间及温度层级上的错位问题。如图1所示,按照储能机制的差异,热储能可分为显热储能、潜热储能与热化学储能三大类,三者 in 储能密度、温度特性与商业化成熟度上各有侧重,分别适合不同场景的储能需求^[11]。

1.1 显热储能

显热储能是发展最早、工程应用最广泛的热储能技术^[12],其工作原理是通过改变储能介质的温度进行储存和释放热量,储释过程中介质无相变,储热量与介质的质量、比热容及温差呈正相关。在建筑应用场景中,常用的显热储能介质主要分为2类:一类是以水为代表的液态介质,具有比热容大、成本低廉、换热便捷的优势,是空调蓄冷蓄热水箱常用的储热介质,广泛应用于公共建筑集中空调系统;另一类为岩土及建筑结构类介质,包括土壤、砾石等,可依

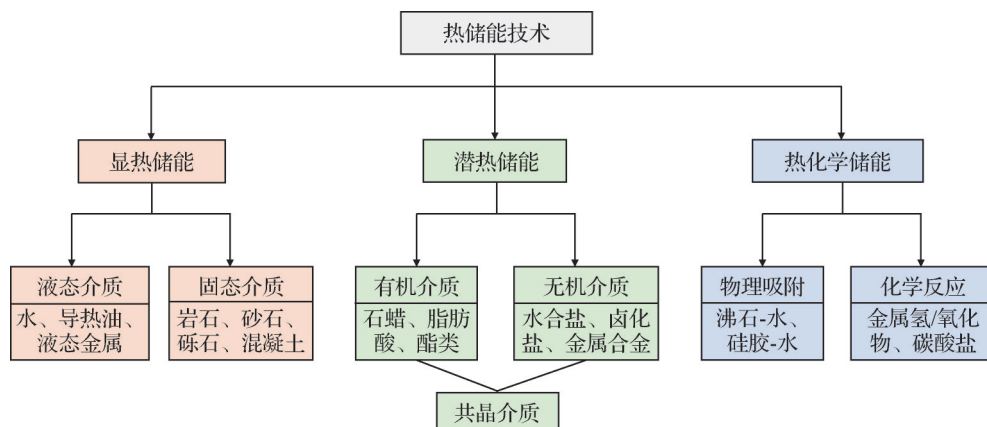


Fig.1 Categorization of thermal energy storage technologies

托地下空间或建筑本体结构实现储能,具备成本低、不额外占用建筑有效空间的特点。

总体而言,显热储能技术成熟、系统结构简单、运行稳定,是当前建筑应用的主流热储能技术。然而显热储能技术的局限也较为突出,不仅能量密度偏低,且储放热过程中输出温度波动显著,为实现同等储热容量,一般需要配置更大体积的储能设备与相应占地空间^[13]。

1.2 潜热储能

潜热储能又称相变储能,是利用储能介质发生物相变化时吸收或释放大量潜热实现能量存储的技术。潜热储能在储放热过程中介质温度近似恒定,利用材料熔化、凝固等相变过程中吸收或释放的大量潜热完成储放热,能量密度优于显热储能,是当前建筑储能领域的研究热点^[14]。依据材料属性的差异,建筑常用相变材料可分为有机、无机及共晶3类。其中有机相变材料以石蜡、脂肪酸为代表,化学性质稳定,是建筑围护结构集成的主流材料;无机相变材料以水合盐、卤化盐为代表^[15],相变潜热高于有机材料且成本更低;共晶相变材料则是由2种及以上材料混合而成,可通过材料配比调节相变温度。

潜热储能的突出优势是储能密度显著高于显热储能,系统结构更紧凑,且相变过程近似等温,易与暖通空调等运行系统耦合。然而,相变材料的导热系数普遍偏低,导致热储能系统传热速率受限^[16],同时部分相变材料还存在高成本及腐蚀性的问题,制约了其在建筑场景中的应用。

1.3 热化学储能

热化学储能可分为物理吸附与化学反应2种^[4]。吸附储能依靠吸附和解吸作用实现能量存储,化学反应储能则基于可逆化学反应的焓变实现能量储存与释放,充电时反应物吸收热能发生分解反应,将能

量以化学能形式储存;放电时反应物发生合成反应释放热量,整个过程伴随化学键的断裂与重构^[17]。由于热化学储能过程几乎没有显热损失,理论上可以实现跨季节长周期储存而无能量衰减,是下一代长周期储能的重要发展方向。

凭借化学反应的能量存储特性,热化学储能的能量密度远高于显热储能与潜热储能,兼具储能效率高、存储寿命长的优势。但目前多数热化学储能技术仍处于实验室研发阶段,技术体系尚不成熟^[18],在建筑场景的应用仍面临诸多技术瓶颈与成本约束。

2 热储能技术在建筑中的应用效果

在建筑应用中,热储能技术按集成方式与作用机理可分为被动式与主动式两大路线。被动式热储能以围护结构为载体,将热储能材料复合于墙体、屋面、地板等构件中,通过储放热特性提升建筑热惯性,削弱室外温度波动对室内的影响,降低建筑冷热负荷^[19]。主动式热储能以独立储能装置为核心,与建筑空调、供暖等系统结合,在电价低谷或可再生能源富余时段蓄存能量,用能高峰时定向释放,实现负荷移峰填谷,提升建筑用能经济性。本节将从围护结构集成和暖通系统耦合2方面入手,系统研究热储能在建筑应用的研究进展与节能效果。

2.1 热储能技术在围护结构中的集成应用

热储能技术在围护结构中的应用是将储能材料直接嵌入建筑围护结构,依托建筑本体实现热能的储放过程,无需占用额外空间。相变材料是该技术路线中应用最广泛的储能介质^[20],将相变储能材料复合于建筑中可以提升围护结构的热容,有效抑制温度波动。

在建筑墙体应用方面,国内外学者围绕相变材

料与墙体的集成方式、热性能调控效果及其影响因素开展了大量实验与数值模拟研究^[21]。其中,早在1993年,D. W. Hawes等^[22]就尝试将相变材料直接添加至石膏墙板中,验证了添加相变材料的墙板温度比传统墙板低4℃,且在阻燃性和防潮性方面表现更好。M. Khan等^[23]研究显示,在围护结构中应用相变储能材料可以提升建筑能效,巴基斯坦地区的单层建筑每月可节能32.0%~49.6%。M. A. Izquierdo-Barrientos等^[24]建立了相变储能材料应用于建筑外墙的瞬态传热模型,对瞬时热流的削减幅度进行了量化表征。考虑到嵌入位置会直接影响相变材料的性能,Jin Xing等^[25]对相变储能材料在3种不同墙体位置中的热性能进行了分析。结果表明,与常规结构相比,将相变储能材料嵌入墙体内部可降低11%的峰值热流密度,而置于墙体外侧或中间时,其对热流的调控效果相对有限。上述研究从材料可行性验证、建筑能效评估向嵌入位置优化与传热机理深化等逐步推进,证明相变墙体可有效削减峰值热流,其实际效果与相变温度、嵌入位置及当地气候特征的匹配程度密切相关。

在屋面应用方面,Meng Erlin等^[26]对普通屋顶、高反射率屋顶及高反射复合相变材料屋顶进行了实验对比,发现高反射复合相变材料屋顶应用效果最佳,可以减少66.8%的热流,并使室内温度降低2.2℃。D. K. Bhamare等^[27]针对相变材料集成屋顶构建了三维数值模型。经验证,与常规屋顶相比,相变储能集成屋顶可使天花板温度保持在25.5~27.5℃,并显著降低峰值热负荷。此外,被动式天花板冷却系统中也常采用填充水合盐的相变储能袋^[28],这种产业化的商品使用方便,应用后可使室内峰值温度降低约2℃。在地板应用方面,Lin Kunping等^[29]较早将定型相变板材嵌入地板结构,实测表明该系统可在夜间蓄热、日间平稳释热,在维持室内热舒适的同时显著降低采暖运行电费。F. Rebelo等^[30]进一步开展了辐射地板结合微胶囊相变材料的实验分析,经验证,结合相变材料的地板可显著平抑温度波动,避免峰值热负荷。Wang Zhenyu等^[31]则对比了相变材料在辐射地板的不同集成模式,结果表明,相变层的布置位置与封装方式对地板表面温度响应与释热特性具有显著影响,包覆式布置的相变材料利用率最高,可将地板表面温度波动差控制在5.67℃。

除直接嵌入建筑围护结构的应用形式外,相变储能材料还可在建材生产阶段掺混制备为砖、混凝土、砂浆等建筑基材,与建筑原料实现一体化成型。M. Mahdaoui等^[32]制造了填充相变材料的建筑空心

砖,并对其传热过程进行了建模与分析。实验证明该类相变储能砖可有效提升建筑的储热能力与隔热性能,应用效果良好。A. Castell等^[33]对比验证了常规砖和蜂窝砖结合相变材料的应用效果,发现使用相变储能材料的实验房能耗降低15%,并且每年能减少1~1.5 kg/m²的CO₂排放量。A. Sari等^[34]研发了掺混共晶相变材料的复合水泥,其相变潜热可达40 J/g,能够实现0.78℃的室内温度被动调节效果。此类一体化成型技术使储能功能与建材生产流程相融合,但受制于相变材料的掺混比例与耐久性,其蓄热容量与长期稳定性仍需工程验证。

如图2所示,被动式热储能技术通过与墙体、屋面、地板等围护构件及建筑基材的多形态融合,可直接增强建筑围护结构热惰性、削减室内峰值热流。但需要注意的是,被动式热储能技术并非在任何条件下都能带来净节能效益:仅当相变温度与当地气候特征及室内设定温度相匹配、且蓄存时段积累的热量能够充分释放时,才能有效降低建筑冷热负荷;若相变温度选取不当、昼夜温差不足或夜间散热受阻,不仅节能效果有限,甚至可能因蓄热滞后引发室内过热。因此,工程应用中需结合当地气候条件与运行工况优化相变材料的选取与布置,方能将降低冷热负荷、提升热环境稳定性的技术潜力转化为实际的节能与减碳效益。

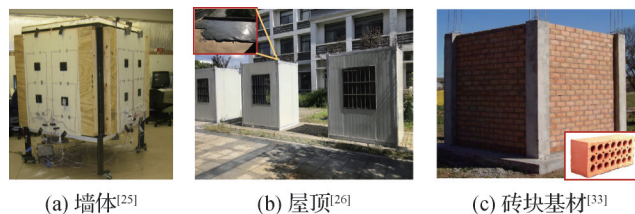


图2 热储能材料在建筑围护结构中的应用

Fig.2 Applications of thermal energy storage materials in building envelopes

2.2 热储能技术在建筑系统中的耦合应用

主动式热储能系统在建筑中的应用通常配置单独的储能设备,与暖通空调、太阳能集热等系统结合,使用主动式调节实现冷热量的集中储存与按需调配。通过对分时电价及可再生能源的有效利用,主动式热储能系统可实现建筑冷热负荷的时空平移,降低建筑运行能耗。根据储能介质的差异,热储能技术在暖通系统中的应用可分为显热储能系统与潜热储能系统两大类。

水蓄冷是应用较成熟、广泛的显热储能系统^[35]。该技术以水作为储能介质,利用夜间电力低谷时段由制冷机组制备低温冷水并储存于蓄冷罐中,日间

电网高峰时段释放储存的冷量供给建筑空调系统,从而实现用电负荷削峰填谷。围绕水蓄冷系统的应用效果,已有研究大致沿运行策略优化与蓄冷装置结构改进2条脉络展开。黄俊杰等^[36]对水蓄冷的冷水机组进行了模拟分析,通过冷水主机负荷的主动调控,可使空调系统供冷季总能耗降低2.35%。黄军心等^[37]从经济性角度提出高峰优先释冷策略,相较于水蓄冷原有方案,该方案进一步降低了21.9%~27.3%的夏季运行电费。任亮^[38]则从设备结构的影响出发,采用数值模拟与实验相结合的方法,揭示了布水器扰流度对斜温层的影响规律。经结构改善后的布水器可使斜温层体积最大降低33.33%,为蓄冷水箱结构设计提供了量化依据。上述研究表明,水蓄冷的节能收益主要源于负荷的时空平移与机组运行效率的提升,其经济效益则高度依赖当地峰谷电价差与运行策略的协同优化。

与水蓄冷储能系统相比,潜热储能系统具有更高的能量密度,可显著减小系统占地面积。相关研究呈现储能系统与新能源复合、新型相变储能换热装置研发并进的局面。O. Y. Odufuwa等^[39]针对医疗建筑的冰蓄冷空调,提出了一种与光伏结合的复合系统。新型复合系统可节省33%的能耗,大幅降低对电网的依赖。B. Arcuri等^[40]则进一步研究了不同气候条件与电价水平对冰蓄冷系统经济效益的影响。研究证实,在高温、高电价城市,冰蓄冷系统的投资回收期最短仅需1.4年,而在低电价地区收益有限,部分场景甚至出现经济亏损,表明热储能系统的应用需要因地制宜。R. M. Saeed等^[41]开发了以十六烷为储能介质的板式相变热储能换热器,模块化设计使其可与数据中心空调系统灵活结合。常莎莎^[42]则针对通信基站高制冷能耗场景,将峰谷电价、自然冷源与相变储能结合实现联合蓄冷,表明模块化相变储能装置正逐步向数据机房、通信基站等高散热密度场景拓展。

热储能技术在建筑系统中的耦合应用如图3所示,主动式热储能技术通过显热和潜热储能系统的灵活配置,实现了建筑用电负荷的柔性调节,是建筑侧参与电网需求响应、支撑电网稳定运行的关键技术路径^[43]。随着系统的不断完善,主动式热储能技术有望在建筑节能及电网需求响应中发挥更为显著的柔性调节作用。

2.3 热储能技术建筑应用的经济性分析

经济性是衡量热储能技术建筑应用价值的核心指标之一,直接决定技术的推广可行性与投资回报效益。建筑热储能系统的成本收益涵盖储能材料与

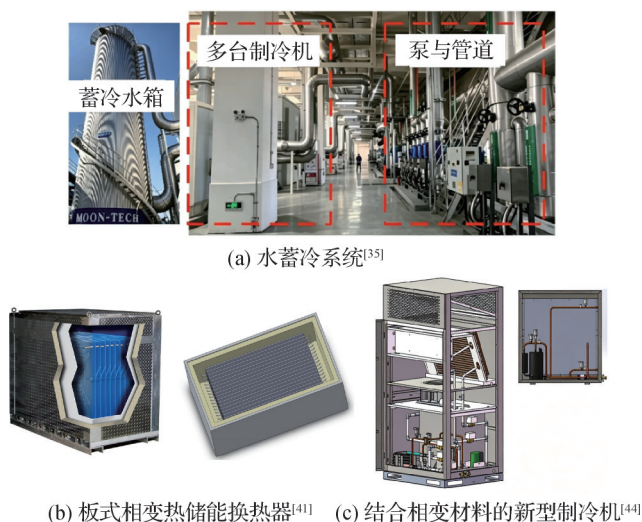


图3 热储能技术在建筑系统中的耦合应用

Fig.3 Coupled applications of thermal energy storage technologies in building systems

设备的初投资、运行维护成本、峰谷电价套利等多个维度,需结合建筑用能特征与适用环境开展全生命周期综合测算,才能客观反映热储能技术的实际应用价值。

在应用经济性方面,热储能技术的推广效果与峰谷电价政策、系统初投资及运行周期密切相关。Tang Hong等^[45]对面向需求响应的建筑热储能开展了全生命周期经济性分析,结果表明其投资回报对峰谷电价差高度敏感,价差越大、需求响应补偿越高,投资回收期越短,热储能能在建筑需求响应场景下具有竞争力的经济性。N. Chaiyat^[46]对结合相变储能装置的房间空调器进行了能量与经济性分析,该系统可利用夜间低谷电蓄冷、削减白天峰值电耗,日均节电3.09 kW·h,投资回收期约4.15年。E. Gholamian等^[47]的经济性评估进一步显示,集成相变材料储能可将建筑的年供暖与制冷需求降低25.6%,产品成本降低8.57%。结合前述水蓄冷运行电费降低21.9%~27.3%^[37]与冰蓄冷投资回收期最短1.4年^[40]的结果可知,主动式热储能系统的投资回收期多数控制在2~5年以内,经济性评估应作为热储能系统方案比选与容量配置的必要环节。

总体而言,热储能技术在建筑应用中的经济性受电价政策、负荷特征与系统方案共同作用,在峰谷价差显著、冷热负荷稳定的建筑场景中具备较好的投入产出效益,是实现建筑节能降碳与电网需求响应协同推进的重要技术支撑。

3 热储能技术应用效果优化

热储能技术在建筑节能及电网需求响应领域已

展现出显著的应用价值与广阔的研究前景。然而在建筑实际应用中,该技术还存在导热系数低、热响应滞后、与建筑能源系统结合受限等问题,限制了节能效益与柔性调节潜力的充分释放。针对上述技术瓶颈,诸多学者围绕建筑场景下热储能技术的应用优化开展了一系列研究,形成了基于材料与结构改进的优化和基于外场调控的性能强化两大技术路径。本节将从上述2个维度出发,归纳总结建筑热储能技术应用优化的研究进展,并结合本团队研究提出新型建筑热储能应用系统,以期对热储能技术的高效应用提供参考。

3.1 基于材料与结构改进的性能优化

热储能技术的无源优化以相变储能介质的传热增强为核心,通过添加高导热材料^[48]、优化翅片结构与传热管道^[49]、耦合热管^[13]等手段,提升相变过程的传热速率与响应效率。

常规相变储能材料普遍存在导热系数低、易发生过冷与相分离等问题。为解决这些局限,可在相变储能材料中掺杂碳基及金属基等高导热系数材料,从而提升相变材料的性能。在十二醇有机相变材料中添加膨胀石墨改性后^[50],导热系数最大达到 $3.21 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,是未优化前的14.43倍,显著提升了相变储能材料的传热性能。R. Bharathiraja等^[51]研究了碳纳米管与二氧化硅对石蜡的改性作用,经验证仅需少量材料融合,即可使原材料的导热系数提升32%~46%。Zhao Bo等^[52]以多孔氧化铝颗粒为导热填料制备复合相变材料,当氧化铝质量分数为50%时,复合材料的导热系数达到 $1.27 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,性能提升了4倍。此外,将传统相变储能材料与聚合物^[53]、气凝胶^[54]等功能载体结合,也是材料优化的重要研究方向。

高性能材料决定热储能容量的大小,而合理的传热结构设计是热储能系统能得到有效应用的关键。A. Kumar等^[55]从储罐的基本形状出发,提出一种新型的漏斗型储罐结构。与传统的圆柱形潜热储罐相比,新结构内部温度分布更均匀,储能效率可提高66.6%。而储罐的高径比等几何参数也会对热储能的传热特性有影响^[56]。除储罐本体的设计外,翅片结构优化也是扩大储能介质传热面积、提升热储能性能的主要路径。Lee Yee-Ting等^[57]通过数值模拟研究了不同翅片高度和翅片数量对储罐传热的影响,所提出的分层翅片新设计可将熔融时间缩短44.3%,系统平均功率达到172.4 W。Song Zilong等^[58]则受到自然结构的启发,制造了结合偏心树状翅片的管式储热装置。结果表明,优化后的树状翅

片结构可使设备蓄热速率提高1.2倍,温度不均匀性降低47.75%。

近年来,热管受到国内外研究者的广泛关注。凭借高效导热、均温性强、被动运行的技术特点,热管可与储能系统结合^[59],有效解决热储能应用存在的储释能速率慢等技术瓶颈,为热储能系统的优化提供了新的研究方向。其中,Wang Ziyun等^[60]提出一种由平板热管耦合相变材料的新型供暖天花板系统,通过实验研究加热功率和弯曲角度对复合储热系统传热效率的影响,验证了热管对相变储能传热效果的强化作用。Yan Tian等^[61]设计了一种结合重力热管与相变材料的动态围护结构,依托重力热管的高效导热保障系统稳定运行,应用后可降低17.4%的冷负荷。S. Motahar等^[62]量化了热管对相变储能材料熔化和凝固过程的影响。引入热管后储能材料的相变速率显著提高,熔化与凝固时间分别减少了53%与49%。上述基于材料与结构改进的性能优化代表性研究汇总如图4所示。

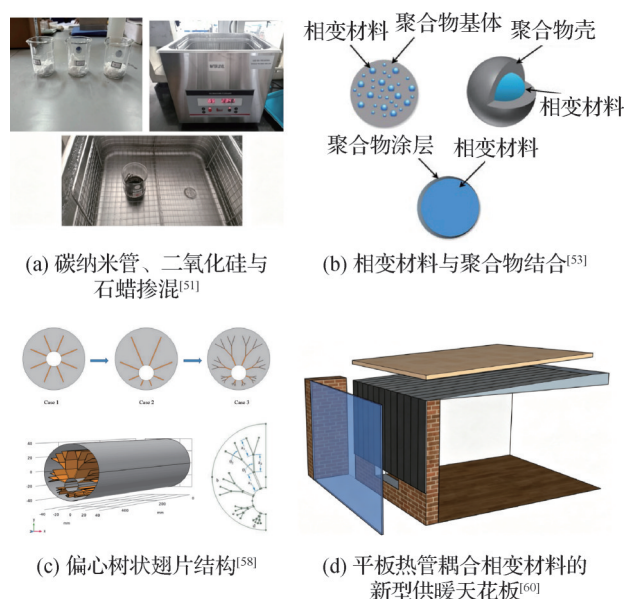


图4 热储能技术基于材料与结构改进的性能优化

Fig.4 Performance optimization of thermal energy storage technologies through material and structural improvements

3.2 基于外场调控的性能强化

热储能技术的外场强化通过外加能量场调控、引入机械扰动等方式增强储能介质内部传热,能够突破材料与结构优化的性能极限^[63],实现传热效率与动态调节能力的提升。

外加磁场是应用广泛的主动式强化方法,可通过产生开尔文力增强系统内部的强制对流,进而缩短相变材料的熔化过程^[64]。在已有研究中,LMQ.

Nguyen等^[65]针对掺混铁磁颗粒的相变储能屋顶开展研究。结果表明,合理改变外加磁场的倾角可使相变材料的熔化速度提升30%,并降低45%的热阻。Fan Yubin等^[66]提出结合旋转磁场的相变材料对流强化方法,并以十二烷醇为介质开展实验验证。当磁场转速为20 r/min时,相变储能材料的熔化时间可缩短22.9%,为潜热储能系统提供了非接触式传热强化路径。Lu Bohui等^[67]在石蜡中掺入磁性氧化铁颗粒,并利用磁场增强磁性相变材料内部的对流传热效果。经实验验证,材料完全熔化时间随磁性颗粒质量分数的升高呈先降后升趋势,当颗粒质量分数为0.5%时,完全熔化时间可缩短9.19%。

与外加磁场的强化思路相近,施加电场与超声场也是现有研究的热点。Sun Zhihao等^[68]开展电流体动力学强化熔融效果的研究。在施加电场后,库仑力是强化传热的主要因素,可使相变储能材料的熔化时间最多缩短92.7%,强化幅度显著优于常规磁

场强化方案。Guo Junfei等^[69]搭建可视化实验系统,研究超声场对石蜡传热的强化作用。研究表明,声流与空化效应是超声强化传热的关键,在60 W的超声波作用下,石蜡熔化的温度响应速率提高了161.7%,吸热速率提升了151.9%。S. Rahmanian等^[70]采用数值模拟方法,对比分析了超声对水平和竖直2种不同位置储能系统的影响。在最优的布置方案下,超声波可使2种系统内储能介质的熔化时间分别缩短56.63%与74.59%,为超声强化型相变储能装置的优化提供了量化参考。

此外,外场强化技术还包括气泡驱动^[71]、机械旋转^[72]等方法,本质上也是通过强化储能介质内部对流传热实现性能提升。如图5所示,基于外场调控的性能强化突破了材料与结构优化的瓶颈,可显著提升系统储释热速率与动态调控能力。但这类技术存在额外能耗、系统初投资与运维复杂度较高等问题,其在建筑应用的可靠性与经济性仍有待验证与改善。

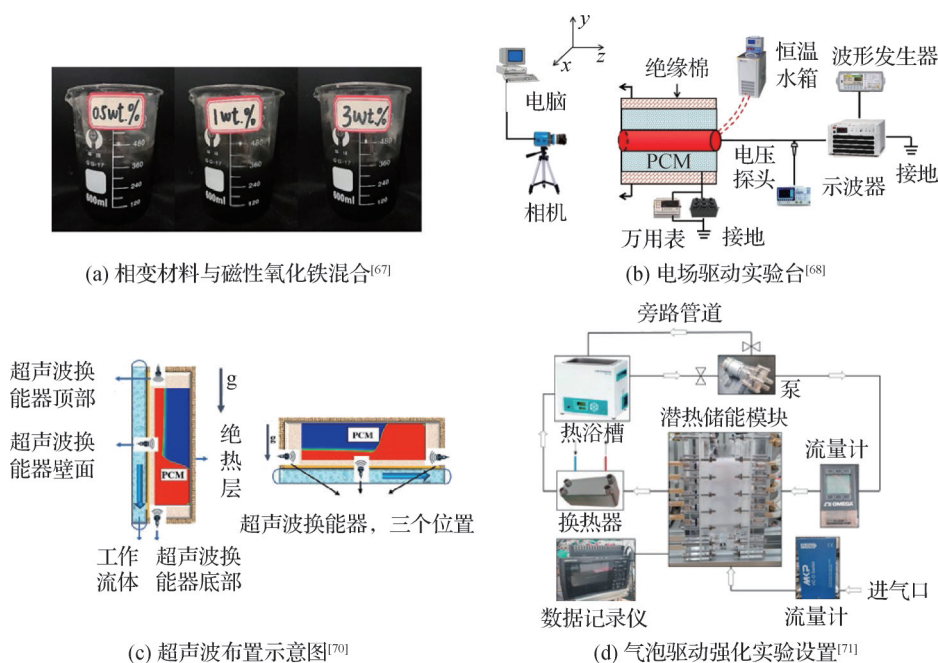


图5 热储能技术基于外场调控的性能强化

Fig.5 Performance enhancement of thermal energy storage technologies based on external field control

3.3 新型建筑储能应用系统

基于上述建筑热储能技术的应用进展与性能优化研究基础,本文进一步结合本团队相关研究成果,设计并提出新型建筑储能应用系统,为低碳建筑场景下热储能技术的轻量化、智能化设计与工程应用夯实基础。

3.3.1 新型相变热二极管储能屋顶

超材料领域的快速发展为建筑与材料学科的交叉创新提供了全新契机。新型相变热二极管属于热

二极管的一种,与电二极管类似,传热具有较强的方向性。本文提出的新型相变热二极管由超亲水表面、超疏水表面及隔热垫片3部分组成^[73]。根据两侧温度的不同,新型相变热二极管的工作模式可分为正向与反向2种。正向模式下,热二极管内部的工作介质去离子水蒸发相变,将热量从超亲水板带到超疏水板侧,实现热量的高效传递。与之对应的,反向模式下热二极管内部不发生相变传热,仅通过四周隔热垫片低效导热,具有优异的隔热性能。由于工

作模式不同,新型相变热二极管的正、反向传热系数存在显著差异,二者比值可达到约80^[74]。

由于超材料的使用,新型相变热二极管不仅具有优异的正向传热性能,同时反向隔热效果突出,解决了传统热管存在的反向热桥问题,平板构造也便于在建筑围护结构中应用。因此,本文将新型相变热二极管与天空辐射冷却技术及相变材料结合,提出一种新型相变热二极管储能屋顶,助力建筑与材料领域的交叉创新与协同发展。

新型相变热二极管储能屋顶采用分层集成构造,自上而下分别为天空辐射冷却膜、新型相变热二极管层与相变储能层,在冬夏季具有不同的应用模式与节能效果,如图6所示。

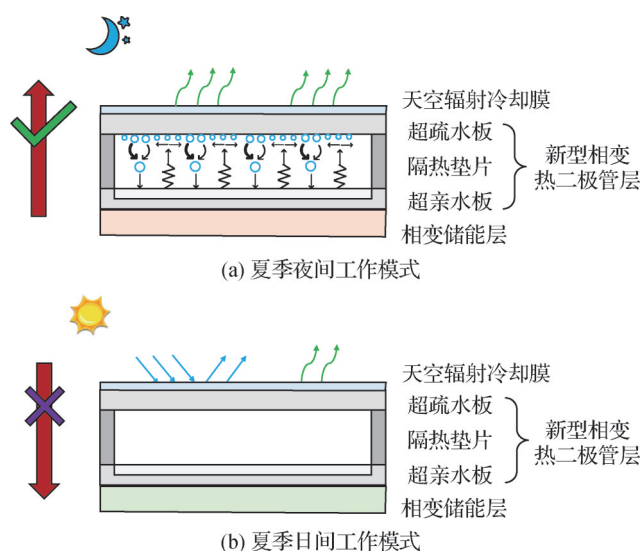


图6 新型相变热二极管储能屋顶

Fig.6 New phase-change thermal diode energy storage roof

夏季夜间:对于公共建筑而言,夜间无人员活动时不开启空调。此时由于设备产热及日间得热的延迟,室内温度会高于室外。随着室内热量的不断传递,新型相变热二极管的超亲水板温度会逐渐升高,当温度高于内部真空对应的饱和温度时,吸液芯的去离子水蒸发相变,蒸汽携带热量在上层的超疏水表面冷凝,将热量从室内侧带到室外侧的超疏水板。与此同时,屋顶外侧的天空辐射冷却膜充分发挥辐射制冷的作用,利用较高的中红外发射率与深空辐射传热,实现室内热量的被动转移。在该动态被动排热过程中,屋顶内侧的相变储能材料同步吸收冷量并发生凝固相变,以潜热形式储存部分夜间冷量。

夏季日间:室内制冷空调运行,室内温度低于室外。由于屋顶外层的天空辐射冷却膜具有较高的太阳反射率及中红外发射率,可有效反射太阳辐射,削减室外热量的进入。与之协同的,室内外温度的差

异使新型相变热二极管处于反向的隔热状态,室外热量只能通过垫片材料和真空层进行少量导热,进一步减少了室外高温环境的影响。此外,随着室内侧温度升高,屋顶内侧相变储能层中的相变材料发生熔化相变,释放夜间储存的冷量;而上部热二极管的反向隔热可抑制冷量向室外侧散失,保障冷量定向朝室内供给。通过天空辐射冷却膜、新型相变热二极管反向工作模式及相变储能的协同,达到了高效隔热以及被动供冷的应用效果。

冬季:对于夏热冬暖地区、炎热地区等全年无需供暖的区域,室外温度常年较高。此时新型储能系统处于日间隔热(被动供冷)一夜间排热(被动蓄冷)的循环模式中。而对于夏热冬冷及寒冷地区等有供暖需求的气候区,冬季室内温度会高于室外温度。为避免冬季室内热量向外散失,可通过调节新型相变热二极管内部的真空度,提高去离子水的相变温度临界点,从而使热二极管层在冬季全程处于反向工作状态,始终保持高效的隔热效果。这样既实现了冬季的室内保温效果,也解决了天空辐射冷却在建筑应用中存在的冬季热损失问题。

整体而言,该新型系统通过热二极管超材料的创新使用,有效解决了常规相变储能材料存在的导热系数低、热响应滞后的瓶颈,同时弥补了天空辐射冷却技术的应用短板。新型相变热二极管储能屋顶将天空辐射冷却膜、新型相变热二极管层与相变储能层集成一体,依托热二极管正、反向传热能力近80倍的显著差异,可实现建筑分季节动态热调控与轻量化储能,为超材料与建筑热储能的交叉融合以及建筑被动节能技术的发展提供了新的设计思路与技术路径。

3.3.2 移动式供冷储能末端

对于高大空间、人员零散分布的建筑场景,传统集中式空调系统存在供冷灵活性不足、间歇运行能耗偏高的问题,难以兼顾人员热舒适与节能降碳的双重目标。近年来,移动式机器人在人员识别、自主导航与环境感知领域取得了显著突破,为近人体空间非均匀热环境营造提供了全新思路;相变储能技术则为移动式设备摆脱管线束缚、实现持续独立供冷提供了技术支撑。因此,本文提出一种集成相变储能模块的移动式供冷储能末端,在实现非均匀热环境营造效果的同时,推动建筑热储能技术向末端侧、柔性化方向延伸拓展。

移动式供冷储能末端由移动式机器人载体、储能模块及对流-辐射传热结构3部分组成,如图7所示。末端采用平板热管作为辐射供冷载体,通过导

热硅胶垫将对流换热器与平板热管紧密贴合,依托平板热管优异的均温性与导热性能^[75],保障辐射面温度均匀一致。与传统单一送风末端相比,对流-辐射耦合结构可实现对流供冷与辐射供冷的比例动态调控^[76]:在启动阶段强化对流送风,实现近人体空间快速降温。而稳态阶段以辐射供冷为主、低风速送风辅助,兼顾热舒适性同时避免辐射面结露风险。

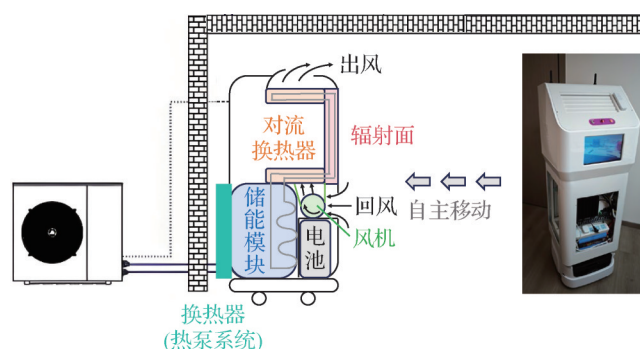


图7 移动式供冷储能末端设计构造

Fig.7 Design and structure of mobile cooling energy storage terminal

储能模块为移动式末端提供持续工作保障,采用石蜡、结晶水合盐类等相变储能材料,可在有限设备体积下实现大容量冷量存储,满足移动式设备长距离移动、长时间供冷的使用需求。储能模块配备标准化接口,可自主对接建筑空气源热泵等冷源系统完成充冷蓄能,无需人工干预。此外,移动式供冷储能末端搭载人员定位与环境感知模块,经智能算法优化后可实时精准识别建筑内人员位置、采集近人体空间温湿度参数。基于温度响应匹配系数等评价方法,移动式末端可以动态调节储能释冷速率与末端对流辐射比,实现供冷输出与人员热需求的实时匹配。

移动式供冷储能末端突破了传统固定空调末端的空间与场景限制,构建了“部分时间、局部空间”的供冷模式。在建筑应用层面,末端可聚焦近人体空间进行有效供冷,避免了大空间全区域空调产生的无效能耗,提升供冷能效。在电网协同方面,储能模块可依托分时电价机制,在夜间电网低谷时段完成充冷蓄能,在日间用电高峰时段释放冷量供冷,既降低了建筑运行电费成本,又可作为建筑侧柔性负荷参与电网需求响应,助力电力系统削峰填谷。

综上所述,移动式供冷储能末端适用于高大空间、临时办公区等人员间歇分布的建筑场景。该系统通过将热储能技术与移动机器人设备、对流-辐射耦合末端等技术结合,拓展了热储能技术在建筑中的应用形式与应用场景,为建筑末端侧的轻量化、柔

性化储能应用提供了重要的技术参考。

4 总结与展望

本文围绕建筑领域节能降碳的核心目标,系统梳理了热储能技术的分类体系与工作原理,从围护结构集成与暖通系统耦合两大应用路径入手,全面总结了热储能技术在建筑领域的研究进展与节能潜力。在此基础上,从材料改性、结构优化、外场强化等角度归纳了热储能技术的性能提升方法,并结合前沿技术交叉与本团队研究积累,提出了新型相变热二极管储能屋顶与移动式供冷储能末端2类创新应用方案。现有研究已充分证实,热储能技术在建筑节能与电网需求响应领域已展现出显著的应用价值,是推动建筑低碳转型、提升建筑用能柔性的关键技术手段。

虽然热储能技术已取得丰富的研究成果,但在建筑领域的推广应用仍受材料性能、技术成熟度及系统复杂性等多种因素制约。此外,现有研究多聚焦于热储能系统的热工性能与节能效益,对其全生命周期经济性、环境效益的综合评估不足,难以充分发挥热储能技术的综合应用价值。因此,面向建筑领域节能降碳的发展需求,未来建筑热储能技术需从多角度开展深化研究。在材料层面,需推进高性能储能材料的研发与应用,开发高导热、高潜热、低腐蚀的复合相变储能材料,夯实建筑应用的材料基础;在系统运行层面,可结合建筑能耗预测、电网需求响应机制,建立建筑热储能系统的智能调控模型,实现储释热过程的动态调控。在此基础上,依托跨学科交叉创新,推动热储能技术与超材料、辐射制冷、移动机器人等技术融合,也是提升热储能技术建筑应用效果的新方向。

总体而言,随着材料性能迭代与跨学科技术的深度融合,建筑热储能技术将向高效化、轻量化、智能化方向发展,在建筑节能与可再生能源利用中发挥愈发重要的作用,为建筑领域“双碳”目标的实现提供坚实的技术支撑。

参考文献

- [1] Zhai Xiangrui, Xu Zeyu, Zhang Wei, et al. Phase change thermal energy storage: Materials and heat transfer enhancement methods [J]. Journal of Energy Storage, 2025, 123: 116778.
- [2] 何雅玲. 热储能技术在能源革命中的重要作用[J]. 科技导报, 2022, 40(4): 1-2. (He Yaling. The important role of thermal energy storage technology in the energy revolution

- [J]. Science & Technology Review, 2022, 40(4): 1-2.)
- [3] 朱光明, 陈珣, 何洪浩, 等. “双碳”背景下热储能技术的发展及应用(上)[J]. 大众用电, 2025, 40(3): 73-75. (Zhu Guangming, Chen Xun, He Honghao, et al. Development and application of thermal energy storage technology under the background of carbon peaking and carbon neutrality (part I) [J]. Popular Utilization of Electricity, 2025, 40(3): 73-75.)
- [4] Lizana J, Chacartegui R, Barrios-Padura A, et al. Advances in thermal energy storage materials and their applications towards zero energy buildings: a critical review[J]. Applied Energy, 2017, 203: 219-239.
- [5] Lizana J, Chacartegui R, Barrios-Padura A, et al. Advanced low-carbon energy measures based on thermal energy storage in buildings: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 82: 3705-3749.
- [6] Sohail A. Cutting-edge advancements in phase change materials for thermal energy storage: innovations and applications[J/OL]. Energy Storage and Saving, 2026-02-27. <https://doi.org/10.1016/j.enss.2025.06.005>.
- [7] 范玮, 周忠波, 李炎辉. 热储能技术的发展现状与展望[J]. 煤质技术, 2025, 40(1): 1-8. (Fan Wei, Zhou Zhongbo, Li Yanhui. Development status and prospect of thermal energy storage technology [J]. Coal Quality Technology, 2025, 40(1): 1-8.)
- [8] Al Alawin A, Rasheed R H, Abdullah M, et al. Heat transfer mechanisms and enhancement strategies in thermal energy storage for renewable energy integration [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2026, 178: 111861.
- [9] 丁志雄, 隋云任, 吴伟. 吸收式储能研究进展[J]. 制冷学报, 2025, 46(3): 11-23, 31. (Ding Zhixiong, Sui Yunren, Wu Wei. Research progress in absorption thermal energy storage[J]. Journal of Refrigeration, 2025, 46(3): 11-23, 31.)
- [10] Vallese L, Javadi H, Badenes B, et al. A comprehensive review of thermal energy storage technologies and their applications: Creation of a database[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2026, 225: 116133.
- [11] Mao Shang, Liu Yong, Wu Xuehong, et al. Thermal energy storage performance, application and challenge of phase change materials: a review[J]. Energy Storage and Saving, 2025, 4(3): 300-322.
- [12] 唐亚平, 余志勇, 李芬, 等. 基于显热储能系统的储能介质经济性评估[J]. 装备制造技术, 2026(2): 142-146. (Tang Yaping, Yu Zhiyong, Li Fen, et al. Economic evaluation of energy storage medium based on sensible heat energy storage system [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2026(2): 142-146.)
- [13] Liu Kaibao, Wu Chenhui, Gan Haolin, et al. Latent heat thermal energy storage: Theory and practice in performance enhancement based on heat pipes [J]. Journal of Energy Storage, 2024, 97: 112844.
- [14] 张春伟, 陈静, 王成刚, 等. 相变储能技术的传热强化方法综述[J]. 制冷学报, 2023, 44(1): 1-13. (Zhang Chunwei, Chen Jing, Wang Chenggang, et al. Review on heat transfer enhancement methods of latent heat storage technology [J]. Journal of Refrigeration, 2023, 44(1): 1-13.)
- [15] 倪永良, 董旭, 刘华明, 等. 多元卤化盐高温相变热储能研究与应用试验[J]. 能源工程, 2026, 46(3): 17-25. (Ni Yongliang, Dong Xu, Liu Huaming, et al. Research and application experiment on high temperature phase change thermal energy storage of multicomponent halogenated salts[J]. Energy Engineering, 2026, 46(3): 17-25.)
- [16] Alva G, Lin Yaxue, Fang Guiyin. An overview of thermal energy storage systems[J]. Energy, 2018, 144: 341-378.
- [17] 曾光, 纪阳, 符津铭, 等. 热储能技术研究现状、热点趋势与应用进展[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(增刊1): 127-142. (Zeng Guang, Ji Yang, Fu Jinming, et al. Research status, hot trends and application progress of thermal energy storage technology [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2023, 43(S1): 127-142.)
- [18] Liu Lijun, Zhang Quan, Zhai Zhiqiang, et al. State-of-the-art on thermal energy storage technologies in data center[J]. Energy and Buildings, 2020, 226: 110345.
- [19] Jayabal R, Sekar S, Lionus Leo G M, et al. Advanced phase change material-thermal energy storage for low-carbon heat: materials, reliability, and AI-driven system integration for industry, buildings, and data centers [J]. Applied Energy, 2026, 409: 127479.
- [20] Dora S, Kuznik F, Mini K M. A novel PCM-based foam concrete for heat transfer in buildings-Experimental developments and simulation modelling [J]. Journal of Energy Storage, 2025, 105: 114625.
- [21] Sharshir S W, Joseph A, Elsharkawy M, et al. Thermal energy storage using phase change materials in building applications: a review of the recent development [J]. Energy and Buildings, 2023, 285: 112908.
- [22] Hawes D W, Feldman D, Banu D. Latent heat storage in building materials [J]. Energy and Buildings, 1993, 20(1): 77-86.
- [23] Khan M, Khan M M, Irfan M, et al. Energy performance enhancement of residential buildings in Pakistan by integrating phase change materials in building envelopes [J]. Energy Reports, 2022, 8: 9290-9307.
- [24] Izquierdo-Barrientos M A, Belmonte J F, Rodríguez-

- Sánchez D, et al. A numerical study of external building walls containing phase change materials (PCM) [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2012, 47: 73–85.
- [25] Jin Xing, Medina M A, Zhang Xiaosong. On the placement of a phase change material thermal shield within the cavity of buildings walls for heat transfer rate reduction [J]. *Energy*, 2014, 73: 780–786.
- [26] Meng Erlin, Wang Junqi, Yu Hang, et al. Experimental study of the thermal protection performance of the high reflectivity-phase change material (PCM) roof in summer [J]. *Building and Environment*, 2019, 164: 106381.
- [27] Bhamare D K, Rathod M K, Banerjee J. Numerical model for evaluating thermal performance of residential building roof integrated with inclined phase change material (PCM) layer [J]. *Journal of Building Engineering*, 2020, 28: 101018.
- [28] Li Gang, Zheng Xuefei. Thermal energy storage system integration forms for a sustainable future [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 62: 736–757.
- [29] Lin Kunping, Zhang Yinping, Xu Xu, et al. Experimental study of under-floor electric heating system with shape-stabilized PCM plates [J]. *Energy and Buildings*, 2005, 37 (3): 215–220.
- [30] Rebelo F, Figueiredo A, Vicente R, et al. Experimental analysis of a radiant floor system incorporating phase change materials: Thermal performance and energy efficiency [J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 102: 114084.
- [31] Wang Zhenyu, Gao Weijun, Gao Yanna. Effect of the integration mode of phase change materials on thermal performance of radiant floor heating systems [J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 110: 115275.
- [32] Mahdaoui M, Hamdaoui S, Ait Msaad A, et al. Building bricks with phase change material (PCM): Thermal performances [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 269: 121315.
- [33] Castell A, Martorell I, Medrano M, et al. Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling [J]. *Energy and Buildings*, 2010, 42 (4): 534–540.
- [34] Sari A, Bicer A, Karaipekli A, et al. Preparation, characterization and thermal regulation performance of cement based-composite phase change material [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2018, 174: 523–529.
- [35] Feng Yiwei, Li Yanpeng, Qu Shengli, et al. Proactive operational strategy of thermal energy storage tank in an industrial multi-chiller system based on chilled water flow difference between supply and demand sides [J]. *Energy*, 2025, 319: 134752.
- [36] 黄俊杰, 梁彩华, 何慧, 等. 基于主动水蓄冷的冷水机组节能优化策略研究 [J]. *制冷学报*, 2025, 46 (1): 108–115. (Huang Junjie, Liang Caihua, He Hui, et al. Energy-saving optimization strategy research for chilled water units based on active water storage [J]. *Journal of Refrigeration*, 2025, 46 (1): 108–115.)
- [37] 黄军心, 周军莉, 杨艳, 等. 水蓄冷空调系统运行优化策略及耗电量预测 [J]. *武汉理工大学学报*, 2025, 47 (10): 54–61. (Huang Junxin, Zhou Junli, Yang Yan, et al. Operation optimization strategy and power consumption prediction of water storage cooling air conditioning system [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2025, 47 (10): 54–61.)
- [38] 任亮. 水蓄冷空调系统布水器优化设计研究 [D]. 北京: 北京建筑大学, 2020. (Ren Liang. Research on optimal design of water diffuser for water storage air conditioning system [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2020.)
- [39] Odufuwa O Y, Kusakana K, Numbi B P, et al. Optimal energy management of grid-connected PV for HVAC cooling with ice thermal storage system [J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 77: 109844.
- [40] Arcuri B, Spataru C, Barrett M. Evaluation of ice thermal energy storage (ITES) for commercial buildings in cities in Brazil [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2017, 29: 178–192.
- [41] Saeed R M, Schlegel J P, Sawafta R, et al. Plate type heat exchanger for thermal energy storage and load shifting using phase change material [J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 181: 120–132.
- [42] 常莎莎. 高效三元双向相变储能换热单元的性能分析 [D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2014. (Chang Shasha. The performance analysis of efficient ternary two-way phase change energy storage and heat transfer unit [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2014.)
- [43] Xiong Chengyan, Meng Qinglong, Wei Ying'an, et al. A demand response method for an active thermal energy storage air-conditioning system using improved transactive control: On-site experiments [J]. *Applied Energy*, 2023, 339: 120935.
- [44] Chen Xiaoming, Zhang Quan, Zhai Z J, et al. Experimental study on operation characteristics of a novel refrigeration system using phase change material [J]. *Energy and Buildings*, 2017, 150: 516–526.
- [45] Tang Hong, Wang Shengwei. Life-cycle economic analysis of thermal energy storage, new and second-life batteries in buildings for providing multiple flexibility services in electricity markets [J]. *Energy*, 2023, 264: 126270.
- [46] Chaiyat N. Energy and economic analysis of a building air-conditioner with a phase change material (PCM) [J].

- Energy Conversion and Management, 2015, 94: 150–158.
- [47] Gholamian E, Zare V, Javani N, et al. Dynamic 4E (energy, exergy, economic and environmental) analysis and tri-criteria optimization of a building-integrated plant with latent heat thermal energy storage [J]. Energy Conversion and Management, 2022, 267: 115868.
- [48] Akhavan Mohseni S, Akhavan Mohseni M, Babapoor A, et al. Application of nano-phase change materials in thermal energy storage: an engineering approach to optimizing efficiency, sustainability, and industrial economics—a review[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 134: 118116.
- [49] Yu Guojun, Sun Yuze, Zhou Yanjie, et al. Review on heat transfer structures for enhancing thermal performance of latent heat thermal energy storage systems[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 132: 117908.
- [50] Zhao Le, Yu Qiongfeng, Li Ming, et al. Preparation and thermal properties of low-temperature composite phase-change materials based on a binary eutectic mixture with expanded graphite: Effect of particle size and mass fraction [J]. Journal of Energy Storage, 2021, 40: 102778.
- [51] Bharathiraja R, Ramkumar T, Selvakumar M. Studies on the thermal characteristics of nano-enhanced paraffin wax phase change material (PCM) for thermal storage applications [J]. Journal of Energy Storage, 2023, 73: 109216.
- [52] Zhao Bo, Wang Yuchen, Wang Chongbo, et al. Thermal conductivity enhancement and shape stabilization of phase change thermal storage material reinforced by combustion synthesized porous Al_2O_3 [J]. Journal of Energy Storage, 2021, 42: 103028.
- [53] Al-mahmodi A F, Munusamy Y, Atta M R, et al. Advancements in polymer-based phase change materials for thermal energy storage: a systematic review [J/OL]. Energy Storage and Saving, 2026–03–24. <https://doi.org/10.1016/j.enss.2025.06.006>.
- [54] Zhang Li, Liu Xiaomei, Yuan Yanjie, et al. Opportunities in thermal energy storage: Where phase change materials meet aerogels [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2026, 232: 116781.
- [55] Kumar A, Saha S K. Performance study of a novel funnel shaped shell and tube latent heat thermal energy storage system[J]. Renewable Energy, 2021, 165: 731–747.
- [56] Zhu Chao, Zhang Jian, Wang Yueshe, et al. Study on thermal performance of single-tank thermal energy storage system with thermocline in solar thermal utilization [J]. Applied Sciences, 2022, 12(8): 3908.
- [57] Lee Yee-ting, Chien Liang-han, Cheung Fan-bill, et al. Numerical and experimental investigations on melting heat transfer performance of PCM in finned cold thermal energy storage [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2023, 210: 124199.
- [58] Song Zilong, Wang Jiao, Shao Zhenyu, et al. Performance optimization of thermal storage device based on bionic tree-shaped fins and eccentric arrangement [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2024, 157: 107774.
- [59] Huo Ziheng, Quan Zhenhua, Zhang Wanlin, et al. Synergistic enhancement of cold thermal energy storage device performance using a micro heat pipe array and Y-shaped fractal fins [J]. Journal of Energy Storage, 2026, 176: 123413.
- [60] Wang Ziyun, Zhu Jia, Wang Moxin, et al. Experimental study on heat transfer and storage of a heating system coupled with solar flat heat pipe and phase change material unit[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 73: 108971.
- [61] Yan Tian, Zhou Xuan, Xu Xinhua, et al. Parametric analysis on performances of the pipe-encapsulated PCM (PenPCM) wall system coupled with gravity heat-pipe and nocturnal radiant cooler [J]. Renewable Energy, 2022, 196: 161–180.
- [62] Motahar S, Khodabandeh R. Experimental study on the melting and solidification of a phase change material enhanced by heat pipe [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2016, 73: 1–6.
- [63] Zhang Di, Wang Yibin, Zhang Chao, et al. Towards high-performance cold thermal energy storage with phase change materials: From material modification to structural topology optimization and system application [J]. Journal of Energy Storage, 2026, 176: 123320.
- [64] Bonab S A, Goharkhah M, Zonouzi S A. Magnetic field and chamber partitioning effects on charging performance of a latent heat thermal energy storage system[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 281: 128762.
- [65] Nguyen L, Alshuraiaan B, Hajjar A, et al. Controlling energy loss from roof structures equipped by round-corner double semi-hexagonal Ferro- phase change material layer using magnetic field [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 428: 139335.
- [66] Fan Yubin, Yu Meng, Zhang Chunwei, et al. Melting performance enhancement of phase change material with magnetic particles under rotating magnetic field [J]. Journal of Energy Storage, 2021, 38: 102540.
- [67] Lu Bohui, Zhang Yongxue, Xiao Junfeng, et al. Experimental investigation of the effect of rotating magnetic field on the melting performance enhancement of paraffin/nano- Fe_3O_4 composite phase change material [J]. Journal of Energy Storage, 2024, 83: 110751.
- [68] Sun Zhihao, Li Boyu, Zhou Chutong, et al. Organic phase

- change materials melting with electrohydrodynamics (EHD): Numerical simulation and experimental validation [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2023, 217: 124646.
- [69] Guo Junfei, Li Ze, Xie Yuan, et al. Improved phase change performance of ultrasonic-assisted melting: a visualized experimental study [J]. *Energy*, 2024, 306: 132500.
- [70] Rahmanian S, Shahsavari A, Rahmanian-Koushkaki H, et al. Numerical feasibility study of improving the melting performance of horizontal and vertical double-pipe latent heat storage systems using ultrasonic field [J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 67: 107594.
- [71] Choi S H, Ko H S, Sohn D K. Bubble-driven flow enhancement of heat discharge of latent heat thermal energy storage[J]. *Energy*, 2022, 244: 123168.
- [72] Yu Xiaoli, Jiang Ruicheng, Li Zhi, et al. Synergistic improvement of melting rate and heat storage capacity by a rotation-based method for shell-and-tube latent thermal energy storage [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 219: 119480.
- [73] Zhao Hengxin, Wu Yifan, Jiang Guochen, et al. Material and structural optimization of novel phase-change thermal diode for dynamic building envelope [J]. *Engineering*, 2026, 63: 287–299.
- [74] Zhao Hengxin, Li Shiyang, Wu Yifan, et al. Improved superhydrophobic surface for new phase-change thermal diode in building thermal management [J]. *Energy*, 2026, 347: 140161.
- [75] Wu Yifan, Sun Hongli, Duan Mengfan, et al. Novel radiation-adjustable heating terminal based on flat heat pipe combined with air source heat pump [J]. *Engineering*, 2023, 20: 192–207.
- [76] Wu Yifan, Zhao Hengxin, Wu Shuangdui, et al. Evaluation methods of intermittent heating at the individual scale: From theory to terminal application [J]. *Applied Energy*, 2025, 377: 124649.

通信作者简介

林波荣,男,教授,清华大学建筑学院,13910989594, E-mail: linbr@mail.tsinghua.edu.cn。研究方向:绿色建筑与建筑节能。

About the corresponding author

Lin Borong, male, professor, School of Architecture, Tsinghua University, 86–13910989594, E-mail: linbr@mail.tsinghua.edu.cn. Research fields: green building and building energy efficiency.