

储热储冷多场景应用专刊



极端热浪叠加停电情景下相变储热围护结构提升建筑本体热韧性方法研究

张佩泽¹, 吕石磊^{1,2,3}, 王冉¹

(¹天津大学环境科学与工程学院, 天津 300350; ²天津大学滨海工业研究院, 天津 300452;

³沈阳建筑大学市政与环境工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

摘要: 针对极端热浪叠加停电导致建筑主动热调节失效及室内过热风险的严峻问题, 本工作提出了一种基于相变储热围护结构的建筑本体热韧性提升方法。以典型小型办公建筑为对象, 基于EnergyPlus平台构建了集成 $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}/\text{EG}$ 复合相变材料(PCM)的建筑热工模型。研究采用SSP5-8.5未来气候情景下的极端热浪数据, 模拟停电工况下室内热环境的动态响应特征, 并构建了包含室内过热度(IOD)、过热因子(OEF)及创新性指标“等效虚拟储能容量”的热韧性多维评价体系。结果表明: 在热环境响应方面, PCM墙体较常规墙体降低室内峰值温度 1.31°C , 并将峰值出现时间延后约5 h, 显著平抑了室内升温速率与温度波动; 在环境热韧性方面, 相变储热围护结构有效阻断了外部热冲击的室内累积效应, 使IOD与OEF分别大幅降低66.33%和65.57%, 显著降低了建筑对极端高温的响应敏感性; 在能源热韧性方面, 相变储热围护结构在断电期间发挥了“分布式储热虚拟电池”作用, 典型日累计提供等效被动冷量 $0.09 \text{ kWh}/\text{m}^2$, 有效填补了主动冷源失效后的能量缺口。研究证实了相变储能技术在保障极端工况下室内热安全与缓解电网供需矛盾方面的双重潜力, 为气候适应性建筑设计提供了定量依据。

关键词: 相变储能; 建筑围护结构; 建筑热韧性; 极端热浪; 被动式调温

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0081

中图分类号: TU 111.4

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 03-1004-08

Research on methods for enhancing building thermal resilience based on phase-change thermal storage envelopes under extreme heatwave and power outage scenarios

ZHANG Peize¹, LYU Shilei^{1,2,3}, WANG Ran¹

(¹School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China; ²Tianjin University-Bin Hai Industrial Research Institute, Tianjin University, Tianjin 300452, China; ³School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, Liaoning, China)

Abstract: To address indoor overheating risks caused by extreme heatwaves compounded by power outages, this paper proposes a thermal resilience enhancement method using phase-change envelopes. Based on the EnergyPlus platform, a model incorporating a $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}/\text{EG}$ composite phase-change material (PCM) is constructed. The study uses SSP5-8.5 future climate scenario extreme heatwave data to simulate the dynamic response characteristics of the indoor thermal environment under power outage conditions, and constructs a multi-dimensional thermal resilience evaluation system including indoor overheating degree (IOD), overheating factor (OEF), and an innovative index "Equivalent Virtual Storage Capacity". The results show: In terms of thermal environment response, the PCM wall body reduces the indoor peak temperature by 1.31°C and delays the peak appearance time by about 5 h, significantly smoothing the indoor temperature rise rate and temperature fluctuation; In terms of environmental thermal resilience, the phase-change thermal storage envelope effectively blocks the indoor accumulation effect of external thermal impact, reducing IOD and OEF by 66.33% and 65.57% respectively, significantly reducing the building's sensitivity to extreme high temperature response; In terms of energy thermal resilience, the phase-change thermal storage envelope plays a "distributed thermal storage virtual battery" role during power outage, providing an equivalent passive cooling of $0.09 \text{ kWh}/\text{m}^2$ per typical day, effectively filling the energy gap after active cooling source failure. The study verifies the dual potential of phase-change storage technology in ensuring indoor thermal safety under extreme conditions and alleviating the contradiction between power grid supply and demand, providing quantitative basis for climate adaptive building design.

收稿日期: 2026-01-26; 修改稿日期: 2026-02-10。

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (52538003)。

第一作者: 张佩泽 (2002—), 男, 硕士研究生, 研究方向为建筑本体热韧性, E-mail: zpze@tju.edu.cn; 通信作者: 吕石磊, 教授, 研究方向为建筑热韧性、建筑新型储冷储热、城镇源网荷储柔性能源, E-mail: lvshilei@tju.edu.cn。

引用本文: 张佩泽, 吕石磊, 王冉. 极端热浪叠加停电情景下相变储热围护结构提升建筑本体热韧性方法研究[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(3): 1004-1011.

Citation: ZHANG Peize, LYU Shilei, WANG Ran. Research on methods for enhancing building thermal resilience based on phase-change thermal storage envelopes under extreme heatwave and power outage scenarios[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(3): 1004-1011.

6H₂O/EG composite PCM was simulated under the SSP5-8.5 future climate scenario. A multidimensional framework, including Indoor Overheating Degree (IOD), Overheating Exceedance Factor (OEF), and "equivalent virtual energy storage capacity," was established to evaluate performance. Results indicate that the PCM wall reduced peak indoor temperature by 1.31°C and delayed the peak by 5 hours. It significantly enhanced environmental resilience by lowering IOD and OEF by 66.33% and 65.57%, respectively. Functioning as a "distributed thermal-side virtual battery," the PCM layer provided 0.09 kWh/m² of passive cooling during outages. This study validates the potential of phase-change technology for ensuring thermal safety and bridging energy gaps in climate-adaptive building design.

Keywords: phase-change energy storage; building envelope; building thermal resilience; extreme heatwaves; passive thermal regulation

在全球气候变暖背景下, 极端高温与热浪事件的频发对城市能源系统与建筑安全构成了严峻挑战。此类极端气象往往伴随电力负荷激增, 极易诱发区域性停电事故。一旦主动制冷系统因断电失效, 建筑室内热环境将完全取决于围护结构的被动调节能力。在此背景下, 建筑热韧性 (building thermal resilience) 成为关键议题, 其被定义为建筑系统在遭受极端热扰动 (如热浪、停电) 时, 能够抵抗冲击、维持室内基本生存环境并快速恢复的能力^[1-2]。具体到建筑本体热韧性, 则特指在主动调节系统失效后, 完全依赖围护结构的热物理特性 (如热阻、显热容及相变潜热) 来削弱外部热流侵入、平抑室内温度波动的被动防御属性, 从而争取“被动热安全窗口期”的能力^[3]。

建筑围护结构作为室内外热交换的关键界面, 其热工性能优化长期以来聚焦于降低运行能耗。相变材料 (PCM) 凭借其高潜热存储特性, 被广泛视作提升围护结构热惰性与被动调温能力的有效手段。从现有研究进展来看, 学术界主要围绕能效提升、参数优化及热环境改善三个维度展开了大量探索。在节能潜力与参数敏感性方面, Zhang 等人^[4]综述指出, 集成 PCM 的围护结构较传统保温材料可实现 23.5%~52.7% 的节能效果, 热存储效率显著提升。Bai 等人^[5]通过建立复合相变墙体的热传递模型, 分析了相变温度和相变蓄热层厚度对墙体保温性能的影响。Kishore 等人^[6]研究了 PCM 在墙体中的位置、相变温度、厚度、潜热、密度、比热容和热导率等七个参数对建筑室内热负荷调节和与墙体相关热增益的组合影响。在高温气候适应性方面, 现有研究普遍证实了 PCM 在削减热流、平抑波动

及改善舒适性方面的显著效能, 同时也辩证地指出了其在极端条件下的性能瓶颈。一方面, 多项研究验证了 PCM 在炎热环境下的积极作用。例如, Jamal 等人^[7]的研究表明, 在摩洛哥炎热气候下, PCM 墙体可减少 31.80% 的内部热流量, 并将外部热浪对室内的热扰动延迟约 120 分钟。Al-Yasiri 等人^[8]针对极端高温工况, 量化分析了围护结构集成 PCM 后对降低逐时温度与减少热增益的具体贡献。Jegan 等人^[9]采用直接浸入法将 PCM 集成于围护结构内侧, 实验证实该方法显著降低了建筑内部的温度波动, 有效提升了室内热舒适性。另一方面, 部分学者也揭示了 PCM 在极端工况下的应用局限。例如, Paswan 等人^[10]发现, 虽然 PCM 能降低温度波动, 但在极端气候持续作用下, 材料微观结构的退化会导致其宏观热性能下降。Lehmil 等人^[11]指出, 尽管集成 PCM 提升了混凝土抵抗室外温度急剧波动的能力, 但在极端天气条件下, 其吸放热过程中的显著延迟效应可能会削弱整体的热缓冲效果。针对上述局限, 本工作选用的 CaCl₂·6H₂O/EG 复合材料利用膨胀石墨基质构建了高导热的稳定微观结构, 有效克服了传统材料的热响应滞后与循环退化问题, 确保其在极端热浪冲击下仍能保持高效、稳定的热缓冲性能。综上所述, 尽管现有研究已充分验证了 PCM 在降低建筑能耗与改善常规热环境方面的优势, 但多集中于正常供电工况下的性能表现。针对极端热浪叠加停电这一极限生存工况, 相变围护结构如何从单纯的“节能调温”转变为保障生命安全的“韧性屏障”, 即其对建筑本体热韧性的提升机制与定量评估, 目前仍缺乏系统的研究与对比分析。

在极端气候适应性评价方面,学术界的关注点正逐渐从单一的热舒适判据(如过热频率与强度)^[12-15]向多维度的“建筑热韧性”评价体系转变。为准确量化建筑在极端扰动下的抵御与恢复能力,多位学者构建了各具侧重的热韧性评估框架。具体而言,现有的热韧性评价体系主要涵盖了时间维度、强度维度及综合安全维度。例如,Zhang等人^[16]侧重于室内外耦合关系,提出了室内过热度、环境过热度及过热升级因子三项指标,通过量化中庭空间对外部热浪的响应敏感性来评估其韧性水平。Tao等人^[17]结合未来气候情景(SSP2-4.5/SSP5-8.5),针对零碳建筑引入了过热度、湿球温度及热指数等三项指标,构建了覆盖温湿双重维度的综合评价体系。Sheng等人^[2]则聚焦于脆弱人群与极限工况,针对老年住宅在无电热浪及寒潮场景下的表现,采用了冲击度时数与安全小时数等指标,重点评估主被动措施对生存环境的保障能力。综上所述,尽管目前的评价指标体系尚不统一,但上述研究一致表明,构建涵盖“累积强度”与“响应因子”的定量指标是评估极端工况下建筑性能的关键。

针对上述不足,本工作以2050年SSP5-8.5极端气候情景为背景,构建极端热浪-停电复合场景,通过建立集成无机复合相变材料($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}/\text{EG}$)的建筑墙体热工模型,引入过热度、过热因子及“等效虚拟储能容量”等多维指标,系统量化相变储热围护结构对室内温度场的缓冲作用及其对建筑

本体热韧性的提升方法,为提升建筑气候风险适应能力提供理论支持。

1 研究方法

1.1 相变储热围护结构建筑仿真模型构建及验证

1.1.1 基准建筑模型与参数设定

本工作选取符合中国建筑特征的典型小型办公建筑作为物理模型(建筑几何模型及外观详见图1),基于EnergyPlus平台建立热工仿真环境。为消除相邻建筑遮挡及多区域热耦合带来的不确定性干扰,模型简化为单体独立热工分区形式。建筑围护结构热工参数及内部负荷设定严格遵循国家标准GB 55015—2021^[18]。具体而言,表1列出了围护结构的关键热工参数;表2汇总了建筑运行期间的人员密度、照明功率、设备功率密度及新风量等内扰信息。运行时间表设定为典型办公模式,以确保仿真工况贴近实际使用场景。

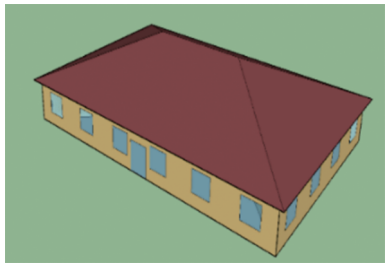


图1 小型办公建筑
Fig. 1 Small office building

表1 建筑设计参数表

Table 1 Building design parameters

建筑类型	外墙传热系数/[W/(m ² ·K)]	屋面传热系数/[W/(m ² ·K)]	外窗传热系数/[W/(m ² ·K)]
小型办公建筑	0.35	0.325	1.55

表2 内部负荷信息和时间表

Table 2 Internal load and schedule profiles

建筑类型	运行时间	照明功率密度/(W/m ²)	人员密度/(m ² /人)	内部设备功率密度/(W/m ²)	新风量/[m ³ /(h·人)]
办公建筑	8:00—18:00(工作日)	8	10	15	30

1.1.2 相变储热围护结构构造与模拟

为量化评估相变储能对建筑热韧性的提升效果,本研究在基准围护结构中引入无机复合相变材料。材料选用叶荣达^[19]开发的 $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}/\text{EG}$ (膨胀石墨基六水氯化钙),该材料利用膨胀石墨基质有效抑制了过冷与相分离现象,兼具高潜热密度与高导热系数。基于此构建了PCM墙体与常规墙体两

种对比工况,如图2所示。PCM墙体构造由外至内依次为水泥砂浆(20 mm)、EPS保温板(20 mm)、黏土砖砌块(240 mm)、相变板(20 mm)及水泥砂浆(20 mm),相变层置于内侧以最大化优势参与对室内温度波动的直接调控,该构造虽在非极端工况下可能因外侧保温阻碍PCM夜间向外散热重置,但在本工作聚焦的极端停电场景中,内侧布置能优先

强化对室内热环境的直接调控，符合保障极限热安全的首要目标；常规墙体作为对比基准，取消相变板并将EPS保温板增厚至40 mm，其余构造保持一致。

数值模拟基于EnergyPlus平台的Material-Property: PhaseChange模块,通过定义焓-温函数动态描述材料的相变吸放热过程。考虑到极端热浪背景下的被动生存需求与人体热耐受极限,将相变温度区间设定为28~32℃,以确保材料在极端高温工况下能充分发挥潜热调节作用,详细热物性参数见表3。

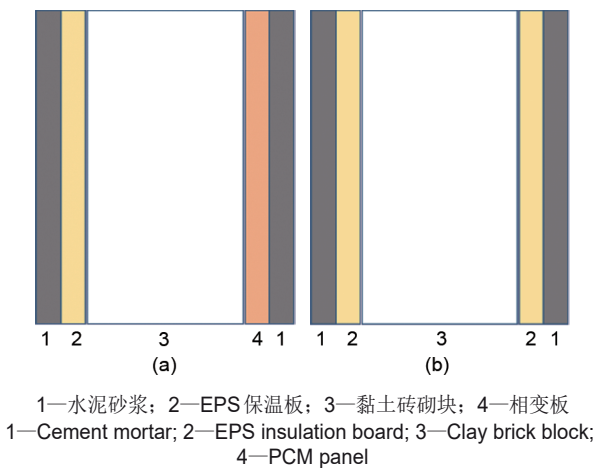


图2 PCM与常规墙体示意图: (a) PCM墙体; (b) 常规墙体

Fig. 2 Schematic diagram of PCM-integrated and reference wall structures: (a) PCM walls; (b) Conventional walls

表3 CaCl₂·6H₂O/EG 复合相变墙体各热物性参数

Table 3 Thermal property parameters of CaCl₂·6H₂O/EG composite phase change walls

材料	密度 /(kg/m ³)	导热系数 /[W/(m·K)]	比热容 /[J/(kg·K)]	相变温 度/℃	相变潜 热/(J/g)
CaCl ₂ ·6H ₂ O/EG	800	0.54	2516	29	125
水泥砂浆	1800	0.93	1050	—	—
黏土砖砌块	1800	0.81	1050	—	—
EPS保温板	10.3	0.045	1380	—	—
OSB板	696.1	0.19	1869	—	—

1.1.3 模型有效性验证

为确保本工作构建的相变传热模型及数值计算的可靠性,选取文献[19]中的实验数据作为校验基准。

验证设置:完全复现文献中的实验工况,包括采用相同的PCM热物性参数、设定房间初始温度为26℃、导入一致的气象文件,并将模拟时间步长设定为600 s以匹配实验采样频率,从而消除插值误差。

误差分析:通过对比室内平均温度模拟值(x_{sim})与实验测量值(x_{exm}),计算相对误差最大值(RME)与相对误差平均值(RAE)来评估模型精度,计算公式如下:

$$RME = \text{Max} \left(\left| \frac{x_{sim} - x_{exm}}{x_{exm}} \right| \times 100\% \right) \quad (1)$$

$$RAE = \text{Average} \left(\left| \frac{x_{sim} - x_{exm}}{x_{exm}} \right| \times 100\% \right) \quad (2)$$

图3展示了模拟结果与实验数据的对比情况。由图可见,模拟曲线与实验测值的变化趋势呈现高度一致性,尽管模拟值整体略有偏高,但拟合度良好。造成模拟值略高的原因可能在于:仿真模型基于理想化假设构建,忽略了实际实验中围护结构各构造层之间可能存在的接触热阻,以及实验箱体不可避免的空气渗透所带来的额外热损耗,致使实验测得的温升幅度略低于模拟预测值。定量误差分析表明,室内平均温度RME为3.53%,RAE仅为1.87%。两项指标均远低于工程模拟通用的误差允许上限(RME<10%,RAE<5%)。综上所述,本工作建立的数值模型具有较高的计算精度,完全满足后续关于相变围护结构传热性能及热韧性研究的要求。

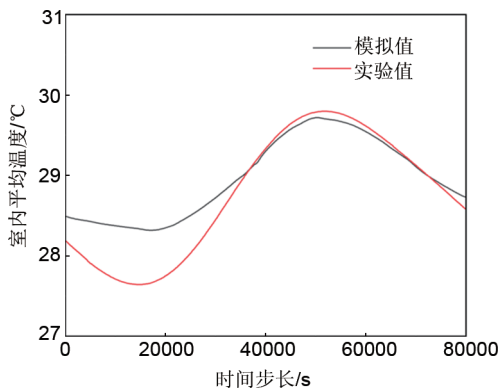


图3 室内平均温度的模拟值和实验测量值对比

Fig. 3 Comparison of simulated and measured indoor average temperatures

1.2 极端热浪-停电耦合情景设置

1.2.1 极端热浪气象边界构建

依据中国气象局^[20]关于热浪的定义标准(日最高

温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 且持续3天以上), 本工作选取2004—2018年天津市历史气象数据, 利用CCWorld WeatherGen软件在SSP5-8.5情景下生成2050年预测气象文件, 并提取夏季连续7天的高温时段作为模拟背景[图4(a)]。CCWorldWeatherGen是由英国南安普顿大学开发的气候数据生成工具。该软件基于IPCC气候变化情景模型, 采用“变形算法”对现有的典型气象年(TMY)数据进行修正与转换, 能够生成适用于EnergyPlus等仿真平台的未来特定年份(如2050年)预测气象文件, 被广泛应用于气候变化背景下的建筑热环境及能耗评估研究^[21]。该时段内日最高气温持续高于 35°C , 多日峰值超过 40°C , 符合极端热浪的气象特征。

1.2.2 停电工况与运行参数设定

为模拟“极端热浪-突发停电”的耦合情景, 设定停电事故始于6月25日12:00。停电期间, EnergyPlus模型中强制关闭空调系统及主动调控设备运行日程, 建筑进入完全被动运行模式。仿真过程中, 设定通风与渗透参数保持恒定, 以剔除其他变量干扰, 确保室内热环境演变仅由围护结构热工性能与外部热冲击驱动, 从而提高结果的针对性。

1.2.3 典型日选取

选取热浪中期的6月27日作为典型分析日[图4(b)]。该日室外最高温达 41.0°C (16:00), 最低温为 24.9°C (05:00), 日温差 16.1°C 。该典型日同时包含高温峰值与夜间降温特征, 能够反映极端工况下的外部热扰动过程, 为下文评估相变围护结构的调温机理及热韧性差异提供了具有代表性的气象边界条件。

1.3 热韧性评价指标体系

常规单一温度指标在极端灾害下存在双重局限: 既难以量化高温持续暴露对人体的“累积热伤害”, 又无法剥离气象背景差异以实现韧性水平的标准化横向对比。针对上述不足, 为定量评估极端热浪停电情景下建筑本体的热韧性表现, 本工作选取室内过热度(IOD)、过热因子(OEF)和等效虚拟储能容量(E_{ves})三项指标构建评价体系^[16]。

1.3.1 室内过热度(IOD)

IOD用于量化室内热环境超过安全阈值的累积强度, 是衡量室内热安全水平的核心指标。该指标

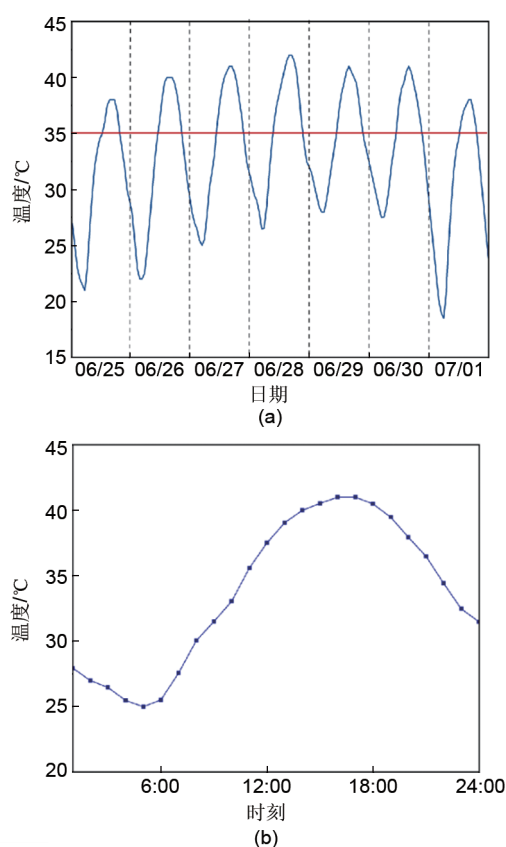


图4 极端热浪下室外逐时干球温度: (a) 连续七日变化过程; (b) 典型分析日

Fig. 4 Hourly outdoor dry-bulb temperatures during an extreme heatwave: (a) Variation over seven consecutive days; (b) Typical analysis day

通过对研究时段内超过设定阈值的温差进行时间积分, 反映了建筑内部热暴露的持续性与严重程度。IOD值越大, 表明建筑在热浪扰动下的室内过热问题越严重, 热韧性水平越低。计算公式如下:

$$\text{IOD} = \sum_{t=1}^{24} \max[T_{\text{in}}(t) - T_{\text{thr}}] \cdot \Delta t \quad (3)$$

式中, $T_{\text{in}}(t)$ 为室内逐时空气温度, $^{\circ}\text{C}$; Δt 为时间步长(一般为1小时), h; T_{thr} 为设定室内风险阈值温度(本工作设定为 32°C), $^{\circ}\text{C}$ 。

1.3.2 过热因子(OEF)

OEF定义为室内过热度与环境过热度的比值, 用于刻画建筑围护结构对外部热扰动的缓冲或放大特性。该指标反映了建筑对极端高温的响应敏感性: OEF值越小, 说明围护结构对外界热浪的削弱与延滞能力越强, 即建筑本体热韧性越优; 反之, 则表明建筑对外部热扰动敏感, 热风险易在室内快速累积。计算公式如下:

$$OEF = \frac{IOD}{AWD} \quad (4)$$

其中, AWD 为环境过热度, 用于表征室外气象环境的热扰动强度。其计算逻辑与 IOD 一致, 但针对室外干球温度。该指标反映了外部气候条件对建筑施加的热冲击水平, 能够避免仅凭室内温度评价而忽略外部气象差异的局限性, 为不同情景下的热韧性评估提供了统一的外部参照。计算公式如下:

$$AWD = \sum_{t=1}^{24} \max[T_{out}(t) - T_{thr}] \cdot \Delta t \quad (5)$$

其中, $T_{out}(t)$ 为室外逐时干球温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

1.3.3 等效虚拟储能容量(E_{ves})

等效虚拟储能容量定义为断电期间相变围护结构较常规墙体减少的室内显热增益所对应的等效空调耗电量。该指标从能量供需匹配角度, 量化了围护结构作为虚拟储能单元对建筑冷量缺口的填补能力。 E_{ves} 值越大, 表明围护结构在停电期间提供的等效冷量越多, 建筑本体抵御断电风险的能源支撑能力越强。计算公式如下:

$$E_{ves} = \int_{t_{start}}^{t_{end}} \frac{\rho_{air} \cdot H \cdot c_p \cdot [T_{ref}(t) - T_{pcm}(t)]}{3600 \cdot COP} dt \quad (6)$$

其中, E_{ves} 为单位面积等效虚拟储能容量, kWh/m^2 ; ρ_{air} 为空气密度, 取 $1.2 \text{ kg}/\text{m}^3$; H 为房间净高, 取 3 m ; c_p 为空气定压比热容, 取 $1005 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; $T_{ref}(t)$ 为常规墙体工况下的逐时室内空气温度, $^{\circ}\text{C}$; $T_{pcm}(t)$ 为相变墙体工况下的逐时室内空气温度, $^{\circ}\text{C}$; COP 为空调系统制冷能效比, 本工作取 3.5 。

2 结果与分析

2.1 极端热浪下 PCM 墙体建筑与常规建筑室内温度分析

图5展示了极端热浪典型日条件下, 常规墙体与 PCM 墙体建筑室内空气温度的逐时变化情况。从整体趋势看, 两种工况下的室内温度均呈现昼夜周期性波动, 但相变材料的加入显著改变了高温时段的热响应特征。具体数据显示, 常规墙体下室内热环境在午后迅速恶化, 自 12 时起即进入持续高温阶段, 峰值高达 34.85°C 且持续时间较长, 日最大温差达到 3.06°C 。相比之下, PCM 墙体表现出明显的“削峰滞后”效应, 其室内温度峰值控制在

33.54°C , 较常规工况降低了 1.31°C ; 同时峰值出现时刻推迟至 17 时左右, 相较于常规建筑延后了约 5 小时, 有效错开了室外气温最高的时间段。

进一步分析室内温度的上升过程可知, PCM 墙体利用材料相变潜热吸能, 显著平抑了室内升温速率, 使其较常规墙体平均减少了 $0.35^{\circ}\text{C}/\text{h}$, 全天日温差也缩减至 2.50°C , 温度波动幅度明显减小。综上所述, 在极端热浪叠加停电且无主动制冷系统运行的情景下, PCM 墙体通过吸收热量并延缓外部热流向室内的传递, 发挥了显著的热缓冲作用。这种被动调温优势有效降低了室内温度峰值并缓解了白天的过热现象, 为下文进行热韧性指标的定量计算提供了直接的数据支持。

值得注意的是, 夜间降温阶段(18:00 后)PCM 墙体的室内降温速率($0.13^{\circ}\text{C}/\text{h}$)明显慢于常规墙体($0.19^{\circ}\text{C}/\text{h}$)。这是由于相变材料重结晶释放潜热形成了内部延迟热源, 表明 PCM 结构在显著增强热“吸收能力”(削峰)的同时, 也因放热滞后效应在一定程度上限制了自然冷却条件下的“恢复速度”, 反映了其在极端工况全周期内呈现出的“高抵抗-慢恢复”的热响应特征。

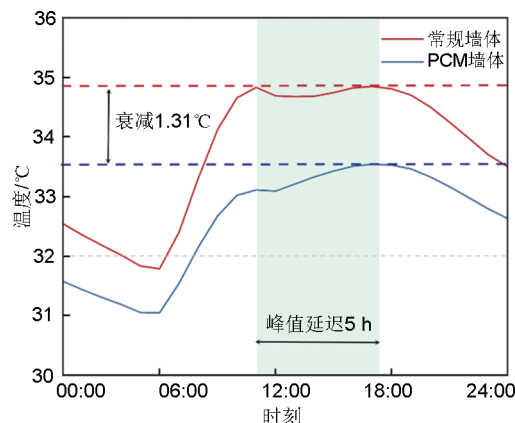


图5 常规墙体与 PCM 墙体室内温度变化曲线

Fig. 5 Comparison of indoor air temperature profiles for conventional and PCM-integrated wall configurations

2.2 极端热浪下 PCM 墙体建筑与常规墙体建筑热韧性分析

基于前述典型日室内温度模拟结果, 本工作采用室内过热度(IOD)与过热因子(OEF)两项核心指标, 对极端热浪停电情景下建筑本体的热韧性进行了定量评价, 如图6所示。整体评估结果显示, 相变围护结构在抑制室内过热风险方面展现出显著优

势。具体数据表明,在面临相同的外部热扰动时,常规墙体建筑的 IOD 高达 $41.91^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$, OEF 为 0.61, 反映出其对热浪的防御能力较弱, 导致室内热暴露风险迅速累积; 相比之下, PCM 墙体建筑的 IOD 显著降至 $14.11^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$, 降幅高达 66.33%; 对应的 OEF 也降至 0.21, 降幅为 65.57%。这一显著的指标差异揭示了两者在应对极端热冲击时的性能区别。相较于常规墙体有限的热缓冲能力, PCM 围护结构利用相变材料的潜热调节作用, 大幅削弱了外部高温向室内的传递强度与累积效应。综上所述, 在无主动制冷系统运行的极限工况下, 相变材料的引入有效降低了建筑对外部极端热浪的响应敏感性, 从而显著提升了建筑本体抵御热风险的韧性水平。

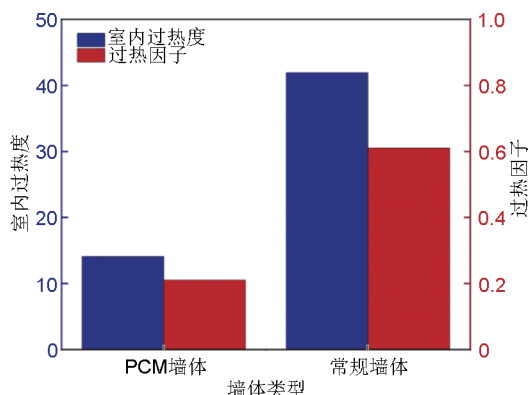


图6 过热度与过热因子变化情况

Fig. 6 Indoor overheating degree and overheating escalation factor for conventional and PCM wall configurations

2.3 相变储热围护结构建筑的等效虚拟储能容量分析

为量化相变围护结构在极端热浪停电情景下的能量贡献, 本工作引入“等效虚拟储能”概念。其物理本质在于利用相变材料的潜热吸能特性, 替代原本需由主动空调系统消耗电力维持的冷负荷, 从而在断电期间发挥类似电池的能量调节作用。图7展示了该系统的全天逐时运行特性, 可见其“虚拟放电”行为呈现出与室外热扰动高度耦合的双峰特征。具体数据显示, 该虚拟储能单元在上午 11:00 左右达到 $5.5 \times 10^{-4} \text{ kWh/m}^2$ 的峰值放电电量, 有效平抑了白天时段的快速升温, 且典型日全天累计提供了高达 0.09 kWh/m^2 的等效虚拟冷量。以典型单间办公室 (20 m^2) 为例, 该容量相当于配备了一台

1.8 kWh 的移动储能电源, 足以支撑 1.5 匹空调在断电后继续运行近 2 小时。这一结果从能量供需匹配的视角深刻揭示了相变材料的应用价值: 即在围护结构中构建了一个分布式的热侧储能单元。在电网失效期间, 该单元通过持续的被动冷量释放, 有效填补了主动制冷系统停运后的能量缺口。这不仅在物理上验证了相变围护结构作为“能量缓冲器”的功能特性, 更为极端工况下建筑本体热韧性的提升提供了量化的能量学依据。

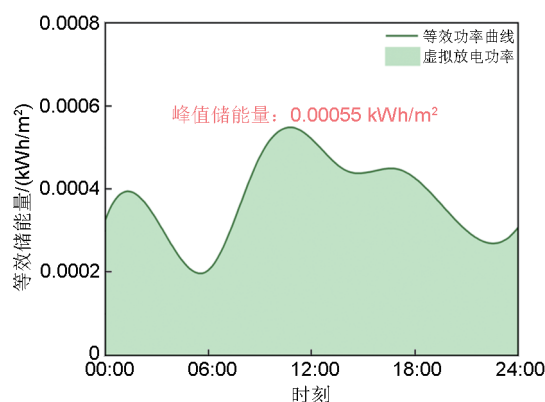


图7 相变储能建筑全天逐时等效虚拟放电功率

Fig. 7 Hourly equivalent virtual discharge power of phase change energy storage buildings throughout the day

3 结论

针对全球变暖背景下极端热浪与停电事故叠加的极限生存工况, 本工作聚焦于建筑主动热调节系统失效后的被动热安全问题, 提出了一种利用相变储热围护结构提升建筑本体热韧性的方法。研究基于 SSP5-8.5 未来气候情景与 EnergyPlus 平台, 构建了 2050 年夏季极端热浪-停电耦合下的建筑热工仿真模型, 从室内热环境动态响应、热韧性指标量化评估以及等效虚拟储能特性三个维度, 系统解析了该方法的有效性与提升机制。研究结果表明, 本工作提出的方法为提升建筑在极端气候风险下的被动适应能力提供了量化的能量支撑与可行的技术路径。主要结论如下:

在热环境响应层面, 与常规墙体相比, 相变储热围护结构将室内峰值温度降低了 1.31°C , 并将峰值出现时间延后约 5 h, 有效平抑了室内升温速率与温度波动, 降低了热环境的快速恶化。

在热韧性评估层面, 相变材料显著阻断了外部

热冲击在室内的累积效应,使室内过热度(IOD)与过热因子(OEF)分别大幅降低66.33%(减少 $27.8^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$)和65.57%(减少0.4),证实该结构能显著降低建筑对极端高温的响应敏感性。

在能量机制层面,该方法本质上在围护结构中构建了“分布式储热虚拟电池”,在典型断电日累计向建筑提供了 0.09 kWh/m^2 的等效被动冷量,有效填补了主动制冷失效后的能量缺口。

参考文献

- [1] SENGUPTA A, AL ASSAAD D, BERK KAZANCI O, et al. Building and system design's impact on thermal resilience to overheating during heatwaves: An uncertainty and sensitivity analysis[J]. *Building and Environment*, 2024, 265: 112031. DOI: 10.1016/j.buildenv.2024.112031.
- [2] SHENG M, REINER M, SUN K Y, et al. Assessing thermal resilience of an assisted living facility during heat waves and cold snaps with power outages[J]. *Building and Environment*, 2023, 230: 110001. DOI:10.1016/j.buildenv.2023.110001.
- [3] GUO S Y, YAN D, GUI C X. The typical hot year and typical cold year for modeling extreme events impacts on indoor environment: A generation method and case study[J]. *Building Simulation*, 2020, 13 (3): 543-558. DOI:10.1007/s12273-020-0617-2.
- [4] ZHANG A, XIONG Y X, ZHAO Y Q, et al. A review of passive building thermal management with phase-change materials[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2025, 211: 115334. DOI:10.1016/j.rser.2025.115334.
- [5] BAI L, WANG Y Q, BAI Y F, et al. Influence of phase change materials on the thermal performance of heavy-weight walls with different thermal inertia[J]. *Journal of Building Engineering*, 2025, 99: 111573. DOI:10.1016/j.job.2024.111573.
- [6] KISHORE R A, BIANCHI M V A, BOOTEN C, et al. Parametric and sensitivity analysis of a PCM-integrated wall for optimal thermal load modulation in lightweight buildings[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 187: 116568. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2021.116568.
- [7] JAMAL B, HIDKI R, BOUKENDIL M, et al. Thermal performance analysis of building walls incorporating phase change materials under hot climatic conditions in Morocco[J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2025, 59: 103373. DOI: 10.1016/j.tsep.2025.103373.
- [8] AL-YASIRI Q, SZABÓ M. Hourly analysis of temperature and heat gain reduction for building envelope-compacted phase change material in extremely hot conditions[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 68: 107838. DOI:10.1016/j.est.2023.107838.
- [9] JEGAN J, ANITHA P, LOGARAJA R. Comprehensive study on thermal properties and application of phase change materials in construction[J]. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 2024, 10(1): 31. DOI:10.1007/s41024-024-00536-x.
- [10] PASWAN R, DAS S. Meso-structural degradation and mechanical property evolution in cementitious mortars containing microencapsulated phase change materials under extended freeze-thaw cycles[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 457: 139405. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2024.139405.
- [11] LEHMIL S, HADDADI M, AGOUDIL B. Numerical simulation of the influence of PCM and DPC incorporation on the thermal insulation buildings[M]//*Technological and Innovative Progress in Renewable Energy Systems*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2025: 171-174. DOI:10.1007/978-3-031-71926-4_30.
- [12] SIU C Y, O'BRIEN W, TOUCHIE M, et al. Evaluating thermal resilience of building designs using building performance simulation—A review of existing practices[J]. *Building and Environment*, 2023, 234: 110124. DOI: 10.1016/j.buildenv.2023.110124.
- [13] HOMAEI S, HAMDY M. Thermal resilient buildings: How to be quantified? A novel benchmarking framework and labelling metric [J]. *Building and Environment*, 2021, 201: 108022. DOI:10.1016/j.buildenv.2021.108022.
- [14] WANG R, LU S L, ZHAI X, et al. The energy performance and passive survivability of high thermal insulation buildings in future climate scenarios[J]. *Building Simulation*, 2022, 15(7): 1209-1225. DOI:10.1007/s12273-021-0818-3.
- [15] HAMDY M, CARLUCCI S, HOES P J, et al. The impact of climate change on the overheating risk in dwellings—A Dutch case study [J]. *Building and Environment*, 2017, 122: 307-323. DOI:10.1016/j.buildenv.2017.06.031.
- [16] ZHANG G Y, LI L X, YU Y, et al. Thermal resilience of public building atriums under different states during heatwaves[J]. *Buildings*, 2025, 15(4): DOI:10.3390/buildings15040598.
- [17] TAO M Y, GOU Z H, MA N. Assessment of thermal comfort and thermal resilience in dwellings during heat waves: A case study of a near-zero energy house[J]. *Journal of Building Engineering*, 2025, 109: 113052. DOI:10.1016/j.job.2025.113052.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑节能与可再生能源利用通用规范: GB 55015—2021[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.
- [19] 叶荣达. 水合无机盐/膨胀石墨复合相变材料应用于建筑围护结构的实验与模拟研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019. DOI:10.27151/d.cnki.ghnlu.2019.000158.
- YE R D. Experimental and simulation study on the building envelopes containing hydrated inorganic salt/expanded graphite composite phase change materials[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [20] 国家气候中心. 极端高温监测指标: QX/T 280—2015[S]. 北京: 气象出版社, 2015.
- [21] JENTSCH M F, BAHAJ A S, JAMES P A B. Climate change future proofing of buildings—Generation and assessment of building simulation weather files[J]. *Energy and Buildings*, 2008, 40(12): 2148-2168. DOI:10.1016/j.enbuild.2008.06.005.