

相变混凝土在建筑节能中的研究进展与应用展望

莫振坤¹, 刘昱^{1,*}, 周继弘¹, 黄振宇¹, 于佳枫¹, 李梓睿¹, 蔡浩敏¹, 钟亮²

1. 辽宁科技大学土木工程学院, 辽宁 鞍山 114051

2. 鞍钢集团工程技术有限公司, 建筑科技事业部土建二室, 辽宁 鞍山 114051

摘要: 建筑采暖、空调与通风能耗长期占据运行能耗的重要比例, 围护结构的被动蓄热与调温能力因而受到关注。相变材料具有潜热储能特征, 将其引入混凝土或水泥基复合材料, 可改善构件热惰性, 缓解室内温度波动并延迟热流传递。本文围绕相变混凝土的材料组成、储能调温机理、制备方式、热工性能、力学性能、耐久性和工程应用展开综述。已有研究表明, 微胶囊法、多孔载体吸附法、轻骨料负载法和复合封装法能够提升相变材料在水泥基体系中的形态稳定性, 但较高掺量通常伴随强度下降、界面弱化和耐久性不确定性。相变混凝土可用于墙体、屋面、楼板和装配式构件的热调节, 但工程应用仍受泄漏控制、导热匹配、长期服役性能、成本和评价标准限制。后续研究宜围绕热工、力学与耐久性能的协同设计开展, 并加强实尺度构件验证、长期运行监测和全寿命周期评价, 为其在绿色低碳建筑中的应用提供依据。

关键词: 相变材料; 相变混凝土; 水泥基复合材料; 建筑节能; 热工性能; 耐久性

Research Progress and Application Prospects of Phase Change Concrete in Building Energy Efficiency

Zhenkun Mo¹, Yu Liu^{1,*}, Jihong Zhou¹, Zhenyu Huang¹, Jiafeng Yu¹, Zirui Li¹, Haomin Cai¹, Liang Zhong²

1. School of Civil Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan Liaoning, 114051, China

2. Civil Engineering Office 2 of Construction Technology Division, Ansteel Engineering Technology Corporation Limited, Anshan, Liaoning, 114051, China

Abstract: Energy use for heating, ventilation, and air conditioning remains a major component of building operational energy demand. Improving the passive heat storage and temperature regulation capacity of building envelopes is therefore important for energy-efficient buildings. Phase change materials (PCMs) can store and release latent heat near their phase transition temperature. When incorporated into concrete or cement-based composites, they may increase the thermal inertia of components, reduce indoor temperature fluctuations, and delay heat transfer. This paper reviews phase change concrete in terms of material composition, thermal regulation mechanism, preparation methods, thermal properties, mechanical performance, durability, and engineering applications. Previous studies show that microencapsulation, porous carrier adsorption, lightweight aggregate loading, and composite encapsulation can improve the shape stability of PCMs in cementitious matrices. Nevertheless, higher PCM contents often introduce strength loss, interfacial weakening, and durability uncertainty. Phase change concrete is promising for walls, roofs, floors, and prefabricated components, but its practical use is

still limited by leakage control, thermal conductivity matching, long-term service performance, cost, and standardized evaluation. Future work should emphasize coupled thermal, mechanical, and durability design, together with full-scale component tests, long-term monitoring, and life-cycle assessment.

Keywords: Phase change materials; Phase change concrete; Cement-based composites; Building energy efficiency; Thermal performance; Durability

建筑运行能耗与碳排放控制是绿色建筑发展的重要议题,其中采暖、空调和通风系统承担了相当比例的运行负荷。传统节能措施通常通过提高保温层热阻、改善门窗气密性或提升机电系统效率来减少热量传递,但对热量在昼夜周期中的转移和缓冲作用有限。对于昼夜温差明显或冷热负荷峰值突出的建筑,如果围护结构能够在高温时段吸热、低温时段释热,便可在较少依赖主动设备的情况下改善室内热环境。

相变材料(phase change materials, PCMs)可在相变温度附近吸收或释放潜热,具有较高储能密度和相对稳定的温度平台,适合建筑短周期热调节^[1-3]。目前,PCMs已被用于建筑围护结构、墙体板材、砂浆、混凝土构件和被动冷却系统等方面^[4-10]。混凝土用量大、耐久性和施工适应性较好,若与PCMs复合形成相变混凝土,可在保持水泥基材料工程属性的同时引入储能调温功能,从而提高围护结构热惰性并削减室内温度峰值。然而,相变混凝土并非简单的“混凝土+相变材料”。一方面,PCMs多为有机蜡类、脂肪酸或水合盐,其导热系数、相变稳定性、可燃性和体积变化特征与水泥基体系存在差异;另一方面,PCMs的引入会改变混凝土孔隙结构、界面过渡区和水化过程,可能导致抗压强度、抗折强度和耐久性下降^[11-17]。因此,相变混凝土研究的主要问题不是单纯提高潜热值,而是在储热能力、导热效率、力学性能、耐久性、施工性和经济性之间建立可工程化的平衡。

基于此,本文从材料体系、制备方法、热工性能、力学与耐久性能、工程应用和发展趋势等方面梳理相变混凝土研究进展,重点分析不同PCMs引入方式对综合性能的影响,并讨论其由实验室研究走向工程应用时需要解决的问题。

1 相变混凝土的组成与储能调温机理

1.1 相变材料类型

用于建筑领域的PCMs通常包括有机相变材料、无机相变材料和复合相变材料。有机PCMs以石蜡、脂肪酸及其衍生物为代表,具有相变温度可调、化学稳定性较好、过冷度小和循环稳定性较高等优点,因而在建筑围护结构和水泥基材料中应用较多^[1, 4-6]。其不足主要表现为导热系数较低、与无机水泥基体相容性有限,且部分有机PCMs存在可燃性风险。无机PCMs主要包括水合盐和盐类混合物,通常具有较高相变潜热、较好导热性能和较低成本,但容易出现过冷、相分离和循环稳定性不足等问题^[2, 3]。复合PCMs则通过多孔载体吸附、微胶囊封装、导热增强或多组分复配等方法,将相变储能功能与形态稳定性结合,是目前水泥基相变材料的研究方向^[18-22]。

1.2 储能调温机理

普通混凝土主要依靠显热储能,即材料温度随热量吸收或释放而升高或降低。相变混凝土则在显热储能基础上引入潜热储能机制。当环境温度升至PCMs相变温度附近时,PCMs吸收热量并发生相态转变,而材料温度变化较小;当环境温度下降时,PCMs释放潜热并恢复原有相态。该过程可降低围护结构内表面温度峰值,延迟热流传递,并减小室内温度波动^[4-8]。

相变混凝土的调温效果取决于相变温度、相变潜热、有效掺量、导热性能、构件厚度和外部气

候条件。相变温度若与建筑室内舒适温度区间相匹配, PCMs 可在白天吸收太阳辐射和室内余热, 在夜间或低温时段释放热量, 实现热负荷的时间转移。若相变温度偏离建筑运行温区, PCMs 可能无法充分完成相变循环, 其潜热储能优势难以发挥。因此, 相变混凝土设计必须结合建筑所在地气候、房间功能、围护结构位置和通风方式进行匹配。

1.3 与水泥基体系的相容性

PCMs 引入水泥基材料后, 会同时影响热工性能和材料微结构。直接掺入的有机 PCMs 可能包裹水泥颗粒、阻碍水化反应或形成弱界面; 微胶囊 PCMs 虽能减少泄漏, 但胶囊壳层和水泥浆体之间可能形成界面薄弱区; 多孔载体吸附 PCMs 后会改变骨料吸水率、孔隙结构和界面过渡区^[12-16]。因此, 相变混凝土性能受“相变材料、封装层、载体与水泥基体”多相界面共同控制。

从工程角度看, 相变混凝土需要同时满足热工功能和基本材料性能要求。对于非承重墙板、砂浆层和屋面保护层, 可适当提高 PCMs 含量以增强调温效果; 对于承重或半承重构件, 则应优先保证力学安全和耐久性, 在此基础上进行热工功能设计。

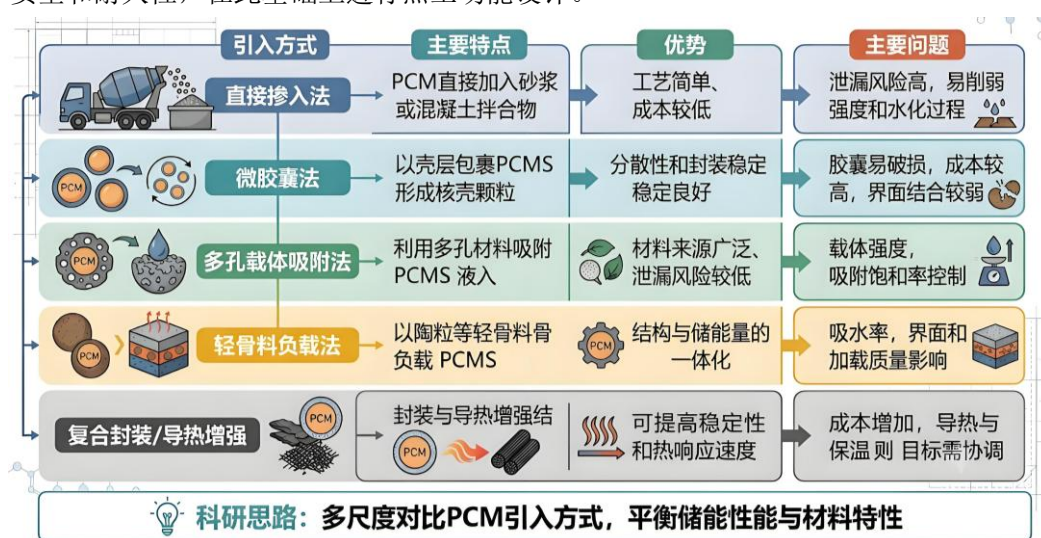


图 1 相变材料在混凝土中的主要引入方式比较

Fig. 1 Comparison of PCMs incorporation techniques in concrete

2 相变材料在混凝土中的引入方式

2.1 直接掺入法

直接掺入法是将 PCMs 以液态、粉末状或颗粒状形式直接加入混凝土或砂浆中。该方法工艺简单、成本较低, 能够较直接地提高材料储热能力。但直接掺入固-液相变材料时, PCMs 在相变过程中容易迁移或泄漏, 导致材料表面污染、孔隙结构劣化和长期热性能衰减。此外, PCMs 与水泥基体界面结合较弱, 可能使混凝土强度明显下降。因此, 直接掺入法更适合低掺量、非承重或探索性研究场景。若用于工程材料, 通常需要配合吸附载体、表面包覆或形态稳定化处理, 以降低泄漏和强度损失风险。

2.2 微胶囊法

微胶囊法通过聚合物、无机材料或有机-无机复合壳层包覆 PCMs, 形成核壳结构。微胶囊壳层可限制固-液相变材料流动, 提高其在水泥基体中的分散性和稳定性。Cabeza 等^[11]较早研究了微胶囊 PCMs 混凝土墙体的节能效果, 表明其可改善墙体热响应。Hunger 等^[12]研究了含微胶囊 PCMs 自密实混凝土行为, 发现微胶囊掺入会提高热容量, 但也会对混凝土工作性和力学性能产生影响。微胶囊法有利于获得分散较均匀、泄漏风险较低的功能化水泥基材料, 但其短板同样明显: 胶囊壳层在

搅拌、振捣或泵送过程中可能破裂,胶囊与水泥基体界面结合较弱,较高掺量还可能形成内部薄弱相。近年来,无机壳层、有机-无机杂化壳层和工业固废壳材被用于提高胶囊强度和界面稳定性^[29, 30],但其成本、规模化制备和长期耐久性仍需结合工程条件继续评价。

2.3 多孔载体吸附法

多孔载体吸附法利用膨胀珍珠岩、硅藻土、膨胀石墨、再生水泥浆体或陶粒等多孔材料吸附 PCMs,再将复合相变材料掺入水泥基体系。多孔孔隙可通过毛细作用和表面张力固定 PCMs,从而减少泄漏。相较微胶囊法,多孔载体吸附法工艺较简单,材料来源较广,具有一定的工程适应性^[18, 19, 22]。不同载体对相变混凝土性能影响明显。膨胀珍珠岩和膨胀蛭石孔隙率高,吸附能力较强,但自身强度较低;膨胀石墨兼具多孔结构和较高导热性能,可改善有机 PCMs 导热不足的问题^[22];再生水泥浆体作为载体可提高资源循环利用价值^[18]。多孔载体法的关键在于控制吸附率、泄漏率、载体强度和界面粘结之间的关系,避免因追求高 PCMs 负载量而牺牲混凝土力学性能。

2.4 轻骨料负载法与相变骨料

轻骨料负载法通常以陶粒、页岩陶粒或其他多孔轻骨料吸附 PCMs,并通过表面包覆减少泄漏。该方法可将骨料功能化,使其同时承担骨架作用和储热作用。Memon 等^[20]利用宏封装 PCMs 发展结构轻骨料混凝土,表明该方法具有热储能和轻质化潜力。Xu 等^[19]以膨胀蛭石负载石蜡制备轻质储能水泥基复合材料,也验证了多孔轻质载体在水泥基储能材料中的可行性。近年来,相变骨料研究进一步关注“结构-储能”一体化,即通过开发无泄漏相变骨料、壳层增强骨料或复合导热骨料,使相变混凝土兼具较高储热能力和可接受的力学性能^[23, 24]。不过,轻骨料负载 PCMs 后吸水率、表面粗糙度和界面过渡区会发生变化,可能影响拌合物流动性和硬化强度。因此,该类方法需要重点优化预处理、封装、级配和界面改性工艺。

2.5 复合封装与导热增强

有机 PCMs 导热系数较低,若热量不能及时传递至材料内部,相变过程难以充分发生,调温效果会受到限制。常见导热增强方法包括加入膨胀石墨、石墨片、碳纤维、碳纳米材料或金属颗粒,也可构建连续导热网络^[16, 22, 29]。Xiong 等^[29]研究了石墨片对含微胶囊 PCMs 水泥基复合材料传热性能的增强作用,说明导热填料可提高材料热响应速度。但导热增强需要服务于具体应用目标。对于需要快速吸放热的地板储能层或太阳能储热构件,提高导热性能有利于增强热响应;对于外墙或屋面围护构件,过高导热系数可能削弱隔热性能甚至形成热桥。因此,相变混凝土不宜简单追求高导热,而应在导热效率、隔热效果和热储能能力之间进行协同设计。

3 相变混凝土热工性能研究进展

3.1 储热能力

储热能力是相变混凝土区别于普通混凝土的核心性能。PCMs 掺入后,材料在相变温度区间内的等效热容量显著提高,能够在温度变化较小的情况下吸收或释放较多热量^[1, 2]。储热能力主要由 PCMs 潜热值、相变温度、有效含量和封装稳定性决定。通常情况下,PCMs 掺量增加可提高潜热储能能力,但同时可能导致密度下降、孔隙率增加和强度降低。PCMs 有效含量并不等同于总掺量。若 PCMs 被封装层、载体孔隙或水泥基体约束后无法充分发生相变,实际潜热贡献会低于理论值。因此,评价相变混凝土储热能力时,应结合差示扫描量热、热循环试验和构件尺度热箱试验,而不能仅依据 PCMs 原材料潜热值进行推算。

3.2 导热性能与热响应

相变混凝土热响应速度受导热系数和内部传热路径控制。微胶囊 PCMs 和多孔轻质载体通常会降低水泥基材料导热系数,使材料吸放热过程变慢^[13, 16]。适度降低导热系数有助于围护结构隔热,但导热过低会导致 PCMs 相变不充分,降低实际储能效率。因此,导热性能应结合构件位置和热工目标进行调控。目前研究多采用高导热填料改善热响应,例如膨胀石墨、石墨片和碳纳米纤维等^[21, 22, 29]。Ren 等^[21]将 PCMs 和碳纳米纤维引入轻骨料混凝土,表明导热增强与轻质储能可结合用于建筑热调节。未来研究需要进一步明确不同导热增强体系对热工性能、力学性能、成本和施工性的综合影响。

3.3 温度调控与节能效果

相变混凝土在建筑中的实际价值主要体现为降低室内温度峰值、延迟峰值出现时间、减少温度波动和削减空调负荷。墙体和屋面是研究较多的应用部位。相关综述指出,PCMs 集成建筑围护结构可改善被动冷却和热舒适性,但节能效果高度依赖气候条件、相变温度、构件位置和通风条件^[4-8]。在昼夜温差较大的地区,PCMs 更容易在白天完成吸热、夜间完成放热,因而调温效果较明显;在夜间温度较高或通风不足的地区,PCMs 可能无法充分释热,次日储热能力下降。由此可见,相变混凝土的应用不应孤立于建筑系统之外,而应与自然通风、遮阳、高性能保温和空调运行策略共同设计。

3.4 热循环稳定性

建筑材料服役期内需要经历大量日周期和季节性温度循环。PCMs 在长期循环中可能出现潜热衰减、相变温度漂移、壳层破裂、载体结构变化或界面损伤。热循环稳定性不足会直接削弱相变混凝土长期调温能力。当前研究通常通过若干次加热-冷却循环评价 PCMs 或复合材料稳定性,但循环次数、温度范围、环境湿度和约束条件差异较大,结果可比性不足。未来应建立更接近建筑实际服役环境的热循环评价方法。例如,将热循环与干湿循环、冻融循环、荷载作用和碳化环境耦合,研究相变功能衰减与混凝土耐久性退化之间的关系。对于工程应用,热循环后的潜热保持率、泄漏率、强度保持率和界面损伤程度应成为重要评价指标。

4 相变混凝土力学性能与耐久性

4.1 力学性能影响规律

相变混凝土的力学性能是其工程应用的底线约束。微胶囊 PCMs、多孔载体和轻质相变骨料的引入通常会降低混凝土抗压强度、抗折强度或弹性模量^[12, 14, 17]。其原因主要包括:PCMs 自身强度较低;封装层或载体与水泥浆体界面结合较弱;多孔载体增加孔隙率;PCMs 影响水泥水化和浆体密实度。不过,强度下降程度取决于 PCMs 类型、掺量、载体强度、封装壳层和胶凝体系设计。Jayalath 等^[14]研究了含微胶囊 PCMs 砂浆和混凝土性能,指出合理掺量和配合比设计可在一定程度上平衡热工性能与力学性能。对于超高性能混凝土等高强基体,适量 PCMs 掺入也可获得一定热调节功能,但仍需关注基体脆性、界面缺陷和长期可靠性^[26]。

4.2 微观结构与界面机制

相变混凝土性能退化常与界面过渡区和孔隙结构变化有关。微胶囊 PCMs 表面较光滑,与水泥水化产物机械咬合作用较弱;多孔载体吸附 PCMs 后,原有孔隙被部分填充,但载体外表面和水泥浆体之间仍可能形成弱界面;直接掺入 PCMs 则更容易在硬化基体内形成孔洞或连续弱相。因此,界面改性是提高相变混凝土综合性能的重要途径。可行方法包括微胶囊无机壳层化、载体表面粗化、硅酸盐或聚合物包覆、矿物掺合料填充以及优化颗粒级配等。未来应结合扫描电镜、孔结构分析、

热重分析和界面力学测试,揭示 PCMs 复合方式与水泥基体微结构演化之间的关系。

4.3 耐久性问题

相变混凝土耐久性研究相对不足,但该问题决定其能否长期应用于实际建筑。Wei 等^[15]研究了含微胶囊 PCMs 水泥基复合材料耐久性,表明 PCMs 引入会影响材料在环境作用下的性能保持。相变混凝土在服役过程中可能受到冻融、干湿循环、氯盐侵蚀、碳化、热循环和荷载耦合作用。若 PCMs 或载体增加孔隙率,侵蚀介质传输将更加容易;若封装层在循环过程中破裂,则可能引发泄漏和局部界面损伤。此外,固-液相变可能伴随体积变化,长期循环会对封装层和界面造成疲劳作用。对于寒冷地区,冻融循环与 PCMs 相变循环叠加可能产生更复杂的损伤机制。未来应从单因素试验转向多场耦合耐久性研究,建立面向工程寿命的评价方法。

4.4 热工-力学-耐久多性能平衡

相变混凝土的设计难点在于热工功能与结构性能的同步约束。提高 PCMs 掺量通常有利于储热,但可能带来强度和耐久性损失;提高导热能力能够加快热响应,却可能削弱围护构件的隔热作用;加强封装可降低泄漏风险,但也可能增加成本并影响界面粘结。因此,相变混凝土不宜以“高潜热”作为唯一目标,而应根据构件类型建立差异化评价标准。非承重内隔墙、抹面砂浆和屋面保护层可侧重热工性能,承重墙体、楼板和结构构件应优先满足安全与耐久要求,装配式功能构件还需考虑工厂生产、运输安装和质量一致性。



图 2 相变混凝土性能评价指标

Fig. 2 Evaluation indicators for performance of phase change concrete

5 工程应用场景与评价方法

5.1 建筑围护结构

墙体、屋面和楼板是相变混凝土最主要的应用对象。墙体中引入 PCMs 可提高围护结构热容量,降低室内温度波动;屋面相变混凝土可吸收白天太阳辐射热量,降低内表面温度峰值;楼板或地面储能层可与地板辐射系统、太阳能集热系统或夜间通风策略结合,提高建筑热能利用效率^[4-8, 24]。相变混凝土也适合与装配式建筑结合。工厂化生产有利于控制 PCMs 掺量、封装质量和构件成型条件,减少现场施工的不确定性。预制相变墙板、复合屋面板和功能砂浆层可作为建筑节能构造的组成部分。

5.2 低能耗建筑与被动冷却

在低能耗建筑和被动式建筑中,相变混凝土不应被视为独立节能措施,而应作为围护结构热调节系统的一部分。PCMs 可与保温层、遮阳系统、自然通风、夜间冷却和智能控制系统协同发挥作

用。被动冷却综述表明,PCMs 建筑围护结构在降低冷负荷方面具有潜力,但其效果与气候和运行策略高度相关^[7, 32]。在夏热冬冷地区,相变混凝土既可能用于夏季削峰,也可能用于过渡季和冬季太阳能蓄热;在寒冷地区,其应用重点可转向室内热稳定和太阳能被动利用;在炎热湿润地区,则需重点解决夜间释热不足问题。

5.3 效果评价指标

相变混凝土评价应包括材料、构件和建筑三个层次。材料层面应测试相变温度、潜热、导热系数、比热容、密度、强度、收缩、渗透性和热循环稳定性。构件层面应关注热流密度、内外表面温差、峰值延迟时间和热惰性指标。建筑层面则应评价室内温度峰值降低幅度、热舒适时长、空调负荷削减率、全年能耗和经济性。当前研究中,小尺寸试件测试较多,实尺度构件和实际建筑长期监测不足。由于建筑能耗受气候、朝向、通风、人员行为和设备运行方式影响,仅凭材料热物性难以准确评价节能效果。因此,未来应加强实验室热箱试验、实尺度样板房监测和建筑能耗模拟的结合,形成从材料参数到建筑能耗评价的完整路径。

6 现存问题与发展趋势

6.1 泄漏控制与长期稳定性仍是核心瓶颈

固-液 PCMs 在相变过程中具有流动性,泄漏会导致储热能力衰减、外观污染和孔隙结构破坏。尽管微胶囊、载体吸附和复合封装能够降低泄漏风险,但长期热循环、湿热环境和机械荷载作用下的稳定性仍不充分。未来应发展多层壳体、无机壳层、载体-壳层协同封装和无泄漏相变骨料,并建立统一的泄漏率和热循环稳定性测试方法。

6.2 储热性能与力学性能需要协同优化

在多数配合比中,储热能力提升与强度保持之间存在权衡关系,其根源包括 PCMs 本体强度较低、多孔载体弱化以及界面过渡区缺陷。后续研究可从高强载体、低缺陷封装、矿物掺合料填充、纤维增强和颗粒级配优化等方面改善整体性能。机器学习等数据驱动方法也可用于预测含 PCMs 水泥基复合材料强度,并辅助配合比筛选^[25]。

6.3 导热增强应服务于具体热工目标

导热增强是提高 PCMs 利用效率的重要手段,但对不同构件的意义并不相同。储能地板和太阳能蓄热构件需要较快热响应,外墙和屋面则需要兼顾隔热。未来可采用分层构造、梯度导热和局部导热网络设计,使相变混凝土在不同部位实现差异化热调控。

6.4 耐久性和标准化评价不足

相变混凝土涉及建筑材料、热工、结构和能源多个领域,目前测试方法和评价指标尚不统一。不同研究在试件尺寸、循环次数、温度边界和评价方法方面差异较大,导致结果难以比较。未来应建立材料-构件-建筑多尺度评价体系,明确相变温度、潜热保持率、泄漏率、强度保持率、耐久性和节能率等关键指标。

6.5 低碳化与工程化应用趋势

相变混凝土的后续应用需要与绿色低碳建筑的实际需求衔接。一方面,可探索生物基 PCMs、工业固废载体、再生骨料和低碳胶凝材料的组合利用;另一方面,可面向装配式构件、功能砂浆、复合墙板和屋面系统开展产品化研究,以提高施工适配性和质量稳定性。同时,应纳入全生命周期评价和经济性分析,避免仅关注运行阶段节能而忽视材料生产、运输和维护阶段的环境影响。

7 结论

(1) 相变混凝土通过引入 PCMs 潜热储能机制,可提高建筑围护结构热惰性,降低室内温度峰值并延迟热流传递,是建筑节能材料中值得持续关注方向。

(2) 微胶囊法、多孔载体吸附法、轻骨料负载法和复合封装法均可改善 PCMs 在水泥基体系中的稳定性。其中,微胶囊法分散性较好但成本和壳层强度问题突出;多孔载体和轻骨料负载法具有一定的工程适应性,但需控制载体强度、吸附率和泄漏风险。

(3) 相变混凝土性能受 PCMs 类型、相变温度、掺量、导热增强方式、封装稳定性和水泥基体微结构共同影响。提高储热能力常伴随力学性能和耐久性风险,因此应从单一热工性能提升转向热工-力学-耐久协同优化。

(4) 相变混凝土在墙体、屋面、楼板和装配式构件中具有应用潜力,但实际节能效果依赖气候条件、构件位置和建筑运行策略。未来应加强实尺度构件试验、长期服役监测和建筑能耗模拟。

(5) 相变混凝土工程化应用仍需解决泄漏控制、长期热循环稳定性、标准化测试、成本控制和全寿命周期评价等问题。随着复合封装、导热调控和装配式构件技术完善,其在绿色低碳建筑中的应用空间将进一步明确。

参考文献

- [1] Sharma A, Tyagi V V, Chen C R, et al. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13(2): 318-345.
- [2] Zhou D, Zhao C Y, Tian Y. Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications[J]. *Applied Energy*, 2012, 92: 593-605.
- [3] de Gracia A, Cabeza L F. Phase change materials and thermal energy storage for buildings[J]. *Energy and Buildings*, 2015, 103: 414-419.
- [4] Kuznik F, David D, Johannes K, et al. A review on phase change materials integrated in building walls[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(1): 379-391.
- [5] Memon S A. Phase change materials integrated in building walls: A state of the art review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 31: 870-906.
- [6] Lamrani B, Johannes K, Kuznik F. Phase change materials integrated into building walls: An updated review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 140: 110751.
- [7] Akeiber H, Nejat P, Majid M Z A, et al. A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 60: 1470-1497.
- [8] Rathore P K S, Gupta N K, Yadav D, et al. Thermal performance of the building envelope integrated with phase change material for thermal energy storage: An updated review[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 79: 103690.
- [9] Song M, Niu F, Mao N, et al. Review on building energy performance improvement using phase change materials[J]. *Energy and Buildings*, 2018, 158: 776-793.
- [10] Shah K W, Ong P J, Chua M H, et al. Application of phase change materials in building components and the use of nanotechnology for its improvement[J]. *Energy and Buildings*, 2022, 262: 112018.
- [11] Cabeza L F, Castellon C, Nogues M, et al. Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings[J]. *Energy and Buildings*, 2007, 39(2): 113-119.
- [12] Hunger M, Entrop A G, Mandilaras I, et al. The behavior of self-compacting concrete containing micro-encapsulated phase change materials[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2009, 31(10): 731-743.
- [13] Eddahak-Ouni A, Drissi S, Colin J, et al. Experimental and multi-scale analysis of the thermal properties of Portland cement concretes embedded with microencapsulated phase change materials (PCMs)[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 64(1-2): 32-39.
- [14] Jayalath A, San Nicolas R, Sofi M, et al. Properties of cementitious mortar and concrete containing micro-encapsulated phase change materials[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 120: 408-417.
- [15] Wei Z, Falzone G, Wang B, et al. The durability of cementitious composites containing microencapsulated phase change materials[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2017, 81: 66-76.
- [16] Ricklefs A, Thiele A M, Falzone G, et al. Thermal conductivity of cementitious composites containing

- microencapsulated phase change materials[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 104: 71-82.
- [17] Thiele A M, Wei Z, Falzone G, et al. Figure of merit for the thermal performance of cementitious composites containing phase change materials[J]. Cement and Concrete Composites, 2016, 65: 214-226.
- [18] Liu Z, Zang C, Hu D, et al. Thermal conductivity and mechanical properties of a shape-stabilized paraffin/recycled cement paste phase change energy storage composite incorporated in cement-based materials[J]. Cement and Concrete Composites, 2019, 99: 165-174.
- [19] Xu B, Ma H, Lu Z, et al. Paraffin/expanded vermiculite composite phase change material as aggregate for developing lightweight thermal energy storage cement-based composites[J]. Applied Energy, 2015, 160: 358-367.
- [20] Memon S A, Cui H Z, Zhang H, et al. Utilization of macro encapsulated phase change materials for the development of thermal energy storage and structural lightweight aggregate concrete[J]. Applied Energy, 2015, 139: 43-55.
- [21] Ren M, Liu Y, Gao X. Incorporation of phase change material and carbon nanofibers into lightweight aggregate concrete for thermal energy regulation in buildings[J]. Energy, 2020, 197: 117262.
- [22] Zhang Z, Shi G, Wang S, et al. Thermal energy storage cement mortar containing n-octadecane/expanded graphite composite phase change material[J]. Renewable Energy, 2013, 50: 670-675.
- [23] Drissi S, Ling T C, Mo K H. Development of leak-free phase change material aggregates[J]. Construction and Building Materials, 2020, 230: 117029.
- [24] Drissi S, Ling T C, Mo K H. Thermal performance of a solar energy storage concrete panel incorporating phase change material aggregates developed for thermal regulation in buildings[J]. Renewable Energy, 2020, 160: 817-829.
- [25] Marani A, Nehdi M L. Machine learning prediction of compressive strength for phase change materials integrated cementitious composites[J]. Construction and Building Materials, 2020, 265: 120286.
- [26] Ren M, Wen X, Gao X, et al. Thermal and mechanical properties of ultra-high performance concrete incorporated with microencapsulated phase change material[J]. Construction and Building Materials, 2021, 273: 121714.
- [27] Yang H, Xu Z, Cui H, et al. Cementitious composites integrated phase change materials for passive buildings: An overview[J]. Construction and Building Materials, 2022, 361: 129635.
- [28] Huang X, Chen X, Li A, et al. Shape-stabilized phase change materials based on porous supports for thermal energy storage applications[J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 356: 641-661.
- [29] Xiong T, Shah K W, Kua H W. Application of graphite platelets for heat transfer enhancement of cementitious composites containing microencapsulated phase change materials[J]. Construction and Building Materials, 2022, 318: 126024.
- [30] Ismail A, Bahmani M, Chen X, et al. An organic-inorganic hybrid microcapsule of phase change materials for thermal energy storage in cementitious composites[J]. Construction and Building Materials, 2024, 416: 135289.
- [31] Yu K, Jia M, Tian W, et al. Enhanced thermo-mechanical properties of cementitious composites via red mud-based microencapsulated phase change material: Towards energy conservation[J]. Energy, 2024, 290: 130301.
- [32] Li C, Wen X, Cai W, et al. Phase change material for passive cooling in building envelopes: A comprehensive review[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 65: 105763.

基金项目: 2026 年辽宁科技大学大学生创新训练项目: 癸酸-肉豆蔻酸相变混凝土热工学与力学性能研究; 辽宁科技大学 2025 年度实验教学改革项目: 产教融合协同育人背景下的土木工程材料试验课程教学改革研究 (2025XNFZ-25473); 教育部产学研合作协同育人项目: 应用型本科高校教学综合改革——以《建筑材料课程为例 (251004092270839); 教育部产学研合作协同育人项目: 应用型本科高校教学综合改革——以《砌体结构课程为例 (2510273556); 2025 年辽宁省科技厅项目-联合计划-博士科研启动项目: 冻融-锈蚀环境下钢渣再生混凝土与钢筋黏结性能及本构模型研究 (2025-BSLH-191)。

¹ **第 1 作者简介:** 莫振坤 (2006-), 男, 本科生在读。E-mail: 1161253119@qq.com。

***通讯作者简介:** 刘昱 (1989-), 男, 博士研究生, 讲师, 研究方向: 低碳混凝土。E-mail: liuyu1225@ustl.edu.cn。