

混凝土中的相变材料： 可持续建筑和建筑材料的机遇与挑战

拉朱伊沙尔，张钟万，胡正国

仁川国立大学建筑工程系，仁川延寿区

摘要：在混凝土中使用相变材料（PCM）在清洁能源储存方面取得了可喜的成果。然而，PCM和混凝土之间的相互作用对力学和耐久性性能的负面影响限制了现场应用，导致研究转向使用不同的技术将PCM纳入混凝土以克服这些问题。通过PCM存储清洁能源极大地支持了联合国可持续发展目标7中负担得起的清洁能源的目标。因此，本研究重点关注三个方面：PCM类型、PCM对混凝土性能的影响以及将PCM混凝土复合材料的结果与联合国可持续发展目标（UN SDGs）联系起来。通过使用纳米材料和辅助胶凝材料，可以在一定程度上补偿含PCM混凝土的强度降低。由于PCM掺入混凝土被归类为一种建筑材料，这种材料的大规模使用将影响与建筑寿命相关的不同阶段。因此，在本研究中，考虑到联合国可持续发展目标7、11和12，讨论和绘制了在使用PCM掺入混凝土后对建筑物寿命的不同相关阶段的可能修正。目前广泛使用的挑战PCM的主要优点是导热率较低，混凝土强度和PCM之间的权衡，以及PCM-混凝土复合材料的结果与联合国可持续发展目标之间的联系缺失。作为实现此处所研究的联合国可持续发展目标的努力的一部分，含PCM混凝土的全球前景将激励建筑师、设计师、执业工程师和研究人员加快努力，以促进对含PCM混凝土的考虑，最终实现净零为可持续的未来建设基础设施所产生的碳排放。

关键词：相变材料；混凝土；建筑围护结构；碳排放；联合国可持续发展目标；热能储存

Phase-Change Materials in Concrete: Opportunities and Challenges for Sustainable Construction and Building Materials

Raju Ishar, Jong-Wan Jang, and Jeong-Gook Hu

Department of Architectural Engineering, Incheon National University, Yeonsu-gu, Incheon

Abstract: The use of phase-change materials (PCM) in concrete has revealed promising results in terms of clean energy storage. However, the negative impact of the interaction between PCM and concrete on the mechanical and durability properties limits field applications, leading to a shift of the research to incorporate PCM into concrete using different techniques to overcome these issues. The storage of clean energy via PCM significantly supports the UN SDG 7 target of affordable and clean energy. Therefore, the present study focuses on three aspects: PCM type, the effect of PCM on concrete properties, and connecting the outcome of PCM concrete composite to the United Nations sustainable development goals (UN SDGs). The compensation of reduction in strength of PCM-contained concrete is possible up to some extent with the use of nanomaterials and supplementary cementitious materials. As PCM-incorporated concrete is categorized a type of building material, the large-scale use of this material will affect the different stages associated with building lifetimes. Therefore, in the present study, the possible amendments of the different associated stages of building lifetimes after the use of PCM-incorporated concrete are discussed and mapped in consideration of the UN SDGs 7, 11, and 12. The current challenges in the widespread use of PCM are lower thermal conductivity, the trade-off between concrete strength and PCM, and absence of the link between the outcome of PCM-concrete composite and UN SDGs. The global prospects of PCM-incorporated concrete

as part of the effort to attain the UN SDGs as studied here will motivate architects, designers, practicing engineers, and researchers to accelerate their efforts to promote the consideration of PCM-containing concrete ultimately to attain net zero carbon emissions from building infrastructure for a sustainable future.

Keywords: phase change materials, concrete, building envelopes, carbon emission, United Nations sustainable development goals, thermal energy storage

引言:

热能储存以供以后使用是一种增长趋势,在文献中被称为热能储存(TES)。在TES系统中,能量可以“热”或“冷”的形式存储在介质中,因此可供以后使用。它弥合了能源(主要是电力)供需之间的差距。各个工业部门不断增加的能源消耗正在导致全球变暖,研究人员越来越多地寻求新的方法来转换能源,而对温室气体(GHG)生产的影响有限。根据加州能源委员会的说法, TES系统的潜在部署可能会导致全州建筑行业的NO_x水平减少560吨,二氧化碳排放量减少260,000吨。如果我们考虑建筑行业的所有相关成本,例如供暖和制冷的持续成本、化石燃料发电成本以及相关的温室气体排放(CO₂、SO₂、NO_x、CFC), TES以及其他常规和非常规储能系统,对于建筑行业的可持续发展非常有前景。由于太阳热能是最清洁的能源之一,而且在自然界中资源丰富,因此在世界范围内开展了高效利用太阳能热能的研究。然而,限制因素包括它在夜间和阴天的缺席,这对持续的能源供应构成了重大挑战。应对这一挑战的一个方法是开发一种足够灵敏的介质,可以在没有阳光的情况下储存热能。在这方面,相变材料(PCM)在建筑行业,特别是在绿色建筑中找到了新的应用。绿色建筑被称为节能建筑,在保持相同舒适度的同时使用更少的传统能源(例如电力)。简而言之,PCM倾向于在或多或少恒定温度下发生的相变为特征。在此,相变不限于熔融,例如也可以是蒸发。有趣的是,PCM既不是新材料也不是外来材料,正如文献中经常声称的那样。PCM密度低,熔化时形成粘性/半粘性物质(与自由流动的水相比),从而避免了在建筑设计和施工中使用重材料的问题。

文献中已经报道了关于PCM的发展以及将它们纳入建筑围护结构的几项研究。然而,很难获得一个很好的理解,因为大多数报告的工作与以前的工作没有科学联系并且是杂乱无章的。文献中也有一些评论,但它们是脱节的。造成这种情况的主要原因是研究人员试图将所有可用信息整合到一篇论文中,而忽略了该主题的复杂性和广度。因此,有必要分别解决PCM的各个方面。关于相变材料,本综述考虑了两个不同的方面。他们是:

- 相变材料本身;
- 如何在建筑施工中使用它们。

将PCM加入建筑围护结构时,每个建筑围护结构都需要具有特定性质、形状和尺寸的PCM。考虑到这一点,本文的目的是对建筑围护结构中应用的PCM进行全面概述。因此,以下将它们称为“智能墙”。在这项研究中,对所有可能用于此目的的PCM进行了批判性分析,并提供了相关信息,例如PCM的发展、它们的物理和热特性以及它们与建筑围护结构的集成。通过这种方式,行业合作伙伴和研究人员可以从这个全面的概述中受益,并克服相关的限制和缺点,以应对未来可持续发展的挑战。此外,还讨论了在材料和方法方面使用PCM的相关挑战。本研究的新特点是评估PCM在整个中东地区,特别是沙特阿拉伯在降低能耗、能源效率和低成本家庭绝缘系统方面的优势使用。目前的研究将使工程师能够为给定的应用选择特定的PCM,并帮助研究人员在该领域开展更多创新的研究工作。

一、相变材料

在从整体上定义PCM之前,简要解释一下替代储能方法将是有益的。最终,储能是减少化石燃料消耗的重中之重,但可持续的储能方法必须实用且持久。储能方法分为四种不同的类型:机械储能、电能储能、热化学储能和热能储能。热能储存型是一种符合联合国可持续发展目标的实用方法,遵循清洁能源的消耗,以提高建筑部门的热舒适性。热能可以通过材料内部能量的变化存储为显热、潜热和热化学热,或这些的组合。与潜热和显热存储方法相比,热化学储能方法表现出最高的储热密度。然而,在进行实验测试时,报告了热化学储能方法在传热和传质方面的性能不佳。

此外,潜热蓄热(LHS)和显热蓄热(SHS)的比较表明,潜热蓄热的蓄热密度高于显热蓄热。此外,LHS存储和释放热量所需的温度范围比SHS更窄。PCM在物理性质转变的过程中,即从固体到液体或液体到固体的过程中,会吸收/释放大量的潜热。与传统(显热)存储材料不同,PCM在几乎恒定的温度下吸收和释放热量。

PCM每单位体积可以存储的热量是显热存储材料(水、砖石或岩石)的5到14倍。Kuznik等人使用他们的内部软件CODY-MUR进行了模拟以优化墙板。实验研究的结果试图实现PCM的最佳厚度。据报道,10 mm的PCM厚度是最佳厚度。此外,将10 mm厚的PCM的储能能力与其他材料的储能能力进行了比较。据观察,基

于潜热的 PCM 显示出增强的可存储能量能力, 提高了热能存储能力。因此, 据报道, 基于 LHS 的 PCM 是建筑应用中最实用的蓄热材料。

在这些 PCM 中, 有机、无机和共晶类型广泛用于建筑物中。具体来说, PCM 的选择取决于其温度范围。20–32 °C 的温度范围是使用 PCM 对建筑物进行被动加热和冷却的可接受范围。

有机 PCM

有机 PCM 可以是石蜡或非石蜡类型。石蜡通常是具有通式 $\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_n-\text{CH}_3$ 的直链正构烷烃的混合物。由于以下几个固有特性, 石蜡是出色的能量存储和被动冷却 PCM: 高潜聚变加热、宽温度范围的过渡可用性、低成本以及理想的物理和化学特性, 例如具有很少或没有治疗滞后的全等聚变。有机 PCM 的化学稳定性更高, 并且熔化一致, 这意味着过冷不是一个重大问题。然而, 有机相变材料的导热率低, 使得有机相变材料的储热/放热率低。酸 ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{2n}\text{COOH}$) 是主要的有机非石蜡 PCM。其熔点与石蜡 PCM 相媲美, 具有优良的熔融和冷冻特性。然而, 非石蜡 PCM 的成本几乎是石蜡 PCM 的三倍。脂肪酸及其酸酯和醇、乙二醇等是用作 PCM 的非石蜡类型, 其中脂肪酸是建筑应用中用于蓄热的最常用的 PCM。建筑物中使用的各种 PCM 的潜热和熔化特性。

无机 PCM

无机 PCM 是盐水合物 (MnH_2O)、硝酸盐和具有稍高熔化热的金属材料。它们的一些特性, 例如高体积潜热存储容量、不可燃性和高导热性, 使这些材料适用于建筑应用。此外, 它们价格便宜且容易获得。然而, 一些缺点是对大多数金属的腐蚀、相分离和偏析、缺乏热稳定性以及固-液转变过程中的过冷。过冷被定义为“凝固开始的延迟”, 每当 PCM 经历从液体到固体的相变时就会发生。因此, 为了充分利用潜热, 充电和放电之间需要较大的温差, 这对于高效的储能应用来说是不可取的。具体来说, 最小化过冷的现实可能性是引入足够大的 PCM 微胶囊, 但是当在建筑应用中使用这些材料时, 与大直径 PCM 的相互作用通常会在混合过程中失效。无机 PCM 的另一个问题是它们在重复相变循环后会降解和分解。在所有无机 PCM 中, 水合物被广泛用于热能存储。

共晶 PCM

低共熔物是有机和/或无机化合物混合物。因此, 低共熔物可以形成有机-有机、无机-无机或有机-无机混合物。共晶 PCM 具有比有机物更高的密度和单一的熔化温度, 因此在相变期间不会分离成组分。结果, 在这些材料中没有观察到相分离和过冷。共晶通常具有较高

的热循环, 特别是与盐水合物 (无机 PCM) 相比。共晶 PCM 提供了根据实际现场应用定制熔化温度和焓的灵活性。因此, 具有较低熔化峰值温度的共晶 PCM 在建筑领域受到了广泛关注。Mert 等人通过乳液聚合技术将含有十六烷的癸酸和油酸混合物封装在苯乙烯-二乙烯基苯共聚物壳中。获得的熔点范围和焓为 14.1–24 °C 和 123 J/g, 表明其适用于建筑应用中的蓄热。此外, 最近的研究集中在使用导热填料 (碳基材料和纳米粒子) 的共晶 PCM 的导热性增强。

二、PCM 对建筑施工的影响

如前所述, 潜热储存比显热储存提供更高密度的能量储存。此外, 前者的温度变化很小。该场景可以模拟热敏开关的场景。一旦打开开关, 即 PCM 达到其熔点, 温度将保持恒定, 直到材料完全熔化。这种熔化过程允许吸收大量热量, 同时将系统温度保持在各个 PCM 的熔化温度。由于 PCM 储存热量或冷量供以后使用, 因此它们可以调节或抑制建筑物内的温度波动, 从而自动节省能源。换句话说, PCM 提供了一个虚拟的建筑体量。如果室温超过 PCM 的熔化温度, 它就会熔化并吸收热量。后来, 当外界温度升高时, 房间内部就不容易达到高温。在较冷的天气中, PCM 会释放热量。PCM 的使用不仅减少了热质量, 还减少了建筑物的占地面积, 并在建筑物内提供了更多的可用空间。

正如 Lagou 等人最近在他们的数值和模拟工作中报告的那样, 除了 PCM 本身, PCM 在给定建筑围护结构中的最佳定位也起着重要作用。据作者介绍, 合并 PCM 的最佳位置是建筑物的内部边缘, 并且还取决于地理位置。此外, 采用 PCM 的建筑构件的能源回收时间小于 7 天/平方米。这种关于能源回收时间的有希望的数据激发了将 PCM 进一步纳入建筑墙体结构的动力。以下部分将介绍用于建筑墙体应用的 PCM 的分类和一般特性。

三、在混凝土中加入 PCM

在混凝土中加入 PCM 有四种不同的方法。本节概述了这四种 PCM 掺入混凝土的方法及其在热、机械和耐久性方面的性能。PCM 类型的选择和相关的混凝土掺入方法显著影响混凝土的整体性能。因此, 本节准备帮助设计师和执行工程师在选择用于混凝土蓄热应用的 PCM 时丰富他们的决策。

微囊化是一种将 PCM 置于聚合物外壳中的方法。由填充有 PCM 的聚合物外壳制成的中空胶囊的尺寸在 1 到 300 μm 之间。外壳充当 PCM 的容器。因此, PCM 可以作为核材料以液态或固态形式储存在聚合物壳中。相变温度在 -10 °C 至 80 °C 之间的 PCM 适用于制造微胶囊。微囊化 PCM (MPCM) 成功地用于墙壁、屋顶、地板、石

膏墙板、石膏和砂浆。然而，与水泥基建筑材料的成分相比，与 MPCM 相关的缺点是刚度和强度较低。此外，搅拌过程中混凝土中 MPCM 的泄漏会降低混凝土的力学性能。强度的降低是由于 PCM 与水泥基体的直接相互作用。宏观封装技术类似于微封装，但用于保存 PCM 的容器尺寸较大，例如管、球或面板。这些容器的尺寸一般大于1厘米。使用该技术制备的组件可以直接用作建筑元素。然而，诸如泄漏、传热特性差和边缘凝固等问题是宏观封装技术的缺点。第三种技术是形状稳定，重点是使用支撑材料制备 PCM。高密度聚乙烯和苯乙烯-丁二烯-苯乙烯是制造形状稳定的 PCM 的常用支撑材料。PCM 和支撑材料的混合物熔化，然后在高温下适当混合。PCM 和支撑材料混合物允许冷却到支撑材料的玻璃化转变温度以下，直到它变成固体。这种 PCM 的优点是相变温度区域的表现比热大，相变过程中形状稳定，不需要容器。这种处理可以防止 PCM 泄漏，但形状稳定的 PCM 较低的热导率限制了其广泛的适应性。多孔夹杂物技术是在将 PCM 浸渍到多孔夹杂物中之后，该复合材料可用于混凝土中以提高隔热性能。

在这些技术中，对 PCM 填充轻骨料及其对力学和热学性能影响的研究已经广泛开展。迄今为止，混凝土是专门为获得强大的机械性能和耐久性而设计的。然而，定制混凝土的概念加速了基础设施行业各种混凝土的生产。PCM 集成混凝土也是一种定制混凝土，经过精确开发以提高热性能（例如导热性、比热容、热扩散率）。然而，通过微封装、宏观封装、形状稳定和多孔夹杂技术在混凝土中使用 PCM 会降低混凝土的强度和密度并增加孔隙率。具体来说，液态相变材料的渗漏以及相变材料对水泥水化的干扰是导致强度降低的原因。因此，该领域仍有待进一步研究以实现安全、耐用和 PCM 兼容的混凝土。

混凝土整体力学性能的下降是由于与混凝土材料发生化学反应和物理相互作用。PCM 和水泥水化产物的相互作用导致水泥基质中水合二氧化硅结晶的减少，并在水泥结合体系中产生较弱的相。因此，PCM 沿着外表面辅助胶凝材料涂层安全沉积到轻质骨料中，对混凝土力学性能的负面影响最小。

一个不可忽视的事实是，只有当 PCM 对混凝土的力学性能具有中性影响或影响最小时，大规模掺入 PCM 的混凝土才有可能在现场应用中进行。PCM 混凝土的大规模应用可以显著降低基于化石燃料的能源需求，并有助于实现联合国可持续发展目标。因此，在接下来的部分中，将讨论在基础设施中使用 PCM 的可能好处、PCM 混凝土复合材料与联合国可持续发展目标之间的映射以及传统基础设施实践的预期改变。

四、PCM 对实现联合国可持续发展目标的贡献

为了使基础设施发展与低碳排放目标保持一致，联合国（UN）做出了不懈的努力。因此，可持续发展目标已被确立为发达国家和发展中国家的未来目标。联合国 SDG No. 7 特别关注可负担的清洁能源，PCM 在促进清洁能源的使用方面发挥着重要作用。使用 PCM 储存和利用清洁能源以实现建筑围护结构的热舒适性符合 UN SDG 7 的不同目标。因此，本节讨论 PCM 对实现联合国 SDGs 下设定的不同目标的可能贡献。首先，我们强调 PCM 对实现联合国 SDG 7 各项目标的贡献。其次，我们在具体考虑联合国 SDGs 的情况下绘制 PCM 的使用。此外，随着 PCM 在基础设施实践中的实际实施，将这种材料与传统实践相适应有些挑战。因此，详细讨论了对传统施工实践的必要修改，以在施工过程的各个阶段实现 PCM 的安全和优质使用。

PCM 对联合国可持续发展目标 7 的贡献

联合国可持续发展目标 7 提到“负担得起的清洁能源”，议程是提供清洁能源研究和技术，与可再生能源、能源效率、先进和更清洁的化石燃料技术、能源基础设施投资促进、基础设施扩建有关和技术升级，为发展中国家，特别是最不发达国家的所有人提供现代和可持续的能源服务。联合国 SDG 7 的关注焦点是实现清洁能源以促进未来发展。可持续发展目标 7 的实现情况由五个目标来衡量。每个目标进一步细分为不同的部分，称为“指标”。文献报道，PCM 是用于混凝土和建筑物的高效清洁能源材料之一，可提高居住者的热舒适度。由于 PCM 混凝土复合材料作为蓄热建筑材料的未知性能参数，研究人员对 PCM 日益增长的兴趣得到了高度认可。因此，在建筑材料中实施 PCM 直接加速了实现联合国可持续发展目标 7 的努力。

指标 7.1.2 指南强调在所有主要的家庭能源最终用途（例如烹饪、空间供暖、照明）中使用高效燃料和技术组合，以确保健康效益。指标 7.2.1 显示了能源在最终能源消费总量中所占的份额。能源份额在指标 7.2.1 中具体表示为可再生能源。可再生能源在最终总消费中的份额是来自可再生资源的能源在最终消费中的百分比。此外，本指标定义的具体可再生能源包括以下可再生能源：太阳能，包括太阳能光伏和太阳能热能；液体生物燃料包括生物汽油、生物柴油和其他液体生物燃料，固体生物燃料包括薪柴、动物废物、蔬菜废物、黑液、甘蔗渣和木炭；和可再生废物能源，包括来自可再生城市废物的能源。迄今为止，尚未报道通过在建筑材料中使用 PCM 来直接测量联合国可持续发展目标实现情况的研究。尽管如此，联合国可持续发展目标和 PCM 之间的间接联系可以通过与在建筑组件中使用 PCM 进行节能相关的文献

来确定。Jangeldinov 等人对 PCM 在由轻钢建造的住宅建筑中的实施进行了研究。选择了八个具有夏季温暖潮湿大陆性气候的不同城市。在 PCM 实施的轻质钢结构中, 最大温度降低了 3.31 °C。PCM 集成到建筑框架中, 每年最多可节省 391.07 千瓦时的能源。Olarte 等人报告说, 在地板采暖系统中使用 PCM 可节省 18% 的能源成本。Zhang 等人强调在建筑物中使用 PCM 来对建筑物进行空间供暖和制冷。将 PCM 用于建筑物的空间供暖和制冷有助于缩小电力需求高峰和非高峰负荷之间的差距。基于 PCM 的结构/非结构元件使用更多的太阳能并减少空调的冷负荷。Sharma 等人报告说, PCM 的选择很大程度上取决于相变温度、潜热储存和热导率。每体积单位 PCM 的高潜热需要较小的物理尺寸的储热。此外, 高导热性有助于根据需要对储能进行充电和放电。这些发现展示了在建筑物中使用 PCM 以促进可再生能源消耗的好处。指标 7.1.2 和 7.2.1 中描述的空间供暖和太阳能热应用反映了 PCM 混凝土复合材料/PCM 与联合国可持续发展目标 7 之间的紧密联系。

此外, 关于清洁能源研发的指标 7.a.1 描述了太阳能研究部分, 并强调太阳能热应用和太阳能加热。因此, PCM 也有助于达到指标 7.a.1。此外, PCM 在建筑物中用于热舒适性的应用间接支持指标 7.b.1。该指标是指可再生能源发电的发电厂装机容量除以一个国家的总人口。PCM 作为建筑材料的使用增加减少了基于化石燃料能源的 HVAC 实践, 间接支持了全球能源需求的减少。可以看出, PCM 和被动式建筑围护结构可以成为建筑领域清洁能源的更大供应商, 以实现 2030 年的目标。

这里应该指出的是, PCM 在基础设施开发中的使用也与通过其贡献实现 SDGs 9、11 和 12 的目标相一致。下一节将全面讨论 PCM 使用对与建筑相关的传统做法可能产生的影响。

PCM 使用对构建寿命阶段的影响以及与可持续发展目标的映射

混凝土复合材料必须经过与建筑寿命相关的各个阶段(建筑规划、材料选择、规划和执行、维修和修复、建造和拆除)。这些阶段被认为是有效使用混凝土的传统基础设施实践。然而, 在混凝土中使用 PCM 作为热能储存材料会影响这些传统做法, 因为定制的 PCM 掺入混凝土可能具有不同的混合和处理程序。此外, PCM 掺入混凝土的耐久性仍处于研究的早期阶段。此外, PCM 掺入混凝土的节能修复和拆除策略在未来可能会受到广泛关注。因此, 考虑到联合国可持续发展目标的建筑寿命的各个阶段, 结合 PCM 混凝土的映射是研究人员继续研究与这种混凝土相关的具有挑战性的问题的动力来源, 这些问题继续阻碍其在现场应用中的使用。

净零能耗建筑的建筑规划符合联合国可持续发展目标 7(负担得起的清洁能源)和 11(可持续社区和城市)。还报告了通过优化建筑元素、形状和几何形状的设计来提高建筑物的能源效率。测试了 Trombe 墙、蒸压加气混凝土(AAC)墙、双层墙和绿色墙等节能墙对建筑物整体能源效率的影响。例如, Trombe 墙在白天储存太阳能热能, 并在夜间将其释放到建筑物内。Odunfa 等人研究了建筑物的朝向对能源需求的影响。建筑物的南北向是减少能源需求的最有利方向。面向东西方的建筑显示了能源需求的增加。Raof 报告说, 建筑物的水平曲线形状相当于矩形建筑物, 并且在冷负荷方面优于垂直曲线。然而, 由于某些限制, 结合 PCM 的基础设施的架构规划需要与传统实践中使用的方法有所不同。在混凝土中使用 PCM 会限制混凝土在不利环境、特殊结构应用下的使用自由度, 并使其在骨架状结构元件中的放置变得复杂。PCM 的使用增加了建筑材料的热惯性。因此, 通过 PCM 并入和可持续基础设施实践(例如建筑物的方向、几何/形状、窗墙面积比以及使用太阳能对建筑物围护结构进行被动冷却和加热的遮阳装置)的能量存储比例量都需要维持。

Zang 和 Zang 进行了一项研究, 比较了考虑到住宅建筑的相同建筑设计不同结构方案的隐含排放。分析了砖砌体、空心砌块砌体、钢筋混凝土框架和钢筋混凝土墙体结构。据报道, 钢筋砖石和混凝土框架结构是控制隐含排放的重要选择。此外, 考虑到其相对较低的项目成本和排放, 空心砌块砌体结构对于非地震地区的建筑物来说可能是一个不错的选择。在节能建筑元素方面, 双层外墙(DSF)可以将两个表面与空气腔分开。DSF 显示了为居住者保持高热舒适度的效率, 但效率会根据窗户玻璃的类型、空腔的设计以及它们之间的空气流动而显着改变。此外, 使用有效的电子控制器, 将它们安装在不同的位置也有助于最大限度地利用可再生能源, 从而使用户的生活更健康。然而, 对于建筑软件开发行业来说, 创建一个完全能够显示完整可操作建筑的虚拟 3D 模型仍然是一个值得关注的发展领域。同时, 该软件计算能源成本以及当地环境因素。因此, 在缺乏与此类混凝土与其他可用选项在强度、热能存储和耐久性能。与 PCM 掺入混凝土的长期性能相关的研究以及相应的功能和与周围环境的相互作用将支持建筑师根据结构类型和当地环境条件促进使用 PCM。

基础设施实践的材料选择和生命周期评估阶段有助于实现联合国可持续发展目标 7、11 和 12。但是, 在基础设施实践中使用 PCM 作为建筑材料会导致与粘合材料的一些相互作用, 并可能改变新鲜、机械和耐久性能。PCM 已成功应用于墙板, 以在建筑物中存储高水平的热

能。然而，将 PCM 掺入混凝土仍然是一个挑战，例如，基于石蜡的 PCM 在高 pH 环境中表现出良好的稳定性和抗降解性，但本质上是非极性的；因此，它们与混凝土水化产品的粘合是不可能的。这一观察结果显著影响了材料选择阶段及其在混凝土中的使用方法。此外，关于各种类型的含 PCM 混凝土的耐久性和生命周期评估数据的稀缺性对于那些寻求在实际项目中采用这种材料的人来说是一个巨大的挑战。

由于政府和非政府政策以及社会关注建筑行业的可持续实践，采用传统做法的建筑项目的执行不再具有可持续性。规划和执行阶段正在转向优化资源利用、减少废物产生和降低施工阶段的二氧化碳排放量。因此，项目规划和执行与联合国可持续发展目标 11 和 12 相匹配。在未来，将 PCM 用作储热材料需要高强度的规划和执行技能，例如 PCM 的处理和存储、PCM 的熟练人力混凝土工地，以及 PCM 混凝土复合材料的质量保证。

要实现建筑部门能源使用的脱碳，到 2050 年，几乎所有现有建筑都需要进行一次深度改造，新建筑必须满足严格的能效标准。涵盖新建和现有建筑的建筑能源规范是推动此类变革的基本政策工具。这些能源法规计划到 2030 年在所有地区实施。因此，这意味着建筑物改造即将发生转变，不仅是强度升级，而且还包括向净零碳就绪建筑（ZCRB）。ZCRB 意味着这些建筑符合零碳就绪建筑的能源规范。图 11 显示，到 2050 年，超过 85% 的建筑为 ZCRB 类型，对供暖和制冷的需求水平降低。因此，PCM 在即将进行的节能改造建筑改造项目中的应用不容忽视。PCM 可以在建筑环境中实施，以提升现有建筑类别并将其转变为更环保的基础设施类别。综合使用可持续混凝土和 PCM 以减少二氧化碳排放，以及最大限度地利用热能用于建筑物的加热和冷却目的，可能是实现联合国可持续发展目标 7（负担得起的清洁能源）、11（可持续社区和城市）的未来范围）和 12（负责任的消费和生产）。然而，需要进行全面的研究来分析 PCM 对节能改造工作的贡献，以将现有结构转变为 ZCRD 结构。

与建筑寿命相关的最后一个阶段是拆除和废物管理。此外，有证据表明，建筑业产生了大约 44% 的垃圾填埋场垃圾，英国、澳大利亚 44%、巴西 40%、美国 29%、加拿大 27% 和香港 25%。

然而，迄今为止，拆除的废物包括混凝土、钢材、木材和电力废物的传统成分。然而，作为基础设施中使用的 PCM，很快拆除材料将包含 PCM 混凝土复合材料。这种废物可能会影响现有的废弃混凝土再利用实践，例如混凝土浆料和骨料的回收利用。PCM 和混凝土之间的相互作用会降低混凝土浆料的水化产物，并且在尝试回收这种混凝土时可能会面临新的挑战。到目前为止，还

没有研究评估使用含有 PCM 的废弃混凝土材料作为填充材料制备的混凝土的性能。

基于上述讨论，可以得出结论，建筑过程的每个环节都与联合国可持续发展目标推荐的环境保护实践相关。因此，考虑、计划、采购材料、执行项目和监督以实现耐用性、维修和改造的重量/注意力，不仅是为了实现强度，而且是为了提高可持续性，减少碳足迹，以及有效管理建筑和拆除废物管理阶段有所增加。每个建筑活动的权重增加的原因是引入了节能材料。此外，每个国家的基础设施和城市发展成果现在都将根据碳足迹和隐含能源的减少来衡量。然而，在建筑施工中处理热效率混凝土的常规做法将为与建筑寿命不同阶段相关的从业者提供经验，从而减少使零碳就绪建筑充分发挥作用所需的时间。

五、PCM在混凝土中大规模应用的安全沉积技术

目前，掺 PCM 混凝土正处于研发阶段。迄今为止关于 PCM 的工作表明，与普通砂浆/混凝土相比，PCM 集成砂浆/混凝土的强度下降。使用 PCM 克服建筑材料的强度退化问题仍然是一个挑战。另一个问题是长期循环稳定性，这需要广泛的研究来确定将 PCM 掺入混凝土/砂浆中作为一种耐用的选择。由于缺乏足够的研究数据，尚未记录与混凝土中 PCM 使用相关的技术指南。

然而，最近的某些尝试，例如含有 LWA 的 PCM 涂层、在 PCM 中使用纳米材料、填充 PCM 的管道、在混凝土中使用补充胶凝材料来克服 PCM 的降解效应，以及 PCM 浸渍到混凝土孔隙中表面，都显示出含 PCM 混凝土的性能改进。Jafarabad 等人报道，与不含硅灰的样品相比，使用水泥基质中的硅灰和聚乙二醇作为 PCM，抗压强度提高了 25%。Le 等人揭示了用水泥在含有 LWA 的 PCM 上进行涂层是提高混凝土性能的有效方法。水泥在化学上与 PCM 主体材料和糊状相之间的结合发展相容。因此，使用单片机或水泥优于其他类型的涂层材料。Royon 等人报道了一种增加建筑物热质量的有效方法，该方法使用在混凝土板的八个圆柱形孔中安全存放 PCM。同样，PCM 沉积在 PVC 管中，然后嵌入混凝土路面是提高混凝土性能的有效技术。Haider 等人研究了低温相变材料与用轻骨料制备的混凝土的相互作用。普通骨料被 50% 和 100% 环氧涂层和 PCM 浸渍的轻质骨料取代。与对照样品相比，50% 和 100% 更换对应的抗压强度分别降低了 28.94% 和 38.82%。此外，已将硅灰和碳纳米管添加到混凝土中以改善糊状相的性能。发现添加硅灰和碳纳米管在 50% PCM-LWA 混合物的情况下恢复了 13.30% 的强度，在 100% PCM-LWA 混合物的情况下恢复了 18.82%。

所有上述技术都是对直接在混凝土中添加 PCM 的改

进,因此在机械和耐久性方面的产品性能结果方面具有更高的可靠性。这些性能是大规模应用的新型混凝土复合材料产品的首要要求。PCM混凝土复合材料的大规模应用将通过使用可再生能源更好地服务于联合国可持续发展目标。除了对PCM的现场实验可靠性进行这些评估外,还开发了可以处理最大参数(例如,湿度因子、不同气候下的室外温度、太阳能可再生系统对各种类型太阳能的贡献)的建筑建模软件,使用带有自然夜间通风的PCM被动系统进行集成建模)以提供统一的解决方案来预测使用绿色材料和可再生能源的最大收益,但在实际使用方面仍需要更多的努力。此外,根据联合国可持续发展目标基础设施相关目标直接评估建筑建模分数的输出可能有助于使从业者与能源节约的测量保持一致。

结论

在TES系统中,PCM发挥着重要作用,对它们的研究正处于开发阶段,吸引了全世界的兴趣和资金。PCMs作为建筑材料的使用是一种旨在限制建筑物能源消耗的增长趋势,其中PCMs直接用于建筑墙体是最有利的。最常见的PCM属于有机、无机或共晶PCM类别,各有优缺点。无机PCM必须与合适的粘合剂(成核和增稠)结合使用,以避免由于过冷导致的相分离和沉降。为此,实验室和商业公司都在努力寻找通用和高效的粘合剂。PCM的直接应用比微/宏封装更可取,不仅从经济角度来看,而且在性能方面也是如此。

本研究从两个方面回顾了PCM及其应用。第一个方面是PCM的类型、性能、其在混凝土中的应用以及在混凝土中使用PCM的相关挑战。第二个方面是PCM混凝土复合材料对联合国可持续发展目标的贡献。

辅助胶凝材料和环氧涂层轻骨料表现出PCM在混凝土中的安全沉积。在混凝土中使用纳米材料和硅灰可恢复PCM混凝土复合材料的强度降低。使用纳米材料和硅灰改善糊状相是强度恢复的原因。对于PCM混凝土复合材料的成功现场应用,机械性能和蓄热性能之间的权衡仍然是研究人员面临的挑战。通过完全消除PCM泄漏到基体中来保证复合基体的质量、良好的长期循环稳定性以及对抗压强度的负面影响可以忽略不计,这些仍然是开放和高度复杂的研究领域。

混凝土中使用的PCM可以为全球实现联合国可持续发展目标7做出重大贡献。已努力将联合国SGD中存在的可用参数(目标和指标)与将PCM用于基础设施开发的混凝土中的好处进行映射。建筑物的完整生命周期分为五个不同的阶段(规划、材料采购、执行、维修和改造、建筑和拆除废物)。广泛介绍了使用PCM时每个阶段对与基础设施相关的联合国可持续发展目标7、11和12的贡献。毫无疑问,需要更科学的测量来在PCM混

凝土复合材料和联合国可持续发展目标之间建立牢固的联系。

简而言之,可以得出结论,在建筑施工过程的不同阶段大规模应用PCM具有实现净零就绪建筑的巨大潜力,因此可以为联合国可持续发展目标的实现做出巨大贡献。这项研究在全球范围内向研究界传播了对联合国可持续发展目标实现中PCM的认识。

参考文献:

- [1]Anisur M., Mahfuz M., Kibria M., Saidur R., Metselaar H.S.C., Mahlia T.M.I. Curbing global warming with phase change materials for energy storage. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2013;18:23 – 30. doi: 10.1016/j.rser.2012.10.014.
- [2]Dincer I., Rosen M.A. *Energetic, Exergetic, Environmental and Sustainability Aspects of Thermal Energy Storage Systems*. Springer; Dordrecht, The Netherlands: 2007.
- [3]Lizana J., Chacartegui R., Barrios-Padura A., Ortiz C. Advanced low-carbon energy measures based on thermal energy storage in buildings: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2018;82:3705 – 3749. doi: 10.1016/j.rser.2017.10.093.
- [4]Lagoua A., Kylilia A., Šadauskienė J., Fokaides P.A. Numerical investigation of phase change materials (PCM) optimal melting properties and position in building elements under diverse conditions. *Constr. Build. Mater.* 2019;225:452 – 464. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.199.
- [5]Guo P., Biegler Z., Back T., Sarangan A. Vanadium dioxide phase change thin films produced by thermal oxidation of metallic vanadium. *Thin Solid Films*. 2020;707:138117. doi: 10.1016/j.tsf.2020.138117.
- [6]Sharma R., Bansal P.P. Behavior of RC exterior beam column joint retrofitted using UHP-HFRC. *Constr. Build. Mater.* 2019;195:376 – 389. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.052.
- [7]Etri C. *China Energy Outlook*. CNPC Economics and Technology Research Institute; Tokyo, Japan: 2018.
- [8]Singh R., Ravache B., Sartor D. *Building Innovation: A Guide for High-Performance Energy Efficient Buildings in India*. Vol. 199 Lawrence Berkeley National Laboratory; Berkeley, NJ, USA: 2018.
- [9]Chel A., Kaushik G. Renewable energy technologies for sustainable development of energy efficient building. *Alexandria Eng. J.* 2018;57:655 – 669. doi: 10.1016/j.aej.2017.02.027.
- [10]Agency I.E. *Energy Technology Perspectives 2017 – Catalysing Energy Technology Transformations*. International Energy Agency; Paris, France: 2017.