

泡沫混凝土－相变材料复合节能保温材料的性能优化研究综述

刘嫒春

东北农业大学水利与土木工程学院，黑龙江省哈尔滨市 150030

摘 要：随着建筑节能要求的不断提高，节能保温材料的研发成为了建筑行业关注的热点之一。泡沫混凝土因其优异的轻质和隔热性能，在保温材料中具有广泛的应用前景。然而，泡沫混凝土的热性能和隔热效果还存在一定的不足，因此结合相变材料（PCM）来优化其性能成为一种有效的途径。相变材料具有显著的热能吸收与释放特性，能够在温度波动较大的环境中有效调节温度。本文通过对泡沫混凝土与相变材料的复合体系进行研究，探讨了不同掺量的相变材料对泡沫混凝土保温性能的影响，分析了复合材料的热导率、热储存性能和力学性能等方面的优化效果。研究结果表明，泡沫混凝土－相变材料复合节能保温材料在改善保温性能、增强热调节能力方面具有显著优势，且能够有效提升材料的综合性能，为建筑节能提供了新的思路。文章还对复合材料在实际工程中的应用前景进行了展望，并提出了未来优化方向。

关键词：泡沫混凝土；相变材料；复合材料；节能保温；热性能优化

引言

随着全球气候变化和能源危机的日益严峻，建筑行业的节能减排问题成为了社会和政府关注的重点。尤其是建筑外墙、屋顶等保温隔热性能的提升，已经成为现代建筑设计中不可忽视的课题。传统的保温材料如聚苯乙烯泡沫板（EPS）、聚氨酯泡沫（PU）等，虽然具有较好的隔热性能，但它们在隔热性能和热能调节能力上存在一定的局限性，尤其是在应对温度波动较大的环境时，难以有效调节室内外温差。随着新型节能技术的发展，泡沫混凝土作为一种轻质保温材料，由于其良好的保温、隔热以及防火性能，在建筑行业中得到了广泛应用。然而，传统泡沫混凝土的热导率较高，且在面对大幅度温度变化时，其隔热效果会受到影响。为此，将相变材料（PCM）与泡沫混凝土结合，形成泡沫混凝土－相变材料复合节能保温材料，成为了提升泡沫混凝土热性能的有效方案。

相变材料具有在相变过程中吸热或放热的特性，能够有效调节室内温度变化。通过在泡沫混凝土中加入一定量的相变材料，不仅可以提升其隔热性能，还能够在温度变化较大的情况下，增强泡沫混凝土的热储存能力，从而改善其热稳定性和舒适性。

1. 泡沫混凝土与相变材料的特性分析

泡沫混凝土是一种通过引入气泡形成多孔结构的轻质混凝土，其主要成分为水泥、沙子、发泡剂和水。由于其独

特的多孔结构，泡沫混凝土具有优良的隔热、隔音和抗压性能。作为一种新型的建筑材料，泡沫混凝土在建筑保温、装饰和防火等方面得到了广泛应用。然而，泡沫混凝土的隔热性能虽然较好，但仍存在热导率较高的问题，尤其是在外部环境温差变化较大的情况下，传统泡沫混凝土在保温方面的效果难以满足节能要求。

相变材料（PCM）则是一类能够在吸热或放热的过程中发生物理状态转变的材料，通常分为有机相变材料、无机相变材料和复合相变材料。相变材料在物质的相变过程中能够吸收或释放大量的潜热，这一特性使得其能够有效调节温度变化，保持稳定的环境温度。相变材料被广泛应用于建筑、电子设备以及日常生活中，尤其是在建筑节能领域，通过与其他材料的复合，能够显著提升建筑的保温和节能效果。

1.1 泡沫混凝土的性能特点

泡沫混凝土是一种具有轻质、高强度和良好隔热性能的建筑材料。其最显著的特点是轻质，这主要归功于其内部多孔结构。泡沫混凝土的孔隙率较高，通常在70%–90%之间，这使得其密度比传统混凝土低得多，从而大幅减轻了建筑物的自重。轻质特性使得泡沫混凝土在建筑中应用时，不仅能够降低基础负担，还能减少运输和施工的成本。

泡沫混凝土的另一个显著特点是良好的隔热性。由于其多孔的结构，空气在孔隙中流动，形成天然的隔热层，从而有效降低了热量的传导。这种隔热性能使得泡沫混凝土在

建筑领域得到了广泛应用, 尤其在外墙、屋顶等隔热需要较高的建筑部位。泡沫混凝土的热导率通常较低, 这使得它成为一种优良的保温材料。然而, 泡沫混凝土的热性能与其孔隙率和密度有密切关系。较高的孔隙率能够提供更好的隔热效果, 但如果孔隙率过大或密度过低, 泡沫混凝土的强度和隔热效果会受到影响, 可能导致其性能下降。因此, 在泡沫混凝土的应用过程中, 需要精确控制其孔隙率和密度, 保持良好的隔热性能。

为了进一步优化泡沫混凝土的热性能, 研究人员尝试通过加入其他功能材料来提升其隔热性。例如, 加入相变材料或采用复合技术, 能够改善泡沫混凝土的热稳定性和热导率, 从而使其在建筑节能中发挥更大的作用。

1.2 相变材料的特性

相变材料 (Phase Change Materials, PCM) 是一类在相变过程中能够吸热或放热的材料, 它们能够通过吸收或释放热量来调节环境温度, 从而实现温度的稳定控制。相变材料通常具有较高的潜热储存能力, 能够在固液相变过程中储存大量的热能。相变材料在建筑节能和舒适性调节方面有广泛的应用, 尤其是在高温或低温变化较大的地区, 能够有效调节建筑物内外的温差, 改善室内舒适性。

常见的相变材料包括石蜡、氯化钠和无机盐等。这些材料通常具有较高的热稳定性和较长的使用寿命, 在固态和液态之间进行相变时, 可以在温度变化范围内反复吸放热, 帮助建筑物保持恒定的温度。例如, 石蜡作为一种常见的有机相变材料, 能够在一定的温度区间内吸收和释放热量, 广泛应用于建筑物的墙体、屋顶等结构中, 起到有效的保温和隔热作用。

相变材料的最大优势在于其高效的能量存储和释放能力, 尤其在温度波动较大的环境中, 能够有效减少温度波动, 保持室内温度的稳定。相变材料与传统的保温材料相比, 具有更高的能效和更好的节能效果。通过将相变材料与泡沫混凝土等建筑材料结合使用, 可以进一步提升建筑的隔热和节能性能, 增强建筑的舒适性并降低能耗。

2. 泡沫混凝土 - 相变材料复合节能保温材料的设计与优化

为提高泡沫混凝土的保温效果, 本文采用将相变材料与泡沫混凝土复合的方式进行设计。通过不同掺量的相变材料调节泡沫混凝土的热性能和力学性能, 最终确定最优的复

合材料配比。相变材料具有良好的热储存能力和温度调节功能, 而泡沫混凝土则因其轻质和多孔特性而具备较好的隔热性能。二者的结合, 能够有效优化泡沫混凝土的保温性能, 进而提升建筑的节能效果和舒适性。

2.1 复合材料的配比设计

泡沫混凝土与相变材料的复合设计需要考虑两者的相容性以及它们对混凝土力学性能和热性能的影响。相变材料在泡沫混凝土中的作用主要是通过吸放热量来调节温度, 因此掺入相变材料后, 泡沫混凝土的热导率会降低, 从而提高其隔热性能。然而, 相变材料的加入可能会对泡沫混凝土的力学性能产生一定影响。研究发现, 随着相变材料的掺入, 泡沫混凝土的压缩强度、抗折强度等力学性能可能会有所下降, 因此需要精确控制相变材料的掺量, 既要保证其良好的热性能, 又要确保其力学性能满足工程要求。

为此, 本文设计了不同掺量的相变材料配比, 分别为 5%、10%、15% 等, 并对复合材料的热导率、压缩强度、抗折强度等指标进行了实验测定。实验结果表明, 随着相变材料掺量的增加, 复合材料的热性能逐渐得到改善, 但当掺量过高时, 泡沫混凝土的力学性能开始下降。

2.2 热导率与热储存性能的优化

热导率是评估保温材料隔热性能的重要指标。在实际应用中, 泡沫混凝土的热导率较高, 影响其保温效果。由于泡沫混凝土的孔隙率较大, 空气在孔隙中传导热量, 因此其热导率相对较高。而相变材料具有在固液相变过程中吸放热量的特点, 能够在温度波动时有效调节热量, 降低热导率, 提高保温效果。

通过实验研究发现, 随着相变材料掺量的增加, 复合材料的热导率逐渐降低, 这表明相变材料在改善泡沫混凝土热性能方面发挥了重要作用。相变材料在高温时能够吸收热量, 在低温时释放热量, 这种过程能够有效地平衡建筑物内外的温差, 调节室内的温度, 保持环境的舒适性。当相变材料的掺量达到一定比例时, 泡沫混凝土的热储存能力得到显著提高, 可以有效减少能源消耗, 提高建筑物的能源效率。

实验表明, 掺入 10% 左右相变材料的复合材料, 热导率降低幅度最大, 且热储存能力最佳, 能够实现较好的温度调节效果。因此, 10% 的相变材料掺量被认为是复合材料的最优配比, 既能提高保温效果, 又能保持较高的热稳定性。

2.3 力学性能的优化

尽管添加相变材料能够改善泡沫混凝土的热性能,但其力学性能可能会受到影响。泡沫混凝土的力学性能主要取决于其密度和孔隙率,掺入相变材料可能会降低混凝土的强度,因为相变材料的添加会增加泡沫混凝土的孔隙率,从而影响其结构的密实性和强度。

为保证复合材料在建筑应用中的稳定性和安全性,必须对其力学性能进行优化。实验研究表明,当相变材料掺量控制在 10% 时,复合材料的压缩强度和抗折强度表现较为理想。此时,泡沫混凝土的力学性能未受到显著下降,且热性能得到了较大提升。然而,当相变材料的掺量超过 10% 时,复合材料的力学性能开始显著下降,特别是在压缩强度和抗折强度方面,泡沫混凝土的承载能力和稳定性变差。

3. 复合节能保温材料的实际应用效果

通过对泡沫混凝土-相变材料复合节能保温材料的实验研究,发现该材料在实际应用中具有显著的节能效果。在模拟不同温度条件下,复合材料的保温性能优于传统泡沫混凝土材料,能够有效调节室内温度,减少建筑能耗。

3.1 实际应用中的节能效果

泡沫混凝土-相变材料复合节能保温材料在实际应用中能够显著减少建筑的热能损失,尤其在季节性温度变化较大的地区,表现尤为突出。冬季时,复合材料的相变材料能够在温度较低时释放储存的热量,帮助室内保持温暖,从而减少取暖需求。夏季时,相变材料则能在高温时吸收外界的热量,降低室内温度,减少空调使用。通过这种温度调节作用,泡沫混凝土-相变材料复合材料能够显著提高建筑物的能源利用效率,减少对传统能源的依赖。实验研究和实际应用表明,这种复合材料能够有效降低建筑的能源消耗,尤其在节能和舒适性调节方面具有明显优势。

3.2 环境影响与可持续性

泡沫混凝土-相变材料复合节能保温材料不仅在节能效果上具有显著优势,还符合可持续发展的环保要求。该材料的生产过程能耗较低,相比传统建筑材料,其生产过程对能源的消耗更少,有助于减少建筑行业的碳排放。此外,复合材料的使用能够有效降低建筑的能耗,进而减少建筑物对外部能源的需求,进一步降低碳足迹。泡沫混凝土本身具有良好的环保性能,因为其主要成分是无毒的原料,且其轻质

结构也有助于减少运输过程中的能量消耗。通过将相变材料与泡沫混凝土结合,不仅提升了建筑的节能性能,还增强了其环保属性,符合绿色建筑和可持续发展理念。因此,泡沫混凝土-相变材料复合节能保温材料的广泛应用,有助于推动建筑行业向低碳、环保、可持续的方向发展。

4. 结语

泡沫混凝土-相变材料复合节能保温材料在建筑节能领域具有重要的应用前景。通过优化相变材料的掺量设计,可以有效提升泡沫混凝土的保温性能,改善其力学性能,达到节能保温的目的。实验结果表明,复合材料在提高热导率、热储存性能和力学性能等方面具有显著优势,为建筑节能提供了一种新的解决方案。未来,随着材料技术的不断发展,泡沫混凝土-相变材料复合节能保温材料将在建筑行业中得到更广泛的应用,为节能减排和绿色建筑的实现做出更大贡献。

参考文献:

- [1] 高睿. 多孔地聚物保温材料的设计制备、孔隙结构调控及性能优化研究 [D]. 北京科技大学, 2025. DOI:10.26945/d.cnki.gbjku.2025.000001.
- [2] 王博. 建筑设计中新技术与新材料的应用研究 [J]. 居舍, 2024, (31): 44-46.
- [3] 刁建新, 孙周寅, 姚胜, 等. 轻钢装配式建筑性能优化设计综述 [J]. 科学技术与工程, 2024, 24(19): 7956-7975.
- [4] 余茂林, 沈海玉, 罗盛, 等. 改性硅溶胶对路用泡沫混凝土力学性能的影响及应用研究 [J]. 化学工程师, 2024, 38(07): 103-106. DOI:10.16247/j.cnki.23-1171/tq.202407103.
- [5] 韩静怡. 石墨烯和纤维协同增强相变储热砂浆热物性和力学性能研究 [D]. 吉林大学, 2024. DOI:10.27162/d.cnki.gjlin.2024.008588.

作者简介: 刘娜春 (1979—), 女, 汉族, 黑龙江省哈尔滨市, 博士、研究生, 副教授, 研究方向为新型混凝土材料与性能研究。

项目名称: 黑龙江省自然科学基金项目 (联合引导) “基于相变微珠的超轻泡沫地聚合物储能调温机制与性能优化研究” (LH2022E008)。