

膨胀珍珠岩及其水泥基 轻质混凝土的研究进展 综述

冯 帅, 孙洪军

辽宁工业大学土木建筑工程学院, 辽宁 锦州

收稿日期: 2026年7月18日; 录用日期: 2026年8月11日; 发布日期: 2026年8月19日

摘 要

在“双碳”战略与绿色建筑发展背景下, 建筑材料需同时满足轻质化、保温节能与耐久安全等综合需求。膨胀珍珠岩(Expanded Perlite, EP)是一种由天然火山玻璃经高温瞬时膨化形成的无机轻质多孔材料, 具有低密度、低导热、不燃及隔声等特点, 在轻质混凝土与围护结构领域应用前景广阔。本文系统综述了国内外关于EP孔隙结构、吸水行为、力学性能及其在水泥基材料中的应用研究进展。研究表明, EP多尺度孔结构是其降低密度与改善热工性能的主要原因, 但高孔隙率亦带来吸水率高、颗粒强度偏低等问题, 进而影响拌合物工作性、界面过渡区(Interfacial Transition Zone, ITZ)致密性及材料强度稳定性。国外研究在微观表征与性能规律总结方面较为成熟, 国内研究则侧重工程应用瓶颈并提出多种改性方案。综合来看, 现阶段仍存在机理量化不足、改性方法缺乏统一评价体系及工程验证数据有限等问题, 未来可从掺合料协同优化、动力吸能潜力开发及多尺度改性增强等方向进一步深化研究。

关键词

膨胀珍珠岩, 轻质混凝土, 孔隙结构, 力学性能, 界面过渡区

A Review of Research Progress on Expanded Perlite and Its Cement-Based Lightweight Concrete

Shuai Feng, Hongjun Sun

School of Civil and Architectural Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou Liaoning

Received: July 18, 2026; accepted: August 11, 2026; published: August 19, 2026

Abstract

In the context of the “dual carbon” strategy and the development of green buildings, building materials must simultaneously meet comprehensive requirements such as lightweight, thermal insulation, durability, and safety. Expanded Perlite (EP) is an inorganic lightweight porous material formed by the high-temperature instantaneous expansion of natural volcanic glass. Characterized by low density, low thermal conductivity, non-combustibility, and sound insulation, it holds promising application prospects in lightweight concrete and building envelopes. This paper systematically reviews domestic and international research progress on the pore structure, water absorption behavior, mechanical properties of EP, and its application in cement-based materials. Research indicates that the multi-scale pore structure of EP is the primary reason for its reduced density and improved thermal performance. However, its high porosity also leads to issues such as high water absorption and low particle strength, which subsequently affect the workability of the mixture, the compactness of the Interfacial Transition Zone (ITZ), and the stability of material strength. While international research is relatively mature in microstructural characterization and summarizing performance, domestic research focuses more on addressing engineering application bottlenecks and proposing various modification strategies. Overall, current challenges include insufficient quantitative understanding of mechanisms, a lack of a unified evaluation system for modification methods, and limited engineering validation data. Future research should be deepened through synergistic optimization of admixtures, exploration of dynamic energy absorption potential, and multi-scale modification and reinforcement.

Keywords

Expanded Perlite, Lightweight Concrete, Pore Structure, Mechanical Properties, Interfacial Transition Zone (ITZ)

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 研究背景和意义

1.1. 研究背景

在“双碳”战略目标和新型城镇化持续推进的背景下,建筑行业正由单一满足结构安全需求,逐步向绿色低碳、节能保温与多重防护性能协同发展转型。现代城市建筑不仅需要具备良好的承载能力和使用功能,还面临着地震、火灾、冲击等多种极端工况的潜在威胁,对建筑围护与结构构件的综合性能提出了更高要求[1][2]。

传统混凝土虽在强度和施工成熟度方面具有优势,但普遍存在自重大、导热系数高、破坏模式脆、能量耗散能力不足等问题,已难以满足绿色建筑与韧性城市建设的需求。因此,开发兼具轻质、保温、耐久及防护性能的新型混凝土材料,成为当前土木工程与建筑材料领域的重要研究方向[3]。膨胀珍珠岩作为一种来源广泛、成本较低、环境友好的无机轻质多孔材料,因其低密度、低导热、耐高温、隔声及内养护等特性,在轻质混凝土的应用前景受到广泛关注。将膨胀珍珠岩引入混凝土体系,有望在降低构件自重和提升热工性能的同时,改善结构在极端荷载下的能量耗散能力,为新型装配式构建提供材料基础[4][5]。

基于上述背景, 本文以膨胀珍珠岩混凝土为研究对象, 围绕其材料组成、结构形式及多性能表现展开系统研究。现有研究表明, 膨胀珍珠岩混凝土在轻质化和保温方面优势显著, 但仍存在吸水率高、早期强度和弹性模量偏低、界面过渡区脆弱、长期耐久性与工程应用数据不足等问题[6]。此外, 关于其在抗震、抗冲击、抗火等多重防护性能方面的协同作用机理仍缺乏系统梳理。因此, 有必要在已有研究基础上, 对膨胀珍珠岩混凝土的材料性能、结构特征及防护潜力进行综合分析, 明确其适用范围和关键技术问题, 为其工程化应用提供理论依据。

1.2. 研究意义

通过系统梳理膨胀珍珠岩混凝土在力学性能、热工性能及防护性能方面的研究成果, 进一步丰富轻质多孔混凝土在装配式建筑与防护结构领域的理论体系。从材料微观结构、界面过渡区演化及构件性能角度出发, 归纳不同性能之间的内在关联, 为轻质混凝土多性能耦合分析和结构设计提供研究思路和方法参考。通过推动膨胀珍珠岩混凝土墙板在轻质化、节能化与防护性能方面的综合应用, 有助于降低建筑能耗和材料碳排放, 促进绿色低碳建筑材料与结构体系的发展[7][8]。

2. 国内外研究现状

2.1. 国外研究现状及发展趋势

国外关于膨胀珍珠岩(Expanded Perlite, EP)的研究起步较早, 研究内容较为系统, 主要集中在材料形成机理、孔隙结构特征、物理力学性能以及工程应用性能等方面。研究[9][10]普遍认为, EP 由天然火山玻璃经高温瞬时膨胀形成, 其内部发育大量多尺度孔隙结构, 是其实现轻质化、隔热和吸声性能的根本原因。

在基础性能研究方面, Grzeszczyk [11]对 EP 的颗粒形貌、孔径分布及其与宏观性能之间的关系进行了较为深入的探讨。研究表明其总孔隙率可达约 26 vol.%, 吸水率可能高达 35%, EP 的粒径减小和掺量增加, 其吸水率会升高。其颗粒内部存在大量封闭和连通孔隙, 使其兼具轻质和隔热性能。Szlachetka [12]等从试验表明, EP 的内养护效应能够延缓水分损失、促进水泥水化, 从而改善混凝土后期强度发展规律, Patthanavarit [13]研究发现随着珍珠岩掺量增加, 密度显著降低; 抗折强度随掺量增加总体下降; 最佳抗折强度在掺入约 10% EP 的样品中出现, 不同两位学者研究在混凝土中引入混合纤维[14]或玄武岩纤维[15]显著提高强度, 表明纤维增强可缓解界面过渡区应力集中问题。从多组对比实验中发现, EP 混凝土的弹性模量较普通混凝土降低 20%~30%, 但破坏形态更为延缓, 表现出一定延性破坏特征。EP 的孔隙率和孔径分布直接影响其密度、吸水率和力学性能, 其中高孔隙率虽有利于降低材料密度和导热系数, 但同时也导致 EP 颗粒强度较低、吸水率较高。相关研究还指出, EP 的粒径和表面形貌会显著影响其在水泥基材料中的界面过渡区结构。

在工程应用方面, 国外大量研究将 EP 作为轻骨料应用于水泥材料中, Hosen [16]已有实验证据表明, EP 制备的轻质混凝土在减轻自重的同时, 通过与纤维或改性胶凝体系配合, 可提高结构延性并使破坏模式由脆性向延性转变, EP 混凝土中引入纤维也可能改善变形能力与减轻冲击损害。Ibrahim [17]等的研究进一步指出, EP 掺入轻质混凝土中可降低热导率、提高热稳定性, 为防火结构材料提供了基础数据支持。Stratoura [18]近期研究表明, 适量掺入 EP 可显著提高混凝土的抗冻性能: 冻融循环中的质量损失和强度衰减均明显降低, 试件临界冻融循环数大幅提高。其机制在于 EP 的内部养护效应: EP 孔隙在低温时吸收游离水缓冲冰冻膨胀, 常温时逐步释放水分继续促进水化, 生成的水化产物填充于界面微裂隙, 提高了界面过渡区的密实度结果表明, 合理掺入 EP 可有效降低混凝土或砂浆的表观密度并改善热工性能。EP 内部孔隙在一定程度上可起到内养护作用, 有利于水泥水化反应的持续进行, 但当掺量过大时, 其低

强度特性会对整体力学性能产生不利影响[19]。

国外研究在膨胀珍珠岩材料领域已经系统建立了 EP 材料微观结构与宏观性能之间的基本认知框架, 明确了孔隙特征在决定材料性能中的核心作用; 通过大量试验研究, 验证了 EP 在建筑材料领域的可行性, 为其工程应用提供了可靠的数据支撑。但仍存在一定局限性。一方面, 部分研究主要侧重材料性能的对比分析, 对性能演化机理的定量描述仍不充分; 另一方面, 对 EP 在复杂服役环境下长期性能表现的研究相对较少, 工程适用性验证仍有待进一步加强。

2.2. 国内研究现状

国内关于膨胀珍珠岩材料的研究起步相对较晚, 但近年来发展迅速, 研究内容主要集中在 EP 的工程应用适应性、吸水性能控制以及改性技术研究等方面。研究普遍认为, 高吸水率是限制 EP 在水泥基材料中广泛应用的关键因素[20] [21]。

在材料性能研究方面, 国内学者在借鉴国外研究成果的基础上, 系统分析了 EP 掺量、粒径及其对水泥基材料力学性能和工作性能的影响[22] [23]。徐[24]将 EP 作为轻质骨料引入水泥材料中, 不仅可有效降低混凝土整体密度、改善保温隔热性能, 还能通过“内养护”效应促进水泥水化产物在界面区析出, 从而改善界面过渡区(ITZ)的致密性与稳定性。刘玮[25] [26]等发现当 EP 掺量为 30% 时, 混凝土在 90 d 的抗压强度较同龄期普通混凝土提高约 13%。同时, 不同粒径的 EP 对强度增长规律存在显著差异: 粒径 0.2~0.5 mm 的 EP 混凝土在长期养护(90 d)下表现出更优的强度增长, 而粗粒径 EP (1.5~3.5 mm 和 0.5~1.5 mm)则在早期表现出较快的强度增长。熊[27]发现 EP 的高吸水性可能削弱混凝土拌合物的流动性和水灰比控制。通过对比实验指出, 当粒径减小至 0.1 mm 以下时, 部分封闭孔结构被破坏, 吸水率升高, 导致砂浆收缩性略有增加。商效禹[28]发现 EP 的内养护效应能够延缓水分损失、促进水泥水化, 从而改善混凝土后期强度发展规律。充分研究结果表明, 适量掺入 EP 可在保证一定力学性能的前提下显著降低材料密度, 同时改善其热工性能。

在改性研究方面, 杨慧君[29] [30]采用表面改性方法(如硅烷浸渍或粉煤灰包覆)有效降低了 EP 的吸水率, 使其与水泥基体的界面结合更为紧密, 进一步证实, 通过引入少量疏水剂或超细掺合料(如硅灰), 可增强膨胀珍珠岩的化学稳定性并改善界面区微结构。王秀丽[31]做了关于轻质混凝土柱在落锤冲击下的响应和不同轴心受压比与有无钢纤维强化对冲击破坏模式、变形能力、延性与刚度损失的影响, 发现含钢纤维的轻质混凝土柱冲击破坏由剪切主导比增加纤维后更偏向弯曲破坏, 冲击后变形与加速度响应改善。闫[32]等通过硅氧烷乳液和甲基硅酸钠真空浸渍, 实现 EP 水吸收率从 390%骤降至 16%, 显著改善了 EP 混凝土的抗水渗透能力。硬脂酸、石蜡等有机憎水物质也被用于改性 EP。张纪纲[33]试验与陶粒或泡沫混凝土相比, EP 混凝土在低密度条件下表现出更高的裂纹扩展阻力与热稳定性。研究结果表明, 合理的改性措施能够有效降低 EP 吸水率, 并在一定程度上改善其与水泥基体之间的界面性能, 从而提升材料的工程适用性。

国内研究的突出贡献在于以工程应用问题为导向, 对 EP 材料性能缺陷开展了针对性改进研究。相关研究不仅提出了多种可行的改性方案, 而且在改善工作性、降低吸水率及提升界面性能等方面取得了一定成效, 为 EP 在建筑材料领域的实际应用提供了重要参考。但仍存在一定不足, 对 EP 微观结构特征及其与宏观性能之间的作用机理研究不够深入, 不同改性方法之间缺乏系统对比和统一评价体系, 部分研究仍停留在材料或小试层面, 对长期服役性能和工程稳定性的研究相对不足。

3. 文献评述

国内外学者围绕膨胀珍珠岩材料的形成机理、孔隙结构特征、物理力学性能及其在水泥基材料中的

应用展开了大量研究,整体上形成了较为系统的研究体系。相关研究从材料微观结构出发,逐步拓展至宏观力学性能、热工性能与工程适用性评价,充分揭示了膨胀珍珠岩作为无机轻质多孔材料在降低密度、改善保温隔热性能及提升材料综合性能方面的潜力,为其在建筑材料领域的应用奠定了坚实的理论与实验基础。从研究优势来看,国外研究起步早、体系完整,在膨胀珍珠岩孔隙结构特征、吸水行为及其与宏观性能之间关系的基础认知方面具有明显优势,较早建立了微观结构-宏观性能之间的基本联系,并通过多种试验手段验证了其在轻质混凝土中的可行性。国内研究则更加注重工程应用需求,围绕膨胀珍珠岩高吸水率、界面过渡区性能不足等关键问题,提出了多种改性与优化思路,在改善工作性、提升界面结合性能和增强工程适用性方面取得了积极进展,体现出较强的工程导向特征。然而,现有研究仍存在一定不足和亟待解决的问题。首先,在机理层面,关于膨胀珍珠岩孔隙结构演化规律及其对水泥基材料长期力学性能、耐久性影响的系统研究仍不充分,多数研究停留在现象描述和定性分析阶段,缺乏统一的定量模型与理论框架。其次,在方法层面,不同改性措施和配合比设计之间缺乏系统对比研究,尚未形成成熟、可推广的性能→评价体系,制约了研究成果在工程实践中的应用。再次,在应用层面,现有研究多集中于材料或试件尺度,对复杂服役环境下的长期性能、构件尺度行为及工程验证关注不足,相关数据仍显有限。

后续研究可在现有成果基础上进一步面向“材料体系协同优化-结构吸能机理揭示-改性增强技术突破”三条主线深化推进:应系统考察膨胀珍珠岩与不同矿物掺合料(如硅灰、粉煤灰、矿渣粉、偏高岭土等)的耦合作用规律,重点阐明其对孔结构调控、界面过渡区(ITZ)致密化及水化产物演化的影响机制,并建立掺量-孔隙参数-宏观性能之间的定量关联,以实现轻质化、保温性与力学性能的平衡设计;鉴于膨胀珍珠岩多孔骨架在受载过程中可能发生孔隙压密与局部破碎并伴随显著能量耗散,未来应将研究视角由静力性能评价拓展至冲击等动力工况,通过落锤冲击、高应变率加载等试验手段揭示其损伤演化规律与吸能机理,进而拓展其在抗冲击与防护类材料中的应用边界;为突破颗粒强度偏低与高吸水率带来的性能波动瓶颈,应发展多尺度改性策略(如疏水浸渍、硅烷/聚合物包覆、无机涂层与复合增强等),实现孔隙封闭与表面强化的协同提升,从而增强骨料强度与界面黏结能力并提高工程适用性。

参考文献

- [1] D'Alessandro, A. (2024) Smart Sustainable Concrete Materials and Structures. In: Ashour, A., Wang, X. and Han, B., Eds., *Sustainable Concrete Materials and Structures*, Elsevier, 601-624.
<https://doi.org/10.1016/b978-0-443-15672-4.00019-x>
- [2] Abu Dabous, S. and Hosny, F. (2025) A Review of Building Envelope Retrofitting Methods for Improving Energy Efficiency, Aesthetic, and Indoor Environmental Quality. *Energy Nexus*, **18**, Article 100407.
<https://doi.org/10.1016/j.nexus.2025.100407>
- [3] Bianchi, S. (2023) Integrating Resilience in the Multi-Hazard Sustainable Design of Buildings. *Disaster Prevention and Resilience*, **2**, Article No. 14. <https://doi.org/10.20517/dpr.2023.16>
- [4] 李建伟, 马炎, 张璐, 等. 建筑用膨胀珍珠岩的资源特性及研究现状分析[J]. 节能, 2024, 43(3): 115-117.
- [5] 宋涛, 苏向东, 王帅辉, 等. 膨胀珍珠岩对单组份轻骨料混凝土性能影响研究[J]. 砖瓦, 2024(12): 54-57.
- [6] Elango, K.S., Sanfeer, J., Gopi, R., Shalini, A., Saravanakumar, R. and Prabhu, L. (2021) Properties of Light Weight Concrete—A State of the Art Review. *Materials Today: Proceedings*, **46**, 4059-4062.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.571>
- [7] Jose, C., Radhakrishnan, G., Anandan, A., T A, A. and B, S. (2024) Review of Mechanical, Durability, and Thermal Properties of Light Weight Concrete Containing Cenosphere. *E3S Web of Conferences*, **529**, Article 01032.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202452901032>
- [8] Omran, Ş. (2024) A Review of Lightweight Concrete in Civil Engineering. *Journal of Civil Engineering and Urbanism*, **14**, 378-404. <https://doi.org/10.54203/jceu.2024.42>
- [9] Alexa-Stratulat, S., Taranu, G., Toma, A., Olteanu, I., Pastia, C., Bunea, G., *et al.* (2024) Effect of Expanded Perlite

- Aggregates and Temperature on the Strength and Dynamic Elastic Properties of Cement Mortar. *Construction and Building Materials*, **438**, Article 137229. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137229>
- [10] Yin, D., Montazerian, M., Hunziker, P., Cornejo, I.A. and Mauro, J.C. (2025) Perspective on Glass Properties Influencing Perlite Expansion and Strength. *Journal of the American Ceramic Society*, **108**, e70055. <https://doi.org/10.1111/jace.70055>
- [11] Grzeszczyk, S. and Janus, G. (2021) Lightweight Reactive Powder Concrete Containing Expanded Perlite. *Materials*, **14**, Article 3341. <https://doi.org/10.3390/ma14123341>
- [12] Szlachetka, O., Dziecioł, J. and Dohojda, M. (2024) Mechanical Properties of Perlite Concrete in Context to Its Use in Buildings' External Walls. *Materials*, **17**, Article 5790. <https://doi.org/10.3390/ma17235790>
- [13] Patthanavarit, J., Kitiwan, M., Keawprak, N. and Tunthawiroon, P. (2021) Effect of Expanded Perlite on Physical and Mechanical Properties of Cement Mortar. *AIP Conference Proceedings*, **2397**, Article 070001. <https://doi.org/10.1063/5.0063810>
- [14] Qasim, A.J. and Fawzi, N.M. (2024) Enhancement of Perlite Concrete Properties Containing Sustainable Materials by Incorporation of Hybrid Fibers. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, **14**, 13870-13877. <https://doi.org/10.48084/etasr.7165>
- [15] Dilbas, H. and Çakır, Ö. (2020) Influence of Basalt Fiber on Physical and Mechanical Properties of Treated Recycled Aggregate Concrete. *Construction and Building Materials*, **254**, Article 119216. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119216>
- [16] Hosen, M.A., Shammas, M.I., Shill, S.K., Al-Deen, S., Jumaat, M.Z. and Hashim, H. (2022) Ductility Enhancement of Sustainable Fibrous-Reinforced High-Strength Lightweight Concrete. *Polymers*, **14**, Article 727. <https://doi.org/10.3390/polym14040727>
- [17] Ibrahim, M., Ahmad, A., Barry, M.S., Alhems, L.M. and Mohamed Suhoothi, A.C. (2020) Durability of Structural Lightweight Concrete Containing Expanded Perlite Aggregate. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, **14**, Article No. 50. <https://doi.org/10.1186/s40069-020-00425-w>
- [18] Stratoura, M.C., Lazari, G.D., Badogiannis, E.G. and Papadakis, V.G. (2023) Perlite and Rice Husk Ash Re-Use as Fine Aggregates in Lightweight Aggregate Structural Concrete—Durability Assessment. *Sustainability*, **15**, Article 4217. <https://doi.org/10.3390/su15054217>
- [19] Jia, G., Wu, J., Liu, W., et al. (2025) Improvement in Frost Resistance of Coal Gangue Aggregate Concrete by Using Expanded Perlite Microbial Self-Healing Agent. *SSRN*.
- [20] 聂光临, 孙诗兵, 姚晓丹, 等. 膨胀珍珠岩粒径对水泥砂浆性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2014(10): 21-24.
- [21] 张聪, 曹宝珠, 宋文涛, 等. 复合双面钢丝网架膨胀珍珠岩 EPS 板的性能研究[J]. 海南大学学报(自然科学版), 2018, 36(2): 183-189.
- [22] 崔涛涛, 宁宝宽, 郜殿伟, 等. 混杂纤维高强轻骨料混凝土单轴受压试验研究[J]. 材料导报, 2024, 38(2): 130-135.
- [23] 文亚智. 绿色装配式钢结构建筑体系研究应用[J]. 甘肃科技纵横, 2020, 49(8): 72-74.
- [24] Xu, C., Pan, W., Zhang, P., Zhang, Z., Wang, Z., Su, D., et al. (2024) Characterization and Performance Evaluation of Lightweight Thermal Insulation Recycled Concrete. *Discover Applied Sciences*, **6**, Article No. 282. <https://doi.org/10.1007/s42452-024-05938-7>
- [25] 刘玮, 张玉, 李珠, 等. 膨胀珍珠岩内养护混凝土抗压强度增长机制及数学模型的建立[J]. 复合材料学报, 2022, 39(11): 5423-5435.
- [26] 权长青, 焦楚杰, 苏永亮, 等. 钢纤维及陶粒掺量对轻质混凝土基本力学性能的影响[J]. 复合材料学报, 2018, 35(5): 1306-1314.
- [27] Xiong, H., Yuan, K., Xu, J. and Wen, M. (2021) Pore Structure, Adsorption, and Water Absorption of Expanded Perlite Mortar in External Thermal Insulation Composite System during Aging. *Cement and Concrete Composites*, **116**, Article 103900. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103900>
- [28] 商效瑀, 黄文逸, 方泽宇, 等. 人工冷粘结轻骨料高强混凝土制备及性能[J]. 复合材料学报, 2025, 42(2): 1010-1020.
- [29] 杨慧君, 李刚, 赵红艳, 等. 膨胀珍珠岩/脱硫石膏复合材料的制备与性能[J]. 矿产综合利用, 2022(3): 37-41.
- [30] 石庆瑄, 魏列祥, 朱贤儒, 等. 膨胀珍珠岩对机制砂混凝土抗冻性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2025(6): 18-21.
- [31] Wang, X., Wu, Q., Gao, Z. and Sha, L. (2023) Study on Impact Resistance of All-Lightweight Concrete Columns Based on Steel Fiber Reinforced and Various Axial Compression Ratio. *Buildings*, **13**, Article 2076. <https://doi.org/10.3390/buildings13082076>

- [32] Yan, Q., Wang, H., Luo, J., *et al.* (2022) Composite Hydrophobic Modification of Expanded Perlite. *ACI Materials Journal*, **119**, 71-78.
- [33] 张纪刚, 杨冉. 纤维增强混凝土及构件抗冲击和抗爆试验研究综述[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(11): 3393-3398.