

浮石轻骨料混凝土复合墙板的研究进展

李尊豪, 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12日; 录用日期: 2026年8月4日; 发布日期: 2026年8月13日

摘要

在“双碳”目标与装配式建筑持续推进的背景下, 外围护墙体正向轻质、高强、自保温、耐久方向迭代。浮石作为天然多孔火山岩轻骨料, 具有密度低、内养护效应显著、无需煅烧、在山西-内蒙古-东北一带储量可观等特点, 是轻骨料混凝土领域仅次于陶粒的区域性候选骨料; 将浮石轻骨料混凝土与保温芯材、轻钢骨架或钢筋桁架复合成墙板, 可同时发挥其在保温、隔音、承载上的综合优势, 契合严寒区近零能耗建筑与装配式建造的双重需求。本文以近五年公开发表的中英文文献为基础, 从浮石轻骨料混凝土的配合比优化与改性、耐久性与环境适应性、复合墙板结构形式与力学性能、热工性能与装配式应用四个层面展开综述。研究表明: 材料层面上, 纳米 SiO_2 、硅灰、聚合物涂层及纤维掺入等手段已能有效提升浮石混凝土的强度与抗冻性; 但专门针对“浮石轻骨料混凝土 + 复合墙板”这一集成体的研究仍明显少于陶粒体系, 尤其在面层-保温芯材的长期粘结退化、低弹模条件下拉结件的锚固滑移机理、温湿度耦合作用下的组合变形与开裂风险等方面尚存显著空白。未来应重点围绕6个具体科学问题展开攻关, 包括栓钉连接件在徐变影响下的剪切滑移本构、面向晋蒙地区的浮石骨料碳排放因子数据库等, 以推动浮石墙板从材料研究向部品化应用跨越。

关键词

浮石轻骨料混凝土, 复合墙板, 力学性能, 耐久性, 热工性能, 装配式建筑

Research Progress on Pumice Lightweight Aggregate Concrete Composite Wall Panels

Zunhao Li, Hongjun Sun

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

Received: July 12, 2026; accepted: August 4, 2026; published: August 13, 2026

Abstract

Against the backdrop of the “dual carbon” goals and the continuous advancement of prefabricated

construction, exterior enclosure walls are evolving toward lightweight, high-strength, self-insulating, and durable solutions. As a natural porous volcanic lightweight aggregate, pumice features low density, significant internal curing effects, no need for calcination, and considerable reserves in the Shanxi-Inner Mongolia-Northeast China region, making it a regional candidate aggregate second only to ceramsite in the field of lightweight aggregate concrete. Combining pumice lightweight aggregate concrete with insulation cores, light steel frames, or steel bar trusses to form composite wall panels can simultaneously leverage its comprehensive advantages in thermal insulation, sound insulation, and load-bearing capacity, meeting the dual demands of near-zero energy buildings and prefabricated construction in severe cold regions. Based on publicly available Chinese and English literature published in the past five years, this paper provides a comprehensive review from four aspects: mix proportion optimization and modification of pumice lightweight aggregate concrete, durability and environmental adaptability, structural forms and mechanical properties of composite wall panels, and thermal performance with prefabricated applications. The review indicates that at the material level, nano-SiO₂, silica fume, polymer coatings, and fiber incorporation have effectively improved the strength and frost resistance of pumice concrete. However, research specifically targeting the integrated system of “pumice lightweight aggregate concrete + composite wall panels” remains significantly less extensive than that for ceramsite systems, with notable gaps in long-term bond degradation between the face layer and insulation core, anchorage-slip mechanisms of connectors under low elastic modulus conditions, and combined deformation and cracking risks under coupled temperature-humidity effects. Future efforts should focus on six specific scientific questions, including the shear-slip constitutive model of stud connectors considering creep effects and the establishment of a carbon emission factor database for pumice aggregates in the Shanxi-Inner Mongolia region, to promote the transition of pumice wall panels from material research to component-level applications.

Keywords

Pumice Lightweight Aggregate Concrete, Composite Wall Panels, Mechanical Properties, Durability, Thermal Performance, Prefabricated Construction

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. 引言

近年来,我国建筑节能标准从 65%逐步提升至 75%乃至“近零能耗”,外围护结构作为建筑冷热负荷的主要通道,其材料选型与构造形式直接决定了建筑的运营能耗与居住品质。传统黏土砖已被全面禁用,加气混凝土砌块、陶粒混凝土墙板、夹芯复合墙板等逐渐成为主流,但在北方地区尤其严寒区,墙体既要满足保温,又要兼顾抗冻融、抗风压与抗震,单一材料往往难以兼顾。轻骨料混凝土因骨料本身多孔、密度低(干表观密度常控制在 1400~1900 kg/m³)、热导率低(约为普通混凝土的 1/2~2/3),且粗骨料的多孔结构可在水泥水化过程中持续释放内部储存的水分,形成“内养护”效应,从而减少自收缩、改善界面过渡区,被认为是配制中高强度轻质墙材的理想基体。浮石作为天然火山岩轻骨料的一种,相较于人造陶粒成本更低、无需煅烧,在山西大同、内蒙古乌兰察布、吉林长白山一带产量可观,运输半径可控,具备区域化推广的先天条件。将浮石轻骨料混凝土作为面层或芯材,与 EPS/XPS 保温板、真空绝热板、轻钢龙骨或钢筋桁架复合形成“浮石轻骨料混凝土复合墙板”,既能发挥浮石混凝土的承载与耐候优势,又能通过构造层叠实现自保温,契合装配式建筑“工厂预制、现场干法连接”的建造逻辑。然而

相较于陶粒体系, 浮石本身颗粒强度偏低、吸水率高、矿源级配波动大, 其在复合墙板这一“结构-功能一体化”部品中的配合比移植、界面粘结、拉结件锚固、温湿变形协调等问题仍需系统梳理。本文依托已发表的中英文文献, 对前述方向的研究进展做整体性综述, 并着重指出后续可深化的具体科学问题。

2. 浮石轻骨料混凝土材料改性与内养护基础(墙板导向)

2.1. 配合比设计、力学性能与改性路径

浮石轻骨料混凝土的基础研究首先围绕配合比展开。李伟等[1]系统讨论了轻骨料混凝土的配合比设计方法, 指出浮石作为高吸水率骨料, 宜采用“附加水法”或“预湿法”处理, 且为弥补浮石自身筒压强度偏低的缺陷, 胶凝体系中常需引入硅灰、粉煤灰或矿粉进行活性叠加, 使 LC30~LC60 强度等级在大掺量矿物掺合料下仍可稳定达到。孙婧等[2]尝试将铁尾矿砂与浮石砂复掺替代河砂, 发现铁尾矿的棱角性与较高硬度可补偿浮石砂偏软的缺陷, 当铁尾矿砂替代率为 30%~50%时, LC40 混凝土的 28 d 抗压强度提升约 12%~18%, 且干缩率有所下降。郭玉娟等[3]指出水胶比从 0.35 降至 0.28 时浮石混凝土抗压强度可由 32 MPa 提升至 48 MPa, 但继续降低会因内养护水分补给不足而导致界面微裂纹增多, 存在“最优水胶比窗口”。王宏等[4]通过三元骨料体系(浮石 + 碎石 + 陶粒)将浮石混凝土推向 LC60 等级。

在改性与增韧方面, 张潇[5]借助核磁共振(NMR)证实浮石颗粒在水泥水化中后期缓慢释放预吸入水分, 使自收缩减少 30%以上, 界面过渡区 C-S-H 凝胶更致密。霍俊芳等[6]发现体积掺量 0.2%的 PVA 纤维可使浮石混凝土冲击韧性提升 40%以上。Yildirim 与 Gul [7]用胶体纳米 SiO₂ 改性, 使 28 d 抗压强度提升 18%, 微观上 C-S-H 凝胶致密度提高。Bideci 等[8]指出聚酯或丙烯酸涂层包裹浮石骨料后可显著降低吸水率(降幅达 35%~50%), 抗折强度提升 10%~15%。上述材料层面的研究为浮石混凝土用作墙板面层提供了强度等级与改性手段储备, 但改性后的浮石混凝土与不同保温芯材、金属连接件的系统配伍性研究尚处于起步阶段。浮石轻骨料混凝土材料改性的主要技术路径与效果汇总如表 1 所示。

Table 1. Summary of main technical modification approaches and effects for pumice lightweight aggregate concrete

表 1. 浮石轻骨料混凝土材料改性的主要技术路径与效果汇总

改性路径	典型掺量/处理方式	主要性能变化	文献来源
铁尾矿砂复掺	30%~50%替代细骨料	抗压 + 12%~18%, 干缩下降	[2]
三元骨料补强	浮石 + 碎石 + 陶粒	LC60 可达, 弹模提升	[4]
硅灰 + 纤维	硅灰 5%~8%, PVA 0.2%	孔分形维数减少, 抗冻提升	[6]
纳米 SiO ₂	CNS 1%~3% (胶材比)	28 d 强度 + 18%, 界面致密	[7]
聚合物涂层裹覆	聚酯/丙烯酸预包浮石	吸水率降低 35%~50%, 抗折 + 10%~15%	[8]
预湿内养护	浮石预湿至饱和面干	自收缩降低 30%, ITZ 致密	[5]

2.2. 耐久性要点(服务于墙板长期服役)

浮石混凝土的抗冻融性能是其在严寒区墙板中应用的前提。王萧萧等[9]建立了天然浮石混凝土的冻融损伤与寿命预测模型, 指出当浮石掺量超过粗骨料总体积的 70%时, 冻融寿命对引气剂剂量的敏感性显著增强。霍俊芳等[10]用低温 SEM 观测发现冻融损伤首先从浮石颗粒内部的连通大孔开始, 逐步扩展至浆体-浮石界面。在耦合环境方面, 王萧萧等[11]发现 3.5% NaCl 溶液条件下浮石混凝土的损伤速率约为淡水冻融的 1.6 倍, 表层浮石颗粒易出现“剥壳式”脱落。Resuloğulları 与 Güven [12]发现 600℃以内浮石混凝土的质量损失率低于石灰岩骨料混凝土, 归因于浮石多孔结构缓冲了内部蒸汽压积聚。康寅与

王培[13]认为当前浮石耐久性数据多集中于材料试件尺度, 构件与墙板尺度的长期暴露数据仍缺——这恰好构成了本文后续重点讨论的界面耐久性问题的基础。

3. 浮石轻骨料混凝土复合墙板的结构行为与关键界面问题

3.1. 复合墙板的常见构造类型与浮石适配性

严格以“浮石”为骨料的复合墙板专门文献目前少于陶粒体系, 但构造逻辑可互通。当前轻骨料复合墙板的主流形式包括: (1) 夹芯复合墙板(内外叶轻骨料混凝土 + 中间 XPS/EPS/VIP 保温层 + 拉结件); (2) 轻钢龙骨 - 轻质混凝土复合墙板(冷弯薄壁 C 型钢为骨架, 两侧覆轻质混凝土面板); (3) 钢筋桁架 - 双皮轻骨料混凝土复合墙板; (4) 陶粒/浮石泡沫混凝土与普通混凝土复合的“带肋”墙板。黄远与陈颖[14]对陶粒混凝土保温带肋复合墙板的轴压试验表明, 带肋构造可使轴压承载力较平板式提升 25% 以上。苗纪奎等[15]指出若面板改用浮石轻骨料混凝土, 可在同等热工下减重 15%~20%。然而, 浮石混凝土弹性模量仅为同强度普通混凝土的 60%~70%, 这一低弹模特性在墙板层面的系统效应——包括界面应力重分布、连接件受力模式转变、组合变形协调——尚未得到充分研究。

3.2. 面层 - 保温芯材的长期粘结性能与破坏模式

夹芯墙板中浮石混凝土面层与 EPS/XPS/VIP 保温芯材之间的界面粘结是保证“外叶 - 内叶 - 保温层”协同工作的首要条件。现有研究多集中于普通混凝土或陶粒混凝土与保温板的粘结, 浮石体系因骨料吸水率与表面纹理特殊, 其界面行为存在显著差异。宋玉霜[16]在制备预制轻骨料夹芯外墙板时发现, 浮石混凝土的早龄期收缩略大于陶粒混凝土, 若养护不当, 面板与保温层间易出现脱粘——这一现象揭示了浮石混凝土的干缩特性对界面粘结的早期损伤风险。在此基础上, 至少有三个深层问题尚待阐明: (1) 浮石混凝土面层在经历温度循环(尤其是北方严寒区冬季室内外温差)后, 其与 XPS/VIP 界面的粘结强度退化规律如何, 是黏聚破坏还是界面剥离破坏占主导? (2) VIP 表面光滑且对剪切敏感, 浮石混凝土粗骨料棱角性可能导致的界面局部应力集中是否会加速 VIP 面层破损? (3) 长期湿度迁移——浮石内部储存水分在服役期的缓慢释放——是否会改变界面处的孔隙水压力分布, 从而诱发延迟性粘结失效? 目前尚无文献对上述问题给出直接回答。

3.3. 低弹性模量浮石混凝土中拉结件的锚固性能与受力机理

拉结件(不锈钢板式、GFRP 棒式或桁架式)是夹芯墙板传递剪力、协调内外叶变形、防止外叶板失稳的核心构件。周剑等[17]对不锈钢板式拉结件在普通混凝土夹心墙板中的复合受力性能做了精细试验, 指出拉结件布置间距 ≤ 600 mm 时弯剪协同性较好。然而, 将同样的拉结件设计方案移植到浮石混凝土叶板中时, 浮石混凝土弹性模量偏低(约为普通混凝土的 60%~70%)将带来三个层面的受力机理改变: 其一, 拉结件周边浮石混凝土的局压承载力下降, 可能导致锚固区在较低荷载下即出现锥体破坏或劈裂破坏, 锚固效率系数需要重新标定; 其二, 浮石混凝土与拉结件之间的粘结 - 滑移本构与普通混凝土不同, 浮石骨料的吸水 - 释水特性使界面区水胶比局部偏高, C-S-H 凝胶堆积密度下降, 降低了化学胶结力占比, 使拉结件的抗拔承载力主要依赖机械咬合力, 进而改变了荷载 - 滑移曲线的形状(峰值滑移量增大、下降段更陡); 其三, 在长期反复荷载(如风致振动、温度变形引起的往复拉压)下, 浮石混凝土的徐变效应显著大于普通混凝土, 会使拉结件周围的约束刚度随时间衰减, 导致剪力重分配, 但目前尚未见到考虑浮石混凝土徐变影响的拉结件长期滑移试验报道。Nie 等[18]对轻钢龙骨-EPS 混凝土墙板的研究提示龙骨连接方式对剪力传递路径影响显著, 但其龙骨嵌入的是普通轻混凝土而非浮石混凝土, 浮石特有的低弹模 - 高徐变耦合效应在现有文献中基本处于空白。

3.4. 温湿度耦合作用下的组合变形与开裂风险

复合墙板作为多层异质体系, 其各层材料的热膨胀系数(浮石混凝土约 $8\sim 10\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, XPS 约 $6\sim 7\times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$, 钢材约 $1.2\times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$)、湿胀/干缩率差异显著。在年温差达 60°C 以上的北方地区, 这种不协调变形可在界面及面层内部产生可观的约束应力。浮石混凝土由于内养护效应, 其干燥收缩峰值出现时间晚于普通混凝土, 但总收缩值(约 $400\sim 600\ \mu\text{ε}$)略高于陶粒混凝土[5] [16], 这意味着浮石墙板的温湿度耦合应力时程具有独特的“滞后-累积”特征。具体而言, 墙板在预制后初期的干燥收缩与使用阶段冬季降温收缩叠加, 若恰好遇到拉结件的强约束, 可能在面层中产生超限拉应力, 导致微裂纹从拉结件锚固区向外辐射扩展——这种“收缩+温降+约束”的三重耦合开裂机制在普通陶粒墙板中已被注意, 但在浮石墙板中因浮石的高吸水-缓释特性, 其收缩时效曲线和应力松弛行为不同, 开裂风险窗口也有所偏移。此外, 外叶板受日照辐射时内外表面温差可导致翘曲变形, 若变形受到内叶板通过拉结件的约束, 则外叶板角部可能产生剥离应力, 加速界面疲劳退化。目前关于浮石复合墙板在温湿度场下的组合变形计算模型与开裂判据尚无系统报道。

3.5. 复合墙板整体力学性能与抗震研究

典型轻骨料复合墙板构造与力学性能对照如表 2 所示。在整体力学性能方面, Gao 等[19]对“陶粒泡沫混凝土+普通混凝土”复合墙板的抗弯试验表明非对称构造可降低跨中挠度 18%; Huang 等[20]指出带肋墙板的肋宽/板厚比宜控制在 0.2~0.3 之间。Li 等[21]研究表明带肋轻骨料墙板在低周往复下的能量耗散系数可达普通砌体墙的 2.1 倍。这些结论对浮石墙板有重要参照价值, 但必须注意到浮石墙板的低弹模会改变墙板整体刚度分配, 进而影响自振频率与地震作用下的弯矩分布。尤其在地震作用下, 浮石混凝土面层与普通混凝土边框或钢框架的组合节点, 其弯矩-曲率关系和塑性铰转动能力是否仍可按陶粒墙板的设计公式计算, 需要专门的拟静力试验验证。Wu 等[22]从 3D 打印混凝土复合墙的层间剪切机理出发给出了多尺度解释框架, 这一方法学对浮石墙板的破坏模式分析有借鉴意义。

Table 2. Comparison of structural configurations and mechanical properties of typical lightweight aggregate composite wall panels

表 2. 典型轻骨料复合墙板构造与力学性能对照

墙板类型	芯材/面层组合	关键试验工况	主要力学指标/结论	文献来源
陶粒混凝土带肋复合墙板	肋: 普混; 面板: 陶粒泡沫	轴压	轴压承载力较平板 +25%; 破坏为肋屈+面板压溃	[14]
轻钢龙骨-EPS 混凝土墙板	C140 龙骨 + EPS 轻混凝土面板	轴压 + 低周往复	满足 6~7 度区低多层承重外墙; 龙骨@400 最优	[18]
陶粒泡沫/普混复合墙板	非对称: 普混底 + 陶粒泡沫面	四点弯	跨中挠度较均质-18%; 弯拉分明明确	[19]
预制轻骨料夹芯外墙板	浮石轻混凝土 ± XPS ± 桁架	工艺性试验	浮石早收缩偏大, 需缓凝 + 延长初养防脱粘	[16]
夹心墙板不锈钢拉结件	轻骨料混凝土叶板 + VIP/XPS	拉结件复合受拉/剪	拉结间距 ≤ 600 mm 时 弯剪协同良好	[17]

4. 热工性能、装配式应用与可持续性

4.1. 热工表现与热桥控制

复合墙板的热工优势来自“多层次阻热”: 浮石混凝土本身 $\lambda\approx 0.45\sim 0.65\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 若中间再夹 40~80

mm XPS 或 VIP, 整体传热系数可做到 $0.35\sim 0.15\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, 满足北方严寒区 75% 节能甚至近零能耗要求。王志成等[23]指出在梁柱部位采用“VIP + 发泡陶瓷”组合的断桥构造可使热桥处内表面温度提升 $2\sim 3^\circ\text{C}$, 避免结露。武吉康[24]的测试方法可直接套用于浮石复合墙板。夏晓东与石铁矛[25]在张家口地区的应用示范表明该类墙板可使全年供暖能耗降至 $15\text{ kWh}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 以下。

4.2. 碳排放与生命周期评价

装配式外墙的“绿色溢价”需要用 LCA 量化。苗纪奎等[26]发现轻骨料混凝土墙板在全生命周期(50 年)碳排放可比传统砌体 + 外保温系统节约 15%~20%; 若轻骨料改用本地浮石(运输半径 $< 150\text{ km}$), 则生产阶段碳足迹可再降 5%~8%。曹婷[27]指出浮石因无需煅烧, 其“从摇篮到大门”的碳排放仅为陶粒的 40%~50%。然而, 目前的 LCA 核算中浮石骨料生产阶段的碳排放因子大多直接引用天然骨料平均值, 未区分不同矿源的开采方式(露天机械化开采 vs 小型矿点半人工开采)、剥离层厚度、破碎筛分能耗等关键变量。对于山西大同、内蒙古乌兰察布等浮石主产区, 建立基于本地实际生产数据的碳排放因子数据库, 是准确评估浮石墙板碳减排效益的前提。

5. 面向装配式建筑的浮石复合墙板: 关键瓶颈与 6 个具体科学问题

浮石轻骨料复合墙板关键研究瓶颈与具体科学问题如表 3 所示。综合文献看, 浮石轻骨料混凝土复合墙板要走向规模化工程应用, 除一般性建议外, 亟需在以下 6 个高度具体化的科学问题上取得突破:

(1) 分矿源浮石骨料性能图谱与配合比库的建立。浮石筒压强度从 1.5 MPa 到 5 MPa 的跨矿源波动, 使单一配合比无法通用。需针对晋蒙地区主要矿源建立“筒压强度 - 吸水率 - 级配 - 最优水胶比 - 强度等级”映射关系图谱, 为墙板预制厂提供差异化配料方案。

(2) 循环荷载下考虑浮石混凝土徐变影响的栓钉式连接件剪切滑移本构关系。浮石混凝土的徐变系数(比普通混凝土高约 30%~50%)使栓钉周边混凝土在长期剪力作用下发生持续变形, 导致栓钉剪力 - 滑移曲线的屈服平台斜率及极限滑移量发生显著改变。需通过长期持荷剪切试验与分级循环加载试验, 建立包含时间项和浮石掺量项的修正 Bode 剪切滑移模型, 为夹芯墙板在风振和地震往复作用下的连接件设计提供精准本构。

(3) 浮石混凝土面层-XPS/VIP 界面的长期粘结退化模型与破坏模式判据。需开展热循环($-25^\circ\text{C}\sim +60^\circ\text{C}$)、湿度循环(30% RH $\rightarrow$ 95% RH)及两者耦合作用下的斜剪/正拉粘结试验, 明确粘结强度随循环次数的衰减曲线, 厘清破坏模式转变的临界条件(是从界面剥离转为浮石混凝土表层内聚破坏的阈值), 建立基于界面断裂能的粘结 - 滑移本构。

(4) 温湿度场下浮石复合墙板的非线性组合变形机制及防开裂构造措施。需建立考虑浮石混凝土收缩时效曲线(区别于普通混凝土的双曲线模型)、各层材料热膨胀系数差异及拉结件离散约束的有限元分析模型, 通过足尺墙板在模拟气候箱中的变形 - 应变监测, 验证并修正组合变形计算公式, 进而提出限制开裂的构造准则(如拉结件最大间距与板厚的匹配关系、面层配筋率下限)。

(5) 面向晋蒙地区的浮石骨料生产阶段碳排放因子数据库构建。如前所述, 需对山西大同、内蒙古乌兰察布等典型矿源开展实地调研, 采集开采设备能耗、爆破频率、运输车辆吨公里油耗、破碎筛分电耗等原始数据, 按照 ISO 14067 框架计算每吨浮石骨料“从摇篮到工厂大门”的碳排放因子, 并将其嵌入装配式墙板的全生命周期评价模型中, 取代目前通用的天然骨料平均值。

(6) 浮石复合墙板足尺拟静力与振动台试验及节点弯矩分配公式修正。鉴于低弹模对墙体刚度与节点弯矩分配的显著影响, 需以足尺浮石夹芯墙板(典型尺寸 $3\text{ m} \times 3\text{ m}$)为对象, 完成拟静力往复加载试验和 7 度设防振动台试验, 获取滞回曲线、骨架曲线、刚度退化规律和能量耗散系数, 修正现行基于陶粒

墙板的设计公式中关于节点弯矩分配系数的取值, 为编制专用技术规程提供直接依据。

Table 3. Key research bottlenecks and specific scientific questions for pumice lightweight aggregate composite wall panels
表 3. 浮石轻骨料复合墙板关键研究瓶颈与具体科学问题

研究维度	已有基础	待攻克的具体科学问题(建议)
材料适配	铁尾矿、硅灰、纳米 SiO ₂ 改性提升强度[2] [7]	问题 1: 分矿源性能图谱与配合比库
连接锚固	不锈钢拉结件在普混墙板中性能明确[17]	问题 2: 徐变 - 循环耦合下的栓钉剪切滑移本构
界面粘结	浮石早收缩偏大, 需缓凝防脱粘[16]	问题 3: 热 - 湿耦合下界面粘结退化与破坏模式判据
组合变形	浮石内养护减小自收缩[5], 但温湿组合变形未量化	问题 4: 温湿场下组合变形计算模型与开裂准则
碳排放核算	浮石无需煅烧, 碳排仅为陶粒 40%~50% [27]	问题 5: 晋蒙地区矿源级碳排放因子数据库
抗震设计	陶粒墙板拟静力与滞回耗能已有数据[21]	问题 6: 足尺浮石墙板拟静力/振动台与弯矩分配修正

6. 总结

浮石轻骨料混凝土复合墙板是“区域资源(浮石)+ 装配式建造 + 近零能耗”三条政策主线交汇的产品方向。材料层面, 通过铁尾矿复掺、硅灰/纳米 SiO₂ 改性、聚合物涂层裹覆及纤维增韧, 浮石混凝土的 LC30~LC60 强度等级与抗冻 F300+ 已获验证; 复合墙板层面, 陶粒带肋墙板、轻钢龙骨-EPS 墙板、夹芯拉结件等成果在构造逻辑上可向浮石体系移植, 但浮石特有的低弹性模量、高吸水 - 缓释内养护、矿源品质波动等问题使墙板层面的界面粘结、连接锚固、温湿变形协调等核心行为不能简单套用陶粒结论。本文在系统梳理现有研究的基础上, 提炼出 6 个高度具体的后续科学问题, 涵盖矿源配合比图谱、徐变 - 循环耦合下的栓钉滑移本构、热 - 湿耦合界面粘结退化模型、温湿组合变形与开裂准则、晋蒙地区碳排放因子数据库以及足尺抗震试验与节点设计修正。这些问题的逐一解决, 将有望使浮石复合墙板从“有材料、有概念”推进到“有参数、有规程、有碳账”的工程可用阶段, 为北方地区装配式超低能耗建筑提供真正的部品级技术支撑。

参考文献

[1] 李伟, 乔天龙, 纪坤, 等. 轻骨料混凝土配合比设计与应用[J]. 建筑技术, 2024, 55(7): 800-803.

[2] 孙婧, 兰建伟, 王宏, 等. 铁尾矿砂-浮石砂复掺轻质混凝土配合比优化研究[J]. 混凝土, 2021(12): 132-135, 140.

[3] 郭玉娟, 丛宇婷, 孙剑飞, 等. 轻质高强浮石混凝土抗压强度试验研究[J]. 水利科技与经济, 2021, 27(5): 105-110.

[4] 王宏, 王丹丹, 朱平, 等. 基于三元骨料体系的 LC60 轻骨料混凝土性能试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2022(3): 96-100.

[5] 张潇. 多孔浮石在超高性能混凝土中的内养护机理[J]. 混凝土与水泥制品, 2025(3): 28-33.

[6] 霍俊芳, 奇雨欣, 王萧萧, 等. PVA 纤维天然浮石混凝土动态力学性能研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2021(3): 56-61.

[7] Yildirim, S. and Gul, R. (2026) Effect of Colloidal Nano-Silica on Early- and Later-Age Compressive Strength and Microstructure of Pumice Aggregate Lightweight Concrete. *Journal of Composites Science*, **10**, Article 204. <https://doi.org/10.3390/jcs10040204>

[8] Bideci, A., Bideci, Ö.S., Ashour, A. and Durmuş, G. (2025) A Review for the Performance of Polymers in Pumice Aggregate Concrete. *Journal of Engineering*, **2025**, Article ID: 8846457. <https://doi.org/10.1155/je/8846457>

[9] 王萧萧, 高宇涛, 荆磊, 等. 天然浮石混凝土冻融损伤及寿命预测模型[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(1): 98-105.

[10] 霍俊芳, 查克乐汗, 曹雪, 等. 冻融循环作用下天然浮石混凝土孔隙结构演变特征[J]. 混凝土, 2024(10): 6-9.

- [11] 王萧萧, 冯蓉蓉, 荆磊, 等. 盐侵-冻融-干湿耦合作用下天然浮石混凝土的耐久性分析[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(32): 13972-13979.
- [12] Resuloğulları, E.Ç. and Güven, M. (2026) Effect of Pumice Aggregate on Fire Resistant Concrete Design: Investigation of Mechanical Behavior and Reinforcement Corrosion under High Temperature. *Journal of Building Engineering*, **123**, Article 115789. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2026.115789>
- [13] 康寅, 王培. 天然浮石混凝土耐久性能研究进展[J]. 混凝土, 2022(8): 74-77.
- [14] 黄远, 陈颖. 陶粒混凝土保温带肋复合墙板轴压试验研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2026, 43(3): 12-23.
- [15] 苗纪奎, 孙飞, 单后壮, 等. 轻钢龙骨复合墙板研究进展[J]. 新型建筑材料, 2024, 51(9): 61-68.
- [16] 宋玉霜. 预制轻骨料混凝土夹芯复合外墙板生产制备工艺研究[J]. 科技与创新, 2024(9): 104-106.
- [17] 周剑, 赵毅, 王雪, 等. 预制混凝土夹心保温墙板中不锈钢板式拉结件复合受力性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2024, 45(S2): 356-364.
- [18] Nie, S., Liu, B., Liu, M., Long, H., Yao, B. and Peng, X. (2026) Experimental Study and Numerical Analysis on Axial Compression Performance of Light Steel Grouted Keel-Expanded Polystyrene (EPS) Concrete Composite Wallboard. *Structures*, **90**, Article 112514. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2026.112514>
- [19] Gao, C., Li, Z., Ma, H., Li, M., Shi, N. and Tian, S. (2025) Study on the Flexural Performance of Composite Wall Panels with Ceramsite Foam Concrete and Normal Concrete. *Buildings*, **16**, Article 128. <https://doi.org/10.3390/buildings16010128>
- [20] Huang, Y., Chen, Y., Lei, L. and Han, B. (2025) Experimental and Numerical Investigations on the Axial Compression Performance and Failure Mode of Ceramsite Concrete Insulation Ribbed Composite Wallboard. *Journal of Building Engineering*, **115**, Article 114473. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.114473>
- [21] Li, J., Chen, P., Wang, W. and Zhu, N. (2026) Study on Seismic Performance of Ceramic Concrete Ribbed Composite Wall Frame Structure. *Structures*, **84**, Article 110989. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.110989>
- [22] Wu, Y., Liu, C., Liu, H., Pan, Z. and Bai, G. (2026) Multiscale Mechanistic Insights into the Dual Effect of Interlayer Reinforcement on the Shear Behavior of 3D-Printed Concrete Composite Walls. *Construction and Building Materials*, **521**, Article 146167. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2026.146167>
- [23] 王志成, 曹正罡, 李源远, 等. 构造热桥对真空绝热板复合墙板热工性能影响研究[J/OL]. 建筑科学与工程学报: 1-9. <https://link.cnki.net/urlid/61.1442.TU.20260407.1732.002>, 2026-07-03.
- [24] 武吉康. 装配式加气混凝土复合保温墙板导热性能试验研究[J]. 上海建材, 2025(5): 60-63.
- [25] 夏晓东, 石铁矛. 基于预制轻钢轻混凝土复合外保温墙板的超低能耗建筑设计与应用[J]. 建筑技术, 2022, 53(1): 80-83.
- [26] 苗纪奎, 单后壮, 陈亚楠. 寒冷地区装配式外墙系统的生命周期碳排放研究[J]. 建筑节能(中英文), 2026, 54(1): 26-32.
- [27] 曹婷. 装配式建筑物中轻质高强抗蚀性能研究[J]. 粘接, 2022, 49(2): 120-124.