

# 聚合物改性轻骨料混凝土的研究综述

朱芯莹, 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5月24日; 录用日期: 2026年6月16日; 发布日期: 2026年6月26日

## 摘要

轻骨料混凝土具备轻质、保温、抗震等优势, 是现代土木工程绿色低碳发展的重要材料, 但其多孔轻骨料带来的高吸水性、界面薄弱等问题, 制约了结构耐久性提升。聚合物改性技术在适宜配比条件下可通过成膜填充、界面强化与网络互穿作用, 优化混凝土微观结构, 改善力学与耐久性能。本文系统梳理轻骨料混凝土的结构特征与耐久性之间的关联, 总结矿物掺合料、纤维增强、工艺优化等传统改性方法, 重点阐述聚合物改性轻骨料混凝土的作用机理、材料类型及国内外研究进展, 剖析当前在适配性、多尺度机理、长期服役性能、工程化与标准化等方面的不足, 并从体系优化、机理表征、寿命预测、绿色材料、工程应用与数字化设计等方向提出未来研究重点, 为聚合物改性轻骨料混凝土的理论研究与工程应用提供参考。

## 关键词

聚合物, 轻骨料混凝土, 混凝土改性

# Research Review of Polymer-Modified Lightweight Aggregate Concrete

Xinying Zhu, Hongjun Sun

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

Received: May 24, 2026; accepted: June 16, 2026; published: June 26, 2026

## Abstract

Lightweight aggregate concrete (LWC) is a vital material for the green and low-carbon development of modern civil engineering due to its advantages of light weight, thermal insulation and seismic resistance. However, the high water absorption and weak interface caused by porous lightweight aggregates restrict the improvement of structural durability. Under appropriate mix proportions, polymer modification technology can optimize the microstructure of concrete and enhance mechanical

and durability properties through film forming, interface strengthening and network interpenetration. This paper systematically reviews the relationship between structural characteristics and durability of LWC, and summarizes traditional modification methods such as mineral admixture, fiber reinforcement and process optimization. It focuses on the mechanism, material types and research progress of polymer-modified lightweight aggregate concrete at home and abroad, analyzes the deficiencies in current adaptability, multi-scale mechanism, long-term service performance, engineering application and standardization. Furthermore, future research priorities are proposed from the aspects of system optimization, mechanism characterization, service life prediction, green materials, engineering application and digital design, providing references for theoretical research and engineering application of polymer-modified lightweight aggregate concrete.

## Keywords

Polymer, Lightweight Aggregate Concrete, Concrete Modification

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

传统普通混凝土在工程实践中应用广泛,但其自重大、保温隔热性能不足以及在复杂服役环境下易出现开裂、钢筋腐蚀等耐久性退化问题,已逐渐难以满足现代土木工程向大跨、高层、装配化和绿色低碳方向发展的需求。轻骨料混凝土因采用多孔轻质骨料替代传统骨料,可显著降低结构自重、改善保温隔热与抗震性能,在高层建筑、大跨度结构及预制构件中的应用前景广阔[1][2]。但轻骨料普遍存在高吸水率、孔隙率大、强度偏低等固有缺陷,导致轻骨料混凝土在未优化配合比或骨料性能条件下早期收缩、力学性能、抗渗、抗冻及抗氯离子侵蚀等部分耐久性指标上劣于普通混凝土,其长期服役性能不足仍是制约其规模化推广的核心问题[3][4]。

聚合物材料因其优异的成膜性、黏结性与柔韧性,已被广泛应用于水泥基材料的改性与修补工程中[5][6]。聚合物可通过内掺浆体、浸渍骨料或表面涂覆等多种方式引入体系,在材料内部孔隙与界面区域构筑连续或半连续的有机相网络结构,有效降低连通孔隙率、优化界面黏结状态,同时显著提升材料的抗裂与抗渗性能[5][7][8]。将聚合物改性技术引入轻骨料混凝土,一方面可弥补轻骨料自身强度低、吸水性高等固有缺陷,另一方面有助于从微观结构层面提升整体耐久性,具有明显的工程应用潜力和研究价值。

基于此,本文在综述轻骨料混凝土基本特征及耐久性问题基础上,系统梳理聚合物改性轻骨料混凝土的研究进展,重点关注聚合物在混凝土中的作用机理、主要种类及在轻骨料混凝土中的应用现状,分析国内外研究差异与不足,并在此基础上提出未来的研究方向与发展建议,以期对聚合物改性轻骨料混凝土在工程中的合理设计与应用提供参考。

## 2. 轻骨料混凝土的主要特征和其耐久性的内在联系

轻骨料混凝土是以轻质骨料替代传统骨料配制而成的一种新型高性能混凝土,其密度不大于 1950 kg/m<sup>3</sup>,具有轻质、高强、保温隔热、抗震、耐火等显著优点,这使得其在高层建筑、大跨桥梁及装配式建筑中具有显著的技术优势[4][9]。轻骨料的多孔吸湿特征是其一关键特性,轻骨料具有较高的吸水率(1 h 吸水率可达 20.2%),这种特性使其在混凝土内部起到“蓄水池”的作用,通过预湿处理可实现内养护效果,在早龄期向砂浆部分输送水分,补偿水泥水化引起的水分消耗,从而减少混凝土的收缩变形[10]。

在微观结构方面, 轻骨料混凝土也表现出独特的界面特征, 与传统普通混凝土不同, 轻骨料与砂浆基质的界面过渡区(ITZ)不明显, 存在跨界面区合并的现象, 这主要是由于轻骨料多孔和粗糙的表面为硬化基质提供了良好的粘结条件, 改善了骨料与基体间的相互作用机制[11]。

研究表明, 超过轻骨料混凝土 50%的混凝土体积由轻质骨料占据, 其孔隙特性和连通性成为控制材料耐久性的关键参数[12]。轻骨料内部的蜂窝状孔隙系统虽然降低了材料密度, 但也为水分和有害离子的传输提供了潜在通道。通过 X 射线显微计算机断层扫描(micro-CT)技术可以观察到, 轻质骨料的孔隙尺寸分布和连通性直接影响混凝土的吸水性、渗透性和抗冻性等耐久性指标[12]。此外, 轻骨料的吸水特性会显著影响新拌混凝土的工作性, 吸水率过高可能导致搅拌过程中有效水胶比降低, 影响水化程度和最终结构的致密性[12]。

轻骨料与水泥基体之间的界面过渡区(ITZ)是影响轻骨料混凝土耐久性的核心区域。与普通混凝土不同, 轻骨料表面的多孔结构使得水泥水化产物能够渗透进入骨料表层, 形成机械咬合作用, 这种“互锁”效应显著改善了界面粘结性能[13]。轻骨料混凝土的密度、强度与耐久性之间也存在密切的关联。在相同配合比设计思路下, 抗压强度与密度基本呈线性关系, 密度增加通常伴随着强度提高和孔隙率降低, 从而改善耐久性[4]。

### 3. 改善轻骨料混凝土耐久性的方法

改善轻骨料混凝土的耐久性是目前的研究热点, 轻骨料混凝土的耐久性与其多孔骨料引入的高吸水性和薄弱界面区等内在特征密切相关。为有效应对这些挑战, 国内外研究者探索并形成了若干成熟的技术路径。以下是一些改善其耐久性的常见方法:

(一) 矿物掺合料法: 粉煤灰、硅灰、矿渣等矿物掺合料通过“微集料”效应和“火山灰”效应, 封堵水泥石孔隙, 优化界面过渡区微观结构, 提高强度和耐久性, 混掺效果优于单掺[14]。

(二) 纤维增强法: 掺入 PVA 纤维、塑钢纤维、玄武岩纤维、聚丙烯纤维和玻璃纤维、PP 纤维、微钢纤维等, 可提高混凝土抗压强度、劈裂抗拉强度、抗冲击韧性、抗冻性能, 改善微观孔隙结构, 但在轻骨料混凝土中应用研究较少[2] [14]。

(三) 工艺改进法: 预湿轻骨料(常压、加压、煮沸预湿); “生产二步法”“搅拌二步法”可改善泵送性能, 常压预湿法可改善轻骨料混凝土和易性, 但会对耐久性产生不利影响; 真空预湿或浸水预湿可改善工作性能[2] [14]。

(四) 外加剂调节法: 适量泡沫剂可提高抗冻性、抗渗性及热工性能, 致密微观界面过渡区; 引气剂可改善工作性能, 但会降低强度; 减缩剂可使收缩量减少, 与预湿复合应用抑制收缩效果更佳[2]。

(五) 骨料改性法: 复合改性或者聚合物改性等通过涂层或渗透, 改善轻骨料混凝土微观结构的均匀性和致密性, 增强抗氯离子渗透性能, 增强骨料与水泥浆体之间的界面过渡区(ITZ), 阻断水分和侵蚀介质的通道, 提升其工作性能、抗压及抗折强度, 进而增强耐久性相关性能[15] [16]。

## 4. 聚合物改性轻骨料混凝土的研究进展

### 4.1. 聚合物在混凝土中的作用原理及种类

聚合物改性混凝土的核心原理在于: 聚合物在水泥水化过程中吸附于水泥颗粒、骨料及纤维表面, 逐步形成连续的有机膜结构。该膜可填充内部孔隙、阻断连通孔并细化孔径, 提高基体密实度; 同时, 部分聚合物体系中聚合物活性基团可与水泥水化产物发生化学反应, 形成水化产物与聚合物相互缠结的互穿网络结构; 柔性聚合物网络与刚性水泥基体交织, 可优化界面过渡区、增强界面粘结强度, 发挥填充、阻裂与增韧作用, 从而整体提升混凝土力学性能与耐久性[6] [7] [17]。在混凝土工程领域, 聚合物按

功能与应用场景可分为七大类(见表 1), 各类聚合物通过不同应用形式优化混凝土性能。

**Table 1.** Classification table of common polymers

**表 1.** 常见聚合物分类表

聚合物种类	典型代表	功能与应用场景
热塑性聚合物	苯丙类聚合物、乙烯 - 醋酸乙烯酯共聚物(EVA)	多作为改性剂或添加剂
热固性聚合物	环氧树脂	主要用作胶凝材料或修补材料
弹性体聚合物	聚氨酯类	常用于密封、防水及疏水涂层
天然及半合成聚合物	纤维素醚	多作为功能性外加剂
功能性有机高分子	聚苯胺	作为功能填料或改性剂
无机地聚合物	粉煤灰基、稻壳灰基地聚合物	常作为胶凝材料体系
水溶性合成聚合物	聚羧酸系	主要用作高效减水剂

## 4.2. 聚合物改性在混凝土中的应用及研究现状

为更清晰呈现国内外研究脉络, 本节依据科学问题将现有成果按性能影响进行整合, 在保持原有表格的基础上, 对力学性能、耐久性 & 界面结构三个方面的研究进展进行简要归纳, 以突出不同聚合物体系的共性作用规律。

### 4.2.1. 对力学性能的影响

国外学者多聚焦于聚合物可通过成膜增强界面、提高基体致密度, 从而改善抗拉、抗折及韧性等性能; 而国内研究多聚焦轻骨料与再生骨料体系, 强调通过薄膜裹覆与孔隙填充提升骨料 - 浆体界面的有效承载能力。表 2 与表 3 中的研究显示: 不同体系中优化掺量存在差异, 但“薄膜桥接”与“微裂缝钝化”是普遍机制。

### 4.2.2. 对耐久性的影响

聚合物可降低连通孔隙率、改善疏水性并提高抗渗、抗冻及抗氯离子侵蚀能力。由表 2 和表 3 可以看出, 国外更多关注树脂、SBR 等对抗渗及氯离子扩散的抑制作用, 国内则常结合工程需求, 从抗冻、抗碳化及抗渗等方面验证性能提升。整体来看, 界面致密化、孔径细化与水分迁移通道阻断是耐久性提升的关键基础。

**Table 2.** Summary table of foreign research on polymer-modified concrete

**表 2.** 聚合物改性混凝土国外相关研究汇总表

文献	混凝土种类	改性材料/处理方式	最优掺量/核心性能提升效果/作用机理
[18]	透水混凝土	环氧树脂 ER、醋酸乙 烯酯 - 乙烯共聚物乳液	2% ER、4% ER; 抗折强度与耐磨性提升; 但过量聚合物掺入会阻碍水泥水化
[19]	再生骨料混凝土	SBR 聚合物	3%掺量; 劈裂抗拉强度提升; 聚合物薄膜桥接界面过渡区微裂缝
[8]	混合再生骨料混凝土	丙烯酸树脂乳液	20%溶液浸泡骨料 60 min; 骨料吸水率、磨损系数与混凝土渗水深度降低/优化骨料界面与孔隙
[20]	轻骨料混凝土	苯乙烯 - 丙烯酸酯共聚物乳液	预饱和和轻骨料; 混凝土阻尼比提升/形成“自由层+约束层”阻尼结构
[21]	聚合物混凝土	聚酯树脂、SBR、环氧乳液	20%聚酯树脂, 25% SBR/环氧; 抗压、抗折强度, 抗冻性、耐磨性提升
[22]	普通水泥基混凝土	聚合物改性水泥基涂层	聚灰比 0.55; 氯离子腐蚀防护时效超 17 年/降低氯离子扩散, 提升电阻率

**Table 3.** Summary table of domestic research on polymer-modified concrete  
**表 3.** 聚合物改性混凝土国内相关研究汇总表

文献	混凝土种类	改性材料/处理方式	最优掺量/核心性能提升效果/作用机理
[14] [23] [24]	轻骨料混凝土	丁苯胶乳; 聚合物乳液; 成膜聚合物 - 无机复合材料	20%时劈裂抗拉强度提升, 脆性改善; 吸水率降低, 抗压、抗高温爆裂性能大幅提升; 表面裹覆改性, 优化骨料表层结构
[25]	机制砂混凝土	聚合物乳液	改善工作性、耐磨性与抗弯拉强度, 抗压强度有所降低, 优化基体密实度与界面过渡区
[26] [29]	水泥基材料	高吸水聚合物(SAP); 通用聚合物	抗冻、抗渗、抗碳化耐久性提升, 发挥内养护效应, 抑制早期收缩开裂; 优化细化孔隙结构
[27]	再生透水混凝土	水性环氧树脂	1% (0.5%~2%), 抗冻性能提升, 树脂成膜优化基体内部结构
[28]	自密实混凝土	环氧树脂	5%小幅提升抗压强度, 10%抗折强度与弯曲韧性最优, 15%抗压强度下降
[30]	普通混凝土	乙烯 - 醋酸乙烯聚合物乳液	疏水抗吸水性能提升, 增大表面接触角、提升疏水性, 成膜缓解冻融孔隙静水压力, 降低吸水与冻融损伤

#### 4.2.3. 界面区域微观结构演变

轻骨料孔隙丰富, 聚合物在骨料表层的渗透与成膜使界面结构的演变更为显著。由表 2 与表 3 可以看出, 国内外研究普遍认同: 聚合物膜层可改善轻骨料表面脆弱区、提升 ITZ 致密性, 并在水泥水化产物与聚合物之间形成互穿网络结构。国外在成膜连续性与界面能量分析方面较深入, 而国内多基于 SEM、孔径分布与宏观性能建立“结构 - 性能”关联。两者共同说明, 界面协同强化是轻骨料混凝土性能改善的核心贡献。

总体而言, 综上, 虽然研究对象与测试条件存在差异, 但国内外成果在作用机理上高度一致, 均强调聚合物通过“成膜 - 填充 - 互穿网络”实现力学性能与耐久性同步提升。然而, 针对轻骨料独特孔隙结构的定量表征与适配机制仍有研究空白。

## 5. 研究不足与未来展望

### 5.1. 研究不足

#### (1) 聚合物与轻骨料混凝土适配性研究不足

现有工作多在普通混凝土或再生骨料混凝土体系中开展, 对轻骨料混凝土的研究数量相对有限。多数研究停留在单一聚合物、单一掺量或单一性能指标(如抗压强度、吸水率)层面, 对不同聚合物体系在力学性能、耐久性与施工性能之间的综合适配性评价不足。

#### (2) 界面过渡区多尺度作用机理认识不够深入

目前对聚合物在轻骨料表层孔隙中的渗透深度、膜层厚度、与水化产物形成互穿网络的形貌特征等缺乏定量描述, 多依赖常规扫描电镜、宏观力学测试等手段, 微观 - 介观 - 宏观多尺度耦合机制尚未明晰, 难以支撑面向性能设计的材料配置。

#### (3) 长期服役性能与环境耦合作用评价不足

多数研究集中在实验室短期测试条件, 主要关注抗压、抗折强度和基本抗渗、抗冻指标, 对聚合物改性轻骨料混凝土在氯盐侵蚀、碳化、干湿循环、冻融循环、硫酸盐侵蚀等复杂环境下的长期性能演变规律研究较少。

#### (4) 工程可施工性与经济性研究不系统

现有研究多侧重性能提升, 对施工难度、材料成本、工期影响等缺乏量化分析。针对预制构件、泵送施工、装配式结构等不同工程场景的工艺适应性研究不足, 缺少面向工程应用的技术经济综合评价。

#### (5) 标准化与工程示范应用不足

当前聚合物改性轻骨料混凝土尚缺乏统一的材料设计方法与技术标准, 聚合物种类选择、掺量范围、骨料预处理要求以及耐久性评估方法等尚未规范化。

## 5.2. 未来研究方向

### (1) 聚合物 - 轻骨料混凝土体系的系统化优化设计

未来应基于轻骨料种类、孔隙结构与吸水特性, 开展聚合物种类、分子结构及掺量的系统对比研究, 建立“聚合物类型 - 轻骨料特征 - 性能指标”之间的关联模型。可通过正交试验、响应面法等手段, 构建适用于不同工程需求的聚合物改性配合比设计方法, 为工程提供可直接应用的参数范围。

### (2) 多尺度界面结构表征与机理研究

未来应进一步利用更高分辨率与可量化能力的测试手段, 对聚合物在轻骨料孔隙与 ITZ 中的分布演变进行多尺度分析。例如, 可采用纳米压痕与 X-CT 建立膜层厚度、模量与孔隙连通性之间的量化关系; 结合 NMR、SAXS 与传统 SEM, 对渗透深度、膜层连续性 & 互穿网络结构进行精细刻画。通过细观模型和力 - 渗耦合模拟, 将界面膜层参数与微裂缝扩展路径、渗流通道阻断效果等性能指标建立可预测关联, 以提升机理研究的可量化性与可验证性。

### (3) 面向服役环境的耐久性与寿命预测研究

应围绕实际服役环境, 设计考虑冻融 - 氯盐、干湿 - 碳化、温度 - 湿度 - 荷载等多因素耦合的加速试验方案, 系统评估聚合物改性轻骨料混凝土在典型环境中的耐久性演变规律。结合聚合物相老化动力学和界面退化行为, 构建适用于该类材料的服役寿命预测模型, 探索基于性能退化的耐久性设计方法, 为耐久性设计和结构全寿命周期评估提供基础数据。

### (4) 绿色低碳与可持续聚合物体系开发

在“双碳”背景下, 未来应更多关注可再生资源来源、低挥发性有机物排放和可降解特性的聚合物材料。可探索生物基聚合物、固废基地聚合物与传统聚合物的复合体系, 兼顾轻骨料混凝土的耐久性提升和环境影响降低。同时, 结合碳足迹分析与生命周期评价(LCA), 系统比较不同聚合物改性方案在环境、经济与性能上的综合效益。

### (5) 工艺一体化与工程化应用研究

建议面向装配式建筑、桥梁结构及海洋工程等典型应用场景, 开展聚合物改性轻骨料混凝土的工艺适应性研究, 如: 骨料预湿与聚合物浸渍一体化工艺、高流态/自密实体系中聚合物对流动性与泵送性能的影响、预制构件生产线中的施工窗口时间控制等。在此基础上, 建设不同气候区的示范工程, 开展长期监测, 形成从材料设计、工艺实施到结构服役评价的完整技术体系, 推动相关标准规范的制定与完善。

### (6) 数字化与智能设计方法的引入

在数字化设计方面, 可构建围绕“轻骨料孔隙特征 - 聚合物分子参数 - 多性能指标”的数据库体系。输入参数可包括骨料孔隙率、孔径分布、聚合物分子量、成膜温度等关键因素, 输出参数如氯离子扩散系数、冻融寿命、界面模量等可量化性能指标。借助数据驱动模型与多目标优化方法, 将材料组成与性能响应建立可预测关系, 以解决当前配合比设计依赖经验、性能预测精度不足等问题, 实现聚合物改性轻骨料混凝土的高效设计。

## 参考文献

- [1] 高峰, 钱言宏, 王洪亮, 等. 不同种类轻骨料混凝土力学性能和耐久性研究进展[J]. 建材世界, 2024, 45(1): 42-45.
- [2] 肖力光, 陈喜昌. 轻骨料混凝土的研究进展与应用前景[J]. 应用化工, 2024, 53(1): 233-237.
- [3] 陈茜, 贾青, 王正君, 等. 不同轻骨料混凝土的力学性能和耐久性研究进展[J]. 建材技术与应用, 2021(4): 32-35.
- [4] 石红磊, 姚庚, 高全青. LC30~LC60 系列轻骨料混凝土的力学性能及耐久性性能研究[J]. 混凝土, 2021(8): 133-136.
- [5] Emad, W., Salih, A. and Kurda, R. (2021) Stress-Stain Behavior, Elastic Modulus, and Toughness of the Soilcrete Modified with Powder Polymers. *Construction and Building Materials*, **295**, Article 123621. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123621>
- [6] 王志航, 白二雷, 许金余, 等. 聚合物改性碳纤维增强混凝土的动态压缩力学性能[J]. 复合材料学报, 2023, 40(3): 1586-1597.
- [7] 胡军安, 李耀威, 夏冬桃, 等. 聚合物改性纤维再生透水混凝土性能试验研究[J]. 混凝土, 2025(4): 263-269.
- [8] Velardo, P., Sáez del Bosque, I.F., Matías, A., Sánchez de Rojas, M.I. and Medina, C. (2021) Properties of Concretes Bearing Mixed Recycled Aggregate with Polymer-Modified Surfaces. *Journal of Building Engineering*, **38**, Article 102211. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102211>
- [9] 刘胜兵, 梅浩华, 黄依莹, 等. 玄武岩-聚丙烯混杂纤维轻骨料混凝土强度研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2024, 57(12): 1725-1732.
- [10] 万钊航, 白鹏翔, 洪淼, 等. 基于数字图像相关技术的轻骨料混凝土早龄期细观收缩实验研究[J]. 实验力学, 2023, 38(5): 549-559.
- [11] 文渊, 刘喜, 张家源, 等. 基于分形理论的地聚物免烧轻骨料混凝土力学性能与孔隙结构研究[J]. 复合材料学报, 2025, 42(9): 5122-5134.
- [12] Chung, S.Y., Sikora, P., Kim, D.J., El Madawy, M.E. and Abd Elrahman, M. (2021) Effect of Different Expanded Aggregates on Durability-Related Characteristics of Lightweight Aggregate Concrete. *Materials Characterization*, **173**, Article 110907. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2021.110907>
- [13] Cheng, S., Shui, Z., Sun, T., Huang, Y. and Liu, K. (2018) Effects of Seawater and Supplementary Cementitious Materials on the Durability and Microstructure of Lightweight Aggregate Concrete. *Construction and Building Materials*, **190**, 1081-1090. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.178>
- [14] 范利丹, 李培涛, 余永强, 等. 轻骨料混凝土性能、本构关系和破坏机理研究进展[J]. 混凝土, 2017(11): 44-49.
- [15] 范小春, 胡宜昌, 孟阳. 改性轻骨料混凝土基本力学性能试验研究[J]. 混凝土, 2017(11): 94-99.
- [16] 梁圣, 崔宏志, 徐丹玥. 纳米 SiO<sub>2</sub> 改性轻骨料混凝土性能[J]. 复合材料学报, 2019, 36(2): 498-505.
- [17] 黄林存, 邢秉元. 聚合物改性混凝土耐久性与表面分形维数关系[J]. 材料科学与工程学报, 2022, 40(6): 969-975+997.
- [18] Wang, Y., Zhu, Z., Cao, R., Xu, L. and Huang, B. (2025) Insights into the Properties of Pervious Concrete Modified with Polymers and Fine Aggregate. *Case Studies in Construction Materials*, **22**, e04627. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04627>
- [19] Assaad, J. and Daou, Y. (2017) Behavior of Structural Polymer-Modified Concrete Containing Recycled Aggregates. *Journal of Adhesion Science and Technology*, **31**, 874-896. <https://doi.org/10.1080/01694243.2016.1235750>
- [20] Tian, Y., Yan, X., Zhang, M., Yang, T., Zhang, J. and Wang, Z. (2020) Effect of the Characteristics of Lightweight Aggregates Presaturated Polymer Emulsion on the Mechanical and Damping Properties of Concrete. *Construction and Building Materials*, **253**, Article 119154. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119154>
- [21] Moodi, F., Kashi, A., Ramezani-pour, A.A. and Pourebrahimi, M. (2018) Investigation on Mechanical and Durability Properties of Polymer and Latex-Modified Concretes. *Construction and Building Materials*, **191**, 145-154. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.198>
- [22] Brenna, A., Beretta, S., Berra, M., Diamanti, M.V., Ormellese, M., Pastore, T., et al. (2020) Effect of Polymer Modified Cementitious Coatings on Chloride-Induced Corrosion of Steel in Concrete. *Structural Concrete*, **21**, 1810-1822. <https://doi.org/10.1002/suco.201900255>
- [23] 王国旺, 王康. 聚合物对轻骨料混凝土力学性能及微观结构的影响[J]. 建材世界, 2019, 40(6): 5-9.
- [24] 郭荣鑫, 何科成, 马倩敏, 等. 改性轻骨料混凝土高温抗压性能及微观结构[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(3): 333-338+344.
- [25] 韦宏规, 白伟, 何哲. 不同水灰比聚合物乳液对机制砂混凝土性能的影响研究[J]. 西部交通科技, 2025(4): 14-16+26.

- [26] 赵圣婴. 高吸水聚合物改性水泥基材料气孔结构与力学性能研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- [27] 夏冬桃, 刘炎昌, 吴方红, 等. 基于正交试验的聚合物改性再生透水混凝土抗冻性能研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2023, 39(4): 707-715.
- [28] 侯圣均, 蒋晨晨, 汤维宇, 等. 聚合物改性自密实混凝土的工作性能及力学性能[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(5): 1489-1496.
- [29] 卢子臣, 刘丹婷, 王磊. 聚合物-混凝土复合材料研究进展[J]. 中国粉体技术, 2025, 31(4): 26-37.
- [30] 李化建, 赵国堂, 高亮, 等. 严寒地区高速铁路无砟轨道用聚合物改性混凝土抗冻机理研究[J]. 铁道学报, 2023, 45(8): 1-9.