

养护方式对地聚物混凝土抗压强度的影响研究

张天旭^{1,2}, 柳鹏^{1,2}, 姜春萌^{1,2}, 王攀^{1,2}, 郑斐^{1,2}, 张瑜硕¹, 宋育贤¹

- 新疆农业大学 水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052;
- 新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室, 乌鲁木齐 830052)

摘要: 为了探究地聚物混凝土不同养护方式对其强度的影响规律。通过试验, 分别研究了不同水胶比和不同钢纤维掺量的地聚物混凝土在标准养护、覆膜养护、干燥空气养护和组合养护四种条件下的抗压强度规律, 并从微观尺度对其水化行为进行了对比分析。结果表明: 标准养护和覆膜养护初期能有效促进地聚物混凝土的水化反应, 形成更为致密的凝胶体结构, 从而显著提高抗压强度; 干燥空气养护则因水分蒸发过快, 导致水化不完全, 孔隙率增加, 抗压强度相对较低; 组合养护则表现出较好的强度发展趋势, 初期养护条件对后续强度发展具有显著影响, 其中覆膜养护3 d后转为干燥空气养护的试件, 其强度发展相较其他组试样表现最好; 较低的水胶比和钢纤维的掺入对地聚物混凝土抗压强度也起着较为重要的作用。研究结果可为相关应用提供参考。

关键词: 地聚物混凝土; 养护方式; 抗压强度; 钢纤维

中图分类号: TU528.0 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2026) 02-0008-07

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.02.002

Study on the Effect of Curing Methods on the Compressive Strength of Geopolymer Concrete

ZHANG Tianxu^{1,2}, LIU Peng^{1,2}, JIANG Chunmeng^{1,2}, WANG Pan^{1,2}, ZHENG Fei^{1,2},
ZHANG Yushuo¹, SONG Yuxian¹

- College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;
- Xinjiang Key Laboratory of Hydraulic Engineering Security and Water Disasters Prevention, Urumqi 830052, China)

Abstract: To investigate the influence of different curing methods on the strength of geopolymer concrete. Through experiments, the compressive strength of geopolymer concrete with different water-glue ratios and different steel fiber content under four conditions: standard curing, film curing, dry air curing and combined curing were studied, and the hydration behavior of the concrete was compared and analyzed from the microscopic scale. The results show that the hydration reaction of geopolymer concrete can be effectively promoted in the early stage of standard curing and film curing, and a denser gel structure can be formed, thereby significantly improving the compressive strength. Dry air curing leads to incomplete hydration, increased

项目来源: 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目 (2022D01B104)。

作者简介: 张天旭 (2003—), 男, 本科, 研究方向: 水工材料。

通信作者: 姜春萌 (1993—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向: 新型建筑材料相关研究。

收稿日期: 2024-12-06

porosity, and relatively low compressive strength due to rapid evaporation of water. The initial curing conditions had a significant impact on the subsequent strength development, and the specimens that were converted to dry air curing after 3 days of film curing had the best strength development compared with other groups. The low water - glue ratio and the incorporation of steel fibers also play an important role in the compressive strength of geopolymer concrete. Research findings can provide references for related applications.

Key words: geopolymer concrete; curing method; compressive strength; steel fiber

0 引言

地聚物混凝土 (Geopolymer Concrete 简称 GPC) 作为一种新型的绿色环保建筑材料^[1], 自 20 世纪 70 年代由法国学者 Davidovits^[2] 首次提出以来, 经过数十年的发展, 逐渐成为建筑行业关注的焦点。与传统的水泥基材料相比, GPC 具有原材料来源广泛、制备过程能耗低、碳排放少、固化后强度高、耐久性好等显著优势^[3-4]。因此 GPC 在土木工程、道路建设、环境修复等领域展现出广阔的应用前景^[5-6]。

近年来, GPC 受到了国内外学者的广泛关注和研究。在力学性能方面, 杨世玉等^[7] 认为粉煤灰和矿渣的掺入能够提高 GPC 的抗压强度; Uysal 等^[8] 对比了抗压强度相同下 GPC 和普通混凝土的抗弯强度; Shaikh 等^[9] 分析了 GPC 的力学性能。由于地聚物内部高度交联, GPC 相比普通混凝土脆性更高^[10], 变形吸收能量减少, 因此 GPC 的脆性特征比较明显。研究者将钢纤维掺入 GPC, 制备出钢纤维 GPC 来改善力学性能。复合力学理论将钢纤维 GPC 视为由钢纤维和地聚物基体组成的两相复合材料, 钢纤维通过与基体间的良好黏结, 能够吸收并分散裂缝扩展时的能量, 防止宏观裂缝的形成, 进而提升混凝土的抗压强度。Al - Majidi 等^[11] 通过观察微观结构证明了基体和钢纤维之间结合效果良好; Zhang 等^[12] 研究发现当钢纤维掺量低于 2% 时, 掺入钢纤维能显著改善 GPC 的各项力学性能指标; Zheng 等^[13] 研究发现钢纤维与地聚物的结合比水泥基更紧密, 掺入 0.5%~1.5% 体积掺量的钢纤维, 使得 GPC 的抗压强度提高了 18.2%。在养护方式方面, 刘乃成等^[14] 研究发现适当提高养护温度并延长养护时间可显著提高地质聚合物的强度, 最佳覆膜养护温度为 80 °C, 固化 3 d 时抗压强度最大; 刘永道等^[15] 研究了常温

和 38 °C 湿气养护条件对粉煤灰 GPC 力学性能的影响; 毛明杰等^[16] 探究了粉煤灰 GPC 包裹养护条件下早期抗压强度的发展情况; 文甜^[17] 研究了基于不同粉煤灰 - 矿渣比的 GPC, 测试了其在不同养护条件下的抗压强度, 得出了前期 (7 d 前) 养护加大湿度有利于提高试件强度的发展速度, 后期 (7~28 d) 养护湿度过高会阻碍地聚物的继续水化, 不利于其后期强度的发展; 王晴等^[18] 研究了早期养护制度对矿渣基无机矿物聚合物混凝土力学性能的影响。研究发现, 在养护早期, 随着养护温度的升高和养护时间的延长, 混凝土的早期抗压强度可以显著提高。

综上所述, 国内外在 GPC 的力学性能研究和养护方式方面均取得了显著进展, 但其力学性能受多种因素影响, 其中养护方式作为材料制备过程中的关键环节, 对最终混凝土的抗压强度等力学性能起着至关重要的作用^[19]。不同的养护条件 (如温度、湿度、养护时间等) 能够显著改变 GPC 的微观结构, 此外钢纤维的掺入也会对 GPC 抗压强度产生影响, 为进一步探究其影响规律, 对于减少我国西北寒旱区混凝土构件因养护不当而导致其强度不足的问题。因此, 深入探究养护方式对 GPC 抗压强度的影响机制, 对于优化材料制备工艺、提升材料性能、拓宽其应用范围具有至关重要的意义^[20]。

研究聚焦于标准养护、覆膜养护、干燥空气养护及其组合养护, 系统探讨不同养护方式对水胶比 (0.30、0.34) 和不同钢纤维掺量 (0、1.2%) 的 GPC 抗压强度的影响。旨在通过试验, 揭示不同养护方式下混凝土强度发展的内在机制, 优化养护工艺, 为 GPC 在实际工程中的推广应用提供理论依据和技术支持^[21]。这不仅有助于推动绿色建材的研发与应用, 还对促进建筑行业的可持续发展具有重要意义。

材料科学

1 试验材料与方案

1.1 试验材料

(1) 粗骨料采用新疆本地天然碎石, 5 ~ 14 mm 粒径范围, 级配良好; 细骨料采用新疆本地天然河砂, 细度模数为 2.74, 级配良好。

(2) 胶凝材料中包含矿渣粉, 比表面积为 $1.43 \text{ m}^2/\text{g}$, 密度为 $2.756 \text{ kg}/\text{m}^3$, 等级为 S95 级。胶凝材料包含粉煤灰, 等级为 I 级。矿渣和粉煤灰均来自新疆本地, 其组成成分详见表 1。

表 2 水玻璃相关性能

Table 2 Properties of water glass

指标名称	氧化钠 /%	二氧化硅 /%	模数	波美度 (20 °C) /°Bé	密度 (20 °C) / (g/mL)	透明度 /%	Fe /%	水不溶物 /%
检测结果	8.61	27.63	3.31	39.7	1.377	89.7	0.004	0.01

(5) 钢纤维: 选用单丝端钩型钢纤维, 其直径为 0.3 ~ 0.5 mm, 长度为 20 ~ 25 mm, 抗拉强度 $\geq 1\,000 \text{ MPa}$ 。

1.2 配合比设计

设计了 3 组配合比方案, 分别为水胶比为 0.30、0.34 及特定钢纤维掺量 (1.2%) 下 0.34 水胶比的 GPC, 胶凝材料为 $400 \text{ kg}/\text{m}^3$, 砂率为 0.36, 水玻璃模数从 3.31 降至 1.0, 配合比详见表 3。

表 3 地聚物混凝土配合比

Table 3 Geopolymer concrete mix proportion / (kg/m^3)

组号	矿渣粉	粉煤灰	硅灰	水	氢氧化钠	水玻璃	粗骨料	细骨料	钢纤维掺量/%
A	200	175	25	120	18	72.12	1 164	666.88	
B	200	175	25	136	18	72.12	1 164	666.88	
C	200	175	25	136	18	72.12	1 164	666.88	1.2

1.3 养护方式

养护方式作为混凝土生产过程中不可或缺的一环, 直接关系到混凝土的强度、耐久性和使用寿命。根据养护条件、方法和目标的不同, 选取了标准养护、干燥空气养护、覆膜养护、组合养护四种养护方法见表 4。

1.4 试验方案与步骤

(1) 材料准备: 按照预定比例准确称量 GPC 原材料、碱激发剂及水, 按照由粗到细的顺序向搅拌机加入原材料干拌 3 min, 加入碱激发剂和水后再次搅拌 4 min, 确保混合均匀。

(2) 拌合与成型: 将混合均匀的浆料倒入模具 (模具尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$, 转换系数

表 1 材料化学组成成分

Table 1 Chemical composition of the material /Wt%

成分	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	H ₂ O	SO ₃	R ₂ O	LOI
矿渣粉	33.06	39.29	15.04	0.1	1.9	0.56	0.80
粉煤灰	45.10	4.50	36.80	0.4	1.2	0.75	2.62

(3) 胶凝材料中包含硅灰, I 级硅灰, 比表面积为 $0.488 \text{ m}^2/\text{g}$, 密度为 $2.56 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。

(4) 氢氧化钠: 为片状氢氧化钠晶体, 氢氧化钠含量 $\geq 99\%$, 密度为 $2.13 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。硅酸钠: 试验选用的硅酸钠为 S38 型硅酸钠详见表 2。

表 4 养护方式

Table 4 Curing method

代号	养护方式	养护制度
S	标准养护	湿度 ($\geq 95\%$), 温度 (20 ± 2) °C
F	覆膜养护	保鲜膜密封 (内部环境保持湿度 $\geq 98\%$), 温度 (20 ± 2) °C
D	干燥空气养护	湿度 ($60\% \pm 5\%$), 温度 (20 ± 2) °C
SD	标准养护 3 d 后转为干燥空气养护	经标准养护 3 d 后转移至室内干燥处进行干燥空气养护
FD	覆膜养护 3 d 后转为干燥空气养护	经覆膜养护 3 d 后转移至室内干燥处进行干燥空气养护

为 0.95) 中, 并放上振动台振动以确保无气泡, 24 h 后脱模得到 GPC 试件。

(3) 分组与养护: 将脱模后的 135 个试件按照预定的养护方式分组, 3 个试件为一组, 每种养护方式 27 个试件。

(4) 强度测试: 养护至指定龄期, 使用万能试验机按照标准试验方法对试件进行抗压强度测试。记录加载过程中的最大破坏荷载, 并计算抗压强度值。

2 试验结果与分析

2.1 不同养护方式下水胶比对 GPC 抗压强度影响

由图 1 可知, 标准养护条件下, 水胶比 0.30 的混凝土因水分蒸发较慢, 内部水化反应充分, 抗压强度表现优异; 而水胶比增至 0.34 时, 尽管标准养护仍能促进强度发展, 但水分过多导致孔隙率上升, 强度增幅减缓。相比之下, 覆膜养护通过减少水分

散失, 对水胶比为 0.30 的混凝土尤为有利, 显著提升了其后期强度。干燥空气养护则加速了水分蒸发, 对水胶比 0.30 的混凝土和 0.34 水胶比混凝土强度提升有限, 前期强度增长较快, 其后期因过度干燥而引发微裂纹, 影响强度发展。在组合养护下, 两种水胶比的混凝土在后期强度增长较快, 均高于单一养护方式。前期养护充足的水分使 GPC 水化反应充分, 后期的干燥养护使 GPC 结构致密, 尤其是覆膜养护 3 d 后转为干燥空气养护, 水胶比为 0.30 与 0.34 的 GPC 在 3~28 d 的强度分别增长了 59.56%、68.96%, 强度增长率远高于单一养护方式。

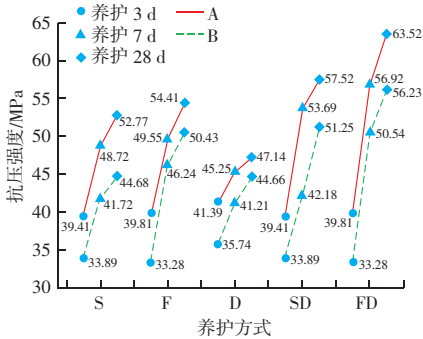


图 1 不同养护方式和水胶比下的 GPC 抗压强度
Fig. 1 Compressive strength of GPC under different curing methods and water-to-binder ratios

2.2 不同养护方式下钢纤维掺量对 GPC 抗压强度影响

由图 2 可知, 钢纤维的掺入显著增强了混凝土的力学性能。在标准养护与标准养护 3 d 转为干燥空气养护条件下, 增强效果更为显著, 其 28 d 的强度较未掺纤维的 GPC 分别提升了 13.90%、9.89%。标准养护通过保持混凝土内部湿度与温度的稳定, 促进了钢纤维与基体材料的界面黏结, 从而有效提升了抗压强度。而标准养护 3 d 转为干燥空气养护下, 前期适当的湿度保持对纤维分散与界面强度发展至关重要, 有助于水化反应更为充分, 使钢纤维与混凝土结合更为紧密; 后期干燥养护下, 钢纤维与混凝土结合的更为致密, 界面黏结能力更强。干燥养护方式下, 钢纤维的掺入对 GPC 的强度提升有限, 疏松多孔, 导致钢纤维与 GPC 的界面黏结能力减弱。覆膜养护和覆膜养护 3 d 转为干燥空气养护两种养护方式增强了 GPC 的中期强度 (3~7 d), 尤其是掺入钢纤维后, 其 3~7 d 的强度分别提升了 35.80%、48.00%, 体现出良好的协同增强作用。

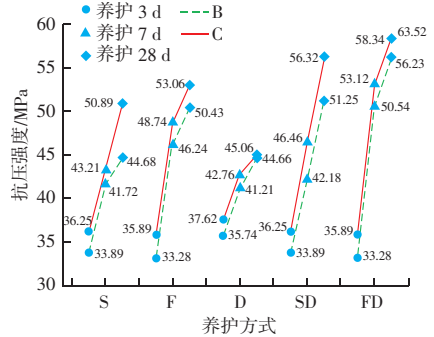


图 2 不同养护方式和钢纤维掺量的 GPC 抗压强度
Fig. 2 Compressive strength of GPC under different curing methods and steel fiber contents

综上所述, 组合养护方式结合低水胶比, 前期能有效保持混凝土内部湿度, 促进水化反应, 后期使内部结构致密, 对混凝土力学性能的提高更为显著。钢纤维的掺入也在一定程度上提升了混凝土的抗压强度, 在水胶比 0.34 基础上, 其 28 d 的强度平均增长率为 6.73%, 尤其是结合组合养护方式, 显著提高了 GPC 的抗压强度, 表明钢纤维的桥接结合 GPC 前期充分的水化反应, 形成了结构致密的网状结构, 有效阻止了混凝土内部微裂缝的扩展, 从而显著提高了 GPC 的抗压强度。

组合养护方式中, 组合方式 GPC 的 28 d 抗压强度均高于单一养护方式 28 d 的抗压强度。其中覆膜养护转为干燥空气养护的组合效果最佳, 该养护方式下的三种混凝土 28 d 强度分别达到了 63.52、56.23、58.34 MPa, 均是所有养护方式下混凝土的强度最高值。此外, 干燥空气养护下的 GPC 在 3 d 时的抗压强度最高, 三种 GPC 的强度分别达到了 41.39、35.74、37.62 MPa, 均是所有养护方式下的 GPC 前期的最高值。然而, 干燥空气养护下的 GPC 在后期强度增长相较于其他养护方式下的 GPC 明显不足。

2.3 养护方式对 GPC 抗压强度及水化产物的影响

2.3.1 不同养护方式下 GPC 的抗压强度规律

由图 3 可知, 标准养护条件下, GPC 经过充分的水化反应, 其抗压强度达到较高水平, 且随龄期增长而逐渐稳定。覆膜养护方式进一步促进了混凝土表面的保水作用, 减少了水分蒸发, 使得水化反应更加充分, 从而显著提高了混凝土的早期及后期抗压强度。相比之下, 干燥空气养护方式下, 混凝土表面水分快速散失, 导致水化反应受阻, 后期抗

材料科学

压强度增长缓慢。

而组合养护方式（如标准养护 3 d 后转为干燥空气养护）则在一定程度上平衡了保湿与干燥的需求，既保证了混凝土早期的充分水化，又通过后期的干燥促进了强度的进一步发展。总体而言，水胶比为 0.30 时，覆膜养护 3 d 后转为干燥空气养护的组合方式对 GPC 抗压强度的提升效果最为显著。

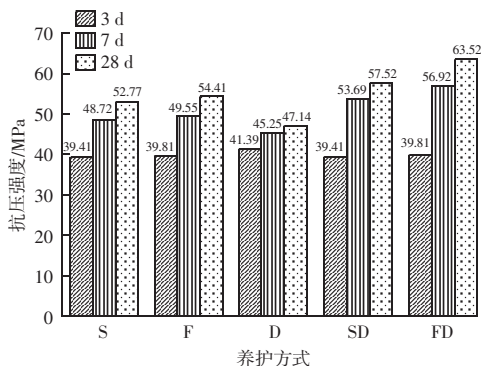


图 3 水胶比为 0.3 的地聚物混凝土在不同养护方式下的强度变化

Fig. 3 Strength variations of geopolymer concrete with a water-to-binder ratio of 0.3 under different curing methods

2.3.2 不同养护方式下 GPC 的水化产物形貌

在标准养护条件下，GPC 电镜图像如图 4 所示，水胶比为 0.3 的 GPC 微观结构呈现致密的凝胶网络，矿物颗粒间通过水化产物紧密胶结。球状的粉煤灰颗粒均匀分布在基体中，整体孔隙率较低，表明充分

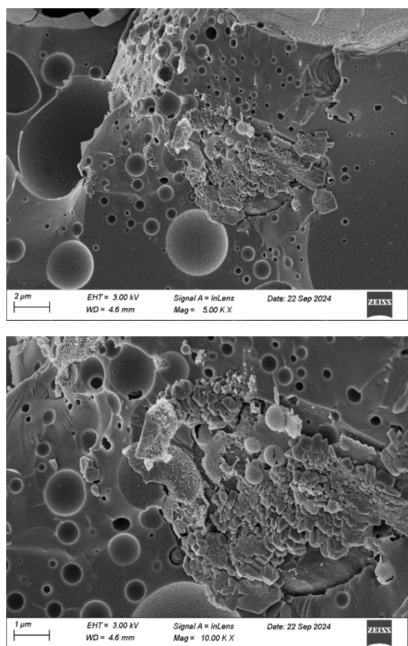


图 4 标准养护下的地聚物混凝土电镜图

Fig. 4 SEM images of geopolymer concrete under standard curing

的水化反应有效促进了强度发展。凝胶相填充于颗粒间隙，形成连续增强的骨架结构，增强了 GPC 结构的力学性能，是标准养护下强度提升的直接微观证据。

覆膜养护下 GPC 电镜分析如图 5 所示，其微观结构致密，水化产物分布均匀，形成了良好的凝胶网络。孔隙率较标准养护条件下显著降低，界面过渡区更加致密，这显著增强了颗粒间的黏结力，从而解释了其抗压强度的提升。覆膜养护有效减缓了水分蒸发，促进了地聚物反应的进行，优化了微观结构。

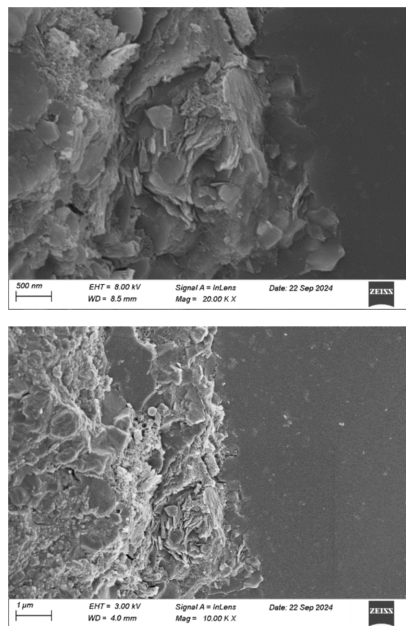
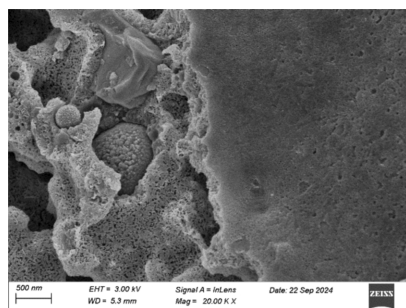


图 5 覆膜养护下的地聚物混凝土电镜图

Fig. 5 SEM images of geopolymer concrete under film curing

干燥空气养护下 GPC 电镜分析如图 6 所示，其微观结构较为疏松，孔隙率显著增加，水化产物结晶度较差，颗粒间黏结力减弱。这些微观特征直接解释了其抗压强度相对下降的原因，即干燥环境加速了水分蒸发，阻碍了地聚物水化反应的充分进行，导致结构整体致密性不足，黏结不充分，影响宏观力学性能。



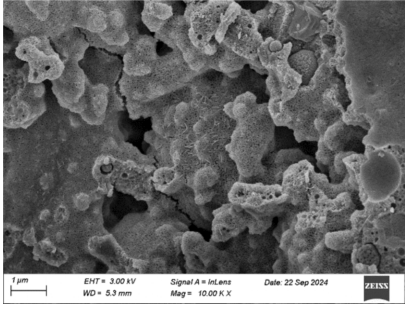


图6 干燥养护下的地聚物混凝土电镜图

Fig. 6 SEM images of geopolymer concrete under dry curing

标准养护后转为干燥空气养护的 GPC 电镜分析如图 7 所示，初期混凝土内部水化产物丰富、结构致密、孔隙较少；转至干燥空气养护后，部分水化产物发生轻微脱水，但整体结构仍保持良好。该试件的抗压强度仅次于覆膜养护 3 d 后转为干燥空气养护的试件，表明前期养护有效促进了混凝土早期强度的形成。

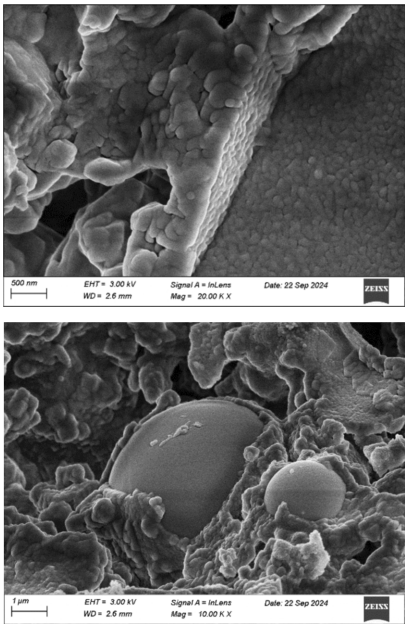


图7 标准养护 3 d 后转为干燥空气养护下的地聚物混凝土电镜图

Fig. 7 SEM images of geopolymer concrete after standard curing for 3 days followed by curing in dry air

覆膜养护 3 d 后转为干燥空气养护的 GPC 电镜分析如图 8 所示，其微观结构致密，水化产物分布均匀，形成了良好的凝胶网络。孔隙率显著低于其他养护方式，这显著增强了颗粒间的黏结力，界面过渡区黏结更加致密，因此其抗压强度提升最为明显。随着养护龄期增长，干燥环境促进了水化产物的进一步硬化与致密化，最终抗压强度均高于其他养护

组。其原因可能是覆膜有效减缓了水分蒸发，促进了地聚物水化反应的进行，优化了微观结构。

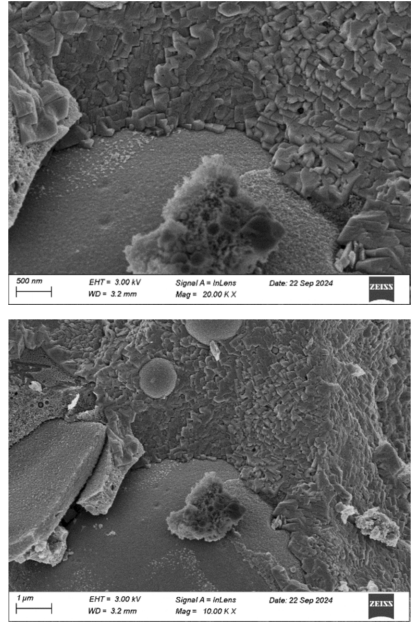


图8 覆膜养护 3 d 后转为干燥空气养护下的地聚物混凝土电镜图

Fig. 8 SEM images of geopolymer concrete after film curing for 3 days followed by dry air curing

3 结论

系统探讨了标准养护、覆膜养护、干燥空气养护及其组合养护对水胶比为 0.30 和水胶比为 0.34 钢纤维掺量为 0、1.2% 的 GPC 抗压强度影响。得出如下结论：

(1) 在标准养护和覆膜养护条件下，充足的水分使 GPC 前期水化反应充分，结构致密。结合较低的水胶比 (0.30) 和钢纤维的掺入 (1.2%) 能够在一定程度上提升 GPC 的强度，但掺入钢纤维的 GPC 可能由于后期水分的侵入导致与钢纤维的界面黏结力减弱，孔隙率增加，强度发展有所减弱。

(2) 干燥空气养护则因水分的快速蒸发，加速了硬化过程的进行，前期强度为所有养护方式的最高值，后期强度提升有限，但在与标准养护或覆膜养护结合使用时，能进一步促进 GPC 强度发展，表明组合养护方式具有优化潜力。

(3) 组合养护方式的 GPC 强度均高于其他养护方式。在结合较低水胶比 (0.30) 和钢纤维的掺入 (1.2%) 时，效果更加显著，通过前期保持混凝土内部水分，后期干燥空气养护的硬化效果显著提升

材料科学

了抗压强度,其 28 d 的强度分别达到了 57.52、63.52、56.32、58.34 MPa。

参 考 文 献

- [1] ZHANG P, FENG Z, GUO J, et al. Mechanical behavior and microscopic damage mechanism of hybrid fiber - reinforced geopolymer concrete at elevated temperature [J]. *Ceramics International*, 2024, 50 (24PB): 53851 - 53866.
- [2] DAVIDOVITS J. Geopolymers and geopolymeric materials [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2005, 35 (2): 429 - 441.
- [3] XIE Y, JIANG C, ZANG T, et al. Analysis of workability and mechanical properties of alkali - activated recycled aggregate fiber concrete [J]. *Modern Management Science & Engineering*, 2024, 6 (2): 177 - 185.
- [4] 夏冬桃, 常闻捷, 李彪, 等. 硅灰改性钢纤维增强地聚物再生混凝土力学性能试验 [J]. *复合材料学报*, 2025, 42 (4): 2090 - 2101.
- [5] 宋天谥, 曲星宇, 潘竹. 地聚物的耐高温性能研究进展 [J]. *材料导报*, 2023, 37 (8): 246 - 254.
- [6] 杨正辉, 朱涛, 张东生, 等. 纳米 Al_2O_3 和钢纤维复合增强煤矸石 - 矿渣基地聚物灌浆材料的性能研究 [J]. *材料导报*, 2025, 39 (15): 136 - 146.
- [7] 杨世玉, 赵人达, 靳贺松, 等. 地聚物砂浆的力学性能与孔结构分形特征分析 [J]. *华南理工大学学报 (自然科学版)*, 2020, 48 (3): 126 - 135.
- [8] UYSAL M, TANYILDIZI H. Estimation of compressive strength of self compacting concrete containing polypropylene fiber and mineral additives exposed to high temperature using artificial neural network [J]. *Construction and Building Materials*, 2011, 27 (1): 404 - 414.
- [9] SHAIKH A U F. Mechanical and durability properties of fly ash geopolymer concrete containing recycled coarse aggregates [J]. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 2016, 5 (2): 277 - 287.
- [10] LUAN C, ZHOU A, GAO P, et al. Developing low - alkalinity geopolymer concrete for enhanced durability of BFRP bars toward sustainable marine engineering [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 457 139356 - 139356.
- [11] Al - MAJIDI H M, LAMPROPOULOS A, CUNDY B A. Steel fibre reinforced geopolymer concrete (SFRGC) with improved microstructure and enhanced fibre - matrix interfacial properties [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 139 286 - 307.
- [12] ZHANG P, WANG J, LI Q F, et al. Mechanical and fracture properties of steel fiber - reinforced geopolymer concrete [J]. *Science and Engineering of Composite Materials*, 2021, 28 (1), 299 - 313.
- [13] ZHENG J H, QI U, ZHENG Y Q, et al. Mechanical properties and compressive constitutive model of steel fiber - reinforced geopolymer concrete [J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 80.
- [14] 刘乃成, 马明晓, 毛明杰. CaO - 粉煤灰地质聚合物早期强度影响因素研究 [J]. *宁夏大学学报 (自然科学版)*, 2022, 43 (4): 378 - 382.
- [15] 刘永道, 卢都友, 郑彦增, 等. 不同养护条件下含石英玻璃地质聚合物砂浆的变形行为 [J]. *硅酸盐学报*, 2012, 40 (5): 696 - 702.
- [16] 毛明杰, 韦旭朋, 韩鹏飞, 等. 养护条件对粉煤灰地聚物混凝土早期收缩性能的影响 [J]. *混凝土*, 2019, (3): 90 - 93.
- [17] 文甜. 养护方式对地聚物混凝土基本力学性能的影响 [J]. *四川建筑*, 2020, 40 (5): 336 - 338, 341.
- [18] 王晴, 赵新宇, 李琳, 等. 无机矿物聚合物混凝土早期养护制度的研究 [J]. *武汉理工大学学报*, 2009, 31 (7): 27 - 30.
- [19] 石旅铭, 毛明杰, 景严谊. 粉煤灰细骨料混凝土早期变形与开裂敏感性研究 [J]. *宁夏工程技术*, 2023, 22 (2): 153 - 157.
- [20] 毛明杰, 马明晓, SHUING DOH, 等. 标准养护下 CaO - 粉煤灰地聚物制备及微观研究 [J]. *非金属矿*, 2020, 43 (4): 28 - 32.
- [21] 渠晔, 姜春萌. 干旱区夏季施工养护方式对混凝土抗压强度的影响研究 [J]. *粉煤灰综合利用*, 2019, (4): 38 - 41.