

利用废玻璃粉和生物蛋壳粉改善高强混凝土的力学性能和微观结构

马 丛^{1*}, 周延波¹, 范中鑫¹, 袁晓洒^{1,2}

¹西京学院土木工程学院, 陕西 西安

²陕西省混凝土结构安全与耐久性重点实验室, 陕西 西安

收稿日期: 2025年5月25日; 录用日期: 2025年6月17日; 发布日期: 2025年6月26日

摘 要

将生物蛋壳粉(BESP)与废玻璃粉(WGP)结合能有效降低碱-硅反应(ASR)现象。将生物蛋壳粉(BESP)与废玻璃粉(WGP)结合, 对高强混凝土(HSC)的力学性能和微观结构进行改性研究。采用WGP和BESP结合替代水泥, 研究了HSC的坍落度、抗压强度和劈裂抗拉强度的发展规律。此外, 在微观方面, 使用了SEM技术分析HSC水化产物的主要成分和微观形貌。结果表明: WGP和BESP结合会增加HSC的坍落度。10% BESP和10% WGP加入混凝土中, 28天抗压强度为98.95 MPa, 与对照组相比增强了22.92%。SEM结果显示, 与对照组混凝土相比, BESP促进了WGP在混凝土中的二次水化, 使HSC内部C-S-H凝胶含量增加, 填充了微裂缝和转化了大孔隙变成了小孔隙, 水化产物组成的空间结构更加密实, 混凝土的整体性更好。

关键词

微观结构, 废玻璃粉, 生物蛋壳粉, 高强混凝土

Improving the Mechanical Properties and Microstructure of High-Strength Concrete Using Waste Glass Powder and Biological Eggshell Powder

Cong Ma^{1*}, Yanbo Zhou¹, Zhongxin Fan¹, Xiaosa Yuan^{1,2}

¹School of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an Shaanxi

²Shaanxi Key Laboratory of Safety and Durability of Concrete Structures, Xi'an Shaanxi

Received: May 25th, 2025; accepted: Jun. 17th, 2025; published: Jun. 26th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 马丛, 周延波, 范中鑫, 袁晓洒. 利用废玻璃粉和生物蛋壳粉改善高强混凝土的力学性能和微观结构[J]. 土木工程, 2025, 14(6): 1546-1554. DOI: 10.12677/hjce.2025.146166

Abstract

Combining biological eggshell powder (BESP) with waste glass powder (WGP) can effectively mitigate the alkali-silica reaction (ASR) phenomenon. This study investigates the mechanical properties and microstructure of high-strength concrete (HSC) modified by the incorporation of BESP and WGP. The development patterns of slump, compressive strength, and split tensile strength of HSC were examined with the replacement of cement by varying proportions of WGP and BESP. Additionally, SEM techniques were employed to analyze the primary components and microscopic morphology of the hydration products in HSC. The results showed that the combination of WGP and BESP increased the slump of HSC. 10% BESP and 10% WGP added to concrete resulted in a 28-day compressive strength of 98.95 MPa, which was enhanced by 22.92% compared with the control group. SEM results showed that, compared with the control concrete, the BESP promoted the secondary hydration of WGP in the concrete, which led to an increase in the internal C-S-H gel content increased, filled microcracks, and transformed large pores into small pores, and the spatial structure composed of hydration products was denser, with better concrete integrity.

Keywords

Microstructure, Waste Glass Powder, Bio-Eggshell Powder, High Strength Concrete

Copyright © 2025 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

随着我国工业经济的发展,高层建筑和大跨度桥梁等建筑结构变得越来越复杂,因此对构成结构要素之一的材料提出了越来越严厉的要求,尤其是混凝土的耐久性和抗压强度[1][2],这促使众多学者致力于改性混凝土材料的探索[3][4]。同时,为响应国家绿色发展理念,利用固废材料来改性混凝土已成为新的途径,以实现资源的可持续利用和降低环境负担。而废玻璃和废弃蛋壳作为固废材料,显著优化了混凝土的水化动力学和微观结构,在提升强度、耐久性和可持续性方面具有重要价值。在替代水泥方面展现了潜在优势,不仅能有效节省成本,还有助于减轻环境压力[5][6]。

废玻璃主要成分为二氧化硅,是一种不可自然降解的材料,其自然降解需要 100 万年[7]。在我国,2018 年废玻璃总产量估计为 1880 万吨,到 2022 年增至 2432.7 万吨。其中只有不到一半被回收利用,而未回收的废弃玻璃会对环境带来严重的污染[8]。为了提高废玻璃的回收利用率,国内外学者采用废玻璃粉替代部分水泥掺入混凝土内进行研究。结果表明,15%和 20%掺量的废玻璃粉可以有效提升混凝土的延展性[9]和耐久性[10]和抗压强度[11]-[13]。此外,废玻璃粉的掺入在一定程度上会提高碱-硅反应(ASR)的发生,而关于抑制 ASR 现象发生,主要研究在废玻璃粉的粒径大小上,其中粒径小于 300 μm 可有效抑制 ASR 现象[14][15],而结合其他外加剂和掺合料来抑制 ASR 的研究较少。

蛋壳主要化学成分为碳酸钙,属于生物垃圾材料,经加工成粉末后,可作为石灰石的替代品用于水泥生产[16][17]。研究表明,10%和 15%掺量的生物蛋壳粉添加至混凝土中,能有效提高其力学性能和耐久性[18]-[20]。并且,生物蛋壳粉还具有催化作用,能够有效缩短水泥的凝结时间[21],并加速与硅酸三钙的水化反应,从而提升混凝土的早期强度[22]。生物蛋壳粉还可以与纳米 SiO_2 应用于高性能纤维混凝土的改性研究中,结果表明 BESP 的最佳掺量为 5%和 10% [23]。此外,高温煅烧后的生物蛋壳粉可以与

火山灰材料结合后,可以使生物蛋壳粉具有一定的活性[24]。

目前关于降低废玻璃粉 ASR 现象的稳定剂研究较为缺乏,因此本文以生物蛋壳粉与废玻璃粉结合抑制 ASR 现象对高强混凝土展开研究。本研究将废玻璃粉与生物蛋壳粉联合替代部分水泥,作为辅助胶凝材料制备高强混凝土,深入研究复合掺杂的最优配比方案,以及对混凝土性能的影响,包括坍落度、抗压强度和劈裂抗拉强度的变化规律。并且,扫描电镜(SEM),对废玻璃粉-生物蛋壳粉高强混凝土的微观结构进行分析。综合评价复掺条件下,废玻璃粉和生物蛋壳粉共同取代水泥作为辅助胶凝材料的可行性,以期废玻璃粉和生物蛋壳粉在混凝土中的再生提供参考。

2. 试验

2.1. 原材料

试验采用普通硅酸盐水泥;细骨料为天然河砂,来源于陕西灞河,细度模数为 2.71;粗骨料为天然骨料,粒径为 4.75 mm~20 mm,表观密度和堆积密度分别为 2840 kg/m³ 和 1730 kg/m³,吸水率为 0.55%;减水剂采用的是聚羧酸类液态减水剂,减水率为 25%。WGP、BESP 与水泥粒径的级配如图 1 所示。BESP 和 WGP 的 SEM 电镜如图 2 所示。

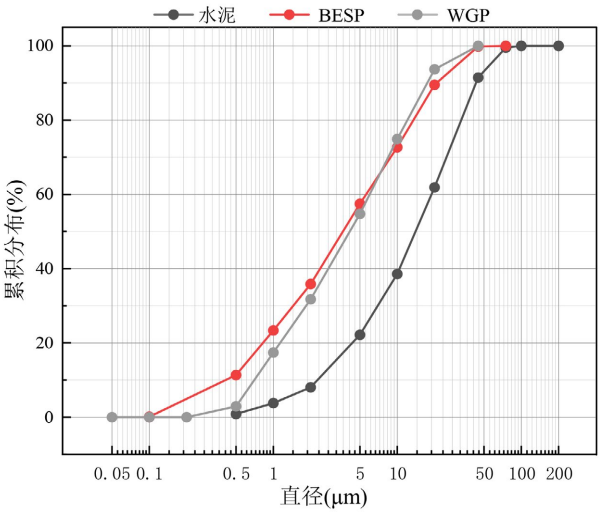


Figure 1. Grading curves of BESP and WGP
图 1. 生物蛋壳粉和废玻璃粉的级配曲线

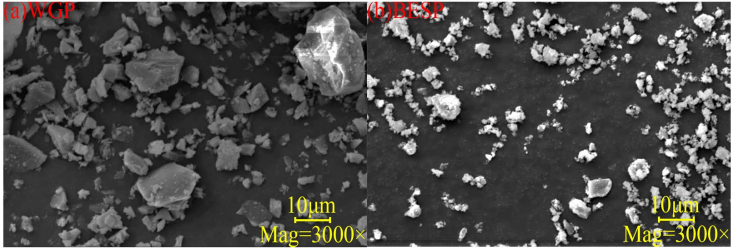


Figure 2. Microstructure of BESP and WGP
图 2. BESP 和 WGP 微观形貌

2.2. 配合比设计

依据研究需要本文共设计 6 种配合比的改性高强混凝土,经试拌调整后的配合比如表 1。

Table 1. Mix design
表 1. 配合比设计

试件编号	配合比(kg/m ³)							水灰比
	水	水泥	细骨料	粗骨料	BESP	WGP	减水剂	
0E0G	133.5	445.0	582.0	1292.7	0	0	4.5	0.3
10E0G	133.5	445.0	582.0	1292.7	44.5	0	4.5	0.3
0E10G	133.5	445.0	582.0	1292.7	0	44.5	4.5	0.3
10E10G	133.5	445.0	582.0	1292.7	44.5	44.5	4.5	0.3
10E20G	133.5	445.0	582.0	1292.7	44.5	89.0	4.5	0.3
10E30G	133.5	445.0	582.0	1292.7	44.5	133.5	4.5	0.3

2.3. 实验方法

混凝土抗压试验和劈裂抗拉试验加载装置均采用 MTS2000kN 万能试验机，根据规范 GB/T50081-2019 测定抗压强度和劈裂抗拉强度。混凝土的微观结构采用扫描电子显微镜技术(SEM)进行测定。

3. 结果与讨论

3.1. 坍落度分析

各配合比试件的坍落度如图 3 所示。从图 3 可知，掺入 10% BESP 和 10% WGP，坍落度分别上升至 44 mm 和 45 mm，提高了 12.82%和 15.38%，两者改善坍落度效果基本相同。而随着 WGP 含量的增加，坍落度呈现增大趋势，其中 10E30G (10% BESP 和 30% WGP)的坍落度达到最大值 55 mm，相较于对照组 0E0G (0%)提高了 41.03%，说明 WGP 含量的增加可改善 HSC 的流动性。原因可能是 WGP 的表面光滑质地，以及玻璃的低吸水率导致掺合物中更多的水分子被水泥吸引，从而增加了坍落度[9]。此外，BESP 和 WGP 的微小粒径等物理性质也适当增加了坍落度。

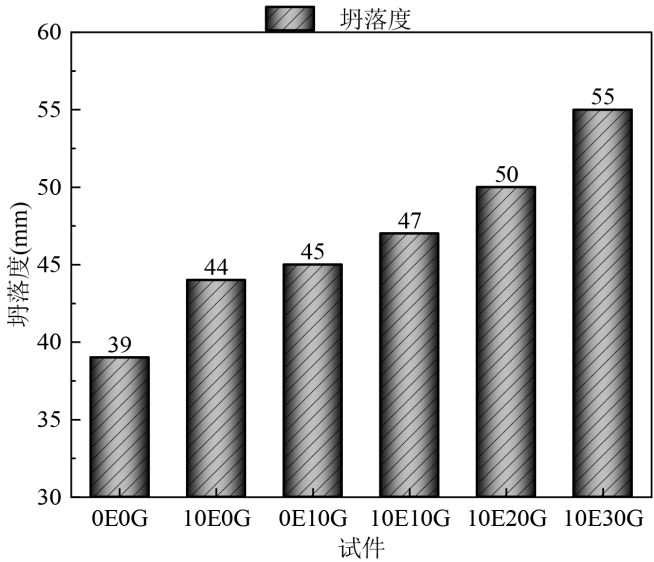


Figure 3. Test piece slump
图 3. 试件坍落度

3.2. 抗压强度与劈裂抗拉强度分析

各配合比混凝土试件的抗压强度和劈裂抗拉强度结果如图 4 所示。从图 4 可知, 抗压强度和劈裂抗拉强度均呈现先增加后减少的趋势。其中, 10E0G (10% BSP)和 0E10G (10% WGP)相较于 0E0G, 抗压强度和劈裂抗拉强度均得到大幅度提升, 说明 BSP 含量为 10%和 WGP 含量为 10%, 均有助于提升 HSC 的抗压强度和劈裂抗拉强度, 这与众多学者的研究基本相同[25] [26], 且 10% WGP 的提升强度效果要优于 10% BSP, 这是由于 WGP 相较于 BSP, 拥有更高的硬度和弹性模量。复掺下, 随着 WGP 含量的增加, 抗压强度和劈裂抗拉强度呈现下降趋势, 其中 10E10G (10% BSP 和 10% WGP)抗压强度和劈裂抗拉强度达到最大值, 分别为 98.95 MPa 和 8.2 MPa, 相较于 0E0G 分别提高了 22.92%和 20.41%。原因可能是 BSP 促进了 WGP 的火山灰反应[27], 使 HSC 内部更加充实, 从而提高了 HSC 的强度。

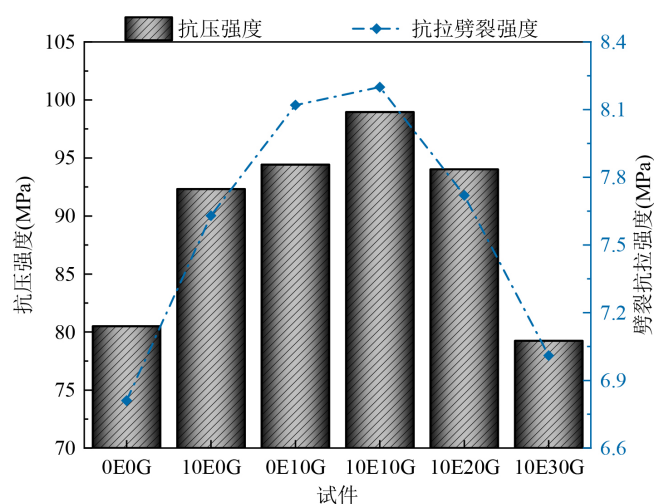


Figure 4. Compressive strength and splitting tensile strength of specimens

图 4. 试件抗压强度和劈裂抗拉强度

3.3. SEM 电镜微观分析

不少学者研究发现, 混凝土的水化产物对其力学性能有显著的影响[28], 从而进一步分析 BSP 和 WGP 掺量对 HSC 微观形貌的影响。选取代表性的水泥砂浆进行真空电镜扫描。

图 5 是不同 BSP 和 WGP 掺量的混凝土水泥砂浆的微观形貌。从图 5(a)可以看出, 当 BSP 和 WGP 取代率为 0 时, 观察发现, 其内部生成了少量水化硅酸钙(C-S-H)、板形状氢氧化钙(CH)、细针状性钙矾石(Aft), 总体结构松散混乱, C-S-H 含量较少, 水化产物聚合形态较差。从图 5(b)可以看出, 当 BSP 取代率为 10%时, 发现出现了大量的块状性 C-S-H, 其结构相较于 0E0G 微观结构更为紧密, 出现这现象原因是 BSP 经过煅烧后主要成分 CaO, CaO 与水泥发生反应, 形成更多的 C-S-H 矿物质, 使 C-S-H 凝胶量的增加, 导致水泥砂浆的微观结构变得更致密。

从图 5(c)可以看出, 当 WGP 取代率为 10%时, 相较于 0E0G, 水化产物密度得到了提升, 内部形成珊瑚状 C-S-H, 从而提高了混凝土的强度性能。同时 WGP 的水化产物占据珊瑚状的 C-S-H 中的大孔, 使其转化为小孔, 这一过程有效地减轻了大孔互连引起的裂缝的形成[29]。从图 5(d)可以看出, 当 BSP 和 WGP 取代率分别为 10%时, 发现块状性 C-S-H 的表面变得光滑, 且上面附着大量的细长针状 Aft 和少量的 CH, 整体密实, 结构层次分明。说明在 BSP 和 WGP 复掺下, 整体消耗了大部分的 CH, 从而提高 C-S-H 等水化产物的产量, 三者相互结合, 从而形成空间致密的排列, 填充了内部孔隙并改善了微观

形貌。综合上述试验,结果表明:BESP与WGP的结合有助于加快火山灰反应,形成更多的C-S-H等水化产物,从而提高混凝土的强度。当WGP掺量达到20%时,从图5(e)可以看出,水化产物C-S-H凝胶,数量减少了,结构内出现小裂缝,结构的致密性相较于10E10G较差,可见随着WGP掺量的逐渐增加,混凝土的结构致密性逐渐降低,水化产物数量减少,这一现象在图5(f)中可以明显看出,试件10E30G中出现了较大的裂缝,可能是由于,较多的废玻璃粉的掺入,导致过量玻璃粉无法完全参与火山灰反应,残留在浆体中形成“惰性颗粒”,削弱界面过渡区(ITZ)的粘结力。

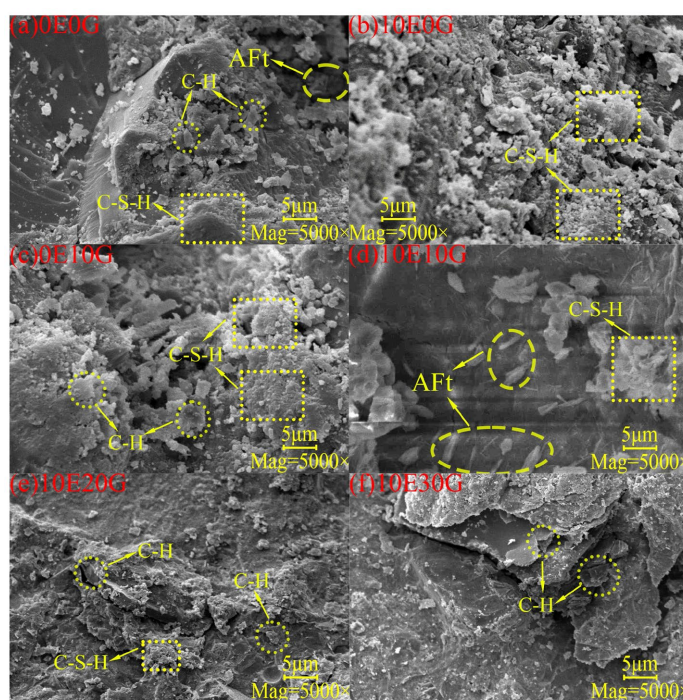


Figure 5. Microscopic morphology of specimens after 28 days of hydration

图5. 试件水化28天的微观形貌

4. BESP和WGP产生二次水化对微观结构的改善机理

BESP和WGP对高性能混凝土微观界面特性的改善如图6所示。图中可以看出,常规混凝土的水化反应主要是指硅酸三钙(C_3S)和硅酸二钙(C_2S)的水化反应,主要生成C-S-H凝胶和氢氧化钙(CH);以及铝酸三钙(C_3A)的水化反应,主要生成钙矾石(AFt或AFm),现有研究表明,混凝土水化期间的强度提升的主要原因是C-S-H凝胶,C-S-H凝胶由于其可塑性强,可以将混凝土内的水泥颗粒、AFt等相互联结起来,形成密集的空间网状结构。

BESP煅烧后主要成份是CaO, CaO的加入会产生额外的CH,并且会导致混凝土内部环境的pH值升高,加速 C_3S 和 C_2S 的水化,促进C-S-H凝胶和CH的生成;WGP的主要成分是 SiO_2 ,煅烧蛋壳粉的CaO提供碱性环境,加速玻璃粉中 SiO_2 的溶解,增强火山灰反应效率;同时,玻璃粉的 SiO_2 与蛋壳粉的CaO结合生成更多C-S-H凝胶,形成“钙-硅协同效应”,同时可以消耗混凝土内的CH,减少因CH碳化导致的体积收缩,减少裂缝的产生。图6中可以看出BESP和WGP由于其较小的粒径,可以填充结构的孔隙;同时蛋壳-玻璃高强混凝土中存在大量C-S-H,并且包裹着WGP、BESP、AFt、AFm和水泥颗粒,具有较强胶凝性的C-S-H将他们联结在一起,相比普通高强混凝土具有更紧密的空间结构,更小的界面孔隙。

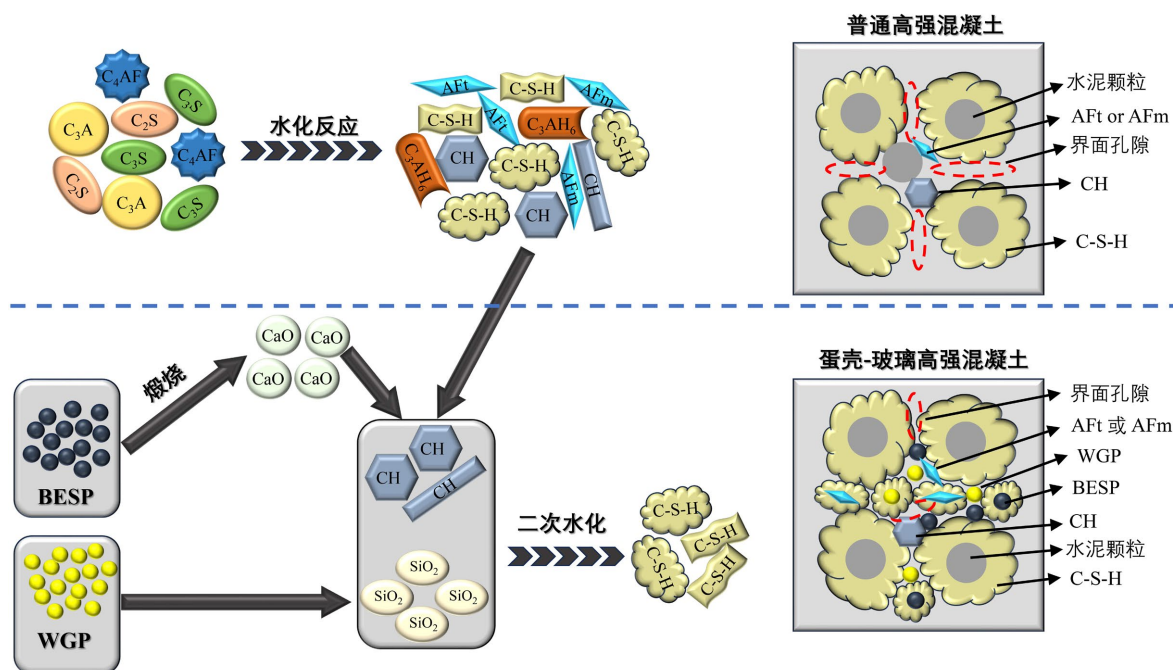


Figure 6. Improvement of micro interface characteristics of high performance concrete by ESP and WGP

图 6. ESP 和 WGP 对高性能混凝土微观界面特性的改善

综上所述, BESP 和 WGP 对高强混凝土的微观结构改善主要包括物理和化学两方面; 物理方面主要是由于 BESP 和 WGP 可以充当填充物, 填充结构的界面孔隙; 化学方面主要是由于, BESP 的掺入增强了 WGP 中 SiO_2 的火山灰反应速率, 发生二次水化反应, 增加了 C-S-H 凝胶的掺量, 使得混凝土内部结构更加密实。

5. 结论

本文采用了单掺 WGP、单掺 BESP 以及复掺 WGP 和 BESP 三种方式, 研究了 WGP 和 BESP 对高强混凝土的坍落度、抗压强度和劈裂抗拉强度以及 SEM 微观形貌, 对其工作性能、力学性能和微观结构进行了分析, 得到了以下主要结论:

1) 适量的 WGP 与 BESP 取代同质量水泥, 有效改善了 HSC 的坍落度, 坍落度值随着 WGP 和 BESP 替代率的增加而增强, 坍落度值在 39 mm~55 mm, 其中 10E30G 的坍落度增加最多, 提高了 41.03%。

2) WGP 或 BESP 含量为 10% 时, HSC 的抗压强度和劈裂抗拉强度得到显著提高。而 WGP 和 BESP 均为 10% 时, 抗压强度和劈裂抗拉强度均达到最佳, 分别为 98.95 MPa 和 8.2 MPa, 提高了 22.92% 与 20.41%。

3) BESP 加快了 WGP 的火山灰反应, 提高了水泥砂浆里的 C-S-H 含量, 使空间致密的排列更为紧密, 可以较好抑制微裂缝的发展, 并且 BESP 和 WGP 可以作为填充物, 填充结构孔隙, 改善混凝土的内部结构, 其中 10% WGP 和 10% BESP 复掺效果最佳。

参考文献

- [1] 董方园, 郑山锁, 宋明辰, 等. 高性能混凝土研究进展I: 原材料和配合比设计方法[J]. 材料导报, 2018, 32(1): 159-166.
- [2] Tao, J., Wang, X., Yao, B., Pei, W., Jiren, G., He, W., et al. (2025) Comparison of Rheology and Durability of Geopolymer and Portland Cement Concrete at the Same Strength Levels. *Construction and Building Materials*, 461, Article

139958. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.139958>
- [3] Zhang, P., Wang, L., Wei, H. and Wang, J. (2021) A Critical Review on Effect of Nanomaterials on Workability and Mechanical Properties of High-Performance Concrete. *Advances in Civil Engineering*, **2021**, Article 8827124. <https://doi.org/10.1155/2021/8827124>
 - [4] 李文涛, 王彩萍, 曹红红, 等. 粉煤灰-偏高岭土地质聚合物混凝土的性能研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2025, 46(1): 124-132.
 - [5] Mariaková, D., Mocová, K.A., Fořtová, K., Pavlů, T. and Hájek, P. (2021) Waste Glass Powder Reusability in High-Performance Concrete: Leaching Behavior and Ecotoxicity. *Materials*, **14**, Article 4476. <https://doi.org/10.3390/ma14164476>
 - [6] Shcherban', E.M., Stel'makh, S.A., Beskopylny, A.N., Mailyan, L.R., Meskhi, B., Varavka, V., *et al.* (2022) Enhanced Eco-Friendly Concrete Nano-Change with Eggshell Powder. *Applied Sciences*, **12**, Article 6606. <https://doi.org/10.3390/app12136606>
 - [7] Amin, M., Agwa, I.S., Mashaan, N., Mahmood, S. and Abd-Elrahman, M.H. (2023) Investigation of the Physical Mechanical Properties and Durability of Sustainable Ultra-High Performance Concrete with Recycled Waste Glass. *Sustainability*, **15**, Article 3085. <https://doi.org/10.3390/su15043085>
 - [8] 刘可欣, 崔燕, 罗岩, 等. 我国废玻璃回收行业发展现状及趋势分析[J]. 中国资源综合利用, 2023, 41(2): 109-112+120.
 - [9] Aliabdo, A.A., Abd Elmoaty, A.E.M. and Aboshama, A.Y. (2016) Utilization of Waste Glass Powder in the Production of Cement and Concrete. *Construction and Building Materials*, **124**, 866-877. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.016>
 - [10] Balasubramanian, B., Gopala Krishna, G.V.T., Saraswathy, V. and Srinivasan, K. (2021) Experimental Investigation on Concrete Partially Replaced with Waste Glass Powder and Waste E-Plastic. *Construction and Building Materials*, **278**, Article 122400. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122400>
 - [11] Bisht, K., Kabeer, K.I.S.A. and Ramana, P.V. (2020) Gainful Utilization of Waste Glass for Production of Sulphuric Acid Resistance Concrete. *Construction and Building Materials*, **235**, Article 117486. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117486>
 - [12] 刘数华, 王磊, 谢国帅, 等. 掺玻璃粉水泥净浆水化性能[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(1): 31-37.
 - [13] Soliman, N.A. and Tagnit-Hamou, A. (2016) Development of Ultra-High-Performance Concrete Using Glass Powder—Towards Ecofriendly Concrete. *Construction and Building Materials*, **125**, 600-612. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.073>
 - [14] Ke, G., Li, W., Li, R., Li, Y. and Wang, G. (2018) Mitigation Effect of Waste Glass Powders on Alkali-Silica Reaction (ASR) Expansion in Cementitious Composite. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, **12**, Article No. 6. <https://doi.org/10.1186/s40069-018-0299-7>
 - [15] Yang, S., Lu, J. and Poon, C.S. (2020) Recycling of Waste Glass in Dry-Mixed Concrete Blocks: Evaluation of Alkali-Silica Reaction (ASR) by Accelerated Laboratory Tests and Long-Term Field Monitoring. *Construction and Building Materials*, **262**, Article 120865. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120865>
 - [16] Her, S., Park, J., Li, P. and Bae, S. (2022) Feasibility Study on Utilization of Pulverized Eggshell Waste as an Alternative to Limestone in Raw Materials for Portland Cement Clinker Production. *Construction and Building Materials*, **324**, Article 126589. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126589>
 - [17] Tchinda Mabah, D.E., Tchakouté, H.K., Rüschler, C.H., Kamseu, E., Elimbi, A. and Leonelli, C. (2019) Design of Low Cost Semi-Crystalline Calcium Silicate from Biomass for the Improvement of the Mechanical and Microstructural Properties of Metakaolin-Based Geopolymer Cements. *Materials Chemistry and Physics*, **223**, 98-108. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2018.10.061>
 - [18] 胡春华, 马腾. 生物蛋壳粉对偏高岭土-水泥水化和强度的影响[J]. 混凝土, 2023(6): 95-99.
 - [19] Wang, N., Xia, Z., Amin, M.N., Ahmad, W., Khan, K., Althoey, F., *et al.* (2023) Sustainable Strategy of Eggshell Waste Usage in Cementitious Composites: An Integral Testing and Computational Study for Compressive Behavior in Aggressive Environment. *Construction and Building Materials*, **386**, Article 131536. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131536>
 - [20] Hakeem, I.Y., Amin, M., Agwa, I.S., Abd-Elrahman, M.H., Ibrahim, O.M.O. and Samy, M. (2023) Ultra-High-Performance Concrete Properties Containing Rice Straw Ash and Nano Eggshell Powder. *Case Studies in Construction Materials*, **19**, e02291. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02291>
 - [21] Tchakouté, H.K., Bewa, C.N., Kesseng, N.A., Rüschler, C.H., Kamseu, E., Andreola, F., *et al.* (2020) Production of Porous Poly(Phospho-Siloxo) Networks for Thermal Insulations Using Low-Value Calcium-Rich Wastes as Pore-Forming Agents. *Waste and Biomass Valorization*, **11**, 5857-5875. <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00846-z>

-
- [22] Moon, G.D., Oh, S., Jung, S.H. and Choi, Y.C. (2017) Effects of the Fineness of Limestone Powder and Cement on the Hydration and Strength Development of PLC Concrete. *Construction and Building Materials*, **135**, 129-136. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.189>
- [23] Zaid, O., Zamir Hashmi, S.R., El Ouni, M.H., Martínez-García, R., de Prado-Gil, J. and Yousef, S.E.A.S. (2023) Experimental and Analytical Study of Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete Modified with Egg Shell Powder and Nano-Silica. *Journal of Materials Research and Technology*, **24**, 7162-7188. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.04.240>
- [24] Cao, Y.M., Sun, J. and Yu, D.H. (2001) Preparation and Properties of Nano- Al_2O_3 Particles/Polyester/Epoxy Resin Ternary Composites. *Journal of Applied Polymer Science*, **83**, 70-77. <https://doi.org/10.1002/app.10020>
- [25] 刘春阳, 徐佳, 于舰, 等. 玻璃混凝土基本性能试验研究[J]. 混凝土, 2021(12): 70-73.
- [26] Rasid, N.N.A., A. Khalid, N.H., Mohamed, A., Mohd.Sam, A.R., Majid, Z.A. and Huseien, G.F. (2023) Ground Palm Oil Fuel Ash and Calcined Eggshell Powder as SiO_2 -CaO Based Accelerator in Green Concrete. *Journal of Building Engineering*, **65**, Article 105617. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105617>
- [27] Chu, S.H., Li, L., Shen, P.L., Lu, J.X. and Poon, C.S. (2022) Recycling of Waste Glass Powder as Paste Replacement in Green UHPFRC. *Construction and Building Materials*, **316**, Article 125719. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125719>
- [28] 胡德鑫, 单玉玺, 王海亮, 等. 颗粒负载氧化石墨烯复合水泥基材料的微观结构及自修复性能[J]. 复合材料学报, 2024, 41(6): 3079-3091.
- [29] Tho-In, T., Sata, V., Boonserm, K. and Chindapasirt, P. (2018) Compressive Strength and Microstructure Analysis of Geopolymer Paste Using Waste Glass Powder and Fly Ash. *Journal of Cleaner Production*, **172**, 2892-2898. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.125>