

掺粉煤灰-玻璃粉透水混凝土物理及力学性能研究

高理想¹, 张海燕²

(1. 雄安宣武医院, 雄安新区 070001; 2. 石家庄市政设计研究院有限责任公司, 石家庄 050000)

摘要: 针对透水混凝土因其多孔结构而存在力学强度不足及使用寿命有限的问题。采用粉煤灰 (FA)、玻璃粉 (GP) 部分取代水泥制备透水混凝土, 系统分析了 FA、GP 掺量对透水混凝土的密度、连通孔隙率、透水系数、抗压强度、弯拉强度的影响规律, 并采用 SEM 对微观形貌变化进行了观测。结果表明: 随 FA、GP 掺量增加, 透水混凝土的密度逐渐上升, 连通孔隙率、透水系数相应下降; FA 和 GP 的早期龄期火山灰效应弱, 在长龄期水化过程中生成更多 C-S-H 凝胶, 显著增强了力学强度, 90 d 抗压与弯拉强度随 FA 掺量增加先增大后减小 (15% 掺量最佳)、随 GP 掺量增加而增大, 掺 GP 增强效果优于 FA; 综合分析表明, FA、GP 可在仅小幅度降低透水性能的前提下, 有效提升透水混凝土力学强度。研究结果可为透水混凝土的配合比优化提供理论参考。

关键词: 粉煤灰; 玻璃粉; 透水混凝土; 透水能力; 力学强度; 微观形貌

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2026) 03-0013-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.03.003

Study on the Physical and Mechanical Properties of Permeable Concrete with Fly Ash and Glass Powder Admixtures

GAO Lixiang¹, ZHANG Haiyan²

(1. Xiong'an Xuanwu Hospital, Xiong'an New Area 070001, China;

2. Shijiazhuang Municipal Design and Research Institute Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: To address the issues of insufficient mechanical strength and limited service life inherent in permeable concrete due to its porous structure, fly ash (FA) and glass powder (GP) were partially substituted for cement in its preparation. A systematic analysis was conducted on the influence of FA and GP content on the density, connected porosity, permeability coefficient, compressive strength, and flexural strength of the permeable concrete. Additionally, SEM was employed to observe changes in microstructure morphology. Results indicate that as FA and GP content increases, the density of permeable concrete gradually rises while connected porosity and permeability coefficient correspondingly decrease. The early-age pozzolanic effect of FA and GP was weak, but during the long-age hydration process, increased C-S-H gel formation significantly enhanced mechanical strength. At 90 days, compressive and flexural strengths first increased then decreased with increasing FA content (with 15% being optimal), while GP content increases both compressive and flexural strength, with GP exhibiting superior strengthening effects compared to FA. Comprehensive analysis indicates that FA and GP can effectively enhance the mechanical strength of

作者简介: 高理想 (1993—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向: 建筑工程管理。

通信作者: 张海燕 (1985—), 女, 本科, 高级工程师, 研究方向: 土木工程。

收稿日期: 2026-01-07

材料科学

permeable concrete with only a slight reduction in permeability. These findings provide theoretical guidance for optimizing the mix design of permeable concrete.

Key words: fly ash; glass powder; permeable concrete; water permeability; mechanical strength; microscopic morphology

0 引言

透水混凝土是依靠大颗粒骨料与水泥胶结形成的多孔结构，用作道路铺装时能够促进雨水快速下渗，助力局部水循环^[1]。相比传统排水系统，透水混凝土具有显著的经济与环境效益，因此得到广泛应用。然而，多孔结构也导致其存在承载能力低、使用寿命短等缺陷，制约了其在高负荷道路的应用^[2]。透水混凝土主要依赖水泥作为胶凝材料，水泥行业是我国碳排放的重要来源之一，年碳排放量约占全国总量的 10%，因此，开发可替代水泥且能提升透水混凝土力学性能的矿物掺合料，对服务国家实现双碳目标具有现实意义。

部分学者开展了粉煤灰、玻璃粉在混凝土中的应用研究。张兴龙^[3]、韩长君等^[4] 基于力学试验和微观形貌观测获得了粉煤灰对混凝土性能影响的演变规律，并建立了粉煤灰混凝土抗压强度预测模型；李方等^[5] 分析了玻璃粉粒径对砂浆性能的影响，掺粗粒径玻璃粉砂浆强度低且易引起碱硅反应，细粒径玻璃粉火山灰活性强，提高抗压强度显著；杨震樱等^[6] 研究了玻璃粉对 UHPC 性能的影响，发现掺入玻璃粉可改善 UHPC 流动性，降低早期力学强度，提高后期力学强度，并可细化微观结构，降低结构孔隙率；刘春阳等^[7] 研究表明，掺入玻璃粉会降低混凝土强度，复掺粉煤灰可缓解强度降低趋势；李德成等^[8] 研究了掺玻璃细骨料、玻璃粉对混凝土力学及碱骨料反应的影响，结果表明玻璃粉可抑制玻璃砂引起的碱骨料反应，且对混凝土后期力学强度提升显著；梁毅等^[9] 采用正交试验研究了玻璃粉等因素对轻荷载透水混凝土路面力学及抗冻性能的影响，得出了玻璃粉最佳掺量为 20%；李琼等^[10] 进行了废弃玻璃粉对透水混凝土影响试验，揭示了玻璃粉水化机理，发现掺 20% 废弃玻璃粉时透水混凝土力学性能最佳，强度达到 C25，透水系数达到 1.9mm/s；赵志鹏^[11] 研究了 35、15、5 μm 粒径玻璃粉对透水混凝土力学性能的影响，结果发现 35、

15 μm 粒径玻璃粉会降低透水及力学性能，掺 15% 的 5 μm 粒径玻璃粉混凝土力学及耐腐蚀性能提升。掺入粉煤灰对提升透水混凝土性能具有积极作用^[12]，周玉玲等^[13]、白小龙等^[14] 研究了粉煤灰对透水混凝土孔隙率影响，发现掺入粉煤灰会降低孔隙率，高透水性混凝土不宜掺入粉煤灰；夏群等^[15] 展开了粉煤灰对直通型透水混凝土抗冻性能影响试验，结果表明 10% 粉煤灰掺量可提高透水混凝土抗盐冻损伤。

目前，关于玻璃粉、粉煤灰在透水混凝土中的应用研究仍相对有限，且现有透水混凝土普遍存在强度等级偏低的问题。为此，以粉煤灰和玻璃粉替代水泥为变量，系统研究不同粉煤灰、玻璃粉掺量对透水混凝土力学性能与透水能力的影响规律，旨在制备出兼具较高力学强度和良好透水性能的透水混凝土。

1 材料与方法

1.1 原材料

自制玻璃粉（GP），将回收废弃玻璃清洗干净自然晾干，经机械破碎，研磨机加工 30 min，筛除粒径大于 100 μm 的颗粒，GP 中值粒径为 26 μm，比表面积为 382 m²/kg，密度为 2.3 g/cm³；采用 F 类粉煤灰（FA），I 级，比表面积为 415 m²/kg，密度为 2.1 g/cm³；采用 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥，比表面积为 326 m²/kg，密度为 3.2 g/cm³。水泥、FA、GP 化学成分见表 1。石灰岩碎石粗骨料，粒径为 9.5~19.0 mm。拌合水为自来水。

表 1 水泥、FA、GP 化学成分

Table 1 Chemical composition of cement, FA, and GP /%							
化学成分	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O
水泥	63.2	18.2	4.9	3.6	1.7	2.6	0.9
FA	2.1	62.5	23.7	5.8	0.6	1.0	3.5
GP	8.6	71.4	1.6	0.1	4.3	0.1	0.1

1.2 试验方案

制备 9 组透水混凝土试件，配合比设计见表 2，每组制备 3 个试件。基准组仅掺水泥，记为 P00，

FA 和 GP 分别以 5%、10%、15%、20% 的质量分数替代水泥，掺 FA 的试件记为 F05、F10、F15、F20，掺 GP 的试件记为 G5、G10、G15、G20，所有试件的目标连通孔隙率均不小于 10%，水胶比恒定为 0.35。

表 2 透水混凝土配合比设计
Table 2 Design of permeable concrete mix proportion / (kg/m³)

编号	水泥	FA	GP	碎石	水
P00	360			1 640	126
F05	342	18		1 640	126
F10	324	36		1 640	126
F15	306	54		1 640	126
F20	288	72		1 640	126
G05	342		18	1 640	126
G10	324		36	1 640	126
G15	306		54	1 640	126
G20	288		72	1 640	126

采用倾斜轴便携式搅拌机进行透水混凝土拌制，搅拌机转速为 30 r/min。先将碎石和胶凝材料干料搅拌 1 min；再加入 2/3 的拌合水，继续搅拌 2 min；然后加入剩余所有水，搅拌 3 min 后浇筑试件。试件脱模后放置标准养护室养护。

1.3 试验方法

连通孔隙率、密度、透水系数试验试件养护龄期为 28 d，均采用为 150 mm×150 mm×150 mm 立方体试件；连通孔隙率、透水系数测试方法按照 CJJ/T 135—2009《透水水泥混凝土路面技术规程》（2023 年版）中附录 A、附录 B 方法进行。

开展 7、28、90 d 龄期透水混凝土抗压强度、弯拉强度试验，试验方法依据 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》进行。抗压强度采用为 150 mm×150 mm×150 mm 立方体试件，弯拉强度采用 150 mm×150 mm×550 mm 棱柱体试件，采用三分加载法。

从 90 d 龄期力学测试后的试件中收集小块混凝土，室温条件下干燥，采用 SEM 仪器进行微观观测分析。

2 结果与讨论

2.1 物理学性能

由图 1（a）可知，透水混凝土的密度低于普通混凝土，基准组 P00 的密度为 1 967 kg/m³，与基准

组 P00 相比，掺入 FA、GP 的透水混凝土密度均有所提高，且随掺量增加密度逐渐增大。与 P00 相比，FA 掺量为 5%、10%、15%、20% 的试件密度分别提升了 1.9%、4.0%、8.5%、14.3%，GP 掺量为 5%、10%、15%、20% 的试件密度分别提升了 2.4%、5.3%、9.6%、16.3%；可见掺入 GP 提高混凝土的密度略高于掺 FA，FA、GP 的颗粒粒径均小于水泥颗粒，部分替代水泥后可改善胶凝材料的和易性与黏附性，增加了骨料与水泥浆体之间的接触面积，从而提高了透水混凝土试件的硬化密度。

由图 1（b）可知，基准组 P00 的连通孔隙率为 16.5%，掺入 FA、GP 会降低透水混凝土的连通孔隙率，且随 FA、GP 掺量增加连通孔隙率呈减小趋势。与 P00 相比，FA 掺量为 5%、10%、15%、20% 的试件连通孔隙率分别降低了 1.2%、2.4%、4.8%、7.9%，GP 掺量为 5%、10%、15%、20% 的试件连通孔隙率分别降低了 1.8%、3.0%、5.5%、9.1%；这源于掺入 FA、GP 增强了水泥的流动性能，使得水泥浆体在模具中易向下流动而封闭了下部孔隙，导致连通孔隙率降低。FA、GP 掺量均为 20% 时，透水混凝土连通孔隙率分别为 15.2%、15.0%，根据 CJJ/T 135—2009《透水水泥混凝土路面技术规程》（2023 年版）透水混凝土连通孔隙率不得小于 10%，各配合比试件的连通孔隙率均满足规范要求。

由图 1（c）可知，基准组 P00 的的透水系数为 5.89 mm/s，同样掺入 FA、GP 会降低透水混凝土的透水系数，且随 FA、GP 掺量增加透水系数呈减小趋势。与 P00 相比，FA 掺量为 5%、10%、15%、20% 的试件透水系数分别降低了 2.4%、6.5%、10.7%、15.4%，GP 掺量为 5%、10%、15%、20% 的试件透水系数分别降低了 3.1%、6.8%、11.2%、16.5%。透水系数的下降归因于 FA、GP 提高了水泥浆体的流动性，虽然混合料的工作性得到改善，但水泥浆体在重力作用下更易于向下流动，未能充分包裹粗骨料，而是聚集在模具底部，堵塞了部分孔隙，从而降低了透水性；此外，聚集在下部表面的水泥浆体堵塞了该区域的大部分孔隙，也是导致连通孔隙降低的主要原因。FA、GP 掺量均为 20% 时，透水混凝土透水系数分别为 4.98、4.92 mm/s，根据 CJJ/T 135—2009《透水水泥混凝土路面技术规程》中透水混凝土透水

材料科学

系数最小值为 0.5 mm/s, 各配合比试件的透水系数远大于规范限值。

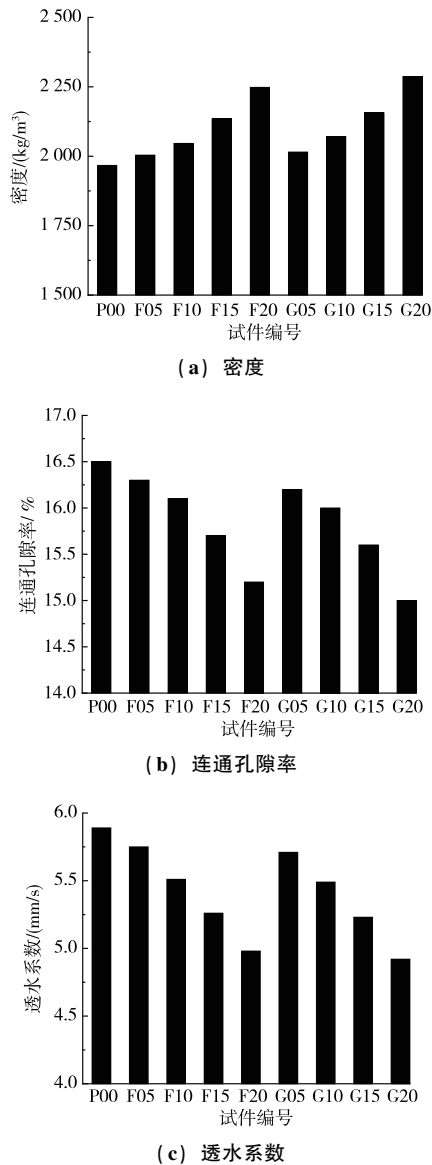


图1 不同FA、GP掺量透水混凝土物理学性能
Fig. 1 Physical properties of permeable concrete with different FA and GP content

2.2 抗压强度

由图2可知, 基准组P00试件, 7、28、90 d龄期抗压强度分别为22.4、27.8、28.6 MPa, 掺入FA的各组试件7、28 d抗压强度均低于基准组P00试件。与P00相比, FA掺量为5%、10%、15%、20%时, 7 d抗压强度分别降低了1.3%、4.9%、9.8%、17.4%, 28 d抗压强度分别降低了9.4%、7.6%、5.0%、7.9%, 90 d抗压强度分别增长了2.8%、

6.6%、11.2%、3.5%; 可见, 7 d抗压强度随FA掺量增加而减小, 28 d抗压强度随FA掺量增加先增大后减小, 90 d抗压强度同样随FA掺量增加先增大后减小, 但抗压强度均已超过基准组P00试件, FA掺量为15%时抗压强度最大, 达到31.8 MPa。这是因为FA在早期火山灰活性弱, 其在后期(90 d)完成水化过程, 并在水泥水化氢氧化钙激发下具有更高的火山灰活性, FA含有的活性二氧化硅与氢氧化钙反应生成更多的C-S-H凝胶, 从而提升了混凝土的抗压强度。

随GP掺量增加, 透水混凝土7、28 d抗压强度呈先增大后减小趋势, 90 d抗压强度呈增大趋势; 7 d龄期, GP掺量为5%~15%的试件抗压强度均高于基准组, 20%掺量试件小于基准组, 而28、90 d龄期, 各组掺GP的混凝土试件抗压强度均高于基准组。与P00相比, GP掺量为5%、10%、15%、20%时, 7 d抗压强度分别增长了1.8%、4.5%、0.9%、-4.9%, 28 d抗压强度分别增长了3.6%、6.8%、12.2%、10.8%, 90 d抗压强度分别增长了5.2%、11.2%、20.6%、35.3%; 可见, GP掺量不超过15%时, 对透水混凝土7 d抗压强度具有增强作用, 至28 d GP掺量为20%时已具有增强作用, 至90 d增强作用显著提高, 掺量为20%的试件抗压强度最大, 达到38.7 MPa。这表明, 小掺量GP时对混凝土早期强度具有增强作用, 这与掺FA有所不同, 但随着养护龄期增长, 水泥水化反应程度提高, GP的火山灰效应逐渐显现, 通过与水泥水化产物反应形成新的C-S-H凝胶而增强抗压强度; 另外, FA、GP具有集料填充效应, 可填充水泥凝胶内部结构的微孔隙, 使水泥、碎石胶结体形成更加致密的微观结构, 同样可提高抗压强度。

综上, 由于FA早期火山灰活性低, 掺入FA会降低透水混凝土7 d抗压强度, 90 d时FA活性充分释放, 在填充效应和火山灰效应的双重作用下, 有效改善了骨料与胶凝材料之间界面过渡区的强度, 进而提高混凝土的抗压强度, FA的最佳掺量宜为15%。相比FA, GP对透水混凝土抗压强度具有更优的增强效应, 增加养护龄期同样可充分发挥其增强效应, 90 d龄期, 掺20% GP增强效应最大, 抗压强度增幅约为掺15% FA的3倍。掺10%~15% FA及

掺 5%~20% GP 透水混凝土的 90 d 抗压强度可满足 CJJ/T 135—2009 中 C30 强度等级要求; 由于 FA、GP 早期火山灰活性低, 建议以 90 d 抗压强度作为确定其力学强度等级。

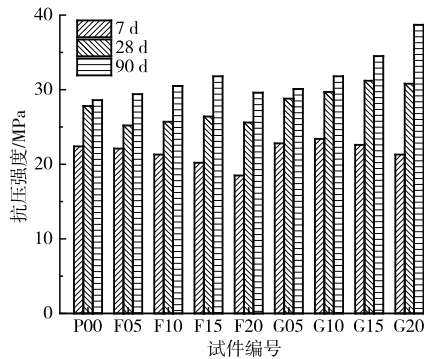


图 2 不同 FA、GP 掺量透水混凝土抗压强度
Fig. 2 Compressive strength of permeable concrete with different FA and GP content

2.3 弯拉强度

由图 3 可知, 基准组 P00 试件, 7、28、90 d 龄期弯拉强度分别为 2.31、2.69、2.94 MPa, 掺入 FA 的各组分试件 7、28 d 弯拉强度均低于基准组 P00 试件, 90 d 弯拉强度高于基准组试件。与 P00 相比, FA 掺量为 5%、10%、15%、20% 时, 7 d 弯拉强度分别降低了 3.9%、8.7%、14.3%、19.0%, 28 d 弯拉强度分别降低了 12.6%、10.4%、13.4%、19.7%, 90 d 弯拉强度分别增长了 4.8%、7.5%、13.9%、6.8%; 可见, 7 d 弯拉强度随 FA 掺量增加而减小, 28、90 d 弯拉强度随 FA 掺量增加先增大后减小, 28 d 时掺 10%FA 抗压强度最大, 90 d 时掺量为 15%FA 抗压强度最大, 达到 3.35 MPa。可见, 掺入 FA 同样会降低早期弯拉强度, 随养护龄期增长, 掺 FA 的混凝土弯拉强度逐渐增大; 28 d 弯拉强度降幅高于抗压强度, 这表明 FA 对透水混凝土早龄期弯拉强度贡献较小, 随养护龄期至 90 d, 弯拉强度增幅超过抗压强度, 故掺 FA 的透水混凝土养护龄期不宜少于 90 d。

随 GP 掺量增加, 透水混凝土 7 d 弯拉强度呈减小趋势, 28、90 d 弯拉强度呈增大趋势; 与 P00 相比, GP 掺量为 5%、10%、15%、20% 时, 7 d 弯拉强度分别降低了 2.2%、5.6%、9.5%、14.3%, 28 d 弯拉强度分别增长了 0.7%、3.3%、5.6%、9.5%,

90 d 弯拉强度分别增长了 6.5%、11.2%、17.7%、24.8%; 可见, 掺入 GP 削弱透水混凝土 7 d 弯拉强度, 至 28、90 d 时, 对弯拉强度具有增强作用, 90 d 弯拉强度增幅约为 28 d 三倍, 20%GP 掺量时弯拉强度达到 3.67 MPa。

与抗压强度类似, FA、GP 掺合料在早期龄期会削弱透水混凝土的弯拉强度, 但随着养护龄期的延长, 其积极作用逐渐显现; 在 90 d 龄期时, FA、GP 的细颗粒特性以及火山灰反应特性促进水泥基体中形成额外的胶凝材料, 其含有的二氧化硅和氧化铝等矿物, 能加速混凝土基体中水化硅酸钙 (C-S-H) 等凝胶的形成, 这有助于增强透水混凝土的微观结构, 提高骨料之间的黏结强度, 从而提高了弯拉强度。掺 5%~15%FA 及掺 5%~20%GP 透水混凝土的 90 d 弯拉强度分别为 3.35、3.67 MPa, 可满足 CJJ/T 135—2009 中 C30 强度等级要求。

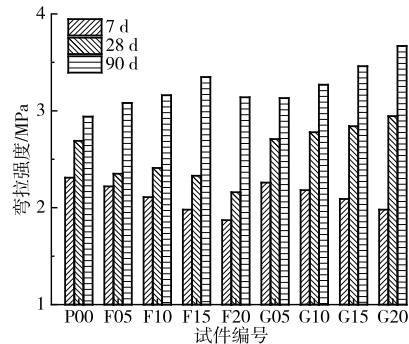


图 3 不同 FA、GP 掺量透水混凝土弯拉强度
Fig. 3 Flexural tensile strength of permeable concrete with different FA and GP content

2.4 微观形貌

取基准组 P00 试件, 以及力学强度最高的 F15、G20 试件进行微观形貌分析, 结果如图 4 所示。所有试件均可观察到 C-S-H 凝胶和水化氢氧化钙产物, 还观察到白色针棒状的钙矾石痕迹以及结构微裂缝。与基准组 P00 试件相比, 掺入 FA 和 GP 后水泥浆体的致密程度显著增加, F15、G20 试件观察到了更加致密的浆体结构; 这是由于 FA 和 GP 的粒径都比水泥小, 将这两种矿物添加到水泥浆体中会增加浆体的密度; 由于混凝土基体中的孔隙被填充, 导致 F15、G20 试件的连通孔隙率略有降低, 但混凝土的抗压强度、弯拉强度得到显著增强。未掺 FA 和 GP

材料科学

的基准组 P00 试件观察到最多的孔隙结构存在, 而 F15、G20 试件的内部结构更为致密, 主要原因是 FA 和 GP 通过微集料填充效应, 有效地填充了透水混凝土中最薄弱区域—骨料与水泥结合的界面过渡区。

此外, FA 和 GP 在水泥水化产物氢氧化钙激发下表现出高效的火山灰活性, 与其进行二次水化反应生成了大量 C-S-H 凝胶, 使混合物更加致密、坚固。C-S-H 凝胶填充了透水混凝土骨料的界面过渡区中的孔隙, 从而提高了水泥与骨料之间的黏结强度。因此, 掺入 FA、GP 可提高水泥水化产物结构的完整性和稳定性, 由此极大增强了混凝土的长期力学性能和耐久性。

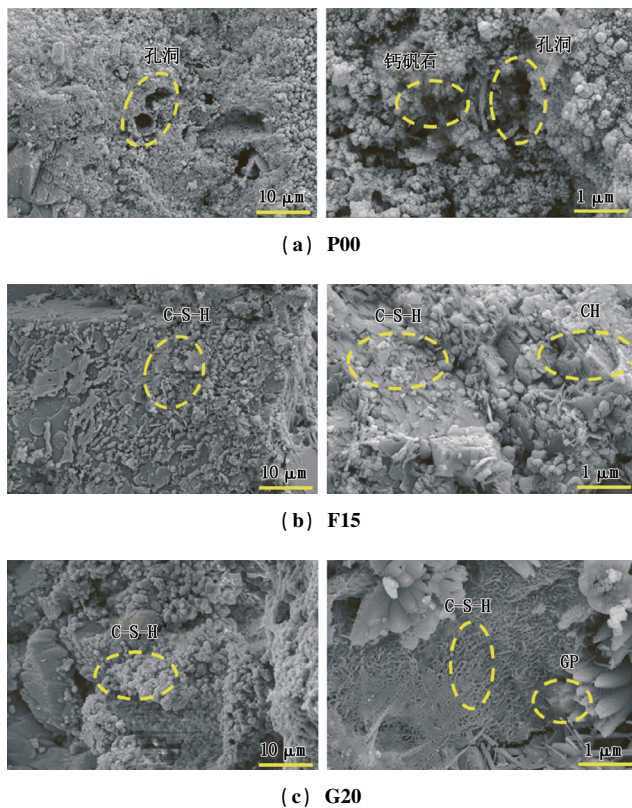


图4 P00、F15、G20 试件微观形貌

Fig. 4 Microscopic morphology of P00、F15 and G20 test specimens

3 结论

为确定 FA、GP 对透水混凝土物理学性能及力学性能的影响, 研究了 FA、GP 分别替代水泥对透水混凝土密度、连通孔隙率、透水系数、抗压强度、弯拉强度的影响, 并采用 SEM 分析了 FA、GP 对混凝土微观结构影响, 得出以下结论:

(1) FA、GP 作为矿物掺合料, 可改善拌合物的和易性能, 填充透水混凝土基体中薄弱界面; 随 FA、GP 掺量增加, 透水混凝土密度呈增大趋势, 连通孔隙率、透水系数呈减小趋势, GP 对透水混凝土物理学性能的影响略高于 FA; FA、GP 掺量均为 20% 时, 连通孔隙率分别为 15.2%、15.0%, 透水系数分别为 5.0、4.9 mm/s。

(2) 掺入 FA 会降低透水混凝土早龄期 (7、28 d) 抗压强度, 在长龄期 (90 d) 抗压强度随 FA 掺量增加先增大后减小, 15% 掺量时抗压强度增幅最大, 为 11.2%; GP 掺量不高于 15% 时对 7 d 抗压强度具有增强作用, 28 d 抗压强度随 GP 掺量增加先增大后减小, 90 d 抗压强度随 GP 掺量增加而增大, 掺 20% GP 抗压强度增幅为 35.3%; 掺 10%~15% FA 及掺 5%~20% GP 透水混凝土的 90 d 抗压强度达到 C30 强度等级要求。

(3) 掺入 FA、GP 会降低透水混凝土早龄期 (7d) 弯拉强度, 在长龄期 (90 d) 弯拉强度随 FA 掺量增加先增大后减小, 随 GP 掺量增加而增大, 掺 15% FA 时弯拉强度增幅最大, 为 13.9%, 掺 20% GP 时弯拉强度增幅为 24.8%; 掺 5%~15% FA 及掺 5%~20% GP 透水混凝土的 90d 弯拉强度达到 C30 强度等级要求。

(4) 掺入 FA、GP 的水化反应进程在 90 d 时充分进行, 二者可增强基体的密实程度, 使连通孔隙率略有降低, 与水泥进行二次水化反应生成更多的 C-S-H 凝胶, 提高了水泥与骨料之间的黏结强度; 综合分析认为, 掺入 FA、GP 对透水混凝土的透水能力影响较小, 但可显著改善其力学强度, 可用于替代水泥制备透水混凝土。

参考文献

- [1] 谢李, 严超群. 改性橡胶透水混凝土老化寿命精准预测模型构建 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (2): 11-16.
- [2] 周晋军, 黄天意, 刘家宏, 等. 我国透水路面发展研究综述 [J]. 水利水电科技进展, 2024, 44 (4): 78-88.
- [3] 张兴龙. 高掺量粉煤灰混凝土力学性能试验研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (2): 49-53.
- [4] 韩长君, 周海龙, 陈岩, 等. 粉煤灰对高强混凝土力学性能及孔隙结构影响 [J]. 排灌机械工程学报, 2024, 42 (4): 410-417.

(下转第 25 页)

作用效果, 吸声性能有所降低。适当的孔隙率和连通孔占比对 RAFC 的吸声性能有利。

(3) RAFC 的隔声性能与材料密度呈正比, 密度越大隔声性能越好; 纤维的掺入使 RAFC 内的闭孔占比提高, 隔声性能也有所提升。

参 考 文 献

- [1] 李欣. 再生微粉泡沫混凝土制备与基本性能 [D]. 北京: 北京建筑大学, 2023.
- [2] 刘森. 再生粉体泡沫混凝土的性能研究 [D]. 扬州: 扬州大学, 2021.
- [3] 叶涛华, 周子晗, 肖建庄, 等. 碳化养护对含再生微粉泡沫混凝土性能的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2025, 44 (3): 872-882.
- [4] 罗建林. 再生细骨料加气混凝土的试验研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
- [5] 杨帆, 张喆, 姜维, 等. 建筑垃圾再生泡沫混凝土性能及其成孔机理研究 [J]. 新型建筑材料, 2022 (8): 112-115, 171.
- [6] KIM H, HONG J, PYO S. Acoustic characteristics of sound absorbable high performance concrete [J]. Applied Acoustics, 2018, 138: 171-178.
- [7] 葛亚雄, 陈怡, 杜兴英, 等. 丁腈橡胶粉以及铝粉对发泡混凝土孔隙率以及吸声性能的影响 [J]. 贵州师范大学学报 (自然科学版), 2019, 37 (5): 70-76, 90.
- [8] 付海, 葛亚雄, 陈怡, 等. 吸水率对发泡混凝土吸声性能的影响 [J]. 贵州师范大学学报 (自然科学版), 2019, 37 (4): 38-43.
- [9] 邓友生, 段邦政, 吴鹏, 等. 泡沫混凝土声屏障吸声特性研究 [J]. 公路交通科技, 2017, 34 (3): 144-151.
- [10] 谢辉, 刘俊超, 侯淑婧. 碱矿渣泡沫混凝土的吸声性能试验研究 [J]. 硅酸盐通报, 2017, 36 (8): 2775-2780.
- [11] 陈立庚. 废旧轮胎橡胶颗粒/水泥复合声屏障研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [12] 吴丽曼, 孙勇, 张晓莉, 等. 粉煤灰对超轻发泡混凝土孔结构及吸声性能的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2014, 33 (9): 2387-2392.
- [13] 张文华, 杨冯皓, 吕毓静, 等. 泡沫混凝土的稳泡措施和机理研究进展 [J]. 硅酸盐学报, 2021, 49 (10): 2266-2275.
- [14] 邓友生, 段邦政, 李玉博, 等. 干湿态泡沫混凝土吸声系数研究 [J]. 混凝土, 2016 (9): 1-5.
- [15] ZHANG Z, PROVIS J, REID A, et al. Mechanical, thermal insulation, thermal resistance and acoustic absorption properties of geopolymer foam concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 2015, 62: 97-105.
- [5] 李方, 杨健, 李粒琿. 废玻璃粉作为辅助胶凝材料对砂浆性能影响及作用机理 [J]. 硅酸盐通报, 2022, 41 (9): 3208-3218.
- [6] 杨震樱, 周长顺. 含玻璃粉超高性能混凝土力学性能及微观结构研究 [J]. 硅酸盐通报, 2021, 40 (12): 3956-3963.
- [7] 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.
- [8] 李德成, 陈宣东, 黄达. 玻璃粉对玻璃骨料混凝土力学性能和 ASR 影响的研究 [J]. 混凝土, 2021 (3): 79-82.
- [9] 梁毅, 杨卿松, 林书立, 等. 橡胶-玻璃粉改性透水路面强度和冻融性分析 [J]. 科学技术与工程, 2024, 24 (17): 7305-7311.
- [10] 李琼, 安宝峰, 苏睿, 等. 废玻璃粉透水混凝土物理性能及复合胶凝体系微观机理研究 [J]. 材料导报, 2025, 39 (8): 127-137.
- [11] 赵志鹏. 废弃玻璃粉透水混凝土力学及抗硫酸盐侵蚀性能研究 [D]. 吉林: 东北电力大学, 2023.
- [12] 张亚鹏, 张凤娇, 曹佳伟, 等. 洗选煤矸石透水混凝土的制备及其性能研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (6): 1-5.
- [13] 周玉玲, 明廷臻, 万美南. 透水混凝土强度及透水性能影响因素研究 [J]. 中国测试, 2021, 47 (10): 155-160.
- [14] 白小龙, 魏亚龙, 毕红卫, 等. 硅灰-矿渣粉改性多孔透水混凝土力学及抗冻性能研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2026, 40 (2): 35-41.
- [15] 夏群, 赵岑, 朱平华, 等. 粉煤灰掺量对直通孔型再生透水混凝土抗盐冻及透水性能的影响 [J]. 混凝土, 2024 (10): 95-99, 110.