

三元矿物材料 - 玻璃纤维对地聚合物力学性能影响分析

尚 竞¹, 陶文彬², 汪 伟¹, 谢 涛¹

- (1. 江苏省人民医院 (南京医科大学第一附属医院) 总务基建处, 南京 210029;
2. 东南大学 土木工程学院, 南京 210000)

摘要: 为改善粉煤灰基地聚合物早期强度发展缓慢、长期强度发展不足的问题, 采用矿渣粉与硅灰部分替代粉煤灰, 探究三元矿物材料组合对地聚合物抗压强度、劈裂抗拉强度及抗折强度的影响规律, 并进一步分析玻璃纤维对最优矿物组合试件力学性能的增强效应。结果表明: 随粉煤灰掺量降低与矿渣粉掺量增加, 地聚合物力学强度呈先增后减趋势, 矿渣粉有助于促进早期强度发展, 掺 40% 粉煤灰、60% 矿渣粉性能最佳; 以 10% 硅灰替代粉煤灰可进一步提升力学性能, 掺 10% 硅灰、30% 粉煤灰、60% 矿渣粉的试件抗压、劈裂抗拉与抗折强度分别提高 13.5%、10.4% 和 11.4%; 随玻璃纤维掺量增加, 地聚合物抗压、劈裂抗拉与抗折强度亦呈先增后减趋势, 纤维掺量为 1.0% 时增强效果最佳, 分别提升 9.4%、17.6% 和 16.0%。研究可为高强度地聚合物的材料设计提供参考。

关键词: 粉煤灰; 矿渣粉; 硅灰; 玻璃纤维; 地聚合物; 力学强度

中图分类号: TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2026) 02-0054-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.02.009

Analysis of the Effects of Ternary Mineral Materials and Glass Fibers on the Mechanical Properties of Geopolymers

SHANG Jing¹, TAO Wenbin², WANG Wei¹, XIE Tao¹

- (1. Jiangsu Province Hospital (First Affiliated Hospital with Nanjing Medical University) General Affairs and Infrastructure Department, Nanjing 210029, China; 2. Southeast University, Nanjing 210000, China)

Abstract: To address the slow early strength development and inadequate long-term strength of fly ash-based geopolymers, slag powder and silica fume were employed to partially replace fly ash, investigating the influence of a ternary mineral material combination on the compressive strength, splitting tensile strength, and flexural strength of the geopolymer. Furthermore, the enhancing effect of glass fibers on the mechanical properties of the optimal mineral composition was analyzed. The results indicate that with the reduction of fly ash content and the increase of slag powder content, the mechanical strength of the geopolymer first increased and then decreased. Slag powder contributed to promoting early strength development, with the composition containing 40% fly ash and 60% slag powder exhibiting the best performance. Substituting fly ash with 10% silica fume further improved the mechanical properties, increasing the compressive strength, splitting tensile strength, and flexural

作者简介: 尚 竞 (1980—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向: 土木工程建筑。

通信作者: 陶文彬 (1987—), 男, 博士研究生, 助理研究员, 研究方向: 基础设施的全寿命周期管控、智慧建造与运维。

收稿日期: 2025-11-13

strength of the mixture containing 10% silica fume, 30% fly ash, and 60% slag powder by 13.5%, 10.4%, and 11.4%, respectively. With the increase in glass fiber content, the compressive, splitting tensile, and flexural strengths also showed an initial increase followed by a decrease, with the optimal enhancement observed at a fiber content of 1.0%, resulting in improvements of 9.4%, 17.6%, and 16.0%, respectively. This study can provide a reference for the preparation of high-performance geopolymer materials.

Key words: fly ash; slag powder; silica fume; glass fiber; geopolymer; mechanical strength

0 引言

碱激发粉煤灰基地聚合物是一种具有潜力的水泥混凝土替代材料,但其在常温碱性环境中反应动力学缓慢,导致早期强度发展不足;同时,受限于反应程度,微观结构往往较为疏松,制约了长期强度的进一步提升^[1];此外,在地聚合过程中水分迁移与蒸发易引发显著的干燥收缩与体积变形^[2],制约了其大规模工程应用。大量研究发现,适量掺入矿渣粉、硅灰等绿色胶凝材料可调控和优化地聚合物的力学强度,掺入纤维亦是提高地聚合物韧性与抗裂性能的重要手段^[3]。

众多学者围绕粉煤灰复合矿渣粉、硅灰等材料制备地聚合物进行了大量研究。杜天玲等^[4]研究了粉煤灰、矿渣粉地聚合反应机理,粉煤灰中富含的硅、铝成分和矿渣粉中的氧化钙是构成地聚合物强度的主要来源;窦占双等^[5]、王英等^[6]研究认为,高掺量粉煤灰时需采用大掺量复合激发剂来提高力学强度,低粉煤灰掺量时力学强度优于同等条件下水泥混凝土;卞立波等^[7]、陈广升^[8]研究表明,提高粉煤灰掺量会降低地聚合物早期和长期强度,增大矿渣粉掺量可促进早期强度发展并使微观结构更为密实;夏冬桃等^[9]研究了不同粉煤灰、硅灰取代矿渣粉对地聚合物混凝土力学性能的影响,结果表明,提高粉煤灰、硅灰掺量会延迟凝结时间,取代率分别为 20%、10% 时力学强度最佳,微观形貌显示水化反应更为充分,结构更密实;孙大全等^[10]研究了粉煤灰、硅灰地聚合物的性能与表征,认为抗压强度、抗折强度随硅灰掺量增加而增大,地聚合反应产物以 N-A-S-H 凝胶相为主;李海清等^[11]揭示了硅灰对矿渣基地聚合物性能的改性效果,结果显示掺 20% 硅灰时抗压强度达 63.5 MPa,提升了 11.2%,提高硅灰掺量会抑制 C-A-S-H 凝胶生成,促进 N-A-S-H 凝胶结构的发育;刘小强

等^[12]研究表明,硅灰可以促进偏高岭土地聚合物反应,提高了凝胶生成量,24% 硅灰掺量时抗压强度不低于 45 MPa;毕超豪等^[13]研究了玻璃纤维在粉煤灰基地聚合物中的黏结行为,并修正了玻璃纤维黏结滑移本构模型,认为玻璃纤维与地聚合物具有良好黏结强度;张延年等^[14]研究了玻璃纤维改善水泥混凝土力学强度规律,掺量为 0.5%~1.5% 时具有增强作用;崔祎菲等^[15]研究表明,碱激发混凝土与玻璃纤维的黏结性能优于硅酸盐混凝土,小直径玻璃纤维黏结效果更佳。

综上,关于粉煤灰和矿渣粉的地聚合物性能研究已较为深入,但复合硅灰的三元矿物材料地聚合物性能尚不清晰,且玻璃纤维对其力学强度的增强效应也不明确。鉴于此,开展了不同粉煤灰、矿渣粉、硅灰配合比地聚合物力学强度试验,并以最佳配合比研究了玻璃纤维的增强效应,研究成果可为制备高强度地聚合物提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 原材料

前驱体材料: I 级低钙粉煤灰,中值粒径为 11.1 μm ,比表面积 637 m^2/kg ,密度 2.43 g/cm^3 ;优质硅灰,比表面积 2 346 m^2/kg ,密度 2.57 g/cm^3 ;S95 级矿渣粉,比表面积 738 m^2/kg ,密度 2.76 g/cm^3 ;前驱体材料主要化学成分见表 1。

骨料:细骨料采用河砂,细度模数 2.7,中砂,密度为 2.63 g/cm^3 ;粗骨料采用花岗岩碎石,细度模数 5.7,密度为 2.59 g/cm^3 ,颗粒粒径区间为 5~20 mm,连续级配。

碱性激发剂:片状 NaOH,纯度不小于 99%;硅酸钠溶液模数 3.3,固体含量 36.5%。

耐碱玻璃纤维,长度 9~12 mm,直径 18 μm ,抗拉强度为 1.4 GPa,弹性模量为 72 GPa;采用聚羧酸醚基高效减水剂,拌合水为自来水。

材料科学

表1 前驱体材料主要化学成分

Table 1 Main chemical components of precursor materials /%

化学成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	MgO	Na ₂ O
矿渣粉	34.2	19.7	7.6	31.5	1.6	2.8	0.5
粉煤灰	62.5	24.1	6.4	2.4	1.1	0.7	0.6
硅灰	92.2	0.8	1.9	1.8	0.2	1.1	0.9

1.2 试验方案

设计 8 组三元矿物材料组合制备的地聚合物, S20、S40、S60、S80 试件前驱体材料采用粉煤灰和矿渣粉, 矿渣粉掺量分别为 20%、40%、60%、80%; S20S、S40S、S60S、S80S 试件中采用硅灰等质量替代 10% 粉煤灰, 矿渣粉掺量不变; 液固比为 0.4, 地聚合物配合比见表 2, 表中氢氧化钠、硅酸钠均为固体掺量, 激发模数为 1.8。根据地聚合物力学强度试验结果, 采用力学强度最优矿物组合, 分别掺入 0.5%、0.75%、1.0%、1.25% 体积分数的玻璃纤维。

表2 三元矿物材料地聚合物配合比

Table 2 Mix proportion of ternary mineral-based geopolymer / (kg/m³)

编号	粉煤灰	矿渣粉	硅灰	砂	碎石	氢氧化钠	硅酸钠	水
S20	296	74		730	1 100	14.5	61.1	178
S40	222	148		730	1 100	14.5	61.1	178
S60	148	222		730	1 100	14.5	61.1	178
S80	74	296		730	1 100	14.5	61.1	178
S20S	259	74	37	730	1 100	14.5	61.1	178
S40S	185	148	37	730	1 100	14.5	61.1	178
S60S	111	222	37	730	1 100	14.5	61.1	178
S80S	37	296	37	730	1 100	14.5	61.1	178

试验开始前 24 h, 将氢氧化钠加入硅酸钠溶液中, 充分搅拌使氢氧化钠全部溶解, 之后按配合比加入所有拌合水, 配制成碱性激发剂溶液。

将所有前驱体材料、骨料、玻璃纤维按照设计配合比投入搅拌机, 低速搅拌 1 min (含有纤维时搅拌时间增加至 3 min, 确保纤维充分分散); 加入 50% 激发剂溶液搅拌 3 min, 最后加入剩余 50% 激发剂溶液再搅拌 2 min, 形成均匀拌合物。将拌合物浇筑为 150 mm × 150 mm × 150 mm 立方体试件和 100 mm × 100 mm × 600 mm 长方体试件, 试件静置 2 h 后表面采用保鲜膜封闭, 24 h 后拆模移至标准养护室养护。

1.3 试验方法

力学强度试验按照 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》中的试验方法, 测试养护龄期分别为 3、7、28 d 地聚合物抗压强度、劈

裂抗拉强度、抗折强度; 抗压强度、劈裂抗拉强度采用电脑恒应力万能试验压力机测定, 抗压强度试验加载速率为 1.0 kN/s, 劈裂抗拉强度试验加载速率为 0.5 kN/s; 抗折强度使用 DYE-10 型抗折试验机, 加载速率为 0.5 kN/s。每组配合比开展 3 组平行试验, 取结果平均值。

2 结果分析

2.1 矿物材料组合对强度特性影响

2.1.1 抗压强度

由图 1 可知, S20、S40、S60、S80 试件的 3 d 抗压强度分别 30.4、35.9、45.2、43.7 MPa。地聚合物的抗压强度随粉煤灰掺量减小、矿渣粉掺量增加呈先增大后减小趋势, 粉煤灰掺量为 40%、矿渣粉掺量为 60% 的 S60 试件抗压强度最大; 各组地聚合物试件 28 d 抗压强度分别为 51.3、55.7、59.8、53.6 MPa, 同样 S60 试件的抗压强度最大, 抗压强度变化规律与 3 d 龄期一致; S80 试件的抗压强度仅略高于 S20, 说明粉煤灰或矿渣粉占比较大时均不利于抗压强度发展。高粉煤灰掺量的地聚合物抗压强度最小, 这是因为粉煤灰中仅含有少量的氧化钙, 碱激发地聚合反应产物以硅铝酸钠晶体 (N-A-S-H) 为主, 仅能形成少量的硅铝酸钙晶体 (C-A-S-H)。由于 N-A-S-H 具有疏松多孔特性, 导致其强度显著低于 C-A-S-H 晶体, 故粉煤灰掺量较大的地聚合物抗压强度降低; 另外, 由于粉煤灰的球形颗粒形态, 提高了拌合物和易性, 其吸水率低于矿渣粉, 拌合物中自由水更多, 导致基体存在大量初始孔隙, 不利强度发展。S20、S40、S60、S80 试件 3 d 抗压强度分别为 28 d 的 59.3%、64.4%、75.6%、81.5%, 7 d 抗压强度分别达到了 28 d 的 76.3%、82.3%、88.4%、91.8%。可见, 高粉煤灰掺量高地聚合物早期强度增长缓慢, 掺入矿渣粉可提高地聚合物的早期强度发展, 随矿渣粉掺量增加, 早期强度增幅越大; 这是由于粉煤灰相比矿渣粉缺少氧化钙组分, 碱性环境下析出 SiO₃²⁻ 离子速度慢, 减缓了地聚合反应速率; 而矿渣粉中富含玻璃体矿物, 在碱性环境下析出 Ca²⁺、SiO₃²⁻ 等离子, 产生的地聚合反应生成凝胶晶体, 促进早期强度发展。

采用 10% 硅灰替代粉煤灰后, 地聚合物的抗压

强度同样随粉煤灰掺量减小、矿渣粉掺量增加呈先增大后减小趋势。粉煤灰掺量为 30%、矿渣粉掺量为 60%、硅灰掺量为 10% 的 S60S 试件抗压强度最高。S20S、S40S、S60S、S80S 试件相比未掺硅灰前, 3 d 抗压强度分别增长 11.4%、12.3%、16.4%、-2.1%, 7 d 抗压强度分别增长 8.7%、11.6%、15.2%、-2.2%, 28 d 抗压强度分别增长 7.6%、9.2%、13.5%、-3.6%。这表明, 粉煤灰掺量不小于 30% 时, 掺入硅灰可提高地聚合物的抗压强度, 但当粉煤灰掺量小于 30% 时, 掺入硅灰将使地聚合物强度降低。这是由于硅灰比表面积大, 具有更高的火山灰活性、且富含 SiO_2 , 更易与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 进行二次水化反应生成 C-S-H 和 C-A-S-H 凝胶晶体; 另外, 硅灰的极细颗粒粒径也可填充结构中微孔隙, 从而提高地聚合物的抗压强度; 但粉煤灰掺量较低时, 拌合物和易性降低, 地聚合反应所需的自由水减少而使反应受限, 同时粉煤灰掺量降低导致 Al_2O_3 含量减小, 限制了 C-A-S-H 凝胶晶体生成, 从而使抗压强度下降。

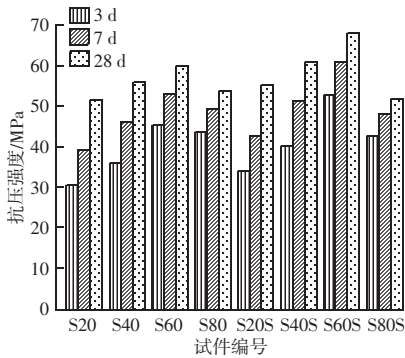


图 1 不同矿物材料组合地聚合物抗压强度

Fig. 1 Compressive strength of geopolymers made from different mineral material combinations

2.1.2 劈裂抗拉强度

由图 2 可知, S20、S40、S60、S80 试件的 3 d 劈裂抗拉强度分别为 2.90、3.38、4.17、4.16 MPa, 7 d 劈裂抗拉强度分别为 3.46、4.02、4.85、4.67 MPa, 28 d 劈裂抗拉强度分别为 4.24、4.81、5.42、5.04 MPa; 可见, 地聚合物的劈裂抗拉强度同样随粉煤灰掺量减小、矿渣粉掺量增加呈先增大后减小趋势, 粉煤灰掺量为 40%、矿渣粉掺量为 60% 的 S60 试件劈裂抗拉强度最大; 劈裂抗拉强度取决于胶凝材料与骨料之间界面过渡区黏结强度, 提高矿渣粉掺量可使

凝胶产物由 N-A-S-H 向 C-A-S-H、C-S-H 转变, 强化了界面过渡区强度性能; 矿渣粉掺量为 80% 时劈裂抗拉强度有所降低, 这源于高矿渣粉掺量时地聚合反应更为剧烈, 会产生大量气泡, 未能排出的气泡提高凝胶孔隙率, 劣化界面过渡区强度, 导致劈裂强度降低。粉煤灰掺量为 80% 的 S20 试件 3 d 劈裂抗拉强度为 28 d 的 68.4%, 7 d 为 28 d 的 81.6%; 但当粉煤灰掺量降低至 20%、矿渣粉掺量为 80% 时, 3 d 劈裂抗拉强度达到了 28 d 的 82.4%, 7 d 达到了 28 d 的 92.5%, 这表明增大矿渣粉掺量可提高地聚合物早期劈裂抗拉强度。

掺入 10% 硅灰的 S20S 试件, 3 d 劈裂抗拉强度为 28 d 的 71.2%, 7 d 为 28 d 的 85.3%, 这表明掺入硅灰可加速地聚合反应进行, 这源于硅灰的高火山灰活性, 使地聚合反应速率更高, 由此可提高地聚合物早期强度。S20S、S40S、S60S、S80S 试件 28 d 劈裂抗拉强度分别为 4.62、4.51、5.99、4.96 MPa, 相比未掺硅灰试件, 劈裂抗拉强度分别增长 9.1%、14.7%、10.4%、-1.7%; 同样粉煤灰掺量不小于 30% 时, 掺入硅灰可提高地聚合物劈裂抗拉强度, 粉煤灰掺量过低时将导致劈裂抗拉强度降低。

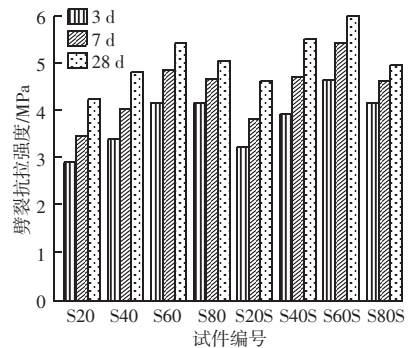


图 2 不同矿物材料组合地聚合物劈裂抗拉强度

Fig. 2 Splitting tensile strength of geopolymers made from different mineral material combinations

2.1.3 抗折强度

由图 3 可知, S20、S40、S60、S80 试件的 3 d 抗折强度分别为 3.10、3.56、4.50、4.44 MPa, 7 d 抗折强度分别为 3.77、4.30、5.16、4.98 MPa, 28 d 抗折强度分别为 4.75、5.19、5.81、5.41 MPa; 可见, 抗折强度变化规律与劈裂抗拉强度基本一致, 粉煤灰掺量为 40%、矿渣粉掺量为 60% 的 S60 试件抗折强度最高, 高矿渣粉掺量时地聚合物力学强度

材料科学

优于高粉煤灰掺量；这源于两种前驱体材料的化学成分不同，单一的材料组成因矿物成分不均衡导致地聚合反应受限，合理的矿物组合可促使地聚合反应进行，生成强度更高的 C-A-S-H、C-S-H 等凝胶晶体而提高力学强度。

掺入 10% 硅灰的 S20S、S40S、S60S、S80S 试件 28 d 抗折强度相比未掺硅灰试件分别增长 9.1%、13.5%、11.4%、-2.4%；硅灰中富含活性 SiO_2 ，降低粉煤灰掺量后使地聚合反应加速进行，过高的地聚合反应速率虽增强了早期强度，但因反应气泡的聚集降低了结构密实度，导致长期强度发展受限；这也进一步说明适当粉煤灰掺量对地聚合物力学强度发展十分必要，地聚合物前驱体材料最佳组合为 30% 粉煤灰、60% 矿渣粉、10% 硅灰。

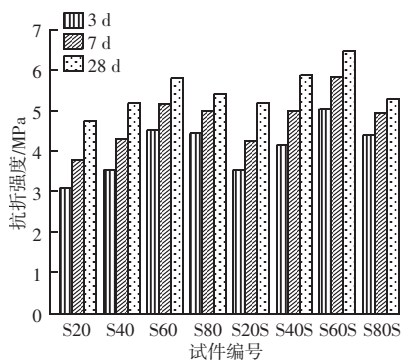


图3 不同矿物材料组合地聚合物抗折强度

Fig. 3 Flexural strength of geopolymers made from different mineral material combinations

2.2 玻璃纤维对强度特性影响

2.2.1 不同玻璃纤维掺量抗压强度

由图4可知，7 d龄期，玻璃纤维掺量为 0.5%、0.75%、1.0%、1.25% 试件抗压强度分别为 62.3、64.6、66.2、63.7 MPa，相比未掺玻璃纤维试件抗压强度分别提高了 2.4%、6.2%、8.8%、4.6%；同样，28 d龄期，各掺玻璃纤维的地聚合物试件抗压强度分别为 70.5、72.6、74.2、71.8 MPa，相比未掺玻璃纤维试件抗压强度分别提高了 3.8%、6.9%、9.4%、5.8%；这表明，地聚合物的抗压强度随玻璃纤维掺量增加先增大后减小，纤维掺量为 1.0% 时效果最优。玻璃纤维的强度及弹性模量均高于胶凝材料，掺入玻璃纤维可抑制基体中微裂缝开展，填充基体孔隙，从而提高地聚合物抗压强度；高玻璃纤维掺量时由于纤维在基体中分布密度大，导致分散

困难，部分纤维出现结块的现象，提高了地聚合物的孔隙率，导致抗压强度降低。从 7、28 d 抗压强度变化规律来看，增加养护时间，地聚合物的抗压强度曲线斜率基本相同，说明提高养护时间不能提高玻璃纤维的增强效应。

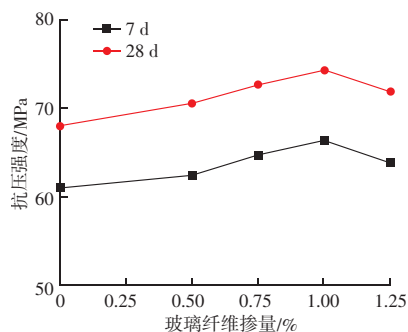


图4 不同玻璃纤维掺量地聚合物抗压强度
Fig. 4 Compressive strength of geopolymers with different glass fiber content

2.2.2 不同玻璃纤维掺量劈裂抗拉强度

由图5可知，7 d龄期，玻璃纤维掺量为 0.5%、0.75%、1.0%、1.25% 试件劈裂抗拉强度分别为 5.52、5.97、6.32、5.88 MPa，相比未掺玻璃纤维试件劈裂抗拉强度分别提高了 1.8%、10.1%、16.5%、8.4%；同样，28 d龄期，各掺玻璃纤维的地聚合物试件劈裂抗拉强度分别为 6.14、6.67、7.04、6.62 MPa，相比未掺玻璃纤维试件劈裂抗拉强度分别提高了 2.5%、11.4%、17.6%、10.5%。这表明，地聚合物的劈裂抗拉强度随玻璃纤维掺量增加先增大后减小，纤维掺量为 1.0% 时劈裂抗拉强度最大。上述分析表明，玻璃纤维掺量较低时地聚合物的劈裂抗拉强度增幅不显著；掺量在 0.75%~1.0% 增幅最为显著；玻璃纤维掺量达 1.25% 时会劣化抗拉性能。均匀分散的玻璃纤维在地聚合物中类似发挥“微型钢筋”作用，有效弥补地聚合物脆性高、抗拉强度低的劣势。横跨微裂缝的纤维可消散外部应力，抑制微裂缝进一步扩展；当地聚合物因开裂而失效时，纤维可发挥桥接能力，承担外部荷载避免结构破坏，从而提高地聚合物的抗拉强度。当纤维掺量较低时，单位体积内分布纤维数量少，难以抑制裂缝开展，不能有效发挥“微型钢筋”作用；过高的纤维掺量又会提高基体的孔隙率，同样会削弱地聚合物的抗拉强度，故最佳的玻璃纤维掺

量建议为 0.75%~1.0%，可有效阻止微观裂缝开展，并弥合宏观裂缝。

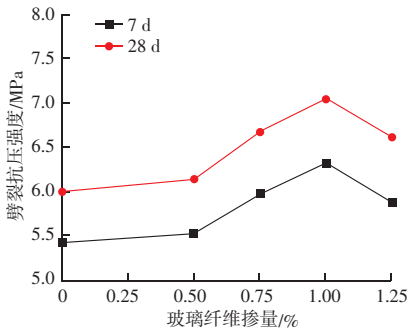


图 5 不同玻璃纤维掺量地聚合物劈裂抗拉强度
Fig. 5 Splitting tensile strength of geopolymer with different glass fiber contents

2.2.3 不同玻璃纤维掺量抗折强度

由图 6 可知，7 d 龄期，玻璃纤维掺量为 0.5%、0.75%、1.0%、1.25% 试件抗折强度分别为 6.36、6.59、6.97、6.46 MPa，相比未掺玻璃纤维试件抗折强度分别提高了 5.1%、8.9%、15.2%、6.8%；同样，28 d 龄期，各掺玻璃纤维的地聚合物试件抗折强度分别为 7.11、7.38、7.78、7.22 MPa，相比未掺玻璃纤维试件抗折强度分别提高了 6.0%、10.1%、16.0%、7.67%。可见，地聚合物抗折强度与劈裂抗拉强度变化规律基本相近，同样随玻璃纤维掺量增加先增大后减小，纤维掺量为 1.0% 时抗折强度最大；纤维掺量为 0.5% 时抗折强度最大增幅为 6.0%，增幅较为显著，这于劈裂抗拉强度并不一致，这是由于玻璃纤维掺量较低时可在基体内部形成三维网状结构，降低基体内部初始孔隙缺陷，由此提高材料之间的嵌锁能力，增强地聚合物的抗弯性能；过高的纤维掺量时易出现结团现象，形成应力薄弱点，降低纤维增强作用；纤维掺量不超过 1.0%

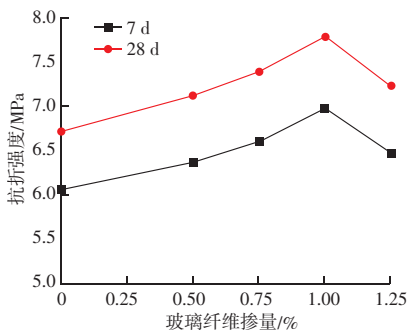


图 6 不同玻璃纤维掺量地聚合物抗折强度
Fig. 6 Flexural strength of geopolymers with different glass fiber contents

时有助于防止微裂纹出现，并改善地聚合物的延性，由此提高抗折强度。

3 结论

进行了粉煤灰、矿渣粉、硅灰三元矿物材料地聚合物力学性能演变规律分析，并分析玻璃纤维对最优矿物材料组合试件力学性能的增强效应，得出以下结论：

(1) 地聚合物的抗压强度、劈裂抗拉强度、抗折强度均随粉煤灰掺量减小、矿渣粉掺量增加呈先增大后减小趋势。粉煤灰掺量为 40%、矿渣粉掺量为 60% 时强度最佳；高粉煤灰掺量早期强度增长缓慢，增加矿渣粉掺量可加快早期强度发展。

(2) 硅灰以高火山灰活性及高比表面积，部分替代粉煤灰可增强地聚合物的力学强度，掺 10% 硅灰、30% 粉煤灰、60% 矿渣粉试件力学强度最佳；与未掺硅灰试件相比，28 d 抗压强度、劈裂抗拉强度、抗折强度分别提升 13.5%、10.4%、11.4%。

(3) 地聚合物力学强度随玻璃纤维掺量增加先增大后减小，玻璃纤维掺量为 1.0% 时最优；28 d 抗压强度、劈裂抗拉强度、抗折强度分别提升 9.4%、17.6%、16.0%，玻璃纤维对地聚合物劈裂抗拉强度、抗折强度增强效应高于抗压强度。

(4) 玻璃纤维掺量不超过 0.5% 时对劈裂抗拉强度增强效果不显著，抗压强度、抗折强度在玻璃纤维掺量不大于 1.0% 时，随掺量增加近似呈线性增长；养护龄期由 7 d 增加至 28 d，玻璃纤维增强效应未见显著提高。

参 考 文 献

- [1] 姜天华, 赵成耿, 万聪聪, 等. 粉煤灰 - 矿渣地质聚合物基本力学性能研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (5): 65-71.
- [2] 邓嘉, 鲍文博, 杨宇豪, 等. 粉煤灰基尾矿碱激发地质聚合物耐久性研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2022, 36 (5): 58-66.
- [3] 朱星, 姜荣斌, 黄杰. PVA 纤维增韧地聚合物动态压缩试验研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (6): 31-36, 42.
- [4] 杜天玲, 刘英, 于咏妍, 等. 水玻璃对粉煤灰矿渣地聚合物强度的影响及激发机理 [J]. 公路交通科技, 2021, 38 (1): 41-49.
- [5] 窦占双, 李晓民, 秦宏涛, 等. 化学激发大掺量粉煤灰复合胶凝材料力学性能与水化机理研究 [J]. 硅酸盐通报, 2025, 44 (1): 243-252.

材料科学

- [6] 王英, 王颖洁, 朱美春, 等. 低掺量粉煤灰基地聚合物胶凝材料性能试验研究 [J]. 上海师范大学学报 (自然科学版), 2022, 51 (4): 550-555.
- [7] 卞立波, 董申, 陶志. 碱激发矿渣/粉煤灰多孔混凝土基本性能试验研究 [J]. 材料导报, 2020, 34 (增刊2): 1299-1303.
- [8] 陈广升. 碱激发粉煤灰-高炉矿渣粉固化铸造废砂用作路基填料研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (4): 117-122.
- [9] 夏冬桃, 吴晨, 崔凯, 等. 粉煤灰和硅灰取代率对碱矿渣混凝土力学性能影响分析 [J]. 西南交通大学学报, 2024, 59 (5): 1113-1122.
- [10] 孙大全, 顾泽宇, 孙硕, 等. 碱激发粉煤灰-硅灰地质聚合物的性能及表征 [J]. 硅酸盐通报, 2020, 39 (5): 1533-1539.
- [11] 李海清, 刘小强, 王仁智, 等. 硅灰对矿渣基地聚合物宏观性能及反应过程的影响 [J]. 公路交通科技, 2025, 42 (7): 68-77.
- [12] 刘小强, 李海清, 王仁智, 等. 硅灰对偏高岭土基地聚合物力学性能及气孔结构的影响机理 [J]. 公路, 2025, 70 (5): 324-330.
- [13] 毕超豪, 赖华铭, 张耿斌, 等. 地聚物混凝土-玻璃纤维增强复合材料筋界面黏结行为为的梁式试验研究 [J]. 工业建筑, 2024, 54 (6): 46-53.
- [14] 张延年, 郭晓钰, 王广林, 等. 玻璃纤维混凝土抗折性能及弯曲韧性试验研究 [J]. 混凝土, 2024, (1): 1-5.
- [15] 崔祎菲, 屈士皓, 张鹏. 海水海砂碱激发混凝土与 FRP 筋的黏结性能 [J]. 硅酸盐学报, 2023, 51 (11): 2750-2762.

(上接第 47 页)

- [5] 王璇, 王淑娟. 氧化石墨烯再生混凝土的制备及耐久性能的研究 [J]. 功能材料, 2025, 56 (7): 7181-7188.
- [6] 何欣, 刘长江. 氧化石墨烯在水泥基材料中的应用研究综述 [J]. 粉煤灰综合利用, 2020, 34 (4): 55-58.
- [7] 董健苗, 庄佳桥, 赵翠华, 等. 氧化石墨烯对水泥基材料力学性能的影响及分子动力学模拟 [J]. 桂林理工大学学报, 2024, 44 (3): 446-454.
- [8] 施溪溪, 孙广俊. 氧化石墨烯对水泥基材料力学性能的影响研究 [J]. 非金属矿, 2021, 44 (1): 47-50.
- [9] 杨晋荣. 氧化石墨烯对固废混凝土工程性能影响研究 [J]. 铁道建筑技术, 2024, (10): 59-62, 80.
- [10] 刘建邦, 汪洋. 氧化石墨烯对 HVFA 混凝土力学和耐磨性能的影响 [J]. 西安建筑科技大学学报 (自然科学版), 2020, 52 (5): 693-699.
- [11] 徐朋辉, 李相国, 刘卓霖, 等. 氧化石墨烯对粉煤灰水泥的水化和力学性能的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2016, 35 (12): 4066-4069.
- [12] 李洁. 氧化石墨烯对高掺量粉煤灰混凝土改性机理研究 [D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2019.
- [13] 张建武, 汪潇, 李志新, 等. 氧化石墨烯对高掺量粉煤灰水泥基材料性能的影响及机理 [J]. 化工新型材料, 2021, 49 (6): 240-243.
- [14] 李东波, 张鸿驰, 刘春燕, 等. 氧化石墨烯与粉煤灰增强水泥基材料的协同机理及其抗压性能尺寸效应 [J]. 应用力学学报, 2021, 38 (5): 1869-1876.
- [15] 杨宏宇, 胡鑫, 郑云西, 等. 氧化石墨烯对粉煤灰地质聚合物力学性能的影响 [J]. 混凝土, 2022, (1): 88-91.
- [16] 邱文俊, 罗旗帜, 吴玉友, 等. 氧化石墨烯对大掺量矿物细粉超高性能混凝土力学性能的影响 [J]. 佛山科学技术学院学报 (自然科学版), 2020, 38 (2): 5-10.