

矿渣-白云石粉对粉煤灰基地聚合物混凝土性能影响分析

潘 浩^{1,2}, 孙 超^{1,2}, 赵 寅^{1,2}, 黄 宏^{1,2}, 张昊鹏^{1,2}

(1. 南京大地建设(集团)股份有限公司, 南京 210029;
2. 南京大地建设集团有限责任公司, 南京 210029)

摘 要: 为提高工业固废材料制备地聚合物混凝土的利用率, 研究了矿渣粉、白云石粉替代粉煤灰对地聚合物混凝土工作性、力学性能及耐久性的影响, 并结合扫描电子显微镜和红外光谱进行微观结构表征。结果表明: 掺入矿渣粉、白云石粉会降低地聚合物坍落度, 提升其力学与耐久性能; 掺矿渣粉的增强效果优于白云石粉, 掺 20% 矿渣粉+20% 白云石粉时协同效应最佳; 相较纯粉煤灰基准组, 40% 矿渣粉试件 90 d 抗压、劈裂抗拉强度分别提高了 76.3% 和 108.8%, 20% 矿渣粉+20% 白云石粉试件则分别提高了 67.1% 和 116.3%, 且二者的动弹模量显著提高、干燥收缩和氯离子扩散系数显著降低; 矿渣粉和白云石粉的微集料填充效应及其参与地聚合反应生成更多 C-A-S-H、C-S-H 凝胶, 使微观结构更加致密。研究成果可为地聚合物配合比设计提供依据。

关键词: 地聚合物混凝土; 固废材料; 力学性能; 耐久性能; 微观结构

中图分类号: U416.16

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2026) 05-0021-08

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.05.004

Analysis of the Effects of Granulated Blast Furnace Slag Powder and Dolomite Powder on the Properties of Fly Ash-Based Polymer Concrete

PAN Hao^{1,2}, SUN Chao^{1,2}, ZHAO Yin^{1,2}, HUANG Hong^{1,2}, ZHANG Haopeng^{1,2}

(1. Nanjing Dadi Construction (Group) Co., Ltd., Nanjing 210029, China;
2. Nanjing Dadi Construction Group Co., Ltd., Nanjing 210029, China)

Abstract: To enhance the utilisation rate of industrial solid waste materials in preparing geopolymer concrete, this study investigated the effects of replacing fly ash with slag powder and dolomite powder on the workability, mechanical properties, and durability of geopolymer concrete. Microstructural characterisation was conducted using scanning electron microscopy and infrared spectroscopy. Results indicate that incorporating slag powder and dolomite powder reduces the slump of geopolymer concrete while enhancing its mechanical and durability properties. Slag powder exhibits superior reinforcement effects compared to dolomite powder, with the synergistic effect peaking at a 20% slag powder + 20% dolomite powder blend. Compared to the pure fly ash control group, specimens with 40% slag powder exhibited 76.3% and 108.8% increases in 90-day compressive and splitting tensile strength, respectively. while specimens with 20% slag powder + 20% dolomite powder showed increases of 67.1% and 116.3%, respectively. Both formulations exhibited significantly enhanced dynamic elastic modulus and markedly

项目来源: 江苏省科技计划项目 (KT202312)。

作者简介: 潘 浩 (1983—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 地铁施工。

通信作者: 张昊鹏 (1981—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 地铁施工。

收稿日期: 2025-09-02

材料科学

reduced drying shrinkage and chloride ion diffusion coefficient. The micro-aggregate filling effect of slag powder and dolomite powder, along with their participation in the geopolymerization reaction to generate more C-A-S-H and C-S-H gels, resulted in a denser microstructure. These findings provide a basis for geopolymer mix design.

Key words: geopolymer concrete; solid waste materials; mechanical properties; durability; microstructure

0 引言

地聚合物是一类经碱激发铝硅酸盐聚合形成的新型绿色胶凝材料，以粉煤灰、矿渣等工业废弃物的主要原料。利用该胶凝材料制备的地聚合物混凝土，不仅可大量消纳工业固废，降低水泥生产造成的碳排放，还具备早期强度高、耐高温、耐腐蚀等优异性能^[1-2]。推广地聚合物混凝土应用可促进工业固废资源消纳，具有显著综合效益，已成为当前土木工程材料领域的研究热点。

粉煤灰为地聚合物最常用前驱体材料，其地聚合反应速率相对缓慢^[3]，导致纯粉煤灰基地聚合物存在早期强度低、干缩变形大等不足^[4-5]。为克服粉煤灰基地聚合物存在的缺陷问题，复掺其他高活性固废材料是有效手段；矿渣粉由钢铁冶炼废弃物经磨细而成，其富含钙元素，相比粉煤灰火山灰效应更强^[6]，与粉煤灰复掺可提高地聚合反应速率，促进水化硅酸钙（C-S-H）及钙铝硅酸盐水合物（C-A-S-H）等凝胶的生成^[7]。窦占双等^[8]以矿渣粉、粉煤灰质量比为 1/3，研究多种激发剂对地聚合物力学及微观结构影响，获得了最佳激发剂掺量及增强机理；杜天玲等^[9]研究了水玻璃对粉煤灰、矿渣粉地聚合物激发机理，水玻璃可解构硅氧键、铝氧键，与溶出 Ca²⁺地聚合反应形成胶凝；王自柯等^[10]研究不同矿渣掺量的地聚合物混凝土抗冻性能变化，结果表明增加矿渣粉掺量可提高抗冻性能；原元等^[11]以抗压强度和劈裂抗拉强度评价了碳化对粉煤灰、矿渣粉地聚合物的损伤，认为钙含量增加会加速碳化速率。矿渣粉虽为优异前驱体材料，但其成本较高，制约了广泛应用；石粉为矿山工业废料，其颗粒粒径小且富含钙离子，常作为惰性填料替代水泥^[12]；当前初步研究发现石粉参与地聚合反应时具有一定活性，林芳等^[13]采用白云石粉适量替代粉煤灰制备地聚合物，促进了 C-A-S-H 凝胶生成，提高了抗压强度；黄梓谕等^[14]、于子豪等^[15]分别研究

了采用花岗岩石粉、凝灰岩石粉制备地聚合物，认为石粉的物理填充效应和提供钙元素参与地聚合反应，是提高地聚合物性能的主要因素。

上述研究成果推动了地聚合物混凝土的应用，但关于粉煤灰、矿渣粉、白云石粉三元固废地聚合物混凝土性能的研究较少。以南京地铁双龙出入场线明挖区间工程为背景，采用粉煤灰、矿渣粉、白云石粉制备地聚合混凝土用于明挖基坑支护结构；研究了矿渣粉、白云石粉掺量变化对地聚合物性能影响规律，并基于微观图像和 FTIR 分析了地聚合物强度形成机制。以期提高白云石粉在地聚合物混凝土中利用率，为地聚合物混凝土配合比提供科学依据。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

粉煤灰等级为Ⅲ级，密度 2.14 g/cm³，粒径范围 1~100 μm，比表面积约 465 m²/kg；矿渣粉为钢铁冶炼废弃物，经试验室机械碾磨后形成矿粉，密度 2.85 g/cm³，粒径范围 0.6~50 μm，比表面积约 1 153 m²/kg；白云石粉为机制砂生产过程的回收粉，密度 2.81 g/cm³，粒径范围 0.75~80 μm，比表面积约 628 m²/kg；粉煤灰、矿渣粉、白云石粉主要化学成分见表 1。碱性激发剂：片状氢氧化钠，纯度为 99%；硅酸钠溶液（水玻璃），模数 3.3，含水量 65.2%。

表 1 粉煤灰、矿渣粉、白云石粉主要化学成分
Table 1 Main chemical components of fly ash, granulated blast furnace slag, and dolomite powder /%

化学成分	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MnO	CaO	SO ₃	MgO
粉煤灰	2.53	26.47	61.81	0.16	5.65	0.34	1.24
矿渣粉	7.42	15.38	35.61	0.75	42.29	0.16	6.26
白云石粉	2.19	6.65	23.92	0.42	40.84	0.47	19.47

粗骨料采用中风化石灰岩机械碎石，粒径 4.75~26.5 mm，表观密度为 2 680 kg/m³；细骨料采用河砂，细度模数 2.86，表观密度为 2 520 kg/m³。试验用水为自来水。

1.2 试件制备

基准组地聚合物混凝土仅采用粉煤灰，对照组采用矿渣粉、白云石粉以 10%、20%、30%、40% 的质量比例替代粉煤灰，共设计 6 组不同材料配合比的混合料，地聚合物混凝土配合比详见表 2。试件编号以 G20-C20 为例，“G20”代表矿渣粉替代粉煤灰质量分数为 20%，“C20”表白云石粉替代粉煤灰质量分数为 20%。

试验开始前 12 h 制备模数为 1.5 的激发剂溶液，将称量好的硅酸钠溶液、片状氢氧化钠、水混合，搅拌至固体充分溶解，自然冷却后放置于容器中备用。

按照设计配合比称量出 3 种前驱体材料，与粗骨料、细骨料混合投入强制搅拌机，搅拌 1 min；然后加入碱激发溶液，搅拌 5 min。将混合料入模并放置于振动台振捣密实，抹平表面并覆盖塑料薄膜；静置 24 h 后脱模，放入标准养护室养护。

表 2 地聚合物混凝土配合比
Table 2 Suspension concrete mix proportion

编号	粉煤灰	矿渣粉	白云石粉	碎石	砂	激发剂
	/ (kg/m ³)					
G00-C00	465			1 176	736	373
G40-C00	279	186.0		1 176	736	373
G30-C10	279	139.5	46.5	1 176	736	373
G20-C20	279	93.0	93.0	1 176	736	373
G10-C30	279	46.5	139.5	1 176	736	373
G00-C40	279		186.0	1 176	736	373

1.3 试验方法

根据 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》规定进行地聚合物混凝土 7、28、90 d 的抗压强度、劈裂抗拉强度测试，抗压强度试验采用 150 mm×150 mm×150 mm 立方体试件，劈裂抗拉强度试验采用直径 100 mm，高度 200 mm 圆柱体试件，试验采用 UTM-600 型电子伺服万能压力试验机。

根据 GBT50082—2024《混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》规定进行动弹性模量、干燥收缩、抗氯离子渗透试验；动弹性模量试验采用尺寸为 100 mm×100 mm×400 mm 棱柱体试件，采用 DT-20 型动弹性模量测定仪测量养护龄期为 7、28、90 d 试件振动频率；干燥收缩试验采用 YC-NES 非接触式混凝土变形测定仪，测定仪测定地聚合物混凝土

0~7 d 干缩变形；采用 NJ-RCM 型混凝土氯离子扩散系数测定仪，按照 RCM 法测定地聚合物混凝土 7、28、90 d 的氯离子迁移系数。

采用 SEM4000 扫描电子显微镜、Nicolet5700 傅里叶红外光谱仪进行 90 d 的地聚合物混凝土微观表征分析。

2 结果分析

2.1 坍落度

由图 1 可知，所有配合比地聚合物混凝土试件的坍落度均大于 80 mm，满足桩基水下混凝土浇筑的需求；掺入矿渣粉、白云石粉后地聚合物混凝土坍落度呈减小趋势，与基准组 G00-C00 相比，G40-C00、G30-C10、G20-C20、G10-C10、G00-C40 组试件坍落度分别降低 4.9%、9.2%、14.4%、19.4%、22.5%，随白云石粉掺量比例增加，拌合物内聚性增强，地聚合物混凝土坍落度近似为线性减小。这应该由于矿渣粉、白云石粉的颗粒尺寸相比粉煤灰颗粒更细，具有更大的比表面积、吸水率更高，由此降低了混合料的和易性。

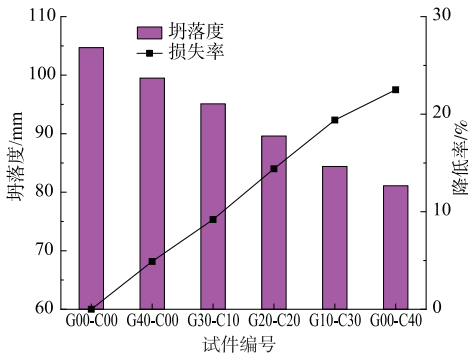


图 1 地聚合物混凝土坍落度
Fig. 1 Geopolymer concrete slump

2.2 抗压强度

由图 2 可知，采用矿渣粉、白云石粉部分替代粉煤灰，地聚合物混凝土抗压强度显著提高；与基准组 G00-C00 相比，G40-C00、G30-C10、G20-C20、G10-C30、G00-C40 组试件 7 d 抗压强度分别提高了 71.8%、50.8%、66.0%、47.4%、22.9%，矿渣粉替代率为 40% 的试件抗压强度增幅最大，矿渣粉、白云石粉替代率均为 20% 的试件次之，白云石粉替代率为 40% 的试件最小。28 d 抗压强度因水化反应

材料科学

更加充分而显著提高,这由于延长养护龄期可生成更多的 C-S-H、C-A-S-H 凝胶,由此提高了基体的密实程度;与 7 d 试件相比, G00-C00、G40-C00、G30-C10、G20-C20、G10-C30、G00-C40 试件 28 d 抗压强度分别提高了 38.4%、42.9%、33.2%、41.4%、26.8%、41.7%, 90 d 抗压强度分别提高了 76.3%、44.7%、67.1%、36.7%、27.1%, 增加养护龄期对提高地聚合物混凝土抗压强度效果显著;地聚合物混凝土养护周期内抗压强度变化规律基本相近, G40-C00、G20-C20 组试件强度增长最为显著,这应该由于矿渣粉、白云石粉中氧化钙含量比粉煤灰高,更利于加速胶凝材料水化反应和提高胶凝材料生成数量;分析 G30-C10、G20-C20、G10-C30 三组试件抗压强度变化规律,矿渣粉、白云石粉等量组合时可产生最佳的协同效应。

综上,采用矿渣粉、白云石粉替代粉煤灰时可获得更高的抗压强度,这应该由于其相比粉煤灰粒度更细,具有更好的填充效应;另一方面,矿渣粉、白云石粉中富含氧化钙,地聚合反应可额外生成 C-S-H、C-A-S-H、N-A-S-H 凝胶,多种凝胶堆叠,形成致密的微观结构骨架,从而增强地聚合物混凝土的强度。

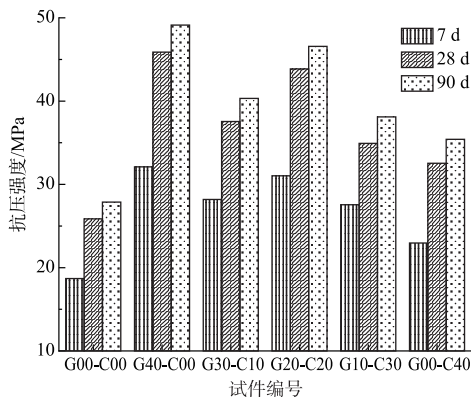


图2 不同龄期地聚合物混凝土抗压强度

Fig. 2 Compressive strength of polymer-modified concrete at different age stages

2.3 劈裂抗拉强度

由图3可知,与抗压强度变化规律相似,采用矿渣粉、白云石粉部分替代粉煤灰后地聚合物混凝土劈裂强度均呈现增大趋势;与基准组 G00-C00 相比, G40-C00、G30-C10、G20-C20、G10-C30、G00-C40 试件 7 d 劈裂强度分别提高 100.6%、91.6%、

111.8%、71.4%、26.9%, 28 d 劈裂强度分别提高 102.8%、78.4%、109.3%、63.2%、20.2%, 90 d 劈裂强度分别提高 108.8%、82.4%、116.3%、66.1%、22.1%;矿渣粉、白云石粉替代率均为 20% 的试件劈裂抗拉强度增幅最大,矿渣粉替代率为 40% 的试件次之,白云石粉替代率大于 20% 后劈裂抗拉强度呈线性减小。随养护龄期增长地聚合物混凝土的劈裂抗拉强度均有所提高, 7~28 d 增幅最为显著, G40-C00、G20-C20 组劈裂抗拉强度增幅最大,且劈裂抗拉强度值显著高于其他各组。这应该由于矿渣粉、石灰石粉等质量掺入时,石灰石粉的成核效可加速碱活化体系水化过程,提高了矿渣粉的反应程度,生成更多 C-S-H、C-A-S-H、N-A-S-H 凝胶产物,多种凝胶晶体复合作用下提高了与骨料之间界面过渡区的黏结性能,故 G20-C20 试件劈裂抗拉强度增幅最大。

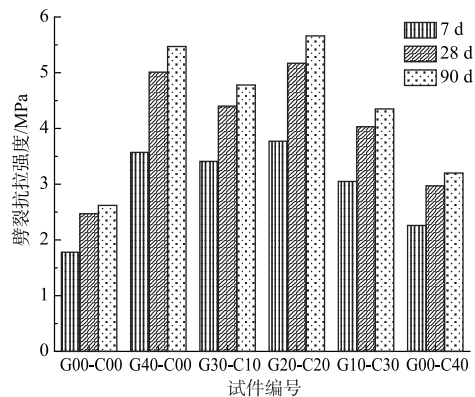


图3 不同龄期地聚合物混凝土劈裂抗拉强度

Fig. 3 Splitting tensile strength of polymer-modified concrete at different curing ages

2.4 动弹性模量

由图4可知,矿渣粉替代粉煤灰为 40% 时地聚合物混凝土动弹性模量最高,随矿渣粉掺量减小、白云石粉掺量增加,动弹性模量呈减小、增大、减小规律。与基准组 G00-C00 相比, G40-C00、G30-C10、G20-C20、G10-C30、G00-C40 组试件 7 d 动弹性模量分别提高 32.2%、18.3%、31.3%、19.1%、7.9%, 28 d 动弹性模量分别提高 33.4%、20.4%、33.6%、18.5%、4.8%, 90 d 动弹性模量分别提高 35.2%、20.5%、33.9%、19.9%、6.4%。动弹性模量表征基体密实程度,无矿渣粉时因铝元素含量降低,导致地聚合反应生成的 C-A-S-H、N-

A-S-H 凝胶大幅减少,降低基体密实程;另一方面,白云石粉相比粉煤灰具有更细的粒径,充填效应好,但其活性较低,含有氧化钙难以充分激活,故白云石粉掺量为 40% 时动弹性模量增长较小。矿渣粉相比粉煤灰、白云石粉粒度更细,对混合料的充填效应更好,且可加速地聚合反应,生成大量多种凝胶,故 G40-C00 组表现出最大的动弹性模量。各组试件 28 d 的动弹性模量相比 7 d 增幅最大,这因为随养护龄期增长,地聚合物反应更加充分而提高混凝土的密实程度,由此提高了动弹性模量。

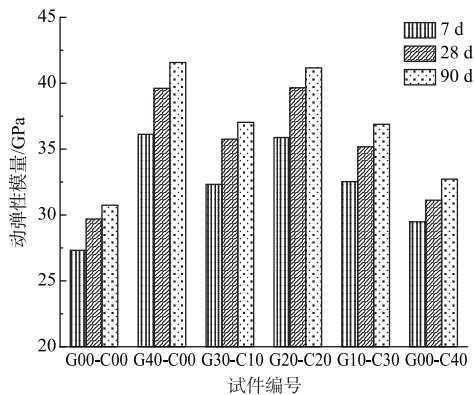


图 4 不同龄期地聚合物混凝土动弹性模量

Fig. 4 Dynamic elastic modulus of polymer-modified concrete at different curing stages

2.5 干缩变形

由图 5 可知,基准组 G00-C00 试件胶凝材料仅为粉煤灰,其干缩变形曲线明显与其他各组不同,0~3 d 干缩变形增长迅速,3~5 d 干缩系数增长逐渐放缓,7 d 以后干缩变形仍有增长趋势;掺矿渣粉、白云石粉的地聚合物混凝土干燥收缩变形在 0~2 d 增长最快,2~4 d 干缩系数增长逐渐减缓,4 d 之后逐渐趋于稳定。这因为仅采用粉煤灰的地聚合反应速率缓慢,混合料固化时间长,导致初始干缩变形速率慢,但随龄期增长干缩变形持续时间更久,故表现出最大的干缩变形;掺入矿渣粉、白云石粉可加速地聚合反应,提高早期强度,从而可缩短混凝土的干缩龄期。与基准组 G00-C00 相比, G40-C00、G30-C10、G20-C20、G10-C30、G00-C40 试件 7 d 龄期时干缩系数分别降低 41.8%、29.9%、37.3%、17.5%、6.2%;矿渣粉掺量为 40% 的 G40-C00 试件干缩系数最小,矿渣粉、白云石粉掺量均为 20% 的 G20-C20 试件同样具有较强的抗干缩变形能力。掺

矿渣粉、白云石粉后地聚合反应产物由 N-A-S-H 凝胶向 C-A-S-H、C-S-H 凝胶转变,从而产生更致密的凝胶晶体,凝胶的力学强度大大提高,从而提高基体的抗干燥收缩和变形能力;另外未反应的矿渣粉、白云石粉可充填基体中孔隙,细化基体孔隙结构并减小孔径,减少基体中联通型毛细管网络,由此抗干缩变形能力提高。

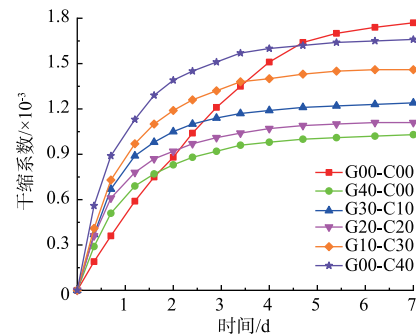


图 5 地聚合物混凝土早期干燥收缩变化曲线

Fig. 5 Early drying shrinkage variation curve of geopolymer concrete

2.6 氯离子扩散系数

由图 6 可知,采用矿渣粉、白云石粉部分替代粉煤灰后,不同养护龄期时地聚合物混凝土的氯离子扩散系数均出现减小;与基准组 G00-C00 相比, G40-C00、G30-C10、G20-C20、G10-C30、G00-C40 试件 7 d 氯离子扩散系数分别降低 67.4%、33.9%、51.6%、32.4%、12.8%, 28 d 氯离子扩散系数分别降低 70.0%、33.4%、51.2%、31.7%、12.6%, 90 d 氯离子扩散系数分别降低 66.6%、32.5%、51.3%、30.9%、10.9%。不同养护龄期时各试件的氯离子扩散系数变化规律基本相近,矿渣

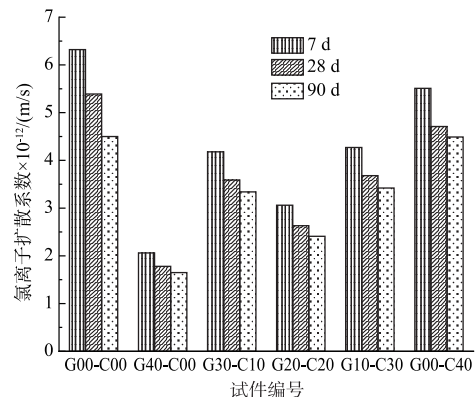


图 6 不同龄期地聚合物混凝土氯离子扩散系数

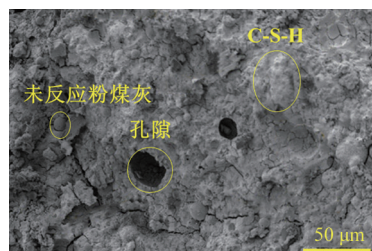
Fig. 6 Chloride ion diffusion coefficient in polymer-modified concrete at different curing stages

材料科学

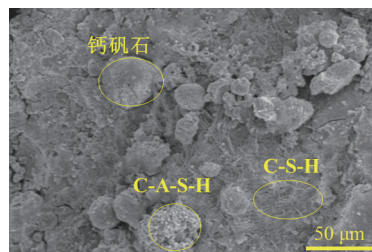
粉掺量为 40% 的 G40-C00 试件氯离子扩散系数最小, 且随养护时间增长, 氯离子扩散系数降低值相比其他各组最小, 说明矿渣粉掺量与地聚合反应速度存在相关性, 矿渣粉掺量越大, 地聚物反应越快, 结构密实度越高。矿渣粉、白云石粉替换粉煤灰后地聚合反应可生产更多凝胶晶体, 形成致密的凝胶结构; 另一方面, 两者具有更细的粒度, 可有效充填结构中微小孔隙, 形成杂乱的毛细管网络, 减少了氯离子的扩散通道并延长了其侵入路径。

2.7 微观形貌

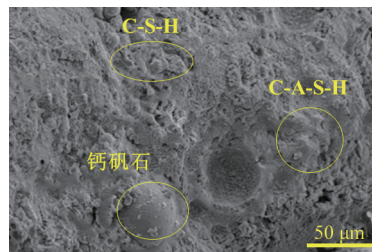
由图 7 可知, 采用矿渣粉、白云石粉替换粉煤灰后地聚合反应后生成大量 C-A-S-H、C-S-H 凝胶, 地聚合反应使微观结构致密化; 同时未反应的材料颗粒在地聚合物中具有良好的“微集料”效应, 可提高地聚合物混凝土密实程度。与基准组 G00-C00 相比, 采用 40% 矿渣粉替代粉煤灰的 G40-C00 试件地聚合反应生成的凝胶更均匀、紧密, 厚实的胶凝产物能够更好的胶结骨料及未反应的胶凝材料颗粒; 基准组 G00-C00 胶凝材料全部为粉煤灰, 导致地聚合物基体中存在不规则分布的孔洞, 基体中存在微结构孔隙, 降低了土工聚合物的力学性能; 此外, 部分未反应的粉煤灰颗粒出现了微裂纹, 与地聚合物胶凝材料相比力学强度大幅降低。掺入矿渣粉、白云石粉后, 可加速地聚合反应速度, 钙含量的提高可生成更多凝胶晶体, 提高未反应粉煤灰颗粒表面胶凝产物附着数量, 降低结构孔隙率, 使基体结构更加致密, 故可改善地聚合物的力学性能。矿渣粉、白云石粉掺量均为 20% 的地聚合物混凝土同样可形成更致密的微观结构, 从而提高了结构的强度, 这与力学强度分析规律一致; G40-C00、G20-C20 试件相比其他各组基体中孔隙较少, 反应生成的 C-A-S-H、C-S-H 凝胶晶体数量多, C-A-S-H 与硫酸盐反应生成钙矾石, 多种凝胶晶体组合形成致密的基质体, 力学强度及耐久性能显著提高。G00-C40 试件随白云石粉掺量最多, 由于其活性低于矿渣粉, 激发剂难以完全激发材料活性, 导致地聚合物反应不充分, 基质体中裂缝数量不断增多、尺寸变大, 故其力学性能逐渐减小; 因氧化钙含量增加, 地聚合反应形成的 C-A-S-H、C-S-H 凝胶数量增多, 其强度相比 G00-C00 仍有增长。



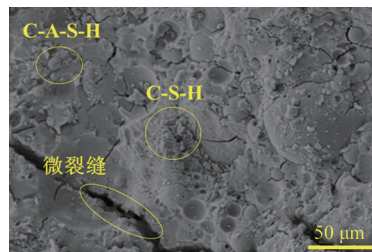
(a) G00-C00



(b) G40-C00



(c) G20-C20



(d) G00-C40

图 7 地聚合物混凝土 90 d 龄期微观形貌

Fig. 7 Microstructure of geopolymer concrete at 90 days

2.8 FTIR 分析

由图 8 可知, 最显著的衍射峰位于 971 cm^{-1} 处, 与 Al-O 和 Si-O 的不对称伸缩振动有关; 此外, $1\ 385$ 、 $1\ 575\text{ cm}^{-1}$ 处的峰表明水化硅酸钙 (C-S-H) 的形成, 随矿渣粉掺量增加峰值减弱。随着矿渣粉和白云石粉掺量变化, 峰值透射率随碳酸钙的生成而变化; G40-C00 相比 G00-C40, 最强衍射峰向低频率移动了约 30 cm^{-1} , 表明矿渣粉掺量较高时, 经

地聚合反应提高了无定形钙铝硅酸盐和钙铝酸盐的含量。

经碱性溶液激发, 铝硅酸盐的溶解度也得到提高, G00-C00 试件在约 $621 \sim 740 \text{ cm}^{-1}$ 处的衍射峰与 Si-O-Si 和 Al-O-Al 的平面弯曲振动相关, 这是铝硅酸盐晶体的特征, 掺入矿渣粉的 G40-C00 试件衍射峰震动带变为 $575 \sim 817 \text{ cm}^{-1}$, 说明水化钙铝硅酸盐 (C-A-S-H) 含量随矿渣粉掺量增加而增大。所有试件在约 3458 cm^{-1} 处的带状峰对应 OH^- 离子的伸缩振动, 而在约 1381 cm^{-1} 处的带状峰则归因于 H-O-H 的弯曲振动, 表明地聚合反应产物中存在化学结合水。

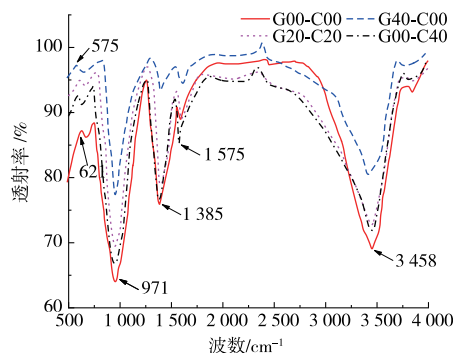


图8 地聚合物混凝土 90 d 龄期 FTIR 图谱
Fig. 8 FTIR spectrum of geopolymer concrete at 90 days

3 结论

以粉煤灰、矿渣粉、白云石粉经碱激发制备地聚合物混凝土, 研究矿渣粉、白云石粉掺量变化对粉煤灰基地聚合物混凝土力学及耐久性性能影响规律, 并从微观角度分析变化机理, 得出以下结论:

(1) 采用矿渣粉、白云石粉部分替代粉煤灰后地聚合物混凝土的坍落度显著降低, 由于白云石粉吸水率大, 随白云石粉掺量增加坍落度呈减小趋势。

(2) 地聚合物混凝土中加入矿渣粉、白云石粉可提高其抗压强度、劈裂抗拉强度, 掺入矿渣粉对提高地聚合物混凝土力学性能显著大于白云石粉, 矿渣粉、白云石粉等掺量时两者具有较佳的协同效应; 与 90 d 基准组相比, 40% 矿渣粉掺量时抗压强度、劈裂抗拉强度分别提高 76.3%、108.8%, 20% 矿渣粉+20% 白云石粉掺量时抗压强度、劈裂抗拉强度分别提高 67.1%、116.3%。

(3) 掺入矿渣粉、白云石粉可提高地聚合物混凝土的动弹性模量、降低氯离子扩散系数, 随养护龄期增长地聚合反应更加充分, 混凝土动弹性模量增大、氯离子扩散系数减小; 40% 矿渣粉掺量和 20% 矿渣粉+20% 白云石粉掺量时地聚合物混凝土动弹性模量最大、抗氯离子扩散性能最佳。

(4) 仅采用粉煤灰的地聚合物混凝土, 地聚合反应龄期长、干缩变形大; 掺入矿渣粉、白云石粉可加快地聚合反应, 缩短干缩变形周期, 提高地聚合物混凝土的抗变形能力; 掺入矿渣粉提高地聚合物混凝土抗干缩变形能力大于掺白云石粉, 矿渣粉掺量 40% 时干缩系数最小, 矿渣粉、白云石粉掺量均为 20% 时抗干缩变形能力同样显著。

(5) 微观表征揭示, 粉煤灰基地聚合物混凝土中掺入矿渣粉、白云石粉后, 通过地聚合反应可额外生成大量 C-S-H 和 C-A-S-H 凝胶, 未反应颗粒具有充填结构微孔隙作用; 凝胶晶体和充填效应协同作用使基体更加致密、均匀, 提高了地聚合物混凝土的力学及耐久性能。

参 考 文 献

- [1] 杨飞. 矿渣粉煤灰基地聚合物耐久性能研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (2): 33-36, 59.
- [2] 张逸超, 杨昊霖, 吴晓鑫, 等. 地质聚合物混凝土力学性能、耐久性 & 微观结构综述 [J]. 混凝土, 2024 (11): 84-87, 92.
- [3] 梁永宸, 石膏爽, 张聪, 等. 粉煤灰地聚合物混凝土性能与环境影响的综合评价 [J]. 材料导报, 2023, 37 (2): 82-87.
- [4] 赵人达, 杨世玉, 贾文涛, 等. 粉煤灰基地聚合物的耐久性研究新进展 [J]. 西南交通大学学报, 2021, 56 (5): 1065-1074.
- [5] 彭玉清, 郭荣鑫, 林志伟, 等. 粉煤灰地聚合物力学性能影响因素研究综述 [J]. 硅酸盐通报, 2021, 40 (3): 858-866.
- [6] 石磊, 林鑫鑫, 张卜天, 等. 全固废胶凝材料混凝土力学及耐久性能研究 [J]. 建筑科学, 2024, 40 (11): 161-172.
- [7] 黄华, 郭梦雪, 张伟, 等. 粉煤灰-矿渣基地聚合物混凝土力学性能与微观结构 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54 (3): 74-84.
- [8] 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.
- [9] 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.

(下转第 63 页)

- [6] 孙冰, 邹春海, 曾晟, 等. 不同裂隙形式类岩体单轴压缩破坏特征研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38 (6): 959-966.
- [7] 杨平. 双轴压缩下混凝土预制双裂纹扩展与应力应变关系研究 [J]. 硅酸盐通报, 2018, 37 (2): 737-743, 748.
- [8] 田文岭, 杨圣奇, 黄彦华. 不同围压下共面双裂隙脆性砂岩裂纹演化特性颗粒流模拟研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34 (6): 1207-1215.
- [9] 肖桃李, 许可, 袁浩, 等. 含共面双裂隙复合岩石的力学特性与破坏规律研究 [J]. 矿业研究与开发, 2024, 44 (1): 94-103.
- [10] 易婷, 唐建新, 王艳磊. 裂隙倾角及数目对岩体强度和破坏模式的影响 [J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17 (1): 98-106, 134.
- [11] 刘杰, 杨新龙, 马建勇, 等. 断续三裂隙花岗岩变形破坏模式单轴压缩颗粒流分析 [J]. 公路, 2018, 63 (12): 258-263.
- [12] 陈少辉, 李尚辉, 王锋. 单压下含多条有序裂隙岩石破裂规律分析 [J]. 产业创新研究, 2021 (19): 76-78.
- [13] 苏海健, 靖洪文, 赵洪辉, 等. 平行裂隙群岩体强度与破裂特征的试验研究 [J]. 工程力学, 2015, 32 (5): 192-197, 207.
- [14] 张科, 刘享华, 李昆, 等. 含孔多裂隙岩石力学特性与破裂分形维数相关性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37 (12): 2785-2794.
- [15] 汪学清, 赵云猛, 冯莹, 等. 含孔洞多裂隙复合岩层裂纹扩展和分形特性模拟研究 [J]. 煤矿安全, 2024, 55 (1): 42-49.

(上接第 27 页)

- [10] 王自柯, 付春豪, 赵军. 清水/海水环境下粉煤灰-矿渣基地聚合物混凝土抗冻性试验 [J]. 混凝土, 2025 (4): 28-33.
- [11] 原元, 赵人达, 占玉林, 等. 粉煤灰-矿渣基地聚合物混凝土的抗碳化性能 [J]. 西南交通大学学报, 2021, 56 (6): 1275-1282.
- [12] 崔钊玮, 杨靖韬, 刘荣桂, 等. 复掺白云石粉与粉煤灰混凝土力学性能试验研究 [J]. 混凝土, 2022 (12): 96-99, 109.
- [13] 林芳, 陈登. 白云石粉改性粉煤灰基地聚合物的渗碱研究 [J]. 非金属矿, 2023, 46 (4): 83-87.
- [14] 黄梓谕, 丁之尧, 曹丹, 等. 基于响应面法的多固废基地聚合物配比优化及其表征 [J]. 硅酸盐通报, 2025, 44 (2): 569-578.
- [15] 于子豪, 张彤炜, 张彤文, 等. 凝灰岩石粉制备凝胶材料及激发剂模数对抗压强度的影响 [J]. 工程科学学报, 2022, 44 (12): 2100-2110.

(上接第 49 页)

- [17] 刘维正, 葛孟源, 万家乐, 等. 考虑空间效应的桩锚支护深大基坑变形特性及影响因素数值分析 [J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18 (12): 3188-3200.
- [18] 蒋进, 周正华, 董青, 等. 土体本构模型及简化模型对基坑开挖变形数值分析结果的影响 [J]. 震灾防御技术, 2020, 15 (2): 285-292.
- [19] 王丹, 王国富, 路林海, 等. 黄河流域冲积层本构模型的深基坑适用性研究 [J]. 土木与环境工程学报 (中英文), 2019, 41 (1): 36-47.