



碱激发矿渣粉煤灰地质聚合物力学性能改性及其混凝土性能

马维¹, 何兆益²

(1. 绵阳职业技术学院, 四川 绵阳 621000; 2. 重庆交通大学, 重庆 400074)

摘要: 这是一篇陶瓷及复合材料领域的论文。碱激发矿渣粉煤灰地质聚合物 (ASFG) 具有早期强度高、耐酸碱等优异性能, 但脆性大、韧性差等缺陷影响其推广应用。为改善 ASFG 的性能且拓宽可应用于 ASFG 改性的矿物掺合料种类, 以偏高岭土、沸石粉、膨润土、硅灰石粉、轻质碳酸钙和硅灰六种矿物掺合料作为改性材料, 研究了其对 ASFG 力学性能的改性效果, 并确定了硅灰为较佳改性材料。为深入探索硅灰对 ASFG 力学性能的改善作用, 研究了硅灰掺量对 ASFG 力学性能的影响, 并确定了硅灰的较佳掺量。最后, 制备了碱激发矿渣-粉煤灰-硅灰地质聚合物混凝土 (ASFSGC), 并研究了其工作性、准静态力学性能和抗渗性。结果表明: 膨润土、硅灰石粉、轻质碳酸钙、硅灰四种矿物掺合料对 ASFG 的抗折强度具有明显增强效果。硅灰石粉、硅灰两种矿物掺合料对 ASFG 的抗压强度具有明显增强效果。对 ASFG 而言, 硅灰是一种优质矿物掺合料。随着硅灰掺量的增大, ASFG 的力学性能先增大后减小, 硅灰的较佳掺量为 4%。ASFSGC 具有良好的工作性、优异的抗渗性能, 且 ASFSGC 的延性较普通硅酸盐水泥混凝土提高了 14.1%。

关键词: 陶瓷及复合材料; 碱激发矿渣粉煤灰; 地质聚合物; 混凝土; 矿物掺合料; 硅灰

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2024.04.027

中图分类号: TD989;TU528 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2024) 04-0182-08

引用格式: 马维, 何兆益. 碱激发矿渣粉煤灰地质聚合物力学性能改性及其混凝土性能[J]. 矿产综合利用, 2024, 45(4): 182-189.

MA Wei, HE Zhaoyi. Mechanical property modification of alkali-activated slag fly ash-based geopolymer and its concrete property[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024, 45(4): 182-189.

地质聚合物是一种新型绿色胶凝材料, 以来源广泛的工业固废为原材料, 在碱性激发剂的条件下发生解聚缩聚反应, 生成三维网状结构的无机聚合物^[1-3]。地质聚合物能耗小、碳排放低、制备方便, 并且快凝早强、耐久性优异, 具有广阔的应用前景, 是普通硅酸盐水泥的较佳替代物之一^[4-5]。然而, 地质聚合物存在脆性大、韧性差等缺陷^[6]。为改善地质聚合物的性能, 相关研究使用了纤维、纳米颗粒、碳纳米管、聚合物等作为改性材料, 改性后的地质聚合物性能均有不同程度改善^[7-10]。

在普通硅酸盐水泥中, 除采用上述改性材料

改善其性能外, 还使用矿物掺合料。作为工业副产品的矿物掺合料, 在建材行业中的回收利用能缓解环境负荷, 降低碳排放, 减少能源和自然资源的消耗^[11]。矿物掺合料在普通硅酸盐水泥中得到了广泛使用, 可有效提高普通硅酸盐水泥的性能, 已成为普通硅酸盐水泥混凝土中的重要组分^[12]。因此, 借鉴矿物掺合料在普通硅酸盐水泥的高效利用, 将其引入地质聚合物中, 以期实现地质聚合物力学性能的改善。但此前将矿物掺合料应用于地质聚合物的研究相对较少, 且主要集中在矿渣、粉煤灰、矿粉等方面^[13]。

为拓宽可应用于地质聚合物改性的矿物掺合

收稿日期: 2023-06-27

基金项目: 国家自然科学基金 (51978116); 四川省教育厅项目 (18ZB0307)

作者简介: 马维 (1984-), 女, 硕士, 讲师, 主要研究方向为建筑工程项目管理及防护工程。

料种类，本文采用偏高岭土、沸石粉、膨润土、硅灰石粉、轻质碳酸钙和硅灰六种矿物掺合料对碱激发矿渣粉煤灰地质聚合物（ASFG）进行改性，研究了矿物掺合料对 ASFG 力学性能的改性效果，确定了硅灰为较佳改性材料。为深入探索硅灰对 ASFG 力学性能的改善作用，研究了硅灰掺量对 ASFG 力学性能的影响。并基于此，制备了碱激发矿渣-粉煤灰-硅灰地质聚合物混凝土（ASFSGC），研究了其工作性、准静态力学性能和抗渗性。

1 实验

1.1 实验材料

制备 ASFG 的材料包括碱性激发剂、胶凝材

料、外加剂、水和矿物掺合料。制备 ASFSGC 的材料包括碱性激发剂、胶凝材料、外加剂、水、矿物掺合料和集料。碱性激发剂包括 NaOH（片状）、Na₂CO₃（粉状），分析纯。胶凝材料包括矿渣和粉煤灰。矿渣：水淬高炉矿渣，比表面积为 491.6 m²/kg。粉煤灰：满足 I 级要求。矿渣和粉煤灰的化学组成见表 1。外加剂：三聚磷酸钠（粉状），P₂O₅≥57%，Na₆P₃O₁₀≥90%。水：洁净的自来水。矿物掺合料包括硅灰、偏高岭土、沸石粉、膨润土、硅灰石粉和轻质碳酸钙，粒径见表 2。粗集料：石灰岩碎石，粒径 5~10 mm 的碎石占 15%，粒径 10~20 mm 的碎石占 85%。细集料：中砂，细度模数为 2.8。

表 1 矿渣和粉煤灰的化学组成/%

Table 1 Chemical composition of slags and fly ash

氧化物	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	TiO ₂	MgO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	其他	烧失量
矿渣	29.2	19.4	5.8	38.6	0.2	0.6	2.8	0.1	—	2.6	0.4	0.3
粉煤灰	45.8	21.4	12.6	13.7	1.1	0.2	1.3	1.8	0.1	1.9	—	0.1

表 2 矿物掺合料的粒径/μm

Table 2 Particle size of mineral admixtures

硅灰	偏高岭土	沸石粉	膨润土	硅灰石粉	轻质碳酸钙
0.1	10	10	75	15	10

1.2 试件制备

ASFG 和 ASFSGC 试件的配合比分别见表 3、表 4。表中，ASFG-K0 为空白对照组，即未参加

矿物掺合料；ASFG-T0 为条件对照组，即参加 4.0% 的煤灰矿渣复合体（m(粉煤灰):m(矿渣)=0.6，与胶凝材，的配比相同）；其余均为实验组，偏高岭土、沸石粉、膨润土、硅灰石粉和轻质碳酸钙等矿物掺合料的掺量均为 4.0%，硅灰的掺量为 2.0%~8.0%。

表 3 ASFG 试件的配合比

Table 3 Mix ratio of ASFG specimens

试件编号	矿物掺合料种类	m(碱性激发剂): m(胶凝材料)	m(胶凝材料+ 碱性激发剂): m(水)	m(NaOH): m(Na ₂ CO ₃)	m(粉煤灰): m(矿渣)	m(三聚磷酸钠): m(胶凝材料)	m(矿物掺合料): m(胶凝材料)
ASFG-K0	-						-
ASFG-T0	粉煤灰、矿渣						
ASFG-M	偏高岭土						
ASFG-Z	沸石粉						
ASFG-B	膨润土						4.0%
ASFG-W	硅灰石粉	6.0%	2.8	1.3	0.6	0.4%	
ASFG-C	轻质碳酸钙						
ASFG-SF2							2.0%
ASFG-SF4							4.0%
ASFG-SF6	硅灰						6.0%
ASFG-SF8							8.0%

ASFG 试件的制备流程如下：（1）将矿渣、粉煤灰、三聚磷酸钠和矿物掺合料混合搅拌均匀，

制备混合粉体。（2）将 NaOH 和 Na₂CO₃ 混合，而后加水搅拌使其溶解，制成混合液体，待

冷却至室温后待用。(3)采用净浆搅拌机将粉体和液体混合并搅拌均匀,而后装入40 mm×40 mm×160 mm 三联模中,振捣、成型,室内放置24 h后移入标准养护箱中养护至相应龄期。

表4 ASFSGC 试件的配合比/(kg/m³)
Table 4 Mix ratio of ASFSGC specimens

矿渣	粉煤灰	NaOH	Na ₂ CO ₃	砂	碎石	水	三聚磷酸钠	硅灰
304	183	17	13	583	1 037	184.6	1.95	19.48

ASFSGC 试件的制备步骤(1)、(2)与 ASFG 试件一致,其中矿物掺合料为硅灰,掺量为4%。(3)将砂、碎石加入搅拌机搅拌30 s。(4)将1/2液体加入搅拌机搅拌30 s。(5)将粉

体全部加入搅拌机搅拌30 s。(6)将剩余1/2液体加入搅拌机搅拌30 s。(7)将拌合物装入模具,振捣、成型、养护。ASFSGC 试件包括150 mm×150 mm×150 mm 立方体试件、150 mm×150 mm×600 mm 长方体试件和顶面直径为175 mm,底面直径为185 mm,高度为150 mm 的圆台体试件。

1.3 实验方法

ASFG 强度测试:按照《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》(GB/T 17671—2021)中规定测试 ASFG 的强度,先测试抗折强度 f_f ,而后使用断块测试抗压强度 f_c 。ASFG 的强度测试实验结果见表5。

表5 ASFG 的强度测试实验结果/MPa
Table 5 Strength test results of ASFG

试件编号	矿物掺合料种类	f_{f-3d}	f_{c-3d}	f_{f-7d}	f_{c-7d}	f_{f-28d}	f_{c-28d}
ASFG-K0	-	3.53	18.13	4.12	27.20	4.43	44.19
ASFG-T0	粉煤灰、矿渣	3.88	19.08	4.51	31.32	4.82	48.38
ASFG-M	偏高岭土	3.28	19.02	3.88	29.98	4.25	46.17
ASFG-Z	沸石粉	3.62	18.39	4.32	28.19	4.69	45.27
ASFG-B	膨润土	3.97	19.39	5.01	28.79	5.33	47.33
ASFG-W	硅灰石粉	4.09	19.60	4.77	33.44	5.52	49.71
ASFG-C	轻质碳酸钙	4.11	18.99	5.11	28.27	6.02	45.72
ASFG-SF2		3.94	18.35	4.87	30.19	4.95	49.57
ASFG-SF4		4.13	20.78	5.40	36.95	6.43	54.57
ASFG-SF6	硅灰	4.09	22.24	5.23	36.01	6.37	55.14
ASFG-SF8		3.26	21.65	4.27	34.97	4.32	51.47

ASFG 扫描电镜实验:采用 EM-30 型扫描电子显微镜观察 ASFG 的微观形貌。

ASFSGC 和易性测试:按照《普通混凝土拌合物性能实验方法标准》(GB/T 50080—2002)中规定测试 ASFSGC 的流动性、粘聚性和保水性。

ASFSGC 强度测试:按照《普通混凝土力学性能实验方法标准》(GB/T 50081—2002)中规定测试 ASFSGC 的抗折强度 f_f 、抗压强度 f_c 和劈拉强度 f_{st} 。

ASFSGC 抗渗性测试:按照《普通混凝土长期性能和耐久性能实验方法标准》(GB/T 50082—2009)中规定测试 ASFSGC 的抗渗性。首先采用逐级加压法测试计算 ASFSGC 的抗渗等级,若压力达到3.0 MPa后,试件均不透水,则采用渗水高度法测试 ASFSGC 的渗水高度。

2 结果与分析

2.1 矿物掺合料对 ASFG 力学性能的影响

2.1.1 矿物掺合料对 ASFG 抗折强度的影响

定义强度增长率(Increase rate of strength, I_f)表征矿物掺合料对 ASFG 强度的影响程度, I_f 可由式(1)计算得到。

$$I_f = (f_{ASFG-X} - f_{ASFG-K0}) / f_{ASFG-K0} \quad (1)$$

式中, $f_{ASFG-K0}$ 为空白对照组 ASFG-K0 的强度, f_{ASFG-X} 为实验组试件的强度。不同龄期下矿物掺合料对 ASFG 抗折强度增长率(I_{ff})的影响见图1。由表5和图1可知,掺加偏高岭土后,ASFG 的抗折强度有所减小,且龄期越早,降低越明显。与 ASFG-K0 相比,3 d 龄期时,ASFG-M 的抗折强度减小了7.08%;28 d 龄期时,ASFG-M 的抗折强度

减小了 4.06%。其余矿物掺合料的掺入均可以提高 ASFG 的抗折强度，且整体上随着龄期的增大，ASFG 的 I_f 不断增大。与条件对照组 ASFG-T0 相比，掺入沸石粉后，ASFG 的抗折强度虽有所增大，但 ASFG-Z 的 I_f 较 ASFG-T0 小。ASFG-B、ASFG-W、ASFG-C、ASFG-SF4 的 I_f 较 ASFG-T0 大，膨润土、硅灰石粉、轻质碳酸钙、硅灰四种矿物掺合料对 ASFG 的抗折强度具有明显增强效果。以 $I_{f, max}$ 表示矿物掺合料对 ASFG 抗折强度的最大增幅，则矿物掺合料对 ASFG 抗折强度增强作用的大小依次为 $I_{f, max-SF4}=45.15\%$ 、 $I_{f, max-C}=35.89\%$ 、 $I_{f, max-W}=24.60\%$ 、 $I_{f, max-B}=21.60\%$ 、 $I_{f, max-Z}=5.87\%$ 。由此可见，硅灰对 ASFG 抗折强度的增强作用较佳，其余依次是轻质碳酸钙、硅灰石粉、膨润土、沸石粉，偏高岭土对 ASFG 抗折强度具有劣化效果。

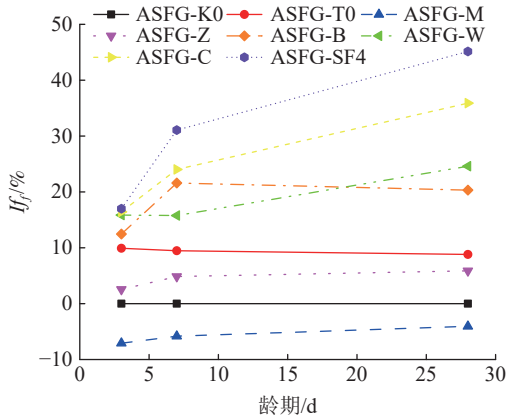


图1 不同龄期下矿物掺合料对 ASFG 抗折强度增长率 (I_f) 的影响

Fig.1 Effect of mineral admixtures on the increase rate of flexural strength of ASFG at different ages

2.1.2 矿物掺合料对 ASFG 抗压强度的影响

不同龄期下矿物掺合料对 ASFG 抗压强度增长率 (I_c) 的影响见图 2。由表 5 和图 2 可知，6 种矿物掺合料的掺入对 ASFG 各个龄期的抗压强度均有一定的提高作用，但对各龄期的增幅不同，总体趋势为 7 d > 28 d > 3 d。与条件对照组 ASFG-T0 相比，掺入偏高岭土、沸石粉、膨润土、轻质碳酸钙后，ASFG 的抗折强度虽有所增大，但 ASFG-M、ASFG-Z、ASFG-B、ASFG-C 的 I_f 较 ASFG-T0 小。ASFG-W、ASFG-SF4 的 I_f 较 ASFG-T0 大，硅灰石粉、硅灰两种矿物掺合料对 ASFG 的抗压强度具有明显增强效果。以 $I_{c, max}$ 表示矿物掺合料对 ASFG 抗压强度的增大增幅，则

矿物掺合料对 ASFG 抗压强度增强作用的大小依次为 $I_{f, max-SF4}=35.85\%$ 、 $I_{f, max-W}=22.94\%$ 、 $I_{f, max-M}=10.22\%$ 、 $I_{f, max-B}=7.11\%$ 、 $I_{f, max-C}=4.74\%$ 、 $I_{f, max-Z}=3.64\%$ 。由此可见，硅灰对 ASFG 抗压强度的增强作用较佳，其余依次是硅灰石粉、偏高岭土、膨润土、轻质碳酸钙、沸石粉。综合两方面的强度特性可知，对于 ASFG 来说，优质的矿物掺合料为硅灰和硅灰石粉。另一方面也说明，在普通硅酸盐水泥中能发挥一定强度优势的矿物掺合料，如偏高岭土、沸石粉、膨润土、轻质碳酸钙等，在 ASFG 中表现出来的强度增强效果却不是特别明显。

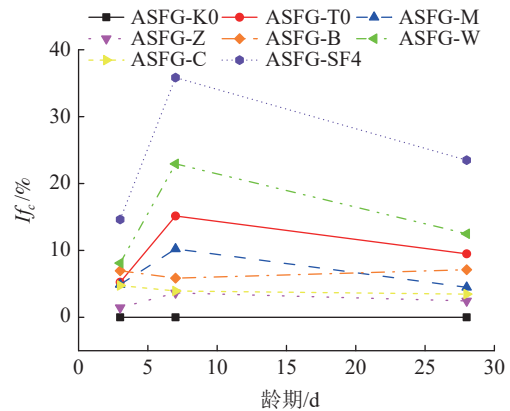


图2 不同龄期下矿物掺合料对 ASFG 抗压强度增长率 (I_c) 的影响

Fig.2 Effect of mineral admixtures on the increase rate of compressive strength of ASFG at different ages

2.2 硅灰掺量对 ASFG 力学性能的影响

2.2.1 硅灰掺量对 ASFG 抗折强度的影响

为深入研究硅灰对 ASFG 力学性能的改善作用，以掺量为设计参数建立了硅灰改性 ASFG 的实验方案，并测试 3、7、28 d 龄期下的强度，结果见表 5。不同龄期下硅灰掺量对 ASFG 抗折强度增长率 (I_f) 的影响见图 3。由表 5 和图 3 可知，当硅灰掺量为 2%~6% 时，ASFG 的抗折强度均有不同程度的增大。当硅灰掺量为 8% 时，ASFG 在 3 d 和 28 d 龄期的抗折强度均有所减小，在 7 d 龄期时的抗折强度有所增大。硅灰掺量过大时，在 ASFG 中不易分散，所以导致 ASFG-SF8 的抗折强度有所减小。龄期相同时，随着硅灰掺量的增大，ASFG 的抗折强度均先增大后减小。当硅灰掺量为 4% 时，各龄期下 ASFG 的抗折强度、 I_f 均最大。以 $I_{f, max}$ 表示硅灰对 ASFG 抗折强度的最大增幅，则各个掺量硅灰对 ASFG 抗折强度增

强作用的大小依次为 $I_{f_f, \max-SF4}=45.15\%$ 、 $I_{f_f, \max-SF6}=43.79\%$ 、 $I_{f_f, \max-SF2}=18.20\%$ 。

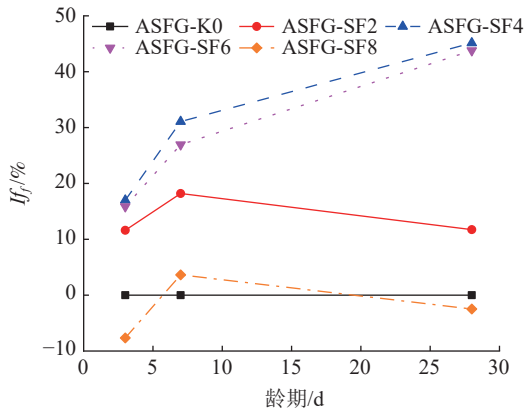


图3 不同龄期下硅灰掺量对 ASFG 抗折强度增长率 (I_{f_f}) 的影响

Fig.3 Effect of silica fume content on the increase rate of flexural strength of ASFG at different ages

2.2.2 硅灰掺量对 ASFG 抗压强度的影响

不同龄期下硅灰掺量对 ASFG 抗压强度增长率 (I_{f_c}) 的影响见图 4。由表 5 和图 4 可知, 不掺量硅灰均对 ASFG 的抗压强度具有增强效果。随着龄期的增大, 硅灰对 ASFG 抗压强度的增幅总体上表现为先增大后减小, 硅灰对 7 d 龄期时 ASFG 抗压强度的增幅最大。龄期相同时, 随着硅灰掺量的增大, ASFG 的抗压强度、 I_{f_c} 均先增大后减小。以 $I_{f_c, \max}$ 表示硅灰对 ASFG 抗压强度的最大增幅, 则各个掺量硅灰对 ASFG 抗压强度增强作用的大小依次为 $I_{f_c, \max-SF4}=35.85\%$ 、 $I_{f_c, \max-SF6}=32.39\%$ 、 $I_{f_c, \max-SF8}=28.57\%$ 、 $I_{f_c, \max-SF2}=12.17\%$ 。

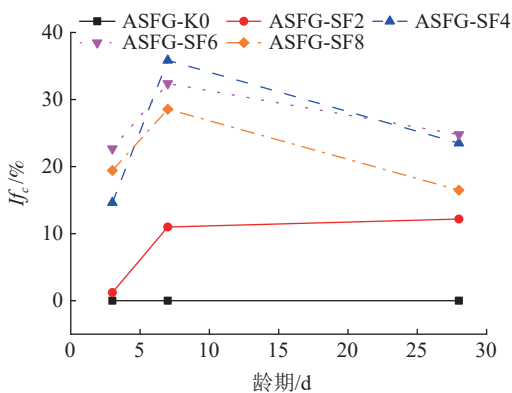


图4 不同龄期下硅灰掺量对 ASFG 抗压强度增长率 (I_{f_c}) 的影响

Fig.4 Effect of silica fume content on the increase rate of compressive strength of ASFG at different ages

综合分析可知, ASFG 的强度并不随着硅灰掺量的增加而不断增大, 因此存在较佳硅灰掺量。

由于硅灰的价格较贵 (1500 元/t), 因此在选择较佳掺量的时候, 需从价格和性能改性的两方面角度综合考虑。定义强度掺量比 (Strength Volumn Ratio, SVR), 以 28 d 龄期时 ASFG 的强度为基准, 评价硅灰掺量增大对 ASFG 强度增长率的影响, SVR 由式 (2) 计算得到。

$$SVR_i = \frac{I_{f_{SF-i}} - I_{f_{SF-(i-2)}}}{v_i - v_{i-2}} \times 100\% \quad i = 2, 4, 6, 8 \quad (2)$$

式中, v_i 为硅灰掺量, 例如 v_2 为 2%。 SVR_{ff} 表示抗折强度掺量比, SVR_{fc} 表示抗压强度掺量比。不同硅灰掺量 ASFG 的强度掺量比 (SVR) 见图 5。由图可知, 综合考虑 SVR_{ff} 与 SVR_{fc} , 硅灰的较佳掺量为 4%。

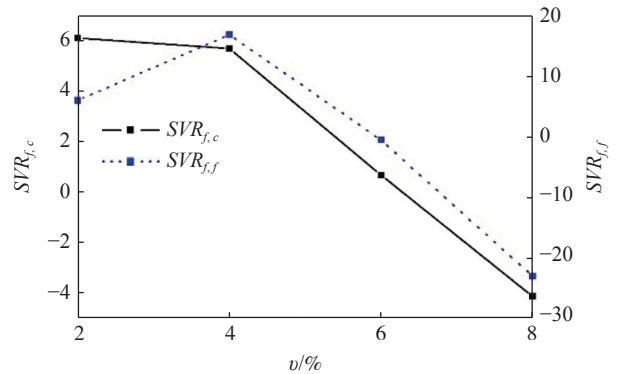


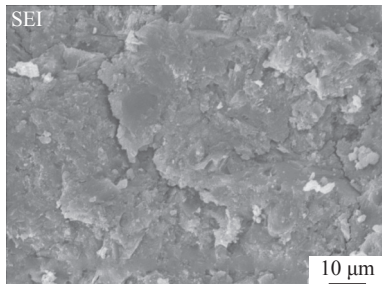
图5 不同硅灰掺量 ASFG 的强度掺量比 (SVR)

Fig.5 Strength volumn ratio of ASFG with different volumn of silica fume

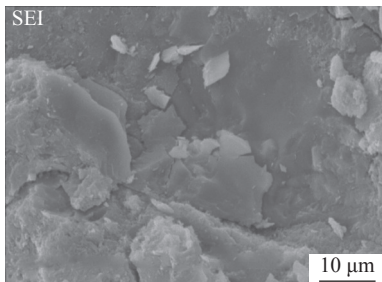
2.2.3 机理分析

ASFG 的微观形貌见图 6。由图 6 可知, 与未掺加硅灰时相比, 掺加 4% 的硅灰后, ASFG 的内部结构更为致密, 基体内孔隙和裂缝的数量显著减少。且未掺加硅灰时, ASFG 内存在较多不规则的界面。而掺加硅灰后, ASFG 内虽然也存在界面, 但界面连接十分紧密。硅灰对 ASFG 强度的增强效应主要在于其具备的两种特性: 由于硅灰的主要成分为无定形二氧化硅, 它们具有很高的活性, 因而硅灰是当前最好的火山灰材料; 硅灰的颗粒极细, 可以填充其他粉体颗粒之间的空隙^[14]。由硅灰的特性, 可产生以下几方面的微观效应: (1) 复合化学效应。在早期水化过程中起到晶核作用, 与矿渣、粉煤灰复合在碱激发作用下发生聚合反应, 同时由于颗粒非常细, 可弥补地质聚合物内部三维网状结构的可能存在的缺陷; (2) 自紧密堆积效应。研究表明, 粉体材料

的粒度分布对混凝土性能的影响至关重要。一般而言，矿渣颗粒粒径>粉煤灰颗粒粒径，而硅灰颗粒的粒径小于1 μm，平均粒径约0.1 μm，小于粉煤灰颗粒粒径，因此可填充粉煤灰颗粒间隙，进一步优化了粉体材料的微级配，形成细观层次的自紧密体系^[15]；（3）界面效应。硅灰颗粒的形状和表面粗糙度利于保水，可抑制界面处水膜的形成，改善界面过渡区的结构，提高界面粘结强度^[13]。大量实验表明，硅灰不仅具有明显的增强效应，而且在耐久性等方面也对 ASFG 具有明显的改善作用。而且市场调研表明，硅灰具有潜在的价格优势前景。对 ASFG 而言，硅灰是一种优质矿物掺合料，发展前景广阔，值得进一步开展相关研究。



(a) 硅灰掺量为0%



(b) 硅灰掺量为4%

图6 ASFG的微观形貌
Fig.6 Micromorphology of ASFG

2.3 ASFSGC的基本性能

ASFG 在工程实践中的应用主要以混凝土的形式出现，因此基于上述研究，制备了 ASFSGC。并对 ASFSGC 的基本性能进行研究，包括三方面的内容：（1）新拌混凝土性能，主要指工作性；（2）准静态力学性能，测试了标准养护 3、7、28 d 的 ASFSGC 的强度特性，分析了应力应变曲线，并从宏观角度评价了其粘结性能；（3）耐久性，主要测试其抗渗性。

2.3.1 ASFSGC的工作性

ASFSGC 工作性测试结果表明：（1）流动性：坍落度为 188 mm，满足大流动性混凝土（坍

落度>160 mm）的要求。（2）粘聚性：用捣棒轻轻敲击已坍落的新拌混凝土锥体，可发现锥体四周逐渐下沉，由此说明粘聚性良好。（3）保水性：根据新拌混凝土中稀浆析出的程度来评定。坍落度筒提起后，可发现基本无稀浆，说明保水性良好。由此可见，ASFSGC 实现了流动性、粘聚性、保水性三方面的协调统一，与硅酸盐水泥作为胶凝材料相比，ASFG 更易于实现高工作性。

2.3.2 ASFSGC的准静态力学性能

ASFSGC 准静态力学性能实验表明，实验中 ASFSGC 破坏面均是贯通骨料，较少出现骨料的突出，由此可从宏观上确定，ASFG 净浆与骨料间的界面粘结性能优异。ASFSGC 抗折、抗压及劈拉实验测试结果见表 6。

表6 ASFSGC 抗折、抗压及劈拉实验测试结果
Table 6 Flexural, compressive and splitting test results of ASFSGC

龄期/d	抗折强度/MPa	抗压强度/MPa	劈拉强度/MPa
3	3.27	19.59	3.87
7	3.66	29.37	4.12
28	4.83	42.89	5.13

测试准静态抗压强度时，得到了 ASFSGC 的应力应变曲线，并将其与同等强度等级（实测 28 d 抗压强度为 39.84 MPa）的普通硅酸盐水泥混凝土（Ordinary Portland Cement-based Concrete, OPCC）进行对比，见图 7。对比可知，相对于 OPCC 而言，ASFSGC 具有较好的延性。定义静态抗压强度达到极大值时对应的应变为 $\epsilon_{s,c}$ ，由图可知， $\epsilon_{s,c}(ASFSGC)=0.0017$ ， $\epsilon_{s,c}(OPCC)=0.00149$ 以此作为延性的评判标准，则 ASFSGC 的延性较之 OPCC 提高了 14.1%。

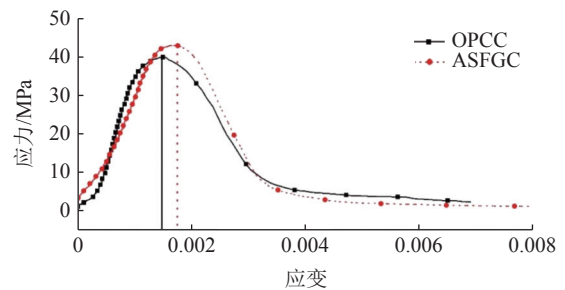


图7 ASFSGC 与 OPCC 的应力应变曲线对比
Fig.7 Comparison of stress-strain curves of ASFSGC and OPCC

2.3.3 ASFSGC的抗渗性

ASFSGC 的抗渗实验结果如下：（1）由逐级

加压法测试表明, 压力达到 3.0 MPa 后, 试件均不透水, 则有 ASFSGC 抗渗等级 $P_{ASFSGC} > 10 \times 3.0 - 1 = 29$ 。而一般而言, 抗渗等级 $\geq P6$ 的混凝土可称为抗渗混凝土, 故 ASFSGC 是抗渗混凝土 (2) 采用渗水

高度法进行进一步的研究, 利用梯形玻璃板测得的渗水高度结果见表 7。由表 7 可知, ASFSGC 的平均渗水高度为 9.2 mm。综合可知, ASFSGC 具有优异的抗渗性。

表 7 ASFSGC 的渗水高度
Table 7 Water penetration height of ASFSGC

试件编号	测点										渗水高度/mm
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
ASFSGC-1	14	12	9	10	8	11	14	11	12	13	11.4
ASFSGC-2	7	7	6	5	6	6	4	6	4	4	5.5
ASFSGC-3	10	11	9	9	8	4	7	8	10	12	8.8
ASFSGC-4	12	13	11	7	5	8	6	7	7	6	8.2
ASFSGC-5	19	17	14	13	12	13	15	17	19	20	15.9
ASFSGC-6	8	6	6	5	7	5	3	2	4	7	5.3
结果	ASFSGC 试件的平均渗水高度/mm										9.2

3 结 论

(1) 膨润土、硅灰石粉、轻质碳酸钙、硅灰四种矿物掺合料对 ASFG 的抗折强度具有明显增强效果。硅灰石粉、硅灰两种矿物掺合料对 ASFG 的抗压强度具有明显增强效果。硅灰对 ASFG 力学性能的改性效果更佳。

(2) 对 ASFG 而言, 硅灰是一种优质矿物掺合料。随着硅灰掺量的增大, ASFG 的力学性能先增大后减小, 硅灰的较佳掺量为 4%。

(3) ASFSGC 具有良好的工作性, 实现了流动性、粘聚性、保水性三方面的协调统一。ASFSGC 的延性较普通硅酸盐水泥混凝土提高了 14.1%。ASFG 净浆与骨料间的界面粘结性能优异, ASFSGC 具有优异的抗渗性能。

参考文献:

[1] 王伟杰, 金会心, 张延玲, 等. 含铬固废的资源化处理及循环利用研究进展[J]. 矿产综合利用, 2022, 2(5):64-70.
WANG W J, JIN H X, ZHANG Y L, et al. Research progress on resource treatment and recycling of solid waste containing chromium[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2022, 2(5):64-70.

[2] 田崇霏, 王亚洲, 刘晓海, 等. 混掺纤维对粉煤灰-矿渣基地质聚合物工作性及力学性能的影响研究[J]. 混凝土, 2023(4):115-119.
TIAN C F, WANG Y Z, LIU X H, et al. Study on the effect of mixed fiber on the workability and mechanical properties of flyash-slag base polymer[J]. *Concrete*, 2023(4):115-119.

[3] 李涛, 罗仙平, 钱有军. 加水一体化合成钨尾矿基地聚合

物[J]. 矿产综合利用, 2019(1):83-87.
LI T, LUO X P, QIAN Y J. Investigation on synthesis of tungsten tailings base geopolymer by water integration[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2019(1):83-87.

[4] 章玉容, 徐雅琴, 姚泽阳, 等. 配合比设计方法对再生混凝土生命周期评价的影响[J]. 浙江工业大学学报, 2020, 48(6):648-653.
ZHANG Y R, XU Y Q, YAO Z Y, et al. Influence of mix ratio design method on life cycle evaluation of recycled concrete[J]. *Journal of Zhejiang University of Technology*, 2020, 48(6):648-653.

[5] 孙英娟, 周旋, 岳丽娜, 等. 工业固废制备聚合氯化铝铁及其在煤泥废水处理中的应用[J]. 矿产综合利用, 2021(1):144-150.
SUN Y J, ZHOU X, YUE L N, et al. Preparation of polyaluminium ferric chloride from industrial solid waste and its application in coal slurry wastewater treatment[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(1):144-150.

[6] 潘钦锋, 陈亚辉, 颜桂云, 等. 钢纤维地质聚合物混凝土静态力学性能研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2023, 56(5):575-583.
PAN Q F, CHEN Y H, YAN G Y, et al. Study on static mechanical properties of steel fiber geopolymer concrete[J]. *Journal of Wuhan University (Engineering Science)*, 2023, 56(5):575-583.

[7] 魏铭, 张长森, 王旭, 等. 微纳米材料改性地质聚合物的研究进展[J]. 材料导报, 2023, 37(4):254-263.
WEI M, ZHANG C S, WANG X, et al. Research progress of micro-nanomaterials modified geopolymers[J]. *Materials Review*, 2023, 37(4):254-263.

[8] ZHANG D, ZHU H, WU Q, et al. Investigation of the hydrophobicity and microstructure of fly ash-slag geopolymer

modified by polydimethylsiloxane[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 369:130540.

[9] 宋学锋, 王骏, 王艳. 纤维/混杂纤维-矿渣地质聚合物复合材料的弯曲强度与弯曲韧性[J]. *材料导报*, 2017, 31(22): 121-124+145.

SONG X F, WANG J, WANG Y. Bending strength and bending toughness of fiber/hybrid fiber-slag geopolymer composites[J]. *Materials Review*, 2017, 31(22):121-124+145.

[10] 汪应玲, 罗绍华, 姜茂发, 等. 铁尾矿制备地质聚合物工艺条件研究[J]. *矿产综合利用*, 2019(5):121-126.

WANG Y L, LUO S H, JIANG M F, et al. Study on process conditions for geopolymer from iron tailings[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2019(5):121-126.

[11] 肖建庄, 邓琪, 夏冰. 混凝土制备低碳化演进与展望[J]. *建筑科学与工程学报*, 2022, 39(5):1-12.

XIAO J Z, DENG Q, XIA B. Evolution and prospect of low-carbon concrete preparation[J]. *Journal of Building Science and Engineering*, 2022, 39(5):1-12.

[12] 吴丽萍, 王军. 铁尾矿粉-硅粉矿物掺合料对混凝土性能的影响[J]. *矿产综合利用*, 2023(2):184-190.

WU L P, WANG J. Effect of iron tailing powder and silica powder mineral admixture on performance of concrete[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2023(2):184-190.

[13] 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.

SUN D Q, GU Z Y, SUN S, et al. Properties and characterization of alkali-excited flyash-silica base polymer[J]. *Bulletin of Silicate*, 2020, 39(5):1533-1539.

[14] 高巧玲, 范功端. 硅灰对新型地质聚合物胶凝材料力学性能影响的研究进展[J]. *武汉工程大学学报*, 2020, 42(5):540-545.

GAO Q L, FAN G D. Research progress of effects of silica fume on mechanical properties of novel geopolymer cementification materials[J]. *Journal of Wuhan Institute of Technology*, 2020, 42(5):540-545.

[15] Sanghamitra Jena, Ramakanta Panigrahi. Study on the durability and microstructure of geopolymer concrete with ferrochrome slag and silica fume[J]. *International Journal of Structural Engineering*, 2022, 12(3):302-319.

Mechanical Property Modification of Alkali-activated Slag Fly Ash-based Geopolymer and its Concrete Property

MA Wei¹, HE Zhaoyi²

(1.Mianyang Polytechnic, Mianyang 621000, Sichuan, China; 2.Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: This is an article in the field of ceramics and composites. Alkali-activated Slag-fly Ash-based Geopolymer (ASFG) has excellent properties such as high early strength, acid and alkali resistance, but its large brittleness and poor toughness affect its popularization and application. In order to improve the properties of ASFG and broaden the types of mineral admixtures that can be used for ASFG modification, six kinds of mineral admixtures, including metakaolin, zeolite powder, bentonite, wollastonite powder, light calcium carbonate and silica fume, are used as modified materials, and their modification effects on ASFG are studied. The optimum modified material is silica fume. In order to further explore the improvement effect of silica fume on the mechanical properties of ASFG, the effect of the content of silica fume on the mechanical properties of ASFG is studied, and the optimal content of silica fume is determined. Finally, Alkali-activated Slag-fly Ash-silica Fume-based Geopolymer Concrete (ASFSGC) is prepared, and its workability, quasi-static mechanical properties and impermeability are studied. The results show that bentonite, wollastonite powder, light calcium carbonate and silica fume can significantly improve the flexural strength of ASFG. Wollastonite powder and silica fume can significantly improve the compressive strength of ASFG. For ASFG, silica fume is a premium mineral admixture. With the increase of silica fume content, the mechanical properties of ASFG first increase and then decrease, and the optimal content of silica fume is 4%. ASFSGC has good workability and excellent impermeability, and the ductility of ASFSGC is 14.1% larger than that of ordinary Portland cement concrete.

Keywords: Ceramics and composites; Alkali-activated slag-fly ash; Geopolymer; Concrete; Mineral admixtures; Silica fume