

钢渣粉-粉煤灰基地聚物流变力学及微观结构分析

贾 嘉, 化思瑜

(云南航空产业投资集团有限责任公司, 昆明 650211)

摘 要: 为实现钢渣资源化利用并降低粉煤灰消耗, 研究采用钢渣粉以 10%、20%、30%、40% 的质量比替代粉煤灰, 碱激发剂为 16%、20%, 分析了地聚合物浆体的流变特性及抗压、劈裂抗拉与抗折强度演变规律, 结合 XRD 与扫描电镜 (SEM) 对微观结构进行了分析。结果表明: 随着钢渣粉与激发剂掺量增加, 浆体剪切应力、表观黏度增大, 稳定性提高, 但施工性能下降; 力学强度随钢渣粉及激发剂掺量增加而提升, 掺量大于 30% 后增幅减小, 30% 钢渣粉掺量时抗压、劈裂抗拉、抗折强度较基准组分别提高 56.9%、59.5%、66.1%; 高粉煤灰掺量下存在未反应颗粒, 掺钢渣粉引入钙离子而促进了地聚合反应进程, 生成 C-A-S-H 凝胶使微观结构更为致密, 从而增强了地聚合物的力学性能。研究成果可为制备钢渣粉地聚合物提供参考。

关键词: 钢渣粉; 粉煤灰基地聚合物; 流变特性; 力学强度; 微观结构

中图分类号: TQ528.4

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2026) 03-0037-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.03.007

Analysis of Polymeric Rheological Properties and Microstructure of Steel Slag Powder-Fly Ash Base Aggregate

JIA Jia, HUA Siyu

(Yunnan Aviation Industry Investment Group Co., Ltd., Kunming 650211, China)

Abstract: To achieve resource utilization of steel slag and reduce fly ash consumption, this study replaced fly ash with steel slag powder at mass ratios of 10%, 20%, 30%, and 40%, while using alkali activators at 16% and 20%. The rheological properties and evolution patterns of compressive, splitting tensile, and flexural strengths of the geopolymer slurry were analyzed. Microstructural analysis was conducted using XRD and scanning electron microscopy (SEM). Results indicate that increasing steel slag powder and activator content enhances paste shear stress and apparent viscosity, improving stability but reducing workability. Mechanical strength increased with higher steel slag powder and activator dosages, though the rate of increase slowed beyond 30% dosage. At 30% steel slag powder, compressive, splitting tensile, and flexural strengths exceeded the control group by 56.9%, 59.5%, and 66.1%, respectively. At high fly ash content, unreacted particles are present. The introduction of calcium ions from steel slag powder accelerates the geopolymerization process, forming C-A-S-H gel that densifies the microstructure and enhances the mechanical properties of the geopolymer. The research findings can serve as a reference for the preparation of steel slag powder geopolymers.

Key words: steel slag powder; fly ash base polymer; rheological properties; mechanical strength; microstructure

作者简介: 贾 嘉 (1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 施工管理。

通信作者: 化思瑜 (1982—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 工程管理。

收稿日期: 2025-10-21

材料科学

0 引言

传统硅酸盐水泥工业需消耗大量不可再生化石能源,且产生大量固体废弃物,不符合国家“碳中和、碳达峰”战略目标。地聚合物采用工业废弃物(如粉煤灰、矿渣粉等)作为前驱体材料,经与碱性激发剂发生地聚合反应制成,具有高力学强度、卓越的耐久性和环境友好性,为传统混凝土良好的替代材料^[1]。当前,粉煤灰的应用范围日益广泛,已出现材料短缺问题;将废弃钢渣碾磨活化替代粉煤灰制备地聚合物,可降低粉煤灰用量,且能解决钢渣资源化利用困难的问题^[2]。

钢渣粉具有一定火山灰活性,掺入粉煤灰基地聚合物中可发挥两者协同效应,对提高地聚合物性能具有积极影响^[3]。掺入钢渣粉对水泥基或地聚合物浆体流变性能存在一定影响,俞莉等^[4]探究了钢渣粉细度对钢渣-矿渣粉地聚合物浆体流变特性影响,建立了浆体流变参数预测模型,结果表明随钢渣粉细度增加塑性黏度、触变性降低;马超等^[5]、杨建祥等^[6]研究了钢渣粉替代水泥对水泥基材料浆体流变性能的影响,结果认为适当钢渣粉掺量可改善浆体稠度及泵送性,提高钢渣粉细度降低浆体流动度、增大塑性黏度;蒋灶等^[7]通过机械力活化钢渣粉后制备钢渣-粉煤灰地聚合物,机械力活化提高无定型凝胶生成量,使结构更为致密;何瑞等^[8]以钢渣为细骨料,研究了钢渣、矿渣、粉煤灰三元地聚合物力学及拉伸性能变化规律,掺入钢渣可提升抗压强度和弹性模量;李茂辉等^[9]采用氢氧化钠、芒硝激发机械粉磨钢渣活性,替代水泥量为25%时早期强度最高;焦向科等^[10]研究发现,将钙组分引入地聚合物体系,可显著改变地聚合物微观结构,钢渣粉中富含“内源钙”,形成的C-A-S-H凝胶与骨料界面过渡区更为致密;高英力等^[11]研究了钢渣等固废材料对粉煤灰地聚合物抗压强度影响,结果表明钢渣可促进水化硅铝酸钙生成,30%钢渣掺量时地聚合物强度达30 MPa;桑明明等^[12]研究了钙硅比、激发剂掺量对钢渣粉多孔地聚合物性能影响,钙硅比为1.0,掺20.4%水玻璃时材料性能最佳;柴石玉等^[13]采用钢渣粉和粉煤灰通过碱激发固化膨胀土,钢渣粉与粉煤灰质量比为1.2、激发剂掺量为

5%时土体力学强度最佳;吴维江等^[14]以钢渣粉、矿渣粉为前驱体材料,通过硅酸钠和生石灰激发其活性生成地聚合物固化疏浚土,获得了最佳质量比;戚庭野等^[15]研究了硅酸钠激发钢渣、粉煤灰固化煤矸石,钢渣粉与粉煤灰质量比为1.5、碱当量8%时地聚合物强度最大。

上述研究表明,钢渣粉可与多种前驱体材料协同制备地聚合物,但对于钢渣粉及碱激发剂掺量对粉煤灰基地聚合物性能影响仍存在不足。基于此,开展了不同钢渣粉、碱激发剂掺量对粉煤灰基地聚合物浆体流变特性及力学强度影响试验,通过XRD和扫描电子显微镜分析微观结构演变规律,揭示固化机理。研究成果可为钢渣资源化利用提供理论依据。

1 试验

1.1 原材料

I级低钙粉煤灰,密度2.33 g/cm³,比表面积为475 m²/kg;自制钢渣粉,密度2.86 g/cm³,比表面积为684 m²/kg;粉煤灰、钢渣粉化学成分见表1,XRD图谱如图1所示。钢渣粉中方解石含量最多,主要成分为CaCO₃,其次为石英,即SiO₂;而粉煤灰中主要成分为SiO₂,其次为莫来石,主要成分为硅铝酸盐矿物。细骨料采用天然河砂,粗骨料采用花岗岩碎石。

表1 粉煤灰、钢渣粉化学成分

材料	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	其他
钢渣粉	32.26	3.71	12.47	1.06	1.15	45.73	0.84	2.78
粉煤灰	60.04	1.22	23.96	0.52	4.83	2.91	1.15	5.37

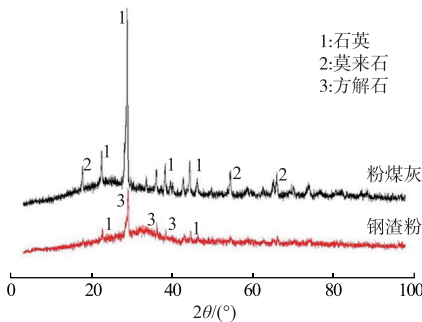


图1 钢渣粉、粉煤灰 XRD 图谱
Fig.1 XRD patterns of steel slag powder and fly ash

碱性激发剂采用水玻璃溶液和固体氢氧化钠，水玻璃溶液中 SiO₂ 含量为 28.6%、Na₂O 含量为 9%，模数为 3.3；固体氢氧化钠呈颗粒状，纯度不小于 99%；向水玻璃中加入一定剂量固体氢氧化钠，获得模数为 1.0 的碱性激发剂溶液。

1.2 试验设计

钢渣粉按照质量分数为 10%、20%、30%、40% 替代粉煤灰，碱性激发剂掺量分别为胶凝材料质量的 16%、20%，激发剂模数为 1.0，水固比为 0.4，配合比见表 2。

表 2 地聚合物配合比
Table 2 Geopolymer mix ratio / (kg/m³)

编号	粉煤灰	钢渣粉	细骨料	粗骨料	碱溶液	额外水
S1	420		670	1 130	146.3	122.7
S2	378	42	670	1 130	146.3	122.7
S3	336	84	670	1 130	146.3	122.7
S4	294	126	670	1 130	146.3	122.7
S5	252	168	670	1 130	146.3	122.7
S6	420		670	1 130	182.8	103.1
S7	378	42	670	1 130	182.8	103.1
S8	336	84	670	1 130	182.8	103.1
S9	294	126	670	1 130	182.8	103.1
S10	252	168	670	1 130	182.8	103.1

1.3 测试方法

钢渣粉-粉煤灰地聚合物浆体流变特性测试按照 JJG 1002—2005《旋转黏度计检定规程》进行，采用 TYC-LBM 型砂浆流变仪按照标准制备浆体，测定不同剪切速率时浆体的表观黏度和剪切应力。按照 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》对养护龄期为 28 d 的地聚合物试件进行抗压强度、劈裂抗拉强度和抗折强度测试。力学强度测试完成后，取试验碎片采用 XRD-6000 型 X 射线衍射仪进行 XRD 分析，采用 MAIA3-XMU 型扫描电子显微镜进行微观结构特性分析。

2 结果与分析

2.1 流变性能

由图 2 (a) 可知，采用钢渣粉部分替代粉煤灰后浆体的剪切应力增大，即浆体的触变性提高，说明用钢渣粉替代粉煤灰可明显改善地聚合物浆体的触变性；具有良好触变性的浆体在低剪切速率下具有更好的抗剪能力，在自重和外部荷载用作下结构形态的稳定性更强。剪切速率在 10~20 s⁻¹ 范围剪切

应力增幅最大，20~90 s⁻¹ 范围剪切应力近似为线性增长；随钢渣粉掺量增加剪切应力增长幅值不断增大，这表明浆体的触变性不断提高，这是因为不规则形态的钢渣颗粒之间摩擦力增大，且细小的颗粒可填充粉煤灰颗粒之间空隙，颗粒的相互吸引形成网状絮凝结构使触变性提高。激发剂掺量由 16% 增加至 20%，浆体剪切应力显著提高，钢渣粉掺量为 30% 的 S9 试件剪切应力已略高于钢渣粉掺量为 40% 的 S5 试件；这是由于提高激发剂掺量会加速地聚合反应进程，钢渣粉、粉煤灰水化反应产物增多，形成的絮状结构不易被破坏，从而提高浆体触变性。剪切应力直接关系到地聚合物在施工过程中的表现，较高的剪切应力意味着地聚合物的力学强度更高，但过高的剪切应力会导致泵送施工难度变大；因此，需合理控制高钢渣粉掺量时浆体的触变性，确保拌合物满足泵送施工要求。

由图 2 (b) 可知，碱激发钢渣粉、粉煤灰浆体的表观黏度随剪切速率增大呈降低趋势，表现出剪切稀化行为，剪切速率在 10~20 s⁻¹ 范围时降幅最大，而后随剪切速率增大逐渐趋于平稳。采用钢渣粉替代粉煤灰后，地聚合物浆体的表观黏度显著提高，随钢渣粉掺量增加表观黏度不断增大；相同钢渣粉掺量试件浆体，碱激发剂掺量为 20% 的表观黏度大于激发剂掺量为 16% 试件，这说明增加激发剂掺量可提高钢渣粉、粉煤灰浆体的表观黏度。表观黏度反映浆体内部结构阻碍浆体流动的性能，提高地聚合物试件的表观黏度可有效减小拌合物在运输、泵送施工期间的泌水现象，并增强其稳定性；表观黏度还反映了浆体内部摩擦程度，更高表观黏度可避免浆体的絮凝结构被破坏。钢渣粉颗粒粒径虽小于粉煤灰，但其形态为不规则形状，颗粒之间呈现球齿咬合作用；另外钢渣粉可充填粉煤灰颗粒间的空隙，提高了浆体颗粒间的接触面积，使颗粒间摩擦力增大；上述两者的共同作用导致浆体表观黏度随钢渣粉掺量而增大。

2.2 抗压强度

由图 3 可知，碱性激发剂掺量为 16% 时，不掺钢渣粉的基准组试件抗压强度为 35.9 MPa，钢渣粉掺量为 10%、20%、30%、40% 的试件抗压强度相比基准组分别提高了 17.6%、30.4%、50.7%、

材料科学

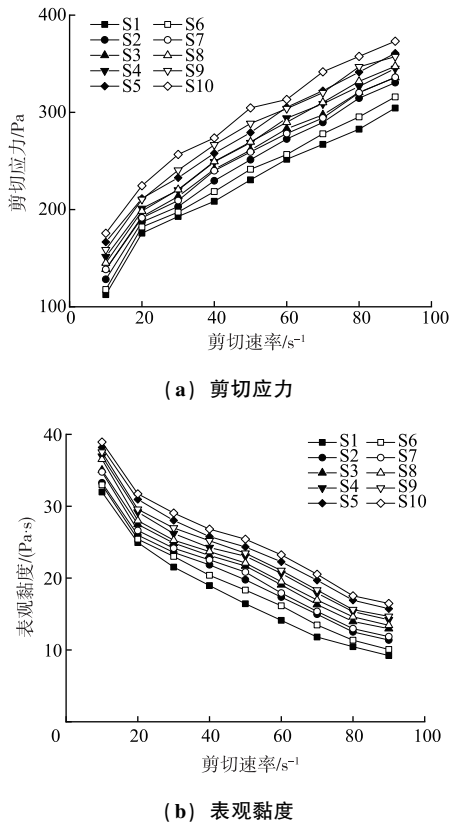


图2 碱激发钢渣粉、粉煤灰浆体流变特性
Fig. 2 Rheological properties of alkali activated steel slag powder and fly ash slurry

56.6%；同样，激发剂掺量为20%时，基准组试件抗压强度为38.7 MPa，钢渣粉掺量为10%、20%、30%、40%的试件抗压强度相比基准组分别提高了20.9%、35.4%、56.9%、65.1%。结果表明，随着地聚合物混合物中钢渣粉含量的增加，抗压强度值显著提高；碱性激发剂掺量对地聚合物抗压强度影响显著，随激发剂掺量增加，抗压强度得到了显著发展。钢渣粉掺量超过30%后，抗压强度曲线斜率出现减小趋势，抗压强度增幅减小，说明过大钢渣粉掺量时并不利于地聚合反应进行；从两种碱激发剂掺量的抗压强度曲线斜率来看，掺量为20%的抗压强度大于掺量为16%的抗压强度，说明提高激发剂掺量可增强高钢渣粉掺量试件的地聚合反应。

掺入钢渣粉可增强地聚合物抗压强度，这源于钢渣粉相比粉煤灰具有更粗糙的颗粒结构，与粉煤灰基地聚合物之间形成了机械黏结机制，随钢渣粉掺量增加这种机械黏结机制增强，由此提高地聚合物抗压强度。此外，钢渣粉颗粒尺寸小于粉煤灰，

具有更高的比表面积，细小钢渣颗粒填充在粉煤灰颗粒之间，形成了牢固的黏结；钢渣颗粒与未反应粉煤灰颗粒协同起到填充孔隙作用，其占据了粉煤灰颗粒之间的空隙，从而形成了更致密的地聚合物微观结构；这也是随着钢渣粉含量增加，地质聚合物混凝土强度增强的主要原因。

全采用粉煤灰作为前驱体材料时，由于存在较多的粉煤灰，导致地聚合物基质不当以及反应不稳定^[16]；采用钢渣粉部分替代粉煤灰后有助于增强地聚合反应过程进行，钢渣粉可提供大量的钙离子，与粉煤灰经地聚合反应形成的C-S-H、C-A-S-H凝胶。碱性激发剂掺量较低时，因碱性浓度不足导致溶出的离子数量少，使地聚合链式反应变得不稳定；提高激发剂掺量可促进地聚合反应，形成以C-A-S-H凝胶为主晶体，C-A-S-H凝胶相比C-S-H具有更高的强度和耐久性能，从而改善强度特性。

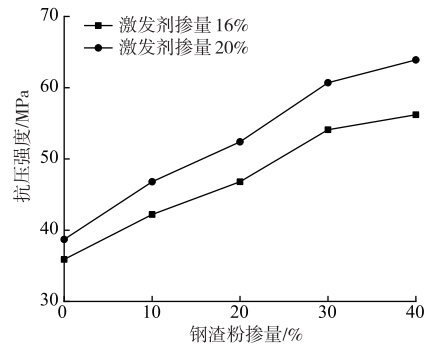


图3 不同钢渣粉掺量的地聚合物抗压强度
Fig. 3 Compressive strength of polymers with different amounts of steel slag powder

2.3 劈裂抗拉强度

由图4可知，碱性激发剂掺量为16%时，不掺钢渣粉的基准组试件劈裂抗拉强度为3.9 MPa，钢渣粉掺量为10%、20%、30%、40%的试件劈裂抗拉强度相比基准组分别提高了20.5%、38.5%、51.3%、58.9%；同样，激发剂掺量为20%时，基准组试件劈裂抗拉强度为4.2 MPa，钢渣粉掺量为10%、20%、30%、40%的试件劈裂抗拉强度相比基准组分别提高了28.6%、45.2%、59.5%、69.1%。与抗压强度变化规律类似，掺入钢渣粉对地聚合物劈裂抗拉强度具有积极作用，随钢渣粉掺量增加劈裂抗拉强度增大；这是由于钢渣粉相比粉煤灰，其颗粒的比表面

积更大, 钢渣粉颗粒填充了粉煤灰颗粒之间的空隙, 这是提高钢渣粉掺量的地聚合物劈裂抗拉强度更高的关键原因之一。碱性激发剂掺量由 16% 提高至 20%, 全采用粉煤灰的试件劈裂抗拉强度提升了 7.7%, 而掺入钢渣粉的各组试件劈裂抗拉强度提升了约 14%; 这说明高激发剂掺量对掺入钢渣粉的粉煤灰基地聚合反应影响更为显著, 高激发剂掺量可引入大量钠离子, 与钢渣粉中的钙离子经地聚合反应生成 C-A-S-H 凝胶, 提高界面过渡区黏结强度, 由此提高地聚合物的劈裂抗拉强度; 仅采用粉煤灰的试件地聚合反应缓慢, 需要更长的反应时间才能达到预期强度, 故 28 d 劈裂抗拉强度低于掺钢渣粉试件。

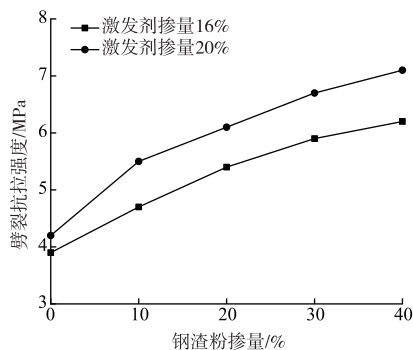


图 4 不同钢渣粉掺量的地聚合物劈裂抗拉强度

Fig. 4 Splitting tensile strength of geopolymer with different amounts of steel slag powder

2.4 抗折强度

由图 5 可知, 碱性激发剂掺量为 16% 时, 不掺钢渣粉的基准组试件抗折强度为 5.1 MPa, 钢渣粉掺量为 10%、20%、30%、40% 的试件抗折强度相比基准组分别提高了 39.2%、51.0%、62.8%、64.7%; 同样, 激发剂掺量为 20% 时, 基准组试件抗折强度为 5.6 MPa, 钢渣粉掺量为 10%、20%、30%、40% 的试件抗折强度相比基准组分别提高了 41.1%、53.6%、66.1%、71.4%。对比分析抗压、劈裂抗拉强度结果, 掺入 10% 钢渣粉后抗折强度增长更为显著; 钢渣粉掺量为 10%~30% 时, 抗折呈线性增长, 掺量大于 30% 后抗折强度增幅显著减小。激发剂掺量由 16% 增加至 20%, 未掺加钢渣粉和钢渣粉掺量为 10%、20%、30%、40% 的试件抗折强度分别提高

了 9.8%、11.3%、11.7%、12.1%、14.3%; 可见, 抗折强度随激发剂掺量增加而提高, 且钢渣粉掺量越高的试件, 抗折强度增幅越大。综上, 掺入钢渣粉可提高粉煤灰基地聚合物的抗折强度, 这源于钢渣粉中“钙”组分具有更高的火山灰反应活性, 与粉煤灰经地聚合反应生成了额外的 C-A-S-H 凝胶, 随着钢渣掺量的增加抗折强度提升更为显著; 另一方面, 高碱性激发剂掺量更利于激活钢渣粉活性, 促进地聚合反应进行。

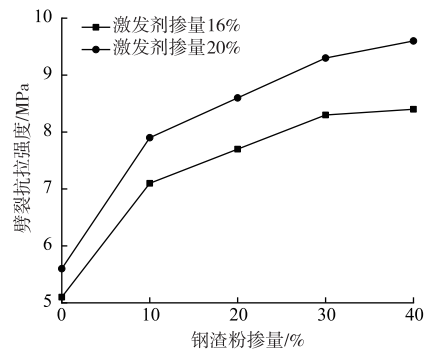


图 5 不同钢渣粉掺量的地聚合物抗折强度

Fig. 5 Flexural strength of geopolymer with different amounts of steel slag powder

2.5 XRD 分析

由图 6 可知, 地聚合物中 XRD 图谱中同时显示了非晶相和晶相存在, 并观察到显著的石英和方解石结晶峰; 另外, 还观察到莫来石、氧化铝的微弱峰。钢渣粉掺量不小于 20% 的各组地聚合物试件中 C-A-S-H 凝胶峰最为显著, 随钢渣粉掺量增加衍射峰呈现增强趋势, 表明掺入钢渣粉增强了地聚合反应的持续性, 生成更多的 C-A-S-H 凝胶晶体。钢渣

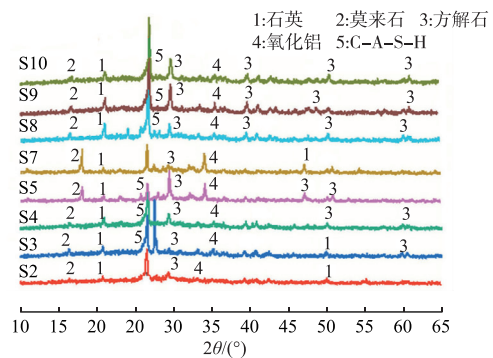


图 6 不同钢渣粉掺量的地聚合物 XRD 衍射图

Fig. 6 XRD diffraction patterns of geopolymers with different amounts of steel slag powder

材料科学

粉中含有较高的可溶性氧化钙,这对提升地聚合反应活性、促进凝胶生成具有积极作用,故随着钢渣粉掺量增加,经地聚合反应形成的凝胶数量也不断增多。钢渣粉与粉煤灰经碱激发反应产生了预期混合凝胶材料,在各组试件共同发现的地聚合产物中,C-A-S-H相在约 $25^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 范围被显著检测到,方解石衍射峰随钢渣粉掺量增加而增强,这归因于地聚合产物氢氧化钙吸收空气中的 CO_2 形成碳酸钙相。

此外,高碱性环境下可促使前驱体材料中 Si^{4+} 、 Al^{3+} 、 Ca^{2+} 及其他微量离子的溶出,增强地聚合反应程度,提高地聚合物凝胶强度;碱激发剂掺量为20%时碱性更强,各组试件中结晶峰较激发剂掺量为16%的试件更为显著。钢渣粉掺量为10%的S2、S7试件中检测到的石英、方解石和莫来石晶相比较少,且C-A-S-H相的峰强度微弱,说明凝胶的生成量较低。

2.6 SEM 分析

由图7可知,地聚合物的微观结构显示了标准化的介质、聚合物反应、未活化的粉煤灰颗粒以及半活化的粉煤灰颗粒。在粉煤灰掺量较高的S2、S7试件中,观察到未活化的粉煤灰颗粒,这由于粉煤灰反应活性较低,而导致粉煤灰颗粒无法充分活化;

且微观形貌中明显可见凝胶形成不充分,基体中存在不良结合面,呈现不连续状,微观结构致密性较差,导致形成的地聚合物力学强度较低。钢渣粉掺量为30%的S4、S9试件中未活化粉煤灰颗粒较少,C-A-S-H凝胶生成量增加,形成了更致密的微观结构,这与强度分析结果一致,说明掺入钢渣粉可提高粉煤灰地聚合反应程度,生成更多的地聚合反应基体。对比S4与S9微观结构的差异性,可发现S9试件相比更为致密;这源于更高碱激发含量会促进了地聚合反应的有效进行,高碱性环境下会增强前驱体材料中离子的溶出,由此提高了地聚合反应凝胶生成数量,从而改变了地聚合物体系的微观结构,这与高掺量碱激发剂时力学强度提高结果一致。

结合XRD分析可以得出,单一粉煤灰基地聚合物因粉煤灰难以全部活化,且钙离子含量低导致地聚合物强度低,这表明均衡的硅、铝、钙元素是地聚合物基体形成和稳定的关键;硅和铝离子通过聚合形成地聚合物网络的骨架,而钙离子则有助于材料的强度和耐久性^[10];提高碱激发掺量,促碱激发反应活性,使地聚合物凝胶由C-S-H转变为C-A-S-H,形成的地聚合物基体具有更高力学性能。

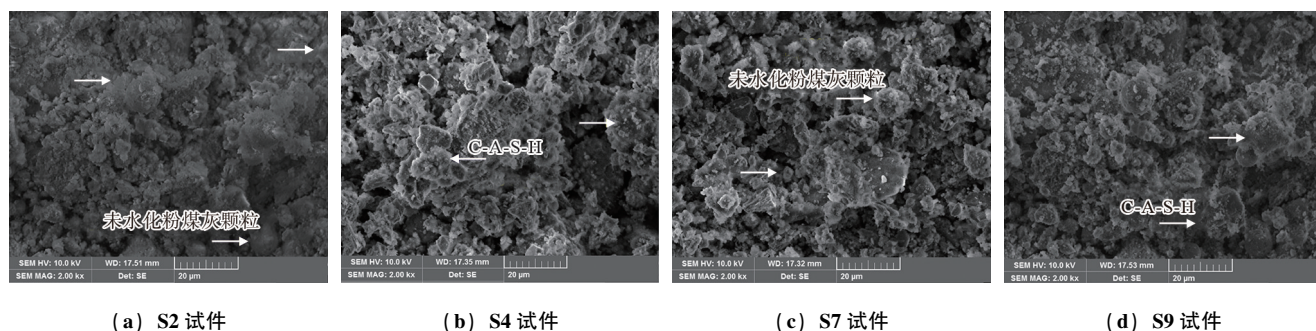


图7 不同钢渣粉掺量的地聚合物 SEM 图像
Fig. 7 SEM images of geopolymer with different amounts of steel slag powder

3 结论

为探讨钢渣粉、激发剂掺量对粉煤灰基地聚合物性能的影响,采用钢渣粉部分替代粉煤灰制备地聚合物,研究了地聚合物浆体流变特性、力学强度以及微观强度增长机制,得出以下结论。

(1) 钢渣粉、碱激发剂掺量对地聚合物浆体流

变特性影响显著,剪切应力、表观黏度均随钢渣粉、碱激发剂掺量增加而增大;高钢渣粉掺量浆体稳定性更好,但会降低可施工性能。

(2) 粉煤灰基地聚合物抗压强度、劈裂抗拉强度、抗折强度均随钢渣粉掺量增加而增大;钢渣粉掺量大于30%后抗压、抗折强度增幅降低,劈裂抗拉强度增幅未有显著减小;地聚合物力学强度随碱

激发剂掺量提高而增大，且钢渣粉掺量越高强度增幅越大；20%碱激发剂掺量、钢渣粉掺量为40%时，地聚合物抗压、劈裂抗拉、抗折强度较基准组试件分别提高了65.1%、69.1%、71.4%。

(3) 掺入钢渣粉通过提供更多的钙组分，提高了地聚合过程的反应活性，促使生成更多C-A-S-H凝胶晶体，提高了地聚合物微观结构致密程度，从而提升力学强度；提高激发剂掺量可促使前驱体材料中活性离子溶出，增强地聚合物反应程度；均衡活性钙、钠等元素含量时形成的地聚合物强度及耐久性能更佳。

参 考 文 献

- [1] 杨飞. 矿渣粉煤灰基地质聚合物耐久性能研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (2): 33-36, 59.
- [2] 王逸飞, 瓦依提·力提甫, 姬豪杰, 等. 钢渣粉-矿渣粉复合胶凝材料力学性能的研究及预测 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (4): 1-6.
- [3] 张西玲, 郭海峰, 汤子奇, 等. 钢渣微粉-粉煤灰基地质聚合物性能研究及微观结构分析 [J]. 硅酸盐通报, 2021, 40 (12): 4044-4051.
- [4] 俞莉, 张树祥, 朱涛, 等. 钢渣-矿粉基地聚合物的流变性能及其参数预测 [J]. 建筑材料学报, 2025, 28 (5): 465-476.
- [5] 马超, 姚兆龙, 杨钊, 等. 钢渣粉与硅灰复掺水泥基材料的流变、早期水化热与强度 [J]. 长江科学院院报, 2024, 41 (6): 164-170.
- [6] 杨建祥, 曾三海, 郑正旗, 等. 超细钢渣粉对硅酸盐水泥浆体流变性能的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2020, 39 (8): 2508-2514, 2566.
- [7] 蒋灶, 徐中慧, 徐亚红, 等. 钢渣-粉煤灰机械活化制备地聚合物水泥的耐盐腐蚀性能研究 [J]. 混凝土与水泥制品, 2017 (9): 88-91.
- [8] 何瑞, 杨泽铭, 颜天佑, 等. 钢渣改性高延性地聚物复合材料力学性能研究 [J]. 混凝土, 2025 (1): 94-98.
- [9] 李茂辉, 陆有军, 楚京军, 等. 激发材料对碱性钢渣替代水泥早期强度规律研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (3): 25-29, 39.
- [10] 焦向科, 李玲, 李佳. 钙对地聚合物微观结构和性能影响的研究进展 [J]. 功能材料, 2024, 55 (5): 5057-5065.
- [11] 高英力, 祝张煌, 孟浩, 等. 电石渣-脱硫石膏-钢渣改性粉煤灰地聚物协同增强机理 [J]. 建筑材料学报, 2023, 26 (8): 870-878.
- [12] 桑明明, 赵恒泽, 吴培益, 等. 钢渣基多孔地质聚合物的制备及吸附性能研究 [J]. 硅酸盐通报, 2022, 41 (2): 562-571, 581.
- [13] 柴石玉, 张凌凯. 碱激发粉煤灰-钢渣粉协同固化膨胀土力学特性与微观机理研究 [J]. 材料导报, 2023, 37 (增刊1): 269-276.
- [14] 吴维江, 谷雷雷, 王盛年, 等. 工业固废基地聚物固化河道疏浚土力学特性试验研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2025, 45 (3): 643-651.
- [15] 戚庭野, 成思远, 冯国瑞, 等. 碱激发钢渣-粉煤灰固废充填材料的制备及强度形成机理 [J]. 煤炭科学技术, 2025, 53 (6): 236-249.
- [16] 彭玉清, 郭荣鑫, 林志伟, 等. 粉煤灰地聚物力学性能影响因素研究综述 [J]. 硅酸盐通报, 2021, 40 (3): 858-866.