

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

Research on the Use of Alkali Activated Fly Ash Blast Furnace Slag Powder Solidified Casting
Waste Sand as Roadbed Filling Material

陈广升

(广州一建建设集团有限公司, 广州 510000)

摘要: 为将铸造废砂经土地质聚合反应应用做路面基层材料, 以不同掺量高炉矿渣粉、粉煤灰为胶凝材料, NaOH 溶液为激发剂, 研究混合料的固化时间及无侧限抗压强度变化规律, 并进行了混合料微观形貌分析。结果表明: 铸造废砂颗粒粒径大, 碱性溶液难以激发其活性并将其固化; 仅掺入 5% 粉煤灰无法使铸造废砂固化; 同时掺入高炉矿渣粉、粉煤灰, 可发生土工聚合反应; 提高高炉矿渣粉掺量、碱性溶液浓度可缩短固化时间; 增加粉煤灰掺量, 将延长固化时间; 粉煤灰掺量为 5%、高炉矿渣粉掺量为 15% 时, 无侧限抗压强度最大; 相同高炉矿渣粉掺量时, 抗压强度随粉煤灰掺量增大而增大; 提高碱性溶液浓度, 使混合料抗压强度降低; 混合料养护 28 d 时, 可获得约 85% 的抗压强度; 碱激发高炉矿渣粉、粉煤灰可产生大量凝胶, 充填密实铸造废砂颗粒间孔隙, 提高混合料密实度, 同时生成沸石晶体, 共同提高混合料抗压强度。研究成果可为铸造废砂用作路基填料提供理论依据。

关键词: 路基工程; 铸造废砂; 碱激发; 工业废渣; 路用性能

中图分类号: U414 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2025) 04-0117-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.04.022

CHEN Guangsheng

(Canton One Construction Group Co., Ltd., Guangzhou 510000, China)

Abstract: To utilize foundry waste sand as a road base material via geopolymerization, the variation patterns of setting time and unconfined compressive strength of the mixtures were investigated using ground granulated blast furnace slag (GGBS) powder and fly ash as cementitious materials at different dosages, with a NaOH solution as the activator, microstructural morphology analysis of the mixtures was also conducted. The results show that casting waste sand particles with large particle size, alkaline solution is difficult to stimulate its activity and curing; only 5% fly ash can not make the casting waste sand curing; at the same time, blasting furnace slag powder, fly ash, geopolymerization reaction can occur; Increase the dosage of blasting furnace slag powder, the concentration of alkaline solution can shorten the curing time; Increase the dosage of fly ash, will extend the curing time; 5% of the dosage of fly ash, the dosage of blast furnace slag powder for 15% fly ash dosage, the maximum unconfined compressive strength; The same blast furnace slag powder dosage, the compressive strength increases with the increase in fly ash dosage; Increase the concentration of alkaline solution, so that the compressive strength of the mixture is reduced; Mixture maintenance 28 d, you can get about 85% of the compressive strength; Alkali excitation of blast furnace slag powder, fly ash can be produced in large quantities to produce a gel, filling and compacting of casting sand particles between the pores to

道桥技术

improve the compactness of the mix, while generating zeolite crystals, which together can produce a large amount of gel, filling and compacting casting sand particles between the pores to improve the compactness of the mix, while generating zeolite crystals. At the same time, zeolite crystals are generated to improve the compressive strength of the mixture. The research results can provide theoretical basis for the casting waste sand used as roadbed filler.

Key words: roadbed engineering; casting waste sand; alkali excitation; industrial waste residue; roadworthiness

0 引言

石英砂为铸造模具的主要材料，铸造石英砂在循环使用中发生质量损失后无法继续使用成为铸造废砂，我国每年在铸件生产过程中产生铸造废砂超过 5000 万 t^[1-2]。由于铸造废砂成分复杂，回收、二次利用难度较大，采用堆放或填埋处理方式不仅浪费土地资源，且给自然环境带来严重污染，研究铸造废砂的二次利用迫在眉睫。铸造废砂颗粒级配与粗粒土相近，其颗粒具有较高的抗压强度，将其替代粗粒土作为路基填料，不仅可实现废弃物二次利用，也符合国家节能减排的“双碳”战略。

为实现铸造废砂的二次利用，学者们从多角度进行了研究，取得了一定成果。芋艳梅等^[3]、卢泽洲^[4]研究认为，采用铸造废砂替代天然石英砂会降低混凝土力学性能，但通过优化配合比，仍可制备力学性能符合要求的铸造废砂混凝土；将铸造废砂作为细骨料会降低混凝土性能，制约了其在混凝土材料中的应用。采用碱性溶液可激发矿渣、粉煤灰等工业废料活性，可将其作为胶凝材料制备土质地质聚合物^[5-6]；高炉矿渣、粉煤灰等活性材料具有形成不确定凝胶的特性，这种凝胶在与碱性溶液混合时凝固形成的 Na-Si-Al-OH 键，与硬化水泥中的 Ca-Si-OH 键相比，具有更好的耐久性^[7-8]。孙晓刚等^[9]、李松波^[10]研究了碱激发高炉矿渣、粉煤灰等胶凝材料作为固化剂，固化地质聚合物具有优异的力学性能；李龙梓等^[11]采用不同种类可再分散乳胶粉作为激发剂，获得了碱激发粉煤灰-矿渣材料的最佳配比；王敏等^[12]采用不同碱激发剂制备铸造粉尘-粉煤灰土质地质聚合物，认为水玻璃激发效果最佳；邓嘉等^[5]、冀欣等^[13]采用钢渣粉、钢渣、粉煤灰为材料，制备碱激发地质聚合物，28 d 养护龄期聚合物抗压强度超过 30 MPa；荀小伟等^[14]、赵银飞等^[15]研究了碱激发废弃矿物胶凝材料机理，认

为富含金属离子的矿物易形成高强度土工地质聚合物，粉煤灰含量对激发胶凝材料的凝固时间具有一定影响。

碱激发粉煤灰、矿渣粉制备地质聚合物胶凝材料的研究较多，但尚未发现采用碱激发高炉矿渣粉-粉煤灰固化铸造废砂用作路基填料的相关研究。碱激发土质地质聚合物不使用水泥，与硬化水泥胶凝材料相比，减少了水泥生产过程中碳排放，具有较高的环保价值。因此，以高炉矿渣粉、粉煤灰为碱激发胶凝材料，采用不同浓度的 NaOH 溶液作为激发剂，研究高炉矿渣粉、粉煤灰、铸造废砂不同配比时，固化地质聚合物性能的变化规律，为铸造废砂用作路基填料提供理论依据。

1 试验材料及方法

1.1 原材料

铸造废砂主要成分为石英砂，含有少量黏土，细度模数为 1.31；粉煤灰采用Ⅲ级粉煤灰，细度 2.17，密度 2.23 g/cm³，勃氏比表面积为 788 m²/kg；高炉矿渣粉采用 S95 级矿渣粉，比表面积为 591 m²/kg，密度为 2 930 kg/m³，28 d 活性指数为 113%。粉煤灰、高炉矿渣粉主要化学成分见表 1，颗粒级配如图 1 所示。铸造废砂颗粒粒径范围在 1 μm~1 mm 之间，大于 0.1 mm 粒径约占总质量的 35%，在三种混合料中颗粒粒径分布范围最大；粉煤灰、高炉矿渣粉颗粒粒径大量集中于 10~20 μm 范围，颗粒粒径显著小于铸造废砂。碱激发剂采用 NaOH 试剂，纯度为 99%，用自来水将其稀释，制备 20%、25% 浓度的 NaOH 溶液。

表 1 粉煤灰、高炉矿渣粉主要化学成分
Table 1 Main chemical components of fly ash and blast furnace slag powder

材料名称	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	SO ₃	MgO	K ₂ O
粉煤灰	4.75	34.62	51.41	2.71	0.44	0.49	1.63
高炉矿渣粉	0.54	13.3	30.73	42.32	1.45	9.23	0.34

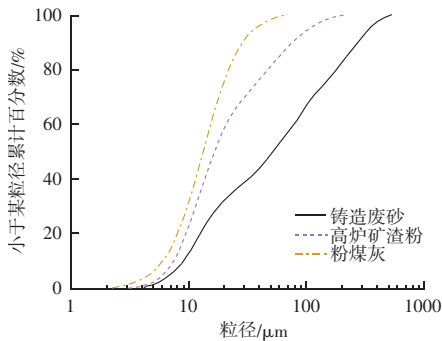


图1 颗粒级配曲线
Fig.1 Particle size distribution curve

1.2 试验配合比

试验采用20%、25%浓度的NaOH溶液，以粉煤灰、高炉矿渣粉等质量替代铸造废砂，试验材料质量配合比见表2。

表2 试验材料质量配合比			
Table 2 Quality mix ratio of experimental materials /%			
编号	粉煤灰	高炉矿渣粉	铸造废砂
SF0-0			100
SF5-0	5		95
SF5-5	5	5	90
SF5-10	5	10	85
SF5-15	5	15	80
SF5-20	5	20	75
SF10-0	10		90
SF10-5	10	5	85
SF10-10	10	10	80
SF10-15	10	15	75
SF10-20	10	20	70

1.3 试验方法

无侧限抗压强度试验采用直径、高度均为100 mm的圆柱体试件，采用ACTIS-1000型压力机测定。根据试验材料配合比将三种材料混合放入搅拌机中搅拌30 s，然后加入NaOH溶液再搅拌2 min，将搅拌均匀的混合料装入模具，之后放置于振动台振捣密实。试件初凝后脱模，采用保鲜膜包裹密封，放入温度(20±1)℃、相对湿度不小95%的标准养护箱中养护，每组配合比试件9个，3个一组，分别养护7、28、90 d。试验方法按照JTG 3441—2024《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》规定执行。

将90 d龄期试件制备抛光切片，采用JSM-IT100LA扫描电子显微镜(SEM)在不同加速电压下对试件的微观形貌进行分析。

2 结果与分析

2.1 固化时间

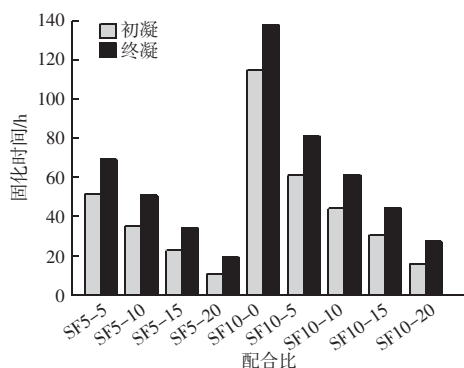
图2为不同配合比混合料固化时间。在NaOH溶液浓度20%激发下，未掺高炉矿渣粉、粉煤灰的SF0-0试件以及仅掺5%粉煤灰的SF5-0未固化，根据7 d后混合物状态，确认无法产生固化反应；SF10-0试件在115 h初凝，168 h终凝，固化时间超过5 d。可见单独碱激发铸造废砂常温条件下无法固化，仅掺入5%粉煤灰同样无法固化。掺入高炉矿渣粉后各组试件均发生固化反应，随高炉矿渣粉掺量的增加，初凝、终凝时间均呈现减小趋势；粉煤灰掺量为5%时，高炉矿渣粉掺量由5%增至20%，初凝时间分别为51.5、35.8、23.1和10.8 h，终凝时间分别为69.3、50.7、34.1和19.8 h，初凝时间最大减小40.7 h，终凝时间最大减小49.5 h；粉煤灰掺量为10%时，高炉矿渣粉掺量由5%增至20%，初凝时间分别为61.2、44.1、30.6和16.3 h，终凝时间分别为81.1、61.2、44.3和27.4 h，初凝时间最大减小44.9 h，终凝时间最大减小53.7 h。由此可见，加入高炉矿渣粉后可显著缩短固化时间，增加粉煤灰掺量将延长混合料固化时间。

NaOH溶液浓度为25%时，各组试件随高炉矿渣粉掺量的增加，初凝、终凝时间均呈现减小趋势；粉煤灰掺量为5%时，高炉矿渣粉掺量由5%增至20%，初凝时间最大减小34.1 h，终凝时间最大减小45.8 h；粉煤灰掺量为10%时，高炉矿渣粉掺量由5%增至20%，初凝时间最大减小31.5 h，终凝时间最大减小48.2 h。相比NaOH溶液浓度为20%时，掺入高炉矿渣粉后各组试件固化时间进一步减小。粉煤灰掺量为5%时，不同高炉矿渣粉掺量混合料的终凝时间分别减小11.7%、16.0%、19.4%、22.2%；粉煤灰掺量为10%时，不同高炉矿渣粉掺量混合料的终凝时间分别减小15.0%、16.2%、23.1%、24.5%。由此可见，不同粉煤灰掺量时，提高NaOH溶液浓度，可显著缩短混合料的初凝、终凝时间；混合料的初凝、终凝时间降低值基本相近。

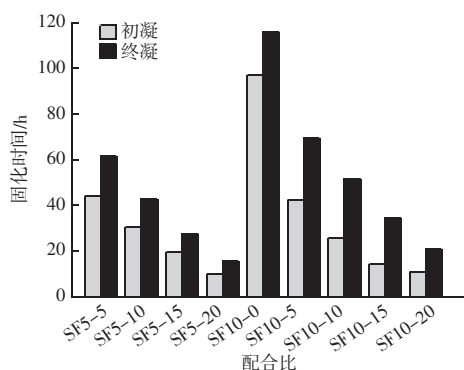
综上，采用NaOH溶液激发铸造废砂无法使其固化，仅掺入10%粉煤灰后可实现混合料固化，再掺

道桥技术

入高炉矿渣粉后可显著缩短混合料固化时间, 增加粉煤灰掺量将延长混合料固化时间, 增大 NaOH 溶液浓度可提高土工地质聚合物反应速率, 缩短混合料的固化时间。这主要是由于粉煤灰中含有较多晶体矿物, 而高炉矿渣粉主要成分为玻璃体矿物, 相比粉煤灰更易于参与碱激发聚合反应; 同时较高的 pH 值环境可加速混合料中的活性成分的析出, 故提高 NaOH 溶液浓度有利于缩短固化时间。



(a) 20% 浓度 NaOH 溶液



(b) 25% 浓度 NaOH 溶液

图2 不同配合比混合料固化时间

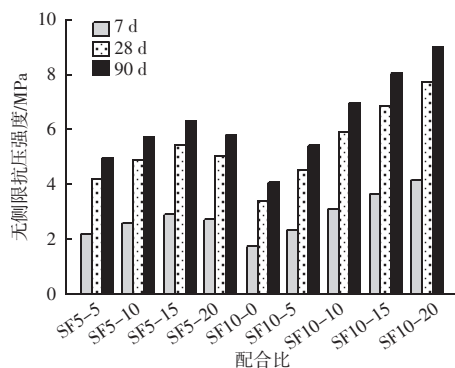
Fig. 2 Curing time of mixtures with different mix proportions

2.2 无侧限抗压强度

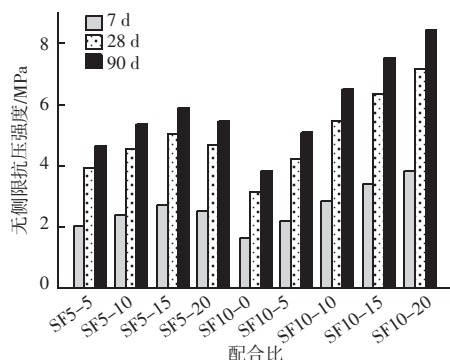
由图3(a)可以看出, 粉煤灰掺量为5%时, 混合料无侧限抗压强度随高炉矿渣粉掺量增加呈先增加后减小趋势, 高炉矿渣粉掺量为15%时抗压强度最大; 粉煤灰掺量为10%时, 混合料无侧限抗压强度随高炉矿渣粉掺量增加而增大, 但增长幅度随掺量增加而减小。这主要由于聚合物固化反应由粉煤灰和高炉矿渣粉产生, 当粉煤灰掺量较小而高炉矿渣粉掺量较大时, 由于粉煤灰掺量小, 使聚合物中活性成分减少, 混合料固化反应由 Na-Si-Al-OH 结构为主向 Ca-Si-Al-OH 结构转变, 这将降低固

化材料的强度。混合料 28 d 龄期无侧限抗压强度相比 7 d 龄期平均增长 88.6%, 90 d 龄期相比 28 d 龄期平均增长 17.8%, 说明碱激发聚合物相比水泥聚合物需要更长的养护龄期方可达到目标设计强度, 故公路基层铺设完成后养护时间不得小于 28 d 方可开放交通。以 10% 粉煤灰掺量为例, 90 d 龄期时高炉矿渣粉每增加 5%, 抗压强度分别增长 33.25%、28.65%、15.37%、12.33%, SF10-0 试件无侧限抗压强度小于 SF5-5 试件 0.9 MPa, 说明仅掺入粉煤灰时不利于提高混合料抗压强度, 掺入高炉矿渣粉后可显著提高混合料抗压强度, 但随高炉矿渣粉掺量增加抗压强度增幅不断减小。根据 JTG D50—2017《公路沥青路面设计规范》中对公路基层材料强度的要求, SF5-5 试件 7、28 和 90 d 龄期无侧限抗压强度分别为 2.2、4.2 和 4.9 MPa, 7 d 龄期强度仅可用于二级及以下公路底基层, 28 和 90 d 龄期强度满足高速公路、一级公路底基层要求; 由于碱激发固化聚合物材料养护龄期长, 宜采用 28 d 龄期强度作为路基材料选定标准。

由图3(b)可以看出, 采用 25% 浓度 NaOH 溶液固化混合料的无侧限抗压强度变化规律与 20% 浓度时基本一致, 但抗压强度相比采用 20% 浓度 NaOH 溶液时均有所降低, 7 d 龄期相比平均降低 7.6%, 28 d 龄期相比平均降低 7.2%, 90 d 龄期相比平均降低 6.4%。高浓度碱性溶液虽有利于加速聚合反应、缩短固化时间, 但将使激发反应产生硅铝酸盐 (C-A-S-H)、水化硅铝酸钠 (N-A-S-H) 等凝胶过早沉淀, 抑制了固化反应的进行; 另外, 高浓度碱溶液提高了反应速率的同时, 也使反应产生的气泡更加密集, 部分气泡无法顺利排出, 提高了固化材



(a) 20% 浓度 NaOH 溶液



(b) 25% 浓度 NaOH 溶液

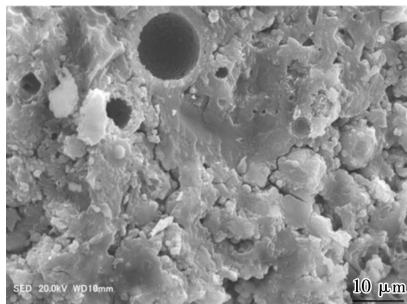
图3 不同配合比混合料无侧限抗压强度
Fig. 3 Unconfined compressive strength of mixtures with different mix proportions

料的孔隙率, 进一步导致抗压强度降低。综上, 增加 NaOH 溶液浓度虽可缩短混合料的固化龄期, 但降低了混合料的抗压强度, 应适当控制碱激发土工聚合反应的溶液浓度。

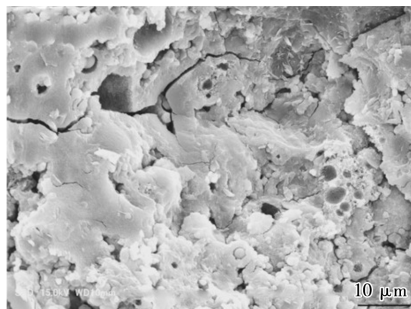
2.3 微观形貌分析

上述分析表明, 采用 20% 浓度 NaOH 溶液激发混合料可获得最佳的抗压强度, 故选取 20% 浓度 NaOH 溶液激发的 SF5-5、SF5-10、SF5-15 三组试件, 进行 28 d 龄期时的微观断裂面图像分析, 如图 4 所示。

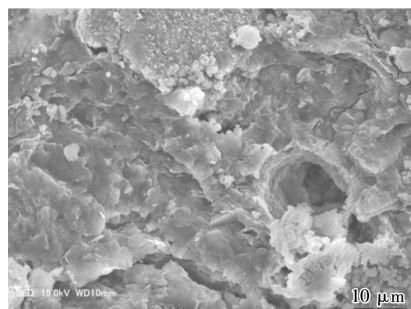
经过 NaOH 碱性溶液激发聚合反应, 三种配合比混合料的颗粒形状已模糊不清, 颗粒之间缝隙被胶凝材料充填, 形成致密的结构。这是由于高炉矿渣粉、粉煤灰经过 NaOH 激发后生成了大量凝胶, 将废砂颗粒固结在一起。随着高炉矿渣粉掺量增加, 结构面中的孔隙数量逐渐减小, 结构表面更加光滑、颗粒形状更加模糊, 聚合物的密实程度大幅度提高, 直观表现为固化混合料抗压强度的增长。这主要由于经过 NaOH 碱性激发, 高炉矿渣、粉煤灰中含有 Si、Al 等有潜在活性的离子被大量溶出, 经过土工



(a) SF5-5



(b) SF5-10



(c) SF5-15

图4 28 d 龄期 20% 浓度 NaOH 溶液激发混合料微观形貌
Fig. 4 Microscopic morphology of mixes excited by 20% NaOH solution at 28 d age

聚合反应生成了致密结构的 C-S-H、N-A-S-H 等胶体, 从而提高了混合料的力学性能。另外, 从结构表面可以看到有沸石晶体, 而在原材料中均不含有沸石, 可以认为土工聚合反应生成沸石, 可进一步提高混合料颗粒间的强度。

3 结论

以 NaOH 溶液为碱性激发剂, 不同粉煤灰、高炉矿渣粉掺量制备胶凝材料, 研究常温条件固化铸造废砂作为路基混合料的性能, 得出以下主要结论:

(1) 20%、25% 浓度 NaOH 溶液可激发粉煤灰、高炉矿渣粉混合物的活性, 使其产生土工地质聚合反应; 随高炉矿渣粉掺量增大及 NaOH 溶液浓度提高, 土工地质聚合物初凝、终凝时间均呈现减小趋势; 增大粉煤灰掺量, 将延长土工地质聚合物初凝、终凝时间。

(2) 粉煤灰掺量为 5% 时, 混合料无侧限抗压强度随高炉矿渣粉掺量增加, 呈先增大后减小趋势, 高炉矿渣粉掺量为 15% 抗压强度最大; 相同高炉矿渣粉掺量时, 抗压强度随粉煤灰掺量增大而增大; 提高碱性 NaOH 溶液浓度, 将降低混合料强度。

道桥技术

(3) 采用 NaOH 溶液可激发固化粉煤灰、高炉矿渣粉、铸造废砂混合料, 28 d 龄期混合料的抗压强度约为最终强度的 85%, 用于路面基层时养护时间不宜小于 28 d。

(4) 高炉矿渣粉、粉煤灰经过 NaOH 激发后生成了大量凝胶, 减小混合料颗粒间的孔隙, 提高结构微观致密程度; 土工聚合反应可生成沸石晶体, 进一步提高混合料强度。

参 考 文 献

- [1] 刘金城. 铸造砂回收利用的新方向 [J]. 铸造, 2024, 73 (11): 1625–1626.
- [2] 徐梦晏. 铸造废砂再生及其环境影响评价分析 [J]. 能源与节能, 2022 (2): 203–204.
- [3] 芋艳梅, 李江华. 改性铸造废砂对混凝土力学及耐磨性能的影响 [J]. 混凝土与水泥制品, 2024 (9): 110–113.
- [4] 卢泽洲. 基于铸造废砂的超高性能混凝土制备与性能研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.
- [5] 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.
- [6] 唐力军, 刘卫东, 陈凯伦. 超细活性粉煤灰对碱激发矿渣体系的影响研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2022, 38 (4): 92–97.
- [7] 徐先杰, 朱志敬, 王孟, 等. 固体 NaOH/Na₂SiO₃ 激发矿粉/粉煤灰-炉渣基注浆材料性能研究 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2024, 55 (2): 628–637.
- [8] 孙开强, 刘琳, 郑蕻陈. 碱激发矿渣-粉煤灰胶凝材料力学性能影响因素分析 [J]. 硅酸盐通报, 2024, 43 (9): 3313–3319.
- [9] 孙晓刚, 赵英良, 邢军, 等. 碱激发高炉矿渣-粉煤灰制备充填胶凝材料 [J]. 金属矿山, 2016 (11): 189–192.
- [10] 李松波. 粉煤灰矿渣基地聚物对软土加固效果的影响研究 [J]. 化学工程师, 2023, 37 (11): 98–102.
- [11] 李龙梓, 李酉成, 田寅. 可再分散乳胶粉改性碱激发粉煤灰矿渣材料的性能研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2022, 36 (4): 36–41.
- [12] 王敏, 吴勇生, 李如燕, 等. 碱激发剂对铸造粉尘-粉煤灰基地质聚合物抗压强度的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2013, 32 (6): 1037–1042.
- [13] 冀欣, 王振军, 赵昕, 等. 碱激发固废道路补强材料的制备与性能 [J]. 长安大学学报 (自然科学版), 2022, 42 (3): 99–111.
- [14] 荀小伟, 肖亚雄, 张佰发, 等. 碱激发地聚物的反应机理、性能与应用的研究进展 [J]. 矿产综合利用, 2023 (6): 83–90.
- [15] 赵银飞, 邓凯, 邹争光, 等. 室温碱激发粉煤灰基胶凝材料制备及其性能研究 [J]. 新型建筑材料, 2024, 51 (7): 60–64.
- [1] 文安飞, 张政, 霍志强, 等. 级配再生细骨料及粉煤灰掺量对活性粉末混凝土性能影响 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (5): 17–21.
- [2] 古文博, 童立元, 闫鑫, 等. 电化学注浆-碳化联合加固软土地基试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2025, 47 (7): 1464–1473.
- [3] 赵兴涛. 适用于软土地基快速固化的土壤固化剂研究 [J]. 化学工程师, 2023, 37 (10): 94–9788.
- [4] 邱近哲, 杜广印, 王传乐, 等. 智能化双向搅拌粉喷桩加固海相软土地基的力学性能及承载力评价方法研究 [J]. 工程地质学报, 2025, 33 (1): 377–386.
- [5] 詹斌, 沈立, 单生辉, 等. 不均匀软土地基加固后沉降特性及参数分析 [J]. 工程与建设, 2024, 38 (5): 1068–1072.
- [6] 卢兰萍, 张泽浩, 张宇超. 水泥粉煤灰碎石桩复合地基对于软土的加固效果研究 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22 (20): 8877–8883.
- [7] 陈颖辉, 蔡伟, 欧明喜. 木质素纤维-高钙粉煤灰复合改良膨胀土试验研究 [J]. 安全与环境学报, 2024, 24 (3): 978–985.
- [8] 黄煌煌, 陈铁锋, 高小建. CO₂ 矿化改性高钙粉煤灰对水泥砂浆力学性能和微结构的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2024, 43 (5): 1889–1896.
- [9] 张扬, 李四平. 高掺量高钙粉煤灰单轴对称矩形钢管混凝土受弯构件力学性能的试验研究 [J]. 混凝土, 2022 (10): 28–33.
- [10] 王志伟. 纳米 SiO₂ 对粉煤灰陶粒混凝土的力学与耐久性能的影响分析 [J]. 粉煤灰综合利用, 2022, 38 (4): 32–35, 116.
- [11] 陈永亮, 张轶轲, 陈铁军, 等. 碱激发高钙粉煤灰发泡地聚合物的制备及机理 [J]. 硅酸盐通报, 2023, 42 (8): 2787–2798.
- [12] 王协群, 桂忆宁, 刘宁, 等. 镁质水泥基多相胶凝材料改性固化淤泥路用性能试验研究 [J]. 公路交通科技, 2025, 42 (1): 85–93.
- [13] 刘庆, 林军, 谢佳旻, 等. MICP 复合材料固化软土一维固结试验及机理研究 [J]. 高校地质学报, 2023, 29 (3): 487–496.
- [14] 邱斌, 许晨成, 张文昌, 等. 基于拓扑优化的水泥土桩加固高速公路软土地基变形特性分析 [J]. 山东农业大学学报 (自然科学版), 2024, 55 (6): 968–976.