

水泥-固废基固化流态膨胀土溶洞注浆充填材料特性研究

崔琦

(中交第三公路工程局有限公司,北京市 101304)

摘要:针对高速铁路岩溶地区溶洞注浆材料成本高、环保性不足的问题,以粗粉煤灰、矿粉协同水泥,制备水泥-固废基固化流态膨胀土注浆充填材料。通过正交试验探究材料流动扩展度、单轴抗压强度的变化规律,并结合XRD微观试验揭示其水化机理。结果表明,水泥、粗粉煤灰对材料两项核心指标影响显著,流动扩展度随水泥掺量增加、粗粉煤灰与矿粉掺量降低而减小,抗压强度则随水泥与矿粉掺量增加、粗粉煤灰掺量降低而增大,材料最大流动扩展度达237 mm,28 d最大抗压强度为15.02 MPa。其水化产物主要为C-S-(A)-H、AFt,优化胶凝材料掺量、延长养护龄期可促进水化反应、提升强度。通过优化材料工作力学性能,得到适配高铁岩溶溶洞注浆的充填材料,为岩溶工程治理提供了低成本、绿色的解决方案。

关键词: 溶洞注浆材料;流态膨胀土;水化机理;工作力学性能

中图分类号: U414

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)07-0088-06

Research on Characteristics of Grouting Filling Materials for Cement-Solid Waste-based Solidified Fluidized Expansive Soil Cave

CUI Qi

(CCCC Third Highway Engineering Co., Ltd., Beijing 101304, China)

Abstract: Aiming at the problems of high material costs and insufficient environmental friendliness in grouting materials for karst caves in high-speed railway karst areas, a cement-solid waste-based solidified fluidized expansive soil grouting filling material is developed by using coarse fly ash and mineral powder in conjunction with cement. Through orthogonal experiments, the variation patterns of material flow expansion and uniaxial compressive strength are explored, and combined with XRD microscopic tests, the hydration mechanism is revealed. The results indicate that cement and coarse fly ash significantly affect two core indicators of the material. The flow spread decreases as the cement content increases and the coarse fly ash and mineral powder content decrease. Meanwhile, the compressive strength increases as the cement and mineral powder content increase and the coarse fly ash content decreases. The maximum flow spread of the material reaches 237 mm, and the maximum compressive strength at 28 days is 15.02 MPa. The hydration products are mainly C-S-(A)-H and AFt. Optimizing the content of cementitious materials and extending the curing period can promote the hydration reaction and enhance the strength. By optimizing the mechanical properties of materials, a filling material suitable for grouting in karst caves of high-speed railways is obtained, providing a low-cost and green solution for the management of karst engineering.

Keywords: grouting materials of karst caves; solidified fluidized expansive soil; hydration mechanism; working mechanical properties

0 引言

岩溶地区地下溶洞是高速铁路、桥梁稳定运营的潜在重大安全隐患^[1]。目前,注浆充填是解决此隐患的常用处治方法,其核心关键为具备高流动性、

力学性能的注浆材料^[2]。传统注浆材料以水泥基浆液为主,但具有生产能耗高、碳排放量大及成本高等缺点^[3]。因此,急需开发出具备高性能、绿色环保经济类注浆材料^[4]。

为解决上述问题,近年来逐渐发展出固废基注浆材料充填施工工艺。固废基注浆材料可作为传统水泥注浆材料的替代方案,具备流动性优良、强度可调、自密实等特性,适用于溶洞与采空区回填工

收稿日期: 2020-01-21

作者简介: 崔琦(1990—),男,学士,工程师,中交第三公路工程局有限公司项目工程师。

程^[5-6]。肖杰^[7]等以循环流化床脱硫灰(Circulating Fluidized Bed, CFB 灰)、钢渣微粉(Steel Slag Slurry, SSS 粉)及脱硫石膏三种工业固废为原料,制备全固废型采空区注浆材料。研究表明,该全固废注浆材料的工作性能与力学性能均可满足道路采空区充填的施工要求。

任才富^[8]等以钢渣、矿渣和脱硫石膏为原料制备了一种低碳、低成本的固废基注浆材料,研究发现固废材料可提高固废基注浆材料的工作性能与后期强度。

膨胀土具备显著的遇水膨胀、失水收缩变形特性,常被视为不良工程土体,因此在各项工程中常常将其丢弃^[9]。然而,膨胀土膨胀性与吸附能力在注浆材料设计中可能转化为独特优势^[10]。杜建彪^[11]等采用废弃膨胀土、水泥与标准砂配制流态固化土,试验结果表明,试样膨胀特性主要受水泥掺量与砂掺量控制,无侧限抗压强度主要由水泥水化作用提供,初始流动度与水固比、砂掺量及水泥掺量呈正相关。基于流态化改性技术,可实现膨胀土与固废协同固化,能制备出兼具自密实性能与微裂隙填充能力的浆液体系。肖杰^[12]等采用粒化高炉矿渣粉、粉煤灰与水泥制备流态固化红黏土,试验结果表明:体系流动扩展度随水泥掺量提高或粉煤灰掺量降低呈下降趋势;无侧限抗压强度随水泥、粒化高炉矿渣粉掺量增加先升后降,随粉煤灰掺量提高逐渐减小,各组试件 28 d 无侧限抗压强度介于 0.7~2 MPa 范围内。但目前相关研究多集中于材料改性层面,针对体系间协同作用机制、流变性能调控及长期耐久性等方面仍缺乏系统深入的研究。

本研究利用水泥(Ordinary Portland Cement, OPC)、粗粉煤灰(Coarse Fly Ash, CFA)与矿粉(Blast Furnace Slag, BFS)制备水泥-固废基膨胀土注浆材料,系统性研究注浆材料工作力学性能及水化反应机理规律,解决固废处置与溶洞治理难题。研究成果可为岩溶区工程安全、固废资源化及低碳施工提供技术路径,具有显著的环保价值与工程意义。

1 试验材料

本文所采用的水泥为海螺牌 42.5 普通硅酸盐水泥(OPC),所用粗粉煤灰(CFA)与矿粉(BFS)来自山东宽信工贸有限公司,外加剂为三聚磷酸钠(Sodium Tripolyphosphate, STP)。所用土为山东枣庄膨胀土(Expansive Soil, ES)。拌合用水为自来水。

2 试验方案设计

2.1 正交水平设计

根据前期预备试验结果,本研究设定水固比(水与固相材料质量比)为 0.9,灰土比(固化剂与土颗粒质量比)为 50%,STP 掺量固定为 ES 质量的 2%。经预试验配比计算,采用 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 三联立方体模具成型试件,单组试件所需浆体总量约 4 300 g,其中 ES 约 1 132 g、固化剂 1 131 g、外加剂 23 g、用水量约 2 037 g。

以水泥、粗粉煤灰、矿粉掺量作为正交试验的三个因素,分别记为 A、B、C,用于分析其对流态固化膨胀土性能的影响规律,具体因素水平如表 1 所示。

表 1 正交试验因素与水平

水平	因素		
	A(OPC)/g	B(CFA)/g	C(BFS)/g
1	103	154	51
2	180	206	103
3	257	308	154

2.2 正交试验方案设计

将 2.1 中各因素的水平混合值输入 SPSS 软件,设计 9 组正交实验方案,如表 2 所示。

表 2 正交试验因素与水平

组号	内掺/g			外掺/%
	A(OPC)	B(CFA)	C(BFS)	STE
D ₁	257	308	51	2
D ₂	103	206	154	
D ₃	257	154	154	
D ₄	103	308	103	
D ₅	180	308	154	
D ₆	257	206	103	
D ₇	180	206	51	
D ₈	180	154	103	
D ₉	103	154	51	

3 试验方法

3.1 工作力学试验

3.1.1 流动扩展度(FED)

参照规范《预拌流态固化土工程应用技术标准》(DBJ51/T 188—2022),采用美国 ASTM 高 150 mm 直径 76 mm 的空心圆柱筒测定浆体流动扩展度。

3.1.2 无侧限抗压强度(UCS)

依据《水泥土配合比设计规程》(JGJ/T 233—2011)成型 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 立方体试件,经标准养护至设计龄期后,采用全自动抗折抗压一

体机进行无侧限抗压强度(Unconfined Compressive Strength, UCS)测试。

3.2 微观试验

3.2.1 微观试样制备

选取 UCS 测试后的破碎试样,放入无水乙醇密闭容器中以终止水化反应。测试前,将试样置于 60℃烘箱中干燥至恒重。

3.2.2 XRD 衍射试验

取部分试样碎块经玛瑙研钵磨细并过 0.075 mm 筛,采用 X 射线衍射仪进行物相分析与结晶度测定,扫描区间 2θ 为 $5^\circ \sim 80^\circ$,扫描速率为 $5^\circ/\text{min}$ 。

4 试验结果分析

4.1 工作力学性能试验结果分析

4.1.1 原材料特性

(1) 化学成分

采用 X 荧光射线显微镜(XRF)分析各材料化学成分,试验如表 3 所示。

表 3 原材料化学成分

单位: %

材料	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	SO ₃
OPC	20.09	5.74	62.18	4.37	1.22	1.93	0.58	3.30
CFA	51.68	35.08	4.04	6.65	0.23	0.64	0.48	1.03
BFS	14.60	27.52	40.19	0.49	—	13.21	—	0.10
ES	54.33	30.35	0.079	6.72	3.48	1.57	0.15	0.02

由上表可知, OPC 与 CFA 的主要化学成分相似,均为 Al₂O₃、Fe₂O₃、CaO 与 SiO₂,但含量各不相同。OPC 中化学成分含量较多的为 SiO₂、CaO,分别高达 20.09%、62.18%; CFA 中化学成分含量较多的为 SiO₂、Al₂O₃,分别高达 51.68%、35.08%。BFS 中主要化学成分为 SiO₂(14.6%)、Al₂O₃(30.25%)、CaO(40.19%)。ES 主要化学成分为 SiO₂(54.33%)、Al₂O₃(30.25%)。

(2) 粒度分析

利用激光粒度分析仪对试验所用原材料的粒径特性进行测试,测试结果如表 4 所示。

表 4 原材料粒度参数、比表面积与密度

样品	粒度参数/ μm			比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)	表观密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
	D ₁₀	D ₅₀	D ₉₀		
OPC	1.55	11.37	41.12	553	2.87
CFA	8.28	31.79	102.62	139	2.77
BFS	1.973	13.327	42.492	387	2.84

由表 4 可得, OPC、CFA 与 BFS 的比表面积依次为 553、139、387 m^2/kg ,表观密度分别为 2.87、2.77、2.84 g/cm^3 。由此可知,四种原材料平均粒径大小顺序为: CFA>BFS>OPC。

4.1.2 FED

水泥-固废基固化流态膨胀土材料 FED 单因素方差分析的结果如表 5 所示,因素与水平影响曲线如图 1 所示,各因素对 FED 规律如图 2 所示, FED 各组正交试验结果如图 3 所示。

表 5 水泥-固废基固化流态膨胀土材料 FED 单因素方差分析结果

因素	F	P
A	209.33	0.005
B	72.33	0.014
C	10.33	0.088
R ²	0.986	

由表 5 可知, FED 单因素方差分析模型 R^2 为 0.986,说明模型执行效果良好。因素 A、B 的 P 值分别为 0.005、0.014,均小于 0.05;说明对 FED 具有显著性影响。因素 C 的 P 值(0.088)>0.05,对 FED 影响不显著。根据各因素 F 值大小,可得到各因素对 FED 的影响程度排序为: A>B>C。根据图 2 可知, FED 随 OPC 掺量增加而降低,这是由于 OPC 具备吸水性,使得流态固化土浆体中自由水含量降低,黏度增加,流动扩展度降低^[13]; FED 随 CFA、BFS 掺量增加而增大,这是由于 CFA、BFS 表面光滑,特别是 CFA 粒径较大,且多有球状颗粒,可浆体中固体原材料对自由水的吸附作用,降低黏度,流动扩展度增大^[14]。

根据图 3 中 FED 试验结果可知, D₁~D₉ 组流动扩展度在 215~237 mm 之间,均满足《铁路隧道注浆技术规程》(TB 10121—2014)中注浆材料流动扩展度不小于 180 mm 的要求。说明水泥-固废基固化流态膨胀土材料具备良好的流动性。

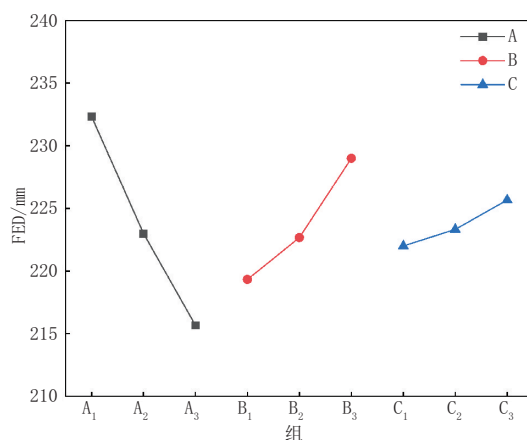


图 1 因素与水平影响曲线图

4.1.3 UCS

水泥-固废基固化流态膨胀土材料 UCS 单因素方差分析的结果如表 6 所示,各因素对 UCS 规律如图 3 所示。UCS 各组正交试验结果如图 4 所示。

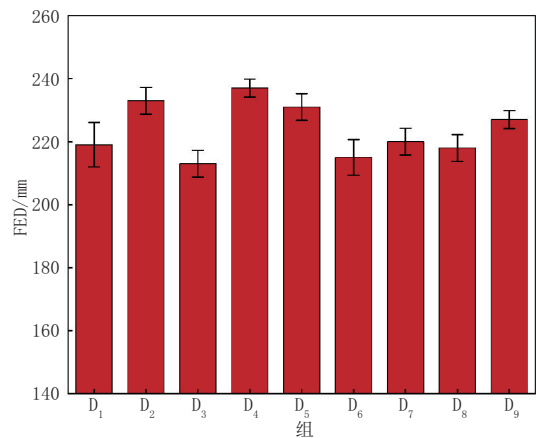


图 2 FED 试验结果图

表 6 水泥-固废基固化流态膨胀土材料 UCS 单因素方差分析结果

因素	7 d		28 d	
	F	P	F	P
A	532.000	0.002	50.746	0.019
B	183.000	0.005	21.092	0.045
C	4.000	0.200	1.818	0.355
R ²	0.994		0.946	

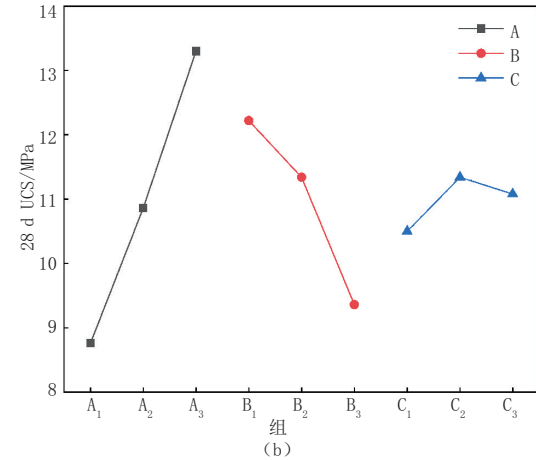
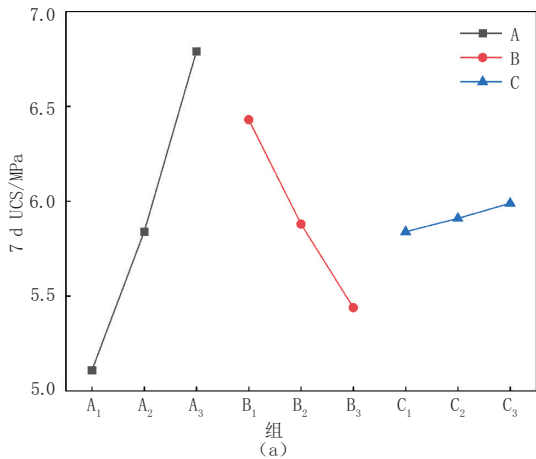


图 3 UCS 因素与水平影响曲线

根据表 6 中 UCS 单因素方差分析结果可知, UCS 的 7、28 d 单因素方差分析模型 R^2 分为 0.994、0.946, 说明 UCS 的单因素方差拟合效果良好。7、28 d 的 UCS 方差拟合分析结果中, 因素 A (0.002、0.019)、B

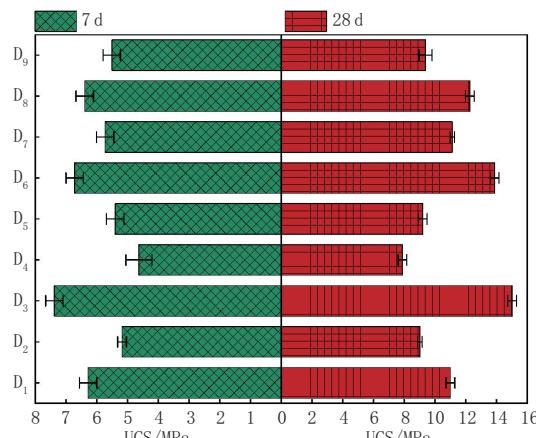


图 4 UCS 试验结果

(0.005、0.045) 的 P 值均小于 0.05, 因素 C (0.2、0.355) 的 P 值均大于 0.05。结果表明, 因素 A、B 对 UCS 产生明显影响, 因素 C 则未表现出显著作用。依据各因素 F 值大小, 其对 UCS 的影响程度依次为: $A > B > C$ 。

根据图 3 可发现, 7、28 d 中 UCS 随 OPC 掺量增加、CFA 掺量降低而增大。这是由于 OPC 活性高, 可快速进行水化反应生成水化产物, 加强试样的密实性, 提高其强度; CFA 水化活性弱, 虽具有火山灰活性, 但目前体系下的碱性环境不足以快速激发其活性, 而随其掺量增加, 固化剂体系内部活性物质降低, 水化反应速率减慢^[15-16]。7 d UCS 随 BFS 掺量增加会小幅度增大, 28 d UCS 在 BFS 第 2 水平 (103 g) 掺量时产生峰值强度, 该掺量为 BFS 适配本体系的最优掺量。究其原因, BFS 在碱性环境下, 前期可溶出活性氧化钙、氧化硅等物质, 当 BFS 从第 1 水平 (51 g) 增至第 2 水平 (103 g) 时, 体系内可参与二次水化的活性物质得到补足, 能充分消耗 OPC 水化生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 进一步生成 C-S-(A)-H 凝胶与 AFt, 水化产物总量增加且未稀释 OPC 的核心活性占比, 对强度提升形成正向增益; 而当 BFS 掺量继续增至第 3 水平 (154 g) 时, 会稀释体系中 OPC 的有效掺量, 导致 OPC 水化生成的碱性中间产物不足, 无法充分激发过量 BFS 的活性, 未被激发的 BFS 会成为惰性颗粒, 不仅无法参与水化反应形成强度, 还会在试件内部形成弱连接界面, 降低试件密实性, 最终造成 28 d UCS 下降^[17]。

根据图 4 中试验结果可知, $D_1 \sim D_9$ 组 28 d UCS 在 9.02~15.02 MPa 之间, 有五组试样满足《铁路隧道注浆技术规程》(TB 10121—2014) 中注浆材料 28 d UCS 不小于 10 MPa 的要求。说明水泥-固废基固化流态膨胀土材料具备良好的力学性能。

4.2 微观试验结果分析

通过4.1中对水泥-固废基固化流态膨胀土材料特性分析结果,选择7 d D_3 与28 d D_3 、 D_4 、 D_5 试样进行XRD,分析其微观水化机理。

4.2.1 XRD分析

水泥-固废基固化流态膨胀土材料 D_3 组7 d及 D_3 、 D_4 、 D_5 组28 d试件的XRD图谱如图5所示。那么由图5可知, D_3 组试件在28 d龄期的钙矾石特征峰强度高于7 d龄期,而石膏峰强度则低于7 d龄期。这表明随养护龄期延长,体系水化产物不断生成并累积,试件致密度显著提升,力学性能得到有效增强^[18]。

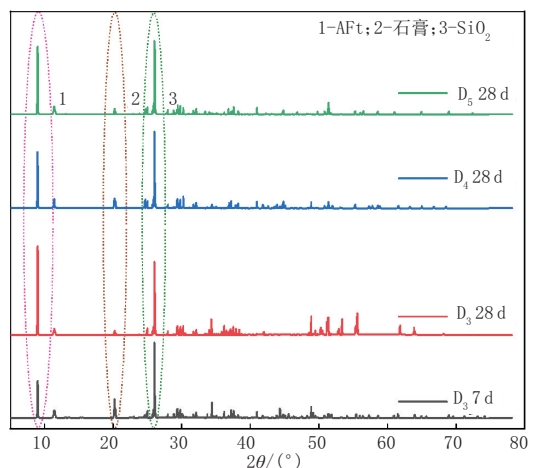


图5 XRD试验结果

对比 D_3 、 D_4 、 D_5 组28 d试件XRD图谱可知,随OPC与BFS掺量提升、CFA掺量降低,钙矾石衍射峰强度逐渐升高,而石膏峰则呈逐渐降低趋势。其主要原因在于OPC中含有 C_2S 、 C_3S 等活性矿物组分,而BFS富含 CaO 、 SiO_2 活性化学物质,均为固化剂体系中水化反应过程活性物质的主要来源;因此,随着OPC与BFS掺量的提高,体系水化反应速率加快,水化产物生成量相应增多^[19]。CFA虽具有一定火山灰活性,但在本体系碱度条件下难以被充分激发,故对体系强度的贡献相对有限。

已有研究表明,固化剂原料中富含高活性的 C_2S 、 C_3S 等矿物,以及活性氧化硅、氧化铝、氧化钙等组分,在水化过程中可大量生成C-S-(A)-H凝胶。由于C-S-(A)-H以非晶态形式存在,故XRD图谱中并未呈现出明显的特征衍射峰^[20]。

4.2.2 水化机理分析

根据前文研究结论,可将水泥-固废基固化流态膨胀土的水化反应机理归纳如下:

(1) OPC中的 C_2S 、 C_3S 及 CaO 遇水迅速发生水

化,生成C-S-(A)-H凝胶、 $Ca(OH)_2$ 与AFt等产物^[21]。

(2)在弱碱性环境中,BFS所含大量活性 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO ,以及CFA中的少量活性 SiO_2 、 Al_2O_3 参与二次水化反应,进一步形成C-S-(A)-H与AFt^[22]。

5 结 语

本研究首先分析了原材料的化学成分与固化剂的粒径、比表面积、表观密度;随后,考察了对水泥-固废基固化流态膨胀土材料的工作力学性能的变化规律;最后研究了水化反应微观机制。

主要研究结果如下。

(1)本研究中所采用的固化剂原材料均具有水硬性胶凝活性。FEG随OPC掺量增加、CFA与BFS掺量降低而降低;OPC、CFA对FEG具有显著性影响。通过调整水泥-固废基固化流态膨胀土材料配合比,可获得满足施工要求的FEG。

(2)在水泥-固废基固化流态膨胀土体系中,提高OPC掺量、降低CFA掺量、选用适宜BFS掺量及延长养护龄期,均有助于提升试件强度。通过优化水泥-固废基固化剂配合比,可获得满足施工要求的无侧限抗压强度UCS。

(3)水泥-固废基固化流态膨胀土材料水化产物主要成分为C-S-(A)-H、钙矾石。固化剂体系中OPC率先进行自水化反应并提供水化主要中间产物、碱性环境,CFA在体系中具备微弱火山灰效应与微集料效应,BFS可为水化反应提供活性原材料。

参考文献:

- [1] 姚裕春,李安洪,周波,等.岩溶地基高速铁路路基关键技术分析[J].铁道工程学报,2023,40(8):35-39.
- [2] 周勇,李召峰,左志武,等.滨海岩溶注浆充填体性能研究[J].山东大学学报(工学版),2022,52(1):103-110.
- [3] 冯海明.压水试验在岩溶路基注浆效果评价中的应用研究[J].中国岩溶,2020,39(2):243-250.
- [4] 章定文,陈顺达,毛忠良,等.铁路岩溶路基注浆引起地表位移与注浆效果评价方法[J].东南大学学报(自然科学版),2018,48(6):1094-1101.
- [5] 石起振,周梅,白金婷,等.煤矸石对煤基固废地聚物注浆材料性能的影响[J].建筑材料学报,2025,28(8):717-724.
- [6] 王朋飞,张明璇,王慧娴,等.超细固废对超细硫铝酸盐水泥基注浆材料性能的影响[J].绿色矿山,2024,2(3):258-272.
- [7] 肖杰,刘财壮,何建刚.CFB灰-钢渣微粉多源固废协同注浆材料特性研究[J].中国公路学报,2023,36(8):162-171.
- [8] 任才富,王栋民,房奎圳,等.固废基注浆材料的性能与硬化机理研究[J].硅酸盐通报,2025,44(4):1328-1336.
- [9] Fu S, Li Z, Zhang G, et al. Study on characteristics of ammonia alkali

- white mud and mechanical properties of preparation of fluid solidified soil [J]. *Frontiers in Materials*, 2024(11), 3389–3399.
- [10] Zhenhai Z, Linkang Z. A New Type of Cable Duct Channel and Design Method with Composite Support of Gravity Retaining Wall and Premixed Fluid Solidified Soil[J]. *E3S Web of Conferences*, 2025, 617(2): 1–5.
- [11] 杜建彪, 罗强, 蒋良淮, 等. 膨胀土流态固化改性试验与配合比研究[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2024, 58(10): 2137–2148.
- [12] 肖杰, 闫斌, 刘财壮, 等. 流态工业固废基固化剂固化红黏土性能及作用机理[J]. *铁道科学与工程学报*, 2025, 22(9): 3957–3967.
- [13] 肖杰, 刘财壮, 刘志勇, 等. CFB灰-钢渣粉-矿渣-脱硫石膏全固废公路下伏采空区注浆材料特性研究[J]. *中国公路学报*, 2024, 37(6): 193–206.
- [14] Fang F, Wang Z, Zhang F, et al. Experimental Study of Alkali-Excited Steel Slag - Granulated Blast Furnace Slag - Cement-Based Grouting Material Based on Response Surface Methodology[J]. *Buildings*, 2024, 14(12): 3841–3841.
- [15] Liu W, Jiang Y, Zhao Z, et al. Optimal development of the new type of ultra-fine fly ash semi flexible pavement grouting material: Rheological, mechanical, pore distribution, and hydration characteristics[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 438(9): 137103–13719.
- [16] Xu Y, Zhang H, Yu X, et al. Development and evaluation of physical and mechanical properties of alkali-activated multi-component composite grouting materials[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 434(6): 136718–136730.
- [17] Song H, Wei F, Cheng F, et al. Formulation determination and performance study of high-volume fly ash-based grouting fire extinguishing materials[J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, 88(10): 9194.
- [18] Pan D, Zhang N, Xiang Z, et al. Performance improvement of nanocolloidal silica-aluminate cement composite grouting materials with organic acids[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2024(20): 1–17.
- [19] Qin X, Zhang H, Xu R, et al. Experimental investigation on the failure mechanism of grouted rock mass: Mesostructure and macroscopic mechanical behavior[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2024(161): 108304–108315.
- [20] Guo L, Liu J, Zhou M, et al. Effect of an alkali activators on the compressive strength and reaction mechanism of coal gangue-slag-fly ash geopolymer grouting materials[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 426(3): 136012–136025.
- [21] Sun Y, Meng X, Fan J, et al. Study on the mechanical properties and hydration synergy of MEA and UEA modified ultrafine cement grouting materials[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 423(12): 135898–135910.
- [22] Lutao J, Yicheng F, Zijian J, et al. Optimization of the fresh and hardened properties of cement grouting material for semiflexible pavement using polypropylene fiber[J]. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 2024, 13(4): 536–545.

(上接第75页)

- 评估研究[J]. *中国民航飞行学院学报*, 2025, 36(1): 53–58.
- [16] 郭茜. 基于云模型的京津冀物流一体化指标权重研究[J]. *云南财经大学学报*, 2018, 34(6): 96–104.
- [17] 邓宗萍, 肖秋明, 朱真景. 云模型-TOPSIS法在公路路线方案比选中的应用[J]. *公路*, 2025, 70(2): 92–98.
- [18] 成泉, 董志强, 徐峰. AHP层次分析法在铁路枢纽方案研究中的应用[J]. *铁道工程学报*, 2025, 42(2): 11–15.
- [19] 任娟娟, 刘宽, 王伟华, 等. 基于区间层次分析的CRTSⅢ型板式无砟轨道开裂状况评估[J]. *浙江大学学报*, 2021, 55(12): 2267–2274.