2025 年 4月

材料科学

矿渣粉煤灰基地质聚合物耐久性能研究

Study on the Durability of Slag/Fly Ash - based Geopolymer

杨飞

(河海大学 土木与交通学院,南京 210098)

摘 要: 矿渣粉煤灰地质聚合物材料在应对碳化作用、冻融循环以及氯离子渗透等复杂环境时,耐久性能 有待提升,为此,提出矿渣粉煤灰基地质聚合物材料耐久性能研究。通过对矿渣粉煤灰基地质聚合物的原料配 比进行分析,将高炉矿渣和偏高岭土按照不同比例添加到粉煤灰中,研究不同配比对材料耐久性能的影响,制 备出地质聚合物样品,分别为粉煤灰主导型、高炉矿渣增强型以及偏高岭土优化型,并对其进行抗压性能、冻 融循环测试,全面评估材料耐久性能随时间的变化情况。结果表明: 与粉煤灰主导型、高炉矿渣增强型的试验 结果相比,偏高岭土优化型的 XRD 驼峰出现在 21.5°~29.8°区间内,尖锐衍射峰数量有所增加,在多次冻融循 环后,偏高岭土优化型的外观变化最小,重量损失率(-1.0%)和力学性能保留率(82%)均高于其他配比, 表现出最优的耐久性能,为该类材料在实际工程中的配比优化提供依据。

关键词:粉煤灰;地质聚合物;耐久性能;抗压强度;冻融循环

中图分类号: TU599 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2025) 02-0033-05 **DOI**:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.02.006

YANG Fei

(School of Civil Engineering and Transportation, Hohai University, Nanjing 210098, China) Abstract: The durability of slag fly ash geological polymer needs to be improved in dealing with complex environments such as carbonization, freezing and thawing cycle and chloride ion penetration. Therefore, the durability properties of slag fly ash is proposed. By analyzing the ratio of raw material of slag fly ash base polymer, the blast furnace slag and kaolin added to the fly ash according to different proportions, study the influence of different ratio of the material durability, prepare geological polymer samples, respectively for fly ash, blast furnace slag enhanced and kaolin optimization, and the compressive performance test and freeze – thaw cycle test, comprehensively evaluate the change of material durability over time. The results show that compared with the test results of fly ash and blast furnace slag, the hump of XRD appeared in 21. 5°~29. 8°, and the number of sharp diffraction peaks increased. After the repeated freeze – thaw cycles, the appearance of the optimized kaolin was minimized, the weight loss rate (1.0%) and the mechanical performance retention rate (82%) are higher than other ratios, showing the optimal durability performance and providing the basis for the ratio optimization of such materials in practical engineering.

Key words: fly ash; geopolymer; durability performance; compressive strength; freeze - thaw cycle

作者简介:杨 飞(1980—),男,硕士研究生,研究方向: 土木水利。 收稿日期:2024-12-09

0 引言

地质聚合物是一种通过特定工艺合成的先进无 机材料,其核心在于利用碱激发剂激活硅铝酸盐类 无机材料,如偏高岭土、粉煤灰等工业副产品或废

材料科学

弃物,在常温或相对温和的温度范围(40~80℃) 内发生化学反应而制得^[1]。这一过程不仅将工业废 弃物转化为可利用的建筑材料,而且还降低了二氧 化碳的排放。矿渣与粉煤灰作为地质聚合物制备中 的两大基石原料,不仅来源广泛,易于获取,而且 成本相对较低^[2]。同时,其在建筑材料、环保治理、 高性能复合材料等多个领域被广泛利用。

近年来,国内外学者对地质聚合物材料及其性 能进行了大量研究。例如,余金虎等^[3]在介绍地质 聚合物混凝土氯离子传输机理的基础上, 归纳总结 了地质聚合物混凝土抗氯离子渗透性能试验方法的 特点和局限性,并分析了其与普通混凝土氯离子传 输机理的区别。杨兴春等^[4]探究了发泡剂种类和含 量对富镁镍渣 - 粉煤灰基多孔地质聚合物性能的影 响,发现随着发泡剂含量增加,多孔地质聚合物的 干密度、抗压强度和导热率逐渐减低,吸水率逐渐 上升, 地质聚合物内部形成了多孔结构, 但不影响 地质聚合反应产物。邓嘉等[5]分析了粉煤灰基尾矿 碱激发地质聚合物的耐久性,发现在标准养护下, 尾矿含量10%的粉煤灰基尾矿碱激发地质聚合物抗 冻性降低,抗硫酸盐侵蚀较好。张逸超等^[6]采用地 质聚合物替代普通硅酸盐水泥配制地质聚合物混凝 土,并从力学性能、耐久性及微观结构角度展开分 析。龙庆辉等^[7]通过无侧限抗压强度试验发现,地 质聚合物固化土早强特性明显, 矿渣与粉煤灰最优 比为9:1, 矿渣水化产物提升强度, 适量粉煤灰使结 构致密, 过量则导致土体松散。王新富等^[8]通过正 交试验分析地质聚合物性能,发现浆液流动度随水 固比增大而增加, 随粉煤灰/磷矿砂质量比增大而减 小; 抗压强度随碱当量、水固比上升而下降, 随粉 煤灰掺量增大而上升;体积收缩率随水固比、粉煤 灰掺量增大而上升, 随模数增加而减小。王志航 等^[9]通过动态压缩试验发现, 玄武岩纤维增强地质 聚合物混凝土的动态抗压强度和比能量吸收随应变 率近似线性增加,随龄期增大而增大,且敏感性增 强,最佳纤维掺量为0.2%。田崇霏等^[10]利用控制 变量法研究发现,钢纤维长度与掺量对地质聚合物 凝结时间影响小、但增加长度和掺量会降低初始流 动度;钢纤维能显著增强地质聚合物的抗压、抗折 强度及韧性,长钢纤维效果更佳。李洁等[11]利用单 因素与正交试验发现,氢氧化钠影响最显著,过高 会抑制凝胶合成,凝胶量随氢氧化钠先增后减,地 质聚合物耐高温性能良好。王家河等^[12]以牡蛎壳和 粉煤灰制备轻质地质聚合物,研究发泡剂 H₂O₂、硅 酸铝纤维和硬脂酸钙的影响。

基于此,通过对矿渣粉煤灰基地质聚合物在不同 应力状态、温度波动、湿度变化及化学侵蚀等复杂环 境下的试验,探讨原料配比、碱激发剂种类与浓度、 制备工艺参数等因素对材料耐久性能的影响。研究成 果为优化矿渣粉煤灰基地质聚合物材料的配方设计、 提升其综合性能提供了理论依据,对于推动该类绿色 建材的广泛应用与产业升级具有重要意义。

1 试验材料及方法

1.1 原材料

粉煤灰等级为低钙类 F 级, 主要化学成分见表 1。 高炉矿渣和偏高岭土作为硅铝质改性掺合料, 高炉 矿渣为水淬矿渣, 在外观上通常呈现为灰黑色或深 褐色的细颗粒状, 二者的化学成分见表 2; 纳水玻璃 性能参数见表 3; 水为去离子水; NaOH 固体纯度为 96%,物体形态为片状晶体。

表1 F级粉煤灰化学成分

Т	able 1 Ch	emical com	position of	grade F fly ash	ı ∕%
SiO ₂	Al ₂	03	$\mathrm{Fe}_2\mathrm{O}_3$	CaO	MgO
45~65	20 ~	. 35	3~10	1~8	0.5~3
表2 硅铝质改性掺合料化学成分 /%					
Table 2 C	hemical cor	nposition o	f silica – alu	mina modified	admixture
	高炉	「矿渣		偏高岭土(煅烧后)
SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	SiO ₂	Al_2O_3
30 ~ 40	$10 \sim 20$	$30 \sim 45$	2~5	50~60	35~45
表 3 纳水玻璃性能参数					

Table 3	Table 3 Performance parameters of sodium silicate glass				
模数	SiO_2	Na ₂ O	含固量/%		
3.2	30.4	9.6	40		

1.2 试验方法

1.2.1 地质聚合物试件制备

首先称量 200 g 粉煤灰,按照质量比1:1 的比例 加入等量的高炉矿渣作为辅助硅铝质原料,添加 50 g 的偏高岭土作调节剂优化材料的性能。将上述 3 种原 料充分混合均匀,形成硅铝质原料混合物。配制 500 mL模数为 1.5 的钠水玻璃溶液,加入适量 NaOH 固体使溶液的 pH 值为 12~13,制得碱激发剂,待冷却 至室温后备用。将硅铝质原料混合物与碱激发剂一同加

材料科学

入搅拌机进行搅拌,先以 60 r/min 的转速慢搅 180 s, 然后暂停 15 s,再以 120 r/min 的转速快搅 180 s。

拌和完成后,迅速将搅拌均匀的浆体注入尺寸 为40 mm×40 mm×160 mm的联钢制模具内,并将 表面刮平,以确保浆体分布均匀。注浆完成后,将装 有浆体的模具固定于振动台上,以20次/min的频率 振捣240次,充分排出浆体内的气泡,确保材料的致 密性和均匀性。地质聚合物浆体振捣密实后,先覆 膜密封放置在室温环境下养护。

脱模后,将试件放置在烘干箱中进行高温养护。 养护温度为80℃,养护时间为48h。高温养护完成 后,将试件放置在水泥砼恒温恒湿养护箱中进行标 准养护。将养护箱的温度设定为(20±2)℃,相对 湿度保持在95%以上,养护28d。

试验通过对矿渣以及偏高岭土的掺量进行调整, 制备出三种不同类型的地质聚合物,分别为试件1粉 煤灰主导型、试件2高炉矿渣增强型以及试件3偏高 岭土优化型。试件配比见表4。

	Table 4 Proj	portion of test pieces		/%
试件编号	粉煤灰	高炉矿渣	偏高岭土	
试件1	65	25	10	
试件2	50	40	10	
试件3	55	25	20	

表4 试验配比

1.2.2 试件微观分析

采用 D8 ADVANCE 衍射仪对地质聚合物试件进 行微观结构分析,设定扫描范围为 5°~80°的 2θ角, 基础扫描速度为 4°/min,为了在保证数据质量的同 时提高分析效率,参数可根据实际情况灵活调整。 为了提高衍射峰的分辨率,设定 0.02°的步长。

从地质聚合物试件中切割出尺寸为 10 mm × 10 mm × 10 mm × 10 mm 的试块,对其进行研磨和抛光,直到 表面质量达到要求。将处理好的试件用 SEM (扫描 电子显微镜)观察微观结构、颗粒形态以及在样品 中的分布情况。

使用 AS-4800 扫描显微镜对试件的材料形貌进 行分析。放大倍数范围为 500~50 000 倍,设定工作 距离为 5 mm,根据设定的参数进行扫描,获取样品 的表面形貌图像。

1.2.3 耐久性能测试

采用 KDB-26V 混凝土快速冻融试验机对试件

进行冻融循环测试,通过观察冻融循环后样品的外 观变化、重量变化和力学性能等指标,分析地质聚 合物配比对地质聚合物抗冻融性能的影响。

冷冻温度设定为 (-18 ±2)℃,融化温度设定为 15~20 ℃。每个冻融循环为2~4 h,循环次数设为 30 次。在完成预定次数的冻融循环后,取出试件 测试。

2 试验结果与分析

2.1 微观结构分析

3 种不同配比下聚合物的 XRD 图谱如图 1 所示。



图 1 三种不同配比下聚合物的 XRD 图谱 Fig. 1 XRD patterns of polymers with three different ratios

试件1的 XRD 图谱中, 在衍射角约为 17.5°~ 65.5°范围内,观察到宽泛而弥散的衍射峰,这些峰 对应于原料中粉煤灰、高炉矿渣以及偏高岭土中的 玻璃体矿物非晶区。在 2θ 约为 $22^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 区间内、出 现了一个较为明显的驼峰,说明有大量非晶态玻璃 相的存在。试件2的驼峰出现在21.8°~29.5°区间 内,表明试件中非晶态玻璃相的含量依然很高。与 试件1相比,试件2的尖锐衍射峰数量略有增加,这 可能是由于高炉矿渣的活性特点导致某些矿物成分 在地质聚合过程中未能完全转化为非晶态结构,但 仍保持较低的结晶度。试件3的驼峰出现在21.5°~ 29.8°区间内, 说明非晶态玻璃相的高含量。与前两 组试验相比,试件3的尖锐衍射峰数量有所增加,且 某些峰的强度也有所增强。这可能是由于偏高岭土 掺量的增加促进了某些矿物成分的结晶化过程,尽 管整体结构仍以非晶态为主。

2.2 试验形貌分析

3种不同配比下的电镜扫描结果如图2所示。

36



(a) 试件1

(b) 试件2 图2 试验电镜扫描图 Fig. 2 Electron microscope scanning of specimens

在粉煤灰主导型(试件1)的配比中,SEM 图像显示出以粉煤灰颗粒为主体的多孔结构。高 炉矿渣和偏高岭土作为辅助成分,填充在粉煤灰 颗粒之间,形成了一种较为紧密但又不失多孔性 的复合结构。

高炉矿渣增强型(试件2)的配比中,SEM 图 像呈现出更加均匀且致密的微观结构。高炉矿渣的 掺入显著提升了材料的密实度,使得颗粒间的空隙 减少。同时,高炉矿渣的活性特点在碱激发剂的作 用下得到了充分发挥,形成了更多的地质聚合反应 产物。

在偏高岭土优化型(试件3)的配比中,偏高岭 土掺量的增加使得试件中出现了更多的层状和片状 结构,这些结构在 SEM 图像中清晰可见。偏高岭土 中的 Al₂O₃成分在碱激发剂的作用下得到了更好地溶 解和反应,形成了更加复杂的地质聚合反应产物。 这些产物在 SEM 图像中表现为交错分布的纤维状和 片状物质,它们相互交织在一起,形成了一种高度 稳定且强度较高的复合结构。

2.3 耐久性能

3 种不同配比试验的冻融循环测试结果见表 5。所有试件在冻融循环后均出现重量损失,但损 失程度不同。试件1 损失最大,30 次循环后达到 -2.5%;而试件3 损失最小,仅为-1.0%。试件 1 在15 次冻融循环后抗压强度保留率为78%,30 次 后降至65%,表明其力学性能随冻融循环次数增加 而显著下降。试件2 和试件3 在15 次循环后强度保 留率均较高,分别为85%和90%;30 次后虽有所下 降,但仍保持在75%和82%以上,显示出较好的力 学稳定性。

表 5 冻融循环测试结果				
Table 5 Test results of freeze – thaw cycle				
试件编号	冻融循环 次数/次	外观变化 描述	重量变化 率/%	抗压强度 保留率/%
	15	轻微表面剥落	-1.2	78
试件1	30	明显表面剥落, 部分裂缝	-2.5	65
试件2	15	无明显变化	-0.8	85
	30	轻微表面剥落	-1.5	75
试件3	15	无明显变化	-0.5	90
	30	轻微表面磨损	-1.0	82

(c) 试件3

3 结论

通过对原料配比与性能关联的深入解析,明确 了提升材料耐久性能的核心路径,揭示了矿渣粉煤 灰基地质聚合物材料在复杂环境下的耐久性优化机 制,为绿色建筑材料的开发提供了关键理论支撑。 研究得到以下主要结论:

(1)掺偏高岭土显著增强了地质聚合物结构的 致密性与化学稳定性。其高活性铝源促进了更充分 的地质聚合反应,形成交错分布的纤维状凝胶相, 有效抑制了环境侵蚀引起的微裂纹扩展,从而提升 了材料的整体耐久性。

(2)优化配比下,非晶态玻璃相与结晶相的协同作用可缓冲温度波动与化学侵蚀的破坏效应,为材料在冻融循环、碳化等环境中的长期稳定性提供了微观机制保障。

(3)基于配比优化的矿渣粉煤灰基地质聚合物,兼具工业固废高附加值利用与低碳制备特性, 其耐久性能的突破为替代传统水泥基材料提供了新 思路,尤其适用于严酷环境下的基础设施与海洋工 程领域。

4 结论

基于离散元方法,利用 UDEC 软件建立二维数 值模型,针对研究区厚层灰岩顺层岩质边坡,模拟 了不同开采深厚比和开采位置开采过程对边坡稳定 性的影响,得到主要结论如下:

(1)开采深厚比的变化,对基底岩层的应力以及变形影响显著,随着深厚比的减小,剪应力不断减小,垂直应力不断增大,层面抗剪强度降低,进而导致坡体稳定性降低。

(2)随着深厚比的减小,由于卸荷作用以及煤 层反复开采,导致软弱夹层下沉量以及水平位移量 在不断增大。

(3) 在不同开采区段, 卸荷带附近均受到开采 影响而出现下沉, 下沉幅度大于陡崖中下部。

参考文献

- [1] GUO G L, ZHA J F, MIAO X X, et al. Similar material and numerical simulation of strata movementlaws with long wall fully mechanized gangue backfilling [J]. Procedia Earth & Planetary Science, 2009, 1 (1): 1089-1094.
- [2] REN W Z, GUO C M, PENG Z Q, et al. Model experimental research on deformation and subsidence characteristics of ground and wall rockdue to mining under thick overlying terrane [J].

International Journal of Rock Mechanics and MiningSciences, 2010, 47 (4): 614-624.

- [3] 徐廷甫,尹志明,邓月华.地下采动条件下顺层岩质边坡稳定
 性分析 [J].地下空间与工程学报,2011,7 (6):1241-1245,1262.
- [4] 沈宁,宗亮,李萌,等. 岩体扰动对岩石边坡稳定性影响[J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (4): 40-46, 58.
- [5] 刘健. 变质岩类顺层边坡破裂迹象及边坡开挖失稳范围研究
 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (3): 91-96.
- [6] 谭明健,周春梅,孙东,等. 软硬互层顺层岩质边坡破坏试验
 [J]. 地质科技通报, 2022, 41 (2): 274-281+324.
- [7] 唐雨生,苏培东,马云长,等.含软弱夹层的顺层岩质滑坡渐进破坏研究[J].自然灾害学报,2021,30(6):155-165.
- [8] 刘洋,马素健,张良,等. 地震作用下顺层岩质边坡动力稳定 性研究 [J]. 铁道建筑, 2020, 60 (12): 97-100.
- [9] 潘林. 地震作用下顺层岩质边坡桩锚支护体系动力响应研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
- [10] 史彧,李兴华,赵瑞欣,等.顺层岩质边坡锚索锚固参数与优化设计分析 [J].公路,2022,67 (10):1-8.
- [11] 魏中凯,杨智强,李锐鹏.超高黄土不稳定斜坡的防治设计及 效果评价 [J].粉煤灰综合利用,2023,37 (3):58-65.
- [12] 郝广杰.考虑土层变形特征的边坡稳定性分析方法研究 [J].
 粉煤灰综合利用, 2023, 37 (2): 62-67.
- [13] 许明,余小越,赵元平,等.顺倾层状碎裂结构岩质边坡地震动力响应及破坏模式分析 [J]. 岩土力学,2023,44 (2): 362-372.

endre no pendre no pendre

(上接第36页)

参考文献

- [1] 郑溢雯,吴俊,杨爱武,等.采用固体硅酸钠激发的一步法地 质聚合物在软土固化中的适用性研究 [J]. 岩土力学,2024, 45 (7): 2072-2084.
- [2] 赵金钰,夏蕾,张扬.环氧树脂掺杂对地质聚合物木材胶黏剂 性能的影响 [J].北京林业大学学报,2024,46 (8):15-24.
- [3] 余金虎,李强,刘学应,等. 地质聚合物混凝土抗氯离子渗透 性能研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2024, 43 (7): 2503-2513.
- [4] 杨兴春,吴渊,孙志高,等. 富镁镍渣-粉煤灰基多孔地质聚 合物性能研究 [J].粉煤灰综合利用,2023,37 (3):77-83.
- [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] 张逸超,杨昊霖,吴晓鑫,等.地质聚合物混凝土力学性能、耐 久性及微观结构综述[J]. 混凝土,2024 (11): 84-87,92.

- [7] 龙庆辉,李曙光,章本本,等.地质聚合物固化软土的力学特
 性及微观机理分析 [J]. 铁道建筑, 2024, 64 (7): 136-142.
- [8] 王新富,赵恒,吴求刚,等.粉煤灰/磷尾矿基地质聚合物的制备及性能表征 [J].材料科学与工程学报,2024,42 (6):999-1006.
- [9] 王志航,白二雷,周後鹏,等. 玄武岩纤维增强地质聚合物混凝土的动态力学性能 [J]. 振动与冲击,2024,43 (19):134-144.
- [10] 田崇霏,王亚洲,刘晓海,等. 钢纤维对粉煤灰-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, 2024
 (6): 121-125, 133.
- [11] 李洁, 伊元荣, 刘伟, 等. 氢氧化钠对地质聚合物制备及高温 力学性能影响 [J]. 环境科学与技术, 2024, 47 (5): 46-54.
- [12] 王家河,何宇轩,华颖,等. 碱激活法制备轻质牡蛎壳基地质 聚合物的结构与性能 [J]. 陶瓷学报,2023,44 (6):1231-1239.

岩十力学