

引文格式:赵晨浩,梁家馨,董晓强,等. 氧化钠含量对赤泥基地聚合物同步注浆浆液性能影响分析[J]. 太原理工大学学报, 2026, 57(4): 738-748.

ZHAO Chenhao, LIANG Jiaxin, DONG Xiaoqiang, et al. Effects of sodium oxide content on the performance of red mud-based geopolymer for tail grouting[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2026, 57(4): 738-748.

氧化钠含量对赤泥基地聚合物同步 注浆浆液性能影响分析

赵晨浩¹, 梁家馨¹, 董晓强^{1,2}, 刘维³, 杨振¹

(1. 太原理工大学 土木工程学院, 山西 太原; 2. 山西省土木工程防灾与控制重点实验室, 山西 太原;

3. 苏州大学 轨道交通学院, 江苏 苏州)

摘要:【目的】针对赤泥基地聚合物同步注浆材料的性能优化问题, 探讨氧化钠含量对浆液新鲜状态性能、硬化后力学性能、电学特性及微观结构的影响。【方法】通过单因素试验设计, 以氧化钠含量(0%~8%)为变量, 系统分析浆液的密度、流动度、稠度、结石率、泌水率、凝结时间、无侧限抗压强度、电阻率、电化学性能及微观形貌特征。【结果】结果表明: 随着氧化钠的增加, 浆液密度逐渐增大, 流动度降低, 浆液趋于黏稠, 凝结时间明显缩短; 抗压强度呈指数增长趋势, 含量在5%~8%时显著提升, 28 d龄期强度最高达60.64 MPa; 电阻率随氧化钠含量增加而升高, 长期养护进一步提高材料的微观致密性; 电化学测试显示, 高氧化钠含量促进聚合反应产物生成, 提高材料耐久性; 扫描电子显微镜(SEM)测试结果表明, 氧化钠含量的增加使材料由疏松多孔逐渐转变为致密均匀结构, 其中5%~8%含量试样表现出最佳微观特性; 总结得出氧化钠含量在5%~7%时可优化浆液性能, 兼顾施工性与力学耐久性。

关键词: 赤泥基地聚合物; 同步注浆; 氧化钠; 浆液性能; 电学特性

中图分类号: TU41 **文献标识码:** A

DOI: 10.16355/j.tyut.1007-9432.20250118

文章编号: 1007-9432(2026)04-0738-11

Effects of Sodium Oxide Content on the Performance of Red Mud-Based Geopolymer for Tail Grouting

ZHAO Chenhao¹, LIANG Jiaxin¹, DONG Xiaoqiang^{1,2}, LIU Wei³, YANG Zhen¹

(1. College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi, China;

2. Shanxi Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Control, Taiyuan, Shanxi, China;

3. Soochow University, School of Rail Transportation, Suzhou, Jiangsu, China)

Abstract:【Purposes】To optimize the performance of red mud-based geopolymer for tail grouting, the effects of Na₂O content on the fresh properties, hardened mechanical properties, electrical characteristics, and microstructure of the slurry are investigated in this study. 【Methods】A single-factor experimental design was employed, with Na₂O content (0~8%) as the variable, to systematically analyze the slurry's density, fluidity, consistency, stone rate, bleeding rate, setting time, unconfined compressive strength, resistivity, electrochemical properties, and microscopic morphology. 【Results】

收稿日期: 2025-03-01; 修回日期: 2025-04-28

基金项目: 国家自然科学基金(52378360, 51978438); 山西省基础研究计划青年项目(202403021212155); 山西省高等学校科技创新计划(2024L044)

第一作者: 赵晨浩, 博士研究生, (E-mail) zch564083808@outlook.com

通信作者: 董晓强, 博士, 教授, 主要从事岩土工程研究, (E-mail) dongxiaoqiang@tyut.edu.cn

The results indicate that as the Na_2O content increases, the slurry density gradually increases, fluidity decreases, the slurry becomes more viscous, and the setting time is significantly shortened. The compressive strength exhibits an exponential growth trend, with a significant increase at 5%~8% Na_2O content, reaching a maximum of 60.64 MPa at 28 d. Resistivity increases with Na_2O content, and long-term curing further enhances the material's microstructural compactness. Electrochemical tests show that higher Na_2O content promotes the formation of geopolymerization products, improving material durability. Scanning electron microscope analyses reveal that increasing Na_2O content transforms the material from a porous and loose structure to a dense and uniform one, with the 5%~8% content samples exhibiting the most favorable microstructural characteristics. In summary, Na_2O content in the range of 5%~7% optimizes slurry performance, balancing workability and mechanical durability.

Keywords: red mud-based geopolymer; tail grouting; sodium oxide; slurry performance; electrical characteristics

随着全球工业化进程的加速,工业固废的累积已成为亟待解决的重大环境问题^[1]。其中赤泥作为铝工业的主要副产物,因其产量庞大且具有强碱性,若得不到有效处置,除占用大量土地资源外,可能对周边生态环境造成严重威胁^[2]。因此,赤泥的资源化利用,尤其在建筑材料和环保领域的应用,已成为学术界和工业界关注的热点问题。

赤泥主要由氧化铝、氧化铁及一定量的氧化硅组成,这使其具备一定的胶凝活性^[3]。与其他工业固废(如偏高岭土、粉煤灰、矿渣等)联合使用时,能够制备性能优异的地聚合物材料^[2]。近年来,赤泥基地聚合物材料在道路工程、建筑行业及环境修复等领域展现出广阔的应用前景^[4-5]。在同步注浆材料领域,赤泥与其他物质协同作用,通过碱激发形成的地聚合物浆液,不仅具有良好的流动性和抗压强度,还具备低碳环保及优异耐久性的特点^[6]。

国内外已有大量研究探讨赤泥的资源化利用。Bing等^[7]研究发现,水玻璃与氢氧化钠的共同作用可促进赤泥形成力学性能优良的地聚合物材料。Chen等^[8]对赤泥基材料的微观结构特征的进一步分析,指出水玻璃种类及其含量对材料强度和耐久性有重要影响。李召峰等^[9]指出,不同碱激发剂的选择不仅影响赤泥的反应性,还决定最终产物的物理化学性质。许多研究还关注赤泥基注浆材料的环境性能,如生态稳定性和长期耐久性^[10]。

但现有研究主要集中在赤泥基地聚合物的宏观力学性能和固结体性质,对浆液本身的工作性能及其随时间的演变规律研究较少。特别是在同步注浆应用中,浆液的密度、流动性、凝结时间等特性对工程施工至关重要,然而这些关键参数的变化机制仍不明确。此外,由于赤泥在地聚合物体系中的

活性较低,单独使用时难以产生足够的聚合反应,需借助碱激发剂(如氢氧化钠和水玻璃)提高其活性。然而,不同激发剂的用量对注浆材料的流变特性、硬化强度及微观结构的影响规律尚缺乏系统研究,导致工程应用缺乏科学指导。

本研究以赤泥为主要原料,通过单因素试验设计,探讨氧化钠含量对赤泥基同步注浆材料性能的影响,重点分析浆液的基础性能(如密度、流动度、凝结时间等)、硬化后性能(无侧限抗压强度、电阻率、电化学特性)及微观结构特征。旨在揭示氧化钠含量对浆液性能的作用规律,并建立相应的拟合模型,以量化含量与性能之间的关系。为赤泥基地聚合物同步注浆材料的配比优化提供理论支撑,并为其在同步注浆工程中的实际应用提供科学指导。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

本研究选用赤泥、煤系偏高岭土、水玻璃和氢氧化钠作为主要原材料,如图1所示。

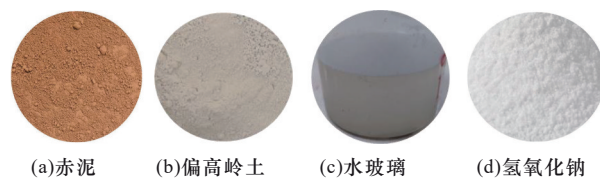


图1 试验原料

Fig. 1 Experimental materials

赤泥来源于山西吕梁某铝厂的露天赤泥堆场,采用拜耳法生产。由于堆场压实,回收的赤泥呈块状,无法直接用于实验。同时为避免含水率差异对试验结果的影响,首先将赤泥烘干后经过人工破碎成粉末状,其主要物理指标如表1所示。

偏高岭土来自山西某煅烧高岭土公司,采用煤

表 1 赤泥物理指标
Table 1 Physical properties of red mud

名称	液限/ %	塑限/ %	干密度/(g·cm ⁻³)	含水率/ %
赤泥	42.57	24.29	1.79	11.23

矸石煅烧而成,主要成分为 Al₂O₃和 SiO₂,具有较高的反应活性。在本研究中,偏高岭土作为辅助硅铝源与赤泥共同使用,以提高地聚合物体系的反应活性。主要检测指标见表 2。

表 2 煤系偏高岭土检测指标
Table 2 Testing indicators of coal-series metakaolin

名称	需水率/ %	含水率/ %	活性指数/ %	
			7 d	28 d
煤系偏高岭土	105	35	110	110

水玻璃采用工业级钠水玻璃,模数为 3.1,其中 SiO₂含量为 24.73%,Na₂O 含量为 8.17%,其余为水。水玻璃不仅提供聚合反应所需的硅源和碱性环境,同时在体系中起到黏结剂的作用。水玻璃的成分质量分数如表 3 所示。

表 3 水玻璃原液各成分质量分数
Table 3 Mass fractions of components in raw water glass solution

水玻璃原液	SiO ₂	Na ₂ O	H ₂ O
质量分数/ %	24.73	8.17	67.1

氢氧化钠为分析纯试剂,购自佛山西陇化工有限公司,纯度≥99.1%。试验中将氢氧化钠溶解于水中,配制成所需的 NaOH 溶液。

使用 X 射线荧光光谱仪(XRF)对赤泥粉末及偏高岭土的主要化学成分进行检测,结果见表 4。

表 4 试验材料主要化学成分(质量分数)
Table 4 Major chemical compositions of experimental materials

名称	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Na ₂ O	CaO	TiO ₂	MgO
赤泥	30.73	22.59	18.37	13.43	6.74	4.65	0.48
偏高岭土	0.50	47.02	50.07	0.15	0.11	1.35	0.16

1.2 试验设计

本研究采用单因素试验设计,以氧化钠含量为唯一变量,探讨其对赤泥基地聚合物材料性能的影响。试验中,氧化钠含量设定为 0% 至 8%,每隔 1% 设一组试验,共计 9 组。氧化钠含量的设定参考了已有相关文献中针对碱激发剂含量对地聚合物性能影响的研究范围,并结合本研究所使用原材料的化学组成和预试验结果进行确定^[11]。在 0~8% 范围内,浆液既可覆盖无激发剂状态下的基础反应情况,又能体现出较高碱度条件下对浆液各项性能的影响趋势。为保证试验结果的科学性和可比性,

赤泥与偏高岭土比例(2:1)、水玻璃模数(1.2)和水固比(0.5)在所有试验组中保持不变。根据上述条件,计算得出各组的配比方案,具体每千克浆液的原材料质量如表 5 所示。

表 5 试验设计
Table 5 Experimental design

No.	m(赤泥)/ g	m(偏高 岭土)/g	m(水玻璃)/ g	m(氢氧化钠)/ g	m(添加水)/ g
1	444.44	222.22	0	0	333.34
2	435.54	217.78	46.96	7.96	291.76
3	426.64	213.32	93.92	15.90	250.20
4	417.74	208.88	140.88	23.86	208.64
5	408.84	204.42	187.84	31.82	167.08
6	399.96	199.98	234.8	39.76	125.52
7	391.06	195.52	281.76	47.72	83.96
8	382.16	191.08	328.72	55.68	42.38
9	373.26	186.62	375.68	63.62	0.82

1.3 试样制备及测试方法

本试验通过一系列测试方法对赤泥基地聚合物浆液的性能进行全面评估。在制备浆液阶段,首先按照试验设计的材料配比,将氢氧化钠颗粒溶解于适量的水中后,与水玻璃溶液混合制成碱激发剂溶液。随后,将碱激发剂溶液倒入赤泥与偏高岭土的混合料中,使用搅拌锅均匀搅拌,直至浆液呈现均匀状态。

制备好的浆液分为两部分,一部分用于测量浆液的基本性能,包括密度、流动度、稠度、结石率、泌水率和凝结时间。

另一部分浆液倒入边长为 40 mm 的立方体模具中,每组浆液设 3 个平行试样,共制备 9 个试样,标准养护至龄期为 3 d、7 d 和 28 d 时测试无侧限抗压强度、电阻率和电化学性能。使用 YHS-229WJ-50 kN 型微机控制电子万能试验机测试无侧限抗压强度。

采用两相电极法测定不同养护龄期下浆液的电阻率,以表征其微观孔隙结构和离子迁移能力。由于地聚合物材料的固化过程涉及复杂的离子溶解、迁移和聚合反应,电阻率可用于分析浆液在不同氧化钠含量下的致密化程度。较高的电阻率表明浆液固化后孔隙减少,结构更加致密。使用 TH2828A 型号的 LCR 数字电桥,设置电流频率为 50 Hz、100 Hz、500 Hz、1 kHz、5 kHz、10 kHz、50 kHz、100 kHz、500 kHz 和 1 MHz,测试试样在不同频率下的电阻率。

电化学测试采用 CS350 电化学工作站,应用电化学阻抗谱技术(EIS)研究浆液固化过程中界面电

荷转移及离子扩散特性。地聚合物材料在长期服役环境下可能受到外部侵蚀,导致离子交换和微结构变化,通过 Nyquist 图和 Bode 图分析材料的电化学行为,可用于评估不同氧化钠含量对浆液耐久性的影响。

2 试验结果与分析

本实验对所有测试数据均记录三次,取其平均值作为最终试验结果。表 6 展示出 9 种浆液的基本性能测试结果。需要指出的是,0% 氧化钠含量(即

未添加碱激发剂)的试样在 3 d 和 7 d 养护龄期内均未能完成凝结,无法形成可进行力学测试的固结体。这一现象表明,在缺乏外加碱性激发剂的条件下,赤泥与煤系偏高岭土的混合体系难以启动有效的聚合反应,反应活性不足,导致浆液无法固化。由此也进一步验证了碱激发剂在赤泥基地聚合物反应体系中所起的关键作用。数据分析过程中,将重点评估氧化钠含量对浆液各项性能指标的影响规律,为优化配方设计提供科学依据。

表 6 基本性能测试结果
Table 6 Basic performance test results

No.	密度/(kg·m ⁻³)	流动度/mm	稠度/mm	结石率/%	泌水率/%	凝结时间/ min	无侧限抗压强度/MPa		
							3 d	7 d	28 d
1	1 670	268	118	91.82	8.18	—	—	—	0.48
2	1 701	265	117	98.81	1.19	2 835	0.020	0.074	0.63
3	1 729	256	109	98.91	1.09	1 396	0.058	0.10	0.66
4	1 790	245	105	99.21	0.79	846	0.087	0.23	0.74
5	1 809	245	100	99.81	0.19	675	0.24	0.77	1.48
6	1 829	235	97	99.61	0.39	620	1.19	3.36	5.59
7	1 832	233	95	99.81	0.19	573	3.57	9.15	30.85
8	1 844	220	93	99.89	0.11	504	9.15	22.05	44.84
9	1 904	207	91	99.91	0.09	435	12.12	35.62	60.64

注:No.1 浆液因不满足相关测试条件,无法取得测试结果

2.1 浆液新鲜状态性能分析

本研究测量出 9 组不同氧化钠含量的试样在新鲜状态下的主要性能数据,具体包括密度、流动度、稠度、结石率、泌水率和凝结时间,测试结果见表 6。数据分析结果表明,氧化钠含量对浆液性能具有显著影响。

泌水率和结石率的变化情况显示,添加碱激发剂明显改善浆液的泌水率和结石率。对比氧化钠含量为 0% 和 1% 数据可见,碱激发剂的添加使泌水率从 8.18% 下降至 1.19%,结石率则从 91.82% 提高至 98.81%。随着氧化钠含量进一步增加,泌水率和结石率的变化趋于平缓,且接近其极限值(泌水率接近 0%,结石率接近 100%),表明氧化钠含量对两个指标的改善效果逐渐减弱。

对于密度、流动度、稠度和凝结时间,氧化钠含量与这些性能指标之间表现出一定的规律性。随着氧化钠含量的增加,浆液密度逐渐增大,稠度与流动度逐步降低,凝结时间呈现下降趋势。这些变化反映出碱激发剂在改善赤泥基地聚合物浆液性能方面的作用。

为进一步揭示氧化钠含量对浆液性能的影响,

本研究采用拟合分析方法。拟合的主要目的是为量化氧化钠含量与各性能指标之间的关系,并通过拟合曲线预测氧化钠含量在 0% 到 8% 区间内浆液性能的变化。基于性能数据的变化趋势选择合适的拟合函数,观察发现密度、流动度和稠度与氧化钠含量呈现出线性相关关系,遂采用线性拟合函数。而凝结时间则是与氧化钠含量呈现出先迅速降低后趋于平缓的变化特点,遂采用幂函数进行拟合。值得注意的是,由于泌水率和结石率的变化幅度较小且当氧化钠含量达到一定水平时仍未表现出明显趋势,故未对这两个指标进行拟合分析。

拟合曲线及结果如图 2 和表 7 所示,拟合结果表明:浆液密度与氧化钠含量之间呈线性正相关,随着氧化钠含量的增加,浆液密度逐渐增加;流动度与氧化钠含量之间呈线性负相关,氧化钠含量的增加导致流动度逐步降低;稠度与氧化钠含量之间同样呈线性负相关,氧化钠含量的增加导致浆液逐渐变得更为粘稠;凝结时间与氧化钠含量之间则呈非线性负相关关系,凝结时间随氧化钠含量的增加先明显降低,随后逐渐趋于平缓,表明低含量的氧化钠可以大幅度加速浆液的凝结过程,但随着氧化

钠含量的进一步增加,对凝结时间的影响逐渐减弱。所有拟合曲线的 R^2 值均大于0.95,表明拟合效果良好。拟合结果表明氧化钠含量对浆液性能具

有明显影响,并能有效预测氧化钠含量对浆液性能的影响,为后续同步注浆浆液配比优化提供有力的理论依据。

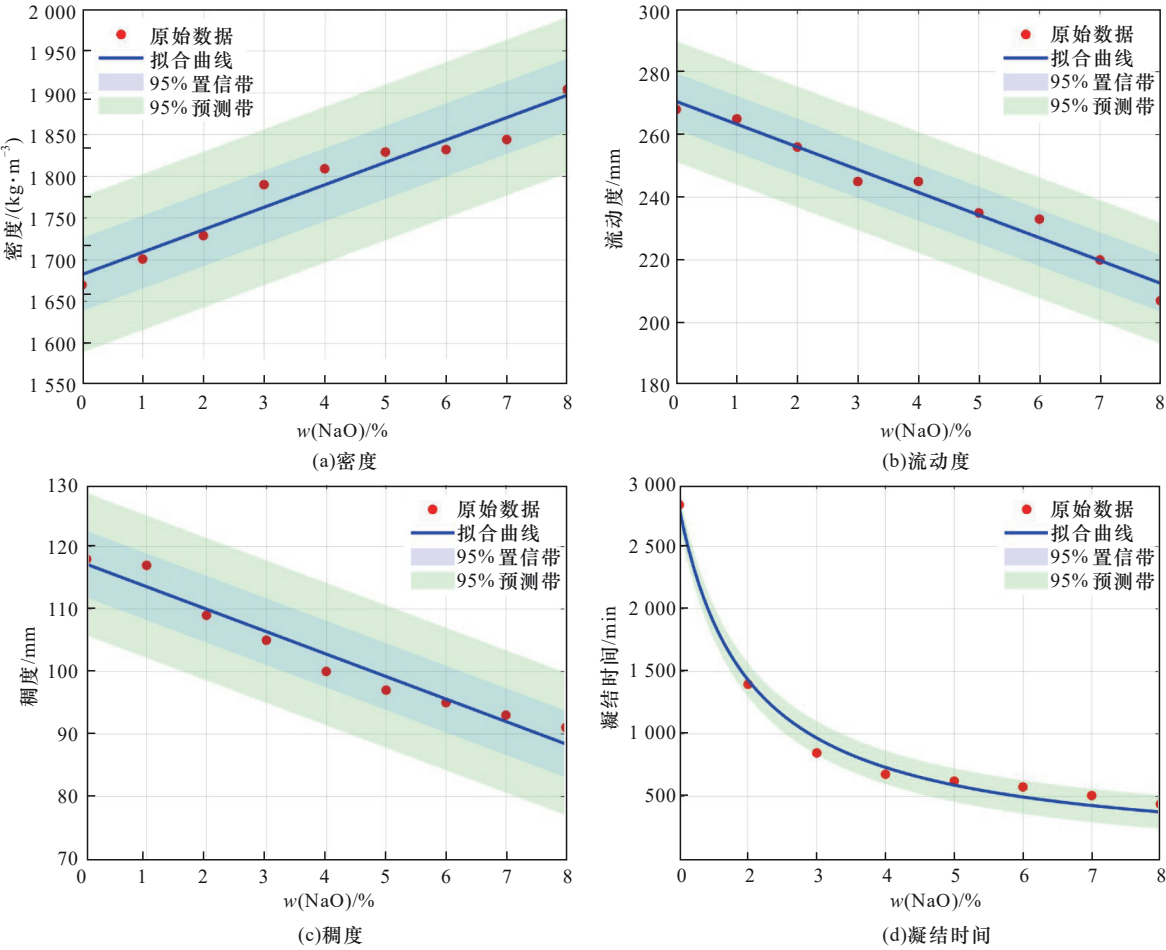


图 2 浆液性能与氧化钠含量的拟合情况
Fig. 2 Fittings of grout performance with sodium oxide content

从施工角度来看,氧化钠含量为5%~7%时,浆液的流动性较好,凝结时间适中,既能保证可操作性,又能避免过快凝结影响施工连续性。因此,该范围内的氧化钠含量在保证良好工作性能的同时,也能适应现场施工要求。

表 7 浆液性能与氧化钠含量拟合曲线的结果参数
Table 7 Resulting parameters of the fitting curve between grout performance and sodium oxide content

参数	拟合方程	R^2
密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	$f_1 = 26.83C + 1\,682.44$	0.95
流动度/mm	$f_2 = -7.25C + 270.56$	0.97
稠度/mm	$f_3 = -3.6C + 117.18$	0.96
凝结时间/min	$f_4 = 2\,803.43\cdot C^{-0.97}$	0.99

2.2 无侧限抗压强度变化分析

本研究测量得到9组不同氧化钠含量的试样在不同养护龄期(3 d、7 d、28 d)时的无侧限抗压强度(如图3),并开展氧化钠含量变化对强度的影响趋

势分析。

在3 d养护龄期内,试样的抗压强度普遍较低,特别是氧化钠含量为0%~4%的试样,其抗压强度较低,显示出聚合反应不强烈,材料尚未达到一定的强度。随着氧化钠含量的增加,抗压强度逐步上升。具体而言,氧化钠含量为7%和8%的试样,抗压强度显著提高,分别达到9.15 MPa和12.12 MPa,表明较高氧化钠含量能够促进聚合反应,增强材料的早期强度。总体而言,3 d养护期内,高氧化钠含量条件下试样的抗压强度得到提升。

7 d养护龄期时,所有试样的抗压强度普遍提高,尤其是氧化钠含量为6%~8%的试样,抗压强度增长最为明显。8%氧化钠含量试样的抗压强度达到35.62 MPa,表现出明显的优势,而0%~4%氧化钠含量的试样仍表现出较低的强度,最大值仅为0.77 MPa,表明低氧化钠含量试样的强度增长较

为缓慢。该结果进一步验证氧化钠含量对强度的促进作用,并表明氧化钠的加入能够加速聚合反应产物的生成。

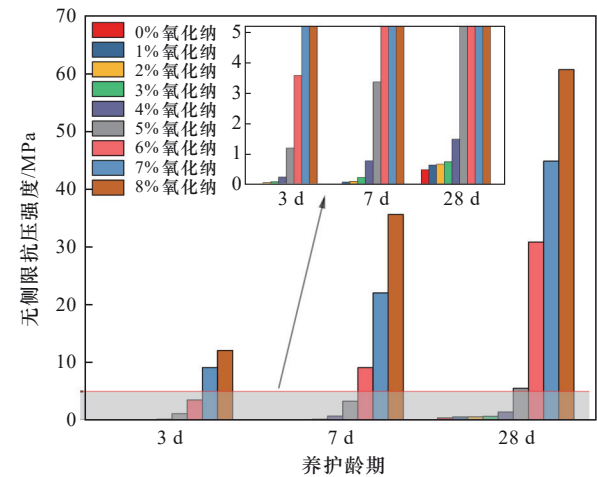


图3 不同养护龄期9种试样无侧限抗压强度
Fig. 3 Unconfined compressive strengths of nine samples at different curing ages

在 28 d 养护龄期时,氧化钠含量为 6%~8% 的试样依旧显示出较高的抗压强度,特别是 8% 氧化钠含量的试样,抗压强度达到 60.64 MPa,展现出最优的强度表现。其他较低氧化钠含量的试样(如 0%~4%)虽然在 28 d 时也有一定的强度提升,但仍明显低于 6%~8% 的含量试样,表明高含量氧化钠能够有效提高同步注浆材料的抗压强度。

根据上述数据,对不同氧化钠含量与无侧限抗压强度之间的关系进行拟合,结果见图 4 和表 8。

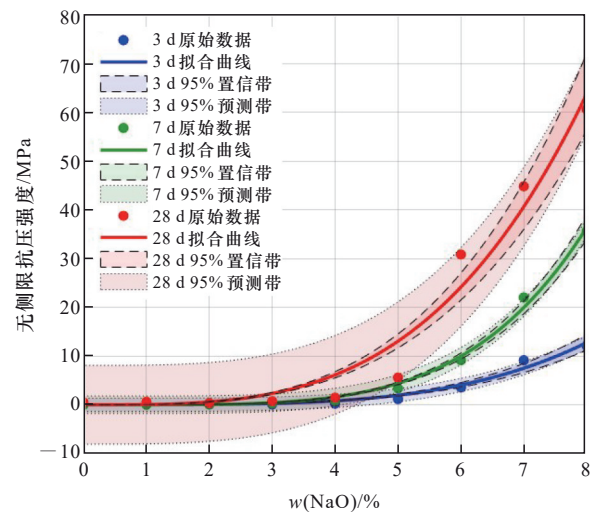


图4 无侧限抗压强度与氧化钠含量的拟合情况
Fig. 4 Fittings of unconfined compressive strength with sodium oxide content

拟合结果表明三条曲线均具有较高的拟合度。 R^2 值均超过 0.96,表明氧化钠含量与无侧限抗压强

表 8 无侧限抗压强度与氧化钠含量拟合曲线的结果参数
Table 8 Resulting parameters of the fitting curve between unconfined compressive strength and sodium oxide content

养护龄期/d	拟合方程	R^2
3	$f_{UCS} = 3.23 \times 10^{-3} \cdot C^{3.98}$	0.97
7	$f_{UCS} = 3.17 \times 10^{-3} \cdot C^{4.50}$	0.99
28	$f_{UCS} = 5.69 \times 10^{-2} \cdot C^{3.38}$	0.96

度具有较好的指数型关系。随着氧化钠含量的增加,试样的抗压强度呈指数型增长趋势,且该趋势在不同养护龄期内保持一致。通过这些拟合曲线,可以进一步推测在不同氧化钠含量下,试样的抗压强度表现,特别是在 1% 至 8% 氧化钠含量范围内养护龄期为 3 d、7 d 和 28 d 时试样的无侧限抗压强度。

试验结果表明,氧化钠含量在 5%~8% 时,显示出优异的固化效果,试样强度在碱激发的作用下得到有效提升。

2.3 电阻率变化分析

电阻率是材料导电性能的重要表征参数,与材料的孔隙结构、离子迁移性及微观结构变化密切相关^[12]。本研究开展氧化钠含量对赤泥基地聚合物浆液电阻率的影响分析,测量得到不同氧化钠含量试样在 3 d、7 d 和 28 d 养护龄期下的电阻率,并结合电流频率的变化规律对材料导电性变化的机制进行探讨。

图 5 展示出在不同养护龄期下,不同试样的电阻率随电流频率变化的曲线。整体趋势表明,电阻率随电流频率的升高而显著降低,这一趋势在所有试样中均表现出高度一致性。低频段下试样的电阻率较高,而在高频段下,电阻率趋于稳定。此现象可归因于高频电流促进离子迁移效应,从而降低材料的电阻率^[13,14]。这一结果与电阻率领域其他研究结果相符,进一步验证频率对材料电导性的影响强烈。

进一步分析氧化钠含量的影响时发现,随着氧化钠含量增加,材料的电阻率逐渐升高。这是由于碱激发剂的加入显著改变聚合反应行为,促进反应产物的生成。这些产物对材料内部的孔隙提供填充效果,使孔隙结构更加密实,减少离子迁移的有效通道,导致电阻率增加。此外,高浓度的碱激发剂会引发局部离子积累效应,进一步增加电阻率。这一趋势在 28 d 养护龄期(图 5(c))中尤为明显,表明长期养护进一步增强孔隙的密实化,伴随着聚合反应的持续进行,从而加剧离子迁移的阻碍。

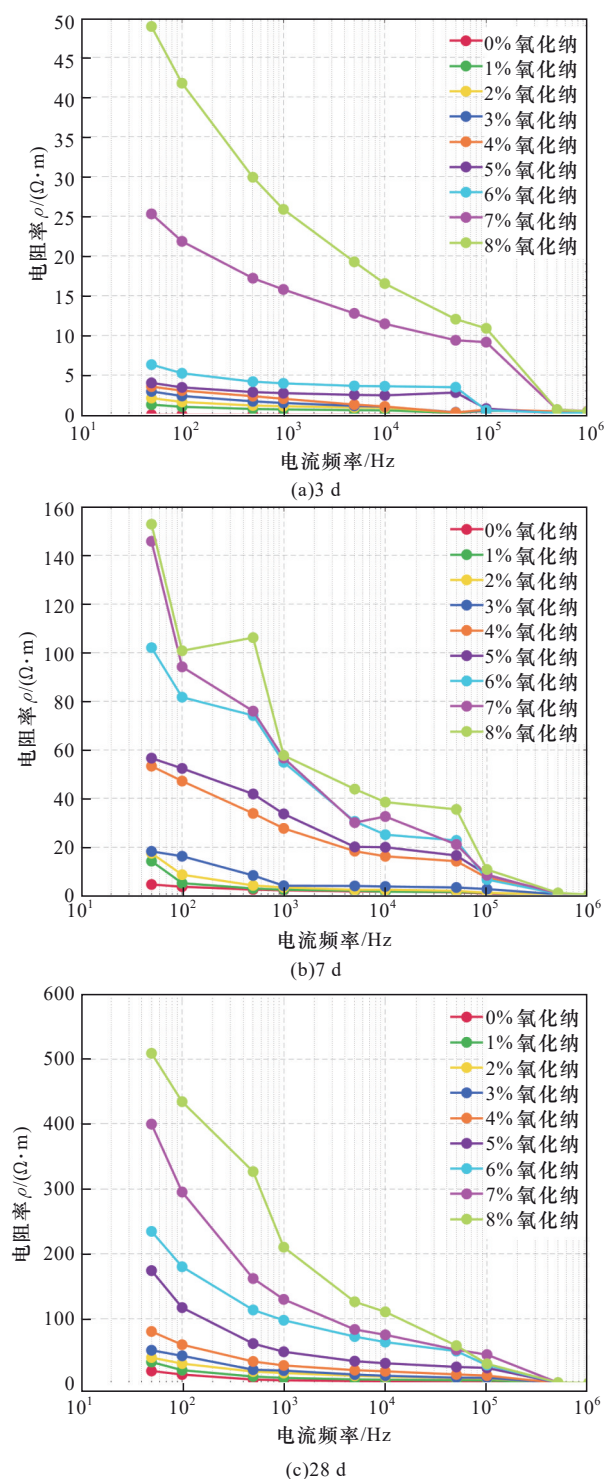


图5 不同养护龄期氧化钠含量对电阻率变化分析

Fig. 5 Effects of sodium oxide content on resistivity changes at different curing ages

对比不同养护龄期, 3 d 养护龄期试样的电阻率明显低于 7 d 和 28 d 养护龄期试样。这是由于初期聚合反应不完全, 孔隙结构较为疏松, 离子迁移阻力较小。随着养护时间的延长, 反应逐渐完成, 材料的孔隙结构逐渐密实, 离子迁移通道受到阻碍, 电阻率显著上升。

综上所述, 氧化钠含量对赤泥基聚合物浆液的电阻率具有显著影响。随着氧化钠含量的增加, 电阻率表现出逐渐升高的趋势。这一变化主要与聚合反应生成的产物填充孔隙、改变了材料的微观结构有关。这一现象得到无侧限抗压强度结果的验证, 试样强度会随着氧化钠含量的升高而升高。此外, 高含量氧化钠可能引发局部离子浓度极化效应, 从而限制离子迁移路径, 进一步增加电阻率。试验结果表明, 低含量氧化钠有助于增强材料的导电性, 而高含量则通过改善孔隙结构和聚合反应产物提高电阻率。该研究为氧化钠的合理配比设计提供理论依据, 并为材料性能优化及长期耐久性研究提供重要指导。

试验结果显示, 氧化钠含量在 5%~7% 时, 材料的电阻率逐步增加, 表明微观结构趋于致密, 该范围内的氧化钠含量可在保证力学性能的同时, 提升材料的耐久性。

2.4 电化学分析

为深入分析赤泥基聚合物浆液的电化学性能, 本研究结合试验测量数据, 构建出适用于固、液、气三相体系的等效电路模型, 以全面表征材料的导电特性及界面行为, 如图 6 所示。所构建的等效电路模型由溶液电阻(R_s)、双界面电荷传输特性(CPE1 与 R_{ct1} 、CPE2 与 R_{ct2})以及扩散阻抗(W)组成。

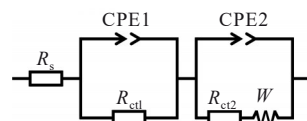


图6 等效电路模型

Fig. 6 Equivalent circuit diagram

在该等效电路模型中, 溶液电阻(R_s)表征材料孔隙液的整体电阻特性, 其大小主要受孔隙液中离子浓度及溶液电导率的影响, 能够反映浆液体系的初始导电能力^[15]。材料的固液界面行为由两个并联回路描述, 分别采用常相位元件(CPE1、CPE2)和电荷转移电阻(R_{ct1} 、 R_{ct2})表征^[16]。CPE1 和 R_{ct1} 用于描述材料初级界面处的电荷转移与离子分布特性, CPE2 和 R_{ct2} 则模拟次级界面处的电化学反应行为^[17]。

此外, Warburg 阻抗(W)被引入以描述离子在材料孔隙中的扩散特性, 该部分与电荷转移电阻(R_{ct2})串联, 用于反映材料内部的离子扩散行为。该模型能够更准确地表征材料的导电特性和微观结构的动态演化, 确保对试验数据的高精度拟合。

通过构建该等效电路模型, 能够精准解析赤泥

基地聚合物浆液的电化学特性,并清晰揭示氧化钠含量对材料导电性和微观结构演化的影响。溶液电阻、界面电荷传输特性及离子扩散阻抗的协同作用,使得该模型能够全面描述材料内部的电化学行为,为进一步优化赤泥基地聚合物浆液的配方设计和性能调控提供重要的理论支持。

为研究氧化钠含量对赤泥基地聚合物浆液电化学性能的影响,测量并拟合出不同养护龄期试样的Nyquist图与Bode图,如图7、图8、图9所示。结果表明,氧化钠含量的增加对材料的电荷传输和离子扩散特性产生显著影响。

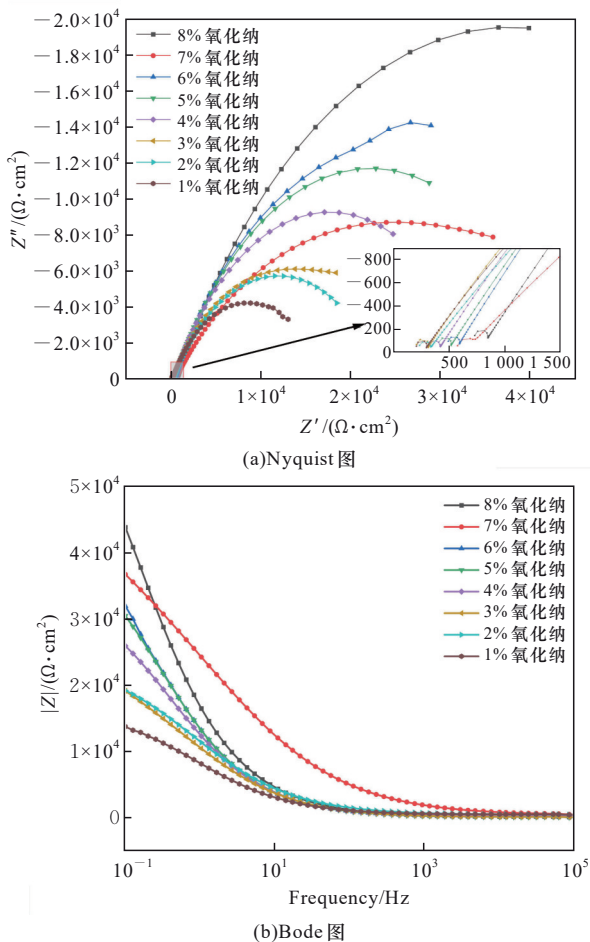


图7 不同氧化钠含量地聚物电化学阻抗谱(3 d)

Fig. 7 Electrochemical impedance spectra of geopolymers at different sodium oxide content (3 d)

从Nyquist图的整体趋势来看,随着氧化钠含量的增加,阻抗值逐渐增大,尤其在高频区域,这一趋势尤为明显。对于3 d养护龄期的试样,阻抗谱主要表现为不完整的半圆弧,表明此时体系仍处于聚合反应的早期阶段,离子扩散和界面极化现象较为明显。低含量氧化钠的试样显示出较低的阻抗值,说明此时体系的电荷传输较为顺畅,而高含量

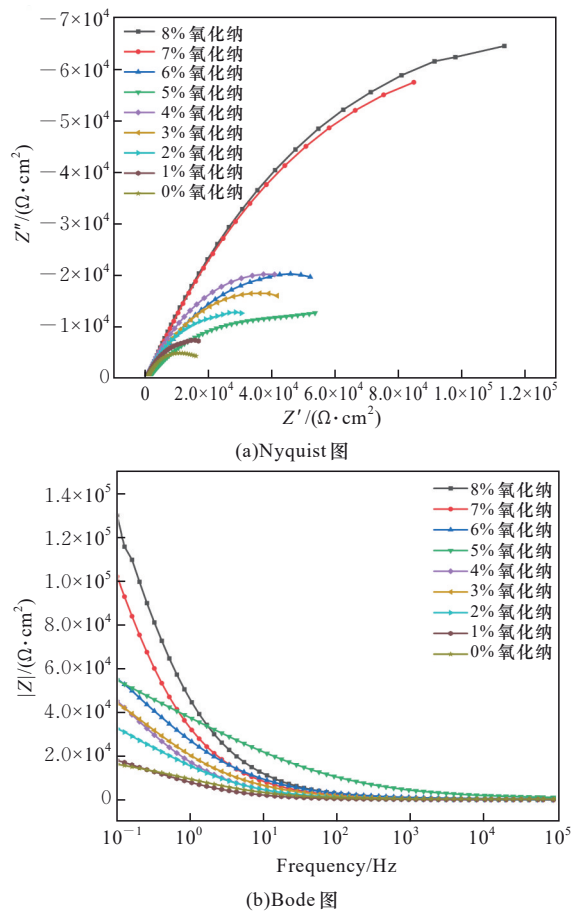


图8 不同氧化钠含量地聚物电化学阻抗谱(7 d)

Fig. 8 Electrochemical impedance spectra of geopolymers at different sodium oxide content (7 d)

氧化钠的试样则表现出较高的阻抗值,可能是由于反应产物的生成,使得孔隙率降低,从而限制离子迁移。

在7 d养护龄期,Nyquist图呈现更为明显的半圆特征,表明界面极化效应逐渐增强,电荷转移电阻(R_{ct})相较于3 d养护龄期有所增加。随着氧化钠含量的提高,半圆的直径不断增大,反映固相结构的进一步致密化,导致离子传输路径受到抑制。此时,材料内部的电导率降低,反应产物的累积在界面处形成更强的屏障效应,进一步提高体系的整体阻抗。此外,Bode图显示,在中高频范围内,阻抗模值的变化趋势与Nyquist图保持一致,进一步验证氧化钠含量对材料电化学行为的影响。

当养护龄期达到28 d时,阻抗值继续增加,并表现出更加明显的半圆弧结构,表明体系的反应产物逐步趋于稳定,孔隙结构进一步收缩。在高氧化钠含量的情况下,阻抗曲线的弧长显著增加,反映材料导电性能的下降。这是由于较高的碱含量导致反应产物的密集堆积,进而降低孔隙连通性,使

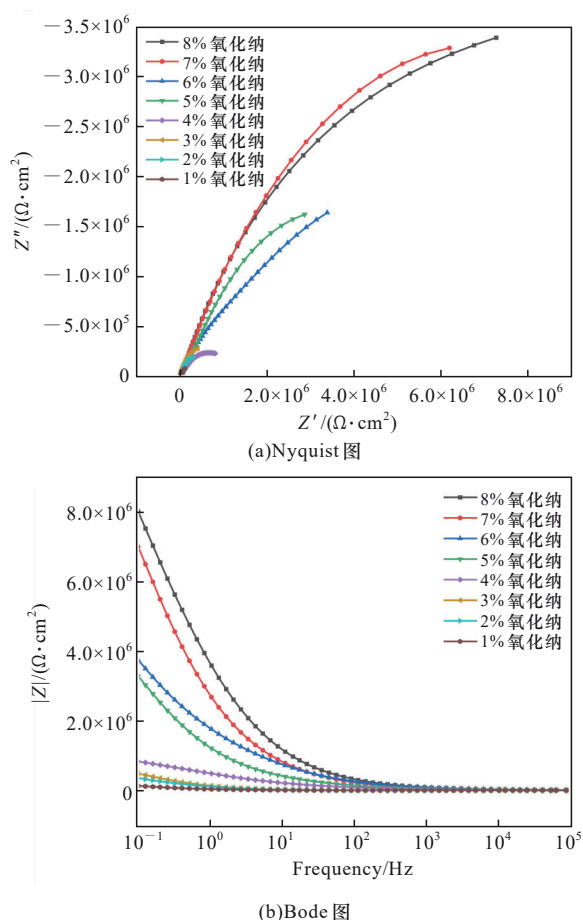


图9 不同氧化钠含量地聚物电化学阻抗谱(28 d)

Fig. 9 Electrochemical impedance spectra of geopolymers at different sodium oxide content (28 d)

得离子扩散阻力增大。同时,Bode图的相位角变化趋势进一步说明,随着氧化钠含量的增加,体系的等效电容行为逐步增强。这一结果表明,材料在长期养护过程中,反应产物的生成及分布情况对电化学阻抗特性产生决定性影响。

综合来看,氧化钠含量对赤泥基地聚合物浆液的电学性能具有重要影响。低氧化钠含量时,体系的电导率较高,离子迁移受限程度较小,而高氧化钠含量则导致孔隙结构收缩,离子扩散通道减少,阻抗增加。此外,随养护龄期延长,体系的聚合反应趋于完全,孔隙结构更加密实,进一步影响材料的导电特性。本研究所构建的等效电路模型较好地对试验数据进行拟合,并有效揭示氧化钠含量对材料电化学行为的作用机理,为赤泥基地聚合物浆液的优化设计提供重要理论依据。

从Nyquist图和Bode图分析可见,5%~7%试样的阻抗值显著增加,表明材料的离子迁移受限,结构趋于稳定,该范围内的氧化钠用量能够兼顾固化效果与长期稳定性。

2.5 微观特性

为深入分析不同氧化钠含量对赤泥基地聚合物浆液微观结构的影响,本研究对九组试样在28 d养护龄期时进行扫描电子显微镜(SEM)测试,分析不同氧化钠含量下的微观形貌特征。图10中的图像结果表明,氧化钠含量对材料微观结构具有显著影响,尤其是在孔隙结构和聚合反应产物的分布上。

在氧化钠含量为0%的试样(No. 1)中,样品表面呈现粗糙的颗粒结构,孔隙较大且分布不均,显示出材料的聚合反应尚未完全进行,反应产物生成较少,导致材料强度较低。含量为1%(No. 2)和2%(No. 3)的试样,表面仍保持松散结构,尽管孔隙相较于0%含量的试样有所减小,但仍显得粗糙,反应产物的生成较少,孔隙结构不够致密,导致材料的强度性能较差。

当氧化钠含量达到一定水平时,试样的微观结构逐渐发生变化。在氧化钠含量为4%(No. 5)和5%(No. 6)时,反应产物的生成有所增加,颗粒出现聚集现象,表面出现更多晶体结构,显示出一定的致密性。然而,这些样品仍存在一定程度的空隙,孔隙率较高,表面较为粗糙,表明尽管聚合反应得到一定促进,但材料的强度尚未达到最优。

氧化钠含量为6%(No. 7)和7%(No. 8)时,微观结构表现出致密特点,孔隙明显减少,反应产物逐渐增多,形成均匀的晶体结构,表面相对光滑,表现出较高的聚合反应和良好的微观密实度。

氧化钠含量为8%(No. 9)时,试样的微观结构达到最致密状态,反应产物高度密实,孔隙几乎消失,材料表面光滑,表现出良好的聚合反应。此时反应产物已填充孔隙形成稳定的结构,材料的强度和耐久性显著提高,表明高氧化钠含量促进聚合物的强化作用。

随着氧化钠含量的增加,试样的微观结构由松散粗糙逐渐转变为致密均匀的结构。表明高氧化钠含量条件在促进聚合反应方面起到积极作用,并在改善材料孔隙结构和微观密实度方面也起到关键作用。微观结构的变化与材料力学性能密切相关,分析结论符合无侧限抗压强度数据的变化情况,进一步验证氧化钠含量对赤泥基地聚合物性能的显著影响。

分析结果表明氧化钠含量在5%~8%时,试样孔隙率降低,形成均匀致密的聚合网络。

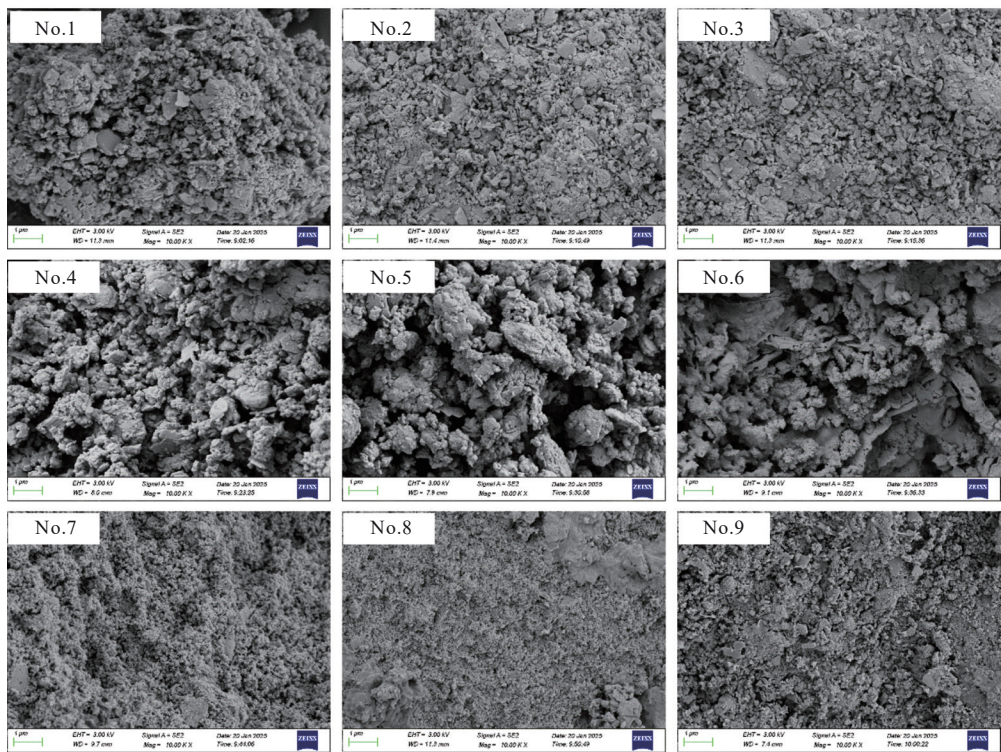


图 10 28 d 养护龄期下 9 组试样的 SEM 图像
Fig. 10 SEM images of nine samples at 28 d curing age

3 结论

本研究探讨氧化钠含量对赤泥基地聚合物同步注浆浆液性能的影响,主要结论如下:

1)氧化钠含量对浆液的新鲜状态性能具有显著影响。随着氧化钠含量的增加,浆液密度增大,流动度和稠度降低,凝结时间明显缩短。适量的碱激发剂有助于优化施工性能,但当含量过高时,浆液流动性降低,影响施工可操作性。

2)氧化钠含量对浆液硬化后的力学性能和电学特性具有极大影响。无侧限抗压强度随氧化钠含量的增加呈指数增长趋势,特别是在 5%~8% 范围内,强度显著提升,28 d 养护龄期的最高强度可达 60.64 MPa。电阻率随着氧化钠含量的增加而升

高,高氧化钠含量促进聚合反应,使微观结构更加致密,减少离子迁移通道,提高材料的耐久性。

3)微观结构分析表明,适量碱激发剂可有效提高材料的致密性和耐久性。氧化钠含量的增加使试样的孔隙率逐渐降低,5%~8% 时形成致密且均匀的聚合物结构,与无侧限抗压强度和电阻率的变化趋势一致。

4)综合考虑浆液的新鲜状态性能、力学性能、电学特性及微观结构,氧化钠含量在 5%~7% 时可显著优化浆液性能,既能保持良好的施工性能,又能在后期养护过程中提高强度和耐久性。此外,研究建立出拟合曲线,可较为精准地预测不同氧化钠含量下浆液的各项性能,为赤泥基地聚合物同步注浆材料的工程应用提供合理的配比建议。

参考文献:

[1] 高影,涂亚楠,王卫东,等.含钙镁煤基固废 CO₂ 矿化封存及其产物性能研究进展[J].煤炭科学技术,2024,52(5):301-315.
[2] Amin A,Zakaria N M,Shaik B I,et al.Characterization and Applications of Red Mud,an Aluminum Industry Waste Material,in the Construction and Building Industries,as well as Catalysis[J].Chemical Record,2023,23(5):e202300039-e202300039.
[3] Pal B D,Tiwari K A,Jana K S.Alumina industrial waste management of red mud:a review[J].International Journal of Mining and Mineral Engineering,2024,15(4):396-415.
[4] Cui W,Cui Q,Dong X,et al.Current research status and emerging trends in utilization of red mud resources:A study based on bibliometric network analysis[J].Construction & Building Materials,2024,442:137605.
[5] 林雪峰,陈爱军,贾致荣,等.赤泥矿渣固化钛石膏的强度与水稳定性研究[J].中外公路,2023,43(6):315-321.
[6] 张健,王川,李召峰,等.赤泥基绿色高性能注浆材料工程特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2022,41(S2):3339-3352.

- [7] Bing B, Fan B, Qingke N, et al. A high-strength red mud-fly ash geopolymer and the implications of curing temperature[J]. *Powder Technology*, 2023, 416: 118242.
- [8] Chen J, Bai B, Du Q. Durability evaluation of a high-performance red mud-based composite material[J]. *Materials Today Communications*, 2024, 39: 108684.
- [9] 李召峰, 刘超, 王川, 等. 赤泥-高炉矿渣-钢渣三元体系注浆材料试验研究[J]. *工程科学与技术*, 2021, 53(1): 203-211.
- [10] Cui W, Liu J, Duan W, et al. Study on the synergistic effects and eco-friendly performance of red mud-based quaternary cementitious materials[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 428: 136352.
- [11] 白晓红, 薛世强, 郭天天, 等. 基于正交试验的赤泥-煤系偏高岭土地聚合物混凝土力学性能研究[J]. *太原理工大学学报*, 2023, 54(4): 710-715.
- [12] Gloria C, Alessandra M, Francesca T, et al. Electrical Resistivity and Electrical Impedance Measurement in Mortar and Concrete Elements: A Systematic Review[J]. *Applied Sciences-Basel*, 2020, 10(24): 9152.
- [13] 宋志伟, 韩素丽, 秦鹏举, 等. 氧化钙改性赤泥固化黄土的电阻率特性及机理[J]. *太原理工大学学报*, 2024, 55(2): 331-337.
- [14] 董晓强, 黄凤凤, 苏楠楠, 等. 非饱和黄土受压过程中交流电阻率特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(1): 189-197.
- [15] Liu K, Cheng X, Li J, et al. Effects of microstructure and pore water on electrical conductivity of cement slurry during early hydration[J]. *Composites Part B*, 2019, 177: 107435.
- [16] Qiong L, Huilin T, Lin C, et al. Evolution of electrochemical impedance spectra characteristics of cementitious materials after capturing carbon dioxide[J]. *Sustainability*, 2023, 15(3): 2460-2460.
- [17] 何斌, 柳堰, 唐龙海, 等. 赤泥-粉煤灰-石灰协同固化 Cu^{2+} 污染高岭土的力学及电化学特性研究[J]. *太原理工大学学报*, 2021, 52(2): 238-246.

(编辑: 万 佳)