

赤泥取代率对三元全废地聚物性能的影响

王家全 孟廷宇 畅振超 唐毅

Effect of red mud substitution rate on the properties of ternary solid waste geopolymers

WANG Jiaquan, MENG Tingyu, CHANG Zhenchao, TANG Yi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20241021.005>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

聚乙烯纤维增强赤泥-碱矿渣复合材料的力学性能

Mechanical properties of polyethylene fiber reinforced red mud-alkali slag composite

复合材料学报. 2022, 39(11): 5367–5374 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220104.003>

高掺量硅灰石纤维对偏高岭土基地聚物性能和微结构的影响

Effect of high wollastonite fiber incorporation on metakaolin base geopolymers' properties and microstructure

复合材料学报. 2023, 40(8): 4694–4702 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20221108.002>

赤泥/聚二甲基硅氧烷复合材料的制备及性能

Synthesis and properties of red mud/polydimethylsiloxane composites

复合材料学报. 2024, 41(7): 3561–3571 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20231129.002>

石墨烯量子点对水泥砂浆流动度、强度和耐盐腐蚀性的影响

Effect of graphene quantum dots on fluidity, strength and salt corrosion resistance of cement mortar

复合材料学报. 2024, 41(4): 2043–2054 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230810.001>

偏高岭土-矿渣地聚物宏观性能试验及Lasso回归模型

Experiment and Lasso regression model of the macroscopic performance of metakaolin-slag geopolymer paste

复合材料学报. 2022, 39(11): 5474–5485 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20211230.001>

橡胶地聚物混凝土力学性能及阻尼特性试验研究

Experimental study on mechanical properties and damping characteristics of rubber geopolymer concrete

复合材料学报. 2022, 39(11): 5321–5332 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20211201.002>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

赤泥取代率对三元全固废地聚物性能的影响

王家全^{*1,2}, 孟廷宇^{1,2}, 畅振超^{2,3}, 唐毅^{1,2}

分享本文

(1. 广西科技大学 土木建筑工程学院, 柳州 545006; 2. 广西壮族自治区岩土灾变与生态治理工程研究中心, 柳州 545006;

3. 北投交通养护科技集团有限公司, 南宁 530029)

摘要: 为进一步提升赤泥 (Red mud, RM) 综合利用率, 本文将赤泥掺入矿渣-粉煤灰基地聚物中制备了三元全固废地聚物 (Ternary solid waste geopolymer, TSWG) 材料, 研究了不同赤泥取代率对 TSWG 的力学性能及和易性的影响, 结合 X 射线衍射 (XRD) 和扫描电子显微镜 (SEM) 测试, 重点探讨了不同取代率赤泥对 TSWG 性能影响机制, 并对 TSWG 砂浆的成本效益和环境影响进行了评估。结果表明, 高掺量的赤泥能够促进铝硅酸盐材料的解聚过程, 与基准组 (赤泥掺量为 0wt%) 相比, 40wt% 赤泥掺量的 TSWG 的初凝时间缩短了 113 min; 随着赤泥取代率的增加, 提高了地聚物的聚合反应程度, 体系中出现了越来越多的硅酸二钙、石英等晶体, 破坏地聚物材料的原有结构, 导致抗压强度逐渐下降; 20wt% 赤泥取代率下 TSWG 28 d 抗压强度达 34.2 MPa, 浆液初始流动度为 254 mm, 与普通波特兰水泥砂浆相比, 具有更好的经济效益和环境效益及更方便的制备方法。

关键词: 赤泥取代率; 地聚物; 力学性能; 和易性; 经济效益; 环境效益

中图分类号: U414; TB332 文献标志码: A 文章编号: 1000-3851(2025)08-4666-13

Effect of red mud substitution rate on the properties of ternary solid waste geopolymers

WANG Jiaquan^{*1,2}, MENG Tingyu^{1,2}, CHANG Zhenchao^{2,3}, TANG Yi^{1,2}

(1. School of Civil and Architectural Engineering, University of Science and Technology Guangxi, Liuzhou 545006, China;

2. Guangxi Zhuang Autonomous Region Engineering Research Center of Geotechnical Disaster and Ecological Control, Liuzhou 545006, China; 3. Guangxi Beitou Transportation Maintenance Technology Group Co. Ltd., Nanning 530029, China)

Abstract: In order to further enhance the comprehensive utilization rate of red mud (RM), ternary solid waste geopolymer (TSWG) materials were prepared by incorporating red mud into slag-fly ash-based polymers. The effects of varying red mud substitution rates on the mechanical properties and workability of these TSWG materials were investigated. Combining X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM) tests, the influence mechanism of red mud with different substitution rates on the properties of TSWG was discussed. Furthermore, the cost-effectiveness and environmental impact of TSWG mortars were evaluated. The results indicate that a high content of red mud can stimulate the depolymerization process of aluminosilicate materials. Compared to the reference group (with 0wt% red mud content), the initial setting time of the TSWG containing 40wt% red mud is shortened by 113 minutes. As the red mud substitution rate increases, the degree of polymerization reaction in the geopolymer is improved, but an increasing number of crystals, such as dicalcium silicate and quartz, emerge in the

收稿日期: 2024-08-14; 修回日期: 2024-09-29; 录用日期: 2024-10-09; 网络首发时间: 2024-10-22 13:56:13

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20241021.005>

基金项目: 国家自然科学基金 (52468047); 广西自然科学基金重点项目 (2022GXNSFDA035081); 广西高等学校高水平创新团队及卓越学者计划项目 (桂教人才[2020]6号); 2022 年度交通运输行业重点科技项目 (2022-MS1-030); 广西科技大学研究生教育创新计划项目 (GKYC202463)

National Natural Science Foundation of China (52468047); Natural Science Foundation of Guangxi Province of China (2022GXNSFDA035081); High Level Innovation Team and Outstanding Scholars Program of Guangxi Institutions of Higher Learning of China (GuiJiaoRenCai[2020]6); Key Technology Project of Transportation Industry in 2022 (2022-MS1-030); Graduate Education Innovation Program Project of Guangxi University of Science and Technology (GKYC202463)

通信作者: 王家全, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为地聚物注浆材料和土工合成材料 E-mail: wjquan1999@163.com

引用格式: 王家全, 孟廷宇, 畅振超, 等. 赤泥取代率对三元全固废地聚物性能的影响 [J]. 复合材料学报, 2025, 42(8): 4666-4678.

WANG Jiaquan, MENG Tingyu, CHANG Zhenchao, et al. Effect of red mud substitution rate on the properties of ternary solid waste geopolymers[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(8): 4666-4678(in Chinese).

system, disrupting the original structure of the geopolymers and resulting in a gradual decrease in compressive strength. At a 20wt% red mud replacement rate, the compressive strength of the TSWG after 28 days reaches 34.2 MPa, and the initial fluidity of the slurry is 254 mm. Compared to ordinary Portland cement mortar, this TSWG exhibits superior economic and environmental benefits, as well as a more convenient preparation method.

Keywords: red mud substitution rate; geopolymers; mechanical properties; workability; economic benefits; environmental benefits

在中国,公路养护里程占公路总里程的99%。每年在交通荷载和自然因素的作用下,公路会出现路基沉陷、路面脱空等多种病害。普通波特兰水泥浆作为目前最常用的灌浆材料之一,虽性能稳定,却存在凝结时间长、成本高、能耗及污染大等问题^[1]。加入混凝土外加剂如硫酸钠、石膏、硫酸钾及铝酸钠等,能改善水泥和易性及强度,缩短其凝结时间^[2-4]。然而,外加剂的使用同时增加了材料成本,且水泥基材料难以与路基的惰性矿物有效结合,易导致界面粘结不佳^[5-6]。因此,为了实现路基病害修复工程的环保、低成本施工,迫切需要一种绿色、低碳环保的灌浆材料。

地聚物是一种基于硅铝四面体结构构建的三维网状无机聚合物,以其高强度、耐侵蚀及低碳排放特性,在建筑领域展现出作为传统水泥替代品的巨大潜力^[7]。研究指出,利用赤泥、粉煤灰、矿渣、建筑垃圾等工业废弃物制备地聚物,能节约能源75%以上,减少排放95%以上^[8-9]。近年来,固废基地聚物注浆材料取代水泥基注浆材料的应用研究越来越多。田中男等^[10]以钢渣基料、粉煤灰、高炉矿渣粉为原料,制备的道路基层材料具有优异的抗压强度和劈裂强度及显著的碳减排效益。Xie等^[11-12]使用高炉矿渣-偏高岭土基地聚合物及高炉矿渣、粉煤灰完全替代再生骨料混凝土中的普通硅酸盐水泥浆料,能够显著改善混凝土的抗压强度和工作性能,有效降低CO₂排放。

激发剂在地质聚合物的制备过程中起着至关重要的作用。根据其对体系环境的影响,可以将地质聚合物激发剂分为酸性、碱性和盐类激发剂三大类。研究表明,氢氧化钠、水玻璃等是制备地质聚合物的常用碱性激发剂^[13-14]。Tchakoute等^[15]和Gao等^[16]证实了酸性激发剂的有效性。Zhang等^[17]进一步发现,高浓度磷酸结合适宜的预处理温度有助于提升地聚合度。而Nikolov等^[18]则通过使用硅酸盐对沸石进行活化,制备出的沸石基地聚物抗压强度达43 MPa。相比之下,铝酸盐激发的聚合物在28天的抗压强度上提升了3倍,表

现出优异的力学性能。

赤泥是铝土矿提炼氧化铝后产生的高碱性残渣,具有“污染物”和“资源”的双重属性,历史存量和年新增量巨大,目前全球年新增赤泥量近2亿吨,而赤泥绿色利用率不足10%^[19]。国内外赤泥的处置方式以露天堆存为主,不仅占用大面积土地,而且严重污染河湖水系和饮用水源。当前,将赤泥转化为建筑材料成为研究热点。李召峰等^[20]基于协同理论制备了赤泥-高炉矿渣-钢渣基三元体系全固废类注浆材料,探究了钢渣在赤泥-高炉矿渣二元体系中对工作性能和力学强度的影响规律及其作用机制。张健^[21]建立了多类型固废协同利用的赤泥基注浆材料的制备理论,分析了其水化机制并实现了有效性能调控。

尽管国内外学者在利用赤泥制备地聚物注浆材料方面有所进展,但研究多聚焦于地聚物材料工作性能评价与水化反应机制,关于赤泥、粉煤灰掺量等关键因素如何影响材料性能的规律并不统一,且其作用机制尚不清晰,这使深入剖析地聚物注浆材料力学性能演变规律变得困难。组合利用赤泥与粉煤灰是基于以下4点原因:(1)通过粉煤灰补充地质聚合所需的游离[SiO₄]⁴⁻和[AlO₄]⁵⁻四面体单元;(2)以赤泥中的碱、SiO₂和Al₂O₃为辅料;(3)铝厂产生的赤泥与其自备电厂产生的粉煤灰可就地协同利用;(4)为道路注浆补强材料的清洁生产及实现赤泥减量化、高值化应用提供参考。鉴于此,本文利用赤泥取代部分粉煤灰,协同矿渣制备高性能固废基注浆材料,探究赤泥取代率对地聚物材料流动度、抗压和抗折强度的影响。采用X射线衍射仪、扫描电镜等测试手段分析赤泥取代率对注浆材料水化历程、微观结构的作用关系和机制,并评估三元全固废地聚物材料的成本效益与环境影响。

1 实验材料及方法

1.1 原材料

F级粉煤灰:比表面积为1.409 m²/g,巩义市龙泽净水材料有限公司;S95级矿渣:比表面积

为 $0.855 \text{ m}^2/\text{g}$, 巩义市龙泽净水材料有限公司; 烧结法赤泥, 比表面积为 $1.277 \text{ m}^2/\text{g}$, 河南铂润铸造材料有限公司。试验中使用的碱活化剂为模数为 1 的速溶硅酸钠粉末(河南铂润铸造材料有限公司), 它含有 50% 的 Na_2O 和 47.5% 的 SiO_2 , 细度范围为 $250\text{--}1000 \mu\text{m}$ 。通过荷兰帕纳科 Axios X 射线荧光光谱仪(XRF)分析了赤泥、矿渣、粉煤灰的化学组成, 结果示于表 1 中。可以看出, 赤泥中 CaO 含量最高(45.43%), 高 CaO 含量的赤泥

能够赋予体系较强的碱性特征。此外, 赤泥中 Fe_2O_3 含量较高(12.79%), 这可能会引起材料颜色的变化并对材料的电化学性能产生影响。相比之下, 粉煤灰中的 SiO_2 和 Al_2O_3 含量分别为 48.72% 和 38.26%, 远高于矿渣和赤泥, 表明其具有较高的硅铝活性, 能够在地聚物体系中充当主要的硅铝来源。矿渣则具有较高的 CaO 和适中的 SiO_2 含量, 能够为地聚物反应提供必要的钙源和作为辅助的硅铝质材料。

表 1 赤泥、矿渣和粉煤灰的化学成分 (wt%)

Table 1 Chemical composition of red mud, slag and fly ash (wt%)

Material	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	SO_3	K_2O	CaO	TiO_2	MnO	Fe_2O_3	ZrO_2
Slag	0.47	8.58	15.24	30.54	0.01	2.08	0.45	40.75	0.73	0.58	0.31	0.04
Red mud	2.02	1.46	9.39	22.12	0.23	1.84	0.51	45.43	3.46	0.06	12.79	0.16
Fly ash	0.50	0.48	38.26	48.72	0.41	1.68	1.20	2.99	1.51	0.04	3.76	0.09

用布鲁克公司生产的 D8 ADVANCE 型 X 射线衍射仪(XRD)分析了赤泥、矿渣和粉煤灰的矿物组成, 如图 1 所示。赤泥的主要矿物组成为钠长石($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$)、方解石(CaCO_3)、硅酸二钙(C_2S)、方铁矿(FeO)、石英(SiO_2)、赤铁矿(Fe_2O_3)和纤铁矿(FeO(OH))。矿渣无明显晶相, 无定型物质。粉煤灰的主要矿物相为六方硅钙石(Ca_3SiO_5)、方解石(CaCO_3)、铁铝酸钙($\text{Ca}_2\text{FeAlO}_5$)和黄铁矿(FeS_2), 晶体衍射峰较尖锐, 结晶度较好。

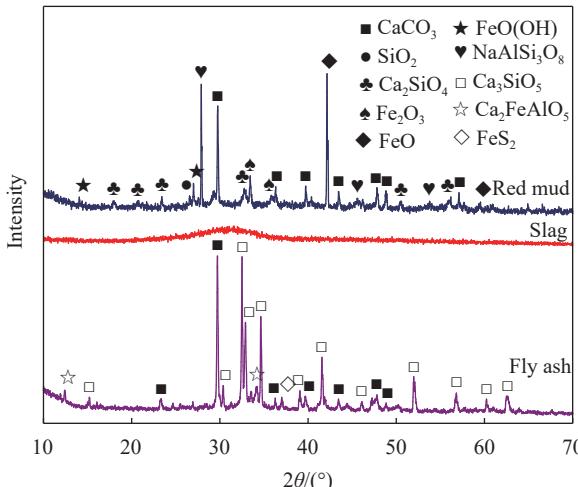


图 1 赤泥、矿渣和粉煤灰的 XRD 图谱

Fig. 1 XRD patterns of red mud, slag and fly ash

用 Battersize 2000 激光粒度分布仪(丹东百特仪器有限公司)和德国 ZEISS-Gemini SEM 360 扫描电子显微镜(SEM)分析了赤泥、矿渣和粉煤灰的

粒径分布及微观形貌, 如图 2、图 3 所示。从图 2 可以看到, 矿渣粒径分布在 $0.382\text{--}78.75 \mu\text{m}$ 之间, 赤泥的平均粒径(D_{50})为 $13.07 \mu\text{m}$, 粉煤灰的平均粒径为 $10.66 \mu\text{m}$ 。

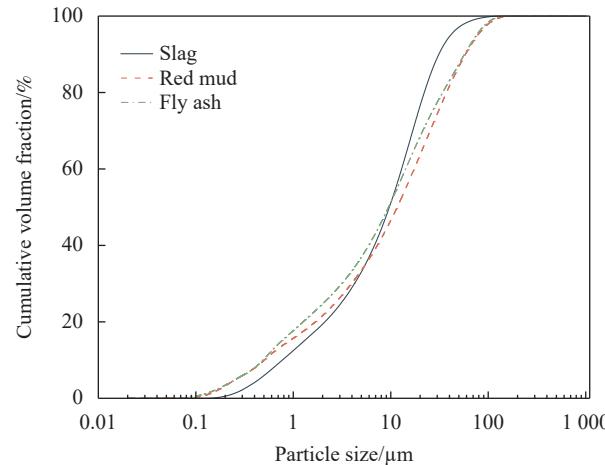


图 2 原材料的粒径分布图

Fig. 2 Particle size distribution map of materials

从图 3 可以看出, 赤泥的形貌以椭球状为主, 矿渣的形貌以不规则块状和条状为主, 颗粒尺寸大小不均, 粉煤灰则主要呈不同粒径的球状或团块状。很明显, 粉煤灰颗粒具有规则的形状和光滑的表面, 赤泥颗粒具有不规则的形状和粗糙的表面。

1.2 混合比例

通过前期试验确定了全固废地聚合物制备的矿渣掺量为固体总质量的 0.6, 硅酸钠浓度为 1.4 mol/L , 模数为 1(所使用的硅酸钠为直接购买的模数为 1

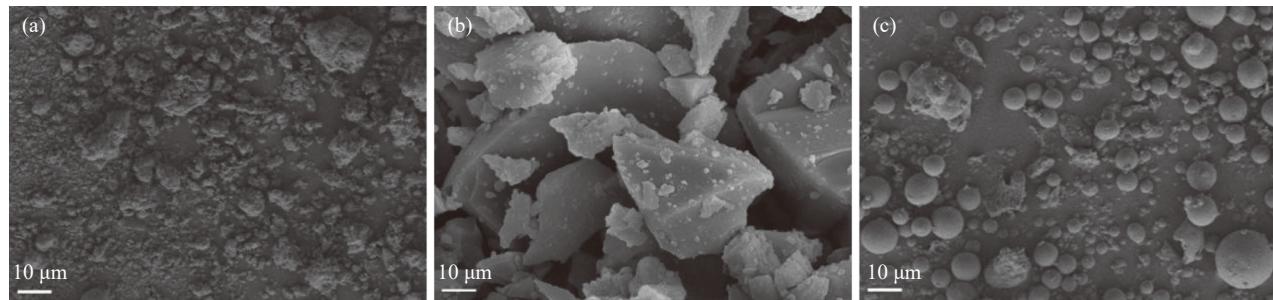


图3 原材料的SEM图像: (a) 赤泥; (b) 矿渣; (c) 粉煤灰

Fig. 3 SEM images of materials: (a) Red mud; (b) Slag; (c) Fly ash

的硅酸钠粉末, 无需通过加入碱进行模数调整)。在本试验中, 首先改变粉煤灰与赤泥含量, 并固定矿渣的含量及矿渣与赤泥和粉煤灰的质量比为3:2, 由于粉煤灰吸水性较强, 对于体系流动性影响较大, 故采用0.5的水胶比来确保浆液流动性。制备摩尔浓度为1.4 mol/L的硅酸钠溶液, 并

在样品制备之前冷却至25℃, 以溶液形式与胶凝材料(赤泥、矿渣、粉煤灰)在干拌过程中进行均匀混合。将赤泥取代率设置为0wt%、10wt%、20wt%、30wt%、40wt% 5个梯度, 考察其对流动性和力学性能的影响, 并以此为指标选择较优的赤泥取代率, 具体材料试验配合比见表2。

表2 三元全固废地聚物(TSWG)浆液配合比

Table 2 Mix ratio of ternary solid waste geopolymer (TSWG) slurry

Group	Slag content/wt%	Fly ash content/wt%	Red mud dosage/wt%	Sodium silicate content (Relative to cementitious materials)/wt%	Water-glue ratio
0wt%RM	60	40	0		
10wt%RM	60	30	10		
20wt%RM	60	20	20	8.54	0.5
30wt%RM	60	10	30		
40wt%RM	60	0	40		

1.3 样品制备

采用“一步法”制备地质聚合物, 即在试验过程中先根据试验设计称取相应质量的胶凝材料进行预拌和, 得到均匀的粉体, 再缓慢加入制备好的碱激发剂溶液(摩尔浓度为1.4 mol/L的硅酸钠溶液)与赤泥、矿渣和粉煤灰混合均匀, 避免泥浆飞溅。为保证整个体系完全混合均匀, 搅拌4 min得到地聚合物浆液。最后, 将其倒入40 mm×40 mm×160 mm的矩形三重模具中, 不振动, 用刮刀插捣后刮试件表面, 覆盖塑料薄膜, 并在温度为(20±2)℃、相对湿度≥(95±5)%的环境(标准养护箱)中养护至规定时间后脱模。

本文将固体激发剂的含量换算成速溶硅酸钠在体系中的摩尔浓度:

$$C(\text{Na}_2\text{SiO}_3) = \frac{n(\text{Na}_2\text{SiO}_3)}{V} \quad (1)$$

$$n(\text{Na}_2\text{SiO}_3) = \frac{m(\text{Na}_2\text{SiO}_3)}{M(\text{Na}_2\text{SiO}_3)} \quad (2)$$

$$V = \frac{m(\text{H}_2\text{O})}{\rho(\text{H}_2\text{O})} = \frac{PQ}{\rho(\text{H}_2\text{O})} \quad (3)$$

其中: $C(\text{Na}_2\text{SiO}_3)$ 为 Na_2SiO_3 在体系中的摩尔浓度(mol/L); V 为水的体积(L); $m(\text{H}_2\text{O})$ 为体系中水的质量(g); $\rho(\text{H}_2\text{O})$ 为水的密度(1 g/cm³); P 为胶凝材料的总质量(g); Q 为水胶比; $n(\text{Na}_2\text{SiO}_3)$ 和 $m(\text{Na}_2\text{SiO}_3)$ 分别为 Na_2SiO_3 的物质的量(mol)和质量(g); $M(\text{Na}_2\text{SiO}_3)$ 为 Na_2SiO_3 的相对分子质量(122 g/mol)。

1.4 试验方法

(1) 凝结时间试验: 根据《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》(GB/T 1346—2011^[22])进行。

(2) 流动性试验: 浆液流动度采用浆液扩散直径表示, 参照《水泥基灌浆材料应用技术规范》(GB/T 50448—2015^[23])进行, 测试砂浆扩展度的截锥圆模上口内径100 mm, 下口内径70 mm, 高60 mm。砂浆扩展度为提起截锥圆模后, 在重力作用下自由流动至静止时两个垂直方向直径的平均值。

(3) 强度试验: 采用WANCE微机控制电子万能试验机, 参照《水泥胶砂强度检验方法》

(GB/T 17671—2021^[24]), 按照 2 400 N/s、50 N/s 加载速率, 分别测试硬化试样在 3、7、14 和 28 d 的抗压强度与抗折强度。

(4) X 射线衍射 (XRD): 将待测样品研磨成粉末, 采用 X 射线衍射 (XRD) 测试检测不同赤泥取代率、不同养护龄期水化产物的变化。XRD 测试采用 D8 ADVANCE 型 X 射线衍射仪。测试参数为: 工作电压 40 kV, 工作电流为 40 mA, 测试角度范围 10°~90°(2θ)。

(5) 微观结构性能测试: 将不同龄期下压裂的试块细致敲碎, 选取中心部位碎块浸泡于无水乙醇中以终止其水化反应, 并确保浸泡时间不少于 24 h。测试前, 取出碎块置于奥菲达 202-1 电热恒温干燥箱中 100°C 干燥 24 h, 选取表面平整的小块通过德国 ZEISS-Gemini SEM 360 扫描电子显微镜 (SEM) 观察其水化产物的微观结构。

2 结果与讨论

2.1 TSWG 的凝结时间

注浆材料的凝结时间决定了其泵送距离和工程实用性, 图 4 为不同赤泥取代率下 TSWG 的凝结时间。可知, 随着赤泥取代率的增加, TSWG 的初凝及终凝时间均呈先增大后减小的趋势。当赤泥取代率低于 20wt% 时, 由于赤泥粉内玻璃体含量较粉煤灰更少, 且赤泥的地聚合反应性较低, 前者更不易于被碱性物质活化产生无定形凝胶, TSWG 的初凝时间由 187 min 延长至 273 min, 同时终凝时间也相应增加。

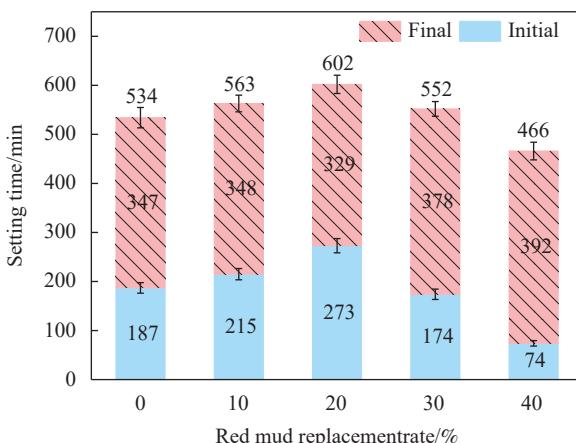
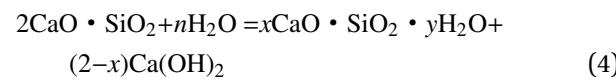


图 4 不同赤泥取代率对 TSWG 凝结时间的影响

Fig. 4 Effect of different red mud substitution rates on the setting time of TSWG

需要注意的是, 当赤泥取代率超过 20wt%, 如赤泥取代率为 30wt%、40wt% 时, TSWG 的初凝

时间缩短至 174 min、74 min, 这说明提高赤泥取代率对于 TSWG 凝结时间的延长是存在阈值的。赤泥取代率超过 20wt% 时, 赤泥中硅酸二钙与拌合水反应放热^[25], 使反应环境温度升高, 早期固化过程中的高温有助于水分子的巨大运动, 从而加速蒸发, 降低了地聚合物前驱体的含水量, 促进了硬化速度:



同时, 温度升高和反应引起的水量减少会引起环境碱度升高。体系内温度和碱度升高均会提高化学反应的速率, 提高固体原料中 Si^{4+} 和 Al^{3+} 的溶出速率和溶解度, 从而促进铝硅酸盐材料的解聚过程, 加快前驱体的形成速度, 这有助于低聚反应过程中凝胶相的形成, 致使地聚物浆体的凝结时间缩短^[26]。综上, 0wt%~30wt%RM 组别的凝结时间位于 174~273 min, 能够适用于 3D 打印或道路修补等需要一定时间固化的应用场景。在 40wt%RM 组别中, 当赤泥的取代率达到 40wt% 时, 浆液的凝结时间得到了显著缩短, 低于 75 min, 展现出了其成为快凝型地聚物注浆材料的巨大潜力。

2.2 TSWG 的流动性

将浆液的流动度定义为料浆的扩展度。注浆材料的流动度取决于浆液颗粒分布、水化速率等参数, 是注浆材料工程泵送特性的重要保障。

图 5 显示了不同赤泥取代率的 TSWG 注浆材料的初始流动度和 30 min 流动度保留值。可以看出: 未掺赤泥的样品初始流动度为 268.5 mm。当矿渣含量和水灰比不变, 赤泥含量从 0wt% 增长到 40wt% 时, 浆体的初始流动度呈先减小后增加再减小的特征, 各组浆液流动度 30 min 保留值较初始流动度分别降低 8.01%、5.54%、2.56%、11.2%、9.03%, 衰减率也呈先减小后增加再减小的趋势。当赤泥取代率小于 20wt% 时, 对地质聚合物浆体初始流动度有一定的负面影响, 在赤泥取代率为 10wt%、20wt% 时, 初始流动度分别降低了 5.96% 和 5.40%, 从原材料的 SEM 图像来看, 这是由于赤泥的掺入降低了体系中粉煤灰含量, 削弱了其“微珠效应”。所谓“微珠效应”, 就是粉煤灰中含有大量的玻璃珠, 其颗粒形态主要为球形, 混合后, “微珠”可以均匀地分布在浆料体系中, 增加浆料的流动性^[1]。而赤泥颗粒的表面更粗糙,

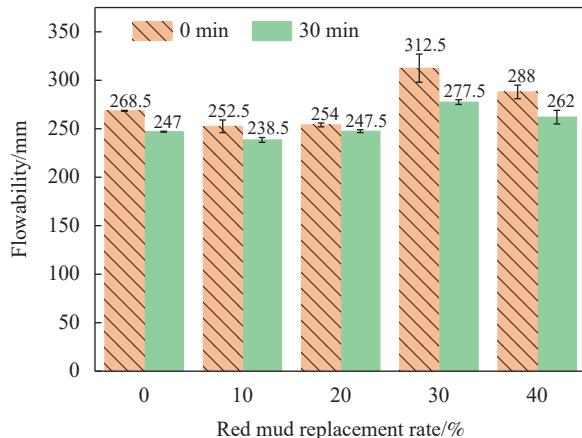


图 5 不同赤泥取代率对 TSWG 流动度的影响

Fig. 5 Effect of different red mud substitution rates on TSWG flowability

导致浆液内摩擦力更高，致使浆液的流动度下降。从反应机制分析，赤泥的加入增加了体系中包括方解石、硅酸二钙的富钙相物质含量，也增加了浆体的初始碱度，在碱性环境下，富钙相具有较低的键能、较高的活性和较快的溶解速度，因此能迅速与溶液中的 OH^- 和 SiO_3^{2-} 发生剧烈反应，生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 沉淀和水化硅酸钙凝胶，从而提高浆料的稠度。

当赤泥取代率高于 20wt% 后，对浆体流动度有一定的改善作用，取代率为 30wt% 时赤泥对浆体的分散作用最好，流动度达到最大值 312.5 mm，较对照组提升了约 16.39%。这是由于赤泥的颗粒级配较好，掺入适量赤泥可以优化浆体中固体颗粒的粒径级配，其次，赤泥的比表面积为 $1.277 \text{ m}^2/\text{g}$ ，小于粉煤灰的比表面积 $1.409 \text{ m}^2/\text{g}$ ，较高的比表面积能够吸附更多的水，赤泥需水量较小导致浆体中自由水含量增多，进而提高了浆体的流动度^[27]。

2.3 TSWG 的抗压强度与抗折强度

图 6、图 7 为不同赤泥取代率下 TSWG 在 3 d、7 d、14 d、28 d 的抗压、抗折强度。可以看出，相同养护龄期条件下试样的抗压、抗折强度均随着赤泥取代率的增加而降低，这主要是由于赤泥掺量过大，导致体系中活性的硅铝质原材料相对减少，不足以充分激发以形成有效的聚合物结构所致。赤泥取代率从 0wt% 增加到 10wt%、20wt%、30wt%、40wt% 时，试样 7 d 龄期抗压强度较基准组下降了 11.08%、21.02%、32.10%、45.74%，试样 56 d 龄期抗压强度较基准组下降了 14.08%、20.17%、37.18%、46.64%，表明赤泥对 TSWG 早期及后期强度的不利影响都较大。这归因于赤泥取

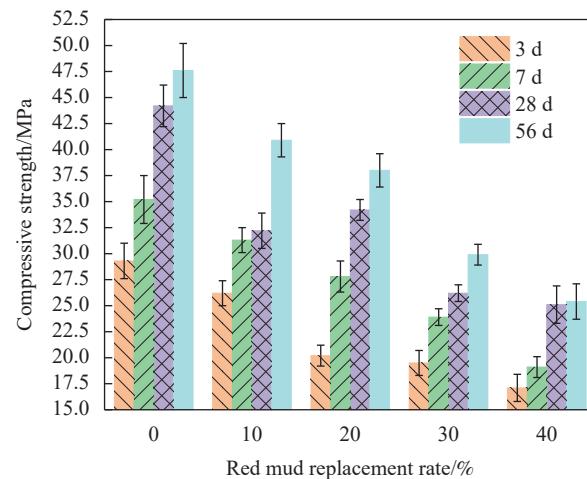


图 6 赤泥取代率对 TSWG 抗压强度的影响

Fig. 6 Effect of red mud substitution rate on the compressive strength of TSWG

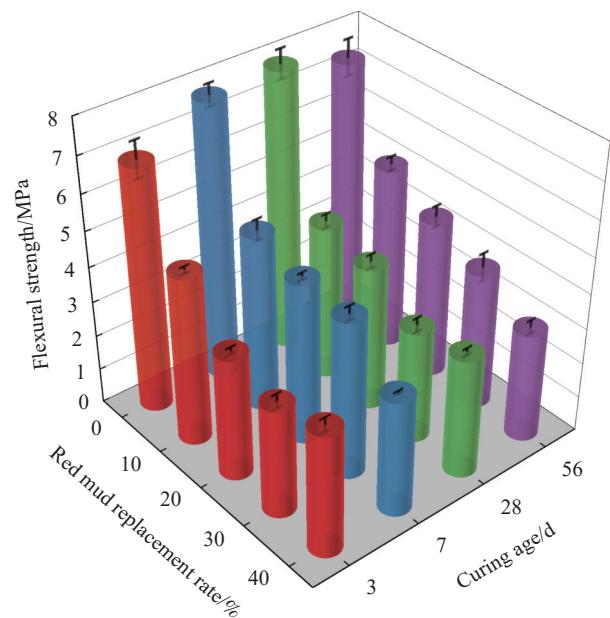


图 7 赤泥取代率对 TSWG 抗折强度的影响

Fig. 7 Effect of red mud substitution rate on the flexural strength of TSWG

代粉煤灰导致钙含量的显著升高，进而提升体系中的 Ca、Si 比值，促进了水化硅酸钙 (C-S-H) 凝胶中硅酸盐链结构的分解过程。这种分解导致凝胶的单轴拉伸强度减弱，从而显著降低了 C-S-H 凝胶的力学性能^[28]。从原材料的粒径分配图可以看出，赤泥的平均粒径大于粉煤灰且都小于 0.1 mm，掺入赤泥削弱了体系中细颗粒物质的微集料效应，同时粗颗粒分布增多使试样浆体基质中的自由水分子变多，降低地聚物材料的紧密性和致密性，从而减小了 TSWG 的强度^[29]。

值得注意的是,当赤泥取代率为10wt%时,养护56 d龄期较养护28 d龄期的试样抗压强度有明显提升,强度增长率达27%,这一现象主要归因于体系中赤泥含量的相对较低水平。在28 d龄期时,赤泥中的主要矿物硅酸二钙仅能发生约20%的水化反应,表明其水化过程相对缓慢,因此,对材料早期强度的贡献较有限。然而,在28 d之后,由于硅酸二钙的持续水化反应,试样的强度仍能保持稳定增长。与此同时,当赤泥掺量较低时,对溶液碱度的提升并不显著。因此,赤泥与水玻璃之间的协同激发作用未能充分释放足够的OH⁻离子,以加速赤泥和粉煤灰中铝硅酸盐结构的断裂。这一过程中,原本应当形成的游离不饱和键无法与胶凝体系中的Ca²⁺有效结合,从而生成水化硅酸钙(C-S-H)凝胶。C-S-H凝胶作为支撑充填体抗压强度的关键组分,其生成量的不足直接导致了试样在早期阶段呈现出较低的抗压强度^[30]。

赤泥取代率对不同龄期TSWG抗折强度的影

响见图7。可以看出,随着赤泥取代率的增加,抗折强度均低于对照组。由于TSWG中未加入纤维,影响抗折强度的主要因素为基体强度,故主要是由于赤泥的掺入使活性硅铝酸盐共价结构含量减少,抗折强度呈降低趋势。折压比为考虑材料韧性较重要的指标,在28 d龄期时抗压强度接近的情况下,折压比越高,材料韧性越好。综合来看,当赤泥取代率为10wt%时,TSWG强度性能最佳,28 d龄期时分别为抗压强度32.2 MPa,抗折强度4.4 MPa,折压比为0.137。

2.4 TSWG水化微观产物分析

为分析赤泥对TSWG水化和硬化性能的影响,采用XRD测试了赤泥取代率分别为0wt%、10wt%、20wt%、30wt%、40wt%的TSWG在3 d、7 d龄期下水化产物的组成,如图8(a)、图8(b)所示。此类材料硬化过程中的主要水化产物为C-S-H凝胶、方解石、托贝莫来石、石英、莫来石、硅酸二钙、赤铁矿。

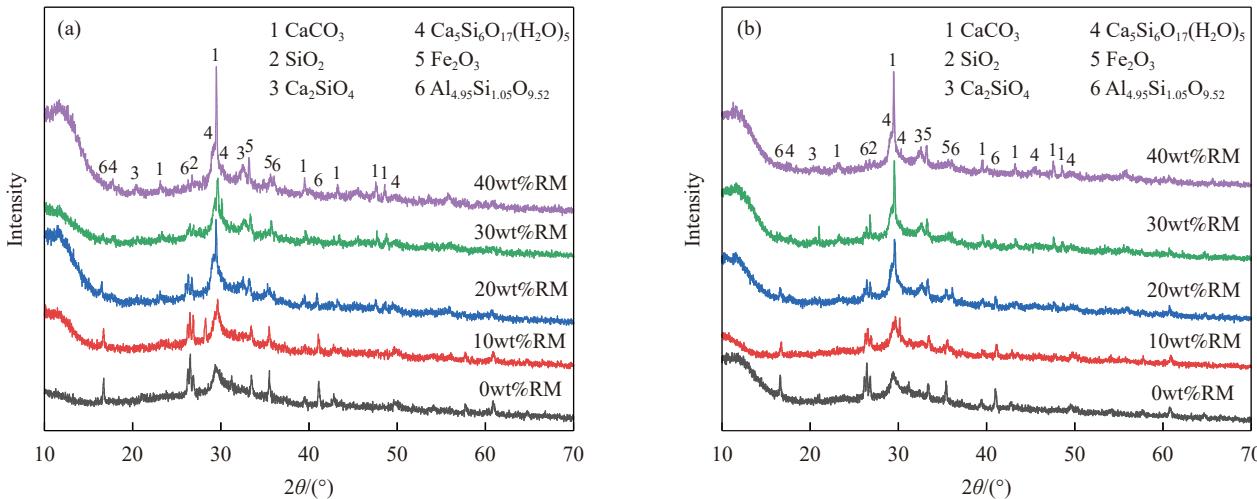


图8 不同赤泥取代率的TSWG在3 d (a)、7 d (b)时的XRD图谱

Fig. 8 XRD patterns of TSWG with different red mud substitution rates at 3 d (a) and 7 d (b)

从图中可以发现,不同赤泥取代率下合成产物组成略有变化。赤泥掺量10wt%时(10wt%RM),方解石和赤铁矿的强度很低,表明大部分参与了聚合反应;随赤泥取代率的增加(20wt%~40wt%RM),TSWG中方解石相和赤铁矿相的特征衍射峰强度开始明显增高,表明此时体系中的Ca含量较高,胶凝材料并未充分反应,未通过地聚合反应消耗的SiO₂、Fe₂O₃等活性物质增加,越来越多的晶体堆积,它们在地聚物体系中充当非活性填料,这对地聚物注浆材料的强度非常不利^[31]。这是由

于赤泥的活性较低,加入赤泥延缓了地质聚合反应进程。在50°左右有一个较明显的弥散“馒头”状宽峰,据资料显示这些无定形“馒头”峰为生成的C-S-H凝胶的特征峰,是无定形的水化硅酸钙凝胶结构,它是材料强度的主要来源。随着赤泥取代率的逐渐增加,TSWG的C-S-H凝胶相特征峰较低,这是由于赤泥的取代会造成体系内的SiO₂含量的降低,从而导致C-S-H凝胶生成量的减少,宏观上表现为地聚物材料力学性能的下降^[32]。

当赤泥含量高时,TSWG的托贝莫来石相特

征峰显著, 表明其水化生成的大量水化硅酸钙会进一步发生晶型转变生成托贝莫来石, 随着托贝莫来石晶体数量逐渐增加, 它们之间的紧密堆积在试件内部易于形成空隙和裂纹。这些空隙和裂纹累积导致试件中的有害孔体积显著上升, 无害孔体积则相对减少, 从而使试件的孔结构状态趋于恶化, 对 TSWG 的抗折和抗压强度产生了不利的影响, 降低了其整体力学性能^[33]。与未添加赤泥的地聚物 XRD 图像对比发现随着赤泥的加入, 地聚合反应进行的过程中还会形成由 CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 组成的结晶细小的矿物集合体硅酸二钙, 可能是由于赤泥的加入增加了体系的碱性, 促成了硅酸二钙晶体的形成。当晶体含量持续增加时, 晶体填充在浆体的毛细孔内且结晶膨胀后尺寸大于毛细孔的直径, 破坏地聚物材料的原有结构, 同时钙硅铝比持续增加还会使 C-S-H 中硅氧四面体的聚合程度降低, 导致强度下降, 两者

共同作用下宏观上表现为 TSWG 的抗压强度下降, 与强度测试结果相符合^[34]。

对比不同龄期 TSWG 的 XRD 图谱可见不同养护龄期的地聚物样品 XRD 谱大致一样, 各龄期 XRD 图谱中均存在 C-S-H 凝胶、方解石、托贝莫来石、石英、莫来石、硅酸二钙、赤铁矿的特征峰。随着养护龄期的增长, 在 45° 左右又发现了 C-S-H 凝胶的宽峰, 这表明碱激发地聚物的反应程度在持续提高, 水化硅酸钙凝胶不断增多, 新生无定形凝胶显著提高试件的力学性能, 与强度测试结果相吻合。

在对各组样品进行定性分析后, 采用全谱拟合软件进行 XRD 谱的 Rietveld 全谱拟合定量分析, 定量计算出各主要矿物相在材料中所占比例与赤泥取代率的关系。主要矿物相含量如表 3、表 4 所示, 图 9(a)、图 9(b) 直观地反映了煅烧温度下矿物相含量的变化。

表 3 3 d 不同赤泥取代率下 TSWG 中各种矿物相含量 (wt%)

Table 3 Content of various mineral phases in TSWG under different red mud substitution rates for three days (wt%)

Group	Mullite	Calcite	Clinotobermorite	Quartz	Hematite	Calcio
0wt%RM	44.4	15.8	38	1.8	—	—
10wt%RM	37.5	24.9	33.6	4	—	—
20wt%RM	21.5	26.7	38.1	2.1	3	8.6
30wt%RM	10.1	39	32.7	4.2	4.4	9.6
40wt%RM	1.6	33.7	43	0.5	3.9	17.3

表 4 7 d 不同赤泥取代率下 TSWG 中各种矿物相含量 (wt%)

Table 4 Content of various mineral phases in TSWG under different red mud substitution rates for seven days (wt%)

Group	Mullite	Calcite	Clinotobermorite	Quartz	Hematite	Calcio
0wt%RM	50.5	24.4	19.8	5.3	—	—
10wt%RM	40	26.4	25.1	4.2	—	4.3
20wt%RM	20.2	27.2	38.2	2.4	7.6	4.4
30wt%RM	10.9	27.3	45.4	2.5	2.8	11.1
40wt%RM	3.3	30.4	41.8	0.4	3.6	20.5

如图 9 所示, 矿物相含量变化趋势呈现一定的相同规律性。以 7 d 不同赤泥取代率下各种矿物相含量变化趋势为例, 随着赤泥取代率的增加: 方解石和赤铁矿含量总体变化幅度不大, 莫来石和石英含量总体呈现大幅减少的趋势, 莫来石含量减少范围为 20.79%~93.47%, 石英含量减少范围为 20.75%~92.45%, 这是由于赤泥中 SiO_2 含量为 22.12wt%, 粉煤灰中为 48.72wt%, 赤泥取代粉煤灰原材料中未参与反应的 SiO_2 含量降低, 使体系中的硅铝质原料减少。同时也进一步反映了随着赤泥含量的增加, 聚合反应进行的更不完全^[35]。由表 4 可发现, 随着赤泥取代率从 0wt% 升至

40wt%, 托贝莫来石和 C_2S 含量总体呈增加的趋势, 托贝莫来石含量的增加范围为 26.77%~129.29%, C_2S 含量增加范围为 2.33%~376.74%, 变化趋势与 XRD 图谱分析中所预测的相吻合。赤泥掺量为 40wt%, 养护 3 d 条件下 TSWG 中石英相和莫来石相含量均大幅降低, 表明此时固体原料中 Si^{4+} 和 Al^{3+} 的溶出速率和溶解度有所提高, 与凝结时间测试结果相对应。逐渐增多的托贝莫来石晶体和硅酸二钙晶体堆积在试件中形成空隙和裂纹, 使试件的有害孔体积增加, 破坏了 TSWG 的原有结构, 对 TSWG 的抗压强度起到负面影响, 与上文中强度试验结果相同。

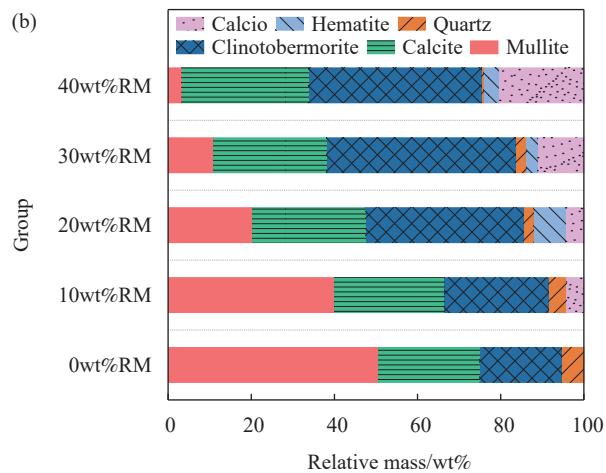
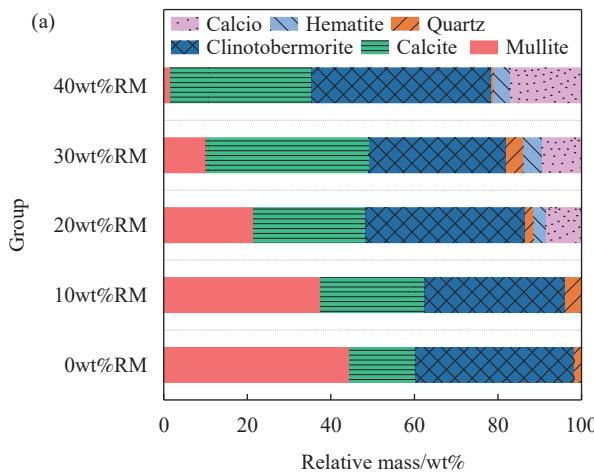


图 9 不同龄期不同赤泥取代率下 TSWG 中各种矿物相含量: (a) 3 d; (b) 7 d

Fig. 9 Content of various mineral phases in TSWG under different red mud replacement rates at different ages: (a) 3 d; (b) 7 d

为进一步分析不同配合比条件下试件养护 3 d、7 d 后水化产物形貌、颗粒大小和分布情况, 进行了 SEM 分析, 结果见图 10、图 11。

养护龄期为 3 d 时, (0wt%~40wt%RM)TSWG 的 SEM 图像如图 10 所示。如图 10(a) 所示, 0wt%RM 组 3 d 和 7 d 样品中可见未反应的粉煤灰颗粒与矿渣颗粒, 同时生成了大量无定形 C-S-H 凝胶。由图 11(a)~图 11(e) 可知, 随着赤泥取代率的增加, 可以看到由于体系中粉煤灰含量降低导致大粒径的粉煤灰颗粒逐渐消失, 尽管仍然有部分粉煤灰

尚未完全反应, 但这些未反应的部分能够嵌入地聚物胶凝体中, 从而构成一个相对均一的结构体。这验证了赤泥的添加能够有效提升体系的碱度, 进而促进 TSWG 在早期阶段的聚合反应程度, 使材料中无定形胶凝体的含量得到一定的增加。此外, 能够清晰看到随着赤泥的掺入样品中出现了未反应完全的赤泥颗粒, 尽管赤泥颗粒活性较低未能及时完全发生水化反应, 但其剩余颗粒粒径较小, 能够分散填充在试样的空隙和裂纹中, 使 TSWG 微观结构更密实, 对地聚物结石体仍然具有一定的强度贡献。与此同时体系中不断有块状

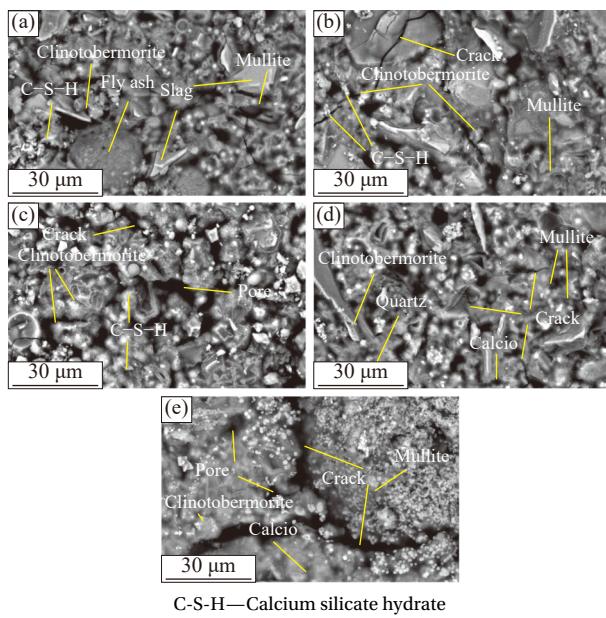


图 10 养护 3 d 时 TSWG 的 SEM 图像: (a) 0wt%RM; (b) 10wt%RM; (c) 20wt%RM; (d) 30wt%RM; (e) 40wt%RM

Fig. 10 SEM images of TSWG curing for 3 d: (a) 0wt%RM; (b) 10wt%RM; (c) 20wt%RM; (d) 30wt%RM; (e) 40wt%RM

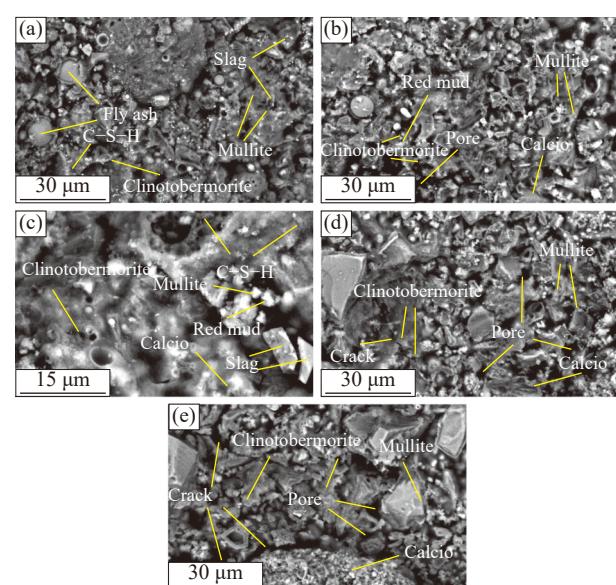


图 11 养护 7 d 时 TSWG 的 SEM 图像: (a) 0wt%RM; (b) 10wt%RM; (c) 20wt%RM; (d) 30wt%RM; (e) 40wt%RM

Fig. 11 SEM images of TSWG curing for 7 d: (a) 0wt%RM; (b) 10wt%RM; (c) 20wt%RM; (d) 30wt%RM; (e) 40wt%RM

和针状的托贝莫来石、硅酸二钙、莫来石晶体生成, 这些晶体大量堆积使试件出现条形裂纹, 孔隙结构恶化, 因此赤泥取代率的提高最终仍会伴随硬化体强度降低, 这进一步解释了为何0wt%RM的抗压强度高于10wt%~40wt%RM。

从图11可以看出, 随着解聚-缩聚反应的持续进行, 原料中的硅铝氧化物大部分溶解, 生成了更多的絮状凝胶物质, 更大限度地填充了试样的孔隙或孔洞, 使TSWG微观结构更致密, 也为进一步的聚合反应提供了成核场所。龄期为7 d时, 明显更少观察到粉煤灰和矿渣等大块晶状物质, 托贝莫来石等晶体穿插包裹于胶凝物质之间, 桥接形成三维空间骨架密实组合结构, 这一现象解释了不同赤泥取代率TSWG的强度随龄期增长特性。

2.5 TSWG经济和生态分析

成本和CO₂排放是影响工程材料广泛应用的关键因素。使用两个指标来表征地聚物材料的成本效益和环境影响^[36]:

$$C_p = \frac{T_{\text{cost}}}{f_c} \quad (5)$$

其中: C_p是每立方米材料在获得单位 MPa 强度时所需的生产成本; T_{cost}为每立方米材料的总生产成本, 未包含原材料加工及运输费用的考量; f_c是材料的28 d抗压强度。

$$E_p = \frac{T_e}{f_c} \quad (6)$$

其中: E_p表示每立方米材料在获得单位 MPa 强度时的CO₂排放量; T_e代表每立方米材料在生产、运输及使用全生命周期中所产生的平均温室气体排放总量, 以二氧化碳当量(E)作为计算碳排放量的基本度量单位。

实际操作过程中, 涉及碳排放的活动或过程主要包括赤泥、矿渣、粉煤灰的开采与堆存及水玻璃的生产和配制等环节。根据调查研究^[36-39], TSWG各原材料的成本和二氧化碳当量(E)如表5所示。不同工况下TSWG的C_p和E_p计算结果如表6所示。

根据TSWG的材料组成及其材料成本和碳排放当量, 计算每m³地聚物0wt%RM、10wt%RM、20wt%RM、30wt%RM、40wt%RM结石体每MPa的成本和碳排放当量如表6所示, Control group组别示出的为每MPa普通波特兰水泥砂浆的成本

和碳排放当量。由表6可以发现, 5组工况下样品C_p值均低于普通波特兰水泥砂浆, 赤泥、矿渣、粉煤灰的协同作用对抗压强度的正面影响及3种固废相对于水泥成本更低是TSWG的C_p值降低的原因。当赤泥取代率为0wt%时, TSWG的C_p值最低, 其比其他5个样品的C_p值降低12%~38%。与掺入赤泥的其他3组试件对比, 赤泥取代率为20wt%的TSWG具有较好的经济效益, 这是由于此时赤泥的掺入并未使材料强度损失过多且用赤泥取代粉煤灰降低了材料成本。赤泥取代率为10wt%、30wt%、40wt%的TSWG显示出较高的C_p值, 但仍略低于普通波特兰水泥砂浆。随着中国日益严格的环保政策及水泥基材料价格上涨, 地聚物材料显示出较优的成本优势, 并展现出在实际工程项目中应用的潜力。

表5 原材料的成本和二氧化碳当量E

Table 5 Cost of raw materials and carbon dioxide equivalence E

Material	Cost/(CNY·kg ⁻¹)	E/(kgCO ₂ ·kg ⁻¹)
Fly ash	0.25	0.027
Instant Na ₂ SiO ₃ powder	2.50	1.530
Water	0.002	0.0006
Red mud	0.01	0.00518
Slag	0.09	0.143

表6 TSWG成本效益和环境影响

Table 6 Cost effectiveness and environmental impact of TSWG

Group	Compressive strength/MPa	C _p /(CNY·MPa ⁻¹ ·m ⁻³)	E _p /(kgCO ₂ ·MPa ⁻¹ ·m ⁻³)
0wt%RM	44.2	11.72	7.24
10wt%RM	32.2	15.05	9.84
20wt%RM	34.2	13.18	9.18
30wt%RM	26.2	15.91	11.86
40wt%RM	25.1	15.27	12.26
Control group	30	16.29	13.54

Notes: Control group refers to ordinary Portland cement mortar; C_p is the production cost required to obtain a unit megapascal strength per cubic meter of material; E_p is the carbon dioxide emissions per cubic meter of material when obtaining a unit megapascal strength..

5个地聚物材料的E_p值的比较如图6所示。其中40wt%RM试样的E_p值最高, 但相较于普通波特兰水泥砂浆依然有所降低。赤泥取代率从10wt%~40wt%的样品相比普通波特兰水泥砂浆低9%~47%, 这是由于基材中3种固废生产过程中每kg原料的CO₂排放量明显低于水泥。值得注意

的是，在掺入赤泥的4个试验组别中，赤泥取代率为20wt%时TSWG的 E_p 值依然处于最低水平，与其 C_p 值变化趋势相同。如前所述，这主要是由于赤泥的掺入并未使材料强度损失过多并降低了材料生产过程中的CO₂排放量。这表明TSWG的应用开发在减少环境污染方面具有重要意义。

综合分析经济效益和环境影响，发现掺入一定量的赤泥取代粉煤灰能够有效地降低材料成本和减少碳排放。对于TSWG，赤泥取代率为20wt%时经济和生态效益最佳。

3 结论

分析了不同赤泥取代率对三元全固废地聚物(TSWG)的凝结时间、流动性、抗压、抗折强度及水化产物的影响，主要结论如下：

(1) 高取代率掺入赤泥，促进了铝硅酸盐材料的解聚过程，进而降低地聚物的凝结时间；同时对浆体流动度也有一定的改善作用，取代率为30wt%时对浆体的分散作用最好，流动度达到最大值312.5 mm，较未掺入赤泥组提升了约16.39%，而低赤泥取代率会加速体系生成Ca(OH)₂沉淀和水化硅酸钙凝胶，从而提高浆料的稠度；

(2) TSWG的抗压强度随赤泥取代率的增大呈降低的趋势，抗折强度随赤泥取代率增大而减小。当赤泥掺量为40wt%时，抗压强度最低，其28 d抗压强度为25.1 MPa，但此时依然能够满足SZ-G-B04-2007《公路路基与基层地聚合物注浆加固技术规程》中提到的路基加固用材料28 d抗压强度 ≥ 5 MPa的要求；

(3) 随着赤泥取代率的增加，体系中出现了越来越多的硅酸二钙、莫来石等晶体，晶体填充在浆体的毛细孔内且结晶膨胀后尺寸大于毛细孔的直径，破坏地聚物材料的原有结构，导致强度下降；

(4) 综合考虑整体性能、成本和环境因素，建议20wt%是最佳的赤泥取代率，此时结石体28 d抗压强度达34.2 MPa，浆液初始流动度为254 mm，同时能够消纳一定量的赤泥，TSWG实现了非凡的成本效益和环境影响。

参考文献：

- [1] LI J, DANG X T, ZHANG J W, et al. Mechanical properties of fly ash-slag based geopolymer for repair of road subgrade diseases[J]. *Polymers*, 2023, 15(2): 309.
- [2] WANG Y L, TANG H Y, SU J X, et al. Effect of sodium sulfate

and gypsum on performances of expansive grouting material with aluminum as expansion agent[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 394: 132212.

- [3] WANG J J, WANG Y L, YU J, et al. Effects of sodium sulfate and potassium sulfate on the properties of calcium sulfoaluminate (CSA) cement based grouting materials[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 353: 129045.
- [4] WANG Y L, YU J, WANG J J, et al. Effects of sodium aluminate and quicklime on the properties of CSA grouting materials[J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 58: 105060.
- [5] LIU H B, TANG W Q, MA W Z, et al. Research progress of cement-based grouting materials[J]. *Concrete*, 2016, 3: 71-75.
- [6] ZHANG L, WEN P, WANG C, et al. Advances in non-excavation grouting reinforcement materials in the road engineering[J]. *Materials Science and Engineering: Reports*, 2017, 31: 98-105.
- [7] 李召峰, 陈经棚, 杨磊, 等. 石粉对赤泥基注浆材料的影响机制[J]. 工程科学学报, 2021, 43(6): 768-777.
- LI Zhaofeng, CHEN Jingpeng, YANG Lei, et al. Influence mechanism of limestone powder on red mud-based grouting material[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2021, 43(6): 768-777(in Chinese).
- [8] AZAD N M, SAMARAKOON S. Utilization of industrial by-products/waste to manufacture geopolymer cement/concrete[J]. *Sustainability*, 2021, 13(2): 873.
- [9] REN B, ZHAO Y, BAI H, et al. Eco-friendly geopolymer prepared from solid wastes: A critical review[J]. *Chemosphere*, 2021, 267: 128900.
- [10] 田中男, 张争奇, 何勇海, 等. 全固废地聚物稳定钢渣基层的性能及微观特性分析[J]. 中国公路学报, 2023, 36(12): 131-142.
- TIAN Zhongnan, ZHANG Zhengqi, HE Yonghai, et al. Performance and microscopic characteristics of geopolymer stabilized steel slag roadbase with full solid-waste reusing[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2023, 36(12): 131-142(in Chinese).
- [11] XIE J H, CHEN W, WANG J J, et al. Coupling effects of recycled aggregate and GGBS/metakaolin on physicochemical properties of geopolymer concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 226: 345-359.
- [12] XIE J H, WANG J J, ZHANG B X, et al. Physicochemical properties of alkali activated GGBS and fly ash geopolymers recycled concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 204: 384-398.
- [13] MUTHADHI A, SUGANYA B. Effect of activator on strength and microstructure of alkali activated concrete with class C fly ash[J]. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 2021, 46: 261-269.

- [14] YURT U. High performance cementless composites from alkali activated GGBFS[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 264: 120222.
- [15] TCHAKOUTE H K, RUESCHER C H, KAMSEU E, et al. Influence of the molar concentration of phosphoric acid solution on the properties of metakaolin-phosphate-based geopolymers cements[J]. *Applied Clay Science*, 2017, 147: 184-194.
- [16] GAO L, ZHENG Y X, TANG Y, et al. Effect of phosphoric acid content on the microstructure and compressive strength of phosphoric acid-based metakaolin geopolymers[J]. *Heliyon*, 2020, 6(4): e03853.
- [17] ZHANG B F, GUO H Z, YUAN P, et al. Novel acid-based geopolymers synthesized from nanosized tubular halloysite: The role of precalcination temperature and phosphoric acid concentration[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2020, 110: 103601.
- [18] NIKOLOV A, NUGTEREN H, ROSTOVSKY I. Optimization of geopolymers based on natural zeolite clinoptilolite by calcination and use of aluminite activators[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 243: 118257.
- [19] 张博. 2023 赤泥绿色利用国际论坛在郑州召开 [J]. *中国有色金属*, 2023(24): 10-11.
ZHANG Bo. The 2023 international forum on green utilization of red mud was held in Zhengzhou[J]. *China Non-ferrous Metals*, 2023(24): 10-11(in Chinese).
- [20] 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.
LI Zhaofeng, LIU Chao, WANG Chuan, et al. Experimental study on grouting material of red mud-blast furnace slag-steel slag ternary system[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2021, 53(1): 203-211(in Chinese).
- [21] 张健. 赤泥协同多源固废制备注浆材料组成设计、水化机理与性能调控 [D]. 济南: 山东大学, 2021.
ZHANG Jian. Composition design, hydratation mechanism and performance control of grouting material prepared by red mud and multi-source solid waste[D]. Jinan: Shandong University, 2021(in Chinese).
- [22] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法: GB/T 1346—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Test methods for water requirement of normal consistency, setting time and soundness of the portland cement: GB/T 1346—2011[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011(in Chinese).
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 水泥基灌浆材料应用技术规范: GB/T 50448—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Technical code for application of cementitious grout: GB/T 50448—2015[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015(in Chinese).
- [24] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 水泥胶砂强度检验方法(ISO法): GB/T 17671—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Test method of cement mortar strength (ISO method): GB/T 17671—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021(in Chinese).
- [25] 徐勍, 徐霁, 周琼, 等. 碱含量对水泥性能影响的研究 [J]. *建筑工程技术与设计*, 2017(16): 2013.
XU Qing, XU Ji, ZHOU Qiong, et al. Study on the effect of alkali content on cement properties[J]. *Architectural Engineering Technology and Design*, 2017(16): 2013(in Chinese).
- [26] 钟卿瑜, 粟森, 彭晖. 偏高岭土-矿渣地聚物宏观性能试验及Lasso 回归模型 [J]. *复合材料学报*, 2022, 39(11): 5474-5485.
ZHONG Qingyu, SU Miao, PENG Hui. Experiment and Lasso regression model of the macroscopic performance of metakaolin-slag geopolymers paste[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(11): 5474-5485(in Chinese).
- [27] 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.
ZHANG Jian, WANG Chuan, LI Zhaofeng, et al. Experimental study on the engineering characteristics of red mud-based green high-performance grouting material[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(S2): 3339-3352(in Chinese).
- [28] 杨进波, 赵征洋, 尹航. 基于分子动力学的C-S-H凝胶性能研究进展 [J]. *材料导报*, 2021, 35(5): 5095-5101, 5121.
YANG Jinbo, ZHAO Zhengyang, YING Hang. Research development on molecular dynamics of C-S-H gels[J]. *Materials Reports*, 2021, 35(5): 5095-5101, 5121(in Chinese).
- [29] ZHANG J, LI S, LI Z, et al. Feasibility study of red mud for geopolymers preparation: Effect of particle size fraction[J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2020, 22(5): 1328-1338.
- [30] 刘树龙, 王贻明, 吴爱祥, 等. 赤泥复合充填材料浸出行为及固化机制 [J]. *复合材料学报*, 2023, 40(12): 6729-6739.
LIU Shulong, WANG Yiming, WU Aixiang, et al. Leaching behavior and solidification mechanism of red mud composite filling material[J]. *Acta Materiae Compositae*

- Sinica, 2023, 40(12): 6729-6739(in Chinese).
- [31] 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.
- GAO Yingli, ZHU Zhanghuang, MENG Hao, et al. Synergistic enhancement mechanism of calcium carbide residue desulfurization gypsum-steel slag modified fly ash geopolymers [J]. *Journal of Building Materials*, 2023, 26(8): 870-878(in Chinese).
- [32] 夏冬桃, 吴晨, 崔凯, 等. 粉煤灰和硅灰取代率对碱矿渣混凝土力学性能影响分析 [J]. 西南交通大学学报, 2024, 59(5): 1113-1122.
- XIA Dongtao, WU Chen, CUI Kai, et al. Effect of fly ash and silica fume contents on the mechanical properties of alkali-activated slag-based concrete [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2024, 59(5): 1113-1122(in Chinese).
- [33] 刘刚, 丁明巍, 刘金军, 等. 碱激发矿粉-粉煤灰-偏高岭土地聚物水化行为和力学性能 [J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(6): 2106-2114.
- LIU Gang, DING Mingwei, LIU Jinjun, et al. Hydration behavior and mechanical properties of alkaline excited slag-fly ash-metakaolin geopolymers [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2023, 42(6): 2106-2114(in Chinese).
- [34] 张佳丽, 庞来学, 王文超, 等. 铁尾矿粉基 CLSM 的制备及水化产物的 Rietveld 结构精修 [J]. 材料导报, 2023, 37(S2): 305-310.
- ZHANG Jiali, PANG Laixue, WANG Wenchao, et al. Preparation of iron tailing powder based CLSM and the structure finishing of hydration product by rietveld [J]. *Materials Reports*, 2023, 37(S2): 305-310(in Chinese).
- [35] 黄华, 郭梦雪, 张伟, 等. 粉煤灰-矿渣基地聚物混凝土力学性能与微观结构 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(3): 74-84.
- HUANG Hua, GUO Mengxue, ZHANG Wei, et al. Mechanical property and microstructure of geopolymer concrete based on fly ash and slag [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2022, 54(3): 74-84(in Chinese).
- [36] MO K H, ALENGARAM U J, JUMAAT M Z. Utilization of ground granulated blast furnace slag as partial cement replacement in lightweight oil palm shell concrete [J]. *Materials and Structures*, 2015, 48: 2545-2556.
- [37] ZHAO J B, XIE J H, WU J W, et al. Workability, compressive strength, and microstructures of one-part rubberized geopolymers mortar [J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 68: 106088.
- [38] 杨超超. 赤泥微粉对水泥混凝土路面性能影响的研究 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2022.
- YANG Chaochao. Research on the influence of red mud micro powder on the performance of cement concrete pavement [D]. Guiyang: Guizhou University, 2022(in Chinese).
- [39] TOUFIGH V, GHASSEMI P, AZIZMOHAMMADI M, et al. Mechanical properties and environmental impact of rubberized fly ash-and red mud-based geopolymers concrete [J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2022, 26(16): 8091-8114.