

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20260116002

文章编号:1674-599X(2026)02-0154-09

引用格式:唐静,姚杰,何忠明.赤泥-粉煤灰基注浆材料制备与性能研究[J].交通科学与工程,2026,42(2):154-162.

Citation: TANG Jing, YAO Jie, HE Zhongming. Preparation and performance of red mud-fly ash based grouting materials[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2026, 42(2): 154-162.

# 赤泥-粉煤灰基注浆材料制备与性能研究

唐静<sup>1,2</sup>, 姚杰<sup>3</sup>, 何忠明<sup>3</sup>

(1.长沙瀚铭勘测设计咨询有限公司,湖南长沙 410007;2.长沙理工大学 土木与环境工程学院,湖南长沙 410114;3.长沙理工大学 交通学院,湖南长沙 410114)

**摘要:**【目的】针对赤泥与粉煤灰堆存造成的环境问题,基于赤泥强碱性与粉煤灰活性的协同互补,开发一种新型绿色注浆材料。【方法】系统探究水固比、赤泥掺量、碱激发剂掺量及水玻璃模数对浆液工作性能与力学强度的影响规律,并结合扫描电子显微镜分析,揭示浆液强度形成的微观机理。【结果】水固比是调控浆液流变性的关键因素;赤泥的最佳掺量为30%,此掺量下浆液析水率低至3.5%,且结石率较高;碱激发剂可显著加速胶凝体系的缩聚反应,有效提升材料的早期力学强度;水玻璃模数为1.2时,材料力学性能达到峰值。综合各项试验结果,确定最优配合比为:水固比0.8、赤泥掺量30%、碱激发剂掺量10%、水玻璃模数1.2。微观分析证实,碱激发生成的C-(A)-S-H/N-A-S-H复合凝胶网络与未反应颗粒的微集料填充效应协同作用,是材料力学强度形成的关键。【结论】研究成果为赤泥、粉煤灰的资源化利用提供了新路径。

**关键词:**赤泥;粉煤灰;注浆材料;碱激发;微观结构

中图分类号:TU528

文献标志码:A

## Preparation and performance of red mud-fly ash based grouting materials

TANG Jing<sup>1,2</sup>, YAO Jie<sup>3</sup>, HE Zhongming<sup>3</sup>

(1. Changsha Hanming Survey Design and Consulting Co., Ltd., Changsha 410007, China; 2. School of Civil and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 3. School of Transportation, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** [Purposes] To address the environmental burden caused by the large-scale stockpiling of red mud and fly ash, a novel green grouting material was developed by leveraging the synergistic complementarity between the strong alkalinity of red mud and the activity of fly ash. [Methods] The effects of the water-solid ratio, red mud content, alkali activator content, and sodium silicate modulus on the performance and mechanical strength of the slurry were systematically investigated, and the microscopic mechanism of its strength formation was revealed by using scanning electron microscopy. [Findings] The results indicate that the water-solid ratio is the critical factor in governing the rheology of the slurry. The optimal threshold for red mud content is 30%, at which the slurry water separation rate drops to 3.5% with a high stone ratio. The alkali activator significantly accelerates polycondensation of the system, enhancing early mechanical strength of materials. The mechanical

收稿日期:2026-01-16

基金项目:国家自然科学基金项目(52478437);湖南省自然科学基金项目(2024JJ5027)

通信作者:姚杰(1999—),男,博士研究生,主要从事固废材料利用方面的研究工作。E-mail:jieyao@stu.csust.edu.cn

投稿网址:https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home

performance of materials peaks when the sodium silicate modulus is 1.2. Consequently, the optimal mix ratio is determined to be a water-solid ratio of 0.8, red mud content of 30%, alkali activator content of 10%, and a sodium silicate modulus of 1.2. Microscopic analysis confirms that the C-(A)-S-H/N-A-S-H composite gel network generated by alkali activation and the micro-aggregate filling effect of unreacted particles work synergistically. They are critical to material mechanical strength formation. [Conclusions] The research findings provide a new pathway for the resource utilization of red mud and fly ash.

**Key words:** red mud; fly ash; grouting material; alkali activation; microstructure

随着全球工业化进程的持续推进,氧化铝生产、火力发电等基础工业衍生出海量的固体废弃物。据统计,我国赤泥年产生量已逾1亿吨,历史累积堆存量巨大,但其资源化利用长期处于较低水平<sup>[1-3]</sup>。赤泥呈强碱性、细度高,且存在潜在的重金属淋溶风险,其长期露天堆存不仅侵占大量土地资源,还对周边土壤、水体及生态环境构成严重威胁<sup>[4-6]</sup>。与此同时,作为燃煤电厂主要副产物的粉煤灰,年排放量同样居高不下<sup>[7-9]</sup>。在国家“双碳”战略目标引领下,利用工业固废制备绿色低碳注浆材料,已成为岩土加固与生态修复领域的研究热点<sup>[10-11]</sup>。这不仅有助于破解大宗固废消纳难题,对推动循环经济发展、促进岩土工程材料绿色转型也具有重要的科学意义与工程应用价值<sup>[12]</sup>。

近年来,基于固废的绿色注浆材料因兼具优异的力学性能与良好的环境效益,已成为研究热点<sup>[13-14]</sup>。国内外学者在赤泥与粉煤灰的活性激发及协同利用方面开展了大量研究工作<sup>[15-16]</sup>。在赤泥资源化利用方面,吴平川等<sup>[17]</sup>系统分析了赤泥的组构特征与功能化利用研究进展,指出在实验室条件下赤泥中硅、铝、铁等有价值组分回收率可达90%以上。王思莹等<sup>[4]</sup>采用800℃热活化赤泥复配电石渣与脱硫石膏,成功制备出赤泥掺量达74%的全固废胶凝材料,其28d抗压强度可达16.5MPa。肖桂元等<sup>[18]</sup>采用水玻璃激发赤泥以固化红黏土,研究表明:复合固化剂可有效激发赤泥潜在活性,反应生成的C-S-H与C-A-H凝胶可填充土体孔隙;固化剂掺量为20%时,固化加固效果最优。

针对粉煤灰的改性及其作用机理,黄凯等<sup>[19]</sup>采用响应面法,对碱激发粉煤灰-磷石膏协同固化膨胀土开展了试验研究。结果表明:通过精准调控粉煤灰与磷石膏的配合比,可显著激发胶凝体系的潜在活性;在最优配合比下,固化土无侧限抗压强度可达0.83MPa,且膨胀潜势得到有效抑制,证实了碱激发条件下采用磷石膏改性粉煤灰基固化材料的可

行性。黄国栋等<sup>[20]</sup>研究表明,利用粉煤灰玻璃体在反应初期的化学惰性及球状微珠的物理“滚珠效应”,可有效延缓矿渣基体系的过快凝结,并改善浆体的流变性。同时,该研究证实,粉煤灰颗粒在微观尺度上能够诱导裂缝偏转,并释放活性硅铝组分以修复凝胶网络,从而有效抑制微裂纹扩展,实现材料力学强度与体积稳定性的协同提升。王家全等<sup>[21]</sup>引入基于粒子群优化的反向传播神经网络模型,对赤泥-矿渣-粉煤灰三元注浆材料的力学性能进行了高精度预测。该研究通过沙普利可加解释分析进一步揭示,粉煤灰对材料强度的贡献呈现出显著的非单调性特征:在长龄期及适宜激发剂占比条件下,粉煤灰可通过生成C-S-H凝胶发挥正向增强作用,但其影响权重整体上比矿渣及养护龄期的低。

尽管上述研究表明赤泥与粉煤灰在胶凝材料制备方面具有广阔的应用前景,但仍存在一些亟待解决的关键科学问题。现有研究多聚焦于单一固废的性能优化,针对赤泥-粉煤灰体系的协同互补机制研究尚不充分,特别是赤泥的高碱性与粉煤灰的潜在活性如何实现高效协同,目前仍缺乏系统认知。鉴于此,本文旨在突破传统单一固废利用的局限,构建基于赤泥内源碱性与外加激发剂协同驱动的“双源激发”体系,制备高性能赤泥-粉煤灰基注浆材料。本文拟系统探究赤泥掺量、水固比、碱激发剂掺量、水玻璃模数等关键参数对注浆材料工作性能与力学性能的影响规律,在此基础上,揭示凝胶网络的化学胶结作用与颗粒的物理填充效应之间的协同增强机理。本研究旨在为赤泥与粉煤灰的大规模资源化利用提供理论依据,并为绿色低碳注浆材料的工程应用提供技术支撑。

## 1 材料与试验

### 1.1 试验原材料

试验所用赤泥的主要化学成分见表1。由表1

可知,赤泥主要由铁、铝、硅的氧化物组成,其中 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 的质量分数最高(40.2%),其次为 $\text{Al}_2\text{O}_3$ (22.2%)和 $\text{SiO}_2$ (14.4%),因此该赤泥属于典型的高铁赤泥。此外,赤泥中 $\text{Na}_2\text{O}$ 的质量分数高达12.8%,这使得赤泥具有较强的碱度,可为后续粉煤灰活性激发提供碱性环境。

表1 赤泥主要化学成分

Table 1 Main chemical composition of red mud %

<i>w</i>	<i>w</i>	<i>w</i>	<i>w</i>	<i>w</i>	<i>w</i>	<i>w</i>
( $\text{SiO}_2$ )	( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	( $\text{CaO}$ )	( $\text{MgO}$ )	( $\text{SO}_3$ )	( $\text{Na}_2\text{O}$ )
14.4	22.2	40.2	2.0	0.2	0.3	12.8

赤泥X射线衍射图谱如图1所示。由图1可知,赤泥衍射峰中最为尖锐、强度最高的矿物相为赤铁矿,这表明铁元素主要以稳定的氧化物形式存在;铝元素主要赋存于水软铝石相;硅元素则主要赋存于石英相。综上所述,该赤泥具有高铁富碱特征。

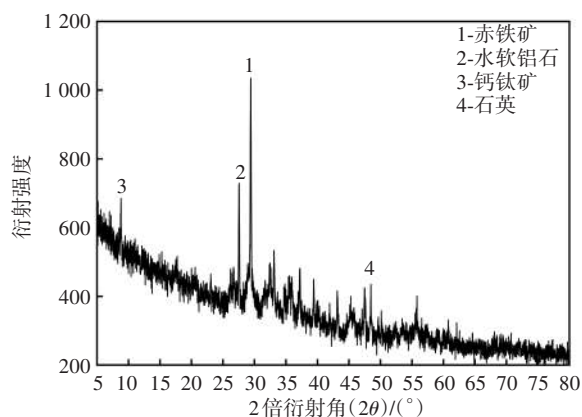


图1 赤泥X射线衍射图谱

Fig. 1 XRD pattern of red mud

试验所选用粉煤灰的主要化学成分见表2。由表2可知,其主要氧化物为 $\text{SiO}_2$ (55.4%)和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ (30.8%),两者总质量分数超过85%, $\text{CaO}$ 的质量分数仅为3.4%,因此该粉煤灰属于典型的低钙粉煤灰。

表2 粉煤灰主要化学成分

Table 2 Main chemical composition of fly ash %

<i>w</i>	<i>w</i>	<i>w</i>	<i>w</i>	<i>w</i>	<i>w</i>	<i>w</i>
( $\text{SiO}_2$ )	( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	( $\text{CaO}$ )	( $\text{MgO}$ )	( $\text{SO}_3$ )	( $\text{Na}_2\text{O}$ )
55.4	30.8	3.1	3.4	0.9	1.2	1.0

粉煤灰X射线衍射图谱如图2所示。由图2可知,在2倍衍射角(2θ)为15°~35°的区间内,出现一处显著的宽化弥散衍射峰。该漫散峰是粉煤灰化学活性的主要来源。与此同时,图谱还显示,粉煤灰中存在石英、莫来石以及方解石等矿物相。其

中,石英和莫来石作为煤粉燃烧过程中形成的高温稳定晶相,其化学性质相对惰性,在后续形成的结石体中主要起到微集料填充与骨架支撑作用。

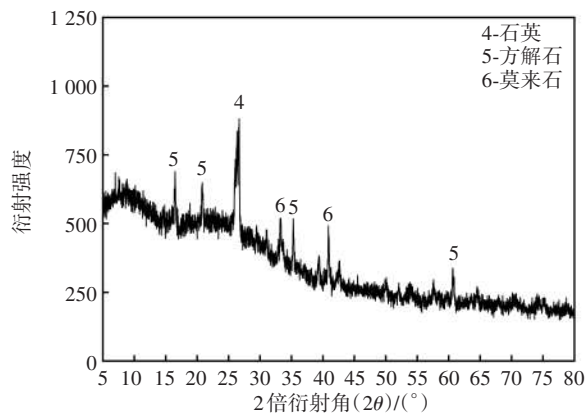


图2 粉煤灰X射线衍射图谱

Fig. 2 XRD pattern of fly ash

本文采用市售液态水玻璃( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ 溶液)与工业级片状氢氧化钠(纯度>96%)作为碱激发剂原料。初始水玻璃溶液中 $\text{SiO}_2$ 与 $\text{Na}_2\text{O}$ 的质量分数分别为27.3%和8.3%。试验通过向初始水玻璃溶液中添加定量氢氧化钠,将水玻璃模数由3.3调整至各试验组所需的目标模数。

### 1.2 试验设计

为系统揭示配合比参数对赤泥-粉煤灰基注浆材料工作性能及力学强度的影响规律,本文采用单因素试验法设计试验方案。

需要说明的是,单因素试验可直观高效地反映单一变量对浆液性能的主效应规律,适用于本文基础配合比的初步筛选与关键参数的探究;尽管该方法在反映多因素间的交互耦合影响方面存在一定局限,但可为后续研究提供清晰的单变量基准数据支撑。

本文试验选取水固比、赤泥掺量、碱激发剂掺量及水玻璃模数作为关键影响因素,并以水固比0.8、赤泥掺量30%、碱激发剂掺量10%、水玻璃模数1.2为基准配合比;在保持其他因素恒定的前提下,分别对各单一变量设置五个梯度水平开展独立研究。具体试验方案设计见表3。

参数取值区间及梯度的设定主要基于课题组前期预试验结果,并参考了现有相关固废基注浆材料的工程经验<sup>[22-23]</sup>。其中,水固比与赤泥掺量的取值范围旨在确保浆液具备基本可注性,同时避免发生过度离析;激发剂参数的设定则旨在覆盖反应迟缓至“闪凝”风险区间。

表3 试验方案设计  
Table 3 Test scheme design

编号	影响因素			
	水固比	赤泥掺量/%	碱激发剂掺量/%	水玻璃模数
S1	0.6	30	10	1.2
S2	0.7			
S3	0.8			
S4	0.9			
S5	1.0			
C1	0.8	10	10	1.2
C2		20		
C3		30		
C4		40		
C5		50		
J1	0.8	30	6	1.2
J2			8	
J3			10	
J4			12	
J5			14	
W1	0.8	30	10	0.8
W2				1.0
W3				1.2
W4				1.4
W5				1.6

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 浆液制备

试验采用机械搅拌法制备注浆材料。首先,按照预设配合比准确称量赤泥与粉煤灰,将其放入搅拌机中干拌2 min,确保固体前驱体混合均匀。随后,将预先调配并陈化至目标模数的碱激发剂溶液缓慢加入干粉中,先低速搅拌2 min,再高速搅拌2 min,直至形成质地均匀、无团聚颗粒的稳定浆液。

#### 1.3.2 浆液工作性能测试

1) 流动度:采用截锥圆模法测定。将截锥圆模放置于水平玻璃板中央,注满浆液并刮平表面后,迅速垂直提起圆模;待浆液自由流淌并静置稳定后,测量浆液扩散面的最大直径及其垂直方向直径,取二者平均值作为流动度。

2) 析水率与结石率:依据相关标准采用量筒静置法测定。将新拌浆液注入100 mL带塞量筒,密封后置于平稳台面静置2 h;静置结束后,分别记录上层析出水体积与下部沉积结石体体积,据此计算析水率和结石率。

3) 凝结时间:采用维卡仪测定初凝及终凝时间。将浆液装入圆台形试模并刮平,置于标准养护

箱内,每隔一定时间进行测试;当试针沉入浆液至距底板(4±1) mm时,记为初凝时间;当试针沉入浆液深度仅为0.5 mm,且浆液表面不再留下环形压痕时,记为终凝时间。

#### 1.3.3 浆液结石体力学性能测试

将制备好的浆液注入70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm三联试模中,振捣排气后刮平表面,置于标准养护条件下养护。试件养护24 h后脱模,并继续养护至规定龄期(3、7、28 d)。采用全自动压力试验机测定试件的无侧限抗压强度,取每组3个试件的测试平均值作为最终抗压强度结果。

#### 1.3.4 微观测试

选取养护至28 d的试件碎块作为微观分析样品,并将碎块放入无水乙醇中浸泡48 h终止水化反应。测试前,将样品真空干燥至恒重,并对其断裂面进行喷金处理以提高导电性。本文采用扫描电子显微镜观察水化产物的微观形貌及孔隙结构。

## 2 试验结果

### 2.1 工作性能

#### 2.1.1 流动度与凝结时间

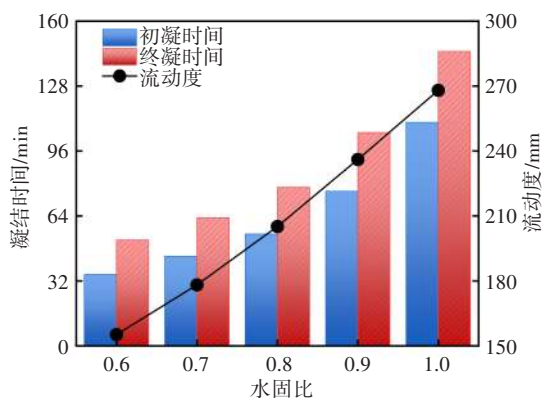
浆液流动度与凝结时间变化规律如图3所示。图3(a)揭示了水固比对浆液工作性能的影响。随着水固比由0.6提高至1.0,浆液流动度呈近似线性增长趋势(由155 mm增至268 mm),凝结时间亦随之延长。其机理在于:水分增加使固体颗粒表面水膜增厚,有效增大了颗粒间距,并显著削弱了颗粒间摩擦阻力,宏观上表现为浆液流动性提升;过量自由水稀释了液相体系,降低了碱激发剂的有效占比,延缓了Si—O键与Al—O键的断裂与解聚速率,阻碍了水化产物凝胶网络的形成,最终表现为凝结时间显著延长。

图3(b)反映了赤泥掺量对浆液性能的调控作用。随着赤泥掺量增加,浆液流动度逐步增大,凝结时间亦随之延长。这是由于赤泥活性低于矿渣,高掺量赤泥会降低单位体积内高活性前驱体的占比,减缓反应初期絮凝状凝胶的快速生成,从而抑制胶凝体系黏度上升,宏观上表现为浆液流动性提高。同理,赤泥活性较低使得胶凝体系中水化产物骨架的形成速率下降,进而导致浆液凝结硬化时间延长。

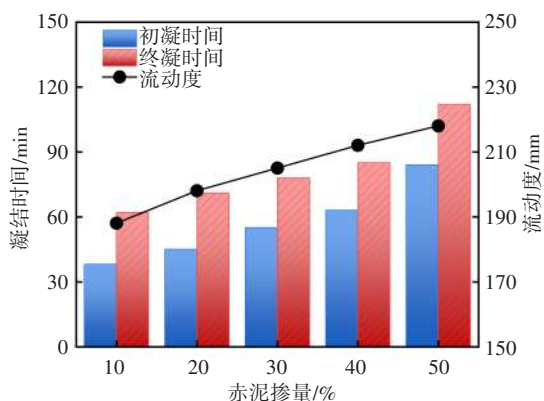
图3(c)表明了激发剂掺量是决定胶凝体系反

应速率的关键参数。随着碱激发剂掺量增加,浆液流动度持续降低,凝结时间亦随之缩短。机理分析表明:高掺量碱激发剂提高了体系pH值,高碱度的OH<sup>-</sup>加速了Si—O与Al—O键的断裂及活性单体的溶解释放,促使胶凝体系迅速发生缩聚反应并形成致密的凝胶骨架,进而使凝结时间提前。在试验制备过程中同样可直观观察到,当碱激发剂掺量高达14%时,胶凝体系在搅拌过程中伴随明显放热现象,浆液在短时间内迅速失去流动性,呈现出显著的“闪凝”特征。过快的反应速率使胶凝体系快速生成大量凝胶结构,加剧了颗粒间的絮凝与团聚,进而导致宏观流动度降低;同时,过高的碱激发剂掺量会增加材料成本,不利于提升工程经济性。

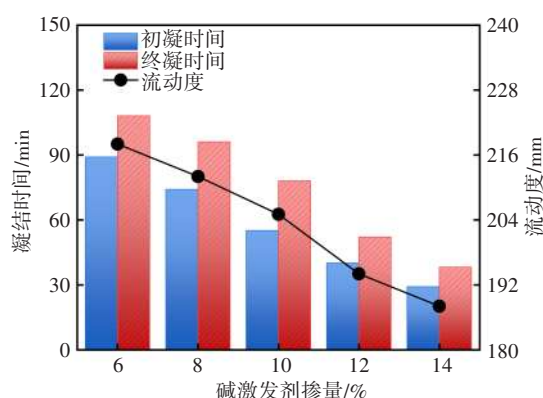
图3(d)阐明了水玻璃模数对浆液性能的影响。随着水玻璃模数增大,浆液流动度呈上升趋势,凝结时间相应延长。这是因为模数升高意味着体系有效碱度降低,减缓了激发剂对前驱体颗粒的侵蚀速率,抑制了反应初期因快速溶解与沉淀形成的絮凝结构,使浆液具有良好的分散性与流动性。碱度降低也削弱了前驱体内Si—O、Al—O化学键的断裂与解聚进程,延缓了水化产物(C-A-S-H/N-A-S-H)凝胶骨架的成核与生长,宏观上表现为凝结时间延长。



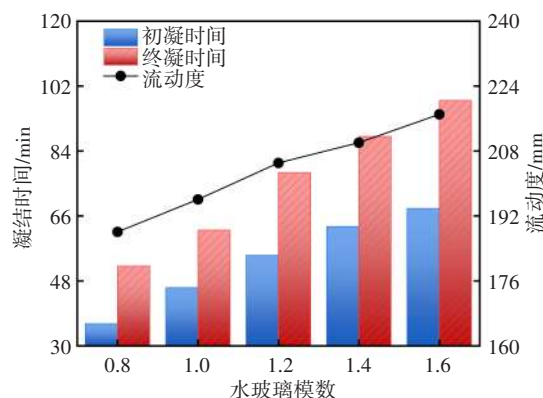
(a) 水固比对浆液流动度与凝结时间的影响



(b) 赤泥掺量对浆液流动度与凝结时间的影响



(c) 碱激发剂掺量对浆液流动度与凝结时间的影响



(d) 水玻璃模数对浆液流动度与凝结时间的影响

图3 浆液流动度与凝结时间变化规律

Fig. 3 Variation of slurry fluidity and coagulation time

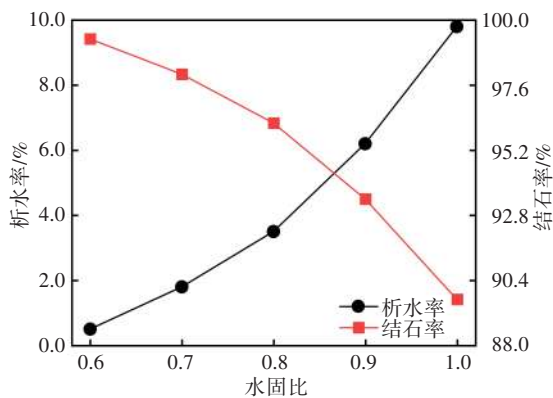
### 2.1.2 析水率与结石率

注浆材料的析水率与结石率是评价浆液稳定性及固化后充填密实度的两大核心指标,直接关系到注浆工程的加固效果与耐久性。析水率反映浆液的悬浮稳定性与保水抗离析能力,结石率表征浆液固化后的有效体积留存率。鉴于试验中发现碱激发剂掺量和水玻璃模数对析水率、结石率的影响较小,本节主要研究水固比和赤泥掺量对浆液析水率与结石率的影响规律。浆液析水率与结石率变化规律如图4所示。

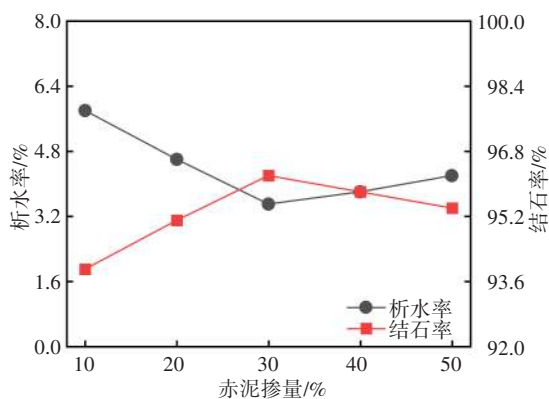
图4(a)反映了水固比对浆液析水率与结石率的影响。随着水固比从0.6提高至1.0,浆液析水率呈显著上升趋势(由0.5%增大至9.8%),而结石率则相应从99.3%降至89.7%。其机理在于:水固比增大直接导致体系内液相体积分数升高,过量水分不仅稀释了固体颗粒占比,增大了颗粒间距,更削弱了浆液内部絮凝结构强度,使其难以有效抵抗固体颗粒在重力作用下的沉降。悬浮稳定性下降使大量无法被物理吸附或化学结合的自由水向浆液上部迁移析出,造成析水率升高,固化后有效固相

体积占比(结石率)随之降低。

图4(b)揭示了赤泥掺量对浆液保水性能的影响规律。试验数据表明,30%为赤泥最优掺量。当赤泥掺量由10%增至30%时,浆液析水率由约5.8%显著降至最低点3.5%,结石率则由93.9%升至峰值96.2%。这是因为与表面光滑的粉煤灰相比,赤泥颗粒多孔、比表面积大,可通过物理吸附将大量自由水转化为束缚水;同时其微细颗粒的填充效应优化了颗粒级配,提高了骨架堆积密度。然而,当赤泥掺量继续增至50%时,析水率略有回升,结石率小幅下降。这是因为赤泥的火山灰活性比粉煤灰的低,过量掺入会导致胶凝体系内活性组分占比降低,水化生成的胶凝产物减少,从而削弱了体系对水分的束缚能力。



(a) 水固比对浆液析水率与结石率的影响



(b) 赤泥掺量对浆液析水率与结石率的影响

图4 浆液析水率与结石率变化规律

Fig. 4 Variation of slurry water separation rate and stone rate

## 2.2 力学性能

图5展示了各因素对不同龄期浆液结石体无侧限抗压强度的影响规律。总体而言,随着养护龄期的延长,各组试件无侧限抗压强度均呈增长趋势。这表明结石体内部胶凝反应持续进行,水化产物不断填充孔隙,致使结石体结构日趋致密。

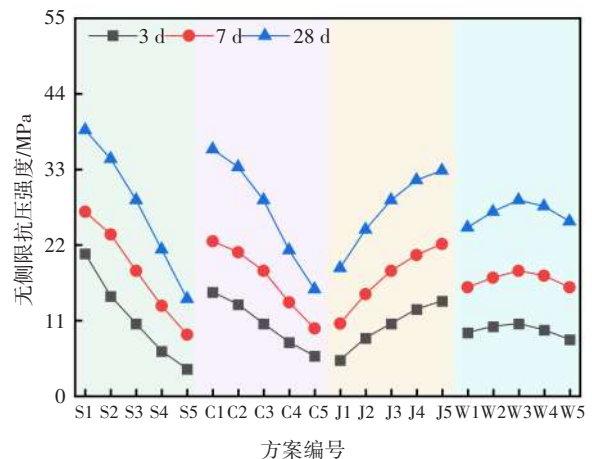


图5 浆液结石体无侧限抗压强度变化规律

Fig. 5 Variation of unconfined compression strength of slurry stone body

由图5可知,各单因素对浆液结石体无侧限抗压强度变化的影响规律为:

1) 水固比与赤泥掺量的增加均会使无侧限抗压强度呈显著下降趋势。当水固比从0.6增至1.0时,结石体28 d抗压强度由最高38.7 MPa显著降至14.1 MPa,降幅达63.6%;当赤泥掺量从10%增至50%时,其28 d抗压强度由35.9 MPa降至15.5 MPa。前者主要归因于过量水分蒸发后,在结石体内部留下大量连通孔隙,降低了结石体密实度;试件脱模时可直观观察到,高水固比组别试件的表面存在明显泌水通道痕迹,整体结构较为疏松。后者则是由于赤泥反应活性相对较低,高掺量赤泥会稀释体系中高活性组分的占比,使得凝胶物质生成量与聚合程度降低。

2) 碱激发剂掺量对结石体强度发展具有显著的促进作用。以结石体28 d抗压强度为例,当碱激发剂掺量由6%提高至14%时,结石体无侧限抗压强度由18.6 MPa显著提升至32.8 MPa。这是由于高碱度OH<sup>-</sup>能够加速前驱体相的侵蚀、解聚与活性单体的释放,进而促进缩聚反应进行,形成更为致密的凝胶网络结构。

3) 水玻璃模数对无侧限抗压强度的影响呈先升高后降低的趋势。当模数从0.8增至1.2时,结石体28 d抗压强度由24.5 MPa升至峰值28.5 MPa;而当模数进一步提高至1.6时,结石体28 d抗压强度回落至25.4 MPa。这表明体系碱度存在最佳平衡区间,模数过高或过低均会打破该平衡,从而制约无侧限抗压强度的充分发展。

## 2.3 最佳配合比分析

注浆材料配合比优选是一个综合考量浆液可

注性、体积稳定性、力学强度及经济环保效益的多指标分析过程。在本文试验条件与参数研究范围内,基于上述试验结果分析可知:水固比是调控浆液流变性与稳定性的关键因素。较高水固比虽可显著提升浆液流动度,但析水率增大会破坏结石体的完整性与耐久性;较低水固比则易使浆液过于黏稠,难以满足微细裂隙的注浆渗透要求。因此,经综合权衡,最佳水固比为0.8。在赤泥掺量方面,为在固废资源化利用率与力学承载力之间取得平衡,避免50%高掺量所导致的浆液强度大幅下降,优选30%作为最佳掺量,此时浆液可同时具备良好的稳定性与后期强度。碱激发剂掺量直接影响反应速率与工程成本,10%的掺量既可避免低掺量下早期强度发展缓慢的问题,又能有效防止高掺量引发的“闪凝”风险与材料成本大幅增加。此外,水玻璃模数通过调控体系碱度平衡影响凝胶骨架的形成与发展,试验结果表明,模数为1.2时抗压强度达到峰值。

综上所述,在本文设定的单因素试验条件与参数研究范围内,综合各项性能指标,本文推荐的较优配合比为:水固比0.8、赤泥掺量30%、碱激发剂掺量10%、水玻璃模数1.2。结合工程实际需求,该配合比下结石体具有较高的早期强度(3 d强度达10.5 MPa),适用于对早期承载力要求较高的紧急抢修或超前支护工程;同时,结石体后期强度稳定(28 d强度达28.5 MPa),能够较好地满足深部岩土体加固工程对长期耐久性与充填密实度的要求。总体而言,该配合比浆液在保证良好工作性能的同时,兼顾了强度与固废资源化利用效益。

需要指出的是,本文采用的单因素试验方法能够直观揭示各单一变量对浆液性能的主效应规律,适用于现阶段基础配合比的筛选;但该方法难以全面反映多因素(如赤泥与激发剂掺量)之间的交互耦合作用。在后续工程应用与深化研究中,拟引入正交试验或响应曲面法对多参数耦合效应开展进一步研究。

### 3 微观分析

图6展示了最佳配合比下浆液结石体的微观形貌特征。由图6可见,结石体内部为非均匀堆积形貌,既能观测到表面光洁的球状颗粒,亦存在大量包覆并联结颗粒的絮状团聚结构。结合材料组分特征分析,球状颗粒为未完全反应的粉煤灰微珠,

而充填于颗粒骨架间的絮状物质可判定为碱激发反应生成的复合胶凝产物。

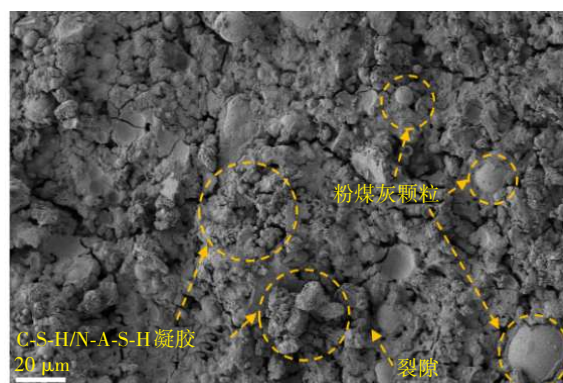


图6 浆液结石体扫描电子显微镜图

Fig. 6 Scanning electron microscope image of slurry stone body

从反应机理上分析,高活性碱激发剂与赤泥组分协同营造出强碱性环境,有效激发了前驱体中硅铝质玻璃体相的反应活性,促使其网络结构解聚、离子重组,进而发生缩聚反应。结合胶凝体系组成与微观形貌特征,该絮状产物主要为C-(A)-S-H及N-A-S-H等无定形凝胶。此类絮状凝胶产物在微观结构中发挥了关键的“桥接”与“胶结”作用,广泛包覆于颗粒骨架表面,并将松散颗粒胶结为具有一定强度的整体。同时,部分未参与反应的惰性前驱体颗粒可发挥微集料效应,填充于凝胶骨架的孔隙之中,有效优化了微观颗粒级配,提高了体系密实度。

### 4 结论

本文研发了一种赤泥-粉煤灰基绿色注浆材料,系统探究了水固比、赤泥掺量、碱激发剂掺量及水玻璃模数对浆液工作性能与力学特性的影响规律,并揭示了其微观作用机理与水化特性。主要结论如下:

1) 水固比与水玻璃模数的提高可显著改善浆液流动度,但同时会延长凝结时间;与之相反,提高碱激发剂掺量能够加速前驱体的解聚与缩聚反应,使浆液流动度降低、凝结时间显著缩短。

2) 水固比是影响结石体密实度的首要因素;30%掺量的赤泥可显著降低析水率,并提升结石率;随着碱激发剂掺量的增加及水固比的降低,结石体强度呈上升趋势;而水玻璃模数存在最佳阈值,过高或过低均不利于体系溶解-缩聚平衡的建立。

3) 综合考量浆液可注性、体积稳定性、力学性能及经济与环保效益,确定最佳配合比为:水固比0.8、赤泥掺量30%、碱激发剂掺量10%、水玻璃模数1.2。

4) 微观分析表明,在强碱环境下,赤泥与粉煤灰中的活性硅铝组分发生解聚-重组,生成大量无定形凝胶;该类产物作为胶结基质,可将未反应的前驱体颗粒紧密包裹并联结为整体。

### 参考文献(References):

- [1] 桑树勋,曹丽文,郭玉良,等.大宗工业固废资源化利用技术进展与前瞻[J].中国矿业大学学报,2025,54(6):1276-1294,1400. DOI: 10.13247/j.cnki.jcmt.20250447.  
SANG Shuxun, CAO Liwen, GUO Yuliang, et al. Progress and prospects of resource utilization technologies for bulk industrial solid wastes[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(6): 1276-1294, 1400. DOI: 10.13247/j.cnki.jcmt.20250447.
- [2] 徐兴卫,李燕,马宏彪,等.赤泥资源化综合利用研究进展[J].中国冶金,2026,36(2):1-17. DOI: 10.13228/j.boyuan.issn1006-9356.20250581.  
XU Xingwei, LI Yan, MA Hongbiao, et al. Research progress on comprehensive utilization of red mud resources [J]. China Metallurgy, 2026, 36(2): 1-17. DOI: 10.13228/j.boyuan.issn1006-9356.20250581.
- [3] 冯琪,冉晋,张新波,等.赤泥基可控性低强度材料性能试验研究[J].公路与汽运,2022,38(2):65-67,70. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2022.02.016.  
FENG Qi, RAN Jin, ZHANG Xinbo, et al. Experimental study on properties of controllable low strength materials based on red mud [J]. Highways & Automotive Applications, 2022, 38(2): 65-67, 70. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2022.02.016.
- [4] 王思莹,刘文欢,郝毅,等.热活化赤泥多固废基胶凝材料的性能优化及水化特性[J/OL].材料导报:1-19 [2026-03-05]. https://link.cnki.net/urlid/50.1078.TB.20251126.1645.004.  
WANG Siying, LIU Wenhuan, HAO Yi, et al. Performance optimization and hydration characteristics of thermally activated multi-solid waste-based cementitious materials incorporating red mud [J/OL]. Materials Reports: 1-19 [2026-03-05]. https://link.cnki.net/urlid/50.1078.TB.20251126.1645.004.
- [5] 罗婷倚,李睿杰,韦才超,等.改性赤泥路基工程特性及其环境影响评价研究[J].硅酸盐通报,2025,44(12):4633-4645. DOI: 10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2025.0617.  
LUO Tingyi, LI Ruijie, WEI Caichao, et al. Engineering characteristics and environmental impact assessment of modified red mud in subgrade [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2025, 44(12): 4633-4645. DOI: 10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2025.0617.
- [6] 李玉冰,赵慧凯,汤毅蓓,等.赤泥对农田土壤理化性质及重金属形态的影响[J].山东化工,2025,54(22):186-189,194. DOI: 10.19319/j.cnki.issn.1008-021x.2025.22.051.  
LI Yubing, ZHAO Huikai, TANG Yibei, et al. Impacts of red mud on physicochemical properties and heavy metal forms in farmland soil [J]. Shandong Chemical Industry, 2025, 54(22): 186-189, 194. DOI: 10.19319/j.cnki.issn.1008-021x.2025.22.051.
- [7] 洪于巍,王树宇,陈焱,等.“双碳”背景下粉煤灰综合利用研究进展与挑战[J/OL].矿产综合利用:1-14 [2026-03-05]. https://link.cnki.net/urlid/51.1251.TD.20251218.1916.006.  
HONG Yuwei, WANG Shuyu, CHEN Yi, et al. Research advances and challenges in comprehensive utilization of coal fly ash under the dual carbon background [J/OL]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources: 1-14 [2026-03-05]. https://link.cnki.net/urlid/51.1251.TD.20251218.1916.006.
- [8] 刘思遥,陈星宇,李江涛,等.粉煤灰资源化:氧化铝回收研究进展[J].中南大学学报(自然科学版),2025,56(8):3089-3103. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2025.08.001.  
LIU Siyao, CHEN Xingyu, LI Jiangtao, et al. Resource utilization of coal fly ash: research progress on alumina recovery [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2025, 56(8): 3089-3103. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2025.08.001.
- [9] 陈瑜,吴思华,丁婧雯.基于RSM的粉煤灰地聚合物注浆材料优化设计[J].交通科学与工程,2023,39(3):10-17,45. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20211102001.  
CHEN Yu, WU Sihua, DING Jingwen. Optimization design of fly ash ground polymer grouting material based on RSM [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2023, 39(3): 10-17, 45. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20211102001.
- [10] 周泽宇,刘文欢,范梦驰,等.赤泥形态对赤泥-矿渣基辅助胶凝材料的性能优化及水化特性[J/OL].材料导报:1-18 [2026-03-05]. https://link.cnki.net/urlid/50.1078.tb.20251224.1321.012.  
ZHOU Zeyu, LIU Wenhuan, FAN Mengchi, et al. Effect of red mud morphology on the properties and hydration characteristics of red mud-ggbfs based supplementary cementitious materials [J/OL]. Materials Reports: 1-18 [2026-03-05]. https://link.cnki.net/urlid/50.1078.tb.20251224.1321.012.
- [11] 张永杰,龙康,仰宗宝,等.地聚物-水泥注浆材料性能及微观结构研究[J/OL].交通科学与工程:1-12 [2026-01-16]. https://doi.org/10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20250208001.  
ZHANG Yongjie, LONG Kang, YANG Zongbao, et al. Study on the properties and microstructure of geopolymer-cement grouting materials. Journal of

- Transport Science and Engineering: 1-12 [2026-01-16]. <https://doi.org/10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20250208001>.
- [12] 张杰, 罗健林, 商怀帅, 等. 工程加固用注浆材料性能调控与应用进展[J/OL]. 化工新型材料: 1-10 [2026-03-05]. <https://doi.org/10.19817/j.cnki.issn1006-3536.2026.05.007>.  
ZHANG Jie, LUO Jianlin, SHANG Huaishuai, et al. Progress in performance regulation and application of grouting materials for engineering reinforcement[J/OL]. New Chemical Materials: 1-10 [2026-03-05]. <https://doi.org/10.19817/j.cnki.issn1006-3536.2026.05.007>.
- [13] 曾铭乐, 王志祥. 固废基道路地聚物注浆材料的组分优化及机理研究[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(8): 3033-3044. DOI: 10.16552/j.cnki.issn1001-1625.20230630.001.  
ZENG Mingle, WANG Zhixiang. Composition optimization and mechanism study of solid waste based road geopolymer grouting materials[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023, 42(8): 3033-3044. DOI: 10.16552/j.cnki.issn1001-1625.20230630.001.
- [14] 包其刚, 闫云翔, 姚崇凯, 等. 穿越断层破碎带隧道超前注浆加固效果分析[J]. 交通科学与工程, 2024, 40(3): 91-99. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202304262024061974.  
BAO Qigang, YAN Yunxiang, YAO Chongkai, et al. Analysis on reinforcement effect of advanced grouting for tunnel crossing fault fracture zone [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2024, 40(3): 91-99. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202304262024061974.
- [15] 刘进琪, 王世玉, 彭晖, 等. 碱激发剂对粉煤灰基地聚物性能影响研究[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(3): 8-13. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.03.002.  
LIU Jinqi, WANG Shiyu, PENG Hui, et al. Study on the effect of alkali activator on the properties of fly ash-based geopolymer[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(3): 8-13. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.03.002.
- [16] 彭俊锋, 黄少杰, 翁义建, 等. 掺粉煤灰水泥稳定碎石材料溶蚀特性及预测模型研究[J]. 公路与汽运, 2023, 39(5): 81-86. DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2023.05.018.  
PENG Junfeng, HUANG Shaojie, WENG Yijian, et al. Study on dissolution characteristics and prediction model of cement stabilized macadam materials mixed with fly ash[J]. Highways & Automotive Applications, 2023, 39(5): 81-86. DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2023.05.018.
- [17] 吴平川, 庞吉辰, 杨炳飞, 等. 从碱法固废到二次资源: 赤泥组构特性与功能化利用研究进展[J]. 金属矿山, 2025(12): 286-294. DOI: 10.19614/j.cnki.jsks.202512035.  
WU Pingchuan, PANG Jichen, YANG Bingfei, et al. From alkaline residue to secondary resource: advances in composition, properties, and functional utilization of red mud[J]. Metal Mine, 2025(12): 286-294. DOI: 10.19614/j.cnki.jsks.202512035.
- [18] 肖桂元, 刘星, 刘巍, 等. 玻璃纤维-石灰复合改良红黏土的强度特性研究[J]. 公路, 2024, 69(9): 275-284.  
XIAO Guiyuan, LIU Xing, LIU Wei, et al. Research on strength characteristics of glass fiber-lime composite modified red clay[J]. Highway, 2024, 69(9): 275-284.
- [19] 黄凯, 孙影, 蔡国军, 等. 响应面法优化碱激发粉煤灰-磷石膏固化膨胀土试验研究[J/OL]. 岩土工程学报: 1-9 [2026-03-05]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1124.TU.20251219.1527.002>.  
HUANG Kai, SUN Ying, CAI Guojun, et al. Optimization of alkali-activated fly ash-phosphogypsum for expansive soil stabilization using response surface methodology: an experimental study [J/OL]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering: 1-9 [2026-03-05]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1124.TU.20251219.1527.002>.
- [20] 黄国栋, 许佳豪, 聂至波, 等. 矿渣与粉煤灰协同改善碱激发建筑固废力学性能演化、凝结特性与流变行为[J/OL]. 上海交通大学学报: 1-19 [2026-03-05]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2025.184>.  
HUANG Guodong, XU Jiahao, NIE Zhibo, et al. Synergistic improvement of mechanical properties evolution, coagulation characteristics, and rheological behavior of alkali activated construction [J/OL]. Journal of Shanghai Jiao Tong University: 1-19 [2026-03-05]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2025.184>.
- [21] 王家全, 吴新彪, 畅振超, 等. 基于可解释 PSO-BPNN 的三元固废注浆材料力学性能预测[J]. 工程科学学报, 2025, 47(11): 2236-2246. DOI: 10.13374/j.issn2095-9389.2025.02.07.001.  
WANG Jiaquan, WU Xinbiao, CHANG Zhenchao, et al. Prediction of mechanical properties of ternary solid waste grouting materials based on interpretable PSO-BPNN [J]. Chinese Journal of Engineering, 2025, 47(11): 2236-2246. DOI: 10.13374/j.issn2095-9389.2025.02.07.001.
- [22] 周泽宇, 刘文欢, 范梦驰, 等. 赤泥形态对赤泥-矿渣基辅助胶凝材料的性能优化及水化特性[J/OL]. 材料导报: 1-18 [2026-02-26]. <https://link.cnki.net/urlid/50.1078.tb.20251224.1321.012>.  
ZHOU Zeyu, LIU Wenhuan, FAN Mengchi, et al. Effect of red mud morphology on the properties and hydration characteristics of red mud-ggbfs based supplementary cementitious materials [J]. Materials Reports: 1-18 [2026-02-26]. <https://link.cnki.net/urlid/50.1078.tb.20251224.1321.012>.
- [23] 张震洋, 张璐, 伊海赫, 等. 基于响应面法的地聚物混凝土力学性能试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(9): 3192-3202. DOI: 10.16552/j.cnki.issn1001-1625.20240812.003.  
ZHANG Zhenyang, ZHANG Lu, YI Haihe, et al. Mechanical properties of geopolymer concrete based on response surface method [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2024, 43(9): 3192-3202. DOI: 10.16552/j.cnki.issn1001-1625.20240812.003.

(责任编辑:熊怡;校对:薛仪)