

利用湿法生产机制砂尾泥制备流态固化土试验研究

Study on the Experimental Preparation of Flowable Solidified Soil Using Tailings from
Wet-process Manufactured Sand Production

吉俊豪, 宋少民, 李 劭, 彭 天, 李金君, 杜若萱, 赵晓娇

(北京建筑大学, 建筑结构与环境修复功能材料北京市重点实验室, 北京 100044)

摘要: 采用水泥固化剂和固废基胶凝材料固化剂分别固化尾泥制备流态固化土, 通过流动扩展度、凝结时间、泌水率、流变性能和无侧限抗压强度试验, 探讨水固比、灰土比、激发剂掺量和砂土比对尾泥流态固化土的工作性能和力学性能的影响。结果表明: 水固比为 0.62~0.69, 掺量为 7%~11% 水泥固化剂或 15%~17% GC 固化剂, 制备尾泥流态固化土 28 d 抗压强度在 0.56~2.10 MPa, 满足一般性非结构回填工程; 水固比为 0.62, 激发剂掺量 20%, 掺入再生细骨料优化颗粒级配并控制砂土比为 0.3 时, GC 固化剂流态固化土流动扩展度为 265 mm, 28 d 抗压强度达到 2.66 MPa, 泌水率低于 3%, 可满足早强型结构性回填工程; 拌合浆体黏度小于 0.88 Pa·s, 流态固化土拌合物泌水率较大; 提出机制砂洗砂尾泥的流态固化土制备中可控的参数和胶凝材料掺量。研究成果可为湿法机制砂尾泥再利用提供参考。

关键词: 机制砂尾泥; 流态固化土; 固废基胶凝材料; 流变性能; 水固比

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2025) 02-0018-07

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.02.004

Ji Junhao, SONG Shaomin, LI Shao, PENG Tian, LI Jinjun, DU Ruoxuan, ZHAO Xiaojiao

(Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing Key Laboratory of Building Structure and
Environmental Remediation Functional Materials, Beijing 100044)

Abstract: Fluidized solidified soil was prepared by stabilizing tailings sludge using cement curing agents and solid waste-based cementitious curing agents, respectively. The effects of water-solid ratio, binder-soil ratio, activator dosage, and sand-soil ratio on the workability and mechanical properties of the fluidized solidified tailings sludge were investigated through experiments on flow spread, setting time, bleeding rate, rheological properties, and unconfined compressive strength. The results indicate that: With a water-solid ratio of 0.62-0.69 and a dosage of 7%-11% cement curing agent or 15%-17% GC curing agent, the 28 days strength of the fluidized solidified tailings sludge ranges from 0.56 to 2.10 MPa, meeting the requirements for general non-structural backfill engineering. For GC-cured fluidized soil optimized with a water-solid ratio of 0.62, 20% activator dosage, and controlled sand-soil ratio of 0.3 (incorporating recycled fine aggregates to improve particle gradation), the flow spread reaches 265 mm, the 28 days strength attains 2.66 MPa, and the bleeding rate remains below 3%, fulfilling the criteria for early-strength structural backfill applications. When the viscosity of the mixed slurry is less than 0.88 Pa·s,

作者简介: 吉俊豪 (1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 建筑材料。

通信作者: 宋少民 (1965—), 男, 硕士, 教授, 研究方向: 现代混凝土材料。

收稿日期: 2024-10-17

the fluidized solidified soil mixture exhibits a higher probability of bleeding. Propose the controllable parameters and cementitious material dosage in the preparation of fluidized stabilized soil using manufactured sand washing tailings. The research findings can provide references for the reuse of wet-process manufactured sand tailings.

Key words: tailings of mechanically crushed sand; flowable fill or self-compacting backfill; full waste-based cementitious materials; rheological properties; water-to-solid ratio

0 引言

根据调查,我国机制砂石年产量高达 200 亿 t,是全球最大的机制砂石生产国。目前,我国大型砂石骨料生产工艺主要分为干法和湿法,对于不同岩种矿物,这两种砂石加工工艺拥有各自的适用场合^[1]。在湿法制砂中,矿山岩石会经过破碎、筛分及多级水洗后,分离出的泥浆、石粉团聚在一起的固体废弃物称为尾泥^[2]。尾泥由于吸附性大、杂质多等问题难以大量且高效地利用,目前处理方式仍以转运至弃渣场堆存或填埋处置为主,不仅增加运输成本且侵占大量土地资源,还会有泥石流、生态环境污染等巨大隐患。

国内外学者对尾泥处理进行研究,王德永等^[3]研究污泥用于生产烧结砖的技术可行性,为制砂企业提供一种利用污泥的技术方案,但污泥中含有石粉和砂颗粒不属于黏土质原料,应用率不高;兰阳^[4]、YE 等^[5]将铝土矿尾泥制成铝硅合金陶瓷地聚物等材料,但过程中能源消耗量大,而且碳排放量高;Sogancioglu 等^[6]研究将废弃的安山岩尾泥掺入混凝土中的可行性以及对混凝土力学性能的影响,试验表明掺絮凝剂的尾泥取代率为 0.5%~1.5%,有利于提高混凝土初始工作性,且不影响混凝土抗冻性。

近年来一种新型回填材料——流态型的预拌固化土(简称流态固化土)被开发应用。周永祥等^[7]指出流态固化土可根据工程需要就地取土,掺入固化剂、水与其他外加剂,通过搅拌得到拌和均匀的流态固化土,对于狭窄空间的填筑工程,更具有无可替代的技术优势;高强^[8]针对山东东营的粉质土使用水泥、石灰、矿粉和钢渣与常见外加剂作为固化剂制备流态固化土,通过改变固化剂掺量来研究固化土力学性能;王奕博等^[9]对云南典型高原红黏土进行固化研究,自配一种矿粉固化剂,组成为矿粉:石膏:水泥:激发剂=6:2:1.5:0.5,研究了其对红黏土的加固效果;李雅曦^[10]采用北京大兴地区生

土材料,研究了石灰、水泥、粉煤灰、偏高岭土单掺或复掺对流态固化土流动度、强度、收缩性能和导热性能的影响。从以上文献可以看出,与传统基坑回填土相比,流态固化土对于土体要求较低,黏土、粉质黏土等软土皆可采用,所以大部分湿法制砂尾泥也符合流态固化土的要求,而对尾泥在此方面的应用研究较少。王聪聪等^[11]提出,当赤泥、钢渣粉、水泥的质量比为 2:3:5,固化剂掺量为 20% 时,流态固化土在 28 d 的抗压强度最佳,可达 4.67 MPa;王子帅等^[12]研究了高炉矿渣、粉煤灰、电石渣和硅灰这四种工业废渣协同水泥固化处理淤泥土的耐久性影响,其中水泥掺量为 6%,工业废渣掺量为 3%。目前的研究多以水泥或复掺粉煤灰、矿渣粉等作为固化剂制备流态固化土,但水泥是一种高能耗、高碳排放产品。周永祥等^[13]指出硅酸盐水泥用于固化具有表面活性的细粒土和特殊土没有技术优势,需要开发新的胶凝材料体系。随着新型胶凝材料固废基胶凝材料——GC 的兴起,对于强度要求不高的流态固化土,GC 具有很高的适配性,满足工程要求,且经济环保^[14-15]。

但目前此方面的研究也较少。基于此,探究水泥固化剂、GC 固化剂及优化 GC 固化剂固化尾泥的可行性及固化效果,并辅以再生骨料调整体系级配,通过流动扩展度、凝结时间、泌水率、流变性能和无侧限抗压强度试验,调控水固比、灰土比等参数制备出符合工程应用的流态固化土,为湿法制砂企业尾泥高效利用提供技术支撑。

1 试验材料与方法

1.1 原材料

试验采用某湿法制砂生产线的硅质机制砂压滤尾泥,基本物理指标见表 1。粒径分布曲线如图 1 所示,XRD 图谱如图 2 所示。水泥采用 P·O 42.5 水泥,主要技术指标见表 2。GC 主要原料为钢渣、粒化高炉矿渣、工业副产石膏、粉煤灰和尾矿经磨细加工制成的水硬性胶凝材料(因与公司签订保密协

材料科学

议,具体组分占比不在此列出),等级为 42.5,其主要技术指标见表 2。激发剂由 30% 生石灰 + 70% 脱硫石膏组成,生石灰 CaO 含量 95% 以上;脱硫石膏密度为 2.25 g/cm³,比表面积为 450 m²/kg。再生细骨料压碎指标值为 22%,表观密度为 2 520 kg/m³,吸水率为 7.2%,再生细骨料级配见表 3。减水剂含固量为 38%,减水率为 30%。尾泥、GC、水泥经 X 射线荧光光谱仪检测分析,化学成分见表 4。

表 1 机制砂洗砂尾泥基本物理指标

Table 1 Basic physical properties of sand tailings

自然含水率/%	液限/%	塑限/%	塑性指数	比重	亚甲蓝 / (g/kg)
58	38.2	20.5	17.7	2.72	4.5

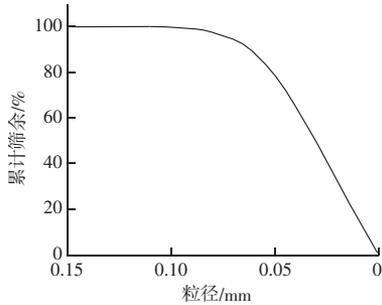


图 1 机制砂尾泥的粒径分布

Fig. 1 Particle size distribution of tailings from mechanically sand

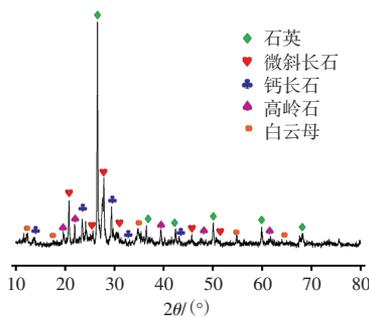


图 2 尾泥的 XRD 图谱

Fig. 2 XRD spectrum of the tailings mud

表 2 水泥、GC 的主要技术指标

Table 2 Key technical parameters of cement and GC

种类	密度 / (g/cm ³)	比表面积 / (m ² /kg)	标准稠度用水/%	凝结时间/min		抗压强度/MPa	
				初凝	终凝	7 d	28 d
水泥	3.03	416	27.3	165	250	31.2	50.4
GC	2.85	405	27.1	146	390	24.3	43.0

表 3 再生细骨料级配

Table 3 Gradation of recycled fine aggregate

筛余指标	过筛孔通过率/%							
	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	0.60 mm	0.3 mm	0.15 mm	0.075 mm	<0.075 mm
分计筛余	2.40	32.82	18.90	14.64	10.98	7.74	4.62	7.90
累计筛余	2.40	35.22	54.12	68.76	79.74	87.48	92.1	100

表 4 尾泥、GC 和水泥的主要化学组成

Table 4 Main chemical composition of tailings, GC and cement

种类	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	TiO ₂	Loss
尾泥	5.31	15.60	50.76	1.21	13.33	1.21	9.39	1.12	2.07
GC	10.63	13.95	49.93	1.77	10.05	0.42	9.49	0.84	2.92
水泥	56.73	6.33	19.87	4.21	3.48	3.27	0.57	0.42	5.12

1.2 试验方法

流动扩展度试验参考美国 ASTM D6103 标准。凝结时间试验采用落球法进行测量,参照 ASTM D6024—2016,测得的压痕直径小于 76 mm,则所测时间长度的 CLSM 适合承受荷载,压痕的直径恰好为 76 mm 的时间为定义为“落球凝结时间”。泌水率试验参见 ASTM C940—16。流变试验使用美国 BROKFIELD 生产的 RST-CC 流变仪对流态固化土塑性黏度、屈服应力等各项流变性能进行测定,并通过 RHE3000 软件对试验数据进行处理。抗压强度试验参见 DBJ51/T 188—2022《预拌流态固化土工程应用技术标准》,试件采用 70.7 mm × 70.7 mm × 70.7 mm 的立方体试块,加载试验时控制加载速率为 1 mm/min。

1.3 配合比设计

机制砂尾泥流态固化土试验配合比见表 5。水固比为水的质量与总的固体质量之比,灰土比为胶凝材料质量与土质量之比,激发剂掺量为激发剂质量与固化剂质量之比,砂土比为再生砂质量与土质量之比。C 系列选用水泥为固化剂,T 系列选取 GC 为固化剂,YT 系列是不同掺量的激发剂对 GC 固化剂的组分优化,W 系列是 GC + 激发剂作为固化剂(以下称为“优化 GC 固化剂”),改变灰土比;Z 系列是水固比为 0.54 时,改变砂土比,用再生细骨料取代部分尾泥。根据前期预试验确定减水剂掺量为固体质量的 0.2%,水质量由水固比求得。

2 试验结果与讨论

2.1 流态固化土工作性能分析

2.1.1 流动扩展度

C 系列和 T 系列流动扩展度测试结果如图 3 所示。当灰土比保持不变时,尾泥流态固化土流动扩展度随水固比增大而增大,随灰土比改变变化不大。由于尾泥在整个固化土中质量占比较大,其比表面积较大且尾泥含有大量的黏土矿物和石粉颗粒具有高吸附性,少量占比的固化剂掺量的改变对体系流

动扩展度影响不大。

表 5 机制砂尾泥流态固化土试验配合比
Table 5 Experimental mix proportions for flowable fill using tailings from crushed sand

编号	灰土比	水固比	固化剂组分比例/%		尾泥/%	激发剂掺量/%	砂土比
			水泥	GC			
C1	0.08	0.62	7		93		
C2	0.08	0.66	7		93		
C3	0.08	0.69	7		93		
C4	0.10	0.62	9		91		
C5	0.10	0.66	9		91		
C6	0.10	0.69	9		91		
C7	0.12	0.62	11		89		
C8	0.12	0.66	11		89		
C9	0.12	0.69	11		89		
T1	0.18	0.54		15	85		
T2	0.18	0.62		15	85		
T3	0.20	0.54		17	83		
T4	0.20	0.62		17	83		
T5	0.22	0.54		18	82		
T6	0.22	0.62		18	82		
YT1	0.18	0.62	13.6		85	10	
YT2	0.18	0.62	12.5		85	20	
YT3	0.18	0.62	11.5		85	30	
W1	0.10	0.69	7.2		91	20	
W2	0.14	0.69	9.6		88	20	
W3	0.18	0.69	12.0		85	20	
Z1	0.18	0.54	12.5		85	20	
Z2	0.18	0.54	12.5	76.5	20	0.1	
Z3	0.18	0.54	12.5	68	20	0.2	
Z4	0.18	0.54	12.5	59.5	20	0.3	
Z5	0.18	0.54	12.5	51	20	0.4	

水泥固化剂流态固化土的水固比为 0.62、0.66 时，流动度扩展度为 108~190 mm，满足一般流动扩展度工程；水固比为 0.69 时，流动度大于 220 mm，满足大流态固化土工程。而 GC 固化剂流态固化土水固比在 0.54~0.62，流动度为 160~195 mm，满足一般流动扩展度要求工程，不适合大流态工程。不同因素对优化 GC 固化剂流态固化土流动扩展度影响如图 4 所示。优化 GC 固化剂流态固化土的流动扩展度随着激发剂取代率和灰土比的增加而降低，从 185 mm 降低到 178 mm，降低幅度不大，但是再生细骨料的掺入大大改善流态固化土的流动扩展度。随着砂土比的增大，流态固化土的流动扩展度急剧增大，砂土比从 0 增加到 0.4 时，流动度从 160 mm 增加到 285 mm，增幅为 78%。原因是随着再生细骨料的增加，尾泥的减少，体系中的总比表面积减少，体系颗粒吸附包裹的水大大降低，流态固化土流动扩展

度增大。

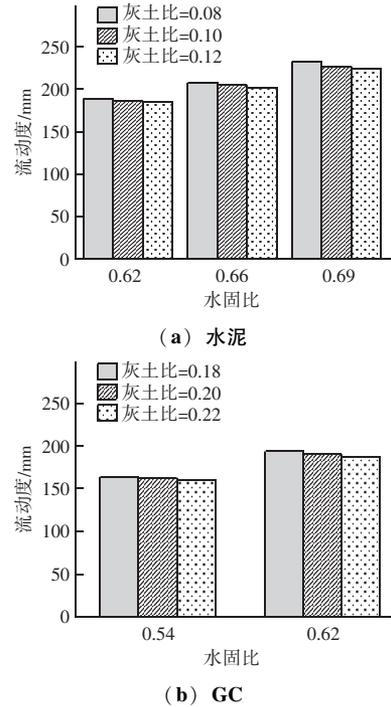


图 3 不同固化剂流态固化土流动扩展度
Fig. 3 Fluidity of flowable fill with various curing agents

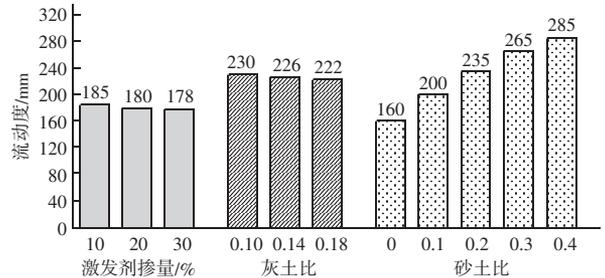


图 4 不同因素对优化 GC 固化剂流态固化土流动扩展度影响
Fig. 4 Effects of various factors on optimizing the fluidity of GC-cured flowable fill

2.1.2 泌水率

表 6 为不同系列配比试验分别在 15、30、45、60、120 min 测得的流态固化土泌水率。若无另外说明，文中泌水率指的是 120 min 泌水率。当流动扩展度保持在 ≥ 220 mm 时，水泥固化剂和优化 GC 固化剂用于固化尾泥时，其保水性能良好，在低水固比时，掺 GC 固化剂流态固化土也未发生泌水现象。根据相关研究^[16]可知，一般要求流态固化土材料的 120 min 泌水率低于 5%。随着砂土比的增大，流态固化土的泌水率逐渐增加，当砂土比为 0.4 时，流态固化土泌水为 6.2%，流态固化土边缘出现泌水现象，建议控制砂土比为 0.3。对于大流态的流态固化

材料科学

土, 现场施工时, 固化剂水化消耗一部分水的同时, 多余的自由水会被周围土壤吸收或者释放到表面而发生沉降, 会导致强度和填充体积的减少。

表 6 流态固化土泌水率

Table 6 Bleeding rate of fluidized solidified soil

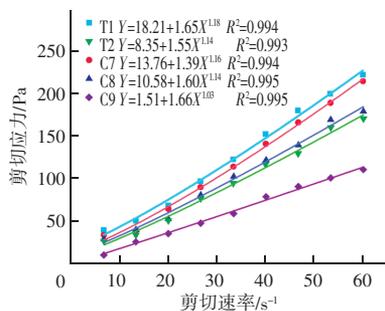
系列	湿密度 / (kg/m ³)	泌水率/%				
		15 min	30 min	45 min	60 min	120 min
C7	1 530	1.0	1.3	1.7	2.5	3.1
C8	1 540	2.5	3.1	3.7	4.3	4.8
T2	1 550	0.6	0.8	1.1	1.5	2.6
YT2	1 545	0.8	1.0	1.3	1.8	2.8
Z1	1 560	1.5	1.3	1.2	0.7	0.6
Z2	1 580	2.0	2.3	2.4	2.8	3.1
Z3	1 590	2.9	3.4	3.7	4.2	4.4
Z4	1 590	3.4	3.9	4.3	4.7	4.9
Z5	1 595	4.7	5.2	5.5	5.7	6.2

2.1.3 流变性能

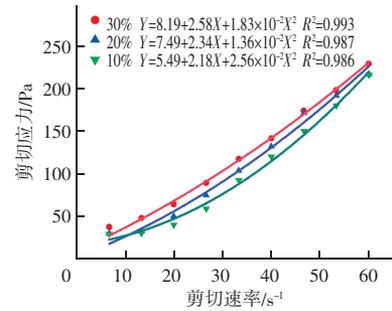
通过对 Bingham 模型进行修正来计算屈服应力和塑形黏度。修正的 Bingham (MB) 模型数学表达式可用二次多项式进行描述:

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \gamma + c\gamma^2 \quad (1)$$

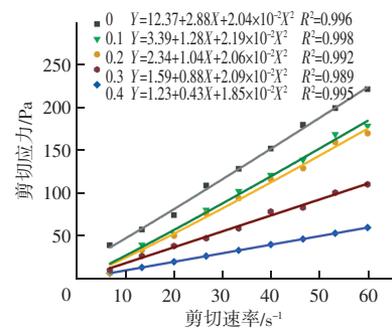
式中: τ 为剪切应力, Pa; γ 为剪切速率, s⁻¹; τ_0 为屈服应力, Pa; η_p 为塑性黏度, Pa·s; c 为常数。试验分别选取 C7、C8、C9、T1 和 T2、YT 系列和 Z 系列制备浆体, 其 MB 拟合曲线如图 5 所示。修正系数 R^2 接近 1, 曲线拟合程度较高。图 5 (a) 显示, 随着水固比的增大, 流变曲线下移, 斜率降低, 即流态固化土材料屈服应力减少。水泥固化剂流态固化土在水固比由 0.62 增加到 0.66 时, 屈服应力由 13.76 Pa 降至 10.58 Pa, 降幅为 23%, 宏观上则表现为流动扩展度逐渐增大。当水固比 ≥ 0.69 时, 水泥基固化剂流态固化土泌水风险大幅增加。GC 固化剂流变性能变化规律与水泥固化剂类似。图 5 (b) 表明, GC 固化剂流态固化土随着激发剂掺量的增大, 其屈服应力逐渐增大, 黏度变化不大。



(a) 固化剂种类



(b) 激发剂掺量



(c) 砂土比

图 5 不同因素下流态固化土剪切速率 - 剪切应力 MB 拟合曲线
Fig. 5 Shear rate - shear stress MB fitting curves of flowable fill under different factors

图 5 (c) 中可看出, 流态固化土中加入再生细骨料后, 流态固化土的屈服应力和黏度迅速下降。当水固比为 0.54 时, 砂土比从 0 提高到 0.3 时, 浆体屈服应力和黏度从 12.37 Pa、2.88 Pa·s 降低到 1.59 Pa、0.88 Pa·s, 浆体流动扩展度大幅增大, 但无泌水现象; 而砂土比继续增大到 0.4 时, 发现拟合曲线倾斜角度增大, 黏度急剧下降, 流动扩展度表现急剧增大, 这是由于浆体中细颗粒的减少, 导致泌水现象的发生。结合泌水率试验, 优化 GC 固化剂浆体控制砂土比为 0.3 较为合理, 与泌水试验结果一致; 控制浆体黏度在 0.88 Pa·s 以上, 屈服应力在 1.59 Pa 以上时, 流态固化土拌合物泌水率较小。

2.1.4 落球凝结时间

选取 C4、T2、YT2 和 Z2 四个试件, 测量其流态固化土拌和成型后 24、48、72 和 96 h 四个时间点的落球值, 试验结果如图 6 所示。水泥固化剂流态固化土在 24 h 后就可脱模进行养护, 而高掺量的 GC 固化剂流态固化土凝结硬化则需要很长时间, 甚至有的在 4 d 后才能进行脱模, 早期凝结硬化较慢会影响施工工期, 凝结时间快慢甚至会决定 CLSM 所应用的工程范围, 所以单一 GC 作为固化剂不适合大流动性

的工程。当用 20% 激发剂进行优化后，48 h 后 YT2 落球值为 71 mm，促进流态固化土凝结硬化。随着再生细骨料取代部分尾泥，达到相同流动扩展度时，需要的水更少，而且体系中大颗粒的数量增加，级配更好，形成的骨架强度更高，48 h 后已经完全凝结。

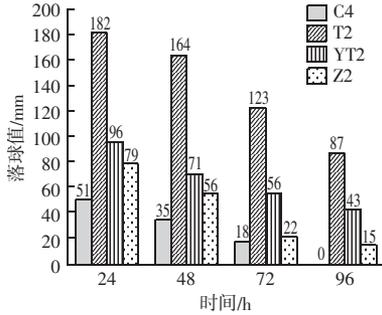
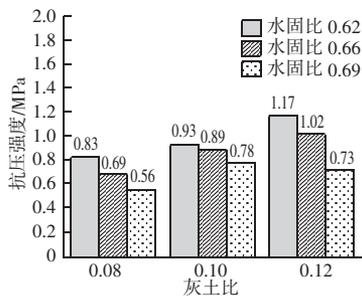


图 6 不同固化剂落球值

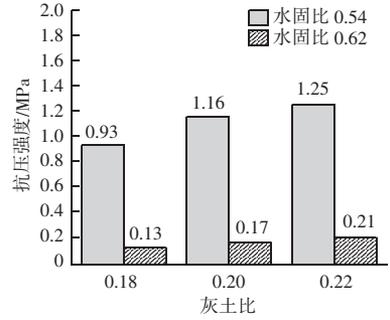
Fig. 6 Ball drop values for various curing agents

2.2 流态固化土力学性能分析

不同固化剂流态固化土的抗压强度随水固比和灰土比变化的规律如图 7 所示，水固比和灰土比对流态固化土抗压强度都有影响。水泥固化剂流态固化土 28 d 最低抗压强度为 0.56 MPa，满足施工要求；而当水固比为 0.62 时，GC 固化剂流态固化土 28 d 抗压强度小于 0.3 MPa，不满足施工要求。从图 8 中可看出来，随着激发剂的掺入，明显改善 GC 流态固化土的抗压强度。GC 固化剂固化尾泥时，当流动度太大，用水量较多，固废基各组分分散太开，互相协同和激发能力下降，使得矿渣中溶出的 $[SiO_4]^{4-}$ 、 $[AlO_4]^{5-}$ 较少，无法快速与 Ca^{2+} 聚合生成大量 C-S-H 凝胶，导致其早期强度太低。在实际工程应用时，也会影响工期，所以需要对其改良优化。当控制激发剂掺量为 20%、砂土比为 0.3 时，优化 GC 固化剂流态固化土抗压强度最高为 2.66 MPa。当其他条件不变时，随着砂土比的增大，流态固化土抗压强度逐渐升高；当砂土大于 0.3 时，流态固化土由于泌水离析而使抗压强度降低。



(a) 水泥



(b) GC

图 7 不同固化剂流态固化土 28 d 抗压强度
Fig. 7 28 days compressive strength of flowable fill with different curing agents

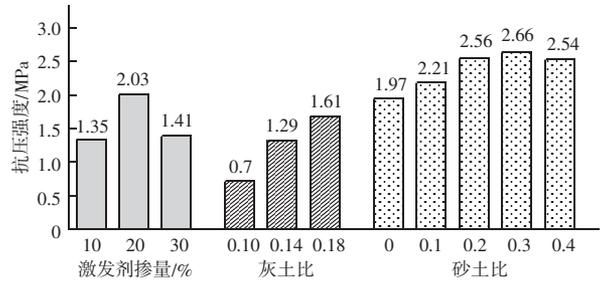


图 8 不同因素对优化 GC 固化剂流态固化土 28 d 抗压强度影响
Fig. 8 Effects of various factors on the 28 days compressive strength of optimized GC flowable fill

综合以上试验结果，结合相关规范，在管沟回填、临时回填、管道垫层等非结构应用场所，流态固化土 28 d 抗压强度为 0.3~2.1 MPa；道路基层、结构回填等结构应用场所 28 d 抗压强度为 2.1~8.3 MPa；有早强要求的一般 7、14 d 抗压强度大于 0.3 MPa；建议采用机制砂洗砂尾泥制备流态固化土参数和胶凝材料掺量见表 7。

表 7 流态固化土参数和胶凝材料掺量参考
Table 7 Parameters and cementitious material dosage reference for flowable fill

固化剂种类	土的组成	固化剂掺量/%	水固比	工程应用类别		
				流动扩展度	是否为早期型	是否为结构性回填
水泥基	尾泥	7~11	0.62~0.66	低	是	否
			0.66~0.69	一般	是	否
			≥0.69	高	否	否
GC 基	尾泥	15~18	0.62~0.66	一般	是	是
			0.54~0.62	低	否	否
			0.54~0.62	低	否	是
优化 GC 基	尾泥 + 再生细骨料	9~15	0.62~0.69	一般	是	是
			≥0.69	高	是	否
			≥0.54	高	是	是

材料科学

3 结论

通过流动扩展度、凝结时间、泌水率、流变性能和无侧限抗压强度试验,探讨水固比、灰土比、激发剂掺量和砂土比对尾泥流态固化土的工作性能和力学性能的影响,得到以下主要结论:

(1) 调控灰土比和水固比可实现水泥固化剂流态固化土满足各种工程工作性要求,水固比对流态固化土流动扩展度影响较大;灰土比与激发剂掺量对 GC 固化剂流动扩展度影响不大;再生细骨料取代部分尾泥可改善优化 GC 固化剂流动扩展度,水固比降低至 0.62,流态固化土流动度大于 220 mm。

(2) 修正的 Bingham 模型对新拌流态固化土浆体流变性能拟合程度较好,确定了 $0.88 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 的临界黏度阈值,低于该值时,泌水风险显著增加;浆体屈服应力和黏度随着水固比增大而降低;激发剂掺量越大,浆体初始屈服应力越高,但黏度改变不大;砂土比提高会降低黏度,但加剧泌水,当砂土比为 0.4 时泌水率达 6.2%,为确保浆体稳定性,砂土比应 ≤ 0.3 。

(3) GC 基固化剂以固废资源(钢渣、矿渣等)为原料,其早期强度发展缓慢,在大流态下,其 28 d 强度 $< 0.3 \text{ MPa}$ 时需 4 d 脱模。通过 20% 激发剂与再生细骨料的复合优化,显著缩短凝结时间至 48 h,并提升 28 d 强度至 2.66 MPa,证明对于尾泥流态固化土,激发-骨架协同优化技术可行性。

参 考 文 献

[1] JUENGER M C G, SNELLINGS R, BERNAL S A. Supplementary cementitious materials: New sources, characterization, and performance insights [J]. *Cement and Concrete Research*, 2019, 122: 257-273.

- [2] 赖伟. 机制砂尾泥和米石制备充填料浆坍落度试验研究 [J]. *黄金*, 2022, 43 (9): 39-42.
- [3] 王德永, 姚文奉, 陈刚, 等. 湿法生产机制砂尾矿污泥用于生产烧结砖的技术可行性分析 [J]. *砖瓦*, 2021 (7): 20-22.
- [4] 兰阳. 铝土矿尾矿多孔陶瓷的制备及其力学性能研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
- [5] YE J Y, ZHANG W S, SHI D. Effect of elevated temperature on the properties of geopolymer synthesized from calcined oredressing tailing of bauxite and ground-granulated blast furnace slag [J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 69-72.
- [6] SOGANCIOGLU M, YEL E, YILMAZ-KESKIN U S. Utilization of andesite processing wastewater treatment sludge as admixture in concrete mix [J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 46-49.
- [7] 周永祥, 王继忠. 预拌固化土的原理及工程应用前景 [J]. *新型建筑材料*, 2019, 46 (10): 117-120.
- [8] 高强. 水泥基流态土固化剂的试验研究 [J]. *中国建材科技*, 2021, 30 (4): 68-73.
- [9] 王奕博, 唐正光, 杨玉龙. 矿粉土壤固化剂改良高原红粘土试验研究 [J]. *中北大学学报 (自然科学版)*, 2020, 41 (5): 443-449.
- [10] 李雅曦. 无机固化剂对流态固化土结构和性能的影响研究 [D]. 北京: 北京建筑大学, 2023.
- [11] 王聪聪, 刘茂青, 宋红旗, 等. 赤泥-钢渣粉-水泥固化流态土性能试验研究 [J]. *硅酸盐通报*, 2023, 42 (7): 2488-2496.
- [12] 王子帅, 王东星. 工业废渣-水泥协同固化土抗硫酸盐侵蚀性能 [J]. *岩土工程学报*, 2022, 44 (11): 2035-2042.
- [13] 周永祥, 刘倩, 王祖琦, 等. 流态固化土用无熟料胶凝材料的性能研究 [J]. *硅酸盐通报*, 2022, 41 (10): 3548-3555.
- [14] 汤畅. 含精炼渣全固废胶凝材料协同超细尾砂制备胶结充填材料 [D]. 北京: 北京科技大学, 2023.
- [15] 李鑫, 杜惠惠, 倪文, 等. KR 脱硫渣碱激发矿渣的配比优化及水化特性 [J]. *硅酸盐通报*, 2023, 42 (1): 170-179.
- [16] 汪伟, 张同生, 陈灿峰, 等. 可控低强度材料 (CLSM) 性能评价方法分析 [J]. *硅酸盐通报*, 2021, 40 (11): 3634-3643.