

安徽某铁矿分级尾砂胶结充填试验研究

Experimental Study on Cemented Filling of Classified Tailings in an Iron Mine in Anhui Province

温震江^{1,2}, 霍思^{1,2}, 任海锋^{1,2}, 郭晓刚^{1,2}, 耿碧瑶^{1,2}

(1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038; 2. 金属矿膏体充填安全绿色开采国家矿山安全监察局重点实验室, 北京 100038)

摘要:为探究分级尾砂在安徽某铁矿胶结充填的可行性,在试验材料物化特性分析的基础上,分别开展了尾砂絮凝沉降试验、充填体强度试验及充填料浆流动性试验研究。研究表明:分级尾砂浓密优化参数为砂浆浓度30%,絮凝剂添加量30 g/t;相同配比条件下,分级尾砂各龄期强度较全尾砂均降低,分级尾砂充填要满足矿山强度要求,在质量浓度不变的条件下,需提高灰砂比,由全尾砂充填时的1:12提高至1:10;分级尾砂流动性与全尾砂相比,虽有所降低,整体相差不大,且均能满足矿山充填要求;分级尾砂充填料浆试验综合确定各灰砂比条件下,充填料浆临界流态浓度均不低于70%。研究结果为分级尾砂在矿山充填应用提供了数据支撑。

关键词:分级尾砂;胶结充填;浓密特性;充填体强度;流动性

中图分类号: TD985 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2024)01-0041-07

Abstract: In order to explore the feasibility of cemented filling classified tailings in an iron mine in Anhui province, based on the analysis of physical and chemical characteristics of test materials, the flocculation settling test of classified tailings, the strength test of backfill and the fluidity test of filling slurry were carried out. The results show that the optimum parameters for density of classified failings is 30% mortar concentration and 30 g/t flocculant addition. Under the same ratio, the strength of classified tailings at each age is lower than that of whole tailings. In order to meet the requirements of mine strength, classified tailings filling needs to increase the ash sand ratio from 1:12 to 1:10 when the mass concentration remains unchanged. The flowability of classified tailings is lower than that of full tailings, but there is little difference in the whole, and both can meet the requirements of mine filling. The comprehensive determination of the critical flow state concentration of the classified tailings slurry test under various ash sand ratio conditions is not less than 70%. The research results provide data support for the application of graded tailings in mine filling.

Key words: classified failings; cemented backfill; thickening characteristics; backfill strength; flowability

1 前言

近年来,矿产开发和利用逐渐向深部和非优质资源转变,废石、尾砂等矿山固废的产出量也在逐年增加,并且随着国家对于矿山安全和环保要求的不断提高,尾砂的处理和利用成为矿山绿色发展面临的一大难题^[1-3]。目前尾砂充填是规模化消耗的主要途径之一,将尾砂、胶凝材料、水按照一定比例混合搅拌均匀制备成料浆充填至采空区或露天坑^[4-6]。此外,尾砂的主要利用途径包括再选回收有益组分、砂石骨料、建筑混合材等^[7-9]。据统计,目前我国尾砂堆存量超240亿t,但综合利用率不足40%,剩余尾砂只能排放至尾矿库堆存^[10-11]。近年来,国家和地方政府对环保

和土地政策逐年收紧,使得尾矿库扩容或新建审批越来越难,尾矿库库容不足,导致矿山生产与尾砂的排放矛盾日益突出^[12-13]。

当前,国内部分矿山步入大规模及深井开采行列,矿石开采量得到空前提升,同时也产出大量尾砂,但是随着国家对于新建尾矿库审批的限制,使得尾砂的排放成为制约大规模矿山发展的棘手问题;为了缓解尾砂排放压力,采用“分级粗砂外销,细砂充填”的思路^[14-15]。但是尾砂分级对于充填体强度、料浆流动性都有一定影响,需要充填工艺参数进行调整。

安徽某铁矿现有资源储量约3.4亿t,年矿石开采量近800万t,为国内在产的超大规模地下铁矿

[作者简介] 温震江(1991—),男,博士,主要从事充填采矿和固废综合利用研究。

[基金项目] 国家重点研发计划资助项目(编号:2023YFC2907203);山东省重点研发计划资助项目(编号:2022CXPT032);博士后科学基金资助项目(编号:2022M723524)。

[引用格式] 温震江,霍思,任海锋,等.安徽某铁矿分级尾砂胶结充填试验研究[J].中国矿山工程,2024,53(1):41-47.

山,采用阶段空场嗣后充填采矿法,将矿体分矿房、矿柱两步骤回采,采场与采场间不留间柱,阶段高100 m,分段高度25 m,矿块宽度为矿体厚度,一步采矿块30~50 m,二步采矿块长40~80 m。目前井下充填均采用全尾砂胶结充填,剩余尾砂排放至尾矿库,年排放量超90万t,预计尾矿库剩余服务年限约6年,而矿山还有30年以上的服务年限,严重制约了矿山的发展。因此,矿山拟采用“卖粗充细”的方针以实现尾砂“产销平衡”。

本文从尾砂的物化特性分析着手,通过尾砂絮凝沉降试验、充填料浆配比强度及流动性试验,综合分析尾砂分级对于充填的影响,为充填工艺参数调整及应用提供数据支撑。

2 试验材料

2.1 尾砂

尾砂作为充填试验的主要材料,其物化特性对充填料浆性质有重要影响。参照国标《土工试验方法标准》GB/T 50123—2019分别测定了尾砂的密度及松散密度,并计算得到尾砂孔隙率,结果见表1。

尾砂的粒径级配对充填料浆的性质有重要的影响,测定和分析尾砂粒径级配可为确定充填工艺要求的充填料浆浓度、配比等提供参考。采用激光粒

表1 尾砂物理性质测试结果

尾砂类型	密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	松散密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	孔隙率/%
全尾砂	2.871	1.203	58.12
分级尾砂	2.762	1.234	55.32

度分析仪分别对全尾砂和分级尾砂粒径级配进行测试,结果如图1所示,并对其特征粒径进行计算;并根据式(1)和式(2)分别计算不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c ,结果见表2。

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (1)$$

$$C_c = \frac{d_{30}}{d_{10} \times d_{60}} \quad (2)$$

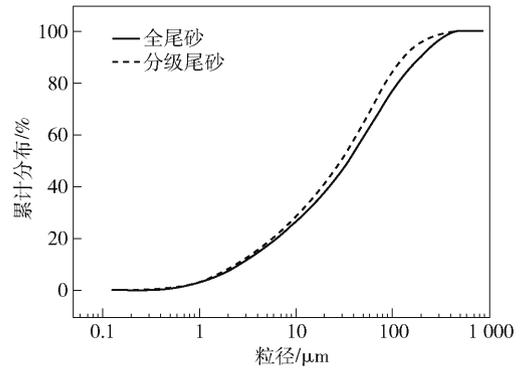


图1 尾砂粒径分布特征

表2 尾砂粒径特征参数

尾砂类型	$d_{10}/\mu\text{m}$	$d_{30}/\mu\text{m}$	$d_{50}/\mu\text{m}$	$d_{60}/\mu\text{m}$	$d_{90}/\mu\text{m}$	C_u	C_c
全尾砂	2.63	12.98	35.56	54.39	199.99	20.68	1.18
分级尾砂	2.46	11.09	29.64	43.08	133.41	17.51	1.16

根据尾砂粒径级配分析结果可以看出:特征粒径 d_{10} 、 d_{30} 、 d_{50} 、 d_{60} 和 d_{90} 全尾砂分别为2.63 μm 、12.98 μm 、35.56 μm 、54.39 μm 和199.99 μm ,分级尾砂分别为2.46 μm 、11.09 μm 、29.64 μm 、43.08 μm 和133.41 μm ;

全尾砂和分级尾砂不均匀系数 C_u 分别为20.68

和17.51,均大于10,并且曲率系数 C_c 分别为1.18和1.16,介于1~3。因此,全尾砂及分级尾砂均级配良好,且连续性较好。

尾砂化学成分和矿物成分对充填料浆的力学性能有着重要的影响。采用XRF和XRD对尾砂化学成分进行分析,结果见表3和图2。

表3 尾砂化学成分组成

成分	Al_2O_3	CaO	SiO_2	MgO	K_2O	TiO_2	P_2O_5	Na_2O	Fe	MnO	S	烧失量
含量/%	1.88	0.77	76.72	0.76	0.56	0.16	0.016	0.066	11.15	0.012	0.029	1.54

根据表3化学成分分析和图2矿物成分分析可以看出:尾砂主要化学成分包括 SiO_2 、Fe、 Al_2O_3 、 CaO 和 MgO ,含量分别为76.72%、11.15%、1.88%、0.77%和0.76%,P、S含量均较低,分别为

0.016%和0.029%;尾砂主要矿物成分包括石英、赤铁矿、白云石、方解石、云母和绿泥石等;综合分析尾砂属于低硫、低磷、高硅型铁尾砂,但是含有对充填体强度不利的黏土类矿物,如绿泥石等,这对充填

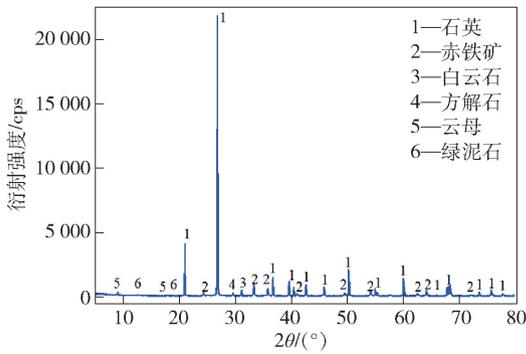


图2 尾砂 XRD 图谱

体强度有负面影响。

2.2 胶凝材料

试验采用的胶凝材料为矿山充填专用胶固粉，

其主要成分为矿渣、水泥熟料、石膏等固废材料经过粉磨混合而成，并添加少量添加剂；经测定该胶固粉密度为 2.83 t/m³，45 μm 筛余为 7.68%，比表面积为 450 m²/kg，各项性能指标满足矿山充填要求。

3 分级尾砂胶结充填性能试验研究

3.1 分级尾砂絮凝沉降特性

尾砂浓密是制备充填料浆的基础，尾砂分级之后，细颗粒含量较高，需要添加絮凝剂提高沉降效果，开展不同砂浆浓度和不同絮凝剂单耗沉降试验，砂浆浓度 20%、25%、30% 和 35%，絮凝剂单耗 20 g/t、25 g/t、30 g/t 和 35 g/t；在确定分级尾砂不同砂浆浓度条件下优化絮凝剂添加量的基础上，开展压缩沉降试验，结果分别如图 3 和图 4 所示。

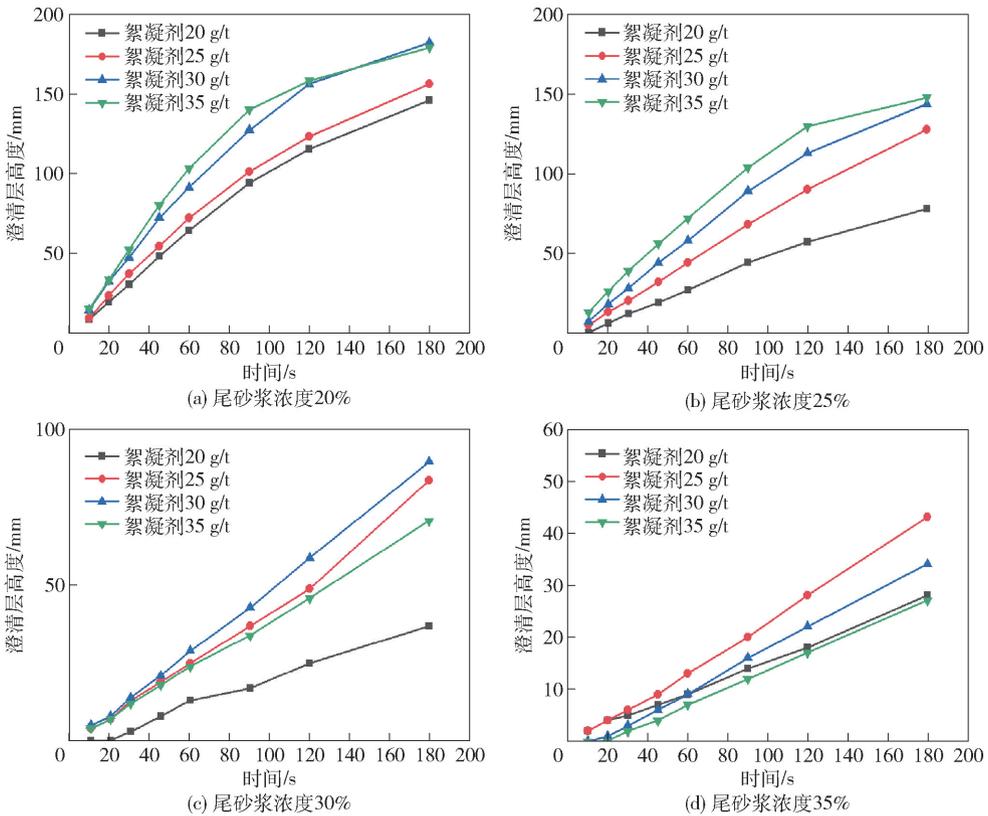


图3 分级尾砂不同砂浆浓度及絮凝剂添加量条件下沉降情况

结合图 3 和图 4 可以看出：随着砂浆浓度的提高，尾砂的沉降速度和澄清度逐渐变差，但底流浓度逐渐提高；适当降低砂浆浓度，对于提高沉降效果有很大改善；在试验范围内，砂浆浓度 20% ~ 25% 时，尾砂沉降速度随着絮凝剂添加量的增加逐渐提高，砂浆浓度 30% ~ 35%，尾砂沉降速度随着絮凝剂添加量的增加先增大后减小。

根据试验结果不同的砂浆浓度对应絮凝剂优化添加量不同，浓度 20%、25%、30% 和 35% 的砂浆分别对应 35 g/t、35 g/t、30 g/t 和 25 g/t 的絮凝剂优化添加量，相应的沉降速度分别为 12.61 mm/min、16.90 mm/min、18.62 mm/min 和 21.53 mm/min，底流浓度分别为 65.32%、64.11%、60.51% 和 59.12%；根据絮凝剂单耗、尾砂沉降速度、底流浓

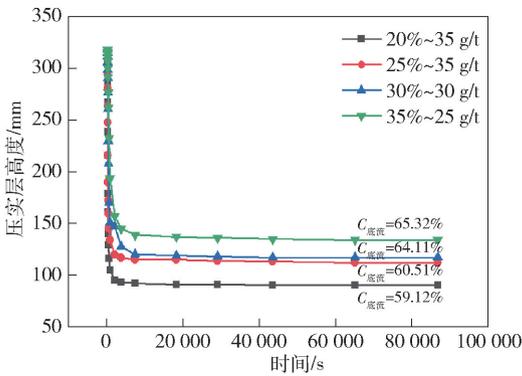


图4 分级尾砂不同条件下压缩沉降结果对比

度、澄清度,结合无法进行强制稀释的现状,综合确定分级尾砂浓密参数为:砂浆浓度30%,絮凝剂添加量30 g/t,此时沉降速度为16.90 mm/min,底流浓度为64.11%。

3.2 分级尾砂胶结充填体强度试验

根据矿山的采矿方法对充填体强度的要求以及尾砂物化特性分析的结果,进行尾砂充填料浆配比实验,测定胶结充填体强度,分析充填体强度随料浆浓度、灰砂比及养护龄期的变化情况,并确定最优的配合比。为了探究尾砂分级对充填体强度的影响,分别开展灰砂比1:8、1:9、1:10、1:11、1:12和1:18,质量浓度66%、68%和70%的充填强度试验,结果见表4。

根据表4试验结果,对充填体强度影响因素和规律进行分析,并对全尾砂和分级尾砂进行对比,结果如图5至图7所示。

根据表4强度试验结果结合图5~图7可以看出:全尾砂及分级尾砂充填体强度随质量浓度、灰砂比的变化规律均一致;当质量浓度一定的情况下,均随着灰砂比的降低而减小,以浓度68%为例,灰砂比由1:8降低至1:18时,全尾砂7 d和28 d强度分别减小了90.29%和68.09%,分级尾砂7 d和28 d强度分别减小了95.08%和57.56%;当灰砂比一定的情况下,均随着质量浓度的提高而增长,以灰砂比1:8为例,浓度由66%提高至70%时,全尾砂7 d和28 d强度分别增长了40.22%和9.54%,分级尾砂7 d和28 d强度分别增长了25%和25.38%;相同配比条件下,分级尾砂各龄期强度较全尾砂均降低,以灰砂比1:8,质量浓度68%为例,分级尾砂7 d和28 d强度较全尾砂分别降低了40.78%和32.57%。

根据试验结果综合分析,尾砂分级之后各龄期

表4 全尾砂及分级尾砂充填体强度试验结果

灰砂比	质量浓度/%	全尾砂充填体强度/MPa		分级尾砂充填体强度/MPa	
		7 d	28 d	7 d	28 d
1:8	66	1.79	2.83	1.16	1.97
	68	2.06	3.04	1.22	2.05
	70	2.51	3.10	1.45	2.47
1:9	66	1.11	2.48	0.89	1.42
	68	1.46	2.72	0.94	1.67
	70	2.06	2.90	1.10	1.95
1:10	66	0.80	2.33	0.54	1.43
	68	0.92	2.65	0.61	1.55
	70	1.23	2.68	0.77	1.78
1:11	66	0.66	2.24	0.46	1.34
	68	0.83	2.48	0.59	1.42
	70	0.90	2.66	0.65	1.67
1:12	66	0.45	1.56	0.34	1.16
	68	0.72	1.76	0.45	1.41
	70	0.81	2.29	0.51	1.52
1:18	66	0.14	0.92	0.05	0.58
	68	0.20	0.97	0.06	0.87
	70	0.31	1.89	0.07	1.12

充填体强度较全尾砂充填均降低,要满足矿山充填28 d强度不低于1.5 MPa的要求,分级尾砂充填,在浓度不变的情况下,需提高灰砂比,由全尾砂充填时的1:12提高至1:10。

3.3 分级尾砂充填料浆流动性试验

塌落度和扩散度是表征料浆流动性好坏的重要定量指标。分别测定不同配比条件下料浆塌落度和扩散度,试验方案按照3.2节强度试验配比,试验方法参照《普通混凝土拌合物性能试验方法》(GB 50080—2019)进行。试验结果如图8和图9所示。

根据图7和图8试验结果可以看出:全尾砂和分级尾砂塌落度和扩散度均随质量浓度的提高逐渐减小,以灰砂比1:8为例,浓度由66%提高到70%,全尾砂塌落度和扩散度分别减小了9.68%和7.20%,相同条件下分级尾砂塌落度和扩散度分别减小了8.33%和7.43%;全尾砂和分级尾砂塌落度和扩散度均随灰砂比的降低逐渐减小,以浓度68%为例,灰砂比由1:8降低到1:18,全尾砂塌落度和扩散度分别减小了8.67%和6.92%,相同条件下塌落

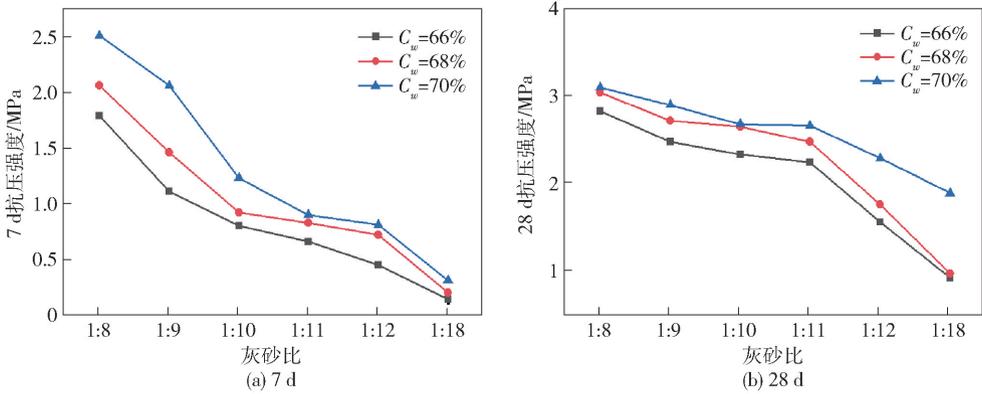


图 5 全尾砂充填体强度试验结果

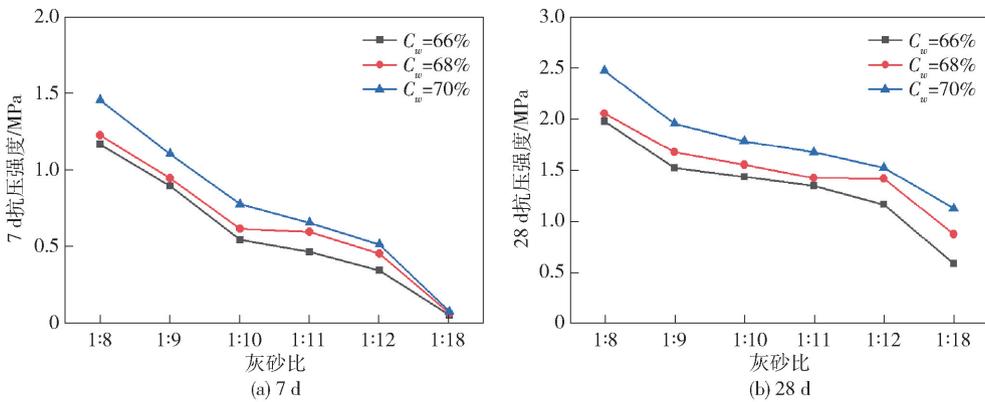


图 6 分级尾砂充填体强度试验结果

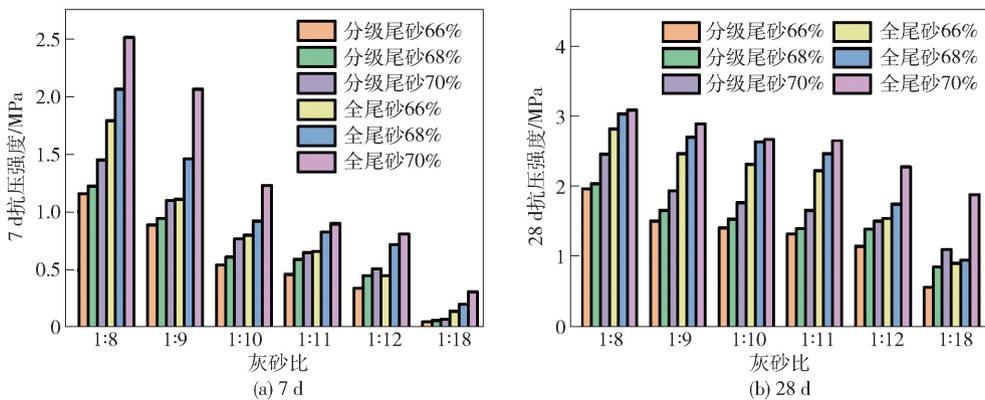


图 7 全尾砂与分级尾砂充填体强对比分析

度和扩散度分别减小了 7.80% 和 6.59% ;相同配比条件下,分级尾砂流动性较全尾砂降低,以灰砂比 1:8,质量浓度 68% 为例,分级尾砂塌落度和扩散度分别较全尾砂降低了 1.67% 和 0.77% ,分级尾砂与全尾砂相比,流动性虽有所降低,整体相差不大,且均能满足矿山充填要求。

3.4 分级尾砂充填料浆流变特性试验

尾砂充填料浆的流变特性参数由屈服应力和黏

度系数描述,是衡量其输送性能的重要指标。采用 RS-SST 软固体流变仪对不同浓度的充填料浆进行流变测试,分别得到其屈服应力及塑性黏度等流变参数,利用宾汉 (Bingham) 流变模型对数据进行拟合分析,确定流变参数。

试验参照充填体强度试验方案进行,具体试验方案及结果见表 4。

根据试验结果分析质量浓度对料浆屈服应力的

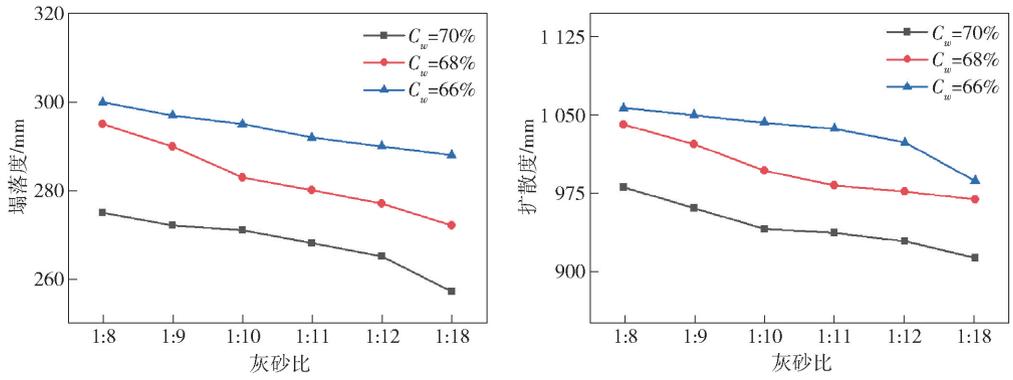


图8 全尾砂充填料浆塌落度及扩散度试验结果

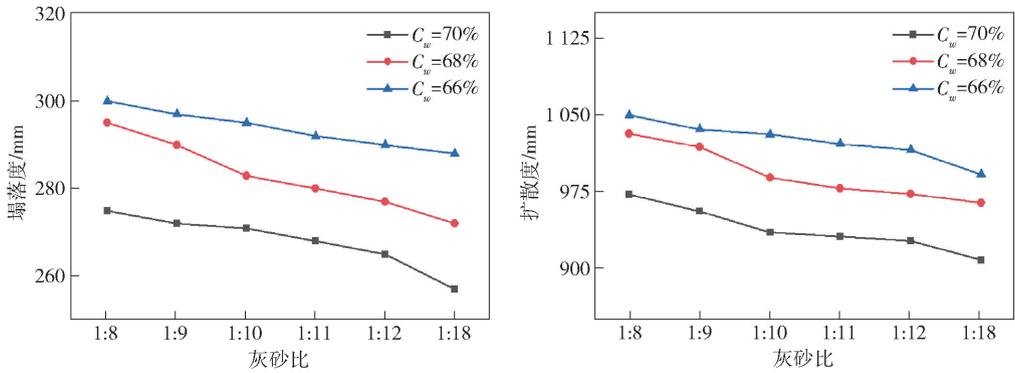


图9 分级尾砂充填料浆塌落度及扩散度试验结果

表4 分级尾砂充填料浆流变参数测试结果

灰砂比	质量浓度/%	Bingham 屈服应力/Pa	Bingham 黏度/Pa·s	Bingham 回归方程	拟合度指数 R^2
1:8	66	7.4379	0.1014	$\tau = 7.4379 + 0.1014\gamma$	0.97
	68	17.1274	0.1146	$\tau = 17.1274 + 0.1146\gamma$	0.97
	70	40.8408	0.1574	$\tau = 40.8408 + 0.1574\gamma$	0.93
1:9	66	7.3463	0.1078	$\tau = 7.3463 + 0.1078\gamma$	0.98
	68	17.9727	0.1035	$\tau = 17.9727 + 0.1035\gamma$	0.97
	70	30.657	0.1121	$\tau = 30.657 + 0.1121\gamma$	0.9
1:10	66	5.0745	0.0925	$\tau = 5.0745 + 0.0925\gamma$	0.92
	68	14.1071	0.1049	$\tau = 14.1071 + 0.1049\gamma$	0.97
	70	32.3797	0.1422	$\tau = 32.3797 + 0.1422\gamma$	0.96
1:11	66	6.8346	0.0785	$\tau = 6.8346 + 0.0785\gamma$	0.94
	68	14.5863	0.0971	$\tau = 14.5863 + 0.0971\gamma$	0.97
	70	25.9168	0.1317	$\tau = 25.9168 + 0.1317\gamma$	0.96
1:12	66	0.58	0.1447	$\tau = 0.58 + 0.1447\gamma$	0.91
	68	11.098	0.104	$\tau = 11.098 + 0.104\gamma$	0.97
	70	23.8094	0.1304	$\tau = 23.8094 + 0.1304\gamma$	0.97
1:18	66	0.4913	0.129	$\tau = 0.4913 + 0.129\gamma$	0.9
	68	10.4535	0.0946	$\tau = 10.4535 + 0.0946\gamma$	0.98
	70	19.054	0.1398	$\tau = 19.054 + 0.1398\gamma$	0.97

影响,结果如图 10 所示。

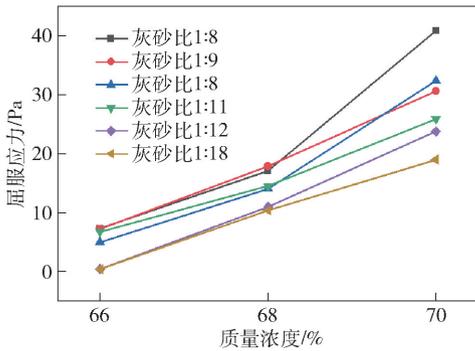


图 10 不同灰砂比条件下分级尾砂充填料浆浓度与屈服应力的关系

根据表 4 试验结果结合图 10 可以看出:各灰砂比条件下,质量浓度 66% ~ 70%,灰砂比 1:18 ~ 1:8 的充填料浆表现出典型的宾汉流体特性,屈服应力均随着料浆质量浓度的升高逐渐增大;料浆 68% ~ 70% 浓度范围内屈服应力增加速率快于 66% ~ 68% 范围内屈服应力增加速率,主要是因为料浆浓稠后逐渐趋于临界流态浓度,料浆流动性逐渐变差,导致屈服应力升高,但是浓度达到 70%,拟合指数在各灰砂比条件下仍然高于 0.9,屈服应力增加幅度不大;综合分析各灰砂比条件下,分级尾砂充填料浆临界流态浓度不低于 70%。

4 结论

(1) 试验分级尾砂粒径级配良好且连续,属于低硫、低磷、高硅型铁尾砂,满足矿山充填要求。

(2) 尾砂的沉降速度随着砂浆浓度的提高逐渐降低,但底流浓度逐渐提高;结合沉降参数和矿山现状,综合确定砂浆浓度 30%,絮凝剂添加量 30g/t 的分级尾砂优化浓密参数。

(3) 全尾砂及分级尾砂充填体强度随质量浓度、灰砂比的变化规律均一致;相同配比条件下,尾砂分级之后各龄期充填体强度较全尾砂均降低,灰砂比 1:8,质量浓度 68% 时,分级尾砂 7 d 和 28 d 强度较全尾砂分别降低了 40.78% 和 32.57%;在浓度不变的条件下,要满足设计充填强度 $R_{28,d} \geq 1.5$ MPa 要求,需提高灰砂比,由全尾砂充填时的 1:12 提高至 1:10。

(4) 全尾砂和分级尾砂塌落度和扩散度随质量浓度的提高及灰砂比的降低均逐渐减小;相同配比条件下,分级尾砂流动性较全尾砂降低,灰砂比

1:8,质量浓度 68% 时,分级尾砂塌落度和扩散度分别较全尾砂降低了 1.67% 和 0.77%,整体相差不大,且均能满足矿山充填要求。

(5) 在试验范围内分级尾砂充填料浆表现出典型的宾汉流体特性,屈服应力均随着料浆质量浓度的升高逐渐增大,料浆 68% ~ 70% 浓度范围内屈服应力增加速率快于 66% ~ 68% 范围内屈服应力增加速率,综合屈服应力和拟合指数变化情况,确定各灰砂比条件下,分级尾砂充填料浆临界流态浓度均不低于 70%。

【参考文献】

- [1] 于润沧. 金属矿山胶结充填理论与工程实践[J]. 北京:冶金工业出版社,2020.
- [2] 宋泽普,付有,林顺才,等. 分级细尾砂充填试验研究[J]. 矿业研究与开发,2022(11):29-33.
- [3] 付建勋,贺茂坤,江国建,等. 绿色无尾矿山优化充填技术与关键装备研究[J]. 中国矿山工程,2022,51(3):58-61.
- [4] 黄仁东,李哲. 基于正交试验的细尾砂-分级尾砂充填体强度研究[J]. 黄金科学技术,2021(2):256-265.
- [5] 滕高礼,石宏伟,王彬,等. 云南某矿山尾矿库分级尾砂用于矿山充填试验研究[J]. 有色金属(矿山部分),2020,72(3):99-103.
- [6] 唐占信,王金波,周东良,等. 夏甸金矿分级尾砂充填材料试验研究[J]. 黄金,2016,37(6):43-45.
- [7] 王立刚,彭剑平,林健,等. 全尾砂充填试验及充填系统方案研究[J]. 中国矿山工程,2022,51(1):45-50.
- [8] 李德先,王锦,张长青,等. 冀东司家营铁尾矿特征及综合利用建议[J]. 地质学报,2022,96(4):1460-1468.
- [9] 张继业,贺茂坤. 某铜矿山尾砂用于充填试验研究[J]. 中国矿山工程,2022,51(2):43-46.
- [10] 杜艳强,段文峰,赵艳. 金属尾矿处置及资源化利用技术研究[J]. 中国矿业,2021,30(8):57-61.
- [11] 史利芳,潘利祥,李朝晖,等. 尾矿微粉用作建筑材料的性能研究[J]. 环境工程,2015(S1):566-569.
- [12] 张润达,李志海. 河东矿区细尾砂胶结充填工艺优化改造及应用[J]. 黄金,2022,43(4):49-52.
- [13] 张长青,邱景智,刘冠男,等. 尾矿综合利用助力绿色矿山建设[J]. 中国矿业,2019,28(S2):135-137.
- [14] 胡术刚,尚修宇,初慧. 金矿尾矿综合利用途径研究与展望[J]. 世界环境,2018(5):26-30.
- [15] 杨玮,常东,龙涛,等. 金尾矿资源化利用研究进展[J]. 矿产保护与利用,2023,43(3):168-178.