超细尾砂充填固化与料浆特性研究*

林敏[1]，王谦源[2]，袁庆盟[3]，杨双有[1]，施振跃[4]

（1.安徽省庐江龙桥矿业有限公司， 安徽 合肥 231555；
2.青岛理工大学 理学院， 山东 青岛市 266033；
3.广州市设计院集团有限公司， 广东 广州 510620；
4.山东科技大学 资源学院， 山东 泰安市 271019）

摘要：针对分级溢流细尾砂固化与料浆特性研究薄弱、井下充填处理细尾砂推进缓慢的问题，采用小扩散桶测定扩散度以确定膏体充填浓度，应用矿渣基胶凝材料，开展了某铁矿中矿溢流超细尾砂、部分黄金矿山分级溢流细尾砂及多座铁矿全尾砂的固化试验与料浆特性研究。结果表明：使用矿渣基胶固粉可有效解决分级溢流超细尾砂固化与强度需求方面的问题；超细尾砂孔隙率高、堆积密度小，料浆质量浓度可低至50%以下；相同胶固粉用量下，超细尾砂灰砂比较高，但充填体28 d强度损失有限，充填成本增幅不大；料浆质量浓度对固化强度影响显著。在3.5～4.0充填倍线下，超细尾砂充填料浆可实现自流输送，无需泵送。

关键词：超细尾砂；矿渣基胶凝材料；固化试验；料浆特性

中图分类号：TD853.34　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1005-2763(2026)08-0105-07

Study on Solidification and Slurry Properties of Ultrafine Tailings Backfill

Lin Min[1], *Wang Qianyuan*[2], *Yuan Qingmeng*[3], *Yang Shuangyou*[1], *Shi Zhenyue*[4]

(1.Anhui Lujiang Longqiao Mining Co., Ltd., Hefei, Anhui 231555, China;
2.School of Science, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong 266033, China;
3.Guangzhou Design Institute Group Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510620, China;
4.College of Resources, Shandong University of Science and Technology, Taian, Shandong 171019, China)

Abstract: To address the problems of weak research on solidification and slurry properties of classified overflow fine tailings and slow progress in underground backfill treatment of fine tailings, a small spread cylinder was used to measure the spread value to determine the paste backfill concentration. Using slag-based cementitious materials, solidification tests and slurry property studies were carried out on ultrafine tailings from middling overflow of an iron mine, classified overflow fine tailings from some gold mines, and unclassified tailings from several iron mines. The results show that the use of slag-based cementitious powder can effectively solve the problems related to the solidification and strength requirements of classified overflow ultrafine tailings. Ultrafine tailings have high porosity and low bulk density, and the slurry mass concentration can be as low as below 50%. Under the same binder dosage, the cement-tailing ratio of ultrafine tailings is relatively high, but the 28-day strength loss of the backfill is limited, and the increase in backfill cost is not significant. The slurry mass concentration has a significant effect on solidification strength. Under a filling line of 3.5 to 4.0, the ultrafine tailings backfill slurry can achieve gravity flow transportation without pumping.

Key words: Ultrafine tailings, Slag-based cementitious material, Solidification test, Slurry property

0 引言

据统计，2023年我国产生尾矿14.24亿t，现有尾矿堆存总量已超过200亿t，其中铁矿、铜矿、金矿和磷矿加工过程中产生约82%的尾矿，铁尾矿和铜尾矿分别占40%和25%以上[1-2]。因现有技术水平和经济效益方面的限制，2023年尾矿综合利用率仅有30.13%，大宗尾矿利用仍是金属矿山面临的工程难题。

针对尾矿的处理，不少学者提出了“细尾砂井下充填，粗尾砂对外商业化利用”的技术思路[3-5]，推动了细尾砂或超细尾砂充填相关技术的研究工作。Chen等[6]研究发现，－20 μm细粒组分占比高的溢

* **收稿日期**：2026-02-06
基金项目：国家自然科学基金项目(52404134)
作者简介：林敏(1984—)，男，安徽庐江人，高级工程师，主要从事金属矿山开采技术研究工作。E-mail：362811003@qq.com
通信作者：王谦源(1956—)，男，山东五莲人，硕士，二级教授，主要研究方向为采矿理论及工艺研究。E-mail：qdwqy@vip.163.com

流尾砂易导致充填体孔隙率升高、强度降低,提高胶凝材料用量与料浆质量浓度是改善充填体力学性能的有效途径。Wang 等[7]以－200 目细尾砂为骨料开展金矿充填试验,探讨料浆质量浓度、灰砂比对充填体强度的影响。黄仁东等[8]通过正交试验探讨了尾砂料浆质量浓度、胶凝材料掺量、外加剂掺量和细尾砂掺加比例对充填体强度的影响。张雷等[9]系统梳理了细尾砂充填的关键技术与材料研究进展,指出粒径和级配差异会直接影响料浆的浓缩脱水效果及流动特性和固化成型性能。郑伯坤等[10]针对超细尾砂搅拌均质化难题,开展了叶轮结构形式、叶轮直径、安装高度参数优化试验。孔翔生等[11]针对高浓度超细尾砂料浆管路输送过程中易出现堵塞甚至爆管等问题,研发了泵送充填智能调压控制系统。王丽红等[12]采用响应曲面法研究了超细尾砂管道输送阻力的影响因素,并提出了适宜的管道输送参数。

由于细尾砂充填存在水泥胶结固化困难的问题,矿渣基新型胶凝材料的开发和应用逐渐受到重视。陈贤树等[13]探讨了固废基胶凝材料在黄金尾矿胶结充填中的应用,得到了各固废的最优配比。Li 等[14]制备了碱激发胶凝材料,得到了实现最佳充填体强度与流动性所需的磷石膏、矿渣、碱掺量等配比。任碧琦等[15]针对水泥胶结超细尾砂充填体强度偏低的问题,研发了一种新型固废基胶凝材料,并探讨了其提高超细尾砂强度的机理。于永纯等[16]以云南某铜铅锌多金属矿山细粒全尾砂为研究对象,分析了不同矿渣微粉掺量对充填体早期及长龄期强度、充填料浆流动性及泌水率的影响规律。李平等[17]针对某黄金矿细尾砂早期固化困难的问题,研制了新型细尾砂早强胶固粉,并系统探究了充填体的强度增长特性。

上述研究所用细尾砂或超细尾砂大多为全尾砂,粒径范围相差较大,针对分级溢流细尾砂固化及料浆特性的研究仍较为匮乏。

基于此,本文以中矿溢流尾砂为研究对象,结合矿山超细尾砂固化试验,主要针对分级溢流细尾砂及水泥难以固化的超细全尾砂,研究探究了细尾砂的固化规律和充填料浆的关键性能,以此验证分级细尾砂充填技术的可行性。

1 膏体充填试验浓度的选择

合理的料浆浓度(本文研究所涉及的料浆浓度均为质量浓度)选择是矿山充填领域的重要研究方向之一,通常采用混凝土和易性测试塌落筒,通过测定充填料浆的塌落度确定膏体浓度。相关研究表明,料浆的塌落度超过 20 cm 可泵送,超过 25 cm 可满足自流输送要求[18]。

由于充填料浆的浓度较低且尾砂骨料粒径细小,采用 30 cm 高度的塌落筒检测料浆流动性时,存在装置体积过大、操作不便等问题。因此,本文采用体积较小的扩散桶代替塌落筒[19],通过测定料浆扩散度确定其合理浓度。试验所用扩散桶为内壁光滑无接缝的金属倒锥容器,其上口直径 36 mm,下口直径 60 mm,高度 60 mm。试验时,将制备好的料浆倒入扩散桶,提起桶体后,用直尺测量料浆铺展的直径,即为料浆扩散度。与塌落筒相比,该装置体积小、操作简便,适用于细粒充填料浆的流动性检测。

对照试验结果表明,小扩散筒的扩散度与塌落筒检测的塌落度高度相关。23～29 cm 的塌落度对应的扩散度范围为 7～16 cm,泌水率为 0.0%～6.0%。大量现场考察及试验结果表明,矿山实际充填的膏体或适合自流充填的似膏体的扩散度范围为 8.5～15 cm,该值相当于 25～28.5 cm 的塌落度和 1%～5%的泌水率。

2 中矿溢流尾砂充填试验研究

2.1 工程背景

中矿溢流是选厂对中矿矿浆进行脱水浓密时,由于生产能力、原矿品位成分变化等原因造成的溢流跑混现象[20],属于不正常的选矿运行事故,但在大多矿山屡有发生,部分矿山的跑混量甚至较为严重。

安徽某铁矿于 2005 年底投产,一期工程生产规模为 100 万 t/a,采用无底柱分段崩落采矿法开采。2018 年初完成 300 万 t/a 采选扩建设计,采用分段崩落嗣后充填采矿法开采,并于 2017 年建成投产一套直径为 18 m 的深锥浓密机高浓度制浆搅拌充填系统。原矿除铁矿品位较高外,还含有铜、硫等可回收的有用成分,选厂配套建设了铜、硫选矿系统。由于选厂扩建初期系统不完善,选铁后的中矿浆进行脱水浓密时,常常出现溢流跑混现象。该矿尾砂年产量为 122.31 万 t,中矿溢流跑混尾砂量为 12 万 t。因尾矿库已排满封闭,故提出利用现有充填系统,将中矿溢流尾砂充填至井下的方案。

2.2 跑混尾砂的密度与级配

根据《建筑砂浆基本性能试验方法标准》(JGJ/T 70—2009)[21]检测了中矿溢流跑混尾砂的真密度和堆积密度,并根据相关公式计算了其孔隙率,结果见表 1。由表 1 可知,跑混尾砂的松散密度较小,密实密度为 1.08 t/m^3,密实孔隙率高达 59.70%。

表 1 中矿溢流跑混尾砂物理性能

Table 1 Physical properties of middling overflow mixed tailings

真密度/(t/m³)	松散密度/(t/m³)	密实密度/(t/m³)	松散孔隙率/%	密实孔隙率/%
2.68	0.75	1.08	72.15	59.70

采用水筛法检验跑混尾砂样品的粒级级配,结果见表 2。激光衍射粒度分析仪的检测结果如图 1 所示。由表 2 和图 1 可知,−200 目细粒尾砂占比 97.3%,−400目颗粒尾砂占比 92.5%。两种不同检测方法得到的检测结果较为一致,表明溢流跑混尾砂粒度极细,−400 目细粒尾砂超过 90%。

表 2 溢流跑混尾砂的粒级级配结果

Table 2 Particle size distribution test results of overflow mixed tailings

筛孔目数/目	筛孔尺寸/mm	筛下百分比/%
100	0.150	98.9
200	0.075	97.3
300	0.048	93.4
400	0.037	92.5

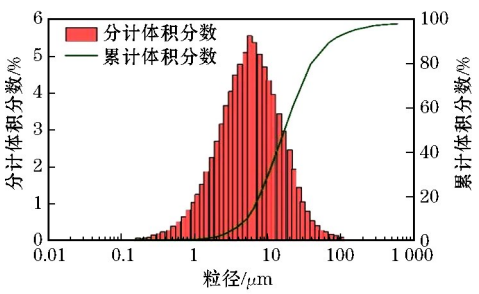


图 1 溢流跑混尾砂粒度分布

Fig.1 Particle size distribution of overflow mixed tailings

2.3 固化试验方案

由于水泥对该类超细尾砂固化效果较差,试验选用两种矿渣基胶固粉开展研究(除特别声明外,以下试验所用胶凝材料均为矿渣基胶固粉):一种是矿山自用的当地胶固粉,另一种是青岛理工大学研制的胶固粉 W4-6128,及在 W4-6128 中添加减水剂得到的改进型 W4-6128J。

灰砂比设计为 1∶4、1∶6 和 1∶8。料浆质量浓度根据扩散度 9 cm 左右确定,对应膏体的塌落高度约为 26 cm。

考虑到中矿溢流跑混尾砂与全尾砂混合充填的可行性,另外增设了跑混尾砂与全尾砂按 1∶4 的比例混合的混合料固化试验。

2.4 试验结果与分析

中矿溢流跑混尾砂固化试验结果见表 3,分析试验结果可得如下初步结论。

(1) 由于超细尾砂的堆积密度较小,而孔隙率过大,中矿跑混溢流细尾砂的膏体料浆质量浓度较低,约为 44%。

(2) 对比灰砂比和每立方米料浆的胶固粉用量可知,相对于一般全尾砂料浆,虽然中矿跑混尾砂浆的灰砂比较高,但胶固粉用量并未同步增大。

(3) 矿渣基胶固粉对超细尾砂的固化效果较好。当地胶固粉灰砂比 1∶4、胶固粉用量 120 kg/m³ 时,充填体 28 d 强度约 1.76 MPa;灰砂比 1∶8,胶固粉用量 68.5 kg/m³ 时,充填体 28 d 强度也有 0.84 MPa。

(4) 固化强度与胶固粉性能有关,在相同灰砂比条件下(1∶4),使用 W4-6128 胶固粉的试块其 28 d 强度达到 2.27 MPa,比使用当地胶固粉的试块的强度提高约 28.98%。

(5) 减水剂有利于提高超细尾砂的浓度和固化强度。使用添加了减水剂的改进型胶固粉 W4-6128J 时,在同样流动性指标下,料浆质量浓度从 44%提高至 46%,28 d 强度由 2.27 MPa 提高至 2.64 MPa。

(6) 跑混尾砂与全尾砂按 1∶4 比例混合充填时,固化效果显著提升。使用当地胶固粉,料浆质量浓度从 43%提高至 62%,灰砂比为 1∶6 时,充填体 28 d 强度达到 2.98 MPa。

表 3 中矿溢流跑混尾砂固化试验结果

Table 3 Solidification test results of middling overflow mixed tailings

胶固粉	灰砂比	跑混尾砂∶全尾砂	质量浓度/%	泌水率/%	扩散度/cm	容重/(g/cm³)	强度值/MPa			胶固粉用量/(kg/m³)
							3 d	7 d	28 d	
W4-6128	1∶4	1∶0	44	1.5	9	1.44	0.19	0.38	2.27	120
	1∶8	1∶0	44	1.6	9	1.45	0.04	0.22	1.24	68.5
W4-6128J	1∶4	1∶0	46	1.3	8.5	1.49	0.26	0.69	2.64	125
当地胶固粉	1∶4	1∶0	43	1.1	9	1.41	0.80	1.00	1.76	120
	1∶6	1∶0	43	1.2	9	1.42	0.45	0.74	1.36	87
	1∶8	1∶0	43	1.1	9	1.42	0.26	0.42	0.84	68.5
	1∶6	1∶4	62	1.2	8.5	1.68	1.35	1.62	2.98	—
	1∶8	1∶4	62	1.4	9	1.69	0.95	1.27	2.11	—

3 铁矿全尾砂充填试验研究

3.1 全尾砂粒度筛分

我国大部分铁矿山采用全尾砂充填工艺,但全尾砂的粒度因矿种和选矿工艺不同而存在较大差异。本节以安徽某铁矿、山东莱芜矿业、河北沙河中关铁矿 3 座全尾砂充填矿山为例,对其相关试验检测结果进行分析。

采用水筛法对上述 3 座矿山全尾砂进行级配筛分,结果见表 4。由表 4 可知,沙河中关铁矿尾砂料度最细,-400 目粒级占比达到 66.5%,莱芜矿业全尾砂的粒度相对较粗,-400 目粒级占比达到 51%;安徽某铁矿全尾砂的粒度最粗,100 目以上粒级占比近 30%,-400 目粒级占比达到 37.1%。

表 4 3 座铁矿全尾砂的粒度级配筛分结果

Table 4 Particle size grading screening results of unclassified tailings in three iron mines

筛孔目数/目	筛孔尺寸/mm	筛下百分比/%		
		安徽某铁矿	莱芜矿业	沙河中关铁矿
100	0.150	70.3	85.8	93.5
200	0.075	53.6	76.6	80.9
300	0.048	41.6	58.2	69.6
400	0.037	37.1	51.0	66.5

3.2 固化试验结果与讨论

上述 3 座矿山的部分配比方案与试验结果见表 5,表中以 WTC 打头的胶凝材料为青岛理工大学自研胶固粉。安徽某铁矿全尾砂充填料浆的扩散度现场检验状态如图 2 所示。

表 5 3 座铁矿山部分全尾砂固化试验结果

Table 5 Partial solidification test results of unclassified tailings in three iron mines

矿山名称	胶凝材料	灰砂比	质量浓度/%	泌水率/%	扩散度/cm	容重/(g/cm³)	强度值/MPa			胶固粉用量/(kg/m³)
							3 d	7 d	28 d	
安徽某铁矿	当地胶固粉	1∶8	67	1.8	9	1.85	1.69	2.81	3.47	124.0
		1∶8	65	4.6	12	1.75	0.89	1.65	3.17	119.4
		1∶8	63	8.1	14	1.75	0.82	1.50	2.84	113.3
		1∶10	67	1.8	9	1.86	1.34	2.01	2.98	101.0
		1∶12	67	2.0	9.5	1.86	0.82	1.47	2.38	92.3
莱芜矿业	WTC4-5	1∶4	56	4.5	10	1.61	0.74	1.81	5.10	172.4
	当地胶固粉	1∶4	57	6.4	9.0	1.61	0.34	0.84	2.82	172.4
沙河中关铁矿	WTC	1∶4	56	—	10	1.59	0.84	1.84	5.04	—
		1∶4	58	—	8.0	1.62	0.93	2.01	5.67	—



图 2 全尾砂自流充填料浆状态

Fig.2 The state of unclassified tailings gravity filling slurry

由图 2 中料浆的扩散度状态和实测扩散度可见,安徽某铁矿全尾砂充填料浆已达到标准膏体浓度。该矿采用自流充填技术,充填倍线 3.5～4.5,在该倍线范围内,膏体或似膏体浓度料浆可实现稳定自流输送,无需采用泵送技术。

受粒级差异,特别是-400 目细粒占比的影响,不同铁矿的全尾砂膏体浓度差异较大。安徽某铁矿全尾砂膏体质量浓度约为 67%,莱芜矿业和沙河中关铁矿全尾砂膏体质量浓度约为 57%。

浓度对固化强度影响显著,特别对早期强度影响较大。在灰砂比为 1∶8 的条件下,安徽某铁矿全尾砂料浆的质量浓度从 63%提高到 67%时,3 d、7 d、28 d 强度分别提高了 106.1%、87.3%和 22.2%。

在相同的扩散度下,由于料浆的固化强度基本与胶固粉用量成正比[19],根据全尾砂灰砂比 1∶8、1∶10 的试验结果可推断,料浆的胶固粉用量为 120 kg/m³ 时,固化强度约为 3.38 MPa。结合表 3 分析认为,在相同的膏体扩散度和胶凝材料用量条件下(灰砂比 1∶4),中矿溢流超细尾砂的 28 d 强度比全尾砂下降 32.8%。

莱芜矿业的对照试验表明,不同类型的矿渣胶固粉不仅影响到固化强度,还对泌水率和流动性有影响。

4 黄金矿山分级溢流细尾砂试验研究

黄金矿山的尾砂产率超过 90%,长期以来主要

采用分级粗尾砂充填,剩余近一半的溢流细尾砂如何处置一直是行业内的长期难题[22]。本节以山东招远市的河东金矿、灵山金矿、焦家金矿和福建鑫源矿业4座矿山为例,分析溢流尾砂的固化试验结果。

4.1 分级溢流尾砂的粒度

福建鑫源矿业溢流细尾砂－400目细粒占97.85%,仅分析河东金矿、灵山金矿、焦家金矿3座矿山的分级溢流细尾砂的筛分结果,见表6。

对比可知,4座黄金矿山的溢流细尾砂的粒度相差较大,福建鑫源矿业的溢流尾砂最细,基本小于400目;其次是灵山金矿,－400目超过90%;河东金矿的溢流尾砂稍粗,－400目占75.1%;焦家金矿的溢流尾砂较粗,＋100目粒级占比21.1%,－400目粒级占比44.8%,中位粒径约0.048 mm,整体粒级大于莱芜矿业全尾砂(d_{50}约0.037 mm)。

表6 分级溢流细尾砂的粒度筛分结果

Table 6 Particle size screeing results of classified overflow fine tailings

筛孔目数/目	筛孔尺寸/mm	筛下百分比/%		
		河东金矿	灵山金矿	焦家金矿
100	0.150	99.55	99.2	78.9
200	0.075	95.95	97.5	64.4
300	0.048	79.9	95.3	49.0
400	0.037	75.1	90.5	44.8

4.2 固化试验结果与讨论

以上4座黄金矿山分级溢流细尾砂的固化试验结果见表7,结果分析如下。

表7 4座黄金矿山分级溢流细尾砂固化试验结果

Table 7 Solidification test results of classified overflow fine tailings in four gold mines

矿山名称	胶凝材料	灰砂比	质量浓度/%	扩散度/cm	容重/(g/cm³)	泌水率/%	强度值/MPa			胶固粉用量/(kg/m³)
							3 d	7 d	28 d	
河东金矿	WTC4-4	1∶4	63	8.5	1.66	1.8	2.50	3.92	5.97	194.2
		1∶4	61	12.0	1.64	3.3	1.51	2.31	3.75	186.0
	当地胶固粉	1∶4	63	9.0	1.73	3.0	1.42	2.19	4.37	—
鑫源矿业	WTC4-6	1∶4	50	8.5	1.55	1.0	1.03	2.23	3.17	145.0
灵山金矿	WTC4-6	1∶4	49	13.0	1.50	4.9	1.01	1.82	3.29	137.9
	42.5水泥	1∶4	49	12.5	1.50	4.9	0.27	0.51	0.84	137.9
焦家金矿	WTC4-6	1∶6	64	9.5	1.70	3.1	2.34	3.63	4.56	142.4
		1∶8	64	9.5	1.71	2.8	1.59	3.05	3.98	111.9

同为溢流细尾砂,相同料浆扩散度(8.5 cm)下,料浆浓度相差较大,鑫源矿业料浆浓度为50%,河东金矿料浆浓度则达到63%。焦家金矿料浆扩散度为9.5 cm浓度达到了64%,接近安徽某铁矿全尾砂的浓度。

将河东金矿溢流尾砂与莱芜矿业全尾砂、鑫源矿业分级溢流尾砂与安徽某铁矿中矿跑混尾砂的－400目细粒和料浆浓度进行两两对比,结果表明,料浆浓度并未随－400目细粒含量的增加而降低,反而有所提高。这表明超细尾料浆浓度并非仅由－400目粒级占比决定,还可能受更细的粒级分布和含量占比等因素的共同影响。

矿渣基胶凝材料完全可以解决分级溢流细尾砂的固化问题。以鑫源矿业－400目细粒尾砂达到98%的分级溢流尾砂为例,胶固粉用量为145 kg/m³时,7 d、28 d强度达到了2.23 MPa和3.17 MPa。灵山金矿溢流尾砂固化试验数据对比表明,水泥固化强度低,无法用于细尾砂胶结充填。

此外,超细尾砂的固化强度对浓度变化十分敏感,河东金矿溢流尾砂浓度从63%降至61%,仅降低2个百分点,7 d、28 d强度分别下降41%和37%。

5 工程应用与分析

上述试验结果表明,细尾砂胶结充填的关键在于应用高性能矿渣胶固粉,同时采用膏体或高浓度充填技术,几个典型矿山应用情况如下。

(1) 安徽某铁矿。该矿采用深锥浓密机脱水、二级搅拌制浆,以及自流方式输送,具备膏体制浆能力,在4.5倍充填倍线条件下,自流输送似膏体浓度达到65%。由于采用了高性能矿渣胶固粉,一步骤矿房充填灰砂比从最初的1∶6逐步下调到1∶10。胶固粉单耗约100 kg/m³,充填体28 d强度超过2.0 MPa。由于深锥浓密机脱水能力较强,胶固粉性能较好,根据2.4小节试验结果,将中矿溢流尾砂导入深锥浓密机,通过与全尾砂混合脱水浓密,顺利实现了井下充填作业。

(2) 莱芜矿业。莱芜矿业采用下向进路胶结充填采矿法,要求打底充填体 28 d 强度超过 3.5 MPa,采用无动力深锥浓密机脱水制浆与泵送膏体充填工艺。由于莱芜矿业全尾砂很细,普通水泥和矿渣胶固粉难以满足要求,采用高性能胶固粉后,很好地解决了全尾砂充填强度要求问题。

(3) 沙河中关铁矿。沙河中关铁矿的全尾砂和莱芜矿业的全尾砂在性质上相似,膏体浓度约 57%,采用空场嗣后充填采矿法开采,充填体 28 d 强度不小于 2.5 MPa 即可。受立式砂仓制浆局限和胶固粉性能不佳等因素影响,出现了充填体离析分层和强度不达标等问题,后来采用旋流器分级脱泥工艺,以较粗尾砂充填为主的优化方案[23],较好地解决了上述问题。

(4) 鑫源矿业。鑫源矿业的分级溢流超细尾砂粒度极细,4.2 小节试验表明,该矿采用高性能胶固粉固结超细尾砂对老空区进行充填处理完全可行。但因当地没有高性能胶固粉,采用普通水泥胶结,后续发现几乎无法实现尾砂固化,因此在后期生产中不再采用溢流细尾砂充填,转而沿用传统的粗尾砂充填。

6 结论

(1) 超细尾砂的孔隙率高、堆积密度小,制备出的膏体料浆浓度较低。膏体浓度不能仅通过-400 目粒度占比判定,还可能与更细粒级分布和级配有关。

(2) 高性能碱激发矿渣基胶凝材料可有效解决超细尾砂(甚至是-400 目粒度占比超过 90%的尾砂)固化和强度的问题。但矿渣基胶固粉性能差异大,应通过试验比较后选择使用。因尾砂细度和级配差异,对应膏体浓度和相同强度要求下的灰砂比相差较大,因此,胶凝材料的性能不能仅通过灰砂比来衡量,料浆的单位体积胶固粉用量是比较科学、可靠的评价指标。

(3) 分级溢流尾砂细度因矿种不同而存在较大差异,部分黄金矿山的分级溢流细尾砂的细度甚至高于铁矿全尾砂。在相同的胶固粉用量下,虽然分级细尾砂的灰砂比较高,但强度损失较小,充填成本增幅不大。

(4) 料浆质量浓度对超细尾砂的固化强度(特别是早期强度)影响显著,建议采用膏体或似膏体浓度进行充填。在 3.5~4.0 充填倍线下,超细尾砂充填料浆可实现自流输送,无需泵送。

参考文献(References):

[1] 费玲云,邹伟民,周美彦,等.尾矿资源化利用现状及生态化利用研究进展[J].能源环境保护,2025,39(4):48-60.
Fei Lingyun, Zou Weimin, Zhou Meiyan, et al. Current status of tailings resource utilization and research progress on ecological utilization [J]. Energy Environmental Protection,2025,39(4):48-60.

[2] 李山梅,刘霄倩,李树臣.中国大宗工业固体废物综合利用产业发展报告(2020—2021 年度)[R].2026-03-29.https://cbm.com.cn/uploads/allimg/20250514/1-250514155649209.pdf.
Li Shanmei, Liu Xiaoqian, Li Shuchen. Research report on comprehensive utilization industry of bulk industrial solid wastes in 2025 [R]. 2026-03-29. https://cbm. com. cn/uploads/allimg/20250514/1-250514155649209.pdf.

[3] 杨昌龙,王海龙,林敏,等.龙桥铁矿无尾矿山建设的可行性试验研究[J].现代矿业,2021,37(9):98-100.
Yang Changlong, Wang Hailong, Lin Min, et al. Experimental study on feasibility of tailingless mine construction in Longqiao Iron Mine[J]. Modern Mining, 2021,37(9):98-100.

[4] 寇云鹏,郭沫川,谭玉叶,等.分级细尾砂胶结充填体早期水化放热及强度演化特性[J].工程科学学报,2023,45(8):1293-1303.
Kou Yunpeng, Guo Mochuan, Tan Yuye, et al. Early hydration heat release and strength evolution of cemented backfill with graded fine tailings[J]. Chinese Journal of Engineering,2023,45(8):1293-1303.

[5] 胡松涛,朱庚杰,张军童,等.胶东地区黄金矿山细尾砂胶结充填应用研究[J].黄金科学技术,2024,32(3):425-436.
Hu Songtao, Zhu Gengjie, Zhang Juntong, et al. Application research on cemented fine tailings backfill of gold mines in the Jiaodong area[J]. Gold Science and Technology,2024,32(3):425-436.

[6] Chen X, Shi X Z, Zhou J, et al. Effect of overflow tailings properties on cemented paste backfill [J]. Journal of Environmental Management,2019,235:133-144.

[7] Wang X Q, Wan W, Yao Z L, et al. Study on strength characteristics and thickening characteristics of classified-fine cemented backfill in gold mine[J]. Scientific Reports, 2023,13(1):8361.

[8] 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,2021,29(2):256-265.
Huang Rendong, Li Zhe. Study on the strength of fine tailings-graded tailings packing body based on orthogonal test[J]. Gold Science and Technology,2021,29(2):256-265.

[9] 张雷,郭利杰,许文远,等.细尾砂在矿山充填应用中关键工艺与材料的研究进展[J].材料导报,2023,37(23):106-116.
Zhang Lei, Guo Lijie, Xu Wenyuan, et al. Research on crucial technological and material issues of applying fine tailings to mine filling: a review[J]. Materials Reports, 2023,37(23):106-116.

[10] 郑伯坤,段单峰,吕伟鹏.超细尾砂充填料浆均质化搅拌参数优化研究[J].黄金,2025,46(6):7-11.
Zheng Bokun, Duan Danfeng, Lyu Weipeng. Optimization of mixing parameters for homogenization of ultrafine tailings filling slurry[J]. Gold,2025,46(6):7-11.

[11] 孔翔生,王朝隆,刘毓,等.高浓度超细尾砂泵送充填智能调压控制系统[J].有色金属工程,2024,14(9):130-137.
Kong Xiangsheng, Wang Chaolong, Liu Yu, et al. Intelligent pressure regulating control system for pumping and filling high concentration ultrafine tailing [J]. Nonferrous Metals Engineering,2024,14(9):130-137.

[12] 王丽红,姚银佩.超细尾砂料浆管道输送阻力影响因素研究及寻优分析[J].矿冶工程,2025,45(6):47-54.
Wang Lihong, Yao Yinpei. Influencing factors and optimization analysis of resistance in pipeline transportation of ultra-fine tailings slurry[J]. Mining and Metallurgical Engineering,2025,45(6):47-54.

[13] 陈贤树,李桦,陈原望,等.固废基胶凝材料在黄金尾矿胶结充填中的研究与应用[J].新型建筑材料,2024,51(6):105-109.
Chen Xianshu, Li Hua, Chen Yuanwang, et al. Research and application of solid waste based cementitious materials in gold tailings cemented filling[J]. New Building Materials, 2024,51(6):105-109.

[14] Li B T, Liu Z R, Sun Q, et al. Preparation of alkali-activated nickel slag-based cemented tailings backfill: workability, strength characteristics, localized deformation and hydration mechanism[J]. Construction and Building Materials,2024,411:134639.

[15] 任碧琦,万小军,向俊宸,等.新型固废基胶结超细尾砂充填体的强度机理研究[J].金属矿山,2025(8):281-288.
Ren Biqi, Wan Xiaojun, Xiang Junchen, et al. Strength mechanism study of a novel solid waste-based binder for cementing ultra-fine tailings backfill[J]. Metal Mine,2025 (8):281-288.

[16] 于永纯,张雷,汪海峰,等.矿渣微粉对细尾砂胶结充填体力学性能及微观结构影响[J].中国矿业,2022,31(10):145-151.
Yu Yongchun, Zhang Lei, Wang Haifeng, et al. Effect of slag powder on mechanical properties and microstructure of fine tailings cemented backfill[J]. China Mining Magazine, 2022,31(10):145-151.

[17] 李平,庞建涛,凡杰,等.细尾砂胶结充填体强度增长特性研究[J].科技与创新,2026(1):113-115.
Li Ping, Pang Jiantao, Fan Jie, et al. Study on strength growth characteristics of fine tailings cemented backfill[J]. Science and Technology and Innovation,2026(1):113-115.

[18] 滑怀田,王清亚.不同因素对超细尾砂胶结充填料流动性、强度和微观结构的影响[J].有色金属科学与工程,2023,14(5):676-683+699.
Hua Huaitian, Wang Qingya. Effects of different factors on the fluidity, strength and microstructure of superfine tailings cemented paste backfill [J]. Nonferrous Metals Science and Engineering,2023,14(5):676-683+699.

[19] 王谦源,王海龙,任晓云.高浓度充填时合理浓度确定与简单检测方法[J].矿业研究与开发,2018,38(3):132-135.
Wang Qianyuan, Wang Hailong, Ren Xiaoyun. Reasonable concentration determination and simple detection method under high concentration filling[J]. Mining Research and Development,2018,38(3):132-135.

[20] 江河海.选矿厂溢流"跑浑"原因分析及对策[J].湖南有色金属,1992(5):277-279+288.
Jiang Hehai. Cause analysis and countermeasures of overflow muddiness in concentrator[J]. Hunan Nonferrous Metals,1992(5):277-279+288.

[21] JGJ/T 70—2009 建筑砂浆基本性能试验方法标准[S].

[22] 孟文文,李鹏.黄金行业尾矿处置政策与综合利用实践[J].黄金科学技术,2023,31(6):1023-1034.
Meng Wenwen, Li Peng. Disposal policy and comprehensive utilization practice in gold industry[J]. Gold Science and Technology,2023,31(6):1023-1034.

[23] 杨金光,刘云龙,廖志强,等.铁矿山超细尾砂分级充填工艺优化[J].河北冶金,2025(9):59-63.
Yang Jinguang, Liu Yunlong, Liao Zhiqiang, et al. Optimization of key parameters of deep hole blasting in fractured skarn[J].Hebei Metallurgy,2025(9):59-63.