doi:10.3969/j.issn.1671-4172.2022.05.005

国内某铁矿充填工艺技术优化

彭志华[1],陈鑫政[2,3],郭利杰[2,3],赵 越[2,3],杨 超[2,3]

(1. 云南富宁县博奥矿业有限公司,云南 富宁 663400;
2. 矿冶科技集团有限公司,北京 100160;
3. 国家金属矿绿色开采国际联合研究中心,北京 102628)

摘 要:为解决国内某矿山充填工艺系统堵管事故频发和充填体质量差等问题,提出优化充填骨料级配和管线敷设的技术思路,并开展试验研究和现场应用验证。结果表明:分级粗尾砂和细尾砂的最佳混合比例为5∶5~6∶4,质量浓度74%~78%的充填料浆可实现自流输送,分级细尾砂浓缩最佳进料浓度为8%~10%,絮凝剂添加量为10~15 g/t,底流高度可达到56% ~ 60%。通过优化充填管线敷设,充填管线减少485 m,平均充填倍线由6.4降至4.5,矿山应用验证优化后的充填骨料和充填管线,保障了充填工艺参数的稳定性,提高了充填体质量,实现了矿山高效稳定充填。

关键词:分级粗尾砂;分级细尾砂;絮凝沉降;管线优化;自流输送

中图分类号:TD853.34 **文献标志码**:A **文章编号**:1671-4172(2022)05-0025-06

Optimization of backfilling technology in a domestic iron mine

PENG Zhihua[1],CHEN Xinzheng[2,3],GUO Lijie[2,3],ZHAO Yue[2,3],YANG Chao[2,3]

(1. Yunnan Funing Boao Mining Co.,Ltd.,Funing Yunnan 663400,China;
2. BGRIMM Technology Group,Beijing 100160,China;
3. National Centre for International Research on Green Metal Mining,Beijing 102628,China)

Abstract:To solve the problems of frequent pipe blockage accidents and poor quality of the backfill in a domestic mine,a technical idea for optimizing the filling tailings particle size distribution and pipeline laying was proposed,and experiments and field application verification ascarried out. The results show that the optimal mixing ratio of classified coarse tailings and fine tailings is between 5∶5 and 6∶4,and the filling slurry with a mass concentration of 74% to 78% can realize gravity transportation. To achieve an efficient concentration of classified fine tailings,the best feed slurry concentration is 8%－10%,the amount of flocculant added is 10－15 g/t,and the underflow concentration can reach 56%－60%. By optimizing the laying of the filling pipeline,the filling pipeline is reduced by 485 meters,and the average filling multiplier is reduced from 6.4 to 4.5. The optimized filling tailings and pipeline laying were used in the mine application verification,which ensured the stability of the backfilling parameters and improved the quality of the backfill,and achieved efficient and stable mine filling.

Key words:classified coarse tailings;classified fine tailings;flocculation sedimentation;pipeline optimization;gravity transportation

收稿日期:2022-06-14
基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFE0102900);国家自然科学基金资助项目(52104131);矿冶集团青年创新基金项目(04-1926)
作者简介:彭志华(1963—),男,高级工程师,主要从事采矿及充填工艺研究与生产管理工作。
通信作者:郭利杰(1980—),男,博士,教授级高级工程师,主要从事矿山充填技术与矿冶固废资源化利用方面的研究。

充填采矿法因其安全、环保等特点,已成为国内地下金属矿山开采的首选采矿方法。充填工艺技术直接影响充填采矿法的开采效率和开采成本[1-3]。充填骨料的级配对充填料浆的和易性和充填体的质量具有较大影响,充填料浆的离析会降低充填体质量[4-5]。对于采用全尾砂等细粒级

骨料,其沉降浓缩方式和浓缩效率是充填工艺技术的关键[6-10]。为解决国内某铁矿充填工艺系统存在堵管事故频发和充填体质量差等问题,本文通过开展充填材料的物化参数测试,流动性、泌水率和抗压强度等一系列试验,对矿山充填工艺参数进行优化以及充填管线进行设计,以期实现矿山稳定高效充填,实现最大的经济效益与社会效益,确保企业可持续发展。

1 矿山充填工艺现状

那纳铁矿山位于云南省文山州富宁县,矿石品位约 48.78%,属于国内少有的高品位铁矿,采用上向进路式充填采矿法开采。矿山目前采用分级粗尾砂胶结充填工艺,充填骨料采用经捞砂机分级后的粗尾砂,胶凝材料为当地生产的 P.O 42.5 水泥,充填管道采用 DN150 的无缝钢管,充填流量为 60 m^3/h。

由于分级粗尾砂颗粒较粗、地表充填管线起伏较大,井下管线布置不合理等问题,导致矿山充填过程中频繁出现堵管等事故,同时井下充填体存在明显的分层离析现象,使矿山充填系统一直无法稳定连续充填,且井下充填体质量差,影响了矿山的生产,也给矿石回采带来一定的安全隐患。

2 充填试验研究

2.1 充填材料

试验材料取自那纳铁矿选矿厂,包括全尾砂、分级粗尾砂和分级细尾砂,根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999)测得全尾砂的相对密度为 2.937 g/cm^3,其化学成分分析结果见图 1,结果表明全尾砂中 SiO_2、Al_2O_3 及 CaO 含量较高,有利于充填体强度增长。分级粗尾砂和分级细尾砂是全尾砂经捞砂机分级的产物,其物化性质与全尾砂相同。

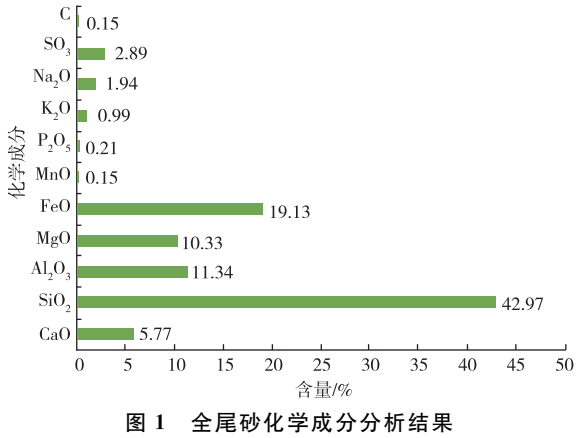


图 1 全尾砂化学成分分析结果

Fig. 1 Analysis results of chemical composition of the unclassified tailings

采用振动筛析法和激光粒度分析仪测得全尾砂、分级粗尾砂和分级细尾砂的颗粒粒径分布结果见图 2 和表 1。结果表明全尾砂的不均匀系数为 7.14,曲率系数为 0.7(d_{10}=7 μm,d_{30}=50 μm,d_{60}=250 μm),属于颗粒不连续分布不均匀的全尾砂;分级细尾砂的不均匀系数为 24,曲率系数为 1.5(d_{10}=2.5 μm,d_{30}=10 μm,d_{60}=60 μm),属于颗粒连续分布不均匀的极细尾砂;分级粗尾砂−38 μm颗粒占比为 7.64%,+125 μm 颗粒占比为 87.97%,属于相对较粗尾砂。

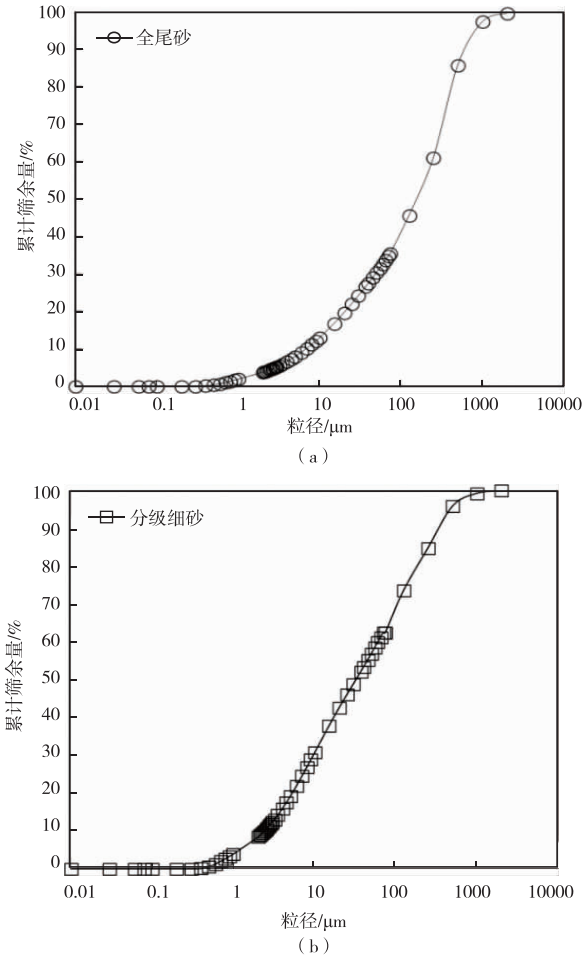


图 2 全尾砂和分级细尾砂粒径分布曲线

Fig. 2 Particle size distribution of the unclassified tailings and classified fine tailings

根据粒径分布测试结果,全尾砂的粗细颗粒分明,级配较差,不能直接用于矿山充填,而经捞砂机分级后的粗尾砂颗粒相对较粗,单独用于充填制备的充填料浆分层离析严重。为此,提出在分级粗尾砂中加入一定比例的细尾砂改善尾砂整体级配组

成,用于改善料浆的流动性能和均和性,制备出质量较优的膏体料浆,从而解决充填料浆分层离析现象,提高充填体质量。

表 1　分级粗尾砂粒径分布

Table 1　Particle size distribution of the classified coarse tailings

粒径/μm	分计/%	累计/%
0～－15	5.24	5.24
＋15～－38	2.40	7.64
＋38～－74	1.19	8.83
＋74～－125	3.19	12.02
＋125	87.98	100.0

2.2　分级细尾砂沉降试验

经捞砂机分级后的细微砂浆浓度低,需经沉降浓缩制成高浓度的尾砂浆才可以用于充填,为此开展分级细尾砂的沉降试验,试验过程如图 3 所示。

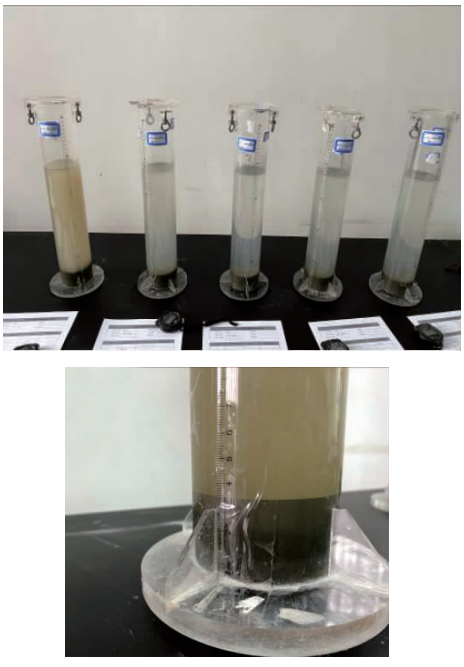


图 3　分级细尾砂絮凝沉降试验过程

Fig. 3　The process of flocculation sedimentation test of classified fine tailings

通过开展分级细尾砂的自然沉降试验和絮凝沉降试验,确定分级细尾砂的最佳絮凝剂型号为爱森 6013S 系列,最佳进料浓度为 8% ～ 10%,絮凝剂添加量为 10 ～15 g/t。当进料浓度为 10%、絮凝剂添加量为 15 g/t 时,分级细尾砂的固体通量为 4.29 t/(h·m^2),底流浓度可达到 58%,试验结果如图 4 所示。

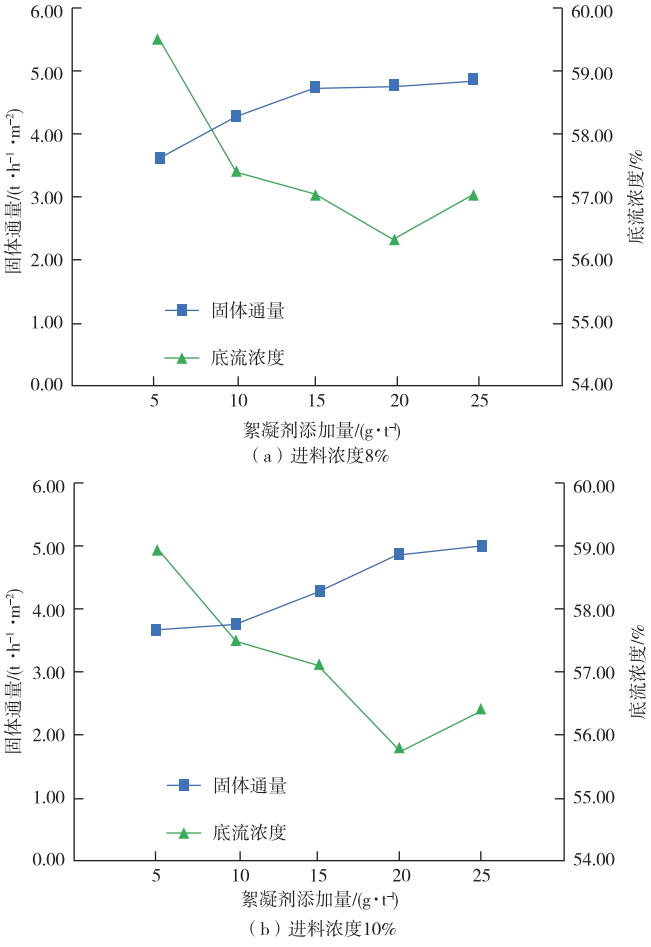
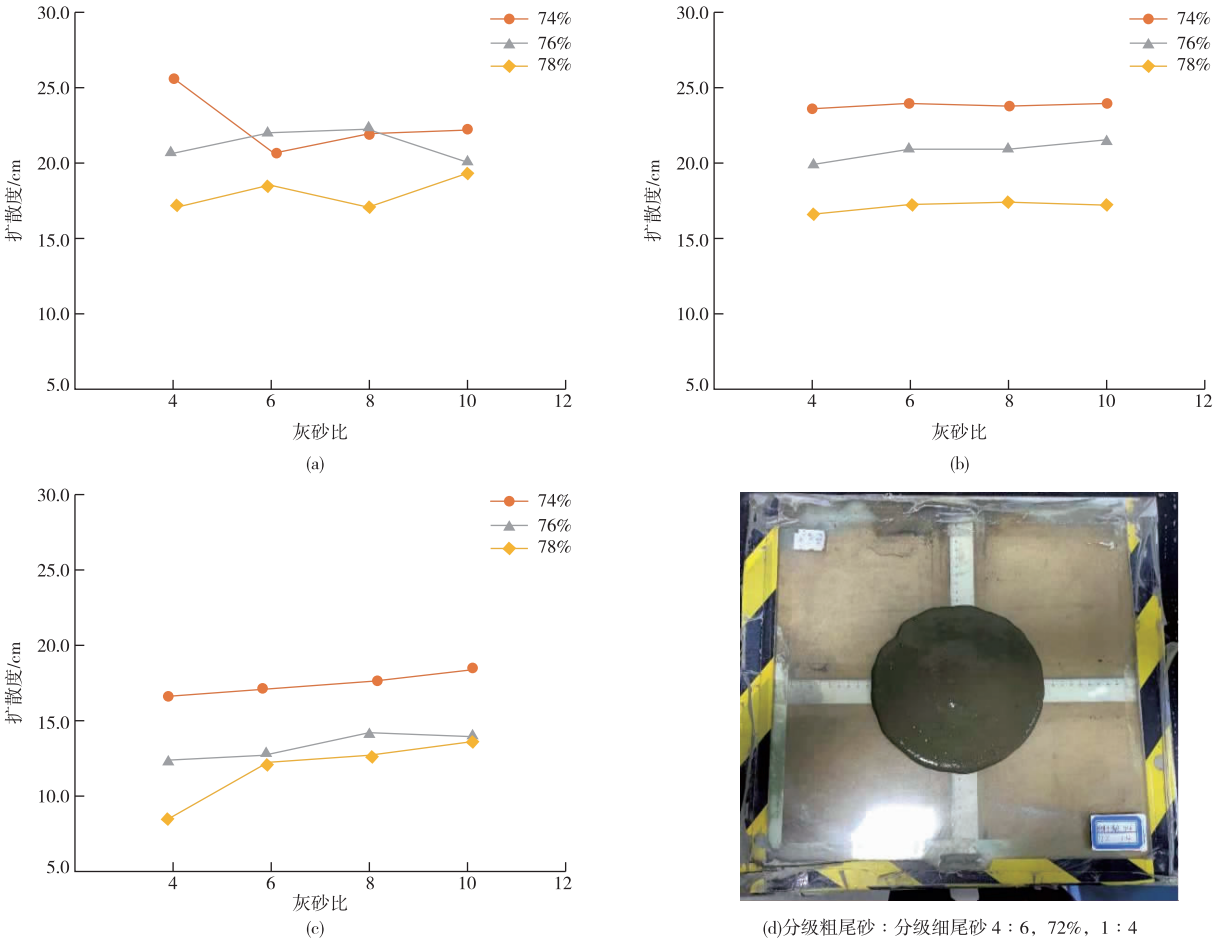


图 4　分级尾砂絮凝沉降试验结果

Fig. 4　Results of flocculation sedimentation test of classified tailings

2.3　流动性测试

充填料浆的流动性直接影响充填料浆的输送方式,通过采用小型坍落度筒测试充填料浆的扩散度[11-13],扩散度越大表明其流动性越好,反之则表明流动性越差,通常充填料浆较佳的扩散度范围为 12～20 cm。设计粗、细尾砂比例为 6∶4、5∶5和 4∶6三种类型、充填料浆质量浓度为 74%～78%,灰砂比为 1∶4～1∶10,试验结果见图 5。结果表明质量浓度对充填料浆的扩散度影响显著,随质量浓度的增加,扩散度逐渐变小;灰砂比对充填料浆的扩散度影响较小。根据扩散度试验结果,当粗、细尾砂比例为 6∶4 时,输送浓度不宜高于 78%;当粗、细尾砂比例为 5∶5 时,输送浓度不宜高于 76%;当粗、细尾砂比例为 4∶6 时,输送浓度不宜高于 76%。



（分级粗尾砂/分级细尾砂：a 6：4，b 5：5，c 4：6）

图 5 充填料浆扩散度试验结果

Fig. 5 Results of spread test of backfilling slurry

2.4 充填配比试验

根据充填料浆流变试验结果，选择粗细尾砂比例为 5：5 和 4：6 两种骨料类型，制备质量浓度为 74%～78%，灰砂比为 1：4～1：10 的充填试块，分别测试其 7 和 28 d 单轴抗压强度，试验结果如表 2 所示。试验结果表明粗细尾砂比例为 5：5～4：6，相同灰砂比充填试块的单轴抗压强度相差不大，且随着质量浓度和灰砂比的增加，单轴抗压强度逐渐增加。

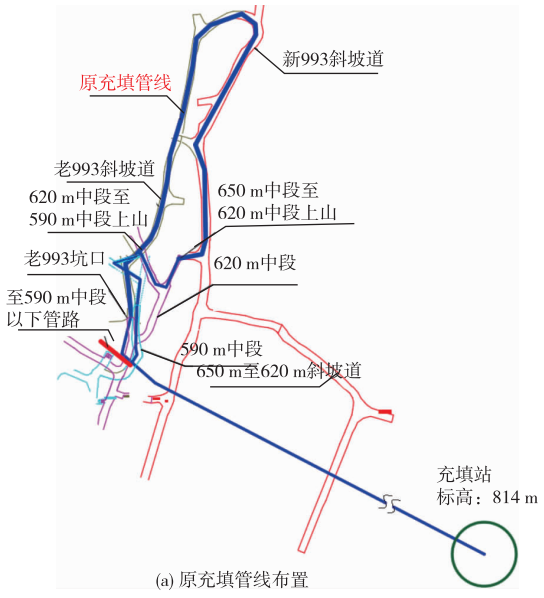
表 2 充填试块抗压强度测试结果

Table 2 UCS test results of backfill blocks

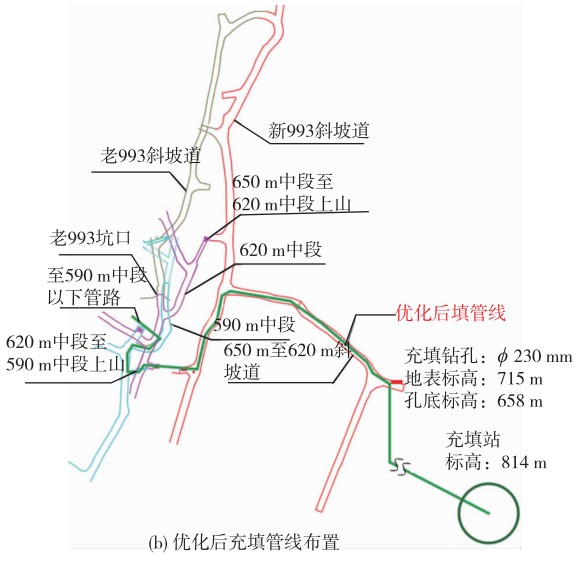
浓度/%	灰砂比	单轴抗压强度/MPa			
		粗细尾砂比 5：5		粗细尾砂比 4：6	
		7 d	28 d	7 d	28 d
74	1：4	1.59	4.38	1.44	4.02
	1：6	0.83	2.7	0.65	2.09
	1：8	0.44	1.35	0.44	1.40
	1：10	0.32	0.87	0.29	0.75
76	1：4	1.40	5.29	2.03	6.68
	1：6	0.92	3.09	0.97	3.23
	1：8	0.53	2.14	0.54	2.17
	1：10	0.41	1.26	0.36	1.11
78	1：4	2.47	6.27	2.66	6.54
	1：6	1.20	3.76	1.12	3.35
	1：8	0.69	2.44	0.72	2.32
	1：10	0.46	1.76	0.48	1.69

3　充填管线优化

通过现场调研,矿山目前充填管线布置如图 6(a)所示。自充填站(标高+814 m)通过山体自然地形铺设至+993 m 坑口,然后通过+993 m 斜坡道进行铺设,最后在+650 m 标高处通过斜上山进入+620 m 中段,然后通过上山敷设至+565 m 中段。经计算,自充填站至+565 m 中段,目前充填管线总长度为 1 341 m,平均充填倍线约 6.4,且充填管路存在多处拐弯,转弯角度小,现有充填管线局部损失多,不利于充填料浆管道输送,容易引起堵管事故。



(a) 原充填管线布置



(b) 优化后充填管线布置

图 6　充填管线优化前后布置

Fig. 6　Layout comparison of filling pipeline before and after optimization

为优化充填管线布置,充分利用矿山已有工程,提出利用 1＃透气钻孔作为充填钻孔的方案,充填管线自充填站经 1＃透气钻孔输送至+650 m 硐室,然后通过斜坡道输送至 620 m 中段,再通过 620 m中段至 590 m 中段通风天井输送至 590 m 中段,利用原管线经上山铺设至 56 m 中段,具体铺设方案如图 6(b)所示。经计算,经过优化管线布置,总管线长度减少 485 m,平均充填倍线为 4.5,且管线拐弯少,能够实现充填料浆自流输送。

4　充填工艺优化效果

通过充填试验研究和充填管线优化,确定充填骨料采用在分级粗尾砂中加入分级细尾砂的混合尾砂,其中粗细尾砂比例在 5∶5～4∶6。具体充填工艺流程为:选厂全尾砂经捞砂机分级,其中分级粗尾砂进入皮带输送机进入充填站堆场备用,分级细尾砂进入浓缩设备进行沉降浓缩,底流浓度达到 50%以上。分级粗尾砂经铲车运输至尾砂给料机,然后经皮带计量输送至一级搅拌机,同时经浓缩的分级细尾砂通过泵输送至一级搅拌机,与水泥加水搅拌均匀后进入二级搅拌机再次搅拌,最后搅拌均匀合格的膏体充填料浆自流至井下充填采场,如图 7 所示。

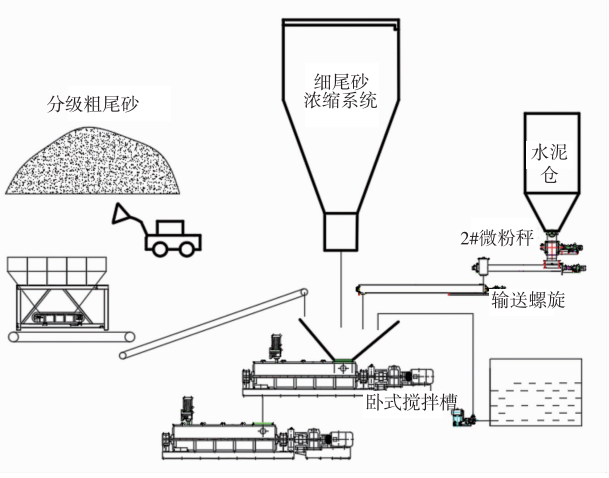


图 7　充填工艺流程图

Fig. 7　Flow chart of filling process

根据现场充填料浆取样,充填浓度达到 74%以上,充填体最高强度能够达到 3 MPa 以上,充填质量高。那纳铁矿采用优化后的充填工艺,能够保障充填工艺参数的稳定性,同时实现充填料浆稳定可靠自流输送,充填采场几乎无排水,为矿石的回采工

作提供了安全保障,实现高品位矿石的高效开采,提高了资源的利用率。

5 结论

1)针对矿山全尾砂级配不佳的现状,提出全尾砂先分级,然后通过在分级粗尾砂中加入分级细尾砂的方案优化骨料级配,试验结果表明分级细尾砂沉降浓缩最佳进料浓度为8%~10%,絮凝剂添加量为10~15 g/t,底流高度可达到56%~60%,粗、细尾砂的比例在5∶5~6∶4范围内最佳,质量浓度74%~78%的充填料浆具有较好的流动性和均合性,灰砂比1∶4充填体强度可达到4 MPa以上。

2)通过对矿山充填管线进行优化配置,利用原1#透气钻孔作为充填钻孔,使充填总管线长度减少485 m,平均充填倍线由6.4降至4.5,实现了充填料浆自流稳定输送。

3)通过对那纳铁矿进行充填工艺技术的优化,解决了矿山堵管事故频发、充填离析分层严重等问题,保障了矿山充填工艺参数的稳定。

参 考 文 献

[1] 杨小聪,郭利杰.尾矿和废石综合利用技术[M].北京:化学工业出版社,2018.
YANG Xiaocong, GUO Lijie. Tailings and waste rock comprehensive utilization technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press,2018.

[2] 吴爱祥,王洪江.金属矿膏体充填理论与技术[M].北京:科学出版社,2015.
WU Aixiang, WANG Hongjiang. Theory and technology of paste filling in metal mine[M]. Beijing:Science Press,2015.

[3] 吴爱祥,王勇,王洪江.膏体充填技术现状及趋势[J].金属矿山,2016(7):1-9.
WU Aixiang, WANG Yong, WANG Hongjiang. Status and prospects of the paste backfill technology[J]. Metal Mine, 2016(7):1-9.

[4] 于润沧.金属矿山胶结充填理论与工程实践[M].北京:冶金工业出版社,2020.
YU Runcang. Theory and engineering practice of cemented filling in metal mine[M]. Beijing:Metallurgical Industry Press, 2020.

[5] 程海勇,吴爱祥,吴顺川,等.金属矿山固废充填研究现状与发展趋势[J].工程科学学报,2022,44(1):11-25.
CHENG Haiyong, WU Aixiang, WU Shunchuan, et al. Research status and development trend of solid waste backfill in metal mines[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(1):11-25.

[6] 陈鑫政,郭利杰,李文臣,等.全尾矿沉降浓缩试验研究[J].黄金科学技术,2019,27(1):109-115.
CHEN Xinzheng,GUO Lijie,LI Wenchen,et al. Experimental study on sedimentation and concentration of unclassified tailings[J]. Gold Science and Technology, 2019, 27(1): 109-115.

[7] 吴爱祥,周靓,尹升华,等.全尾砂絮凝沉降的影响因素[J].中国有色金属学报,2016,26(2):439-446.
WU Aixiang, ZHOU Liang, YIN Shenghua, et al. Influence factors on flocculation sedimentation of unclassified tailings [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2016,26(2): 439-446.

[8] 焦华喆,王树飞,陈新明,等.全尾砂压密区孔隙结构几何特征及剪切演化规律[J].有色金属工程,2019,9(10):95-101.
JIAO Huazhe, WANG Shufei, CHEN Xinming, et al. Geometric characteristics and shear evolution law of pore structure in compaction zone of unclassified-tailings[J]. Nonferrous Metals Engineering,2019,9(10):95-101.

[9] 杨超,郭利杰,侯国权,等.细粒级尾矿膏体最佳排放浓度确定方法[J].金属矿山,2017(5):29-32.
YANG Chao,GUO Lijie,HOU Guoquan,et al. Determination of the best discharge concentration for fine tailing paste[J]. Metal Mine,2017(5):29-32.

[10] 邵亚平,陈鑫政,陈寅.全尾砂沉降特性试验研究[J].有色金属(矿山部分),2018,70(6):29-32.
SHAO Yaping, CHEN Xinzheng, CHEN Yin. Experimental study on settlement characteristics of full tailings[J]. Nonferrous Metals(Mining Section),2018,70(6):29-32.

[11] 陈鑫政,杨小聪,郭利杰,等.基于扩散度的尾砂膏体流变特性[J].工程科学学报,2020,42(10)1299-1307.
CHEN Xinzheng, YANG Xiaocong, GUO Lijie, et al. Rheological properties of tailings paste based on a spread test[J]. Chinese Journal of Engineering, 2020, 42(10): 1299-1307.

[12] 邓代强,高永涛,吴顺川.基于坍落度测试的粗骨料充填料浆流动性检验[J].北京建筑工程学院学报,2009,25(1):30.
DENG Daiqiang, GAO Yongtao, WU Shunchuan. Liquidity detection based on the slump testing of coarse aggregate filling material[J]. Journal of Beijing University of Civil Engineering and Architecture,2009,25(1):30.

[13] 侯国权,郭利杰,杨超,等.高浓度全尾砂充填料浆流变特性试验研究[J].中国矿业,2014,23(增刊2):238-241.
HOU Guoquan, GUO Lijie, YANG Chao, et al. Testing and study on the rheological properties of the high-density filling slurry of the full tailings[J]. China Mining Magazine, 2014, 23(S2):238-241.

(编辑:郭文晶)