柿竹园多金属矿尾砂高浓度连续充填工艺的关键参数研究及应用*

陈国辉[1]，郑伯坤[2,3]，石勇[2,3]，袁子淇[2]

（1.湖南柿竹园有色金属有限公司， 湖南 郴州市 423037；
2.长沙矿山研究院有限责任公司， 湖南 长沙 410012；
3.湖南省矿山固废综合利用工程技术研究中心， 湖南 长沙 410012）

摘要：针对柿竹园多金属矿采用崩落法开采存在矿石贫化率大、地表塌陷严重等问题，提出改用充填采矿法开采。开展了尾砂物化性质试验、静动态絮凝沉降试验，结合矿山实际生产能力，确定了尾砂最佳浓密参数和浓密机尺寸，并应用粒子群优化支持向量机(PSO-SVM)建立了放砂稳定性预测模型，得到了最佳放砂工艺参数。结果表明：絮凝剂最佳种类为CKYZ-24S，其最优掺量为30 g/t，全尾砂入料最佳质量浓度为12.5%，尾砂最佳给料速度为0.744 t/(m²·h)，确定浓密机直径D=12 m。最佳放砂工艺参数为：尾砂泥层高度15.2 m、浓密时间3.9 h、放砂流量96 m³/h、料浆平均放砂质量浓度70%，质量浓度波动控制在±1.5%，标准偏差为0.71，实现了尾砂24 h连续充填，充填能力达4 800 m³/d。研究结果表明，采用充填采矿法开采提高了矿山经济效益，保障了矿山绿色、安全开采。

关键词：充填采矿法；高浓度连续充填；充填工艺；放砂工艺参数；PSO-SVM模型

中图分类号：TD853.34 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-2763(2025)08-0061-09

Research and Application on Key Parameters of High Concentration Continuous Filling Process for Tailings in Shizhuyuan Polymetallic Mine

CHEN Guohui[1], *ZHENG Bokun*[2,3], *SHI Yong*[2,3], *YUAN Ziqi*[2]

(1.Hunan Shizhuyuan Nonferrous Metals Co., Ltd., Chenzhou, Hunan 423037, China;
2.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
3.Hunan Engineering and Technology Research Center for Comprehensive Utilization of Mine Solid Waste, Changsha, Hunan 410012, China)

Abstract: Aiming at the problems of large ore depletion rate and serious surface subsidence in Shizhuyuan Polymetallic Mine by caving mining, it is proposed to use filling mining method. Physical and chemical properties test of tailings, static and dynamic flocculation and settlement test were carried out, combined with the actual production capacity of the mine, the optimum thickening parameters of tailings and thickener size were determined. The particle swarm optimization support vector machine (PSO-SVM) was used to establish the sand discharge stability prediction model, and the optimum sand discharge process parameters were obtained. The results show that the optimum type of flocculant is CKYZ-24S, its optimum dosage is 30 g/t, the optimum feed mass concentration of the unclassified tailings is 12.5%, the optimum feeding rate of the tailings is 0.744 t/(m²h), and the diameter of the thickener is determined to be 12 m. The optimum sand discharge process parameters are as follows: the height of the tailings mud layer is 15.2 m, the thickening time is 3.9 h, the flow rate of sand discharge is 96 m³/h, and the average mass concentration of slurry is 70%, with fluctuation of ±1.5%, which realizes 24 h continuous filling of tailings, and the filling capacity reaches 4 800 m³/d. The research results show that the filling mining method can improve the economic benefits and ensure the green and safe mining of the mine.

Key words: Filling mining method, High concentration continuous filling, Filling process, Sand discharge process parameter, PSO-SVM model

* **收稿日期**：2024-11-20
基金项目：长沙矿山研究院有限责任公司科创项目(ZX23J070)
作者简介：陈国辉(1985—)，男，江西贵溪人，硕士，高级工程师，主要研究方向为有色金属矿山开采技术。E-mail：383020589@qq.com

0 引言

随着矿山开采的不断深入,地下采空区和塌陷区对矿山地质环境的影响愈发显著,可能诱发滚石、滑坡等地质灾害,危及矿山安全及周边环境,因此开采方法的转型至关重要。充填采矿法将采矿过程中产生的废料(如尾砂、废石等)回填至采空区,是稳定采空区、减少地表沉陷和降低灾害风险的有效手段[1-5]。相比于传统的采矿方法,充填采矿法能使矿石回采率大幅度提升,资源利用最大化,并且对环境影响较小,符合现代矿业绿色发展和可持续开采的理念,在采空区处理方面得到了广泛应用[6-7]。因此,继续深入研究充填采矿法的工艺、材料等方面的内容,对推动现代矿业绿色发展十分重要[8-13]。

已有诸多学者对优化充填工艺方面进行了研究,彭亮等[14]为改善料浆输送时分层离析现象,开展了料浆输送性能和流变特性试验,对全尾砂胶结充填工艺进行改进,结果表明:随着料浆输送浓度的提升,料浆分层离析的现象有所改善,能够实现长时间连续输送。史采星等[15]针对某铜矿充填成本高的问题,开展了尾砂物化性质测试,提出了尾砂高浓度充填技术,并进行了工业验证。在浓密工艺参数中,入料质量浓度和絮凝剂单耗、停留时间、泥层高度都是影响底流质量浓度的重要因素[16-18]。王新民等[19]融合遗传算法优化框架,构建了以深锥浓缩设备结构参数(高度/锥角)为特征参量、底流质量浓度为优化目标的 GA-SVM 智能预测系统,并基于司家营铁矿工程数据实现运行参数的全局寻优。

柿竹园多金属矿原采用崩落法采矿,存在矿石贫化率大、地表塌陷严重等问题。矿区的开采需要考虑以下因素。一是安全因素,由于地表发生塌陷,周围的岩石失去支撑,松动的岩石顺着塌陷的边缘滚落,可能造成滚石灾害。柿竹园多金属矿区内有公路经过,滚石可能对附近的设施、交通造成巨大威胁,甚至直接伤害人员。如果不变更采矿方法,也可能造成井下泥石流灾害,威胁井下生产安全。二是经济因素,地表塌陷引发的环境问题会增加矿区的环境治理成本,矿山企业必须支付大量费用用于土地恢复。同时,塌陷会导致矿山采空区失稳,造成未开采矿石的流失或破坏,导致可开采资源量减少,产量下降。某些区域的严重塌陷可能使整个矿床无法继续开采,如果不变更采矿方法,将严重影响矿山的经济效益。三是环境因素,崩落法不仅导致植被破坏、土壤流失,而且会破坏地下水系统,与绿色矿山减少对生态环境影响的目标冲突。

综合以上分析,为了减少采空区坍塌风险、控制地表塌陷、提高矿石回采率、减少环境破坏,矿山拟采用充填采矿法进行开采。在充填采矿法中,地表与地下采空区之间的关联复杂,需要调节充填体密度和强度,精确控制地表塌陷程度,避免诱发地质灾害,因此选择合适的充填材料至关重要。同时,为了提升充填效率,使充填系统能保持稳定高效的运行,保证生产的连续性,充填工艺的优化也很关键。实际生产中,需要提升料浆制备的效率、以及料浆输送的稳定性,综合考虑经济因素和生产实际,确保达到最佳充填效果。

基于此,本文针对柿竹园多金属矿充填系统建设,开展了尾砂物化性质试验、静动态絮凝沉降试验,并应用粒子群优化支持向量机(PSO-SVM)放砂稳定性预测模型优化了放砂工艺参数。根据矿山的生产需求,建设了双浓密机协作的充填系统,采用了柔性导向搅拌技术,建立的充填系统运行稳定,料浆制备输送浓度提高,料浆均匀连续泵送,实现 24 h 连续充填。

1 充填材料基本性质试验

1.1 材料物化性质试验

采用比重瓶法对全尾砂的真密度进行测定,并依据《建筑用砂》(GB/T 14684—2011)中的标准对全尾砂的容重、孔隙率进行测量,测试结果见表 1。采用 Mastersizer 3000 激光衍射粒度分析仪对全尾砂的粒径分布参数进行分析,测试结果如图 1 所示。采用 X-射线荧光光谱分析仪对全尾砂的化学成分进行定量分析,分析结果见表 2。

表 1 全尾砂基本物理参数

Table 1 Basic physical parameters of unclassified tailings

相对密度	松散容重/(t/m³)	密实容重/(t/m³)	松散孔隙率/%	密实孔隙率/%
2.90	1.29	1.57	55.52	45.86

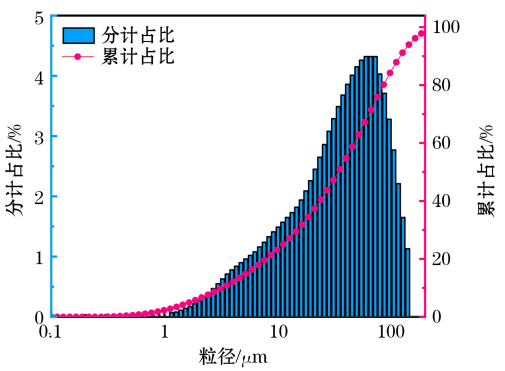


图 1 全尾砂粒径分布

Fig.1 The particle size distribution of unclassified tailings

表 2 全尾砂化学成分分析结果

Table 2 Results of chemical composition analysis of unclassified tailings %

Si	Ca	Al	Fe	F	K	Mg	Mn
49.56	16.49	12.89	7.911	4.37	2.37	1.28	0.902 9
Na	S	Ti	Sn	Rb	Pb	W	P
0.832	0.644	0.148	0.109	0.755 7	0.641	0.06	0.04
Bi	Cl	Zn	Cu	Cr	Mo	Sr	Zr
0.322	0.309	0.306	0.028 3	0.009	0.009 3	0.008 4	0.004 4

从图 1 中的数据可以看出,所取全尾砂样品的粒度小于 308.803 μm、粒径小于 74 μm 的尾砂颗粒占比为 73.66%,粒径在 35.335 μm 以下的颗粒占比达到 50%,20 μm 以下的颗粒含量占比为 35.92%,采用全尾砂作为骨料能够保证充填料浆长距离输送。表 2 化学成分分析检测结果表明,全尾砂中基本不含有毒有害物质,满足井下充填环保要求,且硅含量相对较高,对充填体强度具有益处,适宜于用作充填骨料。

1.2 全尾砂浆静态絮凝沉降试验

1.2.1 絮凝剂种类优选

采用自主研发的 5 种有机絮凝剂(CKYD-10S、CKF06、CKYZ-24S、CKFA02、CKYg-30S)进行试验,配置 5 组质量浓度为 10%的尾砂浆,分别添加这 5 种絮凝剂,掺量均为 30 g/t,试验结果如图 2 所示。由图 2 可以发现,CKYZ-24S 絮凝剂在前 30 s 的絮凝沉降速度最快,因此后续试验采用 CKYZ-24S 絮凝剂。

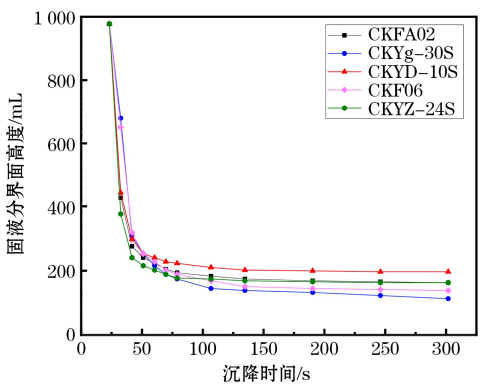


图 2 不同絮凝剂下固液分离界面高度随时间变化曲线

Fig.2 The varying curves of solid-liquid separation interface height with time under different flocculants

1.2.2 絮凝剂掺量优选

配置 4 组质量浓度为 10%的尾砂浆,分别添加 20,30,40,50 g/t 的 CKYZ-24S 絮凝剂,试验结果如图 3 所示。从图 3 可以发现,当絮凝剂掺量从 20 g/t 增加到 30 g/t 时,固液分界面下降的速度明显提升。当絮凝剂掺量从 30 g/t 增加到 50 g/t 时,固液分界面下降的速度变化较小,这主要是絮凝剂掺量过高引起全尾砂絮团过大,沉降过程中阻力增大,导致沉降速率减小。从沉降成本和沉降效率综合考虑,CKYZ-24S 絮凝剂的最优掺量为 30 g/t。

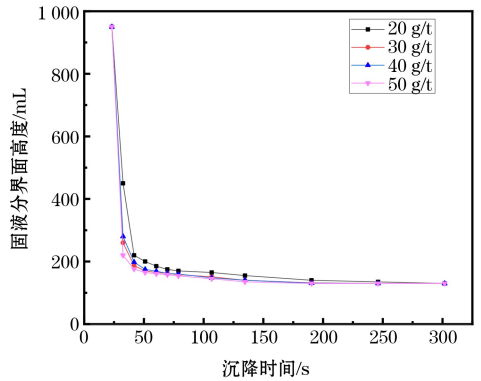


图 3 不同絮凝剂掺量下固液分离界面高度随时间变化曲线

Fig.3 The varying curves of solid-liquid separation interface height with time under different flocculant dosages

1.2.3 尾砂浆最佳入料质量浓度

在最优絮凝剂 CKYZ-24S 和絮凝剂最优掺量 30 g/t 的基础上,测定尾砂浆质量浓度分别为 7.5%、10%、12.5%、15%下的絮凝沉降速度,试验结果如图 4 所示。由图 4 可以看出,随着尾砂浆质量浓度变大,絮凝沉降速度变慢,其中 7.5%低质量浓度尾砂浆的沉降效果最好。当全尾砂浆质量浓度为 10%~12.5%时,固液分离界面高度随时间的变化速率也具有较好的沉降效果。由于在现实生产中难以保证尾砂维持在过低的浓度,从试验结果和实际情况综合考虑,确定全尾砂最佳入料质量浓度为 12.5%。

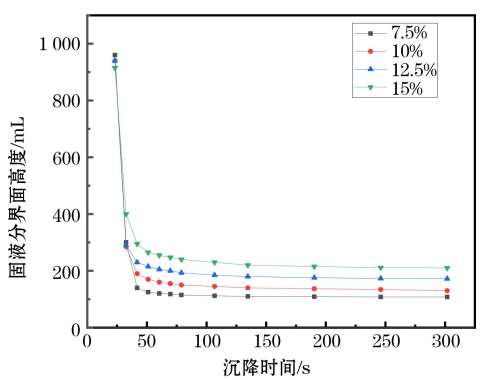


图 4 不同尾砂浆质量浓度下固液分离界面高度随时间变化曲线

Fig.4 The varying curves of solid-liquid separation interface height with time under different mass concentration of tailings slurry

1.3 坍落度试验

全尾砂坍落度试验结果见表3。从表3试验数据可以看出,随料浆质量浓度降低,充填料浆坍落度增加,充填料浆流动性提升;灰砂比对充填料浆流动性影响很小。由于充填的面积较大,充填料浆在满足长距离、长时间输送的同时需要考虑料浆流平性。根据工程经验,当充填料浆坍落度为27～29 cm时,料浆具有良好的和易性,且无明显的离析现象,符合结构流特征,具备良好的管道输送性能。根据坍落度试验结果,坍落度为27～29 cm对应的充填料浆质量浓度为68%～72%。

表3 坍落度试验结果

Table 3 Results of slump test cm

灰砂比	不同料浆质量浓度的坍落度					
	78%	76%	74%	72%	70%	68%
1∶6	9.7	22.5	27.0	28.2	28.4	28.8
1∶20	11.5	22.8	25.7	27.5	28.4	28.9

1.4 强度配比试验

根据坍落度试验结果,在能够满足泵送的充填料浆质量浓度范围内,对灰砂比为1∶6～1∶15,不同养护龄期(3 d、7 d、28 d)下的充填体强度进行了分析,试验结果见表4。由表4可知,随着养护龄期增加,料浆质量浓度增大,充填体强度也提高。而质量浓度降低会引起充填体强度降低,这主要是低浓度的料浆有较多自由水存在,会导致充填体孔隙率增加,从而使强度降低。

表4 充填体强度试验结果

Table 4 Results of filling body strength tests

编号	灰砂比	料浆质量浓度/%	抗压强度/MPa		
			3 d	7 d	28 d
1	1∶6	72	2.27	3.97	5.74
2		70	1.98	3.33	5.03
3		68	1.73	3.22	4.67
4	1∶8	72	1.65	3.14	4.30
5		70	1.45	2.38	3.79
6		68	1.23	2.38	3.37
7	1∶10	72	0.97	2.38	3.11
8		70	0.83	1.93	2.43
9		68	0.74	1.64	2.13
10	1∶12	72	0.56	1.37	1.92
11		70	0.45	1.22	1.90
12		68	0.33	0.72	1.47
13	1∶15	72	—	0.55	1.34
14		70	—	0.56	1.23
15		68	—	0.23	0.67

根据现场不同采场位置对充填体强度的要求,采场关键部位的充填体强度要求大于4.5 MPa。在灰砂比为1∶6、充填料浆质量浓度为68%～72%时,充填体28 d强度为4.67～5.74 MPa,满足井下充填的强度要求。

2 尾砂动态絮凝沉降试验

采用静态絮凝沉降的最优参数开展动态絮凝沉降试验:絮凝剂为CKYZ-24S,絮凝剂浓度为0.3%,絮凝剂掺量为30 g/t,尾砂入料质量浓度为12.5%。动态絮凝沉降试验系统由尾砂进料系统、絮凝剂进料系统、浓密沉降系统和底流出料系统组成,共配置了3台蠕动泵分别输送尾砂浆、絮凝剂和放砂料浆。调节泵转速按照试验方案控制尾砂浆给料速度分别为0.608 t/(m^2·h)、0.646 t/(m^2·h)、0.744 t/(m^2·h)、0.773 t/(m^2·h)、0.870 t/(m^2·h),进行5组试验。等待砂面到达240 mm,调节底流出料速度,使底流高度稳定在240 mm附近。系统稳定运行20 min后,对底流料浆和溢流水进行取样,测得底流排矿密度ρ_2、底流质量浓度C_2和溢流水含固量,试验结果见表5。

表5 动态絮凝沉降试验结果

Table 5 Results of dynamic flocculation sedimentation tests

试验序号	给料速度q_c/(t/(m^2·h))	底流排矿密度ρ_2/(t/m^3)	底流质量浓度C_2/%	溢流水含固量/(mg/L)
1	0.608	1.20	72.88	98.01
2	0.646	1.19	70.28	180.90
3	0.744	1.18	68.41	209.12
4	0.773	1.18	66.80	306.98
5	0.870	1.17	64.72	320.61

由表5可知,随着给料速度增大,底流质量浓度逐渐降低,溢流水含固量不断增大。这是由于给料速度增大,尾砂和絮凝剂的反应时间变短,絮凝剂难以充分发生作用。由1.3节内容可知,设计要求尾砂质量浓度不小于68%;依据行业标准,要求溢流水含固量不超过300 mg/L。因此选取表5中第3组试验作为设计数据,此时给料速度为0.744 t/(m^2·h),底流质量浓度为68.41%,溢流水含固量为209.12 mg/L。

柿竹园多金属矿采场需求的平均采空区处理能力为2 424 m^3/d,充填尾砂平均用量为3 200 t/d,最大用量为3 840 t/d。考虑增大仓储能力同时兼顾尾砂压滤站供料,选用2台浓密机协同工作,单台浓

密机应能满足 24 h 至少处理 1 920 t 尾砂,即处理能力应大于 80 t/h。根据动态絮凝沉降试验结果,基于 Kynch 理论和 T-F 算法[20]计算,得出浓密机面积不小于 107.51 m^2,浓密机设计直径 $D=12$ m。

3 充填系统及工艺流程

3.1 充填系统生产能力

柿竹园多金属矿充填系统按年处理采空区 80 万 m^3 设计,采用 2 套 90～100 m^3/h 充填制备系统 24 h 连续生产作业可满足生产需要,充填系统生产能力见表 6。

表 6 充填系统生产能力

Table 6 Production capacity of filling system

年充填采空区量/m^3	单套系统充填能力/(m^3/h)	年工作天数/d	年平均充填量/m^3	日平均充填量/m^3	充填站日充填时间/h
80×10^4	90～100	330	92.4×10^4	2 800	18

3.2 充填系统工艺流程

柿竹园多金属矿充填系统工艺流程为:选厂尾砂供料,充填站双浓密机协同高效浓密,柔性导向复合流场搅拌制浆,充填工业泵连续泵送,工艺流程如图 5 所示。

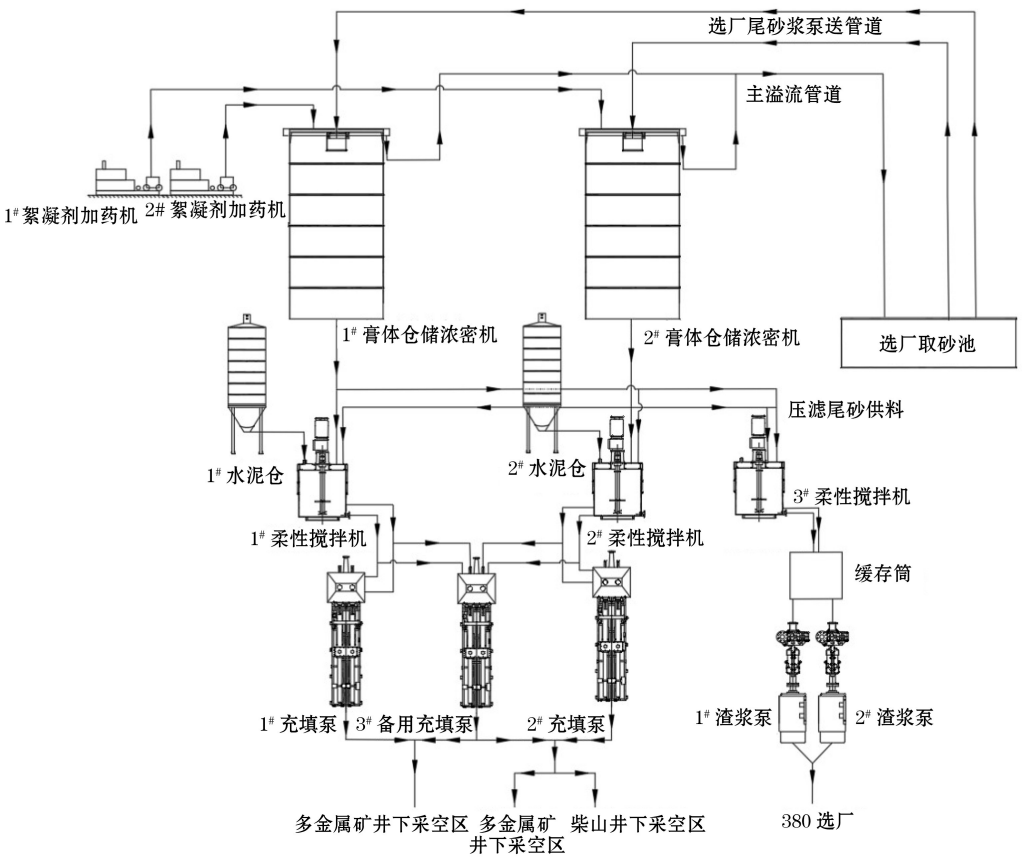


图 5 充填系统工艺流程

Fig.5 Process flow of filling system

(1) 选厂尾砂供料。渣浆泵房标高约+473 m,充填站标高+457 m,浓密机基础平台标高约+466 m,浓密机高度为 20 m,管道高差约 13 m,因此选厂低浓度的尾砂浆需要通过渣浆泵和输送管道泵送至充填站浓密机内。在选厂尾砂收集池附近布置 4 台渣浆泵(两用两备),分别与充填站两台浓密机连接。选择的渣浆泵流量为 500 m^3/h,扬程 30 m,变频电机功率 110 kW,并可通过变频进行流量调节。

(2) 充填站双浓密机协同高效浓密。絮凝剂通过絮凝剂加药机进入中心桶进行多点添加,选厂质量浓度为 10%～12.5%的尾砂浆经泵送进入浓密机的中心桶,与絮凝剂混合后进行自稀释沉降。尾砂在浓密机内进行高效浓密,在泥层到达指定高度后开启底部阀门使砂浆进入高速柔性搅拌机,放砂质量浓度达到 68%～72%。双浓密机协同作用能够提高充填质量,通过精确地控制充填材料的质量和

稳定性,确保充填体的强度和密度达到设计要求;双浓密机协同作用使生产灵活可调,操作人员可以根据具体情况调节每台机器的运行参数,在处理不同性质的尾砂以及进行生产需求调整时效率更高;双浓密机协同作用使设备可靠性提升,一台机器停机维护时,另一台正常运行,充填站的持续生产得以保证,同时通过提高生产效率和减少生产停滞时间降低了生产成本。

(3) 柔性导向复合流场搅拌制浆。固态颗粒、液态浆体、高黏性胶状物料三类物料在混合过程中呈现出截然不同的流体动力学行为。固态颗粒混合时,需借助较强的剪切力和对流作用来克服颗粒间的摩擦力,以实现充分均匀的分散;液态浆体则较容易卷入流场,并在较低的剪切力下迅速均匀混合;而高黏性胶状物料由于其黏度较大,容易产生团聚现象,因此引入特殊设计的导向活化流场和局部高剪切区域来避免团聚,促进活化。柔性导向复合流场是一种创新的搅拌技术,结合柔性与刚性结构,通过柔性搅拌部件在搅拌过程中引导物料的运动轨迹,从而减少硬质物料与刚性叶片的直接碰撞。柔性导向的复合活化流场能够动态适应物料的黏度变化,使固态、液态及胶状物料依次得到充分的分散、混合与活化,确保各物料之间的耦合机制得以充分发挥,最终实现多性态物料广域弥散与活化的效果。采用两台高速柔性搅拌机,分别给两套充填泵送系统供料,另增设一台高速柔性搅拌机作为压滤系统尾砂调浓,在满足充填需求时兼顾压滤尾砂供应。

(4) 充填工业泵连续泵送。充填站配置 3 台锥阀式工业充填泵(两用一备),搅拌后的均质料浆通过充填泵 24 h 连续泵送到井下采空区,料浆流动性满足泵送要求,泵送连续稳定,充填效率高。

4 PSO-SVM 优化放砂参数

4.1 正交试验

综合考虑柿竹园多金属矿采场充填实际生产需要,在静态絮凝沉降试验得到的最佳的入料质量浓度和絮凝剂掺量的基础上,选取浓密机的泥层高度 H、放砂质量浓度 C_2、放砂流量 Q_2 和浓密时间 t 作为影响底流质量浓度稳定性的最主要因素,设计 $L_{25}(5^5)$正交试验方案,见表 7。

表 7 正交试验方案

Table 7 Schemes of orthogonal test

水平	泥层高度 H/m	放砂质量浓度 C_2/%	放砂流量 Q_2/(m^3/h)	浓密时间 t/h
1	13	68	99.10	2.94
2	14	69	98.26	3.16
3	15	70	96.04	3.89
4	16	71	94.69	4.61
5	17	72	93.37	5.14

应用动态絮凝沉降系统进行正交试验,对浓密机底流进行取样,监测并记录一段时间内底流放砂质量浓度的变化,根据数据计算底流质量浓度的标准偏差,得到 PSO-SVM 模型的样本数据,见表 8。

表 8 正交试验结果

Table 8 Results of orthogonal test

序号	泥层高度 H/m	放砂质量浓度 C_2/%	放砂流量 Q_2/(m^3/h)	浓密时间 t/h	底流质量浓度的标准偏差 σ
1	13	68	99.10	2.94	2.39
2	13	69	96.04	4.61	6.78
3	13	70	93.37	3.16	5.31
4	13	71	98.26	5.14	4.92
5	13	72	94.69	3.89	3.88
6	14	68	93.37	4.61	2.37
7	14	69	98.26	3.16	2.35
8	14	70	94.69	5.14	3.16
9	14	71	99.10	3.89	10.54
10	14	72	96.04	2.94	4.89
11	15	68	94.69	3.16	4.14
12	15	69	99.10	5.14	3.06
13	15	70	96.04	3.89	0.05
14	15	71	93.37	2.94	2.59
15	15	72	98.26	4.61	3.33
16	16	68	96.04	5.14	4.16
17	16	69	93.37	3.89	6.87
18	16	70	98.26	2.94	2.56
19	16	71	94.69	4.61	3.58
20	16	72	99.10	3.16	3.03
21	17	68	98.26	3.89	4.74
22	17	69	94.69	2.94	7.23
23	17	70	99.10	4.61	8.56
24	17	71	96.04	3.16	5.07
25	17	72	93.37	5.14	1.57

4.2 PSO-SVM 模型建立与求解

4.2.1 PSO-SVM 参数寻优

(1) 对数据进行归一化,作为样本集,从样本集中随机选出部分数据作为训练集 X,剩下的样本作为测试集 Y。

(2) 设定模型参数寻优范围,对于 RBF 核函数的宽度系数 γ、惩罚系数 C,寻优范围为 $0.1\leqslant\gamma\leqslant$

100,0.1≤C≤100,设定初始化进化代数 $K_0=1$,最大进化代数 $K_{max}=100$,种群最大数量 $S=10$。

(3) 随机初始化种群速度的个体最优和全局最优位置并进行支持向量机训练,将训练结果经 5 折交叉验证,得到的均方根误差作为各个粒子的适应度函数值,通过适应度值判断优劣从而更新极值,若适应度值满足要求或达到最大遗传代数,进行步骤(4)。

(4) 输出最佳参数,构建代理模型,采用 PSO 优化算法进行寻优,根据均方根误差最小加点准则选取新样本 x_{new},将 x_{new} 加入训练集 X。

(5) 判断代理模型的预测误差是否满足要求,如果满足要求则结束加点,进行步骤(6);否则重复步骤(2)至步骤(4)。

(6) 输出经过样本更新后的 SVR 模型,得出最佳参数组合:$\gamma=67.36$,$C=8.53$。模型的均方根误差(RMSE)为 0.165 2,说明模型的预测效果良好。得到的预测模型 $T(\boldsymbol{x})$ 为:

$$T(\boldsymbol{x})=\sum_{i=1}^{102}(\boldsymbol{\alpha}_i-\boldsymbol{\alpha}_i^*)\mathrm{e}^{-67.36|\boldsymbol{x}-\boldsymbol{x}_i|^2}+51.042$$

式中:$\boldsymbol{\alpha}_i$、$\boldsymbol{\alpha}_i^*$ 是拉格朗日乘子,其对应的向量 $\boldsymbol{x}_i$ 为支持向量。

4.3 模型验证与放砂参数优化

柿竹园多金属矿初始放砂方案见表 9 中方案 1,实际生产中为了达到更高的底流质量浓度,指定开始放砂的泥层高度过高,料浆停留时间过长,而放砂流量过大,导致进放砂不平衡。底部料浆出现板结,在出料口附近出现导水通道,通道两侧的高浓度料浆堆积,中部料浆还未充分絮凝沉降就从通道迅速流出。因此实际放砂时初始质量浓度高,后续质量浓度呈现快速下降的趋势。

为了找到最优的放砂参数组合,将优化问题描述为:

$$\min T(\boldsymbol{x}),\boldsymbol{x}=[C_2,\ t,\ Q_2,\ H]$$

$$\text{s.t.}\quad 68\%\leqslant C_2\leqslant 72\%$$

$$12.6\leqslant t\leqslant 17.3$$

$$93.37\leqslant Q_2\leqslant 99.10$$

$$13\leqslant H\leqslant 17$$

应用 MultiStart 方法对构建的 PSO-SVR 模型进行全局寻优,得到了优化方案下的参数优化结果,见表 9。从表 9 可以看出,优化方案中的最优参数下浓密机放砂底流质量浓度标准差预测值为 0.702,说明料浆整体的质量浓度波动控制在±1.40%,满足稳定放砂的要求。由于优化方案为应用优化算法得出的最佳方案,得到的参数精度高,在实际工业情况中难以控制,因此将优化方案根据实际情况进行调整得到应用方案。

表 9 放砂方案

Table 9 Sand discharge schemes

编号	方案	泥层高度 H/m	放砂质量浓度 C_2/%	放砂流量 Q_2/(m³/h)	浓密时间 t/h	底流质量浓度标准差预测值	底流质量浓度标准差试验值
1	初始方案	16.00	71.00	94.69	2.61	—	2.53
2	优化方案	15.24	69.82	96.34	3.87	0.702	—
3	应用方案	15.20	70.00	96.00	3.90	—	0.71

5 工业应用效果

柿竹园多金属矿充填系统建设完成后,根据应用方案进行放砂工业试验,对放砂质量浓度进行取样测试,结果如图 6 所示。由图 6 可知,在正常的 1 个充填班次内,放砂平均质量浓度为 70%,料浆质量浓度波动控制在±1.5%,较初始放砂方案有明显提升。工业试验得到的底流质量浓度标准偏差为 0.71,与模型预测值 0.702 相比,相对误差为1.14%,说明 PSO-SVM 的预测结果较可靠。在实际的生产中,浓密机出料浓度和流量稳定,溢流水澄清。充填系统工作高效可靠,24 h 连续充填,日充填能力最大达到 4 800 m³,料浆泌水率低,充填体强度满足采矿要求,充填效果良好。

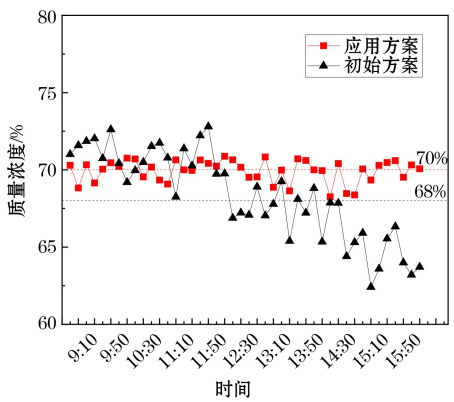


图 6 工业试验结果

Fig.6 Industrial test results

6 结论

(1) 通过开展尾砂物化性质、静动态絮凝沉降试验,结合矿山实际生产能力,确定了尾砂最佳浓密参数和浓密机尺寸:全尾砂入料质量浓度为 12.5%、

给料速度为0.744 t/(m²·h),使用CKYZ-24S絮凝剂,其最优掺量为30 g/t,浓密机直径$D=12$ m。

(2) 通过正交试验,构建PSO-SVM放砂稳定性预测模型,利用全局优化算法找到最佳的浓密机放砂参数为:泥层高度15.2 m,满足浓密时间3.9 h后开始放砂,放砂流量为96 m³/h,优化后平均放砂质量浓度为70%,波动控制在±1.5%,整体的放砂底流质量浓度标准偏差为0.71。

(3) 该矿采用双浓密机协同高效浓密工艺及柔性导向复合流场搅拌制浆技术,并顺利完成了建设和调试。工业试验结果表明,该系统放砂质量浓度高,充填效果良好,实现了尾砂高浓度连续充填,提高了矿山的经济效益,保障了矿山后续绿色、安全开采。

参考文献(References):

[1] 朱起作,段庆豹,刘建国,等.高寒地区金属非金属矿山采空区充填技术研究[J].矿业研究与开发,2023,43(12):59-64.
ZHU Qizuo, DUAN Qingbao, LIU Jianguo, et al. Research on filling technology of goaf in metal and non-metal mines in alpine region[J]. Mining Research and Development, 2023, 43(12):59-64.

[2] 王旭,李闯,法源,等.复杂地形条件下充填工艺研究及应用[J].中国矿业,2024,33(2):168-174.
WANG Xu, LI Chuang, FA Yuan, et al. Research and application of filling technology under complex terrain conditions[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(2):168-174.

[3] 周楠,张吉雄,闫浩,等.煤矿开采嗣后空间矸石注浆充填方法[J].煤炭学报,2023,48(1):150-162.
ZHOU Nan, ZHANG Jixiong, YAN Hao, et al. Method of gangue grouting filling in subsequent space of coal mining [J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1):150-162.

[4] 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.
YANG Wei, CHANG Dong, LONG Tao, et al. Progress of resource utilization of gold tailings[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023, 43(3):168-178.

[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 progress on the resource utilization of gold tailings [J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(1):11-25.

[6] 霍晓君,周燕,许欣,等.固体废物炉渣回填煤矿采坑后的环境行为模拟研究[J].矿业研究与开发,2023,43(7):158-163.
HUO Xiaojun, ZHOU Yan, XU Xin, et al. Simulation study on environmental behavior after slag solid waste backfilling in mining pit of coal mine[J]. Mining Research and Development, 2023, 43(7):158-163.

[7] 吴爱祥,张晋军,王贻明,等.膏体充填:金属矿绿色开采的变革性技术[J].中国有色金属学报,2024,34(5):1652-1666.
WU Aixiang, ZHANG Jinjun, WANG Yiming, et al. Cemented paste backfill: transformative technology for green mining in metal mines[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024, 34(5):1652-1666.

[8] 吕鑫,杨科,方珏静,等.采空区破碎岩体负压注浆加固试验研究与机制分析[J].岩石力学与工程学报,2023,42(增刊2):4174-4188.
LYU Xin, YANG Ke, FANG Yujing, et al. Experimental study and mechanism analysis of negative pressure grouting reinforcement for broken rock mass in goaf[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(Suppl. 2):4174-4188.

[9] 郭利杰,刘光生,马青海,等.金属矿山充填采矿技术应用研究进展[J].煤炭学报,2022,47(12):4182-4200.
GUO Lijie, LIU Guangsheng, MA Qinghai, et al. Research progress on mining with backfill technology of underground metalliferous mine[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(12):4182-4200.

[10] 石英,闵洁,童森森,等.赤泥对磷石膏生物胶结的充填性能影响研究[J].安全与环境学报,2024,24(1):302-311.
SHI Ying, MIN Jie, TONG Sensen, et al. Effect of red mud on the filling performance of phosphogypsum bio-cement[J]. Journal of Safety and Environment, 2024, 24(1):302-311.

[11] 王小勇,王照明,许海龙,等.水泥-粉煤灰胶结矸石充填材料的流变特性与固结机理[J].有色金属工程,2024,14(6):134-143.
WANG Xiaoyong, WANG Zhaoming, XU Hailong, et al. Rheological properties and consolidation mechanism of cement-fly ash cemented gangue backfill material [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2024, 14(6):134-143.

[12] 陈威,尹升华,陈勋,等.添加细菌对充填材料性能的影响[J].中南大学学报(自然科学版),2023,54(3):797-806.
CHEN Wei, YIN Shenghua, CHEN Xun, et al. Effect of adding bacteria on properties of backfilling materials[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54(3):797-806.

[13] 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.

[14] 彭亮,尹贤刚,仵锋锋,等.某铜矿充填分层离析现象分析与充填工艺优化[J].矿业研究与开发,2020,40(12):43-47.
PENG Liang, YIN Xian'gang, WU Fengfeng, et al. Analysis of delamination and separation phenomenon of filling body and optimization of filling process in a copper mine[J]. Mining Research and Development, 2020, 40(12):43-47.

[15] 史采星,郭利杰,许文远,等.某铜矿尾砂高浓度充填技术方案优化研究[J].中国矿业,2019,28(增刊2):415-419.

SHI Caixing, GUO Lijie, XU Wenyuan. Study on optimization of tailings high concentration filling technology in a copper mine[J]. China Mining Magazine, 2019, 28(Suppl.2):415-419.

[16] 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.
FU Jianxun, HE Maokun, JIANG Guojian, et al. Study on optimization of filling technology and key equipment of green tailings-free mine[J]. China Mine Engineering,2022,51(3):58-61.

[17] 王小平,冯亮.全尾砂-废石膏体充填材料特性及工艺参数研究[J].采矿技术,2024,24(5):266-270.
WANG Xiaoping, FENG Liang. Study on the characteristics and process parameters of full tailings-waste gypsum filling material[J]. Mining Technology,2024,24(5):266-270.

[18] 李文波.磷矿超细全尾砂膏体浓密技术研究[D].长沙:长沙矿山研究院,2023.
LI Wenbo. Research on the technology of thickening of phosphate ore ultra-fine whole tailing sand[D]. Changsha: Changsha Institute of Mining Research,2023.

[19] 王新民,张国庆,赵建文,等.深锥浓密机底流浓度预测与外部结构参数优化[J].重庆大学学报,2015,38(6):1-7.
WANG Xinmin, ZHANG Guoqing, ZHAO Jianwen, et al. Underflow concentration prediction and external structure parameter optimization of deep cone thickener[J]. Journal of Chongqing University,2015,38(6):1-7.

[20] TALMAGE W P, FITCH E B. Determining thickener unit areas[J]. Industrial & Engineering Chemistry,1955,47(1):38-41.