超细尾砂充填料浆均质化搅拌参数优化研究

郑伯坤[1,2,3],段单峰[1,2],吕伟鹏[1,2]
(1. 长沙矿山研究院有限责任公司; 2. 湖南省矿山固废综合利用工程技术研究中心;
3. 国家金属采矿工程技术研究中心)

摘要:料浆搅拌环节作为关键环节起着承上启下的作用,针对超细尾砂搅拌过程中搅拌设备的剪切作用对料浆均质化的影响,通过对搅拌装置参数优化及试验研究等方法,对搅拌桶叶轮结构形式、叶轮直径和叶轮安装高度进行研究分析,由扩展度、平均强度和变异系数来评判均质化搅拌效果,最终得到最佳搅拌参数为叶轮直径7 cm,叶轮安装高度1 cm,在较准确的放大基准上为工业现场提供一定的理论支撑。利用3因素3水平的正交实验及分析方法,了解到超细尾砂料浆在泵送和自流方式选择上对应的最适宜坍落度和浓度分别为25~27 cm、56 %~58 %和27~29 cm、50 %~54 %;超细尾砂浓度对搅拌速度较敏感,浓度越大需要的搅拌速度越高。

关键词:超细尾砂;充填料浆;搅拌装置;搅拌参数;流动性;均质化;正交实验
中图分类号:TD853.34　　**文章编号**:1001-1277(2025)06-0007-05
文献标志码:A　　doi:10.11792/hj20250602

引　言

国家对矿山尾矿库的严格管控,使得许多矿山不得不采用充填采矿法采矿以降低尾矿库的压力。科技发展使得浮选出的尾砂越来越细,在搅拌作用下料浆的均质性较差,搅拌作为充填的关键环节,传统搅拌设备已无法很好地满足矿山需求。因此,亟须研究开发针对超细尾砂充填料浆的均质化搅拌技术及设备[1-3]。关于充填领域的搅拌研究有很多,张常青[4]应用第三代强力活化搅拌设备对金城金矿75 %~78 %高浓度充填料浆进行搅拌,灰砂比1∶4时28 d强度可提高1.3~1.8倍,在抗压强度相同的情况下,水泥用量可以减少30 %以上;周家祥等[5]通过将武钢大冶铁矿的高浓度立式搅拌桶更换为两段式双卧轴搅拌机+高效活化搅拌机,在相同浓度和灰砂比下,一定程度上提高了该矿山细粒级全尾砂胶结充填料的强度;苑雪超[6]通过理论研究、室内试验和现场工业试验,确定了金川金矿废石-全尾砂高浓度充填的卧式搅拌机结构参数、搅拌速度、叶轮形式、投料顺序等,充填搅拌质量达到了矿山的要求;王洪江等[7]针对二段卧式螺旋搅拌机设计恒高液位下围流强剪切搅拌方式,通过增强物料轴向循环及径向对流作用,解决了多尺度充填料浆搅拌时间短及水泥聚团问题,在很大程度上提高了胶结充填体的强度;杨柳华[8]以卧式搅拌机为载体,从微观层面上研究了搅拌剪切对充填料浆流动性的影响,一定程度上解释了剪切作用可以破坏胶凝剂的"团聚颗粒",对于充填料浆的均质化搅拌特别重要;李翠平等[9]开展全尾砂膏体充填试验得到了速率与时间对尾砂膏体屈服应力的影响。

但是,前人研究针对超细尾砂均质化搅拌的较少[10-15],本文以现阶段矿山充填领域使用最广泛的立式搅拌桶为研究对象[16-21],通过室内小型搅拌正交实验得出超细尾砂充填料浆均质化最适宜的搅拌参数,为超细尾砂充填提供理论支撑。

1　超细尾砂物化性质

1)物理性能测定。超细尾砂物理参数主要有真密度、松散密度、密实密度(所有测试结果取3次测试的平均值),以及由密度和容重得出的孔隙率。某铁矿全尾砂基本物理参数测定结果见表1。

表1　全尾砂基本物理参数测定结果

Table 1　Determination results of basic physical parameters of ungraded tailings

真密度/(t·m^{-3})	松散密度/(t·m^{-3})	密实密度/(t·m^{-3})	松散孔隙率/%	密实孔隙率/%
2.66	0.82	1.26	69.17	52.63

2)粒径组成。超细尾砂的粒径组成与充填料浆的流变参数、输送性能、胶结强度及胶凝剂的消耗量息息相关。本次采用物理光学分析方法分析充填材

收稿日期:2024-12-20; 修回日期:2025-02-03
基金项目:中国五矿集团全国重点实验室专项(2024GZKJ04);长矿院科创项目(ZX24J070)
作者简介:郑伯坤(1984—),男,高级工程师,硕士,从事矿山充填采矿及固废利用研究工作;E-mail:413778846@qq. com

料的粒级分布参数，粒径分布曲线见图1。采用不均匀系数(K_0)来描述尾砂的级配情况，经计算K_0=8.76，说明超细尾砂粒径分布不均匀，超细颗粒较多。粒径小于74 μm颗粒占比约为94 %，占比达到50 %的粒径在11.2 μm以下，超细尾砂-20 μm颗粒占比约为65 %。

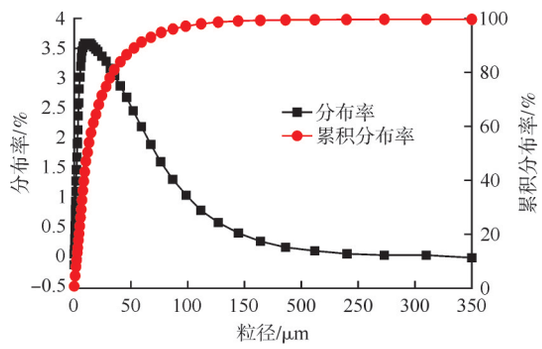


图1　超细尾砂粒径分布曲线

Fig. 1　Particle size distribution curve of ultrafine tailings

3)化学成分分析。超细尾砂的化学成分分析结果见表2。由表2可知：超细尾砂中SiO_2、CaO和MgO含量较多，S和Na元素含量极低，对充填体强度的危害较小。超细尾砂含SiO_2为58.31 %，表明超细尾砂惰性较好，适宜作为充填集料。超细尾砂中不含有其他有毒、有害物质，满足环保要求。

2　均质化搅拌试验研究

2.1　充填料浆流动性能研究

本试验主要针对不同灰砂比和不同料浆浓度的超细尾砂充填料浆开展坍落度全面试验，试验方案见表3。

表2　超细尾砂化学成分分析结果

Table 2　Chemical composition analysis results of ultrafine tailings

成分	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	K_2O	MgO	MnO	TiO_2
w/%	58.31	15.74	7.61	4.124	3.803	2.83	0.747 2	0.628
成分	Na_2O	SO_3	ZnO	P_2O_5	BaO	PbO	其他	
w/%	0.56	0.532	0.222 7	0.216	0.134	0.108	4.435 1	

表3　超细尾砂充填料浆坍落度试验方案

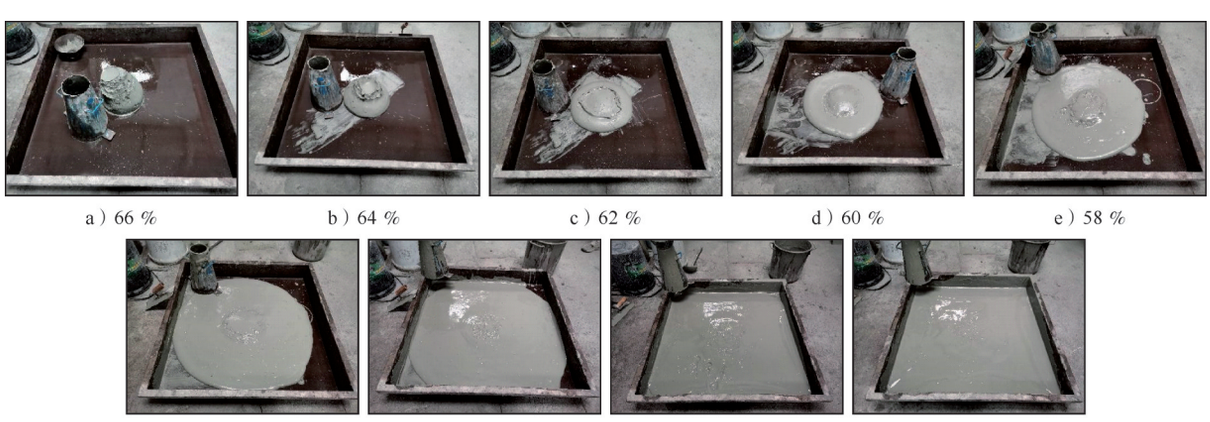
Table 3　Slump test scheme for ultrafine tailings filling slurry

因素	水平
灰砂比	1:4,1:10
料浆浓度/%	50,52,54,56,58,60,62,64,66

灰砂比1:4的超细尾砂不同料浆浓度坍落度试验情况见图2，坍落度试验结果见表4。由表4可知：充填料浆坍落度随料浆浓度降低而增加，即充填料浆流动性越来越好。考虑矿山充填相较于混凝土输送的差异性，同时结合其他矿山充填方面的工程经验[22-23]，推荐选择泵压输送的充填料浆坍落度应为25～27 cm，对应超细尾砂充填料浆浓度为56 %～58 %；选择自流输送时充填料浆坍落度应为27～29 cm，对应超细尾砂充填料浆浓度为50 %～54 %。

2.2　搅拌装置参数优化试验研究

本次试验选择2叶片桨式叶轮、4叶片椭圆叶轮和6叶片涡轮式叶轮进行3水平试验研究[24-27]；选取叶轮直径5 cm、6 cm、7 cm进行3水平试验研究；选取叶轮安装高度1 cm、2 cm、3 cm进行3水平试验研究。根据小型搅拌机与给定充填料浆的试验参数，对给定料浆浓度56 %、灰砂比1:8的充填料浆在不同搅拌试验条件下进行流动性及强度试验。在不影响搅拌试验效果的基础上，为了尽可能减少试验次数，采取正



a）66 %　b）64 %　c）62 %　d）60 %　e）58 %

f）56 %　g）54 %　h）52 %　i）50 %

图2　灰砂比1:4不同料浆浓度坍落度试验情况

Fig. 2　Test results of slump with different slurry concentrations at the cement-sand ratio 1:4

表4　坍落度试验结果　　cm

Table 4　Slump test results

灰砂比	料浆浓度/%								
	66	64	62	60	58	56	54	52	50
1:4	11.0	16.7	22.5	24	25.1	26.7	27.2	28.0	28.2
1:10	8.9	15.7	21.3	24	25.4	26.2	27.0	27.4	28.0

交实验，按照3因素3水平进行设计，选择$L9(3^3)$正交实验表。装置参数优化的极差分析见表5，平均强度、变异系数和流动性指标扩展度和坍落度试验结果见图3。

表5　装置参数优化的极差分析结果

Table 5　Range analysis results for device parameter optimization

试验指标		因素		
		叶轮结构形式	叶轮直径	叶轮安装高度
扩展度/cm	K_1	40.000	42.000	45.000
	K_2	41.500	40.000	41.500
	K_3	44.500	44.000	39.500
	k_1	13.333	14.000	15.000
	k_2	13.833	13.333	13.833
	k_3	14.833	14.667	13.167
极差		1.500	1.333	1.833
最优参数		涡轮式	7 cm	1 cm
28 d平均强度/MPa	K_1	0.557	0.604	0.614
	K_2	0.598	0.583	0.612
	K_3	0.647	0.615	0.576
	k_1	0.186	0.201	0.205
	k_2	0.199	0.194	0.204
	k_3	0.216	0.205	0.192
极差		0.030	0.011	0.013
最优参数		涡轮式	7 cm	1 cm
变异系数/%	K_1	0.317	0.256	0.260
	K_2	0.273	0.279	0.279
	K_3	0.261	0.315	0.312
	k_1	0.106	0.085	0.087
	k_2	0.091	0.093	0.093
	k_3	0.087	0.105	0.104
极差		0.019	0.020	0.017
最优参数		涡轮式	5 cm	1 cm

注：K_i为每因素每水平时，试验扩展度、平均强度、变异系数的加和值；k_i为K_i的平均值。

不同搅拌参数对超细尾砂充填料浆均质化搅拌效果（扩展度和强度）影响程度不同。由表5可知：对均质化搅拌效果影响程度越大的因素，极差也越大。均质化搅拌对超细尾砂混合料浆的流动性能和平均强度的影响程度不一样。各因素的影响程度可通过图3直观地看出。将搅拌各因素对充填料浆的流动性和平均强度进行对比分析，可以得出相关因素对不同指标的影响程度。

1）叶轮结构形式对各指标的影响。由表5、图3可知：叶轮结构形式对扩展度影响程度位于第二位，对28 d平均强度的影响位于第一位，对变异系数的影响程度位于第二位。整体来看，叶轮结构形式对充填料浆的均质化搅拌效果影响较大。涡轮结构形式的搅拌叶轮对超细尾砂充填料浆平均强度最有利，同时变异系数最小，对充填料浆的流动性也最有利。因此，选择涡轮结构形式的叶轮进行搅拌速度和搅拌时间的试验。

2）叶轮直径对各指标的影响。由表5、图3可知：叶轮直径对超细尾砂充填料浆的扩展度和28 d平均强度的影响程度位于第三位，对变异系数的影响位于第一位。本次小型试验选择叶轮直径变化范围较小，可能导致在该小型试验中影响程度最小。叶轮直径为7 cm时，对于充填料浆平均强度、变异系数和流动性最有利。因此，选择叶轮直径为7 cm进行后续试验。

3）叶轮安装高度对各指标的影响。由表5、图3可知：叶轮安装高度对超细尾砂充填料浆的扩展度影响位于第一位，对28 d平均强度的影响位于第二位，对变异系数的影响位于第三位。本次试验发现叶轮安装高度过高，会导致上部混合料浆液面飞溅，且底部尾砂形成了搅拌死区，底部有沉砂现象，搅拌明显不均匀。叶轮安装高度为1 cm时，混合料浆均质化搅拌效果最优。因此，选择叶轮安装高度1 cm为后续试验参数。

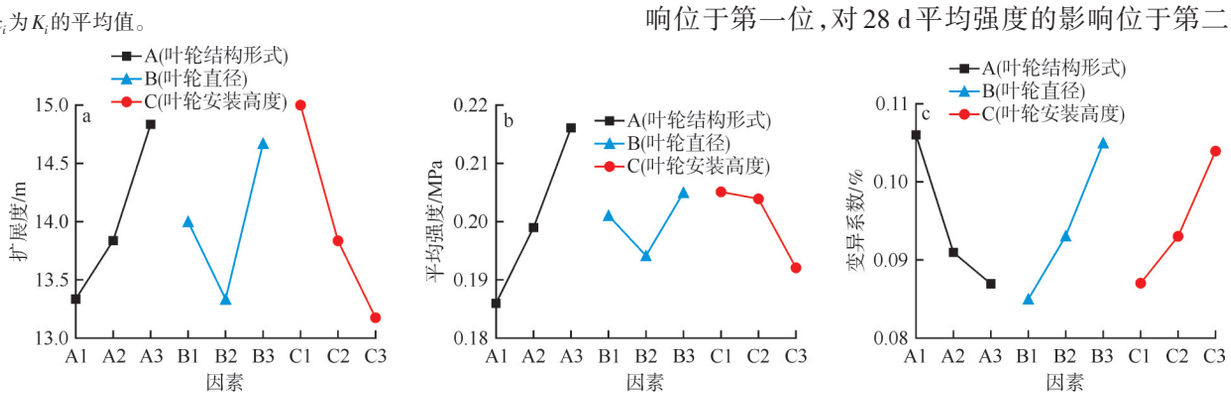


图3　试验指标对搅拌质量的影响

Fig. 3　Effect of test metrics on mixing quality

2.3　搅拌参数试验验证

在确定上述搅拌参数后，设计进行全面试验研究，共进行80组试验，方案见表6。根据设备参数优选试验结果，超细尾砂充填料浆低浓度、低灰砂比试块3 d、7 d、14 d强度较低，为此本次试验全部以28 d强度作为试验指标进行分析研究。

利用最优参数进行搅拌试验，使用4 cm×16 cm条模，在养护室中养护（温度20 ℃±1 ℃，湿度≥90 %），28 d后对试块进行强度测试，计算平均强度和变异系数，结果见图4。

表6　均质化搅拌试验研究方案

Table 6　Research scheme for homogenization mixing test

料浆浓度/%	灰砂比	搅拌速度/(r·min⁻¹)	时间/min
54,58	1∶3,1∶12	1 000,1 200,1 400,1 600,1 800	2,3,4,5

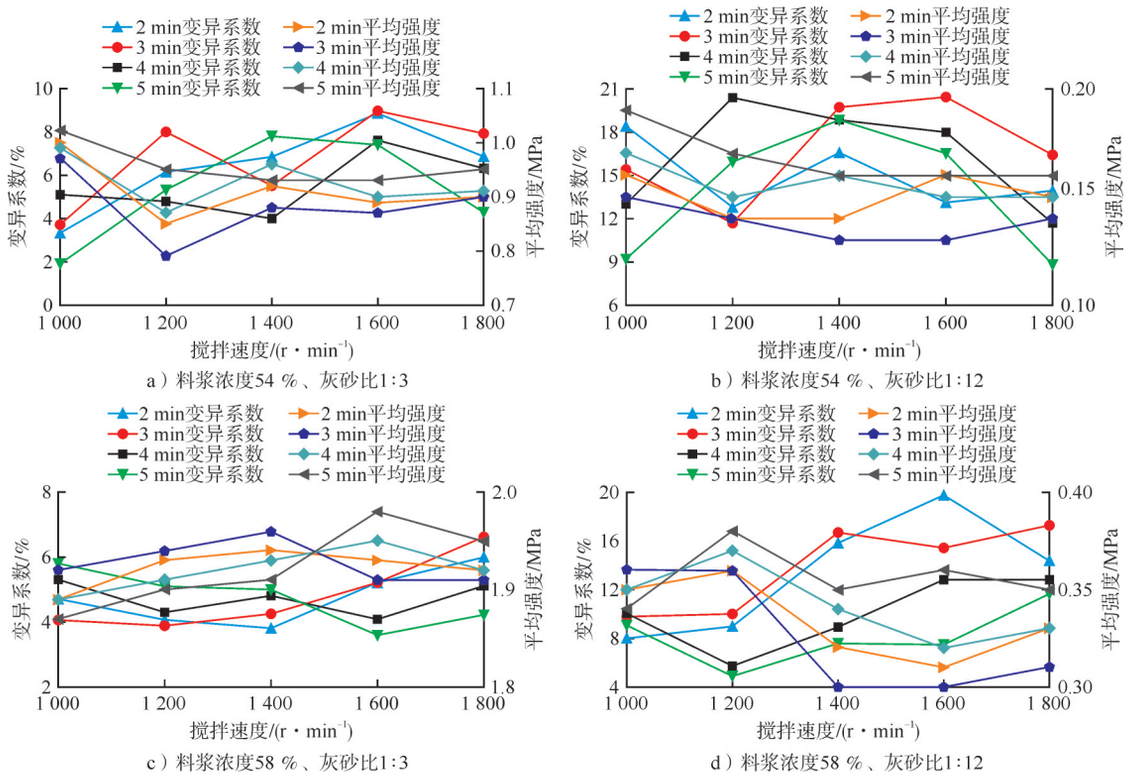


图4　不同料浆浓度、灰砂比试验结果

Fig. 4　Test results with different slurry concentrations and cement-sand ratios

细尾砂充填料浆均质化搅拌效果的影响，将均质化搅拌超细尾砂充填料浆的平均强度和变异系数的变化情况利用曲线图形进行展示（见图4）。搅拌速度对不同料浆浓度、不同灰砂比超细尾砂充填料浆均质化搅拌效果影响不同。混合料浆浓度54 %、灰砂比1∶3，搅拌速度在1 000 r/min时，试块28 d平均强度最高，变异系数最小；当搅拌速度超过1 000 r/min时，随着搅拌速度提高，充填料浆的平均强度存在一定程度的下降，变异系数也有增大趋势。由于是小型搅拌试验，所以平均强度和变异系数的变化幅度并不十分明显。搅拌时间以2 min最优，搅拌时间越长，平均强度和变异系数将存在恶化的趋势。

混合料浆浓度54 %、灰砂比1∶12，搅拌速度为1 000 r/min时，试块28 d平均强度最高、变异系数最小；随着搅拌速度提高，试块的平均强度呈下降趋势，变异系数变化趋势不明显。主要是由于试块整体强度较低，存在一定测量误差和其他操作误差等，但是变异系数还是1 000 r/min时最低。搅拌时间以2 min最优，平均强度随搅拌时间的延长，有下降趋势；变异系数随搅拌时间延长整体呈现先增加后减小的趋势。

混合料浆浓度58 %、灰砂比1∶12时，搅拌速度以1 200 r/min为优。未超过1 200 r/min时，随着搅拌时间延长，试块平均强度有增加趋势，变异系数有减小趋势；超过1 200 r/min时，随着搅拌速度提高，试块平均强度有下降趋势。搅拌时间超过2 min后，变异系数呈现先增大后减小趋势。

由图4可知：不同浓度超细尾砂混合料浆的最优化搅拌速度不同，灰砂比对搅拌速度的影响较小，且所有均质化搅拌试验基本在2 min左右都达到了最佳搅拌效果。为了直观观察搅拌速度和搅拌时间对超

混合料浆浓度58 %、灰砂比1∶3时，搅拌速度以1 600 r/min为优。未超过1 600 r/min时，在搅拌时间相同的情况下，随着搅拌速度提高，试块平均强度有增加趋势，变异系数有减小趋势，在搅拌速度相同的情况下，随着搅拌时间延长，试块平均强度有增大趋势，变异系数有减小趋势。超过1 600 r/min时，随着搅拌速度提高，试块平均强度有下降趋势。搅拌时间超过2 min后，变异系数呈现先增大后减小趋势。

3　结　论

通过均质化搅拌研究及试验，了解了搅拌装置对搅拌效果的影响，得出以下主要结论：

1）考虑矿山充填需求，同时结合其他矿山充填方面的工程经验，推荐选择泵压输送的充填料浆坍落度应为25～27 cm，对应超细尾砂充填料浆浓度为56 %～58 %；选择自流输送时充填料浆坍落度应为27～

29 cm，对应超细尾砂充填料浆浓度为 50 %～54 %。

2）料浆浓度 56 %、灰砂比 1∶8 超细尾砂充填料浆均质化搅拌参数试验研究可以得出，进行不同搅拌速度和搅拌时间的搅拌参数：选择涡轮结构形式叶轮、叶轮直径 7 cm、叶轮安装高度 1 cm，此时搅拌效果最佳。

3）混合料浆的浓度对搅拌速度较敏感，料浆浓度越高，需要的搅拌速度越高，但超过一定搅拌速度后，对超细尾砂充填料浆的均质化效果会产生不利影响，搅拌时间在 2 min 内基本都可以达到较好的均质化效果。

[参 考 文 献]

[1] 胡亚军，陈彦亭，赖伟，等. 超细全尾砂似膏体绿色胶凝充填关键技术研究[J]. 黄金，2023，44(5)：12-15，20.

[2] 赖伟. 尾砂浆体仓式浓密技术及其充填应用[J]. 黄金，2023，44(9)：31-35.

[3] 姜培根，白腾飞，蔚登峰，等. 基于高浓度细粒级尾砂超声波活化的稳态放砂技术试验研究[J]. 黄金，2023，44(4)：10-12.

[4] 张常青. 高浓度胶结充填料强力活化搅拌设备结构与参数的优化[J]. 黄金，2000，21(4)：26-28.

[5] 周家祥，邵霞. 二次搅拌工艺对全尾砂胶结充填质量的影响[J]. 金属矿山，2013(9)：53-55，59.

[6] 苑雪超. 金川矿山废石—全尾砂高浓度充填料浆搅拌方式研究[D]. 昆明：昆明理工大学，2010.

[7] 王洪江，杨柳华，王勇，等. 全尾砂膏体多尺度物料搅拌均质化技术[J]. 武汉理工大学学报，2017，39(12)：76-80.

[8] 杨柳华. 膏体搅拌过程流变特性及剪切作用机制研究[D]. 北京：北京科技大学，2020.

[9] 李翠平，颜丙恒，王少勇，等. 时间-速率双因素下全尾砂膏体的屈服应力易变行为[J]. 工程科学学报，2020，42(10)：1 308-1 317.

[10] 吴爱祥，李红，程海勇，等. 全尾砂膏体流变学研究现状与展望(上)：概念、特性与模型[J]. 工程科学学报，2020，42(7)：803-813.

[11] 吴爱祥，李红，程海勇，等. 全尾砂膏体流变学研究现状与展望(下)：流变测量与展望[J]. 工程科学学报，2021，43(4)：451-459.

[12] JEWELL R J，FOURIE A B. Paste and thickened tailings—A guide[M]. Perth：Australian Centre for Geomechanics，2015.

[13] HUSTRULID W A，BULLOCK R L. Underground mining methods engineering fundamentals and international case studies[M]. Englewood：SME，2001.

[14] ASSAAD J J，HARB J，MAALOUF Y. Effect of vane configuration onyield stress measurements of cement pastes[J]. Non-Newtonian Fluid Mech，2016，230：31-42.

[15] GAWU S K Y，FOURIS A B. Assessment of the modified slump test as a measure of the yield stress of high-density thickened tailings[J]. Canadian Geotechnical Journal，2004，41(1)：39-47.

[16] 冯忠绪. 搅拌理论及其设备的研究进展[J]. 工程机械，2014，45(5)：1-8.

[17] POTVIN Y，THOMAS E G，FOURIS A B. Handbook on mine fill[M]. Perth：Australian Centre for Geomechanics，2005.

[18] MEGGYES T，DEBRECZENI A. Paste technology for tailings management[J]. Land Contamination & Reclamation，2006，14(4)：815-827.

[19] SSOFRA F，BOGER D V. Rheology for thickened tailings and paste-history，state-of-the-art and future directions[C]//JEWELL R，FOURIE A B. Proceedings of 14th international seminar on paste and thickened tailings(Paste 11). Perth：Australian Centre for Geomechanics，2011：131-133.

[20] 张飞鹏，徐迅. 超细粉磨水泥熟料过程中的团聚现象与机理[J]. 中国水泥，2004(5)：34-36.

[21] 冯忠绪，赵利军，申岩，等. 水泥混凝土的流变特性[J]. 工程机械，2019，50(3)：63-66.

[22] 董国强，于涛，童玉升. 夏甸金矿细颗粒尾砂充填技术研究与应用[J]. 黄金，2024，45(3)：9-14.

[23] 姚宣成. 某金矿全尾砂膏体充填优化配比及性能研究[J]. 黄金，2024，45(11)：75-79.

[24] FELICE R D. The voidage function for fluid-particle interaction systems[J]. International Journal of Multiphase Flow，1994，20(1)：153-159.

[25] CAZACLIU B，LEGRAND J. Characterization of the granular-to-fluid state processduring mixing by power evolution in a planetary concrete mixer[J]. Chemical Engineering Science，2008，63(18)：4 617-4 630.

[26] 赵洪亮，殷攀，张立峰. 高固含固液搅拌槽内颗粒悬浮与混合特性[J]. 工程科学学报，2017，39(1)：54-60.

[27] 陈道芳，徐雷兴，陈甘棠，等. 固、液系机械搅拌槽中颗粒悬浮特性的研究[J]. 化学反应工程与工艺，1992，8(1)：44-53.

Optimization of mixing parameters for homogenization of ultrafine tailings filling slurry

Zheng Bokun[1,2,3], Duan Danfeng[1,2], Lü Weipeng[1,2]

(1. *Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd.*;
2. *Hunan Provincial Engineering Technology Research Center for Comprehensive Utilization of Mine Solid Waste*;
3. *National Engineering Research Center for Metal Mining*)

Abstract: The mixing process of slurry plays a pivotal role as a critical link in filling operations. To address the impact of shear forces from mixing equipment on the homogenization of ultrafine tailings slurry, this study optimizes mixing parameters through experimental investigations. Key factors analyzed include impeller type, diameter, and installation height. Homogenization effectiveness was evaluated using spread diameter, average strength, and coefficient of variation. The optimal parameters were determined as an impeller diameter of 7 cm and a bottom clearance of 1 cm, providing theoretical guidance for industrial-scale applications. Through three-factor three-level orthogonal experiments, the most suitable slump and concentration ranges for ultrafine tailings slurry were identified: 25-27 cm and 56 %-58 % for pumping, and 27-29 cm and 50 %-54 % for gravity flow. Additionally, slurry concentration showed significant sensitivity to mixing speed, with higher concentrations requiring increased mixing intensity.

Keywords: ultrafine tailings; filling slurry; mixing device; mixing parameter; fluidity; homogenization; orthogonal test