

超细尾砂均质化搅拌技术研究

郑伯坤^{1,2,3}, 吕伟鹏^{1,2}, 段单峰^{1,2}, 石勇^{1,2}

1. 长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012;
2. 湖南省矿山固废综合利用工程技术研究中心, 湖南 长沙 410012;
3. 国家金属采矿工程技术研究中心, 湖南 长沙 410012



摘要:针对超细尾砂制备成均质化充填料浆时存在搅拌不均匀、流动性差和颗粒团聚等问题,通过数值模拟开展搅拌模型均质化研究。利用多重参考系模型(MRF)方法进行求解,分析超细尾砂料浆在搅拌中的搅拌参数影响,研究搅拌桶叶轮类型、叶轮直径和叶轮安装位置对搅拌均质化的影响,同时建立同向双叶轮的模型进行分析,利用主视图和俯视图的搅拌速度云图反映搅拌效果的好坏。研究得到制备均质化超细尾砂料浆的最佳搅拌参数为:六叶涡轮和叶轮直径为0.9 m,叶轮安装高度为0.35 m;在黏度较大的情况下,增大搅拌速度和延长搅拌时间,可以提高均质化效果。基于某金矿开展了工业试验验证研究,试验所用搅拌桶的搅拌参数按模拟研究结果设置,当料浆浓度为60%时能够达到均质化效果,保水性好,泌水少,无明显大气泡生成,且井下充填体满足矿山充填要求。

关键词:超细尾砂;数值模拟;均质化;搅拌参数;充填料浆

中图分类号:TD853.34 文献标志码:A 文章编号:1005-2518(2025)06-1197-12 DOI: 10.11872/j.issn.1005-2518.2025.06.243
引用格式:郑伯坤,吕伟鹏,段单峰,等.超细尾砂均质化搅拌技术研究[J].黄金科学技术,2025,33(6):1197-1208.ZHENG Bokun, LV Weipeng, DUAN Danfeng, et al. Research on Homogenization and Mixing Technology of Ultra-fine Tailings[J]. Gold Science and Technology, 2025, 33(6): 1197-1208.

随着我国经济社会的发展,国家、社会和公众对矿山开采所带来的环境影响日益重视,充填采矿法不仅可以消耗矿山选矿后产生的尾砂,而且可以消除井下采空区,兼具绿色和安全双重效益的优势,因而在矿业领域得到越来越广泛的应用(苑雪超,2010;吴爱祥等,2016;王洪江等,2017;吴爱祥等,2021)。搅拌桶作为一种在充填领域广泛使用的设备,现阶段的设计、研究主要集中于混凝土行业,对于超细尾砂的均质化搅拌尚未形成系统研究体系。虽然搅拌桶搅拌混合原理并不复杂且构造简单,但对于超细尾砂均质化搅拌的影响机理尚未进行系统研究。利用计算流体力学软件进行立式搅拌桶搅拌效果的研究,在一定程度上可将搅拌过程中的复杂现象通过数值模拟直观地呈现出来(李

少卫,2019),尤其是搅拌中的流场域,从而通过流场变化来推断搅拌效果的优劣。通过不同流场域中表征的搅拌死点区域以及速度、湍动能等分布情况,可以有效评估搅拌效果的优劣(宋泽普等,2021)。针对尾砂愈发细化的趋势,超细尾砂的均质化搅拌成为充填领域的关键技术难题,本文基于立式搅拌桶对超细尾砂的均质化搅拌参数进行研究,实现充填料浆的快速均质化,有助于提高充填体强度、降低灰砂比并减小能耗。

随着充填采矿法的广泛应用,关于充填料浆的均质化搅拌研究呈增加趋势。现有研究主要从搅拌工艺(苑雪超,2010;王洪江等,2017)、搅拌设备参数(Ameur et al, 2016;寇云鹏等,2021)和料浆流变特性(胡松涛等,2024;盛宇航等,2024)等方面,

收稿日期:2024-08-09;修订日期:2024-12-13

基金项目:中国五矿集团有限公司全国重点实验室专项资金项目(编号2024GZKJ04)资助

作者简介:郑伯坤(1984—),男,广东汕头人,高级工程师,从事矿山充填采矿及固废利用研究工作。E-mail:413778846@qq.com

© Editorial Department of Gold Science and Technology (CC BY-NC-ND)

探讨了这些参数对充填料浆均质化搅拌的影响,丰富了充填料浆均质化的研究基础。然而,随着选矿技术的发展,尾砂逐渐趋于细化,而超细尾砂搅拌较难达到良好的搅拌效果,搅拌不足易引发料浆离析,过搅拌则导致功耗增加。因此,确定最佳搅拌参数对于超细尾砂搅拌显得尤为重要。

均质化的超细尾砂料浆泌水率较低且对管道的磨损较小,在料浆输送方面具有明显优势,然而超细尾砂料浆要达到均质化搅拌较为困难。鉴于此,本文旨在研究超细尾砂搅拌影响机理,使用模拟仿真方法进行搅拌参数优化,为实现超细尾砂均质化搅拌奠定理论基础。利用ANSYS 2021 流体软件对超细尾砂充填系统实际搅拌过程中所使用的设备和物料进行模拟仿真分析,最终得到搅拌设备内流场的具体分布状态以及在实际试验中难以获得的搅

拌参数指标,从而通过模拟来指导试验顺利进行。

1 FLUENT分析及计算步骤

1.1 FLUENT建立模型及划分网格

在SOLIDWORKS 2016中对搅拌装置的所有零件尺寸进行1:1建模,零件组装成可被GEOMETRY识别的模型文件。在GEOMETRY中进行搅拌桶内部流场的抽取,即流体计算域。随后,将计算域进行划分,本文所研究的对象是多种搅拌装置,因此需要对每种装置分别进行网格划分,为保证网格质量对结果影响最小,对所有装置的相同区域使用同样的简化方法、划分方法和划分密度(图1);对于不同的区域则需要保证最大的相似性。其中,每2个流体域在仿真过程中通过interior面来传递运动与能量。

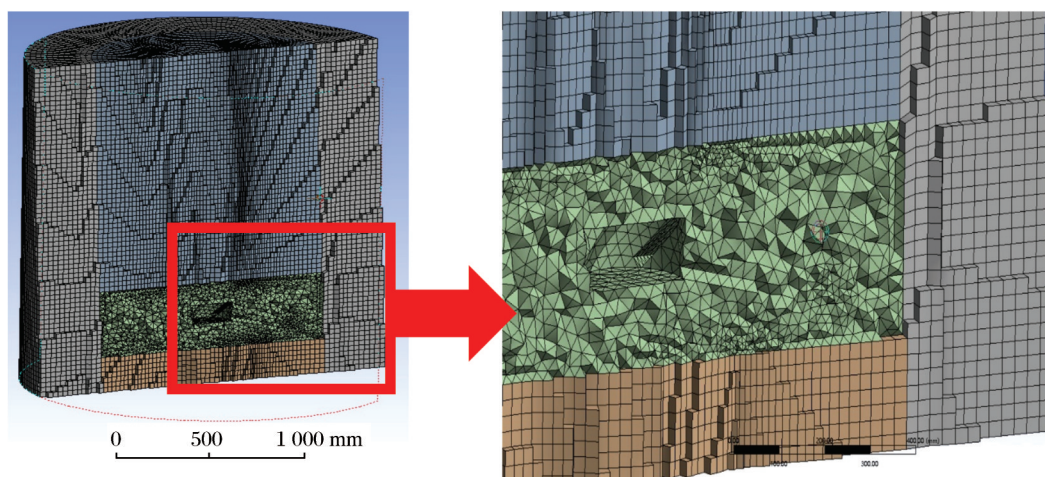


图1 立式搅拌桶建模及网格划分

Fig. 1 Modeling and grid division of vertical mixing barrel

对立式搅拌装置进行网格划分的实质就是利用有限个离散点来代替搅拌装置实际的连续空间。划分网格就是对计算区域离散化,将空间上连续的整个计算区域划分为许多个子区域,并确定每个子区域中的节点。网格划分形式将直接影响仿真过程中的计算精度和计算模型的准确性。合理选择网格数量、疏密度及单元形状是保证网格质量的关键。当流动方向与网格正交时,数值耗散最小,这一特性直接关系到网格的选择。为在保证质量的同时减少网格数量,在对流场区域进行网格划分时,采用以六面体结构网格为主、非结构网格为辅

的策略。以搅拌叶片周围作为搅拌区域,有搅拌叶片区域及其他交界面作为内部的面interior,在求解器中将采用滑移面方法进行搅拌器模拟计算。最终得到所有搅拌装置的计算区域内网格节点数为38万左右,网格单元数为60万左右。

1.2 FLUENT求解器设置

(1)计算模型的选择。超细尾砂料浆流变特性与宾汉姆体相似,属于非牛顿流体(Yang et al, 2019; Zhao et al, 2021)。根据宾汉姆体的流变特性和自身算力限制,选择黏度模型进行求解。求解黏度模型更适合采用旋转体的K-Omega模型。

(2)模拟物象的定义。本研究使用的超细尾砂中,粒径小于 $74\ \mu\text{m}$ (-200目)的颗粒占比约为94%,粒径小于 $11.2\ \mu\text{m}$ 颗粒占比达50%,小于 $20\ \mu\text{m}$ 的颗粒含量约为65%。本次计算的内容为高浓度尾砂和胶凝剂的混合状态,考虑到计算难度和时间,将3种物料看作一稳定的液态物质,只考察物象的黏度和密度(Simon et al, 2013;李翠平等, 2020),不同灰砂比和质量浓度的材料参数定义见表1。

表1 物料流变参数

Table 1 Material rheological parameters			
灰砂比	料浆质量浓度/%	料浆容重/($\text{N}\cdot\text{m}^3$)	黏性系数 η /($\text{Pa}\cdot\text{s}$)
1:4	58	15 510	0.55
	54	14 911	0.40
1:6	58	15 427	0.47
	54	14 840	0.36

(3)边界条件与求解方法。仿真计算旋转区域的运动模型采用多重参考系模型(MRF)(任腾等, 2016;付石, 2022)。该模型采用稳态近似,在各个区域上可以假定不同的旋转或移动速度,每个运动区域网格中使用运动参考系方程求解流动。求解方法采用压力-速度耦合,求解策略选用Phase Coupled SIMPLE,该算法属于一种称为投影法的通用方法。在投影法中,速度场质量守恒(连续性)的约束是通过求解压力(或压力修正)方程来实现的。压力方程由连续性方程和动量方程导出,使速度场经压力修正后满足连续性。由于控制方程是非线性的,并且彼此耦合,因此求解过程涉及迭代,即反

复求解整个控制方程,直至解收敛。空间离散梯度选用基于节点的格林高斯方法(Green-Gauss Node-Based),其余选用一阶迎风求解。

2 搅拌装置优化模拟研究

2.1 搅拌装置参数优化模拟

搅拌装置参数优化模拟研究中,根据尾砂配比试验结果分析,选择灰砂比为1:4和质量浓度为54%的充填料浆作为搅拌介质进行均质化效果研究(王秀丽, 2012;张涛等, 2024)。搅拌桶尺寸为 $\Phi 2\ \text{m}\times 2\ \text{m}$,将搅拌叶轮结构形式、直径和安装位置作为单因素变量开展试验。一般现场搅拌速度控制为150~200 r/min,由于尾砂为超细尾砂选取较中位数大的值,此次试验搅拌速度设置为180 r/min。

搅拌模拟效果以搅拌速度分布为主要评价指标,搅拌速度分布直接影响混合均匀性。搅拌桶内较大的速度分布有利于产生良好的混合效果,其中较高的剪切速率能够有效打散水泥颗粒的团聚体,显著提升料浆的均质化程度(杨建桥等, 2011;冯忠绪, 2014;陈峰宾等, 2022)。为此,以下模拟搅拌以搅拌桶内的物料运动速度作为搅拌效果的评价指标。

首先开展相同直径和安装位置的3种结构形式叶轮搅拌效果的模拟研究,结果如图2和图3所示(由于侧视图与主视图速度分布相似,此处仅展示主视图和俯视图速度分布曲线)。

由图2和图3可以看出,叶轮的形状和排列方式对其搅拌性能具有显著影响,不同叶轮所产生的

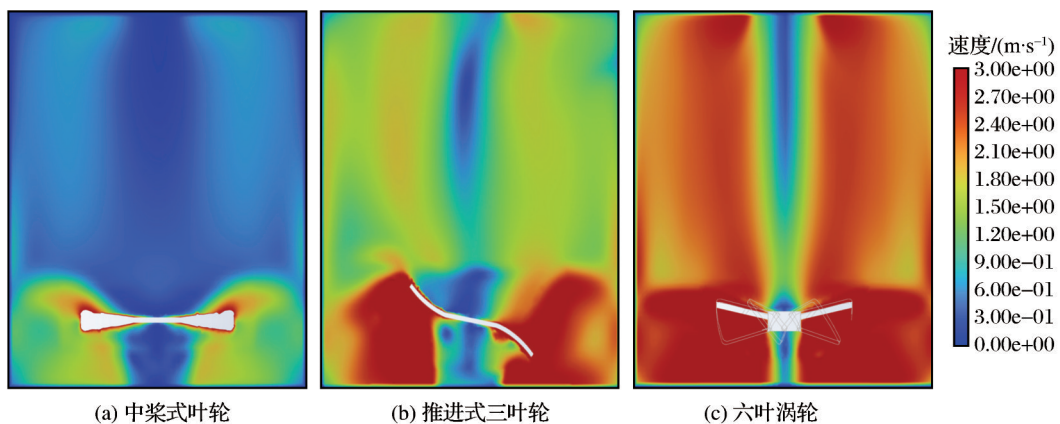


图2 不同形式叶轮搅拌速度主视图(Y-Z平面)

Fig. 2 Main view of different forms of impeller stirring speed (Y-Z plane)

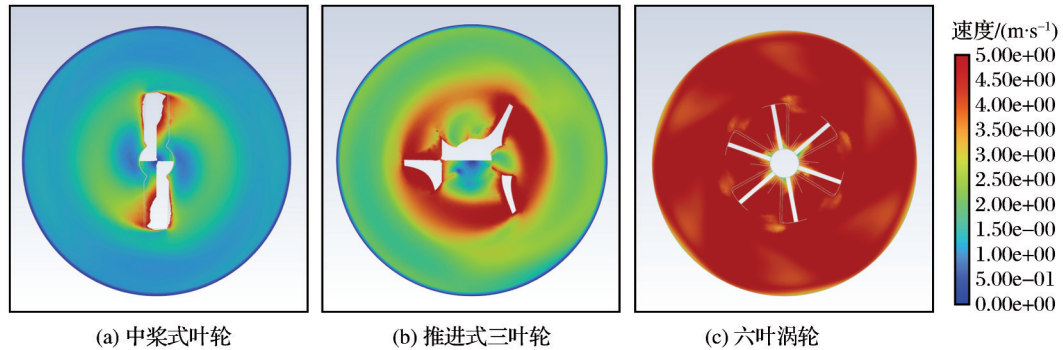


图3 不同形式叶轮搅拌速度俯视图(Y-Z面)

Fig. 3 Top view of different forms of impeller stirring speed (Y-Z plane)

物料速度分布存在明显差异。本次模拟选用了几种常见叶轮类型进行分析:六叶涡轮的叶片数量较多,在俯视图中几乎整个搅拌桶内均产生了大于3 m/s的速度分布;推进式三叶轮则在叶轮周边及其下方较大区域形成了高于3 m/s的速度区域;而桨式叶轮仅在其周边局部达到该速度范围。主视图进一步显示,六叶涡轮所产生速度大于5 m/s的区域范围最大。综合研究表明,在相同条件下,六叶涡轮能使搅拌桶内流体运动最为剧烈,且高速度区域分布最广,因此被选为最佳搅拌叶片,用于后续搅拌效果分析。其次模拟相同叶轮结构、相同安装位置,叶轮直径一般为搅拌桶直径的1/3~1/2,即为0.7~1.0 m,此次对直径分别为0.7 m、0.9 m和1.0 m的叶轮搅拌效果进行模拟研究,结果如图4和图5所示,由于侧视图与主视图速度分布相似,此处仅展示主视图和俯视图速度分布曲线。

由图4可知,对于直径为0.7 m的搅拌叶轮,大

于3 m/s速度分布基本在叶轮端部附近,而对于直径为0.9 m和1.0 m的叶轮,大于3 m/s的速度分布基本覆盖整个流体区域。由图5可知,大于5 m/s的速度分布区域以0.9 m和1.0 m直径叶轮最好。但是0.9 m与1.0 m直径叶轮产生的搅拌速度分布区域基本相同。搅拌叶轮在搅拌过程中的作用至关重要,叶轮的长度对叶轮的耐用性影响显著,较短的叶轮在高黏性超细尾砂中承受的力矩较小,在力学上更加稳定,不易因过大的应力而损坏,维护成本相对较低,因此选择0.9 m直径叶轮开展后续搅拌研究。

最后对叶轮结构和直径相同但叶轮安装高度不同的搅拌效果进行研究。叶轮一般安装在距离桶底1/4~1/3位置处,即叶轮高度为0.25~0.70 m,此次模拟安装距底高度分别为0.35 m、0.50 m和0.70 m的叶轮搅拌效果,结果如图6和图7所示(由于侧视图与主视图速度分布相似,此处仅展示主视图和俯视图

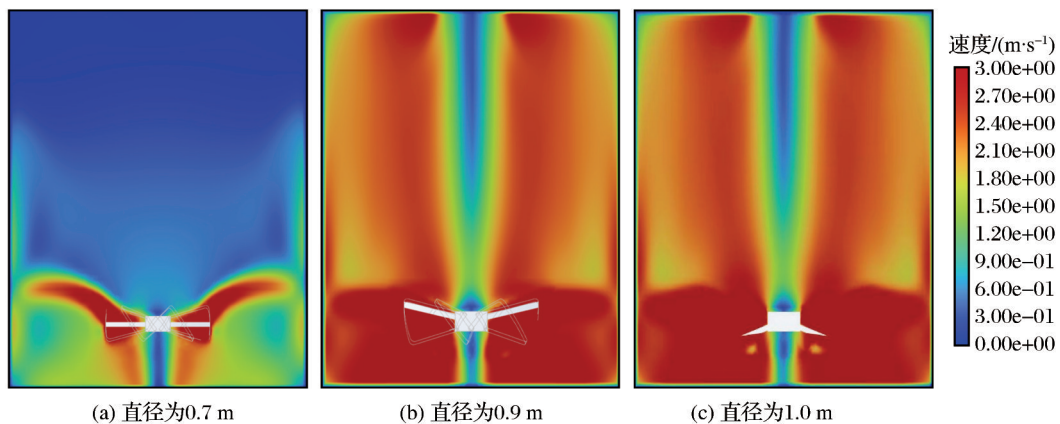


图4 不同直径叶轮搅拌速度主视图(Y-Z面)

Fig. 4 Main view of stirring speed of impellers with different diameters (Y-Z plane)

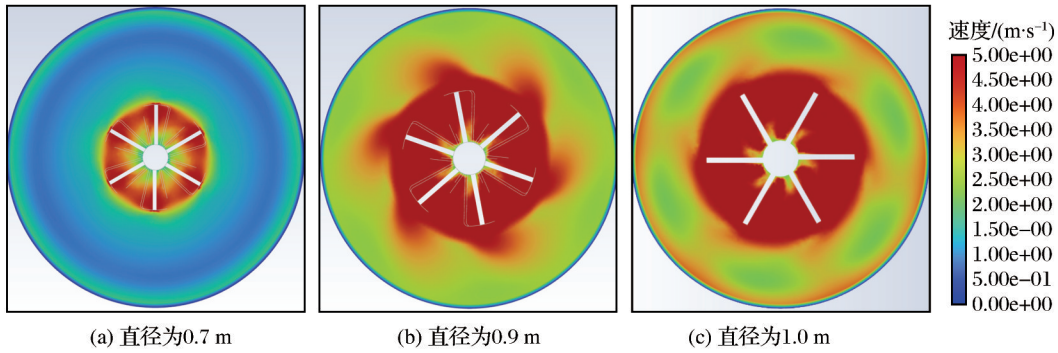


图5 不同直径叶轮搅拌速度俯视图(Y-Z面)

Fig. 5 Top view of stirring speed of impellers with different diameters (Y-Z plane)

图速度分布曲线)。

叶轮不同安装位置对于搅拌速度在搅拌桶底部的分布影响较大。由图6和图7可以看出,距离底部位置越低,底部大于3 m/s搅拌速度分布越广,同时较大的速度带动上部料浆的流动,可以促进桶内充填料浆的均质化混合,速度越大,意味着物料间的剪切作用越强,有助于细化颗粒和提高混合均质化。若速度较小,会使搅拌桶底部沉砂和桶边缘料浆几乎停滞不动,不利于充填料浆的均质化搅拌,因此以安装在0.35 m位置叶轮的搅拌效果最优。但对2 m高的搅拌桶而言,活化搅拌区域仍主要集中在中下部,下面将针对这个问题开展双叶轮搅拌的研究,通过上下同时搅拌,使整个桶内达到活化搅拌效果。

2.2 同向双叶轮搅拌对料浆均质化的影响

开展不同搅拌参数对超细尾砂充填料浆均质化影响研究,由于模拟条件限制,本文仅对2种不

同黏度的物料进行不同搅拌速度的搅拌效果研究,搅拌几何结构参数按照最优试验结果选取。为了研究同向双叶轮能否使得桶内上下料浆的均质化效果提高,从而改善搅拌效果,在距桶底1 m位置再安装一套与底部相同的叶轮,上下同步搅拌加速混合,并进行模拟研究分析。

在物料黏度为0.40 Pa·s和0.55 Pa·s,叶轮搅拌速度为180 r/min的条件下,由于模拟条件的简化,搅拌时间到35 s收敛,搅拌速度分布情况在1 s以后基本趋于稳定,为此仅分析1 s以内的3个时间点,搅拌时间选择0.2, 0.6, 1.0 s,叶轮搅拌速度为180 m/s,物料黏度分别为0.40 Pa·s和0.55 Pa·s,得到速度分布模拟结果如图8~图13所示。

由主视图速度分析结果可知,对于相同黏度物料,在搅拌速度相同的情况下,搅拌0.2 s时,大于3 m/s的速度分布基本位于搅拌轴附近;搅拌0.6 s时,大于3 m/s的速度分布基本覆盖搅拌轴下部区域;搅拌

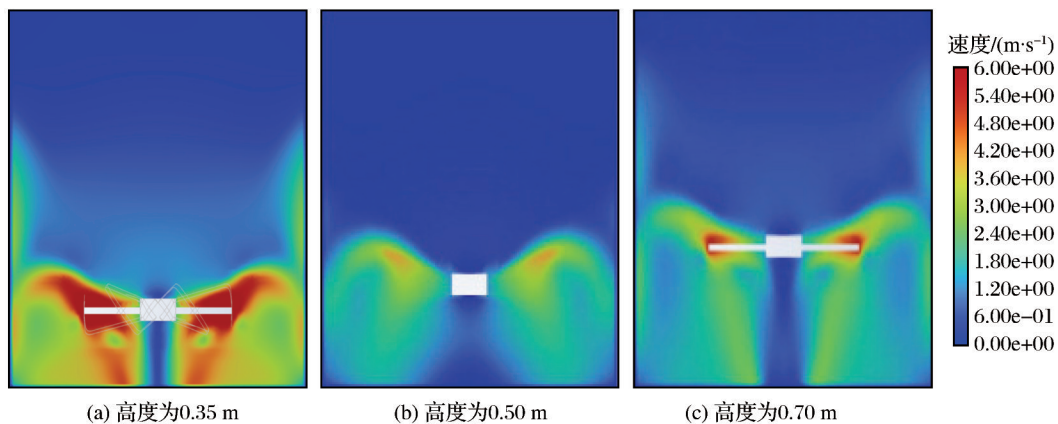


图6 不同高度搅拌速度主视分布图(Y-Z平面)

Fig. 6 Main view distribution diagram of stirring speeds at different heights (Y-Z plane)

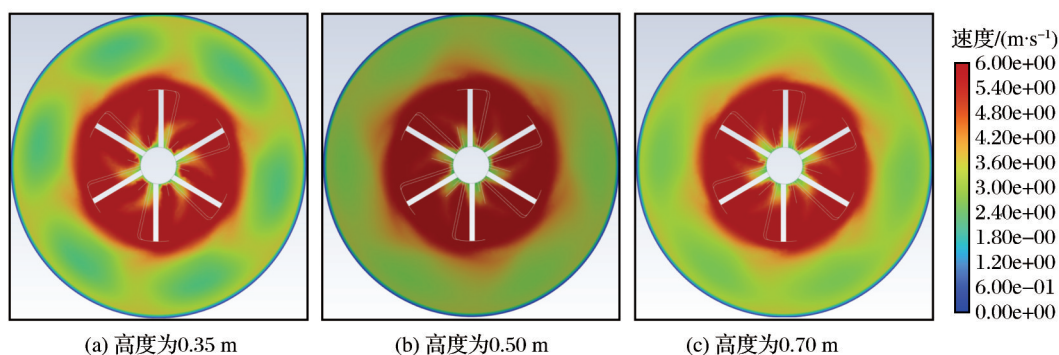


图7 不同高度搅拌速度俯视分布图(Y-Z平面)

Fig. 7 Top view distribution diagram of stirring speed at different heights (Y-Z plane)

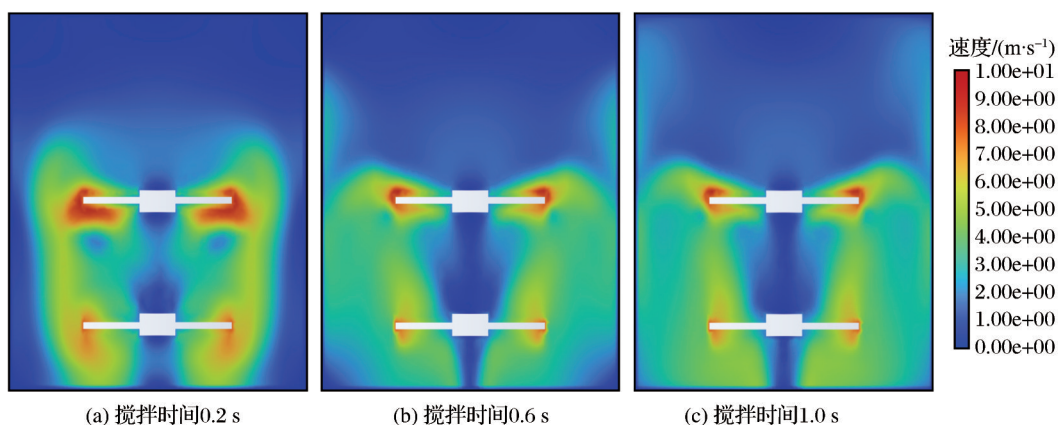


图8 物料黏度为0.40 Pa·s时搅拌速度主视图(Y-Z平面)

Fig. 8 Main view of stirring speed when the materials viscosity is 0.40 Pa·s (Y-Z plane)

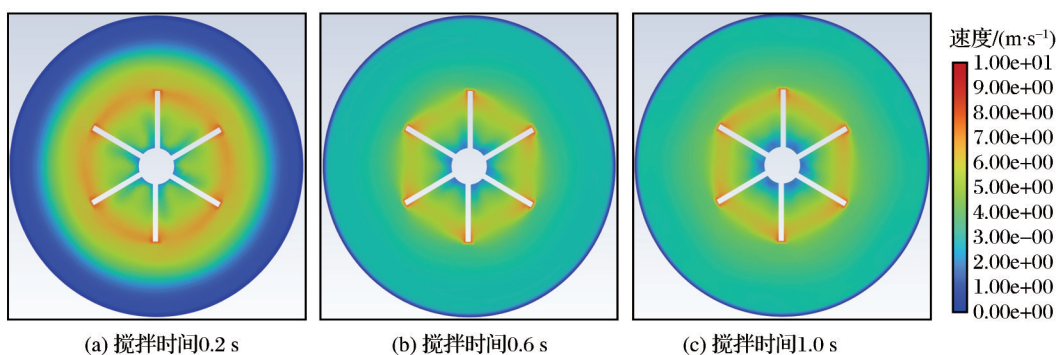


图9 物料黏度为0.40 Pa·s时0.35 m位置的搅拌速度俯视图

Fig. 9 Top view of stirring speed at 0.35 m position when the materials viscosity is 0.40 Pa·s

1.0 s时,速度分布的区域基本不变。从0.35 m和1.00 m高度处搅拌叶轮的俯视图可以看出,速度分布与主视图具有相同的规律,搅拌时间达到1.0 s时,速度分布区域基本稳定。说明延长搅拌时间,可以在一定程度上改善搅拌效果。

由主视图可以看出,对于同种黏度物料,在搅

拌时间相同的情况下,当物料黏度为0.40 Pa·s时,搅拌速度为180 r/min,大于5 m/s的速度分布区域较多,同理在黏度为0.55 Pa·s物料中,俯视图具有相同速度分布规律。当黏度由0.40 Pa·s增大至0.55 Pa·s时,0.35 m位置0.6 s时的搅拌桶边缘的速度明显较低,说明黏度增大需要更大的搅拌速度,

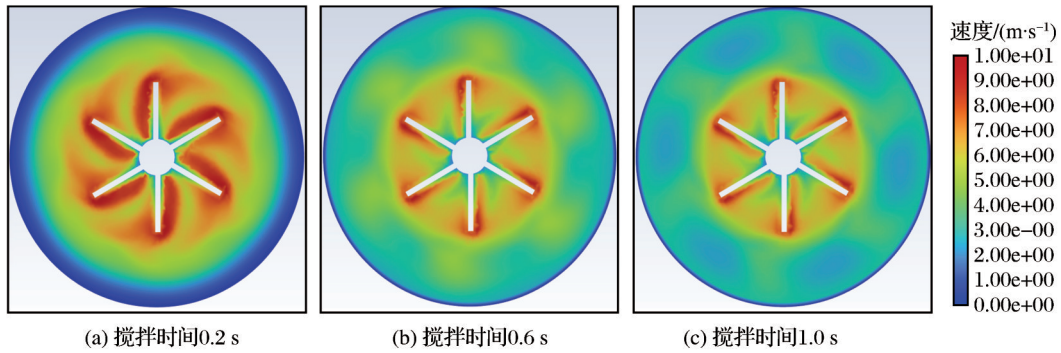


图 10 物料黏度为 $0.40 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 时 1 m 位置的搅拌速度俯视图

Fig. 10 Top view of stirring speed at 1 m position when the materials viscosity is $0.40 \text{ Pa}\cdot\text{s}$

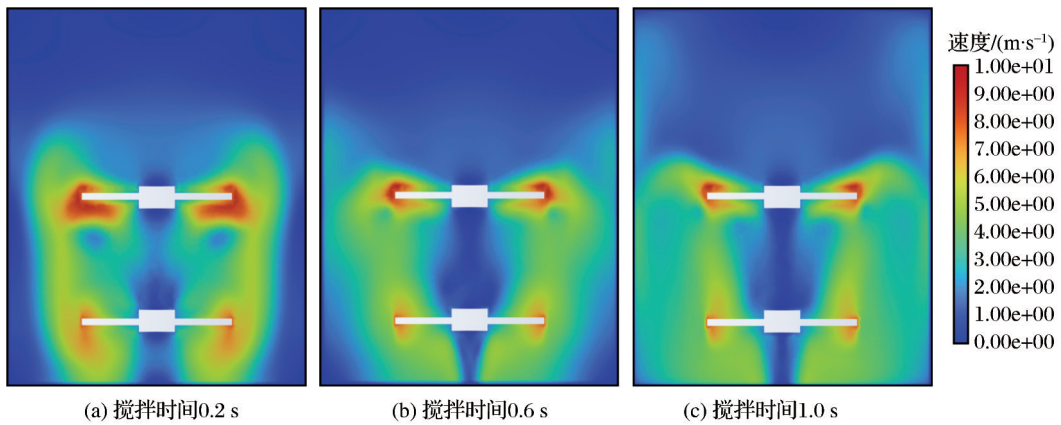


图 11 物料黏度为 $0.55 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 时搅拌速度主视图(Y-Z 平面)

Fig. 11 Main view of stirring speed when the materials viscosity is $0.55 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ (Y-Z plane)

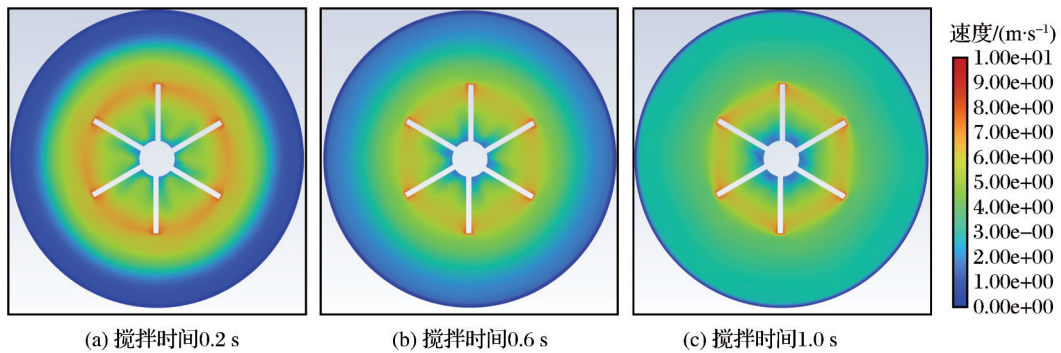


图 12 物料黏度为 $0.55 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 时 0.35 m 位置搅拌速度俯视图

Fig. 12 Top view of stirring speed at 0.35 m position when the materials viscosity is $0.55 \text{ Pa}\cdot\text{s}$

才能较好地提升搅拌效果。

由主视图可以看出,在搅拌速度相同、搅拌时间一致的情况下,黏度从 $0.40 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 提高至 $0.55 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 后,大于 4 m/s 的速度分布区域明显减小,且随着黏度增大,最大速度分布区域明显减小,说明黏度增大时通过增大搅拌速度可以提高均质化搅拌效果。

俯视图具有相同的速度分布规律。由数值模拟结果可知,超细尾砂的黏性系数较大,单叶轮难以活化整个搅拌桶内部的充填料浆,双叶片能够使得更大区域达到活化搅拌效果,后续有待进行双叶轮反向、双叶轮不同转速的研究分析,使整个搅拌桶的充填料浆能够充分活化,达到均质化搅拌的效果。

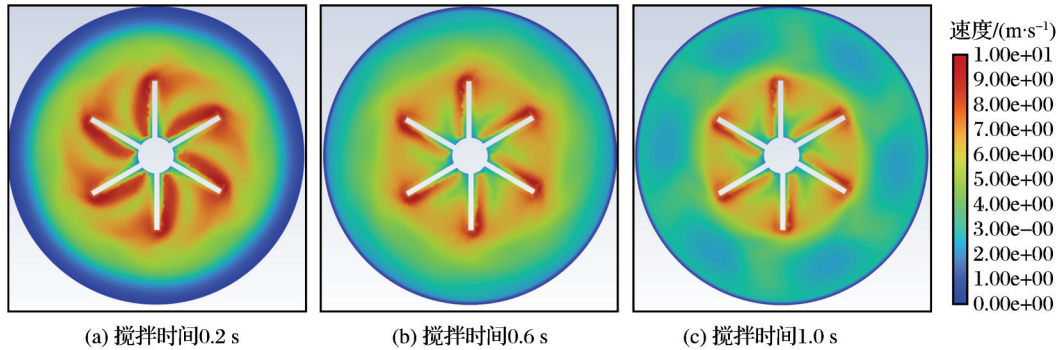


图 13 物料黏度为 0.55 Pa·s 时 1 m 位置搅拌速度俯视图

Fig. 13 Top view of stirring speed at 1 m position when the materials viscosity is 0.55 Pa·s

3 超细尾砂充填料浆搅拌工业试验验证

3.1 半工业试验的充填材料及参数

此次试验验证中搅拌桶的参数均按前文数值模拟分析得到的参数进行设置,采用单叶轮形式搅拌,既能够在强度上满足矿山要求,又能够使得模拟与试验结果相互验证,尾砂选用某金矿的超细尾砂。

半工业试验采用灰砂比为 1:6 的超细颗粒尾砂,当料浆质量浓度为 68% 时,塌落度为 25 cm,需采用泵送压力实现管道输送;当料浆质量浓度为 64% 以下时,塌落度超过 28 cm,料浆流动性好,可实现管道自流输送;当料浆质量浓度为 60% 以上时,料浆的可塑性强,保持水分的能力较强,泌水现象较少,有助于减少分层和分离,从而提高输送效率。

由室内充填强度配比试验可知,在灰砂比为 1:6,质量浓度为 59%~63% 的条件下,充填体的 3 d 强度为 0.64~1.20 MPa。当料浆质量浓度为 61% 和 63%,灰砂比为 1:6 时,充填体强度符合 3 d 强度大于等于 1 MPa 的要求(图 14)。

通过塌落度试验和强度配比试验研究可知,本次工业试验中,当充填料浆浓度大于等于 60%,灰砂比为 1:4~1:6 时,符合井下充填体 3 d 强度大于 1 MPa 的要求。

3.2 工业试验

本次工业试验过程(周家祥等,2013;杨仕教等,2015;吴爱祥等,2019)如下:待放砂稳定后,进行充填料浆搅拌效果强度配比试验并测定其强度,同时分 3 个方向相互验证。取底流充填料浆和立式搅拌桶充填料浆制作试样,同时取井下岩心共 3 批

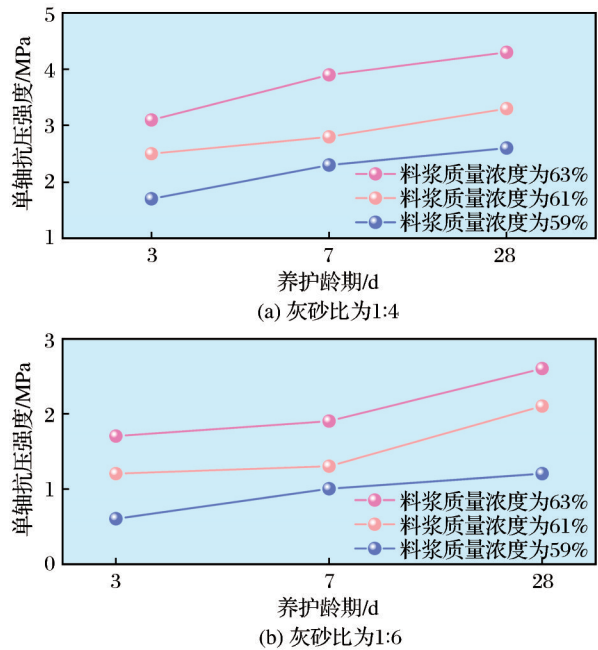


图 14 试块单轴抗压强度

Fig. 14 Uniaxial compressive strength of test block

试块分别测定强度,强度测试方案(曹士凯等,2020;陈作炳等,2022)采用灰砂比为 1:6、料浆质量浓度为 60% 的方案。在立式搅拌桶和底流分别取样充填料浆制作试样,并在井下岩心取样共 3 批试块进行强度测试,每批次取 9 个试块进行强度统计。井下试验充填料浆凝固情况及充填岩心样品如图 15 所示,红色虚线框选显示井下充填面较为平整、无明显隆起且自流动性较好,井下岩心样品的表面和侧面无较大气泡和空隙出现。

由图 16 可以看出,井下充填体制作的试块 3 d 强度均大于 1 MPa,搅拌桶底流制作的试块 3 d 强度有 2 个试块不符合要求,其余 7 个试样均达到设计



图 15 井下充填料浆凝固情况及井下岩心样品

Fig. 15 Solidification status of underground filling slurry and underground core samples

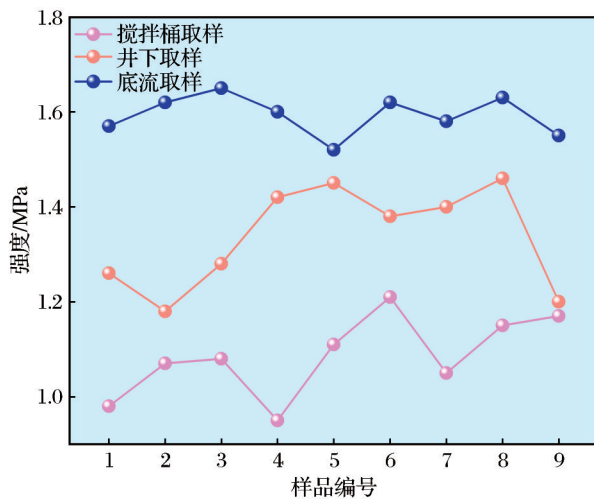


图 16 不同充填体试块强度变化情况

Fig. 16 Strength changes of different filling body test blocks

标准 1 MPa。浓密机底流取样制作的试块强度最高,均达到强度设计标准。由此可知,对搅拌机进行等比例放大后,充填料浆整体的均质化搅拌效果没有小型搅拌机好。因此,在进行数值模拟设计时应提高搅拌效果,使得工业试验具有一定容错。

综上所述,该搅拌桶基本实现了超细尾砂充填料浆的均质化搅拌,井下充填取样试块以及质量浓度为 60%、灰砂比为 1:6 的超细颗粒尾砂充填体的 3 d 强度均大于 1 MPa,满足矿山井下充填体强度要求。该文讨论的参数均建立在 $\Phi 2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 搅拌桶尺寸上,其他形式搅拌叶轮并未研究,且叶轮直径和安装高度仍有中间值未作研究分析。初步判断在粒径分布相近的情况下,对比其他参数搅拌桶,能够实现更优的均质化搅拌效果。

4 结论

通过均质化搅拌的 SolidWorks 建模、数值模拟研究和工业试验,考察了搅拌设备的搅拌参数对搅拌效果的影响,得出以下主要结论:

(1) 通过单变量控制试验对搅拌参数进行优化,结果表明,当叶轮类型为六叶涡轮,叶轮直径取 0.9 m,安装高度为 0.35 m 时,搅拌桶内流体运动最为剧烈,高速度作用区域广,可实现整体均质化搅拌,综合效果最佳。

(2) 当物料黏度增大时,搅拌桶内速度分布区域会明显减小,说明增大搅拌速度可以改善搅拌效果,同时根据不同时间点的搅拌速度云图可知延长搅拌时间可以提高均质化搅拌效果,且黏度增大导致搅拌桶内速度较大的分布范围减小。

(3) 参照数值模拟中的搅拌桶参数,选择某金矿的超细尾砂进行工业试验,井下取样试块均可以达到矿山充填强度要求,充填体 3 d 强度大于 1 MPa。

参考文献 (References):

- Ameur H, 2016. Effect of the shaft eccentricity and rotational direction on the mixing characteristics in cylindrical tank reactors [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 24 (12):1647-1654.
- Simon D, Grabinsky M, 2013. Apparent yield stress measurement in cemented paste backfill [J]. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 27(4):231-256.
- Yang L H, Wang H J, Wu A X, et al, 2019. Shear thinning and thickening of cemented paste backfill [J]. Applied Rheolo-

- gy, 29(1): 80-93.
- Zhao K Y, Zhao L J, Hou J R, et al, 2021. Effect of vibratory mixing on the slump, compressive strength, and density of concrete with the different mix proportions[J]. Journal of Materials Research and Technology, 15: 4208-4219.
- 曹士凯, 王世博, 赵金田, 2020. 基于流变特性分析的膏体充填尾砂级配优化研究[J]. 矿业研究与开发, 40(10): 98-101. Cao Shikai, Wang Shibo, Zhao Jintian, 2020. Optimization of paste filling tailings grading based on rheological analysis[J]. Mining Research and Development, 40(10): 98-101.
- 陈峰宾, 苏芮, 杨柳华, 等, 2022. 搅拌速度对全尾砂膏体流变性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 32(11): 3541-3552. Chen Fengbin, Su Rui, Yang Liuhua, et al, 2022. Effect of mixing speed on rheological properties of cemented paste backfill[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 32(11): 3541-3552.
- 陈作炳, 吴志豪, 孙志胜, 等, 2022. 基于相似理论的大型干法立式搅拌磨仿真分析[J]. 矿山机械, 50(4): 31-35. Chen Zuobing, Wu Zhihao, Sun Zhisheng, et al, 2022. Simulation and analysis of large dry vertical stirring mill based on similarity theory[J]. Mining & Processing Equipment, 50(4): 31-35.
- 冯忠绪, 2014. 搅拌理论及其设备的研究进展[J]. 工程机械, 45(5): 1-8. Feng Zhongxu, 2014. A research progress in concrete mixing theory and the mixer[J]. Construction Machinery and Equipment, 45(5): 1-8.
- 付石, 2021. 基于固液两相流仿真的中高速净浆搅拌技术及其设备研究[D]. 西安: 长安大学. Fu Shi, 2021. Research on medium and high speed slurry mixing technology and equipment based on solid-liquid two-phase flow simulation[D]. Xi'an: Chang'an University.
- 胡松涛, 朱庚杰, 张军童, 等, 2024. 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, 32(3): 425-436. Hu Songtao, Zhu Gengjie, Zhang Juntong, et al, 2024. Application research on cemented fine tailings backfill of gold mines in the Jiaodong area[J]. Gold Science and Technology, 32(3): 425-436.
- 寇云鹏, 郑伯坤, 栾黎明, 等, 2021. 充填料浆搅拌机的桨叶研究[J]. 矿业研究与开发, 41(1): 179-184. Kou Yunpeng, Zheng Bokun, Luan Liming, et al, 2021. Research on blades of filling slurry mixer[J]. Mining Research and Development, 41(1): 179-184.
- 李翠平, 颜丙恒, 王少勇, 等, 2020. 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, 42(10): 1308-1317. Li Cuiping, Yan Bingheng, Wang Shaoyong, et al, 2020. Variability behavior of yield stress for unclassified tailings pasted under measurement time-velocity double factors[J]. Chinese Journal of Engineering, 42(10): 1308-1317.
- 李少卫, 2019. 基于 Fluent 的固液均匀搅拌研究[D]. 西安: 长安大学. Li Shaowei, 2019. Study of solid-liquid uniform stirring based on fluent[D]. Xi'an: Chang'an University.
- 任腾, 赵晶, 王世杰, 2016. 大型搅拌槽不同叶轮高度下矿浆浓度分布的数值模拟[J]. 机械工程师, (5): 50-52. Ren Teng, Zhao Jing, Wang Shijie, 2016. Numerical simulation of concentration distribution under various impeller height for large-scale mixing tank[J]. Mechanical Engineer, (5): 50-52.
- 盛宇航, 裴佃飞, 齐兆军, 等, 2024. 尾砂粒级组成对胶结充填料流变特性与强度的影响[J]. 黄金科学技术, 32(4): 631-639. Sheng Yuhang, Pei Dianfei, Qi Zhaojun, et al, 2024. Influence of particle size composition of tailings on rheological characteristics and strength of cemented tailings backfill[J]. Gold Science and Technology, 32(4): 631-639.
- 宋泽普, 张凌云, 黄腾龙, 等, 2021. 基于 AHP 的矿山充填尾砂料浆搅拌质量评价[J]. 矿业研究与开发, 41(1): 44-47. Song Zepu, Zhang Lingyun, Huang Tenglong, et al, 2021. Study on evaluation of stirring quality of mine filling tailings slurry based on AHP[J]. Mining Research and Development, 41(1): 44-47.
- 王洪江, 杨柳华, 王勇, 等, 2017. 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, 39(12): 76-80. Wang Hongjiang, Yang Liuhua, Wang Yong, et al, 2017. Multi-scale materials' dispersive mixing technology of unclassified tailings paste[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 39(12): 76-80.
- 王秀丽, 2012. 双卧轴强制式混凝土搅拌主机参数优化设计[D]. 济南: 山东大学. Wang Xiuli, 2012. Optimized parameter design of double horizontal shaft concrete forced mixer[D]. Jinan: Shandong University.
- 吴爱祥, 李红, 程海勇, 等, 2021. 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, 43(4): 451-459. Wu Aixiang, Li Hong, Cheng Haiyong, et al, 2021. Status and prospects of research on the rheology of paste backfill using unclassified tailings (Part 2): rheological measurement and prospects[J]. Chinese Journal of Engineering, 43(4): 451-459.
- 吴爱祥, 阮竹恩, 王建栋, 等, 2019. 基于超级絮凝的超细尾砂絮凝行为优化[J]. 工程科学学报, 41(8): 981-986.

- Wu Aixiang, Ruan Zhuen, Wang Jiandong, et al, 2019. Optimizing the flocculation behavior of ultrafine tailings by ultra-flocculation [J]. Chinese Journal of Engineering, 41 (8):981-986.
- 吴爱祥,王勇,王洪江,2016.膏体充填技术现状及趋势[J].金属矿山,45(7):1-9. Wu Aixiang, Wang Yong, Wang Hongjiang, 2016. Status and prospects of the paste backfill technology[J]. Metal Mine, 45(7):1-9.
- 杨建桥,黄德镛,2011.矿用充填料搅拌机研究进展[J].中国非金属矿工业导刊,(5):61-63. Yang Jianqiao, Huang Deyong, 2011. Overview of research on mine-filling mixer [J]. China Non-Metallic Minerals Industry, (5):61-63.
- 杨仕教,陈俊霖,2015.某钨矿全尾砂膏体制备控制系统方案设计[J].南华大学学报(自然科学版),29(2):47-51. Yang Shijiao, Chen Junlin, 2015. Unclassified-tailings paste for backfill mining control system design in a molybdenum mine[J]. Journal of University of South China (Science and Technology), 29(2):47-51.
- 苑雪超,2010.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. Yuan Xuechao, 2010. Study on mixing method of high concentration filling slurry with waste rock and tailings in Jinchuan mine [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology.
- 张涛,李德贤,张鹏强,等,2024.镍渣—全尾砂混合骨料配比试验研究[J].黄金科学技术,32(3):437-444. Zhang Tao, Li Dexian, Zhang Pengqiang, et al, 2024. Experimental study on the ratio proportioning of nickel slag-full tailings mixed aggregate[J]. Gold Science and Technology, 32(3):437-444.
- 周家祥,邵霞,2013.二次搅拌工艺对全尾砂胶结充填质量的影响[J].金属矿山,42(9):53-55,59. Zhou Jiexiang, Shao Xia, 2013. Influence of secondary mixing process on full tailings cementation filling quality[J]. Metal Mine, 42(9):53-55,59.

Research on Homogenization and Mixing Technology of Ultra-fine Tailings

ZHENG Bokun^{1,2,3}, LV Weipeng^{1,2}, DUAN Danfeng^{1,2}, SHI Yong^{1,2}

1. Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha 410012, Hunan, China;

2. Hunan Provincial Engineering Research Center for Comprehensive Utilization of Mine Solid Waste, Changsha 410012, Hunan, China;

3. Research Center of National Metal Mining Engineering Technology, Changsha 410012, Hunan, China

Abstract: As advancements in mining processes persist, tailings are increasingly characterized by finer granularity. Nevertheless, the homogenization of ultra-fine tailings presents challenges, including uneven mixing, limited flowability, and particle agglomeration. To address these challenges, a mixing tank device with dimensions of $\Phi 2\text{ m} \times 2\text{ m}$ was designed using SolidWorks, and its homogenization was analyzed through Fluent numerical simulation. The Multiple Reference Frame (MRF) method was utilized to solve the model, examining two materials with viscosities of $0.40\text{ Pa}\cdot\text{s}$ and $0.55\text{ Pa}\cdot\text{s}$ to assess the impact of various mixing parameters on ultra-fine tailings. The simulation focused on evaluating the effects of impeller type, diameter, and installation height on mixing homogenization. Additionally, a model featuring co-rotating twin impellers was developed for further analysis, employing stirring velocity contour plots from both front and top views to assess stirring performance quality. The study's findings reveal that optimal stirring is achieved with a six-blade turbine, an impeller diameter of 0.9 m , and an installation height of 0.35 m . The axial and radial movement of materials within the stirring tank is vigorous and encompasses a wide range, facilitating uniform mixing. As the viscosity of ultra-fine tailings increases, there is a notable reduction in the area of maximum velocity distribution, necessitating an increase in both stirring speed and duration to achieve improved homogenization. An industrial trial was subsequently conducted using tailings from a gold mine to validate these findings. The mixing parameters for the trial's mixing tank were established based on the research outcomes, with a mixing

speed set at 180 revolutions per minute for a duration of 2 minutes. Upon solidification of the underground backfill slurry, the sample tests indicated satisfactory uniformity, effective water retention, minimal bleeding, absence of significant large bubbles, and a compressive strength exceeding 1 MPa after three days, thereby meeting the criteria for mine backfilling. These research findings offer valuable insights into the homogenization mixing parameters for ultra-fine tailings.

Key words: ultra-fine tailings; numerical simulation; homogenization; mixing parameters; filling slurry

我国低品位、共伴生矿产资源量大幅激活

通过推动绿色矿山建设、创新工艺技术、推广先进适用技术,我国钴、镍、钨等低品位、共伴生资源量大幅增长。

记者11月26日从自然资源部获悉,在全国绿色矿山建设过程中,我国矿山企业将开采回采率、选矿回收率、综合利用率“三率”标准作为约束性指标,资源节约集约利用水平有效提升。通过开展低品位、共伴生再评价,资源量大幅增长,钴、镍新增资源量实现超100%增幅,镍、钨新增资源量超30%增幅,“呆矿”变“活矿”、“小矿”变“大矿”,有效延长矿山服务年限。

在此过程中,各地积极运用5G、物联网和人工智能等技术,开展数字化、智能化矿山建设,实现“采矿不见矿”“无人化采矿”,建成一批无人采矿工作面,极大地提高了矿产资源开发利用效率。

自然资源部副部长、中国地质调查局局长许大纯在近日召开的全国绿色矿山现场交流会上说,在生态环境、财政、市场监管、金融监管、证监、林草等部门和各级自然资源主管部门共同努力下,全国绿色矿山建设取得积极进展,目前已建成1 000余家国家级绿色矿山和4 000余家省级绿色矿山,成为美丽中国建设的生动实践。

(来源:新华社)

我国稀散金属开发利用取得一系列重大突破

作为高新科技发展的关键原材料,我国镓锗钨

等稀散金属开发利用取得一系列重大突破。

自然资源部11月26日发布创新成果显示,我国已经攻克煤铝铜铅锌矿中低品位稀散金属高效提取技术,煤中锗综合回收率由55%提高至80%以上,铅锌冶炼过程镓锗钨综合回收率平均提高10%左右,铜冶炼过程碲铋回收率分别由93%、65%、70%提高至97%、90%和80%。

稀散金属高纯产品制备关键技术及核心装备也取得重要突破。我国自主研发出温度梯度冷凝—晶向控制定向结晶器等5种核心装备,实现半导体分子束外延8N级高纯镓批量稳定生产;开发出第一颗国产平面型高纯锗探测器,填补国内空白;建成超高纯锗等高端原材生产线,实现初级产品向高端产品的跨越;打破国外对高端产品垄断和限制,支撑MBE高纯镓、LCD面板钨、锗单晶衬底、碲化镉薄膜等关键战略金属产品自给率提升至70%以上,在国防、新能源、5G通讯、半导体等领域起到关键支撑作用。

据介绍,镓锗钨等稀散金属对战略性新兴产业、未来产业和国防军工等行业具有不可替代的基础支撑作用,是抢占科技制高点的关键原材料,对提升相关产业链供应链韧性和安全水平至关重要。我国稀散金属主要伴生在煤铝铜铅锌钨等矿物中,但长期以来,采选冶流程长、回收率低及高纯产品质量不稳定、成品率低。这一系列重大突破,有助于结束我国高端原材料和高精尖产品受制于人局面。

(来源:新华社)