机械振动在尾砂浓密与放砂中的协同作用及试验研究*

刘明杰[1],赖伟[2],高峰[2],张高飞[1,2]

(1.河南安钢集团舞阳矿业有限责任公司, 河南 平顶山市 462500;
2.中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要:为揭示机械振动对尾砂浓密与放砂的协同作用机制,在尾砂料浆振动浓密机理的基础上,依托自主研制的振动浓密试验系统,开展振动作用下非连续浓密及放砂试验,验证机械振动对提高尾砂料浆浓密效率,促进底流活化放砂的技术可行性。结果表明:尾砂颗粒在浓密机体内以锥体结构堆积是提高底流质量浓度的关键;偏心振动机构以正弦简谐运动方式传导能量,振动杆激振作用范围与料浆容重、振动器质量相关;振动过程中振动杆周围形成圆柱体的活化区域,屈服应力越低、塑性黏度越高,作用半径越大;相较于无振动条件,振动作用下随着给料速度的增加,底流质量浓度平均提高7.74%,溢流水含固量平均提高10.11%,而溢流水上升速度增加不明显。研究成果为开发机械振动辅助高效浓密设备的研制提供了依据。

关键词:机械振动;尾砂浓密;活化放砂;活化机理;底流质量浓度;溢流水含固量

中图分类号:TD853.34 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)01-0126-07

Cooperative Effect and Experimental Study of Mechanical Vibration in Tailings Thickening and Sand Discharge

LIU Mingjie[1], *LAI Wei*[2], *GAO Feng*[2], *ZHANG Gaofei*[1,2]

(1.Henan Ansteel Group Wuyang Mining Co., Ltd., Pingdingshan, Henan 462500, China;
2.School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China)

Abstract: To reveal the synergistic mechanism of mechanical vibration on tailings thickening and sand discharge, based on the mechanism of tailings slurry vibration thickening, an experimental system for vibration thickening independently developed was used to conduct discontinuous thickening and sand discharge experiments under vibration. The technical feasibility of mechanical vibration to improve tailings slurry thickening efficiency and promote underflow activation and sand discharge was verified. The results show that the accumulation of tailings particles in a conical structure within the thickener is the key to improving the mass concentration of the underflow. The eccentric vibration mechanism transmits energy in a sinusoidal harmonic motion, and the excitation range of the vibrating rod is related to the slurry density and vibrator mass. A cylindrical activation region is formed around the vibrating rod during vibration, with a larger radius when the yield stress is lower and the plastic viscosity is higher. Compared with the no-vibration condition, with the increase of feeding velocity under vibration, the underflow mass concentration is increased by an average of 7.74%, the solid content of overflow water is increased by an average of 10.11%, while the increase of the overflow water rising velocity is not obvious. The research results provide a basis for the development of mechanical vibration-assisted high-efficiency thickening equipment.

Key words: Mechanical vibration, Tailings thickening, Activated sand discharge, Activation mechanism, Underflow mass concentration, Solid content of overflow water

0 引言

基于重力浓密技术的仓式尾砂浆体浓密系统,具有工艺流程简单、尾砂不落地、绿色环保且运维管理简单、便于智能化控制等特点,是实现高质量充填的关键装备子系统,也是当前充填技术与装备领域的主要研究发展方向之一[1-2]。针对矿山“采矿-选矿-充填”流程中突出的时空匹配矛盾关系,无耙架浓密机(含砂仓式)因其结构简单、投资较低,对粗细粒级的尾砂适应性强,被广泛应用于中小矿山[3]。

* **收稿日期**:2025-02-14
基金项目:湖湘青年英才项目(2020RC3088)
作者简介:刘明杰(1988—),男,河南舞钢人,工程师,主要从事矿山运营与管理方面的工作。E-mail:1204206628@qq.com

无耙架浓密机一般配备造浆系统，当尾砂发生板结时，可启动造浆系统，对仓内沉砂局部区域或者全仓实施流态化处理，满足浓密机沉砂流态化放砂的需求[4]。沉砂造浆采取高压风、高压水或者风水联动的方式，其中高压风造浆为全仓活化技术，造浆和放砂过程中不能进砂；高压水造浆为局部活化造浆技术，会稀释已浓缩形成的高质量浓度尾砂料浆，同时由于能量的趋利避害特性，高压水造浆料浆的均质性难以控制，导致放砂质量浓度不稳定。

此外，随着选矿技术的发展，矿山选矿磨矿细度越来越细，部分矿山选矿磨矿粒度－400 目占比达到 85%以上，尾砂粒级越细沉降速度越慢，尾砂浓密效率大幅下降[5-7]。无耙架浓密机受仓体直径的限制，在不添加絮凝剂时，溢流水存在跑浑现象，溢流水质量浓度达到 5%～15%，带走大量细颗粒尾砂。为提高尾砂沉降效果，可采用增大池体结构(如高度)来增加仓内的泥层厚度，以期达到更大泥层压缩荷载，提高仓体内沉砂的有效孔隙水压，进而提高渗流速率，达到快速提浓的目的，但仓体投资和设计难度均大幅增大[8-9]。在添加絮凝剂的情况下，随着絮凝沉降进行，尾砂絮团孔隙水上溢，脱水难度随之增大，提浓效率下降，且絮凝剂的桥架作用使得泥层的渗透性变差，尾砂絮凝沉降相比自然沉降压缩泌水时间延长[10-11]。此外，国内学者通过研究超声波及磁化处理对尾砂料浆沉降的影响，发现二者在缩短尾砂浓密时间以及提高放砂速度方面有较好的作用[12-13]。但是，无论是上述单一方法还是多种方法的综合运用，均属于静态沉降研究范畴。而立式砂仓装砂储砂过程中，尾砂沉降速度、溢流浓度随装砂高度增加而动态变化，是一个动态过程。因此，从动态的角度和思路研究改善浓密系统工作性能具有重要意义。

为此，本文将振动技术引入尾砂浓缩和沉砂流态化，提高尾砂浓缩脱水效率，解决沉砂流态化放砂技术难题，以期为实现高浓度高稳态充填和振动浓密设备的开发提供理论与技术基础。

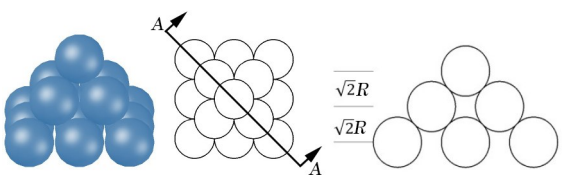
1　尾砂料浆振动浓密模拟系统

尾砂浓密的实质是颗粒集群下沉的过程，浓密沉降规律的核心就是颗粒在介质中的沉降规律。颗粒在介质中的沉降状态，包括两个类别，即自由沉降和干涉沉降[14]。由于颗粒尺寸的大小、形状的各异性，在尾砂浓密过程中，颗粒排列立体结构起到至关重要的作用。

一般来说，理想的球形散体颗粒的挤密排列方式包括简单立体结构、简单交错结构、楔形结构、锥体结构和四面体结构 5 种形式，其密实程度依次递增。根据相关理论模型[15]，进入压缩阶段的尾砂料浆的颗粒孔隙比介于 0.35～0.91 之间，但锥体结构仅为简单立体结构孔隙比的 38.5%，锥体结构密实度更高。图 1 所示颗粒呈锥体结构，颗粒接触的点数为 12 个，层之间的间距为$\sqrt{2}R$，相比简单立体结构，颗粒之间更紧密，层间距更小。截取一个单元体，其边长是$(4/\sqrt{2})R$，体积为$(32/\sqrt{2})R^3$，在这个立方体单元中有 6 个半球和 8 个 1/8 球体，每个球体的体积为$(4/3)\pi R^3$，因此锥体结构的孔隙比为：

$$e=\frac{\frac{32}{\sqrt{2}}R^3-4\left(\frac{4}{3}\pi R^3\right)}{4\left(\frac{4}{3}\pi R^3\right)} \tag{1}$$

式中：e 为孔隙比；R 为颗粒半径。



(a) 立体图　(b) 俯视图　(c) A—A 剖面图

图 1　颗粒呈锥体结构

Fig.1　The particles exhibit a conical structure

因此，使尾砂颗粒在浓密机体内的排列方式尽可能多地从简单立体结构向锥体结构转变是提高底流浓度的关键。如前所述，除添加絮凝剂或磁化水、超声波处理和电场磁化处理等快速沉降浓密方法外，机械振动时机械外力可克服砂土、混凝土等材料的剪应力并使其液化，从而促进土体和混合材料颗粒加速沉降、密实并成型[16-18]。振动作用下尾砂料浆浓密试验表明[19]，振动能够有效提高浓密机浓密效率，并增强底流活化放砂功能。

基于振杆密实法，本文搭建了振动浓密模拟试验系统，结构如图 2 所示，主要包括浓密试验机、振动杆及控制系统(电机驱动与电脑)、蠕动泵、变速搅拌器等。

其中，浓密试验机为高度 500 mm、内径 100 mm 的亚力克密闭圆桶，刻度分度值 1 mm；放料口直径 14 mm[19]，配套开关阀门。振动杆为外径 22 mm、长度 600 mm 的亚克力圆管，底部密闭，管内

安装承重铅条,以及带电机的偏心转子(振动轮),偏心转子可替换(不同惯量),电机为 DC-BL1634 系列空心杯电机,振子转速为 0～15 000 r/min 可调。

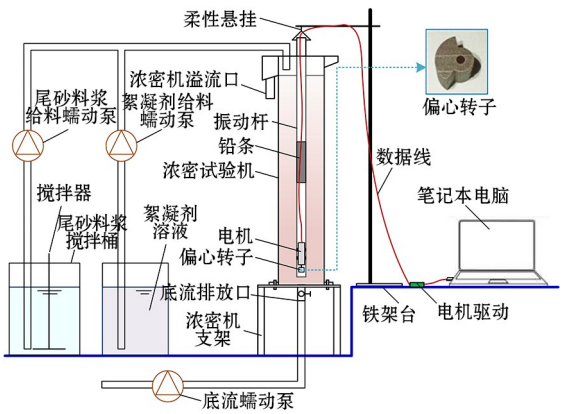


图 2 振动浓密模拟试验系统组成

Fig.2 Composition of vibration thickening simulation test system

试验时振动杆插入浓密试验机桶内,上部用柔性绳悬挂于铁架台上方的悬挂支架的合适位置,使振动杆位于浓密桶的中心位置,且与浓密试验机内底部距离 1 cm。振动杆通过内置电机带动偏心转子转动产生振动,振动参数由电脑端软件设置。

通过该试验系统,以观测振动作用下浓密机连续进放砂效果,测试浓密机的底流质量浓度、浓密机溢流水澄清效果,进一步分析验证振动作用下非连续浓密和活化放砂的试验结果。

2 振动浓密机理分析

2.1 振动的能量传导方式

振动机构是将动力源的运动和力转换为振动输出的装置,根据振动产生原理将振动机构分为 3 大类型:偏心振动机构、轴向振动机构和多边形冲击机构[20]。本文试验系统采用偏心振动机构的单偏心结构,其工作原理如图 3 所示,振动装置使用回转的偏心块,这类振动器产生正弦简谐运动[21],其运动方程为:

$$x=S\sin\omega t=S\sin 2\pi ft \tag{2}$$

式中:x 为振动装置振动的位移,m;S 为振动装置振动的振幅,m;f 为振动装置振动的频率,Hz;t 为振动时间,s;ω 为角频率,rad/s。

对式(2)求导得出振动装置质点的最大速度和最大加速度,其速度方程为:

$$v=2\pi fS\cos 2\pi ft \tag{3}$$

在此振荡期间,质点最大速度方程为:

$$v_{\max}=2\pi fS \tag{4}$$

式中,$v_{\max}$ 为质点最大速度为 $2\pi fS$。

而加速度方程为:

$$a=4\pi^2 f^2 S\sin 2\pi ft \tag{5}$$

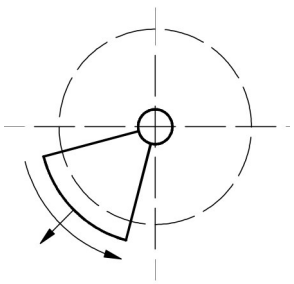


图 3 单偏心振动机构工作原理

Fig.3 Working principle of single eccentric vibration mechanism

振动期间质点的最大加速度方程为:

$$a_{\max}=4\pi^2 f^2 S \tag{6}$$

式中,$a_{\max}$ 为质点最大加速度,m/s^2。

机械振动使尾砂浆体颗粒密实来提高料浆浓度,其核心是使尾砂料浆中的颗粒保持运动状态,以减小或消除颗粒间的摩擦阻力。加速度不能过小或过大,过大时会干扰尾砂颗粒沉降运动的方向,反而不利于压密。振动浓密期间,传递给尾砂料浆的功,可按下式计算:

$$W=C_1 MS^2 f^3 t \tag{7}$$

式中:W 为能量,J;C_1 为与料浆硬度和阻尼性质有关的常量;M 为料浆质量,kg。

将尾砂料浆视为弹性介质,振动对尾砂料浆的压密作用可通过平面正弦压力波的传递表征,其数学关系可用下式表达:

$$S_x=S_0 e^{-\frac{\Omega}{2}x} \tag{8}$$

式中:S_x 为离参考点距离为 x 处的振幅,m;S_0 为参考点 0 处的振幅,m;Ω 为阻尼系数;x 为离参考点 0 的距离,m。

压力波传递时产生的最大压力值为:

$$P=v_{\max}c\rho \tag{9}$$

式中:c 为波速,m/s;ρ 为密度,t/m^3。

根据通过弹性介质时波传导原理,有:

$$c=\lambda f=\sqrt{\frac{E}{\rho}} \tag{10}$$

式中:E 为动弹性模量,MPa;λ 为波长,m。

2.2 振动杆激振作用范围

振动杆中的振动器(振子)是按照不平衡质量设

计的,振子的扰动力是振源。振子振动力 F 由偏心振子质量、圆周速度和偏心距决定[22]。

$$F=\frac{m_1 v_1^2}{r}m_1\omega^2 r \tag{11}$$

式中:m_1 为偏心振子质量,kg;v_1 为圆周运动速度,m/s;r 为振子偏心距,m。

简谐振动圆周运动如图 4 所示,当 A 点运动时,F 在 X 轴上的投影为 $m_1\omega^2 r\cos\omega t$,为典型的简谐振动。该简谐振动的周期 $T=2\pi/\omega$,振动频率 $n=\omega/2\pi$。

当振动运行稳定时,振动杆(除振子外的其他部分)的质量 m 具有一定的速度 v 和加速度 a,计算公式见式(12)。

$$v=\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t},a=\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2} \tag{12}$$

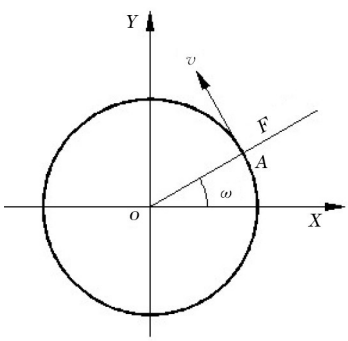


图 4 简谐振动圆周运动示意

Fig.4 Schematic of circular motion of simple harmonic vibration

在偏心振子的振动力(见式(11))的作用下,振动体(振动杆)发生振动,在每一瞬间,偏心轮和整个振动杆的平衡条件为:

$$m_1 v=(m+m_1)v_1 \tag{13}$$

或者:

$$m_1\omega r=(m+m_1)\omega A \tag{14}$$

式中,m 为振动杆的质量,kg。

振动杆的振幅 A 为:

$$A=\frac{m_1}{m+m_1}r \tag{15}$$

振子作为激振源使其周边介质发生强迫振动,与振子接触的介质质体速度为 An;质体的动量等于振动力的冲量 AnM 且应当与振动器冲量平衡。即单位振动时间内的冲量(F/n)等于质体的动量,得:

$$\frac{F}{n}=AnM \tag{16}$$

将式(6)代入式(11)、式(13)和式(14)得:

$$\frac{m_1 r}{m+m_1}=\frac{m_1\omega^2 r}{Mn^2} \tag{17}$$

被振动质体(尾砂料浆)的质量 M 为:

$$M=\frac{(m+m_1)\omega^2}{n^2} \tag{18}$$

由于 $\omega=2\pi n$,故:

$$M=4\pi^2(m+m_1)\approx 39.48(m+m_1) \tag{19}$$

即振动杆可处理的料浆质量约为其本身质量的 40 倍。由于振动杆影响范围可视为一个椭球体,将其简化为振动范围局限在以椭球体长半轴和短半轴平均值为半径(R_0)的球体内,即:

$$\frac{4}{3}\pi R_0^2\gamma=39.48q \tag{20}$$

$$R_0=\sqrt[3]{9.43\frac{q}{\gamma}} \tag{21}$$

式中:γ 为充填料浆的容重;q 为振动器质量,即振动杆与偏心振子质量之和($m+m_1$)。

2.3 尾砂料浆振动活化机理

进一步从力学的角度分析尾砂料浆振动活化机理,本文尾砂料浆指已完成浓密进程的底部沉砂。描述膏体流变行为的模型主要有宾汉姆(Bingham)模型、H-B(Herchel-Bulkley)模型和 Ostwald 模型,其中宾汉姆模型又称为塑性模型,通过流变力学试验研究验证,高浓度尾砂料浆符合宾汉姆模型[23],能对其流变规律进行较为准确的描述。采用屈服应力和塑性黏度来表征料浆的流变性能 τ,用式(22)表示:

$$\tau=\tau_0+\mu_p(\partial\gamma/\partial t) \tag{22}$$

式中:τ_0 为屈服应力,Pa;μ_p 为塑性黏度,Pa·s;$\partial\gamma/\partial t$ 为速度梯度或速度指数,s^{-1}。

当 $\tau-\tau_0\leqslant 0$ 时,料浆基本不发生任何变化,呈似固态;当 $\tau-\tau_0>0$ 时,料浆结构被剪切破坏,呈液化流动,此时料浆流动特性受到塑性黏度的影响,塑性黏度越高料浆越难以液化流动,相反则易于液化。由此可见,影响料浆流变性质的主要因素是屈服应力和塑性黏度。

尾砂料浆振动活化区域分布如图 5 所示,机械振动会在振动杆附近产生高于尾砂料浆屈服应力的剪切应力,并随着与振动杆轴线距离的增加而单调递减,至一定距离时剪切应力低于屈服应力,因此振动过程中振动杆周围会形成圆柱体的活化区域,该区域以内的尾砂浆体为流动状态的液体。

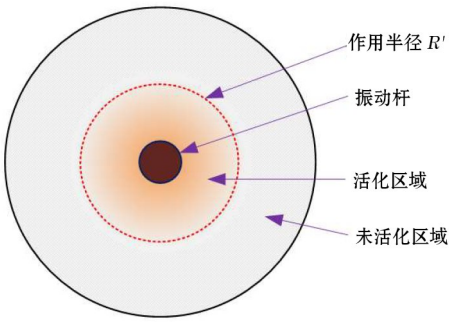


图 5 尾砂料浆振动活化区域分布

Fig.5 Distribution of vibration activation region of tailings slurry

在活化区域内,振动杆和尾砂料浆的接触界面受到的剪切应力最大,尾砂料浆活化界面处受到的剪切应力等于屈服应力。

$$R'=\sqrt{\frac{\tau_w}{\tau_0}r_0^2} \tag{23}$$

式中:R'为振动杆的作用半径,m;τ_w 为振动杆和尾砂浆体接触面的最大剪切应力,Pa;r_0 为振动杆外形的半径,m。

从式(23)可以看出,振动杆附近产生的剪切应力越高、料浆屈服应力越低、振动杆外形的半径越大,作用半径越大。即屈服应力和塑性黏度对作用半径存在相反的影响,屈服应力越低、塑性黏度越高,作用半径越大。此外,塑性黏度越高,气泡的排出速度越慢,需要更长时间的振动以达到密实的目标。

3 试验过程与结果分析

3.1 试验材料

本次试验样品为全粒级尾砂样品,取自某矿山选厂尾矿集料槽,采用 X-射线荧光定性(半定量)分析方法测试得到样品尾砂主要成分为 SiO_2、MgO、Fe_2O_3、CaO 和 Al_2O_3,含量分别为 42.07%,14.02%,12.13%,11.80%和 8.67%。尾砂密度为 2.29 t/m^3,其粒级分布曲线如图 6 所示。

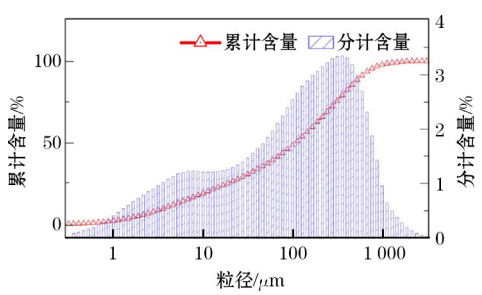


图 6 尾砂粒级分布曲线

Fig.6 Curves of particle size distribution of tailings

尾砂平均粒径 210.5 μm,比表面积 602.5 m^2/kg。由粒级测试结果和级配曲线可以看出,尾砂的粒级分布连续,根据测试结果计算得出颗粒不均匀系数 C_u 为 42.9(≥5),曲率系数 C_c 为 1.55(1~3),尾砂粒级组成不均匀,级配良好。

试验步骤如下。

(1) 配置絮凝剂溶液:采用高精度电子秤称取絮凝剂 (0.25±0.01) g,在 1 000 mL 烧杯中加入(500±0.5) g 水,搅拌水形成旋涡,将絮凝剂均匀地分散在涡流表面,搅拌直至完全溶解。絮凝剂溶液质量浓度为 0.05%,该溶液在 24 h 内使用。

(2) 配制尾砂料浆:按照最佳给料质量浓度配置尾砂料浆。

(3) 将试验浓密机加满水。

(4) 按照设计的流量进砂,同时按照絮凝剂最佳掺量加入絮凝剂。

(5) 根据前期研究成果[19],固定转速 6 000 r/min、选择振动惯量为 0.158 g·cm^2 的振子开展絮凝连续进放砂浓密试验,研究振动作用下絮凝沉降规律。

(6) 当泥层高度为 150 mm 时,开始取样测量溢流水含固量;当泥层高度为 300 mm 时,开始取样测量底流质量浓度。

3.2 试验方案

(1) 絮凝剂添加方案。

采用单因素变量法来确定适合混合料浆的最优絮凝剂种类及其掺量。经验证,选择 XNJ1 絮凝剂作为最优絮凝剂开展试验,最佳掺量为 30 g/t。

(2) 尾砂浆最佳给料质量浓度。

采用单因素变量法确定的最优絮凝剂和最佳掺量开展试验,不同质量浓度料浆絮凝沉降曲线如图 7 所示。随着质量浓度的增大,絮凝沉降的速度越慢,质量浓度为 10%时沉降最快。因此,本文采用质量浓度为 10%的尾砂料浆开展动态浓密试验。

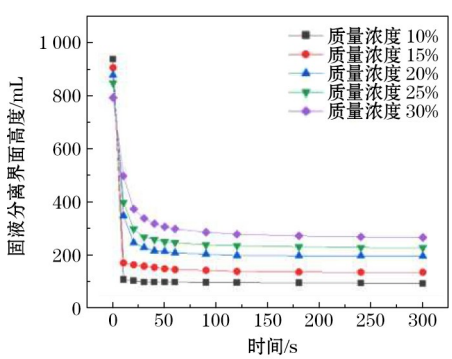


图 7 不同质量浓度尾砂料浆沉降高度随时间变化曲线

Fig.7 Curves of settling height of tailings slurry with different mass concentrations varying with time

3.3　结果分析

有无振动两种情况下的试验结果见表 1 和图 8。

表 1　动态浓密试验结果

Table 1　Results of dynamic thickening tests

试验条件	试验序号	给料速度/(t/(m²·h))	给料质量浓度/%	絮凝剂掺量/(g/t)	底流质量浓度/%	溢流水上升速度/(m/h)	溢流水含固量/(mg/L)
无振动	1	0.30	10	30	62.80	2.59	148
	2	0.40	10	30	65.40	3.43	154
	3	0.60	10	30	62.21	5.19	129
有振动	4	0.30	10	30	67.95	2.52	164
	5	0.40	10	30	70.00	3.38	165
	6	0.60	10	30	67.18	5.19	145

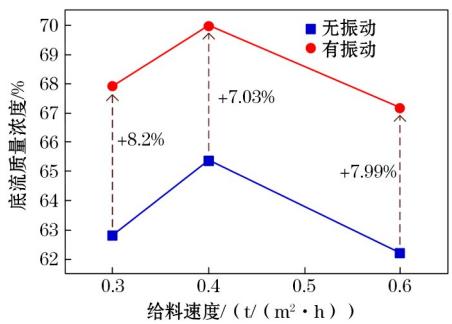


图 8　底流质量浓度与给料速度的关系

Fig.8　Relation between underflow mass concentration and feed rate

根据表 1 和图 8 可以看出，底流质量浓度随着给料速度的增加，呈现先增加后减小的特征，无振动作用下的底流质量浓度介于 62.21%～65.40%之间，振动作用下的底流质量浓度处于 67.18%～70.00%之间，平均增幅 7.74%，试验表明，振动作用对底流质量浓度提升具有显著效果。

溢流水含固量与给料速度的关系如图 9 所示。从图 9 可以看出，溢流水含固量随着给料速度的增大，呈现先增加后减小的特征。

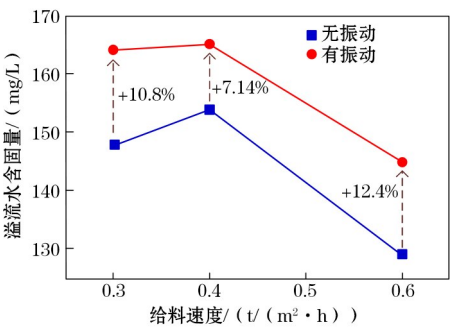


图 9　溢流水含固量与给料速度的关系

Fig.9　Relation between solid content of overflow water and feed rate

无振动作用下的溢流水含固量处于 129～154 mg/L 之间，振动作用下的溢流水含固量上升至 145～165 mg/L，平均增幅 10.11%。溢流水含固量因振动作用而增加，但是增加的幅度不大，这主要是因为振动使细颗粒做不规则的布朗运动，颗粒又受上升水流的影响，随上升水流溢出，从结果来看，这部分尾砂主要是细粒级尾砂。

4　结论

(1) 本文构建的振动浓密试验装置，其偏心振动机构以正弦简谐运动方式传导能量，振动杆激振作用范围与料浆容重、振动器质量相关。振动杆周围形成圆柱体的活化区域，屈服应力越氏、塑性黏度越高，活化区域范围越大。试验结果表明，机械振动作用可以使尾砂颗粒在浓密机体内以锥体结构堆积，从而提高底流质量浓度，对于机械振动辅助高效浓密设备的开发与应用提供了依据。

(2) 基于有振动和无振动非连续浓密和放砂试验，获得了 0.30 t/(m²·h)、0.40 t/(m²·h)和 0.60 t/(m²·h)三种不同给料速度下尾砂料浆的底流质量浓度、溢流水上升速度和溢流水含固量指标。相较于无振动条件，振动作用下随着给料速度的增加，底流质量浓度平均提高 7.74%，溢流水固含量平均提高 10.11%，而溢流水上升速度增加不明显。

(3) 尽管试验数据支持振动作用的有效性，但对不同振动形式的研究还有待进一步扩展，如本研究主要基于偏心振动机构的单偏心结构，未涉及轴向振动机构和多边形冲击机构的潜在效果，后续可对比不同振动机构的浓密和放砂效果，优化振动装置。

参考文献(References)：

[1]　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 progresson miningwith backfill technology of underground metalliferous mine[J]. Journal of Chia Coal Socity，2022，47(12)：4182-4200.

[2]　王俊，乔登攀，韩润生，等.立式砂仓连续放砂模型及应用[J].中国有色金属学报，2020，30(1)：235-244.
WANG Jun，QIAO Dengpan，HAN Runsheng，et al. Consecutive discharge tailings model of vertical sand silo and its application [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals，2020，30(1)：235-244.

[3]　杨茂.无耙膏体浓密机在金属矿山上的应用[J].矿山机械，2021，49(8)：44-47.
YANG Mao. Application of non-rake paste thickener in metal mines[J]. Mining Machinery，2021，49(8)：44-47.

[4] 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.
LAI Wei. Tailing slurry warehouse thickning technology and its application in mine filling[J]. Gold,2023,44(9):31-35.

[5] 汪强,祝鑫,彭亮,等.超细尾砂高效浓密技术及均质化搅拌设备的应用研究[J].矿业研究与开发,2023,43(9):17-20.
WANG Qiang, ZHU Xin, PENG Liang, et al. Research on the application of ultra-fine tailings high-efficience thicknecy technology and homogenization stirring equipment [J]. Mining Research and Technology,2023,43(9):17-20.

[6] HAN Chongchong, TAN Yuye, CHU Lishen, et al. Flocculation and settlement characteristics of ultrafine tailings and microscopic characteristics of flocs [J]. Minerals,2022,12(2):221.

[7] 王洪江,杨亚楠,郭佳宾.基于双重絮凝的超细尾砂浓密脱水性能及絮凝机制[J].中南大学学报(自然科学版),2023,54(9):3597-3608.
WANG Hongjiang, YANG Ya'nan, GUO Jiabin. Thickening dehydration performance and flocculation mechanism of ultrafine tailings based on dual flocculation. Journal of Central South University (Science and Technology),2023,54(9):3597-3608.

[8] BÜRGER R, DAMASCENO J J R, KARLSEN K H. A mathematical model for batch and continuous thickening of flocculated suspensions in vessels with varying cross-section [J]. International Journal of Mineral Processing, 2004, 73(2):183-208.

[9] 陈秋松,张钦礼,王新民,等.立式砂仓断面积和高度研究及应用[J].东北大学学报(自然科学版),2016,37(7):1040-1044.
CHEN Qiusong, ZHANG Qinli, WANG Xinmin, et al. Study on the sectional area and height of vertical sand silo and its application[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science),2016,37(7):1040-1044.

[10] 吴爱祥,周靓,尹什华,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 Jing, YIN Shenghua, et al. Influence factors on flocculation sedimentation of unclassified tailings [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(2):439-446.

[11] JIAO Huazhe, CHEN Weilin, WU Aixiang, et al. Flocculated unclassified tailings settling efficiency improvement by particle collision optimization in the feedwell[J]. Interantional Journal of Minerals Metallurgy and Materials,2022,29(12):2126-2135.

[12] 王志凯,杨鹏,吕文生,等.超声波作用下尾砂浆浓密沉降及放砂[J].工程科学学报,2017,39(9):1313-1320.
WANG Zhikai, YANG Peng, LYU Wensheng, et al. Thickening sedimentation and sand discharge of tailings slurry under ultrasonic[J]. Chinese Journal of Engineering, 2017,39(9):1313-1320.

[13] 王新民,柯愈贤,张钦礼,等.磁化处理全尾砂料浆沉降规律及其参数优化[J].中国矿业大学学报,2017,46(4):803-808.
WANG Xinmin, KE Yuxian, ZHANG Qinli, et al. Rule and optimum magnetization parameters of sedimentation of pre-magnetized crude tailings slurry[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2017,46(4):803-808.

[14] 王旭.针对浓密机泥层高度的偏最小二乘建模及其校正方法研究[D].沈阳:东北大学,2010.
WANG Xu. Research on PLS modeling and correcting of sludge bed height of thichker[D]. Shengyang: Northeastern Universiy,2010.

[15] 吴爱祥,杨莹,王贻明,等.深锥浓密机底流浓度模型及动态压密机理分析[J].工程科学学报,2018,40(2):152-158.
WU Aixiang, YANG Ying, WANG Yiming, et al. Mathematical modelling of underflow concentration in a deep cone thickener and analysis of the dynamic compaction mechanism[J]. Chinese Journal of Engineering,2018,40(2):152-158.

[16] 何曾平.振动密实成型工艺原理[J].混凝土及建筑构件,1981(4):55-63.
HE Zengping. Vibration compaction process principle[J]. Concrete and Building Components,1981(4):55-63

[17] 王亚军,金峰,张楚汉,等.舟山海域海相砂土循环激振下的液化破坏孔压模型[J].岩石力学与工程学报,2013,32(3):582-597.
WANG Yajun, JIN Feng, ZHANG Chuhan, et al. Liquefaction failure pore-pressure models of Zhoushan marine sandy soil under cyclic exciting loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2013,32(3):582-597.

[18] CHARLIE W A, BRETZ T E, SCHURE L A, et al. Blast-induced pore pressure and liquefaction of saturated sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013,139(8):1308-1319.

[19] LAI Wei, ZHOU Keping, GAO feng, et al. Experimental study on dense settlement of full-tail mortar under mechanical vibration[J]. Minerals,2023,13(8):1077.

[20] 薛渊,陆念力,凌贤长.工程振动机构研究应用进展[J].中国工程机械学报,2008,6(2):237-242.
XUE Yuan, LU Nianli, LING Xianchang. Advances on construction vibratory mechanism [J]. Chinese Journal of Construction Machinery,2008,6(2):237-242.

[21] 陈达刚,梁锦萱.流变学与混凝土振捣原理[J].建筑机械,1989(8):13-17.
CHEN Dagang, LIANG Jinxuan. Rheology and vibration principle of concrete[J]. Construction Machinery,1989(8):13-17.

[22] 马恩荣.振动充填提高水砂充填体的支撑能力[J].黄金,1982(4):1-4.
MA Enrong. Vibration filling improves the supporting capacity of water-sand filling body[J].Gold,1982(4):1-4.

[23] 张修香,乔登攀,孙宏生.废石-尾砂高浓度料浆管道输送特性模拟[J].中国有色金属学报,2019,29(5):1092-1101.
ZHANG Xiuxiang, QIAO Dengpan, SUN Hongsheng. Simulation on conveying characteristics in pipe about high-density slurry with waste rock-tailing [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2019,29(5):1092-1101.