



声波对全尾砂浓密沉降的影响

诸利一¹, 吕文生¹, 杨 鹏², 王志凯³, 崔耀盛¹

(1. 北京科技大学 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083;

2 北京联合大学 北京市信息服务工程重点实验室, 北京 100101;

3. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

摘 要: 为提高全尾砂料浆浓密沉降效果, 降低脱水浓缩成本, 将声波引入全尾砂浓密沉降试验中, 探究声波对全尾砂料浆浓密沉降影响。利用清水与全尾砂料浆对比声压分布规律试验预选出合适的声波频率和功率, 进而运用控制变量法, 对声波作用参数进行优选, 分析不同条件下全尾砂浓密沉降速度和底流浓度变化规律, 探索声波在全尾砂料浆浓密沉降中的作用机理。结果表明: 相同点的声压在全尾砂料浆中为 70% 的清水中声压值; 当声波频率为 100 Hz, 功率为 8 W, 施加时刻为 15 min 时为最优作用条件, 与自由沉降和絮凝沉降(单耗 20 g/t、0.2% 絮凝剂溶液浓度)相比, 沉降速度分别提高了 56.759% 和 0.801%, 底流浓度分别提高了 2.54% 和 6.302%; 在合适的声场条件下, 声波可明显提高全尾砂料浆沉降速度和底流浓度。

关键词: 充填采矿; 全尾砂; 声波; 浓密沉降; 声波机理

文章编号: 1004-0609(2019)-12-2850-10

中图分类号: TD853

文献标志码: A

随着社会经济的快速发展, 矿产资源大量消耗, 我国矿业正面临着两大难题: 资源深部化开采和地表尾砂废石灾害化^[1-2]。深部开采存在着“三高一扰动”复杂的岩石力学问题^[3-4]; 地表尾砂废石的堆积不仅会对环境造成污染, 而且会对人类的生存造成永久性的破坏。业内学者^[5-7]普遍认为, 用高浓度全尾砂充填是解决上述两大难题最理想的方案。而目前从选厂排出的全尾砂越来越细, 细泥含量高, 进而出现了尾砂在立式砂仓中沉降速度慢, 放砂浓度低, 溢流水浑浊, 达不到充填体强度和工业水循环利用的要求等问题。因此, 研究如何在短时间内加快细颗粒尾砂快速沉降与浓密问题具有重要意义^[8]。目前, 絮凝剂作为主要的外加剂来加快尾砂沉降, 但是絮凝剂合成成本相对较高, 且在一定程度上影响浓密时间和充填体的早期强度^[9-10]。

国内外研究人员从新方向在尾矿浓密上做了大量工作。王新民等^[11-12]将磁化水引入全尾砂絮凝沉降试验中, 研究发现磁化水能降低絮凝剂单耗饱和点, 并能加快尾砂沉降和提高底流浓度。王志凯等^[13]将超声波作用在尾砂料浆中, 探究了超声波对尾砂浆浓密沉

降及放砂的影响, 从而得出了超声波能明显的缩短尾砂浓密时间, 提高放砂浓度。诸利一等^[14]通过响应面法试验建立了数学模型, 得到了超声波对全尾砂浓密沉降的最佳作用条件。BARTON 等^[15]对污泥施加水平静电场, 得到了施加电场能明显加快污泥脱水浓密。DAVIES^[16]在废水中施加 24 kHz 超声波来加快其中的硫酸盐的沉降。不难看出, 国内外对尾砂浓密沉降基本集中于磁化水、超声波和电场等方面。但是磁化水的处理、电场的施加及施加过程中电流的控制等工艺相对复杂^[17], 而声波设备不仅成本低, 且操作方便。声波与超声波相比具有波长长, 衰减慢, 团聚能力强^[18-19], 不容易产生空白作用区等优点, 在空气除尘、淤泥处理方面被广泛应用。关于声波特有的团聚作用对充填采矿全尾砂浓密沉降的影响还未见具体研究报道, 因此, 本文将声波引入全尾砂浓密沉降试验中, 利用声压分布试验, 探究声波在全尾砂料浆中衰减规律, 并预选出合适的声波频率和功率。利用控制变量法对声波的频率、功率和作用时刻等参数进行优选, 得到不同声波作用条件下全尾砂沉降速度和底流质量浓度(底流浓度), 进而优选出声波作用的最佳条件。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51641401)

收稿日期: 2019-04-04; 修订日期: 2019-06-27

通信作者: 吕文生, 副教授, 博士; 电话: 010-62333864; E-mail: sunluw@sina.com

分别建立了声波作用条件与全尾砂沉降速度和底流浓度的数学模型。并结合声波理论, 揭示了声波在全尾砂料对浓密沉降的作用机理, 以期从新方向为尾矿浓密技术发展提供一定的理论支撑。

1 实验

1.1 试验材料

本试验用的全尾砂取自山东某金矿选厂尾砂排放口, 其粒度组成如图 1。从图 1 可以看出, 全尾砂的中值粒径(d_{50})为 $6.379 \mu\text{m}$, 小于 $19 \mu\text{m}$ 的尾砂含量达 89.92% , 小于 $74 \mu\text{m}$ 的尾砂含量达 100% , 说明该全尾砂属于极细尾砂。通过化学成分分析, 得到表 1 所示的全尾砂化学组成, 尾砂的主要成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 和少量的 Fe_2O_3 。

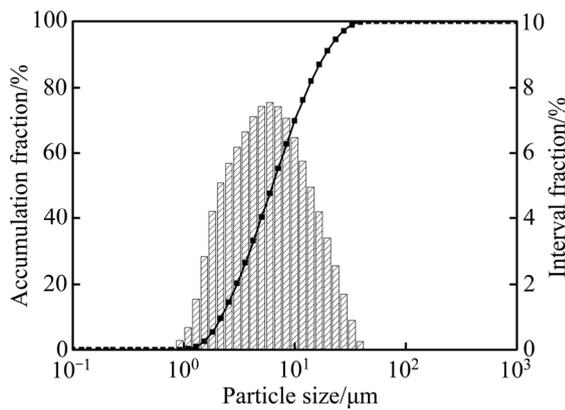


图 1 全尾砂粒度组成

Fig. 1 Particle size distribution of unclassified tailings

表 1 全尾砂化学组成

Table 1 Chemical composition of unclassified tailings (mass fraction, %)

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	SO_3	Other
74.86	11.5	6.7	1.10	0.26	0.80	0.32	1.4	3.06

1.2 试验设备

本次试验主要设备仪器有: 自行设计的砂仓 (Homemade sand silo), 中科院声学研究所的 CS-3 测量水听器 (Hydrophone)、水下扬声器 (Underwater speaker)、香港龙威仪器仪表公司的数显音频发生器 (Audio generator) 和江南电子仪器公司的全数字合成示波器 (Oscilloscope), 部分试验装置如图 2 所示。

1.3 试验原理及设计依据

在试验过程中通过声波发生器将电信号转化为与水下扬声器相匹配的交流电信号, 进而使水下扬声器工作并发出声信号。水下扬声器作为声源在砂浆介质中产生声波, 按照声波团聚理论, 声波能在短时间内促使微颗粒团聚以及使浆体谐振排水, 加快颗粒沉降速度和提高浆体底流浓度。然而, 不同频率、功率声波在砂浆介质中形成的声场分布以及传播过程的衰减差异较大。因此, 通过水听器将水下扬声器发出的声信号转化为电信号, 传输到示波器中显示成图, 测得砂浆介质中的有效电压, 然后通过有效电压与声场灵敏度转化得到声压值, 并通过声压来研究声场分布及衰减规律, 图 3 所示为试验原理示意图。

1) 灵敏度和声压换算关系

在试验中通过水听器和示波器测得数据为有效电压值, 与水听器的灵敏度存在一定关系, 具体可由如下方程求得声压值:

$$P = \frac{U_0}{\frac{M}{10^{20}}} \tag{1}$$

式中: P 为测点有效声压值, Pa; U_0 为信号端采集到的有效电压值, mV; M 为水听器的灵敏度, dB; 试验所用水听器灵敏度为 -210 dB 。

2) 全尾砂料浆的沉降速度和底流浓度计算

尾砂颗粒在砂仓中沉降达到一定时间后, 固液面不再下降, 此时沉降高度与沉降时间的比值即为全尾砂沉降速度。全尾砂料浆的底流浓度即为全尾砂在砂

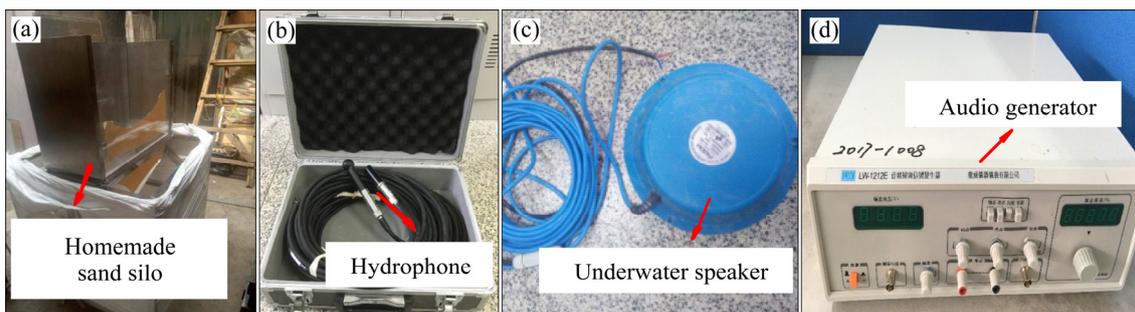


图 2 试验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of test apparatus

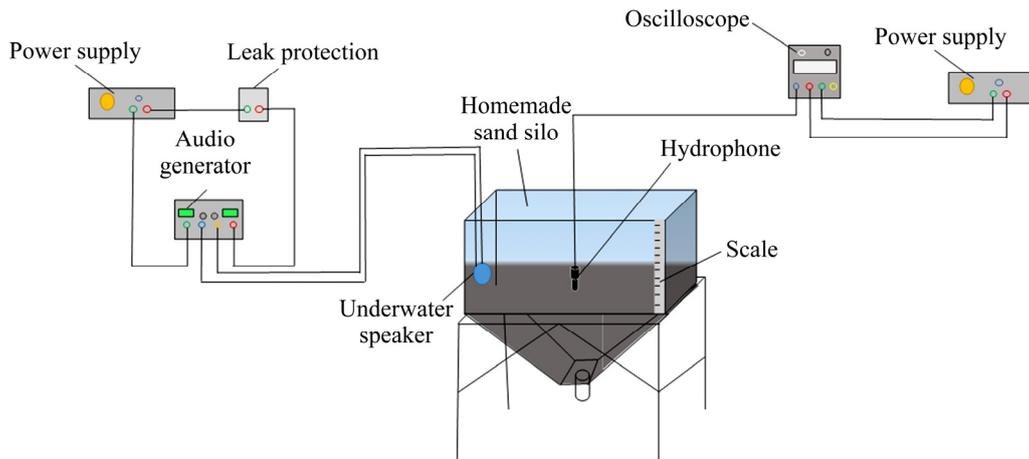


图3 试验原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of experimental principle

仓中达到沉降极限时的质量浓度^[1], 其具体计算可由如下方程可求得:

$$C_d = \frac{m_s}{m_1 - m_2 + m_s} \times 100\% \quad (2)$$

式中: C_d 为砂仓底部料浆的质量浓度, %; m_s 为砂仓中尾砂的质量, g; m_1 为砂仓中水的总质量, g; m_2 为砂仓中澄清水的质量, g.

其中 m_2 的质量根据式(3)得出:

$$m_2 = \rho L^2 (H - h) \quad (3)$$

式中: ρ 为水的密度, g/cm^3 ; L 为砂仓的底面宽度, cm; H 为砂仓中水和尾砂的总高度, cm; h 为砂仓中沉降浓密结束后尾砂的高度, cm.

1.4 试验方法

1) 声压布点。试验之前在砂仓中选定几组特殊点, 通过测定特殊点的声压分布来总结砂仓中清水和全尾砂料浆中的声压的分布规律, 声波测点分3层, 每层6个点, 共18个点, 分别为 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 、 A_5 、 A_6 、 B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 、 B_5 、 B_6 、 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 、 C_6 , 具体方案如图4所示。

2) 仪器设备的安装和连接。将水下扬声器固定到砂仓的 10.25 cm 处, 并将其与音频发生器相连, 将水听器与示波器相连, 形成声压及全尾砂浓密沉降测试系统。

3) 清水中声压的测量。将清水倒入砂仓中, 选取功率为 8 W、声波扫频频率分别为 100、500 和 1000 Hz, 以及功率为 4 W、扫频频率为 500 Hz 四种条件下的声波进行试验。根据声压布点方案, 启动音频发生器和示波器, 调节示波器, 并当出现均匀稳定的正弦波时, 逐层逐点测定并记录各点的有效电压值。

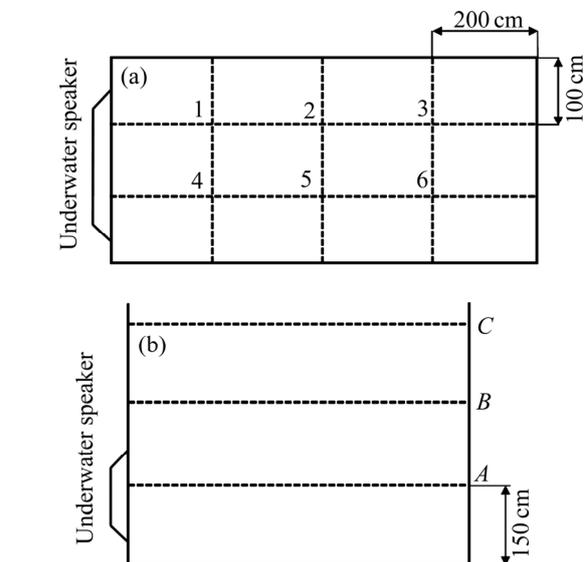


图4 声压测试布点示意图

Fig. 4 Schematic diagram of sound pressure distribution point:

(a) Vertical view; (b) Front view

4) 全尾砂料浆的配制。根据试验和工程实际要求, 配制 30% 的全尾砂料浆。用电子称称量 111 kg 全尾砂(m_s)和 259 kg 水(m_1), 液面高度(H)达 52 cm, 倒入砂仓中进行充分搅拌, 直至均匀。

5) 全尾砂料浆中声压的测量。测量全尾砂料浆的步骤基本和在清水中测量一致, 唯一不同的是每次测完一个面六个点之后重新搅拌 2 min, 尽量保证每次测量声压时砂浆的浓度均匀。

6) APAM 絮凝剂溶液的配制。按照絮凝剂分子量 800 万、单耗 20 g/t 的剂量, 在 1000 mL 烧杯中配制质量浓度为 0.2% 絮凝剂溶液并用电动搅拌器进行充分搅拌, 直至均匀(由于聚丙烯酰胺较难溶解, 此步骤需要提前 2~3 h 准备)。

7) 全尾砂沉降浓密试验。首先进行自由沉降与浓密试验, 在无声场和絮凝剂的条件下, 将制备好的全尾砂浆倒入砂仓中, 开始计时并记录初始液面高度 H , 第 1 h 内每隔 5 min 记录一次, 第 2 h 内每隔 10 min 记录一次, 第 3 h 内以后每隔 30 min 中记录一次, 直至固液面不再下降, 记下尾砂沉降浓密高度 h , 并停止计时。通过式(2)和(3)计算得到全尾砂沉降速度和底流浓度。然后对添加絮凝剂溶液的全尾砂浆进行沉降浓密试验, 试验过程与自由沉降试验基本一致。

8) 施加声波条件的优选试验。根据试验目的, 本试验主要是为了探究声波对全尾砂沉降与浓密的影响, 故采用控制变量法研究, 将声波的作用时长控制在 5 min。首先控制声波的频率 100 Hz 和功率 8 W, 探究不同施加声波时刻(5、10、15、20、25、30、35 和 40 min)对全尾砂料浆的沉降速度和底流浓度的影响; 其次控制声波的施加时刻 15 min 和功率 8 W, 探

究不同频率(100、500、1000 和 1500 Hz)对全尾砂料浆的沉降速度和底流浓度的影响; 最后控制声波的施加时刻 15 min 和频率 100 Hz, 探究不同功率(8、16 和 32W)对全尾砂料浆的沉降速度和底流浓度的影响。

9) 重复上述试验, 减小误差。

2 结果与分析

2.1 声波在清水和全尾砂料浆的声压分布规律

为探究声波对全尾砂料浆浓密沉降影响效果, 首先研究声波在砂仓中分布及衰减规律, 以为后面全尾砂料浆中作用声波频率和功率的初选, 及作用机理分析做前期准备。本次试验为保证可靠性, 将清水与全尾砂料浆作对比分析, 结果如图 5 所示。从图 5 可知:

1) 声波在清水和全尾砂料浆中衰减规律一致, 离声源

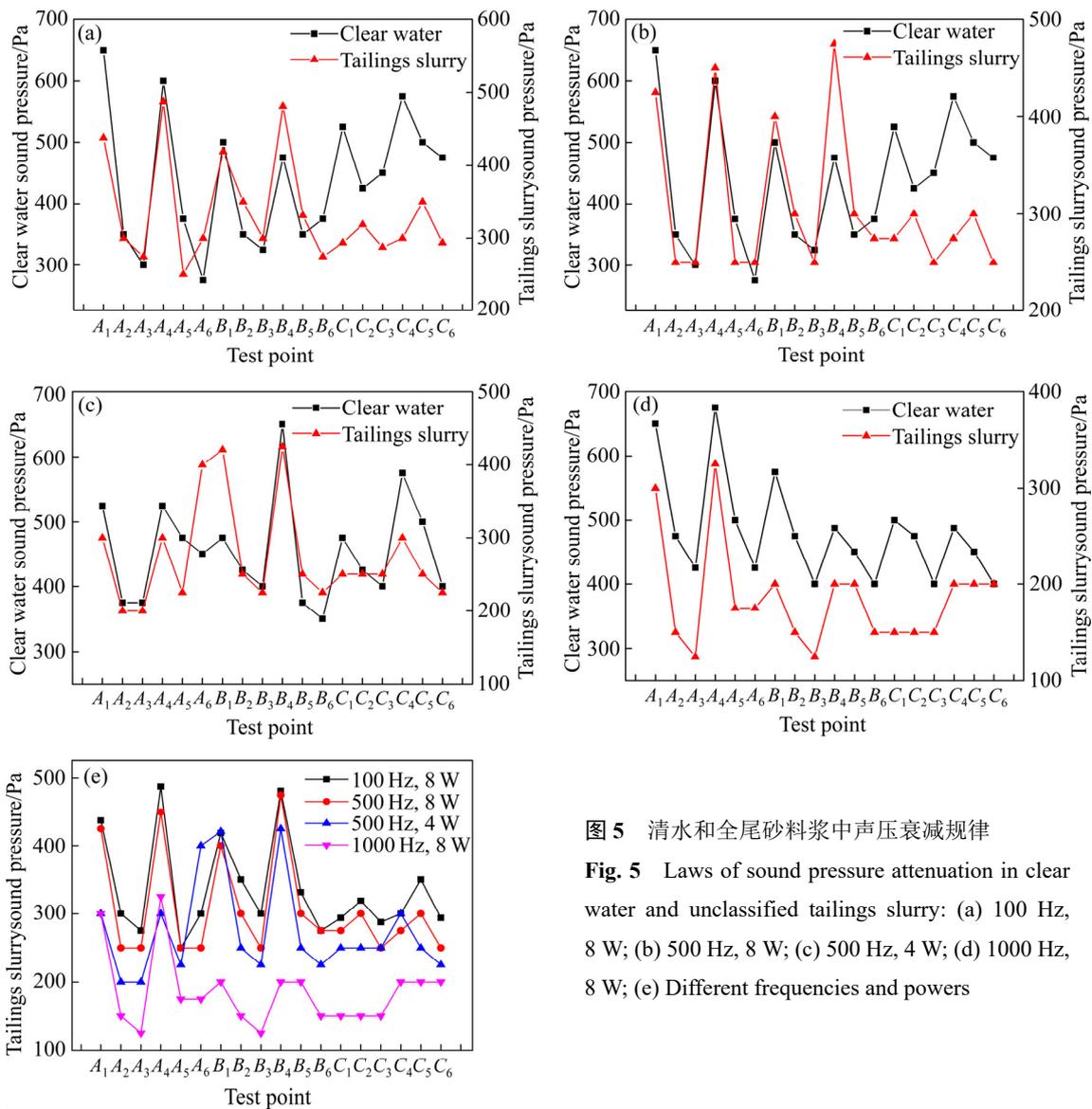


图 5 清水和全尾砂料浆中声压衰减规律
Fig. 5 Laws of sound pressure attenuation in clear water and unclassified tailings slurry: (a) 100 Hz, 8 W; (b) 500 Hz, 8 W; (c) 500 Hz, 4 W; (d) 1000 Hz, 8 W; (e) Different frequencies and powers

越近,声压越大,随着距离的变大,衰减的越快;2) 与在清水中相比,在全尾砂料浆中声波明显衰减要快,声压值大约为70%的清水中的相应声压;3) 由图5(e)可见,在全尾砂料浆中声波频率越低,衰减速度越慢,100 Hz、8 W的声波在 B_4 点的声压达481.25 Pa,比1000 Hz、8 W的声波在 B_4 点的声压大281.25 Pa;传输40 cm后到达 B_6 点时,前者比后者高出125 Pa。

本试验旨在探究声波对全尾砂浓密沉降效果,根据声波在全尾砂料浆中的分布规律,故初选声波频率为100 Hz(扫频),功率为8 W。欲探究声波的最佳作用条件,有必要进一步研究声波施加时刻、声波频率和声波功率对全尾砂浓密沉降的影响。

2.2 声波作用下全尾砂料浆浓密沉降参数优选

2.2.1 声波施加时刻对全尾砂浓密沉降的影响分析

声波扫频控制为100 Hz、施加功率为8 W时,浓密沉降指标(沉降速度和底流浓度)与施加时刻的关系如图6所示。由图6(a)可知,全尾砂浓密沉降速度和底流浓度均随声波施加时刻的增大呈现先增后减的趋势,当施加时刻为15 min时,沉降指标达到峰值,沉降速度和底流浓度分别为16.35 cm/h和72.6%。从图6(b)和(c)可以看出,当声波在全尾砂沉降15 min后施加的浓密沉降效果与自由沉降相比,沉降速度和底流浓度增长率分别为56.759%和2.542%;而与絮凝沉降相比,沉降速度和底流浓度增长率分别为0.801%和6.032%。随着施加时刻的继续增大,沉降速度和底流浓度逐渐降低。这主要因为:1) 料浆中的尾砂颗粒在声场的辐射下产生机械扰动,从中获得能量,使部分细颗粒随声波周期性运动,由于细颗粒比表面积大,范德华力相对于颗粒受到的惯性和水的黏滞力会很大,颗粒一旦发生碰撞,更易发生粘附产生“团聚效应”,与大颗粒尾砂团聚,而加快了沉降速度^[20]。2) 全尾砂料浆经过声波作用后,尾砂颗粒产生机械作用,加速传质传热,料浆的温度上升,水分子撞击尾砂颗粒产生强烈无规则“布朗运动”,使水的黏度和表面张力减小,在声波的“声辐射压”作用下,料浆沉降区封闭的水^[6]及尾砂颗粒间的“自由水”更容易排出,进而提高了底流浓度。3) 自由沉降15 min后,沉降进入颗粒间相互挤压、碰撞的干涉阶段,尾砂颗粒浓度高、间距较近,此时施加声场,在声波“携带作用”下颗粒碰撞更加剧烈,团聚效果更好,因而声波“贡献率”大;当沉降进入压缩阶段,细颗粒减少,颗粒间碰撞减弱,“团聚效应”减弱随之声波“贡献率”相应减小。

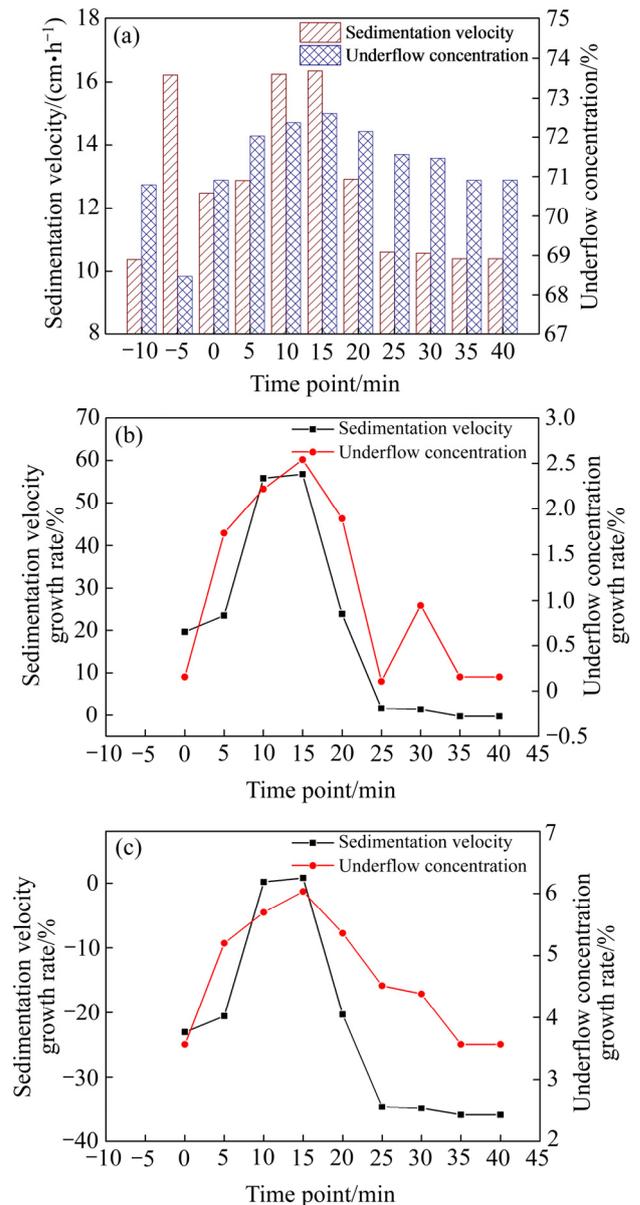


图6 声波施加时刻对全尾砂浓密沉降的影响

Fig. 6 Influence of acoustic wave application time on thickening sedimentation of unclassified tailings (-10 min, -5 min shows free sedimentation and flocculation sedimentation): (a) Comparison of timing of acoustic wave application with free settlement and flocculation; (b) Compared with free settlement; (c) Compared with flocculation sedimentation

2.2.2 声波频率对全尾砂浓密沉降的影响分析

声波的功率控制为8 W,施加时刻为15 min后,全尾砂料浆浓密沉降指标与声波施加频率关系如图7所示。由图7可知:在频率为100 Hz时,沉降速度和底流浓度均为最大值,分别为16.35 cm/h和72.6%。全尾砂浓密沉降速度和底流浓度均随着频率的增大时而减小。主要是因为:1) 从声压分布规律试验中可知,频率越高,声波衰减越快,进而在料浆中各点产生的声压越小,声波夹带尾砂颗粒作用减弱,颗粒间的碰

撞率下降, 而使得全尾砂细颗粒的“团聚效应”就越不显著。2) 声波频率高, 在全尾砂料浆中吸收衰减更为明显, 声波被大量尾砂颗粒和水介质所吸收, 使得水分子与颗粒本身能量增加, 欲改变水与颗粒间的静力平衡, 需更大的声压, 因而使得沉降效果下降。3) 声波的频率越高, 尾流越强, 产生的“尾波效应”越显著, 当频率超过一定时, 尾流强度随之减弱, 因而在一定程度上影响全尾砂浓密沉降效果^[21-22]。

2.2.3 声波功率对全尾砂浓密沉降的影响分析

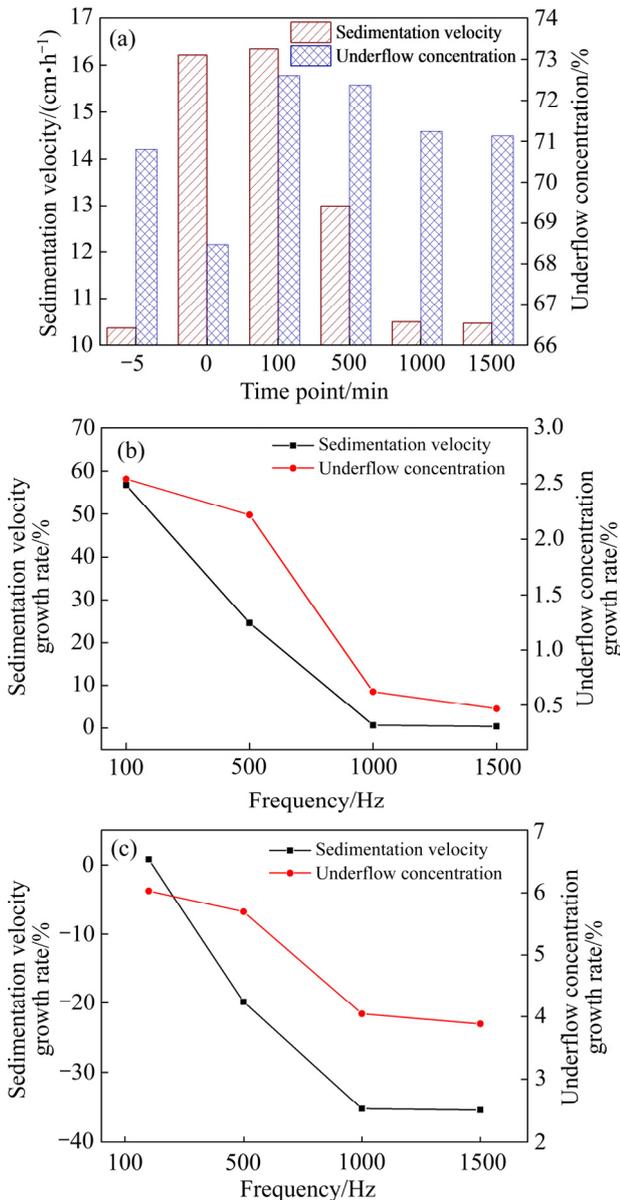


图 7 声波频率对全尾砂浓密沉降的影响
Fig. 7 Influence of acoustic wave frequency on thickening sedimentation of unclassified tailings (-5 Hz, 0 Hz shows free sedimentation and flocculation sedimentation): (a) Comparison of frequency with free settlement and flocculation settlement; (b) Compared with free settlement; (c) Compared with flocculation sedimentation

声波的频率控制为 100~150 Hz, 施加时刻为 15 min 后, 全尾砂料浆浓密沉降指标与声波施加的功率关系如图 8 所示。由图 8 可知, 全尾砂浓密沉降速度和底流浓度随施加的声波功率增加呈先增高后降低的趋势。声波在 8 W 时浓密沉降指标达到最大, 沉降速度和底流浓度分别为 16.35 cm/h 和 72.6%。当声波功率进一步增大时, 浓密沉降效果变差, 浓密沉降指标逐渐下降。这主要因为: 1) 当声波的功率较小时, 产生的能量和辐射声压均较小, 水分子与尾砂颗粒间

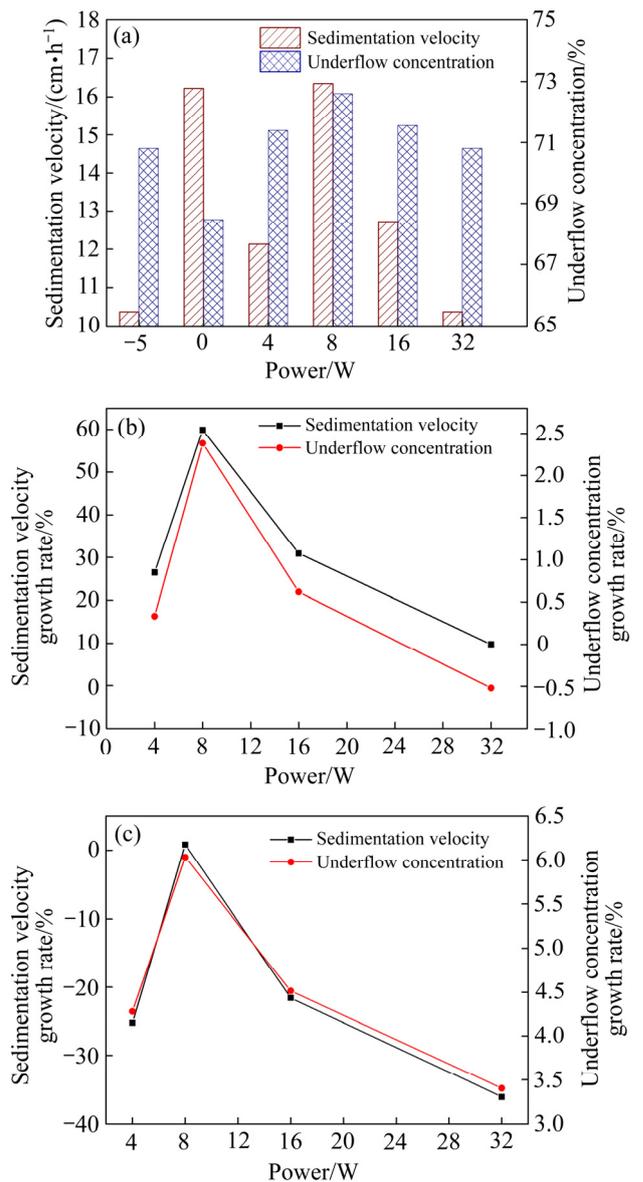


图 8 声波功率对全尾砂浓密沉降的影响
Fig. 8 Influence of acoustic wave power on thickening sedimentation of unclassified tailings (-5 W, 0 W shows free sedimentation and flocculation sedimentation): (a) Comparison of power of acoustic wave with free settlement and flocculation settlement; (b) Compared with free settlement; (c) Compared with flocculation sedimentation

“布朗运动”不显著,水分子表面张力和惯性力大,尾砂颗粒间的范德华力弱,进而使细颗粒产生的“团聚效应”小;同时声波功率较小时,产生的“声辐射压”小,裹覆在尾砂颗粒外表面的水膜以及尾砂与尾砂颗粒间的“自由水”难以破坏和释放。2) 当作用的声波功率过大时,产生的机械扰动过大,细小颗粒的全尾砂在短时间内聚合成的团聚体被迅速的打散^[23],使得细小的颗粒难以长大,进而减慢了沉降速度;功率过大同时在全尾砂浓密压缩阶段产生间断性击波脉动,达到声场饱和,谐波二次效应将增强^[24],进而导致水与颗粒间的静力平衡难以打破,被封闭的水难以

排出,在一定程度上影响了全尾砂的底流浓度。

2.3 声波施加时刻、频率、功率与沉降速度和底流浓度的关系

为得到建立声波施加时刻、频率、功率分别与全尾砂沉降速度和底流浓度之间的关系,分别做声波施加时刻、频率、功率与全尾砂沉降速度和底流浓度关系图,如图9所示。对图9中的试验数据做函数拟合分析,建立数学模型,得到拟合结果如表2所示。

由图9和表2可以看出,声波施加时刻、频率、功率与沉降速度和底流浓度并非简单的线性关系,声

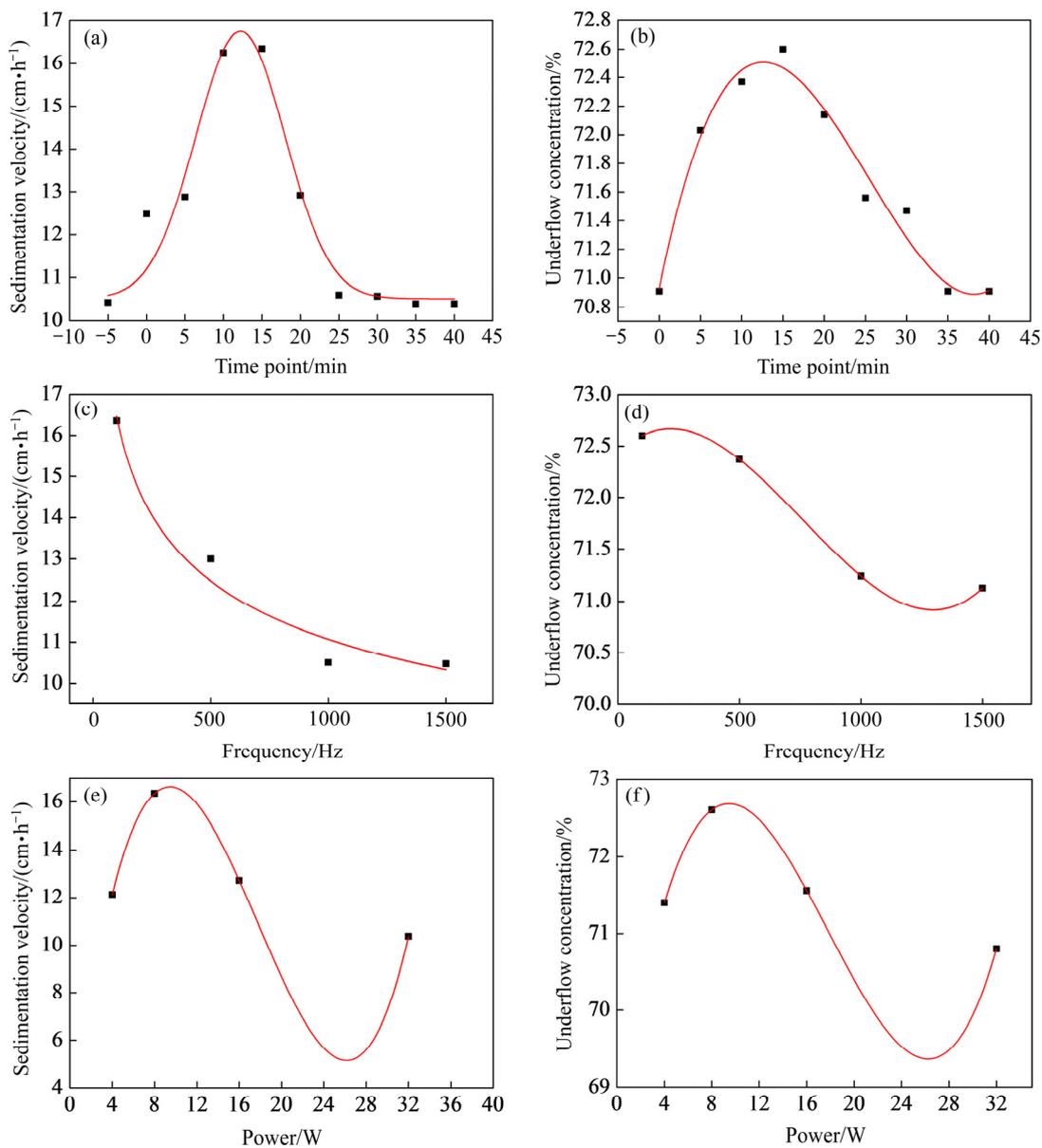


图9 声波施加时刻、频率、功率与沉降速度和底流浓度的关系

Fig. 9 Relationships among sound wave application time, frequency, power and sedimentation velocity and underflow concentration: (a) Application time and sedimentation velocity; (b) Application time and underflow concentration; (c) Frequency and sedimentation velocity; (d) Frequency and underflow concentration; (e) Power and sedimentation velocity; (f) Power and underflow concentration

表2 不同声波作用条件下沉降速度与底流浓度拟合函数

Table 2 Fitting functions of sedimentation velocity and underflow concentration under different acoustic wave conditions

Sound wave application condition	Index	Fitting function	Correlation coefficient, R^2
Time point	Sedimentation velocity	$y = 10.51754 + \frac{90.54378}{11.58559\sqrt{\frac{\pi}{2}}} \exp\left[-2\left(\frac{(x-12.2032)}{11.58559}\right)^2\right]$	0.93064
	Underflow concentration	$y = 70.92586 + 0.28x - 0.01482x^2 + 1.94613 \times 10^4 x^3$	0.95531
Frequency	Sedimentation velocity	$y = 36.33854x^{-0.17205}$	0.95888
	Underflow concentration	$y = 72.42417 + 0.00236x - 6.34333 \times 10^{-6}x^2 + 2.79444 \times 10^{-9}x^3$	0.98443
Power	Sedimentation velocity	$y = 1.35381 + 3.67187x - 0.26424x^2 + 0.00495x^3$	0.98639
	Underflow concentration	$y = 68.33524 + 1.04417x - 0.0751x^2 + 0.0014x^3$	0.97992

波施加时刻与全尾砂沉降速度呈高斯方程形式(见图9(a)), 声波施加频率与全尾砂沉降速度呈非线性幂函数(见图9(c)), 而声波施加时刻与底流浓度(见图9(b))、声波施加频率与底流浓度(见图9(d))、声波施加功率与全尾砂沉降速度(见图9(e))以及底流浓度(见图9(f))均为三次多项式关系。

3 结论

1) 通过清水和质量浓度为30%全尾砂料浆在砂仓中声压分布规律试验对比, 发现声波在全尾砂料浆中衰减明显快于清水中, 其声压值大约为70%的清水声压。由不同频率的声波在砂仓中声压分布对比试验发现, 扫频为100 Hz, 功率为8 W的声波衰减最慢, 适合本次探究性试验。

2) 通过声波作用下全尾砂浓密沉降试验, 发现声波提高全尾砂浓密沉降效果显著, 在其他试验条件相同情况下, 将最佳声场作用条件下与全尾砂自由沉降相比, 沉降速度提高了56.759%, 底流浓度提高了2.542%; 与聚丙烯酰胺分子量为800万、絮凝剂单耗为20 g/t、絮凝剂溶液浓度为0.2%的絮凝沉降相比, 沉降速度提高了0.801%, 底流浓度提高了6.032%。

3) 将声波作用条件进行优选对比, 确定声波作用下全尾砂浓密沉降最优条件为: 声波频率为100 Hz, 声波功率为8 W, 施加时刻为15 min。

4) 声波作用条件与全尾砂沉降速度、底流浓度均为非线性关系, 分析发现, 声波施加时刻、施加频率与沉降速度分别表现为高斯模型关系和幂函数模型, 声波施加时刻与底流浓度、声波施加频率与底流浓度、声波施加功率与全尾砂沉降速度以及底流浓度均为三次多项式关系模型。

REFERENCES

- [1] 柯愈贤, 王新民, 张钦礼. 全尾砂料浆磁化絮凝沉降特性[J]. 中国有色金属学报, 2017, 27(2): 392-398.
KE Yu-xian, WANG Xin-min, ZHANG Qin-li. Flocculating sedimentation characteristic of pre-magnetized crude tailings slurry[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(2): 392-398.
- [2] 张钦礼, 陈秋松, 王新民, 肖崇春. 全尾砂絮凝沉降参数GA-SVM 优化预测模型研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2014, 10(5): 24-30.
ZHANG Qin-li, CHENG Qiu-song, WANG Xin-ming, XIAO Chong-chun. Study on GA-SVM optimal prediction model on flocculating sedimentation parameter of unclassified tailings[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2014, 10(5): 24-30.
- [3] 谢和平. “深部岩体力学与开采理论”研究构想与预期成果展望[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(2): 2-16.
XIE He-ping. Research framework and anticipated results of deep rock mechanics and mining theory[J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(2): 2-16.
- [4] 李夕兵, 周建, 王少峰, 刘冰. 深部固体资源开采评述与探索[J]. 中国有色金属学报, 2017, 27(6): 1236-1262.
LI Xi-bing, ZHOU Jian, WANG Shao-feng, LIU Bing. Review and practice of deep mining for solid mineral resources[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(6): 1236-1262.
- [5] 于润沧. 我国胶结充填工艺发展的技术创新[J]. 中国矿山工程, 2010, 39(5): 1-3, 9.
YU Run-cang. Development and innovation of cemented filling technology in China[J]. China Mine Engineering, 2010, 39(5): 1-3, 9.

- [6] 焦华喆, 王洪江, 吴爱祥, 吉学文, 严庆文, 李 祥. 全尾砂絮凝沉降规律及其机理[J]. 北京科技大学学报, 2010, 32(6): 702-707.
JIAO Hua-zhe, WANG Hong-jiang, WU Ai-xiang, JI Xue-wen, YAN Qing-wen, LI Xiang. Rule and mechanism of flocculation sedimentation of unclassified tailings[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2010, 32(6): 702-707.
- [7] WANG X M, ZHAO B, ZHANG Q L. Cemented backfilling technology with unclassified tailings based on vertical sand silo[J]. Journal of Central South University of Technology, 2008, 15(6): 800-807.
- [8] 王新民, 古德生, 张钦礼. 深井矿山充填理论与管道输送技术[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2010: 9-10.
WANG Xin-min, GU De-sheng, ZHANG Qin-li. Theory and technology of deep mine backfilling[M]. Changsha: Central South University Press, 2010: 9-10.
- [9] 吴爱祥, 周 靓, 尹升华, 王雷鸣. 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 Ai-xiang, ZHOU Jing, YIN Sheng-hua, WANG Lei-ming. Influence factors on flocculation sedimentation of unclassified tailings[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(2): 439-446.
- [10] KURANCHIE F A, SHUKLA S K, HABIBI D, KAZI M. Load-settlement behavior of a strip footing resting on iron ore tailings as a structural fill[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2016, 26(2): 247-253.
- [11] 王新民, 柯愈贤, 张钦礼, 杨 建. 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 Xin-ming, KE Yu-xian, ZHANG Qin-li, YANG Jian. 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.
- [12] 陈秋松, 张钦礼, 王新民, 肖崇春, 徐 丹. 磁化水改善全尾砂絮凝沉降效果的试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(11): 4256-4261.
CHEN Qiu-song, ZHANG Qin-li, WANG Xin-ming, XIAO Chong-chun, XU Dan. Experimental study on effect of magnetized water on flocculating sedimentation of unclassified tailings[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(11): 4256-4261.
- [13] 王志凯, 杨 鹏, 吕文生, 汤寒松, 宋世文, 王志军. 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 Zhi-kai, YANG Peng, LÜ Wen-sheng, TANG Han-song, SONG Shi-wen, WANG Zhi-jun. Thickening sedimentation and sand discharge of tailings slurry under ultrasonic[J]. Chinese Journal of Engineering, 2017, 39(9): 1313-1320.
- [14] 诸利一, 吕文生, 杨鹏, 王志凯. 基于响应面法外场作用下全尾砂浓密沉降试验[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(9): 1908-1917.
ZHU Li-yi, LÜ Wen-sheng, YANG Peng, WANG Zhi-kai. Thickening sedimentation of unclassified tailings under influence of external field based on response surface method[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018, 28(9): 1908-1917.
- [15] BARTON W A, MILLER S A, VEAL C J. The electrode watering of sewage sludges[J]. Drying Technology, 1999(17): 497-522.
- [16] DAVIES L, DSRGUE A, DEAN J, DEARY M E. Use of 24 kHz ultrasound to improve sulfate precipitation from wastewater[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2015, 23: 424-431.
- [17] 王天瑞. 静电场提高污泥絮体沉降性能和活性研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2007: 5-9.
WANG Tian-rui. Study on improving the settling properties and activity of sludge flocs by electrostatic field[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2007: 5-9.
- [18] YANG Z N, GUO Q J, LI J H. Effect of atmosphere and relative humidity on particle agglomeration of fly ash in acoustic wave[J]. CIESC Journal, 2011, 32(2): 123-133.
- [19] LIU J Z, WANG J, ZHANG G X, , ZHOU J H, CEN K F. Frequency comparative study of coal-fired fly ash acoustic agglomeration[J]. Journal of Environmental Sciences, 2011, 23(11): 1845-1851.
- [20] 姚 刚. 燃煤可吸入颗粒物声波团聚-微观动力学特性可视化及宏观效果实验研究及模拟[D]. 南京: 东南大学, 2006: 25-28.
YAO Gang. Acoustic agglomeration of coal combustion inhalable particles-visualization of microcosmic kinetic characteristics and experimental study and simulation of macroscopic effects[D]. Nanjing: Southeast University, 2006: 25-28.
- [21] 张光学, 刘建忠, 王 洁, 周俊虎, 岑可法. 声波团聚中尾流效应的理论研究[J]. 高校化学工程学报. 2013, 27(2): 199-204.
ZHANG Guang-xue, LIU Jian-zhong, WANG Jie, ZHOU Jun-hu, CEN Ke-fa. Theoretical study of acoustic wake effect in acoustic agglomeration[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2013, 27(2): 199-204.
- [22] LIPKENS B, SHAO Z D. The effects of frequency and

- sound pressure level on acoustic agglomeration of flyash[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2007, 122(5): 2965–2966.
- [23] 周 栋. 多种颗粒源的声波团聚实验研究与模拟[D]. 杭州: 浙江大学, 2016: 8–15.
- ZHOU Dong. Experimental researches and simulation on acoustic agglomeration of various particle sources[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016: 8–15.
- [24] ILINSKII Y A, LIPKENS B, LUCAS T S, VAN DOREN T W. Nonlinear standing waves in an acoustical resonator[J]. Journal of Acoustic Society American, 1998, 104(5): 2664–2667.

Influence of acoustic wave on thickening sedimentation of unclassified tailings

ZHU Li-yi¹, LÜ Wen-sheng¹, YANG Peng², WANG Zhi-kai³, CUI Yao-sheng¹

(1. Key Laboratory of High-Efficient Mining and Safe of Metal, Ministry of Education, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Beijing Key Laboratory of Information Service Engineering, Beijing Union University, Beijing 100101, China

3. China Enfi Engineering Corporation, Beijing 100038, China)

Abstract: The high-concentration filling of the unclassified tailings is the main development trend of the current back-fill mining, and how to accelerate the rapid precipitation and dewatering of fine grains in sand silos to obtain high concentration tailings mortar is the key technology. In order to improve the effect of thickening sedimentation of unclassified tailings slurry(UTS) and reduce the expense of dewatering, the acoustic wave was introduced into the thickening sedimentation experiment of UTS. The effect of acoustic wave on the thickening sedimentation of UTS was explored. The acoustic wave frequency and power were pre-selected by comparing the sound pressure distribution laws between clear water and the UTS. And then, the acoustic wave parameters were optimized by the control variable method. Furthermore, the variation laws of sedimentation velocity and mass fraction of underflow of UTS were analyzed under different conditions, and their acoustic wave mechanism was discussed. The results show that the sound pressure in UTS is equivalent to 70% of the sound pressure value in clean water at the same point. Thickening sedimentation has the best effect when the acoustic wave frequency is 100 Hz, the power is 8 W, and the application time is 15 min. Compared with free sedimentation and flocculation sedimentation (Flocculant unit consumption of 20 g/t, Flocculant solution concentration of 0.2%), the sedimentation velocity is increased by 56.759% and 0.801%, respectively, and the underflow concentration is increased by 2.54% and 6.302%, respectively. Therefore, acoustic wave is capable of improving the sedimentation velocity and mass fraction of underflow under the condition of suitable sound field.

Key words: back-fill mining; unclassified tailings; acoustic wave; thickening sedimentation; acoustic mechanism

Foundation item: Project(51641401) supported by the National Natural Science Foundation of China

Received date: 2019-04-04; **Accepted date:** 2019-06-27

Corresponding author: LÜ Wen-sheng; Tel: +86-10-62333864; E-mail: sunluw@sina.com

(编辑 何学锋)