第 28 卷第 9 期 Volume 28 Number 9 2018 年 9 月 September 2018

DOI: 10.19476/j.ysxb.1004.0609.2018.09.22

基于响应面法外场作用下 全尾砂浓密沉降试验



诸利一^{1,2}, 吕文生^{1,2}, 杨 鹏^{2,3}, 王志凯^{1,2}

(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. 北京科技大学 土木与资源工程学院,北京 100083;
3. 北京联合大学 北京市信息服务工程重点实验室,北京 100101)

摘 要:为提高全尾砂料浆浓密沉降的质量浓度,将超声波引入全尾砂料浆浓密沉降试验中。利用 MATLAB 模 拟超声波在全尾砂料浆中的指向性,进而选取出超声波频率范围。采用 Design-Expert 软件设计,并分析不同条件 下超声波对全尾砂料浆最终质量浓度的影响,以及各因素之间的耦合关系,进而优化超声波作用条件。结果表明:当超声波频率为 20~40 kHz 时,在砂仓中传播指向性较好;超声波外场作用能显著提高全尾砂料浆的最终质量浓度,当全尾砂自然沉降 19.77 min 后,施加频率 20.02 kHz、功率 50 W 的超声波为最优作用条件,全尾砂料浆最终质量浓度可达 77.51%,比自然沉降的最终质量浓度提高 4.60%;在合适的超声场条件下,超声波在提高全尾砂 料浆的最终质量浓度具有明显优越性。

关键词:充填采矿;全尾砂;响应面;超声波;浓密沉降 文章编号:1004-0609(2018)-09-1908-10 中图分类号:TD853 文献标志码:A

随着社会经济迅猛发展, 矿产资源又不断枯竭, 在采矿作业中对资源的最大化回收和绿色可持续发展 提出了更高要求[1]。三大类采矿方法中充填采矿是首 选采矿法[2-3],而在充填采矿中又以全尾砂胶结充填为 最理想方案^[4]。全尾砂胶结充填系统中,立式砂仓是 尾砂浓密沉降的重要构筑物,利用贮仓直接将沉淀尾 砂制备成高浓度砂浆,造浆完成后,可直接进行充填 料的制备和输送[5-7]。选厂的全尾砂用于充填对废渣的 利用和减少尾矿库占地有十分重要意义,而其中如何 加快细粒级在砂仓中快速沉淀和脱水,以获得高浓度 的尾砂浆是其关键技术^[8]。目前,主要通过添加絮凝 剂来加快尾砂浓密沉降,虽具有便捷性和可操作性, 但絮凝剂成本高,且存在一些弊端^[9]。沉砂工艺中加 入絮凝剂虽能加速尾砂颗粒沉降,但是相对延长了尾 砂浓密时间且影响充填体早期强度,在一定程度上阻 碍了全尾砂胶结充填的全面推广[10-12]。国内外研究人 员都迫切地从新角度探究减少絮凝剂的使用量甚至替 代絮凝剂的新方法。

随着超声波技术逐渐成熟,且因其存在方向性好、 频率高、能量大、穿透能力强、辐射范围广、高效清 洁、空化作用大等优点,掀起了超声波在各领域的研

究热潮[13]。在超声波强化颗粒凝聚沉降方面也渐渐地 引起广大科研者的兴趣^[14-15]。SMYTHE 等^[16]将超声 场和电场相结合应用于强化 TiO2 细小颗粒的固液分 离过程; ÖNAL 等^[17]将超声波与絮凝剂联合使用, 研 究了黏土浆浓度、絮凝剂用量以及超声参数对其沉降 的影响,研究表明超声波作用下添加少量絮凝剂比在 单独添加絮凝剂下效果明显;杨金美等^[18]利用超声波 强化给水污泥沉降,并进行了脱水性能研究,研究发 现在短时间的超声作用下,达到相同滤饼含水率时可 减少絮凝剂用量约80%,从而得出超声波可以取代絮 凝剂促进污泥的沉降性能; 王志凯等[19-20]通过在不同 时刻施加 20 kHz、50 W 超声波,探究对尾砂浆浓密 沉降和流变影响,进而发现超声作用能缩短尾砂浓密 沉降时间和提高尾砂浆底流浓度,并能改善砂浆流变 特性。目前,国内外研究超声波对颗粒沉降脱水主要 集中于污泥、黏土等净水方面,而对充填采矿全尾砂 浓密沉降研究甚少。

因此,本文作者利用 MATLAB 软件,预先数值 模拟超声波在尾砂浆中传播的指向性,得到超声作用 最优频率。同时基于响应面法采用 Design-Expert 软件 中的 BBD 设计试验,研究超声波作用下,超声波频

收稿日期: 2017-01-25; 修订日期: 2018-04-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51641401);国家"十二五"科技支撑计划资助项目(2012BAB08B01)

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

率、功率以及施加时刻对尾砂浆最终沉降浓度的影响, 以及各因素之间的耦合关系,分析试验结果,以验证 前期超声波指向性数值模拟的结果,进而优化超声波 作用下,尾砂浆浓密沉降条件,以期从新的角度为全 尾砂浓密沉降提供经济上可靠、技术上可行、既环保 安全又高效的新工艺。

1 超声波指向性模拟分析

超声波在媒介中的传播和分布范围称为超声波的 指向性,声场的分布特征采用声场的指向性函数来表 示,指向性函数由式(1)表示:

$$D = \frac{p}{p_{\theta=0}} \tag{1}$$

式中: p 为声压函数; $p_{\theta=0}$ 为超声波换能器中心垂直 方向上的声压函数值; 指向性函数 D=0 时,声压值最 小, D=1 时,声压最大。

非点声源模型如图 1 所示,换能器的半径为 R, 将换能器圆面微分为无限个小面元,每个小面元 ds 可以当做点声源,根据点声源的声压表达式和指向性 函数进行面积分,便可推导出非点源换能器的声场指 向性函数。a 是 ds 与 X 轴的夹角; P 为远场观测点, 与原点距离为 r; a 为 ds 与 X 轴的夹角; θ 为位置矢 量 r 与 z 轴的夹角; ρ 为极径; φ 为极角; P 到 ds 的 距离为 h; c_0 为超声波在介质中传播的速度; $u_a e^{i(wr-kh)}$ 为换能器振动速度势; ω 为超声波振动的角频率。

在 P 点面元 ds 声压表示为

$$dp = j \frac{k\rho_0 c_0}{2\pi h} u_a e^{j(wt - kh)} ds$$
⁽²⁾



图1 超声波换能器声源模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sound source model of ultrasound transducer

对 ds 进行积分,得到换能器的辐射声压表示为

$$p = \iint \mathrm{d}p = \iint_{s} j \frac{k\rho_0 c_0}{2\pi h} u_a \mathrm{e}^{j(wt - kh)} \mathrm{d}s \tag{3}$$

式中: $ds = \rho d\rho d\phi$ 。

$$h^{2} = r^{2} + \rho^{2} - 2r\rho\cos(\boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{r})$$
(4)

对 *r*≫*R* 的区域,上式可近似表示为

$$h \approx r - \rho \cos(\boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{r}) \tag{5}$$

将式(5)代入式(3)得

$$p = j \frac{w \rho_0 u_a}{2\pi r} e^{j(wt - kh)} \iint e^{jk\rho\cos(\boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{r})} \rho d\rho d\varphi$$
(6)

又因:

$$\boldsymbol{\rho} = |\rho| \cos(\varphi \boldsymbol{i} + \sin \varphi \boldsymbol{j}) \tag{7}$$

$$\mathbf{r} = |\mathbf{r}|(\sin\theta \mathbf{i} + \cos\theta \mathbf{k}) \tag{8}$$

$$\cos(\boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{r}) = \sin\theta\cos\varphi \tag{9}$$

将式(9)代入式(6)得

所以夹角余弦为

$$p = \mathbf{j} \frac{w\rho_0 u_a}{2\pi r} \mathrm{e}^{\mathbf{j}(wt - \mathbf{k}h)} \int_0^R \rho \mathrm{d}\rho \int_0^{2\pi} \mathrm{e}^{\mathbf{j}k\rho\sin\theta\cos\varphi} \mathrm{d}\varphi \qquad (10)$$

引入贝塞尔(Bessel)函数对式(10)进行化简,贝 塞尔函数标准解形式为

$$x^{2} \frac{d^{2} y}{dx^{2}} + x \frac{dy}{dx} + (x^{2} - n^{2})y = 0$$
(11)

运用幂级数解法, n 阶贝塞尔函数可表示为

$$J_n(x) = \frac{1}{2\pi j^n} \int_0^{2\pi} e^{j(x\cos\varphi - n\varphi)} d\varphi$$
(12)

$$J_0(x) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \mathrm{e}^{jx\cos\varphi} \mathrm{d}\varphi \tag{13}$$

又因为:

$$J_n(x) = \sum_{m=0}^{\infty} (-1) \frac{x^{n+2m}}{2^{n+2m} m! \Gamma(n+m+1)'}$$
(14)

则根据递推公式得

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}x}[J_n(x)x^n] = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}x} \left[\sum_{m=0}^{\infty} (-1) \frac{x^{2n+2m}}{2^{n+2m}m!\Gamma(n+m+1)'} \right] = x^n J_{n-1}(x)$$
(15)

 $\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}x}[J_1(x)x] = x J_0(x) \tag{16}$

两边同时积分并代入式(13)可得

$$xJ_{1}(x) = \int xJ_{0}(x)dx = \int x\frac{1}{2\pi}\int_{0}^{2\pi} e^{j(x\cos\phi)}d\phi dx$$
(17)

令 *x=krsinθ*,式(10)可表示为

$$p = \mathbf{j}w \frac{p_0 u_a R^2}{2r} = e^{\mathbf{j}(wt - \mathbf{k}r)} \frac{2J_1(\mathbf{k}R\sin\theta)}{\mathbf{k}R\cos\theta}$$
(18)

$$p_{\theta=0} = j_{w} \frac{p_{0} u_{a} R^{2}}{2r} e^{j(wt-kr)}$$
(19)

又由指向性函数定义,得半径为*R*的换能器指向 性函数为

$$D(\theta, \varphi) = \frac{p}{p_{\theta}} \left| 2 \frac{J_1(kR\sin\theta)}{kR\cos\theta} \right|$$
(20)

式中: *J*₀和 *J*₁分别为零阶和一阶贝塞尔函数; *k*=2π/λ, λ 为波长; *i、j、k* 代表沿 *x、y、z* 方向的单位矢量; *Γ*(*z*) 为*Γ*函数。

根据式(20),试验选取换能器半径 R=25 mm,分 析频率 f=10、20、28 和 40 kHz 这 4 种情况的超声波 指向性,其中,超声波声速 c=1500 m/s,利用 MATLB 进行模拟,其空间分布结果如图 2 所示。 由图 2 可以得出,随着超声波频率的增大,超声 波在空间上的指向性分布区域缩小,但在竖直方向分 布增大,表明超声波频率越高,其指向性越好。频率 为 10 kHz 与 20 kHz 的超声波在空间分布上基本一致, 呈近似椭球体,10 kHz 的水平指向范围大于 20 kHz 的,但 20 kHz 的竖直指向性要好于 10 kHz 的;而频 率为 28 kHz 时,超声波在水平方向上分布减小;当频 率为 40 kHz 时,超声波在文平和竖直指向性并结合立式 砂仓的结构特点,本实验中重点选取 20~40 kHz 的超 声波为研究条件。

2 实验

2.1 试验材料

本实验中材料包括全尾砂和自来水。全尾砂取自 山东某金矿,密度为 2.62 g/cm³,孔隙率为 37.60%; 通过 LMS-30 激光粒度分析仪对全尾砂进行粒径分 析,其结果如图 3 所示。全尾砂的粒径分布比较集中, 小于 9.468 µm 的所占比例为 50%,高于 29.501 µm 的 为 10%,该尾砂属于细尾砂,细颗粒含量多。比表面 积为 1.412 m²/cm³,不均匀系数 C_u为 6.09(>5),曲率



图 2 不同频率超声波的指向性分布

Fig. 2 Directional distribution of different frequencies ultrasonic: (a) f=10 kHz; (b) f=20 kHz; (c) f=28 kHz; (d) f=40 kHz



Fig. 3 Grain size distribution of unclassified tailings

系数 C。为 0.99,级配良。

将尾砂进行 X 射线衍射分析,得到 XRD 谱,结果如图 4 所示。

从图 4 可知,该全尾砂以石英、长石、黑云母、 榍石、方解石等为主要成分,此外还存在部分黄铜矿。 由此说明尾砂成分由 SiO₂、CaCO₃、硅酸盐类、铝酸 盐类矿物组成,这些矿物活性低,整个试验过程中基 本不参加水化反应。

2.2 试验设备

试验设备由超声波发生器、超声波换能器(振子)、 小型立式砂仓组成,工作原理如图5所示。

超声波发生器的作用是将电信号转换为与超声波 换能器相匹配的交流电信号,从而使超声波换能器工 作;超声波换能器是一种能量转换的器件,也称振子。



图4 全尾砂的 XRD 谱

Fig. 4 XRD patterns of unclassified tailings



图5 试验装置原理示意图

Fig. 5 Principle diagram of test apparatus

超声波发生器通过换能器将输出的电功率转换成机械 功率传递出去。实验室试验的砂仓则是根据某金矿现 场砂仓设计尺寸,通过相似比例按式(21)计算自制而 得:

$$H_0 _ D$$

h d

式中: *H*₀为某矿立式砂仓高度,取 30 m; *h* 为砂仓模 型高度; *D* 为某矿立式砂仓直径,取 9 m; *d* 为砂仓模 型底面宽度,取 14.6 cm。

经过计算得砂仓模型高度为 49 cm,为了防止尾砂浆液过满从装置顶部溢出,最终按照设计的需要将装置的高度设计为 52 cm。

2.3 试验步骤

步骤 1: 配制 30%浓度的全尾砂浆。根据试验要 求和目的用电子秤量取 3.6 kg 的全尾砂, 再秤得 8.4 kg 水, 倒入桶内进行充分均匀搅拌。

步骤 2: 将搅拌完全的砂浆倒入砂仓中以后,再次用尾砂搅拌棒将砂仓中的全尾砂浆搅拌均匀进行试验,搅拌时间1min。

步骤 3:试验选取超声波功率、频率和施加时刻 3 个因素对全尾砂浆最终质量浓度的影响考察,根据 BBD设计原理,采用 3 因素 3 水平的曲面响应分析法, 每个因素设置高、中、低 3 个水平,各因素水平见表 1。其中超声波频率选取 20、28 和 40 kHz,以验证试 验前的超声波指向性数值模拟的结果;选取功率为 25、50 和 75 W;选取在全尾砂浆沉降 15、20 和 25 min, 施加超声波。

步骤 4: 根据试验设计要求在计划的时间施加适 当功率的超声波,超声波的作用时间为 5 min。研究 自由沉降与不同沉降时间后施加超声波对全尾砂浆的 影响。

步骤 5:数据记录,第一小时每隔 5 min 记录一次,第二个小时每隔 10 min 记录一次,第三个小时以后每隔 30 min 中记录一次,直到砂仓中全尾砂浆沉降浓密的高度不再变化为止。

步骤 6: 更改超声波发生器频率,重新安装不同 频率换能器,重复以上步骤,进行试验。

表1 BBD 试验水平因素设置

Table 1 Level factor settin	ngs in BBD test
-----------------------------	-----------------

Level		Factor	
No.	Frequency/kHz	Power/W	Time point/min
1	20	25	15
2	28	50	20
3	40	75	25

砂仓中全尾砂最终质量浓度计算由如下方程 可得

$$w_{\rm b} = \frac{m_{\rm s}}{m_{\rm w} - m_{\rm w1} + m_{\rm s}} \times 100\%$$
(22)

式中: w_b 为砂仓底部尾砂最终质量浓度,%; m_s 为砂 仓中尾砂的质量,g; m_w 为砂仓中水的总质量,g; m_{w1} 为砂仓中澄清水的质量,g。

其中, m_{w1}的质量根据式(23)得出:

$$m_{\rm wl} = \rho L^2 (H - h) \tag{23}$$

表2 最佳组合水平试验方案

Table 2	Scheme of	best combina	tion level test
---------	-----------	--------------	-----------------

式中: ρ 为水的密度, g/cm³; *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。

3 结果与讨论

3.1 超声波作用下尾砂浓密规律

本次试验研究考察指标主要为尾砂浆的最终质量 浓度,其可以根据式(22)和(23)计算得到,试验结果见 表 2。

沉降开始前,尾砂浆均质,无分层现象,各试验 组浆体总高度基本一致。在响应面最佳组合水平条件 下,尾砂沉降高度随时间变化如图6所示,搅拌均匀 后,开始会隐约出现一条固液分离线先快速上升,达 到一定高度后迅速下降,随后又缓慢下降,最后趋于 不变,从而整个沉降过程可以分为自由沉降阶段、干 涉沉降阶段和压缩沉降阶段。由图6可见,尾砂在20 min 后进入干涉沉降阶段后曲线大致可分为两个上、 下区,上区包含19条曲线,分别为曲线0~10、12~18 和 20; 在 20~60 min 内干涉沉降和压缩沉降短时间内 快速完成, 60 min 之后该区域曲线趋于水平; 下区包 含2条曲线,曲线11和19;下区的干涉与压缩沉降 时间要明显长于上区,且沉降分区更为明显,该段图 中反应为 20~90 min, 并于 90 min 之后, 曲线逐渐趋 于水平。在尾砂沉降阶段,是否有较长的压缩固结时 间,对提高尾砂浆底流浓度有重要的影响。总之,以 最终沉降高度、干涉压缩时间和最终底流浓度为评价 指标,曲线19最优。

Column	Frequency/	Power/	Time point/	Final mass	Column	Frequency/	Power/	Time point/	Final mass
No.	kHz	W	min	concentration/%	No.	kHz	W	min	concentration/%
1	20	25	20	75.4	11	20	50	25	77.5
2	20	75	20	76.4	12	40	50	25	75.7
3	40	25	20	74.4	13	28	25	20	74.4
4	40	75	20	74.7	14	28	50	20	75.7
5	28	25	15	74.1	15	28	75	25	75.3
6	28	75	15	75.2	16	28	50	25	75.7
7	28	25	25	75.2	17	40	50	20	75.4
8	28	75	20	75.4	18	28	50	20	75.7
9	20	50	15	76.8	19	20	50	20	77.5
10	40	50	15	74.4	20	28	50	15	75.1



图 6 最佳组合水平下尾砂沉降高度随时间变化(图中 0 表示自由沉降)

Fig. 6 Tailings sedimentation height changes with time under optimum combination level (0 shows free sedimentation)

3.2 响应面模型的建立与分析

尾砂浆最终质量浓度如表 2 所示,根据公式(24) 对浓密结果进行拟合分析:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \beta_{ij} x_i x_j$$
(24)

式中: *Y* 为响应值,尾砂浆最终质量浓度; β_0 、 β_i 、 β_{ii} 、 β_{ij} 为系数; *n* 为因素数量,取 3; x_i 、 x_j 为试验因素编码。

通过 Design-Expert 软件进行二次响应面回归分 析,建立超声波作用下最终质量浓度与超声波频率、 功率以及施加时刻的关系模型,多元二次响应面回归 模型如式(25)所示:

$$Y = 75.48 + 0.37x_1 - 0.77x_2 + 0.35x_3 - 0.064x_1x_2 - 0.23x_1x_3 + 0.090x_2x_3 - 0.72x_1^2 + 0.79x_2^2 - 0.083x_3^2$$
(25)

表3 最终质量浓度模型方差分析

 Table 3
 Variance analysis of final mass concentration model

式中: Y 为响应值, 尾砂浆最终质量浓度; x_1 为超声 波功率, W; x_2 为超声波频率, kHz; x_3 为施加时刻, min。

回归模型建立与方差分析根据表 2,选择合适的 模型对试验响应值(尾砂浆最终质量浓度)进行回归 分析,如式(25)所示并对回归模型进行方差分析,结 果见表 3。

如表 3 所示,本实例中最终质量浓度模型 F=13.70,SIG<0.0001,表明该模型显著且具有统计 学意义,能较好地反应尾砂浆最终质量浓度与各因素 的关系,因此可用该回归方程代替试验真实点对试验 结果进行分析。

模型的相关性进行分析如表 4 所示,校正决定系数 *R*_a²(0.9850>0.80)和变异系数为 0.45%,进一步说明模型拟合度较好,可用来对超声波作用下尾砂浆浓密的研究进行初步分析和预测。信噪比只有在大于 4 的情况下才可用于模拟优化,本模型中信噪比为 33.8, 具有足够多的信号用于该模拟优化。

3.3 超声波作用下尾砂浆浓密关键因素交互作用

3.3.1 超声波功率与频率对最终质量浓度的交互作用 图 7 所示为超声波功率与频率交互作用影响下尾 砂浆最终浓密质量的响应曲面图和等值线图,超声波 施加时刻固定为沉降 20 min 后才施加。由图 7(a)可知, 超声波的功率和频率的交互作用对尾砂浆最终质量浓 度的影响较为明显,尾砂浆的最终质量浓度随着超声 波功率的增大,呈现出先增大后减小的趋势,而最终 质量浓度随超声波频率的增大呈现减小趋势。超声波 功率对尾砂浆最终质量浓度有着显著影响,低功率或 高功率均不利于尾砂浆的浓密,进而影响尾砂浆最终 质量浓度。由图 7(b)可知,当超声波功率为 50 W 时,

Project	Sum of square	Degree of freedom	Mean square	F	SIG
Model	14.02	9	1.56	13.70	< 0.0001
X ₁ -Frequency	1.34	1	1.34	11.77	0.0004
X_2 -Power	5.93	1	5.93	52.14	< 0.0001
X_3 -Time point	1.19	1	1.19	10.45	0.009
$X_1 X_2$	0.017	1	0.017	0.15	0.707
$X_1 X_3$	0.20	1	0.20	1.78	0.2116
$X_2 X_3$	0.033	1	0.033	0.29	0.6015
X ₁₂	2.31	1	2.31	20.33	0.0011
X ₂₂	2.51	1	2.51	22.10	0.0008
X ₃₂	0.031	1	0.031	0.27	0.6115

1913

表4 最终质量浓度模型相关性分析

Table 4	Correlation	analysis	of	final	mass	concentration
model						

Evaluation index	Value
SIG	< 0.0001
Model correlation	0.9920
Correction coefficient, R_a^2	0.9575
Coefficient of variation	0.45%
Signal to noise ratio	33.8

尾砂浆的最终质量浓度最高,超声波浓密效果最好。 高频率的超声波作用与低频率超声波作用相比较,高 频率的超声波作用效果较差,这与尾砂颗粒的固有频 率相关。在 20 min 沉降后施加频率为 20 kHz、功率为 50 W 的超声波,尾砂浆最终质量浓度最高为 77.5%。 3.3.2 超声波功率与施加时刻对最终质量浓度的交互

作用

图 8 所示为声波功率与施加时刻交互作用影响下 尾砂浆最终浓密质量的响应曲面图和等值线图,固定 超声波频率为 20 kHz。由图 8 可知,超声波功率与施 加时刻对尾砂浆最终质量浓度产生明显影响,但响应 曲面较为平缓,说明超声波功率与施加时刻的交互作





Fig. 7 Interaction of final mass concentration between ultrasonic power and frequency: (a) Response surface; (b) Contour diagram



图 8 超声波功率与施加时刻对最终质量浓度的交互作用 Fig. 8 Interaction of final mass concentration between ultrasonic power and application time: (a) Response surface; (b) Contour diagram

用对尾砂浆最终质量浓度的影响不显著,当超声波功 率为 50 W,在沉降 20 min 后施加超声波,尾砂浆的 最终质量浓度最高。

3.3.3 超声波频率与施加时刻对最终质量浓度的交互 作用

超声波频率与施加时刻交互作用影响下尾砂浆最 终浓密质量的响应曲面图和等值线图如9示,超声波 功率固定为50W。由图9可知,超声波频率与施加时 刻对尾砂浆最终质量浓度产生明显影响,尾砂浆的最 终质量浓度随着超声波的频率增大而减小,且响应面 较陡,说明超声波频率与施加时刻的交互作用对尾砂 浆最终质量浓度的影响显著,当超声波频率为20 kHz,在沉降20min后施加,尾砂浆的最终质量浓度 最高。超声波频率的选择以小于28 kHz为佳。

3.4 优化结果分析验证

通过 BBD 试验对超声波浓密进行优化,结合各 因素交互作用分析,在各影响因素数值变化范围内, 获得超声波浓密的优化方案,并根据优化方案与实验 实测结果做比对,如表6所示。



图 9 超声波频率与施加时刻对最终质量浓度的交互作用

表6 超声波作用下全尾砂浆浓密沉降优化

Table 6	Super-o	ptimized	result of	funclass	sified ta	ilings slur	ry thickenin	g sedimen	tation unde	er ultrasonic
							- /			

Value	Frequency/kHz	Power/W	Time point/min	Predicted concentration/%	Error/%
Optimized	20.02	50	19.77	77.51	0.120
Measured	20	50	20	77.5	0.129

由表 6 可知,利用 Design-Expert 软件优化的参数 与实验设计范围内实测值误差为 0.129%,预测值与试 验值具有很好的吻合度,因此所建立的预测模型有效。 所以,当超声波频率为 20.02 kHz,功率 50 W,在沉 降后 19.77 min 后施加,尾砂浆的最终质量浓度为 77.51%,与自然浓密沉降全尾砂最终质量浓度 74.10% 相比可以提高 4.60%。

4 结论

1)通过数值模拟超声波在全尾砂料浆中传播的指向性发现,随着超声波频率的增大,超声波在空间上的指向性分布区域缩小,但在竖直方向分布增大,从超声波在砂仓中传播指向性分析,当超声波频率为20~40 kHz 时对砂仓中尾砂浓密沉降有重要影响。

2) 通过二次响应面回归分析,建立了多元二次响应面回归模型,并从方差和响应面分析发现,超声波的功率与频率、频率与施加时刻对尾砂浆最终质量浓度的影响存在较为明显的交互作用,而功率与施加时刻交互作用较弱。

 5)与自由沉降相比,在相同的其他试验条件下, 超声波作用下全尾砂料浆浓密沉降最终质量浓度提高
 了 4.60%;通过优化超声波作用条件,确定最佳条件 为频率 20.02 kHz、功率 50 W、施加时刻 19.77 min。

REFERENCES

- SIMONOV K. A novel hybrid multi-criteria decision-making model for green supply Chain performance evaluation in the Ghanaian mining industry[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016: 1–3.
- [2] 蔡嗣经. 矿山充填力学基础[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009: 1-2.

CAI Si-jing. Mine filling mechanics foundation[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009: 1–2.

- [3] 吴爱祥,王 勇,王洪江. 膏体充填技术现状及趋势[J]. 金属 矿山, 2016(7): 1-9.
 WU Ai-xiang, WANG Yong, WANG Hong-jiang. Status and prospects of the paste backfill technology[J]. Metal Mine, 2016(7): 1-9.
- [4] 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.

Fig. 9 Interaction of final mass concentration between ultrasonic frequency and application time: (a) Response surface; (b) Contour diagram

1916

[5] 任伟成. 立式砂仓连续高浓度稳定放砂模型研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017: 76-85.

REN Wei-cheng. Study on high concentration consecutive discharge tailings stably model of Vertical tailings silo[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017: 76–85.

[6] 彭 亮. 絮凝剂在充填系统立式砂仓中的应用研究[D]. 长
 沙: 长沙矿山研究院, 2014: 1-12.

PENG Lang. Study on the application for flocculants in vertical sand tank of filling system[D]. Changsha: Changsha Institute of Mining Research, 2014: 1–12.

[7] 许新启. 浅析立式砂仓尾砂浆固液分离技术[J]. 采矿技术,
 2006, 6(3): 201-202.

XU Xin-qi. Analysis on solid-liquid separation technology of vertical sand tank mortar[J]. Mining Technology, 2006, 6(3): 201–202.

- [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,2010:56-57.
 WANG Xin-min, GU De-sheng, ZHANG Qin-li. Theory of backfilling activity and pipeline transportation technology of backfill in deep mines[M]. Changsha: Central South University Press, 2010: 56-57.
- [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] 何哲祥. 絮凝剂对胶结充填体强度的影响[J]. 长沙矿山研究 院季刊, 1990, 10(1): 48-53.
 HE Zhe-xiang. Flocculant effect on the strength of cemented fill[J]. Quarterly of CIMR, 1990, 10(1): 48-53.
- [12] 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-ming, ZHANG Qin-li. Flocculating

sedimentation characteristic of pre-magnetized crude tailings slurry[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(2): 392–398.

- [13] 李常芳. 超声波、氯化铁联合 PAM 对改善污泥脱水性能的研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2014: 11-13.
 LI Chang-fang. The exploratory research on dewaterability of sludge conditioned by ultrasonic、FeCl3 and PAM[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2014: 11-13.
- [14] SINGH B P. Ultrasonically assisted rapid solid-liquid separation of fine clean coal particles[J]. Minerals Engineering, 1999, 12(4): 437–443.
- [15] KUDRYASHOVA O B, ANTONNIKOVA A A, KOROVINA N V. On Mechanisms of Ultrasonic Sedimentation of Fine Aerosols[J]. Russian Physics Journal, 2015, 58(2): 271–277.
- [16] SMYTHE M C, WAKEMAN R J. The use of acoustic fields as a filtration and dewatering aid[J]. Ultrasonics, 2000, 38(1/8): 657–661.
- [17] ÖNAL G, ÖZER M, ARSLAN F. Sedimentation of clay in ultrasonic medium[J]. Minerals Engineering, 2003, 16(2): 129–134.
- [18] 杨金美,张光明,王 伟. 超声波强化给水污泥沉降和脱水 性能的研究[J]. 环境污染治理技术与设备,2006,7(11):58-61. YANG Jin-mei, ZHANG Guang-ming, WANG Wei. Research on ultrasonic enhancement of water supply sludge settling and dewatering[J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2006, 7(11):58-61.
- [19] 王志凯,杨 鹏,吕文生,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, 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.

[20] 王志凯. 超声波作用下尾砂浆浓密规律及流变特性研究[D]. 北京:北京科技大学, 2017: 43-45.
WANG Zhi-kai. Study on thickness law and rheological properties of tailing slurry under ultrasonic[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2017: 43-45.

Thickening sedimentation of unclassified tailings under influence of external field based on response surface method

ZHU Li-yi^{1, 2}, LÜ Wen-sheng^{1, 2}, YANG Peng^{2, 3}, WANG Zhi-kai^{1, 2}

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

2. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

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

Abstract: In order to improve the mass concentration of unclassified tailings slurry thickening sedimentation, the ultrasonic technology was introduced into the thickening sedimentation test of unclassified tailings slurry. MATLB was used to simulate the directivity of the ultrasonic in unclassified tailings slurry, and then the ultrasonic frequency range was selected. Meanwhile, The Design-Expert software was used to design and analyze the effect of ultrasonic on the final mass concentration of the tailings slurry and the coupling relationship between the factors, and then optimize the ultrasonic action conditions. The results show that, when the ultrasonic frequency is about 20–40 kHz, dissemination is better in vertical sand silo. The final mass concentration of the unclassified tailing slurry has been significantly increased under ultrasonic. The best conditions for ultrasonic application are frequency 20.02 kHz, power 50W and natural sedimentation time 19.77min. And the final mass concentration of unclassified tailings slurry reaches 77.51%, which is 4.60% higher than the final concentration of natural sedimentation. Therefore, ultrasound wave is capable of improving the final mass concentration of suitable ultrasound field.

Key words: back-fill mining; unclassified tailings; response surface; ultrasound; thickening sedimentation

Foundation item: Project(51641401) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (2012BAB08B01) supported by the National Science and Technology Pillar Program during the 12th "Five-year" Plan Period, China

Received date: 2017-01-25; Accepted date: 2018-04-25

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

(编辑 龙怀中)