



# 超声波作用对尾矿底流浓密效果及流变性的影响

彭青松<sup>1,2</sup>, 王洪江<sup>1,2</sup>, 邢 鹏<sup>1</sup>, 杨柳华<sup>1,2</sup>, 王志凯<sup>1,2</sup>

(1. 北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083;  
2. 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)

**摘要:** 目前深锥浓密机的浓密效果差, 底流浓度低。为了探寻提高底流浓度的技术新途径, 将超声波引入浓密机性能改造, 研究超声辐照对深锥浓密机浓密效果及流变性的影响, 借助自制超声辐照深锥浓密机试验系统开展动态浓密实验; 利用正交实验设计, 重点考察耙架转速、超声波辐照频率对其浓密机底流浓度及流变性的影响。结果表明, 超声波辐照频率与底流浓度呈现较为复杂的关系, 超声频率的升高对底流浓度起到增益效果, 实验中底流浓度最大提高 3.85%; 超声波作用对于底流浓度的增益效果呈二次函数分布, 在频率 22.34 kHz 时为函数最低点, 增益效果最弱。超声波作用后, 料浆絮体结构尺寸有所降低, 超声作用使得尾砂颗粒和絮团重新分配组合, 产生形态规模较小的絮团, 絮体体积比降低。超声波辐照对底流浓度有较大影响, 可作为一种提高浓密机底流浓度的手段。

**关键词:** 超声辐照; 动态浓密; 全尾砂; 底流浓度; 絮团结构

文章编号: 1004-0609(2021)-05-1377-11

中图分类号: TD853

文献标志码: A

**引文格式:** 彭青松, 王洪江, 邢 鹏, 等. 超声波作用对尾矿底流浓密效果及流变性的影响[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(5): 1377–1387. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-39186

PENG Qing-song, WANG Hong-jiang, XING Peng, et al. Influence of ultrasonic irradiation on thickening effect and rheology of tailings underflow[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(5): 1377–1387. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-39186

膏体充填技术是将全尾砂、胶凝材料等混合制备成膏体, 并充填到井下采空区的一种技术<sup>[1-2]</sup>。膏体充填技术因其安全、环保、高效等优点, 正逐渐成为矿山充填技术的重要发展方向<sup>[3-7]</sup>。深锥浓密机作为尾矿浓缩设备, 具有大产能, 高效率等优点, 逐渐被更多国内外矿山采用<sup>[8-10]</sup>, 成为膏体充填技术主要设备之一。底流浓度是深锥浓密机最重要的技术指标, 目前对深锥浓密机研究的核心目的之一, 就是提高其底流浓度。由于深锥浓密机底流浓度达不到膏体充填的标准, 国外多采用深锥浓密机与压滤机联合工艺以达到浓度要求, 工艺过程复杂, 成本提高。

国内外学者对浓密机底流浓度的多种影响因

素做了大量研究, 包括高径比<sup>[11]</sup>、给料浓度、絮凝剂浓度和单耗<sup>[12]</sup>、泥层高度<sup>[13]</sup>、底流流量、耙架转速和扭矩、导水杆数量和排列方式<sup>[14]</sup>等。以上研究主要集中于浓密机的结构参数和工艺参数, 对于引入其他因素调控深锥浓密机底流浓度的研究报道较少。

国外一些学者已经开展超声波对浓密机底流影响的初步研究, RUIZ-HERNANDO 等<sup>[15]</sup>对废水料浆进行处理, 得出超声波对于料浆的黏度和絮团结构产生作用, 使得絮团的尺寸变小, 废水的脱水性能得到改善。DU 等<sup>[16]</sup>研究了超声波后处理对尾矿浓密效果的影响, 结果表明超声波的处理能显著提高高岭土料浆的底流浓度。ÖNAL 等<sup>[17]</sup>综合研究

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0602903); 国家自然科学基金资助项目(51834001)

收稿日期: 2020-01-20; 修订日期: 2021-05-08

通信作者: 王洪江, 教授; 电话: 15901196527; E-mail: wanghj1988@126.com

了超声波作用时间、絮凝剂添加量对于底流浓度效果的影响,结果表明超声波有助于絮团颗粒密度增加,且能够显著减少絮凝剂添加量。CHU 等<sup>[18]</sup>注意到超声波气穴作用使得料浆结构产生变化。以上研究表明,超声辐照作为一种能量传播的方式,能够破坏沉降絮团的结构,对浓密效果产生影响。然而以上研究的对象为以废水为代表的低浓度料浆,而对尾矿充填高浓度料浆的相关研究较少;同时以上研究采用的超声波频率单一,作用位置单一,没有对不同频率进行研究探讨;多采用后处理方式,缺乏原位实验,与浓密机动态浓密过程有一定差别。

为了探寻提高底流浓度的技术新途径,突破深锥浓密机底流浓度上限,本研究将超声波引入浓密机性能改造,研究超声波与耙架转速耦合作用下浓密机的浓密效果。借助自制超声辐照+深锥浓密机试验系统开展动态浓密实验,利用正交实验设计,重点考察耙架转速、超声波辐照频率对浓密机底流浓度及流变性的影响。

## 1 实验

### 1.1 实验材料

实验所需全尾砂来自某矿选矿厂,其粒级组成如图 1 所示,物理性质如表 1 所示。经过计算,该全尾砂不均匀系数  $C_u=4.03$ ,尾砂颗粒级配不良;曲率系数  $C_c=0.70$ ,尾砂粒径连续状况不好。

通过絮凝剂筛选实验,最终选择 Magnafloc 5250 作为动态浓密实验所用的絮凝剂,其主要成分为聚丙烯酰胺(PAM),能以各种比例溶解在水中。

### 1.2 实验装置

实验采用自制的超声辐照+浓密机试验系统。该系统包括超声辐照系统、料浆制备输送系统、浓密模拟系统和数据采集系统。其中将浓密机模型从上到下划分为 A~E 五个区域,分别对应浓密机的澄清区、自由沉降区、干涉沉降区、压缩区和压密

表 1 全尾砂的基本物理性质

Table 1 Basic physical properties of unclassified tailings

Proportion/ (t·m <sup>-3</sup> )	Loose density/ (t·m <sup>-3</sup> )	Dense density/ (t·m <sup>-3</sup> )	Loose porosity/ %	Dense porosity/ %	Moisture content/ %
2.58	1.15	1.31	53.72	40.35	0.8

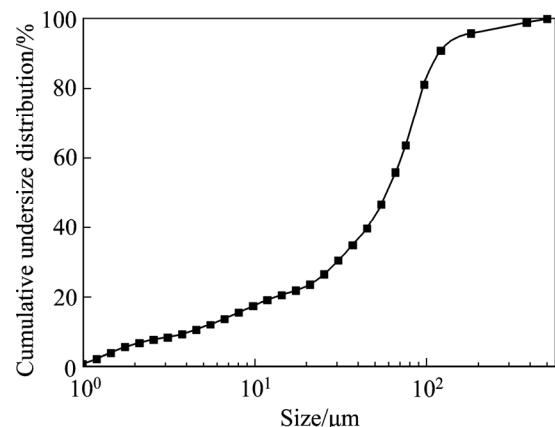


图 1 全尾砂粒级组成

Fig. 1 Grain size composition of unclassified tailings

区,每个区域长度均为 20 cm,模型总长 1 m。每个区域上安装作用小板,实验时超声波换能器与作用小板连接。如图 2 所示。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 实验方案

通过前期探索实验确定本实验的参数:全尾砂

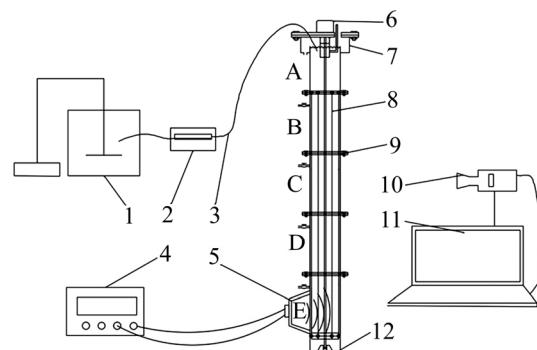


图 2 超声辐照与浓密机实验装置示意图

Fig. 2 Experimental equipment of ultrasonic irradiation and thickener: 1—Mixer; 2—Peristaltic pump; 3—Conveying hose; 4—Ultrasonic generator; 5—Ultrasonic transducer; 6—Motor; 7—Overflow tank; 8—Rake frame; 9—Experimental column; 10—High precision camera; 11—Computer; 12—Underflow discharge port

入料浓度为 10%, 入料流量为 400 mL/min; 絮凝剂选用聚丙烯酰胺, 单耗为 30 g/t, 浓度为 0.1%; 超声波最佳作用位置为 E 区, 即超声波换能器作用位置距离浓密机底部水平 0~20 cm 的位置; 连续动态浓密实验泥层高度基本控制值  $h_0=60$  cm。

考察超声波不同频率( $f$ )与耙架转速两个因素耦合对全尾砂深锥浓密的影响。通过 DPS 数据处理系统设计正交实验, 实验组合如表 2 所示。

表 2 正交实验设计方案

Table 2 Design scheme of orthogonal experiment

Experiment No.	$f/\text{kHz}$	Rake speed/( $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ )
E1	20	10
E2	22	6
E3	25	8
E4	28	2
E5	16	4
E6 <sup>1)</sup>	—	—

1) Control group

### 1.3.2 动态浓密实验的泥层高度控制

本实验通过控制排料流量使得泥层高度大致保持在稳定位置, 以确保浓密机内料浆总量的动态平衡, 需使入料与排料之间维持式(1)所示关系。

$$\rho_1 Q_1 = \rho_2 Q_2 \quad (1)$$

式中:  $\rho_1$  为进料料浆的质量浓度;  $Q_1$  为入料流量;  $\rho_2$  为底流料浆质量浓度;  $Q_2$  为流量。

根据前期探索实验可知, 本次实验的底流质量浓度范围为 60%~65%, 结合入料浓度为 10%, 通过式(1)得出底流流量范围为 92.31~100 mL/min。以式(1)计算得出的底流流量为基础, 参照泥层高度对底流流量进行反馈调节, 建立底流流量的动态调节反馈机制。设定泥层高度  $h_0=60$  cm 为标准值, 以  $(h_0+2)$  cm 作为调节底流流量的阈值, 以 2 mL/min 作为调节的基本单位。泥层高度达到基本控制值  $h_0$  后, 设定底流泵流量为 92 mL/min, 开启底流泵进行底流排放和采集。当泥层高度出现正变动, 且其变动幅值大于 2 cm 时, 将底流泵流量提高 2 mL/min 至 94 mL/min。待泥层高度恢复到  $h_0$  后, 将底流泵流量复原(92 mL/min); 当泥层高度出现负变动, 且其变动幅值大于 2 cm 时, 将底流泵流量减小 2 mL/min 至 90 mL/min。待泥层高度恢复  $h_0$  后, 将

底流泵流量复原。

### 1.3.3 实验步骤

实验步骤如下: 1) 按照实验设计组装超声辐照+浓密机试验系统。2) 制备所需絮凝剂溶液和全尾砂料浆, 并用搅拌机对全尾砂料浆持续搅拌以防止料浆发生沉降, 保证其浓度不变。3) 使用蠕动泵将清水泵满浓密机模型; 开动耙架, 并将转速设定在 10  $\text{r}/\text{min}$ ; 开启超声波发生器, 并将频率设定在 20 kHz。开动两台蠕动泵分别将絮凝剂和全尾砂料浆泵送至浓密机模型。4) 当泥层高度达到  $h_0=60$  mm 时, 打开底流泵, 设定底流泵流量为 92 mL/min, 并根据泥层高度动态控制方案保持其泥层高度不变。5) 实验过程中多次从取样口取 200 mL 底流浓缩料浆并编号, 烘干后计算其底流浓度。实验结束后取样进行流变试验。6) 按照表 2 正交实验设计方案, 改变超声波频率和耙架转速, 重复步骤 2)~5)。

## 2 底流浓度变化规律分析

### 2.1 底流浓度检测结果

连续浓密阶段底流浓度随时间的变化如图 3 所示, 各节点样品使用滤纸采集和称量。经过计算可知, 开启底流泵进行连续浓密实验后底流浓度维持了较为平稳略有上升的状态。由于较长时间的压实作用, 在模型底部形成了较为密实的结构, 开启底流泵排泥 0~3 min 内, 底流浓度出现了较大的变动, 但范围较小。其后, 在超声波和耙架的共同作用下, 底流浓度较最初提取的底流浓度有所提高。去除受

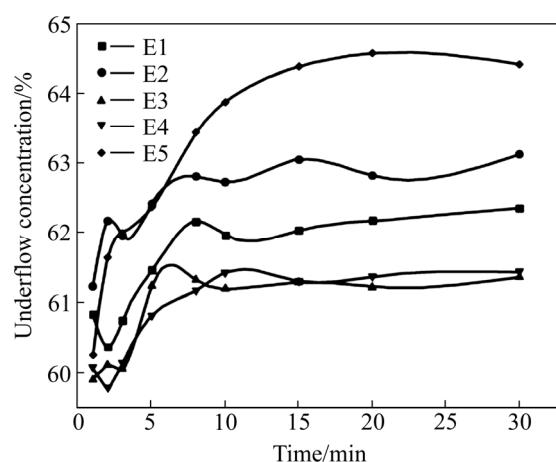


图 3 底流浓度随时间的变化

Fig. 3 Curves of underflow concentration with time

开启底流泵影响较大的5 min内数据后,对剩余数据取平均值,得各组连续浓密阶段底流浓度如表3所示。

表3 连续浓密阶段平均底流浓度

Table 3 Average of underflow concentration in Continuous thickening stage

Experiment No.	$f/\text{kHz}$	Rake speed/ $(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	Mean underflow concentration/%
E1	20	10	62.03
E2	22	6	62.83
E3	25	8	61.28
E4	28	2	61.26
E5	16	4	63.85
E6	—	—	60.57

## 2.2 回归分析

1) 回归方程拟合。以超声波辐照频率和耙架搅动速度分别为自变量 $x_1$ 、 $x_2$ ,以深锥浓密机模型底流浓度为因变量 $y$ ,对该阶段底流浓度与进行二次多项式逐步回归分析,可得回归方程:

$$y = 106.08 - 4.106x_1 + 0.089x_1^2 + 0.013x_1x_2 \quad (2)$$

式中:  $x_1$  为超声波辐照频率,  $\text{kHz}$ ;  $x_2$  为耙架搅动速度,  $\text{r}/\text{min}$ ;  $y$  为底流浓度,  $\%$ 。 $F$  检验临界值  $F_{0.05}(3,1)=9.01 < F_t=217.57$ , 复相关系数  $R_r=0.9992$ , 说明回归方程可靠性显著。根据回归方程,分析各因素对极限底流浓度的影响。

2) 底流浓度随耙架转动速率变化分析。在本实验中,耙架的搅动速度范围是  $2\sim 10 \text{ r}/\text{min}$ ,即  $x_2 \in [2, 10]$ ,根据方程(2)可知,该区间为回归函数的单调递增区间,说明耙架转动速率与底流浓度呈正相关,即耙架转动速率越快,底流浓度越高。超声波辐照频率为  $20 \text{ kHz}$  时,底流浓度随耙架转动速率变化情况如图4所示。耙架转速为  $2 \text{ r}/\text{min}$  时,底流浓度为  $59.6\%$ ;转速为  $10 \text{ r}/\text{min}$  时,底流浓度为  $62.1\%$ 。由此可知耙架转速对底流浓度有重要影响,耙架在转动过程中会形成剪切力对底流进行剪切,底流中的水分因受到剪切力的作用而被挤压形成导水通道。由于水分从导水通道中被挤出,因此底流浓度升高<sup>[19-20]</sup>。超声波作用能进一步使泥层中絮团的水分脱离出来,耙架转速越快,这部分水能迅速沿着导水通道上升,从而对底流浓度的提高产生积极

影响。

3) 底流浓度随超声波频率变化分析。超声波辐照频率与底流浓度呈二次相关性,根据回归方程,当耙架转速为  $10 \text{ r}/\text{min}$  时,超声波频率与底流浓度关系如图5线(1)所示,无超声波作用的对照组如图5线(2)所示。本实验中辐照使用超声波的频率范围是  $16\sim 28 \text{ kHz}$ ,由图5可知,在该范围超声波辐照下,底流浓度均高于对照组,即超声波作用能对底流浓度的提高产生积极作用。其中,  $x_1 \in [16, 22.34]$  时,随着超声波辐照频率的增加,底流浓度提高的程度逐渐减小,说明超声波对底流浓度提高的促进作用减弱;  $x_1 \in [22.34, 28]$  时,随着超声波辐照频率的增加,底流浓度提高的程度逐渐增大,超声波作用对底流浓度提高的促进作用增强。

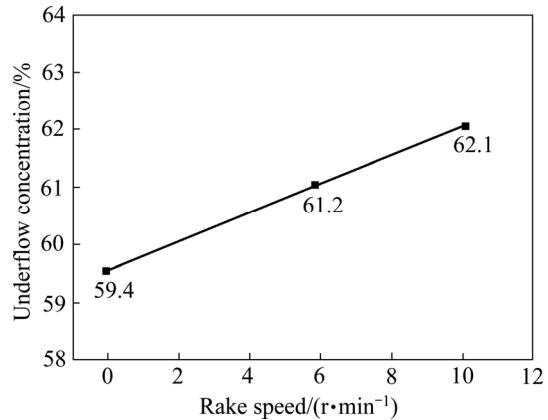


图4 底流浓度随耙架转动速率变化

Fig. 4 Curves of underflow concentration with rake speed

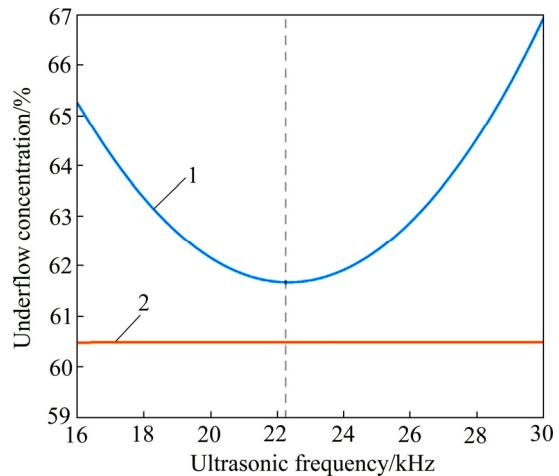


图5 底流浓度随超声波频率变化

Fig. 5 Curve of underflow concentration with ultrasonic irradiation frequency: 1—Ultrasonic irradiation was applied; 2—No ultrasonic irradiation was applied

### 2.3 超声波影响底流浓度的机理分析

超声作用于料浆时产生了包括机械机制、热机制、空化机制、触变机制等在内的各种效应, 其中最主要的是超声作用的机械机制和空化机制。

1) 机械机制。在超声波作用下, 超声波引起质点发生振动, 在振动过程中, 质点的机械位移、加速度等的变化都可能与超声波的频率有关:

$$X_0 = v_0 / (2\pi f) \quad (3)$$

$$a_0 = 2\pi f v_0 \quad (4)$$

式中:  $v_0$  为最大质点振动速度,  $\text{m/s}$ ;  $X_0$  为最大质点振动位移,  $\text{m}$ ;  $f$  为频率,  $\text{Hz}$ ;  $a_0$  为最大质点加速度,  $\text{m/s}^2$ 。

超声波在传播过程中使超声场中的各质点产生线性交变振动, 虽然质点振幅比较小, 但振动加速度很大, 可达重力加速度的数万倍, 剧烈的加速度牵引媒质产生激烈而快速变化的机械运动。机械作用大小与振幅、频率有直接关系, 超声振幅越大, 频率越高, 其机械作用效果越明显。在深锥浓密机压缩区和压密区的泥层中, 由于超声波作用引起絮团产生激烈并快速变化的机械振动, 机械震荡效应增强了污泥颗粒的有效碰撞<sup>[21-22]</sup>, 絮团结构被破坏, 絯团内包裹的水和絮团空隙间的水分被释放出来; 超声波频率越高, 该效果越明显。因此, 超声波频率越大, 浓密机压缩区和压密区泥层越致密, 得到的底流浓度越大。

2) 空化机制。空化效应表现为声场中产生空化气泡的特性。超声波的声压幅值区域随着频率不同而变化, 因此, 其近场剧烈震荡区会随频率不同而变化。超声波的空化效应产生空化泡, 空化泡随声压的变化作脉动、振荡, 或伴随生长、收缩以至破灭; 空化泡破灭时产生的冲击波也会使得尾砂细颗粒做无规则布朗运动, 同时也加速了固液分离<sup>[23]</sup>。超声波在料浆中的声场分为焦前区、焦区、焦后区。3个区域的超声波具有不同的特征, 在焦前区空化气泡小, 运动速度和频率快; 在焦区附近, 空化气泡较大且运动速度慢; 在焦后区, 空化气泡密集且出现枝状结构。稳定空化气泡首先在焦区形成, 继而在焦后区扩展, 最后出现在焦前区。空化气泡在焦区可能产生变形、聚集以及破裂。在实验控制功率、料浆属性等变量的基础上, 焦区出现的位置与

超声波频率有关<sup>[24]</sup>。空化焦区的位置会随着频率变化, 如式(5)所示:

$$x_0 = \frac{D^2}{4\lambda} \quad (5)$$

式中:  $x_0$  为焦区与超声波发生装置的距离,  $\text{m}$ ;  $D$  为声源直径,  $\text{m}$ ;  $\lambda$  为波长,  $\text{m}$ 。

实验中超声的频率范围为 16~28 kHz, 因此料浆中激烈震荡区也随之变化。不同的实验条件下对应不同的焦区位置, 如图 6 所示。超声作用下形成了包括焦前区、焦区、焦后区在内的完整的焦区空化气泡群(见图 6(a)), 能形成持续有效空化且空化效果强烈; 空化区域向后滞推, 因此在料浆中只能形成焦前区、焦区, 在焦区内能够形成有效空化效果, 但缺少焦后区, 其空化效果相对减弱(见图 6(b)); 料浆中只存在焦前区, 因此空化效果很弱(见图 6(c))。

#### 3) 混合作用机制

实验产生的效果是包括机械效应和空化效应等在内的多种效应共同作用的结果, 表现出二次曲线的特点。参考对照组, 以对称轴 22.34 kHz 为分

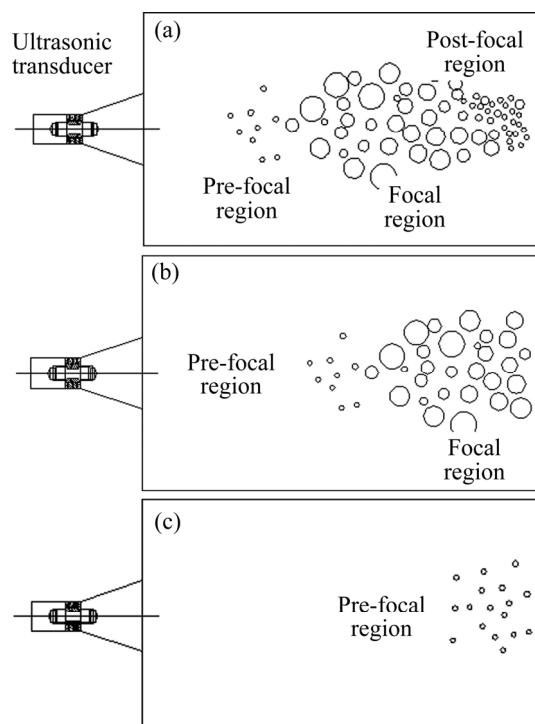


图 6 超声波作用焦区位置

Fig. 6 Location of ultrasonic irradiation focal region:  
(a) Focal area in middle of slurry; (b) Focal area in edge of slurry; (c) Focal area out of slurry

界线, 将超声辐照对底流浓度影响划分为两个区域, 如图 5 所示。在频率小于 22.34 kHz 时, 超声辐照作用使得底流浓度大于对照组, 在该区域超声波作用有利于底流浓度提高, 在该区域内超声空化焦区的布置对于底流浓度提高不利, 提升幅度随着频率升高而减小。在频率大于 22.34 kHz 时, 超声波作用有利于底流浓度提高, 在该区域内超声空化焦区的布置对于底流浓度提高有利, 提升幅度随着频率升高而增大。

### 3 底流流变性变化规律分析

#### 3.1 底流流变性测试结果

本文使用 RS-SST 桨式流变仪, 配备 40 mm×20 mm 桨式转子。桨叶克服浆体的屈服应力才能够转动, 转动使周围一定区域内的浆体发生剪切作用。其剪切作用应力与扭矩关系如下<sup>[25]</sup>:

$$T = \left( \frac{1}{2} \pi D^2 H + \frac{1}{6} \pi D^3 \right) \cdot \tau \quad (6)$$

式中:  $T$  为桨叶扭矩, N·m;  $\tau$  为浆体剪应力, Pa;  $D$  为转子直径, m;  $H$  为转子高度, m。

为考察料浆流变特性, 根据本次实验目的, 设置单程上升速率扫描<sup>[26]</sup>。设计剪切速率由 0 s<sup>-1</sup> 线性增加至 120 s<sup>-1</sup>, 测试时间为 120 s。测试样品采用本章各组实验采集的浓密机底流料浆。剪切应力和塑性黏度测试结果如图 7 和 8 所示。

由图 7 可知, 剪切应力的大小与剪切速率呈一定关系, 随着剪切速率的增加, 剪切应力逐渐增加。

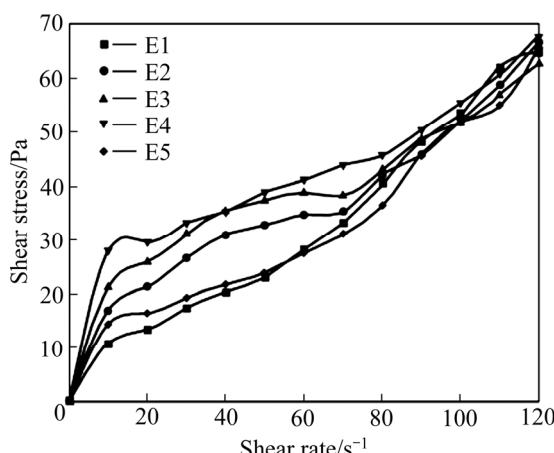


图 7 剪切应力随剪切速率变化图

Fig. 7 Curve of shear stress with shear rate

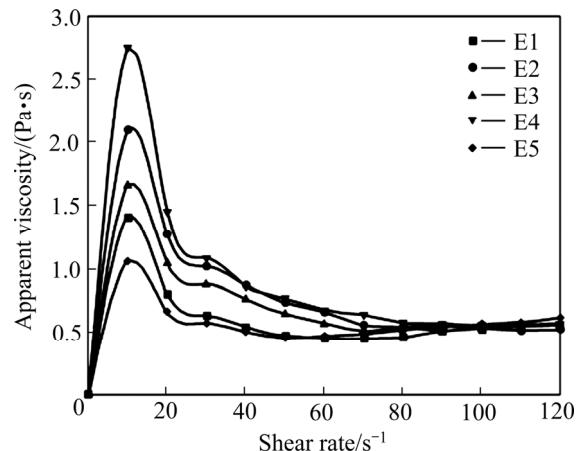


图 8 塑性黏度随剪切速率变化图

Fig. 8 Curve of apparent viscosity with shear rate

由图 5~11 可知, E4 组的剪切应力明显大于其他 4 组的, 且 E5 和 E1 组的剪切应力较小。在实验开始初期, 即剪切速率介于 0~10 s<sup>-1</sup> 时, 剪切应力增长斜率明显大于其后阶段。剪切速率介于 20~120 s<sup>-1</sup> 时, 斜率放缓。由图 8 可知, 剪切速率较低时, E5 和 E1 组的塑性黏度较低, 而 E4 组的塑性黏度较高。随着剪切速率的增大, 受絮网结构破坏增大的影响, 实验的塑性黏度均明显降低。

#### 3.2 流变性影响因素相关性分析

随着剪切速率和剪切时间增加, 尾砂料浆絮网结构受剪破损的比例逐渐增大。为此, 选取剪切速率为 30 s<sup>-1</sup> 时对应的剪切应力和塑性黏度, 与本实验控制的变量, 即超声频率和耙架转速, 分别进行相关性分析。实验参数与对应的流变参数如表 4 所示。

SPSS 相关性分析结果如表 5。

表 4 实验参数和流变参数关系表

Table 4 Relation table of experimental parameters and rheological parameters

Experiment No.	Ultrasonic frequency/ kHz	Rake speed/ (r·min <sup>-1</sup> )	Shear stress/ Pa	plastic viscosity/ (Pa·s)
E1	20	10	17.410	0.633
E2	22	6	26.760	1.023
E3	25	8	31.196	0.977
E4	28	2	33.177	1.087
E5	16	4	19.312	0.571

表 5 超声频率和耙架转速相关性分析

Table 5 Analysis of correlation between frequency of ultrasonic and speed of rake frame

Relevance	Ultrasonic frequency	Rake speed
Shear stress	0.901	0.443
Plastic viscosity	0.856	0.414

由表 5 可知, 超声频率与剪切应力和塑性黏度相关系数分别为 0.901、0.856, 相关性较高; 而耙架转速与流变参数相关系数分别为 0.443 和 0.414。对比表明, 辐照超声波所用频率是导致底流流变参数发生变化的主要因素。

### 3.3 超声波影响流变性的机理分析

絮团结构示意图如图 9 所示。超声作用造成的空化能够对絮团网状结构造成高频高压冲击, 使得大型的絮团破裂。大尺寸絮团的破裂使得网状结构的完整性破坏, 强度大幅降低, 甚至破裂为若干小型絮团结构。原絮网结构中大尺寸絮团固定的封闭间隙水得到释放, 间隙水进入料浆中与其他小尺寸絮团或尾砂颗粒结合形成新的水膜结构。水膜的重新分布使得尾砂颗粒和小尺寸絮团流变性得到改善, 从而提高了整个料浆结构的流变性。

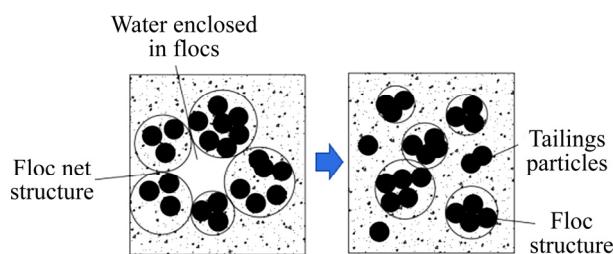


图 9 絮团结构示意图

Fig. 9 Schematic diagram of floc

## 4 底流微观结构分析

### 4.1 底流微观结构检测结果

底流从浓密机底部收集后, 将标本置于液氮或干冰中冷冻, 并在干燥机中进行升华得到絮凝体标本。对处理后的标本进行切割, 得到适合仪器样品座尺寸的块状试样, 并进行镀金处理。SEM 观察结

果如图 10 所示。由图 10 可知, E1 组的颗粒较为均匀, 出现一定量的簇状物, 无大型的片状物; E2 组的颗粒整体几何尺寸较小, 颗粒较为均匀, 很少出现大型片状物; E3 组的颗粒物规格较大, 片状物较多; E4 组的颗粒物较少, 出现了大量的片状物; E5 组几乎有网状结构出现。

对 SEM 像进行二值化处理, 将整个平面分为孔隙和颗粒两个部分。以各组实验 SEM 像为基础, 借助阈值灰度统计工具, 获取料浆微观结构信息中结构体比例, 以便于量化对比各组实验结果<sup>[27]</sup>。然后基于 Image-pro-plus(IPP)图形分析软件进行簇状结构规模分析与统计, 获取量化对比结果。根据 SEM 观察及 Image-pro-plus 处理结果, E1、E2、E5 组的絮体体积占比较小, 而 E3、E4 组的簇状物占比较大。如表 6 所示。

### 4.2 底流微观结构分析

尾砂颗粒间的双电层交叠斥力与范德华力合成交互作用能, 使得颗粒间相互黏结, 尾砂颗粒聚集形成絮团。颗粒和絮团相互黏结形成“一级絮团”, 两个或两个以上“一级絮团”连接形成“二级絮团”, “二级絮团”连接形成更大尺寸的絮团, 直至形成絮网凝胶结构。絮网凝胶结构之间存在着大小不等的孔隙, 孔隙尺度与絮团之间的链接方式有关, “面-边”搭接(E-F)时, 有较大的孔隙体积, “面-面”“边-边”搭接(E-E, F-F)则孔隙体积相对较小。尾砂料浆中的孔隙中圈存有大量的封闭水体, 因此规模越大的絮团尾砂颗粒质量浓度越小。

在尾砂浓密过程中, 微结构的大小是影响底流浓度和流变性的重要因素。超声辐照的空化作用产生的冲击波激荡使得絮团之间、尾砂颗粒之间、絮团与尾砂颗粒之间发生激烈的混合, 形成更为复杂的连接方式。超声作用使得尾砂颗粒和微小絮团再次进行受限扩散, 并相互碰撞接触形成新的絮团, 该过程导致扩散絮团孔隙率减小, 尺寸减小, 如图 11 所示。而超声波携带的能量能够与微结构发生能量互动, 使微结构由于自身组分的不同而产生分离作用, 表现为尾砂颗粒粒间孔隙和粒内孔隙的减小。

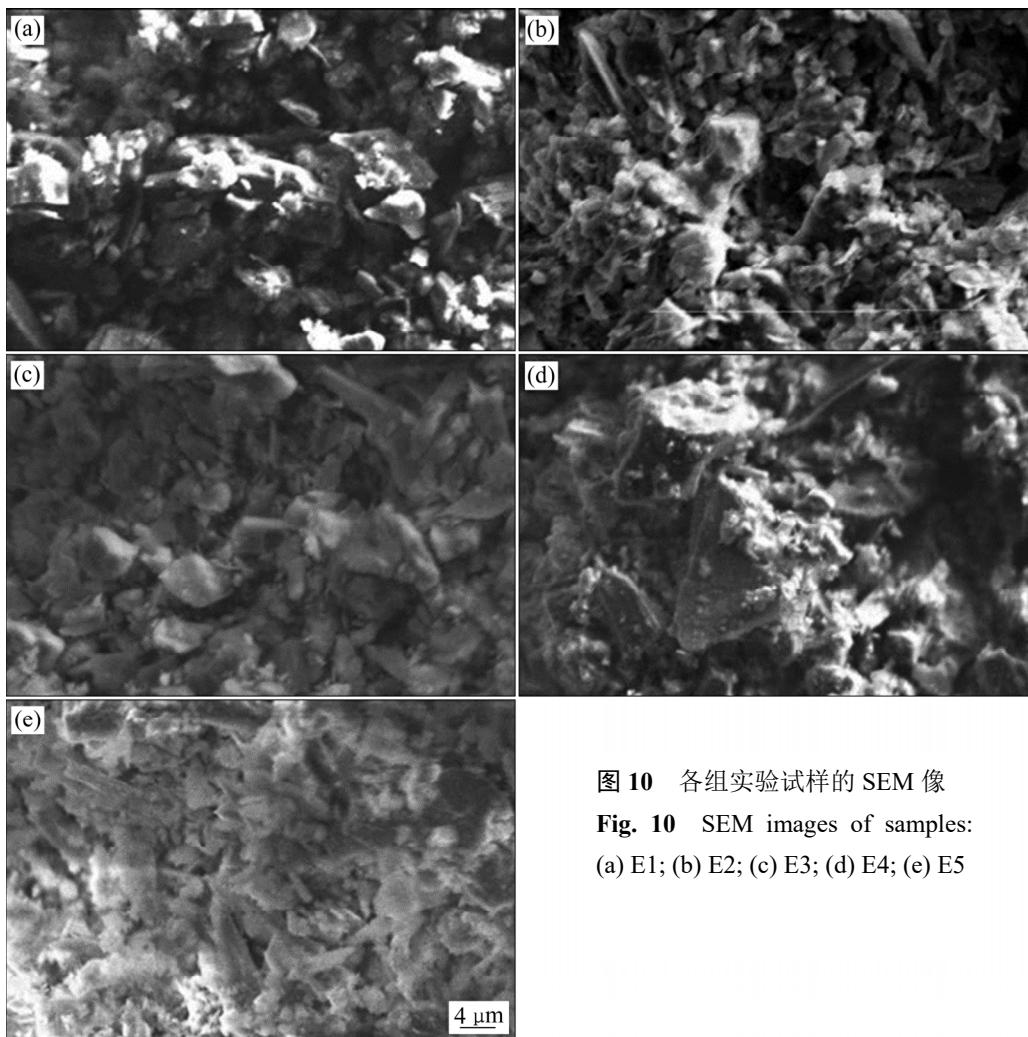


图 10 各组实验试样的 SEM 像

Fig. 10 SEM images of samples:  
(a) E1; (b) E2; (c) E3; (d) E4; (e) E5

表 6 Image-pro 处理所得絮体体积比

Table 6 Volume ratio of floc volume obtained by Image-pro treatment

E1	E2	E3	E4	E5
0.57	0.48	0.73	0.78	0.58

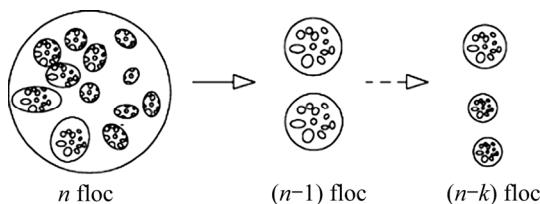


图 11 絮团孔隙率减小示意图

Fig. 11 Schematic diagram for reducing porosity of floc

## 5 结论

分析了超声频率耙架转速两因素影响下底流

浓度变化规律，并对其机理进行分析与讨论：

1) 耙架转速与底流浓度呈线性关系，随着耙架转速的提高，底流浓度逐渐增加。超声频率与底流浓度呈现较为复杂关系，超声波的机械作用随着超声波频率的升高对底流浓度起到增益效果。

2) 超声作用造成的空化能够对絮团网状结构造成高频高压冲击，使得大尺寸的絮团破裂。大型絮团的破裂使得网状结构的完整性破坏，强度大幅降低，甚至破裂为若干小型絮团结构。原絮网结构中大尺寸絮团固定的封闭间隙水得到释放，间隙水进入料浆中与其他小规模絮团或尾砂颗粒结合形成新的水膜结构。水膜的重新分布使得尾砂颗粒和小规模絮团流变性得到改善，从而提高了整个料浆结构的流变性。

3) SEM 观察结果表明，超声波作用使料浆絮体结构尺寸有所降低，孔隙体积减小，边-边、面-面

接触增多, 尾砂颗粒和絮团重新分配组合, 产生形态尺寸较小的絮团。

## REFERENCES

- [1] CIHANGIR F, ERCIKDI B, KESIMAL A, et al. Paste backfill of high-sulphide mill tailings using alkali-activated blast furnace slag: Effect of activator nature, concentration and slag properties[J]. Minerals Engineering, 2015, 83: 117–127.
- [2] BELEM T, BENZAAZOUA M. Design and application of underground mine paste backfill technology[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2008, 26(2):147-174.
- [3] GRABINSKY M W. In situ monitoring for ground truthing paste backfill designs[C]// Proceedings of the 13th International Seminar on Paste and Thickened Tailings. Canada, 2010: 85–98.
- [4] FALL M, NASIR O. Predicting the temperature and strength development within cemented paste backfill structures[C]// Proceedings of the 13th International Seminar on Paste and Thickened Tailings. Canada, 2010: 125–136.
- [5] BELEM T, FOURIE A B, FAHEY M. Time-dependent failure criterion for cemented paste backfills[C]// Proceedings of the 13th International Seminar on Paste and Thickened Tailings. Canada, 2010: 147–162.
- [6] NASIR O, FALL M. Coupling binder hydration temperature and compressive strength development of underground cemented paste backfill at early ages[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2010, 25(1): 9–20.
- [7] 王洪江, 吴爱祥, 肖卫国, 等. 粗粒级膏体充填的技术进展及存在的问题[J]. 金属矿山, 2009, 39(11): 1–5.  
WANG Hong-jiang, WU Ai-xiang, XIAO Wei-guo, et al. The progresses of coarse paste fill technology and its existing problem[J]. Met Mine, 2009, 39(11): 1–5.
- [8] 李辉, 王洪江, 吴爱祥, 等. 基于尾砂沉降与流变特性的深锥浓密机压耙分析[J]. 北京科技大学学报, 2013, 35(12): 1553–1558.  
LI Hui, WANG Hong-jiang, WU Ai-xiang, et al. Pressure rake analysis of deep cone thickeners based on tailings' settlement and rheological characteristics[J]. Univ Sci Technol Beijing, 2013, 35(12): 1553–1558.
- [9] 刘晓辉, 吴爱祥, 王洪江, 等. 膏体充填尾矿浓密规律初探[J]. 金属矿山, 2009, 39(9): 38–41.
- LIU Xiao-hui, WU Ai-xiang, WANG Hong-jiang, et al. A primary discussion on the thickening law of paste-filling[J]. Met Mine, 2009, 39(9): 38–41.
- [10] 勾金玲, 赵福刚. 高效深锥浓密机在梅山选厂的应用[J]. 矿业快报, 2007, 23(3): 70–72.
- GOU Jin-ling, ZHAO Fu-gang, Application of high efficiency paste thickener in Meishan selection plant[J]. Express Information of Mining Industry, 2007, 23(3): 70–72.
- [11] 王勇, 王洪江, 吴爱祥. 基于高径比的深锥浓密机底流浓度数学模型[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(8): 113–117.  
WANG Yong, WANG Hong-jiang, WU Ai-xiang. Mathematical model of deep cone thickener underflow concentration based on the height to diameter ratio[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2011, 33(8): 113–117.
- [12] 焦华喆, 吴爱祥, 王洪江, 等. 全尾砂絮凝沉降特性实验研究[J]. 北京科技大学学报, 2011, 33(12): 1437–1441.  
JIAO Hua-zhe, WU Ai-xiang, WANG Hong-jiang, et al. Experiment study on the flocculation settlement characteristic of unclassified tailings[J]. Univ Sci Technol Beijing, 2011, 33(12): 1437–1441.
- [13] 尹升华, 王勇. 泥层高度对细粒全尾浓密规律的影响[J]. 科技导报, 2012, 30(7): 29–33.  
YIN Sheng-hua, WANG Yong. Influence of mud height on the concentration of the fine tailing[J]. Sci Technol Rev, 2012, 30(7): 29–33.
- [14] 吴爱祥, 王勇, 王洪江. 导水杆数量和排列对尾矿浓密的影响机理[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(1): 244–248.  
WU Ai-xiang, WANG Yong, WANG Hong-jiang. Effect of rake rod number and arrangement on tailings thickening performance[J]. Cent South Univ Sci Technol, 2014, 45(1): 244–248.
- [15] RUIZ-HERNANDO M, MARTINEZ-ELORZA G, LABANDA J, et al. Dewaterability of sewage sludge by ultrasonic, thermal and chemical treatments[J]. Chemical Engineering Journal, 2013, 230(16): 102–110.
- [16] DU J H, MCLOUGHLIN R, SMART R S. Improving thickener bed density by ultrasonic treatment[J]. International Journal of Mineral Processing, 2014, 133: 91–96.
- [17] ÖNAL G, ÖZER M, ARSLAN F. Sedimentation of clay in

- ultrasonic medium[J]. Minerals Engineering, 2003, 16(2): 129–134.
- [18] CHU C P, CHANG B V, LIAO G S, et al. Observations on changes in ultrasonically treated waste-activated sludge[J]. Water Research, 2001, 35(4): 1038–1046.
- [19] GLADMAN B, KRETSER R G D, RUDMAN M, et al. Effect of shear on particulate suspension dewatering[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2005, 83(7): 933–936.
- [20] RUDMAN M, SIMIC K, PATERSON D A, et al. Raking in gravity thickeners[J]. International Journal of Mineral Processing, 2008, 86(1): 114–130.
- [21] 白晓慧. 超声波技术与污水污泥及难降解废水处理[J]. 工业水处理, 2000(12): 8–10, 14.  
BAI Xiao-hui. Ultrasonic technology and treatment of sewage sludge and refractory wastewater[J]. Industrial Water Treatment, 2000(12): 8–10, 14.
- [22] 薛向东, 金奇庭, 朱文芳, 等. 超声对污泥流变性及絮凝脱水性的影响[J]. 环境科学学报, 2006(6): 897–902  
XUE Xiang-dong, JIN Qi-ting, ZHU Wen-fang, et al. Influence of ultrasound on the rheological characterization and the flocculating dewaterability of sludge[J]. Acta Sci Circum, 2006(6): 897–902.
- [23] 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 Zhi-kai, YANG Peng, LÜ Wen-sheng, et al. Thickening sedimentation and sand discharge of tailings slurry under ultrasonic[J]. Chinese Journal of Engineering, 2017, 39(9): 1313–1320.
- [24] 马浪, 郭建中, 刘波, 等. 超声换能器焦区内软组织背散射信号频移与散射子粒径的相关性研究[J]. 中国生物医学工程学报, 2011, 30(3): 370–376, 397.  
MA Lang, GUO Jian-zhong, LIU Bo, et al. Correlation between frequency offset of backscattered signal and scatterer size of soft tissue in focal region of ultrasonic transducer[J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2011, 30(3): 370–376, 397.
- [25] 吴爱祥, 焦华喆, 王洪江, 等. 膏体尾矿屈服应力检测及其优化[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(8): 3370–3376.  
WU Ai-xiang, JIAO Hua-zhe, WANG Hong-jiang, et al. Yield stress measurements and optimization of Paste tailings[J]. Journal of Central South University, 2013, 44(8): 3370–3376.
- [26] 赵海英, 杨光俊, 徐正光. 图像分形维数计算方法的比较[J]. 计算机系统应用, 2011(3): 238–241, 246.  
ZHAO Hai-ying, YANG Guang-jun, XU Zheng-guang. Comparison of calculation methods-based image fractal dimension[J]. Computer Systems & Applications, 2011(3): 238–241, 246.
- [27] 徐日庆, 邓祎文, 徐波, 等. 基于SEM图像信息的软土三维孔隙率定量分析[J]. 地球科学与环境学报, 2015, 37(3): 104–110.  
XU Ri-qing, DENG Yi-wen, XU Bo, et al. Quantitative analysis of soft clay three-dimensional porosity based on SEM image information[J]. Journal of Earth Sciences & Environment, 2015, 37(3): 104–110.

## Influence of ultrasonic irradiation on thickening effect and rheology of tailings underflow

PENG Qing-song<sup>1,2</sup>, WANG Hong-jiang<sup>1,2</sup>, XING Peng<sup>1</sup>, YANG Liu-hua<sup>1,2</sup>, WANG Zhi-kai<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil and Environment Engineering,

University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of High-Efficient Mining and Safety of Metal Mines,

University of Science and Technology Beijing, Ministry of Education, Beijing 100083, China)

**Abstract:** At present, the thickener's thick effect is poor with a low underflow concentration. In order to explore new ways to improve the technology of the underflow concentration, ultrasonic irradiation was applied into thickener transformation performance to research the effects of ultrasonic irradiation on thickener underflow concentration and rheology. With the help of homemade ultrasonic irradiation and deep cone thickener experiment system, dynamic thickening experiments was carried out. Under the orthogonal experiment design, it was focused on that different speed of rake and different frequency of ultrasonic irradiation influence effect on underflow concentration of indoor model of deep cone thickener. The results show that the ultrasonic frequency has a complex relationship with the concentration of underflow. The ultrasonic effect has a gain effect on the concentration of the underflow with the increase of the frequency. The maximum increase of the concentration of the underflow in the experiment is 3.85%. The gain of the ultrasonic effect on the concentration of underflow is the weakest at the frequency of 22.34 kHz, which is a quadratic function distribution. The structure and size of slurry flocs decrease after ultrasonic treatment, which lead to the redistribution and combination of tailings and flocs, and result in smaller flocs and lower floc volume ratio. It can be seen that ultrasonic irradiation has a great influence on the underflow concentration, which can be used to improving the underflow concentration of the thickener.

**Key words:** ultrasonic irradiation; dynamic thickening experiment; unclassified tailings; underflow concentration; flocs structure

---

**Foundation item:** Project(2017YFC0602903) supported by the National Key Research and Development Program of China; Project(51834001) supported by the Key Project of National Natural Science Foundation of China

**Received date:** 2020-01-20; **Accepted date:** 2021-05-08

**Corresponding author:** WANG Hong-jiang; Tel: +86-15901196527; E-mail: wanghj1988@126.com

(编辑 龙怀中)