

超声处理对煤泥组分沉降速度的影响

张晓彬¹, 温欣¹, 曹伟伟¹, 李忠山², 谭静³

(1. 唐山工业职业技术学院, 河北 唐山 063299; 2. 西安科技大学, 陕西 西安 710054; 3. 陕西省煤炭科学研究所 陕西 西安 710001)

摘要: 这是一篇矿业工程领域的论文。高岭石与蒙脱石是煤泥中存在的主要黏土矿物, 而黏土矿物是影响煤泥沉降的主要因素。本文以精煤、高岭石和蒙脱石作为研究对象, 首先探索了超声强度、作用时间、超声脉冲间隔三类超声条件对其沉降效果以及絮团直径的影响, 实验结果表明: 当超声密度为 0.4 W/cm^3 , 超声作用时间为 2 min 时, 高岭石和蒙脱石的沉降速度都得到了改善, 选择合适的超声脉冲间隔时间对样品进行间断超声可以进一步提高其的沉降效果, 但是超声处理反而不利于精煤沉降。将精煤、高岭石和蒙脱石试样按 $2:1:1$ 的比例混合制样, 改变超声脉冲间隔时间对其进行超声处理, 结果表明: 对于混合试样, 未经超声处理时沉降速度为 2.67 cm/min , 在超声密度为 0.2 W/cm^3 , 超声脉冲间隔时间为 4 s 时作用 2 min , 沉降速度提高到 5.41 cm/min 。图像分析与电位表征显示, 适当的超声脉冲间隔时间使药剂作用发挥更充分, 进而双电层得到最大程度压缩, 最终提高了颗粒凝聚和絮团生长效果。

关键词: 矿业工程; 煤泥; 沉降; 超声处理; 絮团

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2024.02.023

中图分类号: TD926 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2024) 02-0138-06

引用格式: 张晓彬, 温欣, 曹伟伟, 等. 超声处理对煤泥组分沉降速度的影响[J]. 矿产综合利用, 2024, 45(2): 138-143.

ZHANG Xiaobin, WEN Xin, CAO Weiwei, et al. Influence of ultrasonic treatment on the sedimentation performance of slime[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024, 45(2): 138-143.

选煤厂经过浮选环节会产生大量尾煤矿浆, 通过煤泥水处理可以使选煤厂用水得以循环利用, 使浓缩压滤形成的尾矿再次得到利用^[1-2]。分选产生的煤泥水中高灰细泥含量高, 给沉降压滤带来困难。研究表明, 煤泥中的黏土矿物对煤泥脱水影响最大, 以蒙脱石、高岭石、伊利石为代表, 泥化率高达 79.94% , 且灰分较高^[3]。近年来对煤泥水研究大多集中在煤泥水处理工艺、药剂制度及自动控制系统^[4-5], 对于煤泥中的重要组分土矿物的研究较少。本文首先研究了超声强度和作用时间两个因素对煤泥中不同矿物组分沉降性

能和絮团结构特性的影响, 在此基础上, 提出采用间断超声的方法进一步强化煤泥沉降, 同时分析了煤泥颗粒之间的凝聚与分散行为, 旨在为实现煤泥水高效固液分离提供科学依据和理论参考。

1 实验材料及方法

1.1 实验材料

本文实验所用精煤经破碎筛分至 -0.074 mm 的煤泥颗粒, 用苯-四氯化碳进行小浮沉实验, 选择 1.30 g/cm^3 作为分级密度, 得到灰分为 5.02% 的精煤样品。高岭石来自湖南醴陵, 钠基蒙脱石 (Na-Mt)

收稿日期: 2021-05-06

基金项目: 国家自然科学基金-青年科学基金项目 (51874230); 河北省高等学校科学技术研究项目 (QN2020530); 唐山市人才资助项目 (A201903011)

作者简介: 张晓彬 (1990-), 男, 硕士研究生, 讲师, 研究方向为岩土工程。

通信作者: 曹伟伟 (1986-), 女, 硕士研究生, 讲师, 研究方向为工程结构可靠度风险评估理论及岩土工程稳定性评价。

原矿来自内蒙古赤峰。实验用絮凝剂为阴离子 600 万聚丙烯酰胺。

为了检验样品纯度，对样品进行 XRD 分析。XRD 测试采用粉末压片法在理学 MiniFlex600 型 X-射线衍射仪上完成，实验条件：Cu 靶 $K\alpha$ 辐射、光管 40 kV、15 mA。

由图 1 与标准衍射数据的比对可知，衍射角于 12.24° 和 25.46° 分别为高岭石 001 峰和 002 峰，是高岭石的两个主峰，除主峰外，高岭石的标准物相中其他角度下的次峰均与样品中对应，且峰的强度较高、峰型完整对称，通过 XRD 衍射对其纯度进行半定量分析，结果见表 1。由表 1 可知，样品中高岭石的纯度较高，杂质矿物含量较低。

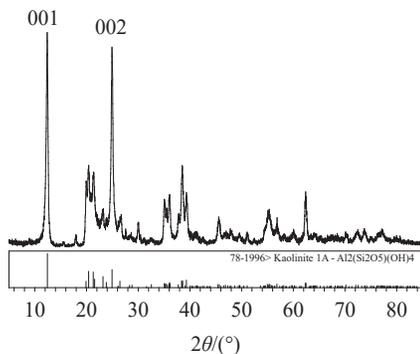


图 1 高岭石样品 XRD
Fig.1 XRD patterns of kaolinite samples

表 1 矿物样品定量分析结果

实验样品	矿物含量/%					
	蒙脱石	伊利石	高岭石	石英	长石	方解石
高岭石	1.7	2.6	84.4	7.4	1.8	2.1
蒙脱石	87		3.7	5.6	0.4	1.4

由图 2 可知，蒙脱石样品的 XRD 与标准衍射数据的比对可知，衍射角于 6.46° 和 20.08° 分别为蒙脱石 001 峰和 003 峰，是蒙脱石的两个主峰，除主峰外，蒙脱石的标准物相中其他角度下的次峰均与样品中对应，且峰的强度较高、峰型完整对称，通过 XRD 衍射对其纯度进行半定量分析，结果见表 1。由表 1 可知，样品中蒙脱石的纯度较高，杂质矿物含量较低。

1.2 实验过程与方法

1.2.1 实验过程

将粒度-0.074 mm 的各样品配置成浓度为 20 g/L 溶液以供使用，将配置好的较佳药剂制度下的溶液在超声装置中进行处理后，在沿沉降管高度方

向标有 250 mL 刻度的沉降管中进行絮凝沉降实验，实验方法按照 GB/T 18712-2002《选煤用絮凝性能实验方法》进行。沉降过程中记录不同时刻的刻度来计算初始沉降速度。表征过程中，采用 S94H 型微电泳仪测试颗粒表面电位，同时用大口径移液管取压缩层絮团滴于干燥皿中，烘干后用显微摄影系统采集图像，用图片处理软件 Image J 处理得到絮团面积与周长值。

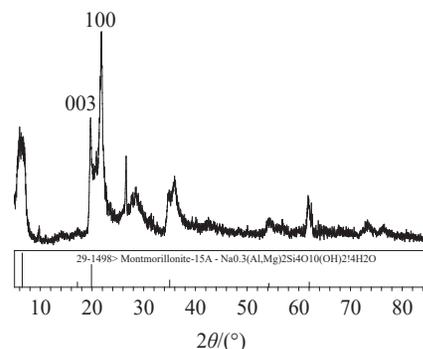


图 2 蒙脱石样品 XRD
Fig.2 XRD of montmorillonite samples

超声波处理设备为 UH-250A 型超声波发生装置，超声功率为 250 W，超声频率为 25 kHz。

在沉降过程中，絮团的大小是絮团的一个重要性质直接影响煤泥水的沉降，通常以等效粒径表示。絮体被看作球形，便于描述非规则形态絮体尺度，等效粒径可用于絮体间的粒度比较，在比较中采用等投影面积直径来表征絮体等效粒径^[6]，即：

$$d = (4A/\pi)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中 d 为絮团等效直径， A 为絮团投影面积。

1.2.2 分形维数计算方法

在絮团内部结构尚不易观测到的情况下，分形维数值是一个有效反映絮团内部密实度的特征量^[7]。絮团分形维数值越大，沉降效果越好^[8]。利用絮团的二维投影面积与投影周长的函数关系来计算絮团的分形维数^[9]，絮团的投影面积与投影周长的函数关系为：

$$A = \alpha P^{D_f} \quad (2)$$

式中， A 为絮团投影面积； P 为投影的周长； α 为比例常数； D_f 为絮团在二维空间的分形维数。

对式 (2) 两边分别取对数得到：

$$\ln A = D_f \ln P + \ln \alpha \quad (3)$$

由式 (3) 可知, 测定不同的 P 和 A , 可根据 $\ln A$ 和 $\ln P$ 的直线关系作图, 求出的直线斜率即为絮团的分形维数 D_F 。

2 实验结果与讨论

本文首先针对三种样品进行了单加絮凝剂的絮凝沉降实验, 以及凝聚剂与絮凝剂复配使用的沉降实验。得到较佳药剂制度见表 2。

表 2 絮凝沉降实验较佳药剂制度

Table 2 Optimal pharmaceutical system for the flocculation sedimentation experiment

实验样品	药剂用量/(g/t)	沉降速度/(cm/min)	透光率/%
精煤	1000 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ +100 PAM	46.56	88.5
高岭石	100 PAM	64.43	90.0
蒙脱石	300 PAM	17.04	38.2

由实验结果可知, 在消耗大量药剂的情况下, 各组分的沉降效果仍不是很好。现在较佳药剂制度下, 引入超声因素, 通过改变超声强度、超声时间、超声脉冲间隔时间分别对三种样品进行超声处理, 研究是否可通过超声的引入来提高各组分的沉降效果。

2.1 超声处理对不同矿物沉降效果的影响

首先在超声能量密度为 0.2 W/cm^3 的超声强度下, 考查了超声时间对沉降速度的影响, 由图 3 可知, 超声时间对三种样品的沉降速度都有一定的影响, 在连续的超声处理 2 min 时, 高岭石和蒙脱石样品的沉降速度都达到了极大值, 此后, 随着超声时间的增大, 沉降速度反而降低, 而超声处理对精煤的沉降速度影响不大。

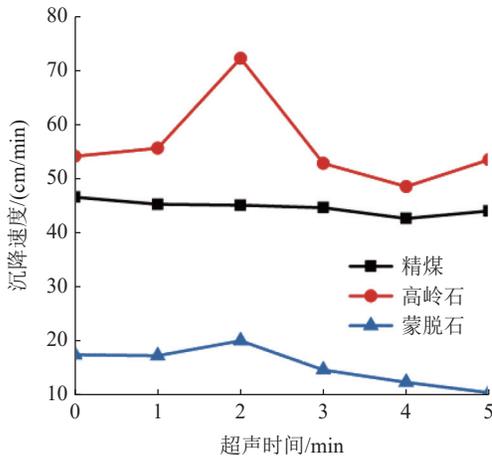


图 3 超声时间对沉降速度的影响

Fig.3 Effect of ultrasonic time on sedimentation velocity

控制超声时间为 2 min, 改变超声能量密度, 考查超声强度对三种样品沉降速度的影响, 由图 4 可知, 在超声能量密度由 0 变化到 0.8 W/cm^3 的过程中, 精煤的沉降速度由 46.56 cm/min 降低到了 35.58 cm/min 。高岭石在连续超声处理过程中, 在超声能量密度为 0.4 W/cm^3 的超声强度下作用 2 min, 沉降速度从超声处理前的 54.12 cm/min , 提高到 84.21 cm/min 。蒙脱石沉降速度较慢, 在超声能量密度达到 0.4 W/cm^3 时, 沉降速度有所提高, 之后随着超声强度的增大, 沉降速度又会下降, 整体而言, 改变超声强度对其沉降速度影响不大。

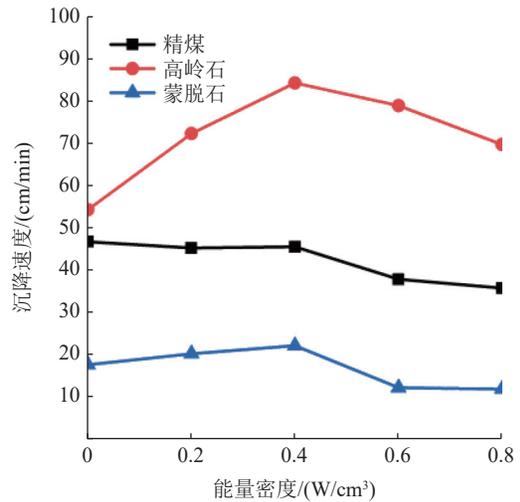


图 4 超声强度对沉降速度的影响

Fig.4 Effect of ultrasonic intensity on sedimentation velocity

保持超声能量密度为 0.4 W/cm^3 , 作用总时间为 2 min, 但是调节超声脉冲间隔时间, 进一步考查超声脉冲间隔时间对沉降速度的影响, 结果见图 5。对高岭石而言, 当超声间隔时间为 3 s 时, 沉降速度会进一步大幅提高, 由 84.21 cm/min 提高到 125.59 cm/min 。所以, 在连续与不连续的两种模式下, 超声处理均提高了高岭石的沉降效果。当超声脉冲间隔时间为 0.5 s 时, 蒙脱石沉降速度也由 21.93 cm/min 提高到 43.62 cm/min , 显著提高了蒙脱石的沉降效果。对于精煤而言, 增加超声脉冲间隔时间反而会破坏其絮团结构, 对沉降不利。

从图 6 中三种样品的絮团直径统计结果可以看出, 未经超声处理的高岭石絮团细小, 经过 0.2 W/cm^3 作用 2 min, 在改变高超声脉冲间隔时间过程中, 高岭石絮团逐渐增大, 在超声脉冲间隔时间为 3 s 时, 絮团达到了极大, 此时在宏观上

反映沉降效果较好。未经超声处理的蒙脱石絮团细小，经过改变超声脉冲间隔时间的超声处理后，蒙脱石絮团变大，超声脉冲间隔时间为0.5 s时，蒙脱石絮团较大，此时宏观表现为沉降效果较好。而精煤絮团在此过程中会明显破碎，因而絮凝效果变差，导致沉降速度降低。

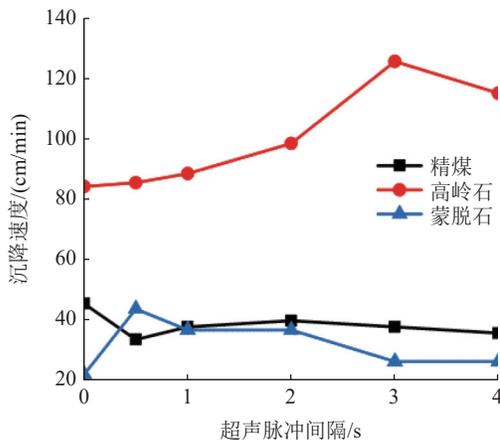


图5 超声脉冲间隔对沉降速度的影响

Fig.5 Effect of ultrasonic pulse interval on sedimentation velocity

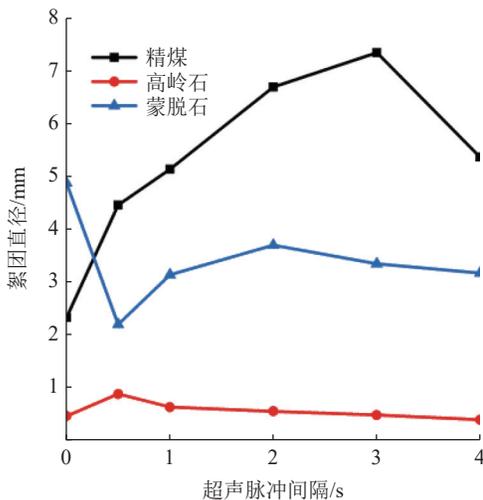


图6 超声脉冲间隔对絮团直径的影响

Fig.6 Effect of ultrasonic pulse interval on floc diameter

2.2 超声处理对混合试样沉降的影响

通过比较超声密度、超声时间与超声脉冲间隔三个因素对三种组分的处理效果，发现改变超声脉冲间隔时间使高岭石与蒙脱石沉降性能显著提高。于是对三种组分的混合样品进行改变超声脉冲间隔时间处理。为了更好地考查混合样中黏土矿物对煤泥表面性质及沉降效果的影响，本实验按精煤与黏土矿物按质量比 1:1 混合研磨，黏土矿物中高岭石和蒙脱石的质量比也为 1:1，配成

浓度为 40 g/L 的煤泥水搅拌 30 min 后进行实验。所用药剂制度为 1 kg/t $Al_2(SO_4)_3$ + 100 g/t PAM。

实验样品只添加凝聚剂与絮凝剂时，沉降速度为 2.67 cm/min，远小于三种纯矿物的沉降速度，这主要是因为蒙脱石和高岭石颗粒粒度细小、分布均匀，从而形成均匀分散的细泥，在混合样中稳定性良好，沉降速度急剧减小，使其中的煤颗粒不容易下沉，使得整个体系变得更稳定，导致沉降困难。另一方面，粘土矿物会罩盖在煤颗粒表面，形成竞争吸附，混合样中药剂的吸附架桥能力变弱。由图7可知，加入超声处理，在超声密度为 $0.4 W/cm^3$ 下作用 2 min，改变超声脉冲间隔时间，从超声脉冲间隔时间为 0 s 增加到 4 s 的过程中，沉降速度由 2.67 cm/min 提高到 5.41 cm/min。沉降后取压缩层中的絮团烘干拍照，由图8絮团直径统计结果可以看出，絮团大小由不进行超声处理的 0.25 mm 增加到经过超声脉冲间隔时间为 4 s 作用 2 min 下的 0.62 mm，絮团分形维数由未经超声处理的 1.52 增加到超声脉冲间隔时间为 4 s 作用 2 min 下的 1.62，说明经过超声处理，絮团大小变大同时絮团变得密实。

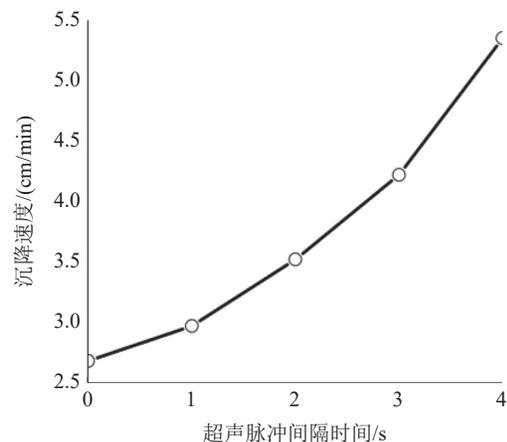


图7 脉冲间隔对混合样品沉降效果的影响

Fig.7 Effect of pulse interval on the sedimentation effect of mixed samples

对实验结果进行分析，实验所采用的超声装置频率为 25 kHz，属于低超声频段，在这种频段，超声空化使得样品颗粒粉碎，超声空化的界面效应在固体表面剥离，凹蚀从而产生新的活性表面^[10]。在这个过程中实验样品的分散体系充分混合均匀，增加絮凝剂与颗粒之间的接触机会，提高了絮凝剂的吸附架桥能力。在连续模式下，进行持续的震荡，连续的超声粉碎反而不利于絮

凝剂与试样的结合，而在不连续模式下，在没有脉冲作用的间隔时间，留了时间给药剂与试样结合。这种作用对蒙脱石来说更为显著，蒙脱石是层状矿物，具有较强的吸湿膨胀性，膨胀后形成网络结构内水，不易形成密实的絮团，而经过超声空化处理，抑制了这种膨胀，弱化水簇位阻效应，并促使蒙脱石中的结构内水转化为自由水分子，从而提高絮凝剂的作用效果^[11]。颗粒的 Zeta 电位绝对值越小，颗粒间的排斥力越小，体系越稳不稳定，越利于颗粒沉降，混合样品经过超声处理，压缩了煤泥表面的双电层，使得颗粒表面的电位绝对值降低，结果见图 9，由未经超声处理的 -14.08 mV 降低到经过超声脉冲间隔时间为 4 s 处理 2 min 情况下的 -6.5 mV，此时颗粒之间作用力增强，形成较大密实的絮团，从而加速了颗粒沉降，促进了沉降效果。

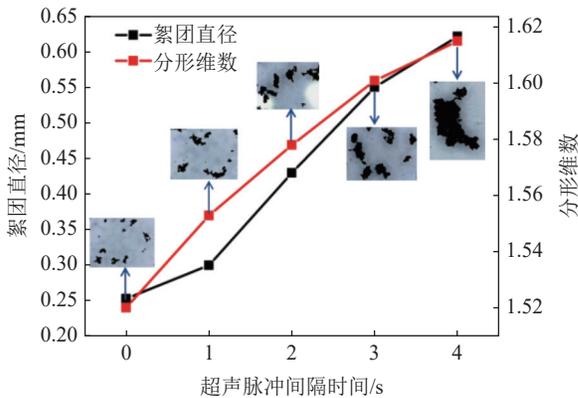


图 8 改变超声脉冲间隔时间混合样品的絮团特性
Fig.8 Flocculation characteristics of the mixed samples by changing the ultrasonic pulse interval time

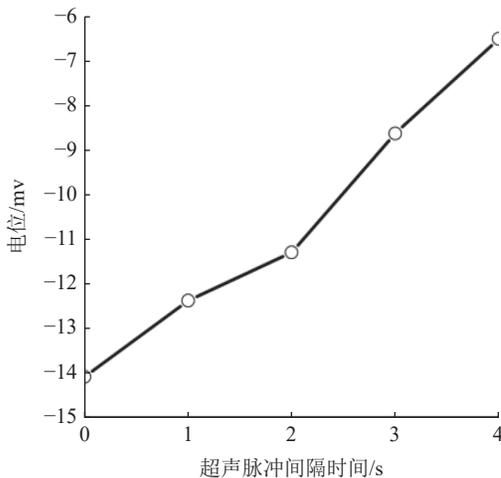


图 9 改变超声脉冲间隔时间混合样品颗粒表面 Zeta 电位

Fig.9 Zeta potential on the surface of mixed sample particles with changing ultrasonic pulse interval

3 结 论

(1) 对于精煤，超声因素对其沉降效果不利；对于高岭石，在连续与不连续的两种模式下，超声处理均提高了高岭石的沉降效果，在不连续的超声模式下，当超声间隔时间为 3 s 时，沉降速度由 84.21 cm/min 进一步提高到 125.59 cm/min；而连续超声对蒙脱石沉降速度影响不大，但在超声脉冲间隔时间为 0.5 s 时，其沉降速度由 21.93 cm/min 提高到 43.62 cm/min，显著改善了其沉降效果。

(2) 对于混合样品，未经超声处理的沉降速度为 2.67 cm/min，在超声密度为 0.2 W/cm³，超声脉冲间隔时间为 4 s 下作用 2 min，沉降速度提高到 5.41 cm/min，而且絮团直径也由未经过超声处理的 0.25 mm 增大到 0.62 mm，同时絮团分形维数从 1.52 增加到 1.62，说明经过超声处理，絮团直径变大同时变得更加密实，从而显著改善了其沉降效果。

参考文献:

[1] 马晓敏, 樊玉萍, 董宪姝, 等. 基于摄像分析法的煤泥絮团特性及相关关系[J]. 矿产综合利用, 2019(6):145-149.
MA X M, FAN Y P, DONG X S, et al. Study on characteristics and correlation of coal tailings floc based on video analysis method Ma[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(6):145-149.

[2] 宋帅, 樊玉萍, 马晓敏, 等. 煤泥水中煤与不同矿物相互作用的模拟研究[J]. 矿产综合利用, 2020(1):168-172.
SONG S, FAN Y P, MA X M, et al. Simulation study on interaction between coal and different minerals in coal slurry[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(1):168-172.

[3] 程万里, 邓政斌, 刘志红, 等. 煤泥浮选中矿物颗粒间相互作用力的研究进展[J]. 矿产综合利用, 2020(3):48-55.
CHENG W L, DENG Z B, LIU Z H, et al. Research progress of interaction force between mineral particles in coal slurry flotation[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(3):48-55.

[4] 文献才. 平煤天宏难处理煤泥水沉降试验研究[J]. 煤炭工程, 2019, 51(10):148-151.
WEN X C. Experimental study on sedimentation of Tianhong difficult to handle coal slurry in Pingdingshan coal mine[J]. Coal Engineering, 2019, 51(10):148-151.

[5] 王云飞, 李宏亮, 董宪姝, 等. 伊利石对煤泥水过滤机制的影响研究[J]. 矿产综合利用, 2020(4):202-208.

WANG Y F, LI H L, DONG X S, et al. Study on effect of illite on the filtration mechanism of coal slime water[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(4):202-208.

[6] 张明青, 刘炯天, 何伟, 等. 煤泥水絮凝处理中絮凝体的分形特征[J]. 环境科学研究, 2009, 22(8):956-960.

ZHANG M Q, LIU J T, HE W, et al. Fractal characteristics of flocs in coal slime water flocculation treatment[J]. Environmental Science Research, 2009, 22(8):956-960.

[7] 王永田, 张明青, 刘炯天. 分形理论在难沉降煤泥水澄清药剂选择中的应用[J]. 煤炭学报, 2010(12):2116-2120.

WANG Y T, ZHANG M Q, LIU J T. Application of fractal theory in the selection of clarification agents for difficult-to-settle slime water[J]. Chinese Journal of Coal, 2010(12):2116-2120.

[8] 亓欣, 匡亚莉. 黏土矿物对煤泥表面性质的影响[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(7):126-128.

QI X, KUANG Y L. Influence of clay minerals on the surface

properties of coal slime[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(7):126-128.

[9] 刘炯天, 张明青, 曾艳, 等. 不同类型黏土对煤泥水中颗粒分散行为的影响[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(1): 59-63.

LIU J T, ZHANG M Q, ZENG Y, et al. Effects of different types of clay on particle dispersion behavior in coal slime water[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2010, 39(1): 59-63.

[10] 戴曦, 张传福. 超声空化与过程强化[J]. 有色金属:冶炼部分, 2001(1):20-22.

DAI X, ZHANG C F. Ultrasonic cavitation and process strengthening[J]. Nonferrous Metals:Extractive Metallurgy, 2001(1):20-22.

[11] 李剑波, 董宪姝, 李宏亮, 等. Li, Na, K 基蒙脱石的基因特性与其水化膨胀特性的关系[J]. 金属矿山, 2020, 528(6):142-147.

LI J B, DONG X Z, LI H L, et al. The relationship between genetic characteristics of Li, Na, K-based montmorillonite and its hydration swelling characteristics[J]. Metal Mines, 2020, 528(6):142-147.

Influence of Ultrasonic Treatment on the Sedimentation Performance of Slime

ZHANG Xiaobin¹, WEN Xin¹, CAO Weiwei¹, LI Zhongshan², TAN Jing³

(1. Tangshan Polytechnic of Industry, Tangshan 063299, Hebei, China; 2. Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. Shaanxi Coal Research Institute, Xi'an 710001, Shaanxi, China)

Abstract: This is an article in the field of mining engineering. Kaolinite and montmorillonite are the main clay minerals in coal slime, and clay minerals are the main factors affecting the sedimentation of coal slime. This paper takes clean coal, kaolinite and montmorillonite as the research objects. The influence of ultrasonic intensity, action time, and ultrasonic pulse interval on its sedimentation effect and floc diameter was investigated. The test results show that when the ultrasonic density is 0.4 W/cm^3 , when the ultrasonic action time is 2 min, the sedimentation speed of kaolinite and montmorillonite are improved. Further choosing the appropriate ultrasonic pulse interval can further improve the sedimentation effect, but ultrasonic treatment is not conducive to the clean coal settlement. Further, the clean coal, kaolinite and montmorillonite samples were mixed at a ratio of 2:1:1, and the ultrasonic pulse interval time was changed to perform ultrasonic treatment. The results showed that: for the mixed sample, it settled without ultrasonic treatment, the velocity is 2.67 cm/min . When the ultrasonic density is 0.2 W/cm^3 and the ultrasonic pulse interval is 4 s, the settling velocity is increased to 5.41 cm/min . Image analysis and potential characterization show that the proper ultrasonic pulse interval time enables the drug to play more fully, and then the electric double layer is compressed to the greatest extent, and finally the particle agglomeration and the growth of flocs are the best.

Keywords: Mining engineering; Coal slime; Sedimentation; Ultrasonic treatment; Flocs