

王卫东,张楠,靳立章. 超声波同步处理强化煤泥浮选的试验研究[J]. 矿业科学学报, 2019, 4(4): 357-364. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2019.04.010

Wang Weidong, Zhang Nan, Jin Lizhang. Experiment study on fine coal slime flotation with simultaneous ultrasonic treatment[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2019, 4(4): 357-364. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2019.04.010

超声波同步处理强化煤泥浮选的试验研究

王卫东,张楠,靳立章

中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院,北京 100083

摘要:为探究超声波对细粒煤泥浮选过程的影响,自制超声浮选装置进行浮选试验。使用激光粒度仪、扫描电子显微镜,分析超声波对浮选产品粒度组成和表面特性的影响;利用紫外分光光度计测定矿浆剩余捕收剂量,计算超声波对捕收剂吸附的影响。试验结果表明:在浮选过程加入超声波后,可燃体回收率、浮选完善指数均有提升;100 kHz超声波作用时,可燃体回收率比常规浮选提高10%,改进效果最佳;在同等浮选条件下,超声浮选比常规浮选所需浮选药剂用量低19%~35%。超声作用能够去除煤粒表面吸附细泥,促使浮选气泡团聚,形成气絮团,提高大于0.045 mm粒级的浮选效率。

关键词:细粒煤泥;浮选;超声波;粒度分布;气泡

中图分类号:TP 94

文献标志码:A

文章编号:2096-2193(2019)04-0357-08

Experiment study on fine coal slime flotation with simultaneous ultrasonic treatment

Wang Weidong, Zhang Nan, Jin Lizhang

School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China

Abstract: In order to investigate the effect of ultrasonic simultaneous treatment on flotation of fine coal slimes, a new ultrasonic flotation device was made to conduct flotation experiment. The particle size distribution of clean coal was measured by Laser Particle Sizer, and the influence of ultrasound on surface characteristics of clean coal particles was investigated by SEM. The influence of ultrasound on adsorption of collector was investigated by UV spectrophotometer. The result revealed that combustible recovery and perfect index flotation of floated products increased by using ultrasonic treatment with same reagent dosages. The best flotation effect can be achieved with 100 kHz ultrasound, and the combustible recovery rate is 10% higher than that of conventional flotation. Ultrasonic flotation need 19%~35% less reagent dosages than conventional flotation under the same flotation condition. Ultrasonic can remove the fine mud adsorbed on the surface of coal particles, promote bubble agglomeration in the pulp, form air flocculation, and improve the flotation efficiency of particles with size of +0.045 mm.

Key words: fine coal slimes; flotation; ultrasonic; size distribution; air bubble

收稿日期:2018-05-09

基金项目:国家自然科学基金(51574251);中国矿业大学(北京)“越崎青年学者”“越崎学者”奖励计划

作者简介:王卫东(1978—),男,安徽淮北人,博士,副教授,主要从事洁净煤技术和矿物加工过程检测与控制方面的研究工作。

Tel:010-62339963, E-mail: wwd@cumt.edu.cn

在目前的选煤工艺中,浮选依然是处理细粒煤泥应用最广泛的方法^[1-2]。然而随着煤炭行业机械化程度的不断提高,浮选入料的粒度不断下降,给浮选作业带来了极大的挑战^[3]。细粒物料由于质量小、动量小,与气泡之间的碰撞概率低,无法得到较好的回收效果^[4]。同时,高灰细泥的夹带、罩盖也是导致浮选效果恶化的原因^[5]。针对细粒煤泥浮选效果差的问题,许多学者^[6-7]进行了大量研究,探索了脱泥浮选、分级浮选等浮选方法。

浮选过程中的能量输入及能量强度的增强,可在一定程度上提高最终的浮选效果^[8-9]。超声波作为一种能量形式,具有能量集中、强度大等特点^[10],在矿物加工方面的应用有着很好的潜力。超声波在浮选作业中的应用研究表明,采用超声波对入浮煤泥进行一定程度的预处理,能够提高浮选精煤产率,浮选完善指标也有提升^[11-12]。康文泽等研究了20 kHz 超声处理对煤泥特性的影响^[13],发现超声波对煤粒有一定的破碎解离作用,经过超声处理的煤粒粒度减小,促使煤粒与黄铁矿、矽石的解离,提升浮选效果。此外,超声处理的煤粒与水的润湿热有明显减小,而与煤油的润湿热则明显增大^[14-15]。康文泽等研究了超声波对高硫煤表面成分浮选效果的影响^[16],由于超声波的清洗作用,经过超声处理后的煤粒表面黏附的黄铁矿、方解石等矿物含量大大降低,煤粒表面变得更加纯净,这种变化使得高硫煤的浮选效果得到提升。Ozkan研究了超声处理与浮选过程同步进行时浮选效果的变化情况^[17-18],在浮选过程中加入超声波可以提高浮选效果,同时浮选药剂的消耗量也有所降低。王卫东等研究了超声作用对于浮选气泡运动过程的影响^[19],一定频率的超声辐照能够促进气泡团聚,对气泡的粒径也有影响。

从相关文献可知,关于超声波强化浮选效果已经有了一定研究,但主要集中在浮选作业之前,通过超声波对入浮原煤的预处理来改变煤样的性质,从而强化浮选的作用。而关于超声处理与浮选过程同步进行时,超声波对浮选的气、液、固三相以及最终浮选效果影响的相关研究很少。针对这个问题,本试验采用超声同步处理的方式,研究超声波作用对浮选过程各因素的影响。

1 试验

1.1 试验煤样

试验煤样来自山西大同矿区四台选煤厂,其灰分为36.66%,水分为2.12%。采用湿法筛分对煤

样进行粒度分析,结果见表1。

表1 煤样小筛分试验结果
Tab. 1 Sieve analysis of coal slime

粒级/mm	产率/%	灰分/%	筛上累计/%	
			产率	灰分
>0.3	0.03	14.15	0.03	14.15
0.3~0.15	1.65	3.35	1.68	3.54
0.15~0.075	10.69	3.41	12.37	3.43
0.075~0.045	10.31	7.87	22.68	5.45
<0.045	77.32	45.82	100	36.66
合计	100	36.66	—	—

由表1可知,小于0.045 mm粒级的产率达到77.32%,且该粒级灰分达到了45.82%,高于原煤灰分36.66%,属高灰细泥。从表1的灰分数据看,0.3~0.15 mm、0.15~0.075 mm、0.075~0.045 mm这3个粒级属于优质精煤,在浮选过程中需要尽可能回收这部分精煤。而大于0.3 mm粒级产率仅为0.03%,可忽略不计。为便于粒度分析,试验前对煤样进行筛分,去除大于0.3 mm粒级。

1.2 试验方法

1.2.1 试验装置

本试验采用深圳科美达超声设备公司KMD-D2(68~80 kHz,100~120 kHz)超声波发生器以及超声波振子(68 kHz、80 kHz、100 kHz、120 kHz)各两个,超声波发生器输出频率与超声波振子固有频率匹配,输出功率为150 W。试验装置如图1所示。

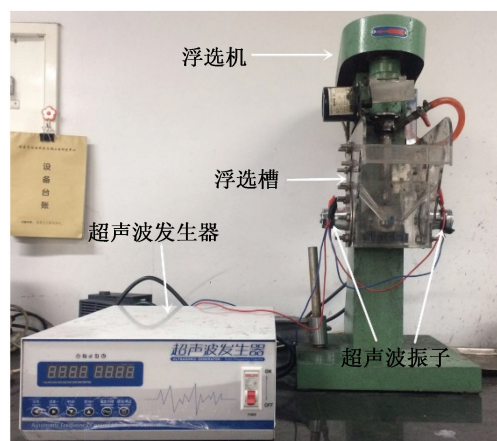


图1 超声浮选装置

Fig. 1 Devices of ultrasonic flotation experiment

1.2.2 浮选试验

在浮选槽中配置浓度为100 g/L的浮选矿浆,同时,开启浮选机搅拌机构与超声波发生器。首先

矿浆搅拌 2 min 后加入捕收剂 300 g/t,接着再搅拌 2 min 后加入起泡剂 100 g/t,然后再搅拌 30 s 后开启充气阀门,刮泡 5 min。本试验中每组进行 2 次试验。充气量与浮选机转速保持恒定。

1.2.3 SEM 观察试验

选取常规浮选和 100 kHz 超声浮选后的精煤产品中大于 0.045 mm 粒级部分,采用蔡司 EVO 扫描电镜观察煤颗粒表面放大 2 500 倍的形态变化情况,探究超声波作用对煤颗粒表面形态的影响。

1.2.4 气泡观察试验

如图 2 所示,观察室充满清水,高压空气通过微孔陶瓷板后产生气泡。相机固定于观察室正前方,在不同条件下各拍摄 50 张照片进行分析。

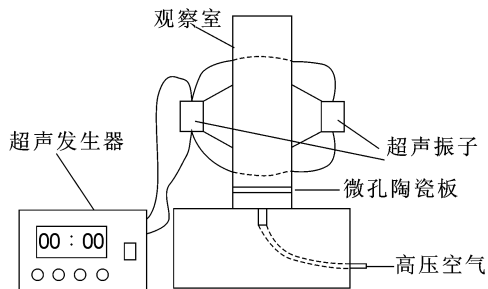


图 2 气泡观察装置示意图

Fig. 2 Devices diagram of bubble observation

1.2.5 捕收剂吸附量测定

采用紫外分光光度法测定矿浆中剩余捕收剂量,再计算煤颗粒表面捕收剂的吸附量。具体方法为:预先配置浓度为 0.01 $\mu\text{L}/\text{mL}$ 、0.02 $\mu\text{L}/\text{mL}$ 、0.04 $\mu\text{L}/\text{mL}$ 、0.06 $\mu\text{L}/\text{mL}$ 、0.08 $\mu\text{L}/\text{mL}$ 、0.10 $\mu\text{L}/\text{mL}$ 的捕收剂石油醚标准液,采用上海佑科公司双光束分光光度计测定吸光度,绘制标准曲线。

测定煤样吸附捕收剂量。为使矿浆中残余药剂剂量足够,初始添加量分别选择 500 g/t、800 g/t。加入捕收剂后搅拌 2 min,之后提取 300 mL 矿浆,放入离心机中进行固液分离,提取上层清液,加入 10 mL 石油醚萃取,充分搅拌后静置 30 min,弃去清液,提取石油醚测定其吸光度,计算矿浆中剩余药剂剂量,并换算为煤泥吸附的药剂剂量。每个浓度条件下做 2 组平行试验。

2 结果与分析

2.1 不同频率超声波对浮选结果的影响

图 3 表示不同频率超声作用对浮选过程可燃体回收率和浮选完善指标的影响。

由图 3 可知,与无超声处理的常规浮选相比,超声波同步处理浮选可燃体回收率和浮选完善指

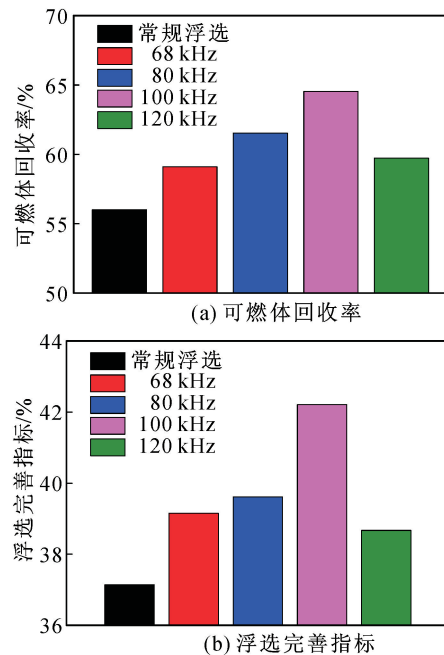


图 3 不同频率超声波对浮选效果的影响

Fig. 3 The influence of different ultrasonic frequency on flotation effects

标均有明显提高。在 100 kHz 超声波作用下浮选效果改善最为明显,可燃体回收率比常规浮选提高将近 10%,浮选完善指标提高约 5%。100 kHz 的浮选结果也明显优于其他频率超声波的作用。这说明在浮选过程中引入超声波能提升浮选效果,在所应用的 4 种超声频率中,100 kHz 超声波的效果最佳。

超声波在水中传播驱使气泡共振,气泡的共振半径与超声频率呈反比^[20],当超声频率低于共振频率时气泡将会发生崩溃^[21]。随着超声频率的增加,稳定共振的气泡半径变小,小气泡更容易发生矿化,提高浮选最终效果。超声在矿浆中的空化效应产生冲击波和微射流,对浮选过程的界面反应提供有力条件^[21]。超声波频率是影响超声空化效应的主要因素之一,当超声波频率小于 100 kHz 时超声空化效应明显,频率过大时振动时间间隔变短,气泡在压缩来不及崩溃,空化效应减弱^[21],对浮选的促进效果减弱。

2.2 超声波对浮选精煤粒度分布的影响

图 4 为常规浮选和 100 kHz 超声波作用下浮选精煤粒度分布结果。

由原煤小筛分试验结果可知,浮选入料可以分为低灰粗粒精煤(>0.045 mm)和高灰细泥(<0.045 mm)两个部分。由图 4 可知,与常规浮选相比,经过 100 kHz 超声波作用的浮选精煤中大于 0.045 mm 粒级含量比常规浮选精煤该粒级含量增加约 7%。低

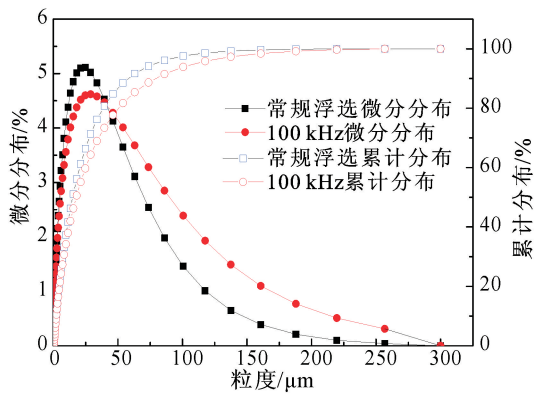


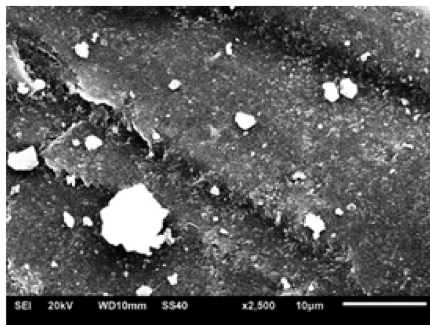
图4 浮选精煤粒度分布

Fig. 4 Particle size distribution of flotation clean coal

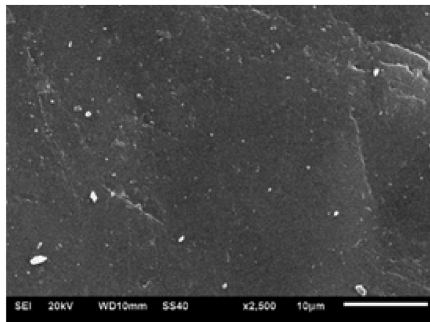
灰精煤回收率的提高使得最终浮选效果得到提升。经过超声浮选后的精煤,其粒度分布均比常规浮选的精煤粒度分布更大,常规浮选精煤的 d_{80} (低于该粒度的煤样占比为 80%) 为 0.039 mm,而超声浮选的精煤 d_{80} 约为 0.05 mm。超声浮选后大颗粒含量的增加,使得其精煤煤样的粒度分布增大。同时,超声波能够促使水中的微泡融合、团聚^[22],更大体积气泡的产生能够负载更大颗粒上浮,使得浮选精煤中大于 0.045 mm 粒级含量增加。

2.3 超声波去除煤粒表面细泥及清洗作用

图5为放大2 500倍的精煤表面形态。



(a) 常规浮选



(b) 100 kHz超声浮选

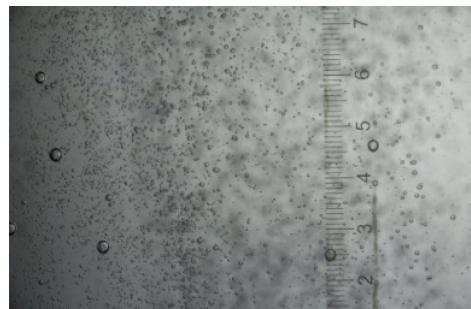
图5 扫描电镜下精煤表面形态

Fig. 5 Morphology of clean coal particles under scanning electron microscope

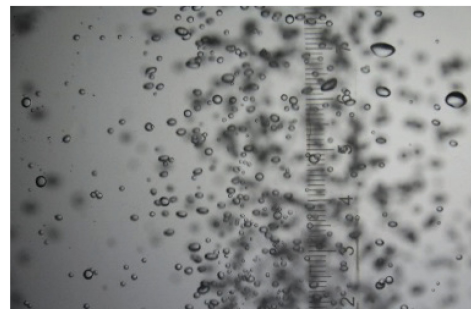
由图5可知,常规浮选精煤表面依然有亮色颗粒吸附,这些颗粒粒度约为 5 μm 甚至更小,可能是一些黏土类矿物。吸附物质的存在会阻碍浮选药剂与煤颗粒的相互作用,使得药剂无法发挥最大效率。100 kHz 超声波浮选后的煤样表面基本平整光滑,吸附的亮色物质明显减少,这表明浮选过程引入超声波后,对于煤样表面确实起到了清洁作用,罩盖于煤粒表面的高灰细泥在超声波的作用下被去除,使煤样表面更加清洁、平整。这可能是由于超声波传播过程中,在矿浆中产生空化作用,并伴随强烈的冲击波、微射流,在固液界面产生搅拌作用,剥离煤颗粒表面的吸附物质^[22],对煤颗粒表面产生清洁作用,强化了捕收剂分子的吸附,提高浮选效率。

2.4 超声波对气泡的影响

图6为不同情况下水中气泡状态。



(a) 无超声波、无起泡剂



(b) 加超声波、无起泡剂



(c) 加超声波、加起泡剂

图6 超声波对水中气泡的影响

Fig. 6 Effect of ultrasonic on air bubble in the water

由图6(a)(b)对比可知,在无起泡剂的情况下引入超声波后,水中的大量微泡相互之间迅速兼

并形成大气泡,这与文献[19]的研究结果相一致。图6(c)与图6(a)(b)对比可得,加入起泡剂后,超声波的引入依然会促进微泡的聚集,但由于气泡表面被起泡剂覆盖稳定性提高,不易兼并,小气泡依附于大气泡,形成大小气泡共存的气絮团。浮选过程中,吸附于煤颗粒表面的微泡将会附着于矿浆中的大气泡,煤颗粒通过微泡与大气泡的附着更牢固^[23-24],且气絮团的浮力比单个微泡的浮力更大,能够负载较大的颗粒,大颗粒由微泡与大气泡形成的气絮团上浮,从而提高最终浮选效果^[25]。超声浮选精煤中的大于0.045 mm粒级的含量,高于常规浮选精煤中该部分的含量。

2.5 超声波对捕收剂吸附量的影响

测定捕收剂标准液吸光度并绘制标准曲线,如图7所示。不同条件煤泥吸附捕收剂结果见表2。

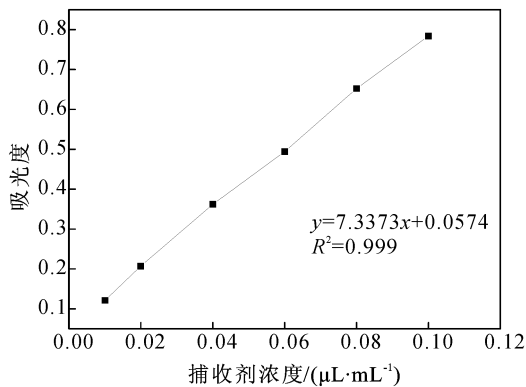


图7 吸附标准曲线

Fig. 7 The standard curve of adsorption

表2 煤样吸附捕收剂结果

Tab. 2 Adsorption dosage of coal sample

初始浓度/ (g·t ⁻¹)	无超声		加超声	
	吸光度	吸附量/ (g·t ⁻¹)	吸光度	吸附量/ (g·t ⁻¹)
500	0.254	492.85	0.174	495.76
	0.275	492.09	0.187	495.29
800	0.332	790.02	0.244	793.22
	0.343	789.62	0.243	793.25

由表2可知,加入超声波后,原煤对捕收剂的吸附量有小幅增加。当捕收剂的初始浓度为500 g/t时,加入超声波后煤样的吸附量增加约为3 g/t;当初始添加浓度为800 g/t时,加入超声后吸附量增加仍然约为3 g/t。这说明超声波作用能够在一定程度促进捕收剂在煤颗粒表面的吸附作用,这与前面的分析一致。在捕收剂初始浓度不

同的条件下,超声作用后煤样对捕收剂的吸附量的增加量基本相同,这说明超声作用与捕收剂吸附量的影响与初始捕收剂浓度关系小。而捕收剂吸附量增幅相比添加量占比小,说明超声波对捕收剂吸附的促进作用并不是提高浮选效果的主要原因。

2.6 不同捕收剂和起泡剂用量条件下超声波对浮选的影响

2.6.1 捕收剂用量对浮选效果的影响

图8为不同条件下浮选指标随捕收剂用量不同的变化情况。

由图8可知,可燃体回收率、浮选完善指标、精煤产率与捕收剂用量呈正相关。对于常规浮选,当捕收剂用量从100 g/t增加到400 g/t时,其可燃体回收率从40%增加到65%,浮选完善指标从25%增加到40%;浮选过程引入超声波作用后,在不同的捕收剂用量下,可燃体回收率、浮选完善指标、精煤产率相比常规浮选都有明显增加,这说明采用超声波处理能降低浮选过程的药剂用量。以可燃体回收率60%为例,在起泡剂用量恒定的情况下,常规浮选需要约370 g/t捕收剂用量,100 kHz条件下的所需捕收剂用量约为240 g/t,120 kHz条件下的所需捕收剂用量约为300 g/t,超声波浮选的药剂用量降幅为19%~35%。

可见,超声波的加入对煤颗粒起到清洁作用,减少其表面微细粒的罩盖现象,使得煤粒表面更加平整,清洁表面的出现提高了煤粒表面的疏水性;超声波在水中传播过程会产生空化现象,空化过程微泡的快速崩溃会产生瞬时高压,进而会产生类似剪切作用的机械效应,促进捕收剂的乳化。超声波产生的界面不稳定也会促使捕收剂在矿浆中的乳化^[26],乳化后的捕收剂能够更全面地与矿物颗粒相作用,最终使得药剂的消耗量降低。

2.6.2 起泡剂用量对浮选效果的影响

图9为不同条件下浮选指标随起泡剂用量的变化情况。

由图9可知,精煤产率、可燃体回收率、浮选完善指标的变化情况与起泡剂用量呈正相关。精煤灰分随起泡剂的增加变化程度较小,维持在17%左右,且无明显规律,而尾煤灰分随起泡剂的增加呈增加趋势。这可能是因为试验所使用的药剂用量未达到该煤样浮选所需的最佳用量,导致尾煤产品中依然有部分低灰精煤未被回收。而超声波作用的浮选尾煤的灰分均高于常规浮选,这证明超声波作用能够促进更多精煤的回收。

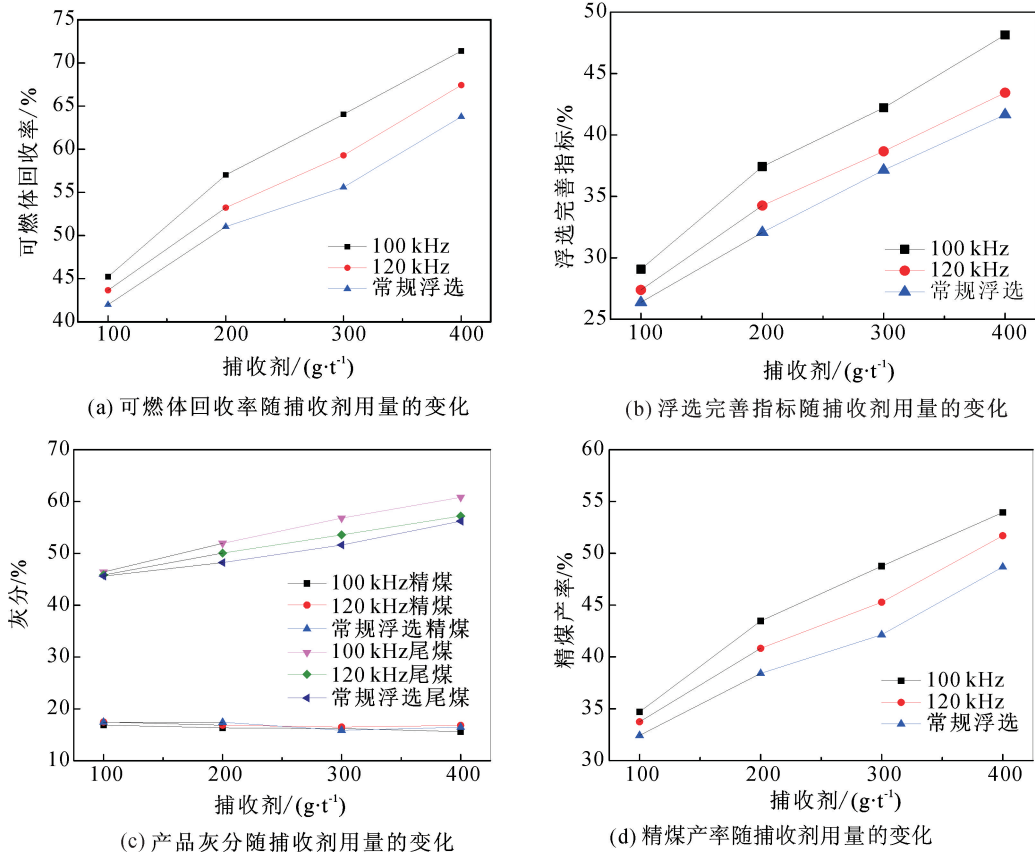


图8 不同条件下浮选指标随捕收剂用量的变化

Fig. 8 Flotation index against collector dosages under conventional and different ultrasonically flotation

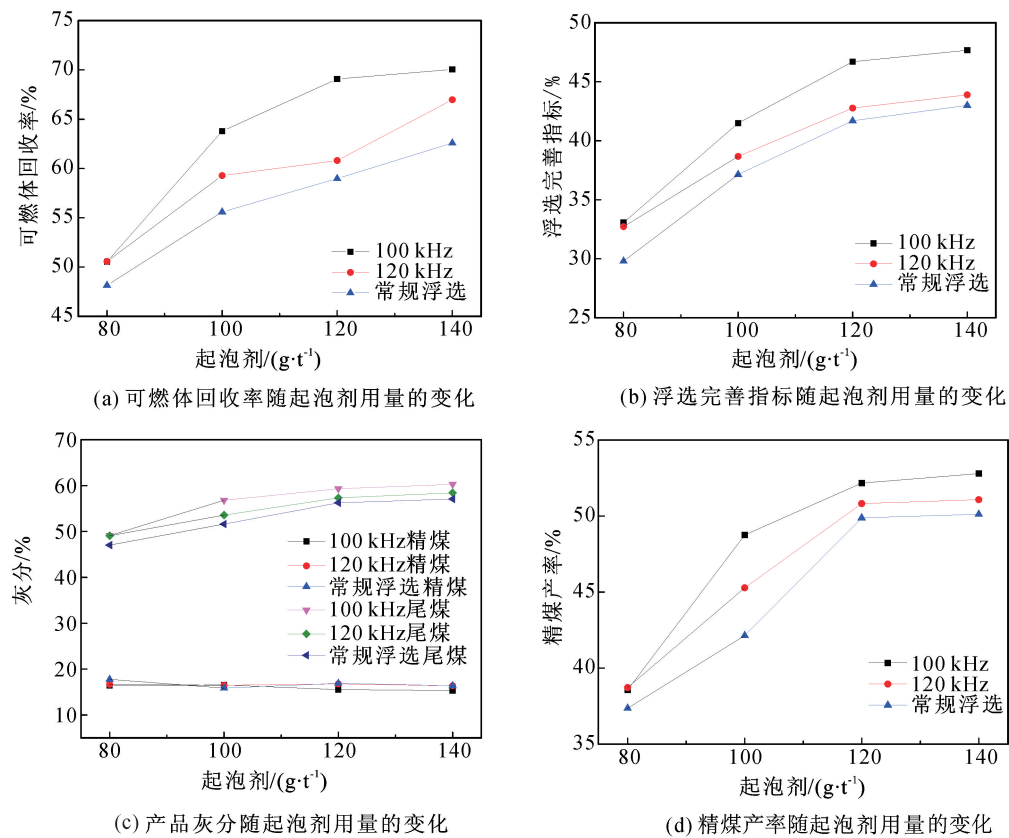


图9 不同超声条件下浮选指标随起泡剂用量的变化

Fig. 9 Flotation index against frother dosages under conventional and different ultrasonically flotation

3 结 论

(1) 超声波同步处理能够强化浮选效果。浮选过程加入超声波后,可燃体回收率、浮选完善指标等均有着明显的提升,且存在最佳超声频率,过高和过低都会使浮选效果有所降低。

(2) 超声波对于煤粒表面起到清洁作用,减少细泥罩盖现象,提高煤粒表面疏水性,促进捕收剂在煤粒表面的吸附,从而提高了浮选效率。同时,超声波对捕收剂的乳化分散作用提高了捕收剂的使用效率,降低了浮选过程捕收剂的用量。

(3) 浮选过程加入超声波,精煤中低灰大颗粒含量增加。超声波能够促使矿浆中已存在的气泡合并形成气絮团,矿粒通过表面的微泡与大气泡吸附上浮,从而提高大颗粒矿物的浮选效果。

参考文献

- [1] 谢广元,倪超,张明,等. 改善高浓度煤泥水浮选效果的组合柱浮选工艺[J]. 煤炭学报, 2014, 39(5): 947-953.
Xie Guangyuan, Ni Chao, Zhang Ming, et al. Enhanced separation of high concentration coal slurry by a two stages process with different flotation columns[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(5): 947-953.
- [2] 马力强,韦鲁滨,江兴华,等. 调浆剪切强度对煤泥浮选的影响[J]. 煤炭学报, 2013, 38(1): 140-144.
Ma Liqiang, Wei Lubin, Jiang Xinghua, et al. Effects of shearing strength in slurry conditioning on coal slime flotation[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(1): 140-144.
- [3] Jia R H, Harris G H, Fuerstenau D W. An improved class of universal collectors for the flotation of oxidized and/or low-rank coal [J]. International Journal of Mineral Processing, 2000, 58: 99-118.
- [4] 李志远,谢广元,梁龙,等. 入料组成对细粒煤泥浮选的影响[J]. 煤炭技术, 2015, 34(7): 318-320.
Li Zhiyuan, Xie Guangyuan, Liang Long, et al. Influence of flotation feed composition on fine coal flotation. [J]. Coal Technology, 2015, 34(7): 318-320.
- [5] 于跃先,马力强,张志军,等. 高灰煤泥难选原因分析及分选技术探讨[J]. 煤炭工程, 2016, 48(7): 118-121.
Yu Yuexian, Ma Liqiang, Zhang Zhijun, et al. Cause analysis for separation difficulty of high ash fine coal and discussion on the separation techniques [J]. Coal Engineering, 2016, 48(7): 118-121.
- [6] 瞿望,谢广元,彭耀丽,等. 脱泥浮选与精煤精选工艺试验研究[J]. 煤炭工程, 2014, 46(3): 97-99.
Qu Wang, Xie Guangyuan, Peng Yaoli, et al. Experimental study on deslime-flotation process and the roughing-cleaning process. [J]. Coal Engineering, 2014, 46(3): 97-99.
- [7] 佟顺增,夏灵勇,桂夏辉,等. 高灰难选煤泥分级浮选试验研究[J]. 选煤技术, 2011(5): 18-22.
Tong Shunzeng, Xia Lingyong, Gui Xiahui, et al. Experimental study on grading flotation of high-gray difficult coal [J]. Coal Preparation Technology, 2011(5): 18-22.
- [8] 桂夏辉,刘炯天,程敢,等. 能量输入对煤泥浮选过程的影响[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(6): 2075-2083.
Gui Xiahui, Liu Jiongtian, Cheng Gan, et al. Effect of energy input on coal flotation process [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2012, 43(6): 2075-2083.
- [9] 宋国阳,刘杰,闫思勤,等. 能量强度变化对不同粒级煤泥浮选影响的理论和试验研究[J]. 矿业科学学报, 2018, 3(1): 91-98.
Song Guoyang, Liu Jie, Yan Siqin, et al. Theoretical and experimental study on the effects of energy intensity on the flotation of different size coal slime [J]. Journal of Mining Science and Technology, 2018, 3(1): 91-98.
- [10] 荀海鑫. 超声强化稀缺难浮煤泥浮选研究[D]. 哈尔滨: 黑龙江科技学院, 2009.
- [11] 康文泽,王慧,陈俊涛,等. 煤泥超声浮选的试验研究[J]. 洁净煤技术, 2005(3): 35-37.
Kang Wenze, Wang Hui, Chen Juntao, et al. Experimental study of slime ultrasonic flotation [J]. Clean Coal Technology, 2005(3): 35-37.
- [12] 史英祥,程宏志. 利用超声波强化煤泥浮选效果的研究[J]. 选煤技术, 2007(2): 8-10, 72.
Shi Yingxiang, Cheng Hongzhi. Research on enhancement of coal slime flotation performance by use of ultrasonic wave [J]. Coal Preparation Technology, 2007(2): 8-10, 72.
- [13] 康文泽,吕玉庭. 超声波处理对煤泥特性的影响研究[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(6): 783-786, 798.
Kang Wenze, Lü Yuting. Effect of ultrasonic treatment on slime characteristics [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006, 35(6): 783-786, 798.
- [14] 康文泽,荀海鑫,李明明. 超声波预处理对稀缺难浮煤浮选的作用[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(4): 625-630.
Kang Wenze, Xun Haixin, Li Mingming. The effect of ultrasonic pretreatment on the flotation of scarce difficult-to-float coals [J]. Journal of China University

- of Mining & Technology, 2013, 42(4): 625-630.
- [15] Kang Wenzhe, Xun Haixin, Chen Juntao. Study of enhanced fine coal de-sulphurization and de-ashing by ultrasonic flotation[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2007, 17(3): 358-362.
- [16] Kang Wenzhe, Xun Haixin, Hu Jun. Study of the effect of ultrasonic treatment on the surface composition and the flotation performance of high-sulfur coal[J]. Fuel Processing Technology, 2008, 89(12): 1337-1344.
- [17] Ozkan S G. Effects of simultaneous ultrasonic treatment on flotation of hard coal slimes[J]. Fuel, 2012, 93(1): 576-580.
- [18] Ozkan S G. Further investigations on simultaneous ultrasonic coal flotation[J]. Minerals, 2017, 7(10): 177.
- [19] 王卫东, 张楠. 超声场中浮选泡沫粒度变化规律研究[J]. 矿业科学学报, 2018, 3(1): 84-90.
Wang Weidong, Zhang Nan. Flotation bubble size distribution rules with ultrasonic radiation[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2018, 3(1): 84-90.
- [20] Celik M S. Effect of ultrasonic treatment on the floatability of coal and galena[J]. Separation Science and Technology, 1989, 24(14): 1159-1166.
- [21] 马爽文. 超声空化气泡动力学行为研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2013.
- [22] 王萍辉, 方湄. 超声空化清洗机理的研究[J]. 水力水电科技进展, 2004, 24(1): 32-35.
Wang Pinghui, Fang Mei. Research on ultrasonic cavitation cleaning mechanism[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2004, 24(1): 32-35.
- [23] J·赖亚. 泡沫浮选表面化学[M]. 何伯泉, 陈祥涌, 译. 北京: 冶金工业出版社, 1987: 545.
- [24] 唐超. 超声预处理对煤泥浮选过程的强化作用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
- [25] 黄波. 界面分选技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2008: 141.
- [26] 余锦锦. 超声及表面活性剂对柴油微乳化的影响[D]. 南京: 南京工业大学, 2005.

(责任编辑: 李朝雯)