

动力煤煤泥高剪切调浆浮选提质研究

刘旭¹, 韩华¹, 申世钰¹, 李志红¹, 王怀法^{1,2}

(1. 太原理工大学, 山西 太原 030024;
2. 矿物加工科学与技术国家重点实验室, 北京 100160)

摘要: 高剪切调浆作为煤泥浮选预处理技术, 对浮选过程强化具有积极作用。本次研究以内蒙古自治区鄂尔多斯市乌审旗图克镇葫芦素煤矿的煤样进行一系列的调浆浮选实验, 研究了高剪切调浆预处理对于该煤样浮选的影响。结果表明: FDJ+Q1 药剂组合下, 高剪切调浆浮选比常规浮选可燃体回收率提高了 3.79 个百分点; 在可燃体回收率相近的情况下, 可节省捕收剂用量 37.5%; 浮选动力学实验结果表明, 经过高剪切调浆预处理, 前两个 20 s 内可燃体回收率分别提升了 20.02% 和 25.99%, 90 s 时基本完成分选过程, 浮选速度常数增大了近 50%。EKOF+仲辛醇药剂组合下, 高剪切调浆强大的剪切力与涡流效应会使复合药剂中的起泡剂在调浆阶段便发挥作用, 气泡携带煤粒上浮, 并带走未及时分散的药剂, 造成药剂的浪费, 恶化浮选效果。

关键词: 煤泥; 浮选; 高剪切调浆; 浮选动力学

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2022.03.028

中图分类号: TD951 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2022) 03-0158-05

我国是煤炭消费大国, 2019 年原煤产量约 40 亿 t, 按照 80% 入选率要求, 入选总量将超过 36 亿 t, 煤泥产生量将超过 3 亿 t, 而且随着煤矿开采深度加大, 机械化采煤程度增强以及煤炭资源的日益枯竭, 粉煤和煤泥的占比大大提高, 导致浮选精煤中高灰细泥夹带严重, 造成浮选精煤灰分偏高^[1-3]。对于动力煤而言, 其煤泥产量不容小觑, 煤泥大量堆放污染环境, 掺入商品煤中变卖影响商品煤质量且徒增运输成本, 为了不让这部分资源白白浪费, 在动力煤选煤厂中, 浮选工艺日渐展开^[4]。

高剪切调浆作为浮选前的预处理方法, 主要目的是实现微细矿粒的悬浮分散并与浮选药剂的充分混合^[5-6], 其特点是能够增强絮体剪切, 实现煤粒表面清洗, 减少细泥罩盖, 增强药剂的分散度并提高其与颗粒的碰撞概率, 从而提高浮选速度和分选指标同时节省药剂用量^[7]。本文对内蒙古

自治区鄂尔多斯市乌审旗图克镇葫芦素煤矿的煤样进行一系列的调浆浮选实验, 研究高剪切调浆预处理对该煤矿煤样的浮选强化规律。

1 煤样性质与实验方法

1.1 煤样性质与组成分析

实验煤样取自内蒙古自治区鄂尔多斯市乌审旗图克镇葫芦素煤矿, 其工业分析和粒度组成分析结果分别见表 1、2。

表 1 煤样工业分析/%

水分	灰分	挥发分	固定碳
1.97	37.14	21.40	39.49

由表 2 可知, 原生煤泥的平均灰分为 36.47%。+0.5 mm 的粒级含量较少, 产率为 5.87%, 灰分 14.07%; 0.25~0.5 mm 粒级产率为 26.83%, 灰分

收稿日期: 2020-11-02

基金项目: 矿物加工科学与技术国家重点实验室开放基金 (BGRIMM-KJSKL-2020-14); 山西省自然科学基金资助项目 (201801D121054)

作者简介: 刘旭 (1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究细粒煤浮选、高剪切调浆浮选方向。

通信作者: 王怀法 (1963-), 男, 教授, 主要研究浮选理论与工艺; 面向智能化的浮选过程与装备设计。

表2 煤样粒度组成
Table 2 Size analysis of coal samples

粒级/mm	产率/%	灰分/%	筛上累计		筛下累计	
			产率/%	灰分/%	产率/%	灰分/%
+0.5	5.87	14.07	5.87	14.07	100.00	36.47
-0.5+0.25	26.83	38.71	32.70	34.28	94.13	37.86
-0.25+0.125	19.88	44.73	52.57	38.23	67.30	37.53
-0.125+0.074	10.76	37.32	63.34	38.08	47.43	34.51
-0.074+0.045	7.31	30.08	70.65	37.25	36.66	33.68
-0.045	29.35	34.58	100	36.47	29.35	34.58
合计	100.00	36.47				

38.71%，说明该煤样中的矽石较多；较易分选的0.074~0.25 mm粒级产率为30.64%，-0.074 mm的粒级产率为36.66%，-0.045 mm的灰分为34.58%。

在矿浆浓度为80 g/L，FDJ用量为1000 g/t，Q1用量为500 g/t的条件下所做煤泥分步释放实验，其结果见表3。

表3 煤泥分步释放实验结果
Table 3 Timed-release analysis results of coal samples

产品编号	产率/灰分		精煤累计		尾煤累计	
	产率/%	灰分/%	产率/%	灰分/%	产率/%	灰分/%
1	29.29	2.79	29.29	2.79	100.00	35.70
2	7.20	3.94	36.49	3.01	70.71	49.33
3	6.19	5.49	42.68	3.37	63.51	54.47
4	6.31	4.74	48.99	3.55	57.32	59.76
5	5.43	7.16	54.42	3.91	51.01	66.57
6	5.81	21.46	60.23	5.60	45.58	73.65
7	39.77	81.27	100	35.70	39.77	81.27
合计	100.00	35.70				

由分步释放实验可知，在精煤灰分要求为8%时，精煤的理论产率为68%左右；经过多次精选可以得到高品质低灰精煤，经过6次分选之后，精煤产率为29.29%、灰分为2.79%。

1.2 实验仪器和药剂

1.2.1 实验仪器

XFD-1型单槽浮选机（1 L），主轴转速0~2600 r/min，刮板转速为0~30 r/min；SFJ-400分散研磨搅拌机，主轴转速为0~8000 r/min；搅拌桶高度260 mm，搅拌桶内径94 mm；叶轮直径45 mm，叶片高度10 mm，叶片数量8片，叶片倾角90°，上下叶轮间距65 mm，下叶轮距离桶底30 mm；挡板数量4片，挡板长10 mm，宽5 mm，高260 mm。

1.2.2 实验药剂

本次研究实验药剂分为两个组合：(1)FDJ（捕收剂）+Q1（起泡剂）；(2)EKOF（捕收剂）+仲辛醇（起泡剂）。

1.3 实验方法

1.3.1 浮选实验

根据GB/T 4757—2013《煤粉（泥）实验室单元浮选试验方法》进行浮选实验；以可燃体回收率作为浮选效果的评价标准。根据GB/T 34164—2017《选煤厂浮选工艺效果评定方法》中的可燃体回收率计算公式为：

$$E_j = \frac{R_j(100 - A_j)}{100 - A_y}$$

式中： R_j 为精煤产率%； A_j 为精煤灰分%； A_y 为计算入料灰分%。

1.3.2 浮选动力学实验

动力学实验是研究在单位时间内煤泥的浮选速率规律性，浮选速率常数越大，浮选过程进行得越快。实验时采用（20、20、20、30、30、60、60）s共7个时间间隔分批刮泡，选用经典一级动力学模型对实验结果进行拟合，其公式为：

$$\varepsilon = \varepsilon_\infty [1 - \exp(-kt)]$$

式中： ε 为累计可燃体回收率； ε_∞ 为理论最大可燃体回收率； k 为浮选动力学常数。

2 实验结果与分析

2.1 高剪切调浆浮选与常规浮选效果比较

2.1.1 高剪切调浆转速对浮选效果的影响

在FDJ用量为1000 g/t，Q1用量为500 g/t；EKOF用量为1000 g/t，仲辛醇用量为500 g/t时，分别进行常规浮选实验和高剪切调浆浮选实验，高剪切调浆浮选实验时，调浆时间固定为2 min，

调浆转速设定为 500 r/min, 1000 r/min、1500 r/min 和 2000 r/min。实验结果分别见图 1、2。

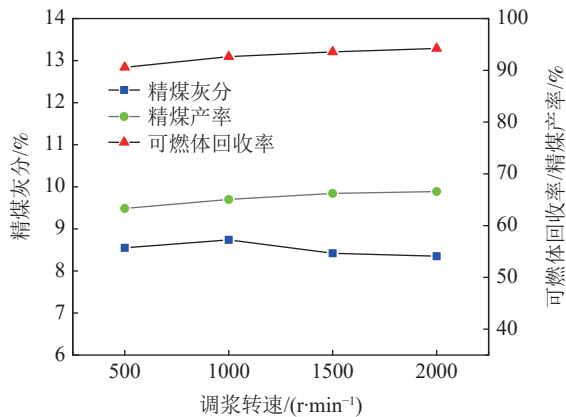


图 1 FDJ+Q1 组合下不同调浆转速时的浮选效果
Fig.1 Effect of different mixing speed on flotation under combination of FDJ and Q1

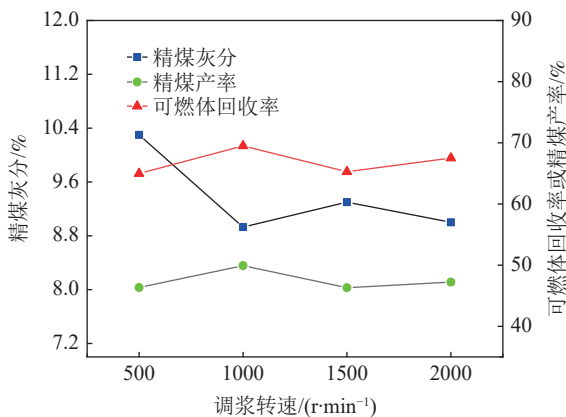


图 2 EKOF+仲辛醇组合下不同调浆转速时的浮选效果
Fig.2 Effect of different mixing speed on flotation under combination of EKOF and Secoctanol

由图 1 可知, 在 FDJ+Q1 药剂组合条件下, 随着调浆转速的增大, 精煤产率和可燃体回收率都呈现出不断增高的趋势, 精煤灰分呈现出先增大后减小的趋势。说明在适当转速增长范围内, 分选过程的捕收性及选择性都有明显改观。在 500 r/min 时, 精煤产率和可燃体回收率比常规浮选提升的不大, 说明 FDJ 药剂在较低的转速下便能较好的在矿浆中分散; 在 1000 r/min 时, 搅拌系统向矿浆系统中输入大量能量, 增强了煤粒与药剂的碰撞与吸附概率, 精煤产率与可燃体回收率有了较高提升; 在 1500 r/min 时, 精煤产率为 66.23%, 可燃体回收率为 93.56%; 与 2000 r/min 的效果几乎相当。对比常规浮选精煤产率上升了 2.94 个百分点, 可燃体回收率提高了 3.79 个百分点, 有较好的浮选效果。综合能量消耗及指标的变化程

度, 考虑将 1500 r/min 作为较佳转速用于之后的调浆浮选实验中。

从图 2 可以看出, 在 EKOF+仲辛醇的药剂组合条件下, 随着调浆转速的提高, 精煤产率以及可燃体回收率都呈现出普遍减小的趋势, 调浆之后的各项指标都比常规浮选的差。可能是因为 EKOF 这种药剂属于复合型药剂, 在经过调浆之后, 矿浆顶部形成了稳定泡沫层, 其中携带着未能及时分散的药剂, 转移到浮选槽中后, 加入起泡剂充气刮泡, 这部分泡沫层便直接进入到了精矿中。说明在高剪切调浆预处理过程中, 强大的剪切力以及涡流力场会使复合药剂中的起泡剂发挥作用, 造成药剂的损失, 影响浮选入料的捕收性, 进而影响浮选的各项指标。

2.1.2 高剪切调浆时间对浮选效果的影响

固定捕收剂用量 1000 g/t, 起泡剂用量 500 g/t, FDJ+Q1 药剂组合条件下, 调浆转速为 1500 r/min; EKOF+仲辛醇组合下, 调浆转速为 1000 r/min。高剪切调浆浮选实验结果见图 3。

依据图 3, FDJ+Q1 组合下, 随着调浆时间的延长, 精煤产率和可燃体回收率呈现出上升趋势; 延长调浆时间, 精煤灰分呈现出减小趋势, 说明适当的调浆时间对于精矿的选择性有正作用, 综合考虑各项指标, 以调浆时间 2 min 作为之后调浆实验的较佳调浆时间; EKOF+仲辛醇组合下, 精煤产率和可燃体回收率均随着调浆时间的延长而增高, 但其选择性和捕收性等均没有常规浮选优, 综合各项指标, 以调浆时间 2 min 作为之后调浆实验的较佳调浆时间。

2.1.3 不同药剂用量下常规浮选与高剪切调浆浮选实验结果对比

FDJ+Q1 组合下, 根据 2.1 和 2.2 较佳调浆转速 (1500 r/min) 和调浆时间 (2 min) 进行不同药剂用量的浮选实验; EKOF+仲辛醇组合下, 以 1000 r/min 和调浆 2 min 的参数进行。其实验结果见图 4。

由图 4 可以得出, FDJ+Q1 组合下, 在同一药剂用量条件下, 经过调浆预处理的浮选比常规浮选在精煤产率和可燃体回收率的指标上都有提升, 在 FDJ 用量为 1000 g/t, 精煤灰分有少许提高, 在药剂用量减小的情况下, 调浆浮选较常规浮选精煤灰分均有下降趋势; 在 FDJ 用量为 1000

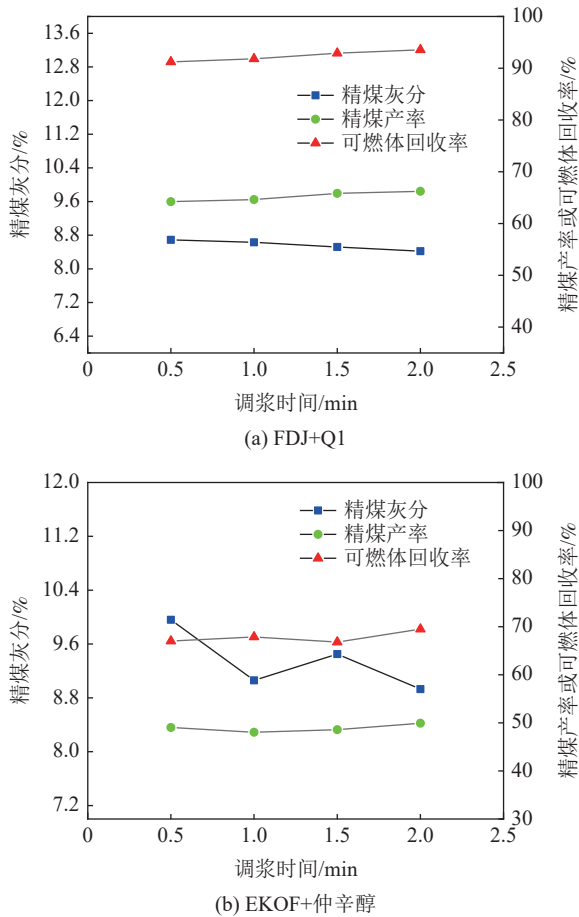


图3 不同药剂组合下调浆时间实验结果
Fig.3 Down-mixing time test results of different chemical combinations

g/t时，精煤灰分提高了0.2个百分点，精煤产率提高了3个百分点，可燃体回收率提高了3.79个百分点；在可燃体回收率相近的水平时（FDJ用量为500 g/t与800 g/t），调浆浮选较常规浮选可节省药剂剂量37.5%。EKOF+仲辛醇组合下，在同一药剂用量下，高剪切调浆浮选相比常规浮选没有显现出优势，可燃体回收率和精煤产率均下降，精煤灰分提高，选择性和捕收性均变差。

2.2 常规浮选与调浆浮选动力学对比

将经典一级浮选动力学公式键入Origin中并进行非线性曲线拟合，其结果见图5。

由图5可知，FDJ+Q1药剂组合下经过高剪切调浆处理后，浮选速度有了显著提升，浮选动力学常数由1.29提高到2.44，提高了1.15，在前40 s内，精煤灰分几乎不变，精煤产率分别提升12.97和3.72个百分点，累计可燃体回收率及其增速均大于常规浮选，并且在90 s时基本完成分选

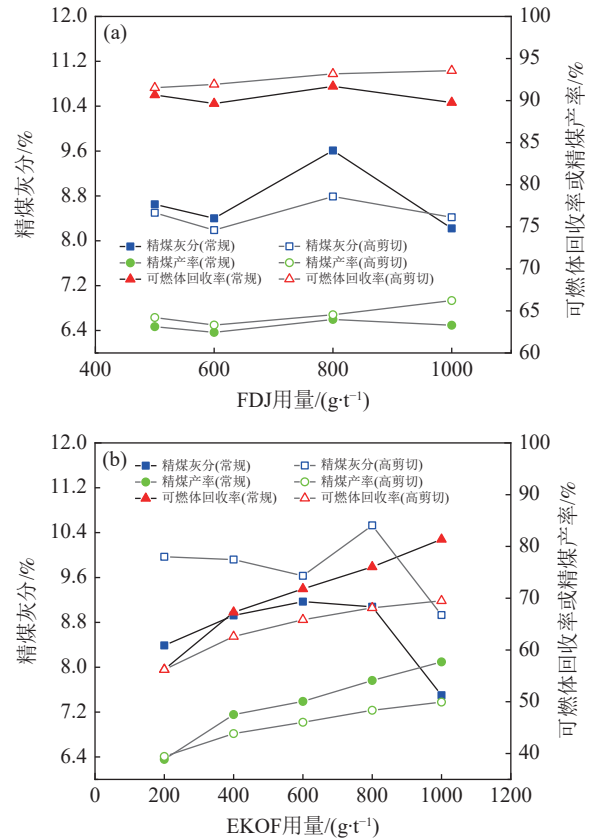


图4 不同药剂（捕收剂）用量下的浮选实验
Fig.4 Flotation test results under different dosage of reagents

过程，而常规浮选直至180 s才浮选结束，说明高剪切调浆技术对浮选初期的浮选速度以及选择性有积极作用；EKOF+仲辛醇组合下，高剪切调浆浮选仅在前20 s比常规浮选速度快，是因为双功能药剂EKOF在高剪切调浆阶段便发挥了起泡剂的作用，矿浆顶部浮出致密泡沫层，浮选阶段时便直接进入精矿，表现为浮选速率快的现象，之后的浮选速度均慢于常规浮选，浮选动力学常数虽然有所提高，但最大可燃体回收率下降了10.22个百分点，再一次说明EKOF双功能药剂不适用高剪切调浆浮选。

3 结论

(1) 调浆转速与调浆时间是浮选中的重要参数，对浮选效果有直接影响。在较低的转速和较短的调浆时间下，系统接收的能量不足，药剂在矿浆中分散不彻底，煤粒表面的擦洗作用较弱，煤粒与药剂的碰撞概率低；在转速提升至1500~2000 r/min时，以上作用增强，浮选效果较变好。

(2) 高剪切调浆技术对提高浮选指标以及节

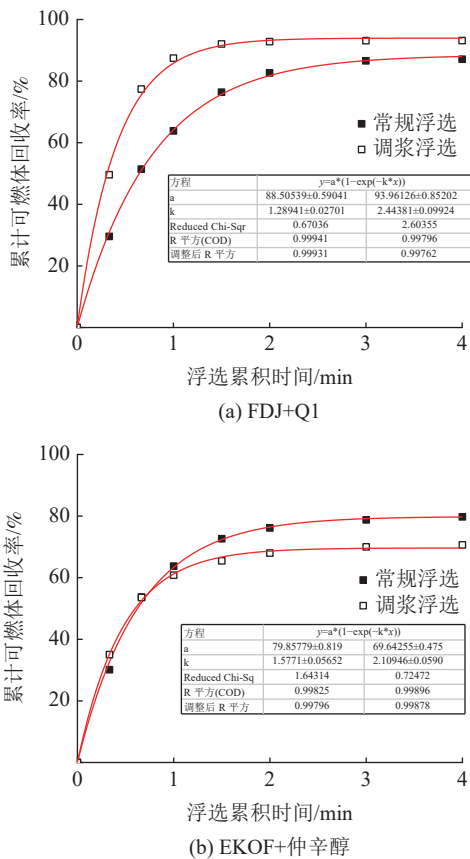


图5 不同调浆方式时的浮选动力学曲线
Fig.5 Kinetics curves of flotation with different mixing methods

省药剂用量均有积极作用。FDJ+Q1 组合同一药剂用量下高剪切调浆浮选比常规浮选可燃体回收率提高了 3.79 个百分点；在可燃体回收率相近的情况下，可节省捕收剂用量 37.5%；对于 EKOF 双功能药剂，药剂中的起泡剂因强大的剪切力在预处理阶段便发挥作用，药剂未及时分散便进入顶部泡沫层，浮选效果差。

(3) 浮选动力学实验中，对于 FDJ+Q1，经过高剪切调浆预处理，浮选动力学常数有近一倍的提升（由 1.29 提高到 2.44），且精煤灰分基本不变，说明高剪切调浆对于浮选速度（特别是浮选初期速度）和选择性有积极作用。EKOF+仲辛醇药剂组合下，初期浮选速度略高于常规浮选，说明对于双功能药剂来说，高剪切调浆浮选提升效果并不理想。

参考文献：

[1] 武立俊, 彭耀丽, 刘春华. 动力煤选煤厂煤泥浮选降灰提质增效试验研究[J]. 矿山机械, 2016, 44(3):59-63.
WU L J, PENG Y L, LIU C H. Experimental study on ash reduction and quality improvement of coal slime flotation in steam coal preparation plant[J]. Mining Machinery, 2016, 44(3):59-63.

[2] 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.

[3] 王成勇, 陈鹏, 潘东, 等. 疏水引力在煤泥浮选过程中的作用机理及应用[J]. 矿产综合利用, 2020(3):105-110.
WANG C Y, CHEN P, PAN D, et al. Mechanism and application of hydrophobic attraction in coal flotation process[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(3):105-110.

[4] 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.

[5] 李吉辉, 马力强, 吴伦, 等. 高剪切调浆和捕收剂乳化处理对煤泥浮选效果的影响研究[J]. 选煤技术, 2019(1):67-71.
LI J H, MA L Q, WU L, et al. Study on the effect of high-shear slurry adjustment and collector emulsification treatment on slime flotation effect[J]. Coal Preparation Technology, 2019(1):67-71.

[6] 张峰. 高剪切调浆煤泥浮选动力学研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2019.
ZHANG F. Study on the dynamics of high-shear mixed slurry flotation[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2019.

[7] 许宁, 陶秀祥. 高剪切搅拌对煤泥颗粒表面性质的影响[J]. 煤炭技术, 2018, 37(12):325-327.
XU N, TAO X X. The effect of high shear mixing on the surface properties of slime particles[J]. Coal Technology, 2018, 37(12):325-327.

(下转第 192 页)