

邓紫林,侯英. 基于均匀试验设计优化煤泥浮选药剂制度[J]. 矿业科学学报,2021,6(2):237-243. DOI:10.19606/j.cnki.jmst.2021.02.012  
Deng Zilin,Hou Ying. Optimization of flotation reagent system of coal slime based on uniform experimental design[J]. Journal of Mining Science and Technology,2021,6(2):237-243. DOI:10.19606/j.cnki.jmst.2021.02.012

## 基于均匀试验设计优化煤泥浮选药剂制度

邓紫林<sup>1</sup>,侯英<sup>1,2</sup>

1. 辽宁科技大学矿业工程学院,辽宁鞍山 114051;
2. 辽宁省金属矿产资源高效采选与利用工程技术研究中心,辽宁鞍山 114051

**摘要:**为了研究浮选药剂制度对煤泥浮选的影响,以水峪选煤厂的煤泥为研究对象,基于均匀试验设计方法建立浮选效果与药剂用量之间的数学模型,考察捕收剂和起泡剂用量对浮选效果的影响。研究表明:捕收剂在一定的用量范围内,煤泥浮选效果只与起泡剂用量存在相关关系;最佳的起泡剂用量为75 g/t,适宜的捕收剂用量为130 g/t;与现场药剂用量捕收剂257 g/t和起泡剂143 g/t相比,在保证精煤灰分不变的情况下,浮选精煤产率提高0.49%,可燃体回收率提高0.50%,浮选完善指标提高0.17%,捕收剂用量降低127 g/t,起泡剂用量降低68 g/t;当捕收剂用量在一定范围内时,起泡剂用量是影响浮选效果的关键因素,适宜的起泡剂用量可显著提高煤泥分选效果。

**关键词:**均匀试验设计;煤泥;浮选药剂制度;可燃体回收率;浮选完善指标

中图分类号:TD 94

文献标志码:A

文章编号:2096-2193(2021)02-0237-07

## Optimization of flotation reagent system of coal slime based on uniform experimental design

Deng Zilin<sup>1</sup>,Hou Ying<sup>1,2</sup>

1. School of Mining Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan Liaoning 114051, China;
2. Engineering and Technology Research Center of High-efficiency Mining-processing and Utilization of Metal Mineral Resources, Anshan Liaoning 114051, China

**Abstract:**In order to study the influence of flotation reagent system on coal slime flotation, the coal slime of Shuiyu Coal Washing Plant is taken as the research object. Based on the uniform experimental design (UED) method, the mathematical model between flotation effect and reagent dosage is established, and the effect of collector and frother dosage on flotation effect is investigated. The results show that the flotation effect of coal slime is only related to the amount of frother in a certain range of collector dosage; the optimal dosage of frother is 75 g/t, the appropriate dosage of collector is 130 g/t. Compared with the actual production dosage, under the conditions of 257 g/t collector and 143 g/t frother, and the ash content of clean coal kept unchanged, the yield of flotation clean coal is increased by 0.49%, the combustible material recovery is increased by 0.50%, the improvement index of flotation is increased by 0.17%, the dosage of collector is reduced by 127 g/t, and the dosage of frother

收稿日期:2020-09-04 修回日期:2020-10-26

基金项目:辽宁省教育厅项目(2019LNQN09);辽宁省重点研发项目(2017230002);辽宁科技大学大学生创新创业训练计划项目(202010146661)

作者简介:邓紫林(1998—),男,湖南邵阳人,本科生,主要从事浮选领域的研究。Tel:13647709521,E-mail:958489205@qq.com

通信作者:侯英(1986—),男,辽宁鞍山人,副教授,主要从事破碎磨矿和浮选领域的教学和研究工作。Tel:18341288088,E-mail:houying@ustl.edu.cn

is reduced by 68 g/t. When the collector dosage is within a certain range, the frother dosage is the key factor affecting the flotation effect, and the appropriate frother dosage can significantly improve the coal slime separation effect.

**Key words:** uniform experimental design; coal slime; flotation reagent system; combustible material recovery; flotation perfection index

浮选是目前细粒煤最有效的分选方法,对选煤厂煤泥回收起着至关重要的作用。在煤泥浮选过程中,浮选药剂是影响浮选效果的重要因素,高效合理的浮选药剂制度是改善浮选效果的关键<sup>[1-2]</sup>。徐东方等<sup>[3]</sup>研究了六偏磷酸钠对浮选中煤泥与黏土颗粒间相互作用的影响;程晨等<sup>[4]</sup>研究了氧化钙强化高硫细粒煤浮选的影响;张志军等<sup>[5]</sup>研究了高岭石对金属阳离子的吸附特性。由上述研究可知,浮选药剂会与煤泥中的矿物或煤发生交互作用,进而影响煤泥浮选效果。

煤泥浮选过程中需要依次添加捕收剂和起泡剂。捕收剂的作用是对煤泥中的煤炭进行改性,使其表面疏水<sup>[6]</sup>,起泡剂的作用是降低浮选溶液的表面张力并防止气泡兼并而形成稳定的泡沫层<sup>[7]</sup>。捕收剂和起泡剂的用量一般根据单因素试验方法确定<sup>[8-11]</sup>。

常用的多因素优化统计试验设计方法包括正交试验设计(Orthogonal Experimental Design, OED)<sup>[12-13]</sup>和均匀试验设计(Uniform Experimental Design, UED)<sup>[14-15]</sup>。

OED是一种基于正交表的多因素试验设计方法,它从全因子试验中选择在测试范围内均匀分布的代表点<sup>[16]</sup>,该方法已用于煤泥浮选药剂用量的优化。例如,王洁等<sup>[17]</sup>将OED方法应用于难选煤泥浮选药剂制度的优化,减少了实验次数,取得了

显著的效果。然而,OED方法只能得到代表性试验点的最优值,而不是所有试验范围内的最优值。此外,当试验水平较高时,它不再有效。

UED也是一种多因素试验设计方法,它是基于数论的准蒙特卡罗方法<sup>[18]</sup>。UED的原理是用少量均匀分布在参数空间内的试验值来代替所有可能的试验参数的完全组合<sup>[19]</sup>。采用数论方法确定试验的参数值,从而证明所选试验值与试验参数的完全组合十分接近。与传统的统计试验设计方法(如拉丁方设计和OED方法)相比,UED为每个参数提供了尽可能多的水平<sup>[8-21]</sup>。在工程实践中,UED方法有着广泛的应用<sup>[22]</sup>。

本文对山西汾西矿业(集团)有限责任公司水峪选煤厂的煤泥样品应用均匀试验设计方法进行浮选药剂制度优化研究,建立浮选效果与药剂用量之间的数学模型,考察捕收剂和起泡剂用量对浮选效果的影响,并分析对比优化后的药剂制度与现场药剂制度下的浮选效果;同时,考察起泡剂对浮选溶液表面张力的影响,探讨浮选药剂对浮选的影响机理。

## 1 试验煤样分析

试验煤样为山西汾西矿业(集团)有限责任公司水峪选煤厂的煤泥。煤样的粒度组成和物相分析结果见表1和表2,试样的X射线衍射分析见图1。

表1 煤样粒度组成

Tab. 1 Size analysis of coal sample

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	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	20.28
0.5~0.3	2.65	16.78	2.65	16.78	100.00	20.28
0.3~0.125	17.99	11.76	20.63	12.40	97.35	20.37
0.125~0.076	16.93	10.31	37.57	11.46	79.37	22.33
0.076~0.038	19.05	14.48	56.61	12.48	62.43	25.58
<0.038	43.39	30.46	100.00	20.28	43.39	30.46
合计	100.00	20.28	—	—	—	—

由表1可知,小于0.038 mm 粒级煤泥样品的灰分显著升高,说明脉石矿物易泥化,会显著影响浮选分离效果。

表2 煤样物相分析结果

Tab. 2 Results of phase analysis of coal sample

矿物名称	高岭石	石英	合计
含量/%	69.93	30.07	100.00

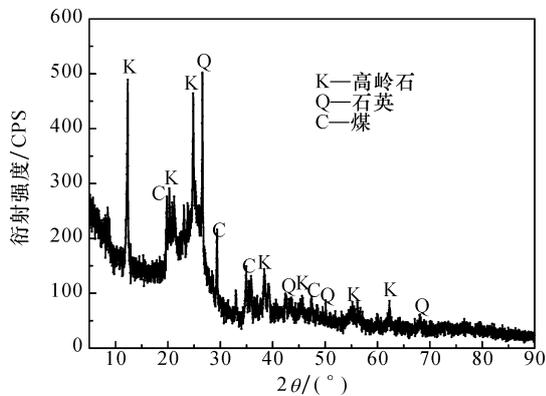


图1 煤样的XRD图谱

Fig. 1 XRD pattern of coal sample

由表2的物相分析结果和图1的XRD分析结果可知,煤泥样品中的主要脉石矿物为高岭石  $[Al_2(Si_2O_5)(OH)_4]$  和石英  $(SiO_2)$ 。

## 2 试验条件与试验方法

浮选试验在1.5LXFD-III型单槽浮选机进行。每次取150.0 g煤样,加水调浆3 min,浮选机转速为1 800 r/min,然后依次加入捕收剂 nalco-9883,起泡剂 nalco-88050 进行浮选。捕收剂和起泡剂均取自水峪选煤厂,由美国纳尔科化学公司生产。

采用均匀试验设计方法研究捕收剂和起泡剂的最佳质量分数和配比,测定浮选精煤和尾煤的产率,化验浮选精煤和尾煤的灰分,计算浮选完善指标。添加捕收剂 nalco-9883 的质量分数在100 ~ 400 g/t 之间,每隔30 g/t 取一个水平;添加起泡剂 nalco-88050 的质量分数在0 ~ 200 g/t 之间,取值分别为80 g/t,180 g/t,40 g/t,140 g/t,0 g/t,100 g/t,200 g/t,60 g/t,160 g/t,20 g/t 和120 g/t。选用  $U_{11}^*(11^4)$  均匀表安排试验<sup>[11]</sup>,试验结果见表3。

表3  $U_{11}^*(11^4)$  均匀表及试验数据

Tab. 3  $U_{11}^*(11^4)$  uniform table and test data

试验号	因素水平									浮选完善指标 $n_{wf}/\%$
	$A/(g \cdot t^{-1})$	$B/(g \cdot t^{-1})$	$A^2$	$B^2$	$AB$	$A^3$	$B^3$	$A^2B$	$AB^2$	
1	100	80	10000	6400	8000	1000000	512000	800000	640000	53.680
2	130	180	16900	32400	23400	2197000	5832000	3042000	4212000	49.279
3	160	40	25600	1600	6400	4096000	64000	1024000	256000	54.266
4	190	140	36100	19600	26600	6859000	2744000	5054000	3724000	51.650
5	220	0	48400	0	0	10648000	0	0	0	36.584
6	250	100	62500	10000	25000	15625000	1000000	6250000	2500000	51.847
7	280	200	78400	40000	56000	21952000	8000000	15680000	11200000	51.454
8	310	60	96100	3600	18600	29791000	216000	5766000	1116000	53.885
9	340	160	115600	25600	54400	39304000	4096000	18496000	8704000	52.717
10	370	20	136900	400	7400	50653000	8000	2738000	148000	51.008
11	400	120	160000	14400	48000	64000000	1728000	19200000	5760000	53.728

X射线衍射分析采用德国布鲁克公司的D8 Advance型X射线衍射仪,表面张力测试采用瑞典百欧林公司生产的Sigma700型表/界面张力仪。

浮选效果采用可燃体回收率、浮选完善指标进行评价。

煤炭可浮性的指标采用灰分符合要求的浮选精煤可燃体回收率评定。浮选精煤可燃体回收率  $E_c$  的计算公式如下:

$$E_c = \frac{R_j(100 - A_j)}{100 - A_y} \times 100\% \quad (1)$$

式中,  $E_c$  为浮选精煤可燃体回收率,%;  $R_j$  为浮选精煤产率,%;  $A_y$  为浮选入料灰分,%;  $A_j$  为浮选精煤灰分,%。

浮选完善指标用于评价同一原煤不同分选条件的浮选效果,表征浮选的完善程度,也可以说是产品中非目的物的混杂程度。浮选完善指标  $n_{wf}$  计算公式如下:

$$n_{wf} = \frac{r_j(A_y - A_j)}{A_y(100 - A_y)} \times 100\% \quad (2)$$

式中,  $n_{wf}$  为浮选完善指标。

### 3 试验结果及讨论

#### 3.1 浮选药剂对浮选效果的影响

应用 SPSS19.0 软件对表 3 中的试验数据进行回归分析,浮选完善指标  $n_{wf}$  为因变量,捕收剂和起泡剂用量及其交互作用指标等为自变量,回归分析结果见表 4、表 5 和表 6。

表 4 模型汇总

Tab. 4 Model summary

模型	R	R <sup>2</sup>	调整后的 R <sup>2</sup>	估计的标准误差
1	0.956	0.915	0.573	3.259 64

由表 4 可知,相关系数  $R=0.956$ ,说明因变量和自变量之间的相关程度为 95.6%,故可判断因变量与自变量之间关系密切。

表 5 方差分析

Tab. 5 Anova of uniform design

	平方和	自由度 df	均方差	F	显著性水平 S
回归	227.365	8	28.421	2.675	0.301
残差	21.252	2	10.626	—	—
总离差	248.617	10	—	—	—

由表 5 可以看出,回归方程的显著性水平  $S=0.301>0.05$ ,说明回归方程不显著,不能由所有参与回归的因素对结果进行解释,应进行逐步回归分析。

表 6 回归系数

Tab. 6 Coefficients of uniform design

因素	非标准化系数	标准误差	标准化系数	t 值	显著性水平 S
常数项	30.617	24.025	—	1.274	0.331
A	0.111	0.316	2.207	0.350	0.760
B	0.551	0.154	7.334	3.582	0.070
A <sup>2</sup>	-0.001	0.001	-5.827	-0.420	0.716
B <sup>2</sup>	-0.005	0.002	-14.383	-2.940	0.099
A <sup>3</sup>	1.008×10 <sup>-6</sup>	0.000	4.287	0.535	0.646
B <sup>3</sup>	1.267×10 <sup>-5</sup>	0.000	6.882	2.067	0.175
A <sup>2</sup> B	-9.773×10 <sup>-7</sup>	0.000	-1.412	-0.787	0.514
AB <sup>2</sup>	2.331×10 <sup>-6</sup>	0.000	1.755	0.761	0.526

由表 6 可知,A、A<sup>2</sup>、A<sup>3</sup>、A<sup>2</sup>B 和 AB<sup>2</sup> 的显著性水平 S 均大于 0.5,是极不显著的因素,应对其逐个剔除后,再用 SPSS19.0 软件对数据进行分析,逐步回归分析的结果要求所有自变量的显著性水平均小于 0.05。逐步回归分析后的结果见 7、表 8 和表 9。

表 7 模型汇总

Tab. 7 Model summary

模型	R	R <sup>2</sup>	调整后的 R <sup>2</sup>	估计的标准误差
2	0.911	0.830	0.757	2.458 77

由表 7 可知,相关系数  $R=0.911$ ,说明因变量和自变量之间的相关程度为 91.1%,故可判断因变量与自变量之间关系密切。

由表 8 可以看出,回归方程的显著性水平  $S=0.004<0.05$ ,说明回归方程高度显著,可由参与回归的因素对因变量进行解释。

表 8 方差分析

Tab. 8 Anova of uniform design

	平方和	自由度 df	均方差	F	显著性水平 S
回归	206.298	3	68.766	11.375	0.004
残差	42.319	7	6.046	—	—
总离差	248.617	10	—	—	—

由表 9 可知,常数项、B、B<sup>2</sup> 和 B<sup>3</sup> 的显著性水平 S 均小于 0.05,是高度显著的因素,可由参与回归的因素对因变量进行解释。自变量和因变量之间的关系如图 2 所示,因变量与自变量的回归方程如下:

$$n_{wf} = 39.182 + 0.504 \times B - 0.005 \times B^2 + 1.314 \times 10^{-5} \times B^3$$

表 9 回归系数

Tab. 9 Coefficients of uniform design

因素	非标准化系数	标准误差	标准化系数	t 值	显著性水平 S
常数项	39.182	2.186	—	17.926	0.000
B	0.504	0.100	6.703	5.063	0.001
B <sup>2</sup>	-0.005	0.001	-13.331	-4.049	0.005
B <sup>3</sup>	1.314×10 <sup>-5</sup>	0.000	7.140	3.361	0.012

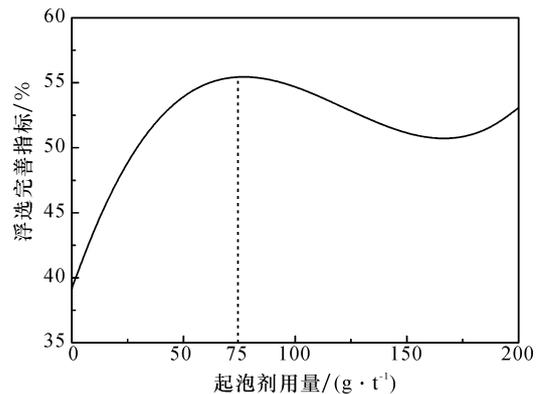


图 2 起泡剂用量与浮选完善指标之间的关系  
Fig. 2 Relationship between frother dosage and flotation perfection index

由图2可知,浮选完善指标只与起泡剂用量存在相关关系,当捕收剂用量在一定范围内时,浮选效果与起泡剂关系密切,随着起泡剂用量的增加,浮选效果显著变好。在起泡剂用量为75 g/t时达到最大值,随着用量的继续增加,浮选效果小幅度下降后又略有升高,故最佳的起泡剂用量为75 g/t。

### 3.2 起泡剂对表面张力的影响

在煤泥浮选过程中,起泡剂具有一定的稳泡性质,起泡剂分子通过在气液界面的定向吸附使产生的气泡更稳定,在液相性质上表现为溶液表面张力的降低。起泡剂的添加是煤泥浮选有效发生的前提,煤泥浮选溶液的表面张力反映了浮选泡沫的稳定性。起泡剂 nalco-88050 用量对浮选溶液表面张力的影响如图3所示。

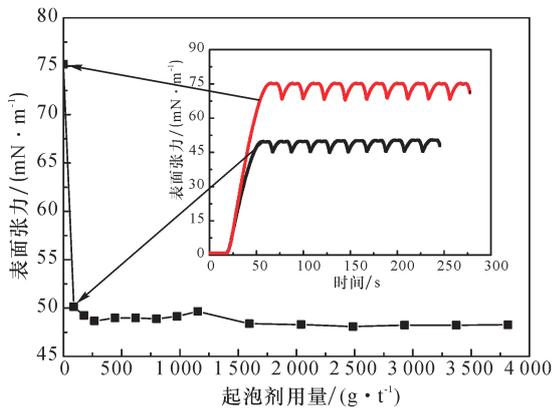


图3 起泡剂用量对表面张力的影响

Fig. 3 Effect of frother dosage on surface tension

由图3可知,添加起泡剂会显著降低溶液的表面张力,随着起泡剂用量的增加,表面张力趋于稳定,在浮选过程中添加起泡剂会使浮选泡沫层的稳定性提高。随着煤泥浮选的进行,起泡剂与浮选精煤一同成为泡沫产品被刮到浮选机之外,因此需要保证足够数量的起泡剂才能保证浮选泡沫的稳定性,进而使得疏水性的煤被浮出成为浮选精煤。但过量的起泡剂会造成细粒级的脉石矿物被机械夹带进入精矿产品中,造成精煤灰分的升高,影响煤泥的浮选效果。邓丽君等<sup>[7]</sup>论述添加起泡剂可以防止气泡兼并,起泡剂通过抑制气泡之间的兼并而使得液相中气泡的平均尺寸减小,气泡之间的兼并行为将会在起泡剂浓度达到某一值之后被有效抑制,当起泡剂浓度再增大时,气泡的尺寸保持不变。气泡大小值出现拐点所对应的浓度值称为起泡剂的临界兼并浓度,可以用来表征起泡剂的表面活性,为起泡剂的有效用量提供参考依据。当起泡剂用量低于临界兼并浓度时,浮选效果较差;当用量远远大于临界兼并浓度时,会造成细粒级脉石矿物

的机械夹带,故适宜的起泡剂用量对于煤泥浮选至关重要。

### 3.3 捕收剂用量对煤泥浮选的影响

在起泡剂用量为75 g/t的条件下,改变捕收剂用量后进行浮选试验,试验结果如图4和图5所示。

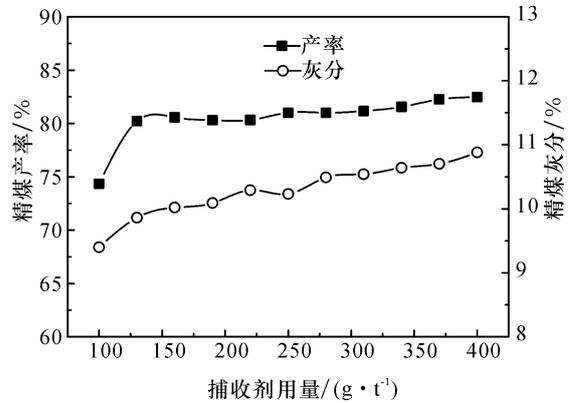


图4 捕收剂用量对产率和灰分的影响

Fig. 4 Effect of collector dosage on yield and ash content

由图4可知,随着捕收剂用量的增加,浮选精煤的灰分逐渐增加,而产率在显著增加后逐渐趋于平缓。在浮选过程中添加捕收剂的作用是对煤炭颗粒的界面性质进行表面改性,添加适量的捕收剂可以实现对煤炭颗粒在气泡表面黏附行为的调控,添加过量捕收剂会造成在其他矿物表面无选择性吸附,进而恶化浮选效果。捕收剂用量从100 g/t增加到130 g/t时,浮选精煤产率显著增加,此阶段为实现捕收剂在煤炭颗粒表面的吸附而调控煤炭的浮选行为;当捕收剂用量大于130 g/t时,浮选精煤产率不再显著增加,而浮选精煤灰分逐渐增加,此阶段为过量捕收剂在其他矿物表面无选择性吸附而恶化浮选效果。综上所述,适宜的捕收剂用量确定为130 g/t。

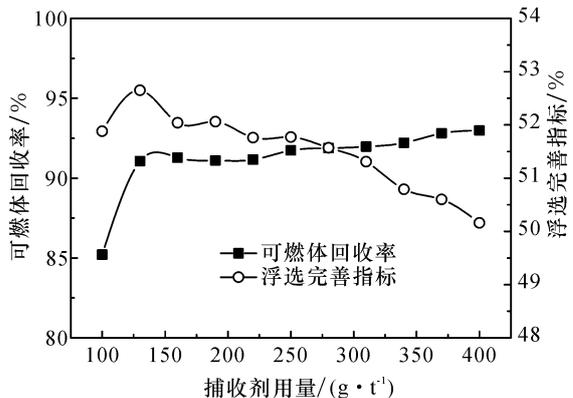
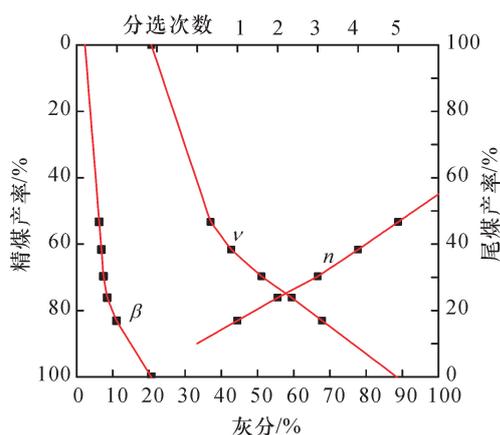


图5 捕收剂用量对可燃体回收率和浮选完善指标的影响

Fig. 5 Effect of collector dosage on combustible recovery and flotation perfection index

由图5可知,随着捕收剂用量的增加,浮选精煤的浮选完善指标显著增加后逐渐下降,而可燃体回收率显著增加后逐渐趋于平缓。当起泡剂用量为75 g/t、捕收剂用量为130 g/t时,浮选精煤产率为80.22%,灰分为9.86%,可燃体回收率为91.06%,浮选完善指标为52.65%。

采用现场药剂用量捕收剂257 g/t和起泡剂143 g/t,进行分步释放浮选试验,结果如图6所示。由图6可知,当保证精煤灰分为9.86%时,精煤产率为79.73%,根据试验数据计算,此时的可燃体回收率为90.56%,浮选完善指标为52.48%。



$\beta$ —精煤产率-灰分曲线; $\nu$ —尾煤产率-灰分曲线;  
 $n$ —精煤产率-分选次数曲线

图6 煤泥分步释放浮选试验结果

Fig. 6 Test results of stage released flotation of coal slime

在捕收剂用量130 g/t和起泡剂用量75 g/t情况下,与上述现场药剂用量条件相比,保证精煤灰分不变的情况下,浮选精煤产率提高0.49%,可燃体回收率提高0.50%,浮选完善指标提高0.17%,捕收剂用量降低127 g/t,起泡剂用量降低68 g/t。

## 4 结论

(1) 由均匀试验设计和逐步回归分析结果可知,当捕收剂用量在一定范围内时,浮选效果只与起泡剂关系密切。对于水峪选煤厂的煤泥,最佳的起泡剂用量为75 g/t。

(2) 当起泡剂用量为75 g/t时,适宜的捕收剂用量为130 g/t,浮选精煤产率为80.22%,灰分为9.86%,可燃体回收率为91.06%,浮选完善指标为52.65%。

(3) 当现场药剂用量捕收剂为257 g/t、起泡剂为143 g/t时,在保证精煤灰分为9.86%的情况

下,精煤产率为79.73%,可燃体回收率为90.56%,浮选完善指标为52.48%。

(4) 优化后的药剂制度与现场药剂用量条件相比,在保证精煤灰分不变的情况下,浮选精煤产率提高0.49%,可燃体回收率提高0.50%,浮选完善指标提高0.17%,捕收剂用量降低127 g/t,起泡剂用量降低68 g/t。

(5) 当捕收剂用量在一定范围内时,起泡剂用量是影响浮选效果的关键因素,适宜的起泡剂用量可显著提高煤泥分选效果。

## 参考文献

- [1] Wen B F, Xia W C, Sokolovic J M. Recent advances in effective collectors for enhancing the flotation of low rank/oxidized coals [J]. Powder Technology, 2017, 319:1-11.
- [2] Wang G C, Bai X T, Wu C N, et al. Recent advances in the beneficiation of ultrafine coal particles [J]. Fuel Processing Technology, 2018, 178:104-125.
- [3] 徐东方,朱书全,朱志波,等. 六偏磷酸钠对浮选中煤泥与黏土颗粒间相互作用的影响[J]. 矿业科学学报, 2016, 1(3):269-276.  
Xu Dongfang, Zhu Shuquan, Zhu Zhibo, et al. Influences of sodium hexametaphosphate on interactions of coal and clay particles in flotation[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2016, 1(3):269-276.
- [4] 程晨,宋杨,杨博,等. 氧化钙强化高硫细煤泥浮选试验研究[J]. 贵州大学学报:自然科学版, 2020, 37(5):54-60.  
Cheng Chen, Song Yang, Yang Bo, et al. Flotation performance of a high-sulfur coal fine enhanced by calcium oxide[J]. Journal of Guizhou University: Natural Sciences, 2020, 37(5):54-60.
- [5] 张志军,李亚南,佟震阳,等. 高岭石对金属阳离子的吸附特性研究[J]. 矿业科学学报, 2017, 2(3):294-300.  
Zhang Zhijun, Li Yanan, Tong Zhenyang, et al. Adsorption characteristics of metal ions on kaolinite[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2017, 2(3):294-300.
- [6] 崔广文,于文慧,张玉,等. 煤泥浮选药剂研究现状及发展趋势[J]. 洁净煤技术, 2015, 21(1):15-19.  
Cui Guangwen, Yu Wenhui, Zhang Yu, et al. Status and development trend of coal slime flotation reagents [J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(1):15-19.
- [7] 邓丽君,曹亦俊,王利军. 起泡剂溶液的表面张力对气泡尺寸的影响[J]. 中国科技论文, 2014, 9(12):1340-1343.

- Deng Lijun, Cao Yijun, Wang Lijun. Effect of surface tension on bubble size in frother solutions [J]. China Sciencepaper, 2014, 9(12):1340-1343.
- [8] 杨蕾,徐初阳,周欢欢,等. 望峰岗选煤厂煤泥可浮性研究[J]. 洁净煤技术, 2013, 19(6):5-8, 16.  
Yang Lei, Xu Chuyang, Zhou Huanhuan, et al. Slime flotability in Wangfenggang coal preparation plant [J]. Clean Coal Technology, 2013, 19(6):5-8, 16.
- [9] 张鸿波,张涛,张强. 表面活性剂对难浮煤泥浮选效果的影响[J]. 煤矿机械, 2019, 40(11):84-86.  
Zhang Hongbo, Zhang Tao, Zhang Qiang. Effect of surface active agent on flotation effect of difficult flotation slime [J]. Coal Mine Machinery, 2019, 40(11):84-86.
- [10] 侯鹏辉. 煤泥浮选起泡剂的优化试验[J]. 洁净煤技术, 2012, 18(4):13-15, 29.  
Hou Penghui. Optimization test of frother for slime flotation [J]. Clean Coal Technology, 2012, 18(4):13-15, 29.
- [11] 郭坤,赵文婷,董连平,等. 聚乙二醇作为煤泥浮选起泡剂的规律研究[J]. 煤炭技术, 2016, 35(9):298-300.  
Guo Kun, Zhao Wenting, Dong Lianping, et al. Regularity of polyethylene glycol as coal slime flotation frothers [J]. Coal Technology, 2016, 35(9):298-300.
- [12] Li N, Yang X D, Gong Y, et al. Enhancing electrical capacitance tomographic sensor design using fuzzy theory based quantifiers [J]. Measurement Science and Technology, 2014, 25(12):125401.
- [13] Li N, Cao M C, He C F, et al. Multi-parametric indicator design for ECT sensor optimization used in oil transmission [J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(7):2074-2088.
- [14] Fang K T, Lin D K J, Winker P, et al. Uniform design: theory and application [J]. Technometrics, 2000, 42(3):237-248.
- [15] 李登万,陈洪涛,冯锦春,等. 基于均匀设计法的精密车削参数优化[J]. 机械工程学报, 2015, 51(3):206-212.
- Li Dengwan, Chen Hongtao, Feng Jinchun, et al. Precision cutting parameters optimization based on uniform design method [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(3):206-212.
- [16] Deng L N, Feng B, Zhang Y. An optimization method for multi-objective and multi-factor designing of a ceramic slurry: Combining orthogonal experimental design with artificial neural networks [J]. Ceramics International, 2018, 44(13):15918-15923.
- [17] 王洁,丁华琼,桂夏辉. 开滦矿区难选煤泥浮选影响因素研究[J]. 选煤技术, 2012(4):1-5, 9.  
Wang Jie, Ding Huaqiong, Gui Xiahui. Research on influencing factors of hard flotation tiny coal in Kailuan mining area [J]. Coal Preparation Technology, 2012(4):1-5, 9.
- [18] Ping H L, Xu G H, Wu S F. System optimization of cyclohexane dehydrogenation under multiphase reaction conditions using the uniform design method [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(46):15923-15932.
- [19] Song G, Xu G Q, Quan Y K, et al. Uniform design for the optimization of  $Al_2O_3$  nanofilms produced by electrophoretic deposition [J]. Surface and Coatings Technology, 2016, 286:268-278.
- [20] Yang J, Li L, Yang L Y, et al. Uniform design for the parameters optimization of pin-fins channel heat sink [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 120:289-297.
- [21] Wang H, Zhang L, Li G L, et al. Application of uniform design experimental method in waste cooking oil (WCO) co-hydroprocessing parameter optimization and reaction route investigation [J]. Fuel, 2017, 210:390-397.
- [22] Tsai J T, Yang P Y, Chou J H. Data-driven approach to using uniform experimental design to optimize system compensation parameters for an auto-alignment machine [J]. IEEE Access, 2018, 6:40365-40378.

(责任编辑:李朝雯)