

高灰细粒煤泥正交优化浮选实验

申世钰¹, 李帅¹, 王怀法^{1,2}, 祁占海³

(1. 太原理工大学, 矿业工程学院, 山西 太原 30024; 2. 矿物加工科学与技术国家重点实验室, 北京 100000; 3. 中钰泰德煤炭有限公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017000)

摘要: 这是一篇矿物加工工程领域的论文, 研究了内蒙古鄂尔多斯市凯达煤样的粒度特征和矿物组成, 并在前期单因素实验结果的基础上, 采用正交实验考查了叶轮转速、充气量、捕收剂和起泡剂的用量对浮选完善指标和可燃体回收率的影响。最终采用“一粗一精”浮选工艺流程对正交实验的较优方案进行进一步研究, 结果表明: 各因素主次顺序为起泡剂用量>捕收剂用量>叶轮转速>充气量; 正交实验所得的较优方案为 $A_2B_2C_3D_3$, 即起泡剂用量 800 g/t、捕收剂用量 1600 g/t、矿浆浓度 60 g/L、叶轮转速 1800 r/min、充气量 $0.175 \text{ m}^3/(\text{m}^2/\text{min})$; 在较佳条件下, 经过“一粗一精”浮选工艺流程, 最终得到了产率 49.41%、灰分 8.70% 的精煤和产率 50.59%、灰分 74.15% 的尾煤。

关键词: 矿物加工工程; 高灰细粒煤泥; 浮选; 正交实验; 一粗一精

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2023.06.025

中图分类号: TD94 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2023) 06-0164-05

随着机械化采煤程度的提高和矿井开采的不断深入, 高灰细泥也随之增加, 精煤灰分高、尾煤灰分低、粗粒精煤损失大等已经成为许多选煤厂浮选过程的共性问题^[1-3]。

于跃先等^[4]通过对细泥夹带机理的研究发现: 影响高灰细泥夹带的主要因素为细泥粒度、起泡剂用量和矿浆浓度。宋云霞等^[5]研究表明: 一次浮选的精煤灰分高, 产率低, 尾煤灰分低, 很难满足生产要求。Taki Güler 等^[6]发现, 粒径越细, 夹带程度越高, 同时还受起泡剂类型的影响。Sripriya R 和 Oats W J 等研究表明, 细泥矿物的存在降低了煤的可燃体回收率并影响精煤灰分^[7-8]。张晓鹏^[9]认为在生产现场中, 应针对煤质的变化情况, 调整合适的油比、充气量和搅拌速度, 减少高灰细泥对浮选精煤的污染。

异质细泥遇水易泥化成微米级矿物黏附于气泡与煤粒表面形成细泥罩盖, 由此引起了煤泥浮选的一系列问题^[10-11]。提高精煤质量和可燃体回收率是当前提高浮选效率的关键所在, 本论文将以

内蒙古鄂尔多斯市凯达矿的难浮煤泥为研究对象, 在正交实验设计的基础上, 进行了精煤再选工艺优化实验。

1 煤样性质与实验方法

1.1 煤样性质分析

(1) 煤样矿物组成分析

本实验选取的煤样来自内蒙古鄂尔多斯市凯达矿, 采用 X 射线衍射仪 SmartLab 在 Cu 靶、管电压 40 kV、管电流 40 mA、衍射角度为 $2\sim 45^\circ$ 的衍射条件下进行了全岩矿物分析, XRD 和结果见图 1 和表 1。

由图 1 和表 1 可知, 煤样中脉石矿物主要为石英和由高岭石、伊利石、蒙脱石组成的粘土矿物。其中石英的含量最大, 意味着精煤与脉石矿物间存在着较大斥力, 通过选择合适的工艺可有效实现分离; 粘土矿物的含量为 40.4%, 这会导致该煤样在浮选过程中容易泥化。

收稿日期: 2021-04-25

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)

作者简介: 申世钰 (1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向为矿物加工工程。

通信作者: 王怀法 (1963-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为矿物加工工程。

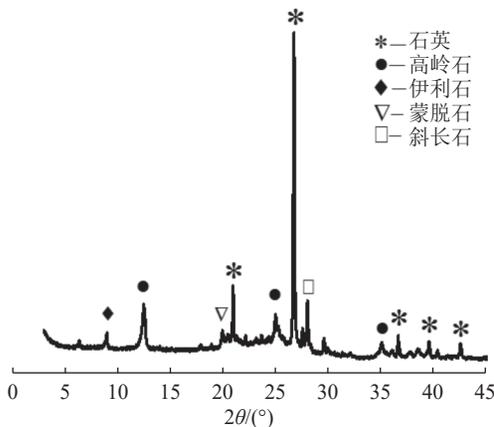


图1 煤样 XRD

Fig.1 X-ray diffraction pattern of coal sample

表1 煤样矿物组成分析结果/%

Table 1 Timed-release analysis results of coal sample

石英	钾长石	斜长石	方解石	普通辉石	磷石英	粘土矿物
35.3	3.3	9.4	1.8	2.3	7.5	40.4

(2) 煤样筛分分析

对煤样进行筛分分析，结果见表2。

表2 煤样筛分分析

Table 2 Coal sample screening analysis

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+0.25	10.25	3.51	10.25	3.51	100.00	42.41
-0.25+0.125	11.37	4.98	21.62	4.28	89.75	46.85
-0.125+0.074	9.12	14.49	30.74	7.31	78.38	52.93
-0.074+0.045	9.84	37.26	40.57	14.57	69.26	57.99
-0.045	59.43	61.42	100.00	42.41	59.43	61.42
合计	100.00	42.41				

由表2可知，-0.045 mm粒级的产率和灰分分别达到了59.43%、61.42%，说明该煤样为高灰细粒煤。其余各粒级的产率相差不大，在9.12%~11.37%之间。+0.125 mm粒级的灰分明显较低，为4.28%，这说明煤泥中的粗颗粒需要最大程度地实现回收。

1.2 实验仪器和药剂

(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；

(2) 实验药剂。本次研究实验药剂为：FDJ(一种新型非极性烃类捕收剂)+Q1(一种新型醇类起泡剂)。

1.3 实验方法

(1) 正交实验设计法是利用正交表来安排与

分析多因素实验的一种设计方法^[12]。它是在实验因素的全部水平组合中，挑选出部分具有代表性的水平组合进行实验，通过对这部分实验结果的分析了解全面实验的情况，确定因素主次顺序、较佳水平和较优条件。

(2) 浮选实验严格按照GB/T 4757-2013《煤粉(泥)实验室单元浮选实验方法》要求执行，以可燃体回收率和浮选完善指标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：

$$\varepsilon = \frac{\gamma_j(100 - A_{d,j})}{100 - A_{d,y}} \times 100\%$$

其中， ε 为浮选精煤可燃体回收率/%； A_y 为浮选入料灰分/%； A_j 为浮选精煤灰分/%； γ_j 为浮选精煤实际产率/%。

浮选完善指标的计算公式为：

$$\eta_{wf} = \frac{100\gamma_j}{100 - A_y} \times \frac{A_y - A_j}{A_y}$$

其中， η_{wf} 为浮选完善指标/%； γ_j 为浮选精煤实际产率/%； A_y 为浮选入料灰分/%； A_j 为浮选精煤灰分/%。

2 实验结果与分析

2.1 煤泥浮选正交实验研究

影响煤泥浮选效果的主要因素有浮选矿浆浓度、捕收剂用量、起泡剂用量、充气量、叶轮转速等，为了考查这些因素及其水平，在前期单因素探索实验基础上，采用 $L_9(3^4)$ 正交实验进行研究。其中矿浆浓度固定为60 g/L，其他的因素水平安排见表3，实验结果见表4、5。

表3 因素水平

Table 3 Factor level table

水平	因素			
	A 叶轮转速/ (r/min)	B 充气量/ (m ³ /(m ² /min))	C 捕收剂用量/ (g/t)	D 起泡剂用量/ (g/t)
1	1600	0.15	800	400
2	1800	0.175	1200	600
3	2000	0.2	1600	800

结合表4和图2，分析各个因素对指标的影响情况：

(1) 各因素影响的主次顺序为：起泡剂用量>捕收剂用量>叶轮转速>充气量。

表 4 正交实验安排及分析
Table 4 Orthogonal test arrangement and analysis

实验号	列号					可燃体回收率 $\epsilon/\%$	浮选完善指标 $\eta_{WF}/\%$
	叶轮转速/(r/min)	充气量/($m^3/(m^2/min)$)	捕收剂用量g/t	起泡剂用量g/t			
1	1	1	1	1	1	43.45	34.56
2	1	2	2	2	2	68.64	52.66
3	1	3	3	3	3	82.22	54.91
4	2	1	2	3	3	82.69	55.71
5	2	2	3	1	1	57.77	45.46
6	2	3	1	2	2	70.87	53.34
7	3	1	3	2	2	77.56	54.69
8	3	2	1	3	3	80.84	52.99
9	3	3	2	1	1	53.68	41.57
可燃体回收率	K1	194.31	203.70	195.17	154.90		
	K2	211.32	207.25	205.01	217.07		
	K3	212.09	206.77	217.54	245.75		
	k1	64.77	67.90	65.06	51.63		
	k2	70.44	69.08	68.34	72.36		
	k3	70.70	68.92	72.51	81.92		
	极差	5.93	1.18	7.46	30.28		
优方案1	A3	B2	C3	D3	83.88	53.80	
浮选完善指标	K1	142.13	144.95	140.89	121.59		
	K2	154.51	151.11	149.94	160.68		
	K3	149.25	149.82	155.06	163.61		
	k1	47.38	48.32	46.96	40.53		
	k2	51.50	50.37	49.98	53.56		
	k3	49.75	49.94	51.69	54.54		
	极差	4.13	2.05	4.72	14.01		
优方案2	A2	B2	C3	D3	84.82	54.95	

表 5 正交实验各组结果
Table 5 Orthogonal experimental results

实验号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	优方案1	优方案2	
精煤	产率/%	29.01	46.62	59.26	59.40	38.76	48.57	54.70	58.68	36.30	61.38	61.85
	灰分/%	12.82	14.33	19.27	18.99	13.27	15.09	17.49	19.84	13.95	20.49	20.20
尾煤	产率/%	70.99	53.38	40.74	40.60	61.24	51.43	45.30	41.32	63.70	38.62	38.15
	灰分/%	53.86	66.47	74.37	75.68	60.50	67.29	71.67	73.38	57.54	76.72	76.81
合计灰分/%	41.95	42.16	41.72	42.01	42.20	41.94	42.03	41.96	41.72	42.20	41.79	

(2) 起泡剂用量 D 对各指标的影响。由表 4 可知，对可燃体回收率和浮选完善指标来说，起泡剂用量的极差都是最大的，即起泡剂用量是最大的影响因素，从图 2 可以看出，明显取值 800 较好。

(3) 充气量 B 对各指标的影响。由表 4 可知，对于两个指标来说，充气量的极差都是最小的，即为影响最小的因素；从图 2 可以看出，充气量取值 0.175 较好。

(4) 捕收剂用量 C 对各指标的影响。由表 4 可知，对于两个指标来说，捕收剂用量的极差都是第二大的，即次要影响的因素；从图 2 可以看出，捕收剂用量取值 1600 较好。

(5) 叶轮转速 A 对各指标的影响。由表 4 可知，对于两个指标来说，转速的极差都是第三大的，即第三影响的因素；从图 2 可以看出，对于可燃体回收率来说，取值 2000 较好；但对于浮选完善指标来说，取值 1800 较好。

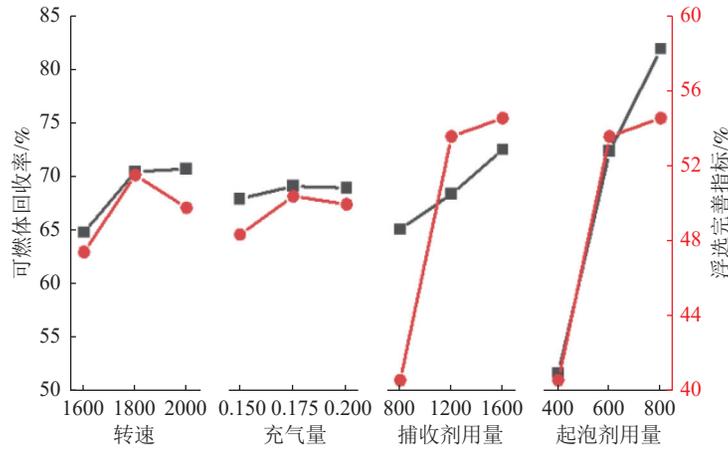


图2 各指标随因素水平的变化
Fig.2 Changes of various indicators with factor levels

通过以上分析，得出较好的实验方案有两组： $A_2B_2C_3D_3$ 和 $A_3B_2C_3D_3$ 。而这两组都不在正交实验的9组实验安排中，因此需要补做，其结果见表4和表5。经比较得出较优的方案为 $A_2B_2C_3D_3$ ，即较佳条件为：叶轮转速 1800 r/min、充气量 $0.175 \text{ m}^3/(\text{m}^2/\text{min})$ 、捕收剂用量 1600 g/t、起泡剂用量 800 g/t。浮选结果为：精煤产率 61.85%、灰分 20.20%，尾煤产率 38.15%、灰分 76.81%。还可以看出，当可燃体回收率和浮选完善指标达极大时，精煤的灰分偏大，同时考虑到脉石矿物中石英的含量较大，此时对精煤进行精选实验将非常有意义。

2.2 “一粗一精”浮选实验研究

由图3可知，采用“一粗一精”浮选工艺流程对正交实验的较优方案进行进一步研究，一段粗选加药，二段精选不加药；一段粗选提高回收率，二段精选确保精煤灰分和产率。实验结果见表6。

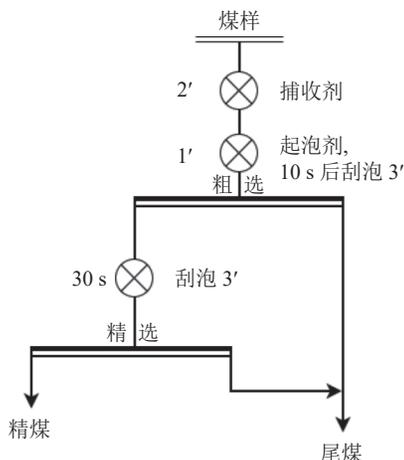


图3 “一粗一精”浮选工艺流程
Fig.3 Process of one roughing and one cleaning flotation test

表6 “一粗一精”浮选实验结果
Table 6 Results of one roughing and one cleaning flotation test

实验号	精煤		尾煤		合计	
	产率/%	灰分/%	产率/%	灰分/%	产率/%	灰分/%
$A_2B_2C_3D_3$	49.41	8.70	50.59	74.15	100.00	41.81

由表6可知， $A_2B_2C_3D_3$ 方案经过“一粗一精”工艺流程，可以得到产率 49.41%、灰分 8.70% 的精煤和产率 50.59%、灰分 74.15% 的尾煤，有效地降低高灰细泥对精煤浮选效果的影响。

3 结论

(1) 煤样的主导粒级为 -0.045 mm ，其产率和灰分分别为 59.43%、61.42%。XRD 分析结果表明煤样中脉石矿物以石英和粘土矿物为主。

(2) 实验中各因素影响浮选结果的主次顺序为：起泡剂用量 > 捕收剂用量 > 叶轮转速 > 充气量；正交实验所得的较优方案为 $A_2B_2C_3D_3$ ，得到了产率 61.85%、灰分 20.20% 的精煤和产率 38.15%、灰分 76.81% 的尾煤。

(3) 在起泡剂用量 800 g/t、捕收剂用量 1600 g/t、矿浆浓度 60 g/L、叶轮转速 1800 r/min、充气量 $0.175 \text{ m}^3/(\text{m}^2/\text{min})$ 的条件下，通过“一粗一精”浮选工艺流程，得到了产率 49.41%、灰分 8.70% 的精煤和产率 50.59%、灰分 74.15% 的尾煤。“一粗一精”浮选工艺能有效地降低高灰细泥对该煤样浮选的影响，确保了精煤灰分和产率。

参考文献：

[1] 郭丽敏, 王怀法. 非离子表面活性剂对高灰细粒难浮煤泥浮选促进作用研究[J]. 矿产综合利用, 2018(4):96-100.

- GUO L M, WANG H F. Study on the promotion of non-ionic surfactants on the flotation of high-ash fine-grained coal slime[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2018(4):96-100.
- [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] 于跃先, 马力强, 张仲玲, 等. 煤泥浮选过程中的细泥夹带与罩盖机理[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(3):652-658.
- YU Y X, MA L Q, ZHANG Z L, et al. The mechanism of fine mud entrainment and cover in the process of slime flotation[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(3):652-658.
- [5] 宋云霞, 魏昌杰. 难浮煤泥二次浮选工艺研究与应用[J]. *煤炭工程*, 2017, 49(7):93-96.
- SONG Y X, WEI C J. Research and application of secondary flotation process for difficult-to-float coal slime[J]. *Coal Engineering*, 2017, 49(7):93-96.
- [6] A T G, B N A. Statistical evaluation of flotation and entrainment behavior of an artificial ore[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, 22(1):199-205.
- [7] Sripriya R, Rao P, Choudhury B R. Optimisation of operating variables of fine coal flotation using a combination of modified flotation parameters and statistical techniques[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2003, 68(1-4):109-127.
- [8] Oats W J, Ozdemir O, Nguyen A V. Effect of mechanical and chemical clay removals by hydrocyclone and dispersants on coal flotation[J]. *Minerals Engineering*, 2010, 23(5):413-419.
- [9] 张晓鹏. 高灰细泥对浮选精煤质量的影响分析[J]. *煤炭加工与综合利用*, 2017(3):30-34.
- ZHANG X P. Analysis of the influence of high ash fine mud on the quality of flotation clean coal[J]. *Coal Processing and Comprehensive Utilization*, 2017(3):30-34.
- [10] 陈智超, 李志红, 樊民强. 高细泥含量难浮煤泥的反、正两段浮选工艺[J]. *中国煤炭*, 2015(7):95-99.
- CHEN Z C, LI Z H, FAN M Q. The reverse and positive two-stage flotation process of high-fine mud content and difficult-to-float coal slime[J]. *China Coal*, 2015(7):95-99.
- [11] 张龙鑫, 效妍, 倪超. 高灰难浮煤泥二次浮选试验研究[J]. *煤炭工程*, 2014, 46(2):22-24.
- ZHANG L X, XIAO Y, NI C. Experimental study on secondary flotation of high ash and difficult-to-float coal slime[J]. *Coal Engineering*, 2014, 46(2):22-24.
- [12] 刘炯天, 樊民强. 试验研究方法[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2011.
- LIU J T, FAN M Q. Experimental research methods [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2011.

Orthogonal Optimization Flotation Experiment of High Ash and Fine Coal Slime

Shen Shiyu¹, Li Shuai¹, Wang Huaifa^{1,2}, Qi Zhanhai³

(1.College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi, China;

2.State Key Laboratory of Mineral Processing, Beijing, China;

3.Zhongyu Taide Coal Co., Ltd., Ordos, Inner Mongolia, China)

Abstract: This is an essay in the field of mineral processing engineering. In this essay, the particle size characteristics and mineral composition of the Kaida coal sample in Ordos City, Inner Mongolia were studied. Meanwhile, based on the results of the previous single factor test, the orthogonal test was used to investigate the impeller speed, aeration amount, the dosage of the collecting agent and foaming agent on the flotation perfection index and the recovery rate of combustible material. Finally, the "one roughing and one cleaning" flotation process was used to further study the optimal scheme of the orthogonal experiment. The results show that the primary and secondary order of the factors is the dosage of foaming agent > the dosage of collector > the impeller speed > the aeration dosage. The optimal scheme obtained from the orthogonal experiment is $A_2B_2C_3D_3$, that is, the dosage of frother is 800 g/t, the dosage of collector is 1600 g/t, the slurry concentration is 60 g/L, the impeller speed is 1800 r/min, and the aeration dosage is 0.175 $m^3/(m^2/min)$. Under the optimal conditions, after the "one roughing and one cleaning" flotation process, a clean coal with yield of 49.41%, ash of 8.70%, and a tailing coal with yield of 50.59%, ash of 74.15% were obtained.

Keywords: Mineral processing engineering; High-ash and fine coal slime; Flotation; Orthogonal test; One roughing and one cleaning