

不同实验设计方法在高灰分煤泥浮选优化实验中的应用

谢才秀, 张永菊, 龙涛, 陈鹏, 石开仪, 王市委

(六盘水师范学院化学与材料工程学院, 贵州 六盘水 553004)

摘要: 采用经验实验设计、多因素逐项实验设计及正交实验设计方法, 以优化贵州高灰煤泥浮选较佳条件。结果表明, 经验实验法中浮选精煤的最小灰分为 12.42%, 产率为 19.92%; 多因素逐项实验中较优浮选条件为捕收剂用量为 60g/t、起泡剂用量为 80 g/t、转子转速为 1800 r/min、浓度为 60 g/L, 浮选精煤产率为 24.62%、灰分为 11.57%, 浮选尾煤产率为 75.38%、灰分为 61.68%; 正交实验中较优浮选条件为起泡剂用量 90 g/t、捕收剂用量 60g /t、浓度 80 g/L、转速 2000 r/min, 浮选精煤产率为 26.36%, 灰分为 12.46%, 浮选尾煤产率为 73.64%, 灰分为 63.82%。煤泥浮选多因素逐项实验与正交实验均能获得浮选的较优条件。

关键词: 高灰煤泥; 浮选; 经验实验; 多因素逐项实验; 正交实验

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2021.01.011

中图分类号: TD951 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2021) 01-0072-06

高灰细粒煤泥浮选一直是选煤领域研究的热点与难题, 选煤工作者在浮选工艺流程^[1-4]、浮选药剂^[5-8]和分选设备^[9-12]等方面进行了大量的研究与实践, 并取得了诸多研究成果与工程经验。贵州某选煤厂煤泥含量大、灰分高, 一直困扰浮选精煤质量的提升。本文旨在前人有关高灰分煤泥浮选研究的基础上, 应用不同实验设计方法探索该选煤厂高灰煤泥浮选的最优条件。

1 煤泥性质

入浮煤泥的灰分、粒度与密度组成在很大程度上决定了浮选精煤的产率与灰分, 故了解煤泥的灰分、粒度组成和密度组成至关重要。煤泥筛分, 结果见表 1。

表 1 煤泥粒度组成

Table 1 Coal particle size composition

粒级 /mm	产率 /%	灰分 /%	筛上累计 /% 产率	筛下累计 /% 灰分
+0.500	0.30	52.15	0.30	52.15
-0.500+0.250	58.02	52.35	58.32	52.35
-0.250+0.125	15.01	51.77	73.33	52.23
-0.125+0.075	5.17	46.77	78.50	51.87
-0.075+0.045	9.13	44.64	87.63	51.12
-0.045	12.37	47.02	100.00	50.61
合计	100.00	50.61		

由表 1 可知, 煤泥的主导粒级为 -0.500+0.250 mm, 产率为 58.02%, 灰分为 52.35%, 初步判断适合浮选机浮选; -0.075 mm 粒级产率为 21.50%, 灰分为 46.01%, 产率较高, 灰分较高, 浮选过程应注意避免过多细泥夹带。

收稿日期: 2019-11-04; 改回日期: 2020-01-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51504134); 矿物加工工程重点支持学科 (黔学位合字 [2016]24 号); 贵州省煤炭绿色发展 2011 协同创新中心 (黔教合协同创新字 [2016]02); 六盘水师范学院硕士学位培育点项目 (LPSSYSSDPY201702)

作者简介: 谢才秀 (1996-), 女, 学生。

通讯作者: 陈鹏 (1987-), 男, 讲师, 硕士。Tel: 0858-8600172, 邮箱: chenpeng8789@163.com

2 实验设计方法

在煤泥浮选条件优化实验中采用经验实验方法、多因素逐项实验方法和正交设计实验方法。考查了浮选矿浆固体浓度、捕收剂用量、起泡剂用量和转子转速四个因素对煤泥浮选的影响。

所谓“经验实验方法”就是根据经验确定因素的水平变化范围，再使其各因素的变化步长相等，根据经验对各因素水平排序搭配来进行有限个数实验。选取较好一组作为优化条件。

多因素逐项实验方法也叫一次一因素法，先将多因素中其他因素设定在某一个特定水平上，然后就某一个因素进行不同水平的条件实验，找出该因素的较优水平^[13]。再按此法找出每个因素的较优水平。各因素较优水平组合在一起就是较佳实验条件。

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^[13]。它是由实验因素

的全部水平组合中，挑选出部分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。

3 煤泥浮选实验结果

3.1 经验实验法

在经验实验中，煤浆固体浓度为(60、80、100、120、140和160) g/L；捕收剂用量为(60、100、140、180、220和260) g/t；起泡剂用量为(80、140、500、260、320和380) g/t；叶轮转速为(1400、1600、1800、2000、2200和2400) r/min。根据实践经验较低的矿浆浓度应该需要较低的捕收剂浓度、较低的起泡剂浓度和较低的转速。而较高的矿浆浓度应该需要较高的捕收剂浓度、较高的起泡剂浓度和较高的转速。选择合适水平搭配进行浮选实验。其实验结果见表2。

表2 经验实验结果
Table 2 Results of experience test

实验号	捕收剂 (g·t ⁻¹)	起泡剂 (g·t ⁻¹)	转速 (r·min ⁻¹)	浓度 (g·L ⁻¹)	浮选精煤/%		浮选尾煤/%		计算入料灰分/%
					产率	灰分	产率	灰分	
1	60	80	1400	60	19.92	12.42	80.08	60.67	51.06
2	100	140	1600	80	39.30	17.36	60.70	72.35	50.74
3	140	200	1800	100	43.72	19.69	56.28	74.81	50.71
4	180	260	2000	120	44.64	20.29	55.36	74.75	50.44
5	220	320	2200	140	45.44	20.50	54.56	75.45	50.48
6	260	380	2400	160	51.49	23.20	48.51	79.77	50.64

从表2试验结果可以看出，较优浮选工艺条件为：捕收剂用量为60 g/t，起泡剂用量为80 g/t，转子转速为1400 r/min，矿浆固体浓度为60 g/L。浮选结果为，精煤产率为19.92%，灰分为12.42%，浮选尾煤产率为80.08%，灰分为60.67%。精煤产率较低，而浮选尾煤灰分仅比计算入料灰分高9.61个百分点。

在该实验中，由于经验不足，因素水平选择不当，或4个水平搭配不尽合理，获得的优化条件，并不是优化条件。

3.2 多因素逐项实验法

根据初步经验实验结果，确定多因素逐项实验的4个因素水平（见表3）。

表3 多因素逐项实验因素水平
Table 3 Factors and levels of multi -factors test

水平	因素			
	捕收剂 (g·t ⁻¹)	起泡剂 (g·t ⁻¹)	转速 (r·min ⁻¹)	浓度 (g·L ⁻¹)
1	30	60	1600	60
2	60	80	1800	80
3	90	100	2000	100
4	120	120	2200	120

在捕收剂用量实验中，捕收剂用量变化，而起泡剂用量、转子转速和矿浆固体浓度固定，找

出较佳捕收剂用量。在起泡剂用量实验中，起泡剂用量变化，而捕收剂用量、转子转速和矿浆固

体浓度固定，找出起泡剂较佳用量。依次对 4 个因素的 4 个水平进行 16 次实验。实验结果见表 4。

表 4 多因素逐项实验结果
Table 4 Results of multi-factors test

实验号	捕收剂 (g·t ⁻¹)	起泡剂 (g·t ⁻¹)	转速 (r·min ⁻¹)	浓度 (g·L ⁻¹)	浮选精煤 /%		浮选尾煤 /%		计算入料灰分 /%
					产率	灰分	产率	灰分	
1	30				26.59	12.09	73.41	63.78	50.04
2	60				24.62	11.57	75.38	61.68	49.57
3	90	80	1800	60	31.70	13.15	68.30	66.33	49.47
4	120				28.46	13.01	71.54	64.38	49.76
5		60			23.18	11.36	76.82	62.82	50.89
6		80			24.62	11.57	75.38	61.68	49.57
7	60	100	1800	60	34.56	15.54	65.44	68.52	50.21
8		120			37.73	16.01	62.27	70.74	50.09
9			1600		21.75	11.54	78.25	61.28	50.46
10			1800		24.62	11.57	75.38	61.68	49.57
11	60	80	2000	60	23.17	12.11	76.83	60.46	49.26
12			2200		22.53	12.10	77.47	59.84	49.08
13				60	24.62	11.57	75.38	61.68	49.57
14				80	22.83	11.70	77.17	60.96	49.72
15	60	80	1800	100	12.58	12.61	87.42	56.38	50.87
16				120	11.78	12.80	88.22	55.55	50.42

浮选精煤产率与灰分随捕收剂用量、起泡剂用量、转子转速和矿浆浓度的变化趋势见图 1 ~ 4。

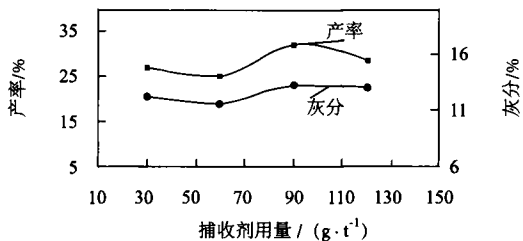


图 1 浮选精煤产率与灰分随捕收剂用量的变化趋势
Fig. 1 Trend of flotation clean coal yield and ash content with the amount of collector

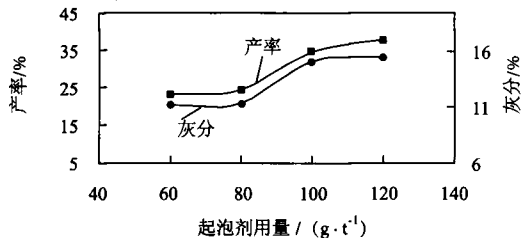


图 2 浮选精煤产率与灰分随起泡剂用量的变化趋势
Fig. 2 Trend of flotation clean coal yield and ash content with the amount of foaming agent

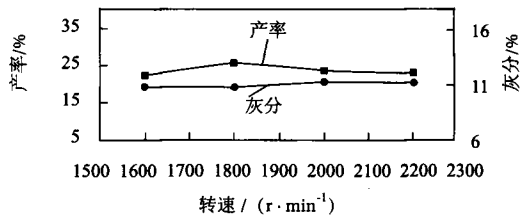


图 3 浮选精煤产率与灰分随转速的变化趋势
Fig. 3 Trend of flotation clean coal yield and ash content with rotating speed

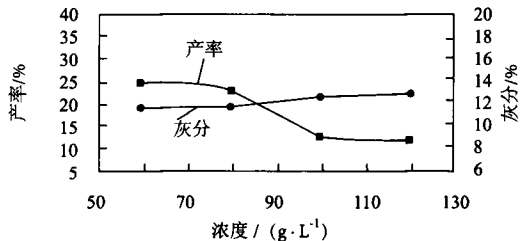


图 4 浮选精煤产率与灰分随矿浆浓度的变化趋势
Fig. 4 Trend of flotation clean coal yield and ash content with slurry concentration

由图 1 可知，精煤产率与灰分均随捕收剂用量的增加，呈现先减后增再减的趋势，这说明捕收剂的选择性较差。由图 2 可知，随着起泡剂用量的增加，精煤的产率与灰分均呈现上升的趋势；当起泡剂用量由 60 g/t 增加到 80 g/t 时，精煤的产

率与灰分均缓慢增长；当起泡剂用量由 80 g/L 增加到 100 g/t 时，精煤的产率与灰分均快速增长；当起泡剂用量超过 100 g/L 后，浮选精煤的产率与灰分均又呈现缓慢增长的趋势。因此，根据对精煤灰分的实际需要，当起泡剂用量在 80 g/t 左右时，控制起泡剂的用量很关键。由图 3 可知，随着转子转速的增加，精煤灰分变化不大，精煤产率在 1800 r/min 时产率最高。由图 4 可知，随着矿浆浓度的增加，精煤的产率呈下降趋势，而灰分稍增加，但增加不大。

由此可知较优浮选工艺条件为：捕收剂用量 60 g/t，起泡剂用量 80 g/t，转子转速 1800 r/min，矿浆固体浓度为 60 g/L。浮选结果为：精煤产率为 24.62%，灰分为 11.57%，浮选尾煤产率为 75.38%，灰分为 61.68%。

3.3 正交实验法

根据多因素逐项实验的结果，确定煤泥浮选正交实验中 4 个因素的水平见表 5，实验结果见表 6。

表 5 正交实验因素水平
Table 5 Factors and levels of orthogonal test

水平	因素			
	捕收剂 /(g·t ⁻¹)	起泡剂 /(g·t ⁻¹)	转速 /(r·min ⁻¹)	浓度 /(g·L ⁻¹)
1	30	60	1600	60
2	60	80	1800	80
3	90	100	2000	100

表 6 煤泥浮选正交实验结果

Table 6 Results of orthogonal test for coal slime flotation

实验号	浮选精煤 /%		浮选尾煤 /%		计算入料 灰分 /%
	产率	灰分	产率	灰分	
1	15.92	10.82	84.08	58.51	50.92
2	37.38	15.54	62.62	70.67	50.06
3	40.29	16.56	59.71	74.39	51.09
4	33.94	14.59	66.06	70.08	51.25
5	31.45	13.45	68.55	67.65	50.60
6	34.00	16.09	66.00	69.35	51.24
7	26.36	12.46	73.64	63.82	50.28
8	36.48	16.41	63.52	71.71	51.54
9	33.40	15.69	66.60	69.67	51.64

由实验结果可知，浮选精煤灰分差距较大，不适合根据可燃体回收率、浮选完善指标和精煤

产率等指标评价浮选结果，故选用精煤灰分对实验结果进行评价，结果见表 7。

表 7 煤泥浮选正交实验分析
Table 7 Analysis of orthogonal test coal slime flotation

实验号	捕收剂 用量 /(g·t ⁻¹)	起泡剂 用量 /(g·t ⁻¹)	转速 /(r·min ⁻¹)	浓度 /(g·L ⁻¹)	浮选精煤 灰分 /%
1	30	60	1600	60	10.82
2	30	80	1800	80	15.54
3	30	100	2000	100	16.56
4	60	60	1800	100	14.59
5	60	80	2000	60	13.45
6	60	100	1600	80	16.09
7	90	60	2000	80	12.46
8	90	80	1600	100	16.41
9	90	100	1800	60	15.69
K1	42.92	37.87	43.32	39.96	
K2	44.13	45.4	45.82	44.09	
K3	44.56	48.34	42.47	47.56	
极差	1.64	10.47	3.35	7.60	
主次 顺序	起泡剂用量 > 矿浆固体浓度 > 叶轮转速 > 捕收剂用量				
较佳 水平	30	60	1800	60	
最优 条件	90	60	2000	80	

各因素的主次顺序为起泡剂用量 > 矿浆浓度 > 叶轮转速 > 捕收剂用量；较优浮选条件为起泡剂用量 90 g/t、捕收剂用量 60 g/t、矿浆固体浓度 80 g/L 和叶轮转速 2000 r/min。获得的浮选指标为，浮选精煤产率为 26.36%，灰分为 12.46%，浮选尾煤产率为 73.64%，灰分为 63.82%。

4 结 论

(1) 经验实验由于经验不足未能找到煤泥浮选的较优条件，而多因素逐项实验与正交实验均能获得煤泥浮选的较优条件。但是前者进行了 16 次实验，后者只进行了 9 次实验，而且还确定了 4 个因素的主次关系。由此可知正交实验设计在优化浮选实验条件中具有一定的优势。

(2) 煤泥浮选多因素逐项实验获得的较优浮选工艺条件为捕收剂用量 60 g/t、起泡剂用量 80 g/t、叶轮转子转速 1800 r/min、矿浆固体浓度 60 g/L。浮选精煤产率 24.62%、灰分 11.57%，浮选

尾煤产率 75.38%、灰分 61.68%。

(3) 煤泥浮选正交实验获得的较优浮选条件为: 起泡剂用量 90 g/t、捕收剂用量 60 g/t、矿浆固体浓度 80 g/L、叶轮转速 2000 r/min。浮选精煤产率为 26.36%, 灰分为 12.46%, 浮选尾煤产率为 73.64%, 灰分为 63.82%。各因素的主次顺序为起泡剂用量 > 矿浆固体浓度 > 叶轮转速 > 捕收剂用量。

参考文献:

- [1] 姜亚伟. 高灰煤泥浮选回收工艺探索 [J]. 现代矿业, 2019(7): 191-192.
- JIANG Y W. Exploration on flotation recovery technology of high ash slime [J]. Modern Mining Industry, 2019(7): 191-192.
- [2] 陈鹏, 王成勇, 石开仪, 等. 基于正交试验设计的煤泥浮选工艺试验研究 [J]. 工矿自动化, 2019, 45(2): 94-98.
- CHEN P, WANG C Y, SHI K Y, et al. Experimental study on coal slime flotation technology based on orthogonal test design [J]. Industrial and Mining Automation, 2019, 45(2): 94-98.
- [3] 荣国强, 吴迪, 张友飞, 等. 高灰难选煤泥浮选降灰试验研究 [J]. 选煤技术, 2018, 271(6): 61-65.
- RONG G Q, WU D, ZHANG Y F, et al. Experimental study on ash reduction in flotation of high-ash refractory coal slime [J]. Coal Preparation Technology, 2018, 271(6): 61-65.
- [4] 胡忠波, 任祥军, 戴昭斌, 等. 开滦难选煤泥的煤质特性及其浮选工艺探究 [J]. 矿产综合利用, 2018(2): 81-85+51.
- HU Z B, REN X J, DAI Z B, et al. Research on coal quality characteristics and Flotation Technology of Refractory coal slime in Kailuan [J]. Comprehensive Utilization of Mineral Resources, 2018(2): 81-85+51.
- [5] 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. Research on the promotion effect of non-ionic surfactant on the flotation of high ash fine Particles and difficult to float coal slime [J]. Comprehensive Mineral Utilization, 2018(4): 96-100.
- [6] 朱志波, 徐东方, 陈慧昀, 等. 硅酸钠对高灰煤泥浮选影响研究 [J]. 中国煤炭, 2017(5): 94-98.
- ZHU Z B, XU D F, CHEN H Y, et al. Effect of sodium silicate on flotation of high ash slime [J]. China Coal, 2017(5): 94-98.
- [7] 赵文婷, 郭坤, 李志红, 等. 无机磷酸盐对高灰煤泥浮选的作用研究 [J]. 煤炭技术, 2016, 35(10): 310-313.
- ZHAO W T, GUO K, LI Z H, et al. Effect of inorganic phosphate on flotation of high ash slime [J]. Coal Technology, 2016, 35(10): 310-313.
- [8] 曹明强, 王怀法. 聚苯乙烯纳米粒子作为浮选捕收剂的试验研究 [J]. 矿产综合利用, 2017(4): 46-51.
- CAO M Q, WANG H F. Experimental study on polystyrene nanoparticles as flotation collectors [J]. Comprehensive Utilization of Mineral Resources, 2017(4): 46-51.
- [9] 张迟强. 充气旋流浮选柱充气性能对煤泥粒度影响研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
- ZHANG C Q. Study on the influence of aeration performance of cyclone filled flotation column on coal slime particle size [D]. Xuzhou, Beijing: China University of Mining and Technology, 2017.
- [10] 药靖晖, 杨润全, 王怀法. 叶轮转速对粗粒浮选机分选动力煤的影响 [J]. 矿产综合利用, 2019(4): 153-156.
- YAO J H, YANG R Q, WANG H F. Influence of impeller speed on the separation of steam coal by coarse particle flotation machine [J]. Comprehensive Utilization of Minerals, 2019(4): 153-156.
- [11] 赵敏捷, 方建军, 李国栋, 等. 旋流-静态微泡浮选柱的应用及研究进展 [J]. 矿产综合利用, 2016(4): 6-10.
- ZHAO M J, FANG J J, LI G D, et al. Application and research progress of hydrocyclone - static micro-bubble flotation column [J]. Comprehensive Utilization of Mineral Resources, 2016(4): 6-10.
- [12] 张贤贤, 张羽末, 吴朝荡, 等. 中国喷射式浮选机与美国浮选柱在桑德斯选煤厂应用效果对比 [J]. 选煤技术, 2018(2): 37-44.
- ZHANG X X, ZHANG Y M, WU Z D, et al. Comparison of application effects of Chinese jet flotation machine and American flotation column in sanders coal preparation plant [J]. Coal preparation Technology, 2018(2): 37-44.
- [13] 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.

(下转 56 页)

Current Status and Prospects of Emission Reduction Technology for Gaseous Pollutants in Sintering Flue Gas

Yang Guang¹, Zhang Shuhui¹, Yang Yanshuang²

(1. School of Metallurgy and Energy, North China University of Technology, Tangshan, Hebei, China; 2. School of Management, North China University of Technology, Tangshan, Hebei, China)

Abstract: The sintering process, an important section of the blast furnace ironmaking process, is also one of the most prominent sections of environmental pollution in the steel production process. A large amount of gaseous pollutants, such as SO₂, NO_x and dioxin, which were generated during the sintering process could seriously threaten the human beings and the environment. Based on the current environmental protection treatment of sintering process, this paper focuses on analyzing the causes of gaseous pollutants (SO₂, NO_x and dioxin) in sintering flue gas. The technique principles and methods to be commonly used to remove the above pollutants are reviewed in combination with engineering examples. And the technologies for removing pollutants from the sintering flue gas have been prospected. It is pointed out that the reasonable utilization of desulfurization gypsum should be developed. The comprehensive treatment technology of SO₂, NO_x and dioxin in sintering flue gas and the improvement of adsorption capacity of activated carbon or activated coke should be explored further. The control of sintering sources and processes should be strengthened, and combining the existing terminal treatment to achieve ultra-low emission of sintering flue gas is the direction of future efforts to reduce gaseous pollutants in sintering flue gas.

Keywords: Sintering flue gas; Emission reduction technology; Sulfur dioxide; Nitrogen oxides; Dioxin; Desulfurization and denitrification

////////////////////////////////////
(上接 76 页)

The Application of Different Experimental Design Method in the Flotation Optimization Experiments of High Ash Coal Slime

Xie Caixiu, Zhang Yongju, Long Tao, Chen Peng, Shi Kaiyi, Wang Chengyong

(School of Chemistry and Materials Engineering, Liupanshui Normal University, Liupanshui, Guizhou, China)

Abstract: The empirical design, multi factor design and orthogonal design were used to optimize flotation condition of high ash coal slime flotation in guizhou. It shows that the minimum ash content of flotation clean coal was 12.42% and the yield was 19.92% in the uniform experiment; the optimal flotation conditions are as follows: the amount of collector was 60 g/t, the amount of foaming agent was 80 g/t, the rotor speed was 1800 r/min, the concentration was 60 g/L, the yield of flotation clean coal was 24.62%, the ash content was 11.57%, the yield of flotation tail coal was 75.38%, the ash content was 61.68%, and the optimum flotation conditions were 90 g/t of foaming agent, 60 g/T of collector, 80 g/L of concentration, 2000 r/min of rotation speed, 26.36% of flotation clean coal, 12.46% of ash, 73.64% of flotation tail coal yield and 63.82% of ash in the orthogonal experiment. The optimum conditions of coal slime flotation were obtained by multi factor experiment and orthogonal experiment.

Keywords: High ash coal slime; Flotation; Empirical design; Multi factor design; Orthogonal design