

磁种絮凝处理煤泥水的优化选择

吕玉庭¹,赵丽颖²,杨强³,刘慧莹¹

(1. 黑龙江科技大学 矿业工程学院,黑龙江 哈尔滨 150022;2. 吉林省黄金管理局,吉林 长春 130000;
3. 黑龙江龙煤矿业控股集团有限责任公司 鹤岗分公司,黑龙江 鹤岗 154100)

摘要:为考察磁种絮凝对煤泥水沉降效果的影响程度,以磁种絮凝沉降速度(v)和上清液浊度(TU)为评价指标,采用三因素(磁场强度、磁种用量、聚丙烯酰胺 PAM 用量)、三水平的正交试验,利用自制的磁絮凝沉降管进行絮凝沉降优化试验。结果表明,各因素对煤泥水絮凝沉降速度和上清液浊度影响程度由大到小依次为:PAM 用量、磁种用量、磁场强度。对试验数据进行回归拟合,获得沉降速度和上清液浊度的回归方程。预测最优结果为:磁场强度 0.25 T,磁种用量 0.36 g/L,PAM 用量 29 g/t,沉降速度和上清液浊度分别为 10.44 mm/s 和 33.71 NTU。沉降速度和上清液浊度拟合方程的相关性系数(R^2)与显著性(P 值)分别为 0.938、0.011 和 0.933、0.013,回归方程显著性检验均达到显著水平($P < 0.05$),利用回归方程预测的最优结果与实测结果十分接近。

关键词:煤泥水;磁种;磁场强度;沉降速度;浊度

中图分类号:TD94 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2016)02-0009-05

Optimal selection of magnetic seeds flocculation treatment of slime water

LYU Yuting¹, ZHAO Liying², YANG Qiang³, LIU Huiying¹

(1. College of Mineral Engineering, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin 150022, China; 2. Jilin Province Administration of Gold, Changchun 130000, China; 3. Hegang Branch of Dragon Mining Group Co., Ltd., Hegang 154100, China)

Abstract: To study the magnetic flocculation effects of slime water deposition, using self-made flocculation sedimentation pipe, in magnetic flocculation setting velocity (v) and supernatant turbidity (TU) as evaluation index, the orthogonal test of three factors magnetic field intensity, the dosage of magnetic flocculating seeds, the dosage of PAM and three levels for optimization selection was carried out. The results showed that, the influencing factors from the biggest to the smallest were the dosage of PAM, the dosage of magnetic flocculating seeds, magnetic field intensity. The setting velocity and turbidity supernatant fluid regression equations were established by regressing data of experiment. The experimental results were predicted by two regression equations. The optimal results showed that the magnetic field intensity was 0.25 T, the dosage of magnetic flocculating seeds was 0.36 g/L, the dosage of PAM was 29 g/t, and the setting velocity and turbidity supernatant fluid were 10.44 mm/s and 33.71 NTU, respectively. The correlation coefficients (R^2) and significance levels (P) of the two regression equations respectively were 0.938, 0.011 and 0.933, 0.013, and the significance test had reached significant level ($P < 0.05$). The predictions by the regression equations were close to the measuring results.

Key words: slime water; magnetic flocculating seeds; magnetic field density; setting velocity; turbidity

0 引言

磁种絮凝方法是一项新兴、高效的分离方法,通过向煤浆中投加磁性粒子(磁种),使磁性粒子选择

性地作用于煤浆中矿物表面上,从而使目的矿物带有磁性或提高目的矿物表面的磁性,在高梯度磁场的作用下,实现矿物相互分离。目前该方法已在工业废水处理、城市污水净化等领域得到了较广泛的

收稿日期:2015-01-01;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2016.02.003

基金项目:黑龙江省教育厅科学技术研究面上项目(12541692)

作者简介:吕玉庭(1971—),男,山东曹县人,教授,硕士,研究方向为燃前煤炭加工技术。E-mail:mynameyt@sina.com

引用格式:吕玉庭,赵丽颖,杨强,等.磁种絮凝处理煤泥水的优化选择[J].洁净煤技术,2016,22(2):9-13.

LYU Yuting, ZHAO Liying, YANG Qiang, et al. Optimal selection of magnetic seeds flocculation treatment of slime water[J]. Clean Coal Technology, 2016, 22(2): 9-13.

应用。崔丽娜等^[1]用磁种絮凝法处理化学需氧量 COD_{Cr} 为 3 232 mg/L、浊度为 435 NTU 的猪场废水,结果表明,聚合氯化铝 PAC 加入量 0.75 g/L,磁种用量 1.5 g/L,聚丙烯酰胺 PAM 加入量 16 mg/L,搅拌速度 300 r/min 为最佳工艺条件。孙水裕等^[2]用磁种凝聚磁分离技术处理含 Ni²⁺ 电镀废水, Ni²⁺ 去除率达到 99%,出水达到国家排放标准。王龙贵^[3]将从粉煤灰中回收的磁珠与混凝剂结合,在高梯度磁分离器作用下处理含磷废水,磷去除率达到 90% 以上。雷国元^[4]、潘涌璋等^[5-6]曾在实验室采用磁种和磁处理技术处理废水中重金属离子、放射性污染物、有机物、乳化油等,都得到了较好的处理效果。磁处理技术用于煤炭工业方面研究较少,研究多集中于利用磁场强化浮选等环节的处理效果^[7-9]和矿井水絮凝处理^[10-12]。磁种絮凝法在非煤矿物选择性分选应用较多,在浓度相对较高的选煤循环水净化工艺中的应用还较少。因此,笔者以煤泥水磁种絮凝单因素试验^[13-14]为依据,研究磁场强度、磁种用量、PAM 用量 3 个因素对煤泥水处理效果的影响,以期找到磁种絮凝最佳试验条件。

1 试 验

1.1 试验样品

试验样品选用哈尔滨市依兰选煤厂煤泥,对试样进行工业分析、粒度分析、X 射线衍射 (XRD)、X 射线荧光光谱分析 (XRF) 测试,发现该试样灰分达到 50.26%,累积 50% 平均粒径 D_{50} 为 73.33 μm ,煤泥粒度较细,煤泥中含有大量高岭石、蒙脱石等易泥化矿物质。试验用水选用自来水。考虑到生产实际,煤泥水配制浓度为 40 g/L。

1.2 试验装置

试验选用自制容积为 250 mL、截面为正方形、高为 300 mm 的有机玻璃沉降管作为磁化装置。在沉降管两侧排布磁场强度、规格相同的条形永磁铁,在沉降管一侧标上刻度以便观测数据,通过改变两排永磁铁间的间距来调节磁化磁场强度。

1.3 试剂

试验以相对分子质量 1 000 万、质量浓度 1 g/L 的非离子型 PAM 溶液作为絮凝剂,絮凝剂用量为 10~30 g/t (t 为干煤泥量),即在 250 mL 沉降管中添加 0.1~0.3 mL PAM 溶液。选用选煤厂常用磁铁矿粉作为磁种,磁种用量为 0.4~0.6 g/L,即在 250 mL 煤泥水中投加 0.1~0.3 g 磁种。

1.4 试验方法

取 250 mL 质量浓度为 40 g/L 的煤泥水加入沉降管中,向煤泥水中投加磁种粒子,上下翻转均匀,倒入外壁两侧装有稀土永磁铁的沉降管中,根据 GB/T 26919—2011《选煤厂煤泥水自然沉降试验方法》进行煤泥水絮凝沉降试验。

1.5 正交试验设计

正交试验选择磁场强度、磁种用量、PAM 用量 3 个因素,根据单因素试验结果^[10],在最佳点附近选取 3 个水平,按照 $L_9(3^4)$ 正交表进行设计^[15],见表 1。

表 1 正交因素水平表

Table 1 Factors and levels of orthogonal table

水平	A	B	C
	磁场强度/T	磁种用量/g	PAM 用量/mL
1	0.15	0.1	0.1
2	0.20	0.2	0.2
3	0.25	0.3	0.3

2 结果与讨论

2.1 试验结果

根据正交因素水平表进行正交试验,研究各试验因素对煤泥水磁种絮凝沉降速度 (v) 和上清液浊度 (TU) 的影响,试验结果见表 2。

表 2 试验方案及结果

Table 2 Experiment program and results

编号	A	B	C	空列 D	$v/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	TU/NTU
1	1	1	1	1	5.33	267.70
2	1	2	2	2	7.00	219.70
3	1	3	3	3	8.52	88.51
4	2	1	2	3	7.75	113.70
5	2	2	3	1	5.91	182.30
6	2	3	1	2	6.77	165.50
7	3	1	3	2	10.38	73.87
8	3	2	1	3	4.77	339.10
9	3	3	2	1	7.96	129.90

2.2 直观分析

根据表 2 正交试验结果,对煤泥水的沉降速度和上清液浊度进行平均值 (K_i)、极差 (R) 分析,结果见表 3、图 1。

由表 3 和图 1 可初步确定磁种絮凝对煤泥水絮

凝沉降速度的影响最优方案是 $A_3B_1C_3$;磁种絮凝对煤泥水上清液浊度的影响最优方案是 $A_2B_3C_3$ 。从极差分析,可看出三因素对絮凝沉降速度影响程度为:PAM用量>磁种用量>磁场强度。

表3 试验结果分析

Table 3 Experiment data analysis

指标	参数	A	B	C	空列 D
$v/(mm \cdot s^{-1})$	K_1	6.95	7.82	5.62	6.40
	K_2	6.81	5.89	7.57	8.05
	K_3	7.70	7.75	8.27	7.01
	R	0.89	1.93	2.65	1.65
TU/NTU	K_1	191.97	151.76	257.43	193.30
	K_2	153.83	247.03	154.43	153.02
	K_3	180.96	127.97	114.89	180.44
	R	38.14	119.06	142.54	40.28

在影响相对较显著的2个因素中,磁种用量对沉降速度和上清液浊度的影响呈现一个波谷波峰状,在预先设定的磁种用量水平中,中等水平最差。这可能是因为试验样品是粒度较细的煤泥,絮凝过程中粗颗粒形成的絮凝核心较少,磁种起到了絮凝核心的作用。在磁场作用下,絮团尺寸随着磁种用量增加而增大。从前期所做试验样品絮团的显微镜照片可以看出,不加PAM时,在磁场作用下,随着磁

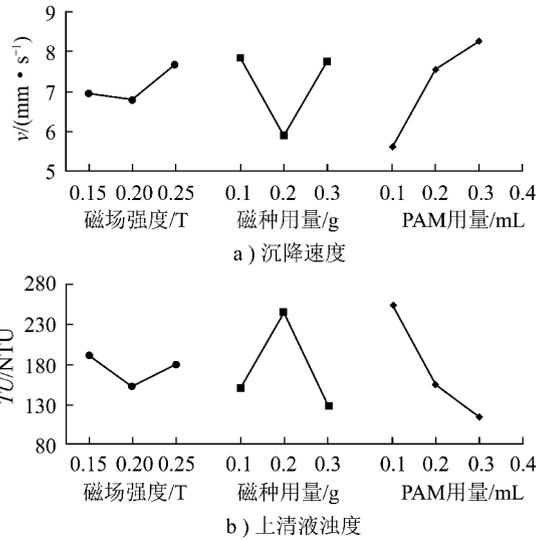


图1 因素水平与各指标的关系

Fig. 1 Relations between factor and index

种用量增加,形成的絮团逐渐增大。受沉降管边壁影响,磁种用量中等水平时,絮团沉降容易受沉降管边壁和磁场吸引的影响而降低沉降速度^[14],沉降速度的变化也直接影响了上清液浊度。PAM用量越多,煤泥水絮团越大且松散,沉降速度也就越快^[16]。

2.3 极差和方差分析

将正交试验中各因素水平输入 SPSS 软件中,运行 SPSS 软件中单因素方差分析程序后,得到的分析结果见表4。

表4 方差分析

Table 4 Variance analysis

变异来源	因变量	偏差平方和	自由度	均方	F分布
A	$v/(mm \cdot s^{-1})$	1.385	2	0.693	0.332
	TU/NTU	2311.374	2	1155.687	0.910
B	$v/(mm \cdot s^{-1})$	7.164	2	3.582	1.717
	TU/NTU	23819.526	2	11909.763	9.381
C	$v/(mm \cdot s^{-1})$	11.284	2	5.642	2.704
	TU/NTU	32490.063	2	16245.032	12.796
误差	$v/(mm \cdot s^{-1}) \cdot s^{-1}$	4.173	2	2.087	—
	TU/NTU	2539.166	2	1269.583	—
合计	$v/(mm \cdot s^{-1})$	484.682	9	—	—
	TU/NTU	338636.227	9	—	—
矫正合计	$v/(mm \cdot s^{-1})$	24.007	8	—	—
	TU/NTU	61160.129	8	—	—

极差大小反映各因素对试验指标影响的主次

关系,极差大说明因素对试验指标有重要影响,反

之,则影响小;方差分析能定量表示各因素对试验指标的影响程度。由表3、表4可知,对煤泥水絮凝沉降指标影响程度由小到大分别为:磁场强度<磁种用量<PAM用量。磁场强度、磁种用量、PAM用量对沉降速度影响较小,对上清液浊度的影响较大。

在磁种强化PAM絮凝沉降试验过程中,磁场强度对沉降速度和上清液浊度的影响极差分别为0.89和38.14,均小于误差空列的1.65和40.28,说明磁场强度影响较弱。磁种用量和PAM用量对沉降速度和上清液浊度的影响极差分别为1.93、2.65和119.06、142.54,影响比较显著。

2.4 平衡分析与回归预测

由于不同指标对应的优化方案不相同,需对优化方案进行分析,运用综合平衡法对不同指标所对应的优化方案平衡过程如下:

1)煤泥水沉降速度取水平 A_2 、 A_3 相差很大,煤泥水上清液浊度取水平 A_2 、 A_3 相差结果相对较小,因素A对沉降速度和上清液浊度的影响程度相同,因而选取 A_3 为最优水平。

2)煤泥水沉降速度和上清液浊度分别取水平 B_1 、 B_3 相差结果不大,且因素B对沉降速度和上清液浊度的影响程度相同,考虑到节约成本,选取 B_1 为最优水平。

3)对于煤泥水沉降速度和上清液浊度来说,都以 C_3 为最佳水平,所以取 C_3 为最优水平。

综合上述正交试验结果对煤泥水絮凝沉降速率和上清液浊度的平衡分析结果,得出磁种絮凝的最优试验方案为 $A_3B_1C_3$,即磁场强度为0.25 T,磁种用量为0.1 g(0.4 g/L),PAM用量为0.3 mL(折算量为每吨干煤泥用量30 g)。该结果与表2中最优试验组合相同。

单因素平衡法分析没有考虑因素之间的交互影响,且因素水平仅能在预先拟定水平内确定。利用方程回归法对试验数据进行拟合,获得了三因素对于沉降速度和上清液浊度影响的回归方程,回归拟合方程考虑三因素之间的交互作用,回归方程如下

沉降速度回归方程:

$$v = 5.093 + 132.385B^2 - 113.343C^2 - 233.985AB + 263.293AC$$

上清液浊度回归方程:

$$TU = 281.522 - 6729.951B^2 + 4855.039C^2 + 11346.2AB - 11807.199AC$$

沉降速度和上清液浊度的拟合方程的拟合 R^2 与方程拟合显著性 P 值分别为0.938、0.011和0.933、0.013,表明拟合度较好,方程显著。方程的常量和因变量的 P 值检验最大值为0.022,均小于0.05,回归方程检验为显著水平。从拟合方程的 P 值也可看出其交互影响的显著性,2个方程的 AB 和 AC 的 P 值分别为0.007、0.004和0.009和0.007,均为 $P < 0.01$ 的非常显著水平。其中磁场强度与PAM用量的交互作用显著,在一定程度上说明外加磁场有促进细煤泥絮团相互聚集的作用。

利用沉降速度回归方程和上清液浊度回归方程进行数据的拟合预测,预测结果为:磁场强度为0.25 T,磁种用量为0.09 g(0.36 g/L),PAM用量为0.29 mL(折算量为每吨干煤泥用量29 g)。各因素最优水平预测的沉降速度和上清液浊度分别为10.44 mm/s和33.71 NTU。回归方程预测结果与正交分析结果十分接近,说明利用回归方程拟合分析方法可以更好地进行试验因素的最优值预测。

磁场强度继续增强,絮凝沉降指标均变好。磁种用量继续增加,沉降速度降低但变化幅度不大,而上清液浊度增加,当磁种用量超过0.22 g后,浊度逐渐下降。这是由于磁种用量增加影响了絮团速度,磁种用量增大到一定量后,虽然絮团沉降速度增加不大,但絮团紧密程度增大,减少了澄清水层中游离的纳米级超细煤泥数量。当PAM用量继续增加,超过0.29 mL后,沉降速度开始降低,超过0.3 mL后,上清液浊度开始增加,过量的PAM药剂使得絮团开始结构化,影响絮凝沉降效果。

3 结 论

1)在磁种强化煤泥水磁絮凝沉降试验基础上,以磁种絮凝沉降速度(v)和上清液浊度(TU)为评价指标,利用正交试验对磁种絮凝过程中的磁场强度、磁种用量和PAM用量进行优化,并利用SPSS软件进行了方差分析和方程回归分析。试验结果显示磁种磁化絮凝对煤泥水沉降效果有显著影响。

2)正交试验结果表明,当磁场强度为0.25 T,磁种用量为0.1 g(0.4 g/L),PAM投加量为0.3 mL(折算量为每吨干煤泥用量30 g)时,煤泥水絮凝沉降速度达到10.38 mm/s,煤泥水上清液浊度降至73.87 NTU,煤泥水的絮凝沉降效果最优。各因素对煤泥水絮凝沉降指标影响程度由小到大依次为:

磁场强度、磁种用量、PAM用量。

3)利用回归拟合方程进行预测,预测最优结果为:磁场强度为0.25 T,磁种用量为0.09 g(0.36 g/L),PAM投加量为0.29 mL(折算量为每吨干煤泥用量29 g)。回归方程预测结果与正交分析结果十分接近。沉降速度和上清液浊度的方程拟合 R^2 与 P 值分别为0.938、0.011和0.933、0.013,表明拟合度较好,回归方程检验为显著水平。拟合方程表明磁场强度与磁种用量及PAM用量之间有较强的交互影响。利用回归模型方程进行絮凝沉降结果和各因素最优指标的预测,能很好地满足预测精度要求。

参考文献:

- [1] 崔丽娜,王克科,王岩.磁絮凝法处理规模化猪场废水的实验研究[J].工业安全与环保,2010,36(5):3-4.
Cui Li'na, Wang Keke, Wang Yan. Experimental study on large scale of piggery wastewater by magnetic flocculation[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2010, 36(5): 3-4.
- [2] 孙水裕,张俊浩,刘炳基,等.磁种凝聚-磁分离技术处理含 Ni^{2+} 电镀废水的研究[J].环境工程,2002,20(4):17-19.
Sun Shuiyu, Zhang Junhao, Liu Bingji, et al. Research on treatment of Ni^{2+} bearing electroplating wastewater by magnetic particle coagulation-magnetic separation[J]. Environmental Engineering, 2002, 20(4): 17-19.
- [3] 王贵龙.粉煤灰中磁珠的回收及用于含磷废水的处理[J].粉煤灰综合利用,1999(1):21-22.
Wang Guilong. Magnetic beads in the recycling of fly ash and used in the phosphorus wastewater treatment[J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 1999(1): 21-22.
- [4] 雷国元.磁种和磁处理技术在废水处理中的应用[J].上海环境科学,1997,16(11):24-27.
Lei Guoyuan. Application of magnetic seeding-magnetic treatment technique to wastewater treatment[J]. Shanghai Environmental Sciences, 1997, 16(11): 24-27.
- [5] 潘涌璋,梁瑛瑜.磁种-磁滤技术处理污染河水的试验研究[J].四川环境,2005,24(2):15-17.
Pan Yongzhang, Liang Yingyu. Experimental study on treatment of water from polluted rivers by magnetic seed-magnetic filtration[J]. Sichuan Environment, 2005, 24(2): 15-17.
- [6] 潘涌璋,谢晓敏.磁种-磁滤法在洗车废水回用处理的研究[J].净水技术,2005,24(4):15-17.
Pan Yongzhang, Xie Xiaomin. Study on car washing effluent treatment for reuse by magnetic seed magnetic filtration[J]. Water Purification Technology, 2005, 24(4): 15-17.
- [7] 边炳鑫,陈清如,韦鲁滨.浮选矿浆的磁化处理效应和机理研究[J].煤炭学报,2004,29(1):97-100.
Bian Bingxin, Chen Qingru, Wei Lubin. Study on flotation pulp's magnetization effect and mechanism[J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(1): 97-100.
- [8] 边炳鑫,陈清如,韦鲁滨.药剂磁化处理对煤泥浮选效果影响的研究[J].中国矿业大学学报,2004,33(3):343-346.
Bian Bingxin, Chen Qingru, Wei Lubin. Research on coal slime flotation using magnetized agents[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 33(3): 343-346.
- [9] 黄文豪,沈强华,陈雯,等.细粒煤浮选磁选联合脱灰脱铁试验研究[J].洁净煤技术,2014,20(5):44-48.
Huang Wenhao, Shen Qianghua, Chen Wen, et al. Fine coal deashing and deferrization with flotation and magnetic separation combined process[J]. Clean Coal Technology, 2014, 20(5): 44-48.
- [10] 李哲,刘凤娟.磁场强化混凝处理矿井水[J].黑龙江科技学院学报,2012,22(6):581-584.
Li Zhe, Liu Fengjuan. Magnetic field strengthening coagulation treatment of mine water[J]. Journal of Heilongjiang Institute of Science and Technology, 2012, 22(6): 581-584.
- [11] 倪鸿,周勉,易洋.矿井水处理新技术:ReCoMagTM超磁分离水体净化系统[J].金属矿山,2009,11(S1):789-792.
Ni Hong, Zhou Mian, Yi Yang. A new technology of mine water treatment-ReCoMagTM ultra-magnetic separating & purifying system for water treatment[J]. Metal Mine, 2009, 11(S1): 789-792.
- [12] 刘红丽,崔东锋.重介质加载磁分离矿井水净化技术在亭南煤矿的应用[J].能源环境保护,2014,28(5):34-36.
Liu Hongli, Cui Dongfeng. Application of heavy medium loaded magnetic separation for mine drainage water purification technology in tingnan coal mine[J]. Energy Environmental Protection, 2014, 28(5): 34-36.
- [13] 吕玉庭,赵丽颖,时起磊.磁场对煤泥水絮凝沉降效果的影响[J].黑龙江科技学院学报,2013,23(5):424-426.
Lyu Yuting, Zhao Liying, Shi Qilei. Effects of magnetic field on flocculating sedimentation of slime-water[J]. Journal of Heilongjiang Institute of Science and Technology, 2013, 23(5): 424-426.
- [14] 吕玉庭,赵丽颖,杨强.磁种絮凝对煤泥水沉降效果的影响[J].黑龙江科技大学学报,2014,24(2):153-156.
Lyu Yuting, Zhao Liying, Yang Qiang. Effects of magnetic seeds flocculating on slime-water sedimentation[J]. Journal of Heilongjiang University of Science and Technology, 2014, 24(2): 153-156.
- [15] 邱轶兵.试验设计与数据处理[M].合肥:中国科学技术出版社,2008.
Qiu Yibing. Experimental design and data processing[M]. Hefei: Science and Technology of China Press, 2008.
- [16] 赵丽颖.磁处理强化煤泥水絮凝沉降试验研究[D].哈尔滨:黑龙江科技大学,2014:21-23.
Zhao Liying. Study on magnetic field intensify slime-water flocculation[D]. Harbin: Heilongjiang University of Science and Technology, 2014: 21-23.