



移动扫码阅读

刘芳池,戚凯,李向东. 粉煤灰加载絮凝处理煤矿矿井水的试验研究[J]. 能源环境保护, 2022, 36(1): 44-50.

LIU Fangchi, QI Kai, LI Xiangdong. Experimental study on optimization of fly ash loading flocculation treatment of coal mine water[J]. Energy Environmental Protection, 2022, 36(1): 44-50.

粉煤灰加载絮凝处理煤矿矿井水的试验研究

刘芳池, 戚 凯, 李向东

(中国矿业大学 环境与测绘学院, 江苏 徐州 221116)

摘要:利用粉煤灰作为加载材料,通过加载絮凝处理含悬浮物矿井水。在单因素试验的基础上,通过响应曲面法优化处理工艺,建立了以浊度去除率为响应值的预测函数,确定了粉煤灰加载絮凝试验的最佳反应条件。结果表明:当粉煤灰投加量为 2.0 g/L、絮凝剂 PAC 投加量为 22.8 mg/L、助凝剂 PAM 投加量为 0.5 mg/L 时,矿井水的 pH 值为 7.20,上清液浊度降低至 2.7 NTU,浊度去除率达到 99.27%,与预测值 99.45% 接近;验证试验与理论模型吻合,回归模型准确可靠;与传统絮凝相比,粉煤灰加载絮凝的药剂投加量较少,去除效率高,投加粉煤灰可调节矿井水 pH 值并促进絮凝过程;粉煤灰中的微量元素的浸出率较低,未对水体造成二次污染。

关键词:煤矿矿井水;粉煤灰;加载絮凝;响应曲面法

中图分类号:X703

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2022)01-0044-07

Experimental study on optimization of fly ash loading flocculation treatment of coal mine water

LIU Fangchi, QI Kai, LI Xiangdong

(School of Environmental Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Fly ash was used as loading material to treat coal mine water containing suspended solids by loading flocculation. Based on single factor test, response surface method was used to optimize the treatment process. A prediction function taking the removal rate of turbidity as response value was established. The optimum reaction conditions of fly ash loading flocculation were determined. The results showed that when the dosage of fly ash was 2.0 g/L, flocculant PAC was 22.8 mg/L and coagulant aid PAM was 0.5 mg/L, the pH of mine water was 7.20 and the turbidity of supernatant was reduced to 2.7 NTU. The removal rate of turbidity reached 99.27%, which was close to the predicted value of 99.45%. The validation test was consistent with the theoretical model, and the regression model was accurate and reliable. Compared with traditional flocculation, the reagent dosage of fly ash loading flocculation was less and the removal rate was higher. The addition of fly ash could adjust the pH value of mine water and promote the flocculation process. Moreover, the leaching rate of trace elements in fly ash was low and would not cause secondary pollution to water.

Key Words: Coal mine water; Fly ash; Loading flocculation; Response surface method

0 引 言

我国是全球第一大煤炭生产国和消费国,煤

炭开采过程中,外排出大量的矿井水^[1-2],对生态环境造成严重污染,需采取有效措施加以控制^[3]。目前,国内多采用化学混凝法处理矿井水,可有效

去除矿井水中的 COD 和悬浮物^[4],同时也存在矾花结构松散、沉降性能差、药剂种类及投加量不适用于待处理矿井水、混凝药剂易造成二次污染等问题。加载絮凝工艺是一种应用于水处理领域的快速絮凝沉淀技术,是基于常规混凝沉淀技术改进、发展而来,其处理效果优于传统的化学絮凝工艺,具有沉淀性能好、占地面积小等优点^[5-6]。常用的加载材料有回流污泥^[7]、细砂^[8]、磁性介质^[9]等,鲜有利用粉煤灰作为加载材料的相关研究。

据报道,我国现存粉煤灰的堆积量约为 25 亿吨^[10]。为实现粉煤灰资源化高效利用,目前已将其应用于农业、建筑材料等领域^[11]。以粉煤灰为加载材料处理矿井水可达到“以废治废”、资源综合利用的可持续发展要求。

在加载絮凝的基础上,可以通过响应面法将絮凝过程进行优化,以达到最佳处理效果^[12]。响应曲面法是一种综合实验设计与数学建模的统计学优化方法,已被应用于众多领域。该方法是由具有代表性的局部点试验结果,拟合得出全部范围内的影响因子与响应值的函数关系,进而得出最佳的工艺参数^[13-14]。较传统的正交实验设计方法,响应曲面法实验次数少且精密度高,并具有良好的预测性能,适用范围广泛。

本研究将粉煤灰作为加载絮凝工艺的加载材料应用于矿井水处理,在絮凝剂投加量、助凝剂投加量、粉煤灰粒径及投加量等单因素试验的基础上,通过响应曲面法优化处理工艺,旨在为粉煤灰加载絮凝工艺处理矿井水提供科学依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料与仪器

试验用水为某煤矿矿井水,其主要水质指标见表 1。粉煤灰取自某燃煤电厂,主要化学成分见表 2。

表 1 矿井水水质

Table 1 The water quality of mine water

指标	pH 值	浊度/ NTU	SS/ (mg · L ⁻¹)	Zate 电位/ mV	粒度分布/ μm
数值	6.30	370.0	152	-23.8	0.6~0.8

表 2 粉煤灰的成分及含量

Table 2 The composition and content of fly ash

化学 成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O
含量/ %	44.5	25.1	13.2	4.6	3.0	2.1	1.1	0.9	0.4

混凝剂为聚合氯化铝(PAC),配制成 10 g/L 的溶液;助凝剂为阴离子聚丙烯酰胺(PAM),分子量为 1 500 万,配制成 0.5 g/L 的溶液。

试验所用仪器:ZR4-6 混凝试验搅拌机;WZS-185 高浊度仪;PHS-3CA 型实验室酸度计;Zeta-sizer Nano ZS90 型激光粒度分析仪。

采用筛分法测定粉煤灰的粒径分布,结果如表 3 所示。BET 比表面积测试法测得粉煤灰的比表面积为 16.4 m²/g,平均孔径为 0.76 μm,孔容为 0.0 653 cm³/g。

表 3 粉煤灰粒径分布

Table 3 Partical size distribution of fly ash

粒径/μm	<45	46~75	76~105	106~125	125~150	>150
占比/%	8.5	37.5	32.7	7.1	8.8	5.4

1.2 试验设计

首先探究粉煤灰粒径和絮凝剂、助凝剂及粉煤灰投加量等因素对矿井水浊度去除效果的影响,并以此确定响应面试验中的因素及其水平。随后,运用 Design-Expert 8.0.6 软件对粉煤灰加载絮凝的试验结果进行拟合,建立相应的预测函数,再通过模型预测得出优化条件。最后,在该优化条件下进行试验,验证模型的准确度,对比常规絮凝与粉煤灰加载絮凝的处理效果,并通过浸泡试验探究粉煤灰对水体的污染。

1.3 试验方法

絮凝试验中,各取 1 000 mL 矿井水于若干烧杯中,根据试验方案加入絮凝剂、粉煤灰,以 300 r/min 搅拌 3 min,再投加助凝剂,以 50 r/min 搅拌 10 min,静置 15 min 后,于液面下 2 cm 处取上清液测定浊度,并计算去除率。每组试验重复三次取平均值。

浸泡实验中,根据《固体废物 浸出毒性浸出方法 水平振荡法》(HJ 557—2010),未筛分的粉煤灰与去离子水的固液比为 1 : 10,于室温下以 120 次/min 连续振荡 8 h,再静置 16 h,用中性滤纸过滤,所得滤液即为浸出液。通过电感耦合等离子体原子发射光谱、离子色谱法测定该溶液中微量元素的含量。

2 结果与讨论

2.1 单因素试验结果分析

2.1.1 粉煤灰粒径的影响

采用 100、120、140、200、325 目标标准筛将上述粉煤灰筛分至粒径大小分别为 46~75、76~105、106~125、126~150 μm。絮凝剂 PAC、助凝剂

PAM 投加量分别为 15 mg/L 和 0.2 mg/L。为对比不同粒径粉煤灰的处理效果,将上述四种粒径的粉煤灰分别以投加量 1 g/L 加入相应的水样中。试验结果见表 4。

表 4 粉煤灰粒径对矿井水浊度去除效果的影响

Table 4 Effect of particle size of fly ash on turbidity removal of mine water

粉煤灰粒径/ μm	46~75	76~105	106~125	126~150
浊度去除率/%	78.51	86.62	87.78	87.11

从表 4 可知,投加的粉煤灰粒径不同时,加载絮凝工艺处理矿井水的效果存在差异。粒径较小时,随着粉煤灰粒径的增大,浊度去除率升高,粒径较大时,增加粒径对浊度去除效果的影响较小。粉煤灰的粒径为 106~125 μm 时,试验水样的浊度去除率最大,达到 87.78%;粒径为 76~105 μm 和 126~150 μm 时,浊度去除率分别为 86.62% 和 87.11%。粉煤灰粒径不同时,其颗粒的数量和结构也不相同^[15],在加载絮凝工艺中的作用位点也有区别。加载絮凝过程中,加载材料随着搅拌作用做离心运动,形成许多微小涡旋,这些微小涡旋所产生的紊流动力在絮凝反应中起到了关键作用^[16]。涡旋的大小与加载材料粒径成正比,与涡旋的离心惯性力成反比。粉煤灰粒径较小时,涡旋较小;粒径较大时,惯性力较大。适中的粒径有利于提升加载效果。此外,粒径分布较广,依靠各粒径间的协同作用,具有更好的去除效果^[17]。76~150 μm 粒径的粉煤灰对浊度的去除效果相近,因此,选择该粒径的粉煤灰应用于后续加载絮凝试验。

2.1.2 絮凝剂投加量的影响

各取 1 000 mL 矿井水于若干烧杯中,分为两组。第一组进行传统絮凝试验,即絮凝剂 PAC 投加量分别为 10、15、20、25、30、35 mg/L,助凝剂 PAM 投加量为 0.2 mg/L;第二组进行加载絮凝试验,即絮凝剂 PAC 投加量分别为 10、15、20、25、30、35 mg/L,助凝剂 PAM 投加量为 0.2 mg/L,粉煤灰(粒径为 76~150 μm)投加量为 1 g/L。试验结果如图 1 所示。

由图 1 可知,随着絮凝剂投加量的增大,浊度的去除率逐渐提高。当 PAC 的投加量为 25 mg/L 时,未投加粉煤灰组的浊度去除率达到 87.43%;而投加 1 g 粉煤灰(粒径为 76~150 μm)的试验组,在 PAC 的投加量为 20 mg/L 时,浊度去除率已达到 89.32%。随后,继续加大絮凝剂的投加量,浊度的去除率呈缓慢上升趋势,考虑到控制处

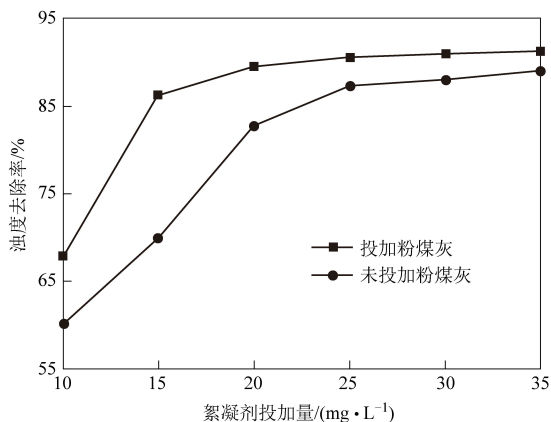


图 1 PAC 投加量对矿井水浊度去除效果的影响

Fig.1 Effect of PAC dosage on turbidity removal of mine water

理成本、避免二次污染等因素,选择 25 mg/L 为常规絮凝工艺中 PAC 较优投加量,20 mg/L 为加载絮凝工艺中 PAC 较优投加量。周碧雯等^[18]进行了磁加载絮凝去除水体浊度的实验研究,得出 PAC 最佳投加量为 30 mg/L。朱丽榕等^[19]通过污泥回流进行加载絮凝,最佳出水效果对应的 PAC 投加量中,传统工艺为 30 mg/L,加载工艺为 20 mg/L,与本研究结果基本相符。此外,投加粉煤灰的加载絮凝中,PAC 投加量对絮凝效果的影响较小,增加了絮凝过程的稳定性。

2.1.3 助凝剂投加量的影响

取 1 000 mL 矿井水于若干烧杯中,分别进行加载絮凝及传统絮凝试验。两组试验中,絮凝剂 PAC 投加量均为上述较优投加量,第一组不投加粉煤灰,第二组投加 1 g 粉煤灰(粒径为 76~150 μm)。为探究助凝剂 PAM 的投加量对处理效果的影响,两组试验均设置了 0.2~1.0 mg/L 之间 5 个梯度的投加量。试验结果见图 2。

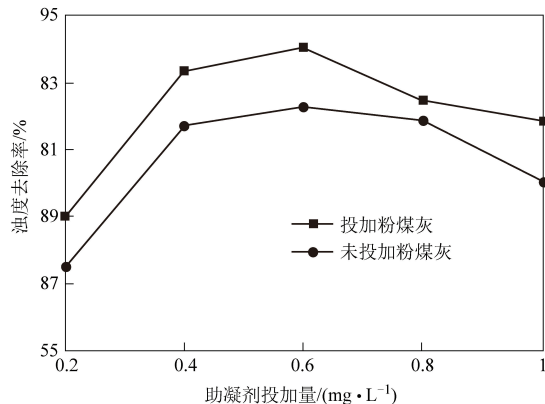


图 2 PAM 投加量对矿井水浊度去除效果的影响

Fig.2 Effect of PAM dosage on turbidity removal of mine water

由图 2 可知,随着助凝剂投加量的增大,浊度的去除率出现先增大再减小的现象。当 PAM 的投加量为 0.4 mg/L 时,经常规絮凝工艺处理的水样,浊度去除率达到 91.70%;而加载絮凝工艺的浊度去除率达到 93.35%。若继续加大助凝剂的投加量,浊度去除率呈现缓慢增加再略微下降的趋势。助凝剂通过高分子絮凝剂的架桥作用,将凝聚体絮凝成大絮团,改善絮体结构,适量的助凝剂可显著加强絮凝效果。过量的 PAM 会形成胶体保护,导致絮凝效果变差^[20],污水浊度去除率降低。考虑到聚丙烯酰胺在环境中会产生丙烯酰胺单体,其对人体及环境具有危害作用^[21],故选择 0.4 mg/L 为 PAM 较优投加量。

2.1.4 粉煤灰投加量的影响

取 1 000 mL 矿井水于若干烧杯中,絮凝剂 PAC 投加量为 20 mg/L,助凝剂 PAM 投加量为 0.4 mg/L。试验设置了 6 个粉煤灰(粒径为 76~150 μm)投加量梯度,分别为 0.5、1、1.5、2、2.5、3 g/L,以研究粉煤灰投加量对浊度去除率的影响,结果见图 3。

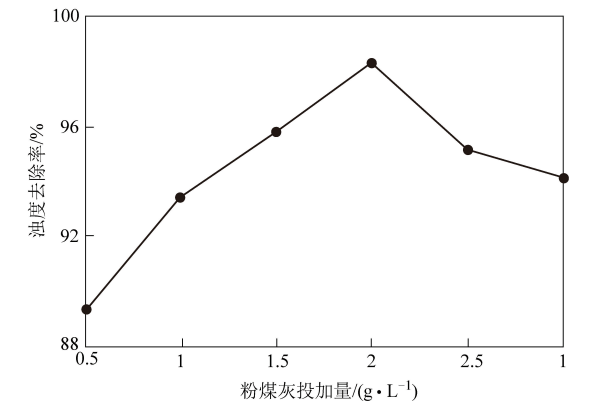


图 3 粉煤灰投加量对矿井水浊度去除效果的影响

Fig.3 Effect of fly ash dosage on turbidity removal of mine water

由图 3 可知,随着粉煤灰投加量的增加,浊度去除率呈现先增后减的趋势。当投加量为 2 g/L 时,加载絮凝对浊度的去除率最大,达 98.2%。粉煤灰投加量对加载絮凝工艺的处理效果有着直接影响,投加量过小或过大都会影响出水的浊度。然而,不同加载材料的投加量对絮凝效果的影响有所不同,以细砂为加载材料的研究显示,随着投加量的增加,浊度去除率逐渐降低^[22];以磁粉为加载材料的研究得出相反的结论^[18]。由此可知,以单因素探究絮凝效果可以为相关研究提供参考价值,而更为可靠的结论需综合考虑加载材料的理化性质、絮凝药剂的种类、絮凝过程的外界条件

和原水水质等因素间的相互作用。

2.2 响应面优化试验

2.2.1 加载絮凝工艺模型的建立

由以上单因素试验结果可知,粉煤灰粒径、絮凝剂投加量、助凝剂投加量、粉煤灰投加量均对加载絮凝工艺处理矿井水的效果有所影响。其中,根据浊度去除率与各因素的坐标图可以看出, PAC、PAM 和粉煤灰投加量对处理效果影响较大,其较优值分别为 20 mg/L、0.4 mg/L 和 2 g/L。利用 Design Expert 8.0.6 软件,根据 Box-Behnken 实验设计原理,以浊度去除率为响应值,设计三因素三水平五中心点的响应曲面法试验方案,各因子编码变换结果见表 5,试验结果见表 6。

表 5 加载絮凝工艺响应曲面法的原值和编码值对照表
Table 5 Comparison table of original value and coding value of response surface method for loading flocculation process

水平	flocculation process		
	PAC 投加量(A)/ (mg · L ⁻¹)	PAM 投加量(B)/ (mg · L ⁻¹)	粉煤灰投加量(C)/ (g · L ⁻¹)
下水平(-1)	15	0.2	1
零水平(0)	20	0.4	2
上水平(+1)	25	0.6	3

表 6 加载絮凝工艺响应曲面法试验设计与结果
Table 6 Experimental design and results of response surface method for loading flocculation process

试验序号	编码值			浊度去除率/%	
	A	B	C	试验值	预测值
1	1	0	-1	93.65	94.27
2	0	-1	1	89.14	89.42
3	0	0	0	98.22	98.20
4	0	0	0	98.59	98.20
5	1	0	1	94.65	94.89
6	0	0	0	97.81	98.20
7	0	1	-1	94.05	93.77
8	-1	0	1	90.81	90.19
9	0	-1	-1	89.03	88.94
10	0	0	0	97.95	98.20
11	1	1	0	98.65	98.32
12	0	1	1	94.38	94.47
13	1	-1	0	92.97	92.45
14	-1	-1	0	88.38	88.71
15	-1	1	0	92.19	92.71
16	-1	0	-1	89.86	89.62
17	0	0	0	98.43	98.20

通过 Design-Expert 8.0.6 软件对试验结果

(表5)进行二次回归非线性拟合,得到回归模型(式1):

$$Y = 98.20 + 2.34A + 2.47B + 0.30C + 0.47AB + 0.012AC + 0.055BC - 2.28A^2 - 2.87B^2 - 3.68C^2 \quad (1)$$

对回归模型进行方差分析(表7)表明,该模型是极显著的($p < 0.01$),在该研究区域内拟合度高;Design-Expert 8.0.6 软件中 Adj R-Squared 为 0.977 0,说明此模型能解释 97.70% 试验所得浊度去除率的变化;变异系数 C_v 为 0.60%,说明此试验的精确度和可信度较高;信噪比(Adeq Precisor)为 22.138,该值大于 4,说明此模型的精密度很高;失拟项 P 值为 0.061 6 > 0.05 ,不显著,说明该模型回归方程不失拟,建立的模型可较好的分析以及预测加载絮凝工艺处理矿井水的浊度去除率变化。

表7 加载絮凝工艺回归模型方差分析表

Table 7 Variance analysis table of regression model for loading flocculation process

方差来源	平方和	自由度	均方差	F 值	Prob>F
回归模型	220.22	9	24.47	76.42	< 0.01
残差	2.24	7	0.32	-	-
失拟项	1.82	3	0.61	5.78	0.061 6
纯误差	0.42	4	0.11	-	-
总误差	222.46	16	-	-	-

2.2.2 加载絮凝工艺响应面分析

通过响应曲面可以分析各影响因子对响应值的影响与各影响因子之间的交互影响情况。不同 PAC、PAM 以及粉煤灰投加量对矿井水浊度去除率的响应曲面详见图4~图6。

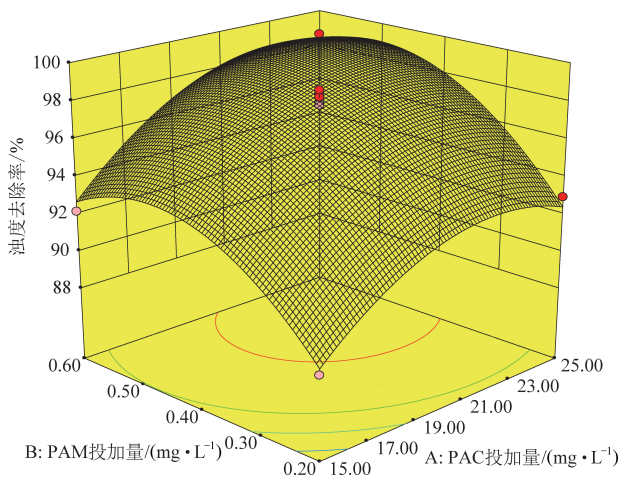


图4 PAC与PAM投加量对矿井水浊度去除率的影响

Fig.4 Effect of PAC and PAM dosage on turbidity removal rate of mine water

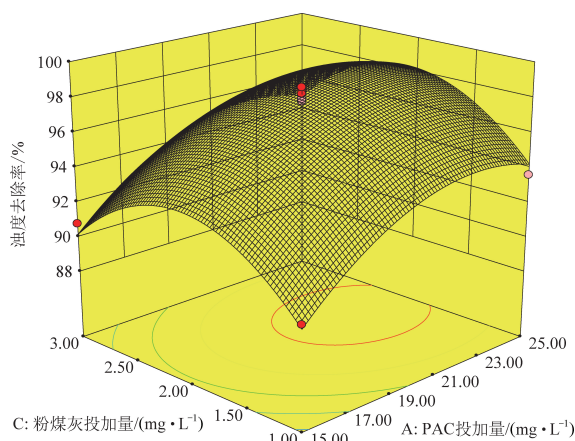


图5 PAC与粉煤灰投加量对矿井水浊度去除率的影响

Fig.5 Effect of PAC and fly ash dosage on turbidity removal rate of mine water

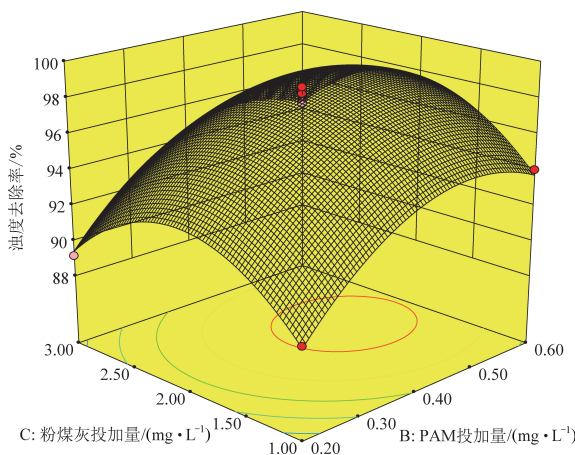


图6 PAM与粉煤灰投加量对矿井水浊度去除率的影响

Fig.6 Effect of PAM and fly ash dosage on turbidity removal rate of mine water

由图4可知,当粉煤灰投加量一定时,随着PAM投加量的增大,浊度去除率先增大后缓慢减小;随着PAC投加量的增加呈现先增大后基本稳定的趋势。由图5可知,当絮凝剂PAC的投加量是20 mg/L、PAM的投加量为0.4~0.55 mg/L、粉煤灰投加量在1.6~2.4 g/L时,处理效果较好。由图6可知,当PAM的投加量一定时,随着粉煤灰投加量的增多,浊度的去除率先升高后降低。先前关于响应面法优化絮凝处理效果的研究得出相似的变化趋势^[23-24]。

使用响应面分析法对浊度去除率取最大值,得到粉煤灰加载絮凝工艺处理矿井水的优化条件为:PAC投加量为22.81 mg/L,PAM投加量为0.5 mg/L,粉煤灰投加量为2.04 g/L。在此最佳工艺条件下,粉煤灰加载絮凝工艺对矿井水的浊度去除率预测值为99.45%。考虑到实际情况下的试验条件,将上述最佳工艺优化为:PAC投加量为

22.80 mg/L,PAM 投加量为 0.5 mg/L,粉煤灰投加量为 2.0 g/L。在此条件下进行验证试验,重复三次,得到浊度去除率的平均值为 99.27%,该值与预测值 99.45% 相接近,因此,该模型能够较好预测粉煤灰加载絮凝沉淀工艺与矿井水浊度去除率的关系,模型可靠。

2.2.3 粉煤灰加载絮凝与常规絮凝工艺对比分析
依据响应面优化得出的最优试验条件及验证试验结果如表 7 所示。PAC 与 PAM 投加量相同时,加载絮凝工艺的浊度去除率远高于常规絮凝,而继续增加 PAC 和 PAM 的投加量,常规絮凝对浊度的去除率继续增加,而加载絮凝对浊度的去除率略有降低。实际应用中,为达到一定的去除效果,粉煤灰加载絮凝所需的絮凝剂将低于常规絮凝,减少处理工艺的运行成本,达到废物资源化利用。

表 8 常规絮凝工艺与加载絮凝工艺对比分析

Table 8 Comparative analysis of loading flocculation process and traditional flocculation process

试验条件及结果	常规絮凝	加载絮凝
PAC 投加量/(mg·L ⁻¹)	22.8	22.8
PAM 投加量/(mg·L ⁻¹)	0.5	0.5
粉煤灰投加量/(g·L ⁻¹)	-	2.0
浊度去除率/%	89.86	99.27
pH 值	6.30	7.20

铝系混凝剂在酸性和碱性条件下均能生成 Al(OH)₃ 沉淀,常规絮凝工艺中往往需要调节原水 pH 值,以获得最佳絮凝效果。在加载絮凝条件下,粉煤灰作为加载材料的同时,可以起到调节 pH 值的作用。原水呈弱酸性,而粉煤灰中含有的 CaO、MgO 等成分经水解反应后呈碱性^[25],故随着粉煤灰投加量增加,pH 值将有所增加。已有学者研究表明,混凝工艺处理废水的最佳 pH 值范围为 7~8^[26-27]。本研究中,经加载絮凝处理后,矿井水的 pH 值提升为 7.20。这表明当投加适量粉煤灰时,无需外加碱度,原水 pH 值即可使加载絮凝过程达到较优的处理效果。

2.3 粉煤灰加载絮凝的污染分析

粉煤灰中含有多种微量元素,其中 As、F、Zn、Cu、Cr、Cd、Pb 等元素危害较大。利用其作为加载材料时,应考虑粉煤灰中的微量元素是否会对水体产生二次污染。粉煤灰浸泡试验检测结果见表 9。通过浸泡试验表明,粉煤灰中的微量元素浸出率较低,均未超出《生活饮用水卫生标准》(GB

5749—2006)。因此,将粉煤灰作为加载材料不会对水体产生污染。

表 9 粉煤灰浸泡后水样中微量元素检测

Table 9 Detection of trace elements in water samples soaked with fly ash

	mg·L ⁻¹					
指标	As	F	Zn	Cu	Cr	Pb
pH=8	-	0.15	0.14	-	-	-
pH=6.5	-	0.01	0.14	0.01	-	-
pH=5	-	0.15	0.14	0.01	-	-

注:“-”表示未检出

3 结 论

本文研究了加载絮凝处理技术对某矿井水的浊度去除效果,在单因素试验的基础上,运用响应曲面法,建立了多元二次回归模型,通过检验,模型的拟合度良好,能有效预测最优值。确定了加载絮凝试验最佳反应条件:絮凝剂投加量为 22.80 mg/L,助凝剂 PAM 投加量为 0.5 mg/L,粉煤灰投加量为 2.0 g/L。与传统的化学混凝法相比,粉煤灰加载絮凝处理矿井水的加药量更少、处理效果更好。粉煤灰在加载絮凝过程中可调节原水 pH 值,加强絮凝效果。

参考文献

[1] 蓝航,陈东科,毛德兵.我国煤矿深部开采现状及灾害防治分析[J].煤炭科学技术,2016,44(1):39-46.

[2] 郭雷,张略,胡婵娟,等.我国矿井水管理现状分析及对策[J].煤炭学报,2014,39(S2):484-489.

[3] 林曼利,桂和荣,彭位华,等.典型矿区深层地下水重金属含量特征及健康风险评价——以皖北矿区为例[J].地球学报,2014,35(5):589-598.

[4] 李立欣,贾超,张瑜,等.絮凝剂在矿井水处理中的应用进展[J].矿产综合利用,2018(5):1-5.

[5] 陈煜权,何伟.加载絮凝对微污染水的治理效果及应用前景[J].环境工程,2016,34(S1):58-61.

[6] Lapointe M, Barbeau B. Selection of media for the design of ballasted flocculation processes [J]. Water Research, 2018, 147: 25-32.

[7] 刘研萍,李文龙,朱佳,等.加载絮凝—超滤—反渗透组合工艺处理 PCB 电镀废水 [J]. 化工环保,2019,39(1):16-21.

[8] 李天琪. Actiflo 微砂加重絮凝高效沉淀工艺设计介绍 [J]. 给水排水,2009,45(4):11-13.

[9] 阳旭.高浊度原水磁加载絮凝应急饮用水处理试验研究及工艺设计 [D]. 杭州:浙江大学,2017:14-32.

[10] 蔡洁莹,李向东,李海红,等.电厂粉煤灰固定二氧化碳实验研究 [J]. 煤炭转化,2019,42(1):87-94.

[11] 侯芹芹,张创,赵亚娟,等.粉煤灰综合利用研究进展

- [J]. 应用化工, 2018, 47 (6): 1281-1284.
- [12] 刘研萍, 饶玉凤, 兰森, 等. “三气”合采产出水的加载絮凝预处理响应面优化 [J]. 环境工程学报, 2021, 15 (1): 215-223.
- [13] Mosaddeghi M R, Shariati F P, Yazdi S A V, et al. Application of response surface methodology (RSM) for optimizing coagulation process of paper recycling wastewater using Ocimum basilicum [J]. Environmental Technology, 2020, 41 (1): 100-108.
- [14] Singh B, Kumar P. Pre-treatment of petroleum refinery wastewater by coagulation and flocculation using mixed coagulant: Optimization of process parameters using response surface methodology (RSM) [J]. Journal of Water Process Engineering, 2020, 36: 101317.
- [15] 黎载波, 林命坤. 粉煤灰中不同粒度区间组分的粉体特性研究 [J]. 江西建材, 2016, 14: 3+7.
- [16] 王绍文. 惯性效应在絮凝中的动力学作用 [J]. 中国给水排水, 1998, 14 (2): 13-16.
- [17] 王少康, 程方, 郭兴芳, 等. 磁粉在磁加载混凝深度除磷中的作用机理分析 [J]. 环境工程学报, 2019, 13 (2): 302-309.
- [18] 周碧雯, 张军, 李日标, 等. 磁加载絮凝工艺处理城市生活污水的试验研究 [J]. 当代化工, 2018, 47 (10): 2086-2087.
- [19] 朱丽榕, 柯水洲, 朱佳, 等. 传统与加载絮凝工艺处理铜镍废水的污泥特性对比研究 [J]. 环境工程, 2018, 36 (4): 142-147.
- [20] 陈啸, 伍喜庆, 岳涛, 等. 矿山尾矿水的磁种絮凝处理及机理研究 [J]. 环境污染与防治, 2019, 41 (11): 1313-1318.
- [21] 李雪, 林聪, 沙军冬, 等. 不同生物预处理方式对污泥厌氧消化过程性能的影响 [J]. 农业机械学报, 2015, 46 (8): 186-191.
- [22] Zafisah N S, Anga W L, Mohammad A W, et al. Interaction between ballasting agent and flocs in ballasted flocculation for the removal of suspended solids in water [J]. Journal of Water Process Engineering, 2020, 33: 101028.
- [23] 周振, 姚吉伦, 庞治邦, 等. 响应曲面法优化电絮凝去除微污染水中 UV_{254} 的研究 [J]. 水处理技术, 2016, 42 (3): 32-36.
- [24] 张潇逸, 蒋进元, 周岳溪, 等. 响应曲面法优化聚硅酸铁混凝剂处理腈纶废水 [J]. 环境工程学报, 2017, 11 (2): 721-716.
- [25] 孙亚乔. 粉煤灰浸出及浸出液与介质相互作用的水文地球化学机理研究 [D]. 西安: 长安大学, 2007: 19-26.
- [26] 邓磊, 黄文章, 蒋姝, 等. PAC-PAM 复合混凝处理钻井液废水研究 [J]. 广州化工, 2017, 45 (11): 88-90.
- [27] 薛俊杰, 黄显怀, 王坤, 等. 煤矿矿井废水混凝处理工艺条件研究 [J]. 工业用水与废水, 2014, 45 (1): 14-16+21.