

磁絮凝法处理河水工艺条件的响应面分析

胡家玮¹, 李 军¹, 于凤芹², 王昌稳¹, 李 研¹, 刘国洋¹

(1. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124; 2. 北京市北运河管理处, 北京 101100)

摘 要: 应用响应面法分析磁絮凝工艺处理微污染河水的影响因素和去除效果. 以聚合氯化铝(PAC)、磁粉(MP)和聚丙烯酰胺(PAM)的投加量为因素, 利用中心组合设计(Box-Behnken)和响应面法(RSM)分析了3个因素对响应值(浊度、正磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)和化学需氧量(COD)的去除率)的影响, 并通过拟合回归模型来描述河水中污染物的去除效果. 试验结果表明: 磁絮凝工艺处理微污染河水的最佳工艺条件为: PAC为51.31 mg/L、MP为176.47 mg/L、PAM为0.10 mg/L. 在该条件下, 浊度、正磷酸盐和COD的去除率分别可以达到96.80%、86.25%和51.00%, 与模型预测值的相对误差小于2.12%. 建立的统计学模型确信可靠, 同时表明磁絮凝工艺具有较高的河水污染物去除能力.

关键词: 磁絮凝; 微污染河水; 中心组合设计; 响应面法

中图分类号: X522

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2013)03-0459-07

Analysis of Magnetic Flocculation Process Conditions for River Water Treatment by Response Surface Method

HU Jia-wei¹, LI Jun¹, YU Feng-qin², WANG Chang-wen¹, LI Yan¹, LIU Guo-yang¹

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Beijing North Canal Office, Beijing 101100, China)

Abstract: Response surface methodology (RSM) was applied to analyze the magnetic flocculation influencing factors and removal efficiency for micro-polluted river water treatment. Box-Behnken experimental design was applied. The poly aluminum chloride (PAC), magnetic particle (MP) and polyacrylamide (PAM) were chosen as causal factors. The effects of these factors on turbidity, orthophosphate ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) and chemical oxygen demand (COD) removal efficiency were analyzed using RSM. The pollutants removals in river water were developed to describe by regression models. The results showed that the optimum conditions were PAC 51.31 mg/L, magnetic particle 176.47 mg/L and PAM 0.10 mg/L. Based on these conditions, the turbidity, orthophosphate and COD removals were 96.80%, 86.25% and 51.00%, respectively. The relative errors between the measured data and the predicted values were less than 2.12%. It confirms that the statistic models are reliable, and the magnetic flocculation operating conditions for contaminants removals in river water are appropriated.

Key words: magnetic flocculation; micro-polluted river water; Box-Behnken design; response surface method

收稿日期: 2011-10-12.

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2009ZX07314-009).

作者简介: 胡家玮(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事水体污染控制方面的研究, E-mail: hujiaweiyly@hotmail.com.

通过投加铝盐、铁盐等无机絮凝剂或有机高分子溶剂作为水中的电解质实现絮凝工艺,不但可以显著降低后续处理工艺的负荷,也能有效降低整体水处理流程的成本^[1].目前,絮凝技术依旧是水处理领域应用最为广泛的技术^[2-3].国内外的研究学者通过研制新型絮凝剂^[4-5],或将絮凝与其他技术相结合^[6-7]取得了很多有价值的研究成果.

将磁技术与其它水处理技术相结合,可强化并提高处理系统的除污能力和效率^[8].磁絮凝技术就是在常规絮凝工艺基础上发展起来的强化絮凝新工艺,具有处理水量大、效率高、装置占地面积小等优点.磁技术应用于絮凝工艺主要有2种方式,通过外加磁场改善接种磁种后的絮凝条件^[9-11],或是投加磁种与絮凝剂联用达到强化絮凝的目的^[12]2种方式都使絮体利于分离.

响应面分析法(response surface methodology, RSM)常用于生物、化学和医药工程等领域中的处方筛选和工艺优化^[13-15].试验研究中常采用的正交设计法只能处理离散的水平值,在实际应用中局限性较大.而响应面法是用多元回归拟合方程拟合多个因子与响应值之间的关系,估计回归方程的系数,通过对方程求极值或目标值的方式达到工艺或参数优化的目的;因此,在磁絮凝试验研究中,应用RSM法优化了磁絮凝处理河水的工艺参数,考察了在絮凝工艺研究中应用新的试验设计方法的可行性,并为进一步微污染河水的治理提供技术探索和研究依据.

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

由于河流水受季节和附近排污口的影响水质变化较大,因此试验用水选择在检测北京市通惠河某段水质基础上,用北京工业大学生活污水与自来水按一定比例配制而成.浊度、正磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)和化学需氧量(COD)作为河水水质的主要表征参数(见表1).絮凝剂和助凝剂分别选用分析纯的聚合氯化铝(PAC)(Al_2O_3 质量分数不低于28%)与聚丙烯酰胺(PAM),配置成一定浓度的标准溶液备用;磁粉(MP)由北京紫盈公司提供,磁粉比表面积 $8.921\text{ m}^2/\text{g}$, Fe_3O_4 质量分数大于59%(X衍射最高波峰)(见图1).

1.2 试验方法

量取原水1000 mL于混凝烧杯中,加入适量MP并使之与水样充分混合;设定搅拌器(ZR4-6型

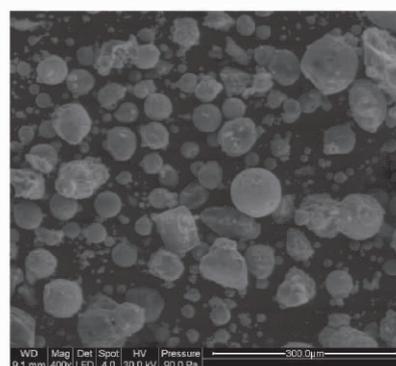
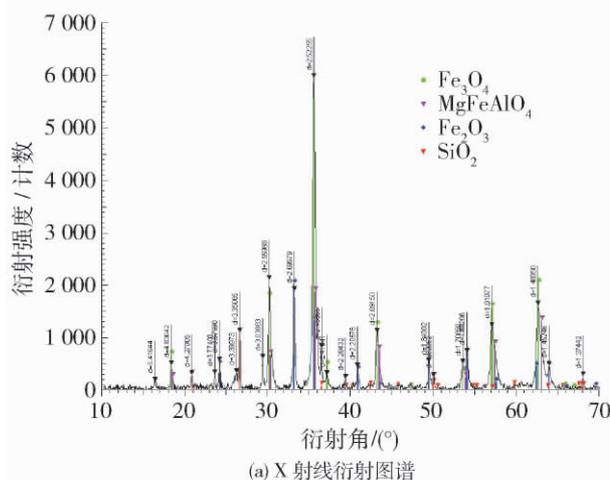
混凝试验搅拌器,深圳中润水工业有限公司)程序:混合段转速288 r/min、絮凝段转速69 r/min,分别持续1 min和5 min(搅拌程序经多次试验确定);启动搅拌器,在混合段投加PAC溶液,絮凝段投加PAM溶液,絮凝结束后沉淀15 min;取上清液并按照表1方法测定试验数据.

表1 试验原水水质

Table 1 Water quality of experiment

参数	数值	分析方法/仪器
浊度/(NTU)	16.9~17.4	2100 浊度仪(哈希,美国)
$\rho(\text{PO}_4^{3-}\text{-P}) / (\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	1.06~1.22	钼酸铵法(UV765紫外分光光度计,上海精科)
$\rho(\text{COD}) / (\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	39.52~55.68	重铬酸钾法(5B-3F型COD快速测定仪,连华科技)

注:浊度反映水体感官指标; $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 是水中磷的主要形态,为水体富营养化的主要因素之一^[16];COD反映水中受还原性物质污染的程度.



(b) 扫描电镜照片

图1 磁粉的X射线衍射图谱和扫描电镜照片

Fig. 1 XRD atlas and SEM photo of magnetic particle

1.3 试验设计及参数优化

应用 Design Expert 软件设计 2 阶段试验: 第 1 阶段研究 PAC 投加量对浊度、正磷酸盐和 COD 去除效果的影响; 第 2 阶段采用中心组合设计(Box-Behnken design ,BBD) 试验(见表 2) ,分析 3 个因素 x_1 (PAC 投加量/(mg/L))、 x_2 (MP 投加量/(mg/L))、 x_3 (PAM 投加量/(mg/L)) 对响应值 y_1 (浊度去除率/%)、 y_2 (正磷酸盐去除率/%)、 y_3 (COD 去除率/%) 的影响. 应用 RSM 法获得二次回归模

表 2 响应面分析因素及水平

Table 2 Analytical factors and levels for RSM

因素	编码标识	水平		
		-1	0	1
ρ (PAC) / (mg·L ⁻¹)	x_1	5	52.5	100
ρ (MP) / (mg·L ⁻¹)	x_2	20	145	270
ρ (PAM) / (mg·L ⁻¹)	x_3	0.1	0.33	0.55

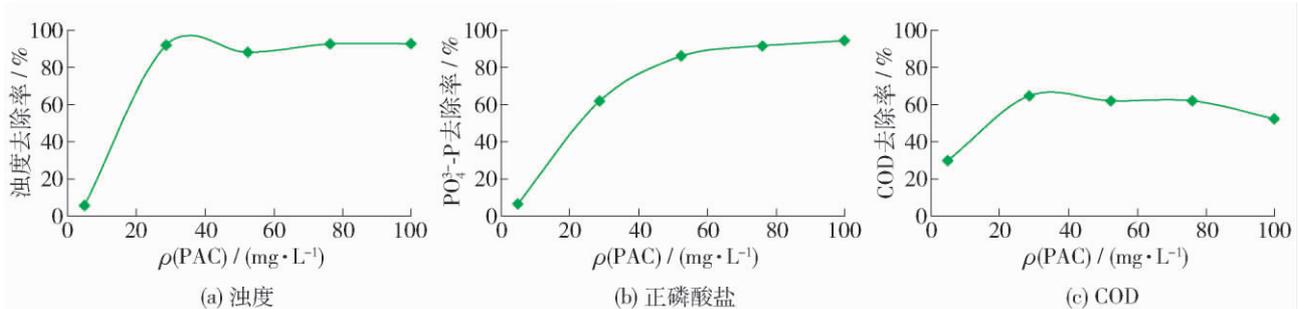


图 2 PAC 投加量对污染物质去除率的影响

Fig. 2 Effects of PAC dosage on the pollutants removal efficiency

2.2 响应面法优化磁絮凝处理微污染河水的工艺条件

应用 Box-Behnken 设计 3 因素 3 水平共 17 组试验(见表 3) . 所得二次回归模型拟合公式(以编码值表示) 为

$$\begin{aligned}
 y_1 &= +96.37 + 42.28x_1 - 0.15x_2 + 1.75x_3 + 1.24x_1x_2 - \\
 &\quad 3.37x_1x_3 - 0.047x_2x_3 - 43.19x_1^2 - 1.91x_2^2 + 1.50x_3^2 \quad (1) \\
 y_2 &= +86.50 + 46.09x_1 - 0.41x_2 - 0.17x_3 + 0.79x_1x_2 + \\
 &\quad 0.16x_1x_3 + 0.53x_2x_3 - 36.32x_1^2 + 0.50x_2^2 - 0.28x_3^2 \quad (2) \\
 y_3 &= +46.45 + 17.44x_1 + 3.88x_2 + 1.74x_3 - 1.42x_1x_2 - \\
 &\quad 6.52x_1x_3 - 11.47x_2x_3 - 18.17x_1^2 - 5.56x_2^2 + 2.38x_3^2 \quad (3)
 \end{aligned}$$

表 3 显示: 试验数据与统计学模型预测值无显著性差异, 说明试验所得数据真实可靠. 通过方差分析可知 x_1 属于影响显著项($p < 0.05$) ,说明絮凝剂 PAC 对去除污染物起主要作用, 其投加量直接影

响絮凝效果. 回归分析结果(见表 4) 表明: 拟合公式(1) 的模型拟合系数 $R^2 = 99.86\%$,修正拟合系数 $R^2_{adj} = 99.67\%$,说明响应值 y_1 的模型拟合度和可靠性很高. 响应值 y_2 和 y_3 也可得到相同的结论.

2 结果和分析

2.1 PAC 投加量对污染物质去除效果的影响

按照 1.2 试验方法, 以 PAC 投加量对浊度、正磷酸盐和 COD 去除率分别进行单因素试验(见图 2) .

如图 2 所示, 随着絮凝剂 PAC 投加量的提高, 污染物去除率迅速升高. 这一现象表明: PAC 水解产生的 Al_{13} 及其聚集体吸附在水中污染物颗粒表面, 并以其较高的电荷和较大的分子量发挥电中和和吸附架桥作用; 随着 PAC 表面羟基继续水解, 直到饱和成为氢氧化物沉淀凝胶, 与污染物颗粒形成絮团^[17]; 絮团沉淀使水样澄清, 污染物质得到有效去除. 若 PAC 投加过量, 水样 COD 值会上升, 去除率下降.

响絮凝效果. 回归分析结果(见表 4) 表明: 拟合公式(1) 的模型拟合系数 $R^2 = 99.86\%$,修正拟合系数 $R^2_{adj} = 99.67\%$,说明响应值 y_1 的模型拟合度和可靠性很高. 响应值 y_2 和 y_3 也可得到相同的结论.

因素 x_1 、 x_2 、 x_3 对响应值 y_1 、 y_2 、 y_3 的响应曲面见图 3. 每幅响应曲面图表示 2 个因素相互作用对单一响应值的影响.

2.2.1 药剂投加量对污染物去除效果的影响

由响应曲面图分析得知: 絮凝剂 PAC 在絮凝过程中起主要作用, 其投加量直接影响污染物质的去除效果, 所以在曲面图上呈现及其明显的波峰变化趋势.

PAM 在絮凝过程中充当助凝剂, 对絮体的粒径有一定的影响. 由于水中悬浮类污染物颗粒大多带负电, 在 PAC 水解产物的电中和作用下碰撞形成细小的絮体, 投加 PAM 后电中和作用使颗粒间距离进一步缩短; 同时, PAM 长链结构上的活性基团能在污染物颗粒表面产生吸附架桥作用, 絮体粒径逐渐

增大利于快速沉淀^[18]. 若 PAM 投加过量,颗粒表面被 PAM 完全包裹,吸附架桥作用无法实现,絮体粒径反而会减小使沉淀速率减慢,影响出水水质.

从响应面图 PAM 变化趋势可知,试验中所投加的 PAM 并未过量.

表 3 中心组合设计试验及结果

Table 3 Box-Behnken design and data of experiment

试验号	编码	x_1	编码	x_2	编码	x_3	$y_1/\%$		$y_2/\%$		$y_3/\%$	
		数值/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)		数值/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)		数值/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	实测	预测	实测	预测	实测	预测
1	1	100.0	0	145	-1	0.10	95.94	98.58	94.93	96.00	58.12	52.87
2	0	52.5	0	145	0	0.33	95.97	96.37	83.77	86.50	42.89	37.41
3	0	52.5	0	145	0	0.33	96.64	96.37	84.72	86.50	46.69	46.45
4	0	52.5	0	145	0	0.33	96.75	96.37	86.13	86.50	42.89	37.41
5	0	52.5	-1	20	1	0.55	95.86	97.91	83.61	86.44	54.30	52.60
6	-1	5.0	0	145	1	0.55	20.15	17.51	4.56	3.49	16.22	21.47
7	0	52.5	1	270	1	0.55	96.04	97.50	86.45	86.67	42.89	37.41
8	1	100.0	1	270	0	0.33	95.23	94.63	95.40	97.16	39.07	42.61
9	-1	5.0	-1	20	0	0.33	9.78	10.38	7.55	5.79	3.52	3.02
10	-1	5.0	0	145	-1	0.10	6.41	7.59	2.16	4.14	6.90	4.96
11	0	52.5	1	270	-1	0.10	96.15	94.11	88.77	85.94	55.18	56.88
12	0	52.5	0	145	0	0.33	95.80	96.37	88.41	86.50	48.05	46.45
13	-1	5.0	1	270	0	0.33	6.41	7.59	2.53	3.38	10.33	10.56
14	0	52.5	0	145	0	0.33	96.69	96.37	89.49	86.50	51.72	46.45
15	0	52.5	-1	20	-1	0.10	95.78	94.32	88.05	87.83	20.69	26.17
16	1	100.0	-1	20	0	0.33	93.64	92.46	97.25	96.40	37.92	37.69
17	1	100.0	0	145	1	0.55	96.20	95.33	97.97	95.99	41.38	43.32

表 4 中心组合设计的回归分析结果

Table 4 Results of regression analysis for the Box-Behnken design

模型组	标准方差/%	拟合系数/%	修正拟合系数/%
y_1	2.15	99.86	99.67
y_2	2.86	99.75	99.42
y_3	5.47	95.87	90.55

磁粉表面带正电荷,在水中的作用类似助凝剂,起强化絮凝作用.由于磁粉亲水性较差,须在搅拌作用下才能在水中呈悬浮态,等于增加了水中固体颗粒的数量并使碰撞次数增多,形成絮体机会增大.在静电力作用下,磁粉作为凝聚核心,吸附带负电的污染物颗粒,形成磁絮体^[19],结构与无磁粉的絮体显著不同(见图4).同时在试验中观察到,投加磁粉的水样絮体密实,沉淀速度更快;若磁粉投加过

量,超过絮体的饱和吸附量,水样浊度会上升^[20].

2.2.2 磁絮凝处理微污染河水的最佳工艺

设定浊度、正磷酸盐和 COD 去除率的目标值分别达到 95%、85% 和 50%,RSM 程序计算预测得出的最佳工艺参数为: PAC 51.31 mg/L、磁粉 176.47 mg/L、PAM 0.10 mg/L;在此条件下进行 3 次验证试验并取平均值,浊度、正磷酸盐和 COD 的去除率分别达到 96.80%、86.25%、51.00%,与模型预测值的相对误差小于 2.12%,试验值与预测值相吻合;说明建立的响应曲面模型真实可靠,优化得到的工艺参数可以达到设定的试验目标.同时在该工艺条件下进行试验,磁絮凝工艺对氨氮的去除率小于 10%.

2.3 技术优势评价

对比常规絮凝和磁絮凝的处理效果,考察投加磁粉是否会显著提高絮凝工艺效果(见表5).药剂投加量选用响应曲面法所获得的最佳参数,试验条

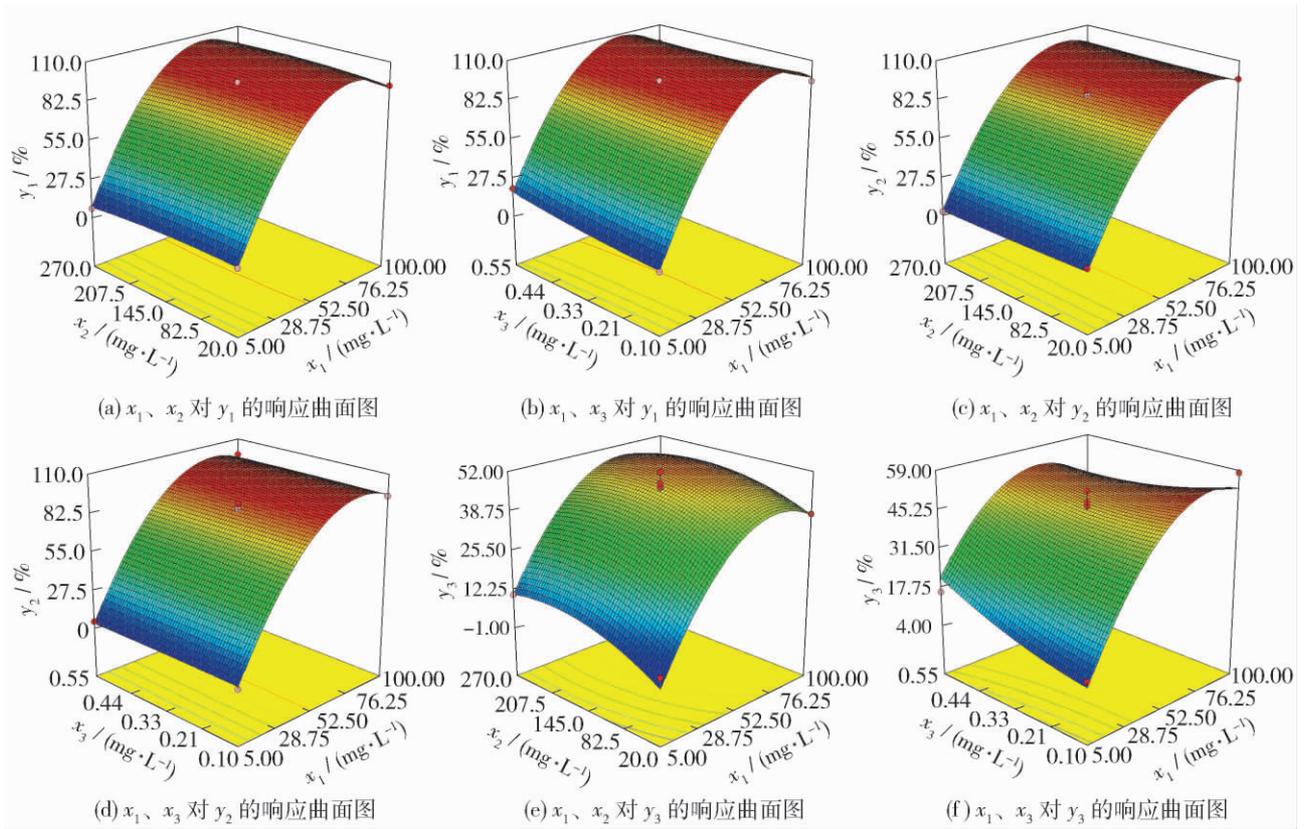


图3 响应曲面图

Fig.3 Response surface

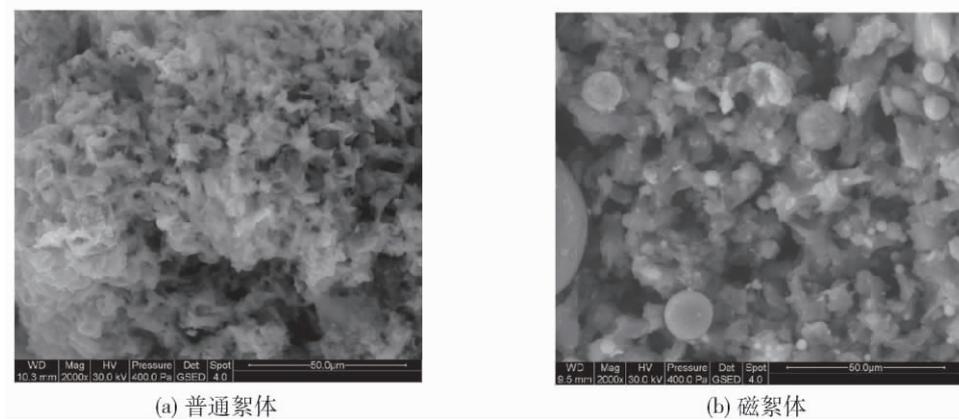


图4 絮体结构扫描电镜照片

Fig.4 SEM photos of flocculating constituents

表5 剩余污染物质浓度对比

Table 5 Comparison of residual pollutants concentration

试验样	沉淀时间 15 min			沉淀时间 30 min		
	剩余浊度/ NTU	剩余正磷酸盐/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	剩余 COD/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	剩余浊度/ NTU	剩余正磷酸盐/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	剩余 COD/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
投加磁粉	0.603	0.172 1	24.08	0.590	0.171 2	24.08
未投加磁粉	1.722	0.311 2	34.87	0.899	0.201 9	27.67

件与前文试验条件一致。

表5显示:絮凝反应后沉淀15 min 投加磁粉的试验样中剩余污染物质量浓度显著低于未投加磁粉的试验样;继续沉淀到30 min 投加磁粉的试验样中剩余污染物质量浓度仍低于未投加磁粉的试验样,表明磁粉在改善絮体沉淀效果上作用明显;若要使常规絮凝工艺出水达到磁絮凝的处理效果,必须提高药剂投加量或延长沉淀时间。而磁粉主要来源于钢铁厂的废渣,且能通过磁分离器(例如磁鼓)进行回收再利用,相当于降低了整个絮凝工艺流程的药剂成本,并能显著降低整体处理时间。

3 结论

1) 响应曲面模型拟合程度较高,可用于磁絮凝法去除河水中污染物工艺条件的预测与优化,所得到的优化预测结果经多次试验验证真实可靠。

2) 由响应曲面法得到的最优磁絮凝处理微污染河水的工艺参数为: PAC 为 51.31 mg/L、磁粉为 176.47 mg/L、PAM 为 0.10 mg/L; 该条件下的浊度、正磷酸盐和 COD 去除率分别达到 95%、85%、50% 以上,但对氨氮无明显去除效果。

3) 分析响应曲面可知: PAC 投加量是影响污染物去除效果的主要因素,投加磁粉强化了絮凝过程,改善了絮体沉淀效果,单位时间内处理水量更大,并且具备一定的经济优势。

4) 利用响应面法优化磁絮凝工艺条件,可以有效减少工艺操作的盲目性并获得最优的工艺参数,同时也降低了传统正交试验法的局限性,可为进一步的中试试验研究提供参考。

参考文献:

- [1] WANG L K, HUNG Y T, SHAMMAS N K. Physicochemical treatment processes, handbook of environmental engineering [M]. Totowa: Humana Press, 2005: 103-138.
- [2] ABER S, SALARI D, PARSA M R. Employing the taguchi method to obtain the optimum conditions of coagulation-flocculation process in tannery wastewater treatment [J]. Chemical Engineering Journal, 2010, 162 (8): 127-134.
- [3] LIANG Z, HAN B P, LIN H. Optimum conditions to treat high-concentration microparticle slime water with bioflocculants [J]. Mining Science and Technology, 2010, 20(3): 478-484.
- [4] XU Y, SUN W, WANG D S, et al. Coagulation of micro-polluted pearl river water with IDF-PACls [J]. Journal of Environmental Sciences, 2004, 16(4): 585-588.
- [5] ZHOU Q, XIAO J. Removal of nanometer particles in micropolluted water source by coagulation with polysilicate-aluminum [J]. Journal of South China University of Technology, 2003, 31(2): 34-37.
- [6] CHAVALPARIT O, ONGWANDEE M. Optimizing electrocoagulation process for the treatment of biodiesel wastewater using response surface methodology [J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, 21(11): 1491-1496.
- [7] BEN M L, KESENTINI I. Treatment of effluents from cardboard industry by coagulation-electroflotation [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 153(3): 1067-1070.
- [8] 马放,王强,朱雪松,等. 磁技术在污水处理中的应用现状及发展趋势 [J]. 中国给水排水, 2010, 26(14): 34-37.
MA Fang, WANG Qiang, ZHU Xue-song, et al. Application status and development of magnetic technology in wastewater treatment [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(14): 34-37. (in Chinese)
- [9] GOKON N, SHIMADA A, HASEGAWA N, et al. Ferrimagnetic coagulation process for phosphate ion removal using high-gradient magnetic separation [J]. Separation Science and Technology, 2002, 27(16): 3781-3791.
- [10] DUANGDUEN C, NTHAPORN A, KITIPHATMO-NTREE M, et al. The effects of magnetic field on the removal of organic compounds and metals by coagulation and flocculation [J]. Physica Status Solidi, 2006(9): 3201-3205.
- [11] 曹勇锋,张朝升,张可方,等. 采用微絮凝/大梯度磁滤工艺处理珠江水的研究 [J]. 中国给水排水, 2010, 26(23): 55-57.
CAO Yong-feng, ZHANG Chao-sheng, ZHANG Ke-fang, et al. Treatment of pearl water by microflocculation/high gradient magnetic filter [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(23): 55-57. (in Chinese)
- [12] 王利平,何又庆,范洪波,等. 磁絮凝分离法处理含油废水的研究 [J]. 环境工程, 2007, 25(3): 12-15.
WANG Li-ping, HE You-qing, FAN Hong-bo, et al. Treatment of oily wastewater by magnetic flocculation separation process [J]. Environment Engineering, 2007, 25(3): 12-15. (in Chinese)
- [13] 李博,屠幼英,梅鑫,等. 响应面优化超临界 CO₂ 提取茶籽多糖的工艺研究 [J]. 高校化学工程学报, 2010, 24(5): 897-901.

- LI Bo, TU You-ying, MEI Xin, et al. Optimization of supercritical CO₂ extraction process of the polysaccharide from tea seed by response surface methodology [J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese University, 2010, 24(5): 897-901. (in Chinese)
- [14] 杨新河,李勤,黄建安,等. 普洱茶茶色素提取工艺条件的响应面分析及其抗氧化活性研究[J]. 食品科学, 2011, 32(6): 1-6.
YANG Xin-he, LI Qin, HUANG Jian-an, et al. Optimization of process conditions for pu-erh tea pigment extraction by response surface analysis and its antioxidant activity [J]. Food Science, 2011, 32(6): 1-6. (in Chinese)
- [15] GUO J Q, LUO Y E, FAN D D, et al. Analysis of metabolic products by response surface methodology for production of human-like collagen II [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2010, 18(5): 830-836.
- [16] HUSSAIN S, AZIZ H A, ISA M H, et al. Orthophosphate removal from domestic wastewater using limestone and granular activated carbon [J]. Desalination, 2011, 271(1-3): 265-272.
- [17] 汤鸿霄,栾兆坤. 聚合氯化铝与传统混凝剂的凝聚-絮凝行为差异[J]. 环境化学, 1997, 16(6): 497-504.
TANG Hong-xiao, LUAN Zhao-kun. Condensation/flocculation behavior contrast of poly aluminum chloride and orthodox flocculant [J]. Environment Chemistry, 1997, 16(6): 497-504. (in Chinese)
- [18] 朱哲,李涛,王东升,等. 阳离子型聚丙烯酰胺投加量对絮体性状特征的影响[J]. 环境化学, 2007, 26(2): 175-179.
ZHU Zhe, LI Tao, WANG Dong-sheng, et al. Effect of cationic PAM dosage on the micro-properties of flocs [J]. Environment Chemistry, 2007, 26(2): 175-179. (in Chinese)
- [19] 朱又春,曾胜. 磁分离法处理餐饮污水的除油机理[J]. 中国给水排水, 2002, 18(7): 39-41.
ZHU You-chun, ZENG Sheng. Degreasing mechanism of magnetic separation for cateringsewage [J]. China water & wastewater, 2002, 18(7): 39-41. (in Chinese)
- [20] 杜海明,张发宇,吕凤明,等. 磁絮凝-磁盘分离法处理巢湖富营养化水的试验研究[J]. 水处理技术, 2009, 35(5): 86-90.
DU Hai-ming, ZHANG Fa-yu, LÜ Feng-ming, et al. Experimental study on magnetic flocculation-magnetic disc separation technique for Chaohu eutrophication of water treatment [J]. Technology of Water Treatment, 2009, 35(5): 86-90. (in Chinese)

(责任编辑 张蕾)

(上接第444页)

- [13] 洪盛茂,焦荔,何曦,等. 杭州典型区域C₂-C₁₂质量浓度变化及臭氧潜势量分析[J]. 环境科学研究, 2009, 22(8): 938-943.
HONG Sheng-mao, JIAO Li, HE Xi, et al. Variations in mass concentrations and ozone formation potentials of C₂-12 hydrocarbons in typical areas of Hangzhou [J]. Research of Environmental Sciences 2009, 22(8): 938-943. (in Chinese)
- [14] 崔虎雄,吴迺名,段玉森,等. 上海城区典型臭氧污染VOCs特征及潜势分析[J]. 环境监测管理与技术, 2011(增刊1): 22-27.
CUI Hu-xiong, WU Ya-ming, DUAN Yu-sen, et al. VOCs characteristics of ozone pollution and its potential in shanghai urban area [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2011(Suppl 1): 22-27. (in Chinese)
- [15] 朱彬,李子华,肖辉,等. 非甲烷碳氢化合物的光化学臭氧生成潜势的数值模拟研究[J]. 南京气象学院学报, 2000(3): 34-41.
ZHU Bin, LI Zi-hua, XIAO Hui, et al. Simulation research of photochemical ozone creation potential of NMHC [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2000(3): 34-41. (in Chinese)
- [16] 张俊刚,王跃思,王珊,等. 京津地区大气中非甲烷烃(NMHCs)质量浓度水平和反应活性研究[J]. 环境科学研究, 2008, 21(5): 158-162.
ZHANG Jun-gang, WANG Yue-si, WANG Shan, et al. Ambient mass concentration and reactivity of non-methane hydrocarbons (NMHCs) in Beijing and Tianjin cities [J]. Research of Environmental Sciences, 2008, 21(5): 158-162. (in Chinese)

(责任编辑 张蕾)