

响应面法优化铁尾矿砂对铜 (II) 的吸附条件

方楠^{1,2}, 吴健^{1,2}, 何强², 程辉彩², 张丽萍², 王宏伟¹

(1. 河北省科学院生物研究所, 河北 石家庄 050081; 2. 河北大学生命科学学院, 河北保定 071002)

摘要: 以铁尾矿砂作为水体沉积物污染修复覆盖材料, 研究了不同 pH 值、转速下铁尾矿砂对水相中 Cu^{2+} 去除情况, 得出水相 pH 值在 3~5 时有利于 Cu^{2+} 去除率的提高; 静态吸附与动态吸附相比有显著差异, 转速为 180 r/min 时, 铁尾矿砂对水相中 Cu^{2+} 去除率最高。使用 Box-Behnken 设计了响应面试验, 研究了水相 pH 值、温度、 Cu^{2+} 初始浓度以及铁尾矿砂投加量 4 个因素对水相中 Cu^{2+} 去除作用, 建立了铁尾矿砂对水中 Cu^{2+} 去除率的回归模型。其中各因素对响应值的影响次序为: 温度 > 投加量 > 初始浓度 > pH 值。模型验证结果预测去除率与试验值偏差仅为 0.08%, 能够很好预测去除率变化情况。

关键词: 铁尾矿砂; 二价铜离子; 去除率; 吸附; 响应面优化

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2020.01.029

中图分类号: TD989 文献标识码: A 文章编号: 1000-6532(2020)01-0140-06

伴随我国经济发展, 大量开采冶炼、工农业污水灌溉、农药和化肥施用^[1] 导致大量重金属进入水体环境。除人类活动外, 气候变化、大气沉降等因素^[1] 也导致一系列重金属污染物进入水体。水中重金属经过一系列反应沉降于沉积物中, 沉积物中大量重金属物质对水体自洁和水体环境造成长期影响。铜作为我国产量最大且被广泛应用的工业重金属之一^[2], 在工业、半导体制造^[3] 中起到了不可替代的作用。这也导致大量淡水湖泊沉积物中, 铜元素成为主要的重金属污染物质^[4-5]。目前针对于水体沉积物污染物控制的常见方法中, 原位覆盖修复法因见效快^[6], 对水体扰动小受到广泛关注。但河流、湖泊面积大, 所需覆盖材料数量大、获得困难, 在不同程度上限制了该方法的发展^[7]。如何选择经济、环保、高效且具有一定吸附能力的覆盖材料是现在研究的需解决的重要问题之一。

铁尾矿砂是铁矿开采后废弃物, 因其含有丰

富的硅酸盐及金属氧化物^[8], 是理想的沉积物覆盖材料。响应面法因其可以大幅减少试验次数且预测准确, 被广泛应用于科研试验、产品设计、药物提取优化等^[9-10] 方面。本实验室经过筛选和调研, 选出沉降系数大, 且含有极少量重金属盐的铁尾矿砂, 将其作为沉积物覆盖材料研究其吸附情况。同时铁尾矿砂对水相中重金属吸附能力受各种条件影响, 为精确铁尾矿砂作为覆盖材料的使用量, 定量分析必不可少。因此, 本试验采用模拟 Cu^{2+} 水溶液, 以粒径分布在 0.250 ~ 0.450 mm 的铁尾矿砂作为静态及动态覆盖材料。结合单因素试验结果, 并综合影响吸附剂去除率的因素^[11-14], 采用 4 因素 3 水平中心组合设计试验, 利用响应面法对影响铁尾矿砂吸附的各种外界因素进行研究并优化, 确定了铁尾矿砂作为沉积物覆盖材料对水相中 Cu^{2+} 的较佳吸附条件, 为铁尾矿砂作为沉积物覆盖材料提供理论上的支持。

收稿日期: 2018-11-22

基金项目: 河北省科技计划项目 (18393814D); 河北省高层次人才资助项目 (E2015100006); 河北省科学院人才资助项目 (2018G05)

作者简介: 方楠 (1994-), 男, 研究生, 工程师, 研究方向为水体环境污染治理。

通信作者: 程辉彩 (1974-), 女, E-mail: huicaicheng@163.com。

1 材料与方法

1.1 材料及试剂

试验所用原料采集于河北省承德市宝馨矿业集团有限公司，其成分见表1。

表1 铁尾矿砂化学成分/%
Table 1 The chemical indicators of FMT

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO
46.54	3.47	17.82	7.03	11.34

铁尾矿砂密度为2.603 g/cm³，pH值为8.54。试验所用模拟废水使用CuSO₄·2H₂O配置。HCl及NaOH均为分析纯。试验中用水为电阻率为18.0 MΩ·cm的超纯水。

1.2 仪器与设备

电子分析天平；原子吸收分光光度计(AAS)；pH值计；恒温摇床；超纯水系统。

1.3 pH值及转速对吸附量的影响

pH值对吸附量的影响：称取1.5 g粒径在0.250~0.450 mm的铁尾矿砂置于150 mL锥形瓶中，加入pH值范围在1~8的100 mL浓度为100 μg/mL的Cu²⁺模拟废水，置于25℃，180 r/min震荡24 h，取出液体过0.22 μm水系膜后，使用原子吸收分光光度计测量Cu²⁺浓度。

转速对吸附量的影响：称取1.5 g粒径在0.250~0.450 mm的铁尾矿砂置于150 mL锥形瓶中，加入100 mL浓度为100 μg/mL的Cu²⁺模拟废水，置于25℃，转速0~250 r/min震荡30 min后取出过0.22 μm水系膜，使用原子吸收分光光度计测量Cu²⁺浓度。

1.4 响应面法优化投放条件

选取pH值、温度、Cu²⁺初始浓度^[11]以及铁尾矿砂投加量^[12-13]作为自变量，震荡96 h。采用Design-Expert中Box-Behnken法，通过响应面分析优化反应条件。试验设计见表2。

表2 响应面试验因素水平和编码值
Table 2 Factor levels and coded value of the responding surface design

编码	因素	三水平		
		0	1	2
A	pH值	3	4	5
B	温度/℃	15	25	35
C	初始浓度/(mg·L ⁻¹)	100	150	200
D	投加量/(g·L ⁻¹)	15	20	25

取粒径范围在0.250~0.450 mm的铁尾矿砂，置于150 mL三角瓶内，按照表格内各项参数进行配置100 mL模拟废水，使用HCl/NaOH调节pH值到对应值，并置于对应温度96 h后使用0.22 μm水系膜过滤后使用分光光度计测量Cu²⁺浓度。Cu²⁺的去除率计算公式为：

$$E = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100\%$$
 (1)

式中：E为Cu²⁺去除率(%)；C₀为吸附前溶液中Cu²⁺的初始浓度(mg/L)；C_e为吸附平衡后溶液中剩余Cu²⁺的浓度(mg/L)。

2 结果和讨论

2.1 pH值及转速去除率的影响

图1可得，在pH值<2时，铁尾矿砂对模拟废水中的Cu²⁺去除率为负值，说明在极低pH值下可能导致铁尾矿砂中含有的部分铜氧化物以Cu²⁺的形式析出，从而造成对水体的二次污染。pH值=2时作为一个吸附平衡位点，在此pH值下H⁺与Cu²⁺对吸附剂表面的吸附位点竞争处于动态平衡状态，导致水体中的Cu²⁺去除率接近0；pH值为3~6时，伴随着pH值升高，去质子化作用使得铁尾矿砂表面吸附位点逐渐增多，同时CuOH⁺与Cu²⁺形成Cu(OH)₂进一步降低了H⁺浓度^[18]，进而使得覆盖剂表面以化学键形式吸附更多的Cu²⁺，进而提高去除率；直至pH值为7此时模拟废水中的Cu开始以沉淀形式析出。因此，后续试验将围绕pH值在3~5展开讨论。

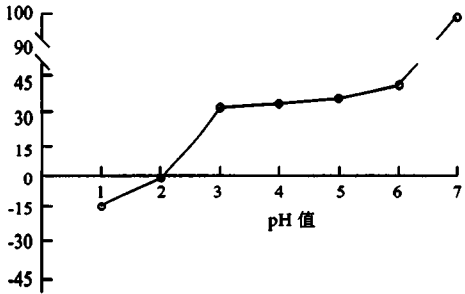


图1 pH值对铁尾矿砂对Cu²⁺去除率的影响
Fig.1 Effect of different pH on Cu²⁺ removal rate of FMT

转速对去除率影响见表3，铁尾矿砂对Cu²⁺的去除随转速的升高有所提高，但经检验不显著(50~250 r/min) (LSD,P>0.05)，说明转速大

小对吸附过程影响不大；但 180 r/min、250 r/min 与 0 r/min 相比差异显著 (LSD, $P < 0.05$)，说明相对于静态吸附，匀速震荡可以显著提高去除率。其中 250 r/min 去除率均值低于 180 r/min，原因是随着转速的提高，铁尾矿砂大部分旋进锥形瓶中央，减少了铁尾矿砂与溶液的接触面积，导致了吸附位点数量有所下降。综上，转速为 180 r/min 为铁尾矿砂吸附水相中 Cu^{2+} 的较佳转速，为保证后续试验结果均使用该转速。

表 3 不同转速时铁尾矿砂对 Cu^{2+} 去除率的影响
Table 3 Effect of different rotational speeds on Cu^{2+} removal rate on FMT

转速 / $\text{r} \cdot (\text{min}^{-1})$	剩余浓度 / $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	去除率 / %
0	93.48 ± 0.59^c	6.62 ± 0.59^c
50	89.30 ± 0.88^{bc}	10.70 ± 0.88^{bc}
100	87.44 ± 0.76^{bc}	12.56 ± 0.76^{bc}
180	85.81 ± 0.26^{ab}	14.19 ± 0.31^{ab}
250	86.31 ± 2.30^{ab}	13.69 ± 2.30^{ab}

同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)

2.2 响应面法优化铁尾矿砂对 Cu^{2+} 的吸附条件

铁尾矿砂对 Cu^{2+} 的去除率响应面试验设计及结果见表 4。

表 4 试验方案、结果与模型预测值
Table 4 Design result and model predicted value of test

试验序号	A	B	C	D	去除率 %	
					试验值	响应值
1	4	25	150	20	99.976	99.98
2	4	35	150	15	99.999	103.19
3	5	25	150	15	99.976	97.62
4	3	15	150	20	86.323	87.35
5	4	35	200	20	99.982	102.70
6	4	15	150	25	98.036	95.21
7	5	25	100	20	99.964	101.68
8	4	25	150	20	99.952	99.98
9	4	25	150	20	99.999	99.98
10	4	25	150	20	99.976	99.98
11	3	35	150	20	99.929	100.19
12	4	25	100	15	99.999	99.74
13	3	25	150	25	99.999	101.30
14	5	25	200	20	99.964	98.93
15	4	15	100	20	97.274	93.51
16	5	35	150	20	99.952	99.61
17	4	25	200	25	99.999	100.95
18	4	25	150	20	99.976	99.98
19	4	35	100	20	99.999	98.04
20	4	15	150	15	75.959	80.19
21	5	15	150	20	88.101	88.53
22	4	25	200	15	98.288	96.11

23	3	25	200	20	99.964	98.61
24	4	35	150	25	99.999	96.13
25	5	25	150	25	99.999	101.57
26	4	15	200	20	82.404	83.31
27	3	25	100	20	99.999	101.40
28	4	25	100	25	99.999	102.87
29	3	25	150	15	99.905	97.28

2.2.1 模型方差分析

对试验数据进行多元三次回归分析，并依据 R^2_{Adj} 进行选择剔除交互方程中的不显著项，得到拟合后得到交互方程：

$$E = 99.39 + 4.47 \times 10^{-3}A + 6.43B - 0.22C + 0.23D - 0.44AB + 3.71BC - 5.52BD + 0.43CD - 5.6B^2 + 0.61C^2 + 0.45AB^2 - 3.5B^2C + 5.29B^2D - 1.36BC^2$$

式中：E 为特尾矿对模拟废水中 Cu^{2+} 的去除率，A、B、C、D 分别为 pH 值、温度、初始浓度、投加量。方程中可得，4 个因素对去除率的影响并不是简单的线性关系，而是有所交互。为验证模型对试验结果进行模拟的充分性和显著性，对模型拟合的二次回归方程进行方差分析，结果见表 5。

表 5 响应面模型方差分析
Table 5 Analysis of variance (ANONA) of RSM model

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	Prob>F	显著性
模型	1025.23	19	53.96	360.39	<0.0001	***
A	1.60×10^{-4}	1	1.60×10^{-4}	1.07×10^{-3}	0.9747	不显著
B	331.03	1	331.03	2210.85	<0.0001	***
C	3.06×10^{-4}	1	3.06×10^{-4}	2.05×10^{-3}	0.9649	不显著
D	3.44×10^{-3}	1	3.44×10^{-3}	2.30×10^{-2}	0.8828	不显著
AB	7.69×10^{-1}	1	7.69×10^{-1}	5.14	0.0496	不显著
BC	55.16	1	55.16	368.38	<0.0001	***
BD	121.85	1	121.85	813.83	<0.0001	***
CD	7.33×10^{-1}	1	7.33×10^{-1}	4.89	0.0543	不显著
A ²	8.23×10^{-1}	1	8.23×10^{-1}	5.49	0.0437	**
B ²	157.22	1	157.22	1050.06	<0.0001	不显著
C ²	4.13×10^{-2}	1	4.13×10^{-2}	2.76×10^{-1}	0.6120	不显著
D ²	1.55×10^{-1}	1	1.55×10^{-1}	1.04	0.3354	不显著
AB ²	5.30×10^{-1}	1	5.30×10^{-1}	3.54	0.0927	不显著
B ² C	27.57	1	27.57	184.17	<0.0001	***
B ² D	60.28	1	60.28	402.60	<0.0001	***
BC ²	4.91	1	4.91	32.78	0.0003	**
C ² D	3.18×10^{-1}	1	3.18×10^{-1}	2.12	0.1791	不显著
CD ²	3.51×10^{-1}	1	3.51×10^{-1}	2.35	0.1600	不显著
B ² C ²	3.20	1	3.20	21.40	0.0012	**
残差	116.94	14	8.35			
失拟值	4.21	10	0.42	1.4	0.3991	不显著
纯误差	1.20	4	0.3			
总离差	1026.58	28				

* $P < 0.05$ ，显著，** $P < 0.01$ ，极显著，*** $P < 0.0001$ ，极极显著

模型的 F 值为 360.39，远大于 1，说明方程的显著性强； $P < 0.0001$ ，表明拟合的二次模型极显

著,说明该模型设计合理且具有良好的预测能力。同时,校正绝对系数(R^2_{Adj})、 R^2 的预测值(R^2_{pred})与相关系数(R^2)分别为0.9895、0.8842与0.9947,均接近1,表明模型拟合程度高,试验误差较小^[16]。 R^2_{Adj} 与 R^2_{pred} 的差值为0.1053,小于0.2,表明该模型可信度高^[16]; R^2 值为0.9947,表明该模型能解释99.47%响应值的变化,仅有0.53%不能用该模型解释;变异系数(CV)为0.64%,远小于10%,在接受范围内,有效信号与噪音的比值(AP)等于53.96,远大于4,表明试验的精确度极高^[19]。

由回归系数显著性检验可知:铁尾矿砂对 Cu^{2+} 的吸附模型中B、BC、BD、 B^2 、 B^2C 、 B^2D 、 BC^2 、 B^2C^2 差异极显著($P < 0.01$), A^2 、BD、 B^2 差异显著($P < 0.05$)。pH值、温度、初始浓度、投加量的F值为: 1.07×10^{-3} 、2210.85、 2.05×10^{-3} 、 2.30×10^{-2} ,因此各因素对吸附过程影响显著性顺序为温度>投加量>初始浓度>pH值。

2.2.2 因素效应分析

依据回归方程绘出3D响应面曲面图,以确定pH值、温度、初始浓度、投加量4个因素对铁尾矿砂吸附 Cu^{2+} 性能影响,见图2~5。

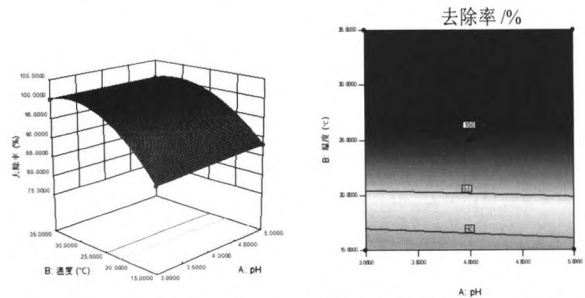


图 2 温度与 pH 对 Cu^{2+} 去除率交互影响的响应面
Fig. 2 Interaction effect of temperature and pH on Cu^{2+} adsorption in responding surface plot

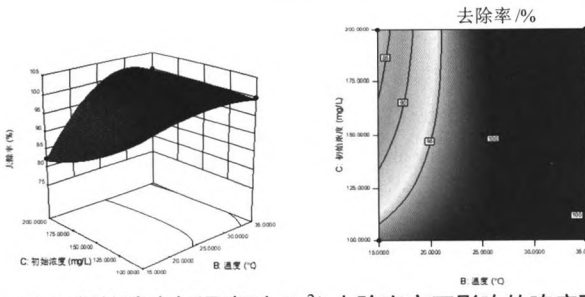


图 3 初始浓度与温度对 Cu^{2+} 去除率交互影响的响应面
Fig. 3 Interaction effect of initial concentration and temperature on Cu^{2+} adsorption in responding surface plot

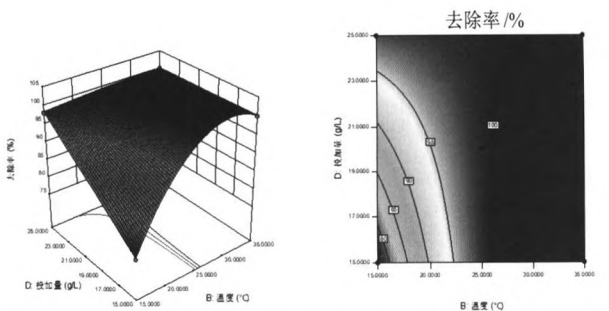


图 4 投加量与温度对 Cu^{2+} 去除率交互影响的响应面图
Fig. 4 Interaction effect of dosage and temperature on Cu^{2+} adsorption in responding surface plot

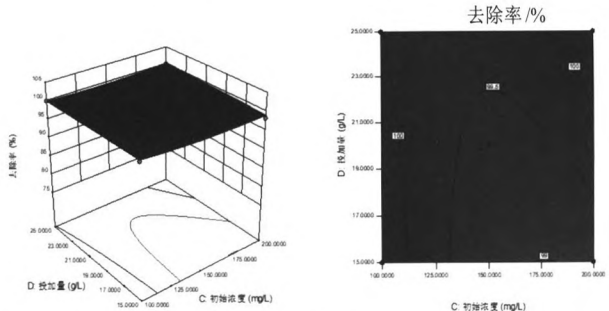


图 5 投加量与初始浓度对 Cu^{2+} 去除率交互影响的响应面
Fig. 5 Interaction effect of dosage and initial concentration on Cu^{2+} adsorption in responding surface plot

图 2 为初始浓度和投加量在中心条件下, pH 值和温度对去除率的影响。在 pH 值=4, 温度为 15℃, 初始浓度为 150 mg/L, 投加量为 20 g/L 时, 铁尾矿对水中 Cu^{2+} 的去除率为 86.32%, 当 pH 值提升到 5 时, 去除率为 88.10%, 仅提高 1.78%, 差异不显著, 因此铁尾矿砂对 Cu^{2+} 去除率在 pH 值在 3~5 之间基本保持不变。同时由表 5 可得 pH 值和温度存在显著的交互影响关系 ($P > 0.05$)。图 3 是以 pH 值和投加量为中心条件, 初始浓度和温度对去除率的影响, 随着模拟水相中 Cu^{2+} 初始浓度由 100 mg/L 增加至 200 mg/L, 去除率有所下降, 由 97.27% 下降至 82.40% (温度为 15℃, pH 值为 4, 投加量 20 g/L)。模拟水相中 Cu^{2+} 的浓度升高, 虽提高铁尾矿砂对 Cu^{2+} 的吸附速度, 但铁尾矿砂投加量一定, 其达到饱和状态后吸附量一定, 所以造成去除率明显下降。且二者不存在交互影响关系 ($P < 0.05$)。

图 4 中是以 pH 值和初始浓度为中心条件, 温度和投加量对去除率的影响。控制试验条件: 温度为 15℃, pH 值=4, 初始浓度为 150 mg/L。

投加浓度由 15 g/L 提高至 25 g/L 时, 去除率由 75.96% 提高至 98.04%, 有显著提高。原因是伴随着铁尾矿砂量提高, 总的吸附位点数量也在提高, 而模拟水相中 Cu^{2+} 初始浓度不变, 从而导致了去除率升高。且温度和投加量之间不具有显著的交互影响作用 ($P < 0.05$)。综合图 2~5 可知, 当自变量包含温度因素时, 响应面的坡度改变比较敏感, 说明铁尾矿砂对 Cu^{2+} 去除率对温度的改变敏感^[20]。同时去除率随温度升高而升高, 原因是铁尾矿砂对 Cu^{2+} 吸附过程是一个吸热的化学过程, 温度的提高有利于促进整个吸附过程, 从而提高了去除率。

2.2.3 模型优化验证

使用 Design Expert 10.0.3 软件进行优化, 根据实际情况, 得到铁尾矿砂吸附 Cu^{2+} 较佳条件为温度为 20℃, 初始 pH 值为 4, 初始浓度为 250 mg/L, 铁尾矿砂的投加量 15 g/L。为预测模型的可靠性, 使用较佳条件进行了三次平行试验。得到平均去除率为 88.80%, 模型预测值为 88.87%, 试验值与预测值基本一致, 说明该模型能够较好的拟合不同条件下铁尾矿砂对 Cu^{2+} 去除率的影响。因此, 采用响应面优化铁尾矿砂对 Cu^{2+} 吸附数据可靠, 具有实用价值。

3 结 论

(1) 在室温条件下 (25℃) 且未造成 Cu^{2+} 在水相沉淀情况下, pH 值为 3~5 适合于铁尾矿砂吸附 Cu^{2+} , pH 值低于 2 时铁尾矿砂中的 Cu^{2+} 析出, 造成水体二次污染。动态吸附效果显著优于静态吸附, 转速在 180 r/min 时, 铁尾矿砂对 Cu^{2+} 去除率最大。

(2) 以 pH 值、温度、初始浓度、投加量为影响因素, 采用响应面方法 (RSM) 中的 Box-Behnken 中心组合设计进行了条件优化, 得到了模拟显著且真实的模型方程。其中, 温度对铁尾矿砂与 Cu^{2+} 过程有显著影响, 模型因素的显著性顺序为: 温度 > 投加量 > 初始浓度 > pH 值。

(3) 为验证模型准确性, 使用温度为 20℃、

初始 pH 值为 4、初始浓度为 250 mg/L 和投加量在 15 g/L。得出去除率为 88.80%, 与预测值 88.87% 偏差 0.08%, 表明回归所得到的模型方程能够有效的预测不同条件下铁尾矿砂对 Cu^{2+} 的去除率。

参考文献:

- [1] 谢超然, 王兆炜, 朱俊民, 等. 核桃青皮生物炭对重金属铅、铜的吸附特性研究 [J]. 环境科学学报, 2016, 36(4):1190-1198.
- [2] 郝雅荣, 吕建波, 高雪, 等. 电絮凝同步去除水中铜 (II) 和铬 (VI) 复合污染物的影响因素及其作用机理 [J]. 环境工程学报, 2018, 12(2):460-467
- [3] Aoudj S, Khelifa A, Drouiche N. Removal of fluoride, SDS, ammonia and turbidity from semiconductor wastewater by combined electrocoagulation-electroflotation[J]. Chemosphere, 2017, 180:379-387.
- [4] Yi Y, Tang C, Yi T, et al. Health risk assessment of heavy metals in fish and accumulation patterns in food web in the upper Yangtze River, China[J]. Ecotoxicology and environmental safety, 2017, 145: 295-302.
- [5] Guo X, Liu X, Niu Z, et al. Seasonal and spatial distribution of antibiotic resistance genes in the sediments along the Yangtze Estuary, China[J]. Environmental pollution, 2018, 242: 576-584.
- [6] Ensie B, Samad S. Removal of nitrate from drinking water using nano $\text{SiO}_2\text{-FeOOH-Fe}$ core-shell[J]. Desalination, 2014, 347: 1-9.
- [7] Beh C L, Chuah T G, Nourouzi M N, et al. Removal of heavy metals from steel making waste water by using electric arc furnace slag[J]. Journal of Chemistry, 2012, 9(4): 2557-2564.
- [8] Pham A N, Xing G, Miller C J, et al. Fenton-like copper redox chemistry revisited: Hydrogen peroxide and superoxide mediation of copper-catalyzed oxidant production[J]. Journal of Catalysis, 2013, 301(5):54-64.
- [9] Malik D S, Jain C K, Yadav A K. Removal of heavy metals from emerging cellulosic low-cost adsorbents: a review[J]. Applied Water Science, 2017, 7(5): 2113-2136.
- [10] Bustos G, Calvar S, Vecino X, et al. Industrial Symbiosis Between the Winery and Environmental Industry Through the Utilization of Grape Marc for Water Desalination Containing Copper (II)[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2018, 229(2): 36.
- [11] Chen Y, Zhang Y, Chen T, et al. Preparation and characterization of red porcelain tiles with hematite tailings[J]. Construction & Building Materials, 2013, 38:1083-1088.

- [12] Khuri A I, Mukhopadhyay S. Response Surface Experiments and Designs[M]//Handbook of Design and Analysis of Experiments. Chapman and Hall/CRC, 2015: 217-256.
- [13] 于戈, 王丽, 胡欣蕾, 等. 响应面法优化蛹虫草固态发酵产物虫草素与腺苷综合提取工艺 [J]. 食品科学, 2018, 39(6):270-275.
- [14] 张华, 罗柳丹, 张学洪, 等. 响应面法优化柚皮基活性炭对 Cr(VI) 的吸附条件 [J]. 桂林理工大学学报, 2015, 35(3):555-559.
- [15] 王哲, 张思思, 黄国和, 等. 高炉水淬渣对电镀废水中重金属和 COD 吸附的响应面优化 [J]. 化工进展, 2016, 35(11):3669-3676.
- [16] 王利平, 刘静静, 沈肖龙, 等. 响应面法优化凹凸棒土吸附水中亚甲基蓝 [J]. 环境工程学报, 2016, 10(9):4912-4918.
- [17] 黄增, 黄红铭. 基于响应面法优化活性炭处理含镉废水工艺的研究 [J]. 环境科学与管理, 2018, 43(1):108-112.
- [18] Kim D H, Shin M C, Choi H D, et al. Removal mechanisms of copper using steel-making slag: adsorption and precipitation[J]. Desalination, 2008, 223(1-3): 283-289.
- [19] Xu C, Wang J, Yang T, et al. Adsorption of uranium by amidoximated chitosan-grafted polyacrylonitrile, using response surface methodology.[J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 121:79-85.
- [20] 管映兵, 王刚, 徐敏, 等. 响应面法优化制备新型重金属絮凝剂 MAAPAM[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(6):63-69.

Optimization of Adsorption Conditions of Copper (II) on Ferrous Mill Tailings by Response Surface Methodology

Fang Nan^{1,2}, Wu Jian^{1,2}, He Qiang¹, Cheng Huicai¹, Zhang Liping¹, Wang Hongwei²

(1. Biology Institute, Hebei Academy of Science, Shijiazhuang, Hebei, China; 2.College of Life Science, Hebei University, Baoding, Hebei, China)

Abstract: The ferrous mill tailings (FMT) were applied in an in-situ restoration for copper (II) in water, the pH and rotation rate were investigated which effected removal rate. The result showed that removal rate was promoted apparently in pH 3 to 5 and also rotation rate in 180 r/min. The factors such as pH, temperature, initial copper(II) concentration, and adsorbent dosage were investigated by Box-Behnken in response surface methodology, mathematical models were established, and also the effectiveness of the model was verified. Evaluation of the effects of different factors on the removal rate showed that the effects followed the trend: temperature, adsorbent dosage, initial copper (II) concentration, and pH in descending order. The optional conditions for absorption progress involved a temperature of 20 ℃ , initial pH of 4, and initial copper (II) concentration of 250 mg/L, and adsorbent dosage of 15 g/L. Under the aforementioned conditions, the removal rate is 88.80%, which is closed to the predicated removal rate of 88.87%. Therefore, the model established can truly reflect of those main factors.

Keywords: Ferrous mill tailings; Copper (II); Removal rate; Absorption; Optional design by respond surface

欢迎投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告