

响应面优化三氧化二铁处理污酸工艺的研究

高一强, 黄建洪*, 张利祥, 郑前兴, 田森林

(昆明理工大学环境科学与工程学院, 云南 昆明 650500)

摘要:为解决三氧化二铁在污酸治理中的浸出问题,采用响应面分析法对处理工艺中的污酸酸度、浸出温度、浸出时间和液固比进行优化。基于响应实验结果进行方程回归分析,得到4个关键因素与响应值的二次关联模型。通过方差分析和平行实验证明该模型准确可用,并得出三氧化二铁处理污酸工艺的最佳条件为:酸度为180 g/L、浸出温度为85℃、浸出时间为600 min、液固比为125 mL:4.36 g,在该条件下三氧化二铁处理污酸中砷的去除率达到99.42%。

关键词:污酸;三氧化二铁;浸出;响应面法

中图分类号:X703

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2020)12-0116-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2020.12.024

Response surface optimization of treatment process for waste acid by ferric oxide

GAO Yi-qiang, HUANG Jian-hong*, ZHANG Li-xiang, ZHENG Qian-xing, TIAN Sen-lin

(Faculty of Environmental Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: In order to solve the leaching problem of ferric oxide in the treatment of waste acid, the response surface analysis method is employed to optimize the acidity, leaching temperature, leaching time and liquid-solid ratio in the treatment process. Based on response experiments, the regression analysis of the experimental results is performed to obtain a quadratic correlation model between four key factors and response values. Variance analysis and parallel experiments prove that the model is accurate and available. The optimum conditions for the treatment process of waste acid by ferric oxide are obtained as follows: acidity is $180 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, leaching temperature remains at 85°C , leaching time is 600 min, and the liquid-solid ratio is 125 mL:4.36 g. Under these conditions, the removal rate of arsenic from waste acid by ferric oxide reaches 99.42%.

Key words: waste acid; ferric oxide; leaching; response surface methodology

随着工业的不断发展,冶炼过程产生的废水污染问题越来越突出,污酸作为冶炼行业的主要污染物具有酸度高且含有砷和重金属的特点^[1-2],对周围生态环境造成了严重的影响^[3-4]。目前国内外污酸处理技术主要是将污酸中的溶解态重金属转变为不溶性重金属化合物,经过沉淀分离去除。污酸处理技术主要有中和法、硫化法、铁氧体法、电絮凝法等^[5-7]。国内外学者将含有三氧化二铁成分的物质应用于水环境治理进行了大量的研究,如利用赤铁矿在酸性介质中的吸附和沉淀作用处理砷^[8];利用钢渣、硫铁矿渣处理水中污染物也具有较好的效果^[9-10]。这些冶炼废渣在水处理上的应用与三氧化二铁成分的浸出情况有直接影响,但三氧化二铁成分的溶出受诸多因素的影响,因此通过三氧化二铁浸出实验找出不同因素对浸出总铁的影响有着重要的理论和现实意义。响应曲面分析方法相比传统优

化法具有实验效率高、节约资源、能够解释因素之间交互影响等优点^[11-13],被越来越多的实验工作者应用于工艺优化过程研究^[14-17]。因此,笔者采用响应面分析法对三氧化二铁处理铜冶炼污酸工艺中的各因素进行优化。根据中心组合(Box-Behnken)实验设计原理,利用四因素三水平的响应面分析法以浸出液中总铁浓度为响应指标确定最佳工艺及其交互作用。

1 实验的材料与方法

1.1 实验药品与仪器

药品:三氧化二铁(69.80%~70.10%,以Fe计)、98%硫酸、砷标准溶液、氢氧化钠。

仪器:电子分析天平,美国奥斯豪公司生产;PHS-3C台式酸度计,上海虹益仪器仪表有限公司生产;恒温震荡箱,上海一恒科学仪器有限公司生

收稿日期:2020-02-27;修回日期:2020-10-13

基金项目:国家重点研发计划课题(2018YFC1802603)

作者简介:高一强(1994-),男,硕士研究生,研究方向为工业废水处理,1334709523@qq.com;黄建洪(1978-),男,博士,副教授,研究方向为工业废水的处理与利用,通讯联系人,49069592@qq.com。

产;TAS-992 火焰原子分光光度计,北京普析通用仪器有限责任公司生产;AFS-8230 原子荧光光度计,北京吉天仪器有限公司生产。

1.2 实验方法

云南某铜业公司提供的铜冶炼污酸成分如表 1 所示,考虑到铜冶炼污酸成分复杂,采用相应酸度范围的硫酸进行实验。

表 1 云南某铜业公司铜冶炼污酸成分分析

项目	酸度/ (g·L ⁻¹)	ρ (氟)/ (g·L ⁻¹)	ρ (尘)/ (g·L ⁻¹)	ρ (砷)/ (g·L ⁻¹)
指标值	80~200	6000~12000	<7000	20000~45000

1.2.1 浸出实验的响应面实验设计

采用单因素实验法考察污酸浸三氧化二铁对浸出总铁的影响,根据单因素实验结果,利用软件 Box-Behnken 模型实验设计原理设计实验方案中的因素及水平,如表 2 所示。

表 2 响应面分析因素与水平

因素	水平		
	-1	0	1
酸度(A)/(g·L ⁻¹)	120	150	180
浸出温度(B)/°C	45	65	85
浸出时间(C)/min	360	480	600
液固比(D)/(mL·g ⁻¹)	50:4.36	100:4.36	150:4.36

1.2.2 最佳浸出条件下三氧化二铁处理含砷溶液

利用砷标准溶液配置含有砷 1 g/L 的污酸,取 100 mL 污酸溶液与 4.36 g 三氧化二铁在最佳酸度、浸出温度、浸出时间及液固比下反应,恒温振荡箱转速为 200 r/min。反应结束后,用 2.5 mol/L 氢氧化钠调节溶液 pH 至 4~5,产生大量絮状沉淀,静置沉淀后经 0.45 μm 滤膜过滤,获得上清液用原子荧光分光光度计测定溶液中残留砷质量浓度,计算砷去除率:

$$\text{砷去除率}(\%) = [(C_1 - C_2)/C_1] \times 100\%$$

式中: C_1 为处理前砷质量浓度, $C_1 = 1\ 000\ \text{mg/L}$; C_2 为残留砷质量浓度,mg/L。

2 实验结果与讨论

2.1 酸浸因素对实验结果的影响

2.1.1 酸度对总铁浸出的影响

酸度对总铁浸出的影响如图 1 所示。由图 1 中可以看出,当污酸酸度为 180 g/L 时溶液中总铁的

质量浓度达到 2 474.6 mg/L,总铁的浸出质量浓度随酸度的升高而明显增加。在 150~180 g/L 较高质量浓度污酸中,总铁浸出速率有所减缓,继续增加酸度,浸出液中总铁质量浓度呈下降的趋势,这是由于酸度增加,溶液中活性氢离子增加,使得溶液中浸出总铁质量浓度增加,但随着溶液中 Fe^{3+} 质量浓度的升高,抑制了溶液中氢离子的活性,导致总铁质量浓度增长缓慢甚至下降。

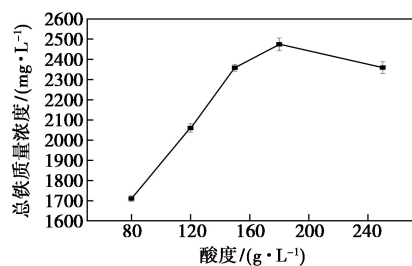


图 1 酸度对总铁浸出的影响

2.1.2 浸出温度对总铁浸出的影响

浸出温度对总铁浸出的影响如图 2 所示。从图 2 中可以看出,升高温度对铁浸出率的影响比较显著,温度升高促进了三氧化二铁的溶解。当温度为 65°C 时,总铁的浸出质量浓度达到 2 474.6 mg/L。在相同的条件下,在 45~85°C 的温度范围内总铁的浸出质量浓度持续快速升高;而在 85~105°C 范围内时,总铁的浸出量变化并不十分明显。

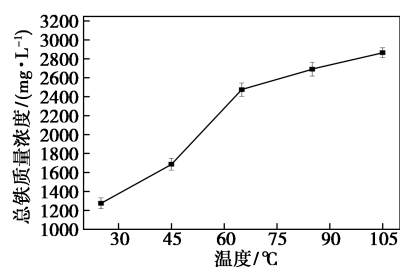


图 2 浸出温度对总铁浸出的影响

2.1.3 浸出时间对总铁浸出的影响

浸出时间对总铁浸出的影响如图 3 所示。浸出时间对污酸溶液中总铁质量浓度的影响也非常明显。

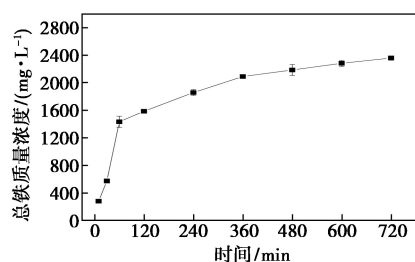


图 3 浸出时间对总铁浸出的影响

由图 3 可以看出,随着浸出时间的延长,溶液中总铁质量浓度有所增加,在 10~600 min 溶液中总铁质量浓度增加速度较快,在之后的 120 min 中,溶液中总铁质量浓度几乎没有明显变化。

2.1.4 液固比对总铁浸出的影响

液固比对总铁浸出的影响如图 4 所示。由图 4 中可以看出,当液固比为 100:4.36 时(污酸溶液体积为 100 mL,三氧化二铁质量为 4.36 g),总铁的浸出质量浓度达到最高。在相同的条件下,当液固比由 100:4.36 增加到 250:4.36 时,溶液中总铁的质量浓度明显降低,增加反应溶液体积会增加总铁的浸出效率,但效率升高比较缓慢。

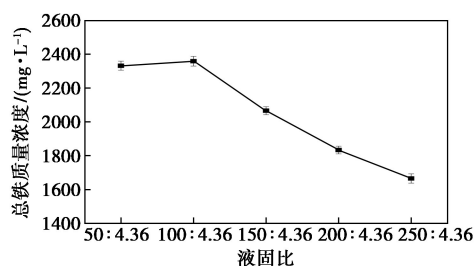


图 4 液固比对总铁浸出的影响

2.1.5 震荡速度对总铁浸出的影响

震荡速度对总铁浸出的影响如图 5 所示。由图 5 中可以看出,震荡速度对浸出反应的影响并不显著,在反应之前三氧化二铁沉于污酸溶液底部,经过充分长时间的震荡,三氧化二铁粉末能够均匀分布在溶液中,可以增加三氧化二铁与溶液的接触频率,加速铁的浸出。当震荡速度为 200 r/min 时,三氧化二铁粉末在溶液中已经处于均匀分布状态,固相粉末与浸出过程中的水合硫酸铁在机械作用下形成较强对流作用,从而迅速扩散达到最佳状态,继续增加震荡的速度,总铁的浸出效果并没有明显的增加。

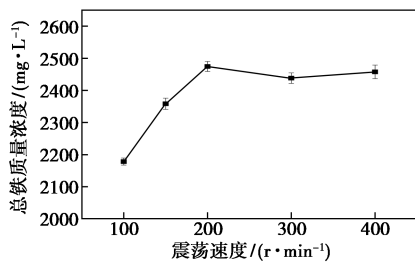


图 5 震荡速度对总铁浸出的影响

2.2 回归模型的建立及分析

结合单因素实验结果,得到设计实验结果如表 3 所示。

表 3 Box-Behnken 设计方案及响应值结果

实验号	酸度(A)/(g·L ⁻¹)	浸出温度(B)/°C	浸出时间(C)/min	液固比(D)/(mL:g)	浸出总铁/(mg·L ⁻¹)
1	0	1	0	1	2729.60
2	-1	-1	0	0	1135.60
3	0	-1	1	0	1435.60
4	0	0	-1	-1	2466.80
5	1	0	1	0	2397.30
6	0	0	0	0	2185.25
7	0	-1	-1	0	1450.80
8	-1	0	0	-1	2423.00
9	-1	0	1	0	1981.55
10	0	0	-1	1	1695.00
11	0	1	1	0	2871.60
12	0	0	1	1	2207.20
13	1	0	-1	0	2198.15
14	1	-1	0	0	1503.00
15	0	0	0	0	2185.25
16	0	0	0	0	2790.20
17	1	0	0	1	2193.80
18	-1	0	-1	0	1750.80
19	0	1	-1	0	2487.20
20	0	0	1	-1	2268.00
21	0	-1	0	1	920.00
22	-1	1	0	0	2527.40
23	1	0	0	-1	2645.40
24	0	1	0	-1	2921.60
25	1	1	0	0	3134.00
26	-1	0	0	1	1644.60
27	0	-1	0	-1	1988.20

对表 3 中的试验数据进行二次多元回归拟合,得到 R1(浸出总铁)的二次多元回归方程为:

$$R1(\text{浸出总铁}) = 2386.90 + 217.39 \times A + 686.52 \times B + 92.71 \times C - 276.90 \times D + 59.80A \times B - 7.90 \times A \times C + 81.70 \times A \times D + 99.90 \times B \times C + 219.05 \times B \times D + 177.75 \times C \times D - 125.63 \times A^2 - 179.38 \times B^2 - 166.21 \times C^2 - 54.56 \times D^2$$

对该模型进行方差分析及模型系数显著性检验,结果如表 3 所示。根据模型显著性检验 $p < 0.05$,说明实验模型具有统计学的意义。失拟项表示所用模型与实验拟合的程度,即二者差异的程

度^[18],实验结果显示 F 值为 $0.999\ 2 > 0.05$,该模型模拟效果良好,因此可用该回归方程对实验结果进行预测^[19]。通过对二次多项式回归模型进行方差分析,结果 F 值为 21.04 , $P < 0.000\ 1$,表明回归方程极显著,其校正相关系数 $R^2 = 0.961\ 0$ 及变异系数 (CV) 为 7.61% ,该模型只有 3.90% 的变异可能性,说明响应值的变化有 96.10% 来源于所选的变量,即此模型与数据拟合度较高,实验误差较小,可用此模型和方程来分析和预测总铁的浸出质量浓度。

响应面二次模型及其回归系数的方差分析结果如表 4 所示。由表 4 可以看出, B 、 D 对三氧化二铁浸出总铁质量浓度 $R1$ 影响极显著 ($p < 0.000\ 1$); A 、 C 、 BD 、 B^2 、 C^2 、 D^2 对浸出总铁 $R1$ 影响显著 ($P < 0.05$),表明酸度、浸出温度、浸出时间、液固比 4 个因素对浸出总铁质量浓度 $R1$ 都有显著的影响,且各个因素对三氧化二铁浸出效果的影响呈现非线性关系,交互作用及方程二次项也对三氧化二铁的浸出效果影响较大。由表 4 可知, $F(A) = 21.13$, $F(B) = 210.70$, $F(C) = 3.84$, $F(D) = 34.28$,故 4 个因素的影响程度由大到小为:浸出温度 > 液固比 > 酸度 > 浸出时间。

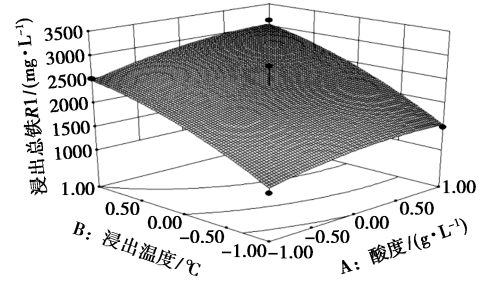
表 4 响应面二次模型及其回归系数的方差分析结果

来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	7.905×10^6	14	5.647×10^5	21.04	< 0.0001	**
A	5.671×10^5	1	5.671×10^5	21.13	0.0006	*
B	5.656×10^5	1	5.656×10^6	210.70	< 0.0001	**
C	1.031×10^5	1	1.031×10^5	3.84	0.0736	
D	9.201×10^5	1	9.201×10^5	34.28	< 0.0001	**
AB	14304.16	1	14304.16	0.53	0.4794	
AC	249.64	1	249.64	9.3×10^{-3}	0.9248	
AD	26699.56	1	26699.56	0.99	0.3383	
BC	39920.04	1	39920.04	1.49	0.2461	
BD	1.919×10^5	1	1.919×10^5	7.15	0.0203	*
CD	1.264×10^5	1	1.264×10^5	4.71	0.0508	
A^2	84179.92	1	84179.92	3.14	0.1019	
B^2	1.716×10^5	1	1.716×10^5	6.39	0.0265	*
C^2	1.473×10^5	1	1.473×10^5	5.49	0.0372	*
D^2	15875.26	1	15875.26	0.59	0.4567	
残差	3.221×10^5	12	26842.14			
失拟项比 F 值	78129.36	10	7812.94	0.064	0.9992	
绝对误差	2.440×10^5	2	1.220×10^5			
总和	8.227×10^6	26				

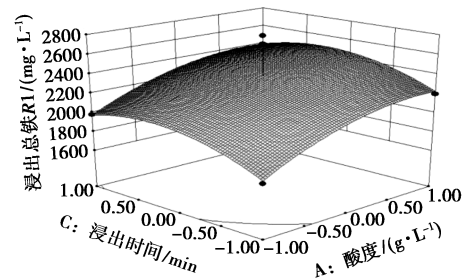
注: P 值是方差齐性检查的结果, * 表示差异极显著 ($P < 0.000\ 1$), * 表示差异显著 ($P < 0.05$)。

2.3 响应曲面分析与优化

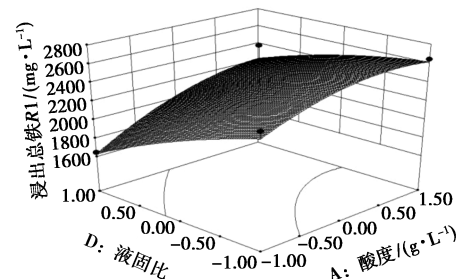
根据实验回归方程得到模型的响应曲面及其等高线图,如图 6 所示。



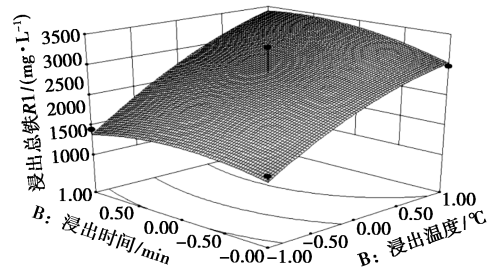
(a) 酸度与浸出温度的交互关系



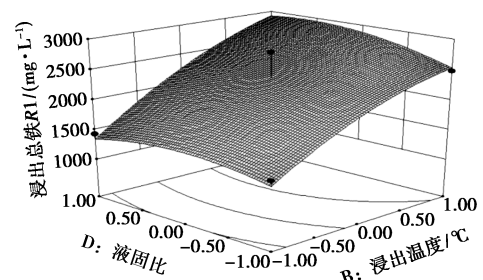
(b) 酸度与浸出时间的交互关系



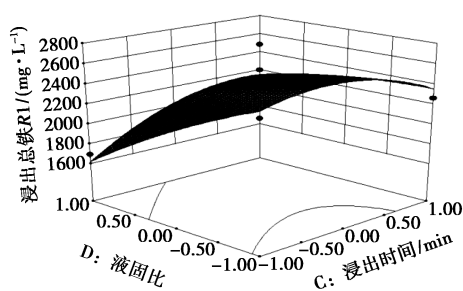
(c) 酸度与液固比的交互关系



(d) 浸出温度与浸出时间的交互关系



(e) 浸出温度与液固比的交互关系



(f) 浸出时间与液固比的交互关系

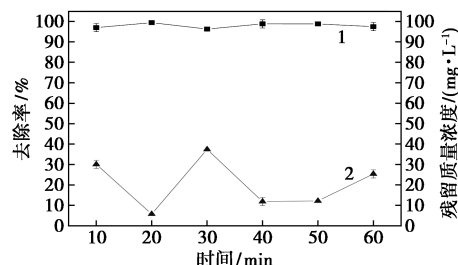
图 6 污酸中浸出总铁的响应面图

从图 6(a) 中可以看出, 当反应温度一定时, 随着酸度的提高, 总铁的浸出效果呈上升的趋势。这是由于酸度增加溶液中氢离子增多, 更多地参与到浸出过程, 促进三氧化二铁的溶解。当溶液酸度一定时, 随着温度的升高, 总铁浸出质量浓度呈现明显上升趋势, 温度升高增强了溶液中氢离子的活性, 大大提高了利用效率, 使总铁的浸出速率加快。从等高线图中可以看出, 酸度为 180 g/L 左右、反应温度为 85℃ 左右时, 总铁浸出质量浓度得到最大值。从图 6(b) 中可以看出, 当酸度固定时, 延长浸出时间总铁的浸出质量浓度缓慢增加。在相同的时间内, 提高酸度也可以使总铁浸出质量浓度提高。从图 6(c) 中可看出, 在酸度一定条件, 液固比升高减小了总铁质量浓度, 酸度与液固比有交互作用。从图 6(d) 中可以看出, 当浸出时间固定, 提高浸出温度可以迅速提高浸出总铁质量浓度; 而浸出温度固定, 随着浸出时间的延长溶液中总铁质量浓度变化相对较小, 所以浸出温度和浸出时间的交互作用较弱。所以由图 6 可知, 浸出温度与液固比的交互作用对三氧化二铁浸出总铁的影响最为显著; 浸出时间和液固比、浸出温度和浸出时间、酸度和液固比、酸度和浸出温度的交互作用次强; 而酸度与浸出时间的交互作用相对最弱。

2.4 最佳工艺的确定及验证试验

利用 Design Expert 统计软件进行优化, 以浸出总铁质量浓度 (mg/L) 为指标并限定其范围为 920~3 134, 得到最优条件为: 酸度为 180 g/L、浸出温度为 85℃、浸出时间为 600 min、液固比为 125 mL: 4.36 g, 预测总铁浸出质量浓度达到 3 150.60 mg/L。根据优化的最佳反应条件进行验证实验 3 次, 得到浸出总铁质量浓度平均为 3 139.85 mg/L, 与预测值相近。因此, 利用最佳实验结果对污酸中的砷进行处理, 反应过程中观察到溶液中产生大量棕黄色絮状物, 经过不同时间取样检测溶液中残留砷

质量浓度, 结果如图 7 所示。在 10 min 时, 砷的去除率已经达到 97%, 20 min 后砷的去除效率达到 99% 以上。



1—去除率; 2—残留质量浓度

图 7 最佳条件下砷溶液的去除效果

3 结论

(1) 利用 Design Expert 软件建立的响应面数学模型, 其 $P < 0.000 1$, $R^2 = 0.961 0$, 表明模型显著, 回归方程能较好地模拟真实的曲面。

(2) 在酸度、浸出温度、浸出时间、液固比 4 个因素中, 浸出温度和液固比对总铁的浸出影响最为显著, 影响程度由大到小为: 浸出温度 > 液固比 > 酸度 > 浸出时间。

(3) 三氧化二铁处理铜冶炼污酸实验的最佳工艺条件为: 酸度为 180 g/L、浸出温度为 85℃、浸出时间为 600 min、液固比为 125 mL: 4.36 g。该条件下浸出总铁质量浓度为 3 139.85 mg/L, 在此条件下, 三氧化二铁对污酸中砷的去除率为 99.42%。

参考文献

- [1] Yang T, Hu B, Liu W, et al. A novel process for the treatment of copper-smelting waste acid with a high arsenic concentration [J]. *Jom*, 2018, 70(10): 2022-2026.
- [2] Amir Mohammad Nazari, Rebecca Radzinski, Ahmad Ghahreman. Review of arsenic metallurgy: Treatment of arsenical minerals and the immobilization of arsenic [J]. *Hydrometallurgy*, 2017, 174: 258-281.
- [3] 李安, 郑雅杰, 彭映林, 等. 铝钙粉浸出渣的活化及其在锌冶炼废水处理中的应用 [J]. *中国有色金属学报*, 2019, 29(5): 1073-1082.
- [4] 李永奎, 祝星, 祁先进, 等. 铜渣与含砷污酸反应行为及除砷机理 [J]. *中国环境科学*, 2019, 39(10): 4228-4238.
- [5] 刘志刚. 石灰中和法处理含重金属离子酸性废水 [J]. *江西冶金*, 2003, 23(6): 109-110.
- [6] 吴兆清, 陈燎原, 许国强, 等. 石灰-铁盐法处理硫酸厂高砷废水的研究与应用 [J]. *矿冶*, 2003, 12(1): 79-81.
- [7] 高峰, 贾永忠, 孙进贺, 等. 锌冶炼废渣浸出液硫化法除砷的研究 [J]. *环境工程学报*, 2011, 05(4): 812-814.

(下转第 126 页)

- International Biodeterioration & Biodegradation, 2018, 130:32-39.
- [7] Michela S, Giada R, Valentina C, *et al.* Tests on the effect of ultrasonic treatment on two different activated sludge waste [J]. Environment Protection Engineering, 2014, 4(1):23-34.
- [8] 李道甲, 员建, 马华继, 等. 连续流超声对低水温活性污泥性能和污泥减量的影响 [J]. 中国给水排水, 2019, 35(9):16-22.
- [9] Xu X Z, Dan C, Wang Z H, *et al.* Study on ultrasonic treatment for municipal sludge [J]. Ultrasonics-Sonochemistry, 2019, 57:29-37.
- [10] 徐慧敏, 何国富, 戴晓虎, 等. 超声联合碱解预处理对剩余污泥破解和厌氧消化的影响 [J]. 环境工程学报, 2017, (5):3073-3078.
- [11] 沈会山. 超声波破碎联合 ClO_2 氧化污泥的效能研究 [J]. 工业用水与废水, 2016, 47(4):84-87.
- [12] Lizama A C, Figueiras C C, Herrera R R, *et al.* Effects of ultrasonic pretreatment on the solubilization and kinetic study of biogas production from anaerobic digestion of waste activated sludge [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2017, 123:1-9.
- [13] Pilli S, Yan S, Leblanc R J, *et al.* Ultrasonic pretreatment of sludge: A review [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2011, 18(1):1-18.
- [14] 孙绪顺, 褚春风, 李春杰. 反相高效液相色谱测定厌氧反应上清液中挥发性脂肪酸 [J]. 净水技术, 2009, (5):68-70.
- [15] Xiao K, Chen Y, Jiang X, *et al.* Variations in physical, chemical and biological properties in relation to sludge dewaterability under Fe (II)-oxone conditioning [J]. Water Research, 2017, 109:13-23.
- [16] Hu H, Liao K, Shi Y, *et al.* Effect of solids retention time on effluent dissolved organic nitrogen in the activated sludge process: Studies on bioavailability, fluorescent components, and molecular characteristics [J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(6):3449-3455.
- [17] Dan L, Keke X, Yun C, *et al.* Transformation of dissolved organic matters produced from alkaline-ultrasonic sludge pretreatment in anaerobic digestion: From macro to micro [J]. Water Research, 2018, 142:138-146.
- [18] Li W, Yu N J W, Fang A R, *et al.* Co-treatment of potassium ferrate and ultrasonication enhances degradability and dewaterability of waste activated sludge [J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 361:148-155.
- [19] 蔺舒. 低声能密度超声波破解污泥的效果研究 [J]. 环境污染与防治, 2015, 37(2):78-82.
- [20] 康晓荣. 超声联合碱促进剩余污泥水解酸化及产物研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [21] 刘苗苗. 活性污泥投加粉末活性炭对硝化反硝化的影响研究 [D]. 扬州: 扬州大学, 2017.
- [22] Le N T, Julcour L C, Delmas H. An executive review of sludge pretreatment by sonication [J]. Journal of Environmental Sciences, 2015, 37:139-153.
- [23] 江云, 朱曙光, 欧阳匡, 等. 超声破解对剩余污泥内含营养物质及粒径的影响 [J]. 环境工程学报, 2018, 12(5):1303-1309.
- [24] Kang X R, Zhang G M, Chen L, *et al.* Effect of initial pH adjustment on hydrolysis and acidification of sludge by ultrasonic pretreatment [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2011, 50(22):12372-12378.
- [25] 徐慧敏, 秦卫华, 李中林, 等. 超声联合热碱预处理促进剩余污泥中温厌氧消化研究 [J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(1):93-99.
- [26] 李平, 朱凤霞, 王丽苹, 等. 基于碳源回用目标的剩余污泥水解酸化产物调控研究 [J]. 生态环境学报, 2017, 26(4):676-680.
- [27] Liu Y L, Li X, Kang X R, *et al.* Effect of extracellular polymeric substances disintegration by ultrasonic pretreatment on waste activated sludge acidification [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2015, 102:131-136.
- [28] Li X Y, Guo S Y, Peng Y Z, *et al.* Anaerobic digestion using ultrasound as pretreatment approach: Changes in waste activated sludge, anaerobic digestion performances and digestive microbial populations [J]. Biochemical Engineering Journal, 2017, 139:139-145.
- [29] 元信石. 污泥预处理强化及厌氧消化特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [30] 蔡文良, 许晓毅, 杜嫫, 等. 嘉陵江重庆段 DOM 三维荧光光谱的平行因子分析 [J]. 环境科学研究, 2012, 25(3):276-281. ■

(上接第 120 页)

- [8] 王强, 卜锦春, 魏世强, 等. 赤铁矿对砷的吸附解吸及氧化特征 [J]. 环境科学学报, 2008, 28(8):1612-1617.
- [9] 张从军, 甘义群, 蔡鹤生. 利用钢渣处理含铜废水的试验研究 [J]. 环境科学与技术, 2005, (1):87-88, 110, 121.
- [10] 朱红, 商平. 硫铁矿烧渣在环境治理中的应用 [J]. 天津化工, 2007, 21(3):24-26.
- [11] 王谦, 张宏波, 戴丽雅, 等. 响应面法优化亚氯酸钠湿法脱硝工艺的研究 [J]. 现代化工, 2017, (1):157-160.
- [12] Kontogiannopoulos K N, Patsios S I, Karabelas A J. Tartaric acid recovery from winery lees using cation exchange resin: Optimization by response surface methodology [J]. Separation and Purification Technology, 2016, 165:32-41.
- [13] 祝方, 李璐玮, 程畅, 等. Box-Behnken 响应面分析法对双阳极电 Fenton 法处理垃圾渗滤液工艺的优化 [J]. 环境工程学报, 2016, 10(4):1749-1754.
- [14] Yagho Bimoghaddam M, Shafaei S Z, Noaparast M, *et al.* Modeling and optimization of low-grade Mn bearing ore leaching using response surface methodology and central composite rotatable design [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(12):4126-4143.
- [15] Dariush Azizi, Sied Ziaedin Shafaei, Mohammad Noaparast, *et al.* Empirical model for bio-extraction of copper from low grade ore using response surface methodology [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(9):2295-2305.
- [16] 唐远, 印万忠, 迟晓鹏. 金矿石全泥氰化浸出的响应面分析和优化 [J]. 福州大学学报(自然科学版), 2017, 45(2):246-251.
- [17] 龙云飞, 张玉, 苏静, 等. 响应面优化改进硫脲法浸出炼锌渣中银的工艺 [J]. 无机盐工业, 2015, 47(1):13-17.
- [18] 高美丽. 由赤铁矿渣制备七水合硫酸亚铁和聚硅硫酸铁的合成 [D]. 郑州: 郑州大学, 2018.
- [19] 杨美艳, 聂少平, 李景恩, 等. 利用响应面分析法优化香薷中挥发油提取工艺 [J]. 食品科学, 2008, 29(9):222-225.
- [20] 万俊, 蒋爱民, 曲直, 等. 响应面法优化 Camembert 干酪加工工艺 [J]. 现代食品科技, 2012, (7):121-125.
- [21] 张秀红, 孙静超, 李琪. 响应面法优化茉莉花茶茶多糖提取工艺 [J]. 基因组学与应用生物学, 2010, 29(3):603-608. ■