

混凝-微波强化 Fenton 法处理 PVA 废水

李亚峰¹, 白靖铭¹, 刘文卿²

(1. 沈阳建筑大学市政与环境工程学院, 辽宁 沈阳 110168;

2. 华东建筑设计研究院有限公司华东都市建筑设计研究总院, 上海 200070)

摘要 目的 研究混凝与微波强化 Fenton 体系降解 PVA 废水的去除效果。方法 采用混凝除去一部分 PVA 废水, 确定混凝条件。经混凝处理后的废水, 采用微波强化 Fenton 法进一步处理, 改变各种影响因素后观察 PVA 废水的降解程度, 比较得出最佳影响因素。结果 混凝预处理的 PVA 废水, pH 为 8, PAC 的投加量为 50 mL/L, PAM 投加量为 4 mL/L, 以 250 r/min 搅拌 30 s, 再以 50 r/min 搅拌 15 min, COD 去除率可以达到 33.17%。微波强化 Fenton 法处理混凝后的 PVA 废水, H_2O_2 投加量为 14 mL/L, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 投加量为 30 g/L, 微波的辐射功率为 400 W, 微波的辐射时间为 5 min, pH 值为 3 时, COD 去除率为 89.54%, COD 质量浓度从 3 000 mg/L 左右降低至 300 mg/L 左右。通过正交试验得出, 对处理效果的影响由强到弱依次为: 辐射时间、 Fe^{2+} 、 H_2O_2 、pH。结论 混凝-微波强化 Fenton 法药剂投加量低, 可提高 COD 的去除率, 能有效地处理 PVA 废水。

关键词 PVA 废水; 混凝; Fenton; 微波

中图分类号 TU99; X703

文献标志码 A

PVA Wastewater Treatment Based on Coagulation and Enhanced Fenton by Microwave

LI Yafeng¹, BAI Jingming¹, LIU Wenqing²

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168;

2. East China Architectural Design & Research Institute Co. Ltd., Shanghai, China, 200070)

Abstract: The treatment efficiency of PVA wastewater by coagulation and enhanced Fenton with microwave was studied. Coagulation conditions was determined by coagulation test. The wastewater after coagulation was further treated by microwave enhanced Fenton method, and the treatment effect of different conditions on PVA wastewater was analyzed to determine the best experimental conditions. In coagulation pretreatment test of PVA wastewater, under pH8, PAC dosage 50 mL/L, PAM dosage 4 mL/L, stir at 250 r/min for 30 s, then at 50 r/min for 15 min,

收稿日期: 2020-04-18

基金项目: 水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07601001)

作者简介: 李亚峰(1960—), 男, 教授, 博士, 主要从事水污染控制理论与技术方面研究。

COD removal rates are 33.17%. In microwave enhanced Fenton test of PVA wastewater after coagulation, when the dosage of H_2O_2 14 mL/L, the dosage of $\text{FeSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$ 30 g/L, the irradiation power of microwave 400 W, the irradiation time of microwave 5 min, pH 3, the removal rate of COD is 89.54% and the COD is reduced from about 3 000 mg/L to about 300 mg/L. The order of the influence on the treatment effect is: radiation time > Fe^{2+} > H_2O_2 > pH. The coagulation-microwave enhanced Fenton can effectively treat PVA wastewater, the dosage of the system agent is low, and the COD removal rate can also be improved.

Key words: PVA wastewater; coagulation; Fenton; microwave

PVA(聚乙烯醇)经常用于浆料及浆料的配合成分,纺织印染行业退浆后所产生的 PVA 废水 COD 含量高^[1]、污染物毒性大、难以生物降解^[2]。单一的物理、生物和化学方法对 PVA 废水的去除都有局限性^[3]。Fenton 法通过生成强氧化性·OH^[4],可对废水中的有机物无选择性地去除,对难以生物降解的工业废水具有理想的处理效果,也是目前研究应用比较多的一种高级氧化法^[5]。但 Fenton 法单独使用具有一定的局限性^[6]。微波是一种高频波,它不仅能够催化化学反应,使有机物的合成反应时间变短且速率变快^[7],还可协助其他方法高效反应。微波强化 Fenton 法的研究已有发展,许丽梅等^[8]利用微波强化 Fenton 法处理氯苯废水,在有微波辐射作用时, COD 的去除率能够达到 90%。由于 PVA 废水中难降解污染物浓度较大^[9],直接采用微波强化 Fenton 法不仅会影响处理效果,而且也会增加处理成本,因此,应增加预处理^[10]。笔者主要对混凝-微波-Fenton 法组合工艺处理 PVA 废水的效果及工艺参数进行试验研究,提高了对 PVA 废水的去除率。

1 试 验

1.1 试验用水及主要试验试剂

模拟 PVA 废水, PVA 质量浓度为 1 700 ~ 2 000 mg/L, COD 质量浓度为 3 200 ~ 3 600 mg/L。

1.2 试验仪器与试验试剂

仪器: PTX-FA120 电子天平, UV-6000

紫外可见分光光度计, GZX-9246MEB 电热鼓风干燥箱, SX711 pH 计, ZR4-6 六联同步混凝试验搅拌机, MS-H-Pro + LCD 数控加热型磁力搅拌器, WBFY-205 微波化学反应器, HH-S24 数显恒温水浴锅, 玻璃器皿若干。

试验主要试剂: 重铬酸钾、硫酸铝钾、钼酸铵、硫酸银、硫酸汞、硼酸、碘、碘化钾、聚乙烯醇(1788)、硫酸、氢氧化钠、PAC(聚合氯化铝)、PAM(聚丙烯酰胺)、过氧化氢、硫酸亚铁。

1.3 分析方法

PVA 的测定方法采用 Finley 分光光度法,在 690 nm 处测定溶液的吸光度; COD 的测定采用快速密闭催化消解法; pH 值使用酸度计进行测量。

2 结果与分析

2.1 混凝对 PVA 废水的处理效果

混凝的整个过程中,一般又细分为两个不同速度的处理过程。在快速混合阶段^[11],一般要求控制在 30 s 以内,但是最好不少于 10 s,这是因为虽然要求速度快,但仍需要合理的时间用于充分的接触反应,以达到快速混凝的效果,笔者采取 30 s^[12]。在慢速搅拌阶段,速度较前一阶段相比稍慢,这是因为过于剧烈会使生成的目的产物因为分裂而遭到破坏,进而达不到预先去除部分污染物的效果,所以关于搅拌的速度控制需要很严格,一般在慢速搅拌其速度通常情况下不超过 80 r/min,试验中选取 50 r/min。

在室温条件下,取废水水样置于 6 个烧

杯中,每个烧杯中为 500 mL,测得废水水样的 COD 质量浓度为 3 221 mg/L,PVA 质量浓度为 1 715 mg/L,调节 pH,使 pH 到达目的值 8 时将六联搅拌器进行运行,在 250 r/min 的条件下进行搅拌,投加 50 mL/L PAC 混凝剂,搅拌时间为 1.5 min,之后投加 4 mL/L PAM 助凝剂,持续搅拌时间为 0.5 min。调整转速以 50 r/min 继续搅拌,再分别搅拌 5 min、10 min、15 min、20 min、25 min、30 min。沉淀时间达到 30 min 时,对 COD 和 PAC 的质量浓度进行测定,计算去除率(见图 1)。

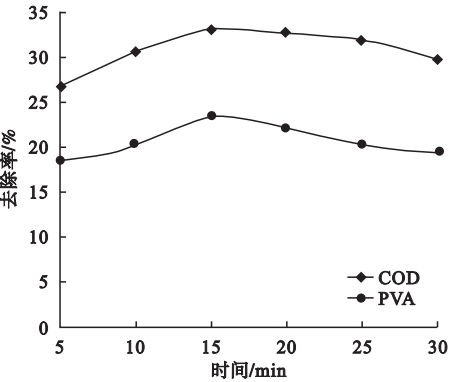


图 1 混凝对 PVA 废水的处理效果

Fig. 1 Effect of PVA wastewater treatment by coagulation

由图 1 可知,在时长达 15 min 左右时,去除效果达到最好。低于 15 min,去除率略低。是因为搅拌的时长不够,会导致 PAC 与 PVA 废水中的胶体还没有得到充足的时间凝集沉降,因此要增加搅拌时间,使胶体得到充分的混合,从而提高去除 COD 的效果。当时间大于 15 min 时,导致已经凝聚好的絮体被破坏,出现重新分散的现象,再次絮凝会增加困难。在投加药剂方面,在加入适量的 PAC 时,可通过自重沉降去除,能够加快自重沉降的速率并提升自重沉降的数量。控制加入 PAC 的量,不宜过多,否则会使混凝过程中体系电荷过盛从而无法提供空间供胶体发生其余的化学作用。为了达到更好地沉降效果可以添加助凝剂,既可以通过包裹颗粒

减轻阻力,又可以增加官能团具备的吸附颗粒及其他可吸附物质的特性,间接地提升分子间的吸附架桥作用力^[13],且未与胶粒结合的 PAM 直接增大了溶液中的有机物含量。COD 和 PVA 分别去除 33.17% 和 23.52%, COD 质量浓度可以从 3 221 mg/L 下降到 2 152 mg/L,PVA 质量浓度可以从 1 715 mg/L 下降到 1 312 mg/L。混凝预处理 PVA 废水可以达到一个较好的去除效果。

2.2 H₂O₂ 投加量对微波-Fenton 氧化试验效果影响

在室温条件下,在 7 个试验用的烧杯中各加入 100 mL 经预处理的废水,测得废水水样的 COD 质量浓度为 2 152 mg/L。向 7 个烧杯中加入适量 NaOH 溶液或 H₂SO₄ 溶液调节,使 pH 值为 3,加入 4 g 的七水合硫酸亚铁,分别滴入 3.5 mL/L、7 mL/L、14 mL/L、21 mL/L、28 mL/L、35 mL/L、42 mL/L 的 H₂O₂ 溶液,混合后倒入 250 mL 烧瓶,放入微波化学反应器中,采用 500 W 的辐射功率,并在该条件下持续照射 5 min。测定的结果如图 2 所示。

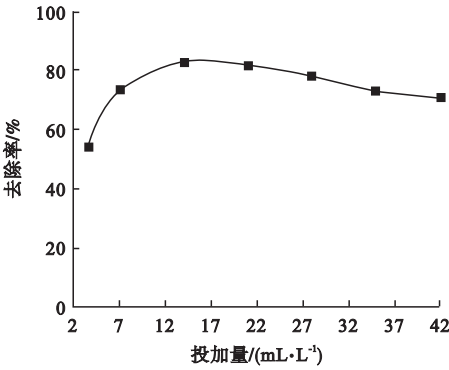


图 2 H₂O₂ 投加量对 COD 的去除率

Fig. 2 Effect of H₂O₂ dosage on COD removal rate

由图 2 可知,在投加量为 14 mL/L 之前,去除率处于持续上升的状态,在达到 14 mL/L 时,COD 去除率最好为 82.72%, COD 质量浓度从 2 152 mg/L 下降到 557 mg/L。当投加的药剂不足 14 mL/L 时,产生的·OH 的量少,不够用来去除有机

物,所以会导致氧化效果差,处理效果达不到标准,但当加入 H_2O_2 较多时,原来产生的 $\cdot\text{OH}$ 则会被利用而含量减少,同时造成 H_2O_2 分解成水而不是 $\cdot\text{OH}$,无法处理有机物并造成药剂的浪费。所以 H_2O_2 的投加量宜为 14 mL/L。

2.3 pH 对微波-Fenton 氧化试验效果影响

在室温条件下,测得废水水样 COD 的质量浓度为 2 152 mg/L。选取 pH 值为 1、2、3、4、5、6、7,加入 14 mL/L H_2O_2 。测出 COD 的质量浓度,计算去除率(见图 3)。

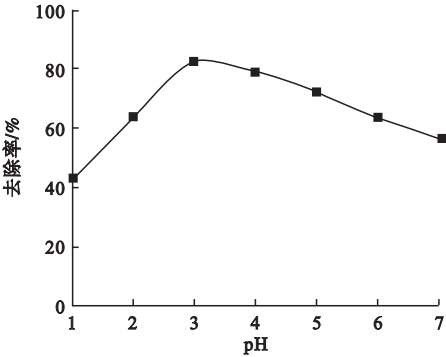


图3 pH 对 COD 的去除率

Fig. 3 Effect of pH on COD removal rate

由图 3 可知,当 pH 值 3 时,COD 去除率最好为 82.72%,COD 质量浓度从 2 152 mg/L 下降到 557 mg/L。微波会对 Fe^{2+} 与 Fe^{3+} 的循环有催化作用,使体系中 Fe^{2+} 的质量浓度一直保持在理想状态。而强酸条件能更好地去除有机物,因为 H_2O_2 在较低 pH 值条件下能更快地生成 $\cdot\text{OH}$,但 pH 值过低,亚铁离子的产生会受到阻碍,反而影响了反应过程中 $\cdot\text{OH}$ 的生成速度^[14]。所以 pH 宜为 3。

2.4 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 投加量对微波-Fenton 氧化试验效果影响

在室温条件下,测得废水水样 COD 的质量浓度为 2 152 mg/L。改变 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 的量为 1 g、2 g、3 g、4 g、5 g、6 g、7 g,加入 14 mL/L H_2O_2 。测出 COD 的质量浓度,计算去除率(见图 4)。由图 4 可知,当硫酸亚铁加入 3 g 时,COD 降解率为 82.68%,COD 质量浓度从 2 152 mg/L 下降到 558 mg/L。

亚铁离子的量增加越来越多时,去除效果变得越来越平缓,亚铁离子与有机污染物相比,可能某种条件下更容易被氧化,从而影响体系的处理能力。所以 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 的量宜为 3 g。

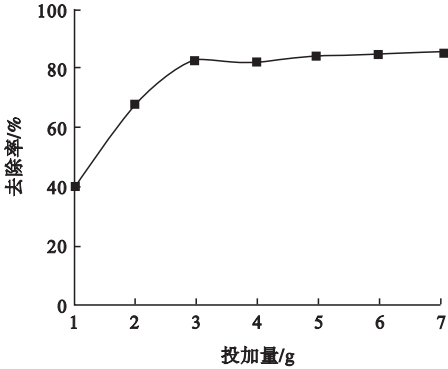


图4 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 投加量对 COD 的去除率

Fig. 4 Effect of $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ dosage on COD removal rate

2.5 微波辐射功率对试验效果影响

在室温条件下,测得废水水样 COD 质量浓度为 2 152 mg/L。选取 7 个不同微波辐射功率,加入 3g $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$,加入 14 mL/L H_2O_2 。测出 COD 的质量浓度,计算去除率(见图 5)。

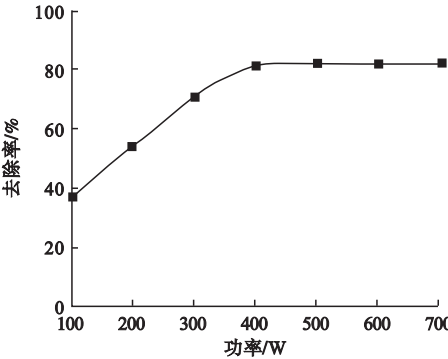


图5 辐射功率对 COD 的去除率

Fig. 5 Effect of irradiation power on COD removal rate

由图 5 可知,当功率逐渐变高时,去除率也随之呈上升的状态,当功率达到 400 W 时,去除率的曲线基本处于水平,没有起伏过大的变化,此时 COD 降解率为 82.14%,COD 质量浓度从 2 152 mg/L 下降到 576 mg/L。低功率时温度低,无法分解出更

多的·OH,去除效果不理想,辐照功率的增大,可以快速产生·OH,提高催化能力^[15]。而当高于 400 W,部分 H₂O₂ 没有生成·OH 而是分解成了其他的物质,降低体系的氧化效率,导致去除率没有太大变。所以微波辐射功率宜为 400 W。

2.6 微波辐照时间对试验效果影响

在室温条件下,测得废水水样 COD 的质量浓度为 2 152 mg/L。选取 7 个不同微波辐射时间,加入 3 g FeSO₄·7H₂O,加入 14 mL/L H₂O₂,400 W 的辐射功率。测出 COD 的质量浓度,计算去除率(见图 6)。

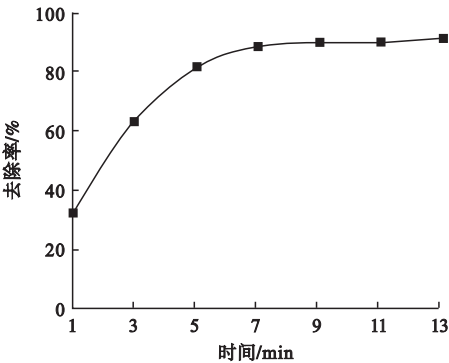


图 6 辐照时间对 COD 的去除率

Fig. 6 Effect of irradiation time on COD removal rate

由图 6 可知,反应的上升速率是先快后慢趋于平缓,当反应到 7 min 时,COD 降解率为 89.54%,COD 质量浓度从 2 152 mg/L 下降到 337 mg/L。7 min 以后去除效果基本不发生改变,COD 降解率一直为 89% 以上。在微波的辐照时间较短时,废水内的 PVA 分子吸收了微波的能量,大量·OH 迅速降解污染物。再继续反应,产生的中间产物最终变成小分子物质等,最后,氧化剂产生量越来越少,有机物继续被氧化,反应渐渐变得平稳^[16]。所以选用持续照射时间宜为 7 min。

2.7 正交试验及验证

正交试验设计:由于微波强化 Fenton 试剂的反应会受到多种因素的制约影响,因此要确定一个最佳的反应条件。笔者将辐射功率稳定在 400 W,设计 4 个因素为变量的正

交试验。因素 H₂O₂ 投加量为 A、因素 Fe²⁺ 质量浓度为 B、因素辐照时间为 C、因素 pH 值为 D。正交试验因素水平如表 1 所示。数理分析如表 2 所示,其中 K_{i,j}(i=1、2、3)为试验指标的平均值,R 为极差。

表 1 因素水平

Table 1 Factor level

水平	因素			
	A	B	C	D
1	7	20	5	2
2	14	30	7	3
3	21	40	9	4

表 2 数理分析

Table 2 Mathematical analysis

因素	K _{1,j}	K _{2,j}	K _{3,j}	R
A	75.01	74.053	69.82	5.19
B	67.883	76.12	74.88	8.237
C	77.517	73.27	68.097	9.42
D	71.033	74.803	73.047	3.77

由表 2 可看出,R(辐照时间)>R(Fe²⁺)>R(H₂O₂)>R(pH),极差越大,影响就越大。在固定 400 W 情况下,通过正交所得的最优条件进行处理的效果最好,此时 COD 降解的最好值可达到 89% 以上^[17]。说明此反应能够很好地处理 PVA 废水^[18]。

2.8 混凝-微波强化 Fenton 处理 PVA 废水的动态试验效果

在装置内加入 50 mL/L 混凝剂的量,加入 4 mL/L 助凝剂的量,控制进水 pH 值为 8 左右。在混凝阶段反应的总时长为 47 min,在混合的过程中,其反应时长为 2 min,在 250 r/min 的条件下进行,在絮凝过程中,其持续时长为 15 min,在 50 r/min 的条件下进行搅拌。待混凝完成后,接下来进入到沉淀池,沉淀 30 min 后的废水经出水堰流入蓄水池内。通过计量泵将加药槽内的芬顿试剂泵入蓄水池内进行混合,在控制反应 pH 为 3 的条件下,H₂O₂ 的投加量为 14 mL/L,Fe²⁺

的投加量为 30 g/L。经蠕动泵进入微波发生器,废水在装置中下进上出,调节水流速度,改变水力停留时间,使辐射功率稳定在 400 W,并在该条件下持续照射 5 min。

试验用水为 PVA 废水。运行装置 1 h 后,每间隔 20 min,将出水取出一次对其进行测定,测定废水中的 COD 和 PVA 的质量浓度,计算出去除率(见表 3)。

表 3 动态试验效果

Table 3 Dynamic test effect

取样时间/ min	$\rho(\text{COD})/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{PVA})/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	剩余 $\rho(\text{COD})/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	剩余 $\rho(\text{PVA})/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	COD 去除率/%	PVA 去除率/%
20	3 243	1761	312	58	90.38	96.71
40	3 243	1761	375	82	88.44	95.34
60	3 243	1761	356	72	89.02	95.91
80	3 243	1761	326	61	89.95	96.54
100	3 243	1761	337	65	89.61	96.31
120	3 243	1761	342	66	89.45	96.25
140	3 243	1761	378	69	88.34	96.08
160	3 243	1761	329	60	89.86	96.59
180	3 243	1761	373	81	88.50	95.40
200	3 243	1761	321	63	90.10	96.42

由表 3 可知,混凝-微波强化 Fenton 试剂法对 PVA 废水的去除效果很好^[19-20]。COD 可被去除 89.37%,PVA 可被去除 96.16%,PVA 去除效果良好,COD 去除效果也很好,COD 质量浓度可从 3 000 mg/L 左右降低至 300 mg/L 左右。动态试验的效果与单因素试验的结果基本相吻合。

3 结 论

(1)混凝预处理 PVA 废水,在 pH 为 8,PAC 的投加量为 50 mL/L,PAM 加量为 4 mL/L,短期搅拌为 250 r/min,长期搅拌转速为 50 r/min 的条件下,COD 的去除率可达到 33.17%,COD 质量浓度可以从 3 221 mg/L 下降到 2 152 mg/L。

(2)微波强化 Fenton 氧化法处理经预处理后的 PVA 废水,在微波辐照功率为 400 W,H₂O₂ 投加量为 14 mL/L、FeSO₄·7H₂O 投加量为 30 g/L、微波辐照时间为 5 min、pH 值为 3 条件下,COD 的降解率达到了 89.54%,COD 质量浓度可以降低到 337 mg/L。影响效果强弱程度依次为:辐照时间、Fe²⁺、H₂O₂、pH。

(3)动态试验 COD 可被去除 89.37%,COD 质量浓度从 3 000 mg/L 左右降低至 300 mg/L 左右,PVA 可被去除 96.16%,动态试验的效果与单因素试验的结果基本相吻合。工艺稳定、处理效果好,既节约了药剂投加量,又提高了去除率。

参考文献

[1] 刘路. 纺织印染废水处理技术研究现状及进展[J]. 上海工程技术大学学报, 2017, 31(2): 174-177.
(LIU Lu. Research state and progress of textile printing and dyeing wastewater treatment technologies [J]. Journal of Shanghai university of engineering and technology, 2017, 31(2): 174-177.)

[2] 晓铭. 国内外聚乙烯醇的供需现状及未来发展趋势[J]. 乙醛醋酸化工, 2018(3): 4-7.
(XIAO Ming. Supply and demand situation and future development trend of polyvinyl alcohol at home and abroad [J]. Acetaldehyde acetic acid chemical industry, 2018(3): 4-7.)

[3] 李功松, 陈小光, 汪彩华. 含 PVA 废水处理工艺探讨[J]. 工业水处理, 2019, 39(10): 20-24.
(LI Gongsong, CHEN Xiaoguang, WANG Caihua. Discussion on treatment process of wastewater containing PVA [J]. Industrial water treatment, 2019, 39(10): 20-24.)

[4] GIROTO J A, GUARDANI R, TEIXEIRA A, et al. Study on the photo-Fenton degradation of polyvinyl alcohol in aqueous solution [J].

- Chemical engineering and processing, 2005, 45 (7): 523 - 532.
- [5] 单巨川, 郑庆康. PVA 的 Fenton 试剂氧化降解[J]. 印染, 2017, 43(11): 7 - 11.
(SHAN Juchuan, ZHENG Qingkang. PVA degradation with Fenton reagent [J]. Dyeing and finishing, 2017, 43(11): 7 - 11.)
- [6] 高艳娇, 黄继国, 聂广正. Fenton 氧化法深度处理垃圾渗滤液[J]. 工业用水与废水, 2005, 36(6): 39 - 41.
(GAO Yanyiao, HUANG Jiguo, NIE Guangzheng. Advanced treatment of landfill leachate by Fenton oxidation process [J]. Industrial water and wastewater, 2005, 36(6): 39 - 41.)
- [7] RENZO C, FRANCESCO D. The enhancing effect of low power microwaves on phenol oxidation by the Fenton process [J]. Journal of environmental chemical engineering, 2013, 1(4): 1292 - 1300.
- [8] 许丽梅, 王艳, 廖丹. 微波辅助 Fenton 法处理废水中有机氯苯[J]. 辽宁化工, 2015, 44(8): 937 - 939.
(XU Limei, WANG Yan, LIAO Dan. Treatment of chlorobenzene in wastewater by microwave-Fenton process [J]. Liaoning chemical industry, 2015, 44(8): 937 - 939.)
- [9] 余梦春. 絮凝沉淀-催化氧化印染 PVA 高浓度废水的研究[D]. 武汉: 武汉纺织大学, 2016.
(YU Mengchun. Study on PVA high concentration wastewater by flocculation precipitation and catalytic oxidation [D]. Wuhan: Wuhan Textile University, 2016.)
- [10] 管锡珺, 仇模凯, 夏丽. Fenton - 混凝沉淀法预处理锂电池加工高浓度废水[J]. 工业水处理, 2018, 38(12): 76 - 80.
(GUAN Xijun, QIU Mokai, XIA Li. Pretreatment of high-concentration wastewater from lithium battery processing by Fenton-coagulation precipitation method [J]. Industrial water treatment, 2018, 38(12): 76 - 80.)
- [11] 周莹, 王孙巍, 王彦军. 快速搅拌对混凝-絮凝最佳处理效果的影响研究[J]. 北方环境, 2000(2): 36 - 39.
(ZHOU Ying, WANG Sunwei, WANG Yanjun. Study on the effect of rapid mixing on the best treatment of coagulation flocculation [J]. North environment, 2000(2): 36 - 39.)
- [12] 杨严. 混凝-MAP 法应用于垃圾渗滤液中的试验研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2011.
(YANG Yan. The treatment of landfill leachate by flocculants and MAP methods [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2011.)
- [13] 程旺斌. 混凝沉淀预处理中药废水及其对特征污染物去除机制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
(CHENG Wangbin. Pretreatment of traditional Chinese medicine wastewater using coagulation and removal mechanism of specific pollutant [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.)
- [14] LIU S T, HUANG J, YE Y, et al. Microwave enhanced Fenton process for the removal of methylene blue from aqueous solution [J]. Chemical engineering journal, 2013, 215(2): 586 - 590.
- [15] WANG N N, ZHENG T, JIANG J P, et al. Pilot-scale treatment of p-nitrophenol wastewater by microwave-enhanced Fenton oxidation process: effects of system parameters and kinetics study [J]. Chemical engineering journal, 2014, 239: 351 - 359.
- [16] 崔红梅, 周静, 郭丽娜, 等. 微波-Fenton 法水处理技术的研究进展[J]. 当代化工, 2016, 45(8): 2010 - 2013.
(CUI Hongmei, ZHOU Jing, GUO Lina, et al. Research progress in the water treatment technology with microwave-Fenton process [J]. Contemporary chemical industry, 2016, 45(8): 2010 - 2013.)
- [17] 施国飞, 徐晓军, 贾佳, 等. 微波-Fenton 氧化-PAFSi 絮凝法处理含油废水[J]. 环境工程学报, 2014, 8(1): 190 - 197.
(SHI Guofei, XU Xiaojun, JIA Jia, et al. Treatment of oily wastewater by microwave-Fenton oxidation-PAFSi flocculation [J]. Journal of environmental engineering, 2014, 8(1): 190 - 197.)
- [18] 崔红梅, 黄星, 周静, 等. 微波辅助 Fenton 体系预处理 ABS 生产废水[J]. 化学工程, 2020, 48(2): 6 - 10.
(CUI Hongmei, HUANG Xing, ZHOU Jing, et al. Microwave-assisted Fenton system for pretreatment of ABS production wastewater [J]. Chemical engineering, 2020, 48(2): 6 - 10.)
- [19] 李微, 曾飞, 由昆, 等. SBR 工艺处理大蒜废水及污泥菌群结构研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2021, 37(2): 370 - 377.
(LI Wei, ZENG Fei, YOU Kun, et al. The treatment of garlic wastewater and sludge microbial structure in SBR process [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2021, 37(2): 370 - 377.)
- [20] 袁茂彪. 混凝-微波-Fenton 氧化组合工艺深度处理焦化废水研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2014.
(YUAN Maobiao. Research on advanced treatment for coke wastewater by combined process of coagulation-microwave-Fenton oxidation [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2014.)
(责任编辑: 徐玉梅 英文审校: 唐玉兰)