

新型多元微电解填料对染料废水的降解性能研究

李子奚, 杨刚*

(南京工业大学化工学院, 材料化学工程国家重点实验室, 江苏南京 211800)

摘要:在传统铁碳微电解填料的基础上同时加入铝和铜, 制备得到了新型多元微电解填料。利用新型多元微电解填料对刚果红模拟废水进行降解性能研究, 探究废水初始 pH、填料投加量、曝气量、反应时间对降解效果的影响, 确定最佳处理条件, 并在此基础上进行静态循环实验、UV-Vis 分析, 初步推断多元微电解体系的降解机理并对使用前后填料形态进行 SEM 表征。结果表明, 当废水初始 pH 为 3、填料投加质量浓度为 200 g/L、曝气量为 200 mL/min、室温、反应时间为 180 min 时, 对 100 mg/L 刚果红废水的降解率高达 96.25%。通过 10 次静态循环实验, 连续运行 30 h, 刚果红降解率始终保持在 95% 以上; 絮凝后, 刚果红降解率始终保持在 96% 以上。

关键词:多元; 微电解; 染料废水; 降解机理; 性能研究

中图分类号: X703

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2021)11-0117-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2021.11.025

Study on degradation performance of novel multi-component micro-electrolysis filler to dye wastewater

LI Zi-xi, YANG Gang*

(State Key Laboratory of Materials-Oriented Chemical Engineering, College of Chemical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211800, China)

Abstract: A novel multi-component micro-electrolysis filler is prepared through adding aluminum and copper simultaneously into traditional iron-carbon micro-electrolysis filler, and used to degrade simulated Congo red wastewater to explore the effects of the initial pH value of wastewater, filler dosage, aeration, reaction time on the degradation effect and determine the best treatment conditions. On this basis, a static cycle experiment and UV-Vis analysis are carried out to preliminarily infer the degradation mechanism of the multi-component micro-electrolysis system. The morphology of filler before and after use is characterized by means of SEM. Experimental results show that the degradation rate of 100 mg·L⁻¹ Congo red wastewater by the filler reaches as high as 96.25% when the initial pH of wastewater is 3, the filler dosage is 200 g·L⁻¹, the aeration rate is 200 mL·min⁻¹, and the reaction has performed for 180 min at room temperature. Through 10 static cycle tests and continuous operation for 30 h, the degradation rate of Congo red has always remained above 95%. If degradation is performed after flocculation, the degradation rate of Congo red has always remained above 96%, even reaching 100%.

Key words: multi-component; micro-electrolysis; dye wastewater; degradation mechanism; performance study

印染行业中, 每加工 1 t 纺织品需要消耗 100~200 t 水, 其中 80%~90% 最终将成为废水, 废水中所含有机染料若排放到地表及地下水系统, 对水中生物以及人类生活将造成严重威胁^[1]。偶氮染料含有 1 个或多个偶氮基团, 是印染工艺中应用最广泛的一类合成染料, 占全球染料总产量的 70% 以上, 其复杂的结构使其具有高稳定性和持久性, 可抵抗物理化学分解和生态系统修复^[2-3]。近年来, 染料废水的降解和脱色问题引起广泛的关注, 各种各样的技术被广泛应用于染料废水的处理, 包括膜分

离^[4]、生物法^[5]、电化学法^[6]、AOPs^[7]。

微电解法是以金属化学腐蚀原理为基础、活泼金属(通常是铁)为阳极、非金属(通常是碳)为阴极、废水为电解质溶液, 形成数以万计的微观原电池对废水进行处理。近年来, 微电解法是一种低成本、无毒、高效率的有机废水处理方法, 不仅可处理染料废水, 还包括垃圾渗滤液^[8]、制药废水^[9]、硝氮废水^[10]、化工废水等^[11]。

刚果红是一种典型的致癌性难降解的联苯胺类直接偶氮染料, 广泛应用于印染、造纸、纺织等领域,

收稿日期: 2020-12-07; 修回日期: 2021-09-06

基金项目: 国家科技支撑计划(2013BAE11B03); 江苏省产学研前瞻性联合研究项目(BY2016005-11)

作者简介: 李子奚(1994-), 男, 硕士研究生, 研究方向为微电解技术的研究及应用, 1249724613@qq.com; 杨刚(1966-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为水处理技术的开发研究及应用, 通讯联系人, yanggang@njtech.edu.cn。

在生产使用过程中流失率高,易进入水体,对生态环境和人体具有严重的破坏作用,在染料废水中具有一定的代表性。笔者主要探究新型多元微电解填料对刚果红模拟偶氮染料废水的降解效果,考察废水初始 pH、填料投加量、曝气量、反应时间对降解率的影响;并通过静态循环实验考察填料的稳定性,结合 UV-Vis 分析结果,初步推断多元微电体系对有机污染物的降解机理。

1 实验部分

1.1 实验试剂及仪器

试剂:还原铁粉,分析纯,400 目,美国阿拉丁公司生产;膨润土,化学纯(CP),上海试四赫维化工有限公司生产;草酸铵,分析纯,永华化学科技(江苏)有限公司生产;刚果红,分析纯,天津市化学试剂研究所有限公司生产;铜粉(200 目)、铝粉(100~200 目),分析纯,国药集团化学试剂有限公司生产;粉状活性炭,分析纯,江苏竹溪活性炭有限公司生产;氢氧化钠、硫酸,分析纯,西陇化学试剂有限公司生产;去离子水,实验室自制。

仪器:DR 3900 型便携式分光光度计,美国 HACH 公司生产;MP 521 型实验室 PH/电导率仪,上海三信仪表厂生产;DZF-6020 型真空干燥箱,上海一恒科学仪器有限公司生产;SG-GL 1200K 型真空管式炉,上海大恒光学精密机械有限公司生产;S-4800 型冷场发射扫描电子显微镜(SEM),日本 HITACHI 公司生产。

1.2 微电解填料的制备

本实验中所使用的新型多元微电解填料最佳制备工艺如下:铁铝质量比为 4:1、铁铝总质量与活性炭质量比为 1:1、添加剂质量分数为 3%、膨润土质量分数为 30%、催化金属铜质量分数为 2%。称量上述比例的原材料,将其置于密闭容器中,充分混合均匀后,加入适量纯水并不断搅拌至黏稠状,人工揉制成 1 cm 左右的球状颗粒。采用两段升温法对球形颗粒进行预热,避免温度升高过快造成破裂。首先将球形颗粒置于 75℃ 真空干燥箱中加热 30 min,然后将真空干燥箱温度升高至 110℃ 加热 1 h,真空状态下冷却至室温,然后将经过预热后的球形颗粒转移至管式炉中, N₂ 氛围下 850℃ 焙烧 3 h,待冷却至室温后取出,即可得到新型多元微电解填料。

填料使用前将其浸泡在 2 g/L 的刚果红溶液中 24 h,使填料内活性炭吸附饱和,排除吸附过程对实验结果的影响^[12]。

1.3 分析方法

1.3.1 刚果红模拟废水质量浓度和吸光度标准曲线的绘制

对刚果红模拟废水进行紫外-可见光谱扫描,在 495 nm 出现最大吸收峰;设定波长为 495 nm,扫描不同质量浓度的刚果红溶液并确定其吸光度,使用 Origin 绘图软件拟合出质量浓度和吸光度的标准曲线,其拟合方程为:

$$Y = 11.94428X - 0.06856 \quad R^2 = 0.99917$$

式中:Y 为刚果红的质量浓度;X 为吸光度;R² 为相关系数。

1.3.2 降解率测定

在一定的时间间隔内,取适量反应后溶液并经过 0.45 μm 有机滤膜过滤,利用 DR 3900 便携式分光光度计测定溶液的吸光度,通过拟合方程得出溶液的质量浓度并计算出相应的降解率:

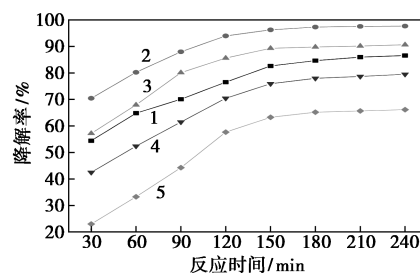
$$D, \% = (C_0 - C_t) / C_0 \times 100\%$$

式中:D 为降解率;C₀ 为初始质量浓度,mg/L;C_t 为反应时间 t 时的质量浓度,mg/L。

2 结果与讨论

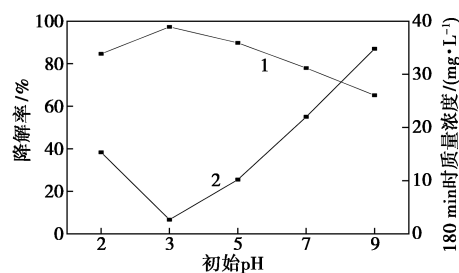
2.1 初始 pH 对模拟废水降解率的影响

填料投加质量浓度为 250 g/L、曝气量为 200 mL/min、反应时间为 240 min 的条件下,考察初始 pH 对降解率的影响,结果如图 1、图 2 所示。



1—pH=2;2—pH=3;3—pH=5;4—pH=7;5—pH=9

图 1 废水初始 pH 对降解率的影响



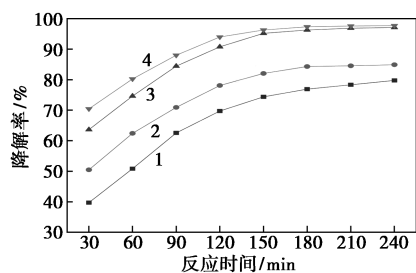
1—降解率;2—180 min 时质量浓度

图 2 180 min 时的降解率

废水初始 pH 会显著影响微电解反应过程中的氧化还原电位以及 $[H]$ 、 $O\cdot$ 的生成量,由图 1 可知,在不同 pH 条件下,降解率均随反应时间的延长逐渐增长,反应进行到一定程度后趋于平稳。初始 pH=3 时,降解率始终处于最高水平,反应 180 min 降解率达到 97.32%,这是因为在酸性有氧条件下阴阳两极之间拥有更大的电位差,活性物质的生成量更高,促进了氧化还原反应的进行,提高了废水降解率。由图 2 可知,随着废水初始 pH 的增加,刚果红的降解率先升高后降低,这是因为 pH=2 时,酸性较强,导致阳极金属的过度腐蚀,降低了阳极的效率和活性^[13]。初始 pH>3 时,刚果红的降解率逐渐降低,这是因为 pH 的增加降低了阴阳两极之间的电位差,参加反应的 H^+ 数目不足,微电解反应能力削弱,活性物质生成量减少,抑制了氧化还原反应的进行,因此选取模拟废水的最佳初始 pH 为 3。

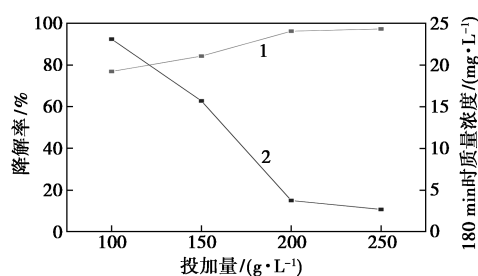
2.2 填料投加质量浓度对模拟废水降解率的影响

在废水初始 pH=3、曝气量为 200 mL/min、反应时间为 240 min 的条件下,考察填料投加质量浓度对降解率的影响,结果如图 3、图 4 所示。



1—100 g/L; 2—150 g/L; 3—200 g/L; 4—250 g/L

图 3 填料投加质量浓度对降解率的影响



1—降解率; 2—180 min 时质量浓度

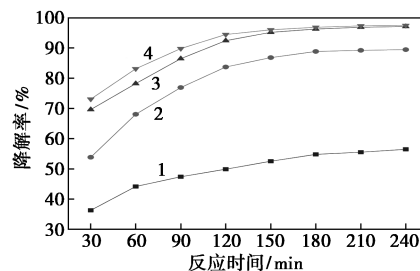
图 4 180 min 时的降解率

由图 3 可知,在不同填料投加质量浓度条件下,降解率随着反应时间的延长逐渐增加,反应进行到一定程度后趋于平稳。填料投加质量浓度为 250 g/L 时,刚果红的降解率始终处于最高水平,这是因为填料的投加质量浓度越高,形成的微观原电池数目越

多,短时间活性物质的生成量越高,从而提高刚果红的降解率。由图 4 可知,填料投加质量浓度由 100 g/L 增加至 200 g/L 时,反应 180 min,刚果红降解率由 76.90% 增长至 96.25%; 继续增加填料投加质量浓度为 250 g/L,降解率为 97.32%,并无明显增长,因此选取最佳填料投加质量浓度为 200 g/L。

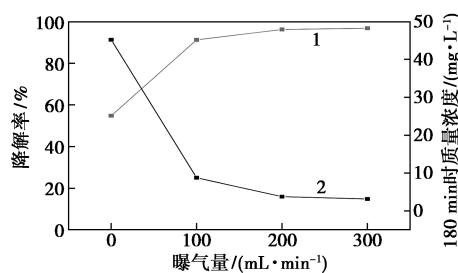
2.3 曝气量对模拟废水降解率的影响

废水初始 pH=3、填料投加质量浓度为 200 g/L、反应时间为 240 min 的条件下,考察曝气量对降解率的影响,结果如图 5、图 6 所示。



1—0 mL/min; 2—100 mL/min; 3—200 mL/min; 4—300 mL/min

图 5 曝气量对降解率的影响



1—降解率; 2—180 min 时质量浓度

图 6 180 min 时的降解率

由图 5 可知,在不同曝气量条件下,刚果红的降解率均随着反应时间的延长逐渐增加,反应进行到一定程度后趋于平稳。由图 6 可知,曝气量为 0 mL/min 时,刚果红降解率始终处于较低水平,反应 180 min 刚果红降解率仅仅为 34.80%,随着曝气量的增加,刚果红的降解率急剧增加,这是因为氧气参与微电解反应,增大阴阳两极之间的电位差,活性物质的生成量增加,从而实现了对刚果红的有效降解;此外当曝气量增大时,曝气对废水造成扰动,可促进填料表面覆盖物的脱落,同时消除了浓差极化的现象,有效增大填料与废水之间的接触。反应进行到 120 min、曝气量为 300 mL/min 条件下,刚果红降解率无明显提升,综上所述,选取最佳曝气量为 200 mL/min。

2.4 反应时间对模拟废水降解率的影响

废水初始 pH=3、填料投加质量浓度为 200 g/L、

曝气量为 200 mL/min 的条件下,考察反应时间对降解率的影响,结果如图 7 所示。

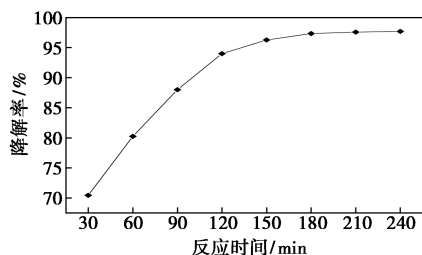


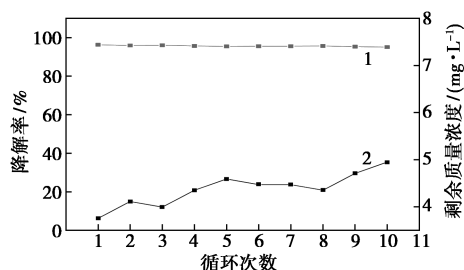
图 7 反应时间对降解率的影响

反应时间是影响微电解反应对污染物去除的重要参数。一般来说,较长的反应时间有利于去除污染物,而过长的反应时间并不会显著提高污染物的去除,并且增加了基建投资和运行成本,为使运行成本和降解率达到双优,合理的反应时间至关重要。由图 7 可知,随着反应时间的延长,在 0~120 min 内,刚果红降解率增长迅速;反应继续进行至 180 min,降解率增长极其缓慢,几乎达到平衡状态,这主要是因为反应进行到 180 min 时,溶液中刚果红浓度急剧下降,降解率不会再大幅度增长;随着反应进行,溶液 pH 逐渐升高,导致降解率提升减缓,此时刚果红降解率为 96.25%,因此,确定最佳反应时间为 180 min。

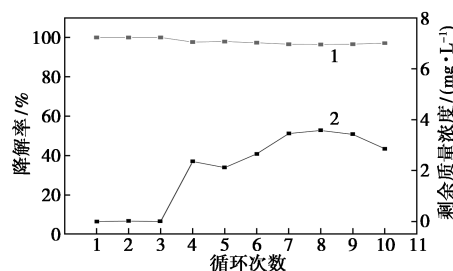
2.5 静态循环实验

微电解反应过程中,活泼金属阳极生成大量的 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Al^{3+} ,微电解反应结束后将废水 pH 调节至 8.5,分别生成 $Fe(OH)_2$ 、 $Fe(OH)_3$ 、 $Al(OH)_3$,三者的协同絮凝作用和沉降性能优于 $Fe(OH)_2$ 和 $Fe(OH)_3$ ^[14];三者的协同作用可进一步去除废水中残留的刚果红分子和断链后的有机小分子。在最佳处理工艺的基础上,进行连续 10 次循环实验研究填料的稳定性,絮凝前后刚果红的降解率、剩余质量浓度的变化如图 8 所示。

由图 8(a)可知,连续 10 次循环实验,刚果红降解率始终保持在 95% 以上,说明该新型多元微电解填料对于刚果红的降解具有良好的可重用性。由图 8(b)可知,絮凝后,刚果红的降解率始终保持在



(a) 絮凝前



(b) 絮凝后

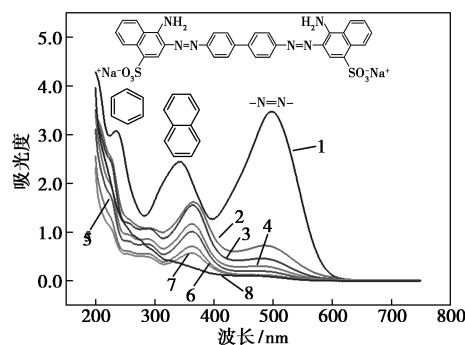
1—降解率;2—剩余质量浓度

图 8 循环次数对降解率的影响

96% 以上,并且前 3 次循环实验的降解率为 100%,实现刚果红完全降解。

2.6 UV-Vis 分析

刚果红模拟废水的 UV-Vis 随降解时间的变化情况如图 9 所示。由图 9 中可以看出,未处理的刚果红溶液有 3 个明显的吸收峰,最大吸收峰位于可见光区 495 nm 处,与刚果红分子中强发色基团偶氮键有关;另外 2 个吸收峰位于紫外光区 236、344 nm 处,分别对应于苯环和奈环的特征吸收峰。UV-Vis 中,3 个吸收峰的强度均随着反应时间的增加而降低,495 nm 处显色基团偶氮键的吸收峰减弱极为明显,说明微电解反应过程中,偶氮键发生断裂;344、240 nm 处的吸收峰也发生明显减弱,说明在反应过程中发生了奈环和苯环的开环反应。微电解反应后,调节废水 pH=8.5,UV-Vis 中观察不到任何特征吸收峰,说明 $Fe(OH)_2/Fe(OH)_3/Al(OH)_3$ 协同絮凝作用使得刚果红分解后有机小分子以及残留的刚果红分子完全去除。此外,刚果红溶液的颜色由深红色变为无色。



1—0 min;2—30 min;3—60 min;4—90 min;5—120 min;
6—150 min;7—180 min;8—絮凝后

图 9 刚果红溶液的 UV-Vis 随降解时间的变化

2.7 多元微电解体系降解机理分析

在新型多元微电解体系中,一方面,阳极反应产生的新生态 Fe^{2+} 具有很强的还原能力,能将部分难

降解环和长链有机物转化为易于生物降解的小分子有机物,阴极反应产生大量新的生态 $[H]$ 和 $\cdot O$,并能与废水中的多种有机组分发生氧化还原反应,导致有机大分子链断裂,分解为小分子有机物或部分矿化为 CO_2 、 H_2O 和无机物;另一方面,微电解反应后,生成大量的 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Al^{3+} ,将废水的pH调节至碱性,降解后生成的小分子有机物和中间产物可通过 $Fe(OH)_2/Fe(OH)_3/Al(OH)_3$ 的协同絮凝和共沉淀作用去除。 $Fe(OH)_2/Fe(OH)_3/Al(OH)_3$ 三者的协同絮凝作用优于 $Fe(OH)_2/Fe(OH)_3$,因此,Al的加入可提高有机物去除率,该新型多元微电解填料可通过多种协同作用降解和去除废水中的有机污染物。多元微电体系降解机理见图10。

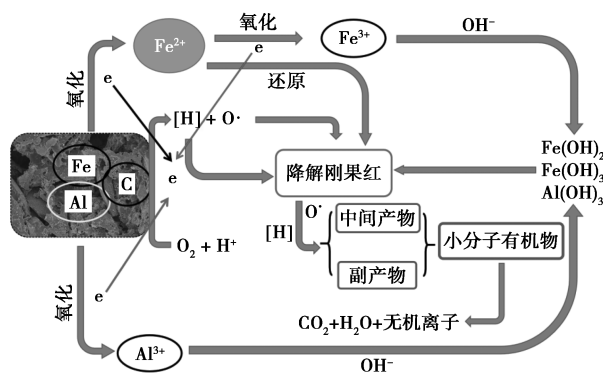


图10 多元微电体系降解机理分析

2.8 微电解填料的SEM表征

微电解填料使用前表面和截面SEM图如图11所示。

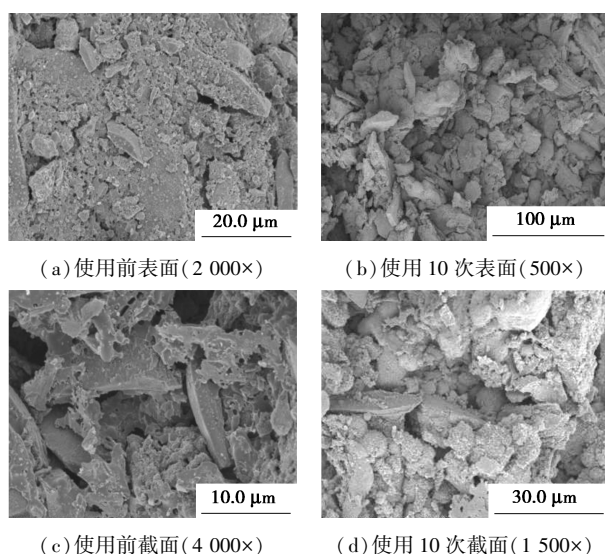


图11 微电解填料使用前表面和截面SEM图

由图11(a)、图11(c)可知,微电解填料在使用之前表面粗糙、分布大小不一的孔道,可使废水流入填料内部甚至通过孔道,有利于填料与废水之间的

接触。由图11(b)可知,微电解填料使用后,填料表面更为粗糙,填料内部活性组分充分暴露在水体中,增大了填料表面活性位点的利用率;由图11(d)可知,填料使用后内部各组分表面出现沉积物,主要为铁、铝氢氧化物或氧化物,但填料未发生明显腐蚀,仍然可观察到填料内部空隙良好,未发生明显的堵塞现象,填料在使用10次后,始终保持一体化结构,结合2.6中刚果红废水始终保持95%以上的降解率,说明该新型多元微电解填料对于刚果红废水具有良好处理效果的同时物理结构稳定,不易发生传统微电解填料存在的堵塞、板结、钝化等问题。

3 结论

(1)在传统铁碳微电解填料的基础上,同时加入铝、铜,通过高温焙烧制备得到新型多元微电解填料。该新型多元微电解填料对100 mg/L的刚果红模拟废水的最佳处理条件为:废水初始pH=3、填料投加质量浓度为200 g/L、曝气量为200 mL/min,室温下反应180 min,刚果红降解率达到96.25%。

(2)静态循环实验、SEM分析结果表明:该新型多元微电解填料对于刚果红模拟废水的降解相当稳定,连续使用30 h,并未发生明显腐蚀、板结、钝化等现象。微电解反应结束后,调节pH至碱性,可进一步去除废水中的有机污染物,说明新型多元微电解填料对于染料废水的降解具有良好的应用前景。

(3)UV-Vis、降解机理分析结果表明:微电解反应过程中,刚果红分子的3个特征吸收峰的强度均随着反应时间的延长而逐渐降低,证实了偶氮键、苯环、奈环的断裂,该多元微电体系可通过多种协同作用降解和去除废水中的有机污染物。

参考文献

- [1] Yaseen D A, Scholz M. Textile dye wastewater characteristics and constituents of synthetic effluents: A critical review[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2018, 16(2): 1193-1226.
- [2] Zhang X B, Dong W Y, Sun F Y, et al. Degradation efficiency and mechanism of azo dye RR2 by a novel ozone aerated internal micro-electrolysis filter[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, 276: 77-87.
- [3] Brito C N, Ferreira M B, de Moura Santos E C M, et al. Electrochemical degradation of azo-dye acid violet 7 using BDD anode: Effect of flow reactor configuration on cell hydrodynamics and dye removal efficiency[J]. *Journal of Applied Electrochemistry*, 2018, 48(12): 1321-1330.
- [4] 石紫,王志,王宠,等.染料分离有机纳滤膜制备技术研究进展[J]. *膜科学与技术*, 2020, 40(1): 340-351.

(下转第127页)

mg/g,这与付军等^[20]研究的铁锰复合氧化物/壳聚糖珠的除磷吸附剂的吸附容量 Q_{\max} (13.3 mg/g) 接近。

3 结论

通过制备 FACP 并与 Fe-Al 和 CTS 对比发现, FACP 和 Fe-Al 对磷酸盐的吸附量远高于 CTS,弥补了 CTS 吸附容量小和 Fe-Al 粉末在水体中难以回收的缺点,证明 FACP 复合颗粒的应用潜力。结果表明,铁铝复合氧化物/壳聚糖颗粒对磷酸盐的吸附量远高于壳聚糖,高于铁铝复合氧化物。在 pH 为 3 时, FACP 对磷酸盐有最大的吸附量。NaCl 离子强度对 FACP 吸附磷酸盐影响不大,表明 FACP 对磷酸盐具有选择吸附性。通过动力学模型拟合发现 FACP 吸附过程由液膜扩散和内扩散共同控制。通过 Langmuir 模型模拟得出 FACP 对磷酸盐最大的吸附容量为 11.05 mg/g。该研究结果将促进可生物降解的复合壳聚糖吸附剂在吸附磷酸盐中的应用,从而解决现有人工合成树脂吸附剂不易生物降解的缺点。

参考文献

- [1] 吴玉兰,蛋壳负载纳米铁对水体中磷酸盐的去除及机理研究[D].成都:成都理工大学,2017.
- [2] 仇春华,王文君,安晓雯,等.质子化壳聚糖的除磷性能[J].环境工程学报,2013,7(2):568-572.
- [3] 李如忠,刘科峰,钱靖,等.合肥市典型景观水体氮磷污染特征及富营养化评价[J].环境科学,2014,35(5):1718-1726.
- [4] 王昶,吕晓翠,贾青竹,徐永为.含磷废水处理技术研究进展[J].水处理技术,2009,35(12):16-17.
- [5] Cheung K, Venkitachalam T. Improving phosphate removal of sand infiltration system using alkaline fly ash[J]. Chemosphere, 2000, 41(1):243-249.

- [6] 梁美娜,王敦球,朱义年,等.甘蔗渣活性炭/纳米氧化铁对磷的吸附作用[J].环境化学,2012,31(8):1279-1280.
- [7] Hang Dong, Michael German, Lin Tian, et al. Multifunctional ion exchange pretreatment driven by carbon dioxide for enhancing reverse osmosis recovery during impaired water reuse [J]. Desalination, 2020, 485:114459.
- [8] Hang Dong, Tian Lin, Arup K. Sen Gupta. Field validation of multifunctional ion exchange process for reverse osmosis pretreatment and phosphate recovery during impaired water reuse [J]. Journal of Water Process Engineering, 2020, 36:101347.
- [9] Zhou Q, Wang X, Liu J, et al. Phosphorus removal from wastewater using nano-particulates of hydrated ferric oxide doped activated carbon fiber prepared by Sol-Gel method [J]. Chemical Engineering Journal, 2012, 200-202(16):619-626.
- [10] 李海宁,铁锰复合氧化物/壳聚糖珠吸附材料制备及其去除水中砷、磷的研究[D].烟台:烟台大学,2016.
- [11] 马红梅,朱志良,张荣华,等.弱碱性环氧阴离子交换树脂去除水中铜的动力学研究[J].离子交换与吸附,2006,22(6):519-526.
- [12] Weber W J, Morris J C. Kinetics of adsorption on carbon from solution [J]. Asce Sanitary Engineering Division Journal, 1963, 1(2):1-2.
- [13] Li Ping, Arup K, Sen Gupta. Intraparticle diffusion during selective ion exchange with a macroporous exchanger [J]. Reactive & Functional Polymers, 2000, 44:273-287.
- [14] 杨金梅,吕建波,李莞璐,等.壳聚糖载纳米羟基氧化铁对水中磷的吸附[J].环境工程学报,2018,12(5):1286-1294.
- [15] 辛杰,裴元生,王颖,等.几种吸附材料对磷吸附性能的对比研究[J].环境工程,2011,29(4):30-34.
- [16] Popuri Sr, Vijaya Y, Boddu V M, et al. Adsorptive removal of copper and nickel ions from water using chitosan coated PVC beads [J]. Bioresource Technology, 2009, 100(1):194-199.
- [17] Sankaramakrishnan N, Dixit A, Iyengar L, et al. Removal of hexavalent chromium using a novel cross linked xanthated chitosan [J]. Bioresource Technology, 2006, 97(18):2377-2382.
- [18] 洗昶华.壳聚糖对水中磷的吸附处理研究[J].化工时刊,2008,22(3):29-31.
- [19] 郑晓英,李楠,邱丽佳,等.羟基铁对污水厂二级处理出水中低浓度磷的深度处理性能[J].净水技术,2019,38(3):70-75.
- [20] 付军,范芳,等.铁锰复合氧化物/壳聚糖珠:一种环境友好型除磷吸附剂[J].环境科学,2016,37(12):4882-4890. ■

(上接第 121 页)

- [5] Vairavel P, Murty V R. Decolorization of Congo red dye in a continuously operated rotating biological contactor reactor [J]. Desalination and Water Treatment, 2020, 196:299-314.
- [6] Sonu K, Sogani M, Syed Z, et al. Effect of corn cob derived biochar on microbial electroremediation of dye wastewater and bioenergy generation [J]. Chemistryselect, 2020, 5(31):9793-9798.
- [7] 薛齐,陆曦,陈静,徐炎华. Fenton 氧化处理染料中间体生产废水的生化尾水[J].南京工业大学学报(自然科学版),2014,36(1):107-111.
- [8] Zhang W X, Li X M, Yang Q, et al. Pretreatment of landfill leachate in near-neutral pH condition by persulfate activated Fe-C micro-electrolysis system [J]. Chemosphere, 2019, 216:749-756.
- [9] Zhang L L, Gao Y, Yue Q Y, et al. Preparation and application of novel blast furnace dust based catalytic-ceramic-filler in electrolysis assisted catalytic micro-electrolysis system for ciprofloxacin wastewater treatment [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020,

383:121215.

- [10] 柯钰,朱易春,连军锋.铁碳微电解去除水中硝酸盐影响因素的研究[J].现代化工,2019,39(7):79-82.
- [11] 郝素菊,孙天昊,张文博,等. Fe-C@CNTs 球团降解含氰废水[J].现代化工,2019,39(6):104-106.
- [12] Yang Z M, Ma Y P, Liu Y, et al. Degradation of organic pollutants in near-neutral pH solution by Fe-C micro-electrolysis system [J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 315:403-414.
- [13] Malakootian M, Pourmamdari M, Asadipour A, et al. Degradation and removal of p-nitroaniline from aqueous solutions using a novel semi-fluid Fe/charcoal micro-electrolysis reactor [J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2019, 36(2):217-225.
- [14] Yang R H, Zhu J Zh, Li Y L, et al. A study on the preparation of regular multiple micro-electrolysis filler and the application in pretreatment of oil refinery wastewater [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2016, 13(5):457. ■