

钛白废酸活化制备污泥活性炭的 改性及应用

李航^{1,3}, 张太亮^{1*}, 吕利平^{1,2}, 曾行艳²

(1.西南石油大学化学化工学院, 四川 成都 610500; 2.长江师范学院化学化工学院, 武陵山片区绿色发展协调创新中心, 三峡库区环境监测与灾害防治工程研究中心, 重庆 408100; 3.重庆市三峡水务渝北排水有限责任公司, 重庆 401120)

摘要:以城市污水处理厂二沉池脱水污泥为原料, 钛白废酸为活化剂, 制备污泥活性炭(SAC), 以 H₂O₂ 为改性剂对 SAC 进行改性处理制备 MAC。研究了改性剂质量分数、改性时间对吸附效果的影响, 通过单因素实验得出最佳改性参数为: 改性质量分数为 10%、改性时间为 60 min; 该条件下, MAC 的碘吸附值为 493.40 mg/g、比表面积为 1 021.45 m²/g、总孔容为 0.622 8 mL/g、含氧官能团为 1.792 5 mmol/g, 分别较改性前提高了 21.4%、35.5%、30.9% 和 8.44%。将 MAC 用于屠宰废水的处理, 结果表明, 当 MAC 质量浓度为 12 g/L、振荡时间为 50 min、pH 维持不变时, 屠宰废水中 COD 和 TP 的去除率分别为 90.7% 和 98.5%。MAC 对屠宰废水中 COD 的吸附符合 Freundlich 等温模型和准二级动力学模型。

关键词: 钛白废酸; H₂O₂; 改性; 污泥活性炭; 屠宰废水

中图分类号: X705; X703

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2019)04-0131-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2019.04.029

Modification of sludge activated carbon made by activation of waste acid from titanium dioxide production and applications

LI Hang^{1,3}, ZHANG Tai-liang^{1*}, LV Li-ping^{1,2}, ZENG Xing-yan²

(1.College of Chemistry & Chemical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 2.Research Center for Environmental Monitoring and Hazard Prevention of Three Gorges Reservoir, Collaborative Innovation Center for Green Development in Wuling Mountain Areas, School of Chemistry and Chemical Engineering, Yangtze Normal University, Chongqing 408100, China; 3.Yubei Drainage Co., Ltd., Chongqing Three Gorges Water Service Company, Chongqing 401120, China)

Abstract: Dehydrated sludge from a municipal wastewater treatment plant is used as raw materials and waste acid from the production of titanium dioxide is used as an activator to prepare sludge-activated carbon (SAC). SAC is then modified by H₂O₂ to prepare modified activated carbon (MAC). The effects of the mass fraction of modifier and modification time on the adsorption performance are studied. The optimum modification parameters are determined by single factor experiment design as follows: the mass fraction of modifier is 10% and modification spends 60 min. Under these optimum preparation parameters, the iodine adsorption value of MAC is 493.40 mg·g⁻¹, its specific surface area is 1 021.45 m²·g⁻¹, the total pore volume is 0.622 8 mL·g⁻¹ and the oxygen-containing functional group is 1.792 5 mmol·g⁻¹, which increase 21.4%, 35.5%, 30.9% and 8.44% respectively than that of SAC. As MAC is used to treat slaughter wastewater, the results show that the removal rates of COD and TP in slaughter wastewater can reach 90.7% and 98.5%, respectively when the mass concentration of MAC is 12 g·L⁻¹, oscillation spends 50 min and pH value remains unchanged. MAC's adsorption to COD in slaughter wastewater coincidences well with Freundlich isothermal model and quasi-second-order kinetic.

Key words: waste acid from the production of titanium dioxide; H₂O₂; modification; sludge activated carbon; slaughter wastewater

Chiang^[1]于1987年首次提出以污泥为原料进行活性炭的制备研究,并证明了其可行性。随后,国内外学者进行了大量的实验探究^[2-10],但学者们普

遍采用的是成品活化剂,虽然制得的污泥活性炭比表面积并不低,且具有一定的使用研究价值^[11],但迄今为止,污泥活性炭并未能得到规模化的工业利

收稿日期: 2018-08-06; 修回日期: 2019-01-29

基金项目: 全国大学生创新创业训练项目(201710647001); 重庆市教委科研项目(KJ1712307); 重庆市涪陵区应用技术与开发资金项目(FLKJ, 2016ABA1026)

作者简介: 李航(1986-),男,硕士,工程师,研究方向为固废的减量化与资源化利用, lihng0213@163.com; 张太亮(1971-),男,博士,教授,研究方向为环境污染治理技术, 通讯联系人, 575863166@qq.com。

用,其主要原因有 2 个方面:一是在污泥活性炭制备过程中活化剂的使用量太大,造成污泥活性炭的制备成本居高不下,难以工业化推广;二是制得的污泥活性炭部分参数较低,吸附性能不太理想。鉴于此,本课题组采用了一种新型污泥活性炭活化剂^[12]。在此基础上,对制得的污泥活性炭进行改性处理,以进一步提升其对污染物的吸附性能^[13-15]。

在国际上,将屠宰废水散发出来的臭味强度等级确定为 4~5 级,属于无法忍受的严重恶臭级别^[16],其臭味大、污染物浓度高,属间歇性排水,对大量存在的分散性屠宰场来说,存在严重的“散乱污”问题,若采用传统的废水处理工艺进行处置,其管理难度与运行成本将是主要障碍,并严重制约此类废水的达标排放。随着国家对“黑臭水体”监管力度的加强,屠宰废水的处理与处置再次进入了公众的视野并引起了广泛关注。活性炭吸附法因在废水处理领域具备效率高、灵活性好、操作简便、成本低廉等优点而备受青睐^[17]。

因此,笔者以剩余污泥为原料,废弃的钛白废酸为活化剂,制备污泥活性炭,以 H_2O_2 为改性剂,对污泥活性进行改性处理,并将改性后的污泥活性炭用于屠宰废水的处理,从而为新型活化剂的选用、钛白废酸的资源化利用以及屠宰废水的高效便捷处理提供一种新的选择。

1 材料与仪器

1.1 材料来源及性质

实验用污泥取自重庆市某城市污水处理厂二沉池剩余污泥;钛白废酸取自重庆市某钛白粉生产企

业;屠宰废水取自重庆市某食品加工公司。经检测,污泥基本性质如下:pH=6.82、含水率为 76.3%、挥发性固体质量分数为 59.9%、灰分质量分数为 40.1%;钛白废酸基本性质如下:硫酸质量浓度 \approx 20%、 Fe^{2+} 质量浓度=3.49%、密度=1.33 g/mL;屠宰废水基本性质如下:pH=6.37、COD=1 020 mg/L、TP=16.1 mg/L。

1.2 实验仪器

BSA224S 型电子天平、721 型分光光度计、GZX-DH.400BS 型电热干燥箱、SL-100 型高速多功能粉碎机、SHA-B 型恒温水浴振荡器、2.5-10 型马弗炉、DRB200 消解器、DR2800 分光光度计、DR5000 型紫外分光光度计、HCA-100 型 COD 消解器、PHSJ-4F 型 pH 计、LDZX-50KBS 型压力蒸汽灭菌器、ASAP2020 型比表面和孔径分析仪。

2 实验

2.1 SAC 的制备

将脱水污泥于 103~105℃ 下烘干至恒重,待样品冷却后研磨过 100 目筛,将干污泥粉末与钛白废酸按 1:3 的固液比搅拌均匀,在室温下浸渍活化 24 h。将活化样品烘干至恒重后以 15℃/min 的升温速率升至 350℃ 并高温炭化 75 min。待样品冷却后用 10% HCl 反复清洗数次至洗液澄清,然后用 70℃ 去离子水润洗至洗液为中性。随后将样品烘干至恒重,待样品冷却后研磨过 100 目筛,即制得 SAC。

2.2 SAC 的改性

用 H_2O_2 对 SAC 进行改性处理制备 MAC,以制得的 MAC 碘吸附值、比表面积、总孔容和含氧官能

(上接第 130 页)

- [11] Chakrabarti M H, Saleem M, Ifan M F, *et al.* Application of waste derived activated carbon felt electrodes in minimizing NaCl use for electrochemical disinfection of water [J]. *International Journal of Electrochemical Science*, 2011, 6(10): 4470-4480.
- [12] Nageswara Rao Neti, Rohit Misra, Nitin Gedam, *et al.* Kinetics of electrooxidation of landfill leachate in a three-dimensional carbon bed electrochemical reactor [J]. *Chemosphere*, 2009, 76(9): 1206-1212.
- [13] 熊英健, 范娟, 朱锡海. 三维电极电化学水处理技术研究现状及方向 [J]. *工业水处理*, 1998, 18(1): 5-8.
- [14] 柴立元, 尤翔宇, 舒余德, 等. 三维电极电化学反应器降解有机废水中的 EDTA [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2010, 41(4): 1240-1245.
- [15] 杨昌柱, 崔艳萍, 黄健, 等. 三维电极反应器氧化降解苯酚 [J]. *化工进展*, 2006, 25(5): 551-556.
- [16] 张斌, 刘井军, 车玉泉. 三维电极法处理印染废水的实验研究 [J]. *吉林化工学院学报*, 2005, 22(4): 19-21.
- [17] 刘珊, 孙宏亮, 孙大鹏, 等. 电化学氧化法处理生活污水的研究 [J]. *应用化工*, 2007, 36(6): 567-569.
- [18] Li Miao, Feng Chuanping, Zhang Zhenya, *et al.* Electrochemical reduction of nitrate using various anodes and a Cu/Zn cathode [J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2010, 127(3): 161-166.
- [19] Lei Xiaohui, Li Miao, Zhang Zhenya, *et al.* Electrochemical regeneration of zeolites and the removal of ammonia [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 169(1-3): 746-750.
- [20] Ding Jing, Zhao Qingliang, Wei Liangliang, *et al.* Ammonium nitrogen removal from wastewater with a three-dimensional electrochemical oxidation system [J]. *Water Science and Technology*, 2013, 68(3): 552-559.
- [21] Huang Y, Song C, Li L, *et al.* The mechanism and performance of zeolites for ammonia removal in the zeolite packed electrolysis reactor [J]. *Electrochemistry*, 2014, 82(7): 557-560. ■

团为衡量标准,得到 MAC 的最佳改性参数。

2.3 MAC 对屠宰废水的吸附性实验

称取一定量的 MAC,分别加入 100 mL 屠宰废水,调节废水 pH,以 150 r/min 速率在恒温水浴振荡器上振荡吸附一定时间,而后过滤,测定滤液的 COD 和 TP 质量浓度并计算其去除率。

3 结果与分析

3.1 改性参数的优化

3.1.1 H_2O_2 改性剂质量分数对吸附效果的影响

当 H_2O_2 改性时间为 60 min、MAC 质量浓度为 12 g/L、屠宰废水体积为 100 mL、水浴温度为 30℃、振荡频率为 150 r/min、振荡时间为 90 min 时, H_2O_2 改性剂质量分数对 MAC 吸附屠宰废水中 COD 和 TP 的影响如图 1 所示。

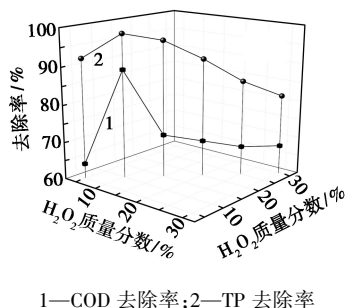


图 1 H_2O_2 改性剂质量分数对 MAC 吸附效果的影响

从图 1 可以看出,随着 H_2O_2 改性剂质量分数的增加,MAC 对废水中 COD 和 TP 的去除率均呈现上升趋势,且在 H_2O_2 改性剂质量分数为 10% 时达到最大值,此时 MAC 的碘吸附值为 493.40 mg/g,比表面积为 1021.45 m^2/g ,总孔容为 0.6228 mL/g,含氧官能团为 1.7925 mmol/g,分别较改性前提高了 21.4%、35.5%、30.9% 和 8.44%,此改性剂质量分数下 MAC 对废水中 COD 和 TP 的去除率分别为 89.1% 和 98.4%。随着改性剂质量分数的进一步增加,COD 和 TP 的去除率出现下降趋势。这是因为当改性剂质量分数较低时, H_2O_2 氧化能力较弱,致使 MAC 孔道中的部分氧化物、无机灰分及杂质溶解不充分,MAC 净化不彻底,其碘吸附值、比表面积、孔容较小,如表 1 所示,对 COD 和 TP 的吸附去除率较低。但当改性剂质量分数过高时,因 H_2O_2 的强氧化性,一方面使 MAC 的孔隙发生腐蚀,孔道坍塌;另一方面,高质量分数的 H_2O_2 会在 MAC 表面形成大量的含氧官能团及分子态 O_2 而连接在孔道表面,堵塞孔道,致使活性炭比表面积、孔容减小。

表 1 不同质量分数 H_2O_2 改性后的活性炭性能

H_2O_2 质量分数/%	碘吸附值/ ($mg \cdot g^{-1}$)	比表面积/ ($m^2 \cdot g^{-1}$)	总孔容/ ($mL \cdot g^{-1}$)	含氧官能团/ ($mmol \cdot g^{-1}$)
0	406.40	753.76	0.4757	1.6530
5	460.25	755.29	0.4874	1.3860
10	493.40	1021.45	0.6228	1.7925
15	449.20	869.69	0.4709	1.9200
20	416.05	777.38	0.3527	1.9360
25	360.81	708.42	0.2980	1.9680
30	283.46	623.50	0.2264	1.9840

3.1.2 改性时间对吸附效果的影响

当 H_2O_2 改性质量分数为 10%、MAC 质量浓度为 12 g/L、屠宰废水体积为 100 mL、水浴温度为 30℃、振荡频率为 150 r/min、振荡时间为 90 min 时, H_2O_2 改性时间对 MAC 吸附屠宰废水中 COD 和 TP 的影响如图 2 所示。

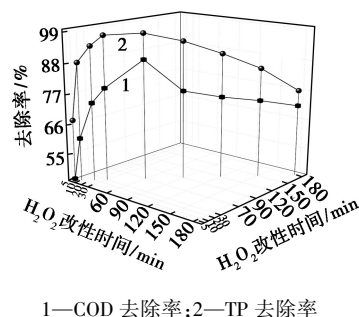


图 2 H_2O_2 改性时间对 MAC 吸附效果的影响

从图 2 中可以看出,随着 H_2O_2 改性时间的延长,MAC 对废水中 COD 和 TP 的去除率呈现先上升后下降的趋势,且在改性时间为 60 min 时达到最大值。原因主要是当改性时间较短时,一方面 MAC 孔道中氧化物及杂质溶解不充分,致使孔道发生堵塞,导致 MAC 碘吸附值、比表面积、孔容较小(如表 2 所示);另一方面,制备活性炭所用的污泥中含有大量的 COD 和 TP,因改性时间过短,致使活性炭内部的 COD 和 TP 未能及时充分溶解出来,在活性炭中残留较多,当用于屠宰废水的吸附性实验时,部分 COD 和 TP 便会溶解在废水中而被检出,这种解释与图 3(H_2O_2 改性时间对空白实验的影响)结果相吻合。鉴于以上两方面原因,导致在改性时间较短的情况下,废水中 COD 和 TP 去除率较低,但当改性时间过长时,附着在 MAC 表面的含氧官能团及 H_2O_2 反应生成的分子态 O_2 会连接在活性炭孔道的表面,堵塞孔道,致使 COD、TP 的去除率降低。

表 2 不同 H₂O₂ 改性时间下的活性炭性能

改性时间/ min	碘吸附值/ (mg·g ⁻¹)	比表面积/ (m ² ·g ⁻¹)	总孔容/ (mL·g ⁻¹)	含氧官能团/ (mmol·g ⁻¹)
10	318.82	636.71	0.2863	1.4400
20	398.37	688.25	0.4017	1.4640
30	464.67	813.69	0.4431	1.5750
60	493.40	1021.45	0.6228	1.7925
90	438.15	923.18	0.5539	1.9760
120	396.16	897.63	0.4720	2.0743
150	371.86	751.40	0.3308	2.0914
180	327.66	726.38	0.3151	2.1086

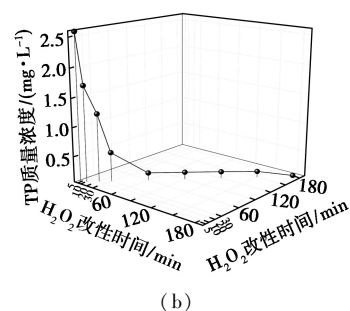
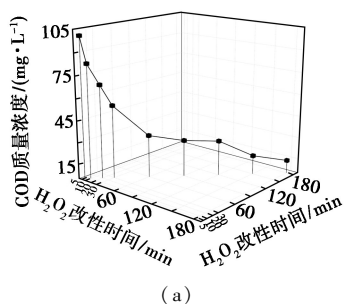


图 3 H₂O₂ 改性时间对空白实验的影响

3.2 MAC 对屠宰废水的吸附

3.2.1 质量浓度对吸附效果的影响

当屠宰废水体积为 100 mL、水浴温度为 30℃、振荡频率为 150 r/min、振荡时间为 90 min 时,MAC 质量浓度对屠宰废水中 COD 和 TP 的吸附效果如图 4 所示。

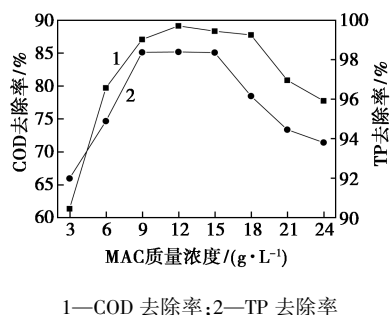


图 4 MAC 质量浓度对吸附效果的影响

从图 4 可以看出,随着 MAC 质量浓度的增加,MAC 对屠宰废水中 COD 和 TP 的去除率均呈现先上升后下降的趋势,且 MAC 质量浓度为 12 g/L 时,COD 和 TP 的去除率达到最大值,分别为 89.1% 和 98.4%。原因主要是因为制备活性炭所用的污泥中含有大量的 COD 和 TP,经高温炭化和 H₂O₂ 改性后还有部分残留,随着 MAC 质量浓度的增加,残留在其中的 COD 和 TP 溶出量也呈现上升趋势,这种解释与图 5(MAC 质量浓度对空白实验的影响)结果相吻合。

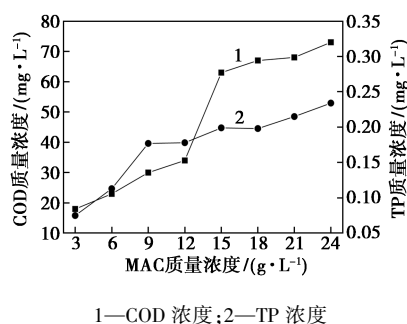


图 5 MAC 质量浓度对空白实验的影响

3.2.2 振荡时间对吸附效果的影响

当屠宰废水体积为 100 mL、水浴温度为 30℃、振荡频率为 150 r/min、MAC 质量浓度为 12 g/L 时,振荡时间对屠宰废水中 COD 和 TP 的吸附效果如图 6 所示。

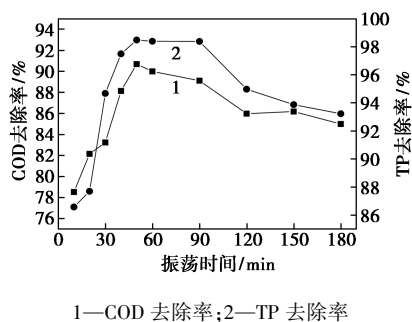


图 6 振荡时间对吸附效果的影响

从图 6 中可以看出,随着振荡时间的延长,MAC 对屠宰废水中 COD 和 TP 的去除率均呈现先上升后下降的趋势,且振荡时间为 50 min 时,COD 和 TP 的去除率达到最大值,分别为 90.7% 和 98.5%。原因主要是因为制备活性炭所用的污泥中含有大量的 COD 和 TP,经高温炭化和 H₂O₂ 改性后还有部分残留,随着振荡时间的延长,残留在其中的 COD 和 TP 溶出量也呈现上升趋势,这种解释与图 7(振荡时间对空白实验的影响)结果相吻合。

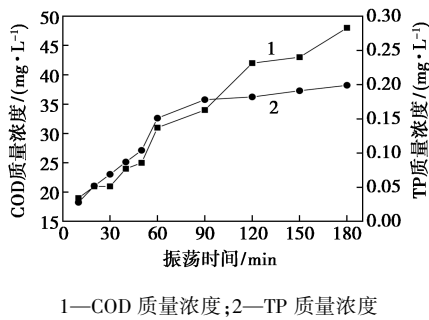


图 7 振荡时间对空白实验的影响

3.2.3 pH 对吸附效果的影响

当屠宰废水体积为 100 mL、水浴温度为 30℃、振荡频率为 150 r/min、MAC 质量浓度为 12 g/L、振荡时间为 50 min 时, pH 对屠宰废水中 COD 和 TP 的吸附效果如图 8 所示。

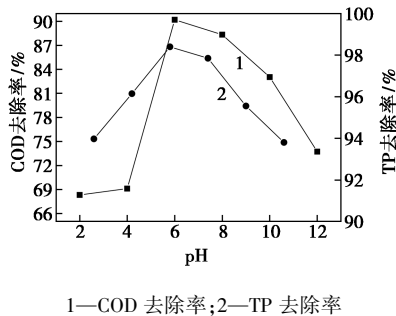


图 8 pH 对吸附效果的影响

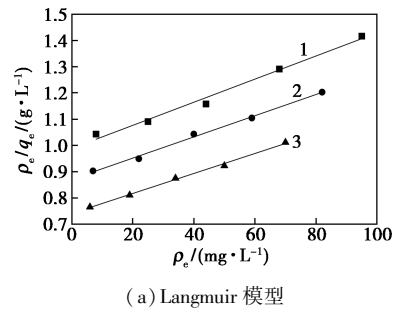
从图 8 中可以看出,当废水 pH 为 2~6 时,MAC 对屠宰废水中 COD 和 TP 的吸附量均随 pH 的增加而增大。这主要是因为当 pH 较低时,溶液中 H⁺ 浓度较高,而 H⁺ 会与 MAC 表面大量存在的含氧官能团结合,从而改变其表面亲水性,导致 COD 和 TP 的去除率偏低;但随着 pH 的增加,结合的 H⁺ 会发生解离,使 MAC 中大量的活性位暴露,吸附质会迅速占据活性位而被吸附,所以随着 pH 的增加,COD 和 TP 的去除率会逐渐增大。但当废水的 pH 为 8~12 时,此时体系中大量存在的 OH⁻ 会与铁等金属离子反应产生沉淀,进而堵塞活性炭孔道,致使其比表面积和孔容减小,从而使得废水中 COD 和 TP 去除率降低。因此,适宜的屠宰废水 pH 为 6.37。

3.3 吸附机理

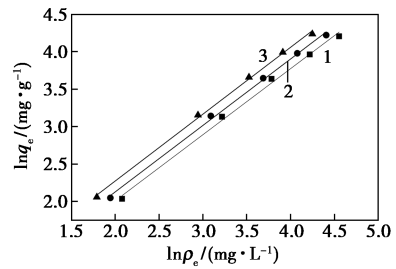
3.3.1 吸附等温线

采用 Langmuir 与 Freundlich 模型对 MAC 吸附屠宰废水中 COD 的数据进行线性拟合,其拟合结果分别如图 9、表 3 所示。

从图 9 再结合表 3 可以看出,Langmuir 与 Freundlich 模型均适宜于描述 MAC 对屠宰废水的吸附



(a) Langmuir 模型



(b) Freundlich 模型

1—303 K;2—313 K;3—323 K

图 9 Langmuir 和 Freundlich 模型

注:ρₑ 代表平衡质量浓度;qₑ 代表平衡吸附量。

表 3 Langmuir 与 Freundlich 模型拟合结果

T/K	Langmuir			Freundlich		
	Q _m /(mg·g ⁻¹)	K _L /(L·mg ⁻¹)	R ²	n	K _F	R ²
303	227.27	0.004450	0.9878	1.13	1.28	0.9966
313	250.00	0.004591	0.9954	1.13	1.42	0.9982
323	263.16	0.005126	0.9967	1.12	1.63	0.9984

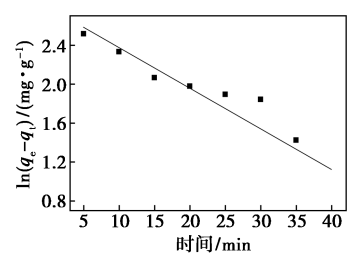
注:Q_m 代表吸附剂的饱和吸附量;K_L 代表 Langmuir 平衡常数;n 代表 Freundlich 浓度指数;K_F 代表 Freundlich 平衡常数。

行为,但通过相关指数的比较,在同一温度水平条件下, Freundlich 模型拟合的相关指数要高于 Langmuir 模型,从而得出 Freundlich 较 Langmuir 模型更适合描述 MAC 对屠宰废水的吸附,且该吸附为多层吸附;随着体系温度的升高,吸附剂的饱和吸附量呈明显上升趋势,说明 MAC 对屠宰废水的吸附属于吸热反应,吸附强度随着温度的升高而得到加强。

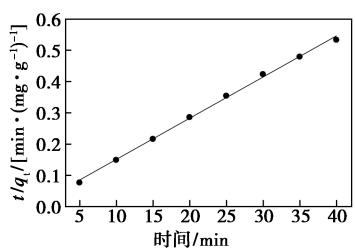
3.3.2 吸附动力学

分别采用准一级动力学模型、准二级动力学模型、颗粒内扩散模型以及 Elovich 模型对 MAC 吸附屠宰废水中的 COD 数据进行动力学线性拟合,其拟合曲线如图 10 所示。

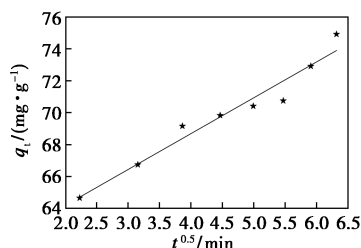
从图 10 可以看出,用准二级动力学模型进行拟合的相关指数为 0.998 0,拟合程度较高,平均偏差为 2.17%,偏差较小,说明准二级动力学模型较其他 3 种动力学模型更适合描述 MAC 对屠宰废水的吸附行为,该吸附过程主要为化学吸附^[18]。



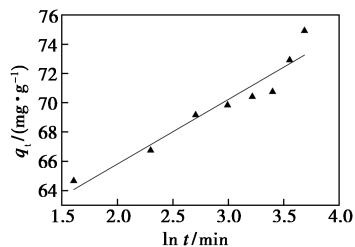
(a) 准一级动力学模型



(b) 准二级动力学模型



(c) 颗粒内扩散模型



(d) Elovich 模型

图 10 MAC 吸附屠宰废水的动力学模型

4 结论

(1) 以城市污水处理厂二沉池脱水污泥为原料,钛白废酸为活化剂, H₂O₂ 为改性剂,对 SAC 进行改性的最佳参数为:改性质量分数为 10%,改性时间为 60 min。

(2) 改性后污泥活性炭的碘吸附值为 493.40 mg/g、比表面积为 1 021.45 m²/g、总孔容为 0.622 8 mL/g、含氧官能团为 1.792 5 mmol/g,分别较改性前提提高了 21.4%、35.5%、30.9%和 8.44%。

(3) 将 MAC 用于屠宰废水的处理,当 MAC 的质量浓度为 12 g/L、振荡时间为 50 min、pH 维持不变时,废水中 COD 和 TP 的去除率分别为 90.7%和 98.5%,说明 MAC 具有较强的吸附性能,在废水处

理领域具有较为广阔的应用前景。

(4) MAC 对屠宰废水中 COD 的吸附符合 Freundlich 模型和准二级动力学模型。

参考文献

- [1] Chiang P C, You J H. Use of sewage sludge for manufacturing adsorbents [J]. Canadian Journal of Chemical Engineering, 1987, 65 (6) : 922-927.
- [2] Rozada F, Calvo L F, García A I, et al. Dye adsorption by sewage sludge-based activated carbons in batch and fixed-bed systems [J]. Bioresource Technology, 2003, 87 (3) : 221-230.
- [3] Martín M J, Artola A, Balaguer M D, et al. Activated carbons developed from surplus sewage sludge for the removal of dyes from dilute aqueous solutions [J]. Chemical Engineering Journal, 2003, 94 (3) : 231-239.
- [4] Zhang F S, Nriagu J O, Itoh H. Mercury removal from water using activated carbons derived from organic sewage sludge [J]. Water Research, 2005, 39 (2-3) : 389-395.
- [5] 佚名. 石化污泥生产活性炭取得成功 [J]. 现代化工, 2012, (2) : 12-12.
- [6] Boualem T, Debab A, Martā Nez d Y A, et al. Activated carbons obtained from sewage sludge by chemical activation: Gas-phase environmental applications [J]. Journal of Environmental Management, 2014, 140 : 145-151.
- [7] Zhai Y, Chen H, Xu B, et al. Influence of sewage sludge-based activated carbon and temperature on the liquefaction of sewage sludge: Yield and composition of bio-oil, immobilization and risk assessment of heavy metals [J]. Bioresource Technology, 2014, 159 (6) : 72-79.
- [8] Tao H C, Zhang H R, Li J B, et al. Biomass based activated carbon obtained from sludge and sugarcane bagasse for removing lead ion from wastewater [J]. Bioresource Technology, 2015, 192 : 611-617.
- [9] Li Y, Li Y, Li L, et al. Preparation and analysis of activated carbon from sewage sludge and corn stalk [J]. Advanced Powder Technology, 2016, 27 (2) : 684-691.
- [10] Reis G S D, Wilhelm M, Silva T C D A, et al. The use of design of experiments for the evaluation of the production of surface rich activated carbon from sewage sludge via microwave and conventional pyrolysis [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 93 (19) : 590-597.
- [11] 于洪斌, 丁蕴铮. 活性炭在水处理中的应用方法研究与进展 [J]. 工业水处理, 2003, 23 (8) : 12-16.
- [12] 王英伍, 杨皓, 宁平, 等. 污泥基活性炭的制备及其在环境污染治理中的应用进展 [J]. 材料导报, 2017, 31 (15) : 50-59.
- [13] Tseng J M, Yang H C, Chou W L, et al. Effect of H₂O₂ and alkaline treatment on acetone removal by activated carbon [J]. Sustainable Environment Research, 2013, 23 (5) : 289-294.
- [14] Gu Li, Wang Dandan, Deng Rui, et al. Effect of surface modification of activated carbon on its adsorption capacity for bromate [J]. Desalination & Water Treatment, 2013, 51 (13-15) : 2592-2601.
- [15] Chen C, Li X, Tong Z, et al. Modification process optimization, characterization and adsorption property of granular fir-based activated carbon [J]. Applied Surface Science, 2014, 315 : 203-211.
- [16] 韩春威. 水解酸化-好氧工艺处理屠宰废水的试验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007 : 2.
- [17] Pehlivan E, Cetin S. Application of fly ash and activated carbon in the removal of Cu²⁺ and Ni²⁺ ions from aqueous solutions [J]. Energy Sources, 2008, 30 (13) : 1153-1165.
- [18] Aksu Z. Determination of the equilibrium, kinetic and thermodynamic parameters of the batch biosorption of nickel(II) ions onto *Chlorella vulgaris* [J]. Process Biochemistry, 2002, 38 (1) : 89-99. ■