

微波热裂解-KOH 活化制备杏壳活性炭 及其对甲基橙的吸附性能

王 程¹ 张玉全² 李治军² 马东平² 张鹏会² 汤海涌³

(1.庆阳职业技术学院能源工程系,庆阳 745000;2.陇东学院化学化工学院,庆阳 745000;
3.木林森炭业集团,南京 210000)

摘 要 以陇东地区生物质废弃物杏壳为原料,采用微波热裂解-KOH 活化联合法制备活性炭,研究了微波功率和时间,活化过程中 KOH 溶液的浓度、用量、浸渍时间、加热活化温度和时间对活性炭吸附性能的影响;以甲基橙为染料模拟印染废水,研究了甲基橙初始浓度、振荡吸附时间和活性炭用量对吸附效果的影响。结果表明:微波功率 800W,热裂解 30min,生物炭的收率为 56%;KOH 溶液的浓度为 25%,碱/炭为 2.5:1,活化温度 800℃,加热活化 1.5h,所制备活性炭的碘吸附值为 1332mg/g,比表面积为 1223m²/g,总孔体积为 0.68cm³/g,活性炭的得率为 32.7%;甲基橙浓度为 250mg/g,振荡吸附 240min,活性炭用量为每 100mL 甲基橙溶液 0.15g 时,甲基橙去除率高达 99.78%;吸附过程符合准二级动力学方程。

关键词 微波热裂解,KOH 活化,陇东杏壳,活性炭,甲基橙

Preparation of apricot shell AC by microwave pyrolysis-KOH activation and absorption of methyl orange

Wang Cheng¹ Zhang Yuquan² Li Zhijun² Ma Dongping² Zhang Penghui² Tang Haiyong³

(1.Department of Energy Engineering,Qingyang Vocational and Technical College,
Qingyang 745000;2.College of Chemistry and Chemical Engineering,Long Dong University,
Qingyang 745000;
3.Mu Lin Sen Activated Carbon Group,Nanjing 210000)

Abstract Activated carbon(AC) was prepared from apricot shell of biomass waste in Longdong region by microwave pyrolysis-KOH activation combination method.The effects of microwave power and time,the concentration and dosage of KOH solution,dipping time,heating activation temperature and time on the adsorption performance of AC were studied.Using methyl orange as simulated dyeing wastewater,the effects of initial concentration of methyl orange,oscillating adsorption time and AC content on the adsorption result were studied.The results showed that the yield of biochar was 56% at 800W microwave power and 30min pyrolysis.The concentration of KOH solution was 25%,alkali/carbon was 2.5:1,the activation temperature of 800℃,heating activation 1.5h.The iodine adsorption value of AC prepaed was 1332mg/g,BET specific surface area was 1223m²/g,total pore volume was 0.68cm³/g,the yield of AC was 32.7%.When the concentration of methyl orange was 250mg/g,the adsorption time was 240min,and the amount of AC was 0.15g per 100mL of methyl orange solution,the removal rate of methyl orange was up to 99.78%.The adsorption process conformed to the quasi-second order kinetic equation.

Key words microwave pyrolysis,KOH activation,apricot shell of Longdong,activated carbon,methyl orange

生物质作为一种可再生资源,发展废弃生物质再利用技术具有显著的经济价值和环境效益。废弃生物质在缺氧条件下通过不同的热裂解技术得到生物炭,可有效避免废弃生物质毫无意义的燃烧而向

大气中释放热量和 CO₂,这对于促进大气中碳的减排及应对全球气候变化都非常有利^[1]。微波热裂解装置或设备因其制造方法简单、成本低,对于生物质加热效率高^[2],在生物质热裂解制备生物炭领域受

到国内外研究者越来越多的关注。生物炭经过活化可以进一步获得具有独特的物化性质和表面特性,经济价值更高,且具有广泛适用性和实用性的活性炭材料^[3]。

工业废水主要来源于纺织工业和其他印染行业,如造纸、印刷、皮革、食品和塑料等,印染废水中常含有多种有毒且难以降解的染料化合物^[4]。由于各种染料的存在,印染废水通常是有颜色的。大多数染料在水中即使浓度低于 1mg/L 也是可见的,而印染废水中染料的含量通常在 10~200mg/L,因此印染废水的颜色一般非常鲜艳^[5]。然而,活性偶氮染料在纺织染料中所占比例超过 50%,其特征是染料分子中存在氮氮双键^[6-7]。由于偶氮染料在水中溶解度高、结构复杂、来源广泛等特点,使得从印染废水中去除偶氮染料比较困难^[8-9]。甲基橙属于常见的偶氮染料之一,因此,探索印染废水中甲基橙的去除方法就尤为重要。

去除印染废水中的染料通常采用物理、化学及生物等方法,例如絮凝、沉淀、吸附、膜过滤、臭氧氧化和真菌脱色等技术^[10],与其他技术相比,吸附法应该是去除印染废水中染料最简单、成本较低和效果较好的物理方法^[11-12]。活性炭作为性能最好的吸附材料之一,其原料来源广泛、生产成本较低^[3],无疑是大规模用于工业印染废水中染料去除的最好选择^[13-14]。杏壳作为杏仁利用和深加工企业的废弃物不仅易得而且廉价,本研究以甘肃省陇东地区所产杏壳为原料,通过微波热裂解技术,得到生物炭,并进一步以 KOH 为活化剂,在少氧的条件下制备了具有良好吸附能力的果壳活性炭(W_p)^[15],并研究了所制备活性炭对于偶氮染料甲基橙的去除能力;以期为废弃生物质的再利用、活性炭的制备及印染废水中偶氮染料甲基橙的去除提供新的途径和工艺。

1 实验部分

1.1 主要材料与仪器

杏壳,甘肃省陇东地区;浓盐酸(HCl)、碘(I_2)、碘酸钾(KIO_3)、碘化钾(KI)、硫代硫酸钠($Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$)、可溶性淀粉、无水碳酸钠(Na_2CO_3)、氢氧化钾(KOH)、氢氧化钠(NaOH)、甲基橙等均为分析纯。

马弗炉(XL-1 型),鹤壁市华通分析仪器有限公司;回旋振荡器(GH-100 型),济南禾普仪器设备有限公司;比表面积孔隙度分析仪(ASAP2020 型),美

国 Micromeritics 仪器公司;紫外-可见分光光度计(Agilent Cary 60 型),安捷伦科技(中国)有限公司。

1.2 杏壳活性炭的制备

杏壳原料粉碎至 1~5mm,用蒸馏水清洗后,80℃烘干至恒重。采用微波热裂解法制备生物炭,其中微波频率为 2450MHz,微波功率自动可调,然后利用一定浓度的 KOH 溶液对生物炭进行浸渍,浸渍结束后过滤,并将浸渍后的生物炭在 120℃下快速烘干至恒重,最后在少氧的条件下利用马弗炉对其进行加热活化。活化结束后冷却至常温,对活化后的物料采用 1:4(浓盐酸与蒸馏水体积比)盐酸溶液进行酸洗,酸洗结束后再水洗至中性,120℃烘干至恒重后得到杏壳活性炭产品。

1.3 活性炭的表征

所制备活性炭产品的碘吸附值按照最新国家标准(GB/T 12496.8—2015)规定方法进行测定^[16]。活性炭的比表面积和孔径分布表征采用比表面积孔隙度分析仪测定,以 N_2 作为吸附介质,采用 BET 法计算比表面积,采用 BJH 法计算孔径分布。

1.4 甲基橙吸附实验

称取一定量活性炭产品于 250mL 锥形瓶中,做简单的预处理后,加入一定浓度的甲基橙模拟废水 100mL 密封,在室温下将锥形瓶置于 120r/min 的恒温振荡器中进行振荡吸附,振荡吸附结束进行过滤,滤液进行等比稀释后采用紫外-可见分光光度计测定吸光度,通过甲基橙的标准曲线计算滤液中甲基橙的浓度,通过式(1)和式(2)计算吸附量和去除率^[17]。实验选取对于吸附性能影响较大的甲基橙溶液的浓度、吸附时间、活性炭使用量等因素进行正交试验,每组试验平行 3 次,取平均值作为最终结果。

$$q_t = \frac{c_0 - c_t}{m} V \quad (1)$$

$$\beta = \frac{c_0 - c_t}{c_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中, q_t 为 t 时刻时活性炭的吸附量,mg/g; c_0 为吸附前甲基橙溶液的浓度,mg/g; c_t 为 t 时刻时甲基橙溶液的浓度,mg/g; m 为活性炭的质量,g; V 为甲基橙溶液的体积,L; β 为去除率,%。

2 结果与讨论

2.1 活性炭制备条件优化及结果分析

根据微波热裂解生物质的特点,选择在不同功率和时间条件下对杏壳进行热裂解。根据 KOH 活化法制备活性炭的特点,选定 KOH 溶液浓度、

KOH 溶液用量、生物炭浸渍时间、加热活化温度和活化时间 5 个因素,每个因素选取若干个水平进行正交试验,每组试验重复 2—3 次,取平均值作为最终实验结果。

2.1.1 杏壳生物炭制备

表 1 列出了微波热裂解杏壳制备生物炭的优化条件。由表 1 可知,杏壳生物炭制备阶段,首先在 600W 功率微波下,对杏壳原料进行热裂解碳化,结果发现加热 20min 后,杏壳原料基本没有任何变化;随后,将微波功率提高至 800W,并改变加热时间,结果发现,当加热时间延长至 30min 后,原料的剩余质量基本恒定,生物炭的收率为 56%。

表 1 微波热裂解杏壳制备生物炭条件优化

序号	微波功率/W	热裂解时间/min	热裂解得率/%
01	600	20	—
02	800	20	76
03	800	25	61
04	800	30	56
05	800	35	55

2.1.2 杏壳活性炭制备

表 2 列出了微波热裂解-KOH 活化法制备杏壳活性炭的优化条件。由表 2 可见,在活性炭制备阶段,首先考查了 KOH 溶液浓度对于活性炭碘吸附值的影响,结果发现,当 KOH 溶液浓度小于 20% 时

表 2 微波热裂解-KOH 活化法制备杏壳活性炭条件优化

序号	碱及质量 分数	碳/碱/ (g· mL ⁻¹)	浸渍 时间/ h	活化 温度/ ℃	活化 时间/ h	得率/ %	碘吸 附值/ (mg·g ⁻¹)
01	15% KOH	1/2.5	12	800	2.0	27.3	926
02	20% KOH	1/2.5	12	800	2.0	26.3	973
03	25% KOH	1/2.5	12	800	2.0	25.4	1298
04	30% KOH	1/2.5	12	800	2.0	20.8	1274
05	25% KOH	1/2.5	24	800	2.0	19.5	1318
06	25% KOH	1/2.5	36	800	2.0	18.1	1305
07	25% KOH	1/2.0	24	800	2.0	23.0	1178
08	25% KOH	1/3.0	24	800	2.0	19.3	1248
09	25% KOH	1/2.5	24	700	2.0	42.0	744
10	25% KOH	1/2.5	24	900	2.0	16.8	1276
11	25% KOH	1/2.5	24	800	1.0	35.0	1142
12	25% KOH	1/2.5	24	800	1.5	32.7	1332
13	25% NaOH	1/2.5	24	800	1.5	48.6	430

注:活性炭得率为所得活性炭产品与杏壳生物炭的质量之比。

时影响较大,当 KOH 溶液浓度大于 20% 时,碘吸附值明显提高;受所制备生物炭体积的影响,当 KOH 溶液用量小于生物炭质量的 2 倍时,生物炭不能得到有效浸渍,当 KOH 溶液用量大于生物炭质量的 3 倍时,活性炭的碘吸附值反而有所降低;当浸渍时间大于 12h 后,浸渍时间对于活性炭的碘吸附值影响较小;活化温度对于活性炭的吸附性能具有较大影响,当活化温度由 700℃ 升高到 800℃,活性炭的碘吸附值提高了 1.77 倍,继续将活化温度升高至 900℃ 时,活性炭的得率和碘吸附值都有所降低;将加热活化时间由原来预设的 2h 进行筛查,结果发现,当活化时间缩短至 1.5h 后,在保证活性炭的碘吸附值不降低的基础上,较高得率的制备了活性炭产品;最后,尝试使用 NaOH 作为活化剂,研究表明,NaOH 的活化效果远不及 KOH。

综上所述,微波热裂解-KOH 活化法制备杏壳活性炭的最佳条件为:微波功率 800W,热裂解 30min,KOH 溶液浓度 25%,浸渍过程中所使用 KOH 溶液的体积应是生物质炭质量的 2.5 倍,活化温度为 800℃,活化时间为 1.5h,在此条件下所制备活性炭的碘吸附值为 1332mg/g,活性炭的得率为 32.7%。以下实验均采用最佳条件所制杏壳活性炭进行。

2.2 活性炭比表面积及孔结构分析

杏壳活性炭的 N₂ 吸附-脱附等温线见图 1。由图可知,当相对压力较低时($P/P_0 < 0.1$),吸附量急剧增大,吸附速率相对较快,表明该工艺条件下所

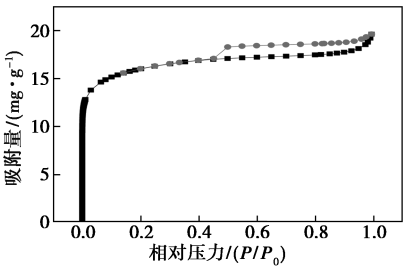


图 1 杏壳活性炭 77K 条件下 N₂ 的吸附-脱附等温线图

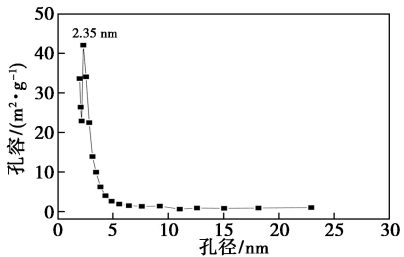


图 2 杏壳活性炭的孔径分布图

制备的活性炭具有发达的微孔和中孔。通过 BET 法计算的该工艺同条件下所制备活性炭的比表面积为 $1223\text{m}^2/\text{g}$, 总孔体积为 $0.68\text{cm}^3/\text{g}$ 。采用 BJH 法计算杏壳活性炭的孔径分布情况, 结果见图 2。由图可知, 该工艺条件下所制备活性炭的孔径主要为 $2\sim 5\text{nm}$ 的中孔, 平均孔径为 2.35nm 。

2.3 甲基橙吸附实验及条件优化

2.3.1 绘制甲基橙吸收标准曲线

准确称取 100mg 甲基橙于小烧杯中, 加水溶解, 转移至 1L 容量瓶中, 用蒸馏水稀释至刻度, 摇匀后得到 100mg/L 甲基橙溶液标准溶液备用。取 100mg/L 甲基橙溶液 10mL 稀释 10 倍后得到 10mg/L 甲基橙溶液。再利用 10mg/L 的甲基橙溶液配制浓度分别为 0.5mg/L 、 1.0mg/L 、 2.0mg/L 、 4.0mg/L 和 8.0mg/L 的甲基橙溶液, 用 100mg/L 甲基橙溶液标准溶液配制 12mg/L 甲基橙溶液。以蒸馏水作为参比溶液, 在固定波长 461nm 处测量所配制各溶液的吸光度值。以甲基橙浓度为横坐标, 吸光度为纵坐标, 所绘制的甲基橙标准曲线见图 3。

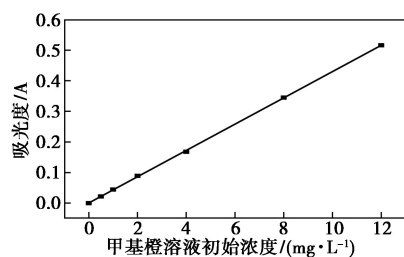


图 3 甲基橙标准曲线图

由图可知, 当甲基橙的浓度小于 12mg/L 时, 甲基橙浓度与吸光度呈线性关系, 标准曲线方程为 $y=0.0429x+0.0006$, $R^2=0.9999$ 。

2.3.2 甲基橙初始浓度对其去除率及吸附量的影响

称取研磨通过 200 目筛 ($71\mu\text{m}$) 自制杏壳活性炭 0.1g 于 250mL 具塞磨口锥形瓶中, 用移液管准确加入盐酸 (5% , wt, 质量分数) 5mL 使活性炭充分润湿, 置于电炉上加热至沸, 微沸 30s 后, 冷却至室温, 加入 100mL 甲基橙溶液, 立刻塞好瓶盖, 将锥形瓶置于 120次/min 的振荡器上振荡 120min , 振荡结束后过滤并调节 pH, 对滤液进行等比稀释后测量其吸光度值, 结果见图 4。由图可知, 随着甲基橙浓度的增加, 去除率下降, 吸附量增加, 当甲基橙浓度小于 100mg/L 时, 活性炭基本可以完全去除溶液中的甲基橙; 当甲基橙浓度大于 250mg/L 时, 去除率下降较为明显, 吸附量也由较快增加变为缓慢增

加, 此时活性炭对于甲基橙的去除率为 85.24% , 吸附量为 213.10mg/g 。

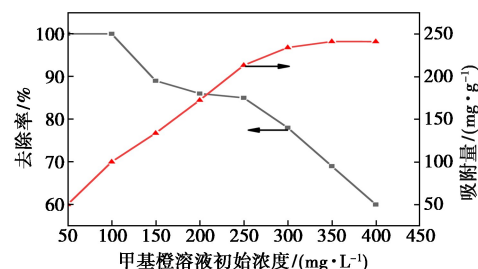


图 4 甲基橙溶液初始浓度对其去除率及吸附量的影响

2.3.3 振荡吸附时间对甲基橙去除率及吸附量的影响

实验方法同 2.3.2 节, 在甲基橙浓度为 250mg/L 时, 考察振荡吸附时间对于甲基橙去除率及吸附量的影响, 结果见图 5。由图可知, 去除率和吸附量均随振荡吸附时间的增加而增加, 当振荡吸附时间超过 240min 以后, 去除率趋于平稳, 此时活性炭对于甲基橙的去除率为 89.24% , 吸附量为 223.10mg/g 。

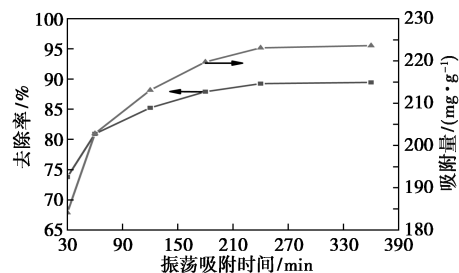


图 5 振荡吸附时间对甲基橙去除率及吸附量的影响

2.3.4 活性炭用量对甲基橙去除率及吸附量的影响

实验方法同 2.3.2 节, 在甲基橙浓度为 250mg/L , 所用体积为 100mL , 振荡吸附时间为 240min 的条件下, 考察活性炭用量对于甲基橙去除率及吸附量的影响, 结果见图 6。由图可知, 去除率随活性炭用量的增加而增加, 吸附量随活性炭用量的增加而降低。当活性炭用量增加到 0.15g 时, 溶液中的甲基橙基本被去除完全, 此时活性炭对于甲基橙的去除

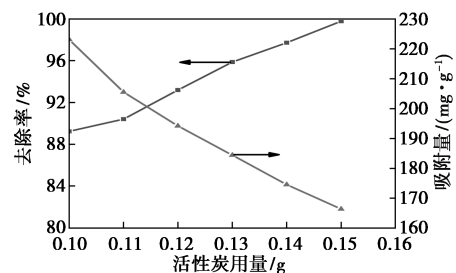


图 6 活性炭用量对甲基橙去除率及吸附量的影响

率为 99.78%, 吸附量为 166.31mg/g。

由以上实验可知, 甲基橙的初始浓度、振荡吸附时间及活性炭用量都会不同程度的影响甲基橙的去除率和吸附量。当甲基橙浓度为 250mg/g, 振荡吸附时间为 240min, 活性炭用量为每 100mL 甲基橙溶液 0.15g 时, 活性炭对溶液中甲基橙的去除率可以高达 99.78%, 吸附去除能力优于文献报道^[18-19]。

2.4 活性炭吸附甲基橙的动力学分析

吸附速率和吸附量是吸附剂吸附性能的重要参数。采用目前常用的 Lagergren 准一级动力学方程(式 3)、准二级动力学方程(式 5)和 Elovich 方程(式 6)对吸附过程进行拟合分析^[20-21], 结果如图 7 和表 3 所示。

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t$$

对式(3)进行积分, 得式(4)。

$$q_t = q_e(1 - e^{-k_1 t})$$
$$t/q_t = 1/k_2 q_e^2 + t/q_e$$
$$q_t = k_p t^{1/2} + C$$

(3)

(4)

(5)

(6)

式中, q_t 为 t 时刻的吸附量, mg/g; t 为吸附时间, min; k_1 为一级吸附速率常数, min^{-1} ; k_2 为准二级吸附速率常数, $\text{g}/(\text{mg} \cdot \text{min})$; k_p 为颗粒内扩散速率常数, $\text{mg}/(\text{g} \cdot \text{min}^{1/2})$; C 为常数。

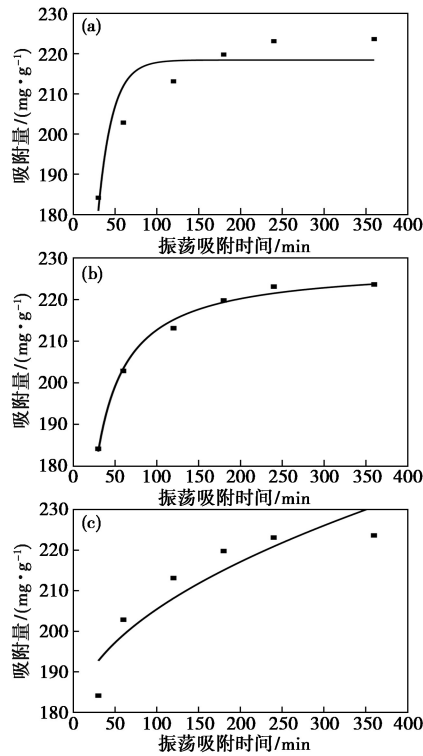


图 7 吸附动力学方程拟合曲线图
[(a)Lagergren 准一级动力学方程; (b)准二级动力学方程; (c)Elovich 方程]

表 3 微波热裂解-KOH 活化法制备杏壳活性炭吸附甲基橙的动力学模型参数	
T/K	298
Lagergren 准一级动力学模型	
速率常数 $K_1/(\text{min}^{-1})$	5.87×10^{-2}
吸附量 $q_e/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	218.40
R^2	0.8545
准二级动力学模型	
速率常数 $K_2/(\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1})$	5.98×10^{-4}
吸附量 $q_e/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	228.26
R^2	0.9935
Elovich 动力学模型	
速率常数 $K_P/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1})$	2.81
常数 C	177.29
R^2	0.8380

由图 7 和表 3 可知, Lagergren 准一级动力学方程和 Elovich 方程对杏壳活性炭吸附甲基橙的吸附过程拟合效果不佳, 相关系数 R^2 均小于 0.90; 准二级动力学模型得到的拟合相关系数 R^2 大于 0.99, 所以准二级动力学方程更适合解释所制备杏壳活性炭对于甲基橙的吸附过程。该模型的适用性表明杏壳活性炭吸附甲基橙的过程为化学吸附或化学键合^[22-23]。

3 结论

- (1) 以生物质废弃物杏壳为原材料, 采用频率 2450MHz, 功率 800W 微波热裂解工艺制备生物质炭, 利用 KOH 活化杏壳生物质炭来制备具有较大比表面积活性炭在工艺上是可行的。
- (2) 微波热裂解-KOH 活化法制备杏壳活性炭的最佳工艺条件为微波频率 2450MHz, 功率 800W, 热裂解 30min, KOH 溶液浓度 25%, 浸渍过程中 KOH 溶液的体积为生物质炭质量的 2.5 倍, 活化温度为 800℃, 活化时间为 1.5h, 在此条件下所制备活性炭的碘吸附值为 1332mg/g, 活性炭的得率高达 32.7%。
- (3) 最佳工艺条件下所制备的杏壳活性炭通过 BET 法计算的活性炭的比表面积为 1223m²/g, 总孔体积为 0.68cm³/g; 通过 BJH 法计算的最佳工艺所制备活性炭的孔径分布情况, 其主要为 2~5nm

的中孔,平均孔径为 2.35nm。

(4)采用微波热裂解-KOH 活化制备的陇东地区杏壳活性炭,当甲基橙浓度为 250mg/g,振荡吸附 240min,活性炭用量为每 100mL 甲基橙溶液 0.15g 时,活性炭对溶液中甲基橙的去除率可以高达 99.78%;杏壳活性炭吸附甲基橙的过程符合准二级动力学方程。

参考文献

- [1] Lehmann J. A handful of carbon[J]. *Nature*, 2007, 447: 143-144.
- [2] 孙红文. 生物炭与环境[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013, 20.
- [3] 王程, 曹强, 汤海涌, 等. 活性炭的应用研究进展[J]. *化学与生物工程*, 2019, 36(1): 11-14.
- [4] Vakili M, Rafatullah M, Salamatinia B, et al. Application of chitosan and its derivatives as adsorbents for dye removal from water and wastewater: a review[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2014, 113: 115-130.
- [5] Ali N, Hameed A, Ahmed S. Physicochemical characterization and bioremediation perspective of textile effluent, dyes and metals by indigenous Bacteria[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 164: 322-328.
- [6] Liu H L, Chiou Y R. Optimal decolorization efficiency of reactive Red 239 by UV/TiO₂ photocatalytic process coupled with response surface methodology[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2005, 112: 173-179.
- [7] Asouhidou D D, Triantafyllidis K S, Lazaridis N K, et al. Sorption of reactive dyes from aqueous solutions by ordered hexagonal and disordered mesoporous carbons[J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2009, 117(1-2): 257-267.
- [8] Ozdemir O, Armagan B, Turan M, et al. Comparison of the adsorption characteristics of azo-reactive dyes on mesoporous minerals[J]. *Dyes and Pigments*, 2004, 62(1): 49-60.
- [9] Cristóvão R O, Tavares A P M, Ribeiro A S, et al. Kinetic modelling and simulation of laccase catalyzed degradation of reactive textile dyes[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(11): 4768-4774.
- [10] Dawood S, Sen T K. Removal of anionic dye Congo red from aqueous solution by raw pine and acid-treated pine cone powder as adsorbent: equilibrium, thermodynamic, kinetics, mechanism and process design[J]. *Water Research*, 2012, 46: 1933-1946.
- [11] Wang S B, Zhu Z H. Characterisation and environmental application of an Australian natural zeolite for basic dye removal from aqueous solution[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 136(3): 946-952.
- [12] Yang Z, Ji S S, Gao W, et al. Magnetic nanomaterial derived from graphene oxide/layered double hydroxide hybrid for efficient removal of methyl orange from aqueous solution[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2013, 408: 25-32.
- [13] Ahmad A, Mohd-Setapar S H, Chuong C S, et al. Recent advances in new generation dye removal technologies: novel search for approaches to reprocess wastewater[J]. *RSC Advances*, 2015, 5(39): 30801-30818.
- [14] Heibati B, Rodriguez-Couto S, Al-Ghouthi M A, et al. Kinetics and thermodynamics of enhanced adsorption of the dye AR 18 using activated carbons prepared from walnut and poplar woods[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2015, 208: 99-105.
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 32560—2016, 活性炭的分类和命名[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 12496.8—2015, 木质活性炭试验方法—碘吸附值的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [17] Lin K L, Pan J Y, Chen Y W, et al. Study the adsorption of phenol from aqueous solution on hydroxyapatite nanopowders[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 161(1): 231-240.
- [18] 吴永红, 张晓宇, 周佳玲, 等. 石油焦基活性炭的制备及处理甲基橙废水的研究[J]. *应用化工*, 2017, 46(1): 50-53.
- [19] 刘晓红, 王省伟, 康妮娜, 等. 核桃果皮基活性炭对甲基橙和酸性品红的吸附性能[J]. *环境工程学报*, 2015, 9(5): 2155-2159.
- [20] Juang R S, Wu F C, Tseng R L. Mechanism of adsorption of dyes and phenols from water using activated carbons prepared from plum kernels[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2000, 227(2): 437-444.
- [21] Gao X M, Dai Y, Zhang Y, et al. Effective adsorption of phenolic compound from aqueous solutions on activated semi-coke[J]. *Journal of Physics & Chemistry of Solids*, 2017, 102: 142-150.
- [22] Deng L, Shi Z, Li B, et al. Adsorption of Cr(VI) and phosphate on Mg-Al hydrotalcite supported kaolin clay prepared by ultrasound-assisted co-precipitation method using batch and fixed-bed systems[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2014, 53(18): 7746-7757.
- [23] Yan L G, Yang K, Shan R R, et al. Kinetic, isotherm and thermodynamic investigations of phosphate adsorption onto core-shell Fe₃O₄@LDHs composites with easy magnetic separation assistance[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2015, 448: 508-516.

收稿日期: 2019-08-26