

多壁碳纳米管/壳聚糖复合材料对水中染料的吸附

靳 君¹, 张聪璐²

(1. 辽宁省建设事业指导服务中心, 辽宁沈阳 110032;
2. 沈阳药科大学制药工程学院, 辽宁本溪 110074)

[摘要] 随着我国印染工业的快速发展,大量印染废水随之产生。印染废水具有色度高、难降解有机物浓度高、水质波动大等特点,对环境和人类健康造成危害。采用碱液沉积交联法制备多壁碳纳米管/壳聚糖复合材料(MWCNTs/CS),对二甲酚橙和茜素红染料模拟废水进行吸附处理,考察不同制备条件对吸附性能的影响。结果表明:多壁碳纳米管与壳聚糖质量比为 1:4、交联剂戊二醛投加量为 2.5 mL、交联温度为 50 ℃、交联时间为 5 h 时,制得的复合材料吸附效果最好。MWCNTs/CS 对茜素红的最大吸附量可达 291.44 mg/g,对二甲酚橙的最大吸附量可达 263.59 mg/g。2 种染料的吸附过程符合拟二级动力学模型,以化学吸附为主,为自发放热过程。Freundlich 吸附等温线能较好地拟合该吸附过程, n 大于 1,表明吸附过程为优惠吸附。

[关键词] 碳纳米管;壳聚糖;吸附;染料

[中图分类号] X703;TQ424 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)04-0100-06

Adsorption of dyes in water by multiwall carbon nanotubes/chitosan composite

JIN Jun¹, ZHANG Conglu²

(1. Liaoning Construction Guidance Service Center, Shenyang 110032, China;

2. School of Pharmaceutical Engineering, Shenyang Pharmaceutical University, Benxi 110074, China)

Abstract: With the rapid development of printing and dyeing industry in China, a large amount of printing and dyeing wastewater is produced. The printing and dyeing wastewater is characterized by high chroma, high concentration of difficultly degradable organic compounds and high fluctuation of water quality, which poses a risk to environment and human health. Multiwall carbon nanotubes/chitosan composite(MWCNTs/CS) were prepared by alkali deposition cross-linking method to adsorb xylenol orange and alizarin red simulated wastewater, and the effects of different preparation conditions on the adsorption performance were investigated. The results showed that the best adsorption performance of composite was achieved when mass ratio of MWCNTs to CS was 1:4, the dosage of glutaraldehyde was 2.5 mL, the cross-linking temperature was 50 ℃ and the cross-linking time was 5 h. The maximum adsorption capacity of MWCNTs/CS was up to 291.44 mg/g for alizarin red and 263.59 mg/g for xylenol orange. The adsorption of MWCNTs/CS on the two dyes was in accordance with the pseudo secondary kinetic model, which was dominated by chemisorption as a spontaneous exothermic process. The Freundlich adsorption isotherm was good fit for the adsorption process with constant $n > 1$, indicating that the adsorption process is preferential.

Key words: carbon nanotube; chitosan; adsorption; dye

[6] 杨成方,叶正华,吴语,等.洗煤废水处理工艺及药剂研究进展[J].环境生态学,2021,3(6):68-73.

YANG Chengfang, YE Zhenghua, WU Yu, et al. Coal washing wastewater advances in research progress of coal washing wastewater treatment technology and agents research [J]. Environmental Ecology, 2021, 3(6):68-73.

[作者简介] 李俊强(1993—),硕士研究生,E-mail:1962079142@qq.com。通讯作者:王晓瑞,高级实验师,硕士生导师,E-mail:wangxiaorui@sit.edu.cn。

[收稿日期] 2022-03-08(修改稿)

染料废水对生态环境和人类健康会产生严重影响^[1]。工业上常用的处理方法有絮凝沉淀、氧化、吸附、生物降解等^[2]。其中吸附法高效价廉、易于操作,被认为是一种较实用的水处理技术。与传统的吸附材料相比,碳纳米管(CNTs)具有优异的吸附性能,机械强度更强、化学结构更稳定,对重金属离子和有机污染物^[3-5]等有很好的吸附效果。但碳纳米管的粒径小、分散性好,难以从液体中分离出来,会造成材料损失。

基于上述问题,笔者采用碱液沉积交联法在多壁碳纳米管表面引入壳聚糖,通过交联赋予壳聚糖酸稳定性,制备了多壁碳纳米管/壳聚糖复合材料,并用于水中常见阴离子染料的吸附,以期更好地发挥碳纳米管的吸附作用。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

壳聚糖(CS,脱乙酰度>90%)、多壁碳纳米管(MW-CNTs)、茜素红(AR, $\lambda_{\max}=422\text{ nm}$)、二甲酚橙(XO, $\lambda_{\max}=436\text{ nm}$)、戊二醛、氢氧化钠、盐酸,均为分析纯。

GFL-125电热鼓风干燥箱,上海精宏实验设备有限公司;D-79219电动磁力搅拌器,德国IKA公司;UV2450紫外扫描分光光度计,日本岛津公司;HZQ-C空气浴振荡器,哈尔滨东明医疗仪器厂;UPtra Plus场发射扫描电子显微镜,Carl Zeiss公司;EQUINOX 55傅里叶变化红外光谱仪,德国Bruker公司。

1.2 材料制备

采用碱液表面沉积交联法^[6]制备多壁碳纳米管/壳聚糖复合材料。先将一定质量的多壁碳纳米管(MWCNTs)分散在100 mL壳聚糖(CS)溶液(壳聚糖溶于100 mL质量分数为2%的醋酸溶液中)中,超声处理10 min后搅拌1 h。将质量分数为8%的氨水滴入MWCNTs/CS分散体系至pH为10~11,使壳聚糖析出形成凝胶并沉积在碳纳米管表面。将混合物加热至50 ℃,加入一定量的交联剂戊二醛(GA),用于交联表面沉积的壳聚糖。离心收集交联产物,用稀醋酸洗涤产物以去除表面未交联的壳聚糖,最后水洗数次至中性,在60 ℃下真空干燥24 h。干燥后的产物为表面疏松多孔的片状物,即多壁碳纳米管/壳聚糖复合材料(MWCNTs/CS),研磨成粉末待用。

1.3 吸附实验

1.3.1 pH对MWCNTs/CS吸附性能的影响

分别取50 mL 100 mg/L的AR溶液和50 mL 50 mg/L的XO溶液,用0.1 mol/L的NaOH溶液和0.1 mol/L的HCl溶液调节pH分别为4、5、6、7、8、9,投加20 mg MWCNTs/CS,于25 ℃、150 r/min恒温振荡条件下进行吸附实验,考察溶液pH对复合材料吸附性能的影响。

1.3.2 吸附动力学和吸附等温线

分别取50 mL质量浓度为0、40、60、80、100、120 mg/L的AR溶液和50 mL质量浓度为0、40、60、80、100、120 mg/L的XO溶液,投加20 mg MWCNTs/CS,于25 ℃、150 r/min恒温振荡条件下进行吸附实验,不同时刻取样测定吸光度,进行动力学和吸附等温线研究。

1.3.3 吸附热力学

分别取50 mL质量浓度为20、40、60、80、100、120 mg/L的AR溶液和50 mL质量浓度为0、40、60、80、100、120 mg/L的XO溶液,投加20 mg MWCNTs/CS,恒温振荡器转速150 r/min,分别在25、35、45 ℃下进行吸附实验,考察不同温度下复合材料的吸附性能。

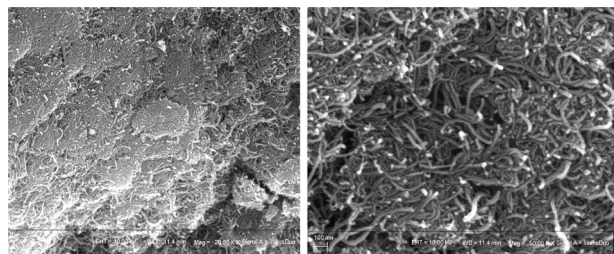
1.4 分析方法

采用紫外扫描分光光度计测定溶液吸光度,其中茜素红与二甲酚橙的最大吸收波长分别为422、436 nm;采用场发射扫描电子显微镜对材料的表面形貌进行表征;采用红外光谱仪对材料进行分析,范围为400~4 000 cm^{-1} 。

2 结果与讨论

2.1 材料表征

MWCNTs/CS复合材料的SEM分析结果如图1所示。



(a)放大10 000倍;(b)放大50 000倍

图1 MWCNTs/CS复合材料的SEM照片

Fig. 1 SEM images of MWCNTs/CS composite

由图1可见大量壳聚糖沉积在碳纳米管表面,证实了通过碱液沉积交联使壳聚糖和碳纳米管发生结合。碳纳米管具有巨大的比表面积,可提供丰富的吸附位点;壳聚糖含有大量氨基,可结合阴离子染料。

CS、MWCNTs 和 MWCNTs/CS 的红外光谱(FTIR)谱图如图2所示。

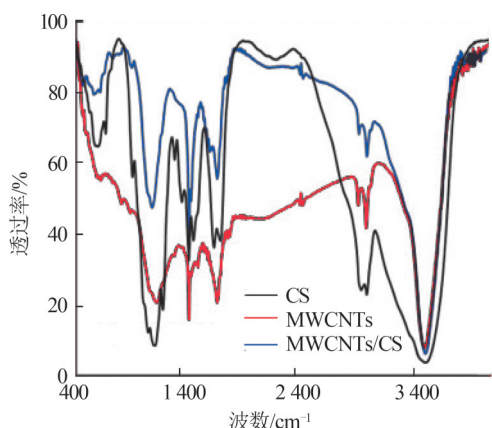


图2 CS、MWCNTs、MWCNTs/CS的红外谱图

Fig. 2 FTIR spectra of CS, MWCNTs and MWCNTs/CS

由图2可以看出,CS谱图中 3440 cm^{-1} 为 $-\text{NH}_2$ 和 $-\text{OH}$ 的特征吸收峰, 1656 、 1597 cm^{-1} 分别为 $\text{C}=\text{O}$ 的伸缩振动峰和弯曲振动峰, 1086 cm^{-1} 为 $\text{C}-\text{O}$ 的伸缩振动峰。MWCNTs谱图中, 1153 、 1639 、 3489 cm^{-1} 为 $\text{C}-\text{O}$ 、 $\text{C}=\text{C}$ 和 $\text{O}-\text{H}$ 的特征吸收峰,其中 $\text{C}-\text{O}$ 和 $\text{O}-\text{H}$ 来自MWCNTs表面的少量羟基, 2860 、 2924 cm^{-1} 处为 $\text{C}-\text{H}$ 的伸缩振动峰。MWCNTs/CS的红外谱图中, 3440 cm^{-1} 处的特征峰被保留, 1656 、 1597 、 1086 cm^{-1} 处的吸收峰偏移,且吸收强度发生变化,表明复合材料中CS与MWCNTs发生结合。

MWCNTs和MWCNTs/CS在水中的分离性能如图3所示。

由图3可见,纯的多壁碳纳米管颗粒较小,在水中分散性良好,但是分离性能较差,很难自然沉降。而对于MWCNTs/CS,壳聚糖和多壁碳纳米管复合后的粒径变大,在水中能够快速沉降,实现固液分离,表现出优异的分性性能。

2.2 制备条件对MWCNTs/CS吸附性能的影响

考察了 $m(\text{MWCNTs}):m(\text{CS})$ 、戊二醛(GA)投加量、温度、交联时间等制备条件对MWCNTs/CS吸附性能的影响:(1)在壳聚糖乙酸溶液质量分数为2%、

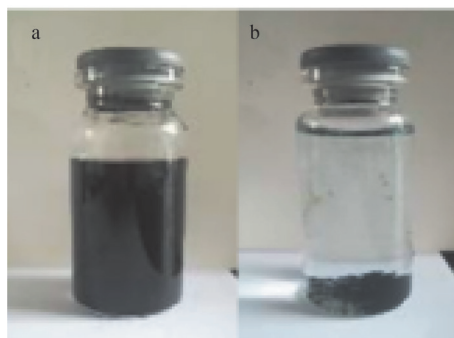


图3 MWCNTs(a)和MWCNTs/CS(b)的分离性能

Fig. 3 Separation performance of MWCNTs(a) and MWCNTs/CS(b)

体积为100 mL的条件下,设置 $m(\text{MWCNTs}):m(\text{CS})$ 分别为1:1、1:2、1:3、1:4、2:1、3:1;(2)在 $m(\text{MWCNTs}):m(\text{CS})$ 为1:4、壳聚糖乙酸溶液质量分数为2%、体积为100 mL的条件下,设置GA投加量分别为1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 mL;(3)在GA投加量为2.5 mL、 $m(\text{MWCNTs}):m(\text{CS})$ 为1:4、其他条件相同的情况下,设置交联温度为30、40、50、60℃;(4)GA用量为2.5 mL、 $m(\text{MWCNTs}):m(\text{CS})$ 为1:4、交联温度为50℃、其他条件相同,交联时间分别取3、4、5、6 h。不同条件下制得的MWCNTs/CS复合材料对AR、XO的吸附性能如表1所示。

表1 制备条件对吸附性能的影响

$m(\text{MWCNTs}):m(\text{CS})$	1:1	1:2	1:3	1:4	2:1	3:1
AR去除率/%	75.91	78.65	93.70	95.71	49.60	50.20
XO去除率/%	66.92	67.16	79.25	85.78	50.42	43.22
GA投加量/mL	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	
AR去除率/%	87.21	94.25	96.87	98.60	98.24	
XO去除率/%	65.42	74.41	80.65	85.14	84.83	
温度/℃	30	40	50	60		
AR去除率/%	81.41	85.60	98.93	92.91		
XO去除率/%	82.52	87.28	98.80	91.46		
交联时间/h	3	4	5	6		
AR去除率/%	72.82	89.90	99.60	86.81		
XO去除率/%	84.55	93.72	99.70	83.53		

由表1可知,随着CS用量的增加,复合材料对AR、XO染料的吸附能力增大,可能是因为壳聚糖表面提供了更多氨基,与阴离子染料的负电基团结合,使得吸附量增大。 $m(\text{MWCNTs}):m(\text{CS})$ 为1:4时吸附效果最佳,对AR的去除率达到95.71%,对XO的去除率达到85.78%。GA用量为2.5 mL时制得的MWCNTs/CS吸附效果最好,AR去除率可达98.6%,

XO去除率达到85.14%。交联温度为50℃时,制备的复合材料对AR去除率可达98.93%,对XO去除率可达98.80%。在一定温度范围内,随着温度的升高,交联剂活性增大,促进交联反应进行;但温度继续升高后会有部分戊二醛发生自聚,从而影响壳聚糖的交联,最终导致材料的吸附性能略有下降。交联时间为5h时MWCNTs/CS复合材料对AR去除率最高,可达到99.60%,对XO的去除率达到99.70%。

2.3 吸附性能

2.3.1 溶液pH对吸附效果的影响

在最佳条件下合成MWCNTs/CS,考察溶液pH对吸附效果的影响,结果如表2所示。

表2 pH对MWCNTs/CS吸附性能的影响						
Table 2 Effect of pH on adsorption performance of MWCNTs/CS						
pH	4	5	6	7	8	9
AR去除率/%	91.62	93.95	99.10	86.32	67.20	37.50
XO去除率/%	91.51	95.80	99.70	90.65	35.64	5.32

由表2可见,pH在4~6时MWCNTs/CS对AR、XO的去除率较高,其中pH为6时MWCNTs/CS对AR的去除率达到99.10%,对XO的去除率达到99.70%。原因可能是AR和XO在酸性溶液中带负电,而复合材料表面带有氨基,两者易通过静电作用发生吸附,因此酸性条件下吸附效果最好。

2.3.2 吸附动力学

考察了不同初始质量浓度下MWCNTs/CS对AR和XO的吸附效果随时间的变化情况,如图4所示。

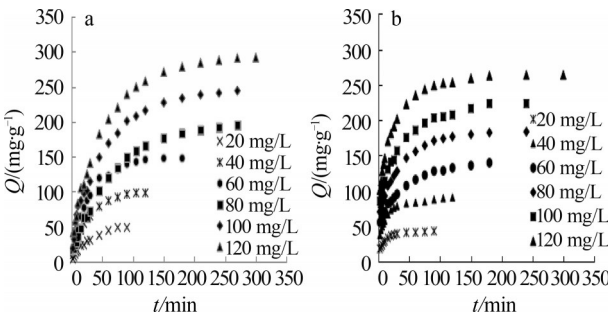


图4 不同初始质量浓度下MWCNTs/CS对AR(a)和XO(b)的吸附效果

Fig. 4 Adsorption of MWCNTs/CS on AR(a) and XO(b) at different initial mass concentrations

由图4可见,前60min内吸附速率较快,主要是由于吸附初期壳聚糖和碳纳米管有大量吸附位点未被占据;随着吸附时间的增加,吸附位点减少,吸附速率降低,最终达到吸附平衡。同时,初始质量浓度会影响MWCNTs/CS对染料的吸附过程:随着染料初始质量浓度的提高,吸附平衡时间延长,平衡吸附量增加。随着质量浓度的增加,吸附传质推动力增大,平衡吸附量更高。为研究吸附过程的动力学,采用拟一级动力学模型〔式(1)〕和拟二级动力学模型〔式(2)〕进行拟合,相关参数如表3所示。

lg(Qe-Qt)=-K1t/2.303+lgQe (1)

t/Qt=1/Qe + t/K2Qe^2 (2)

式中:K1——拟一级动力学常数,min⁻¹;
K2——拟二级动力学常数,g/(mg·min);
Qt——瞬时吸附量,mg/g。

表3 拟一级、拟二级动力学拟合参数

Table 3 Fitting parameters of pseudo first order and pseudo second order kinetics								
项目	C0/(mg·L ⁻¹)	Q0'/(mg·g ⁻¹)	拟一级动力学			拟二级动力学		
			K1/10 ⁻³ min ⁻¹	Qe/(mg·g ⁻¹)	R ²	K2/(10 ⁻⁵ g·mg ⁻¹ ·min ⁻¹)	Qe/(mg·g ⁻¹)	R ²
AR	20	48.94	41.454	48.854	0.977	85.982	49.02	0.992 0
	40	98.31	39.151	97.97	0.981	53.173	98.03	0.997 7
	60	147.69	32.242	142.39	0.986	32.453	147.05	0.998 0
	80	195.19	16.121	193.37	0.995	11.324	196.07	0.990 6
	100	243.94	16.121	213.01	0.997	11.651	270.27	0.996 3
	120	291.44	18.424	276.37	0.971	11.273	303.03	0.996 7
XO	20	42.14	43.757	21.086	0.946	454.413	44.248	0.999 3
	40	90.01	29.939	43.752	0.955	192.475	92.593	0.999 0
	60	139.10	18.424	81.283	0.993	64.474	142.85	0.995 0
	80	183.03	36.848	116.14	0.995	47.774	192.31	0.998 1
	100	223.01	18.424	129.42	0.988	38.382	232.56	0.997 4
	120	263.59	25.333	150.66	0.978	45.182	270.27	0.999 6

由表3可以看出,拟一级动力学的 R^2 较低,且最大吸附量与实际吸附数据相差较大;拟二级动力学的 R^2 均 >0.99 ,且 Q_e 与实际值较接近。因此得出结论,2种染料的吸附均为化学吸附过程,且吸附速率受染料质量浓度与吸附剂性能的共同影响^[8-9]。

2.3.3 吸附等温线

MWCNTs/CS对2种染料的吸附等温线如图5所示。分别用Langmuir[式(3)]、Freundlich[式(4)]和Temkin方程[式(5)]对实验数据进行拟合。

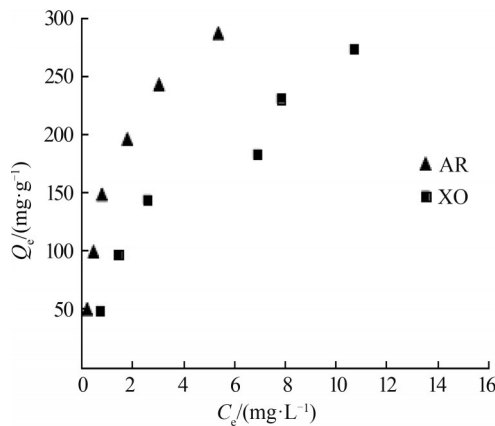


图5 染料吸附平衡时 Q_e 与 C_e 的关系曲线

Fig. 5 Curves of Q_e versus C_e relationship at adsorption equilibrium

$$Q_e = \frac{Q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (3)$$

$$Q_e = K C_e^{1/n} \quad (4)$$

$$Q_e = B_T \ln C_e + B_T \ln A_T \quad (5)$$

式中: Q_m ——饱和吸附量,mg/g;

K_L ——Langmuir常数,L/mg;

K ——Freundlich常数, $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot (\text{L} \cdot \text{mg}^{-1})^{1/n}$;

n ——与表面非均匀程度有关或表面吸附点能量分布有关的常数, >1 说明吸附过程为优惠吸附;

A_T ——与结合能相关的吸附平衡常数,mg/L;

B_T ——与吸附热相关的常数,L/g。

用OriginPro8.5软件对实验数据进行拟合,结果见表4。

由表4可见,3种等温线拟合的 R^2 均 >0.9 ,Langmuir拟合时AR和XO的最大饱和吸附量分别为500.0、519.5 mg/g。由Freundlich方程可得 n 值分别为1.887、1.715,均 >1 ,说明2种染料的吸附均为优惠吸附^[10]。结合Temkin方程拟合结果,表明复合材料对

表4 不同吸附等温式拟合数据

Table 4 Fitting data of different adsorption isotherms			
项目		AR	XO
Langmuir	$Q_m/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	500.0	519.5
	$K_L/(\text{L} \cdot \text{mg}^{-1})$	0.666 7	0.166 7
	R^2	0.993 9	0.986 8
Freundlich	$K/[\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot (\text{L} \cdot \text{mg}^{-1})^{1/n}]$	134.586	68.549
	n	1.887	1.715
	R^2	0.944 7	0.951 9
Temkin	$A_T/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	8.384 5	2.451 3
	$B_T/(\text{L} \cdot \text{g}^{-1})$	258.9	70.57
	R^2	0.991 3	0.950 9

染料的吸附不是均匀单层吸附,而是同时存在多分子层吸附。

2.3.4 吸附热力学

将不同温度下的 $\ln(Q_e/C_e)$ 对 $1/T$ 作图并进行线性拟合,如图6所示,计算热力学参数,见表5。

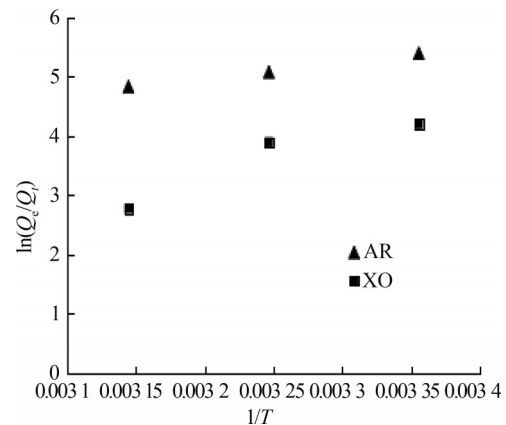


图6 MWCNTs/CS吸附染料时 $\ln(Q_e/C_e)$ 与 $1/T$ 的关系

Fig. 6 Relationship between $\ln(Q_e/C_e)$ and $1/T$ for MWCNTs/CS adsorption of dyes

表5 不同温度下的热力学参数

Table 5 Thermodynamic parameters at different temperatures				
项目	T/K	$\Delta G/(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	$\Delta H/(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	$\Delta S/(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$
AR	298	-13.34		
	308	-13.05	-22.19	-0.029 7
	318	-12.75		
XO	298	-10.85		
	308	-9.34	-55.84	-0.151
	318	-7.83		

由表5可知,复合材料MWCNTs/CS吸附AR、XO过程中 $\Delta H < 0$,说明吸附均为放热过程,降温有利于吸附进行。 $\Delta G < 0$ 表明复合材料对染料的吸附过程为自发不可逆。随温度的升高 ΔG 绝对值均减小,说明温度升高会使驱动力变小,即高温不利于吸

附发生,这与 ΔH 的结论相符。2种染料的 ΔS 均为负值,表明吸附过程为熵减过程。

3 结论

采用改进碱液表面沉积交联法制备得到MWCNTs/CS复合材料,对酸性阴离子染料茜素红和二甲酚橙进行吸附实验,结果表明MWCNTs/CS对茜素红和二甲酚橙均有良好的吸附性能。MW-CNTs/CS对茜素红和二甲酚橙的吸附过程符合Langmuir吸附等温模型,动力学符合拟二级动力学模型,为放热、自发、单分子层和多分子层结合的吸附过程。

参考文献

- [1] 陈华泉,周雪松,司景航.茶渣活性炭的制备及其对亚甲基蓝的吸附性能研究[J].应用化工,2020,49(6):1425-1429.
CHEN Huaquan, ZHOU Xuesong, SI Jinghang. Preparation of tea residue based activated carbon and its adsorption properties for methylene blue[J]. Applied Chemical Industry, 2020, 49(6): 1425-1429.
- [2] ANAS M, HAN D S, MAHMOUD K, et al. Photocatalytic degradation of organic dye using titanium dioxide modified with metal and non-metal deposition[J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2016, 41: 209-218.
- [3] 王可,李虹雨,任华堂,等.多壁碳纳米管吸附水中典型苯酚类物质[J].工业水处理,2018,38(11):40-44.
WANG Ke, LI Hongyu, REN Huatang, et al. Adsorption of MWCNTs for typical phenolic compounds in water[J]. Industrial Water Treatment, 2018, 38(11): 40-44.
- [4] 易滢佳,王钰,史俊,等.碳纳米管及其复合材料在水中有机污染物去除中的应用[J].净水技术,2021,40(3):23-32.
YI Yingjia, WANG Yu, SHI Jun, et al. Application of carbon nanotubes and composite materials in organic pollutants removal in water[J]. Water Purification Technology, 2021, 40(3): 23-32.
- [5] 方梦园,赵天慧,赵晓丽,等.碳纳米管对腐殖酸的吸附及其环境意义[J].环境化学,2020,39(10):2897-2906.
FANG Mengyuan, ZHAO Tianhui, ZHAO Xiaoli, et al. Effect of humic acid on adsorption and sedimentation of carboxylic multi-walled carbon nanotubes with different diameters[J]. Environmental Chemistry, 2020, 39(10): 2897-2906.
- [6] WANG Shi, ZHAI Yanyun, GAO Qiang, et al. Highly efficient removal of acid red 18 from aqueous solution by magnetically retrievable chitosan/carbon nanotube: Batch study, isotherms, kinetics, and thermodynamics[J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2014, 59(1): 39-51.
- [7] 张亦南,丁佳锋,张小芳,等.镧负载沸石壳聚糖复合吸附剂高效除磷性能研究[J].环境科学学报,2021,41(2):557-565.
ZHANG Yinan, DING Jiafeng, ZHANG Xiaofang, et al. Adsorption properties of high efficient lanthanum-loaded zeolite-chitosan composite absorbent for phosphorus removal[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(2): 557-565.
- [8] PÉREZ-MARÍN A B, ZAPATA V M, ORTUÑO J F, et al. Removal of cadmium from aqueous solutions by adsorption onto orange waste[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 139(1): 122-131.
- [9] 苏龙,张海波,程红艳,等.木耳菌糠生物炭对阳离子染料的吸附性能研究[J].中国环境科学,2021,41(2):693-703.
SU Long, ZHANG Haibo, CHENG Hongyan, et al. Study on adsorption properties of biochar derived from spent *Auricularia auricula* substrate for cationic dyes[J]. China Environmental Science, 2021, 41(2): 693-703.
- [10] 李艳春,张鹏会,张强,等.4种生物炭对阳离子染料吸附性能[J].环境科学与技术,2020,43(7):101-110.
LI Yanchun, ZHANG Penghui, ZHANG Qiang, et al. Adsorption of cationic dye in aqueous solution by four biochars[J]. Environmental Science & Technology, 2020, 43(7): 101-110.

[作者简介] 靳君(1978—),高级工程师,硕士,E-mail: 16945674@qq.com。

[收稿日期] 2022-03-13(修改稿)