

· 研究论文 ·

戊二醛交联改性壳聚糖 / 氧化铝复合吸附剂 去除活性橙 16 染料的综合实验设计

吴瑞红 陈灵智 邢广恩*

(衡水学院化学系 衡水 053500)

摘要: 结合教师科研工作与绿色化学理念, 针对纺织印染废水中活性橙 16 染料难处理、传统吸附材料容量有限、稳定性与再生性差的问题, 设计改进综合化学实验项目“戊二醛交联改性壳聚糖/氧化铝复合吸附剂去除活性橙 16 染料”。本研究通过氧化铝改性增大比表面积、辅以戊二醛交联构建三维网络, 提升吸附性能。实验设置了“材料制备—表征分析—性能优化—再生利用—机理研究”的完整流程, 同时加入响应面法-贝肯设计、动力学/等温线拟合、构建函数等内容, 让学生自主进行实验操作, 树立环保理念和科研服务社会的责任感。

关键词: 活性橙 16; 三维网络; 响应面法; 环保理念

Comprehensive Experimental Design on Removal of Reactive Orange 16 Dye by Glutaraldehyde Cross-linked Chitosan/Alumina Adsorbent

WU Rui-hong, CHEN Ling-zhi, XING Guang-en*

(School of Chemistry, Hengshui University, Hengshui 053500)

Abstract: Integrating teachers' research work with the principles of green chemistry, this study designs an improved comprehensive chemistry experiment titled “removal of reactive Orange 16 dye using glutaraldehyde-crosslinked modified chitosan/alumina adsorbent”. The experiment targets key challenges in the treatment of textile dyeing wastewater, particularly the difficulty of removing reactive Orange 16, as well as the limited adsorption capacity, poor stability, and weak regenerability of conventional adsorbent materials. In this work, alumina modification is employed to increase the specific surface area of the adsorbent, while glutaraldehyde crosslinking is used to construct a three-dimensional network structure, thereby enhancing the adsorption performance. The experimental design follows a complete workflow including material preparation, characterization analysis, performance optimization, regeneration and reuse, and adsorption mechanism investigation. It also incorporates response surface methodology (Box-Behnken design), kinetic and isotherm fitting, function construction, and other contents, enabling students to conduct experiments independently, establish environmental awareness, and cultivate a sense of responsibility for serving society through scientific research.

Keywords: Reactive Orange 16; Three-dimensional network; Response surface methodology; Environmental protection concept

2026-01-27 收稿, 2026-03-10 录用

基金项目: 衡水市科技计划(项目号 2024014083Z), 衡水学院培育基金(项目号 2025ZRPY01), 河北省湿地保护与绿色发展协同创新中心专项(项目号 2025XTCX004)

* 通信联系人: 邢广恩, E-mail: xingguangen@hsnc.edu.cn

doi: 10.14028/j.cnki.1003-3726.2026.26.043

引用:吴瑞红,陈灵智,邢广恩.戊二醛交联改性壳聚糖/氧化铝复合吸附剂去除活性橙16染料的综合实验设计.高分子通报, doi: 10.14028/j.cnki.1003-3726.2026.26.043

Citation: Wu, R. H.; Chen, L. Z.; Xing, G. E. Comprehensive experimental design on removal of reactive orange 16 dye by glutaraldehyde cross-linked chitosan/alumina adsorbent. *Polym. Bull.* (in Chinese), doi: 10.14028/j.cnki.1003-3726.2026.26.043

在纺织印染行业的快速发展背景下,活性橙16等偶氮染料由于具有较高毒性和难以生物降解的特点而给环境以及人类带来严重危害。在传统的实验室中使用壳聚糖(含有氨基或羟基的功能团)去除染料,但是壳聚糖在酸性环境中容易溶解,力学性能较差并且循环使用次数少不能达到实际应用的要求^[1-4]。因此本工作提出了“物理-化学双重改性”的方法:以壳聚糖作为原料,添加氧化铝(Al_2O_3)提升材料比表面积和力学性能,再经戊二醛(GA)交联形成三维网络结构,最终制得戊二醛交联壳聚糖/氧化铝($\text{CS-Al}_2\text{O}_3\text{-GA}$)吸附剂。实验采用两步改性法,减少能源消耗及简化生产工艺,符合“双碳”要求。现有多数同类教学实验仅局限于材料制备与基础吸附性能测试,研究内容较为单一^[5-7]。本实验搭建“材料制备—表征分析—性能优化—再生利用—机理探究”一体化实验流程,还融入RSM-BBD响应面优化、吸附动力学与等温模型拟合、数据模型构建等科研内容。相较于传统演示类实验,本实验既锻炼学生实操能力与独立思考能力,又能帮助学生树立生态环保意识、建立工程研究思维,在实现育人目标的同时,进一步培养学生以科研服务社会的责任意识。

1 实验项目设计

1.1 实验目的

掌握壳聚糖-氧化铝-戊二醛复合吸附剂的制备方法,优化吸附活性橙16染料的条件(如吸附剂用量、pH、时间等),提升对染料的脱色率。

通过吸附动力学与等温线实验,分析吸附过程,明确吸附容量及机理。

利用傅里叶变换光谱(FTIR)、扫描电子显微镜(SEM)等表征手段,验证氧化铝与戊二醛对壳聚糖稳定性和吸附率的提升作用。

培养学生跨学科实践能力(材料化学与环境治理结合)、环保责任感(染料废水处理)及科研思维(实验方案设计、数据分析、机理解释)。

1.2 实验教学安排

课程教学按照表1内容开展实施。

1.3 实验原理

1.3.1 合成机理

壳聚糖含氨基和羟基,吸附性好但稳定性差;氧化铝作为载体提供高比表面积和结构支撑。戊二醛通过两端醛基与壳聚糖的氨基发生交联反应,形成共价交联键($\text{C}=\text{N}$),构建三维网状结构,

表1 实验教学安排表

Table 1 Experimental teaching schedule

课程安排	内容	学时
理论讲授阶段	详细介绍印染废水的现状、危害以及现有的处理方法。重点讲解壳聚糖、氧化铝、戊二醛的结构和性质,深入合成原理和吸附原理以及相关的吸附理论模型。同时,讲述环保科研工作者为保护环境所付出的努力以及他们肩负的社会责任。布置预习思考题,如“壳聚糖酸性条件下易溶解的原因是什么”“交联剂为何选择戊二醛,其交联机理是什么”	1
实验操作阶段	(1)吸附剂制备(在反应釜反应2h空闲阶段,完成活性橙16标准曲线实验);(2)活性橙16标准曲线实验;(3)样品FTIR和SEM表征;(4)RSM-BBD优化最佳吸附条件(教师提前给出学生吸附的RSM-BBD设计表,按表中条件一起完成17组吸附);(5)在最佳吸附条件下进行吸附动力学和吸附等温线研究;(6)NaOH解吸再生循环利用实验(学时)	18
数据分析与讨论阶段	自主构建浓度 c_0 、 c_e 、去除率、吸附容量的Excel计算函数,绘制图表,运用所学理论知识解释实验结果;组织小组讨论,引导学生评价吸附剂与活性橙16间的吸附机制;融入思政教育,让学生思考科研成果转化对社会的影响	2.5
总结汇报阶段	各小组以PPT的形式汇报实验成果,教师进行点评,评选出优秀小组;鼓励学生分享在实验过程中的收获和体会,进一步树立“科研服务社会”的责任意识	1.5

最终得到兼具吸附性、稳定性和机械强度的复合材料(图1)。

1.3.2 吸附机理

以下5种作用力协同促进吸附剂对活性橙16的良好吸附。静电吸引作用:壳聚糖分子在酸性条件下质子化形成 $-\text{NH}_3^+$ (带正电),与带负电的活性橙16染料(阴离子染料)间的相互作用力^[7]。氢键作用:壳聚糖/氧化铝的羟基与染料分子作用^[8]。 $n-\pi$ 共轭效应:吸附剂氮/氧原子孤对电子与染料苯环共轭结构作用。孔隙效应:亚胺键($-\text{C}=\text{N}-$)三维网络结构增加孔隙率和比表面积^[7]。配位键作用:壳聚糖羟基氧与氧化铝空轨道作用^[9]。

1.4 试剂和仪器

壳聚糖(脱乙酰度 $\geq 90\%$,分析纯)、活性橙16(分析纯);冰乙酸(分析纯)、氢氧化钠(分析纯)、氧化铝(纳米级,平均粒径50 nm)、戊二醛(分析纯),以上均购自上海麦克林生化有限公司。

T6新世纪紫外可见分光光度计,北京普析通用仪器有限责任公司;XS224型分析天平,上海佑科仪器仪表有限公司;反应釜,巩义市予华仪器有限责任公司;78-1型磁力搅拌器,江苏共创教学设备有限公司;DHG型鼓风干燥箱,上海一恒科学仪器有限公司;FW100型万能粉碎机,天津市泰斯特仪器有限公司;SHA-B水浴振荡器,上海力辰科技有限公司;PHS-3C型酸度计,上海雷磁仪器厂;WQF-510A型傅里叶变换红外光谱仪,北京欧贝尔科学仪器有限公司;Apreo 2S HiVac扫描电子显微镜(赛默飞世尔科技)。

1.5 实验步骤/方法

1.5.1 吸附剂的制备

将2.50 g纳米氧化铝和7.50 g壳聚糖混匀后,

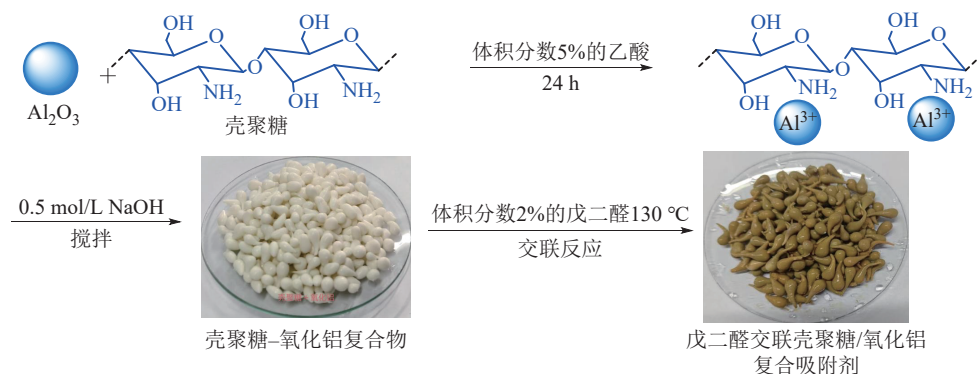


图1 戊二醛交联壳聚糖/氧化铝复合材料合成原理图

Figure 1 Schematic synthesis diagram of glutaraldehyde cross-linked chitosan/alumina composite material

用体积分数为5%的乙酸溶液搅拌溶解至凝胶状态^[8]。用注射器将其滴入磁力搅拌下的500 mL 0.5 mol/L的氢氧化钠溶液中,滴加全部结束得到大量乳白色小球后,继续搅拌20 min。用蒸馏水冲洗乳白色小球,至其pH值为7。将小球放入反应釜中,向反应釜中加入戊二醛溶液(浸没乳白色小球),拧紧反应釜,放入 $130\text{ }^\circ\text{C}$ 烘箱中反应2 h,清洗反应后小球至pH值为7,烘干、粉碎,研磨过120目筛子后得到壳聚糖-氧化铝-戊二醛复合吸附剂^[10]。

在反应2 h空闲阶段,进行RO16标准曲线(10~100 mg/L)的实验与绘制,目的是建立 A (吸光度)与 c (质量浓度)的线性关系;配制2 L 50 mg/L的RO16溶液(调节pH为4的溶液500 mL, pH为10的溶液500 mL, pH为7的溶液1000 mL)用于后续RSM-BBD优化实验。

1.5.2 RSM-BBD最佳吸附条件实验

学生根据实验参数用响应面法(RSM-BBD)^[9]自主设计17组BBD实验(表2),通过紫外-可见分光光度计在492 nm波长下读取吸光度值,并依据标准曲线和公式(1、2)计算去除效率和吸附容量。最后采用Design-Expert 13.0软件对结果进行RSM-BBD多元回归分析,得到最佳条件(吸附剂用量, pH, 吸附时间)^[11]。

$$R\% = \frac{c_0 - c_e}{c_0} \times 100 \quad (1)$$

$$q = \frac{(c_0 - c_e)V}{m} \quad (2)$$

式中, R 为去除率,%; q 为吸附容量,mg/g; c_0 和 c_e 分别为RO16初始和平衡质量浓度,mg/L; V 为染料溶液体积,固定位0.1 L; m 为吸附剂投加量(g)。

由学生提前根据标准曲线和公式(1)和(2)在

表2 三变量RSM-BBD矩阵及RO16去除率的实验数据

Table 2 Three-variable RSM-BBD matrix and experimental data of RO16 removal rate

组数	投加质量(g)	pH	吸附时间(min)	RO16去除率(%)
1	0.10	4	30	96.72
2	0.06	7	30	54.95
3	0.10	10	30	37.60
4	0.06	7	30	52.31
5	0.06	10	10	0.26
6	0.06	4	50	95.52
7	0.02	7	50	30.23
8	0.06	7	30	53.78
9	0.02	7	10	13.97
10	0.02	10	30	2.05
11	0.06	7	30	50.11
12	0.06	10	50	36.49
13	0.06	4	10	89.48
14	0.06	7	30	52.31
15	0.02	4	30	58.02
16	0.10	7	10	46.00
17	0.10	7	50	90.76

Excel中构建好对应函数,只需输入吸光度和质量,可自动得到 c_0 、 c_e ,去除率及吸附容量的数值;既节省了时间,又能直观地看出数据的对错。

1.5.3 吸附动力学和吸附等温线实验

室温下(25 °C)在最佳pH和最佳吸附剂用量(Dose)下,壳聚糖-氧化铝-戊二醛对100 mL不同浓度(20~200 mg/L)RO16染料溶液进行吸附动力学和吸附等温线研究^[10~12]。公式见表3。

1.5.4 解析再生实验(拓展实验)

0.1 g复合吸附剂对100 mL 50 mg/L的活性橙16溶液(调到最佳pH)吸附30 min后,过滤后测滤液吸光度 A ,计算去除率。将滤纸上的固体复合吸附剂于乙醇溶液中超声解吸再生10 min后,用蒸馏水洗涤至中性,烘干,再次重复上述吸附过程,计算再生循环第一次去除率。如此进行3次再生循环实验,记录去除率数据。

2 结果与讨论

表2~6、图2~4及图6的数据仅为其中一组学生的实验数据,仅用于举例说明。

2.1 RSM-BBD优化

从表2结果知,吸附剂对100 mL 50 mg/L活性橙16溶液的最佳吸附条件:吸附剂用量0.1 g, pH=4,吸附时间30 min,吸附率达96.72%。在酸

表3 吸附动力学、等温线模型公式

Table 3 Adsorption kinetics and isotherm model equations

模型	公式	参数
准一级动力学模型(PFO)	$q_t = q_e(1 - e^{-k_1 t})$	k_1 为一级动力学速率常数(1/min)
准二级动力学模型(PSO)	$q_t = \frac{q_e^2 k_2 t}{1 + q_e k_2 t}$	k_2 为二级动力学速率常数(g/(mg·min))
Langmuir等温模型	$q_e = \frac{q_m K_a c_e}{1 + K_a c_e}$	q_m 为单层吸附容量(mg/g); K_a 为Langmuir常数(L/mg)
Freundlich等温模型	$q_e = K_f c_e^{1/n}$	K_f 为Freundlich常数(mg/g)(L/mg) ^{1/n} ; n 为吸附强度系数
Temkin等温模型	$q_e = \frac{RT}{b_T} \ln(K_T c_e)$	K_T 为Temkin常数(L/mg); b_T 为吸附热(J/mol)

性环境下改性壳聚糖吸附剂很稳定,此结果也解决了壳聚糖在酸性环境下易膨胀溶解的问题。同时结合“酸碱环境对官能团电荷状态的影响”知识点,学生思考分析出:吸附剂在pH=4活性橙16溶液中易带较多正电荷,能与带负电的活性橙16染料分子产生强静电吸附作用^[13]。作用方程式: $CS-Al_2O_3-GA^+ + RO16^- \leftrightarrow CS-Al_2O_3-GA^+ \dots RO16$ 。此处教学内容培养学生理论联系实际的能力。

2.2 吸附动力学研究

根据实验测得的吸附量数据(图2),可采用准一级动力学模型和准二级动力学模型对吸附剂的动力学行为进行拟合分析^[11~14]。公式见表2。

学生使用Sigma Plot 14.0软件进行动力学模型拟合,培养学生严谨的数据分析与解释的能力。从表4和表5拟合结果可知,吸附过程以准二级动力学PSO(化学吸附)为主。

2.3 吸附等温线拟合

学生采用Sigma Plot 14.0软件拟合吸附等温模型(公式见表2),所得参数结果见表6,可知Langmuir单层吸附模型的 R^2 (0.9760)小于Freundlich多层吸附模型的 R^2 (0.9793)。由于Freundlich模型的 R^2 更接近1,而且由Langmuir模型拟合得到吸附剂对于RO16的最大吸附容量是228.54 mg/g,因此说明这个吸附过程更适合用Freundlich多层吸附模型描述^[15]。吸附过程呈现以化学吸附为主的多层吸附特性,学生结合实验结果自主探究,明确体系中存在静电吸引、 $n-\pi$ 共轭、氢键、配位键等多种作用力协同作用。在此过程中,学生不仅熟练掌握SigmaPlot软件非线性拟合与绘图操作,

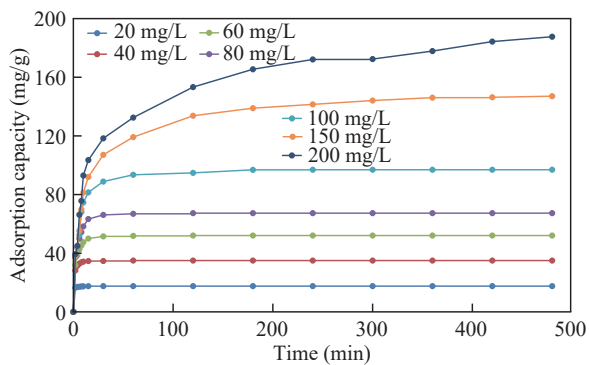


图2 戊二醛交联壳聚糖/氧化铝对不同质量浓度RO16染料随时间变化的吸附量

Figure 2 Adsorption capacity curve of glutaraldehyde cross-linked chitosan/alumina for RO16 dye with different mass concentrations over time

表4 准一级动力学(PFO)模型拟合数据

c_0 (mg/L)	q_e (exp) (mg/g)	k_1 (1/min)	q_e (cal) (mg/g)	R^2
20	17.55	1.4079	17.4640	0.9987
40	34.99	0.7789	34.5941	0.9934
60	52.05	0.3690	51.1633	0.9781
80	67.31	0.2737	66.2346	0.9699
100	97.68	0.1422	94.9858	0.9934
150	147.09	0.0688	139.2855	0.9561
200	187.63	0.0555	168.9132	0.9156

表5 准二级动力学(PSO)模型拟合数据

c_0 (mg/L)	q_e (exp) (mg/g)	k_2 (g/mg·min)	q_e (cal) (mg/g)	R^2
20	17.55	0.4234	17.5851	0.9999
40	34.99	0.0612	35.2293	0.9989
60	52.05	0.0189	51.5674	0.9548
80	67.31	0.0078	68.2265	0.9941
100	97.68	0.0032	98.2389	0.9998
150	147.09	0.0007	147.0461	0.9925
200	187.63	0.0004	180.6523	0.9720

表6 戊二醛交联改性壳聚糖/氧化铝复合吸附材料对活性橙16染料的吸附等温模型数据

Table 6 Adsorption isotherm model fitting data of glutaraldehyde cross-linked chitosan/alumina composite adsorbent for reactive Orange 16 dye

吸附等温模型	参数	数值
Langmuir(单层吸附)	q_{max} (mg/g)	228.54
	K_a (L/mg)	0.3758
	R^2	0.9760
	K_f (mg/g) (L/mg) ^{1/n}	66.41
Freundlich(多层吸附)	n	2.27
	R^2	0.9793

还能依托优异的吸附效果,深入剖析吸附剂与染料分子间的作用机制,有效锻炼科研思维,提升自主探究与创新实践能力。

2.4 表征

2.4.1 FTTR 表征

如图3所示,在FTTR光谱中,580和1093 cm^{-1} 处有吸收峰可能是由于Al—O键引起的,说明纳米氧化铝与壳聚糖复合,物理改性有效;在1610 cm^{-1} 附近有吸收峰是由于席夫碱反应形成C=N亚胺键的伸缩振动,说明壳聚糖与戊二醛之间发生了良好的化学交联,形成三维网状结构^[13]。吸附活性橙16染料之后,原来的1093 cm^{-1} 处的Al—O键峰移动到1081 cm^{-1} ;并且在1448 cm^{-1} 处C=N键对应的峰强度变弱。上述峰位偏移以及强度的变化说明,在吸附剂上存在着静电作用、氢键以及 $n-\pi$ 相互作用,染料分子被有效吸附到吸附剂上面,也证明了戊二醛交联改性的壳聚糖/氧化铝复合材料对于活性橙16具有良好的吸附能力。

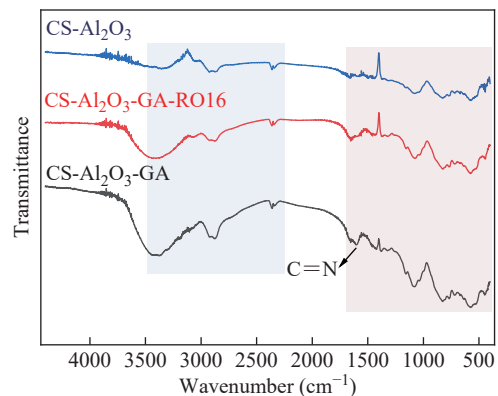


图3 戊二醛交联壳聚糖/氧化铝吸附RO16前后的红外光谱示意图

Figure 3 FTIR spectra of glutaraldehyde cross-linked chitosan/alumina before and after RO16 adsorption

在教学过程中可以给同学们讲解物理改性和化学改性的区别(如 Al_2O_3 负载属于物理改性,而席夫碱反应属于化学改性),了解不同的方法对于提高材料性能的作用;也可以让同学们思考“如何利用红外光谱来证明该吸附机理”,例如比较不同阴离子染料吸附后的谱图差异等,激发同学们的兴趣以及创新能力。

2.4.2 SEM 形貌表征

从图4可以看出,CS- Al_2O_3 -戊二醛的SEM形貌:有大量的缝隙、孔洞,表面很疏松、粗糙。吸附RO16后,表面紧致、平滑,说明大量RO16染料

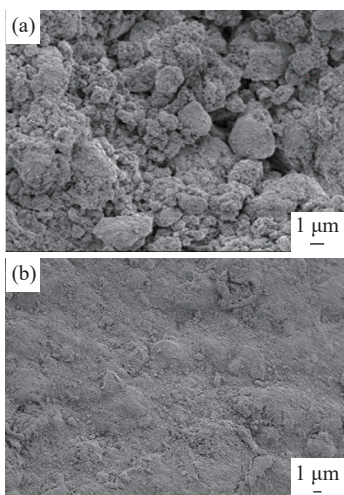


图4 戊二醛交联改性壳聚糖/氧化铝复合材料吸附RO16染料前(a)后(b)的SEM形貌示意图

Figure 4 SEM images of glutaraldehyde cross-linked chitosan/alumina before (a) and after (b) RO16 dye adsorption

分子进入吸附剂的缝隙和孔洞内,完成高效吸附。这可能因为纳米氧化铝的“大比表面”,氧化铝和与染料分子间形成的氢键和配位键作用,同时也有壳聚糖的羟基与染料分子间的氢键和 $n-\pi$ 键作用。引导学生建立“形貌特征-比表面积-吸附性能”的关联认知,明确纳米氧化铝“大比表面”对吸附容量的促进作用(如更多吸附位点)。让学生学习区分物理吸附(孔隙填充)与化学吸附(氢键、配位键)的作用机制,通过SEM形貌变化(从疏松到紧致)佐证“染料分子进入孔洞”的物理过程。结合染料吸附的环境治理场景,理解材料形

貌优化(如高孔隙率)在工业吸附剂设计中的实际意义,建立“结构-功能-应用”的工程逻辑。

2.5 吸附机理

在实验教学中,引导并鼓励学生以表征结果及动力学、等温线拟合数据为基础,自己思考吸附剂与活性橙16分子间可能存在什么样的吸附方式,如静电作用、氢键作用、 $n-\pi$ 作用、配位键或者孔隙作用等。而在酸性条件下,吸附剂表面带正电荷的氨基($-\text{NH}_3^+$)与染料分子上的氧原子之间存在较强的静电相互作用力^[15],是主要的作用力,同时复合物表面的氢原子与染料分子上的氧原子之间形成了氢键网络^[10],另外,在吸附剂内部存在一些氮/氧原子孤对电子与染料苯环之间也存在 $n-\pi$ 共轭^[8]。由于纳米氧化铝具有较高的比表面积及壳聚糖和戊二醛之间形成的席夫碱 $\text{C}=\text{N}$ 网络结构有利于孔隙内吸附,在壳聚糖上存在的羟基氧原子上的孤对电子可与氧化铝表面空穴产生配位作用从而提高对其吸附力。综上所述,上述多种因素都促使了该复合物对活性橙16的良好去除效果。同时利用ChemDraw软件绘制出其吸附机理示意图如图5所示。

2.6 再生循环实验

采用两步改性法(减少能耗较高)所得到戊二醛交联改性壳聚糖/氧化铝复合吸附剂经过3次循环使用后,仍然可以达到70%左右的吸附量(如图6所示),具有良好市场前景,符合低碳理念,在此着重讲解再生性对于工业生产的重要性(如减

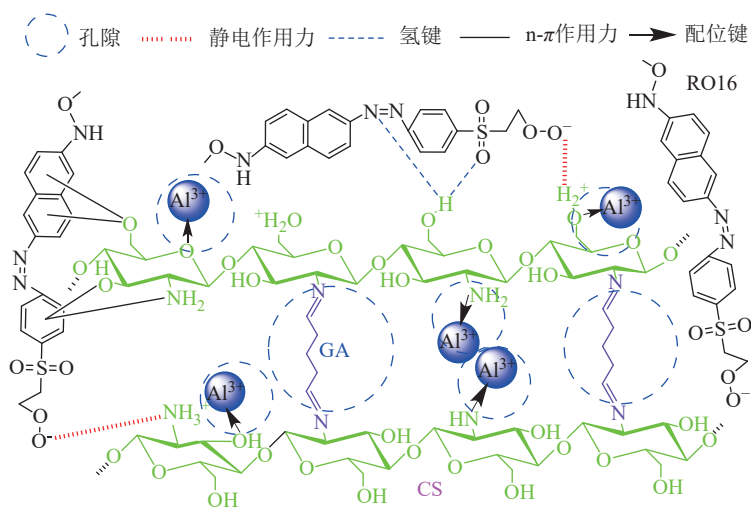


图5 戊二醛交联改性壳聚糖/氧化铝复合材料与RO16间的吸附机理示意图

Figure 5 Schematic diagram of adsorption mechanism between glutaraldehyde cross-linked chitosan/alumina and RO16

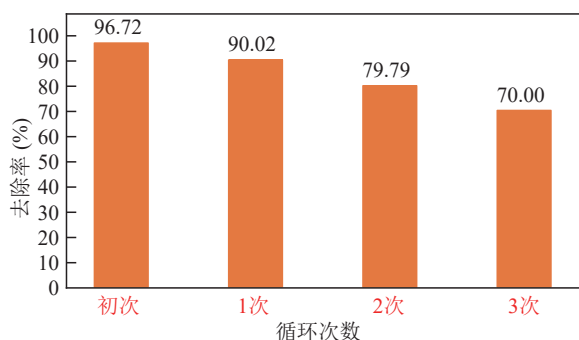


图6 戊二醛交联改性壳聚糖/氧化铝复合吸附剂的循环再生性能曲线示意图

Figure 6 Cyclic regeneration performance curve of glutaraldehyde cross-linked chitosan/alumina composite adsorbent

少固体废物产生量以及节省费用等),使同学们更加深刻理解“资源循环再利用”,将“绿色化学”理念落实到实际研究工作中。

3 结语

本实验面向本科学生开设,是兼具创新性与综合性的实践实训课程。实验立足环境治理与功能材料学科前沿,以印染废水中难生物降解的活性橙16染料为处理对象,设计材料合成、结构表征、性能优化、循环利用、机理分析一体化实验体系,契合高水平综合性化学实验教学要求。实验仿照实际科研过程,让学生使用RSM-BBD响应面法寻找最优吸附条件,在Origin以及Sigmaplot上进行吸附动力学以及等温线拟合,通过SEM、FTIR表征结果分析吸附剂“组成结构-吸附性能”的关系,最后自主探究出界面吸附多种机理,旨在锻炼学生的发散性思维、动手能力和团结合作精神,使他们由原来的“听讲”变为现在的“学习”。

本工作以科教融合为指导思想,将老师的研究项目作为本科生的实验内容,既保证了实验的专业性和前沿性,同时也考虑了教学的实用性和指导性,在课前布置预习思考题、让学生自己编写Excel数据计算公式、指导学生自己探讨吸附机理等方面都充分调动学生的积极性,克服以往实验中老师过多干预的现象,在实验中,学生可以切身感受到由实验室的研究成果到解决环境污染问题的应用过程,理解功能材料以及环境化学等相关领域的知识,并树立起“科研服务于社会”的使命感和环保意识。本实验对综合化学实验改革

起到示范作用,在一个完整的实验过程中采用一体化的设计理念及问题导向教学法,实现知识、能力和价值三者的统一,从而有利于培养具有跨学科思维方式以及创新能力的高素质化学人才奠定良好基础。

参考文献

- 1 Malek, N. N. A.; Jawad, A. H.; Ismail, K.; Razuan, R.; ALothman, Z. A. Fly ash modified magnetic chitosan-polyvinyl alcohol blend for reactive orange 16 dye removal: adsorption parametric optimization. *Int. J. Biol. Macromol.*, **2021**, 189, 464–476.
- 2 Benhouria, A.; Zaghouane-Boudiaf, H.; Bourzami, R.; Djerboua, F.; Hameed, B. H.; Boutahala, M. Cross-linked chitosan-epichlorohydrin/bentonite composite for reactive orange 16 dye removal: experimental study and molecular dynamic simulation. *Int. J. Biol. Macromol.*, **2023**, 242, 124786.
- 3 李彦琴,张洁,王卫,杨金凤,于锋.“双一流”建设背景下科教融合实验教学探索:以TiO₂光催化降解染料废水实验为例. *大学化学*, **2021**, 36(6), 146–153.
- 4 Wu, R. H.; Hapiz, A.; Musa, S. A.; ALothman, Z. A.; Sillanpää, M.; Jawad, A. H. Hydrothermal fabrication of composite chitosan grafted salicylaldehyde/coal fly ash/algae for malachite green dye removal: a statistical optimization. *Int. J. Biol. Macromol.*, **2024**, 280, 135897.
- 5 曹俊雅,雷兴雨,刘猛,张莉昕,刘吉,罗晨辉. TiO₂/活性炭光催化剂降解乙黄药的综合实验设计. *实验技术与管理*, **2023**, 40(9), 23–28.
- 6 暴佳欣,王连艳,周志茂,张竞,朱艳华. 壳聚糖复合物微球吸附水中药物污染物的研究进展. *工业用水与废水*, **2023**, 54(1), 1–5.
- 7 马婧凤,胡晓芬. 壳聚糖/聚多巴胺复合颗粒染料吸附性能研究. *环境科学与技术*, **2023**, 46(S2), 103–107.
- 8 和芹,陈伟,赵红丽,舒世立,孙涛. Fe₃O₄@SA@CMC@CTS对孔雀石绿的吸附性能. *南开大学学报(自然科学版)*, **2025**, 58(1), 104–111.
- 9 胡启立,何智浩,张帅,杨杰,王权峰. 吸附动力学模型拟合优度的统计评估及模型比较研究. *水处理技术*, **2025**, 51(3), 23–30.
- 10 程惠亭,刘恩周,郝文斌. 基于Langmuir等温吸附的吸附动力学方程. *化学工程*, **2024**, 52(6), 29–32.
- 11 刘晓雨. 典型有机污染物在介孔活性炭上的竞争吸附及等温吸附线性机制. 浙江大学硕士学位论文, **2024**.
- 12 魏婕,魏静新,张佳奇. 壳聚糖复合凝胶球对染料吸附与回收. *环境科学与技术*, **2024**, 47(10), 1–9.

- 13 王诗生, 张梦梦, 盛广宏, 田勇攀, 刘轶璠, 章慧娟, 刘永兴. 磁性生物炭吸附水中甲基橙的作用机制: 基于密度泛函理论与实验研究. 中国环境科学, **2023**, 43(9), 4596–4605.
- 14 陈树薇, 施文健, 宋伟, 秦琴, 张元璋, 高隽臣. 壳聚糖交联 β -环糊精对酸性染料吸附动力学和热力学研究. 功能材料, **2009**, 40(4), 656–659.
- 15 张冠. 科研成果与先进技术融入本科环境化学课程教学: 水环境中污染物与颗粒物的吸附作用. 化学教育(中英文), **2024**, 45(16), 74–79.