

# 煤质颗粒活性炭对染料废水中苯胺的吸附性能及机理

高誉<sup>1,2</sup>, 罗莉涛<sup>2,3</sup>, 常风民<sup>2</sup>, 陈兆林<sup>2\*</sup>, 袁婧<sup>2</sup>, 裘华刚<sup>4</sup>

1. 华北电力大学(保定)环境科学与工程系, 保定 071003
2. 北京国环清华环境工程设计研究院有限公司, 北京 100084
3. 华北理工大学建筑工程学院, 唐山 063210
4. 浙江环兴机械有限公司, 杭州 311251

**摘要** 研究煤质颗粒活性炭对苯胺的吸附性能及机理对染料废水中大量苯胺类污染物的去除具有重要的技术支撑作用。开展了炭投加量/化学需氧量(COD)、不同浓度、吸附时间及pH值的煤质颗粒活性炭对苯胺的吸附实验, 绘制吸附等温线及吸附动力学曲线。结果表明在单因素条件下, 随着炭投加量/COD增加, 废水中苯胺污染物去除率逐渐上升, 且当炭投加量/COD大于4.5时, 去除率上升幅度较小, 考虑运行经济成本, 建议最优炭投加量/COD取4.5; 苯胺初始浓度越大, 单位吸附量增大, 去除率降低; 吸附时间越长, 吸附量与去除率均上升; pH值在1~4时, 去除率及吸附量逐渐上升, 当pH值为5时苯胺去除效果最好, 随着pH值继续上升, 去除率及吸附量有下降趋势。Langmuir等温线方程拟合度高达0.99, 苯胺在煤质颗粒活性炭表面发生单分子层吸附; Freundlich等温线方程特征常数小于0.5, 为0.33, 煤质颗粒活性炭对苯胺有较强吸附性; 吸附过程符合准二级动力学特征, 说明煤质颗粒活性炭对苯胺吸附作用力强, 饱和煤质颗粒活性炭再生方式应采取热再生; 根据Weber-Morris方程特征曲线, 依次发生了表面吸附、粒子内扩散及内表面吸附3个阶段吸附过程, 水中有机物去除速度在表面吸附阶段最快, 说明煤质颗粒活性炭比表面积为吸附效果的主要影响因素, 而微孔数量的影响较小。

**关键词** 苯胺; 煤质颗粒活性炭; 吸附机理

收稿日期: 2021-03-09; 修回日期: 2021-07-01

基金项目: “十三五”国家水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07402005)

作者简介: 高誉, 硕士研究生, 研究方向为水资源与水污染控制, 电子信箱: gaoyuyu@tsinghua.edu.cn; 陈兆林(通信作者), 教授级高级工程师, 研究方向为水资源与水污染控制, 电子信箱: zhaolinbest@126.com

引用格式: 高誉, 罗莉涛, 常风民, 等. 煤质颗粒活性炭对染料废水中苯胺的吸附性能及机理[J]. 科技导报, 2021, 39(17): 55-62; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2021.17.007

染料行业是精细化工行业的重要分支,染料生产废水成分复杂,其特征污染物除染料分子外还含有大量中间体苯胺及连苯胺类物质<sup>[1]</sup>。当水体中苯胺类物质的质量浓度大于  $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时将微生物产生很强的毒害作用,因此无法直接使用生物降解法处理<sup>[2]</sup>。同时国家制定了相关标准,明确规定苯胺类污染物的排放量不得超过  $0.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ <sup>[3]</sup>,加大了对苯胺类废水处理的难度。

由于苯胺类有机废水具有高毒性的特点,通常对该类废水使用物理化学方法进行处理,包括物理分离法、高级氧化法等。活性炭吸附是一种典型的物理处理技术<sup>[4-5]</sup>,目前国内外已经有文献研究生物质颗粒活性炭吸附剂对苯胺废水的吸附性能,取得了良好的去除效果<sup>[6-8]</sup>。由于实际废水处理工程中对活性炭吸附剂存在机械磨损及再生损耗,因此研究选用具有较高硬度和强度的煤质颗粒活性炭作为吸附剂更具有实用价值。

研究煤质颗粒活性炭对苯胺的吸附性能及机理对染料废水中大量苯胺类污染物的去除具有重要的技术支撑作用。以实际工程应用角度出发,选择煤质颗粒活性炭作为吸附剂,开展炭投加量与溶液化学需氧量的比值(炭投加量/COD)、不同浓度、吸附时间及pH值的煤质颗粒活性炭对苯胺的吸附实验,绘制了吸附等温线及吸附动力学曲线,以期在实际工程进行指导。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 实验材料

材料:煤质颗粒活性炭( $\geq 40$ 目不规则颗粒),苯胺(麦克林公司,分析纯),去离子水。

### 1.2 检测仪器

分光光度计(DR6000美国Hach公司);多参数分析仪(DR900,美国Hach公司);pH探头(美国哈希公司);恒温振荡器(HZQ-F160A,上海一恒科学仪器有限公司)。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 炭投加量/COD对苯胺去除效果的影响

用去离子水配置  $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  苯胺溶液  $100 \text{ mL}$

加入6个锥形瓶中,投加煤质颗粒活性炭至锥形瓶中,使炭投加量/COD为0.5、1.5、2.5、3.5、4.5、5.5,在恒温振荡器中  $25^\circ\text{C}$ 、pH值为7、转速  $150 \text{ r/min}$  的条件下震荡吸附  $60 \text{ min}$ 。

#### 1.3.2 吸附时间及初始浓度对苯胺去除效果的影响

用去离子水配置  $100$ 、 $200$ 、 $300$ 、 $400$ 、 $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的苯胺溶液,将  $100 \text{ mL}$  配置好的不同浓度的苯胺溶液分别加入5个锥形瓶中,投加煤质颗粒活性炭  $4.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  至锥形瓶中,在恒温振荡器中  $25^\circ\text{C}$ 、pH值为7、转速  $150 \text{ r/min}$  的条件下震荡吸附,同时设置吸附时间为  $0$ 、 $15$ 、 $30$ 、 $60$ 、 $90$ 、 $120$ 、 $150$ 、 $180$ 、 $210$ 、 $240$ 、 $270$ 、 $300$ 、 $330$ 、 $360$ 、 $390$ 、 $420$ 、 $450$ 、 $480 \text{ min}$ 。

#### 1.3.3 pH对苯胺去除效果的影响

用去离子水配置  $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  苯胺溶液  $100 \text{ mL}$  加入6个锥形瓶中,调节pH值为1、3、5、7、9、11,投加煤质颗粒活性炭  $4.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  至锥形瓶中,在恒温振荡器中  $25^\circ\text{C}$ 、转速  $150 \text{ r/min}$  条件下震荡吸附  $60 \text{ min}$ 。

#### 1.3.4 计算方法

根据式(1)计算煤质颗粒活性炭对苯胺的吸附量

$$q_e = \frac{(C_0 - C_t)v}{m} \quad (1)$$

式中, $q_e$ 为取样时煤质颗粒活性炭对苯胺的吸附容量,  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ;  $C_0$ 为初始苯胺浓度,  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;  $C_t$ 为  $t$ 时刻溶液中剩余苯胺浓度,  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;  $v$ 为溶液体积,  $\text{L}$ ;  $m$ 为煤质颗粒活性炭质量,  $\text{g}$ 。

去除率  $\eta$  计算公式为

$$\eta = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100\% \quad (2)$$

#### 1.3.5 吸附等温线

在  $25^\circ\text{C}$  的条件下分别向  $100$ 、 $200$ 、 $300$ 、 $400$ 、 $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的苯胺溶液中投加  $4.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  煤质颗粒活性炭,恒温吸附  $480 \text{ min}$  以达到吸附平衡。吸附后过滤,并检测其溶液中剩余苯胺浓度,计算吸附量。

吸附等温线可用于描述煤质颗粒活性炭对苯胺的吸附能力,并对吸附过程的难易程度进行评价。Langmuir 吸附等温方程(式(3))和经验的 Freundlich 吸附等温方程公式<sup>[9-10]</sup>(式(4))进行拟合。

$$C_e/Q_e = 1/(Q_m K_L) + C_e/Q_m \quad (3)$$

$$\lg Q_e = \lg K_F + 1/n \lg C_e \quad (4)$$

式中,  $Q_e$  为平衡时苯胺的吸附量,  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ;  $C_e$  为平衡浓度,  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ;  $K_L$  为 Langmuir 常数;  $Q_m$  为最大单层吸附量的大小;  $K_F$  为 Freundlich 平衡吸附常数;  $n$  为特征常数。

### 1.3.6 吸附动力学

在 25℃ 条件下, 浓度为 100、200、300、400、500  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的苯胺溶液中投加 4.5  $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  煤质颗粒活性炭, 在不同吸附时间取样, 过滤后检测其溶液中剩余苯胺浓度, 计算吸附量。

吸附动力学可用于描述苯胺分子在活性炭上吸附时间与吸附量之间的规律, 对于苯胺在活性炭表面的吸附动力学, 拟用准一级动力学、准二级动力学模型及 Weber-Morris 粒子扩散方程进行描述<sup>[11]</sup>。

准一级反应速率线性方程表达式

$$\ln(Q_e - Q_t) = \ln Q_e - tK_1/2.303 \quad (5)$$

准二级反应速率线性方程表达式

$$t/Q_t = 1/(K_2 Q_e^2) + t/Q_e \quad (6)$$

式中,  $K_1$  为准一级速率常数,  $\text{min}^{-1}$ ;  $K_2$  为准二级速率常数,  $\text{min}^{-1}$ ;  $Q_e$  为饱和吸附量,  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ;  $t$  为吸附时间,  $\text{min}$ ;  $Q_t$  为  $t$  时刻活性炭单位吸附量,  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

Weber-Morris 粒子扩散方程为

$$Q_t = K_i t^{1/2} + C \quad (7)$$

式中,  $C$  为涉及厚度、边界层的常数;  $K_i$  为内扩散速率常数。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同因素对吸附效果的影响

#### 2.1.1 炭投加量/COD 对吸附效果的影响

在水中有机物含量一定的情况下, 不同炭投加比例对吸附效果有着直接的影响。由图 1 可以看出随着炭投加比例的增加, 废水中苯胺污染物去除率逐渐上升, 去除率由 81.70% 上升至接近 100%; 当炭投加量/COD 大于 4.5 后, 去除率增加幅度较小, 考虑到最优经济运行成本因素, 建议炭投加量/COD 为 4.5 时为最佳投加量, 此时苯胺去除率为

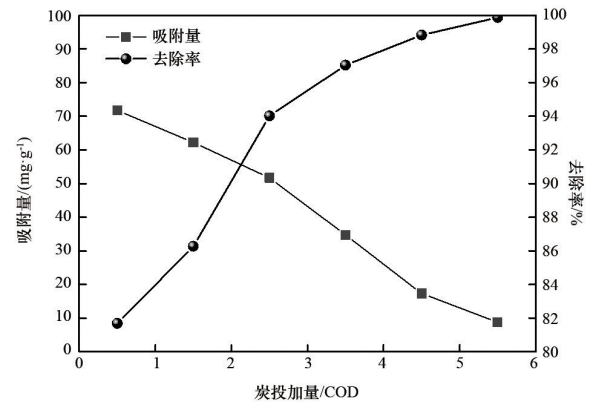


图 1 炭投加量/COD 对苯胺吸附的影响

17.28  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ , 去除率为 98.8%。单位吸附量逐渐降低, 随之由 71.8  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$  降低至 8.8  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

由于颗粒活性炭表面的活性位点数固定, 当炭投加比例增加时, 溶液中苯胺分子数量小于颗粒活性炭表面的活性位点数, 此时苯胺分子易吸附于活性炭表面, 但同时吸附剂表面上的不饱和活性位点也随之增多, 这就使得吸附位点不能被充分利用, 导致可吸附位点利用效率降低, 单位质量的活性炭吸附苯胺的效率下降。

#### 2.1.2 初始浓度及吸附时间对吸附效果的影响

图 2 所示, 在不同浓度条件下, 随着吸附时间的增加, 活性炭单位吸附量均同步增加, 低浓度苯胺溶液 (100~200  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 在 60 min 时即可达到吸附平衡, 随着初始浓度的增高, 平衡时间逐渐延长至 300 min。由图 3、图 4 可以看出, 吸附相同时间的条件下初始浓度越大去除率由 99% 降低至 91%, 吸附时间越长, 去除率上升。可以看出, 浓度越高去除率上升的速率越快, 这也可以说明浓度越大,

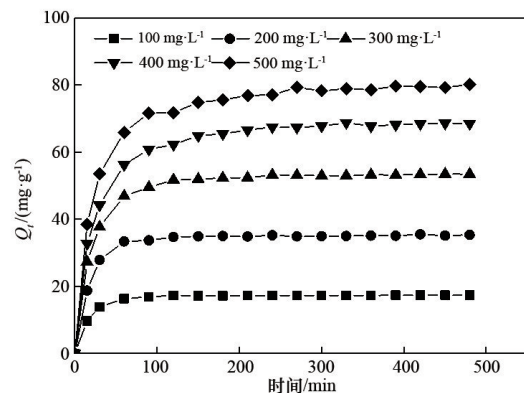


图 2 不同浓度苯胺吸附平衡曲线

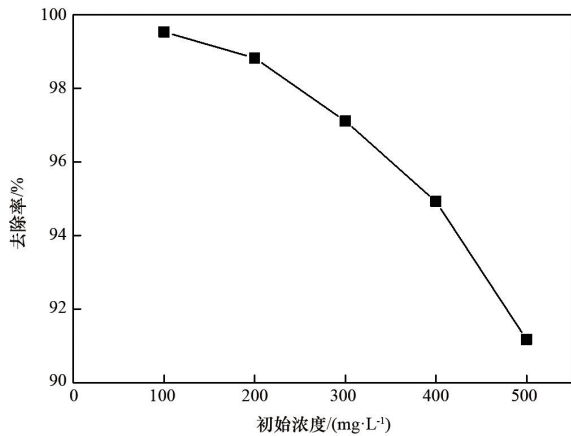


图3 不同初始浓度对苯胺去除率影响

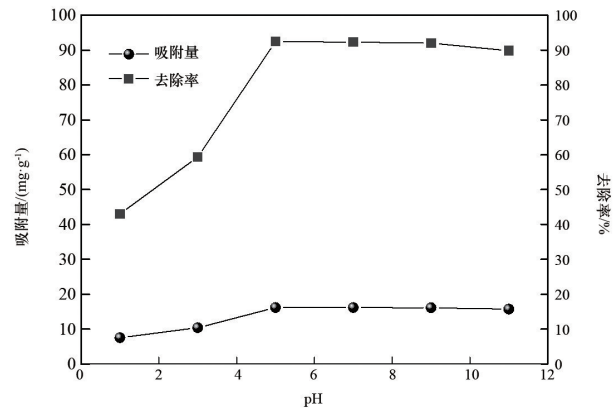


图5 pH值对苯胺吸附的影响

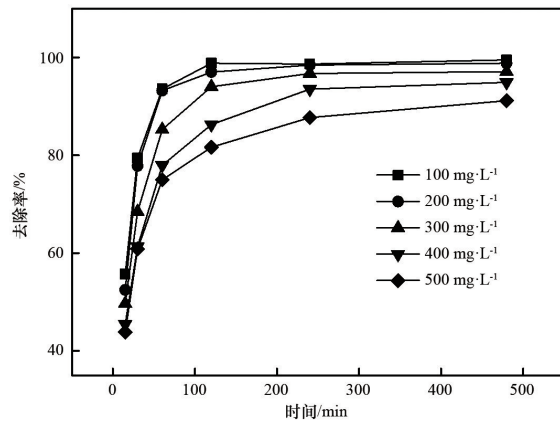


图4 不同吸附时间对苯胺去除率影响

可提供吸附动力也越大。由于初始浓度的升高,导致溶液和活性炭表面之间的苯胺浓度差增大,苯胺分子在吸附过程前期以更快的速度扩散至活性炭表面,提高了单位活性炭的吸附效率。

### 2.1.3 pH值对吸附效果的影响

由于苯胺分子中的氨基会在酸性条件下解离,因此pH值的变化对活性炭吸附苯胺的过程有着重要的影响。图5为pH值对苯胺吸附效果的影响,可以看出pH值在1~4时单位吸附量与去除率随之升高,在pH值为5时吸附效果达到峰值,去除率与单位吸附量可达到92.47%和16.17 mg·g<sup>-1</sup>,pH值在7~11时单位吸附量与去除率表现出略微下降。

不同pH值的条件对吸附效果影响主要是通过改变煤质颗粒活性炭表面吸附位点与苯胺分子间的作用力强度来实现的<sup>[12]</sup>。苯胺是一种弱碱性物质,其解离常数 $pK_a=4.6$ ,据经典化学理论,当溶液pH值在解离常数 $pK_a\pm 2$ 以内,苯胺的分子状态与离子状态在

溶液中共存,溶液pH值在 $pK_a\pm 2$ 以外,99%都是以离子或分子状态存在<sup>[13-14]</sup>。因此当溶液pH值 $\leq 4.6$ 时,苯胺主要呈阳离子形态,具有供电子的氨基基团。

pH值在1~4时此时活性炭表面官能团发生解离,表面带负电荷,苯胺离子与带负电荷官能团产生静电作用力。当pH值为5时,溶液中同时存在苯胺分子,根据氢键的生成理论,苯胺分子上的氨基基团上氢原子也可以与煤质活性炭表面的羧基、酚羟基等发生氢键作用。因此推断,煤质颗粒活性炭与苯胺分子之间主要存在作用力较强的静电力和氢键<sup>[15]</sup>,吸附效果最好。pH值在7~11时苯胺呈分子形态,分子间作用力以苯胺与活性炭间较弱的 $\pi-\pi$ 色散力为主,pH值对吸附效果的影响较小。

## 2.2 吸附机理分析

### 2.2.1 吸附等温线

用式(1)、式(2)对吸附出水数据进行拟合,结果如图6所示。

由图6可以看出在25℃条件下,不同苯胺浓度均表现为Langmuir吸附等温线具有更高的相关度( $R^2=0.9929$ ),计算得到的理论平衡吸附量 $Q_m$ (84.74 mg·g<sup>-1</sup>)与实际最大吸附量80.11 mg·g<sup>-1</sup>接近,表明此时苯胺在煤质颗粒活性炭上发生了单分子层吸附<sup>[16]</sup>。

Freundlich拟合模型中常数 $1/n$ 通常在0~1,若其值在0~0.5表示吸附容易进行<sup>[17]</sup>,拟合结果表明此时的 $1/n$ 为0.3362,该结果也表明煤质活性炭对苯胺有较好的吸附效果。吸附等温线拟合参数见表1。

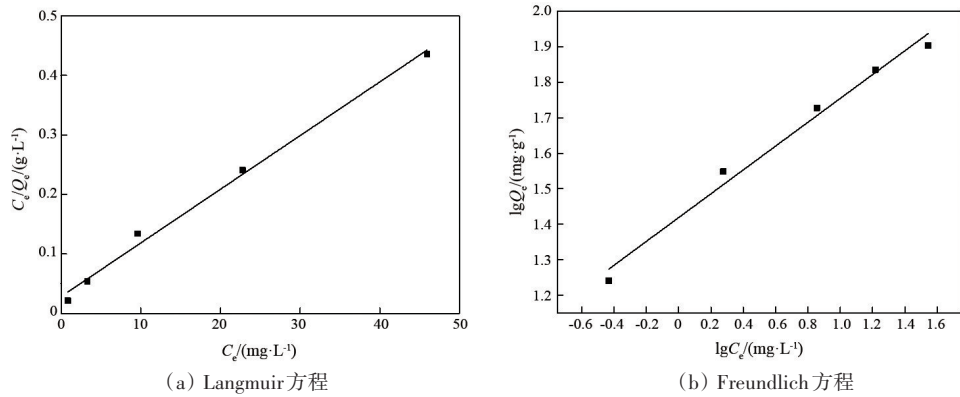


图6 Langmuir、Freundlich 吸附等温线

表1 吸附等温线拟合参数

T/K	Langmuir 方程			Freundlich 方程		
	$K_L$	$Q_m/(mg \cdot g^{-1})$	$R^2$	$K_F$	$n$	$R^2$
298.15	0.3481	84.74	0.9929	26.212	2.974	0.9855

2.2.2 吸附动力学

用准一级、准二级动力学方程对吸附出水浓度进行拟合,得到  $\ln(Q_e - Q_t)$  对  $t$  的准一级动力学方程关系如图7所示,可以看出不同苯胺浓度条件下准一级动力学预测的结果与实际实验结果差距很大,偏离了线性规律。准二级动力学方程中  $t/Q_t$  对  $t$  的关系如图7(b)数据均表现为良好的线性关系。

表2为准一级、准二级动力学方程拟合参数,可以看出准二级动力学拟合结果明显好于准一级动力学方程拟合结果,其相关系数  $R^2$  均达到0.99以上,且计算出的理论吸附量与实际吸附量十分接近,这说明准二级动力学更适合描述煤质颗粒活性炭对苯胺的吸附行为,苯胺与煤质颗粒活性炭的吸附作用较强。若考虑饱和和煤质颗粒活性炭再生利

用,应采取热再生方式,使表面吸附的苯胺分子得到较为彻底的去除,恢复活性炭吸附性能。

液相吸附的过程主要有3个步骤:边界层扩散、内扩散及内表面吸附。一般来说,吸附速率取决于该过程中最慢阶段。吸附过程的第一步边界层扩散吸附速率很快,吸附质在吸附剂表面迅速建立平衡,因此吸附总速率主要由内扩散过程控制<sup>[18]</sup>。

拟合结果由图8所示,  $Q_t$  对  $t^{1/2}$  呈现多级线性关系,这说明吸附过程发生了多段连续的传质作用:边界层扩散、粒子内扩散及内表面吸附。

借助 Weber-Morris 粒子扩散方程拟合参数  $C$  可表征煤质颗粒活性炭表面的溶液边界层厚度,从而表示扩散阻力<sup>[19]</sup>。由图8可以看出,依次发生了

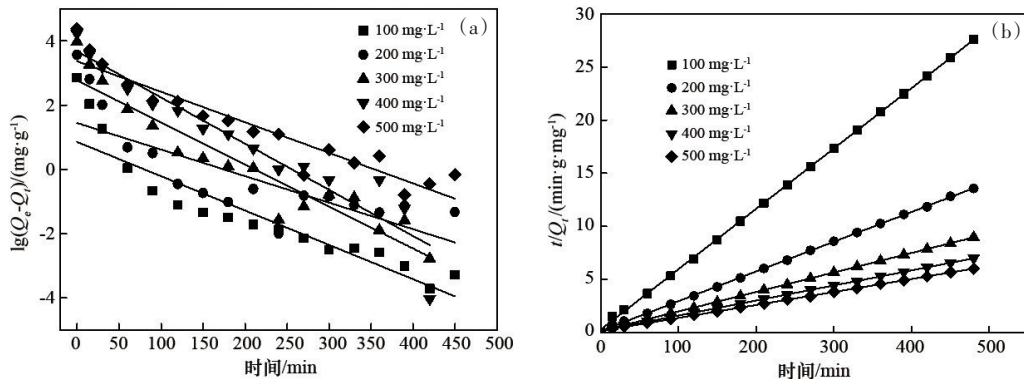


图7 准一级动力学模型(a)及准二级动力学模型(b)

表2 煤质颗粒活性炭对苯胺吸附动力学拟合数据

浓度 $C_0$ /( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	准一级动力学				准二级动力学			
	$K_1$ /( $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ )	$Q_{\text{ecal}}$ /( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ )	$Q_{\text{exp}}$ /( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ )	$R^2$	$K_2$ [( $\text{g}\cdot(\text{mg}\cdot\text{min})^{-1}$ )]	$Q_{\text{ecal}}$ /( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ )	$Q_{\text{exp}}$ /( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ )	$R^2$
100	0.0246	2.36	17.41	0.7774	0.0410	17.51	17.41	0.9999
200	0.0191	4.24	35.36	0.5799	0.1073	35.46	35.36	0.9998
300	0.0301	15.91	53.42	0.8847	0.1287	54.34	53.42	0.9997
400	0.0332	39.60	68.47	0.8904	0.1688	70.42	68.47	0.9993
500	0.0219	29.07	80.11	0.8842	0.1474	81.30	80.11	0.9993

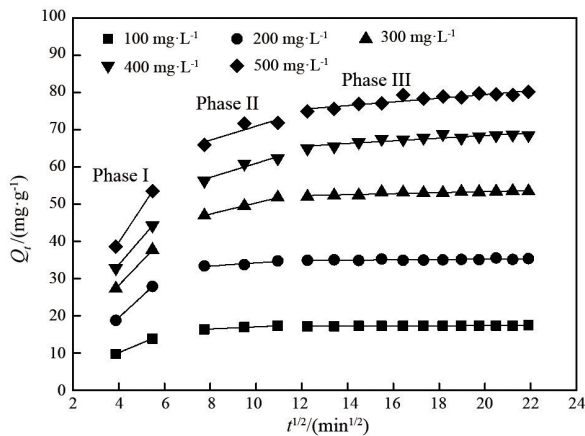


图8 Weber-Morris 粒子内扩散方程

边界层扩散、粒子内扩散及内表面吸附3个阶段吸附过程,不同阶段的拟合曲线截距 $C$ 均有上升趋势,这表明第一阶段边界层厚度较小,苯胺在煤质颗粒活性炭表面扩散阻力小。这是因为在吸附初期,苯胺分子在煤质颗粒活性炭内部数量较少,苯胺分子可在活性炭表面或内部自由移动。随着越来越多的苯胺分子占据活性炭表面的活性位点,吸附过程后期苯胺分子需要克服更大的扩散阻力才可吸附至活性炭表面。各浓度溶液吸附第二阶段(内扩散阶段)拟合直线均不过原点,这意味着吸附速率由粒子内扩散过程及内表面吸附共同控制<sup>[20-21]</sup>。

在边界层扩散阶段,曲线的斜率较大,吸附量增长迅速,随着吸附过程的发展,后期吸附量增长速度逐渐减缓,这说明水中有机物的去除主要发生在边界层扩散阶段,煤质活性炭的比表面积是影响出水效果的主要影响因素,而微孔数量的影响较小。在实际工程使用当中,同种吸附材料比表面积越大吸附效果越好,能在较短停留时间内降低有机物浓度,达到预期的出水效果。

### 3 结论

1) 在转速、温度条件不变的前提下,分别控制炭投加量/COD、初始浓度、吸附时间及pH值4个单一变量进行研究:当炭投加量/COD大于4.5时,去除率上升幅度较小,考虑运行经济成本,建议最优炭投加量/COD为4.5,单位吸附量与去除率分别为 $17.28 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和98.8%;浓度越大,单位吸附量增大,但去除率减少;吸附时间越长,吸附量与去除率均有所上升;pH值为5时苯胺去除效果最佳,苯胺去除率与单位吸附量分别为 $16.17 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和92.47%。

2) 对浓度 $100\sim 500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的苯胺溶液进行等温线分析,结果表明Langmuir吸附等温式更能够表示煤质颗粒活性炭对苯胺的吸附( $R^2=0.9929$ ),这证实苯胺在煤质颗粒活性炭上发生单分子层吸附,Freundlich等温线中 $1/n=0.3362$ ,说明吸附过程容易进行,煤质活性炭对苯胺有很好的去除效果。

3) 对吸附行为进行动力学分析,可以发现准二级动力学更适合用来描述煤质颗粒活性炭对苯胺的吸附,说明苯胺与煤质活性炭之间吸附作用力较强,宜采取热再生方式对饱和炭进行再生。通过对Weber-Morris粒子扩散方程的分析发现,依次发生了边界层扩散、粒子内扩散及内表面吸附3个阶段吸附过程,水中有机物的去除主要发生在边界层扩散阶段。煤质活性炭的比表面积是影响苯胺去除效果的主要影响因素,而微孔数量的影响相对较小,在实际工程使用当中,同种吸附材料比表面积越大吸附效果越好,在较短的停留时间内降低出水有机物浓度。

## 参考文献(References)

- [1] 王纯, 王文龙, 刘鑫, 等. 印染废水处理过程中有机污染物及急性毒性变化规律研究[J]. 环境科学学报, 2019, 39(10): 3434-3441.
- [2] 曹向禹. 含联苯胺废水处理技术的研究进展[J]. 染料与染色, 2012, 49(4): 52-55.
- [3] 环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. 纺织染整工业水污染物排放标准: GB 4287-2012[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2013.
- [4] 张滕, 王勇梅, 彭昌盛, 等. 染料废水的处理方法及研究进展[J]. 环保科技, 2016, 22(1): 36-40.
- [5] 李佳, 翁端. 环境工程材料的研究现状及发展趋势[J]. 科技导报, 2006, 24(7): 9-13.
- [6] Sharifzade G, Asghari A, Rajabi M. Highly effective adsorption of xanthene dyes (rhodamine B and erythrosine B) from aqueous solutions onto lemon citrus peel active carbon: characterization, resolving analysis, optimization and mechanistic studies[J]. RSC Advances, 2017, 7(9): 5362-5371.
- [7] Senthil K P, Varjani S J, Suganya S. Treatment of dye wastewater using an ultrasonic aided nanoparticle stacked activated carbon: Kinetic and isotherm modelling[J]. Biore-source Technology, 2018, 250: 716-722.
- [8] 李晓蕾. 磁性生物质活性炭的制备及其对工业染料废水的吸附特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- [9] 高佩. 玉米芯活性炭的制备及对水中Cr(VI)与苯胺的去除[D]. 太原: 太原理工大学, 2018.
- [10] 朱丽芳, 张明, 徐立恒. 甘蔗渣和玉米芯对水中亚甲基蓝的吸附去除作用[J]. 科技导报, 2015, 33(14): 93-96.
- [11] Hernández-Barreto D F, Giraldo L, Moreno-Piraján J C. Dataset on adsorption of phenol onto activated carbons: Equilibrium, kinetics and mechanism of adsorption[J]. Data in Brief, 2020, 32: 1-8.
- [12] 刘晓晶, 李俊, 朱海晨, 等. 活性炭吸附高盐废水 COD 的影响因素及应用[J]. 应用化工, 2020, 49(6): 1519-1522.
- [13] 近藤精一, 石川达雄, 安部郁夫. 吸附科学[M]. 李国希, 译. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [14] 陈国华. 应用物理化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [15] Lan Q, Bassi A S, Zhu J X, et al. A modified Langmuir model for the prediction of the effects of ionic strength on the equilibrium characteristics of protein adsorption onto ion exchange/affinity adsorbents[J]. Chemical Engineering Journal, 2001, 81(1): 179-186.
- [16] Bhatti H N, Mahmood Z, Kausar A, et al. Biocomposites of polypyrrole, polyaniline and sodium alginate with cellulosic biomass: Adsorption-desorption, kinetics and thermodynamic studies for the removal of 2,4-dichlorophenol[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 153: 146-157.
- [17] 李明天, 赵岩, 刘志宇, 等. 富G海藻酸钠聚氨酯泡沫对亚甲基蓝的吸附[J]. 环境工程学报, 2016, 10(2): 781-786.
- [18] Lyubchik S I, Lyubchik A I, Galushko O L, et al. Kinetics and thermodynamics of the Cr(III) adsorption on the activated carbon from co-mingled wastes[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2004, 242(1): 151-158.
- [19] 宋珍霞, 蔡长青, 赵晓宇, 等. ZIF-67吸附AO<sub>7</sub>的动力学特性研究[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(5): 1871-1878.
- [20] Gupta H, Singh S. Kinetics and thermodynamics of phenanthrene adsorption from water on orange rind activated carbon[J]. Environmental Technology & Innovation, 2018, 10: 208-214.
- [21] 罗莉涛, 张鸿涛, 魏云云, 等. 球状颗粒多孔介质喉道算法及应用[J]. 工业水处理, 2018, 38(7): 18-22.

## Adsorption property and mechanism of aniline on coal activated carbon

GAO Yu<sup>1,2</sup>, LUO Lita<sup>2,3</sup>, CHANG Fengmin<sup>2</sup>, CHEN Zhaolin<sup>2\*</sup>, YUAN Jing<sup>2</sup>, QIU Huagang<sup>4</sup>

1. Department of Environment Science and Engineering, North China Electric Power University (Baoding), Baoding 071003, China

2. Beijing Guohuan Tsinghua Environmental Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Beijing 100084, China

3. College of Civil and Architectural Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China

4. Zhejiang Huanxing Machinery Co., Ltd., Hangzhou 311251, China

**Abstract** The study on adsorption performance and mechanism of aniline on coal granular activated carbon is important technical support for removing a large number of aniline pollutants in dye wastewater. Through adsorption experiments of aniline on coal based granular activated carbons with different concentrations, carbon dosages /COD, adsorption times and pH values, and the adsorption isotherm and adsorption kinetics curves it is shown that the removal rate of aniline and the unit adsorption capacity of aniline are 17.28 mg/g and 98.8%, respectively when the single control variable is carbon dosage /COD of 4.5, under the premise of other conditions being unchanged. When pH value is 5, the aniline removal efficiency is the best. Aniline removal rate and unit adsorption capacity are 16.17 mg/g and 92.47%, respectively. Similarly, when other variables remain unchanged, the higher the concentration, the higher the unit adsorption capacity, but the lower the removal rate; the longer the adsorption time, the higher the adsorption capacity and removal rate. The fitting degree of Langmuir isotherm equation is 0.9929, indicating that a monomolecular layer of aniline is adsorbed on the surface of coal granular activated carbon. The Freundlich characteristic constant  $1/n$  is 0.3363, indicating that this adsorption process is easy to occur. In addition, the adsorption process is more in line with the quasi-second-order kinetics, and the adsorption rate is controlled by internal diffusion and internal surface adsorption process. This study provides reference for improving operating efficiency and reducing treatment cost of activated carbon adsorption process.

**Keywords** aniline; coal granular activated carbon; adsorption mechanism ●



(责任编辑 刘志远)