

# MOF衍生多孔碳和活性炭吸附2号油的行为研究

张文美<sup>1,2</sup>,潘辉<sup>3</sup>,杨洋<sup>3</sup>,韩庆<sup>3</sup>,李名新<sup>1,2,3\*</sup>

(1. 江苏扬州化学工业园区综合服务中心; 2. 南京大学扬州化学化工研究院; 3. 东北大学冶金学院)

**摘要:**系统研究了MOF衍生多孔碳与粉末活性炭对2号油的吸附特性,详细考察了吸附时间、吸附剂投加量、温度及pH等因素对其吸附性能的影响,并深入探讨了吸附机理。研究结果表明:相较于粉末活性炭,MOF衍生多孔碳表现出更优的pH耐受性;在最佳条件下,MOF衍生多孔碳与粉末活性炭对2号油的平衡吸附量分别为224.95 mg/g和194.86 mg/g。吸附动力学分析显示,二者均符合准二级动力学模型,相关系数 $R^2>0.999$ 。热力学研究表明,MOF衍生多孔碳对2号油的吸附为放热过程,且以物理吸附为主。

**关键词:**2号油;MOF衍生多孔碳;活性炭;吸附;动力学;热力学

中图分类号:TD926.5

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2025)11-0057-07

doi:10.11792/hj20251109

## 引言

矿山选矿废水含有高浓度的浮选药剂残余,其成分主要包括重金属离子(如铅、镉、汞等)、胶体状固体悬浮物及多种结构复杂的有机化合物。若未经有效处理直接排入自然水体,将导致受纳水体化学需氧量(COD)急剧升高,引发水体富营养化,进而破坏水生生态系统平衡,造成水生生物群落的大规模死亡和生物多样性的显著降低<sup>[1-2]</sup>。近年来,随着COD排放标准愈加严格,GB 8978—1996《污水综合排放标准》一级排放标准要求废水COD的排放标准限值为100 mg/L,GB 25467—2010《铜、镍、钴工业污染物排放标准》及GB 25466—2010《铅、锌工业污染物排放标准》对废水中COD的排放要求均不超过60 mg/L。如何控制选矿废水的排放,降低其对水资源的污染,提高水资源利用率是当下面临的主要问题。

目前,常用的选矿废水处理方法有自然降解法、混凝沉淀法、物理吸附法、化学氧化法、微生物处理法等<sup>[3-5]</sup>。物理吸附法主要通过吸附剂分子与吸附质分子之间的作用力实现污染物的吸附去除,此力也称为范德华力<sup>[6-7]</sup>。物理吸附法处理选矿废水是基于吸附剂表面分子与污染物分子之间的范德华力作用,有效去除废水中的有机浮选药剂、重金属离子、固体悬浮物等。活性炭因价格相对低廉、比表面积大、孔隙结构多、吸附性能好、可重复使用等优点,在吸附法处理选矿废水工艺中被广泛使用<sup>[8]</sup>。

本文采用自制备的MOF衍生多孔碳,考察其对选矿废水中2号油的吸附特性,并研究吸附时间、吸附剂投加量、pH、温度对MOF衍生多孔碳吸附2号油效果的影响,并进一步探讨其吸附动力学和热力学,以期开发一种高效、绿色、经济地去除选矿废水中有机物的药剂。

## 1 试验原料与设备

### 1.1 试剂及设备

试剂:MOF衍生多孔碳,实验室自制;粉末活性炭;氢氧化钠、盐酸、氯化钠,均为分析纯;LH-D,LH-E,均为优级纯。

设备:5B-3B(V11)多参数水质测定仪,82-5恒温磁力搅拌器,ZU-85气浴恒温振荡器,KH3200B超声波清洗器,PHS-2F pH计。

### 1.2 MOF衍生多孔碳制备

将对苯二甲酸与六水三氯化铁按摩尔比1:1混合,在球料比40:1、温度200℃条件下球磨6 h,所得产物用N,N-二甲基甲酰胺和无水乙醇洗涤,烘干后即为MOF-235;将烘干后MOF-235在升温速率5℃/min,700℃条件下热解2 h,热解产物经酸洗烘干后,得到MOF衍生多孔碳。

### 1.3 目标溶液配制

用滴管取2号油溶于1 L去离子水中,此为高含量COD模拟2号油废水。取样,测量COD,根据测定结果将溶液稀释至COD为120 mg/L。单因素试验

收稿日期:2025-07-01;修回日期:2025-08-05

基金项目:福建省科技计划重大专项(2023HZ021005)

作者简介:张文美(1975—),女,高级工程师,从事安全环保与资源循环再利用等相关工作;E-mail:379010455@qq.com

\*通信作者:李名新(1990—),男,博士,从事资源循环再利用等相关工作;E-mail:minginxli90@126.com

所用模拟2号油废水均为该溶液;吸附等温线试验按上述方法配制不同质量浓度COD的模拟2号油废水。

#### 1.4 COD测定

取2根洁净消解管,一根加入2.5 mL去离子水作为空白,另一根加入2.5 mL待测水样,依次分别加入0.7 mL LH-D试剂和4.8 mL LH-E试剂。摇匀至溶液没有分层,放入消解仪中消解10 min,取出,空气冷却2 min,分别加入2.5 mL去离子水,摇匀,水冷却2 min,倒入比色皿进行比色读值。

#### 1.5 零点电荷的测定

采用pH移位法测定零点电荷:分别取25 mL NaCl溶液(0.01 mol/L)于若干50 mL一次性塑料离心管中,用0.1 mol/L HCl和0.1 mol/L NaOH溶液调节离

心管中溶液pH至稳定,记录初始pH。称量0.1 g吸附剂粉末于上述离心管中,用超声波清洗器超声分散30 min,静置24 h,待吸附剂完全沉淀到离心管底部后用pH计测定并记录最终pH。以初始pH为横坐标,初始pH与最终pH之差为纵坐标,所作曲线纵坐标为零的点与所对应的横坐标的值即为吸附剂的零点电荷<sup>[9]</sup>。

#### 1.6 吸附行为

分别采用MOF衍生多孔碳和粉末活性炭作为吸附剂进行静态吸附试验,研究不同吸附时间、吸附剂投加量、温度及pH对2号油吸附效果的影响。从动力学和热力学角度分析MOF衍生多孔碳与粉末活性炭对2号油的吸附行为和机理,从而确定去除2号油的有利条件。吸附动力学模型见表1。

表1 吸附动力学模型

Table 1 Adsorption kinetic s model

模型	分类	方程式	备注	参考文献
Langmuir吸附模型	线性等温式	$\frac{C_e}{Q_e} = \frac{1}{K_L Q_m} + \frac{C_e}{Q_m}$	$Q_e$ 为吸附达到平衡时的吸附量(mg/g); $K_L$ 为吸附强度; $Q_m$ 为最大单层吸附量(mg/g); $C_e$ 为吸附达到平衡时溶液中吸附质质量浓度(mg/L)	[10]
	非线性等温式	$Q_e = \frac{Q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e}$	$K_F$ 为Freundlich模型常数,与吸附强度和吸附量相关。 $n$ 为该等温线的非线性程度,当 $1/n$ 为0.1~0.5时,吸附过程比较容易进行;当 $1/n$ 大于2时,吸附过程不容易进行	
Freundlich吸附模型		$Q_e = K_F C_e^{\frac{1}{n}}$		[11]
Temkin吸附模型		$Q_e = A \ln(K_T C_e)$	$A$ 为Temkin常数, $A=RT/b$ ( $R$ 为理想气体常数,8.314 J/(mol·K)); $T$ 为温度(K); $b$ 为常数); $K_T$ 为Temkin平衡结合常数(L/mg),与最大结合能相关	[12]
颗粒内扩散		$Q_t = k_{id} t^{0.5} + C$	$Q_t$ 为吸附时间 $t$ 时的吸附量(mg/g); $k_{id}$ 为颗粒内扩散速率常数(mg/(g/min <sup>0.5</sup> )); $C$ 为与界面层厚度相关的系数	[13]
吸附动力学模型	准一级动力学	$\ln(Q_e - Q_t) = \ln Q_e - k_1 t$	$k_1$ 为一级吸附速率(min <sup>-1</sup> )	[14]
	准二级动力学	$\frac{t}{Q_t} = \frac{1}{K_2 Q_e^2} + \frac{1}{Q_e} t$	$k_2$ 为准二级吸附速率常数(g/(mg/min))	

MOF衍生多孔碳与粉末活性炭吸附2号油的过程中,可能既发生了可逆的物理吸附,又同时存在不可逆的化学吸附。通过对热力学吉布斯自由能变 $\Delta G^0$ 、焓变 $\Delta H^0$ 、熵变 $\Delta S^0$ 等参数的计算,以判断吸附类型。 $\Delta G^0$ 表达式为:

$$\Delta G^0 = -RT \ln K_c \quad (1)$$

式中: $K_c$ 为吸附分配系数, $K_c = \frac{Q_e}{C_e}$ 。

根据Van't Hoff公式可求得焓变 $\Delta H^0$ 和熵变 $\Delta S^0$ ,其表达式为:

$$\ln K_c = \frac{\Delta S^0}{R} - \frac{\Delta H^0}{RT} \quad (2)$$

通过 $\ln(Q_e/C_e)$ 对 $Q_e$ 作图所得直线的截距估算

$\ln K_c$ 。以各反应体系中的 $\ln K_c$ 对 $1/T$ 作图,从而求得 $\Delta H^0$ 和 $\Delta S^0$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 吸附时间的影响

取2组各9根50 mL一次性塑料离心管,编号A、B,均加入初始COD为120 mg/L的模拟2号油废水40 mL,A组MOF衍生多孔碳的投加量为0.5 g/L,B组粉末活性炭的投加量为0.5 g/L,置于温度为298 K的恒温摇床中以250 r/min的转速振荡,分别在10 min、20 min、30 min、40 min、60 min、90 min、120 min、150 min、180 min取样,过滤后测量滤液中COD,并计算吸附量,结果见图1。

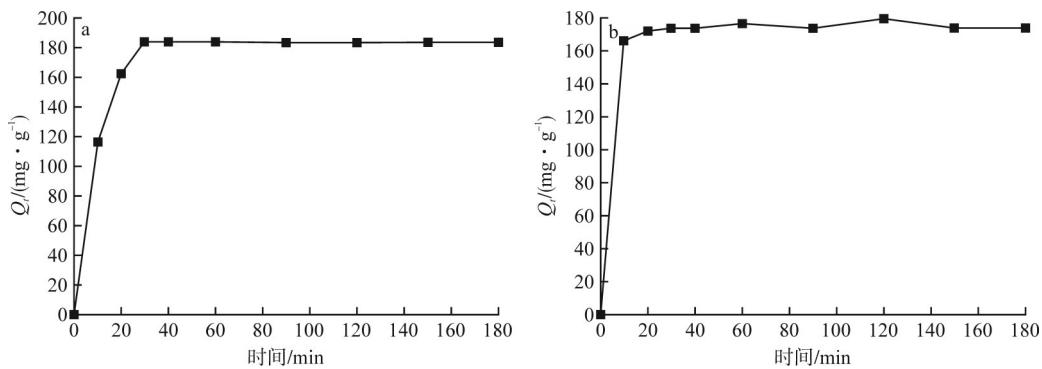


图1 2号油在MOF衍生多孔碳(a)和粉末活性炭(b)上的吸附量与吸附时间的关系

Fig. 1 Relationship between adsorption capacity of No. 2 oil and adsorption time on (a) MOF-derived porous carbon and (b) powdered activated carbon

从图1可以看出:MOF衍生多孔碳和粉末活性炭分别在开始的前30 min和前10 min对2号油的吸附速率非常快;这是因为在初始阶段,吸附剂表面有大量活性吸附点位,2号油能够被快速吸附。随着吸附时间的增加,吸附剂表面活性吸附点位逐渐减少,吸附速率降低,吸附量均无明显变化,表面吸附趋于平衡。综合考虑,最佳吸附时间为MOF衍生多孔碳为30 min,粉末活性炭为20 min。

30 min,粉末活性炭为20 min。

## 2.2 吸附动力学

为研究2种吸附剂对2号油的吸附动力学特点,找到最适合描述此吸附过程的动力学模型,选用准一级动力学方程、准二级动力学方程对吸附数据进行分析<sup>[16]</sup>,结果见图2、图3、表2。

从表2可以看出:2种动力学模型中,准二级动力

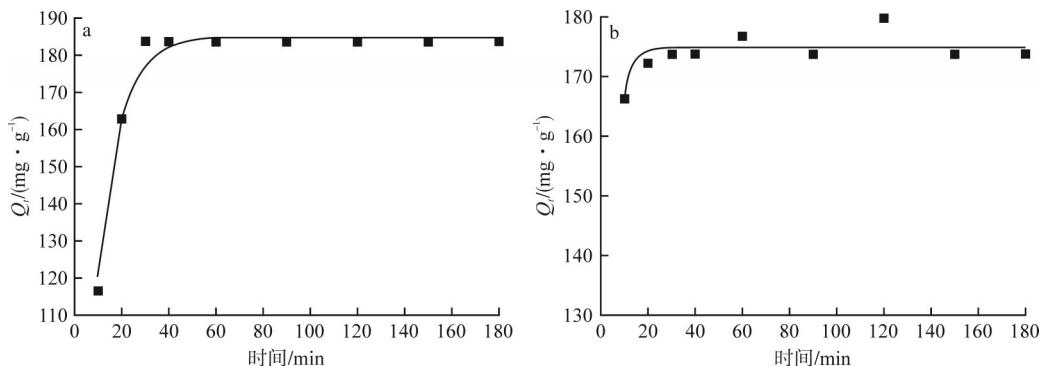


图2 MOF衍生多孔碳(a)和粉末活性炭(b)吸附2号油的准一级动力学非线性拟合曲线

Fig. 2 Quasi-first-order kinetic nonlinear fitting curves of (a) MOF-derived porous carbon and (b) powdered activated carbon on adsorption of No. 2 oil

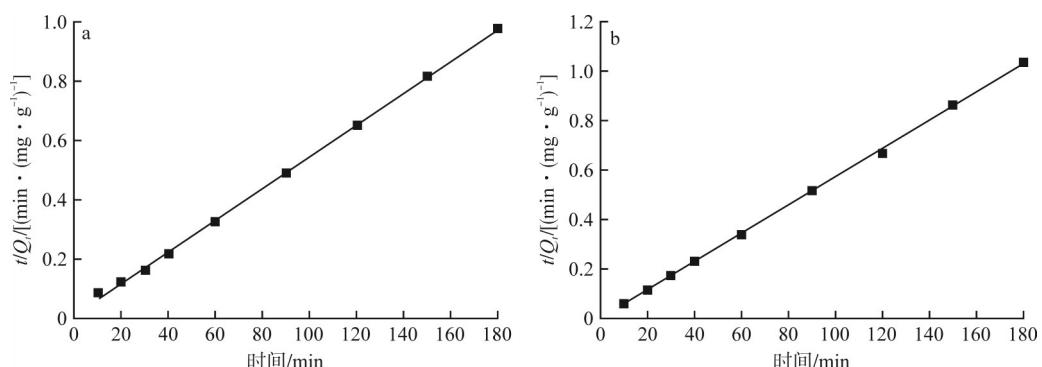


图3 MOF衍生多孔碳(a)和粉末活性炭(b)吸附2号油的准二级动力学拟合曲线

Fig. 3 Quasi-second-order kinetic fitting curves of (a) MOF-derived porous carbon and (b) powdered activated carbon on adsorption of No. 2 oil

学模型的相关系数均较高,拟合效果好,说明MOF衍生多孔碳与粉末活性炭对2号油的吸附过程更适合用准二级动力学模型来描述。同时,准一级动力学模

型也能较好描述MOF衍生多孔碳对2号油的吸附,但不适合描述粉末活性炭对2号油的吸附。综合考虑,准二级动力学方程能够比较全面地描述整个吸附过

表 2 MOF 衍生多孔碳与粉末活性炭对 2 号油的吸附动力学拟合模型参数

Table 2 Kinetics fitting model parameters of MOF-derived porous carbon and powdered activated carbon on adsorption of No.2 oil

吸附剂	准一级动力学模型		准二级动力学模型	
	$R_1^2$	$k_1/\text{min}^{-1}$	$R_2^2$	$k_2/[\text{g} \cdot (\text{mg} \cdot \text{min}^{-1})^{-1}]$
MOF 衍生多孔碳	0.981	0.10	>0.999	2.26
粉末活性炭	0.577	0.30	>0.999	7.14

程,真实反映 MOF 衍生多孔碳与粉末活性炭对 2 号油

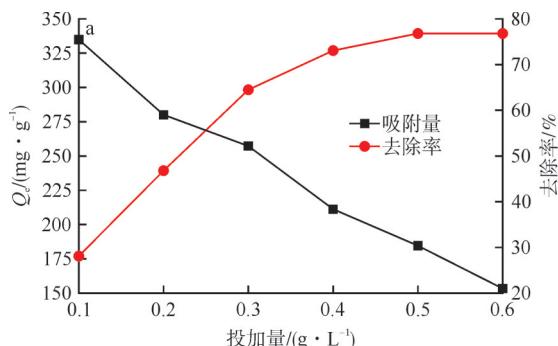


图 4 MOF 衍生多孔碳(a)和粉末活性炭(b)投加量对吸附 2 号油的影响

Fig. 4 Influence of (a) MOF-derived porous carbon concentration and (b) powdered activated carbon concentration on adsorption of No. 2 oil

油去除率逐渐增大;分析原因是吸附剂投加量增加,可以提供更多的吸附位点,因而去除率增大。但是,提高吸附剂投加量,吸附量降低,原因是可吸附的 2 号油量是一定的。综合考虑,MOF 衍生多孔碳和粉末活性炭的最佳投加量均为 0.5 g/L。

#### 2.4 吸附等温线

取 2 组各 18 根 50 mL 一次性塑料离心管,编号 A、B,加入不同质量浓度梯度的模拟 2 号油废水 40 mL,

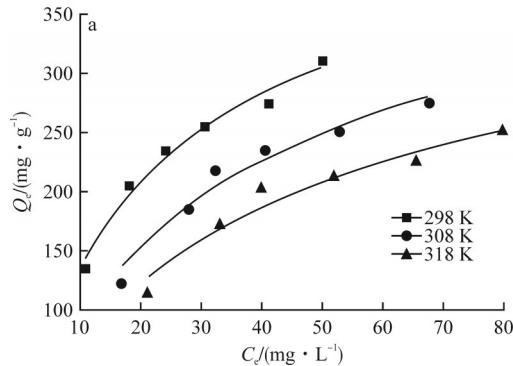


图 5 MOF 衍生多孔碳(a)和粉末活性炭(b)在 3 种温度下 Langmuir 吸附等温线非线性拟合图

Fig. 5 Nonlinear fitting of Langmuir isotherms of (a) MOF-derived porous carbon and (b) powdered activated carbon at three temperatures

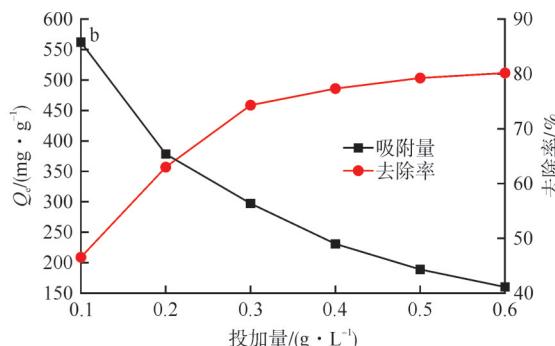
从图 5~7 可以看出:在相同温度下,MOF 衍生多孔碳和粉末活性炭对 2 号油的吸附量随 2 号油初始质量浓度的升高而增加。温度为 298~318 K 时,随着

的吸附。

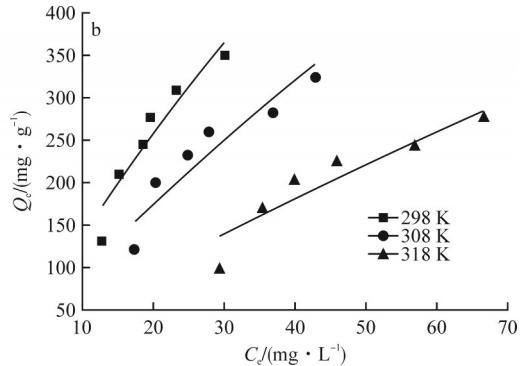
#### 2.3 吸附剂投加量

取 2 组各 6 根 50 mL 一次性塑料离心管,编号 A、B,分别加入初始 COD 为 120 mg/L 的模拟 2 号油废水 40 mL,A 组 MOF 衍生多孔碳的投加量分别为 0.1 g/L、0.2 g/L、0.3 g/L、0.4 g/L、0.5 g/L、0.6 g/L,B 组粉末活性炭的投加量为 0.1 g/L、0.2 g/L、0.3 g/L、0.4 g/L、0.5 g/L、0.6 g/L,置于温度为 298 K 的恒温摇床中以 250 r/min 的转速振荡,2 h 后取样、过滤,测量滤液中 COD,并计算吸附量,结果见图 4。

从图 4 可以看出:随着吸附剂投加量的增加,2 号



A 组 MOF 衍生多孔碳投加量为 0.5 g/L,B 组粉末活性炭投加量为 0.5 g/L,将体系置于不同温度(298 K、308 K、318 K)的恒温摇床中振荡 2 h。取样、过滤,测量滤液中 COD,并计算吸附量,结果见图 5~7。采用 Langmuir、Freundlich、Temkin 吸附等温线对所得数据进行分析处理(见表 3、表 4),确定相关参数并预测最佳的吸附等温线方程,从而推算出各反应体系的最大吸附容量及吸附反应的难易程度。



温度升高,MOF 衍生多孔碳和粉末活性炭对 2 号油的吸附量减小,表明吸附反应是放热反应,降低体系温度有利于 MOF 衍生多孔碳和粉末活性炭对 2 号油的

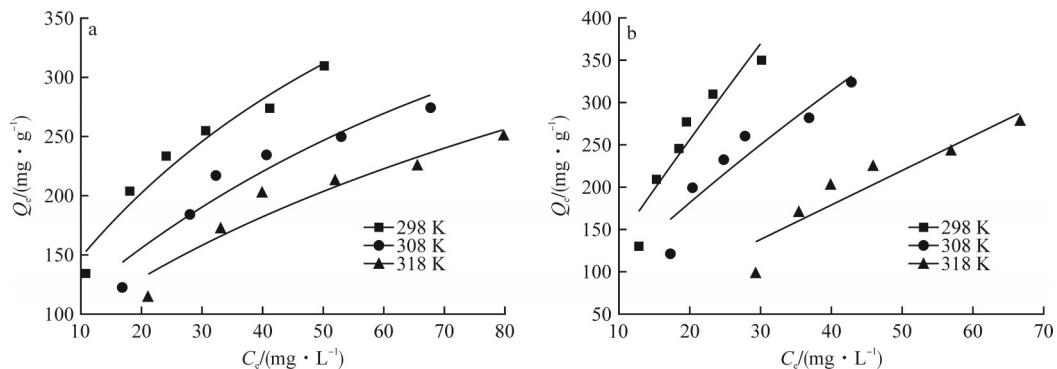


图6 MOF衍生多孔碳(a)和粉末活性炭(b)在3种温度下Freundlich吸附等温线非线性拟合图

Fig. 6 Nonlinear fitting of Freundlich isotherms of (a) MOF-derived porous carbon and (b) powdered activated carbon at three temperatures

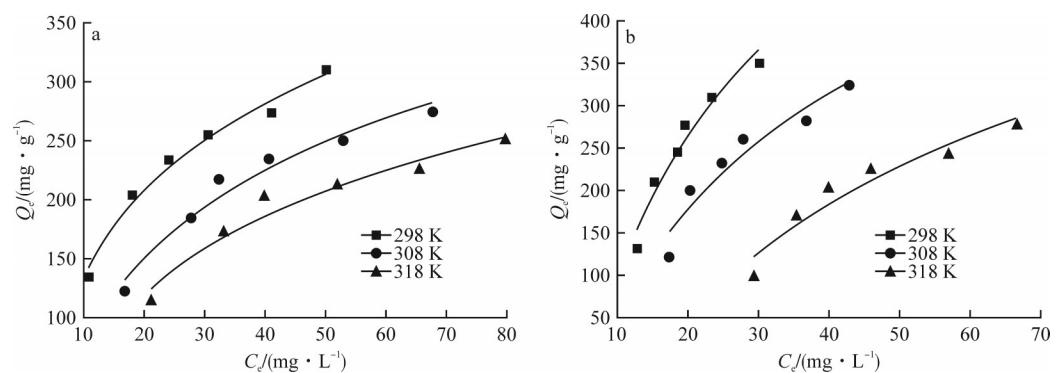


图7 MOF衍生多孔碳(a)和粉末活性炭(b)在3种温度下Temkin吸附等温线非线性拟合图

Fig. 7 Nonlinear fitting of Temkin isotherms of (a) MOF-derived porous carbon and (b) powdered activated carbon at three temperatures

表3 MOF衍生多孔碳吸附2号油的吸附等温线参数

Table 3 Adsorption isotherm parameters of No.2 oil adsorbed by MOF-derived porous carbon

T/K	Langmuir 模型			Freundlich 模型			Temkin 模型		
	$Q_m/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	$b/(\text{L} \cdot \text{mg}^{-1})$	$R^2$	$K_F/(\text{mg}^{1-n} \cdot \text{L}^n \cdot \text{g}^{-1})$	$n$	$R^2$	$A/(\text{L} \cdot \text{mg}^{-1})$	$b/(\text{J} \cdot \text{mol}^{-1})$	$R^2$
298	440.49	0.04	0.978	50.49	0.47	0.950	0.34	23.07	0.981
308	429.71	0.03	0.943	35.54	0.49	0.906	0.20	24.50	0.961
318	384.46	0.02	0.956	30.00	0.48	0.900	0.17	26.48	0.948

表4 粉末活性炭吸附2号油的吸附等温线参数

Table 4 Adsorption isotherm parameters of No.2 oil adsorbed by powdered activated carbon

T/K	Langmuir 模型			Freundlich 模型			Temkin 模型		
	$Q_m/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	$b/(\text{L} \cdot \text{mg}^{-1})$	$R^2$	$K_F/(\text{mg}^{1-n} \cdot \text{L}^n \cdot \text{g}^{-1})$	$n$	$R^2$	$A/(\text{L} \cdot \text{mg}^{-1})$	$b/(\text{J} \cdot \text{mol}^{-1})$	$R^2$
298	2 183.79	0.007	0.880	17.22	0.90	0.871	0.14	9.90	0.946
308	2 068.46	0.005	0.875	17.41	0.78	0.851	0.12	13.01	0.908
318	1 876.26	0.003	0.842	6.21	0.91	0.835	0.06	13.30	0.907

吸附。

从表3、表4可以看出:Langmuir 和 Temkin 2个模型能够较好地拟合MOF衍生多孔碳对2号油的吸附等温线;粉末活性炭对2号油的吸附符合Temkin模型。

## 2.5 热力学参数分析

通过吸附热力学研究,计算相应的吉布斯自由能变 $\Delta G^\circ$ 、焓变 $\Delta H^\circ$ 、熵变 $\Delta S^\circ$ 等热力学参数,从能量的角度进一步解释吸附的机理,了解吸附的自发性和能量

的变化。Van 't Hoff公式计算结果见图8,热力学参数见表5。

从图8、表5可以看出: $\Delta G^\circ$ 均为负值,表明MOF衍生多孔碳与粉末活性炭吸附2号油的过程均为自发进行。 $\Delta H^\circ$ 分别为-13.71 kJ/mol、-15.97 kJ/mol,表明2种吸附剂对2号油的吸附反应均为放热反应。此外, $\Delta S^\circ$ 均小于零,表明MOF衍生多孔碳与粉末活性炭吸附2号油是熵减过程,吸附体系向着混乱度减小

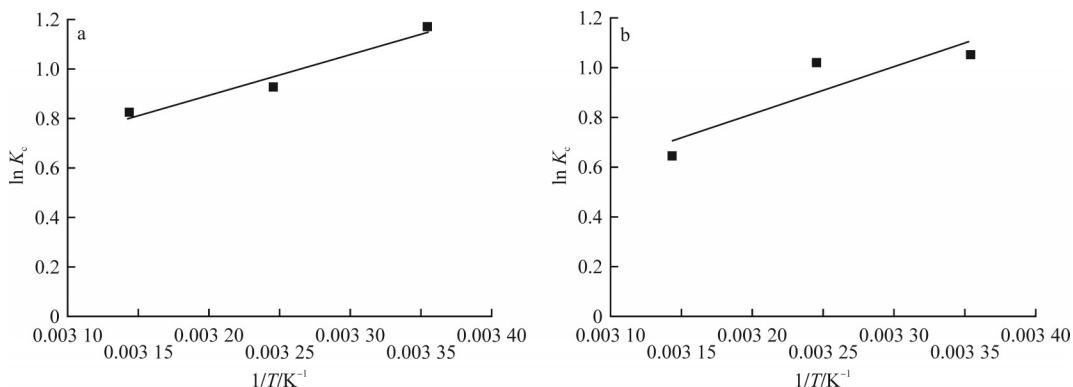
图8 MOF衍生多孔碳(a)和粉末活性炭(b) $\ln K_c$ 与 $1/T$ 的关系曲线Fig. 8 Relationship between  $\ln K_c$  and  $1/T$  of (a) MOF-derived porous carbon and (b) powdered activated carbon

表5 MOF衍生多孔碳与活性炭吸附2号油的热力学参数

Table 5 Thermodynamic parameters of MOF-derived porous carbon and activated carbon for adsorption of No. 2 oil

吸附剂	T/K	$\Delta G^\circ/$ (kJ·mol <sup>-1</sup> )	$\Delta H^\circ/$ (kJ·mol <sup>-1</sup> )	$\Delta S^\circ/$ (J·mol <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	$\ln K_c$
MOF衍生多孔碳	298	-2.86			0.93
	308	-2.49	-13.71	-36.42	0.82
	318	-2.13			1.05
粉末活性炭	298	-2.74			1.01
	308	-2.30	-15.97	-44.40	0.64
	318	-1.85			1.17

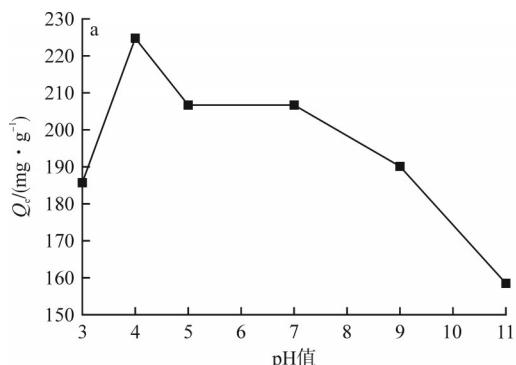


图9 不同pH对MOF衍生多孔碳(a)和粉末活性炭(b)吸附2号油的影响

Fig. 9 Influence of different pH values on adsorption of No. 2 oil by (a) MOF-derived porous carbon and (b) powdered activated carbon

从图9可以看出：随着pH增大，MOF衍生多孔碳对2号油的吸附量先上升后下降，表明低pH和高pH均不利于MOF衍生多孔碳对2号油的吸附，其最佳pH值为4。而粉末活性炭对2号油的吸附量随着pH增大逐渐下降，说明pH越小，越有利于粉末活性炭对2号油的吸附，其最佳pH值为3。综合分析，pH增大对粉末活性炭的影响更为显著，而MOF衍生多孔碳对pH表现出更好的耐受性。

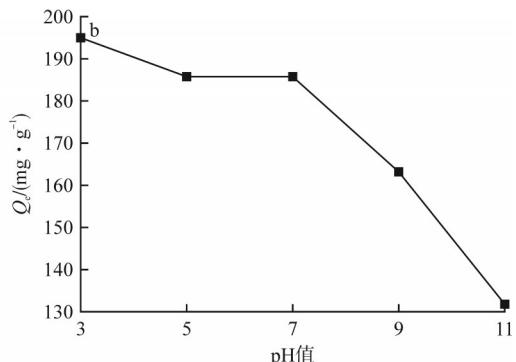
## 2.7 零点电荷的测定

将MOF衍生多孔碳零点电荷测定初始pH值分别设定为3, 4, 5, 6, 7, 8, 9；对于粉末活性炭，初始pH值设定为1, 2, 3, 4, 5。以初始pH( $pH_i$ )为横坐标，初

的方向进行，即2号油从游离态逐渐向吸附剂表面固定态转变的过程。根据吉布斯自由能和焓变大小，参数均在物理吸附范围内，因此二者吸附2号油的过程主要为物理吸附<sup>[17]</sup>。

## 2.6 pH的影响

取2组各5根50 mL的一次性塑料离心管，编号A、B，加入初始COD为120 mg/L的模拟2号油废水40 mL，A组MOF衍生多孔碳投加量为0.5 g/L，pH值分别为3, 4, 5, 7, 9, 11；B组粉末活性炭投加量为0.5 g/L，pH值分别为3, 5, 7, 9, 11，置于温度为298 K的恒温摇床中振荡2 h。取样、过滤，测量滤液中COD，并计算吸附量，结果见图9。



始pH-最终pH( $pH_i-pH_f$ )为纵坐标作图，结果见图10。从图10可以看出：MOF衍生多孔碳的零点电荷约为4，粉末活性炭的零点电荷约为3；即MOF衍生多孔碳吸附2号油的最佳pH值为4左右，粉末活性炭吸附2号油的最佳pH值为3左右。

综上，MOF衍生多孔碳吸附2号油的最佳条件为：吸附时间30 min、吸附剂投加量0.5 g/L、pH值4、温度298 K。粉末活性炭吸附2号油的最佳条件为：吸附时间20 min、吸附剂投加量0.5 g/L、pH值3、温度298 K。MOF衍生多孔碳与粉末活性炭在最佳条件下，对2号油的平衡吸附量分别为224.95 mg/g和194.86 mg/g，经吸附后的模拟2号油废水含COD分别

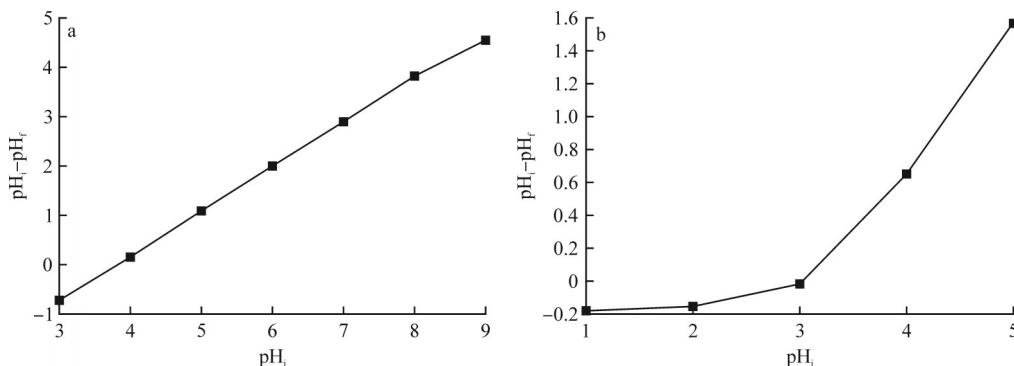


图10 MOF衍生多孔碳(a)和粉末活性炭(b)表面的零点电荷

Fig. 10 Zero-point charges on surface of (a) MOF-derived porous carbon and (b) powdered activated carbon

为7.53 mg/L和22.57 mg/L,均达到了排放标准。

### 3 结 论

研究了MOF衍生多孔碳与粉末活性炭对2号油吸附的单因素试验、吸附等温线、吸附动力学、吸附热力学及吸附剂表面的零点电荷。主要结论如下:

1) MOF衍生多孔碳吸附2号油的最佳条件为:吸附时间30 min、吸附剂投加量0.5 g/L、pH值4、温度298 K,平衡吸附量为224.95 mg/g,处理后废水中COD达到排放标准。

2) MOF衍生多孔碳对2号油的吸附过程,更符合准二级动力学模型,其对2号油的吸附等温线可用Temkin模型、Langmuir模型进行拟合;而粉末活性炭则符合Temkin模型。

3) 热力学计算表明,MOF衍生多孔碳和粉末活性炭对2号油的吸附均为放热反应,低温有利于吸附,且主要为物理吸附。

### [参考文献]

- [1] 周瑞仙.某金矿浮选药剂制度优化试验与生产实践[J].黄金,2023,44(4):34-37,43.
- [2] 董红建.青海某金锑矿选矿试验研究[J].黄金,2024,45(10):96-101.
- [3] 张胜东,童雄,谢贤,等.我国选矿废水回用处理方法研究进展[J].矿产保护与利用,2016,36(3):66-72.
- [4] 迟崇哲,范亚峰,刘强,等.浮选废水特性与综合治理试验研

- 究[J].黄金,2011,32(8):53-57.
- [5] 李阔,王升雨.工业废水在选矿生产中的综合利用与生产实践[J].黄金,2016,37(9):61-64.
- [6] 刘大中,王锦.物理吸附与化学吸附[J].山东轻工业学院学报(自然科学版),1999,13(2):24-27.
- [7] 赵玉娥.黄药、黑药、二号油在水体中的降解试验研究[J].黄金,1995,16(7):47-51.
- [8] 梁波,关杰.吸附法处理亚甲基蓝研究[J].工业用水与废水,2015,46(1):6-11,31.
- [9] 王文东,刘荟,张银婷,等.新型污泥基吸附材料制备及其氨氮去除性能评价[J].环境科学,2016,37(8):3 186-3 191.
- [10] ZHENG W, LI X M, YANG Q, et al. Adsorption of Cd(Ⅱ) and Cu(Ⅱ) from aqueous solution by carbonate hydroxylapatite derived from eggshell waste [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 147(1/2):534-539.
- [11] 张平.活性炭吸附饮用水中氯消毒副产物特性研究[D].杭州:浙江大学,2019.
- [12] 黄蓉.废PET乙二醇醇解单体BHET的离子交换树脂脱色研究[D].北京:中国科学院大学(中国科学院过程工程研究所),2021.
- [13] ACHARYA J, SAHU J N, MOHANTY C R, et al. Removal of lead(Ⅱ) from wastewater by activated carbon developed from Tamarind wood by zinc chloride activation[J]. Chemical Engineering Journal, 2008, 149(1/2/3):249-262.
- [14] 宋志伟,卿卓霖,钱锋,等.海藻酸钠/锆@钙水凝胶的制备及其对磷的吸附研究[J].环境科学学报,2022,42(3):151-161.
- [15] HO Y S. Second-order kinetic model for the sorption of cadmium onto tree fern: A comparison of linear and non-linear methods[J]. Water Research, 2006, 40(1):119-125.
- [16] 陈传伟,程相恩,王风.聚氨酯泡沫塑料对Au(Ⅲ)吸附动力学性能的研究[J].黄金,2017,38(9):80-83,87.
- [17] 程相恩,陈传伟,王风.聚氨酯泡沫塑料对Au(Ⅲ)吸附热力学性能的研究[J].黄金,2020,41(1):91-94.

## Study on adsorption behavior of No. 2 oil by MOF-derived porous carbon and activated carbon

Zhang Wenmei<sup>1,2</sup>, Pan Hui<sup>3</sup>, Yang Yang<sup>3</sup>, Han Qing<sup>3</sup>, Li Mingxin<sup>1,2,3</sup>

(1. Comprehensive Service Center of Jiangsu Yangzhou Chemical Industry Park;

2. Yangzhou Institute of Chemical Engineering, Nanjing University; 3. School of Metallurgy, Northeastern University)

**Abstract:** The adsorption characteristics of MOF-derived porous carbon and powdered activated carbon for No.2 oil were systematically investigated. The effects of adsorption time, adsorbent dosage, temperature, and pH on their adsorption performance were examined in detail, and the adsorption mechanisms were thoroughly discussed. Results demonstrate that MOF-derived porous carbon exhibits superior pH tolerance compared to powdered activated carbon. Under optimal conditions, the equilibrium adsorption capacities of MOF-derived porous carbon and powdered activated carbon for No.2 oil reach 224.95 mg/g and 194.86 mg/g, respectively. Adsorption kinetic analysis reveals that both follow the pseudo-second-order kinetic model with correlation coefficients  $R^2 > 0.999$ . Thermodynamic studies indicate that the adsorption of No.2 oil by MOF-derived porous carbon is an exothermic process dominated by physical adsorption.

**Keywords:** No.2 oil; MOF-derived porous carbon; activated carbon; adsorption; kinetics; thermodynamics