

# 神东矿区长焰煤对焦化污染地下水中喹啉的吸附性能

丛日红<sup>1</sup>,高且远<sup>2</sup>

(1.国家能源集团神东洗选中心,陕西 榆林 719315;2.中国矿业大学 国家煤加工与洁净化工程技术研究中心,江苏 徐州 221116)

**摘要:**煤泥作为煤炭分选中的产品,其高质量化利用是关键。神东矿区作为我国长焰煤的主产地,每年有大量煤泥产出,有必要深入研究其煤泥高质化利用途径。研究了神东矿区长焰煤对焦化污染地下水中喹啉的吸附性,利用激光粒度分析仪、SEM、BET、XRF、XPS 对煤样性质进行了分析,通过单因素试验考察了长焰煤投加量、吸附反应时间、初始浓度等因素对吸附效果的影响,探讨了长焰煤表面结构、性质与其吸附性能的关系。结果表明,神东长焰煤是一种天然的炭基吸附剂,其表面粗糙且孔隙结构发达,比表面积为  $17.53 \text{ m}^2/\text{g}$ 。表面孔结构为介孔,表面含有含氧官能团,且有无机矿物存在。神东长焰煤对喹啉的吸附效果较好,在投加量  $6 \text{ g/L}$ ,接触时间  $30 \text{ min}$ ,初始浓度  $4 \text{ mg/L}$  时,神东长焰煤对模拟废水中喹啉的去除率为  $81.46\%$ 。吸附行为符合 Freundlich 等温吸附模型,吸附过程是以表层为主的多层吸附。该吸附行为与喹啉和长焰煤表面性质以及孔径大小有关。根据拟合参数来看,神东煤泥对喹啉的吸附较容易发生,且吸附性能较好。

**关键词:**神东长焰煤;吸附;喹啉;水处理

中图分类号:X73

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2020)06-0096-06

## Adsorption performance of quinoline in coking polluted groundwater from Shendong long flame coal

CONG Rihong<sup>1</sup>, GAO Qieyuan<sup>2</sup>

(1. CHN Energy Shendong Coal Preparation centre, Yulin 719315, China; 2. National Engineering Research centre of coal preparation and purification, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** As a product of coal processing, the high quality utilization of slime is a key problem in the field of coal processing. Shendong mining area, as the main producing area of long flame coal in China, produces a lot of slime every year, and it's necessary to study the utilization way of high quality slime. In this paper, the adsorption of quinoline from coking tail water by long flame coal in Shendong mining area was studied. The properties of coal samples were analyzed by laser particle size analyzer, SEM, BET, XRF and XPS. The influence of factors such as the dosage of long flame coal, adsorption contact time and initial concentration on adsorption effect was investigated by single factor test. The relationship between surface structure, properties and adsorption performance of long flame coal was discussed. The results show that Shendong long flame coal is a natural carbon-based adsorbent with rough surface and developed pore structure, with a specific surface area of  $17.53 \text{ m}^2/\text{g}$ . The surface pore structure is mesoporous, the surface contains oxygen-containing functional groups, and there are inorganic minerals. Shendong long flame coal has good adsorption effect on quinoline. Under the optimal conditions of the dosage  $6 \text{ g/L}$ , the contact time  $30 \text{ min}$ , and the initial concentration  $4 \text{ mg/L}$ , the removal rate of quinoline in simulated wastewater by Shendong long flame coal is  $81.46\%$ . The adsorption behavior is found to accord with Freundlich isotherm model, indicating that the adsorption process is mainly dominated by multi-layer adsorption on the coal surface. The adsorption behavior is related to the surface properties and pore size of quinoline and long flame coal. According to the fitting parameters, the adsorption of quinoline on Shendong coal slime is easy to occur, and the adsorption performance is good.

**Key words:** Shendong long flame coal; adsorption; quinoline; water treatment

收稿日期:2020-08-04;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.20080401

基金项目:国家能源集团科技创新项目(CSIEZB170204990)

作者简介:丛日红(1989—),男,内蒙古赤峰人,工程师,从事洗选中心煤质管理工作。E-mail:281412103@qq.com。通讯作者:高且远,博士,研究方向为工业水处理。E-mail:gaoqieyuan@cumt.edu.cn

引用格式:丛日红,高且远.神东矿区长焰煤对焦化污染地下水中喹啉的吸附性能[J].洁净煤技术,2020,26(6):96-101.

CONG Rihong, GAO Qieyuan. Adsorption performance of quinoline in coking polluted groundwater from Shendong long flame coal[J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(6): 96-101.



移动阅读

## 0 引言

地下水是地球水资源中最重要的组成部分之一。我国地下水占全国淡水资源的1/3,维持着我国近70%人口的饮用水和40%的农田灌溉用水<sup>[1-2]</sup>。目前,我国有60%以上的城市采用地下水供水系统。据环境普查数据可知,在开展地下水资源质量评价的118个城市中,有近60%的城市地下水受到不同程度的污染,其中有高于30%的城市受到中重度污染<sup>[3]</sup>。地下水与工业排放废水不同,传统方法治理地下水时,伴有难度大、成本高、周期长等特点。焦化行业作为我国煤化工产业的重要组成部分,已成为地下水污染的主要污染源之一<sup>[4]</sup>。焦化场地污染的地下水中污成分复杂,主要有氨氮、氰化物、硫氰化物、氟化物、酚类、含氮杂环化合物、多环芳烃等有机污染物<sup>[5-6]</sup>。其中,喹啉、吡啶、吡啶等毒害作用较大,且化学结构稳定性较高,难以被生物降解。

针对此问题,国内外学者开展了诸多研究。杨丙衡等<sup>[7]</sup>利用电化学方法,制备了具有三维结构的Ti/SnO<sub>2</sub>-Sb/PPy/PbO<sub>2</sub>-Ce电极,在电流密度161.18 A/m<sup>2</sup>、电解质浓度5.90 g/L、极板间距1.58 cm、初始pH为9.05条件下,焦化废水的降解效率达到90.47%,能耗为0.787 kWh/g(以COD计)。但电化学法在实际焦化废水处理中应用不多,原因是处理成本高昂,所需电极合成路线较长。张恒等<sup>[8]</sup>采用微波强化Fenton技术,对焦化废水生化出水进行深度处理。结果表明,Fe<sup>2+</sup>和H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>投加量分别为1.8和15.6 mmol/L时,Fenton处理方法对COD的最佳去除率仅为18%,利用微波强化Fenton技术对COD的去除率可提升到77%,出水COD可降至52 mg/L,但是Fenton方法涉及到化学药剂以及加入酸的问题,往往会带来二次污染。李杰<sup>[9]</sup>利用一种基于常规工艺的焦化废水强化混凝深度处理技术,制备出新型复合混凝剂,不仅能保证出水水质,还降低了运行成本。但是混凝法本身对污染物有局限性,只对特定的污染物有效,但对有机污染物尤其是难降解有机污染物的去除效果不好。

吸附法广泛应用于各种废水处理,相比于其他处理方法,具有工艺简单、投资成本低等特点。常用的吸附剂有无机非金属多孔材料、炭基多孔材料、吸附树脂等,但吸附性能较好的吸附剂价格昂贵、合成路线长、复用效果差,且复用过程解析出的污染物无合理去向。煤炭是我国主要能源<sup>[5]</sup>,因其较大的孔隙率和比表面积,在各类污水处理中表现出一定的

吸附性能<sup>[6]</sup>。若将煤炭用于焦化污染地下水的修复,一方面可为污染源企业降低大量修复成本,另一方面负载有机污染物的煤炭可回到煤化工或冶炼工艺继续使用而不减值,同时其所吸附的有机污染物也可以有效消解。我国已探明的煤炭种类中低阶煤储量最大,其主要分布在东北和西北地区,包括鄂尔多斯盆地和新疆地区。本文以神东矿区长焰煤(LFC)作为吸附剂,讨论不同条件下低阶煤对污水中难降解有机物喹啉的吸附效果。

## 1 试验

### 1.1 试验仪器与药剂

主要试验仪器:智能水浴恒温振荡器(CLF-3),全自动氮气吸附仪(BET, BELSORP-max),扫描电子显微镜(SEM, Quanta TM 250),X射线荧光光谱仪(XRF, S8 TIGER),X射线光电子能谱仪(XPS, ESCALAB 250Xi),激光粒度分析仪(S3500)。

主要药剂:硫酸(AR),氢氧化钠(AR),重铬酸钾(AR),喹啉(AR)。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 煤样性质分析

试验煤样来自内蒙古自治区伊金霍洛旗与陕西省神木市大柳塔镇交界处神府-东胜矿区某选煤厂。该煤样属长焰煤。煤样处置方法为:将所取煤样破碎、粉磨使其粒度小于74 μm,将样品置于烘箱中在100℃干燥2 h。干燥后,将煤样储存在密封玻璃容器中备用。

利用扫描电子显微镜(SEM)对神东煤泥的表面结构进行超微观察,以分析煤样表面形貌;采用BET全自动氮气吸附仪,对煤样比表面积以及孔隙结构进行分析;利用X射线荧光光谱仪(XRF)对煤样进行化学组成分析;采用X射线光电子能谱仪(XPS)对煤样进行表面元素分析<sup>[10-11]</sup>。

#### 1.2.2 吸附试验

使用去离子水,配置浓度1 g/L喹啉溶液的储备液,放在避光阴凉处贮存,防止其见光分解。进行吸附试验时,量取50 mL溶液置于250 mL锥形瓶中,加入试验低阶煤煤样,封口后放入恒温水浴振荡箱中,在试验要求温度和振荡器转速下振荡。一定时间后,利用砂芯漏斗和真空泵过0.45 μm滤膜过滤,并通过紫外分光光度法测定剩余的喹啉浓度。

喹啉去除率 $\gamma$ 计算式为

$$\gamma = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100\%, \quad (1)$$

式中, $C_0$ 为喹啉起始浓度,mg/L; $C_t$ 为经过 $t$ 时的污

染物浓度,mg/L。

吸附量计算式为

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t) V}{W}, \quad (2)$$

式中, $q_t$ 为吸附平衡时吸附剂的吸附量,mg/g; $V$ 为处理的废水体积,L; $W$ 为投加吸附剂质量,g。

### 1.2.3 污染物浓度测定

采用喹啉试剂配置标准溶液进行全波段扫描,喹啉在波长 278 nm 处吸收最佳。利用先前配置好的储备液,配置不同浓度(10、20、30、40、50、60、70、80 mg/L)的模拟废水标准溶液。利用分光光度计测得不同浓度的吸光值,绘制浓度-吸光度函数图,并进行线性拟合,获得喹啉在特征波长下的浓度-吸光值拟合方程,如图 1 所示。

由图 1 可知,在喹啉的特征波长处,喹啉含量与吸光度之间符合朗伯-比尔定律。对过滤的上清液进行吸光值测定,通过拟合方程反求出待测滤液中剩余喹啉的浓度。

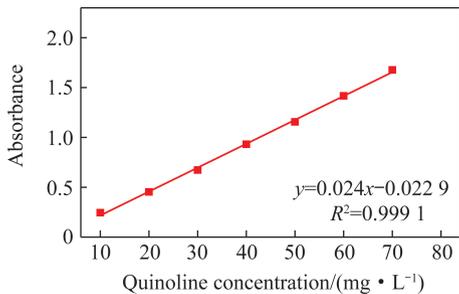


图 1 喹啉溶液标准曲线

Fig.1 Quinoline solution standard curve

## 2 结果与讨论

### 2.1 煤样性质

#### 2.1.1 煤样粒度

根据试验要求,使用分样器将存放于密封玻璃容器中的煤样干式缩分,并进行煤样性质分析。利用激光粒度分析仪对其进行粒度分析,结果如图 2 所示。可知煤样粒度较细,为 0.1 mm 以下。对一般

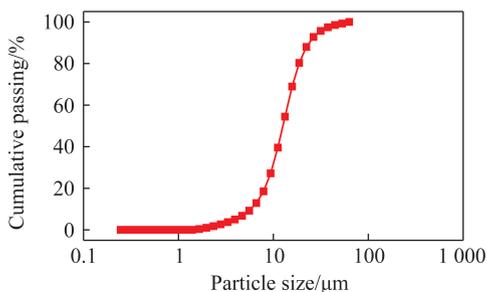


图 2 煤样粒度组成

Fig.2 Particle size distribution of the coal

吸附剂,粒度越细,吸附活性位点暴露越多,其吸附效果越好。与其他天然吸附剂相比,本文所用煤样天然粒度较细,免去了破碎筛分工序,提高了大规模应用时的磨矿成本。

#### 2.1.2 煤样表面性质

煤样表面形貌图如图 3 所示。对于一般吸附剂,表面粗糙且孔隙结构发达,有利于吸附行为及过程。由图 3 可知,长焰煤表面粗糙且孔隙结构发达,会增加有效吸附活性位点与污染物分子接触概率,有利于吸附<sup>[10]</sup>。

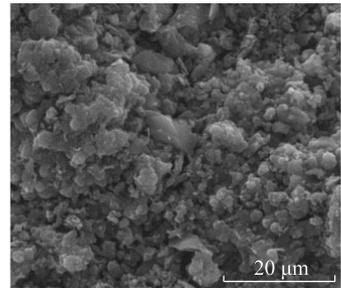


图 3 煤样表面形貌

Fig.3 Surface morphologies of the coal

煤样孔特性结果如图 4 和表 1 所示。可知 4 种吸附剂的孔结构均以介孔结构为主,孔径为 7.14 nm,说明神东煤泥是一类具有介孔结构的吸附材料。介孔结构是指孔径 2~50 nm 的孔结构,这类结构有利于污染物吸附,合适的孔径能够对喹啉分子形成有效吸附。神东煤泥的比表面积较大,为 17.53 m<sup>2</sup>/g,增加了与污染物碰撞概率,吸附活性位点较多,有利于吸附。

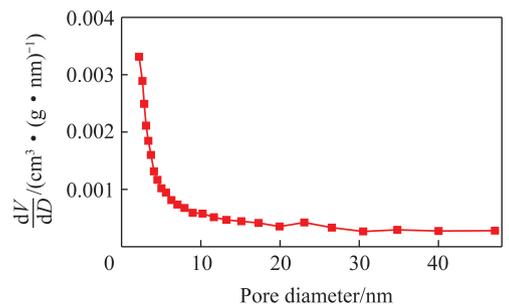


图 4 煤样孔径分布

Fig.4 Pore size distribution of the coal

表 1 神东煤泥 BET 分析

Table 1 BET analysis of the coal

比表面积/ (m <sup>2</sup> · g <sup>-1</sup> )	平均孔径/ nm	中孔孔容/ (cm <sup>3</sup> · g <sup>-1</sup> )	总孔容/ (cm <sup>3</sup> · g <sup>-1</sup> )
17.53	7.14	0.017	0.017

XRF 分析结果见表 2。可知煤样表面矿物组成主要以硅、钙和铝元素为主,还含有铁、镁、钾和钠元

素的氧化物,这些矿物可能来源于神东煤泥中的灰分。这类无机矿物本身具有吸附性能,有利于后续的沉降分离。

C与O是影响吸附剂吸附能力的主要元素,煤

表2 煤样XRF分析

Table 2 XRF analysis results of the coal

物质	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
质量分数/%	3.24	2.96	1.32	1.21	0.12	0.45	0.14

表3 煤样表面元素组成

Table 3 Element contents of the coal surface by XPS analysis

组成	C1s	O1s	N1s	Si2p	Al2p	Na1s	K2p
含量/%	38.59	36.35	0.02	11.99	10.64	2.08	0.34

XPS的C1s窄范围扫描光谱如图5所示。可知C1s峰结合能分别为284.6、285.6、286.6和289.1 eV,分别对应于C—C/C—H、C—O、C=O和C=O—O。经过校正以及对应出峰位置可以分峰拟合得出C元素在神东长焰煤表面的不同存在形式(表4,相对C1s百分比)。可知神东煤泥中C元素的结合形式主要为碳碳键和碳氧双键(C—O和C=O)。进一步说明了神东煤泥表面有丰富的含氧官能团,主要是以碳氧键形式存在,更易发生吸附。

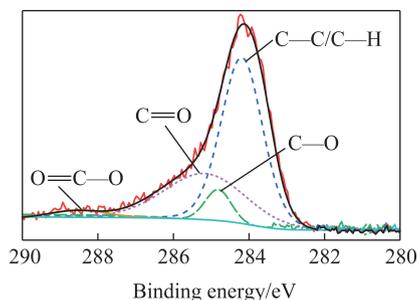


图5 煤样C1s峰XPS测试结果

Fig.5 C1s peaks of the coal obtained by XPS

表4 煤样表面C结构组成

Table 4 Fraction of C on the surface of the coal

组成	C—C	C—O	C—H	C=O
含量/%	67.39	21.20	8.24	3.16

## 2.2 投加量影响

煤样投加量对喹啉去除率和吸附量的影响如图6所示。可知煤样对喹啉有较好的去除率,对喹啉的吸附量随着投加量增大而减小。煤样投加量达到6 g/L时,去除率达到峰值为81.46%。因此,煤样对喹啉吸附的最佳投加浓度为6 g/L。

## 2.3 接触时间影响

接触时间对喹啉去除率和吸附量的影响如图7所示。可知喹啉去除率和吸附量在前30 min随时间增加而上升,接触时间达到30 min时,神东煤泥

样的XPS分析结果见表3。神东煤泥的C含量为38.59%,O含量为36.35%。说明神东煤泥表面含有大量含氧官能团,含氧官能团可强化吸附作用,使污染物分子更好地吸附在神东煤泥表面。

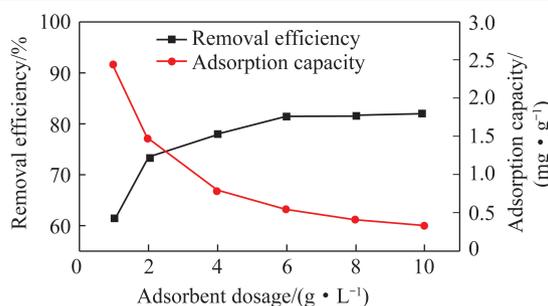


图6 吸附剂投加量对喹啉去除率和喹啉吸附量的影响

Fig.6 Effect of the dosage of adsorbent on removal efficiency and adsorption capacity of quinoline

的去除率为81.46%;30 min后,两者保持基本恒定。这是由于吸附初期,煤样表面有较多的吸附活性中心,煤样能以较快速度吸附溶液中的喹啉分子。到达30 min接触时间后,吸附剂表面活性吸附位点趋于饱和,喹啉的吸附和解吸行为及速率达到了动态平衡,将无法实现进一步有效吸附。因此,煤样吸附喹啉最佳吸附时间为30 min。

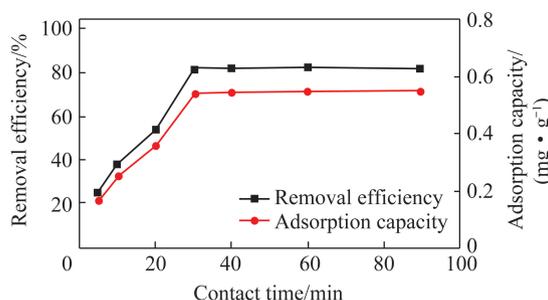


图7 接触时间对喹啉去除率和吸附量的影响

Fig.7 Effect of contact time on removal efficiency and adsorption capacity of quinoline

## 2.4 初始浓度影响

喹啉初始浓度对其去除率和吸附量的影响如图8所示。

由图8可知随着初始浓度的增加,喹啉的去除率和吸附量增大。喹啉初始浓度较低时,随着初始

浓度的增加,喹啉的去除率和吸附量增速较高。初始喹啉浓度增加到 4 mg/L 时,去除率和吸附量达到峰值。初始浓度大于 4 mg/L 时,喹啉的去除率和吸附量略有增加,这可能是吸附动态平衡的原因。初始喹啉浓度较低时,喹啉分子与吸附剂表面有效吸附点之间的有效碰撞几率较小,导致喹啉去除率较低。浓度差越大,吸附容量和速率越高。随着初始浓度的增加,有效碰撞几率增大,吸附容量和去除效率提高。当吸附达到动态平衡,两者将不再变化。因此,试验确定最佳的初始浓度确定为 4 mg/L。

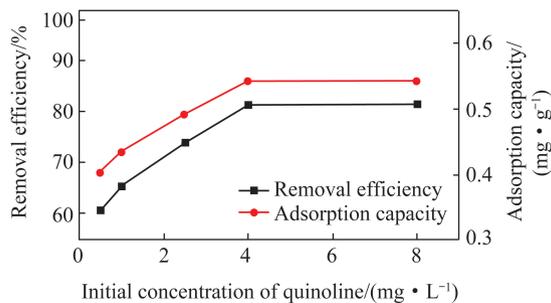


图8 喹啉初始浓度对其去除率和吸附量的影响  
Fig.8 Effect of initial concentration of quinoline on its removal efficiency and adsorption capacity

## 2.5 吸附等温线

等温吸附曲线描述了恒定温度下吸附质分子在吸附剂表面吸附达到平衡时,吸附质分子在吸附剂表面的吸附量与吸附质分子在溶液中浓度的关系,可从吸附等温线类型获取吸附剂表面性质、孔结构性能以及吸附剂和吸附质之间相互作用的信息。

利用3种常见的等温吸附模型(Langmuir模型、Freundlich模型和Temkin模型)对煤样吸附喹啉试验数据进行拟合确定吸附机理。试验设定污染物喹啉的初始浓度分别为5、10、20、30、40、50 mg/L,其他试验条件为:投加浓度为6 g/L、吸附时间为30 min、初始浓度为4 mg/L。3种等温吸附模型及对应的线性表达式为

Langmuir模型表达式<sup>[12]</sup>:

$$q_e = \frac{K_L q_m C_e}{1 + K_L C_e}, \quad (3)$$

其线性表达式为

$$C_e/q_e = 1/(K_L q_m) + C_e/q_m, \quad (4)$$

式中, $C_e$ 为平衡浓度,mg/L; $q_m$ 为最大吸附量,mg/g; $q_e$ 为平衡吸附量,mg/g; $K_L$ 为Langmuir模型的吸附常数。

Freundlich模型表达式<sup>[13]</sup>:

$$q_e = K_F C_e^{1/n}, \quad (5)$$

其线性表达式为

$$\ln q_e = \ln K_F + 1/n \cdot \ln C_e, \quad (6)$$

式中, $K_F$ 为Freundlich模型常数; $n$ 为模型常数,与吸附体系的整体性质有关。

Temkin模型线性表达式<sup>[14]</sup>:

$$q_e = \left(\frac{RT}{b_T}\right) \ln(K_T C_e), \quad (7)$$

其线性表达式为

$$q_e = (RT/b_T) \ln C_e + (RT \ln K_T)/b_T, \quad (8)$$

式中, $T$ 为绝对温度,K; $R$ 为理想气体常数; $K_T$ 为Temkin模型常数,L/mg; $b_T$ 为与吸附热相关的参数,kJ/mol。

线性拟合结果见表5。可知利用Freundlich等温吸附模型拟合煤样对喹啉的吸附行为好于其他2种模型, $R^2$ 大于0.99,说明煤样对喹啉的吸附过程更符合Freundlich等温吸附模型<sup>[15]</sup>,一定浓度内喹啉的吸附行为存在多分子层吸附<sup>[16]</sup>。Freundlich等温吸附模型中 $1/n$ 值表示吸附难易程度, $n/1 < 1$ 时,说明该吸附过程容易发生。本文线性拟合所得 $1/n < 1$ ,说明试验煤样易吸附喹啉。 $K_F$ 值是吸附有关的Freundlich等温吸附模型另一重要参数,值越大,表明吸附行为越容易发生。煤样对喹啉吸附行为的 $K_F$ 值较大,说明其对喹啉的吸附性能较好。同时,较好的吸附性能或暗示喹啉分子尺寸与吸附剂的孔径结构相适配,有利于吸附<sup>[17-19]</sup>。喹啉在吸附剂上的Freundlich吸附等温线如图9所示。

表5 喹啉吸附等温吸附模型参数

Table 5 Model parameters of quinoline adsorption isotherm

Langmuir 等温吸附模型			Freundlich 等温吸附模型			Temkin 等温吸附模型		
$K_L/(L \cdot mg^{-1})$	$q_m/(mg \cdot g^{-1})$	$R^2$	$K_F/(L \cdot mg^{-1})$	$1/n$	$R^2$	$K_T/(L \cdot mg^{-1})$	$b_T/(kJ \cdot mol^{-1})$	$R^2$
0.466 2	0.555 3	0.969 2	0.148 8	0.440 6	0.997 6	3.052 7	14.423 4	0.900 5

## 3 结 论

1) 神东长焰煤是一种天然的炭基吸附剂,其表面粗糙且孔隙结构发达,比表面积为 $17.53 \text{ m}^2/\text{g}$ 。表面C与O元素是影响炭基吸附剂吸附能力的主

要元素,而神东长焰煤碳元素的结合形式主要为C—O和C=O。

2) 在最佳条件下(投加浓度为6 g/L、吸附时间30 min、初始浓度4 mg/L),神东长焰煤对于喹啉的吸附效果较好,在最佳条件下,对模拟废水中喹啉的

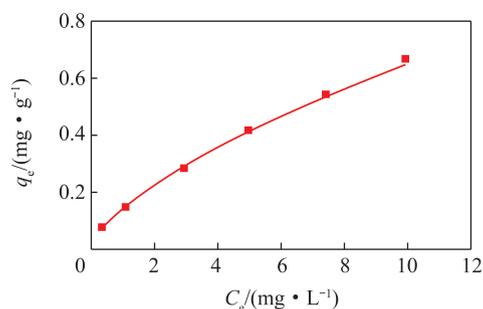


图9 吸附的 Freundlich 吸附等温线

Fig.9 Freundlich adsorption isotherms of adsorption

去除率为 81.46%。

3) 神东长焰煤对喹啉的吸附行为符合 Freundlich 等温吸附模型, 吸附过程是以表层为主的多层吸附。该吸附行为与吸附质(喹啉)和长焰煤表面性质以及孔径大小有关。

### 参考文献 (References) :

- [1] 梁亦欣, 刘祥, 于鲁冀. 我国地下水污染现状及趋势[J]. 科技信息: 科学教研, 2007(27): 288.  
LIANG Yixin, LIU Xiang, YU Luji. The current situation and trend of groundwater pollution in China [J]. Science and Technology Information: Science Teaching and Research, 2007(27): 288.
- [2] 熊玲, 鄢贵权. 浅谈我国地下水的污染现状及防治措施[J]. 贵州科学, 2009, 27(4): 86-90.  
XIONG Ling, YAN Guiquan. A brief talk on the current situation of groundwater pollution in my country and preventive measures [J]. Guizhou Science, 2009, 27(4): 86-90.
- [3] 王昭, 王慧珍, 石建省. 地下水有机污染研究进展[J]. 勘察科学技术, 2008(6): 23-27.  
WANG Zhao, WANG Huizhen, Shi Jianxing. Advances in research on organic pollution of groundwater [J]. Survey Science and Technology, 2008(6): 23-27.
- [4] 王林. 地下水石油污染原位修复三维中试模拟研究[D]. 北京: 清华大学, 2009.  
WANG Lin. Three-dimensional pilot simulation study on in-situ remediation of groundwater oil pollution [D]. Beijing: Tsinghua University, 2009.
- [5] 高且远, 李志朋, 谢雅琪, 等. KD-1 型煤基吸附剂对喹啉吸附性能的研究[J]. 应用化工, 2019, 48(9): 2074-2080.  
GAO Qiyuan, LI Zhipeng, XIE Yaqi, et al. Study on the adsorption performance of KD-1 coal-based adsorbent for quinoline [J]. Applied Chemical Industry, 2019, 48(9): 2074-2080.
- [6] ZHOU Y A, SUN W J, CHU W, et al. Theoretical insight into the enhanced CH<sub>4</sub> desorption via H<sub>2</sub>O adsorption on different rank

coal surfaces [J]. Journal of Energy Chemistry, 2016, 25(4): 677-682.

- [7] 杨丙衡, 安路阳, 张立, 等. 中间层为聚吡咯的复合电极深度处理焦化废水[J/OL]. 化工进展, 1-15 [2020-07-14]. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2019-1987>.
- [8] 张恒, 李淑敏, 刘媛, 等. 微波强化 Fenton 技术对焦化废水生化出水的深度处理[J]. 环境工程学报, 2020, 14(6): 1495-1502.  
ZHANG Heng, LI Shumin, LIU Yuan, et al. Advanced treatment of bio-treated coking wastewater by microwave-enhanced Fenton process [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(6): 1495-1502.
- [9] 李杰. 基于新型复合混凝剂的焦化废水深度处理技术[J]. 山东化工, 2020, 49(7): 259-260.  
LI Jie. Advanced treatment of coking wastewater by the enhanced coagulation process based on a newly developed composite coagulant [J]. Shandong Chemical Industry, 2020, 49(7): 259-260.
- [10] GAO Q Y, WANG L, LI Z P, et al. Adsorptive removal of pyridine in simulation wastewater using coke powder [J]. Processes, 2019, 7(7): 459.
- [11] SHEN L, WANG W, LI T, et al. Powdered activated coke for COD removal in the advanced treatment of mixed chemical wastewaters and regeneration by Fenton oxidation [J]. Chemical Engineering Journal 2019, 371: 631-638.
- [12] LANGMUIR I. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum [J]. Journal of the American Chemical Society, 1917, 40(9): 1361-1403.
- [13] FREUNDLICH H M F. Over the adsorption in solution [J]. The Journal of Physical Chemistry, 1906, 57: 385-471.
- [14] TEMKIN M J, PYZHEV V. Kinetics of ammonia synthesis on promoted iron catalysts [J]. Acta Physicochim URSS, 1940, 12: 217-222.
- [15] XU H X, HUANG G, LI X B, et al. Removal of quinoline from aqueous solutions by lignite, coking coal and anthracite. Adsorption isotherms and thermodynamics [J]. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 2016, 52(1): 214-227.
- [16] BIAN Y, Sun H, LUO Y X, et al. Effect of inorganic salt ions on the adsorption of quinoline using coal powder [J]. Water Science and Technology, 2018, 78(3): 496-505.
- [17] KIM Y S and KIM J H. Isotherm, kinetic and thermodynamic studies on the adsorption of paclitaxel onto Sylopute [J]. Journal of Chemical Thermodynamics, 2019, 130: 104-113.
- [18] RAMESHRAJA D, SRIVASTAVA V C, KUSHWAHA J P, et al. Quinoline adsorption onto granular activated carbon and bagasse fly ash [J]. Chemical Engineering Journal, 2012, 181: 343-351.
- [19] WANG L, GAO Q Y, LI Z P, et al. Improved removal of quinoline from wastewater using coke powder with inorganic ions [J]. Processes, 2020, 8(2): 156.