

DOI: 10.19666/j.rlfed.202411234

改性硅胶对风电齿轮油中 Fe^{3+} 的吸附性能

底广辉¹, 李师圆¹, 黄泽宇², 夏启斌²

(1. 华北电力科学研究院有限责任公司, 北京 100045;

2. 华南理工大学化学与化工学院, 广东 广州 510640)

[摘要] 对风电机组齿轮油运行油样品和新油样品进行对比测试, 发现 Fe^{3+} 含量为劣化最快的指标。通过浸渍改性将聚乙烯亚胺 (PEI) 负载到硅胶材料 (SG) 上制备 SG-PEI 吸附剂并进行表征, 研究了 Fe^{3+} 在 SG-PEI 上的吸附等温线和动力学。结果表明: Fe^{3+} 在 SG-PEI 上的吸附等温线符合 Langmuir 吸附模型; SG-PEI 对 Fe^{3+} 饱和吸附量约为 28.71 mg/g, 相比 SG (20.63 mg/g) 提升 39.2%; SG-PEI 对 Fe^{3+} 的吸附过程符合拟二级动力学模型, 吸附过程为自发的放热反应; 在吸附温度 60 °C, 吸附时间 120 min, 油剂比 100:3 的条件下, SG-PEI 对风电机组运行齿轮油中 Fe^{3+} 脱除率达 96.23%, 是 801 吸附剂 (3.27%) 的 29.43 倍, 也是 Al_2O_3 (0.52%) 的 185.06 倍, 其对齿轮油中 Fe^{3+} 具有高吸附容量和选择性, 具有良好的应用前景。

[关键词] 齿轮油; 吸附再生; 金属脱除; 硅胶; 改性

[引用本文格式] 底广辉, 李师圆, 黄泽宇, 等. 改性硅胶对风电齿轮油中 Fe^{3+} 的吸附性能[J]. 热力发电, 2025, 54(9): 79-85.
DI Guanghui, LI Shiyuan, HUANG Zeyu, et al. Adsorption properties of modified silica gel on Fe^{3+} in wind turbine gear oil[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(9): 79-85.

Adsorption properties of modified silica gel on Fe^{3+} in wind turbine gear oil

DI Guanghui¹, LI Shiyuan¹, HUANG Zeyu², XIA Qibin²

(1. North China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100045, China;

2. School of Chemistry and Chemical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: A comparative test was conducted on operating oil samples from wind turbine gear oil and a fresh oil sample, revealing that the Fe^{3+} content was the most rapidly deteriorating indicator. The SG-PEI adsorbent was prepared by loading polyethyleneimine (PEI) onto a silica gel material (SG) through impregnation modification, and its characteristics were evaluated. The adsorption isotherms and kinetics of Fe^{3+} on SG-PEI were thoroughly investigated. The results indicated that, the adsorption isotherm of Fe^{3+} on SG-PEI conforms to Langmuir model. The saturated adsorption capacity of SG-PEI for Fe^{3+} was 28.71 mg/g, representing a 39.2% improvement compared to SG (20.63 mg/g). The adsorption process of Fe^{3+} on SG-PEI adhered to the pseudo-second-order kinetic model, with adsorption process occurring as a spontaneous exothermic reaction. Under optimal conditions of an adsorption temperature of 60 °C, an adsorption time of 120 min, and an oil-adsorbent ratio of 100:3, the removal rate of Fe^{3+} from wind turbine gear oil by SG-PEI reached 96.23%, which is 29.43 times higher than that of the 801 adsorbent (3.27%) and 185.06 times higher than that of Al_2O_3 (0.52%). The SG-PEI has a good prospect for applications due to its high adsorption capacity and selectivity for Fe^{3+} .

Key words: gear oil; adsorption regeneration; metal removal; silica gel; modification

作为世界上最大的能源消费国, 我国十分重视清洁能源发电技术的研发和应用, 积极推动新能源

行业发展, 力争实现“碳达峰、碳中和”^[1]。风能作为一种清洁无公害的可再生能源, 与传统火力发电

收稿日期: 2024-11-25

基金项目: 华北电力科学研究院有限责任公司科研项目 (KJZ2023119)

Supported by: Scientific Research Project of North China Electric Power Research Institute Co., Ltd. (KJZ2023119)

第一作者简介: 底广辉 (1990), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力用油监测、诊断、处理, 1374678567@qq.com。

通信作者简介: 夏启斌 (1976), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为新型环境功能材料和碳基能源材料应用, qbxia@scut.edu.cn。

相比, 风力发电具有零排放、污染小、成本低等优点, 因此成为目前全球发展最快的新能源之一^[2]。

风电增速齿轮箱是双馈型风力发电机组的核心部件, 它将低转速的风轮所携带的功率转换为与发电机匹配的高转速低扭矩功率, 它的运转性能决定着风力发电整机的发电量^[3]。造成风电齿轮箱失效的原因有设计、安装、环境和齿轮油等, 其中齿轮油为风电齿轮箱提供主要的润滑作用, 但在工作中可能会受到恶劣环境的影响, 造成齿轮油的劣化, 出现性能下降、润滑不良等问题, 影响风电齿轮箱的稳定运行并产生大量废润滑油^[4-5]。大量的废油直接丢弃会造成极大的环境污染, 因此废油再生与循环利用具有重要意义^[6]。

风电齿轮油油品劣化故障案例中统计较多的为黏度超标(34%)与Fe磨损元素超标(27%)^[7]。若油液中出现磨损元素异常增加, 反映出齿轮异常磨损状态, 会导致润滑油劣化, 影响油品使用寿命。Fe元素是摩擦副材质的最主要物质, 在风机运行中, Fe元素含量也是判断齿轮箱内部磨损情况的主要指标, 《工业闭式齿轮油换油指标》(NB/SH/T 0586—2010)中指出油品Fe³⁺质量分数高于200 μg/g时需换油处理。目前, 关于废油吸附

再生常以色度、酸值、黏度、密度等常规性质作为指标^[8-11], 对于油品中金属离子的脱除研究较少^[12-13]。因此, 开发出一种针对风电机组齿轮油中Fe³⁺脱除的技术具有重要研究价值。

吸附技术是一种广泛用于废油再生的重要手段, 吸附剂是吸附技术的核心^[8]。本研究对常用吸附材料进行了初步筛选, 并对筛选出的最优吸附材料进行改性, 使其对于油中Fe³⁺具有高效吸附脱除性能。

1 实验内容

1.1 试剂及仪器

本文齿轮油运行油样品采集于两处风电机组, 其与壳牌OMALA S2G新油的物化参数列于表1。氢氧化钾、无水乙醇、甲醇、酚酞、甲酚红、聚乙烯亚胺(分子量为600)均为分析纯试剂, VH G-21磨损元素标油(Fe, 1 000 μg/g)购于英国LGC公司, 硅胶细砂购于青岛硕远硅胶科技有限公司, 白油购于广州穗欣化工有限公司、溶剂油购于广东文天环保清洗液科技有限公司。主要测试仪器包括石油产品运动黏度测定仪、石油产品微量水分测定仪、安捷伦240FS AA火焰原子吸收光谱仪。

表1 齿轮油样品基本性质以及换油指标
Tab.1 Basic properties of gear oil samples and the oil change indicators

性质	壳牌 OMALA S2G 新油 (320号)	风电机组运行油 1 (220号)	风电机组运行油 2 (320号)	NB/SH/T 0586—2010L-CKD
40 °C运动黏度/(mm ² ·s ⁻¹)	323.62	229.78	325.16	变化率>15%
20 °C油密度/(g·cm ⁻³)	0.879 9	0.874 3	0.873 8	
水分/(mg·L ⁻¹)	55.9(0.006%)	182.2(0.02%)	119.5(0.013%)	>0.5%
酸值/(mgKOH·g ⁻¹)	0.384 9	0.383 2	0.666 4	酸值增加>1
Fe ³⁺ 质量分数/(μg·g ⁻¹)	<5.0	17.3	93.1	>200.0
Cu ²⁺ 质量分数/(μg·g ⁻¹)	<5	<5	<5	

1.2 实验部分

1.2.1 改性材料的制备

通过在硅胶(SG)表面修饰聚乙烯亚胺(PEI)合成吸附剂(SG-PEI)。硅胶使用前进行酸洗活化除杂^[14], 称取一定活化后的硅胶, 加入30 mL 5%的PEI-甲醇溶液, 室温下浸渍搅拌24 h, 用去离子水、甲醇洗涤后, 放入60 °C烘箱干燥过夜, 得到SG-PEI吸附剂。

1.2.2 改性材料的表征测试

改性材料XRD测试在Bruker D8 ADVANCE多晶衍射仪上进行。N₂吸脱附测试在Micromeritics

ASAP 2460全自动比表面与孔径分析仪上进行, 材料测试前要在150 °C真空脱气12 h, 采用BET方程和BJH模型计算材料比表面积、孔容和平均孔径。在Thermo Nicolet IS50红外光谱仪上进行FTIR测试。SEM/EDS测试在HITACH SU8600超高分辨场发射扫描电子显微镜上进行, 加速电压15 kV。

1.2.3 Fe³⁺吸附实验

由于齿轮油体系复杂, 为了消除各类添加剂对实验的干扰, 更好地分析材料的吸附行为, 本实验通过白油添加VH G-21磨损标油配制模拟油进行吸附实验。配置Fe³⁺初始质量分数为100 μg/g的模拟

油, 加入一定量的 SG-PEI, 在室温和不同温度下, 分别以 5、10、20、40、60 min 及 2、5、10、24 h 作为取样时间点, 完成吸附动力学与热力学测试。配置不同 Fe³⁺初始质量分数 (70、120、180、260、290、380 μg/g) 的模拟油, 加入一定量的 SG-PEI, 吸附平衡后静置取上清油样过滤测定 Fe³⁺质量分数, 完成等温吸附实验。

1.2.4 运行油样品吸附对比实验

选用风电机组运行油 2 (ULO2) 进行吸附材料筛选实验。具体操作为: ULO2 自然沉降 24 h 后, 取 50 g 上清油样, 与 1.5 g SG-PEI 混合, 在 60 °C 下恒温搅拌 120 min, 静置分层, 取上清液油样过滤后进行分析。油样黏度通过石油产品运动黏度测定仪测试, 水分通过石油产品微量水分测定仪测试, 酸值按照 GB/T 264 标准进行测试, Fe³⁺含量按照 SH/T 0077—1991 标准进行测试。

2 结果与讨论

2.1 新油及运行油样品分析

油样基本性质与《工业闭式齿轮油换油指标》(NB/SH/T 0586—2010) 标准见表 1。从表 1 可以看出, 2 种运行油运动黏度与密度未发生明显降低, 说明其油膜强度、接触面隔离能力并未损失较多^[7], 水分、酸值与 Fe³⁺质量分数均有不同程度增加。值得注意的是, 运行油 2 的 Fe³⁺质量分数为 93.1 μg/g, 相比其他性质更接近换油指标。

新油与 2 种风电机组运行油的红外光谱如图 1 所示。2 958~2 854 cm⁻¹ 代表 CH₃ 和 CH₂ 的伸缩振动, 1 463、1 377 cm⁻¹ 是 CH₃ 和 CH₂ 的变形振动。2 种运行油在 1 734 cm⁻¹ 附近出现了强的 C=O 吸收峰^[15], 在 1 162 cm⁻¹ 处出现了 C-O 吸收峰^[16], 说明运行油中产生了一定量的酸、醛、酮等氧化产物^[11,17-18]。

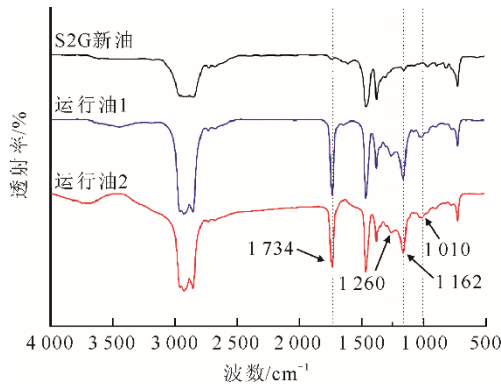


图 1 新油及运行油样红外光谱
Fig.1 FT-IR spectrum of the fresh oil and operating oil samples

2.2 改性硅胶的表征

2.2.1 比表面及孔径分析

77 K 下 N₂ 在 PEI 改性 SG 前后材料上的吸脱附曲线如图 2 所示。由图 2 可见, N₂ 在 SG 与 SG-PEI 上的吸脱附曲线均属于介孔材料特有的 IV 型等温线^[19], 存在明显 H₂ 型回滞环, 其孔径参数列于表 2。由表 2 可知, SG 与 SG-PEI 的 BET 比表面积为 312.576 m²/g 和 262.523 m²/g, 改性后材料的孔径、孔径等均略有下降, 这可能是由于材料吸附了 PEI 使得表面官能团增加^[20], 部分孔道被 PEI 占据所致。

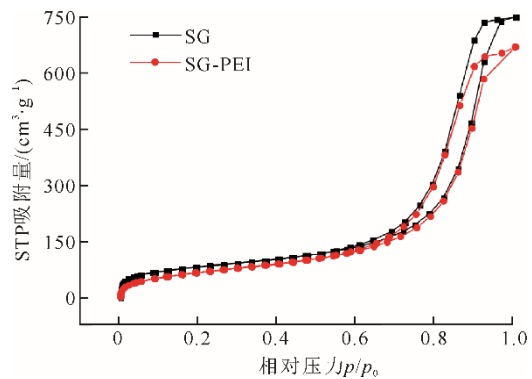


图 2 N₂ 在 SG 与 SG-PEI 上的吸脱附曲线 (77 K)
Fig.2 The adsorption-desorption curves of N₂ by SG and SG-PEI at 77 K

表 2 SG 与 SG-PEI 的孔隙参数
Tab.2 Pore parameters of SG and SG-PEI

材料	BET 比表面积/ (m ² ·g ⁻¹)	总孔容/ (cm ³ ·g ⁻¹)	平均孔径/nm
SG	312.576	1.158	11.002
SG-PEI	262.523	1.024	10.318

图 3 为 SG 与 SG-PEI 的孔径分布。由图 3 可以看出, PEI 改性前后材料均以 5~20 nm 介孔为主, 利于吸附扩散。

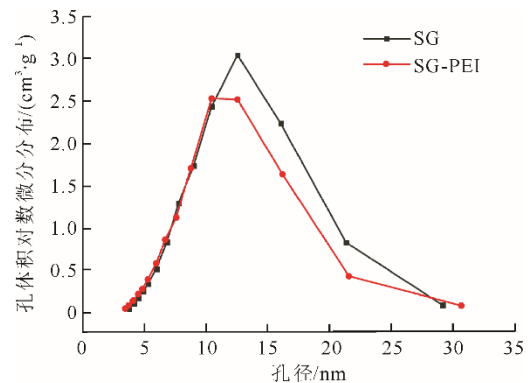


图 3 SG 与 SG-PEI 的孔径分布
Fig.3 Pore size distributions of SG and SG-PEI

2.2.2 FTIR 表征

SG 与 SG-PEI 材料的 FTIR 光谱如图 4 所示。其中, 波数 3 454、1 639 cm^{-1} 处的峰对应于样品中的 O-H 振动, 1 100 cm^{-1} 处的大包峰对应于 Si-O-Si 的拉伸振动^[19,21], 804、484 cm^{-1} 处的峰对应于硅胶中 Si-O-Si 的弯曲振动^[22]。对于改性后的材料, 3 454 cm^{-1} 处的峰宽、峰高均有减小, 可能是硅胶表面-OH 基团参与反应^[23]。改性后的材料出现了许多 PEI 的特征峰: 2 855 cm^{-1} 处的峰归因于 C-H 键的振动, 1 540 cm^{-1} 处的峰归因于 N-H 的弯曲振动^[24], 1 470 cm^{-1} 处的峰归因于 C-N 键的伸缩振动^[19]。这说明浸渍改性后 PEI 成功涂覆在硅胶材料表面。

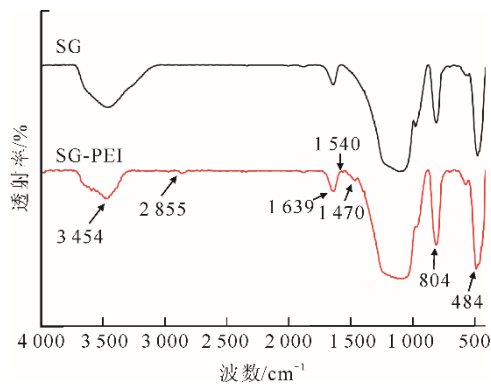


图 4 SG 与 SG-PEI 的 FTIR 谱图
Fig.4 FTIR spectrum of SG and SG-PEI

2.2.3 XRD 表征

SG 与 SG-PEI 材料 XRD 谱图如图 5 所示。硅胶为无定形材料, 衍射峰强度均较低, 且衍射峰位置接近, 无新增特征峰出现。

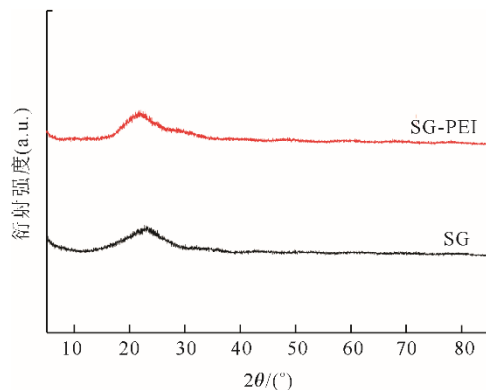
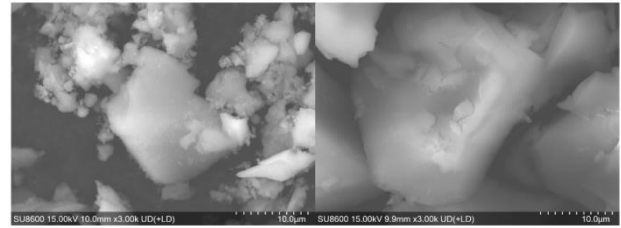


图 5 SG 与 SG-PEI 的 XRD 谱图
Fig.5 XRD patterns of SG and SG-PEI

2.2.4 SEM/EDS 表征

使用扫描电子显微镜观察改性前后材料的表面形貌和元素分布情况, 结果如图 6 所示。材料改

性前后并未出现典型外观, 均为不规则结构。



a) SG b) SG-PEI

图 6 SG 与 SG-PEI 扫描电镜图
Fig.6 SEM images of SG and SG-PEI

EDS mapping 元素含量测试结果见表 3。改性前 SG 样品 N 元素质量分数为 0, 改性后 SG-PEI 样品中的 C 与 N 元素质量分数均有上升, 证明了 PEI 的有效负载。

表 3 C、N、O、Si 元素质量分数 单位: %
Tab.3 Mass fractions of element C, N, O and Si

材料	元素质量分数			
	C	N	O	Si
SG	7.67	0	50.34	41.99
SG-PEI	16.68	1.58	47.26	34.48

2.3 改性硅胶吸附油中 Fe^{3+} 的动力学分析

图 7 为 SG 与 SG-PEI 的 q_t - t 曲线。由图 7 中可以看出: SG 吸附 Fe^{3+} 的吸附速率缓慢上升, 5 h 后吸附基本平衡; SG-PEI 在初始阶段吸附速率极快, 1 h 后吸附速率放缓, 同样在 5 h 左右基本达到平衡; SG-PEI 对 Fe^{3+} 吸附量 (17.54 mg/g) 显著高于 SG (10.28 mg/g)。

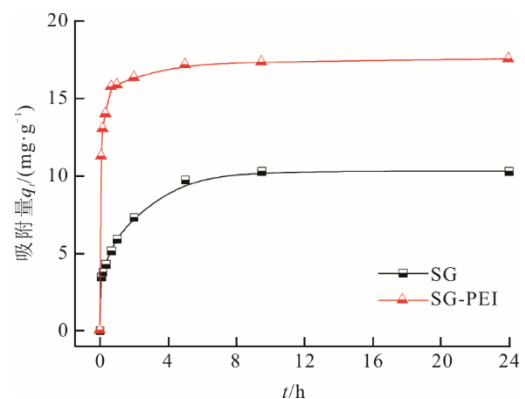


图 7 SG 与 SG-PEI 的 q_t - t 曲线
Fig.7 q_t - t curves of SG and SG-PEI

采用拟一级动力学模型、拟二级动力学模型对 SG 与 SG-PEI 吸附油中 Fe^{3+} 的动力学过程进行拟合分析。所采用的动力学方程如下。

拟一级动力学模型:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (1)$$

拟二级动力学模型:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{q_e} \cdot t + \frac{1}{k_2 q_e^2} \quad (2)$$

式中: q_e 为平衡吸附量, mg/g; q_t 为时间 t 时的吸附量, mg/g; t 为吸附时间, h; k_1 为拟一级吸附速率常数, h⁻¹; k_2 为拟二级吸附速率常数, g/(mg·h)。

拟一级动力学模型和拟二级动力学模型, 拟合参数结果见表 4。拟合结果显示: SG 与 SG-PEI 拟二级动力学模型计算得到的平衡吸附量更接近实验值, 而拟一级动力学模型计算平衡吸附量远低于实验值; 另外, SG-PEI 拟二级动力学模型得到的相关系数 R^2 为 0.999 97。因此, 拟二级动力学模型能更好地解释其吸附行为, 进一步说明了吸附过程由化学吸附主导^[25], 存在化学键的断裂和产生, 可能是 N、O 等原子与 Fe³⁺配位的过程。

表 4 动力学模型拟合参数
Tab.4 Fitting parameters of the kinetics models

材料	拟一级动力学模型			拟二级动力学模型		
	q_e' (mg·g ⁻¹)	k_1 /h ⁻¹	R^2	q_e' (mg·g ⁻¹)	k_2' (g·mg ⁻¹ ·h ⁻¹)	R^2
SG	7.244	0.503 9	0.996 0	10.480	0.177 8	0.998 99
SG-PEI	3.338	0.334 6	0.840 3	17.593	0.588 5	0.999 97

2.4 改性硅胶吸附油中 Fe³⁺的热力学分析

图 8 为 308、318、328 K 下吸附材料的 q_t - t 曲线。由图 8 可见, SG-PEI 对 Fe³⁺的吸附量随温度升高略有减小, 说明吸附过程可能是放热反应。为了更好分析吸附过程与温度的关系, 通过式(3)一式(5)对测试结果进行拟合分析, 拟合结果见表 5。

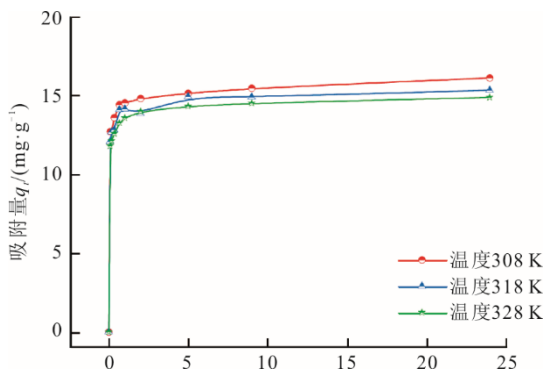


图 8 不同温度下 q_t - t 曲线
Fig.8 q_t - t curves at different temperatures

$$\ln K_0 = \frac{\Delta S_0}{R} - \frac{\Delta H_0}{RT} \quad (3)$$

$$\Delta G_0 = \Delta H_0 - T\Delta S_0 \quad (4)$$

$$\ln k_2 = \ln A - \frac{E_a}{RT} \quad (5)$$

式中: K_0 为无因次热力学平衡常数; ΔS_0 为标准熵变, J/(mol·K); ΔH_0 为标准焓变, kJ/mol; ΔG_0 为吉布斯自由能变, kJ/mol; E_a 为表观活化能, kJ/mol; k_2 为速率常数, g/(mg·h); A 为常数; R 为摩尔气体常数, 8.314 J/(mol·K)。

表 5 为吸附热力学参数。由表 5 中拟合结果可知, 随着温度升高, 速率常数 k_2 值有所增加, 说明温度升高有利于提升吸附速率。反应的标准焓变 $\Delta H_0 = -14.862$ kJ/mol, 说明其为放热反应, 升高温度不利于吸附进行, 对应于图 8 曲线中吸附量的降低。反应标准熵变 $\Delta S_0 > 0$, 表明吸附过程中体系的无序度增加。在不同温度下 ΔG_0 值均小于 0, 说明吸附过程为自发过程, 并且随着温度的升高, ΔG_0 绝对值先减小后增加, 这可能是由于反应为放热反应, 温度升高抑制吸附进行, 另一方面温度升高会降低油相的黏度^[7], 固液两相接触更充分, 在一定程度上促进了吸附的进行, 因此, 该体系下吸附过程的难易程度与温度并非简单的线性关系。

表 5 吸附热力学参数
Tab.5 Adsorption thermodynamic parameters

T/K	k_2' (g·(mg·h) ⁻¹)	$\Delta G_0'$ (kJ·mol ⁻¹)	$\Delta S_0'$ (J·(mol·K) ⁻¹)	$\Delta H_0'$ (kJ·mol ⁻¹)	E_a' (kJ·mol ⁻¹)
308	0.539	-17.049			
318	0.749	-16.919	6.896	-14.862	15.884
328	0.784	-17.195			

2.5 改性硅胶对油中 Fe³⁺的吸附等温线

SG 与 SG-PEI 的吸附等温线如图 9 所示。由图 9 可知, 存在明显平台区, SG-PEI 对 Fe³⁺的饱和吸附量约为 28.71 mg/g, 而 SG 平衡吸附量约为 20.63 mg/g。SG-PEI 相比 SG 对 Fe³⁺吸附量提升了 39.2%。这是由于 PEI 中具有丰富的氨基基团(图 10), 其中的 N 原子能够提供电子, 形成空腔, 与 Fe³⁺配位络合形成螯合环, 从而有效吸附 Fe³⁺^[19,25-26]。

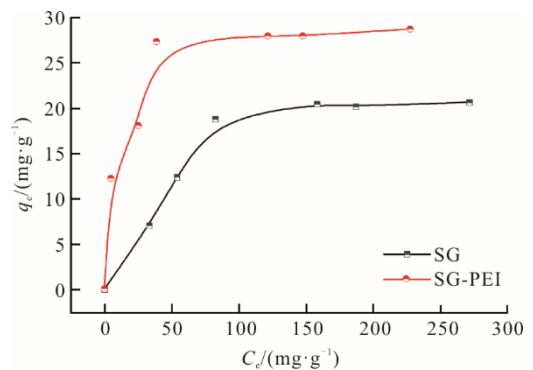


图 9 SG 与 SG-PEI 对模拟油 Fe³⁺的吸附等温线
Fig.9 Adsorption isotherms of Fe³⁺ on SG and SG-PEI

- CUI Yang, LI Yuanhong. Development and application of wind turbine special lubricant: transmission gear oil[J]. *Lubricating Oil*, 2020, 35(3): 32-36.
- [6] SHARMA K, SHAH G, SINGHAL K, et al. Comprehensive insights into the impact of oil pollution on the environment[J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2024, 74: 103516.
- [7] 王圆, 梁培沛. 粘度对风电用齿轮油润滑性能的影响[C]//中国农业机械工业协会风能设备分会. 第二届中国风电后市场专题研讨会论文集. 2015: 155-160.
WANG Yuan, LIANG Peipei. The influence of viscosity on the lubrication performance of gear oil for wind power[C]//Wind Energy Equipment Branch of China Agricultural Machinery Industry Association. Proceedings of the 2nd China Wind Power Aftermarket Symposium. 2015: 155-160.
- [8] 陈凌, 曾亚, 张贤明, 等. 高炉钛渣对废润滑油的吸附性能[J]. *材料科学与工程学报*, 2017, 35(3): 413-418.
CHEN Ling, ZENG Ya, ZHANG Xianming, et al. Adsorption performance of Ti-bearing blast furnace slag for waste lubricating oil[J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2017, 35(3): 413-418.
- [9] 刘国清, 曾坚贤, 李友凤, 等. 氨基功能化 SBA-15 接触精制废润滑油[J]. *现代化工*, 2016, 36(2): 59-62.
LIU Guoqing, ZENG Jianxian, LI Youfeng, et al. Contact treating process of waste lubricating oil with amine functionalized SBA-15[J]. *Modern Chemical Industry*, 2016, 36(2): 59-62.
- [10] 刘国清, 王红丽, 李友凤, 等. 硅胶接触精制废润滑油[J]. *石油学报(石油加工)*, 2015, 31(6): 1425-1429.
LIU Guoqing, WANG Hongli, LI Youfeng, et al. Contact treatment of waste lubricating oil with silica gel[J]. *Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section)*, 2015, 31(6): 1425-1429.
- [11] MAJANO G, MINTOVA S. Mineral oil regeneration using selective molecular sieves as sorbents[J]. *Chemosphere*, 2010, 78(5): 591-598.
- [12] AL-GHOUTI M A, AL-DEGS Y S. New adsorbents based on microemulsion modified diatomite and activated carbon for removing organic and inorganic pollutants from waste lubricants[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2011, 173(1): 115-128.
- [13] 徐茹婷, 赵剑, 孙康, 等. 活性炭对润滑油中磨损元素吸附性能的研究[J]. *林产化学与工业*, 2022, 42(4): 25-32.
XU Ruting, ZHAO Jian, SUN Kang, et al. The adsorption performance of wear elements in lubricant by activated carbon[J]. *Chemistry and Industry of Forest Products*, 2022, 42(4): 25-32.
- [14] REPO E, KURNIAWAN T A, WARCHOL J K, et al. Removal of Co(II) and Ni(II) ions from contaminated water using silica gel functionalized with EDTA and/or DTPA as chelating agents[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 171(1): 1071-1080.
- [15] PINHEIRO C T, PAIS R F, QUINA M J, et al. Regeneration of waste lubricant oil with distinct properties by extraction-flocculation using green solvents[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 200: 578-587.
- [16] ZIĘBA-PALUS J, KOŚCIELNIAK P, ŁĄCKI M. Differentiation of used motor oils on the basis of their IR spectra with application of cluster analysis[J]. *Journal of Molecular Structure*, 2001, 596(1): 221-228.
- [17] 程治升, 费逸伟, 胡建强, 等. 聚 α -烯烃润滑油基础油热氧化安定性试验研究[J]. *石油炼制与化工*, 2013, 44(12): 91-94.
CHENG Zhisheng, FEI Yiwei, HU Jianqiang, et al. Experimental study on thermal oxidative stability of polyalphaolefin lubricant base oils[J]. *Petroleum Processing and Petrochemicals*, 2013, 44(12): 91-94.
- [18] TAN K H, CHAM H Y, AWALA H, et al. Effect of extra-framework cations of LTL nanozeolites to inhibit oil oxidation[J]. *Nanoscale Research Letters*, 2015, 10(1): 253.
- [19] LU J, WU X, LI Y, et al. Modified silica gel surface with chelating ligand for effective mercury ions adsorption[J]. *Surfaces and Interfaces*, 2018, 12: 108-115.
- [20] AMIEL C, SEBILLE B. FTIR study of copolymer adsorption on silica[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1992, 149(2): 481-492.
- [21] TIAN Y, YIN P, QU R, et al. Removal of transition metal ions from aqueous solutions by adsorption using a novel hybrid material silica gel chemically modified by triethylenetetraminomethylenephosphonic acid[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2010, 162(2): 573-579.
- [22] TIAN B, LIU X, YU C, et al. Microwave assisted template removal of siliceous porous materials[J]. *Chemical Communications*, 2002, 2(11): 1186-1187.
- [23] SOSA N, CHANLEK N, WITTAYAKUN J. Facile ultrasound-assisted grafting of silica gel by aminopropyltriethoxysilane for aldol condensation of furfural and acetone[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2020, 62: 104857.
- [24] QU R, NIU Y, SUN C, et al. Syntheses, characterization, and adsorption properties for metal ions of silica-gel functionalized by ester- and amino-terminated dendrimer-like polyamidoamine polymer[J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2006, 97(1): 58-65.
- [25] METWALLY S S, AYOUB R R. Modification of natural bentonite using a chelating agent for sorption of ⁶⁰Co radionuclide from aqueous solution[J]. *Applied Clay Science*, 2016, 126: 33-40.
- [26] SHIRAISHI Y, NISHIMURA G, HIRAI T, et al. Separation of transition metals using inorganic adsorbents modified with chelating ligands[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2002, 41(20): 5065-5070.

(责任编辑 杨嘉蕾)