磺化柚子皮吸附剂对硫酸溶液中铁的吸附与分离机制研究

王　昕

(矿冶科技集团有限公司,北京　100160)

摘要:研究了采用低温磺化法改性柚子皮制备磺酸基功能化生物炭(PPBC),并用于吸附高浓度硫酸溶液中铁离子。考察了吸附时间、温度、搅拌转速、铁离子初始质量浓度及酸度对 PPBC 吸附性能的影响,探讨了吸附与分离机制及循环再生性能。结果表明:在硫酸浓度 0.1 mol/L、温度 55 ℃、搅拌转速 200 r/min、铁离子初始质量浓度 1 000 mg/L、吸附时间 120 min 优化条件下,PPBC 对铁离子的吸附率达98.2%,吸附容量为 98.2 mg/g;在铁离子初始质量浓度为 5 000 mg/L 时,PPBC 对铁离子的吸附容量达最大值 324.6 mg/g;吸附行为符合 Langmuir 等温吸附模型和准二级动力学模型,属于单分子层化学吸附;经过 5 次吸附-解吸循环后,PPBC再生率仍保持 87.8%。PPBC 具有良好的结构稳定性与重复使用性,可为高酸高铁废水的治理及农业废弃物高值化利用提供技术参考。

关键词:磺化柚子皮;低温磺化法;改性;生物炭;吸附剂;硫酸溶液;吸附;铁

中图分类号:TF803.2;TQ424　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1009-2617(2026)01-0097-07

DOI:10.13355/j.cnki.sfyj.2026.01.014

在冶金、电镀及矿山开采过程中会产生高浓度含铁酸性废水,这类废水不仅酸度高,铁离子浓度也很高,如处理不当会对生态系统和人体健康构成严重威胁[1]。因此,开发高效、经济且环境友好的铁离子去除与回收技术,对实现该类废水资源化具有重要意义。

目前,处理含铁酸性废水的主要方法包括化学沉淀法、离子交换法、电解法和膜分离法等[2-5]。这些方法普遍存在处理成本高、易产生二次污染、操作复杂或在高酸条件下适应性差等缺点[6-7]。而吸附法因其操作简便、成本低、效率高及吸附剂可再生等优点,近年来受到广泛关注[8-9]。特别是以农业废弃物为原料制备的生物质吸附剂,如秸秆、果壳、木屑等,具有来源广泛、价格低廉、绿色可再生等特性,逐渐成为了研究重点[10-11]。其中,柑橘类果皮(如柚子皮)因含有丰富的纤维素、半纤维素和木质素,以及大量羟基、羧基等活性官能团,对金属离子吸附性能在众多生物质吸附材料中表现更佳[12]。为进一步提高生物质吸附性能和结构稳定性,可通过磺化、氧化等方法对其进行改性[13-15]。目前,有关磺化改性生物质材料吸附重金属的研究多集中在中性或弱酸性体系(酸浓度为 0.01 mol/L 左右),而在高浓度硫酸体系中针对铁离子的吸附,目前仅侧重于单一吸附条件的优化方面,而对于吸附动力学、热力学、离子竞争效应,以及吸附剂的循环再生性能的系统研究尚显不足[16-18]。

试验研究了采用低温磺化法改性废弃柚子皮制备磺酸基功能化生物炭(PPBC)。考察了各因素对 PPBC 吸附铁的影响,采用 Langmuir、Freundlich 等温吸附模型及准一级、准二级动力学模型深入探讨了吸附行为的热力学特征与动力学过程,并分析了 PPBC 的循环再生性能,以期为高酸高铁废水治理提供一种低成本、高效率的吸附剂材料。

1　试验部分

1.1　试验原料及试剂

柚子皮,洗净、烘干,破碎至 0.5 ～ 1.0 cm;

收稿日期:2025-08-23;**修订日期**:2025-09-08

基金项目:2024 年度矿冶科技集团有限公司青年科技创新基金项目(042359)。

作者简介:王昕(1994—),男,博士,工程师,主要研究方向为工业废水处理。

硫酸铁溶液模拟液(0.1 mol/L 硫酸,铁离子质量浓度为 1 000 mg/L),Fe^{3+}、SO_4^{2-} 质量浓度分别为1 000、12 186 mg/L,pH=0.75。

试剂:浓硫酸,98%,阿拉丁试剂;硫酸铁,≥98.5%,国药集团。

1.2 试验方法

1.2.1 吸附剂的制备方法及原理

采用低温磺化法制备磺化柚子皮吸附剂。首先,将柚子皮碎片与 92%~98%的浓硫酸按固液质量体积比 1∶10 混合,置于 40 ℃恒温水浴中搅拌反应 3 h;之后用去离子水反复洗涤反应产物,直至滤液呈中性,以彻底去除游离酸;最后,将反应固体产物于 60 ℃下干燥至恒重,研磨后过 100 目筛,所得产品即为磺化柚子皮吸附剂,储存于干燥器中,备用。

磺化柚子皮吸附剂的制备是基于浓硫酸对生物质组分的多重反应。其主要反应为亲电磺化反应:浓硫酸首先生成活性磺化剂三氧化硫(SO_3),随后 SO_3 作为亲电试剂进攻柚子皮木质素芳香环上的富电子位点,通过亲电取代反应将磺酸基团(—SO_3H)共价接枝到生物质骨架上。同时,浓硫酸还可与纤维素、半纤维素上的羟基发生酯化反应,引入硫酸酯基(—OSO_3H)。严格控制反应温度为 40 ℃,目的是在促进这些磺化/酯化反应的同时,最大限度地抑制生物质的脱水碳化副反应,从而保留原料本身丰富的羟基、羧基等天然含氧官能团。反应所得最终产物的表面不仅富含强酸性的磺酸基和硫酸酯基,还保留了羟基、羧基等官能团,这种多官能团之间的协同作用为其在极端酸性环境中实现高效的阳离子交换和配位吸附创造了有利条件。主要反应方程式如下:

活性磺化剂 SO_3 的生成:

$$2H_2SO_4 \rightleftharpoons SO_3 + H_3O^+ + HSO_4^- \quad (1)$$

SO_3 与生物质芳香环结构的磺化反应,其中 Ar—H 代表柚子皮中的木质素单元:

$$Ar—H + SO_3 \longrightarrow Ar—SO_3H \quad (2)$$

纤维素或半纤维素链与硫酸反应,其中 R—OH 代表纤维素或半纤维素链,R—OSO_3H 代表硫酸酯基团:

$$R—OH + H_2SO_4 \rightleftharpoons R—OSO_3H + H_2O \quad (3)$$

1.2.2 PPBC 吸附铁离子

首先采用硫酸和硫酸铁配制具有一定酸度的硫酸铁模拟溶液,取一定量 PPBC 加入到 50 mL 模拟溶液中,在一定温度和搅拌转速下搅拌吸附一定时间,之后过滤,用 ICP-OES 测定铁浓度。PPBC 对铁的吸附容量和吸附率根据式(4)、(5)计算。

$$q_t = \frac{(\rho_0 - \rho_t)V}{m} \quad (4)$$

$$r = \frac{\rho_0 - \rho_t}{\rho_0} \times 100\% \quad (5)$$

式中:q_t—吸附 t 时间时铁吸附容量,mg/g;ρ_0—溶液中初始铁质量浓度,mg/L;ρ_t—吸附 t 时间时溶液中铁质量浓度,mg/L;V—溶液体积,L;m—PPBC 加入量,g;r—铁吸附率,%。

1.2.3 吸附等温线

采用硫酸和硫酸铁配制铁离子质量浓度分别为 500、1 000、1 500、2 000、2 500、3 000、4 000、5 000 mg/L且酸浓度为 0.1mol/L 的硫酸铁溶液 0.5 L。将上述溶液分别置于烧杯中,分别加入 5 g PPBC,再分别在 45、55、65 ℃、搅拌转速 200 r/min条件下搅拌反应 120 min。过滤后测定溶液中铁质量浓度,并采用 Langmuir 和 Freundlich 等温吸附模型对试验数据进行拟合。

$$\frac{\rho_e}{q_e} = \frac{\rho_e}{q_m} + \frac{1}{k_L q_m} \quad (6)$$

$$\ln q_e = \ln k_F + \frac{1}{n}\ln \rho_e \quad (7)$$

式中:ρ_e—吸附平衡时的铁质量浓度,mg/L;q_e—吸附平衡时铁吸附容量,mg/g;q_m—最大吸附容量,mg/g;k_L—Langmuir 等温吸附平衡常数,L/mg;k_F—Freundlich 等温吸附平衡常数,$mg^{1-1/n} \cdot L^{1/n} \cdot g^{-1}$。

1.2.4 吸附动力学

采用硫酸和硫酸铁配制铁离子质量浓度 1 000 mg/L、酸浓度为 0.1 mol/L 的硫酸铁溶液 0.5 L 并置于烧杯中,之后加入 5 g PPBC。在温度 55 ℃、搅拌转速 200 r/min 下反应,并分别在反应 10、30、60、90、120、150、180、210 min 时取样过滤,测定其中铁浓度。再分别用准一级动力学模型(式(8))和准二级动力学模型(式(9))对试验数据进行线性拟合计算。

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (8)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (9)$$

式中:t—吸附时间,min;k_1—准一级动力学反应速率常数,min^{-1}、k_2—准二级动力学反应速率常数,g/(mg·min)。

2　试验结果与讨论

2.1　吸附条件的优化

2.1.1　温度对吸附的影响

在 PPBC 加入量 5 g、铁离子初始质量浓度 2 000 mg/L、硫酸初始浓度 0.05 mol/L、吸附时间 90 min、搅拌转速 300 r/min 条件下，考察温度对铁吸附率及吸附容量的影响，结果如图 1 所示。

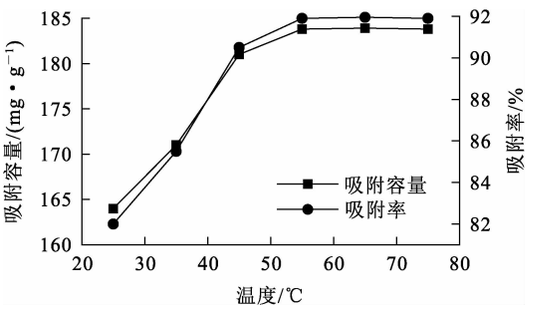


图 1　温度对铁吸附率及吸附容量的影响

Fig. 1　Effect of temperature on iron adsorption rate and adsorption capacity

从图 1 看出：温度在 25～55 ℃范围内，吸附性能随温度升高而增强，吸附率与吸附容量均显著提升，并在 55 ℃时达最大值，这表明吸附过程为吸热反应，升温不仅能促进 Fe(Ⅲ)离子的扩散速率，更能为离子交换反应提供能量；当温度超过 55 ℃后，吸附性能趋于稳定，表明吸附剂已达到其最大吸附容量，且材料结构在 55～80 ℃范围内较稳定，未发生活性位点失活。综合考虑成本等因素，确定温度以 55 ℃为宜。

2.1.2　搅拌转速对吸附的影响

在 PPBC 加入量 5 g、铁离子初始质量浓度 2 000 mg/L、硫酸初始浓度 0.05 mol/L、吸附时间 90 min、温度 55 ℃条件下，考察搅拌转速对铁吸附率及吸附容量的影响，结果如图 2 所示。可以看出：当搅拌转速从 50 r/min 增至 200 r/min 时，吸附性能显著提升，吸附率与吸附容量均显著提升，并在搅拌转速增至 200 r/min 时性能达最优，这是因为溶液混合程度加剧能增强吸附剂颗粒与 Fe(Ⅲ)离子的接触频率，同时促进离子向吸附剂表面的传质，进而有利于吸附进行；继续增大搅拌转速至 400 r/min，吸附率与吸附容量均略有下降，表明此时吸附过程可能不再受外部传质控制，而是由其他速率限制步骤决定，过高搅拌转速产生的流体剪切作用反而可能导致已吸附离子的产生脱附效应。综合考虑，确定搅拌转速以 200 r/min为宜。

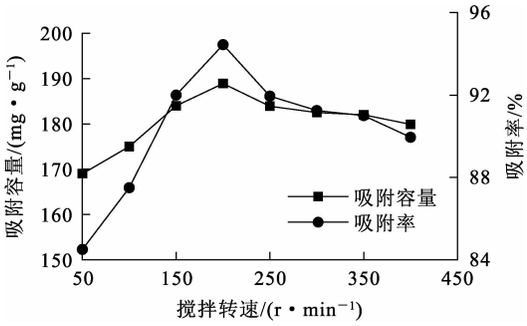


图 2　搅拌转速对铁吸附率及吸附容量的影响

Fig. 2　Effect of stirring speed on iron adsorption rate and adsorption capacity

2.1.3　铁离子初始质量浓度对吸附的影响

在 PPBC 加入量 5 g、硫酸浓度 0.05 mol/L、吸附时间 90 min、温度 55 ℃、搅拌转速 200 r/min 条件下，考察铁离子初始质量浓度对铁吸附率及吸附容量的影响，结果如图 3 所示。

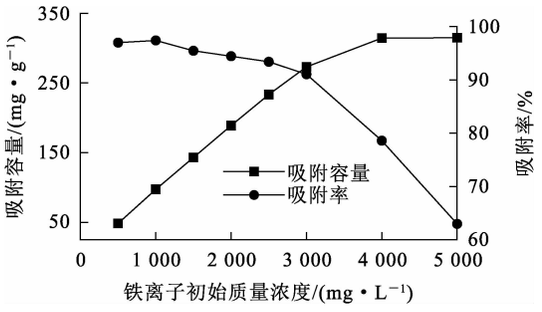


图 3　铁离子初始质量浓度对铁吸附率及吸附容量的影响

Fig. 3　Effect of initial mass concentration of iron ions on iron adsorption rate and adsorption capacity

从图 3 看出，铁离子初始质量浓度从 500 mg/L增至 5 000 mg/L 的过程中，吸附容量升高，吸附率下降。这主要是由吸附剂的有限活性位点与传质推动力共同决定：铁离子初始质量浓度较低时(≤1 000 mg/L)，吸附剂表面丰富的活性位点相对于铁离子过量，能够高效捕获大部分铁离子，故吸附率较高，但有限的位点总量限制了绝对吸附量，导致吸附容量较低；铁离子初始质量浓度较高时(>1 000 mg/L)，极大的浓度梯度提供更强的传质推动力，驱使更多铁离子向活性

位点扩散并发生吸附，使吸附容量持续增大，但吸附剂位点总量恒定，最终逐渐趋于饱和，无法按比例去除更高浓度的铁离子，因此吸附率呈现下降趋势。这一规律符合典型吸附等温线的特征，表明吸附过程受活性位点可用性的制约。综合考虑，确定选取最佳的铁离子初始质量浓度为 1 000 mg/L。

2.1.4 硫酸浓度对吸附的影响

在 PPBC 加入量 5 g、铁离子初始质量浓度 1 000 mg/L、吸附时间 90 min、温度 55 ℃、搅拌转速 200 r/min 条件下，考察初始硫酸浓度对铁吸附率及吸附容量的影响，结果如图 4 所示。

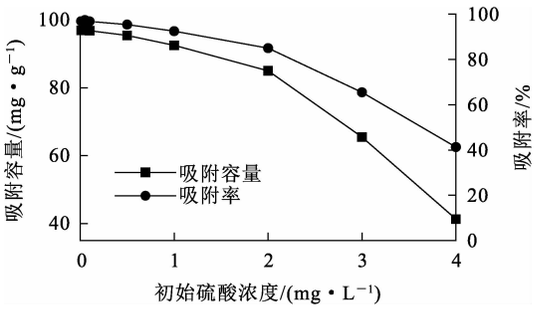


图 4 初始硫酸浓度对铁吸附率及吸附容量的影响

Fig. 4 Effect of sulfuric acid initial mass concentration on iron adsorption rate and adsorption capacity

从图 4 看出，硫酸浓度在 0.05～0.5 mol/L 范围内，吸附容量与吸附率均较为稳定，表明磺酸基团(—SO_3H)在此酸度区间内保持完全电离状态，其与 Fe^{3+} 的离子交换能力受 H^+ 竞争效应的影响较小，说明该吸附剂对中低浓度酸具有良好的耐受性；硫酸浓度从 0.5 mol/L 增至 4 mol/L 时，溶液中 H^+ 浓度急剧升高，通过离子交换平衡的逆反应方向强烈抑制吸附反应(式(10))，同时超高离子强度产生的盐效应进一步削弱传质效率，共同导致吸附容量与吸附率的显著下降。综合考虑，选取最佳硫酸浓度为 0.1 mol/L。

$$3H^+ + (\equiv R—SO_3)_3Fe \rightleftharpoons 3(\equiv R—SO_3H) + Fe^{3+} \quad (10)$$

2.1.5 吸附时间对吸附的影响

在 PPBC 加入量 5 g、铁离子初始质量浓度 1 000 mg/L、硫酸浓度 0.1 mol/L、温度 55 ℃、搅拌转速 200 r/min 条件下，考察吸附时间对铁吸附率及吸附容量的影响，结果如图 5 所示。可以看出：吸附时间在 10～120 min 范围内，吸附容量与吸附率随吸附时间延长显著升高，这是该阶段 Fe(Ⅲ)离子在浓度梯度驱动下会快速向吸附剂表面及孔隙内的活性位点扩散，并发生结合反应所致；吸附时间延长至 120 min 时，吸附过程达到动态平衡，此时吸附剂表面的活性位点已达到饱和状态，吸附速率与解吸速率相等；继续延长吸附时间至 210 min，吸附容量与吸附率均维持稳定，表明该吸附剂具有良好的稳定性，未发生明显解吸或结构变化，且吸附容量趋于最大值。综合考虑，确定 120 min 为吸附体系达到平衡的最优时间。

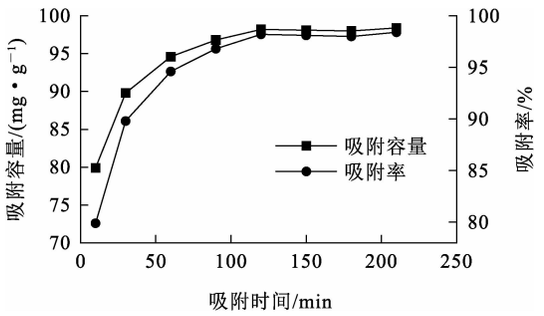


图 5 吸附时间对铁吸附率及吸附容量的影响

Fig. 5 Effect of adsorption time on iron adsorption rate and adsorption capacity

综上可知，最优吸附条件为：PPBC 加入量 5 g，铁离子初始质量浓度 1 000 mg/L，硫酸浓度 0.1 mol/L，温度 55 ℃，搅拌转速 200 r/min，吸附时间 120 min。在该条件下，铁吸附率达 98.2%，吸附容量为98.2 mg/g。铁离子初始质量浓度为5 000 mg/L时，PPBC 对铁的最大吸附容量为324.6 mg/g。

2.2 吸附等温线

为深入探究 PPBC 表面性质及其与铁离子的相互作用机制，采用 Langmuir 和 Freundlich 等温吸附模型分别对吸附平衡数据进行拟合分析，结果如图 6、表 1 所示。可以看出：Langmuir 等温吸附模型在不同高温度下的拟合相关系数(R^2)均为0.99，明显高于 Freundlich 等温吸附模型，说明该吸附过程更适合用 Langmuir 等温吸附模型描述，即 PPBC 对 Fe^{3+} 的吸附以单分子层吸附为主，吸附剂表面的活性位点分布均匀；q_m、k_L均随温度升高而增大，表明升温可提高吸附剂对 Fe^{3+} 的吸附能力及亲和力，说明吸附过程为吸热反应；不同高温度下的 n 均大于 1，表明吸附过程易进行，且 n、k_F随温度升高而增大，进一步验证了温度升高对吸附性能的促进作用。

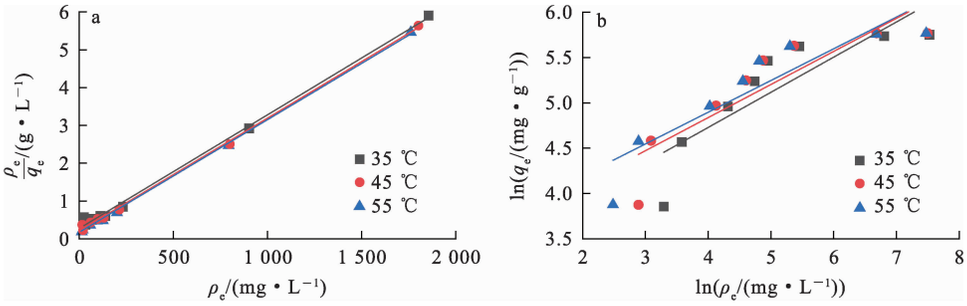


图 6　Langmuir(a)和 Freundlich(b)等温吸附模型拟合曲线

Fig. 6　Fitting curves of Langmuir (a) and Freundlich (b) adsorption isotherm model

表 1　Langmuir 和 Freundlich 等温吸附模型拟合参数

Table 1　Fitting parameters of Langmuir and Freundlich adsorption isotherm model

温度/℃	Langmuir 等温吸附模型			Freundlich 等温吸附模型		
	q_m/(mg·g^{-1})	k_L/(L·mg^{-1})	R^2	n	k_F/(mg$^{1-1/n}$·L$^{1/n}$·g^{-1})	R^2
35	333.3	0.011	0.99	2.58	24.0	0.70
45	334.5	0.015	0.99	2.74	29.3	0.75
55	335.6	0.018	0.99	2.86	33.1	0.79

2.3　吸附动力学

为探究吸附过程的速率特征、明确速率控制步骤及揭示吸附机制,采用准一级、准二级动力学模型分别对试验数据进行拟合,结果如图 7 及表 2 所示。可以看出:准二级动力学模型相关系数为 0.99,明显高于准一级动力学模型相关系数(0.90),且试验值与准二级动力学的理论平衡吸附量更接近,表明 PPBC 对 Fe^{3+} 的吸附过程更符合准二级动力学特征,说明该吸附过程主要受化学吸附控制,即吸附速率由吸附剂与 Fe^{3+} 之间的电子转移或化学键合等化学作用步骤所决定。

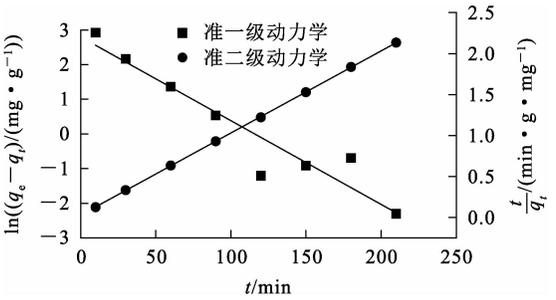


图 7　准一级动力学和准二级动力学拟合曲线

Fig. 7　Fitting curves of pseudo-first-order kinetics and pseudo-second-order kinetics

表 2　准一级动力学和准二级动力学拟合参数

Table 2　Fitting parameters of pseudo-first-order kinetics and pseudo-second-order kinetics for PPBC

$q_{e,试验}$/(mg·g^{-1})	准一级动力学			准二级动力学		
	k_1/min^{-1}	$q_{e,理论}$/(mg·g^{-1})	R^2	k_2/min^{-1}	$q_{e,理论}$/(mg·g^{-1})	R^2
98.5	0.024	16.4	0.90	0.003	100	0.99

2.4　循环再生性能

为考察 PPBC 在实际应用中的可持续性与经济性,进行了 5 次吸附-解吸循环试验。取最佳条件(硫酸浓度 0.1 mol/L、温度 55 ℃、搅拌转速 200 r/min、铁离子初始质量浓度 1 000 mg/L、吸附时间 120 min)下吸附饱和的 PPBC 5 g,过滤后用去离子水快速冲洗表面残留溶液;选用 0.5 mol/L H_2SO_4 溶液作为解吸剂,在温度 55 ℃、搅拌转速 200 r/min 条件下振荡解吸 2 h;然后用去离子水反复洗涤 PPBC 至中性,再于 60 ℃下烘干至恒重,得到再生吸附剂。将再生后的 PPBC 再用于吸附试验,重复上述吸附-解吸过程 5 次,每次测定其对铁离子的吸附容量与吸附率,以评估 PPBC 的循环使用稳定性,试验结果如图 8 所示。

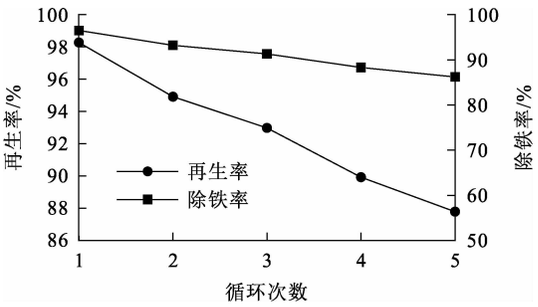


图 8 PPBC 吸附-解吸循环性能

Fig. 8 Adsorption-desorption cycle performance of PPBC

由图 8 看出：随循环次数增加，PPBC 对铁的吸附去除率呈缓慢下降趋势，但经过 5 次循环后仍保持较高的吸附性能，再生率为87.8%，除铁率为 86.2%。表明再生过程中磺酸基团稳定性较好，PPBC 具有良好的结构稳定性。综上可知，PPBC 具有良好的循环再生性能，适用于实际废水处理中的多次重复使用。

3 结论

通过低温磺化改性柚子皮制备磺酸基功能化生物炭(PPBC)并用于吸附高浓度硫酸体系中铁离子是可行的。磺化改性能显著增强生物炭在强酸环境中的化学稳定性和吸附性能，磺酸基的成功引入能为铁离子提供有效的离子交换位点。用 5 g PPBC 吸附铁离子初始质量浓度为 1 000 mg/L、硫酸浓度 0.1 mol/L 的溶液时，在温度 55 ℃、搅拌转速 200 r/min、吸附时间 120 min条件下，铁吸附率达 98.2%，吸附容量为 98.2 mg/g；其他条件不变，增加铁离子初始质量浓度至 5 000 mg/L 时，PPBC 对铁的最大吸附容量为 324.6 mg/g。PPBC 对铁的吸附行为符合 Langmuir 等温吸附模型和准二级动力学模型，吸附过程是以化学吸附为主的单分子层吸附，且吸附速率受化学键合机制控制，饱和吸附容量达 335.6 mg/g。PPBC 循环再生性能良好，具有在实际应用中重复使用的潜力。

该吸附剂以废弃生物质为原料，兼具低成本、高吸附容量和优良酸稳定性等特点，既可推动农业废弃物资源化利用，又能高效处理高酸高铁废水，具有一定应用推广价值。

参考文献：

[1] 王海北. 我国二次资源循环利用技术现状与发展趋势[J]. 有色金属(冶炼部分)，2019(9)：1-11.
WANG Haibei. Status and prospect on recycling technologies of secondary resources in China[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)，2019(9)：1-11.

[2] YANG Y Y，QIN S C，LI Q G，et al. Study on the effects of Fe/Al on the distribution and fate of rare earth elements during the mixing of acid mine drainage with karst river water[J]. Journal of Geochemical Exploration，2025，277. DOI：10. 1016/j. gexplo. 2025. 107813.

[3] HE X，TANG C L，WANG H H，et al. Chemical mineralization of AMD into schwertmannite fixing iron and sulfate ions by structure and adsorption：paving the way for enhanced mineralization capacity[J]. Bulletin of environmental contamination and toxicology，2024，112(2). DOI：10. 1007/s00128-024-03856-3.

[4] 夏栋，蒋晓云，易亚男，等. 用螯合树脂从高浓度硫酸溶液中吸附除铁试验研究[J]. 湿法冶金，2025，44(6)：766-777.
XIA Dong，JIANG Xiaoyun，YI Yanan，et al. Adsorption and removal of iron from high-concentration sulfuric acid by chelating resin [J]. Hydrometallurgy of China，2025，44(6)：766-777.

[5] GOSWAOM K M，SRIVASTAVA A. Polypyrrole-coated cobalt ferrite nano-sorbent for efficient removal of fast green dye：a kinetic and thermodynamic approach[J]. Russian Journal of Physical Chemistry：B，2025，19(2)：466-479.

[6] HUANG Y K，CHRN X L，FAN Y Y，et al. A new strategy for clean utilization of zinc oxide dust：preparation of spinel zinc ferrite by solid phase reaction and its catalytic degradation of organic wastewater[J]. Minerals Engineering，2024，214. DOI：10. 1016/j. mineng. 2024. 108781.

[7] 钱功明，蔡兴梅，孙浩钧，等. 酸性矿山废水中铁的微生物处理[J/OL]. 环境保护科学，1-15[2025-08-12]. https：//doi. org/10. 16803/j. cnki. issn. 1004-6216. 202502037.
QIAN Gongming，CAI Xingmei，SUN Haoyun，et al. Microbial treatment of iron in acid mine drainage[J/OL]. Environmental Protection Science，1-15[2025-08-12]. https：//doi. org/10. 16803/j. cnki. issn. 1004-6216. 202502037.

[8] MUDDIN A N，BADSHA M M，ARAFATH A M，et al. Magnetic chitosan nanoparticles as a potential bio-sorbent for the removal of Cr(Ⅵ) from wastewater：synthesis，environmental impact and challenges[J]. Desalination and Water Treatment，2024，319. DOI：10. 1016/j. dwt. 2024. 100449.

[9] 张伟，罗旭彪，欧阳婷，等. 吸附法去除水中典型有机络合态重金属的研究进展[J]. 工业水处理，2024，44(6)：60-68.
ZHANG Wei，LUO Xunbiao，OUYANG Ting，et al. Research progress on removing typical organic heavy metal complexes from water by adsorption[J]. Industrial Water Treatment，2024，44(6)：60-68.

[10] 张斌全，郝江辉，李新冬，等. 改性生物炭吸附稀土离子的研究进展[J]. 现代化工，2025，45(9)：39-43.
ZHANG Binquan，JIA Jianghui，LI Xindong，et al. Applica-

tion and research progress of biochar in adsorption of organic pollutants in wastewater[J]. Modern Chemical Industry,2025,45(9):39-43.

[11] GEORGIEVA V, GONSALVESH L, MILEVA S, et al. Evaluation of heavy metal adsorption efficiency of biochars derived from agricultural waste[J]. Biomass, 2025, 5(2). DOI:10.3390/BIOMASS502033.

[12] PRIYA E, JAN S, SUDIPTI S, et al. Phosphate recovery from wastewater by cellulose-based adsorbent derived from agricultural waste and its reuse as a slow-release fertilizer[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2025, 13(3). DOI:10.1016/j.jece.2025.116716.

[13] 潘显苗,阮芳涛,王赫,等.生物炭的活化改性策略及其对工业废水中污染物吸附的研究进展[J/OL].精细化工,1-15[2025-08-23]. https://doi.org/10.13550/j.jxhg.20250206.
PAN Xianmiao, RUAN Fangtao, WANG Hao, et al. Research progress on activation and modification strategy of biochar and its adsorption of pollutants in industrial wastewater[J/OL]. Fine Chemicals, 1-15[2025-08-23]. https://doi.org/10.13550/j.jxhg.20250206.

[14] TROGISCH N, DU F, ALBERT A, et al. Modelling the chemical degradation of PFSA membranes in proton exchange membrane fuel cells:effect of low relative humidity on the degradation of the sulfonic acid group[J]. Journal of The Electrochemical Society, 2025, 172(7). DOI:10.1149/1945-7111/ADE202.

[15] SAJJADI M, NASROLLAHZADEH M, GHAFURI H. Functionalized chitosan-inspired (nano) materials containing sulfonic acid groups: synthesis and application[J]. Carbohydrate Polymers, 2024, 34(3). DOI: 10.1016/J.CARBPOL.2024.122443.

[16] LI C J, ZHANG L, GAO Y, et al. Facile synthesis of nano ZnO/ZnS modified biochar by directly pyrolyzing of zinc contaminated corn stover for Pb(Ⅱ), Cu(Ⅱ) and Cr(Ⅵ) removals[J]. Waste Management, 2018, 7(9):625-637.

[17] 郑晨阳,鲁亚凡,赵俊帅,等.用于水体污染物吸附去除的生物质衍生碳研究进展[J].当代化工研究,2024(8):5-7.
ZHENG Chenyang, LU Yafan, ZHAO Junshuai, et al. Recent advances in biomass-derived carbon for adsorption removal of aquatic pollutants[J]. Modern Chemical Research, 2024(8):5-7.

[18] 马芳,黄淑萍,杜宏涛.小麦秸秆两性吸附剂的制备及其去除水中 Pb^{2+} 和 As^{5+} 的机制[J].农业工程学报,2019,35(20):210-219.
MA Fang, HUANG Shuping, DU Hongtao. Preparation of a novel amphoteric bio-adsorbent using wheat straw and mechanism for removing Pb^{2+} and As^{5+} from aqueous solutions[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(20):210-219.

Adsorption and Separation Mechanism of Iron in Sulfuric Acid Solution by Sulfonated Pomelo Peel Adsorbent

WANG Xin

(*Mining and Metallurgy Technology Group Co., Ltd., Beijing* 100160, *China*)

Abstract: Preparation of sulfonic acid-based functionalized biochar (PPBC) by modifying discarded pomelo peels through low-temperature sulfonation method and its application in adsorbing iron ions from high-concentration sulfuric acid solutions was investigated. The effects of adsorption time, temperature, stirring speed, initial mass concentration of iron ions and acidity on the adsorption performance of PPBC were examined, and the adsorption and separation mechanism as well as the recycling and regeneration performance were discussed. The results show that under the optimized conditions of sulfuric acid concentration of 0.1 mol/L, temperature of 55 ℃, stirring speed of 200 r/min, initial mass concentration of iron of 1 000 mg/L, and adsorption time of 120 min, the adsorption rate of PPBC for iron ions reaches 98.2%, and the adsorption capacity is 98.2 mg/g. When the initial mass concentration of iron ions is 5 000 mg/L, the adsorption capacity of PPBC for iron ions reaches a maximum of 324.6 mg/g. The adsorption behavior conforms to the Langmuir isothermal adsorption model and the pseudo-second-order kinetic model, and belongs to monolayer chemical adsorption. After five adsorption-desorption cycles, the regeneration rate of PPBC remains at 87.8%. PPBC has excellent structural stability and reusability, which can provide technical references for the treatment of high-acid and high-iron wastewater and the high-value utilization of agricultural waste.

Key words: sulfonated pomelo peel; low-temperature sulfonation method; modification; biochar; adsorbent; sulfuric acid solution; adsorption; iron