



木质素磺酸钠接枝聚丙烯酸钠树脂的制备及其吸附

魏 婕, 徐 铭, 李宏伟

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院, 辽宁沈阳 110168)

[摘要] 以木质素磺酸钠和聚丙烯酸钠为原料制备了具有重金属吸附性的木质素磺酸钠接枝聚丙烯酸钠树脂, 并研究了其对水中重金属离子 Pb^{2+} 和 Cu^{2+} 的吸附性能。首先研究了引发剂用量、反应时间、反应温度等制备条件对吸附树脂接枝率的影响; 其次对制备的吸附树脂进行了 SEM、XRD 及 FTIR 表征; 最后考察了接枝率、pH、吸附时间、初始金属离子浓度对吸附效果的影响。结果表明: 最大接枝率为 81.7%; 制备的吸附树脂对 Pb^{2+} 和 Cu^{2+} 的最大吸附率分别为 93.28% 和 91.46%, 饱和吸附容量分别为 25.338 1、23.675 9 mg/g。

[关键词] 木质素磺酸钠; 聚丙烯酸钠; 接枝; 重金属; 吸附

[中图分类号] X703 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2021)10-0072-06

Preparation and adsorption of sodium lignosulfonate grafted sodium polyacrylate resin

WEI Jie, XU Ming, LI Hongwei

(College of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

Abstract: Sodium lignosulfonate and sodium polyacrylate were used as raw materials to prepare a sodium lignosulfonate grafted sodium polyacrylate resin with heavy metal adsorption properties, and its adsorption properties for heavy metal ions Pb^{2+} and Cu^{2+} in water were studied. Firstly, the influence of initiator dosage, reaction time, reaction temperature and other preparation conditions on the grafting rate of adsorption resin was studied. Secondly, the prepared adsorption resin was characterized by SEM, XRD and FTIR. Finally, the influence of grafting rate, pH, adsorption time, and the initial metal ion concentration on the adsorption effect were investigated. The results showed that the maximum grafting rate was 81.7%, and the maximum adsorption rates of the prepared adsorption resin for Pb^{2+} and Cu^{2+} were 93.28% and 91.46%, respectively. The saturated adsorption capacities were 25.338 1 and 23.675 9 mg/g, respectively.

Key words: sodium lignosulfonate; sodium polyacrylate; grafting; heavy metal; adsorption

近年来, 对水中重金属的处理已成为废水处理的重要部分。由于水体中的重金属不能被生物降解,

并可在食物链中循环, 因此, 含重金属的废水若不经处理直接排放, 会对人类健康及生态环境造成极大

[基金项目] 水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07601004-01); 辽宁省教育厅项目(lnjc202011)

的降解特性研究[J]. 食品工业科技, 2014, 35(14): 221-225.

[19] 王辉. 白腐菌产漆酶优化及其对稻草秸秆预处理分析[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013.

[20] 邵秀芝, 李爱珍, 肖永霞, 等. 酶作用条件对抗性淀粉形成的影响[J]. 粮油加工, 2010(2): 53-56.

[21] 王俊, 申立中, 杨永忠, 等. 基于响应曲面法的非道路用高压共轨柴油机设计点优化标定[J]. 农业工程学报, 2017, 33(3): 31-39.

[22] 李晓雪, 王菲, 崔新爽, 等. 响应面优化紫苏叶中黄酮类物质提

取工艺研究[J]. 森林工程, 2019, 35(6): 48-54.

[23] 刘运伟, 李占君. 响应面优化塔拉籽油超声提取工艺研究[J]. 森林工程, 2020, 36(4): 64-69.

[作者简介] 王旭(1996—), 硕士。电话: 16603695272, E-mail: wangxu961021@163.com。通讯作者: 岳金权, 副教授。电话: 13503685136, E-mail: yuejinq@163.com。

[收稿日期] 2021-07-26(修改稿)

的危害。目前,处理水体中重金属的主要方法为吸附法。但通常所用的吸附剂如活性炭,存在价格昂贵、不可再生的缺陷,使其实际应用具有局限性^[1]。

木质素磺酸钠具有无毒、易溶水、化学稳定性好及价格低廉等特点,其分子结构中含有苯环骨架及羟基、羧基、磺酸基等离子基团,使其能吸附在各种固体质点的表面上进行金属离子的交换作用^[2]。但是,其存在吸附容量较小、吸附时间较长、选择性低的缺陷。为了提高其吸附能力,需对其进行改性处理。已有的研究表明^[3-5],经改性后的木质素磺酸钠对水中重金属的吸附去除效果显著提高。

聚丙烯酸钠具有成本低、可加工、应用范围广等特点^[6]。改性聚丙烯酸钠亦是良好的阻垢剂、助洗剂,可以与水中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Ni^{2+} 等发生螯合反应,减少其对环境的污染,改性聚丙烯酸钠对水中重金属离子的吸附依赖于聚合物链上的亲水性官能团与重金属离子间的化学的或者物理的相互作用。俞洁等^[7]将聚丙烯酸接枝到壳聚糖上,形成具有多孔网络结构的水凝胶。研究表明,其对水中 Cu^{2+} 具有良好的吸附性。Fangyan CHEN 等^[8]采用制备的复合聚丙烯酸钠吸附处理水中重金属 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 和 Cu^{2+} ,结果表明,去除率均大于 90%。杨帆等^[9]利用聚丙烯酸钠对含铜废水进行吸附处理,最大吸附容量可达 8.35 mg/g。对聚丙烯酸钠进行改性处理,可改善聚丙烯酸钠的微观结构,增加有效官能团,从而提高其吸附性能^[10]。

本研究以木质素磺酸钠和聚丙烯酸钠为原料制备了具有重金属吸附性的木质素磺酸钠接枝聚丙烯酸钠树脂,并研究了其对水中重金属离子 Pb^{2+} 和 Cu^{2+} 的吸附性能。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

试剂:木质素磺酸钠、聚丙烯酸钠、过硫酸钾、无水乙醇、 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$,均为分析纯。

仪器:HH-S4 恒温磁力搅拌器,常州国宇仪器制造有限公司;S-4800 扫描电子显微镜,Thermo Nicolet IS5 红外光谱仪、XRD-7000S X 射线衍射仪,武汉德盟科技有限公司;SX711 型 pH 计,上海三信仪表厂;AA240 原子吸收分光光度计,美国瓦里安公司。

1.2 木质素磺酸钠接枝聚丙烯酸钠改性试验方法

1.2.1 吸附树脂的制备

将 5 g 木质素磺酸钠溶于 100 mL 蒸馏水中,搅拌 10 min 后置于三口瓶中。通入氮气,向其中加入一定量质量分数为 10% 的过硫酸钾引发剂,再加入一定量聚丙烯酸钠,在磁力搅拌水浴锅中恒温反应一定时间。冷却至室温,然后加入无水乙醇,静置 24 h。过滤,用无水乙醇反复冲洗,直至洗出液无色。烘干,得到棕色固体,即为木质素磺酸钠接枝聚丙烯酸钠树脂。

1.2.2 接枝率的测定

将试样在室温 20 ℃、相对湿度 50% 的条件下平衡静置 3 d,称重,然后按下式计算接枝率(G)。

$$G = \frac{W}{W_L + W_A} \times 100\% \quad (1)$$

式中: W ——产物质量,mg;

W_L ——加入木质素磺酸钠的质量,mg;

W_A ——加入聚丙烯酸钠的质量,mg。

1.2.3 制备条件优化

以反应时间、反应温度、引发剂体积、木质素磺酸钠与聚丙烯酸钠质量比为影响因素,以接枝率为评价指标进行 $L_9(3^4)$ 正交试验,试验因素与水平见表1。

表1 影响因素水平

水平	Table 1 Influence factor level			
	影响因素			
	A 反应时间/h	B 反应温度/℃	C 引发剂体积/mL	D 木质素磺酸钠与聚丙烯酸钠质量比
1	4	50	5	1:2
2	6	55	10	1:1
3	8	60	15	2:1

1.3 吸附性能试验

1.3.1 接枝率影响试验

取 25 mL 质量浓度为 50 mg/L 的 Pb^{2+} 和 Cu^{2+} 溶液置于 100 mL 锥形瓶中,分别向其中加入 0.1 g 吸附树脂(接枝率分别为 28%、44.5%、57.6%、70.2%、81.7%),调节溶液 pH 为 5.0,然后于 25 ℃ 下振荡反应 2 h。取样,离心分离,测定离心后上清液中的金属离子浓度。

1.3.2 pH 影响试验

取 25 mL 质量浓度为 50 mg/L 的 Pb^{2+} 和 Cu^{2+} 溶液置于 100 mL 锥形瓶中,分别向其中加入 0.1 g 吸

附树脂,用 0.1 mol/L HCl 和 0.1 mol/L NaOH 调节溶液 pH 分别为 2.5、3.0、3.5、4.0、4.5、5.0、5.5、6.0 和 6.5,然后于 25 ℃下振荡反应 2 h。取样,离心分离,测定离心后上清液中的金属离子浓度。

1.3.3 吸附动力学试验

取 25 mL 质量浓度为 50 mg/L 的 Pb^{2+} 和 Cu^{2+} 溶液置于 100 mL 锥形瓶中,分别向其中加入 0.1 g 吸附树脂,调节溶液 pH 为 5.0,然后于 25 ℃下振荡反应一定时间(0~120 min)。取样,离心分离,测定离心后上清液中的金属离子浓度。

1.3.4 等温吸附试验

取 25 mL 质量浓度为 0~150 mg/L 的 Pb^{2+} 和 Cu^{2+} 溶液置于 100 mL 锥形瓶中,分别向其中加入 0.1 g 吸附树脂,调节溶液 pH 为 5.0,然后于 25 ℃下振荡反应 2 h。取样,离心分离,测定离心后上清液中的金属离子浓度。

1.4 吸附剂解吸再生试验

将已经吸附了 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 的吸附树脂分别放入 0.1 mol/L 的 HCl 溶液中,于 25 ℃下振荡 2 h。过滤,用去离子水清洗至中性,然后重复利用。

2 结果与分析

2.1 制备条件对树脂接枝率的影响

正交试验结果见表 2。

表 2 正交试验结果

Table 2 Results of orthogonal test					
序号	A	B	C	D	接枝率/%
F1	4	50	5	1:2	28.0
F2	4	55	10	1:1	81.6
F3	4	60	15	2:1	36.3
F4	6	50	10	2:1	57.6
F5	6	55	15	1:2	78.3
F6	6	60	5	1:1	41.7
F7	8	50	15	1:1	62.1
F8	8	55	5	1:2	70.2
F9	8	60	10	2:1	44.5
K_1	48.63	49.23	46.63	58.83	
K_2	59.2	76.7	61.23	61.8	
K_3	58.93	40.83	58.9	46.13	
R	10.57	35.87	14.6	15.67	

试验结果表明,各因素的影响大小依次为反应温度>木质素磺酸钠与聚丙烯酸钠质量比>引发剂体积>反应时间;优化的制备条件:反应温度为 55 ℃,木质素磺酸钠与聚丙烯酸钠质量比为 1:1,引发剂体积为 10 mL,反应时间为 6 h,在此条件下接枝率最

高,为 81.7%。

温度是影响接枝速率及聚合物相对分子质量的决定性因素。温度升高,可提高反应物活性,加快反应速率,但同时也会导致引发剂早期过度分解,反应后期引发剂不足,聚合产物分子结构不稳定,接枝率降低的现象的发生。原料配比对接枝效率也起着较为重要的作用。在木质素磺酸钠投加量一定的情况下,聚丙烯酸钠用量较小,则可提供的亲水基团较少,接枝率较低;聚丙烯酸钠用量较多,反应体系受 Trommsdorff 效应的影响则趋于显著,黏度增加,导致空间位阻变大,接枝聚合反应受限^[11]。以过硫酸钾为引发剂,其中的 K^+ 能夺取木质素磺酸钠酚羟基上面的 H^+ ,生成木质素磺酸钠自由基,以此为基础的木质素磺酸钠主链可与聚丙烯酸钠支链接枝聚合形成共聚物^[12]。引发剂用量过大,会增加大分子自由基终止的机会,链终止反应增多,使得产物相对分子质量下降,树脂交联网络收缩,性能降低;引发剂用量太少,则形成的大分子链少,反应速率慢,从而影响聚合反应和交联的进行,同样会使性能下降^[13]。反应时间也会对接枝聚合的反应程度及产物的相对分子质量造成一定影响。反应时间过短,接枝不充分;反应时间过长,会造成树脂降解,相对分子质量变小,反应产量下降^[14]。

2.2 制备的吸附树脂的表征

2.2.1 SEM 分析

木质素磺酸钠接枝聚丙烯酸钠树脂的 SEM 表征结果如图 1 所示。

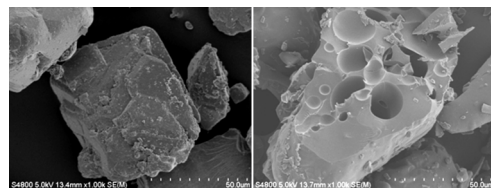


图 1 木质素磺酸钠、改性后木质素磺酸钠的表面形态(从左到右)

Fig. 1 Surface morphology of sodium lignosulfonate and modified sodium lignosulfonate

由图 1 可以看出,木质素磺酸钠原料表面结构致密,呈现细小颗粒状态,表面孔隙不明显。而与聚丙烯酸钠接枝后形成的吸附树脂表面则呈现出更多的较为明显的微孔隙结构,最大孔径约在 1 mm 左右。这是由于木质素磺酸钠在接枝改性时发生了氧化反应和交联,呈现出松散的孔状结构。

2.2.2 FTIR 分析

木质素磺酸钠、聚丙烯酸钠及吸附树脂的 FTIR 表征结果如图 2 所示。

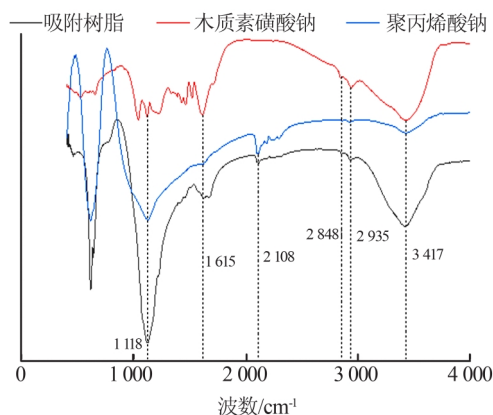


图 2 3 种物质的红外光谱

Fig. 2 Infrared spectrum of three substances

从图 2 可知,对于制备的吸附树脂,在 3417 cm^{-1} 处存在较强的—OH 和酚类的吸收峰^[15],在吸附过程中羟基氧原子上的共用电子对能与重金属离子形成配位键,起到吸附作用^[16]; 2935 、 2848 cm^{-1} 处存在—OCH₃ 中 C—H 的伸缩振动峰; 2108 cm^{-1} 处存在 C≡C 伸缩振动峰; 1615 cm^{-1} 处存在木质素苯环上 C=C 伸缩振动吸收峰; 1118 cm^{-1} 处的吸收峰归属为典型的紫丁香环 C—H 的面内弯曲振动吸收峰。上述结果表明,木质素磺酸钠与聚丙烯酸钠成功发生了接枝反应,并且具备吸附重金属的官能团。

2.2.3 XRD 分析

木质素磺酸钠、聚丙烯酸钠及吸附树脂的 XRD 表征结果如图 3 所示。

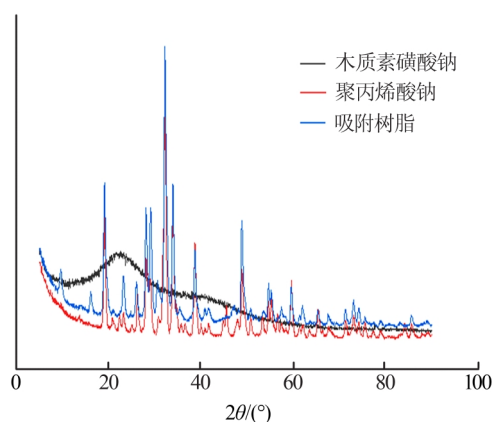


图 3 3 种物质的 XRD 图谱

Fig. 3 XRD patterns of three substances

由图 3 可以看出,木质素磺酸钠经改性后出现了新峰,说明产生了新的晶体结构;且形成的吸附树脂的最高峰高相对于聚丙烯酸钠有所增加,表明其结晶度增强,结晶效果好。

2.3 吸附树脂对重金属 Pb^{2+} 和 Cu^{2+} 的吸附性能研究

2.3.1 吸附剂接枝率对吸附效果的影响

吸附剂接枝率对吸附效果的影响如图 4 所示。

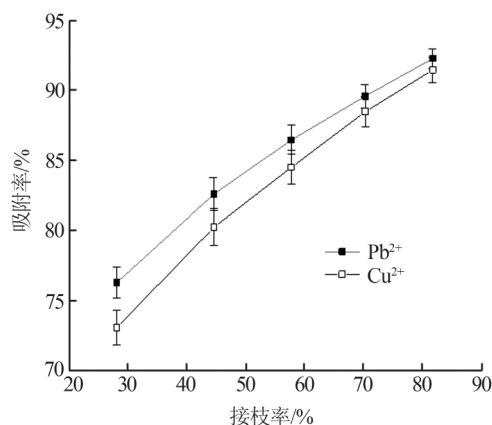


图 4 吸附剂接枝率对吸附效果的影响

Fig. 4 Influence of grafting ratio of adsorbents on adsorption effect

由图 4 可知,随着接枝率的增加,吸附树脂对 Pb^{2+} 和 Cu^{2+} 的吸附率增大,当接枝率为 81.7% 时,吸附树脂对 Pb^{2+} 和 Cu^{2+} 的吸附率分别为 93.28% 和 91.46%。后续选用接枝率为 81.7% 的树脂进行试验。

2.3.2 pH 对吸附效果的影响

pH 对吸附效果的影响如图 5 所示。

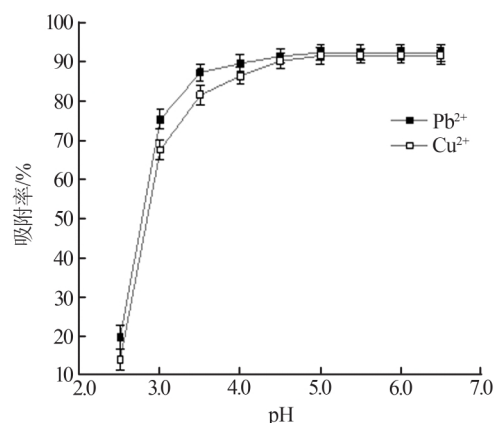


图 5 pH 对铅、铜的吸附效应曲线

Fig. 5 Adsorption effect curve of pH on lead and copper

由图 5 可以看出,当 pH 为 2.5 时,吸附树脂对 Pb^{2+} 与 Cu^{2+} 的吸附率仅分别为 19.85%、14.15%;随着 pH 的升高,吸附树脂对 Pb^{2+} 与 Cu^{2+} 的吸附率上升,当

pH 为 5.0 时,吸附树脂对 Pb^{2+} 与 Cu^{2+} 的吸附率分别为 92.28%、91.46%;之后随着 pH 的进一步升高,二者的吸附率基本保持不变。当 pH 较低时, H^+ 浓度较高,其与 Pb^{2+} 与 Cu^{2+} 产生竞争吸附,导致吸附率较低;随着 pH 的增加, H^+ 浓度降低,吸附剂的表面负电荷增加,有利于金属离子吸附在活性点位上^[17],吸附率增大。

2.3.3 吸附动力学试验结果

吸附树脂对 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 的吸附动力学试验结果如图 6 所示。

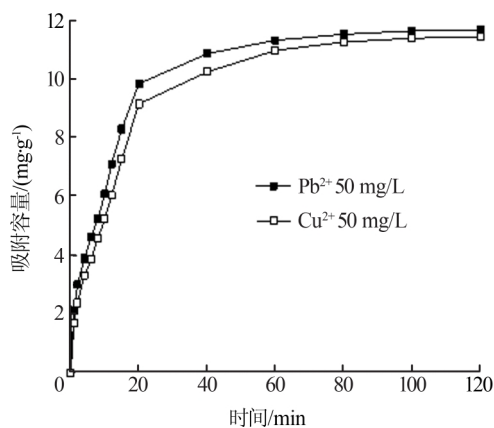


图 6 吸附动力学曲线

Fig. 6 Adsorption kinetic curves

由图 6 可知,吸附树脂对 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 的吸附呈先快后慢的趋势,20 min 后吸附容量增长缓慢,120 min 时,吸附树脂对 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 的吸附均达到平衡。吸附初期吸附容量增加较快,这和金属离子在吸附树脂-溶液两相比大浓度差引起的传质驱动力和吸附剂较充裕的表面活性位点有关^[18]。

采用准二级吸附动力学方程对试验数据进行拟合,结果见表 3。

表 3 准二级吸附动力学方程拟合参数

Table 3 Fitting parameters of pseudo second order adsorption kinetic reaction

金属离子	质量浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	试验值 $q_e/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	准二级吸附动力学方程		
			$K_d/(\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1})$	$q_d/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	R^2
Pb^{2+}	50	11.66	0.008 4	12.912 6	0.982 3
Cu^{2+}	50	11.43	0.006 3	12.984 6	0.984 8

由表 3 可知,吸附树脂对 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 的吸附过程遵循准二级反应机理,吸附速率被化学吸附所控制^[19]。

2.3.4 等温吸附试验结果

图 7 是 25 $^{\circ}\text{C}$ 下吸附树脂对 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 的等温吸

附试验结果。

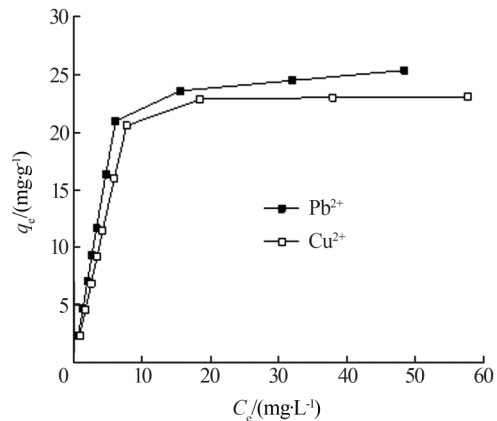


图 7 等温吸附曲线

Fig. 7 Isotherm adsorption curve

由图 7 可以看出,二者的吸附容量均随金属离子浓度的增加而升高,最终达到吸附平衡状态。

采用 Langmuir、Freundlich 等温吸附模型对试验数据进行拟合,结果见表 4。

表 4 等温吸附方程拟合参数

Table 4 Fitting parameters of isothermal adsorption equation

金属离子	Langmuir 方程			Freundlich 方程		
	$b/(\text{L}\cdot\text{mg}^{-1})$	$q_{\text{max}}/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	R^2	K_F	$1/n$	R^2
Pb^{2+}	0.104 8	25.338 1	0.989 6	7.753 7	0.338 0	0.813 3
Cu^{2+}	0.061 4	23.675 9	0.986 2	7.101 3	0.328 3	0.776 8

由表 4 可以看出,吸附树脂对 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 的吸附更符合 Langmuir 方程,该吸附过程可近似为单层吸附及均匀吸附^[20];吸附树脂对 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 的饱和吸附容量分别为 25.338 1、23.675 9 mg/g。

2.4 吸附树脂的重复利用性

解吸再生后的吸附树脂对 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 的吸附效果如图 8 所示。

试验结果表明,再生后的吸附树脂的吸附性能逐渐缓慢降低。经过 4 次循环使用后,吸附树脂对 50 mg/L Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 的吸附率分别从第 1 次使用的 93.28%、91.46%降低至 89.03%、87.32%。可见,木质素磺酸钠接枝聚丙烯酸钠树脂吸附剂至少可循环使用 4 次以上。

3 结论

根据正交试验结果,木质素磺酸钠接枝聚丙烯酸钠树脂制备的优化条件:木质素磺酸钠与聚丙烯酸钠的质量比为 1:1,引发剂体积为 10 mL(6 mol/mL),

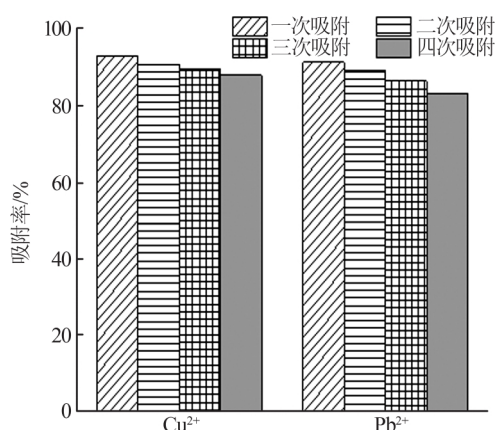


图8 吸附树脂解吸再生性能

Fig. 8 Desorption and regeneration performance of adsorption resin

接枝反应温度为 55 ℃, 反应时间为 6 h, 在此条件下, 接枝产率可达到 81.7%。吸附树脂的 SEM、XRD 及 FTIR 表征结果表明, 其具有孔隙网状结构, 并生成了具有吸附性能的官能团。

吸附树脂吸附 Pb²⁺ 和 Cu²⁺ 的最佳 pH 为 5.0, 吸附 100 min 就可达到吸附平衡。吸附树脂对 Pb²⁺ 和 Cu²⁺ 的吸附过程符合准二级动力学方程, 表明其吸附主要是化学吸附; 吸附树脂对 Pb²⁺ 和 Cu²⁺ 的等温吸附过程符合 Langmuir 模型, 二者的饱和吸附容量分别为 25.338 1、23.675 9 mg/g。吸附了重金属离子的吸附树脂经过 0.1 mol/L 的 HCl 解析再生后可重复使用 4 次以上。

参考文献

- [1] 邓景衡, 余侃萍, 肖国光, 等. 吸附法处理重金属废水研究进展[J]. 工业水处理, 2014, 34(11): 4-7.
- [2] JIA Kun, HE Xiaohong, ZHOU Xuefei, et al. Solid state effective luminescent probe based on CdSe@CdS/amphiphilic co-polyarylene ether nitrile core-shell superparticles for Ag⁺ detection and optical strain sensing[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2018, 257: 442-450.
- [3] 向育君, 许爱清, 周信, 等. 改性木质素磺酸钠水凝胶对镉离子的吸附研究[J]. 离子交换与吸附, 2015, 31(2): 115-122.
- [4] 王珏珏, 张越非, 池汝安, 等. 改性木质素磺酸钠对铅离子的吸附行为研究[J]. 武汉工程大学学报, 2017, 39(1): 12-18.
- [5] 周海峰, 杨东杰, 伍晓蕾, 等. 漆酶改性木质素磺酸钠的结构表征及吸附特征[J]. 高等学校化学学报, 2013(1): 232-238.
- [6] 贾振宇, 崔英德, 黎新明, 等. 聚丙烯酸钠高吸水性树脂的改性研究进展[J]. 化工进展, 2004(5): 468-471.
- [7] 俞洁, 郑继东, 陆泉芳. 壳聚糖/聚丙烯酸水凝胶的制备及对 Cu²⁺ 和 Cd²⁺ 的吸附性能[J]. 精细化工, 2016, 33(12): 1398-1404.
- [8] CHEN Fangyan, YE Wei, TANG Yubin. Adsorption of heavy metals by sodium polyacrylate-humic acid-rectorite composite as a novel adsorbent[J]. Advanced Materials Research, 2012, 550/551/552/553: 2428-2435.
- [9] 杨帆, 高俊发. 聚丙烯酸钠吸附含铜废水的研究[J]. 应用化工, 2012, 41(4): 602-605.
- [10] 张保平, 马钟琛, 刘运, 等. 木质素的化学改性及其对 AuCl₃ 的吸附[J]. 化工学报, 2017, 68(5): 1946-1953.
- [11] 黄祖强, 梁兴唐, 高利, 等. 机械活化甘蔗渣与丙烯酸(钠)的接枝共聚反应[J]. 化工学报, 2009, 60(6): 1573-1580.
- [12] 郭睿, 宋博, 郭煜, 等. 木质素磺酸盐接枝共聚物的合成及工艺优化[J]. 化工进展, 2018, 37(5): 335-340.
- [13] 贺龙强, 胡鹏, 刘中阳. 耐盐性淀粉接枝丙烯酸类高吸水性树脂的制备及表征[J]. 化工新型材料, 2015, 43(8): 96-98.
- [14] ABDEL M, ZAHRAN H, BASUNI M M. Study on graft-copolymerization of sodium lignosulfonates with acrylic monomers[J]. KGK Rubberpoint, 2015, 68(9): 35-40.
- [15] THIRUMAVALAVAN M, LAI Y L, LEE J F. Fourier transform infrared spectroscopic analysis of fruit peels before and after the adsorption of heavy metal ions from aqueous solution[J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2011, 56(5): 2249-2255.
- [16] 姜立萍. 高分子纳米复合吸附剂在重金属废水处理中的应用[J]. 工业水处理, 2015, 35(12): 10-13.
- [17] SUHAS P J M, CARROTT M M L, CARROTT R. Lignin-From natural adsorbent to activated carbon: A review[J]. Bioresource Technology, 2007, 98(12): 2301-2312.
- [18] 王寿武, 邓应森, 周雪婷, 等. 聚丙烯酸钠的合成及性能研究[J]. 精细石油化工进展, 2010(5): 42-43.
- [19] 夏广洁, 宋萍, 邱宇平. 牛粪源和木源生物炭对 Pb(II) 和 Cd(II) 的吸附机理研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(3): 569-575.
- [20] ZHU Yinian, JIANG Yanhong, ZHU Zongqiang, et al. Preparation of a porous hydroxyapatite carbon composite with the bio-template of sugarcane top stems and its use for the Pb(II) removal[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 187(1): 650-661.

[作者简介] 魏婕(1984—), 博士后, 副教授。电话: 13190068235, E-mail: weijie0307@126.com。通讯作者: 徐铭, 硕士研究生。电话: 13841383283, E-mail: 344704413@qq.com。

[收稿日期] 2021-07-12(修改稿)