

KIP210 树脂对水杨酸的吸附性能研究*

韩淑萃¹ 杨金杯^{2#} 谢伟平²

(1.福州大学至诚学院化学工程系,福建 福州 350002;

2.福建师范大学福清分校海洋与生化工程学院,福建 福州 350300)

摘要 采用离子交换树脂为吸附剂,研究了其吸附水杨酸过程的热力学和动力学。通过树脂筛选实验发现强碱性阴离子交换树脂 KIP210 对水杨酸的吸附效果最好,并进一步考察了振荡速度、树脂用量、pH、水杨酸初始浓度和温度等因素对 KIP210 树脂吸附性能的影响,且探究了树脂的再生情况。结果表明,振荡速度大于 160 r/min 后,外扩散对吸附的影响已基本消除,pH 为 5 时吸附性能最佳。KIP210 树脂对水杨酸的吸附率大体上随树脂用量、温度的上升而增大,随水杨酸初始浓度的上升而减小。热力学研究显示,KIP210 树脂对水杨酸的吸附符合 Langmuir 方程,且是一个吸热的熵驱动和自发的吸附过程。动力学研究显示吸附过程符合准一级动力学,吸附活化能为 13.9 kJ/mol。使用 8% (质量分数) 氯化钠和 6% (质量分数) 氢氧化钠混合溶液可很好地实现对树脂的脱附再生。

关键词 树脂 水杨酸 吸附 热力学 动力学

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2018.12.012

Adsorption of salicylic acid on KIP210 resin HAN Shucui¹, YANG Jinbei², XIE Weiping². (1. Department of Chemical Engineering, Fuzhou University Zhicheng College, Fuzhou Fujian 350002; 2. School of Ocean Science and Biochemistry Engineering, Fuqing Branch of Fujian Normal University, Fuzhou Fujian 350300)

Abstract: The adsorption thermodynamics and kinetics of salicylic acid in aqueous solution were studied by anion exchange resin as adsorbent. Series of resin selection experiments were carried out and the strong base anion exchange resin KIP210 showed the maximum equilibrium adsorption capacity in terms of the removal of salicylic acid from aqueous solution. The effect of various factors such as oscillation speed, resin dosage, pH, initial salicylic acid concentration and temperature on the adsorption were investigated by static experiment. The regeneration of resin KIP210 was also explored. The results indicated that the effect of external diffusion was eliminated at 160 r/min and the best solution pH was 5. The removal efficiency of salicylic acid increased with an increase of the resin dosage, temperature and a decrease of the initial concentration of salicylic acid within a certain range. The adsorption of salicylic acid on KIP210 agreed well with the Langmuir isotherm and the adsorption of salicylic acid on KIP210 was a spontaneously endothermic adsorption process. Furthermore, the adsorption of salicylic acid on the resin could be well described by a pseudo-first-order kinetic model and the activation energy was 13.9 kJ/mol. KIP210 was successfully regenerated using the 8% (mass fraction) sodium chloride and 6% (mass fraction) sodium hydroxide solution.

Keywords: resin; salicylic acid; adsorption; thermodynamics; kinetics

水杨酸(又称邻羟基苯甲酸)是一种重要的有机化工原料^[1],常作为防腐剂、显色剂、络合剂、发泡剂和合成原料而广泛应用于化妆品、香精、染料、食品、橡胶助剂、农药和医药等生产过程^[2]。在水杨酸的工业生产及应用过程中产生了大量的含高浓度水杨酸的废水^[3],而经常接触这些含水杨酸废水将会导致一些毒副作用,比如出现肾功能衰竭和皮肤过敏等,其对儿童以及胎儿的危害更为严重^[4]。当前,对于含水杨酸废水的处理方法主要有:高级氧化法^[5]、

臭氧氧化法^[6]、光化学降解法^[7]、生物降解法^[8-9]、萃取法^[10]和吸附法^[11-14]等。

在多种处理工艺中,吸附法既可使废水水质达标,也可从废水中回收水杨酸,具有性能稳定、经济环保和节能高效等特点^[15]。吸附法中常用的吸附剂——离子交换树脂(以下简称树脂)具有吸附容量大、易重复使用和生产效率高等特点,已是治理废水废气的重要方法之一,并得到广泛使用^[16-19]。为此,本研究采用树脂为吸附剂,研究了其吸附水杨酸过

第一作者:韩淑萃,女,1984年生,硕士,讲师,主要从事废水处理研究。* 通讯作者。

* 福建省中青年教育科研项目(No.JAT170852、No.JT180625);福建省高校杰出青年科研人才培育计划(闽教教[2017]52号);洁净煤气化技术福建省协同创新中心(培育)资助项目(No.XK1705)。

表1 所用树脂的基本特征参数
Table 1 Basic characteristic parameters of the used resin

树脂型号	类别	功能基团	骨架	交换容量/(mmol·g ⁻¹)
KIP209	强碱性	季铵基	聚苯乙烯二乙烯基苯	4.12
KIP210	强碱性	季铵基	聚苯乙烯二乙烯基苯	4.54
CT269DR	强酸性	磺酸基	聚苯乙烯二乙烯基苯	5.25
HND-315A15	强酸性	磺酸基	聚苯乙烯二乙烯基苯	4.34
CT100E	强酸性	磺酸基	聚苯乙烯二乙烯基苯	2.45
2GBK001	强酸性	磺酸基	聚苯乙烯二乙烯基苯	3.48

程的热力学和动力学,考察了振荡速度、树脂用量、pH、初始浓度和温度等因素对吸附过程的影响,并探究了树脂的再生情况,为吸附法治理废水中水杨酸提供依据。

1 实验介绍

1.1 试剂与仪器

实验所使用的树脂有:KIP209、KIP210、CT269DR、HND-315A15、CT100E和2GBK001,其基本特征参数如表1所示。水杨酸、盐酸、氯化钠和氢氧化钠均为分析纯。主要仪器包括:精密水银温度计(分度0.1℃)、752型紫外-可见分光光度计、SHA-B型恒温水浴振荡器。

1.2 树脂的预处理

树脂使用前,进行如下处理步骤:首先将树脂浸泡在蒸馏水中24h使之充分溶胀,之后倒出并洗至出水澄清;然后将树脂泡在4%(体积分数)盐酸里24h,再将树脂洗到中性;再将盐酸泡过的树脂浸没在2%(质量分数)氢氧化钠溶液里24h,之后倒出碱液并洗至中性为止;最后将经上述处理的树脂置于蒸馏水贮藏待用。

1.3 吸附实验

将预处理过的树脂称量后放入单口锥形瓶中,再移入各个实验条件下的水杨酸母液。将锥形瓶放入恒温水浴振荡器里开展吸附实验,定时取样分析水杨酸浓度,直至吸附达到平衡,按式(1)和式(2)分别计算实时吸附量(q_t ,mg/g)、平衡吸附率(r ,%)。

$$q_t = \sum_{i=1}^N (c_{i-1} - c_i) \times V_i / m \quad (1)$$

$$r = \frac{(c_0 - c_e)}{c_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: c_t 和 c_{t-1} 分别为 t 时刻和其前一时刻的水杨酸质量浓度,mg/L; t 为吸附时间,min; N 为取样次数; V_i 为 t 时刻溶液体积,L; m 为树脂用量,g; c_0 和 c_e 分别为初始和吸附平衡时水杨酸质量浓度,

mg/L。

1.4 脱附实验

用蒸馏水洗涤已吸附饱和的树脂,之后用烘箱进行干燥,加入一定体积一定浓度的氯化钠和氢氧化钠混合脱附液,固定温度和振荡速度,于振荡器中开展脱附实验,定时分析水杨酸浓度,直到脱附平衡,计算出树脂的脱附率。

1.5 分析方法

水杨酸浓度采用分光光度法测定。通过紫外-可见分光光度计,在波长295nm下,测定水杨酸溶液吸光度,再通过标准曲线方程(R^2 为0.9991)计算其浓度。

2 结果与讨论

2.1 树脂的筛选

分别移取100mL质量浓度为100mg/L的水杨酸溶液,置于6个250mL带塞锥形瓶中,再分别加入0.10g经预处理的KIP209、KIP210、CT269DR、HND-315A15、CT100E和2GBK001树脂。固定温度303.15K、振荡速度110r/min,振荡吸附5h,待6种树脂对水杨酸的吸附已达平衡,分别取样测量水杨酸浓度,并计算各种树脂的平衡吸附量(q_e ,mg/g),考察其吸附能力。

实验表明,6种树脂对水杨酸的吸附能力从大到小为:KIP210、KIP209、CT269DR、CT100E、HND-315A15、2GBK001,对应的水杨酸平衡吸附量分别为85.20、80.22、3.89、3.12、0.39、0.25mg/g,以上结果显示KIP210树脂对水杨酸的平衡吸附量最大、吸附效果最好,因此选用强碱性阴树脂KIP210进行后续实验研究工作。

2.2 树脂吸附性能研究

2.2.1 振荡速度的影响

分别准确移取100mL质量浓度为100mg/L的水杨酸溶液于4个250mL带塞锥形瓶中,各加入0.10g经预处理的KIP210树脂。固定温度303.15K,改变恒温水浴振荡器的振荡速度(分别设

定为 60、110、160、210 r/min) 进行吸附实验, 定时取样测定溶液中水杨酸浓度, 计算树脂对水杨酸的吸附量, 实验结果如图 1 所示。

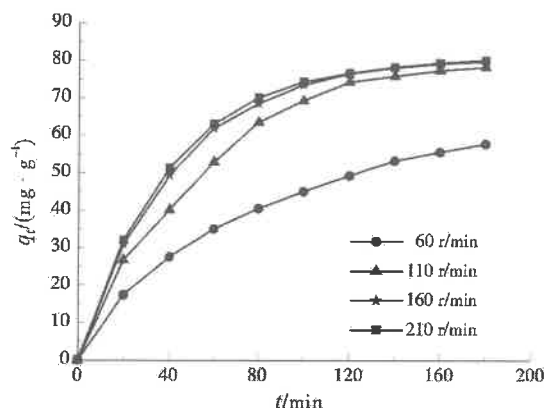


图 1 振荡速度对树脂吸附性能的影响
Fig.1 Effect of shaking speed on adsorption

由图 1 可见, 当振荡速度小于 160 r/min 时, KIP210 树脂对水杨酸的吸附量随着振荡速度的增加而明显增大。当振荡速度大于 160 r/min 时, 振荡速度的增大对树脂吸附量的影响很小, 说明外扩散已经基本消除, 所以后续实验的振荡速度均设为 160 r/min。

2.2.2 树脂用量的影响

分别准确移取 100 mL 质量浓度为 100 mg/L 的水杨酸溶液置于 8 个 250 mL 带塞锥形瓶中, 然后对应加入 0.05、0.10、0.20、0.30、0.40、0.50、0.60、0.70 g 经预处理 KIP210 树脂。在振荡速度 160 r/min、温度 303.15 K 下进行吸附实验, 吸附时间为 5 h, 此时吸附已达到平衡, 取样分析, 算出 KIP210 树脂对水杨酸的平衡吸附率, 结果见图 2。

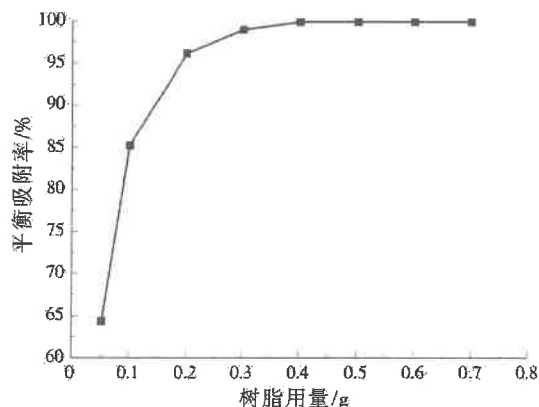


图 2 树脂用量对吸附的影响
Fig.2 Effect of quantity of resins on adsorption

从图 2 可知, 当树脂用量低于 0.40 g 时, 随着其用量的上升, 平衡吸附率明显增大, 这主要是由于增加树脂用量提供了更大的吸附表面积或更多的吸附位点^[20]。当树脂用量达到 0.40 g 时, 水杨酸能够完全被

KIP210 树脂所吸附。当树脂用量大于 0.40 g 时, 其用量的增加对平衡吸附率影响很小。综合考虑吸附效果和实验成本, 后续实验的树脂用量设定为 0.10 g。

2.2.3 pH 的影响

分别准确移取 100 mL 质量浓度为 100 mg/L 的水杨酸溶液于 14 个 250 mL 带塞锥形瓶中, 然后用盐酸和氢氧化钠调节溶液 pH, 再各自加入 0.10 g 经预处理 KIP210 树脂。在振荡速度 160 r/min、温度 303.15 K 下进行吸附实验, 吸附时间为 5 h, 此时吸附已平衡, 取样分析, 算出 KIP210 树脂对水杨酸的平衡吸附量, 结果见图 3。

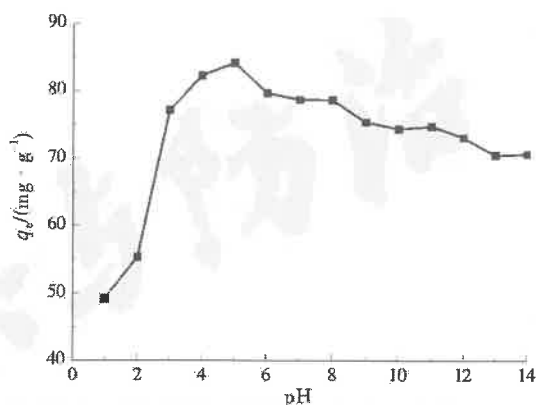


图 3 pH 对树脂吸附性能的影响
Fig.3 Effect of pH on adsorption

由图 3 可知, 当 pH=5 时, KIP210 树脂对水杨酸的平衡吸附量最大, 吸附效果最好。当 pH<5 时, KIP210 树脂对水杨酸的平衡吸附量随 pH 的增大而增大; 当 pH>5 时, KIP210 树脂对水杨酸的平衡吸附量随 pH 的增大而降低。这与水杨酸在溶液中的状态有较为密切的关系。当 pH≤1 时, 水溶液中水杨酸以分子形态为主; 当 pH 为 1~5 时, 逐渐从分子转变为离子; 当 pH≥5 时, 以离子为主。分子形态的水杨酸不利于树脂对其吸附; 离子形态的水杨酸有利于离子交换, 此时 KIP 树脂对其的平衡吸附量更高。但当 pH≥5 后, 随着 pH 的升高, 水杨酸溶液中的氢氧根离子浓度会增加, 产生竞争吸附, 使 KIP210 树脂对水杨酸的平衡吸附量下降。

2.2.4 水杨酸初始浓度的影响

分别准确移取 100 mL 质量浓度为 100、150、200、250、300 mg/L 的水杨酸溶液于 5 个 250 mL 带塞锥形瓶中, 然后各加入 0.10 g 经过预处理的 KIP210 树脂。在振荡速度 160 r/min、温度分别为 293.15、303.15、313.15 K 的条件下进行吸附实验, 吸附时间为 5 h, 此时吸附已平衡, 取样分析, 计算树脂的平衡吸附率, 考察水杨酸初始浓度对树脂吸

附性能的影响,结果见图 4。

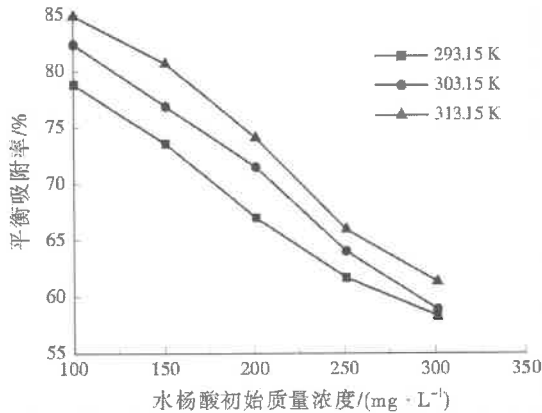


图 4 水杨酸初始质量浓度对吸附的影响
Fig.4 Effect of initial salicylic acid concentration on adsorption

从图 4 可知,KIP210 树脂对水杨酸的平衡吸附率随水杨酸初始浓度的上升呈现逐渐减小趋势。这是由于当树脂用量固定时,其提供的吸附位点是有限的,即其饱和吸附量是固定的,因此当吸附趋于饱和后,继续增大水杨酸的浓度,树脂对水杨酸的吸附率则不断地降低^[21]。从图 4 中还可以看出,同一初始浓度下,KIP210 树脂对水杨酸的饱和吸附率随着温度的上升而增大,这说明温度的提高有利于吸附^[22],即吸附过程是一个吸热过程。

2.3 吸附等温线

在恒温条件下,吸附质在吸附液和吸附剂两相之间吸附达到平衡时,吸附质在两相中浓度之间的关系曲线,称为吸附等温线^[23],可使用 Langmuir 方程(见式 3)和 Freundlich 方程(见式 4)对吸附过程进行拟合。

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

$$\ln q_e = \frac{1}{n} \ln c_e + \ln K_F \quad (4)$$

式中: q_m 为饱和吸附量,mg/g; K_L 为 Langmuir 平衡常数,L/mg; n 为与吸附强度有关的经验常数; K_F 为 Freundlich 吸附等温常数,mg^{1-1/n}·L^{1/n}/g。

在研究水杨酸初始浓度对树脂吸附性能的过程中,以不同温度、不同初始浓度下的吸附平衡浓度与

平衡吸附量进行作图,得到吸附等温线,如图 5 所示。由图 5 可知,同一温度下,平衡吸附量随着吸附平衡浓度的增大而上升;且同一初始浓度下,平衡吸附量随着温度的上升而增大。

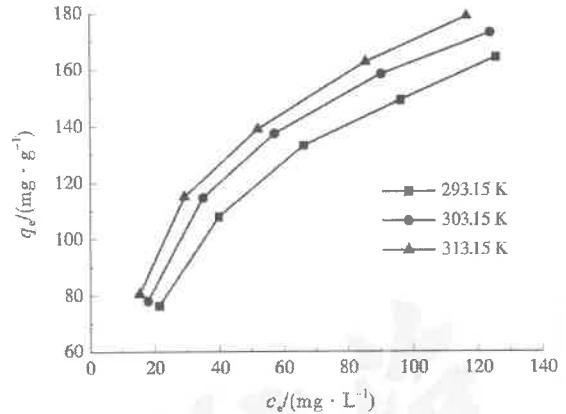


图 5 KIP210 树脂对水杨酸的吸附等温线
Fig.5 Isothermal adsorption curves of salicylic acid on KIP210 resin

将图 5 中 293.15、303.15、313.15 K 温度下的 3 组吸附等温数据分别使用式(3)和式(4)进行拟合,结果如表 2 所示。从表 2 可知,不同温度下的吸附等温线使用 Langmuir 方程拟合的 R^2 均大于 Freundlich 方程,这说明 KIP210 树脂对水杨酸的吸附更符合 Langmuir 方程, $R^2 > 0.99$,其拟合曲线如图 6 所示。由 Langmuir 方程拟合获得了 293.15、303.15、313.15 K 温度下 KIP210 树脂对水杨酸的理论饱和吸附量,分别是 212.70、215.62、217.14

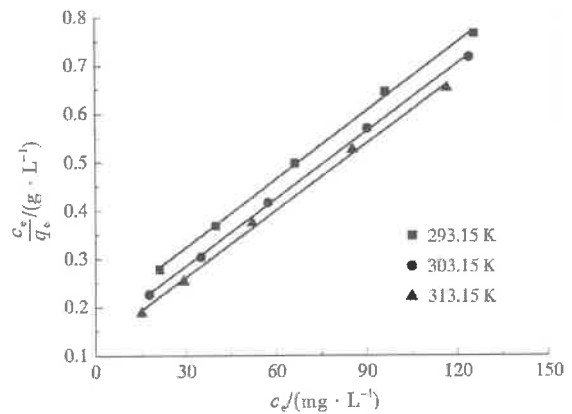


图 6 Langmuir 方程拟合结果
Fig.6 Fitting results of Langmuir equation

表 2 吸附等温模型拟合参数
Table 2 Fitting parameters of adsorption isotherm models

温度 /K	Langmuir 方程			Freundlich 方程		
	$K_L/(L \cdot mg^{-1})$	$q_m/(mg \cdot g^{-1})$	R^2	$K_F/(mg^{1-1/n} \cdot L^{1/n} \cdot g^{-1})$	n	R^2
293.15	0.025 7	212.70	0.998 8	21.55	2.35	0.985 7
303.15	0.031 7	215.62	0.999 4	25.82	2.48	0.975 9
313.15	0.037 2	217.14	0.997 9	29.96	2.62	0.981 6

mg/g,由此可知,该树脂对水杨酸具有良好的去除效果,也具有很大的潜在应用价值。另外,Langmuir 平衡常数为正值,表明这是一个优惠型吸附^[24]。

2.4 吸附热力学

吸附热力学的相关参数包括焓变(ΔH , J/mol)、熵变(ΔS , J/(mol·K))和吉布斯自由能变(ΔG , J/mol)^[25],可以根据式(5)和式(6)计算。

$$\ln K_L = -\frac{\Delta H}{RT} + \frac{\Delta S}{R} \quad (5)$$

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (6)$$

式中: T 为热力学温度,K; R 为气体常数,取8.314 J/(mol·K)。

以 $\ln K_L$ 与 $1/T$ 进行作图,发现 $\ln K_L$ 与 $1/T$ 之间具有良好的线性关系,直线的斜率和截距分别为-1 689.6和9.017 2, R^2 为0.996 4,根据所回归的直线方程即可求出该吸附过程的焓变、熵变以及不同温度下的吉布斯自由能变,如表3所示。

从表3可知, ΔH 介于0~42 kJ/mol,进一步印证了KIP210树脂对水杨酸的吸附是一个吸热过程,升高温度有利于吸附的进行。另外,不同温度下KIP210树脂吸附水杨酸过程的 ΔG 均为负值,且随着温度的上升而逐渐变小,这揭示了该吸附过程是自发进行的,并且温度越高自发程度越高; $\Delta S > 0$ 表明该吸附过程是熵驱动而不是焓驱动^[26]。

表3 KIP210树脂对水杨酸的吸附热力学参数
Table 3 Thermodynamic parameters for adsorption of salicylic acid on KIP210 resin

T/K	ΔH /(kJ·mol ⁻¹)	ΔS /(J·mol ⁻¹ ·K ⁻¹)	ΔG /(kJ·mol ⁻¹)
293.15			-24.75
303.15	14.05	132.3	-26.12
313.15			-27.40

2.5 吸附动力学

吸附动力学主要是研究吸附剂吸附过程的速率,即吸附过程中吸附量随着时间的变化趋势,通常可采用准一级动力学(见式(7))或准二级动力学模型(见式(8))来描述树脂的吸附过程。

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (7)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{q_e} t + \frac{1}{k_2 q_e^2} \quad (8)$$

表4 KIP210树脂吸附水杨酸的动力学模型参数
Table 4 Adsorption kinetic parameters of salicylic acid on KIP210

T/K	准一级动力学模型			准二级动力学模型		
	$q_e/(mg \cdot g^{-1})$	k_1/min^{-1}	R^2	$q_e/(mg \cdot g^{-1})$	$k_2/(g \cdot mg^{-1} \cdot min^{-1})$	R^2
293.15	102.71	0.023 1	0.990 4	141.94	$5.474 1 \times 10^{-5}$	0.960 0
303.15	107.53	0.026 7	0.991 2	125.45	$9.852 4 \times 10^{-5}$	0.972 9
313.15	134.13	0.033 3	0.991 1	129.50	$9.941 5 \times 10^{-5}$	0.957 5

式中: k_1 为准一级速率常数, min^{-1} ; k_2 为准二级速率常数, $g/(mg \cdot min)$ 。

不同温度下KIP210树脂对水杨酸的吸附动力学数据测定步骤如下:分别准确移取100 mL质量浓度为100 mg/L的水杨酸溶液于3个250 mL带塞锥形瓶中,各加入0.10 g经预处理的KIP210树脂。固定振荡速度160 r/min,改变温度(293.15、303.15、313.15 K)进行吸附实验,定时取样测定溶液中水杨酸的浓度,计算树脂对水杨酸的吸附量,如图7所示。分别采用准一级和准二级动力学模型拟合上述测得的动力学数据,拟合得到的相关参数如表4所示。

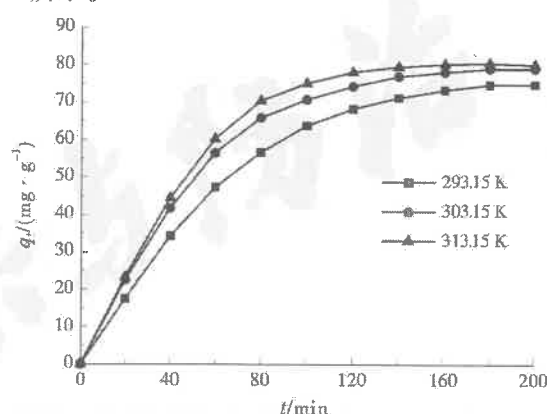


图7 不同温度下KIP210树脂对水杨酸的吸附动力学
Fig.7 Adsorption kinetics of salicylic acid on KIP210 resin at different temperatures

从表4可以看出,不同温度下的动力学数据使用准一级动力学模型拟合的 R^2 均大于准二级动力学模型,这说明KIP210树脂对水杨酸的吸附更遵循准一级动力学模型, $R^2 > 0.99$,其拟合曲线如图8所示。准一级速率常数随着温度的上升而逐渐变大,这是由于水杨酸的扩散速率随着温度的升高而加快,从而促进了吸附的进行,提高了吸附速率常数^[27]。

以 $\ln k_1$ 与 $1/T$ 进行作图,发现 $\ln k_1$ 与 $1/T$ 间具有较好的线性,直线的斜率和截距分别为-1 674.2和1.929 0, R^2 为0.980 9。根据Arrhenius方程,求得KIP210树脂吸附水杨酸的活化能为13.9 kJ/mol。

2.6 树脂再生

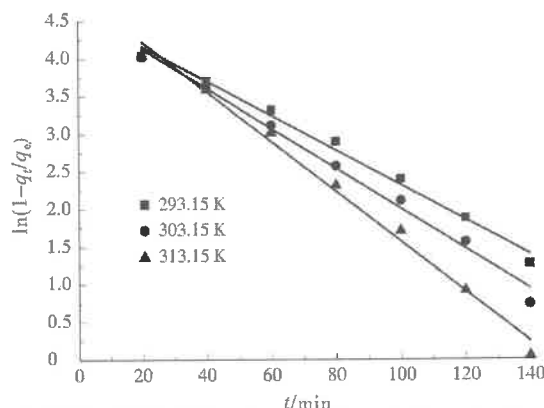


图8 KIP210树脂吸附水杨酸的准一级动力学模型
Fig.8 Pseudo-first-order kinetic model for adsorption of salicylic acid on KIP210

以氯化钠与氢氧化钠混合溶液可对已吸附饱和的树脂进行脱附^[28]。脱附温度 30.0 ℃,脱附时间 3 h,取样分析并计算水杨酸的脱附率,结果见表 5。从表 5 可以看出,当脱附剂为 8% (质量分数)氯化钠与 6% (质量分数)氢氧化钠的混合溶液时,水杨酸的脱附率已达到 98.6%,这说明组合脱附剂可实现水杨酸在树脂中的高效脱附。

表 5 不同配比脱附剂对 KIP210 树脂的脱附率
Table 5 Desorption efficiency of KIP210 resin by different ratios of desorbing agent %

氢氧化钠 质量分数/%	氯化钠质量分数/%			
	2	4	6	8
2	62.2	74.4	88.5	96.5
4	67.5	78.6	95.8	97.6
6	76.8	87.7	96.5	98.6
8	82.3	90.7	97.7	98.8

3 结 论

(1) 当振荡速度大于 160 r/min 后,外扩散对吸附过程的影响已基本消除,pH=5 时吸附性能最佳。KIP210 树脂对水杨酸的吸附率大体上随树脂用量、温度的上升而增大,随水杨酸初始浓度的上升而减小。

(2) KIP210 树脂对水杨酸的吸附符合 Langmuir 方程,是一个吸热的熵驱动和自发的吸附过程。

(3) KIP210 树脂对水杨酸的吸附过程可以很好地用准一级动力学模型进行描述,吸附活化能是 13.9 kJ/mol。

(4) 用 8% 氯化钠与 6% 氢氧化钠混合溶液作脱附剂可高效地实现对 KIP210 树脂的脱附再生,水杨酸的脱附率可达到 98.6%。

参考文献:

[1] 于振云.水杨酸的合成与应用进展[J].化工中间体,2003(21):

• 1388 •

27-32.

- [2] 王学江,张全兴,赵建夫,等.水杨酸生产废水的治理与资源化[J].环境污染治理技术与设备,2005,6(1):62-67.
- [3] 曹广宏.水杨酸的合成及其应用[J].辽宁化工,1994(3):33-41.
- [4] 胡俊杰,李学宇,魏春城.络合萃取法处理高浓度含酚废水的研究[J].化工矿物与加工,2001,30(12):6-7,14.
- [5] GARZA CAMPOS B, BRILLAS E, HERNÁNDEZ RAMÍREZ A, et al. Salicylic acid degradation by advanced oxidation processes. Coupling of solar photoelectro-Fenton and solar heterogeneous photocatalysis[J]. Journal of Hazardous Materials, 2016, 319: 34-42.
- [6] HU R K, ZHANG L F, HU J Y. Study on the kinetics and transformation products of salicylic acid in water via ozonation[J]. Chemosphere, 2016, 153: 394-404.
- [7] ZHANG Q, ZHU J, WANG Y, et al. Electrochemical assisted photocatalytic degradation of salicylic acid with highly ordered TiO₂ nanotube electrodes[J]. Applied Surface Science, 2014, 308(8): 161-169.
- [8] KHARDENAVIS A A, KAPLEY A, PUROHIT H J. Salicylic acid-mediated enhanced biological treatment of wastewater[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2010, 160(3): 704-718.
- [9] ODIZE V, RAHMAN A, JONES K, et al. Removal of 17 α -ethinylestradiol, salicylic acid, trimethoprim, carbamazepine and nonylphenol through biological carbon and nitrogen removal processes[J]. Water and Environment Journal, 2017, 31(3): 440-449.
- [10] INCI I. The extraction of salicylic acid from aqueous solutions using tertiary amines[J]. Revista de Chimie, 2002, 53(12): 790-794.
- [11] OTERO M, GRANDE C A, RODRIGUES A E. Adsorption of salicylic acid onto polymeric adsorbents and activated charcoal[J]. Reactive & Functional Polymers, 2004, 60(4): 203-213.
- [12] BONINA F P, GIANNOSI M L, MEDICI L, et al. Adsorption of salicylic acid on bentonite and kaolin and release experiments[J]. Applied Clay Science, 2007, 36(1/2/3): 77-85.
- [13] POLAKOVIC M, GORNER T, VILLIERAS F, et al. Kinetics of salicylic acid adsorption on activated carbon[J]. Langmuir, 2005, 21(7): 2988-2996.
- [14] MENG M, FENG Y, ZHANG M, et al. Highly efficient adsorption of salicylic acid from aqueous solution by wollastonite-based imprinted adsorbent: a fixed-bed column study[J]. Chemical Engineering Journal, 2013, 225: 331-339.
- [15] OTERO M, ZABKOVA M, RODRIGUES A E. Comparative study of the adsorption of phenol and salicylic acid from aqueous solution onto nonionic polymeric resins[J]. Separation and Purification Technology, 2005, 45(2): 86-95.
- [16] 谢祖芳,童张法,陈渊,等.717 阴离子交换树脂选择吸附分离水杨酸和苯酚[J].高校化学工程学报,2011,25(1):49-54.
- [17] LAI B, ZHOU Y X, QIN H K, et al. Pretreatment of wastewater from acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) resin manufacturing by microelectrolysis[J]. Chemical Engineering Journal, 2012, 179: 1-7.
- [18] LI C, ZHONG H, ZHOU L, et al. Study on adsorption characteristic of macroporous resin to phenol in wastewater[J]. Canadian Journal of Chemical Engineering, 2010, 88(3): 417-424.

(下转第 1393 页)