

沸石分子筛对水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果 及再生研究

袁雅姝¹, 来庆宇¹, 包顺宇¹, 郜玉楠²

(1. 沈阳建筑大学市政与环境工程学院, 辽宁 沈阳 110168;

2. 佛山科学技术学院环境与化学工程学院, 广东 佛山 528000)

摘 要 目的 研究沸石分子筛对水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸附机理与去除效果, 并探究饱和沸石分子筛的最佳再生方案。方法 通过试验分析得出沸石分子筛去除 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的最佳温度和 pH 条件; 从动力学、等温线、热力学等角度分析沸石分子筛吸附 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的机理; 分析基于不同再生剂和再生因素的氨氮饱和沸石分子筛的再生效果。结果 温度大于 20 ℃、pH 值为 6~7 时, 去除率最高, 为 79.6%; 拟合相关系数为 $R^2=0.986$ 的准二级动力学模型能更准确地描述沸石分子筛去除 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的反应, 等温线符合 Langmuir 方程, 吸附过程为吸热反应; 确定最佳再生剂为 0.4 mol/L 的 NaCl 溶液, 最佳再生时间为 24 h, 再生 pH 为 7, 再生温度为 25 ℃, 再生率为 88.17%, 重复再生 5 次后, 再生率仍能达到 78.76%。结论 沸石分子筛对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 具有较好的去除效果, 当达到吸附饱和后, 对其进行再生处理后可多次利用, 提高了沸石分子筛在给水处理领域的利用价值。

关键词 沸石分子筛; 吸附; $\text{NH}_4^+\text{-N}$; 再生

中图分类号 TU991.26; X523

文献标志码 A

Performance and Regeneration of Zeolite Molecular Sieve for Removal of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ in Water

YUAN Yashu¹, LAI Qingyu¹, BAO Shunyu¹, GAO Yu'nan²

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168;

2. School of Environmental and Chemical Engineering, Foshan University, Foshan, China, 528000)

Abstract: The performance and adsorption mechanism of ammonia-nitrogen removal from water by zeolite molecular sieve were studied and the optimal regeneration scheme of saturated zeolite molecular sieve was explored. The optimum environmental conditions for removing $\text{NH}_4^+\text{-N}$ from

收稿日期: 2021-04-16

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFD1100500-03-03)

作者简介: 袁雅姝 (1964—), 女, 高级实验师, 主要从事水处理与微生物等方面研究。

water were obtained by changing temperature and pH. The adsorption mechanism of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ by zeolite molecular sieve was analyzed by kinetics, isotherm and thermodynamics. The regeneration effect of saturated zeolite molecular sieve was studied by using different regenerative agents and regeneration factors. When the temperature is higher than 20°C and the pH value is 6-7, the removal rate of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ is 79.6%. The quasi-second-order kinetic model with a fitted correlation coefficient $R^2 = 0.986$ can more accurately describe the removal of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ by zeolite molecular sieve. The isotherm is in line with Langmuir equation, and the adsorption process is endothermic reaction. The best regeneration agent was 0.4 mol/L NaCl solution, the regeneration time was 24h, the regeneration pH was 7, the regeneration temperature was 25°C , the regeneration rate was 88.17%, and the regeneration rate was still up to 78.76% after repeated regeneration for 5 times. Zeolite molecular sieve has a good removal effect on $\text{NH}_4^+\text{-N}$, and can be used for many times after reaching adsorption saturation for regeneration treatment, which improves the utilization value of zeolite molecular sieve in the field of water supply treatment.

Key words: zeolite molecular sieve; adsorption; $\text{NH}_4^+\text{-N}$; regeneration

氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)是地下水的主要污染物之一。当前,我国大多数净水厂使用的处理工艺为“混凝-沉淀-过滤-消毒”^[1],该工艺去除 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的能力有限,难以保障居民的饮水安全^[2]。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的处理技术还有折点加氯法、离子交换法、吸附法等。折点加氯法在净水厂应用中有产生氯胺等副产物的风险,对人体健康构成潜在危害^[3];离子交换法虽然具有效率高、无副产物等优点,但成本较高;吸附法具有处理性能高效稳定、投资少等优点,因此在给水处理领域中被广泛应用^[4]。沸石分子筛是一种多孔结构的水合铝硅酸盐化合物,其内部孔径分布均匀,具有良好的吸附性和选择交换性^[5-7],能够同水中的 NH_4^+ 进行离子交换反应。基于此,笔者对利用沸石分子筛处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 原水进行研究,考察了沸石分子筛在不同温度和 pH 等条件下对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果,然后分别运用动力学、等温线、热力学等方法对沸石分子筛的吸附机理进行研究,并对吸附饱和的沸石分子筛进行了再生试验研究,取得令人满意的效果,为提高给水水质提供技术支持。

1 试验

1.1 试剂和仪器

试剂:氯化铵、酒石酸钾钠、氢氧化钠、碘

化钾、碘化汞、盐酸、无水碳酸钠、氯化钠、无水氯化钙,均为分析纯。

仪器:MS5s 数显磁力搅拌器;SHA-B 气浴恒温振荡器;SX836 便携式 pH 计;DZF 型干燥箱;RV-1100 紫外可见分光光度计。

1.2 试验方法

向蒸馏水中添加适量的氯化铵,配制成 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度为 $4 \sim 5\text{mg/L}$ 模拟原水,在一定条件下进行试验,然后测试不同因素和再生条件对氨氮去除效果的影响。

2 去除效果及吸附机理

2.1 温度的影响

分别取沸石分子筛 1.0 g,放入 6 组温度分别为 5、10、15、20、25、 30°C 的 100 mL 模拟原水中,调节 pH 为 7,转速设为 200 r/min,振荡 12 h,分别测定 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果,如图 1 所示。当温度为 20°C 时,去除率达到 77.2%;当温度大于 20°C 时,去除率增幅较小,去除率在 30°C 时仅增长至 80.4%。温度升高使水中分子的运动势能不断增加,从而运动速率增加,进而增加了沸石分子筛与水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的接触机率,导致 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率不断增长^[7]。但当温度继续增大时,由于沸石分子筛已经达到了吸附平衡状态,去除率几乎停止增长。

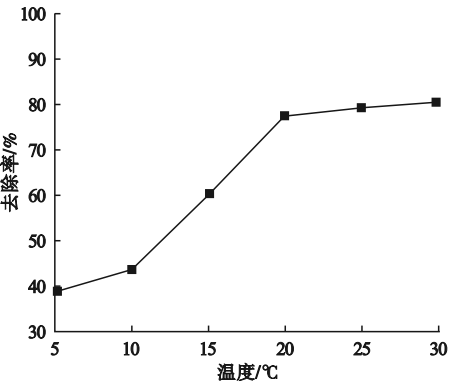


图1 温度对去除效果的影响

Fig.1 Effect of temperature on removal of NH₄⁺-N

2.2 pH 值的影响

将 1.0 g 沸石分子筛分别投加到 6 组 100 mL 模拟原水中,使用摩尔浓度为 0.1 mol/L 盐酸和氢氧化钠将溶液调节 pH 值分别为 4、5、6、7、8 和 9,在室温、转速为 200 r/min 条件下振荡 12 h,分别测定 NH₄⁺-N 的去除效果,如图 2 所示。去除率呈先增加后降低的趋势。当溶液 pH 值低于 6 时,沸石分子筛去除 NH₄⁺-N 的效果不好,pH 值较低时,水中 H⁺ 含量较多,同 NH₄⁺ 竞争,抢夺部分 NH₄⁺ 吸附位点,影响了 NH₄⁺-N 的去除效果^[7];当 pH 值为 6 和 7 时,吸附效果较好,去除率分别为 79.6% 与 79.1%;当溶液 pH 值高于 7 时,去除率呈现降低的趋势,这是由于碱性条件下 NH₄⁺ 易与溶液中的 OH⁻ 反应,从而降低了 NH₄⁺ 离子的浓度,使 NH₄⁺-N 的去除效果下降^[8]。

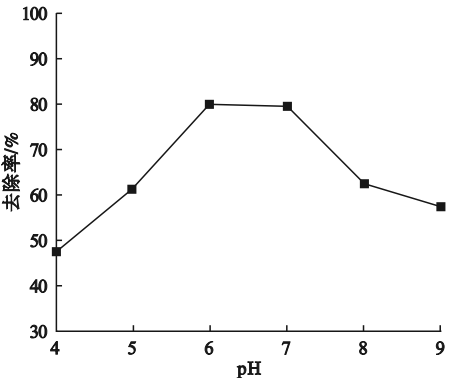


图2 pH 对去除效果的影响

Fig.2 Effect of pH on removal of NH₄⁺-N

2.3 吸附动力学

在吸附等温线研究中常用的模型有准一级与准二级动力学模型^[11-12]。

准一级动力学方程:

log(q_{e1} - q_t) = logq_{e1} - $\frac{k_1}{2.303}t$. (1)

准二级动力学方程:

$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_{e2}^2} + \frac{t}{q_{e2}}$. (2)

式中:q_t为 t 时刻吸附剂的吸附量,mg/g;t 为时间,min;k₁为准一级方程吸附速率常数,min⁻¹;k₂为准二级方程吸附速率常数,g/(mg·min);q_{e1}和 q_{e2}分别为准一级和准二级方程平衡吸附量,mg/g。

称取沸石分子筛 1.0 g,将其置于 100 mL 模拟原水中,在室温、转速为 200 r/min 条件下,振荡时间分别为 15、30、60、120、180、240、300、360、420、480、540、600、660 和 720 min,分别测定溶液中的 NH₄⁺-N 的去除效果。动力学曲线如图 3 所示。

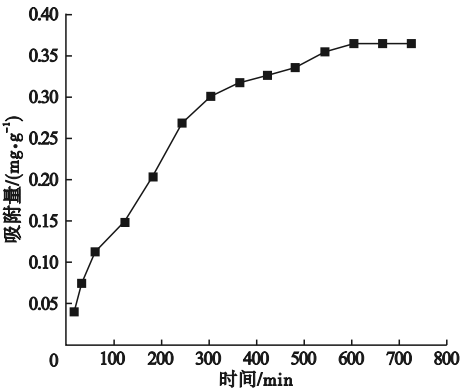


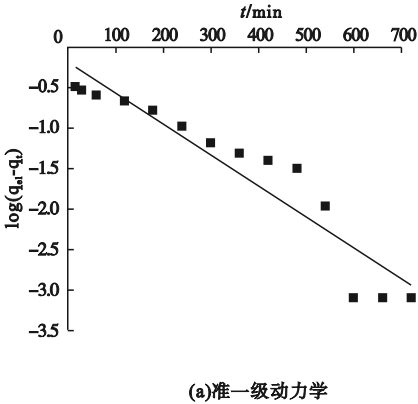
图3 沸石分子筛吸附水中氨氮的动力学曲线

Fig.3 Kinetic curve of ammonia-nitrogen adsorption in water by zeolite molecular sieve

在吸附反应开始的前 300 min 内,呈直线上升,沸石分子筛能够快速吸附氨氮,开始由于吸附时间较短,沸石分子筛表面剩余大量吸附位点,NH₄⁺-N 较容易被吸附;当反应进行到 300 ~ 540 min 时,NH₄⁺-N 的吸附量增长缓慢,这期间沸石分子筛逐渐达到饱和

状态;当反应超过 600 min 后,吸附量增长很慢,说明反应已达到了平衡状态;由此可知沸石分子筛对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 吸附的平衡时间为 600 min,平衡吸附量为 0.364 mg/g。

分别采用准一级与准二级动力学模型对吸附动力学过程进行拟合,动力学参数如表1



所示,吸附动力学模型拟合曲线如图 4 所示。

表 1 吸附动力学参数

准一级			准二级		
q_{e1}	k_1	R_1^2	q_{e2}	k_2	R_2^2
0.641	0.008 8	0.891	0.467	0.011	0.986

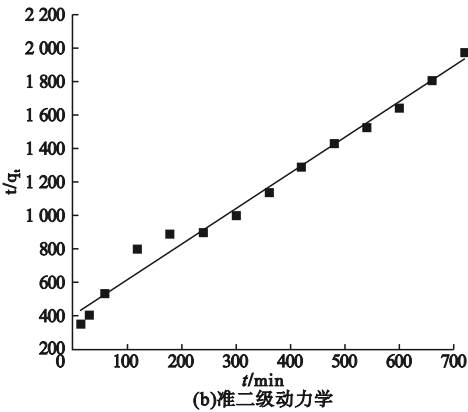


图 4 吸附动力学模型拟合曲线

Fig. 4 Adsorption kinetics model fitting curve

由图 4 和表 1 可知,准一级动力学模型拟合相关系数 $R_1^2 = 0.891$ 较低,且平衡吸附量 $q_{e1} = 0.641$ mg/g 与试验结果相差较大;准二级动力学模型拟合相关系数 $R_2^2 = 0.986$ 较高,且平衡吸附量为 $q_{e2} = 0.467$ mg/g,与试验所得平衡吸附量 0.364 mg/g 更接近。可知准二级动力学模型可以更好地描述沸石分子筛吸附 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的过程,吸附过程以化学吸附为主^[13]。

2.4 吸附等温线

在吸附等温线研究中常用的模型有 Langmuir 与 Freundlich 模型^[14-15]。

Langmuir 等温吸附方程:

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \tag{3}$$

Freundlich 等温吸附方程:

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \tag{4}$$

式中: q_e 为平衡吸附量,mg/g; C_e 为吸附质平衡浓度,mg/L; q_m 为最大吸附量,mg/g; K_L 为 Langmuir 常数,L/mg; K_F 为 Freundlich 经验

常数; $1/n$ 为异质因子^[16]。

取 1.0 g 沸石分子筛投加到 6 组 100 mL 质量浓度分别为 2、4、6、8、10、12 mg/L 氨氮溶液中,在室温、转速为 200 r/min 条件下振荡 10 h,吸附平衡后,分别测定 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果。根据试验数据,采用 Langmuir 与 Freundlich 等温吸附方程进行拟合,吸附等温线参数见表 2。

表 2 吸附等温线参数

Langmuir			Freundlich		
q_m	K_L	R_L^2	K_F	$1/n$	R_F^2
1.341	0.092	0.979	0.136	1.517	0.936

从表 2 中可以看出,Langmuir 模型的复相关系数 $R_L^2 = 0.979$ 较高,说明 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在沸石分子筛上的吸附主要属于单层吸附和化学吸附过程。同时经计算得出沸石分子筛对溶液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的单分子层最大吸附量为 1.341 mg/g^[17]。

2.5 吸附热力学

通过对试验数据拟合分析,求出热力学参数 $\Delta G^0, \Delta H^0, \Delta S^0$ [18]:

$$K_d = \frac{(C_0 - C_e)}{C_e \times m} = \frac{q_e}{C_e} \tag{5}$$

$$\ln K_d = \frac{\Delta S^0}{R} - \frac{\Delta H^0}{RT} \tag{6}$$

$$\Delta G^0 = -RT \ln K_d \tag{7}$$

式中: K_d 为平衡吸附分配系数; T 为绝对温度, K ; R 为理想气体常数,8.314 J/(mol·K)。

称取沸石分子筛 1.0 g, 将其置于 100 mL 模拟原水中, 在温度分别设置为 5、10、15、25、35 ℃ 的条件下, 以 200 r/min 转速振荡 10 h, 分别测定其中的 NH₄⁺-N 浓度。根据试验结果对 ln K_d 与 1/ T 进行线性拟合, 并求出 ΔH^0 与 ΔS^0 , 然后按照式(7) 计算得出 ΔG^0 , 沸石分子筛吸附氨氮的 ln K_d 和 1/ T 关系如图 5 和表 3 所示。

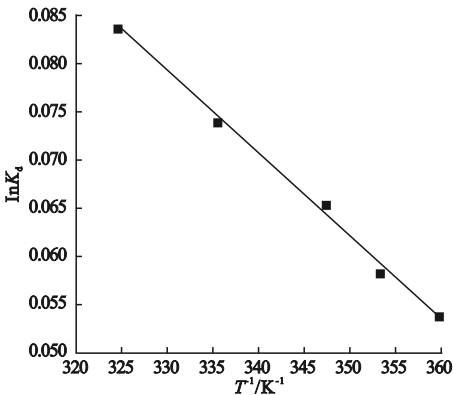


图5 沸石分子筛吸附氨氮的 ln K_d 和 1/ T 关系
Fig. 5 The relationship between ln K_d and 1/ T of NH₄⁺-N adsorption of zeolite molecular sieve

表3 吸附热力学参数

Table 3 The adsorption thermodynamic parameters

<i>T</i> /K	$\Delta G^0 /$ (kJ·mol ⁻¹)	$\Delta H^0 /$ (J·mol ⁻¹)	$\Delta S^0 /$ (J·(K·mol) ⁻¹)
278	-0.124 2	0.708	2.993
283	-0.136 8	0.708	2.993
288	-0.156 3	0.708	2.993
298	-0.182 9	0.708	2.993
308	-0.213 7	0.708	2.993

由图 5 和表 3 可知, $\Delta H^0 > 0$, 说明沸石分子筛吸附 NH₄⁺-N 的过程属于吸热反应; $\Delta G^0 < 0$, 表明该吸附过程可以自发进行, 并且温度升高能够使沸石分子筛能更高效地去除 NH₄⁺-N; $\Delta S^0 > 0$, 可知该吸附过程属于熵增反应, 体系的混乱程度增加可提高沸石分子筛对 NH₄⁺-N 的吸附能力 [19]。

3 饱和和沸石分子筛再生研究

再生试验的条件及处理步骤: 吸附饱和的沸石分子筛的量取 1.0 g, 离子溶液基液为 100 mL, 室温, 振荡时间为 24 h, 转速为 200 r/min, 使用去离子水冲洗沸石分子筛, 60 ℃ 下烘干 5 h, 然后测定其中 NH₄⁺-N 吸附平衡浓度, 以此计算再生率。

3.1 不同离子溶液对再生效果的影响

采用洗脱液能够将饱和的沸石分子筛中的 NH₄⁺ 交换下来, 恢复其对氨氮的吸附能力, 可实现饱和沸石分子筛的再生 [20]。将吸附饱和的沸石分子筛分别置于 100 mL 物质的量浓度为 1 mol/L 的 NaOH、Na₂CO₃、NaCl、HCl、CaCl₂ 溶液中, 分析不同离子溶液对再生效果的影响, 试验结果如图 6 所示。经多次试验后取平均值, 得到各离子溶液处理后的再生率分别为 51.21%、64.26%、89.18%、32.05%、42.17%。可以看出, NaCl 溶液的化学再生效果最佳。

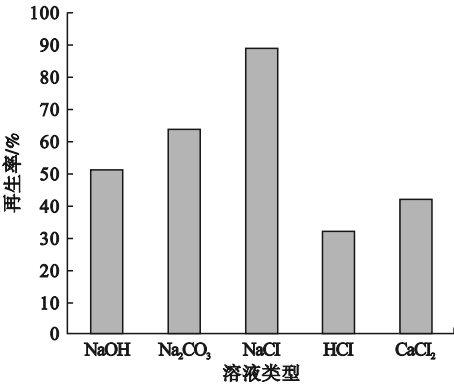


图6 不同溶液的再生效果

Fig. 6 Effect of different solution on regeneration

3.2 再生剂浓度对再生效果的影响

设置 NaCl 溶液物质的量浓度分别为 0.05、0.1、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.2 mol/L,不同 NaCl 浓度的再生效果如图 7 所示。随着 NaCl 浓度的增加,再生率先快速增长后趋于平缓,当 NaCl 物质的量浓度由 0.05 mol/L 增至 0.4 mol/L 时,再生率增长较快,NaCl 物质的量浓度为 0.4mol/L 时,再生率达到 88.17%。再生剂浓度增大后可在沸石分子筛表面形成较高的浓度梯度,有利于颗粒孔隙中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 解吸,从而使再生率逐渐增加^[21]。当 NaCl 浓度继续增加时,再生率增长速度变缓,NaCl 物质的量浓度为1.2 mol/L时,再生率为 90.14%。在饱和沸石分子筛中有一部分 NH_4^+ 与沸石分子筛结合得比较牢固,这部分 NH_4^+ 较难与再生液进行离子交换反应,即使不断增大 NaCl 溶液的浓度,再生率也难以增长^[22]。从成本角度考虑,物质的量浓度为 0.4 mol/L 的 NaCl 溶液最合适。

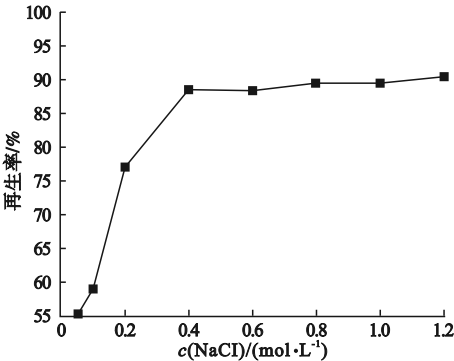


图 7 NaCl 浓度对再生效果的影响

Fig. 7 The influence of NaCl on regeneration effect

3.3 再生时间对再生效果的影响

将 NaCl 溶液摩尔浓度设为 0.4 mol/L,保持其他条件不变,再生时间设置为 3 h、6 h、12 h、18 h、24 h、30 h,分析时间对再生效果的影响,结果如图 8 所示。随再生时间的增长,再生率呈先增加然后趋于平缓的趋势。当再生时间为 3 h 时,再生率为 73.36%,当再生时间为 24 h 时,再生率增长至 88.17%,

当再生时间超过 24 h 后,再生率几乎不再增长。由此可知,处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 饱和沸石分子筛的最佳再生时间为 24 h。

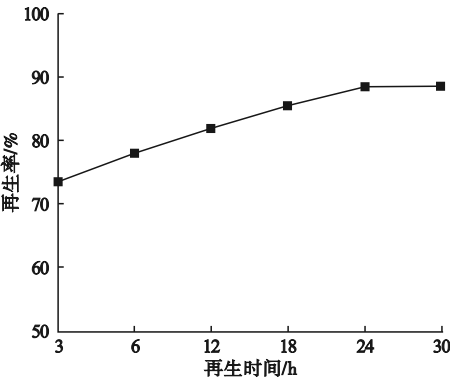


图 8 再生时间对再生效果的影响

Fig. 8 Effect of regeneration time on regeneration effect

3.4 再生溶液 pH 对再生效果的影响

保持其他条件不变,使用摩尔浓度为 0.1 mol/L 盐酸和氢氧化钠溶液将基液 pH 值分别调节至 4、5、6、7、8 和 9,不同 pH 对再生效果的影响如图 9 所示。从图 9 中可以看出,随 pH 的增大,再生率呈先增长后减少的趋势,当 pH 为 7 时再生效果最佳,再生率为 88.13%。说明 NaCl 溶液对氨氮饱和沸石分子筛的再生反应适合在中性环境中进行。

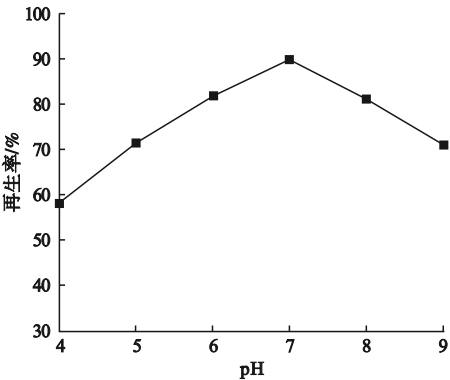


图 9 再生 pH 对再生效果的影响

Fig. 9 Effect of pH on regeneration effect

3.5 再生温度对再生效果的影响

保持其他条件不变,将温度分别设为 5、10、15、25、35 ℃,测试温度对再生效果的影响,结果如图 10 所示。由图 10 可知,随着温

度的增高再生率逐渐增长,当温度为25℃时再生率为88.15%,这是由于温度增高会使溶液中阳离子的运动势能不断增加,有利于阳离子深入到沸石分子筛的孔隙中将吸附的NH₄⁺-N置换下来^[23]。当温度增至35℃时,再生率略有增长,为88.64%。由此确定最佳再生温度为25℃。

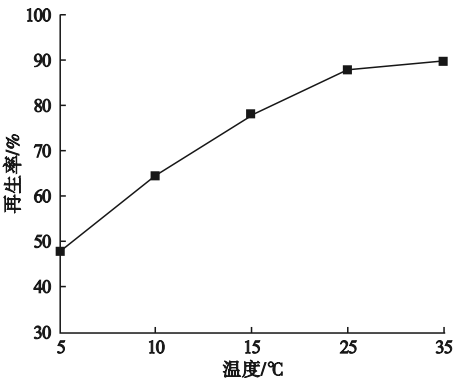


图10 再生温度对再生效果的影响

Fig. 10 Effect of regeneration temperature on regeneration effect

3.6 重复再生试验

保持前述优化条件不变,然后重复进行吸附试验,计算其吸附量和再生率。表4为对吸附饱和的沸石分子筛进行5次重复再生试验得到结果。经再生处理后,再生率与吸附量分别为78.76%和0.293 mg/g。由此看出,经多次再生后,沸石分子筛仍然能够基本恢复原有的活性。

表4 重复再生效果比较

Table 4 Comparison of repeated regeneration effect

重复再生/次	再生率/%	吸附量/(mg·g ⁻¹)
0	—	0.372
1	88.17	0.328
2	86.56	0.322
3	83.60	0.311
4	80.11	0.298
5	78.76	0.293

4 结 论

(1)使用沸石分子筛处理NH₄⁺-N质量浓度为4~5 mg/L的模拟原水,温度大于

20℃、pH值为6~7时,去除率为79.6%;沸石分子筛吸附水中NH₄⁺-N的行为符合准二级动力学模型和Langmuir等温线模型,吸附过程以单层吸附与化学吸附为主,吸附过程为吸热反应。

(2)最佳单因素处理参数为采用0.4 mol/L的NaCl溶液,再生时间为24 h、再生pH为7、再生温度为25℃,再生率达到88.17%,吸附量为0.328 mg/g;重复再生5次后,仍可保持78.76%的再生率,0.293 mg/g的吸附量,且处理效果稳定。

参考文献

[1] 孙美乔,郜玉楠,傅金祥,等.改性壳聚糖强化混凝处理低温氨氮污染水源水研究[J].给水排水,2017,43(7):67-71.
(SUN Meiqiao, GAO Yu'nan, FU Jinxiang, et al. Modified chitosan enhanced coagulation treatment of low temperature ammonia nitrogen polluted water source [J]. Water & wastewater engineering, 2017, 43(7): 67-71.)

[2] 马军,江进,杨友强,等.机械旋转格网强化混凝处理低温低浊水研究[J].中国给水排水,2012,28(17):5-8.
(MA Jun, JIANG Jin, YANG Youqiang, et al. Mechanical rotating grid for enhanced coagulation of low temperature and low turbidity water [J]. China water & wastewater, 2012, 28(17): 5-8.)

[3] 崔海.受高浓度铁锰氨氮污染的地下水治理研究[J].应用能源技术,2016(1):1-3.
(CUI Hai. The research on management of high contation of Fe-Mn and NH₃-N in the underground water [J]. Applied energy technology, 2016(1): 1-3.)

[4] WANG S, PENG Y. Natural zeolites as effective adsorbents in water and wastewater treatment [J]. Chemical engineering journal, 2010, 156(1): 11-24.

[5] 张世春,王恩文,雷绍民,等.沸石分子筛在大气与水污染治理应用的研究进展[J].无机盐工业,2014,46(11):9-12.
(ZHANG Shichun, WANG Enwen, LEI Shaomin, et al. Application research progress of zeolite molecular sieve in air and water pollution control [J]. Inorganic chemicals industry, 2014, 46(11): 9-12.)

[6] 郜玉楠,周历涛,茹雅芳,等.壳聚糖改性4A沸石分子筛颗粒去除低温水中硝酸盐的机理研究[J].环境科学研究,2019,32(3):523-531.
(GAO Yu'nan, ZHOU Litao, RU Yafang, et al. Mechanism of nitrate removal in drinking water by 4A zeolite molecular sieve modified with chitosan at low temperature [J]. Research of environmental sciences, 2019, 32(3): 523-531.)

[7] 郜玉楠,周历涛,王静,等.壳聚糖包覆沸石分

- 子筛处理微污染水中的氨氮[J]. 环境工程学报, 2018, 36(12): 108–112.
(GAO Yu'nan, ZHOU Litao, WANG Jing, et al. Treatment of ammonia nitrogen in micro-polluted water by chitosan coated zeolite molecular sieve [J]. Environmental engineering, 2018, 36(12): 108–112.)
- [8] 任根宽. 用煤矸石合成4A沸石分子筛处理氨氮废水[J]. 环境工程学报, 2014, 8(4): 1533–1538.
(REN Genkuan. Removal of ammonia-nitrogen in wastewater with 4A zeolite molecular sieve synthesized from coal gangue [J]. Chinese journal of environmental engineering, 2014, 8(4): 1533–1538.)
- [9] 陈丽珠, 巢猛, 丁卫, 等. pH值和纯氧曝气对氨氮去除的影响研究[J]. 中国给水排水, 2016, 32(9): 58–61.
(CHEN Lizhu, CHAO Meng, DING Wei, et al. Effect of pH and pure oxygen aeration on ammonia nitrogen removal [J]. China water & wastewater, 2016, 32(9): 58–61.)
- [10] HARIKISHORE D, REDDY K, LEE S M, et al. Removal of Cd(II) and Cu(II) from aqueous solution by agro biomass: equilibrium, kinetic and thermodynamic studies [J]. Environmental engineering research, 2012, 17(3): 125–132.
- [11] 黄晓鸣, 潘敏, 陈天虎, 等. 天然斜发沸石吸附去除水中氨氮机理研究[J]. 矿物学报, 2016, 36(3): 371–376.
(HUANG Xiaoming, PAN Min, CHEN Tianhu, et al. Mechanism of ammonium removal from aqueous solution by natural clinoptilolite [J]. Acta mineralogica sinica, 2016, 36(3): 371–376.)
- [12] 桂花, 谭伟, 李彬, 等. 4A沸石分子筛处理中低浓度氨氮废水[J]. 环境工程学报, 2014, 8(5): 1944–1950.
(GUI Hua, TAN Wei, LI Bin, et al. Removal ammonia-nitrogen from medium-low concentration wastewater by 4A zeolite molecular sieve [J]. Chinese journal of environmental engineering, 2014, 8(5): 1944–1950.)
- [13] 郭志伟. 改性沸石分子筛吸附氨氮废水机理研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2022.
(GUO Zhiwei. Adsorption mechanism of ammonia nitrogen from waste liquid by modified molecular sieve [D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2022.)
- [14] 钱吉彬, 杨朗, 张华, 等. 镇江斜发沸石对氨氮的吸附动力学及热力学研究[J]. 环境工程学报, 2011, 5(2): 327–330.
(QIAN Jibin, YANG Lang, ZHANG Hua, et al. Research on adsorption kinetics and thermodynamics of natural Zhenjiang clinoptilolite for ammonia [J]. Chinese journal of environmental engineering, 2011, 5(2): 327–330.)
- [15] LIU H B, PENG S C, SHU L, et al. Effect of Fe₃O₄ addition on removal of ammonium by zeolite Na A [J]. Journal of colloid and interface science, 2013, 390(1): 204–210.
- [16] KONG J, YUE Q, SUN S, et al. Adsorption of Pb(II) from aqueous solution using beratin waste-hide waste: equilibrium, kinetic and thermodynamic modeling studies [J]. Chemical engineering journal, 2014, 241(4): 393–400.
- [17] 姚睿. 改性沸石的制备及对水源水中氨氮的去除效能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
(YAO Rui. Preparation of modified zeolite and study on its removal efficiency of ammonia nitrogen in source water [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.)
- [18] 靳薛凯, 冯素敏, 邵立荣, 等. 天然片沸石对废水中NH₄⁺-N的吸附机理研究[J]. 河北科技大学学报, 2018, 39(1): 56–64.
(JIN Xuekai, FENG Sumin, SHAO Lirong, et al. Study on adsorption mechanism of ammonia nitrogen in wastewater by natural heulandite [J]. Journal of Hebei university of science and technology, 2018, 39(1): 56–64.)
- [19] 何李文泽, 陈钰, 赵玉婷, 等. 碱水热净水污泥吸附剂对氨氮的吸附性能[J]. 水处理技术, 2022, 48(10): 82–87.
(HE Liwenzhe, CEHN Yu, ZHAO Yuting et al. Adsorption properties of ammonia nitrogen by alkali-hydrothermal water treatment sludge adsorbent [J]. Technology of water treatment, 2022, 48(10): 82–87.)
- [20] 邵玉楠, 包顺宇, 王静, 等. 壳聚糖改性沸石分子筛再生方法选择及优化[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(2): 378–384.
(GAO Yu'nan, BAO Shunyu, WANG Jing, et al. Selection and optimization of regeneration method for chitosan-modified zeolite molecular sieve [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2020, 36(2): 378–384.)
- [21] HEDSTRÖM A, AMOFAH L R. Adsorption and desorption of ammonium by clinoptilolite adsorbent in municipal wastewater treatment systems [J]. Journal of environmental engineering & science, 2008, 7(1): 53–61.
- [22] 周历涛. 壳聚糖改性沸石分子筛吸附颗粒再生性能及机理研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2019.
(ZHOU Litao, Study on regeneration performance and mechanism of chitosan modified zeolite molecular sieve adsorption particles [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2019.)
- [23] 张帅, 叶芳芳, 李长刚, 等. 饱和吸附氨氮沸石的化学再生方法研究[J]. 工业水处理, 2019, 39(8): 73–76.
(ZHANG Shuai, YE Fangfang, LI Changgang et al. Study on chemical regeneration method of saturated zeolite adsorbed ammonia nitrogen [J]. Industrial water treatment, 2019, 39(8): 73–76.)
- (责任编辑: 王国业 英文审校: 唐玉兰)