

离子交换树脂处理二甲胺废水的研究

孟媛媛¹ 胡勤海^{1*} 陆侨治² 熊云龙²

(1. 浙江大学环境与资源学院, 浙江 杭州 310029; 2. 杭州金枫叶科技有限公司, 浙江 杭州 310012)

摘要 通过 ZGSPC106 型树脂对水中二甲胺(DMA)的静态吸附、动态吸附和解吸试验,探讨了溶液 pH、初始浓度、温度和流速等对树脂吸附 DMA 的影响以及合适的再生条件。结果表明,该树脂对 DMA 有较强的吸附能力,293 K 下树脂的静态饱和吸附量为 138.89 mg/g;动态吸附试验表明,进液流速为 20 mL/min 较为适宜;以 2 mol/L 的 HCl 溶液为洗脱剂,在洗脱流速为 10 mL/min 条件下,4 倍树脂体积的 HCl 溶液对饱和树脂的洗脱率达 90% 以上;该树脂具有良好的稳定性,可多次重复利用。

关键词 二甲胺 离子交换树脂 吸附 再生

Study on treatment of DMA containing wastewater with ion exchange resin MENG Yuanyuan¹, HU Qin Hai¹, LU George², XIONG Yunlong². (1. College of Environmental & Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310029; 2. Golden Maple Leaf Corporation of Hangzhou, Hangzhou Zhejiang 310012)

Abstract: The static adsorption of dimethylamine (DMA) on three ion exchange resins was performed to select the best absorbent, and ZGSPC106 among the three resins presented the best performance for its adsorption capacity and adsorption rate. Batch experiments of DMA adsorption on ZGSPC106 were conducted, the effect of initial acidity, concentration of DMA, temperature and interfered ions on adsorption capacity were investigated. The adsorption capacity of ZGSPC106, which increased with increasing initial DMA and temperature, was highest under the natural pH. The dynamic experiments showed that 20 mL/min of flow rate was acceptable for dynamic adsorption of DMA from ZGSPC106. The saturated resin was eluted by 2 mol/L hydrochloric at the flow rate of 10 mL/min, the elution percentage could reach as high as 90%. Furthermore, the resin could be well reused due to its good stability.

Keywords: dimethylamine; ion exchange resin; adsorption; regeneration

二甲胺(DMA)是一种重要的化工原料,广泛应用于农药、制药、橡胶、皮革和有机化学工业中^[1]。DMA 在生产和使用过程中会产生大量含胺废水,如合成革企业采用精馏工艺回收溶剂 N,N-二甲基酰胺(DMF)时,塔顶产生的每升废水中往往含有数千毫克的 DMA^[2]。这些废水若不加以处理而直接排放,会造成环境的污染以及资源的浪费,因此采取有效的治理和回收措施很必要。

含胺废水的处理方法较多^[3],离子交换法在国内外也有研究^[4-6],其使用的树脂主要有凝胶型强酸性和大孔型弱酸性阳离子交换树脂,处理对象多为中低质量浓度(<500 mg/L)的含胺废水,且尚未考察细颗粒树脂对 DMA 的吸附效果。细颗粒树脂因比表面积较大往往具有更大的吸附能力^[7,8],有望用于更高浓度 DMA 废水的处理。笔者以 800~2 000 mg/L 的 DMA 模拟废水为处理对象,通过静态吸附、动态吸附和解吸试验,探讨溶液初始 pH、初始浓

度、温度、交换时间和流速等对 DMA 去除效果的影响,以期能为离子交换法在中高浓度 DMA 废水处理中的应用提供理论指导与技术支持。

1 试验部分

1.1 仪器与材料

材料:ZGSPC106、001×7 和 D001 型树脂,3 种树脂的物理性质如表 1 所示。DMA 模拟废水(用质量分数为 33% 的 DMA 溶液配制)。所有试剂均为分析纯,溶液均用去离子水配制。

表 1 3 种树脂的物理性质
Table 1 Physical property of three resins

型号	ZGSPC106	001×7	D001
骨架	苯乙烯系	苯乙烯系	苯乙烯系
型式	凝胶型	凝胶型	大孔型
功能基团	—SO ₃ H	—SO ₃ H	—SO ₃ H
粒度/mm	0.200~0.315	0.315~1.250	0.315~1.250
含水率/%	52.0~57.0	45.0~50.0	45.0~55.0
全交换容量/(mmol·g ⁻¹)	≥4.50	≥4.50	≥4.35

第一作者:孟媛媛,女,1986 年生,硕士研究生,主要从事工业废水处理研究。* 通讯作者。

仪器:交换柱(自制,直径28 mm);FA1004N型电子天平;PHS-3B型精密 pH 计;UV-2802 紫外—可见分光光度计;HZ-9211K 恒温振荡器;PH0140 型干燥箱;兰格蠕动泵。

1.2 树脂预处理

取适量新树脂于烧杯中,用清水反复冲洗至出水澄清。用约 2 倍树脂体积、质量分数为 10% 的 NaCl 溶液浸泡 24 h,去离子水洗至中性;用约 2 倍树脂体积、1 mol/L 的 NaOH 溶液浸泡 24 h,去离子水洗涤至中性;用约 2 倍树脂体积、1 mol/L 的 HCl 溶液浸泡 24 h,去离子水洗涤至 pH 为 5~6^[9];将树脂抽滤至不滴水后,在 323 K 下的干燥箱中烘至恒质量,备用。

1.3 分析方法

采用分光光度法测定水中 DMA 的浓度^[10],即在碱性介质下,使次氯酸钠与 DMA 反应生成氯胺,再加入亚硝酸钠除去过量的次氯酸钠。氯胺与淀粉-碘化钾试剂形成蓝色络合物,用紫外—可见分光光度计(波长(λ)为 585 nm)分析出水中 DMA 浓度。

1.4 试验方法

1.4.1 静态吸附

取一定浓度的 DMA 溶液 50 mL 于具塞锥形瓶中,加入 0.500 g 树脂,于恒温振荡器中以 100 r/min 的转速振荡 30 min 后,测定溶液中 DMA 浓度,按式(1)计算平衡吸附量(Q_e , mg/g)。

$$Q_e = \frac{V(c_0 - c_e)}{W} \quad (1)$$

式中: V 为溶液体积,L; c_0 和 c_e 分别为 DMA 初始和平衡质量浓度,mg/L; W 为树脂质量,g。

1.4.2 动态吸附

准确称取一定量树脂,采用湿法装柱,即将树脂与去离子水混合后,从交换柱上端逐渐倒入以尽量避免带入气泡^[11]。交换柱上下端填少量脱脂棉压紧树脂层。将 DMA 溶液以一定流速通过交换柱,定容接收流出液,测定 DMA 浓度,绘制穿透曲线。

1.4.3 动态解吸

用去离子水将交换柱中吸附达饱和的树脂洗净,以一定流速通入不同浓度的 HCl 溶液进行再生,定容接收洗脱液,测定 DMA 浓度,绘制洗脱曲线,按式(2)计算解吸率(y ,%)。

$$y = \frac{x_1}{x_2} \times 100\% \quad (2)$$

式中: x_1 、 x_2 分别为解吸得到的 DMA 量、树脂上吸附的 DMA 量,g。

2 结果与讨论

2.1 树脂筛选

2.1.1 吸附量的比较

分别取预处理后的 ZGSPC106、001×7 和 D001 型树脂进行静态吸附试验,绘制 3 种树脂在 293 K 下对 DMA 的静态吸附等温线,结果如图 1 所示。结果表明,DMA 初始浓度越高,其平衡浓度越高,在相同初始浓度条件下 ZGSPC106 型树脂对 DMA 的吸附量最大,001×7 型树脂次之。由图 1 可见,DMA 平衡浓度较低时,ZGSPC106 型树脂对 DMA 的平衡吸附量随平衡浓度的增加而迅速增大,平衡浓度增加到一定程度后,平衡吸附量基本稳定在 140 mg/g 左右。

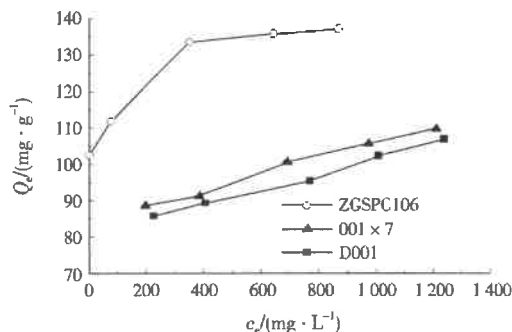


图 1 3 种树脂对 DMA 的吸附等温线

Fig. 1 Isothermal curves of DMA adsorption on three resins

2.1.2 吸附速率的比较

分别绘制 ZGSPC106、001×7 和 D001 型树脂对初始质量浓度为 1 000 mg/L DMA 溶液的吸附动力学曲线,结果如图 2 所示(其中 Q_t 为不同时刻的吸附量,mg/g)。由图 2 可知,3 种树脂对 DMA 的吸附均较快,其中 ZGSPC106 和 001×7 型树脂对 DMA 的吸附速率较为接近,皆可在 12 min 内达到

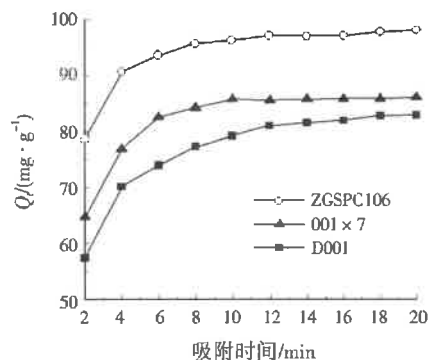


图 2 3 种树脂对 DMA 的吸附动力学曲线

Fig. 2 Kinetic curves of DMA adsorption on three resins

平衡,D001型树脂的吸附速率略小于前两者,20 min时基本达到平衡。综合考虑3种树脂对DMA的吸附量和吸附速率后,选择ZGSPC106型树脂作为研究对象。

2.2 静态吸附试验结果

2.2.1 溶液初始pH的影响

溶液pH对吸附过程影响很大,因为pH可以影响吸附剂表面的电荷以及吸附质的离子化程度^[12,13]。将初始质量浓度分别为800、1 000 mg/L的DMA溶液(自然条件下pH为11.4)用HCl或NaOH调至不同的pH,于293 K下进行静态吸附试验,结果如图3所示。

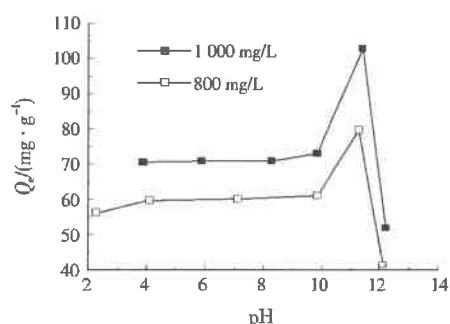


图3 pH对吸附的影响

Fig. 3 Effect of pH on the DMA adsorption

由图3可看出,对于2个不同初始浓度的DMA溶液,树脂对DMA的平衡吸附量均在溶液的自然pH条件下最大,加入酸或碱改变初始pH后,平衡吸附量都明显降低。因此,以下试验均在DMA溶液的自然pH条件下进行。

2.2.2 吸附时间的影响

称取预处理过的树脂0.500 g,加入50 mL DMA溶液(初始质量浓度为2 000 mg/L),于293 K下进行静态吸附试验,在不同时刻取样测定DMA浓度(c_t , mg/L),并计算 Q_t , Q_t 随吸附时间变化的情况如图4所示。

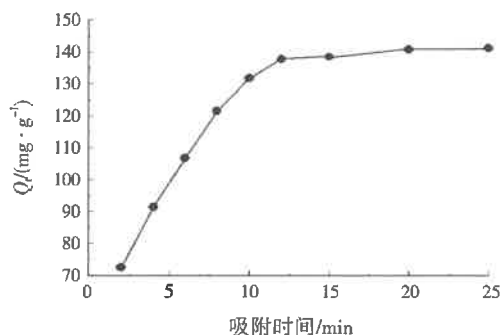


图4 吸附时间对吸附的影响

Fig. 4 Effect of contact time on DMA adsorption

由图4可看出,前10 min内 Q_t 随时间快速增加,表示吸附进行得较快,这是因为开始时吸附主要发生在树脂外表面,在不断振荡下固液界面上的扩散较易进行。随着吸附过程的进行,DMA浓度逐渐减少,同时吸附质沿树脂微孔向内部扩散,扩散阻力渐增,导致吸附速率随时间逐渐减缓。20 min后吸附量变化不大,为确保达到平衡,选择吸附时间为30 min。

2.2.3 初始浓度和温度的影响

分别在293、313、333 K下进行静态吸附试验,测定相同温度、不同初始浓度下的平衡吸附量,绘制 Q_e 与 c_0 的关系曲线,结果如表2所示。由表2可看出,平衡吸附量随着DMA初始浓度的增加而增大;相同DMA初始浓度条件下,树脂对DMA的平衡吸附量随温度的升高而增大,表明升高温度有利于吸附的进行。经计算,293 K下ZGSPC106型树脂对DMA的静态饱和吸附量为138.89 mg/g。

表2 DMA初始质量浓度和温度对吸附的影响
Table 2 Effect of initial DMA concentration and temperature on DMA adsorption

$c_0/(mg \cdot L^{-1})$	$Q_e/(mg \cdot g^{-1})$		
	293 K	313 K	333 K
1 030	102.66	102.72	102.76
1 200	112.02	113.58	114.60
1 690	133.60	134.88	136.32
2 000	136.05	137.83	139.18
2 240	137.29	139.60	140.30

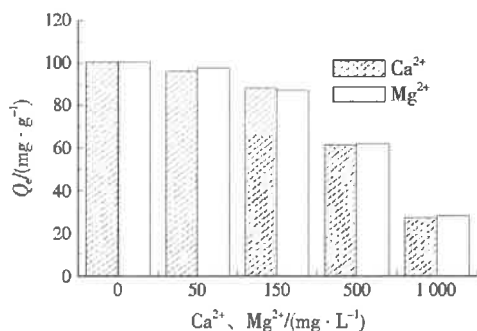
2.2.4 干扰因子的影响

向初始质量浓度为1 000 mg/L的DMA溶液中分别加入不同质量的NaCl、FeCl₃、CaCl₂和MgCl₂固体,调节各种干扰因子的含量。各取50 mL上述溶液于装有0.500 g树脂的具塞锥形瓶中,在293 K下进行静态吸附试验,结果分别如表3和图5所示。

表3 Fe³⁺和Na⁺对吸附的影响
Table 3 Effect of Fe³⁺ and Na⁺ on DMA adsorption

Fe ³⁺ /(mg · L ⁻¹)	Q_e /(mg · g ⁻¹)	Na ⁺ /(mg · L ⁻¹)	Q_e /(mg · g ⁻¹)
0	100.35	40	97.30
10	99.74	400	76.35
100	92.84	4 000	22.58
500	62.75	20 000	3.33

由表3和图5可见,Na⁺、Fe³⁺、Ca²⁺和Mg²⁺引入后树脂对DMA吸附量减少,当各种干扰离子<100 mg/L时,其吸附量可保持在原有水平的90%以上,继续增加干扰离子含量,树脂对DMA的吸附

图5 Ca²⁺和Mg²⁺对吸附的影响Fig. 5 Effect of Ca²⁺ and Mg²⁺ on DMA adsorption

量明显降低。这主要是因为 ZGSPC106 型树脂是一种强酸性阳离子交换树脂,且以上干扰离子分子量均较小,更易被吸附,竞争吸附的存在导致树脂对 DMA 吸附量的减少。由图 5 可进一步看出,相同浓度的 Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 对吸附的影响基本一致。鉴于各种离子的引入可导致树脂对 DMA 吸附量的减少,工业运用中需考虑实际废水的成分,对于含离子较多的废水,应采取适当的预处理措施予以去除,从而提高树脂对 DMA 的吸附效果。

向初始质量浓度为 1 000 mg/L 的 DMA 溶液中分别加入不同质量的蔗糖和硅藻土,调节溶液中 COD 和 SS 的浓度,按照静态试验方法考察 COD 和 SS 对吸附的影响,结果如图 6 所示。由图 6 可知, COD 和 SS 的引入对树脂吸附 DMA 的过程基本没有影响,当两者质量浓度很高时(50 000 mg/L),其吸附量仍接近原有水平。由此推测,树脂对 DMA 的吸附是离子交换过程,蔗糖和硅藻土属于大分子物质,故对吸附影响较小。

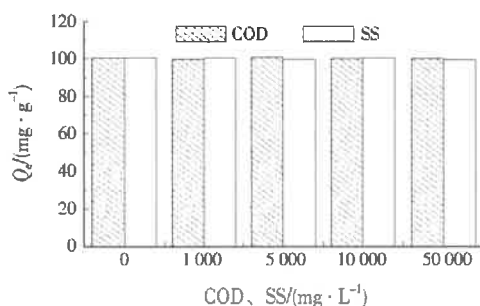


图6 COD和SS对吸附的影响

Fig. 6 Effect of COD and SS on DMA adsorption

2.3 动态吸附试验结果

2.3.1 穿透曲线

取一定量树脂装入交换柱(约 13 mL),在室温(283 K)下将初始质量浓度约为 1 000 mg/L 的 DMA 溶液以 10 mL/min 的流速通过交换柱,其穿透曲线如图 7 所示。

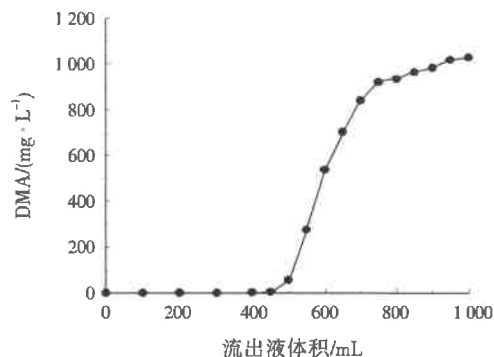


图7 树脂吸附DMA的穿透曲线

Fig. 7 Breakthrough curves of DMA adsorption on the resin

由图 7 可见,当流出液体积为 500 mL 时,流出液中 DMA 为 21 mg/L,以 DMA 的最大允许质量浓度(50 mg/L)作为穿透点^[14],因此 500 mL 可视为穿透体积,之后流出液中 DMA 浓度随着流出液体积的增加而迅速升高,当流出液体积为 950 mL 时, DMA 浓度与其初始浓度接近,说明树脂对 DMA 的吸附已饱和,经累积计算得树脂对 DMA 的动态饱和和吸附量为 132.37 mg/g。

2.3.2 树脂床层高度对穿透曲线的影响

取相同质量的树脂(约 13 mL)装入不同直径的交换柱中,室温(283 K)下将初始质量浓度约为 1 000 mg/L 的 DMA 溶液均以 10 mL/min 的流速通过交换柱,不同高径比下的穿透曲线如图 8 所示。

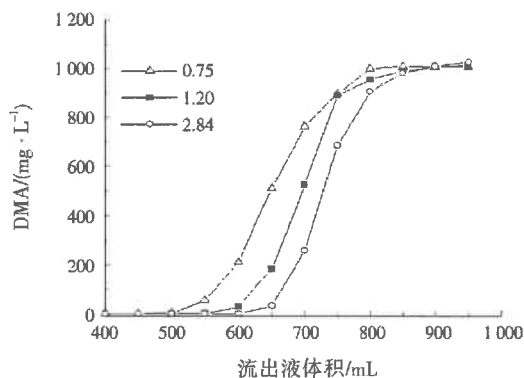


图8 不同高径比下的穿透曲线

Fig. 8 Breakthrough curves at different ratios of height to diameter

由图 8 可知,高径比为 0.75、1.20 和 2.84 时,对应的穿透体积分别约为 550、600、650 mL。即随着树脂床层高度(或高径比)的增加,穿透点右移,穿透时间延长,所处理的 DMA 溶液增多。这主要是因为增加交换柱高度,可延长两相接触时间,同时也可以改善柱内流体力学条件,使液流分布均匀避免发生沟流,从而有利于交换的进行。

2.3.3 进液流速对动态吸附的影响

在室温 (283 K) 下将初始质量浓度为 1 000 mg/L 的 DMA 溶液以不同流速通过交换柱,直至吸附达饱和,结果如表 4 所示。

表 4 进液流速对动态吸附的影响
Table 4 Effect of flow rates on the dynamical adsorption

进液流速 ($\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$)	穿透体积/mL	穿透点吸附量 ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	饱和吸附量 ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)
10	500	104.80	132.37
20	500	103.58	126.71
40	450	93.15	127.39
80	400	84.10	129.89

由表 4 可知,进液流速越大,穿透体积越小,这是因为进液流速增加,DMA 溶液与树脂床接触时间减少,DMA 溶液不能被充分吸附就流出,故穿透点提前。考虑到吸附量的大小和单位时间处理能力的高低,选择动态吸附的进液流速为 20 mL/min。

2.4 动态解吸

2.4.1 洗脱流速对解吸效果的影响

用去离子水将交换柱中吸附达饱和的树脂洗净,室温 (283 K) 下以不同流速各通入 130 mL 的洗脱剂 (HCl 溶液,摩尔浓度为 2 mol/L) 进行解吸,定容接收洗脱液,测定 DMA 浓度,绘制洗脱曲线 (见图 9)。

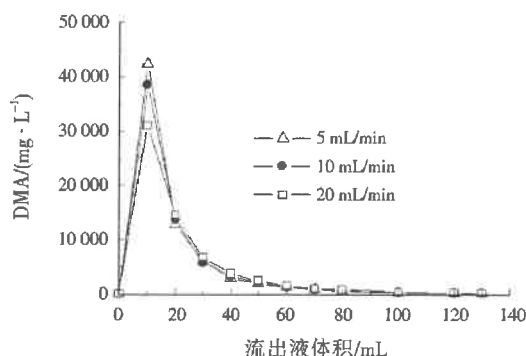


图 9 洗脱流速对解吸效果的影响
Fig. 9 Effect of HCl flow rates on stripping curves

由图 9 可知,洗脱流速较低时,洗脱曲线的峰尖且窄;洗脱流速较高时,曲线峰较宽且峰值变小;在洗脱流速分别为 5、10、20 mL/min 的条件下,流出液体积为 50 mL 时的解吸率分别约为 93%、92% 和 90% (通过累积积分计算得到),可见低洗脱流速有利于树脂的再生。这是因为洗脱流速小时,洗脱剂与树脂的接触时间较长,反应较充分,但洗脱流速小时会增大再生周期,故试验选择 10 mL/min 作为再生洗脱流速。

进一步对 3 条洗脱曲线做累积积分统计,得到积分曲线。由积分曲线得出,不同洗脱流速下,洗脱剂中 DMA 浓度的变化规律一致,即随着 HCl 溶液的不断通入,洗脱剂中的 DMA 浓度迅速增加,流出液体积为 20 mL 后,曲线斜率变小,DMA 浓度增加速度减慢,流出液体积为 40 mL (约 3 倍树脂体积) 后,曲线趋于平缓,DMA 浓度变化不大。为了使洗脱进一步完全,试验中通入 50 mL (约 4 倍树脂体积) 洗脱剂对树脂进行洗脱。

2.4.2 HCl 浓度对解吸效果的影响

用去离子水将交换柱中吸附达饱和的树脂洗净,室温 (283 K) 下以 10 mL/min 的流速通入不同浓度的 HCl 溶液各 50 mL 进行解吸,测定流出液中 DMA 浓度,计算解吸率,结果如图 10 所示。

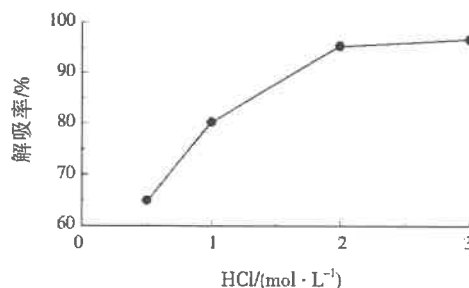


图 10 HCl 摩尔浓度对解吸率的影响
Fig. 10 Effect of HCl concentration on desorption

由图 10 可知,HCl 浓度越大,解吸率越高,HCl 为 2 mol/L 时,解吸率达 95% 以上,HCl 浓度继续增大,解吸率增加很小,故试验中以 2 mol/L HCl 溶液作为洗脱剂。在工业上往往不需要对树脂彻底再生,因此可选用 1 mol/L 的 HCl 溶液进行解吸,通入 3 倍树脂体积时解吸率约 80%,洗脱液为高浓度的二甲胺盐酸盐溶液,可以回收利用,这样既减轻了对设备的腐蚀,又进一步节约了成本。

2.5 稳定性试验

取一定量树脂 (约 13 mL) 装入交换柱,在室温 (283 K) 下将 500 mL 初始质量浓度为 2 000 mg/L 的 DMA 溶液以 20 mL/min 的流速通过交换柱,确保树脂吸附达饱和,然后用 2 mol/L 的 HCl 作为洗脱剂,以 10 mL/min 的流速进行再生,如此往复进行 10 次吸附/解吸试验,考察树脂对 DMA 吸附/解吸性能的稳定性,结果见表 5。

由表 5 可知,树脂对 DMA 的动态饱和吸附量接近 190 mg/g,明显高于静态饱和吸附量。这是因为在静态吸附过程中,溶液中 DMA 的含量随着吸

表5 稳定性试验结果
Table 5 Results of the stability experiment

树脂使用次数/次	动态饱和吸附量 ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	再生率/%
1	196.00	
2	191.44	97.67
3	189.62	96.75
4	186.03	94.91
5	185.06	94.42
6	190.52	97.20
7	190.26	97.07
8	188.06	95.95
9	188.21	96.02
10	188.41	96.13

附的进行逐渐降低,树脂上吸附的DMA逐渐增加,两者最终达到吸附动态平衡;而动态吸附流经树脂层的DMA溶液始终保持较高浓度,树脂床层逐渐达到饱和,流出液DMA浓度先是零,然后缓慢上升,直至与其初始浓度相同,故树脂的动态饱和吸附量比静态饱和吸附量高^[15]。在选定的吸附和洗脱条件下,树脂对DMA的吸附/解吸性能比较稳定,再生率均接近95%,且树脂反复使用10次后无明显破碎现象,可多次重复利用。

工业应用时,应根据DMA废水水质首先选择适宜的预处理措施减少干扰因子的影响,待树脂吸附DMA达到穿透点后进行清洗和再生,再生后的树脂经过清洗后进入下一个循环,通常需要2个交换柱交替进行以保证吸附的连续性。由于是以DMA的最大允许浓度为穿透点,所以处理后废水中的DMA可达标排放,清洗水可作为废水进行吸附处理,洗脱液是高浓度的二甲胺盐酸盐溶液,需作回收处理。鉴于试验室小试与实际生产工艺存在一定差距,今后还应进行工艺放大和中试研究,使离子交换法更适于工业应用。

3 结 论

(1) 树脂筛选试验表明,相同条件下ZGSPC106型树脂对DMA的吸附性能最佳;pH对吸附过程影响很大,在DMA溶液的自然pH条件下,树脂对DMA的吸附效果最好。

(2) 在本研究的浓度范围内,树脂对DMA的平衡吸附量随其初始浓度的增加而增大,且升高温度有利于吸附的进行。293 K下ZGSPC106型树脂对DMA的静态饱和吸附量为138.89 mg/g。 Na^+ 、 Fe^{3+} 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 可对吸附过程造成较大干扰,引

起树脂对其竞争吸附,使树脂对DMA的吸附量减少;蔗糖和硅藻土则对吸附过程基本没有影响。

(3) DMA溶液的进液流速越快,树脂动态吸附DMA的穿透体积越小,穿透点前的累积吸附量越小,选择进液流速为20 mL/min较为适宜。以HCl溶液作为洗脱剂,HCl溶液的浓度越高,洗脱流速越低,洗脱效果越好。在洗脱流速为10 mL/min条件下,4倍树脂体积的HCl溶液对饱和树脂的洗脱率可达90%以上。

(4) 在选定的吸附和洗脱条件下,树脂对DMA具有良好的吸附/解吸性能和机械性能,再生效果好,可多次重复利用。

参考文献:

- [1] 张锡卿. 甲胺的化学加工产品及其应用[J]. 化肥工业, 1992, 19(1): 58.
- [2] 仇汝臣, 孔锐睿, 石德武, 等. 二甲胺与二甲基酰胺溶剂回收流程改造[J]. 石油化工设计, 2003, 20(1): 11-14.
- [3] 曲晶心, 陈均志. 物化法处理合成革厂DMA废水研究进展[J]. 西部皮革, 2009, 31(12): 38-41.
- [4] 耿军. 络合萃取法及离子交换法处理DMA废水的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009.
- [5] 潘高峰. 合成革工业废水中低浓度DMA的分离研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009.
- [6] 魏凤玉, 耿军. 一种离子交换法处理DMA废水的方法: 中国, 101337707[P]. 2009-01-07.
- [7] JAIN C K, SINGHAL D C, SHARMA M K. Adsorption of zinc on bed sediment of River Hindon; adsorption models and kinetics[J]. Journal of Hazard Materials, 2004, 114(1/2/3): 231-239.
- [8] MEHMET D, HARUN A, MAHIR A. Adsorption of methylene blue onto hazelnut shell: kinetics, mechanism and activation parameters[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 164(1): 172-181.
- [9] 王菲, 王连军, 孙秀云, 等. 强酸性阳离子交换树脂对铅的吸附行为及机理[J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(3): 564-569.
- [10] 汤惠中. 分光光度法测定废水中DMA[J]. 化工环保, 1993, 13(6): 371-373.
- [11] 钱庭宝. 离子交换剂应用技术[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1984.
- [12] CHIARLE S, RATTI M, ROVATTI M. Mercury removal from water by ion exchange resins adsorption[J]. Water Research, 2000, 34(11): 2971-2978.
- [13] GULAY B, BEGUM A, YAKUP M. Adsorption kinetics and thermodynamic parameters of cationic dyes from aqueous solutions by using a new strong cation exchange resin[J]. Chemical Engineering Journal, 2009, 152(2/3): 339-346.
- [14] 范晨曦. 大孔苯乙烯系螯合树脂对铅的吸附行为及其应用[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
- [15] 张星, 阮奇, 叶长荣. 大孔弱酸树脂对西索米星的吸附交换性能研究[J]. 离子交换与吸附, 2007, 23(5): 421-426.

编辑: 陈泽军 (修改稿收到日期: 2010-05-04)