

污水处理用介孔结构 MIL-101(Cr)-125Ti 的制备及其 BPA 吸附研究

尚苏芳^{1*}, 李立青²

(1. 河南建筑职业技术学院设备工程系, 河南 郑州 450000;

2. 华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南 郑州 450000)

摘要:选择 $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 与对苯二甲酸为原料, 通过溶剂热处理方法制备得到 MIL-101(Cr) 及 MIL-101(Cr)-125Ti, 利用 SEM、TEM、XRD 等对其形貌和结构进行表征, 对比了不同吸附剂添加量、溶液 pH 及温度参数引起的 MIL-101(Cr)-125Ti 吸附能力变化。结果表明, 相对于 MIL-101(Cr), MIL-101(Cr)-125Ti 粒径尺寸显著增大, 可以获得对 BPA 的更强吸附能力; MIL-101(Cr)-125Ti 中同时形成了结晶相与非晶相两种组织形态; MIL-101(Cr)-125Ti 大部分孔径接近 6.1 nm, 说明 MIL-101(Cr)-125Ti 属于一种介孔结构; MIL-101(Cr) 的比表面积更小, 形成了更大的孔径。经过对 BPA 去除率的影响试验结果确定了最优的参数: 吸附剂质量浓度为 0.75 mg/mL、溶液 pH 为 5、溶液温度为 35℃。

关键词: 金属有机框架; 吸附; MIL-101(Cr)-125Ti; 双酚 A (BPA)

中图分类号: TQ424.3

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2021)04-0132-04

DOI: 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2021.04.028

Preparation of mesoporous MIL-101(Cr)-125Ti for wastewater treatment and analysis on its adsorption to BPA

SHANG Su-fang^{1*}, LI Li-qing²

(1. Department of Equipment Engineering, Henan Technical College of Construction, Zhengzhou 450000, China;

2. College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ and terephthalic acid are used as raw materials to obtain MEL-101(Cr) and MEL-101(Cr)-125Ti both with mesoporous structure by solvent heat treatment method. Their morphology and structure are characterized by SEM, TEM, XRD, etc. Changes in adsorption capacity of MEL-101(Cr)-125Ti caused by different adsorbents, solution and temperature parameters are compared. It is shown that compared with MIL-101(Cr), MIL-101(Cr)-125Ti has a much larger particle size, which represents a stronger adsorption capacity for bisphenol A (BPA). Both crystalline and amorphous phases are formed within MIL-101(Cr)-125Ti. Most of the pore of MIL-101(Cr)-125Ti approaches 6.1 nm, indicating that MIL-101(Cr)-125Ti has a mesoporous structure. MIL-101(Cr) has smaller specific surface area and a larger pore size. Through evaluating the influencing factors on the removal rate of BPA, the optimal parameters are determined as follows: the concentration of adsorbent is 0.75 mg·mL⁻¹, the pH value of solution is 5, and the solution temperature remains at 35℃.

Key words: composite materials; metal organic framework; adsorption; mil-53 (Al)-125Ti; bisphenol A

环境激素对生物的新陈代谢、内分泌等造成影响很大^[1]。其中, 内分泌干扰物主要包括重金属与有机污染物, 其结构特性也存在较大差异^[2]。尤其是双酚 A (BPA) 因具备多种用途, 其生产量也非常巨大, 在实际生产、使用期间存在 BPA 被中释到环境中的情况, 由于其难以降解, 对自然环境造成的破坏也不断积累^[3-5]。现阶段, 从地下水与饮用水中均检测到一定浓度的 BPA, 当 BPA 浓度达到

1 pmol/L~1 nmol/L 之间时便可以对细胞功能造成影响^[6-8]。

目前已有许多学者开展了去除水体 BPA 方面的研究内容, 主要包括光催化、生物降解、活性物吸附、化学氧化等^[9]。相对于其他处理工艺, 吸附技术的操作过程较简单, 并且具备能耗较低、不会引起二次污染、可以实现吸附剂再生处理等多项优点, 非常适合将其应用于处理含 BPA 废水。孙玥等^[10]通

收稿日期: 2020-05-31; 修回日期: 2021-02-23

基金项目: 河南省科技攻关项目 (172102310367)

作者简介: 尚苏芳 (1987-), 女, 硕士, 讲师, 主要从事给排水处理的研究, 通讯联系人, shengche665hdb@126.com。

过一步溶剂热处理法制得含介孔结构的 MIL-5-F127 金属有机材料,之后测试了该材料对双酚的吸附特性,发现 MIL-5-F127 可以实现高效吸附双酚 A 的作用。杨清香等^[11]选择物理加工的方式制得 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{MIL}-10$ 磁性多孔复合材料,同时利用紫外吸收光谱分析方法对比了双酚浓度、处理时间与复合材料添加量条件下的复合材料吸附特性,研究表明随着吸附时间增加,复合材料对 BPA 的单位吸附量也增加。王鑫鑫等^[12]采用萃取方法从马铃薯淀粉废水中获得过氧化物酶,实现对双酚的催化降解过程,有效发挥了水体修复的功能。张文强等^[13]利用光谱法分析 P450 酶跟双酚相互作用机制,通过测试发现提高 BPA 浓度后,形成了强度更高的 CYP3A4-BPA 荧光,同时紫外吸收峰也明显增大并存在红移的情况。Dong 等^[14]采用表面改性方法处理沸石后使其获得了更强的双酚 A 吸附性能; Namasisvayam 等^[15]选择工业固体废物铁/铬氢氧化物作为酚类化合物吸附材料,通过测试发现只达到了 60% 的最高去除率,同时还会引入铬离子。壳基活性碳具备对邻苯二甲酸二丁酯的优异吸附特性,但存在吸附时间偏长以及寿命短的缺陷。笔者选择 $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 与对苯二甲酸为原料,并通过一步溶剂热处理方法制备得到 MIL-101(Cr) 与含有介孔组织的 MIL-101(Cr)-125Ti,对比了不同吸附剂添加量、pH 以及溶液温度参数引起的 MIL-101(Cr)-125Ti 吸附能力变化。

1 实验方法

1.1 实验用材料

双酚 A, 化学纯; *N,N*-二甲基甲酰胺(DMF)和无水乙醇, 分析纯; 九水硝酸铬, 分析纯; 对苯二甲酸, 纯度 $\geq 99\%$; 聚醚 125Ti。

1.2 吸附剂材料的制备

制备 MIL-101(Cr): 配制由水与 DMF 组成的混合溶液, 之后加入 $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 与对苯二甲酸并充分搅拌 2.5 h, 再把混合物加入高压反应釜内并放入 130℃ 的烘箱内持续反应 50 h。反应结束后再利用去离子水进行洗涤使反应期间产生的硝酸被除去, 再把所得产物浸入 DMF 试剂中保持 24 h 使对苯二甲酸被充分去除, 最后过滤白色颗粒并升温到 160℃ 持续干燥 15 h 获得 MIL-101(Cr)。

制备 MIL-101(Cr)-125Ti: 采用 $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 作为铝源, 同时以苯二甲酸作为有机配体, 依

次把对苯二甲酸与 $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 加入由 DMF、水、无水乙醇组成的混合溶液, 接着在施加磁力搅拌的状态下添加聚醚 125Ti, 对上述混合物进行 2 h 搅拌后再将其转移到高压反应釜内, 并利用烘箱加热到 130℃ 持续反应 50 h。通过过滤得到反应后的产物, 经过去离子水与乙醇清洗处理, 再升温到 75℃ 进行 12 h 回流萃取得到表面活性剂 125Ti, 同时利用 DMF 浸泡 24 h 使多余的酸被充分去除, 接着将其放入 130℃ 烘箱内经过 12 h 处理除去 DMF 获得 MIL-101(Cr)-125Ti 产物。

1.3 性能表征

通过 SU8000 型扫描电镜、DX-2700 型 X 射线衍射仪、JSM-7001F 型透射电镜、JEM-2100F 型红外变换光谱仪对试样进行表征分析。

为分析 pH 差异对试样吸附特性产生的影响, 以 NaOH 与 HCl 溶液控制 BPA 溶液 pH。使其介于 2~12 之间, 在溶液温度为 35℃ 与吸附剂加入量为 0.75 mg/mL 的条件下控制不同 pH 并添加 MIL-101(Cr) 与 MIL-101(Cr)-125Ti 对吸附 BPA 的性能进行测试。

2 结果和讨论

2.1 组织分析

MIL-101(Cr) 与 MIL-101(Cr)-125Ti 的 SEM 图和 TEM 图如图 1 所示。由图 1(a)、图 1(b) 中可以看出, 此时形成了无规则 MIL-101(Cr) 产物, 并

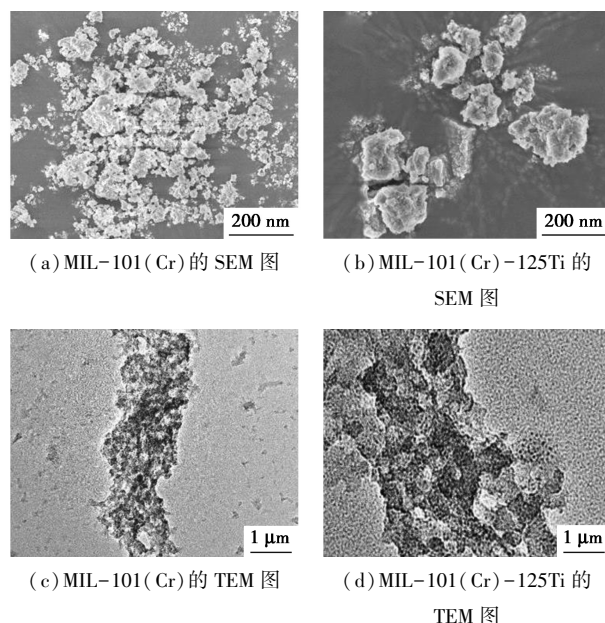
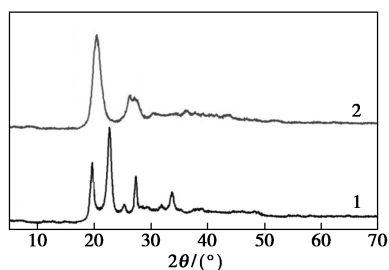


图1 吸附剂 MIL-101(Cr) 和 MIL-101(Cr)-125Ti 的 SEM 和 TEM 照片

且在生长期间发生了团聚现象。由图 1(c)、图 1(d)中可以看出,相对于 MIL-101(Cr), MIL-101(Cr)-125Ti 粒径尺寸显著增大,可以获得对 BPA 的更强吸附能力。

吸附剂 MIL-101(Cr) 和 MIL-101(Cr)-125Ti 的 XRD 谱图如图 2 所示。根据图 2 中谱线 1 可知,谱图在 20.9、26.4、35.3° 位置处形成明显的特征峰,已经制得了具有理想结构的 MIL-101(Cr) 多孔材料。根据图 2 中谱线 2 可以发现, MIL-101(Cr)-125Ti 形成的特征峰出现在 19.7、22.2、27.2、33.6° 位置处,同时可以看到 MIL-101(Cr)-125Ti 形成了由分散峰与强峰共同构成的衍射峰,说明 MIL-101(Cr)-125Ti 中同时形成了结晶相与非晶相两种组织形态。由于 MIL-101(Cr) 含有大量孔隙,将其应用于污水处理领域时具备优异的吸附特性,考虑到 MIL-101(Cr)-125Ti 是利用孔径控制的方式进行制备,形成的孔尺寸较大,获得比 MIL-101(Cr) 更强的稳定性与吸附性能。

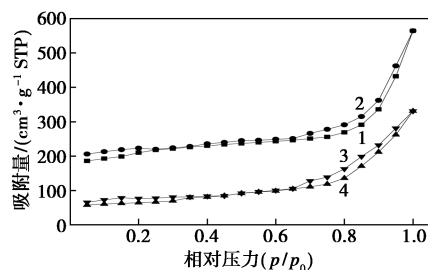


1—MIL-101(Cr); 2—MIL-101(Cr)-125Ti

图 2 吸附剂 MIL-101(Cr) 和 MIL-101(Cr)-125Ti 的 XRD 谱图

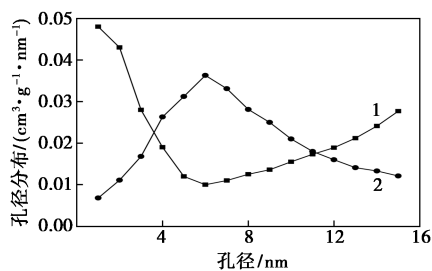
通过 ASAP 3020 型比表面积及孔隙度仪分别测试了 MIL-101(Cr) 与 MIL-101(Cr)-125Ti 两种吸附剂的比表面积与孔径尺寸,得到图 3 和图 4 所示结果。由图 3 中可以看出, MIL-101(Cr) 与 MIL-101(Cr)-125Ti 都表现为 I 型微孔吸附的特征,同时还可以看到吸附与脱附曲线都存在闭合滞后环,由此可以判断此时形成介孔,属于一种包含微孔与介孔的多级结构。两种吸附剂比表面积依次为 606.29 m²/g 与 324.14 m²/g。由图 4 中可以看出, MIL-101(Cr) 孔径接近 1.7 nm,可以判断 MIL-101(Cr) 主要由微孔构成;而 MIL-101(Cr)-125Ti 达到了 2 nm 以上的孔径,大部分孔径接近 6.1 nm,说明 MIL-101(Cr)-125Ti 属于一种介孔结构,当孔径越大时, BPA 吸附量也越高。通过对比发现, MIL-101(Cr)-125Ti 相对 MIL-101(Cr) 的比表面积更小,但

形成了更大的孔径。这是因为 MIL-101(Cr)-125Ti 孔径增大后,在 N₂ 吸附-脱附过程中发生框架坍塌,对部分孔洞造成了堵塞,从而降低了比表面积,但相对 MIL-101(Cr) 依然具备更大的孔径与更强的吸附性能。



1—MIL-101(Cr) 吸附; 2—MIL-101(Cr) 脱附;
3—MIL-101(Cr)-125Ti 脱附; 4—MIL-101(Cr)-125Ti 吸附

图 3 吸附剂 MIL-101(Cr) 和 MIL-101(Cr)-125Ti 的 N₂ 吸附-脱附曲线



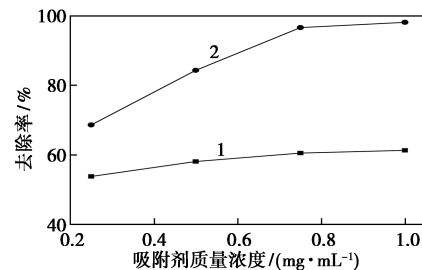
1—MIL-101(Cr); 2—MIL-101(Cr)-125Ti

图 4 吸附剂 MIL-101(Cr) 和 MIL-101(Cr)-125Ti 的孔径分布曲线

2.2 参数对 BPA 去除率的影响

2.2.1 吸附剂质量浓度的影响

吸附剂质量浓度是对 BPA 去除率造成影响的一项关键因素。依次测试了加入 0.25、0.5、0.75、1.0 mg/mL 的 MIL-101(Cr) 与 MIL-101(Cr)-125Ti 吸附效果,共吸附 5 min。吸附剂质量浓度对 BPA 去除率的影响如图 5 所示。由图 5 中可以看出,增大吸附剂质量浓度后, BPA 去除率也随之发



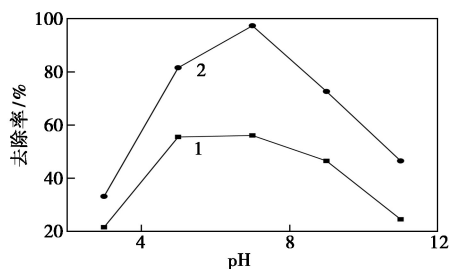
1—MIL-101(Cr); 2—MIL-101(Cr)-125Ti

图 5 吸附剂质量浓度对 BPA 去除率的影响

生提升,而当吸附剂质量浓度增大至 0.75 mg/mL 以上时,继续升高吸附剂质量浓度时,BPA 去除率达到了一个相对稳定的状态。这是由于,当加入 0.75 mg/mL 的吸附剂时,BPA 已被几乎全部吸附,达到了较高的去除率,此时继续增大吸附剂质量浓度时 BPA 去除率处于基本不变的状态。

2.2.2 溶液 pH 的影响

BPA 吸附效果受到 pH 的明显影响,这是由于 pH 会显著改变 BPA 吸附形式与表面电荷,从而引起吸附作用机制与吸附能力的变化。溶液 pH 对 BPA 去除率的影响结果如图 6 所示。由图 6 中可以看出,MIL-101(Cr) 与 MIL-101(Cr)-125Ti 依次在 pH 为 5 的条件下表现出对 BPA 的最大吸附量。在酸性状态下进行测试发现,当 pH 减小后,吸附性能发生了减弱,此时吸附剂的 $\text{Al}(\text{OH})_4$ 已被 H^+ 占据,与 BPA 分子间只产生了少量氢键。当 pH 增大后,吸附剂发生了 BPA 吸附性能的明显减弱,这是由于 BPA 分子处于碱性环境中会发生电离形成 BPA^- 与 BPA^{2-} ,同时 BPA 分子与吸附剂分子氢键也发生消失。以上测试结果表明,MIL-101(Cr) 与 MIL-101(Cr)-125Ti 处于酸性环境中可以达到比碱性环境中更稳定的吸附性能,并且 MIL-53-(Al)-125Ti 表现出了更强的稳定性。



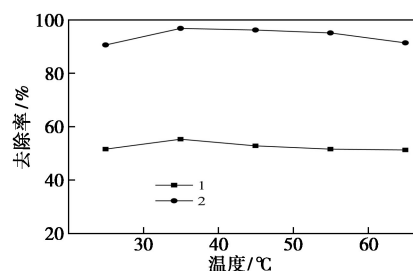
1—MIL-101(Cr); 2—MIL-101(Cr)-125Ti

图 6 溶液 pH 对 BPA 去除率的影响

2.2.3 溶液温度的影响

溶液温度也是影响吸附特性的一项重要因素。不同溶液温度下 BPA 吸附性能变化情况如图 7 所示。由图 7 中可以看出,两种吸附剂都存在一个最优的 BPA 吸附溶液温度,最优溶液温度是 35℃。偏离最优溶液温度时,会出现吸附性能下降现象。根据图 7 可以发现超过最优溶液温度后继续升高溶液温度的过程中,吸附量发生了下降,这是由于提高溶液温度会导致分子热运动的明显增强,从而减弱 BPA 和吸附剂分子相互作用力。而在室温 25℃ 的环境中,BPA 热运动能力过低,从而减小了 BPA 与

吸附剂孔表面接触的概率,由此导致在低于最优溶液温度下时也会引起吸附能力的下降。



1—MIL-101(Cr); 2—MIL-101(Cr)-125Ti

图 7 溶液温度对 BPA 去除率的影响

3 结论

相对于 MIL-101(Cr), MIL-101(Cr)-125Ti 粒径尺寸显著增大,可以获得对 BPA 的更强吸附能力。MIL-101(Cr)-125Ti 中同时形成了结晶相与非晶相两种组织形态。MIL-101(Cr)-125Ti 达到了 2 nm 以上的孔径,大部分孔径接近 6.1 nm,说明 MIL-101(Cr)-125Ti 属于一种介孔结构, MIL-101(Cr) 的比表面积更小,形成了更大的孔径。

经过参数对 BPA 去除率的影响试验结果确定了最优参数:吸附剂质量浓度为 0.75 mg/mL、溶液 pH 为 5、溶液温度为 35℃。而且相比 MIL-101(Cr), MIL-101(Cr)-125Ti 均表现出更强的 BPA 去除率结果,具备更强的吸附能力。

参考文献

- [1] 侯书亮,卢慧宫,顾逸凡,等.水不溶性铝源合成金属有机骨架 MIL-101(Cr) 及其对洛克沙肿的吸附[J].材料研究学报,2017,31(7):495-501.
- [2] Liu D, Lang J P, Abrahams B F. Highly efficient separation of a solid mixture of naphthalene and anthracene by a reusable porous metal-organic framework through a single-crystal-to-single-crystal transformation [J]. Journal of the American Chemical Society, 2011, 133(29): 11042-11045.
- [3] 高艳娇.水中 BPA 的吸附去除方法研究进展[J].现代化工,2019,39(5):71-75.
- [4] Zhou M M, Wu Y N, Qiao J L, et al. The removal of bisphenol A from aqueous solutions by MIL-101(Cr) and mesostructured MIL-101(Cr) [J]. Journal of Colloid & Interface Science, 2013, 405(9): 157-163.
- [5] 韦复华,梁钊,姚亮,等.金属有机框架材料的制备及应用研究进展[J].现代化工,2017,37(5):33-37.

(下转第 140 页)

- lution Research, 2007, 56(7): 99-107.
- [3] 刘幽燕, 李青云, 覃益民, 等. 聚氨酯泡沫固定化产碱杆菌细胞生物转化氰化物[J]. 环境科学, 2006, 27(3): 188-191.
- [4] Chen C Y, Kao C M, Chen S C. Application of *Klebsiella oxytoca* immobilized cells on the treatment of cyanide wastewater[J]. Chemosphere, 2008, 71(1): 133-139.
- [5] Maniyam M N, Sjahir F, Abdul Latif Ibrahim. Cyanide degradation by immobilized cells of *Rhodococcus* UKMP-5M [J]. Biologia, 2012, 67(5): 837-844.
- [6] Zhou X, Liu L, Chen Y, et al. Efficient biodegradation of cyanide and ferrocyanide by Na-alginate beads immobilized with fungal cells of *Trichoderma koningii* [J]. Canadian Journal of Microbiology, 2007, 53(9): 1033-1037.
- [7] Dash R R, Balomajumder C, Kumar A. Removal of metal cyanides from aqueous solutions by suspended and immobilized cells of *Rhizopus oryzae* (MTCC 2541) [J]. Engineering in Life Sciences, 2010, 9(1): 53-59.
- [8] Cheong K H, Choi H I, Kim J A, et al. Degradation of cyanide by activated sludge immobilized with polyethylene glycol [J]. Journal of Environmental Science International, 2008, 17(12): 1343-1351.
- [9] Maniyam M N, Ibrahim A L, Cass A E G. Enhanced cyanide biodegradation by immobilized crude extract of *Rhodococcus* UKMP-5M [J]. Environmental Technology, 2017, 40(3): 386-398.
- [10] 刘幽燕, 何玉财, 李青云, 等. 沸石固定化细胞降解氰化物的实验研究[J]. 高校化学工程学报, 2005, 19(4): 532-532.
- [11] 贺莉丽, 刘幽燕, 李青云, 等. 玉米芯固定化产碱杆菌 DN25 处理含氰废水研究[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(23): 14285-14287.
- [12] Avar G, Meier-Westhues U, Casselmann H, et al. 10. 24-Polyurethanes [J]. Polymer science: A Comprehensive Reference, 2012, 10(68): 411-441.
- [13] Zhou L C, Li Y F, Bai X, et al. Use of microorganisms immobilized on composite polyurethane foam to remove Cu(II) from aqueous solution [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 167(1-3): 1106-1113.
- [14] Massalha N, Brenner A, Sheindorf C, et al. Application of immobilized and granular dried anaerobic biomass for stabilizing and increasing anaerobic bio-systems tolerance for high organic loads and phenol shocks [J]. Bioresource Technology, 2015, 197: 106-112.
- [15] Rajendran R, Prabhavathi P, Karthiksundaram S, et al. Biodecolorization and bioremediation of denim industrial wastewater by adapted bacterial consortium immobilized on inert polyurethane foam (PUF) matrix: A first approach with biobarrier model [J]. Polish Journal of Microbiology, 2014, 64(4): 329-338.
- [16] 王蕾, 曹德菊, 张娟. 聚氨酯材料固定化微生物处理含酚废水的研究[J]. 安徽农学通报, 2008, 14(9): 59-60.
- [17] 司伟磊, 吕红, 周集体, 等. 聚氨酯泡沫固定化蕈菌强化偶氮染料生物脱色的研究[J]. 高校化学工程学报, 2010, 24(3): 498-502.
- [18] Hasan S M, Easley A D, Monroe M B, et al. Development of siloxane-based amphiphiles as cell stabilizers for porous shape memory polymer systems [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2016, 478(3): 34-43.
- [19] Solanki A, Das M, Thakore S. A review on carbohydrate embedded polyurethanes: An emerging area in the scope of biomedical applications [J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 181: 1003-1016.
- [20] 杜峰, 项尚林, 邹巍巍, 等. 化学发泡剂对吸油聚氨酯泡沫性能的影响[J]. 塑料, 2014, 43(5): 71-74.
- [21] Li Qingyun, Lu H, Yin Y, et al. Synergic effect of adsorption and biodegradation enhance cyanide removal by immobilized *Alcaligenes* sp. strain DN25 [J]. Journal of Hazardous Materials, 2019(364): 367-375.
- [22] 中华人民共和国环境保护部. HJ 484—2009, 水质氰化物的测定[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009-11-01.
- [23] Ma X S, Li N J, Jiang J, et al. Adsorption-synergic biodegradation of high-concentrated phenolic water by *Pseudomonas putida* immobilized on activated carbon fiber [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2013, 1(3): 466-472.
- [24] 陈维敏, 罗金安, 黄杰, 等. 一种高强度硬质聚氨酯泡沫塑料的制备研究[J]. 化学工程师, 2016, 30(1): 70-72.
- [25] 李小斌, 曹宏斌, 张懿. 全水发泡硬质聚氨酯泡沫塑料技术研究进展[J]. 中国塑料, 2004(7): 1-4. ■

(上接第 135 页)

- [6] 龙萍, 谭海燕, 刘畅, 等. 金属有机骨架材料 MIL-101(Cr) 对污水中 Ni²⁺ 的吸附研究[J]. 武汉理工大学学报, 2016, 38(6): 79-83, 116.
- [7] 梁书秋, 马明月. 双酚 A 雌性生殖毒性及其机制研究进展[J]. 沈阳医学院学报, 2021, 23(1): 67-71.
- [8] 张晶晶, 张亚涛. 基于 MOFs 的混合基质膜在气体分离中的研究进展[J]. 现代化工, 2019, 39(8): 38-42.
- [9] 王骏鹏, 姚健龙, 施天伟, 等. Ru/C 催化剂的制备及其催化双酚 A 加氢的研究[J]. 现代化工, 2016, 36(5): 61-64.
- [10] 孙玥, 李大伟, 魏取福. 金属有机框架材料 MIL-53(Al)-F127 对双酚 A 的吸附性能[J]. 材料研究学报, 2020, 34(5): 353-360.
- [11] 杨清香, 赵倩倩, 李银萍, 等. Fe₃O₄@SiO₂@MIL-101(Cr) 制备及对双酚 A 的吸附性能研究[J]. 轻工学报, 2016, 31(3): 8-13.
- [12] 王鑫鑫, 李鑫, 张树林, 等. 马铃薯过氧化物酶催化氧化快速降解双酚 A [J]. 工业水处理, 2021, 41(1): 93-97.
- [13] 张文强, 刘红艳, 唐琳, 等. 细胞色素 P450 酶 CYP3A4 与双酚 A 的相互作用研究[J]. 分析科学学报, 2020, 36(6): 869-873.
- [14] Dong Y, Wu D Y, Chen X C, et al. Adsorption of bisphenol A from water by surfactant-modified zeolite [J]. Journal of Colloid & Interface Science, 2010, 348(2): 585-590.
- [15] Namasivayam C, Sumithra S. Adsorptive removal of phenols by Fe(III)/Cr(III) hydroxide, an industrial solid waste [J]. Clean Technologies & Environmental Policy, 2007, 9(3): 215-223. ■