

# 聚氨酯泡沫材料对氰降解菌 固定化影响的研究

蒋郑峰, 郑殿秋, 陈昱光, 孙士杰, 刘幽燕, 李青云\*  
(广西大学化学化工学院, 广西南宁 530004)

**摘要:**在聚氨酯泡沫(PUF)固定化细胞降解氰化物研究的基础上,探讨了泡沫组分硅油(L-580)、交联剂(1006-2)以及发泡剂(水)质量分数对材料亲水性、孔壁性质的影响,并对氰化物降解菌固定化细胞量、降氰酶活的影响进行了研究。结果表明,当 PUF 组分中 L-580、1006-2 和水的质量分数分别为 1%、10%、0% 时制备所得泡沫用于氰降解菌的固定化,体系的总生物量比游离细胞体系提高了 43%,降解氰化物的总酶活约为游离细胞体系的 2 倍。

**关键词:**聚氨酯泡沫;固定化;氰化物;生物降解;酶活

**中图分类号:**TQ317;X52

**文献标志码:**A

**文章编号:**0253-4320(2021)04-0136-05

**DOI:**10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2021.04.029

## Influence of polyurethane foam materials on immobilization of cyanide-degrading bacteria

JIANG Zheng-feng, ZHENG Dian-qiu, CHEN Yu-guang, SUN Shi-jie,  
LIU You-yan, LI Qing-yun\*

(School of Chemistry and Chemical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract:**Based on the previous study on cyanide degradation by PUF-immobilized cells, effects of the mass fraction changes of silicone oil (L-580), crosslinking agent (1006-2) and foaming agent (water) on the hydrophilicity and pore wall properties of polyurethane foam (PUF) are studied, and impacts on the immobilized cell amount of cyanide-degrading bacteria are investigated. Results show that the preferred mass fraction of L-580, 1006-2 and water for cyanide-degrading strains immobilization shall be 1%, 10% and 0%, respectively. Total biomass of PUF-immobilized cell system is 43% higher than that of planktonic cell system, and total enzyme activities in cyanide degradation doubles approximately that of planktonic cell system.

**Key words:** polyurethane foam; immobilization; cyanide; biodegradation; enzyme activity

氰化物是一种剧毒性的化工基础原料,低浓度下就会对生物体造成致命危害。由于其在金属电镀、冶金、合成纤维、塑料等多种行业都有应用,由此产生的含氰工业废水的环境污染问题一直受到重视和关注<sup>[1]</sup>。以高生物密度为显著特征的固定化细胞体系是处理有毒、难生物降解类污染物的有效手段<sup>[2-3]</sup>。如 Chen 等<sup>[4]</sup>分别采用海藻酸盐和三乙酸纤维素固定化 *Klebsiella oxytoca* 菌株降解 3 mmol/L 氰化物的最大降解速率为 0.224 mmol/(L·h) 与 0.192 mmol/(L·h),而游离的细胞降解速率仅为 0.085 mmol/(L·h);Maniyam 等<sup>[5]</sup>采用海藻酸钙小球固定化 *Rhodococcus* UKMP-5M 细胞降解 12 mmol/L 氰化物,经过 10 h 后固定化细胞对 12 mm KCN 的降解率为 81%,而游离细胞的降解率仅为 48%。因

此,构建高生物量的固定化细胞体系是氰污染生物处理系统具有高效降解率的重要基础。

目前,用于氰降解菌固定化的载体材料主要有海藻酸盐<sup>[6]</sup>、活性炭<sup>[7]</sup>、聚乙二醇<sup>[8]</sup>、结冷胶<sup>[9]</sup>等。课题组在前期的研究中也开展了沸石<sup>[10]</sup>、玉米芯<sup>[11]</sup>、聚氨酯泡沫<sup>[3]</sup>固定化细胞体系降解氰化物的相关实验,结果表明,不同载体固定化的生物量存在较大差异,说明材料本身对细胞的附着生长具有影响作用。聚氨酯泡沫(PUF)是由多元醇和聚醚合成的一类高分子材料,具有多孔性、机械性能好、生物相容性高、理化性质稳定等优点而被认为是良好的固定化载体材料<sup>[12-13]</sup>,在环境污染处理领域应用广泛<sup>[14-15]</sup>。如王蕾等<sup>[16]</sup>利用 PUF 固定化菌株降解苯酚,经过 120 h 对 1 000 mg/L 苯酚的降解率达到

收稿日期:2020-12-09;修回日期:2021-02-17

基金项目:国家自然科学基金项目(51108098);广西大学科研基金项目(XJZ130360);广西大学“大学生创新创业训练计划”项目(202010593174)

作者简介:蒋郑峰(1994-),男,硕士研究生,主要研究方向为生物化工,369415855@qq.com;李青云(1978-),女,博士,讲师,研究方向为化工污染控制技术与理论,通讯联系人,qyli@gxu.edu.cn。

72.96%。司伟磊等<sup>[17]</sup>利用 PUF 吸附固定蒽醌,使得偶氮染料的生物脱色速率提高 1~3 倍,强化了偶氮染料的生物脱色作用。聚氨酯泡沫材料的泡孔结构与机械强度是影响菌株附着生长的关键因素,在泡沫的制备合成过程中,表面活性剂硅油(L-580)、交联剂 6-羟基聚乙二醇(1006-2)以及化学发泡剂(水)这 3 种组份分别对泡沫的亲水性与孔径结构具有调节作用<sup>[18-20]</sup>。Hasan 等<sup>[18]</sup>发现表面活性剂用量的改变会影响 PUF 的孔径、孔壁厚度和张力,继而影响细胞黏附生长的特性。

因此,笔者基于课题组前期筛选获得 1 株氰化物降解菌株以及聚氨酯泡沫固定化细胞的研究基础<sup>[21]</sup>,进一步探讨了聚氨酯泡沫组分硅油(L-580)、交联剂 6-羟基聚乙二醇(1006-2)以及化学发泡剂(水)质量分数变化对氰降解菌固定化的影响,为构建高效氰化物生物降解体系奠定基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验菌株和培养基

产碱杆菌 *Alcaligenes sp.* DN25 为实验室筛选获得并保藏,保藏号为 CGMCC 5734。

基本培养基:(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 质量浓度为 2.0 g/L, NaCl 质量浓度为 0.5 g/L, K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> 质量浓度为 2.0 g/L,蛋白胨质量浓度为 5.0 g/L,葡萄糖质量浓度为 10.0 g/L,酵母粉质量浓度为 5.0 g/L, pH 为 8.0。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 菌株 DN25 的培养

使用 250 mL 的摇瓶培养,将菌株 DN25 接种于 20 mL 经过高压蒸汽灭菌后的培养基中,30℃、120 r/min 摇床培养 24 h,制备得到种子液,待用于固定化细胞体系的接种。

#### 1.2.2 聚氨酯泡沫的制备

在塑料烧杯中称取聚醚 4110G、L-580 硅油、1006-2(6 羟基聚乙二醇)、1618A、C-8(二甲基环己胺)、KF-28(二羟基聚丙二醇/乙二醇共聚物,EO 占 30%)、CFC-141B(发泡剂)、水、A-33 催化剂(33%三乙烯二胺的二丙二醇溶液)、Y-1 等原料混合,然后在 4 000 r/min 转速下充分搅拌 1 min,静置,恒温水浴至 30℃,得到混合聚醚组分。再加入 MDI-5005,以 4 000 r/min 的转速搅拌 5 s 后,迅速倒入模具中进行发泡。将制作完成的泡沫置于 80℃烘箱中熟化 4 h,得到聚氨酯泡沫(聚氨酯泡沫原料均购于湖州合达科技有限公司)。

采用单一变量法考察 PUF 组分含量对细胞固定化的影响,硅油、1006-2 和水的质量分数分别设定为 1%、3%、5%、7%;5%、10%、15%、20%;0、1%、2%、3%,其他组分质量分数保持不变。

#### 1.2.3 聚氨酯泡沫载体的预处理及细胞固定化

将制备的聚氨酯泡沫切割成 0.5 cm×0.5 cm×0.5 cm 的小立方体泡沫方块。用 95%乙醇浸泡 10 min,再用去离子水浸洗 3 次后烘干。称取预处理后的泡沫 10 块为 1 份[(0.06±0.005)g],加入 20 mL 培养基中,121℃高压蒸汽灭菌 20 min 后,以 10%的接种量接种,然后置于摇床中(30℃、120 r/min)培养 24 h。将固定化细胞与发酵液固液分离后,用 pH 8.0 的磷酸缓冲液清洗固定化细胞 2~3 次,最后在真空冷冻干燥机中冷冻干燥,待用于氰化物降解实验。

### 1.3 固定化细胞降解氰化物

以 10 mL 磷酸盐缓冲液(0.2 mol/L, pH = 8.0)作为氰化物降解的基本体系,氰离子质量浓度为 100 mg/L,加入 1 份固定化细胞,于 30℃、120 r/min 条件下降解 15 min,一定时间取样测定剩余氰离子浓度。最后按照氰降解量/固定化的细胞量的关系,计算得到固定化细胞的比酶活。与游离细胞体系进行对比时,采用总酶活进行表征,总酶活按照单位时间内总细胞量降解氰化物的量。

### 1.4 分析方法

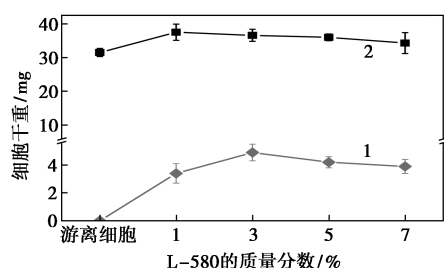
游离态的细胞以 4℃、9 500 r/min 离心 15 min,然后用磷酸缓冲液洗涤 2 次,相同条件下离心,冷冻干燥后称重,得到游离细胞的干重。固定化细胞的质量采用重量差法测定,即载体固定化前后的质量差值。体系的总菌量以固定化细胞的干重和游离态细胞的干重计。比固菌量定义为载体上的固定化细胞量与载体质量的比值。氰化物的分析采用国标方法<sup>[22]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 硅油(L-580)质量分数对菌株固定化的影响

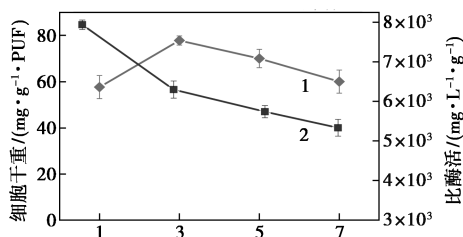
表面活性剂在调整泡沫的孔径和形态方面发挥关键作用<sup>[18]</sup>,不同质量分数硅油制备的聚氨酯泡沫对细胞固定化的结果如图 1 所示。由图 1(a)中可以看出,固定化细胞体系的总菌量均高于游离细胞体系,当硅油质量分数为 3%时,固定化细胞的生物量达到最大值 4.96 mg,此时体系的总菌量为 36.6 mg,比游离细胞体系的总菌量(30.5 mg)提高约 20%;当硅油质量分数增大为 7%时,固定化的细

重量减少为 3.93 mg。不同质量分数硅油制备所得聚氨酯泡沫的电镜扫描图如图 2 所示。由图 2 中可以看出,增大硅油质量分数会使泡孔变小,同时孔壁也变得更加光滑、细腻,但是泡孔细腻反而不利于细胞的附着生长,因此硅油质量分数大于 3% 时,固定化的细胞量降低。从图 1(b) 中可以看出,当 L-580 质量分数为 1% 时,固定化细胞的比酶活最大,达到 7 936.1 mg/(L·g)。随着 L-580 质量分数的增加,固定化细胞的比酶活降低,当 L-580 质量分数增加至 7% 时,固定化细胞的比酶活仅为 5 334.7 mg/(L·g),比硅油质量分数为 3% 时降低了 32.7%。这是因为孔壁变光滑不利于泡沫吸附营养物质,从而影响细胞的附着生长,因此不利于菌株降氰酶的产酶。虽然硅油质量分数为 3% 时的比固菌量比 1% 时提高了 35%,但是比酶活却降低了 32.7%,因此从经济成本考虑,选择制备 PUF 的 L-580 质量分数为 1%。



1—固定化细胞量;2—总细胞量

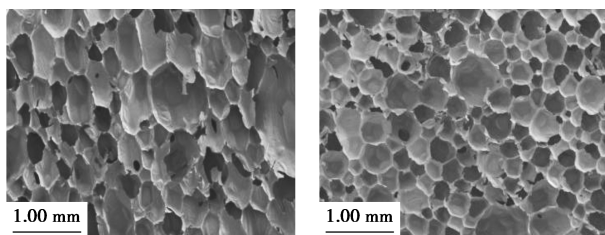
(a) 对生物量的影响



1—比固菌量;2—比酶活

(b) 对比酶活的影响

图 1 硅油 L-580 质量分数对细胞固定化的影响



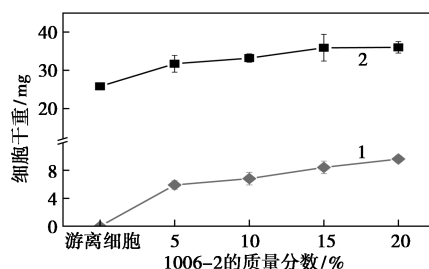
(a) 硅油质量分数为 3%

(b) 硅油质量分数为 7%

图 2 聚氨酯泡沫的电镜扫描图

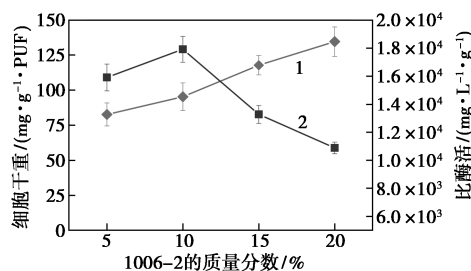
### 2.2 1006-2 质量分数对菌株固定化的影响

交联剂 1006-2 可以提高聚氨酯泡沫的力学强度<sup>[19]</sup>,同时改善亲水性以及形成致密的泡孔结构,交联剂 1006-2 质量分数对细胞固定化的影响如图 3 所示。从图 3(a) 中可以看出,固定化细胞体系的生物量皆高于游离细胞体系,当 1006-2 质量分数为 20% 时,固定化细胞量达到最大值 9.23 mg,体系总生物量为 37.5 mg,比游离细胞体系(25.4 mg) 高约 47%。Ma 等<sup>[23]</sup>发现活性碳纤维的网状结构使得 *P.putida* 可以均匀地附着在网状纤维上固定生长,因此固定化的生物量增多。与 Ma 等的研究结果相类似,增大交联剂 1006-2 的质量分数可以使聚氨酯泡沫形成致密的网状结构<sup>[24]</sup>,可为细胞的附着生长提供更多的界面。从图 3(b) 中可以看出,当 1006-2 的质量分数为 10% 时,固定化细胞的比酶活达到最大值 1 7921.1 mg/(L·g);当 1006-2 的质量分数大于 10% 时,细胞的比酶活明显降低,而当 1006-2 质量分数增加至 20% 时,固定化细胞的比酶活减少为 10 882.1 mg/(L·g),比 10% 时的比酶活降低了 39%。原因是致密的泡孔结构不利于生长在泡孔内部的细胞(如图 4 所示)与氰化物相接触,从而使得氰的降解率下降,比酶活变低。尽管 1006-2 质量分数为 20% 时的比固菌量比 10% 时提高了 41.2%,但是比酶活却降低了 39%,从经济成本考虑,采用 10% 的交联剂 1006-2 较为合适。



1—固定化细胞量;2—总细胞量

(a) 对生物量的影响



1—比固菌量;2—比酶活

(b) 对比酶活的影响

图 3 交联剂 1006-2 质量分数对细胞固定化的影响

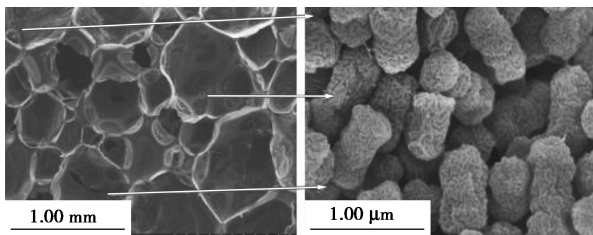
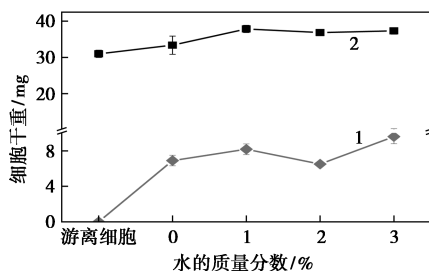
(a) PUF-固定化细胞 (b) 氰降解菌 *Alcaligenes* sp. DN25

图4 PUF-固定化细胞的 SEM 图

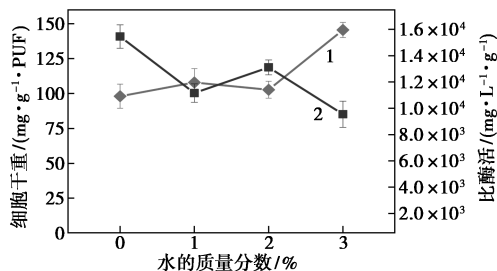
### 2.3 水的质量分数对菌株固定化的影响

水可以作为合成聚氨酯泡沫材料的发泡剂<sup>[20]</sup>, 泡沫在制备过程中存在发泡与凝胶的反应平衡问题, 发泡剂用量太多会导致聚氨酯的泡孔坍塌, 因此, 考察水的质量分数对细胞固定化的影响, 结果如图5所示。由图5(a)中可以看出, 与硅油、交联剂的结果相一致, 固定化细胞体系的生物量比游离细胞体系高, 载体上的固定化细胞量的最大值(9.59 mg)发生在水质量分数为3%时。由图5(b)可知, 固定化细胞的氰降解比酶活随着水质量分数的增加呈下降趋势, 当水的质量分数为0%时, 固定化细胞的比酶活为最大值 15 455.9 mg/(L·g); 水的质量分数增大至3%时, 比酶活降低为 95 444.5 mg/(L·g)。比酶活的降低与细胞脱落有关, 由于增大发泡剂的量使得泡孔结构变大, 泡沫变得松散<sup>[25]</sup>、机械强度降低, 导致在降解过程中易于磨损, 造成固定化细胞脱落, 因此, 氰降解效率下降, 比酶活显著降低。鉴于



1—固定化细胞量; 2—总细胞量

(a) 对生物量的影响



1—比固菌量; 2—比酶活

(b) 对比酶活的影响

图5 水质量分数对细胞固定化的影响

发泡剂对泡沫机械强度的显著影响, 水的质量分数采用0%较为合适。

### 2.4 固定化细胞体系和游离细胞体系的对比

将组分 L-580、1006-2 和水按照 1%、10%、0% 的质量分数合成聚氨酯泡沫制备固定化细胞降解氰化物, 结果如表1所示。由表1中可以看出, 游离细胞体系的总生物量为 25.85 mg, 而固定化细胞体系的总菌量达到 36.85 mg, 比游离细胞体系提高了 43%, 计算得到单位载体上的比固菌量为 98.07 mg/(g·PUF)。对比 2 个体系的氰降解总酶活结果可知, 游离细胞体系的总酶活为 11 415.7 mg/(L·h), 固定化细胞体系的总酶活则提高至 22 781.2 mg/(L·h), 约为游离细胞体系的 2 倍, 说明该载体材料有利于实验菌株的附着生长以及酶活提高。

表1 固定化细胞体系与游离细胞体系的对比结果

	总细胞量/ mg	固定化细胞量/ [mg·(g <sup>-1</sup> PUF)]	总酶活/ [mg·(L·h) <sup>-1</sup> ]
游离细胞体系	25.85±7.49%	—	11415.7±3.17%
固定化细胞体系	36.85±5.14%	98.07±1.5%	22781.2±2.33%

## 3 结论

通过对影响聚氨酯泡沫材料泡孔性质的组分进行初步研究, 结果表明, 表面活性剂硅油的质量分数增大会使泡孔壁变得光滑、细腻, 不利于菌株的附着生长; 交联剂 1006-2 质量分数的增加虽然可以使泡沫形成更为致密的网状结构, 但是却不利于孔壁内部降解菌与氰的接触, 影响生物降解效率; 发泡剂水的质量分数的增加会使得泡沫变得松散, 降低其机械强度, 导致固定化细胞在降解过程中易脱落、损失。因此 3 种组分的质量分数分别为 1%、10% 和 0% 时, 制备得到的固定化细胞体系总生物量比游离细胞体系提高约 43%, 氰降解酶活约为游离细胞体系的 2 倍。因此, 通过调整聚氨酯泡沫组分来提高生物处理体系的生物量以及降解酶活可为高效固定化细胞体系的构建提供一条新思路。

### 参考文献

- [1] Kao C M, Liu J K, Lou H R, et al. Biotransformation of cyanide to methane and ammonia by *Klebsiella oxytoca* [J]. *Chemosphere*, 2003, 50(8): 1055-1061.
- [2] Chen C Y, Kao C M, Chen S C, et al. Application of immobilized cells to the treatment of cyanide wastewater [J]. *Water and Environment Technology A Journal of the International Association on Water Pollution*

- 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 Ni<sup>2+</sup> 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. 金属有机骨架材料 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. Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@SiO<sub>2</sub>@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. ■