

文章编号:1000-582X(2004)03-0125-05

微生物固定化的发展及在废水处理中的应用*

王里奥^{1,2}, 崔志强¹, 钱宗琴¹, 郑阳华¹

(1. 重庆大学资源与环境科学学院, 重庆 400030;

2. 重庆大学教育部生物力学与组织工程重点实验室, 重庆 400030)

摘要:通过对固定化技术方法的介绍以及不同载体选择的对比,分析评价了固定化微生物在废水处理中应用研究进展。认为固定化微生物是一种比一般生物处理法更为高效的方法,并讨论了它在含毒重金属离子废水、有机废水、酚类废水、芳香烃类废水、含磷含氮废水中的应用。研究表明:固定化技术的应用前景十分广泛,但在从实验室阶段走向废水处理的实际应用阶段上还存在一些问题。

关键词:微生物固定化技术;载体;废水处理

中图分类号:X703

文献标识码:A

固定化微生物技术起始于1959年,那时Hattori等人首次实现了大肠杆菌的固定化。从此发展迅速,至今已经形成了较为完备的理论和方法。固定化微生物技术是用化学的或者物理学的手段和方法将游离微生物定位于限定的空间领域,并使其保持活性,具备反复利用的特点。这项技术最初主要用于工业发酵,20世纪70年代以后,由于水污染严重,迫切需要一种高效、快速,能连续处理的废水处理技术,从而微生物固定化技术才在污水处理中得到广泛应用。作者就国内外学者对固定化技术在废水处理中应用的大量研究进行综述。

1 固定化技术

根据所固定微生物的种类的不同,固定化方法也不同,常用的主要有3种:包埋法、交联法、吸附法(载体结合法)。以及新近发展的无载体固定化方法。

1.1 包埋法

包埋法是利用高分子载体将游离微生物截留在高分子网络内,该网络结构能防止菌体或细胞渗出到周围培养基中,但底物仍能渗入与菌体或细胞分泌的各种酶发生反应。该方法操作简单,对微生物活性影响小,制作的固定化微球的强度高,是目前研究最广泛的固定化技术方法。但包埋材料会一定程度阻碍底物和氧扩散,对大分子底物不适用。

蒋宇红等^[1]以琼脂,明胶,海藻酸钙,聚乙烯醇(PVA)和聚丙烯酰胺(PACAM)为载体固定化研究,结果表明:它们制备的固定化材料具有机械强度高,传质性能好,生物毒性较低,固定化操作容易等特点。而且

认为PVA比海藻酸钙更适用于废水处理^[2]。黄霞等^[3]的研究也得出类似的结论。Stormo等^[4]研究了用海藻酸钙、琼脂、聚氨酯类结构聚合物包埋Flavobacterium(黄杆菌),制成微球(直径2-50 μ m),在进行对氯酚降解时发现这些微球与自由菌体具有相同的代谢活性。

1.2 交联法

交联法是使用双功能或多功能的试剂与酶分子进行分子间的交联固定化方法。由于酶蛋白的功能团参与此反应,所以酶的活性中心构造可能受到影响,而使酶显著失活,且交联剂价格昂贵,故不常用。

1.3 吸附法

又称载体结合法,是通过物理吸附,化学或离子结合,将微生物固定于非水溶性载体。此方法操作简单,对微生物活力影响小,但结合的微生物量有限,反应稳定性和反复使用性差,因此往往采用引入疏水和亲水的配位体后制成载体衍生物。

1.4 聚集-交联方法

聚集-交联方法是将凝聚剂与菌体形成聚集体,再利用交联剂进行交联,构成立体网状结构。这种方法的显著特点在于:高效菌体不易流失,生物浓度高从而使处理效果大为提高。这种方法已经应用于染料废水的处理^[1-2]。

1.5 无载体固定化方法

利用某些微生物具有自絮凝形成颗粒的特性,使微生物产生自固定,成为无载体固定化技术。这种固定化方法是一种全新的概念^[5]:在自絮凝颗粒形成过

* 收稿日期:2003-10-08

基金项目:教育部访问学者基金项目(教计司1999-5)

作者简介:王里奥(1956-),女,重庆市人,重庆大学教授,博士,主要从事环境科学与环境工程的研究。

程中,同时形成了微生物的适宜生态环境,使之有利于微生物代谢之间的协调。这种方法相比于以往的一些固定方法具有显著的优势,将在环境工程中的污水处理领域得到广泛的应用^[6]。

2 载体的选择

在污水的水处理过程中,固定化微生物技术的使用对载体有一些必须的要求。这些要求归纳起来可以认为是:

- 1) 具有足够的机械,物理和化学稳定性;
- 2) 具有生物相容性,不能干扰生物分子的功能;
- 3) 具备一定的容量;
- 4) 价廉易得。

传统的载体主要可分为两大类:一类是天然高分子凝胶载体,如琼脂、角叉胶、海藻酸钙等;另一类是有有机合成高分子凝胶载体,如聚丙烯酰胺(ACAM)凝胶、聚乙烯醇(PVA)凝胶、光硬化树脂、聚丙烯酸凝胶。常见的固定化载体的性能如表1^[1]:

表1 几种微生物固定化载体的性能

指标	琼脂	海藻酸钙	角叉胶	ACAM	PVA-硼酸
压缩强度(kg/cm ²)	0.5	0.8	0.8	1.4	2.8
耐曝气强度	差	一般	一般	好	好
扩散系数($\times 10^{-6}$ cm ² /g) *	—	6.8(30℃)	3.7(25℃)	5.4~6.7(60~70℃)	3.4(25℃)
有效系数 **	75	68	58	60	—
耐生物分解性	差	较差	较差	好	好
对生物毒性	无	无	无	较强	一般
固定技术难易程度	易	易	易	较难	较易
成本	一般	较低	较高	高	一般

说明: * 基质为葡萄糖;

** 有效系数: [固定化微生物氧利用速度(mg O₂/h)/破碎载体后微生物氧利用速度(mg O₂/h)] $\times 100$

新固定化载体的开发研究主要是新型载体和多种传统载体的复合。王孔星等^[7]用多孔陶珠 M-M-2 和 多孔硅酸盐材料 WV-1 固定化细胞载体处理印染废水; Durham 等^[8-9]以沸石为机体研制具有离子交换性能的 Z 型微生物载体,在此基础上将活性炭与之复合制备具有离子交换和吸附功能的 CZ 型微生物载体。杨云霞等^[10]采用人工合成多孔高分子载体,运用包络法微生物固定化技术处理低浓度废水取得显著成效。Pai^[11]用含 1% 活性炭, 4% 海藻酸钙凝胶, 1% 湿菌体的海藻酸钙凝胶, 包埋微生物以降解苯酚废水, 效果比较理想。Lin^[12]利用海藻酸钙与吸附剂(粉末活性炭)联合包埋固定 *Phanerochaete chrysosporium* 菌, 用于降解五氯酚比单独固定化体系更有效。

最近 Lozinsky 和 Plieva^[13]对 PVA 凝胶作为固定化载体作了较为全面的总结, 他们认为 PVA 凝胶固定化包埋技术优势有: PVA(低温制备)的凝胶。

1) 有很高的大小孔隙率, 提供最佳的菌体代谢物转运途径;

2) 有极好的流变学性能(不易脆), 可作为大多数反应器的固定化载体;

3) 有超常的热稳定性(相比于热可逆性凝胶);

4) 对生物降解耐受性很高, 对培养介质成分无不良反应;

5) 生物相容, 无毒, 低成本。

显然, PVA 作为一种优良的固定化载体, 将会得到更多的应用。

3 固定化技术的研究与应用

3.1 重金属离子的去除

吴乾菁等^[14]利用聚丙烯酰胺固定化酵母菌细胞去除电镀废水中的 Cd(II): 在 pH 为 9, Cd(II) 浓度为 1~400 mg/L 的时候, 反应 1 h, 固定化细胞对 Cd(II) 的去除率为 98.9%; 采用未固定化细胞则去除 37.6%。分别采用 0.1 M HCl 和 0.1 M EDTA 解吸, Cd²⁺ 的回收率为 88.5% 和 87.6%。

严国安^[15]利用褐藻酸钙包埋固定普通小球藻, 对人工配置的含汞污水进行净化试验, 结果表明固定藻对汞的去除明显高于悬浮藻。固定化小球藻对汞的去除效率中, 藻体的去除作用占 70%, 藻类代谢活动引起汞的挥发 20%, 载体凝胶吸附 10%。

土耳其科学家^[16-18]用海藻酸钙截留(包埋)真菌 (*Lentinus sajor-caju*), 处理含 Cd(II) 废水。最大吸附能力 104.8 \pm 2.7 mg Cd(II) (活菌) 及 123.5 \pm 4.3 mg Cd(II)。吸附能力与时间的关系符合假二级方程。0.5 h 之内镉的生物吸附很快就达到 85%。有希望作为镉的生物吸附剂使用。用海藻酸钙固定真菌 (*Phanerochaete chrysosporium*) (包括活的和加热灭活的 2 种菌体), 去除 30~500 mg/L 的含 Hg(II) 和 Cd(II) 的废水。吸附平衡大约在 1 h, 条件: pH5.0 和 pH6.0; 温度 15~45 °C 范围。海藻酸钙-真菌用 10 MM HCl 处理, 回收吸附率达到原来的 97%, 处理 3 次后, 吸附能力仅只略降。最大吸附能力: 102.3 \pm 3.2 mg Cd(II) (活

菌)和 $120.6 \pm 3.8 \text{ mg Cd(II)}$ (死菌); 吸附平衡大约 1 h; 回收 3 次, 其吸附能力几乎无明显下降。

3.2 有色废水脱色

牛志卿等^[19]对紫色非流光合细菌采用聚集-交联法固定, 用于处理活性艳红 X-3B 染液, 最适条件是 pH 为 7.5~9.4, 温度 30~45 °C, 连续运转 45 d, 脱色率保持在 80% 左右。比较聚集-交联固定化微生物和海藻酸钠包埋固定微生物和脱色能力, 牛志卿认为前者比后者酶活力高, 其脱色率较活性污泥高 1~2 倍, 且前者的半衰期长, 成本低。

韩树琴等^[20]以琼脂为载体固定蜡状芽孢杆菌 45 号, 连续处理酸性红 B 溶液, 当进水浓度为 42.1 mg/L 时, 有出水平均脱色率 87%。

李浩然等^[21]用深海锰结核作为生物固定化载体, 在气升式反应器内进行了对比试验, 结果表明: 结核作为固定化载体可有效地降低染料废水中的化学耗氧量 (COD), 生物耗氧量 (BOD), 固体悬浮物 (SS), 色度等, 并且可以打开难降解的苯环。处理后的污水可作为 J13 菌的有效营养和炭源。

美国圣地亚哥州立大学和土耳其科学家^[22]合作, 利用流化床式反应器 (FBR), 以浮石作为固定化材料 (支持材料), 厌氧处理棉纺厂废水, 现场的效果: 外加碳源 (约 2g/L 葡萄糖型化合物), 处理最大效果 COD82%, BOD594%, 脱色 59%。进一步研究表明, 再加碳源对脱色效果没有增加。

3.3 处理含氮含氨废水

葛文淮^[23]从凝胶颗粒的机械强度, 缩水性能, 化学稳定性和微生物活性等方面研究包埋剂的选择。结果表明海藻酸钠, 卡拉胶, 聚乙烯醇和丙稀酰胺是较理想的微生物载体。在选用丙稀酰胺凝胶颗粒固定消化菌的氨氮废水处理工艺中, 证明重要影响因素有: pH 值, 颗粒重量, 丙稀酰胺量、菌体量。并得出最佳的工艺组合—丙稀酰胺含量 12.5%, 包埋菌体含量 5%, 颗粒重量 4 g, pH 值 8.5 时, 氨氮的去除率为 70%。

王磊等^[24]在固定化硝化菌去除氨氮的研究中选用聚乙烯醇作为包埋载体, 并且添加适量粉末活性炭, 包埋固定化硝化污泥, 处理以硫酸铵和葡萄糖为主的废水。间歇试验结果表明, 在 24~28 °C, 颗粒填充率为 7.5%, 停留时间为 8h 的条件下, 进水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 负荷由 $0.6 \text{ kg}/(\text{m}^3 \times \text{d})$ 提高至 $3.49 \text{ kg}/(\text{m}^3 \times \text{d})$, $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率可达 95.5%, COD 去除率保持在 80% 以上。

宋军等^[25]用聚乙烯醇 (PVA) 在低温下包埋反硝化菌, 在 PVA 浓度为 10%, 交联剂 pH 值为 6.7, 反硝化菌的浓度为 10%, 并加入 0.1% 的活性炭的适宜条件下, 当温度很低 ($10 \pm 1^\circ\text{C}$) 时, 固定化细胞 10 h 脱氮率可达 40%, 而未固定化细胞几乎不能脱氮。另外, 当毒物浓度超过抑制浓度 [NO_3^-] 去除率仍能达到 80%。证明了固定化微生物的低温和毒物耐受力都很强。

曹国民等^[26]用 PVA 为载体, 采用单级生物脱氮

新技术, 即利用一种固定化细胞膜两侧分别与好氧的氨氮废水, 缺氧的乙醇炭源接触, 固定于膜中的硝化菌将氨氧化为亚硝氮和硝氮, 随即被同膜中的反硝化菌还原为氮气。采用这种方法使氨氧化速率为硝化菌单独使用的 2 倍。

关于焦化废水, 是一种氨氮和有机物浓度较高的, 难生化降解的有机废水, 一般处理较难。王业耀等对此已经作了综合评述^[27]。

3.4 含酚和杂环芳烃的废水

周定等^[28]从活性污泥中分离得到热带假丝酵母 (*Candida tropicalis*), 经海藻酸钙凝胶包埋固定后, 在自制的三相流化床反应器内进行含酚废水的连续处理。进水酚浓度 300 mg/L, 出水酚浓度小于 0.5 mg/L, 与悬浮生物相比, 酚的容积负荷可提高 1 倍以上。

Amanda 等^[29]以 PVA- H_3BO_3 包埋法固定化假单胞菌, 在流化床反应器中连续降解苯酚。固定化细胞在三相流化床中连续运行 2 周, 进水酚浓度从 250 mg/L 逐渐提高到 1300 mg/L, 出水酚浓度均为 0。

南非 Rhodes 大学的 Luke 等人^[30]用膜固定真菌 (*Neurospora crassa*) 的生物膜反应器, 处理含酚废水。该真菌生产氧化酶, 可以将酚降解。固定化后去除效率可持续 4 个月, 而未固定有效期仅 8~15 d。

还有 Wang 等人^[31]用悬浮菌体和固定化菌体 (*Bacillus insolitus*) 比较, 在 2,4-二氯苯酚浓度较低 (10~50 mg/L) 时, 固定化菌体除处能力高于悬浮菌体; 当 2,4-二氯苯酚浓度较高 (50~200 mg/L) 时, 悬浮菌体和固定化菌体的效率相同, 说明高浓度的 2,4-二氯苯酚会抑制菌体的活性。

另有 Wang 和 Qian^[32]用角叉胶-几丁糖凝胶固定 (包埋) 微生物, 降解 4-氯苯酚。利用角叉胶和几丁糖复合载体, 改进了固定用材的力学强度和热稳定性。

黄霞^[33]等采用聚丙烯无纺布 (多孔结构) 与 PVA 的复合载体包埋固定化优势菌种, 来降解含有喹啉, 异喹啉, 吡啶的高浓度氨氮焦化废水, 3 种难降解有机物经处理 8h 后降解率均在 90% 以上。

中国^[34]和德国科学家合作^[35], 用 PVA 和纱布混合载体以及单独用 PVA 凝胶固定化从活性污泥中分离出的微生物降解废水中的喹啉, 当初始喹啉浓度在 50~500 mg/L 时, 固定化微生物的喹啉降解过程符合零级反应速率方程。用海藻酸钙固定 *Burkholderia sp.*, 处理含喹啉废水。固定化菌体的活性稳定超过 100 h。

李海英^[36]等用 PVA 包埋对氯代芳香类有机化合物 (AOX) 具有高效降解作用的混合菌, 并在厌氧条件下处理含有 AOX 的废水, 与自由菌液比较可得: 固定化细胞的酶活性及 AOX 去除率均高与自由菌液, 对温度和 PH 的适应范围较宽。在停留时间为 2.4 h 时, 对造纸漂白废水的去除率可稳定在 65%~81%。

Bokhamy 等^[37]利用固定化混合微生物体系降解蒽醌-2-磺酸钠 (SAS) 并与游离微生物体系进行了

比较。结果表明:当稀释率为 0.05h^{-1} 时,固定化细胞体系的SAS最大降解速率为 $89\text{mg}/(\text{L}\times\text{h})$,远远超过游离细胞体系的 $59\text{mg}/(\text{L}\times\text{h})$ 。

Wang及其合作者^[38]用海藻酸钙固定 *Pseudomonas sp.*,用于降解邻苯二甲酸二正丁酯,实验表明,整个固定化菌体在培养期间呈现梯度呼吸活性。

Lee等^[39]用海藻酸钙凝胶包埋固定化 *Pimelobacter sp.* 细胞进行了降解吡啶的研究,结果表明,与游离细胞相比,固定化细胞的比降解速率和对吡啶毒性的承受能力并没有提高。但是由于固定化细胞具有较高的生物浓度,所以其体积降解速率较高。Lee等认为,固定化细胞具有较高的生物浓度和可以重复利用,利用固定化细胞降解吡啶是可行的。

3.5 处理其它废水

蒋立锐等^[40]用聚丙烯酰胺凝胶包埋假单胞杆菌 B3 菌株,对合成洗涤剂中的LAS净化率达60%。

李彤^[41]等用PVA-硼酸化法包埋经富集得到的降解LAS的细菌,对洗衣粉中的LAS,净化率可达到90%以上。

宋志文等^[42]采用物理吸附的方法吸附从化工废水中筛选出具有降解甲醇能力的菌株,并在最适的条件——pH值为7~8,温度20~30℃,停留时间60min,空气曝气的状态下,若甲醇含量为5~30mg/L,则甲醇去除率大于90%,出水中甲醇含量少于5mg/L,COD_{Cr}小于12mg/L。宋志文等认为此方法可以用于甲醇工业废水的深度净化。

赵军等^[43]采用包埋法与吸附法相结合的方法固定甲烷八叠球菌,其最适在pH值为7.2,用于处理高浓度人工废水时COD最高容积负荷为 $14.7\text{kg}/(\text{m}^3\times\text{d})$,最高去除率为94.29%,且运行期间固定化介质不上浮,不膨胀,具有良好的传质和托气性能。

4 固定化微生物技术的优势与展望

综上,固定化微生物在废水处理中的应用是十分广泛的,它的优势主要是:

- 1) 浓度高,容积小,使处理负荷大幅提高;
- 2) 污泥产量低;
- 3) 有利于优势菌种的固定,提高降解效率;
- 4) 对有毒物质的承受能力强;
- 5) 稳定性好。

同时我们也应该看到,将固定化微生物技术从实验室走向废水处理的实际应用上还是有一定难度的,还有许多问题有待研究,比如:实际废水是一个很复杂的体系,单一菌种可能无法应对;固定化载体的成本和使用寿命目前都不够经济;需要开发高效曝气和固定化设备,使其克服包埋载体对基质(特别是氧气)和产物存在的扩散阻力。

总之,我们可以预计,随着固定化微生物技术的不断研究发展,它在废水处理,乃至环境保护工程中将

发挥越来越实际,越来越重要的作用。

参考文献:

- [1] 蒋宇红,黄霞.几种固定化细胞载体的比较[J].环境科学,1993,14(2):11-15.
- [2] 吴晓磊,刘建广.海藻酸钠和聚乙烯醇作用固定化微生物包埋剂的研究[J].环境科学,1993,14(2):28-31.
- [3] 黄霞,刘建广.固定化细胞处理难降解有机废水[J].城市环境与城市生态,1993,6(3):1-4.
- [4] KEITH E. STORMO, RONALD L C, et al. Preparation of encapsulated microbial cell for environmental application [J]. Appl Environ Microbiol, 1992, 58: 727-730.
- [5] 白凤武.无载体固定化细胞的研究进展[J].生物工程进展,2000,20(2):32-36.
- [6] 胡勇有,高健.微生物絮凝剂的研究与应用进展[J].环境科学进展,1999,7(4):24-29.
- [7] 王孔星,谢裕敏.用无机载体固定脱色混合菌处理印染废水的模拟试验[J].环境科学与技术,1989,(4):26-29.
- [8] DURHAM DR, LEDA C. MARSHALL, et al. Characterization of inorganic biocarriers that moderate system upsets during fixed-film biotreatment processes [J]. Appl Environ Microbiol, 1994, 60: 3329-3335.
- [9] DURHAM DR, LEDA C. MARSHALL, et al. New composite biocarriers engineered to contain adsorptive and ion-exchange properties improve immobilized-cell bioreactor process depend ability [J]. Appl Environ Microbiol, 1994, 60: 4178-4181.
- [10] 杨霞,方治华.多孔高分子载体固定化微生物厌氧流化床处理低浓度废水的研究[J].中国沼气,1998,16(2):3-7.
- [11] PAI S L. Continuous degradation of phenol by *R. hodococcus sp.* Immobilized on granular activated carbon and inactivated alginate [J]. Bioresource Technol, 1995, 51: 37-42.
- [12] LIN J E, WANG HY, HICKEY R F. Use of coimmobilized biological systems to degrade toxic organic compounds [J]. Biotechnol and Bioengin, 1991, 38: 273-279.
- [13] LOZINSKY VI, PLIEVA F M. Poly(vinyl alcohol) cryogels employed as matrices for cell immobilization. 3. Overview of recent research and developments [J]. Enzyme and Microbial Technology, 1998, 23(3-4): 227-242.
- [14] 吴乾善.固定化酵母菌细胞去除 Cd^{2+} 的研究[J].重庆环境科学,1996,18(3):16-19.
- [15] 严国安. Hg^{2+} 对固定化小球藻污水净化及生理特征的影响[J].环境科学,1994,15(5):6-9.
- [16] BAYRAMOGLU G, DENIZLI A, BEKTAS S, et al. Entrapment of *Lentinus sajor-caju* into Ca-alginate gel beads for removal of Cd(II) ions from aqueous solution: preparation and biosorption kinetics analysis [J]. Microchemical Journal, 2002, 72(1): 63-76.
- [17] KACAR Y, ARPA C, TAN S, et al. Biosorption of Hg(II) and Cd(II) from aqueous solutions: comparison of biosorptive capacity of alginate and immobilized live and heat inactivated *Phanerochaete chrysosporium* [J]. Process Biochemistry, 2002, 37(6): 601-610.
- [18] ARLCA MY, KACAR Y, GENCO O. Entrapment of white-

- rot fungus *Trametes versicolor* in Ca-alginate beads; preparation and biosorption kinetic analysis for cadmium removal from an aqueous solution[J]. *Bioresource Technology*, 2001, 80(2): 121-129.
- [19] 牛志卿, 吴国庆. 固定化紫色非硫光合细菌降解活性艳红 X-3B 的研究[J]. *环境科学*, 1994, 15(5): 49-52.
- [20] 韩树琴, 杨惠芳. 用混合细菌 89-01 固定化细胞去除合成洗涤剂废水中 LAS [J]. *环境科学学报*, 1988, 8(1): 93-97.
- [21] 李浩然, 冯雅丽. 深海锰结核作生物固定化载体处理染料废水[J]. *北京科技大学学报*, 2002, 24(1): 11-14.
- [22] SEN S, DEMIRE GN. Anaerobic treatment of real textile wastewater with a fluidized bed reactor [J]. *Water Research*. 2003, 37(8): 1 868-1 878.
- [23] 葛文准, 荣雯辉. 固定化微生物法处理氨氮废水[J]. *上海环境科学*, 1995, 14(4): 10-13.
- [24] 王磊, 兰淑澄. 固定化硝化菌去除氨氮的研究[J]. *环境科学*, 1997, 18(2): 18-23.
- [25] 宋军, 袁林江, 金奇庭. 固定化微生物用于废水生物脱氮的试验研究[J]. *陕西环境*, 1998, 5(2): 19-21.
- [26] 曹国民, 赵庆祥. 新型固定化细胞膜反应器脱氮研究[J]. *环境科学学报*, 2001, 21(2): 189-193.
- [27] 王业耀, 袁彦肖, 田仁生. 焦化废水处理技术研究进展[J]. *工业水处理*, 2002, 22(7): 1-5.
- [28] 周定, 侯文华. 固定化微生物法处理含酚废水的研究[J]. *环境科学*, 1990, 11(1): 2-5.
- [29] AMANDA K Y. Cell immobilization using PVA crosslinked with boric acid[J]. *Biotechnol and Bioeng*, 1992, 39: 447-449.
- [30] LUKE A K, BURTON S G A novel application for *Neurospora crassa*; Progress from batch culture to a membrane bioreactor for the bioremediation of phenols [J]. *Enzyme and Microbial Technology*. 2001, 29(6-7): 348-356.
- [31] WANG CC, LEE CM, KUAN CH. Removal of 2,4-dichlorophenol by suspended and immobilized *Bacillus insolitus* [J]. *Chemosphere*, 2000, 41(3): 447-452.
- [32] WANG J, QIAN Y. Microbial degradation of 4-chlorophenol by microorganisms entrapped in carrageenan-chitosan gels [J]. *Chemosphere*, 1999, 38(13): 3 109-3 117.
- [33] 黄霞, 陈钱. 固定化优势菌种处理焦化废水中几种难降解有机物的试验研究, *中国环境科学*, 1995, 15(1): 1-4.
- [34] WANG J, HAN L, QUAN X, et al. Biodegradation of quinoline by gel immobilized *Burkholderia* sp. [J]. *Chemosphere*, 2001, 44(5): 1 041-1 046.
- [35] WANG J, QUAN X, HAN L. et al. Microbial degradation of quinoline by immobilized cells of *Burkholderia pickettii*. [J]. *Water Research*, 2002, 36(9): 2 288-2 296.
- [36] 李海英, 李小明. 固定化微生物处理造纸漂白废水[J]. *工业用水与废水*, 2001, 32(5): 19-22.
- [37] BOKHAM Y M. Degradation of sodium ntrhaquinone sulfonate by free and immobilized bacterial cultures [J]. *Appl. Microbiol. Biotechnol*, 1994, 41: 110-116.
- [38] WANG J, HORAN N, STENTIFORD E, et al. The radial distribution and bioactivity of *Pseudomonas* sp immobilized in calcium alginate gel beads [J]. *Process Biochemistry*, 1999, 35(5): 465-469.
- [39] LEE S T. Biodegradation of pyridine by freely and suspended immobilized *Pimelobactersp.* [J]. *Appl microbiol iotechnol*, 1994, 41: 652-657.
- [40] 蒋立锐, 任维栋. 用聚丙烯酰胺凝胶固定化微生物细胞清除合成洗涤剂污水中 LAS 的初步研究 [J]. *环境科学*, 1981, 2(3): 36-38.
- [41] 李彤, 俞毓馨. 用 PVA 包埋法固定化细胞去除洗衣粉废水中 LAS 的研究 [J]. *环境科学*, 1992, 13(5): 16-19.
- [42] 宋志文, 陈冠雄, 马放等. 微生物固定化处理甲醇废水的实验研究 [J]. *微生物学杂志*, 2000, 20(4): 30-41.
- [43] 赵军, 曹亚莉, 骆海鹏, 等. 固定化甲烷八叠球菌处理高浓度有机废水的研究 [J]. *可再生能源*, 2002, 104(4): 10-13.

Advances in Immobilized Microorganism and Its Applications of Wastewater Treatment

WANG Li-ao^{1,2}, CUI Zhi-qiang¹, QIAN Zong-qin¹, ZHENG Yang-hua¹

(1. College of Resource & Environmental Science, chongqing University Chongqing 400030, China;

2. Open Laboratory of Biomechanics & Tissue Engineering under the State Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: By introducing the way of the immobilized cell and comparing the carriers, this paper presented the advances in immobilized microorganism and its applications of wastewater treatment are presented. It is believed that immobilized microorganism treatment is a more effective method than general biological method. The paper discusses its application in treating heavy metal wastewater, organic wastewater, hydroxybenzen wastewater, and nitrogen wastewater, et al. And the research indicates the advances and the problems of immobilized microorganism.

Key words: immobilized microorganisms; carrier; wastewater treatment