

三相生物流化床处理高浓度丙烯酸丁酯生产废水

范志庆^{1,2}, 宋玉栋¹, 周岳溪^{1*}, 梁汉东²

(1. 中国环境科学研究院水污染控制技术研究中心, 北京 100012; 2. 中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 北京 100083)

摘要: 采用三相生物流化床工艺处理模拟丙烯酸丁酯生产废水, 考察了进水丙烯酸浓度、对甲基苯磺酸浓度、容积负荷、水力停留时间对废水处理效果的影响。结果表明, 该工艺适合于丙烯酸丁酯废水的高负荷处理。进水中 100 mg/L 丙烯酸及 50 mg/L 的对甲基苯磺酸对生物流化床中未经驯化的微生物具有明显的毒害作用, 经过 2 周左右的驯化, 毒害作用可基本消除。生物膜驯化后三相生物流化床处理含丙烯酸和对甲基苯磺酸的丙烯酸丁酯模拟废水, 在 COD 容积负荷低于 11.56 ~ 13.56 kg/(m³·d) 的条件下, 丙烯酸和对甲基苯磺酸被完全去除。在进水 COD 为 2 000 mg/L, 容积负荷 < 8.86 kg/(m³·d) 时, 出水 COD 可稳定达到《污水综合排放标准》(GB 8978-1996) 规定的二级标准。在进水 COD 为 9 550 ~ 11 800 mg/L (丙烯酸、对甲基苯磺酸质量浓度分别为 6 244 mg/L、1 000 mg/L), 容积负荷为 7.96 ~ 9.83 kg/(m³·d) 条件下, 出水 COD 维持在 271 ~ 360 mg/L, 达到《污水综合排放标准》(GB 8978-1996) 三级标准。

关键词: 丙烯酸丁酯废水; 生物处理; 三相生物流化床; 丙烯酸; 对甲基苯磺酸

中图分类号: X783 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)05-1382-06

Treatment of High-Concentration Butyl-Acrylate-Production Wastewater by A Three-Phase Biological Fluidized Bed Reactor

FAN Zhi-qing^{1,2}, SONG Yu-dong¹, ZHOU Yue-xi¹, LIANG Han-dong²

(1. Research Center of Water Pollution Control Technology, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The butyl-acrylate-production wastewater was treated by a three-phase biological fluidized bed reactor. The influences of acrylic acid concentrations, *p*-toluenesulfonic acid concentrations, volumic load and hydraulic retention time on pollutants removal efficiencies were investigated. It was indicated that the reactor was suitable for the treatment of butyl-acrylate-production wastewater at a high loading rate. Acrylic acid of 100 mg/L or *p*-toluenesulfonic acid of 50 mg/L in the influent can inhibit the unacclimated microorganisms in the fluidized bed reactor. The inhibition effects were eliminated after an acclimation of two weeks. Acrylic acid and *p*-toluenesulfonic acid could be removed completely at COD loading rates up to 11.56-13.56 kg/(m³·d). The effluent COD could satisfy the demand of Class II in Chinese Integrated Wastewater Discharge Standard (GB 8978-1996) at COD loading rates up to 8.86 kg/(m³·d) when influent COD concentration is below 2 000 mg/L. When the influent COD concentration was increased to 9 550-11 800 mg/L (acrylic acid of 6 244 mg/L and *p*-toluenesulfonic acid of 1 000 mg/L), the effluent COD was 271-360 mg/L, which satisfied the demand of Class III in Chinese Integrated Wastewater Discharge Standard (GB 8978-1996) at COD loading rates of 7.96-9.83 kg/(m³·d).

Key words: butyl-acrylate-production wastewater; biological treatment; three-phase biological fluidized bed; acrylic acid; *p*-toluenesulfonic acid

丙烯酸丁酯是一种重要的化工原料, 广泛应用于有机合成中间体、黏合剂、乳化剂、涂料等^[1], 其生产过程产生大量废水。丙烯酸丁酯生产废水 COD 高达 60 ~ 70 g/L, TOC 在 20 ~ 30 g/L, 废水所含有有机污染物主要为丙烯酸钠和对甲基苯磺酸钠, 丙烯酸和对甲基苯磺酸浓度分别可达 40 ~ 50 g/L 和 7 ~ 8 g/L。由于该废水含盐量高且污染物毒性很大, 目前仍缺乏有效的处理技术, 主要通过大量稀释后进行生物处理。现有研究的处理技术包括焚烧法^[2]、催化湿式氧化法^[3]和生物处理法^[4~7]等。其中焚烧

法和催化湿式氧化法能耗大、成本高, 且在高含盐条件下容易发生腐蚀和堵塞等问题^[8,9]。目前研究的生物处理技术主要为厌氧处理, 尽管该技术能耗较低, 但丙烯酸和对甲基苯磺酸对微生物有毒害作用, 研究表明, 在 UASB 反应器中, 丙烯酸对产甲烷菌的半抑制浓度 (IC₅₀) 为 200 ~ 214 mg/L^[10,11], 厌

收稿日期: 2010-03-22; 修订日期: 2010-11-29

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2008ZX07207-004)

作者简介: 范志庆 (1985 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制技术, E-mail: fanzhiqing1985@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zhoubuyuexi@263.net

氧处理存在负荷较低、运行不稳定等问题。

三相生物流化床是将传统活性污泥法与生物膜法相结合并引入化工流态化技术的一种新型废水生物处理装置。与传统生物处理工艺相比,其具有载体生物量大、有机负荷高、反应器容积小、产泥少、污泥龄长、处理效率高等优点^[12]。国内外有利用三相流化床工艺处理石油化工废水的研究^[13-15],但用三相生物流化床处理高负荷丙烯酸丁酯生产废水的研究鲜有报道。

本研究采用三相生物流化床处理模拟丙烯酸丁酯生产废水,旨在探索其在高有机负荷下处理此类废水的可行性,开发一种处理成本低、运行稳定的高负荷丙烯酸丁酯生产废水处理技术。

1 材料与方法

1.1 试验装置

采用的三相生物流化床工艺流程如图 1 所示。三相生物流化床为有机玻璃加工成的圆筒型反应器,有效体积 12 L,采用比表面积大、过水通气性能良好、传质效率高的聚氨酯泡沫作为载体。该载体由于表面经化学修饰后带有正电荷,有利于微生物细胞在载体表面的附着。同时该载体附着生物膜后,密度与水相近,流化所需的能量较低,已成功应用于高浓度含酚废水和染料废水的处理^[16,17]。载体尺寸为 10 mm × 10 mm × 10 mm,投加量占反应区体积 40%,用转子流量计控制曝气量,用砂芯曝气头置于反应器底部曝气,模拟废水由蠕动泵提升进入三相流化床。

1.2 进水组成

试验所用废水为自配水,其有机物组成详见

1.4 节。微生物生长所需 N、P 分别由氯化铵和磷酸二氢钾提供,按照 COD:N:P = 100:5:1 的质量比配制,进水 pH 用氢氧化钠调节至中性。为模拟高含盐废水,自配水加入 10 g/L 的 NaCl。

1.3 测试项目

COD:快速消解法,CTL-12 型化学需氧量速测仪;氨氮:纳氏试剂比色法,752 N 型紫外可见分光光度计;污泥指数:标准质量法;载体外部及内部微生物形态:QUANTA 200 扫描电子显微镜;丙烯酸、对甲基苯磺酸^[18];Dionex ICS-1000 离子色谱仪[电导检测器;ASRS 4 mm 抑制器;IonPac AS11-HC 阴离子色谱柱;Chromeleon (6.50 SP2) 色谱工作站];30 mmol/L NaOH 淋洗液;流速 1.0 mL/min;抑制电流 75 mA;进样量为 25 μL。

1.4 三相生物流化床运行试验

在曝气量充足的条件下,考察进水丙烯酸浓度、对甲基苯磺酸浓度、容积负荷、水力停留时间对废水处理效果的影响,具体试验过程如下。

(1)反应器的启动 流化床接种污泥取自北京某市政污水处理厂活性污泥,以葡萄糖自配水进行闷曝培养,24 h 后连续进水,保持水力停留时间为 6 h,3 周后载体表面生物膜生长饱满,膜表面有钟虫等原生动植物附着生长,通过扫描电子显微镜可观察到载体内外均大量生长着长杆菌、短杆菌和球菌,此时溶解性 COD 去除率达 80% 以上,反应器完成启动。

(2)进水丙烯酸浓度的影响 控制进水 COD 为 1 500 mg/L,丙烯酸浓度按 50、100、200、400、800、1 125 mg/L 梯度逐步提高,不足的碳源由葡萄糖补充,研究进水丙烯酸质量浓度对三相生物流化床处理效果的影响。

(3)对甲基苯磺酸浓度的影响 在丙烯酸作为单一碳源后,逐步加入 50、100、150 mg/L 对甲基苯磺酸,相应降低丙烯酸浓度以保证进水 COD 为 1 500 mg/L,考察对甲基苯磺酸对废水处理效果的影响。

(4)容积负荷(OLR)的影响 提高进水 COD 至 2 000 mg/L,即丙烯酸浓度 1 245 mg/L,对甲基苯磺酸浓度 200 mg/L,考察容积负荷由 6 kg/(m³·d)提升至 8 kg/(m³·d),工艺处理性能的变化。

(5)水力停留时间(HRT)的影响 通过蠕动泵调节进水流速,研究 HRT 分别为 8、6、4 h 条件下,三相生物流化床对丙烯酸、对甲基苯磺酸、COD 的去除效果。

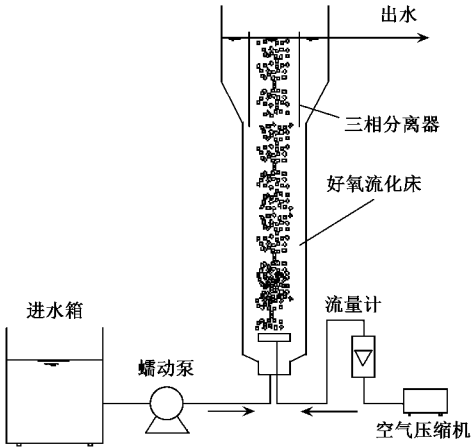


图 1 三相生物流化床流程示意

Fig. 1 Diagram of three-phase biological fluidized bed

(6)高浓度废水试验 维持容积负荷不变,提高进水 COD 至 10 000 mg/L (丙烯酸浓度 6 244 mg/L,对甲基苯磺酸浓度 1 000 mg/L),研究三相生物流化床对高浓度丙烯酸丁酯废水的处理能力.

2 结果与分析

2.1 进水丙烯酸浓度对处理效果的影响

该运行阶段历时 66 d,进水丙烯酸质量浓度对废水处理效果的影响如图 2 所示.三相生物流化床运行至第 25 d,载体表面生物膜生长饱满,流化床对葡萄糖去除率稳定在 80% 以上,反应器完成启动,进水中开始加入 50 mg/L 的丙烯酸,没有发现反应器运行异常.第 28 d 丙烯酸浓度提高到 100 mg/L,第 30 d 观察到载体表面生物膜近乎完全脱落,出水 COD 由之前的 129 mg/L 升高到 422 mg/L,说明 100 mg/L 的丙烯酸对流化床中的微生物毒害作用明显,经过 12 d 的驯化,恢复正常.逐步提高丙烯酸浓度至 200、400 和 800 mg/L,未见对微生物有明显抑制作用.第 65 d 丙烯酸浓度提高到 1 125 mg/L,此时进水不含葡萄糖,COD 完全由丙烯酸提供,观察到载体表面生物膜有脱落迹象,出水悬浮物增多,反应器内壁以及溢流堰上附着生长的生物膜消失.经检测出水 COD 有所升高,流化床运行第 82 d 恢复正常,此时载体上的生物浓度(以 VSS 计)为 2 853 mg/L.

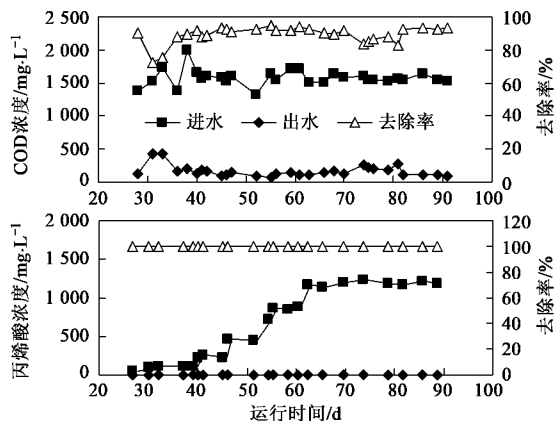


图 2 丙烯酸浓度对 COD 去除效果的影响

Fig. 2 Effect of acrylic acid concentrations on COD removal

由图 2 可知,保持进水 COD 在 1 500 mg/L 左右,容积负荷约为 $6 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,随丙烯酸浓度的提高,经一段时间的驯化,反应器各项指标均能恢复正常,丙烯酸能够被完全去除,出水 COD 低于 120 mg/L,COD 去除率达到 90% 以上.试验结果表明经过驯化,三相生物流化床对丙烯酸废水具有较好的

处理能力.

2.2 对甲基苯磺酸对处理效果的影响

反应器运行第至 91 d,流化床出水 COD 稳定在 120 mg/L 以下,开始加入 50 mg/L 对甲基苯磺酸,待反应器稳定运行后,逐步提高对甲基苯磺酸浓度至 150 mg/L.由图 3 可知,刚开始加入对甲基苯磺酸时,其去除率只有 30% ~ 40%,生物膜大量脱落,出水悬浮物增多.说明 50 mg/L 的对甲基苯磺酸对流化床中的微生物有毒害作用,但 COD 去除率未见明显下降,经 10 d 左右的培养,对甲基苯磺酸能够被完全去除,之后尽管对甲基苯磺酸浓度提高,仍可以被完全去除.由图 3 可知,对甲基苯磺酸浓度提高到 100 mg/L、150 mg/L 之后几天的出水中偶尔能检测到几 mg/L 丙烯酸,运行 1 星期之后丙烯酸能够被全部去除.可见经过驯化 150 mg/L 的对甲基苯磺酸对丙烯酸的降解无抑制作用.

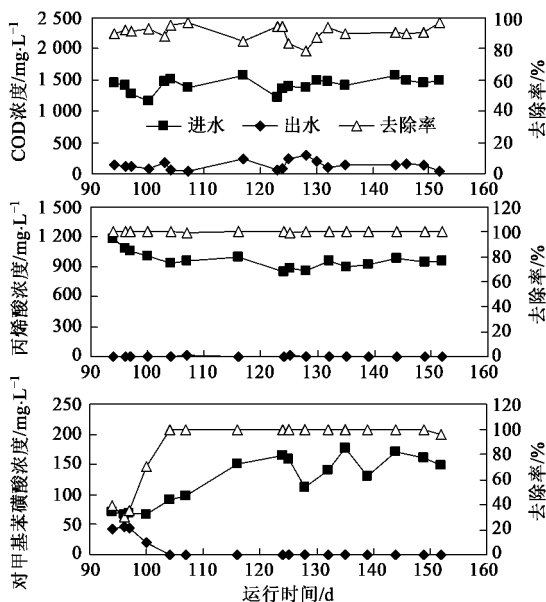


图 3 对甲基苯磺酸浓度对污染物去除效果的影响

Fig. 3 Effect of *p*-toluenesulfonic acid concentrations on pollutant removal

2.3 容积负荷对处理效果的影响

反应器连续运行 152 d,进水 COD 提高到 2 000 mg/L,由图 4 可知,容积负荷由 $6 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 提升至 $8 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,出水 COD 未见明显升高,COD 去除率保持在 90% 以上,经一个月的稳定运行,出水 COD < 120 mg/L,达到 GB 8978-1996 规定的二级排放标准,此外经离子色谱检测,丙烯酸和对甲基苯磺酸被完全去除.

2.4 水力停留时间对处理效果的影响

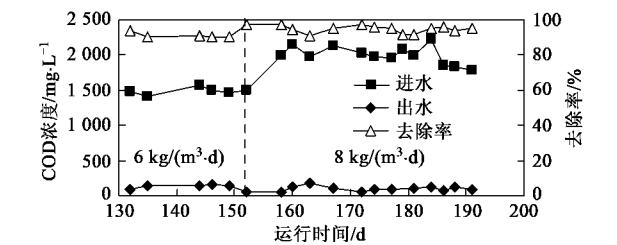


图4 容积负荷对COD去除效果的影响
Fig.4 Effect of volumic load on COD removal

水力停留时间直接影响污染物的去除率,水力停留时间长,容积负荷低,去除率高,但基建费用与运行成本相应增加,因此选择合适的水力停留时间至关重要.本试验考察了HRT为6、8、4 h,三相生物流化床对丙烯酸丁酯生产废水的处理效果.运行期间主要试验参数见表1,运行情况如图5所示.由图5可知,在HRT为6 h条件下,出水COD为84~117 mg/L,达到GB 8978-1996规定的二级排放标准;延长HRT至8 h,出水COD为76~100 mg/L,虽处理效果稍微变好,但仍不能达到一级排放标准;缩短HRT至4 h,出水COD为101~283 mg/L,平均为199 mg/L,达到GB 8978-1996规定的三级排放标准.此外,3个不同的HRT下,出水中均未检出这2种物质,说明三相生物流化床对丙烯酸及对甲基苯磺酸可完全去除.

表1 不同水力停留时间下的运行参数

Table 1 Process parameters at different hydraulic retention time			
运行时间 /d	HRT /h	进水 COD /mg·L ⁻¹	容积负荷 /kg·(m ³ ·d) ⁻¹
172~191	6	1 837~2 216	7.35~8.86
192~210	8	1 888~2 016	5.66~6.05
211~241	4	1 927~2 260	11.56~13.56

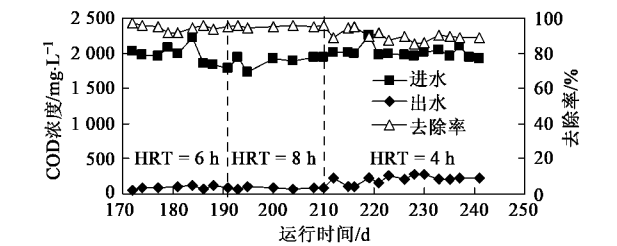


图5 HRT对COD去除效果的影响
Fig.5 Effect of HRT on COD removal

2.5 高浓度废水处理试验

反应器连续运行255 d,提高进水COD至10 000 mg/L,为保持容积负荷不变,水力停留时间延长至30 h.由图6可知,进水COD提高后,出水

COD由之前的200 mg/L左右升高至1 010 mg/L,出水中检测到244 mg/L丙烯酸、137 mg/L对甲基苯磺酸,驯化5 d后丙烯酸、对甲基苯磺酸均能够被完全去除,2周后出水COD维持在271~360 mg/L, COD去除率达到96.8%.

研究表明,采用三相生物流化床处理含丙烯酸和对甲基苯磺酸的丙烯酸丁酯生产废水,可在7.96~9.83 kg/(m³·d)的高负荷条件下,达到GB 8978-1996规定的三级排放标准.

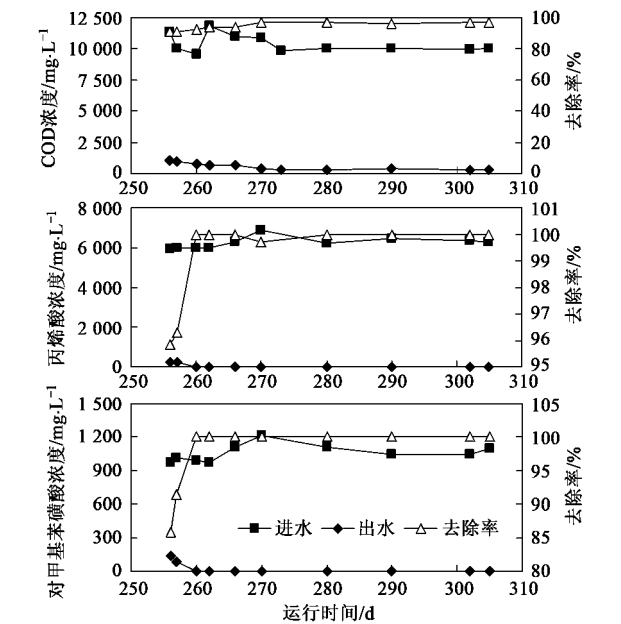


图6 三相生物流化床处理高浓度丙烯酸丁酯废水

Fig.6 Performance of three-phase biological fluidized bed for high concentration arylate wastewater treatment

2.6 微生物相观察及分析

三相生物流化床处理丙烯酸和对甲基苯磺酸混合废水达到稳定时(运行第152 d),反应器中载体生物膜及悬浮污泥扫描电镜照片如图7所示.图7(a)为流化床内悬浮态活性污泥的形态,微生物种类丰富,以杆菌、球菌为主.

图7(b)为流化床中载体外部附着生长的微生物形态,与悬浮态污泥相比,丝状菌明显增多,微生物种类以杆菌、球菌、丝状菌为主.载体表面附着生长大量丝状菌,一方面将具有污染物降解能力的丝状菌保留在废水处理系统中,另一方面防止了污泥膨胀、污泥沉降性能下降等问题的发生.

图7(c)为流化床中载体内部附着生长的微生物形态,微生物种类以长杆菌与球菌为主,丝状菌较少,并存在以球菌和杆菌分别占优势的区域,与载体

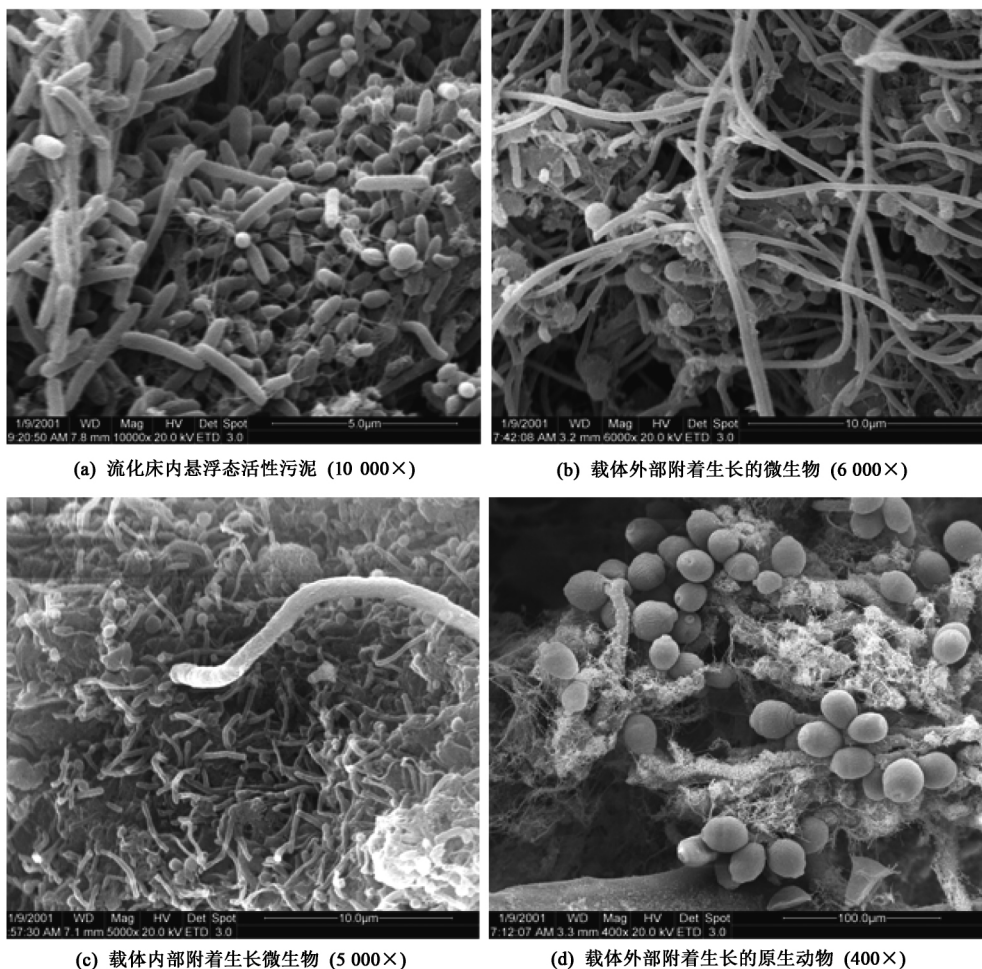


图 7 流化床内悬浮及附着生长微生物扫描电镜照片

Fig. 7 SEM photographs of suspended- or attached-growth microorganisms in the biological fluidized bed

外部的菌落明显不同。

图 7(d)为流化床中载体外部放大 400 倍的电镜照片,可清晰看见轮虫、钟虫的存在,说明三相生物流化床内水质良好。

由此可知,由于多孔载体对氧气和污染物的传质阻力的存在,使得三相生物流化床中存在混合液、载体外部、载体内部等多种不同的微环境,并有其各自不同的优势菌种.从而保证了生物流化床对废水中有毒有机污染物的高效处理。

3 讨论

目前研究的含丙烯酸废水生物处理技术以厌氧工艺为主,但由于丙烯酸对厌氧微生物的毒害作用,厌氧工艺多存在污染物去除率低,运行不稳定等问题.如 Demirer 等^[6]研究了丙烯酸在 UASB 反应器中的厌氧转化,当进水丙烯酸为 3 000 mg/L,容积负荷为 3.6 kg/(m³·d)时,COD 去除率为 45%. Stewart

等^[7]研究发现 1 500 mg/L 丙烯酸对厌氧微生物毒害作用很大,产甲烷受抑制后很难恢复. Dohanyos 等^[19]采用上流式厌氧生物膜反应器处理丙烯酸废水,在进水 COD 浓度为 10 ~ 15 g/L、进水 COD 负荷为 2 ~ 2.5 kg/(m³·d)、停留时间为 5.5 ~ 6 d 的条件下,丙烯酸的去除率可达到 98% 以上;当停留时间缩短为 1.6 d,即 COD 容积负荷为 7.8 kg/(m³·d)时,处理效果变得不稳定,甲烷产生停止。

好氧法处理丙烯酸及其酯类废水的相关研究较少,周平等^[20]采用内循环生物流化床处理丙烯酸废水,以陶粒为流化载体,COD 容积负荷为 5.5 ~ 7.5 kg/(m³·d)时,平均去除率为 72.4%. 该研究以丙烯酸生产废水为主,进水 COD 在 1 277 ~ 2 276 mg/L 之间,未考虑对甲基苯磺酸等污染物和盐度对处理效果的影响,也未考察流化床对高浓度废水的处理效果。

综上所述,采用以聚氨酯泡沫为流化载体的三相生物流化床处理含丙烯酸和对甲基苯磺酸的丙烯酸丁酯生产废水,与焚烧法、催化湿式氧化法相比,能耗低,投资和运行成本少.与厌氧处理工艺相比,可以承受更高的进水有毒有机物浓度,容积负荷高,出水水质稳定,且能够完全去除废水中的丙烯酸和对甲基苯磺酸.与以石英砂和陶粒为流化载体的传统生物流化床相比,由于采用了密度较小的流化载体,载体流化的启动能耗低,吨水处理成本低,且可在更高的有机负荷条件下获得更好的出水水质,具有广阔的应用前景.

4 结论

(1)进水 100 mg/L 丙烯酸对流化床中未驯化微生物具有一定的毒害作用,进水 50 mg/L 对甲基苯磺酸会对丙烯酸的降解产生抑制.经过驯化,流化床对 2 种污染物的耐受和降解能力将提高.

(2)当进水 COD 为 1 837 ~ 2 216 mg/L, HRT 为 6 h, COD 负荷 $< 8.86 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 时,经过驯化 COD 去除率可达 95.2%,出水 COD $< 120 \text{ mg/L}$,满足 GB 8978-1996 规定的二级排放标准.

(3)当进水 COD 为 9 550 ~ 18 000 mg/L, HRT 为 30 h, COD 容积负荷为 $7.96 \sim 9.83 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 时, COD 去除率可达 96.8%,出水 COD 维持在 271 ~ 360 mg/L,达到 GB 8978-1996 规定的三级排放标准.

(4)三相生物流化床处理模拟丙烯酸丁酯废水, COD 容积负荷可以达到 $11.56 \sim 13.56 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,废水中丙烯酸、对甲基苯磺酸均能够被完全去除.

(5)新型聚氨酯流化载体的投加,使得三相生物流化床中形成了混合液、载体外部、载体内部等多种不同的微环境,并且不同微环境下具有不同的优势菌种,保证了生物流化床对丙烯酸丁酯生产废水的高效处理.

参考文献:

- [1] 王沛熹, 罗丽宏. 丙烯酸(酯)制备、应用进展及市场趋势[J]. 化工科技市场, 2001, (4): 15-18.
- [2] 陈刚, 李丹阳, 张光明. 高浓度难降解有机废水处理技术[J]. 工业水处理, 2003, 23(3): 13-15.

- [3] 李万海, 黄江丽, 王红, 等. 催化湿式氧化处理丙烯酸废水[J]. 吉林化工学院学报, 2007, 24(3): 2-6.
- [4] 苏本生, 乔壮明, 李鱼. EGSB 反应器处理丙烯酸废水的试验研究[J]. 环境工程学报, 2007, 1(12): 83-87.
- [5] 汤晓艳, 梅凯, 陆曦, 等. 内循环 UASB 处理高浓度丙烯酸废水[J]. 南京工业大学学报, 2008, 30(5): 94-99.
- [6] Demirer G N, Speece R E. Anaerobic biotransformation of four 3-carbon compounds (acrolein, acrylic acid, ally alcohol and *N*-propanol) in UASB reactors[J]. Water Research, 1998, 32(3): 747-759.
- [7] Stewart J M, Bhattacharya S K, Madura R L, *et al.* Anaerobic treatability of selected organic toxicants in petrochemical wastes[J]. Water Research, 1995, 29(12): 2730-2738.
- [8] 龚为进, 李方, 奚旦立. 超临界水氧化处理高浓度丙烯酸废水[J]. 化工环保, 2007, 27(5): 314-319.
- [9] 苏本生. EGSB 反应器处理丙烯酸废水的试验研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2009.
- [10] Castilla P, Leyva A, Garcia U, *et al.* Treatment of a low concentration industrial chemicals mixture in an UASB reactor[J]. Water Science and Technology, 2005, 52(1-2): 385-390.
- [11] Speece R E. Anaerobic Biotechnology [M]. Nashville, Tennessee, WA: Archae Press, 1996. 274-275.
- [12] 张忠祥, 钱易. 废水生物处理新技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. 284.
- [13] Lohi A, Alvarez C M, Anania G, *et al.* Biodegradation of diesel fuel-contaminated wastewater using a three-phase fluidized bed reactor[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 154(1-3): 105-111.
- [14] 叶正芳, 李彦锋, 李贤真, 等. 曝气生物流化床(ABFB)处理煤气化废水的研究[J]. 中国环境科学, 2002, 22(1): 32-35.
- [15] 周平, 汪诚文, 吴晓磊, 等. 内循环生物流化床处理石化废水的中试研究[J]. 环境科学, 1997, 18(1): 26-29.
- [16] 宋玉栋, 杨健, 杨靖晖, 等. 曝气生物流化床处理高浓度含酚废水[J]. 环境科学研究, 2010, 23(7): 930-935.
- [17] 赵婧, 蒋进元, 丁林, 等. 核黄素对偶氮染料生物降解的影响[J]. 环境科学研究, 2009, 22(10): 1193-1197.
- [18] 范志庆, 宋玉栋, 周岳溪. 离子色谱法测定丙烯酸丁酯生产废水中丙烯酸和对甲基苯磺酸[J]. 中国环境监测, 2010, 26(3): 26-28.
- [19] Dohanyos M, Zabranska J, Grau P. Anaerobic breakdown of acrylic acid[A]. In: Anaerobic Digestion 1988: Proceedings of 5th International Symposium on Anaerobic Digestion [C]. Bologna, Italy, 1988. 287-294.
- [20] 周平, 钱易. 内循环生物流化床处理丙烯酸废水的试验[J]. 环境科学, 1995, 16(1): 58-61.