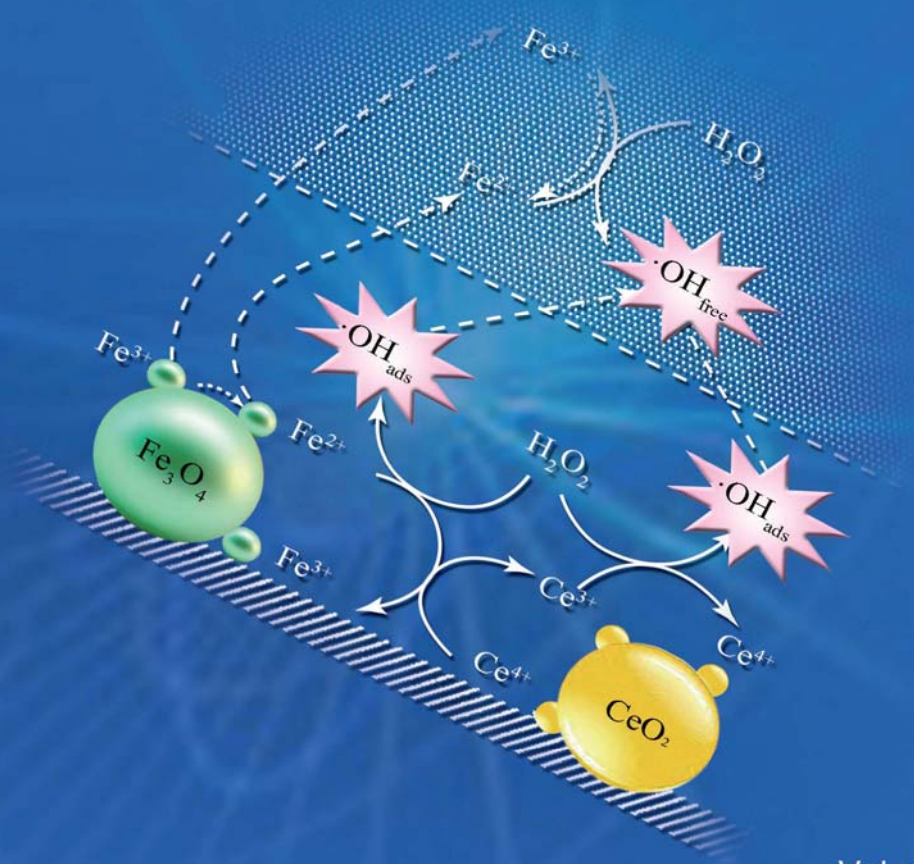
全国中文核心期刊
中国科技核心期刊

环境工程学报

Chinese Journal of Environmental Engineering

封面文章

磁性Fe_3O_4纳米颗粒的制备及在水处理中的应用
展思辉，张 宇，朱丹丹，等，2016,10(1)：1–11



Vol. 10 No. 1
2016.1

中国科学院
生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

环境工程学报
第 10 卷　第 1 期　　(HUANJING GONGCHENG XUEBAO)　　2016 年 1 月

目　　次

综　　述

磁性 Fe_3O_4 纳米颗粒的制备及在水处理中的应用 …… 展思辉　张　宇　朱丹丹　邱明英　于雯超　史　强(1)

水污染防治

人工湿地对水产养殖废水典型污染物的去除 …… 黄翔峰　王　珅　陈国鑫　陆丽君　刘　佳(12)
选矿废水中黄药的生化处理 …… 夏丽娟　胡学伟　张雅琳　靳松望　王亚冰(21)
增强型中空纤维膜生物反应器处理污水 …… 赵　微　肖长发　权　全　胡晓宇　环国兰(27)
TEMPO 氧化微晶纤维素和马来酸酐接枝微晶纤维素的制备及对 Cu^{2+} 的吸附 … 杨　阳　王一宁　潘远凤　肖惠宁(33)
利用活性氧分子消除污水中的 COD …… 白敏葯　毛首蕾　李超群　周建纲(38)
污水颗粒尺寸分布对深度过滤中雌激素去除的影响 …… 胡碧波　阳　春　刘　达(43)
于桥水库溶解性有机碳分布特征及三卤甲烷的生成势 …… 牛志广　魏晓婷　张　颖(48)
不同 pH 下纳米级天然黄铁矿对水中 ReO_4^- 的去除规律 …… 丁　峰　钱天伟　丁庆伟　赵东叶　崔晋艳　王莉霄(55)
聚醚砜小球负载 *Comamonas* sp.(*bdq*06)生物降解水中的喹啉 ……
…… 蔺　娆　陈　瑜　郭树君　邵德武　耿　直　霍明昕　刘志强　朱遂一(60)
草酸改性柚子皮对废水中镉离子的吸附性能 …… 毛艳丽　康海彦　吴俊峰(65)
合肥城郊典型排水沟渠沉积物磷形态及其释放风险 …… 唐文坤　李如忠　钱　靖　金菊良　常　笑(73)
新型缓释碳源的制备及其性能 …… 王润众　郝瑞霞　赵文莉(81)
乳液电纺纤维膜固定化漆酶及其对水中酚类污染物的降解 …… 袁　钰　代云容　宋永会　于彩虹(88)
螺蚌和沉水植物搭配对微污染水体的净化作用 …… 李雪娟　和树庄　常学秀　谭福广　申　意　陆福田　侯文通(95)
HRT 和 SRT 对 AO 工艺去除四环素及耐药菌的影响 …… 郑　宇　黄满红　陈　亮　徐　奇(103)
对乙酰氨基苯磺酰氯生产废水的 UASB 处理及硫酸盐的影响 ……
…… 李伟成　张　红　戚伟康　牛启桂　刘予宇　李玉友　高迎新(110)
炼化污水的厌氧生物预处理技术 …… 王　宇　许双双　阎光绪　王庆宏　李　敏　马文峰　马静园　郭绍辉(115)
多胺改性 PGMA-DAAM 树脂的合成及对 Pb^{2+} 的吸附性能 …… 杨迎霞　宋明超　陶子元　刘春萍(121)
光催化剂磷钨酸钾的制备及结构表征 …… 刘天成　黄家卫　王天丽　唐光阳　贾丽娟　王博涛　王红斌(127)
重庆市加油站周边浅层地下水中石油烃污染调查与特征分析 …… 赵　丽　张　韵　郭劲松　张　丹　邓春光(131)
太湖地区典型降雨水稻田径流污染物输出特点及相关性分析 …… 陈育超　李　阳　于海明　乔　斌　孙井梅(137)
铁屑耦合生物麦饭石的 PRB 系统修复含铬酸根与硝酸根地下水 …… 狄军贞　朱志涛　戴男男　江　富(145)
山核桃加工废水的成分测定与分析 …… 张贝贝　刘文洪　李俊峰　叶志青(150)
煤基活性炭的改性及其对含铜废水的吸附性能 …… 吕　游　刘树根　谢容生　宁　平　谷俊杰(157)
以养殖固体废弃物发酵产物为碳源的 SND 系统的脱氮除磷效果 …… 成小婷　罗国芝　李　丽　谭洪新(163)
石墨烯/TiO_2 复合物的制备及其光催化性能 …… 张宏忠　秦小青　王明花(169)
剩余污泥对活性黑和酸性大红混合染料的吸附 …… 王春英　黄平清　黄晓霞　刘　茹(175)
狭叶香蒲活性炭对 Cd^{2+} 与 Pb^{2+} 的吸附及机理分析 …… 舒　艳　李科林　宋金凤　李　冰　汤春芳(181)
催化湿式氧化法处理垃圾渗滤液 …… 蔡先明　秦　侠　张　丽　崔红蕊(189)
印染废水中氮硫形态转化和去除效率 …… 王学华　李　蕾　刁新星　王　浩(194)
反硝化生物滤池用于再生水脱氮效能及动力学研究 …… 高建锋　杨碧印　赵建树　张金松(199)
TiO_2 光催化耦合 SO_4^- · 体系对硝基苯酚的降解性能及动力学 …… 唐　海　沙俊鹏　颜酉斌　蔡昌凤　王军刚(205)
铁碳微电解/H_2O_2 耦合类 Fenton 法预处理高浓度焦化废水 …… 殷旭东　李德豪　毛玉凤　朱越平　刘正辉(212)
生化-Fenton 氧化联合工艺处理石化净化水的回用 …… 王泳超　李玉平　陈　娟(217)
模拟优化模型在地下水监测布井中的应用 …… 熊　锋　苏　婧　翟秋敏　孙源媛　吴　超　姜永海　席北斗(223)
活性炭负载 CuO 催化过硫酸盐去除活性艳红 X-3B 染料 …… 王宇轩　王应军　方明珠(230)
生物接触氧化法应急处理原水突发性藻类污染 …… 许　骆　罗建中　邓俊强　刘敏强(237)
次氯酸钠降解水中萘普生的效果 ……
…… 纪夏玲　吕文英　李富华　陈　平　李若白　范斯娜　姚　琨　张祥丹　刘国光(243)

大气污染防治

活性炭纤维负载功能化离子液体的脱硫性能 …… 王建英　张丽喆　穆惠英　陈　莹　胡永琪(248)
滤袋式膜生物反应器净化二甲苯 …… 徐孟孟　陈　效　蒋轶锋　吴成强(257)
电极配置对多针-板脉冲等离子体反应器放电特性的影响 … 董冰岩　周海金　施志勇　黄尝伟　丁奇岖　王　晖(262)

环境工程学报

第 10 卷　第 1 期　　(HUANJING GONGCHENG XUEBAO)　　2016 年 1 月

油茶果壳炭对油烟的吸附性能 …… 刘　超　廖　雷　覃爱苗　周江喜　彭　娟(267)
防止中小型锅炉脱硫除尘一体化系统中引风机积灰振动的研究 …… 吕　太　贺培叶(272)
程序升温脱附法测定活性炭上酯类有机物的脱附活化能 …… 任爱玲　孟少左　田森　张丁超　韩梦非(277)
大风量低浓度 VOCs 气体二次吸附浓缩净化技术开发 ……
…… 荀志萌　李照海　何　娇　羌　宁　覃兰雪　徐素玮　曹　熠(283)
挥发性有机物生物增溶性能及效果 …… 王国惠　许亚楠　李慧敏(289)
制备条件对锰氧化物 SCR 脱硝性能的影响 …… 刘育松　高凤雨　唐晓龙　易红宏　赵顺征　曹雨萌(295)

固体废物处置

水泥回转窑共处置含砷污泥 …… 熊正为　朱　雷　杨博豪　虢清伟　陆　森(301)
进出料频率对牛粪两相厌氧发酵特性的影响 …… 王光远　李文哲　李　鬻　蔡康妮　王忠江(306)
城市污泥过热蒸汽薄层干燥初始段凝结特性 …… 张绪坤　孙瑞晨　王学成　温祥东　吴　起　邢　普(311)
家电报废量预测模型与安徽省实例分析 …… 刘志峰　张雅堃　黄海鸿　薛亚琼　王　玲(317)
药渣与煤共热解动力学模型及逸出气红外特性分析 …… 刘宝宣　蒋旭光　吕国钧　王　飞　池　涌　严建华(323)
温度对热水解预处理高含固污泥特性的影响 …… 程　瑶　韩　芸　卓　杨　代　璐　彭党聪(330)
疏浚底泥固化改性与资源化利用技术 …… 武博然　柴晓利(335)
利用旋转炉热解城市污泥的产物特性 …… 王学涛　张兴宇　徐　斌　兰维娟(343)
次氯酸钠氧化废轮胎胶粉对改性沥青性能的影响 ……
…… 于　凯　张　琛　王　欢　张　楠　陆宇鹏　李彤彤　李沁宇　刘双喜(350)
聚乙烯醇/超细羽绒粒子共混膜的制备及其染料吸附动力学 ……
…… 陈凤翔　谢文雅　董兵海　王世敏　赵　丽　许祖勋　万　丽(355)
以粉煤灰为原料制备高纯度 NaP 型分子筛 …… 周慧云　徐婷婷　陈彦广　解骢浩　宋　华(360)
核桃壳骨架构建剂对污泥脱水性能的影响 …… 董凌霄　丁绍兰　谢林花　蔡　丽　杨慧佳(365)
巢湖蓝藻酸提取液提高玉米秸秆的酶解效率 …… 吴玉杰　王　进　崔康平　洪天求　岳正波(370)
稻壳基高比表面积介孔活性炭的制备与表征 …… 薛广钊　侯贵华　乔仁静　董鹏玉　张勤芳(375)
改性油菜秸秆对 Co(Ⅱ)的吸附 …… 汪　洋　吴　缨(379)
化工污泥基轻质填料的制备及其应用 …… 俞敏洁　胡　俊　孙　婧　李　溪　徐炎华(385)
不同碱剂对污泥与餐厨垃圾联合厌氧发酵产氢余物产甲烷的影响 …… 郑育毅　林　鸿　林志龙　罗鸿信　刘常青(393)
废弃 LCD 面板金属铟的超声协同浸出 …… 庄绪宁　李英顺　杨义晨　胡冰倩　赵颖璠(399)
脉冲电场在污泥处理中的应用 …… 姜俊杰　梁美生　李　伟　裴旭倩(405)

土壤污染防治

外源铅在不同类型土壤的形态转化 …… 宋　波　曾炜铨(410)
荧光假单胞菌产铁载体对油麦菜吸收砂基和水基中镉的影响 …… 晋银佳　刘　文　朱　跃　王丰吉(415)
再生水灌溉区土壤对头孢噻肟的吸附特征 …… 虞敏达　张　媛　张　慧　檀文炳　高如泰　席北斗　杨津津(421)
化学氧化法治理焦化厂 PAHs 污染土壤 …… 杨　勇　张蒋维　陈　恺　李忠博　李洪旺　牛　静　王瑜瑜(427)
循环流化床燃煤固硫灰改良云南红粘土 …… 李勇辉　王群英　邓庆德　景文斌　张石华(432)

生态修复工程

不同沉水植物组配对北大港水库水体净化效果的影响 …… 常素云　吴　涛　赵静静(439)
生态修复工程对城市内河水体细菌多样性的影响 …… 唐方园　张秋芳　周阳靖　陈力行　徐继荣　程军蕊(445)
组合型生态浮床处理农家乐污水 …… 王　郑　崔康平　许为义　孟　蓉　孙　鹏　陈鸿汉(455)
微宇宙法研究环境因子对南方典型梯级水库群藻类生长的影响 …… 周　利　朱嘉成　朱　佳　高静思(461)

环境生物技术

水葫芦多环芳烃含量及其与脂肪含量的关系 …… 杨海燕　郭金鹏　卢少勇　曲洁婷　贾九敏(467)
金鱼藻对不同扰动方式下悬浮物的生理响应 …… 张翠英　王丽萍　万　蕾　张后虎(473)
以不同底物和苯胺为燃料的微生物燃料电池的产电特性 …… 佟海龙　黄力群　何　燕　刘解答　刘承鸿　于　荆(480)
含固率和电极间距对牛粪发酵产电性能的影响 …… 王成昱　张艺臻　吴淑娜　张小梅　沈建国　丁仕林　辛言君(485)

工程实例

城镇污水处理厂的综合绩效评价 …… 魏　亮　陈　滢　刘　敏　翟宇超(490)
膜工艺在电镀废水处理工程中的应用 …… 夏仙兵　蔡邦肖　缪　佳　林建平　倪　政(495)

环境监测与评价

SPE-HPLC 法检测环境水样中的痕量三氯卡班 …… 朱开杭　曾庆玲　沈春花　周真明　李　飞(503)

滤袋式膜生物反应器净化二甲苯

徐孟孟 陈 效 蒋轶锋 吴成强*
(浙江工业大学 生物与环境工程学院,杭州 310032)

摘 要 采用模拟膜生物反应器构建的滤袋式膜生物反应器处理二甲苯废气,并初步探讨了其净化性能。实验结果表明:在 4~9℃的低温条件下,二甲苯的去除能力随着停留时间、进气负荷的增大而提高,最大去除能力可达到 74.3 g/(m^3·h),与一般生物滴滤塔的运行性能相当。微生物主要附着在滤袋表面,且生长良好。根据本实验中滤袋式膜生物反应器的结构特点,可进一步增加滤袋比表面积以提高其去除能力。

关键词 滤袋式膜生物反应器 二甲苯 去除能力 低温

中图分类号 X701 **文献标识码** A **文章编号** 1673-9108(2016)01-0257-05

Purification of xylenes by filter-bag membrane bioreactor

Xu Mengmeng Chen Xiao Jiang Yifeng Wu Chengqiang
(College of Biology and Environmental Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China)

Abstract The filter-bag membrane bioreactor which simulates the way of membrane bioreactor was designed and used to purify waste gases containing xylene, and its performance was preliminarily discussed. The experimental results showed that the elimination capacity of xylene increased when the empty bed residence time prolonged and the inlet loading increased under the low temperature of 4—9℃. The elimination capacity can reach 74.3 g/(m^3·h), which was as much as that for the bio-trickling filter. Most of the microorganisms well-grew on the surface of the filter-bag. In order to enhance the elimination capacity, the specific surface area should be amplified based on the structure of the filter-bag membrane bioreactor.

Key words filter-bag membrane bioreactor; xylene; elimination capacity; low temperature

工业生产中排放的有机废气严重污染大气环境,破坏生态环境,危害人类健康,因此,这类污染日益受到人们的重视。挥发性有机化合物中的芳香烃(二甲苯和甲苯等)及含氧烃(乙醇、酮和酯等)挥发性较大,易扩散在大气中,严重污染环境,并影响人体健康[1]。早在 1990 年,美国的空气法修正案就把二甲苯列为有毒有害的大气污染物质,所以必须加强二甲苯的治理[2]。

在挥发性有机物(VOCs)的净化方法中[3],生物法具有良好的净化效果、优越的经济性、可靠的安全性和天然的环境相容性等优点。近年来,生物法在净化挥发性有机废气污染方面的研究和应用日趋活跃,尤其是膜生物反应器因具有气液接触面积大、处理能力大、占地面积小等优点[4],得到了广泛的关注和研究。然而,以中空纤维膜、平板膜为代表的膜生物反应器投资成本高[5-9],成为限制其应用的一大难题。

在我国北方地区,冬季温度(从气候学上讲,连续 5 d 日平均气温在 10℃以下算作冬季)较低,很难达到微生物生长所需要的最佳的温度环境。虽然我国对生物膜法处理挥发性有机废气进行了许多研究,但是多侧重于在常温下的应用研究,对于低温条件下膜生物反应器运行特性的研究不多见。

本研究从膜生物反应器净化废气的特点出发,选用了一种廉价的工业滤布制作成成本低廉,工艺简单的滤袋替代平板膜,以二甲苯作为研究对象,在低温条件下研究了膜生物反应器对有机废气的处理效果,初步探讨了该滤袋式膜生物反应器净化有机废气的性能及其可行性。这也为低温条件下生物处理有机废气提供了相关实验依据。

基金项目:浙江省环保科研计划项目(2011B16);国家自然科学基金资助项目(51308501)
收稿日期:2014-09-21; **修订日期**:2014-12-07
作者简介:徐孟孟(1988—),女,硕士研究生,主要从事污染控制工程研究工作。E-mail:xmmkl123@163.com
*通讯联系人,E-mail:wucq@zjut.edu.cn

1 实验装置和分析方法

1.1 实验装置

实验装置(如图 1 所示)采用 PVC 反应器,尺寸为 50 cm × 15 cm × 30 cm。内部设置有效体积为 5 L 的滤袋(表面积约为 0.2 m^2),浸没在含有活性污泥的混合液中。二甲苯气体从管道进入到滤袋内腔,然后透过滤袋、滤袋表面的生物膜和混合液,排放到大气中。为了防止活性污泥沉淀,反应器内设有曝气器。本实验过程中混合液的 pH 控制在 6 左右,温度在 4 ~ 9℃低温条件范围内。

本实验中二甲苯气体采用动态法配置,即由空气泵向盛有二甲苯的瓶中吹入一定量的空气,吹出部分含有二甲苯的气体进入主管道,在气体混合瓶中与一定量空气混合,然后进入到滤袋式膜生物反应器的内腔中。

接种污泥取自某处理含二甲苯废水的工业污水处理厂,经过 3 d 的曝气处理后加入反应器中,并开始运行。运行过程中按一定比例投加氮、磷营养物质(氮投加量为 100 mg/L,磷投加量是 20 mg/L,并补充 100 mL 水),并用氢氧化钠和盐酸来调节混合液的 pH。

1.2 分析方法

二甲苯浓度用气相色谱仪(岛津 GC-2014)检测,检测器为氢火焰离子化检测器(FID),pH 值用 PHSJ-4A(上海雷磁)酸度计测定,TOC 用总有机碳分析仪(岛津 TNM-L)测定,浊度用 WGZ-B 浊度计(上海昕瑞)测定,溶解氧及温度用 JSBJ-608 便携式溶解氧测定仪(上海雷磁)测定。

2 实验结果与分析

2.1 二甲苯的去除效果

滤袋式膜生物反应器对二甲苯的净化效果见表 1。由表可见,滤袋式膜生物反应器对低浓度二甲苯废气去除率较高。随着二甲苯进气浓度的提高,其去除率降低,但去除能力提高。在二甲苯进气浓度小于 900 mg/m^3 时,二甲苯的去除率可以达到 80% 以上。

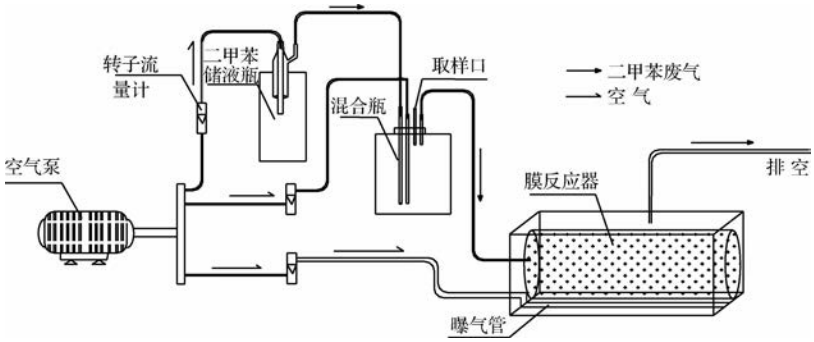


图 1 膜生物反应器装置图

Fig. 1 Diagram of membrane bioreactor

表 1 二甲苯去除效果

Table 1 Removal efficiency of xylene in filter-bag membrane bioreactor

进气浓度(mg/m^3)		出气浓度(mg/m^3)		平均去除率	平均去除能力
范 围	平均值	范 围	平均值	(%)	(g/(m^3 · h))
350 ~ 550	443	15 ~ 25	23	95	12.57
650 ~ 900	777	100 ~ 200	147	82	21.30
1 100 ~ 1 400	1 234	300 ~ 400	307	72	22.63
1 500 ~ 1 900	1 707	500 ~ 900	703	66	32.80
2 200 ~ 2 500	2 365	900 ~ 1 200	1 006	64	56.88
2 700 ~ 3 000	2 965	1 100 ~ 1 300	1 261	58	64.40

2.2　二甲苯去除影响因素

2.2.1　气体停留时间

在二甲苯进气浓度为(1 500 ±200) mg/m^3 的条件下,考察了气体停留时间对二甲苯降解效率影响,实验结果如图 2 所示。

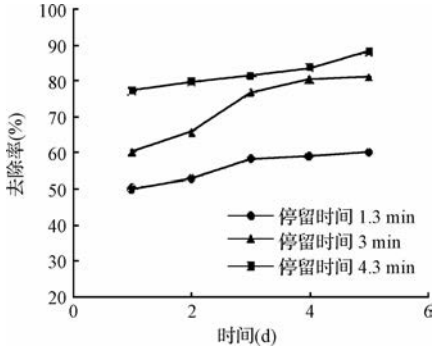


图 2　停留时间对二甲苯处理率的影响

Fig. 2　Effect of residence time on xylene removal rate

在进气浓度一定的条件下,停留时间越长,二甲苯的去除率越高。实验表明,在停留时间为 4.3 min 时,二甲苯的去除率可以达到 80% 以上,停留时间越短,二甲苯的降解率越低,在停留时间缩短至 1.3 min 时,处理效率只有 50% ~60% 左右。这是因为当二甲苯在生物反应器中的停留时间不能满足生物膜上的微生物对废气的生化降解的时间要求时,废气还未被膜上的微生物降解便被排出反应器,从而导致净化效率下降。另一方面是由于停留时间短即进气流速比较快,这也可能使得部分已被生物膜吸附但是尚未被分解的二甲苯分子重新从生物膜上脱附出来进入到气相主体,从而导致净化效率降低[10]。因此,在实际应用中要适当控制气体的停留时间,保证生物膜反应器对有机废气的处理率。

2.2.2　处理负荷

图 3 是二甲苯的进气负荷和二甲苯出气浓度之间的关系。当二甲苯的负荷越大时,出气二甲苯浓度越高,两者之间呈一定的线性关系。根据我国大气污染排放标准规定,二甲苯最高排放浓度为 90 mg/m^3,为了控制二甲苯达标排放,二甲苯的进气负荷不能太高,应控制在 20 ~30 g/(m^3 · h)范围内。

由二甲苯负荷与去除能力的关系(见图 4)可知,二甲苯的去除能力与二甲苯的负荷呈线性关系,随着负荷的增加而提高,去除能力最高可以达到 74.3 g/(m^3 · h)。

由图 3 和图 4 可见,在二甲苯负荷较低时,二甲苯去除能力较小,但出气浓度低。随着二甲苯负荷增大,二甲苯去除能力相应地提高,二甲苯出气浓度也会升高。因此,在实际的应用过程中,可根据废气特性及要达到的处理要求来确定二甲苯负荷和反应器的去除能力。

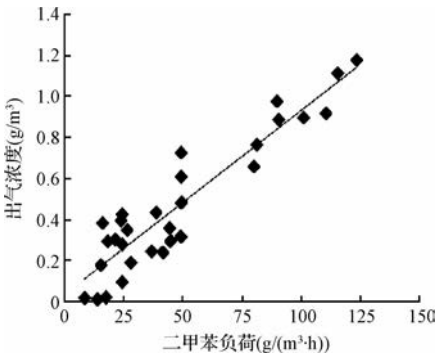


图 3　负荷与出气浓度的关系

Fig. 3　Relationship between inlet loading and outlet concentration

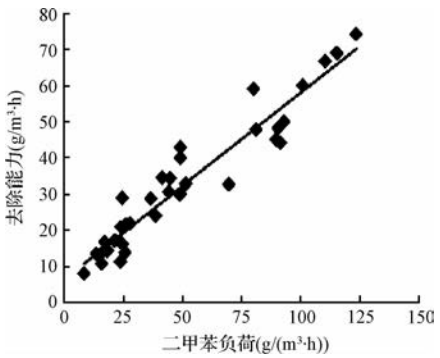


图 4　二甲苯负荷与二甲苯处理能力的关系

Fig. 4　Relationship between inlet loading and elimination capacity

2.3　反应器内混合液性状分析

有研究表明,二甲苯被降解时一部分被微生物降解为二氧化碳,另一部分用于微生物自身生长[5,11]。由于二甲苯难溶于水,通过测定反应器内混合液中的总有机碳含量可侧面反映溶于水中的二甲苯降解产物情况,实验结果见图 5。水相中 TOC 的含量变化为 110 ~161 mg/L。运行前 17 天,反应器内有机物含量变化不明显,呈略微上升的趋势;随着二甲苯的不断降解,混合液中有机物含量上升明显,随后出现下降趋势,这可能是由于后期二甲苯进气负荷降低,从而使得降解产物减少引起的。进气不含二甲苯时,混合液中 TOC 的含量呈现略微下降的趋势,残留在混合液中的二甲苯降解中间产物进

一步被微生物降解。由此推测,溶于水中的二甲苯降解中间产物的量很少,TOC 浓度的升高一方面可能是由于微生物代谢产物含量增加,另一方面可能是由于降解产物积累导致的。

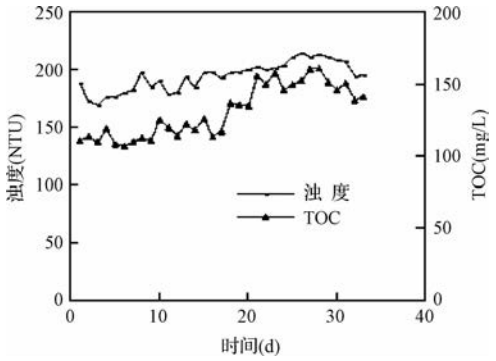


图 5 反应器液相中有机碳浓度和浊度变化

Fig. 5 Changes of TOC and turbidity in reaction liquid

由图 5 可知,反应器内混合液浊度的变化范围是 170 ~ 215 NTU,水相中微生物浓度较为稳定。由此可见,微生物增值后主要附着在滤袋表面,形成生物膜。反应器内的曝气冲刷作用对生物膜脱落影响不大,说明生物膜附着较为牢固。

2.4 纤维膜表面扫描电镜照片

生物膜表面扫描电镜见图 6,滤袋表面原有空隙被生物膜不均匀覆盖,在膜表面生长有大量的丝状微生物,此外,可能还存在许多微生物新陈代谢产生的颗粒状胞外聚合物,它们在膜表面重新搭建出许多的孔穴,这样就增加了微生物与二甲苯废气接触的面积,有利于二甲苯的去除。

2.5 袋式膜生物反应器的去除能力比较分析

袋式膜生物反应器与其他生物反应器的最大去除能力比较见表 2。袋式膜生物反应器去除能力比膜生物反应器低,但是与其他生物滴滤塔的去除能力相当。由于本实验采用的滤袋式膜生物反应器的内腔体积比较大,导致其比表面积比膜生物反应器小得多,因此,可通过缩小滤袋体积来增加比表面积,以提高其去除能力。

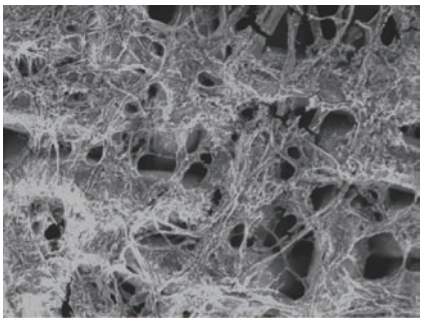


图 6 纤维膜外表面(500 ×)

Fig. 6 Outer surface of fiber membrane

3 结 论

(1)滤袋式膜生物反应器在低温 4 ~ 9℃,pH 为 6 左右的条件下,可以有效去除二甲苯废气,去除率可达 90% 以上,最大去除能力可达 74.3 g/(m^3 · h)。

(2)二甲苯的去除效率与停留时间、进气负荷密切相关。合理的处理负荷应根据废气特性及处理要求或排放标准来确定。

(3)本研究采用的滤袋式膜生物反应器比表面积小,去除能力与传统生物滴滤塔相当,但是远低于中空纤维膜膜生物反应器。根据滤袋式膜生物反应器的结构特点,可进一步通过增加滤袋比表面积以提高其去除能力。

表 2 不同生物反应器的性能比较

Table 2 Comparison of different biological reactors' performance

废气类型	反应器类型	比表面积 (m^2/m^3)	反应条件	进气负荷(g/(m^3 · h))	最大去除能力(g/(m^3 · h))	文献
二甲苯	生物滴滤塔	230	30℃	50 ~ 70	47.5	[12,13]
邻-二甲苯	生物滴滤塔	38	20 ~ 30℃	28.8 ~ 260	180	[14]
邻-二甲苯	生物滴滤池	–	16 ~ 30℃	10 ~ 90	42	[5]
二甲苯	生物滴滤塔	366	常 温	0 ~ 230	120	[11]
邻-二甲苯	生物过滤器	6 000	30℃	8 ~ 335	180	[15]
二甲苯	生物过滤器	–	26 ~ 28℃	34 ~ 95	60	[16]
二甲苯	生物过滤池	700	25 ~ 33℃	25 ~ 195	61	[17]
二甲苯	生物过滤池	–	23 ~ 28℃	12 ~ 110	67	[18]
二甲苯	中空纤维膜膜生物反应器	8 000	常 温	–	738	[8]
二甲苯	滤袋式膜生物反应器	40	4 ~ 9℃	13 ~ 111	74.3	本 文

参 考 文 献

[1] Wu Dan, Quan Xie, Zhao Yazhi, et al. Removal of ρ-xylene from an air stream in a hybrid biofilter. Journal of Hazardous Materials, **2006**, 136(2): 288-295

[2] 童志权. 工业废气净化与利用. 北京: 化学工业出版社, **2001**

[3] 王丽燕, 王爱杰, 任南琪, 等. 有机废气(VOC)生物处理研究现状与发展趋势. 哈尔滨工业大学学报, **2004**, 36(6): 732-735
Wang Liyan, Wang Aijie, Ren Nanqi, et al. Present status and trend of bio-treatment of volatile organic compound. Journal of Harbin Institute of Technology, **2004**, 36(6): 732-735(in Chinese)

[4] Álvarez-Hornos F. J., Gabaldón C., Martínez-Soria V., et al. Biofiltration of ethylbenzene vapours: Influence of the packing material. Bioresource Technology, **2008**, 99(2): 269-276

[5] 李琳, 崔福义, 刘俊新. 真菌降解废气中邻-二甲苯试验研究. 环境科学学报, **2005**, 25(1): 99-104
Li Lin, Cui Fuyi, Liu Junxin. Degradation of o-xylene in off-gas by fungi. Acta Scientiae Circumstantiae, **2005**, 25(1): 99-104(in Chinese)

[6] 乔婷, 王震文, 修光利, 等. 中空纤维膜生物反应器处理VOCs废气. 环境科学与技术, **2014**, 37(4): 145-149
Qiao Ting, Wang Zhenwen, Xiu Guangli, et al. Experimental study on treatment of VOCs by hollow fiber membrane bioreactor. Environmental Science & Technology, **2014**, 37(4): 145-149(in Chinese)

[7] 江凤诞, 初庆东, 刘强, 等. 陶粒填料生物滴滤塔处理二甲苯废气. 化工环保, **2004**, 24(2): 121-123
Jiang Fengdan, Chu Qingdong, Liu Qiang, et al. Study on treatment of xylene-containing waste gas by trickling biofilter packed with ceramic pellets. Environmental Protection of Chemical Industry, **2004**, 24(2): 121-123(in Chinese)

[8] 修光利, 张晓峰, 赵康, 等. 中空纤维膜生物反应器处理二甲苯废气. 环境工程学报, **2010**, 4(10): 2287-2292
Xiu Guangli, Zhang Xiaofeng, Zhao Kang, et al. Treatment of waste gas containing xylene by a hollow fiber membrane bioreactor. Chinese Journal of Environmental Engineering, **2010**, 4(10): 2287-2292(in Chinese)

[9] 王震文, 修光利, 詹天珍, 等. 聚丙烯中空纤维膜生物反应器净化复合芳香族VOCs. 环境工程学报, **2013**, 7(6): 2267-2272
Wang Zhenwen, Xiu Guangli, Zhan Tianzhen, et al. Treatment of mixtures of aromatic VOCs by a polypropylene hollow fiber menbrane bioreactor. Chinese Journal of Environmental Engineering, **2013**, 7(6): 2267-2272(in Chinese)

[10] 刘建伟, 张波. 气体停留时间对生物滤池去除恶臭和微生物气溶胶影响. 环境科学与技术, **2013**, 36(11): 125-129
Liu Jianwei, Zhang Bo. Effect of gas retention time of biofilter on removal of odor and bioaerosol from municipal wastewater treatment process. Environmental Science & Technology, **2013**, 36(11): 125-129(in Chinese)

[11] 刘强, 马广大, 贾立岩, 等. 生物滴滤床净化二甲苯废气的性能研究. 环境科学研究, **2002**, 15(6): 35-38
Liu Qiang, Ma Guangda, Jia Liyan, et al. Study on the performance of trickling biofilter in purifying xylene in waste gas. Research of Environmental Sciences, **2002**, 15(6): 35-38(in Chinese)

[12] 王娟, 钟秦, 郑曼曼, 等. 生物膜法净化甲苯二甲苯混合废气的研究. 环境科学与技术, **2006**, 29(6): 91-93
Wang Juan, Zhong Qin, Zheng Manman, et al. Purification of waste gas containing toluene and xylene using bio-film method. Environmental Science & Technology, **2006**, 29(6): 91-93(in Chinese)

[13] Pedersen A. R., Arvin E. Toluene removal in a biofilm reactor for waste gas treatment. Water Science and Technology, **1997**, 36(1): 69-76

[14] 周学霞, 姚伟国, 杨冰雪, 等. 生物滴滤塔处理邻二甲苯废气研究. 浙江大学学报(理学版), **2013**, 40(1): 71-75
Zhou Xuexia, Yao Weiguo, Yang Bingxue, et al. Removal of o-xylene from waste gases by biotrickling filter. Journal of Zhejiang University(Science Edition), **2013**, 40(1): 71-75(in Chinese)

[15] Jeong E., Hirai M., Shoda M. Removal of o-xylene using biofilter inoculated with *Rhodococcus* sp. BTO62. Journal of Hazardous Materials, **2008**, 152(1): 140-147

[16] Elmrini H., Bredin N., Shareefdeen Z., et al. Biofiltration of xylene emissions: Bioreactor response to variations in the pollutant inlet concentration and gas flow rate. Chemical Engineering Journal, **2004**, 100(1-3): 149-158

[17] Bibeau L., Kiared K., Brzezinski R., et al. Treatment of air polluted with xylenes using a biofilter reactor. Water, Air, and Soil Pollution, **2000**, 118(3-4): 377-393

[18] Jorio H., Bibeau L., Viel G., et al. Effects of gas flow rate and inlet concentration on xylene vapors biofiltration performance. Chemical Engineering Journal, **2000**, 76(3): 209-221