

研究论文

油烟废气高效降解菌的选育与降解特性

郑连英 缪建玉 郭晓芬

(浙江大学化学工程与生物工程学系, 浙江 杭州 310027)

摘 要 从受油烟污染的土壤中分离筛选出4株菜油降解菌株。试验表明, 4株菌株能够不同程度地降解菜油。菌株Z1表现出较强的降解能力, 该菌最适生长条件为: 温度30℃, pH=7, 摇床转速210 r·min⁻¹, 接种量1%。在空塔气速0.2~1.2 cm·s⁻¹、停留时间10~40 s的试验范围内, 选取木块为滤料, 研究生物滤塔油烟废气的降解性能, 分析了浓度、流量、湿度对降解能力的影响。试验运行结果表明, 滤料微生物菌株Z1活性较强, 对油烟具有较强的降解能力和抗负荷冲击力。

关键词 油烟废气 菌种筛选 生物降解 生物滤塔

中图分类号 X 17

文章标识码 A

文章编号 0438-1157 (2004) 05-0788-06

SCREENING OF OILY SMOKE DEGRADING BACTERIA AND THEIR DEGRADATION POWER

ZHENG Lianying, MIAO Jianyu and GUO Xiaofen

(Department of Chemical and Biochemical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China)

Abstract Four strains with rapeseed oil degrading power were isolated from contaminated soil and screened. Experimental results indicated that these four strains had different degrading activities and *Pseudomonas* sp. Z1 showed higher rapeseed oil degrading activity. Optimum condition of growth of Z1: 30℃, pH 7.0, inoculum amount 1%, and shaker rotary speed 210 r·min⁻¹. Biodegradation of oily smoke was investigated at superficial velocity of biofilter reactor 0.3—1.2 cm·s⁻¹, retention time 10—40 s and the effects of such factors as smoke concentration, flow rate and humidity on oily smoke removal were studied. The biofilter reactor was effective in removing oily smoke and was able to handle a high smoke load.

Keywords oil smoke, screening of strains, biodegradation, biofilter

引 言

饭店、酒家等各种餐饮行业及居民家庭烹饪食品过程中产生大量的油烟废气, 这种油烟的成分至少有300种, 主要是脂肪酸、烷烃、烯烃、醛类、酮、醇、酯、芳香族化合物和杂环化合物^[1]。其中, 大多数物质对人体有害, 而油烟中所含的多环芳香烃(PAH)是直接导致肺癌、膀胱癌的物质之一^[2~4]。研究表明, 油烟中不仅含有能够导致癌

症的物质, 而且还含有能引起基因突变、DNA损伤、免疫功能降低等的毒性物质^[5,6]。现有油烟废气的处理通常采用物理化学方法, 但存在投资大、运行费用高、易产生二次污染等缺点。而生物法处理有机废气具有设备简单、能耗低、不产生二次污染等优点, 目前已经成为世界工业废气净化研究的前沿热点课题之一^[7~9]。

生物降解是环境污染物降解和消失的重要途径。传统的生物膜法处理废气大多利用经过一定驯

化的微生物菌群^[10,11], 但这种方式有驯化周期长、对一些难降解有机物去除能力有限等弊端。应用经过筛选的、对目标污染物具有较强降解能力的微生物, 可缩短处理驯化的时间, 使系统快速达到较高的稳态去除效果。

本试验从人工筛选菌种着手, 对利用纯种微生物挂膜的生物滤塔处理油烟废气的有效性进行了研究, 为治理饮食业油烟废气提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 样品来源 取自某食堂油烟排气口附近的土壤。

1.1.2 培养基 KH_2PO_4 2 g, K_2HPO_4 1 g, NH_4Cl 2 g, MgSO_4 0.2 g, MnSO_4 19.7 g, ZnSO_4 4 mg, 琼脂 15 g, H_2O 1000 ml。在以上无碳源培养基的基础上添加 1 g 菜油。

1.2 实验方法

1.2.1 菌种的筛选、分离和纯化 从 10 个样品中各取出 1 g 土样, 制得稀释倍数分别为 10、100、1000 等倍的菌悬液。分别吸取 0.2 ml 各稀释浓度的菌悬液均匀涂在上述培养基平板上, 倒置于培养箱内, 恒温 30 ℃ 培养 7 天。挑取单菌落进行划线分离。将初筛得到的菌株 (4 株) 进行摇瓶通气培养后, 直接测定各类菌株对菜油的降解能力。

1.2.2 细菌计数 稀释平板菌落计数法。

1.2.3 菌悬液的制备 将 30 ℃ 下生长 36 h 的斜面菌种接种到装有 50 ml 上述培养基的 250 ml 三角瓶中, 在 30 ℃、210 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的恒温摇床中培养 16 h, 然后将种子液经过离心、洗涤, 最后配制成一定浓度的菌悬液。

1.2.4 菌株最适生长条件 在装有 50 ml 培养基的三角瓶中加入菜油作为惟一碳源, 分别对温度 (20, 25, 30, 35, 40 ℃)、初始 pH 值 (4, 5, 6, 7, 8, 9, 10)、摇床转速 (60, 90, 120, 150, 210, 240 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$) 和接种量 (以单位体积的细胞湿质量表示, 分别为 0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1.0%、1.5%、2.0%) 进行单因素条件试验, 测定不同条件下菌体的生长量, 确定最适生长条件。

1.2.5 菌降解性能的测定 在装有 50 ml 培养基的三角瓶中加入菜油作为惟一碳源, 接入

高活性悬菌液。接种的摇瓶和未接种的空白对照置于恒温摇床中培养, 按一定时间取样, 分析摇瓶中菜油的浓度变化。

将三角瓶中的培养液用四氯化碳萃取 3 次, 每次用量 15 ml, 萃取后用四氯化碳定容至 50 ml, 摇匀, 以备分析用。

1.2.6 油烟废气的生物降解模拟试验

(1) 填料的挂膜 将菌种 Z1 接种至 2 L 发酵罐中, 30 ℃ 培养 16 h, 菌液明显浑浊, 将菌液与填料充分混合后均匀加入生物滤塔中进行通气培养。

(2) 生物滤塔处理油烟废气的试验装置与流程 试验装置与流程如图 1 所示。生物滤塔 (带保温夹套) 为有机玻璃柱, 内径为 250 mm, 总高度为 1 m。填料为梧桐木块, 规格为 20 mm × 20 mm × 10 mm, 空隙率为 57%, 填料高度为 300 mm, 有效容积为 15 L。柱子底部设有布气板, 确保气体均匀分布。油烟发生器产生的油烟与空气均匀混合后从底部进入生物滤塔, 经附着在填料上的微生物降解后, 由塔顶部排出。营养物质的补充及其 pH 调节在贮液槽中进行, 喷淋水由塔顶部喷洒, 每 12 h 喷淋一次, 保持填料含水量在 35% 左右。

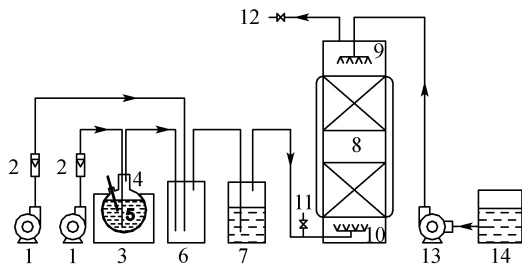


Fig. 1 Flow chart of biofilter system

- 1—air pump; 2—flow meter; 3—heating apparatus;
4—lampblack reactor; 5—thermometer; 6—gas blender;
7—humidifier; 8—packing; 9—spray thrower;
10—gas distributor; 11—inlet; 12—outlet;
13—compressed water bump; 14—reservoir

1.3 油 (油烟) 浓度的测定

采用红外测油仪检测。

2 结果与讨论

2.1 菜油降解菌的分离和筛选

土壤样品在以菜油作为惟一碳源的培养基中富集, 划线分离得到 4 株编号分别为 Z1、Z2、Z3、Z4 的单菌落, 它们均能以 1000 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 菜油作为惟一碳源生长。经初步鉴定, 所筛选的菌种属于假

单胞菌 (*Pseudomonas* sp.). 将 4 株菌的单菌分别接种至以菜油作为惟一碳源的液体培养基中, 并将各降解菌株等比例配置成混合菌群, 在 30 ℃、210 r·min⁻¹ 条件下摇床培养 16 h 后, 用细胞记数和红外测油仪测定菜油的残余浓度, 比较混合菌群和这 4 株单菌落的生长情况及对菜油的降解能力 (见表 1). 其中菌株 Z1 的细胞数达到 10⁹ ml⁻¹ 的数量级, 培养液中菜油的残余浓度仅为 43.3 mg·L⁻¹, 降解率达到 95.67%, 其他 3 菌的降解率从 19.3%~70.2% 不等. 由此可见, 菌株 Z1 无论是生长速度还是对菜油的降解能力均强于混合菌群和其他单菌落.

Table 1 Growth of bacteria in rapeseed oil medium

Inoculum	CFU/ml ⁻¹	Residual concentration of rape oil/mg·L ⁻¹	Rate of rapeseed oil degradation/%
mixed culture	5.2×10 ⁸	468.00	53.2
Z1	2.8×10 ⁹	46.33	95.6
Z2	8.2×10 ⁸	298.00	70.2
Z3	4.1×10 ⁶	817.00	19.3
Z4	6.8×10 ⁷	547.00	45.7

Note: initially, cell density was 10⁵ ml⁻¹.

2.2 菌株 Z1 的生长和降解菜油的效果

以 1000 mg·L⁻¹ 菜油作为惟一碳源生长, 在 30 ℃、210 r·min⁻¹ 条件下摇床培养不同时间, 取样测定菌体生长情况和培养基中菜油的残余浓度. 结果表明 (表 2), 菌株 Z1 的生长和对菜油的降解是同步的, 菌株延滞期较短, 在摇床培养 8 h 后菌株的细胞数达到 10⁷ ml⁻¹ 数量级, 这时菌株对菜油的降解率也达到 27.7%; 16 h 后菌株基本上达到最大的生长量 2.8×10⁹ ml⁻¹, 培养液中菜油的残余

Table 2 Degradation of rapeseed oil by strain Z1

Time/h	CFU/ml ⁻¹	Residual concentration of rapeseed oil/mg·L ⁻¹	Rate of rapeseed oil degradation/%
0	2×10 ⁵	1000	0
4	4.9×10 ⁵	918	8.82
8	1.2×10 ⁷	723	27.7
10	4.9×10 ⁷	549	41.1
12	7.03×10 ⁸	362	63.8
14	1.13×10 ⁹	176	82.4
16	2.8×10 ⁹	44.3	95.7
18	2.1×10 ⁹	43.8	96.2
20	9.58×10 ⁸	43.3	96.7
22	3.03×10 ⁸	43.1	96.9
24	8.7×10 ⁷	43.05	96.9

浓度仅为 43.3 mg·L⁻¹, 菜油降解率达到 95.7%; 24 h 后由于菜油已经基本上消耗完毕, 菌株 Z1 得不到外源碳源, 细胞自溶, 这时进一步培养, 细菌量反而下降.

2.3 菌株 Z1 最佳生长条件的确定

测定不同温度、初始 pH 值、摇床转速和接种量条件下以 1000 mg·L⁻¹ 菜油为惟一碳源时 Z1 菌株的生长情况和培养基中菜油的残余浓度、各条件对菌株的生长和菜油降解的影响 (见表 3~表 6).

Table 3 Effect of temperature on growth and degradation of rapeseed oil by strain Z1

Temperature/℃	CFU/ml ⁻¹	Rate of rapeseed oil degradation/%
10	1.12×10 ⁶	23.4
20	6.9×10 ⁷	45.7
25	1.3×10 ⁹	88.9
30	2.8×10 ⁹	95.6
35	1.43×10 ⁹	90.2
40	9.4×10 ⁸	69.8
45	9.2×10 ⁵	19.2

Table 4 Effect of initial pH on growth and degradation of rapeseed oil by strain Z1

pH	CFU/ml ⁻¹	Rate of rapeseed oil degradation/%
4	6.3×10 ⁶	6.8
5	8.03×10 ⁸	66.2
6	1.47×10 ⁹	91.1
7	2.92×10 ⁹	96.1
8	2.21×10 ⁹	93.4
9	5.82×10 ⁸	77.4
10	8.2×10 ⁶	9.5

Table 5 Effect of inoculum amount on growth and degradation of rapeseed oil by strain Z1

Inoculum amount/%	CFU/ml ⁻¹	Rate of rapeseed oil degradation/%
0.2	7.89×10 ⁸	45.7
0.4	1.24×10 ⁹	70.3
0.6	1.71×10 ⁹	75.7
0.8	2.03×10 ⁹	81.5
1.0	2.31×10 ⁹	86.3
1.5	2.56×10 ⁹	95.8
2.0	2.63×10 ⁹	95.9

以生长量最大或者生长量较大但更经济可行的条件作为最适条件. 根据以上试验确定菌株 Z1 的最适生长条件为: 温度 30 ℃, pH=7, 摇床转速 210 r·min⁻¹, 接种量 1%.

Table 6 Effect of shaker rotary on growth and degradation of rapeseed oil by strain Z1

Rotational speed/r · min ⁻¹	CFU/ml ⁻¹	Rate of rapeseed oil degradation/%
60	6.9×10 ⁷	45.7
90	8.22×10 ⁸	70.3
120	9.13×10 ⁸	75.7
150	1.22×10 ⁹	81.5
180	1.79×10 ⁹	86.3
210	2.33×10 ⁹	95.8
240	2.40×10 ⁹	95.9

2.4 生物滤塔降解性能的影响因素

2.4.1 填料的成膜时间对生物滤塔降解性能的影响 从挂膜的当天开始计算，到填料上生物膜稳定为止，这段时间称为成膜时间。由图 2 可见，在滤塔起始运行时，对油烟的去除以吸附为主；2~3 天后，填料已经吸附饱和，此时生物膜尚未形成，对油烟的降解能力很弱，去除率下降；10 天后，油烟的去除率基本稳定在 99% 左右，此时生物膜已经基本形成，生物滤塔进入了稳定运行阶段。

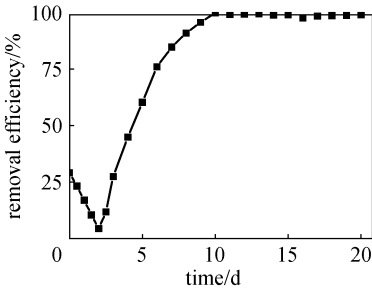


Fig. 2 Oil smoke efficiency during acclimation phase of biofilter studies

2.4.2 入口浓度对降解性能的影响 入口油烟浓度对生物滤塔降解能力的影响如图 3~图 5 所示。

由图 3 可知，随着入口气体浓度的增加，生物滤塔的净化效率呈下降趋势，当入口浓度低于 2000 mg · m⁻³ 时净化效率保持在 90% 以上。图 4 表明，当浓度低于 5000 mg · m⁻³ 时，体积降解速率随浓度的增加而增加；当入口浓度在 5000 ~ 10000 mg · m⁻³ 时，体积降解速率随入口浓度的变化速率介于线性和稳态之间。

生产实践中，气相有机污染物浓度沿滤料层高度的分布是生物滤塔设计的重要数据，它决定着滤塔滤料层高度、塔层阻力、有机物的停留时间、滤塔生物降解能力等多项设计指标。由图 5 油烟浓度分布曲线可知，入口油烟浓度高低对所需填料层高度有很大的影响，当入口浓度不超过 2000

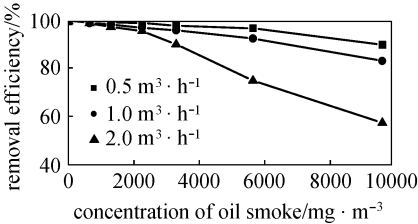


Fig. 3 Effect of concentration of oil smoke to removal efficiency

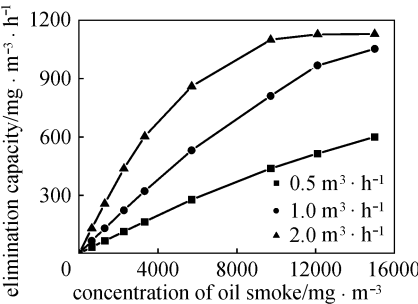


Fig. 4 Effect of concentration of oil smoke to elimination capacity

mg · m⁻³ 时，只需要 40 cm 高的生物膜滤料就可将其完全净化，而当入口浓度大于 2000 mg · m⁻³ 时需增加过滤层高度才能达到完全净化的目的。因此，在实际应用中，应根据浓度分布曲线、范围和净化要求来设计适宜的滤层高度和相应的辅助设施。

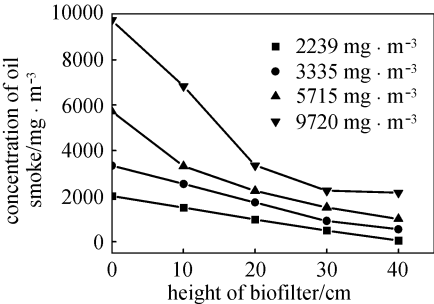


Fig. 5 Concentration of oil smoke along with distance of biofilter

2.4.3 气体流量对降解性能的影响 气体流量对生物滤塔降解性能的影响见图 6、图 7。由图可知，当入口浓度不超过 5000 mg · m⁻³ 时，随着气体流量的增加，去除效率下降，体积降解速率随着流量的增加而增加；当入口浓度大于 5000 mg · m⁻³ 时，随着气体流量的增加去除效率下降，体积降解速率变化不大，稳定在 800 ~ 1000 g · m⁻³ · h⁻¹。以上分析说明本研究的生物菌落对油烟废气具有较强的降解能力。根据传递过程原理和生物降解理论，在低负荷和无其他限制条件下，目标生物量受控于基

质量,随着气量的增加,基质的传输速率加快,进而加快了有机物的降解,表现为油烟废气的去除量增加。但随着有机负荷的增加,当基质量不再是微生物生长的限制因素时,从生存空间的角度出发,微生物的生长必将受其他营养物和代谢产物等因素的制约,致使其对有机物的降解趋于极限,表现在降解能力方面出现极限值。由此可知,生物滤塔中油烟废气的净化过程属于传质和降解双重控制过程,当气量较小、有机负荷较低时传质过程为控制过程,当气量较大、有机负荷较高时生物降解过程为控制过程。

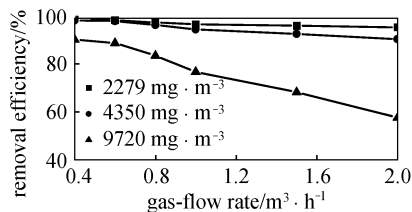


Fig. 6 Effect of gas-flow rate to removal efficiency

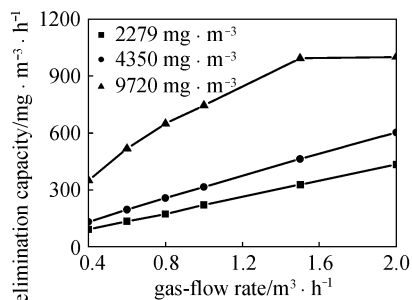


Fig. 7 Effect of gas-flow rate to elimination capacity

2.4.4 湿含量对净化性能的影响 塔顶喷淋液的主要作用是润湿滤料表面的微生物膜,同时亦向微生物提供其生长所必需的营养元素和微量元素,用相对湿度含量来表征。相对湿度含量对降解能力的影响分别见图8、图9。

从图8可知,实验条件下,相对湿度含量在

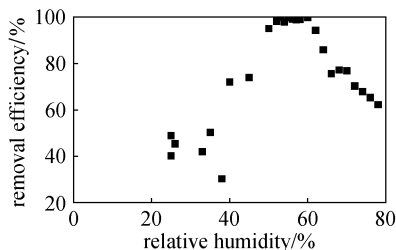


Fig. 8 Effect of relative humidity to removal efficiency

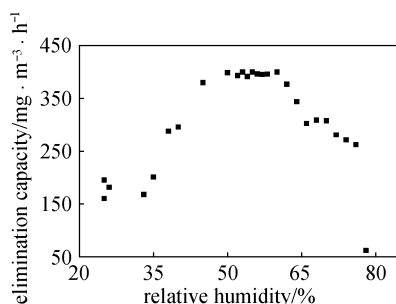


Fig. 9 Effect of relative humidity to elimination

25%~50%范围内,油烟的去除效率随相对湿含量的增加而增加;相对湿含量在50%~60%范围内,油烟的去除效率基本稳定在最高水平(>90%);相对湿含量在60%~80%范围内,油烟的去除效率随相对湿含量增加反而呈下降趋势。图9表明,油烟的体积降解速率与相对湿含量无明显的相关关系,说明在低负荷条件下,生物膜对油烟的降解能力远远大于油烟负荷,而相对湿含量(30%~80%)的变化不足以改变两者的原有关系。因此,在低油烟浓度过滤塔操作过程中,为保证较高的去除效率,最佳相对湿含量应控制在50%~60%之间。实验中观察到,当湿含量很低时,滤料生物膜呈干燥状态,活性很低,表现为油烟去除率和体积降解速率很低;随着相对湿含量的增大,生物活性亦增强,其对油烟的代谢能力亦增大,表现为去除率增高,体积降解速率增大;而当湿含量大于65%时,由于水分子的亲合作用,使生物膜和滤料的油烟吸附力大大减小,同时引起滤料阻力增加,从而导致去除率和降解能力的下降。

2.4.5 初步动态负荷 饮食业油烟浓度的变化在实际应用过程中会经常遇到,因此有必要研究生物滤塔的抗冲击能力,实验结果如图10所示。当油烟的进气浓度突然从1260 mg · m⁻³增加至9720 mg · m⁻³时,其去除率从98.2%降至87.4%,在1 h后去除率继续降至76.7%。不过,当油烟浓度减小到3350 mg · m⁻³时,去除效率可恢复到94.4%;油烟浓度继续减小至1230 mg · m⁻³时,生物滤塔的去除能力已基本恢复到97.8%。从图3也可以看出,在运行过程中,由于油烟浓度变化较大,油烟的净化效率出现了一些扰动,但扰动较小,说明系统对油烟浓度变化的缓冲能力较强,在偶然的超负荷状态下可以及时地自动调整,不会对系统造成伤害。

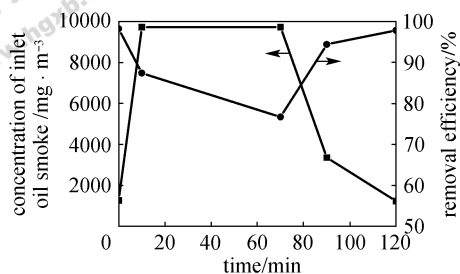


Fig. 10 Performance of biofilter under shock loading conditions

2.5 滤料生物膜的形态

图 11 所示是还没有吸附微生物的梧桐木块的内部结构。可以看出, 该载体内拥有许多空隙, 很适合微生物的生长。生物滤塔稳定运行 10 天后, 在电镜下观察 (图 12), 填料上有一层致密的生物膜覆盖在其表面, 生物膜厚度为 0.5~1.5 mm, 颜色为白色, 内部结构如蜂窝、山谷或山峰状。

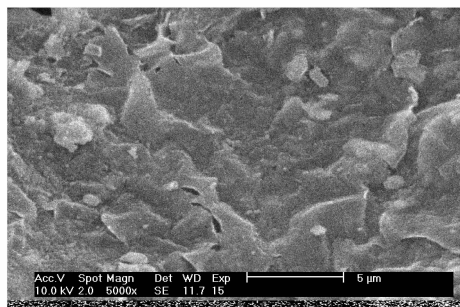


Fig. 11 SEM of microporous structure of *Spermaceae flavonoibis* wood

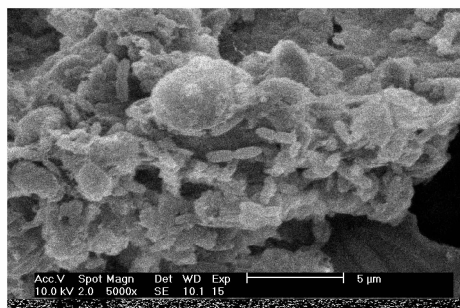


Fig. 12 SEM of internal part of immobilized *Pseudomonas* sp. Z1 in microporous *Spermaceae flavonoibis* wood

3 结 论

(1) 从受油烟污染的土壤中分离筛选到 4 株菜油降解细菌, 它们能以菜油为惟一碳源和能源进行

生长, 经鉴定均属假单胞菌 (*Pseudomonas* sp.). 其中菌株 Z1 的菜油降解性能明显高于其他 3 株细菌, 其最佳生长条件为: 温度 30 ℃, pH=7, 摇床转速 210 r·min⁻¹, 接种量 1%。

(2) 梧桐木块作为填料的生物滤塔能够有效处理油烟废气, 且具有良好的抗负荷冲击性能。

(3) 生物滤塔运行 10 天后, 木块上形成一层致密的生物膜。其膜厚 0.5~1.5 mm, 内部结构如蜂窝、山谷或山峰状。

References

- Chen Hua (陈华), Ye Shunhua (叶舜华). Study on the Effects of Cooking Oil Fume Condensate on Human Health. *Shanghai Enviromental Science* (上海环境科学), 1991, **10** (8): 48
- Gupto D, Boffeta P, Jindal S K, Rapiti E. Risk Factors of Lung Cancer in Chandigarh, India. *India J. Med. Res.*, 2001, **113**: 142—150
- Lutz D. Structure-Mutagenicity Relationship in α , β -Unsaturated Compounds and Their Corresponding Allylic Alcohols. *Mutat. Res.*, 1982, **93**: 305
- Kleinerman R A, Wang Z Y, Lubin J H, Zhang S Z, Metayer C, Brenner A V. Lung Cancer and Indoor Air Pollution in Rural China. *Epidemiology*, 1999, **10** (5): 488—494
- Liu Zhanqin (刘占琴), Zhu Zhengang (朱振岗), Wang Xianzhen (王贤珍). Effects of Frying Oil Fumes on Mutagenicity. *Journal of Enviroment and Health (China)* (环境与健康杂志), 1987, **4** (6): 10
- Zhang Hui (张晖), Wang Guoxiong (汪国雄), Tan Weijun (谈伟君). Study on the Effects of Cooking Oil Fume Condensate on the DNA Integrality. *Journal of Hygiene Research* (卫生研究), 2002, **31** (4): 238—240
- Leson G, Winer A. Biofiltration: a Innovative Air Pollution Control Technology for VOC Emissions. *J. Air Waste Manage Assoe.*, 1991, **41** (8): 1045—1053
- Bohn H L. Consider Biofiltration for Decontaminating Gases. *Chem. Eng. Progress*, 1992, **88** (4): 34—40
- Perdersen R A, Arvin E. Removal of Toluene in Waste Gases Using a Biological Trickling Filter-biodegradation, 1995, **6** (2): 109—118
- Wang Yuting (王玉亭), Lin Daquan (林大泉). Deodorization of Sulfides in Refinery Waste Gas by Microorganism. *Petroleum Processing and Petrochemicals* (石油炼制与化工), 1998, **29** (10): 40—42
- Liu Qiang (刘强), Ma Guangda (马广大). Study on the Performance of Trickling Biofilter in Purifying Xylene in Waste Gas. *Enviromental Engineering* (环境工程), 2001 (增刊): 30—32