

生物法净化挥发性有机废气的吸附-生物膜理论模型与模拟研究

孙 石, 黄兵, 黄若华, 杨萍 (昆明理工大学环境科学与工程学院, 昆明 650093, E-mail: sunps@ynmail.com)

摘要: 针对挥发性有机废气的生物法净化过程, 进行了吸附-生物膜新型理论的相关动力学模型研究. 经采用实验室数据和工业应用试验结果的对比验证表明, 该模型对描述实际过程有很好的适用性. 应用该模型对入口气体甲苯浓度、气体流量及生物膜填料层高度等主要因素的影响进行模拟研究, 模拟计算值与实验值之间有较好的相关性, 相关系数 r 为 $0.80 \sim 0.97$.

关键词: 吸附-生物膜理论; 动力学模型; 模拟研究; VOC 废气净化

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2002)03-04-0014

Kinetic Model and Simulation of the Adsorption Biofilm Theory for the Process of Biopurifying VOC Waste Gases

Sun Peishi, Huang Bing, Huang Ruohua, Yang Ping (Institute of Environ. Science & Eng., Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, E-mail: sunps@ynmail.com)

Abstract: For the process of biopurifying waste gas containing VOC in low concentration by using a biological trickling filter, the related kinetic model and simulation of the new Adsorption-Biofilm theory were investigated in this study. By using the lab test data and the industrial test data, the results of contrast and validation indicated that the model had a good applicability for describing the practical bio-purification process of VOC waste gas. In the simulation study for the affection of main factor, such as the concentration of toluene in inlet gas, the gas flow and the height of biofilm-packing, a good pertinence was showed between calculated data and test data, the interrelation coefficients were in $0.80 \sim 0.97$.

Keywords: adsorption-biofilm theory; kinetic model; simulation study; purification of VOC waste gas

低浓度有机废气的生物净化是近年发展起来的废气污染治理新方法, 与其相关的理论和应用技术目前仍处在不断改进和完善的过程中, 尚有许多问题有待于研究解决^[1~5].

本研究在前期采用生物膜填料塔净化低浓度甲苯废气的净化过程机理研究以及工业应用试验研究的基础上^[4~6], 针对挥发性有机废气的生物净化过程, 进一步对相关动力学理论模型及过程模拟进行研究, 以期在目前尚不成熟的生物法净化低浓度有机废气的基础理论增添新的内容.

1 吸附-生物膜理论

在前期相关^[4~6]研究的基础上, 本研究依据气体吸附理论和生化反应动力学原理来描述废气中低浓度挥发性有机物的生物净化过程,

并提出内容如下所示的吸附-生物膜新型理论.

按照此吸附-生物膜(双膜)理论, 生物法净化低浓度挥发性有机废气一般要经历几个步骤^[4](图1).

(1) 废气中的挥发性有机物(及空气中的 O_2) 从气相本体扩散通过气膜到达润湿的生物膜表面.

(2) 扩散到生物膜表面的有机物(及 O_2) 被直接吸附在润湿的生物膜表面.

(3) 吸附在生物膜表面的有机污染物(及

基金项目: 国家自然科学基金项目(59878020), 云南省自然科学基金项目(98B040M).

作者简介: 孙 石(1957~), 男, 博士, 教授, 主要从事生物法工业废气净化技术以及高浓度工业有机废水处理技术的研究与工业应用.

收稿日期: 2001-06-09; 修订日期: 2001-07-24

O₂) 迅速被其中的微生物活菌体捕获。

(4) 进入微生物菌体内的有机污染物在代谢过程中作为能源和营养物质被分解,经生物化学反应最终转化为无害的化合物(如 CO₂ 和 H₂O)。

(5) 生化反应产物 CO₂ 从生物膜表面脱附并反扩散进入气相本体,而 H₂O 则被保持在生物膜内。

吸附-生物膜理论描述生物法净化废气中低浓度挥发性有机物的过程机理,不涉及液膜扩散、生化反应级数变化以及过渡区等复杂问题,而且可用一个吸附净化模型来描述整个过程,可以简化计算和提高准确性。因此可以认为这一新理论是对国外目前流行的 Ottengraf 依据传统吸收双膜理论提出的吸收-生物膜理论^[1,2]的修正和补充,是专门针对低浓度挥发性有机废气生物法净化过程的新型理论。

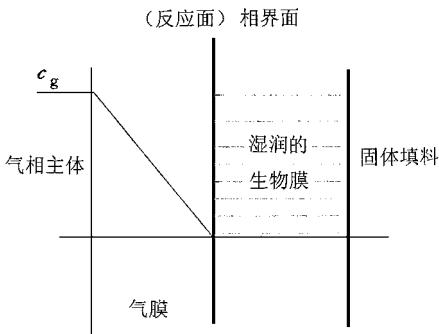


图 1 吸附-生物膜新型(双膜)理论示意图
Fig.1 Sketch map of adsorption biofilm (two film) new theory

2 动力学模型

由吸附-生物膜理论可知,废气中的甲苯首先被吸附在润湿的生物膜表面,而后再由生物膜内的微生物捕获并生化降解。基于微生物净化作用特性和吸附-生物膜理论,本研究从这一净化过程的实现环节,即从吸附-生化降解角度来进行相关的动力学模型探索。

对于吸附-生物膜理论的动力学模型研究,首先以生物膜填料塔废气净化装置为基础,建立如图 2 所示的数学模拟系统,并作出以下假

设:

(1) 在净化处理低浓度甲苯废气(通常 $c_g < 3.0 \text{ mg/L}$) 时,生物膜填料塔循环液体中的甲苯浓度为常数,即 $c_{lin} = c_{lout} = c_l$

(2) 系统处于稳定且平衡状态,构成生物膜的微生物对甲苯的生化降解反应速率足够快,甲苯在生物膜表面的吸附速率等于其在生物膜内的生化降解反应速率,也即单位时间单位体积生物膜填料的甲苯吸附量(q)与其在生物膜内的生化去除量(B)相等, $q = B [\text{mg}/(\text{L} \cdot \text{h})]$ 。

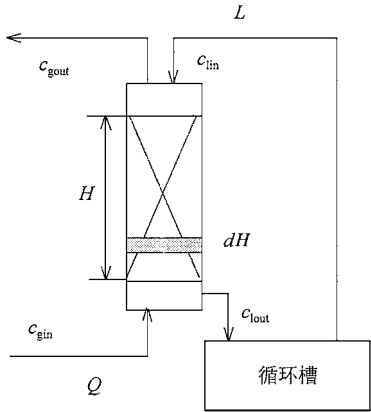


图 2 生物膜填料塔的数学模拟系统
Fig.2 Sketch map of the mathematical simulation system for the biofilter

依据假设条件,甲苯的生化去除量定义以及经典的朗格谬尔(Langmuir)吸附公式,可由图 2 所示的塔内微单元,建立甲苯在塔内生化降解去除的微分方程:

$$- \left[\frac{Q \cdot dc_g}{A \cdot dH} - \frac{L \cdot dc_l}{A \cdot dH} \right] = b \frac{\lambda \cdot c_g}{1 + \lambda \cdot c_g} \tag{1}$$

式中, Q 为气体流量, L 为液体流量, A 为填料塔的横截面积, dH 为填料塔层微单元高度, c_g 为气相甲苯浓度, c_l 为液相甲苯浓度, b 为生物膜填料塔的生化降解反应速率常数(也可视为吸附常数), λ 为吸附系数。

对(1)式进行积分及变换整理后可得:

$$c_{gout} + \frac{1}{\lambda} \ln c_{gout} = \frac{1}{\lambda} \ln c_{gin} + c_{gin} - \frac{b \cdot A \cdot Hc \cdot H}{Q \cdot Hc - L} \tag{2}$$

(2) 式即为本研究依据吸附-生物膜理论, 针对生物膜填料塔净化低浓度(通常 $c_g < 3.0 \text{ mg/L}$) 挥发性有机废气过程建立的反应动力学模型的计算式.

本研究采用实验室小型生物膜填料塔实验数据和工业应用试验用生物膜填料塔数据对上述动力学模型进行验证. 由实验室数据, 求得小型生物塔中甲苯的吸附常数 $b = 238.89 \text{ mg/(L} \cdot \text{h)}$, 吸附系数 $\lambda = 0.2878$. 由工业试验数据, 求得工业生物塔中甲苯的吸附常数 $b = 112.36 \text{ mg/(L} \cdot \text{h)}$, 吸附系数 $\lambda = 0.000178$. 对比验证结果如图 3 和图 4 所示.

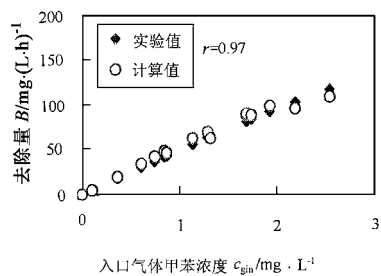


图 3 甲苯生化去除量的计算值与实验值的对比(实验室实验数据)

Fig.3 Comparing the result calculated by model with experimental result for bio-elimination capacity of toluene (lab test data)

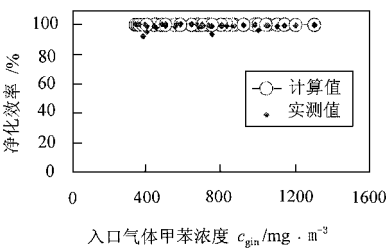


图 4 甲苯净化效率计算值与实测值的对比(工业应用试验数据)

Fig.4 Comparing the result calculated by model with experimental result for purification efficiency of toluene (industrial test data)

由图 3 和图 4 可知, 采用本研究模型对甲苯生化去除量和净化效率的计算值与实测值之间有很好的相关性. 对于实验室小型生物塔, 甲

苯生化去除量的计算值与实测值之间的相关系数 $r = 0.97$. 对于工业试验生物塔, 甲苯净化效率值的计算值与实测值之间的相对误差为 1.27% . 这表明该模型可以用来描述生物膜填料塔净化低浓度甲苯废气的实际过程.

3 主要影响因素的模拟

为了考察本研究建立的动力学模型对实际过程的适用性, 采用模型对净化过程的主要影响因素进行模拟研究. 模拟计算考虑的主要因素有: 入口甲苯浓度 c_{gin} 、气体流量 Q 和生物膜填料层高度 H . 其中, 入口甲苯浓度和气体流量与生物膜填料塔的设备能力有直接关系, 生物膜填料层高度则直接影响到设备的体积及投资费用等.

模拟研究即采用模型计算公式, 依据入口甲苯浓度 c_{gin} 、气体流量 Q 和填料层高度 H 的变化, 对相应的 c_{gout} 进行预测计算, 并将换算的 $\eta\%$ 和 B 的计算结果与实验室的实验数据进行对比, 结果如图 5 ~ 图 9 所示.

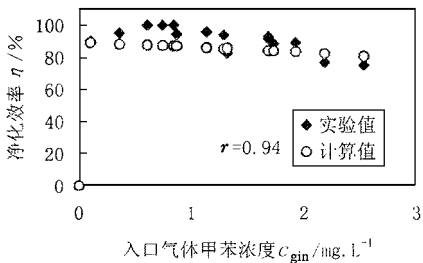


图 5 净化效率计算值与实测值的对比

Fig.5 Comparing the result calculated by model with experimental result for purification efficiency

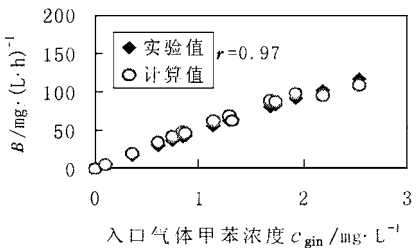


图 6 甲苯生化去除量计算值与实测值的对比

Fig.6 Comparing the result calculated by model with experimental result for bio-elimination capacity of toluene

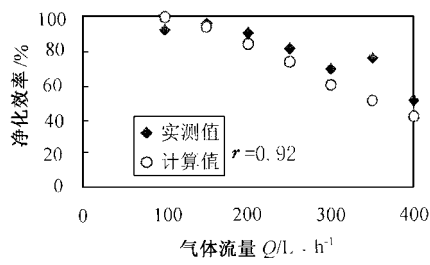


图 7 净化效率计算值与实测值的对比

Fig. 7 Comparing the result calculated by model with experimental result for purification efficiency

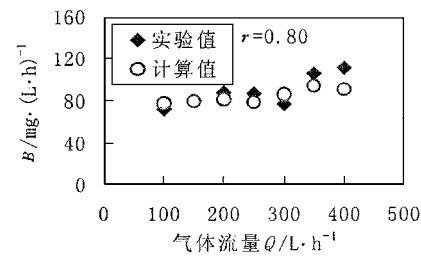


图 8 甲苯生化去除量计算值与实测值的对比

Fig. 8 Comparing the result calculated by model with experimental result for bio-elimination capacity of toluene

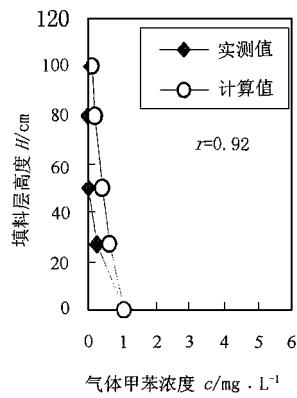


图 9 不同填料层高度的气体甲苯浓度计算值与实测值的对比

Fig. 9 Comparing the result calculated by model with experimental result for concentration of toluene at the different height of bio-packing layer

由图 5 ~ 图 9 可知,针对入口气体甲苯浓度 c_{gin} 、气体流量 Q 和填料层高度 H 的变化进行的模拟结果表明,模型计算值与实验值之间有很好的相关性,相关系数为 r 为 0.80 ~ 0.97. 表明该模型对描述实际过程有很好的适用性,可用于对生物膜填料塔的净化效果进行模拟预测.

4 结论

本研究在生物膜填料塔净化低浓度甲苯废气的机理研究基础上,依据吸附-生物膜理论,研究建立了相关动力学模型及计算公式.经对比验证表明,应用该模型计算公式对入口气体甲苯浓度、气体流量及生物膜填料层高度等主要因素的影响进行模拟研究是可行的,模拟计算值与实验值之间有很好的相关性.

本研究建立的吸附-生物膜理论的动力学模型可用于描述生物膜填料塔对废气中低浓度甲苯(挥发性有机污染物)的生物净化处理过程,研究结果对生物法净化低浓度挥发性有机废气的研究与工业应用具有较好指导意义和参考应用价值.

参考文献:

- 1 何坚,季学李,羌宁. 生物滴滤池法处理挥发性有机污染物的进展. 上海环境科学, 1999, 18(6): 261 ~ 263.
- 2 Acuna M E, Perez F, Auria R et al. Microbiological and kinetic aspects of a biofilter for the removal of Toluene from waste gases, Biotechnology and Bioengineering, 1999, 63 (2): 175 ~ 184.
- 3 王德民,赵一先,李定邦. 生物滴滤池法处理废气动力学模式研究. 上海环境科学, 1999, 18(7): 309 ~ 311.
- 4 孙 石,杨显万,谢蕴国等. 生物法净化低浓度挥发性有机废气的动力学模式研究. 上海环境科学, 1997, 16(8): 13 ~ 17.
- 5 孙 石,杨显万,黄若华等. 生物法净化废气中低浓度挥发性有机物的过程机理研究. 中国环境科学, 1997, 17(6): 545 ~ 549.
- 6 孙 石,杨显万,黄若华等. 再生胶工业脱硫废气的生物法净化. 再生胶信息, 2001, (3): 10 ~ 14.