

转笼生物反应器运行影响参数分析与优化实验

陈维平¹, 江 帆^{1,2}, 张 帆¹, 麦明仁¹

(1. 华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640; 2. 广州大学机械与电气工程学院, 广东 广州 510006)

摘要 根据前期的实验结果对转笼生物反应器运行影响因素进行了分析, 发现其污水处理率主要与转笼转速、曝气量、污水流速、浸没量等因素有关。为了得到较优的运行参数, 采用混合正交实验方案进行测试, 实验结果表明 在转笼转速为 1.5 r/min、曝气量为 2 m³/h、污水流速 1 m³/h、转笼完全浸没、平均水力停留时间为 80.5 min 条件下, COD 和 NH₃-N 的去除率分别达到 82.18% 和 81.62%, 为转笼生物反应器的实际应用提供参考。

关键词 河道水污染 生物治理 转笼生物反应器 正交实验 参数优化

中图分类号 X131.2 **文献标识码** A **文章编号** 1004-6933(2008)04-0044-03

Analysis and optimization of parameters affecting the performance of cage-rotor bioreactors

CHEN Wei-ping¹, JIANG Fan^{1, 2}, ZHANG Tao¹, MAI Ming-ren¹

(1. School of Mechanic and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Mechanical and Electrical Engineering College, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract Analyses of the operation of a cage-rotor bioreactor show that the main factors influencing treatment efficiency are the rotation rate of the cage-rotor, aeration rate, wastewater discharge and immergence of the bioreactor. In order to maximize the operation efficiency, orthogonal experiments were designed and performed. The results show that the removal rates of COD and NH₃-N are, respectively, 82.18% and 81.26% when the bioreactor is totally submerged, and the rotation rate of the cage-rotor, aeration rate, wastewater discharge and average hydraulic retention time are, respectively, 1.5 r/min, 2 m³/h, 1 m³/h and 80.5 minutes. These results provide references for the application of cage-rotor bioreactors.

Key words river water pollution biotreatment; cage-rotor bioreactor; orthogonal experiment; parameter optimization

针对严重的河道水污染, 世界各国研究人员正在积极开展治理研究工作, 并已取得了一系列成果。目前, 研究和应用的污染河道水体治理装备主要有曝气船、岸边固定的处理设施两大类。其中曝气船造价较高, 维护操作的费用较高, 不便于推广应用; 而岸边固定的处理设施灵活性较差, 河流恢复自净功能后需要拆除, 造成浪费^[1-4]。本项目组在广东省科技攻关计划项目的资助下, 融合曝气、生物滤池、流化床技术研发了针对河流水环境治理的转笼生物反应器。该反应器集成了曝气法和生物膜法的优点, 适用于河道、湖泊受污染水体处理, 是一种新型

生物反应器^[5-7]。在反应器启动实验中发现, 反应器的运行效果受多个工艺参数的影响。为了得到最佳处理效果, 本文详细分析了转笼生物反应器的影响因素, 并进行正交优化实验得到较优的运行参数。

1 转笼生物反应器运行影响因素分析

转笼生物反应器是基于主动流化床的理念设计的, 与流化床相似, 其污水处理效果主要与水中的溶解氧、污水与填料接触时间、水力剪切力等有关, 在实际运行实验中发现, 影响运行过程运行参数的因素主要有 4 个。

1.1 转笼转速

在反应器中,由于转笼内叶片的转动所造成的搅动,使污水浓度分布相对均匀,悬浮生物载体相互碰撞和摩擦,因此对生物载体上生物膜的厚度和反应器内气含率产生影响。当转速较低时,反应器内悬浮生物载体间碰撞和摩擦较小,有利于微生物的生长繁殖以及微生物膜在悬浮生物载体表面的附着固定,但转速过小又造成反应器流化态不均匀,致使载体上生物膜厌氧层增厚,影响污水处理效果。当转笼转速过高时,反应器内悬浮生物载体间碰撞和摩擦加剧,使得生物载体表面的微生物膜脱落,生物膜的厚度下降,影响污水处理效果。

1.2 曝气量

曝气量是生物好氧处理污水的重要影响因素,当曝气量较大时,反应器内供氧充足,载体上生物膜新陈代谢加速,生物活性较好,改善了污水处理效果,同时氧直接降解污水中的有机污染物。但曝气量过大时,反应器内剪切力加大,微生物不易在生物载体上附着生长,也使生物膜剥落过快,生物量下降,污水处理效果降低。

1.3 污水流量

当反应器中的污水流速较低时,污水在反应器内停留时间相对较长,污水与生物膜充分接触,并且由于流量小,生物载体表面单位面积 COD 负荷小,即使是很低的转速也能保证水中的溶解氧充足,使微生物膜对污水中的有机污染物进行有效降解,但处理污水总量较小。当流量过大时,需要降解的有机污染物的总量大大增加,单位体积生物载体表面的 COD 负荷过大,致使生物膜生长过厚,生物膜内发生厌氧,生物膜在载体碰撞和水力剪切力作用下大量脱落,使反应器除污能力减弱。

1.4 转笼浸没状态

当转笼半浸时,其另一半暴露于空气中,则转笼在转动时,悬浮生物载体有机会与空气直接接触,有利于生物膜直接吸收空气中的氧,不需要中心曝气,节省能源,但生物膜与水中污染物的接触面积和接触时间减小,当转笼全浸时,保持了反应器内供氧与

生物膜接触污染物面积和时间得到平衡,但需要消耗额外的能源。

2 转笼生物反应器运行参数优化实验

根据上述的影响因素分析进行正交优化实验,获得较优的运行工艺参数,为实际应用提供参考。

2.1 实验装置及实验材料

转笼式悬浮填料生物反应器由转笼体、叶片、转轴、悬浮填料、曝气管等组成。转笼直径 400 mm,长 400 mm,有效容积 0.05024 m^3 ,如图 1 所示。转笼体外周的流线型叶片能在水流动能的驱动下转动,实现能源自助。反应器内充填悬浮填料,其内周布有叶片以搅拌悬浮生物填料,达到流化状态。转笼体周壁上开孔,开孔率为 70%,水流进入转笼体与悬浮填料(挂膜介质)接触。充气增氧机通过周壁上开微孔的中心轴管给反应器曝气。实验用悬浮填料采用广州华穗轻质陶粒制品厂出产的轻质陶粒,陶粒直径 16 ~ 24 mm,堆积密度 300 kg/m^3 ,孔隙率 72.8%,比表面积 $0.364\text{ m}^2/\text{go}$ 。

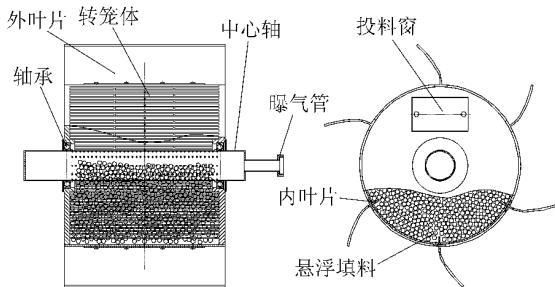


图 1 转笼式悬浮填料生物反应器结构

整个实验在如图 2 所示的模拟河道水污染治理实验装置中进行,由进水池、出水池、反应区(由 2 个相同的转笼反应器组成)、风泵、水泵、流量计等构件和设备组成。反应区截面尺寸 $400\text{ mm} \times 700\text{ mm}$,长 2730 mm,进水池 $1100\text{ mm} \times 1096\text{ mm} \times 1075\text{ mm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高),出水池 $1500\text{ mm} \times 1096\text{ mm} \times 1075\text{ mm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高)。所有实验装置均由 PVC 塑料板焊接成型。

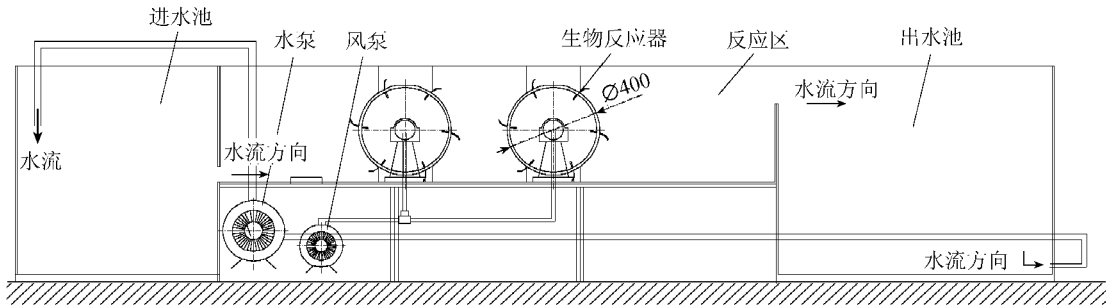


图 2 模拟实验装置示意图

2.2 实验方法

转笼生物反应器内悬浮填料充填率为 50%，处理水量 1.8 m³/d,水力停留时间 80.5 min。

测试指标及方法。化学需氧量(COD) :采用重铬酸钾快速消解法(GB 11914—89《水质化学需氧量的测定重铬酸盐法》),XJ-1 型 COD 消解装置 ;氨氮(NH₃-N) 采用纳氏试剂光度法(GB 7479—1987《水质铵的测定纳氏试剂比色法》),UV9100 型紫外可见光光度仪。

实验原水取自华南理工大学南湖生活污水, COD 质量浓度在 100 ~ 150 mg/L 范围,NH₃-N 质量浓度在 15 ~ 25 mg/L 范围。实验用水质污染物浓度略低于或接近一般污染河流水质。

2.3 实验方案

工艺参数优化实验主要通过控制 4 个因素,即转笼转速(A)、曝气量(B)、污水流量(C)、转笼浸没状态(D),来探讨反应器的最佳工艺运行参数。

其中因素 A、B、C 有 4 个水平,因素 D 只有 2 个水平。因此,要选用混合正交表,根据文献[8-9]选用 L₁₆(4⁴ × 2³)型正交表。为简化实验,不考虑因素之间的交互作用,以每个因素为列,占据 L₁₆(4⁴ × 2³)型正交表的 1、2、3、5 列。根据正交表,共 16 组实验方案。表 1 为因素与水平数据。

表 1 因素与水平数据

水平	因 素			
	转笼转速(A)/ (r·min ⁻¹)	曝气量(B)/ (m³·h ⁻¹)	污水流量(C)/ (m³·h ⁻¹)	浸没深度(D)/ mm
1	1.0	1.5	1.0	600(全)
2	1.5	2.0	2.0	300(半)
3	2.0	2.5	3.0	
4	2.5	3.0	4.0	

2.4 实验结果及讨论

根据正交实验表进行优化实验,对实验结果进行整理,绘出因素与指标关系图(图 3)。

根据极差大小,4 个因素分别对 2 个指标影响的重要性的主次顺序为

主 → 次

COD 去除率 B A C D
NH₃-N 去除率 A C B D

由图 3 可知,对于本实验的 2 个评价指标,较佳运行参数分别为

NH₃-N 去除率 A2 B3 C1 D1
COD 去除率 A2 B2 C3 D2

在多指标实验设计中,各指标的最优方案之间可能存在着一些矛盾,为兼顾 2 个指标而得到最好的方案,采用综合平衡法来解决多指标正交实验设

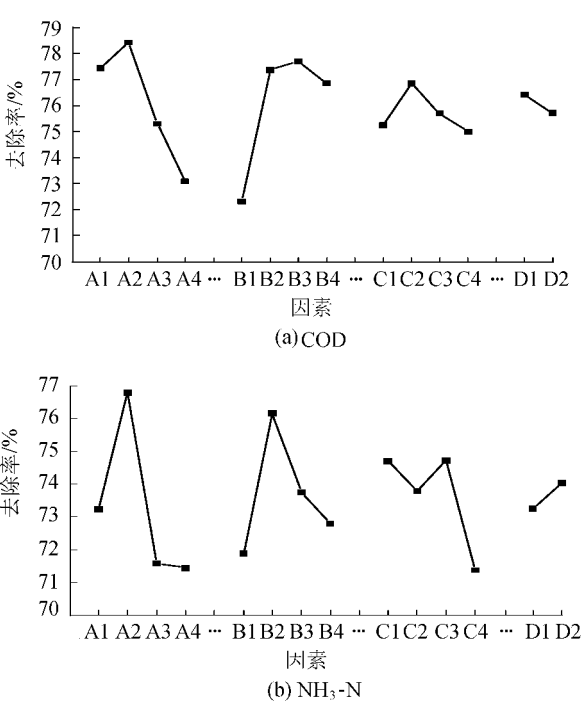


图 3 因素与指标关系

计中的矛盾。综合平衡法的分析方法是:先把各指标进行计算分析,然后再把各指标的分析结果进行综合比较,从而得出最佳方案^[9]。分析讨论如下。

a. 因素 A(转笼转速)。当转笼速度逐渐增加时,COD 和 NH₃-N 去除率表现出相同的变化趋势,即先上升,到达峰值后持续下降。说明转速过大会造成反应器内悬浮生物载体间碰撞和摩擦加剧,微生物很难在其上附着生长,污水处理效果下降。从图 3 中可以得出,COD 和 NH₃-N 去除率都是 A2 时达到最大值,因此选 A2。

b. 因素 B(曝气量)。当反应器内曝气量增加时,基质 COD 和 NH₃-N 去除率也表现出相似的变化趋势,即先上升后下降,但它们到达峰值的水平不一样。对于 COD 去除率取 B3 好,对于 NH₃-N 取 B2 好,从图 3 中看到,在 B2 和 B3 时 COD 去除率的变化不大,综合考虑,选 B2。

c. 因素 C(污水流量)。当污水流量逐渐增多时,基质 COD 去除率是持续下降,而 NH₃-N 去除率呈现波形变化。当大流量时,由于单次水力停留时间短,2 种基质的去除率均不理想。由图 3 可以看出,虽然 COD 和 NH₃-N 去除率不是在同一水平达到最值,但 NH₃-N 去除率在 C1 时也能达到次最值,因此选 C1。

d. 因素 D(转笼浸没深度)。转笼反应器浸没状态的变化,引起 COD 和 NH₃-N 去除率的变化截然相反。但由于对 2 种基质的去除影响的重要性排在最后,不是主要影响因素,综合考虑,选择 D1。

(下转第 49 页)

干流中的。分析原因主要是 :①在排污渠(支流)向干流汇聚的过程中水体的自净作用 ;②沉积物的吸附作用 ;③干流水体的稀释作用。但也有断面例外,如洱闸、月牙河北闸、外河闸、小东庄、中心桥与营房村干流的总磷含量要高于其对应排污渠中的含量,可能这些断面有污染源直接向干流排放,其具体原因还需进一步探讨。

3 结 论

- a. 海河干流各断面的 TP 质量浓度为 0.4 ~ 3.5 mg/L,SRP 质量浓度为 0.09 ~ 0.75 mg/L,TDP 质量浓度为 0.24 ~ 1.42 mg/L,多数断面质量浓度超出 GB3838—2002《地面水环境质量标准》V 类标准。
- b. 海河排污渠(支流)各断面 SRP 质量浓度为 0.01 ~ 3.63 mg/L,TDP 质量浓度为 0.12 ~ 4.16mg/L,TP 质量浓度为 0.2 ~ 5.0 mg/L。除洱闸、月牙河北闸、外河闸、小东庄、中心桥与营房村 6 个点外,其余断面排污渠(支流)的含磷量均高于相应干流。
- c. 海河干流与排污渠(支流)中的 TP 以 TDP 为主,干流中多数样点的 SRP 较低,但排污渠(支流)中 TDP 以 SRP 为主,说明其污染源发生了变化。

参考文献 :

[1] 赵静,王德荣,崔淑贞.天津海河二道闸以下河段水质溶解氧模型分析[J].农业环境保护,1996,15(1) :29-31.

[2] 刘国华,傅伯杰,杨平.海河水环境质量及污染物入海通量[J].环境科学,2001,22(4) :46-50.

[3] 秦保平,翟德华,袁倩,等.海河水生生态系统研究[J].城市环境与生态,1998,11(1) :48-51.

[4] 袁倩,林坚,袁秀文,等.天津市汛期排水对海河的污染[J].城市环境与城市生态,1998,11(增刊) :23-25.

[5] JARVIE H, JÜRGENS M D, WILLIAMS R J, et al. Role of river bed sediments as sources and sinks of phosphorus across two major eutrophic UK river basins : the Hampshire Avon and Herefordshire Wye [J]. Journal of Hydrology, 2005, 304 : 51-74.

[6] Organisation for Economic Cooperation and Development, 1982. Anon. Eutrophication of waters : monitoring, assessment and control. OECD, 1982, Paris.

[7] HECKY R E, KILHAM P. Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments : a review of recent evidence on the effects of enrichment [J]. Limnology and Oceanography 1989, 33 (4/2) :796-822.

[8] MAINSTONE C P, PARR W. Phosphorus in rivers-ecology and management [J]. Sci Tot Environ, 2002, 282/283 :25-47.

[9] BOWES M J, HOUSE W A, HODGKINSON R A. Phosphorus dynamics along a river continuum [J]. The Science of the Total Environment, 2003, 313 :199-212.

[10] 国家环境保护局.水和废水监测分析方法[M].4 版.北京 中国环境科学出版社,2002.

[11] GB3838—2002,地表水环境质量标准[S].

(收稿日期 2007-04-15 编辑 舒 建)

(上接第 46 页)

由以上分析结果,得到的最优方案为 A2B2C1D1。即转笼转速为 1.5 r/min、曝气量为 2m³/h、污水流量 1 m³/h、转笼完全浸没状态时,转笼生物反应器达到较好的污水处理效果。

在得到优化的工艺参数后,转笼生物反应器在此参数下稳定运行,验证试验结果 :COD 的去除率为 82.18%,NH₃-N 的去除率为 81.62%。

3 结 论

- a. 根据主动流化床的设计理念及前期的启动实验情况对转笼生物反应器污水处理影响因素进行了分析,发现影响转笼生物反应器处理效果的主要工艺参数为转笼转速、曝气量、污水流量、转笼的浸没状态。
- b. 利用正交试验设计、极差分析法和综合平衡法得到最佳运行参数 :转笼转速 1.5 r/min,曝气量 2 m³/h,污水流量 1 m³/h,转笼处于完全浸没状态。
- c. 正交实验结果与影响因素分析的各因素对污水处理效果的影响趋势一致,为转笼生物反应器

的实际应用提供较优的运行工艺参数。

参考文献 :

[1] 国家环境保护总局.2004 年中国环境状况公报[R].2005.

[2] 刘鸿志,卢雪云.中外河流水污染治理比较[J].世界环境,2001(4) :27-30.

[3] 孙从军,张明旭.河道曝气技术在河流污染治理中的应用[J].环境保护,2001(4) :12-14.

[4] 张捷新,吴纯德,陈维平,等.污染河道治理技术研究进展[J].生态科学,2005,5(24) :178-181.

[5] 陈维平,江帆,吴纯德,等.一种转笼式悬浮填料生物污水处理方法及其装置 中国,200410077611.2[P].2004-11-24.

[6] 江帆,陈维平,吴纯德,等.悬浮填料转笼式生物反应器的研制与应用[J].现代化工,2005,25(8) :53-55.

[7] 江帆.悬浮载体材质-结构的生物特性及新型转笼生物反应器[D].广州 华南理工大学,2006.

[8] 庄楚强.应用数理统计基础[M].2 版.广州 华南理工大学出版社,2003 :427.

[9] 何国富,徐和胜,周增炎,等.悬浮填料优化试验研究[J].环境科学与技术,2005,4(7) :36-38.

(收稿日期 2006-12-30 编辑 傅伟群)