

曝气量对 SBBR 生物除磷的影响研究

荣宏伟^{1,2}, 彭永臻¹, 张朝升², 方 茜²

(1 北京工业大学 北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验室, 北京 100022; 2 广州大学 土木工程学院, 广东 广州 510006)

摘 要: 为了考察曝气量对序批式生物膜反应器 (SBBR) 除磷效果的影响, 采用厌氧/好氧交替运行的方式, 通过控制好氧反应过程中的曝气量, 研究了不同曝气量时 SBBR 的好氧吸磷效果, 以及不同曝气量对生物膜脱落量的影响, 并推导了生物除磷过程中生物膜内溶解氧的扩散模型。结果表明, 曝气量是影响生物除磷效果的一个重要因素, 为了满足生物膜内聚磷菌对氧的需求量, 加快氧的传递速率, 增加活性生物膜的厚度, 加快聚磷菌的好氧吸磷速率, 必须提高液相主体中溶解氧的含量。选择适宜的曝气量能够促进生物膜的脱落与更新, 起到调控污泥龄的作用, 从而增强生物除磷的稳定性。

关键词: 序批式生物膜反应器; 曝气量; 生物除磷; 扩散模型

中图分类号: X703.1 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2008)05-0072-05

Study on Effect of Aeration Rate on Biological Phosphorus Removal in Sequencing Batch Biofilm Reactor

RONG Hong-wei^{1,2}, PENG Yong-zhen¹, ZHANG Chao-sheng², FANG Qian²

(1 Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China; 2 School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: In order to investigate the effect of aeration rate on biological phosphorus removal in sequencing batch biofilm reactor (SBBR), the aerobic phosphorus uptake efficiency of SBBR at different aeration rates and the influence of different aeration rates on biofilm detachment quantity were studied by using alternating anaerobic/aerobic operation mode and controlling aeration rate during aerobic reaction. The diffusion model of DO in biofilm during biological phosphorus removal was deduced. The results show that the aeration rate is a key factor affecting biological phosphorus removal. The DO concentration in liquid phase must be increased to meet the oxygen demand of phosphorus accumulating organisms (PAOs) in biofilm, quicken the transfer rate of oxygen, increase the active thickness of biofilm and accelerate the aerobic phosphorus uptake. On the other hand, the appropriate aeration rate can promote biofilm detachment and regeneration to control sludge age and enhance stable phosphorus removal.

Key words: SBBR; aeration rate; biological phosphorus removal; diffusion model

磷作为一种营养物质, 在水体中含量过高会引起水体富营养化, 因此研究开发经济、高效的除磷技

术已成为近年来的研究热点。序批式生物膜反应器 (SBBR) 兼有活性污泥法和生物膜法的特点, 不仅

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50578044); 国家“十一五”科技支撑计划重点项目 (2006BAC19B03)

具有良好的脱氮除磷效果,而且实现了污水处理一体化,具有占地面积少、基建投资省、操作管理方便等优点^[1~4]。与活性污泥法相比,SBBR 具有出水污泥浓度低、易于沉淀等优点,可有效防止在沉淀池中发生磷的二次释放,从而提高了除磷效率^[5,6]。这些特征使其在城市污水脱氮除磷处理中具有广阔的发展前景,尤其为一些中、小城镇的生活污水处理提供了一种可行的工艺。

在生物除磷系统中,为了最大限度地发挥聚磷菌的好氧吸磷作用,必须在好氧段内提供足够的溶解氧,以满足聚磷菌在吸磷过程中以 DO 作为最终电子受体的需求量,保证聚磷菌对其细胞内贮存的 PHB /PHV 和水体中的有机物进行氧化分解,并释放出足够的 ATP 用于对水体中溶解性磷的吸收以及对聚磷的合成和新的聚磷菌细胞的合成,实现细胞的增殖^[7]。曝气不仅增加了水中的溶解氧,为聚磷菌的生长代谢创造有利条件,而且改变了生物膜表面的水力条件,促进生物膜的脱落与更新。笔者通过改变 SBBR 好氧运行过程中的曝气量,研究了曝气量对 SBBR 生物除磷效果和生物膜脱落量的影响,并对生物膜内溶解氧扩散模型进行了推导与分析,为 SBBR 生物除磷工艺的推广应用奠定了基础。

1 原水水质

试验用水采用人工模拟城市生活污水,以淀粉为碳源、磷酸二氢钾为磷源、氯化铵为氮源,并投加碳酸氢钠、硫酸镁、氯化钙、硫酸亚铁及一些微量元素配制而成。试验期间原水水质见表 1。

表 1 原水水质

Tab 1 Raw wastewater quality

项目	COD / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TN / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TP / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	pH
范围	286 ~ 324	26.5 ~ 35.7	23.7 ~ 31.4	4.14 ~ 5.95	6.8 ~ 7.2
均值	297	32.6	29.7	5.18	7.12

2 试验材料和方法

2.1 试验装置

试验所用反应器为由有机玻璃制成的圆柱体,填料选用组合纤维填料。反应器的内径约为 15 cm,有效水深约为 120 cm,除去填料所占体积,其有效容积为 17 L。下部锥形沉淀区的容积为 2 L,厌氧时采用循环泵进行反应器的内部循环,曝气采用微孔曝气。试验装置如图 1 所示。

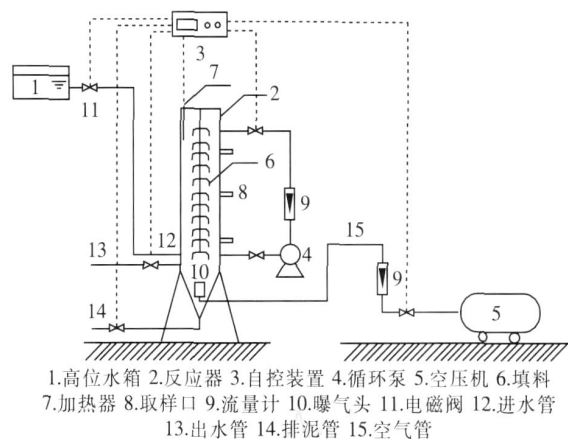


图 1 序批式生物膜反应器试验装置

Fig 1 Schematic diagram of SBBR

试验采用瞬时进水方式,厌氧循环为 20 h,曝气为 60 h,静沉为 20 min,排水为 10 min,运行周期为 85 h,反应器内的水在每个运行周期后完全排放。

2.2 生物膜的培养与驯化

为了实现生物除磷的目的,生物膜的培养与驯化分为好氧培养驯化阶段和厌氧-好氧交替运行培养驯化阶段。接种污泥取自大庆市东城区污水处理厂二沉池的回流污泥。将新鲜污泥沉淀且排除上清液后加入到悬挂填料的反应器内,同时加入原水并连续曝气,大约 25 d 左右生物膜逐渐成熟,颜色呈黄褐色,镜检能观察到菌胶团、丝状菌和轮虫等,同时也获得了较为稳定的出水水质,对 COD 和氨氮的去除率分别达到 90% 和 82.5%,表明挂膜成功。然后采用厌氧-好氧交替的运行方式进行生物膜驯化,在 23 d 时系统对 TP 的去除率已达到 78% 以上,出水 TP 在 1 mg/L 左右,说明聚磷菌的数量在不断增殖,已经成为优势菌种,生物膜培养驯化完成。系统稳定运行两周之后进行正式试验。

2.3 分析与测定方法

TP、COD 和氨氮等采用国家标准分析方法测定^[8],DO 采用 YSI 溶解氧仪测定,试验数据均采用多个稳定运行周期内重现性良好的试验结果。

3 结果与讨论

3.1 曝气量对好氧吸磷效果的影响

SBBR 反应器的厌氧循环水量控制在 50 L/h,将曝气量分别控制在 0.075、0.1、0.125 和 0.15 m³/h 的条件下,考察反应器内 DO 在不同曝气量下的变化情况以及曝气量对除磷效果的影响,结果见图 2。

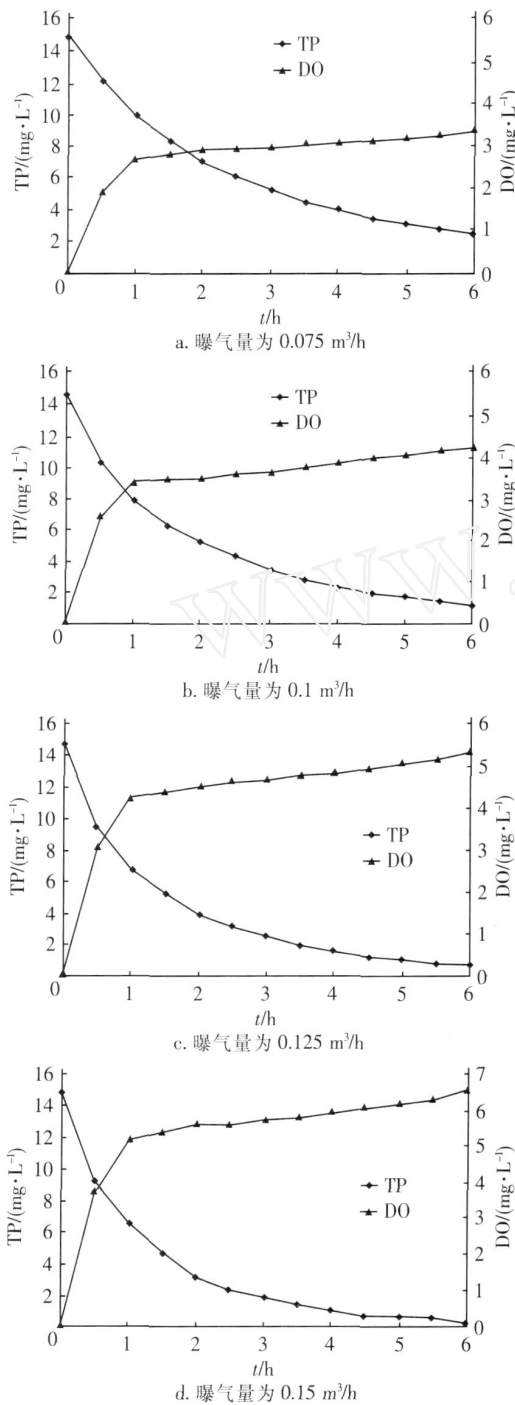


图 2 曝气量对好氧吸磷的影响

Fig 2 Effect of aeration rate on aerobic phosphorus uptake

由图 2 可知,反应器内的 DO 浓度随着曝气量的增加而提高,对 TP 的去除率也相应增加,4 种曝气量下的去除率依次为 46.38%、72.85%、86.36%、92.62%,对磷的吸收速率也依次增加,但幅度逐渐降低,而且当曝气量 $>0.125\text{ m}^3/\text{h}$ 后,总磷的吸收曲线变化不大,对 TP 的去除率达 85% 以上,且出水

$\text{TP} < 1.0\text{ mg/L}$ 。当曝气量为 $0.075\text{ m}^3/\text{h}$ 时,反应器内 DO 值在 1 h 后达到 2.5 mg/L 以上,并且一直保持在 $2.6\sim 3.3\text{ mg/L}$,平均吸磷速率为 $2.043\text{ mg}/(\text{L}\cdot\text{h})$;曝气量为 $0.1\text{ m}^3/\text{h}$ 时,反应器内 DO 值在 1 h 后达到 3.28 mg/L 以上,并且一直保持在 $3.4\sim 4.2\text{ mg/L}$,平均吸磷速率为 $2.217\text{ mg}/(\text{L}\cdot\text{h})$;曝气量为 $0.125\text{ m}^3/\text{h}$ 时,反应器内 DO 值在 1 h 后达到 4.34 mg/L 以上,并且一直保持在 $4.5\sim 5.2\text{ mg/L}$,平均吸磷速率为 $2.322\text{ mg}/(\text{L}\cdot\text{h})$;曝气量为 $0.15\text{ m}^3/\text{h}$ 时,反应器内 DO 值在 1 h 后达到 5.37 mg/L 以上,并且一直保持在 $5.5\sim 6.4\text{ mg/L}$,平均吸磷速率为 $2.398\text{ mg}/(\text{L}\cdot\text{h})$ 。由此可见,提高反应器的曝气量可以提高氧转移效率,使反应器内的 DO 升高。在释磷量基本相同的情况下,DO 浓度上升的幅度越高,好氧吸磷速率就越大,相应地所需的曝气时间就越短。而在低 DO 浓度范围内要达到同样的好氧吸磷效果,则需要延长好氧反应时间。综合考虑除磷效果、吸磷速率、曝气时间及动力消耗等因素,确定系统好氧 6 h 的反应时间内,最优的曝气量在 $0.125\text{ m}^3/\text{h}$ 左右,并应保证 DO 值 $>4.0\text{ mg/L}$ 。

3.2 生物膜内溶解氧扩散模型

上述结果证实,在好氧 6 h 的反应时间内要达到较好的除磷效果和较低的出水 TP 浓度,好氧吸磷阶段的 DO 需达到 4.0 mg/L 以上。而在相同条件下,活性污泥法的 DO 只需控制在 2.0 mg/L 以上。在生物膜反应器中之所以需要较高的溶解氧,主要是因为 DO 从液相到生物膜需要一个传递过程。

在生物膜系统内,物质在液相及生物膜相之间的传递可由两种机制完成:扩散和平流。相比较而言,平流运输的贡献较小,可以忽略。图 3 为溶解氧在生物膜内扩散过程的图解。

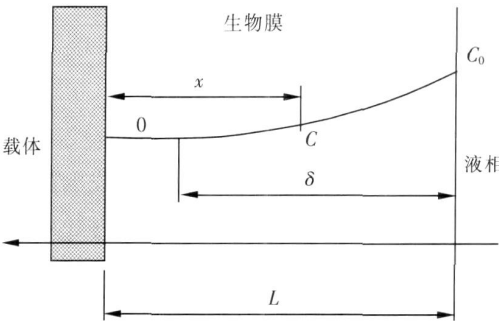


图 3 DO 在生物膜内的扩散示意图

Fig 3 Schematic diagram of DO diffusion within biofilm

对于 DO 在生物膜内反应—扩散模式的假设:生物膜结构均匀且为薄层生物膜;生物膜处于稳定态,即厚度一定;在生物膜内溶解氧运输是通过分子扩散完成的,并且这种扩散是单一方向的,同时对液膜阻力不予考虑;扩散到生物膜内的氧立刻被聚磷菌利用。根据上述假设,DO 在生物膜内的扩散满足 Andrews 公式,即:

$$D \left(\frac{d^2 C}{dx^2} \right) - r = 0 \quad (1)$$

式中 D ——DO 在生物膜中的扩散系数, m^2/s

C ——生物膜内 x 处 DO 浓度, mg/L

x ——距载体表面的距离, m

r ——生物膜耗氧速率, $mg/(L \cdot s)$

氧的比消耗速率可认为是 DO 浓度的一级反应,即有:

$$r = (1 - \varepsilon) p f \frac{q_{\max}}{K} C \quad (2)$$

式中 $q_{\max}$ ——好氧吸磷反应中氧的最大比反应速率, $mgO_2/(mgVSS \cdot s)$

K ——好氧吸磷反应中氧气的半饱和常数, mg/L

p ——生物膜中微生物的体积质量, $mgVSS/L$

f ——生物膜中聚磷菌所占的体积分数

ε ——生物膜的空隙率, %

p, f 都只是时间的函数,与其在薄层生物膜中的位置无关,假定 $q_{\max}, K$ 均为常数,设 $r = K' C$, $K' =$

$(1 - \varepsilon) p f \frac{q_{\max}}{K}$,并代入式 (1),根据边界条件:当 $x = L$ 时, $C = C_0$;当 $x = L - \delta$ 时, $C = 0$,对式 (1) 进行积分并整理可得:

$$C = C_0 \cdot \left\{ \exp \left[\sqrt{\frac{K'}{D}} (\delta - L + x) \right] - \exp \left[\sqrt{\frac{K'}{D}} (L - \delta - x) \right] \right\} / \left[\exp \left(\delta \sqrt{\frac{K'}{D}} \right) - \exp \left(-\delta \sqrt{\frac{K'}{D}} \right) \right] \quad (3)$$

式中 L ——生物膜厚度, m

δ ——活性生物膜厚度,或称可扩散生物膜厚度, m

C_0 ——液相主体的 DO 浓度, mg/L

式 (3) 即为生物膜内溶解氧扩散模型,模型反

映了反应器液相中的溶解氧在生物膜内沿生物膜厚度的扩散情况。从公式中可以发现,生物膜内的溶解氧随着生物膜深度的增加而减少,而在同一深度处膜内的溶解氧随着液相主体中溶解氧浓度的升高而增加。同时扩散到生物膜内的溶解氧量还跟氧在生物膜内的扩散系数、生物膜内聚磷菌的数量以及氧在好氧吸磷反应中的半饱和常数有关。

由此可见,为了满足生物膜内聚磷菌对溶解氧的需求量、加快氧的传递速率、增加活性生物膜的厚度,必须提高液相主体中溶解氧的含量。因此在生物膜反应系统的生物除磷过程中,反应器内所需的溶解氧浓度往往要高于活性污泥系统所需的溶解氧浓度。

3.3 曝气量对生物膜脱落量的影响

由生物除磷机理可知,采用生物除磷必须通过排除富磷污泥来实现真正的除磷,传统活性污泥法可通过排除一定量的污泥来实现,而生物膜法则要通过生物膜脱落来实现。因此,如果生物膜的脱落量不合适,势必影响生物膜中聚磷菌的数量和活性,从而直接影响生物除磷效果。附着在载体上的生物膜在经过稳定期的稳态运行后,生物膜厚度、生物总量趋于稳定,表现出相对的稳定性。当系统的环境条件如底物的供给浓度、剪切力等有显著变化时,生物膜又会达到新的动态平衡。为此,考察了曝气量对生物膜脱落量的影响。

在系统稳定运行工况不变的条件下,考察了将曝气量分别控制在 0.075、0.1、0.125 和 0.15 m^3/h 时的生物膜脱落量,结果如图 4 所示。

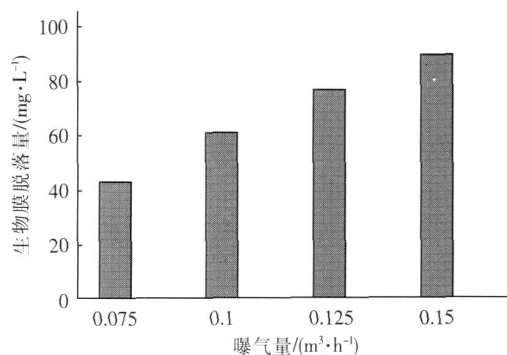


图 4 曝气量对生物膜脱落量的影响

Fig 4 Effect of aeration rate on biofilm detachment quantity

从图 4 可以看出,生物膜的脱落量随曝气量的增加而增加,一方面曝气量的增加,提高了水中溶解氧的浓度和氧在生物膜中的渗透能力,增强了微生

物的代谢活性,加快了生物膜的更新脱落;另一方面,曝气量的增加还加快了水流的速度,在水流和气流的联合作用下使得作用在生物膜上的水力剪切力加大,对生物膜的冲刷作用变强,使生物膜的脱落量增加。因此,通过控制曝气量可调节生物膜的脱落量,对反应系统的污泥龄起到调控作用,增强生物除磷的稳定性。

4 结论

曝气量是影响生物除磷效果的一个重要因素,提高反应器的曝气量可以提高氧的转移效率,增加反应器内 DO 浓度,加快聚磷菌的好氧吸磷速率,缩短好氧反应时间。

在生物膜反应器中由于 DO 从液相到生物膜相需要一个传递过程,为了满足生物膜内聚磷菌对氧的需求量、加快氧的传递速率、增加活性生物膜的厚度,必须提高液相主体中溶解氧的含量。

生物膜的脱落量受曝气量的影响,通过调节曝气量能促进生物膜的脱落与更新,从而调控污泥龄,增强生物除磷的稳定性。

参考文献:

- [1] Morgenroth E, Wilderer P A. Controlled biomass removal—the key parameter to achieve enhanced biological

phosphorus removal in biofilm systems [J]. Water Sci Technol, 1999, 39 (7): 33 - 40.

- [2] Amz P, Arnold E, Wilderer P A. Enhanced biological phosphorus removal in a semi full-scale SBBR [J]. Water Sci Technol, 2001, 43 (3): 167 - 174.
- [3] Gieseke A, Amz P, Amann R, et al. Simultaneous P and N removal in a sequencing biofilm batch reactor: Insight from reactor and microscale investigations [J]. Water Res, 2002, 36 (2): 501 - 509.
- [4] 李军,彭永臻,杨秀山,等. 序批式生物膜法反硝化除磷特性及其机理 [J]. 中国环境科学, 2004, 24 (2): 219 - 223.
- [5] 李军,王宝贞,聂梅生. 序批式生物膜法除磷机理研究 [J]. 中国给水排水, 2002, 18 (1): 1 - 4.
- [6] 王建芳,赵庆良,张雁秋. 投加有效微生物强化 SBR 和 SBBR 除污效果的研究 [J]. 中国给水排水, 2007, 23 (9): 56 - 59.
- [7] 郑兴灿,李亚新. 污水除磷脱氮技术 [M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1998.
- [8] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 (第 4 版) [M]. 北京:中国环境科学出版社, 2002.

电话: 13688868755

E - mail: rhwcn@126. com

收稿日期: 2007 - 10 - 09

(上接第 71 页)

出水水质的影响,出水水质可稳定地达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 A 标准。

城市污水生物—生态组合处理工艺的年平均处理能耗为 $0.362 \text{ (kW} \cdot \text{h) / m}^3$,在达到相同处理效果的基础上,该组合工艺的处理能耗比 A^2/O 工艺和 Bardenpho 工艺分别降低了 37.69% 和 57.91%,节能效果显著。

生物—生态组合处理工艺节能的原理是建立在生物单元变工况运行与生态单元低能耗脱氮除磷共同作用基础上的。

参考文献:

- [1] 高旭,龙腾锐,郭劲松. 城市污水处理能耗能效研究进展 [J]. 重庆大学学报 (自然科学版), 2002, 25 (6): 143 - 148.
- [2] 刘礼祥,章北平,周红燕,等. 一体化反应器的低温脱

氮除磷中试 [J]. 中国给水排水, 2006, 22 (19): 21 - 24.

- [3] 章北平,章芳,任拥政,等. 递进布水缩变波形流湿地构建与降污动力学 [J]. 华中科技大学学报 (城市科学版), 2006, 23 (4): 23 - 26.
- [4] 陈秀荣,周琪,赵书成. 生物—生态优化组合工艺处理城市污水试验 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2006, 34 (8): 1061 - 1065.
- [5] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 (第 4 版) [M]. 北京:中国环境科学出版社, 2002.
- [6] 刘礼祥,章北平,陆谢娟,等. CBR 波形潜流人工湿地工艺处理城市污水研究 [J]. 中国给水排水, 2007, 23 (15): 34 - 38.
- [7] Owen W E. Energy in Wastewater Treatment [M]. Englewood Cliffs NJ: Prentice Hall Inc, 1982.

E - mail: probpzhang@163. com

收稿日期: 2007 - 11 - 19