

# 一体式膜生物反应器膜污染防治理论研究

艾翠玲

(福州大学土木工程学院, 福建 福州 350002)

**摘要** :从理论上分析了一体式膜生物反应器内曝气量与污水流量、反应器设计高度、主副腔过流面积的关系,膜外污染错流临界流速与抽吸压力及主腔宽度的关系,膜管内污染的临界速度与膜管径、膜壁吸力的关系,并得出采用化学方法消除膜污染的原理。

**关键词** :一体式膜生物反应器 ;水动力学 ;膜污染 ;临界流速 ;曝气量

**中图分类号** :X12      **文献标识码** :A      **文章编号** :1004-693X(2007)04-0069-04

## Prevention of membrane fouling in submerged membrane bioreactor

AI Cui-ling

(College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

**Abstract** :The relation of aeration rate with wastewater flow, designed bioreactor height, and flowing section area of main and sub chamber was analyzed theoretically, as well as the relation of the critical velocity of membrane fouling outside with the internal suction pressure and the width of main chamber. The relation of critical velocity of membrane pipe inner fouling with membrane pipe diameter and the attraction on membrane wall was also studied. The principle of chemical method for eliminating membrane fouling was obtained.

**Key words** :submerged membrane bioreactor ; hydrodynamics ; membrane fouling ; critical velocity ; aeration rate

一体式膜生物反应器是由膜分离部分和生物反应器组合而成的一种新型水处理工艺,因其有结构紧凑、容积负荷高、剩余污泥量少、出水水质好且稳定<sup>[1-2]</sup>等优点而日益受到重视。但是,由于膜在运行过程中易受水中污染物的影响,膜孔易堵塞,单位出水能耗增加,膜通量下降,严重时膜无法继续使用<sup>[2]</sup>,致使单位膜组件水处理量有限,阻碍了其在实际中的广泛应用。为减轻膜污染,延长膜运行周期,提高污水处理效率,保持反应器内各运行参数良好平衡与协调是十分关键和重要的。本文对反应器内多相流体力学膜污染防治理论进行研究,为反应器设计、运行、管理过程中解决膜污染问题提供理论基础。

### 1 一体式膜生物反应器结构

一体式膜生物反应器工艺流程如图 1。整个系统主要由生物反应器和膜组件两部分组成。生物反

应器被横隔板分成两个不同的功能腔:主腔和副腔,主腔和副腔通过横隔板上下液流通道相互连通。

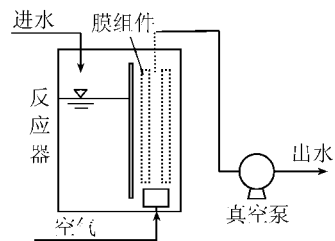


图 1 一体式膜生物反应器工艺

反应器概化成内循环式反应器(图 2),主腔设有曝气装置和膜组件,主要功能是曝气供氧、膜分离废水。副腔为空腔,主要功能是控制水力停留时间,混合调控污水浓度,提高反应器抗冲击负荷能力。反应器中,由曝气驱动液体循环流速是一个重要的设计参数,它控制着气液传质速率、污水混合性能、膜污染特性,同时膜污染的产生还与反应器主腔尺寸结构、膜

管径、膜内抽吸压力、膜内流速等密切相关,如何协调这些参数,对防止和减小膜污染起着重要作用。

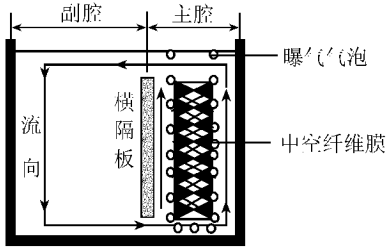
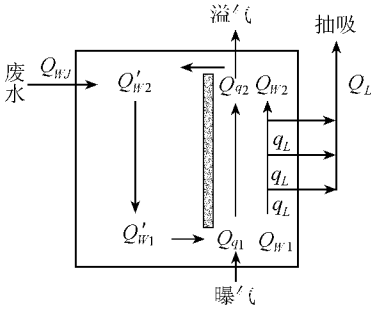


图2 内循环式反应器示意图

## 2 曝气量与错流流速、污水循环量理论关系

为研究反应器内曝气量、污水流速、膜内抽吸压力与膜污染发生的关系机理,绘制反应器内物料平衡示意图(图3)。为分析方便,根据污水处理需较长的停留时间的特点,可知腔体污水流量  $Q_z \gg Q_L = Q_{WJ}$  则:  $Q_z \approx Q_{W1} \approx Q_{W2}$ 。虽然反应器内存在曝气,水流属复杂的气液混合运动,但由于整个系统是一个循环平衡系统,因此仍可用水静力学对反应器内的水体进行分析。



$Q_{W2}$ —副腔顶污水流量;  $Q_{W1}$ —副腔底部污水流量,  $Q_{W1} = Q_{WJ} + Q_{W2}$ ;  $Q_{q1}$ —主腔初始曝气气量;  $Q_{q1}$ —主腔初始污水流量,  $Q_{W2} = Q_{W1} - Q_L$ ;  $Q_{q2}$ —主腔顶曝气气量;  $Q_{W2}$ —主腔顶污水流量;  $q_L$ —单位长度中空纤维膜抽吸净水流量;  $Q_L$ —中空纤维膜抽吸净水流量;  $Q_{WJ}$ —进入反应器的废水流量。

图3 反应器气、液运动物料平衡示意图

设主腔横截面积为  $\omega_1$ ; 主腔底部最大水深  $h_1$  处曝气量为  $Q_{q1}$ ,  $p_0$  为大气压强;  $\rho$  为污水密度;  $g$  为重力加速度, 则主腔水深  $z$  处的气流量为

$$Q_q(z) = \frac{Q_{q1}(p_0 + \rho gh_1)}{p_0 + \rho gz} \quad (1)$$

曝气气流在主腔内上升过程中,  $z$  逐渐变小, 液体压强减小、气体体积变大。根据连续性方程知: 主腔内液、气混合液的初始流速  $V_{10}$ 、沿程流速  $V_{1z}$ 、最大流速  $V_{1zmax}$ 、沿程平均流速  $\bar{V}_z$  变化分别为

$$V_{10} = \frac{Q_z + Q_q(h_1)}{\omega_1} = \frac{Q_z + Q_{q1}}{\omega_1} \quad (2)$$

$$V_{1z} = \frac{Q_z + Q_q(z)}{\omega_1} \quad (3)$$

$$V_{1zmax} = \frac{Q_z + Q_q(0)}{\omega_1} \quad (4)$$

$$\bar{V}_z = \frac{\int_0^{h_1} \frac{Q_z + Q_q(z)}{\omega_1} dz}{h_1} = \frac{Q_z h_1 + \frac{Q_{q1}(p_0 + \rho gh_1)}{\rho g} \ln\left(\frac{p_0 + \rho gh_1}{p_0}\right)}{\omega_1 h_1} \quad (5)$$

设主腔  $z$  处的含气率为  $\epsilon(z)$ , 则

$$\epsilon(z) = \frac{Q_{q1}(p_0 + \rho gh_1)}{Q_z(p_0 + \rho gz) + Q_{q1}(p_0 + \rho gh_1)} \quad (6)$$

设主腔  $z$  处气流浮力为  $f(z)$ , 主腔总浮力为  $F_z$ , 据浮力定理得:

$$f(z) = \rho g \omega_1 \epsilon(z)$$

$$F_z = \int_0^{h_1} f(z) dz =$$

$$\rho g \omega_1 \int_0^{h_1} \frac{Q_{q1}(p_0 + \rho gh_1)}{Q_z(p_0 + \rho gz) + Q_{q1}(p_0 + \rho gh_1)} dz = \omega_1 \frac{Q_{q1}(p_0 + \rho gh_1)}{Q_z} \ln\left(1 + \frac{Q_z \rho gh_1}{Q_z p_0 + Q_{q1}(p_0 + \rho gh_1)}\right) \quad (7)$$

由于浮力特殊性, 则由动量方程  $F_z = \rho Q_z$

( $V_{1zmax} - V_{10}$ ) 得:

$$\omega_1 \frac{Q_{q1}(p_0 + \rho gh_1)}{Q_z} \ln\left(1 + \frac{Q_z \rho gh_1}{Q_z p_0 + Q_{q1}(p_0 + \rho gh_1)}\right) = \rho Q_z \frac{Q_q(0) - Q_{q1}}{\omega_1} \quad (8)$$

由式(8)可见, 已知  $Q_{q1}$ 、 $h_1$ 、 $\omega_1$ 、 $\rho$ , 通过试算可求得  $Q_z$ 。知道  $Q_z$  后可进一步求得  $V_{1z}$ 、 $V_{1zmax}$ 、 $\bar{V}_z$ 。

设反应器未曝气前液面深度为  $h_0$ , 主腔水深为  $h_1$ , 副腔水深为  $h_2$  (如图4), 副腔横截面积为  $\omega_2$ , 现对  $h_1$  求解。

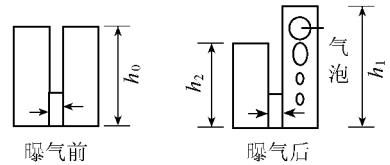


图4 曝气运行过程示意图

未曝气前反应器内水体体积

$$V_0 = (\omega_1 + \omega_2) h_0$$

由于主腔水体的曝气作用对水体存在向上的加速运动, 主、副腔横隔板下连接断面的动量分析如图5, 得:

$$\rho gh_2 = \rho gh_1 - \frac{F_z}{\omega_1}$$

$$\text{即} \quad h_2 = h_1 - \frac{F_z}{\rho g \omega_1} \quad (9)$$

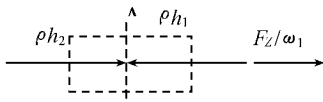


图5 主、副腔水面平衡动量分析

设主腔总气体体积为  $V_{气}$ , 由体积平衡得:

$$\omega_1 h_1 + \omega_2 h_2 = V_{气} + (\omega_1 + \omega_2) h_0 \quad (10)$$

主腔平均含气率:

$$\overline{\varepsilon_q(h_1)} = \frac{1}{h_1} \int_0^{h_1} \varepsilon(z) dz$$

得

$$V_{气} = \overline{\varepsilon_q(h_1)} h_1 \omega_1 \quad (11)$$

将式(9)代入式(10)得:

$$h_1(\omega_1 + \omega_2) = V_{气} + \frac{F_z}{\rho g} \frac{\omega_2}{\omega_1} + (\omega_1 + \omega_2) h_0 \quad (12)$$

通过多次迭代求得  $h_1$  后, 可得  $h_2$ 。

由于主腔运动速度向上, 主腔的最大水头高度即主腔的污水可达的最高点为  $h_{1max}$ :

$$h_{1max} = h_1 + \frac{V_{1zmax}^2}{2g} \quad (13)$$

$$\Delta h = h_{1max} - h_1 = \frac{V_{1zmax}^2}{2g} \quad (14)$$

主腔污水惯性上抛运动高度范围  $\Delta h$ , 恒受大气压作用, 此范围内气泡不再具有浮力和对污水产生加速, 但设计主腔高度尺寸时必须考虑。副腔运动速度向下, 速度增加了运动水头高度, 但对副腔水深  $h_2$  并不产生影响, 在用动量方程求解  $h_2$  时, 已经考虑了其中的影响, 如图6。

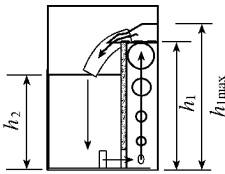


图6 反应器运行高度

### 3 消除膜面污染的临界理论流速

设主腔横截面的宽度为  $b$ , 并假设长度远大于  $b$ 。参照水力学流速分布<sup>[3]</sup>, 根据一体式膜生物反应器主腔内膜板间混合液流动边界条件, 可知膜板间沿宽度方向流速呈指数分布:

$$\frac{u_y}{u_{max}} = \left(\frac{2y}{b}\right)^m \quad (15)$$

式中:  $y$  为距膜面的距离;  $u_{max}$  为膜板间最大流速;  $u_y$  为距膜板壁  $y$  点最大流速;  $m$  为流速分布指数, 取  $m = 4 \sim 9$ 。

设主腔横截面的平均流速为  $V$ , 则

$$V = \frac{u_{max}}{b/2} \int_0^{b/2} \left(\frac{y}{b/2}\right)^m dy = \frac{u_{max}}{1+m} \Rightarrow u_{max} = (1+m)V \quad (16)$$

取  $y = \alpha d$  ( $d$  为污染颗粒粒径) 处的流速作为作用于颗粒上的流速平均值  $u_b$ :

$$u_b = u_{max} \left(\frac{\alpha d}{b/2}\right)^m = (1+m)V \alpha^m \left(\frac{d}{b/2}\right)^m \quad (17)$$

$u_b$  与主腔横截面平均流速  $V$  的关系:

$$V = \frac{u_b}{(1+m)(2\alpha)^m} \left(\frac{b}{d}\right)^m \quad (18)$$

### 3.1 膜管外不产生污染的临界流速

#### 3.1.1 正常运行阶段

设膜管内抽吸压强为  $p_z$ ; 水流对膜表面污染颗粒的冲击力为  $F_t$ ; 水流对膜表面污染颗粒产生的离膜力为  $F_f$ ; 中空纤维膜抽吸负压对膜表面污染颗粒产生的吸力为  $F_c$ ; 中空纤维膜膜表面污染颗粒产生的摩擦阻力为  $F_s$ ; 污染颗粒与膜管表面间的摩擦阻力系数为  $k$ ;  $u^*$  为水流对膜表面不产生污染、在膜表面污染物颗粒冲击点的临界流速;  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$  分别为污染物颗粒受力的常系数。污染颗粒受力分析如图7(a)<sup>[4]</sup>。

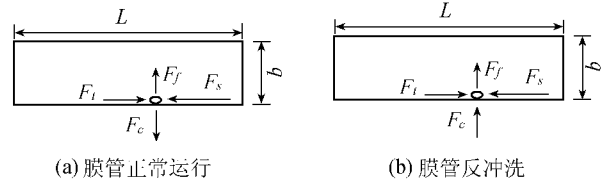


图7 膜管外污染颗粒受力分析图

污染颗粒受到的力分别为

$$F_t = \rho u^*{}^2 \alpha_1 d^2; \quad F_f = \rho u^*{}^2 \alpha_2 d^2;$$

$$F_c = p_z \alpha_3 d^2; \quad F_s = (F_c - F_f)k$$

当  $F_t > F_s$  时, 膜管表面污染物颗粒不会停留。

临界状态时

$$F_t = F_s = (F_c - F_f)k \Rightarrow u^*{}^2 =$$

$$\frac{p_z \alpha_3 d^2 k}{\rho \alpha_1 d^2 + \rho \alpha_2 d^2 k}$$

令

$$K' = \sqrt{\frac{\alpha_3 k}{\rho \alpha_1 + \rho \alpha_2 k}}$$

则

$$u^* = K' \sqrt{p_z} \quad (19)$$

膜表面污染颗粒处于临界流速时, 有  $u_b = u^*$ 。

将式(19)代入式(18), 令  $\eta = \frac{K'}{2^m (1+m) \alpha^m}$ , 得主腔横截面的平均临界流速  $V_c$ :

$$V_c = \eta \sqrt{p_z} \left(\frac{b}{d}\right)^m \quad (20)$$

当  $V > V_c$  时, 膜表面不会污染。

#### 3.1.2 膜管水力反冲洗运行阶段

膜管水力反冲洗阶段污染颗粒受力情况见图7

(b) 从图 7(b) 看出:  $F_c$  与  $F_f$  方向相同, 有  $F_l > -(F_f + F_c)k$ , 很容易清洗干净。

从上看出, 通过曝气控制主腔内的流速, 减少主腔的横断面宽度, 增加主腔高, 合理控制膜管内的膜压力, 可极大地减少膜外污染或消除膜污染。增加污染颗粒粒径, 减少凝胶体对膜管壁的吸引力, 是化学方法解决膜污染的途径。同样, 反冲洗也可大大减小污染物临界起动流速。

由于主腔曝气作用,  $V$  随气泡上升呈一定的函数变化, 如要求膜面不污染, 必须满足膜面不淤积污染条件:  $V > V_c$ 。而临界流速  $V_c$  是膜管内抽吸压力的函数, 也即在总抽吸管流量一定的情况下需变化抽吸管的界面尺寸以减小膜管内抽吸压力, 保证膜面不污染。或采用较大的曝气量, 产生较大的流速  $V$ , 同时为适应减少膜管内抽吸压力不均匀的影响, 可在主腔内挂膜, 改变主腔的流速  $V$ , 使膜管表面不产生污染。

### 3.2 膜管内不产生污染的临界流速

设膜管内横截面平均流速为  $V_i$ , 取  $y = \alpha d$  处的流速作为作用于颗粒上的流速平均值  $u_b$ , 则

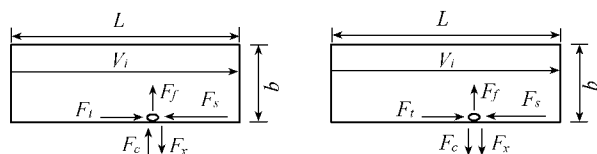
$$u_b = u_{\max} \left( \frac{\alpha d}{b/2} \right)^m = (1+m)V_i \alpha^m \left( \frac{d}{b/2} \right)^m \quad (21)$$

$u_b$  与  $V_i$  的关系为

$$V_i = \frac{u_b}{(1+m)(2\alpha)^m} \left( \frac{b}{d} \right)^m \quad (22)$$

#### 3.2.1 正常运行阶段

该阶段管内膜面正常运行存在凝胶层, 污染颗粒受力分析如图 8(a), 设凝胶层对固壁单位面积胶结吸引力为  $p_s$ , 对膜表面污染颗粒吸引力  $F_x = p_s \alpha_4 d^2$ 。



(a) 膜管正常运行

(b) 膜管反冲洗

图 8 管内膜面存在凝胶层时污染颗粒受力分析图  
膜管内不污染条件

$$F_l > F_s = (F_x - F_c - F_f)k \quad (23)$$

当污染颗粒在膜管内处于临界状态时,  $u^{**} = u_b$ 。

由  $F_l = F_s = (F_x - F_c - F_f)k$  得

$$u^{**2} = \frac{(\alpha_4 p_s - \alpha_3 p_z) d^2 k}{\rho \alpha_1 d^2 + \rho \alpha_2 d^2 k}$$

令

$$K'' = \sqrt{\frac{k}{\rho \alpha_1 + \rho \alpha_2 k}}$$

则  $u^{**} = K'' \sqrt{\alpha_4 p_s - \alpha_3 p_z}$  (24)

将式(24)代入式(22)得临界状态垂线平均流速  $V_{ic}$ :

$$V_{ic} = \frac{K''}{(1+m)(2\alpha)^m} \left( \frac{b}{d} \right)^m \sqrt{\alpha_4 p_s - \alpha_3 p_z} \quad (25)$$

由式(25)可见, 在正常运行阶段有凝胶层存在时, 膜管内抽吸压力  $p_z$  越大, 则临界起动流速越小。同样,  $V > V_{ic}$  时膜管内不污染, 抽吸流量越大, 膜管内断面平均流速越大, 污染可能性越小。

#### 3.2.2 反冲洗阶段

该阶段污染颗粒在膜管内停留的临界受力状态如图 8(b) 所示。

由  $F_l = F_s = (F_x + F_c - F_f)k$  得

$$u^{**2} = \frac{(\alpha_4 p_s + \alpha_3 p_z) d^2 k}{\rho \alpha_1 d^2 + \rho \alpha_2 d^2 k}$$

令

$$K''' = \sqrt{\frac{k}{\rho \alpha_1 + \rho \alpha_2 k}}$$

则  $u^{**} = K''' \sqrt{\alpha_4 p_s + \alpha_3 p_z}$  (26)

$$V_{ic} = \frac{K'''}{(1+m)(2\alpha)^m} \left( \frac{b}{d} \right)^m \sqrt{\alpha_4 p_s + \alpha_3 p_z} \quad (27)$$

反冲洗时, 虽然污染颗粒起动流速加大, 膜管内用的是出水, 因此对膜管内不会造成污染。

从上看出, 紊流时膜内管径愈小, 膜内污染物颗粒粒径愈大, 管内不污染的临界流速  $V_{ic}$  愈小。用化学方法消除膜污染, 膜管内为层流时需使污染颗粒粒径减小, 紊流时污染颗粒粒径增大, 才可使管内不污染的临界流速减小。管内  $V > V_{ic}$  才可能不污染, 增大管内运行流速, 管内污染会尽可能减小。同时, 应尽可能减小污染颗粒与管壁的黏结力。

## 4 结论

a. 曝气产生反应器内污水循环和增氧, 曝气量愈大, 水循环流量愈大, 并且随主腔水深增大, 水循环流量增大, 在主腔污水上升过程中流速随气泡的体积增大、浮力增大而增大, 副腔尽量减小流速可增加主腔的曝气浮力。

b. 在污染颗粒粒径一定的情况下, 膜面不淤临界流速减小的方法为减小膜管的抽吸压力, 减小主腔宽度, 合理控制膜管内的膜压力可极大减少膜外污染或消除膜污染。增加污染颗粒粒径, 减少胶体对膜管壁的吸引力, 是化学方法解决膜污染的途径。

c. 膜管内径愈小, 膜内污染颗粒粒径愈大, 管内不污染的临界流速  $V_c$  愈小。用化学方法消除膜污染, 层流时需使污染颗粒粒径减小, 紊流时需使污染颗粒粒径增大, 才可使管内不污染的临界流速减小。

d. 减小膜与污染颗粒间的黏结力, 使污水与膜材料具有同种电荷, 也可有效减少膜管壁内外面污染。

(下转第 76 页)

[ 6 ] LAURA A , NIFTRIK V. The anammoxosome : an intracytoplasmic compartment in anammox bacteria[ J ]. FEMS Microbiology Letters 2004 233 7-13.

[ 7 ] MIKE S M , STROUS M. The anaerobic oxidation of ammonium [ J ]. FEMS Microbiology Reviews ,1999 22 421-437.

[ 8 ] 曾国驱 ,许玫英 ,梁燕珍 ,等 . 亚硝化细菌的分离和特性的研究 [ J ]. 生物技术 2005 ,15( 1 ) 27-28.

[ 9 ] SCHMIDT I , SLIEKERS O. Aerobic and anaerobic ammonia oxidizing bacteria-competitors or natural partners[ J ]. FEMS Microbiology Ecology 2002 39 :175-181.

[ 10 ] SCHMIDT I , SLIEKERS O. New concepts of microbial treatment processes for the nitrogen removal in wastewater [ J ]. FEMS Microbiology Reviews 2003 27 481-492.

[ 11 ] RICK W ,STUART M. Microbial nitrogen cycles : physiology , genomics and applications [ J ]. Current Opinion in Microbiology 2001 4 307-312.

[ 12 ] SLIEKERS A , DERWORTA N. Completely autotrophic nitrogen removal over nitrite in one single reactor[ J ]. Water Research 2002 36 2475-2482.

[ 13 ] STROUS M , GERVEN E V. Ammonium removal from concentrated waste streams with the anaerobic ammonium

oxidation ( anammox ) process in different reactor configurations[ J ]. Water Research ,1997 31( 8 ) :1995-1962.

[ 14 ] DALSGAARD T , THAMDRUP B ,DONALD E C. Anaerobic ammonium oxidation ( anammox ) in the marine environment [ J ]. Research in Microbiology 2005 ,156 457-464.

[ 15 ] THIRD K A , SLIEKERS A. The CANON system ( completely autotrophic nitrogen-removal over nitrite ) under ammonium limitation :interaction and competition between three groups of bacteria[ J ]. Systematic and Applied Microbiology ,2001 , 24 588-596.

[ 16 ] SLIEKERS A ,THIRD K A. CANON and anammox in a gas-lift reactor[ J ]. FEMS Microbiology Letters 2003 218 339-344.

[ 17 ] NIELSEN M , BOLLMANN A. Kinetics , diffusional limitation and microscale distribution of chemistry and organisms in a CANON reactor[ J ]. FEMS Microbiology Ecology ,2005 ,51 : 247-256.

[ 18 ] 郝晓地 ,曹秀芹 ,曹亚莉 ,等 . 厌氧氨氧化细菌在生物膜系统中起主要脱氮作用的模拟预测 [ J ]. 环境科学学报 2004 24( 6 ) :1007-1013.

[ 19 ] 吴斌 ,李旭东 . 新型脱氮工艺及其可控因素的分析 [ J ]. 世界科技研究与发展 2005 27( 3 ) :67-71.

( 收稿日期 2005-11-26 编辑 徐 娟 )

( 上接第 72 页 )

e. 由于曝气是主腔内的流速随气泡上升体积增大而加快 ,同时膜管内抽吸压力距离抽吸泵口越远、压力越小 ,为了协调一致 ,保证膜管壁不受污染 ,膜管抽吸泵与曝气泵的相互布置必须加以注意才能达到整体污染最轻的效果。

f. 过量曝气调节流速可消除污染 ,但同时必须系统考虑曝气的另一重要目的是供氧。最佳供氧效率、最佳膜管结构、最佳膜分离抽吸压力等工况需共同协调一致 ,才能确保能耗最低 ,膜组件使用寿命达到最长 ,效果最佳。

### 参考文献 :

[ 1 ] 桂平 ,黄霞 ,汪诚文 ,等 . 膜-复合式生物反应器组合系统操作条件及稳定运行特性 [ J ]. 环境科学 ,1998 ,19( 2 ) 35-38.

[ 2 ] 桂平 ,黄霞 ,陈颖 ,等 . 膜-生物反应器运行条件对膜过滤特性的影响 [ J ]. 环境科学 ,1999 20( 3 ) 38-41.

[ 3 ] 吴持恭 . 水力学 ( 下册 ) [ M ]. 北京 :高等教育出版社 ,1982 :124-129.

[ 4 ] 武汉水利电力学院 . 河流泥沙工程学 [ M ]. 北京 :水力出版社 ,1982 :153-161.

( 收稿日期 2005-12-26 编辑 徐 娟 )

( 上接第 64 页 )

### 参考文献 :

[ 1 ] 孙顺才 ,黄漪平 . 太湖 [ M ]. 北京 :海洋出版社 ,1993 :80-84.

[ 2 ] 秦伯强 ,胡维平 ,陈伟明 ,等 . 太湖水环境演化过程与机理 [ M ]. 北京 :科学出版社 2004 3-7 ,162-169.

[ 3 ] 陈荷生 ,张永健 ,宋祥甫 ,等 . 太湖底泥生态疏浚技术的

初步研究 [ J ]. 水利水电技术 2004( 11 ) :11-13.

[ 4 ] 敖静 . 污染底泥释放控制技术的进展 [ J ]. 环境保护科学 2004( 12 ) :29-32.

[ 5 ] 籍国东 ,倪晋 ,孙铁珩 . 持久性有毒物污染底泥修复技术进展 [ J ]. 生态学杂志 2004( 4 ) :118-121.

( 收稿日期 2006-04-20 编辑 高渭文 )