

曝气密度对曝气系统充氧性能的影响研究*

庄健 王洪臣[#] 刘国华 齐鲁 魏延苓 张源凯 李小冬 龙海涛

(中国人民大学环境学院,北京 100872)

摘要 曝气密度(即曝气面积占曝气系统服务总面积的比率)是曝气系统重要的参数之一。以标准氧总转移系数作为评价指标,在小试装置中对不同曝气密度的曝气系统充氧性能进行评价。结果表明:(1)曝气系统标准氧总转移系数随曝气密度增大而显著增大,但同时需要考虑到曝气系统的微孔曝气器布置方式;(2)相同气量下,曝气系统的气泡直径与气泡运动速度随曝气密度增大而减小,气泡停留时间和气含率随曝气密度增大而增大。

关键词 曝气密度 充氧性能 气泡直径 气泡运动速度 标准氧总转移系数

Effects of diffuser density on oxygenation performance in aeration system ZHUANG Jian, WANG Hongchen, LIU Guohua, QI Lu, WEI Yanling, ZHANG Yuankai, LI Xiaodong, LONG Haitao. (School of Environment, Renmin University of China, Beijing 100872)

Abstract: Diffuser density (the ratio that the diffuser area accounts for the total area of the aeration system services) is one of the important parameters for fine bubble diffusers. The paper assessed the impacts through a pilot test of aeration system of different diffuser density using standard oxygen transfer coefficient ($K_L a_s$) as evaluation criterion. The results showed that: (1) $K_L a_s$ increased significantly with the increasing of diffuser density, however, the layout of diffusers should be taken into consideration; (2) Under the same condition of air flow rate, when diffuser density increased, the bubble became smaller and gas velocity decreased, while the retention time and gas hold-up were increased.

Keywords: diffuser density; oxygenation performance; bubble size; gas velocity; standard oxygen transfer coefficient

我国的污水处理行业已完成基础建设,进入提标改造阶段。污水处理厂的40%~60%成本发生在电耗,而曝气系统电耗占污水处理厂总电耗的50%~70%,节能潜力巨大^[1-5]。因此,改善曝气系统的充氧性能对污水处理节能降耗有重大的意义。

在污水处理曝气系统的设计运行中,影响曝气系统充氧性能的因素有很多^[6-10]。除了微孔曝气器本身,曝气密度(即曝气面积占曝气系统服务总面积的比率($0 < \text{曝气密度} \leq 1$))反映了曝气池中微孔曝气器的密集程度,是直接影响曝气系统充氧性能的重要影响因素之一。国内外大多污水处理厂一般采用 $0.3 \sim 0.5 \text{ m}^2/\text{个}$ 的微孔曝气器方式布置,只有部分国外污水处理厂,例如日本的一些污水处理厂采用满布曝气的大密度曝气方式布置。但国内外关于曝气密度对充氧性能影响的研究较少^[11],如若研究清楚这一点,可对污水处理厂曝气系统的设计有巨大借鉴意义。

本研究使用925型橡胶膜微孔曝气器,测定不

同数量的该微孔曝气器组成的曝气系统在小试试验条件下的充氧性能,得出曝气系统充氧性能随曝气密度的变化规律,为指导污水处理曝气系统的设计与运行提供参考。

1 试验装置与方法

1.1 试验装置

装置如图1所示,主体为一个 $0.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m} \times 0.7 \text{ m}$ 的矩形曝气池。925型橡胶膜微孔曝气器安装在曝气池底部的微孔曝气器底座上,微孔曝气器底座气口与空压机气管相连。运行水深为 0.3 m ,在曝气池池中心水面下约 $1/2$ 位置处安装一个溶解氧测定仪探头(避开气泡运动轨迹),并连接在线数据采集系统动态采集存储溶解氧数据。

1.2 设备与仪器

橡胶膜微孔曝气器:膜式,直径 92.5 mm (如图2(a)所示);空压机:全无油润滑空气压缩机,WWA- $0.4/7$;气体转子流量计:量程 $0 \sim 5 \text{ m}^3/\text{h}$,精度 $\pm 2\%$;

第一作者:庄健,男,1989年生,硕士研究生,主要从事污水处理研究。[#] 通讯作者。

* 国家水体污染控制与治理重大科技专项(No. 2011ZX07316-001);国家高技术研究发展计划("863计划")项目(No. 2012AA063404)。

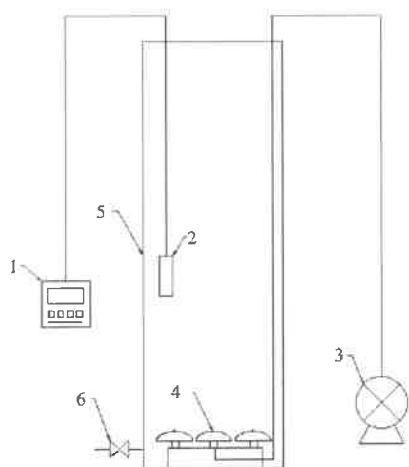
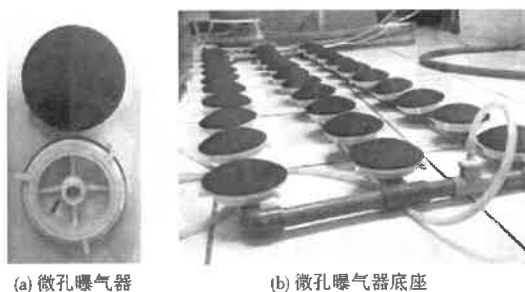


图1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of test device

1—溶解氧测定仪及记录仪;2—溶解氧测定仪探头;3—鼓风机;
4—微孔曝气器;5—曝气池;6—进水及放空阀

压力表:精度 $\pm 2\%$;气温、水温表:精度 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$;在线溶解氧测定仪;DO4200 微电脑溶解氧控制器,精度 $\pm 0.5\%$;无纸记录仪;XSR10R 无纸记录仪;微孔曝气器底座:PVC 塑料管、塑料接头连接而成(如图2(b)所示);工业相机:德国 SVS-Vistek 公司,SVS340 工业相机。



(a) 微孔曝气器

(b) 微孔曝气器底座

图2 微孔曝气器及底座

Fig. 2 Fine bubble diffusers and pedestal

微孔曝气器底座分为3排,每排最多可布置10个微孔曝气器,不同曝气密度以布置不同数量的微孔曝气器的方式实现,本次试验包括1、2、3排,每排3、5、8、10个微孔曝气器,共计12种曝气密度梯度,曝气密度为 $0.027\sim 0.269$ 。气量为 $2, 3\text{ m}^3/\text{h}$ 。

1.3 试验材料

脱氧剂: Na_2SO_3 ,工业纯。

催化剂: $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$,工业纯。

试验用水:自来水,总溶解性固体(TDS)初始质量浓度约为 300 mg/L 。

1.4 清水充氧性能测定方法

试验原理是由 WHITMAN^[12]提出的双膜理论。

试验按照《曝气器清水充氧性能测定》(CJ/T 3015.2—93)进行,同时采用美国最新的清水氧传质测试标准^[13]提供的修正方法(见式(1))对 TDS 进

行修正。以标准氧总转移系数作为充氧性能的评价指标。

$$K_{La_s} = K_{La} \cdot \text{EXP}(0.000\ 096\ 5(1\ 000 - c_{\text{TDS}}))$$

(1)

式中: K_{La_s} 为标准氧总转移系数, min^{-1} ; K_{La} 为氧总转移系数, min^{-1} ; c_{TDS} 为 TDS 质量浓度, mg/L 。

1.5 气泡直径及气泡运动速度测定方法

使用工业相机对固定位置的气泡进行拍摄,一次拍摄100帧,相邻两帧间时间间隔为 0.002 s 。通过对照片中气泡所占的像素点数进行统计,得到不同曝气密度下的气泡直径;通过对相邻两帧气泡运动距离所占的像素点数进行统计,得到不同曝气密

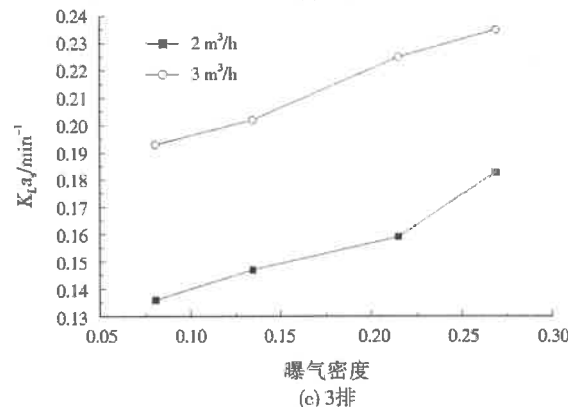
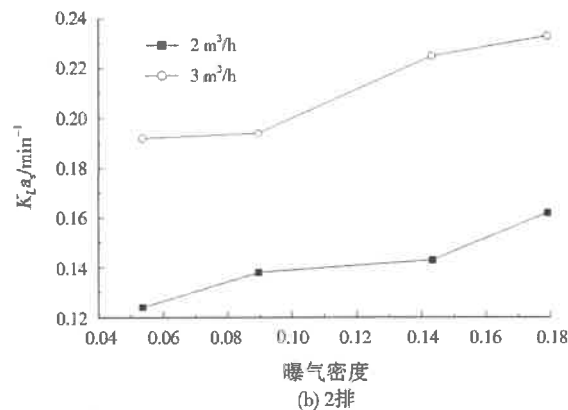
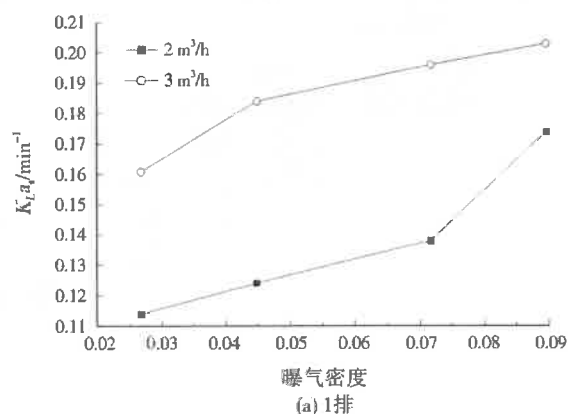


图3 固定微孔曝气器排数的不同曝气密度下的充氧性能

Fig. 3 Oxygenation performance of different diffuser density given fixed number of row

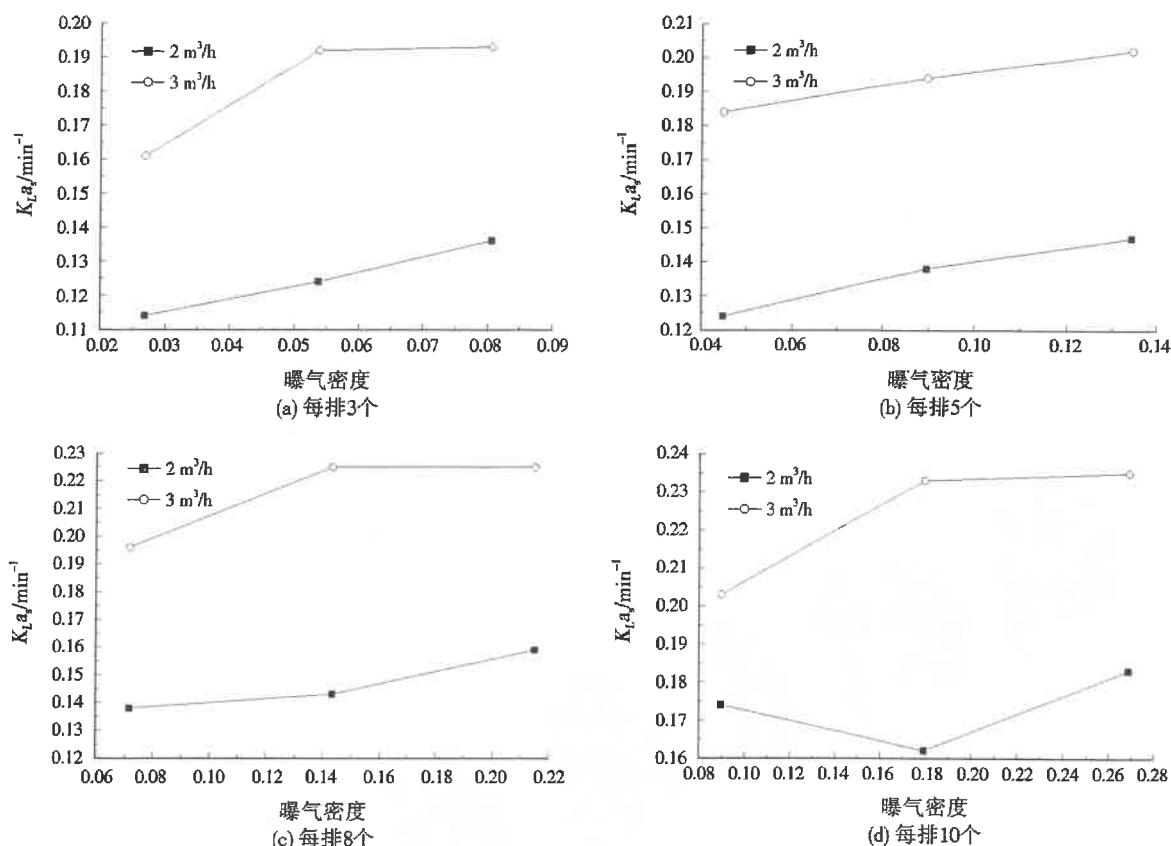


图4 固定每排微孔曝气器个数的不同曝气密度下的充氧性能

Fig. 4 Oxygenation performance of different diffuser density given fixed number of diffusers in each row

度下的气泡运动速度。

2 结果与讨论

2.1 不同曝气密度下的充氧性能

2.1.1 固定微孔曝气器排数

分别固定曝气系统为1、2、3排,改变每排微孔曝气器个数,不同曝气密度的充氧性能如图3所示。

由图3可知,固定微孔曝气器排数,以增加每排微孔曝气器个数的方式增大曝气密度,在气量为2、 $3 \text{ m}^3/\text{h}$ 下,不管有几排微孔曝气器,曝气密度的增大都使得标准氧总转移系数显著增大。

2.1.2 固定每排微孔曝气器个数

分别固定曝气系统每排微孔曝气器为3、5、8、10个,改变微孔曝气器排数,不同曝气密度的充氧性能如图4所示。

由图4可知,除了图4(d)中 $2 \text{ m}^3/\text{h}$ 气量下可能存在误差,固定每排微孔曝气器个数,以增加微孔曝气器排数的方式增大曝气密度,在气量为2、 $3 \text{ m}^3/\text{h}$ 下,不管每排有几个微孔曝气器,曝气密度的增大都使得标准氧总转移系数显著增大。

2.1.3 不考虑微孔曝气器布置方式

不考虑微孔曝气器布置方式的不同曝气密度下

的充氧性能如图5所示,其中1排、每排10个微孔曝气器与2排、每排5个微孔曝气器的曝气密度相同,均为0.090,图5中的值为两种布置方式标准氧总转移系数的平均值。

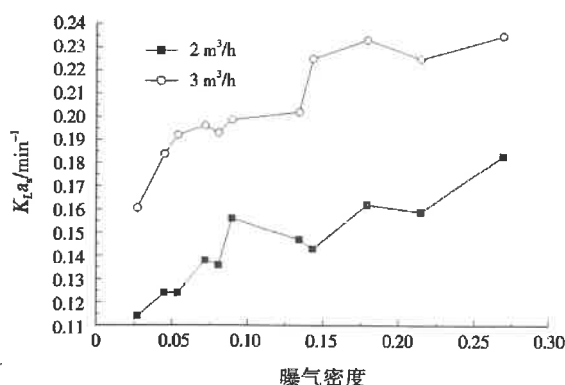


图5 不考虑微孔曝气器布置方式的不同曝气密度下的充氧性能

Fig. 5 Oxygenation performance of different diffuser density without considering diffuser layout

由图5可知,无论气量为 $2 \text{ m}^3/\text{h}$ 还是 $3 \text{ m}^3/\text{h}$,随着曝气密度的不断增大,曝气系统的标准氧总转移系数变化整体均呈现上升的趋势。曝气密度从0.027上升至0.269,标准氧总转移系数分别从 0.114 min^{-1} 上升至 0.183 min^{-1} ($2 \text{ m}^3/\text{h}$ 气量下)、

0.161 min^{-1} 上升至 0.235 min^{-1} ($3 \text{ m}^3/\text{h}$ 气量下), 分别上升 60.5% 与 46.0%, 上升非常显著。同时, 标准氧总转移系数变化存在波动, 如 $2 \text{ m}^3/\text{h}$ 和 $3 \text{ m}^3/\text{h}$ 气量下, 曝气密度为 0.215 的标准氧总转移系数均比曝气密度为 0.179 的小。

综合而言, 在考虑微孔曝气器布置方式的情况下, 无论是固定微孔曝气器排数还是每排微孔曝气器的个数, 曝气系统充氧性能均随曝气密度增大而增大。而不考虑微孔曝气器布置方式的情况下, 曝气系统充氧性能随曝气密度增大呈现增大的趋势, 但变化过程有波动, 这同时表明微孔曝气器布置方式(如微孔曝气器布置均匀程度等)对曝气系统充氧性能有一定的影响。

2.2 影响机制

2.2.1 气泡直径

在 $2, 3 \text{ m}^3/\text{h}$ 气量下, 气泡直径随曝气密度的变化如图 6 所示。由图 6 可知, 在同一气量下, 气泡直径随着曝气密度增大而变小。

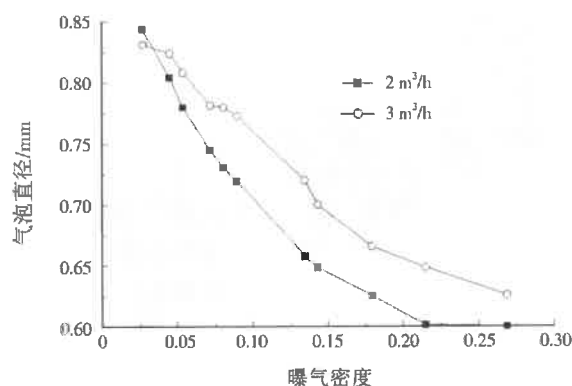


图 6 气泡直径随曝气密度的变化

Fig. 6 Bubble size changes with diffuser density

2.2.2 气泡运动速度

在 $2, 3 \text{ m}^3/\text{h}$ 气量下, 气泡运动速度随曝气密度的变化如图 7 所示。由图 7 可知, 在同一气量下, 气泡运动速度随着曝气密度的增大而变小。

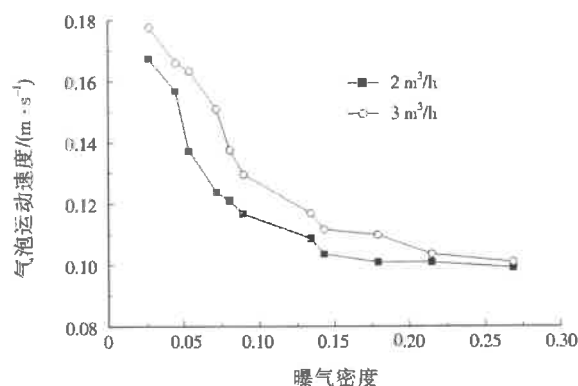


图 7 气泡运动速度随曝气密度的变化

Fig. 7 Gas velocity changes with diffuser density

2.2.3 气泡停留时间与气含率

当水深(H, m)为 0.3 m 时, 根据式(2)可以得到气泡停留时间。可根据气泡停留时间计算得到同一时刻内水中含气的体积, 再与水的体积相比则得到气含率。不同曝气密度下的气泡停留时间与气含率如图 8、图 9 所示。由图 8 与图 9 可知, 同一气量下, 气泡停留时间与气含率均随曝气密度的增大而增大。

$$t = H/v \quad (2)$$

式中: t 为气泡停留时间, s ; v 为气泡运动速度, m/s 。

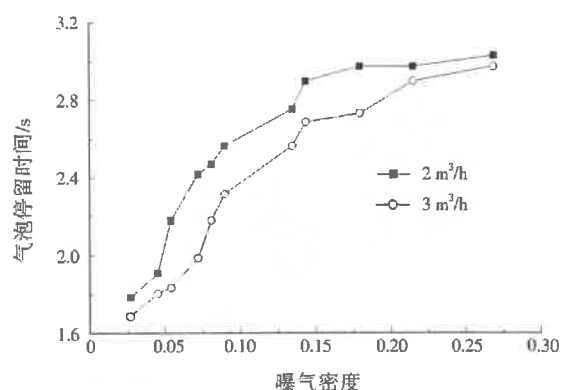


图 8 气泡停留时间随曝气密度的变化

Fig. 8 Bubble retention time changes with diffuser density

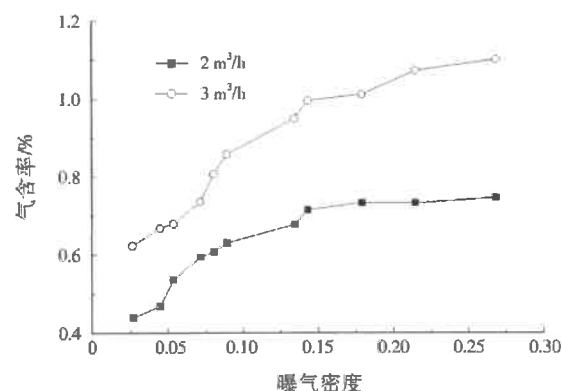


图 9 气含率随曝气密度的变化

Fig. 9 Gas hold-up changes with diffuser density

由于本试验在同一个小型装置内完成, 因此曝气密度的增大意味着曝气面积的增大。在某一特定气量下, 曝气面积越大, 出气速度越小(出气速度 = 气体流量/曝气面积), 进而造成气泡直径的减小。另一方面, 本次试验采用的是橡胶膜微孔曝气器, 曝气面积越大意味着单位曝气面积的曝气量越小, 这使得橡胶膜一定程度上未能完全撑开, 也造成气泡直径的减小。

小气泡具有较大的比表面积, 这就意味着气泡减小, 气液接触面积更大。标准氧总转移系数与气液接触面积成正比, 因此气泡越小, 标准氧总转移系数越大, 充氧性能越好^[14-16]。另一方面, 由于曝气面

积增大导致的出气速度减小,增大了气泡的停留时间和气含率,有助于氧传质^[17-19]。

因此,对于污水处理厂,应尽可能增加微孔曝气器的数量,以增大曝气密度;但同时,需要保证微孔曝气器的质量,使得曝气均匀,防止维护周期的缩短。

3 结论

(1) 曝气系统标准氧总转移系数随曝气密度增大而显著增大,但同时需要考虑到曝气系统的微孔曝气器布置方式。

(2) 相同气量下,曝气系统的气泡直径与气泡运动速度随曝气密度增大而减小,气泡停留时间和气含率随曝气密度增大而增大。

参考文献:

- [1] 梁远,王佳伟,李洁,等.微孔曝气器充氧性能变化对污水处理厂能耗的影响[J].给水排水,2011,37(1):42-45.
- [2] 张自杰.环境工程手册(水污染防治卷)[M].北京:高等教育出版社,1996.
- [3] 顾国维.水污染治理技术研究[M].上海:同济大学出版社,1997.
- [4] ROSSO D, STENSTROM M K. Surfactant effects on alpha-factors in aeration systems[J]. Water Research, 2006, 40(7): 1397-1404.
- [5] 谷成国,宋剑锋.城市污水处理厂鼓风曝气阶段的节能降耗研究[J].环境保护科学,2008,34(5):26-28.
- [6] 范海涛.污泥浓度对微孔曝气氧传质过程的影响[J].环境工程学报,2012,6(12):4305-4309.
- [7] 罗涛,王洪臣,齐鲁,等.总溶解性固体及表面活性剂对微孔曝气氧传质过程影响的中试研究[J].环境科学学报,2012,32(9):2066-2070.
- [8] LEU H G, LIN S H, SHYU C C, et al. Effects of surfactants and suspended solids on oxygen transfer under various operating conditions[J]. Environ. Technol., 1998, 19(3): 299-306.
- [9] 汤利华,孟广耀.曝气器的最优孔径分析[J].中国科学技术大学学报,2006,36(7):775-780.
- [10] 孙从军,陈季华.水温对氧转移速率的影响研究[J].环境科学研究,1998,11(4):13-15.
- [11] 张斌,郝玉萍,张东生,等.几种型式微孔曝气器清水充氧性能对比实验研究[J].工业安全与环保,2013,39(3):14-15.
- [12] WHITMAN W G. The two-film theory of gas absorption[J]. Chem. Met. Eng., 1923, 29(4): 1215-1220.
- [13] ASCE/EWRI 2-06, Measurement of oxygen transfer in clean water[S].
- [14] BURRIS V L, LITTLE J C. Bubble dynamics and oxygen transfer in a hypolimnetic aerator[J]. Water Science and Technology, 1998, 37(2): 293-300.
- [15] 张炎,黄为民.气泡大小对反应器内氧传递系数的影响[J].应用化工,2005,34(12):734-736,740.
- [16] 郭瑾琰,程文,周孝德,等.小气泡扩散曝气氧传质速率研究[J].西安理工大学学报,1999,15(4):86-90.
- [17] 陈旭露,王洪臣,齐鲁,等.阴离子表面活性剂对微孔曝气氧传质过程影响的研究[J].环境科学学报,2013,33(2):395-400.
- [18] 林松.鼓泡塔中气泡尺寸分布和局部气含率研究[J].化学工程,2008,36(2):21-24.
- [19] MOUNIR B, GILLES H, DOMINIQUE B, et al. A comparative study of gas hold-up, bubble size, interfacial area and mass transfer coefficients in stirred gas-liquid reactors and bubble columns[J]. Chemical Engineering and Processing, 2001, 40(2): 97-111.

编辑:黄苇 (修改稿收到日期:2013-10-09)

(上接第49页)

容,特别是冬季低温条件下的生物脱氮、除磷效果进行深入研究。

(2) 反硝化所需的碳源有多种,主要包括:甲醇、乙醇、葡萄糖、淀粉、蛋白质以及进水、处理或未处理过的剩余污泥等,投加时应根据实际情况选用。

(3) 供氧速度不足时,COD能够降解,硝化反应不能同时进行。只有通过延长曝气时间,才能完成硝化反应。

参考文献:

- [1] 杨拓.城市污水除磷试验研究[D].太原:太原理工大学,2013:50-51.
- [2] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会.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.
- [3] 蒋惠敏,冯生华.关于德国硝化反应基础理论的介绍[J].给水排水,2008,34(S1):103-106.
- [4] NAGATANI H, SHIMIZU M, VALENTINE R C. The mechanism of ammonia assimilation in nitrogen fixing bacteria[J]. Archiv für Mikrobiologie, 1971, 79(2): 164-175.
- [5] FAY P. Heterotrophy and nitrogen fixation in *Chlorogloea fritschii*[J]. Microbiology, 1965, 39(1): 11-20.
- [6] 曹令通.有机物浓度对硝化作用影响的试验研究[D].太原:太原理工大学,2009:66-67.
- [7] ZHU Songming, CHEN Shulin. Effects of organic carbon on nitrification rate in fixed film biofilters[J]. Aquacultural Engineering, 2001, 25(1): 1-11.
- [8] KIM Y M, CHO H U, LEE D S, et al. Influence of operational parameters on nitrogen removal efficiency and microbial communities in a full-scale activated sludge process[J]. Water Res., 2011, 45(17): 5785-5795.
- [9] EVANS E A, TIMOTHY G, ELLIS M, et al. Trickling filter nitrification performance characteristics and potential of a full-scale municipal wastewater treatment facility[J]. Journal of Environmental Engineering, 2004, 130(11): 1280-1288.
- [10] PAGGA U, BACHNER J, STROTMANN U. Inhibition of nitrification in laboratory tests and model wastewater treatment plants[J]. Chemosphere, 2006, 65(1): 1-8.
- [11] 陈清后.影响生物脱氮除磷的因素[J].污染防治技术,2007,20(1):41-42.
- [12] 张亮,张树军,彭永臻.污水处理中游离氨对硝化作用抑制影响研究[J].哈尔滨工业大学学报,2012,44(2):75-79.
- [13] 邓荣森,李德春,王涛,等.康定高寒地区采用氧化沟工艺污水处理厂的启动调试[J].给水排水,2009,35(7):42-45.
- [14] 邓荣森,郎建,王涛,等.城市污水生物除磷脱氮机理研究探讨[J].重庆建筑大学学报,2002,24(3):106-111.
- [15] 金春姬,余宗莲,高京淑,等.间歇曝气周期对低C/N比污水生物脱氮的影响[J].环境污染与防治,2003,25(5):257-261.

编辑:黄苇 (修改稿收到日期:2013-12-30)

