

•水利与土木工程•

DOI:10.15961/j.jsuese.201700129

基于气泡理论分析表面活性剂对微孔曝气增氧性能的影响

程香菊^{1,2}, 谢宇宁¹, 朱丹彤¹, 李然², 谢骏³

(1.华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510641; 2.四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065;
3.中国水产科学研究院珠江水产研究所, 广东 广州 510380)

摘要:在污水处理厂、湖泊、水库、河口和养殖池塘等需要曝气增氧的水体中,通过增氧机来维持水体溶解氧的动态平衡是非常重要的。而生活污水、城市废水等水体中常常会存在有表面活性剂,当这些废水进入以上需要曝气增氧的水体时,势必影响微孔曝气系统的增氧性能和传质效果。因此,为了探究表面活性剂对微孔曝气系统增氧性能的影响,在长2 m、宽0.8 m、高0.8 m的试验水池中,以固定于水池中央的微孔曝气盘为增氧机,根据美国土木工程协会(ASCE)标准增氧试验方法,以阴离子表面活性剂,即十二烷基苯磺酸钠为影响因子,在5种曝气流量和阴离子表面活性剂浓度下进行了一系列的水体底部微孔曝气增氧试验。基于氧体积传质理论和气泡理论,计算分析了水体氧体积传质系数、气泡的Sauter平均直径和波形因子等参数,结果表明:在一定的曝气流量下,1 mg/L的阴离子表面活性剂提高了水体的氧体积传质系数,促进了氧传质;在阴离子表面活性剂浓度为1~5 mg/L时,随着浓度的增加,氧体积传质系数降低;而且阴离子表面活性剂使气泡的Sauter平均直径降低,降低率达到22.76%;在水体无表面活性剂的试验中,气泡的波形因子变化幅度较大,气泡的形状趋于扁平,而表面活性剂的存在阻碍了气泡发生变形,使气泡的波形因子变化幅度降低,气泡保持在近乎球体状态。

关键词:微孔曝气系统; 阴离子表面活性剂; 氧体积传质系数; Sauter平均直径; 波形因子

中图分类号:X70

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2017)05-0028-07

Effect of Surfactants on the Microporous Aeration Oxygenation Performance Based on Air Bubble Theory

CHENG Xiangju^{1,2}, XIE Yuning¹, ZHU Dantong¹, LI Ran², XIE Jun³

(1.School of Civil Eng. and Transportation, South China Univ. of Technol., Guangzhou 510641, China;

2.State Key Lab. of Hydraulics and Mountain River Eng., Chengdu 610065, China;

3.Pearl River Fisheries Research Inst., Chinese Academy of Fishery Sci., Guangzhou 510380, China)

Abstract: In the sewage treatment plants, lakes, reservoirs, estuaries and aquaculture ponds where the dissolved oxygen level needs to be elevated by artificial aeration, it is very important to maintain the dynamic equilibrium of dissolved oxygen through the aerator. There are always surfactants in the domestic sewage and urban wastewater. When these waste waters flow into the above aerated water body, they would affect the oxygenation performance and mass transfer effect of aeration system. In order to investigate the effect of surfactants on the oxygenation performance of microporous aeration system, a series of microporous aeration tests were carried out in a glass tank of 2.0 m long, 0.8 m wide and 0.8 m high, in five different air flow rates and anionic surfactant concentration, according to the Standard Test Method for Oxygen from American Society of Civil Engineers (ASCE). The microporous aeration plate fixed in the center of the tank bottom was taken as aerator and the anionic surfactant, i.e., sodium dodecyl benzene sulfonate (SDBS), was used introduced. Based on the theory of air bubble mass transfer, the oxygen mass transfer coefficient, Sauter mean diameter and form factor were calculated and analyzed. The results showed that, at 1.0 mg/L SDBS concentration, the oxygen volumetric mass transfer coefficient was increased and the oxygen mass transfer effect was improved in different air flow rates. But at 1.0~5.0 mg/L SDBS concentration, with the increase of the concentration, the oxygen volumetric mass transfer coefficient decreased. The Sauter mean diameter of the bubbles in water containing surfactant was decreased by 22.76% compared to pure water. The variation

收稿日期:2017-02-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51579106);水力学与山区河流开发保护国家重点实验室开放合作基金资助项目(SKHL1421);现代农业产业技术体系建设专项资金资助项目(CARS-46-16)

作者简介:程香菊(1974—),女,教授,博士。研究方向:水力学及环境动力学。E-mail: chengxiangju@scut.edu.cn

of the form factor was small, and thus the air bubbles were kept in the almost spherical shape. While, in the tests without surfactants, the form factor of the bubbles had a larger variation and the shape of the air bubbles tended to be flat.

Key words: microporous aeration system; anionic surfactant; oxygen mass transfer coefficient; Sauter mean diameter; form factor

表面活性剂作为一种有机化合物,具有增溶、起泡、洗涤、防腐和杀菌等作用^[1-2],可分为非离子型、阴离子型、阳离子型和两性离子型等种类。其中阴离子表面活性剂(如十二烷基苯磺酸钠, sodium dodecyl benzene sulfonate, 简称SDBS),占市场使用份额的70%^[3],特别是在工业生产和生活用品中有着广泛的应用。因此,生活污水、工业废水等常常会含有较高浓度的SDBS,这些废水一般流入污水处理厂、湖泊、水库、河口或养殖池塘等水体中。目前对于SDBS废水的处理方法主要有混凝沉淀、吸附分离、气浮等物理化学法和好氧、厌氧等生物处理法,最常用的是通过曝气技术进行的好氧生物法^[4]。所以在污水处理厂、湖泊、水库、河口或养殖池塘等水体底部进行微孔曝气增氧时,表面活性剂很可能会改变水液相的理化性质和气泡的动力学行为,从而影响曝气气液传质效果^[5],例如Rosso等^[6]在研究中发现表面活性剂对氧传质有显著影响;Martin^[7]和Liu^[8]等研究了不同类型、不同含量的离子型和非离子型表面活性剂对增氧性能的影响;魏延苓等^[9]总结出表面活性剂的存在降低了氧体积传质系数;安东子等^[3]却得出阴离子表面活性剂质量浓度大于1 mg/L时增大了曝气难度,降低了传质效率;尹训飞等^[10]发现表面活性剂条件下的氧传质效率随着表面活性剂浓度的增大而降低;罗涛^[11]和陈旭露^[12]等研究了表面活性剂对微孔曝气氧传质的影响,发现在一定的表面活性剂浓度范围内,总的氧体积传质系数先减小后增大;Krzan等^[13]研究表明表面活性剂可以降低气泡的速度,增加其停留时间,对氧传质有促进作用;刘春等^[14]在研究中发现表面活性剂会提高气泡表面黏度和弹性,促进氧传质过程。从目前国内外的调研可以看出,针对于水体底部微孔曝气增氧系统的性能研究中,存在如下不足:1)大多在室内模型试验中,水体为清水,当把试验结果外延至含有表面活性剂的天然水体,势必存在误差;2)较少有从表面活性剂对气泡传质的影响机制方面进行分析。基于此,本文集中关注水体是否含有表面活性剂对增氧性能的影响,而不希望引入其他因子可能对增氧造成影响,因此选择清水和含有一定量SDBS清水开展一系列的增氧对比试验,以微孔曝气盘为增氧机,采用电荷耦合器件(CCD)相机拍摄水中的气泡,并且以数量、Sauter平均直径、波形因子等气泡参数为理论基础,分析探究出SDBS对气泡传质的影响机制,以期为含

有SDBS的水体增氧性能提供理论参考。

1 试验装置与测量方法

1.1 试验装置

试验装置如图1所示,主要由有机玻璃水池、溶氧仪、微孔曝气管、空气流量计、空气压缩机和电脑组成。有机玻璃水池的尺寸为2 m×0.8 m×0.8 m(长×宽×高),结合实际水体的水深与室内试验装置的局限,试验水深取为0.7 m。溶氧仪探头放置在非气泡区,并且固定在距离水面0.3 m处。程香菊等^[15]在管长为0.9~1.5 m时,对比分析了不同长度的微孔曝气管对水体增氧性能的影响,发现当管长为1.1 m时具有最佳的增氧性能,因此本试验也采用1.1 m的微孔曝气管作为曝气增氧设备。该微孔曝气管是一种软性管状曝气器,内径为10 mm,外径为15 mm,其表面布满了极其微小的气孔,当进行曝气时微小孔口会鼓胀张开,否则收缩关闭,在很大程度上可以避免一些细微杂质堵塞孔口。把微孔曝气管卷曲成环状,固定在有机玻璃水池底面中心处,采用空气压缩机进行曝气,空气流量计读取曝气流量。

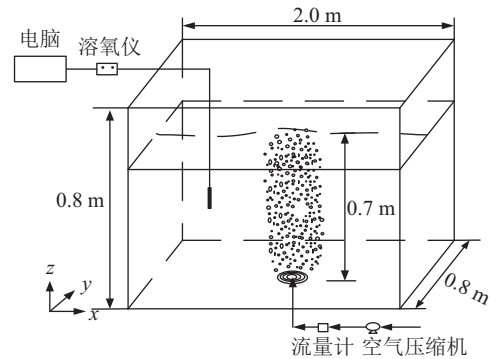


图1 试验装置示意图

Fig.1 Experimental setup

1.2 测量方法

本次试验水体为自来水,根据ASCE^[16]标准对曝气水体的溶解氧(dissolved oxygen, DO)值进行测量。先注水直至试验水深0.7 m,然后根据测量的溶解氧浓度值,计算无水亚硫酸钠(Na_2SO_3)和氯化钴(CoCl_2)的所需量,温水溶解混合后轻轻注入水池,慢速搅拌使其均匀分布,直至当水体的DO值降至接近0 mg/L且处于稳定状态时,往水池添加十二烷基苯磺酸钠(SDBS),浓度分别为1、2、3、4、5 mg/L^[3,17],打开空压机开始曝气增氧,并调节曝气流量,试验布设了5组不同曝气流量,约为20.5、23.5、26.5、29.5、

32.5 L/min。因为气体流量计易受空压机气缸尺寸和温度的影响,使读数产生一定的波动,当最大读数与最小读数误差不足5%时^[16],记录最大和最小读数,平均后作为每个试验工况的曝气流量。溶解氧浓度采用YSI ProODO光学溶氧仪进行测量,并与电脑连接,通过专业软件,每隔10 s读取溶解氧浓度、水温和测量点处压强数据,直至溶解氧含量趋于饱和稳定,停止曝气,保存数据。

采用SonyA7相机以水槽内的黄色标尺为聚焦对象进行拍照,对标尺附近拍摄清晰的气泡群进行截图并统计分析。虽然相机光线经过水、玻璃和空气介质的过程会产生折射,对气泡尺寸会有一定影响,但黄色标尺和气泡处于水槽里的同一位置,并基本在同一垂直面,因此照片中的标尺刻度基本反映了气泡的尺寸^[18]。对于不规则的椭球形气泡,则计算气泡长短轴的算术平均值作为气泡的定性尺寸^[19]。

2 理论计算方法

2.1 ASCE氧传质计算模型

根据ASCE标准提出的DO质量输移模型,采用总氧体积传质系数来衡量水体的增氧效率,其氧传质计算方程为^[16]:

$$\frac{dC}{dt} = K_L a_T (C_\infty^* - C_0) \quad (1)$$

积分得:

$$C = C_\infty^* - (C_\infty^* - C_0) \exp(-K_L a_T t) \quad (2)$$

式中: C_0 为开始曝气增氧前的初始DO浓度,一般为0; C 为曝气水体中测量时间点的DO浓度, mg/L; $K_L a_T$ 为温度 T 时曝气水池中总的氧体积传质系数, h^{-1} ; C_∞^* 为曝气水体中达到饱和时的DO平衡浓度, mg/L; t 为水体曝气增氧时间, h。应用高斯-牛顿法的非线性回归分析法对某一固定工况下随时间变化的实测数据进行拟合,最终计算得到 C_∞^* 、 $K_L a_T$ 的值。

为了研究分析每个工况下的氧体积传质系数,有必要对各个工况进行温度的修正。对此,20℃时的氧体积传质系数 $K_L a_{20}$ 的计算公式如下^[16]:

$$K_L a_{20} = K_L a_T \cdot \theta^{(T-20)} \quad (3)$$

式中: θ 为一待定常数,一般取值为1.024; T 为测量时的水温,℃。

2.2 气泡尺寸大小的计算

观察发现,气泡在水中上升时的形状为椭圆形,通过测量其长、短轴的长度,可计算得到椭圆气泡的当量直径 d_{bi} ,即指与椭圆气泡有着相同体积的球体气泡的直径,其计算公式为^[17]:

$$d_{bi} = (h_i l_i^2)^{1/3} \quad (4)$$

式中: d_{bi} 指第 i 个气泡的当量直径, m; h_i 指第 i 个椭圆气泡的短轴的长度, m; l_i 指第 i 个椭圆气泡的长轴的长度, m。

波形因子 e 也用于描述椭圆气泡长、短轴的情况,指长轴与短轴之比,即^[17]

$$e = l_i / h_i \quad (5)$$

当 e 为1时,该气泡为球形气泡。

计算得到每个气泡的当量直径 d_{bi} 后,可算得气泡的Sauter平均直径 d_{bs} ,是气泡群表面积分布的平均直径,其计算公式为^[17]:

$$d_{bs} = \frac{\sum n_i d_{bi}^3}{\sum n_i d_{bi}^2} \quad (6)$$

式中, n_i 指具有相同当量直径的气泡的个数。

3 结果

采用上述ASCE氧传质计算模型,对试验数据进行拟合计算,得到了不同曝气流量下,无SDBS和不同浓度的SDBS的水体的氧体积传质系数,整理如表1、2所示。

表 1 不同工况下的氧体积传质系数

Tab.1 Oxygen mass transfer coefficient under different conditions

试验工况	$Q_g / (m^3 \cdot h^{-1})$	$C_\infty^* / (mg \cdot L^{-1})$	$K_L a_T / h^{-1}$	$K_L a_{20} / h^{-1}$
无SDBS	1.247	8.739	2.175	2.015
	1.414	8.755	2.327	2.137
	1.599	9.447	2.284	2.310
	1.780	9.487	2.412	2.461
	1.966	8.739	2.812	2.600
SDBS为1 mg/L	1.239	8.566	2.305	2.066
	1.418	8.633	2.523	2.270
	1.600	8.57	2.655	2.372
	1.784	8.555	2.895	2.591
	1.957	8.524	3.003	2.660

表 2 不同SDBS浓度下的氧体积传质系数

Tab.2 Oxygen mass transfer coefficient at different SDBS concentration

SDBS浓度 / (mg · L ⁻¹)	$Q_g / (m^3 \cdot h^{-1})$	$C_\infty^* / (mg \cdot L^{-1})$	$K_L a_T / h^{-1}$	$K_L a_{20} / h^{-1}$
0	1.414	8.755	2.327	2.137
1	1.418	8.633	2.523	2.270
2	1.423	7.700	2.194	1.828
3	1.415	7.921	1.967	1.681
4	1.415	7.920	1.879	1.589
5	1.408	8.042	1.729	1.481

图2给出了在不同曝气流量下,无SDBS和1 mg/L浓度SDBS下曝气水体的溶解氧质量浓度随时间的

变化情况,图中的散点为实测值,实线为采用ASCE计算模型中基于高斯-牛顿法的非线性回归分析得到的拟合曲线。在试验测量过程中,为了准确得到水体总的氧体积传质系数,必须要在溶解氧质量浓度达到基本饱和且处于稳定状态之后才能停止测量,否则会出现一定的误差,影响试验结果的准确性。

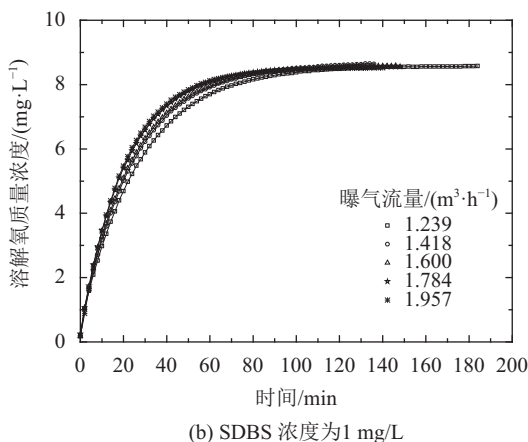
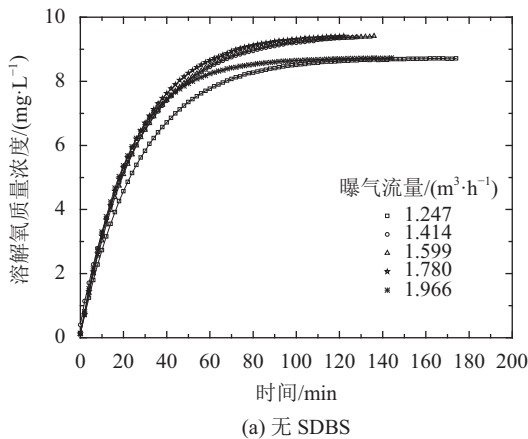


图2 水体溶解氧质量浓度随时间的变化情况
Fig.2 DO concentration against time

从图2可以看出,不同工况下所得到的实测点基本都落在拟合的曲线上,而且每个工况的复相关系数 R^2 均接近等于1,说明ASCE计算模型拟合效果好,采用该模型计算的水体的氧体积传质系数的是合理可行的。

图3给出了1 mg/L浓度的SDBS对水体氧体积传质系数的影响。从图3可知,随着曝气流量的增加,氧体积传质系数也在不断增加。在试验曝气流量下,1 mg/L的SDBS使水体的氧体积传质系数得到了提高,其增加的百分率如图4中白色柱状所示。其最大的增加率为6.22%,最小的增加率为2.28%,可见1 mg/L的SDBS对于水体中氧传质过程具有一定的促进作用。

有机物质对曝气过程中增氧性能的影响可用修正系数 α 表示,本试验中的 α 值为SDBS条件下水体的氧体积传质系数与清水条件下氧体积传质系数的比

值^[12],因此,本试验的SDBS的修正系数 α 值如图4中黑色柱状所示。从图4中的黑色柱状可以看到,在试验曝气流量下,虽然SDBS的修正系数变化范围不大,但是它们都大于1,同样说明1 mg/L浓度的SDBS,其氧体积传质系数大于清水条件下的氧体积传质系数,促进了氧的传质,而从Chern等^[20]在研究中发现,表面活性物质浓度的增加增进了水表面紊动氧传质过程。

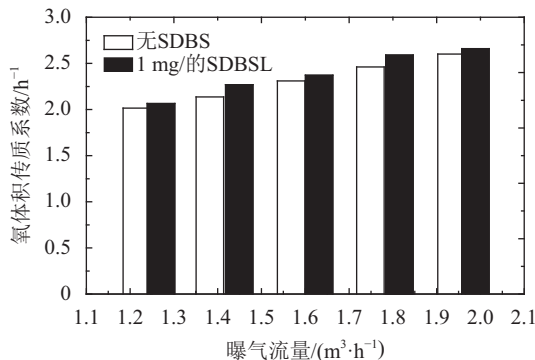


图3 1 mg/L SDBS对水体氧体积传质系数的影响
Fig.3 Effect of 1 mg/L SDBS on oxygen mass transfer coefficient

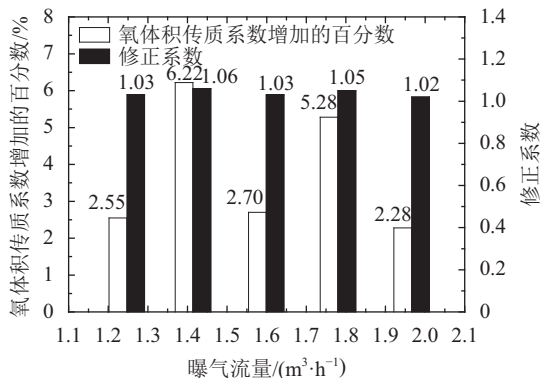


图4 氧体积传质系数的增加百分率与修正系数的变化柱状图

Fig.4 Histogram of rising percentage of oxygen mass transfer coefficient and the correction coefficient α

图5给出了不同浓度的SDBS对氧传质的影响。从图5可知,在0~5 mg/L浓度下,氧体积传质系数呈现出先升高后降低的趋势,拐点出现在1 mg/L上^[3],当浓度大于1 mg/L时,随着浓度的增加,氧体积传质系数在下降,而且低于清水的工况。说明高浓度下,SDBS对氧传质的抑制作用占主导,水面形成厚泡沫层,削弱了外空气与水面之间的传质交换。

4 讨论

4.1 SDBS对曝气气泡尺寸的影响

在拍摄得到的气泡照片中,选取了较为清晰的、曝气流量为1.41 m³/h时的气泡图作为代表进行统计分析,照片通过Adobe Photoshop图片分析软件进行处理后,得到同区域下的气泡图,如图6所示。

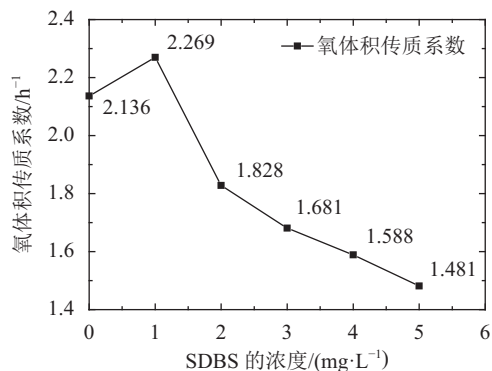
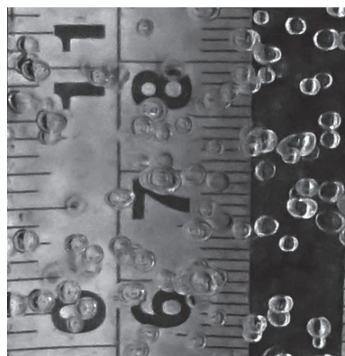


图 5 不同SDBS浓度下的氧体积传质系数曲线

Fig.5 Curve of oxygen mass transfer coefficient at different SDBS concentration



(a) 无 SDBS



(b) 1 mg/L 的 SDBS

图 6 $Q_g=1.41 \text{ m}^3/\text{h}$ 的气泡图

Fig.6 Bubble image in $Q_g=1.41 \text{ m}^3/\text{h}$

从以上2个气泡图中分别提取30个清晰的气泡,进行标号,然后量取其长、短轴的长度,再结合式(4)、(5)计算其当量直径 d_{bi} 和波形因子 e 。根据气泡的当量直径 d_{bi} 可以得到试验中气泡的直径分布直方图,如图7所示。

从图7可知,气泡直径的分布为中间高两边低,其概率分布形态接近于正态分布。其中无SDBS工况的气泡直径大多分布在2.0~3.0 mm范围内,而1 mg/L的SDBS时气泡的直径则基本集中在1.5~2.5 mm范围内,可见气泡的直径范围降低了,从分布图中可以

粗略得出SDBS的存在使气泡直径减小了。另外根据式(6)可以计算得到在 $Q_g=1.41 \text{ m}^3/\text{h}$ 下无SDBS和1 mg/L的SDBS 2个工况的Sauter平均直径 d_{bs} 分别为2.884 mm和2.227 mm。由此可见SDBS的存在的确降低了气泡的平均直径,而且下降率达到22.76%。从图6(a)和(b)对比发现,微气泡的数量在SDBS溶液中比在清水中多,这是氧传质过程的促进因素。这可能是因为当带阴离子的SDBS添加到试验水体后,会发生电离作用,产生了静电排斥作用力,然后SDBS分子会快速地在气泡-水液界面积聚起来,包围着微气泡,在气泡边界形成一层坚固的膜,抑制微气泡间的结合,从而减小了最终成型气泡的平均直径,同时也促使了更多微气泡的产生,增加了总的接触面积,而且微气泡上升的速度较慢,增加了在水体中的停留时间,更多的氧气就能从气泡中溶入水中,促进了气液氧传质过程。另外,在最优气泡群理论中^[21],不同工况下都存在着一个最优的气泡平均直径,使得微孔曝气可以在最优工况下运行,增氧效果好而且能耗低。

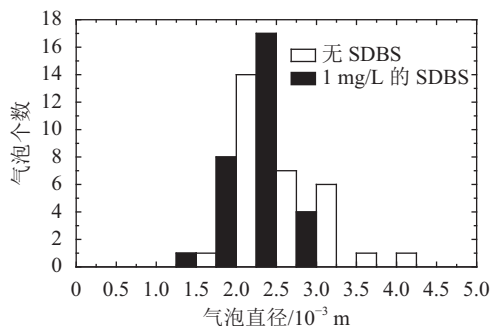
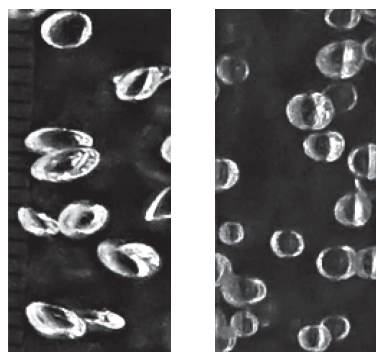


图 7 $Q_g=1.41 \text{ m}^3/\text{h}$ 的气泡当量直径分布

Fig.7 Distribution of bubble equivalent diameter in $Q_g=1.41 \text{ m}^3/\text{h}$

4.2 SDBS对曝气气泡形状的影响

为了能直观地观察到气泡的形状变化,从图6中截取了更细致的气泡形状图,如图8所示



(a) 无 SDBS

(b) 1 mg/L 的 SDBS

图 8 $Q_g=1.41 \text{ m}^3/\text{h}$ 的气泡形状对比

Fig.8 Comparison of bubble shape in $Q_g=1.41 \text{ m}^3/\text{h}$

图8比较了无SDBS和1 mg/L的SDBS工况下微曝气气泡的形状的可视化结果,可以看出,在无SDBS的清水中,气泡呈现出扁椭球形,而添加了1 mg/L的SDBS后,气泡形状则为近似于球形,长轴和短轴基本没发生变形,接近相等。为了在定量的角度上比较微气泡形状的变形程度,根据计算得到的气泡波形因子 e 值,得到了这2个工况下微气泡波形因子的折线图,如图9所示。

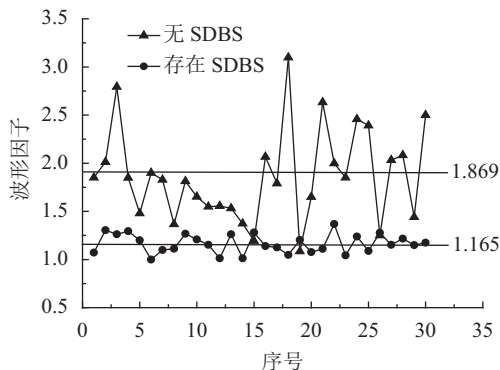


图9 $Q_g=1.41 \text{ m}^3/\text{h}$ 的气泡波形因子对比

Fig.9 Comparison of form factor in $Q_g=1.41 \text{ m}^3/\text{h}$

从图9中可以看到,在无SDBS的试验中,气泡的波形因子 e 变化的范围和幅度较大,最大值达到3.099,而最小值只有1.085,其平均值达到1.869,意味着微气泡的长轴几乎为短轴的2倍,说明气泡的形状变化程度大,气泡形状越趋于扁平。而1 mg/L的SDBS时,曝气气泡的波形因子 e 变化幅度却很小,最大值只有1.305,最小值为1,其平均值为1.165,也就是说曝气气泡的长轴与短轴差不多相等,说明了SDBS的存在也对气泡的形状产生了影响,阻碍了气泡发生变形,使其保持在近乎球体状态。这可能是因为在SDBS水溶液中,微气泡在脱离曝气管孔上升过程中,在水体流动的作用下,SDBS分子迅速地包围气泡,降低其表面张力,并且在表面形成了表面张力梯度,而该表面张力梯度形成了一个与压差作用方向相反的切应力,降低了气泡的净作用力,抑制气泡的变形,使气泡的形状更趋于形成一个球体^[22]。

5 结论

本文以微孔曝气盘为增氧机,在含一定浓度的SDBS水体和清水水体中进行了一系列的增氧试验,并且以气泡数量、Sauter平均直径 d_{bs} 和波形因子 e 等气泡参数为基础,分析了SDBS对气泡传质的影响机制,得到了以下结论:

1)在试验的曝气流量下,1 mg/L浓度下的SDBS增加了水体的氧体积传质系数,最大、最小的增加率分别为6.22%和2.28%,而且SDBS的修正系数 α 均大

于1,说明1 mg/L SDBS对氧在水体中的传质过程具有促进作用。但浓度大于1 mg/L时,氧传质随着质量浓度的增加在降低。

2)当 $Q_g=1.41 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,气泡直径的分布均为中间高两边低,其中无SDBS工况的气泡直径主要在2.0~3.0 mm范围,而1 mg/L的SDBS则集中在1.5~2.5 mm范围。这2个工况的Sauter平均直径 d_{bs} 分别为2.884 mm和2.227 mm,说明SDBS浓度为1 mg/L时降低了气泡的平均直径。

3)在无SDBS的试验中,气泡的波形因子 e 变化的范围和幅度较大,气泡的形状变化程度大,趋于扁平。而存在SDBS的水体中,气泡的波形因子变化幅度较小,SDBS会对气泡的形状产生影响,阻碍气泡发生变形,让它保持在近乎球体状态。

本文的试验是在室内的模型装置中进行的,相比于实际的大水体而言,具有较大的局限性,但是本文的试验结果是基于气泡理论进行分析得出的,受水体的大小影响较小,所以对实际大水体中SDBS对氧传质的影响机制的研究具有一定的参考价值。另外,气泡理论中除了本文分析的气泡参数外,还有气泡速度、气泡掺气浓度和气泡受力等参数,所以今后的研究重点将会以这几个参数为基础进行深入的分析,并补充湖泊、水库等实际水体的相关试验,以期完善SDBS对气泡传质的影响机制的研究。

参考文献:

- [1] Li Yi, Wang Dong, Zhou Jiti. Technical advances in treatment of surfactant LAS wastewater in China[J]. Shanxi Chemical Industry, 2008, 28(1): 28-31. [李轶, 王栋, 周集体. 我国表面活性剂LAS废水的处理技术进展[J]. 山西化工, 2008, 28(1): 28-31.]
- [2] Cui Li, Wang Ya'na. Present research situation and forecast of surfactant wastewater treatment[J]. Industrial Water Treatment, 2008, 28(2): 9-11. [崔励, 王雅娜. 表面活性剂废水处理研究现状与展望[J]. 工业水处理, 2008, 28(2): 9-11.]
- [3] An Dongzi, Zhang Yangang, Li Wei, et al. The influence of anionic surfactants on the treatment effect of wastewater from the sewage treatment plant and the harmless study of its production wastewater[J]. Technology of Water Treatment, 2015, 41(11): 22-24. [安东子, 张岩岗, 李玮, 等. 阴离子表面活性剂对污水处理厂处理效果的影响及其生产污水的无害化研究[J]. 水处理技术, 2015, 41(11): 22-24.]
- [4] Dai Liang, He Wenzhi, Li Bingjing, et al. Progress of treatment technologies for wastewater from daily chemicals industry[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2014, 33(S1): 273-278. [戴亮, 贺文智, 李冰璟, 等. 日用化学品行业废水处理技术的研究进展[J]. 化工进展, 2014, 33(增刊1): 273-278.]

- [5] Liu Peng,Zheng Xiang,Wang Bo,et al.Progress in the research on the effects of water quality in aeration systems on oxygen mass transfer[J].Industrial Water Treatment,2014,34(9):10-14.[刘鹏,郑祥,王博,等.曝气系统中水质条件对氧传质影响的研究进展[J].工业水处理,2014,34(9):10-14.]
- [6] Rosso D,Huo D L,Stenstrom M K.Effects of interfacial surfactant contamination on bubble gas transfer[J].Chemical Engineering Science,2006,61(16):5500-5514.
- [7] Wagner M,Pöpel H J.Surface active agents and their influence on oxygen transfer[J].Water Science and Technology,1996,34(3/4):249-256.
- [8] Liu Chun,Zhang Lei,Yang Jingliang,et al.Effects of surfactants on oxygen transfer in microbubble aeration[C]//Proceedings of the 2009 International Conference on Energy and Environment Technology,Washington D C:IEEE Computer Society,2009,2:531-534.
- [9] Wei Yanling,Qi Lu,Liu Guohua,et al.Effect factors affecting oxygen transfer performance of fine bubble diffusers[J].Technology of Water Treatment,2014,40(2):1-7.[魏延苓,齐鲁,刘国华,等.微孔曝气器充氧性能的影响因素[J].水处理技术,2014,40(2):1-7.]
- [10] Yin Xunfei,Yang Shuo,Xue Xiaofei,et al.Influence of different fine-pore diffusers and surfactant on oxygenation performance in aeration system[J].Environmental Pollution and Control,2015,37(10):17-20.[尹训飞,杨硕,薛晓飞,等.膜孔参数及表面活性剂对微孔曝气器充氧性能的影响研究[J].环境污染与防治,2015,37(10):17-20.]
- [11] Luo Tao,Wang Hongchen,Qi Lu,et al.Pilot scale research on the impact of TDS and surfactant on oxygen mass transfer in fine bubble aeration[J].Acta Scientiae Circumstantiae,2012,32(9):2066-2070.[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传质过程影响的中式研究[J].环境科学学报,2012,32(9):2066-2070.]
- [12] Chen Xulu,Wang Hongchen,Qi Lu,et al.Effects of anionic surfactant on oxygen mass transfer in the fine bubble aeration[J].Acta Science Circumstantiae,2013,33(2):395-400.[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.]
- [13] Krzan M,Zawala J,Malya K.Development of steady state adsorption distribution over interface of a bubble rising in solutions of n-alkanols and n-alkyltrimethylammonium bromides[J].Colloids and Surfaces A:Physicochemical Engineering Aspects,2007,298(1/2):42-51.
- [14] Liu Chun,Zhang Lei,Yang Jingliang,et al.Characteristics of oxygen transfer in microbubble aeration[J].Chinese Journal of Environmental Engineering,2010,4(3):585-589.[刘春,张磊,杨景亮,等.微气泡曝气中的氧传质特性研究[J].环境工程学报,2010,4(3):585-589.]
- [15] Cheng Xiangju,Zeng Yingxue,Xie Jun,et al.Impact of microporous aeration flow and aeration tube length on oxygen transfer performance in water[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2014,30(22):209-217.[程香菊,曾映雪,谢俊,等.微孔曝气流量与曝气管长度对水体增氧性能的影响[J].农业工程学报,2014,30(22):209-217.]
- [16] ASCE.ASCE Standard measurement of oxygen transfer in clean water[M].Virginia:American Society of Civil Engineers,2007.
- [17] Gillot S,Capela S,Heduit A.Effect of horizontal flow on oxygen transfer in clean water and in clean water with surfactants[J].Water Research,2000,34(2):678-683.
- [18] Akita K,Yoshida F.Bubble Size,interfacial area and liquid-phase mean transfer coefficient in bubble columns[J].Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development,1974,13(1):84-91.
- [19] Bhavaraju S M,Russell T W F,Blanch H W.The design of gas sparged devices for viscous liquid systems[J].Aiche Journal,1978,24(3):454-466.
- [20] Chern J M,Chou S R,Shang C S.Effects of impurities on oxygen transfer rates in diffused aeration systems[J].Water Research,2001,35(13):3041-3048.
- [21] Li Er.Theory of optimal bubble group for fine bubble aeration and its application to reaeration Engineering[D].Wuhan:Huazhong University of Science and Technology,2007.[李尔.微孔曝气最优气泡群理论及其在复氧工程中的应用[D].武汉:华中科技大学,2007.]
- [22] Liu Yanyan,Li Yanpeng,Zhu Tingting.Study on modulating shape and velocity of meso-scale bubble using surfactants[J].Journal of Xi'an Jiaotong University,2011,45(10):93-97.[刘艳艳,李彦鹏,朱婷婷.表面活性剂对中尺度气泡形状及速度的调控研究[J].西安交通大学学报,2011,45(10):93-97.]

(编辑 张琼)

引用格式:Cheng Xiangju,Xie Yuning,Zhu Dantong,et al.Effect of surfactants on the microporous aeration oxygenation performance based on air bubble theory[J].Advanced Engineering Sciences,2017,49(5):28-34.[程香菊,谢宇宁,朱丹彤,等.基于气泡理论分析表面活性剂对微孔曝气增氧性能的影响[J].工程科学与技术,2017,49(5):28-34.]