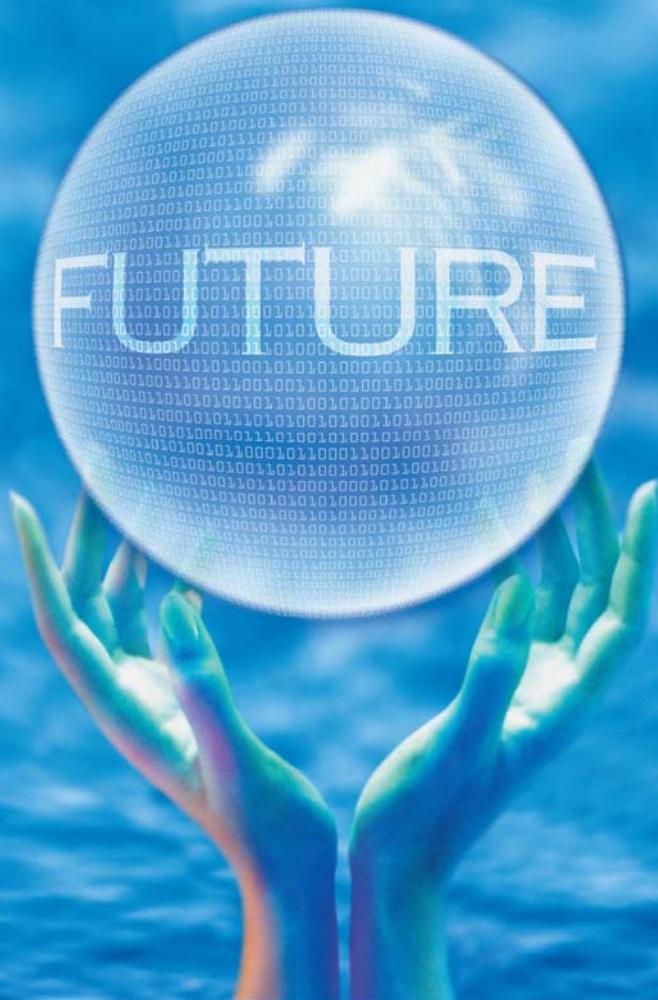




全国中文核心期刊
中国科技核心期刊

环境工程学报

Chinese Journal of Environmental Engineering



第9卷 第9期

Vol.9 No.9

中国科学院 主办
生态环境研究中心
科学出版社 出版

9
2015

目 次

水 污 染 防 治

紫外线消毒对3种大肠杆菌的灭活效果和耐药性影响	张崇森	庄凯	巨欣	王晓昌(4097)
强化除磷型 A/O-MBR 工艺运行稳定性	任金柱	李军	王朝朝	刘彬 高金华 常江(4102)
超声波紫外线一体化推流式反应器中试装置用于污水消毒				
.....	郭浩	周瑛	周晓琴	李子富 闫圆圆 靳昕(4107)
Ca ²⁺ 强化短程硝化颗粒污泥培养	吕永涛	贾燕妮	鞠恺	赵洁 苗瑞 王磊(4112)
猪场废水厌氧自电解处理过程中关键参数优化	王云	朱能武	沈伟航	李小虎 吴平霄(4117)
碳纳米管稳定纳米 Fe ₃ O ₄ 的制备及降解染料橙 II		邓景衡	李佳喜	余侃萍 谢建国(4125)
湿式过氧化氢氧化活性艳蓝 KN-R	贺玲	刘红玉	杨春平	彭艳蓉 曾光明 王鹏 刘芬(4131)
草皮缓冲带对洱海流域面源污染的削减效果			胡威	王毅力 储昭升(4138)
共培养条件下黄菖蒲和狭叶香蒲对铜绿微囊藻光合系统的影响	陈国元	李青松	谢莆尧	陈燕虹(4145)
Fenton 试剂协同 TiO ₂ 光催化降解三氯乙酸及协同机理	王芬	赵宝秀	李想	李伟江 杨龙(4153)
城市大型缓流景观水体流场模拟及人工循环水动力优化		贾泽宇	郑剑锋	孙力平 于静洁(4159)
短程硝化反硝化工艺处理低 C/N 餐厨废水	张周	赵明星	阮文权	缪恒锋 任洪艳 黄振兴(4165)
改性天然菱铁矿去除水中六价铬			周晓倩	郭华明 赵凯(4171)
2种载体对厌氧同步消化、反硝化的影响	冉春秋	邹学军	范立明	崔玉波 周集体(4178)
基于有效去除铅(II)的中孔炭乙二胺改性及影响因素分析				
.....	杨美蓉	李坤权	徐恩兵	乔小朵 潘根兴 郑正(4185)
城市污水处理过程中不同形态氮类营养物的转化特性			金鹏康	宋利 任武昂(4193)
曝气对潜流人工湿地中木本植物的影响	陈永华	吴晓芙	纪智慧	马群 陈明利(4199)
变权组合模型在景观水体水质模拟中的应用			赵加斌	赵新华 彭森(4206)
鱼菜共生系统氮素迁移转化的研究与优化	邹艺娜	胡振	张建	谢慧君 梁爽(4211)
基于虚拟治理成本法的生态环境损害量化评估	蔡锋	陈刚才	彭枫	杨清玲 赵士波 鲜思淑 吴飞(4217)
漂浮型可见光催化剂 Fe-N-TiO ₂ /FP-CTS 的制备及其对溶解性柴油的降解				
.....	黄嘉瑜	王学江	卜云洁	张晶 马荣荣 赵建夫(4223)
非晶态 Co _{0.5} Ni _{0.5} Fe ₂ O ₄ 的制备及对水中五氯苯酚的吸附		孙梦圆	崔春月	吴娟 宋姿蓉(4228)
pH 对同步硝化反硝化生物膜内溶解氧分布的影响			黄胜娟	荣宏伟 林孟霞(4233)
稻壳制备介孔状二氧化硅的光催化性			穆浩荣	张玲玲 白淑琴(4239)
玉米秆碳源去除地下水硝酸盐		李同燕	李文奇	胡伟武 冯传平(4245)
提高低 C/N 值农村生活污水中 TN 的去除效果	匡武	王翔宇	周其胤	杨远盛(4252)
油田聚驱采出液乳化特性及其破乳-絮凝	翁艺斌	阎光绪	李敏	翟星月 郭绍辉 张佩佩(4259)
西安某人工湖水水质时空分布特征及其荧光特性		于佳真	王晓昌	薛涛 陈荣(4265)
改性钙基蒙脱土酸性条件下吸附油酸钠	任瑞晨	张乾伟	石倩倩	李彩霞 王秀兰 孟媛媛(4273)
天然沸石对海水中氨氮的吸附特性	王文华	赵瑾	张晓青	成玉 王静 张雨山 李陆杨(4281)
微孔曝气器脉冲式充氧效果		徐鹏	单继宏	金晓航 于江忠 孙毅 张建中(4287)
厌氧、好氧、厌氧/好氧交替状态对活性污泥性质的影响		杨波	单晓明	田晴 李方 马春燕(4293)
城市人工湖的生态治理		徐后涛	赵凤斌	张玮 王丽卿 郑小燕(4300)
载钴催化剂的制备及对染料降解	李洁冰	李玉龙	Asif Hussain	王瑾 李登新(4309)
低温季大型表流湿地对微污染水体脱氮效果及优化运行				
.....	左倬	仓基俊	朱雪诞	成必新 胡伟 商志清 卿杰(4314)
沸石负载高锰酸钾去除低浓度氨氮	郭华	王军林	张小燕	王娜 刘俊良(4321)
2-乙基蒽醌修饰石墨毡催化电极电化学降解土霉素废水二级出水				
.....	李贵霞	岳琳	潘贵芳	刘艳芳 李伟 李再兴(4326)
抗菌剂三氯卡班在水溶液中的光降解		冯振涛	刘海津	汪应灵 冯家豪(4333)
磁性水滑石快速吸附水体中 Cu(II) 离子	张琪	罗琳	张嘉超	刘武嫦 胡伟斌(4339)
零价铁对水中六价铬还原性能及沉淀污泥中铬的固定化	陈忠林	李金春子	沈吉敏	王斌远 樊磊涛(4345)
椰壳活性炭对水中 N-DBP 前体物的吸附			张一凡	金腊华 周元(4353)

混凝和活性炭吸附深度处理制药废水中有机物去除特征	崔凤国	杨鹏	张伟军	王东升(4359)
Fenton 试剂氧化处理火炸药污染土壤淋洗液	薛江鹏	王建中	赵泉林	王中友 叶正芳(4365)
微波法对吸附扑热息痛废水活性炭的再生	吴坚	夏洪应	彭金辉	张利波 郑照强 张声洲(4371)
ES 稳定重金属污染底泥效果	蒋玉广	袁珊珊	杨伟	梁静波 巢军委(4376)
<i>Halothiobacillus neapolitanus</i> 脱硫性能及限制性因素影响			冯守帅	陈金才 杨海麟(4385)
曝气速率对附加微通道湍流促进器 SMBR 流体动力学性能的影响			解芳	王建敏 刘进荣(4391)
H ₂ O ₂ /Fe ⁰ 、H ₂ O ₂ /Fe ²⁺ 、H ₂ O ₂ /Fe ³⁺ 3种体系处理印染废水			姚兴	颜幼平 冯霞(4398)
以游泳馆污水为处理对象的 SBR 中不同污泥负荷下氨氧化菌群落的演变				
.....	薛士琼	孙宝盛	于凤庆	王明圆 李恺 薛圆圆(4403)
环糊精改性蛭石对水中 Cr(VI) 的吸附			张太亮	吴凤 阳萍 欧阳斌(4409)
滤材的表面改性对淤泥脱水过程中渗透性能的影响			浩婷	王曦 周颜 吴燕(4415)
不同混凝剂处理低温低浊水				洪云 徐慧(4421)
SMBBR 工艺不同填料处理生活污水	李卫平	李杰	朱浩君	杨文焕 敬双怡 殷震育 刘燕(4427)

大气污染防治

煤矿井下高压喷雾雾化特性研究	王鹏飞	刘荣华	汤梦	张文	桂哲(4433)
露天堆场防风抑尘网遮蔽效果的数值模拟			潘武轩	宋翀芳	何鸿展(4440)
TEPA/TETA 改性 SBA-15 对 CO ₂ 吸附性能的影响			魏建文	和凯凯	孟令硕 廖雷(4447)
改性粉煤灰基吸附剂烟气脱汞			郑慧敏	刘清才	王铸 孟飞 牛德良(4453)
改性 Fe ₂ O ₃ 脱硫剂脱除 H ₂ S 反应特性	沈洪波	张辉	刘应书	李皓琰	张贺 郝智天(4458)
一株鱼粉加工硫化氢恶臭气体脱除菌株的分离与鉴定			孙佩璇	姜永江	庄荣玉 严小军(4465)
北京市近 12 年空气污染变化特征及其与气象要素的相关性分析	谢志英	刘浩	唐新明	李腾腾	张文君(4471)
循环灰加湿量对密相塔半干法脱硫效率的影响			韩剑宏	黄永海	卢熙宁 童震松(4479)
折流式反应器空气净化效果			刘鹏	郑洁	宋雪瑞 王小艳(4483)

固体废物处置

市政污泥干化动力学研究			范海宏	武亚磊	李斌斌	马增(4488)
响应曲面法优化 CO ₂ 活化制备夏威夷坚果壳基活性炭	程松	张利波	夏洪应	彭金辉	张声洲	周朝金(4495)
胞外聚合物对生物浸出线路板金属粉末中铜的作用			杨崇	朱能武	崔佳莹	吴平霄(4503)
微波超声协同处理废弃印刷线路板中非金属			蔡丽楠	殷进	张桐	孔晓露(4509)
水淬钢渣碳化固定 CO ₂	涂茂霞	雷泽	吕晓芳	赵宏欣	王丽娜	张军玲 陈德胜 宋文婉 齐涛(4514)
O ₂ /CO ₂ 气氛下市政污泥混煤燃烧及动力学特性			邵志伟	黄亚继	严玉朋	刘长奇(4519)
提高硅钙渣胶凝活性的热活化实验			杨志杰	孙俊民	张战军	苗瑞平(4526)
医疗废物处理中生物指示剂湿热灭菌动力学方程			靳登超	李阳	鲍振博	刘娜(4531)
三七渣固态发酵生产康宁木霉生防菌	谭显东	王君君	王浪	羊依金	郭俊元	彭兰 覃璐琳(4535)
3 种畜禽粪便产气特性差异分析			陈芬	李伟	刘奋武	张吴平 李筱梅 卜玉山(4540)
黑曲霉固态发酵三七渣产纤维素酶			黄凡	谭显东	胡伟	羊依金 林巧玉 任晓霞(4547)
常温下好氧颗粒污泥的形成过程及除污性能			姚力	信欣	郭毅	宋幻 李姣(4553)
垃圾填埋场 HDPE 膜漏洞密度及其影响因素的统计分析			徐亚	能昌信	刘玉强	刘景财 董路(4558)
富集同型产乙酸菌污泥厌氧产酸			王晋	李习伟	符波	杨彦 刘和(4565)

土壤污染防治

海泡石及其复配原位修复镉污染稻田	梁学峰	韩君	徐应明	谭适娟	雷勇	罗文军(4571)
水泥固封镉污染土离子释放规律与微观结构				董祯琴	陆海军	李继祥(4578)

环境生物技术

嗜酸氧化亚铁硫杆菌脱煤矸石中硫影响因素的筛选及条件优化						
.....	赵尚明	何环	于忠琦	黄冠华	冷云伟	陶秀祥(4585)
高岭土固定 GY2B 优化其降解性能			李跃武	吴平霄	李丽萍	党志(4591)

环境监测

成都市道路细颗粒物污染特征	袁小燕	叶芝祥	杨怀金	张菊(4598)
基于远程图像色度的点源水质监测方法			李文	杨守波 罗学科(4603)
海洋石油工程新型溢油监测系统研究	隋迎光	彭吉友	刘志明	任华(4609)

微孔曝气器脉冲式充氧效果

徐鹏 单继宏 金晓航 于江忠 孙毅* 张建中

(浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室,杭州 310014)

摘要 针对生化池连续曝气过程中氧转移率低的问题,结合污水处理中的实际情况,提出了盘式微孔曝气器脉冲式充氧方法来提高氧的转移率。通过4组不同类型的盘式微孔曝气器分别在脉冲式和连续曝气下的实验对比发现,脉冲式曝气产生的是气泡簇,对生成的气泡进行图像统计分析,得出同一区域范围内脉冲式曝气生成的气泡数量多、平均直径小。实验数据分析显示,脉冲式曝气达到氧饱和所需的时间较连续曝气方式增加了10%左右,但氧的利用率增加了50%以上,且动力效率提高了28%以上。脉冲式曝气方式大幅度提高了氧的利用率,节约能耗的同时具有更好的充氧效果,为活性污泥好氧生化处理系统工艺提供了新的研究思路。

关键词 微孔曝气器 脉冲式 微气泡 氧传质

中图分类号 X703 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2015)09-4287-06

Performance of impulse-type fine bubble aerator

Xu Peng Shan Jihong Jin Xiaohang Yu Jiangzhong Sun Yi Zhang Jianzhong

(Key Laboratory of Manufacturing of Ministry of Education, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract In order to address the problem of low rate of the aeration system oxygen transfer in wastewater treatment, a new approach, fine bubble aerator, was proposed for improving the oxygen transfer rate. A group of test on fine bubble aerators was done to compare the performance of intermittent operation and continuous aeration. Compared with the continuous aeration, in intermittent aeration process, the size of bubble was reduced, the degree of turbulence in water was enhanced, and the retention time of air bubbles in water was extended. These phenomena could lead to an increasing oxygen transfer rate. The experimental results show that the bubble cluster generated by our proposed fine bubble aerator has a higher oxygen transfer rate with a bigger contact area compared with the traditional bubble aerator. Hence, it has good performance in aeration oxygenation. Although the time of intermittent oxygen saturation aeration increases about 10% than continuous aeration, oxygen utilization increases by more than 50% and power efficiency is improved by more than 28%. Therefore, our proposed approach improves the utilization of oxygen and has good aeration effects in saving energy, which could provide a new idea for the aerobic activated sludge biological treatment system.

Key words fine bubble aerator; intermittent aeration; fine-bubble; oxygen transfer

微孔曝气器是活性污泥水处理曝气系统中的核心设备,通过曝气器增加污水中氧的含量,用于微生物的生长和生化反应,改善水体环境。有统计资料表明^[1-3],曝气系统电能的消耗占污水处理系统全部电能消耗的60%以上,曝气系统的电耗费用占整个污水处理系统运行成本的40%左右^[4,5]。传统的曝气系统因氧利用率低导致能耗大的缺点一直受到国内外专家密切关注,并对此进行了相关的研究,然而这些问题并未得到实质性的改善^[6-8],因此,改进曝气设备使其提高效率、降低能耗成为环保产业的重要研究课题。

本研究采用脉冲式微孔曝气充氧方式来提高曝

气器效率。实验采用4种相同直径、不同类型膜片的曝气盘在曝气池中进行清水性能实验,测得其在实验条件下的充氧性能,实验对比分析了脉冲式曝气和连续曝气方式的充氧效果,初步得出脉冲式曝气具有更好的充氧效果,为污水处理中的曝气系统提供新的研究方向。

基金项目:浙江省重大科技专项计划项目(2012C13006-1)

收稿日期:2014-08-14; 修订日期:2014-09-08

作者简介:徐鹏(1988—),男,硕士研究生,主要从事污水处理研究工作。E-mail:xupengzjut@163.com

* 通讯联系人,E-mail:sunyi@zjut.edu.cn

1 实验部分

1.1 实验装置

脉冲式微孔曝气器实验装置示意图如图1所示,主体是一个0.8 m×0.6 m×1 m的矩形曝气池,为了便于观察实验现象,曝气池用透明的有机玻璃制成。

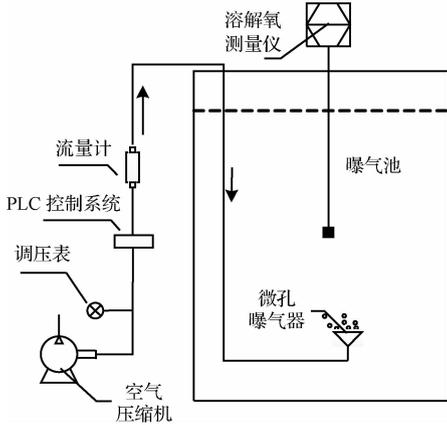


图1 脉冲式微孔曝气器实验装置示意图
Fig. 1 Schematic of impulse-type fine aerator experimental setup

1.2 实验设备和仪器

实验设备和仪器包括型号为ZBM-0.1/8空气压缩机、型号AR2000-02调压阀、型号FX2N-64MT的PLC、型号LZB-10转子流量计和型号JPB-607A溶解氧测量仪。

4种盘型微孔曝气盘的直径都为 $\phi 270$ mm,分别是平EPDM膜片材料的微孔曝气器、凸EPDM膜片材料的微孔曝气器、蘑菇头状微孔曝气器和硅橡胶膜片材料的微孔曝气器,如图2所示。

1.3 气泡形成受力分析

由于曝气产生的气泡众多,以单个气泡为例,分析其在传统的连续曝气和脉冲式曝气情况下的受力情况,如图3所示。气泡在连续曝气情况下生成过程中受到上升浮力 F_f 、约束力 F_σ 、流体对气泡的粘性力 F_d 、惯性力 F_l 、通过小孔的气体冲量的力 F_m 等力的作用,气泡受力分析如图3(a)所示。采用脉冲曝气方式时,膜片在收缩过程中还受到阻力 F_z 的作用。由于周期性的气压,膜片做间歇性的鼓起、收缩,膜片在收缩的某一瞬间过程中气泡的受力情况如图3(b)所示。

气泡在连续曝气情况下的受到的力平衡公式如下式(1)所示:

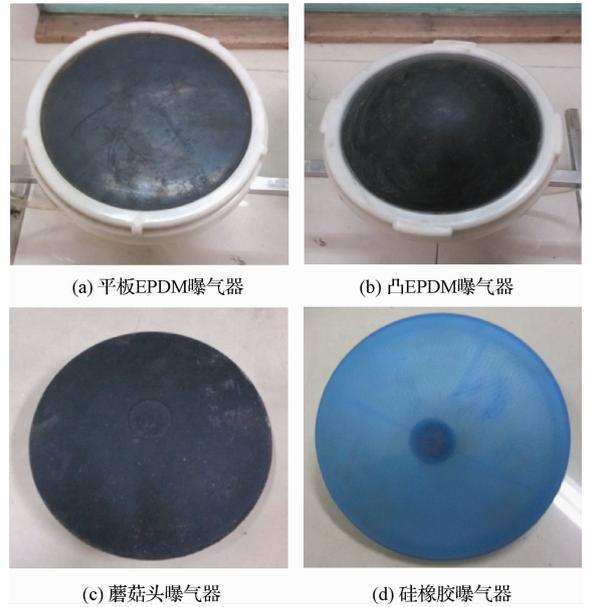


图2 4种类型的微孔曝气器

Fig. 2 Four kinds of fine aerators

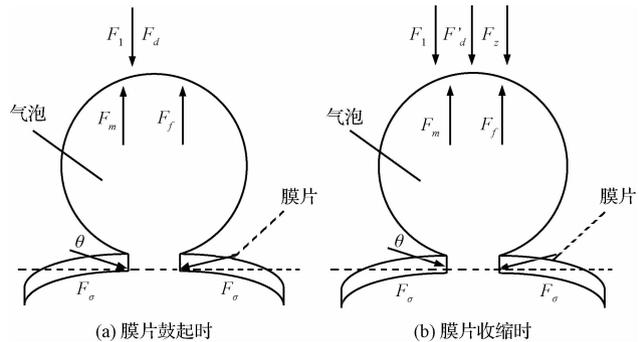


图3 膜片上气泡受力情况分析

Fig. 3 Analysis of forces on bubble

$$\vec{F}_l + \vec{F}_d + \vec{F}_\sigma = \vec{F}_m + \vec{F}_f \quad (1)$$

具体公式表达式如下所示:

$$F_l = (\rho_g + C_l \rho_l) \frac{d}{dt} (V_b U_b); F_f = (\rho_l - \rho_g) g V_b$$

$$F_\sigma = \pi d_w \sigma \sin \theta; F_d = \frac{\pi d_{\max}^2}{8} C_D \rho_l U_b^2;$$

$$F_m = \frac{4 \rho_g q^2}{\pi d_{OR}^2};$$

式中: ρ_g 为气相密度,kg/m³; C_l 为虚拟质量系数,11/16; ρ_l 为液相密度,kg/m³; V_b 为气泡体积,m³; U_b 为气泡质心垂直速度,m/s; d_{\max} 为气泡直径,mm; C_D 为阻力系数; θ 为气泡接触角; σ 为表面张力,N/m; d_w 为气泡的接触直径,m; d_{OR} 为孔口直径,m; q 为孔口气体流量,m³/s。

由式(1)整理可得,在膜片鼓起时气泡直径 $d_{\max 1}$:

$$d_{\max 1} = \sqrt{\frac{8(F_m + F_f - F_l - F_p)}{\pi C_D \rho_l U_b^2}} \quad (2)$$

气泡在脉冲式曝气情况下,周期性的气压使膜片收缩、鼓起,在膜片收缩的过程中,气泡又受到阻力 F_z 的作用,如式(3)所示:

$$F_z = C_D \rho_l \frac{u^2}{2} \cdot S_d \quad (3)$$

式中: S_d 为球形气泡在垂直方向上的投影面积, m^2 ; u 为气泡向下振动时脱离孔口的瞬时速度。

由力的平衡条件得:

$$\vec{F}_l + \vec{F}_d + \vec{F}_\sigma + \vec{F}_z = \vec{F}_m + \vec{F}_f \quad (4)$$

式中:

$$F'_d = \frac{\pi d_{\max 2}^2}{8} C_D \rho_l U_b^2 \quad (5)$$

由式(4)整理可得,在膜片收缩时气泡直径 $d_{\max 2}$:

$$d_{\max 2} = \sqrt{\frac{8(F_m + F_f - F_z - F_l - F_p)}{\pi C_D \rho_l U_b^2}} \quad (6)$$

式中: $d_{\max 1}$ 为连续曝气中膜片鼓起时气泡直径, m ; $d_{\max 2}$ 为膜片收缩时气泡在某一时刻直径, m 。

比较式(2)和式(6)可得,膜片在某一收缩的过程中,都有 $d_{\max 2} < d_{\max 1}$,即膜片在收缩过程中,气泡直径变小;在膜片鼓起过程中,由于膜片孔没有完全扩张,产生气泡的大小较膜片完全鼓起时产生的气泡小。同时,对气泡运动特性的数值模拟研究发现,气泡初始直径越小,上升的速度越慢^[9],即气泡越小,则气泡停留在水中时间更长,与水体充分接触,更多的氧能扩散进入水体中。

1.4 实验方法

本研究做 4 组不同曝气器的对比实验,以平板 EPDM 盘型微孔曝气器为例,其具体实验流程如下:用气管将仪器按图 1 所示连在一起,并检查装置的密封性;将曝气盘安装在距池底 20 cm 处,进行消氧处理,即往水中加入 20 g 的亚硫酸钠 Na_2SO_3 和 0.5 g 的氯化钴 $CoCl_2 \cdot 6H_2O$,使水中的溶解氧浓度降低到 0.20 mg/L 左右开始本次实验的测量;通过 PLC 来控制电磁换向阀的通断周期,周期为 0.1 s,通断各为 0.05 s;用型号为 JPB-607A 的溶解氧测量仪以 30 s 的间隔时间记录水中溶解氧浓度,持续测量直至水中的溶解氧达到饱和。平板 EPDM 盘型微孔曝气器的实验现象如图 4 所示。为了排除其他因素对测试结果的干扰,实验装置处于相同的条件下来测得水中溶解氧浓度 C_t ^[10,11],测得当时实验所处的



图 4 连续曝气充氧和脉冲曝气充氧实验对比
Fig. 4 Comparison between continuous aeration and intermittent operation

气压为标准大气压 1.01 MPa,通气量为 1.5 Nm^3/h ,曝气池中水温为 22.7℃,气温为 24.3℃。

1.5 实验原理和性能指标

为了有效评价充氧效果,通过清水实验测试微孔曝气器在不同工作条件下的氧总转移系数 K_{La} 、充氧能力 E_L 、氧利用率 E_A 和动力效率 E_p ,对相关性能指标的影响因素进行理论分析^[12-13]。

(1) 氧总转移系数 K_{La} : 氧总转移系数 K_{La} 表示氧在曝气过程中的总传递性,当 K_{La} 高时表示水中溶解氧从 C_0 到 C_s 所用的时间短,传递过程中阻力小,氧传递速率快。

液膜内氧传递方程式经整理可得:

$$\ln(C_s - C_t) = \ln C_s + K_{La} \cdot t \quad (7)$$

式中: C_0 为初始溶解氧浓度; C_s 为溶解氧饱和浓度; C_t 为 t 时刻相对应的溶解氧浓度; t 为曝气时间; K_{La} 为氧总转移系数。

实验数据经处理后,求得 $\ln(C_s - C_t)$,与时间 t 进行线性拟合,以时间 t 为横坐标, $\ln(C_s - C_t)$ 为纵坐标,绘制出 $\ln(C_s - C_t) \sim t$ 关系直线图,该关系直线的斜率即为氧总转移系数 K_{La} ^[14]。

将 K_{La} 转化成标况下的 K_{Las} ,可求出标准氧总转移系数 K_{Las} (1.01 MPa、20℃ 条件下测定)。

$$K_{Las} = K_{La} \cdot 1.024^{(20-T)} \quad (8)$$

(2) 充氧能力 E_L : 曝气设备充氧能力 E_L 指的是在标况的测试条件下,曝气设备在单位时间内向溶解

氧浓度为零的液体中所传递的氧量。可得式(9):

$$E_L = K_{Las} \cdot V \cdot (C_{s(20)} - C_0) \cdot \frac{1}{1000} \quad (9)$$

式中: E_L 为标况下曝气设备的充氧能力,kg/h; V 为反应池中水的体积, m^3 ; C_0 为向反应池水体曝气前,水中溶解氧的起始浓度,mg/L; $C_{s(20)}$ 为20℃时水中溶解氧的浓度,mg/L。

因此,本实验中计算曝气设备充氧能力 E_L 公式:

$$E_L = K_{Las} \cdot V \cdot C_{s(20)} \quad (10)$$

(3)氧利用率 E_A :氧利用率 E_A 也称为氧转移效率,是指在标准状态下传递到水中的氧占供氧量的百分比(%)。氧利用率 E_A 计算公式如下:

$$E_A = \frac{E_L}{0.28 \times Q_{气(标)}} \times 100\% \quad (11)$$

式中: E_A 为标准状态下,曝气设备氧利用率,%; $Q_{气(标)}$ 为标准状态下通气量, m^3/h ;0.28为标准状态下,1 m^3 空气中含氧气的重量,kg/ m^3 。

式(11)中 $Q_{气(标)}$ 是按式(12)计算:

$$Q_{气(标)} = Q_{气} \sqrt{\frac{P_c T_j}{T_c P_j}} \quad (12)$$

式中: $Q_{气}$ 为流量计实际测得通气量, m^3/h ; P_c 为实验时测定的气体绝对压力,MPa; P_j 为绝对压力,0.1 MPa; T_c 为实验时测定的气体绝对温度(273 + T) K; T_j 为绝对温度293 K。

(4)动力效率 E_p :动力效率 E_p 是指每消耗1 kWh电传递到水中的氧量,是曝气设备重要的能效指标。计算公式如式(13)所示:

$$E_p = E_L / N \quad (13)$$

式中: E_p 为曝气设备的动力效率(kg/kWh); N 为充氧时曝气设备所消耗的理论功率。

空气压缩机所消耗的理论功率计算公式如式(14)所示:

$$N = \frac{338}{3600} \left[\left(\frac{P_c}{0.1} \right)^{0.29} - 1 \right] Q_{气(标)} \quad (14)$$

2 结果与讨论

2.1 曝气实验现象

从图4实验现象中可以看到,连续微孔曝气产生的是平稳的气泡流,且曝气盘膜片一直处于鼓起状态;脉冲式微孔曝气产生的是一股一股的气泡簇,水体的紊流性更大,同时可以观察到曝气盘膜片周期性的鼓起、收缩现象,气泡也从不同的角度从膜片的表面产生,溶入水体中。

2.2 脉冲曝气对气泡生成的影响

根据气泡生成理论^[15]分析,气泡在脉冲曝气情况下气泡直径变小,为了验证以上理论分析的正确性,对气泡形成过程的图像进行了分析处理。因为曝气盘口处的气泡多而密集、不易区分,因此取样的气泡是在距池底80 cm处,如图4中2个黑框部分。实验采用的高像素数码相机(VW-600光学显微系统)在同一位置进行多次拍照,再用生物学图像分析软件Image profession plus 6.0对多张气泡图像进行统计、分析,在选定范围内取其气泡个数的平均值。其中的2张图片如图5所示,数据统计结果如表1所示。从图5可以看到,脉冲式曝气生成的气泡数量多、单个气泡面积小。利用Image-Pro Plus 6.0统计功能进行数据分析,数据整理如表1所示。从表1中可以看到,在同一区域范围内,脉冲式曝气产生的气泡个数比连续曝气多了近46%;脉冲式产生的气泡平均直径比连续曝气产生的气泡小,同时可以看到气泡平均面积较连续曝气产生的气泡小,符合理论分析。综合上述情况,在同一区域范围内,脉冲式曝气生成的气泡直径小,产生的气泡总面积较连续曝气方式生成的气泡大,增加气液间的接触面积,更加有利于氧的转移。

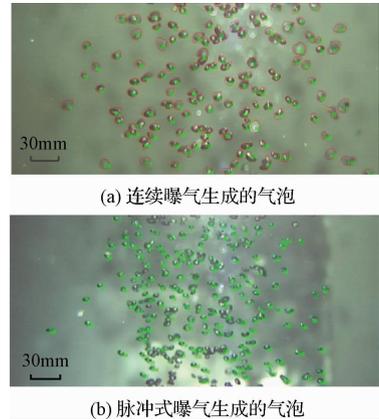


图5 2种曝气方式产生的气泡图像分析
Fig. 5 Image analysis of bubbles produced by two kinds of aeration

表1 平板EPDM曝气器脉冲式曝气和连续曝气气泡数据对比

Table 1 Data of convex EPDM aerator under intermittent and continuous aerator

曝气方式	气泡个数 N	气平均直径 (mm)	平均面积 (mm^2)	气泡总面积 (mm^2)
脉冲式曝气	172	8.2030	59.3	10 119.6
连续曝气	118	9.8023	85.1	10 041.8

2.3 曝气实验数据分析

根据 1.5 小节中相关性能评价指标,将 4 组对比实验数据整理如图 6 和表 2 所示。实验测得 4 种曝气盘在同一种曝气方式情况下氧总转移系数 K_{La} 和氧利用率 E_A 有所区别,但是区别不是很明显。每种曝

气盘在 2 种曝气情况下氧总转移系数 K_{La} 和氧利用率 E_A 有较大区别:脉冲式曝气较连续曝气时间增加了 10% 左右,即在脉冲式曝气情况下达到水体氧饱和和所需时间较长;脉冲式曝气氧的利用率较传统的连续曝气方式提高了 50% 以上,大幅度提高了氧的利用率。

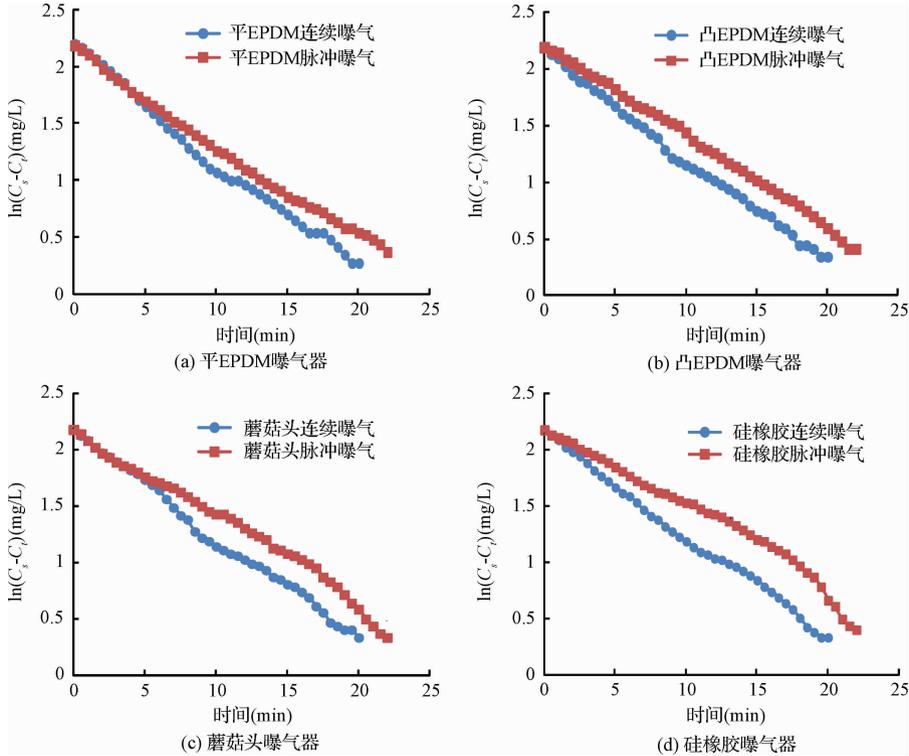


图 6 4 种曝气盘在 2 种曝气方式下对比实验
Fig. 6 Comparison of four aerators under two types of operation

表 2 氧转移参数

Table 2 Oxygen transfer parameters

指标	平 EPDM		凸 EPDM		蘑菇头		硅橡胶	
	连续	脉冲	连续	脉冲	连续	脉冲	连续	脉冲
$K_{La} (h^{-1})$	5.814	4.866	6.354	5.538	6.348	5.226	5.424	4.728
$K_{Las} (h^{-1})$	5.677	4.752	5.793	5.049	6.054	4.984	5.136	4.477
$E_L (kg/h)$	20.823	17.430	17.053	14.836	17.821	14.671	15.119	13.179
$Q_{气(标)} (m^3/h)$	0.33	0.184	0.368	0.184	0.368	0.184	0.368	0.184
$E_A (\%)$	19.57	29.8	16.5	28.8	17.3	28.5	14.7	25.6
$E_p (kg/kWh)$	13.63	17.47	8.54	14.87	8.93	14.70	7.58	13.21

3 结 论

(1) 实验结果表明,脉冲式微孔曝气器产生的是周期性气泡簇,相对于传统的连续曝气充氧方式,服务面积大大增加;脉冲式的曝气方式提高了出气压力和速度,加速了水体的紊动程度;微孔膜片亦会随着气压的周期性上下振动,气泡通过微小孔眼时被振动拉伸、挤压,使气泡尽快脱离孔眼,形成微小

气泡,可增大气液接触面积,提高氧的转移率。通过清水性能实验验证了微孔曝气器脉冲式充氧设计方案具有更好的充氧效果。

(2) 采用高像素数码相机拍摄实验生成的气泡,再用生物学图像分析软件 Image profession plus 6.0 对多组拍摄的气泡进行统计分析,得到脉冲式曝气产生的气泡较传统连续曝气产生的气泡数量多,平均气泡直径小,增加了气液接触面积。

(3)由4组实验数据分析可得,虽然脉冲曝气的时间较传统的连续曝气增加了10%,但是氧的利用率较传统的连续曝气方式提高了50%以上,且动力效率提高到28%以上,达到节能的目的。在氧转移系数差别不大的情况下,氧的利用率和动力效率更为重要,采用脉冲式曝气可以大幅度提高氧的利用率,动力效率也有很大的提高,从而减少能源浪费,降低运行成本。

参考文献

- [1] 原建光, 孙娟, 宛丽, 等. 污水处理厂节能降耗的运行措施. 中国给水排水, **2013**, 29(18): 149-150
Yuan Jianguang, Sun Juan, Wan Li, et al. Operation measures for saving energy and reducing consumption in sewage treatment plant. China Water & Wastewater, **2013**, 29(8): 149-150(in Chinese)
- [2] 杨勇, 王玉明, 王琪, 等. 我国城镇污水处理厂建设及运行现状分析. 给水排水, **2011**, 37(8): 35-39
Yang Yong, Wang Yuming, Wang Qi, et al. Analysis on current municipal wastewater treatment plants operation in china. Water & Wastewater Engineering, **2011**, 37(8): 35-39(in Chinese)
- [3] Zhou Xiaohong, Wu Yuanyuan, Shi Hanchang, et al. Evaluation of oxygen transfer parameters of fine-bubble aeration system in plug flow aeration tank of wastewater treatment plant. Journal of Environmental Sciences, **2013**, 25(2): 295-301
- [4] 庄健, 王洪臣, 齐鲁, 等. 孔径对微孔曝气充氧性能的影响. 环境工程学报, **2014**, 8(5): 1723-1726
Zhuang Jian, Wang Hongchen, Qi Lu, et al. Effects of pore diameter on oxygenation performance in fine pore aeration. Chinese Journal of Environmental Engineering, **2014**, 8(5): 1723-1726(in Chinese)
- [5] 张斌, 郝玉萍, 周京徽. 橡胶膜微孔曝气器的清水充氧性能试验研究. 环境科学与技术, **2010**, 33(12F): 304-305
- [6] Zokaee-Kadijani S., Safdari J., Mousavian M. A., et al. Study of oxygen mass transfer coefficient and oxygen uptake rate in a stirred tank reactor for uranium ore bioleaching. Annals of Nuclear Energy, **2013**, 53: 280-287
- [7] 王琰, 李小明, 杨麒, 等. 好氧-缺氧-闲置运行模式处理生活污水. 环境工程学报, **2013**, 7(9): 3483-3488
Wang Yan, Li Xiaoming, Yang Qi, et al. Municipal sewage treatment by alternating aerobic/anoxic/idle operation. Chinese Journal of Environmental Engineering, **2013**, 7(9): 3483-3488(in Chinese)
- [8] Gresch M., Armbruster M., Braun D., et al. Effects of aeration patterns on the flow field in wastewater aeration tanks. Water Research, **2011**, 45(2): 810-818
- [9] 徐炯, 王彤, 杨波, 等. 静止水下气泡运动特性的测试与分析. 水动力学研究与进展, **2008**, 23(6): 709-714
Xu Jiong, Wang Tong, Yang Bo, et al. The measurement and analysis of motion behavior of bubbles in calm water. Chinese Journal of Hydrodynamics, **2008**, 23(6): 709-714(in Chinese)
- [10] 张凌新, 闻仲卿, 邵雪明. 多泡相互作用对气泡溃灭的影响. 力学学报, **2013**, 45(6): 861-867
Zhang Lingxin, Wen Zhongqing, Shao Xueming. Investigation of bubble-bubble interaction effect during the collapse of multi-bubble system. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, **2013**, 45(6): 861-866(in Chinese)
- [11] 吴媛媛, 周小红, 施汉昌, 等. 污水厂微孔曝气系统工况下充氧性能测试与分析. 环境科学, **2013**, 34(1): 194-197
Wu Yuanyuan, Zhou Xiaohong, Shi Hanchang, et al. Measurement and analysis of micropore aeration system's oxygenating ability under operation condition in waste water treatment plant. Environmental Science, **2013**, 34(1): 194-197(in Chinese)
- [12] 康勇烽. 自吸式自激振荡脉冲射流曝气器的实验研究. 重庆: 重庆大学硕士学位论文, **2006**
- [13] 郭烨烨, 杨淑英, 黄莹, 等. 间歇曝气潜流人工湿地的污水脱氮效果. 环境工程学报, **2014**, 8(4): 1405-1409
Guo Yeye, Yang Shuying, Huang Ying, et al. Effect of intermittent aeration on performance of nitrogen removal in domestic wastewater treatment by subsurface constructed wetlands. Chinese Journal of Environmental Engineering, **2014**, 8(4): 1405-1409(in Chinese)
- [14] 汤利华, 孟广耀. 水深对曝气过程中氧总转移系数的影响. 同济大学学报(自然科学版), **2007**, 35(6): 760-763
Tang Lihua, Meng Guangyao. Influence of water depths on volumetric oxygen transfer coefficient in aeration. Journal of Tongji University (Natural Science), **2007**, 35(6): 760-763(in Chinese)
- [15] 李小冬, 齐鲁, 刘国华, 等. 通气量对微孔曝气器充氧性能影响的中试研究. 中国给水排水, **2014**, 30(5): 81-84
Li Xiaodong, Qi Lu, Liu Guohua, et al. Impact of airflow rate on oxygen mass transfer in a pilot-scale fine bubble aeration system. China Water & Wastewater, **2014**, 30(5): 81-84(in Chinese)