

射流微泡曝气器溶氧性能测试与工程应用

周涛, 孙建红, 刘可

(南京航空航天大学航空宇航学院, 南京, 210016)

摘要:射流微泡曝气器是一种基于新型微泡生成机理的曝气设备,具有广泛的工程应用价值。射流微泡曝气器溶氧性能测试分析的结果表明:当新设计的射流微泡曝气器进气量从 $0.2 \text{ m}^3/\text{h}$ 增至 $2.0 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,其氧总转移系数从 $0.052 \text{ L}/\text{min}$ 增加到 $0.338 \text{ L}/\text{min}$,理论动力效率从 $0.659 \text{ kg}/\text{kW} \cdot \text{h}$ 增加到 $4.284 \text{ kg}/\text{kW} \cdot \text{h}$ 。与其他类型曝气器相比,该型射流微泡曝气器的氧总转移系数和理论动力效率均有显著提高。此外,射流微泡曝气器应用于实际工程中,废水出水水质中化学需氧量的平均去除率可达到 76.6% 。

关键词:射流微泡曝气器;溶氧性能;氧总转移系数;氧利用率;理论动力效率

中图分类号: X505 文献标志码: A 文章编号: 1005-2615(2014)06-0915-05

Experimental Analysis and Application of Oxygen Transfer Performance of Micro-bubble Jet Aerator

Zhou Tao, Sun Jianhong, Liu Ke

(College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: The micro-bubble jet aerator is a novel aerator based on the new mechanism of micro-bubble, which has the extensive applications in the waste-water treatment. The performance of the new aerator is analyzed by the experimental measurement. Results show that the standard oxygen transfer coefficients ($K_{L_{as}}$) increase from $0.052 \text{ L}/\text{min}$ to $0.338 \text{ L}/\text{min}$, and the theoretical power efficiency (E_p) increases from $0.659 \text{ kg}/\text{kW} \cdot \text{h}$ to $4.284 \text{ kg}/\text{kW} \cdot \text{h}$, when the aerator airflow rate increases from $0.2 \text{ m}^3/\text{h}$ to $2.0 \text{ m}^3/\text{h}$. Compared with other type aerators, both $K_{L_{as}}$ and E_p are improved obviously in the present aerator. Furthermore, the micro-bubble jet aerator is also applied to a real waste-water treatment, and it is verified that there is a high COD_{Cr} removal rate of 76.6% in the effluent water.

Key words: micro-bubble jet aerator; oxygen transfer performance; standard oxygen transfer coefficient; oxygen utilization efficiency; theoretical power efficiency

曝气设备是污水处理活性污泥法系统中的关键性设备,其功能是将空气中的氧转移到曝气池液体中,满足好氧微生物所需要的氧量,并保持曝气池内微生物、污水有机物、溶解氧三者充分混合,为微生物降解有机物提供有利的生化反应条件^[1]。一方面,曝气器充氧性能的好坏直接关系到整个好氧处理工艺的成败,影响到处理工艺的出水水质。

另一方面,曝气也是目前污水处理过程中的主要能耗环节,约占总能耗的 $45\% \sim 75\%$ ^[2]。而传统的曝气设备存在曝气效率低、运行成本高等问题,因此,如何改进现有或研制新型曝气设备,提高其充氧性能,成为各国研究学者广泛关注的热门课题^[2-3]。

目前,曝气方式主要有机械曝气、鼓风曝气和

基金项目:国家自然科学基金(21407077)资助项目;江苏省六大人才高峰(2012-JNHB-014)资助项目;江苏省博士后科研资助计划(1002013C)资助项目;江苏高校优势学科建设工程资助项目。

收稿日期:2014-09-25; **修订日期:**2014-10-27

通信作者:孙建红,男,教授,博士生导师, E-mail: jhsun@nuaa.edu.cn。

射流曝气3种方式。相比较前两者,射流曝气器具有以下优点:氧吸收率和充氧能力高,混合搅拌作用强;污泥活性好,基质降解常数较高,可提高污泥的沉淀性能;构造简单、工作可靠、运转灵活、维修管理方便^[4]。但从射流曝气器在污水处理领域的实际运行情况来看,虽然具有很强的供氧能力,但吸入水中的氧并未充分利用,大部分都以气泡以及气泡聚并的形式由曝气池表面逸出,导致氧利用率低,动力效率不高,从而影响了射流曝气器的推广和应用。

影响曝气器传质的因素较多,其产生的气泡粒径大小是重要的因素之一。气泡直径缩小10倍,1个气泡可以变成1000个小气泡,总表面积提高10倍,同等情况下,表面积增大可以提高空气在水中的传质效率,以提高溶氧性能,气泡直径缩小还可以有效地降低气泡聚并的可能性,延长气泡溢出水面的时间,从而可以和液体进行充分地传质。目前,微泡曝气器大多数为微孔曝气器,与普通的曝气设备相比,微孔曝气系统的氧利用效率、动力效

率、氧总转移系数较大,但同时具有阻力损失较大、容易堵塞、使用寿命较短等不足。针对上述曝气器的缺点和不足,本研究采用一种新型射流微泡曝气器,通过强化气泡之间的扩散与碰撞,以及流体对气泡的水力剪切作用^[5],使得曝气器所产生的气泡平均粒径约为200 μm ,增大了空气与水的接触面积。同时该曝气器又克服了微孔曝气器阻力损失大、易堵塞、使用寿命短的缺点。一般而言,氧总传递系数、理论动力效率和氧利用率可以作为曝气器的评价指标^[6-7],因此本文通过性能测试和实际工程应用来研究分析射流微泡曝气器的溶氧性能。

1 试验装置与方法

1.1 试验装置、仪器及药剂

基于气泡碰撞与强化剪切作用而设计的射流微泡曝气器的基本构造与普通射流曝气器大体相同,同样包括喷嘴段、吸气室、喉管段、扩散管段等,属于自吸式供氧,具体如图1所示。同时依据清水溶氧测试的要求,清水充氧试验装置见图2。

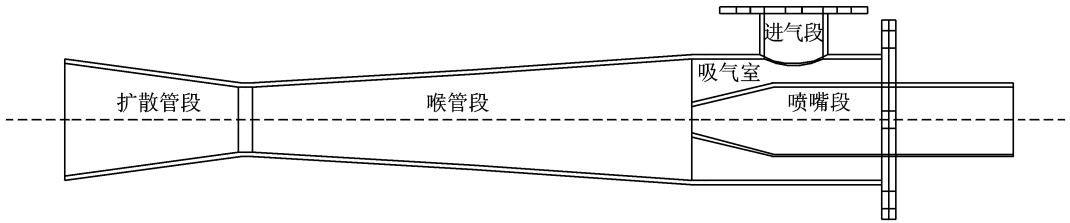


图1 射流微泡曝气器结构示意图

Fig. 1 Schematic of micro-bubble jet aerator

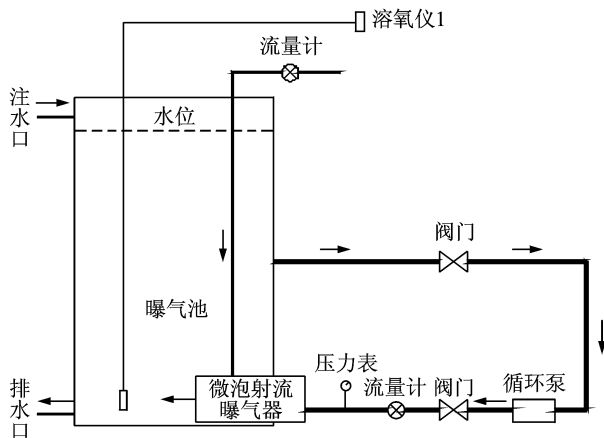


图2 试验装置示意图

Fig. 2 Schematic of test device

试验仪器:包含RBL50-100A型IS型单级立式离心清水泵用于系统水循环;ZY-Y100普通压力表、LZB-50型防腐玻璃转子流量计、LZB-10和LZB-15型玻璃转子流量分别用于测定不同工况下

循环水压,循环水量以及射流微泡曝气器的进气量;水中溶解氧与温度的则由JENCO9010型便携式溶解氧测定仪测得;同时利用脱氧剂为亚硫酸钠(分析纯)和催化剂为氯化钴(分析纯)对水体进行脱氧处理。

1.2 试验方法

射流微泡曝气器的充氧能力,理论动力效率,氧利用率的检测与数据处理均按照文献[8]进行。

试验采用间歇非稳态动态启动法,测定水中溶解氧的质量浓度随时间变化的规律,进而计算出氧的总传递系数 K_{Las} 值和氧的传递速率 dC/dt 。同时记录测定时的供气量,进一步计算出不同曝气器的理论动力效率和氧的利用率。

1.3 试验条件

射流微泡曝气器清水溶氧试验,试验条件基本数据见表1。每个试验持续时间大约在30 min左右,在无外热源的条件下,时间短水温变化小,可以

表 1 曝气器清水充氧试验条件

Tab. 1 Condition of oxygen transfer measurement of aerator in clean water

试验 编号	循环水量 $Q_w / (\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	供气流量 $Q_g / (\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	水温 $t / ^\circ\text{C}$	水深 H / m	饱和溶解氧浓度 $C_s(\text{标准}) / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	饱和溶解氧浓度 $C_s(\text{实测}) / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$
1	10	0.2	10.0	1.8	11.25	11.21
2	9	0.5	9.8	1.8	11.30	11.21
3	13	0.8	9.5	1.8	11.38	11.32
4	12	1.0	8.6	1.8	11.64	11.60
5	12	1.6	15.7	1.8	9.92	9.85
6	13	1.8	10.0	1.8	11.25	11.14
7	13	2.0	10.0	1.8	11.25	11.24

认为水温恒定。表中针对不同循环水量和供气量进行了检测,可以看出:实际测定的饱和溶解氧浓度与相同水温条件下标准饱和溶解氧浓度有一些差异,这些差异主要源于测量仪器和测试系统。但由于误差很小,可以满足曝气器性能测试的要求。

2 射流微泡曝气器充氧性能

2.1 氧总转移系数 $K_{L,as}$

氧总转移系数 $K_{L,as}$ 表征氧从气相传递到液相的速度,是计算曝气器的氧利用效率和动力效率的重要参数,其值可通过拟合溶解氧变化曲线的斜率计算得到。图 3 为射流微泡曝气器氧总转移系数随进气量的变化情况。

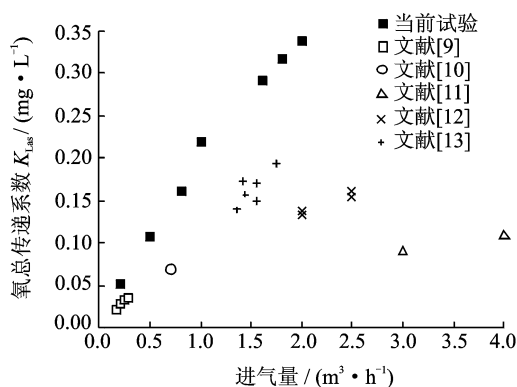


图 3 氧总转移系数随进气量的变化

Fig. 3 Variations of standard oxygen transfer coefficient versus airflow rate

由图 3 可见,随着进气量从 0.2 m^3/h 增加到 2.0 m^3/h ,射流微泡曝气器氧总转移系数从 0.052 L/min 增加到 0.338 L/min ,这是由于曝气量的增加加剧了液相紊流程度,一方面减小了液膜厚度,从而减小传质阻力,增大 $K_{L,as}$;另一方面,曝气器中气液界面更新加快,从而加速氧从气相传递到液相,传质推动力变大,有利于氧的传递,因此,随着射流微泡曝气器进气量的增加,氧总转移系数增加。从图 3 中还可以看出,射流微泡曝气器与其

他类型的曝气器相比,其氧总转移系数明显优于其他曝气器^[9-13],以潘涛等^[13]测试的射流曝气器为例,当进气量从 1.36 m^3/h 增加到 1.75 m^3/h 时,氧转移系数从 0.139 L/min 增加到 0.193 L/min ,而射流微泡曝气器在进气量为 1.0 m^3/h 时,其氧总转移系数已达到 0.22 L/min ,氧总转移系数明显优于前者。这可能是由于两种曝气器产生的气泡粒径不同,气液接触时间不同,进而导致两种曝气器氧总转移系数不同。

2.2 理论动力效率 E_p

理论动力效率同样是曝气器重要性能参数,它的高低决定着曝气器的能耗。图 4 为曝气器理论动力效率随进气量的变化情况。

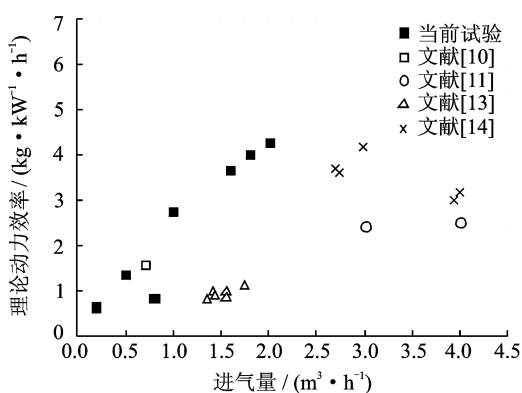


图 4 理论动力效率随进气量的变化

Fig. 4 Variations of theoretical power efficiency versus airflow rate

从图 4 中可以看出:当进气量较大时,理论动力效率随着供气量的增大而增大,当供气量较小时,理论动力效率可能会随着供气量的增大而减小。这是因为当供气量很小时,氧的总转移系数和充氧能力都非常低,导致设备的动力效率很低,应增加供气量来提高动力效率。但供气量增加至一定值时,曝气器的理论动力效率会有所下降。这主要是由于进气量增大时,气液界面的总面积也增大,使得氧总转移系数增大,充氧能力也随之增大,

但是两者增大的幅度远远低于供气设备动力消耗的速率,导致随着供气量的增加动力效率呈下降趋势,进而增加了供气的能耗和运行费用。从图4中还可以看出,与其他类型的曝气器相比^[10-11,13-14],射流微泡曝气器在能耗方面也具有一定的优越性。

2.3 氧利用率 ϵ

氧的利用效率指通过鼓风机曝气系统转移到混合液中的氧量占总供气量的百分比。图5给出了曝气器氧利用率随着进气量的变化情况。

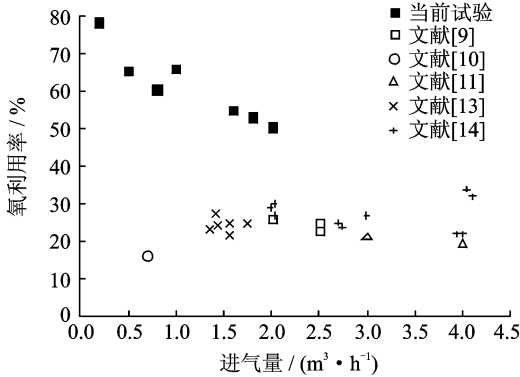


图5 氧利用率随进气量的变化

Fig. 5 Variations of oxygen utilization efficiency versus airflow rate

从图5中可以看出,随着进气量的增大,氧利用率越来越小。当进气量从 $0.2 \text{ m}^3/\text{h}$ 增加到 $2.0 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,氧的利用率从 78.6% 降至 50.6% 。造成这种现象的原因是由于进气量小时,在剪切碰撞条件下,气泡直径会相对变小,气液接触面积变大。同时,进气量小时,曝气池中气泡上浮速度慢,气泡在水中的停留时间相对较长,单位气量转移到水中的氧量多,氧利用率高。进气量大时,气泡直径大,引起的流场扰动强度增强,气泡上升速度快,气泡在水中的停留时间短,同时气泡因碰撞而凝聚的可能性增大,单位气量转移到水中的氧量少,氧利用率低。图5还列举了相近进气量条件下,其他类型曝气器的氧利用率,可以看到,相同进气量范围内,射流微泡曝气器的氧利用率是普通曝气器的 $2\sim 4$ 倍^[9-10,13-14]。

因此,结合上述研究,选取进气量 $2.0 \text{ m}^3/\text{h}$ 作为该型射流微泡曝气器在实际工程应用中的运行参数,此时,氧利用率为 50.6% ,理论动力效率达 $4.284 \text{ kg}/\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

2.4 射流微泡曝气器与其他常见曝气器的性能比较

为了对比射流微泡曝气器与其他常见曝气的

充氧性能,进气量为 $2.0 \text{ m}^3/\text{h}$ 左右时,各型号曝气器的性能参数见表2。可以看出,与其他曝气器相比较,射流微泡曝气器无论氧利用率还是氧转移系数都有较大提高,充氧性能明显优于其他曝气器。

表2 各种曝气器性能对比

Tab. 2 Comparison of performance for different aerators

曝气器	$K_{L,as}/$ ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)	$\epsilon/\%$	$E_p/(\text{kg} \cdot$ $\text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})$
射流微泡曝气器	0.338	50.60	4.284
微孔雾化曝气器 ^[10]	0.376	24.70	2.450
Nopol曝气器 ^[12]	0.137	26.00	
供气式低压 曝气器 ^[11]	0.089	21.00	2.450
膜片式微孔 曝气头 ^[15]	0.098	18.04	5.010
Fine-bubble aerator ^[16]	0.140		

3 射流微泡曝气器的工程应用

将射流微泡曝气器应用于某高速公路服务区污水处理站中。该污水处理站设计处理能力为 $100 \text{ m}^3/\text{d}$,主要接纳的水体是服务区的生活污水。该处理站采用高溶氧生化处理池进行曝气处理。该生化处理池在池底部均匀分布3个射流微泡曝气器,每个曝气器的进气量为 $2.0 \text{ m}^3/\text{h}$,循环水量为 $10 \text{ m}^3/\text{h}$ 。曝气池进出水 COD_{Cr} 随时间变化曲线见图6。污水处理系统的效果见表3。可以看出,该污水处理站处理的污水出水水质较好, COD_{Cr} 的平均去除率达 76.6% ,磷的平均去除率达 61.8% ,SS符合污水水质排放标准,进而表明该射流微泡曝气器应用在污水处理领域具有工程实用价值,是一种具有广阔应用前景的装置。

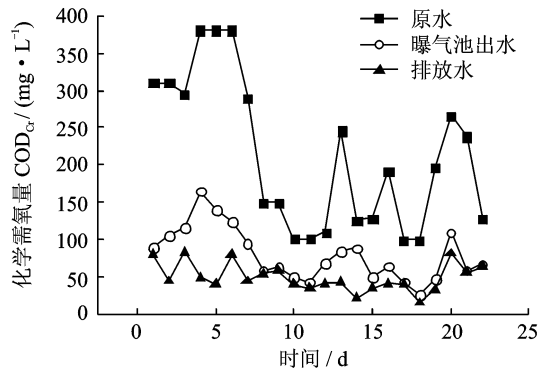


图6 曝气池进出水 COD_{Cr} 随时间变化曲线

Fig. 6 Variations of COD_{Cr} of effluent water versus time

表3 污水处理站进出水水质

Tab.3 Water quality of effluent in waste-water treatment

项目	COD _{Cr} / (mg·L ⁻¹)	SS/ (mg·L ⁻¹)	P/ (mg·L ⁻¹)	pH
进水水质	300~500	45~60	7.6~15.2	6~9
出水水质	40~70	32~38	0.3~2.9	6~9

4 结束语

新型射流微泡曝气器的清水溶氧性能测试结果表明:该型射流微泡曝气器随着进气量从0.2 m³/h增加到2.0 m³/h时,曝气器氧总转移系数从0.052 L/min增加到0.338 L/min,理论动力效率从0.659 kg/kW·h增加到4.284 kg/kW·h。同时,该型射流微泡曝气器最优的进气量2.0 m³/h,氧利用率达50.6%,理论动力效率达4.3 kg/kW·h。另外,射流微泡曝气器应用于实际工程,其出水水质有了较大的改善,其中化学需氧量COD_{Cr}的平均去除率达到76.6%。

参考文献:

- [1] 高激飞,顾国维.射流曝气器的改进与发展[J].净水技术,2005,24(4):76-80.
Gao Jifei, Gu Guowei. Modification and development of jet aerator[J]. Water Purification Technology, 2005,24(4):76-80.
- [2] 姚萌,贺延龄.与射流曝气器充氧性能相关的一些因素[J].工业水处理,2004,24(4):74-76.
Yao Meng, He Yanling. Factors affecting the performance of jet aerator[J]. Industrial Water Treatment, 2004, 24(4):74-76.
- [3] 陈福泰,胡德志,栾兆坤.射流曝气器研究进展[J].环境污染治理技术与设备,2002,3(2):76-80.
Chen Futai, Hu Dezhi, Luan Zhaokun. The research progress of jet aerator[J]. Techniques and Equipment for Environment Pollution Control, 2002, 3(2):76-80.
- [4] Schmid A. New jet-aerator system using 'Supercavitation'[J]. Environ Sci Pollut Res, 2010(17):582-585.
- [5] Zhao Liqing, Sun Jianhong, Xu Changyue. Flow field analyses of plane jet at low reynolds numbers using lattice boltzmann method[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2012,29(3):199-206.
- [6] Moulick S, Mal B C. Prediction of aeration performance of paddle wheel aerators[J]. Aquacultural Engineering, 2002(25):217-237.
- [7] Arlo W, Tan E C. Paddlewheel aerator oxygen transfer efficiencies at three salinities[J]. Aquacultural Engineering, 1999(19):99-103.

- [8] 中华人民共和国城镇建设行业标准. CJ/T3015.2-1993,曝气器清水充氧性能测定[S]. 1993.
The People's Republic of China Urban Construction Industry Standard. CJ/T3015.2-1993, Oxygen transfer measurement of aerators in clean water [S]. 1993.
- [9] 刘晓旭,费庆志.不同填料对反应器充氧能力影响的比较研究[J].环境污染与防治,2007,29(3):190-192.
Liu Xiaoxu, Fei Qingzhi. Study on the effects of different bio-media on reactor oxygenation capacity[J]. Environment Pollution & Control, 2007,29(3):190-192.
- [10] 张闯,陶涛,李尔.两种曝气设备的清水曝气充氧实验研究[J].环境污染与防治,2006,28(1):25-27.
Zhang Chuang, Tao Tao, Li Er. Evaluation of two aerator based on results of clean water oxygenation experiment[J]. Environment Pollution & Control, 2006, 28(1):25-27.
- [11] 曹蕊.供气式低压射流曝气器与微孔曝气器性能的研究[D].陕西:陕西科技大学,2013:27-45.
Cao Rui. Study on performance of the air-forced type low-pressure jet aeration and microporous aeration [D]. Shanxi: Shangxi University of Science and Technology, 2013:27-45.
- [12] 何群彪,刘坤.三种曝气器在染料化工废水中充氧能力的比较[J].同济大学学报,2003,31(8):982-985.
He Qunbiao, Liu Kun. Comparison for oxygen capacities of three aeration diffusers in dye production wastewater[J]. Journal of Tongji University, 2003, 31(8):982-985.
- [13] 潘涛,邬杨善,王绍堂.三相生物流化床射流曝气器的研究与设计[J].给水排水,1997(5):11-15.
Pan Tao, Wu Yangshan, Wang Shaotang. The research and design of the aerator on the three-phase biological fluidized bed reactor [J]. Water & Wastewater Engineering, 1997(5): 11-15.
- [14] 张斌,郝玉萍.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(3):14-15.
Zhang Bin, Hao Yuping. Contrast experiments of oxygenation performance in clean water for several type of microporous aerator[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2013(3):14-15.
- [15] 王鹤立,王绍文.均匀受限曝气机理及清水充氧试验研究[J].中国给水排水,2001,17(1):15-17.
Wang Heli, Wang Shaowen. Research on mechanism of well-distributed limited-aeration by the oxygenated Clean water test[J]. China Water & Wastewater, 2001,17(1):15-17.
- [16] Pittoors E, Guo Yapin, Stijin W H. Oxygen transfer model development based on activated sludge and clean water in diffused aerated cylindrical tanks[J]. Chemical Engineering Journal, 2014(243):51-59.