

DOI:10.3969/j.issn.1007-9580.2016.02.005

一种新型管式曝气装置的设计与试验

宋奔奔, 单建军, 吴凡

(农业部渔业装备与工程技术重点实验室, 中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所, 上海 200092)

摘要:随着水产养殖业逐渐向高密度、集约化方向的发展,为实现氧气(O_2)高效溶解、二氧化碳(CO_2)调控、流态改善等目的,急需研制新型高效曝气装置,开发高效节能的曝气技术。基于气水两相溶解的双膜理论和文丘里原理,设计开发了一种管式曝气装置,经初步试验获得了影响增氧性能的关键技术参数,并以此为基础对曝气装置进行优化设计,研究新型节能增氧技术。试验结果表明,管式曝气装置中影响曝气效果的因素有水面高程(H_w)、缩径(D_1/D_2)、旋混结构、进气口大小、进气量等。水面高程、缩径、进气口越大,进气量越充足,曝气装置的增氧效果越高;而额外增加延长结构和旋混结构后,曝气装置水头损失增大、进气量下降,从而导致增氧效果显著下降。该装置利用额外水流动力实现增氧,是一种高效、节能、经济的新型曝气装置,可为水产养殖提供一种新的增氧方法。

关键词:管式曝气装置;曝气效率;节能增氧

中图分类号:S237;S951

文献标志码:A

文章编号:1007-9580(2016)02-022-06

水产养殖业逐渐呈现出向高密度、集约化方向发展的趋势。在循环水养殖中,溶氧的有效控制是系统运行中最关键的因子之一^[1],也是养殖集约化的前提之一^[2]。为实现氧气高效溶解、流态改善、二氧化碳(CO_2)调控等养殖目标,急需研制新型高效曝气装置,设计科学合理的曝气系统,开发高效节能的曝气增氧技术^[5-6]。如何提高氧气溶解效率、减少氧气逸出、合理控制溶氧水平等技术难关的突破,对循环水养殖技术的提高具有重大意义^[4]。为此,科研人员研制出各种类型的曝气装置和增氧机^[3-4]。基于气水两相溶解的双膜理论^[7-8]和文丘里原理^[9],设计开发了一种管式曝气装置,通过初步试验,获取了影响增氧性能的关键技术参数,并以此为基础对该装置进行优化设计,以期研究开发新型节能增氧技术提供参考。

1 材料和方法

1.1 管式曝气装置设计与工作原理

基于气水混合双膜理论研制的养殖水体曝气装置即管式曝气装置(图1)^[10],其顶部设置进气

口,在文丘里原理的作用下,通过一定的水流速度将空气吸入内部,充分混合后共同射入养殖池内。

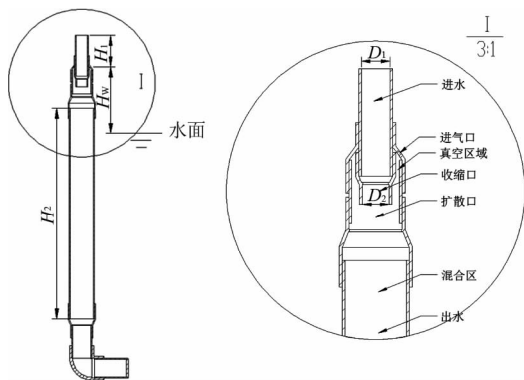


图1 管式曝气装置示意图(左)
与核心部位局部图(右)

Fig. 1 Sketch map of tube aeration device (left)
and part sectioned view (right)

1.2 试验系统

试验系统由水池、水管、气管、水泵、阀、压力表、流量计、气体流量计、管式曝气装置等组成(图2)。试验用水池直径1.5 m,水深0.6 m,使用一台潜水泵从池内取水再泵入管式增氧装置,

收稿日期:2015-11-28 修回日期:2016-02-30

基金项目:国家科技支撑计划(2012BAD38B04-3);农业部渔业装备与工程技术重点实验室开放课题(2012-061)

作者简介:宋奔奔(1983—),男,助理研究员,研究方向:养殖工程与养殖环境。E-mail:songbenben@fmiri.ac.cn

装置出水口浸没在水面下,沿鱼池切线方向推动水流旋转。

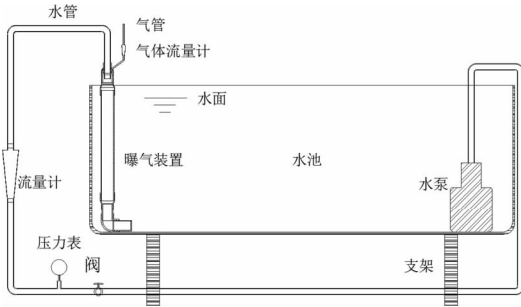


图2 曝气试验系统示意图

Fig. 2 Sketch map of aeration experiment system

1.3 试验设计

本文设计制造出一款新型管式曝气装置,并采用间歇非稳态法中的静态启动测试法进行溶氧试验^[8]。本试验于2012年5—9月在农业部渔业装备与工程重点开放实验室进行。试验条件:水温 $(26.94 \pm 2.05)^\circ\text{C}$,气压 (100.298 ± 0.018) kPa,盐度0(淡水),水体体积 1.06 m^3 。

参考相关文献^[12-14],先对清水中的溶氧进行消氧直至接近0,然后开启曝气装置;当水中溶氧上升至饱和溶氧的10%时开始记录溶氧和时间数据,至饱和溶氧的75%左右时结束试验;测定水中溶氧值,获得溶氧随时间的变化曲线,并按理论公式计算增氧能力 Q_s 和氧利用率 ε_s 。

1.4 水质测定及数据处理

溶氧测定采用YSI Professional Plus多参数水质分析仪器,并用Excel表格进行数据整理分析,对数字化处理数据后进行回归拟合分析。采用Solidworks软件进行优化设计,并进行流体流态的基础模拟分析。

1.5 曝气性能基础原理与计算依据

曝气和充氧过程均为传质过程,该过程依照双膜理论和菲克(Fick)定律^[4,5,15],氧传递微分方程为 $dc/dt = K_{La}(C_s - C)$,经积分整理后

$$\ln(C_s - C) = \ln C_s - K_{La} \cdot t \quad (1)$$

式中: dc/dt —单位时间氧的转移速率, $\text{mg}/(\text{L} \cdot \text{h})$; K_{La} —试验条件下的氧转移系数, h^{-1} ; C_s —标准状态下水中饱和溶氧值, mg/L ; C —时间 t 时水中实际溶氧值, mg/L ; t —增氧时间, h 。

标准状态下(20°C 水温,1个标准大气压)氧

转移系数^[16-17]:

$$K_{La(20)} = K_{La}/1.024^{(T-20)} \quad (2)$$

式中: $K_{La(20)}$ —标准状态下的氧转移系数, h^{-1} ; T —水温, $^\circ\text{C}$; 1.024—温度修正系数。

标准氧转移效率^[16-17]:

$$R_{SOTR} = K_{La(20)} \times (C_{s(20)} - C_0) \times V \quad (3)$$

式中: R_{SOTR} —标准氧转移效率, $\text{kg O}_2/\text{h}$; V —试验水体体积, m^3 ; $C_{s(20)}$ —标准状态(20°C)下的水中饱和溶氧值, mg/L ; C_0 —实验初始溶氧值, mg/L 。

2 结果

2.1 曝气装置水体流态、流速与水头损失模拟分析

假设置置中没有气孔和空气,只有清水,设定进水流量为 $10.98 \text{ m}^3/\text{h}$ 。结果表明,根据管径大小计算得出入口处流速为 3.83 m/s ,水压为 0.03 MPa ;软件模拟流体运行结果显示,最大压力为 $139\,784 \text{ Pa}$,最小压力为 $98\,156 \text{ Pa}$ 。此时负压吸气量可达到 $1.67 \text{ m}^3/\text{h}$ 。经流态软件流体模拟,最大流速(收缩口处)为 7.05 m/s ,最小流速(出水口处)为 $1.04 \sim 2.6 \text{ m/s}$ (图3)。

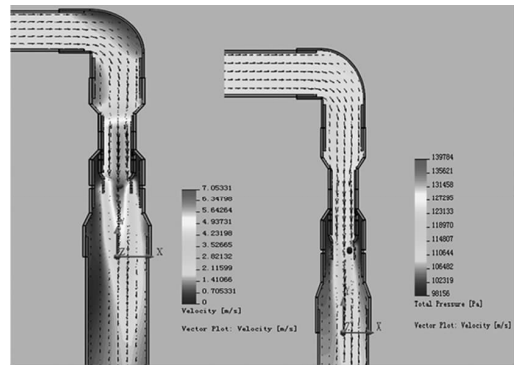


图3 管式曝气装置的流体流速模拟(左)与流体压力分布模拟(右)

Fig. 3 Simulation map of tube aeration device fluid elocity (left) and water pressure distribution (right)

2.2 进气孔径5 mm的曝气装置增氧效果

通过比较(图4),管式曝气装置孔径为5 mm时,双孔进气口略好于单孔进气口的增氧效果;双孔负压进气的增氧效果好于 $1\,584 \text{ L/h}$ 的正压进气,说明负压吸气量大于 $1\,584 \text{ L/h}$ 的正压进气量。当曝气装置进气口为双孔负压时,增氧效果最佳,溶氧达到 $7 \text{ mg}/\text{L}$ 约需 12 min ;经测量,此时负压吸气量为 $1.674 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

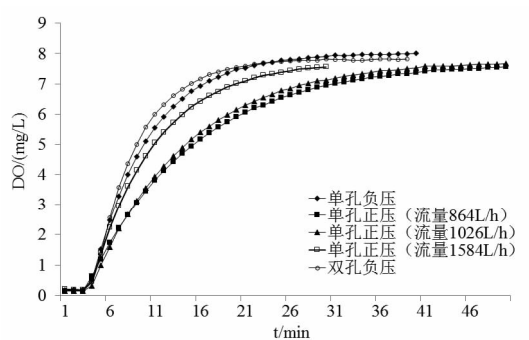


图4 管式曝气装置不同进气量的氧饱和曲线

Fig. 4 DO change under different air intake volumes of tube aeration device

2.3 进气孔径 1.5 mm 时不同进气孔数量的曝气装置负压增氧效果

如图5所示,当进气孔径为 1.5 mm 时,管式曝气装置增氧效果随着进气孔数量的增加而增强。说明 1.5 mm 孔径对于曝气装置的增氧性能而言仍然偏小;8 个孔径 1.5 mm 进气孔时,溶氧达到 7 mg/L,曝气装置增氧约需 37 min。

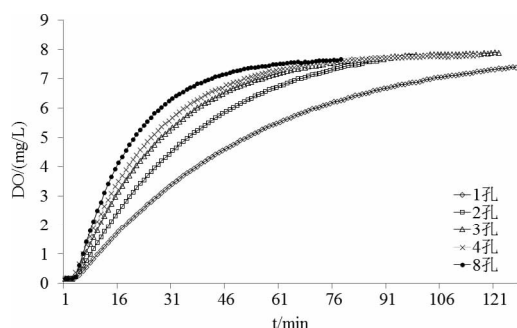


图5 孔径 1.5 mm 负压不同进气孔数量的氧饱和曲线

Fig. 5 DO change under different numbers of Φ 1.5 mm air hole of tube aeration device

2.4 不同缩径曝气装置的增氧效率

缩径指的是 D_1/D_2 , 通过缩小口径提高水流流速, 改变水流流态与动能, 影响进气量与气水混合效果, 从而导致不同的增氧效果。当缩径为 1、水流量为 $10.98 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 通过水流量与管径数值计算, 得出缩径处的流速为 3.01 m/s ; 当缩径为 1.28 时, 通过水流量与管径数值计算, 得出缩径处流速为 4.93 m/s ; 当缩径为 1.6 时, 通过水流量与管径数值计算, 得出缩径处流速为 7.69 m/s 。如图6所示, 随着缩径的增大和缩径处水流流速的

提高, 增氧效果也相应提高; 缩径为 1.6 时, 比缩径 1.28 增氧效果略有提高, 而此时能耗已经较高, 因此认为缩径处流速适宜范围为 $3 \sim 5 \text{ m/s}$ (缩径 1.28)。当流速为 4.93 m/s (缩径 1.28) 时, 溶氧达到 7 mg/L , 管式曝气装置增氧约需 21 min。

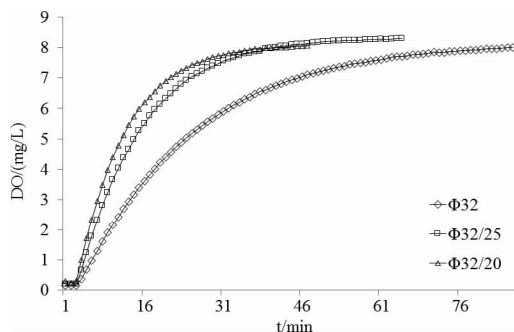


图6 管式曝气装置不同缩径时的氧饱和曲线

Fig. 6 DO change under different nozzle reduction ratios of tube aeration device

2.5 不同水面高程的曝气装置增氧效果

H_w 指的是水面高程, 一定程度上反映了曝气装置吸气后的气液混合时间。由于大气压和水压的影响, 正常情况下 H_w 的下限和水池液位一致, 但是在水流的冲击作用下, H_w 的下限会略低于水面液位。由于该部分测定较困难, 故采用 H_w 代表气液混合时间段, 反映从空气进入曝气装置到气液混合物进入水池中的主要混合时间段。如图7所示, 随着水面高程的提高, 管式曝气装置增氧效果有所提高, 当水面高程为 1080 mm 时, 溶氧达到 7 mg/L , 曝气装置增氧约需 10 min。经测量, 此时负压吸气量约 $1.674 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

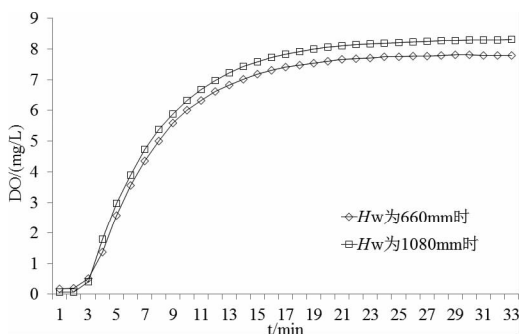


图7 管式曝气装置在不同水面高程时的氧饱和曲线

Fig. 7 DO change under different air hole heights above water level (H_w) of tube aeration device

2.6 曝气装置添加额外结构的混合效果

通过在管式曝气装置后端额外添加延长结构(出水口处额外添加 0.8 m 的管路)和旋混结构(如图 8,单螺旋形静态混合器由扭转 180°的螺旋板单元重复叠加构成,相邻的螺旋分别为左旋和右旋),探讨延长混合时间对曝气装置增氧效果的影响。图 9 表明,添加延长结构和旋混结构后,曝气装置增氧效果均显著下降。由此推测,管式曝气装置本身的气液混合时间已经足够使气液充分混合与溶解,添加额外结构的同时,使得水头损失增大,降低了吸气量,从而导致曝气效果下降。当无额外添加结构时,溶氧达到 7 mg/L,曝气装置增氧约需 12 min。

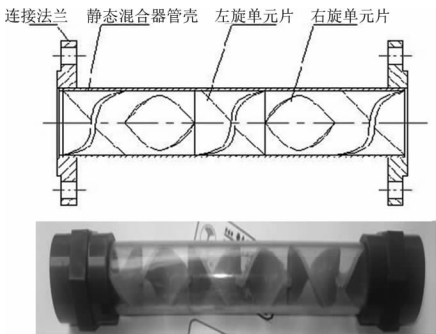


图 8 旋混结构

Fig. 8 Vortex structure

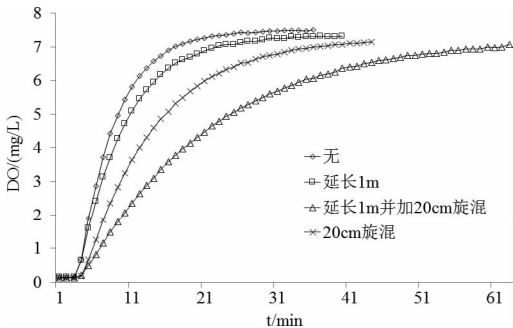


图 9 管式曝气装置不同结构的混合效果

Fig. 9 DO change under different extra structures of tube aeration device

3 分析与讨论

3.1 管式曝气装置流态模拟效果

假定水管中无气泡, $D_1/D_2 = 32/25$ 时,当水流量为 $10.98 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,经过计算,收缩口处流速为 6.2 m/s ,出水口处流速为 1.836 m/s 。因此认为

为最大流速约为 $6.2 \sim 7.05 \text{ m/s}$ 。假定装置工况为一个标准大气压,分析结果显示,管式曝气装置进水口压力为 $38\,784 \text{ Pa}$,出水口压力为 $15\,000 \text{ Pa}$,压力损失为 $23\,784 \text{ Pa}$ 。经收缩口处高速流体产生的真空区域的气压为 $98\,156 \text{ Pa}$,而大气压为 $101\,325 \text{ Pa}$,该局部负压区域的吸气压力为 $3\,169 \text{ Pa}$ 。该负压值是影响进气量与增氧能力的关键参数之一。

本试验结果表明,管式曝气装置的压力损失为 $23\,784 \text{ Pa}$,装置内最大流速 (D_2) 为 $6.2 \sim 7.05 \text{ m/s}$,压力为 $139\,784 \text{ Pa}$,此时负压吸气量可达到 $1.67 \text{ m}^3/\text{h}$ 。局部负压区吸气压力约为 $3\,169 \text{ Pa}$,该压力促使大气压下的空气流向装置内。该模拟结果初步揭示了管式曝气装置吸气和增氧的原理:吸气能力来自于水流在曝气装置特殊结构下产生的局部负压区域(低于空气大气压),从而得以吸入空气并进入装置。管式曝气装置的进水和进气均具有一定的初始速度和压力,压力水和空气在进入装置后,气流与水流沿气液混合管的轴向进入气液混合腔内,气水混合物在径向环流混合作用下会充分接触,从而提高气水接触面积和紊流系数,提高氧气溶解效率。

3.2 曝气装置的关键结构参数

理论上讲,采用正压进气比负压吸气的效果好,提供额外的气压能明显提高进气总量,从而提高氧气溶解效果,增氧效果随着气量的增大而提高。试验证明, 1.5 mm 孔径对于曝气装置的增氧性能而言仍然偏小。当管式曝气装置进气口为双孔负压(孔径 5 mm)时,增氧效果最佳,甚至比单孔正压 $1\,584 \text{ L/h}$ 的效果更好(图 4)。这是由于双孔负压的进气量比单孔正压的进气量充足,即由于水流高速流动产生局部负压区,从而使得产生吸气作用的气流量大于通过气泵和气管输入的气流量。这是由于本试验装置中,进气管外径为 5 mm ,内径为 3 mm ,进气管为软管,可能有一定的折叠,导致进气量不足,进而影响增氧效果。总体上,由于负压产生的气流量已可满足曝气装置的氧气溶解所需,因此不必增加额外的正压供气来提高曝气装置的增氧效果。

随着缩径的增大,缩径处的水流流速提高,同时水头损失也增大,从而使得吸气量提高,气水混合紊流、湍流作用增强^[20],改善了增氧效果。本

试验根据增氧效果和水头损失,初步明确了曝气装置缩径处流速适宜范围为 $3 \sim 5 \text{ m/s}$ 。各种曝气装置的曝气性能不仅受水质的影响,而且与水流运动状态、曝气量、曝气装置浸没深度和气泡直径等参数有很大的关系^[21]。本试验证明,随着水面高程的提高,曝气装置增氧效果随之提高,这是由于高程提高会延长气水混合时间。本曝气装置中,在高程范围内,气水在水流重力、水流流动量和进气动量等综合作用下自由高效混合;而在液面下,由于静水压的反作用,导致混合作用急剧减弱,因此认为有效的气水混合作用主要发生在高程范围内。

当添加额外延长结构和旋混结构后,曝气装置增氧效果均显著下降。可推测出曝气装置本身的气液混合时间已经足够使气液充分混合与溶解,添加额外结构的同时,使得水头损失增大、水流速度下降,导致吸气量降低的负效果大于增加旋混作用的正效果,从而导致曝气效果下降。

3.3 管式曝气装置的曝气效率

本试验管式曝气装置(0.4 kW)的标准氧转移效率(R_{SOTR})最高达到 $0.107 \text{ kg O}_2/\text{h}$,处于 Ryan 等^[18]研制的 U 管气体泵(1.47 kW)的中间值范围,其标准氧转移效率为 $0.059 \sim 0.207 \text{ kg O}_2/\text{h}$,低于 Fast 等^[19]研究的叶轮曝气增氧机(0.75 kW)的标准氧转移效率($0.220 \sim 1.725 \text{ kg O}_2/\text{h}$)。本试验装置属于文丘里曝气装置的衍生新品,和 U 管气提泵同样都属于扩散型曝气装置,而叶轮曝气增氧机属于表面曝气型曝气装置。一般而言,扩散性曝气装置由于动力需求低,因此标准氧转移效率普遍较低。这是管式曝气装置与气提泵接近,却低于叶轮曝气装置的原因所在。

Ryan 等^[18]研制的 U 管气提泵需风机提供 1.47 kW 的额外动力,能耗较高。本装置的优点是利用额外水流动力提高增氧效果,不需额外动力,是一种节能、经济的新型曝气装置。不同于传统的鼓风曝气也不同于机械表面曝气,本管式曝气装置是通过对供水管路出口的改良,设计独特的管路出口和进气结构,同时向供水管路的出水口曝气,从而实现在供水的同时也能供气的功能。

管式曝气装置产生的高速气液混流携带有大量的动能,可通过推流作用改善高密度养殖的水体流态,促进颗粒有机物和二氧化碳及时有效地

排出,改善养殖池水质,从而降低水体循环速率和水体循环能耗。针对特定的循环水养殖系统,通过科学合理地设计曝气系统,将本管式曝气装置整合进曝气系统,对于控制水体最佳溶氧、改善系统水体流态、实现节能减排目标具有重要意义。

4 结论

设计构建了一种简洁、高效的管式曝气装置,初步得出该装置中影响曝气效果的因素有水面高程(H_w)、缩径(D_1/D_2)、进气口大小和进气量等关键结构参数。试验发现, H_w 、 D_1/D_2 、进气口越大,进气量越充足,管式曝气装置的增氧效果越好;而额外增加延长结构和旋混结构,会使曝气装置水头损失增大,进气量下降,从而导致增氧效果显著下降。

本管式曝气装置目前仍存在一些技术问题,如当气水混合设计不当(气量过大,气压不稳)会出现憋气、水流不畅等现象,影响水流的正常流动,因此仍有待继续改进。如何优化水流切割方式、气水混合结构、进气口等曝气装置结构,怎样确定最佳的流速、气水比、水头损失、混合长度等一系列关键工况参数,提高管式曝气装置的利用效率等都值得进一步研究与改善。 □

参考文献

- [1] PARKER E V, COUTURIER M, BENFEI T. Oxygen management at a commercial fresh water recirculating aquaculture systems [D]. Fredericton, NB, Canada: Nova Scotia Agricultural College, the University of New Brunswick, 2000.
- [2] WOOD G L, WATTEN J B, GENE H C, *et al.* Modeling Gas Transfer and Biological Respiration in a Recirculating Aquaculture System [J]. Aquacultural engineering, 1996, 15(5):359-379.
- [3] 刘海英,曲克明,马绍赛.养殖水体中溶氧的变化及收支平衡研究概况[J].海洋水产研究, 2005, 26(2):79-84.
- [4] 董晓煜,张秀梅,张沛东.溶氧与养殖密度对褐牙鲆幼鱼血细胞数量及血红蛋白含量影响的研究[J].海洋水产研究, 2008, 26(6):40-46.
- [5] 宋奔奔,吴凡,倪琦,等.封闭循环水养殖中曝气系统设计与曝气器的选择[J].渔业现代化,2011,38(3):6-11.
- [6] KUMAR A, MOULICK S, MAL B C. Selection of aerators for intensive aquacultural pond [J]. Aquaculture Engineering, 2013(56):71-78.
- [7] JAMES A M, WILLIAM C B, POPEL H J. Aeration;

- principles and practice [M]. New York: CRC press, 2002: 26-29.
- [8] 羊寿生. 曝气的理论与实践 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1982: 4-15.
- [9] 陈次颖. 德制 ATK VENTURI II 自动泡沫分离器 [J]. 渔业现代化, 1998(4): 17-18.
- [10] 宋奔奔, 吴凡, 单建军, 等. 一种养殖水体曝气装置: 中国, ZL201210407653.2 [P]. 2013-01-16.
- [11] CJ/T 3015.2-1993. 曝气器清水充氧性能测定 [S].
- [12] SC/T6009-1999. 增氧机增氧能力试验方法 [S].
- [13] 谷坚, 徐皓, 丁建乐, 等. 池塘微孔曝气和叶轮式增氧机的增氧性能比较 [J]. 农业工程学报, 2013, 29(22): 212-217.
- [14] 王娟, 于杰, 范迪, 等. 曝气设备充氧性能测试装置及实验研究 [J]. 青岛理工大学学报, 2007, 28(3): 54-58.
- [15] BARRUTA B, BLANCHETON J P, CHAMPAGNEC J Y, *et al.* Mass transfer efficiency of a vacuum airlift—Application to water recycling in aquaculture systems [J]. Aquacultural Engineering, 2012, 46: 18-26.
- [16] SC/T6051-2011. 溶氧装置性能试验方法 [S].
- [17] ASCE/EWRI 2-06. ASCE Standard: Measurement of Oxygen Transfer in Clean Water [S].
- [18] RYAN H. Gas transfer in air-lifts used to recirculate aquaculture systems [D]. US Louisiana State: Louisiana State University, 2009.
- [19] FAST A W, TAN EC, STEVENS D F, *et al.* Paddlewheel aerator oxygen transfer efficiencies at three salinities. Aquaculture Engineering [J]. 1999, 19(2), 99-103.
- [20] 机械设计手册编委会. 机械设计手册: 管道与管道附件 [M]. 4 版. 北京: 机械工业出版社, 2007: 11-17.
- [21] 冯俊生, 万玉山. 鼓风曝气充氧性能与曝气器水深关系 [J]. 环境工程, 2007, 25(1): 19-22.

Design and oxygenation experiment of a new tube aeration device

SONG Benben, SHAN Jianjun, WU Fan

(Key Laboratory of fishery Equipment and Engineering, Ministry of Agriculture,
Fishery Machinery and Instrument Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences,
Shanghai 200092, China)

Abstract: With the aquaculture industry becoming more intensive and industrialized, it is in urgent need to study energy-saving aeration technologies and develop new aeration devices with high performance thus to achieve high efficiency of oxygen dissolving, CO₂ stripping and fluidization improving. Based on the double film theory of air and water two-phase dissolution and Venturi tube principle, a new tube aeration device was designed and developed. The key technological parameters affecting aeration performance were studied and elaborated, based on which the device structure was optimized to develop new-type energy-saving technology for fishery aeration and oxygenation. This study showed that the aeration efficiency was the influenced by such key structure parameters as height above water level (H_w), diameter shrinkage (D_1/D_2), air inlet size and air flow rate. Within certain limits, the aeration and oxygenation efficiency was higher if the H_w , diameter shrinkage, air inlet size and air flow volume were also higher or larger. However, the additional increase of the prolonging and spiral mixing structures pushed up head loss, brought down air flow rate and thus reduced the aeration and oxygenation efficiency. This new tube aeration device utilizes extra flow dynamics to realize water oxygenation, providing a novel oxygenation method in aquaculture with the merits of high-efficiency, energy-saving, simple operation and economic production.

Key words: tube aeration device; aeration efficiency; energy-saving oxygenation