

裴凯,王永江,黄庆兰,等.面向池塘圈养模式的气液混合泵的参数优化及增氧试验[J].华中农业大学学报,2024,43(2):40~46.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2024.02.005

面向池塘圈养模式的气液混合泵的参数优化及增氧试验

裴凯¹,王永江^{1,2},黄庆兰¹,朱明^{1,2},何绪刚^{2,3},冯耀泽^{1,2}

1. 华中农业大学工学院,武汉 430070; 2. 农业农村部水产养殖设施工程重点实验室,武汉 430070;
3. 华中农业大学水产学院,武汉 430070

摘要 为探究气液混合泵能否满足在高密度养殖条件下养殖对象对水体溶氧的需求,基于气液(氧气-水)混合泵搭建溶氧试验平台,在不同水温、不同出水压力和不同气水体积比的条件下,测试气液混合泵溶氧性能,并在池塘圈养桶(直径4 m,高2 m,养殖水体体积20 m³)内进行增氧试验。溶氧性能测试结果显示:当出水压力为0.25 MPa、气水体积比为0.01~0.05时,在不同水温(5.6、13.5、30.3)条件下出水溶解氧与水温成反比,溶解氧在47.93~20.60 mg/L变化;氧气吸收效率与气水体积比呈反比,氧气吸收效率在91%~33.7%变化;动力效率与气水体积比成正比,动力效率在22.32~55.12 kg/(kW·h)变化。基于圈养桶的增氧试验结果显示,在有鱼耗氧的条件下(黄颡鱼,单个桶内养殖密度为13.19~16.49 kg/m³),使用功率3 kW的气液混合泵为4个圈养桶增氧时,每个桶内水体溶解氧在光照时间内可达11 mg/L,夜间稳定保持在8 mg/L以上。试验结果表明气液混合泵可应用于高密度的水产养殖,并能有效应对夏季高温供氧难题。

关键词 水产养殖;溶氧;气液混合;纯氧增氧;池塘圈养

中图分类号 S969.32 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2024)02-0040-07

中国是世界上最大的水产品消费国,水产品的供给越来越依靠于水产养殖^[1]。而我国池塘养殖约占淡水养殖的74%,是淡水养殖的主要形式^[2]。近年来,随着我国水产养殖规模化、产业化水平的不断提高,高密度养殖模式已成为水产养殖业的主要发展方向。池塘圈养模式由于能够及时清除圈养桶内养殖废弃物,具有较高的清污效率^[3],养殖容量可达50~100 kg/m³^[4],但高密度养殖也导致耗氧加剧,因而圈养桶内水体的溶解氧浓度也成为了养殖户关心的重要问题。

在传统的池塘养殖中主要采用叶轮式^[5]、水车式^[6]、射流式^[7]、微孔曝气式^[8]等增氧机来增加养殖水体中的溶解氧含量。但在池塘圈养模式中每个圈养桶内的养殖密度较大,当夏季水温较高时,利用空气增氧效率低、效果差,溶解到水里的氧气很快通过空气-水界面散失,采用空气曝气的增氧方式已不能很好地满足养殖要求,需要探索新的增氧方式。

气液混合泵目前主要在污水处理中作为生产气泡的主要设备,工作时以空气为介质,经腔体内叶轮的切割、分散和泵体内的高压力作用,使空气和水充分混合产生纳米气泡水,然后混合泵将产生的纳米气泡水排放到污水池中利用微小气泡为载体吸附杂质,同时又对污水进行增氧。本研究尝试以氧气为介质,利用气液混合泵为水产养殖水体增氧,探索可行性和工艺参数;探究气液混合泵在不同气水体积比、不同工作压力和不同水温条件下对养殖水体的溶氧效果、氧气吸收效率和系统动力效率的影响;分析、优化气液混合泵在增氧时的工作效率,并在池塘圈养桶内进行增氧试验,以期为找到一种更好的适用于池塘圈养模式的增氧方式提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 气液混合泵增氧的传质模型

相间传质涉及的领域非常广泛,在工程和理论

收稿日期:2022-11-02

基金项目:中央高校基本科研业务费专项(11041910103;11041910104)

裴凯,E-mail:k1666888@163.com

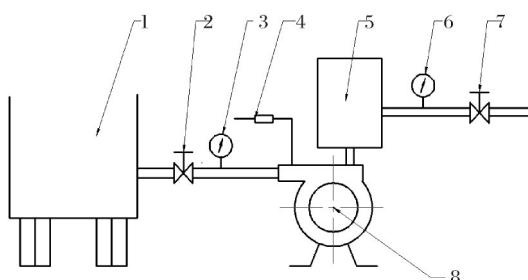
通信作者:王永江,E-mail:wangyongjiang@mail.hzau.edu.cn

上应用较多的是Whitman^[9]提出的双膜理论。根据双膜理论和亨利定律可以推导出氧转移公式^[10]，在向水中增氧时想要增加液相中溶解氧浓度，可以适当强化液相主体的紊流，提高氧转移公式中氧传质系数的实际值^[11]。

气液混合泵在增氧时，利用入口处的负压同时吸入氧气和水，在腔体内经过叶轮的切割搅拌使气液两相处于较强的紊流状态，这可以增大气液间的接触面积、降低液膜厚度，有利于氧传质过程。由于腔体内是加压混合，可以迅速使氧气在水中的溶解度达到饱和，在强大的压力作用下还可以将氧气分子的动能转化为内能，克服两相界面处虚拟膜所产生的阻力，从而增加液相中的溶解氧浓度。

1.2 气液混合泵增氧性能测试

1) 试验装置及试验设计。试验装置如图1所示，试验所用气液混合泵由南方泵业股份有限公司研制，功率 $P=0.55 \text{ kW}$ ，电压 $U=220 \text{ V}$ ，流量 $Q=1 \text{ m}^3/\text{h}$ ，扬程 $H=40 \text{ m}$ 。进水管连接水箱，水箱体积400 L，在华中农业大学水产学院养殖教学实践基地圈养池塘进行试验。氧气源自氧气瓶，本试验采用工业氧气瓶，液态容积40 L，纯度约99.8%。溶氧检测使用YSIProSolo型溶氧仪，量程0~50 mg/L。在进气管上装有氧气流量计，型号YB-4M，量程0.2~2 L/min。压力表量程0~0.4 MPa，真空表量程-0.1~0.15 MPa。



1. 水箱 Water tank; 2. 进水控制阀 Inlet valve; 3. 真空表 Vacuum gauge; 4. 氧气流量计 Flowmeter; 5. 压力罐 Pressure vessel; 6. 压力表 Pressure gauge; 7. 出水控制阀 Outlet valve; 8. 气液混合泵 Gas-liquid mixing pump.

图1 试验装置示意图

Fig.1 Diagram of test device

由于试验用水取自养殖池塘，水体初始溶氧浓度较高，为避免初始溶氧对气液混合泵增氧结果产生影响，每次试验前向水箱内投入一定量的脱氧剂亚硫酸钠(Na_2SO_3)和催化剂氯化钴(CoCl_2)充分搅拌后对水体脱氧，使水箱中水的溶氧含量保持在

$(2.0 \pm 0.2) \text{ mg/L}$ ，模拟养殖过程中水体低溶氧状态。启动气液混合泵，调节进水阀门，使真空表产生负压，打开氧气流量计开关，同时调节出水控制阀控制混合泵的出水压力以及氧气的吸入量，使气液混合泵在不同出水压力和气水体积比的工况下溶解氧气，产生富氧水。使用溶氧仪在管道出水口检测不同工况条件下产生富氧水的DO值和水温并记录数据。本试验设置3组不同水温，调节6组不同出水压力和5组不同气水体积比。考虑到氧气实际吸入量受氧气瓶出口压力和混合泵吸力的影响，每组试验重复3次，取平均值作为每个工况下产生富氧水中的溶解氧含量。

2) 测定指标。根据溶氧仪测定试验过程中进出水的溶解氧值，利用公式(1)、(2)分别计算出气液混合泵溶氧过程中的氧气吸收效率和系统的动力效率。

$$A = \frac{[Q \times (C_{\text{out}} - C_{\text{in}}) \times 10^{-3}]}{M_{\text{O}_2}} \quad (1)$$

式(1)中： A 为氧气吸收效率，使用混合泵溶氧转移进水中的氧气与输入氧气的质量比^[12]，%； C_{in} 为进水溶解氧质量浓度，mg/L； C_{out} 为出水溶解氧质量浓度，mg/L； Q 为出水流量，L/min； M_{O_2} 为输入混合装置的纯氧流量，g/min。

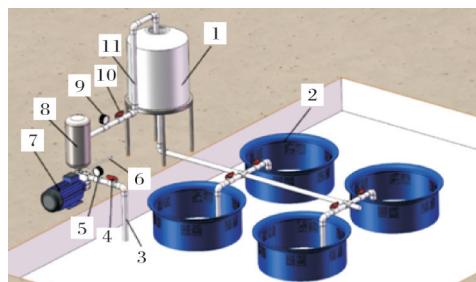
$$T = \frac{[Q \times (C_{\text{out}} - C_{\text{in}}) \times 60 \times 10^{-3}]}{P} \quad (2)$$

式(2)中： T 为气液混合泵动力效率，表示设备每消耗 1 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 电能而溶解到水中氧气的质量，kg/(kW·h)； P 为气液混合泵的功率，kW。

1.3 气液混合泵参数优化及圈养桶增氧试验

根据对气液混合泵溶氧性能的测试发现出水压力和气水体积比对产生富氧水中溶解氧浓度的影响较为显著，在测试压力0.05~0.30 MPa范围内溶解氧随压力的增加而增加，但当压力超过0.25 MPa以后产生的富氧水中溶解氧增量并无明显增加，而且还会影响富氧水的排放量；在测试的气水体积比0.01~0.05范围内溶解氧随体积比增加而增加，但氧气吸收效率却随体积比增加而减小，在气水体积比0.01时氧气吸收效率最高，考虑到氧气成本，最终决定采用压力0.25 MPa，气水体积比0.01为最优工艺参数，选择3 kW大功率的气液混合泵于华中农业大学水产学院养殖教学实践基地圈养平台进行圈养桶（直径4 m，高2 m，养殖水体体积20 m³）增氧试验。增氧系统如图2所示，气液混合泵通过进水管直接从

圈养池塘抽水,产生的富氧水先排放至距离地面2 m高的储水箱内,然后再利用水体自重分别排放到每个圈养桶底部。



1. 储水箱 Water tank; 2. 圈养桶 Captive bucket; 3. 进水管 Inlet pipe; 4. 进水控制阀 Inlet valve; 5. 真空表 Vacuum gauge; 6. 进气管 Intake pipe; 7. 气液混合泵 Gas-liquid mixing pump; 8. 压力罐 Pressure vessel; 9. 压力表 Pressure gauge; 10. 出水控制阀 Outlet valve; 11. 出水管 Outlet pipe.

图2 圈养平台增氧系统示意图

Fig.2 Captive platform oxygenation system

在圈养桶增氧试验中本研究以4个圈养桶为单位进行增氧,试验用鱼为黄颡鱼,每个桶内的养殖密度为13.19~16.49 kg/m³,试验周期为24 h,每间隔

1 h测量1次水中溶氧。溶氧测量过程中每个圈养桶内1次测量4组数据,4个测量点以排水管道处为起始点间隔90°均匀分布,每个测量点距离水面1.5 m。

在气液混合泵产生富养水的溶解氧测量过程中,使用溶氧仪在管道出水口测量得到不同工况下富氧水中DO值,溶解氧浓度以3次重复试验的“平均值±标准差”表示。

2 结果与分析

2.1 不同气水体积比工况下溶解氧分析

图3给出了在不同水温和不同出水压力下水体DO质量浓度随气水体积比(G:L)的变化情况,由图3可知,在试验测定的气水体积比0.01~0.05、出水压力0.05~0.30 MPa范围内,水中DO质量浓度随气水体积比的增加呈现递增趋势。随着氧气投放量和出水压力的不断增加,可以调高溶解氧过程的推动力,显著提高氧气向水中的转移效率,气液混合泵纯氧混合装置在水温5.6、13.5和30.3 °C时产生富养水中的溶解氧分别最大可以达到46.26、45.71和36.95 mg/L。

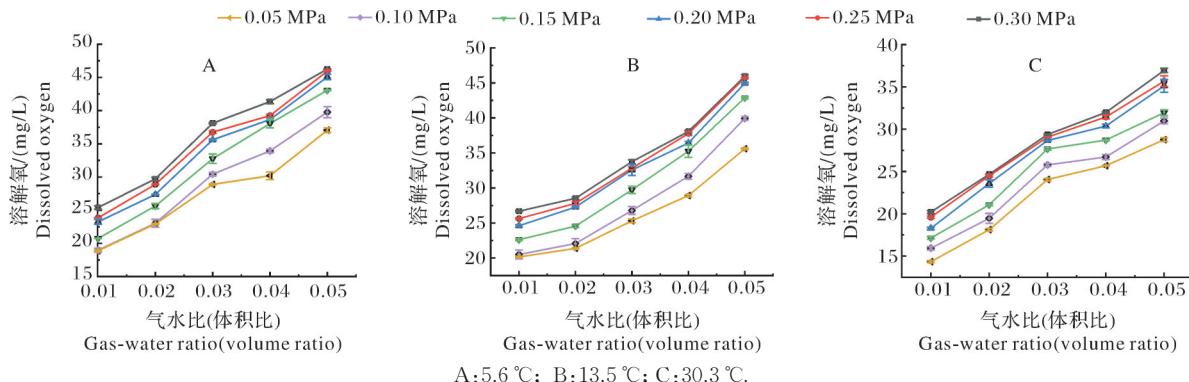


图3 水体溶解氧随气水体积比变化曲线

Fig.3 Curve of dissolved oxygen with water volume ratio

2.2 不同出水压力工况下溶解氧分析

图4显示了气液混合泵排放富养水中的溶解氧和出水压力呈正相关。气液混合泵在向水中溶解氧气时腔体内的叶轮会将吸入的氧气切割成微小氧气泡,随着溶气环境内绝对压力的不断增加,微气泡的直径会直线下降,氧气泡的体积变小,气体溶解量增大,溶氧含量也会随之增加。在这个过程中也会有一定量未溶解的微小氧气泡结合成大气泡进入压力罐,随着气体的不断吸入,这部分氧气的浓度始终维持在一个较高水平,随着出水压力的不断增加,压力罐和出水管道内的压力也会增加,在高压的作用下会发生二次溶氧现象,从而提高排放出的水中溶解

氧浓度。但当压力超过0.25 MPa时受氧气通入量的限制,压力对水中溶解氧的影响逐渐减小,此后富氧水中溶解氧浓度的增量减小,气液混合泵排放的富氧水中DO值并无明显增加,这也说明在气液混合泵溶氧过程中压力高于所需范围对溶氧效果并无明显益处,反而过高的出水压力还会降低富氧水的排放量和增大泵的动力消耗。

2.3 不同水温下溶解氧分析

图5表示的是在不同水温条件下的溶解氧曲线(试验时间分别在冬季、春季和夏季,试验时养殖池塘平均水温分别为5.6、13.5、30.3 °C),由图5可知在相同的溶氧工况下水温越高,气液混合泵排放出的

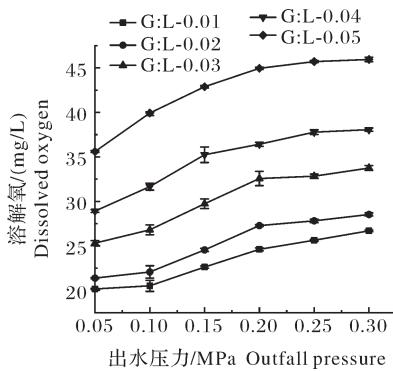


图4 水体DO随压力变化曲线
Fig.4 Curve of DO with pressure

富营养水中DO的质量浓度越低。水体温度升高时,水分子的黏性系数会降低,扩散系数会增加,液膜的厚度随之降低,氧传质系数 K_{La} 的值增加,这会促进氧传质过程。但较高水温也会对水体的溶解氧饱和度 C_s 有显著影响,水温越高水中溶氧饱和度越低,过高的水温会增加氧分子的动能,使溶解到水中的氧气分子通过自由扩散运动快速的从水界面散失到空气中去,降低液相中氧的梯度值,抑制氧气的转移。因此,在氧传质过程中水温会对氧传质有着2种相反的影响,但这并不能相互抵消,总体上在水体高温状态下会抑制氧传质过程。本试验用水取自圈养池塘,水中含有部分耗氧微生物,温度升高,耗氧速率增大,可能也会对试验结果造成一些影响,但在不同温度下得到的溶氧结果在整体趋势上和“气体的溶解度随温度升高而降低”的理论是相符的。

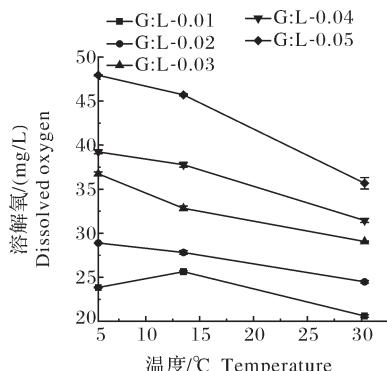


图5 出水压力0.25 MPa下溶氧随温度变化曲线
Fig.5 Curve of dissolved oxygen with temperature at water pressure 0.25 MPa

2.4 气水体积比对气液混合泵氧气吸收效率的影响

根据气液混合泵的出水溶氧检测结果利用公式(1)计算得到的该系统在溶氧过程中的氧气吸收效率结果如图6所示。由图6可知随着气水体积比的

不断增加,氧气的吸收率呈现下降趋势,在气水体积比为0.01时氧气的吸收效率最高,在低温5.6 °C时氧气吸收效率最大可以达到91%,在高温30.3 °C时最大可以达到72%。随着气水体积比的不断增大,气液混合泵产生的富氧水会逐渐变成视觉感官为乳白色状的浑浊液体,之前溶解于水中的氧气会以微小

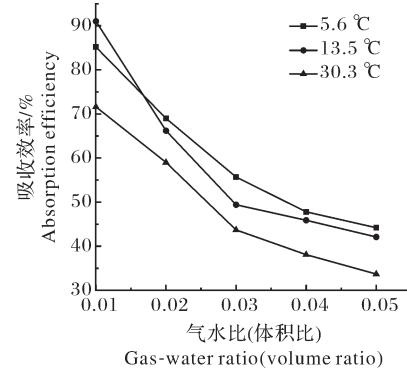


图6 出水压力0.25 MPa下氧气吸收效率变化曲线
Fig.6 Curve of oxygen absorption efficiency at water pressure 0.25 MPa

气泡的形式释放出来。将气液混合泵停止工作后,乳白状的微气泡-水混合液中微小的氧气气泡会上浮,继而散失到空气中去,一段时间后恢复到原来的清水状态。试验中用2 000 mL烧杯在气液混合泵出水口盛取不同气水比工况下排放的富氧水,记录富氧水从浑浊到澄清的时间,每一工况下测量3次,以秒为单位,记录气泡悬浮的平均时间。结果发现在气水体积比为0.01、0.02、0.03、0.04和0.05时气液混合泵产生富氧水中气泡的悬浮时间为0、112、90、75和51 s。由试验结果发现,气水体积比为0.01时产生的富氧水处于非饱和状态,无气泡产生;而当气水体积比大于0.01时产生的富氧水处于饱和状态,气水体积比越高,排放出来的富氧水越浑浊,释放出来的微小氧气泡越多,溶解到水中的氧气占氧气总通入量的比例越小,这也导致氧气的吸收效率随氧气通入量的增加而减小。

2.5 气液混合泵动力效率分析

增氧设备的动力效率是衡量其增氧性能优劣的一项重要指标,气液混合泵作为一款纯氧混合装置,在增氧能力满足高密度养殖要求的前提下,还必须具有低能耗的特点。根据公式(2)计算得到了气液混合泵于最优工作压力0.25 MPa工况下在水温5.6、13.5和30.3 °C时向水中溶解氧气时的动力效率变化曲线如图7所示。由图7可知,在试验测定的气水体积比0.01~0.05范围内随着氧气通入量的不断增加,

气液混合泵的动力效率逐渐递增。在气水体积比0.01时动力效率最低,在水温30.3℃向水中溶氧的动力效率最小值也可达到22.32 kg/(kW·h)。由此可见气液混合泵在增氧过程中,在节能性方面表现较优。

2.6 圈养桶水体增氧效果

图8是气液混合泵为4个圈养桶增氧时桶内水体溶解氧变化曲线,由图8可知采用气液混合泵增氧时,4个圈养桶内水体的溶解氧均呈现先增加后降低的趋势,通常在16:30左右达到最大溶氧值,之后降低直至趋于稳定状态。在氧气通气量不变的情况下,通过对气液混合泵进出水溶氧检测发现,在一昼夜内溶解氧浓度也呈现先增加后减少的趋势。通过观察发现在圈养池塘内种植了一些苦草用于净化水质,基本可以推测水中植物的光合作用在白天释放

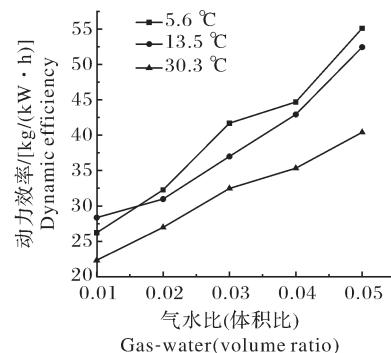
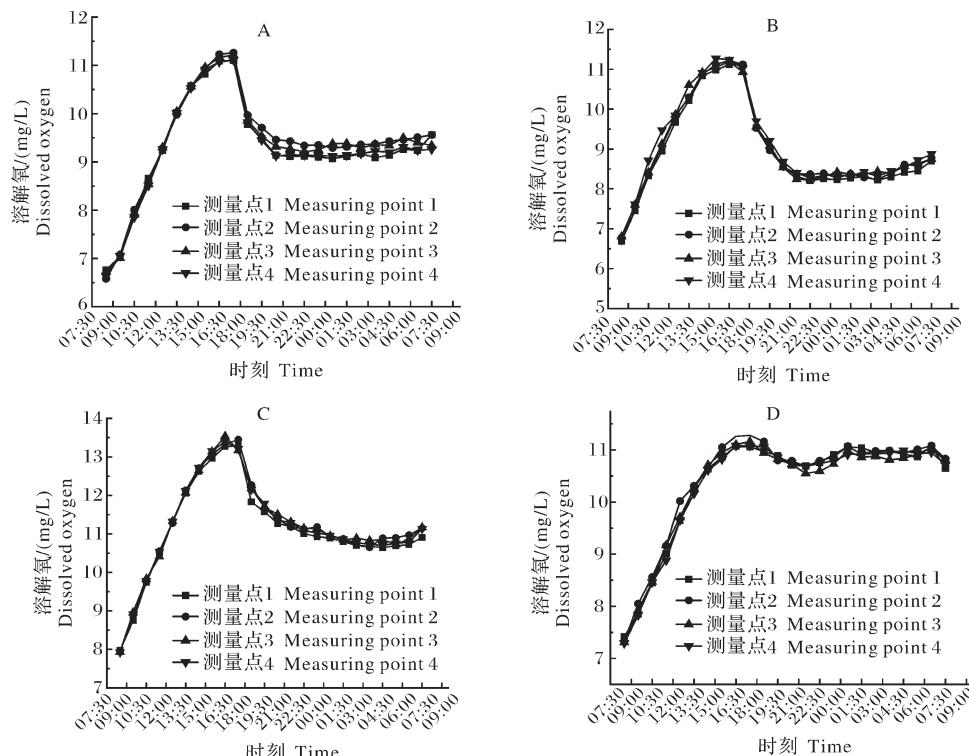


图7 出水压力0.25 MPa动力效率变化曲线

Fig.7 Dynamic efficiency curve of water pressure 0.25 MPa

了许多氧气溶于水中,导致在白天进水初始溶氧较高,在夜间光合作用消失后,水中生物呼吸作用加强消耗水中氧气,进水初始溶氧降低,导致气液混合泵产生富氧水的整体溶氧水平也会降低。



A:1号桶 No. 1; B:2号桶 No. 2; C:3号桶 No. 3; D:4号桶 No. 4.

图8 圈养桶内水体溶解氧变化曲线

Fig.8 Dissolved oxygen change curve of water in captive bucket

经过一昼夜时间对圈养桶内水体溶氧的不同断测量发现,4个圈养桶内在有鱼耗氧的情况下,白天最大溶氧可以达到11 mg/L,在夜间处于稳定状态时每个桶内的溶解氧也可保持在8 mg/L以上,且每个桶内4个测量点的溶氧差值均保持在0.2 mg/L以内,溶氧均匀性较好。而采用空气曝气增氧在夏季

水温较高时经过鱼的耗氧后每圈养桶内溶解氧一般在3 mg/L左右,可见气液混合泵结合纯氧增氧在增氧效果上要优于传统的微孔曝气式增氧。

3 讨 论

本研究以气液混合泵为核心装置采用纯氧为介

质搭建增氧系统,测试气液混合泵的溶氧性能,并在池塘圈养平台的圈养桶内进行增氧试验,验证气液混合泵结合纯氧增氧的可行性。气液混合泵腔体内有叶轮,经气嘴吸入的氧气会被切割成纳米级气泡,微气泡具有良好的渗透性和溶解性,能够强化气液传质过程,使氧气更好地溶解到水中去^[13];而纯氧是空气中氧气质量分数(21%)的4.7倍,氧分压也是4.7倍,纯氧比空气中氧气在水中的饱和度也要高4.7倍^[14];这也使得气液混合泵在温度5.6、13.5和30.3℃时产生的富氧水中溶解氧分别可以达到46.26、45.71和36.95 mg/L。增大气水体积比可以增加富氧水中的溶解氧浓度,但随着氧气通入量不断增加,气液混合泵会产生过度饱和的富氧水,经出水控制阀减压消能后会发生气穴效应^[15],溶解于水中的氧气会以微小气泡的形式释放出来,继而散失到空气中;根据研究发现水中微气泡越多,水分子对气泡的摩擦阻力就越小,气泡散失的速度就越快^[16-17],这会降低氧气的利用率,增大氧气使用成本,因此,在使用气液混合泵增氧时要尽量避免产生过度饱和的富氧水。经过对气液混合泵溶氧性能进行测试,最后选则最优工作参数在池塘圈养桶内进行了增氧试验;溶氧检测结果显示4个圈养桶内的溶解氧在有鱼消耗的情况下白天光照时间内可以达到11 mg/L,夜间稳定保持在8 mg/L,且4个数据测量点的溶氧波动性保持在0.2 mg/L以内,溶氧均匀性较好,表明使用气液混合泵结合纯氧增氧能够很好地满足高密度养殖模式下养殖对象对水体的溶氧需求。

参考文献 References

- [1] CHANG Z Q, NEORI A, HE Y Y, et al. Development and current state of seawater shrimp farming, with an emphasis on integrated multi-trophic pond aquaculture farms, in China: a review[J]. Reviews in aquaculture, 2020, 12(2):2544-2558.
- [2] 农业农村部渔业渔政管理局,全国水产技术推广总站,中国水产学会.中国渔业统计年鉴-2022[M].北京:中国农业出版社,2022. Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisher. China fishery statistical yearbook-2022[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2022(in Chinese).
- [3] 何绪刚,侯杰.池塘圈养模式研究进展[J].华中农业大学学报,2021,40(3):21-29. HE X G, HOU J. Research progress on pond Juanyang mode [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40 (3) : 21-29 (in Chinese with English abstract).
- [4] 何绪刚.池塘“零排放”绿色高效圈养新模式[J].渔业致富指南,2019(14):27-28. HE X G. A new green and efficient captive mode of “zero discharge” in ponds [J]. Fishery guide to be rich, 2019(14):27-28 (in Chinese).
- [5] 蒋建明,朱正伟,李正明,等.水产养殖中复合精确自动增氧技术研究[J].农业机械学报,2017,48(12):334-339. JIANG J M, ZHU Z W, LI Z M, et al. Technology of green accurate oxygen enhancement in aquaculture [J]. Transactions of the CSAM, 2017, 48 (12) : 334-339 (in Chinese with English abstract).
- [6] KANG Y H, LEE M O, CHOI S D, et al. 2-D hydrodynamic model simulating paddlewheel-driven circulation in rectangular shrimp culture ponds [J]. Aquaculture, 2004, 231 (1/2/3/4):163-179.
- [7] DESWAL S, VERMA D V S . Performance evaluation and modeling of a conical plunging jet aerator [J]. International journal of engineering and applied sciences, 2008, 4 (5) : 278-282.
- [8] 程香菊,曾映雪,谢骏,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. CHENG X J, ZENG Y X, XIE J, et al. Impact of micro-porous aeration flow and aeration tube length on oxygen transfer performance in water [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30 (22) : 209-217 (in Chinese with English abstract).
- [9] WHITMAN W G. The two film theory of gas absorption [J]. International journal of heat and mass transfer, 1962, 5 (5) : 429-433.
- [10] 靳明伟,丁建宁,凌智勇,等.超微细气泡水体修复技术[J].功能材料与器件学报,2008,14(1):19-22. JIN M W, DING J N, LING Z Y, et al. River system repair technology of super-micro bubble [J]. Journal of functional materials and devices, 2008, 14 (1) : 19-22 (in Chinese with English abstract).
- [11] 程坤.富氧水制备装置的设计和试验研究[D].无锡:江南大学,2017. CHENG K. The rig and experimental study for preparation of oxygen-enriched water [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2017 (in Chinese with English abstract).
- [12] WATTEN B J, BOYD C E. Gas transfer within a multi-stage packed column oxygen absorber: model development and application[J]. Aquacultural engineering, 1990, 9 (1) : 33-59.
- [13] 熊永磊,杨小丽,宋海亮.微纳米气泡在水处理中的应用及其发生装置研究[J].环境工程,2016,34(6):23-27. XIONG Y L, YANG X L, SONG H L. Review on application of micro-nano bubble in water treatment and its generator [J]. Environmental engineering, 2016, 34 (6) : 23-27 (in Chinese with English abstract).
- [14] 陈致泰,李世刚,韩光瑶,等.微气泡纯氧曝气技术用于河湖复氧治理[J].水科学与工程技术,2008(1):17-19. CHEN Z T, LI S G, HAN G Y, et al. Micro-bubble pure oxygen aeration that used in renew oxygen of rivers and lakes [J]. Water sciences and engineering technology, 2008 (1) : 17-19 (in Chinese with English abstract).

- Chinese with English abstract).
- [15] 时玉龙,王三反,武广,等.加压溶气气浮微气泡产生机理及工程应用研究[J].工业水处理,2012,32(2):20-23.SHI Y L, WANG S F, WU G, et al. Study on the mechanism of the micro-bubble formation of pressure dissolved air flotation and application [J]. Industrial water treatment, 2012, 32(2): 20-23 (in Chinese with English abstract).
- [16] 石晟伟,王江安,蒋兴舟.水中微气泡上浮过程的力学影响因子研究[J].海军工程大学学报,2008,20(3):83-87.SHI S W, WANG J A, JIANG X Z. Mechanics effect study of a rising micro-bubble in still water [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2008, 20(3): 83-87 (in Chinese with English abstract).
- [17] 付攀,王路.水中微气泡运动特性的理论研究与仿真[J].舰船电子工程,2009,29(4):155-158.FU P, WANG L. Theoretical study and simulation of a single micro-bubble in still water [J]. Ship electronic engineering, 2009, 29(4): 155-158 (in Chinese with English abstract).

Parameter optimization and oxygen aeration test by gas-liquid pump for pond aquaculture of captive-pond mode

PEI Kai¹, WANG Yongjiang^{1,2}, HUANG Qinglan¹, ZHU Ming^{1,2}, HE Xugang^{2,3}, FENG Yaoze^{1,2}

1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. Key Laboratory of Aquaculture Facilities Engineering, Ministry of Agriculture and
Rural Affairs, Wuhan 430070, China;

3. College of Fisheries, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Abstract Aquaculture of captive-pond mode has higher sewage treatment efficiency and breeding density, which is due to the benefit of frequent removals of aquaculture waste in the captive tank. However, dissolved oxygen in high density aquaculture water is a concern for farmers. When the water temperature is high in summer, air aeration is inefficient, and the bubble-based aeration method cannot meet the requirements of oxygen supply. Gas-liquid mixed pump has a great performance on increasing dissolved oxygen in sewage aeration treatment. To explore whether gas-liquid mixed pump is suitable for the oxygen enhancement in the captive-pond mode, it is necessary to explore the optimal process parameters through experiments. In this study, the performances of the pump were tested under different water temperatures, outlet pressures and gas-water volume ratios, and the field tests were carried out in the pond captive tank (diameter 4 m, height 2 m, aquaculture water volume 20 m³). The results showed that, under the conditions of outlet pressure of 0.25 MPa and gas-water volume ratio of 0.01 to 0.05, the dissolved oxygen in outlet water was inversely proportional to the water temperature (5.6 °C, 13.5 °C and 30.3 °C), and the dissolved oxygen varied from 47.93 mg/L to 20.60 mg/L. The oxygen absorption efficiency was inversely proportional to the gas-liquid volume ratio, and the oxygen absorption efficiency varied from 91% to 33.7%. The dynamic efficiency was proportional to volumetric gas-liquid ratio and varied from 22.32 kg/(kW·h) to 55.12 kg/(kW·h). Field test showed that, under the condition of fish oxygen consumption density of about 13.19 to 16.49 kg/m³, when the pump's working power was about 3 kW, the dissolved oxygen of each captive tank can reach 11 mg/L in the daytime and keep above 8 mg/L at night. The fluctuation of dissolved oxygen in the captive tank was within 0.2 mg/L, and the uniformity was good. The pump system is simple in structure and can work efficiently under high water temperature conditions.

Keywords aquaculture; dissolved oxygen; gas-liquid mixing; oxygen aeration; round tank aquaculture in pond

(责任编辑:边书京)