

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.01.013

水下曝气对水体分层效果的研究*

潘华辰, 杨怡君, 屠汉超, 田晓庆

(杭州电子科技大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要:针对分层湖泊或水库底部因溶解氧不足而引起的水质恶化等问题,将水下曝气技术应用到水体分层破坏工程中。在实验水池中,展开了曝气流量、曝气孔径大小和曝气时长对水体分层破坏的实验研究,测量了曝气开始后不同时刻,水下1 m、2 m和2.3 m处水体中溶解氧含量,其中,曝气头垂直方向位于水下2 m处,水平方向上位于该矩形的中心位置。分析了曝气参数和曝气时长与水体分层破坏程度之间的关系。研究结果表明:曝气流量越大,水体分层破坏越快;曝气孔板直径越小,水体分层破坏越快。随着曝气流量的增加,水体中溶解氧的增量并不随之增加;随着曝气孔板孔径的减少,水体中溶解氧的增量逐步增加。同时,曝气头以下水体的溶解氧浓度与曝气无关。该研究结果为工程实际中的曝气法改善水体分层提供了依据。

关键词:水下曝气;分层水体;曝气流量;曝气板孔径

中图分类号:X171;TH7

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)01-0068-05

Underwater aeration research on the effect of water

PAN Hua-chen, YANG Yi-jun, TU Han-chao, TIAN Xiao-qing

(School of Mechanical Engineering, Hangzhou Dianzi University, Zhejiang Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at improving the water quality of stratified lakes and reservoirs, artificial aeration was investigated. In a tank, the influences of aeration flow and orifice diameter of diffuser on aeration were studied by experiments. After aeration, dissolved oxygen of water at 1 meter, 2 meter and 2.3 meter below surface was measured at different time. The diffuser was installed at 2 meter, while in the rectangular center, horizontally. The results indicate that: the bigger aeration flow is, the faster stratified water destroyed; Time of destratification decreases when the orifice diameter decreases. But with the increasing of aeration flow, the dissolved oxygen is not increased. The dissolved oxygen increases, when the orifice diameter decreases. What is more, dissolved oxygen of water column under diffuser is a constant no matter how aeration parameter changes. It is meaningful for engineering of stratified water destroyed.

Key words: underwater aeration; stratified water; aeration flow; orifice diameter of diffuser

0 引 言

在深水湖泊或者水库中,由于受温度、太阳辐射、风速、水密度等因素的影响,水体会呈现一定的分层现象^[1-3],特别是夏秋季节,受动植物生长和繁殖等因素的作用,水体分层现象一般比较明显^[4]。水体分层后,由于上、下层水体间的交换停止,因而会造成水体底部缺氧、内源污染释放、富营养化和藻类爆发等诸多水

质问题^[5],特别在深水湖泊或水库中,水温分层的温差大、持续时间较长^[6]。所以在水质污染比较严重的湖泊或水库,如何破坏水体分层,成为研究的热点之一。

水体底部曝气增氧法作为增加水体底部溶氧和阻止水体分层的一种通用方法,在西方国家已被广泛应用^[7-9]。然而,曝气参数对水体分层影响的研究却比较匮乏。

本研究围绕水体溶解氧浓度展开曝气气泡大小、

收稿日期:2015-08-12

基金项目:国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(51120195001)

作者简介:潘华辰(1956-),男,浙江杭州人,博士,教授,硕士生导师,主要从事计算流体力学研究与应用. E-mail:panhuachen@139.com

曝气流量和曝气时间的实验研究,为后续水体增氧和分层破坏提供依据。

1 实验装置及方法

1.1 实验设备

实验设备如图 1 所示,包含一个多功能水池、曝气装置、顶部增氧装置和测量仪器 4 个部分。其中长方体多功能水池的尺寸为:1 700 mm × 1 000 mm × 2 600 mm(长 × 宽 × 高)。为保证涌升流的顺利进行,曝气头安装在上长方形的中心处(水平方向),垂直方向上曝气头与水池底部的距离为 600 mm。



图 1 多功能水箱

曝气装置(实验示意图如图 2 所示)主要包含平板曝气头、微孔曝气板和压板 3 个部分,其中曝气头的直径为 200 mm,其表面均匀分布着直径相同的小孔。同时,当曝气装置关闭时,这一系列小孔均处于关闭状态;当曝气装置开启时,这些小孔打开,气泡能通过这些孔。此时,由于曝气头内气压高,外界的水体无法进入曝气装置,进而,保证了气泡的均匀性。

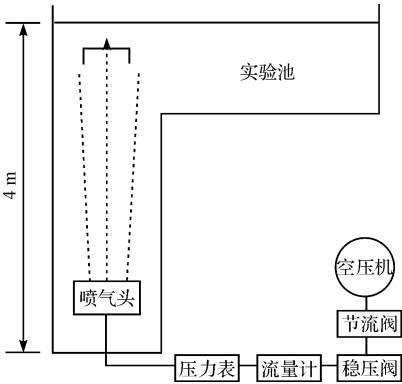


图 2 实验示意图

顶部增氧装置如图 3 所示,其主要由软管、砂石曝气头和辅助线路组成,其中,砂石曝气头均匀分布在水池的顶部,形成 5 × 4 阵列,垂直方向上砂石曝气头与水面的距离为 500 mm。增氧阵列的进气口与可调转子流量计相连,可以直接控制曝气的流量。

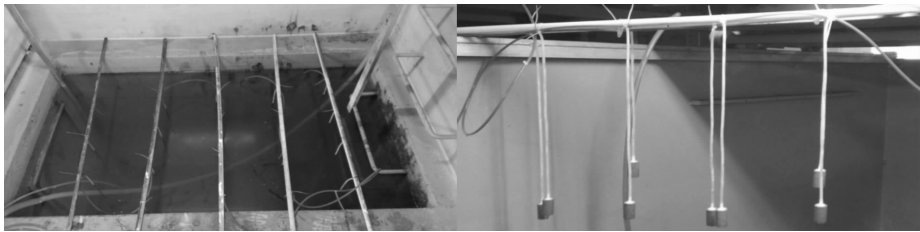


图 3 增氧阵列与砂头

测量仪器主要有:数字化多参数仪(德 Multi3430)、流量计和压力表。其中多参数测量仪主要测量水体深度和溶氧,流量计用于测量曝气所形成涌升流的流量,压力表测量曝气装置所用气泵的出口压力。

1.2 实验方法

贺冉冉等^[10]的研究结果表明:水体深度要超过 7 m后会形成温跃层。所以在上述实验装置中,须人为设计分层水体。整个实验在室温为 25 ℃,1 个标准大气压下完成。

实验采用受污染的河水和自来水混合(比例为 1:2),其中污染水体在低层,自来水上层。为使溶氧分层效果更加明显,需降低底部受污染河水的溶氧,并对其进行除氧,具体操作为:在水池底部添加

除氧剂——海绵铁,在实验室中培养两周。然后,向实验水池中加入自来水,同时,在水池顶部对水体增氧。

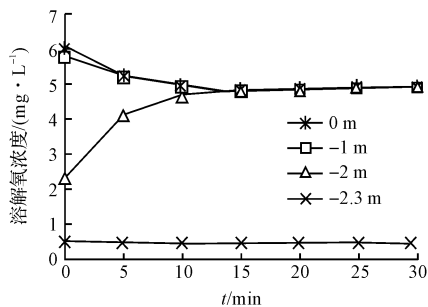
为研究水体中溶氧的变化情况,实验过程中本研究分别在水面、水下 1 m、水下 2 m 和水下 2.3 m 层围绕曝气头分别设置多个测量点。该实验中,垂直方向上曝气头与水池底部的距离为 0.6 m,总的水深为 2.6 m。从而注意到测量位置水面、水下 1 m、水下 2 m 为曝气头以上位置,水下 2.3 m 为曝气头以下位置。根据潘华辰^[11]、田晓庆^[12]等的研究结果,曝气开始后测量的时间间隔可设置为 5 min,测量的终止时间为水体溶解氧分层消失后。

为研究曝气所用气泡大小对水体分层破坏的情

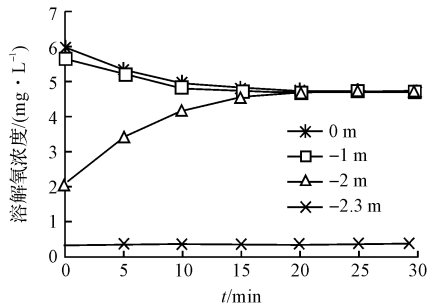
况,实验过程中笔者分别采用孔径为 0.2 mm、0.5 mm 和 1.0 mm 的曝气板对分层水体进行实验研究;为研究曝气流量对水体分层破坏的情况,笔者依次采用了 1 L/min、2 L/min 和 4 L/min 的气体流量进行实验。笔者研究的主要内容是水下曝气对水体分层的破坏情况,水下曝气水体势必产生一定的涌升流,因而,涌升流流量是曝气的一个表征参数,需要不同时刻分布测量涌升流流量,并以此表示涌升流对水体分层的影响。

2 实验结果

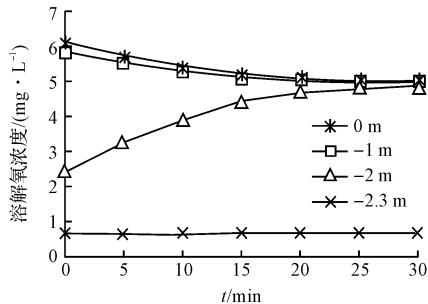
为保证曝气流量相同,每个曝气孔板上各个孔的面积之和相等,且保证曝气机的出口压力相同(1 atm)。本研究先采用直径为 0.2 mm 的曝气孔板进行曝气,不断改变气体流量,先后观察水面、水下 1 m、水下 2 m 和水下 2.3 m 处水体的溶解氧含量依次如图 4 所示。



(a) 曝气流量为 4 L/min 时,各个测量点在不同时刻的溶解氧含量



(b) 曝气流量为 2 L/min 时,各个测量点在不同时刻的溶解氧含量



(c) 曝气流量为 1 L/min 时,各个测量点在不同时刻的溶解氧含量

图 4 不同曝气流量时,各个测量点在不同时刻时的溶解氧含量

接着笔者研究曝气流量对水体溶解氧的影响,在固定曝气流量(2 L/min)的情况下,本研究先后改变曝气孔板的直径,依次用直径为 0.5 mm 和 1.0 mm 的曝气孔板对水体进行曝气研究。通过实验测量出:水面、水下 1 m、水下 2 m 和水下 2.3 m 处水体的溶解氧含量依次如图 5、图 6 所示。

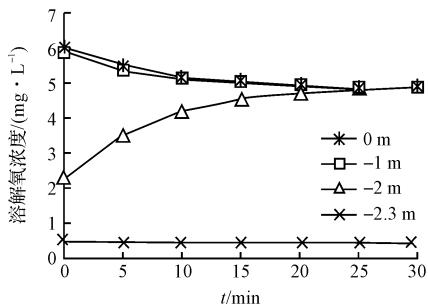


图 5 曝气孔板直径为 0.5 mm 时,各个测量点在不同时刻的溶解氧含量

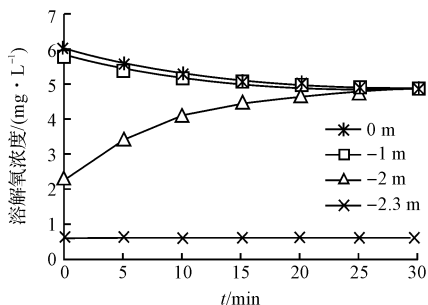


图 6 曝气孔板直径为 1 mm 时,各个测量点在不同时刻的溶解氧含量

3 实验结果的分析

3.1 实验的理论分析

气泡增氧过程中,空气中的氧分子通过气、液界面由气相转移到液相,由于这两者间的氧分子含量存在浓度梯度,两者间必然存在氧分子的传递^[13]。基于下式,可以计算出水体在任意时段的增氧量^[14-16]:

$$\frac{dc}{dt} = k_{La}(C_s - C) \quad (1)$$

式中: C —氧分子的浓度, KgO_2/m^3 ; C_s —初始时的氧分子浓度, KgO_2/m^3 ; k_{La} —氧传质系数, $1/\text{s}$; t —时间, s 。

根据 Bewtra 等^[17]的研究表明:温度为 $20\text{ }^\circ\text{C} \sim 50\text{ }^\circ\text{C}$ 时,自来水中的氧转移速率维持不变。刘星^[18]计算出氧传质系数,发现该工况下,氧传质系数为: 0.0386 s^{-1} 。可以计算出自然状态下表层水体溶解氧达到平衡的时间极短(5 s 内),所以在实验开始时,表层水体的溶解氧是一定值,气泡所至位置水体溶解氧

的浓度变化时间可以忽略。

根据 Ashton 等^[19]的研究,可以发现单个气孔曝气的曝气流量 Q_o (单位: $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) 可用如下式计算得出:

$$Q_o = C_d \frac{\pi d}{4} \left(\frac{2\Delta p}{\rho_a} \right)^{1/2} \quad (2)$$

式中: C_d —流量系数,当 $Re > 10^5$ 时, C_d 可以认为是不变的常数,计算时取平均值 $C_d = 0.60 \sim 0.61$,在这里 C_d 取 0.6; Δp —曝气机出口和曝气位置的压差; ρ_a —曝气气体的密度。

可见单个曝气孔的曝气流量与曝气孔直径的平方成比例,但是由于曝气板上各个孔的面积之和相等,各个曝气孔板的气体流量相等。整个实验过程中水体的曝气流量与曝气孔板的气体通过量无关。

3.2 实验结果分析

从图4、图5中可以看出:水下1 m 和水面处水体溶解氧的变化一致,水下2.3 m 处水体溶解氧的浓度保持不变。对比图4(a)、4(b)、4(c)可以看出:外界条件相同时,曝气流量越大,水体分层破坏所用的时间越短,随着曝气流量增加,分层破坏所用时间基本呈现线性减少。

对比图4(b)、图5、图6可以看出:在相同的外界条件下,随着曝气孔孔径的增加,水体分层破坏所用的时间越长,并且曝气孔的直径基本与水体分层破坏所用的时间不是线性相关。

从图4~6中,可以看出在水体分层完全破坏时,不同深度处水体的溶解氧几乎相等,并且随着曝气时间的延长水体溶解氧会继续增加,直至水体溶解氧达到饱和值。

为研究水下曝气对水体溶解氧浓度的改变,笔者以溶解氧的平均浓度为研究对象,先固定曝气孔板直径(0.2 mm),计算出曝气流量对水体溶解氧的增加情况(计算结果如图7所示)。接着,笔者计算出特定曝气流量(2 L/min)时,曝气头上方水体溶解氧平均浓度的增量(计算结果如图8所示)。

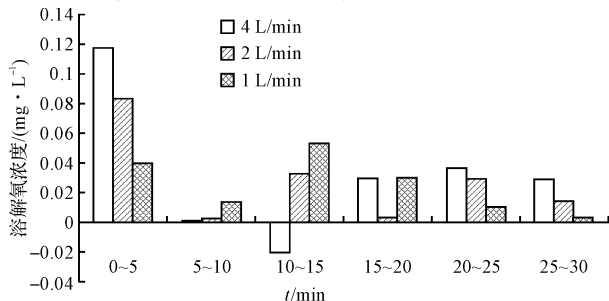


图7 不同曝气流量时,水体溶解氧平均浓度的增量与曝气时间的关系

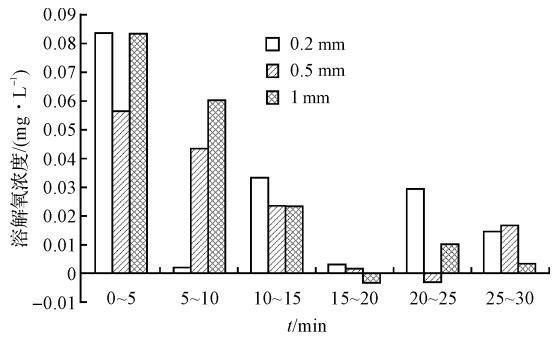


图8 不同曝气孔直径时,水体溶解氧平均浓度的增量与曝气时间的关系

从图7、图8中可以看出:在曝气开始的前5 min,水体溶解氧浓度有较显著的增加;水体溶解氧分层破坏后,水体溶解氧的平均浓度仍然会不断增加。

固定直径的曝气孔($\Phi 0.2$ mm),在各种不同流量时,水体的溶解氧增量变化有明显的差异:曝气流量为4 L/min,水体溶解氧增量在10 min~15 min时出现负值,说明水体分层依然存在,曝气所提供的氧气并没有被水体吸收。同时,当曝气流量为4 L/min和2 L/min,曝气时长为5 min~10 min时,水体溶解氧的增量几乎为零。因而,运用水下曝气法增加水体溶解氧时,并不是曝气流量越大越好。

固定的曝气流量下(2 L/min),不同直径曝气孔曝气时,在刚开始曝气的5 min内,水体溶解氧浓度增加较快,在水体分层破坏后,水体溶解氧的平均值仍然会不断增加。孔径为0.5 mm和1 mm的曝气孔板曝气时,水体溶解氧增量都会出现零值和负值,而孔径为0.2 mm的曝气孔板曝气时,水体溶解氧增量一直呈增加状态,因而,从提高能源利用率角度看,曝气孔孔径为0.2 mm曝气效果最优。

4 结束语

通过对实验室分层水体的水下曝气的实验和理论研究,得出如下一些结论:

(1)水下曝气可以产生涌升流,通过涌升流水体在垂直方向形成环流,进而,破坏水体原有的分层。因而,水体分层破坏的时间与涌升流的规律一致;

(2)在相同的外界条件下,随着曝气流量增加,分层破坏所用时间减少,但并不是曝气流量越大越好;

(3)在相同的外界条件下,随着曝气孔直径的增加,分层破坏所用的时间也逐渐增加,而水体溶解氧的增量确减少;因而,曝气孔板的孔径越小越好。

(4)曝气孔板以下水体,溶解氧不随曝气流量、曝气孔板和曝气时长的变化而变化。

参考文献 (References):

- [1] 赵林林,朱广伟,陈元芳,等. 太湖水体水温垂直分层特征及其影响因素[J]. 水科学进展,2011,22(6):844-849.
- [2] SHERMAN B. Scoping Options for Mitigating Cold Water Discharges From Dams [R]. Canberra: CSIRO Land and Water,2000.
- [3] SHERMAN B, TODD C R, KOEHN J D, et al. Modelling the impact and poten-tial mitigation of cold water pollution on Murray cod populations downstream of Hume Dam[J]. **Australia. River Research and Applications**,2007(23):377-389.
- [4] 邱二生. 黑河水库水质及藻类监测和水体分层研究[D]. 西安:西安建筑科技大学环境与市政工程学院,2010.
- [5] 刘 流,刘德富,肖尚斌,等. 水温分层对三峡水库香溪河库湾春季水华的影响[J]. 环境科学,2012,33(9):3046-3050.
- [6] 董春颖,虞左明,吴志旭,等. 千岛湖湖泊区水体季节性分层特征研究[J]. 环境科学,2013,34(7):2574-2581.
- [7] SINGLETON V L, LITTLE J C. Designing hypolimnetic aeration and oxygenation system-a review[J]. **Environmental Science & Technology**,2006(40):7512-7520.
- [8] MILES N G, WEST R J. The use of an aeration system to prevent thermalstrati? cation of a freshwater impoundment and its effect on downstream fish assemblages[J]. **Journal of Fish Biology**,2011(78):945-952.
- [9] TOFFOLON M, RAGAZZI M, RIGHETTI M, et al. Effects of arti ? cial hypolimnetic oxygenation in a shallow lake . Part 1 : Phenomenological description and management[J]. **Journal of Environmental Management**,2013(114):520-529.
- [10] 贺冉冉,罗澈葱,朱广伟. 天目湖溶解氧变化特征及对内源氮释放的影响[J]. 生态与农村环境学报,2010,26(4):344-349.
- [11] 潘华辰,章 慧. 静水中气泡群上升规律的实验研究[J]. 水动力学研究与进展 A 辑,2012,27(5):575-581.
- [12] 田晓庆,潘华辰,章 慧,等. 气泡大小对涌升流流量影响的实验研究[J]. 水动力学研究与进展 A 辑,2014,29(5):586-591.
- [13] 谷 坚,门 涛,刘兴国,等. 基于氧传质的池塘机械增氧节能技术[J]. 农业工程学报,2011,27(11):120-125.
- [14] 程香菊,曾映雪,谢 骏,龚望宝. 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.
- [15] ASCE. ASCE Standard Measurement of Oxygen Transfer in Clean Water[M]. Virgina: American Society of Civil Engineers,2007.
- [16] 刘 春,张 磊,杨景亮,等. 微气泡曝气中氧传质特性研究[J]. 环境工程学报,2010,4(3):585-589.
- [17] Bewtra J K, Nicholas W R, Polkowski L B. Effect of temperature on oxygen transfer in water[J]. **Water Research**,1970,4(1):115-123.
- [18] 刘 星. 曝气技术中氧传质影响因素的实验研究[D]. 大连:大连理工大学化工学院,2008.
- [19] ASHTON G D. Point source bubbler systems to sup-press ice[R]. CRREL Report, Hanover, New Hampshire, USA, 1979,79-112.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

潘华辰,杨怡君,屠汉超,等. 水下曝气对水体分层效果的研究[J]. 机电工程,2016,33(1):68-72.

PAN Hua-chen, YANG Yi-jun, TU Han-chao, et al. Underwater aeration research on the effect of water[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2016,33(1):68-72.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>