

曝气对过饱和溶解氧消散过程影响的试验研究

王云云¹,刘盛赞²,杨慧霞¹,姚元波¹,梁珈珈¹,杨玲¹

(1. 贵州大学土木工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610031)

摘要: 为了促进曝气技术在减缓过饱和溶解氧(DO)影响中的应用,设计开展了无曝气工况和曝气工况下的过饱和DO释放试验,研究了曝气对过饱和DO消散过程的影响规律,分析了不同曝气条件下过饱和DO的释放过程和释放系数。试验结果表明,曝气能显著促进过饱和DO的消散,曝气工况下DO饱和度从170%左右消散至105%左右所需时间均小于11 min,而无曝气工况下所需时间最少为240 min;过饱和DO释放系数随曝气量的增大而增大,随曝气水深的增大而减小,与曝气孔径呈现较强的负相关幂函数关系。根据曝气对过饱和DO的释放规律建立了过饱和DO释放系数与曝气条件的定量关系,通过量纲分析建立了过饱和DO释放系数与曝气条件、模型尺寸、流体参数之间的定量关系,两种定量关系中,后者的均方根误差和平均绝对误差较小、相关系数较高,且参数较易获取,因此实用性更好。

关键词: 曝气;过饱和;溶解氧;释放系数;定量关系

中图分类号:TV131.2⁺9 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2023)06-0030-08

Experimental study on effect of aeration on dissipation process of supersaturated dissolved oxygen//WANG Yunyun¹, LIU Shengyun², YANG Huixia¹, YAO Yuanbo¹, LIANG Jiajia¹, YANG Ling¹ (1. College of Civil Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. POWERCHINA Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu 610031, China)

Abstract: In order to promote the application of aeration technology in alleviating the influence of supersaturated dissolved oxygen (DO), the release tests of supersaturated DO under non-aeration and aeration conditions were carried out. The impact of aeration on the dissipation process of supersaturated DO and its related laws were studied, and the release process and release coefficient of supersaturated DO under different aeration conditions were analyzed. The experimental results show that the time required for DO saturation to dissipate from about 170% to about 105% under aeration conditions is less than 11 min, while the time required under no aeration conditions is at least 240 min, indicating that aeration can significantly promote the dissipation of supersaturated DO. The supersaturated DO release coefficient increases with the increase of aeration rate, decreases with the increase of aeration depth, and shows a strong negative correlation power function relationship with aeration aperture. According to the release law of supersaturated DO, the quantitative relationship between release coefficient and aeration conditions was established. The quantitative relationship between release coefficient and aeration conditions, model size and fluid parameters was established by dimensional analysis. By comprehensively analyzing the two quantitative relationships, it can be concluded that the latter has smaller root mean square error and average absolute error, higher correlation coefficients, and easier parameter acquisition, which shows that the latter is more applicable in practice.

Key words: aeration; supersaturation; dissolved oxygen; release coefficient; quantitative relationship

在高坝泄流过程中水舌将大量空气裹挟带入水垫塘深处,气体在高压的环境下迅速溶入周围水体,导致总溶解气体(TDG)过饱和,主要包括过饱和溶解氧(DO)和溶解氮(DN)^[1-2]。过饱和溶解气体在下游河道的自然释放速率缓慢^[3],这会使部分

特定鱼类和水生生物患“气泡病”甚至死亡^[4-6],导致渔业资源衰退^[7]。目前,高坝泄流导致溶解气体过饱和的减缓措施^[8]主要分为工程措施、调度措施以及生态功能利用措施。常见的工程措施包括建设挡板溢洪道、阶梯溢洪道、溢洪道导流坎、辅助消能

墩^[9]等,但采用工程措施还需要考虑经济、安全等问题。如何利用泄水调度措施来减缓过饱和 TDG 的影响是国内外持续研究的问题^[10],如 Wan 等^[11]提出了水库脉冲泄水方式来降低过饱和 TDG 的生成,我国已经应用梯级调度泄水方案减缓过饱和 TDG 带来的影响。另外,利用支流交汇区、水体深层、河滩区等区域的生态功能^[12-13],可降低 TDG 饱和度,为鱼类创造适宜的生存环境。

在以往的研究中,多数研究者将曝气用于促进 DO 的非饱和态向饱和平衡态的转变。程香菊等^[14]进行了水体底部微孔曝气增氧试验,探究了微气泡-水界面与水体湍动对氧传质的贡献。曾映雪^[15]分析了影响曝气增氧效率的关键因子,建立了氧的总体积传质系数与氧利用率的模型。曝气技术已作为一种重要的生态功能利用措施用于降低 TDG 饱和度^[8],曝气不仅能增加水气界面面积,还可增强水体紊动强度,促进水中 DO 的传质^[14,16]。过饱和溶解气体的释放属于气-液界面传质和自由界面传质,其释放速率与水气界面面积、静水压力、水温、水体紊动强度、水面风速等因素有关^[17-21]。Murphy 等^[22]在含 1 L 过饱和水体的玻璃瓶中加入一定尺寸的微气泡,TDG 饱和度从 117.9% 降低到了 101.7%,但没有探究微气泡对一定水深的高 TDG 饱和度水体的影响。Ou 等^[13]在曝气水柱中探究了过饱和 TDG 释放速率与曝气条件之间的关系,结果表明曝气促进过饱和 TDG 释放的效果显著,但该研究中只使用了两种曝气孔径,对于过饱和 TDG 释放速率与曝气孔径的关系有待进一步研究。黄膺翰等^[23]开展了室内曝气试验,建立了 DO 释放系数与曝气量和曝气深度的定量关系式,但该关系式仅适用于特定曝气孔径。张丹^[24]基于室内曝气试验,得到通气量对过饱和 TDG 传质系数影响最大、曝气水深次之、曝气孔径最小的结论,由于自变量的取值范围受试验条件限制,该结论尚需在大量试验工况下进行验证。

综上所述,曝气能促进过饱和 TDG 和 DO 的释放,但相关研究只分析了曝气条件(曝气量、曝气水深、曝气孔径)与释放系数的关系,均未综合考虑模型尺寸、流体参数等因素对释放在过程的影响。本文在不同曝气条件下对过饱和 DO 水体进行曝气试验,探究曝气孔径对过饱和 DO 释放在过程的影响,以期在曝气技术在减缓过饱和 DO 影响的应用中提供参考。

1 试验设计

1.1 试验装置及仪器

试验装置如图 1 所示。水泵、空气压缩机分别

为过饱和 TDG 生成装置提供水体和空气,在强掺气、高压环境内水体产生强烈紊动生成过饱和水体^[25]。空气压缩机通过密封性较好的气管与玻璃转子流量计、曝气盘相连。曝气盘布置在距离亚克力圆筒底部 0.31 m 处,曝气盘上均匀分布着 41 个针孔转接头,可方便多种刚性针孔的更换,试验以固定在曝气盘上的刚性针孔直径代表曝气孔径。高 1.5 m、内径 0.4 m 的亚克力圆筒能满足试验所需的曝气水深。

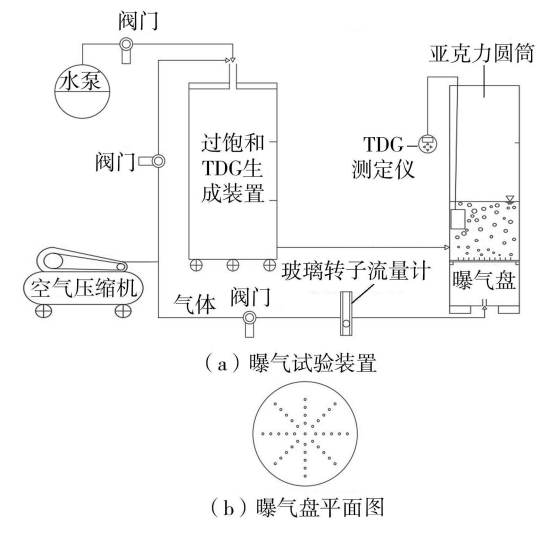


图 1 曝气试验装置与曝气盘平面示意图

曝气量由玻璃转子流量计测量,量程范围为 0.5 ~ 5 m³/h。采用总溶解气体压力(TGP)测定仪(Oxyguard)测量和记录水体的 DO 饱和度和温度(*T*),其中,DO 饱和度量程为 0 ~ 600%,精度为 ±1%,水温测量的精度为 ±0.2℃,数据记录时间间隔为 10 s。

1.2 试验工况

无曝气工况下曝气水深(*h*)为 0.4、0.8 m,曝气工况下曝气量(*Q*)为 1.5、2 m³/h,曝气水深(*h*)为 0.4、0.8 m,曝气孔径(*d*)为 1.20、1.10、0.84、0.72、0.60、0.51、0.41 mm,总共 30 组试验。

1.3 试验步骤

在试验开始之前,首先控制进入过饱和 TDG 生成装置中的水量和气量,使生成的水体 DO 饱和度保持在 170% 左右,将试验工况所需的刚性针孔安装在曝气盘上的针孔转接头上,然后将过饱和 DO 水体注入亚克力圆筒中,水位控制在预定深度。在空气中校准 TGP 测定仪读数,将测定仪的探头置于水面下 0.1 m 处,测量并记录初始 DO 饱和度和水温。待测定仪的 DO 读数稳定后,启动空气压缩机并调节玻璃转子流量计控制曝气量,同时开启测定仪的自动计数功能记录随时间变化的 DO 饱和度。当 DO 饱和度降到 105% 左右时,停止测量并保存试

验数据。

2 试验结果与分析

不同曝气条件下过饱和 DO 随时间的释放过程如图 2 所示。从图 2 可以看出,曝气工况下 DO 饱和度和从初始较高值(170% 左右)消散至较低值(105% 左右)所需时间均小于 11 min,而无曝气工况下所需时间最低为 240 min,对比说明曝气对过饱和 DO 的释放是高效的。分析图 2(a)可知,在曝气量为 1.5 m³/h、水深为 0.4 m 时,曝气孔径从 0.41 mm 增至 1.20 mm 过程中过饱和 DO 释放时间逐渐变长,释放时间增加 64.41%;同样分析图 2(b)(c)(d)可知,释放时间增加 67.87%、71.09%、30.50%。总体上说明过饱和 DO 释放时间与曝气孔径呈现正相关,且曝气量和曝气水深的变化也会导致释放时间不同。

美国陆军工程兵团^[26]和 Li 等^[17]研究认为可用一阶动力学方程表述过饱和和溶解气体的释放过程,一阶动力学方程表达式为

$$d(G - G_{eq})/dt = k(G - G_{eq}) \tag{1}$$

式(1)可转换为

$$\ln(G - 100) = -kt + C \tag{2}$$

式中: t 为释放时间; G 为时刻 t 的 DO 饱和度; G_{eq} 为 DO 平衡饱和度,通常取 100%; k 为过饱和 DO 释放系数,是衡量过饱和 DO 释放速率的参数; C 为常数。

采用式(2)对过饱和 DO 释放过程进行拟合,得到过饱和 DO 释放系数 k 如表 1 所示。拟合结果的相关系数 R^2 都不小于 0.99,说明一阶动力学方程能较好拟合过饱和 DO 释放过程。从表 1 可知,所有曝气工况中最大释放系数为 0.633 min⁻¹(工况 10,即 $Q=2.0$ m³/h、 $h=0.4$ m 和 $d=0.41$ mm),最小释放系数为 0.244 min⁻¹(工况 23,即 $Q=1.5$ m³/h、 $h=0.8$ m 和 $d=1.20$ mm),而无曝气工况下的释放系数接近于 0.01 min⁻¹,曝气工况下过饱和 DO 的释放速率是无曝气工况的数十倍。

3 影响过饱和 DO 释放系数的因素

3.1 曝气量对过饱和 DO 释放系数的影响

对表 1 中过饱和 DO 释放系数进行分析,得出释放系数随曝气量增大的变化情况如表 2 所示。释放系数增长范围为 5.56%~38.30%,可知在曝气水深和曝气孔径一定的条件下,曝气量的增大对过饱和 DO 释放具有促进作用。原因为随着曝气量的增大,水体紊动增强,同时也能生成更多的气泡数量^[27],气体在气液两相间的传质速率就越快^[28-29],因此水体表面与气泡-水界面的溶解氧传质作用均会受到曝气量的增大而增强^[30]。

3.2 曝气水深对过饱和 DO 释放系数的影响

对表 1 中过饱和 DO 释放系数进行分析,得到释放系数随曝气水深增大的变化情况如表 3 所示。由表 3 可知,释放系数下降范围为 10.64%~

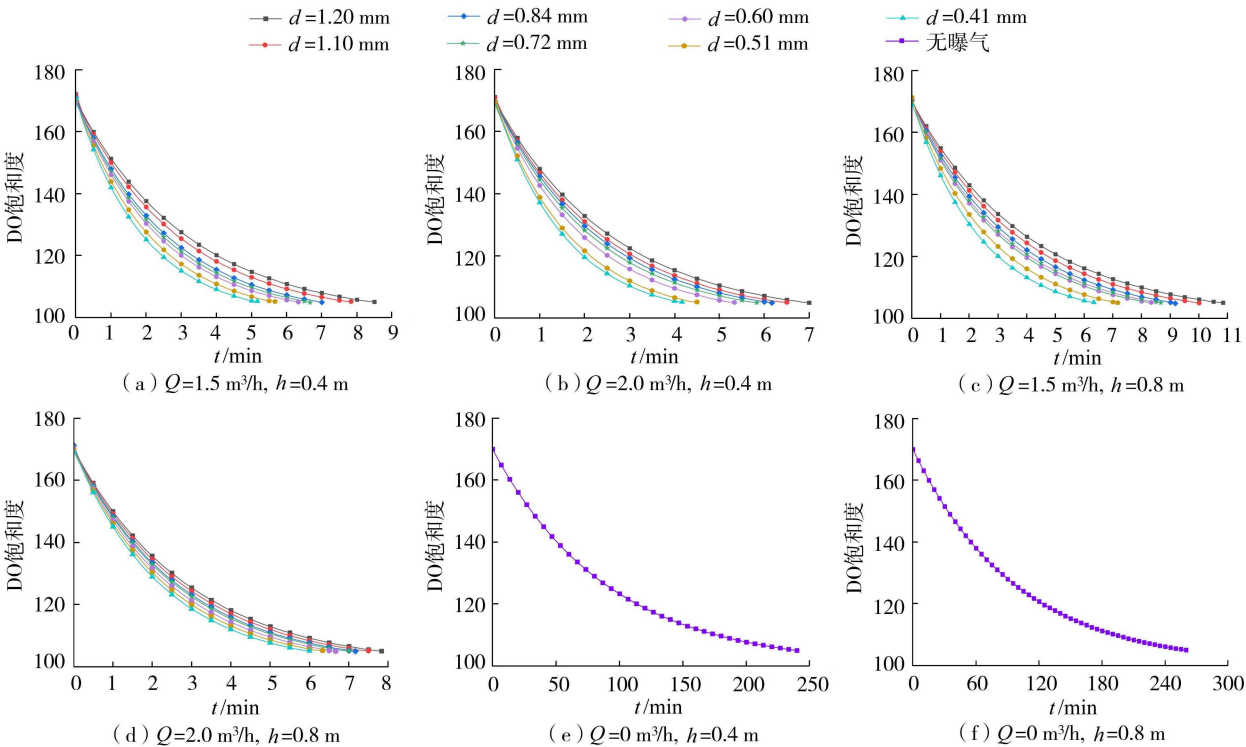


图 2 不同曝气条件下过饱和 DO 释放过程

表 1 一阶动力学方程拟合的释放系数

工况	$Q/(m^3/h)$	h/m	d/mm	k/min^{-1}	t/min	$T/^\circ C$	R^2
1		0.4		0.011	240	25.7	0.990
2		0.8		0.010	260	25.3	0.993
3	1.5	0.4	0.41	0.511	5.17	25.0	0.997
4	1.5	0.4	0.51	0.466	5.67	24.6	0.995
5	1.5	0.4	0.60	0.417	6.33	24.6	0.997
6	1.5	0.4	0.72	0.396	6.67	23.7	0.998
7	1.5	0.4	0.84	0.377	7.00	24.8	0.993
8	1.5	0.4	1.10	0.337	7.83	24.9	0.994
9	1.5	0.4	1.20	0.311	8.50	24.9	0.993
10	2.0	0.4	0.41	0.633	4.17	25.8	0.995
11	2.0	0.4	0.51	0.586	4.50	24.7	0.997
12	2.0	0.4	0.60	0.495	5.33	24.7	0.998
13	2.0	0.4	0.72	0.452	5.83	24.0	0.992
14	2.0	0.4	0.84	0.428	6.17	25.0	0.993
15	2.0	0.4	1.10	0.406	6.50	25.1	0.995
16	2.0	0.4	1.20	0.377	7.00	25.0	0.998
17	1.5	0.8	0.41	0.417	6.33	25.9	0.991
18	1.5	0.8	0.51	0.368	7.17	24.9	0.993
19	1.5	0.8	0.60	0.317	8.33	24.7	0.995
20	1.5	0.8	0.72	0.305	8.67	24.5	0.994
21	1.5	0.8	0.84	0.288	9.17	25.1	0.995
22	1.5	0.8	1.10	0.264	10.00	25.1	0.997
23	1.5	0.8	1.20	0.244	10.83	25.1	0.996
24	2.0	0.8	0.41	0.440	6.00	25.8	0.996
25	2.0	0.8	0.51	0.417	6.33	25.0	0.993
26	2.0	0.8	0.60	0.396	6.67	24.7	0.995
27	2.0	0.8	0.72	0.377	7.00	24.6	0.994
28	2.0	0.8	0.84	0.368	7.17	25.1	0.997
29	2.0	0.8	1.10	0.352	7.50	25.0	0.997
30	2.0	0.8	1.20	0.337	7.83	25.1	0.996

表 2 曝气量对过饱和 DO 释放系数的影响

d/mm	$K_a/\%$	$K_b/\%$
0.41	24.00	5.56
0.51	25.93	13.16
0.60	18.75	25.00
0.72	14.29	23.81
0.84	13.51	27.91
1.10	20.51	33.33
1.20	21.43	38.30

注: K_a 、 K_b 分别为各曝气孔径下曝气水深为0.4 m和0.8 m、曝气量从1.5 m³/h增大至2.0 m³/h时过饱和DO释放系数增长百分比。

表 3 曝气水深对过饱和 DO 释放系数的影响

d/mm	$K_c/\%$	$K_d/\%$
0.41	18.42	30.56
0.51	20.93	28.95
0.60	24.00	20.00
0.72	23.08	16.67
0.84	23.64	13.95
1.10	21.67	13.33
1.20	21.54	10.64

注: K_c 、 K_d 分别为各曝气孔径下曝气量为1.5、2.0 m³/h、曝气水深从0.4 m增大至0.8 m时过饱和DO释放系数下降百分比。

30.56%,可知在曝气量和曝气孔径一定的条件下,曝气水深的增大对过饱和DO释放具有消减作用。原因为随着曝气水深的增大,气泡上升带动水体的紊动强度减小,导致水体表面紊动强度减弱,从而减

弱了DO在水体表面上的传质作用^[14],更多的气泡会在上升过程中发生聚并,使得气泡直径变大,总比表面积减小,从而减弱了DO在气泡-水界面上的传质作用^[15]。

3.3 曝气孔径对过饱和 DO 释放系数的影响

运用 ORIGIN 软件的非线性曲线对表 1 中过饱和 DO 释放系数与曝气孔径的关系进行拟合,选取幂函数模型,其关系式可描述为

$$k = ed^f \tag{3}$$

式中 e 、 f 为无量纲参数。

不同曝气量及曝气水深工况下的 e 和 f 拟合结果见表 4。由表 4 可见,在曝气量和曝气水深一定的情况下, k 与 d 的幂函数关系拟合度均较好,相关系数 R^2 均高于 0.95,表明释放系数与曝气孔径存在显著的幂函数关系。

过饱和 DO 释放系数随曝气孔径的变化情况见图 3。在曝气量和曝气水深一定的条件下,释放系数随着曝气孔径的增大而减小,所以曝气孔径的增大会降低过饱和 DO 释放速率。原因是同等曝气量下,小孔径产生的气泡数量多且气泡尺寸小,小气泡又具有较大的比表面积,从而增大了气泡-水传质界面面积,进一步加快过饱和 DO 的析出^[16]。

表4 公式(3)拟合结果

$Q/(m^3/h)$	h/m	e	f	R^2
1.5	0.4	0.343	-0.440	0.989
1.5	0.8	0.264	-0.482	0.966
2.0	0.4	0.403	-0.496	0.956
2.0	0.8	0.353	-0.238	0.988

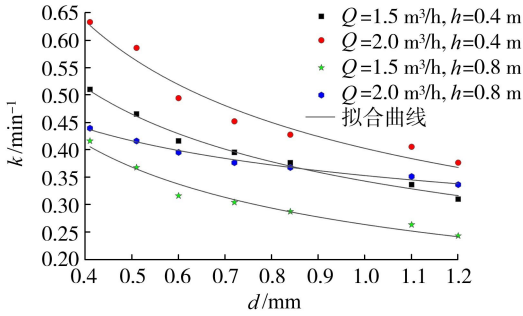


图3 过饱和和DO释放系数与曝气孔径的关系

3.4 曝气条件与过饱和DO释放系数的定量关系

从表2可知各试验工况下的温度差异不大,所以不考虑对过饱和DO释放系数进行温度修正。曝气量、曝气水深和曝气孔径与过饱和DO释放系数的关系可描述为

$$k = f(Q, h, d) = f_1(Q)f_2(h)f_3(d) \quad (4)$$

由于本文只选取了两种曝气量、两种曝气水深,所以未能建立过饱和DO释放系数 k 与 Q 、 h 的定量关系。参考黄膺翰等^[23]建立的如下特定曝气孔径下过饱和DO释放系数的定量关系式:

$$k = k_0 \left(\frac{Q}{Q_0} \right)^m \left(\frac{h_0}{h} \right)^n \quad (5)$$

式中: k_0 为特定曝气孔径下曝气量为 Q_0 、水深为 h_0 的过饱和DO释放系数; m 、 n 为待拟合的无量纲参数。

在式(4)和式(5)的基础上,再考虑式(3),建立曝气量、曝气水深和曝气孔径与释放系数的定量关系如下:

$$k = k_0 \left(\frac{Q}{Q_0} \right)^\alpha \left(\frac{h_0}{h} \right)^\beta \left(\frac{d_0}{d} \right)^\eta \quad (6)$$

式中: k_0 为曝气量为 Q_0 、水深为 h_0 、孔径为 d_0 的过饱和DO特征释放系数, $Q_0 = 1.5 \text{ m}^3/\text{h}$, $h_0 = 0.4 \text{ m}$, $d_0 = 0.41 \text{ mm}$; α 、 β 、 η 为待拟合的无量纲参数。

利用式(6)作为SPSS软件中多元非线性回归分析的模型,对释放系数 k 进行拟合,迭代求解得到参数 α 、 β 、 η 的最优解为0.621、0.358、0.431,相关系数 R^2 达到0.955,则式(6)改写为

$$k = 0.511 \left(\frac{Q}{1.5} \right)^{0.621} \left(\frac{0.4}{h} \right)^{0.358} \left(\frac{0.41}{d} \right)^{0.431} \quad (7)$$

3.5 曝气条件、模型尺寸和流体参数与过饱和DO释放系数的定量关系

要较全面地探究曝气对过饱和DO的释放作

用,除了分析曝气条件(曝气量、曝气水深和曝气孔径)对过饱和DO释放系数的影响外,还须将模型尺寸、流体参数等作为因素考虑^[29-36]。本文将氧在水中的扩散系数 D 、水密度 ρ_L 、水动力黏度 μ_L 、重力加速度 g 、曝气孔面积 A_0 、水柱横截面积 A_{cs} 作为影响气液传质的参数,释放系数与各参数的关系可描述为

$$k = f(Q, h, d, D, \rho_L, \mu_L, g, A_0, A_{cs}) \quad (8)$$

其中 $Q = 4.16667 \times 10^{-4} \sim 5.55556 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$

$$h = 0.4, 0.8 \text{ m}$$

$$d = 0.41 \times 10^{-3} \sim 1.20 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$D = 2.65 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\rho_L = 996.813 \sim 997.448 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu_L = 0.896 \times 10^{-3} \sim 0.948 \times 10^{-3} \text{ Pa/s}$$

$$g = 9.8 \text{ m/s}^2$$

$$A_0 = 5.4103 \times 10^{-6} \sim 46.3464 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$A_{cs} = 0.1256 \text{ m}^2$$

采用表观气速 u 来表征曝气量与模型尺寸对气液传质的影响,其表达式为^[37]

$$u = Q/A_{cs} \quad (9)$$

式(8)转换为

$$k = f(u, h, d, D, \rho_L, \mu_L, g, A_0, A_{cs}) \quad (10)$$

经量纲分析,可将式(10)变换为

$$\frac{h^2 k}{D} = \beta_1 \left(\frac{\rho_L u h}{\mu_L} \right)^{\beta_2} \left(\frac{u}{\sqrt{gh}} \right)^{\beta_3} \left(\frac{\mu_L}{\rho_L D} \right)^{\beta_4} \cdot \left(\frac{d}{h} \right)^{\beta_5} \left(\frac{A_0}{A_{cs}} \right)^{\beta_6} \quad (11)$$

式中: $\beta_1 \sim \beta_6$ 为待拟合的无量纲常数; $h^2 k/D$ 为舍伍德数 Sh ,表征总传质通量与扩散质通量的比例,反映包含有待定释放系数的无因次数群; $\rho_L u h / \mu_L$ 为雷诺数 Re ,表征气泡在上升过程中惯性力与水流黏滞力之比,反映流体流动特性; $u / \sqrt{gh}$ 为弗劳德数 Fr ,表征气泡惯性力与重力之比; $\mu_L / (\rho_L D)$ 为施密特数 Sc ,表征黏滞动量通量与扩散动量通量之比。

综上所述,式(11)可表述为

$$k = \beta_1 \frac{D}{h^2} Re^{\beta_2} Fr^{\beta_3} Sc^{\beta_4} \left(\frac{d}{h} \right)^{\beta_5} \left(\frac{A_0}{A_{cs}} \right)^{\beta_6} \quad (12)$$

利用式(12)作为SPSS软件中多元非线性回归分析的模型,对释放系数 k 进行拟合,迭代求解得到参数 $\beta_1 \sim \beta_6$ 的最优解分别为22.896、0.873、-0.253、-0.205、-0.644、0.119,相关系数 R^2 达到0.959。则式(12)改写为

$$k = \left(\frac{22.896 D^{1.205} \rho_L^{1.078} g^{0.1265}}{\mu_L^{1.078}} \right) \frac{Q^{0.62} A_0^{0.119}}{h^{0.3565} d^{0.644} A_{cs}^{0.639}} \quad (13)$$

从式(13)可以看出,如果假定 D 、 ρ_L 、 μ_L 、 g 为常数,则释放系数 k 主要与曝气量 Q 、曝气水深 h 、曝气

孔径 d 、曝气孔面积 A_0 、水柱横截面积 A_{cs} 有关。 Q 的指数为 0.62, 曝气量的增大会促进过饱和 DO 的释放; d 、 h 和 A_{cs} 的指数分别为 -0.644、-0.3565 和 -0.639, 曝气孔径、曝气水深和水柱横截面积的增大会消减过饱和 DO 的释放。由于试验未改变曝气孔数量, 所以曝气孔面积的变化完全取决于曝气孔径的改变, 结合 A_0 和 d 的指数分析, 总的体现为曝气孔径的增大会减弱过饱和 DO 的释放。

3.6 两种定量关系的对比分析

用统计指标均方根误差 (RMSE) 和平均绝对误差 (MAE) 来判断两种定量关系的预测效果, 当 RMSE 与 MAE 越接近于 0 时表示预测模型越理想, 当 MAE 在 10% 以内时认为该模型是合理可行的^[38]。

式(7)和式(13)的预测值与试验值的对比如

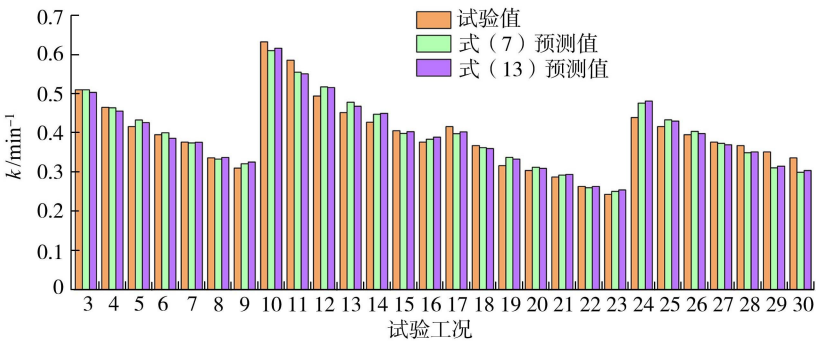


图4 预测值与试验值的对比

4 结 语

本文选用多种孔径对过饱和 DO 水体进行不同曝气条件的试验, 开展曝气对过饱和 DO 消散过程影响及其相关规律的研究。试验结果表明, 曝气能显著促进过饱和 DO 的消散, 过饱和 DO 释放系数随曝气量的增大而增大, 随曝气水深的增大而减小, 与曝气孔径呈较强的负相关幂函数关系。建立了过饱和 DO 释放系数与曝气条件的定量关系, 通过量纲分析建立了过饱和 DO 释放系数与曝气条件、模型尺寸、流体参数之间的定量关系。分析两种定量关系可知, 后者对过饱和 DO 释放系数的预测精度更高, 且所需参数都可直接测量获得, 因此实用性更好。

由于试验条件有限, 本文未能捕捉到曝气过程中的气泡大小、数量及分布情况, 有待进一步研究基于气泡动力学的过饱和和溶解气体释放机理。在现有基础上还需深入考虑改变曝气孔数量和水体横截面积, 探究其对过饱和 DO 释放过程的影响。本文建立的定量关系在更大的曝气区域和曝气条件下的适用性需要进一步研究, 但该研究可为曝气技术在促进过饱和 DO 的应用提供有价值的参考。

图4所示, 可见预测值与试验值的吻合程度较高。预测值与试验值的误差见表7, RMSE 和 MAE 均较小, 且 MAE 都小于 10%, 表明所建立的两定量关系都能反映曝气对过饱和 DO 的释放作用。对比可知式(13)的 RMSE 和 MAE 较小, 拟合关系式的相关系数较高。式(13)较于式(7)不需要获取特定曝气条件下的特征释放系数, 只需要获得曝气量、曝气水深、曝气孔径、流体参数、水柱横截面积、曝气孔面积等可直接测量的参数, 便能预测释放系数, 由此说明该定量关系式在实际中应用性更强。

表7 预测值与试验值的误差统计值

定量关系	RMSE	MAE	R^2
式(7)	0.0186	0.0145	0.955
式(13)	0.0177	0.0139	0.959

参考文献:

[1] 程香菊, 陈永灿. 大坝泄洪下游水体溶解气体超饱和和理论分析及应用[J]. 水科学进展, 2007, 18(3): 346-350. (CHENG Xiangju, CHEN Yongcan. Theoretical analysis of dissolved gas supersaturation downstream of sluicing dam and application[J]. Advances in Water Science, 2007, 18(3): 346-350. (in Chinese))

[2] 黄雅楠, 李然, 李纪龙, 等. 比表面积促进水体过饱和和溶解氧释放的试验研究[J]. 水电能源科学, 2017, 35(4): 45-48. (HUANG Yanan, LI Ran, LI Jilong, et al. Experimental research on promotion of supersaturated dissolved oxygen dissipation by surface area[J]. Water Resources and Power, 2017, 35(4): 45-48. (in Chinese))

[3] QU L, LI R, LI J, et al. Field observation of total dissolved gas supersaturation of high-dams[J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(1): 156-162.

[4] 王远铭, 张陵蕾, 曾超, 等. 总溶解气体过饱和胁迫下齐口裂腹鱼的耐受和回避特征[J]. 水利学报, 2015, 46(4): 480-488. (WANG Yuanming, ZHANG Linglei, ZENG Chao, et al. Tolerance and avoidance responses of Schizothorax pernanti to total dissolved gas supersaturation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(4): 480-488. (in Chinese))

- [5] STEFFENSEN J F, FARRELL A P. Swimming performance, venous oxygen tension and cardiac performance of coronary-ligated rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*, exposed to progressive hypoxia[J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology, 1998, 119 (2) : 585-592.
- [6] 孙井沛,施浩然,刘晓庆,等. 鱼类在TDG过饱和和含沙水体中的耐受性[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39 (1) : 28-33. (SUN Jingpei, SHI Haoran, LIU Xiaoqing, et al. Tolerance of fish to TDG supersaturated water with sediments[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39 (1) : 28-33. (in Chinese))
- [7] 谭德彩,倪朝辉,郑永华,等. 高坝导致的河流气体过饱和及其对鱼类的影响[J]. 淡水渔业, 2006, 36 (3) : 56-59. (TAN Decai, NI Zhaohui, ZHENG Yonghua, et al. Dissolved gas supersaturation downstream of dam and its effects on fish[J]. Freshwater Fisheries, 2006, 36 (3) : 56-59. (in Chinese))
- [8] 李然,李克锋,冯镜洁,等. 水坝泄水气体过饱和对鱼类影响及减缓技术研究综述[J]. 工程科学与技术, 2023, 55 (4) : 91-101. (LI Ran, LI Kefeng, FENG Jingjie, et al. Review on the effect of dissolved gas supersaturation of dam spill on fishes and its mitigation measures [J]. Advanced Engineering Sciences, 2023, 55 (4) : 91-101. (in Chinese))
- [9] HUANG J P, LI R, FENG J, et al. The application of baffle block in mitigating TDGS of dams with different discharge patterns[J]. Ecological Indicators, 2021, 133 : 108418.
- [10] YANG H X, LI R, LIANG R F, et al. A parameter analysis of a two-phase flow model for supersaturated total dissolved gas downstream spillways [J]. Journal of Hydrodynamics, 2016, 28 (4) : 648-657.
- [11] WAN H, TAN Q, LI R, et al. Incorporating fish tolerance to supersaturated total dissolved gas for generating flood pulse discharge patterns based on a simulation-optimization approach [J]. Water Resources Research, 2021, 57 (9) : e2021WR030167.
- [12] YUAN Y Q, HUANG J P, WANG Z H, et al. Experimental investigations on the dissipation process of supersaturated total dissolved gas; focus on the adsorption effect of solid walls[J]. Water Research, 2020, 183 : 116087.
- [13] OU Y M, LI R, TUO Y C, et al. The promotion effect of aeration on the dissipation of supersaturated total dissolved gas[J]. Ecological Engineering, 2016, 95 : 245-251.
- [14] 程香菊,谢骏,余德光,等. 曝气增氧微气泡-水界面和水体表面的氧传质的计算分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29 (13) : 190-199. (CHENG Xiangju, XIE Jun, YU Deguang, et al. Calculated analysis of oxygen transfer from air bubble-water interface and turbulent water surface in microporous aeration systems [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29 (13) : 190-199. (in Chinese))
- [15] 曾映雪. 水产养殖池塘底部微孔曝气增氧的机理试验[D]. 广州:华南理工大学, 2015.
- [16] 李尔. 微孔曝气最优气泡群理论及其在复氧工程中的应用[D]. 武汉:华中科技大学, 2007.
- [17] LI R, HODGES B R, FENG J, et al. Comparison of supersaturated total dissolved gas dissipation with dissolved oxygen dissipation and reaeration[J]. Journal of Environmental Engineering, 2013, 139 (3) : 385-390.
- [18] 李然,李嘉,赵文谦,等. 紊动水体复氧规律研究[J]. 环境科学学报, 2000, 20 (6) : 723-726. (LI Ran, LI Jia, ZHAO Wenqian, et al. Study on reaeration laws of turbulent water body [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2000, 20 (6) : 723-726. (in Chinese))
- [19] 王皓冉,周卓灵,行亚楠,等. 水利工程总溶解气体过饱和和问题探讨[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30 (5) : 12-15. (WANG Haoran, ZHOU Zhuoling, XING Yanan, et al. On supersaturation of total dissolved gas for hydraulic projects [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30 (5) : 12-15. (in Chinese))
- [20] 刘焱,王乐乐,邹璇,等. 风速对过饱和总溶解气体释放速率的影响[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35 (4) : 28-31. (LIU Yi, WANG Lele, ZOU Xuan, et al. Impacts of wind speed on release rate of supersaturated total dissolved gas [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35 (4) : 28-31. (in Chinese))
- [21] 黄奉斌,李然,邓云,等. 过饱和总溶解气体释放过程预测[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30 (2) : 29-31. (HUANG Fengbin, LI Ran, DENG Yun, et al. Prediction of release process of supersaturated total dissolved gas [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30 (2) : 29-31. (in Chinese))
- [22] MURPHY A P, LICHTWARDT M A. Microbubble treatment of gas supersaturated water[R]. Washington D. C. : United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation, 2001.
- [23] 黄膺翰,李然,冯镜洁,等. 曝气促进溶解氧过饱和和水体恢复的试验研究[J]. 水力发电学报, 2016, 35 (6) : 80-86. (HUANG Yinghan, LI Ran, FENG Jingjie, et al. Experimental study on aeration effect of promoting recovery of water supersaturated with dissolved oxygen [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35 (6) : 80-86. (in Chinese))
- [24] 张丹. 基于气泡动力学的高坝下游总溶解气体过饱和和生成机理及浓度预测模型研究[D]. 贵阳:贵州大学, 2021.
- [25] 李然,黄翔,李克锋,等. 水体总溶解气体过饱和生成及其对鱼类影响研究的装置:200910164299. 3[P]. 2011-07-20.
- [26] US Army Corps of Engineers. Technical analysis of TDG

- processes [R]. Washington D. C. : US Army Corps of Engineers,2005.
- [27] 贾荣畅,刘颖,朱燕,等. 微孔曝气器孔径与运行气量对微孔曝气氧传质的影响研究[J]. 环境污染与防治, 2015,37 (8): 75-79. (JIA Rongchang, LIU Ying, ZHU Yan,et al. Effects of pore diameter and air flow rate on oxygen mass transfer in fine pore aeration [J]. Environmental Pollution & Control,2015,37 (8): 75-79. (in Chinese))
- [28] 杜开开,李云峰,柳凌,等. 紊动对水体过饱和溶氧释放的影响初探[J]. 淡水渔业,2017,47 (5): 21-25. (DU Kaikai, LI Yunfeng, LIU Ling, et al. The effect of turbulence on the release of supersaturated dissolved oxygen in the water [J]. Freshwater Fisheries, 2017, 47 (5): 21-25. (in Chinese))
- [29] 蒋亮,李然,李嘉,等. 高坝下游水体中溶解气体过饱和问题研究[J]. 四川大学学报(工程科学版),2008,40 (5): 69-73. (JIANG Liang, LI Ran, LI Jia, et al. The supersaturation of dissolved gas in downstream of high dam [J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition),2008,40(5):69-73. (in Chinese))
- [30] WITT A, GULLIVER J S, SHEN L. Numerical investigation of vorticity and bubble clustering in an air entraining hydraulic jump[J]. Computers & Fluids,2018, 172:162-180.
- [31] AL-AHMADY K. Mathematical model for calculating oxygen mass transfer coefficient in diffused air systems [J]. Al-Rafidain Engineering Journal (AREJ), 2011, 19 (4): 43-54.
- [32] PITTOORS E, GUO Y, VAN HULLE S 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.
- [33] SCHIERHOLZ E L, GULLIVER J S, WILHELMS S C, et al. Gas transfer from air diffusers [J]. Water Research, 2006,40(5):1018-1026.
- [34] GILLOT S, CAPELA-MARSAL S, ROUSTAN M, et al. Predicting oxygen transfer of fine bubble diffused aeration systems: model issued from dimensional analysis [J]. Water Research,2005,39(7):1379-1387.
- [35] LI R, GUALTIERI P, FENG J, et al. A dimensional analysis of supersaturated total dissolved gas dissipation [C]//The 36th IAHR World Congress. The Hague: IAHR,2015:1-8.
- [36] FENG J J, LI R, MA Q, et al. Experimental and field study on dissipation coefficient of supersaturated total dissolved gas[J]. Journal of Central South University,2014,21(5): 1995-2003.
- [37] 王燕,尹侠,薛胜伟. 表观气速对气升式环流反应器性能的影响[J]. 化学反应工程与工艺,2007,23 (2): 104-108. (WANG Yan, YIN Xia, XUE Shengwei. Effects of superficial gas velocity on performance of the airlift loop reactor [J]. Chemical Reaction Engineering and Technology,2007,23(2):104-108. (in Chinese))
- [38] 程香菊,曾映雪,谢宇宁. 池塘底部微孔曝气增氧试验及分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2015,13 (5): 339-343. (CHENG Xiangju, ZENG Yingxue, XIE Yuning. Experiments and analysis on re-oxygenation of fine bubble aeration systems at the bottom of pond [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2015, 13 (5): 339-343. (in Chinese))
- (收稿日期:2022 - 11 - 20 编辑:雷燕)
- +++++
- (上接第 23 页)
- [20] SILVA A T, KATOPODIS C, SANTOS J M, et al. Cyprinid swimming behaviour in response to turbulent flow [J]. Ecological Engineering,2012,44:314-328.
- [21] TAN Junjun, GAO Zhu, DAI Huichao, et al. Effects of turbulence and velocity on the movement behaviour of bighead carp (*Hypophthalmichthys nobilis*) in an experimental vertical slot fishway [J]. Ecological Engineering,2019,127:363-374.
- [22] 郑金秀,韩德举,胡望斌,等. 与鱼道设计相关的鱼类游泳行为研究[J]. 水生态学杂志,2010,31(5): 104-110. (ZHENG Jinxiu, HAN Deju, HU Wangbin, et al. Fish swimming performance related to fishway design [J]. Journal of Hydroecology, 2010, 31 (5): 104-110. (in Chinese))
- [23] 徐体兵,孙双科. 竖缝式鱼道水流结构的数值模拟[J]. 水利学报,2009,40 (11): 1386-1391. (XU Tibing, SUN Shuangke. Numerical simulation of the flow structure in vertical slot fishway [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2009,40(11):1386-1391. (in Chinese))
- [24] BRAUN C B, COOMBS S. The overlapping roles of the inner ear and lateral line: the active space of dipole source detection [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2000, 355 (1401): 1115-1119.
- [25] MOGDANS J, BLECKMANN H. Coping with flow: behavior, neurophysiology and modeling of the fish lateral line system [J]. Biological Cybernetics, 2012, 106 (11): 627-642.
- (收稿日期:2022 - 11 - 22 编辑:俞云利)