

风速对过饱和总溶解气体释放速率的影响

刘 焱, 王乐乐, 邹 璇, 胡中华, 曾昭高

(四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065)

摘要:通过不同风速下的过饱和总溶解气体(TDG)室内释放试验,研究风速对过饱和 TDG 释放过程的影响,并根据已有释放模型对释放系数进行估算,建立了过饱和 TDG 释放系数与风速的定量关系式。结果表明在 8.5~9.5℃条件下,风速较小时,水体中过饱和 TDG 释放相当缓慢,随着风速的增大,过饱和 TDG 的释放速率显著增大;在无风工况下,TDG 释放系数为 0.005 42 h⁻¹;当风速为 1.08~11.33 m/s 时,TDG 释放系数为 0.007 09~0.066 68 h⁻¹;相对释放系数为 1~12.303,拟合的相对释放系数与风速的定量关系式计算偏差在-11.76%~10.21%之间。

关键词:总溶解气体;过饱和;风速;释放系数;相对释放系数

中图分类号:TV131.2⁺⁹

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2015)04-0028-04

Impacts of wind speed on release rate of supersaturated total dissolved gas//LIU Yi, WANG Lele, ZOU Xuan, HU Zhonghua, ZENG Zhaogao (State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: A series of supersaturated total dissolved gas (TDG) release tests, under different wind speeds, were carried out in laboratory and the impacts of wind speed on supersaturated TDG release process were studied. According to available release models, we estimated the release coefficients and derived a quantitative formula to describe the relationship between the release coefficient of supersaturated TDG and wind speed. Results showed that, under the condition that temperatures were among 8.5℃ and 9.5℃, the release rate was fairly slow for low wind speed, but the release rate of supersaturated TDG remarkably augmented as wind-speed increased. The release coefficient of TDG was 0.005 42 h⁻¹ under windless condition, and others were between 0.007 09 h⁻¹ and 0.066 68 h⁻¹ with wind speeds ranging from 1.08 to 11.33 m/s. And, at the same time, the relative release coefficients were within the range of 1 to 12.303 in the experiment. Thereafter, a fitted quantitative formula between relative release coefficients and wind speeds was obtained, whose calculation deviation ranged from -11.76% to 10.21%.

Key words: total dissolved gas (TDG); supersaturation; wind speed; release coefficient; relative release coefficient

高坝总溶解气体(TDG)过饱和现象的产生主要是由于高速下泄的水流将空气以气泡的形式带至水体深处,水体深处的气泡承受着高于大气压数倍的压力,致使气泡周围水体总溶解气体浓度迅速升高^[1]。过饱和 TDG 随水流向下游输移扩散的过程中会导致鱼类患气泡病,甚至引起鱼类大规模死亡,这不仅给人们带来了严重的经济损失,还会导致渔业资源衰退^[2],对下游水环境和水生态产生严重不利影响。随着越来越多高坝的建设,高坝泄水导致的 TDG 过饱和问题在我国将日渐突出,开展高坝泄水下游水体中过饱和 TDG 的研究具有重要的理论价值和现实意义^[3]。

早在 20 世纪初美国科学家就认识到了天然水

体中 TDG 过饱和对水生生物的危害,并由美国陆军工程兵团^[4]率先开展了过饱和 TDG 沿程释放研究,提出了纵向一维释放模型。此后,Webert 等^[5]用两相流模型模拟了溢洪道下游过饱和和气体释放过程。通过大量的试验研究,美国国家环保局^[6](EPA)于 1986 年规定水质标准中 TDG 饱和度的上限值为 110%,文献^[7]对大坝下游的 TDG 饱和度的上限值进行了补充规定。国内关于过饱和 TDG 释放的研究开展较晚,目前主要是清华大学、武汉大学、四川大学及部分研究机构在进行过饱和 TDG 的影响研究^[8]。

过饱和 TDG 的释放过程受水深、河流形态、静水压力、水温、含沙量及紊动强度等因素的影响^[9-14],同时风可以促进水气界面的传质^[15]。在风

的影响下,水体内部产生环流,表面产生波浪。风改变了流场的性质,提高了流场的紊动动能和紊动动能耗散率,使水气界面的传质过程显著加快。陈丽萍^[16]研究表明,随风速增大,水气界面附近时均速率梯度显著增大,风速越大,水中污染物浓度下降越快。目前国内外关于风速对过饱和 TDG 释放过程影响的研究相当缺乏,为此本文通过开展一系列室内试验研究风速对过饱和和 TDG 释放过程的影响,对河道水生生态的保护有重要现实意义。

1 试验装置与试验方法

1.1 试验装置

设计静置水体过饱和 TDG 释放试验(简称静置释放试验),试验装置如图 1 所示,包括风道、试验水箱、鼓风机、热线式风速仪、温度仪等,其中风道长 2.3 m、宽 0.6 m、高 0.1 m,试验水箱长 0.7 m、宽 0.6 m、高 0.6 m,水体中 TDG 饱和度的测定采用 Point Four 公司生产的 TGP 测定仪,其测量范围为 0~200%,仪器精度为 1%,风速的测定采用 Hot-Wire 风速仪,精度为 0.01 m/s。TDG 过饱和水体由四川大学自主设计并获发明专利的过饱和 TDG 生成装置^[17]产生,该生成装置由空压机、压力钢管、水泵等部件组成,如图 2 所示。经测试,该生成装置最高可以产生 TDG 饱和度达 140% 的水体,完全满足过饱和 TDG 释放试验研究需要。

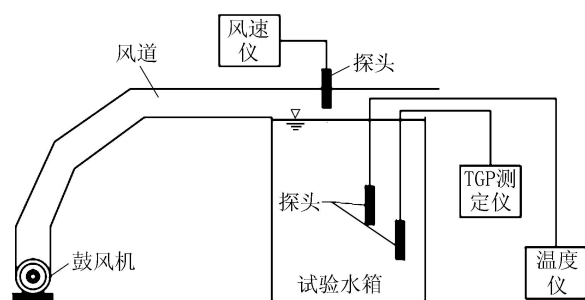


图 1 过饱和和 TDG 释放试验装置

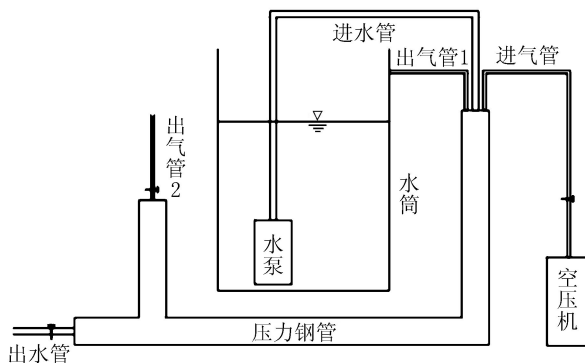


图 2 过饱和和水体生成装置

1.2 试验方法

试验时先向容器内注入 TDG 饱和度为 135% ~

140% 的过饱和水,启动鼓风机并调节鼓风机侧向开口大小,待风速稳定后向水面吹风,一段时间后关闭,使用 TDG 测定仪测定水体 TDG 饱和度,静置一段时间后重复上述过程,当水体饱和度降低至一定值(110%)时,停止试验。

试验在常温下进行,在水浴的作用下,试验水箱中水温为 8.5~9.5℃,变幅不超过 1℃,基本可忽略水温变化的影响。由于过饱和和 TDG 的释放系数随风速的增大而显著增大,为了获得其更加精确的释放过程,TDG 饱和度的读数时间间隔随风速的增大而减小。

试验设置一个无风工况和风速 v 为 1.08 m/s、3.01 m/s、6.06 m/s、7.16 m/s、8.87 m/s、10.39 m/s 及 11.33 m/s 的 7 组有风工况,每组工况下吹风的时间间隔依次为 1 h、1 h、0.5 h、0.33 h、0.33 h、0.25 h、0.25 h、0.08 h。

2 试验结果与分析

2.1 风速对过饱和和 TDG 释放过程的影响

在不同风速下 TDG 饱和度随时间的变化过程如图 3 所示。

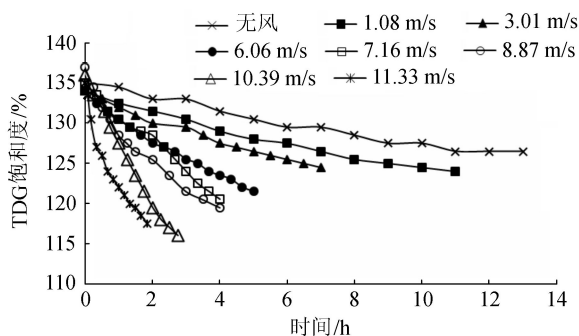


图 3 不同风速下过饱和和 TDG 释放过程

从图 3 可以看出,过饱和 TDG 释放过程受风速的影响较大,随着风速的增大,TDG 由过饱和状态降至饱和状态的时间显著缩短,无风或风速分别为 1.08 m/s、3.01 m/s、6.06 m/s、7.16 m/s、8.87 m/s、10.39 m/s、11.33 m/s 时,TDG 饱和度由 135% 降至 125% 所需要的时间分别为 15 h、11 h、7 h、3.33 h、2.67 h、2 h、1.25 h、0.67 h。风速不变条件下,随着 TDG 浓度降低,过饱和 TDG 释放速率逐渐变小。

2.2 风速与过饱和和 TDG 释放系数的关系

过饱和和 TDG 的释放过程服从一阶动力学方程:

$$\frac{d(G - G_{eq})}{dt} = K(G - G_{eq}) \quad (1)$$

式中: G 为 TDG 饱和度; G_{eq} 为 TDG 平衡饱和度,通常取 100%; t 为时间; K 为过饱和和 TDG 释放系数,也是衡量过饱和 TDG 释放速率的参数。采用式(1)对释放系数进行拟合,得到不同风速条件下过饱和 TDG 释放过程如图 4 所示。

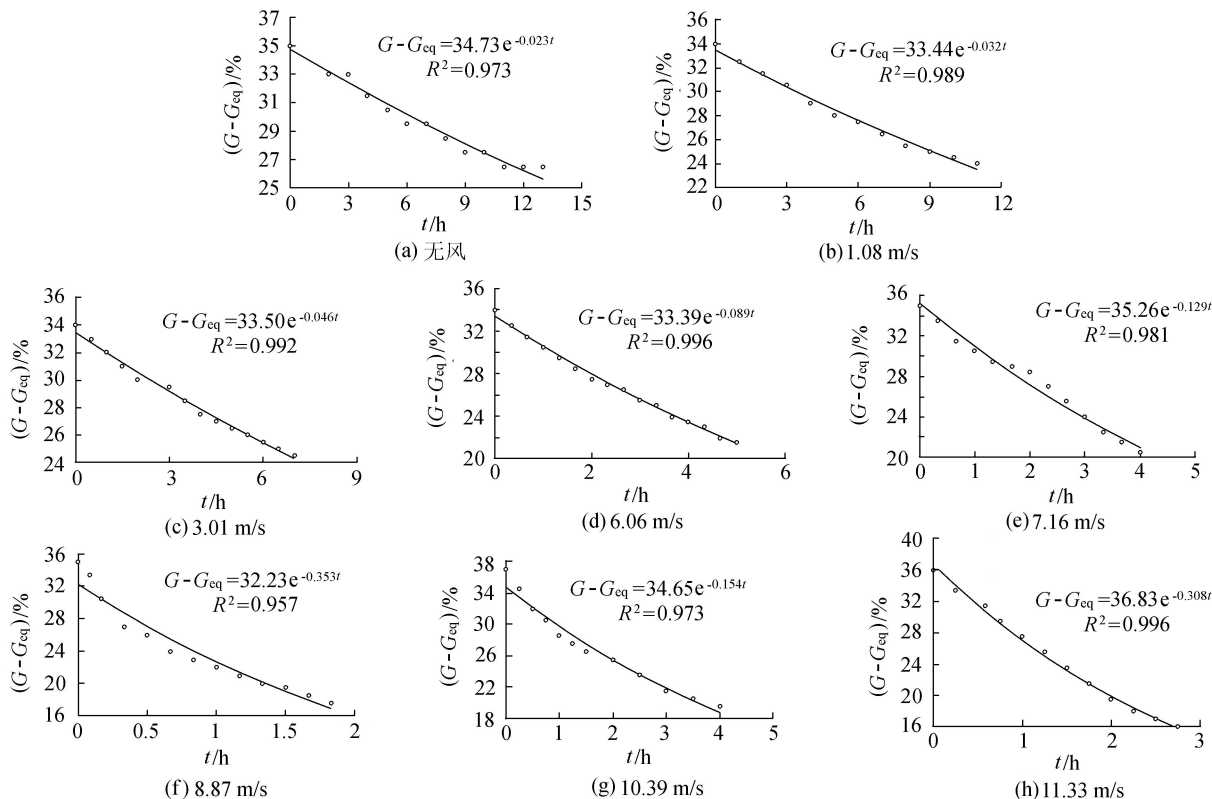


图4 不同风速条件下过饱和 TDG 释放过程

从图4可以看出,不同风速条件下 TDG 释放系数差别较大,风速越大,释放系数越大;无风时释放系数最小,为 0.00542 h^{-1} ;试验风速最大(11.33 m/s)时,释放系数最大,为 0.06668 h^{-1} ,二者相差 11.3 倍。为了更直接地表示风速对释放速率的影响,引入相对释放系数 $\beta = K/K_0$,即不同风速的 TDG 释放系数 K 与无风时的 TDG 释放系数 K_0 的比值,不同风速的释放系数 K 和相对释放系数 β 见表 1。

表 1 各工况下释放系数及相对释放系数

工况编号	$v/(m \cdot s^{-1})$	K/h^{-1}	β
1	0	0.0054	1
2	1.08	0.0071	1.308
3	3.01	0.0103	1.897
4	6.06	0.0188	3.472
5	7.16	0.0275	5.072
6	8.57	0.0322	5.932
7	10.39	0.0600	11.068
8	11.33	0.0667	12.303

用指数函数拟合相对释放系数随风速的变化如图5所示,得到相对释放系数与风速的拟合关系为

$$\beta = 0.986e^{0.222v} \quad (2)$$

式中 v 为风速。

在风的作用下水体产生强烈紊动,风速的增大引起水气交界面下水流速度梯度的增大,进而导致紊动能和紊动能耗散率增大。这大大增强了过饱和 TDG 在水气界面的传质速率,从而导致过饱和 TDG 释放系数增大。

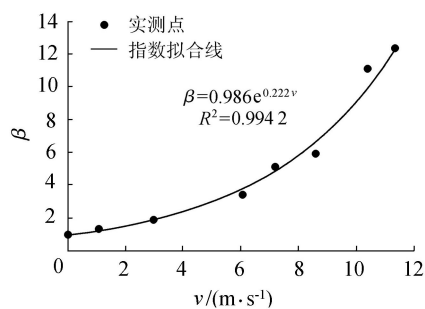


图5 过饱和 TDG 释放系数拟合曲线

由式(2)计算所得过饱和 TDG 释放系数及静置释放试验的实测值及计算相对误差见表 2。

表 2 过饱和 TDG 释放系数计算值及其相对误差

工况编号	$v/(m \cdot s^{-1})$	K		
		计算值/ h^{-1}	实测值/ h^{-1}	相对误差/%
1	0	0.00534	0.00542	-1.48
2	1.08	0.00679	0.00709	-4.23
3	3.01	0.01043	0.01028	1.46
4	6.06	0.02056	0.01882	9.25
5	7.16	0.02626	0.02749	-4.47
6	8.57	0.03593	0.03215	11.76
7	10.39	0.05387	0.05999	-10.20
8	11.33	0.06639	0.06668	-0.43

过饱和 TDG 释放系数的拟合相对误差在 $-11.76\% \sim 10.21\%$,除了静置释放试验工况 6(风速 8.57 m/s)、工况 7(风速 10.39 m/s)外,其他工况相对误差在 10% 以内,说明建立的过饱和 TDG 释放系数随风速变化的关系式与试验结果符合程度较高。

试验过程中,存在着较多的不确定性对结果产生影响。这些不确定因素主要包括:读取 TDG 饱和度的过程中,为保证读数的准确性,需要长时间(10 min)搅动仪器的探头,使水体受到扰动,引起过饱和 TDG 的额外释放而造成误差;受风道长度及风速调控装置等限制,风道内风速分布存在不均匀现象,各点风速存在偏差;试验中只监测了两点的风速,并且以这两点风速平均值作为特征风速进行试验结果的分析,也会造成一定误差。

3 结论

a. 水体中过饱和 TDG 的释放受风速的影响较大,风速较小时,水体中过饱和 TDG 释放相当缓慢,随着风速的增大,水体中的过饱和 TDG 释放速率迅速增大,且在同一风速下,水体中的 TDG 浓度较高时,TDG 释放速率较大,随着水体中 TDG 浓度的降低,其释放速率也呈递减规律。

b. 风速在 0 ~ 11.33 m/s 时,TDG 释放系数在 $0.00542 \text{ h}^{-1} \sim 0.06668 \text{ h}^{-1}$, 相对释放系数在 1 ~ 12.303,以指数函数拟合相对释放系数与风速的关系为 $\beta = 0.986e^{0.222v}$,拟合公式的相对误差在 12% 以内。

参考文献:

[1] STEVEN C W, MICHAEL L S. Total dissolved gas in the near-hield field tailwater of ice harbor dam [J]. International Association for Hydraulics Research, 1997, 123(5): 513-517.

[2] 谭德彩,倪朝辉,郑永华,等.高坝导致的河流过饱和及其对鱼类的影响[J].淡水渔业,2006,36(3):56-59. (TAN Decai, NI Chaohui, ZHENG Yonghua, et al. Supersaturation caused by the high dam rivers and their effects on fish[J]. Freshwater Fisheries, 2006, 36(3): 56-59. (in Chinese)).

[3] 冯静洁.高坝泄水下过饱和和总溶解气体释放规律及应用研究[D].成都:四川大学,2013.

[4] US Army Corps of Engineers. Technical Analysis of TDG Processes[R]. Jacksonville District: US Army Corps of Engineers-Northwest Division, Environmental Resources and Fish Planning Offices, 2005.

[5] WEBER T L, HUANGH, LAI Y, et al. Modeling total dissolved gas production and transport downstream of spillway: three-dimensional development and application [J]. International Journal of River Basin Management, 2004(2): 157-167.

[6] U. S. EPA rep. 5-86-001 Quality criteria for water[S].

[7] Washington State Department of Ecology 06-10-091 Water quality standards for surface waters of the State of Washington[S].

[8] 刘盛赞.温度对过饱和总溶解气体生成和释放规律的影响研究[D].成都:四川大学,2013.

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

[10] LI Ran, LI Jia, LI Kefeng, et al. Prediction for supersaturated total dissolved gas in high-dam hydropower projects[J]. Science China Technological Sciences, 2009, 52(12): 3661-3667.

[11] 蒋亮,李然,李嘉,等.高坝下游水体中溶解气体过饱和和问题研究[D].成都:四川大学,2008.

[12] 曲璐,李然,李嘉,等.高坝工程总溶解气体过饱和和影响的原型观测研究[J].中国科学:技术科学,2011,41(2): 177-183. (QU Lu, LI Ran, LI Jia, et al. Prototype observation research about the influence of the total dissolved gas supersaturation in the high dam project) [J]. Scientia Sinica Technologica, 2011, 41(2): 177-183 (in Chinese)).

[13] 唐春燕.泥沙对水体总溶解气体过饱和的影响研究[D].成都:四川大学,2011.

[14] LI Ran, HODGES H D, FENG Jingjie, et al. A comparison of supersaturated total dissolved gas dissipation with dissolved oxygen dissipation and reaeration[J]. Journal of Environmental Engineering, ASCE, 2013, 139(3): 385-390.

[15] 朱为真,李玉梁,余常昭.波浪对河流复氧影响的研究[J].交通环保,1987,2(增刊1):1-6. (ZHU Weizhen, LI Yuliang, YU Changzhao. Research of the effects of waves on the river after oxygen [J]. Environmental Protection in Transportation. 1987, 2(Sup1): 1-6. (in Chinese)).

[16] 陈丽萍.四川省大渡河水电规划环境影响回顾性评估气体过饱和和观测分析及影响研究[R]成都:四川大学,2012.

[17] 王浩冉,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)).

(收稿日期:2014-04-17 编辑:郑孝宇)

