

DOI: CNKI: 32. 1309. P. 20111125. 1636. 011

高坝工程总溶解气体过饱和与水体含沙量关系

曲 璐^{1, 2}

(1. 浙江省水利河口研究院, 浙江 杭州 310020; 2. 清华大学水沙科学与水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 为研究伴随高坝泄水产生的总溶解气体(TDG)过饱和现象与水体中含沙量关系的问题, 提出切实可行的减缓 TDG 过饱和影响的措施, 通过实验的方法, 对含沙水体中 TDG 过饱和的生成和释放进行了研究分析。结果表明: 同样初始条件下, 在含沙水体与清水中的 TDG 过饱和生成过程中, TDG 过饱和度没有明显变化。在 TDG 释放过程中, 含沙水体中 TDG 释放速率明显快于清水中 TDG 释放速率, 据此提出可通过开启排沙孔等泄洪调度方式使泄流中悬沙含量增加, 促使 TDG 沿程释放加快, 降低其对鱼类的影响。

关键词: 大坝; 总溶解气体; 饱和; 悬沙

中图分类号: TV131.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2011)06-0839-05

高坝工程在泄水时, 会造成下游水体中总溶解气体(Total Dissolved Gas, TDG)体积数大于当地温度和大气压力对应的溶解度, 产生 TDG 过饱和现象, 严重时会导致下游水生生物患气泡病甚至死亡^[1]。关于大坝下游 TDG 过饱和问题的研究国外开展较早, 美国从 20 世纪 60 年代开始至今, 对 Columbia 河及其支流 Snake 河上的水利工程泄水产生的 TDG 过饱和现象及其影响进行了大量研究^[2-4]。Politano 等^[5]通过建立两相流模型对大坝下游 TDG 进行了预测研究, 模型预测结果和 Wanapum 坝的原型观测实测数据符合较好, 但研究不具有普适性。李玉樑等^[6]首先对高坝泄水时溶解氧过饱和现象进行了研究, 认为复氧应分为非饱和和过饱和和复氧, 并提出了过饱和复氧率的经验关系式; 陈永灿等^[7]对三峡大坝下游溶解氧变化特性及影响因素进行了分析, 指出每年 7~9 月三峡下游出现溶解氧过饱和现象, 并随下游水位的升高而增大。近年来国内研究才以 TDG 为研究对象, 进行了 TDG 过饱和的原型观测和其产生机理的初步探讨^[8-10]。虽然国内外对 TDG 过饱和的生成机理有合理的科学解释, 但多是经验结论。目前虽有一些观测成果和数值模拟分析^[11-12], 但缺乏对高坝、超高坝的研究成果, 且其中尚未见考虑水体中泥沙含量对 TDG 过饱和影响的研究报道。近年来, 随着三峡、紫坪铺、溪洛渡、向家坝等一批高坝陆续开工建设或投产运行, 长江上游干、支流水体流速变缓, 大量来自上游流域的泥沙被拦截并淤积在库内, 使得经水电工程下泄的水体中泥沙含量降低^[13], 悬沙粒径有明显的细化趋势, 但泄洪时水体中仍携带大量泥沙。因此, 水体中泥沙含量对 TDG 过饱和影响的研究是十分必要的。四川大学在对高坝下游 TDG 过饱和的原型观测中, 紫坪铺水利枢纽泄洪期间溢洪道下水垫塘内迅速翻起大量泥浆, 下游水体迅速变浑, 观测到 TDG 过饱和度有一个迅速减小, 而后逐渐增大的过程。分析认为水体中泥沙含量可能对 TDG 饱和度有一定影响。

本文主要考虑水体中泥沙含量的影响, 利用机理模型的实验手段, 对高坝下游 TDG 过饱和度与水体含沙量的关系进行初步研究, 以期得到切实可行的减缓 TDG 过饱和和影响的措施, 为工程的环境影响评价、环境保护设计和工程泄流消能设计及运行调度方案的制定提供科学依据。

收稿日期: 2011-01-26; 网络出版时间: 2011-11-25

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20111125.1636.011.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50979063)

作者简介: 曲 璐(1982-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 主要从事环境水力学方面研究。E-mail: qlsniper@163.com

1 实验装置及量测

实验在四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室中进行的, 实验装置如图 1 所示。实验装置主体为高 6.0 m、直径 0.2 m 的 PVC 圆柱形水容器, 上端敞开, 使水面压强为大气压强。容器侧壁设有有机玻璃观测窗和用来测量水深的直尺, 侧壁直尺刻度处连接有多个测压计。装置下端开有直径约 8 mm 的小孔, 用塑料管与空气压缩机连接; 装置下端还装有放水阀门。装置利用水深产生的压强梯度并通过空气压缩机注入气体产生 TDG 过饱和的水体, 可实现对水体压力、掺气强度、水深等影响过饱和 TDG 生成和释放的主要物理参数的测量控制, 便于对其进行定量分析。装置中空气压缩机开启后, 水体中迅速鼓入大量的气体, 并产生强烈的紊动, 用以模拟高坝泄洪时下游水体中 TDG 过饱和产生的物理条件。水体中 TDG 浓度在此实验条件下, 逐渐增大至稳定值。

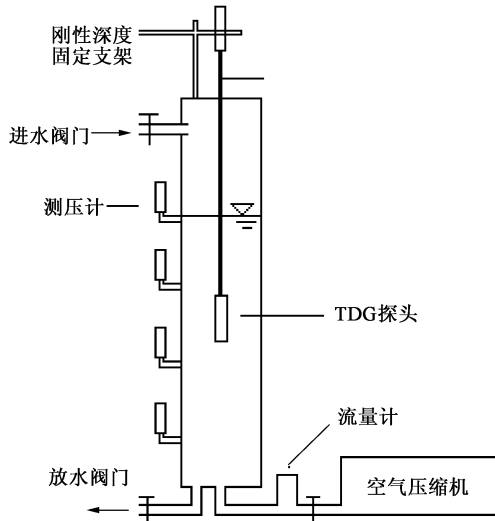


图 1 实验装置图

Fig. 1 Sketch for the experimental device

实验水体中 TDG 的测量采用美国 YSI 公司生产的 YSI 5200 型 TDG 测定仪, 测量范围为 $\pm 5.3 \times 10^4$ Pa, 分辨率为 13 Pa, 精度为 ± 200 Pa。测量得到的水中 TDG 压强与当地大气压的比值即为水体中 TDG 过饱和度。测量时将 TDG 测定仪探头通过刚性深度固定支架

放入装置内, 可控制测量深度。

2 实验结果及分析

2.1 实验工况的选取

实验用沙参考三峡工程, 三峡工程蓄水前, 坝址处汛期输沙量占全年 88.88%, 实测多年平均含沙量汛期为 1.61 kg/m^3 , 非汛期为 1.19 kg/m^3 , 最大含沙量 10.50 kg/m^3 , 最小含沙量 0.008 kg/m^3 , 2004 年三峡下游宜昌站年平均粒径小于 0.125 mm 的泥沙占沙重的 88.6%。据此, 实验水体采用含沙量范围确定为 $1.61 \sim 10.50 \text{ kg/m}^3$, 模型沙粒径小于 0.125 mm , 并采用含沙量为 0 kg/m^3 的水体作为 TDG 饱和度水平的对照组。为更好地让实验水体中的沙悬浮, 实验工况 1 ~ 工况 5 采用天然江段浑水中提取细粒径沙作为实验用沙, 经分析其粒径小于 0.1 mm , 并在工况 6 中采用了悬浮性更好的粒径小于 0.075 mm 的粉煤灰。实验用水采用实验室自来水, 实验水深为装置内总水深。

表 1 为实验进行的 6 组工况, 为保证实验结果的准确性, 实验开始前, 须反复清洗实验竖井后重新注水, 测量其初始 TDG 饱和度为 98%, 将空气压缩机开启并将工作压强调至 $3 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。空气压缩机向水体中鼓入空气 20 min 后关闭, 分别对 0.5 m、1.0 m、2.0 m、3.0 m、4.0 m 水深处的 TDG 饱和度值进行测量。

表 1 TDG 过饱和和实验工况

Table 1 Conditions of TDG experiment

工况	用沙质量/kg	粒径/mm	水体含沙量/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	清水 TDG 饱和度/%	鼓气前静水水深/m	鼓气中动水水深/m
1	0	/	0		4.86	5.51
2	0	/	0		5.08	5.85
3	1	≤ 0.10	6.55		4.86	5.51
4	0.5	≤ 0.10	3.28	98%	4.86	5.51
5	0.1	≤ 0.10	2.55		5.01	5.77
6	0.3 粉煤灰	≤ 0.075	1.88		5.08	5.85

2.2 含沙水体 TDG 过饱和生成实验结果及分析

空气压缩机开启后，水体中迅速鼓入大量的气体，并产生强烈的紊动，用以模拟高坝泄洪时下游水体中 TDG 过饱和的产生。水体中 TDG 浓度在此实验条件下，逐渐增大至稳定值，实验结果见表 2。其中水深 0.5 m 处 TDG 过饱和度最大差值 0.3%，水深 1 m 处 TDG 过饱和度最大差值 1.5%，水深 2 m 处 TDG 过饱和度最大差值 1.5%，水深 3 m 处 TDG 过饱和度最大差值 1.6%，水深 4 m 处 TDG 过饱和度最大差值 0.6%。

表 2 含沙水体 TDG 过饱和生成实验结果

Table 2 Measurement of TDG generation

工况	水体含沙量/(kg·m ⁻³)	不同水深的 TDG 饱和度/%				
		0.5 m	1.0 m	2.0 m	3.0 m	4.0 m
1	0	105.7	108.7	116.2	124.9	133.2
2	0	105.7	108.6	116.3	125.1	133.6
3	6.55	105.8	110.0	117.7	125.4	133.8
4	3.28	106.0	109.7	117.2	126.5	133.2
5	2.55	105.8	108.5	116.5	125.3	133.5
6	1.88	105.7	108.6	116.6	125.4	133.8

实验结果显示在其它初始条件相同时，清水和含沙水体、不同含沙量水体之间同深度生成的 TDG 过饱和值没有显著的变化，且垂向 TDG 饱和度分布均符合与水深(压强)梯度关系的变化趋势，泥沙对于水体中 TDG 过饱和的生成没有影响。

2.3 含沙水体 TDG 过饱和耗散实验结果及分析

实验在含沙水体 TDG 过饱和生成实验的基础上进行，当测得水体中 TDG 过饱和生成值稳定后，关闭空气压缩机，开始 TDG 耗散实验数据监测。

由于含沙水体 TDG 耗散实验需要较长的时间，为此采用具有良好悬浮性的粉煤灰作为实验用沙，并用其它初始条件相同的工况进行清水中 TDG 过饱和耗散的实验，对比清水与含沙水体中 TDG 饱和度随时间变化的情况，实验工况参数见表 3。

表 3 含沙水体 TDG 耗散实验参数

Table 3 Conditions of TDG release experiment

工况	用沙质量/kg	粒径/mm	水体含沙量/(kg·m ⁻³)	清水 TDG 饱和度/%	静水水深/m
1	0	/	0	98%	5.08
2	0.3	≤0.08	1.88	98%	5.08

实验水体中 TDG 饱和度变化过程如图 2 和图 3 所示，结果显示含沙水体在实验开始 108 h 后已经趋近于饱和态，而清水中 TDG 的释放则很缓慢，在实验开始 132 h 后清水中 TDG 仍存在过饱和现象。实验表明：在同等初始条件下，含沙水体中 TDG 衰减速率明显快于清水中 TDG 的衰减速率，悬浮在水体中的沙，对过饱和 TDG 从水体中的析出起到了促进作用。

图 4 为不同水深含沙水体中 TDG 耗散与时间关系图，可以看出，在含沙水体 TDG 过饱和耗散过程中，耗散第 12 h 和第 36 h 观测结果显示，垂向上 0.5 m、1.0 m、2.0 m 处，TDG 饱和度出现了升高的现象，超过了初始时刻水体中产生的 TDG 饱和度。

分析认为下层溶解气体首先会进入较浅的水深处，最后再通过与大气交界面释放，图 3 显示 0.5 m 和 1 m 处水体中，含有悬浮沙的水体耗散过程中这一现象较清水中明显。而图 2 由于 4.0 m 水深下可以补充 TDG 的水体较少，经过 12 h 后测量，没有产生明显的这一现象。现象部分解释了汛期泄洪时，下游河道表层水

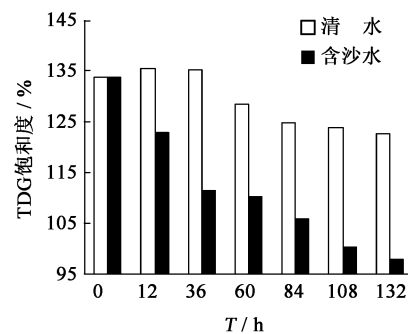


图 2 清浑 TDG 过饱和和耗散实验对比图(水深 4.0 m)
Fig. 2 Comparison of TDG levels between different sediment concentration(water depth 4.0 m)

体虽然水深很浅，压强较小，但存在超过压强梯度所对应的 TDG 饱和度上限的过饱和水体，并保持相对较长时间的问题。

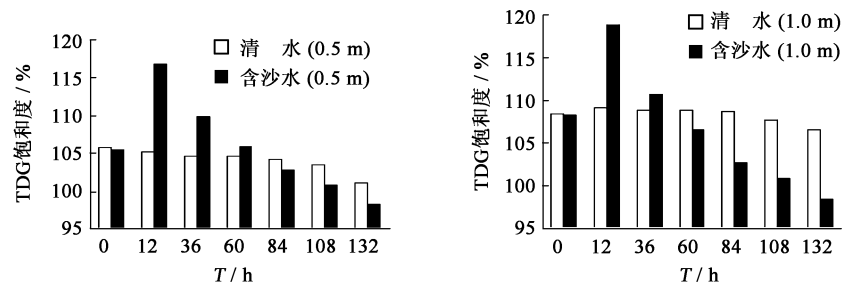


图 3 清浑 TDG 过饱和耗散实验对比(水深 0.5 m, 1.0 m)

Fig. 3 Comparison of TDG levels between different sediment concentration (water depth 0.5 m, 1.0 m)

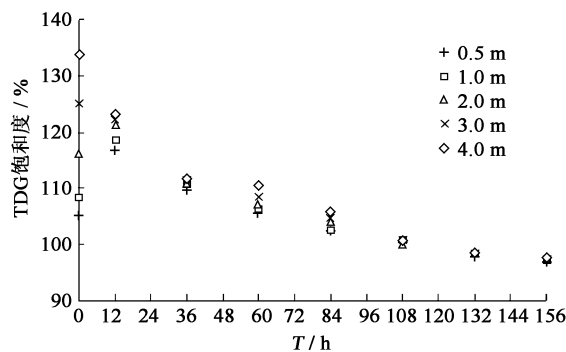


图 4 不同水深含沙水体中 TDG 耗散与时间关系

Fig. 4 TDG changes vs. time under different water depth

作为开拓性研究，由于高坝工程 TDG 过饱和生成问题影响因素复杂，关于生成过程的研究不够成熟和完善，耗散实验中垂向上水深较浅处 TDG 饱和度升高过程还有待于进一步的实验研究，悬沙在其中的影响程度有待于实验资料的进一步丰富，其对流动水体中 TDG 过饱和耗散的促进程度将是进一步研究的重点。

3 结 论

(1) 泥沙对水体中 TDG 过饱和的生成影响不显著，相同初始条件下，含沙水体中 TDG 生成的与清水中 TDG 生成的最大过饱和度没有显著差异。

(2) 紫坪铺水利枢纽 TDG 过饱和原型观测到水体中过饱和 TDG 过饱和度突然变小而后逐渐增大的现象，不是由于水体中携带泥沙导致，该现象应为其它影响因素的改变导致。

(3) 水体中过饱和 TDG 的释放过程较为缓慢，水体中含有泥沙可以加快水体中过饱和 TDG 的耗散，同样初始 TDG 饱和浓度下，含沙水体可比清水中更早达到饱和态。

(4) 在实际高坝工程建设及泄洪消能调度时，应尽量优先考虑建设和使用排沙底孔，通过提高下泄水体中的含沙量，促使高坝下游水体中过饱和 TDG 沿程释放加快，减小其对鱼类的影响。

参考文献：

- [1] 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 De-cai, NI Zhao-hui, ZHENG Yong-hua, et al. Dissolved of dam and its effects on fish [J]. Freshwater Fisheries, 2006, 36(3): 56-59. (in Chinese))
- [2] ORLINS J J, GULLIVER J S. Dissolved gas supersaturation downstream of a spillway: II: Computational model [J]. Journal of Hydraulic Research, 2000, 38(2): 151-159.

- [3] POLITANO M, CARRICA P, TURAN C, et al. A multidimensional two-phase flow model for the total dissolved gas downstream of spillways [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2007, 45(2): 165-177.
- [4] US Army Corps of Engineers. Technical analysis of TDG processes [R]. Jacksonville District: US Army Corps of Engineers, 2005.
- [5] POLITANO M, CARRICA P, WEBER L. A multiphase model for the hydrodynamics and total dissolved gas in tailraces [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2009, 35(11): 1036-1050.
- [6] 李玉樑, 廖文根, 余常昭. 泄水建筑物的复氧能力与控制[J]. *水利学报*, 1994(7): 63-69. (LI Yu-liang, LIAO Wen-gen, YU Chang-zhao. The reaeration and its control of sluice structures[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1994(7): 63-69. (in Chinese))
- [7] 陈永灿, 付健, 刘昭伟, 等. 三峡大坝下游溶解氧变化特性及影响因素分析[J]. *水科学进展*, 2009, 20(4): 526-530. (CHEN Yong-can, FU Jian, LIU Zhao-wei, et al. Analysis of the variety and impact factors of dissolved oxygen downstream of Three Gorges Dam after the impoundment [J]. *Advances in Water Science*, 2009, 20(4): 526-530. (in Chinese))
- [8] 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[J]. *四川大学学报*, 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*, 2008, 40(5): 69-73. (in Chinese))
- [9] 蒋亮, 李然, 李嘉, 等. 紫坪铺坝下游过饱和和溶解气体原型观测研究[J]. *水科学进展*, 2008, 19(3): 367-371. (JIANG Liang, LI Ran, LI Jia, et al. A study of dissolved gas supersaturation downstream of Zipingpu dam [J]. *Advances in Water Science*, 2008, 19(3): 367-371. (in Chinese))
- [10] 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 Xiang-ju, CHEN Yong-can. Theoretical analysis of dissolved gas supersaturation downstream of sluicing dam and application [J]. *Advances in Water Science*, 2007, 18(3): 346-350. (in Chinese))
- [11] LI Ran, LI Jia, LI Ke-feng, et al. Prediction for supersaturated total dissolved gas in high-dam hydropower projects [J]. *Science China Ser E: Technological Sciences*, 2009, 52(12): 3661-3667
- [12] POLITANO M, CARRICA P, TURAN C. Multidimensional simulation of the two-phase flow downstream of spillways for total dissolved gas prediction [R]. Reston: ASCE, 2005.
- [13] 张莉莉, 陈进. 长江上游水沙变化分析[J]. *长江科学院院报*, 2007, 24(6): 34-37. (ZHANG Li-li, CHEN Jin. Analysis on change of water flow and sediment in upstream of Yangtze River[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2007, 24(6): 34-37. (in Chinese))

Relation of total dissolved gas supersaturation and suspended sediment concentration of high-dams*

QU Lu^{1,2}

(1. Zhejiang Institute of Hydraulics & Estuary, Hangzhou 310020, China;

2. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to resolve the issue concerning the relation of total dissolved gas (TDG) supersaturation and suspended sediment concentration of high-dams, a practical abatement measure for TDG supersaturation is put forward in this study. Based on a series of experiments, the production and release of TDG supersaturation in sediment laden flow are studied. The result shows that the production of TDG supersaturation remains almost the same level in either sediment laden flow or clear water for the same initial conditions. The rate of release of TDG supersaturation in sediment laden flow is significantly faster than that in clear water. The suspended sediment concentration can be increased through the use of bottom intakes, speeding up the release of TDG supersaturation. Such a measure can minimize the effect of TDG supersaturation on fish species in the downstream region of high-dams.

Key words: dams; total dissolved gas; saturation; suspended sediment

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50979063).