

文章编号:0559-9350(2011)05-0523-06

## 龚嘴水电站总溶解气体过饱和和原型观测结果分析

曲璐, 李然, 李嘉, 李克锋

(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:** 大坝泄水对环境的不利影响之一是会产生总溶解气体(TDG)过饱和现象, 导致鱼类患气泡病甚至死亡。在理论分析的基础上, 建立了基于面流消能的TDG过饱和和浓度预测公式。该预测公式采用平均静水压强作为自变量进行TDG饱和度计算, 避免了以往采用很难精确定量的动水压强进行TDG预测而带来的不便。通过对大渡河上龚嘴水电站泄洪期间TDG过饱和和气体的原型观测, 对公式参数进行了率定。所建立的公式可用于面流消能时坝下TDG过饱和度的预测。

**关键词:** 总溶解气体; 过饱和; 生成; 大坝; 面流消能

**中图分类号:** TV131.2

**文献标识码:** A

## 1 研究背景

水利工程的不利环境影响之一就是泄水时可能导致坝下总溶解气体(Total Dissolved Gas, 简称TDG)过饱和, 进而致使鱼类患气泡病甚至死亡。我国“十一五”期间制定了单位GDP耗能减少20%的节能减排目标, 水电作为一种低碳清洁能源更加受到青睐, 在整个国民经济的发展中占有举足轻重的地位。我国除紫坪铺、溪洛渡、向家坝和锦屏等一批高坝或超高坝已建或在建外, 还将新建一批如双江口、白鹤滩等坝高在200m以上的高坝。由此导致的我国高坝泄水时产生的TDG过饱和问题将日渐突出, 其对坝下水生生态环境, 特别是鱼类的影响也越来越受到人们关注。鉴于此, 开展大坝下游TDG过饱和研究, 特别是已建大坝工程的原型观测具有重要的现实意义和理论价值。

国外关于坝下TDG过饱和问题的研究开展较早<sup>[1-2]</sup>, 成果较丰富<sup>[3-5]</sup>。但多针对50m以下特定水利工程的TDG过饱和问题, 成果通用性较差。由于我国许多大坝工程为50m以上的高坝、超高坝, 坝高、泄洪流量、掺气消能等工程特性与国外中低坝有着很大不同, 因此国外许多相关研究成果尚不能直接应用。我国虽在20世纪80年代葛洲坝工程的初期运行就已注意到了工程泄水导致溶解气体过饱和问题的不利影响, 并开展了初步的调查工作<sup>[6]</sup>, 但之后一直没有对此进行深入系统的研究。随着三峡工程蓄水发电及越来越多的高坝工程的投入运行, 溶解气体过饱和问题近年来再次被人们普遍关注<sup>[7-9]</sup>。目前我国对溶解气体过饱和生成与释放过程的研究尚处在起步阶段, 多针对水体中溶解氧单一问题进行研究分析<sup>[10-11]</sup>, 已建大坝工程溶解气体过饱和原型观测, 特别是对TDG的观测工作开展较少, 同时缺乏深入系统的对不同消能方式的过饱和TDG生成过程的机理研究, 更没有开展对过饱和TDG消减措施特别是工程措施的研究。据了解, 在我国已建、在建或待建大坝工程的环境影响评价中, 多数工程没有对其坝下溶解气体过饱和和影响进行评价, 少数工程虽进行了初步评价, 但仅局限于粗浅的分析, 没有进行深入系统的研究。我国在关于大坝下游过饱和TDG研究中, 目前尚缺乏对采用面流消能的大坝工程过饱和TDG生成过程的原型观测及机理研究。

收稿日期: 2010-09-14

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, 博士生, 主要从事环境水力学研究。E-mail: qlsniper@163.com

## 2 龚嘴TDG过饱和和原型观测

四川大学在2009年8月3日起结合大坝泄洪，对大渡河上的龚嘴水电站开展了TDG过饱和的原型观测研究，受汉源“8·6”山体垮塌影响，观测于8月7日凌晨结束。龚嘴水电站的地理位置如图1所示。

水体中TDG测量采用加拿大PF公司生产的P4-Tracker TDG压力测定仪。测量得到的水中TDG压力与当地大气压的比值即为水体中TDG饱和度。观测在龚嘴坝前左右两侧各布置1个测点；坝下发电尾水处布置1个测点；在坝下860m处的龚电大桥断面布置3个测点，其中右侧测点水深较浅并有大量砾石，测量条件相对较差，各观测点位置见图2。

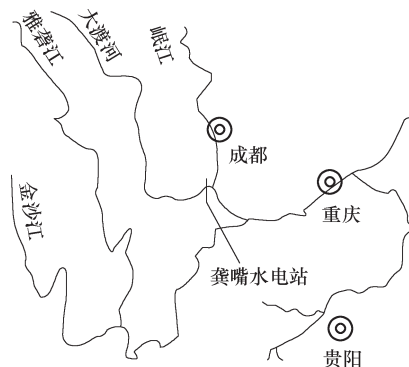


图1 原型观测地理位置

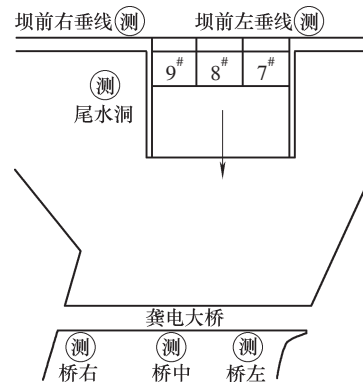


图2 龚嘴TDG测点位置

**2.1 工程特性** 龚嘴水电站位于四川省境内的大渡河中下游，距下游乐山市90km，是以发电为主的综合性利用水利枢纽。拦河坝为混凝土重力坝，全长447m，坝顶高程530.5m，最大坝高85m，消力池长182m，底高程450m。泄洪采用4孔表面溢洪道，其中右部3孔下游用面流衔接，鼻坎高度15.5~21.0m，下游水深25~35m，洪水时可以漂木；左部4<sup>#</sup>坝段溢洪道一般不参与泄洪，采用远驱水跃衔接，水深较小，不能漂木。为减少泥沙对水轮机磨损，在溢洪道两侧和坝后式厂房的一侧设有3孔泄洪排沙底孔，在左岸地下厂房进水口处设有拦沙坎。各泄水建筑物特征值如表1所示。

表1 龚嘴泄水建筑物设计特性

建筑物名称	坝段	高程/m	孔口尺寸/m	流量/(m <sup>3</sup> /s)	备注
溢洪道	7、8、9	堰顶506	12×18	最大单宽流201~242	面流消能
左侧排沙底孔	5、10	底坎472	5×8	最大单宽流220	
右侧排沙底孔	15	底坎472	5×6		
左侧地下厂房		进水口494	直径8	最大单机引用流254	3台机组
右侧发电厂房	11、12、13、14	进水口494	直径8		4台机组

## 2.2 观测结果分析

**2.2.1 坝前水体中TDG分布** 对龚嘴坝前水体中TDG饱和度进行了观测，以便于与坝下TDG饱和度数据对比分析。坝前左侧测点水面TDG饱和度为110.1%，坝前右侧测点水面TDG饱和度为109.2%，通过在两点之间的移动测量，水体表面横向TDG饱和度没有明显变化。

龚嘴坝前右侧测区水流平静，测量钢绳垂直于水面；坝前左侧测区水流复杂，探头时沉时浮。因此，选择龚嘴坝前右侧测点对坝前水体TDG饱和度进行垂向分布观测，结果见表2。

观测结果显示，龚嘴坝前水体垂向TDG饱和度在109.2%~113.9%之间，TDG饱和度在垂向上分布不均，其中水体表面由于和空气接触，饱和度一般较低，而当水深达到一定深度后TDG饱和度在垂向上趋于稳定。

表2 龚嘴坝前右侧测点TDG饱和度垂向分布

工况	水深/m	温度/℃	大气压/kPa	TDG饱和度/%	工况	水深/m	温度/℃	大气压/kPa	TDG饱和度/%
1	0	15.8	94.792	109.2	5	20	15.8	94.792	111.9
2	5	15.8	94.792	113.9	6	25	15.8	94.925	111.9
3	10	15.8	94.792	112.1	7	28	15.8	94.925	111.9
4	15	15.8	94.792	111.9					

表3 龚嘴电站1#尾水洞TDG饱和度

工况	水深/m	温度/℃	大气压/kPa	TDG饱和度/%	工况	水深/m	温度/℃	大气压/kPa	TDG饱和度/%
1	0	15.8	95.592	112.4	4	0	16.1	95.725	112.2
2	0	16.5	95.459	112.9	5	0	15.8	95.592	111.4
3	0	16.6	95.459	112.2	6	0	15.8	95.592	112.1

2.2.2 发电尾水的TDG过饱和度 表3所示为发电尾水水体中TDG饱和度的情况，其中工况1对TDG饱和度进行了垂向测量，发现垂向上TDG饱和度稳定，所以各工况仅测量水体表面TDG饱和度。

对1#尾水洞下游TDG饱和度观测结果显示，坝下发电尾水TDG饱和度为111.4%~112.9%之间，坝前发电进水口高程处TDG饱和度为111.9%，坝上与坝下TDG饱和度最大差值仅为1%。通过原型观测可以看出，经过机组后的水体中TDG饱和度与龚嘴坝前TDG饱和度没有发生明显的变化，研究认为发电水流经过水轮机时，不会改变水体中的TDG过饱和浓度。

2.2.3 坝下水体中TDG分布 龚嘴水电站泄洪期间，7#、8#、9#坝段全泄流时有明显雾化现象，其余工况下雾化现象不明显，其消力池内水体紊动强烈，无法布置探头。水电站下游龚电大桥距离大坝860m，泄水期间水流湍急，现有研究手段无法进行垂向分布观测，国外采用大坝建设期或枯水期大量布置固定探头的方式在国内不可行，故在龚电大桥断面仅进行了横向观测。表4为龚嘴水电站下游龚电大桥断面TDG饱和度横向分布，由此可见龚电大桥断面TDG饱和度横向分布最大差值约为12.9%。

表4 龚电大桥断面TDG饱和度横向分布

工况	左测点TDG饱和度/%	中间测点TDG饱和度/%	右测点TDG饱和度/%	最大差值/%
1	135.2	130.0	124.6	10.6
2	137.9	136.4	130.1	7.8
3	130.7	125.3	124.2	6.5
4	138.1	132.9	125.2	12.9

原型观测结果表明，龚嘴水电站下游水体中TDG最大饱和度为138.1%，泄洪孔口高程处水体中TDG饱和度为111.9%，最大差值高达26.2%，龚嘴水电站泄水期间下游TDG过饱和现象显著。受龚嘴水电站泄水沿河宽的横向不均匀分布及发电尾水掺混等因素影响，坝下TDG沿横向呈不均匀分布，其程度与工程泄水及下游水动力学特性有关，其中主流区域TDG饱和度普遍大于非主流区域。

图3为龚嘴泄洪流量与发电流量比值和TDG饱和度的关系。结果显示，在汛期发电流量 $Q_{电}$ 基本不变的条件下，TDG饱和度随泄洪流量增大而增大。分析认为泄洪流量增大时，消力池内水深增大，水体紊动强度更高，导致水体总溶解气体承受平均压强更大，TDG浓度更高，所以消力池内生成的过饱和水体与发电尾水掺混后水体中的

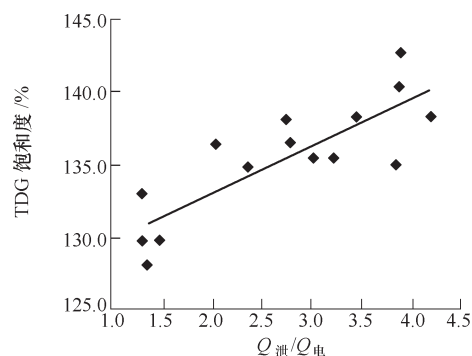


图3 龚嘴泄洪流量/发电流量与生成TDG饱和度关系

TDG 饱和度也越高。

### 3 大坝面流消能过饱和和 TDG 预测数学模型

**3.1 模型的建立** 气体的溶解度( $C_s$ )是指某气体在压强为 101kPa 和一定温度时溶解在单位体积溶剂中达到饱和状态时的体积数。若水体中 TDG 体积数大于当地温度和压力对应的溶解度, 则称为 TDG 过饱和。水体中 TDG 饱和度  $G$  定义为:

$$G = \frac{C}{C_s} \times 100 \quad (1)$$

式中:  $G$  为 TDG 饱和度, %;  $C$  为水体中 TDG 浓度, ml/L;  $C_s$  为对应当地大气压和温度的 TDG 的溶解度, ml/L。

根据气体溶解定义分析认为, 大坝泄水时水头高, 消力池或冲坑内水深大, 压强大于当地大气压, 同时水体紊动剧烈, 掺气量大, 因此造成水体中 TDG 浓度  $C$  超过当地大气压对应的溶解度, 于是就产生了 TDG 过饱和现象。

研究表明, 压强、掺气强度及气泡溶解时间是影响 TDG 过饱和产生的主要因素。对于大坝下泄的高速掺气水流, 气体持续剧烈的掺混在水体中, 在其水体温度和当地大气压强相对稳定的情况下, 水深和水压自然成为影响气体溶解度即 TDG 饱和度最直接和重要的因素。根据原型观测结果, 四川大学已建立了挑流消能时水垫塘内 TDG 生成的数学模型<sup>[12]</sup>。其中由于大坝泄洪过程中, 消力池内压力通常在 10 个标准大气压以内, 在这种压力条件下的气体溶解能力与压强仍近似成正比<sup>[13]</sup>, 所以可用消力池底板平均相对压强  $\Delta\bar{P}_k$  作为衡量 TDG 饱和度的因素之一。由于  $\Delta\bar{P}_k$  在实际大坝工程中很难精确定量, 需要依托水工模型试验, 所以在建立面流消能的过饱和 TDG 预测数学模型时, 采用消力池内平均静水压强  $\Delta\bar{P}$  和其修正系数  $\phi$  作为衡量 TDG 饱和度的因素, 建立面流消能时消力池内 TDG 过饱和生成的数学模型:

$$G_k = G_{eq} + \frac{1}{2} \frac{\Delta\bar{P}}{P_0} \phi G_{eq} \exp \left[ -k_k \left( \frac{h_k}{h_t} \right)^{3/2} \right] \quad (2)$$

式中:  $G_k$  为消力池出口下游 TDG 饱和度, %;  $G_{eq}$  为当地大气压强相应的平衡饱和度, %;  $\Delta\bar{P}$  为消力池内平均静水压强, kPa;  $P_0$  为当地大气压强, kPa;  $\phi$  为修正系数;  $k_k$  为水流流经消力池出口时的 TDG 释放系数;  $h_k$  为消力池出口与消力池底板高差, m;  $h_t$  为消力池出口水深, m。

**3.2 参数率定** 采用龚嘴 TDG 原型观测资料对本文建立的模型进行参数率定。其中, 由于大坝泄洪时存在发电流量, 在龚电大桥断面已经发生掺混, 故还采用了混合模式考虑发电尾水混入影响:

$$G = \frac{G_k Q_{洪} + G_{初} Q_{电}}{Q_{洪} + Q_{电}} \quad (3)$$

式中:  $G$  为混合后 TDG 饱和度, %;  $G_{初}$  为坝上初始饱和度, %;  $Q_{洪}$  为泄洪流量, m<sup>3</sup>/s;  $Q_{电}$  为发电流量, m<sup>3</sup>/s。

其中, 由于龚电大桥在坝下仅 860m, 认为桥左测点处泄洪流量仅与左侧 3 台发电机组发电尾水掺混, 而桥中测点为泄洪流量与全部 7 台发电机组尾水掺混。

根据观测数据和泄洪资料, 对建立的模型进行参数率定。观测数据时每 6 秒测量一组数据, 每组工况取 100 组数据, 测量数据中共有典型工况 15 组。通过原型观测资料的率定结果表明, 模型中修正系数  $\phi$  取值范围为 0.31~0.39, 表 5 通过率定确定公式中修正参数  $\phi$  取值为 0.34, 拟合公式与原函数关系近似程度较高。原型观测与模型计算结果的 TDG 饱和度差值小于 4.2%。图 4 绘出了实测结果与模型计算结果的比较。

**3.3 模型误差分析** 本文采用龚嘴 TDG 原型观测资料进行参数率定。受观测条件限制, 泄洪期间坝下消力池出口无法布置观测点, 观测断面布置在坝下 860m 处, 因此观测工况的代表性会产生一定的模型误差。模型建立过程中对过饱和 TDG 生成过程进行了概化, 考虑其中压强的假定误差, 引入修

表5 过饱和TDG模型参数率定结果

工况	泄洪流量/(m <sup>3</sup> /s)	发电流量/(m <sup>3</sup> /s)	修正系数 $\phi$	测量TDG饱和度/%	计算TDG饱和度/%	差值/%
1	2 212	1 440		135.4	137.2	1.9
2	1 873	1 580		136.4	136.1	-0.3
3	2 614	1 580		134.9	138.1	3.1
4	2 160	1 700		135.2	136.3	1.1
5	2 777	1 540		137.9	138.6	0.7
6	2 642	1 580		142.5	138.2	-4.2
7	2 606	1 560		139.9	138.1	-1.8
8	1 837	1 560	0.34	138.1	135.5	-2.6
9	2 144	1 560		137.9	136.6	-1.3
10	1 580	1 570		134.7	134.2	-0.4
11	2 218	1 660		128.0	130.8	2.9
12	2 138	1 670		130.0	130.5	0.5
13	2 907	1 410		136.4	133.9	-2.5
14	2 264	1 570		129.7	130.7	1.1
15	1 716	1 320		132.9	129.4	-3.5

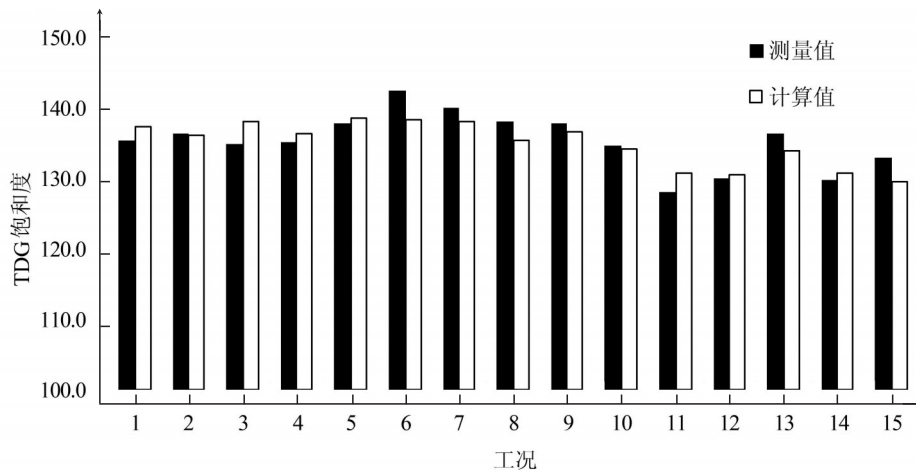


图4 龚嘴TDG饱和度实测值与计算结果对比

正系数 $\phi$ ，关于其精确取值，有待今后开展更多采用面流消能工程的原型观测资料进行验证。

对于大坝大流量泄水消能时，消力池内压强分布、消力池内外水深的计算，单纯采用经验公式的方法往往带来较大误差。为尽可能减小对高坝泄流TDG过饱和的预测误差，预测中应采用经验公式与水工模型相结合的方法，尽可能依托工程设计中的面流消能研究成果，避免由于单纯采用经验公式计算压强分布等所带来的误差。

#### 4 结论

通过对大渡河龚嘴水电站TDG过饱和的原型观测研究，对面流消能的大坝泄流产生TDG过饱和现象进行了全面分析。在此基础上，建立了基于面流消能的大坝TDG过饱和浓度预测公式，并通过泄洪期间的原型观测数据，对公式参数进行了率定。结果表明，所建立的公式能够用于面流消能时坝下TDG过饱和度的预测。研究在大坝面流消能TDG过饱和预测方面积累了大坝TDG原型观测经验，可为TDG过饱和问题的理论研究和定量预测提供基础数据和参考依据，对系统研究不同消能方式下TDG过饱和生成过程具有重要意义，对保护大坝下游水环境具有重要作用。

由于大坝泄洪历时短等泄洪期间观测条件的限制，原型观测资料有待于进一步丰富，模型的完

善和精度以及在其它采用面流消能大坝工程中的应用推广仍需要进一步的深入研究。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] Ebel W J . Supersaturation of nitrogen in the Columbia River and its effect on salmon and steelhead trout[J] . US National Marine Fisheries Service, Fishery Bulletin, 1969, 68: 1-11 .
- [ 2 ] Rucker R R, Kangas P M. Effect of nitrogen supersaturated water on coho and Chinook salmon [J] . Prog, Fish-Cult, 1974, 36(3): 152-156 .
- [ 3 ] US Army Corps of Engineers . Technical analysis of TDG processes[Z] . US Army Corps of Engineers-Northwest Division, Environmental Resources and Fish Planning Offices, 2005 .
- [ 4 ] 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 .
- [ 5 ] 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 .
- [ 6 ] 长江流域水资源保护局 . 葛洲坝工程泄水与鱼苗气泡病调查[R] . 1983 .
- [ 7 ] 谭德彩 . 三峡工程致气体过饱和和对鱼类致死效应的研究[D] . 重庆: 西南大学, 2006 .
- [ 8 ] 陈永柏, 彭期冬, 廖文根 . 三峡工程运行后长江中游溶解气体过饱和和演变研究[J] . 水生态学杂志, 2009, 2(5): 1-5 .
- [ 9 ] 蒋亮, 李嘉, 李然, 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 .
- [ 10 ] 李玉梁, 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 .
- [ 11 ] 李然, 赵文谦, 李嘉, 等 . 紊动水体表面传质系数的实验研究[J] . 水利学报, 2000(2): 60-65 .
- [ 12 ] LI Ran, LI Jia, Li Kefeng, 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 .
- [ 13 ] 蒋亮 . 高坝下游水体中溶解气体过饱和问题研究[D] . 成都: 四川大学, 2008 .

## Analysis on field observation of total dissolved gas supersaturation of Gongzui Dam

QU Lu, LI Ran, LI Jia, LI Ke-feng

(Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** The supersaturation of total dissolved gas (TDG) downstream of dams, is one of the possible negative effects of hydropower stations on environment, which can lead to gas bubble disease or even death of fish. Based on the conceptual summarization of the TDG production process, the TDG prediction model for dam projects, in which the surface flow energy dissipation is adopted, is developed in this paper. The prediction model takes the average hydro-pressure as the main dependent variable. The model is more practical and easy to use because of avoiding using the dynamic pressure as the dependent variable, which is difficult to quantify. The model is calibrated by field data and employed in the TDG prediction of Gongzui Hydropower Project to be built on the Dadu River.

**Key words:** total dissolved gas; supersaturation; generation; dam; surface flow energy dissipation

(责任编辑: 王成丽)