

# 高坝工程总溶解气体过饱和和预测研究

李然, 李嘉\*, 李克锋, 邓云, 冯镜洁

水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川大学, 成都 610065

\* E-mail: [lijia@scu.edu.cn](mailto:lijia@scu.edu.cn)

收稿日期: 2009-05-08; 接受日期: 2009-07-19

国家自然科学基金(批准号: 50579043)和水力学与山区河流开发保护国家重点实验室(四川大学)开放基金(批准号: 0604)资助项目

**摘要** 随着越来越多的高坝工程建设, 伴随高坝泄水而存在的总溶解气体过饱和问题及其对鱼类的影响成为在我国日渐突出并日益受到关注的环境生态风险之一. 本文在理论分析基础上, 将高坝下游总溶解气体的生成过程概化为气体过饱和及瞬间释放两个过程, 建立了高坝挑流消能下游总溶解气体过饱和和风险预测模型. 采用紫坪铺、二滩、漫湾等已建高坝原型观测资料对模型进行了验证, 并对西南某待建高坝工程总溶解气体过饱和和风险进行了预测. 本文作为高坝挑流消能过饱和和总溶解气体预测方面的开拓性研究工作, 对于定量预测评价高坝工程总溶解气体过饱和问题, 建设生态环境友好型高坝水利工程具有重要意义.

## 关键词

高坝  
挑流  
总溶解气体  
过饱和

水体中总溶解气体(Total Dissolved Gas, 简称 TDG)过饱和和可能致使鱼类患气泡病甚至死亡, 因此伴随高坝泄水出现的总溶解气体过饱和问题成为高坝工程运行的主要生态环境风险之一. 随着国家西部大开发和“西电东送”战略的实施, 紫坪铺、溪洛渡、向家坝、锦屏等一批高坝已建或在建之中, 另外双江口、白鹤滩等一批坝高在 200 m 以上的高坝也即将建设. 由于各具特色的气候、自然地理等因素影响, 我国许多河流水生生物具有特有程度高、物种数量大等特点, 因此, 高坝泄水导致的总溶解气体过饱和问题在我国将日渐突出, 开展高坝下游溶解气体过饱和研究具有特别重要的现实意义和理论价值.

关于水利工程溶解气体过饱和问题的研究以美国为最早, 成果也最丰富. 美国关于过饱和问题的研究大约始于 20 世纪 60 年代, 主要是围绕 Columbia 河(Columbia River)及其支流 Snake 河(Snake River)上水利工程泄水产生的 TDG 过饱和和对河道内大麻哈鱼

(Salmon)等珍稀保护鱼类的影响开展的<sup>[1,2]</sup>. 研究内容包括鱼类影响调查、TDG 生成与释放过程、消减措施等. 其中, 在 TDG 过饱和和生成预测方面, 经历了由经验公式、单相流模型发展到最近的两相流模型<sup>[3,4]</sup>. 但这些研究成果多针对坝高 50 m 以下, 且采用底流消能方式的中低水头特定水利工程. 由于坝高在 100 m 甚至 200 m 以上的高坝多采用挑流消能形式, TDG 生成规律与中低坝有着显著差别, 因此, 国外建立的各种适用于底流消能的中低水头特定工程的 TDG 预测模型不能用于国内高坝 TDG 的预测评价. 我国虽在二十世纪八十年代葛洲坝工程的初期运行中就已注意到了工程泄水导致的溶解气体过饱和问题及其对鱼类的不利影响, 并开展了初步的调查工作, 但之后一直没有对此进行深入系统的研究. 随着越来越多高坝工程的投入运行, 近年来高坝过饱和和环境风险再次被人们普遍关注<sup>[5,6]</sup>. 研究表明, TDG 饱和度与泄洪流量之间虽然存在定量经验关系, 但这一经验关

**引用格式:** 李然, 李嘉, 李克锋, 等. 高坝工程总溶解气体过饱和和预测研究. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2009, 39(12): 2001—2006

Li R, Li J, Li K F, et al. Prediction for supersaturated total dissolved gas in high-dam hydropower projects. Sci China Ser E-Tech Sci, 2009, 52(12): 3661—3667, doi: 10.1007/s11431-009-0337-4

系随工程不同而不同, 无法得到各工程普遍适用的定量关系式. 随着数值模拟的发展, 有些学者开始尝试运用数值模拟技术进行高坝过饱和TDG的预测, 但由于其中气液传质过程的机理性认识不足, 其中诸多系数难以确定, 同时高坝泄流气液传质的全过程两相流数值模拟在收敛性和经济性等方面尚存在诸多问题和困难. 由于目前国内外尚缺乏高坝过饱和和TDG环境风险的定量预测方法和模型, 严重影响了我国对高坝工程TDG过饱和影响评价及有关生态环境保护对策措施研究.

## 1 过饱和 TDG 风险预测数学模型的建立

关于气体溶解过程的研究也表明<sup>[2]</sup>, 温度、含盐量及压力是影响气体溶解度的主要因素, 而水气界面面积、水体紊动强度是影响气体溶解速度的重要因素. 对于高坝下泄的高速掺气水流, 在温度与含盐量相对稳定情况下, 水深(代表静水压强)和水体动水压强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, 因此本文将重点考虑下游水压和水深两个特征物理量的作用, 建立过饱和TDG预测模型.

高坝泄洪水流消能方式一般采用冲坑消能或水垫塘消能. 当泄洪出口距坝基较远时, 一般采用自然冲坑形成水垫以达到消能目的. 当泄流入水点距坝址较近时, 为保证坝基稳定, 在水流入水处均布置有水垫塘, 同时为增加消能效果, 在水垫塘出口修建二道坝. 两种泄洪消能方式如图 1 示. 由于两种消能方式的水深及水压分布特征不同, 因此总溶解气体过饱和和产生各有特点, 需分别进行预测.

### 1.1 冲坑内 TDG 预测模型

美国陆军工程兵团(the U.S. Army Corps of En-

gineers)曾根据对Columbia河及其支流Snake河上总溶解气体的研究成果, 对TDG产生过程及其影响因素进行了总结分析<sup>[8]</sup>, 认为大坝泄水时, 总溶解气体的迅速生成过程通常发生在水垫塘内. 这主要是由于水垫塘内水流深度(即水压)、气体浓度、流速和紊流强度都很高. 而当水流出水垫塘后, 质量传输过程则相反, 气体开始从水体释放到大气中. 为此, 高坝下游过饱和总溶解气体的生成可概化为两个过程. 第一个过程为冲坑内高压掺气水流中气体的过饱和过程, TDG平均饱和度为  $G_1$ , 过饱和度为  $\Delta G_1$ ; 第二个过程为水流流经冲坑出口时, 由于压力和水深突然减小导致的过饱和TDG的瞬间快速释放过程, 过程末TDG饱和度为  $G_d$ , 过饱和度为  $\Delta G_d$ .

高坝泄洪过程中, 冲坑内压力通常在 10 个标准大气压以内. 高压釜内空气溶解度试验表明, 在这种压力条件下的气体溶解度与压力仍近似成正比<sup>[5]</sup>. 因此在第一个概化过程中, 可假定冲坑内TDG过饱和度  $\Delta G_1$  与冲坑内平均相对压力  $\Delta \bar{P}$  成正比, 即:

$$\Delta G_1 = \frac{\Delta \bar{P}}{P_0} G_{eq}, \quad (1)$$

式中,  $\Delta \bar{P}$  为冲坑内平均相对压强(kPa);  $P_0$  为当地大气压强(kPa);  $G_{eq}$  为当地大气压强相应的平衡饱和度(%).

关于冲坑或水垫塘内压强分布规律的研究表明<sup>[6,9]</sup>, 除局部冲击区域外, 动水压强沿水深方向近似呈线性分布. 由此可得到:

$$\Delta G_1 = \frac{1}{2} \frac{\Delta \bar{P}_d}{P_0} \phi_1 G_{eq}, \quad (2)$$

式中,  $\Delta \bar{P}_d$  为冲坑底部平均相对压强(kPa). 具体可根

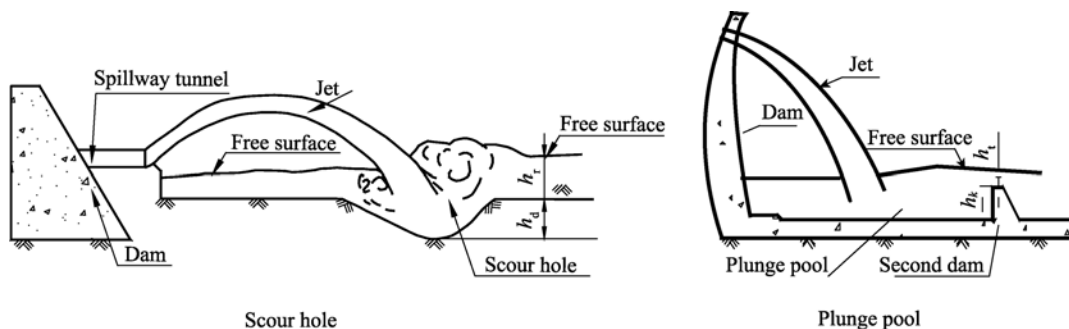


图 1 高坝挑流消能示意图

据相关规范导则及水力模型实验确定;  $\phi_1$  为修正系数.

第二个概化过程最终的TDG过饱和度  $\Delta G_d$  与冲坑内平均过饱和度  $\Delta G_1$ 、冲坑内平均水深  $h_d$  和出口水深  $h_t$  相关. 美国陆军工程兵团对过饱和TDG释放过程的研究认为, 过饱和TDG的释放过程符合一阶动力学过程<sup>[7]</sup>, 即:

$$\frac{dG}{dt} = -k(G - G_{eq}), \quad (3)$$

其中释放系数  $k$  与当地水深的  $3/2$  成正比, 表达式为:

$$k = f(h^{-3/2}). \quad (4)$$

求解方程(3)和(4)可得到:

$$\Delta G_e = \Delta G_0 \exp[-f(h^{-3/2})], \quad (5)$$

式中,  $\Delta G_0$  为初始过饱和度,  $\Delta G_e$  为时刻末 TDG 过饱和度.

参照上述研究成果, 冲坑出口过饱和 TDG 的瞬间释放过程可写为:

$$\Delta G_d = \Delta G_1 \exp[-f(h_t)^{-3/2}], \quad (6)$$

式中,  $\Delta G_d$  为冲坑下游 TDG 过饱和度,  $\Delta G_1$  为冲坑内 TDG 过饱和度. 考虑冲坑深  $h_d$  的影响, 引入无量纲物理量  $h_t/h_d$  和释放系数  $k_d$ , 方程(6)改写为:

$$\Delta G_d = \Delta G_1 \exp\left[-k_d \left(\frac{h_d}{h_t}\right)^{3/2}\right], \quad (7)$$

将(2)式代入(7)式可得到关系式:

$$G_d = G_{eq} + \frac{1}{2} \frac{\Delta \bar{P}_d}{P_0} \phi_1 G_{eq} \exp\left[-k_d \left(\frac{h_d}{h_t}\right)^{3/2}\right], \quad (8)$$

模型(8)即为冲坑下游过饱和 TDG 的预测模型.

## 1.2 水垫塘内 TDG 预测模型

与冲坑内 TDG 生成过程相似, 水垫塘内 TDG 生成过程也可概化为水垫塘内高压掺气水流中气体的过溶过程以及水流流经水垫塘二道坝出口时, 由于压力和水深突然减小导致的过饱和 TDG 的瞬间快速释放过程. 采用与冲坑相似的分析方法, 可建立得到水垫塘内 TDG 预测模型:

$$G_k = G_{eq} + \frac{1}{2} \frac{\Delta \bar{P}_k}{P_0} \phi_2 G_{eq} \exp\left[-k_k \left(\frac{h_k}{h_t}\right)^{3/2}\right], \quad (9)$$

式中,

$G_k$  为水垫塘出口下游 TDG 饱和度(%);

$\Delta \bar{P}_k$  为水垫塘底板平均相对压强(kPa);

$\phi_2$  为修正系数;

$k_k$  为水流流经二道坝时的 TDG 释放系数;

$h_k$  为二道坝高(m);

$h_t$  为二道坝上水深(m).

水垫塘内 TDG 预测模型与冲坑内 TDG 预测模型尽管形式上非常相近, 均表现为压力及水深的关系. 但由于两种建筑物内水流的压力、水深等水动力学特性的不同, 最终导致不同的 TDG 饱和度.

## 2 模型验证及参数率定

采用国内已建高坝工程原型观测资料对本文建立的数学模型进行验证和参数率定.

受国家自然科学基金资助, 四川大学在 2006 至 2008 年间结合高坝泄水, 对国内已建的紫坪铺、三峡、二滩、漫湾和大朝山等高坝开展了总溶解气体过饱和和原型观测研究. 各工程地理位置分布示意图见图 2, 各工程基本概况见表 1.

水体中 TDG 测量采用美国 YSI 公司生产的 YSI52 型总溶解气体压力(TGP)测定仪. 观测得到的水中总溶解气体压力与当地大气压的比值即为水体中总溶解气体饱和度. 各工程 TDG 观测断面位置尽量布置在冲坑及水垫塘出口, 但部分工程受观测条件限值, 观测断面布置在坝下游一定距离. 各工程观测断面位置及 TDG 饱和度最大观测值详见表 2.

原型观测结果表明, 各高坝工程泄水期间下游均观测到总溶解气体过饱和现象, 其中 2007 年 7 月 10 日三峡观测断面最高达到 143%.

采用 TDG 原型观测资料对本文建立的模型进行验证和参数率定. 其中, 各工程冲坑和水垫塘底部压强分别参照各工程泄洪消能设计成果及水力学模型试验研究成果确定. 对泄水期间存在发电流量的, 采用混合模式考虑发电尾水混入影响. 表 3 和表 4 分别为冲坑及水垫塘模型的验证与参数率定结果, 图 3 绘出了两种泄洪方式下模型计算结果与实测结果的比较.

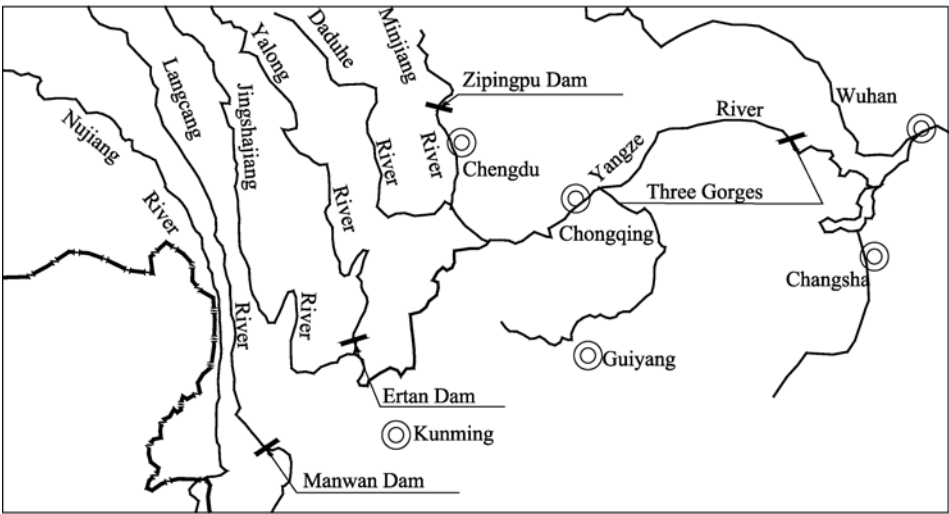


图 2 原型观测工程地理位置示意图

表 1 原型观测代表工程基本概况统计表

| No. Project    | River          | Dam type                      | Maximum dam height (m) | Release structure                                              |
|----------------|----------------|-------------------------------|------------------------|----------------------------------------------------------------|
| 1 Ertan        | Yalong River   | concrete hyperbolic arch dam  | 240                    | surface, middle and bottom discharge orifice, discharge tunnel |
| 2 Zipingpu     | Minjiang River | concrete deck rock-filled dam | 156                    | discharge tunnel, spillway                                     |
| 3 Manwan       | Lancang River  | concrete gravity dam          | 132                    | surface and middle discharge orifice, discharge tunnel         |
| 4 Three Gorges | Yangze River   | concrete gravity dam          | 185                    | surface and bottom discharge orifice                           |

表 2 已建高坝工程 TDG 饱和度最大观测值统计表

| No. | Project      | Location of the observed sections   | Maximum TDG level (%) | Occurrence time |
|-----|--------------|-------------------------------------|-----------------------|-----------------|
| 1   | Ertan        | 3000 m downstream the dam           | 140.0                 | 2007-07-27      |
| 2   | Zipingpu     | outlet of the scour hole            | 130.6                 | 2006-12-28      |
| 3   | Manwan       | outlet of the scour and plunge pool | 124.0                 | 2008-07-31      |
| 4   | Three Gorges | 4000 m downstream the dam           | 143.0                 | 2007-07-10      |

表 3 泄洪洞泄流的过饱和 TDG 模型参数率定结果表

| Case No. | Project  | Discharge rate (m <sup>3</sup> /s) | Power flow (m <sup>3</sup> /s) | Correction coefficient $\phi$ | Dissipation coefficient $k_d$ | Observed TDG level (%) | Computed TDG level (%) | Difference between computed and observed (%) |
|----------|----------|------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------|------------------------|----------------------------------------------|
| 1        | Ertan    | 3700                               | 1809                           | 0.50                          | 0.20                          | 140.0                  | 138.1                  | -1.9                                         |
| 2        | Ertan    | 1850                               | 1263                           | 0.48                          | 0.15                          | 134.1                  | 130.1                  | -4.0                                         |
| 3        | Ertan    | 2220                               | 1263                           | 0.40                          | 0.20                          | 121.6                  | 126.6                  | 5.0                                          |
| 4        | Zipingpu | 170                                | 0                              | 0.46                          | 0.15                          | 107.1                  | 107.5                  | 0.4                                          |
| 5        | Zipingpu | 310                                | 0                              | 0.47                          | 0.15                          | 111.0                  | 113.7                  | 2.7                                          |
| 6        | Zipingpu | 340                                | 0                              | 0.48                          | 0.15                          | 114.9                  | 115.7                  | 0.8                                          |
| 7        | Manwan   | 880                                | 2304                           | 0.55                          | 0.10                          | 120.0                  | 115.6                  | -4.4                                         |
| 8        | Manwan   | 540                                | 1968                           | 0.55                          | 0.10                          | 116.0                  | 113.6                  | -2.4                                         |

表 4 泄洪孔泄流的过饱和 TDG 模型参数率定结果表

| Case No. | Project | Discharge Rate (m <sup>3</sup> /s) | Power flow (m <sup>3</sup> /s) | Correction coefficient $\phi_k$ | Dissipation coefficient $k_k$ | Observed TDG level (%) | Computed TDG level (%) | Difference between computed and observed (%) |
|----------|---------|------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|------------------------|------------------------|----------------------------------------------|
| 1        | Ertan   | 2400                               | 1809                           | 0.475                           | 0.08                          | 127.2                  | 122.5                  | -4.7                                         |
| 2        | Ertan   | 800                                | 1809                           | 0.429                           | 0.08                          | 122.6                  | 118.1                  | -4.5                                         |
| 3        | Manwan  | 1810                               | 1927                           | 0.562                           | 0.08                          | 124.0                  | 120.5                  | -3.5                                         |

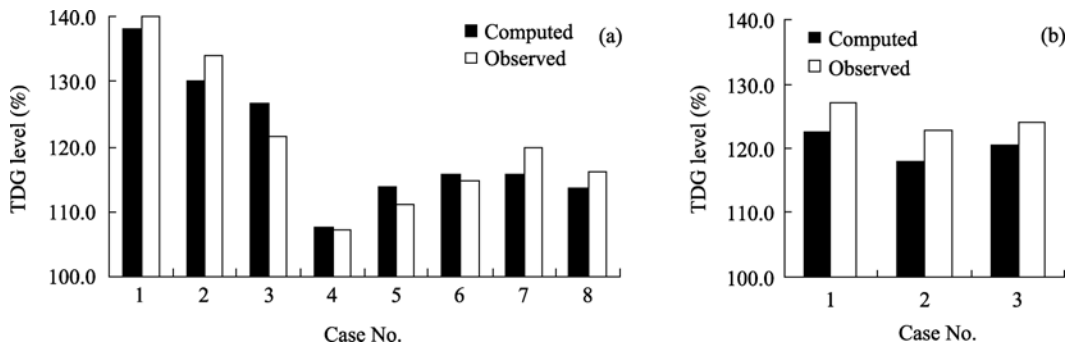


图 3 TDG 饱和度计算与实测结果对比

原型观测资料的率定结果表明, 冲坑模型中修正系数  $\phi_1$  取值范围为 0.40~0.55, 冲坑出口区域的 TDG 释放系数  $k_d$  取值范围为在 0.1~0.2. 水垫塘模型中修正系数  $\phi_2$  取值范围在 0.43~0.56 之间, 水垫塘出口区域的 TDG 释放系数  $k_k$  取值范围在 0.08~0.12 之间.

模型计算结果与原型观测结果之间的 TDG 饱和度差值小于 5.0%. 本文认为在缺乏高坝泄流 TDG 风险预测模型及在现有高坝工程 TDG 过饱和研究水平条件下, 本文建立的过饱和预测模型误差在可以接受的范围内, 可以用于高坝工程泄洪洞泄洪的 TDG 饱和度预测中.

3 模型误差分析

本文采用 TDG 原型观测资料进行参数率定. 受观测条件限制, 泄洪期间二滩坝下冲坑及水垫塘出口无法布置观测点, 观测点布置在坝下 3 km 处, 因此观测结果的代表性是产生本模型误差的原因之一.

基于对过饱和 TDG 生成过程的概化, 考虑其中假定误差, 在冲坑及水垫塘模型中分别引入修正系数  $\phi_1$  和  $\phi_2$ . 考虑冲坑和水垫塘内产生的高饱和度的水流在流出冲坑和水垫塘过程中, 由于水流承压急剧减小而导致的 TDG 快速释放过程, 模型中分别引入了冲坑和水垫塘出口的 TDG 释放系数  $k_d$  和  $k_k$ . 关

于这些系数的精确取值, 有待今后开展深入的机理研究以及更多工程的原型观测资料验证.

目前, 关于动水压强分布、冲坑内外水深的计算, 一般采用相关设计规范中推荐的经验公式法或水工模型试验法. 但对于高坝大流量泄水消能的计算, 单纯依靠经验公式方法往往带来较大误差, 一般采用经验公式和水工模型试验相结合的方法. 因此为尽可能减小对高坝泄流 TDG 过饱和的预测误差, 预测中应尽可能依托工程设计中的泄流消能研究成果, 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 西南某高坝工程 TDG 过饱和预测

待建的某高坝工程位于我国西南山区, 最大坝高 289.0 m, 坝身泄洪消能设施由 6 个表孔、7 个深孔及坝体下游水垫塘、二道坝组成. 岸边泄洪消能设施由 3 条泄洪隧洞组成.

采用本文建立的过饱和 TDG 预测模型, 对不同泄洪方式下的过饱和 TDG 生成进行预测(表 5). 基于待建工程下游消能工的尺寸规模与二滩工程较为接近, 因此预测中模型参数根据待建工程泄流消能设计成果, 参照二滩工程模型参数取值. 各工况下参数取值及预测得到的 TDG 饱和度同时列于表 5 中.

模型预测结果表明, 待建的高坝工程由于泄洪水

表 5 某高坝工程泄洪下游过饱和 TDG 生成预测结果表

| Case No. | Release mode            | Discharge rate (m³/s) | Correction coefficient $\phi_1$ | Dissipation coefficient $k_d$ | Correction coefficient $\phi_2$ | Dissipation coefficient $k_k$ | Predicted TDG level (%) |
|----------|-------------------------|-----------------------|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| 1        | single surface orifice  | 11468                 | —                               | —                             | 0.495                           | 0.08                          | 140.0                   |
| 2        | single bottom orifice   | 10689                 | —                               | —                             | 0.473                           | 0.08                          | 135.0                   |
| 3        | single discharge tunnel | 3703                  | 0.46                            | 0.2                           | —                               | —                             | 143.8                   |

头高, 流量大, 各泄洪工况下均出现总溶解气体过饱和现象, 且随着泄洪方式和流量的不同而不同. 其中, 不考虑发电尾水掺混作用, 在单个泄洪洞单泄时, 坝下 TDG 饱和度最大值达到 143.8%. 说明该工程建成运行后存在 TDG 过饱和问题.

预测结果同时表明, 在泄流量相当情况下, 深孔、表孔以及泄洪洞等不同泄洪方式产生的气体过饱和水平不同, 其中深孔泄洪方式明显低于表孔以及泄洪洞泄洪方式, 因此, 为减小工程 TDG 过饱和影响, 建议优选深孔泄洪, 其次是表孔泄洪, 尽量减少使用泄洪洞泄洪.

## 5 小结

本文采用理论分析与原型观测相结合的方法, 建立了挑流消能泄洪建筑物过饱和 TDG 预测模型, 并对西南某待建高坝工程总溶解气体过饱和问题进

行了预测研究. 模型充分考虑了水深、压力分布等重要泄洪特性参数在过饱和和总溶解气体生成中的作用. 同时, 由于水深、压力分布也是工程消能设计中通常需要确定的常用参数, 因此大大提高了模型的工程应用价值和普适性. 本文挑流消能 TDG 预测模型的建立是高坝工程过饱和 TDG 定量预测研究领域的开拓性研究工作, 对于定量预测高坝工程总溶解气体过饱和程度, 客观公正评价高坝工程生态环境风险, 探讨高坝工程环境保护具有重要意义.

由于高坝工程 TDG 过饱和问题涉及高坝泄洪消能中水气两相流问题, 影响因素复杂, 目前关于过饱和和 TDG 形成机理的研究尚不够成熟和完善, 且已建高坝工程原型观测资料有待进一步丰富, 因此本文模型的进一步完善和精度及其在大型高坝工程中的推广应用仍将是作者今后进一步深入研究和探讨的主要问题.

## 参考文献

- 1 Orlins J J, Gulliver J S. Dissolved gas supersaturation downstream of a spillway II: Computational model. *J Hydraul Res*, 2000, 38(2): 151—159
- 2 Politano M, Carrica P, Turan C, et al. A multidimensional two-phase flow model for the total dissolved gas downstream of spillways. *J Hydraul Res*, 2007, 45(2): 165—177
- 3 Huang H Q. Computational model of total dissolved gas downstream of a spillway. Dissertation of Doctoral Degree. Iowa: University of Iowa, 2002
- 4 Dai H C, Wang L L, Gao J Z, et al. Numerical simulation of two-phase turbulent flow in hydraulic and hydropower engineering. *Sci China Ser E-Tech Sci*, 2007, 50(Suppl 1): 79—89
- 5 谭德彩. 三峡工程致气体过饱和对鱼类致死效应的研究. 重庆: 西南大学硕士学位论文, 2006
- 6 蒋亮. 高坝下游水体中溶解气体过饱和问题研究. 成都: 四川大学博士学位论文, 2008
- 7 Li R, Luo L. Study on the effect of hydrodynamic characteristics on reaeration process. *J Environ Sci*, 2002, 14(3): 393—398
- 8 US Army Corps of Engineers. Technical Analysis of TDG Processes. US Army Corps of Engineers—Northwest Division, Environmental Resources and Fish Planning Offices, 2005
- 9 刁明军. 高坝大流量泄洪消能数值模拟及实验研究. 成都: 四川大学博士学位论文, 2004