

复杂流动条件下过饱和 TDG 释放系数的确定

雍晓东¹, 易文敏¹, 李 然¹, 唐春燕², 冯镜洁¹

(1. 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 ;

2. 广西水利电力勘测设计研究院 广西 南宁 520023)

摘要 在总结国内外对 TDG 过饱和问题研究的基础之上,通过物理模型试验并结合数值模拟,以鱼道模型为例研究了绕流、回流等复杂流动条件下过饱和 TDG 的释放过程及释放系数。结果表明,鱼道模型内挡墙等建筑物的布置使水流出现绕流、回流等复杂水力学特征,由此增加了水体在鱼道内的滞留时间和局部区域的紊动动能,大大增加了过饱和 TDG 的释放。分析显示,在高紊动区域,过饱和 TDG 的释放速率与紊动强度成正相关关系。

关键词 过饱和;总溶解气体;释放系数;鱼道;数值模拟

中图分类号:TV135.2+9

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2012)S1-0062-04

随着我国水能资源的大力开发,一大批高坝工程相继建成运行,所带来的环境影响问题日益受到人们的关注。其中之一便是高坝泄洪水流由于水头高、流速大,导致过量空气随水流进入水体并部分溶解于水中,使得水体总溶解气体(total dissolved gas, TDG)过饱和,而过饱和 TDG 释放过程及释放系数的确定是其中的热点和难点之一。美国陆军工程兵团是最早研究 TDG 过饱和问题的机构之一,并且在大量的原型观测资料和试验基础之上提出了纵向一维释放模型^[1]。Politano 等^[2]用两相流模型模拟了溢洪道下游过饱和气体释放过程。我国在水利工程 TDG 过饱和方面的研究开展相对较晚,四川大学从 2006 年开始对过饱和 TDG 生成和释放规律进行了试验和理论研究^[3-4],分别对长江三峡、岷江紫坪铺、雅砻江二滩、澜沧江漫湾和大朝山、大渡河龚嘴和铜街子等已建电站泄洪时下游河道 TDG 沿程变化进行了原型观测^[5-6],唐春燕^[7]通过室内试验,探讨了不同紊动强度下的清水及含沙水 TDG 释放过程。清华大学、中国水利水电科学研究院近年来集中对长江三峡及葛洲坝电站下游过饱和 DO 沿程变化规律进行了原型观测和数值模拟研究^[8]。综合分析以往国内外研究成果表明,关于过饱和 TDG 释放系数的研究,特别是复杂水流条件对过饱和 TDG 释放系数的影响研究较少。对于单个电站的情况,鱼道不会引用过饱和 TDG 水流,但在对河流进行梯级开发

时,上一梯级会影响到下一梯级,形成累积效应,所产生的过饱和 TDG 会随流输移很长距离。鉴于流场、紊动特性等均会对过饱和 TDG 的释放过程产生影响,为此本文主要利用室内机理试验并结合数值模拟,以鱼道模型为例,对复杂水流条件下的过饱和 TDG 释放过程进行初步探讨,尝试采用紊流数值模拟方法分析确定过饱和 TDG 释放系数。

1 鱼道模型试验研究

1.1 试验装置与量测方法

试验的主要装置为过饱和 TDG 供水系统及鱼道模型系统(图 1)。

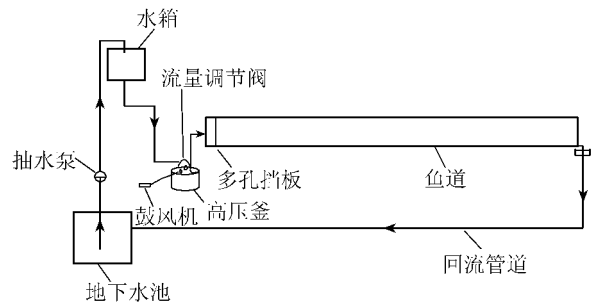


图 1 鱼道模型试验装置示意图

为开展不同鱼道结构形式在消能效果、水流流态等方面的影响研究,四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室曾参照西藏狮泉河鱼道工程设计,按 1:8 的比例建造了鱼道模型。本文试验装置是在对该模型进行改造的基础上建成的,鱼道

模型总长度为 4.625 m ,宽度为 0.313 m ,深度为 0.188 m ,其中前后休息池长度都为 0.828 m。模型整体示意图及单池尺寸示意图见图 2(图中监测点 A 为入流监测点,监测点 B 为出流监测点)和图 3。

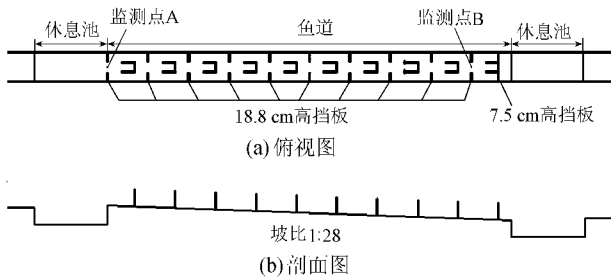


图 2 鱼道模型整体示意图

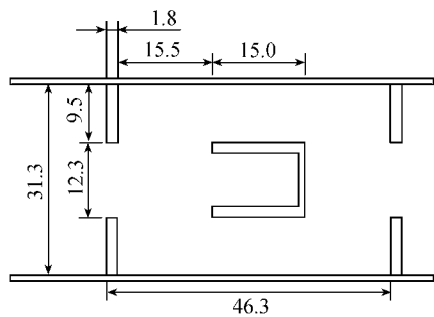


图 3 鱼道模型单池尺寸示意图(单位:cm)

试验过程中水体 TGP 的测定采用 Point Four 公司生产的 TGP 测定仪。仪器 TDG 饱和度的测量范围为 0~200% ,仪器精度为 1% ,仪器测量原理为通过测量水中溶解气体压力与当地大气压,计算得到水中 TDG 饱和度。

1.2 试验工况

试验过程中共进行了 0.601 L/s ,0.933 L/s , 1.508 L/s 2.157 L/s 4 种不同流量条件的试验。

1.3 试验结果分析

各工况试验结果如表 1 所示。由表 1 可以看出,尽管鱼道模型上下游监测点直线距离仅为 4.163 m ,却已能明显看出过饱和 TDG 的释放效果,TDG 饱和度的最大降幅达 7.9%。原因为鱼道中阻挡建筑物的存在对过饱和 TDG 的释放起到了促进作用。

表 1 鱼道模型过饱和 TDG 释放试验结果统计

工况 编号	入流流速/ (m·s ⁻¹)	入流 水深/m	入流过 饱和度/%	出流过 饱和度/%	TDG 释放 值/%
1	0.058	0.084	37.4	29.5	7.9
2	0.084	0.096	31.5	27.2	4.3
3	0.111	0.111	33.4	29.6	3.8
4	0.144	0.144	26.9	24.1	2.8

试验观测发现,鱼道模型在边壁转角及各池中 部凹槽的外边壁附近都出现了不同程度的回流现 象,其中凹槽内水流速度缓慢,凹槽两侧外壁附近区 域及各池进出口区域流速较快。

2 过饱和 TDG 释放系数的确定

流场、紊动特性等均会对过饱和 TDG 的释放过 程产生影响。由于试验鱼道模型内水流流动特性复 杂,无法采用概化的均匀流平均流速和一阶动力学 释放过程去拟合得到释放系数。为此,确定采用紊 流数值模拟方法,通过模拟结果与试验结果比较, 分析确定各试验工况下的过饱和 TDG 释放系数 K 值,同时分析释放系数与流速、紊动动能等物理量之 间的相关关系。

2.1 模型方程

由于鱼道模型中水深较浅,水流紊动强度较大, 因此在模型计算中,忽略各物理量在水深方向的变化,采用平面二维紊流数学模型对鱼道模型内的水 动力学特性及 TDG 饱和度输移变化进行模拟。模 型方程的通用形式为

∂(ρΦ)/∂t + div(ρUΦ) = div(ΓgradΦ) + S (1)

其中 P_k = ν_t (∂u_i/∂x_j + ∂u_j/∂x_i) ∂u_i/∂x_j

式中:Φ 为通用变量,Φ = u_i, K, ε, C; S 为源项;Γ 为广义扩散系数。通用方程中的变量、扩散系数及 源项如表 2 所示。表 2 中:u_i 为纵向和横向流速, m/s; p 为压力, Pa; B_i 为单位体积的体积力; ρ 为水 体密度, kg/m³; ν 为分子黏性系数, m²/s; ν_t 为紊动 涡黏系数, m²/s; K 为紊动动能, m²/s²; ε 为紊动动能 的耗散率, m²/s³; σ_k, σ_ε 为紊动动能和紊动动能耗散 率的 Prandtl 数,分别为 1.0 和 1.3; C 为 TDG 浓度, S_φ 为 TDG 的源项。通常假定 TDG 释放过程遵循一 阶动力学反应^[4],则 TDG 源项方程表达式为

S_φ = -KC (2)

式中 K 为 TDG 释放系数, min⁻¹。

表 2 通用方程中变量、扩散系数和源项

方程	Φ	扩散系数 Γ	源项 S
连续方程	1	0	0
动量方程	u_i	ρν	-∂P/∂x_i + ρB_i
k 方程	K	ρν_t/σ_k	ρP_k - ρε
ε 方程	ε	ρν_t/σ_ε	ρ[C_ε1(ε/K)P_k - C_ε2(ε^2/k)]
TDG 输移方程	C	Γ_C	S_φ

2.2 计算区域及计算条件

模拟区域为鱼道物理模型中第 1 个单池入口至 第 9 个单池出口间的水流区域。为提高计算收敛 性,网格划分尽量采用矩形网格,并在鱼道模型两侧

固壁及中间凹槽固壁附近区域进行网格加密。

鱼道模型入口定义为速度入口,入流边界条件采用模型试验中实测入流流速及过饱和 TDG 浓度。鱼道模型出口定义为自由出流边界。

2.3 释放系数率定结果

对各试验工况,预先假定过饱和 TDG 释放系数,采用平面二维紊流数学模型模拟过饱和 TDG 释放过程。根据下游观测断面 TDG 过饱和度的模拟结果与模型试验观测结果的误差对比,实时调整过饱和 TDG 释放系数值,直至模拟结果与试验结果之差达到误差允许范围内。本文采用的过饱和 TDG 模拟误差限为 1%。率定结果见表 3。

表 3 各工况过饱和 TDG 释放系数率定结果

工况编号	流量/ ($L \cdot s^{-1}$)	入流 过饱和度/%	释放系数率定 结果/ min^{-1}
1	0.601	37.4	0.084
2	0.993	31.5	0.079
3	1.508	33.4	0.084
4	2.157	26.9	0.090

根据唐春燕^[7]对顺直水槽过饱和 TDG 的研究成果,顺直水槽流量为 0.688 L/s 条件下过饱和 TDG 释放系数为 $0.0262 min^{-1}$ 。由此对比可见,鱼道模型内释放系数远远大于顺直水槽内的释放系数,说明水流条件对释放系数影响显著。

3 过饱和 TDG 释放规律分析

图 4 给出了数值模拟得到的鱼道模型中池流速分布。与试验观察到的现象相同,鱼道模型内水流流动复杂,在边壁转角及各池中凹槽的外边壁附近都出现了不同程度的回流现象。其中在各池凹槽区域水流流速很小,水体交替更新速度缓慢。

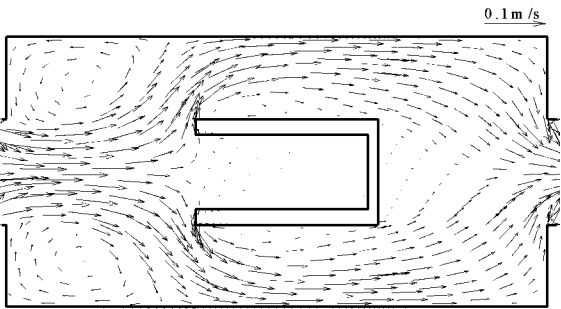


图 4 工况 1 中池流速分布

图 5 给出了数值模拟得到的鱼道模型内工况 1 中池紊动动能分布。可以看出,鱼道模型内各区域紊动动能值呈现显著差异。在各凹槽前部及两侧附近区域,由于受凹槽布置影响,水流运动受到阻挡和胁迫,出现较强紊动。特别是在凹槽入口区域,紊动动能达 $0.0015 m^2/s^2$ 。

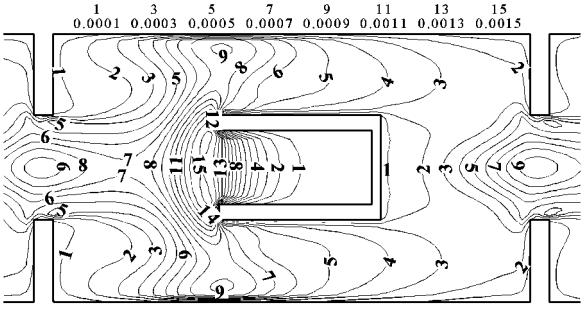


图 5 工况 1 中池紊动动能分布(单位: m^2/s^2)

图 6 为工况 1 中 TDG 过饱和度沿程分布情况。由图 6 可以看出,环流区域的 TDG 过饱和度明显较主流区域低。这是因为,环流增加了水体在水槽内的滞留时间,使水体过饱和 TDG 得以充分释放。

统计不同工况下计算区域内平均紊动动能,得到过饱和 TDG 释放系数与平均紊动动能的关系,如图 7 所示。

由图 7 看出,随着平均紊动动能的增大,过饱和和释放系数出现了先略微降低后线性增加的现象。由于鱼道模型结构复杂,鱼道内凹槽的存在对水流的流动产生了较大影响,入流流速越小(紊动越小),凹槽内水流越缓慢,水体在凹槽内的停滞时间越长,从而造成过饱和 TDG 释放量增加,对整体流域的过饱和和释放速率造成影响。而当入流流速逐渐增大(紊动增大)时,尽管水体紊动增加可以促使释放速率有一定程度增加,但同时流速增大使水体滞留时间缩短,更新速度加快,又会造成过饱和 TDG 释放量的减少,两者综合作用的结果,使过饱和 TDG 释放系数出现轻微减低的现象。当紊动继续增大,水体紊动强度对过饱和 TDG 释放的促进作用大于了停滞时间缩短对释放量的减少作用,因此过饱和 TDG 的释放速率又呈现为随着紊动强度增加而增大。

4 结 语

通过对鱼道模型试验的数值模拟,研究了复杂

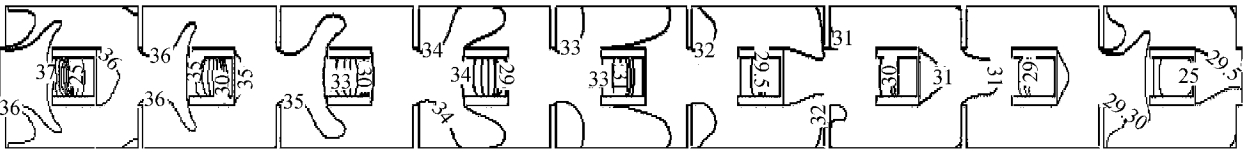


图 6 工况 1 鱼道模型内 TDG 过饱和度沿程分布(单位: %)

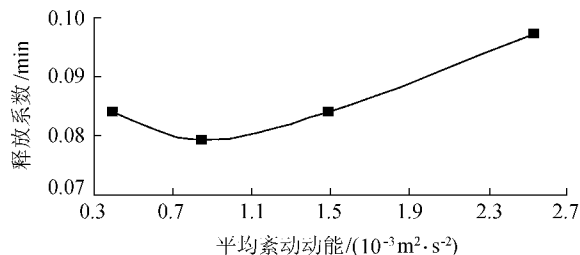


图7 鱼道模型内过饱和 TDG 释放系数与平均紊动动能关系

水流条件下过饱和 TDG 的释放过程及释放系数。研究认为,过饱和和水体在有阻挡建筑物存在时,TDG 的释放速率比在顺直边界条件下显著增大,说明水流的绕流、回流现象可以增加过饱和 TDG 的释放,促使过饱和 TDG 在较短的河道中获得较大的释放量。在高紊动区域,过饱和 TDG 释放速率与紊动强度成正相关关系,紊动强度越大,TDG 释放越快。

受高压釜供水系统功能限制,试验流量范围较小,试验工况较少,影响了本文更深层次的规律性结论的得出。同时文中鱼道模型长度较短,造成过饱和和观测误差对试验结果影响相对较大。在实际工程中,鱼道作为一种特殊的复杂水域,随着试验条件的改善及数值模拟技术的发展,有待结合实际工程应用,进一步开展对多种复杂水域条件下过饱和 TDG 释放试验及理论研究。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] POLITANO M, CARRICA P, TURAN C, et al. Multidimensional simulation of the two-phase flow downstream of spillways for total dissolved gas prediction[R]. [S.l.]: EWRI 2005.
- [3] 蒋亮, 李然, 李嘉, 李克锋. 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.
- [4] 冯镜洁, 李然, 李克锋, 等. 高坝下游过饱和 TDG 释放过程研究[J]. 水力发电学报, 2010, 29(1): 7-12.
- [5] QU Lu, LI Ran, LI Jia, et al. Field observation of total dissolved gas supersaturation of high-dams[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2011, 54(1): 156-162.
- [6] LI Ran, LI Jia, LI Ke-feng, et al. Prediction for supersaturated total dissolved gas in high-dam hydropower projects[J]. Science in China: Series E: Technological Sciences, 2009, 52(12): 3661-3667.
- [7] 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.
- [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演变研究[J]. 水生态学杂志, 2009, 28(5): 1-5.

(收稿日期 2011-07-07 编辑 熊水斌)

(上接第 61 页)

a. 省级河道。全省山丘区省级河道 41 条(段),长 2165.7 km,占省级河道总长度的 70.4%,有 42 条(段)与按照部颁标准的划分结果一致,一致率为 93.3%。从地区分布看,丽水、嘉兴、杭州、台州的省级河道最多,宁波的省级河道较少。

b. 市级河道。全省山丘区市级河道 34 条(段),长 1179.9 km,占市级河道总长度的 46.6%,有 29 条(段)与按照部颁标准的划分结果一致,一致率为 85.3%。从地区分布看,湖州、温州的市级河道最多,杭州市级河道较少。

4 结 语

a. 结合浙江省河道特点及河道管理体制实际现状,提出了浙江省山丘区河道等级划分标准和划分办法,并进行了全省山丘区河道省级、市级河道的初步划分,划分结果与按照部颁标准划分结果的一致率达 84.8% 以上,实现了与部颁标准的有效衔接。

b. 提出的浙江省山丘区河道等级划分标准和

划分办法简单、实用,可操作性强,体现了自然属性、管理属性和功能属性方面的划分原则,其中,管理属性中的河道范围和干支流情况在制定河道等级划分程序时考虑,山丘区河道不考虑排涝和水量调蓄功能。

c. 还需对浙江省平原区河道等级划分标准和划分办法进行研究。

参考文献:

- [1] 芮孝芳. 水文学原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004: 18-43, 267-317.
- [2] 杨立波. 河北省河流水系分级标准及河道治理对策研究[J]. 河北水利水电技术, 1996(4): 45-47.
- [3] 常文娟, 马海波, 燕杰. 基于灰色系统理论的河道等级划分方法研究[J]. 水电能源科学, 2009, 27(5): 151-155.
- [4] 余炯, 孙毛明, 曹颖, 等. 基于生态功能的河流等级划分及应用: 以浙江省河流为例[J]. 地理研究, 2009, 28(4): 1115-1126.
- [5] 刘进宝. 河道等级划分的几个问题研究[J]. 人民黄河, 2010, 32(12): 42-43.

(收稿日期 2011-11-21 编辑 熊水斌)