

Cdoi: 10. 3969/j. issn. 1007 - 855x. 2010. 02. 011

# 跌坎深度对跌坎型底流消能工水力特性影响的数值模拟分析

郑 雪<sup>1</sup>,付腾吉<sup>1</sup>,张闻辉<sup>1</sup>,钟志镭<sup>2</sup>

(1. 昆明理工大学 电力工程学院,云南 昆明 650051; 2. 中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院,云南 昆明 650051)

**摘要:** 采用 RNGk- 双方程紊流模型进行数值模拟,就跌坎深度对跌坎型底流消能工水力特性的影响进行分析,并将模拟结果与模型试验观测值进行了对比,验证数学模型的可行性,为跌坎型底流消能工的设计提供参考.

**关键词:** 数值模拟;底流消能;跌坎深度;水力特性

**中图分类号:** TV135. 2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007 - 855X(2010)02 - 0051 - 05

## Numerical Simulation Analysis of Step - down Depth Influence on Hydraulic Characteristics of Energy Dissipater with Step - down Floor

ZHENG Xue<sup>1</sup>, FU Teng-ji<sup>1</sup>, ZHANG Wen-hui<sup>1</sup>, ZHONG Zhikui<sup>2</sup>

(1. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China;

2. Kunming Engineering Corporation, HydroChina, Kunming 650051, China)

**Abstract:** The RNGk- double equation turbulent model is adopted in this paper to process the numerical simulation and to analyze the influence of step-down depth on hydraulic characteristic of energy dissipater with step-down floor. The test results are then compared with the numerical simulation results to verify the feasibility of mathematical model. It is a valuable source of reference to the step-down hydraulic jump dissipater design.

**Key words:** numerical simulation; energy dissipation by hydraulic jump; step-down depth; hydraulics characteristic

## 0 引言

跌坎型底流消能工是一种能适应高水头大流量的新型消能工,相对于常规底流消能工能有效降低消力池临底水力学指标.但目前国内缺乏对底流消能的跌坎型消能工水力特性的研究,特别是消力池中特征流速及分布等.

随着水力学模型与流场可视化技术<sup>[1]</sup>的发展,流体动力学与计算技术的有机结合极大地增强了解决复杂疑难问题的能力.杨忠超等<sup>[2]</sup>通过将 RNGk- 紊流模型和 VOF (Volume of Fluid)法相结合,对多股多层水平淹没射流进行数值模拟研究,且计算值与实验值吻合较好,表明数值模拟方法是研究消力池水流运动规律及消能机理的有效途径.同时,数值模拟分析的介入能弥补物理模型测试中存在的不足,从而得到更详细的水力特性指标.

本文采用数值模拟方法对跌坎型底流消能工消力池内水流进行仿真计算.就跌坎深度对消力池内水流流态、底板压力分布和临底流速分布的影响进行研究,得出跌坎深度对跌坎型底流消能工水力特性影响的变化规律,且数值计算结果与试验数据吻合良好.

收稿日期: 2008 - 11 - 27. 基金项目: 云南省自然科学基金项目 (项目编号: 2006A0018M).

第一作者简介: 郑雪 (1985 - ),女,硕士研究生. 主要研究方向: 工程水力学. E - mail: snowhelo@sina.com

### 1 流态特征分析

跌坎型底流消能工消力池内的流态与跌坎深度、水流的入池角度及入池能量等因素有关。当影响流态的因素发生改变时,消力池内会出现远驱式底流、混合流、淹没混合流以及淹没底流流态。远驱式底流流态中,水流进入消力池后直接冲击底板,导致临底流速和底板动水压力都很大,消能率低。而混合流流态中水体消能主要集中在消力池尾部,表面流速大,消能水体利用不充分。淹没混合流流态极不稳定,部分消能水体被推出消力池外,使得水流对尾坎的冲击力变大,下游水位不稳定。淹没底流流态水流进入消力池与池内水体进行强烈的剪切、掺混和摩擦作用,主流速度梯度很大,在主流下方形成底部漩涡。同时下泄水流紊动扩散作用强烈,主流迅速潜底,再附后在消力池中形成淹没水跃,产生强烈的上部漩涡,沿主流方向可分为淹没射流区、冲击区、附壁射流区,见图 1。本文主要研究流态为淹没底流流态。



图1 淹没底流流态下消力池内流态示意图  
Fig.1 Flow pattern of baffle basin in submerged bottom flow

### 2 计算模型

计算模型如图 2 所示。假设水流从孔口流出处为原点, x 轴为水流方向, y 轴取向上为正。其中速度进口到跌坎处距离为 25 cm,消力池长 65 cm,消力池尾坎后长为 60 cm。本次数值模拟只计算沿中轴线的断面,忽略边壁影响。

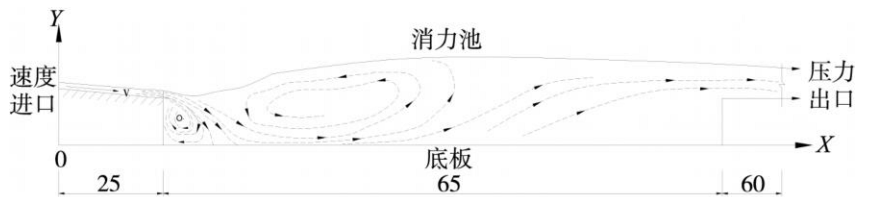


图2 计算模型示意图  
Fig.2 Calculation model

#### 2.1 控制方程

本文采用能够更好的处理高速射流的各项异性的问题的 RNGk-ε 双方程紊流模型<sup>[3]</sup>,其控制方程如下。

$$\text{连续方程: } \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\text{动量方程: } \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} u_i u_j = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\nu + \nu_t) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right]$$

$$k \text{ 方程: } \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\nu + \nu_t}{k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k -$$

$$\text{方程: } \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\nu + \nu_t}{\epsilon} \frac{\partial}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{G_k}{k} - C_2 \frac{\epsilon}{k}$$

式中  $\mu$  和  $\rho$  分别是体积分数的粘性系数和密度;  $\nu_t$  为紊流粘性系数,可由紊动能  $k$  和紊流耗散率  $\epsilon$  求出;  $p$  为修正压力。

$$\nu_t = \frac{C_\mu k^2}{\epsilon}, C_1 = 1.42 - \frac{\left( \frac{1 - \beta}{\beta} \right)}{\left( 1 + \frac{\beta}{3} \right)}, \epsilon = S k, S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$$

其中  $i = 1, 2, 3$ , 方程中通用模型常数  $C_\mu, C_{2\mu}, C_k, C_\epsilon$  分别取 0.38, 0.012, 0.0845, 1.42, 1.68, 0.7179, 0.7179。

#### 2.2 离散方法、计算方法及自由水面线的处理

本文采用有限体积法对方程进行离散,对于动量方程、k 方程、ε 方程的对流项则采用一阶迎风差分

格式进行离散,扩散项采用中心差分格式。

对模型的数值计算采用了压力的隐式算子分割算法,即 PISO 算法,并采用 VOF (Volume of Fluid) 法对于自由液面进行追踪,自由液面的具体位置采用几何重建格式来确定。

### 2.3 网格划分及边界条件设置

计算区域采用四边形结构网格划分。模型计算区域边界为:进口边界条件定为速度进口边界,出口边界设为充分发展的均匀出流即压力出口边界,各速度分量、紊动能、紊动扩散率均取为第二类齐次边界条件,底板为无滑移固体边界条件,取壁面上法向与切向的流速均为零,近壁区模拟采用壁面函数法。

## 3 计算结果分析

### 3.1 试验数据与数值模拟数据分析

本文实验数据选取消力池底板中轴线上布设的距原点距离分别为 35 cm、55 cm、75 cm 的 3 个观测点,将相应工况下水面线高度、消力池底板压力、临底流速的模拟数据与模型试验中测得的数据进行对比,见表 1。

表 1 数值模拟与试验数据对照表

Tab 1 Numerical data parallel table

跌坎深度	测点距离	模拟数据			试验数据		
		水面线高度	底板压力	临底流速	水面线高度	底板压力	临底流速
/cm	/cm	/cm	/cm	$/m \cdot s^{-1}$	/cm	/cm	$/m \cdot s^{-1}$
2	35	2.4	2.6	0.86	2.6	2.9	0.97
	55	2.6	2.8	0.14	2.9	3.1	0.23
	75	7.3	7.3	0.33	7.5	7.5	0.44
4	35	5.5	5.6	0.12	5.6	5.8	0.17
	55	7.4	7.2	0.26	7.6	7.0	0.23
	75	7.8	8.0	0.10	7.7	7.7	0.14
6	35	10.1	10.2	0.79	10.3	10.5	0.83
	55	11.1	11.1	0.21	11.4	11.4	0.26
	75	11.6	11.6	0.15	11.6	11.6	0.18

由对照表可以看出,数值模拟计算得到的水面线高度及底板压力值与试验观测到的基本一致。底板临底流速除消力池前端的数据与实验值有一定差距外也基本吻合。这是由于模型试验中消力池前段水流掺气较多、较为紊乱导致流速测量存在误差,故消力池底板前端的临底流速与实验值有一定差距,但随着消力池后端水流的稳定,模拟值与实验值基本吻合,数值模拟结果能较真实地反映临底流速的分布形态。由此看出数值模拟方法可行。

### 3.2 跌坎深度对消力池内水力特性的影响

运用数值模拟方法计算入池角度为  $15^\circ$  入池流速为  $3.0 m/s$ ,跌坎深度  $d$  分别为 2 cm、4 cm、6 cm、10 cm 的四个工况。就跌坎深度对消力池内水力特性的影响进行研究,并分析相应工况下流态、消力池底板压力分布和临底流速分布情况。

#### (1) 流态分析

通过数值模拟得流态示意图如图 3 所示,图中箭头方向为流速方向,坐标轴单位为 m。

如图 3 所示,在跌坎深度为 2 cm 的工况中,水流直接冲击消力池底板,形成远驱式底流流态,使消力池内水体在冲击点和跃前段面之间较长一段距离出现了急流段,该段临底流速较大。坎深为 4 cm、6 cm 和 10 cm 的三个工况中水流入池后表现出类似淹没底流的流态特征,高流速水体不再临底,消力池中出现了分离再附的现象。下泄水流与消能水体产生强烈的剪切、摩擦和掺混作用,并沿着主流射流方向出现了淹没射流区、冲击区和附壁射流区。在淹没射流区,主流基本沿着射流中心线按直线扩散近似遵循线性扩散规律,水流得到一定的扩散,在射流四周与消能水体发生强烈剪切、摩擦作用。在冲击区,主流受到底板约束,流向急剧改变,流速迅速降低,底板压力增大。在附壁射流区水流向表面跃起,在表面形成表面漩流,使

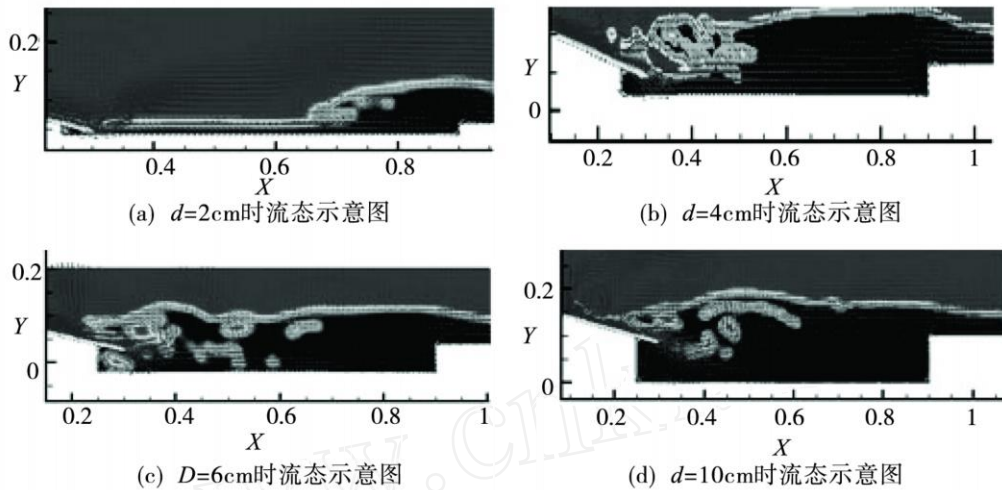


图3 流态示意图  
Fig.3 Flow pattern

主流沿程扩散,具有明显的淹没水跃特征.

可以看出,当坎深较小时水流进入消力池后经过一段距离会再次潜底,在消力池内形成大尺度的水跃,消力池内水流平稳.随着坎深的增加,消力池内高速水流不再潜底,而在主流上方和前下方形成上部滚和底部漩涡,水面波动较大.

#### (2)消力池底板压力分布

如数值模拟的消力池内压力分布云图如图 4所示,图中压力单位为 Pa,坐标轴单位为 m.

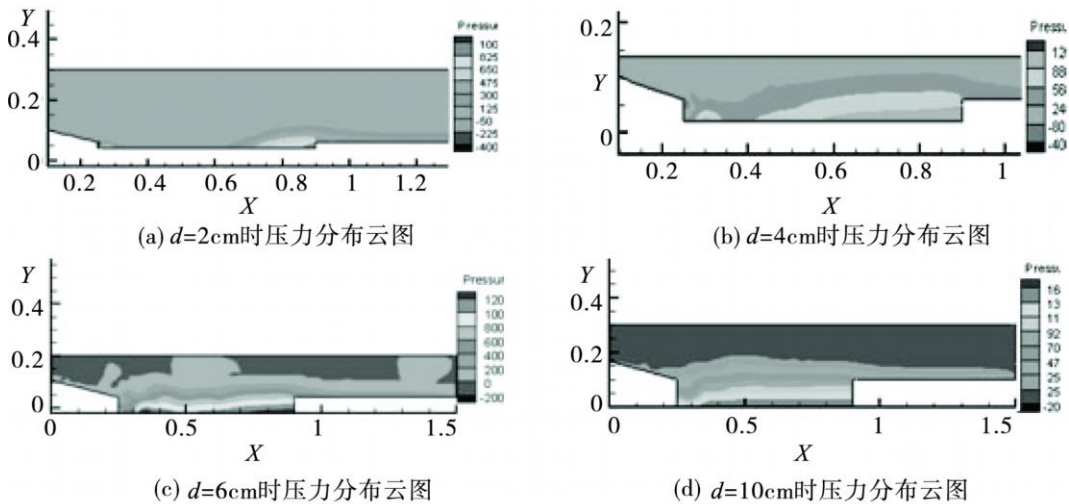


图4 压力分布云图  
Fig.4 Dynamic pressure distribution

根据压力分布云图得出,坎深为 2 cm 时,由于坎深较小入池水流直接冲击消力池底板,冲击区底板压力急剧增大.而其余三个工况中射流入水后扩散,主流流速沿程减小,冲击区水流由于受到底板约束,流向发生急剧改变,底板压力突增,并在冲击区主流前部附近出现时均动水压力的峰值.冲击区后,水流形成附壁射流,在附壁射流区,底板的时均动水压力逐渐平稳并逐渐增大,在尾坎处增至最大.同时,随跌坎深度增加,冲击点冲击压力值减小,冲击点与跌坎之间的回流区再附长度增长.坎深为 10 cm 的工况中,水流到达底板时已充分扩散,冲击压力非常小.

经分析,淹没底流流态下,随跌坎深度增加,入池主流的能量消耗更充分,到达底板时余能减小且扩散

更为充分,冲击区底板时均动水压力减小,压力峰值也相应减小,由于底部漩涡的作用,漩涡外缘处时均动水压力最小.在附壁射流区消力池底板时均动水压力逐渐平稳,底板压力近似按静水压力分布.

### (3)流速分布

通过数值模拟计算,得消力池内流速分布云图如图 5 所示,图中流速单位为  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,坐标轴单位为  $\text{m}$ .

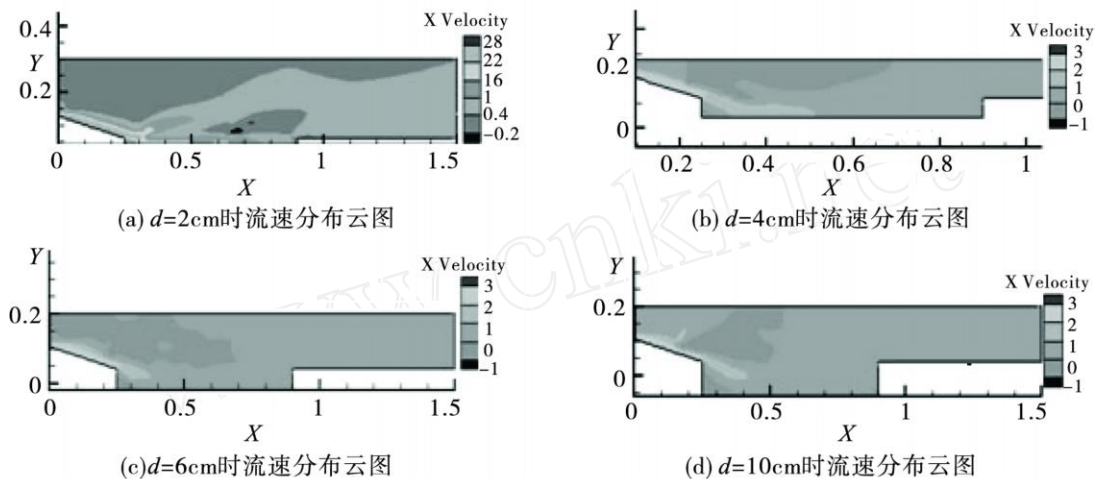


图5 流速分布云图  
Fig.5 Velocity distribution

由流速分布云图可以看出,在坎深为 2 cm 时,入池水流在到达消力池底板前动能消耗少,故到达底板时临底流速较大.当坎深增至 4 cm、6 cm、10 cm 时水流形成淹没射流,并在淹没射流区里得到一定程度的扩散,随着消力池内消能水体的增多,主流与其剪切面积增大,与四周水体的剪切、掺混作用更剧烈,动能耗散较多,流速降低.并在跌坎和再附点之间形成水平横向漩滚,该处流速反向且值较小.

根据以上分析得到:淹没底流流态下,随跌坎深度增加,消力池内消能水体的增多,冲击区长度增长.淹没射流区内入射水体的主流与消力池中水体的剪切、掺混作用更剧烈,消耗更多动能,主流流速明显降低,使得冲击区临底流速峰值有效减小,且回流区长度增长,底部漩滚剧烈,流速反向.在附壁射流区,随着水流到达底板动能充分耗散,临底流速分布均匀且流速较小,在消力池末端趋于平稳.

## 4 结论

本文通过双方程紊流模型采用数值模拟的方法,对不同跌坎深度对跌坎型底流消能工消力池内流态、底板压力分布及流速分布进行模拟.同时通过数值模拟数据与试验数据的对比,表明本文采用的数值模拟方法可行.并对数值模拟结果进行分析得出跌坎型底流消能工消力池跌坎深度对消力池内水流流态、底板压力、流速影响的变化规律.即在淹没底流流态下,随着坎深增加,入池主流与消能水体之间的剪切、掺混作用更剧烈,动能消耗明显,主流不再潜底,在冲击区产生的冲击压力及临底流速峰值有效减小,而附壁射流区内消力池底板时均动水压力逐渐平稳,临底流速分布均匀且流速值较小.

### 参考文献:

- [1] 杨永森.明渠自掺气水流均匀流区掺气浓度分布 Wood模型的改进 [J].四川水力发电,1992,(2):45-49.
- [2] 杨志超,邓军,杨永全,等.多股多层水平淹没射流数值模拟研究 [J].水利学报,2004,(5):31-38.
- [3] 张功育,汤健,王海军,等.跌坎式底流消能工的消能机理分析与研究 [J].南水北调与水利科技,2005,3(6):43-45.
- [4] 许唯临,廖华胜,杨永全,等.溪落渡水垫塘流场的数值计算 [J].四川联合大学学报,1998,2(5):34-38.
- [5] 邓军,许唯临,张建民,等.向家坝水垫塘的实验研究与数值模拟 [J].水力发电,2004,30(11):12-15.
- [6] 孙双科,刘海涛,夏庆福,等.跌坎型底流消力池的水力特性与优化研究 [J].水利学报,2005,36(10):1188-1193.