

# 闸下废旧轮胎消能防冲的三维数值模拟

史国庆<sup>1</sup>, 文恒<sup>2</sup>

(1. 咸阳职业技术学院建筑学院, 陕西 咸阳 712000;

2. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018)

**摘要:** 为了进一步揭示闸下应用废旧轮胎消能防冲时的水流形态, 采用 RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型对加糙后的流场进行模拟计算, 并采用流体体积分数法对自由水面进行跟踪, 得到流场内的水、气相体积、速度、压力等分布, 并与模型试验实测结果进行对比分析。分析结果表明, 计算结果与模型试验实测结果吻合较好, 说明模型能很好地应用于加糙后的流场模拟计算。

**关键词:** 废旧轮胎; 加糙体; RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型; 消能; 防冲; 数值模拟

中图分类号: TV653<sup>+</sup>.7

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2015)02-0024-04

**Three-dimensional numerical simulation of scrap tires in energy dissipation and erosion control under sluice**//SHI Guoqing<sup>1</sup>, WEN Heng<sup>2</sup>(1. Civil Engineering College, Xianyang Vocational Technical College, Xianyang 712000, China; 2. Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

**Abstract:** In order to reveal the flow shape of scrap tires in energy dissipation and erosion control under sluice, the RNG  $k-\varepsilon$  turbulence model is applied to simulate the flow where the apron was roughened by scrap tires. The volume of fluid (VOF) method for water-air two-phase flow is introduced into the tracking of the free surface. The distributions of water, gas volume, velocity and pressure were obtained through simulation. Contrast analyzed, the result is in good agreement with experimental data and shows that the VOF method is feasible for the simulation of roughened flow.

**Key words:** scrap tires; artificial roughness model; RNG  $k-\varepsilon$  turbulence model; energy dissipation; erosion control; numerical simulation

据不完全统计, 全国大、中型水闸下游消能防冲设施严重损坏的占总数的 42.3%<sup>[1]</sup>。为了防止闸下冲刷, 许多研究者对于水闸的消能防冲问题已进行了长期而系统的研究, 其中使用废旧轮胎制作加糙体可达到增大糙率、减小冲坑深度和面积的目的<sup>[2-7]</sup>。

近年来, 计算流体动力学研究方法被广泛应用到水力学及水流形态的研究中, 特别是需要考虑湍流各向异性效应的研究及流线呈弧线的流动流态研究<sup>[8]</sup>。为进一步揭示使用废旧轮胎加糙体的流场水流形态, 并验证模型试验结果, 本文采用 RNG  $k-\varepsilon$  双方程湍流模型对流场进行三维数值模拟。胡宇等<sup>[9-10]</sup>采用流体体积分数法 (volume of fluid, VOF) 对水、气界面进行跟踪计算, 得到了比较理想的结果。对于加糙后的非定常流动复杂情况, 采用 VOF 法对流体自由液面进行模拟研究。

## 1 模型试验

试验在长 2000 cm、宽 50 cm、高 90 cm 的玻璃水

槽中进行, 水槽底坡为 0.124%。轮胎加糙体选用外直径为 15 cm、内直径为 8 cm 的模型汽车轮胎, 加糙段长 100 cm。模型轮胎通过螺纹钉与水槽底板相连接, 可灵活安装与拆卸。轮胎加糙体呈梅花状布置, 排列间距为 15 cm。用未加糙方案作对比参照工况, 对加糙段后 5 个断面的水深和流速进行测量, 各断面分别位于轮胎加糙段后 10 cm、30 cm、50 cm、70 cm 和 90 cm 处, 每个断面布置 7 条测线。加糙段及测量点布置如图 1 所示。试验环境水温为 (20±2) °C, 水的密度为 998.26 kg/m<sup>3</sup>, 水的运动黏滞系数为 1.047×10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup>/s。

## 2 数学模型

### 2.1 控制方程

Yakhot 等<sup>[11]</sup>对标准  $k-\varepsilon$  模型进行了修正, 提出了 RNG  $k-\varepsilon$  模型, 该模型能更好地模拟高应变率及流线弯曲程度较大的流动, 因此选择 RNG  $k-\varepsilon$  模型

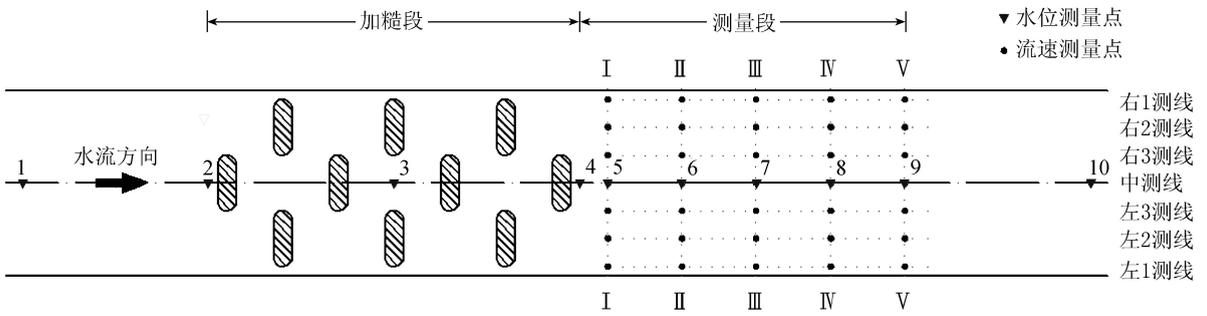


图1 加糙点及测量点布置示意图

进行湍流模拟, RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型的基本控制方程<sup>[12]</sup>如下:

$$\text{连续方程} \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \left[ (\mu + \mu_t) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

$k$  方程

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + \rho \varepsilon \quad (3)$$

$\varepsilon$  方程

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{C_{1\varepsilon}^* \varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

其中

$$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$$

$$G_k = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

$$C_{1\varepsilon}^* = C_{1\varepsilon} - \frac{\eta(1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta\eta^3}$$

式中:  $\rho$  为流体的密度;  $t$  为时间;  $u_i, u_j$  分别为流体  $x, y$  方向的速度分量;  $p$  为修正的压力;  $\mu$  为分子黏滞系数;  $\mu_t$  为湍动黏度;  $k$  为湍动能;  $\varepsilon$  为湍动耗散率;  $G_k$  为由平均速度梯度引起的湍动能的产生项;  $\alpha_k, \alpha_\varepsilon, C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, \eta, \eta_0, \beta$  均为模型中的经验常数。

与 SPLASH 法、波前追踪法、等值面函数法等相比, VOF 法具有占用计算内存少和计算时间短的优点, 也能更好地对水气界面进行跟踪计算<sup>[13]</sup>, 因此利用 VOF 法对自由液面进行数值模拟。RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型与单相流的湍流模型形式基本相同, 只是  $\rho$  和  $\mu$  的表达式稍有不同:

$$\rho = \alpha_w \rho_w + (1 - \alpha_w) \rho_a \quad (5)$$

$$\mu = \alpha_w \mu_w + (1 - \alpha_w) \mu_a \quad (6)$$

$$\alpha_a = 1 - \alpha_w \quad (7)$$

式中:  $\rho_a, \mu_a$  分别为气相的密度、分子黏性系数;  $\rho_w, \mu_w$  分别为水相的密度、分子黏性系数;  $\alpha_a$  为气相的

体积分数;  $\alpha_w$  为单元中水相的容积比率, 对于任意一个单元, 对于没有水、包含水、气界面和充满水这 3 种情况,  $\alpha_w$  分别取 0、0~1、1。

## 2.2 计算区域

为便于与物理模型试验值进行对比, 以物理模型试验为依据进行建模。在轮胎加糙段上游和下游均取 2.0 m 作为计算区域。计算区域内轮胎加糙段及流速测量段采用非结构化网格对流场进行离散, 网格尺度为 1 mm; 其他部分采用六面体结构网格进行离散, 网格尺度为 2 mm。轮胎加糙体附近由于几何结构复杂, 对轮胎加糙体表面、加糙段及流速测量段的网格进行加密。计算区域边界条件及网格划分如图 2 所示。

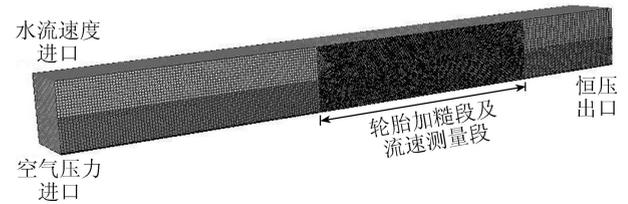


图2 计算区域边界条件及网格划分示意图

## 2.3 边界条件

数值模拟计算中, 至关重要的一步就是定义边界条件。将进口边界条件定义为水流速度进口和空气压力进口两部分, 水流速度部分由模型试验实测的流量和水位计算, 流速按垂向均匀分布, 空气压力进口部分定义为恒压边界。出口边界条件定义为恒压出口边界条件。加糙体表面和水槽的边壁边界都定义为无滑移边界, 考虑到壁面处理方法对数值模拟结果的影响, 对壁面处理采用标准壁面函数处理方法<sup>[10]</sup>。初始条件定义为整个流场充满空气, 水流从进水口流入水槽, 通过对体积分数的迭代求解, 自动生成水气界面。

## 2.4 数值算法

与 SIMPLE 算法和 SIMPLEC 算法相比较, PISO 算法是针对非定常流动是一种更优的数值模拟算法, 其增加了网格偏斜修正, 使非正交网格的计算精度大幅度提高<sup>[14]</sup>。但在相同的网格尺度条件下, PISO 算

法的耗时比其他算法长,为了保证更高的计算精度和更优的收敛性,采用 PISO 算法对压力、速度耦合。

### 3 数值模拟结果

#### 3.1 水、气相体积分布

水、气相体积通过水、气两相分层流的瞬态迭代计算进行求解。布置 7 排轮胎加糙体、流量为  $310 \text{ m}^3/\text{h}$  时水、气相体积分布如图 3 所示,计算区域内深色表示水流。当  $t=4.500 \text{ s}$  时,由于轮胎加糙体的拦截作用,过流流量小于进口流量,使加糙段上游水位开始壅高;当  $t=165.008 \text{ s}$  时,入口和出口流量已达到平衡,加糙段上游水深保持不变,水流达到稳定状态。由图 3 可知,VOF 方法可以很好地跟踪水流的自由表面,有效地生成水气界面。

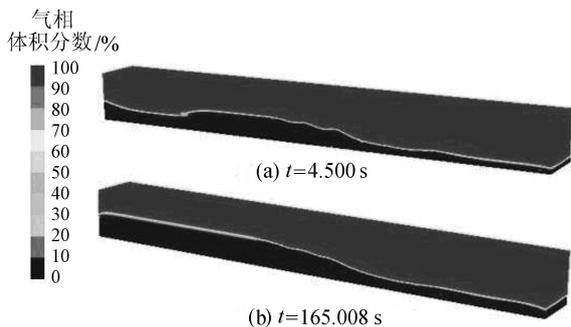


图 3 流场水、气相体积分布

#### 3.2 速度分布

为清楚地反映加糙段及其下游测量段流速分布情况,布置 7 排轮胎加糙体、流量为  $310 \text{ m}^3/\text{h}$  时,计算所得水槽底板及水槽中心断面处流速矢量分布如图 4 所示。由图 4 可知:在加糙段,流体受到轮胎的挤压作用,在轮胎胎口处,水流速度较大;在轮胎胎圈处,水流速度较小。

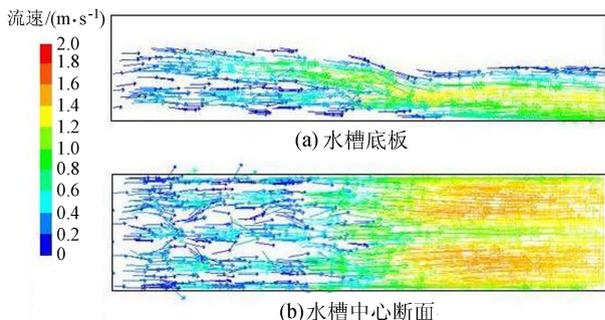


图 4 流场速度矢量分布

#### 3.3 压力分布

布置 7 排轮胎加糙体、流量为  $310 \text{ m}^3/\text{h}$  时,计算区域内水槽底板及水槽中心断面处压力分布如图 5 所示。由图 5 可知:在轮胎加糙段上游,水面线壅高,槽底板压力增大;在轮胎加糙段下游,水面线降低,槽底板压力减小。

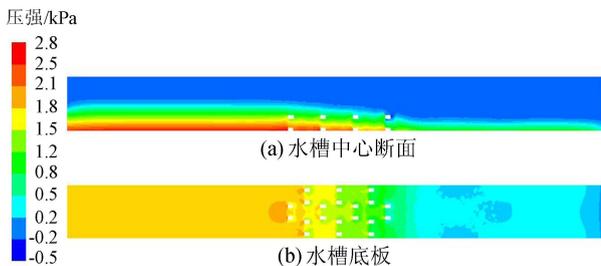


图 5 流场压力分布云图

#### 3.4 计算结果分析

##### 3.4.1 水面线

流量为  $310 \text{ m}^3/\text{h}$ 、布置 7 排糙体和无糙体条件下,水槽试验段中心线水深的试验值和计算值分布如图 6 所示,可见计算值与试验值吻合很好。由图 6 可以看出,加糙后,槽底糙率增大,使得加糙段及上游水深壅高,高于无糙体时的正常水深。当槽底比降为 0.124% 时,在试验设定的流量和水深范围内,槽中水流为缓流,即正常水深大于临界水深。加糙段与上游的水面衔接为  $a_1$  型壅水曲线,加糙段与下游的水面衔接为  $b_1$  型降水曲线,加糙段的正常水深应为加糙段首端的水深。

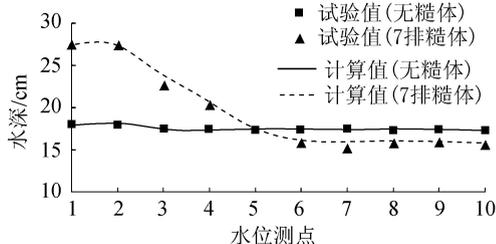


图 6 水槽中心线水深分布

##### 3.4.2 流速

流量为  $310 \text{ m}^3/\text{h}$ 、布置 7 排糙体和无糙体条件下,Ⅲ—Ⅲ断面的中测线、左 1 测线、左 2 测线、左 3 测线纵向(顺水流方向)流速的试验值和计算值分布如图 7 所示,可见流速计算值和实测值也吻合良好。由图 7 可以看出,加糙后中、上层水流的纵向流速增大,近底流速降低,且靠近水槽中心附近的近底流速降低显著。降低近底流速是水闸消能防冲设计所追求的目标之一,意味着水流对海漫的冲刷作用将减弱,从而证明了轮胎加糙海漫可提高消能效果。

### 4 结语

应用 RNG  $k-\varepsilon$  模型、VOF 法对加糙后流场进行数值模拟,从流场的水、气相体积分布、速度分布和压力分布可知,其数值模拟结果与物理试验结果相吻合;通过瞬态的迭代求解,VOF 法能够有效模拟水流的自由表面,选用的计算模型和计算程序是可行的。

■ 试验值(无糙体)    — 计算值(无糙体)  
 ▲ 试验值(7排糙体)    - - - 计算值(7排糙体)

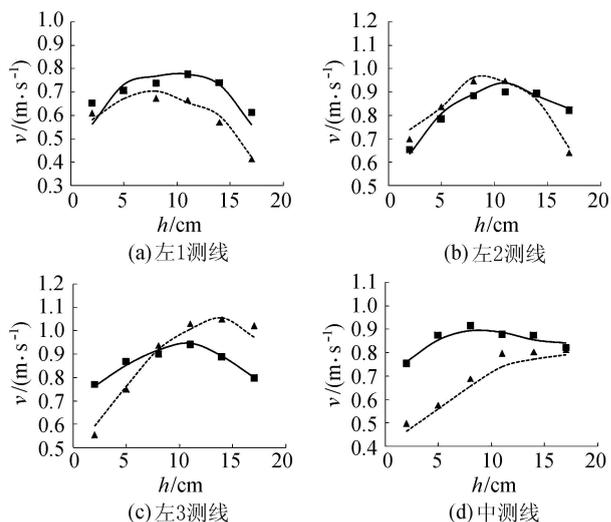


图7 III—III断面纵向流速分布曲线

参考文献:

[ 1 ] 袁庚尧,余伦创. 全国病险水闸除险加固专项规划综述 [J]. 水利水电工程设计, 2003, 22 (3) : 6-9. (YUAN Gengyao, YU Lunchuang. The summary of the special program of countrywide ill-conditioned and dangerous sluice [J]. Design of Water resources and Hydroelectric Engineering, 2003, 22(3) : 6-9. (in Chinese))

[ 2 ] 赖勇,黄荣卫,张永进. 浙江省山区水利枢纽工程水闸消能防冲新技术[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32 (5) : 78-81. (LAI Yong, HUANG Longwei, ZHANG Yongjin. New technologies for energy dissipation and scour prevention in hydropower projects of Zhejiang mountainous area[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(5) : 78-81. (in Chinese))

[ 3 ] 万继伟,牛争鸣,李鲁,等. 小挑角跌坎加浅水垫消力池水力特性试验[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2012, 40(3) : 300-306. (WAN Jiwei, NIU Zhengming, LI Lu, et al. Experimental study of hydraulic characteristics of small-trajectory angle drop sill combined with stilling basin with shallow-water cushion [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2012, 40 (3) : 300-306. (in Chinese))

[ 4 ] 翟孟斌,鞠伟,丁珏,等. 青草沙水库闸下海漫段加糙体消能效应的数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33 (3) : 50-53. (ZHAI Mengbin, JU Wei, DING Jue, et al. Numerical simulation of energy dissipation effects of aprons for sluices of Qingcaosha Reservoir[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33 (3) : 50-53. (in Chinese))

[ 5 ] 牟献友,文恒. 废旧轮胎在闸下消能防冲中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27 (3) : 64-66. (MOU Xianyou, WEN Heng. Application of scrap tires in energy

dissipation and erosion control under sluice [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, 27 (3) : 64-66. (in Chinese))

[ 6 ] 史国庆,文恒,牟献友. 闸下海漫柔性加糙体消能防冲机理试验 [J]. 水利水电科技进展, 2011, 31 (5) : 49-52. (SHI Guoqing, WEN Heng, MOU Xianyou. Experiment research on the functional mechanics of apron carriers in energy dissipation and erosion control under sluice [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(5) : 49-52. (in Chinese))

[ 7 ] 史国庆,文恒,牟献友,等. 闸下应用废旧轮胎消能防冲的水流紊动特性[J]. 人民黄河, 2011, 33 (10) : 110-112. (SHI Guoqing, WEN Heng, MOU Xianyou, et al. The turbulence characteristics of flow used scrap tires for energy dissipation and erosion control under sluice [J]. Yellow River, 2011, 33(10) : 110-112. (in Chinese))

[ 8 ] 李福田,刘沛清,马宝峰. 高拱坝宽尾墩三维流场数值模拟 [J]. 水科学进展, 2005, 16 (2) : 185-188. (LI Futian, LIU Peiqing, MA Baofeng. 3-D numerical modeling of spillway with flaring gate piers for high arch dams [J]. Advances in Water Science, 2005, 16 (2) : 185-188. (in Chinese))

[ 9 ] 胡宇. 明渠水面线计算方法分析研究 [D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2008.

[ 10 ] 程丽,罗庆杰,张亮,等. 三维钝体的近壁面受力[J]. 水动力学研究与进展, 2008. 23 (2) : 150-157. (CHENG Li, LUO Qingjie, ZHANG Liang, et al. On the forces of 3D blunt-end bodies near wall [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2008. 23(2) : 150-157. (in Chinese))

[ 11 ] YAKHOT V, ORZAG S A. Renormalization group analysis of turbulence; basic theory [J]. J Scient Comput, 1986 (1) : 3-11.

[ 12 ] 张廷芳. 计算流体力学 [M]. 大连:大连理工大学出版社, 2007.

[ 13 ] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries [J]. Journal of Computational Physics, 1981, 39: 201-225.

[ 14 ] ISSA R I. Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting [J]. Journal of Computational Physics, 1986, 62: 40-65.

(收稿日期:2013-12-03 编辑:周红梅)

