

旋流消能工内空腔旋流的数值模拟

南军虎¹, 牛争鸣², 张东¹, 洪镒³

(1. 兰州理工大学 能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050;

2. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 3. 黄河上游水电开发有限责任公司, 青海 西宁 810209)

摘要: 为了克服试验研究的局限, 揭示旋流消能工内部的流动特性, 以公伯峡水平旋流泄洪洞为例, 在原、模型试验研究的基础上, 采用 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型对空腔旋流进行数值模拟。模拟结果表明, 压强等值线沿径向大致以旋流空腔为中心的同心圆轴对称分布; 旋流区和空腔内流速具有明显的分区特性, 旋流区动能沿程由切向动能向轴向动能转变, 并得到旋流角的印证; 旋流空腔沿旋流洞轴向和径向均有变化; 湍动能与湍动能耗散率的径向分布体现出水气交界面处水气混掺紊动、离心力引起壁面摩擦力的增加是空腔旋流具有较大消能率的原因。通过数值模拟与原、模型水力特性的对比分析可知, 数值模拟能够客观地反映出空腔旋流内部的流场特性, 成果可为旋流消能工内空腔旋流的研究应用提供参考。

关键词: 空腔旋流; 数值模拟; 水力特性

中图分类号: TV135.2

文献标志码: A

Numerical Simulation of Cavity Gyrating Flow in Gyrating Discharge Tunnel

NAN Junhu¹, NIU Zhengming², ZHANG Dong¹, HONG Di³

(1. School of Energy and Power Eng., Lanzhou Univ. of Technol., Lanzhou 730050, China;

2. College of Water Resources and Hydro-electric Eng., Xi'an Univ. of Technol., Xi'an 710048, China;

3. Yellow River Upstream Hydropower Limited Liability Co., Xining 810209, China)

Abstract: In order to overcome the limitation of test study and reveal the inner field of gyrating discharge tunnel, the cavity gyrating flow of Gongboxia horizontal gyrating discharge tunnel was simulated using Realizable $k-\varepsilon$ turbulence model based on prototype and experiment tests. The simulation results indicated that the contours of radial pressure were some concentric circles with the cavity as the center approximately and presented axial symmetrical distribution. The velocity in gyrating area and cavity area had an obvious character of zoning. Kinetic energy of gyrating area changed from the tangential momentum into the axial kinetic energy along the gyrating discharge tunnel, and the same results can be obtained from the variation of rotation angle. The cavity varied greatly with the axial and radial position in the gyrating discharge tunnel. The radial profiles of turbulent kinetic energy and turbulent dissipation rate indicated that the cavity gyrating flow remarkably enhances the efficiency of energy dissipation due to the strong turbulent water in the interface between water and air and the wall friction caused by centrifugal force. The results showed that the simulation can describe the inner field of the cavity gyrating flow objectively through comparison of hydraulic characteristics obtained by simulating and testing, and provides a reference for the application of the cavity gyrating flow in gyrating discharge tunnel.

Key words: cavity gyrating flow; numerical simulation; hydraulic characteristics

旋流是一种特殊的空间 3 维运动现象, 由流体的轴向运动和切向旋转运动迭加而成, 其产生机理和运动规律较为复杂, 水力特性因形成的方式和用

途各异, 因具有能量集中、携带能力强等特点, 在工程和工业中应用广泛, 如旋流消能、旋流分离、旋流输送等^[1-3]。旋流消能工是生态环境友好的消能技

收稿日期: 2014-05-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51166008); 甘肃省青年科技基金资助项目(1310RJYA005)

作者简介: 南军虎(1985—), 男, 讲师, 博士, 研究方向: 流体力学。E-mail: nanjh08@126.com

http://jsuese.scu.edu.cn

术 其中在消能工竖井或水平段形成的空腔旋流即为旋流消能技术在工程当中的具体应用。由于水流运动方式独特, 加之水流掺气, 使得空腔旋流与明流或有压泄洪洞内的流动之间存在较大的差别。目前对该类流动的研究主要以试验研究为主^[3-5], 但研究范围大都局限于近壁面流动, 且无法直接量测内部流动参数, 同时模型试验存在一定的缩尺效应。随着计算机技术的发展, 数值模拟逐渐成为研究空腔旋流的又一手段, 例如杨朝晖等^[6]、张建民等^[7]对旋流竖井消能工内的空腔旋流进行了数值模拟; 牛争鸣等^[8]分别选用 3 种湍流模型模拟了典型竖井进流水平旋流消能工内的流动; 赵振兴等^[9]对比了不同湍流模型在旋流阻塞空腔旋流模拟中的适应

性; 此外, 数值模拟的方法在气液旋流分离器等空腔旋流的研究中也屡见不鲜^[10-11]。上述研究均表明数值模拟是研究空腔旋流这类复杂水气两相流的可行手段。

公伯峡水平旋流消能工(图 1)是国内外首个水平旋流泄洪洞, 已开展了原型和 2 种不同比尺的反演模型试验, 但受试验研究的局限, 对其内部流动特性缺乏系统研究。为此, 以公伯峡水平旋流消能工为例, 在试验研究基础上, 结合前人累积的经验^[7-8], 采用 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型和 VOF 法, 开展对空腔旋流的数值模拟, 一方面, 能够补充和丰富已有的试验成果, 另一方面, 也可以更全面地了解空腔旋流的流场特性, 具有重要的工程意义和应用价值。

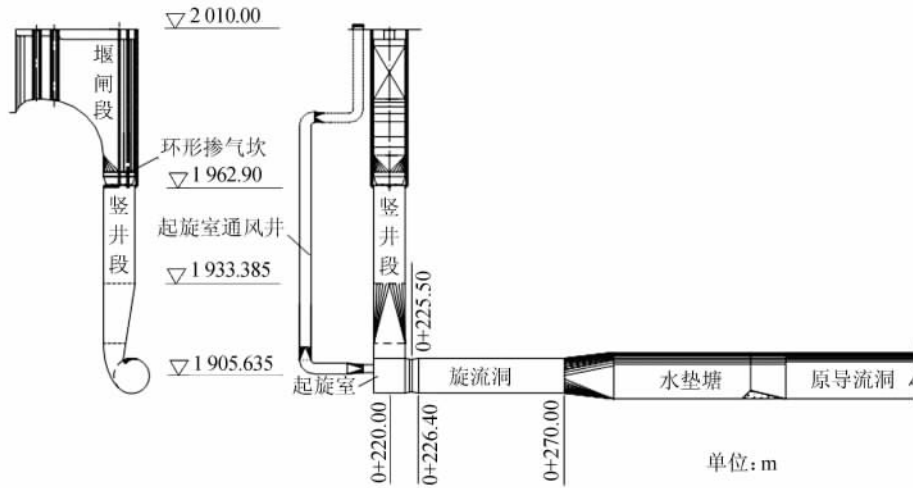


图 1 公伯峡水平旋流泄洪洞

Fig. 1 Gongboxia horizontal gyrating discharge tunnel

1 数值模型

选取 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型进行空腔旋流的数值模拟, 控制方程及参数如下^[12]:

连续性方程:

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

动量方程:

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

湍动能 k 方程:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

湍动能耗散率 ε 方程:

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 E \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \quad (4)$$

式中: u_i 为 x_i 方向的速度分量; t 为时间; ρ 为密度; p 为压力; μ 为动力黏性系数; ν 为运动黏性系数; $-\rho \overline{u_i u_j}$ 为雷诺应力; $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ 为湍流黏性系数, C_μ 为经验系数; $G_k = \mu_t S^2$ 为平均速度梯度引起的湍动能产生项; σ_k 和 σ_ε 分别为 k 和 ε 的湍流普朗特数; C_1 和 C_2 为 ε 方程中的常数, 其中 $C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right]$, $\eta = \frac{S k}{\varepsilon}$, $S = (2 E_{ij} E_{ij})^{1/2}$, $E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$; 以上各参数的取值见表 1。

表 1 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型中的参数Tab.1 Value of Realizable $k-\varepsilon$ turbulent model parameters

| 参数 | C_μ | σ_k | σ_ε | C_2 |
|----|---------|------------|----------------------|-------|
| 数值 | 0.09 | 1.0 | 1.2 | 1.9 |

2 网格划分及边界条件

公伯峡水平旋流泄洪洞水平段结构复杂,在起旋室和旋流洞中分别设置了增压装置,且旋流洞呈圆弧形平面布置,结构极不规则,因此计算时分区域生成对不规则结构具有较强适应性的非结构化网格,网格尺寸范围约为 0.1~0.5 m,其中起旋室和旋流洞为空腔旋流的主要形成区域,故在该段网格划分更密,尺寸最小;由于空腔沿旋流洞轴向和径向变化较大(详见 3.3 节),因此在获得初步计算结果后采用自适应网格对空腔旋流水气交界面处的网格密度进一步调整,以适应流态的急剧变化。因网格划分需要数张图才能说明,受篇幅所限在此略去。

在分析计算区域内流动特性的基础上定义边界条件,其中计算区域包括水流和空气 2 个进口,定义进口类型为速度进口,速度大小与原型观测速度保持一致;泄洪洞出口满足明流流态的运行条件,定义出口类型为压力出口,水面压强为大气压;定义壁面为静止的 No-Slip-Wall,由于水流是具有黏性的流体,因此与之接触的水流的相对速度为零;近壁面采用非平衡的壁面函数法处理。

在模拟时采用 VOF 法捕捉空腔旋流的水气交界面,对控制方程的离散用有限体积法,离散格式采用 QUICK 格式,压力速度耦合采用 PISO 算法。

3 数值模拟成果

3.1 压强特性

空腔旋流的压强分布既与流速、旋流空腔直径有关,也与动量特性相关;压强大小不仅沿径向变化,沿程也受轴向断面尺寸的影响。图 2 为空腔旋流近壁面压强(以下壁面为例)沿程分布,因起旋室内的空腔旋流以切向运动为主,故该段壁面压强值最大;在起旋室封闭断面的导流及压强差作用下,水流出现轴向运动,且轴向运动速度不断增大,故压强沿程减小;需要说明的是, (0+225)~(0+230) m 断面之间压强呈现小范围的波动,该波动由设置于起旋室后的收缩环引起。作用于空腔旋流上的质量力有重力和离心力,二者的作用方向在空腔旋流的底部相同,在空腔旋流的顶部相反,因此同一轴向断

面上环向各点的压强存在一定的差异,空腔旋流的顶部压强最小,底部压强最大,左右两侧压强大致相当,但也存在较小差异,该差异与水流的湍动和空间分布不均匀有关。对比相应位置处数值模拟与试验压强可以看出,数值模拟与试验成果吻合良好,沿程分布趋势一致。

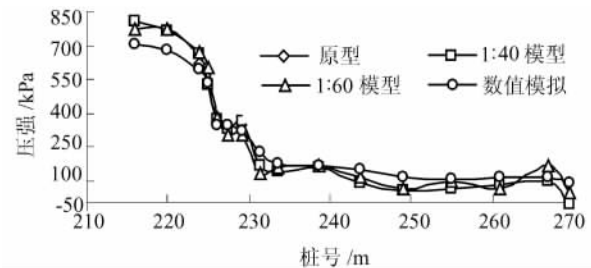


图 2 空腔旋流近壁面压强沿程分布

Fig.2 Distribution of the pressure along the grating discharge tunnel

空腔旋流的径向压强分布如图 3 所示,作用于其上的离心力沿径向具有传递作用,因此各流层间的压强不同,存在一定的压强差,其中空腔内压强最小,旋流区压强随半径的增大而增大。

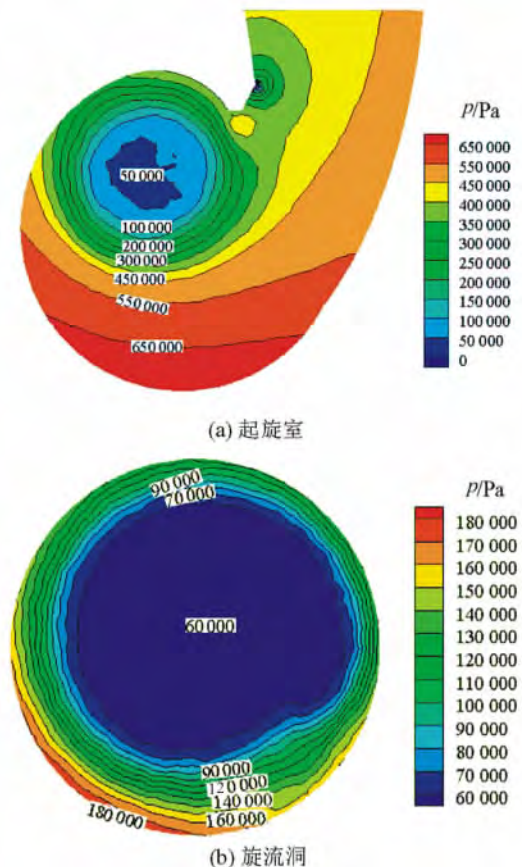


图 3 压强分布云图

Fig.3 Contours of pressure at typical cross-section
闸门全开时视流动为定常的轴对称流动,忽略高阶微元项后,空腔旋流径向压强梯度可表示为:

$$\frac{dp}{dr} = \rho \frac{v_{\theta}^2}{r} \quad (5)$$

在不可压缩均质流体中, 其与切向流速 v_{θ} 的平方成正比, 与半径 r 成反比, 因此随半径的减小, 空腔旋流的径向压力梯度增大, 压强等值线变密, 且沿径向大体上以旋流空腔为中心的同轴对称分布 (图 3)。压强等值线表征径向压强梯度的分布规律, 也反映出空腔旋流内部的流动状态。

3.2 流速特性

空腔旋流典型断面的流速沿径向的分布如图 4 所示, 模型试验时采用自制毕托管量测空腔旋流的流速, 由于水流的旋转和湍动, 以及水层厚度的分布不均, 实际操作过程中很难将总压孔完全对着 3 维合速度的方向, 且靠近水气交界面处水流中的气体容易进入测压管中, 同时离心力引起的压力梯度等因素均会影响量测精度。但总体来讲, 数值模拟和试验流速沿径向的变化趋势基本相符: 越接近旋流空腔区域, 流速值越小; 越靠近下游侧, 流速沿径向的分布越均匀, 相应位置处的流速越小, 且数值模拟与试验流速之间的误差越小。

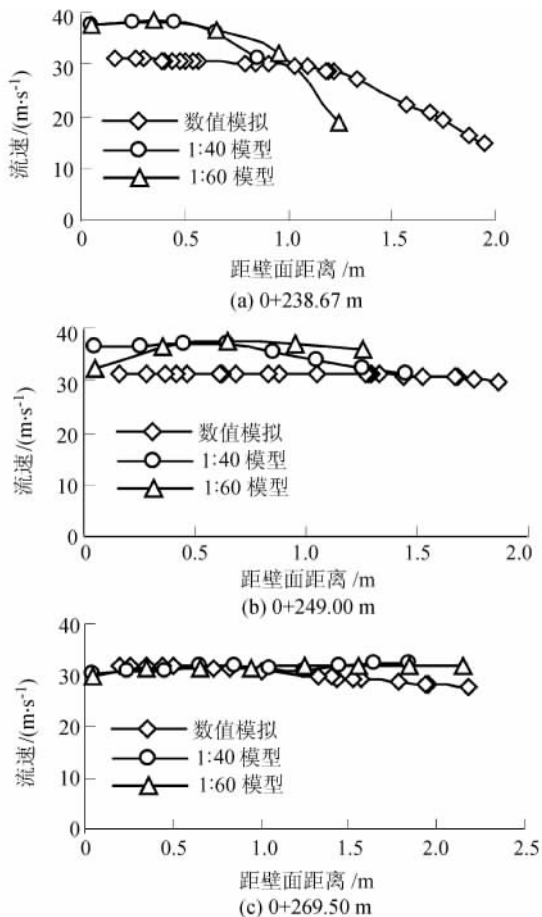
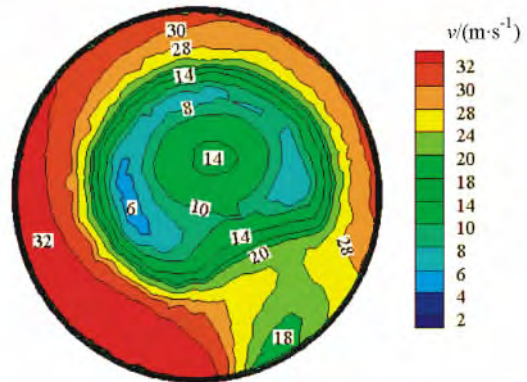


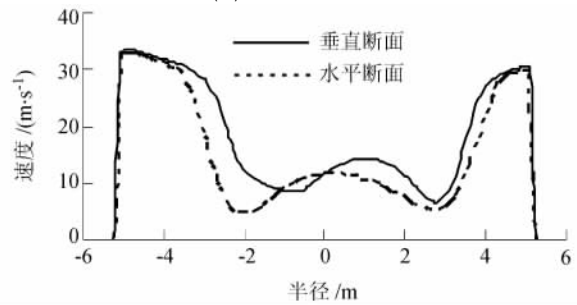
图 4 空腔旋流流速对比

Fig. 4 Comparison of the velocity at typical cross-section

流速分布云图和流速的径向分布直观体现了空腔旋流内部的流动状况, 各断面的合成流速均具有图 5 所示 (以 0+233.50 m 断面为例) 的变化规律。



(a) 流速分布云图



(b) 流速沿径向分布图

图 5 空腔旋流断面流速分布

Fig. 5 Distribution of velocity in cavity gyrating flow

从图 5 可以看出, 旋流区和空腔内流体运动具有明显的分区特性: 1) 旋流区水流沿径向向壁面变化时流速等值线逐渐变疏, 表明空腔旋流的速度梯度和相邻流层间的黏性切应力减小, 能量损失降低, 因此流速沿半径的增大而增加, 这一规律符合空腔旋流的实际流动特点; 流速在接近壁面的某处到达峰值, 而后又急剧减小, 在壁面处减至零值, 从而在整个旋流区形成组合涡结构。2) 空腔内气体的运动始于旋流内表面水流挟带和空腔内轴向压差的联合作用, 其中水气交界面处对应的边界条件要求气体速度与旋流速度相等, 因此该位置处气体流速最小; 空腔旋流的流速由于水头损失的增加沿程呈减小趋势, 受此影响旋流内表面气体运动速度应沿程减小, 从而在空腔内沿流动方向形成一定的压力差, 在压差作用下气体速度有所增大, 流速沿径向呈现如图 5 (b) 所示的波动变化。

在空腔旋流的 3 维流动中, 切向流动是以不可滑移固壁为外边界、以自由液面为内边界, 在沿径向的非线性压强作用下形成的; 轴向流动是以不可滑移固壁为外边界、以自由液面为内边界, 在较大的轴

向压强差作用下形成的。流动过程中动能是由切向动能逐渐向轴向动能转变的,如表 2 所示,最大切向流速沿程减小,最大轴向流速沿程增加,并具有一定的保持性,其中(0+229.30)~(0+233.50) m 断面间流速极值的跳跃变化与收缩环的设置有关。相对同一断面的轴向流速和切向流速,径向流速数值较小,可忽略不计。

表 2 空腔旋流的流速特性

Tab.2 Velocity characteristics of cavity gyrating flow

| 桩号/m | 最大切向流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) | 最大轴向流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) |
|----------|---|---|
| 0+220.00 | 21.0 | 7.4 |
| 0+229.30 | 21.5 | 28.0 |
| 0+233.50 | 20.0 | 31.6 |
| 0+238.67 | 17.7 | 26.5 |
| 0+243.84 | 16.2 | 26.4 |
| 0+249.00 | 16.7 | 28.1 |
| 0+255.00 | 15.9 | 29.3 |
| 0+261.00 | 14.8 | 29.3 |

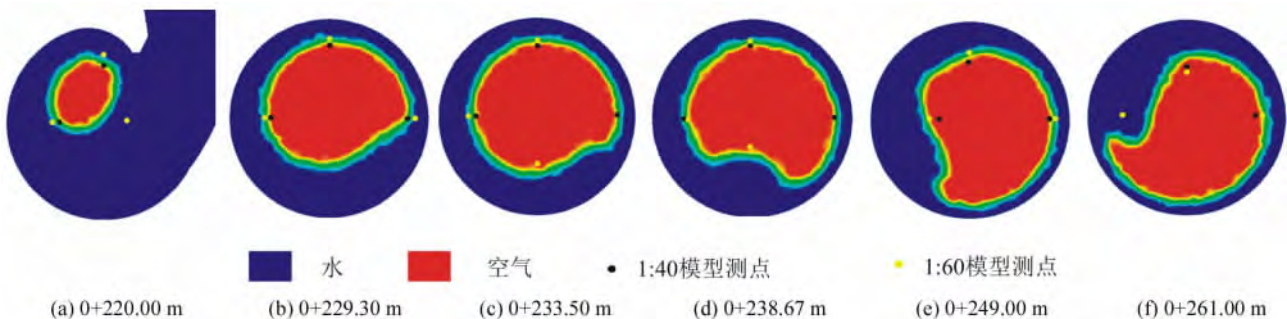


图 6 空腔形态

Fig. 6 Shapes of cavity in the gyrating discharge tunnel

反映空腔形态的另一重要方面是空腔中心偏离旋流洞轴线的程度,若水平旋流消能工的结构完全对称,且水流以对称的方式进入其中,则旋流空腔中心应与旋流洞轴线重合,但公伯峡水平旋流消能工的实际布置难以满足上述条件,如水流并非对称进入旋流洞内、起旋室内加设增压块、旋流洞的水平轴线为圆弧曲线等,从而使得空腔中心不可避免地偏离旋流洞轴线。

3.4 旋流角

旋流角是空腔旋流 3 维运动的合速度与旋流洞轴线之间的夹角,其体现了轴向流速 v_z 和切向流速 v_θ 的大小比例及转化情况,可表示为:

$$\alpha = \arctan(v_\theta/v_z) \quad (6)$$

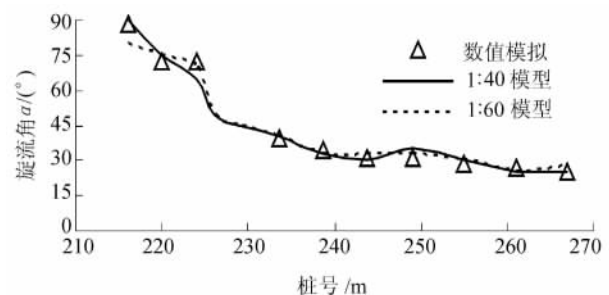
图 7 为空腔旋流近壁面旋流角的沿程分布,可见旋流角的数值模拟值与试验值不仅沿程变化趋势

3.3 空腔形态

空腔形态是旋流空腔的外在性质和内部流动的体现,也是保证流动相似的内壁面条件。空腔形态包括两方面的内容:一是,空腔形成过程中环向水层厚度的沿程变化,即旋流空腔在不同断面的分布情况,反映空腔形成时的动态变化;二是,旋流空腔中心与旋流洞轴线是否重合,反映空腔形成后的静态特征。若能实现对空腔形态的精确模拟,就能保证空腔旋流内部流场计算结果的准确性。

图 6 为典型断面的空腔形态,可以看出数值模拟成果与试验量测值基本一致,不同断面处环向水层厚度不同,沿水平洞径向及轴向皆有变化。在起旋室段壁面压强最大,相应的空腔形态的大小与通气孔尺寸相近,形状近似椭圆形;空腔旋流的能量损失沿程增加,近壁面压强沿程降低,空腔尺寸沿程增加,相应地气体分布区域逐渐增大,但其沿环向的分布极不规则。这一变化规律表明,只有在壁面压强较大的断面,旋流空腔的大小才能上下均匀。

相符,而且在数值上也非常接近。其中,在起旋室内的各轴断面,切向流速最大,轴向流速最小,故该断面旋流角约为 90° ;由流速分布可知切向流速沿程减小,轴向流速沿程增大,因此旋流角沿程减小,整个旋流洞中其值在 $20^\circ \sim 90^\circ$ 范围内变化。

图 7 旋流角 α 沿程变化Fig. 7 Variations of rotation angle α along the tunnel

轴向各断面的旋流角沿径向的分布如图 8 所示。在起旋室和旋流洞内具有明显的分区特性,其中起旋室内沿径向向内旋流角逐渐减小,且越靠近旋流空腔,旋流角越小,体现了旋流运动和空腔内气体运动的相互关系:一方面,水流的旋转运动挟带空气致使空腔内形成负压,空气通过起旋室通风井进入空腔内;另一方面,起旋室断面的空腔较小,气体的运动速度大,其反作用于旋流流动。旋流洞同一轴向断面上的旋流角沿径向的变化幅度较小,且越靠近空腔区域旋流角越大,体现出旋流空腔内气体运动主要由水流的挟带作用而产生。此外,由图 8 也可以看出,旋流区水流的旋流角沿程减小,其表征水流流速的沿程转变特性,即空腔旋流的流动沿程是由切向流动向轴向流动转变的。

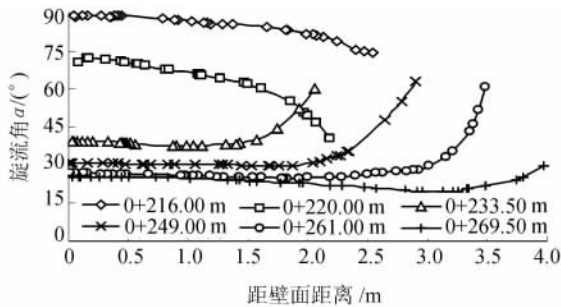


图 8 旋流角沿径向分布

Fig. 8 Radial profiles of rotation angle

3.5 湍动能与湍动能耗散率

湍动能 k 和湍动能耗散率 ε 分别表征水流在运动过程中湍动的剧烈程度和水中小尺度旋涡机械能转化为热能的速率,可定义如下^[13]:

$$k = \frac{1}{2} \overline{v_i' v_i'} \quad (7)$$

$$\varepsilon = \nu \overline{\frac{\partial v_i'}{\partial x_k} \frac{\partial v_i'}{\partial x_k}} \quad (8)$$

图 9 和 10 分别为空腔旋流典型断面湍动能及湍动能耗散率径向分布图。

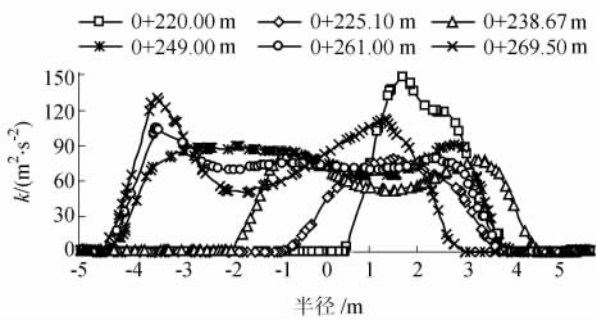


图 9 湍动能 k 沿径向分布

Fig. 9 Radial profiles of turbulent kinetic energy k

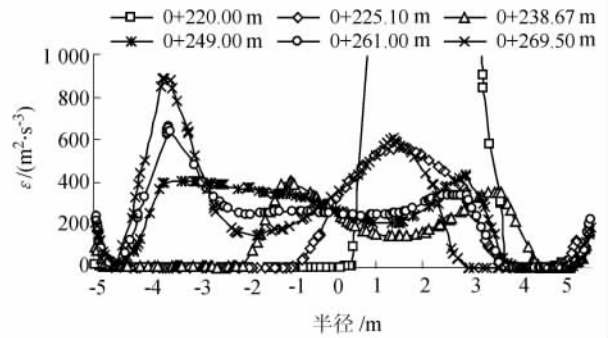


图 10 湍动能耗散率 ε 沿径向分布

Fig. 10 Radial profiles of turbulent dissipation rate ε

图 11 为湍动能分布云图,因湍动能耗散率分布云图与湍动能的非常相似,在此不再陈列。由图 11 可知,各轴向断面上近壁面湍动能较小,中间空腔区或水气交界面处,湍动能迅速增大,表明在这些区域内时均流为湍流支出的能量较多,能量损失较大;湍动能耗散率代表能量的损耗,是消耗湍动能量的主要途径,在旋流内部其沿径向分布与湍动能的径向分布相近,表明水气交界面的水气掺混,并强烈紊动是空腔旋流具有较高消能率的原因之一;同时水流旋转运动时离心力加大了旋流与壁面的摩擦力,因此近壁面处湍动能耗散率出现又一新高,这是空腔旋流具有较高消能率的另一原因;对比相应位置处湍动能与湍动能耗散率不难发现,各轴向断面湍动能和湍动能耗散率的最大值沿程增加,并在旋流洞末端达到最大,而旋流洞末端即为旋流扩散段,表明过流断面变化产生的局部损失是对空腔旋流消能率的又一贡献。

4 结 论

结合原、模型试验成果,选用 Realizable $k - \varepsilon$ 湍流模型和 VOF 法,对水平旋流消能工内的空腔旋流进行了数值模拟,主要结论如下:

- 1) 对比分析数值模拟与原模型试验压强、流速、空腔形态、旋流角等水力特性可知,数值模拟是研究旋流消能工内空腔旋流的可行手段,能真实地反映出空腔旋流的内部流动和参数的分布规律。
- 2) 压强等值线沿径向大体上以旋流空腔为中心的同轴对称分布,其中在旋流空腔处较密,且随半径的增大而变疏。
- 3) 流速分布云图和流速沿径向的分布直观体现了空腔旋流的流动状况,旋流区水流沿径向向内迁移的过程中流速等值线逐渐变密,流速逐渐降低,空腔内气体流速沿径向呈波动变化。空腔旋流的动能沿程呈现由切向动能向轴向动能转变的规律。

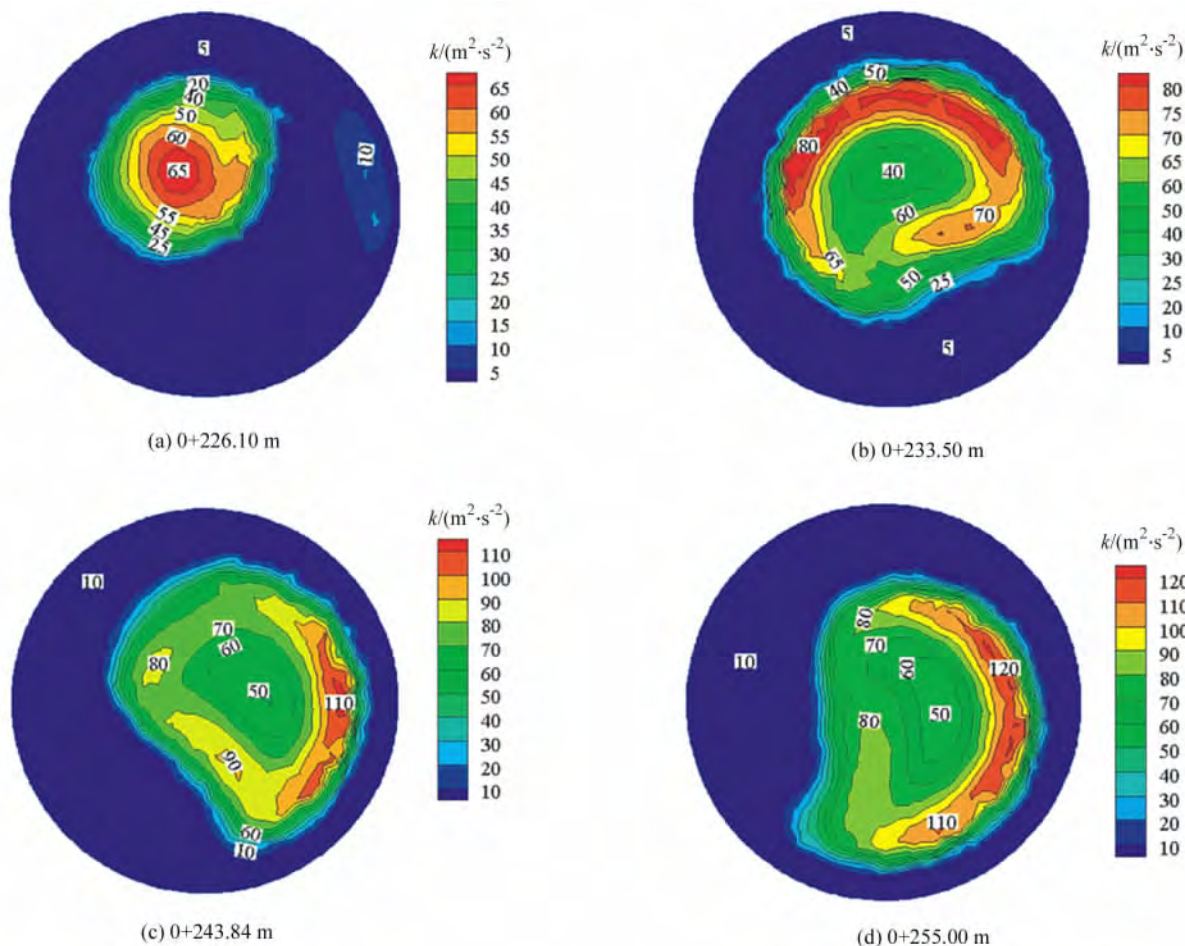


图 11 湍动能分布云图

Fig. 11 Cloud distributions of the turbulent kinetic energy

4) 水平旋流消能工内的旋流空腔并非标准的圆柱形,也非标准的椭圆形,沿旋流洞轴向和径向均有变化;空腔旋流近壁面旋流角沿程减小,其值在 $20^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 范围内变化。

5) 湍动能与湍动能耗散率的径向分布体现出水气交界面处水气充分掺混紊动、离心力引起壁面摩擦力的增加,以及过流断面面积变化产生局部损失是空腔旋流具有较大消能率的原因。

参考文献:

- [1] Dong Xinglin, Yang Kailin, Fu Hui, et al. Design principles of the swirling device of morning glory shaft spillway with a deep intake[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(8): 941-947. [董兴林, 杨开林, 付辉, 等. 兼有深水孔的旋流喇叭形竖井泄洪洞设计原理[J]. 水利学报, 2012, 43(8): 941-947.]
- [2] Matvienko O V, Andropova A O, Agafontseva M V. Influence of the regime of flow of particles from a hydrocyclone on its separation characteristics[J]. Journal of En-

gineering Physics and Thermophysics, 2014, 87(1): 24-37.

- [3] Nan Junhu, Niu Zhengming, Hong Di, et al. Study on hydraulic characteristics of horizontal spiral flow in the Gongboxia discharge tunnel[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(3): 101-107. [南军虎, 牛争鸣, 洪颖, 等. 公伯峡水平旋流泄洪洞水力特性研究[J]. 水力发电学报, 2013, 32(3): 101-107.]
- [4] Chen Huayong, Xu Weilin, Deng Jun, et al. Theoretical and experimental studies of hydraulic characteristics of discharge tunnel with vortex drop[J]. Journal of Hydrodynamics, 2010, 22(4): 582-589.
- [5] Cao Shuangli, Niu Zhengming, Yang Jian, et al. Velocity and pressure distributions in discharge tunnel of rotary-obstruction composite inner energy dissipation[J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(Suppl 1): 111-117.

- [6] Yang Zhaohui, Wu Shourong, Yu Ting, et al. Numerical simulation of silo discharge tunnel with whirling currents [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition 2007, 39(2): 41 - 46. [杨朝晖, 吴守荣, 余挺, 等. 竖井旋流泄洪洞三维数值模拟研究 [J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2007, 39(2): 41 - 46.]
- [7] Li Shuai, Zhang Jianmin, Hu Xiaoyu, et al. Numerical stimulation of transition flow pattern in a vortex shaft with submerged outlet [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2014, 46(4): 13 - 19. [栗帅, 张建民, 胡小禹, 等. 淹没型旋流竖井泄洪洞流态过渡的数值模拟研究 [J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2014, 46(4): 13 - 19.]
- [8] Cao Shuangli, Niu Zhengming, Fu Bo, et al. Numerical simulation of level swirling flow of inner energy dissipation discharge tunnel with shaft inlet [J]. Journal of Xi'an University of Technology 2009, 25(3): 263 - 269. [曹双利, 牛争鸣, 付波, 等. 竖井进流水平旋转内消能泄洪洞的数值模拟 [J]. 西安理工大学学报, 2009, 25(3): 263 - 269.]
- [9] Lu Xuelei, Fan Jishen, Zhao Zhenxing. Numerical simulation of energy dissipation of vortex flow in flood discharging tunnel with barrage [J]. Hydro-Science and Engineering 2014(1): 78 - 84. [鲁学蕾, 范济神, 赵振兴. 泄洪洞旋流阻塞消能的数值模拟 [J]. 水利水运工程学报, 2014(1): 78 - 84.]
- [10] Elsayed K, Jacor K. Optimization of the cyclone separator geometry for minimum pressure drop using mathematical models and CFD simulations [J]. Chemical Engineering Science 2010, 65(8): 6048 - 6058.
- [11] Maysam Saidi, Reza Maddahian, Bijan Farhanieh. Numerical investigation of cone angle effect on the flow field and separation efficiency of deoiling hydrocyclones [J]. Heat Mass Transfer 2013, 49(2): 247 - 260.
- [12] 王福军. 计算流体力学分析 [M]. 北京: 清华大学出版社 2004.
- [13] Jones W P, Launder B E. The prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1972, 15(2): 301 - 311.

(编辑 张琼)