

旋流消能工内空腔旋流的流速特性

南军虎^{1,2}, 牛争鸣³, 张东^{1,2}

(1. 兰州理工大学 西部能源与环境研究中心, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学 能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050;
3. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 为了揭示空腔旋流的内部流场特性, 以公伯峡水平旋流消能工为例, 结合数值模拟和试验成果, 研究空腔旋流的流速特性。结果表明, 随半径的增大, 同一轴向断面的切向流速呈先增大后减小的规律, 具有组合涡的分布特性, 而轴向流速具有先急剧增大, 而后平缓变化的特性。旋流消能工内空腔旋流的流动以切向流动和轴向流动为主, 且沿程是由切向流速向轴向流速转变的, 并与旋流角的沿程分布相印证。组合涡指数是旋流内部流动自由程度和能量损失的体现, 在研究流段上其值介于-0.8~0.5之间, 并随半径的减小而减小; 组合涡指数的沿程分布表明旋流消能工内的空腔旋流沿程是由准强制涡向准自由涡转变的。推导并建立压强及流量的计算公式, 代入数值模拟结果验证了空腔旋流的组合涡运动规律, 成果可为空腔旋流内部微观流动特性的研究提供参考。

关键词: 空腔旋流; 流速特性; 切向流速; 组合涡; 数值模拟

中图分类号: TV135.2

文献标志码: A

Study on Velocity Characteristics of Cavity Gyrating Flow in Gyrating Discharge Tunnel

NAN Junhu^{1,2}, NIU Zhengming³, ZHANG Dong^{1,2}

(1. Western China Energy & Environment Research Center, Lanzhou Univ. of Technol., Lanzhou 730050, China;
2. School of Energy and Power Eng., Lanzhou Univ. of Technol., Lanzhou 730050, China;
3. Inst. of Water Resources and Hydro-electric Eng., Xi'an Univ. of Technol., Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to reveal the inner flow characteristics of cavity gyrating flow, the velocity characteristics of Gongboxia horizontal gyrating discharge tunnel were studied based on the numerical simulation and experimental results. The results indicated that with the increase of the radial, the tangential velocity increased at first and then decreased, and had a distribution characteristics of combined vortex, while the axial velocity increased rapidly at first and then changed slowly. The cavity gyrating flow in gyrating discharge tunnel was mainly tangential flow and axial flow and changed from the tangential flow into the axial flow along the gyrating discharge tunnel, which was proved by the rotation angle. The freedom degree and energy loss of cavity gyrating flow were reflected by the combined vortex index, which decreased with the decrease of the radial in the range from -0.8 to 0.5. The variations of the combined vortex index indicated that the cavity gyrating flow changed from quasi forced vortex to quasi free vortex along the gyrating discharge tunnel. The computational formulas for pressure and discharge were established based on the motion rule of combined vortex, and the combined vortex motion law of the cavity gyrating flow was verified by the numerical datum. The results can provide a reference for the internal micro flow study of the cavity gyrating flow.

Key words: cavity gyrating flow; velocity characteristic; tangential velocity; combined vortex; numerical simulation

旋流是一种空间3维运动现象, 其主要特征是流体在轴向运动的同时迭加了切向的旋转运动, 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^[1-2]、旋流分离^[3]、旋流沉

砂^[4]等。旋流消能工就是利用旋流消能原理提出的一种生态环境友好的消能技术, 其内部形成的水气两相流即为空腔旋流。根据布置型式不同, 可将旋流消能工内的空腔旋流分为竖井旋流和水平旋流

收稿日期: 2015-07-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51509123; 51479164); 甘肃省自然科学基金资助项目(1506RJZA110)

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

两种。对旋流消能工内空腔旋流水力特性的研究始于 20 世纪 60 年代,这些研究主要集中在空腔旋流的流态、压强、流速、消能率、旋流空腔、通风量、水气两相流特性^[5-12]等方面,取得了丰富的成果。

空腔旋流与明流或有压泄洪洞内的流动之间存在较大的区别,流速分布具有自身的复杂性和特殊性。上述关于旋流消能工内空腔旋流水力特性的研究成果中对流速多有涉及,例如, Cao 等^[7]结合模型试验成果基于准自由涡分布规律研究了水平旋流消能工内的切向流速。此外,也有仅针对空腔旋流流速特性的研究,例如,李奇龙等^[13]对阻塞旋流消能工内流场进行了研究,结果表明,阻塞较大时旋流洞段切向流速沿径向分布的组合涡分布特征更明显,无阻塞或较小阻塞时自由涡或准自由涡分布特征则更明显。但这些对流速特性的研究大多以试验研究为主,受测量手段的限制,研究范围局限于空腔旋流的近壁面区域,而对空腔旋流的内部流场特性缺乏系统研究。

基于此,作者以国内外首个水平旋流消能工——公伯峡水平旋流消能工(图 1)为例,结合原、模型试验成果对旋流消能工内的空腔旋流进行了数值模拟^[14]。在此基础上深入研究空腔旋流的流速特性,有助于揭示空腔旋流内部微观的流动特征、流动形态和流速转化机理。

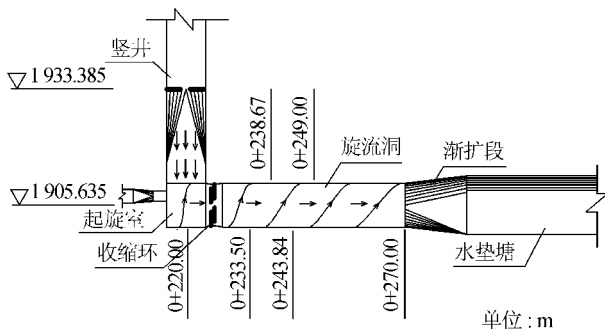


图 1 公伯峡水平旋流消能工

Fig.1 Gongboxia horizontal gyrating discharge tunnel

1 空腔旋流的流速分布

旋流消能工内空腔旋流的流速分布既受体型几何尺寸、旋流空腔形态、空腔内壁面和外壁面边界条件等因素的影响,也决定了压强、旋流角、内部微观流动等特性的分布规律。因公伯峡水平旋流消能工起旋室和旋流洞末端存在不同型式的渐变断面,这些结构对空腔旋流的稳定性产生了不同程度的影响,相对而言 0+233.50~0+249.00 m 之间的空腔旋流流动较为稳定,故研究旋流消能工内的空腔

旋流时以该流段为对象。

1.1 对流速数值模拟结果的说明

文献[14]对比分析了旋流消能工内空腔旋流流速的数值模拟值与试验量测值,结果表明数值模拟和试验流速沿径向的变化趋势基本相符,但在数值上存在一定的差异。受空腔旋流流动复杂性和量测手段局限性的影响,模型试验中流速采用自制毕托管量测(分别用静压管和动压管测量同一点的流速),并按照重力相似准则换算成原型值,但旋流的强离心力效应引起的压力梯度不可避免地存在于流动中,加之水流的湍动以及水层厚度的分布不均,实际操作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空腔内气体容易进入测压管中,这些均会对模型流速的量测结果产生较大影响,因此试验中采用毕托管只能对流速有定性量测。空腔旋流的压强、旋流角、空腔形态、流速等参数是流动规律的外在体现,并相互制约影响,通过数值模拟与试验压强、旋流角、空腔形态等水力特性的对比分析可知,相应的数值模拟与试验成果吻合良好^[14]。特别是空腔形态其不仅是旋流空腔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,实现对空腔形态的精确模拟,就能保证流速场和压强场分布的相似^[15]。因此空腔旋流流速的数值模拟结果是客观真实的。

1.2 合成流速

旋流消能工内空腔旋流各断面合成流速的径向分布如图 2 所示。

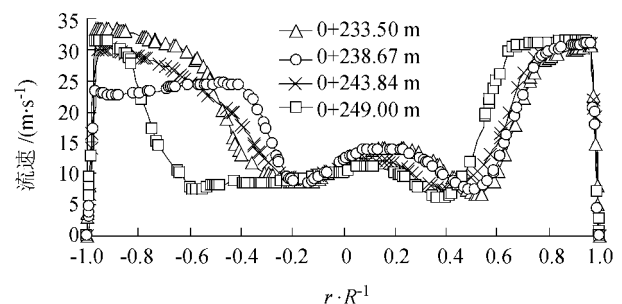


图 2 空腔旋流的合成流速分布

Fig.2 Distribution of velocity in cavity gyrating flow

由图 2 可知,旋流区水流和空腔内气体运动具有明显的分区特性:1) 对旋流区水流而言,随 r/R 的增大,流速等值线逐渐变疏,表明水流的速度梯度减小,则黏性切应力减小,能量损失降低,相应地空腔旋流的流速增大,且在接近壁面的某处达到峰值,而后受固壁影响急剧减小,在 $r/R = 1$ 处减为零值。2) 对空腔内气体而言,由边界条件可知水气交界面

处的气体速度应与旋流速度相等,体现的是旋流内表面水流对空腔内气体的挟带作用;空腔旋流的运动伴随大量的能量损失,受此影响水气交界面处水流和气体速度沿程减小,从而在空腔内沿流动方向形成一定的压力差,因此空腔中心处气体运动速度有所增大,体现的是轴向压差的推动作用;在旋流内表面水流挟带和空腔内轴向压差的联合作用下,空腔内气体流速呈图 2 所示的波动变化。

1.3 3 维流速

在柱坐标系下空腔旋流的合成流速可分解为径向流速、切向流速及轴向流速,并满足^[16]

$$v^2 = v_r^2 + v_\theta^2 + v_z^2 \quad (1)$$

式中, v 为合成流速, v_r 为径向流速, v_θ 为切向流速, v_z 为轴向流速。

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,离心力形成的沿径向的非线性压强作用下的流动,切向流速的径向分布如图 3 所示,从旋流空腔到壁面,切向流速逐渐增大,并具有一定的波动,在距离壁面较近的某处增至最大值,而后呈减小趋势,同时受边界层的影响,在壁面处降至零值,从而在旋流区符合外部准自由涡与内部准强制涡的分布规律。

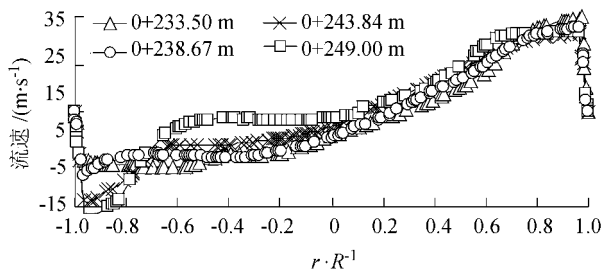


图 3 切向流速的径向分布

Fig. 3 Radial profiles of the tangential velocity

轴向流动以不可滑移固壁为外边界、以自由液面为内边界,在较大轴向压强差作用下的形成的。轴向流速的径向分布如图 4 所示,壁面处空腔旋流的轴向流速为零,在边界层的外边界处轴向流速最大,且随半径的减小呈先平缓变化、而后急剧减小的趋势,并在旋流空腔内减至负值,表明旋流空腔内气体出现一定的反向运动。

空腔旋流径向流速的径向的分布如图 5 所示,各断面旋流空腔内空气的径向流速较大,而旋流区水流的径向流速接近于零。相对同一断面的轴向流速和切向流速,径向流速数值很小,因此旋流消能工内的空腔旋流以切向流动和轴向流动为主。

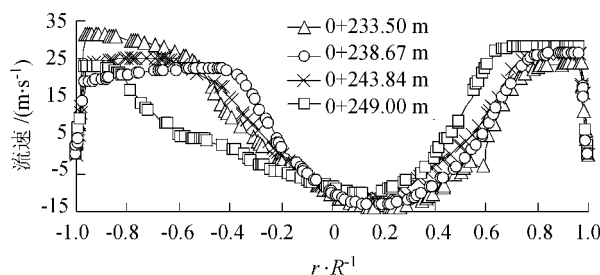


图 4 轴向流速的径向分布

Fig. 4 Radial profiles of the axial velocity

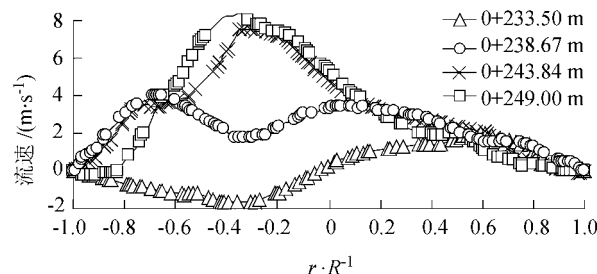


图 5 径向流速的径向分布

Fig. 5 Radial profiles of the radial velocity

1.4 旋流角与流速分布

当水流以一定的压力和初始速度沿切线方向进入旋流洞时,受水平洞封闭端头的约束影响被迫转向,并在轴向压强差的作用下形成轴向流动,切向流动和轴向流动合成与旋流洞轴线呈一定夹角的空腔旋流,该夹角即为旋流角 α ,其与轴向流速和切向流速之间满足:

$$\alpha = \arctan(v_\theta/v_z) \quad (2)$$

空腔旋流近壁面旋流角的沿程分布如图 6 所示,其中模型试验的旋流角采用丝线示踪法测量,数值模拟的旋流角由式(2)反算得到。

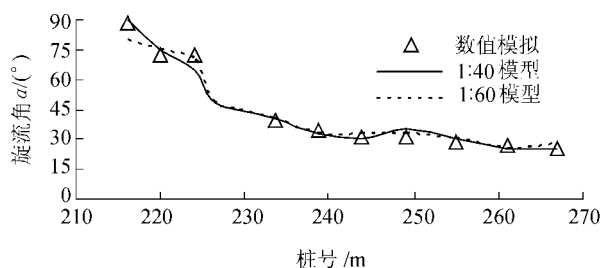


图 6 旋流角 α 沿程变化

Fig. 6 Variations of rotation angle α along the tunnel

由图 6 可知旋流角的数值模拟与试验值不仅沿程变化趋势相符,而且在数值上也非常接近,由此可以得出两点重要结论:旋流角可客观反馈出轴向流速和切向流速的大小比例及沿程转化情况;旋流角沿程减小的趋势体现出空腔旋流的流速沿程是由切向流速向轴向流速转变的,这一规律也与文献[14]中的流速特性表相印证。

2 空腔旋流的压强

旋流消能工内空腔旋流的压强分布受旋流空腔形态、旋流洞几何尺寸等因素的影响,在旋流洞几何尺寸及上游水位不变时,空腔旋流轴向断面的压强又与流速分布有关。

图 7 为空腔旋流的径向压强分布图(以 0 + 233.50 m 断面为例),可以看出旋流空腔内压强最小,近壁面压强最大,而旋流区域内压强随半径的增大而增大,且在同一半径处压强值较为接近,这一分布趋势与组合涡流场压强的理论分布规律相一致。空腔旋流同一半径处压强的差异既与作用在其上的重力和离心力有关,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,也与水层厚度的径向分布不均匀有关。

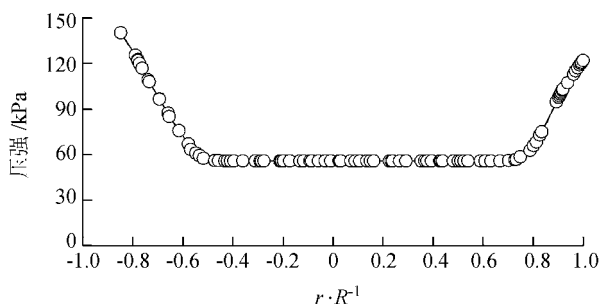


图 7 径向压强分布图

Fig. 7 Radial profiles of pressure

3 空腔旋流内部的流场特性

3.1 组合涡指数

综合空腔旋流轴向断面的压强和切向流速分布特性可知,空腔旋流流动基本符合组合涡流场的运动规律,则切向流速应满足:

$$v_{\theta} r^n = C \quad (3)$$

式中: r 为空腔旋流半径; C 为与流动相关的参数; n 为组合涡指数,当 $n = 1$ 时,流动为理想自由涡运动,当 $n = -1$ 时,流动为理想强制涡运动,当 $0 < n < 1$ 时,流动为准自由涡运动,当 $-1 < n < 0$ 时,流动为准强制涡运动^[16], n 在一定程度上反映了水流流动的自由程度,其值越偏离 1,说明该区域内水流运动越偏离理想自由涡运动规律。

对于旋流区域内的任意相邻流层,则有:

$$v_{\theta 1} r_1^n = v_{\theta 2} r_2^n \quad (4)$$

式中, r_1 、 r_2 分别为相邻流层的半径, $v_{\theta 1}$ 、 $v_{\theta 2}$ 分别为相应流层的切向流速。现将研究流段上各断面的参数代入式(4)中,即可求得相应的 n 值,其径向分布如图 8 所示。

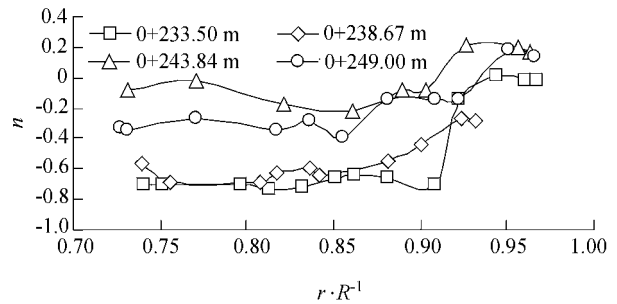


图 8 n 值径向分布

Fig. 8 Radial profiles of n

各轴向断面上水流在高速旋转的同时向内迁移,而旋流内部的能量损失又不可避免地存在,且越靠近旋流空腔,水流的速度梯度越大^[14],从而产生更大的能量损失,进一步降低了空腔旋流的自由度,因此从壁面到空腔 n 值减小,且越靠近旋流空腔 n 值越小,这一规律完全符合空腔旋流的实际流动特点。研究流段上各断面的 n 值均在 $-0.8 \sim 0.5$ 范围内变化,则旋流区域内的流动由准强制涡和准自由涡组成,表明空腔旋流的组合涡规律是准确的。

此外,由图 8 还可以看出 0 + 233.50 m 和 0 + 238.67 m 断面上不同半径 r 处对应的 n 值均小于零,说明这 2 个断面上空腔旋流的组合涡运动中准强制涡分布占主导,而 0 + 243.84 m 和 0 + 249.00 m 断面上,一定半径处 n 值为大于零的值,说明研究流段上的空腔旋流沿程是由准强制涡向准自由涡转变的。

3.2 与理想组合涡的差异

尽管旋流消能工内空腔旋流的运动满足组合涡流场的运动规律,但需要说明的是空腔旋流中组合涡与理想组合涡^[16]之间存在一定的差异:

1) 理想组合涡中的自由涡由中心强制涡束的诱导作用形成,流体运动仅存在切向速度;在旋流消能工内由于其边壁的约束和水流的特殊运动方式,空腔旋流不仅存在切向速度,还存在一定大小的径向速度和轴向速度,因此水流不能形成典型的自由涡运动,而是出现准自由涡运动形态。

2) 理想组合涡断面的流体由同一种流体组成,旋流消能工内的空腔旋流由旋流区和空腔区构成,空腔内流体为通过通气孔进入其中的空气,因此断面的流体由水流和气体两部分组成。

3) 理想自由涡是由作强制涡运动的涡束诱导而产生的,但空腔旋流中是先存在水流的强旋运动,然后才形成中心区域的旋流空腔。

4 空腔旋流的组合涡分布验证

4.1 径向压强

现于研究流段上任取一轴向断面, 视流动为定常流动, 列二元理想强制涡运动的 $N-S$ 方程:

$$\begin{cases} v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} = f_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} \right), \\ v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} = f_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} \right) \end{cases} \quad (5)$$

在理想强制涡运动中切向流速和径向流速分别满足下列条件:

$$v_\theta = \omega r \quad v_r = 0.$$

极坐标中的切向流速和径向流速与直角坐标系中的速度分量 v_x 和 v_y 存在如下对应关系:

$$v_x = -v_\theta \sin \theta = -\omega y \quad v_y = v_\theta \cos \theta = \omega x.$$

作用在空腔旋流上的质量力分量 $f_x = 0 \quad f_y = -g$ 。将上述已知条件代入式(5)得:

$$\omega^2 x = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad \omega^2 y = g + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y}.$$

即

$$dp = \frac{\partial p}{\partial x} dx + \frac{\partial p}{\partial y} dy = \rho(\omega^2 x dx + \omega^2 y dy) - \rho g dy.$$

积分并代入水气交界面处的边界条件, 则旋流消能工内空腔旋流的压强可表示为:

$$p = p_0 + \frac{\rho}{2}(v_\theta^2 - v_{\theta 0}^2) + \rho g \sin \theta (r_0 - r) \quad (6)$$

式中, r_0 为旋流空腔半径 $v_{\theta 0}$ 为 r_0 处的切向流速 p_0 为旋流空腔内压强。

将研究流段上空腔旋流顶部 ($\theta = 90^\circ$) 对应的各点参数代入式(6), 可得到不同半径处的公式计算压强, 其与相应的数值模拟压强对比如图 9 所示。由图 9 可知, $0+233.50 \text{ m}$ 断面上数值模拟压强和公式计算压强吻合良好, 说明该断面上的空腔旋流基本符合理想强制涡的运动规律, 与前文所述该断面上空腔旋流的组合涡运动中强制涡分布占主导相一致。但数值模拟压强和公式计算压强之间的误差沿程增大, 且在 $0+249.00 \text{ m}$ 断面上达最大, 表明实际压强分布偏离理想强制涡压强分布规律的趋势沿程增大, 与此对应的是图 8 中 $0+249.00 \text{ m}$ 断面上出现 n 大于零的流层, 因此空腔旋流流动沿程呈现由准强制涡向准自由涡转变的趋势。空腔旋流内部流动的沿程变化与边界条件的影响有关, 这是因为旋流洞与水垫塘由渐扩段连接, 越靠近渐扩段, 空

腔旋流受边界条件的影响越大, 也与流动过程中的能量损失有关。

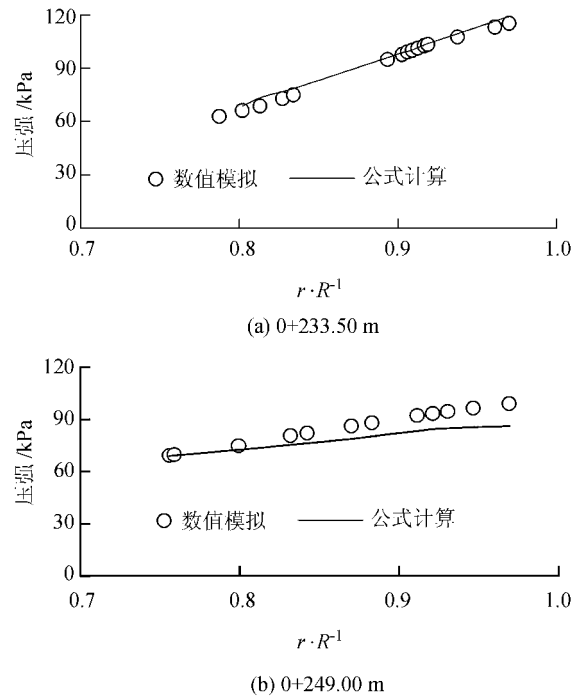


图 9 断面的压强对比

Fig.9 Comparison of the pressure at typical cross-section

4.2 流量

通过空腔旋流断面的流量与轴向流速应满足连续性方程, 故二者之间的关系可用下式表示:

$$Q = \int_{r_0}^R 2\pi r v_z dr \quad (7)$$

将式(2)和(3)代入式(7)可得:

$$Q = \int_{r_0}^R 2\pi r \frac{v_\theta}{\tan \alpha} dr = \frac{2\pi C}{\tan \alpha} \int_{r_0}^R r^{1-n} dr = \frac{2\pi C}{\tan \alpha} \frac{1}{2-n} (R^{2-n} - r_0^{2-n}) \quad (8)$$

式中, Q 为流量 R 为旋流洞半径。

因 n 和 C 值沿径向变化, 故无法直接应用式(8)计算流量, 但在空腔旋流的相邻流层上 n 和 C 均为一确定的值, 为此将相邻流层的参数代入流量的表达式中可得:

$$q_i = \int_{r_{1i}}^{r_{2i}} 2\pi r v_{zi} dr = \frac{2\pi C}{\tan \alpha} \frac{1}{2-n} (r_{2i}^{2-n} - r_{1i}^{2-n}) \quad (9)$$

式中: r_{2i}, r_{1i} 分别为旋流区域任意相邻流层的半径; q_i 为通过相邻流层间流量; v_{zi} 为相邻流层间的轴向流速; i 与旋流区域的水层厚度相关 $i = 0, 1, 2, 3, \dots, N$ 。

总流量 Q 与相邻流层间的流量 q_i 应满足:

$$Q = \sum_{i=1}^N q_i = \sum_{i=1}^N \frac{2\pi C}{\tan \alpha} \frac{1}{2-n} (r_{2i}^{2-n} - r_{1i}^{2-n}) \quad (10)$$

现分别将研究流段上各断面的数值模拟结果代入式(10),公式计算流量如表1所示。因空腔旋流近壁面边界层内的流速分布已远远偏离组合涡流场的运动规律,同时水气交界面处流体为水气两相流,流速变化均较为剧烈,在应用式(10)计算流量时未考虑上述区域通过的流量。原型和模型试验流量分别采用水面浮标法和量水堰量测,不受各参数的影响,而式(10)是在空腔旋流呈组合涡运动的前提下从理论上推导得到,因此考虑通过边界层和水气交界面的流量误差,流量的公式计算值与试验量测值基本一致,表明旋流消能工内空腔旋流的组合涡规律是客观的。

表 1 流量对比

Tab.1 Comparison of the discharge

| 桩号/m | 流量/(m ³ ·s ⁻¹) | | | |
|----------|---------------------------------------|-------|---------|---------|
| | 公式计算 | 原型 | 1:40 模型 | 1:60 模型 |
| 0+233.50 | 1 047.6 | | | |
| 0+238.67 | 1 014.7 | | | |
| 0+243.84 | 993.4 | 1 093 | 1 050 | 1 042 |
| 0+249.00 | 1 029.2 | | | |

4.3 旋流空腔半径

空腔形态(图10)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。公伯峡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,水层厚度沿旋流洞轴向和径向均有变化^[14]。

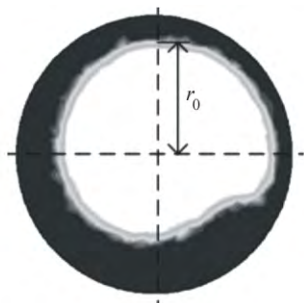


图 10 空腔形态

Fig.10 Shapes of cavity in the gyrating discharge tunnel

旋流空腔半径 r_0 为旋流空腔的特征参数,指某断面上旋流区域内 $i=0$ 的流层对应的半径,若忽略水气两相流的过渡区域,该位置即为旋流区水流和空腔内空气的分界点。表2为旋流空腔半径的对比表,可以看出采用式(10)计算流量时所取的旋流空腔半径与数值模拟及模型试验的实际旋流空腔半径

相对应,并在一定程度上刻画了空腔形态。

表 2 旋流空腔半径

Tab.2 Radius of gyrating cavity

| 桩号/m | 旋流空腔半径 r_0 /m | | | |
|----------|-----------------|------|---------|---------|
| | 式(10) | 数值计算 | 1:40 模型 | 1:60 模型 |
| 0+233.50 | 3.75 | 4.1 | 3.8 | 3.5 |
| 0+238.67 | 3.60 | 4.2 | 3.9 | 4.1 |
| 0+243.84 | 3.84 | 4.0 | — | — |
| 0+249.00 | 3.80 | 4.0 | 3.5 | 3.6 |

5 结 论

以公伯峡水平旋流消能工旋流洞中 0+233.50~0+249.00 m 流段为例,结合数值模拟和原、模型试验成果,研究了空腔旋流的流速特性,主要结论如下:

1) 从旋流空腔到壁面,切向流速先逐渐增大,在距离壁面较近的某处增至最大值,而后呈减小趋势,具有组合涡的分布特性;轴向流速在边界层的外边界处最大,随半径的减小呈先平缓变化,而后急剧减小的趋势。空腔旋流的 3 维流动以轴向流动和切向流动为主,且沿程是由切向流速向轴向流速转变的,旋流角反馈并验证了切向流速和轴向流速的大小比例及沿程转化情况。

2) 组合涡指数 n 是空腔旋流内部流动自由程度和能量损失的体现, n 随半径的减小而减小;在研究流段上 n 值在 $-0.8 \sim 0.5$ 范围内变化,体现出空腔旋流内部的流动是由准强制涡和准自由涡组成的组合涡运动,其中 0+233.50 m 和 0+238.67 m 断面上空腔旋流的组合涡运动中准强制涡分布占主导,0+243.84 m 和 0+249.00 m 断面上,一定半径处 n 值为大于零的值,表明空腔旋流沿程由准强制涡向准自由涡转变。

3) 根据流体运动的理论规律和流动特点,建立了压强和流量的计算公式,验证了空腔旋流的组合涡分布规律。

参考文献:

- [1]Zuikov A L, Chepaikin G A. A model of a high-head bottom spillway with interaction of concentric swirled flows [J]. Power Technology and Engineering, 1986, 20(12): 708-712.
- [2]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.]
- [3] 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 Engineering Physics and Thermo physics, 2014, 87(1): 24-37.
- [4] Wang Xiaolin, Sun Ruirui, Ao Xuefei, et al. Large eddy simulation on vortex grit chamber for sandstone wastewater treatment[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(8): 155-162. [王晓玲,孙蕊蕊,敖雪菲,等.大涡模拟在旋流沉砂池中的应用研究[J].工程力学, 2013, 30(8): 155-162.]
- [5] 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.]
- [6] 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.]
- [7] 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.
- [8] Nan Hong, He Wei. Numerical simulation of the impact of stilling wells' depth in vortex spillway tunnel on energy dissipation ratio[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2014, 12(5): 133-136. [南洪,贺威.竖井旋流泄洪洞消力井深度对竖井消能率影响的数值模拟研究[J].水利与建筑工程学报, 2014, 12(5): 133-136.]
- [9] Li Yao, Zhang Faxing, Deng Jun, et al. Calculation of the cavity length of annular aerator in the vortex drop shaft spillway[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2011, 43(2): 28-33. [李瑶,张法星,邓军,等.旋流式竖井环形掺气坎的掺气空腔计算[J].四川大学学报:工程科学版, 2011, 43(2): 28-33.]
- [10] Niu Zhengming, Nan Junhu, Hong Di, et al. Study on ventilation similarity of horizontal gyrating discharge tunnel[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(4): 77-81. [牛争鸣,南军虎,洪镒,等.水平旋流泄洪洞通风量相似性研究[J].水力发电学报, 2013, 32(4): 77-81.]
- [11] Yang Kailin, Han Kun, Wang Tao. Model similarity laws of gas-liquid mixed flow in horizontal swirling flow tunnels with vertical shaft[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(12): 1416-1424. [杨开林,韩昆,王涛.竖井式水平旋流洞含气水流模型相似律[J].水利学报, 2009, 40(12): 1416-1424.]
- [12] Niu Zhengming, Nan Junhu, Hong Di. An experimental study on hydraulic characteristics of a novel aerator[J]. Advances in Water Science, 2013, 24(3): 372-378. [牛争鸣,南军虎,洪镒.一种新型掺气设施的试验研究[J].水科学进展, 2013, 24(3): 372-378.]
- [13] Li Qilong, Niu Zhengming, Wang Jie. Analysis of rotary flow in spillway tunnel with blocking based on quasi-free-vortex rules[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2014, 46(5): 49-57. [李奇龙,牛争鸣,王捷.基于准自由涡分布的阻塞旋流泄洪洞流场分析[J].四川大学学报:工程科学版, 2014, 46(5): 49-57.]
- [14] Nan Junhu, Niu Zhengming, Zhang Dong, et al. Numerical simulation of cavity gyrating flow in gyrating discharge tunnel[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2015, 47(1): 76-83. [南军虎,牛争鸣,张东,等.旋流消能工内空腔旋流的数值模拟[J].四川大学学报:工程科学版, 2015, 47(1): 76-83.]
- [15] Li Qilong, Niu Zhengming, Ge Chen, et al. Model tests and numerical simulation on hydraulic characteristics of level rotary flow in spillway tunnel with blocking and diffuser. I[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(5): 145-151. [李奇龙,牛争鸣,葛晨,等.泄洪洞内具有阻塞与扩散段的水平旋流消能方式水力特性的试验与数值模拟(1)[J].水力发电学报, 2014, 33(5): 145-151.]
- [16] 徐继润,罗茜.水力旋流器流场理论[M].北京:科学出版社, 1998.

(编辑 张琼)