

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.2012.01.017

二级洞塞泄流的消能特性分析

尹则高^{1,2}, 朱慧洁², 曹先伟², 陈更², 郑清鑫²

(1. 中国海洋大学山东省海洋工程重点实验室, 山东 青岛 266100; 2. 中国海洋大学工程学院, 山东 青岛 266100)

摘要:为了分析二级洞塞泄流的消能特性,揭示洞塞几何体形参数对洞塞泄流消能效果的影响规律,运用三维 RNG $k-\varepsilon$ 紊流数学模型对洞塞泄流进行了数值模拟。建立了洞塞泄流的室内物理模型试验,利用模型试验结果对数学模型进行了验证,两者吻合较好。第1和第2级洞塞面积收缩比分别取为0.2,0.3,0.4和0.5,第1和第2级洞塞相对长度相等并分别取为0.5,1.5和3,形成144种工况。利用验证后的数学模型对上述144种工况进行计算和分析。结果表明:第1和第2级洞塞面积收缩比对消能率和消能比的影响较大,而相对长度对其影响很小。在其他几何体形参数一定的情况下,随着第2级洞塞面积收缩比的增大,第1级洞塞消能率和消能比相应增大,第2级洞塞消能率和消能比相应降低。在其他几何体形参数一定的情况下,随着第1级洞塞面积收缩比的增大,第1级洞塞消能率和消能比相应降低;第2级洞塞消能率变化不大,而消能比相应增加。当第1和第2级洞塞面积收缩比分别达到最小时,消能率达到最大。

关键词:二级洞塞;面积收缩比;相对长度;消能率;消能比

中图分类号: S277.7; TV65 文献标志码: A 文章编号: 1674-8530(2012)01-0085-06

Analysis on discharge energy dissipation in two-stage plugs

Yin Zegao^{1,2}, Zhu Huijie², Cao Xianwei², Chen Geng², Zheng Qingxin²

(1. Key Laboratory of Ocean Engineering of Shandong Province, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China; 2. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China)

Abstract: In order to analyze the discharge energy dissipation of a two-stage plug and reveal the influence of its geometrical parameters on the dissipation, a three-dimensional RNG $k-\varepsilon$ turbulence model was adopted to study discharge in the plug. A physical model of the plug was established to validate the computational results, good agreement has been achieved. The area contraction ratios of both plugs are 0.2, 0.3, 0.4 and 0.5, respectively, the relative lengths of two plugs are equal to 0.5, 1.5 and 3, respectively, causing 144 experimental cases. Then the verified mathematical model of energy dissipation was used to estimate the discharge energy loss in the two-stage plugs at the 144 conditions. The results showed that the area contraction ratio influences the energy dissipation more significantly than the relative length. The energy dissipation rate and ratio of the first plug were increased, but those of the second-stage were decreased with increasing area contraction ratio of the second plug. The energy dissipation rate and ratio the first plug were decreased, the energy dissipation rate of second plug was varied little, but its energy dissipation ratio was increased with increasing area contraction ratio of the first plug. When the area contraction ratios of the two plugs were optimal, their energy dissipation rates were the largest.

Key words: two-stage plug; area contraction ratio; relative length; energy dissipation rate;
energy dissipation ratio

收稿日期: 2011-05-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51009123); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2009FQ003)

作者简介: 尹则高(1977—),男,山东青州人,副教授,博士(yinzegao@ouc.edu.cn),主要从事水工水动力学研究。

朱慧洁(1989—),女,新疆巴州人,本科生(zhuhuijie163@163.com),主要从事水工水动力学研究。

二级洞塞消能是利用连续突缩和突扩边界来增大对水流的形状阻力达到消能的目的(见图1). 洞塞式消能具有流态稳定、结构简单、水流参数易于控制等优点, 是一种有发展前景的内流消能方式^[1-2]. 加拿大麦加坝(Mica dam)在直径13.7 m的导流洞内设置了两个长分别为49和37 m, 间隔为104 m的混凝土塞, 将导流洞改建成永久的泄水底孔, 可以使特高速水流流速由52降至35 m/s以下; 1973年首次投入运行, 至1976年4月, 泄水底孔共使用75个星期, 运行情况与设计和模型试验情况相符, 为洞塞消能进行了一次有益的尝试和成功的实践^[3].

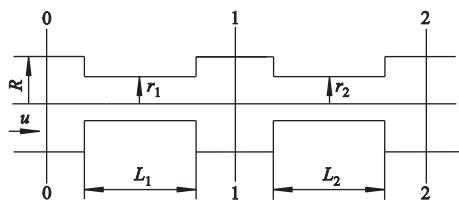


图1 二级洞塞消能示意图
Fig. 1 Two plugs discharge sketch

国内目前尚没有洞塞消能的工程实例, 但已有大量的理论研究、数值计算与试验成果. 刘善均等^[1]介绍了洞塞消能的特点和布置型式, 给出了泄流能力和水头损失计算公式. 张建民等^[4]对洞塞消能工进行数值模拟, 指出洞塞相对长度一定时, 突缩比减小, 消能率增大; 突缩比一定时, 洞塞相对长度增大, 消能率增大. 贺益英等^[5]分析了洞塞泄流的模型试验和数值模拟结果, 指出洞塞局部阻力系数随断面收缩比的增大而减小, 随洞塞相对长度增大而略有增大. 田忠等^[6-7]利用室内实验和数值模拟方法, 得出了典型几何体型洞塞的水头损失系数和初生空化数表达式, 进而指出三级洞塞可以进行高水头(约200 m)和大流量(约2 500 m³/s)的泄流. 尹则高等^[8-9]对洞塞消能工的水头损失系数和最小压强系数进行计算, 表明当洞塞相对长度从很小开始增大时, 水头损失系数急剧减小而后明显增大, 最后缓慢线性增大; 最小压强系数在洞塞两端呈现双峰分布; 在其他参数一定的情况下, 最小压强系数峰值随洞塞相对长度增大而减小.

从上述研究成果看, 单级顺直洞塞的消能率一般较小, 难以达到满意的消能效果, 因此对多级洞塞的水力特性和消能效果进行研究, 具有很强的工程实践意义.

文中拟建立洞塞泄流的室内试验模型和数学模型, 利用物理模型试验结果对数学模型进行验证, 进

而利用数学模型对二级顺直洞塞的消能状况进行计算, 探讨二级洞塞的面积收缩比、相对长度等参数对消能率和消能比的影响规律, 给出二级洞塞消能效果较佳的几何布置方案.

1 数值计算

1.1 紊流数学模型

由于二级洞塞式消能的突缩和突扩边界条件, 导致流线发生强烈弯曲, 因此选用 RNG $k-\varepsilon$ 紊流数学模型. 恒定流的 RNG $k-\varepsilon$ 控制方程^[10-12]张量形式为

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + g_i, \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho \varepsilon, \quad (3)$$

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + G_b - R_\varepsilon, \quad (4)$$

式中: $\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) - \frac{\partial}{\partial x_j} \rho \overline{u'_i u'_j}$;

G_k 为由于平均速度梯度而引起的脉动动能产生项;

G_b 为由于浮力而引起的脉动动能产生项; R_ε 为源项.

$$G_k = - \rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}, G_b = - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i},$$

$$R_\varepsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 \left(1 - \frac{\eta}{\eta_0} \right)}{1 + \beta \eta^3} \frac{\varepsilon^2}{k},$$

其中: $\eta = Sk/\varepsilon$, $C_{1\varepsilon} = 1.42$, $C_{2\varepsilon} = 1.68$, $\alpha_k = \alpha_\varepsilon = 1.393$, $Pr_t = 0.7179$, $C_\mu = 0.0845$, $\eta_0 = 4.38$, $\beta = 0.012$.

1.2 离散方法与边界条件

1.2.1 离散方法

方程的离散采用交错网格的有限体积法. 将压力 p 、紊动动能 k 、紊动耗散率 ε 等标量布置在网格的中点, 将速度分量 u_i 分别布置在计算网格边界上, 对流项采用 Quick 格式实施离散, 扩散项的离散采用中心格式. 为了确保计算的稳定性, 对紊动动能与紊动耗散率离散化方程中的 Quick 格式附加源项按常正变量源项线性化的要求进行重置. 对各变量的 Quick 格式离散化方程组采用 TDMA (tridiagonal

matrix algorithm, TDMA)逐线扫描低松弛迭代法依次顺序求解,对压力与速度的耦合迭代求解采用 SIMPLE 算法.

1.2.2 边界条件

进口边界为水流速度进口,出口边界为水流质量出口.给出进口速度分量 u_i, k 和 ε ,其中 k, ε 由经验公式^[13]确定;假定出口断面为充分发展的紊流运动,所有标量的法向梯度及流速法向分量的梯度为 0;在固壁边界上,采用无滑移边界条件,对黏性底层采用壁函数处理.

2 物理模型试验与数学模型验证

为了对三维 RNG $k - \varepsilon$ 紊流数学模型计算结果的可靠性进行验证,建立了单级洞塞室内物理试验模型,见图 2,其中主管段和洞塞段总长为 1.895 m,主管段直径为 0.13 m,洞塞段直径为 0.05 m,洞塞段长度为 0.255 m,进口断面流速为 0.2 m/s. 利用 ADV 流速仪和测压排对流速和压力进行观测,并与数值计算结果进行对比,见表 1,2,表中 d 为测点距进口处距离, u_t 为实测流速, u_c 为计算流速, p_t 为实测压强, p_c 为计算压强, e 为相对误差.

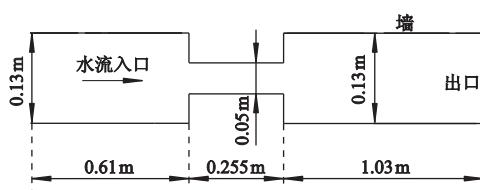


图 2 物理模型
Fig. 2 Physical model

表 1 计算流速与实测流速对比

Tab. 1 Comparison between computational velocity and physical model velocity

d/m	$u_t/(m \cdot s^{-1})$	$u_c/(m \cdot s^{-1})$	$e = (u_c - u_t)/u_t$
0.250	0.194	0.195	0.007
0.575	0.181	0.190	0.047
1.840	0.191	0.186	-0.023

表 2 计算压力与实测压力对比

Tab. 2 Comparison between computational pressure and physical model pressure

d/m	p_t/Pa	p_c/Pa	$e = (p_c - p_t)/p_t$
0.145	5 003	4 832	-0.034
0.785	4 994	4 837	-0.031
0.980	2 546	2 633	0.034

由表 1,2 可知,计算值与观测值相对误差较小,吻合较好;计算结果较合理,模型相对较可靠.

3 计算结果及分析

3.1 计算工况

当 $Re = 49 500$ ($Re = uD/\nu$, 其中 $u = 0.1917 \text{ m/s}$, $\nu = 1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $D = 0.130 \text{ m}$) 时, 第 1 级洞塞面积收缩比 δ_1 ($\delta_1 = r_1^2/R^2$) 和第 2 级洞塞面积收缩比 δ_2 ($\delta_2 = r_2^2/R^2$) 分别取 0.2, 0.3, 0.4 和 0.5, 第 1 和第 2 级洞塞相对长度相等 ($\eta_1 = \eta_2 = L_1/r_1 = L_2/r_2$) 并分别取为 0.5, 1.5 和 3, 形成 144 种工况, 对其进行计算. 为了保证两级洞塞均达到完全消能效果, 其间距取为 $15.4R$.

3.2 流速与压力分布

由图 3,4 可知, 水流经过第 1 级洞塞前, 受到断面收缩造成挤压, 流速快速增大, 压力迅速降低; 进入洞塞段后, 流速达到最大, 压力急剧降低; 进入突扩段后, 由于过水面积增大, 流速降低, 并在突扩段前端形成旋涡回流区, 随后流速和压力的断面分布沿程趋向均匀; 由于两级洞塞间距较长, 第 1 级洞塞后水流回旋得到充分发展, 回流长度达到最大便不再增大, 水体之间的强烈紊动以及水体与壁面之间的摩擦致使动能转化为热能, 达到初步消能的目的, 然后进入第 2 级洞塞, 重复第 1 级洞塞的消能过程, 直至速度沿程恢复.

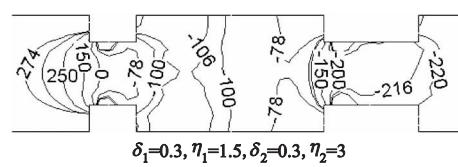


图 3 压力等值线图
Fig. 3 Contours of pressure

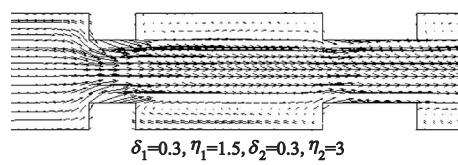


图 4 速度矢量图
Fig. 4 Velocity distribution

综合分析各工况计算流速与压力分布, 得出在第 1,2 级洞塞入口稍后位置处流速最大, 此处压强相应为最小, 且洞塞段的断面收缩比越小, 最小压强点越靠近洞塞入口.

3.3 消能率、消能比的分析

为了分别分析第1,2级洞塞的消能效果,定义第1,2级洞塞的消能率(即 $E_1 = \Delta p_1/(p_0 + p_u)$, $E_2 = \Delta p_2/(p_1 + p_u)$)及第1级洞塞消能比 F_1 (即 $F_1 = \Delta p_1/(\Delta p_1 + \Delta p_2)$)等参数进行分析研究。其中 p_1 为第1级洞塞前压强, p_2 为第1,2级洞塞中间断面的压强;动压强 $p_u = 0.5\rho u^2$; $\Delta p_1 = p_0 - p_1$, $\Delta p_2 = p_1 - p_2$ 。由于第2级洞塞消能比 $F_2 = 1 - F_1$,这里不再对 F_2 进行计算与分析。

由图5可知,第1级洞塞面积收缩比一定的情况下,第1级洞塞消能率随第2级洞塞面积收缩比的增大而增大; $\delta_1 = 0.2$ 时的第1级洞塞消能率大于其他各工况。从图6可知,在第2级洞塞面积收缩比一定的情况下,第1级洞塞消能率随第1级洞塞面积收缩比的增大而迅速降低; $\delta_2 = 0.5$ 时的第1级洞

塞消能率大于其他各工况。当 $\delta_1 = 0.2$ 和 $\delta_2 = 0.5$ 时,第1级洞塞消能率达到最大,为0.925左右。综合分析图5,6可知,第1,2级洞塞面积收缩比对消能率影响较大。

由图7可知,第1级洞塞面积收缩比一定的情况下,第2级洞塞消能率随第2级洞塞面积收缩比的增大而减小; $\delta_1 = 0.2$ 时的第2级洞塞消能率大于其他各工况;第2级洞塞面积收缩比在0.2~0.3时,各曲线对应的第2级洞塞消能率差别不大,几乎重合。

由图8可知,第2级洞塞面积收缩比一定的情况下,第2级洞塞消能率随第1级洞塞面积收缩比的增大变化不大; $\delta_2 = 0.2$ 时的第2级洞塞消能率大于其他各工况;当 $\delta_1 = \delta_2 = 0.2$ 时,第2级洞塞消能率达到最大,约为0.98。

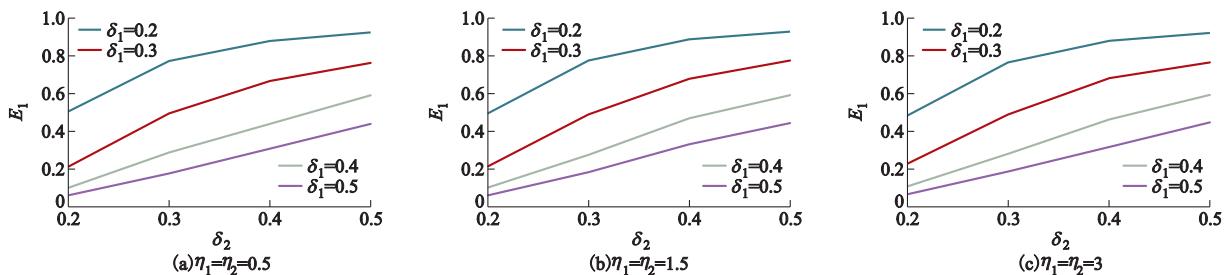


图5 E_1 与 δ_2 关系图
Fig. 5 Relation between E_1 and δ_2

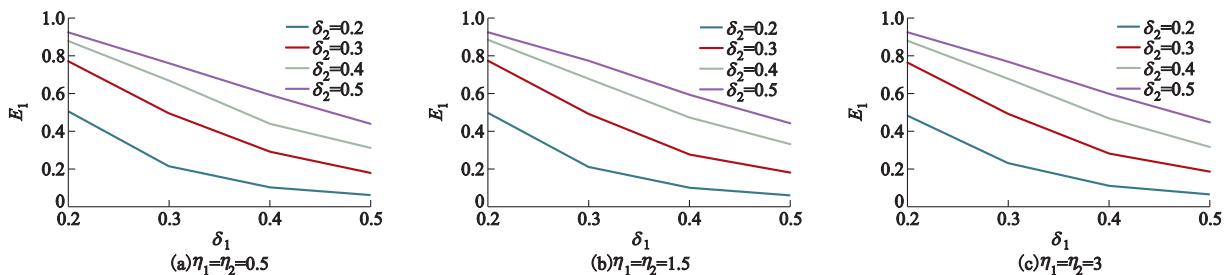


图6 E_1 与 δ_1 关系图
Fig. 6 Relation between E_1 and δ_1

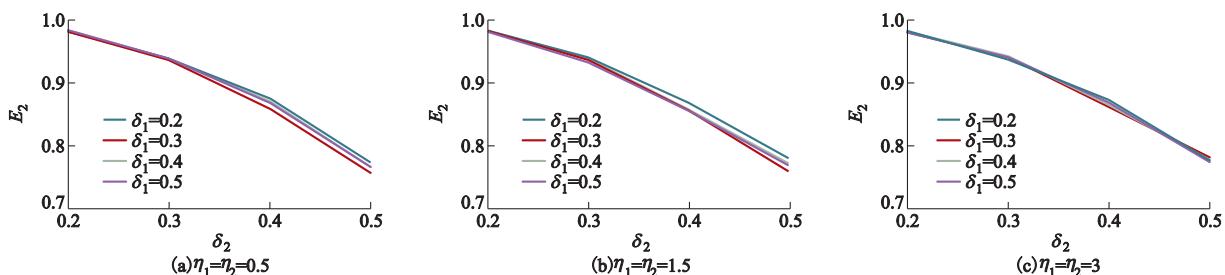
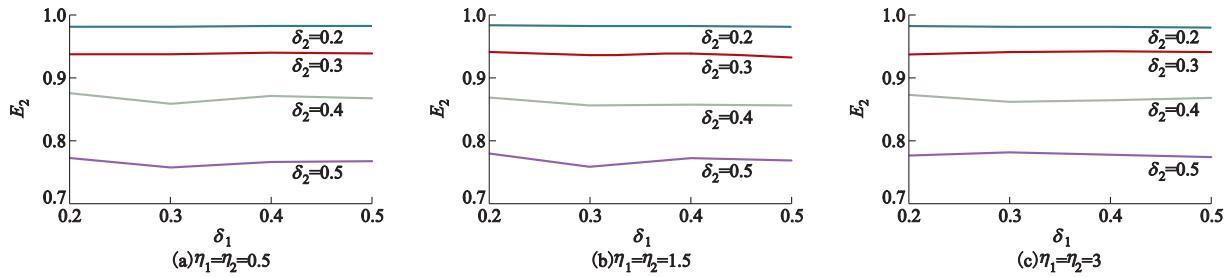
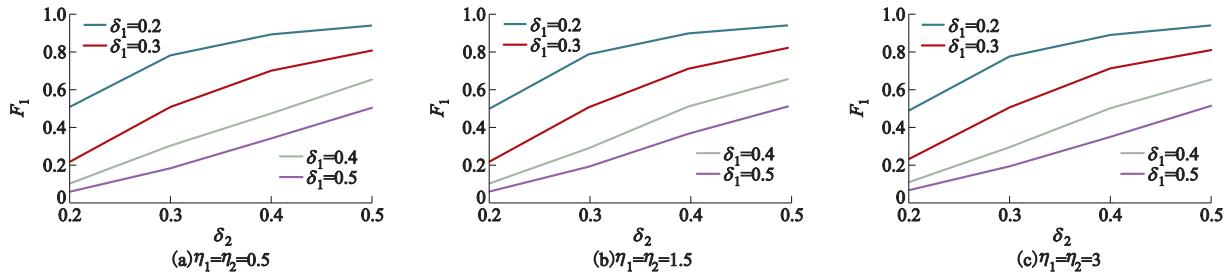
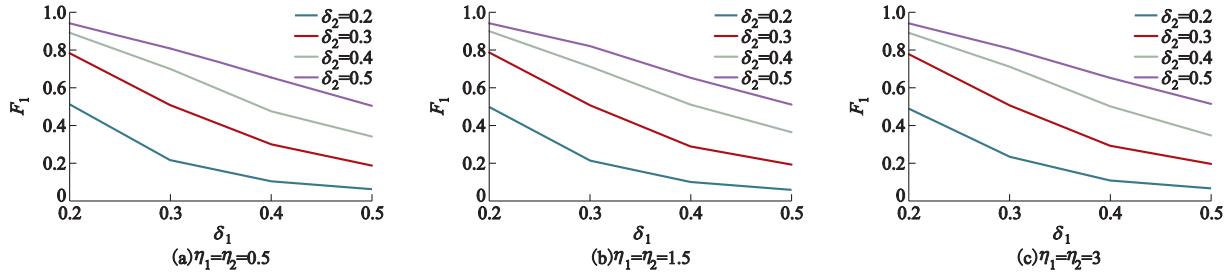


图7 E_2 与 δ_2 关系图
Fig. 7 Relation between E_2 and δ_2

图 8 E_2 与 δ_1 关系图Fig. 8 Relation between E_2 and δ_1

由图 9 可知, 第 1 级洞塞面积收缩比一定的情况下, 第 1 级洞塞消能比随着第 2 级洞塞面积收缩比的增大而增大; $\delta_1 = 0.2$ 时的第 1 级洞塞消能比大于其他各工况; 由图 10 可知, 第 2 级洞塞面积收缩

比一定的情况下, 第 1 级洞塞消能比随第 1 级洞塞面积收缩比的增大而减小; $\delta_2 = 0.5$ 时的第 1 级洞塞消能比大于其他各工况。当 $\delta_1 = 0.2$ 和 $\delta_2 = 0.5$ 时, 第 1 级洞塞消能比达到最大, 为 0.94 左右。

图 9 F_1 与 δ_2 关系图Fig. 9 Relation between F_1 and δ_2 图 10 F_1 与 δ_1 关系图Fig. 10 Relation between F_1 and δ_1

4 结 论

1) 针对二级洞塞消能工附近的局部流动, 分析研究了水流紊乱特点, 应用了洞塞泄流的三维 RNG $k - \varepsilon$ 紊流数学模型。建立了单级洞塞泄流的物理模型, 利用物模试验资料对数学模型计算结果进行了验证, 两者吻合较好, 说明利用 RNG $k - \varepsilon$ 模型模拟洞塞泄流是合理可行的, 计算结果比较可靠。

2) 利用建立的数学模型对第 1, 2 级洞塞的消能率和消能比进行了计算分析。第 1 和第 2 级洞塞面积收缩比对消能率和消能比的影响较大, 而相对

长度对其影响很小。具体说来, 当第 1, 2 级洞塞相对长度和第 1 级洞塞面积收缩比一定时, 随着第 2 级洞塞面积收缩比的增大, 第 1 级洞塞消能率和消能比相应增大, 第 2 级洞塞消能率和消能比相应降低。当第 1, 2 级洞塞相对长度和第二级洞塞面积收缩比一定时, 随着第 1 级洞塞面积收缩比的增大, 第 1 级洞塞消能率和消能比相应减小; 第 2 级洞塞消能率变化不大, 而第 2 级洞塞消能比相应增大。当第 1, 2 级洞塞面积收缩比分别达到最小时, 总消能率最大。

3) 实际工程运行中, 由于防洪条件的限制, 给出消能率和泄流量俱佳的二级洞塞几何尺寸参数是后续工作需要深入研究的内容。

参考文献(References)

- [1] 刘善均,杨永全,许唯临,等.洞塞泄洪洞的水力特性研究[J].水利学报,2002,33(7):42-46.
Liu Shanjun, Yang Yongquan, Xu Weilin, et al. Hydraulic characteristics of throat-type energy dissipater in discharge tunnels [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002,33(7):42-46. (in Chinese)
- [2] Dong Jianwei, Xu Weilin, Deng Jun, et al. Numerical simulation of turbulent flow through throat-type energy-dissipators [J]. Journal of Hydrodynamics, 2002,14(3): 135 - 138.
- [3] Russell S O, Ball J W. Sudden-enlargement energy dissipator for Mica dam [J]. Journal of the Hydraulics Division, 1967,93(4):41 - 56.
- [4] 张建民,许唯临,刘善均,等.突扩突缩式内流消能工的数值模拟研究 [J]. 水利学报,2004,35(12):27 - 33.
Zhang Jianmin, Xu Weilin, Liu Shanjun, et al. Numerical simulation of turbulent flow in throat type energy dissipators [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35 (12):27 - 33. (in Chinese)
- [5] 贺益英,杨帆.洞塞消能工在火电核电厂排水口消能消泡中的应用 [J]. 水利学报,2008,39(8):976 - 981.
He Yiyang, Yang Fan. Application of plug energy dissipater to elimination of bubbles in cooling water occurred to the outlet of power plants [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008,39(8):976 - 981. (in Chinese)
- [6] 田忠.洞塞式内流消能工的水力特性研究 [D]. 成都: 四川大学水利水电学院,2006.
- [7] Tian Zhong, Xu Weilin, Wang Wei, et al. Hydraulic characteristics of plug energy dissipater in flood discharge tunnel [J]. Journal of Hydrodynamics, 2009, 21 (6):799 - 806.
- [8] 尹则高,拾兵,赵林,等.洞塞式消能工的数值模拟 [J]. 水科学进展,2008,19(1):89 - 93.
Yin Zegao, Shi Bing, Zhao Lin, et al. Numerical simulation of plug energy dissipater flow [J]. Advances in Water Science, 2008,19(1):89 - 93. (in Chinese)
- [9] 尹则高,拾兵,史宏达,等.洞塞式泄洪的数值模拟 [J]. 北京工业大学学报,2008,34(8):856 - 860.
Yin Zegao, Shi Bing, Shi Hongda, et al. Numerical simulation of plug discharge [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2008,34(8):856 - 860. (in Chinese)
- [10] 刘沛清,屈秋林,王志国,等.内加强月牙肋三岔管水力特性数值模拟 [J]. 水利学报,2004,35(3):42 - 46.
Liu Peiqing, Qu Qiulin, Wang Zhiguo, et al. Numerical simulation on hydrodynamic characteristics of bifurcation pipe with internal crescent rib [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35 (3):42 - 46. (in Chinese)
- [11] Mompean G. Numerical simulation of a turbulent flow near a right-angled corner using the speziale non-linear model with RNG $k - \varepsilon$ equations [J]. Computers & Fluids, 1998,27(7):847 - 859.
- [12] Bazdidi-Tehrani F, Shahmir A, Haghparast-Kashani A. Numerical analysis of a single row of coolant jets injected into a heated crossflow [J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2004,168(1/2):53 - 63.
- [13] 沈新荣,崔良成,章本照.绕壁面小障碍物的湍流边界层研究 [J]. 力学学报,1998,30(6):737 - 742.
Shen Xinrong, Cui Liangcheng, Zhang Benzhao. Turbulent boundary layer study of flow behind small obstacles placed on the wall [J]. Acta Mechanica Sinica, 1998, 30 (6):737 - 742. (in Chinese)

(责任编辑 张文涛)