

组合式洞塞消能工的数值计算

田 忠¹, 许唯临¹, 刘善均¹, 王 韦¹, 张建民¹, 段 辉²

(1. 四川大学高速水力学国家重点实验室, 四川 成都 610065; 2. 中国水利水电第五工程局, 四川 成都 610225)

摘要: 为了提高洞塞内的最小压强, 扩大洞塞式消能工的应用范围, 提出了一种新型的内流式消能工——组合式洞塞消能工, 并用 $k-\epsilon$ 模型计算了组合式洞塞消能工的水力参数. 计算结果表明, 与洞塞式消能工相比, 组合式洞塞消能工能显著提高洞塞内的最小压强和水流空化数, 并且不会明显降低消能率.

关键词: 洞塞消能工; 洞塞最小压强; 空化数; 消能率; $k-\epsilon$ 模型

中图分类号: TV653+.9 文献标识码: A 文章编号: 1006-7647(2005)03-0008-03

Numerical calculation of combined plug energy dissipator//TIAN Zhong¹, XU Wei-lin¹, LIU Shan-jun¹, WANG Wei¹, ZHANG Jian-min¹, DUAN Hui² (1. State Key Hydraulics Laboratory of High-Speed Flows, Sichuan Univ., Chengdu 610065, China; 2. Sinohydro Engineering Bureau 5, Chengdu 610255, China)

Abstract: For improvement of the minimum pressure in plugs and extension of the application range of the plug energy dissipator, a new type of energy dissipator—the combined plug energy dissipator was proposed, and the $k-\epsilon$ model was used for calculation of the hydraulic parameters of the energy dissipator. The calculated result shows that the combined energy dissipator can greatly improve the minimum pressure in plugs and cavitation number of water flow as compared with the single plug dissipator, and the efficiency of energy dissipation does not decrease obviously.

Key words: plug dissipator; minimum pressure in plug; cavitation number; efficiency of energy dissipation; $k-\epsilon$ model

为了满足因国民经济的快速发展日益增长的电力需要,我国西南地区将建设一批 200 m 以上的高坝,为满足其泄洪消能的要求,迫切需要发展能适应高水头、大流量泄洪要求的高效可靠的内流式消能工.将导流洞改建成永久泄洪洞具有巨大的经济效益,国外已有将导流洞改建成永久洞塞式泄洪洞的成功先例^[1],国内虽然大型工程尚无采用洞塞式消能的实例,但已有洞塞式消能工的实验和数值模拟的相关研究^[2~4].文献[2]的研究结果表明,洞塞式消能工具有流态稳定、消能率高、结构简单、水流参数易于控制等优点.文献[2]的算例还表明,洞塞处的最小空化数大于文献[5]给出的初生空化数.为了进一步提高洞塞处的水流空化数,使洞塞式消能工能适应不同的工作水头,笔者提出了一种新型的内流式消能工——组合式洞塞消能工.本文首先定义了组合式洞塞消能工及相关的水力参数,然后用文献[2]的实验结果验证所选用的标准 $k-\epsilon$ 模型的适用性,最后用该模型研究轴对称组合式洞塞消能工的过流断面形状对水头损失系数和压强系数的影

响,并与单洞塞消能工进行了比较.

1 组合式洞塞消能工

组合式洞塞消能工由主洞塞和辅洞塞两部分组成,如图 1 所示.主洞塞直径为 D_1 ,辅洞塞直径为 D_2 ,辅洞塞的长度为 $0.5D_1$,辅洞塞后缘与主洞塞前缘的距离亦为 $0.5D_1$.设 1-1 断面的流速为 v_1 ,压强为 p_1 ;2-2 断面的流速为 v_2 ,压强为 p_2 ;3-3 断面的流速为 v_3 ,压强为 p_3 , $v_1 = v_3$.设主洞塞内的最小压强为 $p_{\min}$,1-1 断面和 3-3 断面的压强水头差为 ΔH ,则组合式洞塞的水头损失系数为

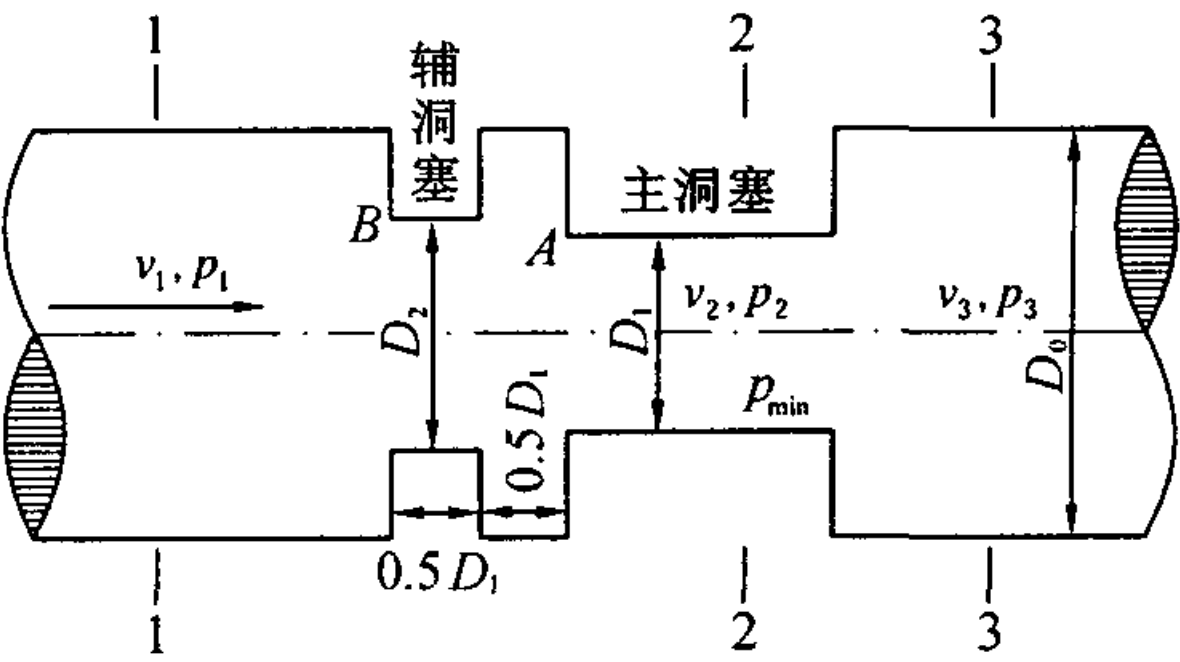


图 1 组合式洞塞示意图

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(50325928); 国家自然科学基金资助项目(50209010)
作者简介: 田忠(1977—),男(土家族),湖南保靖人,博士研究生,从事工程水力学研究.

$$\xi = \frac{\Delta H}{v_1^2/(2g)} \quad (1)$$

ξ 的大小反映了消能工的消能率, ξ 越大, 消能率越高, 反之则越小. 定义主洞塞内的最小压强系数为

$$c_d = \frac{(p_2 - p_{\min})/(\rho g)}{v_2^2/(2g)} \quad (2)$$

c_d 的大小反映了洞塞抵抗空蚀破坏的能力, c_d 越小, 洞塞内的最小压强与平均压强之差越小, 洞塞越不易空化.

为了确定不同的洞塞(主、辅洞塞)收缩比对 ξ 及 c_d 的影响, 以便与单洞塞的水力特性进行比较, 本文采用标准 $k-\epsilon$ 轴对称模型计算不同断面收缩比下的 ξ 及 c_d .

2 计算模型的验证

2.1 基本方程

$k-\epsilon$ 模型控制方程组即由时均的连续性方程、动量方程、紊动能方程和紊动能耗散率方程组成, 在柱坐标系统下, 可以写成统一的形式^[6]:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho r U \Phi) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho r V \Phi) = \frac{\partial}{\partial x} \left(r \Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(r \Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) + r S_\Phi \quad (3)$$

式中: Φ 是通用变量; Γ_Φ 是扩散系数; r 为径向坐标; ρ 为水的密度; U, V 分别表示纵向和径向的时均速度(即 x 方向和 r 方向); S_Φ 为源项. Φ, Γ_Φ 和 S_Φ 在不同的方程中的具体形式如表 1 所示, 其中,

$$G = \mu_t \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{V}{r} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 \right\}$$

是紊动能方程中的生成项; $\mu_e = \mu_1 + \mu_t = \mu_1 + C_\mu K^2/\epsilon$ 是有效黏度系数(μ_1 和 μ_t 分别是分子黏度系数和紊动黏度系数). 模化后模型常数的取值为:

$C_\mu = 0.09, C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.85, \sigma_K = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3$. 事实上 $C_{2\epsilon}$ 是 ϵ 方程里产生破坏项的一项系数, 有资料表明, 在计算自由射流时, 该参数对射流的扩张率的影响较大, Rodi 给出了 $C_{2\epsilon}$ 的修正公式, $C_{2\epsilon} = 1.92$

$- 0.0667f$, 其中 $f = \left| \frac{\delta}{\Delta U_m} \left(\frac{\partial U_a}{\partial x} - \left| \frac{\partial U_a}{\partial x} \right| \right) \right|^{0.2}$, 此修

表 1 通用方程中的 Φ, Γ_Φ 和 S_Φ

方 程	Φ	Γ_Φ	S_Φ
连续方程	1	0	0
x 方向的动量方程	U	μ_e	$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_e \frac{\partial V}{\partial x} \right)$
r 方向的动量方程	V	μ_e	$-\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_e \frac{\partial V}{\partial r} \right) - \frac{2\mu_e V}{r^2}$
紊动能方程	k	μ_e/σ_K	$G - \rho \epsilon$
紊动能耗散率方程	ϵ	μ_e/σ_ϵ	$\frac{\epsilon}{K} (C_1 G - C_2 \rho \epsilon)$

正公式的主要想法是反映射流轴线流速 U_a 减小时, $C_{2\epsilon}$ 的数值也相应减小.

2.2 边界条件

计算区域为洞塞进口前 2 倍洞径到洞塞出口后 6 倍洞径范围内, 其边界条件如下:

a. 入流边界: 为速度入流边界条件, 入流速度根据文献[2]的实测资料确定, 紊动能和紊动能耗散率的边界值由式(4)确定:

$$K_{in} = 0.0144 U_{in}^2, \quad \epsilon_{in} = K_{in}^{1.5}/(0.5R) \quad (4)$$

式中: R 为泄洪洞的半径.

b. 出流边界: 在计算域的出口按时均流条件给出各变量的边界条件, 可以近似认为水流已充分发展, 由此可以给出出流表面上各参变量法向梯度为零的边界条件.

c. 壁面边界: 采用壁函数法, 这一边界条件可采用经验性的定律由壁面处的边界条件导出, 本文采用的是对数率.

d. 对称面边界: 在对称面边界上, 给出法向梯度为零和法向速度为零的条件.

2.3 计算结果与实测值的比较

图 2 为压力水头计算值与文献[2]中实测值的比较, 横坐标 X 表示隧洞断面位置, 纵坐标 H 为测压管水头. 从图 2 中可以看出, 计算值与实测值吻合良好, 说明该模型可以计算洞塞消能工的水力参数.

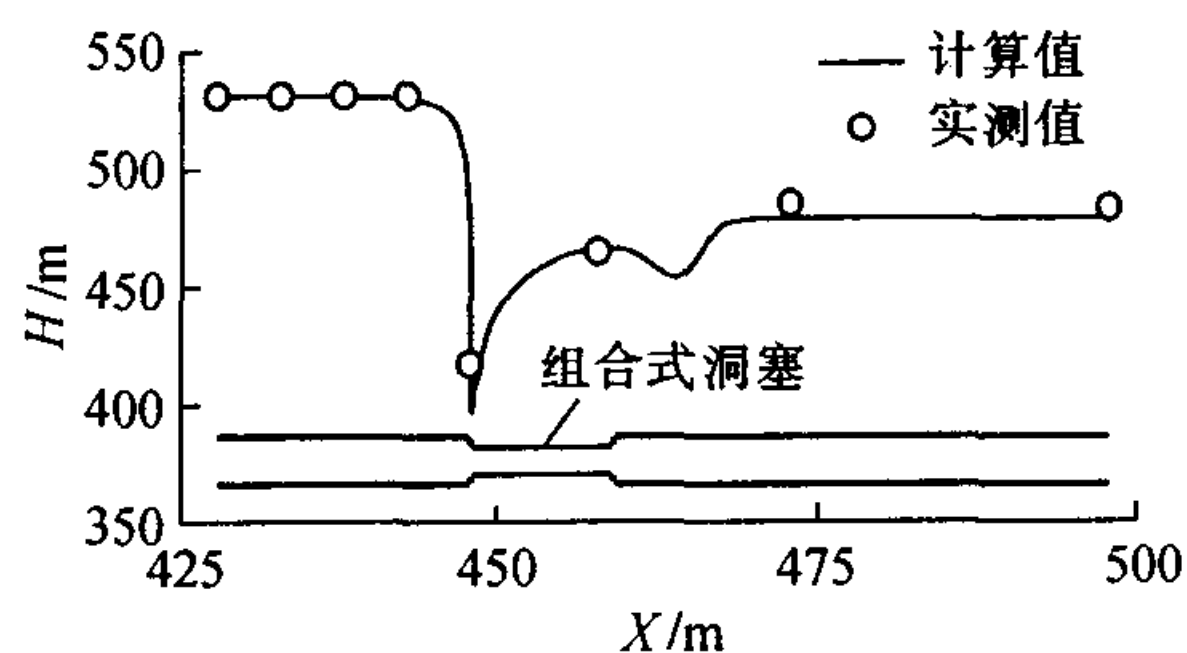


图 2 计算压力水头与实测压力水头比较

3 组合式洞塞消能工的计算结果及分析

鉴于该计算模型的适用性, 笔者用该模型计算了不同收缩比的组合式洞塞的流场, 进口流速均取 4 m/s, 其他边界条件由 2.2 节规定, 据此计算了组合式洞塞消能工的水头损失系数 ξ 及主洞塞内的最

小压强系数 c_d , 并与单洞塞情况下的相应值进行了比较. 图 3 与图 4 为洞塞面积收缩比为 0.3 的情况下计算出的洞塞压强沿程分布, 图 4 中辅洞塞与主洞塞的直径比 $D_2/D_1 = 1.2$, 从图 4 可以看出, 最小压强集中在图 1 所示的 A, B 两点, 最小压强比单洞塞情况下的要大, 从而使最小空化数得以提高. 为了获得不同洞塞收缩比、不同 D_2/D_1 情况下的组合式洞塞的 ξ 及 c_d , 笔者计算了洞塞面积收缩比分别为 0.2, 0.25, 0.3, 0.4, 0.5 和 D_2/D_1 分别为 1.0, 1.1, 1.2, ..., 1.8 下的 ξ 及 c_d . 图 5 和图 6 是主洞塞面积收缩比为 0.25 时, 不同辅塞直径的组合式洞塞的 ξ 及 c_d , 从图中可以看出, D_2/D_1 在 1.1 ~ 1.3 范围内时, 与单洞塞相比, c_d 急剧减小, 最小仅为单洞塞的 0.4 倍, 而 ξ 的减小程度则较小. 主洞塞面积收缩比为 0.2, 0.3, 0.4 和 0.5 时的计算结果见表 2. 表 2 中的 k_ξ 和 k_{c_d} 分别为相对于单洞塞, 组合式洞塞的 ξ

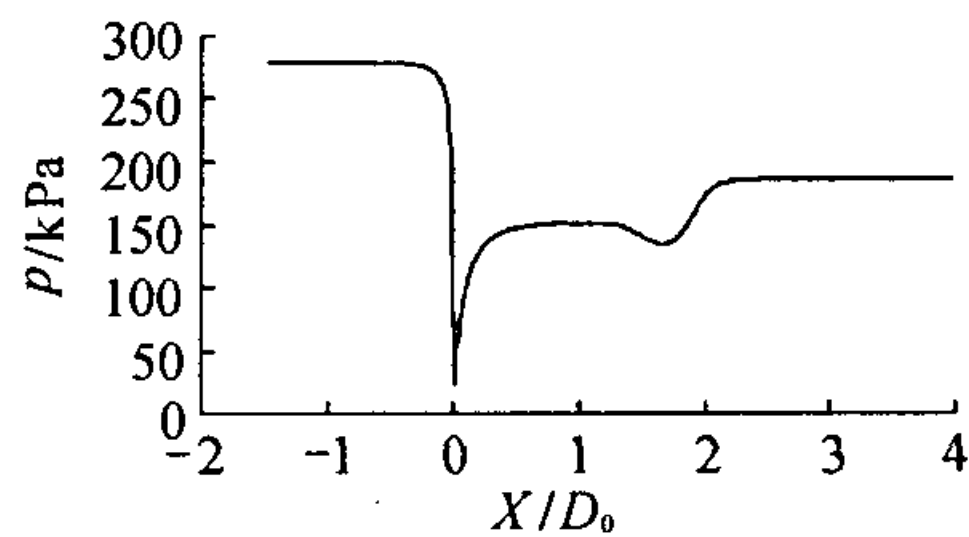


图 3 单洞塞顶壁的压强沿程分布

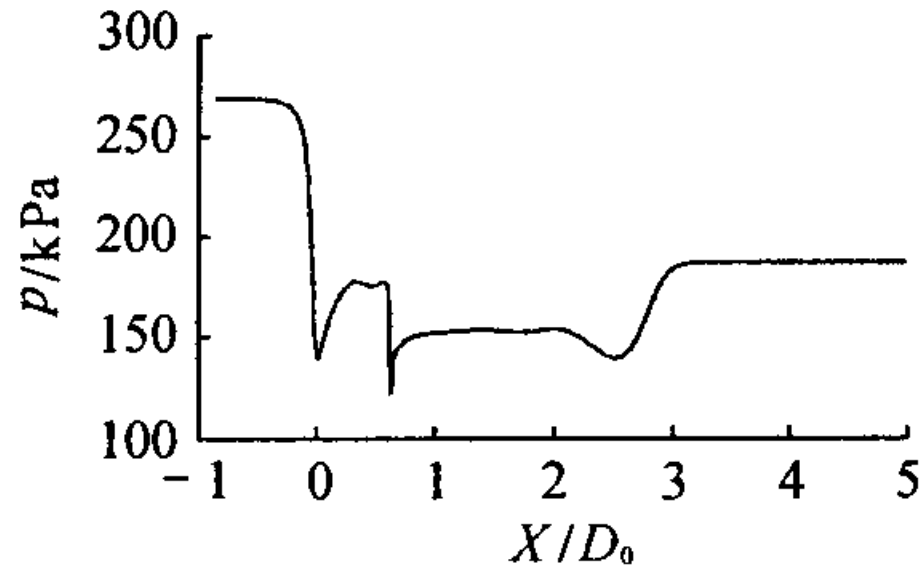


图 4 组合式洞塞顶壁的压强沿程分布

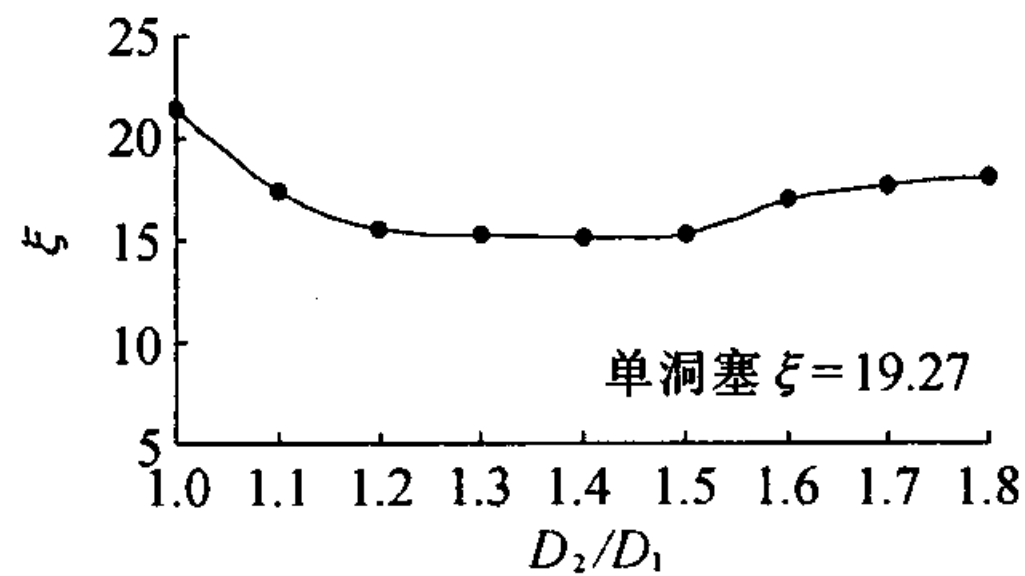


图 5 收缩比为 0.25 时不同辅塞直径下组合式洞塞水头损失系数

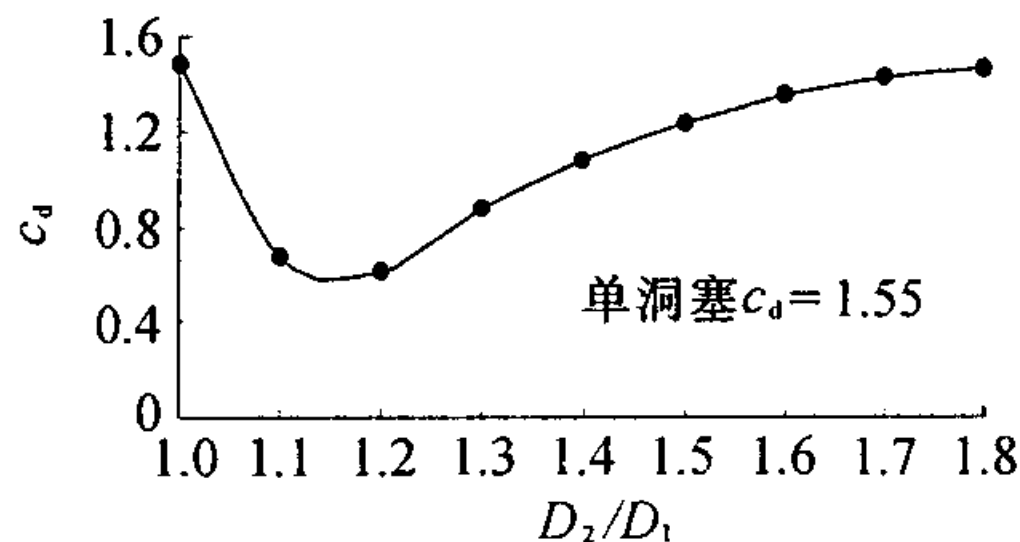


图 6 收缩比为 0.25 时不同辅塞直径下组合式洞塞最小压强系数

和 c_d 的减小程度, 由表 2 可知 $k_\xi = 9.03\% \sim 22.46\%$, $k_{c_d} = 29.43\% \sim 62.39\%$, 表明不同的面积收缩比下, 水头损失的减小程度比压强系数的减小程度小许多, 这说明采用组合式洞塞消能工, 虽会牺牲一定的消能率, 但会大幅度提高洞塞内的最小压强, 从而提高洞塞内的空化数, 增强其抵抗空蚀破坏的能力.

表 2 不同主洞塞面积收缩比下的 ξ 及 c_d

收缩比	洞塞类型	D_2/D_1	ξ	c_d	$k_\xi/\%$	$k_{c_d}/\%$
0.2	单洞塞		33.62	1.55		
0.2	组合洞塞	1.1	29.56	0.68	12.07	56.51
0.2	组合洞塞	1.2	28.18	0.58	16.16	62.39
0.2	组合洞塞	1.3	27.75	0.82	17.45	47.47
0.3	单洞塞		11.39	1.52		
0.3	组合洞塞	1.1	10.37	0.67	9.03	56.29
0.3	组合洞塞	1.2	9.86	0.63	13.43	58.59
0.3	组合洞塞	1.3	9.20	0.90	19.30	40.79
0.4	单洞塞		5.66	1.52		
0.4	组合洞塞	1.1	4.55	0.65	19.68	57.23
0.4	组合洞塞	1.2	4.39	0.76	22.46	50.41
0.4	组合洞塞	1.3	4.48	1.08	20.84	29.43
0.5	单洞塞		2.78	1.50		
0.5	组合洞塞	1.1	2.45	0.60	11.91	60.13
0.5	组合洞塞	1.2	2.27	0.91	18.37	39.21

4 结 论

用 $k-\epsilon$ 模型计算了笔者提出的一种新型组合式洞塞消能工的水力参数. 计算结果表明, 与单洞塞式消能工相比, 组合式洞塞消能工能显著地提高洞塞内的最小压强, 从而增强其抵抗空蚀破坏的能力, 且不会明显降低消能率.

参考文献:

- [1] Russell S O, Ball J W. Sudden-enlargement energy dissipator for Mica dam[J]. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1997 (7): 41—56.
- [2] 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(7): 46—52.
- [3] Dong Jianwei, Xu Weilin, Deng Jun. Numerical simulation of turbulent flow through throat-type energy dissipators[J]. Journal of Hydrodynamics(Ser. B), 2002(3): 135—138.
- [4] 夏庆福, 倪汉根. 洞塞消能的数值模拟[J]. 水利学报, 2003(8): 37—42.
- [5] Katz J. Cavitation phenomena within regions of flow separation [J]. J fluid Mech, 1984, 140: 397—436.
- [6] Rodi W. Turbulence models and their application in hydraulics [M]. Delft, Netherlands: IAHR Publication, 1980. 26—33.

(收稿日期: 2004-11-05 编辑: 骆超)