

# 底流消力池墩栅联合消能工水力特性数值模拟研究

周凯<sup>1,2</sup>, 牧振伟<sup>1,2</sup>, 周镇<sup>1,2</sup>, 赵乾<sup>1,2</sup>

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆乌鲁木齐 830052; 2. 新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830052)

**摘要:** 针对低弗汝德数底流消力池消能不充分、流态紊乱及底板时均动水压强过大而造成失稳破坏的问题, 通过采用数值模拟的方法, 对传统消力池内分别加设趾墩-悬栅、消力墩-悬栅、T型墩-悬栅联合辅助消能工, 分析各联合辅助消能工的水力特性及消能规律。结果表明: 消力池内布置3种墩栅联合辅助消能工后, 相较于传统消力池, 水面流态趋于平稳, 消力池底板最大时均动水压强分别减小了50%、25%、12.5%, 消能率分别提高了3.13%、6.06%、5.24%; 相较于同种墩型消力池(未加悬栅), 消力池底板最大时均动水压强分别减小了20%、25%、12.5%, 消能率分别提高了0.17%、3.05%、0.39%; 趾墩、消力墩、T型墩与悬栅辅助消能工联合运用具有优势叠加效应。本研究可为解决同类底流消能问题提供参考。

**关键词:** 底流消能; 消力池; 联合辅助消能工; 时均动水压强; 消能率; 数值模拟

中图分类号: TV653<sup>+</sup>.1; TV135.2 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2023)02-0142-07

## Numerical simulation of hydraulic characteristics of pier – fence joint dissipators in underflow dissipation basins

ZHOU Kai<sup>1,2</sup>, MU Zhenwei<sup>1,2</sup>, ZHOU Zhen<sup>1,2</sup>, ZHAO Qian<sup>1,2</sup>

(1. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Hydraulic Engineering Safety and Water Disaster Prevention, Urumqi 830052, China)

**Abstract:** To address the problems of insufficient energy dissipation, turbulent flow patterns and unstable damage caused by excessive dynamic water pressure on the bottom plate of underflow dissipation basins with low Froude number, the conventional dissipation pools were equipped with joint auxiliary energy dissipators such as toe pier – suspended fence, dissipation pier – suspended fence, T-shaped pier – suspended fence, then the hydraulic characteristics and energy dissipation law of each joint auxiliary energy dissipator was analyzed using numerical simulation method. The results show that after the arrangement of the joint auxiliary energy dissipators in the dissipation basin, the water surface flow pattern tends to be smoother compared with the conventional dissipation basin, the maximum hourly mean dynamic water pressure on the bottom plate of the underflow dissipation basin is decreased by 50%, 25% and 12.5%, and the energy dissipation rate is increased by 3.13%, 6.06% and 5.24%, respectively; compared with the same pier-type dissipation basin (without suspended fence), the maximum hourly mean dynamic water pressure on the bottom plate of the dissipation basin is reduced by 20%, 25% and 12.5%, and the energy dissipation rate is increased by 0.17%, 3.05% and 0.39%, respectively. It is concluded that the combined use of auxiliary energy dissipators of toe piers, dissipation piers, T-shaped piers and suspended fence has a superposition of advantages, and the study can provide a new way of thinking for

收稿日期: 2022-07-07; 修回日期: 2022-10-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(52269019、51469031); 新疆维吾尔自治区高校科研计划创新团队项目(XJEDU2017T004)

作者简介: 周凯(1997—), 男, 河南信阳人, 硕士研究生, 研究方向为水力学及河流动力学。

通讯作者: 牧振伟(1973—), 男, 河南南阳人, 教授, 博士生导师, 研究方向为水力学及河流动力学。

similar underflow energy dissipation problems.

**Key words:** underflow energy dissipation; energy dissipation basin; auxiliary energy dissipator; hourly mean dynamic water pressure; energy dissipation rate; numerical simulation

## 1 研究背景

泄洪建筑物底流消能对环境的影响较小,适用范围广,其原理是高速下泄水流通过消力池内相互混掺、剪切、剧烈紊动而耗散水体中大部分能量<sup>[1-3]</sup>。但对于低水头、大单宽流量的底流消能而言,传统底流消力池往往会出现消能不充分、临底流速过大、流态紊乱等不利因素,这些不利因素在泄流过程中容易造成底板失稳破坏、冲刷破坏以及空蚀破坏等典型水力学问题<sup>[4-6]</sup>。对此,国内外学者进行了大量研究,提出在消力池内加设趾墩<sup>[7]</sup>、消力墩<sup>[8]</sup>、T型墩<sup>[9]</sup>以及悬栅<sup>[10-12]</sup>等辅助消能工方案,有效解决了部分工程水力学问题。例如,龙建等<sup>[13]</sup>、王亚洲等<sup>[14]</sup>、周招等<sup>[15]</sup>、吴战营等<sup>[16]</sup>通过物理模型试验及数值模拟相结合的方法,提出了收缩墩-跌坎、T型墩-尾坎、趾墩-非完全宽尾墩、消力墩-悬栅的新型联合辅助消能工的方案,有效降低了消力池内的水面波动,同时提高了消能率;孙文博等<sup>[17-18]</sup>、高尚等<sup>[19]</sup>通过数值模拟的方法,对趾墩-悬栅消力池及悬栅消力池水力特性进行了研究,得到趾墩-悬栅消力池在降低底板脉动压强及改善水流流态方面均优于悬栅消力池的结论,验证了联合辅助消能工的优势叠加效应;吴战营等<sup>[20-21]</sup>首次提出梯型墩-悬栅消力池,有效解决了单一梯型墩消力池溢水问题。前人的研究成果为墩栅联合消力池水力特性分析提供了理论基础,但由于所研究的墩型

较为单一,缺乏不同墩栅联合消力池之间的试验对比,对于不同墩型与悬栅联合使用的叠加作用尚不明确。另外,消力池内辅助消能工处水流流态紊乱,采用物理模型试验的方法对消力池内临底流速及时均动水压强分布的监测较为困难。故本文选择数值模拟的方法,以新疆某泄洪洞消力池为研究对象,设置3种墩型(趾墩、消力墩、T型墩)分别与悬栅联合运用的方案,通过对比消力池内水流流态、沿程底板流速、时均压强分布状况以及消能率等指标,对比各墩栅联合辅助消能工的水力特性,探究墩栅联合辅助消能工叠加消能的原理,旨在寻求一种较为可靠的联合辅助消能方式。

## 2 模型设计与数值模拟

### 2.1 模型设计

以新疆某水库泄洪洞消力池为研究对象,按照重力相似准则并考虑到模型尺寸及流量的因素构建几何比尺为1:71.3的试验模型。模型引渠段长度为250 mm,横断面尺寸为80 mm×147.5 mm(宽×高);扩散段长度为597.7 mm,扩散角为4.782°;消力池池身段长度为750 mm,横断面尺寸为180 mm×260 mm(宽×高);尾坎高度为55 mm,护坦与消力池同宽,长度为250 mm。各单一辅助消能工与联合辅助消能工的尺寸与布置位置均相同,流量选用5.45 L/s。传统消力池体型及各联合辅助消能工布置见图1,表1为试验方案。

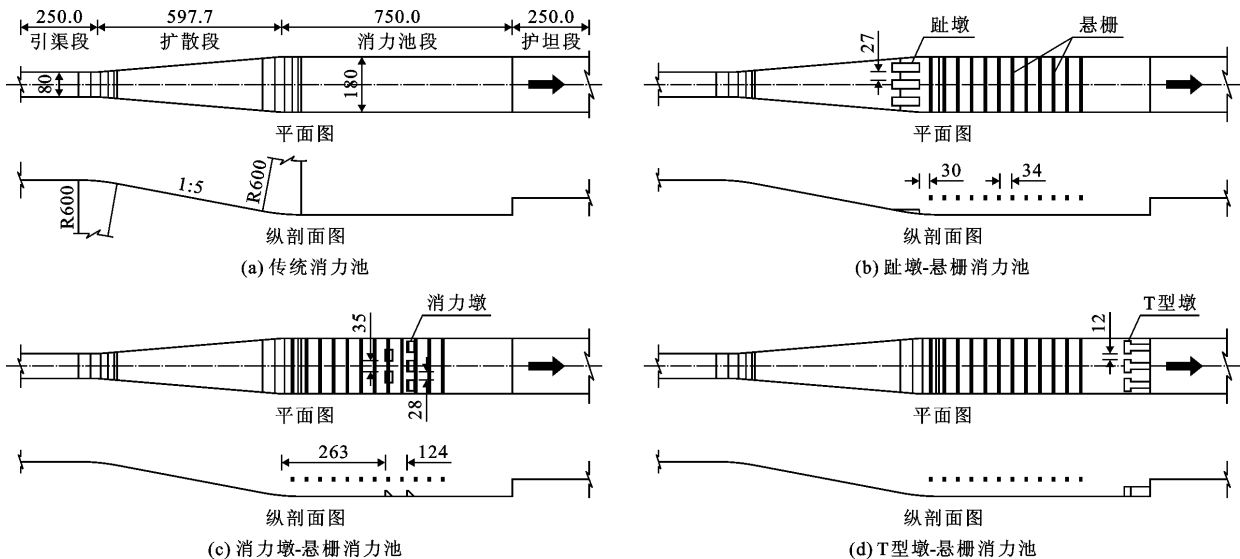


图1 传统消力池体型及各联合辅助消能工布置(单位:mm)

表1 模型试验方案

序号	辅助消能工型式	数量(悬栅+墩)	模型尺寸(长×宽×高)/mm
方案1	无辅助消能工		
方案2	悬栅	12	180×6×10
方案3	趾墩	3	80×24×15
方案4	消力墩	3	35×24×20
方案5	T型墩	3	前墩:44×22×33,纵墩:66×22×33
方案6	趾墩-悬栅	12+3	同单一辅助消能工
方案7	消力墩-悬栅	12+3	同单一辅助消能工
方案8	T型墩-悬栅	12+3	同单一辅助消能工

## 2.2 数值模拟方法

2.2.1 模型网格划分 为了更好地模拟消力池内的水力特性,消力池模型网格单元全部采用六面体网格,在加设辅助消能工的位置采用局部网格加密的方法,在消力池段近底部布置20层细网格,以便捕捉边界层流态。

表2为消力池模型网格质量,图2为传统底流消力池及加设各联合辅助消能工的消力池数值模型

网格划分,加设单一辅助消能工与加设联合辅助消能工的模型网格划分方法类似,由于篇幅关系,这里不做展示。

表2 消力池模型网格质量(不包含趾墩型消力池)

网格节点数/10 <sup>4</sup>	网格总质量	最小角	行列式(3×3×3)	纵横比
80~100	≥0.53	≥33°	≥0.6	≤12

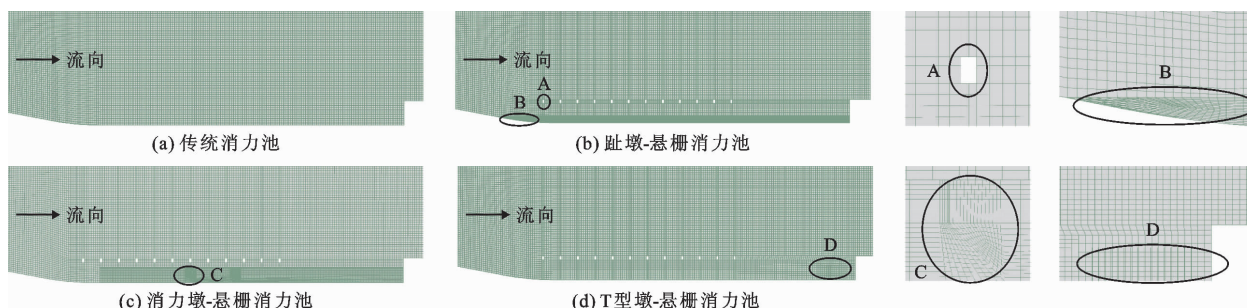


图2 传统消力池及加设各联合辅助消能工的消力池模拟区网格划分

2.2.2 控制方程 VOF(volume of fluid)模型适用于分层流和解决需要追踪自由表面的问题,在不同流体域中共用着一组方程来计算各个流体域占整个计算域体积的百分比。

在水气二相流中,规定水体积分数为 $\alpha_n$ ,当 $\alpha_n = 0$ 时,表示单元内没有水相;当 $\alpha_n = 1$ 时,表示单元内完全充满水相;当 $\alpha_n$ 在0~1之间时,表示单元内存在水相,对于单元内水气二相流而言,水和气的体积分数之和为1。根据 $\alpha_n$ 的值,就可以实现对计算区域里特征参数的确定。

数值计算选用RNG  $k-\varepsilon$  (generalized renormalization group  $k-\varepsilon$ )湍流模型<sup>[22]</sup>,该模型考虑了墩栅联合消力池中的旋转及旋流流动情况,能够更好地表示出受强剪切力的水流流动,该湍流模型已成功运用于水工结构的数值模拟<sup>[23-24]</sup>。控制方程见方

程式(1)~(9)。

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:

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

紊动能  $k$  方程:

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

紊动耗散率  $\varepsilon$  方程:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \sigma_\varepsilon (\mu + \mu_t) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] +$$

$$C_{\varepsilon 1}^* \cdot \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

$$G_k = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (5)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

$$C_{\varepsilon 1}^* = C_{\varepsilon 1} - \frac{\eta(1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta\eta^3} \quad (7)$$

$$\eta = (2S_{ij}S_{ij})^{\frac{1}{2}} \frac{k}{\varepsilon} \quad (8)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (9)$$

式中:  $u_i$ 、 $u_j$  为流体时均流速分量, m/s;  $x_i$ 、 $x_j$  为坐标分量, m;  $t$  为时间, s;  $\mu$  为流体运动黏滞系数,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $\rho$  为流体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $p$  为混合流体的压强, Pa;  $k$  为紊动能,  $\text{m}^2/\text{s}^2$ ;  $\varepsilon$  为流体紊动耗散率,  $\text{m}^2/\text{s}^3$ ;  $G_k$  为湍动能产生项;  $\mu_t$  为混合流体的紊动黏滞系数,  $\text{m}^2/\text{s}$ ; 模型中的常量分别取值为  $\eta_0 = 4.38$ 、 $\beta = 0.012$ 、 $C_\mu = 0.0845$ 、 $C_{\varepsilon 1} = 1.42$ 、 $C_{\varepsilon 2} = 1.68$ ;  $\sigma_k$  与  $\sigma_\varepsilon$  均取 1.39。

### 2.2.3 边界条件设置

(1) 消力池进口采用流速进口边界, 流速设定为  $v = 2.27 \text{ m/s}$ 。

(2) 消力池出口采用标准大气压出口边界。

(3) 对黏性底层采用标准壁面函数法<sup>[25]</sup> 设定固壁边界条件。

## 3 结果与分析

### 3.1 数值模型验证

为确保数值模型模拟结果的可靠性, 根据物理模型试验测试结果对传统消力池的数值模拟计算进行验证。图 3 为传统消力池水面线、底板时均动水压强及临底流速 3 项水力要素的物理模型试验与数值模拟结果对比。

分析图 3 可知, 在  $y = 0$  (消力池中心线) 截面处, 数值模拟结果与模型试验值相比, 水深最大误差为 7.5%; 底板时均动水压强最大误差为 9.0%; 临底流速最大误差为 8.6%。对比结果表明, 数值模拟结果的相对误差均小于 10%, 说明所建立的数值模型能有效地模拟消力池内的实际流态, 具有较高的可靠性。

### 3.2 水面流态及底板流速分布

数值模拟中选取掺气浓度为 70% 的等值面为水流表面, 图 4 为各试验方案消力池流态及底板速度分布模拟结果。

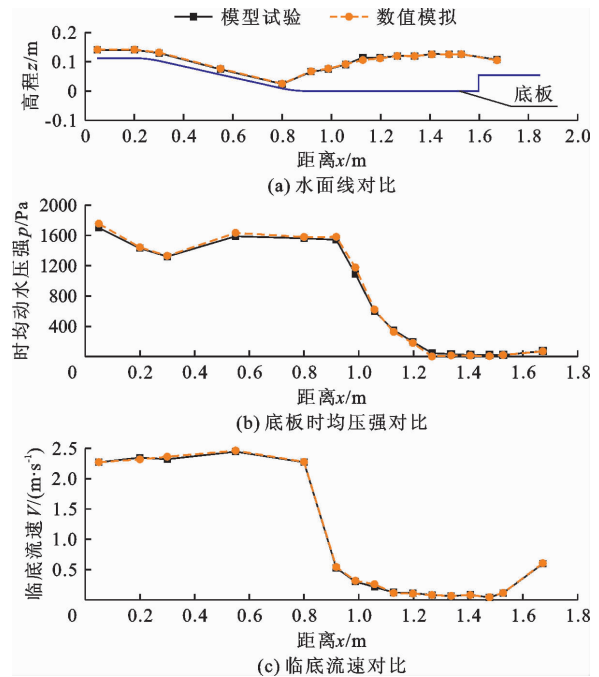


图 3 传统消力池主要水力要素数值模拟与模型试验结果对比

对于未加设辅助消能工的传统消力池 (图 4 (a)), 由于尾水位低于跃后共轭水深, 因而将产生远驱式水跃<sup>[26]</sup>, 消能效果差, 入池底板流速最大达到 1.8 m/s 且流速分布集中。图 4(b) ~ 4(e) 为 4 种单一辅助消能工的模拟结果, 其中, 悬栅消力池稳水效果较为显著, 入池水流绕栅运动, 提高了消力池池首水深, 入池底板流速最大为 1.6 m/s, 比传统消力池减小了 11% (图 4(b)); 趾墩消力池对于降低入池流速效果显著, 入池水流被趾墩分散为多股小型水流, 水流间冲击碰撞, 从而增加了池首水深, 入池底板流速最大为 1.4 m/s, 较传统消力池降低了 22% (图 4(c))。

图 4(f) ~ 4(h) 为 3 种联合辅助消能工的模拟结果。由图 4(f) 可以看出, 入池水流经过趾墩分流及悬栅稳流的双重作用后, 池首水深较趾墩消力池略有增加, 其水面流态平稳, 水跃位置提前, 池内水流绕栅运动, 掺气充分, 水面线整体下降, 跃后水面平稳, 入池底板流速最大为 1.2 m/s, 相较于传统消力池减小了 33%, 较单一趾墩消力池减小了 14%; 由图 4(g) 可以看出, 消力墩-悬栅消力池壅水效果显著, 入池底板流速最大达到 1.6 m/s, 相较于传统消力池及消力墩型消力池均降低了 11%, 且底板流速分布更为均匀; 由图 4(h) 可以看出, 消力池前半区域水流绕栅运动, 水流达到 T 型墩后, 墩前水位稍有上升, 池内整体水深较 T 型墩消力池有所减小, 入池底板流速最大为 1.6 m/s, 相较于传统消力池



及单一 T 型墩消力池均降低了 11%。

就单一辅助消能工而言,悬栅对于改善入池水流流态效果较好,入池水流经过悬栅的阻挡和碰撞,加剧了水流紊动能的耗散,有效降低了消力池的最大水深,起到了平稳水流、改善流态的作用,这点与朱玲玲等<sup>[27]</sup>所得研究结论基本一致;趾墩对于减小入池底板流速效果较好,入池水流在趾墩的分散及挑射作用下,呈纵向拉伸、横向收缩、主流分散状态,从而加剧了池内水流主体之间的剪切、碰撞,降低了水流主体对消力池底板的冲击作用;消力墩墩前壅水效果较好,下潜水流与墩前水流激烈相冲而耗散

了部分能量,相较于传统消力池,其水跃发生位置稍有提前,紊动更为剧烈,墩后水流流态平稳且与下游尾水位自然衔接;T 型墩对于加剧池内整体水流紊动效果较好,利用前墩产生强迫水跃有效增加了前墩与尾坎之间的紊动混掺强度,而且 T 型墩自身的局部阻力也致使其与周围水体发生剪切碰撞而消除了部分能量。

上述模拟对比结果表明,墩栅联合辅助消能工均可叠加其各自单一辅助消能工的优点,对于改善消力池水流流态及减小入池底板流速要优于相应的单一墩型消力池。

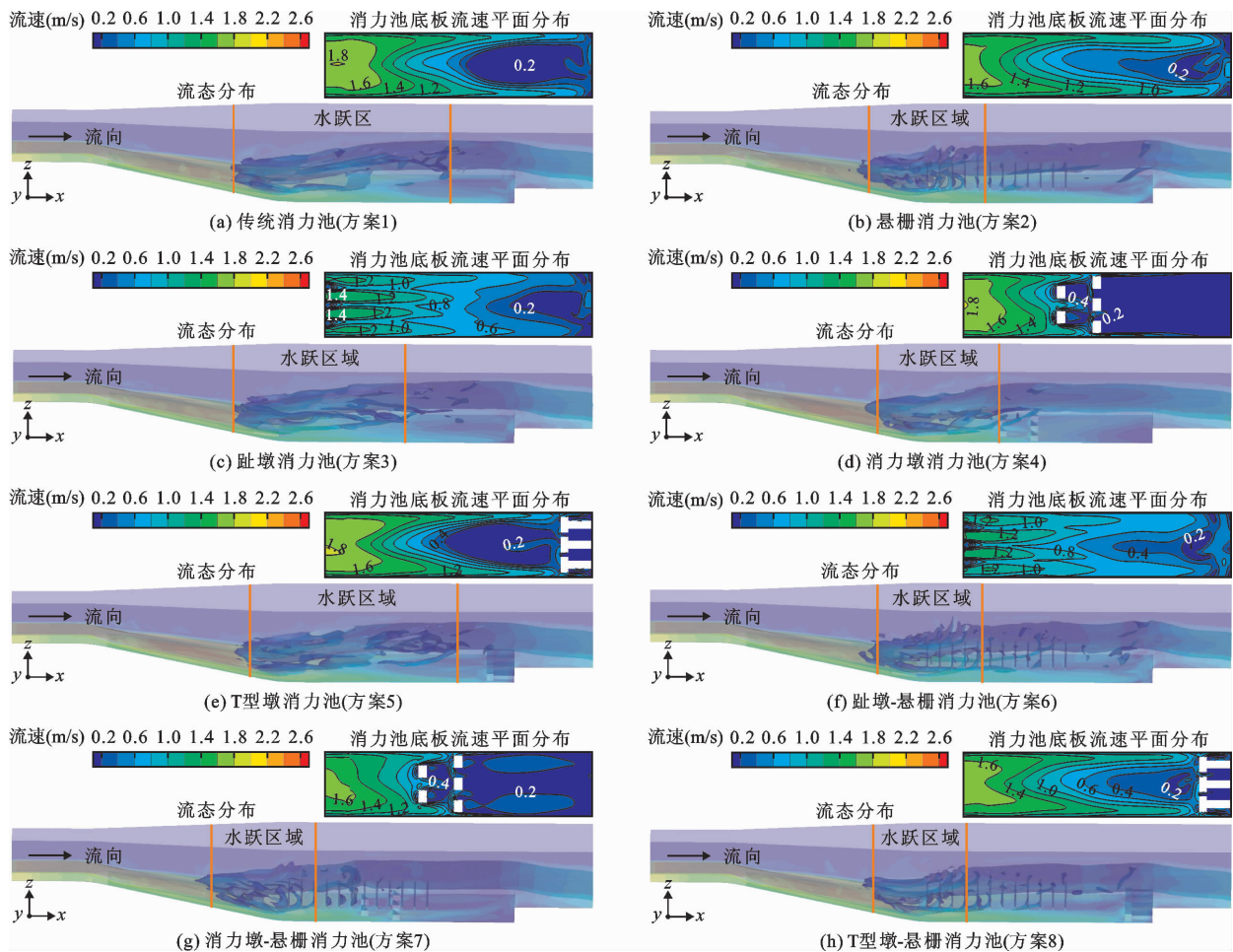


图 4 各试验方案消力池流态及底板速度分布模拟结果

### 3.3 底板时均动水压强分布

入池水流在惯性力作用下,容易对消力池前半区底板产生较大的冲击力,由于消力池前半区水流紊动剧烈,能量耗散较为集中,局部时均动水压强过大容易对消力池底板造成破坏,因此对于消力池底板时均动水压强的研究至关重要。图 5 为各试验方案消力池底板时均动水压强等值线分布模拟结果。

图 5(a) 显示,传统消力池时均动水压强集中分

布在消力池前半区域内,最高可达 1 600 Pa,主要是由于水流主体从扩散段进入消力池池身段携带大量动能,对消力池底板前半区产生较强的冲击力。图 5(b)~5(e) 为 4 种单一辅助消能工的模拟结果,其中,趾墩对于消力池底板时均动水压强的降低作用最为显著,最大动水压强相较于传统消力池降低了 37.5% (图 5(c));悬栅消力池次之,最大动水压强相较于传统消力池降低了 12.5% (图 5(b));消力

墩消力池(图 5(d))及 T 型墩消力池(图 5(e))底板最大时均动水压强与传统消力池基本一致。

图 5(f)~5(h)为 3 种联合辅助消能工的模拟结果。由图 5(f)可以看出,高速入池水流经过趾墩分散及挑射作用,主流划分为多股小型水流,水流绕悬栅冲击碰撞,进一步削弱了水流对底板的冲击作用,最大时均动水压强为 800 Pa,相较于传统消力池降低了 50%,相较于单一趾墩消力池降低了 20%;由图 5(g)可以看出,由于消力墩-悬栅的壅水作用,墩前水深增加,降低了高速入池水流对底板的冲击作用,水流冲击区集中在墩前,最大时均动水压强为 1 200 Pa,相较于传统消力池及单一消力墩消力池均降低了 25%,墩后底板时均动水压强基本稳定为

100 Pa;由图 5(h)可以看出,T 型墩具有阻流和分流作用,但由于其设置于尾坎处,故对高速入池水流冲击区的影响较小,消力池底板的最大时均动水压强为 1 400 Pa,相较于传统消力池及 T 型墩消力池均降低了 12.5%。

综上所述,趾墩辅助消能工对于降低消力池底板时均动水压强的效果优于悬栅,消力墩及 T 型墩辅助消能工对于降低底板时均动水压强基本未发挥作用,墩栅联合辅助消能工对于降低底板时均动水压强具有叠加作用,这点与高尚等<sup>[19]</sup>研究所得结论基本一致。其中趾墩-悬栅联合辅助消能工方案对于降低消力池底板时均动水压强效果优于其他联合辅助消能工方案。

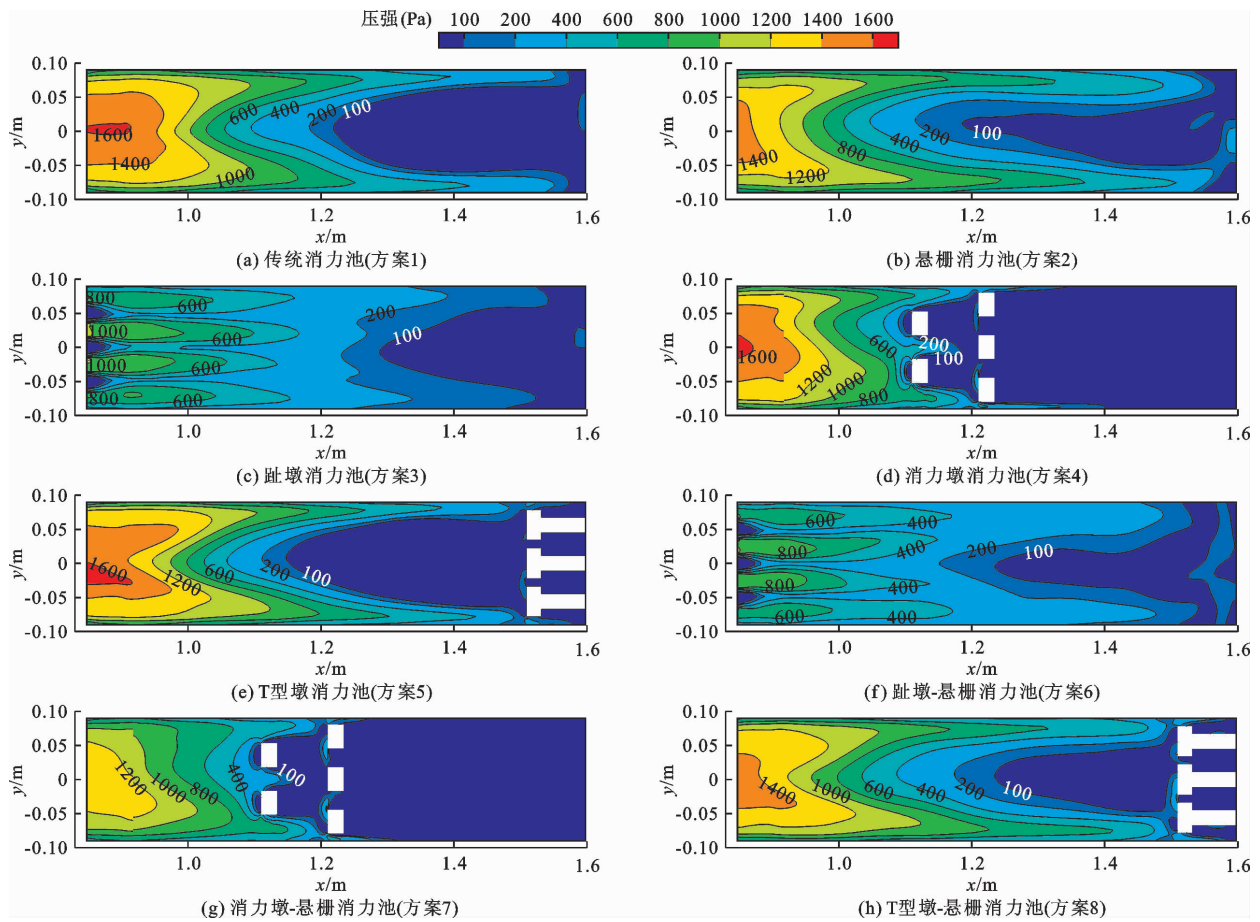


图 5 各试验方案消力池底板动水压强等值线分布模拟结果

### 3.4 消能率

各方案消力池的消能率可反映出不同墩栅联合辅助消能工的消能效果。取消力池进口断面及出口断面为消能前、后能量计算断面,底板平面为基准面,消力池的消能率  $\eta$  计算公式如下:

$$\eta = \frac{E_1 - E_2}{E_1} \times 100\% \quad (10)$$

$$E_1 = Z_1 + h_1 + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} \quad (11)$$

$$E_2 = Z_2 + h_2 + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} \quad (12)$$

式中: $E_1$ 、 $E_2$  分别为消力池进、出口断面的能量水头,m;  $h_1$ 、 $h_2$  分别为消力池进、出口断面的水深,m;  $Z_1$ 、 $Z_2$  分别为消力池进、出口断面与基准面之间的

距离,  $m$ ;  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  为动能修正系数;  $v_1$ 、 $v_2$  分别为消力池进、出口断面的平均流速,  $m/s$ 。

表3为各方案下消力池的消能率计算结果及其与模型试验值对比。由表3可见,传统消力池(方案1)的消能率为65.90%;消力池中布置趾墩-悬栅后(方案6),入池水流在趾墩处分散及挑射,墩后水流紊动加剧,悬栅也起到了平稳水流及消能作用,两种辅助消能工消能效果叠加,比传统消力池的消能率提高了3.13%;消力池内布置消力墩-悬栅后(方案7),消力墩壅水效果明显,同时水流撞击墩体及栅条耗散大量能量,其消能率比传统消力池提高了6.06%;消力池中布置T型墩-悬栅后(方案8),小部分能量经过绕栅运动及撞击栅条而耗散,大部分能量经过在T型墩及尾坎处的局部水体剪切、碰撞及剧烈紊动混掺而消耗,其消能率比传统消力池提高了5.24%。另外,消能率计算结果与模型试验值相比,其绝对误差均不超过1%。上述结果表明,消力池中布置墩栅联合辅助消能工后,其消能率较传统消力池有较显著提升。

表3 各方案消力池消能率计算结果及其与模型试验值对比 %

方案	数模计算值	模型试验值	绝对误差
方案1	65.90	65.91	0.01
方案2	67.82	67.72	0.10
方案3	68.86	68.18	0.68
方案4	68.91	68.99	0.08
方案5	70.75	70.58	0.17
方案6	69.03	68.42	0.61
方案7	71.96	72.21	0.25
方案8	71.14	71.62	0.48

## 4 结论

本文采用数值模拟的方法,对消力池内加设墩栅联合辅助消能工进行研究,拟定趾墩-悬栅、消力墩-悬栅、T型墩-悬栅3种联合辅助消能工方案,并分析了各方案的水力特性及消能效果,得出以下结论。

(1)悬栅消力池可有效改善消力池内水流流态,减小水跃区域及水面翻滚强度;趾墩消力池对于减小底板时均动水压强效果最为显著,最大动水压强较传统消力池降低了37.5%。消力池内加设墩栅联合辅助消能工后,能有效叠加各辅助消能工的

优点。

(2)消力池内加设墩栅联合辅助消能工后,消力池底板最大时均动水压强均有所减小,其中趾墩-悬栅消力池作用最为显著,相较于单一趾墩消力池和传统消力池,其最大时均动水压强分别减小了20%和50%,从而可有效避免消力池底板由于时均压强过大及分布不均所造成的破坏。

(3)在本文设定的试验条件下,传统消力池的消能率为65.90%,消力池内加设趾墩-悬栅、消力墩-悬栅、T型墩-悬栅联合消能工后,其消能率分别增大至69.03%、71.96%、71.14%,提升了消能效果。研究结果可为实际工程设计提供参考。

## 参考文献:

- [1] 刘之平,夏庆福,孙双科. 跌坎底流消能水流再附长度的数值模拟研究[J]. 水力发电学报,2012,31(1):162-167.
- [2] 李一川,牛争鸣,李奇龙,等. 大单宽流量低佛汝德数收缩墩底流消力池的试验研究[J]. 水利水电技术,2018,49(5):77-83.
- [3] 张文静. 突扩式跌坎消力池水力特性实验研究[D]. 泰安:山东农业大学,2017.
- [4] 官夏菲,刁明军,蒋雷,等. 基于SVR-GA算法的跌扩型消力池优化研究[J]. 水力发电学报,2018,37(10):66-75.
- [5] 杜振康,尹进步,朱光明,等. 不同扩散角下单侧渐扩消力池水力特性研究[J]. 水资源与水工程学报,2022,33(2):144-151.
- [6] 洪振国,苟勤章,李海华. 水利工程溢洪道底流消能水力特性分析[J]. 排灌机械工程学报,2022,40(3):258-263.
- [7] 董嘉锐. 低佛氏数下扭面式消能墩消能机理研究[D]. 西安:西安理工大学,2019.
- [8] 杨凡,王均星,陈帅,等. 低弗劳德数水流辅助消能工空蚀问题研究[J]. 水力发电学报,2015,34(2):125-129.
- [9] 钱圣,刘焕芳,林木松,等. T型墩消力池优化设计试验研究[J]. 水利水电技术,2014,45(11):37-40.
- [10] 梁洪儒,谭燕平,刘星,等. 低水头坝消力池内悬栅辅助消能工的优化试验研究[J]. 水力发电学报,2018,37(1):79-86.
- [11] 蒋键楠,牧振伟,张佳祎. 消力池内双层悬栅对消能效果影响试验研究[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(3):157-160.
- [12] 蒋键楠,牧振伟,张佳祎,等. 双层悬栅消力池的水力特性数值模拟[J]. 南水北调与水利科技,2016,14(1):129-135.
- [13] 龙建,牛争鸣,李奇龙. 增设收缩墩后的跌坎消力池三维流场研究[J]. 长江科学院院报,2020,37(1):67-72.
- [14] 王亚洲,王均星,周招,等. 新集水电站泄洪消能防冲刷优化研究[J]. 中国农村水利水电,2019,60(8):197-203.

(下转第156页)



- [25] 李江,柳莹,何建新.新疆碾压式沥青混凝土心墙坝筑坝技术进展[J].水利水电科技进展,2019,39(1):82-89.
- [26] 汪正兴.骨料与沥青黏附性评价方法及水工沥青混凝土长期水稳定性评估研究[D].北京:中国水利水电科学研究院,2020.
- [27] 高博.水损害对水工沥青混凝土斜坡稳定性的影响研究[D].太原:太原理工大学,2021.
- [28] 国家能源局.水工碾压式沥青混凝土施工规范 DL/T 5363—2016 [S].北京:中国电力出版社,2016.
- [29] 国家能源局.水工沥青混凝土试验规程 DL/T 5362—2018 [S].北京:中国电力出版社,2018.
- [30] 张文朝,顾雪平.应用变异系数法和逼近理想解排序法的风电场综合评价[J].电网技术,2014,38(10):2741-2746.
- [31] 张朝飞,黄川友,殷彤,等.改进的逼近理想解排序法在地表水水质综合评价中的应用[J].水电能源科学,2018,36(4):37-40+48.
- [32] 吴森.花岗岩沥青混合料路用性能研究[J].山东交通科技,2016(2):57-60

(上接第 148 页)

- [15] 周招,王均星,杨凡,等.角木塘水电站非完全宽尾墩联合消能试验研究[J].武汉大学学报(工学版),2018,51(9):760-765.
- [16] 吴战营,牧振伟.辅助消能工联合运用试验研究及数值模拟[J].中国农村水利水电,2013,38(7):115-121.
- [17] 孙文博,牧振伟,高尚.趾墩悬栅联合消能紊动及荷载特性数值模拟[J].长江科学院院报,2020,37(1):73-78.
- [18] 孙文博,牧振伟,高尚.低弗劳德数趾墩悬栅联合消能工数值模拟[J].水电能源科学,2019,37(7):81-85.
- [19] 高尚,牧振伟,俞晓伟.趾墩-悬栅消力池水力特性及消能效果研究[J].水电能源科学,2021,39(6):108-111.
- [20] 吴战营,牧振伟.消力池内悬栅辅助消能工优化试验[J].水利水电科技进展,2014,34(1):27-31.
- [21] 吴战营.消力池内辅助消能工试验研究及数值模拟[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2013.
- [22] 王海军,张凡,李会平.溢洪道泄流临底流速仿真模拟研究[J].水资源与水工程学报,2018,29(5):128-132.
- [23] LI Shicheng, ZHANG Jianmin. Numerical investigation on the hydraulic properties of the skimming flow over pooled stepped spillway[J]. Water, 2018, 10(10): 1478.
- [24] ZHANG Wenchuan, WANG Junxing, ZHOU Chuangbing, et al. Numerical simulation of hydraulic characteristics in a vortex drop shaft[J]. Water, 2018, 10(10): 1393.
- [25] 罗凯文,杨易,谢壮宁.基于  $k-\varepsilon$  模型模拟平衡态大气边界层的比较研究[J].工程力学,2018,35(2):21-29.
- [26] 刘沛清,冬俊瑞.消力池及辅助消能工设计的探讨[J].水利学报,1996,40(6):48-56.
- [27] 朱玲玲,牧振伟,杨力行.悬栅消能工均匀正交设计及投影寻踪回归试验研究[J].水资源与水工程学报,2014,25(6):210-214.

