

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20222597

# 格栅式底流消能掺气特性研究

葛亚飞<sup>1,2</sup>, 邱 勇<sup>1</sup>, 何沛山<sup>3</sup>, 普进兵<sup>1</sup>, 和云秋<sup>1</sup>

(1. 云南农业大学水利学院, 云南 昆明 650201; 2. 南水北调东线江苏水源有限责任公司宝应站管理所, 江苏 扬州 225000; 3. 昆明红昭水利水电工程设计咨询有限公司, 云南 昆明 650020)

**摘要:** 对于底流消能, 格栅的布置能够缩短消力池长度, 使其更容易适应地形条件的变化。为此, 通过 FLOW-3D 中的掺气模型对圆孔  $\Gamma$  形格栅式消力池内水气两相流进行数值模拟。结果表明, 纵向临底掺气浓度沿程递减(由 31.3% 减小到 8.0%), 在格栅位置出现明显下降, 栅前(“6 断面”)临底空穴数最小为 5.6, 格栅附近空穴数均在 9.0 左右, 栅后空穴数远大于 9.0; 栅前沿轴线方向近底气泡尺寸沿程增大(由 0.9 mm 增大到 8.1 mm), 栅后近底板气泡尺寸则沿程减小(由 1.6 mm 减小到接近 0 mm); 流速较大区域较小直径的气泡在掺气减蚀中起主要作用, 对混凝土固体边界的保护作用明显, 包括格栅在内的消力池结构不易发生空蚀破坏。

**关键词:** 气泡尺度; 湍动强度; 掺气减蚀; 底流消能; 数值模拟

**中图分类号:** TV135 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)11-0099-05

## 1 引言

高速水流泄水建筑物, 过流面常遭空蚀破坏。当掺气浓度达到 2%~3% 时, 空蚀破坏减轻; 当掺气浓度达到 5%~7% 时, 空蚀现象基本不发生<sup>[1-2]</sup>。但过水建筑物在较高掺气浓度下发生破坏以及小于 2%~3% 未发生破坏的情况均有发生, 如黄河三门峡水利枢纽的泄水建筑物经论证可行后, 在运行期间发现底孔、双层孔的底板和侧墙等均遭到严重破坏<sup>[3]</sup>; 而鲁布革水电站左岸泄洪洞的下游较远处, 掺气浓度仅为 0.4%, 但有明显的减蚀效果<sup>[4]</sup>。因此, 陈先朴等<sup>[5]</sup>提出了掺气减蚀小气泡保护作用的新概念, 即高速水流下泄时, 小直径的微小气泡在掺气减蚀中起主要作用, 无需较高的掺气浓度即可达到掺气减蚀的保护作用; 许唯临<sup>[6]</sup>也指出决定减蚀效果的指标不仅仅是掺气浓度, 水中气泡对掺气减蚀效果也有着重要的影响。限于试验条件, 较小尺度气泡测量难度大。数值模拟具有改变方案迅速、仿真能力好等特征<sup>[7]</sup>, 与其他 CFD 软件相比, FLOW-3D 采用独特的 TnVOF 计算方法, 能够准确追踪自由液面的变化情况<sup>[8]</sup>。如董宗师等<sup>[9]</sup>使用 FLOW-

3D 探讨了宽尾墩的消能机理; 周鑫宇等<sup>[10]</sup>通过数值模拟研究了侧槽底坡变化对侧堰淹没度的影响; 练继建等<sup>[11]</sup>运用数值模拟分析了明渠完全掺气水流水力特性, 均得出满意的结果。为此, 本文通过 FLOW-3D 中的掺气模型对圆孔  $\Gamma$  形格栅式消力池内水气两相流进行数值模拟, 获得了一些有益的结论, 可供借鉴。

## 2 试验简况及模拟设置

试验所用的格栅式底流消力池见图 1, 消力

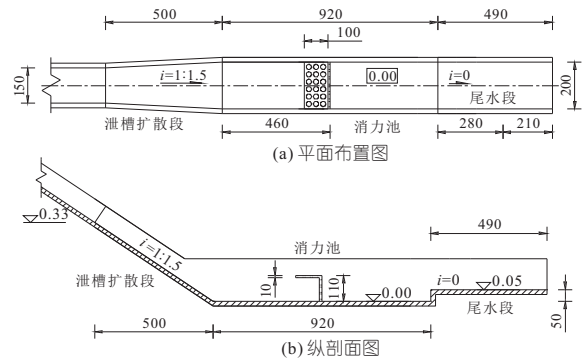


图 1 格栅式底流消能工体型示意图(单位: mm)

Fig. 1 Schematic diagram of grid-type underflow energy dissipater

收稿日期: 2022-12-16, 修回日期: 2023-02-01

基金项目: 云南省兴滇英才支持计划(202201788)

作者简介: 葛亚飞(1995-), 男, 硕士研究生, 研究方向为工程水力学, E-mail: 1726761435@qq.com

通讯作者: 邱勇(1971-), 男, 教授, 研究方向为工程水力学, E-mail: 13108854817@126.com

池布置于坡比为 1 : 1.5、宽 150~200 mm、 $\alpha=3^\circ$  的泄槽扩散段后,长 920 mm、宽 200 mm,尾水渠  $i=0$ 。消力池内格栅布置在距泄槽扩散段末端 460 mm(1/2 池长)处,物理模型试验几何比尺  $\lambda_L=40$ 。

在消力池格栅前等间距布置<sup>#</sup>1~<sup>#</sup>6 测点(断面),栅后布置<sup>#</sup>7、<sup>#</sup>8 测点(断面),测点间距均为 5 cm,见图 2<sup>[12]</sup>。

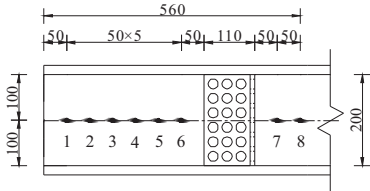


图 2 消力池底板轴线测点布置图(单位:mm)  
Fig. 2 Layout of the axis measurement point of the floor of the pool

在数值模拟中,为使水流在水平段充分发展并在出口处方便施加自由出游的边界条件,将消力池下游尾水段在原设计方案的基础上向下游延长 210 mm。本文模拟计算了下泄流量为  $Q=6$  L/s 的工况(泄槽出口计算流速 2.86 m/s,相当于原型流速 18.09 m/s),计算域长度定为 1.91 m(起于泄槽扩散段进口处,止于尾水段末端)。进口边界(上边界)设置为流速进口边界,出口边界(下边界)设置为压力出口。整个格栅式底流消能工结构的固体边界表面设置为无滑移壁面。计算共使用四个网格块,网格块 A(网格尺寸为 3.8 mm×3.8 mm)包络了泄槽扩散段进口处下泄水体,网格块 B(网格尺寸为 3.4 mm×3.4 mm)包络了全部泄槽结构,网格块 C(网格尺寸为 2.5 mm×2.5 mm)包络了部分消力池(自消力池起点至铅直格栅后 100 mm),网格块 D(网格尺寸为 4.0 mm×4.0 mm)包络了自铅直格栅后 100 mm 至尾水段,见图 3。为加快计算时间,流体提前达到稳定,在消力池及尾水段内预设置一定深度的水体。



图 3 网格划分示意图(单位:mm)  
Fig. 3 Meshing diagram

数学模型中临界韦伯数设定为 1.6、临界毛细管数设定为 1,阻力系数设定为 0.5, Richardson-Zaki 系数设定为 1。水相的最小、最大体积分数分别设定为 0、1,允许气体在自由表面逃逸,空气密度、粘度分别设定为 1.29 kg/m<sup>3</sup>、 $1.79 \times$

$10^{-5}$  kg/(m·s),环境温度考虑为 15 ℃。

### 3 格栅式底流消能掺气特性研究

格栅设置前后,消力池底板轴线位置各测点的水力特性见表 1。由表 1 可看出,未设置格栅时,<sup>#</sup>1 断面处的流速为 2.50 m/s(原型流速 15.81 m/s),各断面轴线底板近壁掺气浓度均小于 1.0%,消能率仅为 56.59%;设置格栅后,消力池内各测点的压强增大,流速降低,掺气浓度大幅提升,消能率也提升至 77.86%,增幅超过 37%。

表 1 格栅设置前后消力池测点水力特性

Tab. 1 Hydraulic characteristics of measuring points of stilling basin before and after grid setting

格栅设置情况	断面编号 / 桩号	相对压强 $p'/kPa$	流速 $v/(m \cdot s^{-1})$	掺气浓度 $c/\%$	消能率/ $\%$
未设格栅	<sup>#</sup> 1/ 0+000.050	0.23	2.50	0.85	56.59
	<sup>#</sup> 6/ 0+000.300	0.07	2.10	0.40	
	<sup>#</sup> 7/ 0+000.510	0.09	1.67	0.26	
设置格栅	<sup>#</sup> 1/ 0+000.050	0.68	1.51	35.26	77.86
	<sup>#</sup> 6/ 0+000.300	1.06	0.95	19.84	
	<sup>#</sup> 7/ 0+000.510	1.18	0.25	8.36	

#### 3.1 模型验证

模型验证均以开孔率为 34% 的  $\Gamma$  形格栅试验研究结果进行对比分析。

##### 3.1.1 水流流态对比

入射水流在竖直格栅阻拦下形成向消力池进口翻滚的回淹水流,并与自泄槽下泄的水流相互摩擦、混掺和剪切,水流湍动大;同时,由于水平格栅的作用,上涌水突现象不明显,消力池内能形成一定的淹没;栅后扰动长度约为 150 mm,其后水流趋于平稳,与下游尾水衔接良好。计算水流流态和试验水流流态基本吻合,栅前的水面线稍有偏离、栅后水面线吻合程度更好。

##### 3.1.2 底板时均压强

图 4 为数值模拟和试验研究的消力池底板纵向时均压强对比图。由图 4 可看出,无论是计算值还是试验值栅前消力池底板纵向时均压强沿程增大,过栅后突然降低,二者变化规律基本一致;数值计算结果与模型试验最大误差出现在距泄槽末端 30 cm 处,也仅为 3.08%(格栅范围内的底板时均压强,计算值与试验值误差均小于 3.0%)。

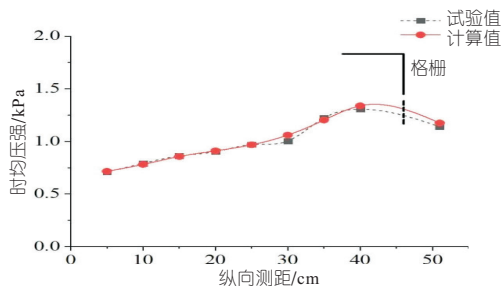


图 4 消力池底板纵向时均压强对比

Fig. 4 Contrast of the uniform pressure of the pool floor in the longitudinal direction

### 3.2 掺气浓度

#### 3.2.1 掺气浓度分布

掺入水中的气体对工程安全有着重要影响,一方面使水流膨胀、水深加大;另一方面,近底掺气浓度对空蚀预防有着重要作用<sup>[13]</sup>。

(1)纵向掺气浓度。通过模拟计算,得到消力池内临底纵向沿程各测点下的掺气浓度分布规律,图 5 为沿程测点掺气浓度试验值与计算值误差对比。由图 5 可看出,受气体迁移扩散(逃逸)作用,纵向沿程掺气浓度,在栅前均沿程递减,格栅位置水体掺气浓度出现明显下降,栅前的掺气浓度高于栅后。其原因在于设置格栅后,栅前壅水增加,消能水体体积增大,回淹水流将空气卷入,水气混掺更为充分;由于格栅水体存在一定的消能作用,水体流速下降后,有利于掺入水体中气体逸出。另外,栅前掺气浓度值计算值与试验值相比,离散程度相对较大(距泄槽末端 15 cm 位置最大为 15.68%),格栅位置附近,掺气浓度离散程度更小(距泄槽末端 30 cm 位置最小仅为 0.76%)。表 2 为沿程测点掺气浓度试验值与计算值。由表 2 可知,距离泄槽末端 5~15 cm,消力池底板掺气浓度试验值与计算值的差值(离散程度)增大,在 15 cm 位置处最大(15.68%),而后随着沿程的增加(15~51 cm),其离散程度均有所减小(在 30 cm 位置最小仅为 0.76%),且 25 cm 后的离散值均低于 10%。表明随着沿程的增加,过栅水体沿

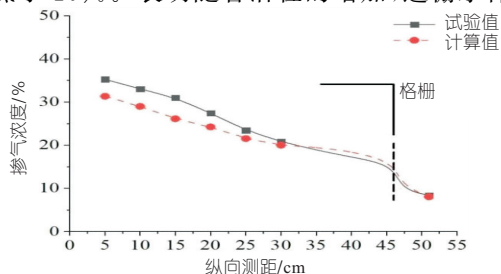


图 5 沿程测点掺气浓度试验值与计算值误差对比

Fig. 5 Comparison chart of the error between the test value of doped gas concentration and the calculated value at each measurement point along the longitudinal route

表 2 沿程测点掺气浓度试验值与计算值  
Tab. 2 Test value and calculated value of doping concentration at the measurement point along the course

沿程测距/cm	试验值/%	计算值/%	误差/%	沿程测距/cm	试验值/%	计算值/%	误差/%
5	35.26	31.34	11.20	25	23.45	21.53	8.19
10	33.03	28.99	12.23	30	19.84	19.99	0.76
15	30.99	26.13	15.68	51	8.36	8.03	3.94
20	27.45	24.24	11.69				

程掺混程度减弱,流速降低明显,亦即二者的离散性受水流湍动程度的影响。

(2)垂向掺气浓度。根据计算,得到在距泄槽末端 30 cm 位置(栅前<sup>#</sup>6 断面)和距泄槽末端的 51 cm 位置(栅后<sup>#</sup>7 断面),沿水深方向(垂向)的掺气浓度变化。图 6 为测点断面垂向掺气浓度试验值与计算值对比图。由图 6 可看出,计算值在栅前断面(<sup>#</sup>6 测点)近底 2 cm 水深范围的垂向掺气浓度在 9.08%~24.96%之间;距离泄槽末端 51 cm 位置(<sup>#</sup>7 测点)断面的垂向掺气浓度分布更为接近,近底 2 cm 水深范围的垂向掺气浓度小于 8.03%。分析其原因在于栅前底部水流流速大,主流集中,气泡粒子主要以迁移为主,卷吸空气能力弱(掺气不明显);栅后流速降低,近底范围垂向掺气浓度变化明显。

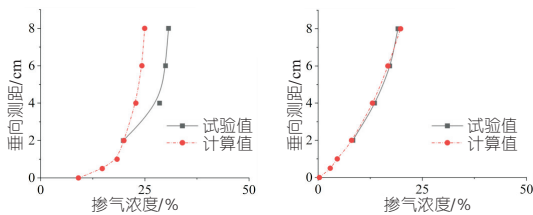


图 6 测点断面垂向掺气浓度试验值与计算值对比图  
Fig. 6 Comparison of test value and calculated value of vertical doping concentration of measurement point cross-section

(3)湍流强度百分比。为了更好地说明消力池内临底纵向沿程和垂向沿水深方向掺气浓度计算值与试验值的离散性,表 3 给出了消力池内轴线位置沿程各测点的湍流强度百分比。由表 3 可看出,水流的湍动程度在栅前距泄槽末端 15 cm 位置最大(83.66%),在栅后 51 cm 位置最小(仅为 28.11%)。结合表 2 分析可知,水流湍动强度掺气浓度离散性相关性明显,距离泄槽末端 15 cm 位置的最大湍流强度百分比 86.64%,与其相

表 3 消力池轴线沿程各测点的湍流强度百分比  
Tab. 3 The percentage of turbulence intensity at each measurement point along the axis of the damper cell

沿程测距/cm	5	10	15	20	25	30	51
湍流强度百分比/%	73.65	83.66	86.64	83.26	75.51	66.45	28.11

对应的掺气浓度离散程度最大为 15.68%；格栅范围内的湍动强度下降，掺气浓度离散程度也减小，说明水流湍动强度大，气泡粒子被剪切、挤压、拉伸剧烈，其所产生的强剪切力使得表面张力无法维持气泡粒子的自身形态，致使气泡大小各异且稳定性差。

### 3.2.2 气泡尺度

掺气浓度纵向和垂向的变化和气泡大小有关，而气泡的大小变化可通过压强来解释，较高的环境压强将迫使气泡破碎分解来产生更高的表面张力来平衡气泡周围压力，能够间接性地影响掺气减蚀的效果<sup>[14]</sup>。图 7 为沿轴线纵向的气泡大小分布情况。由图 7(a)可看出，3 mm 以下的气泡所占总体概率超过 60%，而气泡尺寸为 0.5 mm 以下的气泡概率值达到了 50%，表明小尺度气泡在近底板范围占比更大。由图 7(b)可看出，消力池近底板(2 cm 水深)范围栅前气泡直径均较小(气泡大小约在 0~5 mm 之间)，与气泡数量概率曲线结果一致；栅后则由于水流流速下降，近底板(2 cm 水深)附近气泡几乎消失。

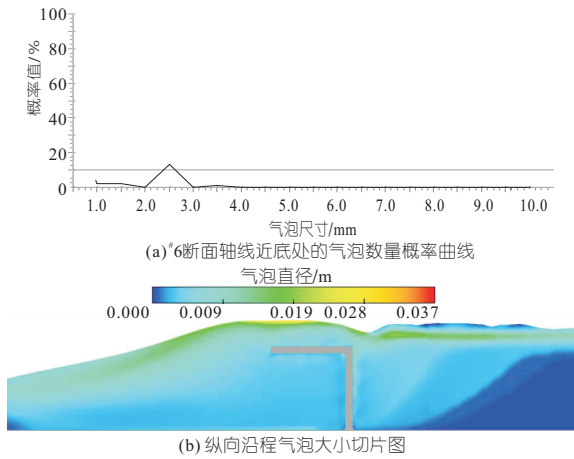


图 7 气泡大小分布规律

Fig. 7 Bubble size distribution law

通过模拟计算，得到栅前( # 6 断面)和栅后( # 7 断面)垂向上气泡大小的分布情况(图 8)。由图 8 可看出，格栅附近近底板的气泡直径均在 4 mm 以下，且比较密集；# 6 断面垂向临底范围(0.02 m 以下)气泡尺寸先减小后增大(由 4 mm 减小到 0.75 mm，后增大至 1.19 mm)，靠近底板位置气泡尺寸较大，其原因在于受回淹水流作用，极小部分较大尺寸气泡被带到底板壁面，但由于底部压强较大，气泡在短距离内被迅速挤压，尺寸减小；# 7 断面临底范围的气泡沿水深方向尺寸增大(0.9 mm 增大至 3.6 mm)，且增幅趋势变小。

### 3.3 掺气水流湍动对气泡尺度和掺气浓度的影响

气泡粒子在湍流流场中运动期间，自身形态

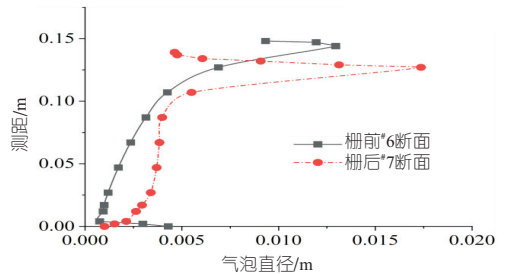


图 8 格栅前后垂向气泡大小分布图

Fig. 8 Distribution of vertical bubble size before and after the grille

(气泡大小)稳定性差，易变形。而消力池格栅前部水流的湍动程度较大(在 # 3 断面最大)，气泡之间无可避免的发生接触碰撞，气泡发生碰撞后，内部介质能量交互融合成一个更大的气泡。气泡的融合在形态上能改变气泡的大小，在受力上能改变气泡的运动速度和动能，进而影响气液交界面面积、流场的湍动程度和掺气浓度等。可看出掺气水流的湍动与气泡尺度之间存在相关性。

对于中、高水头的格栅式底流消能，入池水流流速大，小尺度气泡不易逃逸。掺气水体内部掺气浓度大，气泡上浮过程中，周围压强降低，气泡尺寸变大。而近底范围(2 cm 水深以下)垂向掺气浓度不大，但小尺度气泡占比多。

消力池底板测点空穴数  $K$  按下式(1)进行计算：

$$K = \frac{p - p_v}{\rho v^2 / 2} = \frac{(p - p_v) / (\rho g)}{v^2 / (2g)} \quad (1)$$

式中， $p$  为测点绝对压强，kPa； $v$  为流速，m/s； $p_v$  为蒸汽压强，1.705 kPa； $\rho$  为水的密度， $\text{kg/m}^3$ 。

由表 1 数据计算发现，设置格栅前后，原型消力池相应测点空穴数分别由 0.80、1.78 增大到 5.60、80.60，其中格栅附近空穴数均在 9.0 左右，而栅后的空穴数远大于 9.0，无需考虑空蚀。

从研究来看，格栅的设置，一方面加大了栅前水体的湍动，有利于消能；另外一方面，掺气后的近底范围(临底)小尺度气泡对混凝土固体边界的保护作用明显，能有效避免消力池发生空蚀破坏，且由于较小直径的气泡在掺气减蚀中起主要作用，无需较高的掺气浓度即可满足掺气减蚀的保护要求。

## 4 结论

a. 设置格栅，栅前近底范围掺气浓度增大，气泡以小尺度居多。较小直径的气泡在掺气减蚀中起主要作用，对混凝土固体边界的保护作用明显，包括格栅在内的消力池结构不易发生空蚀破坏。

b. 对高强度掺气水流，湍动强度大，气泡形

状一般不为球体。因此,未来可对漂流流模型中 Drag coefficient 和 Richardson-Zaki 系数进行对比分析,以探究其敏感性。

#### 参考文献:

[1] PETERKA A J. The effect of entrained air on cavitation pitting [C]//Minnesota International Hydraulic Convention, ASCE, 1953:507-518.  
 [2] 中华人民共和国水利部. 溢洪道设计规范: SL253-2018[S]. 北京:中国水利水电出版社,2018.  
 [3] 白世禄. 三门峡水利枢纽底孔和双层孔破坏原因分析及改善措施[J]. 水利水电技术,1988(11):38-44.  
 [4] 李文忻,陈大为. 鲁布革水电站左岸泄洪洞水力学原型观测[C]//中国水力发电工程学会泄水工程与高速水流信息网第四届会议,1994:45-48.  
 [5] 陈先朴,邵东超. 掺气减蚀的小气泡保护作用及研究展望[C]//第三十届全国水动力学研讨会暨第十五届全国水动力学学术会议,2019.  
 [6] 许唯临. 高坝水力学的理论与实践[J]. 人民长江, 2020,51(1):166-173,186.

[7] 陈大宏,陈妮. 溢流堰水流的三维模拟[J]. 武汉大学学报(工学版),2005,38(5):54-56.  
 [8] GUO J. Recent achievements in hydraulic research in China [J]. Comprehensive renewable energy, 2012,6:485-505.  
 [9] 董宗师,王均星,张文传,等. 低  $Fr$  数非完全宽尾墩消能特性研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2016,48(5):9-15.  
 [10] 周鑫宇,邱勇,吴锦钢,等. 侧槽底坡变化对侧堰淹没度影响研究[J]. 中国农村水利水电,2022(9):44-48.  
 [11] 练继建,任盼红,刘东明,等. 明渠完全掺气水流水力特性数值模拟研究[J]. 水力发电学报,2022,41(4):1-8.  
 [12] 葛亚飞,邱勇,吴锦钢,等. 格栅式底流消能工掺气浓度分布规律[J]. 农业工程,2021,11(12):65-69.  
 [13] 李勇泉,蔡芳. 矩形明渠掺气水深和底掺气浓度计算公式探讨[J]. 水电能源科学,2022,40(7):151-155.  
 [14] FALVEY H T. Cavitation in chutes and spillways [Z]. Engineering Monograph 42, Bureau of Reclamation, Denver, 1990.

## Study on Aeration Characteristics of Grid Type Underflow Energy Dissipation

GE Ya-fei<sup>1,2</sup>, QIU Yong<sup>1</sup>, HE Pei-shan<sup>3</sup>, PU Jin-bing<sup>1</sup>, HE Yun-qiu<sup>1</sup>

(1. College of Water Conservancy, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2. Baoying Station Management Office of Jiangsu Water Source Co., Ltd. on the East Line of the South to North Water Diversion Project, Yangzhou 225000, China; 3. Kunming Hongzhao Water Conservancy and Hydropower Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Kunming 650020, China)

**Abstract:** For underflow energy dissipation, the arrangement of the grille shortens the length of the stilling pool and makes it easier to adapt to changes in terrain conditions. The two-phase flow of water and gas in the round-bore  $\Gamma$ -shaped grille type stilling pool was numerically simulated by the aeration model in FLOW-3D. The results show that the concentration of longitudinal bottoming gas decreased (31.3%  $\rightarrow$  8.0%) along the way, and decreased significantly at the grid position, the minimum number of holes in front of the grid ( $\#$  6 section) was 5.6, the number of holes near the grid was about 9.0, and the number of holes behind the grid was much greater than 9.0. The bubble size near the bottom of the grid front axis increases along the course (0.9 mm  $\rightarrow$  8.1 mm), and the bubble size of the near bottom plate after the grid decreases along the way (1.6 mm decreases to close to 0 mm). It can be considered that the bubbles with smaller diameters in large flow velocity areas play a major role in aeration corrosion reduction, which has obvious protective effect on the solid boundary of concrete, and the structure of the stilling pool including the grid is not easy to occur cavitation erosion damage.

**Key words:** bubble scale; Turbulence intensity; doped corrosion reduction; energy dissipation by bottom flow; numerical simulation

\*\*\*\*\*  
 (上接第 207 页)

## Fuzzy Comprehensive Comparison and Selection of Water Intake Mode of Pumping Station Under Large Variable Water Level of Water Source

LIU Fu-feng<sup>1</sup>, GAO Yu-yang<sup>2</sup>, LI Ling-ling<sup>3</sup>, YAN Li-li<sup>3</sup>, GU Shi-xiang<sup>3</sup>, LIU Zhi-yong<sup>2</sup>

(1. CEWUD Group Co., LTD., Wuhan 430070, China; 2. School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. Yunnan Institute of Water & Hydropower Engineering Investigation, Design and Research, Kunming 650021, China)

**Abstract:** The water intake mode of pumping station under the condition of large variable water level of water source has great impact on the reliability of water intake, project cost and safety of water intake building, so the reasonable evaluation of different water intake mode is one of the key problems in engineering design. In this paper, a two-level evaluation index system consisting of 3 quantitative indicators and 14 qualitative indicators was constructed. The analytic hierarchy process (AHP), entropy weight method and least square method were used to assign the combination of subjective and objective weights. The method of membership degree and fuzzy comprehensive evaluation was used to evaluate and rank different water intake schemes, and an engineering example was analyzed. The results show that the proposed index system is comprehensive, the weighting method is reasonable, and the evaluation method can better reflect the uncertainty of the scheme selection. The practical engineering example verified the feasibility of the evaluation method.

**Key words:** large variable water level of water source; water intake method; combination weighting; fuzzy comprehensive evaluation