

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.19.019

# 基于VOF模型的深隧系统入流竖井两相流模拟

周大庆<sup>1</sup>, 陈雅楠<sup>2</sup>, 陈会向<sup>3</sup>, 郭俊勋<sup>1</sup>, 邵煜<sup>1</sup>, 苏文博<sup>1</sup>

(1. 河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 211100; 2. 水发规划设计有限公司 南京分公司, 江苏 南京 210000; 3. 河海大学 农业科学与工程学院, 江苏 南京 211100)

**摘要:** 以国内某深隧系统工程入流竖井为研究对象,应用Realizable  $k-\varepsilon$ 湍流模型对不同工况下竖井段入流全过程进行瞬态模拟计算,并结合物理模型试验,对比不同工况下竖井内流场特征及其消能性能。结果表明,数值模拟与模型试验结果吻合度较高,竖井均是在来流方向一侧的溢流量较大,且在该侧竖井底部的水流紊动较管口侧更剧烈;设计工况下竖井泄流过程中的液相下流速最大可达到10 m/s,排气井内气相平均上升速度为2.5 m/s,而排气井外侧的气流因受水流下流的影响,速度较大,可达5 m/s;竖井内部仅在溢流堰和管道入口上方存在局部负压,且随着流量增大,负压区扩大,最大压差为154 kPa;竖井入流量在不超出工程设计流量时,消能率在73%以上,具有较好的消能效果,但在过载工况下,其消能效果有所降低。

**关键词:** 深层隧道; 入流竖井; 模型试验; VOF模型; 气液两相流

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)19-0132-07

## Simulation of Two-phase Flow in Inflow Shaft of Deep Tunnel Drainage System Based on VOF Model

ZHOU Da-qing<sup>1</sup>, CHEN Ya-nan<sup>2</sup>, CHEN Hui-xiang<sup>3</sup>, GUO Jun-xun<sup>1</sup>, SHAO Yu<sup>1</sup>,  
SU Wen-bo<sup>1</sup>

(1. School of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. Nanjing Branch, Shuifa Planning & Design Co. Ltd., Nanjing 210000, China; 3. School of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

**Abstract:** This study simulated the entire inflow process in a shaft section of a domestic deep tunnel drainage system project under different working conditions by using the Realizable  $k-\varepsilon$  turbulence model, and compared the flow field characteristics and energy dissipation performance of the shaft under different working conditions combined with the physical model tests. The results of numerical simulation and model test were in good agreement. The overflow of the shaft was larger on the side of the incoming flow direction, and the turbulence of the water flow at the bottom of the shaft on this side was more intense than that on the inlet side of the pipe. Under the design conditions, the falling velocity of the liquid phase reached the maximum of 10 m/s in the process of shaft discharge, and the average rising velocity of the gas phase in the exhaust well was 2.5 m/s, while the airflow outside the exhaust well had a higher velocity of up to 5 m/s due to the influence of the falling current. Inside the shaft, local negative pressure was only

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51979086、51839008、52006053); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20200508)

通信作者: 陈会向 E-mail: chenhuixiang@hhu.edu.cn

detected above the overflow weir and the inlet of the pipeline, and the negative pressure area expanded with the increase of the flow rate, in which the maximum pressure difference was 154 kPa. When the shaft inflow did not exceed the engineering design flow rate, the energy dissipation rate was above 73%, indicating that a good energy dissipation performance was achieved. However, the energy dissipation performance was reduced under overload conditions.

**Key words:** deep tunnel; inflow shaft; model test; VOF model; air-water two-phase flow

深层隧道排水系统(简称深隧系统)是海绵城市建设的重要工程措施之一,能有效缓解城市内涝、解决雨洪和合流制溢流污染等问题,已有多例应用<sup>[1]</sup>。入流竖井是深隧系统中衔接浅层排水系统与深层排水隧道的重要结构,承担着安全进水、消能、排气等多重功能。因此,针对竖井开展水力学研究对深隧系统工程设计及运行至关重要。

目前,国内外城市排水系统工程中所应用的竖井,按照体型结构可分为跌落式、旋流式、折板式和螺旋坡道式4种<sup>[2]</sup>。各类型竖井具有不同的消能机理,针对竖井消能性能、体型优化等方面,主要采用模型试验和数值模拟两种方法<sup>[3-7]</sup>。牛争鸣等<sup>[8]</sup>通过原型观测和模型试验两种手段进行对比分析,发现模型掺气特性缩放效应明显,这说明在涉及复杂两相流特性时,仅通过物理模型试验难以有效研究气相特性<sup>[9]</sup>,需开展数值模拟并结合试验进行对比分析。徐剑乔<sup>[10]</sup>、Cataño-Lopera等<sup>[11]</sup>、Akhlaghi等<sup>[12]</sup>采用三维数值模拟方法对深隧系统两相流特性进行研究,结果均表明,竖井泄流过程所伴随着的复杂水气两相流运动,可能会造成竖井内水流振荡、排气不畅、消能不好等问题,严重时还会威胁系统的结构安全。因此,研究入流竖井的水力特性对于深隧系统工程设计与运行具有重要的现实意义。

笔者依托国内某深隧系统工程,应用基于VOF法的Realizable  $k-\varepsilon$  湍流模型对不同工况下竖井段入流全过程进行瞬态模拟计算,并结合物理模型试验,分析不同工况下竖井内流场特征及其消能性能,旨在为该体型竖井在工程中的应用奠定基础。

## 1 水力计算模型

由于实际入流过程中竖井内部的流体运动规律较为复杂,故对计算模型进行相应简化。将水流视为三维不可压缩流动,假设入流过程为等温条件,且不考虑来流中污染物固体颗粒对液相流态的影响,只进行气液两相模拟。

### 1.1 控制方程

入流竖井段运行过程中包含自由液面流动、大流量泄流、管道流等混合流动,且绝大部分流体处于湍流状态,基本控制方程为连续性方程和动量方程,并选择Realizable  $k-\varepsilon$  湍流模型对控制方程进行封闭,该湍流模型适用于有旋均匀剪切流、包含有射流和混合流的自由流、管道流动等复杂流动。本研究中采用VOF模型对竖井入流过程进行模拟,该模型对自由液面流动有较高的计算精度,适用于多相流体间的界面追踪。气液两相界面的跟踪通过求解液相体积分数来实现。

连续性方程:

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

动量方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \rho f_i - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right) \quad (2)$$

液相控制微分方程:

$$\frac{\partial \alpha_w}{\partial t} + u_i \frac{\partial \alpha_w}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

式中: $x_i, x_j$ 为坐标分量; $u_i, u_j$ 为速度分量; $\rho$ 为流体密度; $f_i$ 为质量力分量; $P$ 为流体压强; $\mu$ 为动力黏度系数; $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ 为湍流切应力; $\alpha_w$ 为液相体积分数, $0 \leq \alpha_w \leq 1$ 。

### 1.2 离散方法及边界条件

本研究在Fluent软件平台上完成数值模拟工作,采用有限体积法对控制方程进行离散,压力项采用PRESTO!格式,动量方程采用二阶迎风格式,湍动能及耗散率采用一阶迎风格式,数值计算采用SIMPLE算法进行压力-速度耦合。入流竖井段模型进口断面设为流量进口,出口设置为压力出口边界,壁面选择无滑移壁面边界。

### 1.3 计算域与网格划分

研究对象包括明渠入流段、沉砂池、竖井、入隧管道等结构,竖井内部还包含排气井、消力墩等排气消能结构。三维模型按照实际工程设计的竖井原型1:1建立(见图1),具体尺寸如下:竖井内径为10 m,高为16 m;沉砂池内径为21.4 m,高为7 m;溢流堰外缘径长为15 m,高为2 m;排气井内径为2.5 m,高为13.75 m;入隧管道内径为6 m。

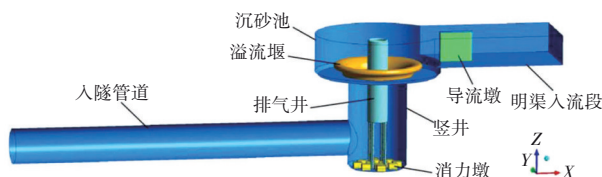


图1 某深隧系统入流竖井三维结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of three-dimensional structure of inflow shaft of deep tunnel drainage system

采用对几何模型适应性较强的非结构化网格划分计算模型,网格采用四面体单元,并根据计算区域内水流水力特性合理划分,局部进行加密处理,所生成总网格数约为 $255 \times 10^4$ 个(见图2)。

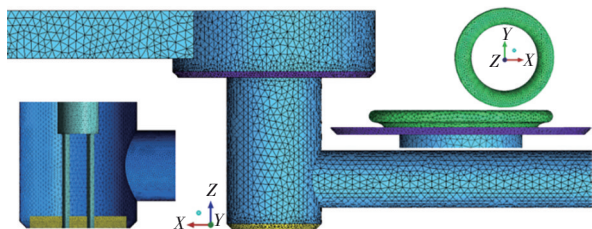


图2 竖井模型非结构化网格划分示意

Fig.2 Schematic diagram of unstructured grid division of shaft model

## 2 物理模型试验设计

竖井物理模型基于重力相似准则设计,模型主体由有机玻璃制成,其糙率可满足紊流粗糙区的摩阻力相似条件。试验模型主要物理量比尺如下:几何比尺 $\lambda_l = \lambda_h = 80$ ,流速比尺 $\lambda_v = \lambda_l^{0.5}$ ,时间比尺 $\lambda_t = \lambda_l^{0.5}$ ,流量比尺 $\lambda_Q = \lambda_l^{2.5}$ 。模型试验装置如图3所示。

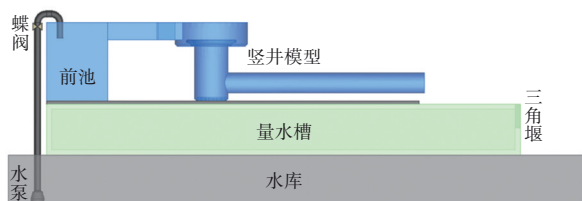


图3 竖井模型试验装置示意

Fig.3 Schematic diagram of test device of shaft model

考虑到实际操作环境下可充分满足通气等条件,制作物理模型时,对竖井结构进行了简化,未设置排气井等结构。物理模型试验系统通过水泵从水库抽水进入前池,并通过蝶阀调控入流量,竖井出口水流流入量水槽,再经堰口流入水库,完成水循环。试验过程中采用高速摄像机获取流态图像。

## 3 工况设置

结合工程实际应用背景,分别进行了三种流量工况的数值模拟,并开展相应工况的模型试验。工况设置见表1,其中工况2为设计流量工况。

表1 数值模拟与模型试验的入流量

Tab.1 Inlet flow of numerical simulation and model test  $L \cdot s^{-1}$

项目	工况1	工况2	工况3
原型	66 100	56 000	20 000
模型	1.15	0.97	0.35

不同工况下竖井模型进口边界气液两相分布如图4所示。工况1进口处液相占比为36%,工况2进口处液相占比为27%,工况3进口处液相占比为9%。操作环境为大气压,其中气相进口设为压力进口边界,液相进口设为质量流量进口。当模型出口流量与入流量的差值在1%以内时认为计算已收敛。

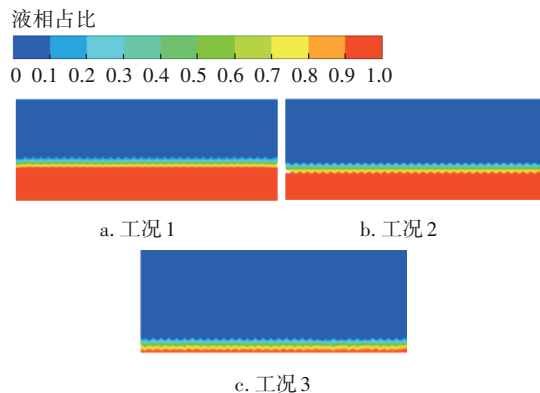


图4 不同工况下竖井模型进口边界气液两相分布

Fig.4 Distribution of air-water at inlet boundary of shaft model under different conditions

## 4 结果与分析

### 4.1 数值模拟与模型试验结果

竖井模型的人流过程可分为以下三个阶段:①水流经明渠流至蓄满沉砂池阶段;②水流从沉砂池溢出跌入竖井至稳定出流阶段;③竖井稳定出流阶段。以设计工况为例,通过数值模拟得到的竖井出



口流量曲线(见图5)和不同时刻竖井内气液两相分布云图(见图6,  $t_p$ 表示数值模型模拟时间,  $t_m$ 表示物理模型试验时间),可以判断出该工况下竖井入流时间0~10 s为第一阶段,10~60 s处于第二阶段,60 s之后竖井处于稳定出流阶段。同样地,通过重力相似准则要求的流量比尺与时间比尺换算,可得到物理模型在设计工况下相应时刻的流场特征。

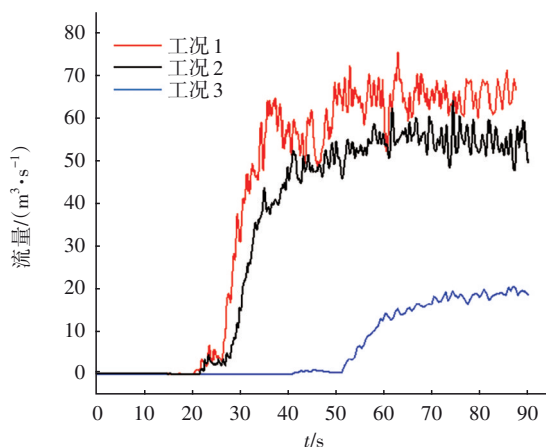


图5 不同工况下竖井模型出口流量的变化

Fig.5 Change of outlet flow rate of shaft model under different conditions

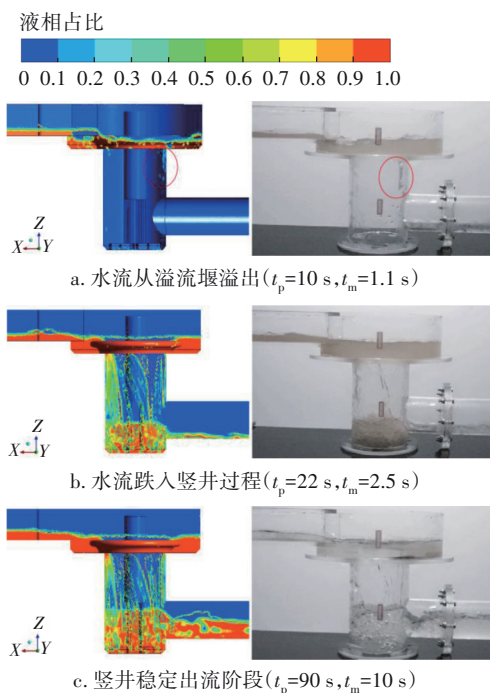


图6 设计工况下竖井数值模拟与模型试验不同时刻的流态对比 ( $\lambda_t = t_p/t_m = \lambda_l^{0.5}$ )

Fig.6 Comparison of flow patterns at different times between numerical simulation and model test of shaft under design conditions ( $\lambda_t = t_p/t_m = \lambda_l^{0.5}$ )

由图6的流态对比可以看出,设计工况下数值模拟所得到的水流流态与试验结果基本一致,计算模型与物理模型中的水流从溢流堰溢出跌入竖井时,均是先从与来流方向相反的一侧溢出,而在稳定出流状态下,竖井溢流量均是在来流方向上较多,两者流态吻合度较高。

#### 4.2 流态分析

第一阶段  $t_p=10$  s时,水流已经蓄满沉砂池,此时可以观察到沉砂池进水侧存在明显的水气混掺现象。这是由于经导流墩分流后进入池中的水流撞击溢流堰时产生了局部旋流并裹挟了部分空气,而绕流至沉砂池另一侧的水流则更加平稳,水气混合物含量也明显降低。第二阶段水流经堰口溢出后跌入竖井,  $t_p=18$  s时可观察到水流从溢流堰四周沿竖井壁面落至底部,下跌过程中伴有大量空气,做加速运动。竖井在  $t_p=90$  s时,处于稳定出流阶段,可观察到竖井底部水气混掺剧烈,液面高度逼近管道入口上缘,并在流入管道时呈现水跌,管道入口处的水流存在大量气泡,但经过一定距离后水气分离,管中水流逐步稳定,且始终为无压流动状态。

参考设计工况稳定出流阶段竖井ZX截面的速度矢量图(见图7),可以看出,在沉砂池来流方向一侧有旋流产生,此处水流速度增幅不明显,而在跌入竖井过程中,水流势能转化为动能,流速急剧增大,液相平均下跌流速达到10 m/s。同时竖井空腔中气体向上排出,排气井内气相平均上升速度为2.5 m/s,而排气井外侧的气流因受水流下跌影响,速度较大,可达5 m/s。

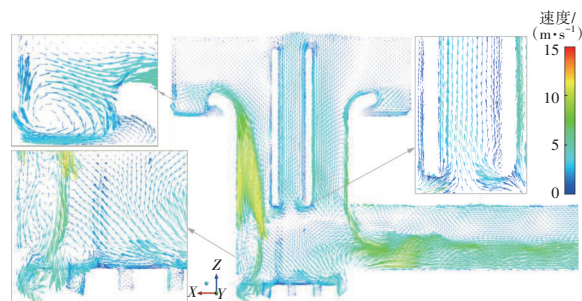


图7 设计工况稳定出流阶段模型ZX截面速度矢量图

Fig.7 Velocity vectors on ZX section of model in steady flow stage under design conditions

图8展示了设计工况稳定出流阶段的竖井在Z轴方向上不同横断面处的速度场变化。可以看出,

随着高程的下降,竖井横断面流场平均流速减小,速度场分布也更均匀,这是由于在竖井底部已形成一定厚度的水垫层,跌至竖井底部的水流冲击水垫层,部分水流从底部反射上升与下落的水流碰撞,此过程亦急剧消耗水流能量。经掺混消能后,设计工况下出流管道中水流的平均速度为4.3 m/s,较下跌过程的水流速度明显降低。

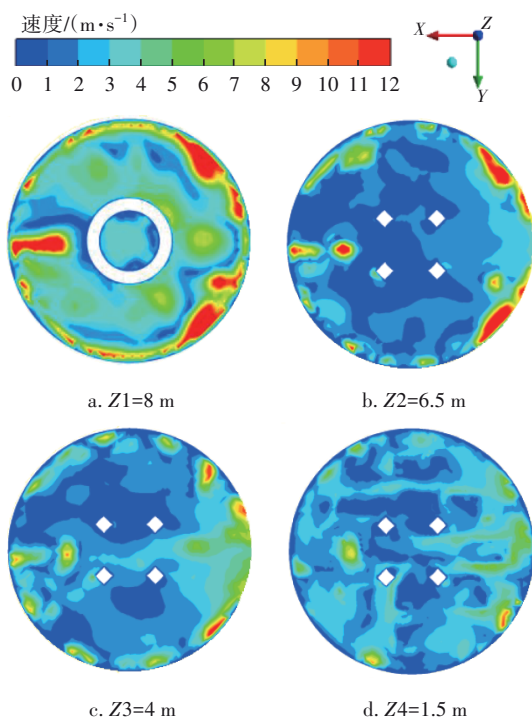


图8 设计工况稳定出流阶段竖井XY断面速度分布云图

Fig.8 Velocity distribution on XY section of model in steady flow stage under design conditions

工况1与工况3下竖井模型入流过程的流态变化规律与设计工况类似,其中工况1下竖井的充水时间较设计工况短,但入流量较大,竖井内水流紊动较强,故达到稳定出流状态所用时间较工况2长,该工况下管道中的平均流速为6.8 m/s。工况3下竖井达到稳定出流状态所用时间为80 s,管道中的平均流速为3.8 m/s。图9为不同工况下稳定出流阶段竖井模型ZX截面上的气液两相分布云图。可以看出,入流量越大,竖井底部形成的水垫层高度越高,水气掺混越强烈,进入管道中的水气混合物含量越高,实现管中水气分离所需的距离也越长。3种工况下竖井均是在来流方向一侧的溢流量较大,竖井底部在来流侧的水流紊动较管口侧更为剧烈,而在井内水流进入管道前,大部分气团可从水

中溢出,故该溢流特征有利于减少进入管道的水流中水气混合物的含量。

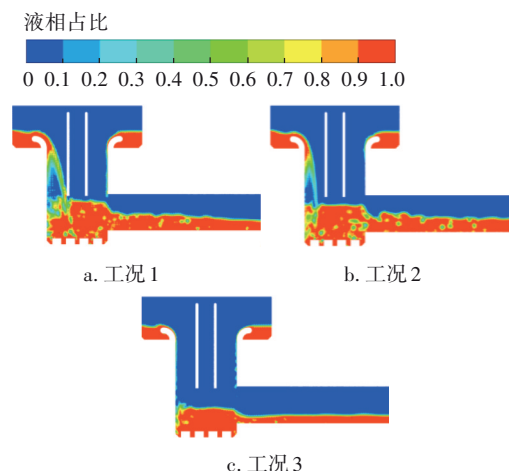


图9 不同工况下稳定出流阶段竖井模型ZX截面气液两相分布云图

Fig.9 Air-water two-phase distribution on the ZX section of model in steady flow stage under different conditions

同样以设计工况为例分析竖井模型全局压力分布状况,如图10所示。模型内部仅在溢流堰和管道入口上方存在局部负压,这两处均是由于水流从过流固体壁面脱流后所产生的负压。竖井壁面压强随高程的下降呈增大趋势,3种工况下的最大压力也均出现在底部。

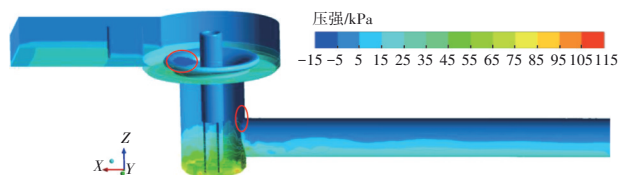


图10 设计工况下竖井模型内部压力分布云图

Fig.10 Internal pressure distribution of shaft model under design conditions

图11为不同工况下溢流堰的压力分布云图。可以看出,入流量越大,溢流堰上负压区域越大;反之,压力分布越均匀。结合图9可以发现,水流在溢流堰来流方向侧的溢流量较大,故负压区也更多地分布在该侧。竖井底部均为正压分布(见图12),这是因为水流沿井壁自然跌落过程中伴有大量空气,跌至底部的水流反射,沿井壁上升并与下落的水流碰撞,形成低速做循环运行的掺气水流,同时竖井通过排气井实现循环充气,因此竖井模型内不会产生较大的负压。结合图11与图12可以发现,竖井内压差随着入流量的增加而增大。工况1条件下竖

井模型全局压差为154 kPa,底部压差为125 kPa;工况2的竖井模型全局压差为136 kPa,底部压差为85 kPa;工况3条件下竖井全局压差为117 kPa,底部压差为74 kPa。

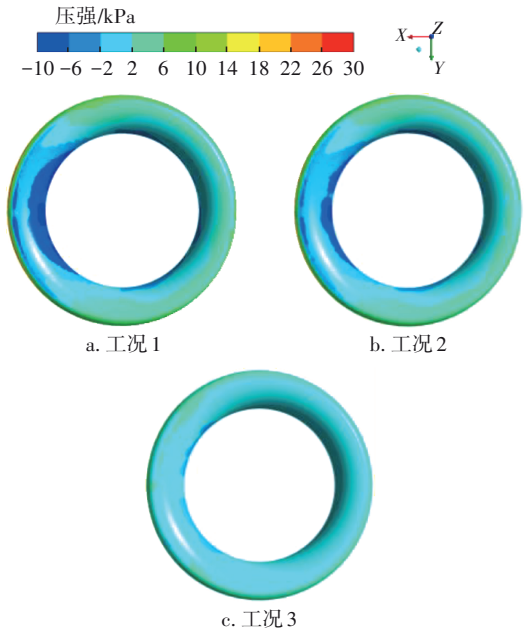


图11 不同工况下溢流堰压力分布云图

Fig.11 Pressure distribution on overflow weir under different conditions

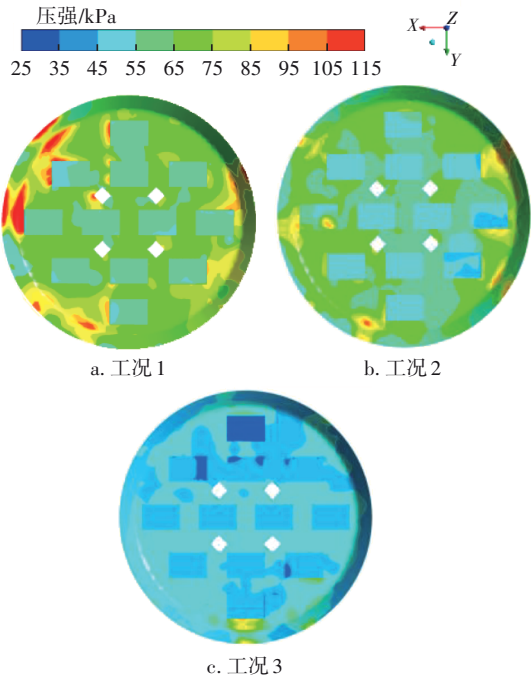


图12 不同工况下竖井底部压力分布云图

Fig.12 Pressure distribution on the bottom of shaft under different conditions

4.3 消能率分析

本模型的消能机理主要体现在水流跌落至竖井过程中掺气、与井壁摩擦、落至竖井底部后撞击消力墩和冲击水垫层形成水跃并与来流相互冲撞消能。竖井模型的消能率可利用进出口处的水头计算,见式(4)。

$$\eta = 1 - \frac{z_2 + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g}}{z_1 + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g}} \quad (4)$$

式中: $\eta$ 为消能效率,%; $z_1$ 、 $z_2$ 分别为模型进口、出口处液面高程,m; $v_1$ 、 $v_2$ 分别为模型进口、出口处水流的平均流速,m/s; $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 均为动能修正系数,取值均为1.0; $g$ 为重力加速度,m/s<sup>2</sup>。

竖井模型消能率结果见表2。可知,该入流竖井在设计工况下的消能率为73%,通过竖井掺混消能,管道中水流的平均速度为4.3 m/s,较泄流时的下跌流速有显著降低,消能效果良好。小流量工况时竖井消能效果明显提高,总消能率达到77%。而在入流量超出设计流量时,管道中水流仍具有较高的流速,消能率仅为67%。这是由于此时竖井底部水垫层高度已逼近管道入口上缘,掺混后的水流进入管道时存在水跌,因此水流仍具有较高的动能和势能,其消能效果显著下降。

表2 竖井消能率计算结果

Tab.2 Calculation results of energy dissipation rate of shaft

项 目	$z_1/\text{m}$	$v_1/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$z_2/\text{m}$	$v_2/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\eta/\%$
工况1	19.8	2.8	4.3	6.8	67
工况2	19.6	2.6	4.5	4.3	73
工况3	18.4	1.5	3.5	3.8	77

5 结论

① 利用Fluent对深隧系统入流竖井的泄流过程进行不同工况的模拟与研究,并结合模型试验结果进行对比分析。结果表明,应用基于VOF方法的Realizable  $k-\varepsilon$  湍流模型模拟跌落式竖井动态入流过程能较好地反映其流态变化规律。

② 3种流量工况下,竖井均是在来流方向一侧的溢流量较大,且在该侧竖井底部的水流紊动较管口侧更为剧烈。入隧管道在过载工况下仍为明流流动状态,该工程方案中入隧管道的管径选择合理。



③ 竖井泄流过程中水流势能转化为动能,流速急剧增大,设计工况下液相下跌流速最高可达10 m/s。排气井内气相平均上升速度为2.5 m/s,而排气井外侧的气流因受水流下跌影响,速度较大,可达5 m/s。随着竖井高程的降低,其横断面流场平均流速减小,速度场分布也更均匀。

④ 竖井内部仅在溢流堰和管道入口上方存在局部负压,且随着流量的增大,负压区域扩大,压差增大,最大流量工况模型全局压差为154 kPa。3种工况下模型内最大压强均出现在竖井底部,因此在工程应用时需特别注意其底部承压的强度。

⑤ 跌落式竖井主要通过水流掺气、与井壁摩擦、在底部形成水垫层掺混消能。竖井入流量在不超出工程设计流量时,消能率在73%以上,具有较好的消能效果。但在过载工况下,其消能效果有所降低。

#### 参考文献:

- [1] 刘家宏,夏霖,王浩,等. 城市深隧排水系统典型案例分析[J]. 科学通报, 2017, 62(27):3269-3276.  
LIU Jiahong, XIA Lin, WANG Hao, *et al.* Typical case analysis of deep tunnel drainage system in urban area [J]. Chinese Science Bulletin, 2017, 62(27): 3269-3276(in Chinese).
- [2] 何贞俊,王斌,杨聿,等. 市政排水系统中竖井研究及应用进展[J]. 中国给水排水, 2017, 33(10):49-53.  
HE Zhenjun, WANG Bin, YANG Yu, *et al.* Review on vertical shaft in urban wastewater drainage system [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(10): 49-53(in Chinese).
- [3] DING Q, MA Y Y, ZHU D Z. Air entrainment in a vertical dropshaft with limited air supply[J]. Theoretical and Applied Mechanics Letters, 2018, 8(5):315-319.
- [4] 李璐,梁舒豪,杨墨,等. 用于深隧工程的折板式竖井湿室部分数值模拟研究[J]. 中国给水排水, 2019, 35(13):128-133.  
LI Lu, LIANG Shuhao, YANG Mo, *et al.* Numerical simulation of wet chamber part of a baffle-drop shaft in deep tunnel engineering [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(13):128-133(in Chinese).
- [5] 张宗孝,白欣,刘冲. 基于消能井井深变化下水力特性的研究[J]. 应用力学学报, 2018, 35(2):316-321.  
ZHANG Zongxiao, BAI Xin, LIU Chong. An empirical analysis based on the hydraulic characteristics of energy dissipation well depth variation [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2018, 35(2): 316-321 (in Chinese).
- [6] 何军龄,尹进步,蒋俏芬,等. 竖井旋流泄洪洞不同衔接段体型对竖井底板压强的影响[J]. 水电能源科学, 2017, 35(6):88-91.  
HE Junling, YIN Jinbu, JIANG Qiaofen, *et al.* Influence of different connection section types of vortex shaft spillway on bottom pressure [J]. Water Resources and Power, 2017, 35(6):88-91(in Chinese).
- [7] ADRIANA C G, ZHU D Z, RAJARATNAM N. Flow observations in tall plunging flow dropshafts[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 141(1):6014020.
- [8] 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(5):372-378.  
NIU Zhengming, NAN Junhu, HONG Di. An experimental study on hydraulic characteristics of a novel aerator [J]. Advances in Water Science, 2013, 24(5):372-378(in Chinese).
- [9] PFISTER M, CHANSON H. Two-phase air-water flows: scale effects in physical modeling [J]. Journal of Hydrodynamics, 2014, 26(2):291-298.
- [10] 徐剑乔. 基于FLUENT的排水深隧入流竖井三维湍流仿真[J]. 中国给水排水, 2019, 35(21):125-131.  
XU Jianqiao. Three-dimensional turbulent simulation of inflow shaft in deep tunnel based on FLUENT [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(21): 125-131 (in Chinese).
- [11] CATAÑO-LOPERA Y A, TOKYAY T E, MARTIN J E, *et al.* Modeling of a transient event in the tunnel and reservoir plan system in Chicago, Illinois [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 140(9):5014005.
- [12] AKHLAGHI M, MOHAMMADI V, NOURI N M, *et al.* Multi-fluid VOF model assessment to simulate the horizontal air-water intermittent flow [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2019, 152:48-59.

作者简介:周大庆(1976—),男,浙江泰顺人,博士,教授,博士生导师,主要从事水电站、泵站水力学等方面的研究。

E-mail:zhoudaqing@hhu.edu.cn

收稿日期:2021-01-04

修回日期:2021-01-24

(编辑:任莹莹)