

基于 FLUENT 的排水深隧入流竖井三维湍流仿真

徐剑乔

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063)

摘要: 依托武汉大东湖深隧建设项目,采用流体力学分析软件(ANSYS 15.0-FLUENT)对落步咀预处理站的入流竖井进行建模分析,对比了两种典型竖井(涡流式和折板式)在不同工况下的消能和排气效果。模拟结果表明,在正常工况下,涡流式竖井中心入流筒中能形成附壁螺旋流,出流管末端断面平均流速为 2.1 m/s,水相体积分数为 0.991;折板式竖井通过流体在折板间的反复跌落实现消能和排气,出流管末端断面平均流速为 3.0 m/s,水相体积分数为 0.983。在过载工况下,两种竖井均不具备排气、消能效果。综合对比两种竖井的排气和消能效果,涡流式竖井略优于折板式竖井,且折板式竖井在大流量工况下会冲击井壁,影响竖井结构安全。

关键词: 深层隧道; 入流竖井; 多相流; 数值模拟; 计算流体力学

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)21-0125-07

Three-dimensional Turbulent Simulation of Inflow Shaft in Deep Tunnel Based on FLUENT

XU Jian-qiao

(China Railway Siyuan Survey and Design Group Co. Ltd., Wuhan 430063, China)

Abstract: The inflow shaft of Luobuzui sewage pretreatment station was simulated by fluid mechanics analysis software (ANSYS 15.0-FLUENT) based on the project of Dadonghu deep tunnel in Wuhan, and the energy dissipation and exhaust effect of two typical shafts (cyclone shaft and folded plate shaft) were compared under different operational conditions. Spiral flow could be formed in the central inlet tube of the cyclone shaft, and the average velocity at the end of the outlet pipe was 2.1 m/s and the volume fraction of water phase was 0.991. The energy dissipation and exhaust were realized by the fluid falling repeatedly between the folded plates in the folded plate shaft, the average flow velocity at the end section of the outlet pipe was 3.0 m/s and the volume fraction of water phase was 0.983. Under overload condition, both shafts had no exhaust and energy dissipation effect. By comprehensive comparison of the exhaust and energy dissipation effect of the two shafts, the cyclone shaft was slightly better than the folded plate shaft. The folded plate shaft would impact the shaft wall under the condition of large flow, and it would affect the structural safety of the shaft.

Key words: deep tunnel; inflow shaft; multiphase flow; mathematic simulation; computational fluid dynamics

近年来,利用地下深层排水隧道来解决城市排水问题成为许多国内外发达城市的选择。深层排水隧道主要包括浅层连接设施、预处理设施、竖井、隧道、调压水槽、排水泵站、通风(除臭)设施、排泥除

砂设施、监测与控制管理系统等^[1]。入流竖井是排水深隧最为重要的组成部分,也是隧道设计最关键的部分,其作用是将水流从浅层排水系统接入到深层隧道排蓄系统,并在水流下降时消减水流的机械

能,排出夹带的空气。入流竖井按其结构特点可分为直落式竖井、涡流式竖井、折板式竖井、螺旋坡道竖井、靴型竖井等,其中涡流式和折板式竖井较为常见。参考国内外已建成入流竖井的运行数据,两种入流竖井的比较如下:涡流式竖井适用于污水和雨水,对隧道冲洗强度较小,要求入流稳定,占地较小,不需要单独气室,排气效果好;而折板式竖井适用于雨水、合流污水和小流量污水,对隧道冲洗强度较大,对入流稳定性要求不高,占地较大,不需要单独气室,上部气体较为紊乱,下部入流排气效果较好。

1 工程概况

武汉大东湖排水深隧系统由北线和南线两部分组成,其中北线隧道功能定位为污水输送型系统,南线隧道功能定位为初期雨水调蓄和污水输送型系统,近期先实施北线“四厂合一”传输系统。北线工程主要服务于拟建的北湖污水处理厂,工程建设内容主要包括以下两大部分:①污水深隧系统,二郎庙预处理站至北湖污水处理厂污水主隧工程,总长约为17.5 km,直径为3.0~3.4 m;落步咀预处理站至三环线支线工程,采用双管,直径为1.5 m,长度为1.7 km。②地表完善系统,沙湖污水提升泵站(1.0 m³/s)及配套管网、二郎庙预处理站(9.8 m³/s)及配套管网、落步咀预处理站(5.7 m³/s)及配套管网、武东预处理站(2.4 m³/s)及配套管网。

2 分析方法

入流竖井中绝大部分流体处于湍流状态,其运动特性可通过连续性方程和N-S方程描述。

连续性方程:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

N-S方程:

$$\begin{cases} X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + v \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial u}{\partial t} \\ Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + v \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial v}{\partial t} \\ Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + v \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial w}{\partial t} \end{cases} \quad (2)$$

对上述方程组求解可获得速度、压力等流场信息^[2-3]。选用有限元软件 ANSYS 15.0 中的 FLUENT 模块进行建模分析,模拟对象为北线落步咀预处理站中的入流竖井,对比涡流式、折板式竖井的消能效果和气液分离效果。

3 实体建模

3.1 基本设置及控制参数

深隧入流竖井中流体包括气相和水相,其中气相密度设为1.29 kg/m³,黏度设为1.79 × 10⁻⁵ Pa·s(20℃);水相密度设为1000 kg/m³,黏度设为1.01 × 10⁻³ Pa·s(20℃),表面张力系数为7.28 × 10⁻² N/m(20℃)^[4]。为充分比较不同类型竖井的气液分离能力,本次模拟将入流污水初始含气量设为较高值(5%)。

数值计算方法选用基于PISO的压力-速度耦合算法,对于自由表面的追踪采用体积率函数法(VOF),时间步长设为0.01 s,松弛因子先保持默认值,若迭代收敛,则此设置不变,若解出现发散行为,则适当减小松弛因子^[5]。

3.2 边界条件

竖井入流箱涵的进口断面设为速度入口边界,出流管的出口断面设为自由出流边界^[6]。考虑到固液接触面间边界层的存在,壁面选择无滑移壁面边界^[7]。操作情况为大气压,在模型铅垂方向定义重力加速度为-9.81 m/s²(指向z轴负方向)^[8]。

3.3 涡流式竖井建模及网格划分

涡流式竖井内径为11.0 m,涡室有效高度为12.4 m,设两座入流箱涵,每座断面尺寸为1.5 m × 2.6 m,箱涵长10 m,在箱涵与中心入流筒交界位置设有两个涡室,涡室顶部留有2根Ø0.2 m的通风管。两条中心入流筒直径为1.5 m、长度为10.05 m,入流筒末端距竖井下底面1.65 m。在竖井底部正对入流筒位置设有两个直径为1.5 m、高为0.35 m的圆锥体凸起(起导流作用),竖井底部有两根Ø1.5 m的排出管。利用 FLUENT 自带的 ANSYS FLUENT MESHING 进行网格划分,采用四面体网格自动划分,全计算域单元总数为229 234个。涡流式竖井的三维模型及网格划分见图1。

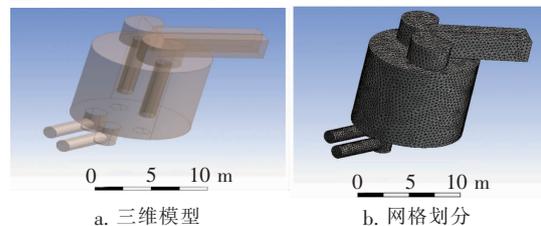


图1 涡流式竖井的三维模型及网格划分示意

Fig. 1 Three-dimensional model and meshing of cyclone shaft

3.4 折板式竖井建模及网格划分

折板式竖井内径为 11.0 m,有效高度为 15.0 m,其中入流箱涵底与井底高差为 12.4 m。对于折板间距、折板厚度、通气孔位置与尺寸等参数,参考国内相关研究,当入流量在 10 ~ 40 m³/s 之间时,采用如下设计参数具有较小的弗劳德数:折板厚度 $t = 0.3$ m、折板宽度 $B = 5.5$ m、两折板间距 $h = 2.1$ m、共设 5 块折板^[9]。

折板式竖井仅设 1 座入流箱涵,涵宽为 3 m、高为 2.6 m。竖井干湿区之间设两个矩形通气孔,尺寸为 1.0 m × 0.8 m。在网格划分时,与涡流式竖井相同,仍采用四面体网格自动划分,全计算域单元总数为 118 991 个。折板式入流竖井的三维模型及网格划分如图 2 所示。

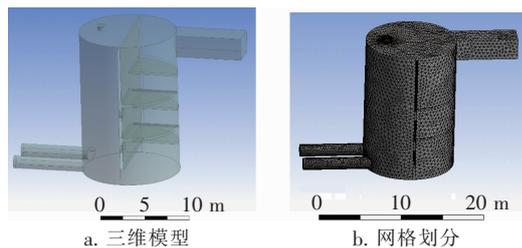


图 2 折板式竖井三维模型及网格划分示意

Fig. 2 Three-dimensional model and meshing of folded plate shaft

3.5 模拟工况

竖井近期旱季设计流量为 3.0 m³/s,考虑到落步咀预处理站服务范围(主城武昌北部地区)内存在较大的合流区域,按照截流倍数 $n_0 = 5$ 考虑,则入流量为 15.0 m³/s,对应流速为 1.92 m/s,为便于后期分析流速变化规律,将入流流速取整(2.0 m/s),对应入流量为 15.6 m³/s(工况 1)。此外,对过载状态下竖井内流体流动规律的研究也十分必要,因此将入流箱涵中流速取设计最大值(5.0 m/s),对应入流量为 39.0 m³/s(工况 2)。由于实际入流竖井流动情况比较复杂,需要对模型进行简化,做如下假设:①系统不考虑温度变化的影响,即在等温条件下运行;②模拟过程中上游入流断面处流态视为恒定流,竖井下游管道排水始终视为通畅;③不考虑污水中固体颗粒对水相流态的影响。

4 模拟结果与分析

4.1 涡流式竖井流态分析

取涡流式竖井中混合体入流稳定后(第 10 秒)

的流体状态进行分析。当入流量为 15.6 m³/s(工况 1)时,混合体的流速随流线的变化规律如图 3(a)所示。入流箱涵中的流线较为均匀,流体接近层流状态,流速较小(0.96 ~ 2.0 m/s),涡室中的流体流速有所增加(1.1 ~ 6.2 m/s),但流线依然保持均匀,越靠近涡室中心则流速越大。在中心入流筒中,流速明显增大。竖井中的水相体积分数随流线的变化规律如图 3(b)所示。在入流箱涵与涡室中,流体主要以气液混合态流动,在箱涵以及涡室顶部空气含量略高(20% ~ 35%)。在中心入流筒中气液混合体快速分离,由于离心力的作用,液相在入流筒中呈附壁螺旋流,这种特殊的流态可有效改善水动力荷载,减少结构受到的激振力。在较大的边壁切应力下,气液两相界面清晰,水相紧贴入流筒内壁,气相沿竖井中心线形成稳定的气核空腔,出流管中气相体积分数几乎为零。

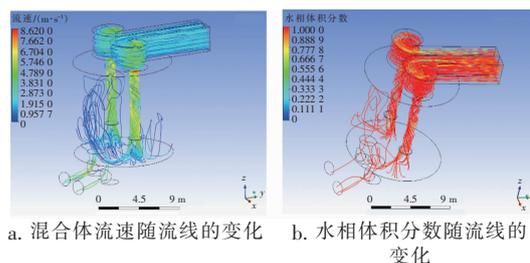


图 3 涡流式竖井的流态模拟结果(工况 1)

Fig. 3 Simulation results of flow pattern in cyclone shaft (condition 1)

当入流量为 39.0 m³/s(工况 2)时,混合体流速随流线的变化规律如图 4(a)所示。入流箱涵中流线出现轻微波动,流体质点之间开始出现掺杂现象。值得注意的是,该工况下中心入流筒中的最大流速为 6.85 m/s,而工况 1 中的最大流速为 8.62 m/s,这主要是由于入流量增大后,井室下方水相无法及时排出,导致液位上升,混合体有效跌水深度减小。显然,随着入流时间的延续,污水很快会充满井室并从通气孔溢流,因此在后期运行过程中应控制涡流式竖井的入流量,避免其发生超载现象。虽然工况 2 的峰值流速低于工况 1,但其出流管中流体平均速度偏高,介于 3.9 ~ 6.6 m/s 之间,主要是由于在较大的入流量下,中心入流筒中的流态由附壁螺旋流转变为水塞流,消能效果减弱。结合图 4(b)所示的水相体积分数随流线的变化规律可以看出,在入流箱涵、中心入流筒和出流管中,气相均离散地分布在

水相中,出流管中水相体积分数为 0.96 左右,可见在该工况下涡流式竖井已不具备气液分离的作用。

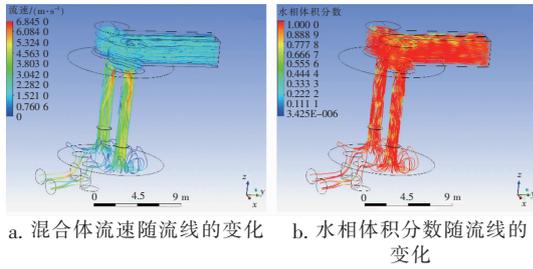


图 4 涡流式竖井的流态模拟结果(工况 2)

Fig. 4 Simulation results of flow pattern in cyclone shaft (condition 2)

为进一步研究入流筒内流体的流速变化规律,截取入流筒中心线所在的 xz 断面速度分布云图,如图 5 所示。对于工况 1,混合体峰值流速出现在中心入流筒入口处,平均流速沿入流筒向下逐渐减小,跌落后的流体流速介于 1.0 ~ 2.9 m/s 之间,井体内流速普遍偏低。对于工况 2,峰值依然出现在入流筒的入口处,但流速沿入流筒向下始终保持较大值,跌落后的流体流速介于 1.5 ~ 3.8 m/s 之间。

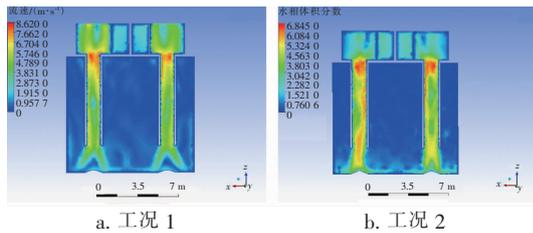


图 5 涡流式竖井 xz 断面流速分布云图

Fig. 5 Velocity distribution of cyclone shaft in xz cross-section

4.2 折板式竖井流态分析

对于折板式竖井,同样取混合体入流稳定后(第 10 秒)的流体状态进行分析。在工况 1 条件下,混合体流速和水相体积分数随流线的变化规律如图 6 所示。折板式竖井中混合体流速介于 0 ~ 9.74 m/s 之间,最大流速出现在混合体跌落到下层折板前的瞬间,平均流速约为 5.5 m/s,局部流体质点流速接近 7.5 m/s,在出流管中平均流速约为 4.0 m/s,消能效果略差于涡流式竖井。在流态上,每层折板末端出射水流可近似视为矩形截面出流,由于过流“湿”区的竖井边壁为弧形曲面,原本就不稳定的水流在折板间跌落的过程中,受弧形边壁的挤压,导致折板末端的水流宽度比折板宽度小。从气液分

离效果来看,折板上方水面距离上一层折板底面仍有一定空间,混合体在折板面跌水的同时发生气液分离,大量空气首先聚集在两层隔板之间,随后通过隔板间的通气孔由“湿区”进入“干区”。在工况 1 条件下,折板式竖井的气液两相得到了较好的分离,出流管中的水相体积分数接近 1。

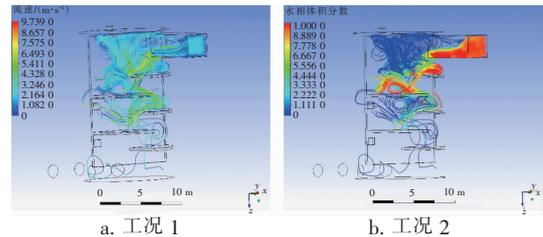


图 6 折板式竖井的流态模拟结果(工况 1)

Fig. 6 Simulation results of flow pattern in folded plate shaft (condition 1)

在工况 2 中,混合体流速和水相体积分数随流线的变化规律如图 7 所示。折板式竖井中混合体流速介于 0 ~ 17.41 m/s 之间,随着流量的增大,水流的跌落距离(水流中心线跌落点到折板末端的水平距离)相应增大,水舌无法直接跌落在折板上,而是冲向竖井边壁,并沿壁面向下流动,随后贴着折板表面水平射出,跌向下一层折板。折板式竖井通过将水流直接引入折板上的水垫层中进行消能,而贴壁流态使水流直冲向井壁,不仅冲击井壁,还不利于消能,这也导致出流管中流体流速较大,达到了 7 ~ 11 m/s。在气液分离方面,该工况下,两折板间几乎被气液两相体充满,这一方面大大减少了液面上部气体的积存空间,另一方面过高的壅水面也会堵塞通气孔,阻碍气体从“湿区”到达“干区”,因此出流管中仍有一定气体,水相体积分数为 88% ~ 95%。

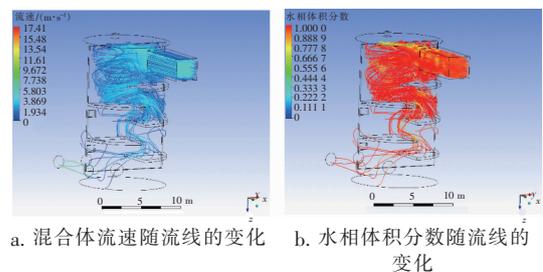


图 7 折板式竖井的流态模拟结果(工况 2)

Fig. 7 Simulation results of flow pattern in folded plate shaft (condition 2)

4.3 涡流式竖井与折板式竖井的比较

分别在涡流式竖井与折板式竖井中心沿轴向(z

轴)取 29 个流体质点,对其流速进行统计,结果如图 8 所示。

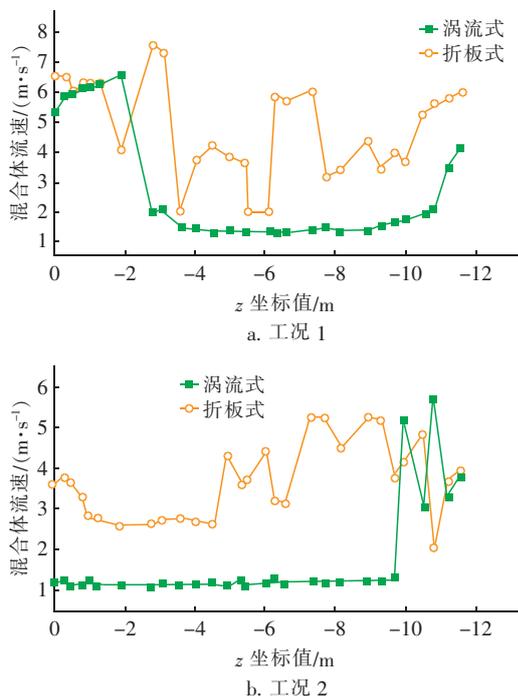


图 8 两种竖井中的流速随跌落深度的变化

Fig. 8 Variation of flow velocity with drop depth in two shafts

在工况 1 中,涡流式竖井的质点流速随跌落深度先缓慢增加,在 $z = -2$ m 位置达到最大值 (6.6 m/s),随后急剧减小,并在 $z = -4 \sim -9$ m 位置保持在 1.5 m/s 左右,而在 $z = -9$ m 以下,流速又呈现增大的趋势,末端流速为 4.0 m/s。折板式竖井的质点流速随 z 坐标值的减小呈现近似周期性的变化规律,在两折板之间流速较大,在折板附近流速较小,末端质点流速为 6.5 m/s。在工况 2 中,两种竖井的质点在 $z = 0 \sim -10$ m 范围内波动均有所减小,尤其是涡流式竖井,在工况 2 中流速变化规律与工况 1 中存在较大差异,这主要是由于在过载工况下,涡室与中心入流筒中已充满流体,流体质点有效跌水深度接近零,中心入流筒内的流态类似于有压管流,流速随流程缓慢增大,在入流筒出口附近由于阻力减小,质点流速突然增大。总的来看,在两种工况下涡流式竖井中质点平均流速与流速波动较小,可以认为涡流式竖井的消能效果优于折板式竖井。

在工况 1 中进一步分析竖井中心轴向 (z 轴) 水相体积分数数据,统计结果如图 9 所示。两种竖井的水相体积分数均在局部位置出现较低值,主要是

由于该区域附近存在微气泡群。涡流式竖井的水相体积分数随 z 坐标值的减小整体呈略微增大趋势,在跌水末端水相体积分数接近 1;折板式竖井跌水末端的水相体积分数虽然与涡流式竖井较为接近,但其值沿流程波动较大。

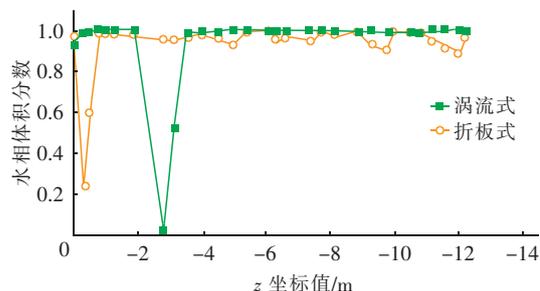


图 9 两种竖井的水相体积分数随跌落深度的变化

Fig. 9 Variation of volume fraction of water phase with drop depth in two shafts

进一步选取工况 1 下两种竖井出流管末端断面进行分析,该断面处的流速分布见图 10。

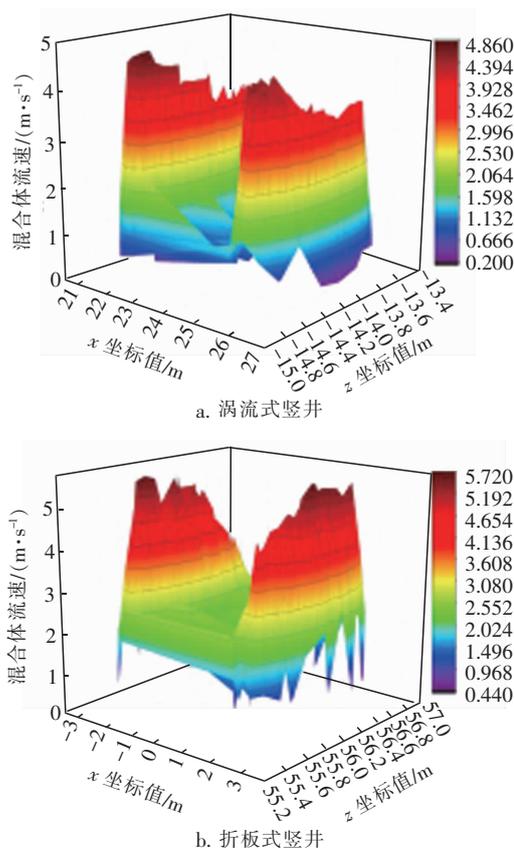


图 10 涡流式竖井与折板式竖井的出口断面流速分布

Fig. 10 Flow velocity distribution of outlet cross-section in cyclone shaft and folded plate shaft

由图 10 可知,两种竖井的流速变化规律较为类

似,从出流管中心向管道内壁流速均先增大后减小,但涡流式竖井的最大流速(4.8 m/s)小于折板式竖井的最大流速(5.3 m/s),且涡流式竖井出流管的平均流速约为2.1 m/s,而折板式竖井出流管的平均流速约为3.0 m/s。

图11为竖井出流管末端断面的水相体积分数分布。涡流式竖井中,水相体积分数为1的区域占整个截面的60%,水相体积分数最低值为0.92,可以认为涡流式竖井出流管中除局部位置含有微气泡群外,全部由水相组成。折板式竖井除靠近管道内壁处水相体积分数接近1外,其余位置仍然有大量离散的微气泡群分布,且越靠近管道中心,气相含量越大,其气液分离效果略差于涡流式竖井。

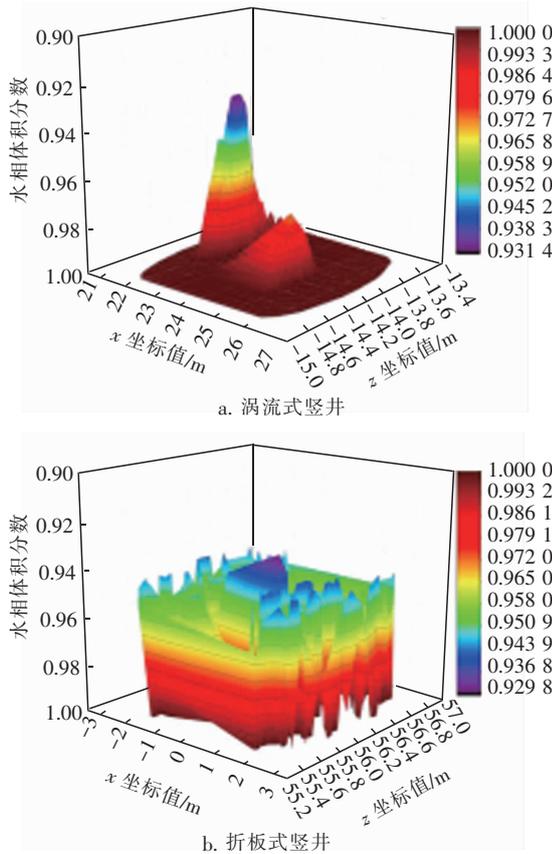


图11 涡流式竖井与折板式竖井的出口断面水相体积分数分布

Fig. 11 Distribution of volume fraction of water phase of outlet cross-section in cyclone shaft and folded plate shaft

5 结论

在武汉大东湖深隧建设工程中,利用FLUENT软件对落步咀预处理站的入流竖井进行了建模分析,从消能和排气两方面对比了两种竖井在不同工

况下的性能,主要结论如下:

① 在消能方面,工况1条件下(入流量为 $15.6 \text{ m}^3/\text{s}$)涡流式竖井在入流筒中以附壁螺旋流形式消能,入流筒中水流流速梯度较大,出流管中的平均流速为2.1 m/s;折板式竖井中的混合流体在跌落过程中实现消能,出流管中的平均流速为3.0 m/s。在工况2条件下(入流量为 $39.0 \text{ m}^3/\text{s}$),两竖井均处于过载状态,不具备消能效果。

② 在排气方面,工况1条件下涡流式竖井入流筒中有稳定的气核空腔,气液界面清晰,出流管中的水相体积分数为0.991,折板式竖井中的污水集中在折板上底面,空气聚集在上层折板的下底面,并通过排气口进入干区,出流管中的水相体积分数为0.983。在工况2中,两种竖井的排气效果较差,出流管中的水相体积分数与入流管差异不大。

综合对比两种竖井的排气消能效果,涡流式竖井略优于折板式竖井,且折板式竖井在大流量工况下会冲击井壁,影响竖井结构安全,因此落步咀预处理站的入流竖井形式确定为涡流式。需要指出的是,数学模型结果的准确性需建立在率定、验证的基础上,本研究主要用于不同方案的对比,武汉大东湖深隧目前正处于建设阶段,待其投入使用后,应结合入流竖井的运行数据,对模型参数进行校验,以提高模型的准确性。

参考文献:

- [1] 鲁朝阳,车伍,唐磊,等. 隧道在城市洪涝及合流制溢流控制中的应用[J]. 中国给水排水,2013,29(24): 35-40.
Lu Zhaoyang, Che Wu, Tang Lei, et al. Application of stormwater tunnel to control of urban flooding and combined sewer overflow [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(24): 35-40 (in Chinese).
- [2] Pettersson K, Krajnovic S, Kalagasidis A S, et al. Simulating wind-driven rain on building facades using Eulerian multiphase with rain phase turbulence model [J]. Building and Environment, 2016, 106: 1-9.
- [3] Kubilay A, Derome D, Blocken B, et al. Wind-driven rain on two parallel wide buildings: field measurements and CFD simulations [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2015, 146: 11-28.
- [4] 张德胜,吴苏青,施卫东,等. 不同湍流模型在轴流泵叶顶泄漏涡模拟中的应用与验证[J]. 农业工程学报,

2013,29(13):46-53.

Zhang Desheng, Wu Suqing, Shi Weidong, *et al.* Application and experiment of different turbulence models for simulating tip leakage vortex in axial flow pump[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(13):46-53 (in Chinese).

- [5] 谭思超, 赵富龙, 李少丹, 等. VOF 模型界面传质与体积传质的转换方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2015, 36(3):317-321.

Tan Sichao, Zhao Fulong, Li Shaodan, *et al.* The transformation method of mass flux and mass transfer rate per volume at the interface in VOF model[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2015, 36(3):317-321 (in Chinese).

- [6] Huang S H, Li Q S. Large eddy simulations of wind-driven rain on tall building facades [J]. Journal of Structural Engineering, 2012, 138(8):967-983.

- [7] 何森, 柳贡慧, 李军, 等. 多相流全瞬态温度压力场耦合模型求解及分析[J]. 石油钻探技术, 2015, 43(2):25-32.

He Miao, Liu Gonghui, Li Jun, *et al.* Solution and analysis of fully transient temperature and pressure coupling model for multiphase flow[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43(2):25-32 (in Chinese).

- [8] 尹邦堂, 李相方, 孙宝江, 等. 井筒环空稳态多相流动力学模型[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(3):359-366.

Yin Bangtang, Li Xiangfang, Sun Baojiang, *et al.* Hydraulic

model of steady state multiphase flow in wellbore annuli [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(3):359-366 (in Chinese).

- [9] 王斌, 邓家泉, 何贞俊, 等. 折板跌落式竖井设计约束条件研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2015, 13(5):363-367, 374.

Wang Bin, Deng Jiaquan, He Zhenjun, *et al.* A study on design constraints for baffle-drop shaft structure [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2015, 13(5):363-367, 374 (in Chinese).



作者简介:徐剑乔(1992-),男,浙江建德人,工学硕士,助理工程师,研究方向包括海绵城市、深层排水隧道、水力模型等。

E-mail:925455989@qq.com

收稿日期:2019-04-26

