

跌流竖井结构优化及其气压特性数值模拟

芦三强¹, 乔时雨²

(1. 兰州理工大学能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要:针对入流水舌引起的跌流竖井内负压过大问题,对前人研究中的原始竖井模型进行了结构优化设计。采用可实现的 $k-\varepsilon$ 湍流模型以及 VOF 两相流模型研究了不同入流量下原始竖井模型和优化竖井模型中的流态分布规律及气压分布情况,建立了可用于确定优化竖井模型中通气管道底部安装高程的水舌撞击模型,探讨了通气管道相对进水管的位置对优化模型中气压分布的影响。结果表明:进水管附近的跌落水舌束窄了井内气体的正常流通通道,水舌上方形成了大面积气体回流区,水舌下方补气不足,进水管附近负压突增现象明显;建立的水舌撞击模型能够较准确地预测出水舌末端的撞击点位置,最大误差不超过 10%;得到的通气管道底部安装高程为 2.31 m,顶部高程略高于进水管上壁面;相比原始竖井模型,优化竖井模型能够使负压突增区的压差降低 70% 以上,并且当通气管道与进水管水平中心延长线之间的夹角为 30° 时,优化竖井模型所发挥的效果最好。

关键词:跌流竖井;水舌;水气两相流;结构优化;气压分布;数值模拟

中图分类号:TV672;TU992 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2023)06-0024-06

Structure optimization and numerical simulation of air pressure characteristics of a plunging flow dropshaft//LU Sanqiang¹, QIAO Shiyu² (1. College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Aiming at the problem of excessive negative pressure in a dropshaft caused by the inflow water tongue, the structure optimization design for the original dropshaft model was carried out. The realizable $k-\varepsilon$ turbulence model and VOF two-phase flow model were used to study the flow regime and air pressure distribution in the original model and the optimized one under different inflow rates. A water tongue impact model was established to determine the installation elevation of the ventilation pipe bottom in the optimized model. The influence of the ventilation pipe position relative to the intake pipe on the air pressure distribution was discussed. The results show that the falling water tongue near the intake pipe blocks the normal air flow in the well, and large air recirculation zones are formed above the water tongue. The space below the water tongue cannot be replenished in time, and the sudden increase of negative pressure near the intake pipe is obvious. The established water tongue impact model can accurately predict the impact point position at the water tongue end, and the maximum error is within 10%. The installation elevation of the ventilation pipe bottom is 2.31 m, and the top elevation is slightly higher than the upper wall of the water inlet pipe. The optimized shaft model can reduce the pressure difference in the negative pressure surge zone by at least 70%, and when the angle between the ventilation pipe and the horizontal center extension line of the inlet pipe is 30°, the optimized dropshaft model has the best effect.

Key words: plunging flow dropshaft; water tongue; gas-liquid two-phase flow; structure optimization; air pressure distribution; numerical simulation

跌流竖井作为水利工程及市政排水系统中广泛使用的输水建筑物之一,主要用于将上游海拔较高处管道中的水流转移到下游海拔较低的排水管道中^[1-2]。不同于旋流竖井^[3]、折板竖井^[4]等其他类型竖井的进水方式,跌流竖井中水流从进水管处以水舌的形式直接自由跌落,水舌撞击井壁后会在进水管附近形成一个水体阻隔区域,造成竖井内通气不畅、负压过大以及卷吸气量过多等问题^[5-8]。

跌流竖井内负压过大会引发一系列问题,如排污管道中气体流通的空间被加压,会导致排污系统中产生的一些臭气从一些地表开口逸散到外界环境中^[9-10];在极端暴雨天气下还可能会引发井喷,冲起的井盖在下落时可能会砸伤行人和引发交通事故等^[11-12]。为了降低水舌引起的负压过大问题,芦三强等^[13]在跌流竖井进水管附近布置了一个有旋分流隔板,目的是改变下落水流的流动方向,使水流围

绕隔板两侧旋转流动,同时隔板中间形成了一个不过水的空腔区域,能有效防止水舌束窄气体流通的空间。龚旭^[14]在进水管与立管交汇处上方放置了一个挡板,其目的是调节进水管中跌落水舌的入流角度,使水舌直接撞击到挡板上而不是管壁上,从而在进水管附近保留一定气体流通空间。以上关于跌流竖井进水管附近的结构优化设计都发生在竖井结构内部,尽管能起到一定的通气和调节气压的作用,但是由于占据了部分水体流通的空间,影响了竖井的过流能力,同时也不利于后续检修作业等。

本文基于文献[7]中的竖井几何模型(原始竖井模型),采用数值模拟的方法研究了原始竖井模型进水管附近的流态与气压分布规律,分析了进水管附近负压突增的原因,提出了改善进水管附近通气状况的结构优化方案,建立了可以确定通气管道安装高程的理论模型,并评估了优化竖井模型的性能,最后探讨了通气管道相对进水管的位置对优化竖井模型内气压分布的影响。

1 竖井模型数值模拟

1.1 数值模型

跌流竖井内水流以自由跌落的形式运动,下落过程中水流会发生碰撞和破碎等,水流运动剧烈,同时下泄水流会夹带大量气流,水气混掺严重,属于典型的水气两相流。雷诺平均模型能够很好地模拟湍流运动,其中可实现的 $k-\varepsilon$ 湍流模型在湍动黏度中引入了与旋转和曲率有关的内容^[15-16],可以较好地模拟管道流、射流和混合流等多种复杂形式的流动^[16-17]。VOF 模型能够很好地追踪两种流体的相界面位置,可以方便地观察竖井内水气两相的分布状态。本文采用可实现的 $k-\varepsilon$ 湍流模型和 VOF 模型进行跌流竖井内流态分布规律及气压分布研究,两种模型的具体形式可参见文献[16-17]。

1.2 几何模型及网格划分

优化竖井模型几何结构如图 1(a)所示,该结构以竖井顶部中心为原点, z 轴向下为正方向进行建模。优化模型由原始竖井模型与添加在进水管正对面的通气管道组成,通气管道主要作为水舌阻隔区域气体流通的通道。通气管道主要包括水平管、竖直管和倾斜管,其直径均为 0.1 m,水平管的长度为 0.36 m,竖直管的高度为 0.85 m,倾斜管与竖井井身的夹角为 70° ,设置倾斜管的目的是防止贴壁水流发生回流,堵塞通气管道的出口,原始竖井模型的几何参数可参见文献[7]。

利用 ICFM CFD 软件进行网格划分。考虑到竖井结构为规则的圆柱体结构,采用 O-grid 方法能够

很好地地将计算域划分为六面体结构化网格,同时也便于生成边界层网格。可实现的 $k-\varepsilon$ 湍流模型适用于雷诺数较大的湍流核心区域,而对于雷诺数较小的近壁面区域则配合壁面函数法进行求解,本文选用非平衡壁面函数法进行处理。将边界层网格的层数设置为 15 层,第一层网格高度设为 0.6 mm,每层按照指数方式增长,增长率为 1.2,划分完的网格如图 1(b)和(c)所示。

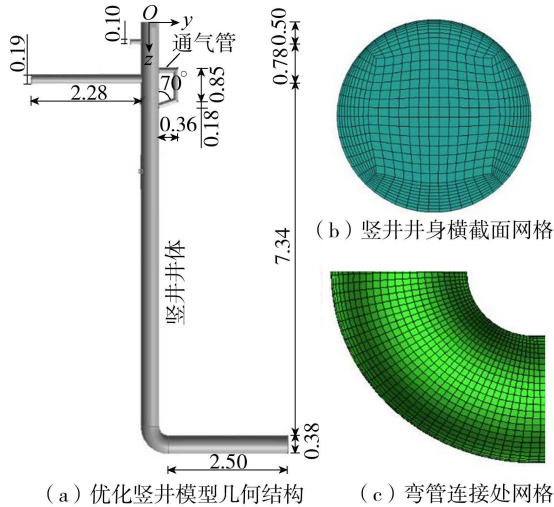


图 1 优化竖井模型几何结构和网格划分(单位:m)

1.3 边界条件及工况

竖井进水管与进气管分开布置,进水管入口采用质量流入口,只允许水流通过;进气管入口通向外界大气,采用压力入口,竖井顶部密封,气体全部从进气管进入竖井内部;出水口连通外界大气,设为压力出口;竖井壁面采用无滑移壁面边界。本文竖井除了结构和进水管中水量有变化外,再无其他变量,所以原始竖井模型和优化竖井模型均采用流量工况。选取 18.6、22.0、25.8、33.5、38.3、42.8、47.6 L/s 等几组典型工况进行分析,其中部分流量工况与文献[7]中的入流量保持一致,主要是为了方便与文献[7]中的试验测量数据进行验证和比较。同时,在后续数据分析处理过程中,将入流量进行了无量纲化,目的是消除竖井体型对模拟结果的影响。无量纲入流量 Q_w^* 可以表示为 $Q_w^* = Q_w / \sqrt{gD^5}$,其中 Q_w 为入流量, g 为重力加速度, D 为竖井的直径。7 组流量工况入流量无量纲化后分别为 0.07、0.08、0.09、0.12、0.14、0.15、0.17。

1.4 网格无关性验证

为了验证网格数量对计算结果精度的影响,对 23 万、36 万、47 万和 65 万共 4 种不同数量的网格在 Fluent 中采用相同的设置进行计算求解,选取无量纲入流量为 0.07 的工况进行网格无关性检验并观察竖井内的垂向气压变化,结果如图 2 所示。由

图 2 可知,随着网格数量的增加,计算结果的精度的确在提高,但是当网格数量增加到 47 万和 65 万时,计算结果趋于稳定并不再变化,并且 47 万和 65 万网格下监测到的压力曲线与测量值吻合较好,也说明了数值模拟结果的准确性,因此选择 47 万网格进行后续的模拟。

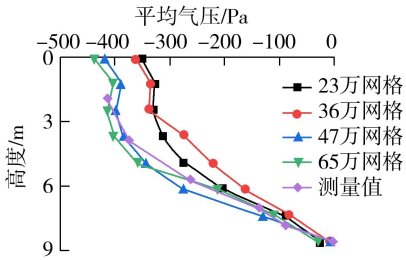


图 2 网格无关性验证

2 结果与分析

2.1 数值模拟准确性验证

为了验证数值模拟结果的准确性,利用不同入流量下进气管中气体流速的模拟值与文献[7]中利用气压测量值计算出的流速值进行比较,结果如图 3 所示。由图 3 可见,不同入流量下进气管中气体平均流速的模拟值与测量值吻合良好,最大误差不超过 6%,说明数值模拟的结果是可靠的。

2.2 井身横向压强分布

为了探究入流水舌对进水管附近井身横截面上压强分布的影响,以无量纲入流量 0.09 和 0.12 为例,在 $z=1\text{ m}$ (水舌影响区域上端)、 $z=1.5\text{ m}$ (水舌影响区域) 和 $z=2.5\text{ m}$ (水舌影响区域下端) 处共选取 3 个截面进行分析,结果如图 4 所示。当无量纲入流量为 0.09 时,由图 4(a) 可见,在 $z=1\text{ m}$ 截面上,最大压差约为 3 Pa,说明在水舌上端区域,整个

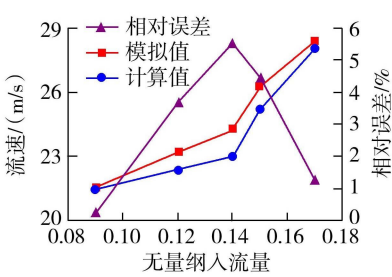


图 3 进气管气体平均流速对比

截面上的气压变化很小,基本上是均匀分布的;由图 4(b) 可见,整个截面上 ($z=1.5\text{ m}$) 的压强也基本相同,只有进水管正对面有一小部分区域表现为正压,这是由于水舌撞击到对面的井壁上造成的;由图 4(c) 可见,除了井壁以及进水管正对面位置处有压力的升降外,其他区域的压强也是均匀分布的,这是因为水舌撞击到井壁后,会有部分水流贴着壁面下落,因此壁面位置处压力会比竖井中央大。当无量纲入流量为 0.12 时,3 个位置处竖井截面上的压强分布与无量纲入流量为 0.09 时的情况相似。综上所述,同一入流量下,除了有水舌撞击的区域以及井壁上有水流附着的区域外,同一平面上的横向压强是均匀分布的。

2.3 垂向气压分布

原始竖井模型内的垂向气压分布如图 5 所示。由图 5 可知,竖井内相同位置上的气压(负压)随着入流量的增大而增大;同一流量下,从竖井顶部到底部气压整体呈现不断增大的趋势,说明竖井内气体卷吸现象严重,竖井底部被不断加压。由图 5 还可以看到,在 $z_1(z=1.23\text{ m}) \sim z_2(z=1.85\text{ m})$ 区域内负压表现为突然增大,并且 z_2 处为竖井内负压最大的地方,同时入流量越大, $z_1 \sim z_2$ 区域内的垂向气压梯度也越大,如当无量纲入流量为 0.09、0.12、

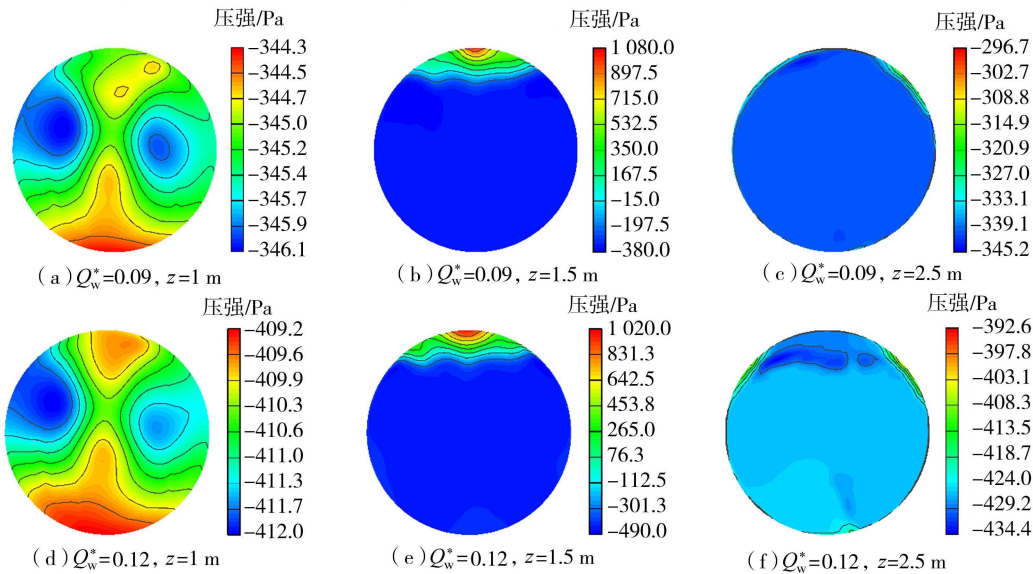


图 4 竖井井身横截面上的压强分布

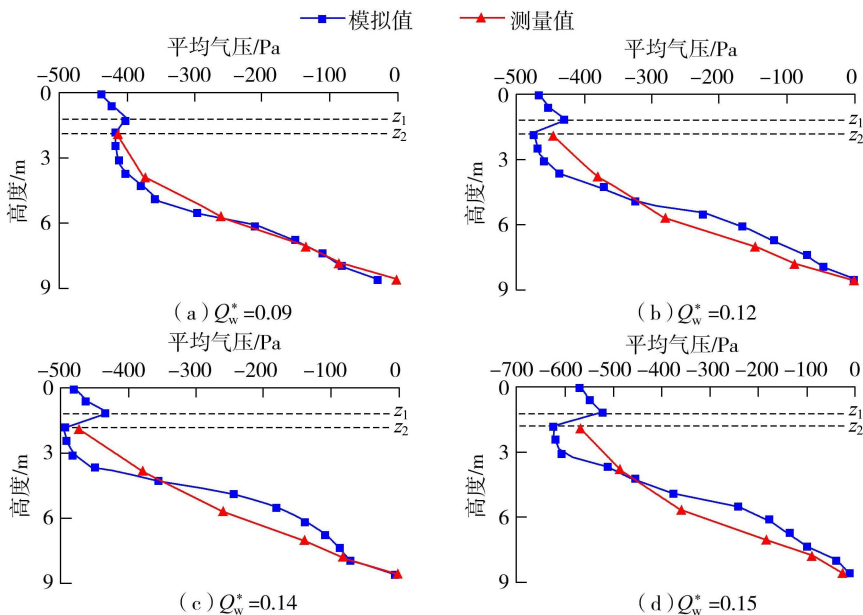


图5 原始竖井模型内垂向气压分布

0.15、0.17 时, z_1 和 z_2 两者间压差的绝对值分别为 14.67、43.99、104、161 Pa, 增幅很大。从进水管附近的流速分布规律可知, $z_1 \sim z_2$ 区域的负压之所以会突增, 主要是因为水舌束窄了该区域内气体流通的通道, 导致气体在该区域发生了大面积回流, 水舌下方补气不足。

2.4 进水管附近流速矢量和流线分布规律

本文重点探讨进水管附近的水舌运动及其影响, 图 6 为进水管附近流速矢量与流线的分布。由图 6 可知, 进气管中的气体进入竖井后先是与井壁相撞, 一部分气体沿着井壁向上运动并在进气管上方形成了回流区, 另一部分气体向下运动并在进水管附近受到了水舌的阻挡, 在与水舌发生碰撞后, 开始反向流动, 在进水管与进气管之间形成了一个较大的回流区。不同的是, 图 6(b) 中在水舌与井壁碰撞后又形成了一个回流区, 这主要是由于随着入流量的增大, 水舌与井壁撞击后形成的水体面积增大, 导致该区域气体过流空间不足, 所以气体发生了回流。而图 6(a) 中由于水舌所占据的空间还不足以

影响气体的流动, 所以并没有在该处形成回流区。

3 跌流竖井的结构优化

3.1 通气管道安装高程的确定及气压对比分析

通气管道的主要作用是连通被水舌阻隔的气体流通通道, 方便水舌阻隔区域通气, 因此确定通气管道的安装高程和位置就需要确定水舌阻隔区域的大体位置, 水舌阻隔区域即水舌从进水管下方跌落到撞击到对面井壁上的区域。基于这个目的, 本文提出一种水舌撞击模型, 该模型旨在预测水舌末端撞击点的位置(水舌下落的起点位置已知, 即进水管末端高程), 建模时将水舌的跌落过程近似地看作是一种类平抛运动。关于水舌末端撞击点高度的计算过程如下:

a. 确定水舌做类平抛运动的水平速度 v_1 。显然, v_1 就是进水管中水流的流速, 即

$$v_1 = Q_w / A \quad (1)$$

式中 A 为进水管中水流的横截面积。

b. 确定水舌从进水管下落到撞击到井壁上所需的时间 T :

$$T = x / v_1 \quad (2)$$

式中 x 为水舌做类平抛运动的水平位移。由于井壁的约束, 水平位移最大为竖井的直径长。

c. 确定水舌从起始点下落到撞击点 C 的垂直距离 Y , 即撞击点 C 的高度:

$$Y = gT^2 / 2 \quad (3)$$

联合式(1)(2)(3)以及无量纲入流量 Q_w^* 计算公式, Y 可以表示为

$$Y = \frac{\pi^2 D_1^4}{32 D^3 (Q_w^*)^2} \quad (4)$$

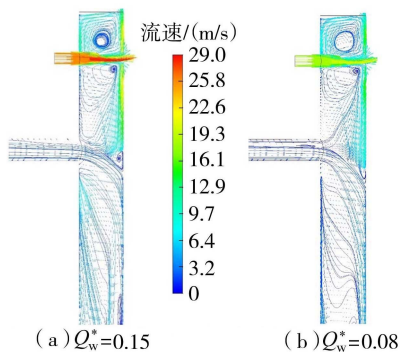


图6 进水管区域流速矢量与流线分布

式中 D_1 为进水管的直径。

利用上述水舌撞击模型计算了有关水舌做类平抛运动时的一些参数(本文中 $Q_w^* > 0.08$ 时,水舌对竖井内气压才会有影响,故不考虑 $Q_w^* < 0.08$ 时的情况),结果如表 1 所示。由表 1 可见,利用式(11)计算的水舌撞击点位置与模拟所得到的撞击点位置吻合较好,最大误差不超过 9%;随着入流量的增大,水舌撞击点位置越靠近进水管位置,符合实际的物理运动过程,所以有关水舌撞击点 C 的位置的预测是较准确的;水舌撞击到井壁上的最大垂直距离为 0.85 m,因此竖直管的最大长度可设为 0.85 m;考虑到当进水管中充满水时水舌顶部与进水管上壁面基本齐平,因此通气管道的起始高程略高于进水管上壁面,而通气管道的底部高程为起始高程加上竖直管最大长度,倾斜管的垂直高度可以作为安全超高,可得到通气管道末端高程为 2.31 m。

表 1 水舌做类平抛运动时的计算参数

无量纲入流量	水平速度/(m/s)	运动时间/s	垂直距离/m	计算撞击点高度/m	模拟撞击点高度/m	误差/%
0.09	0.91	0.42	0.85	2.13	2.21	5.88
0.12	1.18	0.32	0.51	1.79	1.83	4.92
0.15	1.51	0.25	0.31	1.59	1.69	8.88
0.17	1.67	0.23	0.25	1.53	1.58	3.16

为了评价安装通气管道后优化竖井模型的性能,本文分析了 4 组无量纲入流量(0.09、0.12、0.15 和 0.17)下优化竖井模型内的气压分布情况,并与原始竖井模型进行了比较,结果如图 7 所示。由图 7 可以发现,相比原始竖井模型,优化竖井模型能够大幅降低竖井内的整体负压,进水管附近 $z_1 \sim z_2$ 区域基本上没有出现负压突增的情况,并且气压梯度也逐渐趋于平缓,基本上消除了水舌对进水管附近气压的影响。当无量纲入流量为 0.09、0.12 时,负压突增区 z_1 和 z_2 两者间的压差分别为 1、3 Pa,相比原始竖井中的 14.67、43.99 Pa,该区域的压差均降低了 93.2%;无量纲入流量为 0.15、0.17 时, z_1 和 z_2 两者间的压差为 16、34 Pa,相比原始竖井中的 104、161 Pa,分别降低了 84.6%、78.9%。尽管随着流量

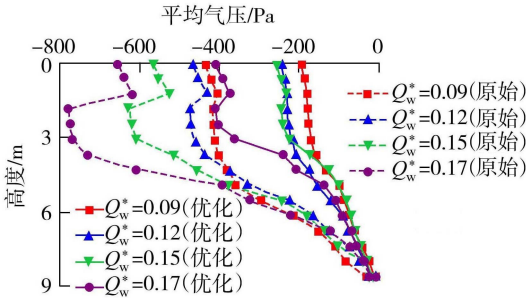


图 7 优化竖井模型与原始竖井模型的气压分布对比

的增大,通气管道发挥的作用有所降低,但是当进水管达到最大无量纲入流量 0.17 时压差仍能降低 70% 以上。从图中还可以发现,竖井中的负压整体有所减小,相比原始竖井结构,4 组入流量下优化竖井中的上下游压差分别降低了 54.8%、52.4%、57.1% 和 40.6%,平均降低约 50%。

3.2 通气管道相对进水管的位置对气压分布的影响

优化模型通气管道是安装在进水管正对面的(见图 1(a)),考虑到通气管道相对进水管的位置可能会影响通气管道的性能,本文对此进行了探讨,具体做法是将通气管道分别设置在与进水管水平中心延长线分别呈 30°、60° 和 90° 角的位置处(30° 工况、60° 工况、90° 工况),具体结构如图 8 所示。

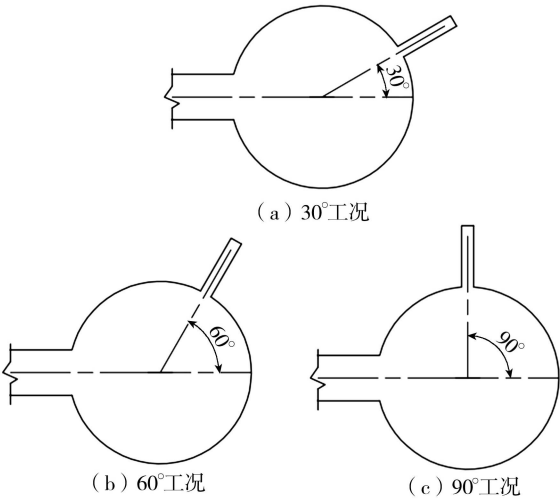


图 8 通气管道与进水管的相对位置

图 9 为 3 种角度工况时优化模型中的气压分布(由于通气管道可以沿进水管水平中心线两侧对称布置,所以只探讨通气管道布置在进水管水平中心延长线一侧的情况)。由图 9 可知,通气管道相对进水管呈不同角度时,竖井内的气压分布有着较大的变化:①通气管道布置在进水管正对面(0° 工况)时,相比其他位置的通气管道,此时竖井内的负压降低最少,也就是说,当通气管道布置在进水管正对面时其所发挥的效果最差;②而当进水管与通气管道垂直(90° 工况)时,尽管竖井内的整体气压比 0° 工况效果要好,但是相比 30° 和 60° 工况仍要差;③30° 和 60° 工况的气压分布曲线接近,但当流量开始增大时,30° 工况更好。综上所述,30° 工况最优,60° 工况次之,90° 工况较差,0° 工况时最差。究其原因,主要与竖井内的水气两相分布规律有关,由于跌落水舌会撞击在进水管正对面并且会出现反弹,进水管延长线两侧会留有空隙,所以当通气管道与进水管延长线呈现一定夹角时竖井内更容易通气。

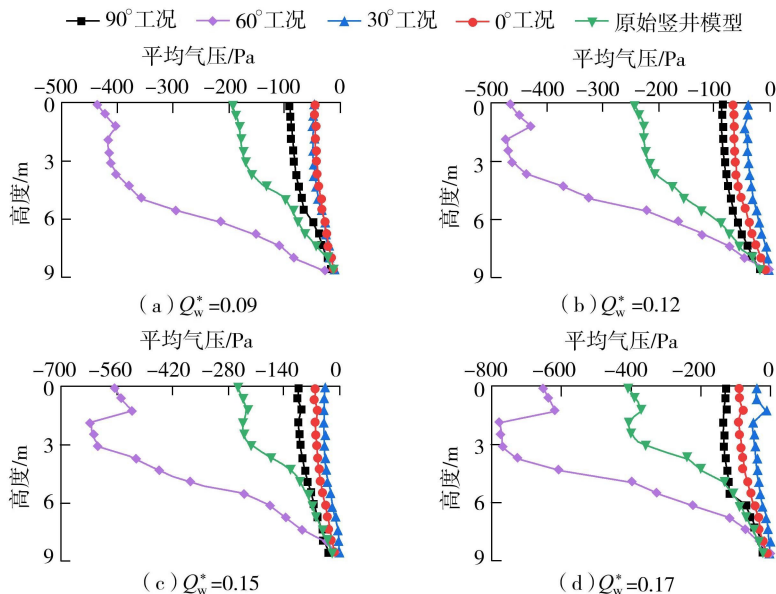


图9 不同角度工况时优化竖井模型内气压分布

4 结 论

a. 水舌对跌流竖井内的垂向气压分布影响很大,尤其是 $z_1 \sim z_2$ 区域,该区域的负压增长明显。水舌阻隔了进水管附近气体流通的通道是造成 $z_1 \sim z_2$ 区域负压突增的主要原因。

b. 建立的水舌撞击模型能够较准确地预测水舌撞击井壁的位置,为通气管道的安装提供理论依据。

c. 优化后的竖井结构能够有效降低竖井中的负压,并且使垂向气压梯度趋于平缓。相比原始竖井模型,优化竖井模型能够有效降低 $z_1 \sim z_2$ 区域的负压差约70%,平均降低竖井上下游压差50%左右。

d. 通气管道与进水管的相对位置极大地影响了优化竖井模型的性能。当通气管道与进水管水平中心延长线之间呈现 30° 角时,优化竖井模型内的负压会大幅降低,并且 $z_1 \sim z_2$ 区域没有明显的负压突增现象。

参考文献:

[1] 魏佳芳,芦三强,张源,等. 跌流竖井循环气流系统中水平管道临界位置及影响因素研究[J]. 水电能源科学, 2022,40(10):127-130. (WEI Jiafang, LU Sanqiang, ZHANG Yuan, et al. Study on critical position and influencing factors of horizontal pipes in circulating air flow system of dropshaft[J]. Water Resources and Power, 2022,40(10):127-130. (in Chinese))

[2] MA Yiyi, ZHU D Z, ZHANG Wenming, et al. Field monitoring and design optimization of dropshafts with air

circulation pipes [J]. Journal of Hydro-environment Research, 2019, 22: 57-69.

[3] 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(3): 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(3): 372-378. (in Chinese))

[4] 杨乾,杨庆华,郑立宁,等. 深隧排水折板型竖井泄流消能的试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2020, 55(6): 1247-1256. (YANG Qian, YANG Qinghua, ZHENG Lining, et al. Experimental study on discharge and energy dissipation of baffle-drop shaft in deep tunnel drainage system [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2020, 55(6): 1247-1256. (in Chinese)).

[5] ZHANG Wenming, ZHU D Z, RAJARATNAM N, et al. Use of air circulation pipes in deep dropshafts for reducing air induction into sanitary sewers [J]. Journal of Environmental Engineering, 2016, 142(4): 04015092.

[6] 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))

[7] MA Yiyi, ZHU D Z, RAJARATNAM N. Air entrainment in a tall plunging flow dropshaft [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 142(10): 04016038.

[8] LIU Jiachun, HUANG Biao, ZHU D Z. Jet impinging in plunging dropshafts of medium height [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 148(12): 04022028.

(下转第43页)

- (10):1823-1835.
- [8] JO C H, YIM J Y, LEE K H, et al. Performance of horizontal axis tidal current turbine by blade configuration [J]. *Renewable Energy*, 2012, 42: 195-206.
- [9] GOUNDAR J N, AHMED M R. Design of a horizontal axis tidal current turbine[J]. *Applied Energy*, 2013, 111: 161-174.
- [10] KANG S, BORAZJANI I, COLBY J A, et al. Numerical simulation of 3D flow past a real-life marine hydrokinetic turbine[J]. *Advances in Water Resources*, 2012, 39: 33-43.
- [11] 张亮,李志川,张学伟,等.垂直轴潮流能水轮机研究与利用现状[J]. *应用能源技术*, 2011(9): 1-7. (ZHANG Liang, LI Zhichuan, ZHANG Xuewei, et al. The status of research and application of vertical axis tidal turbine[J]. *Applied Energy Technology*, 2011(9): 1-7. (in Chinese))
- [12] 盛其虎,赵东亚,张亮.水平轴潮流能水轮机设计与数值模拟[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2014, 35(4): 389-394. (SHENG Qihu, ZHAO Dongya, ZHANG Liang. A design and numerical simulation of horizontal tidal turbine [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2014, 35(4): 389-394. (in Chinese))
- [13] 林勇刚,李伟,刘宏伟,等.水下风车海流能发电技术[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2008, 42(7): 1242-1246. (LIN Yonggang, LI Wei, LIU Hongwei. Ocean current power generation technology for underwater turbine [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2008, 42(7): 1242-1246. (in Chinese))
- [14] 王俭超,王树杰,李伟,等.水平轴海流能水轮机叶片的设计和实验研究[C]//中国可再生能源学会海洋能专业委员会第三届学术讨论会论文集.北京:中国可再生能源学会海洋能专业学术委员会, 2010: 177-184.
- [15] 张雪明,徐明奇,朱挽强.自变距双向潮流流能电站专用水平轴透平设计[C]//中国可再生能源学会海洋能专业委员会第三届学术讨论会论文集.北京:中国可再生能源学会海洋能专业学术委员会, 2010: 113-115.
- [16] 曹高辉,张永良.低海流能驱动微型水轮机的水动力特性研究[C]//第五届全国海洋能学术讨论会论文集.北京:中国可再生能源学会海洋能专业学术委员会, 2014: 45-53.
- [17] 付士凤,郑源,梁晓玲,等.直叶H型潮流水轮机三维数值模拟[J]. *水利水电科技进展*, 2017, 37(2): 33-36. (FU Shifeng, ZHENG Yuan, LIANG Xiaoling, et al. Three-dimensional numerical simulation of H-type straight-blade tidal turbine [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2017, 37(2): 33-36. (in Chinese))
- [18] BETZ A. Wind-energie und ihre ausnutzung durch windmühlen [M]. Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht, 1926. (in German)

(收稿日期:2023-02-02 编辑:熊水斌)

(上接第 29 页)

- [9] 卢金锁,周亚鹏,丁艳萍,等.污水集输管道系统中有害气体释放与解决对策[J]. *环境工程学报*, 2019, 13(4): 757-764. (LU Jinsuo, ZHOU Yapeng, DING Yanping, et al. Release of harmful gases in sewage collection and transportation pipeline system and its countermeasures [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2019, 13(4): 757-764. (in Chinese))
- [10] WEI Jiafang, MA Yiyi, ZHU D Z, et al. Experimental study of plunging-flow dropshafts with an internal divider for air circulation[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 144(9): 06018011.
- [11] 王晓升,钱尚拓,陈曜辉,等.地下调蓄隧道系统井喷水力特性研究进展[J]. *水动力学研究与进展: A 辑*, 2021, 36(2): 273-287. (WANG Xiaosheng, QIAN Shangtuo, CHEN Yaohui, et al. Advances on the geysers in storage tunnel system [J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2021, 36(2): 273-287. (in Chinese))
- [12] 张双庆,刘甲春.竖井及跌水池体形参数对井喷的影响[J]. *水利水电科技进展*, 2022, 42(6): 98-104. (ZHANG Shuangqing, LIU Jiachun. Influence of shaft and chamber shape parameters on storm geysers [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2022, 42(6): 98-104. (in Chinese))
- [13] 芦三强,李学武,安建刚,等.具有旋流式分流进水结构的跌流竖井:CN217601621U[P]. 2022-10-18.
- [14] 龚旭.建筑排水系统水力实验与数值模拟研究[D].福州:福州大学, 2015.
- [15] 李贵吉,张建民.前置突扩突跌掺气设施曲线阶梯水流掺气特性数值计算[J]. *水利水电科技进展*, 2021, 41(4): 46-52. (LI Guiji, ZHANG Jianming. Numerical calculation of aerated flow characteristics in a curve-floor stepped tunnel with pre-sudden lateral enlargement and bottom drop aerator [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2021, 41(4): 46-52. (in Chinese))
- [16] 杨乾,杨庆华,赵子成,等.泄流过程中折板型竖井水气两相流动特性研究[J]. *工程科学与技术*, 2021, 53(1): 75-84. (YANG Qian, YANG Qinghua, ZHAO Zicheng, et al. Study on the water-air two-phase flow characteristics in baffle-drop shaft during the drainage [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2021, 53(1): 75-84. (in Chinese))
- [17] 杨乾,杨庆华.折板型竖井湍流耗散及消能机理分析[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2020, 50(3): 471-481. (YANG Qian, YANG Qinghua. Analysis on turbulent dissipation and energy dissipation mechanism of baffle-drop shaft [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2020, 50(3): 471-481. (in Chinese))

(收稿日期:2022-12-12 编辑:俞云利)