

竖井及跌水池体形参数对井喷的影响

张双庆^{1,2},刘甲春²

(1. 大连理工大学宁波研究院, 浙江 宁波 315016; 2. 宁波大学土木工程与地理环境学院, 浙江 宁波 315211)

摘要:基于排水系统三维数值模型,研究了不同上下游管道直径比和相对高度、跌水池以及竖井体形参数对井喷压力及强度的影响。模拟结果表明:较小的上下游管道相对高度会导致上游管道内的水流流态为满管流,在上游流量快速增加时会产生较大的井喷压力;减小下游管道直径将会限制进入下游管道的水流流量,进而造成更为严重的井喷事件;跌水池总体积不变情况下增加跌水池高度能够在一定程度上缓解井喷压力;增加竖井的长度对井喷压力影响较小,但会减少喷射水量,增加竖井直径会导致井喷压力先增大后减小。

关键词:排水系统;井喷;体形参数;压力峰值;喷射水量

中图分类号: TU992;TV134 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2022)06-0098-07

Influence of shaft and chamber shape parameters on storm geysers//ZHANG Shuangqing^{1,2}, LIU Jiachun² (1. Ningbo Research Institute of Dalian University of Technology, Ningbo 315016, China; 2. School of Civil & Environmental Engineering and Geography Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Based on the three-dimensional numerical model of drainage system, the influences of different upstream and downstream pipe diameter ratios and relative heights, chamber and shaft parameters on geyser pressure and intensity were analyzed. The results show that smaller relative height of the upstream and downstream pipes can cause the flow regime in the upstream pipe to be full pipe flow, and the rapid increase in upstream flow can induce greater geyser pressure. Reducing the diameter of the downstream pipe can reduce the transport capacity, resulting in more severe geyser. When the chamber volume is constant, increasing the chamber height can alleviate the maximum geyser pressure. Increasing the shaft length has little effect on the geyser pressure, but it can reduce the volume of water ejected. Increasing the shaft diameter makes the geyser pressure to increase first and then decrease.

Key words: drainage system; storm geyser; shape parameter; peak pressure; ejected water volume

强降雨期,雨水的快速填充导致排水管道内水流流态快速地由明渠流转变为有压流,在此过程中部分空气被截留在管道中形成截留气团^[1-3]。截留气团在水气的相互作用下发生压缩、移动,气体压力在压缩过程中不断增大^[4-6]。高压气团在竖井处释放时会引发大量水气混合物从地表喷出,形成井喷事件^[7-8]。井喷喷射高度能够达到几十米^[9],并伴随着剧烈的压力脉动,严重威胁排水系统的安全^[10-12]。

国内外学者对排水系统内井喷现象的发生机理进行了研究,发现引发井喷的主要原因为管道中截留气团的释放和惯性作用下水体的振荡^[13-14]。快速填充水流冲击截留气团,产生的峰值压力可达到数倍的驱动压力,此部分压力主要用来推动下游水

体的加速以增强其输运能力,缓解跌水池内的高压^[15-17]。部分学者对井喷的缓解措施进行了研究,如在竖井处安装节流孔板^[18]、设置循环水池^[19]及导流板^[20]、延伸竖井至跌水池中^[21]等。虽然这些措施在一定程度上缓解了井喷,但局限于一些特定的条件,且未能充分排出管道中的气体。不同布置形式以及竖井和跌水池体形参数对井喷强度的影响仍未得到充分研究。

本文基于Liu等^[12]的1:20排水系统物理试验模型在ANSYS CFX软件中建立三维数值模型,并利用其试验结果对数值模型进行验证。基于验证后的数值模型,研究上下游管道直径比和相对高度(两根管道底部之间的高度)、跌水池以及排水竖井的体形参数对井喷的影响,分析不同工况下管道内

部的压力变化、喷射水量及喷射高度变化,以期能为排水管网系统的设计和安全运行提供参考。

1 数值模型

1.1 模型参数

本文建立了如图 1 所示的排水系统三维数值模型,模型主要由上游管道、跌水池、竖井和下游管道组成。上游管道的直径 $D_u=0.20\text{ m}$,长度 $L_u=5.80\text{ m}$,坡度 $i_u=0.10\%$ 。跌水池连接上下游管道,水池底部长和宽 $L_c=B_c=0.30\text{ m}$,高度 $H_c=0.45\text{ m}$ 。竖井位于跌水池上方,直径 $D_r=0.06\text{ m}$,长度 $L_r=1.22\text{ m}$ 。下游水平出水管道的直径 $D_d=0.28\text{ m}$,长度 $L_d=5.95\text{ m}$ 。

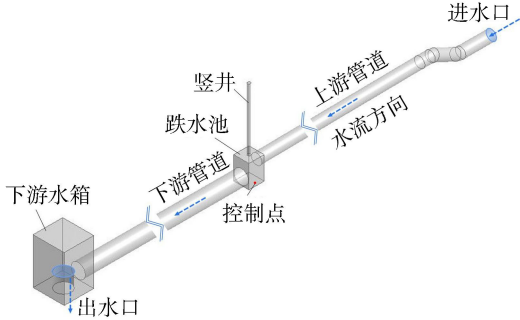


图 1 排水系统的三维数值模型示意图

在三维数值模拟过程中,进水口定义为流量入口边界,出水口定义为大气压力边界,管壁和墙面定义为无滑移壁面边界,壁面为光滑壁面。空气为理想气体,水为不可压缩的流体。采用流体体积法 (VOF) 和基于剪切应力传递湍流模型 (SST) 的 $\kappa\text{-}\omega$ 紊流模型模拟排水系统中的井喷现象。

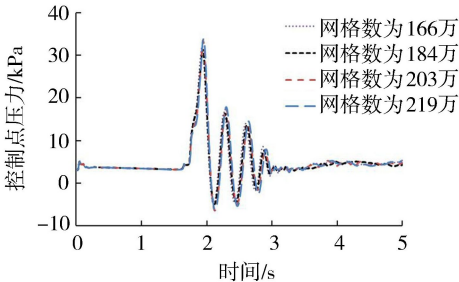
连续性方程和雷诺方程 (RANS) 如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \delta_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho u'_i u'_j) \tag{2}$$

式中: x_i, x_j 为笛卡尔坐标; u_i, u_j 为雷诺平均速度分量; ρ 为流体的密度; p 为压力; u'_i, u'_j 为波动的速度分量; δ_{ij} 为黏性应力张量分量; t 为时间。

VOF 模型的相方程如下:



(a) 网格独立性检验

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + u_i \frac{\partial \alpha}{\partial x_i} = 0 \tag{3}$$

式中 α 为水的体积分数, $\alpha=1$ 表示控制体内完全充满水, $\alpha=0$ 表示控制体内完全充满空气。

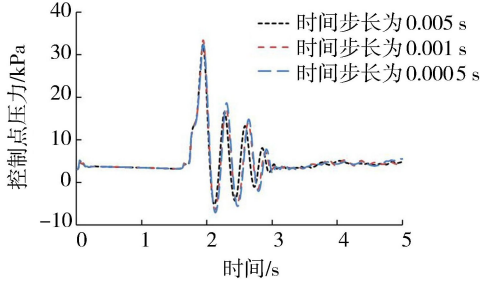
对于稳态模拟,动量方程和湍流输运方程均采用高阶求解的差分格式。以均方根残差值 (RMS) 低于 10^{-4} 和出口水流流量稳定为标准,判断结果是否收敛。对于瞬态模拟,动量方程采用高阶求解的差分格式,湍流输运方程采用二阶向后欧拉格式。当使用二阶向后欧拉格式时,非稳态的湍流方程仍然使用一阶格式,非稳态的体积分数方程将会设定为有限制的二阶格式。

1.2 网格及时间步长检验

为验证三维数值模型在模拟井喷事件中的精度,本文对数值模型进行了网格独立性检验和时间步长敏感性分析,以减小网格数量及时间步长对模拟结果的影响。模拟过程中选择跌水池底部的压力作为控制参数。

通过对跌水池及其周围上下游管段以及竖井进行网格加密,分别对 166 万、184 万、203 万和 219 万网格数量的模型进行模拟分析,控制点 (图 1) 的压力变化如图 2(a) 所示。当数值模型的网格数量为 203 万时,跌水池底部的最大模拟压力为 33.5 kPa,相比于 184 万网格下的压力大 6.7%,相比于 219 万网格下的压力小 0.9%。进一步增加网格数量不能显著改善数值模拟结果。因此,本文其余工况均采用 203 万网格数量的模型进行研究。在网格数量为 203 万时,全局网格尺寸为 0.02 m,通过减小局部网格尺寸对网格进行加密,上下游管段、跌水池和竖井的网格尺寸分别为 0.012 5 m、0.015 m、0.01 m 和 0.006 m。

选取 0.000 5 s、0.001 s 和 0.005 s 共 3 个时间步长进行敏感性分析,模拟压力结果如图 2(b) 所示。3 个时间步长下跌水池底部最大压力分别为 32.4 kPa、33.5 kPa、32.4 kPa。0.000 5 s 和 0.001 s 时间步长之间的压力误差为 3.2%,0.001 s 和 0.005 s 之间的误差为 3.1%。为了平衡计算效率及计算精



(b) 时间步长敏感性分析

图 2 网格独立性及时间步长检验

度,本文数值模拟的时间步长选为 0.001 s。

1.3 数值模拟工况

表 1 给出了本文所有数值模拟工况。工况 A 系列主要用 Liu 等^[12]的试验数据验证模拟结果的准确性。由于上下游管道存在相对高度,快速填充的水流撞击跌水池壁面后折返进入竖井,将部分气体截留在跌水池内。气团压缩、移动、释放,进而引发井喷。因此,工况 B 系列主要针对上下游管道的相对高度和管道直径比进行研究。初始状态下跌水池内气体所占的空间大小会影响快速填充过程,进而影响最大井喷压力。“瘦高形”跌水池在相同初始水位下拥有更大的气体空间,对井喷压力有一定缓解作用。因此,工况 C 系列分别针对 Liu 等^[12]试验模型、“瘦高形”和“矮胖形”跌水池进行模拟,分析相同体积不同高度的跌水池对井喷压力的影响。进入竖井内的水柱将气团截留在跌水池中,高压气

团的释放将推动水柱上升。水柱的特性和竖井的体形参数(如长度、直径)对井喷压力有着重要影响。工况 D 系列针对不同的竖井体形参数进行了研究,以分析竖井参数对井喷压力的影响。

2 模拟结果与分析

2.1 试验数据与模拟数据对比

系列 A 的 3 种工况下,管道系统中的流量由 20.0 L/s 的初始流量分别快速增加到 82.5 L/s、62.5 L/s和 42.5 L/s 的最终流量,模拟压力与 Liu 等^[12]的试验压力对比如图 3 所示。当最终流量为 82.5 L/s 时,跌水池底部最大模拟压力为 33.5 kPa,相比于 Liu 等^[12]试验结果的 33.2 kPa 增大了 1.0%,且模拟压力及试验压力均经过 3 个震荡周期后达到了稳定,说明模型在模拟最大井喷压力时具有良好的精度。当最终流量分别为 62.5 L/s 和

表 1 模拟工况

工况	最终流量/ (L·s ⁻¹)	直径比/m	相对高度/m	竖井		跌水池		
				L_f /m	D_f /m	L_c /m	B_c /m	H_c /m
A1	82.5	1.0 : 1.4	0.20	1.22	0.06	0.3	0.3	0.45
A2	62.5	1.0 : 1.4	0.20	1.22	0.06	0.3	0.3	0.45
A3	42.5	1.0 : 1.4	0.20	1.22	0.06	0.3	0.3	0.45
B1	82.5	1.0 : 1.4	0.25	1.22	0.06	0.3	0.3	0.45
B2	82.5	1.0 : 1.4	0.15	1.22	0.06	0.3	0.3	0.45
B3	82.5	1.0 : 1.4	0.10	1.22	0.06	0.3	0.3	0.45
B4	82.5	1.0 : 1.4	0.05	1.22	0.06	0.3	0.3	0.45
B5	82.5	1.0 : 1.4	0	1.22	0.06	0.3	0.3	0.45
B6	82.5	1.0 : 1.3	0.20	1.22	0.06	0.3	0.3	0.45
B7	82.5	1.0 : 1.2	0.20	1.22	0.06	0.3	0.3	0.45
B8	82.5	1.0 : 1.1	0.20	1.22	0.06	0.3	0.3	0.45
B9	82.5	1.0 : 1.0	0.20	1.22	0.06	0.3	0.3	0.45
C1	82.5	1.0 : 1.4	0.20	1.22	0.06	0.32	0.32	0.4
C2	82.5	1.0 : 1.4	0.20	1.22	0.06	0.28	0.28	0.52
C3	82.5	1.0 : 1.4	0.20	1.22	0.06	0.15	0.3	0.90
D1	82.5	1.0 : 1.4	0.20	0.28	0.12	0.3	0.3	0.45
D2	82.5	1.0 : 1.4	0.20	1.22	0.12	0.3	0.3	0.45
D3	82.5	1.0 : 1.4	0.20	0.62	0.08	0.3	0.3	0.45
D4	82.5	1.0 : 1.4	0.20	1.22	0.08	0.3	0.3	0.45
D5	82.5	1.0 : 1.4	0.20	2.05	0.04	0.3	0.3	0.45
D6	82.5	1.0 : 1.4	0.20	1.22	0.04	0.3	0.3	0.45

注:所有工况的初始流量为 20 L/s。

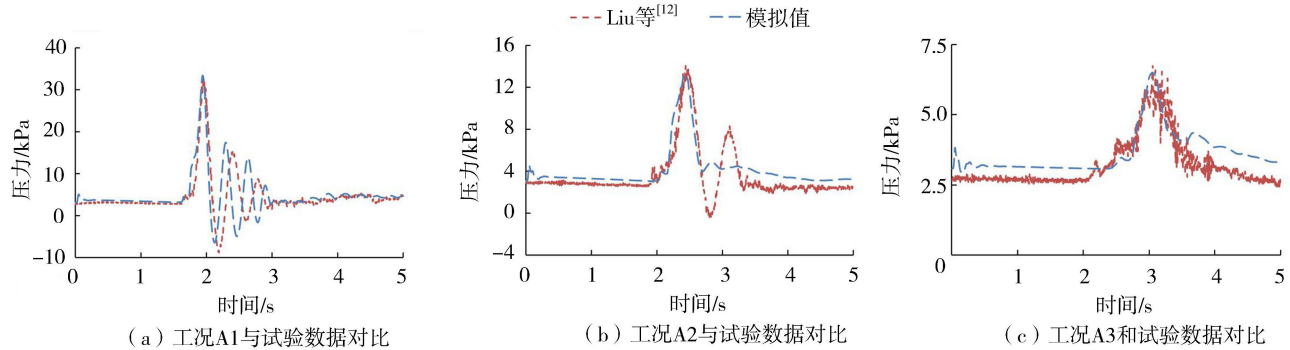


图 3 跌水池底部模拟压力与试验数据对比

42.5 L/s 时,模拟压力与试验压力的差值分别为 5.5% 和 3.5%。流量较小时,试验压力波动较大,对数值模拟结果的精确度带来了一定的影响。因此,本文竖井及跌水池参数特性的研究均选用 82.5 L/s 的最终流量。

2.2 上下游管道布设及体形参数的影响

由于上下游管道相对高度导致快速填充水流折返后截留气团在跌水池中,因此工况 B 系列针对不同上下游管道相对高度进行研究。通过控制上游管道与跌水池的连接高度,对不同上下游管道相对高度进行研究。上下游管道的直径分别为 0.20 m 和 0.28 m,管道直径比为 1.0 : 1.4。相对高度分别选取为 0.25 m、0.20 m、0.15 m、0.10 m、0.05 m 和 0 m。不同工况条件下管道及跌水池内水的体积分数变化如图 4 所示。在初始条件下下游管道均为有压流动。随着上下游管道高度差的降低,初始流量在使下游管道填充成有压流动的同时,上游管道内的水流流态逐渐从明渠流过渡成有压流动。当上下游管道顶部高度一致后,继续降低上游管道的高度对跌水池内水位影响较小。

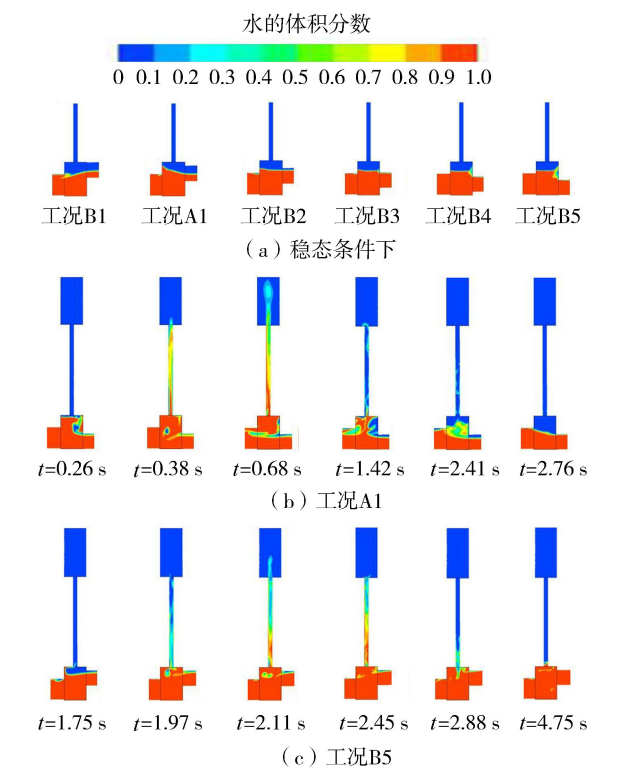


图4 不同上下游管道相对高度下跌水池内水的体积分数变化

当相对高度为 0.20 m 时,管道及跌水池内水的体积分数变化如图 4(b) 所示。快速填充的水流沿着上游管道向跌水池移动,在 $t=1.75$ s 时撞击跌水池壁后折返进入竖井,将气体截留在跌水池及竖井中。水流继续流入压缩截留气团,在气体压力推动

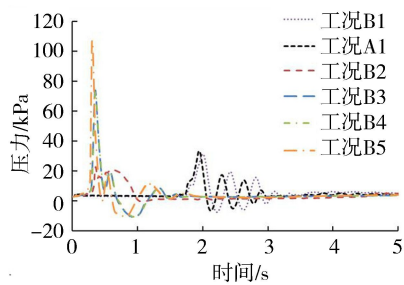
下竖井内的水柱向上移动。压力在 $t=1.94$ s 达到最大,其值为 33.5 kPa。随后水柱在 $t=1.97$ s 被喷出竖井,发生井喷,最大井喷高度约为 1.96 m(以跌水池底部作为 0 点)。随着水流继续流入,井喷再次发生,但强度弱于第一次井喷。跌水池内的气体在 $t=4.75$ s 时基本被排出,此时井喷过程结束,管道内的水流达到相对稳定的状态。当上下游管道相对高度为 0 m 时管道及跌水池内水的体积分数变化如图 4(c) 所示。跌水池底部的压力在 $t=0.30$ s 达到最大,竖井中的水柱在 $t=0.38$ s 时被喷射出竖井,发生井喷。最大井喷高度约为 2.52 m。工况 B 系列的数值模拟结果见表 2。

表2 工况 B 系列及 A1 模拟结果

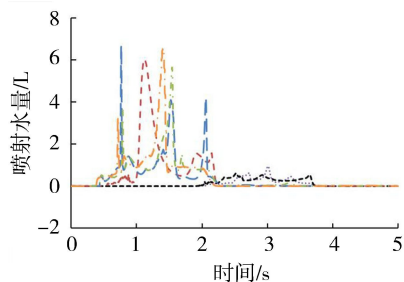
工况	最终流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	最大压力/ kPa	压力 持续时间/s	喷射水量/L
B1	1.46	31.5	0.36	0.48
A1	1.37	33.5	0.32	0.55
B2	1.77	22.8	0.69	2.27
B3	1.85	73.9	0.23	1.85
B4	1.87	72.8	0.22	2.03
B5	1.75	107.6	0.17	2.19

下游管道水流速度的提升来源于跌水池内高压的驱动及上游入流动量的传递。当上下游管道相对高度较小时,上游管道为满管流。上游管道流量的突然快速增加,导致跌水池内的水位瞬时急剧上升。由于此过程中参与相互作用的气体较少,井喷过程中发生的压力类似于水锤压力,水气混合物喷出后跌水池内压力迅速降低。此过程压力的持续时间为 0.17 s,持续时间较短,但产生的压力峰值达到了 107.6 kPa,如图 5(a) 及表 2 所示。当上下游管道相对高度为 0.15 m 时,上游管道截留了部分气团,在管道快速填充过程中气团发挥气垫作用,降低了最大井喷压力,增加了压力的持续时间。如图 5(b) 所示,由于压力峰值的降低,从竖井中喷射出的水量也相应减少。随着相对高度差增大,上游管道内水流流态在初始状态下变为明渠流。井喷过程中有较多的气体被截留在管道中,此部分气体发挥了缓冲作用,因而井喷过程中的压力峰值降低。

下游管道直径的大小影响排水系统的输运能力,进而影响到井喷过程中快速增加水流的释放。由图 6 可知,随着下游管道直径的减小,管道中的压力峰值和井喷期间喷射水量呈上升趋势;当上下游管道直径比分别为 1.0 : 1.4、1.0 : 1.2 和 1.0 : 1.0 时,压力峰值分别为 33.5 kPa、63.1 kPa 和 100.8 kPa,喷射水量分别为 0.55 L、1.51 L 和 3.24 L。Liu 等^[20]对上下游管径比为 1.0 : 1.0 的工况进行了研究,由于初始条件的跌水池和上游管道中较多的气体起到了缓

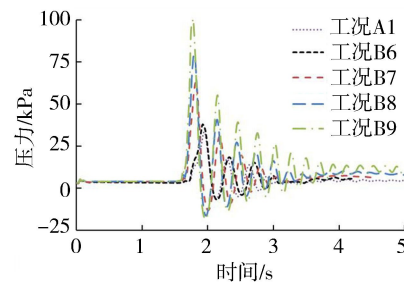


(a) 压力

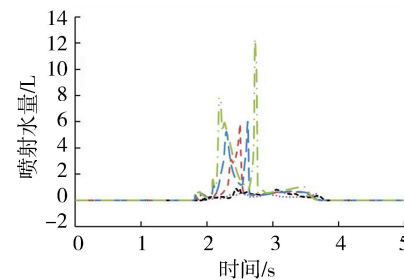


(b) 喷射水量

图5 不同上下游管道相对高度压力和喷射水量



(a) 压力



(b) 喷射水量

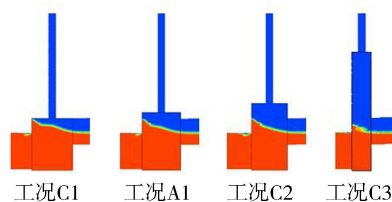
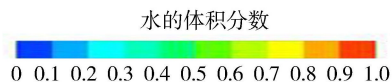
图6 不同上下游管道直径比下压力和喷射水量变化

冲作用,产生了相比本文中上下游管道直径相同时较小的压力峰值。下游管道直径越大,管道的输运能力越强,因而上游管道快速填充的同时可以排出更多的水流以缓解井喷压力,从而竖井喷射出的水量减小。

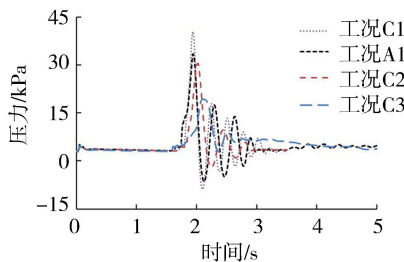
2.3 跌水池体形参数的影响

初始状态下跌水池内气体占据的空间可供井喷过程中水气发生相互作用。空间越大,水气相互作用越充分,因而产生的压力峰值越小。当跌水池总体积相同时,底部断面面积越小,跌水池的高度越高。在初始水位相同时,较高的跌水池内气体占据的空间更大。本节研究了跌水池体积不变情况下“瘦长形”和“矮胖形”跌水池模型中的井喷过程。工况 A1 和 3 种改变体形的跌水池形状和初始流量

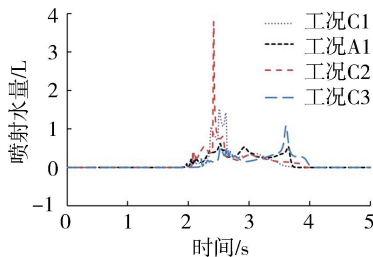
下的水体积分数如图 7(a)所示。图 7(b)(c)给出了不同尺寸跌水池的压力和喷射水量变化。当跌水池的高度分别为 0.45 m 和 0.40 m 时,“矮胖形”模型相比于工况 A1,压力峰值增大了 20.8%;当跌水池的高度分别为 0.45 m 和 0.52 m 时,“瘦高形”跌水池相比于 Liu 等^[12] 试验模型,跌水池底部的压力峰值减小了 9.0%;当减少跌水池长度,进一步增加排水池的高度到 0.90 m 时,压力峰值减小了 72.7%。增加跌水池高度,会增大跌水池上方气体空间,进而减少管道中的压力峰值。工况 A1 喷射总水量为 0.55 L,“瘦高形”跌水池的喷射总水量分别为 0.62 L 和 0.53 L,“矮胖形”模型中喷射总水量为 0.60 L。提高跌水池高度可以缓解井喷峰值压力,对喷射水量的影响较小。



(a) 不同体形跌水池水的体积分数



(b) 压力



(c) 喷射水量

图7 不同尺寸跌水池中水体积分数、压力和喷射水量变化

2.4 竖井体形参数的影响

井喷过程中竖井中水柱在气团作用下被喷出竖井,最终的喷射高度与水柱本身的特性、气团压力相关。竖井内水柱体形受竖井直径的影响,气团的推动时间受竖井长度的影响。工况 D1、D3 和 D5 中的竖井体积与工况 A1 相同,主要研究竖井在输送水

量和空气体积相同的情况下,不同竖井长度对管道中压力的影响;工况 D2、D4 和 D6 中的竖井长度与工况 A1 相同,主要研究竖井直径对井喷强度的影响。数值模拟的压力和喷射水量变化如图 8 所示。

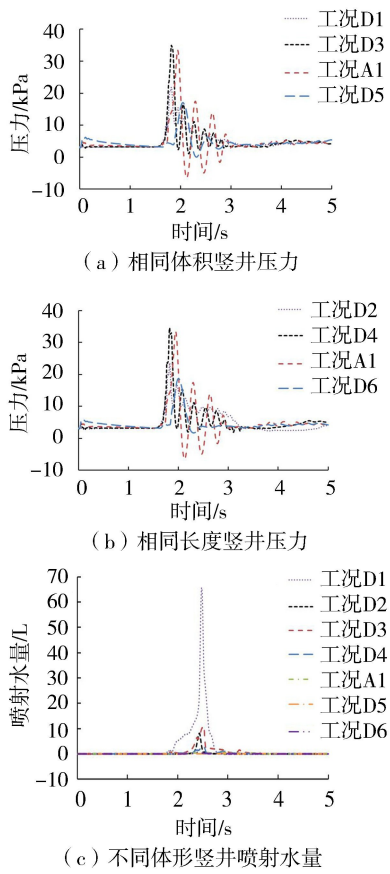


图 8 不同尺寸竖井下的井喷压力和喷射水量

由图 8(a)(b)可以看出,当竖井直径相同时,改变竖井长度对井喷压力的影响较小;当竖井直径为 0.12 m 时,长度分别为 0.28 m 和 1.22 m 时产生的井喷压力分别为 21.9 kPa 和 23.6 kPa,增大了 7.8%。这是由于在 $t=1.83$ s 时气团的压力已经达到最大,而此时水柱的高度为 1.13 m,气团对水柱的加速过程已经结束,因而继续增加竖井长度不会产生更大的压力。当竖井长度相同时,增大竖井直径导致压力峰值逐渐增大;当竖井长度为 1.22 m,直径分别为 0.08 m、0.06 m 和 0.04 m 时,井喷压力分别为 34.6 kPa、33.5 kPa 和 18.7 kPa。但随着直径的进一步增大,竖井对水流的限制作用降低。此时竖井相当于另一条管道,增大了输运能力,因而最大井喷压力降低;当竖井直径为 0.12 m 时,最大井喷压力为 23.6 kPa。

由图 8(c)可以看出,当竖井直径为 0.12 m,长度分别为 0.28 m 和 1.22 m 时产生的喷射水量分别为 12.29 L 和 0.90 L,减少了 92.7%;当竖井直径为 0.08 m,长度分别为 0.62 m 和 1.22 m 时产生的喷射

水量分别为 3.25 L 和 0.90 L,减少了 72.3%。增加竖井的长度可以减少喷射水量。当竖井长度为 1.22 m 时,直径分别为 0.08 m、0.06 m 和 0.04 m 时产生的喷射水量分别为 0.90 L、0.55 L 和 0.25 L。减小竖井直径可以限制水流的喷射,但会导致气团被滞留在水池中,进入下游管道,威胁后续竖井的安全。

3 结 论

a. 当上下游管道直径比小于 1 时(即下游管道直径大于上游管道直径),较小的上下游管道相对高度会导致初始状态下上游管道内的流态为满管流动,井喷过程中产生较大的井喷压力;减小下游管道直径将会限制进入下游管道的水流流量,进而造成更为严重的井喷事件。

b. 在控制总体积不变情况下增加跌水池的高度能够在一定程度上缓解井喷压力,压力峰值能够减少 72.7%。

c. 增加竖井的长度不能降低井喷过程中的最大压力,但会减少喷射水量,相较于长度为 0.28 m 的竖井,长度为 1.22 m 竖井中的喷射水量减少了 92.7%;井喷压力随着竖井直径的增加先增大后减小。

参考文献:

[1] 郑源,刘德有,张健,等. 有压输水管道系统气液两相瞬变流研究综述[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2002, 30(6): 21-25. (ZHENG Yuan, LIU Deyou, ZHANG Jian, et al. Gas-liquid two-phase transient flows in pressurized water conveyance pipe system[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2002, 30(6): 21-25. (in Chinese))

[2] 郑源. 输水管道系统水流冲击截留气团与含气水锤研究[D]. 南京:河海大学, 2004.

[3] 张健,郑源,刘德有,等. 参数对输水管道水流冲击气团压力的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004, 32(6): 655-660. (ZHANG Jian, ZHENG Yuan, LIU Deyou, et al. Influences of relevant parameters on pressure of current rush to air mass in pipeline system [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2004, 32(6): 655-660. (in Chinese))

[4] 刘德有,索丽生. 水流冲击管道内滞留气团的刚性数学模[J]. 水科学进展, 2004, 15(6): 717-722. (LIU Deyou, SUO Lisheng. Rigid model for transient flow in pressurized pipe system containing trapped air mass[J]. Advances in Water Science, 2004, 15(6): 717-722. (in Chinese))

[5] 郑源,索丽生,屈波,等. 有压输水管道系统含气水锤研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2005, 33(3): 277-281. (ZHENG Yuan, SUO Lisheng, QU Bo, et al.

- Study on water hammer with gas in pressurized water delivery pipeline system[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2005, 33 (3): 277-281. (in Chinese))
- [6] 周领,刘静,黄坤,等.输水管线启动填充过程含滞留气团瞬变流数值模拟[J].水利水电科技进展,2021,41(5):1-7. (ZHOU Ling, LIU Jing, HUANG Kun, et al. Numerical simulation of transient flow with entrapped air pockets during pipeline filling water initiation process[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021,41(5):1-7. (in Chinese))
- [7] GUO Q, SONG C C S. Dropshaft hydrodynamics under transient conditions [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1991, 117(8): 1042-1055.
- [8] LEWIS J W. A Physical investigation of air/water interactions leading to geyser events in rapid filling pipelines [D]. Ann Arbor: University of Michigan, 2011: 97-109.
- [9] LEON A S. Mechanisms that lead to violent geysers in vertical shafts [J]. Journal of Hydraulic Research, 2018, 57(3): 1-12.
- [10] WANG J, VASCONCELOS J G. Investigation of manhole cover displacement during rapid filling of stormwater systems [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 146(4): 04020022.
- [11] 胡龙,戴晓虎,唐建国. 深层排水调蓄隧道系统关键技术问题分析[J]. 中国给水排水,2018, 34(8): 17-21. (HU Long, DAI Xiaohu, TANG Jianguo. Analysis of key technical problems of deep drainage tunnel system[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(8): 17-21. (in Chinese))
- [12] LIU L J, SHAO W Y, ZHU D Z. Experimental study on stormwater geyser in vertical shaft above junction chamber [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 146(2): 04019055.
- [13] 马佳杰,周领,刘德友等. 管内水流冲击滞留气团的 CFD 模拟方法验证[J]. 水电能源科学,2016,34(12): 110-113. (MA Jiajie, ZHOU Ling, LIU Deyou, et al. Verification of CFD simulation on the filling of pipeline with standing air mass[J]. Water Resources and Power, 2016,34(12): 110-113. (in Chinese))
- [14] CHAN S N, CONG J, LEE J H W. 3D numerical modeling of geyser formation by release of entrapped air from horizontal pipe into vertical shaft [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 144(3): 04017071.
- [15] FERRERI G B, CIRAIOLO G, LO RE C. Storm sewer pressurization transient: an experimental investigation [J]. Journal of Hydraulic Research, 2014, 52(5): 666-675.
- [16] LUBBERS C L, CLEMENS F. Air and gas pockets in sewerage pressure mains [J]. Water Science & Technology, 2015, 52(3): 37-44.
- [17] ZHOU L, WANG H, KARNEY B, et al. Dynamic behavior of entrapped air pocket in a water filling pipeline [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 144(8): 04018045.
- [18] HUANG B, WU S, ZHU D Z, et al. Mitigating peak pressure of storm geysering by orifice plates installed at the top of vent pipes [J]. Water Science and Technology, 2018, 78(7): 1587-1596.
- [19] QIAN Y, ZHU D Z, LIU L J, et al. Numerical and experimental study on mitigation of storm geysers in Edmonton, Alberta, Canada [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 146(3): 04019069.
- [20] LIU J C, ZHANG S Q, HUANG B, et al. Numerical study on effects of chamber design and multi-inlet on storm geyser [J]. Water Science and Technology, 2021, 83(6): 1286-1299.
- [21] WANG J, VASCONCELOS J G. Preliminary assessment of a retrofit strategy in dropshafts impacted by geysering using CFD [C] //DUNN C N, VAN WEELE B. World Environmental and Water Resources Congress 2017. Virginia: ASCE Press, 2017: 230-239.

(收稿日期:2021 -08 -29 编辑:刘晓艳)

(上接第 72 页)

- [25] 唐晓松,郑颖人,林成功. 计算边界范围的选取对渗流作用下边坡稳定性分析精度的影响[J]. 后勤工程学院学报,2007(1):1-4. (TANG Xiaosong, ZHENG Yingren, LIN Chenggong. The effect of choosing calculating boundary on the accuracy of slope stability analysis under seepage[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2007(1):1-4. (in Chinese))
- [26] DESAI C S. Drawdown analysis of slopes by numerical method [J]. Journal of the Geotechnical Engineering, 1997,103(GT7):667-676.
- [27] GRIFFITHS D V, LANE P A. Slope stability analysis by finite elements[J]. Geotechnique,1993,49(3):387-403.
- [28] MEIN R G, LARSON C L. Modeling infiltration during a steady rain[J]. Water Resources Research,1973,9(2): 384-394.

(收稿日期:2022 -03 -15 编辑:刘晓艳)