

竖井形式对调蓄隧道系统井喷的抑制效果分析

蒯重列¹, 王晓升², 孙振海³, 徐辉², 冯建刚²

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学农业科学与工程学院, 江苏 南京 211100;
3. 嘉兴市杭嘉湖南排工程盐官枢纽管理所, 浙江 嘉兴 314411)

摘要: 为有效抑制调蓄隧道系统内井喷的发生, 采用三维数值模拟方法研究突扩式和分流式两种竖井形式对井喷的抑制效果。结果表明: 突扩式竖井可促使气泡头部分离, 形成局部低压, 并减小上部水体的上升动能, 从而抑制井喷; 分流式竖井可使一仓承接另一仓的上冲水体, 阻止大部分水体向上冲, 增大上部水体的下泄速度, 从而抑制井喷; 突扩式竖井对井喷的抑制效果更好, 井喷强度降低达 60%。
关键词: 调蓄隧道; 气泡; 井喷; 竖井形式

中图分类号: TV135 文献标志码: A 文章编号: 1006-7647(2023)03-0077-06

Suppression effect on the geyser in storage tunnel system with different shaft forms// KUI Zhonglie¹, WANG Xiaosheng², SUN Zhenhai³, XU Hui², FENG Jiangang² (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China; 3. Administration Office of Yanguan Draining Key Project, Jiaxing 314411, China)

Abstract: To effectively suppress the geyser in the storage tunnel system, the suppression effects of two different shaft forms on the geyser are investigated based on the 3-D numerical simulation. The results show that the protruding shaft can induce the separation of the gas-column head, and decrease the local pressure and the kinetic energy of the upper water, resulting in the suppression on the geyser. The shunt shaft can make one bin to undertake the other bin of the upward water, prevent most of the water moving up, and increase the leaky velocity of the upper water, resulting in the suppression on the geyser. The protruding shaft has better suppression effect on the geyser, and the geyser intensity can be reduced by 60%.

Key words: storage tunnel; bubble; geyser; shaft form

调蓄隧道系统是城市防洪排涝的重要设施, 井喷是此系统内的一种严重水力事故。井喷发生时具有较大的瞬时压力变化, 射流高度可达地面以上数十米, 对工程及人身安全造成严重威胁^[1-2]。根据表现形式, 井喷可分为水柱溢流、水柱射流、分裂水柱射流、雾状射流等^[3-4]。井喷产生机理可大致分为两类: 一类为气团在竖井内释放, 诱使上层水体上升形成井喷; 另一类为调蓄隧道系统内存在局部低压, 水流快速充填隧道产生水锤效应, 使得系统压力快速升高, 从而形成井喷^[5]。气团释放诱发的井喷因其水气流动复杂, 近年来受到了学者们更多的关注。Wright 等^[6]首先提出了气团释放诱发井喷的产生机制, 即大体积气团从竖井释放, 携带竖井内水体向上快速运动, 从而形成井喷。Vasconcelos 等^[7]试验分析了竖井初始水位、初始气团压力以及竖井直径等

变量对井喷高度的影响, 指出竖井直径是影响井喷的关键因素。黄标等^[3,8-9]对井喷的影响因素进行了研究, 结果发现井喷的形成与小直径竖井和大体积气团相关。Muller 等^[10]通过大尺度试验观测了气团的释放过程, 发现井喷高度随竖井直径的增大而降低, 液面上升速度随竖井内初始水位的增高、气团体积的增大而增大。Cong 等^[1]、Chan 等^[11]分别通过试验研究和数值模拟分析了井喷过程中气团压力、水气界面以及自由液面的变化过程, 指出气团的压缩作用促使水柱加速上升从而形成井喷, 井喷强度随着竖井直径的减小、上游水头的升高以及气团体积的增大而增大; 同时还给出了特定压力水头下井喷发生的条件。王晓升^[12]采用遗传算法-支持向量回归方法对气团释放诱发井喷的影响因素进行了敏感性分析, 结果表明竖井直径、外部压力、气团体

基金项目: 国家自然科学基金(51779082); 中央高校基本科研业务费专项(B220204003)
作者简介: 蒯重列(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事水利水电工程水动力学研究。E-mail: 429343813@qq.com
通信作者: 王晓升(1983—), 男, 高级实验师, 博士, 主要从事复杂管网系统的气液两相流研究。E-mail: xswang@hhu.edu.cn

积、水柱初始高度对井喷强度的影响逐次减弱。

在井喷抑制措施研究方面, Wright^[8]指出竖井直径至少应与隧道直径相等,以减轻或避免井喷现象的发生。Huang 等^[4]通过在竖井底部增设孔板的方式,增强了水气间的相互作用,从而增大了能量耗散,降低了井喷强度和系统压力的振荡幅度。Wang 等^[13]将竖井下边缘延伸至隧道内,从而破坏了气泡的连续释放,减小了气泡在竖井内的释放动能。Qian 等^[14]研究表明,在竖井顶部增设孔板可以减缓水气混合物的上升,降低井喷强度;同时在竖井上侧布置水再循环室可以改变水气混合物的运动方向,使水气混合物经水再循环室后自动分离,阻止水体直接向上运动,从而避免井喷现象的发生。Liu 等^[15]在井隧衔接处布置带孔的偏转管道,减小了进入竖井的气团体积,减弱了水气混合物的上升动力,从而降低井喷强度。Zhang 等^[16]于竖井顶部布置固定井盖,研究发现增加竖井直径以及减少井盖通风均可减少井喷的数量,甚至避免井喷的发生。

尽管前人已对井喷的抑制措施进行了大量研究,对竖井结构形式进行了大量有益的探索,但受施工成本以及施工条件等方面的限制,目前这些措施的适应性以及作用机制仍有待进一步研究。本文针对气团释放诱发的井喷,提出突扩式竖井、分流式竖井等两种新的竖井形式,采用数值模拟方法分析其抑制井喷的效果和机制,以探寻更优的调蓄隧道系统竖井形式。

1 计算方法

1.1 控制方程

调蓄隧道系统气团的释放过程是水气两相流动,具有较强的非定常性。本文采用 VOF 两相流模型跟踪水气界面位置,忽略相间质量交换和动量传递,质量力仅考虑重力作用。控制方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) = \rho \mathbf{g} - \nabla p + \nabla \cdot \mu (\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{U} \alpha) = \alpha (\nabla \cdot \mathbf{U}) \quad (3)$$

式中: $\mathbf{U}$ 为速度矢量; p 为压力; ρ 为各相密度; μ 为混合动力黏度系数; $\mathbf{g}$ 为重力加速度; α 为水相体积分数; ∇ 为哈密顿算子。

考虑气团的可压缩性,在气团运动过程中将气团视为理想气体。理想气体状态方程为

$$pV_a = nRT \quad (4)$$

式中: V_a 为气体体积; n 为气体的物质的量; R 为摩尔气体常数; T 为温度。由式(4)可计算出气体密度,进而与式(1)(2)(3)耦合。

湍流模型选用 SST $k-\omega$ 模型,该模型将 $k-\omega$ 模型和 $k-\varepsilon$ 模型耦合,同时适用于气相和液相;在近壁面处使用 $k-\omega$ 模型,在边界层处采用 $k-\varepsilon$ 模型,其包含了修正的湍流黏性公式,考虑了湍流剪切应力效应;采用 SST $k-\omega$ 模型进行数值模拟可以定性地反映井喷形成的过程,其输运方程为^[17]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} k) = G_k + D_k - Y_k \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \omega) = G_\omega + D_\omega - Y_\omega \quad (6)$$

式中: k 为湍动能; ω 为湍动频率; G_k 、 G_ω 分别为 k 、 ω 的生成项; D_k 、 D_ω 分别为 k 、 ω 的扩散项; Y_k 、 Y_ω 分别为 k 、 ω 的耗散项。

1.2 计算对象

如图1所示,本文以 T 形管模型作为简化的调蓄隧道系统研究对象,模型由水平管(隧道)和垂直管(竖井)构成。隧道直径 $D_0 = 0.15 \text{ m}$,竖井直径 $D = 0.05 \text{ m}$,竖井高度 $H = 3 \text{ m}$ (为使计算域能捕捉到井喷的最大上升高度,适当控制竖井长度);隧道上游侧长度 $L_{\text{up}} = 5.0 \text{ m}$,下游侧长度 $L_{\text{down}} = 3.0 \text{ m}$,气团长度 $L_0 = 1.2 \text{ m}$ 。T 形管上游端设置为初始气团,端口设置为无粗糙度的光滑壁面;下游端设置为压力进口,给定恒定压力;竖井出口设置为压力出口。上下游依据气团在隧道中的运移方向确定,气团在下游恒定压力水头驱动下自上游向下游移动。

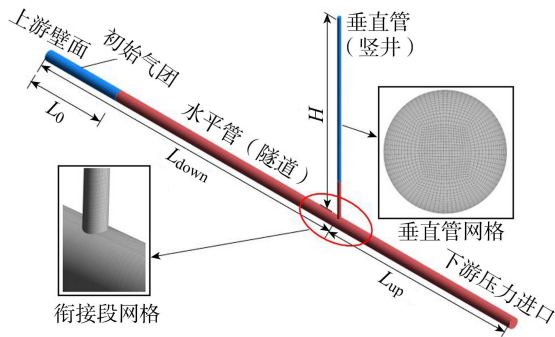


图1 T形管模型

本文采用六面体网格对计算区域进行网格划分,对圆管竖井方案的4套网格进行无关性验证,当网格数为314 728、785 190、1145 244、1 536 420时,前3套网格方案与最精细网格方案的相对误差分别为8.3%、3.1%、1.6%。由此可知,当网格数超过100万时,井喷高度相对误差在1.6%以内,对井喷高度的计算结果影响较小,符合网格无关性要求。在满足计算准确性要求的前提下,为提高计算效率,最终确

定计算域网格数为 1 145 244 ,局部网格划分见图 1。

1.3 数值方法及计算条件

连续性方程和动量方程采用基于有限体积法的压力基分离式算法进行求解,动量离散格式采用二阶迎风格式,压力速度耦合方式采用 PISO 格式^[18]。设定标准化残差收敛条件为:质量不平衡量小于 1%,其他变量小于 10⁻³。时间步长设置为 2×10⁻⁴ ~ 5×10⁻⁶ s;计算中,保证全局最大库朗数不大于 1.0,每个时间步通常在迭代 10 ~ 20 次后收敛。

本文研究的 T 形管调蓄隧道系统中,竖井初始水位由下游进口压力水头决定,竖井初始水位与下游进口压力水头保持一致;进口压力水头越大,竖井初始水位也就越高,气团驱动力则越大;气团驱动力也随气团体积的增大而增大。经过前期试算,选取以下两种工况进行研究^[17]:工况 1,下游进口压力水头 $H_{down} = 0.625$ m,竖井内初始水柱高度 $H_0 = 0.55$ m,气团长度 $L_0 = 1.2$ m;工况 2, $H_{down} = 0.425$ m, $H_0 = 0.35$ m, $L_0 = 1.2$ m。气团初始压力为 0 Pa,竖井出口压力为 0 Pa。

2 结果与分析

井喷过程中,液面上升的最大高度以及气泡破碎时的液面速度是反映上层水体运动状态的重要因素,也是衡量井喷强度的两个重要指标。基于此,本文将井喷强度定义为

$$H_g = H_{fsmax} + \frac{u_{fsmax}^2}{2g} \tag{7}$$

式中: H_g 为井喷强度; H_{fsmax} 为气泡破碎时的液面最大上升高度(以隧道顶为基准); u_{fsmax} 为气泡破碎时的液面最大速度。

2.1 圆管竖井

调蓄隧道系统井喷过程中,气团从隧道运移至竖井并在竖井内释放,气团运动经历了隧道运移和竖井内释放两个阶段^[17]。图 2 为井喷过程气团头部压力水头以及竖井底部压力水头变化,本文以气团头部位置的压强为基准,图中 h 为压力水头, h_p 为竖井底部瞬时压力水头, H_a 为气团头部压力水头, $H_a = P_a/\rho g$, P_a 为气团压力。由图 2 可知,井喷过程中气团压力水头和竖井底部压力水头均呈周期性振荡的趋势,受气团的压缩膨胀效应影响,气团压力水头的振幅相对较大。井喷过程以 $t = 6.42$ s 为界分别为隧道运移阶段和竖井释放阶段。在隧道运移阶段,气团自上游向下游推进,气团头部形态为光滑的半圆弧形,气团推进速度与 Benjamin^[19] 的研究结果相接近,隧道气团流态在文献[17]中已有详细描述,本文不再赘述。在竖井释放阶段,竖井内的气团

形成井喷气泡,随着气泡的向上运动,气泡头部压力水头和竖井底部压力水头迅速下降。图 3 为气团在竖井内释放过程的水气随时间的变化,图中上下 2 条曲线分别表示竖井自由液面和井喷气泡头部的位置变化,隧道中心线为基准高程 $Z = 0$ 。由图 3 可知,竖井内的气团呈长气泡状,在气泡上升初期,气泡头部稍偏向左侧,见图 3(a),经一段时间调整后,气泡头部逐渐居中,气泡头部呈子弹状,是典型的泰勒气泡形态。气泡上升过程中,自由液面位置 H_{fs} 和气泡头部位置 H_b 有加速上升的趋势。

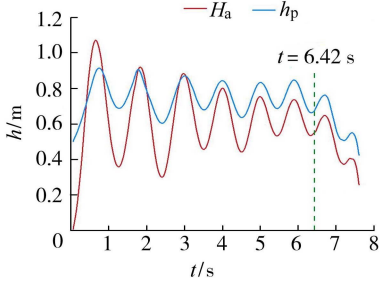


图 2 气团头部压力水头以及竖井底部压力水头变化

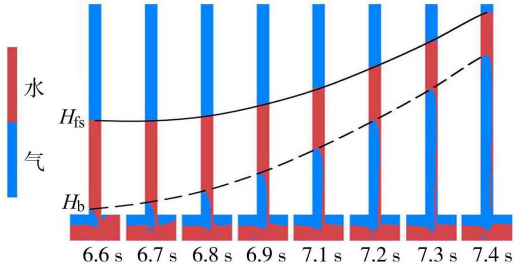


图 3 不同时刻井喷过程的水气演化(工况 1)

以工况 1 为例,圆管竖井井喷过程典型时刻的水体压力分布和对应的井喷过程气泡头部压力水头以及上层水柱高度变化(Δp 为气泡头部压力水头与水柱高度之间的差值, $\Delta p = H_a - h_w$) 如图 4 和图 5 所示。由图 4 和图 5 可知,随着气泡的上升,气泡头部压力水头和上层水柱高度逐渐降低,水柱高度随时间大致呈线性下降,由于气泡的压缩膨胀效应,气泡头部压力水头呈波动下降趋势。当气泡到达液面破碎时,气泡与外界空气相通,气泡压力降至最低。井喷过程中, Δp 值呈波动变化趋势,时均 Δp 为

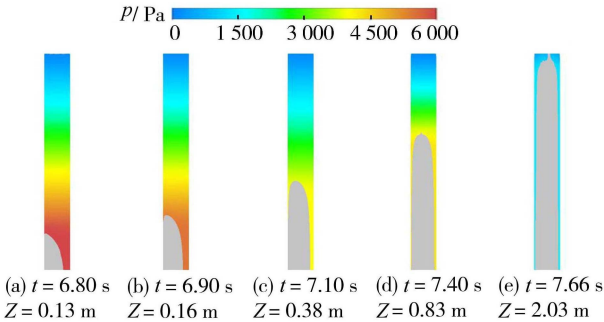


图 4 井喷过程典型时刻的水体压力分布

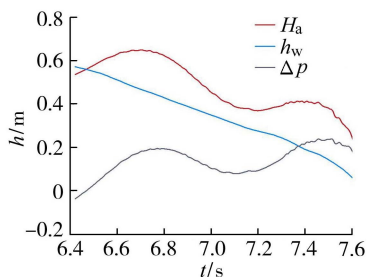


图5 井喷过程气泡头部压力水头及上层水柱高度变化(工况1)

0.14 m, Δp 值大致稳定且大于0,因而上层水柱内的压力梯度大于重力,这也是上层水柱有加速上升趋势的内在原因。

图6为圆管竖井气泡速度、液面速度以及气泡净速度的变化,图中 u_b 为气泡速度, u_{fs} 为液面速度, u_{net} 为气泡净速度, $u_{net} = u_b - u_{fs}$, u_{net} 可以反映上层水柱高度减小的快慢, u_{net} 值越大,水柱下泄速度越快,越不利于井喷的发生。井喷过程中的气泡速度和液面速度呈加速增大趋势, u_{net} 近似为一常数,时均 u_{net} 值为0.44 m/s,大于垂直管静止水体中的泰勒气泡速度0.24 m/s,这与 Cong 等^[1]的研究结论一致。

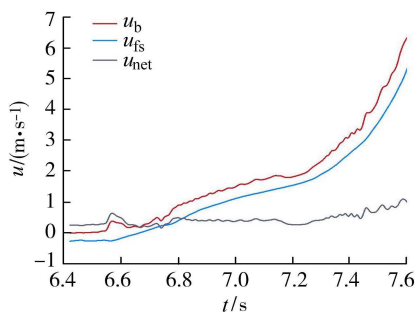


图6 圆管竖井气泡速度、液面速度以及气泡净速度变化(工况1)

2.2 突扩式竖井

根据 Vasconcelos 等^[7-9]研究可知,井隧直径比是影响井喷强度的关键因素,在隧道直径固定不变的情况下,竖井直径越大,越有利于抑制井喷。但增加竖井直径会显著增加竖井的施工难度和投资,为有限度增加竖井直径,本文主要研究突扩式竖井结构对井喷的抑制效果。突扩式竖井上部管段直径 $D_1 = 0.10$ m,下部管段高度 $H_1 = 0.35$ m。

以工况1为例,突扩式竖井井喷过程典型时刻的水体压力分布(竖井中心线距上游壁面5 m)和相应的井喷过程气泡头部压力水头以及上层水柱高度变化如图7和图8所示。由图7和图8可知,气泡在下部管段上升时,气泡头部压力水头和上层水柱高度逐渐降低,水柱高度大致呈线性下降趋势。当气泡头部进入上部管段时,受管径突扩影响,气泡头部分离成小气泡,此时在表面张力作用下气泡周围产生

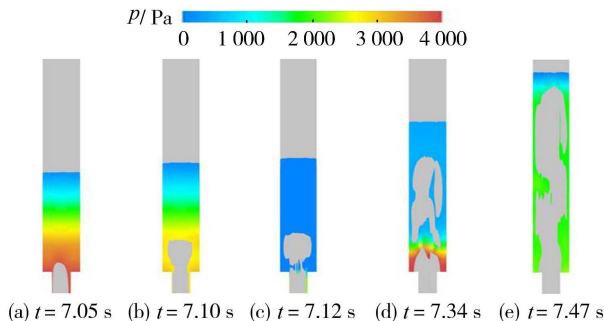


图7 突扩式竖井井喷过程典型时刻的水体压力分布(工况1)

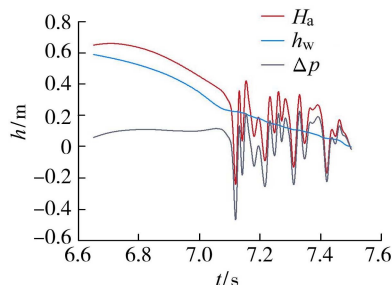


图8 突扩式竖井井喷过程气泡头部压力水头及上层水柱高度变化(工况1)

局部低压,受此影响,气泡头部压力水头及 Δp 值均波动明显。气泡分离后,上部分离气泡基本靠浮力作用上升,该阶段的时均 Δp 值为0.04 m,因而上层水柱内的压力梯度与重力大致相当,气泡上升动力较弱。

图9为突扩式竖井气泡速度、液面速度以及气泡净速度的变化。气泡在下部管段上升时,气泡速度、液面速度及气泡净速度逐渐增大。当气泡头部进入竖井上部管段时,气泡速度和气泡净速度急剧减小。气泡分离后,气泡速度呈波动增大趋势,气泡至液面破碎时,液面高度为1.02 m,此时的液面速度为2.55 m/s,均明显低于圆管竖井方案。井喷过程中,时均 u_{net} 值为0.60 m/s,较圆管竖井方案明显增大,上层水柱的下泄速度更快,从而有利于抑制井喷的强度。

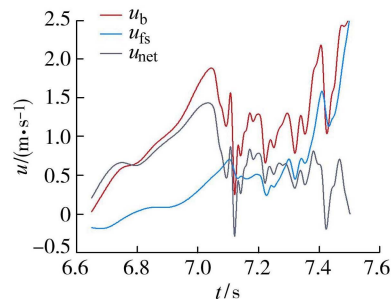


图9 突扩式竖井气泡速度、液面速度以及气泡净速度变化(工况1)

2.3 分流式竖井

气团释放诱发的井喷是竖井内井喷气泡顶冲上层水体所致,增大上层水柱的下泄速度可以加快气团的释放过程,从而对抑制井喷有利。为此,设计如

图 10 所示的分流式竖井,利用布置于竖井底部的分流板,加快竖井内水柱的下泄速度。其中,分流板的高度 $H_2 = 0.6\text{ m}$,分流板厚度 $\delta = 0.002\text{ m}$,竖井底部三角形结构直径 $D_2 = 0.05\text{ m}$,井隧衔接处渐变段高度 $H_3 = 0.025\text{ m}$,井隧衔接处总直径 $D_3 = 0.1\text{ m}$ 。

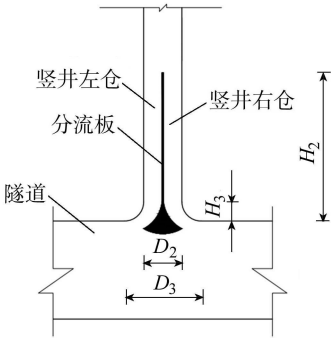


图 10 分流式竖井布置

以工况 1 为例,分流式竖井井喷过程典型时刻的水体压力分布和相应的井喷过程气泡头部压力水头以及上层水柱高度变化如图 11 和图 12 所示。由图 11 和图 12 可知,气泡运移至井隧交界处时,部分气泡先行进入竖井左仓,受分流板底部三角形结构影响,气泡进入右仓有一定延迟。气泡在竖井左仓内上升时,气泡头部压力水头逐渐上升,上层水柱高度逐渐降低,水柱高度大致呈线性下降。当上层水柱顶到达分流板顶部时,水体向右仓溢流,避免了大部分水体直接向上运动,上层水柱高度呈加速下降趋势,气泡头部压力水头逐渐降低, Δp 值逐渐减小,

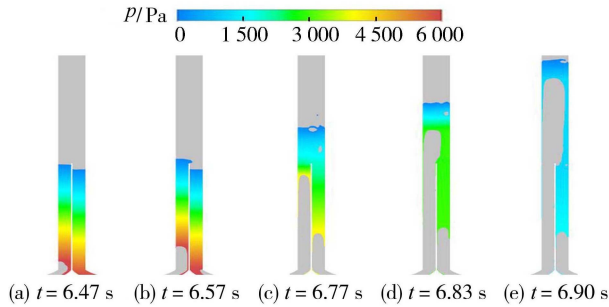


图 11 分流式竖井井喷过程典型时刻的水体压力分布(工况 1)

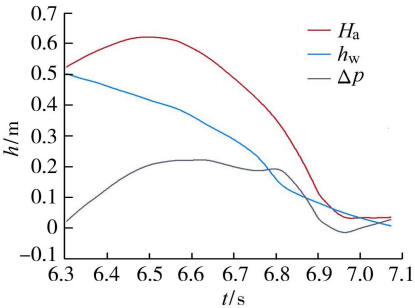


图 12 分流式竖井井喷过程的气泡头部压力水头及上层水柱高度变化(工况 1)

该阶段的时均 Δp 值为 0.05 m ,因而上层水柱内的压力梯度与重力之差较小,气泡上升动力较弱。

图 13 为分流式竖井气泡速度、液面速度以及气泡净速度的变化。井喷过程中的液面速度和气泡速度均呈增大趋势,当气泡至液面破碎时,液面高度为 1.47 m ,液面速度为 3.41 m/s ,均明显低于圆管竖井方案。气泡在竖井左仓内上升时,由于分流板的作用,左仓水流溢流至右仓,气泡净速度有明显增大趋势。当气泡头部超出分流板顶部,气泡净速度逐渐降低并趋于稳定。井喷过程中,时均 u_{net} 值为 0.60 m/s ,较圆管竖井方案明显增大,井喷强度亦大幅降低。

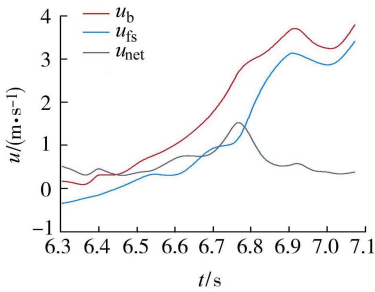


图 13 分流式竖井气泡速度、液面速度以及气泡净速度变化(工况 1)

2.4 3 种竖井方案对比

表 1 给出了 3 种竖井方案在不同工况下的井喷强度对比。由表 1 可知,圆管竖井方案的井喷强度相对较大,突扩式竖井和分流式竖井的井喷强度较圆管方案均有显著降低,其中突扩式竖井对井喷的抑制效果更好,井喷强度降低达 60%。在其他条件不变情况下,进口压力水头以及竖井初始水位越高,井喷强度越大。

表 1 3 种竖井方案的井喷强度对比

工况 编号	$H_{\text{fsmax}}/\text{m}$			$u_{\text{fsmax}}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$			H_{g}/m		
	圆管竖井	突扩式竖井	分流式竖井	圆管竖井	突扩式竖井	分流式竖井	圆管竖井	突扩式竖井	分流式竖井
1	2.46	1.02	1.47	7.55	2.55	3.41	5.37	1.35	2.06
2	0.97	0.47	0.77	2.37	0.59	2.09	1.45	0.49	0.99

总体而言,突扩式竖井和分流式竖井均能有效抑制井喷强度,但其抑制井喷的作用机制又有所差异。突扩式竖井通过管径突扩促使气泡头部发生分离,分离后小气泡周围形成局部低压,上部水体上升动能显著减小,使得井喷强度降低。分流式竖井通过分流板结构使其中一仓可以承接另一仓的上冲水体,大幅增加上部水体的下泄速度,避免大部分水体向上运动,从而降低了井喷强度。

气团释放诱发的井喷,其内在产生机制是在系统压力作用下,竖井内井喷气泡的压力大于上层水体的重力,使得水体有持续上升的动力,从而产生井喷。如何减小井喷气泡的压力、减弱气泡顶冲上部

水体的作用是抑制井喷强度的关键。本文提出的两种竖井形式均显著改变了井喷气泡的上升形态,通过气泡分离、水体交换等方式改变了气泡压力和水柱下泄速度,从而实现了抑制井喷的目的。

本文重点研究的是不同形式竖井对井喷的影响,受篇幅限制,仍存在一些问题有待进一步的研究。实际调蓄隧道系统中,部分竖井顶部设置有井盖装置,此时井喷过程中的竖井顶部空气会产生气垫效应^[20],进而对井喷运动产生影响,不同形式竖井下井盖装置对井喷的影响有何差异,后续将进行对比研究,并进一步研究竖井突扩位置、分流板高度等不同几何参数对气泡形态以及运动状态的影响。

3 结 论

- a. 突扩式竖井和分流式竖井对井喷的抑制效果显著。突扩式竖井利用管径突扩,使气泡头部分离成小气泡,小气泡周围形成的局部低压使得水体上升动能减小,从而显著降低了井喷强度。
- b. 分流式竖井利用竖井底部的分流板使两仓水体可以交换,避免了大部分水体直接向上运动,加快了水柱下泄速度,从而使得井喷强度得到大幅降低。
- c. 两种竖井形式分别利用突扩结构和分流板结构改变了井喷气泡的上升形态,避免了水体加速向上运动,从而达到抑制井喷的目的。

参考文献:

[1] CONG J, CHAN S N, LEE J H W. Geyser formation by release of entrapped air from horizontal pipe into vertical shaft [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 143 (9): 04017039.

[2] 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))

[3] 黄标. 城市排水管道井喷水力特性研究 [D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2017.

[4] HUANG B, WU S Q, ZHU D Z, et al. Mitigating peak pressure of storm geysering by orifice plates installed at the top of vent pipes [J]. Water Science & Technology, 2018, 78 (7): 1587-1596.

[5] 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))

[6] WRIGHT S J, LEWIS J W, VASCONCELOS J G.

Geysering in rapidly filling storm-water tunnels [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 137 (1): 112-115.

[7] VASCONCELOS J G, WRIGHT S J. Geysering generated by large air pockets released through water-filled ventilation shafts [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 137 (5): 543-555.

[8] WRIGHT S J. Influence of air pocket volume on manhole surge [J]. Journal of Water Management Modeling, 2013, 21: 141-155.

[9] HUANG B, WU S Q, ZHU D Z, et al. Experimental study of geysers through a vent pipe connected to flowing sewers [J]. Water Science and Technology, 2017, 2017 (1): 66-76.

[10] MULLER K Z, WANG J, VASCONCELOS J G. Water displacement in shafts and geysering created by uncontrolled air pocket releases [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 143 (10): 04017043.

[11] 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.

[12] 王晓升. 地下调蓄隧道系统滞留气团释放过程的井喷特性研究 [D]. 上海: 上海大学, 2020.

[13] WANG J, VASCONCELOS J G. Preliminary assessment of a retrofit strategy in dropshafts impacted by geysering using CFD [C] // World Environmental & Water Resources Congress 2017. Sacramento: ASCE, 2017: 230-239.

[14] 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.

[15] 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 & Technology, 2021, 83 (6): 1286-1299.

[16] ZHANG Y, CHEN Y H, QIAN S T, et al. Experimental study on geysers in covered manholes during release of air pockets in stormwater systems [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 148 (5): 06022003.

[17] 王晓升, 张健, 钱尚拓, 等. 地下调蓄隧道系统气团释放诱发的井喷特性研究 [J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2022, 37 (3): 432-439. (WANG Xiaosheng, ZHANG Jian, QIAN Shangtuo, et al. Characteristics of geysers induced by the release of air pocket in storage tunnel system [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2022, 37 (3): 432-439. (in Chinese))

[18] Ansys Inc. ANSYS Fluent theory guide [M]. Canonsburg: [s. n.], 2018.

[19] BENJAMIN T B. Gravity currents and related phenomena [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1968, 31 (2): 209-248.

[20] 章艳. 考虑井盖作用的城市调蓄隧道井喷特性研究 [D]. 南京: 河海大学, 2021.

(收稿日期: 2022 - 05 - 30 编辑: 骆超)