

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.06.011

排水管道井喷过程气团演变特性

钱尚拓¹, 张 晗², 陈曜辉¹, 李 昕³, 张建民³, ZHU David Z.^{4,5}, 冯建刚¹

(1. 河海大学农业科学与工程学院, 江苏 南京 211100; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098;

3. 四川大学水利水电学院, 四川 成都 610065; 4. 阿尔伯塔大学工学院, 阿尔伯塔 埃德蒙顿 T6G 2W2;

5. 宁波大学土木与环境工程学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 为揭示井喷过程的气团演变特性, 对两侧入流条件下排水管道系统的滞留气团释放过程进行了数值模拟, 分析了井喷发生机制、排气特性以及水气能量演化规律。结果表明: 管道滞留气团进入竖井释放会诱发气团驱动型井喷, 在气团驱动型井喷后出现快速填充型井喷; 依据气团驱动型井喷、快速填充型井喷发生过程是独立或叠加, 井喷过程可划分为分离式和叠加式; 管道无量纲压差 P^* 越大或无量纲气团初始体积 V_a^* 越小, 越容易出现叠加式井喷过程; 气团驱动型井喷的气团排放比例约为 2%~47%, 随 P^* 增大先升高后降低, 随 V_a^* 增大而降低; 快速填充型井喷的气团排放比例约为 0~5%, 受 P^* 和 V_a^* 的影响有限; 井喷过程中, 气体动能的峰值出现在气团驱动型井喷阶段, 竖井内水体动能的峰值出现在快速填充型井喷阶段; 井喷强度随 P^* 的增大而减小, 随 V_a^* 的增大而增大; 当单位质量气体最大无量纲动能大于 1.5 时, 气团驱动型井喷会发生; 当单位质量水体最大无量纲动能大于 0.5 时, 快速填充型井喷会发生。

关键词: 井喷; 滞留气团; 填充涌浪; 排气管道; 竖井; 数值模拟

中图分类号: TV134

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2025)06-0090-11

Evolution characteristics of air pocket during geyser in drainage pipes

QIAN Shangtuo¹, ZHANG Han², CHEN Yaohui¹, LI Xin³, ZHANG Jianmin³, ZHU David Z.^{4,5}, FENG Jiangang¹

(1. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. College of Water Resources & Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

4. Faculty of Engineering, University of Alberta, Edmonton T6G 2W2, Canada;

5. School of Civil and Environmental Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: To investigate the evolution characteristics of the air pocket during the geyser process, a numerical simulation of the release of an entrapped air pocket in a drainage pipe system under double-sided inflow conditions was conducted. The geyser formation mechanisms, air discharge characteristics, and air-water energy evolutions were analyzed. The results indicate that the entry and subsequent release of an entrapped air pocket into the vertical shaft trigger an air pocket-driven geyser, followed by the occurrence of a rapid-filling geyser. Depending on whether these two processes operate independently or interactively, the geyser process can be classified as either a separated type or a hybrid type. A higher dimensionless pipeline pressure difference P^* or a smaller dimensionless initial air pocket volume V_a^* is more likely to trigger a hybrid geyser process. The air pocket discharge ratio during the air pocket-driven geyser is approximately 2%-47%; it first increases and then decreases with increasing P^* , and it decreases with increasing V_a^* . The air pocket discharge ratio during a rapid-filling geyser is approximately 0-5%, and it is minimally affected by P^* and V_a^* . During the geyser process, the peak kinetic energy of the air occurs in the air pocket-driven geyser stage, while the peak kinetic energy of the water in the vertical shaft occurs in the rapid-filling geyser stage. The geyser intensity decreases with increasing P^* and increases with increasing V_a^* . An air pocket-driven geyser occurs when the dimensionless maximum kinetic energy of the air per unit mass exceeds 1.5; a rapid-filling geyser occurs when the dimensionless maximum kinetic energy of the water per unit mass exceeds 0.5.

基金项目: 江苏省自然科学基金面上项目(BK20231462); 国家自然科学基金面上项目(52279063)

作者简介: 钱尚拓(1988—), 男, 副教授, 博士, 主要从事工程水力学理论与应用研究。E-mail: qshattc@163.com

通信作者: 陈曜辉(1995—), 男, 讲师, 博士, 主要从事管道瞬变流研究。E-mail: yaohuihu@163.com

引用本文: 钱尚拓, 张晗, 陈曜辉, 等. 排水管道井喷过程气团演变特性[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(6): 90-100.

QIAN Shangtuo, ZHANG Han, CHEN Yaohui, et al. Evolution characteristics of air pocket during geyser in drainage pipes[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(6): 90-100.

Key words: geyser; entrapped air pocket; pipe-filling bore; air discharge pipe; vertical shaft; numerical simulation

城市排水系统是防治内涝灾害的重要工程措施,主要包括入流竖井、地下排水管道、排水泵组、通风设施等^[1-4]。在运行过程中,雨污水汇流后经沿线的入流竖井进入排水管道,最终由系统末端排出^[5]。在强降雨期间,排水管道的入流流量突增,流态从明流向满流转变,在此过程中,管道内气体容易被截留并形成滞留气团^[6-9]。当滞留气团随水流运动至竖井释放时,可产生竖井内水气混合物向上喷发的现象,即井喷^[10-11]。井喷高度可达数米至数十米,持续时间数分钟,井喷的发生还会伴随强烈的压力波动,对管道结构和城市公共安全构成严重威胁^[12-14]。

对于井喷的研究,国内外学者大多是基于单进口、下游端封闭的理想化模型,研究一定体积滞留气团从水平管到竖井释放引发的井喷现象,分析井喷发生机制、井喷水力特性及井喷防治措施等^[15-16]。根据井喷发生机制和水气流态特征,可将其分为气团驱动型井喷和快速填充型井喷^[17-18]。气团驱动型井喷的核心特征是气团推动上方水柱在竖井内上升并释放,水气流态类似弹状流,有明显的水气界面,伴随着压力的显著下降^[19]。快速填充型井喷一般发生在气团驱动型井喷之后,表现为水气剧烈混合并填充竖井,伴随着压力的急剧上升^[20-22]。对于气团驱动型井喷, Cong 等^[23]指出,其更容易发生在竖井直径 D_r 与管道直径 D 之比满足 $D_r/D < 0.62$ 时; Choi 等^[24-27]发现气团驱动型和快速填充型井喷的发生概率均随 D_r/D 的减小而增大, D_r/D 增大虽可使管道中的更多气团进入竖井并释放,但气团释放过程的压力降低速率增大,对上方水柱的推动力减弱,导致气团驱动型井喷高度降低; Chan 等^[28]通过数值模拟方法在足够高的竖井中分析了井喷高度随各影响因素的变化; Chen 等^[29]进一步提出了气团驱动型井喷和快速填充型井喷发生的判别式。

在上述理想化模型中,由于管道末端封闭,气团与水流仅可通过竖井及上游进口排出。在此条件下,井喷过程中的系统压力及管道内流动方向会呈现多次震荡现象,这使得该理想化模型难以精确模拟实际排水系统中由压差驱动的多进口入流工况。Li 等^[30]通过数值模拟研究了排水管道双进口不同压差作用下由气团释放引发的井喷特性,指出双侧入流模型相比于单侧封闭理想化模型的快速填充型井喷在最大高度和水气状态方面存在差异。Huang 等^[31]通过物理模型试验研究了流量突变时压差驱动滞留气团在竖井释放引发井喷的现象,但未定量分析气团体积变化对井喷的影响。Liu 等^[32]通过数值模拟研究了多进口入流的管道中快速填充型井喷特性,但未涉及气团释放引发井喷的情况,也并未关注井喷过程的定量排气特征。国内外学者在管道瞬变流领域对水气交互作用和能量转化规律进行了广泛研究^[33-34],认识到强烈的水气交互作用会产生巨大的能量耗散^[35],如 Li 等^[36]基于单进口的二维数值模型分析了井喷过程中水气两相的交互及能量演化机制,指出井喷过程水气速度和压力变化剧烈,且水气界面的变形与水气能量交换密切相关。但在贴近实际的多进口入流条件下,对于气团演变如何主导井喷的发生、井喷过程的能量演化机制的研究尚属空白。

综上,对于压差驱动的多进口入流条件下排水系统的井喷特性有待进一步研究,井喷过程中滞留气团的排放量和排放速率尚且未知,井喷过程中水气能量演变与井喷流态之间的关联有待进一步分析,基于能量基准的井喷发生判别标准有待提出。本文采用三维数值模拟方法,针对双侧入流模式,研究由滞留气团释放引发的井喷过程,探究井喷的发生机制及分类特征,并进一步分析不同类型井喷的排气特性及能量演变规律,以期在城市排水系统的优化设计与安全运行提供理论依据。

1 数值模拟方法

1.1 控制方程和数值方法

井喷过程为气团随水流运动的水气两相问题,采用 VOF 两相流模型跟踪水气界面位置,质量力仅考虑重力作用。控制方程为

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

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \nabla \cdot \boldsymbol{\mu} [\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T] \tag{2}$$

其中 $\rho = \rho_w \alpha_w + \rho_a \alpha_a$ $\alpha_a + \alpha_w = 1$

式中: ρ 为混合密度; $\mathbf{u}$ 为速度矢量; p 为压力; $\boldsymbol{\mu}$ 为动力黏度; $\mathbf{g}$ 为重力加速度; α_a 为气体体积分数; α_w 为水的

体积分数; ρ_a 为气体密度; ρ_w 为水的密度。

考虑气团的可压缩性,在气团运动过程中将气体视为理想气体。理想气体状态方程为

$$pV_a = nRT \tag{3}$$

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。

湍流模型选用 Realizable $k-\varepsilon$ 模型,该模型满足了湍流的可实现性约束,即湍流黏度计算中的涡量波动项是物理上可实现的,能够定量揭示管道水气复杂流动现象,提高模拟的准确性。湍流动能 k 和湍流耗散率 ε 的输运方程如下:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \tag{4}$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \rho S_\varepsilon - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \tag{5}$$

其中

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} = \left\{ A_0 + \sqrt{6} \cos \left[\frac{1}{3} \cos^{-1} \left(\sqrt{6} \frac{S_{ij} S_{jk} S_{ki}}{\sqrt{S_{ij} S_{ij}}} \right) \right] \frac{k \sqrt{S_{ij} S_{ij} + \Omega_{ij} \Omega_{ij}}}{\varepsilon} \right\}^{-1} \rho \frac{k^2}{\varepsilon}$$
$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad C_1 = \max \left[0.43, \frac{Sk/\varepsilon}{Sk/\varepsilon + 5} \right]$$

式中: $\bar{u}_i, \bar{u}_j$ 为平均流速分量; x_i, x_j 为笛卡尔坐标; μ_t 为湍流黏度; ν 为运动黏度; σ_k 为 k 的湍流普朗特数,取为 1; σ_ε 为 ε 的湍流普朗特数,取为 1.2; G_k 为平均速度梯度湍流动能的生成项; G_b 为浮力引起的湍流动能生成项; Y_M 为可压缩湍流中脉动膨胀对总耗散率的贡献; S_k, S_ε 为源项; S 为平均应变率张量的模量; $C_1, C_2, C_{1\varepsilon}, C_{3\varepsilon}, C_\mu, A_0$ 为系数,其中, $A_0=4.0, C_{1\varepsilon}=1.44, C_2=1.9, C_{3\varepsilon}=-0.33$ 。

模拟过程中,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,压力速度耦合方式采用 SIMPLE 格式,利用最小二乘单元法计算梯度,采用 PRESTO! (压力交错选项) 方案对压力进行离散化处理,并使用 GeoReconstruct 计算体积分数。动量和能量采用二阶迎风格式计算,湍流动能和湍流耗散率则采用一阶迎风策略计算,时间步长为 0.001 s。

1.2 几何建模与网格划分

如图 1 所示,采用 T 形管道模型作为简化的排水管道系统,由水平管道和竖井构成,以上下游两端入流模拟多竖井入流。坐标轴原点设置在管道中轴线与竖井中轴线交点处,管道向上游的水平方向为 x 轴正方向,竖井向上方出口的垂直方向为 z 轴正方向。管道直径 $D=0.15\text{ m}$,管道上游段长度 $L_1+L_a+L_2=9.7\text{ m}$,其中 $L_1+L_a=3.4\text{ m}, L_2=6.3\text{ m}$;下游段长度 $L_3=8.3\text{ m}$;竖井直径 $D_r=0.05\text{ m}$,竖井与管道直径比 $D_r/D=0.33$,满足井喷发生条件^[23];竖井高度 $H_r=5\text{ m}$,始终大于模拟中的竖井水位,以定量分析井喷高度。管道上游端和下游端设置为压力进口,分别给定恒定压力 P_{up}, P_{down} ,竖井出口设置为大气压的压力出口。竖井初始水位设置为与下游压力水头 $P_{down}/\rho_w g$ 相同,与类似试验研究一致,便于验证和对比数模结果。对管道初始气团形

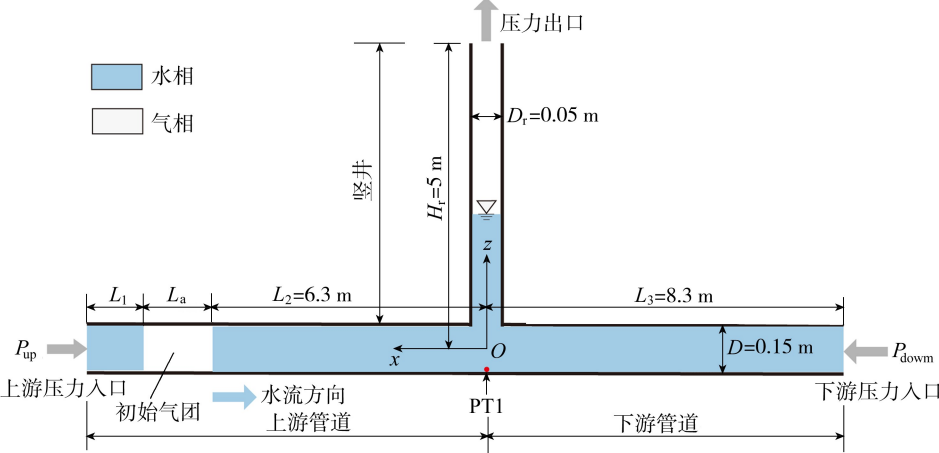


图 1 几何模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of geometric model

态进行简化,在上游管道设置长度为 L_a 的初始气团。在竖井底部 PT1 点处设置压力监测点。数值模拟了 A、B 两个系列工况(表 1),其中 A 系列工况是为了研究管道压差 $\Delta P=P_{up}-P_{down}$ 对井喷的影响,B 系列工况是为了研究气团初始体积 V_a 对井喷的影响,A* 工况用于验证模拟结果可靠性,其竖井高度为 $H_r=1.27\text{ m}$,与王晓升^[37]的试验一致。

表 1 工况设置表
Table 1 Working condition setting

工况	$(P_{up}/\rho_w g)/\text{cm}$	$(P_{down}/\rho_w g)/\text{cm}$	$(P_c/\rho_w g)/\text{cm}$	P^*	L_1/m	L_a/m	V_a^*	井喷类型	Z_1/m	Z_2/m
A*	67.5	37.5	53.67	12	1.0	2.4	24	分离式		
A1	50.0	37.5	44.24	5	1.0	2.4	24	分离式	1.45	1.75
A2	75.0	37.5	57.71	15	1.0	2.4	24	分离式	2.08	1.67
A3	100.0	37.5	71.18	25	1.0	2.4	24	分离式	2.30	1.41
A4	125.0	37.5	84.65	35	1.0	2.4	24	叠加式	2.17	1.90
A5	150.0	37.5	98.13	45	1.0	2.4	24	叠加式	1.56	1.02
B1	67.5	37.5	53.67	12	3.2	0.2	2	叠加式	1.62	1.00
B2	67.5	37.5	53.67	12	3.0	0.4	4	叠加式	1.88	1.10
B3	67.5	37.5	53.67	12	2.6	0.8	8	叠加式	2.06	1.21
B4	67.5	37.5	53.67	12	1.8	1.6	16	分离式	1.94	1.47
B5	67.5	37.5	53.67	12	1.0	2.4	24	分离式	2.07	1.91

注: $P_c/\rho_w g=[P_{up}(L_1+L_a+L_2)+P_{down}L_3]/(L_1+L_a+L_2+L_3)$,为竖井稳定后水位; $P^*=(P_{up}-P_{down})/(\rho_w gD/6)$,为管道无量纲压差; $V_a^*=V_a/(\pi D^3/6)$,为无量纲气团初始体积; Z_1 为气团驱动型井喷的井喷高度; Z_2 为快速填充型井喷的井喷高度。

三维计算模型如图 2 所示,对计算区域进行网格划分,为减小网格数量对模拟结果的影响,建立网格数量分别为 172 596、238 680、367 252 的 3 套方案进行网格无关性分析。由图 3 可知,网格数量为 172 596、238 680 与最精细网格(网格数量为 367 252)的相对误差分别为 3.1%、1.9%,在满足计算准确性要求的前提下,为提高计算效率,最终确定计算网格数为 238 680。

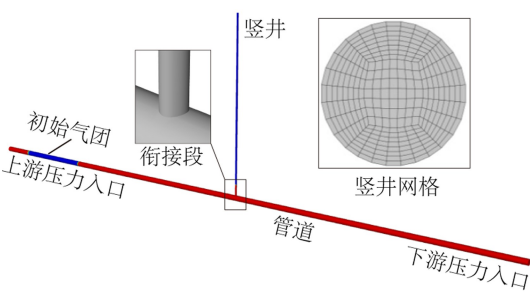


图 2 三维计算模型

Fig. 2 Three-dimensional calculation model

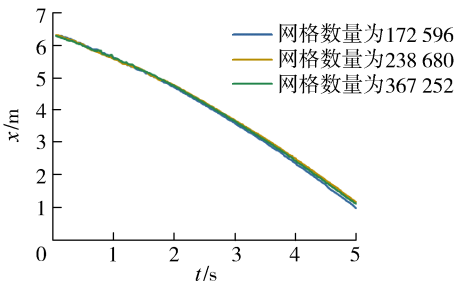


图 3 不同网格数量下 A* 工况气团头部位置变化

Fig. 3 Variation in air pocket head at condition A* under different numbers of grids

1.3 模型验证

采用王晓升^[37]双侧入流管道的井喷试验数据,以 A* 工况为例对模拟结果可靠性进行验证。由图 4(a)可知,竖井底部 PT1 点的压力 P 数值模拟值与模型试验值吻合良好。图 4(b) 为气团头部到达竖井底部后竖井自由液面高度 Z 的对比,其中, t_1 为气团头部到达竖井底部的时间。通过对比,数值模拟能够较好地预测竖井自由液面高度的变化,表明该数值模拟方法对于排水管道井喷的水气流动模拟结果具有良好的预测精度。

2 结果与讨论

2.1 井喷过程水气流态

图 5 和图 6 分别为 A3 工况井喷发生过程水平管道和竖井中的水气流态,根据水气运动方向和气团形态,可以将气团的运动和排出划分为以下几个阶段:①模拟开始后,如图 5(a) $t=0\sim4.0\text{ s}$ 所示,初始气团受密度、压力和水流运动的影响,向竖井运动并逐渐延长,水流填充气团下层并交汇形成凸起涌浪。由于水气界面不稳定形成了表面波,波高增大触及管道顶部封堵管道,在大气团尾部不断分割出数个小气团。小气团亦随水流向竖井运动并不断变得狭长。②如图 5(a) (b) $t=5.0\sim6.0\text{ s}$ 所示,大气团头部移动至竖井底部,部

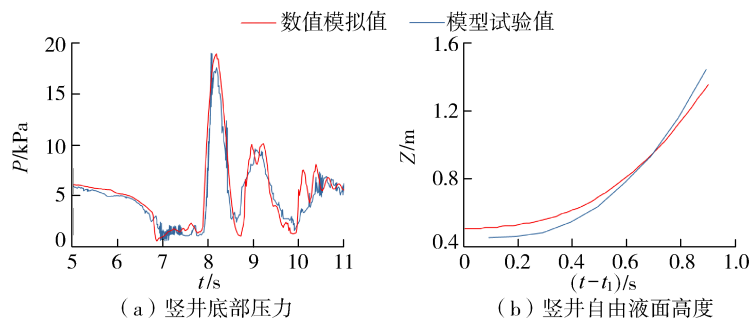


图 4 A* 工况验证结果

Fig. 4 Validation results based on condition A*

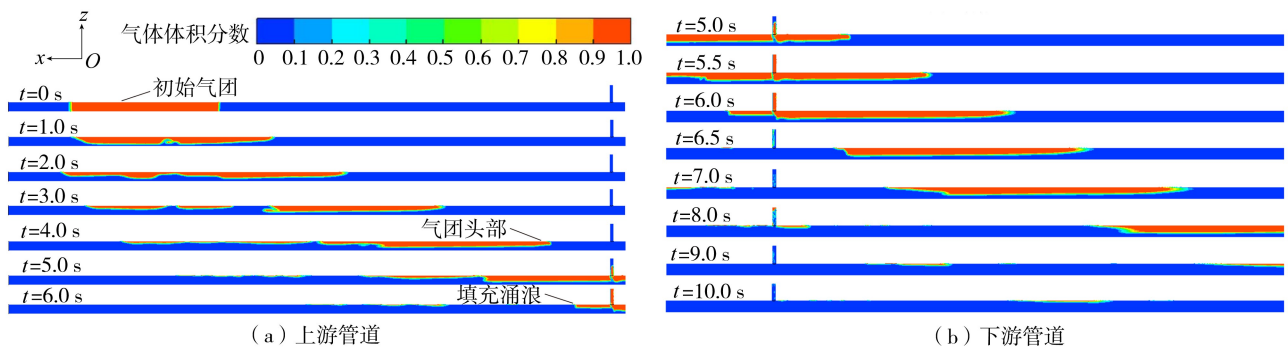


图 5 A3 工况气团在水平管道中的运动变化

Fig. 5 Movement and variation of air pockets in horizontal pipe under condition A3

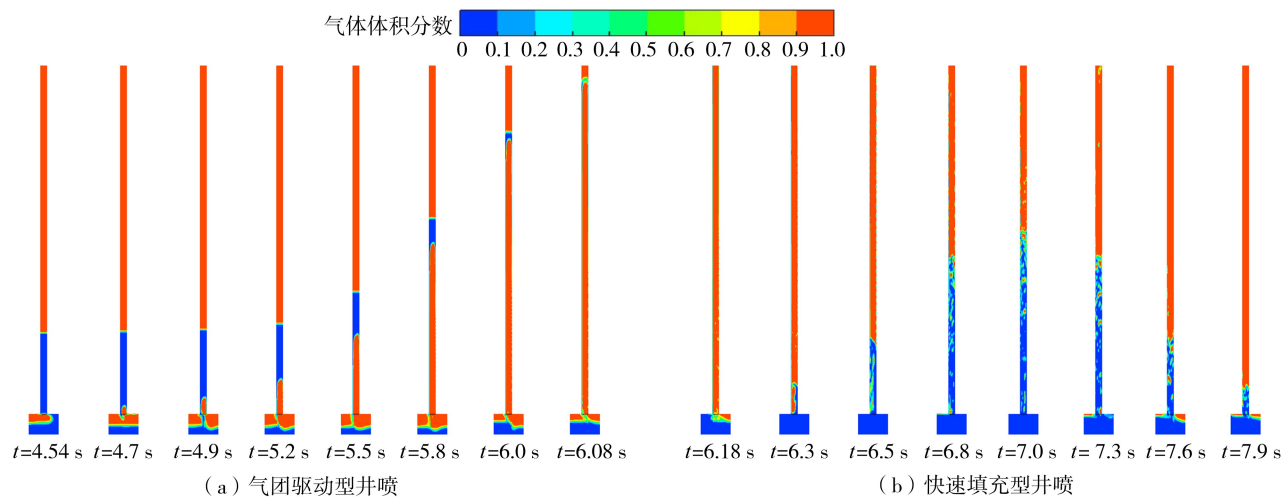


图 6 A3 工况竖井内井喷流态

Fig. 6 Flow regime in vertical shaft under condition A3

分气体在竖井内上升引发气团驱动型井喷,剩余气体继续向下游推进。气团驱动型井喷过程,如图 6(a) $t=4.54$ s 所示,进入竖井的气团在竖井上升并驱动上方水柱上升,水流沿竖井内壁向下流动,水柱长度逐渐减小。 $t=6.08$ s 气团突破上方水柱,标志着气团驱动型井喷的结束。 $t=6.08\sim 6.18$ s 时,大气团尾部位于竖井上游侧,快速填充型井喷尚未开始,竖井中仍有气体排出。③如图 5(b) $t=6.5$ s 所示,大气团尾部的填充涌浪移动至竖井底部并在竖井内上升引发快速填充型井喷,大气团全部移动至管道下游段。快速填充井喷过程,如图 6(b) $t=6.18$ s 所示,涌浪抵达竖井底部并在竖井内开始上升,标志着快速填充型井喷的开始,竖井内的液面经历了先升高后降低的过程,在 7.0 s 时达到最高,随后液面迅速下降到最低,快速填充型井喷结束。④如图 5(b) $t=8.0\sim 10.0$ s 所示,当快速填充型井喷结束后,剩余气团在管道压差的作用下移动至下游入口排出。

气团驱动型井喷的结束时间早于快速填充型井喷开始时间,将该井喷过程定义为分离式井喷;在模拟中

还观测到快速填充型井喷开始时间可能早于气团驱动型井喷结束时间,将其定义为叠加式井喷。同一类型的井喷过程具有相似的流态特征,为系统研究流态与压力、排气量及能量等参数之间的关系,本文选取 A2、B1 工况分别为分离式和叠加式井喷过程的典型工况,分析各参数随时间的变化规律,以揭示分离式和叠加式井喷过程的排气特性与能量演化规律。

图 7(a)为 A2 工况的分离式井喷过程,当气团突破竖井液面后,气团尾部尚未到达竖井底部,在气团尾部涌浪到达竖井前,存在两井喷之间的排气过程,如 $t=6.8\text{ s}$ 所示。图 7(b)以 B1 工况为例展示了叠加式井喷过程,快速填充型井喷在 $t=7.3\text{ s}$ 已经开始,但气团驱动型过程井喷仍未结束,即进入竖井的气团头部尚未突破自由液面,气团和上方水柱仍在上升。各工况的井喷情况已列在表 1 中,可以看出叠加式井喷的发生与管道压差过大或气团初始体积过小密切相关,因为其均导致了气团尾部填充涌浪进入竖井的时间早于气团驱动型井喷的结束时间,使得快速填充型井喷提前发生。各工况气团驱动型井喷的井喷高度 Z_1 和快速填充型井喷高度 Z_2 见表 1,井喷高度为井喷过程竖井中最大的水位;叠加式井喷过程相比分离式井喷过程,其井喷高度一般更低。

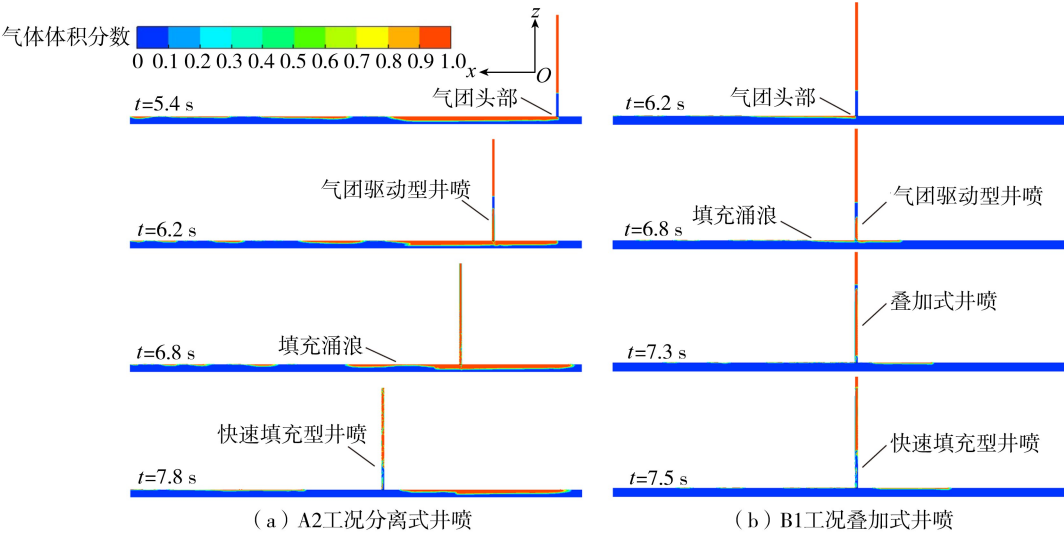


图 7 不同井喷过程流态对比

Fig. 7 Comparison of flow regimes during different geyser processes

由图 8 可知,对于 2 种井喷过程,气团在上游管道运移期间,竖井底部压力($P/\rho_w g$)与竖井内自由液面高度(Z)均呈现波动特征,随着气团运动到竖井,底部压力逐渐趋于平稳。在气团驱动型井喷过程中,竖井底部压力随气团和自由液面的上升均持续降低。对于分离式井喷,竖井底部压力在气团驱动型井喷结束时降至最低值,在快速填充型井喷的液面上升期和回落期分别对应一个峰值。叠加式井喷的竖井底部压力在快速填充型井喷开始时降到最低值,在气团突破液面时达到峰值。快速填充型井喷结束后,竖井水位在系统惯性的作用下发生数次震荡,其振幅始终小于快速填充型井喷高度;同时,上游管段中残留的小气团经竖井排出,最终压力和水位逐渐趋于稳定。根据表 1,除工况 A1 以外的所有工况快速填充型井喷高度均显著低

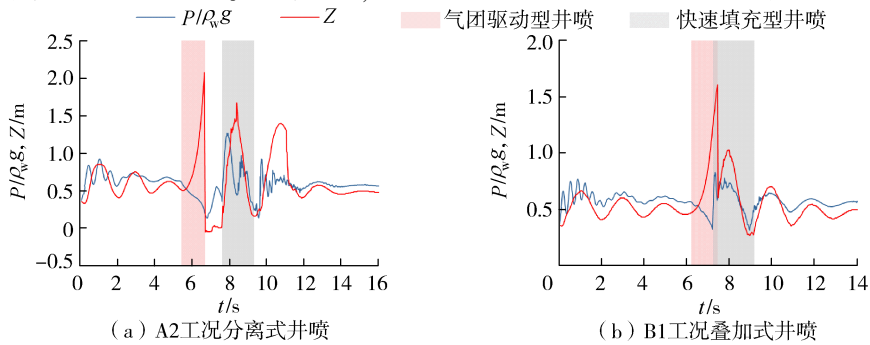


图 8 不同井喷过程竖井底部压力和自由液面高度的瞬时变化

Fig. 8 Transient changes in bottom pressure and free liquid surface height of vertical well during different geyser processes

于气团驱动型井喷高度。

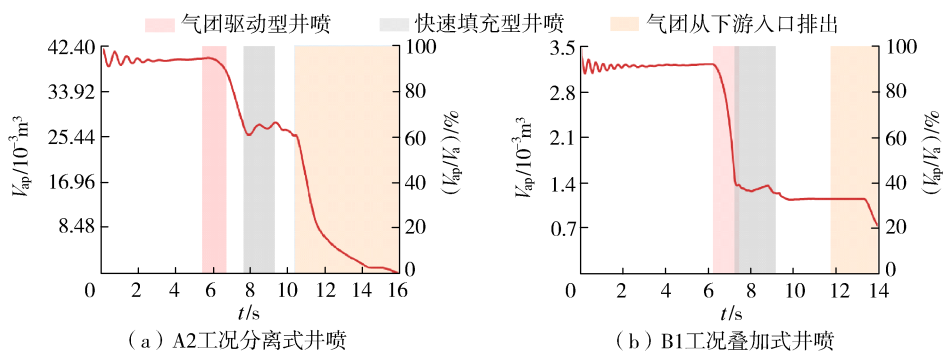


图 9 不同井喷过程水平管道气团体积演变

Fig. 9 Air pocket volume evolution in horizontal pipe during different geyser processes

2.2 井喷过程排气特性

图 6 和图 7 的流态结果表明,井喷是气团经竖井释放并驱动竖井水位上升的过程,本节将进一步分析井喷过程的排气特性。图 9 为不同井喷过程水平管道气团体积 V_{ap} 的变化,其中 V_{ap}/V_a 代表剩余气团体积占比。模拟开始后,由于初始气团被压缩, V_{ap} 均有波动,波动在 $t=4\text{ s}$ 时基本已经消失。在 A2 工况气团驱动型井喷过程中, V_{ap} 持续下降,排出了约 5.6% 的初始气体。在气团驱动型井喷后,气团持续排出,此过程排气量显著,约排出了 23.8% 的初始气体。在快速填充型井喷过程中, V_{ap} 受管道压力波动影响表现为震荡,且气团排放比例很小,气团排放比例约为 0.1%。在 B1 工况气团驱动型井喷过程中约有 49.5% 的初始气体被排出,快速填充型井喷约有 6.6% 的初始气体被排出。分离式井喷的排气集中在两井喷之间,而叠加式井喷的排气集中在气团驱动型井喷过程中。在快速填充型井喷后,剩余气体从管道下游入口排出, V_{ap} 迅速下降趋近于零。

图 10 为各工况的排气量 V_{out} 和气团排放比例 V_{out}/V_a 随 P^* 和 V_a^* 的变化,整体上气团驱动型井喷的气团排放比例显著高于快速填充型井喷。由图 10(a)可知,在相同 V_a^* 下,气团驱动型井喷的气团排放比例随 P^* 的增大先升高后降低。在分离式井喷过程,随着 P^* 从 5 增大至 25,气团排放比例从约 5.5% 增大至约 9%;根据 Li 等^[30] 的结论,气团驱动型井喷的时间与管道压差和竖井稳定后水位 $P_c/\rho_w g$ 成正比,管道压差增大导致气团突破上方水柱所需的时间更长,因此气团驱动型井喷的排气时间增大,排气量增大;当 $P^*=35, 45$ 时,井喷过程由分离式转变为叠加式,此时气团驱动型井喷气团排放比例随 P^* 增大而降低,这是因为快速填充型井喷的提前发生导致气团驱动型井喷实际排气时间缩短,排气量减小。对于 P^* 为 5~25 的分离式井喷,两种井喷之间的气团排放比例随 P^* 增大而减小,这是由于管道压差的增大导致气团尾部填充涌浪的移动速度增大,两种井喷之间的排气时间随 P^* 增大而减小,导致了气团排放比例减小。对于快速填充型井喷,无论分离式或叠加式井喷过程其气团排放比例均在 0~2%,受 P^* 影响有限。

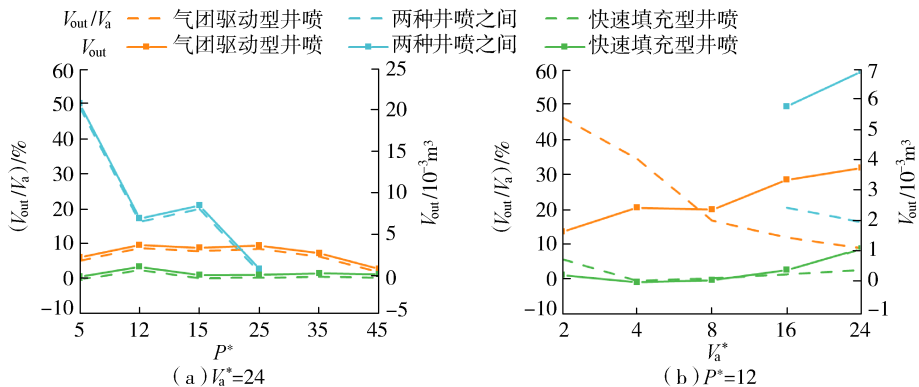


图 10 井喷过程排气量和气团排放比例

Fig. 10 Air discharge volume and air pocket discharge ratio during geyser

由图 10(b)可知,当 P^* 相同时,气团驱动型井喷的排气量随 V_a^* 增大而增大,而气团排放比例随 V_a^* 增大从约 46%降至约 9%。对于 $V_a^* = 16, 24$ 的分离式井喷,两种井喷之间的气团排放比例约为 16%~20%,随 V_a^* 增大而减小,但排气量增大。快速填充型井喷的气团排放比例普遍较小,约为 0%~5%,在部分工况(如 $V_a^* = 4$)存在进气现象。这是由于快速填充井喷过程中竖井自由液面回落导致气体进入管道。

图 11 为各工况气团驱动型井喷、快速填充型井喷和两种井喷之间的无量纲平均排气速率 $\dot{Q}^* = \dot{Q}/(gD^5)^{0.5}$ 与 P^* 和 V_a^* 的关系。整体上分离式井喷过程两种井喷之间的平均排气速率显著大于气团驱动型井喷,因为气团驱动型井喷后竖井内没有水柱的封堵,气团更容易排出。气团驱动型井喷及两种井喷之间排气速率均随 P^* 的增大而降低;气团驱动型井喷及两种井喷之间排气速率随 V_a^* 的增大而增大。快速填充型井喷平均排气速率接近于 0,且受 P^* 和 V_a^* 的影响有限。

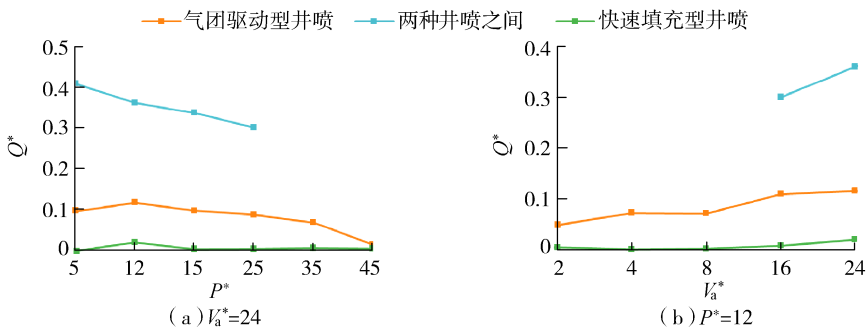


图 11 井喷过程无量纲平均排气速率

Fig. 11 Dimensionless average air discharge rate during geyser

2.3 井喷过程能量演化规律

为建立井喷过程水气能量变化与流态演变的关系,揭示井喷发生过程的能量特性,计算了系统内气体动能 E_{ka} 、气体压力势能 E_{pva} 及竖井内水的动能 E_{kw} 、水的重力势能 E_{pw} :

$$E_{ka} = \int \frac{1}{2} \rho_a \alpha_a u^2 dV \quad E_{pva} = \int P \alpha_a dV \quad E_{kw} = \int \frac{1}{2} \rho_w \alpha_w u^2 dV_r \quad E_{pw} = \int \rho_w g z dV_r \quad (6)$$

式中: V 为管道和竖井总体积; V_r 为竖井体积。

图 12 为不同井喷过程中 E_{ka} 、 E_{pva} 、 Z 的变化,竖井稳定后水位 $P_c/\rho_w g$ 通过虚线给出。对于分离式井喷和叠加式井喷过程,模拟开始后, E_{ka} 均随气团运移速度增加呈震荡上升趋势, E_{pva} 因气体反复压缩-膨胀呈现显著振荡,该振荡在气团到达竖井底部时基本稳定。在气团驱动型井喷阶段,气团在竖井内上升, E_{ka} 持续上升, E_{pva} 显著降低, Z 持续上升并显著大于竖井稳定后水位 $P_c/\rho_w g$,表明气团驱动作用导致井喷发生。

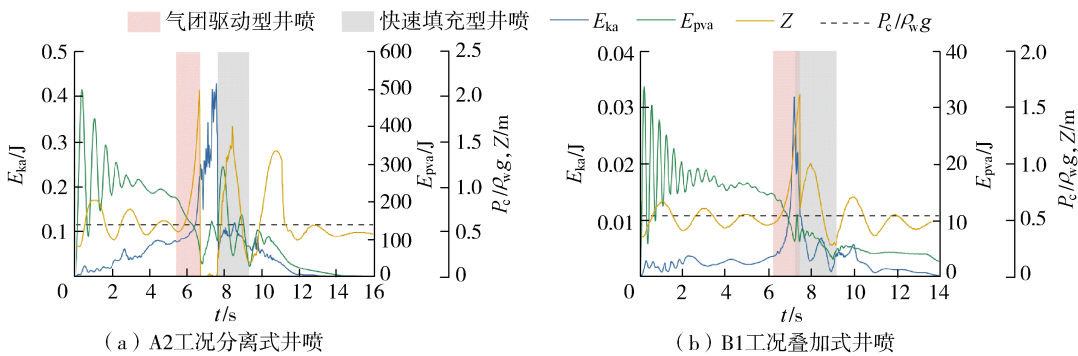


图 12 系统内气体动能、压力势能和竖井水位变化

Fig. 12 Variation of kinetic energy and pressure potential energy of air in system and water level in vertical shaft

由图 12(a)可知,对于分离式井喷过程,在气团驱动型井喷 Z 达到峰值时 E_{pva} 同步降到最低值;在两井喷之间阶段,由于竖井没有水位限制、压差驱动持续排气致使 E_{ka} 持续增大,在涌浪抵达竖井前达到峰值,给出了图 10 和图 11 中井喷过程气团排放比例和排气速率最大值出现在两种井喷之间的原因。在随后的快速填充型井喷过程中, E_{ka} 骤降并持续减小,对应排气量和排气速率的显著降低; E_{pva} 迅速增大,同时 Z 升高达

到第 2 个峰值并且显著大于稳定后水位 $P_c/\rho_w g$, 表明系统压力驱动快速填充型井喷的发生。如图 12(b) 所示, 对于叠加式井喷过程, E_{ka} 在快速填充型井喷开始时达到峰值, E_{pva} 降到最低值, 体现了快速填充型井喷的提前发生削弱了气体的动能, 降低了气团对液面的推动作用, 同时给出了图 10(a) 中 P^* 增大触发叠加式井喷并导致气团驱动型井喷排气量减小的原因。在快速填充型井喷阶段, E_{pva} 和 E_{ka} 均在波动中减小, 与分离式井喷过程类似。快速填充型井喷结束后, E_{pva} 和 E_{ka} 逐渐减小至 0, Z 逐渐趋于稳定, 井喷不再发生。

图 13 为不同井喷过程竖井中 E_{kw} 、 E_{pw} 、 Z 随时间的变化。模拟开始至气团驱动型井喷前, 受压力波动和气团运移的影响, E_{kw} 、 E_{pw} 和 Z 均有波动。由图 13(a) 可知, 对于分离式井喷过程, 在气团驱动型井喷阶段, E_{kw} 和 E_{pw} 均逐渐增大, 其峰值对应 Z 的最大值, 即气团驱动型井喷发生。在快速填充型井喷阶段, E_{kw} 在涌浪进入竖井上升后迅速增大至峰值后持续减小至最低值; 与此同时, Z 达到该阶段最大值, 且 Z 的最大值显著大于稳定后水位 $P_c/\rho_w g$; 此外, Z 达到该阶段最大值时, E_{pw} 也同步达到峰值。快速填充型井喷的 E_{kw} 和 E_{pw} 显著大于气团驱动型井喷, 表明水体能量对井喷发生的驱动作用增强。由图 13(b) 可知, 叠加式井喷 E_{kw} 在气团驱动型井喷发生时达到最大值, 随后由于液面被气团突破, E_{kw} 迅速降低, 在快速填充型井喷发生时达到最小值。 E_{pw} 在气团驱动型井喷阶段随液面的升高而增大, 随后涌浪在竖井的上升使更多水流注入竖井, E_{pw} 进一步升高, 在快速填充型井喷液面最高时达到峰值。

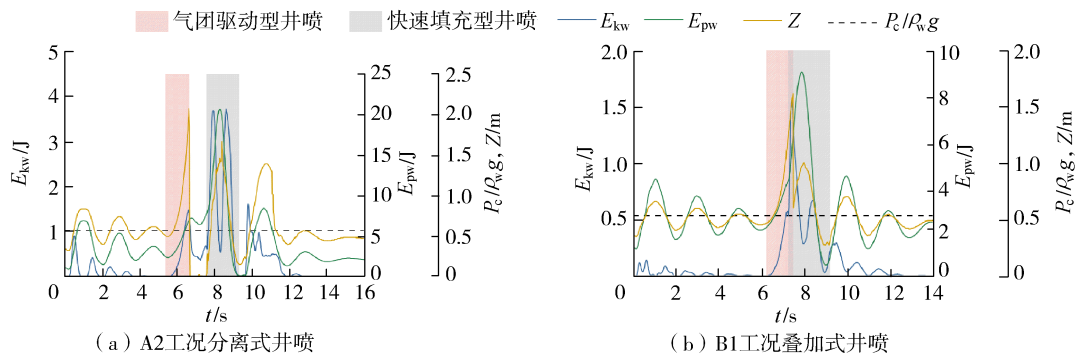


图 13 竖井内水体动能、势能和水位变化

Fig. 13 Variation of kinetic energy and potential energy of water and water level in vertical shaft

图 14 为各工况单位质量气体最大无量纲动能 ($E_{ka,max}^* = E_{ka,max}/m_a gD$)、竖井内单位质量水体最大无量纲动能 ($E_{kw,max}^* = E_{kw,max}/m_w gD$)、气团驱动型井喷强度 ($Z_1^* = Z_1/(P_c/\rho_w g)$) 和快速填充型井喷强度 $Z_2^* = Z_2/(P_c/\rho_w g)$ 随 P^* 和 V_a^* 的变化, 其中, m_a 为气体质量, m_w 为水体质量, 井喷强度的物理意义为井喷高度与竖井稳定后水位之比。对于气团驱动型井喷, $E_{ka,max}^*$ 随 P^* 和 V_a^* 的增大而增大, 当井喷过程从分离式井喷 ($P^* \leq 25$) 转变为叠加式井喷 ($P^* \geq 35$) 时, 由于涌浪在竖井的上升削弱了气团的推动作用, 导致 $E_{ka,max}^*$ 的略微减小; Z_1^* 随 P^* 的增大而减小, 随 V_a^* 的增大而增大。对于快速填充型井喷, $E_{kw,max}^*$ 随 P^* 的增大而减小, 随 V_a^* 的增大而增大; Z_2^* 随 P^* 的增大而减小, 随 V_a^* 的增大而增大。

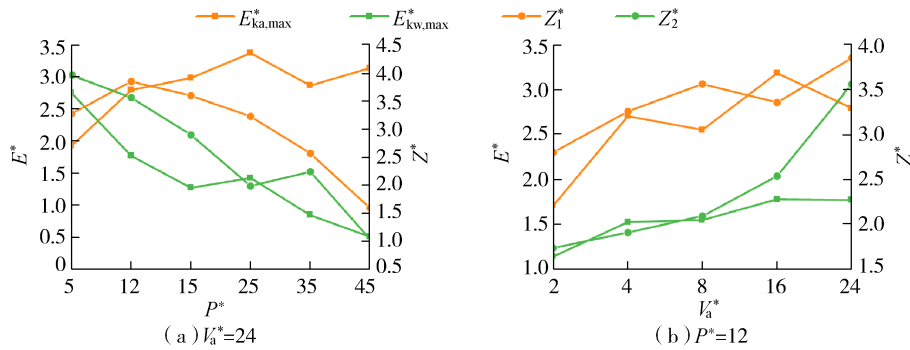


图 14 最大无量纲动能和井喷强度变化

Fig. 14 Variation of dimensionless maximum kinetic energy and geyser intensity

结合表 1 的井喷高度数据可以看出, P^* 的增大会使井喷高度增大, 而同时由于水柱长度和质量 的增大, 井喷强度反而减弱。 V_a^* 的增大会使井喷高度和井喷强度均增大, 因为气相的增多使水气混合物的密度降

低。根据图 11 和图 12,气团驱动型井喷的发生与气体动能密切相关,快速填充型井喷发生与水体动能密切相关。由图 14 可知,气团驱动型井喷发生时 $E_{ka,max}^*>1.5$,快速填充型井喷发生时 $E_{kw,max}^*>0.5$ 。

3 结 论

- a. 模拟了两侧入流排水管道中滞留气团释放引发的井喷过程,发现滞留气团在竖井上升并释放会诱发气团驱动型井喷,气团尾部的填充涌浪移动至竖井底部并在竖井内上升引发快速填充型井喷。根据气团驱动型井喷的结束时间与快速填充型井喷开始时间的相对关系,可将井喷过程分为分离式井喷和叠加式井喷。
- b. 气团驱动型井喷的气团排放比例随 P^* 的增大先升高后降低,随 V_a^* 的增大而降低,约为 2%~47%;快速填充型井喷的气团排放比例受 P^* 和 V_a^* 的影响有限,约为 0%~5%;分离式井喷过程在两井喷之间也存在显著排气,气团排放比例随 P^* 的增大而减小,随 V_a^* 的增大而增大,约为 0%~50%。气团驱动型井喷及分离式井喷中两井喷之间的平均排气速率均随 P^* 的增大而减小,随 V_a^* 的增大而增大;快速填充型井喷的平均排气速率受 P^* 和 V_a^* 的影响有限。
- c. 井喷过程中,气体动能 E_{ka} 的峰值出现在气团驱动型井喷阶段,竖井内水体动能 E_{kw} 的峰值出现在快速填充型井喷阶段。给出了井喷强度的定义,井喷强度随 P^* 的增大而减小,随 V_a^* 的增大而增大;给出了井喷发生时的能量特征阈值,气团驱动型井喷发生时 $E_{ka,max}^*>1.5$,快速填充型井喷发生时 $E_{kw,max}^*>0.5$ 。

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[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] 李桐,张欣,陈昱霖,等. 管道自清淤水流流场及清淤特性数值模拟分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(4):89-98. (LI Tong,ZHANG Xin,CHEN Yulin,et al. Numerical simulation analysis of flow field and dredging characteristics of pipeline self-cleaning[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2025,53(4):89-98. (in Chinese))

[3] 张睿,何琪,徐旭,等. 调蓄池水力自清系统放空冲洗特性[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(2):47-53. (ZHANG Rui,HE Qi,XU Xu,et al. Characteristics of venting flushing in hydraulic self-cleaning systems for storage tanks[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2025,53(2):47-53. (in Chinese))

[4] SUN Jingkang,FEI Zhaodan,QIAN Shangtuo,et al. Airflow characteristics of the stepped dropshaft in the deep tunnel storage system[J]. AQUA-Water Infrastructure,Ecosystems and Society,2024,73(12):2294-2308.

[5] 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))

[6] VASCONCELOS J G,LEITE G M. Pressure surges following sudden air pocket entrapment in storm-water tunnels[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2012,138(12):1081-1089.

[7] CHEN Yaohui,LI Pengcheng,FEI Zhaodan,et al. Air-water interactions during rapid filling of a closed horizontal pipe[J]. Physics of Fluids,2025,37(4):043326.

[8] 王希晨,张健,许听雨,等. 大流量进水工况下主隧系统水气运动特性[J]. 水利水电科技进展,2021,41(5):15-21. (WANG Xichen,ZHANG Jian,XU Tingyu,et al. Characteristics of air-water movement in a main tunnel system under large inflow condition[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2021,41(5):15-21. (in Chinese))

[9] QIAN Shangtuo,MENG Xianghu,LI Pengcheng,et al. Machine learning-based prediction for airflow velocity in unpressured water-conveyance tunnels[J]. Physics of Fluids,2025,37(2):023320.

[10] 安瑞冬,游景皓,廖磊,等. 深层隧道排水系统中井隧水力学特性研究[J]. 水利学报,2021,52(12):1498-1507. (AN Ruidong,YOU Jinghao,LIAO Lei,et al. Study on the hydraulic characteristics of dropshaft and tunnel in the deep tunnel drainage system[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2021,52(12):1498-1507. (in Chinese))

[11] WRIGHT S J,LEWIS J W,VASCONCELOS J G. Physical processes resulting in geysers in rapidly filling storm-water tunnels [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering,2011,137(3):199-202.

[12] LIU Lujia,SHAO Weiyun,ZHU D Z. Experimental study on stormwater geyser in vertical shaft above junction chamber[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2020,146(2):04019055.

[13] ZHANG Yan,CHEN Yaohui,QIAN Shangtuo,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.

[14] WANG Jue,VASCONCELOS J G. Investigation of manhole cover displacement during rapid filling of stormwater systems[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2020,146(4):04020022.

[15] 蒯重列,王晓升,孙振海,等. 竖井形式对调蓄隧道系统井喷的抑制效果分析[J]. 水利水电科技进展,2023,43(3):77-82. (KUAI Zhonglie,WANG Xiaosheng,SUN Zhenhai,et al. Suppression effect on the geyser in storage tunnel system with different shaft forms[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2023,43(3):77-82. (in Chinese))

[16] 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,2022.

[17] QIAN Yu,ZHU D Z,LIU Lujia,et al. Numerical and experimental study on mitigation of storm geysers in Edmonton, Alberta, Canada[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2020,146(3):04019069.

[18] LEON A S,ELAYEB I S,TANG Yun. An experimental study on violent geysers in vertical pipes[J]. Journal of Hydraulic Research,2019,57(3):283-294.

[19] 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,2022,37(3):432-439. (WANG Xiaosheng,ZHANG Jian,QIAN Shangtuo,et al. Characteristics of geysers induced by release of air pocket in storage tunnel system[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics,2022,37(3):432-439. (in Chinese))

[20] WANG Xiaosheng,QIAN Shangtuo,CHEN Yongxun. Experimental study on geysers induced by the release of trapped air in storage tunnel systems[J]. Applied Sciences,2019,9(24):5326.

[21] ZHANG Shuangqing,LIU Jiachun,HUANG Biao,et al. Numerical study of geyser events in rainstorm systems at different scales[J]. Water Science and Engineering,2023,16(4):381-389.

[22] FANG Haoyu,ZHOU Ling,CAO Yun,et al. 3D CFD simulations of air-water interaction in T-junction pipes of urban stormwater drainage system[J]. Urban Water Journal,2022,19(1):74-86.

[23] CONG Jing,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.

[24] CHOI S,HONG S H,LEE S O. Practical approach to predict geyser occurrence in stormwater drainage system[J]. KSCE Journal of Civil Engineering,2019,23(3):1108-1117.

[25] 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,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))

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

[27] 李昕. 城镇排水管道水气运动特性研究[D]. 成都:四川大学,2023.

[28] 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.

[29] CHEN Yaohui,QIAN Shangtuo,QIAN Yu,et al. Prediction of geyser occurrences in covered manholes of urban stormwater systems[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2025,151(1):04024058.

[30] LI Xin,ZHANG Jianmin,ZHU D Z,et al. Modeling geysers triggered by an air pocket migrating with running water in a pipeline[J]. Physics of Fluids,2023,35(4):045126.

[31] HUANG Biao,WU Shiqiang,ZHU D Z,et al. Experimental study of geysers through a vent pipe connected to flowing sewers[J]. Water Science and Technology,2018,2017(1):66-76.

[32] LIU Jiachun,ZHANG Shuangqing,HUANG Biao,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.

[33] LI Yunjie,ZHOU Ling,LI Zhao,et al. Modeling interactions between hydraulic transients and inline air pockets in water pipelines:dynamic behavior and energy dissipation[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2024,150(6):04024038.

[34] ZHOU Ling,LU Yanqing,KARNEY B,et al. Energy dissipation in a rapid filling vertical pipe with trapped air[J]. Journal of Hydraulic Research,2023,61(1):120-132.

[35] ZHOU Ling,WANG Huan,KARNEY B,et al. Dynamic behavior of entrapped air pocket in a water filling pipeline[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2018,144(8):04018045.

[36] LI Fei,YAN Jieru,YAN Hexiang,et al. 2D Modelling and energy analysis of entrapped air-pocket propagation and spring-like geysering in the drainage pipeline system[J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics,2023,17(1):2227662.

[37] 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.