

受限通气条件下滞留气团运动对排水系统井喷的作用机制

徐福军¹, 章 艳²

(1. 上海浦河工程设计有限公司; 2. 河海大学水利水电学院)

摘要:为了探究井盖约束下竖井受限通气条件对气团运动规律及井喷特性的影响,采用模型试验与数值模拟相结合的方法,系统研究了竖井直径、通气率、外部水头及初始气团体积对气团运动及井喷发生的影响。结果表明:气团释放过程中,竖井水位上升过程可分为气团驱动和压差驱动两个阶段,可能产生未发生井喷、仅发生气团驱动井喷、仅发生压差驱动井喷、气团驱动井喷和压差驱动井喷均发生 4 种典型流态;气团形态受管径比、通气率和气团长度共同影响,小直径竖井中气团整体趋于对称并侵入上游管道,而大直径竖井中气团显著不对称并滞留于下游;小直径竖井中气团头部形态随通气率呈非单调变化,通气率为 0 时近似对称,通气率为 0.01、0.02 时呈不规则形态,通气率为 0.05、0.1 时重新趋于对称,通气率为 1(完全通气)时则呈偏向下流的尖锐不对称形态;气团长度越大,其对自由液面的扰动越强烈,释放位置也越高;竖井内气团头部和自由液面上升速度均随通气率、外部水头、气团长度的增加及竖井直径的减小而显著增大。

关键词:城市排水系统;竖井;井盖;滞留气团;井喷;受限通气

Mechanism of trapped air-pocket motion on geyser occurrence in drainage systems under restrictive ventilation conditions//Xu Fujun¹, Zhang Yan²(1. Shanghai Puhe Engineering Design Co., Ltd.; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University)

Abstract: To investigate the effects of restrictive ventilation conditions in a covered vertical shaft on air-pocket motion and geyser characteristics, a combined approach of physical model tests and numerical simulations was employed to systematically examine the influences of shaft diameter, ventilation ratio, external head, and initial air-pocket volume on air-pocket motion and geyser occurrence. The results show that the water-level rise in the shaft during air-pocket release can be divided into an air-pocket-driven stage and a pressure-difference-driven stage, resulting in four typical flow regimes: no geyser, an air-pocket-driven geyser only, a pressure-difference-driven geyser only, and both an air-pocket-driven geyser and a pressure-difference-driven geyser. The air-pocket morphology is jointly influenced by the shaft-to-pipe diameter ratio, ventilation ratio, and air-pocket length. In small-diameter shafts, the air pocket tends to be symmetric and intrudes into the upstream pipe, whereas in larger-diameter shafts, the air pocket exhibits significant asymmetry and remains trapped in the downstream pipe. For small-diameter shafts, the air-pocket head morphology varies non-monotonically with the ventilation ratio: it is approximately symmetric at a ventilation ratio of 0, becomes irregular at ventilation ratios of 0.01 and 0.02, returns to a nearly symmetric shape at ventilation ratios of 0.05 and 0.1, and develops into a sharply asymmetric shape inclined toward the downstream direction at a ventilation ratio of 1 (fully ventilated condition). A larger air-pocket length results in stronger disturbances to the free surface and a higher release position. The rising velocities of both the air-pocket head and the free surface increase significantly with increasing ventilation ratio, external head, and air-pocket length, and decrease with increasing shaft diameter.

Key words: urban drainage system; shaft; cover; trapped air pocket; geyser; restrictive ventilation

城市排水系统在缓解暴雨内涝和保障排水安全方面发挥着关键作用。强降雨过程中,大量地表径流迅速注入排水管道,形成明满交替流,进而封堵管道中的气体并形成滞留气团^[1-3]。滞留气团经竖井

释放可能诱发排水系统井喷,即竖井内水柱或水气混合体高速喷射的水力现象^[4-6]。井喷现象涉及复杂的气液两相流动^[7],具有高突发性和强破坏性,伴随剧烈压力波动、管道振动及井盖掀飞,威胁结构

与人员安全,还可能导致污染物外泄。Muller 等^[8]发现井喷过程中自由液面最大上升速度可达 2~30 m/s,具有极强的冲击性与破坏力。

现有井喷研究主要针对竖井顶部无井盖条件,即竖井完全通气的情况。Monni 等^[9-12]通过模型试验和数值模拟,分析了管道和竖井内滞留气团的形成与运动,以及井喷类型和流态。当管道内发生明满交替流时,空气受浮力、剪切力、压力波等作用^[13-15],可产生分层流、气泡流、段塞流、环状流^[16-17],其中后三者会产生滞留气团。Wright 等^[18]通过分析美国明尼苏达州实际井喷事故的影像与压力数据,阐明了滞留气团在竖井中释放引发井喷的物理机制。Cong^[19]通过模型试验指出,井喷发生时竖井中气团上升净速度会超过 Taylor 气泡速度。Wang 等^[20-22]通过模型试验与数值模拟,揭示了井喷高度随气团体积、初始水深及外部压力的增大而增大、随竖井直径的减小而增大。王晓升等^[23-24]采用 CLSVOF 方法结合混合 RANS/LES 模型,精细捕捉了井喷过程中气泡形态、速度场与压力场的动态变化,揭示了井喷高度与竖井和隧道直径比呈负相关关系。综上,已有研究表明井喷发生受气团体积、上升速度及竖井几何条件等综合影响,为解释气团运动规律和井喷特性提供了重要依据。然而,这些研究普遍忽略了井盖对竖井通气条件的限制及其对气团运动和井喷特性的影响。

针对受限通气条件下的井喷研究表明,井盖的存在可能会导致竖井排气受限以及竖井内位于自由液面上方的初始空气在气团释放过程中被压缩产生“气垫效应”,进而显著影响井喷高度、压力峰值及井盖位移;Zhou 等^[25]发现不同通气条件下压力波动存在明显差异,受限通气条件下气团释放会引起竖井顶部空气增压;Wang 等^[26-27]采用数值模拟方法研究了不同通气条件下井盖发生位移的可能性,指出当相对通气率不大于 0.02 时,大体积滞留气团释放产生的增压足以掀翻井盖,且气团释放引起的压力增幅大于压力波动本身。相关研究关注了装配井盖竖井在受限通气条件下的压力特性及井喷发生临界条件,但尚未深入分析井喷过程中受限通气竖井内的气团动力学特性,且气团形态、上升速度等随各影响因素的变化规律尚不明确,制约了对井喷现象内在物理机制的认识。为此,本文采用模型试验与数值模拟相结合的方法,研究井盖约束下竖井受限通气条件对排水管道井喷的影响,揭示竖井内滞留气团的形态演化与运动规律,以期为城市排水系统的安全设计与运行提供理论支撑与技术参考。

1 研究方法

1.1 物理模型试验

本文采用概化的排水管道模型,以便于控制变量和研究各变量的影响^[28]。模型结构示意图如图 1 所示,主要由上游压力水箱、水平管道和竖井组成。其中,上游水箱(2.0 m×1.6 m×1.2 m)由水泵供水,水平管道(直径 $D=0.15$ m,总长 $L_1+L_2+L_3=17.0$ m)上游连接水箱,下游末端封闭。在竖井与封闭末端之间设置 3 个阀门,通过关闭不同的阀门,可在阀门与下游密封末端之间形成特定长度的初始滞留气团。气团长度 L_3 分别取 1.2、1.8、2.4 m,其体积 $V_a=\pi D^2 L_3/4$ 。竖井中心至水箱的水平距离 L_1 为 8.3 m,竖井顶部至水平管道底部的垂直高度 H_1 为 2.0 m。试验设置 0.075 m 和 0.15 m 2 种竖井直径(D_r),对应的竖井与管道直径比 D_r/D 分别为 0.5 和 1。竖井内初始液面高度与上游水箱内水头 H_0 保持一致, H_0 分别取 0.7 m 和 0.8 m。本文竖井高度超过 2 倍管道上游初始水头,能够较好地反映井喷强度和发生情况。

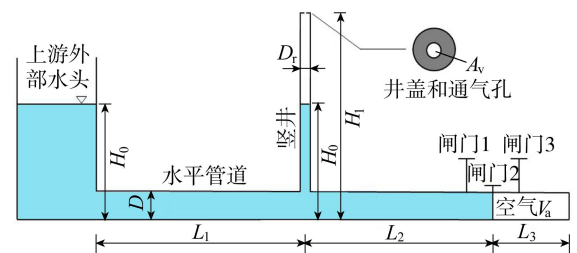


图 1 排水管道模型结构示意图

为模拟竖井受限通气条件,采用有机玻璃制成的井盖,并通过螺栓将其固定于竖井顶部。井盖中心开有通气圆孔,试验设置 6 种不同的通气面积,分别对应 0、0.01、0.02、0.05、0.1、1 共 6 种通气率($A_v^*=A_v/A_s$,其中, A_v 为通气孔面积, A_s 为竖井的横截面积。 $A_v^*=0$ 表示井盖完全不通气; $A_v^*=1$ 表示未设置井盖,即竖井完全通气)。

试验前,所有阀门均处于开启状态,启动水泵并调节上游水箱的液面高度,使系统维持稳定的外部水头 H_0 ;随后根据预设的初始气团长度,关闭相应的阀门并排空阀门与封闭末端之间的水体,从而在系统下游侧形成初始气团,其初始压力等于大气压。试验开始时,通过手动迅速开启对应阀门(平均开阀时间约为 0.25 s)使气团进入管道。试验过程中,使用高速运动相机(GoPro 8)记录竖井中气团释放与井喷的瞬时水气流态,拍摄帧率为 60 帧/s,分辨率为 4 096×2 160 像素。

1.2 数值模拟方法

1.2.1 模型选择

基于物理模型建立三维井喷 CFD 数值模型,并将数值模拟结果与物理模型试验结果进行对比验证,进而利用验证后的数值模型研究不同通气率下竖井直径、外部水头和滞留气团体积对井喷的影响。已有研究表明,VOF 模型能够较为准确地捕捉管道内水气界面的动态演化特征,已广泛用于管道水气两相流动的数值模拟^[29-31]。因此,本文采用 VOF 模型对受限通气条件下的管道水气两相流动过程进行模拟。Chan 等^[21]的研究表明,标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型能够较准确地模拟井喷过程中的压力瞬变及水气相互作用,故本文选用该湍流模型进行求解。

1.2.2 边界条件设置与数值模型验证

基于 Creo 软件构建三维管道模型(图 2)。数值计算边界条件设置如下:水平管道上游端设为压力进口,压力大小为 $\rho_w g H_0$ (ρ_w 为水体密度,取 998.2 kg/m^3 ; g 为重力加速度,取 9.81 m/s^2),该进口处水的体积分数设为 1;井盖通气孔设为表压为 0 的压力出口,其余井盖区域设为无滑移壁面,当 $A_v^* = 0$ 时,竖井顶部全部设为无滑移壁面;水平管道下游封闭端设置长度为 L_3 的初始气团^[32]。

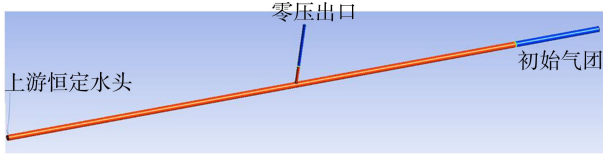


图 2 数值模拟三维模型

采用 ICEM 软件对排水管道井喷计算模型进行六面体结构化网格划分,网格尺寸范围为 $0.03 \sim 0.05 \text{ m}$ 。通过调整单元网格尺寸改变网格数量,对模型进行网格无关性验证。在 $A_v^* = 0.1$ 、 $D_r/D = 0.5$ 、 $H_0 = 0.7 \text{ m}$ 、 $L_3 = 1.8 \text{ m}$ 工况下,测试了 5 套网格划分方案。结果表明,随着网格总数由约 11 万增加至 27 万,数值模拟结果趋近实际值,相对误差由 11.66% 降低至 4.94%,呈现出良好的收敛特性。对比 5 套网格划分方案的计算精度与效率,最终选取网格总数为 192 366 的计算模型(图 3),并采用相同的单元网格尺

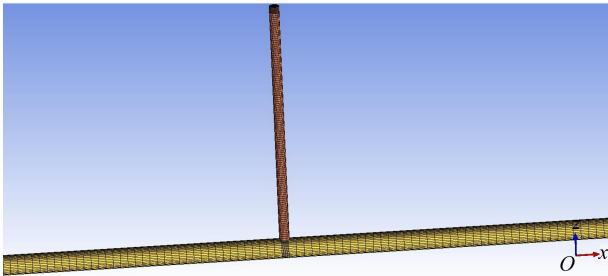


图 3 计算模型网格划分

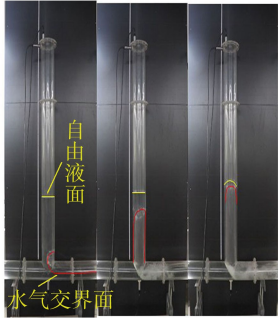
寸对不同竖井直径的三维模型进行网格划分。

固定参数 $D_r/D = 0.5$ 、 $H_0 = 0.8 \text{ m}$ 、 $L_3 = 1.8 \text{ m}$,选取通气率为 0、0.01、0.02、0.05、0.1 共 5 组工况,将数值模拟结果与模型试验结果进行对比验证。结果表明,数值模拟与模型试验在水气流动演变及典型界面运动等方面均保持一致。当通气率为 0、0.01、0.02、0.05、0.1 时,竖井内自由液面高度的相对误差分别为 4.23%、3.80%、4.17%、4.06%、2.89%,表明数值结果与试验结果吻合良好,能够满足本文的精度要求。

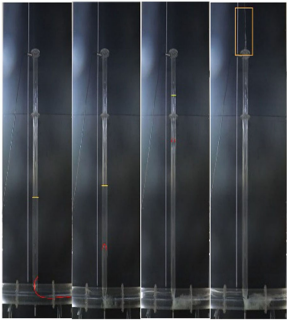
2 结果与讨论

2.1 气团释放过程水气流动现象

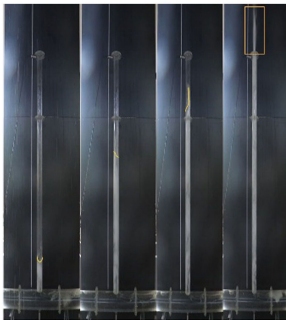
图 4 给出了滞留气团经竖井释放的典型水气流动态。图 4(a) 给出了 $D_r/D = 1.0$ 、 $A_v^* = 0.05$ 、 $H_0 = 0.7 \text{ m}$ 、 $L_3 = 1.8 \text{ m}$ 工况下的气团释放过程,气团进入竖井后,竖井内水气交界面(红线所示)和自由液面(黄线所示)持续上升,当水气交界面在自由液面到达竖井顶部前突破自由液面时,不发生井喷。图 4(b)(c) 给出了 $D_r/D = 0.5$ 、 $A_v^* = 0.1$ 、 $H_0 = 0.7 \text{ m}$ 、 $L_3 = 2.4 \text{ m}$ 工况下发生井喷的典型水气流动态,可划分为气团驱动井喷和压差驱动井喷两个阶段。在自由液面到达竖井顶部前,水气交界面并未突破自由液面,气团将其上方的水柱挤出竖井,并经井盖的孔口喷出,形成气团驱动井喷;随后竖井产生局部低压,在外部压力作用下,水流快速充填到水平管道及连接的竖井中,并冲击管道内未完全释放的滞留



(a) 气团释放未井喷过程



(b) 气团驱动井喷发生过程



(c) 压差驱动井喷发生过程

图 4 气团释放过程典型流态

气团,产生水锤效应,在系统瞬时高压作用下,水平管道内的水流挟带空气从竖井内快速排出,形成压差驱动井喷。

基于气团驱动井喷和压差驱动井喷的发生特征,所有试验工况可归纳为 a 型(未发生井喷)、b 型(仅发生气团驱动井喷)、c 型(仅发生压差驱动井喷)和 d 型(气团驱动井喷与压差驱动井喷均发生) 4 种典型井喷流态,具体结果见表 1。由表 1 可见,当 $D_l/D=1.0$ 或 $A_v^* \leq 0.01$ 时,各工况均未发生井喷现象;当 $D_l/D=0.5$ 时,b 型、c 型及 d 型井喷现象均有发生。井喷发生概率随 A_v^* 、 H_0 和 L_3 的增大而增大;当 L_3 较短时,压差驱动井喷的发生概率显著降低,井喷流态更倾向于 b 型。

表 1 各工况井喷现象的观测结果

D_l/D	A_v^*	H_0/m	L_3/m	井喷类型
1.0	0、0.01、0.02、0.05、0.1、1	0.7、0.8	1.2、1.8、2.4	a 型
	0、0.01	0.7、0.8	1.2、1.8、2.4	a 型
0.5	0.02	0.7	1.2、1.8、2.4	a 型
	0.05	0.7	1.2、1.8	a 型
	0.1、1	0.7	1.2	a 型
	0.02	0.8	1.2、1.8、2.4	b 型
0.5	0.05	0.7	2.4	b 型
	0.05	0.8	1.2、1.8、2.4	b 型
	0.1、1	0.8	1.2	b 型
0.5	0.1、1	0.7	1.8	c 型
0.5	0.1	0.7	2.4	d 型
	1	0.8	1.8、2.4	d 型

2.2 滞留气团形态演变特征

图 5 和图 6 分别为 $D_l/D=0.5, 1.0$ 时, $H_0=$

0.8 m、 $L_3=1.8$ m、 $A_v^*=0.01, 0.02, 0.05, 0.1$ 工况下气团进入竖井时的形态。由图 5 可见,当 $D_l/D=0.5$ 时,气团进入竖井后总体沿竖井中心轴向上发展,整体呈近似对称形态,并有部分气体侵入上游管道。较小的竖井横截面积使竖井内气团的体积占比增大、边壁液膜变薄,气团上方水柱的下泄通道变窄、下泄流量减小,导致水气交界面向上靠近自由液面的速度降低。因此,水气交界面突破自由液面的位置较高,甚至可能在突破自由液面前推动自由液面到达井盖,从而增加气团驱动井喷发生的可能性。相比之下,当 $D_l/D=1.0$ 时(图 6),较大的竖井横截面积导致气团从竖井上游侧进入后呈不对称上升分布(尖端偏向下游侧),气团上方水柱向下流动的流量增大,致使水气交界面在较低高度突破自由液面,井喷高度显著降低,该工况下未观察到井喷发生,与试验结果一致。不同 A_v^* 下, $D_l/D=0.5$ 时气团在进入竖井的同时可侵入上游管道中;而 $D_l/D=1.0$ 时,气团进入竖井后几乎不进入上游管道,主要滞留于下游管道。

图 7 和图 8 分别为 $H_0=0.7, 0.8$ m 时, $D_l/D=0.5$ 、 $L_3=1.8$ m、 $A_v^*=0, 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 1$ 工况下气团头部水气交界面即将突破自由液面时的形态。当 $A_v^*=0$ 时,竖井顶部完全封闭导致自由液面几乎不上升且始终接近水平,气团呈对称形态,与经典泰勒气泡较为接近。当 $A_v^*=0.01, 0.02$ 时,井盖强限制通气使得自由液面上方气团增压,自由液面在上升过程中波动加剧,导致气团形态不规则。当

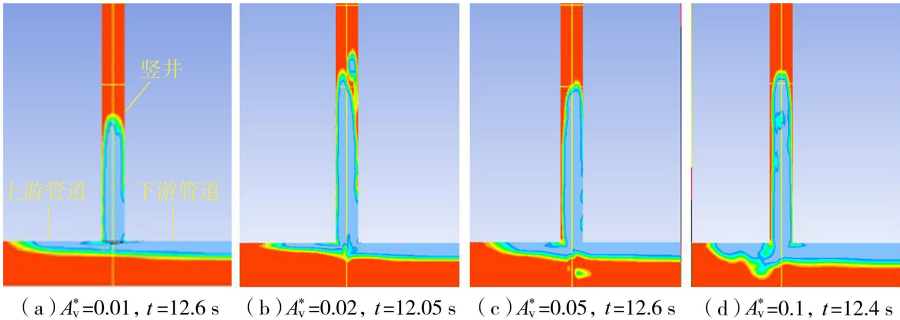


图 5 $D_l/D=0.5$ 时气团进入竖井的形态

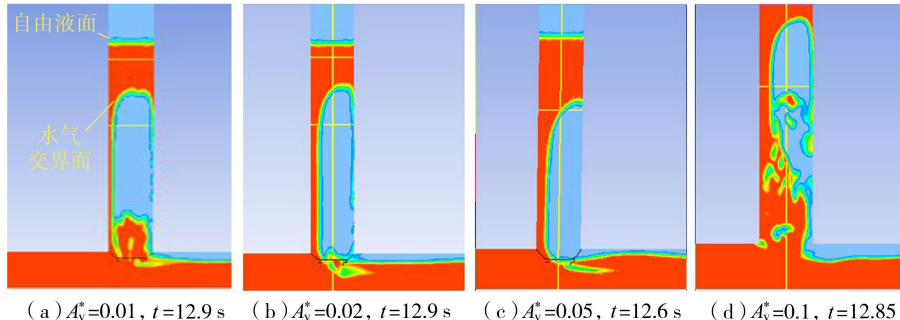


图 6 $D_l/D=1.0$ 时气团进入竖井的形态

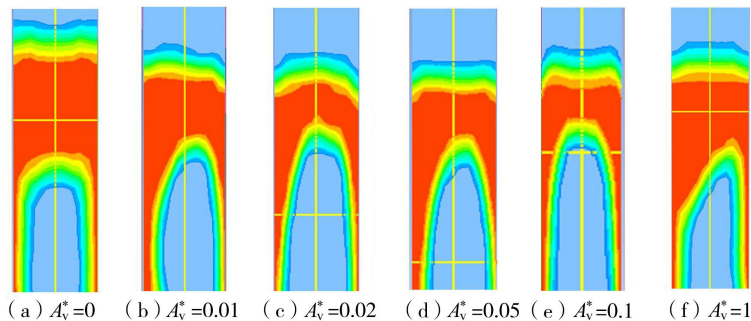


图7 $H_0 = 0.7 \text{ m}$ 时气团即将突破自由液面时的形态

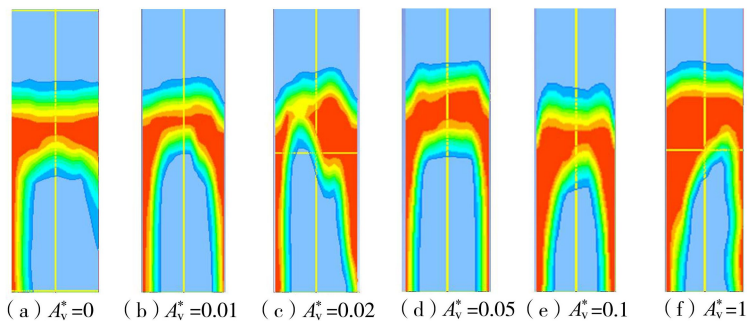


图8 $H_0 = 0.8 \text{ m}$ 时气团即将突破自由液面时的形态

$A_v^* = 0.05, 0.1$ 时,自由液面上方初始气体的增压减弱,气团头部重新趋于对称。当 $A_v^* = 1$ 时,由于通气不受限制,气团进入竖井后上升速度较快,气团头部呈现出偏向下流侧的不对称尖锐状。随着外部水头的增加,井喷高度显著增大。对比图7和图8可见,随着 H_0 增大,竖井内液面波动更为剧烈,同时气团头部形态的不规则性也更为明显。

2.3 竖井中自由液面及水气交界面位移特性

以水平管道底部所在的平面为参照基准平面(基准高度0),定义 H_{fs} 为任意时刻竖井内自由液面高度, H_{int} 为任意时刻竖井内气团头部水气交界面高度, v_{fs} 为竖井内自由液面速度, v_{int} 为气团头部水气交界面速度, H_{net} 为气团头部净位移(即气团释放过程中其上方水柱减小的长度), H_{net} 可表示为:

$$H_{net} = H_{fs,0} - (H_{fs} - H_{int}) \quad (1)$$

式中: $H_{fs,0}$ 为气团刚进入竖井时自由液面的高度。

图9给出了 $H_0 = 0.8 \text{ m}$ 、 $D_r/D = 0.5$ 、 $L_3 = 1.8 \text{ m}$ 、 $A_v^* = 0, 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 1$ 工况下气团释放过程中竖井内 H_{fs} 、 H_{int} 及 H_{net} 随时间 t 的变化曲线(将气团刚进入竖井的时刻定义为 $t=0$)。当 $A_v^* = 0$ (顶部密封)时,竖井内自由液面高度几乎无变化,如图9(a)所示,表明气团上升与边壁液膜下降维持水量平衡。随着水气交界面上升,气团头部净位移增大,直至水气交界面突破自由液面完成气团释放,此过程中 H_{int} 与 H_{net} 随时间近似匀速上升。随着 A_v^* 增加,气团释放时 H_{fs} 和 H_{int} 总体呈升高趋势,气团释放位置更接近竖井顶部井盖,井喷的发生概率和

喷射高度显著增大。当 $A_v^* = 0.02, 0.05, 0.1, 1$ 时,气团释放对应的 H_{int} 分别为 $1.64, 1.72, 1.60, 1.85 \text{ m}$,上述工况均出现井喷现象。当竖井顶部通气时, H_{fs} 与 H_{int} 均加速上升,且 H_{int} 的上升速度更快,导致净位移 H_{net} 持续增加,且不同 A_v^* 下 H_{net} 的最大值均稳定在 0.6 m 附近。

图10给出了 $D_r/D = 0.5$ 时 $H_{net,max}/H_{fs,0}$ 与 A_v^* 的关系,其中 $H_{net,max}$ 为气团释放后水气交界面净位移最大值。 $H_{net,max}/H_{fs,0}$ 用于表征气团释放后上方水柱相对初始水柱的缩短程度,其值越大,气团释放后上方水柱的相对缩短程度越大,剩余水柱高度越小。对于不发生气团驱动井喷的工况(如 $A_v^* = 0$), $H_{net,max}/H_{fs,0}$ 均为1。随着 A_v^* 、 H_0 和 L_3 的增大, $H_{net,max}/H_{fs,0}$ 总体呈下降趋势,表明气团驱动井喷越容易发生。

2.4 自由液面与水气交界面运动速度

图11为 $H_0 = 0.8 \text{ m}$ 、 $D_r/D = 0.5$ 、 $L_3 = 1.8 \text{ m}$ 、 $A_v^* = 0, 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 1$ 工况下竖井内自由液面运动速度 v_{fs} 、水气交界面运动速度 v_{int} 随时间 t 的变化过程。由图11可见,气团释放过程中 v_{fs} 整体小于 v_{int} 。当 $A_v^* = 0$ 时,自由液面几乎不运动,即 $v_{fs} \approx 0$, v_{int} 在 $0.2 \sim 0.5 \text{ m/s}$ 范围内波动,直至气团释放。当 $A_v^* > 0$ 时, v_{fs} 和 v_{int} 随时间推移逐渐增大。随着 A_v^* 增大, v_{fs} 和 v_{int} 逐渐增大,且随时间增大趋势更明显,增长速度加快,在水气交界面行至竖井顶部临近气体释放时刻, v_{int} 出现突增。随着 A_v^* 增大,竖井顶部受限通气条件逐渐缓解,井盖下方的气垫作用

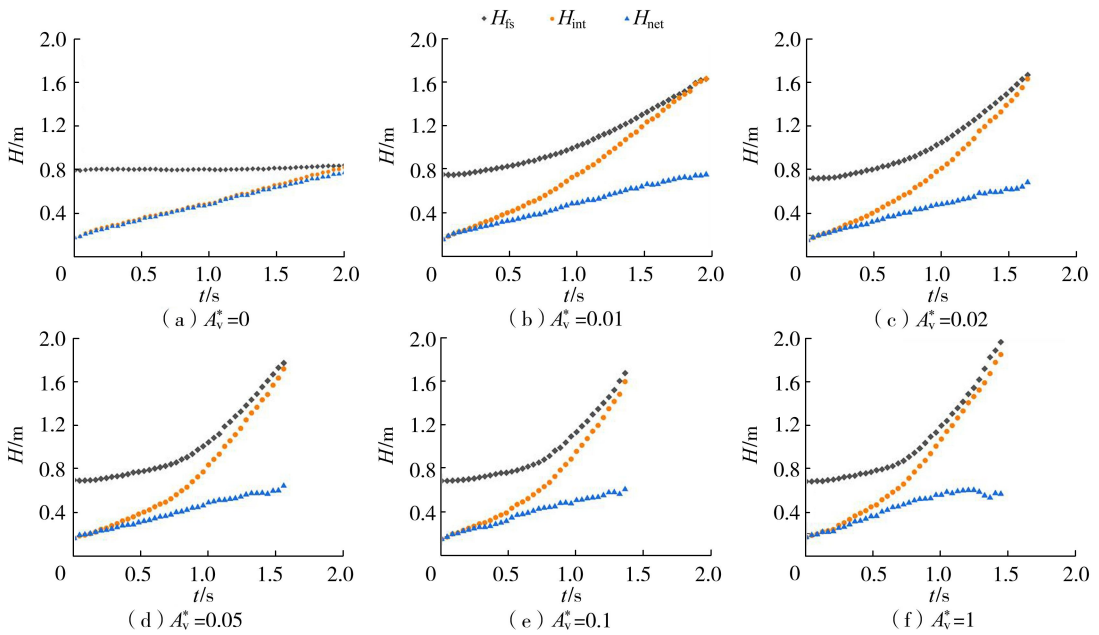


图9 气团释放过程中竖井 H_{fs} 、 H_{int} 、 H_{net} 的变化

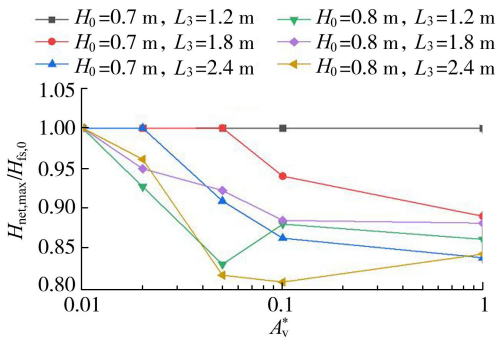


图10 气团上方水柱相对减少值与通气率的关系

减弱,气垫对水柱和气团的向下压力随之减小,导致竖井内水柱和气团所受的向上合力增大,产生的加速度也随之增加,因此 v_{fs} 和 v_{int} 呈更陡峭的上升趋势。

对气团头部水气交界面的最大运动速度 $v_{int,max}$ 进行无量纲化处理,定义 $v_{int,max}^* = v_{int,max} / \sqrt{gD_r}$ 。图12给出了不同试验工况下 $v_{int,max}^*$ 随 A_v^* 的变化规

律。随着 A_v^* 增大, $v_{int,max}^*$ 整体呈上升趋势。当 $0 \leq A_v^* < 0.02$ 、 $0.02 \leq A_v^* < 0.1$ 、 $0.1 \leq A_v^* \leq 1$ 时, $v_{int,max}^*$ 分布范围分别为 $0.5 \sim 2.0$ 、 $1.5 \sim 3.0$ 、 $2.0 \sim 3.5$ 。当 $L_3 = 1.2, 1.8$ m 时,在同一 A_v^* 条件下, $H_0 = 0.8$ m 工况的 $v_{int,max}^*$ 普遍大于 $H_0 = 0.7$ m 工况。当 L_3 增大至 2.4 m 时, $v_{int,max}^*$ 随 H_0 和 A_v^* 的变化表现出不同的趋势:当 $0 \leq A_v^* < 0.02$ 时, $H_0 = 0.8$ m 工况的 $v_{int,max}^*$ 大于 $H_0 = 0.7$ m 工况;而在 $0.05 \leq A_v^* < 0.1$ 时, $H_0 = 0.8$ m 工况的 $v_{int,max}^*$ 小于 $H_0 = 0.7$ m 工况。

2.5 讨论

当 $D_r/D = 1.0$ 时,所有工况均未发生井喷;当 $D_r/D = 0.5$ 时,随着 A_v^* 的增大,根据本文所设置的离散通气率工况,其对井喷的影响可划分为3个区间:

a. 当 $0 \leq A_v^* < 0.02$ 时,气垫作用占据主导地位。气团释放过程中竖井内自由液面高度 H_{fs} 及水

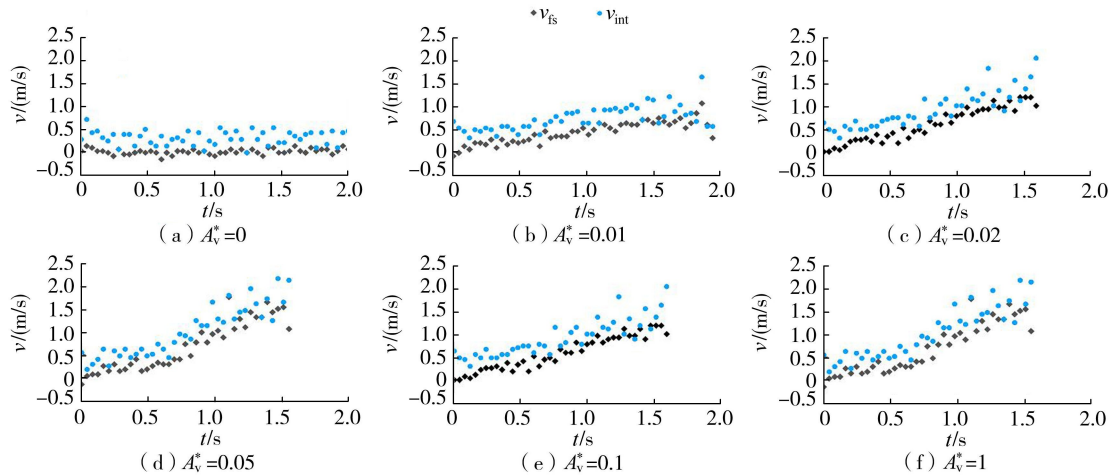


图11 气团释放过程中竖井自由液面及水气交界面的速度变化

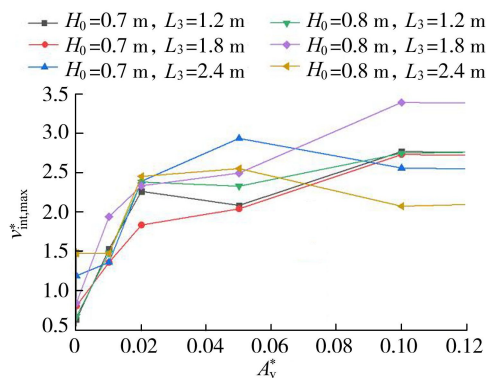


图 12 水气交界面速度最大值与通气率的关系 ($D_r/D=0.5$)

气交界面高度 H_{int} 均维持较低水平,气团头部突破点距井盖的距离超过 $2.67D_r$ 。此区间内所有工况下气团上方水柱相对减少值 $H_{net,max}/H_{fs,0}$ 均为 1,水柱在竖井内发生破碎,无水流喷出。受竖井上部气垫抑制,气团释放后形成的水气混合物无法有效排出,因此压差驱动井喷亦不发生。

b. 当 $0.02 \leq A_v^* < 0.1$ 时,随着 A_v^* 的增大,气垫作用减弱,井盖下方气压降低,气团及液面的运动加速度增大,气团突破高度也相应上升。此区间内是否发生气团驱动井喷与外部水头及初始气团尺寸具有显著相关性。由于气垫阻滞作用仍然存在,压差驱动井喷仍较难发生。

c. 当 $0.1 \leq A_v^* \leq 1$ 时,随着 A_v^* 进一步增大,气垫的影响显著减弱甚至消失。当自由液面升至竖井顶部附近且未被水气界面突破时,井盖孔有水柱射出,形成气团驱动井喷;气团释放后,当气团初始尺寸足够大时,系统增压会驱动白色水气混合物喷出竖井,形成压差驱动井喷。

3 结 论

a. 管径比越小、通气率越大、外部水头越高、初始气团体积越大,井喷现象越易发生,且喷射高度与喷水量显著增大。其中,通气率提高不仅会增强井喷强度,还会降低井喷所需的外部水头与初始气团体积。气团驱动井喷多发生于外部水头较高或初始气团体积较大的工况,在低通气率条件下不会发生;压差驱动井喷仅出现在通气率较大且初始气团体积较大的工况。

b. 当管径比为 0.5 时,竖井内气团易呈对称形态,并侵入上游管道;当管径比为 1.0 时,竖井内气团呈不对称分布,主要滞留于下游管道。通气率变化会显著改变自由液面波动及气团头部形态,进而改变气团释放位置与高度。

c. 随着通气率增大,气团释放时自由液面和水气交界面的高度大幅提高,且自由液面运动速度和

水气交界面运动速度显著增大。气团释放时竖井中液面的位置越接近竖井顶部井盖,水流从井盖中喷出产生井喷的概率越高,井喷高度越大。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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))
- [3] 罗爽,陈奇,刘霞,等.基于 TFM 模型的滞留气团数值模拟方法及 PIV 试验研究[J].排灌机械工程学报,2023, 41(1): 50-55. (Luo Shuang, Chen Qi, Liu Xia, et al. Numerical simulation investigation of entrapped air pocket based on TFM model and PIV test research[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2023, 41(1): 50-55. (in Chinese))
- [4] 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.
- [5] 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))
- [6] 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))
- [7] Pozos-Estrada O. Influence of entrapped air on hydraulic transients during rapid closure of a valve located upstream and downstream of an air pocket in pressurised pipes[J]. Water, 2025, 17(7): 927.
- [8] 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.
- [9] Monni G, Salve M D, Panella B. Horizontal two-phase flow pattern recognition[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2014, 59: 213-221.

- [10] Hamam M A, Mccorquodale J A. Transient conditions in the transition from gravity to surcharged sewer flow[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1982, 9(2): 189-196.
- [11] Chanson H. Experimental investigation of dropshaft hydraulics; two-phase flow and acoustics [C]//Proceedings of the 30th IAHR World Congress. Thessaloniki: IAHR, 2003; 353-360.
- [12] Vasconcelos J G, Wright S J. Mechanisms for air pocket entrapment in stormwater storage tunnels [C]//World Environmental and Water Resource Congress 2006: Examining the Confluence of Environmental and Water Concerns. Omaha: American Society of Civil Engineers, 2006; 1-10.
- [13] Malekpour A, Papa F, Radulj D, et al. Understanding hydraulic transients in sewer systems [C]//WEAO 2015 Technical Conference. Toronto: WEAO, 2015; 1-15.
- [14] Chosie C D, Hatcher T M, Vasconcelos J G. Experimental and numerical investigation on the motion of discrete air pockets in pressurized water flows [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 140(8): 04014038.
- [15] 刘德有, 周领, 索丽生, 等. 水流冲击管道内滞留气团现象的VOF模型仿真分析[J]. 计算力学学报, 2009, 26(3): 390-394. (Liu Deyou, Zhou Ling, Suo Lisheng, et al. Simulation and analysis of the rapid filling in pipeline containing trapped air mass with VOF models[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2009, 26(3): 390-394. (in Chinese))
- [16] 喻宇. 有压管道水流冲击气团的局部三维流场数值模拟研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [17] Li Lin, Zhu D Z, Huang Biao. Analysis of pressure transient following rapid filling of a vented horizontal pipe [J]. Water, 2018, 10(11): 1698.
- [18] Wright S J, Vasconcelos J G, Creech C T, et al. Flow regime transition mechanisms in rapidly filling stormwater storage tunnels [J]. Environmental Fluid Mechanics, 2008, 8(5/6): 605-616.
- [19] Cong Jing. Experimental modeling of air-water interaction in horizontal pipe with vertical riser [D]. Hong Kong: Hong Kong University of Science and Technology, 2016.
- [20] Wang Xiaosheng, Qian Shangtuo, Chen Hongxun. Experimental study on geysers induced by the release of trapped air in storage tunnel systems [J]. Applied Sciences, 2019, 9(24): 5326.
- [21] 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.
- [22] Shao Z S. Two-dimensional hydrodynamic modeling of two-phase flow for understanding geyser phenomena in urban stormwater system [D]. Lexington: University of Kentucky, 2013.
- [23] 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 release of air pocket in storage tunnel system[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2022, 37(3): 432-439. (in Chinese))
- [24] 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. (in Chinese))
- [25] Zhou Ling, Liu Deyou, Ou Chuanqi. Simulation of flow transients in a water filling pipe containing entrapped air pocket with VOF model [J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2011, 5(1): 127-140.
- [26] 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.
- [27] 陈奇, 刘霞, 常正柏, 等. 压力管道局部高点滞留气团排气过程的CFD计算及PIV试验[J]. 武汉大学学报(工学版), 2024, 57(8): 1140-1149. (Chen Qi, Liu Xia, Chang Zhengbai, et al. CFD calculation and PIV test of exhaust process of trapped air mass at local high point of pressure pipeline [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2024, 57(8): 1140-1149. (in Chinese))
- [28] 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.
- [29] Vasconcelos J G, Leite G M. Pressure surges following sudden air pocket entrapment in stormwater tunnels[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 138(12): 1081-1089.
- [30] Tijsseling A S, Vasconcelos J G, Hou Qingzhi, et al. Dancing manhole cover: a nonlinear spring-mass system [C]//ASME 2019 Pressure Vessels and Piping Conference. San Antonio: ASME, 2019; V004T04A032.
- [31] Eldayih Y, Cetin M, Vasconcelos J G. Air-pocket entrapment caused by shear flow instabilities in rapid-filling pipes[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 146(4): 04020016.
- [32] Schulz H E, Vasconcelos J G, Patrick A C. Air entrainment in pipe-filling bores and pressurization interfaces[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 146(2): 04019053.

(收稿日期: 2025-12-17 编辑: 雷燕)