

考虑基础流量的输水系统间歇泉现象实验研究

李小亮¹,何鑫¹,陈千寻²,周领²

(1. 三峡金沙江云川水电开发有限公司宁南白鹤滩电厂; 2. 河海大学水利水电学院)

摘要:针对输水系统在充水等过程中出现的水气突然喷发、局部压力骤变的间歇泉现象,设计并搭建了间歇泉水气两相瞬变流实验系统,通过上下游水箱的水位差间接控制基础流量,研究了含通气竖井的输水系统在充水过程中的水气两相瞬变过程,探究了间歇泉现象的发生机理与动态特征。实验结果表明:考虑基础流量的间歇泉瞬变过程可分为冲击气团阶段和喷发阶段,在冲击气团阶段,气团反复压缩膨胀,系统压力周期性波动,在喷发阶段,水气运动剧烈,基础流量越大,汇入竖管的气体越少,且如果该部分气体晚于自由液面抵达竖管顶部孔口,则易发生间歇泉现象;间歇泉现象可分为多次喷射型、无喷射型、单次喷射型与缓冲喷射型 4 种类型;间歇泉现象发生时气团破裂与聚合时引发的压力波的传播和叠加是造成不稳定压力波动的重要原因。

关键词:输水系统;间歇泉;基础流量;水气两相流;实验研究

Experimental study on geyser phenomena in water conveyance systems considering base flow//Li Xiaoliang¹, He Xin¹, Chen Qianxun², Zhou Ling² (1. Ningnan Baihetan Power Plant, Three Gorges Jinshajiang Yunchuan Hydropower Development Co., Ltd.; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University)

Abstract: To investigate the geyser phenomenon characterized by sudden water-air eruptions and localized pressure surges during the filling process of water conveyance systems, an experimental system for transient water-air two-phase flow was designed and constructed. By utilizing the water level difference between upstream and downstream water tanks to indirectly control the base flow, the water-air two-phase transient process during the filling of a water conveyance system equipped with a ventilation shaft was investigated, aiming to explore the triggering mechanisms and dynamic characteristics of geyser phenomena. The experimental results indicate that the geyser transient process considering base flow can be divided into the air pocket impact stage and the eruption stage. During the air pocket impact stage, the air pocket undergoes repeated compression and expansion, accompanied by periodic pressure fluctuations. During the eruption stage, violent water-air interactions occur, a higher base flow rate results in less gas entrainment into the riser, and geyser phenomena are more likely to occur if the entrained gas arrives at the top orifice of the riser later than the free water surface. The geyser phenomena can be classified into four types: multiple-eruption type, no-eruption type, single-eruption type, and damped-eruption type. Additionally, the propagation and superposition of pressure waves induced by air pocket rupture and coalescence during geyser events are identified as significant contributing factors to the unstable pressure fluctuations.

Key words: water conveyance system; geyser; base flow; water-air two-phase flow; experimental study

水电站尾水系统^[1]、长距离输水工程^[2]、排水管网泵群^[3-5]等输水系统在充水、停机与工况转换过程中,可能发生流态转换,进而导致明满流、明满含气流、水气两相流等复杂流态的出现。此时,竖井、闸门井与通气孔等水力元件的设置,为复杂水力现象提供了客观条件^[6-8],其与大气连通的出口处可能出现水气喷发并伴有压力骤变的间歇泉现象,导致系统运行失常,甚至损毁设施结构^[9]。另外,实际工程中设置的安全装置(空气阀、井盖等)可能引发孔口效应与气垫效应,对水气运动产生不确定的影响,进一步增加了间歇泉现象发生的可能性^[10-12]。目前,间歇泉现象已成为输水系统水气两相流研究领域的前沿课题,学界对其给予了高度关注,但其发生机理与动态特性尚不明确。

针对水力系统中的间歇泉现象,国内外学者已开展了大量实验与数值模拟研究。在实验研究方面,Guo 等^[13]通过初步研究,认为系统内部的压力振荡是间歇泉发生的主要原因;考虑间歇泉现象发

基金项目:三峡金沙江云川水电开发有限公司宁南白鹤滩电厂科研项目(Z532302021)

作者简介:李小亮(1984—),男,高级工程师,硕士,主要从事电站水工建筑物管理和项目管理工作。E-mail:li_xiaoliang@cypc.com.cn

通信作者:周领(1985—),男,教授,博士,主要从事水利水电工程和水气瞬变流研究。E-mail:zlhhu@163.com

生时输水系统往往处于运行状态,即主管道内通常存在一定的基础流量,Muller^[14]开展了考虑基础流量的间歇泉实验,结果表明竖管中自由液面位移距离减少了约15%。在数值模拟方面,由于简化的一维模型易忽略竖井中水气混掺规律,间歇泉现象的模拟往往需要考虑三维模型^[15]。例如:Chan等^[16]通过计算流体力学(CFD)技术对间歇泉的形成过程开展了数值模拟,预测了压力变化和水气交界面的发展过程,发现垂直管道中液柱的瞬间加速是间歇泉的重要特征;Zhang等^[17]将间歇泉的喷射过程划分为快速充水与空气释放两个阶段,指出减小流出面积并增加出口压力会导致间歇泉更剧烈,并说明了CFD在精确计算水气混合物密度方面存在的困难。在此基础上,刘伟等^[18]总结了气液相互作用的特征,特别指出了物理模型实验在间歇泉研究中的主导作用。

综上所述,输水系统流态转换过程中间歇泉的瞬态特性极其复杂,其机理特性目前尚不明确,在工程设计方面暂无相应的规范和标准,且现有的间歇泉研究通常不考虑管道内的基础流量,忽视了实际工程中可能存在的瞬态变化。为此,本文设计并搭建了考虑基础流量的间歇泉实验系统,通过上下游水箱的水位差间接控制基础流量,详细研究了输水系统启动过程中间歇泉现象的瞬态特性,探究其流态转变、动态特征与形成机理,以期为输水系统的设计及安全运行提供科学依据。

1 实验装置和工况设置

1.1 实验装置

本文研究设计并搭建了一套考虑基础流量的间歇泉实验系统。该系统主要由上下游水箱、电磁流量计、管道、三通管道、气动四分之一球阀和带孔口的法兰盘组成,对应的实验装置如图 1 所示。实验以左侧水箱的水位作为初始水位 H_d (下游水位), 调节右侧水箱水位 H_r (上游水位) 控制管道系统的水位差 ΔH 。从上游水箱出水口至下游水箱进水口的

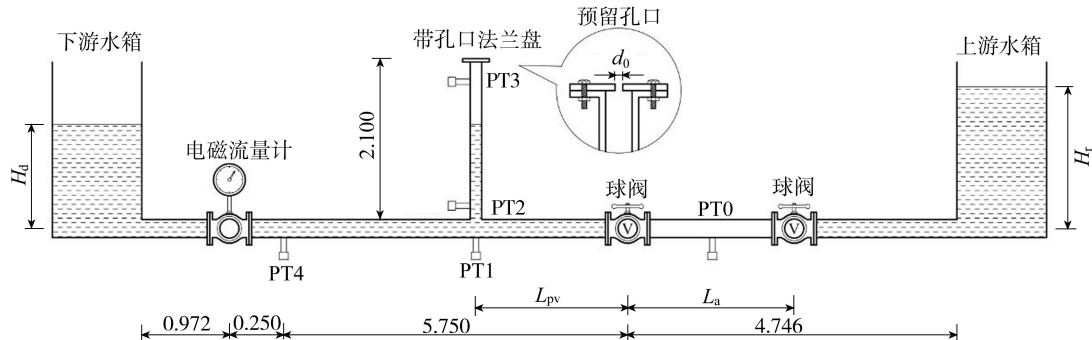


图 1 考虑基础流量的间歇泉实验装置示意图(单位:m)

实验管道总长度 L 为 11.718 m, 内径 d 为 40 mm, 竖直管道长度 L_v 为 2.1 m, 内径 d_v 为 20 mm, 有机玻璃管管壁厚度 e 为 5 mm。竖管顶部安装带孔口的法兰盘, 孔口直径记为 d_0 。气动球阀安装位置为水平段初始储气管道两端, 通过高速摄像机录像与实测数据反推可得其开阀时间为 0.08 s, 关阀时间为 0.05 s。初始储气管道用于提供实验所需的定量体积的无压空气, 其中初始气团的长度记为 L_a 。实验开始时, 同时打开两个球阀以实现水气瞬变, 随后上下游水位差 ΔH 带动水平管道水体裹挟气体向下游侧运动, 进而控制基础流量大小。实验系统共安装 5 个压力传感器 (PT0~PT4), 具体安装位置见图 1。

1.2 实验工况设置

为研究瞬变过程中水气两相流的动态特征以及不同因素的影响,设置考虑基础流量的间歇泉实验方案,包括:6种初始水位($H_d = 0.8, 0.9, 1.0, 1.2, 1.5, 1.8 \text{ m}$)、10种水位差($\Delta H = 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60, 0.90, 1.20 \text{ m}$)、3种初始气团长度($L_a = 0.50, 1.00, 1.50 \text{ m}$)、8种孔口直径($d_0 = 1, 2, 3, 5, 7, 10, 14, 20 \text{ mm}$)、3种竖管位置(竖管至初始气团下游侧球阀的距离 $L_{pv} = 2.00, 3.00, 4.00 \text{ m}$),共计 692 种工况(工况设置不采用枚举法)。

2 实验结果与分析

2.1 实验参数敏感性分析

2.1.1 初始气团位置最大压力

综合各个压力传感器的实测数据来看,系统内最大压力通常出现在初始气团所在管道的中段位置PT0。图2与图3为 $L_a = 0.50\text{ m}$ 、 $d_0 = 20\text{ mm}$ 、 $L_{pv} = 2.00\text{ m}$ 时不同初始水位 H_d 和水位差 ΔH 情况下初始气团位置最大压力 $P_{0\max}$ 的实验结果。不难发现,初始气团位置最大压力与初始水位基本呈正比关系,与水位差基本呈正比关系,但在低水位差情况下略有偏差,这可能是由于水气运动的不确定性与小尺度实验的局限性(张力等因素)所导致的。

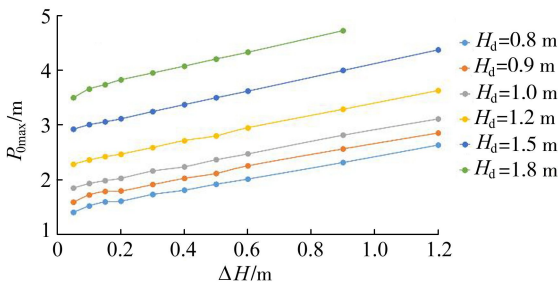


图2 间歇泉初始水位对 P_{0max} 的影响

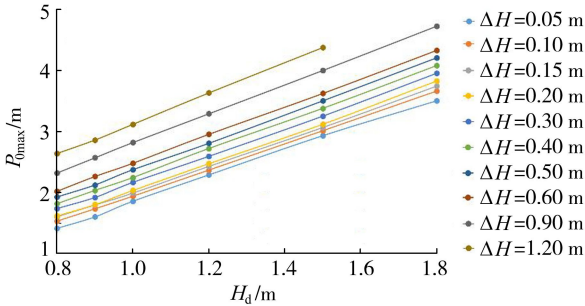


图3 间歇泉水位差对 P_{0max} 的影响

为反映多组数据分布的特征,绘制初始水位和 水位差对初始气团位置最大压力的影响箱线图,如 图 4 所示。图中 19 组数据箱线图所对应的箱体与 箱线较短,即数据集中趋势显著、离群值较少,验证 了实验的准确性,同时也表明其余参数影响较小。 初始气团位置压力最大值随着初始水位和水位差的 增大而增大,均基本呈正比关系。需要注意的是: $H_d=1.2\text{ m}$ 时,数据中存在 7 个异常点,随机性较强, 水气运动较为紊乱; $\Delta H=1.2\text{ m}$ 时,低水位工况下箱 体与箱线较短,表明其数据集中趋势显著,但该组别 中出现的若干离群值降低了结论的普适性,与之相 对的,高水位差工况下数据稍显分散,但未出现离 群值。

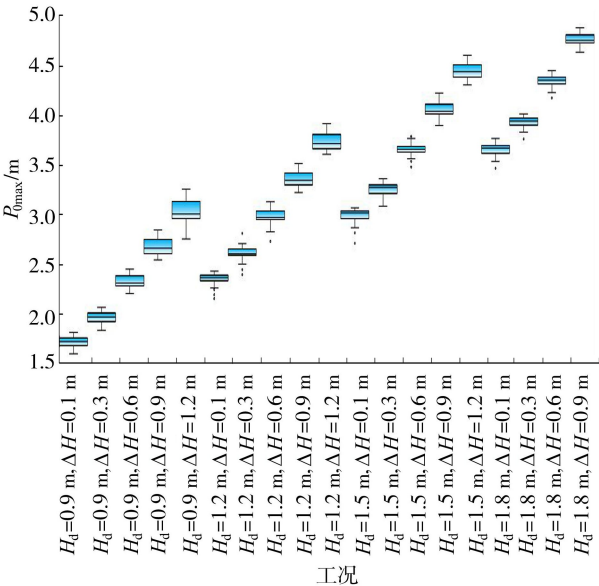


图4 间歇泉初始水位和水位差对 P_{0max} 影响的箱线图

2.1.2 排气孔处最大压力

考虑间歇泉现象发生时往往伴随竖管处的剧烈 压力波动,且排气孔水气喷射时可能出现异常高压, 故取 PT3(排气孔下侧 10 cm 处)的实验数据进行敏 感性分析。图 5 为初始气团长度和排气孔口直径对 该位置的孔口压力最大值 P_{3max} 的影响箱线图。总 体而言,最大压力随着初始气团长度的增大而增大, 随着孔口直径的增大而先增后减,在 $d_0=5\text{ mm}$ 左右 时达到峰值。小孔口工况下,数据分布较为分散,表 明其他参数对孔口压力最大值的影响权重较大;全 开孔口工况下,箱体与箱线均较短,表明数据集中; 小气团工况下,上箱线较长,中位线偏下方,异常点 都在箱体上方,表明存在若干压力异常偏高的离群 值;大气团工况下,箱线分布合理,基本无异常点,表 明样本数据集质量较高且分布集中。

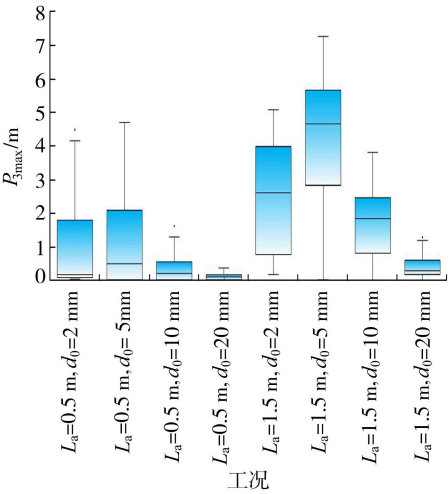


图5 间歇泉初始气团长度和排气孔口直径对 P_{3max} 影响的箱线图

进一步的,图 6 给出了 $d_0>10\text{ mm}$ 时考虑基础流 量的间歇泉初始水位和水位差对孔口压力最大值 P_{3max} 的影响。对比分析表明,孔口压力最大值随着 初始水位的增大而增大,随着水位差的增大而减小, 但当水位差增大到一定程度后($\Delta H>0.9\text{ m}$),间 歇泉现象所导致的剧烈水气喷发会引起孔口处的压 力峰值升高。孔口压力最大值与水位差的反常关系 可能与基础流量相关:当 $\Delta H<0.9\text{ m}$ 时,较大的水 位差赋予了水平管道内较大的基础流量,水流以更 快的速度裹挟气团向下游流动,降低了分流至竖管 的水气混合物比重,减弱了竖管段水气运动的剧烈 程度,最终导致孔口压力最大值随着水位差的增大 而减小;而当 $\Delta H>0.9\text{ m}$ 时,充足的水位差势能 起到了主要推动作用,水位差越大,水气运动越剧 烈,并在竖管孔口处以高速水气混合物的形式释 放,导致高水位差情况下孔口压力最大值增大。

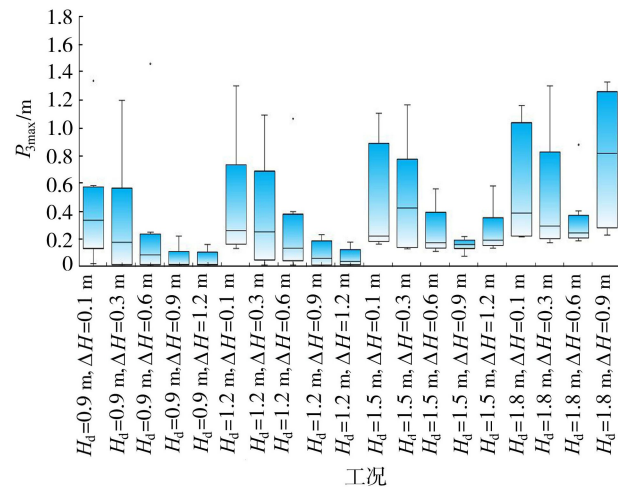


图 6 $d_0>10\text{ mm}$ 时间歇泉初始水位和水位差对 $P_{3\text{max}}$ 影响的箱线图

2.2 实验现象描述

根据实验现象和数据结果选取 4 个代表性工况,用于实验描述并进行现象分类,如表 1 所示。图 7 给出了不同工况下竖管内和水平管道初始气团位置处的压力变化,图 8 给出了高速摄影机记录的不同时刻水流和气团相互作用的结果。

工况	L_{pv}/m	d_0/mm	L_a/m	H_d/m	$\Delta H/\text{m}$
工况 1	2	3	1.5	1.5	1.2
工况 2	2	10	0.5	0.9	0.1
工况 3	2	2	1.5	0.9	0.2
工况 4	2	20	1.5	1.5	0.3

2.2.1 工况 1 水气动态特性

基于实验现象与数据采集结果,工况 1 可划分

为 5 个阶段:①初始阶段($t=0\sim0.90\text{ s}$)为静止阶段。②开阀阶段($t=0.90\sim2.84\text{ s}$),阀门瞬间开启,气团首次受压,其压力达到峰值后开始膨胀,经历数次缩胀循环后,压力与体积趋于稳定,直至 $t=1.99\text{ s}$ 时,液面撞击孔口,发生间歇泉现象。③分流阶段($t=2.84\sim5.41\text{ s}$),气团前端抵达三通管道分岔节点,水气混合物中的一部分继续沿水平管道运动,另一部分沿竖管上升。④上升阶段($t=5.41\sim11.19\text{ s}$),气团以气泡流形式沿竖管上升,推动水体向上运动。如图 8(a)所示,辅助线 i、ii 分别表示首个进入竖管气团的上侧界面与下侧界面,两者均近似呈直线,表明气团匀速上升,且因压力降低而轻微膨胀。 $t=6.00\text{ s}$ 时,水平管中气团到达下游水箱,气体自由上升引起压力振荡。该振荡对大气团形态的影响较小,但促使尾部小气泡聚并;同时,大气团对压力波具有滤波作用,可衰减高频振荡、降低波动频率。⑤二次喷射阶段($t>11.19\text{ s}$),气团继续沿竖管向上运动,气团上侧界面抵达顶部排气孔口,有压气体顺利排出,引起轻微压降与小幅波动,随后气团下侧界面(液面)快速撞击排气孔口,造成二次喷射并伴随剧烈的压力波动。

2.2.2 工况 2 水气动态特性

工况 2 全程未发生剧烈喷发,可划分为以下 3 个阶段:①初始阶段($0\sim0.90\text{ s}$)为静止阶段。②开阀阶段($0.90\sim5.79\text{ s}$),阀门瞬间开启,水平管末端水体冲击气团,管道系统整体压力呈现稳定的周期性变化,且逐渐衰减。③上升阶段($t>5.79\text{ s}$),

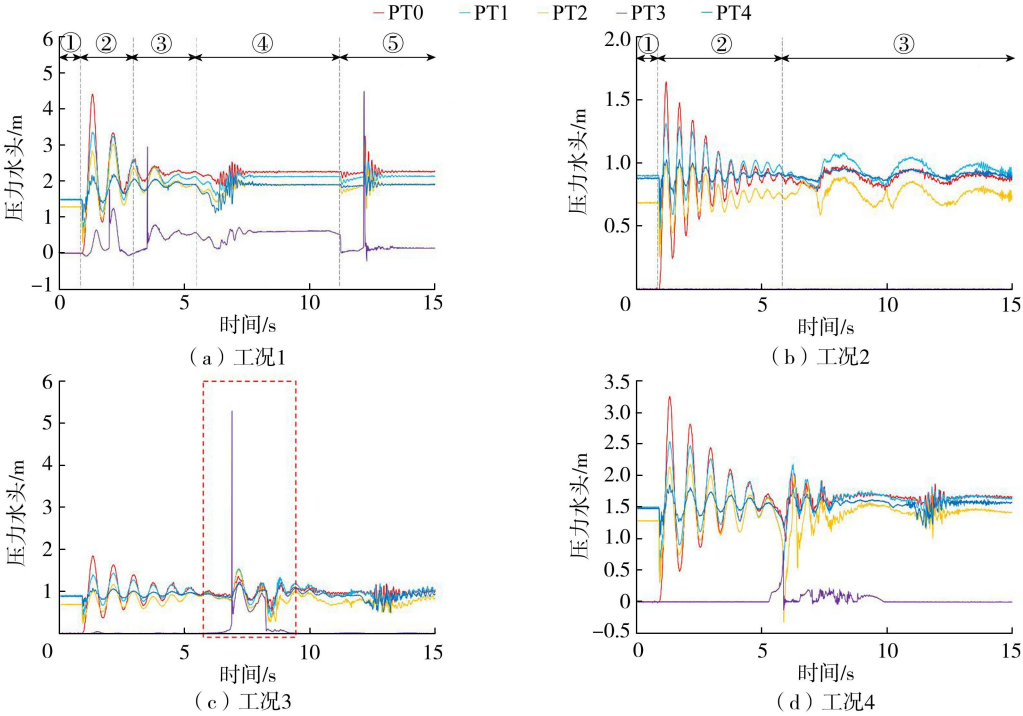


图 7 压力水头波动曲线

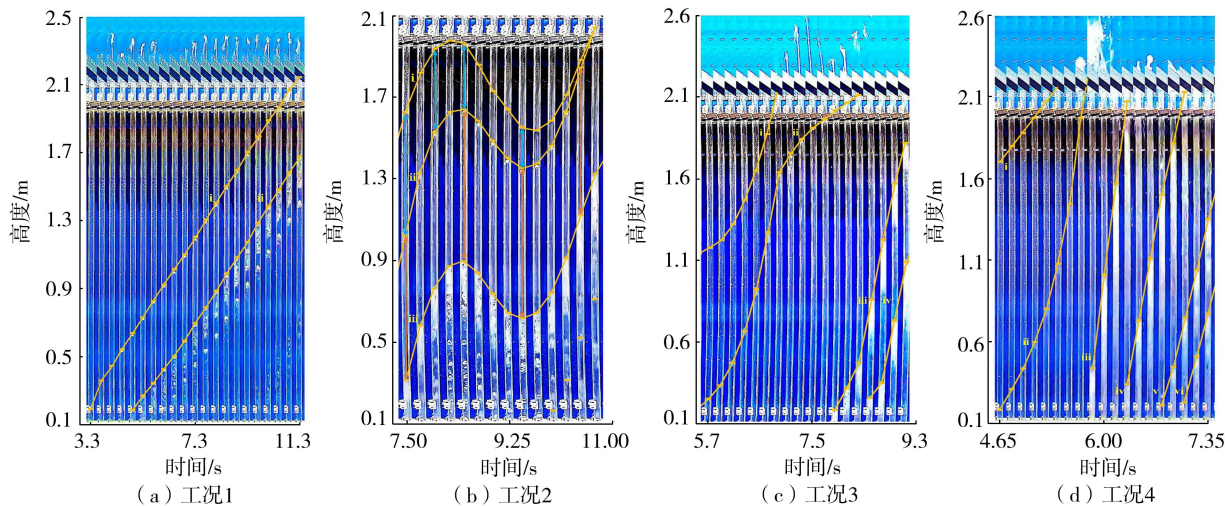


图8 竖管部分摄影图像

气团以气泡流形式沿竖管上升,推动水体向上运动。如图8(b)所示,辅助线 i、ii 分别表示最上端水柱的上侧界面与下侧界面,显示了气团上升时该水柱逐渐缩短直至消失的过程,气团在接触自由液面后破裂;辅助线 iii 表示首个进入竖管气团的下侧界面,在最上端水柱消失后,下方水气混合物仍有上升趋势,但未出现喷射现象。与工况 1 相比,工况 2 开阀后实验系统管道压力的波动周期较短,且处于上升阶段时,气团尾部的絮状水气混合物对管道压力具有显著影响,压力变化曲线接近正弦波形,总体上避免了瞬态高压。

2.2.3 工况 3 水气动态特性

与前两个工况一致,工况 3 管道系统整体压力呈现稳定的周期性变化,液面波动幅度逐渐衰减,仅在喷射阶段液面撞击孔口时产生瞬时高压。在重复实验中观测到单次喷射现象(图 8(c)),对应图 7(c)中红色虚线矩形框选的喷射阶段。如图 8(c)所示,辅助线 i、ii 分别表示最上端水柱的上侧界面与下侧界面,水柱撞击竖管顶部排气孔口后发生喷射;辅助线 iii、iv 表示下方水气混合物的上侧界面,后续未出现喷射现象。作为压力边界的水箱与竖管形成了 U 形管连通器,水气相互作用的压力波动会对水箱压力产生影响,从而影响系统内滞留气团的气压,在喷发阶段易诱发周期性波动。

2.2.4 工况 4 水气动态特性

如图 8(d)所示,辅助线 i 表示最上端水柱的上侧界面,当 $t=5.38\text{ s}$ 时,液面抵达孔口首次喷射;辅助线 ii 表示首个进入竖管气团的上侧界面运动过程,随着气团体积膨胀呈加速上升趋势,此时管道系统压力下降,大体积气团同时分布于竖管与水平管中;辅助线 iii 记录了第一气团尾部的运动状态,气团排空后水体迅速填充竖管,管道压力急剧上升,诱发

间歇泉现象;辅助线 iv、v、vi 分别对应后续气团尾部的运动轨迹,均未发生喷射。几次水气运动过程中的气团上升速度逐次递减,对应系统的能量耗散。值得注意的是,各个气团在竖管中快速上升时,尾部易形成雾状水气混合物,易与后续小体积气团混合,导致气团提前破裂,减少了喷发次数。

2.3 实验结论

2.3.1 规律总结

结合拍摄的照片及同步记录的压力波动曲线,有基础流量情况下的间歇泉过程中气团和压力的动态变化具有以下特点:①考虑基础流量的间歇泉瞬变流过程整体分为两个阶段,即以阀门开启为标志的冲击气团阶段和以气团到达竖管底部为标志的喷发阶段。在冲击气团阶段,竖管液面上下波动,同时水平管内压力(P_{T0})周期变化,气团反复膨胀和压缩;在喷发阶段,气团匀速运动,抵达竖管底部后,只有部分气体分流进入竖管,大部分沿水平管道运动直至下游水箱,并导致持续的压力振荡。②喷发阶段前,气团进入竖管后与水体混掺,可视作气泡流,且气体上升速度快于水体自由液面的上升速度。若自由液面抵达孔口前气团仍被水体包围,则极易顶托上端水体喷射而出,发生间歇泉现象;反之则不发生喷射。③气团在竖管中快速上升时,尾部易形成雾状水气混合物,易与后续小体积气团混合,导致气团提前破裂,减少喷发次数。

2.3.2 间歇泉现象分类

考虑到间歇泉的重要特征是水力元件与大气连通处发生突发性水气喷发,且伴随局部压力骤变乃至瞬态高压,可根据上述代表性工况的水力现象与实验竖井顶部排气孔口处的压力波动变化(图 9)划分间歇泉类别:

a. 多次喷射型。该类间歇泉的最大特征是喷

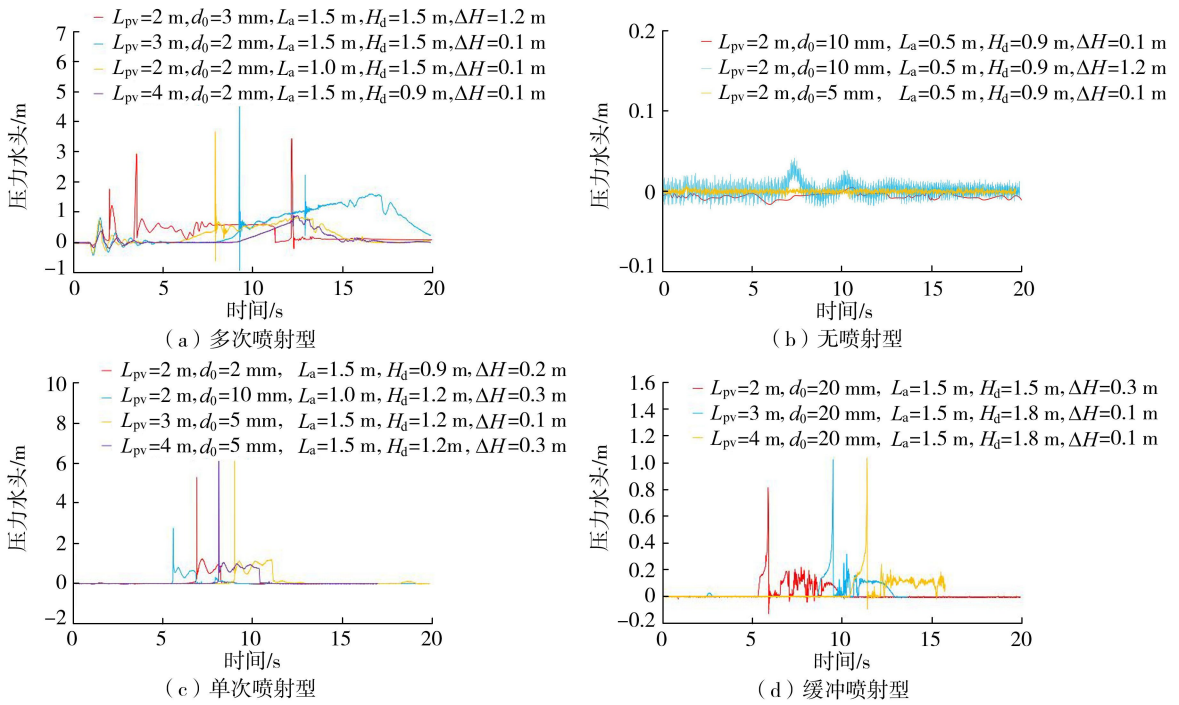


图9 不同类型间歇泉特征压力波动变化

发时间长,与之对应的压力波动几乎贯穿了整个水力过程。在间歇泉喷发阶段,压力波动升高,其过程中可能会发生几次压力脉冲,伴随数次高压与负压。经历脉冲之后,系统内部的压力会在短时间内保持稳定,之后缓慢且略带波动地降低。由于孔口较小,在竖管中气团推升水体时,水体上方的空气压缩或水体排出速度小于上升速度,使得压力逐渐增大。该类间歇泉主要发生在小孔口、大气团、中高初始水位条件下(如工况1): $d_0 \leq 3 \text{ mm}$ 、 $L_a \geq 1.0 \text{ m}$ 且 $H_d \geq 0.9 \text{ m}$ 。

b. 无喷射型。该类间歇泉波形为直线,无压力波动。在瞬变过程中,液面始终保持在PT3位置以下的波动竖管中。该类间歇泉主要出现在中大孔口、小气团、中低水位条件下(如工况2): $d_0 \geq 5 \text{ mm}$ 、 $L_a \leq 0.5 \text{ m}$ 且 $H_d \leq 0.9 \text{ m}$ 。

c. 单次喷射型。该类间歇泉曲线特征为首次压力波动便能达到峰值,该次瞬态高压周期极短,随后压力回落至峰值的20%左右,持续波动,周期相对较长。气团以较大的速度推升水体,使得液面撞击孔口发生压力脉冲,随后气团继续上升,水体持续喷射直至气团抵达孔口释放。该类间歇泉主要发生在中小孔口、中低水位、低水位差条件下(如工况3): $d_0 \leq 10 \text{ mm}$ 、 $H_d \leq 1.2 \text{ m}$ 且 $\Delta H \leq 0.3 \text{ m}$ 。

d. 缓冲喷射型。该波形发生时压力呈指数函数式上升,达到极值时骤然下降至环境压力。实验中主要在第一气团推升水柱直至气团释放阶段出现。该类间歇泉主要出现在全开口、大气团、高水

位、低水位差条件下(如工况4): $d_0 = 20 \text{ mm}$ 、 $L_a = 1.50 \text{ m}$ 、 $H_d \geq 1.5 \text{ m}$ 且 $\Delta H \leq 0.3 \text{ m}$ 。

综上,本文系统性地揭示了通气竖井中间歇泉现象的瞬态演化机理,并对实验尺度下的特征参数做了敏感性分析,并根据实验现象与压力曲线划分了多种间歇泉现象类型。这对大型工程的设计和评估具有一定的参考和预警价值,为后续开展大尺度的物理模型实验或原型模拟提供理论基础。

2.4 压力波动机理分析

基于上述实验现象,对间歇泉发生期间的水气混掺现象进行分析,总结气体排出时气泡破裂与气泡聚合的情况。当较大气团在竖管中分离成两个稍小气团时,由于存在一定高度差,两个稍小气团内的压力不同,纵向压力波在竖管中产生:负压波向上传播,正压波向下传播^[19]。而气泡聚合过程也会产生压力波:正压波向上传播,负压波向下传播。间歇泉喷发时的强烈压力冲击与气团的持续断裂和融合有关。竖管段中大量压力波的传播和叠加是压力波动的重要原因。

3 结 论

a. 在考虑基础流量的情况下,间歇泉瞬变过程可划分为两个阶段:以阀门开启为标志的冲击气团阶段和以气团到达竖管底部为标志的喷发阶段。喷发阶段前,气团进入竖管后与水体混掺,可视作气泡流,若自由液面抵达孔口前气团仍被水体包围,则极易顶托上端水体喷射而出,发生间歇泉现象。此时

气团尾部易形成雾状水气混合物,易与后续小体积气团混合,导致气团提前破裂,喷发次数减少。

b. 基础流量会增大气团水平运动的速度,减小进入竖管的气体含量,从而缓和喷发阶段的水气瞬变与压力波动,降低压力峰值。并且,水位差越大,基础流量越大,系统稳定性越高,压力曲线可更快地趋于稳定。

c. 根据实验条件、发生过程与压力波动趋势,可将间歇泉现象分为多次喷射型、无喷射型、单次喷射型和缓冲喷射型 4 种类型。

d. 间歇泉现象发生时气体会发生气泡破裂与聚合现象,竖管中较大气团破裂或较小气团聚合时,均可能引发纵向压力波,系统内大量压力波的传播与叠加是造成不稳定压力波动的重要原因。

参考文献:

[1] 周建旭,刘峰宏. 复杂输水发电系统尾水隧洞明满流对水力过渡过程的影响[J]. 水利水电科技进展,2024,44(3):51-56. (Zhou Jianxu, Liu Fenghong. Impact of free-surface-pressure flow in tailwater tunnel on hydraulic transition process in complex water conveyance and hydropower systems [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44 (3) : 51-56. (in Chinese))

[2] Shi Lin, Zhang Jian, Yu Xiaodong, et al. Water hammer protection for diversion systems in front of pumps in long-distance water supply projects [J]. Water Science and Engineering, 2023, 16(2) :211-218.

[3] 舒依娜,刘兆峰,夏修萍,等. 排水管网泵群系统动态摩阻水锤仿真模拟[J]. 水利水电科技进展,2025,45(3):32-39. (Shu Yi' na, Liu Zhaofeng, Xia Xiuping, et al. Numerical simulation of water hammer with dynamic friction in pump group systems of drainage pipe networks [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45 (3) : 32-39. (in Chinese))

[4] 周领,王鹤鸣,徐彬,等. 输水管道水锤泄漏耦合数值模拟及反射系数特性研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2026,54(1):43-52. (Zhou Ling, Wang Heming, Xu Bin, et al. Numerical simulation of water hammer and leak coupling in water pipelines and study on reflection coefficient characteristics [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2026, 54 (1) : 43-52. (in Chinese))

[5] 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))

[6] 吴金远,周领,刘德有. 考虑动态摩阻的抽水蓄能电站水力瞬变建模模拟[J]. 排灌机械工程学报,2024,42

(6) : 612-618. (Wu Jinyuan, Zhou Ling, Liu Deyou. Numerical simulation of hydraulic transients in pumped storage power station with unsteady friction [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2024, 42 (6) : 612-618. (in Chinese))

[7] 孙洪亮,陈益民,杨飞,等. 白鹤滩水电站尾水洞明满流段优化试验研究[J]. 中国水利,2019(18):80-83. (Sun Hongliang, Chen Yimin, Yang Fei, et al. Experimental study on optimum of the free-surface-pressurized tailrace tunnel in Baihetan Hydropower Station [J]. China Water Resources, 2019 (18) : 80-83. (in Chinese))

[8] 俞晓东,张健. 尾水隧洞通气孔进排气瞬态过程研究 [J]. 水利学报, 2016, 47 (8) : 1045-1053. (Yu Xiaodong, Zhang Jian. Investigation on hydraulic transients in tailrace tunnel with air inlet and release from the vent [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47 (8) : 1045-1053. (in Chinese))

[9] 钟登禄. 长距离输水隧洞竖井段充水过程两相流瞬态特性研究 [D]. 西安:西安理工大学,2023.

[10] 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))

[11] 蔡付林,樊子凯,周建旭,等. 长距离多支线有压输水系统启动水锤防护 [J]. 水利水电科技进展, 2024, 44 (4) : 1-6. (Cai Fulin, Fan Zikai, Zhou Jianxu, et al. Start-up water hammer protection for long-distance multi-branch pressurized water conveyance systems [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44 (4) : 1-6. (in Chinese))

[12] 周领,李文姆,刘德有,等. 管道内水流冲击滞留气团的二阶 Godunov 数学模型 [J]. 水电能源科学, 2021, 39 (4) : 95-99. (Zhou Ling, Li Wenmu, Liu Deyou, et al. A second order Godunov model of transient flow with trapped air [J]. Water Resources and Power, 2021, 39 (4) : 95-99. (in Chinese))

[13] Guo Qizhong, Song C C S. Dropshaft hydrodynamics under transient conditions [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1991, 117 (8) : 1042-1055.

[14] Muller K Z. Geysering caused by the sudden release of pressurized air pockets [D]. Alabama: Auburn University, 2017.

[15] 朱方磊,程永光. 明渠接竖井水电站引水系统的瞬变流规律[J]. 武汉大学学报(工学版),2015,48(6):744-750. (Zhu Fanglei, Cheng Yongguang. Transient flows in headrace system combining open channel and shaft for hydropower stations [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2015, 48 (6) : 744-750. (in Chinese))

(下转第 49 页)

[3] 陈少林,王恺. 超高层建筑消防系统的减压阀常见问题分析及改进措施[J]. 给水排水, 2021, 57(增刊 2): 362-365. (Chen Shaolin, Wang Kai. Common problems analysis and improvement measures of pressure reducing valves in fire protection systems of super high-rise buildings[J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 57(S2): 362-365. (in Chinese))

[4] 纪昌明,张玉山,李继清. 市场环境下水电系统厂间经济运行问题研究[J]. 华北电力大学学报, 2005, 32(1): 99-102. (Jing Changming, Zhang Yushan, Li Jiqing. Study on inter-plant economic operation of hydroelectric system under market environment [J]. Journal of North China Electric Power University, 2005, 32(1): 99-102. (in Chinese))

[5] Wang Xiaoyu, Wu Guanhao, Zheng Xiaoxiao, et al. Theoretical investigation and experimental support for the cavitation bubble dynamics near a spherical particle based on Weiss theorem and Kelvin impulse [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 89: 106130.

[6] Zheng Xiaoxiao, Wang Xiaoyu, Zhang Yuning, et al. A single oscillating bubble in liquids with high Mach number [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 85: 105985.

[7] Benjamin T B, Ellis A T. The collapse of cavitation bubbles and the pressures thereby produced against solid boundaries[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B Biological Sciences, 1966, 260(1110): 221-240.

[8] Blake J R, Cerone P. A note on the impulse due to a vapour bubble near a boundary [J]. The ANZIAM Journal, 1982, 23(4): 383-393.

[9] Blake J R, Taib B B, Doherty G. Transient cavities near boundaries(Part 1): rigid boundary[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1986, 170: 479-497.

[10] Blake J R, Leppinen D M, Wang Qianxi. Cavitation and bubble dynamics; the Kelvin impulse and its applications [J]. Interface focus, 2015, 5(5): 20150017.

[11] Best J P, Blake J R. An estimate of the Kelvin impulse of a transient cavity [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1994, 261: 75-93.

[12] Landweber L, Miloh T. Unsteady lagally theorem for multipoles and deformable bodies [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1980, 96(1): 33-46.

[13] Milne-Thomson L M . Theoretical hydrodynamics[J]. The Mathematical Gazette, 1996, 34(308): 3608696.

[14] Zheng Xiaoxiao, Wang Xiaoyu, Ding Zhiling, et al. Investigation on the cavitation bubble collapse and the movement characteristics near spherical particles based on Weiss theorem [J]. Ultrasonics Sonochemistry. 2023, 93: 106301.

[15] Hu Jinsen, Lu Xuan, Liu Yifan, et al. Numerical and experimental investigations on the jet and shock wave dynamics during the cavitation bubble collapsing near spherical particles based on OpenFOAM [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 99: 106579.

[16] Wang Xiaoyu, Wu Guanhao, Shen Junwei, et al. Research on the collapse dynamics of a restricted cavitation bubble near a right-angle wall based on Kelvin impulse theory [J]. Physics of Fluids, 2023, 35: 073335 .

[17] Hu Jinsen, Lu Xuan, Liu Yifan, et al. Numerical and experimental investigations on the jet and shock wave dynamics during the cavitation bubble collapsing near spherical particles based on OpenFOAM [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 99: 106576.

[18] 杜先荣,尹建勇,张永学,等. 基于 OpenFOAM 的缺陷壁面附近空化泡动力学过程模拟[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(1): 39-46. (Du Xianrong, Yin Jianyong, Zhang Yongxue, et al. Simulation of cavitation bubble dynamics near defective wall surface based on OpenFOAM [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(1): 39-46. (in Chinese))

(收稿日期: 2025 - 05 - 18 编辑: 熊水斌)

(上接第 15 页)

[16] 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.

[17] 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.

[18] 刘伟,周开锋,赵晗旭,等. 城市排水管道间歇泉形成机理及防护措施研究[J]. 给水排水, 2025, 51(11): 121-128. (Liu Wei, Zhou Kaifeng, Zhao Hanxu, et al. Formation mechanism and protection measures of geysers in urban drainage pipes [J]. Water & Wastewater Engineering, 2025, 51(11): 121-128. (in Chinese))

[19] 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.

(收稿日期: 2025 - 03 - 19 编辑: 俞云利)