

# 压力管道中有压气囊运动的试验研究

赵莉<sup>1</sup>, 栗金晶<sup>2</sup>, 杨玉思<sup>2</sup>, 王彤<sup>2</sup>, 韩文生<sup>2</sup>

(1. 西安航空学院能源与建筑学院, 陕西 西安 710077; 2. 长安大学建筑工程学院住房和城乡建设部  
给排水重点实验室, 陕西 西安 710054)

**摘要:**为探讨压力管道中滞留气囊运动引起压力振荡的影响因素,更全面地表征气囊运动的瞬态效应,区别于以往简单管道系统末端的无压气囊运动试验,以较为复杂的试验管道系统的有压气囊为研究对象,探讨了不同流量和不同气囊体积条件下气囊运动引起的升压规律。试验结果表明:管道系统流量及气囊体积这两个单因素与气囊通过末端阀门产生的最大升压均不成线性关系,而是成上凸形抛物线关系;末端阀门的开度、气体排出引起的水体流速梯度变化、剩余气囊的缓冲作用三者共同决定最大升压值。

**关键词:**压力管道;瞬变流;滞留气囊;压力振荡机理;气液两相流;水锤试验

**中图分类号:**TV134.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2023)05-0018-05

**Experimental study on movement of pressurized air pockets in a pressure pipeline**//ZHAO Li<sup>1</sup>, LI Jinjing<sup>2</sup>, YANG Yusi<sup>2</sup>, WANG Tong<sup>2</sup>, HAN Wensheng<sup>2</sup>(1. School of Energy and Architecture, Xi'an Aeronautical University, Xi'an 710077, China; 2. Key Laboratory of Water Supply and Drainage, Ministry of Housing and Urban-Rural Development, School of Architecture and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** To explore the influencing factors of pressure oscillation induced by the movement of entrapped air pockets in pressure pipelines, and to fully characterize the transient effects of air pockets motion, pressurized air pockets in a more complex experimental piping system were studied, which was different from previous experiments based on the discharge of non-pressurized air pockets at the end of a simple piping system. The law of pressure boost caused by the movement of air pockets under different flow and volume conditions was discussed. The experimental results show that the single influencing factor of system flow rate and air pocket volume on pipeline pressure is not linear, but presents a convex parabola relationship. The maximum pressure boost value is determined by the opening of the end valve, the change of water velocity gradient caused by gas discharge, and the buffering effect of the remaining air pockets.

**Key words:** pressure pipeline; transient flow; entrapped air pockets; pressure oscillation mechanism; air-liquid two-phase flow; water hammer test

压力管道是水电站、火电站、长距离输水等重大工程的重要组成部分,一旦发生事故,不但会影响整个工程的稳定运行,而且可能造成极其严重的经济损失,甚至导致人员伤亡<sup>[1,4]</sup>。输水系统所出现的破坏事故,很多与含滞留气团瞬变流有关<sup>[2,4,7]</sup>。在输水管道系统中,常会发生水流冲击滞留气团的复杂瞬变流<sup>[2,4,7]</sup>,水流冲击滞留气团的复杂瞬变流极易引起异常压力波动,影响系统安全运行甚至导致发生爆管事故<sup>[4,7-10]</sup>。滞留气囊的存在可能导致意外的高压,这种特殊的瞬变流现象所产生的含气水锤压力远大于一般的水锤压力,是导致管道破裂的主要因素之一<sup>[5,9,11-13]</sup>,压力管道系统的许多破坏事故

都与气囊的瞬变流有关。因为无法在实际长距离管线上验证气囊运动产生的压力振荡,因此部分学者以简单管路末端的无压气囊为研究对象,探讨了气囊位置和体积、水柱长度和管末端孔口尺寸对瞬态峰值压力的影响。例如早期试验观察发现,在气囊排出过程中,升压高达无气正常运行压力的15倍<sup>[14]</sup>;Martin等<sup>[9]</sup>开展了水平管道中快速排气试验,研究结果表明,在孔径与管道直径比 $d/D = 0.19$ 处峰值压力最大,峰值压力高达上游水头的近5倍,峰值压力通常与快速压缩剩余的空气有关;Zhou等<sup>[1]</sup>通过观察快速填充过程中的压力振荡模式,指出水流冲击滞留气团可能会引起异常压力波

**基金项目:**陕西省自然科学基金研究计划(2022JM-211);西安市科技局高校院所人才服务企业项目(23GXFW0039);西安航空学院校级科研博士基金项目(2020KY0216)

**作者简介:**赵莉(1982—),女,副教授,博士,主要从事长距离输水安全防护研究。E-mail:22958531@qq.com

动,并且压力波动值与孔口大小有关;Zhou 等<sup>[15-16]</sup>研究了水流冲击滞留气团的瞬变压力及参数变化规律,发现水气耦合作用机理复杂,且可能引起约为10倍入口压力的危险峰值压力;Zhou 等<sup>[17]</sup>对管道启动充注过程中含有1段或2段滞留气团瞬态现象进行了试验研究,结果表明随着阻断水体长度增大,气团最大压力也逐渐增大。

综上所述,水流冲击滞留气团可能会引起异常压力波动,但是以往研究多以简单管道末端的无压气囊为研究对象,探讨了气囊位置和体积、水柱长度和末端孔口尺寸对瞬态峰值压力的影响,而对于起伏管道内水流冲击有压气囊的瞬变流,相关研究成果较少,水气作用规律有待进一步研究。因此,本文基于有压气囊通过末端阀门孔口试验,探讨气囊运动升压的影响因素。

## 1 试验系统和设备

### 1.1 试验系统

试验平台为重力流压力管道系统,主要由高位水箱、吸水池、管道末端小水箱、水位监测仪、电磁流量计、转子流量计、压力传感器及各种阀门构成,还包含用来观察试验现象的1号和2号有机玻璃观察管段。试验系统安装了LabView数字控制系统,可实时监测并传输压力传感器和电磁流量计的测量数据。试验平台的管路系统图如图1所示。

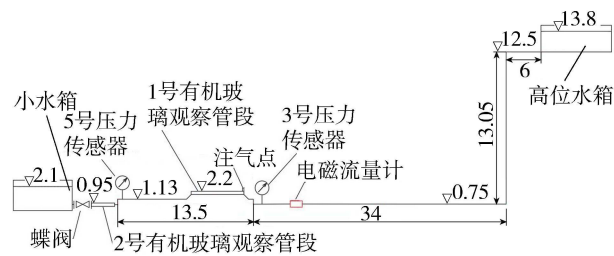


图1 试验管路系统(单位:m)

### 1.2 试验设备

**a. 压力传感器。**试验管路系统共安装两处压力传感器,一处位于特制梯形管件前端的水平管段上(3号压力传感器),另一处位于管道末端、流量控制蝶阀前端(5号压力传感器)。量程为 $-1 \sim 15$  MPa,其灵敏度可达到每0.0001s记录1次压力数据并导入数据采集系统。

**b. 电磁流量计。**采用KROHNE型电磁流量传感器记录系统流量数据,传感器型号为OPTIFLUX 2000,口径为100mm,承压为1.6MPa。该电磁流量计可通过墙体上安装的转换器面板实时读取系统流量数据,也可通过数据采集卡储存到数据记录系统。

**c. 试验水箱。**试验管路系统包括3个水箱:吸

水水箱、高位水箱及管道末端小水箱。小水箱后安装手动闸阀及气动蝶阀,可以将小水箱中的水排入吸水水箱中,形成循环管路系统。在试验过程中,高位水箱及小水箱均保持恒定水位,即上下游水位差恒定。

**d. 试验管路。**试验管路由钢管和有机玻璃管道组成,主体为钢管,在末端阀门上游和用来存气的梯形管段处使用有机玻璃管,以方便观察试验现象。梯形管段管中心距地面高度为2.2m,长度为4m。

## 2 试验现象分析

### 2.1 不同流量下的气囊运动形态变化

在系统流量由小到大的过程中,1号有机玻璃观察管段中的气液两相流呈现出了不同的流态,流态变化依次为分层流→波状流→段塞流→气囊整体运动,如图2所示。当系统流量为 $5 \text{ m}^3/\text{h}$ ,对应流速为 $0.18 \text{ m/s}$ 时,由于液相流速太小,管中的气液两相由于重力作用上下分离,两相分界面存在光滑平直的分界面,流态为分层流,如图2(a)所示。此时管道中的气囊形态稳定,静止不动,无法从管道中排出。持续加大系统流量至 $15 \text{ m}^3/\text{h}$ ,即流速为 $0.53 \text{ m/s}$ 时,由于管道中流速加大,气液两相流速差增大,在剪切力、表面张力及重力等作用下形成波状流,如图2(b)所示。此时,管道中的气液两相流仍保持稳定状态,气囊仍然滞留在管道中无法排出。当系统流量加大至 $18 \text{ m}^3/\text{h}$ ,对应流速为 $0.64 \text{ m/s}$ 时,液面逐渐上涨,液面波峰与管顶接触,呈现典型的段塞流流态,如图2(c)所示。此时水流以段塞流形式推动气囊至末端阀门排出,但5号压力传感器检测到的压力波动非常小。当系统流量大于 $25 \text{ m}^3/\text{h}$ ,即流速大于 $0.88 \text{ m/s}$ 时,管道中的气囊形态基本保持完整,没有被冲散成小气囊,气囊整体随水流运动,如图2(d)所示。在气囊经过末端阀门时,发出巨大声响,引起显著压力振荡。因此,后续进行关于气囊运动导致压力波动的试验时,采用大于 $25 \text{ m}^3/\text{h}$ 的流量。

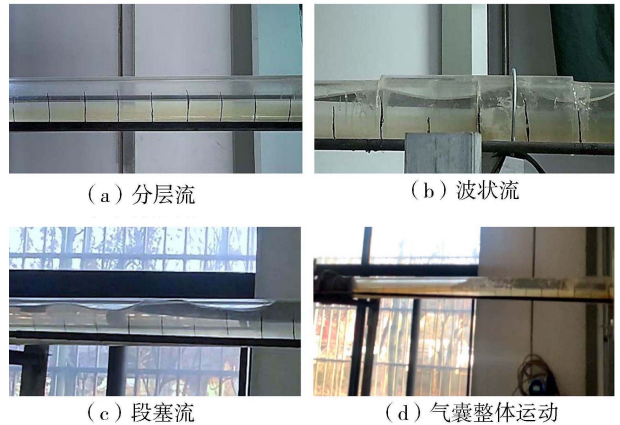


图2 气液两相流不同流态

## 2.2 不同体积的气囊经过阀门时的形态

当气体到达末端阀门,有气气囊迅速排出,同时导致了阀门上游的非满流区压力迅速下降。满流区的水流在压差作用下开始加速。当系统流量大于  $25 \text{ m}^3/\text{h}$ ,且气囊体积较大(充入空气量较大)时,空气从末端阀门处排出所需的时间较长,并且在此过程中,由于阀前压力下降,水流从阀门流出的速度变慢。而阀门上游的非满流区水流由于惯性还保持着原本的流速,因此水流会在阀前逐渐聚集涌起,占据阀门的整个过流断面,暂时阻塞气流排出,使得管道中存在大量空气没来得及排出,对上游水流起到缓冲作用,如图3所示。当气囊体积较小(充入空气量较小)时,空气从末端阀门处排出所需的时间较短,在水流逐渐聚集涌起在末端阀门处之前,空气已基本完全排出,不会对上游水流起到缓冲作用。



(a) 开始涌起



(b) 涌起过程

(c) 水流涌起到最大

图3 水流在末端阀门处形态

## 3 试验结果与分析

### 3.1 相同注气量不同流量工况试验结果

试验中通过末端蝶阀调节流量,将流量分别控制为  $25, 30, 32, 35, 37, 40 \text{ m}^3/\text{h}$ ,此时由于管道是重力流供水,因此管道中的初始压力相同,5号测压点的初始静压为  $0.123 \text{ MPa}$ 。每次试验开始时,管道末端蝶阀保持关闭,向1号有机玻璃观察管段的注气口稳定地充入压力为  $0.4 \text{ MPa}$ 、流量为  $10 \text{ m}^3/\text{h}$  的空气  $10 \text{ s}$ ,保证注气量相同。待气液两相状态相对稳定后开始记录数据,记录  $20 \text{ s}$  后打开末端蝶阀开始泄水,直至气体完全被排出管道后停止记录。

排气过程中管道的压力震荡情况如图4所示。注气量相同,系统流量不同(即末端蝶阀开度不同)的工况下,有气气囊通过末端蝶阀产生的压力震荡情况不同。图5为5号测压点压力极值与流量关系曲线。由图5可知,最大压力曲线为上凸形抛物线,

最小压力曲线无明显规律,压力峰值并不与流量成正比关系。当流量为  $35 \text{ m}^3/\text{h}$  时,5号测压点的压力峰值最大,为  $0.1852 \text{ MPa}$ 。

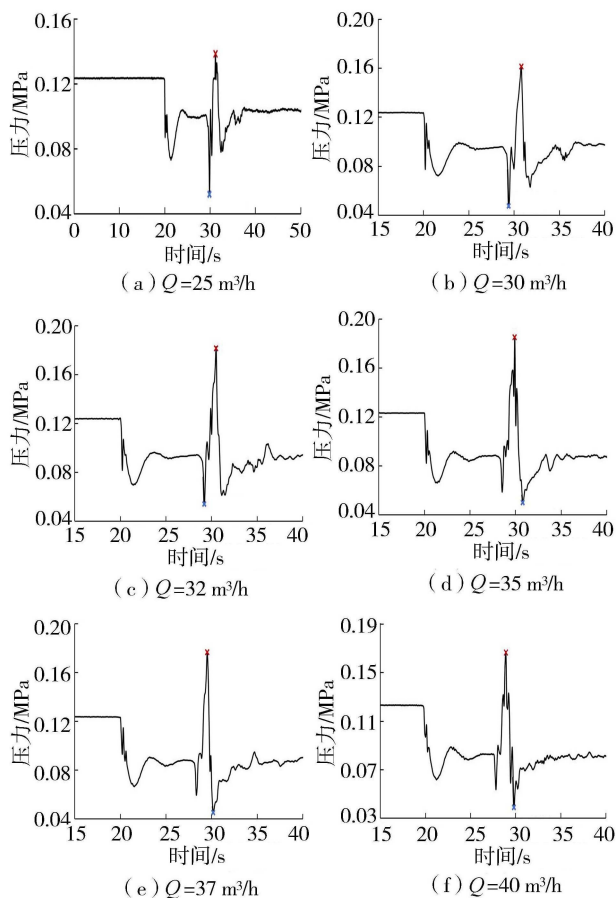


图4 不同流量时5号测压点压力过程线

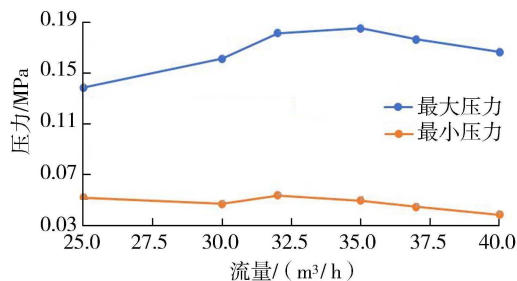


图5 5号测压点压力极值与流量关系

### 3.2 相同流量不同注气量工况试验结果

每次试验开始时,使管道中的初始压力相同,5号测压点的初始静压为  $0.123 \text{ MPa}$ 。将管道末端蝶阀保持关闭,向1号有机玻璃观察管段的注气口稳定地充入压力为  $0.4 \text{ MPa}$ 、流量为  $10 \text{ m}^3/\text{h}$  的空气,注气时间分别为  $5, 8, 10, 12, 15, 20 \text{ s}$ ,对应标准状态下空气体积分别为  $0.055, 0.088, 0.110, 0.132, 0.164, 0.219 \text{ m}^3$ 。待气液两相状态相对稳定时记录数据,记录  $20 \text{ s}$  后打开末端蝶阀,使流量保持为  $35 \text{ m}^3/\text{h}$ ,即流速为  $1.24 \text{ m/s}$ ,直至气体完全被排出管道。

注气时间  $t=5、8、10、12、15、20$  s 时,1 号有机玻璃观察管段中气液两相流如图 6 所示。由图 6 可知当管道稳定注气 20 s 时,1 号有机玻璃观察管段已经被空气充满,形成完全水柱分离现象。

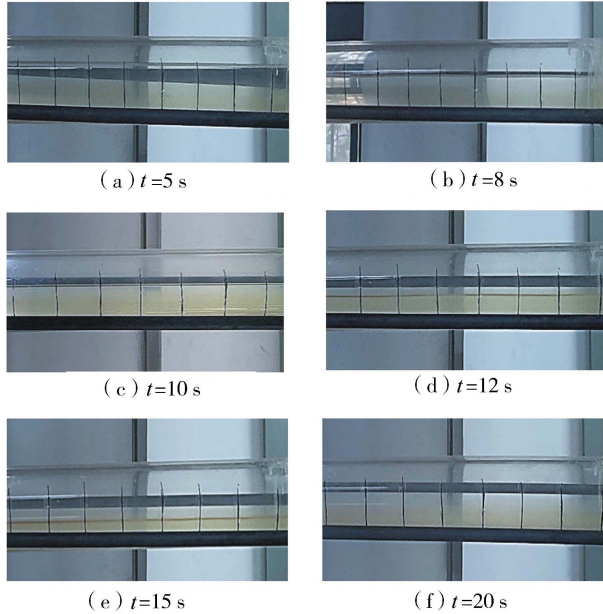


图 6 不同注气时间时 1 号有机玻璃观察管段中气液两相流

在上述各工况下打开末端蝶阀,管道开始输水并排气,得到不同注气时间时 5 号测压点的压力过程线如图 7 所示。试验中各工况的管道系统流量及初始静压(0.123 MPa)和稳定后的压力(0.085 MPa)均相同,但因为管道注气时间不同造成管道内气体体积不同,故而引起管道压力震荡情况也不同。由图 7 可以看出, $t=5$  s 工况无明显压力震荡,其他 5 组工况的最大压力几乎在同一时间形成,这说明管道压力震荡出现峰值的时刻仅与系统流量的大小有关,而与气体体积无关。

图 8 为 5 号测压点压力极值与流量关系曲线,可以看出最大压力曲线也为上凸形抛物线,最小压力曲线无明显规律。

### 3.3 结果分析

综合试验现象与两组试验数据,对气囊通过末端阀门排气过程引起的压力波动进行分析。由于相同压差情况下,气体通过末端阀门时的阻力远小于水体,故有压气体快速通过阀门,引起阀门处瞬时压力降低,同时为上游水体提供了加速空间。上游水体在压差作用下,经过一段空间加速后冲击到阀门,阀门对水体的阻力较大,水体减速,导致压力升高,这是各试验工况中最大压力出现的主要原因。最小压力有时在气囊通过末端阀门排气过程中产生,有时是升压波反射回的降压波叠加所致。具体分析如下:

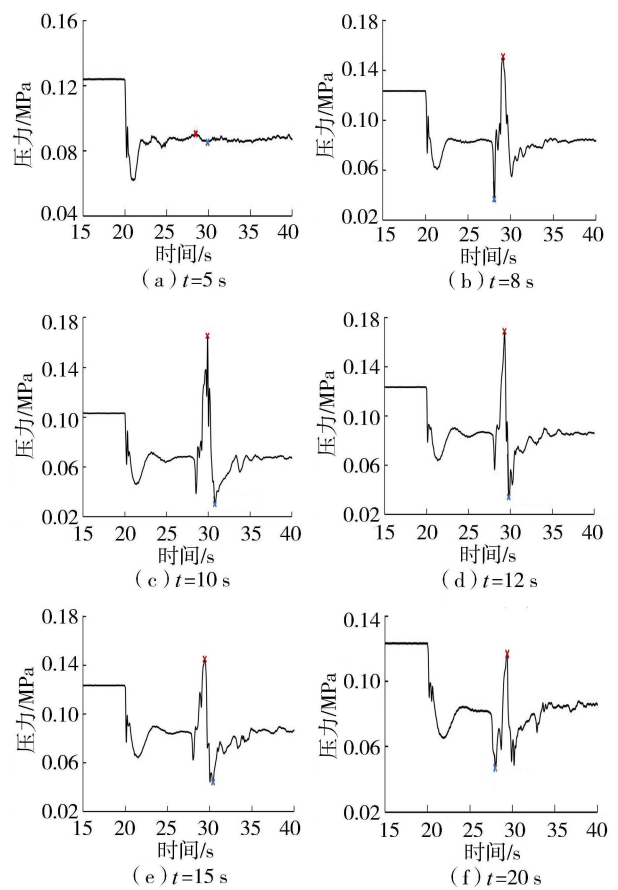


图 7 不同注气时间时 5 号测压点压力过程线

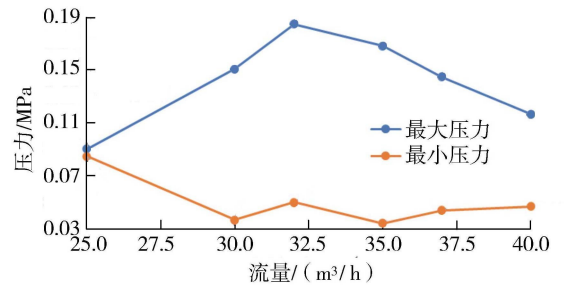


图 8 5 号测压点压力极值与流量关系曲线

a. 注气量相同,不同初始流量(末端阀门开度)下排气过程中的压力分析。①当系统流量较小时(小于  $35 \text{ m}^3/\text{h}$ ),末端阀门开度较小,气体排出的速度较小,水流加速较慢。同时,在排气过程中,后续水体涌起堵塞阀门断面,未排出的气体被压缩,起到缓冲作用。因此在较小的系统流量下气囊排出过程引起的管道压力震荡并不是很大。图 4(a)、4(b)、4(c)中的最小压力在气囊通过末端阀门排气过程中产生。②当系统流量适中时(等于  $35 \text{ m}^3/\text{h}$ ),末端阀门开度适中,气体排出较快,后续水体在压差作用下加速较快。当水体再次遇到阀门时,阻力变大,流速降低,此时的升压很大。同时,由于气体排出较快,水气运动中气囊形态完整,管道中几乎没有残留未排出的空气,无法起到缓冲作用,因此在该流量下的升压最大。图 4(d)中的最小压力是升压波反射

回的降压波叠加所致。③当流量较大时(大于 $35\text{ m}^3/\text{h}$ ),末端阀门开度较大。虽然气体排出过程同样会引起压力差,但由于较大开度的阀门对水体阻力小,因此加速后的水体再次遇到阀门时流速梯度变化较小,引起的震荡压力值也随之减小。图4(e)、图4(f)中的最小压力也是升压波反射回的降压波叠加所致。

**b.** 初始流量(末端阀门开度)不变,不同注气量情况下排气过程中的压力分析。①当注气量较小,对应注气时间较短时( $t=5\text{ s}$ ),气囊体积较小。由于气体含量过低,少量气体随水流一起通过末端阀门,此过程不会出现压力震荡。图7(a)中的最小压力在气囊通过末端阀门排气过程中产生。②加大注气时间至 $8\text{ s}$ ,气体通过阀门时出现了压力波动,但此时的震荡压力值不大,这是因为气囊体积较小,气体在很短的时间内就完全排出,水体加速空间较小,流速梯度变化也较小,因此不会出现较大的压力震荡。图7(b)中的最小压力在气囊通过末端阀门排气过程中产生。③当管道注气量适中,对应注气时间适中时( $t=10\text{ s}$ ),气囊体积适中。气囊排出为水流加速提供了充分的压差和空间,且在阀前水体涌起占据阀门过水断面之前,气囊就几乎全部排出,没有起到缓冲作用,因此当水体加速后冲击到阀门时产生的升压最大。图7(c)中的最小压力是升压波反射回的降压波叠加所致。④当注气量较大,注气时间较长时( $t\geq 12\text{ s}$ ),气囊体积较大。气体通过阀门的过程为后续水体提供了加速空间和压差,但因为气囊体积较大,无法在短时间内完成排气。经过一定时间加速后,阀前水体涌起暂时占据阀门过水断面,阻碍气体的流通。阀门处未排出的大量气体对管道压力震荡起到了一定的缓冲作用,因此当气囊体积大于某值后,排气过程引起的压力震荡反而会变小。图7(d)、7(e)中的最小压力是升压波反射回的降压波叠加所致,图7(f)中的最小压力在气囊通过末端阀门排气过程中产生。

## 4 结 论

**a.** 管道系统流量及气囊体积这两个单因素与气囊通过末端阀门产生的最大升压均不成线性关系,而是成上凸形抛物线关系。末端阀门的开度、气体排出引起的水体流速梯度变化及剩余气囊的缓冲作用共同决定最大升压值。因此,本试验中当流量为 $35\text{ m}^3/\text{h}$ ,注气时间为 $10\text{ s}$ 时,有压气囊在经过末端阀门排气过程中,引起的后续水体流速梯度变化最大,且基本无气囊缓冲作用,产生的压力振荡最大。试验结果显示最小压力无明显规律,低压产生

的原因,其一是压气体快速通过阀门导致,其二是升压波反射回的降压波叠加所致。由于压力降低原因不恒定且变化幅度较小,所以无明显规律。

**b.** 当管道中积存气囊随水流运动,遇到未完全打开的阀门、管径变小的管道,以及弯头等会产生局部阻力的附件时可能产生较大的额外升压。所以工程中要尽量减少管道系统中的气囊,通过安装排气阀来减少管道积存气体,同时又要尽量避免管道负压导致的大量进气,有利于保证管道系统压力稳定。

## 参考文献:

- [1] ZHOU Ling, PAN Tianwen, WANG Huan. Rapid air expulsion through an orifice in a vertical water pipe[J]. Journal of Hydraulic Research, 2018, 57(3): 307-317.
- [2] AHMED F, EAMES I, AZARBADEGAN A. Acoustics and vibrations in a complex piping network with pump startup-shutdown transients[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2022, 227(1): 1-12.
- [3] WYLIE J. Fluid transients in systems[M]. New York: Pearson, 1993: 12-13.
- [4] 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))
- [5] ZHOU Ling, LIU Deyou. Simulation of flow transients in a water filling pipe containing entrapped air pocket with VOF model [J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2014, 5(1): 127-140.
- [6] VARDY A. Fluid transients in pipeline systems [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 1992, 13(2): 207.
- [7] TRIKI A, ESSAIDI B. Investigation of pump failure-induced waterhammer waves; a case study[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2022, 144: 1-8.
- [8] ZHOU Ling, LIU Deyou, KARNEY B. Influence of entrapped air pockets on hydraulic transients in water pipelines[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 137(12): 1686-1692.
- [9] MARTIN C, LEE N H. Rapid expulsion of entrapped air through an orifice [C]//8th International Conference on Pressure Surges. Hague, the Netherlands: [s. n.], 2000: 125-132.
- [10] LEE N H, MARTIN C S. Experimental and analytical investigation of entrapped air in a horizontal pipe [J]. American Society of Mechanical Engineers Fluids Engineering Division, 2000, 248(3): 189-196.

(下转第37页)

[ 3 ] LUO Xianwu, JI Bin, TSUJIMOTO Y. A review of cavitation in hydraulic machinery [ J ]. Journal of Hydrodynamics,2016,28(3):335-358.

[ 4 ] 汪宝罗,张弋扬,苏胜利,等.斜轴变桨轴流泵空化特性试验 [ J ]. 水利水电科技进展,2022,42(4):33-38. ( WANG Baoluo, ZHANG Yiyang, SU Shengli, et al. Experiments on cavitation characteristics of an inclined shaft variable propeller axial flow pump [ J ]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42 (4):33-38. ( in Chinese ) )

[ 5 ] LUO Jing, NIU Zhipan. Jet and shock wave from collapse of two cavitation bubbles [ J ]. Scientific Reports, 2019, 9 (1):1352.

[ 6 ] 袁晓龙,何小珑,汪凯迪.汽液黏滞系数对空化泡溃灭过程影响的数值模拟 [ J ]. 水利水电科技进展,2020,40(5):19-23. ( YUAN Xiaolong, HE Xiaolong, WANG Kaidi. Numerical simulation of effects of vapor and liquid phase viscosity coefficients on cavitation bubble collapse process [ J ]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(5):19-23. ( in Chinese ) )

[ 7 ] LI Qing, LUO K H, KANG Qinjun, et al. Lattice Boltzmann methods for multiphase flow and phase-change heat transfer [ J ]. Progress in Energy and Combustion Science, 2016, 52:62-105.

[ 8 ] HE Xiaolong, YANG Qian, PENG Haonan, et al. Non-condensable gas bubble dissolution with a modified tunable surface tension multicomponent lattice Boltzmann model [ J ]. Computers & Fluids, 2022, 233:105252.

[ 9 ] HE Xiaolong, ZHANG Jianmin, XU Weilin. Study of cavitation bubble collapse near a rigid boundary with a multi-relaxation-time pseudo-potential lattice Boltzmann method [ J ]. AIP Advances, 2020, 10(3):035315.

[ 10 ] HE Xiaolong, PENG Haonan, ZHANG Jianmin, et al. Wall

wettability effects on the collapse of the attached vapor cavitation bubble with a thermal lattice Boltzmann method [ J ]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2023, 140:106529.

[ 11 ] PENG Haonan, ZHANG Jianmin, HE Xiaolong, et al. Thermal pseudo-potential lattice Boltzmann method for simulating cavitation bubbles collapse near a rigid boundary [ J ]. Computers & Fluids, 2021, 217:104817.

[ 12 ] LI Qing, ZHOU P, YAN H J. Improved thermal lattice Boltzmann model for simulation of liquid-vapor phase change [ J ]. Physical Review E, 2017, 96(6):063303.

[ 13 ] DULAR M, COUTIER-DELGOSHA O. Thermodynamic effects during growth and collapse of a single cavitation bubble [ J ]. Journal of Fluid Mechanics, 2013, 736:44-66.

[ 14 ] ZHANG Yuning, CHEN Feipeng, ZHANG Yuning, et al. Experimental investigations of interactions between a laser-induced cavitation bubble and a spherical particle [ J ]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2018, 98:645-661.

[ 15 ] WANG Yurong, PENG Haonan, HE Xiaolong, et al. Cavitation bubbles with a tunable-surface-tension thermal lattice Boltzmann model [ J ]. Physics of Fluids, 2022, 34 (10):102008.

[ 16 ] HE Xiaolong, PENG Haonan, ZHANG Jianmin, et al. Multiple vapor cavitation bubble interactions with a thermal lattice Boltzmann method [ J ]. Ocean Engineering, 2022, 266:113058.

[ 17 ] HE Xiaolong, PENG Haonan, ZHANG Jianmin, et al. Thermodynamics of the inception and interactions of multiple laser-produced cavitation bubbles using the lattice Boltzmann method [ J ]. Computers & Fluids, 2023, 252:105771.

( 收稿日期:2022-10-26 编辑:俞云利 )

( 上接第 22 页 )

[ 11 ] MARTINO G D, FONTANA N, GIUGNI M. Transient flow caused by air expulsion through an orifice [ J ]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 134(9):1395-1399.

[ 12 ] MARTIN C S, LEE N H. Measurement and rigid column analysis of expulsion of entrapped air from a horizontal pipe with an exit orifice [ C ] // 11th International Conference on Pressure Surges. Lisbon, Portugal: [ s. n. ], 2012: 527-542.

[ 13 ] 刘德有,周领,索丽生.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 ) )

[ 14 ] TULLIS J P. Control of flow in closed conduits [ M ]. Fort Collins, Colorado State University, 1971:315-340.

[ 15 ] ZHOU Fayi, HICKS F, STEFFLER P. Analysis of effects of air pocket on hydraulic failure of urban drainage infrastructure [ J ]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2004, 31(1):86-94.

[ 16 ] ZHOU Fayi, HICKS F E. Transient flow in a rapidly filling horizontal pipe containing trapped air [ J ]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 128(6):625-634.

[ 17 ] ZHOU Ling, CAO Yun, KARNEY B, et al. Expulsion of entrapped air in a rapidly filling horizontal pipe [ J ]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 146(7):1-16.

( 收稿日期:2023-01-10 编辑:骆超 )