

有压输水管道系统含气水锤研究

郑 源 索丽生 屈 波 张 健 刘德有

(河海大学水利水电工程学院 ,江苏 南京 210098)

摘要 通过模型试验研究有压输水管道系统阀门关闭时间对汽化时间和弥合水锤压力的影响 ,管道中的含气量对弥合水锤压力的影响 . 研究表明 ,在有压输水管道系统中 ,弥合水锤压力与汽化时间的大小密切关系 ,计算机数据采集的频率对水锤压力的波形有明显影响 . 建立了含气水锤的气泡-离散数学模型并进行了数值计算 ,数值计算结果与试验测试值是吻合的 .

关键词 :有压输水管道系统 ;含气水锤 ;模型试验 ;数值计算

中图分类号 :TV672 文献标识码 :A 文章编号 :1000-1980(2005)03-0277-05

随着城市用水的日益增加 ,有压输水管道系统越来越多且管线越来越长 ,一旦出现事故停电 ,阀门快速关闭 ,在管道系统中将产生剧烈的压力升高和压力降低的水锤过程 . 在此瞬态的水力过渡过程中 ,当压力变化降至液体的饱和蒸汽压力以下 ,在管道中将会有气体和蒸汽析出 ,并在特定的位置汇集而产生“空穴” ,形成水柱分离现象 . 当分离的液柱再弥合时 ,将形成非常大的弥合水锤 ,可能导致管道系统破坏 ,造成事故 . 本文所研究的含气水锤特指上述现象 . 国外对有压管道系统含气水锤的研究较少^[1 2] ,因此有必要对该问题做深入研究 .

1 试验装置

试验装置由循环管道系统和量测系统两部分组成 . 其中循环管道系统包括管道、充水泵、上游水箱、下游水库、球阀、闸阀及空气阀等 ,见图 1 ,量测系统包括电磁流量计、压力传感器、空气阀、压力表、计算机数据采集与处理系统 . 为了全面地采集瞬时数据 ,在进行软件设计时 ,充分利用 Windows 系统资源 ,并能方便地对低

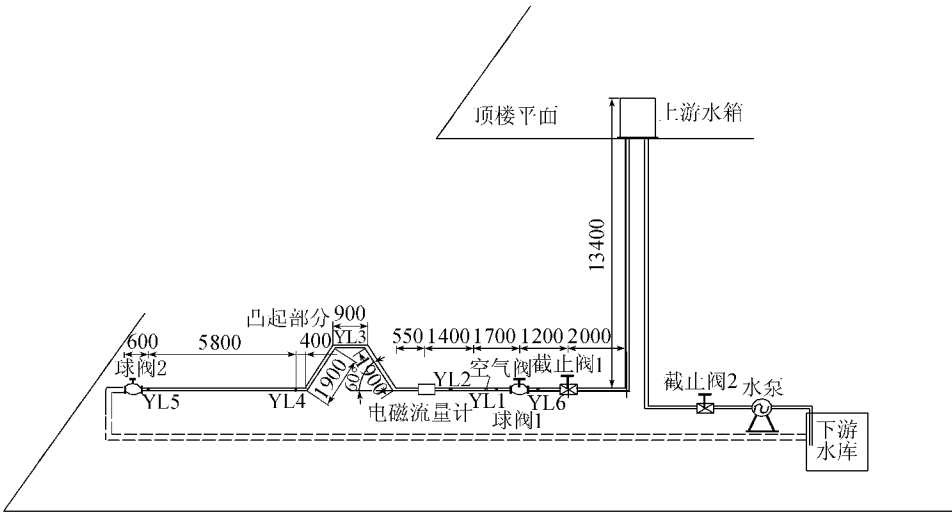


图 1 有压输水管道系统含气水锤试验示意图

Fig.1 Sketch of experiment on water hammer with gas in pressurized water delivery pipeline system

级端口进行控制,选定在 Winodws 98 系统下提供的多媒体时钟,利用 Visual C++ 来开发采样系统^[3],数据采集速度为 1 ms 采集一次.每次试验之前,在稳态条件下对所有量测设备进行重新率定,其相关系数 R 不小于 0.9999,也就是说,所有已测点都应该是线性变化的,以保证试验成果具有较高的精度.

2 含气水锤试验研究

2.1 试验现象

试验时,首先通过水泵将水抽至上游水箱使上游水箱的水溢流并一直保持溢流状态,开启管道中的截止阀和球阀 1、球阀 2(图 1),有压输水管道中的流量由电磁流量计量测,待水流稳定后,快速关闭球阀 1,其关闭时间通过计时器记录.试验发现,在球阀 1 后及管道沿线均形成了一系列大小不等的小空泡,压力降低时空泡直径增大,反之减小,并且随压力而波动,经历几次由小到大再由大到小的变化过程.瞬变过程结束后,沿管道顶部残留很多直径不等的小气泡.由此推测,小空泡包括汽化产生的“蒸汽泡”和气体释放析出的“气泡”.离球阀越远处,气泡个数减少、直径越小.当正压通过时,蒸汽泡即溃灭,并相伴发出清脆的爆破声和剧烈振动,整个过程历时非常短暂.当加快关闭球阀 1 的速度时,管道中发生水柱分离现象,发生水柱分离及溃灭的位置并不固定,水柱的弥合需要一定时间,它与球阀的关闭时间有关,是球阀关闭造成降压波多次传播及反射的结果.

2.2 试验结果与分析

2.2.1 改变球阀关闭时间

改变球阀关闭时间,测得管道沿线各点压力和管道的流量,其中 YL1 测点和 YL3 测点的试验结果见图 2.

由图 2 可知,当迅速关闭球阀 1 时,压力开始降低,当压力减小到水的汽化压力 p_v 时,将保持一定的汽化时间 t_{v1} ,球阀关闭时间越短,水达到汽化压力 p_v 时稳定的时间越长,弥合水锤压力越大.然后经过几个周期,压力振荡逐渐减弱.测点 YL3 的压力变化规律与测点 YL1 处相似,但峰值比 YL1 处的压力小得多.这主要是由于测点 YL3 距离球阀较远,关闭球阀时传递过来的减压波要弱得多.

2.2.2 改变管中含气量

试验采用相同的关闭时间(均为 0.5 s),并改变管中含气量.通过调节球阀 1 和球阀 2,可以改变管中含气量.由于 YL3 测点为凸起(图 1),其含气量比较容量改变,因此,主要针对 YL3 测点进行测试分析,其他各测点含气量对管道压力影响与 YL3 测点相同.不同含气量时 YL3 测点的瞬时压力见表 1.

表 1 不同含气量时管中最大、最小压力

Table 1 Maximum pressure and minimum pressure in pipeline with different gas contents					
球阀关闭时间 t/s	最大压力 水头/m	最小压力 水头/m	管道初始流速 $v_0/(m \cdot s^{-1})$	YL3 测点处 含气量/L	管中空穴 率 $\alpha/\%$
0.5	18.239	-4.359	1.576	0.040	2.8
0.5	49.412	-5.397	1.592	0.020	1.0
0.5	70.843	-7.671	1.592	0.010	0.3
0.5	87.097	-9.094	2.273	0	0

由表 1 可见,在管道初始流量比较接近和球阀关闭时间相同的情况下,改变 YL3 测点处的含气量,管中最大、最小压力随之改变,含气量减少,最大压力升高.当 YL3 测点处不含气,球阀的关闭时间为 0.5 s,管道的初始流速为 2.273 m/s 时,其最大压力为 87.097 m.这说明有压输水管道中,一定的含气量有利于降低水锤压力.

2.2.3 阀上游水锤与阀下游水锤比较

为了对发生在球阀 1 上游侧水锤与球阀 1 下游侧的含气水锤进行比较,在球阀 1 上游侧安装了一只压力传感器 YL6,以测量关阀时上游侧的水锤瞬态变化,试验结果见图 3.

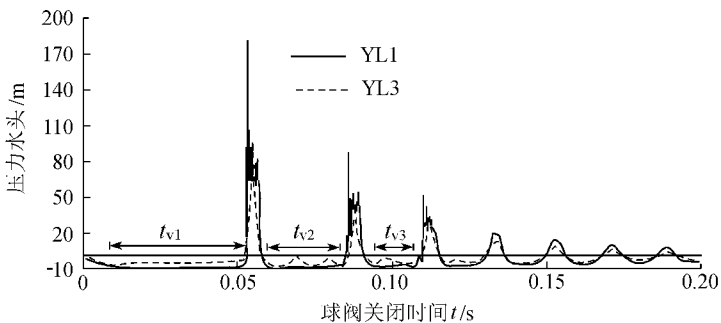


图 2 管中 YL1、YL3 测点瞬态压力变化过程线
Fig.2 Variation of transient pressure at test points YL1 and YL3

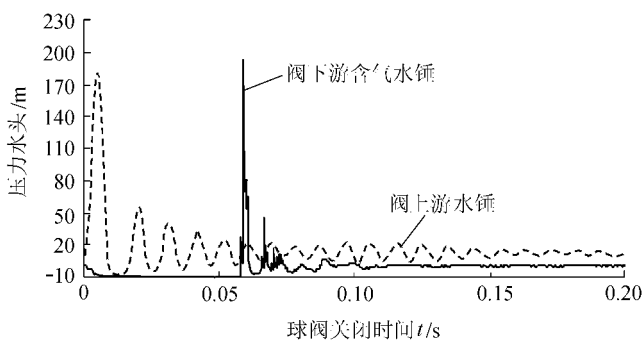


图 3 阀下游含气水锤压力与阀上游水锤压力变化曲线

Fig.3 Variation of water hammer pressure at upper and lower valves

由图 3 可见,当快速关闭球阀 1 时,阀下游因产生水柱分离,两股水流弥合产生的含气水锤压力比阀上游常规水锤压力大,对管道的破坏力更强。

2.2.4 数据采集频率的影响

试验表明,数据采集的频率不同,水锤压力的波形曲线也不同,如果数据采集的频率取得较大,则许多波峰值会被漏掉,将无法测到实际的最高压力。采集频率主要是由试验管路长度和管路材料确定,一般来说,数据采集的时间间隔不应大于 0.001 s。

3 含气水锤数学模型与算法

有压输水管道含气水锤水力瞬变的计算模型主要可归纳为两类^[4]:一类是气泡均匀分布模型;另一类是离散模型。采用何种模型应取决于有压输水管道系统发生含气水锤时水流的流型。通过试验观察可知,本文所研究的含气水锤,水柱分离发生在管道的某临界位置上,当发生了水柱分离现象后,由于某种原因(如压力升高),气泡溃灭、分离的液柱重新弥合,整个管道系统再次发生水锤现象。因此,本文采用气泡离散布置模型进行水力瞬变计算研究。

3.1 气泡-离散模型

3.1.1 基本假设和气泡体积计算

3.1.1.1 模型的基本假设

假设管道中存在微量自由气体,并且气泡集中在管道的各个计算断面上,如图 4 所示。

气泡-离散模型人为地将小气泡孤立置于各计算截面上,而计算截面之间的液体则假定是纯液体,不含任何自由气体。

3.1.1.2 气泡体积的计算

计算截面上的气泡实际是一种混合气团,它包括液体蒸汽和自由气体。根据 Dalton 原理,气泡的总压力 p (绝对)等于蒸汽分压 p_v 和自由气体分压 p_g 之和,即

$$p = p_v + p_g \tag{1}$$

对于质量为 M_g 的自由气体,根据完全气体的状态方程有

$$p_g V_g^n = M_g R_g T \tag{2}$$

式中: V_g ——气泡体积; R_g ——气体常数; T ——绝对温度; n ——气体多方指数,采用文献[5]指出的值进行计算。

对于蒸汽,在完全气体的假定下,式(2)同样成立。

如果不考虑气体逸出,且原液体中含有一定量的自由气体,设 α_0 为某初始状态时的空穴比,则式(2)可表示为

$$p_g V_g^n = p_g \alpha_1^n V = p_0 \alpha_0^n V \tag{3}$$

式中: p_0 ——初始状态时的压力; V ——两计算截面之间混合液体的体积; α_1 —— p_g 对应的空穴比。

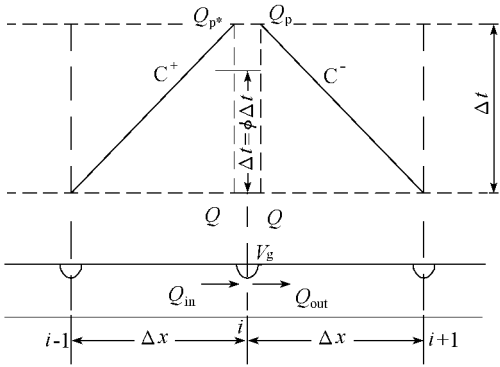


图 4 气泡-离散模型示意图

Fig.4 Sketch of bubble-dispersion model

为方便采用水力坡度线,有

$$p_g = \rho g (H - Z - H_v) \tag{4}$$

式中: Z ——计算截面的标高; $H_v = p_v / (\rho g) - H_b$,其中 p_v 为汽化压力, H_b 为大气压头.

由式(3)及(4),可得自由气体体积为

$$V_g = \frac{c_3}{\sqrt[n]{H - Z - H_v}} \tag{5}$$

其中, $c_3 = \sqrt[n]{\frac{p_0}{\rho g}} \alpha_0 V$.

3.1.2 数学模型

计算截面上的气泡大小随时发生变化,因此描述其变化规律的方程应该予以考虑,每一节点都应作为内边界来处理,由于特征线法在处理边界条件时有独特的优点,再加上两计算截面之间的液体假定是无自由气体的纯液体,因而选用特征线差分法来求解.

计算时采用矩形网格,沿着 C^+ 及 C^- 特征线积分相容性方程:

$$\left. \begin{aligned} C^+ : H &= C_P - B_P Q_{PU} \\ C^- : H &= C_M + B_M Q_P \end{aligned} \right\} \tag{6}$$

式中: Q_{PU} ——时刻 t 流入计算断面的流量; Q_P ——时刻 t 流出计算断面的流量; C_P, B_P, C_M, B_M ——系数,它们是时刻 $t_0 = t - \Delta t$ 的压力水头和流量的函数.

节点处气泡体积的变化应满足连续方程:

$$\frac{dV_g}{dt} = Q_U - Q \tag{7}$$

为了控制数值求解过程中的振荡,在对式(7)进行数值积分时引入加权因子 ψ .

$$\psi = \Delta t' / \Delta t \quad (0 < \psi < 1)$$

从而有

$$V_{gP} = V_g + [\psi(Q_P - Q_{PU}) + (1 - \psi)(Q - Q_U)]\Delta t \tag{8}$$

式中: V_{gP}, V_g —— $t + \Delta t$ 与 t 时刻计算节点处气泡的体积.

联立求解方程(5)(6)和(8),即可求出所需点的压力.

本模型中引入加权因子 ψ 是为了控制数值求解过程中的数值波动,计算时通过合理地选取加权因子 ψ ,可使得数值计算的稳定性满足要求.

3.1.3 计算实例与分析

有压输水管道系统如图1所示,水击波速是按上、下游不同的波速进行处理的, $C_{上游} = 1250 \text{ m/s}$, $C_{下游} = 410 \text{ m/s}$,管道沿程摩擦系数 $\lambda = 0.015$ [5],球阀1和球阀2均开启,管道流量由电磁流量计进行测量,待水流稳定后,突然关闭球阀1,并假设球阀1按直线规律关闭,关闭时间0.20 s.根据数学模型与算法,编制FORTRAN程序进行计算.YL1测点的试验测量和计算得到的压力过程线见图5.由图5可见,计算与试验测量得到的压力波动规律基本一致,这说明本文采用的数学模型和算法是合适的.从图5可以看出,数值计算

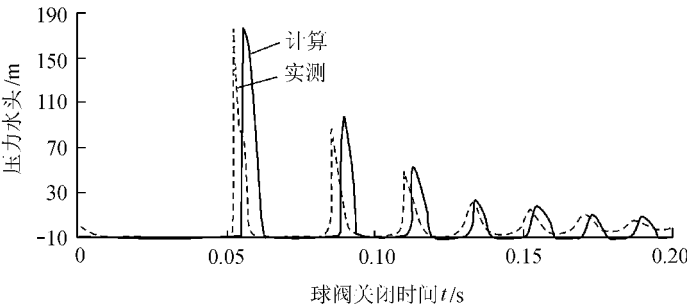


图 5 YL1 测点处试验测量与计算压力过程线
Fig.5 Graph of pressure head measured and calculated at test point YL1

与试验测量的峰值(如第一峰)出现的时间有些差异,这是由于一方面试验时计算机采集的计时时间较难准确控制,且空泡的溃灭机理比较复杂;另一方面由于管道中的摩阻作用,压力波动逐渐减弱,但在压力衰减的过程中,数值计算与试验测量值的变化规律与其他研究结果^[2,6]更加一致,这说明本模型是比较合理的。

4 结 语

- a. 在有压输水管道系统中, 弥合水锤压力与汽化时间 t_{v1} 的大小有密切关系, 球阀关闭时间越短, 水达到汽化压力时稳定的时间越长, 弥合水锤压力越大。
- b. 在进行含气水锤试验时, 计算机数据采集的频率对水锤压力的波形影响明显, 如果数据采集的频率取得不合适, 则无法测到实际的最高压力。
- c. 对于同一管道系统, 由于发生在阀下游弥合水锤压力比阀上游正水锤大得多, 对管道的破坏力更强。因此, 对阀下游弥合水锤的研究应引起人们的重视。
- d. 在进行有压输水管道系统含气水锤数值计算分析时, 采用何种计算模型, 取决于模型试验观察的流型。本文采用离散模型进行数值计算分析, 数值计算与试验测试值是吻合的。

参考文献：

[1] 郑源. 长有压管道系统气液两相瞬变流研究综述[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2002, 32(6): 21—25.
[2] 索丽生. 国外有压瞬变流研究进展[J]. 河海科技进展, 1991, 11: 25—30.
[3] DAVID J K. Visual C++ 技术内幕[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002. 87—101.
[4] WYLIE E B, STREETER V L, SUO Li-sheng. Fluid transients in system[M]. Engle Wood Cliffs, Prentice-Hall, Inc, 1993. 140—160.
[5] 郑源. 输水管道系统水流冲击截留气团与含气水锤研究[D]. 南京: 河海大学, 2004.
[6] 张健, 郑源, 索丽生, 等. 参数对输水管道水流冲击气团压力影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004, 32(6): 655—658.

Study on water hammer with gas in pressurized water delivery pipeline system

ZHENG Yuan, SUO Li-sheng, QU Bo, ZHANG Jian, LIU De-you

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract :An experimental study was performed to investigate the influences of closing valve time on vaporizing time and water hammer pressure in the pressurized water delivery pipeline system and the influence of gas content on water hammer pressure as well. The results show that water hammer pressure is closely related to vaporizing time, and that the frequency of data acquisition is of obvious influence on the fluctuation of water hammer pressure. Furthermore, a bubble-dispersion numerical model for water hammer with gas was developed, and the calculated result with the model was in accordance with that from experiments.

Key words :pressurized water delivery pipeline system; water hammer with gas; model experiment; numerical calculation