

技术总结

漏损管网中瞬态压力变化规律的研究

赵彬伶^{1,2}, 许仕荣¹, 俞亭超², 邵煜²

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 浙江大学建筑工程学院 市政工程研究所, 浙江 杭州 310058)

摘要: 瞬态压力在管网中的传播关系到管网运行的安全。设计并建立了一套供水管网模拟试验装置,用以分析不同管道形式、漏点尺寸和初始流速三者对管内瞬态压力波传播的影响。试验管道采用直径为50 mm的镀锌钢管,通过关闭阀门引起瞬态压力波,采用压力传感器监测瞬态压力波动。结果表明,瞬态压力与漏点尺寸呈负相关关系,漏点的设置对管内瞬态压力有调节作用;上、下游均存在支管可有效削弱管内瞬态压力的峰值和谷值,仅上游存在支管时效果次之,在有漏点的情况下,下游存在支管反而对主管内瞬态压力的正压起到叠加作用;瞬态压力波的特征值随着初始流速的增大而增大。

关键词: 给水管网; 瞬态压力; 管道形式; 漏点尺寸; 初始流速

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)19-0040-06

Variation of Transient Pressure in Leaking Water Pipe Network

ZHAO Bin-ling^{1,2}, XU Shi-rong¹, YU Ting-chao², SHAO Yu²

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Institute of Municipal Engineering, College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Transient pressure in water pipe network is known to affect the safety management of pipelines operation. A set of simulation test device was constructed, in order to study the coupling relationship between three independent variables (pipeline form, leakage size and initial velocity) and the transient pressure in pipelines. The diameter of galvanized steel pipe was designed as 50 mm and a pressure sensor was used to monitor the transient pressure which was manually made by suddenly closing the valve. The results indicated that the transient pressure had a negative correlation with the size of leakage. The location of leakage played a regulatory role in transient pressure changes. In terms of the position of dendritic pipes, when the pipelines had dendritic pipes in both upstream and downstream, it enjoyed the highest effectiveness to weaken the in-pipe positive and negative waves, followed by the pipeline with only dendritic pipe in upstream. However, when there were leakages, the pipelines with dendritic pipes in downstream might increase the positive pressure. Besides, the eigenvalues of the

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC04006); 国家自然科学基金委员会与金砖国家科技创新框架计划合作研究项目(51761145022); 浙江省科技计划项目(2015C33007)

通信作者: 俞亭超 E-mail: tingchaoyu@163.com

transient pressure increased as the initial velocity increased.

Key words: water pipe network; transient pressure; pipeline form; leakage size; initial velocity

瞬态压力的产生归因于供水管道中流速的突然变化,这种现象也被称为“水锤”。输配水管网系统中,瞬态压力事件频繁发生,而瞬态压力产生的问题可能会危及系统的结构和性能^[1]。城市供水管网经常会出现管道漏损问题,《2015年城市供水统计年鉴》显示,我国城市供水管网平均漏损率达到17.9%以上。管网存在漏孔既恶化水质,而且发生水锤事件时又会出现过高的正压和负压。因此,研究漏损管网中瞬态压力波动规律,对于管网的运行管理具有现实意义。

从19世纪40年代以来,人们便开始研究水力瞬变现象,水锤的分析计算方法得到快速发展。Wylie等^[2]对瞬变流的产生、发展机理做了详细介绍,为研究者提供了水锤基础理论;McInnis等^[3]通过对Calgary市的给水管网现场监测与数值模拟,发现在复杂管网中也存在瞬变流;魏闯等^[4]研究了在PVC输配水枝状管网中,支管间距和角度对主干瞬态压力的影响。还有学者使用通用流体计算软件模拟管网瞬态事件的产生、传播与衰减等^[5]。目前在存在漏损的情况下,对单一直管道的研究较多,Mora-Rodríguez等^[6]设计了模拟漏损管道的试验装置,提出了一种估算压力变化的方法;Jones等^[7]通过代表性物理试验研究了瞬态负压与从漏孔入侵污染体积的关系;Fox等^[8]使用填充多孔介质的测试箱模拟管道漏孔外的环境,并记录了其瞬态压力随时间的变化规律。

目前管网瞬变流的研究以数值模拟为主,学者多采用商业软件模拟管道瞬态压力事件。由于管网系统的复杂性,模拟软件尚未设置存有漏点等边界情况,并不能完全反映瞬态压力波在管网内的实际传播过程。本研究采用试验方法对带有支管的漏损管网进行研究,分析瞬态压力波的传播规律以及不同漏点尺寸、管道形式、管内初始流速的影响。

1 材料与方法

1.1 试验装置

试验装置见图1。该装置由试验管道、调速球阀、隔膜阀、上游供水设备、下游溢流水箱、电磁流量计和压力采集系统等组成。上游供水设备由恒压水

箱、水泵及控制柜组成,水箱位于屋顶,为整套装置提供水源。控制柜可通过变频器控制水泵的转速,以保证稳定的压力水头和管道流速。调速球阀安装于漏点上游7.5 m处,由控制系统和机械系统两部分组成,调节控制器的输出脉冲信号以实现阀门的0.1~10 s指定关闭时间。试验管道采用直径为50 mm的镀锌钢管,调速球阀至下游溢流水箱间的管段长为15.48 m,距漏点上、下游各2.2 m处的两根支管长为2 m,以水龙头接出的形式与大气相连。

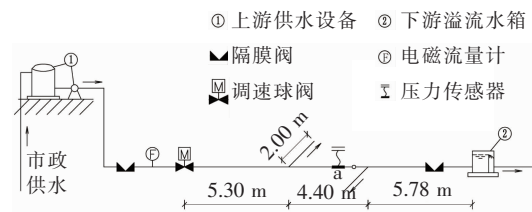


图1 试验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of experimental device

压力采集系统用于测量并记录漏点压力变化情况,由压力传感器、数据采集卡和计算机等组成。压力传感器的数据采集频率为1 000 Hz,安装于漏点上游0.2 m处即a点,代表漏点处的压力变化。电磁流量计用于监测主干管的流量,压力监测点处管道流量由主管流量减去支管与漏点流量得到,支管流量和漏点流量使用时间/体积法得到。

1.2 试验方法

本试验主要研究管道漏损情况下不同管道形式、初始流速、漏点尺寸等对瞬态压力的影响。考虑到管网的复杂性,选择4种管道模型(见图2)模拟实际供水管道,即单一直管道、漏点在支管上游、漏点在支管下游以及漏点在上、下游两支管之间。

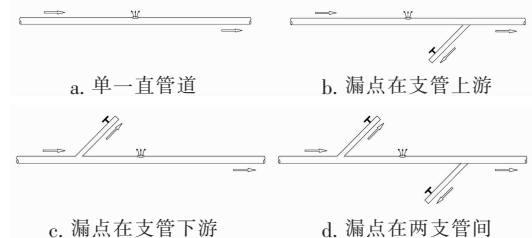


图2 4种管道模型

Fig. 2 Four types of pipelines

试验参考城市供水管网的经济流速,为其设定初始流速的工况值,并通过调节管道上、下游的隔膜阀来控制流速大小。城市供水管网的漏点尺寸(按圆形直径)多在3.2~102 mm范围内,试验选取3~9 mm中的一组孔径,以便模拟小尺寸的管网漏点。阀门关闭时间由步进电机驱动系统设定,可设置不同的关阀时间,用于引起不同强度的瞬态压力波。试验中控制管内初始压力 P_0 为40 kPa不变,变量取值设置如下:关阀时间 T 设为0.2、0.4 s;初始流速 v_0 设为0.6、0.8、1.0、1.2、1.4 m/s;漏点孔径 d 设为0.3、0.5、0.7、0.9 mm。每个工况进行3次试验,当后两次试验的测量结果与第1次试验的相对误差 $\leq 5\%$,即可用第1次试验结果代表此次工况,否则重新进行此次工况的全部试验。

1.3 试验步骤

① 试验前,根据本次工况设置要求,安装指定的支管和更换漏点孔径。

② 开始试验后,开启水泵给管路供水,保持下游水箱溢流状态,调整上、下游隔膜阀,测量孔口出流量和支管出流量,使管内压力和流速达到工况值并稳定运行30 s。

③ 启动数据采集软件记录管内流速和漏点压力的变化,关闭上游调速球阀,管路内产生瞬态压力,待管内压力再次稳定和流速变为零以后停止数据采集。

④ 整理数据并进行下一工况试验,直至完成所有试验。

2 结果与分析

2.1 管内压力变化分析

关闭上游调速球阀使管内产生瞬变流,图3是根据压力采集系统的数据绘制的管道漏点a处压力变化曲线。控制管内初始压力为40 kPa、管道稳定供水时流速 v_0 (1.0 m/s)不变、调速球阀关阀时间 T (0.2 s)不变。

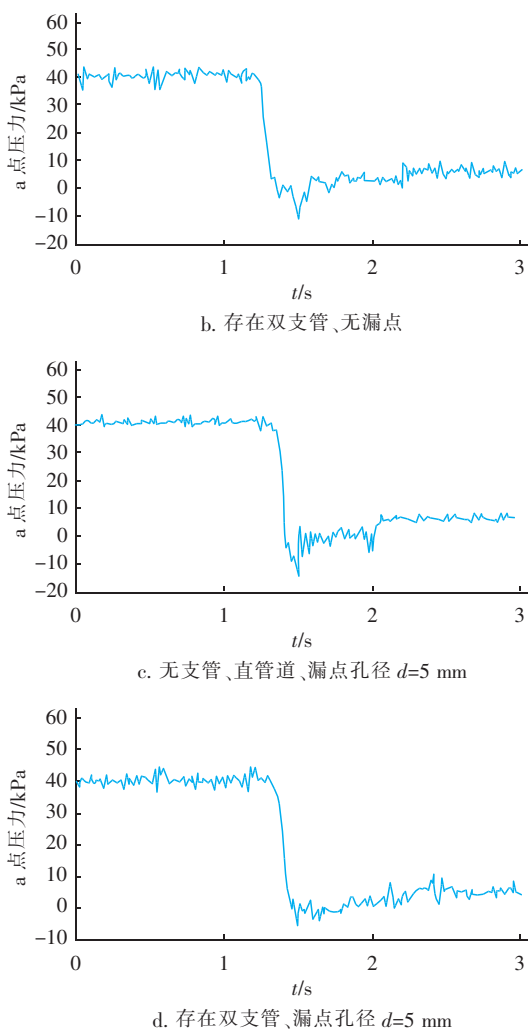
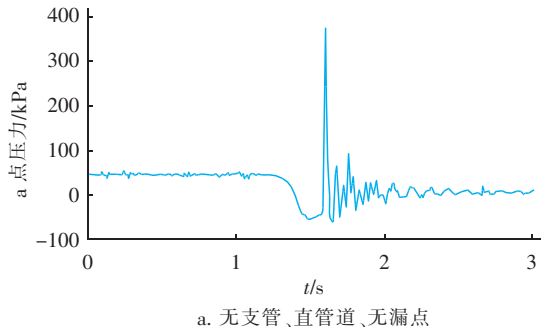


图3 漏点压力波动

Fig. 3 Change of pressure in leakage point

由图3(a)可以看出,关闭上游调速球阀后,无漏点的直管道产生的波动最为剧烈,瞬态压力先降至最低值,随后迅速升到最大值,并在负压与正压间来回震荡数次,其强度呈逐渐减小趋势。在该工况下,压力最大值达到372.96 kPa,而最小值为-55.22 kPa,波峰与波谷尖锐清晰,曲线相对平滑。过高的管内压力有可能使管内产生巨大的能量冲击而不能及时释放,引起阀门设备破坏和管道爆裂等不利于管网供水事故,而负压值虽然不大,但同样对管道具有破坏性。

由图3(b)可以看出,上、下游同时设置支管极大地削弱了瞬态压力波的波峰与波谷。试验过程中,在支管末端设置水阀,管内瞬态压力波由主管道向两侧支管传播,水阀常开与大气相接,使管内巨大的压力波能量得到有效释放。因此,发生水锤事件

时,枝状管网比单根支管更能调节管内压力和能量传递。在该工况下,第1个波峰最大值为4.98 kPa,压力最小值为-10.60 kPa。与图3(a)相比,图3(b)的压力波最大值减小了,并且震荡两个周期后逐渐衰减至稳定,曲线相对平缓,维持在波峰和波谷的时间较长。

由图3(c)可以看出,存在漏点使直管道产生的压力波得到调节,远远小于没有漏点时产生的压力波。在该工况下,第1个波峰的最大值为3.48 kPa,压力最小值为-13.95 kPa,而后并没有明显周期性的压力波传递规律,压力值持续在零附近,震荡0.5 s以后恢复稳定的管内压力。当管道稳定运行时,漏点处的水从管道内出流至外界大气中,关闭管道上游调速球阀产生水锤,负压传播至漏点时“吸入”空气,使负压得到削弱,正压传播至漏点时,管内压力大于管外压力,造成管内水流向管外运动,使升压值降低。

由图3(d)可以看出,在支管和漏点的双重调节作用下,管内瞬态压力波得到充分的缓解。从压力曲线可以看出,该工况下不存在波峰和波谷,产生水锤后,压力迅速下降为负压,在-1 kPa上下波动0.3 s,接近管外大气压,随后缓慢增长至稳定压力。与图3(a)相比,同时存在支管与漏点几乎消除了管内负压和过大的正压。

2.2 管道形式和漏点孔径对压力波的影响

本研究定义压力的两个特征值,用以分析管网压力波动强度。瞬态压力波的初次压降值 ΔP_1 (即初始压力减去最小压力)可反映管内负压的强度,瞬态压力波的最小负压与最大正压之差(即 ΔP_2)可以反映管内压力突降骤升的剧烈程度。控制关阀时间 $T=0.4$ s、初始流速 $v_0=1.0$ m/s不变,从管道形式和漏点孔径的改变来分析其对压力特征值的影响,结果见图4。

由图4(a)可以看出,无漏点时,由于管道形式的改变,初次压降值下降趋势明显,直管道产生的初次压降值最大,为84.59 kPa,然后分别是下游存在支管的管道、上游存在支管的管道,存在双支管时产生的初次压降值最小,仅为45.63 kPa。从无漏点到 $d>0$ 可以看到,漏点的存在使每种管道形式下的初次压降值下降。漏点孔径相同时,存在双支管时产生的初次压降值最小,其次是上游存在支管的管道,直管与下游存在支管的管道产生的初次压降值不相

上下,说明存在漏点时下游有支管的管道对减少负压的调节作用不大,存在双支管的管道对减少负压的调节作用要优于上游存在支管的管道,可见支管位置会影响调节管内负压的能力。随着漏点孔径的增大,同一管道形式下的初次压降值相应减小,其中直管道下降幅度最大,从无漏点至 $d=9$ mm减少了40.74 kPa,存在双支管的管道下降幅度最小,仅减少了3.87 kPa,因为双支管的存在已经对管内瞬态压力起到了调节作用。

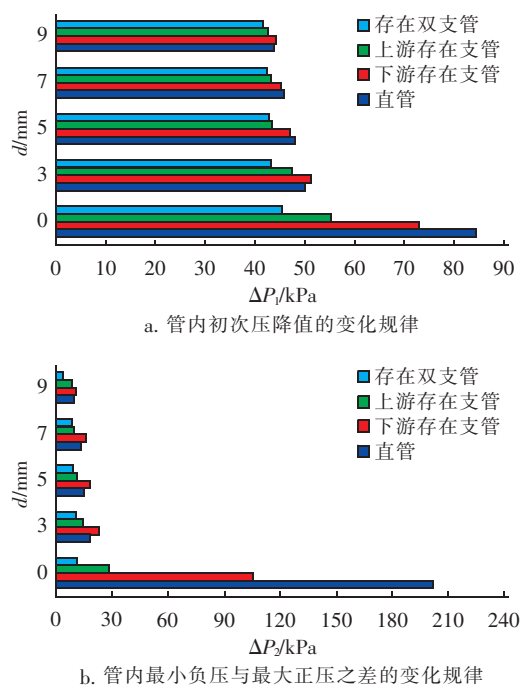


图4 不同管道形式下压力特征值的变化规律

Fig. 4 Change of transient pressure under different forms of pipelines

由图4(b)可以看出,无漏点时,直管道产生的 ΔP_2 最大,达到202 kPa,然后分别是下游存在支管的管道、上游存在支管的管道,存在双支管的管道 ΔP_2 最小,为12 kPa,下降了94%,说明支管对管内瞬态波正压的调节作用显著。存在漏点时,直管道产生的 ΔP_2 下降最明显,减少了91%,而且 ΔP_2 随漏点孔径的增大而缓慢减小,其他形式管道的 ΔP_2 也有所降低并与漏点孔径呈负相关关系。当漏点孔径相同时,下游存在支管管道的 ΔP_2 略大于直管,这是因为下游支管对主管道的瞬态波正压有叠加作用,上游存在支管的管道 ΔP_2 要小于二者,双支管 ΔP_2 最小,说明支管在上游会对主管道的正压有削减效果。

2.3 不同初始流速对压力波的影响

不同初始流速下管内初次压降值 ΔP_1 的变化规律见图 5 ($T=0.4$ s)。

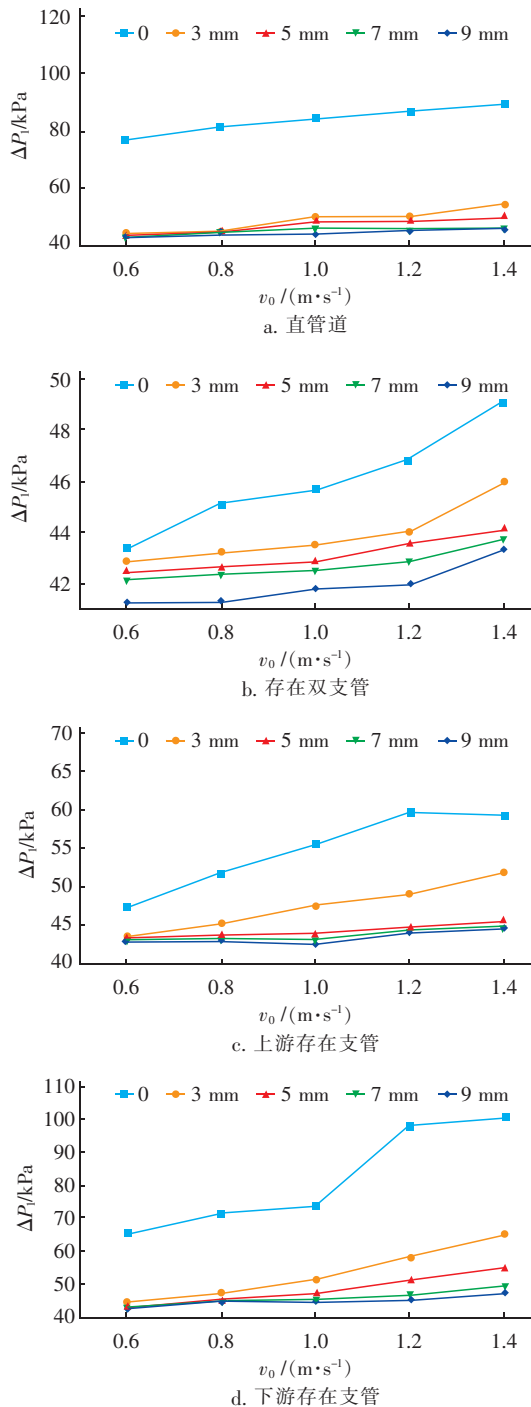


图5 不同初始流速下管内初次压降值的变化规律

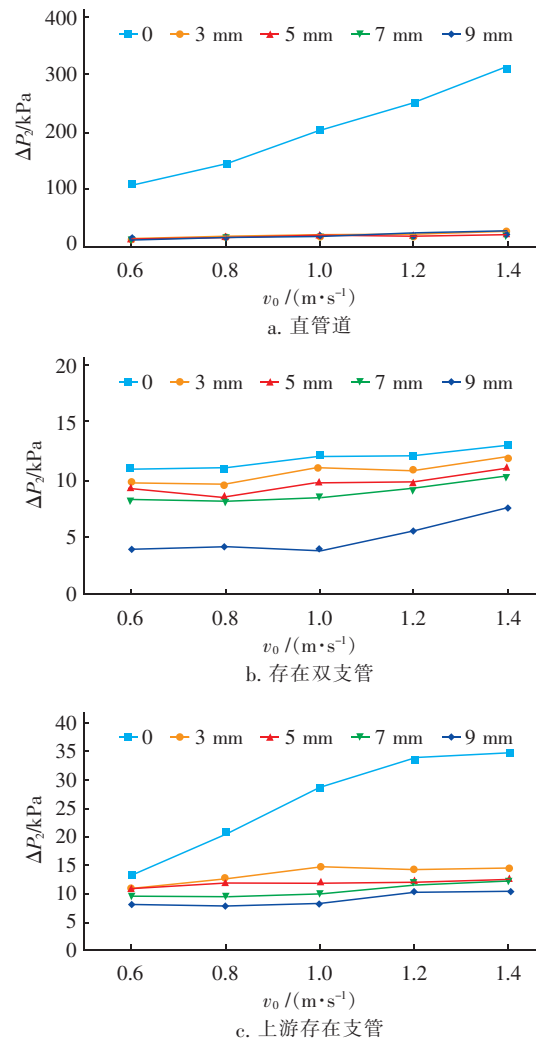
Fig. 5 Initial pressure drop in pipes under different initial velocity

由图 5(a) 可以看出,在其他条件不变的情况下,随着初始流速的增大,初次压降值也相应增加。

原因在于,初始流速越大,产生的瞬态压力波强度越大,管道内负压就越低。可以看到,下游存在支管时 ΔP_1 随流速变化的增幅最大[见图 5(d)],存在双支管时 ΔP_1 随流速变化的增幅最小[见图 5(b)],说明相比于其他管道形式,下游存在支管时 ΔP_1 对初始流速的变化最敏感,存在双支管时管内 ΔP_1 仅稍有上升。

由图 5(c) 可以看出,漏点孔径为 3 mm 时 ΔP_1 随流速的增幅明显高于漏点孔径 ≥ 5 mm 时的,说明上游存在支管时,在漏点孔径进一步增大后, ΔP_1 的增长趋于稳定。

不同初始流速下管内最小负压与最大正压之差 ΔP_2 的变化规律如图 6 所示 ($T=0.4$ s)。可以看出,最小负压与最大正压之差 ΔP_2 与初始流速 v_0 呈正相关关系。存在双支管时 ΔP_2 随初始流速的增加而增大的趋势缓慢,说明初始流速对存在双支管管道的 ΔP_2 影响不大。



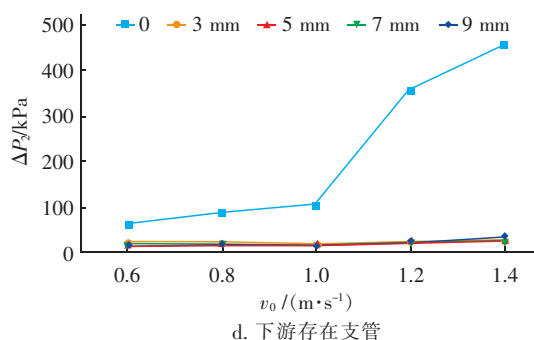


图6 不同初始流速下管内 ΔP_2 的变化规律

Fig.6 Difference between minimum negative pressure and maximum positive pressure under different initial velocity

无漏点且初始流速 $< 1.0 \text{ m/s}$ 时,与直管道相比,下游存在支管时 ΔP_2 较小;当初始流速 $> 1.0 \text{ m/s}$ 时,下游存在支管的 ΔP_2 大于直管道的 ΔP_2 ,说明管内流速达到一定值后,下游存在支管对管内正压有叠加作用,且叠加幅度随流速的增大而增大,而在有漏点且孔径相同情况下,在任何流速条件下,下游存在支管的 ΔP_2 始终大于直管道的 ΔP_2 。

3 结论

① 调速球阀突然关闭引起的瞬态压力波受漏点孔径的影响。随着漏点孔径的增大,管内产生的负压变小,即初次压降值减小;管内最小负压与最大正压之差亦随漏点孔径的增大而降低。漏点的存在有利于调节管网瞬态压力波,避免过高的压力和过低的负压造成管道损害。

② 在有漏点的情况下,下游存在支管会对瞬态波的正压有叠加作用,对负压调节作用不显著。与单一直管道相比,上、下游均设置支管最能有效削弱瞬态波正压和负压,仅设置上游支管的效果次之。

③ 管道的初次压降值与最小负压和最大正压之差随初始流速的增大而增大。下游存在支管时其瞬态压力波动对初始流速的变化最敏感,增幅最明显,然后分别是直管道、上游存在支管,上、下游均存在支管时增幅最小,其瞬态压力峰值和谷值随初始流速的增加而缓慢增大。

④ 城市供水管网中,在符合经济和水力条件下选择小流速可减小瞬态压力波带来的危害。

参考文献:

- [1] Karim M R, Abbaszadegan M, LeChevallier M W. Potential for pathogen intrusion during pressure transients

[J]. J AWWA, 2003, 95(5): 134 - 146.

- [2] Wylie E B, Streeter V L. Fluid Transients [M]. New York: McGraw-Hill Book Co., 1983.
- [3] McInnis D, Karney B W. Transients in distribution networks: field tests and demand models [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995, 121(3): 218 - 231.
- [4] 魏闯,李明思,李东伟,等. PVC 管网中支管连接方式对干管水锤压力叠加的影响 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(18): 88 - 94.
- Wei Chuang, Li Mingsi, Li Dongwei, *et al.* Effects of connecting patterns of branch pipes on superposed water hammer pressure in trunk pipe for the PVC pipeline system [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(18): 88 - 94 (in Chinese).
- [5] Ebacher G, Besner M C, Lavoie J, *et al.* Transient modeling of a full-scale distribution system: comparison with field data [J]. J Water Resour Plan Manage, 2010, 137: 173 - 182.
- [6] Mora-Rodríguez J, López-Jiménez P A, Ramos H M. Intrusion problematic during water supply systems' operation [J]. International Journal of Energy and Environment, 2011, 2(3): 391 - 400.
- [7] Jones S, Shepherd W, Collins R, *et al.* Experimental quantification of intrusion due to transients in distribution systems [J]. Procedia Eng, 2014, 89: 1306 - 1313.
- [8] Fox S, Shepherd W, Collins R P, *et al.* Experimental quantification of contaminant ingress into a buried leaking pipe during transient events [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 142(1): 04015036.



作者简介:赵彬伶(1993 -),女,广西贵港人,硕士研究生,研究方向为给排水管网系统及其优化。

E-mail: zhaobinling980@163.com

收稿日期:2019-03-12