

技术总结

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.21.006

## 基于智能消防栓的供水管网爆管监测试验

王海涛<sup>1</sup>, 涂正沁<sup>2</sup>, 张 坤<sup>1</sup>, 郭杨振<sup>1</sup>, 刘 超<sup>1</sup>, 徐 哲<sup>2</sup>

(1. 杭州水务集团有限公司, 浙江 杭州 310009; 2. 杭州电子科技大学 自动化学院, 浙江 杭州 310018)

**摘 要:** 针对市政管网爆管监测问题,采用智能消防栓组网进行水压在线检测研究。选择具有环网的两类市政管网,利用智能消防栓压力传感器和窄带物联网(NB-IoT),并通过消防栓放水模拟爆管实时采集压力信号。分析结果表明,日常工况存在瞬态压力突变信号,爆管导致的压力瞬变信号虽有幅值但衰减较快,且爆管瞬态压降明显大于稳态压降;进一步结合水力模型分析,监测点合理密布、合理采样及局域联动分析可有效甄别爆管信号。

**关键词:** 供水管网; 爆管监测; 智能消防栓; 窄带物联网; 瞬变信号

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)21-0033-08

## Pipe Burst Monitoring Test of Water Supply Network Based on Intelligent Fire Hydrant

WANG Hai-tao<sup>1</sup>, TU Zheng-qin<sup>2</sup>, ZHANG Kun<sup>1</sup>, GUO Yang-zhen<sup>1</sup>, LIU Chao<sup>1</sup>, XU Zhe<sup>2</sup>

(1. Hangzhou Water Group Co. Ltd., Hangzhou 310009, China; 2. School of Automation, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** An intelligent fire hydrant network was used for online water pressure detection to solve the problem of pipe burst monitoring in municipal pipe network. Two kinds of looped municipal pipe network were selected in the experiment. The pipe burst was simulated by opening the fire hydrant valve, and the real-time pressure signal was collected by the intelligent fire hydrant pressure sensor and NB-IoT. There was transient pressure mutation signal in daily working conditions. Although the pressure transient signal caused by pipe burst had amplitude, it attenuated rapidly, and the transient pressure drop of the pipe burst was obviously greater than that of the steady pressure drop. Combined with the hydraulic model, it was further analyzed that the reasonable distribution of the monitoring sites, reasonable sampling and local linkage analysis could effectively identify the pipe burst signal.

**Key words:** water supply network; pipe burst monitoring; intelligent fire hydrant; NB-IoT; transient signal

由于爆管事故频发,市政管网监测问题已引起 水司重视。业界根据现有 SCADA 数据是否超限进

行判断,并结合信号突变、厂网数据区域联动来减少误报,对于较大爆管侦测取得了一定成效。但现有检测方法局限在较大管道爆管,管径都在 1 000 mm 以上<sup>[1-2]</sup>。赵丹丹等<sup>[3]</sup>使用某水厂 SCADA 实测压力数据,分析了管网压力波动环境背景噪声,并采用该水厂水力模型模拟爆管水力冲击,确定了该水司供水管网系统爆管可监控的最小管径在 DN600 左右。而市政管网中, DN300 ~ DN600 管道长度占比高达 70% 以上,且分支、连接点较多,爆管事故频发,更需要实时监控。

近年来,压力检测的精度和可靠性大幅提高,其便捷安装性得到业界认可。特别是智能消防栓的应用推广,有些城市已经实施全城智能消防栓部署,增强了供水管网压力在线检测能力。如何通过压力监

测点的合理密布、合理采样来实现更广泛市政管网的爆管监测,是当前物联网背景下值得研究的课题。

### 1 既有 SCADA 用于爆管监测的不足

现有供水管网 SCADA 主要用于供水调度,一般采集出厂流量压力、管网若干监测点压力和一些大用户流量压力。其管网压力监测点一般布置在供水分界带、末梢最不利点、大用户单位和水压敏感点,分布密度(每 10 km<sup>2</sup> 一个)及采样频率(5 ~ 15 min 采集一次)均较低。

表 1 汇总了文献[1] ~ [3]的爆管案例情况。显然,既有 SCADA 用于供水管网爆管监测的能力是极其有限的。为了提高对较小爆管的监测效果,文献[1] ~ [3]均建议合理安排压力监测点的密度和位置。

表 1 文献[1] ~ [3]爆管案例情况

Tab. 1 Pipe burst cases in literature [1] - [3]

项 目	采样周期/min	爆管管径和漏失水量	压降幅度	测点关联性	建议
文献[1]	15	DN1 200 ~ DN2 200	21 ~ 38 kPa	相关压力测点 5 个	针对水量变化较小的爆管,由于其与用户的用水量变化相似,因此很难分辨,还需待监测密度及精准度提高后做进一步完善
文献[2]	5	DN1 000; 出厂流量骤增 1 500 和 500 m <sup>3</sup> /h	出厂压力突降 90 和 50 kPa	压力突降幅度最大有 3 个测点	需合理安排压力监测点位置和密度,才能达到最好的监测效果
文献[3]	15	最小可监控管径为 DN600; 漏失水量 > 5 724.9 m <sup>3</sup> /h	> 12.4 kPa (背景噪声阈值)	相关压力测点 > 3 个	监测点密度和位置的合理与否,直接影响管网监控效率。供水系统用水波动引起的环境背景噪声是管网自身运行的特征,一味增加监测点密度并不能解决所有问题,合理的监控密度是今后需要进一步研究的内容之一

实际上,既有 SCADA 受测点硬件限制,一般采样、上传周期为 5 ~ 15 min,所采集数据属于稳态缓变信号。要在稳态信号中检测到失压幅度超过背景噪声,爆管漏失流量必须很大。这是既有 SCADA 用于爆管监测的一个硬伤。

### 2 爆管监测试验设计

本试验将充分利用现有压力变送器及 NB - IoT 传输技术,结合课题组前期爆管监测的相关研究,设计爆管监测试验方案,分析 DN300 ~ DN600 管道爆管的可监测性和测点合理密布、合理采样问题。

#### 2.1 试验片区

试验片区选择原则:①具有环通的局部管网,管道以 DN300 ~ DN600 为主;②具有代表性用水模式(工业用水、居民用水)的开放区块,试验片区如图 1 所示。其中,图 1(a)为 DXCB 试验片区(工业用

水),包括 21 家工业企业供水,约 12 家已装有智能大表;图 1(b)为 JB 试验片区(居民用水),包括 9 个小区和 4 家单位供水,小区均安装了智能大表。距离 DXCB 试验片区最近的 XS 泵站的管道距离约为 5.5 km;距离 JB 试验片区比较近的 JB 泵的管道距离 < 1.5 km。



a. DXCB 试验片区



b. JB 试验片区

图 1 两类试验片区

Fig. 1 Two kinds of experimental areas

2.2 试验装置与检测仪器

本试验利用智能消防栓实时采集管网压力信号,其中压力变送器的测量精度等级为 1%,采用 NB-IoT 或 4G 无线传输,采样周期为 10~15 s,可选择 1 min、10 min、1 h 集中上传,数据可以暂存 10 000 条。

DXCB 试验片区布置了 15 个测点,JB 试验片区布置了 10 个测点,采用平台定时授时校准。数据平台布置在云端,数据接收和存储能力可满足数千监测点分钟级接入要求。

为了准确获取试验中的瞬变信号,在图 1(b)所示的 JB 试验片区 09#测点位置,试验期间特别改用电脑连接压力变送器,采取 10 Hz 的采样频率来采集压力信号。

2.3 试验方法

主要研究内容:

- ① 采集两类试验片区日常数据,分析正常工作特点及其背景噪声;
- ② 采集模拟爆管时各监测点压力数据,分析模拟爆管对邻近监测点的影响;
- ③ 在剔除背景噪声干扰的情况下,分析爆管的可监测性;
- ④ 分析和总结关于测点的合理密布、合理采样等问题。

选择试验片区中心和边缘不同点位, DN300~DN600 不同管径,安排“快开”和“慢开”2 种消防栓开阀模式进行“模拟爆管”放水。其中,快开阀约在 5~10 s 完成,慢开阀约 1 min 完成。DXCB 试验片区测点平均间距为 462.4 m,JB 试验片区测点平均间距为 303.5 m。

具体模拟爆管试验安排见表 2。

表 2 模拟爆管试验

Tab. 2 Simulation experiments of pipe burst

项 目	模拟爆管点	开阀模式	启闭时间	所在主管道
DXCB 试验片区	爆管点 1:经四支路 169 号	快开	5 月 12 日 19:11—19:16	DN200, 智能消防栓
		慢开	5 月 12 日 19:21—19:26	
	爆管点 2:围垦街 34 号	快开	5 月 12 日 19:54—19:59	DN300, 智能消防栓
		慢开	5 月 12 日 20:03—20:08	
	爆管点 3:天津北路 509 号	快开	5 月 12 日 20:22—20:27	DN800, 智能消防栓
		慢开	5 月 12 日 20:31—20:36	
	爆管点 4:围垦街 6 号	快开	5 月 12 日 20:40—20:45	DN800, 智能消防栓
		慢开	5 月 12 日 20:49—20:54	
JB 试验片区	爆管点 1:新塘路与彭文巷交口	快开	8 月 24 日 19:17—19:22	DN500, 普通消防栓
		慢开	8 月 24 日 19:25—19:30	
	爆管点 2:新塘路与园兴路交口	快开	8 月 24 日 19:38—19:43	DN500, 智能消防栓
		慢开	8 月 24 日 19:46—19:51	
	爆管点 3:新塘路与老红普路交口	快开	8 月 24 日 19:59—20:05	DN500, 智能消防栓
		慢开	8 月 24 日 20:08—20:14	
	爆管点 4:新塘路与红普路交口	快开	8 月 24 日 20:19—20:24	DN500, 普通消防栓
		慢开	8 月 24 日 20:27—20:32	

3 结果与分析

3.1 正常工况压力

对两次试验数据进行统计,日常工况存在压力瞬变(波动),见表 3。DXCB 试验片区一周的压力均值为 267.0 kPa,平均标准差为 12.27 kPa;JB 试验片区的一周压力均值为 270.9 kPa,平均标准差为 13.49 kPa。设压力变化值为前后实测值之差,总体服从  $N(0,\sigma)$  的正态分布,DXCB 片区和 JB 片区压力变化值的平均标准差  $\sigma$  分别为 6.10 kPa 和 5.48 kPa。压力波动若在 3 倍标准差  $\sigma$  外,一般认为是异常波动。对于爆管异常,表现为压力突降 3 倍标



准差以上。本试验以 3 倍试验片区平均标准差作为区分背景噪声的压力变化阈值,DXCB、JB 的压力变化阈值分别为 18.3 和 16.5 kPa。

表 3 测点 1 周的压力平均值、标准差和压力变化值标准差

Tab. 3 Pressure average/standard deviation and pressure change standard deviation of measuring points in one week

kPa

DXCB 试验片区 (5 月 11 日—18 日)				JB 试验片区 (8 月 23 日—29 日)			
测点	均值	标准差	压力变化 值标准差 ( $\sigma$ )	测点	均值	标准差	压力变化 值标准差 ( $\sigma$ )
1 <sup>#</sup>	265.2	15.31	7.10	01 <sup>#</sup>	276.9	13.35	5.76
2 <sup>#</sup>	268.9	13.74	6.34	02 <sup>#</sup>	283.5	13.46	6.55
3 <sup>#</sup>	266.4	13.47	7.29	03 <sup>#</sup>	283.1	13.69	6.09
4 <sup>#</sup>	268.5	12.06	7.12	04 <sup>#</sup>	272.2	14.05	5.64
5 <sup>#</sup>	268.3	12.47	7.52	05 <sup>#</sup>	271.3	14.25	5.55
6 <sup>#</sup>	269.8	11.11	4.95	06 <sup>#</sup>	260.2	13.43	4.99
7 <sup>#</sup>	265.2	10.11	5.76	08 <sup>#</sup>	265.1	13.27	5.30
9 <sup>#</sup>	267.6	10.96	6.14	09 <sup>#</sup>	267.3	13.11	4.80
10 <sup>#</sup>	267.0	11.97	5.16	10 <sup>#</sup>	268.6	13.34	4.35
11 <sup>#</sup>	266.8	11.25	5.33	11 <sup>#</sup>	260.4	12.93	5.79
12 <sup>#</sup>	264.8	11.33	5.56	注: DXCB 试验片区的测点 8 <sup>#</sup> 和 JB 试验片区的测点 07 <sup>#</sup> 未正常工作,被剔除。			
13 <sup>#</sup>	268.9	14.90	7.89				
14 <sup>#</sup>	264.8	11.59	5.72				
15 <sup>#</sup>	269.2	12.23	5.34				
16 <sup>#</sup>	262.8	11.48	4.23				

JB 试验片区主要为居民用水,其测点每天压力均线有周期性规律,与生活作息和泵站供水调度相关,图 2 为 JB 试验区测点 02<sup>#</sup>、08<sup>#</sup>及附近 JB 泵站的压力曲线。

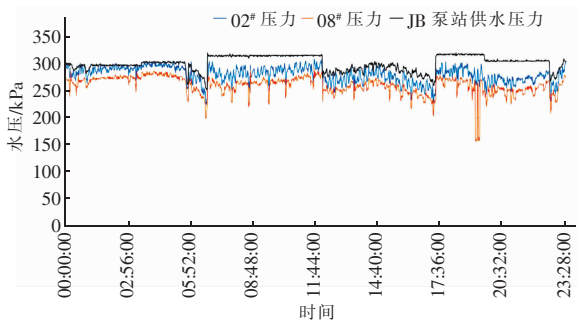


图 2 测点 02<sup>#</sup>、08<sup>#</sup>及附近 JB 泵站的压力曲线  
(2020 年 8 月 24 日)

Fig. 2 Pressure curves of measuring points 02<sup>#</sup>, 08<sup>#</sup> and nearby JB pumping station on August 24, 2020

在用水早高峰和降压供水期间,出现较大波动,

其余时间水压较为稳定。黑色线为附近 JB 泵站供水压力曲线,与 02<sup>#</sup>、08<sup>#</sup>测点水压具有强相关性(相关系数为 0.62)。而 DXCB 试验片区主要为工业用水,每天压力均线基本稳定,但波动较大。

### 3.2 模拟爆管对邻近监测点的影响

#### 3.2.1 智能消防栓放水时的压力波形

两次试验中,共有 6 个智能消防栓模拟爆管放水,图 3 为 JB 试验区测点 08<sup>#</sup>的压力曲线。智能消防栓放水时,失压非常明显,压降 > 100 kPa,用于监测消防栓盗水是显而易见的。

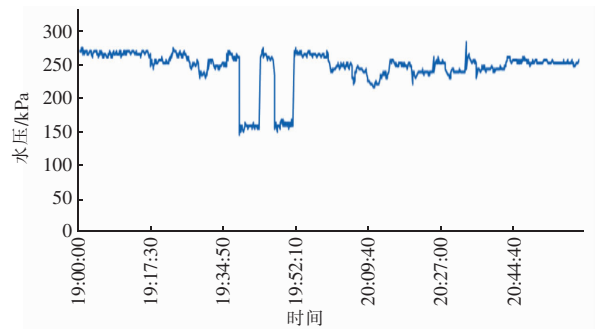


图 3 测点 08<sup>#</sup>的压力曲线(2020 年 8 月 24 日,19:00—21:00)

Fig. 3 Pressure curve of measuring point 08<sup>#</sup> from 19:00 to 21:00 on August 24, 2020

#### 3.2.2 各次模拟爆管试验的邻近测点反应

供水管道发生爆管时,首先在爆漏点引起局部压力突降,紧接着以波的形式向管道上下游传播,形成负压波。压力波传播过程中,能量消耗会衰减,衰减中的压力波仍大于背景噪声时,就有可能被邻近测点所捕获。

两次试验中,各次模拟爆管试验的邻近测点反应见表 4。由表 4 可以看出,距离模拟爆管点较近的测点均有超过阈值的压力突降,可用来侦测爆管。距离对压力波传播的影响:一般当管道距离 < 500 m 时,均有反应;当管道距离 > 500 m 时,偶有测点有反应。至于有反应的测点,其压降幅值有高有低,尚不能按距离远近排列。经分析,10 ~ 15 s 采样周期的信号采集方式不能有效地捕捉失压过程的最大压降(详见 3.3 节)。开阀速度对压力波的影响:快开阀模式对管道水流的影响大,负压波明显,瞬态压降大,影响到的邻近测点多;慢开阀模式,瞬态压降减弱,甚至接近稳态压降,DXCB 试验片区中由于模拟爆管点所在的主管道管径大,失压信号略小且混杂在背景噪音中,4 次试验有 3 次未能检出。

表 4 两个试验片区邻近测点反应

Tab.4 Reaction of adjacent measuring points in two experimental areas

项 目	模拟爆管试验		本地测点反应	邻近测点反应	
DXCB 试验 片区	爆管点 1	19:11—19:16 快开	(5 <sup>#</sup> , -215.1)	(3 <sup>#</sup> , -29.3)(4 <sup>#</sup> , -19.7)(7 <sup>#</sup> , -18.7)	
		19:21—19:26 慢开	(5 <sup>#</sup> , -92.5)	(3 <sup>#</sup> , -23.0)(4 <sup>#</sup> , -18.7)	
	爆管点 2	19:54—19:59 快开	(13 <sup>#</sup> , -226.0)	(11 <sup>#</sup> , -22.1)(9 <sup>#</sup> , -19.2)	
		20:03—20:08 慢开	(13 <sup>#</sup> , -140.0)	—	
	爆管点 3	20:22—20:27 快开	(12 <sup>#</sup> , -97.9)	(10 <sup>#</sup> , -24.1)(15 <sup>#</sup> , -20.8)(16 <sup>#</sup> , -19.8)	
		20:31—20:36 慢开	(12 <sup>#</sup> , -90.7)	—	
	爆管点 4	20:40—20:45 快开	(6 <sup>#</sup> , -232.2)	(11 <sup>#</sup> , -19.4)(16 <sup>#</sup> , -27.7)(10 <sup>#</sup> , -26.1)(12 <sup>#</sup> , -21.6)	
		20:49—20:54 慢开	(6 <sup>#</sup> , -186.2)	—	
JB 试验 片区	爆管点 1	19:17—19:22 快开	— (普通消防栓)	(01 <sup>#</sup> , -21)(02 <sup>#</sup> , -30)(03 <sup>#</sup> , -34)(04 <sup>#</sup> , -30)(05 <sup>#</sup> , -21) (06 <sup>#</sup> , -23)(08 <sup>#</sup> , -26)(09 <sup>#</sup> , -39)(10 <sup>#</sup> , -19)	
		19:25—19:30 慢开	— (普通消防栓)	(01 <sup>#</sup> , -18)(02 <sup>#</sup> , -25)(03 <sup>#</sup> , -29)(04 <sup>#</sup> , -28)(05 <sup>#</sup> , -22) (06 <sup>#</sup> , -16)(08 <sup>#</sup> , -22)(09 <sup>#</sup> , -22)(10 <sup>#</sup> , -19)	
	爆管点 2	19:38—19:43 快开	(08 <sup>#</sup> , -110)	(02 <sup>#</sup> , -31)(03 <sup>#</sup> , -35)(04 <sup>#</sup> , -27)(05 <sup>#</sup> , -25)(06 <sup>#</sup> , -28) (09 <sup>#</sup> , -42)(10 <sup>#</sup> , -27)	
		19:46—19:51 慢开	(08 <sup>#</sup> , -100)	(02 <sup>#</sup> , -20)(03 <sup>#</sup> , -32)(04 <sup>#</sup> , -23)(05 <sup>#</sup> , -20)(06 <sup>#</sup> , -17) (09 <sup>#</sup> , -22)(10 <sup>#</sup> , -19)	
	爆管点 3	19:59—20:05 快开	(06 <sup>#</sup> , -115)	(01 <sup>#</sup> , -25)(02 <sup>#</sup> , -32)(03 <sup>#</sup> , -37)(04 <sup>#</sup> , -32) (05 <sup>#</sup> , -24)(08 <sup>#</sup> , -29)(09 <sup>#</sup> , -34)(10 <sup>#</sup> , -25)	
		20:08—20:14 慢开	(06 <sup>#</sup> , -98)	(01 <sup>#</sup> , -22)(02 <sup>#</sup> , -29)(03 <sup>#</sup> , -27)(04 <sup>#</sup> , -28) (05 <sup>#</sup> , -27)(08 <sup>#</sup> , -26)(09 <sup>#</sup> , -30)(10 <sup>#</sup> , -26)	
	爆管点 4	20:19—20:24 快开	— (普通消防栓)	(01 <sup>#</sup> , -18)(02 <sup>#</sup> , -26)(03 <sup>#</sup> , -34)(04 <sup>#</sup> , -22)(05 <sup>#</sup> , -22) (08 <sup>#</sup> , -28)(09 <sup>#</sup> , -32)(10 <sup>#</sup> , -19)	
		20:27—20:32 慢开	— (普通消防栓)	(01 <sup>#</sup> , -19)(02 <sup>#</sup> , -22)(03 <sup>#</sup> , -21)(04 <sup>#</sup> , -24)(05 <sup>#</sup> , -30) (08 <sup>#</sup> , -20)(09 <sup>#</sup> , -20)(10 <sup>#</sup> , -18)	
	注: 数据项(A,B)中,A 表示测点号;B 表示超过阈值的压降,kPa。				

图 4 为 JB 试验片区爆管点 2 试验期间各测点压力的变化曲线,各测点不仅都有失压反应,而且基本可以反映压降幅度与管道距离相关。

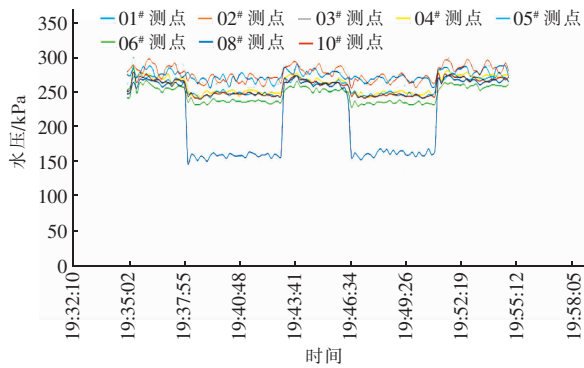


图 4 爆管点 2 各压力监测点的反应

Fig.4 Reaction of pressure monitoring points of pipe burst point 2

3.3 10 Hz 测点压力信号

供水管网水力状态在宏观上具有稳态特性,在

微观上表现出瞬态特性。用水量变化、泵机调压/切换、阀门启闭、爆管等,频繁引发管网中的瞬变流,通过瞬变流的传播、逐渐衰减达到新的稳态。与设计预期相符,JB 试验片区 09<sup>#</sup>测点 10 Hz 压力曲线已能真实捕捉到瞬态信号,如图 5 所示。由图 5(a)可以看出,在快速开阀条件下,爆管 13 s 内水压历经低谷到波峰,经过 3~4 次震荡,很快进入新的稳态。经分析,瞬态最大失压为 38.7 kPa,而稳态最大失压仅为 18 kPa。如果按照 10 s 或 15 s 间隔采样,很难碰巧采集到瞬态最大失压,能采集到震荡过渡期的最大压差,一般在 22~26 kPa,比稳态最大压差略大。从图 5(b)可以看出,在慢速开阀条件下,爆管 29 s 内水压历经低谷到波峰,经过 2~3 次震荡,同样很快进入新的稳态。瞬态最大失压为 22 kPa,而稳态最大失压为 18 kPa,差距已较小。比较两种开阀模式:①快速开阀模式引起更大的瞬态压降和更长的震荡过渡期,在合理的采样频率(譬如 1 Hz 以

上)下更易被侦测;②两种开阀模式的稳态压降均为 18 kPa,略大于 JB 试验片区压力变化阈值 16.5 kPa,在 0.1 Hz 采样频率下尚能被侦测。

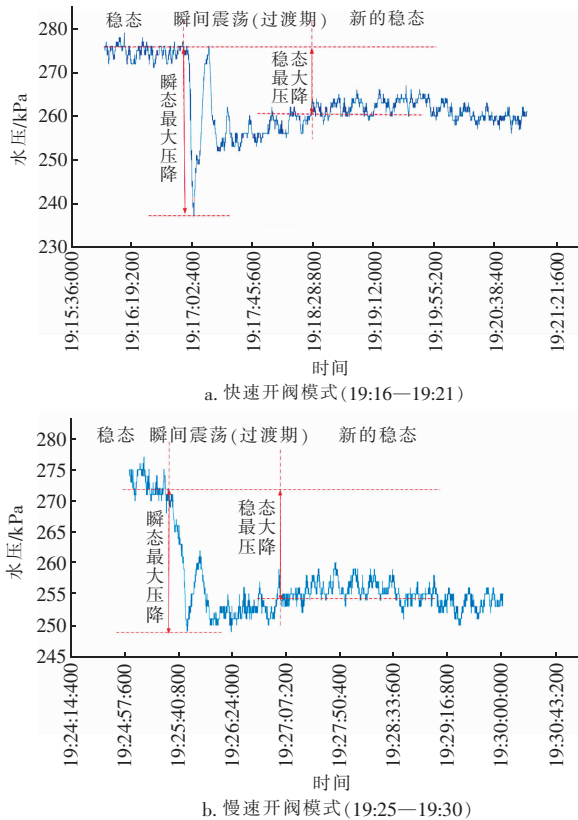


图 5 JB 试验片区 10 Hz 测点爆管试验 1

Fig. 5 10 Hz monitoring point in JB experimental area experiment 1

#### 4 水力模型辅助分析

由爆管泄漏引起的压力突降值  $\Delta P$  可以按照式 (1) 估算。

$$\Delta P = \rho \times u \times (v_L - v_0) / 2g \quad (1)$$

式中:  $\Delta P$  为爆管引起的压力突降值, Pa;  $\rho$  为流体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $u$  为负压波在管道内的传播速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $v_L$  为爆管时管道流速,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $v_0$  为爆管前初始流速,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $g$  为重力加速度,  $\text{m}/\text{s}^2$ 。

此压力突降以压力波的形式向管道上下游传播。为了分析监测点合理密布、合理采样问题,对两个试验片区分别进行了稳态水力模型和瞬态水力模型分析。稳态模型采用 EPANET 软件<sup>[4]</sup>,模拟时长为 10 min,步长为 1 min。瞬态模型可以自行建立并通过特征线方程及数值处理进行求解<sup>[5-6]</sup>。这里借助工具软件<sup>[7]</sup>,模拟时长为 300 s,步长为 1 s。消防栓快速开阀放水,开阀时间  $< 10$  s,流量设为 45 L/s

( $2.7 \text{ m}^3/\text{min}$ )。部分结果如图 6 和表 5 所示。

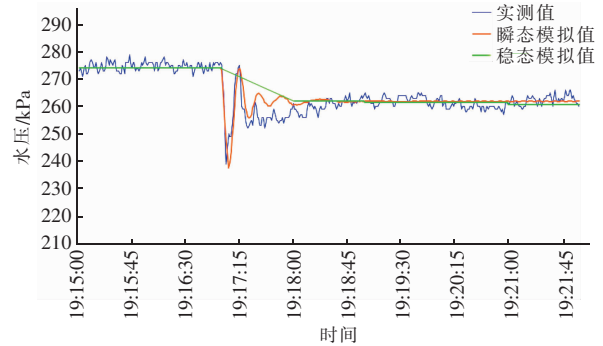


图 6 JB 试验片区爆管试验 1 中 09# 测点模拟压力曲线

Fig. 6 Simulation pressure curves of monitoring point 09# in experiment 1 of JB experimental area

表 5 基于水力模型的爆管压力波分析

Tab. 5 Pipe burst pressure wave analysis based on hydraulic model

项 目	邻近测点及距离	瞬态最大压降/kPa	稳态压降/kPa
DXCB 试验片区爆管点 2	11#, 230 m	35.7	5.8 <sup>a</sup>
	9#, 270 m	34.0	4.7 <sup>a</sup>
	2#, 550 m	31.0	5.1 <sup>a</sup>
	1#, 600 m	28.2	4.3 <sup>a</sup>
	15#, 800 m	7.1 <sup>a</sup>	2.4 <sup>a</sup>
	3#, 980 m	16.2 <sup>a</sup>	3.7 <sup>a</sup>
JB 试验片区爆管点 2	03#, 270 m	25.8	13.9 <sup>a</sup>
	10#, 300 m	27.2	16.2 <sup>a</sup>
	09#, 450 m	26.8	15.6 <sup>a</sup>
	06#, 500 m	25.1	16.0 <sup>a</sup>
	02#, 500 m	26.4	12.4 <sup>a</sup>
	04#, 650 m	26.7	14.9 <sup>a</sup>
	01#, 850 m	16.5	9.2 <sup>a</sup>
	05#, 900 m	24.9	15.3 <sup>a</sup>

注: <sup>a</sup> 表示小于试验片区的压力变化阈值。

从图 6 可以看出,由于水力模型的边界条件:未装智能大表节点的需水量、摩阻、管道波速等方面在初步校验后做了简化假设,因此模拟结果与实际有些许出入,但基本趋势是吻合的,可以用于压降幅度分析。

由表 5 可以看出,“爆管”压力波在传播中逐渐衰减,而最终的稳态压降明显较小。如采用  $> 1$  Hz 的采样频率,可以测到瞬态压降,测点间距可以在 500 ~ 1 000 m 范围;如采用 0.1 Hz 的采样频率,能测到过渡期压降,测点间距需在 250 ~ 500 m 范围。如采用 5 ~ 15 min 间隔采样,则仅能测到稳态压降,大大降低了对 DN300 ~ DN600 管径的爆管侦测能

力。表 5 中,压降幅度并非一味按距离递减,是由于不同管径、上下游位置及流速等因素造成的,在爆管精准定位方面需要给予考虑。

5 可监测性分析

鉴于压力瞬变是由于正常的用水量变化、泵机调压/切换和异常的爆管等造成的,为此,采集了试验当天两个试验片区大用户的智能大表进水数据和

附近供水泵站的压力数据,统计了各测点压力突降事件及甄别情况,见表 6 和表 7。由表 6 和表 7 可知,两个试验片区压力突降事件的平均准确识别率高于 80%,误报主要原因在于片区内某些单位未安装智能大表。随着智能大表的普及,采用结合附近泵站供水压力计、大用户流量计的局域联动判别方法可以确保爆管侦测的准确性。

表 6 DXCB 试验片区压力突降事件及甄别

Tab. 6 Pressure drop events and identification in DXCB experimental area

测点	压力突降次数	准确识别次数	误报次数	漏报次数	准确识别率%	误报原因
1 <sup>#</sup>	51	44	7	0	86.3	附近有 XRJX 公司未装智能大表
2 <sup>#</sup>	31	27	4	0	87.1	附近有 JSWC 公司未装智能大表
3 <sup>#</sup>	56	45	11	0	80.4	附近有 DYSP 公司未装智能大表
4 <sup>#</sup>	5	5	0	0	100.0	附近有 SRDZ 公司未装智能大表
5 <sup>#</sup>	34	27	7	0	79.4	附近有 RCBZ 公司未装智能大表
6 <sup>#</sup>	5	4	1	0	80.0	附近有 SRDZ 公司未装智能大表
7 <sup>#</sup>	21	17	4	0	81.0	附近有 XRJX 公司未装智能大表
9 <sup>#</sup>	5	5	0	1	83.3	附近有 WHH 公司未装智能大表
10 <sup>#</sup>	14	13	1	1	86.7	附近有 PLS 公司未装智能大表
11 <sup>#</sup>	37	32	5	2	82.1	附近有 HZDL 公司未装智能大表
12 <sup>#</sup>	18	13	5	0	72.2	附近有 PLS 公司未装智能大表
13 <sup>#</sup>	66	50	16	0	75.8	附近有 STB 公司未装智能大表
14 <sup>#</sup>	12	10	2	0	83.3	附近有 XRJX 公司未装智能大表
15 <sup>#</sup>	18	14	4	0	77.8	附近有 PLS 公司未装智能大表
16 <sup>#</sup>	6	6	0	2	75.0	附近有 HZDL 公司未装智能大表

注: 5 月 12 日试验当日未发生实际爆管,有 3 次“慢开阀”模拟爆管未被邻近测点检出,存在漏报。

表 7 JB 试验片区压力突降事件及甄别

Tab. 7 Pressure drop events and identification in JB experimental area

测点	压力突降次数	准确识别次数	误报次数	准确识别率%	误报原因
01 <sup>#</sup>	16	15	1	93.8	附近有 ZDSJ 公司未装智能大表
02 <sup>#</sup>	31	25	6	80.6	附近有 ZDSJ 公司未装智能大表
03 <sup>#</sup>	27	23	4	85.2	附近有 HZDT 公司未装智能大表
04 <sup>#</sup>	20	18	2	90.0	附近有 HZDT 公司未装智能大表
05 <sup>#</sup>	17	15	2	88.2	附近有 HZDT 公司未装智能大表
06 <sup>#</sup>	21	17	4	81.0	附近有 HZSY 公司未装智能大表
08 <sup>#</sup>	23	21	2	91.3	附近有 HZSY 公司未装智能大表
09 <sup>#</sup>	14	13	1	92.9	附近有 DTZY 公司未装智能大表
10 <sup>#</sup>	20	19	1	95.0	附近有 DTZY 公司未装智能大表

注: 8 月 24 日试验当日未发生实际爆管,且 8 次模拟爆管均能检出,故不存在漏报。

6 结论

① 日常工况存在压力瞬变信号,平衡时体现为噪声波动,失衡时表现为突升突降和震荡过渡。居民用水片区,每天压力均线有明显规律,与生活作息和泵站供水调度相关。而工业用水片区,每天压力均线没有明显变化,但背景噪声略大。

② 爆管导致的压力瞬变信号虽有幅值,但衰减较快。试验中,快速开阀下模拟爆管的首个瞬态压降过程为 10~20 s,其降幅明显比稳态压降大。

③ 根据本监测试验数据和水力模型辅助分析,“消防栓快速开阀”爆管压力波约可传播 500~1 000 m,再远将会混杂于背景噪声中。如采用 1 Hz



的采样频率,能够测到瞬态压降,测点间距可以在500~1 000 m范围;如采用0.1 Hz的采样频率,能测到过渡期压降,测点间距需在250~500 m范围。合理密布、合理采样是监测到爆管失压信号的首要条件。

④ 与较大爆管不同,市政管网较小爆管对泵站流量的影响甚小。对DN300~DN600管道的爆管侦测,受附近泵站供水压力及大用户用水影响较大。因此,结合泵站供水压力计、大用户流量计的局域联动判别,能够极大地减少误报,提高爆管侦测的准确性。

#### 参考文献:

- [1] 许刚,陈冬雷,吴卓祯,等. 大规模供水管网爆管实时报警技术研究[J]. 中国给水排水,2014,30(21):58-60.  
XU Gang, CHEN Donglei, WU Zhuozhen, *et al.* Real-time warning technology for pipe bursts in large-scale water distribution system [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(21): 58-60 (in Chinese).
- [2] 顾向荣. 供水管网爆管监测方法的探索[J]. 城镇供水, 2020(2): 42-45, 93.  
GU Xiangrong. Discussion on pipe burst monitoring method in water supply network [J]. Journal of China Urban Water Association, 2020 (2): 42-45, 93 (in Chinese).
- [3] 赵丹丹,程伟平,许刚,等. 供水管网系统爆管可监控最小管径分析方法研究[J]. 中国给水排水,2014,30(23):117-122.  
ZHAO Dandan, CHENG Weiping, XU Gang, *et al.* Study on minimum detectable pipe diameter for pipe burst in water distribution system [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(23): 117-122 (in Chinese).
- [4] QI Z X, ZHENG F F, GUO D L, *et al.* Better understanding of the capacity of pressure sensor systems to detect pipe burst within water distribution networks [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2018, 144(7): 04018035. 1-04018035. 11.
- [5] 伍悦滨,曲世琳,刘天顺. 给水管网系统中的水力瞬态工况模拟[J]. 北京科技大学学报, 2006, 28(5): 422-426.  
WU Yuebin, QU Shilin, LIU Tianshun. Simulation of water distribution systems in hydraulic transient conditions [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2006, 28(5): 422-426 (in Chinese).
- [6] NAULT J D, KARNEY B W. Improved rigid water column formulation for simulating slow transients and controlled operations [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 142(9): 04016025.
- [7] EBACHER G, BESNER M C, LAVOIE J, *et al.* Transient modeling of a full-scale distribution system: comparison with field data [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2011, 137(2): 173-182.

作者简介:王海涛(1983-),男,浙江台州人,大学本科,高级工程师,主要研究方向为城市供水管网监控。

E-mail: 26607038@qq.com

收稿日期: 2020-10-08

修回日期: 2020-11-12

(编辑:任莹莹)

强化水资源监管,

落实最严格水资源管理制度