

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.17.007

给水管道外包式管件设计及修复实验

徐剑乔¹, 袁一星², 吴晨光²

(1. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063; 2. 哈尔滨工业大学 环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘 要: 针对管道薄弱位置,提出主动修复的概念,并设计了用于管道薄弱位置修复的外包式管件。通过在管件腔体内部填充吸水膨胀橡胶和安装应变片,可实现外包式管件的漏失自修复与漏失监测两大功能。为了验证外包式管件的实际应用效果,采用碳钢制作了应用于管道法兰接口的外包式管件,并进行了“动态通水”实验。实验中,将应变传感器粘贴在硫化型膨胀橡胶表面,在漏失发生 0.5 h 内就可以监测到明显的漏失信号,在漏失发生的 72 h,填充在管件腔体内的吸水膨胀橡胶可以将漏失率降低 90% 以上。外包式管件在漏失监测与自修复两方面均表现出优越的性能。

关键词: 给水管道; 漏失监测; 管道补强; 主动修复

中图分类号: TU991.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)17-0044-06

Design of Outsourcing Pipe Fittings and Repair Test for Water Supply Pipeline

XU Jian-qiao¹, YUAN Yi-xing², WU Chen-guang²

(1. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co. Ltd., Wuhan 430063, China; 2. School of Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: The concept of active repair was proposed for repair of the weak position of the pipeline, and an outsourcing pipe fitting for reinforcement of the weak positions was designed. The two functions of self-repair and leakage monitoring were achieved by filling the pipe fitting with absorbent rubber and strain gauge. To verify the practical effect of the outsourcing pipe fittings, carbon steel pipe fittings for pipe flanged joints were fabricated, and the “dynamic water” experiment was carried out. During the test, the strain sensors were affixed to the surface of the vulcanized expansion rubber. The obvious leakage signal could be detected within half an hour, and the expansion rubber filled in the pipe fitting cavity could reduce the leakage rate by more than 90% within 72 hours of the leakage, indicating that the outsourcing pipe fittings had superior performance in both leakage monitoring and self-repair.

Key words: water supply pipeline; leakage monitoring; pipeline reinforcement; active repair

从 1875 年上海建立杨树浦水厂至今,我国给水行业的发展已有上百年的历史^[1]。20 世纪我国大量使用安全性能较差的灰口铸铁管^[2],且许多给水管道的的设计使用寿命只有 20 年,目前已有较多管道处于超期服役状态。在这些管道中,漏失现象极为普遍^[3-4]。根据城镇供水协会的相关调查,近几年

我国主要城市供水管网平均漏失率约为 18%^[5],因城市供水管网漏失导致的年损失水量超过 $60 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[6]。供水系统的漏失不但会造成严重的经济损失,也会对周围环境产生消极影响^[7],因此,在基本完成了净水厂及给水管网的建设后,输配水管网的漏失控制将是供水行业未来重点解决的问题^[8]。

给水管道漏失事故主要集中在管道与管道或管道与阀门的接头位置^[9-11]。对于埋地管道,追求零漏失率需要极大的成本,而且在现有技术和经济水平下难以做到。因此,在输配水管道的漏失控制方面,现阶段应着重研究管道接口等局部薄弱位置,如果可以对这些易漏点实现有效的漏失监测及快速修复,那么整个输配水管网的漏失率将明显降低。

1 外包式管件设计

1.1 外包式管件主体结构设计

外包式管件的主要作用是对管道薄弱位置进行保护,对漏失进行监测以及实现临时性自修复,使用时将其预先安装在给水管道的薄弱位置。外包式管件在结构上应满足以下条件:①管件必须具有一定的强度,包括管件材料本身的强度、耳板与管件连接处的强度以及耳板连接螺栓的强度。②管件应具有一定的刚度,以防止在压力较大时管件发生大的变形。③管件应有较好的密封性。④管件与管道之间应具有良好的吻合性。

结合以上4点分析,外包式管件主体部分采用碳钢材质,由两个对称的半套筒结构组成(见图1),通过耳板和螺栓夹装在管道薄弱位置。

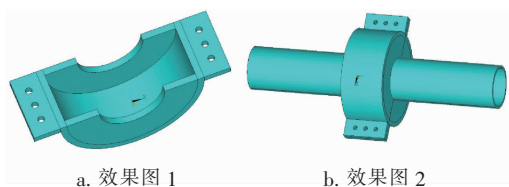


图1 外包式管件

Fig. 1 Schematics of outsourcing pipe fitting

管件与管道外壁接触位置插入2~3 mm厚的硅胶垫,管件安装后能将硅胶垫夹紧,一方面可以增加管件与管道外壁摩擦力,减弱法兰接口螺栓的蠕变效应以及腐蚀位置的轴向拉力,另一方面,即使薄弱部位发生漏失,外包式管件也可以起到止水堵漏的效果。外包式管件各部位尺寸如下:管件内径为61 mm,管件外径为80(穿孔)、105(法兰) mm,管件壁厚为3 mm,耳板宽度为25 mm、长度为82 mm,管件高度为25 mm,螺孔直径为6 mm,螺孔数为6,螺栓直径为6 mm,硅胶垫厚度为3 mm。

1.2 吸水膨胀材料比选

外包式管件的堵漏效果主要依靠填充在其腔体内部的吸水膨胀材料实现。在常用的吸水材料中,聚丙烯酸盐(俗称水凝胶)具有很高的膨胀率(在蒸

馏水中膨胀率超过1 000倍),且膨胀时间短(几十分钟即可吸水膨胀数百倍),但是聚丙烯酸盐吸水后呈胶体状,硬度较低,显然无法直接用于漏点修复。关于增加聚丙烯酸盐吸水后强度的方法,目前已有较多的研究,一种较为简单的方法是通过聚丙烯酸盐与橡胶进行物理共混来制备吸水膨胀橡胶。市面上常见的吸水膨胀橡胶有硫化型(制品型)和非硫化型(腻子型)两种。下面通过实验对两种橡胶进行对比分析。

1.2.1 吸水速率对比

关于膨胀橡胶吸水速率的测定方法,目前没有统一标准,通常通过称量同一粒橡胶在不同浸泡时间下的质量来计算。当测试频率较高且持续时间较长时,频繁取出并擦干橡胶会导致测试值与真实值存在较大偏差;并且,在给水管道的临时修复中,需要研究橡胶在数天内的实时吸水速率,比如一周内每小时橡胶的吸水速率。考虑到以上两点,结合本次实验的特点,采用如下测试方法:

将硫化型(制品型)膨胀橡胶切成0.22~0.25 g的长方体小块,对每个橡胶小块进行标记并记录初始质量,然后向12个100 mL容量的烧杯中(烧杯编号1#~12#)各放入50个橡胶小块。从上午09:00开始,每隔1 h向其中1个烧杯加入100 mL自来水,直到第13个烧杯加满水后,从每个烧杯中取出一个橡胶小块,用滤纸擦干表面水分后用电子天平称量,并计算橡胶的吸水膨胀率(SR)。

$$SR = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中: m_1 为橡胶初始质量,g; m_2 为橡胶吸水平衡时的质量,g。

此后每天上午09:00和晚上21:00按照同样的方法,从各烧杯中取一小块橡胶称量,直到橡胶质量不再变化,并取最后充分吸水的橡胶测定其最大静膨胀率(或者叫平衡膨胀率 SR_e)。

图2是5 d内橡胶膨胀率与浸泡时间的关系曲线。可以看出,硫化型膨胀橡胶的膨胀速率与时间近似呈线性关系,在浸泡24 h后橡胶膨胀率超过100%、48 h后膨胀率超过200%、120 h后膨胀率接近500%;非硫化型橡胶在浸泡前24 h膨胀速率较大,此后逐渐趋于稳定,120 h后膨胀率不到100%。从膨胀来看,使用硫化型膨胀橡胶进行堵漏具备一定的可行性。

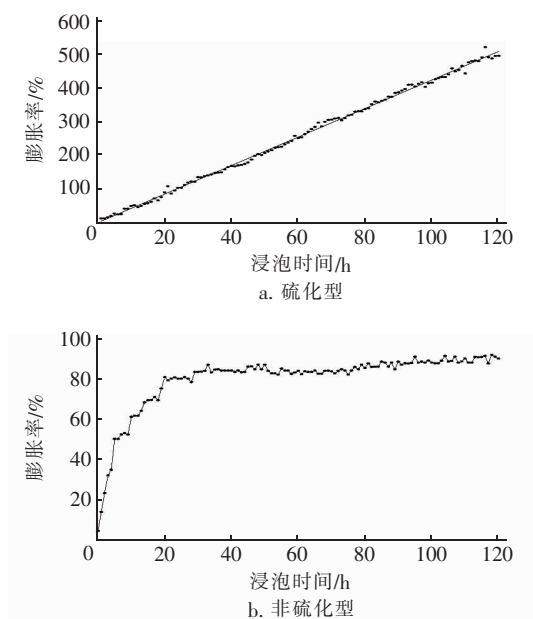


图2 橡胶膨胀率随时间的变化

Fig. 2 Change of rubber expansion rate with time

1.2.2 最大静膨胀率及膨胀效果持续时间

硫化型膨胀橡胶在浸泡16 d后质量趋于稳定,最大静膨胀率为1 130.77%,非硫化型橡胶在浸泡24 h后质量基本稳定,最大静膨胀率为191.67%。针对膨胀效果的持续时间,将达到最大静膨胀率的橡胶分成两组,第一组膨胀橡胶继续浸泡,第二组橡胶达到最大静膨胀率后取出置于空烧杯中,每隔3 d对两组橡胶进行称量。结果如图3所示。

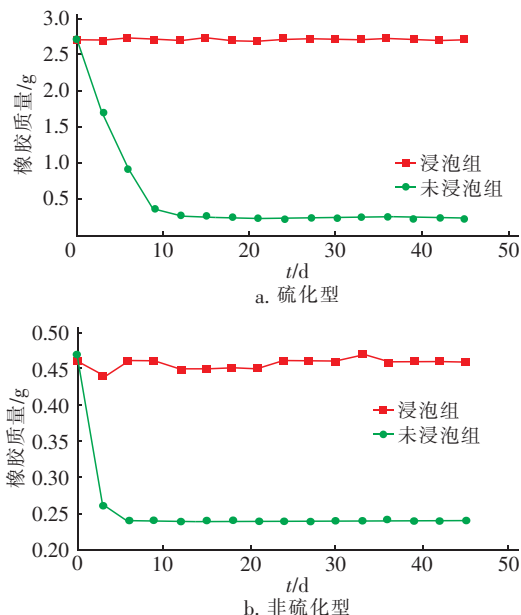


图3 膨胀效果持续时间对比

Fig. 3 Comparison of duration of expansion effect

由图3可知,在浸泡条件下,两种膨胀橡胶在达到最大静膨胀率后均能稳定在该水平,但当两种橡胶不与水接触时,都会出现体积收缩现象。其中,非硫化型膨胀橡胶在干燥条件下,在第3天其质量从达到最大膨胀率时的0.47 g降到0.26 g,质量损失了44.68%,基本回到吸水前的质量水平;硫化型膨胀橡胶3 d内质量从2.73 g降到1.69 g,质量损失了38.10%,在干燥后第18天恢复到初始质量。硫化型橡胶的膨胀稳定性略优于非硫化型橡胶。

综合两种类型膨胀橡胶各方面性能的对比,选择硫化型膨胀橡胶作为吸水膨胀材料。外包式管件填充长条状硫化型膨胀橡胶后效果如图4所示。

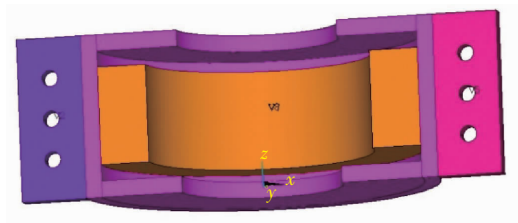


图4 填充膨胀橡胶后外包式管件

Fig. 4 Renderings of outsourcing pipe fitting filled with expanded rubber

1.2.3 硫化型吸水橡胶对水质影响分析

实验用硫化型膨胀橡胶由氯丁橡胶(CR322)与交联型聚丙烯酸钠(PAANa,吸水倍率>400倍)经物理共混后制得。氯丁橡胶是给水管道法兰垫片的常用材料,对管道中的水质无不良影响。聚丙烯酸钠是以丙烯酸、氢氧化钠为主要原料,经化学合成的功能性高分子化合物,无毒,可作增稠增筋剂、稳定剂、澄清剂等,在医药、日化和食品工业中有广泛用途。但在制备膨胀橡胶的过程中涉及硫化,一般使用氧化锌、硬脂酸和硫磺组成硫化体系,有必要检测硫化型膨胀橡胶浸泡液中的硫化物和锌离子浓度。

关于硫化型吸水橡胶用于给水管道路漏失修复的研究国内外鲜有报道,目前还没有关于硫化型吸水橡胶对管网水质影响的权威检测方法。考虑到管网发生漏失时膨胀橡胶完全浸泡在水中,因此采用简单的浸泡实验来测定膨胀橡胶析出物的浓度:取5 g硫化型膨胀橡胶,置于100 mL自来水中浸泡,取24 h和72 h的浸泡液进行检测。硫化物采用亚甲基蓝分光光度法检测,锌离子的检测参考《生活饮用水标准检验方法》(GB/T 5750.6—2006)中的相关检验方法。检测结果如下:24 h浸泡液中硫化物含量

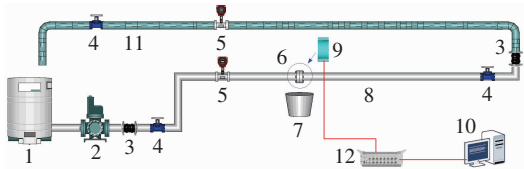
为 0.008 mg/L, 锌离子未检出;72 h 浸泡液中硫化物含量为 0.036 mg/L, 锌离子未检出。《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)对硫化物和锌离子的浓度限值分别是 0.02 mg/L 和 1.0 mg/L。

在实际管网中填充硫化型吸水橡胶的管件只是在部分管道薄弱点使用,相对于整个供水管网,其用量非常少,并且发生漏失时管道内的水喷溅而出,大部分硫化物会随之流出管道,可以认为,硫化型吸水膨胀橡胶对给水管道中水质无不良影响。

2 管道修复实验

2.1 实验装置及仪器

动态通水实验装置由水箱、离心泵、钢管、PVC 管和应变监测系统等组成,原理如图 5 所示,仪器及材料参数如表 1 所示。



1.钢制水箱 2.卧式离心泵 3.可曲挠橡胶接头 4.手动球阀
5.压力表 6.钢制法兰接头 7.玻璃水箱 8.钢管 9.钢制外包式管件
10.上位机 11.PVC 管道 12.动态信号分析仪

图 5 动态通水实验装置示意

Fig. 5 Diagram of dynamic test device

表 1 实验系统仪器及材料参数

Tab. 1 Equipment and material parameters of test system

项 目	参数
离心泵	$Q = 12 \text{ m}^3/\text{s}, H = 32 \text{ m}$
钢制水箱	$L \times B \times H = 1.5 \text{ m} \times 1.0 \text{ m} \times 1.6 \text{ m}$
玻璃水箱	$L \times B \times H = 0.5 \text{ m} \times 0.3 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$
钢管	内径 53 mm、壁厚 4 mm
PVC 管	内径 46 mm、壁厚 9 mm
压力表	0 ~ 0.6 MPa
手动闸阀	DN50、PN16
动态型号分析仪	定制
可曲挠橡胶接头	与钢管配套
导线	—

实验管道中的应变采集系统由电阻式应变片、应变调制器、电荷放大器、动态信号测试分析系统、上位机等部分构成。其中动态信号测试分析系统的型号是 TST5912,应变有效量程为 $-0.05 \sim 0.05$,但由于应变片的应变极限为 0.02,因此动态信号分析系统实际应变量程为 $-0.02 \sim 0.02$,采样频率为 10 000 Hz。

在水泵出水管位置以及管材变更位置设置两处可曲挠橡胶接头,以降低水泵振动对管道的影响。装置运行时,水泵扬程通过调节球阀的开度进行控制。图 5 中玻璃水箱底部接有排水软管,排水能力大于实验管道处的漏失水量。

2.2 漏失报警速率实验

2.2.1 应变片布设

在漏失发生时,膨胀橡胶由于吸水膨胀,表面产生较大的应变,橡胶表面较为湿润,需采取相应的绝缘措施以防止应变片短路。经过反复尝试,确定应变片的粘贴位置为位于管道正上方的膨胀橡胶背面(与外包式管件内壁接触处),如图 6 所示。

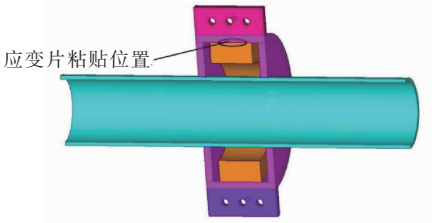


图 6 应变片粘贴位置示意

Fig. 6 Sticking position of strain gauge

应变片具体粘贴方法是:先在膨胀橡胶表面滴 2 ~ 3 滴 502 胶水,涂抹均匀,待胶水干后将应变片放置在其上方,用镊子固定住应变片,继续滴 2 ~ 3 滴胶水,使应变片上下表面完全被胶水包覆,最后在外层均匀涂抹玻璃胶。

2.2.2 法兰接口漏失预警实验

适当调松法兰底部预紧螺栓,将外包式管件夹装在管道的法兰接口处,应变片的引出线与动态信号分析系统相连,对应变初始值调零,在未开泵时测定应变片的应变值,如图 7 所示。在未开泵时,膨胀橡胶表面的应变值在 0 上下波动,主要是由于实验环境周围各种微小振动带来的干扰,属正常现象。

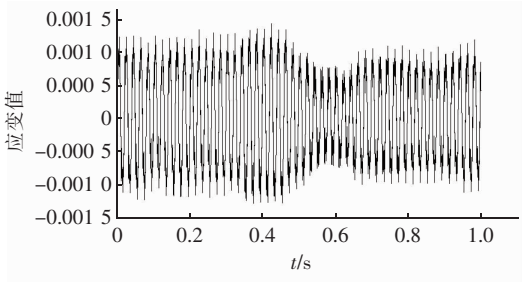


图 7 法兰接口处监测点初始应变值(未开泵)

Fig. 7 Initial strain value of monitoring point at flange joint (pump off)

实验时打开水泵,通过调节水泵出水口阀门开度来控制水泵扬程,使压力表读数稳定在 0.25 MPa,记录下此时动态信号分析仪监测到的应变值,记为 0 h,然后分别记录水泵运行 0.5、1、1.5 h 的应变值。不同时刻应变监测值如图 8 所示。

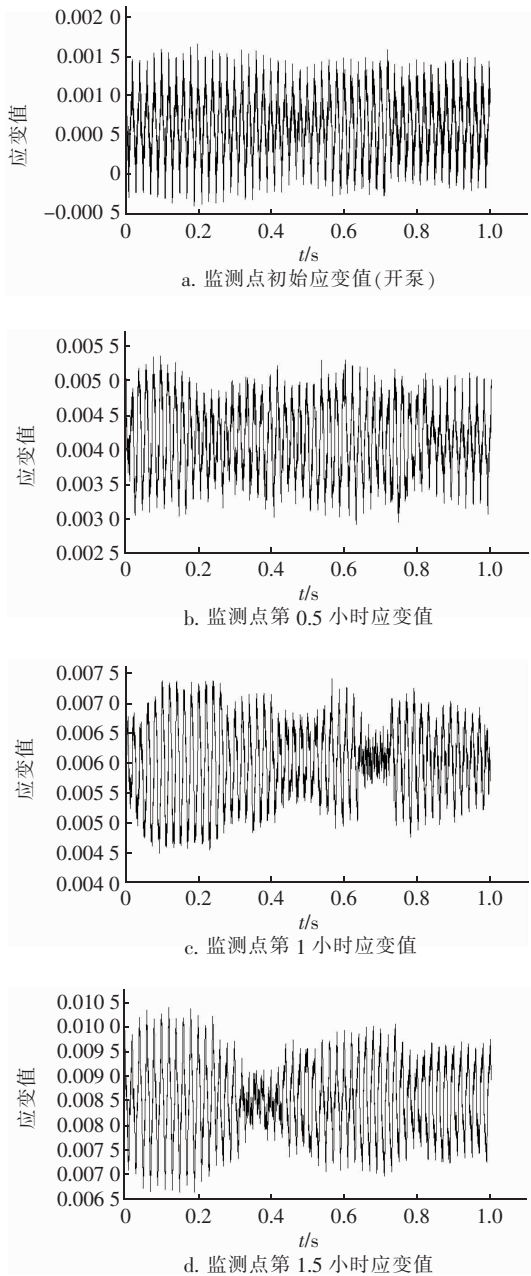


图 8 法兰接口处监测点不同时刻应变值

Fig. 8 Strain value of flange sticking position in different monitoring time

从图 8 可以看出,虽然应变监测值在均值附近的波动较大,但监测时采样频率足够大,且每次监测的应变均值也较大,因此各种干扰带来的波动对漏

失预警的可靠度无影响。粘贴在膨胀橡胶表面的应变片在漏失发生 0.5 h 时能监测到明显的应变值,并且应变值随漏失时间显著增大,在漏失发生 1.5 h 时应变值达到 0.008 6。在图 8(c)的第 0.6~0.8 秒、图 8(d)的第 0.3~0.5 秒,应变监测值的波形与其余时段的波形明显不同,产生这种现象的原因包括实验周边环境的突发性扰动或膨胀橡胶内部的非均匀膨胀等,不过与常规扰动一样,由于应变测量仪的采样频率较大(10 000 Hz),且吸水膨胀橡胶产生的应变值足够大,因此两个监测时间段内的局部突发性扰动对整体监测结果也无明显影响。

2.2.3 漏失修复能力实验

橡胶堵漏主要是依靠橡胶与管道外壁之间的膨胀压力,在外包式管件的腔体中,由于容积有限,膨胀橡胶的膨胀受到制约,会产生一定的膨胀压力,但其值目前尚无准确的测定方法,因此需要通过具体的漏失实验来验证吸水膨胀橡胶的实际堵漏效果。

图 9 是管道法兰接口位置在夹装外包式管件后泄漏流量随时间的变化。可以看出,在泄漏发生的前 36 h 泄漏流量随时间降低幅度较大,在漏失 36 h 时泄漏流量降低了 84.60%,此后泄漏流量逐渐趋于稳定。从暂时性修复效果来看,外包式管件虽然不能完全堵漏,但是在泄漏发生 72 h 后泄漏流量为 0.008 4 L/s,与泄漏初期相比减少了 90.05%。

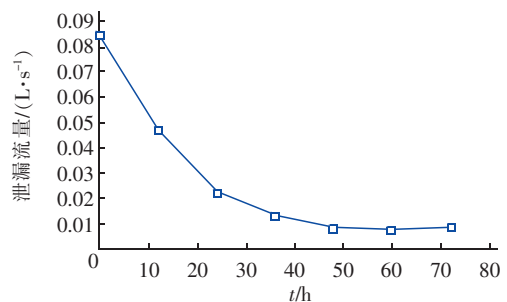


图 9 法兰接口处泄漏流量随时间的变化

Fig. 9 Change of leakage flow of flange interface with time

3 结论

① 在漏失初期,非硫化型橡胶吸水速率较硫化型橡胶大,但漏失 20 h 后硫化型橡胶在吸水速率及膨胀率方面均优于非硫化型橡胶,且硫化型橡胶膨胀效果更持久,更适合在给水管道的漏失修复中应用。

② 在橡胶与自来水质量比为 1:20 的条件下,浸泡 24 h 时,硫化型橡胶浸泡液中硫化物和锌

离子浓度均低于《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)的限值,实际管网中两者质量比更低,因此可以认为对管道中的水质无明显不良作用。

③ 动态通水实验中,在做好相应防水处理的情况下,粘贴在膨胀橡胶表面的应变片能在漏失发生0.5 h后就监测到明显漏失,且应变值与漏失时间呈正相关。在漏失修复效果方面,管件中的吸水橡胶可以通过自身膨胀实现对漏口的临时性修复,在漏失发生72 h时,泄漏量减少90%以上。

参考文献:

- [1] 顾振国. 上海市创立最早的杨树浦水厂[J]. 净水技术, 2003, 22(5): 20-22.
GU Zhenguo. The first constructed water plant—Yangshupu Water Plant [J]. Water Purification Technology, 2003, 22(5): 20-22 (in Chinese).
- [2] 耿天量. 供水铸铁管道破损原因及抢修应注意的问题[J]. 科技与创新, 2015(8): 97-98.
GENG Tianliang. Cast iron water pipe causes of damage and repair issues should be noted [J]. Science and Technology & Innovation, 2015 (8): 97-98 (in Chinese).
- [3] 代焕芳, 刘书明, 吴雪. 供水管网背景漏失指数研究[J]. 中国给水排水, 2019, 35(11): 59-62.
DAI Huanfang, LIU Shuming, WU Xue. Research on background leakage index for water distribution system [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(11): 59-62 (in Chinese).
- [4] 李伟. 谈市政给水管线更换流程[J]. 山西建筑, 2015(28): 129-130.
LI Wei. Discussion on the alteration procedures of urban water-supply pipeline [J]. Shanxi Architecture, 2015 (28): 129-130 (in Chinese).
- [5] 刘锁祥, 赵顺萍, 曹楠, 等. 供水管网漏损控制研究和实践[J]. 中国给水排水, 2015, 31(10): 22-25.
LIU Suoxiang, ZHAO Shunping, CAO Nan, et al. Research and practice of water loss control of water distribution network [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(10): 22-25 (in Chinese).
- [6] 刘阔, 刘锁祥, 赵顺萍, 等. 《城镇供水管网漏损控制及评定标准》CJJ 92—2016 解读[J]. 城镇供水, 2017(2): 21-24, 33.
LIU Kuo, LIU Suoxiang, ZHAO Shunping, et al. Unscramble of Standard for Water Loss Control and Assessment of Urban Water Distribution System CJJ 92-2016 [J]. Journal of China Urban Water Association, 2017(2): 21-24, 33 (in Chinese).
- [7] KISHAWY H A, GABBAR H A. Review of pipeline integrity management practices[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2010, 87(7): 373-380.
- [8] 陆韬, 刘燕, 李佳, 等. 我国供水管网漏损现状及控制措施研究[J]. 复旦学报(自然科学版), 2013, 52(6): 807-810, 816.
LU Tao, LIU Yan, LI Jia, et al. Leakage situation and control solution of China water supply pipeline [J]. Journal of Fudan University (Natural Science), 2013, 52(6): 807-810, 816 (in Chinese).
- [9] 马涛, 杨庆良. 哈尔滨市给水管道漏损事故调查研究[J]. 黑龙江水利科技, 2006, 34(3): 121-123.
MA Tao, YANG Qingliang. Investigation on leakage accident of water supply pipeline in Harbin [J]. Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy, 2006, 34(3): 121-123 (in Chinese).
- [10] 周献东, 姜玲玲, 高金良, 等. 基于水锤模拟的长输管道运行薄弱段分析[J]. 管道技术与设备, 2014(6): 11-14.
ZHOU Xiandong, JIANG Lingling, GAO Jinliang, et al. Based on the simulation of water hammer weak section analysis of long-distance pipeline operation [J]. Pipeline Technology and Equipment, 2014 (6): 11-14 (in Chinese).
- [11] OTEGUI J L. Challenges to the integrity of old pipelines buried in stable ground [J]. Engineering Failure Analysis, 2014, 42: 311-323.

作者简介:徐剑乔(1992—),男,浙江建德人,硕士,工程师,研究方向为城市水系统数字化与管网优化。

E-mail: 925455989@qq.com

收稿日期: 2020-12-21

修回日期: 2021-01-12

(编辑:任莹莹)