

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.01.006

输水管道水锤-泄漏耦合数值模拟及反射系数特性研究

周 领¹, 王鹤鸣¹, 徐 彬², 李赞杰¹, 潘天文³

(1. 河海大学水利水电学院; 2. 宁波市水务环境集团股份有限公司工程建设管理分公司;
3. 水资源工程与调度全国重点实验室)

摘要: 针对长距离供水工程输水管道泄漏识别与定位难题,设计搭建了水锤-泄漏试验系统,构建了考虑动态摩阻和黏弹性效应的水锤-泄漏耦合数学模型以实现瞬态压力精确模拟,提出了泄漏反射系数和透射系数解析模型用于探究二者的影响参数,并通过试验系统验证了模型的准确性。试验与模型模拟分析结果表明:泄漏位置与压降峰值发生时间呈正相关关系;泄漏孔数量增加,压降呈“阶梯”状递增且瞬态压力衰减速率加快;动态摩阻引发的水锤波能量耗散导致反射系数较无摩阻工况降低;黏弹性管道的实际波速小于理论计算值,使得反射系数的计算结果偏大。

关键词: 输水管道泄漏;瞬态流;水锤;动态摩阻;黏弹性管道;泄漏反射系数

Numerical simulation of water hammer and leak coupling in water pipelines and study on reflection coefficient characteristics

Zhou Ling¹, Wang Heming¹, Xu Bin², Li Yunjie¹, Pan Tianwen³

(1. College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University;
2. Engineering Construction Management Branch, Ningbo Water Environment Group Co., Ltd.;
3. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management)

Abstract: To address the challenge of leak detection and localization in water pipelines for long-distance water supply projects, a test system for water hammer and leak was designed and constructed. Moreover, a numerical model of water hammer and leak coupling considering dynamic friction and viscoelastic effects was established to achieve accurate transient pressure simulation. An analytical model for leak reflection and transmission coefficients was proposed to investigate the influencing parameters of these coefficients, and an experimental system was designed to verify the model's accuracy. The results of experiments and model analyses indicate that the leak location is positively correlated with the occurrence time of the pressure drop peak; as the number of leak holes increases, the pressure drop shows a “stepwise” increase, and the transient pressure attenuation rate accelerates; the energy dissipation of water hammer waves caused by dynamic friction reduces the reflection coefficient compared to the frictionless condition; the actual wave velocity of viscoelastic pipelines is lower than the theoretical calculation value, leading to an overestimation of the reflection coefficient.

Key words: water pipeline leak; transient flow; water hammer; dynamic friction; viscoelastic pipeline; leak reflection coefficient

管道输水是国家水网建设的重要部分,随着工业发展与城市建设,供水管网日益庞大复杂,沿程输水建筑物及各类设施种类复杂、数量繁多,沿途与河流、公路、铁路交叉处存在许多穿越设计,部分深埋地下的管道检修起来十分困难,容易引发各种管道故障^[1]。管线故障有多种类型,包括爆管、泄漏^[2-5]、管壁侵蚀、管段堵塞^[6]、阀门堵塞、气阻等。其中,管道泄漏问题频发,造成了以下后果:①浪费水资源;②直接的营收水(售水量)损失或由缺水导致的间接生产经济损失;③增加用于水处理、存储和运输的额外能源成本;④因负压或低压导致污水进入管道,造成饮用水安全问题。目前输水管道泄漏识别与定位已成为长距离供水工程的难题。

近年来,基于瞬态波的泄漏检测技术凭借其检测范围广、抗干扰能力强、非侵入式检测、响应速度快及成本低廉等优势,逐渐成为研究热点。该技术的要点在于对水锤传播机理的深入理解与瞬态压力的高精度数

基金项目: 宁波市重大专项“科创甬江 2035”关键技术项目(2024Z285);青海省 2025 年中央引导地方科技发展资金专项(2025ZY040);
国家自然科学基金项目(52209084)

作者简介: 周领(1985—),男,教授,博士,主要从事水电站与泵站研究。E-mail:zllhu@163.com

值模拟。在水锤机理与数值仿真研究领域,众多学者围绕动态摩阻效应展开了大量探索。为更准确模拟瞬态压力衰减,研究者们^[7-11]将动态摩阻引入水锤方程,认为瞬态管壁切应力是导致管壁能量耗散被低估的关键因素,并在此基础上构建了多种动态摩阻模型,如以 Zielke^[7]模型、Vardy-Brown 模型为代表的卷积模型,通过加权函数量化历史速度与加速度对当前流态的影响,有效提升了瞬态管壁切应力的模拟精度。其中,由 Zielke 模型推导的管道瞬态层流卷积加权模型综合考虑了瞬时平均流速与加权历史流速变化,被视为精确的动态摩阻求解方案。针对玻璃管道等特殊材质,Gally 等^[11]基于广义 Kelvin-Voigt 模型建立了适用于黏弹性管道水力瞬态过程的完整求解体系,该模型通过弹簧-黏壶并联结构,能够有效刻画材料在长时间作用下的可逆变形特性,为有机玻璃管内瞬态过程的模拟提供了理论支撑。

水锤-泄漏耦合过程中,泄漏的反射是检测、定位的关键因素,Jönsson 等^[12]通过无摩阻假设推导了泄漏的反射系数,解析解表明泄漏反射系数大小取决于泄漏量和入射波与泄漏孔稳态压力的比值,并量化分析了管道泄漏情况下瞬态压力波的反射与叠加,从而解释了管道泄漏局部压降随周期增大的现象。Brunone 等^[13]通过试验得到了与 Jönsson 等^[12]解析解一致的结论,并指出对于小泄漏情况,将泄漏孔口视为圆形孔口对研究泄漏结果相差不大。Zhang 等^[14]推导了考虑管道瞬态波传播衰减效应的泄漏反射系数,量化分析表明,在所有无量纲参数中,泄漏量对反射系数的影响最大(约占 40%),其次是入射波强度(占 23%),初始系统参数和流动条件的影响共占 20%,泄漏孔位置影响最小(占 17%)。Wang 等^[15]将泄漏模型纳入连续性方程和动量方程,推导了泄漏阻尼率的解析表达式,并指出泄漏阻尼率呈指数型变化趋势。Ferrante 等^[16]通过比较有泄漏和无泄漏管道的传递函数,发现泄漏会导致传递函数峰值减小,并提出根据泄漏阻抗比来区分泄漏的大小。

目前针对水锤-泄漏耦合特征的研究,水锤-泄漏耦合的仿真精准度有待提高,且对其特征与机制方面的研究仍有待深入。在前人研究的基础上,本文设计搭建了泄漏-水锤试验系统,建立了考虑动态摩阻和黏弹性效应的水锤-泄漏耦合数学模型,并试验验证了模型的准确性。通过理论模型推导、数值仿真模拟和物理试验验证等研究手段,分析了不同试验工况下的水锤-泄漏耦合特征,并推导了泄漏反射、透射系数解析模型,分析了反射系数解析解与无摩阻工况、动态摩阻工况、黏弹性工况反射系数的区别及其原因。

1 试验系统

如图 1 所示,试验系统主要由输水管道系统、控制系统和测量系统组成。试验系统选取压力罐为上游边界,截止阀(DN50 手动球阀)作为下游盲端边界,利用侧阀(DN15 手动球阀)控制流量和激发瞬态。这是因为侧阀可在 0.02 s 内迅速关闭,能够产生具有较短波长的瞬态波,从而提高瞬态波的分辨率,获得较大的信号频率带宽和能量。为了保证水循环,侧阀水流流入地下水库,地下水库利用潜水泵向压力罐供水加压。

压力罐设计压力 1.6 MPa,容积 2.2 m³,可根据试验工况的不同压力要求,提供接近恒压的水头。由于场地限制,钢管和有机玻璃管沿管道轴向盘旋上升布置,两套管道可由控制阀门切换使用。管道两端弯管转弯半径为 1.8 m,靠近压力罐的一侧进行抬升,连接上下两层管道,管道平均坡度为 0.4°。使用钢支架将管道固定于竖梁上,竖梁沿管线方向每隔 1 m 布置,弯管处另加竖梁加固,以削弱流固耦合的影响。管道钢管和有机玻璃管试验管道内径均为 50 mm,管壁厚度分别为 3.5 mm 和 5.0 mm,长度分别为 241.52 m 和 229.40 m。

测量系统包括一个电磁流量计、10 个压力传感器(PT0~PT9)、一套 NI9253 采集板和一台配备 LabVIEW 软件的台式计算机。电磁流量计位于压力罐出口,保证其“前 10 后 5”的安装方式。电磁流量计量程为 0.707~10 m³/h,精度为满量程的 0.5%。压力传感器量程为-0.3~1.0 MPa,精度为满量程的 0.2%。钢管和有机玻璃管瞬态流试验的压力传感器位置和高程分别如图 1(b)(c)(图中 LK1、LK2、LK3 为泄漏孔的位置,括号中数据为泄漏孔与上游水库的距离)和表 1 所示。这些压力传感器用于校准管道性态参数(稳态摩阻系数和波速),并分析系统发生瞬态流时的管道各点压力响应。电磁流量计和压力传感器连接 NI 9253 采集卡,利用 LabVIEW 编程展示、处理和存储压力传感器、电磁流量计输出的电流模拟信号,并转化为对应的物理信号,采样频率设置为 2 000 Hz。

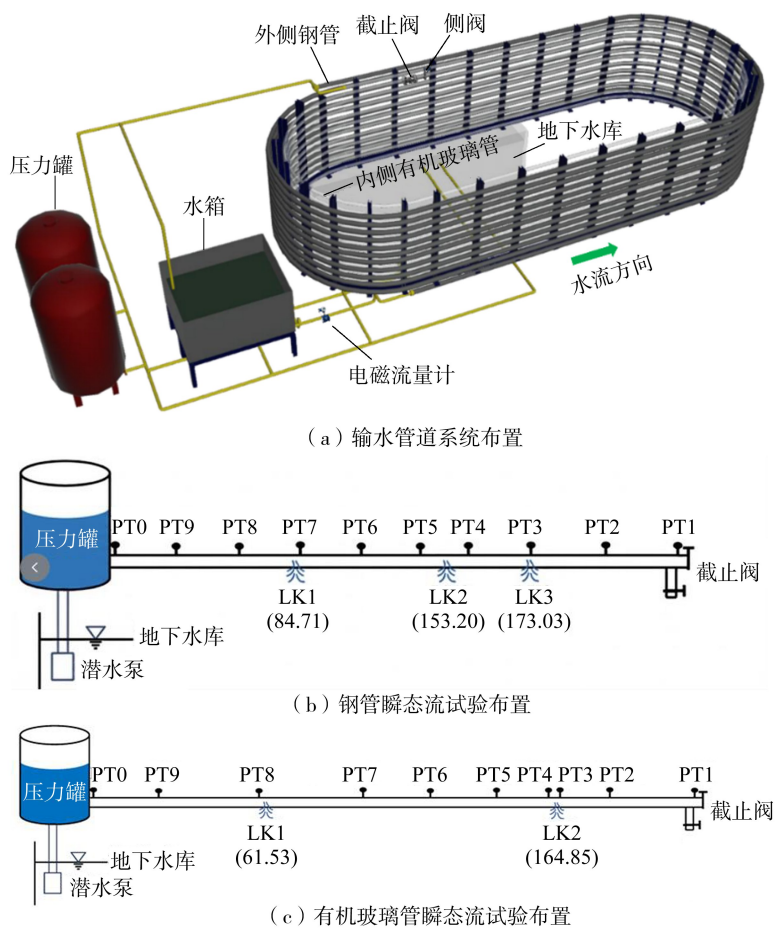


图 1 瞬态流试验系统示意图(单位:m)

Fig.1 Transient flow experimental system (unit: m)

表 1 试验系统物理参数

Table 1 Physical parameters of test system

传感器编号	钢管瞬态流试验		有机玻璃管瞬态流试验	
	距压力罐距离/m	高程/m	距压力罐距离/m	高程/m
PT0	0.05	0.50	0.05	0.50
PT9	20.52	0.21	19.85	0.18
PT8	64.68	0.58	61.33	0.61
PT7	84.91	0.78	103.22	1.00
PT6	129.07	1.15	121.70	1.50
PT4	153.00	1.34	145.42	1.38
PT5	153.40	1.34	164.65	1.56
PT3	173.23	1.51	165.05	1.56
PT2	217.89	1.88	187.30	1.75
PT1	241.32	2.07	229.20	2.13

2 数学模型

2.1 水锤基本公式

对于弹性管道,经典水锤控制方程的连续性方程和动量方程^[17-18]分别为:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial v}{\partial x} = 0$$

(1)

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + H_w = 0$$

(2)

式中: H 为测压管水头,m; v 为流速,m/s; g 为重力加速度,m/s²; a 为波速,m/s; H_w 管道流体中由于摩擦引起

的单位长度的水头损失, m ; x 为沿管轴线距离, m ; t 为时间, s 。

在管道瞬态流的数值模拟领域, 常见的计算方法主要有解析法、特征线法、图解法、有限元法以及有限体积法等^[19]。其中, 特征线法通过将水锤控制方程沿特征线方向转换为常微分方程组, 并采用有限差分格式对已知边界条件进行数值求解, 可精确获得计算域内各时间步长与空间节点上的压力及流量参数。相较于其他数值方法, 特征线法的优势主要体现在以下三方面: ①算法结构清晰, 便于编程实现; ②兼具较高的计算精度与运算效率; ③数值稳定性优异^[20-21]。因此, 本文采用特征线法进行数值模拟。

如图 2 所示, 将管道均分为空间步长为 Δx 的 N 段, 时间步长均分为 Δt , 分别沿着 C^+ 、 C^- 两条特征线对式(1)与式(2)进行积分, 可得:

$$C^+: v_P - v_R + \frac{g}{a}(H_P - H_R) + gH_{wR}\Delta t = 0 \tag{3}$$

$$C^-: v_P - v_S + \frac{g}{a}(H_P - H_S) + gH_{wS}\Delta t = 0 \tag{4}$$

式中: v_P 、 v_R 、 v_S 、 H_P 、 H_R 、 H_S 分别为节点 P 、 R 、 S 处的流速和测压管水头; H_{wR} 、 H_{wS} 分别为节点 R 、 S 处的水头损失; R 、 S 点分别代表模拟有压管道中 Δt 时刻第 Δx 和第 $3\Delta x$ 截面。

2.2 动态摩阻效应

本文动态摩阻效应采用 Zielke 模型模拟。Zielke 模型认为管道瞬态流中瞬时管壁切应力由恒定项和附加项组成。恒定项为恒定状态切应力值, 产生的压力衰减与稳态摩阻相同, 附加项利用加权函数考虑历时速度和加速度对当前流态的影响, 故摩阻项由恒定和非恒定摩阻项组成^[21-24]:

$$H_w = H_{ws} + H_{wu} \tag{5}$$

$$\text{其中} \quad H_{ws} = fv|v|/2gD \quad H_{wu} = \frac{16\nu}{gD^2} \int_0^t \frac{\partial v}{\partial t}(u) W(t-u) du$$

式中: H_{ws} 、 H_{wu} 分别为管道流中恒定摩阻和非恒定摩阻引起的水头损失; ν 为运动黏滞系数; u 为在 $0 \sim t$ 之间积分的时间变量; f 为达西魏斯巴赫管道摩擦系数; D 为管道直径; W 为关于无量纲时间 τ 的加权函数。

2.3 黏弹性效应

本文黏弹性效应采用广义 Kelvin-Voigt 模型模拟。广义 Kelvin-Voigt 模型由于其准确简单的特点, 在表示固体材料的蠕变和延迟特性时被广泛使用^[25-26]。如图 2 所示, 广义 Kelvin-Voigt 模型由 n 个弹簧与黏壶并联组合成的 Voigt 模型串联得到。元件数目越多, 级数项越能精确地描述管道的黏弹性。

广义 Kelvin-Voigt 模型的蠕变函数表达式为:

$$J(t) = J_0 + \sum J_k(1 - e^{-t/\tau_k}) \tag{6}$$

式中: J_0 为瞬时蠕变柔量; J_k 为第 k 个元件中弹簧的蠕变柔量; τ_k 为第 k 个元件中黏壶阻尼的松弛时间。这些参数均可由试验校核得出。

瞬时蠕变柔量 J_0 计算公式为:

$$J_0 = \left(\frac{1}{\rho a^2} - \frac{1}{\kappa} \right) \frac{\varepsilon}{D(1 - \nu^2)} \tag{7}$$

式中: ρ 为水体的密度; κ 为体积弹性模量; ε 为管壁厚度。

2.4 泄漏模型

如图 3 所示, 假定泄漏发生在第 i 个节点处, 泄漏孔口外部压力为大气压。根据泄漏孔处的质量守恒定律, 由连续性方程^[27]可得:

$$Q_1 = Q_2 + Q_L \tag{8}$$

式中: Q_1 为泄漏孔前的流量; Q_2 为泄漏孔后的流量; Q_L 为泄漏流量。

根据动量守恒定律, 可得泄漏边界处的测压管水头

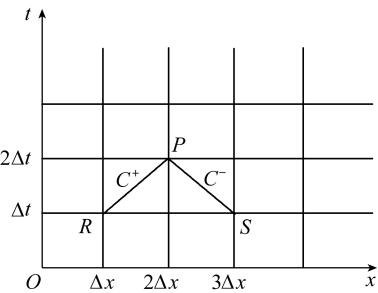


图 2 特征线积分网格

Fig. 2 Characteristic line integration grid

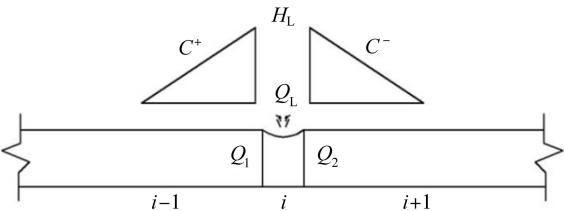


图 3 水锤-泄漏耦合边界条件

Fig. 3 Coupled boundary conditions of water hammer and leak

满足:

$$H_1 = H_2 = H_L \quad (9)$$

式中: H_1 为泄漏孔前的测压管水头; H_2 为泄漏孔后的测压管水头; H_L 为泄漏孔处的测压管水头。

由孔口出流公式可得泄漏孔口的流量为

$$Q_L = C_d A_L \sqrt{2g\Delta H_L} \quad (10)$$

其中

$$\Delta H_L = H_L - z_L$$

式中: $C_d A_L$ 为泄漏孔口的联合泄漏系数, 其中 C_d 为泄漏孔口的流量系数, A_L 为泄漏孔口面积; ΔH_L 为泄漏孔的压力水头; z_L 为泄漏孔高程。将式(8)~(10)与特征线方程联立求解, 可得到泄漏孔处的压力和流量。

最后将式(8)(9)代入特征线方程(3)(4), 便能得到 Q_1 、 Q_2 、 Q_L 、 H_1 、 H_2 、 H_L 。

2.5 泄漏反射系数解析模型

本文推导了泄漏的反射系数和透射系数, 以研究瞬态波-泄漏耦合的反射和透射影响。当泄漏孔两侧的管道阻抗不同时, 反射系数和透射系数是可变的。为了简化, 假设: ①瞬态压力和流量满足 Joukowsky 公式; ②瞬态波在经过泄漏孔处没有额外的能量损失。

图 4 为两种不同入射波传播方向的瞬态波-泄漏耦合情况下, 入射波的反射与透射示意图。稳态下泄漏孔处的流量和压力满足式(8)和式(9)。对于图 4(a) 的情况, 当入射波到达泄漏孔处时, 其动量方程和连续性方程可以表示为:

$$H_{in} + H_{re} = H_{tr} = \Delta H_L - \Delta H_{L0} \quad (11)$$

$$Q_{in} + Q_{re} = Q_{tr} + Q_L - Q_{L0} \quad (12)$$

式中: H_{in} 、 H_{re} 、 H_{tr} 分别为入射、反射和透射压力水头; Q_{in} 、 Q_{re} 、 Q_{tr} 分别为入射、反射、透射压力水头产生的流量变化; Q_{L0} 、 ΔH_{L0} 分别代表初始状态(0 时刻)泄漏孔处的泄漏流量和水头变化。

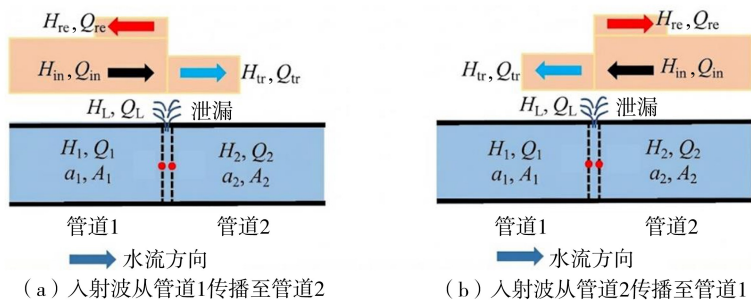


图 4 泄漏孔处入射波的反射与透射示意图

Fig. 4 Schematic diagram of incident wave reflection and transmission at leak point

根据 Joukowsky 公式, 图 4(a) 情况下瞬态波引起的水头变化与对应流量变化之间的关系为:

$$H_{in} = -(a_1 Q_{in})/gA_1 \quad H_{tr} = -(a_2 Q_{tr})/gA_2 \quad H_{re} = -(a_1 Q_{re})/gA_1 \quad (13)$$

式中: a_1 、 a_2 分别为管道 1、2 的波速; A_1 、 A_2 分别为管道 1、2 的截面积。将式(13)代入式(12), 得:

$$\frac{gA_1}{a_1} H_{in} - \frac{gA_1}{a_1} H_{re} - \frac{gA_2}{a_2} H_{tr} = Q_L - Q_{L0} \quad (14)$$

将式(11) 代入式(10), 泄漏孔处的瞬态流量可以表示为:

$$Q_L = C_d A_L \sqrt{2g(H_{tr} + \Delta H_L)} \quad (15)$$

对式(11) 和式(15)进行泰勒展开和一阶近似, 得:

$$Q_L - Q_{L0} = C_d A_L (\sqrt{2g(H_{tr} + \Delta H_L)} - \sqrt{2g\Delta H_L}) \approx C_d A_L H_{tr} \sqrt{2g\Delta H_L} / 2\Delta H_{L0} \quad (16)$$

因此, 式(14)可以表示为:

$$\frac{gA_1}{a_1} H_{in} - \frac{gA_1}{a_1} H_{re} - \frac{gA_2}{a_2} H_{tr} = C_d A_L H_{tr} \sqrt{2g\Delta H_L} / 2\Delta H_{L0} \quad (17)$$

将式(11)代入式(17)可得:

$$2 \frac{gA_1}{a_1} H_{in} = \left(\frac{gA_1}{a_1} + \frac{gA_2}{a_2} + C_d A_L H_{tr} \sqrt{2g\Delta H_L} / 2\Delta H_{L0} \right) H_{tr} \quad (18)$$

根据透射系数的定义,化简得:

$$R_{tr} = \frac{H_{tr}}{H_{in}} = 2 \frac{A_1}{a_1} \bigg/ \left(\frac{A_1}{a_1} + \frac{A_2}{a_2} + C_d A_L / \sqrt{2g\Delta H_L} \right)$$

(19)

式中: R_{tr} 为泄漏的透射系数。

根据反射系数与透射系数的关系,泄漏的反射系数 R_{re} 可以表示为:

$$R_{re} = R_{tr} - 1 = \left(\frac{A_1}{a_1} - \frac{A_2}{a_2} - \frac{C_d A_L}{\sqrt{2g\Delta H_{L0}}} \right) \bigg/ \left(\frac{A_1}{a_1} + \frac{A_2}{a_2} + \frac{C_d A_L}{\sqrt{2g\Delta H_{L0}}} \right)$$

(20)

同理,对于如图 4(b) 的情况,当入射波到达泄漏孔处时,其动量方程与式(2)一致,连续性方程变为式(12),该工况瞬态波引起的水头变化与对应流量变化之间的关系为式(13)。

结合式(11)(12)(13),泄漏的透射系数和反射系数可以表示为:

$$R_{tr} = 2 \frac{A_2}{a_2} \bigg/ \left(\frac{A_1}{a_1} + \frac{A_2}{a_2} + \frac{C_d A_L}{\sqrt{2g\Delta H_{L0}}} \right)$$

(21)

$$R_{re} = \left(\frac{A_2}{a_2} - \frac{A_1}{a_1} - \frac{C_d A_L}{\sqrt{2g\Delta H_{L0}}} \right) \bigg/ \left(\frac{A_1}{a_1} + \frac{A_2}{a_2} + \frac{C_d A_L}{\sqrt{2g\Delta H_{L0}}} \right)$$

(22)

对于泄漏两端管道无阻抗变化的情况(即 $A_1=A_2=A$, $a_1=a_2=a$),其透射和反射系数可以简化为:

$$R_{tr} = 2 \frac{A}{a} \bigg/ \left(2 \frac{A}{a} + \frac{C_d A_L}{\sqrt{2g\Delta H_{L0}}} \right)$$

(23)

$$R_{re} = - \frac{C_d A_L}{\sqrt{2g\Delta H_{L0}}} \bigg/ \left(2 \frac{A}{a} + \frac{C_d A_L}{\sqrt{2g\Delta H_{L0}}} \right)$$

(24)

3 时域上泄漏的瞬态流特征分析

钢管瞬态流试验和有机玻璃管瞬态流试验工况如表 2 所示。

表 2 试验工况设置

Table 2 Test condition settings

试验	工况	背景压力/m	泄漏流量/(m ³ /s)	泄漏孔数量	初始流量/(m ³ /s)	泄漏孔与上游水库 的距离/m
钢管瞬态流试验	1	20	0.2	1	1.0	84.71
	2	20	0.5	1	1.0	84.71
	3	20	0.7	1	1.0	84.71
	4	20	0	1	1.0	无泄漏
	5	30	0.5	1	1.0	84.71
	6	20	0.5	1	1.5	84.71
	7	20	0.5	1	1.0	153.2
	8	20	0.5	1	1.0	173.03
	9	20	0.5	2	1.0	84.71、153.2
	10	20	0.5	3	1.0	84.71、153.2、173.03
有机玻璃管瞬态流试验	1	20	0	1	1.0	61.53
	2	20	0.3	1	1.0	61.53
	3	20	0.5	1	1.0	61.53
	4	20	0.7	1	1.0	61.53
	5	20	0.5	1	1.0	164.85
	6	20	0.5	2	1.0	61.53、164.85

注:背景压力以压力水头表示。

试验过程中,通过改变泄漏孔处安装的阀门口径以及开度来改变泄漏量,背景压力、管道流量等参数保持相同,通过电磁流量计来观察泄漏量的大小,分别进行了泄漏量为 0.2、0.5、0.7 m³/s 以及无泄漏情况下的瞬态流试验。在管道存在泄漏的情况下,瞬态压力会在第一峰值处因泄漏反射而产生压降。从图 5(a)能够清晰观察到,泄漏量大小对瞬态压力变化和瞬态波衰减速度有显著影响;泄漏量大小与压力降幅及瞬态波在管道中的衰减速度均呈正相关关系。为探究背景压力对管道泄漏瞬态特性的影响,通过调整上游压力罐

内压力,设定了背景压力为 20 m 和 30 m 两种工况开展瞬态流试验。由图 5(b)可以看出,通过归一化处理(图中 α 为归一化水头, $\alpha=(H-H_g)/H_m$,其中 H 为试验测得数据, H_g 为背景压力, H_m 为直接水锤压力)可方便观察不同背景压力下第一峰值中的压降大小,使得由于背景压力造成的特征差异更加明显,可以看出背景压力与泄漏反射在第一峰值处造成的压降呈负相关关系,而水锤波在管道中的衰减速度趋于缓慢。

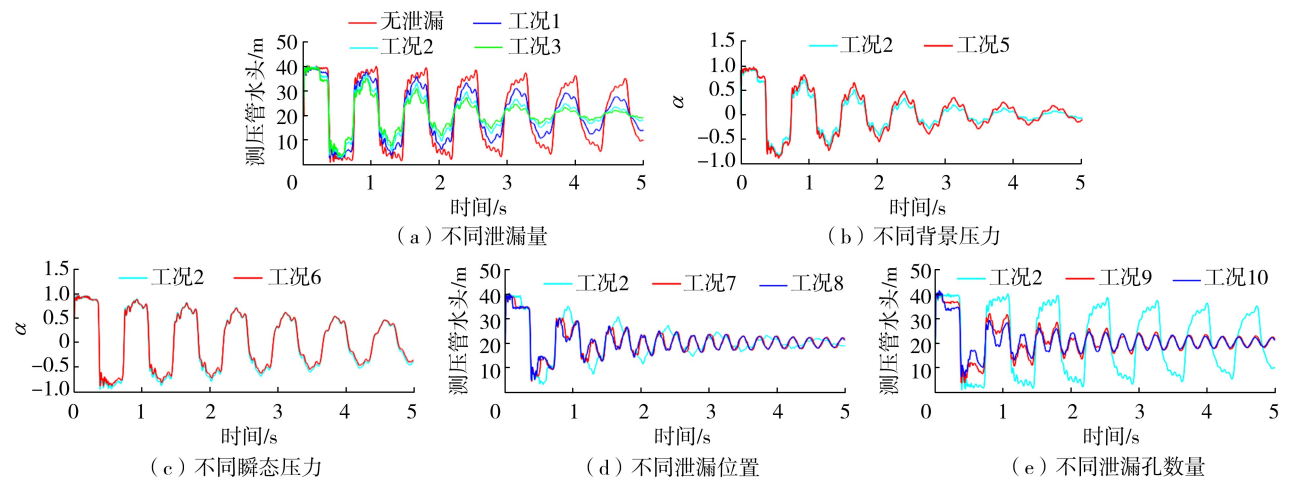


图 5 钢管水锤-泄漏耦合时域特性

Fig. 5 Time-domain characteristics of water hammer and leak coupling in steel pipes

通过直接水锤方程 $\Delta H=-a\Delta v/g$ 可知,改变流速变化量 Δv 的大小(即改变管道内流量的大小)可以改变直接水锤的幅值,通过调节水泵控制主管内流量分别为 1.0、1.5 m³/s 进行瞬态试验。由图 5(c)可以看出,通过控制上游压力不变,改变主管中的流量大小来控制直接水锤波的大小,可改变第一峰值的压力最大值。在瞬态压力不同时,泄漏在瞬态过程中的特征并无明显变化。

本文试验系统在主管上设置了 3 个不同位置的泄漏孔,通过阀门控制泄漏状态,这 3 个泄漏孔与水库的距离分别为 84.71、153.2、173.03 m,试验中保持其他变量不变,由图 5(d)可知,高频压降的出现时间与泄漏位置密切相关,会影响第一峰值处压降发生的时间,原因是不同泄漏位置与阀门的距离不同,泄漏后的反射波到达阀门的时间不同,导致压降发生的时间不同。

通过调控每个泄漏孔处的阀门来控制实际泄漏孔的数量,在试验时保持背景压力、管道流量等参数不变,试验结果如图 5(e)所示,可以看出泄漏孔数量不同时,也有与泄漏位置不同情况下类似的特征。泄漏孔数量不同时,多一个泄漏孔,第一峰值处就多一次压降,泄漏孔越多压降次数越多,形成一种类似“阶梯”形的压力变化,并且随着泄漏孔数量的增加,瞬态波在钢管中的衰减速率呈现显著提升的趋势。

有机玻璃管中的瞬态-泄漏耦合特征与钢管中的特征十分类似,区别在于有机玻璃管中的波速与钢管相差较大,瞬态波的衰减速度也比钢管中要慢。

4 数值模拟验证及反射系数验证

水锤-泄漏耦合数学模型能够精准模拟不同管材和工况下的时域压力波动。钢管水锤-泄漏耦合数学模型在不同泄漏量、背景压力、瞬态压力、泄漏位置和泄漏孔数量工况下均能够较好地重现试验泄漏反射压降和整体压力波动衰减(图 6),有机玻璃管规律类似。

由图 6 可知,在不同泄漏孔数量、不同泄漏量、不同泄漏位置工况下,前几个周期钢管的试验值与模型模拟值都十分吻合,而有机玻璃管的试验数据在 0~10 s 内都可以进行精准的模拟,验证了前文对钢管和有机玻璃管建立的水锤-泄漏耦合数学模型的准确性,为后续验证泄漏反射系数解析模型及解释不同工况下的泄漏特征变化奠定了基础。基于弹性管道和黏弹性管道,利用水锤-泄漏耦合数学模型对泄漏反射系数解析解进行验证,并分析不同参数对泄漏反射系数解析解准确性的影响,结果如图 7 和图 8 所示(图中“解析解”为泄漏反射系数解析模型计算结果;“无摩阻”“动态摩阻”“黏弹性”分别为采用不考虑摩阻、考虑动态摩阻和考虑黏弹性的水锤-泄漏耦合数学模型的计算结果;泄漏位置由泄漏孔与上游水库的距离与管道总长的比值表示)。表 3 为背景压力、泄漏流量和泄漏位置的变化范围,当考虑某一变量时,其他参数为默认值。结果

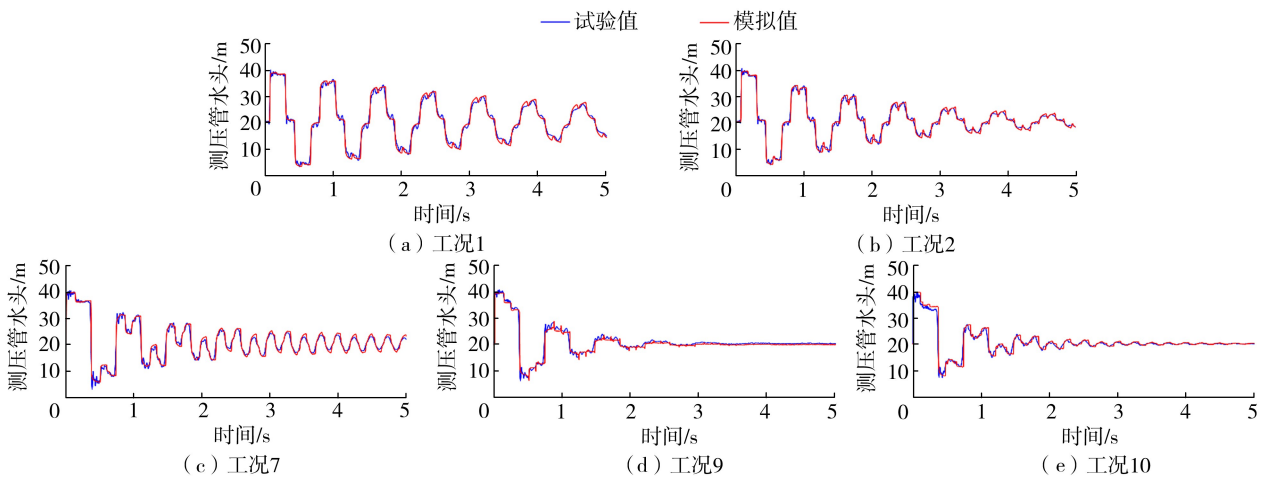


图6 钢管水锤-泄漏耦合试验结果与数学模型模拟结果对比

Fig. 6 Comparison between water hammer and leak coupling test results for steel pipes and simulation results of mathematical model

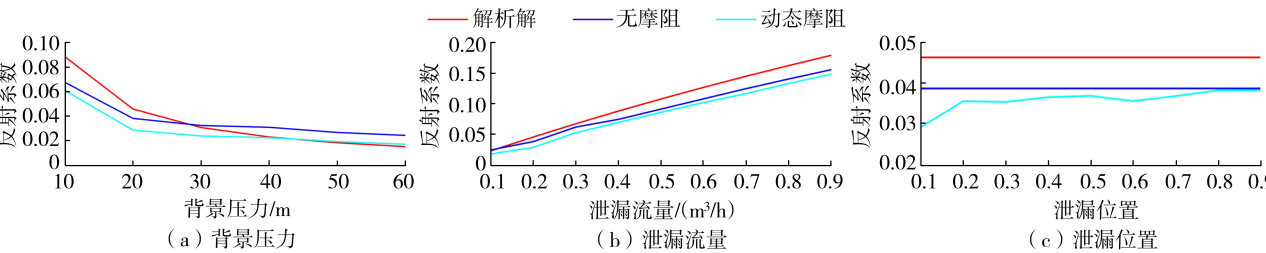


图7 钢管中不同参数对泄漏反射系数解析解和数值解的影响

Fig. 7 Influence of different parameters in steel pipes on analytical solutions and numerical solutions of leak reflection coefficients

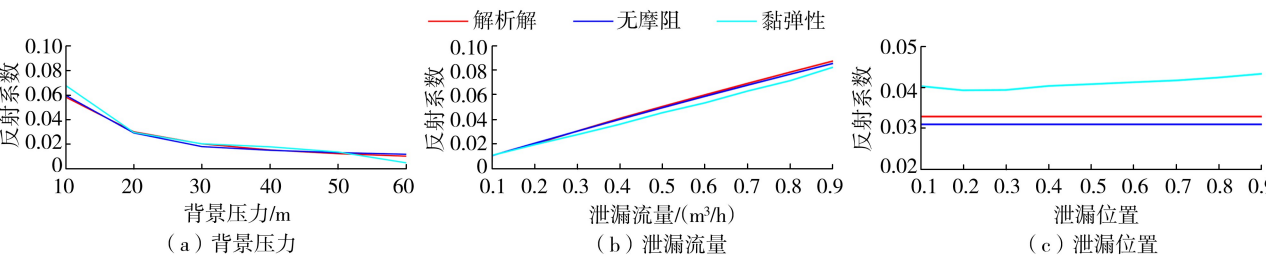


图8 有机玻璃管中不同参数对泄漏反射系数解析解和数值解的影响

Fig. 8 Influence of different parameters in PMMA pipes on analytical solutions and numerical solutions of leak reflection coefficients

表明,无论解析解还是数值解,泄漏反射系数与背景压力呈负相关关系,与泄漏流量呈正相关关系。

由图7和图8可知,考虑动态摩阻的钢管试验数据和考虑黏弹性的有机玻璃管试验数据所得反射系数,在不同工况下的变化趋势与试验结果高度吻合,且符合解析解、无摩阻模型、动态摩阻模型和黏弹性模型间的理论差异,充分验证了本文提出的泄漏反射系数解析模型的准确性。研究发现,各模型间存在如下显著差异:动态摩阻引起的能量耗散加速了水锤波在传播过程中的衰减,导致反射波到达测点时的幅值降低,因此计算所得的反射系数较无摩阻工况偏小;在考虑黏弹性效应时,管道中波速低于理论计算值(600 m/s),从而造成反射系数高于解析解及无摩阻工况。此外,工况参数对反射系数的影响符合理论推导规律,即背景压力增大时,反射系数降低;泄漏流量增大则使水锤波在泄漏孔处的水头损失增大,反射系数增大;无摩阻工况

表3 泄漏反射系数参数敏感性分析工况

Table 3 Sensitivity analysis of leak reflection coefficient parameters for operating conditions

数据类型	背景压力/m	泄漏流量/(m³/h)	泄漏位置
默认值	20	0.3	0.7
变化范围	10~60	0.1~0.9	0.1~0.9

此外,工况参数对反射系数的影响符合理论推导规律,即背景压力增大时,反射系数降低;泄漏流量增大则使水锤波在泄漏孔处的水头损失增大,反射系数增大;无摩阻工况

下,泄漏距离对反射系数无影响,与解析解推导结果一致,而考虑动态摩阻时,泄漏孔靠近阀门端(瞬态过程源点)使动态摩阻对水锤波的衰减作用减弱,反射系数逐渐趋近于无摩阻工况。

5 结 论

- a. 泄漏量与压力降低程度、水锤波衰减速度呈显著正相关关系;背景压力与水锤波衰减速度呈负相关关系,背景压力增大会减小泄漏引发的第一峰值压降并延缓水锤波衰减。
- b. 瞬态压力对泄漏特征的影响相对有限;泄漏位置与泄漏孔数量则通过改变压力波传播路径及叠加效应,对压力变化的时间序列产生重要影响,泄漏位置决定了瞬态波抵达时间与反射波返回阀门的时间差,而泄漏孔数量的增加不仅会形成多阶压降的“阶梯”特征,还会加速钢管中瞬态波的衰减过程。
- c. 融合能量耗散机制的水锤-泄漏耦合数学模型,可精准模拟耦合过程中的瞬态压力;该模型在钢管与有机玻璃管中均具备可靠刻画能力,为水锤泄漏定量分析提供了有效工具。
- d. 泄漏反射系数与透射系数的解析模型,可清晰阐释水锤-泄漏耦合物理机制;动态摩阻会降低反射系数,有机玻璃管模拟中偏小的波速会使反射系数高于解析解及无摩阻工况的模拟值,解析解与无摩阻模型的差异源于阻尼效应的一阶近似;解析模型明确了泄漏位置、泄漏流量与背景压力对反射系数的量化影响路径。

参考文献:

[1] 刘东海,胡东婕,陈俊杰. 基于 BIM 的输水工程安全监测信息集成与可视化分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(4):337-344. (Liu Donghai, Hu Dongjie, Chen Junjie. BIM-based integration and visualization for dynamic safety monitoring information of water diversion project[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(4): 337-344. (in Chinese))

[2] Duan H F, Lee P J. Transient-based frequency domain method for dead-end side branch detection in reservoir pipeline-valve systems[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 142(2): 04015042.

[3] Zeng Wei, Zecchin A C, Gong Jinzhe, et al. Inverse wave reflectometry method for hydraulic transient-based pipeline condition assessment[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 146(8): 04020056.

[4] Zeng Wei, Zecchin A C, Cazzolato B S, et al. Extremely sensitive anomaly detection in pipe networks using a higher-order paired-impulse response function with a correlator[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2021, 147(10): 04021068.

[5] Che Tongchuan, Duan Huanfeng, Lee P J. Transient wave-based methods for anomaly detection in fluid pipes: a review[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 160: 107874.

[6] 周领,白光国,李赟杰,等. 基于匹配场处理法的管道局部阻塞定位方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2024,52(9):156-164. (Zhou Ling, Bai Guangguo, Li Yunjie, et al. Discrete blockage localization using the matched-field processing method[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2024, 52(9): 156-164. (in Chinese))

[7] Zielke W. Frequency-dependent friction in transient pipe flow[J]. Journal of Basic Engineering, 1968, 90(1): 109-115.

[8] Vardy A E, Brown J M B. Transient, turbulent, smooth pipe friction[J]. Journal of Hydraulic Research, 1995, 33(4): 435-456.

[9] Vardy A E, Brown J M B. Transient turbulent friction in smooth pipe flows[J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 259(5): 1011-1036.

[10] Vardy A E, Brown J M B. Transient turbulent friction in fully rough pipe flows[J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 270(1/2): 233-257.

[11] Gally M, Güney M, Rieutord E. An investigation of pressure transients in viscoelastic pipes[J]. Journal of Fluids Engineering, 1979, 101(4): 495-499.

[12] Jönsson L, Larson M. Leak detection through hydraulic transient analysis[M]//COULBECK B, EVANS E P. Pipeline Systems. Dordrecht: Springer, 1992: 273-286.

[13] Brunone B, Ferrante M. Detecting leaks in pressurised pipes by means of transients[J]. Journal of Hydraulic Research, 2001, 39(5): 539-547.

[14] Zhang Ying, Duan Huanfeng, Keramat A, et al. On the leak-induced transient wave reflection and dominance analysis in water pipelines[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 167: 108512.

[15] Wang Xiaojian, Lambert M F, Simpson A R, et al. Leak detection in pipelines using the damping of fluid transients[J]. Journal of

Hydraulic Engineering,2002,128(7):697-711.

[16] Ferrante M,Brunone B. Pipe system diagnosis and leak detection by unsteady-state tests;1. harmonic analysis[J]. Advances in Water Resources,2003,26(1):95-105.

[17] 于永海,索丽生. 有压瞬变流限压控制反问题的最优控制理论解法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2006,34(1):56-59. (Yu Yonghai,Suo Lisheng. Solution to inverse problem of hydraulic transients under limited pressure based on optimal control theory[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2006,34(1):56-59. (in Chinese))

[18] 郑源,索丽生,屈波,等. 有压输水管道系统含气水锤研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2005,33(3):277-281. (Zheng Yuan,Suo Lisheng,Qu Bo,et al. Study on water hammer with gas in pressurized water delivery pipeline system[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2005,33(3):277-281. (in Chinese))

[19] CHAUDHRY M H. Applied hydraulic transients[M]. 3rd ed. New York:Springer,2014:4-7.

[20] 梁圣辰,张健,贺蔚,等. 长距离输水系统串联多阻抗调压室的水锤防护效果[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(2):170-175. (Liang Shengchen,Zhang Jian,He Wei,et al. Water hammer protection effect of series throttled surge chambers in long-distance water conveyance system[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(2):170-175. (in Chinese))

[21] 周领,刘静,欧传奇,等. 水力瞬变中动态摩阻的改进加权类模型[J]. 排灌机械工程学报,2022,40(2):164-169. (Zhou Ling,Liu Jing,Ou Chuanqi,et al. Improved weight-function model of unsteady friction in hydraulic transients[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2022,40(2):164-169. (in Chinese))

[22] 郭新蕾,郭永鑫. 管道泄漏检测中瞬变流非恒定摩阻模型的研究[J]. 水力发电学报,2008,27(1):42-47. (Guo Xinlei,Guo Yongxin. Study of unsteady friction models in transient flow for leak detection[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2008,27(1):42-47. (in Chinese))

[23] 吴金远,周领,刘德有. 考虑动态摩阻的抽水蓄能电站水力瞬变建模拟拟[J]. 排灌机械工程学报,2024,42(6):612-618. (Wu Jinyuan,Zhou Ling,Liu Deyou. Numerical simulation of hydraulic transients in pumped storage power station with unsteady friction[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2024,42(6):612-618. (in Chinese))

[24] 周领,易昌宇,车同川. 输水管道水锤能量衰减效应及参数影响研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2024,52(12):185-192. (Zhou Ling,Yi Changyu,Che Tongchuan. Research on water hammer energy decay effect of water pipeline and influence of parameters[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition),2024,52(12):185-192. (in Chinese))

[25] 周领,田永薪,王栋仪,等. 考虑不确定性因素的弹性管道水锤模型及实验验证[J]. 力学学报,2024,56(11):3178-3187. (Zhou Ling,Tian Yongxin,Wang Dongyi,et al. Water hammer model for elastic pipelines considering uncertainty factors and experimental validation[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics,2024,56(11):3178-3187. (in Chinese))

[26] 王宁,周领,李赞杰,等. 黏弹性管道水柱分离弥合水锤有限体积法模型[J]. 力学学报,2022,54(7):1952-1959. (Wang Ning,Zhou Ling,Li Yunjie,et al. Finite volume model of water column separation and rejoining water hammer in viscoelastic pipes[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics,2022,54(7):1952-1959. (in Chinese))

[27] 李赞杰,周领,欧传奇,等. 考虑动态摩阻的管道泄漏水力瞬变数值模拟[J]. 水利水电科技进展,2021,41(1):62-68. (Li Yunjie,Zhou Ling,Ou Chuanqi,et al. Numerical simulation of hydraulic transient in a leakage pipe considering unsteady friction[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2021,41(1):62-68. (in Chinese))

(收稿日期:2025-04-01 编辑:熊水斌)