

管道工程应用与
健康评估

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.10.001

埋地有压输水管道漏损流量计算方法综述

林存刚^{1,2,3,4,5}, 秦家贵¹, 马保松^{1,2,3,4,5}

(1. 中山大学 土木工程学院, 广东 广州 510275; 2. 中山大学 隧道工程灾变防控与智能建养全国重点实验室, 广东 广州 510275; 3. 南方海洋科学与工程广东省实验室<珠海>, 广东 珠海 519082; 4. 广东省海洋土木工程重点实验室, 广东 广州 510275; 5. 广东省地下空间开发工程技术研究中心, 广东 广州 510275)

摘要: 针对有压管道破损出流问题, 现有研究已建立较为完整的出流方程计算体系, 为管网漏损机理分析及防控设计提供理论支撑。目前常用的管道内流体通过指定破损口的出流量计算方程包括孔口方程、漏损方程和固定与可变面积泄放(FAVAD)方程。其中, 孔口方程常用于常压流体通过小孔的入流或出流量计算; 漏损方程适用于破损口面积不规则或高水压、高流速系统的流量计算; FAVAD方程则大量应用于有压管道及管网系统的漏损流量计算。本文系统综述了有压管道漏损机理的研究进展, 并给出考虑水头、破损口形状参数、管道材料特性和漏损介质的修正出流计算模型。此外, 还讨论了这些出流方程的适用场景与不足, 并为未来的研究方向提供建议。

关键词: 漏损; 有压管道; 管道出流; 给排水系统; 数学模型

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)10-0001-08

Calculation Method of Leakage Flow Rate in Buried Pressurized Water Pipelines

LIN Cungang^{1,2,3,4,5}, QIN Jiagui¹, MA Baosong^{1,2,3,4,5}

(1. School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 2. State Key Laboratory of Tunnel Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory <Zhuhai>, Zhuhai 519082, China; 4. Guangdong Key Laboratory of Marine Civil Engineering, Guangzhou 510275, China; 5. Guangdong Research Center for Underground Space Exploitation Technology, Guangzhou 510275, China)

Abstract: For the issue of outflow from damaged pressurized pipelines, existing research has established a relatively complete system of outflow equations, providing theoretical support for the analysis of pipeline leakage mechanisms and prevention design. The commonly used equations for calculating the outflow rate of fluid through a specified damaged orifice in a pipeline include the orifice equation, the leakage equation, and the fixed and variable area discharges (FAVAD) equation. Among them, the orifice equation is typically used to calculate the inflow or outflow rate of fluid at atmospheric pressure through small openings. The leakage equation is more suitable for cases where the damaged

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42477202); 广东省基础与应用基础研究基金资助项目(2024A1515011200、2025A0505020042); 广东省“珠江人才计划”引进创新创业团队项目(2021ZT09G087)

orifice has an irregular shape or when dealing with high-pressure, high-velocity flow systems. The FAVAD equation is widely applied to the calculation of leakage flow in pressurized pipelines and water distribution networks. This paper systematically reviews the research progress on leakage mechanisms in pressurized pipelines and presents modified outflow calculation models that consider factors such as hydraulic head, damaged orifice shape parameters, pipeline material properties, and leakage medium characteristics. In addition, the advantages and limitations of these outflow equations are analyzed, along with recommendations for future research.

Keywords: leakage; pressurized pipelines; pipeline outflow; water supply and drainage system; mathematical model

根据《中国城市建设统计年鉴》,2023年我国城乡供水管道漏损率为14.40%,水资源浪费问题亟待解决。《关于加强公共供水管网漏损控制的通知》(简称《通知》)提出,截至2025年,我国城镇管网漏损率应控制在9%以内。在管网漏损控制的相关课题中,研究人员通过构建管道漏损流量的计算模型,为优化管网设计提供理论依据,从而抑制漏损现象的发生^[1]。目前,计算管道漏损流量的基本方程包括孔口方程、漏损方程和固定与可变面积泄放(FAVAD)方程,均为描述漏损流量和破损口处水头之间函数关系的方程。研究^[2]认为,漏损水头、管道材料性质、漏损介质的渗透特征以及管道破损口形状参数与分布,是影响流量-水头关系的重要因素。本文将从出流方程基本形式、影响因素及修正方程等方面进行综述。

1 出流方程基本形式

最早描述孔口流体出流现象的理论解析式为托里拆利方程,其为伯努利方程在不计外力、无能量损失条件下的特殊形式,反映了理想流体从小孔中自由出流的现象,具体见下式:

$$V = \sqrt{2gh} \quad (1)$$

式中: V 为孔口出流速度,m/s; g 为重力加速度,m/s²; h 为孔口水头高度,m。

1.1 孔口方程

1998年Streeter等^[3]结合工程案例对托里拆利方程进行修正,提出孔口方程为:

$$Q = C_d A_0 \sqrt{2gh} \quad (2)$$

式中: Q 为孔口出流量,m³/s; C_d 为孔口流量系数; A_0 为管道初始破损口面积,m²。

一般认为式(2)适用于常压或低压漏损系统,

以及较高压力下破损口形状保持为圆孔的漏损系统。

在我国现行《城镇供水管网漏损控制及评定标准》(CJJ 92—2016)中,计算管道漏损流量的方程是以孔口方程为基础,引入管道直径修正系数而建立的半经验方程,具体见下式:

$$Q = C_1 C_d A_0 \sqrt{2gh} \quad (3)$$

式中: C_1 为管道直径修正系数。

孔口方程常被用于计算外界水体通过破损口渗入管道内部的侵入流量值,其计算精度能够满足工程需求。

1.2 漏损方程

根据大量的工程数据和模型试验分析,研究^[4-5]发现水头与流量在大部分情况下并不满足平方关系。因此,研究人员使用幂方程描述水头与出流量之间的关系。2003年Thronton^[6]提出以下公式描述漏损现象:

$$Q = CP^{n_1} \quad (4)$$

式中: P 为管道内压,Pa; C 为漏损系数; n_1 为漏损指数。

式(4)被称为漏损方程的幂法则。这个经验公式中漏损系数 C 和漏损指数 n_1 的取值需综合考虑管道材料、破损口形状、上覆土体物理力学性质等因素。

式(4)也可表示为:

$$Q = Ch^{n_1} \quad (5)$$

后续研究人员通过试验和数值模拟验证了漏损方程相较于孔口方程在实际工程中具有更好的适用性。相关研究^[6]表明, n_1 的取值范围为0.5~2.5。具体而言,破损口形状、管道材料、管道使用情况等因素均能影响 n_1 的取值。

表1汇总了基于室内或原位试验计算拟合得到的 n_1 取值分布。

表1 漏损指数 n_1 的取值范围统计

Tab.1 Statistical range of leakage exponent n_1

研究者及研究工况	Lambert ^[7]				Greyvenstein等 ^[5]			
	小孔破损口	纵向裂缝	环向裂缝	聚氯乙烯(PVC)管	金属管	纵向裂缝(水泥管)	内壁有锈簇(金属管)	纵向裂缝(聚碳酸酯管)
n_1	0.5	1.5	2.0~2.5	1.5~2.5	0.5	0.79~1.04	1.90~2.30	1.39~1.85

1.3 FAVAD方程

虽然漏损方程结构简单、计算便捷,计算精度也能够满足工程需要,但它并不能真实反映管道漏损的物理机制。因此,研究人员对孔口方程进行了修正,从而使其更好地反映漏损流量与水头之间的物理关系。

May^[8]假设管道材料在水头作用下产生弹性变形,且破损口面积随水头线性变化。将该线性假定引入孔口方程,从而推导提出FAVAD方程,具体见下式:

$$A = A_0 + mh \quad (6)$$

$$m = \frac{\Delta A}{\Delta h} \quad (7)$$

$$Q = C_d \sqrt{2g} (A_0 h^{0.5} + mh^{1.5}) \quad (8)$$

式中: A 为有效漏损面积, m^2 ; m 为有效漏损面积与水头之间线性关系的斜率, m 。

式(6)这种假定有效漏损面积与水头呈线性关系的方程结构被称为漏损方程的线性法则。May^[8]认为,在漏损管网中,可按有效漏损面积是否发生变形将破损口分为两类,分别是形状不变的刚性漏损区域和可产生弹性变形的变形漏损区域。前者有效漏损面积不变,水头项指数为0.5;后者有效漏损面积随水头改变,水头项指数为1.5。May对破损口面积变化的假定见图1(a)。

通过进一步研究,学者拓展了FAVAD方程的应用范围。Cassa等^[9]使用Abaqus软件对含多种破损口类型的硬聚氯乙烯(UPVC)管、钢管、铸铁管以及水泥管进行建模,分析发现,所有材质的管道在变化水头作用下,其有效漏损面积 A 与初始破损口面积 A_0 之间均能满足式(6),即所有破损口均由刚性区域和弹性变形区域共同组成,但不同管道材料对应的线性斜率 m 存在显著差异。Cassa等^[9]关于不同方向的渗漏口变形假定见图1(b)。Malde^[10]设计了含多种破损口形状的UPVC管、高密度聚乙烯(HDPE)管以及钢管的漏损模型试验,验证了该线

性关系的普遍存在性。Ssozi等^[11]利用Abaqus软件分析PVC管、HDPE管在水头作用下线性黏弹性的应变响应,发现破损口面积与水头保持线性关系。Schwaller等^[12]分析2012年马尼拉供水管网漏损流量分布数据,发现FAVAD方程能直接计算含多个漏损点的管网系统漏损流量。Schwaller等^[13]在随机生成含 n 个漏损口的管网系统中进一步分析,发现将管内平均水头代入FAVAD方程可直接计算平均漏损流量,在保证精度的同时显著减少计算量,验证了FAVAD方程在管网漏损流量计算中的适用性。

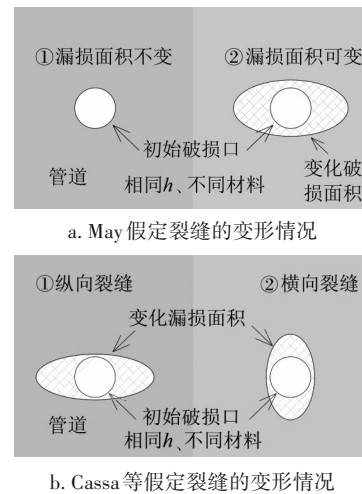


图1 破损口面积变化假设示意

Fig.1 Schematics of the change assumption in damaged opening area

上述研究表明,水头 h 与有效漏损面积 A 之间广泛存在线性联系。

FAVAD方程也可采用以下形式的经验公式表示:

$$Q = aP^{0.5} + bP^{1.5} \quad (9)$$

$$a = \sqrt{2g} C_d A_0 \quad (10)$$

$$b = \sqrt{2g} C_d m \quad (11)$$

式中: a 为固定出流项系数, $m^{2.5}/s$; b 为可变出流项系数, $m^{1.5}/s$ 。

对比式(1)~(11)可知,上述3种出流方程主要区别在于水头 h 的指数取值。孔口方程的水头项指数取值为0.5,表示在任意出流条件下漏损流量与水头均保持平方根比例关系,更适用于常压条件;漏损方程的水头项指数取值范围为0.5~2.5,反映了漏损流量与水头之间的非线性关系,在不规则裂缝或高水压、高流速系统中拟合效果较好;FAVAD方程的水头项指数取值分别为0.5和1.5,在孔口方程假定的基础上考虑了有效漏损面积与水头的线性关系,适用于有压管道与管网系统的漏损流量计算,适用范围较广。

上述3种出流方程的假设与适用范围不同,计算漏损流量时需基于研究对象的关键特性选择合适的方程,综合考虑管道内水头、破损口形状参数、管道材料等因素。

另一方面,以上3种出流方程均用于计算有压水体通过指定破损口的漏损流量,在特定条件下三者互相等价,可描述相同的漏损现象。Van Zyl等^[2]结合弹性变形理论与FAVAD方程进行理论推导,发现在排水管道或低压管道的漏损流量计算中,其理论解析式可退化为孔口方程,表明孔口方程能满足工程精度需求。Lambert^[7]通过试验发现,当破损口为孔洞时,漏损指数 n_1 取值为0.5,此时漏损方程等价于孔口方程。Ekmekcioglu等^[14]认为漏损系数 C 本质上由孔口流量系数 C_d 、 $(2g)^{0.5}$ 等常数参数构成,且在破损口为圆形时,漏损指数 n_1 的拟合值为 0.5073 ± 0.0002 ,此时漏损方程与孔口方程等价。De Marchis等^[15]通过试验定量分析管道直径对漏损流量的影响,发现小直径管道、低水头条件下FAVAD方程可退化为伯努利方程。Van Zyl等^[16]通过有限元模拟不同裂缝形状下的漏损现象,总结得到漏损指数 n_1 与FAVAD方程参数 m 之间存在近似转换关系,具体为:

$$\frac{mh}{A_0} = \frac{n_1 - 0.5}{1.5 - n_1} \quad (12)$$

式(12)构建了FAVAD方程与漏损方程之间的联系,表明二者反映相同的漏损现象。

Van Zyl等^[16]定义了无量纲泄漏数 $L_n = mh/A_0$,并于图2展示了在不同水头作用下 L_n 与 n_1 的对应关系。

由图2可知, L_n 与 n_1 之间存在显著的单调递增关系,当 L_n 接近1时, n_1 对 L_n 的变化较为敏感。

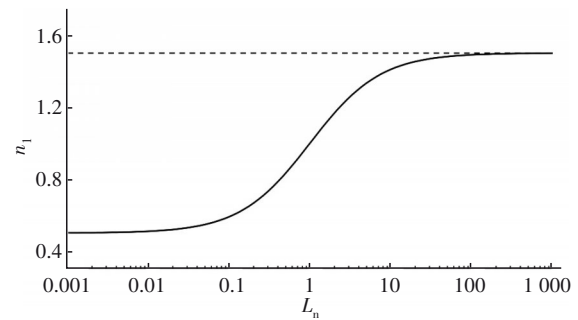


图2 不同水头下 L_n 与 n_1 关系曲线

Fig.2 Curve of L_n and n_1 under different water heads

2 漏损流量计算的影响因素

上述3种出流方程均考虑了有效漏损面积对漏损流量的影响,体现了破损口对漏损现象的控制性作用。影响有效漏损面积的因素可分为两大类:破损口形状参数与管道材料特性。前者主要包含破损口形状、破损口尺寸及管道厚度等结构尺寸参数;后者则体现为管道泊松比、杨氏模量和本构方程等管道材料力学特性参数。

2.1 破损口形状参数分析

在流速一定的条件下, Q 与 A 之间存在严格的单值映射关系,因此,研究破损口形状及尺寸参数在漏损现象中的变化情况,以准确描述有效漏损面积,显得十分关键。

Cassa等^[17]通过有限元建模,分析了初始形状分别为纵向裂缝、圆形小孔及环向裂缝的破损口在变化水头作用下的变形过程。可知,破损口的初始形状对斜率 m 具有显著影响。具体而言,纵向裂缝对 m 的影响最为突出,对水头 h 的敏感性最高;圆形孔口对 h 的敏感性最低;环向裂缝的敏感性则介于二者之间。为验证上述结论的准确性, Van Zyl等^[16]基于式(6)~(8)建立回归模型,对模拟数据中的 h 与 A 进行参数拟合分析。结果表明,相较于破损口宽度,破损口在长度方向的增长对无量纲泄漏数 L_n 的提升效果更为明显,二者呈二次指数上升趋势。这从漏损方程的角度验证了纵向裂缝形状的破损口对管道漏损危害更大的结论。Schwaller等^[12]将上述3种工况的所有模拟数据统一进行拟合,提出了只考虑孔口面积的 m 计算公式:

$$m = 2 \times 10^6 A_0^{2.91} \quad (13)$$

联立式(4)、(12)、(13), Schwaller等^[12]基于Van Zyl等^[2]、Ogura^[18]收集到的 n_1 与 h 数据反演漏损流量 Q ,计算结果与试验数据吻合良好,验证了式

(13)的适用性。

Van Zyl 等^[19]对 FAVAD 方程求导,以分析漏损流量 Q 随 h 的变化趋势和极值,具体见下式:

$$\frac{dQ}{dh} = C_d \sqrt{2g} (0.5A_0 h^{-0.5} + 1.5mh^{0.5}) \quad (14)$$

$$\frac{d^2Q}{dh^2} = C_d \sqrt{2g} (-0.25A_0 h^{-1.5} + 0.75mh^{-0.5}) \quad (15)$$

令式(14)等于零,可求得流量 Q 发展速率的极小值点。解得 $L_n=1/3$ 。这表明当有效漏损面积达到初始漏损面积的 4/3 时,漏损流量的增长速率出现最小值。图 3 为 Q 、 dQ/dh 及 $2m$ 或 $2A_0$ 条件下 dQ/dh 与 h 的关系曲线。可知,当 A 、 m 或 A_0 增大时, Q 均相应增加。具体来看, m 的增长虽然有效降低了漏损流量发生快速增长的阈值水头范围,但在平稳增长期内其流量增长速率较大,导致较高水头下产生的漏损流量更大;而 A_0 的增长则大幅延长了 Q 发生快速增长的阈值水头范围,使得较低水头条件下产生的 Q 相对较大。这表明在不同水头条件下,影响 Q 的主要因素不同:低水头作用时, A_0 为主要影响因素;高水头作用时, m 的影响更为显著。

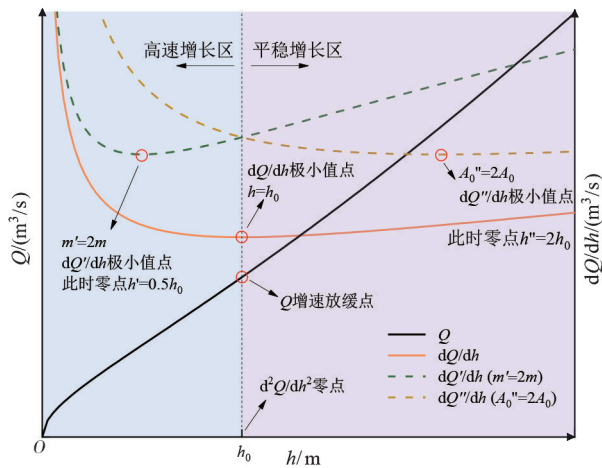


图 3 Q 、 dQ/dh 以及 $2m$ 或 $2A_0$ 条件下 dQ/dh 与水头 h 的关系曲线

Fig.3 Curves of Q , dQ/dh and dQ''/dh under condition of $2m$ or $2A_0$ against h

Shao 等^[20]通过试验探究了不同破损口形状下管内流速 V_0 、 h 对 A 、 C_d 的影响。研究^[21]观察到出流流体的截面积发生收缩,即缩流效应。据此定义孔口变形系数 ε :

$$\varepsilon = A_c/A_0 \quad (16)$$

式中: A_c 为出流流体截面积, m^2 。

Shao 等^[20]忽略破损口产生的小变形,通过改变管内流速 V_0 探究孔口出流流速的变化规律,研究结果如图 4 所示。可知,随着管内流速 V_0 的增大, ε 与 C_d 呈单调下降趋势,但孔口出流流速 V 随 V_0 的增加仍近似保持线性上升,表明 V_0 是影响 V 的主导因素,而 C_d 和出流缩流效应对 V 的影响相对有限。

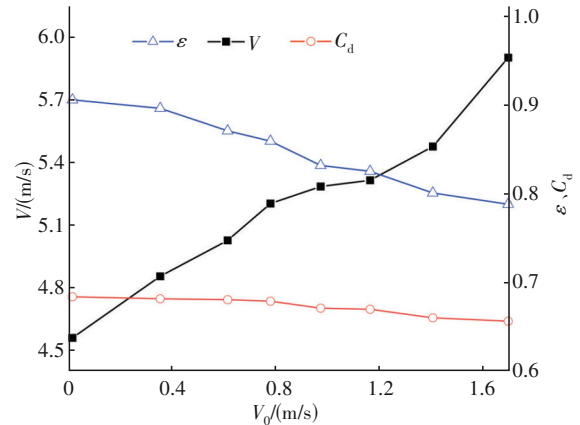


图 4 V 、 ε 、 C_d 与 V_0 的关系

Fig.4 Relationship of V , ε , and C_d as functions of V_0

Mosameem 等^[22]通过试验研究了正负压条件下破损口形状对 C_d 和 n_1 的影响规律。结果表明,入流工况下,不同几何形状破损口对应的 C_d 均大于出流工况下的相应值,但增幅相对有限。具体而言,入流工况下 C_d 稳定在 0.60 左右,出流工况下 C_d 稳定在 0.55 左右。另一方面,漏损指数 n_1 对圆形破损口、环形破损口以及入流工况下的纵向裂缝破损口均不敏感,取值分布稳定在 0.5 左右;但在出流工况下,纵向裂缝对应的漏损指数 n_1 达到 1.0,变异性显著。这也印证了 Van Zyl 等^[16]、Cassa 等^[17]关于纵向裂缝更容易造成严重漏损的结论。

2.2 管道材料特性分析

管道材料的物理力学特性是决定破损口形变量与水头压力之间函数关系的控制因素,该特性在出流方程中主要体现在 C_d 和 m 上。研究人员从管道材料的力学参数及本构方程入手,基于不同的材料特性假设,对上述参数提出了相应的修正方程。

Shahangian 等^[23]通过模型试验和计算流体动力学(CFD)模拟,系统研究了不同材料有压管道的漏损现象。通过对试验数据与模拟数据的拟合分析可知,刚性管道漏损的水头项指数趋近于 0.5,而弹性管道漏损的水头项指数稳定在 1.0 左右。这表明:对于刚性管道,因其形变较小,孔口方程足以描

述其漏损流量的变化规律;对于弹性管道,则需考虑破损口有效漏损面积随水头的变化情况。

Nsanzubuhoro等^[24]使用有限元法对钢、UPVC和HDPE材质的管道进行建模分析,基于管道线弹性变形的假设,通过拟合模拟数据提出了一种考虑管道材料的 m 计算方法,具体为:

$$m = 8 \left(\frac{\rho g A_0 K_s r}{t E} \right) (\alpha - \nu + 1 - \nu \alpha) - 8 \times 10^{-9} \quad (17)$$

式中: t 为管道厚度,m; ρ 为流体密度, kg/m^3 ; E 为管道杨氏模量,Pa; K_s 为应力集中系数; r 为管道内部半径,m; α 为纵向应力与环向应力的比值; ν 为材料泊松比。

将式(17)的计算结果与Malde^[10]的试验数据进行对比,可知UPVC管、HDPE管的理论解析与试验结果吻合良好。

Ssozi等^[11]在验证线性黏弹性管道漏损过程满足FAVAD方程的基础上,使用线性黏弹性本构模型推导了任意时刻 T 管道的有效漏损面积。结果表明,任意时刻 T 管道的总形变量 $[A(T)-A_0]$ 与弹性形变量 (A_e-A_0) 成正比。将管道总形变量与弹性形变量之比定义为黏弹性因子 k_v :

$$k_v = \frac{A(T) - A_0}{A_e - A_0} = \frac{\Delta A(T)}{\Delta A_e} \quad (18)$$

式中: T 为水头作用时间,s; $A(T)$ 为 T 时刻线性黏弹性管道的有效漏损面积, m^2 ; A_e 为弹性管道的有效漏损面积, m^2 ; $\Delta A(T)$ 为 T 时刻破损口总形变量, m^2 ; ΔA_e 为破损口弹性形变量, m^2 ,可采用Cassa等^[17]推导的理论公式进行计算。

将 k_v 代入式(6),推导得到破损口产生线性黏弹性变形时,管道有效漏损面积与水头之间线性斜率的表达式,具体为:

$$m_v = k_v m_e = \frac{k_v A_2 - k_v A_1}{h_2 - h_1} \quad (19)$$

式中: m_v 为线性黏弹性管道有效漏损面积与水头之间的线性斜率,m; m_e 为弹性管道有效漏损面积与水头之间的线性斜率,m; h_1 、 h_2 分别为给定的两个水头,m; A_1 、 A_2 分别为水头 h_1 、 h_2 下破损口发生弹性变形的面积, m^2 。

研究^[11]发现,管道材料对 k_v 影响显著,在HDPE管和PVC管中, k_v 的均值分别为2.10和1.22;而 h 和 T 的变化对 k_v 影响有限,这表明线性黏弹性假设

下,管道破损口的黏弹性变形量主要受管道材料控制。此外,随着漏损时间的延长,破损口变形速率逐渐降低,蠕变变形在漏损12h后达到稳定。

Fox等^[25]基于ANSYS软件建立了含纵向裂缝的管道模型,模拟了自由出流、恒定水头及线性增长水头3种工况下不同纵缝长度的力学响应,拟合得到考虑载荷形式的有效漏损面积的理论公式为:

$$A = \frac{13(\pi D/L_c)^2 + 463}{2000} \frac{P L_c^4}{E t^2} + A_0 \quad (20)$$

式中: L_c 为纵缝长度,m。

研究^[25]发现,纵缝长度、管道壁厚及管道材料弹性模量是影响有效漏损面积的主要因素;纵向裂缝的宽度仅影响初始破损口面积,其对后续形变过程的影响可忽略不计。

3 漏损介质影响

早期对漏损介质的认识存在局限性,如孔口方程未将漏损介质纳入考虑;Jowitt等^[26]、Araujo等^[27]认为管道周围土体仅影响漏损系数 C ,而对漏损指数 n_1 无贡献。实际上,漏损介质水力特性的差异对漏损流量的影响十分显著。Van Zyl等^[2]从理论上分析了破损口处流体-土壤的耦合运动机制,认为漏损流体的流速是土体粒径的函数,直接取决于水头梯度与土体渗透率。Noack等^[28]使用Matlab对管土耦合结构进行仿真模拟,研究了不同渗透性介质下漏损方程参数的取值规律,结果表明,随着土体渗透性逐渐增大,相同水头作用下的漏损流速单调上升。Van Zyl^[29]通过试验发现,当漏损流体处于紊流状态时,破损口附近的土体因无法承受过大水头而抬升形成“空洞”,此时土体渗透性将成为限制漏损流量的主要因素。由此可见,漏损介质对出流方程的影响不可忽略。

Latifi等^[30]通过改变破损口周围土体的颗粒级配,设计试验研究了土体力学参数(如中值粒径 d_{50} 、30%有效粒径 d_{30})、不均匀系数 C_u 、曲率系数 C_c 、渗透系数 K 、渗透率 k 、液限LL、塑限PL、塑性指数 I_p 及液性指数 I_L 对漏损方程的影响,提出了考虑土体综合力学性质的漏损系数修正表达式,具体为:

$$C' = C S^{n_2} \quad (21)$$

式中: C' 为经验漏损系数; S 为与土体力学特性相关的参数; n_2 为经验拟合值。

研究^[30]发现,漏损方程对 d_{50} 、PL、 K 较为敏感。

Latifi等^[31]沿用上述模型试验法对FAVAD方程进行分析,结果表明 d_{50} 、 K 、土体干重度 γ_d 能较好地表征管周土体对漏损流量的影响。上述5个参数均与土体渗透特性显著相关,进一步证明了漏损介质的渗透特性是影响漏损流量的重要因素。

综上所述,控制漏损流量的主要因素包括漏损处相对水头大小、破损口形状参数、管道材料特性以及周围漏损介质,它们在出流方程的参数计算或方程表达式中均有所体现。图5汇总了上述4类控制因素对漏损流量的作用机制。

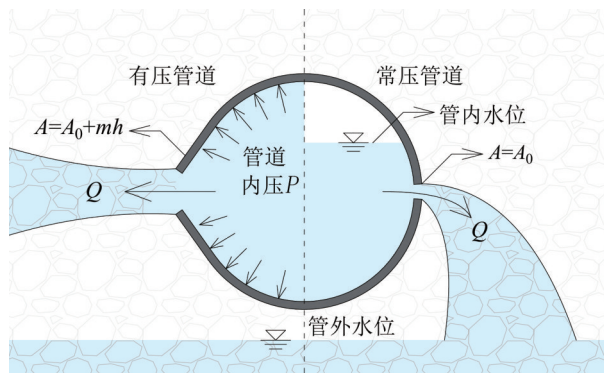


图5 漏损流量主控因素示意

Fig.5 Schematic of main controlling factors of leakage flow rate

4 结论

① 出流方程描述了漏损流量 Q 与破损口处水头 h 之间的函数关系, Q 随 h 单调递增。其中,孔口方程适用于常压管道的漏损计算;漏损方程适用于不规则破损口或高水压、高流速系统;FAVAD方程在有压管道及管网中均具有良好的拟合效果。工程实践中应综合考量管道内压、破损口形状特征及管道材料特性等因素,选择影响漏损流量的主要控制变量,进而选用适合的漏损流量计算方程。

② 破损口对漏损流量的影响体现在其形状参数与管道材料特性两个方面。破损口形状参数主要影响初始漏损面积以及有效漏损面积与水头之间的线性斜率 m ;管道材料特性主要影响孔口变形量。漏损介质对漏损流量的影响主要体现在其渗透性质对出流量的限制作用。

③ 为实现《通知》中预计的漏损率控制指标,应围绕漏损机理开展设计,通过工程措施与技术手段实现减漏防漏,重点推进管网优化、漏点流量监测及老旧管线翻新等工作。现有管道漏损流量研究对实际工程中可能面临的多因素耦合影响考虑

不足,后续应立足管道实际服役环境,深化出流动力学机理研究,构建具有更强普适性的漏损流量预测模型。未来出流研究可考虑的影响因素包括管道变形、地面堆载、水头波动及回填厚度等。

参考文献:

- [1] 张宏伟,牛志广,陈超,等. 供水管道漏损预测模型研究[J]. 中国给水排水, 2001, 17(6): 7-9.
ZHANG H W, NIU Z G, CHEN C, et al. Study on the prediction model for water supply net leakage[J]. China Water & Wastewater, 2001, 17(6): 7-9(in Chinese).
- [2] VAN ZYL J E, CLAYTON C. The effect of pressure on leakage in water distribution systems [J]. Water Management, 2007, 160(2): 109-114.
- [3] STREETER V, WYLIE E, BEDFORD K. Fluid Mechanics[M]. Boston: McGraw-Hill, 1998: 21-22.
- [4] WALSKI T, BEZTS W, POSLUSZNY E T, et al. Modeling leakage reduction through pressure control[J]. Journal American Water Works Association, 2006, 98(4): 147-155.
- [5] GREYVENSTEIN B, VAN ZYL J E. An experimental investigation into the pressure-leakage relationship of some failed water pipes[J]. AQUA-Water Infrastructure, Ecosystems and Society, 2007, 56(2): 117-124.
- [6] THORNTON J. Managing leakage by managing pressure: a practical approach [J]. Water, 2003, 5(5): 43-44.
- [7] LAMBERT A. What do we know about pressure-leakage relationships in distribution systems?[C]//CERM. System Approach to Leakage Control and Water Distribution Systems Management. Brno: CERM, 2001:1-8.
- [8] MAY J. Pressure dependent leakage [J]. World Water and Environmental Engineering, 1994, 17(8): 10.
- [9] CASSA A M, VAN ZYL J E, LAUBSCHER R F. A numerical investigation into the effect of pressure on holes and cracks in water supply pipes[J]. Urban Water Journal, 2010, 7(2): 109-120.
- [10] MALDE R. An Experimental Study of the Hydraulic Behaviour of Leaks with Pressure [D]. Cape Town: University of Cape Town, 2015.
- [11] SSOZI E N, REDDY B D, VAN ZYL J E. Numerical investigation of the influence of viscoelastic deformation on the pressure-leakage behavior of plastic pipes [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 142(3): 04015057.

- [12] SCHWALLER J, VAN ZYL J E. Modeling the pressure-leakage response of water distribution systems based on individual leak behavior [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 141(5): 04014089.
- [13] SCHWALLER J, VAN ZYL J E, KABAASHA A M. Characterising the pressure-leakage response of pipe networks using the FAVAD equation [J]. *Water Science and Technology: Water Supply*, 2015, 15(6): 1373-1382.
- [14] EKMEKCIOĞLU Ö, BASAKIN E E, ÖZGER M. Discharge coefficient equation to calculate the leakage from pipe networks [J]. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 2020, 10(3): 1737-1746.
- [15] DE MARCHIS M, FONTANAZZA C M, FRENI G, et al. Experimental evidence of leaks in elastic pipes [J]. *Water Resources Management*, 2016, 30(6): 2005-2019.
- [16] VAN ZYL J E, CASSA A M. Modeling elastically deforming leaks in water distribution pipes [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 140(2): 182-189.
- [17] CASSA A M, VAN ZYL J E. Predicting the head-leakage slope of cracks in pipes subject to elastic deformations [J]. *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, 2013, 62(4): 214-223.
- [18] OGURA L. Experiment on the relationship between leakage and pressure [J]. *Japan Water Works Association*, 1979, 6(572): 38-45.
- [19] VAN ZYL J E, LAMBERT A O, COLLINS R. Realistic modeling of leakage and intrusion flows through leak openings in pipes [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 143(9): 04017030.
- [20] SHAO Y, YAO T, GONG J Z, et al. Impact of main pipe flow velocity on leakage and intrusion flow: an experimental study [J]. *Water*, 2019, 11(1): 118.
- [21] PATTERSON J, PAGE N W, RITCHIE J B. Contraction coefficients for compressible flow through axisymmetric orifices [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1970, 12(5): 405-415.
- [22] MOSAMEEM A R, VAN ZYL J E. Experimental investigation of leakage flow behavior in pipes subjected to negative pressures [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2025, 151(1): 04024054.
- [23] SHAHANGIAN S A, TABESH M, MIRABI M H. Effects of flow hydraulics, pipe structure and submerged jet on leak behaviour [J]. *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 2019, 52(2): 225-243.
- [24] NSANZUBUHORO R, VAN ZYL J E, ZINGONI A. Predicting the head-area slopes of circular holes in water pipes [J]. *Procedia Engineering*, 2017, 186: 110-116.
- [25] FOX S, BOXALL J, COLLINS R. Derivation and validation of a leakage model for longitudinal slits in polyethylene pipes [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 144(7): 04018034.
- [26] JOWITT P W, XU C. Optimal valve control in water-distribution networks [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1990, 116(4): 455-472.
- [27] ARAUJO L S, COELHO S T, RAMOS H M. Estimation of distributed pressure-dependent leakage and consumer demand in water supply networks [M]//MAKSIMOVIC C, BUTLER D, MEMON F A. *Advances in Water Supply Management*. London: CRC Press, 2003: 119-128.
- [28] NOACK C, ULANICKI B. Modelling of soil diffusibility on leakage characteristics of buried pipes [C]//ASCE. *Proceedings of 8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium*. Reston: ASCE, 2008: 1-9.
- [29] VAN ZYL J E. Theoretical modeling of pressure and leakage in water distribution systems [J]. *Procedia Engineering*, 2014, 89: 273-277.
- [30] LATIFI M, NAEENI S T, MAHDAVI A. Experimental assessment of soil effects on the leakage discharge from polyethylene pipes [J]. *Water Science and Technology: Water Supply*, 2018, 18(2): 539-554.
- [31] LATIFI M, PARVANEH R, NAEENI O. Investigating the influence of surrounding soil properties on leakage discharge from cracks in polyethylene pipes [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2022, 141: 106676.

作者简介:林存刚(1986—),男,山东临沂人,博士,教授、博导,主要从事盾构隧道环境效应、土与结构相互作用及地基渗蚀塌陷防控研究。

E-mail: lincg@mail.sysu.edu.cn

收稿日期:2025-08-04

修回日期:2025-11-02

(编辑:沈靖怡)