

文章编号: 0559-9350(2025)01-0056-07

管道接口缩径的局部阻力试验研究

郭永鑫, 郭新蕾, 王 涛, 付 辉, 潘佳佳, 李甲振

(中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要: 管道接口缩径会产生明显的局部水头损失, 然而一直以来缺乏试验检测资料和评估计算方法。本文建立了管道水头损失检测平台, 提出管道接口局部阻力系数的两种检测方法, 对聚乙烯管热熔对接卷边和球墨铸铁聚乙烯复合管承插接口保护环的局部阻力系数分别进行检测, 分析了接口局部阻力系数的影响因素和变化规律。结果表明: DN150 聚乙烯管热熔对接卷边为圆弧边缘, 凸起高度 δ 约 4.36 mm, 单个接口的局部阻力系数 $\xi \approx 0.086$, 折算当量管长为 0.75 m; DN300 球墨铸铁聚乙烯复合管承插接口保护环为直角边缘, 凸起高度 δ 约为 1.93 mm, 单个接口的局部阻力系数 $\xi \approx 0.022$, 折算当量管长为 0.51 m; 单个接口的局部阻力系数随相对凸起高度 δ/D 减小而减小。接口为直角边缘的局部阻力系数可采用节流孔板的经验公式计算, 圆弧边缘的局部阻力系数可采用钢管焊缝的经验公式计算。研究成果可为管网工程的精细水力计算提供参考。

关键词: 管道接口; 缩径; 水头损失; 局部阻力系数; 当量管长

中图分类号: TV134

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20240195

1 研究背景

输水管道广泛应用于引调水工程、城市给排水和工农业用水中, 部分管道连接方式会在接口断面产生缩径现象。例如, 常用于聚乙烯等塑料管道的热熔对接, 热熔接口卷边凸起将造成接口断面内径不规则缩小, 也称“热熔缩径”; 聚乙烯复合管承插口端部采用金属保护环时, 保护环内径小于管道内径, 产生缩径。管道接口缩径将使水流产生分离和涡流区, 造成一定的局部水头损失, 工程设计阶段通常按沿程水头损失的百分比取值^[1], 具有较大的经验性和不确定性。

不同管材的沿程阻力系数^[2-4]和典型管件的局部阻力系数^[5-7]已有较多检测研究, 但对于管道接口缩径引起的局部阻力关注较少。管道接口的局部阻力与缩径断面的形状、水流流态等因素有关, 其局部阻力影响并不局限于自身的几何长度内, 上、下游相当长范围都会有影响。因此, 管道接口的局部阻力测量需要剔除其上、下游影响范围内的沿程阻力影响, 也就是说需要首先精确测量管道的沿程阻力系数 f , 实际工程还需考虑弯管、阀门等管件局部阻力系数取值精度的影响^[8-9]。管道接口的局部阻力还与其间距有关, 当间距小于某一阈值时, 相邻接口的局部阻力将相互影响, 总局部阻力系数小于单个接口局部阻力系数之和, 且间距越小, 相互影响越明显, 总局部阻力系数越小。研究人员对不同类型相邻管道形变件的局部阻力影响进行研究, 给出了相应的间距阈值, 例如: 白兆亮等^[10-11]对相邻孔板的局部阻力研究认为, 当孔板相对距离 $l_{cr}/D \geq 9$ (l_{cr} 为相邻形变件的间距, D 为管道内径) 时两孔板间已无相互影响; 贺益英等^[12]对弯管研究认为, 当弯管相对距离 $l_{cr}/D \geq (20 \sim 25)$ 时, 相邻弯管局部阻力的影响已十分微弱; 纪昌知等^[13]数值模拟认为 90° 弯管局部阻力的下游影响长度约为 $40D$, 且与管壁的相对粗糙度 Δ/D 有关。综上, 管道接口局部阻力系数的影响因素复杂, 精确测量困难, 由此

收稿日期: 2024-04-09; 网络首发日期: 2024-12-19

网络首发地址: <https://doi.org/10.13243/j.cnki.slxb.20240195>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3202500); 国家自然科学基金项目(52179082)

作者简介: 郭永鑫(1978-), 博士, 正高级工程师, 主要从事调水工程水力控制研究。E-mail: Guoyongxin@iwhr.com

导致相关检测研究资料缺乏, 对其变化规律的认识不足。如何准确分析和评估管道接口缩径造成的局部水头损失, 是实现管道工程安全、经济设计以及输水系统智能调控的关键。

本文首先建立管道水头损失的试验检测平台, 对商用的热熔对接聚乙烯管和承插连接球墨铸铁聚乙烯复合管的水力性能进行检测, 分析热熔卷边和承插口保护环两种典型接口缩径产生的局部阻力特性, 借鉴节流孔板等类似缩径形变件的经验公式给出接口局部阻力系数的经验计算方法, 为管道系统接口局部阻力的评估和设计提供参考依据。

2 检测方法

2.1 试验平台 试验在中国水利水电科学研究院水力学试验室开展。检测平台布置如图 1 所示, 由上游 13 m 高水箱(内装电动平水栅)、数根热熔对接的聚乙烯管或承插连接的球墨铸铁聚乙烯复合管、流量调节阀和下游矩形量水堰组成。试验管道布置有多个测压断面, 试验过程中, 调节不同的上游水箱水位或阀门开度, 待水流稳定后, 通过下游矩形量水堰确定管道的泄流量 Q , 使用测压管测量不同断面间的总水头损失 h_z , 同步记录试验水温 T 。

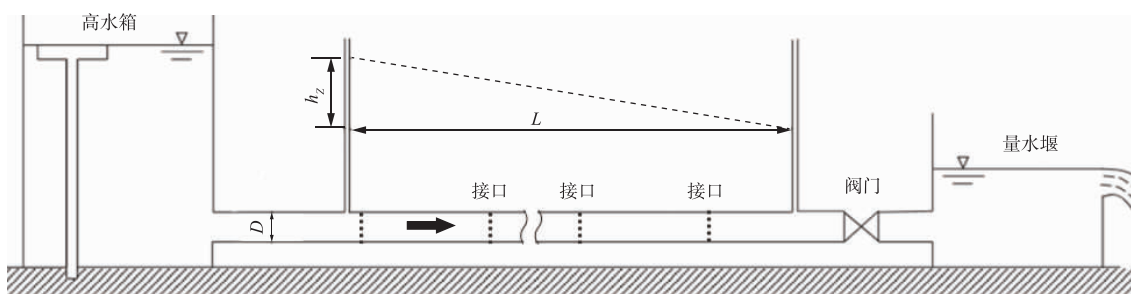


图 1 管道水头损失试验平台

2.2 接口的局部阻力系数测量 考虑接口局部水头损失的管道总水头损失计算公式为

$$h_z = h_j + h_f = \left(\sum \xi + f \frac{L}{D} \right) \frac{V^2}{2g} \quad (1)$$

式中: h_z 为总水头损失, m; h_j 为缩径接口的局部水头损失, m; h_f 为沿程水头损失, m; ξ 为单个缩径接口的局部阻力系数; f 为达西沿程阻力系数; L 为检测管段间距, m; D 为管道内径, m; V 为管道平均流速, m/s; g 为重力加速度, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 。

管道形变件的局部水头损失计算需扣除其影响范围内的沿程水头损失, 然而, 试验中很难对管道接口的局部水头损失和其影响范围内的沿程水头损失分别直接测量。为此, 根据管道的当量粗糙度 Δ 是否已知, 提出如下两种接口局部阻力系数 ξ 的测量方法。

方法一: 当管道的当量粗糙度 Δ 已知时, 将当量粗糙度 Δ 代入柯尔勃洛克-怀特 (Colebrook-White) 公式

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \lg \left(\frac{\Delta}{3.7D} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (2)$$

式中 Re 为管道雷诺数。

由式(2)可得不同流量下的达西沿程阻力系数 f , 进而可依据式(1)求得单个接口的局部阻力系数 ξ 。

方法二: 当管道的当量粗糙度 Δ 未知时, 建立不同断面间距的总水头损失计算方程, 并两两联立, 采用消元法消去式中达西沿程阻力系数 f , 即可求得单个接口的局部阻力系数 ξ 。

试验需考虑的另外一个因素是相邻接口间距的影响。将管道缩径接口看作为一种节流孔板的特例, 则相邻接口局部阻力影响的间距阈值可参考文献[10], 认为相对距离 $l_{cr}/D \geq 9$ 时相邻接口已无相

互影响，单个接口的局部阻力系数具有独立性。

3 不同类型接口的局部阻力系数

3.1 聚乙烯管热熔对接卷边的局部阻力系数 试验检测 DN150 聚乙烯管道的实际内径为 129.5 mm，热熔内卷边的凸起高度 δ 约 4.36 mm，宽度 l 约 13.88 mm，见图 2。单根管道长 6.0 m，相邻接口的相对距离 $l_{cr}/D \approx 46$ ，远大于文献[10]给出的阈值，认为相邻热熔卷边的影响可忽略，单个接口的局部阻力具有独立性。

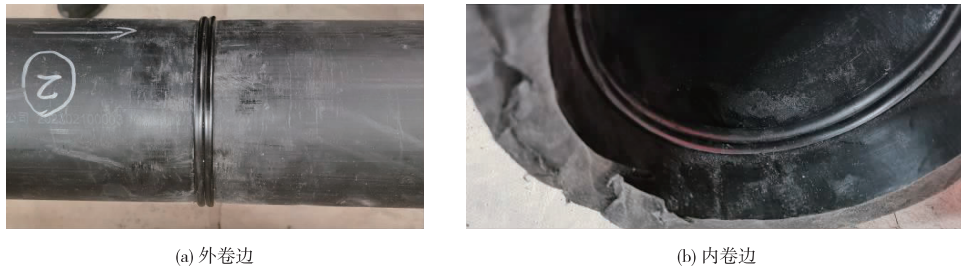


图 2 聚乙烯管热熔对接卷边

采用方法一检测热熔接口的局部阻力系数。试验首先对聚乙烯管道的当量粗糙度 Δ 进行检测^[14-15]。聚乙烯管采用电熔套筒连接时接口处无缩径，接口的局部阻力影响可忽略，流量范围 37.1~62.3 L/s 的试验条件下，电熔套筒连接聚乙烯管的达西沿程阻力系数 f 的变化范围为 0.0137~0.0151，采用柯尔勃洛克-怀特公式反算的当量粗糙度 Δ 值范围为 0.006~0.011 mm，取均值为 $\Delta \approx 0.008$ mm，该值与国内规范^[1]建议 $\Delta = (0.010 \sim 0.015 \text{ mm})$ 的下限和国外规范^[16]建议 $\Delta = (0.003 \sim 0.015 \text{ mm})$ 的中位数相近。

试验测量了热熔对接聚乙烯管两组间距 ($L_1 = 23.970 \text{ m}$ 、 $L_2 = 27.980 \text{ m}$) 的管道总水头损失，每组间距包含 4 个热熔卷边接口，试验的流量范围为 30.0~60.6 L/s，流速范围为 2.273~4.595 m/s，水温 11.45~11.80 °C，雷诺数 Re 范围为 $2.3 \times 10^5 \sim 4.7 \times 10^5$ ，测量结果见图 3。将聚乙烯管道的当量粗糙度 $\Delta = 0.008 \text{ mm}$ 代入式(2)，计算不同流量下的沿程阻力系数 f ，并代入式(1)，即可求得单个热熔接口的局部阻力系数 ξ ，结果见图 4。由于流量、压力水头、当量粗糙度等参数测量的不确定度影响，单个热熔接口的局部阻力系数 ξ 测量结果也具有一定的不确定度，其变化范围为 0.071~0.107，取平均值为 $\xi \approx 0.086$ (标准差为 0.009)。单个热熔接口产生的局部水头损失约占当量粗糙度 $\Delta = 0.008 \text{ mm}$ 时 1.0 m 长 DN150 聚乙烯管道沿程水头损失的 75.3%，折算当量管长为 0.75 m。

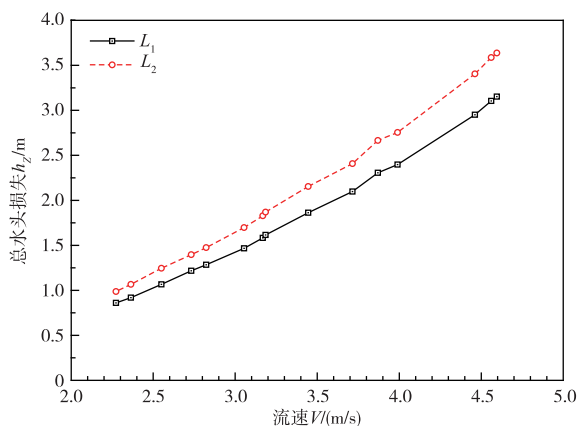


图 3 聚乙烯管的总水头损失和流速的关系

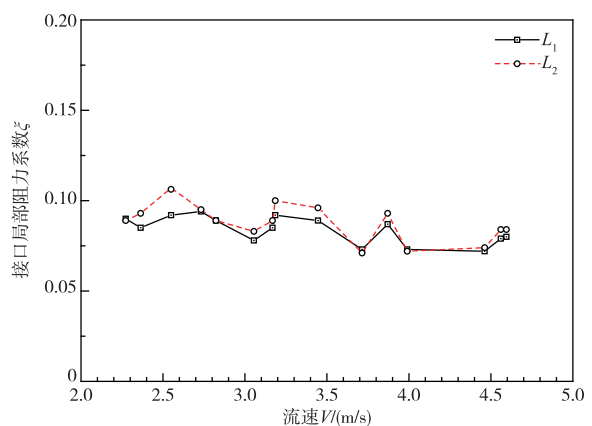


图 4 热熔接口的局部阻力系数 ξ 和流速的关系

3.2 球墨铸铁聚乙烯复合管端部保护环的局部阻力系数 试验检测 DN300 球墨铸铁聚乙烯复合管的

实际内径为 308.1 mm，承口端部保护环的凸起高度 δ 约 2.13 mm，宽度 l 为 41.0 mm，插口端部保护环的凸起高度 δ 约 1.73 mm，宽度 l 为 44.0 mm，见图 5。单根管道长 6.0 m，相邻接口的相对距离 $l_{er}/D \approx 19.5$ ，大于文献[10]给出的阈值，认为相邻接口保护环的影响可忽略，单个接口的局部阻力具有独立性。



(a) 插口端保护环

(b) 承口端保护环

图 5 球墨铸铁聚乙烯复合管端部保护环

球墨铸铁聚乙烯复合管的当量粗糙度 Δ 难以检测获得，因此采用方法二检测接口保护环的局部阻力系数。试验测量了球墨铸铁聚乙烯复合管 3 组不同间距 ($L_1 = 1.00$ m、 $L_2 = 32.70$ m、 $L_3 = 35.70$ m) 的管道总水头损失，每组间距分别包含 1 个、5 个和 6 个承插接口，试验流量范围为 77.2~273.0 L/s，流速范围为 1.035~3.662 m/s，水温 12.0~12.8 °C，雷诺数 Re 范围为 $2.6 \times 10^5 \sim 9.2 \times 10^5$ ，结果见图 6。

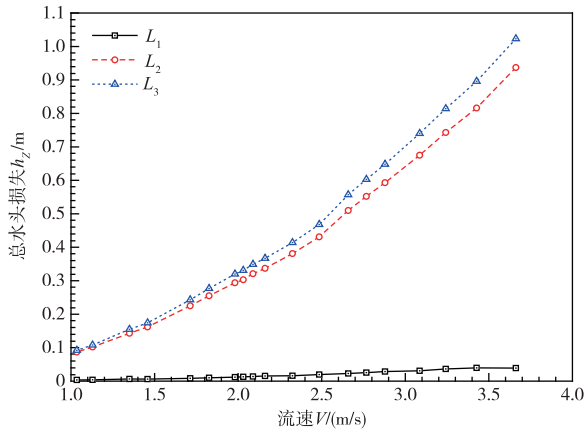


图 6 球墨铸铁聚乙烯复合管的总水头损失与流速关系

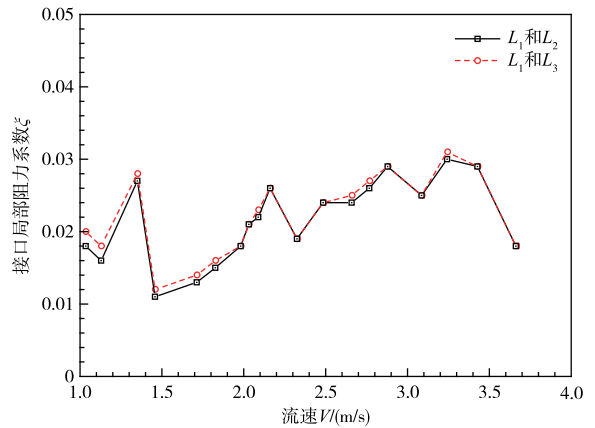


图 7 接口保护环的局部阻力系数 ξ 与流速关系

将不同间距的总水头损失测量值代入式(1)，并联立为方程组

$$\begin{cases} h_{zL1} = \left(\xi + f \frac{1.0}{D} \right) \frac{V^2}{2g} \\ h_{zL2} = \left(5\xi + f \frac{32.7}{D} \right) \frac{V^2}{2g} \\ h_{zL3} = \left(6\xi + f \frac{35.7}{D} \right) \frac{V^2}{2g} \end{cases} \quad (3)$$

式中 h_{zL1} 、 h_{zL2} 、 h_{zL3} 分别为间距 L_1 、 L_2 和 L_3 的总水头损失，m。

采用消元法两两联立消去式(3)中沿程阻力系数 f ，即可求得单个接口的局部阻力系数 ξ 。由于压力水头测量精度的影响，消元时选取接口数量相差较大的两个断面间距联立求解，结果见图 7。单个

承插接口保护环的局部阻力系数 ξ 测量具有一定的不确定度，其变化范围为 0.011~0.031，取平均值为 $\xi \approx 0.022$ (标准差为 0.005)。单个承插接口保护环产生的局部水头损失约占当量粗糙度 $\Delta = (0.003 \sim 0.010) \text{ mm}$ 时 1.0 m 长 DN300 管道沿程水头损失的 51.2%，折算当量管长为 0.51 m。

4 接口局部阻力系数的经验公式

单组接口的试验数据难以得出局部阻力系数的变化规律，为此考虑借鉴已有相似形状管道形变件的局部阻力系数变化规律。管道接口缩径造成过流断面“先突缩后突扩”（见图 8），并引起水流的分离，形成涡流区，其断面形状变化及局部扰流机理与节流孔板和钢管焊缝的类似，因此后二者的局部阻力系数经验公式可供参考。

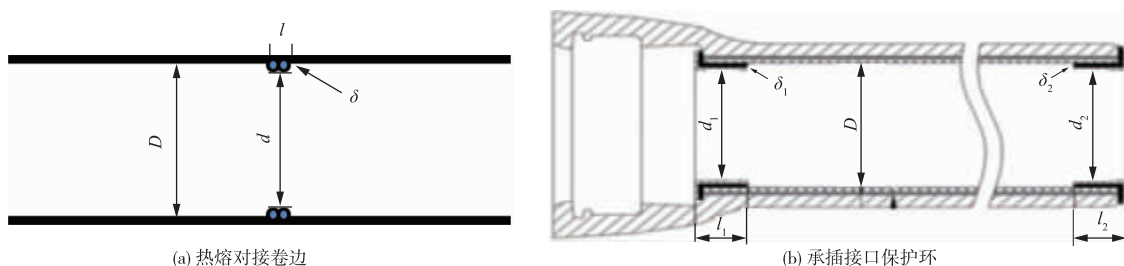


图 8 典型管道接口缩径示意

单个突缩或突扩的局部阻力系数的研究已较为成熟，二者之和的经验公式为^[17]

$$\xi_0 = a^2 + 0.5a \quad (4)$$

$$a = 1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2 \quad (5)$$

式中： ξ_0 为以缩径断面流速计算的局部阻力系数； a 为系数； d 为缩径断面的直径，m。式(4)右侧第一项为断面突扩的局部阻力系数，第二项为断面突缩的局部阻力系数。

节流孔板的局部阻力系数经验公式为^[18]

$$\xi_0 = 0.5a + \tau a \sqrt{a + a^2} \quad (6)$$

式中： τ 为考虑孔板边缘形状和流体流动条件的系数，为 l/d 的经验函数； l 为孔板宽度，m。当 $l/d=0$ 时， $\tau=1.35$ ，为锐边孔板；当 $l/d>2.4$ 时， $\tau=0$ ，式(6)与式(4)一致。

单条钢管焊缝的局部阻力系数经验公式为^[19]

$$\xi = 13.8 \left(\frac{\delta}{D} \right)^{1.5} \quad (7)$$

式中： ξ 为以管道断面流速计算的局部阻力系数； δ 为焊缝的凸起高度， $\delta=0.5(D-d)$ ，m。

图 9 为锐边孔板、钢管焊缝和突缩突扩三种管道缩径的局部阻力系数 ξ 随相对凸起高度 δ/D 的变化规律，表 1 为热熔对接卷边和承插口保护环两种典型管道接口的局部阻力系数试验值与经验公式计算值比较，由图表分析可知：

(1)管道缩径引起的局部阻力系数 ξ 不仅随相对凸起高度 δ/D 减小而减小，而且与缩径断面的边缘形状有关。节流孔板的局部阻力系数较大，锐边孔板时为最大，这是由于锐边直角边缘容易引起流体分离并形成涡流区，减小过流断面，增大水头损失；钢管焊缝的局部阻力系数较小，这是由于顺水流方向的圆弧边缘减小水流的分离和涡流区，减弱断面的收缩效应，相应的水头损失较小。锐边孔板和钢管焊缝的局部阻力系数可作为管道缩径的局部阻力系数 ξ 取值上、下限。

(2)聚乙烯管热熔对接卷边的相对凸起高度 $\delta/D=0.034$ ，缩径断面边缘为光滑圆弧(图 8(a))，局部阻力系数 $\xi \approx 0.086$ 与钢管焊缝的经验公式(7)计算值 $\xi=0.085$ 相近。球墨铸铁聚乙烯复合管承插接口保护环的相对凸起高度 $\delta/D=0.006$ ，缩径断面边缘为直角(图 8(b))，局部阻力系数 $\xi \approx 0.022$ 与节

流孔板的经验公式(6)计算值 $\xi=0.019$ 相近。据此推断,对于管道接口为直角边缘缩径的局部阻力系数可采用节流孔板的经验公式,对于圆弧边缘缩径可采用钢管焊缝的经验公式。

表 1 管道接口局部阻力系数 ξ 的试验值与经验公式计算值比较

接口类型	相对凸起高度 δ/D	试验值 ξ	经验公式值 ξ		
			节流孔板	突缩突扩	钢管焊缝
热熔对接卷边	0.034	0.086	0.190	0.108	0.085
承插口保护环	0.006	0.022	0.019	0.014	0.007

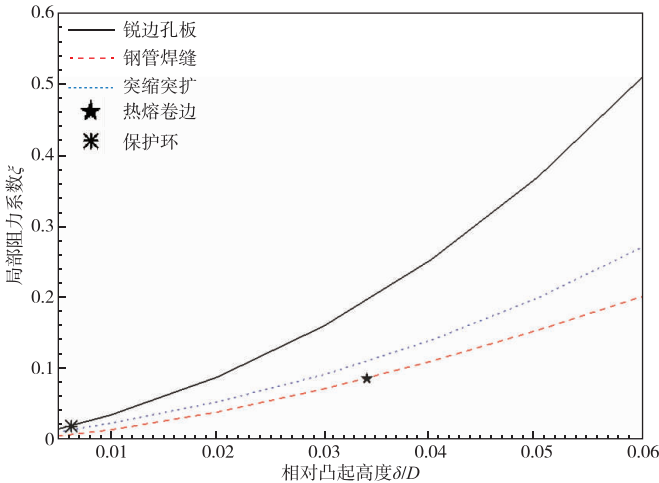


图 9 不同类型管道缩径形变件的局部阻力系数 ξ 变化规律

5 结论

本文提出了当量粗糙度已知和未知两种条件下管道接口局部阻力系数的检测方法,对聚乙烯管热熔对接卷边和球墨铸铁聚乙烯复合管承插口保护环两种典型商用管道接口的局部阻力系数进行检测分析,得出如下结论:

(1)管道接口缩径的局部阻力作用显著。聚乙烯管的当量粗糙度 Δ 约为 0.008 mm, DN150 聚乙烯管热熔对接卷边的凸起高度 δ 约 4.36 mm,单个接口的局部阻力系数 $\xi \approx 0.086$,折算当量管长为 0.75 m。球墨铸铁聚乙烯复合管的当量粗糙度 Δ 未知, DN300 球墨铸铁聚乙烯复合管承插接口保护环的凸起高度 δ 约 1.93 mm,单个接口的局部阻力系数 $\xi \approx 0.022$,折算当量管长为 0.51 m。

(2)管道接口缩径的局部阻力系数 ξ 与相对凸起高度 δ/D 和缩径断面的边缘形状有关。单个接口的局部阻力系数 ξ 随相对凸起高度 δ/D 减小而减小。 δ/D 相同时,缩径断面为直角边缘(如承插口保护环)的局部阻力系数较大,可采用节流孔板的经验公式计算;缩径断面为圆弧边缘(如热熔对接卷边)的局部阻力系数较小,可采用钢管焊缝的经验公式计算。

由于样本数量的有限性,试验结论尚需在工程实践中进一步验证和完善。试验没有考虑相邻接口局部阻力的影响,其间距阈值不仅与相对间距 l_{cr}/D 有关,也应与相对凸起高度 δ/D 有关,后续将通过数值模拟等方式进一步研究。

参 考 文 献:

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 埋地塑料给水管道工程技术规程: CJJ 101—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.

[2] KAMAND F Z. Hydraulic friction factors for pipe flow[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1988,

- 114(2): 311-323.
- [3] FARSHAD F F, RIEKE H H. Surface roughness design values for modern pipes[J]. Spe Drilling & Completion, 2006, 21(3): 212-215.
 - [4] 郭永鑫, 郭新蕾, 杨鹏志, 等. 管道水力摩阻系数的敏感性分析[J]. 水利学报, 2019, 50(8): 1021-1028.
 - [5] 贺益英, 赵懿珺, 孙淑卿, 等. 弯管局部阻力系数的试验研究[J]. 水利学报, 2003(11): 54-58.
 - [6] 张昕, 纪昌知, 姜敏, 等. 相对粗糙度和雷诺数对 90° 弯管局部阻力系数的影响[J]. 水力发电学报, 2013, 32(4): 88-93, 152.
 - [7] 旷金国, 王朝晖, 戴明明. 区域供冷系统管路管件局部阻力系数综述[J]. 暖通空调, 2022, 52(12): 88-95.
 - [8] 常胜, 牧振伟, 万连宾. 大口径玻璃钢管承插式接头局部水头损失系数探究[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(4): 89-92, 101.
 - [9] 谭震, 郭新蕾, 李甲振, 等. 基于多尺度卷积神经网络的管道泄漏检测模型研究[J]. 水利学报, 2023, 54(2): 220-231.
 - [10] 白兆亮, 李琳. 有压管道中孔板相对间距对局部阻力系数的影响及其机理研究[J]. 水电能源科学, 2015, 33(1): 177-182.
 - [11] 白兆亮, 李琳. 有压输水管道孔板局部阻力相邻影响试验[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(2): 28-31.
 - [12] 贺益英, 赵懿珺, 孙淑卿, 等. 输水管线中弯管局部阻力的相邻影响[J]. 水利学报, 2004(2): 17-20.
 - [13] JI C Z, ZHANG X, JIANG M, et al. Numerical simulation of influence of 90° bend pipeline geometric shape on local head loss coefficient[C]//International Conference on ICMET, Singapore, 2010.
 - [14] 杨开林, 郭永鑫, 付辉, 等. 管道当量粗糙度的率定及不确定度[J]. 水利学报, 2012, 43(12): 1397-1404.
 - [15] GUO X, WANG T, YANG K, et al. Estimation of equivalent sand-grain roughness for coated water supply pipes [J]. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 2020, 11(1): 04019054.
 - [16] Council of Standards Australia. Design charts for water supply and sewerage: AS 2200-2006 (R2017)[S]. Sydney: Standards Australia, 2006.
 - [17] 李炜, 徐孝平. 水力学[M]. 武汉: 武汉水利电力大学出版社, 1999.
 - [18] 国家能源局. 火力发电厂汽水管设计规范: DL/T 5054—2016[S]. 北京: 中国计划出版社, 2016.
 - [19] 华绍曾, 杨学宁. 实用流体阻力手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.

Experimental study on minor head losses of pipeline joints

GUO Yongxin, GUO Xinlei, WANG Tao, FU Hui, PAN Jiajia, LI Jiazhen

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, Beijing 100038, China)

Abstract: An internal protrusion from a pipeline joint will lower diameter and advance head loss. For the minor head losses of pipeline joints, there is currently a dearth of calculation methods and experimental data. In addition to establishing a pipeline head loss test rig, this paper suggests two test procedures for determining the minor head loss coefficients of pipeline joints. Tests were done on the minor head loss coefficients of a push-on joint of ductile iron polyethylene composite pipes and a butt fusion joint of polyethylene pipes, then the influencing factors and variations of the minor head loss coefficients are analyzed. A butt fusion joint of DN150 polyethylene pipes has a curved edge melt bead and a 4.36 mm internal protrusion height. The minor head loss coefficient ξ of a butt fusion joint is approximately 0.086, indicating that an equivalent length of 0.75 meters would be necessary. A push-on joint of DN300 ductile iron polyethylene composite pipes has a right-angle edge protective ring with an internal protrusion height δ of approximately 1.93 mm. The minor head loss coefficient ξ of a push-on joint is about 0.022, indicating that an equivalent length of 0.51 meters would be required. The minor head loss coefficient of a pipeline joint decreases with decrease of the relative protrusion height δ/D . The empirical formulas of minor head losses of pipeline joints are given for a circular arc edge and a right angle edge, respectively. This research results can provide a basis for the precise hydraulic calculation of pipeline network engineering.

Keywords: pipeline joint; reduced diameter; head loss; minor loss coefficient; equivalent length

(责任编辑: 韩 昆)