

中文引用格式:徐后佳,帅健,李云涛,等. 多失效模式下天然气管网线路系统可靠性评估模型[J]. 中国安全科学学报,2025,35(9): 176-184.

英文引用格式:XU Houjia, SHUAI Jian, LI Yuntao, et al. Reliability assessment model of natural gas pipeline line system under multiple failure modes[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(9): 176-184.

多失效模式下天然气管网线路系统可靠性 评估模型^{*}

徐后佳^{1,2}, 帅健^{1,2}教授, 李云涛^{**1,2}教授, 闫序¹,

李兴涛³高级工程师, 孙秉才⁴高级工程师

(1 中国石油大学(北京)安全与海洋工程学院, 北京 102249; 2 中国石油大学(北京)油气生产安全与应急技术应急管理部重点实验室, 北京 102249; 3 中国石油国际勘探开发有限公司, 北京 100034; 4 中国石油集团安全环保技术研究院有限公司, 北京 102206)

中图分类号:X937

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.09.0510

资助项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3011300); 中国石油天然气集团有限公司科技项目(2023DJ6508)。

【摘要】 为保障管网安全运行,全面量化评价天然气管网线路的系统可靠性,提出“单元-管段-管网”3个层级的天然气管网线路系统可靠性评估模型。首先,通过分析管网线路系统组成,建立钢管、焊缝单元在不同失效模式下的状态方程,结合蒙特卡罗算法,计算不同失效模式下的失效概率。基于事故树和最小次序理论构建“单元-管段”层级的可靠性模型,实现“单元-管段”层级的可靠性计算。其次,运用GO法分析管网线路拓扑结构,构建“管段-管网”层级的结构可靠性模型,计算整个管网线路系统的结构可靠性,快速定位可靠性薄弱的管段。最后,结合某管网实例验证该模型的准确性和适用性。结果表明:管网线路系统的可靠性与管材强度和壁厚呈正相关,与径厚比及内压呈负相关;相较于以X80为代表的高钢级管道,低钢级管道构成的管网系统对外部因素具有更高敏感性,其可靠性受外部扰动的影响程度更为显著。

【关键词】 失效模式; 管网线路系统; 可靠性评估; 管段可靠度; GO法

Reliability assessment model of natural gas pipeline line system under multiple failure modes

XU Houjia^{1,2}, SHUAI Jian^{1,2}, LI Yuntao^{1,2}, YAN Xu¹, LI Xingtao³, SUN Bingcai⁴

(1 College of Safety and Ocean Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 2 Key Laboratory of Oil and Gas Production Safety and Emergency Technology Emergency Management, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 3 China National Oil and Gas Exploration and Development Company Ltd., Beijing 100034, China; 4 CNPC Safety and Environment Protection Research Institute, Beijing 102206, China)

Abstract: In order to ensure the safe operation of gas pipeline networks and to enable the overall

* 文章编号:1003-3033(2025)09-0176-09; 收稿日期:2025-04-03; 修稿日期:2025-06-10

** 通信作者:李云涛(1988—),男,陕西岐山人,博士,教授,主要从事油气火灾试验与仿真技术、危险化学品风险评价等方面的研究。

E-mail: liyt@cup.edu.cn。

reliability assessment of pipeline systems, a three-level reliability evaluation model "component-segment-pipeline network" was proposed for natural gas pipeline networks. First, the state equations of steel pipe and weld units under different failure modes were established by analyzing the composition of the pipe network line system. Combined with the Monte Carlo algorithm, the failure probability under different failure modes was calculated. Based on fault tree analysis and the minimal cut set theory, a "component-segment" level reliability model was developed, enabling the hierarchical reliability evaluation from components to pipeline segments. Next, the GO method was applied to analyze the topological structure of the pipeline network, and a structural reliability model at "segment-pipeline network" level was established. The structural reliability of the entire pipeline network was calculated and weak segments in terms of reliability were identified rapidly. Finally, a case study was conducted to verify the accuracy and applicability of the proposed model. The results show that the reliability of pipeline network systems is positively correlated with pipe material strength and wall thickness, and negatively correlated with the diameter-to-thickness ratio and internal pressure. Compared to high-grade pipelines represented by X80, networks composed of lower-grade pipelines exhibit higher sensitivity to external factors, with their reliability being more significantly affected by external disturbances.

Keywords: failure mode; pipe network line system; reliability assessment; pipeline segment reliability; graphical and operational (GO) method

0 引言

油气管道运输在推动经济社会发展中发挥着关键作用,但其安全隐患亦不容忽视^[1]。天然气管线多深埋于地下,服役环境复杂且失效模式多样,开展天然气管网线路多失效模式分析,并以线路系统为整体进行可靠性评价,对保障天然气安全稳定供应具有着重要意义。

当前,管道可靠性研究多聚焦于管段单元或单一缺陷的可靠性计算。王海燕等^[2]针对单一腐蚀作用下的管道失效开展分析,通过不同评价准则预测含腐蚀缺陷管道的失效压力。骆正山等^[3]构建有限元模型,预测含腐蚀缺陷管道的失效载荷,拟合极限压力公式,并提出强度-干涉可靠性模型,为管道结构可靠性研究奠定基础。任伟等^[4]在干涉模型基础上,基于应力、应变失效判据,确定相关参数统计分布,结合蒙特卡罗模拟,量化评价环焊缝的可靠性。王旭等^[5]提出基于应变判据的环焊缝失效分析方法,通过数值模拟对比不同学者与标准中失效评估曲线的保守性与适用范围,优化安全评估流程。ABYANI等^[6]利用龙卷风图筛选关键随机变量,通过有限元模型,预测海底管道失效极限状态,并计算失效概率。ABDELMOETY等^[7]采用响应面法对管道凹陷开展基于应变的可靠性分析,通过有限元模型,量化不同的管道参数、压头尺寸和凹痕深度对管道可靠性的影响。除管道失效机制外,可靠性定量求解及算法优化也是研究重点^[8]。CALEYO等^[9]

使用贝叶斯参数估计法分析管道的外腐蚀数据,得到缺陷密度与尺寸的较准确估计值,进一步提高可靠度计算结果的准确性。LEIRA^[10]通过增强蒙特卡罗算法计算腐蚀管道可靠性,对比分析缺陷独立与相互作用下的管道可靠性,相较于单一缺陷模型更具全面性。综上所述,现有研究存在2点不足:①聚焦单一失效模式,缺乏多失效模式下的可靠性分析,难以适配复杂失效场景^[11-12];②以管网线路系统整体为对象的可靠性评估研究较少。

鉴于此,笔者拟以钢管与焊缝作为天然气管网线路系统的基础单元,明确其不同失效模式下状态函数最小统计量的分布及可靠度,进而采用GO (Graphical and Operational)法分析管网线路结构,最终构建“单元-管段-管网”3层级的可靠性评估模型,以量化评价天然气管网线路。

1 可靠性评估模型构建

1.1 管网失效数据收集与分析

收集分析美国管道和危险品安全管理局的管道失效数据库的失效数据^[13],发现在导致油气管道失效的众多因素中,人为因素(施工挖掘破坏、外力损伤等)是最主要原因,其次是腐蚀引发的泄漏或破裂。因此,将腐蚀泄漏、含腐蚀缺陷管道破裂、环焊缝开裂及第三方挖掘破坏这4种失效模式作为管网线路系统可靠性评价的核心指标。

1.2 极限状态方程构建

1) 腐蚀泄漏。基于管道腐蚀临界深度 a_m 和壁

厚 t 的关系($a_m = 0.8t$),构建钢管腐蚀泄漏状态方程^[14]如下:

$$\Omega = a_m - d \tag{1}$$

式中: Ω 为管道的腐蚀泄漏极限深度,mm; d 为腐蚀深度,mm。

2) 含腐蚀缺陷管道破裂。采用《Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines》^[15] 标准计算含缺陷管道的极限压力 Y_m , 对比极限压力 Y_m 与内压 Y_i ,判断含腐蚀缺陷钢管是否发生破裂失效,构建含腐蚀缺陷钢管破裂失效状态方程如下:

$$\lambda = Y_m - Y_i \tag{2}$$

式中: λ 为含腐蚀缺陷管道破裂极限压力,MPa; Y_m 为管道承载的极限压力,MPa; Y_i 为管道运行时的内压,MPa。

3) 环焊缝开裂。参考金属结构缺陷评估标准^[16],采用 Option1 评价等级来评估焊缝裂纹,构建环焊缝开裂失效状态方程如下:

$$\Gamma = f(L_r) - K_r(L_r) \tag{3}$$

式中: Γ 为管道环焊缝开裂函数; $f(L_r)$ 为评定裂纹尖端塑性塌陷风险的函数; L_r 为载荷比; K_r 为断裂比。

4) 第三方挖掘破坏。作为导致线路失效的主要原因,当挖掘机作用于管体时,若挖掘作用力 U_m 大于管道抵抗力 U_d ,将引发穿刺泄漏^[17]。基于此,构建第三方挖掘破坏状态方程如下:

$$\psi = U_m - U_d \tag{4}$$

式中: ψ 为管道受第三方挖掘破坏时承受的作用力,kN; U_m 为挖掘作用力,kN; U_d 为管道抵抗力,kN。

1.3 “单元-管段”层级可靠性评估模型构建

1.3.1 管段可靠度计算

WEIBULL^[18] 提出材料强度尺寸效应,即结构尺寸越大,出现低强度材料单元的概率越高,此单元的失效风险越高,因此,系统的失效由最弱环节的失效所决定。

图 1 为长度 L 的管段离散示意图。若管段各单元具备相近的服役环境,且钢材性能、壁厚、直径基本一致,则将该管段离散为若干钢管与焊缝单元,钢管与焊缝单元的强度可分别视为服从同一分布。

将钢管单元长度设定为 L_E ,已知母体概率密度函数为 $f_m(x)$, 累计分布函数为 $F_m(x)$, 则最小次序统计量的累计分布函数如下式:

$$F(x) = 1 - (1 - F_m(x))^n \tag{5}$$

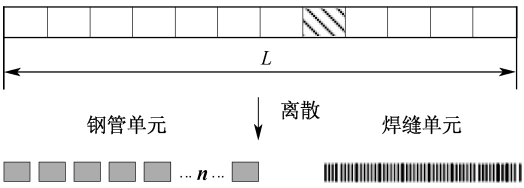


图 1 管段离散

Fig. 1 Pipe section discrete

式中: $F(x)$ 为 n 个单元中最弱强度的累计分布函数; n 为单元个数; x 为单个系统单元的强度随机变量。

单元最小次序统计量概率密度函数 $f(x)$ 如下式:

$$f(x) = F'(x) = n(1 - F_m(x))^{n-1}f_m(x) \tag{6}$$

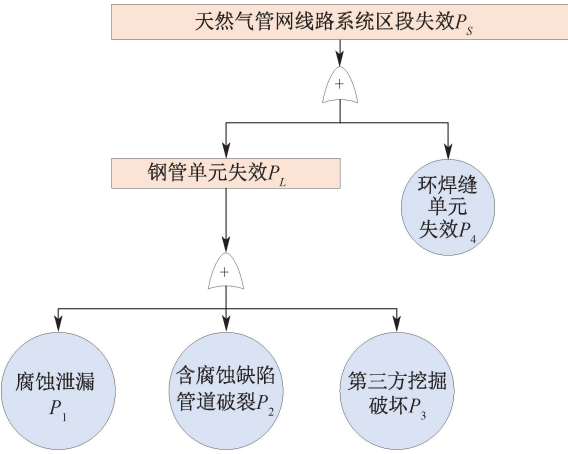
根据次序统计量定义,连续串联系统的强度可由单元强度的最小次序统计量表征。基于应力-强度干涉理论^[19],系统可靠度可视为管段随机应力变量小于单元强度最小次序统计量的概率,计算如下:

$$R = P(C < \delta_1, C < \delta_2, \dots, C < \delta_n) = \int_0^\infty f_c(C) \left[\int_C^\infty f_m(x) dx \right]^n dC \tag{7}$$

式中: C 为应力,Pa; R 为系统可靠度; P 为概率; $f_c(C)$ 为应力分布的概率密度函数; δ_n 为第 n 个单元的强度,MPa。

1.3.2 多失效模式下管段可靠度计算

将不同失效模式视为独立事件,构建线路管段失效事故树模型,如图 2 所示。



注: + 为或逻辑。

图 2 线路管段失效事故树模型

Fig. 2 Fault tree model of line section failure

基于事故树模型,计算钢管单元失效概率:

$$P_L = 1 - (1 - P_1)(1 - P_2)(1 - \varepsilon P_3) \tag{8}$$

式中: P_L 为管段中钢管单元失效概率; P_1 、 P_2 、 P_3 分别为因腐蚀泄漏、含腐蚀缺陷管道破裂、第三方挖掘破

坏导致的管段失效概率; ε 为挖掘事件的发生概率。

计算管段的失效概率:

$$P_s = 1 - (1 - P_L)(1 - P_4) =$$
$$1 - (1 - P_1)(1 - P_2)(1 - \varepsilon P_3)(1 - P_4) \quad (9)$$

式中: P_s 为管段的失效概率; P_4 为管段中的环焊缝单元失效概率。

综上,管段单元的失效状态由应力与强度共同决定。通过拟合蒙特卡罗模拟结果,确定不同失效模式下单元状态函数分布 $F(G)$,结合式(6)计算单元状态函数值的最小次序分布函数 $F(G_s)$ 与密度函数 $f(G_s)$ 。通过计算 $\int_{-\infty}^0 f(G_s) dG_s$ 积分,确定各失效模式下的管段可靠度。

1.3.3 蒙特卡罗模拟参数

在蒙特卡罗计算中,依据实际检测数据和统计数据来确定缺陷及管材参数的分布类型。体积型缺陷的深度、长度和宽度均服从对数正态分布,其均值取自内检测器的检测尺寸,标准差为检测器的检测误差;结合环焊缝异常的现场开挖数据,经统计分析后,发现裂纹缺陷服从正态分布。管材方面,冲击功符合 Weibull 分布,断裂韧性符合正态分布。

为判定蒙特卡罗模拟的收敛性,引入变异系数

表 1 各类型操作的可靠度运算

Table 1 Reliability operations for each type of operation

类型	对象	可靠度	失效概率	失效率	维修率
类型 1	操作符参数 Q	$R_Q(1) = 1$	$P_Q(2) = 0$	$\lambda_Q = 0$	$\mu_Q = \infty$
	输入信号参数 W	$R_W(1)$	$P_W(2)$	λ_W	μ_W
	输出信号参数 T	$R_T(1) = R_W(1)$	$P_T(2) = P_W(2)$	$\lambda_T = \lambda_W$	$\mu_T = \lambda_T R_T(1) / P_T(2)$
类型 2	操作符参数 Q	$R_Q(1) = 1$	$P_Q(2) = 0$	$\lambda_Q = 0$	$\mu_Q = \infty$
	输入信号参数 W	$R_{W1}(1)、R_{W2}(1)、\cdots$	$P_{W1}(2)、P_{W2}(2)、\cdots$	$\lambda_{W1}、\lambda_{W2}、\cdots$	$\mu_{W1}、\mu_{W2}、\cdots$
	输出信号参数 T	$R_T(1) = 1 - P_T(2)$	$P_T(2) = \prod_{i=1}^n P_{Wi}(2)$	$\lambda_T = \sum_{i=1}^n \mu_{Wi}$	$\mu_T = \lambda_T R_T(1) / P_T(2)$
类型 5	操作符参数 Q	$R_Q(1) = 1$	$P_Q(2) = 0$	$\lambda_Q = 0$	$\mu_Q = \infty$
	输出信号参数 T	$R_T(1) = R_Q(1)$	$P_T(2) = 0$	$\lambda_T = 0$	$\mu_T = \infty$

采用 GO 法进行系统可靠性计算时,若某一操作符失效,与其相关的正常单元及操作符将不参与系统运行,直至故障段修复。串联结构是典型的停工相关结构,其等效单元可靠度计算如下:

$$\left\{ \begin{aligned} R_W(1) &= \prod_{i=1}^M R_i(1) \\ P_W(2) &= 1 - \prod_{i=1}^M R_i(1) \\ \lambda_T &= \sum_{i=1}^M \lambda_i \\ \mu_T &= \lambda_T R_W(1) / P_W(2) \end{aligned} \right. \quad (10)$$

(Coefficient of Variation, COV) 作为收敛判据。连续进行 10^6 次模拟后,若对应的 COV 低于 0.5%,则模拟已达到收敛状态。

1.4 “管段-管网”层级可靠度计算模型

GO 法可通过操作符的输入与输出表示信号的次序^[20],以操作码连接构建信号流网络。在天然气管网建模中,将管网线路系统视作可维修系统,操作符表示可维修管段,采用 GO 法描述天然气输送的次序性,计算系统可靠性并识别薄弱管段。

将管网线路拓扑图转化为由多输入、多输出与若干操作符组成的 GO 图。从管网系统气源,沿着气流输送方向,逐个按操作符运算,确定系统的整体输出状态与可靠度。各类型操作的可靠度运算见表 1。表 1 中,类型 1 操作符模拟的管段具有 2 个状态:成功状态(天然气流顺利通过)和故障状态(天然气无法通过该管段)。类型 2 为或门,只要有 1 个输入信号正常,输出信号就符合或门逻辑,可表示天然气管道系统中多个天然气通道的汇合处。类型 5 为信号发生器,无输入信号且仅有输出信号 T ,可表示系统输入源头,可作为管网线路系统 GO 图中的气源。

式中: M 为管段个数; $R_i(1)$ 、 λ_i 分别为第 i 管段的可靠度和失效率; λ_T 为系统总的失效率; μ_T 为系统的总维修率; $R_W(1)$ 为系统总的可靠度; $P_W(2)$ 为系统总的失效概率。

2 管网线路系统可靠性评估实例分析

2.1 管网线路系统场景描述

在“单元-管段-管网”层级下,以某段管网线路系统为例,开展天然气线路系统可靠性评估模型的计算与验证。该管网线路系统全长为 2 713 km,包含

13 座压气站,由 3 条输气管线组成;3 条输气管线的首站及末站均一致,管网线路系统详细参数见表 2。

表 2 管网线路系统详细参数

Table 2 Detailed parameter table of pipe network line system

管线名称	输气量/ ($10^8\text{ m}^3\cdot\text{a}^{-1}$)	设计压力/ MPa	管径/ mm	钢级
1	36	6.4	660	X60
2	170	10.0	1 016	X70
3	150	10.0	1 016	X70

2.2 管段划分

依据管段划分原则,将管网线路划分为 24 个管段,管网线路系统划分结构如图 3 所示。

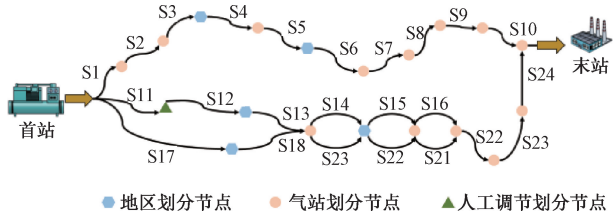


图 3 管网线路系统划分结构

Fig. 3 Pipe network line system division structure

2.3 基本数据和相关参数分布

以管段 3 为研究对象,计算其在腐蚀泄漏、含腐蚀缺陷破裂、环焊缝开裂和第三方挖掘破坏这 4 种失效模式下的可靠度,并验证单元-管段层级可靠性模型的适用性。

管段 3 总里程为 10.5 km,直径为 660 mm,壁厚为 8.7 mm,采用 X60 管材^[21],设计压力为 6.4 MPa。处理管段 3 的内检测数据,得到钢管腐蚀缺陷尺寸分布,缺陷的分布参数见表 3。第三方挖掘破坏的可靠度主要受挖掘机斗齿长度、宽度及载荷因子等参数影响,具体参数分布参照文献[22]。

表 3 缺陷的分布参数

Table 3 Distribution parameters of corrosion defects

名称	分布类型	均值/mm	标准差/mm
腐蚀长度	对数正态分布	24	16.8
腐蚀深度	对数正态分布	1.534 4	0.308 8
裂纹长度	正态分布	39	8.3
裂纹深度	正态分布	1.4	0.28

2.4 “单元-管段”可靠度计算

采用蒙特卡罗法模拟生成 10^6 个状态函数值样本,拟合状态函数值的最小次序统计分布,计算 $[-\infty, 0]$ 的积分结果,得到管段 3 在不同失效模式下的可靠度,见表 4。

表 4 不同失效模式下的可靠度

Table 4 Reliability in different failure modes

单元	失效模式	可靠度
钢管单元	穿孔泄漏	1
	含缺陷钢管破裂	0.999 999
	第三方挖掘破坏	0.999 970
焊缝单元	环焊缝拉伸断裂	0.999 999

2.5 “管段-管网线路系统”可靠度计算

以系统气源作为输入,采用第 5 类操作符表示;管线与输入输出气站及节点采用第 1 类两状态操作符表示;多输入气站节点采用第 2 类或门表示。基于上述规则建立有序 GO 图,如图 4 所示。

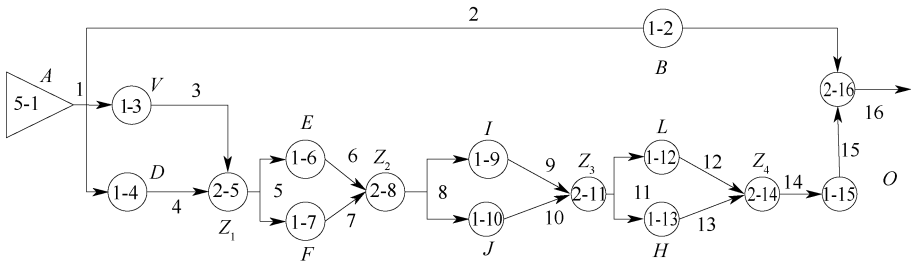
基于或门输出信号参数计算方法,计算得到 1—16 信号流的可靠度(表 5),由表 5 可知:受 S15 管段结构可靠性的影响,气流 15 的输出可靠度较低,该段易失效,建议开展检测工作以避免事故发生。

表 5 1—16 信号流的可靠度

Table 5 1—16 Reliability of signal flow

输气气流	$R_T(1)$	$P_T(2)$
1	1	0
2	0.998 113 000	0.001 887 00
3	0.994 779 000	0.005 221 00
4	0.999 826 000	0.000 174 00
5	0.999 999 091	0.000 000 91
6	0.999 925 091	0.000 074 91
7	0.999 925 091	0.000 074 91
8	0.999 999 994	0.000 000 01
9	0.994 749 994	0.005 250 01
10	0.999 893 994	0.000 106 01
11	0.999 999 443	0.000 000 56
12	0.999 911 443	0.000 088 56
13	0.999 965 443	0.000 034 56
14	0.999 999 996	0.000 000 00
15	0.999 565 996	0.000 434 00
16	0.999 999 181	0.000 000 82

GO 法失效最小割集见表 6。由表 6 可知:管段 S1—S10 及 S27—S29 失效导致的系统失效概率占比最大,高达 82.9%;其中,S9 管段可靠性最低;管段 S16 及 S21 失效导致的系统失效概率居次位,且环焊缝开裂是其主要失效原因。GO 法分析结果表明:管段 S1—S10 与 S27—S29 对系统可靠性影响较大,在系统故障诊断中需要优先排查。



注:A 为气源;B 为管段 S1—S10;V 为管段 S11—S13;D 为管段 S17—S18;E 为管段 S14;F 为管段 S19;I 为管段 S15;
J 为管段 S20;L 为管段 S16;H 为管段 S21;O 为管段 S23—S24;Z₁、Z₂、Z₃、Z₄ 为或门。

图 4 天然气管网线路系统可靠性评估 GO 图

Fig. 4 GO chart for reliability of natural gas pipeline network

表 6 GO 法失效最小割集

Table 6 GO method failure minimal cut set

系统失效最小割集	割集	失效概率	份额/%
B_2O_2	管段 S1—S10、S27—S29 失效	$8.189\ 6\times10^{-7}$	82.907 2
$B_2C_2V_2$	管段 S1—S10、S12—S13、S17—S18 失效	$1.714\ 3\times10^{-9}$	0.173 5
$B_2E_2F_2$	管段 S1—S10、S14、S19 失效	$2.750\ 9\times10^{-11}$	0.002 8
$B_2I_2J_2$	管段 S1—S10、S15、S20 失效	$1.050\ 1\times10^{-9}$	0.106 3
$B_2L_2H_2$	管段 S1—S10、S16、S21 失效	$1.660\ 5\times10^{-7}$	16.810 2

3 可靠性参数的敏感性分析

3.1 管道强度 COV 变化对系统可靠度的影响

管材在制造过程中存在性能差异,其实际性能与理论性能差异的分布规律通常可通过 COV 来反映^[23]。COV 为标准差与均值的比值,表示数据的离散程度。以管段 3 为例,分析天然气管网路线系统中主流的 X60、X65、X70、X80 这 4 类管材的屈服强度变异系数及抗拉强度 COV 对可靠性的影响特性。

COV 对可靠度的影响如图 5 所示,由图 5 可知:线路系统中管材钢级越高,管段可靠性越高。随着钢材屈服强度 COV 的增加,管段 3 可靠度逐渐降低;当屈服强度 COV 达到 0.15 时,管段可靠性已处于不可接受水平;当屈服强度变异系数达到 0.27 后,X60 管道的可靠度下降幅度最大,达到 0.88%,X80 管道的可靠度下降幅度也达到 0.31%。当抗拉强度 COV 超过 0.15 时,会对不同强度钢材的抗拉强度造成较大影响,尤其对于 X60 管道,其抗拉强度下降幅度达到 2.64%。

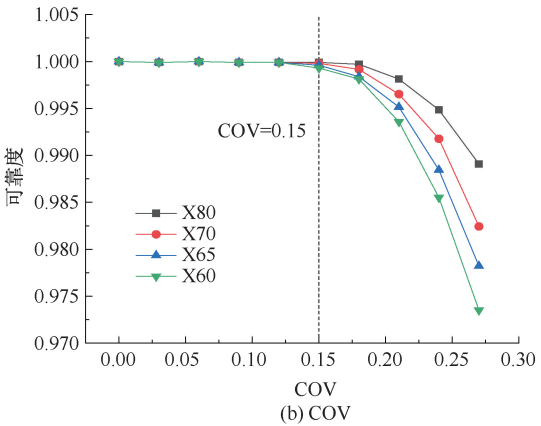
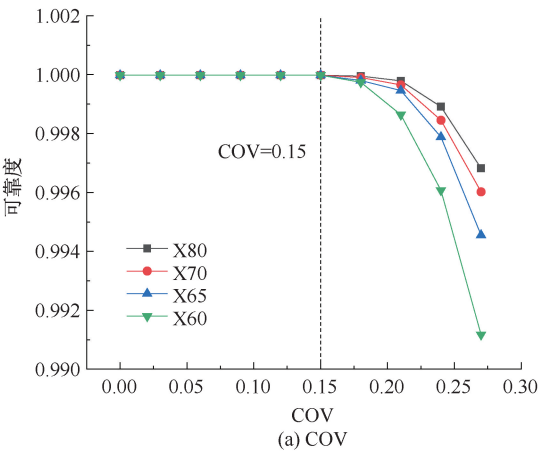


图 5 COV 对可靠度的影响

Fig. 5 Effect of COV of pipe performance

3.2 内压变化对系统可靠度的影响

以管段3为例,分析不同内压作用下可靠性的变化特征,内压对可靠度的影响如图6所示。由图6a可知:管段3的可靠度随内压增加而降低;当内压低于9 MPa时,X60、X65、X70、X80这4类管材的可靠度无明显差异;当内压超过9 MPa时,X60、

X65的管段可靠性将不可接受,且X60管材线路对内压的变化最为敏感。内压每升高1 MPa,X60管材的可靠度以接近20%的幅度快速下降。由图6b可知:随着内压COV的增大,当该系数大于0.21时,X60、X65、X70、X80这4类管材的管段可靠度均出现小幅下降,且下降幅度均维持在0.2%左右。

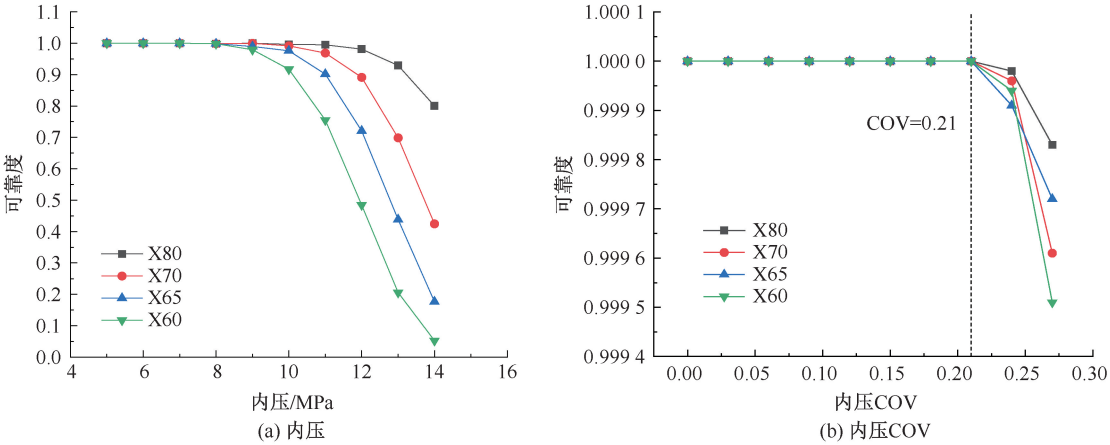
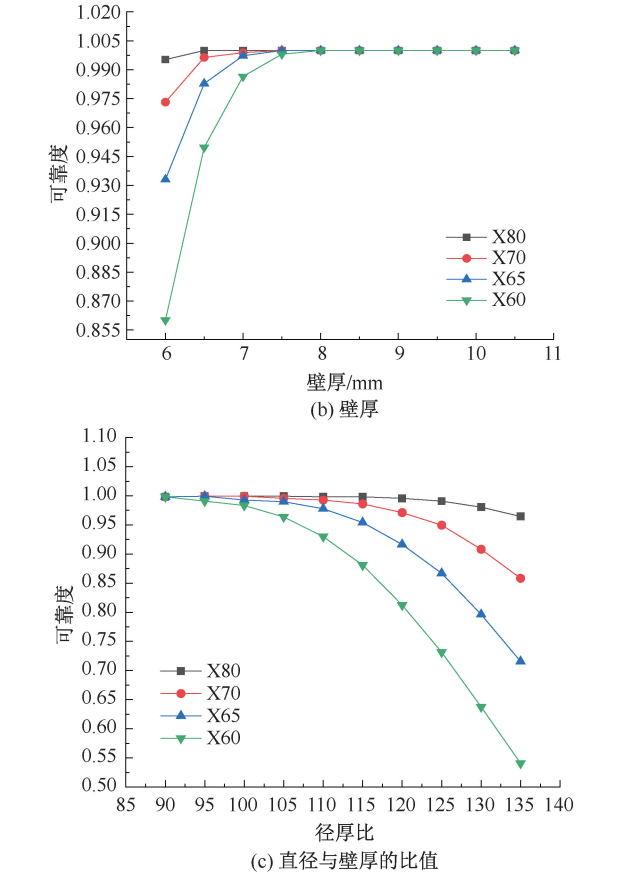


图6 内压对可靠度的影响
Fig.6 Effect of internal pressure on reliability

3.3 管道直径和壁厚变化对系统可靠度的影响

以管段3为例,分析不同壁厚和直径作用下可靠度的变化特征,如图7所示。由图7a可知:管段3的可靠度随直径增大而降低,其中X60管道的下降幅度尤为显著。由图7b可知:管段可靠度随壁厚增加而增大;当壁厚小于8 mm时,随着壁厚减小,可靠度下降幅度快速增大,且X60管道的可靠度变化最大;当壁厚超过8 mm后,X60、X65、X70、X80这4类管材的可靠度均接近于1,且无明显差异。由图7c可知:在当前工况与服役环境下,管段3的径厚比需小于90,才能保证线路系统安全可靠。



综上,天然气管网线路系统的可靠度与管材强

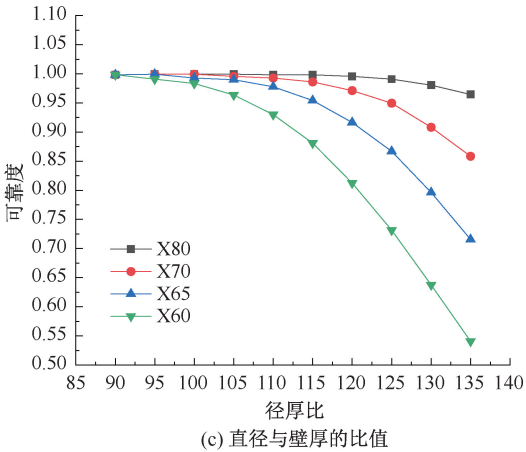
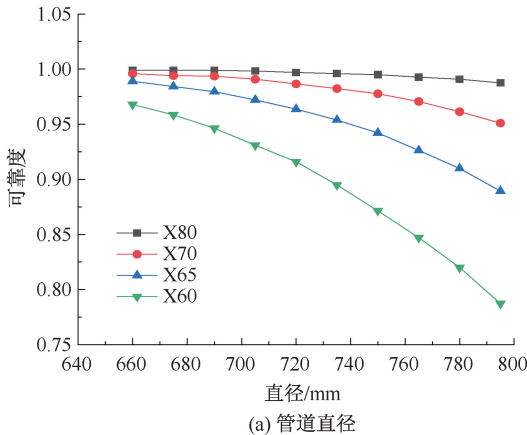


图7 直径和壁厚对可靠度的影响
Fig.7 Effect of diameter and wall thickness

度、壁厚呈正相关,与径厚比、内压呈负相关。从敏感性程度来看,相较于管道强度 COV、直径、壁厚,内压对系统可靠度的影响最为显著。因此,在天然气管道实际运行中,将管道压力维持在合理区间,对提升天然气管网线路系统的可靠性尤为重要。

4 结 论

1) 管网线路系统的可靠性与管材强度、壁厚呈正相关,与径厚比、内压呈负相关。实例中,当管段壁厚低于 8 mm 或径厚比小于 90 时,对管段可靠度

存在较大影响。当内压超过 9 MPa 时,管段可靠度将大幅下降,且低钢级管道的下降尤为明显。因此,管道在升压运行时,应重点关注低钢级管道,并将运行压力控制在合理区间内。

2) 当管材强度 COV 超过 0.15 或运行内压 COV 大于 0.21 时,X60、X65、X70、X80 这 4 类管材的可靠度将大幅下降,且 X60 管道的可靠度变化最大。因此,保证管材性能的匀质性,并将管道运行压力控制在合理的浮动区间内,能够有效提升管网线路系统的可靠性。

参 考 文 献

- [1] 宫运华,张喆,范志伟.油气管道事故原因分类模型及其社会网络分析[J].中国安全科学学报,2024,34(9):34-40.
GONG Yunhua, ZHANG Zhe, FAN Zhiwei. Classification model of oil and gas pipeline accidents causes and its social network analysis[J]. China Safety Science Journal, 2024,34(9):34-40.
- [2] 王海燕,任帅,孙东旭.含腐蚀缺陷油气管道剩余强度的评价方法对比[J].腐蚀与防护,2025,46(2):80-88,94.
WANG Haiyan, REN Shuai, SUN Dongxu. Comparison of evaluation methods for residual strength of oil and gas pipeline with corrosion defects[J]. Corrosion and Protection, 2025,46(2):80-88,94.
- [3] 骆正山,毕傲睿.腐蚀管道寿命可靠性的步降应力加速试验研究[J].中国安全科学学报,2017,27(1):59-64.
LUO Zhengshan, BI Aorui. Research on reliability of corroded pipelines based on step-down-stress accelerated life testing[J]. China Safety Science Journal, 2017,27(1):59-64.
- [4] 任伟,帅健.管道环焊缝可靠性的参数统计分布研究[J].石油科学通报,2016,1(3):484-492.
REN Wei, SHUAI Jian. Research into the statistical distribution of reliability parameters for girth welds on pipelines[J]. Petroleum Science Bulletin, 2016,1(3):484-492.
- [5] 王旭,帅健,张圣柱,等.基于应变的高钢级管道环焊接头失效评定方法[J].天然气工业,2023,43(2):121-130.
WANG Xu, SHUAI Jian, ZHANG Shengzhu, et al. A strain based failure assessment method for girth welded joints in high grade steel line pipes[J]. Natural Gas Industry, 2023,43(2):121-130.
- [6] ABYANI M, BAHAAARI M. A new approach for finite element based reliability evaluation of offshore corroded pipelines[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2021,193: DOI: 10.1016/J. IJVP. 2021. 104449.
- [7] ABDELMOETY K, KAINAT M, YOOSEF-GHODSI N, et al. Strain-based reliability analysis of dented pipelines using a response surface method[J]. Journal of Pipeline Science and Engineering, 2022,2(1):29-38.
- [8] 王东营,陈小平,刘权,等.基于改进的云模型-FMEA 的油气管道风险排序[J].中国安全科学学报,2024,34(5):61-68.
WANG Dongying, CHEN Xiaoping, LIU Quan, et al. Risk ranking of oil and gas pipeline based on improved cloud model-FMEA[J]. China Safety Science Journal, 2024,34(5):61-68.
- [9] CALEYO F, VALOR A, ALFONSO L, et al. Bayesian analysis of external corrosion data of non-piggable underground pipelines[J]. Corrosion Science, 2015, 90: 33-45.
- [10] LEIRA B, NAESS A, NAESS O. Reliability analysis of corroding pipelines by enhanced Monte Carlo simulation[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2016,144:11-17.
- [11] LIU Aihua, CHEN Ke, HUANG Xiaofei, et al. Dynamic risk assessment model of buried gas pipelines based on system dynamics[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2021, 208: DOI: 10.1016/J. RESS. 2020. 107326.
- [12] AULIA T, SRIRAMULA S. Dynamic reliability model for subsea pipeline risk assessment due to third-party interference[J]. Journal of Pipeline Science and Engineering, 2021,1(3): 277-289.
- [13] ZHENG Qian, ABDELMOETY K, LI Yong, et al. Reliability analysis of intact and defected pipes for internal pressure

related limit states specified in CSA Z622:19[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2021,192: DOI: 10.1016/J.IJPVP.2021.104411.

[14] 韩冰,季蓓蕾,付强,等. 含体积型缺陷集输管道剩余强度评价方法适用性[J]. 腐蚀与防护,2025,46(3):91-98.
HAN Bing, JI Beilei, FU Qiang, et al. Applicability of residual strength evaluation method for gathering and transportation pipelines with volume defects[J]. Corrosion and Protection,2025,46(3):91-98.

[15] ASME B31G-2009, Manual for determining the remaining strength of corroded pipelines[S].

[16] BS 7910-2019, Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures[S].

[17] 张强,杨玉锋,郑洪龙,等. 第三方挖掘作用下管道可靠性评估研究[J]. 中国安全生产科学技术,2017,13(2): 143-147.
ZHANG Qiang, YANG Yufeng, ZHENG Honglong, et al. Study on reliability evaluation of pipeline under the effect of third-party excavation[J]. China Safety Science Journal, 2017,13(2):143-147.

[18] WALODDI W. A statistical distribution function of wide applicability[J]. Journal of Applied Mechanics. 1951,18: 293-297.

[19] EZMAREH Z, YARI G. Statistical inference of stress-strength reliability of gompertz distribution under type II censoring. advances in mathematical physics[J]. Advances in Mathematical Physics, 2022: DOI:10.1155/2022/2129677.

[20] 温轶群, 段富海. 一种基于 GO 法的多态反馈系统选择性维修模型[J]. 大连理工大学学报,2023,63(5):501-508.
WEN Yiqun, DUAN Fuhai. A selective maintenance model for polymorphic feedback system based on GO methodology[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2023,63(5):501-508.

[21] NAZEMI N, DAS S. Behavior of X60 line pipe subjected to axial and lateral deformations[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2010,132(3): DOI:10.1115/1.4001426.

[22] 杨玉锋,葛新东,郑洪龙,等. 第三方损坏对管道可靠性的影响规律[J]. 油气储运,2017,36(8):903-909.
YANG Yufeng, GE Xindong, ZHENG Honglong, et al. Influence laws of third party damage on pipeline reliability[J]. Oil and Gas Storage and Transportation, 2017,36(8):903-909.

[23] 郭庆,翟红波,刘永寿. 考虑动态腐蚀的输流管道时变共振可靠性及灵敏度分析[J]. 兵器装备工程学报,2024, 45(1):166-172, 216.
GUO Qing, ZHAI Hongbo, LIU Yongshou. Time-variant resonance reliability and sensitivity analysis of pipes conveying fluid considering dynamic corrosion[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering,2024,45(1):166-172, 216.

作者简介： 徐后佳 （1996—）,男,安徽池州人,博士研究生,主要研究方向为油气生产安全。E-mail: xuhj3020@163.com。