

引文: 唐柳怡, 魏然, 王峰, 等. 高钢级管道安全评价指标体系构建[J]. 油气储运, 2023, 42(10): 1137-1148.

TANG Liuyi, WEI Ranran, WANG Feng, et al. Construction of safety evaluation index system for high-grade steel pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(10): 1137-1148.

高钢级管道安全评价指标体系构建

唐柳怡¹ 魏然² 王峰¹ 张文艳¹ 别沁¹ 田志金¹ 梅苑³

1. 中国石油西南油气田分公司集输工程技术研究所; 2. 国家管网集团科学技术研究总院分公司;
3. 中国石油大学(北京)安全与海洋工程学院

摘要: 大口径高钢级天然气管道一旦发生事故, 将会造成重大人员伤亡和经济损失, 对其进行安全评价至关重要。通过对国内外高钢级管道失效事件进行分析, 将高钢级管道主要的失效影响因素归为材料、载荷及缺陷 3 大类, 并基于出现频率最高的 10 个影响因素, 构建了高钢级天然气管道安全评价指标体系。利用层次分析法获得了各指标的判断矩阵, 确定了各个指标的权重, 计算得到高钢级管道的安全评分。将该方法应用于某高钢级管道的安全评价中, 掌握了管道的实时状态, 并明确了薄弱环节和高后果区, 可为高钢级管道的设计、建设及安全运行提供参考。(图 6, 表 14, 参 25)

关键词: 天然气管道; 高钢级; 安全评价; 指标体系; 层次分析法

中图分类号: TE88

文献标识码: A

文章编号: 1000-8241(2023)10-1137-12

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2023.10.007

Construction of safety evaluation index system for high-grade steel pipeline

TANG Liuyi¹, WEI Ranran², WANG Feng¹, ZHANG Wenyan¹, BIE Qin¹, TIAN Zhijin¹, MEI Yuan³

1. Institute of Gas Gathering and Transportation Engineering Technology, PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company;

2. PipeChina Institute of Science and Technology; 3. College of Safety and Ocean Engineering, China University of Petroleum (Beijing)

Abstract: The occurrence of accidents to large-diameter high-grade steel pipelines, if any, will cause heavy casualties and property losses. Hence, it is very important to evaluate the safety state of large-diameter high-grade steel pipelines. Herein, the main influencing factors of high-grade steel pipeline failure were classified into the three categories of material, load and defects by analyzing the failure events of high-grade steel pipelines at home and abroad. Meanwhile, a safety evaluation index system of high-grade steel pipelines was established based on the 10 influencing factors with the highest frequency. Besides, the judgment matrix of each index was obtained with the analytic hierarchy process, and the weight of each index was determined. Thereby, the safety score of the high-grade steel pipeline was calculated. By applying such a method to the safety evaluation of a high-grade steel pipeline, the real-time state of pipeline was mastered, with the weak links and high-consequence areas identified. Thus, reference could be provided to the design, construction and safe operation of high-grade steel pipelines. (6 Figures, 14 Tables, 25 References)

Key words: natural gas pipeline, high-grade steel, safety evaluation, index system, analytic hierarchy process

目前,石油、天然气通过管道高压输送是最为经济的输送方式^[1],随着制管技术水平及焊接工艺的提高,油气管道钢级越来越高、口径越来越大。高钢级管道因其压力高、失效后果严重而备受关注,近年来发生了多起高钢级管道失效事件^[2],造成了严重的经济损失和社会影响。

国内外学者对管道失效事件进行了大量研究,开发了不同评价模型计算管道的失效概率,最常用的计算模型主要为历史数据失效分析模型、故障树分析模型及结

构可靠性模型。其中,历史数据失效分析模型^[3-7]主要基于油气管道失效数据库,对历年来油气管道事故数据进行统计分析,得到造成管道事故的失效因素种类及占比,进而计算得到油气管道的基本失效概率。故障树分析模型^[8-11]是将管道失效事故作为顶事件,逐级推导造成上一级的事故发生因素,直至得出底事件结束;同时,将造成事故的各种因素按照逻辑顺序逐层列出,通过计算可以确定导致一系列事故发生的概率。结

构可靠性模型^[12-13]则认为造成管道失效的原因往往不是单一的,通常是多种不确定因素共同造成的,而管道自身性能及工况(如屈服强度、输送压力、缺陷尺寸等)也存在着各种不确定性。为了探究构件的工作状况,需先建立结构功能函数来描述构件的极限状态,再确定随机变量及其分布规律,然后计算失效概率,通常利用一次二阶矩阵法、Monte Carlo 法计算管道结构可靠性。上述评价方法已在低钢级管道得到广泛应用^[14-18],但与低钢级管道相比,高钢级管道在失效影响因素、各因素占比及不同因素产生的后果等方面均存在差异。为此,通过对近年来国内外发生的高钢级管道失效事故进行

分析,构建了适用于高钢级管道的安全评价指标体系,以为高钢级管道的设计、建设及运行提供参考。

1 安全评价指标体系构建

1.1 失效事故树

参考国内外典型管道事故案例^[2,19](表1),构建了高钢级管道失效事故树。将“高钢级管道失效”作为事故树顶事件,找出导致顶事件发生的直接原因作为中间事件,再分析确定导致各中间事件发生的基本事件,形成高钢级管道失效事故树(图1、表2)。

表1 国内外典型管道事故案例统计表
Table 1 Statistics on typical pipeline accidents at home and abroad

事故案例	事故概况	事故主要原因
萨斯喀彻温省“2.15”脱硫天然气管道事故	1994年2月15日,加拿大萨斯喀彻温省梅普尔克里克附近输送脱硫天然气管道破裂,继而发生着火事故	在高含水区域,管道聚乙烯防腐层严重剥离;管道周围的地表水中高含氯离子,导致管道防腐层受到HCl腐蚀;管道位于海床位置,其氯离子浓度高,也导致管道防腐层发生腐蚀
加利福尼亚州“9.9”天然气管道事故	2010年9月9日,美国加利福尼亚州圣布鲁诺天然气管道发生破裂、泄漏、爆炸事故	短管纵向直焊缝未焊透;短管节屈服强度不符合规范;短管连接时存在角度错位,导致焊接缺陷;管道未进行压力测试
山东青岛“11·22”输油管道爆炸事件	2013年11月22日,山东省青岛市黄岛区秦皇岛路与斋堂岛路交汇处,中国石化输油储运公司潍坊分公司输油管道破裂	现场操作人员未按照规定的程序 and 标准进行操作,导致化工品发生不正常反应,最终引发了爆炸;同时,在化工厂的生产过程中,安全措施未得到充分的落实。化工厂的管理人员未对操作人员进行充分的培训,也未对生产过程足够的监督,导致了事故的发生
中缅天然气管道黔西南州晴隆段“6.10”事故	2018年,中缅天然气管道黔西南州晴隆县沙子镇段发生泄漏、燃爆事故	现场焊接质量不满足相关标准要求,在组合载荷的作用下造成环焊缝脆性断裂;X80高级钢管道焊接工艺未严格执行焊接标准的要求,现场无损检测标准要求低,施工质量管理不严等

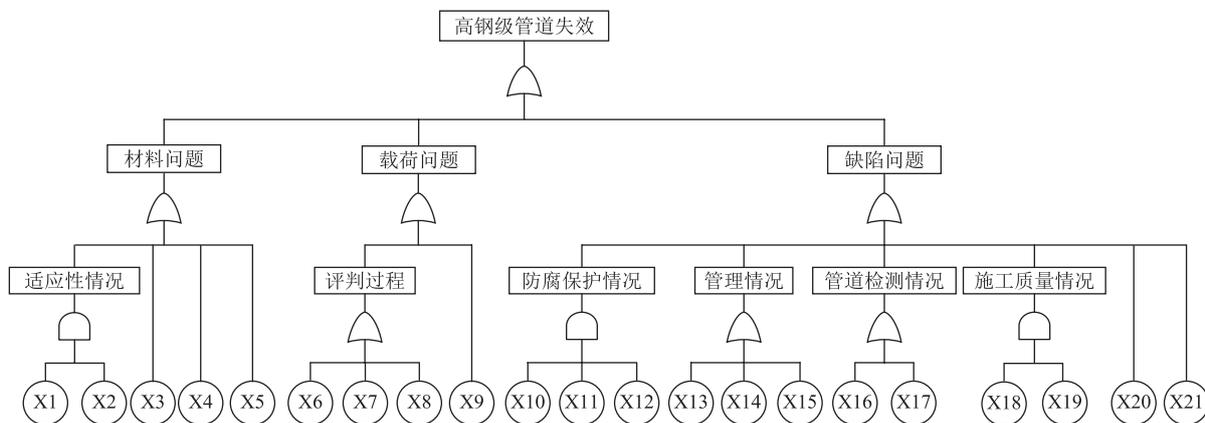


图1 高钢级管道失效事故树图
Fig. 1 Failure tree of high-grade steel pipeline

表2 高钢级管道失效事故树基本事件表
Table 2 Basic events in failure tree of high-grade steel pipeline

符号	事件	符号	事件	符号	事件
X1	材料匹配度	X8	内压载荷系数	X15	运行管理制度
X2	管道材料适应性	X9	制管载荷系数	X16	制管检测能力
X3	购材管理制度	X10	阴保系统有效性	X17	管道检测能力
X4	防腐层材料	X11	防腐层质量状况	X18	制管缺陷情况
X5	管道失效概率	X12	防腐层检测情况	X19	焊接缺陷状况
X6	环境载荷系数	X13	施工过程管理	X20	环境严苛程度
X7	人为载荷系数	X14	监测系统	X21	管体缺陷状况

1.2 安全评价指标体系

高钢级管道安全状况与表 1 中的 21 项基本事件均相关,根据已发生事故中各基本事件出现的频率情况,将材料、载荷及缺陷 3 个中间事件作为一级指标,选择出现频率较高的材料匹配度、材料适应性、管道失效概率、环境载荷、人为载荷、定期检测维护、施工过程管理、阴保系统有效性、焊接缺陷状况、管体缺陷状况等 10 个基本事件作为二级指标(图 2)。

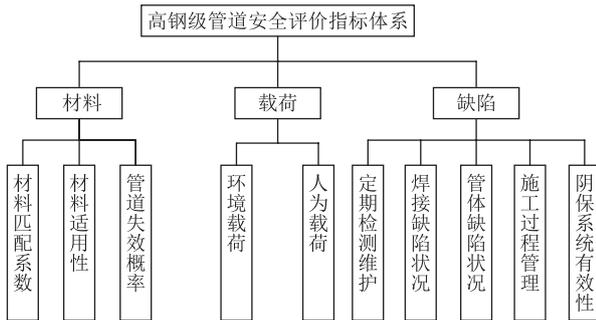


图 2 高钢级管道安全评价指标体系图

Fig. 2 Safety evaluation index system of high-grade steel pipeline

在高钢级管道安全评价过程中,对于每一个指标的评分,如果有客观评分依据,采用客观评分;如果暂无客观评分依据,则采用专家评分法评分。考虑到每位专家知识水平、经验程度、信息来源、研究方向相关性等方面存在差异,因此采用改进的专家判断法^[20]对各指标进行分析评估,降低评分专家的个人主观因素,使评估结果更加符合客观实际。为此,邀请了行业内 10 位专家参与评分,专家分别来自一线操作岗、管理岗、技术研发、技术管理、高校教师等,具有较为广泛的代表性。

1.2.1 材料

1.2.1.1 材料匹配度

材料匹配度表示焊缝与管材的匹配程度,可以用焊缝与管材屈服强度之比(即匹配系数 S)来表征。为分析不同匹配情况下管道的安全状况,利用有限元方法,对低匹配、等匹配以及高匹配条件下焊缝接头的应变分布情况进行模拟。模拟工况条件设置为:管材选用 X80 管道,管材屈服强度 555 MPa,管径 1 016 mm,壁厚 18.4 mm,内压 10 MPa。选取匹配系数为 0.8、0.9、1.0、1.1 及 1.2 共 5 种情况,分别计算得到焊接接头及母材金属应变(图 3)。

根据图 3 可见,当匹配系数 $S < 1$ (即环焊缝低匹配情况)时,环焊缝中产生显著的应变,此时容易在环焊缝处发生断裂,管道整体承载能力较差。进一步



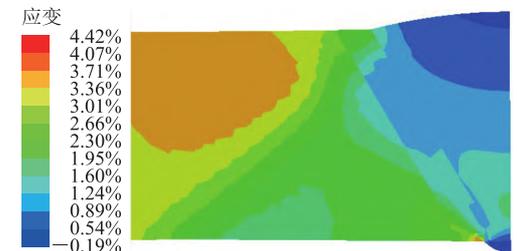
(a) 匹配系数为 0.8



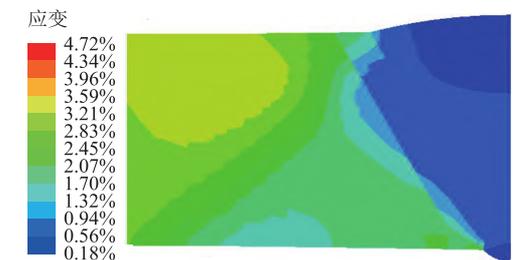
(b) 匹配系数为 0.9



(c) 匹配系数为 1.0



(d) 匹配系数为 1.1



(e) 匹配系数为 1.2

图 3 不同匹配系数下管道环焊缝应变状态对比图
Fig. 3 Strain state comparison of pipeline girth welds with different matching coefficients

提取与焊缝相邻的母材部分最大形变量(图 4)进行分析可见,当 S 为 0.8、0.9 时,母材的最大应变分别为 0.35%、1.20%;当 $S > 1$ 时,母材的最大应变能达到 3% 以上,应变集中现象明显得以缓解。可见,匹配系数越大,环焊缝处越安全,管道的整体变形能力越强。但匹

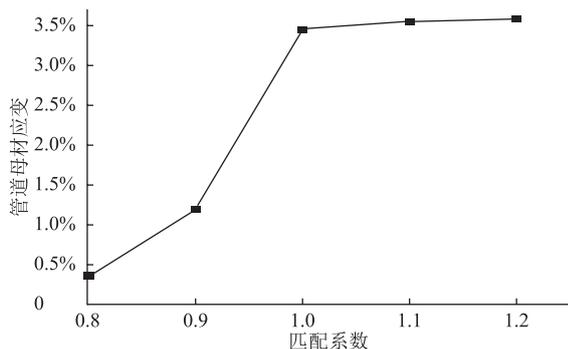


图4 不同匹配系数与焊缝相邻母材的应变关系图
Fig. 4 Relationship of different matching coefficients with strain of base metal near the weld

配系数也不能过大,当S=1.2时即可较好地满足整体性能要求。

根据各种匹配系数下管道整体变形情况(即管道焊缝与母材应变)可见,环焊缝匹配系数不得小于0.8,因为小于0.8时,环焊缝处应变显著集中,极易发生管道断裂事故。根据匹配系数与管道整体变形的关系,制定评分规则如下:当S<0.8时,得0分;当S=0.9时,得60分;当S=1.2时,得100分。

1.2.1.2 材料适应性

管道所处的地区等级直接影响管道壁厚的选择,因此用壁厚指数 γ 来表征所选定的管材壁厚是否与环境要求相适应, γ 为强度计算所需壁厚与管道实际壁厚之比。根据GB 50251—2015《输气管道工程设计规范》,地区等级分为4级5类,分别是一级1类、一级2类、二级、三级及四级,对应的管道设计系数F分别为0.8、0.72、0.6、0.5及0.4。在进行材料适应性评分时,将计算所得的壁厚指数 γ 与相应地区等级的设计系数F进行对比:如果壁厚指数 $\gamma > F$,表明计算所需管道壁厚不满足环境要求,得0分;如果 $\gamma = F$,得60分;如果壁厚指数 γ 达到了高一地区等级的管道设计系数F,表明计算所需管道壁厚完全满足要求,得100分;如果壁厚指数处于本地区等级与上一级管道设计系数之间,其材料适应性评分C的计算式为:

$$C = 100 \frac{40(\gamma - F_2)}{F_1 - F_2} \quad (1)$$

式中: F_1 、 F_2 分别为壁厚指数所处的地区等级及其上一级地区对应的管道设计系数。

1.2.1.3 管道失效概率

管道失效概率表明了管道安全程度。对于高钢级管道,环焊缝是其薄弱环节,根据API-1104-1999《管道及附件焊接损伤检验标准》的二级评定方法,基于

含表面裂纹缺陷的管道环焊缝的极限状态方程^[21],采用Monte Carlo方法模拟对应参数下的管道环焊缝失效概率,以管道的环焊缝缺陷失效概率作为打分依据评判管道安全状态。以X80钢管为例,在基于应力条件建立的极限状态方程中,管道不确定性参数包括裂纹缺陷长度、裂纹缺陷深度、屈服强度、断裂韧性(以裂纹尖端张开位移(Crack Tip Opening Displacement, CTOD)表示)、管道外径、管道壁厚及轴向设计应力。将上述参数取其常见的概率分布情况(表3)^[22],并取对应的统计参数值进行失效概率分析。选取管径为1 219 mm的X80管道计算不同断裂韧性值下的失效概率(图5),结果表明断裂韧性越大,其失效概率越小。

表3 X80管道失效概率计算参数取值表
Table 3 Parameter values in failure probability calculation of X80 pipeline

不确定性参数	分布类型	参数值	评分
裂纹长度	正态分布	100 mm	0.200
裂纹深度	正态分布	5 mm	0.200
屈服强度	Gumbel分布	651.21 MPa	0.033
断裂韧性	Weibull分布	0.303 mm	0.152
管道外径	正态分布	1 219 mm	0.030
管道壁厚	正态分布	18.4 mm	0.050
轴向设计应力	正态分布	200 MPa	0.100

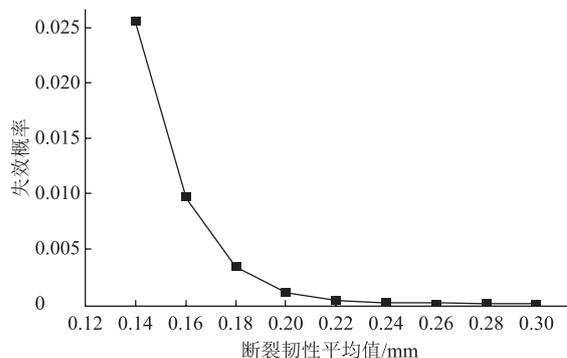


图5 X80管道环焊缝缺陷失效概率与断裂韧性关系图
Fig. 5 Relationship of defect failure probability with fracture toughness of X80 pipeline girth weld

根据计算所得失效概率,制定高钢级管道安全评分规则如下:①根据文献[23],管道最大允许失效概率为 10^{-6} ,因此将管道失效概率为 10^{-6} 设定为及格分(即60分)。②当失效概率为 10^{-7} 时,已超出考核目标值10倍,考核分值为100分。③当失效概率为 10^{-4} 时,失效概率过高,完全不可接受,赋0分。④失效概率在 $10^{-7} \sim 10^{-4}$ 之间时,根据失效概率值运用线性插值法计算安全评分。

1.2.2 载荷

1.2.2.1 环境载荷

环境载荷为管道沿线外界环境对管道产生的载荷作用,主要包括铁路、公路穿越段车辆的冲击载荷和地质灾害引发的载荷。在铁路、公路穿越方面,GB/T 27512—2011《埋地钢质管道风险评估方法》给出了管段穿越铁路或公路时的安全评分方法;在地质灾害方面,SY/T 6828—2017《油气管道地质灾害风险管理技术规范》规定每隔3年需对管道途经地区的地质条件进行灾害安全评价,评价结果划分为高、较高、中、较低、低5个等级。参考以上两个标准,制定了环境载荷安全评分规则(表4)。

1.2.2.2 人为载荷

管道上方及周围的地面人为活动水平是管道安全的重要影响因素之一,参考SY/T 6891.1—2012《油气管道风险评价方法》中第三方破坏情况,对相关人为活动进行评分(表5)。

表4 管道沿线的外界环境对高钢级管道产生的载荷打分表
Table 4 Scores of external environment load on high-grade steel pipeline

载荷分类	评分细则	评分
管道穿越铁路、公路的冲击载荷	管段穿越铁路或有10 t及以上大卡车通过的公路	30
	管段穿越有10 t以下车辆通过的公路	60
	无穿越	100
管道穿越地质灾害地区引发载荷	3年及以上未对管段的地质条件开展评价工作	0
	地质灾害隐患点风险评价结果显示存在高风险点1处及以上	10
	地质灾害隐患点风险评价结果显示存在较高风险点1处及以上	20
	地质灾害隐患点风险评价结果显示存在中风险点1处及以上	30
	地质灾害隐患点风险评价结果显示存在较低风险点1处及以上	60
	地质灾害隐患点风险评价结果显示存在低风险点1处及以上	80
	地质灾害隐患点风险评价结果显示无风险点存在	100

表5 高钢级管道人为载荷打分表
Table 5 Scores of artificial load on high-grade steel pipeline

评分项目	总分	评分细则	评分
埋深	15	埋深得分的最大分值为15分,在钢管外增加钢筋混凝土保护层或加钢套管及其他有效保护措施,能够减少第三方破坏,可视同增加埋深考虑	不同保护措施的分值为:设置警示带,得7分;增加厚度为50 mm、100 mm的水泥保护层,分别相当于增加埋深0.2 m、0.3 m,分别得1、2分;加水泥盖板,相当于增加埋深0.6 m,得4分;布设钢套管,相当于增加埋深0.6 m,得4分。多项措施可累加,但最高不能超过15分
巡线	15	巡线得分为巡线频率得分与巡线效果得分之积	巡线频率按以下规则评分:每日巡查,得15分;每周4次巡查,得12分;每周3次巡查,得10分;每周2次巡查,得8分;每周1次巡查,得6分;每月少于4次而多于1次巡查,得4分;每月少于1次巡查,得2分;从不巡查,得0分。巡线效果主要根据巡线工参加培训情况与年终考核等级综合打分,按照优、良、中、差4个等级分别评为1分、0.8分、0.5分、0分
公众宣传	5	根据管道保护的宣传频率及效果进行评分,最大分值为5分	定期(每年1次及以上)向公众宣传管道保护的重要性,得2分;与途经地区政府沟通地方建设规划,了解管道附近建设活动,得2分;走访附近居民,得2分;无公众宣传活动,得0分。可累加,最高为5分
管道标识	5	根据管道标识是否清楚,以便第三方明确管道的具体位置,防止破坏管道,同时使巡线或检查人员能有效检查	管道标识清晰、设置全面,得5分;管道标识清晰、部分地点未设置,得3分;管道标识清晰度不足,仅设置部分地带,得2分;重要地带未设置管道标识,得0分
打孔盗油(气)	15	根据发生历史、当地社会治安状况以周边环境等因素	当地未发生偷盗等治安问题,得15分;当地发生过偷盗等治安问题,得8分;当地时常发生偷盗治安问题,得0分
管道上方活动水平	15	根据管道周围或上方,开挖施工活动的频繁程度进行打分	管道周围基本无活动,得15分;低活动水平,得12分;中等活动水平,得8分;高活动水平,得0分
管道定位	12	对管道威胁事件定位准确程度进行打分,得分为各项评分之和,最大分值为12分	管道安装了安全预警系统,得4分;管道准确定位,得2分;有地图和信息系统,得4分;具有经证实的威胁事件定位有效记录,得2分
管道地面设施	8	根据待评价管道地面有无相关附属设施及对设施的保护情况进行评分	无附属设施,得8分;有设施,并对设施进行了有效防护,得5分;有设施,但无保护,得0分
公众态度	5	根据管道沿线的公众对管道的保护态度进行评分	公众对管道积极保护、保护态度一般、保护不积极,分别得5分、2分、得0分
政府态度	5	根据管道沿线地方政府对配合打击盗油(气)工作、管道工程施工推进的积极性进行评分	政府机关对管道积极保护、保护态度一般、保护不积极,分别得5分、得2分、得0分

1.2.3 管道缺陷状况评定、检测及防护

1.2.3.1 管体缺陷状况

SY/T 6477—2017《含缺陷油气管道剩余强度评价方法》规定,当管体上有缺陷时,可通过失效评定图来评价管体的安全性。选取最具危险性的管道裂纹缺陷进行安全评价,根据SY/T6477—2017, X80 钢管裂纹缺陷评价公式为:

$$K_r = \begin{cases} \frac{1.75}{1 + \exp\left(\frac{L_r - 1.32}{0.19}\right)} - 0.77, & L_r \leq L_{r,max} \\ 0, & L_r > L_{r,max} \end{cases} \quad (2)$$

$$K_r = K_I / K_{mat} \quad (3)$$

$$L_r = \sigma_{ref} / \sigma_Y \quad (4)$$

$$L_{r,max} = \frac{\sigma_X + \sigma_Y}{2 \sigma_Y} \quad (5)$$

式中: K_r 为韧性比; K_I 为应力强度因子; K_{mat} 为钢管的断裂韧性; L_r 为载荷比; σ_{ref} 为参比应力, MPa; σ_Y 为材料的屈服强度, MPa; $L_{r,max}$ 为评估曲线的截止线; σ_X 为材料的抗拉强度, MPa。

在管道裂纹缺陷失效评定图(图6)中, A点为待评价点, 如果A点落在 K_r 方程曲线与坐标轴组成的区域内, 则待评价点处于安全状态; 如果A点落在 K_r 方程曲线上或曲线外, 则待评价点处于不安全状态。为了评估A点安全程度, 定义一个安全比值 $\delta = |OA| / |OB|$ (其中, OA、OB分别为A点、B点到原点O的距离, 且B点为OA的延长线与 K_r 方程曲线的交点)。

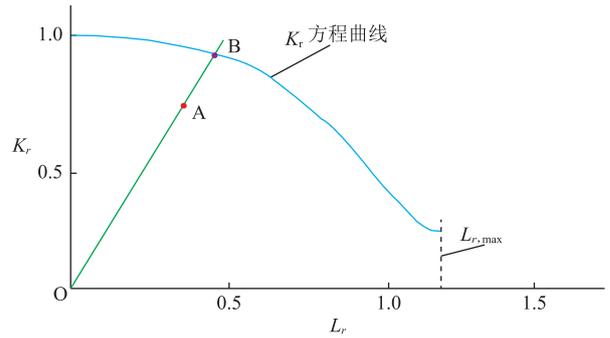


图6 高钢级管道裂纹缺陷失效评定示意图
Fig. 6 Evaluation on crack defect failure of high-grade steel pipeline

当 $\delta \leq 70\%$ 时, A点足够安全, 得100分。管体缺陷的安全评分 C' 的计算方法为:

$$C' = \begin{cases} 100, & \delta \leq 0.7 \\ \frac{100(1-\delta)}{0.3}, & 0.7 < \delta < 1 \\ 0, & \delta \geq 1 \end{cases} \quad (6)$$

1.2.3.2 焊接缺陷状况

根据SY/T 4109—2020《石油天然气钢质管道无损检测》中的规定, 管道焊接缺陷主要包括圆形缺欠、条形缺欠、夹层未融合(中间未焊透)、根部未融合(根部未焊透)、内凹、烧穿、内咬边等多种情况。根据焊接接头中存在的缺陷性质、数量及密集程度, 管道焊接质量等级可划分为I~IV共4个等级, 其中I级焊接质量最好, 其内不应存在条形缺欠、未融合、未焊透、内凹、烧穿、内咬边等缺陷; 若焊接接头内存在条形缺欠、未融合、未焊透、内凹、烧穿、内咬边等缺陷, 将接头判为II级; III级、IV级则表示焊接接头不合格(表6)。

表6 高钢级管道焊接缺陷状况评分表
Table 6 Scores of welding defect status of high-grade steel pipeline

缺陷类型 缺陷等级	评分细则及评分
圆形缺欠	I ①当缺欠点数为0时, 得100分; ②当缺欠点数不少于SY/T 4109—2020表4.18.3-4中规定的点数时, 得90分; ③当缺欠点数少于第②条规定的点数时, 每少1点, 在90分的基础上加3分, 但不超过100分
	II ①当缺欠点数不少于SY/T 4109—2020表4.18.3-4中规定的点数时, 得60分; ②缺欠点数少于第①条规定的点数时, 每少1点, 在60分的基础上加5分, 但不超过90分
	III ①缺欠点数不少于SY/T 4109—2020表4.18.3-4中规定的点数时, 得30分; ②缺欠点数少于第①条规定的点数时, 每少1点, 在30分的基础上加5分, 但不超过60分
	IV ①缺欠点数不少于SY/T 4109—2020表4.18.3-4中规定的点数时, 得0分; ②缺欠点数少于第①条规定的点数时, 每少1点, 在0分的基础上加5分, 但不超过30分
条形缺欠	II ①单个缺欠长度达到 $2t$ (t 为壁厚) 且不超过25 mm 时, 得60分; ②单个缺欠长度比 $2t$ 与25 mm 中的较小值每少1 mm, 分值增加1分, 但不超过90分
	III ①单个缺欠长度达到 $3t$ 且不超过50 mm 时, 得30分; ②单个缺欠长度比 $3t$ 与50 mm 中的较小值每少1 mm, 分值增加1分, 但不超过60分
	IV ①单个缺欠长度达到 $3t$ 或50 mm 时, 得30分; ②单个缺欠长度超过 $3t$ 或50 mm 时, 每多1 mm, 在30分的基础上扣1分, 直至0分

续表

缺陷类型	缺陷等级	评分细则及评分
夹层未融合(中间未焊透)	II	①单个缺欠长度达到 $2t$ 且不超过25 mm时,得60分;②单个缺欠长度比 $2t$ 与25 mm中的较小值每少1 mm,分值增加1分,但不超过90分
	III	①单个缺欠长度达到 $3t$ 且不超过50 mm时,得30分;②单个缺欠长度比 $3t$ 与50 mm中的较小值每少1 mm,分值增加1分,但不超过60分
	IV	①单个缺欠长度达到 $3t$ 或50 mm时,得30分;②单个缺欠长度超过 $3t$ 或50 mm时,每多1 mm,在30分的基础上扣1分,直至0分
根部未融合(根部未焊透)	II	①单个缺欠长度达到 t 且不超过12.5 mm时,得60分;②单个缺欠长度比 t 与12.5 mm中的较小值每少1 mm,分值增加2分,但不超过90分
	III	①单个缺欠长度为 $2t$ 且不超过25 mm时,得30分;②单个缺欠长度比 $2t$ 与25 mm中的较小值每少1 mm,分值增加1分,但不超过60分
	IV	①单个缺欠长度达到 $2t$ 或25 mm时,得30分;②单个缺欠长度超过 $2t$ 或25 mm时,每多1 mm,在30分的基础上扣1分,直至0分
内凹	II	①单个缺欠长度不超过25 mm时,得60分;②单个缺欠长度比25 mm每少1 mm,分值增加1分,但不超过90分
	III	①单个缺欠长度不超过50 mm时,得30分;②单个缺欠长度比50 mm每少1 mm,分值增加1分,但不超过60分
	IV	①单个缺欠长度达到50 mm时,得30分;②单个缺欠长度超过50 mm时,每多1 mm,在30分的基础上扣1分,直至0分
烧穿	II	①单个缺欠长度达到 t 且不超过6 mm时,得60分;②单个缺欠长度比 t 与6 mm中的较小值每少1 mm,分值增加5分,但不超过90分
	III	①单个缺欠长度为13 mm时,得30分;②单个缺欠长度比13 mm每少1 mm,分值增加4分,但不超过60分
	IV	①单个缺欠长度超过13 mm时,得30分;②单个缺欠长度超过13 mm时,每多1 mm,在30分的基础上扣3分,直至0分
内咬边	II	①单个缺欠的黑度小于较薄侧母材黑度、长度不超过50 mm时,或单个缺欠的黑度不小于较薄侧母材黑度、长度不超过25 mm时,得60分;②单个缺欠长度比第①条中的值每少1 mm,分值增加1分,但不超过90分
	III	①单个缺欠的黑度小于较薄侧母材黑度、长度不超过75 mm时,或单个缺欠的黑度不小于较薄侧母材黑度、长度不超过50 mm时,得30分;②单个缺欠长度比第①条中的值每少1 mm,分值增加1分,但不超过60分
	IV	①单个缺欠的黑度小于较薄侧母材黑度、长度75 mm时,或单个缺欠的黑度不小于较薄侧母材黑度、长度50 mm时,得30分;②单个缺欠长度比第①条中的值每增加1 mm,在30分的基础上扣1分,直至0分

1.2.3.3 定期检测维护

对管道进行定期检测、维护,是发现缺陷、增强管道安全性的有效手段。根据 GB/T 27699—2011《钢质管道内检测技术规范》、GB/T 21447—2008《钢质管道外腐蚀控制规范》及 GB/T 30582—2014《基于风险的埋地钢质管道外损伤检验与评价》规定,管道的内检测周期不宜超过8年,发现管道缺陷需进行及时修复。新建管道投产后3年内一般应进行首次基于风险的检验,其他管道以风险水平来调整原定检测周期。因此,考虑从管道类型、内检测及外检测周期、检测缺陷修复情况等方面对管道的定期检测维护指标进行评分,其中管道内检测占70分、外检测30分,定期检测维护评分为内检测评分与外检测评分之和(表7)。

1.2.3.4 施工质量控制

施工质量是管道安全运行的重要基础,施工质量主要通过施工资料、焊接方式以及施工质量管理体系3个方面来进行评判。施工资料的评判重点是考察相关资料是否齐全完整,关键工序是否有监督检查。

焊接方式主要有手工焊、半自动焊及全自动焊,不同焊接方式的焊接质量存在明显差异。施工质量管理体系是施工质量的制度保证,根据标 GB/T 27512—2011,施工质量管理体系可从以下3个方面进行评分:①建设单位未建立质量管理体系;②建设单位已建立质量管理体系,但未获得认证证书;③建设单位已获得质量管理认证证书。因此,管道施工质量控制得分是施工资料、焊接方式、施工质量管理体系3个方面得分之和(表8)。

1.2.3.5 阴保系统有效性

阴极保护是管道最主要的腐蚀防护措施,阴极保护系统的有效性是管道安全的重要指标。根据 GB/T 21448—2017《埋地钢质管道阴极保护技术规范》,阴保系统有效性可从测试桩间距、测试时间间隔、杂散电流3个方面进行评分(表9)。监测阴极保护系统效果的首选方法是利用测试桩进行测试,其能显示出管道阴极保护系统的防护等级,可以通过大小、方向(进管或出管)表明电流的趋势。由于测试桩的读数仅是—定区域内的管地之间的电位,因此,随着测试桩间距的

表7 高钢级管道定期检测维护评分表
Table 7 Scores of regular inspection and maintenance of high-grade steel pipeline

管道类型	检测周期	修复情况	评分细则	评分	
				内检测	外检测
新建管道	3年以上	3年以上未进行任何检测	对于新建管道,3年以上未检测,得0分	0	0
		未对缺陷进行及时修复	当有缺陷而未及时修复时,得0分	0	0
	3年及以内	仅对一般缺陷进行修复	当存在严重缺陷而仅修复了一般缺陷时,按满分的20%得分	14	6
		仅对严重缺陷进行修复	仅修复严重缺陷点,但还存在一般缺陷点未修复时,按满分的60%得分	42	18
		对所有缺陷进行修复(或检测无缺陷)		70	30
在役管道	8年以上	8年以上未进行任何检测	对于在役管道,8年以上未检测,得0分	0	0
		未对缺陷进行及时修复	当有缺陷而未及时修复时,得0分	0	0
	8年及以内	仅对一般缺陷进行修复	当存在严重缺陷而仅修复了一般缺陷时,按满分的20%得分	14	6
		仅对严重缺陷进行修复	仅修复严重缺陷点,但还存在一般缺陷点未修复时,按满分的60%得分	42	18
		对所有缺陷进行修复		70	30

注:严重缺陷指计算失效压力小于等于运行压力的缺陷点,而一般缺陷指计算失效压力大于运行压力的缺陷点。

表8 高钢级管道施工质量控制评分表
Table 8 Scores of construction quality control of high-grade steel pipeline

评分项目	总分	评分细则
施工资料	20	丢失全部施工资料,得0分;保存少量施工资料、但关键资料(如焊缝焊接检测记录)缺失,得5分;施工资料保存较为完整,但关键资料(如焊缝焊接检测记录)有少量缺失,得10分;施工资料少量缺失但关键资料(如焊缝焊接检测记录)保存完整,得15分;所有施工资料整齐、完整,得20分
焊接方式	30	待评价管段主要以手工焊进行连接,得10分;待评价管段以半自动焊接为主,少量金口、死口以手工焊连接,得20分;待评价管段以全自动焊接为主,少量金口、死口以手工焊连接,得30分
质量管理体系	50	未建立质量管理体系,施工质量无法保证,安全管理不到位,得0分;已建立质量管理体系,但未获得认证证书,得18分;质量管理体系已获得质量管理认证证书,施工质量具有可靠的保证,得50分

表9 高钢级管道阴保系统有效性评分表
Table 9 Scores of cathodic protection system effectiveness of high-grade steel pipeline

评分项目	总分	评分细则	评分
测试桩间距	50	测试桩间距不大于2 km,所有埋地金属管道均已得到有效监控	50
		测试桩最大间距2~3 km,管道得到有效监控,但一些套管未受到监控,另有一些埋地金属未得到监控,给予及格分	30
		测试桩最大间距超过3 km,一些潜在的干扰源未得到监控,管道的安全运行受到威胁危险,得0分	0
测试时间间隔	30	以6个月为基准,小于6个月测试1次	30
		以6个月为基准,测试时间每超过1个月扣5分	
		超过1年未开展测试,管道运行风险较大	0
杂散电流情况	20	待测管段周围发现杂散电流	0
		待测管段周围未发现杂散电流	20

增大,其不可靠性也随之增加;测试桩间隔越密,获取的管道腐蚀情况就越全面。腐蚀过程随时间而持续变化,缩短测试时间间隔可以有效、及时发现腐蚀现状。土壤中杂散电流也会对阴极保护系统产生严重影响,需对其进行测试、评估。

2 安全评价

2.1 指标权重计算

层次分析法已经在多个领域中得到广泛应用,其核心思想是将复杂问题分解为若干层次,每一层次

中不同指标间通过两两对比得出各指标的权重。为此,采用层次分析法^[24](Analytic Hierarchy Process, AHP)对高钢级管道 10 个安全评价指标赋予不同的权重。选取材料类的 3 个安全评价指标为例,每次取两个指标 u_i 、 u_j 两两比较(其中 $i, j=1, 2, 3$, u_1 为材料匹配度、 u_2 为材料适应性、 u_3 为管道失效概率),判断两个指标对管道安全的重要性,用 $a_{i,j}$ 表示两者的重要性之比, $a_{i,j}$ 的取值采用 9 点标度法^[24]获得(表 10)。根据高钢级管道实际情况,依据标度评判结果,得到指标权重判断矩阵 $A=[a_{i,j}]$ 。

表 10 高钢级管道材料类指标权重判断矩阵表
Table 10 Index weight judgment matrix of high-grade steel pipe material

$a_{i,j}$	材料类指标		
	u_1	u_2	u_3
u_1	a_{11}	a_{12}	a_{13}
u_2	a_{21}	a_{22}	a_{23}
u_3	a_{31}	a_{32}	a_{33}

为了从权重判断矩阵 A 得到各指标的权重值,需要采用方根法^[25]计算判断矩阵 $A=(a_{ij})_{3 \times 3}$ 的最大特征值 λ_{\max} 。 λ_{\max} 对应的特征向量 W 即为指标集 $U=[u_i]$ 中各指标 u_i 的权重值,其包括以下 3 个计算步骤。

(1) 计算判断矩阵 $A=(a_{ij})_{3 \times 3}$ 每一行各元素之积 M_i :

$$M_i = \prod_{j=1}^3 a_{ij} \quad (7)$$

(2) 计算 M_i 的 3 次方根值:

$$\overline{W}_i = \sqrt[3]{M_i} \quad (8)$$

(3) 对向量 $\overline{W}=(\overline{W}_i)=(\overline{W}_1, \overline{W}_2, \overline{W}_3)$ 进行归一化处理:

$$W_i = \frac{\overline{W}_i}{\sum_{i=1}^3 \overline{W}_i} \quad (9)$$

表 12 某输气管道 4 个管段 10 个评价指标基本概况统计表
Table 12 Statistics on basic conditions of 10 evaluation indexes of four sections of a gas pipeline

评价指标	基本概况			
	管段 1	管段 2	管段 3	管段 4
材料匹配度	管道焊缝处采用低匹配焊接, $S=0.9$	管道焊缝处采用低匹配焊接, $S=0.9$	管道焊缝处采用低匹配焊接, $S=0.9$	管道焊缝处采用低匹配焊接, $S=0.9$
材料适应性	管道处于二级地区, $\gamma=0.55$	管道处于三级地区, $\gamma=0.55$	管道处于三级地区, $\gamma=0.55$	管道处于三级地区, $\gamma=0.55$
管道失效概率 (站场数据库提供)	8.23×10^{-8}	2.34×10^{-8}	4.55×10^{-8}	4.67×10^{-8}
环境载荷	存在低风险点 2 处	存在低风险点 3 处	存在较低风险点 4 处	存在较低风险点 3 处

由此,得到的 $W=(W_1, W_2, W_3)$ 即为 λ_{\max} 所对应的特征向量,亦即 $U=[u_i]$ 中各指标 u_i 的权重值。同理,高钢级管道其他安全评价指标也采用同样方法进行权重计算。

2.2 安全评分计算及分级

根据待评价管道的实际情况,对每个评价指标进行打分;按照上述权重分配方法,建立指标权重判断矩阵,计算各指标的权重系数 W_k (其中 $k=1, 2, 3, \dots, 10$, 表示 10 个评价指标);各个指标得分 C_k 与相应的权重系数 W_k 相乘,得到该指标的修正得分;累加各指标的修正得分,最终得到管段的安全评分 C_{total} :

$$C_{\text{total}} = \sum_{k=1}^{10} (W_k C_k) \quad (10)$$

根据高钢级管道最终得分 C_{total} ,将管道安全划分为优秀、良好、合格、较差 4 个等级(表 11)。

表 11 高钢级管道安全等级划分表
Table 11 Safety classification of high-grade steel pipeline

管道得分	安全等级
$90 < C_{\text{total}} \leq 100$	优秀
$80 < C_{\text{total}} \leq 90$	良好
$60 \leq C_{\text{total}} \leq 80$	合格
$C_{\text{total}} < 60$	较差

3 实例应用

某输气管道管径 1 219 mm、输送压力 10 MPa,管材为 X70,选取管段 1~管段 4 进行评价。根据该管道的设计文件、施工资料、运行维护记录等相关资料(表 12),按照上述各指标评分方法对待评价管段进行安全指标评判(表 13)。

续表

评价指标	基本概况			
	管段 1	管段 2	管段 3	管段 4
人为载荷	管道埋深符合要求,员工巡线规范,安全宣传有所欠缺,管道标识设置合理,治安状况良好,管道上方基本无大型人为活动,管道地面设施有效,公众、政府配合程度良好	管道埋深符合要求,员工巡线规范,安全宣传有所欠缺,管道标识设置合理,治安状况良好,管道上方偶尔有大型活动,管道地面设施有效,公众、政府配合程度良好	管道埋深符合要求,员工巡线规范,安全宣传到位,管道标识设置合理,治安状况良好,管道上方基本无大型活动,管道地面设施有效,公众、政府配合程度良好	管道埋深符合要求,员工巡线规范,安全宣传到位,管道标识设置存在一些问题,治安状况良好,管道上方经常有大型活动,管道地面设施有效,公众、政府配合程度一般
定期检测维护	对管道开展内外检测,并对所有缺陷进行了修复	对管道开展内外检测,并对部分缺陷进行了修复	对管道开展内外检测,并对部分缺陷进行了修复	对管道开展内外检测,并对部分缺陷进行了修复
施工过程管理	施工资料部分缺失,采用全自动全解方式,施工质量管理体系完善	施工资料齐全,采用全自动全解方式,施工质量管理体系完善	施工资料部分缺失,采用全自动全解方式,施工质量管理体系完善	施工资料部分缺失,采用全自动全解方式,施工质量管理体系完善
阴保系统有效性	测试桩间距及检测周期符合规定,管道附件发现杂散电流	测试桩间距及检测周期符合规定,管道附件发现杂散电流	测试桩间距及检测周期符合规定,管道附件发现杂散电流	测试桩间距及检测周期符合规定,管道附件发现杂散电流
焊接缺陷状况	焊接等级为 II, 存在条形缺欠, 长度达 33.1 mm	焊接等级为 III, 存在夹层未融合(中间未焊透), 长度达 30 mm	焊接等级为 II, 存在根部未融合(根部未焊透), 长度达 2 mm	焊接等级为 II, 存在条形缺欠, 长度达 33 mm
管体缺陷状况	安全比值 $\delta=0.79$	安全比值 $\delta=0.79$	安全比值 $\delta=0.76$	安全比值 $\delta=0.76$

表 13 某输气管道 4 个管段安全指标评分表

Table 13 Scores of safety indexes of four sections of a gas pipeline

评价指标	指标得分			
	管段 1	管段 2	管段 3	管段 4
材料匹配度	60	60	60	60
材料适应性	80	0	0	0
管道失效概率	100	100	100	100
环境载荷	80	80	60	60
人为载荷	80	80	90	60
定期检测维护	100	60	60	60
施工过程管理	90	100	90	90
阴保系统有效性	80	80	80	80
焊接缺陷状况	80	80	80	80
管体缺陷状况	70	70	80	80

表 14 某输气管道 4 个管段最终安全得分表

Table 14 Final safety scores of four sections of a gas pipeline

评价指标	安全得分			
	管段 1	管段 2	管段 3	管段 4
材料匹配度	3.71	3.71	3.71	3.71
材料适应性	14.86	0	0	0
管材机械性能	18.58	18.58	18.58	18.58
环境载荷	3.23	3.23	2.42	2.42
人为载荷	16.12	16.12	18.13	12.09
定期检测维护	9.17	5.50	5.50	5.50
施工过程管理	2.38	2.65	2.38	2.38
阴保系统有效性	12.69	12.69	12.69	12.69
焊接缺陷状况	1.23	1.23	1.23	1.23
管体缺陷状况	2.27	2.27	2.60	2.60

采用上述层次分析法,利用式(7)~式(9)分别计算各类指标的最大特征值对应的向量,得到各指标权重:材料类指标权重 $W_1=(0.061\ 9,0.185\ 8,0.185\ 8)$ 、载荷类指标权重 $W_2=(0.040\ 3,0.201\ 5)$ 、缺陷类指标权重 $W_3=(0.091\ 7,0.026\ 5,0.158\ 6,0.015\ 4,0.032\ 5)$ 。

由此,根据式(10)计算得到各管段最终的安全得分(表 14),可见:管段 1 的最终得分为 84.25,管段 2~管段 4 分别得分 65.98、67.25、61.21,即管段 1 的安全等级处于良好,其余管段为合格。管段 2~管段 4 得分较低,主要由于材料适应性指标失分。经过查验该管道相关历史记录,这 3 个管段周围城市发展建设引起地区等级升高,管材强度系数仍为设计时的低等级强度系数,

不能满足该地区目前的安全要求,应引起管理重视,及时采取整改措施。

4 结束语

通过事故树分析法梳理了高钢级管道的主要安全影响因素,构建了安全评价指标体系。基于有限元分析方法及相关标准要求,建立了安全指标的评分细则,并利用层次分析法确定了各项评价指标权重。所建立的安全评价方法能够反映高钢级管道运行过程中存在的问题,可为管道的完整性、可靠性管理提供帮助。为了更全面地对高钢级管道进行安全评价,建

议今后还需将更多的安全影响因素纳入管道安全评价工作中,进一步细化并规范评分细则,有效减小评价的主观性。

参考文献:

- [1] 李秋扬,赵明华,张斌,温文,王乐乐,张雪琴,等. 2020 年全球油气管道建设现状及发展趋势[J]. 油气储运,2021,40(12): 1330-1337, 1348. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2021.12.002.
- LI Q Y, ZHAO M H, ZHANG B, WEN W, WANG L L, ZHANG X Q, et al. Current construction status and development trend of global oil and gas pipelines in 2020[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(12): 1330-1337, 1348.
- [2] 姜昌亮. 高钢级管道可靠性影响因素探讨与思考[J]. 油气储运, 2022, 41(7): 755-764. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2022.07.001.
- JIANG C L. Discussion and thinking on factors influencing reliability of high-grade steel pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2022, 41(7): 755-764.
- [3] 王旭,帅健,张圣柱,王如君,多英全. 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. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2023.02.012.
- WANG X, SHUAI J, ZHANG S Z, WANG R J, DUO Y Q. 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.
- [4] 骆正山,马昌宝,王小亮. 基于 RS-MSWOA-LSSVM 的油气管道失效压力预测[J]. 安全与环境工程,2022,29(4): 163-171.
- LUO Z S, MA C B, WANG X W. Prediction of oil and gas pipeline failure pressure based on RS-MSWOA-LSSVM[J]. Safety and Environmental Engineering, 2022, 29(4): 163-171.
- [5] 张杰,张佩颖,虞维超,刁逢,王圣洁,宫敬. 引入失效数据的腐蚀管道结构可靠性评价方法[J]. 安全与环境工程,2020,27(3): 185-192. DOI: 10.13578/j.cnki.issn.1671-1556.2020.03.026.
- ZHANG J, ZHANG P Y, YU W C, DIAO F, WANG S J, GONG J. Structural reliability evaluation method of corroded pipelines with failure data[J]. Safety and Environmental Engineering, 2020, 27(3): 185-192.
- [6] 巴振宁,王鸣钰,梁建文,王智恺. 改进的一次二阶矩计算埋地管道失效概率方法及其应用[J]. 安全与环境学报,2021,21(6): 2371-2377. DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2020.12.13.
- BA Z N, WANG M S, LIANG J W, WANG Z K. Improved method for calculating failure probability of buried pipeline based on first order second moment and its application[J]. Journal of Safety and Environment, 2021, 21(6): 2371-2377.
- [7] HAO Y M, YANG W M, XING Z X, YANG K, SHENG L, YANG J. Calculation of accident probability of gas pipeline based on evolutionary tree and moment multiplication[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2019, 176: 103955. DOI: 10.1016/j.ijvp.2019.103955.
- [8] CHELIYAN A S, BHATTACHARYYA S K. Fuzzy fault tree analysis of oil and gas leakage in subsea production systems[J]. Journal of Ocean Engineering and Science, 2018, 3(1): 38-48. DOI: 10.1016/j.joes.2017.11.005.
- [9] DONG Y H, YU D T. Estimation of failure probability of oil and gas transmission pipelines by fuzzy fault tree analysis[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2005, 18(2): 83-88. DOI: 10.1016/j.jlp.2004.12.003.
- [10] YU J X, CHEN H C, YU Y, YANG Z L. A weakest t-norm based fuzzy fault tree approach for leakage risk assessment of submarine pipeline[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2019, 62: 103968. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103968.
- [11] BADIDA P, BALASUBRAMANIAM Y, JAYAPRAKASH J. Risk evaluation of oil and natural gas pipelines due to natural hazards using fuzzy fault tree analysis[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2019, 66: 284-292. DOI: 10.1016/j.jngse.2019.04.010.
- [12] 白路遥,施宁,李亮亮,马云宾,蔡永军,姬江. 基于蒙特卡洛法的埋地悬空管道结构可靠度分析[J]. 西安石油大学学报(自然科学版),2016,31(5): 48-52, 59. DOI: 10.3969/j.issn.1673-064X.2016.05.007.
- BAI L Y, SHI N, LI L L, MA Y B, CAI Y J, JI J. Structure reliability analysis of buried suspended pipeline based on Monte-Carlo method[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2016, 31(5): 48-52, 59.
- [13] FREUDENTHAL A M. The safety of structures[J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1947, 112(1): 125-159. DOI: 10.1061/TACEAT.0006015.
- [14] 黄勇,陈海群,王凯全. Fault Tree+软件在长输天然气管道定量风险分析中的应用[J]. 中国安全生产科学技术,2013,9(1): 92-97.
- HUANG Y, CHEN H Q, WANG K Q. Application of fault tree+software for quantitative risk analysis of long distance

- natural gas pipeline[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2013, 9(1): 92-97.
- [15] PARK K, LEE G, KIM C, KIM J, RHIE K, LEE W B. Comprehensive framework for underground pipeline management with reliability and cost factors using Monte Carlo simulation[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2020, 63: 104035. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.104035.
- [16] LI X H, CHEN G M, ZHU H W, ZHANG R R. Quantitative risk assessment of submarine pipeline instability[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2017, 45: 108-115. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.12.001.
- [17] BEN SEGHER M E A, KESHTEGAR B, CORREIA J A F O, LESIUK G, DE JESUS A M P. Reliability analysis based on hybrid algorithm of M5 model tree and Monte Carlo simulation for corroded pipelines: case of study X60 steel grade pipes[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2019, 97: 793-803. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.01.061.
- [18] 朱汪友, 侯磊. 基于人工智能技术的输气管道系统可靠性量化方法[J]. *天然气工业*, 2022, 42(5): 110-119. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2022.05.012.
- ZHU W Y, HOU L. Reliability quantification method of natural gas pipeline system based on artificial intelligence technology[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(5): 110-119.
- [19] 冯庆善, 戴联双. 油气管道事故启示录[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2016: 1-268.
- FENG Q S, DAI L S. Oil and gas pipelines accidents of revelation[M]. Beijing: China Building Materials Press, 2016: 1-268.
- [20] 赵博, 王学迎, 李晓东, 李连峰, 杜玉昆, 夏星帆. 基于 Monte-Carlo 方法含缺陷管道失效概率计算方法研究[J]. *兵器材料科学与工程*, 2020, 43(2): 98-102. DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.20191204.001.
- ZHAO B, WANG X Y, LI X D, LI L F, DU Y K, XIA X F. Failure probability calculation method of pipeline containing defects based on Monte-Carlo method[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2020, 43(2): 98-102.
- [21] 任伟. 管道环焊缝可靠性分析[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2017.
- REN W. Reliability analysis for girth weld on pipelines[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2017.
- [22] 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. DOI: 10.3969/j.issn.2096-1693.2016.03.045.
- REN W, SHUAI J. Research into the statistical distribution of reliability parameters for girth welds on pipelines[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2016, 1(3): 484-492.
- [23] 刘威, 董婉琪. 基于 AHP-熵权法组合赋权的排水管网风险评估方法研究[J]. *安全与环境学报*, 2021, 21(3): 949-956. DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2019.1400.
- LIU W, DONG W Q. Risk assessment on the drainage pipe network based on the AHP-entropy weight method[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2021, 21(3): 949-956.
- [24] 黄小美, 李百战, 彭世尼, 张家兰. 基于层次分析和模糊综合评价的管道风险评价[J]. *煤气与热力*, 2008, 28(2): B13-B18. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4416.2008.02.012.
- HUANG X M, LI B Z, PENG S N, ZHANG J L. Risk assessment of pipeline based on analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive evaluation[J]. *Gas & Heat*, 2008, 28(2): B13-B18.
- [25] 施权. S 气田埋地钢质管道腐蚀防护检测与评价[D]. 成都: 西南石油大学, 2016.
- SHI Q. Corrosion protection testing and evaluation of buried steel pipeline for S field[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016.
- (收稿日期: 2022-09-16; 修回日期: 2023-09-12; 编辑: 李在蓉)
-
- 基金项目:** 中国石油天然气集团有限公司-中国石油大学(北京)战略合作科技专项“‘一带一路’海外长输管道完整性关键技术研究与应用”, ZLZX2020-05。
- 作者简介:** 唐柳怡, 女, 1982 年生, 高级工程师, 2007 年硕士毕业于四川大学植物学专业, 现主要从事地面工程与油气储运方向研究工作。地址: 四川省成都市武侯区航空路 1 号国航世纪中心 A 座, 610041。电话: 028-86018417。Email: tly2016@petrochina.com.cn



开放科学(资源服务)标识码(OSID):