



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2405303

引用格式:张颖,伍万,史君林,等.含腐蚀凹陷的高钢级管道的极限载荷[J].科学技术与工程,2025,25(17):7157-7164.

Zhang Ying, Wu Wan, Shi Junlin, et al. Ultimate load of high-grade steel pipes with corrosion depressions[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(17): 7157-7164.

机械、仪表工业

含腐蚀凹陷的高钢级管道的极限载荷

张颖¹, 伍万^{1*}, 史君林¹, 王怡佳²

(1. 四川轻化工大学机械工程学院, 宜宾 644000; 2. 四川省特种设备检验研究院, 成都 610000)

摘要 随着中国油气管道的服役年限增加,管道受到外在因素影响不可避免地会产生腐蚀、凹陷等缺陷,分析管道凹陷与腐蚀缺陷等对管道极限承载能力的影响势在必行。针对一段含凹陷及腐蚀缺陷的 X80 管道的安全性进行了模拟,通过改变凹陷长度、宽度、深度、材料类型等因素,分析了球型、椭球型等压头作用下的单凹陷区域对管道极限承载能力的影响。同时,研究了凹陷及腐蚀等复合缺陷同时存在时,凹陷及凹坑尺寸及间距等多种因素对管道安全性的影响,结果表明:凹陷长度及腐蚀长度和腐蚀深度是影响复合缺陷的极限承载能力的重要因素,凹陷作用在腐蚀中心点邻近区域时对管道的危害更大。

关键词 油气管道; 凹陷; X80 管道; 极限载荷; 复合缺陷

中图分类号 TH49; 文献标志码 A

Ultimate Load of High-grade Steel Pipes with Corrosion Depressions

ZHANG Ying¹, WU Wan^{1*}, SHI Jun-lin¹, WANG Yi-jia²

(1. College of Mechanical Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Yibin 644000, China

2. Sichuan Special Equipment Inspection and Research Institute, Chengdu 610000, China)

[Abstract] As the service life of China's oil and gas pipelines increase, the pipelines are inevitably subjected to defects such as corrosion and denting due to external factors. It becomes imperative that the impact of these defects, including denting and corrosion, on the ultimate bearing capacity of the pipelines be analyzed. A simulation was conducted on the safety of an X80 pipeline with dents and corrosion defects. By changing factors such as dent length, width, depth, and material type, the influence of a single dent area under the action of spherical and ellipsoidal pressure heads on the ultimate bearing capacity of the pipeline was analyzed. At the same time, the influence of various factors such as the size and spacing of dents and dents on pipeline safety was studied when composite defects such as dents and corrosion coexist. The results show that the length of dents, corrosion length, and corrosion depth are important factors affecting the ultimate bearing capacity of composite defects, and the damage to pipelines is greater when dents act in the vicinity of the corrosion center point.

[Keywords] oil and gas pipelines; concavity; X80 pipes; ultimate load; compound defects

油气管道在实际服役过程中受到外载荷作用下,不可避免地会产生凹陷、裂纹等缺陷^[1],而管道凹陷会削弱管道的极限承载能力,严重危害管道的正常运行,某公司巡检其下属管道共发现凹陷 3 196 处,据统计,纯凹陷占 81.5%,复合凹陷占 18.5%^[2]。针对此类管道的极限承载能力研究刻不容缓。如 Wu 等^[3]利用有限元软件模拟了天然气管道凹陷的形成过程,通过与试验数据对比,提出

了一种考虑凹陷形状和管道径厚比的凹陷评价方法。其他学者还考虑了凹陷位置^[4]、压力^[5-6]、载荷^[7-8]、支撑角度^[9]、曲率半径^[10]、不同环境^[11]等因素对管道极限承载能力的影响,上述研究大多只考虑了单凹陷深度变化对管道的破坏,并未考虑凹陷长度、宽度变化对管道破坏,且并未考虑凹陷与腐蚀凹坑等复合凹陷对管道的破坏,因此,马欣等^[12]采用球型压头模拟了凹陷与腐蚀凹坑同时存

收稿日期: 2024-07-15 修订日期: 2025-03-15

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51974271); 四川省重点研发计划(2020YFSY0038); 四川省特种设备检验研究院科研项目(SCTJ-2022-YN04)

第一作者: 张颖(1988—),男,汉族,四川自贡人,博士,副教授。研究方向:机械设计、油气井工程安全。E-mail:yingzhang@suse.edu.cn。

*通信作者: 伍万(1999—),男,汉族,四川达州人,硕士研究生。研究方向:油气管道安全。E-mail:2648235565@qq.com。

在时对 X60 管道等效应力和应变的影响,得出腐蚀深度为一半壁厚的凹陷管道应力最小,刘维洋等^[13]分析了球型直径、内压等因素对含腐蚀凹陷管道的影响,提出了一种含腐蚀凹陷管道的评定公式,其他学者也从服役环境^[14-15]、内外腐蚀^[16]、缺陷部位^[17]等多种因素分析了含腐蚀凹陷管道的极限载荷,但上述研究凹陷区域大多集中在腐蚀区域中心,并未考虑到不同间距时对管道的影响,随着高强度钢的使用逐渐增多,上述基于 X42、X52、X62 等中低钢级管道得到的结论是否适用仍需深入研究。

基于上述所述的问题,现建立球形、椭圆形、圆柱形等形状压头,分析研究 X80 管道的凹陷尺寸、角度、形状、间距等多种因素对管道安全的影响,以为后续管道的评定及维护提供参考。

1 有限元模型建立

1.1 方法介绍

常用的凹陷管道的安全评定方法主要分为两类,一类为基于深度评价方法,另一类是基于应变评价方法,其中,基于深度评价法主要指凹陷区域的最大深度不超过管径的某一特定值时,该凹陷可以接受,如美国石油协会的 API 579-1/ASME FFS-1-2021(在役设备可用性评价)^[18]、美国天然气协会的管道腐蚀剩余强度评估准则(Pipeline Corrosion Residual Resistance Criterion, PCORRC)及中国《缺陷油气管道剩余强度评价方法》(SY/T 6477—2017)^[19]规定不超过管径的 6%,超过该临界值时,则管道则需维护,基于应变评价方法主要指凹陷区域的最大等效应变不超过管径的某一特定值时,该凹陷可以接受,如 ASME B31.8^[20]认为当凹陷区的最大应变达到 6% 时,管道需进行修理或移除,凹陷区域的最大应变按 Mises 准则计算,管道的轴向、环向、径向应变按式(1)计算^[21],公式为

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = \frac{t}{2} \left(\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_1} \right) \\ \varepsilon_2 = \frac{-t}{2} \frac{1}{R_2} \\ \varepsilon_3 = \frac{t}{2} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: ε_1 为环向弯曲应变; ε_2 为轴向弯曲应变; ε_3 为轴向薄膜应变; t 为管壁厚度; R_0 为管道内径; R_1 为凹陷环向曲线的曲率半径; R_2 为凹陷轴向曲线的曲率半径。

随着油气管线不断朝高钢级、大口径领域发

展,采用何种准则能有效地对凹陷管道进行评定,仍需广泛的讨论。

1.2 凹陷管道模型

针对长输管道常见的凹陷-腐蚀缺陷做了有限元模拟,管径和壁厚设为 $(1\ 219 \pm 19.89)$ mm,建立 1/2 管道模型,根据圣维南定理,为了减少边界效应对分析结果的影响^[22],取长度为 4 000 mm,载荷设置上,管道受外在因素影响较小,因此只考虑内压作用。同时,由于只考虑了直管段管道,因此管道一端限制了 z 轴位移约束,另一端则施加内压引起的等效拉应力^[23],其计算公式如式(2)所示,由于只建立了管道的 1/2 模型,还需对管子施加 X 轴的对称约束,管道的模型图如图 1 所示。

$$P_e = \frac{PR_i^2}{R_o^2 - R_i^2} \quad (2)$$

式(2)中: P_e 为等效拉应力为管道的工作内压; P 为管道的工作内压; R_o 为管道外半径; R_i 为管道内半径。

为了更贴合工程实际,考虑材料非线性,即采用材料的真实应力应变曲线。管道材料选用 X80 钢,试样选取该管道直管段部分,按照《金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2021),在管材拉伸试验机上进行拉伸实验,获得材料的应力应变曲线如图 2 所示,其基本的材料性能如表 1 所示。

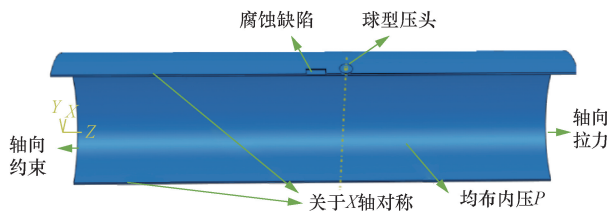


图 1 管道模型示意图

Fig. 1 Pipeline model

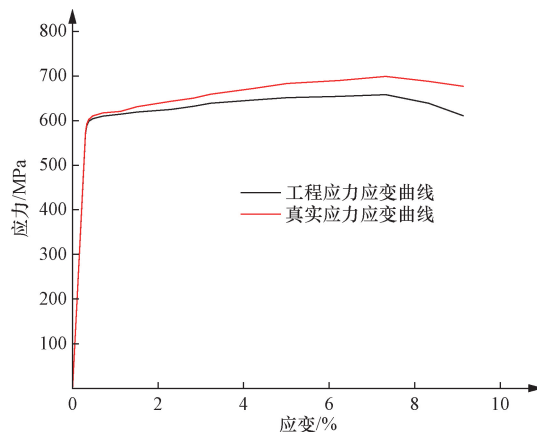


图 2 材料的应力应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of materials

凹陷的施加方式为首先给压头一个向下的位移,进行凹陷加载,随着移除位移,进行凹陷卸载,最后,施加内压。分析步骤设置为3步,分别执行加载、卸载、加压等步骤,腐蚀缺陷简化成长方形凹坑。选用通用静力分析步,考虑几何非线性,开启大变形开关,设置初始增量步为0.001,最大增量步为0.5,最小增量步为 10^{-8} ,采用自动时间步长计算。刚性球头与管道采用表面与表面接触。仅限制接触的切向行为,网格模型的最小和最大的单元尺寸分别为 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 和 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$,网格划分上缺陷区域选用C3D10,其他区域选用C3D20R,管道缺陷周围采取细致网格剖分,远离缺陷一侧粗略划分网格,共计形成42 132个网格单元。具体网格划分如图3所示。

表1 X80 管线钢的材料性能

Table 1 Material properties of X80 pipeline steel

屈服极限 R_{el} /MPa	抗拉极限 R_m /MPa	弹性模量 E /MPa	泊松比 ν
572	643	210 000	0.3

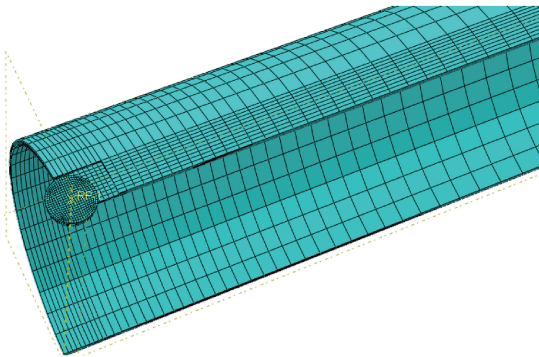


图3 管道网格划分模型

Fig. 3 Pipeline meshing model

1.3 结果分析

选取凹陷作用于腐蚀区域中心点做有限元分析,结果如图4所示,可以看出,当压头加载时,凹陷区域出现了局部应力集中,且不断往周围扩散,部分区域以达到材料的屈服强度,证明此时腐蚀区域已出现局部塑性变形,当压头卸载时,凹陷区域逐渐发生回弹,应力集中区域逐步减少,但其集中于压头作用点附近区域,证明凹陷卸载后的危险区域不是凹陷中心点,而是凹陷临近区域。当加载压力至极限内压时,凹陷区域再次发生回弹,应力集中区域不断增加,主要集中在腐蚀区域,证明管道腐蚀区域存在应力集中,受到的破坏更为严重。

为了验证模型的有效性,将模拟结果与PCORRC方法进行对比^[24],其结果如表2所示。可以看出,误差不超过5%,模型建立合理。

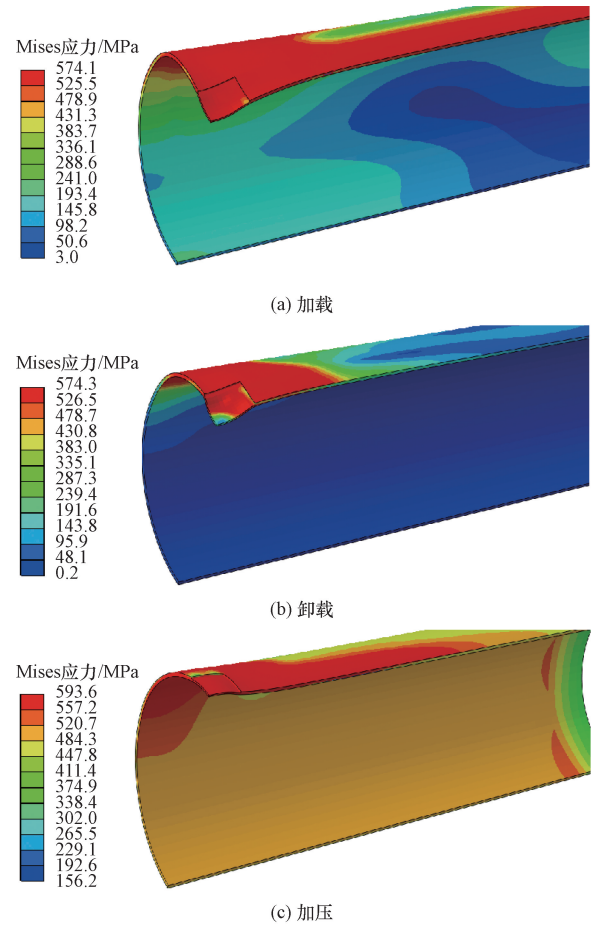


图4 不同过程的管道所受 Mises 应力云图

Fig. 4 Mises stress cloud map of the pipeline of different processes

表2 不同方法计算的极限载荷值

Table 2 Ultimate load values calculated by different methods

缺陷深度/mm	PCORRC 方法	API 579-1 方法	误差/%
2	18.19	18.91	3.9
4	17.55	18.06	2.9
6	16.83	17.21	2.2
8	15.98	16.54	3.5
10	14.96	15.37	2.7
12	13.65	14.23	4.3

2 管道极限承载能力的影响因素

2.1 单凹陷的影响

目前主要以凹陷深度不超过管径的6%为主,而对于凹陷长度和宽度对管径的影响研究较少,因此,以凹陷深度的回弹系数为基准进行评定,回弹系数的定义按式(3)和式(4)计算^[25];凹陷和腐蚀的长度、宽度、深度等尺寸按式(5)~式(9)进行无量纲化处理。凹陷加载前后的位移变化如图5所示。

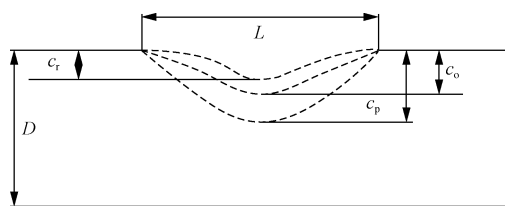


图5 凹陷加载前后的位移变化图
Fig. 5 Displacement change of the depression before and after loading

凹陷第一次回弹系数:

$$G_{i1} = c_o/c_p \quad (3)$$

凹陷第二次回弹系数:

$$G_{i2} = c_r/c_o \quad (4)$$

缺陷长度无量纲系数:

$$K_C = L/\sqrt{Dt} \quad (5)$$

凹陷宽度系数:

$$K_W = W/\sqrt{Dt} \quad (6)$$

腐蚀宽度系数:

$$K_W = \rho/90 \quad (7)$$

凹陷系数:

$$K_a = d/\sqrt{Dt} \quad (8)$$

腐蚀深度系数:

$$K_a = d/t \quad (9)$$

式中: c_p 为压头加载时管道的最大深度,mm; c_o 为压头卸载时管道的最大深度,mm; c_r 为压头卸载后,逐步增加内压到失效时管道的最大深度,mm; L 为凹陷长度,mm; d 为凹陷深度,mm; W 为凹陷环向总宽,mm; D 为管道外径,mm; ρ 为腐蚀缺陷环向角度,°。

为了研究凹陷长宽深尺寸对凹陷回弹系数的影响,设置3种椭球形凹陷模型,研究长度变化时,设置凹陷模型数据为 $K_a = 1/5$, $K_W = 1/4$, 长度系数 K_C 分别设置为 $1/4, 2/5, 8/15, 2/3, 4/5$, 研究宽度变化时,设置凹陷模型数据为 $K_a = 1/5$, $K_C = 1/2$, 宽度系数 K_W 分别设置为 $1/5, 1/3, 7/15, 3/5, 11/15$, 研究深度变化时,设置凹陷模型数据为 $K_W = 1/3$, $K_C = 1/4$, 深度系数 K_a 分别设置为 $1/15, 2/15, 1/5, 4/15, 1/3$, 施加深度为管径的6%,将所有有限元结果绘制成图6,为了更好地展现凹陷尺寸对管道回弹率的影响,将横坐标设置为凹陷模型,模型数增加代表该曲线的变化系数增加。

从图6中可以看出,凹陷发生第一次回弹时,椭球形凹陷长度越大、深度越大,管道回弹率均出现大幅度减少,且凹陷长度变化的曲线相较于凹陷深度变化的曲线更为陡峭,凹陷长度回弹系数变化总量也大于凹陷长度回弹系数变化总量,而随着椭球形

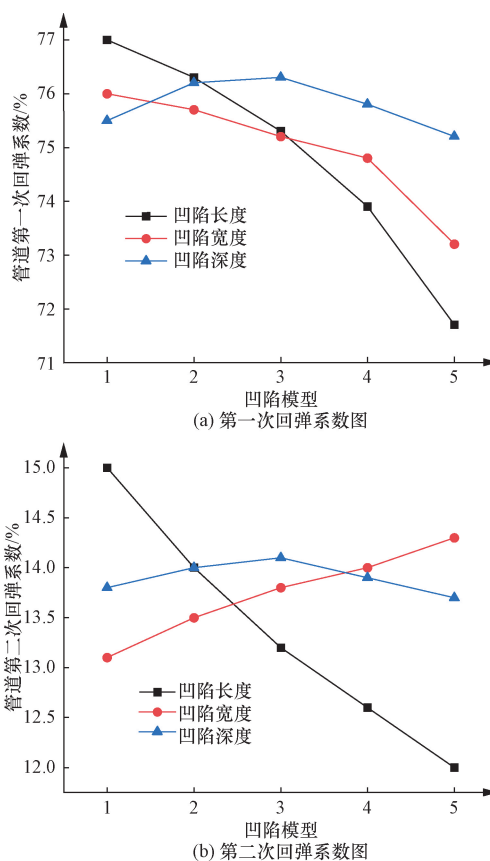


图6 不同过程的凹陷回弹系数与凹陷尺寸的关系
Fig. 6 The relationship between depression rebound coefficient and depression size of different processes

凹陷宽度增加,回弹系数先增加后减少,但回弹系数变化总量小于长度和深度变化的影响。在凹陷发生第二次回弹时,椭球形凹陷长度越大,凹陷回弹系数出现大幅度减小,凹陷深度越大,凹陷回弹系数逐渐增加,凹陷宽度增加,回弹系数仍是先增加后减少,综合两次回弹系数来看,凹陷长度增加,两次回弹系数均出现大幅度衰减,证明凹陷长度越长,管道回弹越困难,而凹陷宽度增加,两次回弹系数均先增加后减少,但总体变化幅度不大,证明凹陷宽度变化对管道的回弹影响较小,而凹陷深度增加,第一次回弹曲线减少,而第二次回弹曲线上升,证明凹陷深度变化时,无内压变化时,管道较难恢复,而在逐渐增大内压时,管道恢复的速率将会加快。综上,凹陷发生回弹时,对凹陷回弹率影响最大的依次为:凹陷长度 > 凹陷深度 > 凹陷宽度。

为了研究管道壁厚与管道直径的比值 t/D (壁厚比)对管道回弹系数的影响,建立了球型压头凹陷模型,压头半径设置为150mm,设置其管径比 $t/D = 0.008, 0.009, 0.01, 0.012, 0.013$,压头加载深度设置为管径的5%,结果如图7所示。

从图7中可以看出,随着凹陷径厚比的增加,管道第一次回弹曲线逐渐增加,管道第二次回弹曲线逐渐减少,但相较于第一次回弹曲线,第二次回弹曲线的变化幅度较少。因此,壁厚越大,管道越容易回弹,管道就越难发生凹陷。

由于高强度钢的不断铺设,针对不同材料的凹陷管道进行有限元分析甚为必要,因此,建立了X60、X70、X80的3种管道模型,采用球头压头进行加载,压头半径设置为100 mm,按施加位移为管径的4%、8%、12%、16%、20%和24%进行加载。其结果如图8所示,可以看出,管道的回弹率变化从大到小依次为X60钢>X70钢>X80钢,但不同材料的凹陷管道的回弹率变化很小,无较明显区别。

因此,基于塑性失效准则求取了3种不同材料的凹陷管道的极限载荷,按施加位移为管径的4%、8%、12%、16%、20%和24%进行加载。其结果如图9所示。可以看出,随着管道材料刚度的不断提高,管道能承受的极限载荷也不断升高,当凹陷加载深度从4%加载至12%时,管道的极限承载能力变化

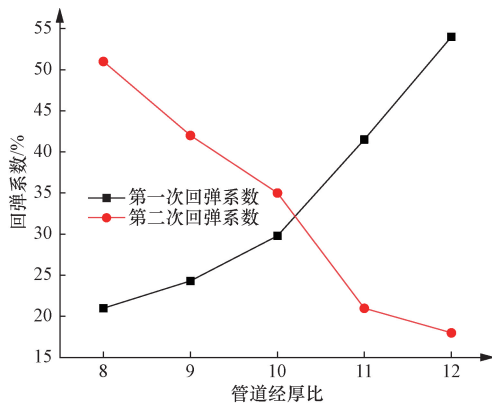


图7 凹陷回弹系数与管道径厚比的关系

Fig. 7 The relationship between the rebound coefficient of the depression and the ratio of the diameter to thickness of the pipe

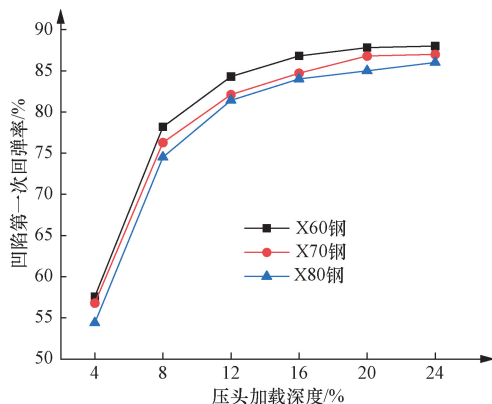


图8 凹陷回弹系数与不同材料管道的关系

Fig. 8 Relationship between the rebound coefficient of the depression and pipes of different materials

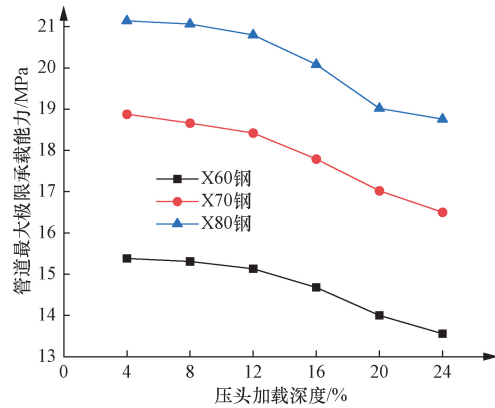


图9 极限载荷与不同材料管道的关系

Fig. 9 Relationship between ultimate load and pipes of different materials

总量不大,而超过12%时,管道的极限载荷减少幅度增加,但当加载深度为12%时,此时凹陷卸载后的深度远大于基于深度准则判定的6%,因此基于深度判定较为保守,在工作内压下,卸载后的3种材料在达到基于应变准则所规定的6%时,加载深度为管道的4%,因此需合理采用基于深度和基于应变两种评定准则进行评定。

2.2 凹陷与腐蚀复合的影响

当管道由于外力作用发生凹陷时,易在周围环境作用下发生腐蚀,造成管道的局部减薄,形成凹坑,因此,研究凹坑与凹陷同时作用时,对管道的破坏更为必要。两种凹陷按图10建立;凹陷间距无量纲系数按式(10)、式(11)进行处理。

轴向间距系数:

$$K_{S1} = S/\sqrt{Dt} \tag{10}$$

环向间距系数:

$$K_{S2} = \varphi/360 \tag{11}$$

式中: S 为管道轴向间距,mm; φ 为实测环向间距,按角度表示,($^{\circ}$)。

在比较腐蚀缺陷自身尺寸变化时,分别建立了不同凹坑长、宽、深变化的3类有限元模型,每类分为5组模型,研究长度变化对管道的影响时,设置凹坑模型数据为 $K_a = 4/9$, $K_w = 1/18$,长度系数 K_c 分别设置为1/3、2/3、2/3、4/3、5/3;研究宽度变化时,设置凹坑模型数据为 $K_a = 4/9$, $K_c = 1$,宽度系数 K_w 分别设置为1/18、1/6、5/18、7/18、1/2;研究深度变化时,设置凹坑模型数据为 $K_w = 1/9$, $K_c = 4/3$,深度系数 K_w 分别设置为2/9、1/3、4/9、5/9、2/3,施加深度为管径的6%,通过有限元分析,得到管道极限承载能力与腐蚀缺陷尺寸的关系曲线如图11所示。可以看出,随着凹坑变化系数的增加,凹坑宽度对管道极限承载能力的曲线波动较小,证明凹坑宽度变

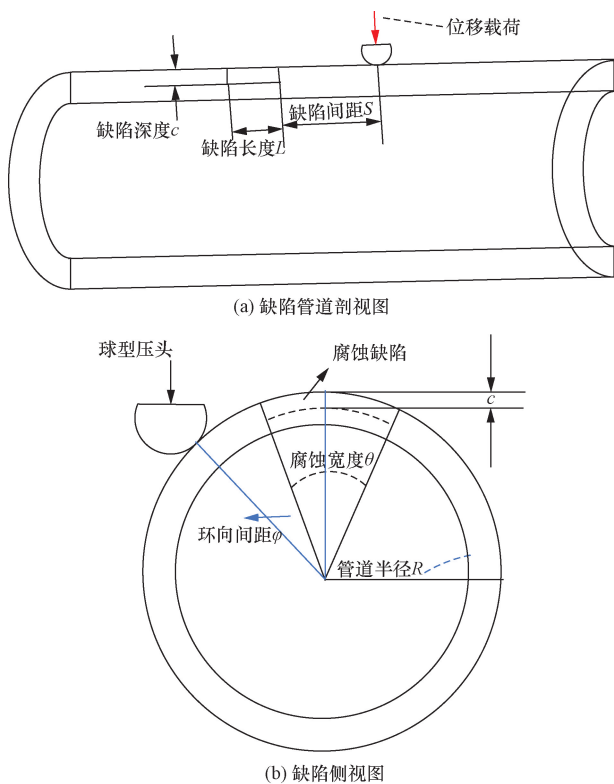


图 10 缺陷不同位置示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the different positions of the defects

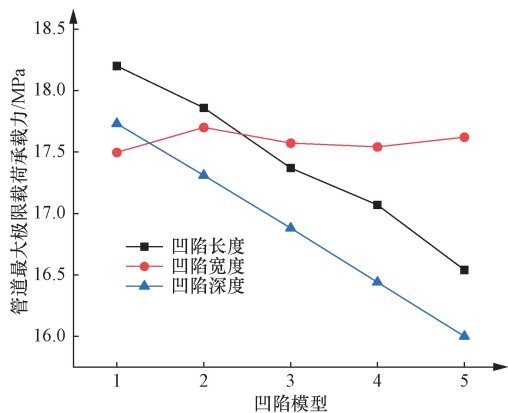


图 11 极限载荷与腐蚀凹坑尺寸的关系
Fig. 11 Relationship between ultimate load and corrosion pit size

化对管道极限承载能力的影响较小,而凹坑长度、深度变化,管道的极限承载能力均出现大幅度下降,但深度变化曲线更为陡峭,证明凹坑深度变化相较于长度变化对管道的极限承载能力影响较大。

在研究凹陷与腐蚀缺陷同时存在凹陷尺寸改变对管道极限承载能力的影响时,凹陷尺寸系数与前节单凹陷尺寸系数相同,腐蚀凹坑尺寸系数设置为 $K_a = 4/3$, $K_w = 2/9$, $K_c = 1/2$,凹陷作用在腐蚀压头中心点,施加位移为管径的 12%,通过有限元

分析,得到管道极限承载能力与凹陷尺寸的关系曲线如图 12 所示。可以看出,随着凹陷变化系数的增加,凹陷宽度的曲线先增加后减少,凹陷长度直线减少,凹陷深度直线上升。但就变化总量而言,凹陷长度变化对管道极限承载能力影响较大,凹陷深度和凹陷宽度的变化总量不大,与凹陷回弹系数研究一致。

在比较凹陷间距对管道的影响时,分别建立了两种不同大小的球型压头的有限元模型,小压头设置半径为 100 mm,大压头设置半径为 250 mm,腐蚀尺寸设置为长为 200 mm,宽为 15°,深为 9 mm,其中前面 3 个点均在腐蚀缺陷上,除凹陷中心点外,分别为腐蚀尺寸中心点右侧的 1/4 和 1/2 点。后面几个点设置为凹陷间距系数 $K_{s1} = 0, 1, 2, 3, 4, 6$,施加位移为管径的 12%。通过有限元分析,得到管道极限承载能力与腐蚀缺陷尺寸的关系曲线如图 13 所示。

从图 13 中可以看出,当压头作用在腐蚀尺寸上时,前 3 个点的值先减小后增大,证明当凹陷和腐蚀同时存在且压头作用在腐蚀中心时,对管道的危害小

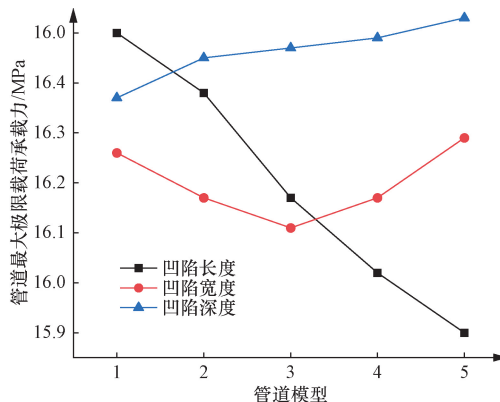


图 12 极限载荷与凹陷尺寸的关系

Fig. 12 The relationship between the ultimate load and the size of the depression

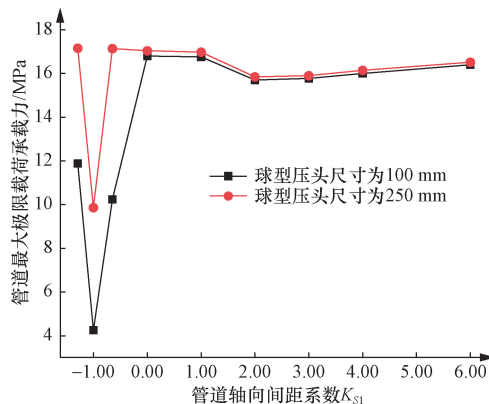


图 13 极限载荷与管道轴向间距的关系

Fig. 13 The relationship between the ultimate load and the axial spacing of the pipe

于压头作用在腐蚀临近区域时的破坏,离腐蚀区域的1/4点,因为当凹陷卸载时,凹陷中心区域的应力小于凹陷附近区域,而腐蚀缺陷应力最大点集中在腐蚀中心区域,当压头作用在腐蚀邻近区域时,卸载后的最大应力与腐蚀中心的最大应力形成叠加,造成对管道的严重破坏,随着间距系数从0增加至6时,管道极限承载能力先不变后减小再增大,当间距系数为2时,二者的相互作用最大,当间距系数超过2时,二者的相互作用逐渐减少。且从图14中可以看出,大小压头作用在腐蚀区域时二者的值相差较大,而在其他区域,两条曲线几乎完全重合,因此在凹陷作用在腐蚀区域时需考虑凹陷尺寸对管道极限承载能力的影响。

在比较凹陷环向和轴向间距同时存在时对管道的影响时,轴向间距点选取除凹陷中心点外,分别为腐蚀尺寸中心点右侧的1/4、1/2点。后面几个点设置为凹陷间距系数 $K_{S1} = 1, 2, 4$,同时,在这6个轴向间距点上设置不同的环向间距系数 K_{S2} ,分别为0.2、0.4、0.6和0.8,施加位移为管径的12%,共24组数据,通过有限元分析,得到管道极限承载能力与间距的关系曲线如图14所示。

从图14中可以看出,当环向间距系数为0.2时,随着轴向间距系数增加,曲线先变大后减小再增加,管道极限承载能力波动较大,为0.8 MPa,当环向间距系数为0.4时,随着轴向间距系数增加,曲线先增加后减小,管道极限承载能力波动为0.4 MPa,而当环向间距系数为0.6和0.8时,曲线先增加后逐渐平稳,证明环向间距越近时,缺陷间的相互作用越大,对管道的危害也越大,环向间距系数小于0.4时,对管道的危害较大,两种间距同时存在时,环向间距越近,轴向间距系数 $K_{S1} = 1$ 时,相互作用达到峰值。

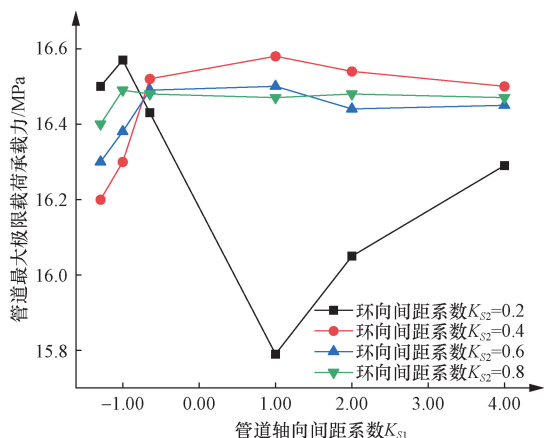


图14 极限载荷与两种间距的关系

Fig. 14 Relationship between the ultimate load and the two spacings

3 结论

(1)当只存在单个凹陷时,影响凹陷回弹率的尺寸因素从大到小分别为:凹陷长度>凹陷深度>凹陷宽度。且对于韧性较好的高钢级管道而言,基于深度评定的准则较为保守。

(2)当凹陷与腐蚀凹坑等复合缺陷同时存在时,对管道极限载荷影响较大的分别为凹坑长度、凹坑深度,凹陷长度、凹陷深度,其中凹坑尺寸变化对管道极限承载能力影响较大,凹陷变化对管道的极限承载能力影响较小。

(3)当复合缺陷存在一定的间距时,轴向间距的影响远大于环向间距的影响,当压头作用在腐蚀区域时,凹陷尺寸对管道的极限承载能力影响较大,且管道最大破坏点并不在凹陷中心,而在其腐蚀临界区域,工程上需着重考虑。而压头作用在腐蚀区域之外,凹陷尺寸对管道极限承载能力影响较小,此时需考虑两缺陷的相互作用,只存在轴向间距系数 $K_{S1} = 2$ 时存在较大的减少,二者间距同时存在时,环向间距系数小于0.2时,轴向间距系数 $K_{S1} = 1$ 时,对管道的破坏较重。

参 考 文 献

- [1] 王怡佳, 伍万, 龙雨娇, 等. 含缺陷压力管道评定技术研究进展[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(18): 7476-7486.
Wang Yijia, Wu Wan, Long Yujiao, et al. Research progress in evaluation technology of pressure pipeline including defects[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(18): 7476-7486.
- [2] 田野, 朱丽霞, 丁融, 等. 含复合凹陷油气管道的安全评估现状[J]. 油气田地面工程, 2019, 38(3): 56-59, 64.
Tian Ye, Zhu Lixia, Ding Rong, et al. Current situation of safety assessment on oil and gas pipelines with compound dents[J]. Oil & Gas Field Surface Engineering, 2019, 38(3): 56-59, 64.
- [3] Wu Y, Du Z, Li L, et al. A new evaluation method of dented natural gas pipeline based on ductile damage[J]. Applied Ocean Research, 2023, 135: 103533.
- [4] 黄云飞. 长输管道上平滑凹痕缺陷的回复研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2019.
Huang Yunfei. Research on the recovery of smooth dent defects on long-distance pipelines[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2019.
- [5] 李成兵, 蔡中陶, 张昕, 等. 波动内压作用下油气管道凹陷再圆分析[J]. 石油机械, 2022, 50(4): 130-138.
Li Chengbing, Cai Zhongtao, Zhang Xin, et al. Analysis of oil and gas pipeline depression and re-rounding under fluctuating internal pressure [J]. China Petroleum Machinery, 2022, 50(4): 130-138.
- [6] Kec J, Cerny I. Stress-strain assessment of dents in wall of high pressure gas pipeline[J]. Procedia Structural Integrity, 2017, 5: 340-346.
- [7] 朱思宇, 冯欣润, 徐涛, 等. 弯曲作用下凹陷海管剩余极限强

- 度研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2020, 44(1): 186-190.
- Zhu Siyu, Feng Xinrun, Xu Tao, et al. Research on residual ultimate strength of dent pipe under bending[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering), 2020, 44(1): 186-190.
- [8] Zeinoddini M, Ezzati M, Parke G. Plastic buckling, wrinkling and collapse behavior of dented X80 steel line pipes under axial compression[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2015, 38: 67-78.
- [9] 钟功祥, 张兴, 吕亚峰, 等. 不同支撑角度下含凹陷管道的应变分析[J]. 塑性工程学报, 2017, 24(6): 209-213.
- Zhong Gongxiang, Zhang Xing, Lü Yafeng, et al. Strain analysis of pipeline with dent under different support angles[J]. Journal of Plastic Engineering, 2017, 24(6): 209-213.
- [10] Tian X, Lu M, Chen Y. Numerical simulation method for failure pressure of buried dented pipeline[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2020(8): 944-949.
- [11] 景勇, 矫滨田, 陈邦敏. 海底管道的凹坑损伤安全评估[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(28): 38-43.
- Jing Yong, Jiao Bintian, Chen Bangmin. Pit damage safety assessment of submarine pipelines[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(28): 38-43.
- [12] 马欣, 李杰, 薛涛, 等. 含内腐蚀凹陷的压力管道应力应变研究[J]. 塑性工程学报, 2018, 25(3): 267-273.
- Ma Xin, Li Jie, Xue Tao, et al. Study on stress and strain of pressure pipe with inner corrosion depression[J]. Journal of Plastic Engineering, 2018, 25(3): 267-273.
- [13] 刘维洋, 马廷霞, 邹海翔, 等. 含腐蚀凹陷压力管道极限载荷数值分析[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(6): 92-97.
- Liu Weiyang, Ma Tingxia, Zou Haixiang, et al. Numerical analysis of limit load on pressure pipeline with corrosion defect and dent[J]. Chinese Journal of Safety Science, 2016, 26(6): 92-97.
- [14] 李伟, 郭海燕, 李晓秋. 海底悬空管道受坠物撞击凹陷损伤研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2018, 48(8): 139-144.
- Li Wei, Guo Haiyan, Li Xiaoqi. Study on the damage of submarine suspended pipe caused by falling objects[J]. Journal of Ocean University of China (Natural Science Edition), 2018, 48(8): 139-144.
- [15] Cai J, Jiang X, Lodewijks G. Numerical investigation of residual ultimate strength of dented metallic pipes subjected to pure bending[J]. Ships and Offshore Structures, 2018, 13(5): 519-531.
- [16] 司刚强, 薛正林, 孙伟栋, 等. 内外腐蚀对凹陷管道剩余强度影响分析[J]. 科技与创新, 2019(23): 12-15.
- Si Gangqiang, Xue Zhenglin, Sun Weidong, et al. Analysis of the influence of internal and external corrosion on the residual strength of the depressed pipe[J]. Technology and Innovation, 2019(23): 12-15.
- [17] 李成兵, 熊小钦, 张昕, 等. X80 管道焊缝凹陷应力应变特征数值计算分析[J]. 塑性工程学报, 2022, 29(8): 230-238.
- Li Chengbing, Xiong Xiaoqin, Zhang Xin, et al. Numerical calculation and analysis of depression stress and strain characteristics of X80 pipe weld[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29(8): 230-238.
- [18] American Petroleum Institute, American Society of Mechanical Engineers. Fitness-for-service: API 579-1/ASME FFS-1-2021[S]. Washington: API Publishing Services, 2021.
- [19] 国家能源局. 缺陷油气管道剩余强度评价方法: SY/T 6477—2017[S]. 北京: 国家能源局, 2017.
- National Energy Administration. Evaluation method for residual strength of defective oil and gas pipelines: SY/T 6477—2017[S]. Beijing: National Energy Administration, 2017.
- [20] The American Society of Mechanical Engineers. Gas transmission and distribution piping systems: ASME B31.8-2022[S]. New York: The American Society of Mechanical Engineers, 2022.
- [21] 薛涛. 含凹陷管道安全性研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2017.
- Xue Tao. Research on safety of pipeline with depression[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.
- [22] 齐建波, 高建章, 刘通达, 等. 含凹陷在役管道应变预测模型[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(29): 12541-12550.
- Qi Jianbo, Gao Jianzhang, Liu Tongda, et al. Strain prediction model of the depressed in-service pipeline[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(29): 12541-12550.
- [23] 王佳音, 帅健, 刘道乾, 等. 内压作用下含体积型缺陷弯管极限载荷研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(9): 158-163.
- Wang Jiayin, Shuai Jian, Liu Daoqian, et al. Study on the ultimate load of curved pipes with volumetric defects under internal pressure[J]. Chinese Journal of Safety Production Science and Technology, 2019, 15(9): 158-163.
- [24] 马廷霞, 潘玉林, 黄文, 等. 含等壁厚体积型缺陷油气管道的剩余强度评价[J]. 材料保护, 2020, 53(5): 34-41.
- Ma Tingxia, Pan Yulin, Huang Wen, et al. Residual strength evaluation of oil and gas pipelines with volume defects of equal wall thickness[J]. Material Protection, 2020, 53(5): 34-41.
- [25] 吕亚峰, 马廷霞, 邹海翔, 等. 基于有限元的长输管道凹陷回弹系数研究[J]. 锻压技术, 2017, 42(4): 194-200.
- Lü Yafeng, Ma Tingxia, Zou Haixiang, et al. Research on rebound coefficient of long-distance pipeline depression based on finite element[J]. Forging Technology, 2017, 42(4): 194-200.