

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2025.02.019

复合缺陷管道爆破失效研究

敖建华^{1,2}, 刘潇¹

(1. 沈阳建筑大学 土木工程学院, 辽宁 沈阳 110179;

2. 中国科学院武汉岩土力学研究所海洋工程与环境研究中心, 湖北 武汉 430071)

摘要: 为了研究海底管道服役期间在高压环境下内外复合腐蚀缺陷管道的爆破失效机理, 采用经过试验数据验证的有限元方法, 分析不同腐蚀缺陷形式对管道爆破失效的影响。结果表明: API-5L-X52、API-5L-X60、API-5L-X65、API-5L-X70、API-5L-X80 五种不同管材的缺陷管道的临界爆破压力随着管道缺陷深度和缺陷长度的增加逐渐减小。缺陷角度、缺陷宽度对缺陷管道的临界爆破压力无明显贡献, 其中 X52 管道对缺陷尺度变化最为敏感。内外复合缺陷管道的爆破压力则大多介于单一外缺陷和单一内缺陷之间。三种不同类型缺陷的临界爆破压力大小顺序为: $P_{外} > P_{复合} > P_{内}$ 。复合缺陷管道爆破压力和外缺陷与内缺陷深度之比呈正相关, 与内缺陷与外缺陷的长度比值呈负相关。随着复合腐蚀缺陷中的内外腐蚀缺陷的轴向间距和环向间距增大, 复合缺陷管道的承载能力增强。

关键词: 海底管道; 有限元; 复合缺陷; 爆破失效; ABAQUS

中图分类号: TE988

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2025)02-0139-10

Analysis of Blasting Failure of Submarine Composite Defective Pipeline

AO Jianhua^{1,2}, LIU Xiao¹

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, Liaoning 110179;

2. Marine Engineering and Environmental Research Center, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: Submarine pipelines are important part of the offshore oil and gas gathering, transportation, storage and transportation system. During their service, internal and external corrosion defects will inevitably occur due to the marine environment and transportation medium, and they often do not appear in a single form. In the high-pressure environment, corrosion defect pipelines are prone to burst failure, so it is particularly important to study the burst failure mechanism of internal and external composite corrosion defect pipelines. The finite element method verified by experimental data is used to analyze the influence of different corrosion defect forms on pipeline blasting failure under internal and external pressure differential loads. The results show that the critical burst pressure of the defective pipelines of five different type materials, namely API-5L-X52, API-5L-X60, API-5L-X65, API-5L-X70 and API-5L-X80, gradually decreases with the increase of the defect depth and defect length of the pipelines. The defect angle and defect width have no significant contribution to the critical bursting pressure of the defective pipeline, and the X52 pipeline is the most sensitive to the change of defect scale. The burst pressure of the internal and external composite defect pipes is mostly between a single external defect and a single internal defect. The order of critical burst pressure for the three different types of defects is as follows: $P_{outside} > P_{composite} > P_{inside}$. There is a positive correlation between the burst pressure of the composite defect and the ratio of the depth of the external defect to the internal defect, and a negative correlation with the ratio of the length of the internal defect to the external defect. With the increase of axial and circumferential spacing of internal and external corrosion defects in composite corrosion defects, the bearing capacity of composite defect pipelines increases.

Keywords: subsea pipelines; finite elements; composite defects; blast failures; ABAQUS

收稿日期: 2024-12-30

修稿日期: 2025-01-26

基金项目: 近海能源工程结构系统安全科学平台关键技术研究[广西科技厅重大专项(GUIKE AB22080073)]

作者简介: 敖建华(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为管-土耦合作用下的海底管道损伤及失效机理研究。E-mail: 2536212880@qq.com

海底管道是海洋油气开采系统的重要组成部分,连接着海洋油气系统的各个部分用于运输油气、水以及化学物品等,是海洋油气生产系统的“血管”。然而海水和管道结构的相互作用、海底自然灾害和海上作业等因素,会使得海底管道上出现缺陷。中国海油 1986—2016 年的海底管道事故统计和 PARLOC 对北海海底管道事故统计均表明:由腐蚀缺陷引起的失效占比高达 37%,是最主要的海底管道破坏方式^[1]。为了获得缺陷管道的爆破压力,学者们制定了许多行业标准,如改进的 ASME - B31G^[2]、RSTRENG SHELL92、PCORRC^[3]、DNV 模型^[4]和 CSA 模型。Netto 等^[5]指出,缺陷的长度和深度都会削弱缺陷管道的爆破压力。Zhang 等^[6]通过有限元分析发现,当缺陷深度大于壁厚的 70% 时,半椭球体模型比矩形模型更精确。Chiodo 等^[7]指出,缺陷宽度对管道爆破压力影响不大。Fekete 等^[8]用有限元方法讨论了长宽比对爆破压力的影响。

如果两个腐蚀缺陷之间的距离大于 S_{lim} ,它们可以被视为孤立的单点缺陷^[9-10]。否则,腐蚀缺陷会相互干扰,属于多点腐蚀缺陷。Lee 等^[10]通过试验和有限元方法研究了多个缺陷之间距离的影响,结果表明:多缺陷管道的爆破压力低于单缺陷管道。Mondal 等^[11]使用有限元方法研究了具有多种腐蚀缺陷管道的强度和变形特性。腐蚀点相互作用的临界距离主要取决于壁厚、缺陷深度、缺陷位置和管道直径。其中较为通用和经典的多点腐蚀缺陷管道的爆破压力方程如 DNV RP-F101 准则。

现有研究并没有考虑真实情况下复合缺陷的尺寸及相对位置对管道爆破压力的影响。单一缺陷的管道主要在缺陷深度和缺陷长度方向影响管道的爆破压力,与之相比真实情况下复合缺陷的管道由于内外缺陷的相对位置和内外缺陷的尺寸比的不同会对管道爆破压力产生更复杂的影响。本文选取常用的五种海底管道型号和材料,基于 ABAQUS 有限元建模分析法进行缺陷尺寸敏感性分析。选出其中对缺陷尺寸最为敏感的管道型号及材料进行复合缺陷管道爆破失效机理研究。这样有利于更加直观地分析复合缺陷尺寸及相对位置对管道爆破压力的影响。

1 腐蚀缺陷管道有限元模型

1.1 模型尺寸及材料特性

在有限元分析中分别使用一种低强度钢材 API-5L-X52,两种中强度钢材 API-5L-X60、API-5L-X65、两种高强度钢材 API-5L-X70、API-5L-X80 共五

种常用于输送石油、天然气和氢气等的管道材料作为本文的研究对象。大量的试验研究表明,Ramberg-Osgood 本构关系模型可以更好地模拟输油管道的非线性特性。因此,本文采用 R-O 本构关系模型得到了上述五种管线钢的真实的应力-应变曲线,如图 1 所示。管道的弹性变形和塑性变形在爆管过程中会相继出现。无论在材料的弹性阶段还是塑性阶段,都可以更真实地模拟管道实际材料的性能,其材料性能如表 1 所示。使用 ABAQUS 建立三维管道模型,管道外径 $D=458.8\text{ mm}$,管道壁厚 $t=8.1\text{ mm}$ 。在有限元分析中的管道长度的选择会影响计算得到的腐蚀管道爆破压力,导致结果与实际的试验数据结果相差过大。Mondal 等^[12]和 Leong 等^[13]在研究中发现,当有限元模型中采用的最小管道长度 L_{min} 满足公式(1)时,这种影响几乎可以忽略不计。管道有限元模型长度满足 $L=2.2D$,可以防止边界条件对腐蚀区域应力的影响。

$$L_{min} = \frac{L_c}{2} + \frac{d}{t} \sqrt{D \cdot L_c} \quad (1)$$

式中: L_{min} 为有限元分析中的最短管道长度,mm; L_c 为管道缺陷长度,mm; d 为管道缺陷深度,mm; t 为管道壁厚,mm; D 为管道外径,mm。

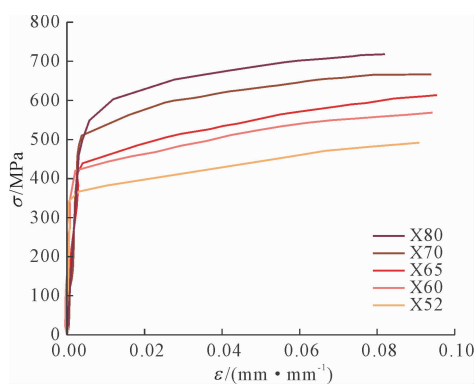


图 1 X52—X80 钢材的应力-应变曲线

表 1 X80 管道的材料特性

材料	弹性模量 /GPa	泊松比	屈服强度 /MPa	极限强度 /MPa
API-5L-X80	206	0.3	534.0	718.2
API-5L-X70	207	0.3	508.0	667.0
API-5L-X65	210	0.3	464.5	563.8
API-5L-X60	200	0.3	452.0	542.0
API-5L-X52	210	0.3	360.0	460.0

为分析外缺陷、内缺陷及复合缺陷对管道爆破压力的影响,建立管道简化力学模型,如图 2、图 3 所示。

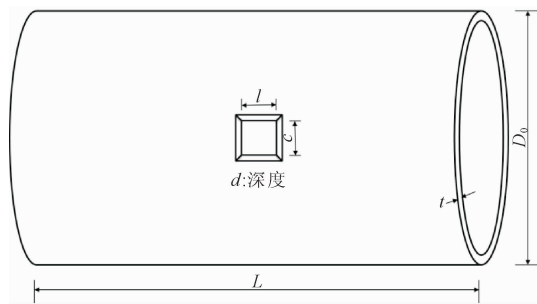


图 2 复合缺陷管道模型

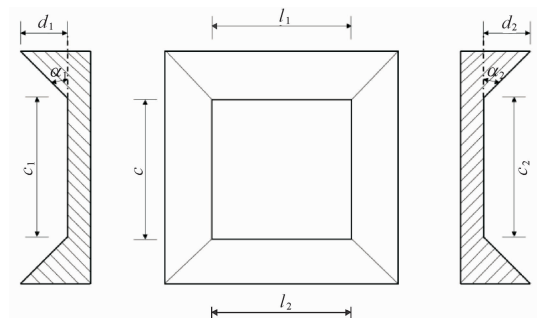


图 3 复合腐蚀缺陷尺寸

(左侧为管道外部,中间为缺陷俯视图,右侧为管道内部)

1.2 网格和边界条件

有限元分析的精度和效率在很大程度上取决于模型的网格划分,因此有必要进行网格敏感性分析以确定最佳网格尺寸;选取 API-5L-X80 管道材料,且有限元模型采用六面体、八节点连续单元(C3D8R)作为计算单元。基于缺陷管道有限元网格敏感性分析,在管道厚度方向至少需要划分 4 层均匀单元(缺陷截面 3 层均匀单元)、环向均匀单元 60 个^[14-15]。初步将网格尺寸范围定为 30 mm~1.5 mm,计算结果列于表 2 中。随着网格尺寸的变小,网格数量总数呈几何倍数增加,而爆破压力随着网格尺寸的减小而逐渐降低。当网格尺寸减小到 2.4 mm 时,单元数量较 3.8 mm 时增加了 2.4 倍,但 3.8 mm 和 2.4 mm 网格之间预测爆破压力的差值仅为 0.03 MPa。当网格尺寸进一步减小至 1.5 mm 时,预测爆破压保持不变。因此,考虑到有限元分析时间的准确性和效率,在有限元模型中缺陷部分使用尺寸为 2.4 mm 的致密网格,而其他部分使用尺寸为 10 mm~30 mm 的稀疏网格以节约计算资源,如

图 4 所示。

表 2 网格敏感性分析结果

网格尺寸/mm	单元数量/个	爆破压力/MPa	差值/MPa
30	18682	26.69	—
15	45630	25.60	1.09
10	84238	25.54	0.06
5	259302	25.50	0.04
3.8	419850	25.48	0.02
2.4	978234	25.45	0.03
1.5	2387358	25.45	0.00

由于管道内压力使得管道不能旋转,三个方向的旋转自由度($UR1 = UR2 = UR3 = 0$)和轴向伸长率($U3 = 0$)受到约束,所以管道端壁需要固定或使用纵向约束^[16]。压力载荷逐渐施加在管道的内壁上,分析时间设置为 200 s,压力从 10 MPa 线性增加到 30 MPa,模拟加载速率为 0.1 MPa/s。载荷及边界条件如图 5 所示。

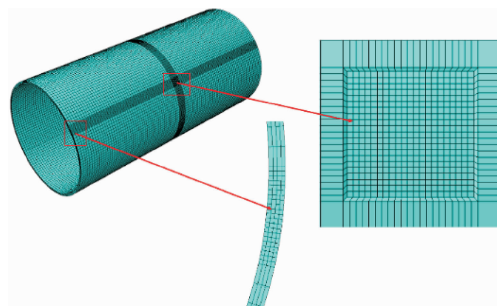


图 4 有限元模型缺陷及其余部分网格划分

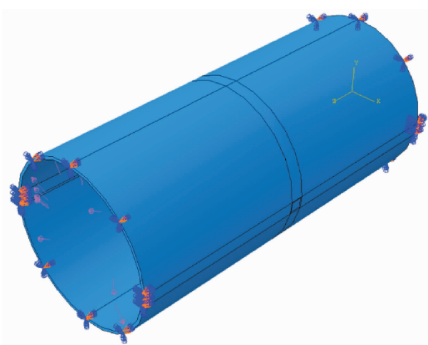


图 5 有限元模型载荷及边界条件

1.3 失效准则

由于在管道的壁厚中,并不能单纯的认为轴向应力和环向应力是均匀的,所以 Roark 等^[17]在计算过程中将管道分为厚壁管道和薄壁管道。厚壁管中的这些应力被称为壁应力,其计算公式与在薄壁中采用的薄膜应力公式不同。首先,应根据管道外径 D 与壁厚 t 的比值将管道分为薄壁或厚壁。当 $t >$

$D/10$ 时,可命名为厚壁管;否则为薄壁管。根据薄厚壁管道划分的原则,在本文中使用的海底管道为薄壁管。该设计方程考虑了材料的应变硬化。在本文的模型中使用 Von Mises 准则用作失效准则,当管道中腐蚀区域的 Von Mises 等效应力达到材料的极限抗拉强度时认为管道爆破失效。有限元分析中使用的破裂压力通过下面公式计算。

厚壁管:

$$P_{burst} = 2 \times \left(\frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} \right) \times \left(2 - \frac{\sigma_y}{\sigma_u} \right) \ln \left(\frac{a}{b} \right) \quad (2)$$

薄壁管:

$$P_{burst} = 2 \times \sigma_u \times \left(\frac{a-b}{a+b} \right) \quad (3)$$

式中: P_{burst} 为管道爆破失效压力,MPa; σ_y 为屈服强度,MPa; σ_u 为极限抗拉强度,MPa; a 为外半径,mm; b 为内半径,mm。

2 数值模拟方法的可靠度验证

一般来说,验证有限元法精度最可靠的方法是管道的全尺寸爆破压力试验。在本研究中使用有限元法分别验证之前文中的试验工作并与其有限元分析结果进行对比。模拟的管道和缺陷的几何参数见表 3。

表 3 缺陷管道的几何参数

管道长度 /mm	外径 /mm	壁厚 /mm	缺陷长度 /mm	缺陷宽度 /mm	缺陷深度 /mm	数据来源
2300	762	17.5	200	50	13.125	文献[18]

Oh 等^[18]首先制备拉伸试样以获得钢的性能参数。拉伸试样从爆破试验的管道材料 API-5L-X65 中抽取,测量获得材料的弹性模量、平均测量屈服应力、极限拉伸应力和泊松比分别为 210.7 GPa、464.5 MPa、563.8 MPa 和 0.3。真实应力-应变曲线如图 1 中 X65 曲线所示。Oh 等对长度、深度等不同缺陷参数的管道共进行了七次爆破试验。图 6 为试验装置与缺陷管道。试验过程:首先在长度为 12 m 的管道切割出 2.3 m 长的一段,再将管道的两端用端盖焊接密封,最后对封闭管道施加内部静水压力,从而使得管壁产生轴向拉伸应力直至缺陷管道发生破裂。在加压过程中用压力传感器记录管道内部压力。在管道缺陷区域发生膨胀变形,最终管道缺陷位置发生纵向破坏,见图 6(b)。

管道应力在腐蚀区域周围集中,而远离腐蚀区域的应力将更加均匀。因此,缺陷位置使用细网格,

其他地方使用粗网格。根据网格收敛性验证,所选网格尺寸范围为腐蚀区域处的 1.44 mm 至距离腐蚀区域 23 mm^[18]。调整网格大小,可以减少在有限元模型计算的运行时间和内存消耗,同时保持精度。分析本文中有限元方法计算的结果与管道全尺寸爆破试验的数据和模拟的结果,如表 4 所示,试验数据与有限元方法的最大相对误差仅为 8%,全部相对误差都在 10% 以内。管道全尺寸试验的最终破裂形态和有限元方法模拟的结果如图 6(b)、图 6(d) 显示:随着内压载荷的增加,管道缺陷处的壁厚逐渐减小,缺陷中部区域出现膨胀现象,其长度沿管道轴向扩展,与试验爆破破坏模型一致。同时还将有限元计算的结果与 Oh 等的模拟结果进行对比,其中相对误差在 10% 以内。对缺陷管道 Von Mises 应力进行提取并绘制在图 7 中,有限元模型计算得到的内压值与 Von Mises 应力变化曲线与试验爆破破坏模型基本一致。

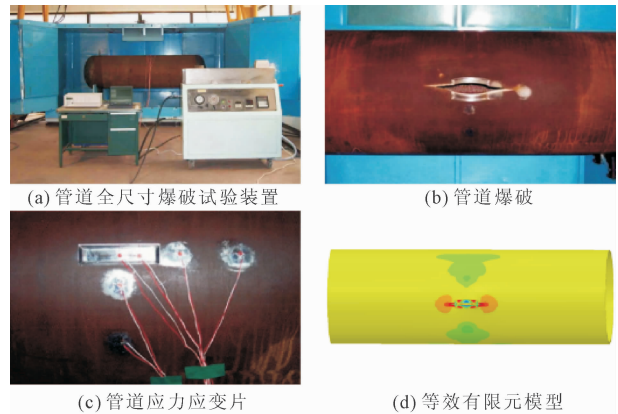


图 6 试验装置与缺陷管道

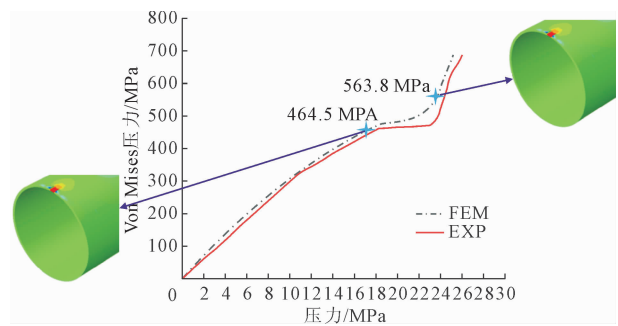


图 7 管道爆破压力与 Von Mises 应力

以 X52 管道在压力差荷载条件下的爆破破坏过程为例进行分析。X52 缺陷管道爆破失效过程如图 8 所示,可以看出,管道最大等效 Von Mises 应力逐渐达到材料屈服应力时最先出现在管道缺陷中心位置,管道中较大的应力沿轴向方向分布(见

表 4 有限元与全尺寸试验数据比较

管道	缺陷参数/mm			管道尺寸/mm		爆破压力/MPa		结果对比/%	
	长度	宽度	深度	外径	壁厚	P_T	P_{FE}	$(P_T - P_{FE})/P_T$	$(P_{FE}^{Oh} - P_{FE})/P_{FE}^{Oh}$
1	100	50	8.750	762	17.5	24.30	23.9	1.646	4.045
2	200	50	4.375	762	17.5	24.11	24.44	1.369	1.104
3	200	50	8.750	762	17.5	21.76	20.80	4.411	8.440
4	200	50	13.125	762	17.5	17.15	16.03	6.525	9.686
5	200	100	8.750	762	17.5	23.42	21.54	8.027	4.889
6	200	200	8.750	762	17.5	22.64	21.04	7.067	6.034
7	300	50	8.750	762	17.5	19.80	18.27	7.717	11.43

注: P_T 为试验爆破压力, P_{FE} 为有限元预测爆破压力, P_{FE}^{Oh} 为 Oh 预测的爆破压力。

图 8(a))。随着管道内部压力的增加,管道发生膨胀现象且 Von Mises 应力也逐渐增大直到达到 X52 管道材料的极限应力,最早在管道缺陷中心处出现(见图 8(b)),表明管道即将在此处破裂失效。当管道缺陷中心达到临界爆破压力后,最大 Von Mises 应力区域在缺陷位置主要沿管道轴向方向扩散并且管道最终沿轴向破裂(见图 8(c)、图 8(d))。

3 管材缺陷尺度敏感性

通过 ABAQUS 有限元软件分别建模并计算不同管材的缺陷管道的爆破失效压力,以探究不同管材的缺陷尺度敏感性。其中管道缺陷长度 l_1 (50 mm ~ 300 mm)、宽度 c_1 (50 mm ~ 300 mm)、深度 d_1 (壁厚的 10% ~ 60%) 和缺陷底角 α_1 ($15^\circ \sim 90^\circ$) 各不相同的体积缺陷有 21 种,共计算模型 105 个。并开展管材尺度敏感性分析,以便选取对缺陷尺度最为敏感的管道材料及型号进行下一步的复合缺陷管道爆破失效机理研究。

3.1 缺陷深度

缺陷深度对管道爆破压力的影响如图 9 所示,由图 9 可知,管道缺陷深度为 0.81 mm ~ 4.86 mm,随着管道缺陷深度的逐渐增大,管道的爆破临界压力逐渐减小,X52、X60、X65、X70、X80 管道下降幅值分别为 13.02%、4.85%、5.93%、10.11%、11.74%。这是由于管道壁厚的不断减薄,导致管道承压能力的下降。在 $d > 3.24$ mm 后,中强度管材(X60、X65)和高强度管材(X70、X80)的爆破压力下降幅度出现减缓的情况,而低强度管材(X52 管道)的临界爆破压力仍有大幅度的下降。对不同管材的缺陷深度的尺度敏感性进行对比分析,结果表明,X52 管道对缺陷深度的尺度变化最为敏感。

3.2 缺陷长度

缺陷长度对管道爆破压力的影响如图 10 所示,由图 10 可知,管道缺陷长度为 50 mm ~ 300 mm,随缺陷长度增加,X52、X60、X65、X70、X80 管道下降幅值分别为 3.25%、2.83%、2.38%、2.36%、2.70%。这是因为管道受内压荷载作用下管道应力最大值为沿环向应力,管道缺陷长度的增加导致沿管道轴向的壁厚减薄区域不断增长,使得管道上的环向应力更容易到达材料极限应力值从而导致管道爆破失效。对不

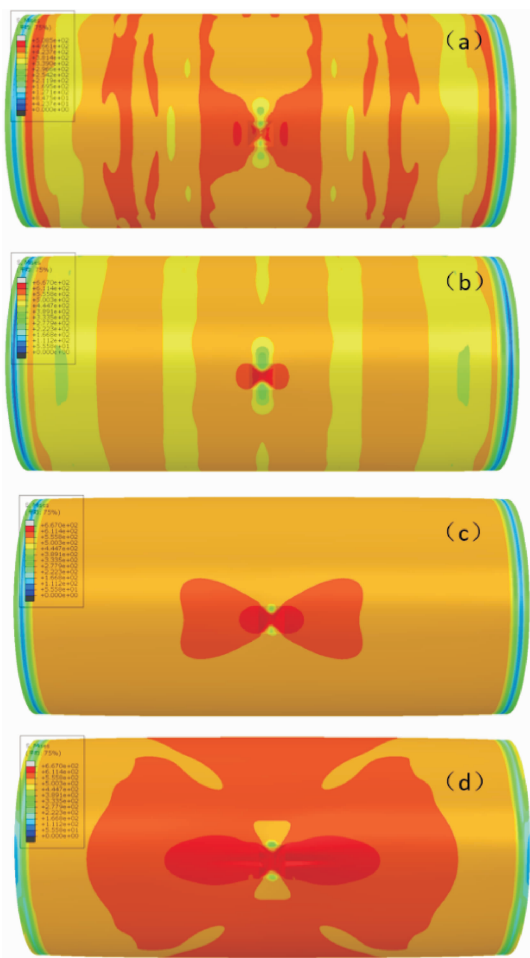


图 8 X52 缺陷管道爆破失效过程

同管材的缺陷长度的尺度敏感性进行对比分析,发现 X52 管道对缺陷长度的尺度变化最为敏感。

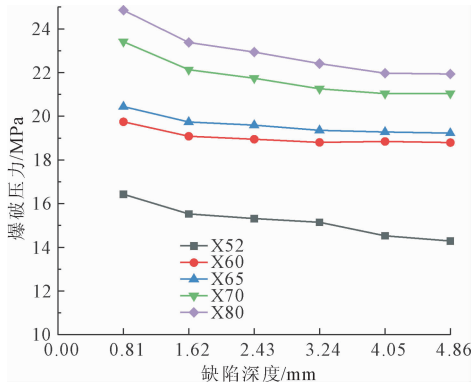


图 9 缺陷深度对管道爆破压力的影响

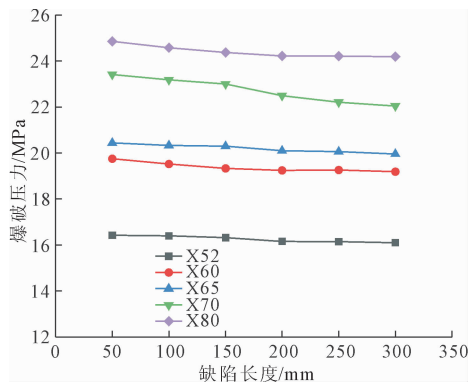


图 10 缺陷长度对管道爆破压力的影响

3.3 缺陷宽度

缺陷宽度对管道爆破压力的影响如图 11 所示,由图 11 可知,腐蚀缺陷的缺陷宽度从 50 mm 逐渐增加到 300 mm 时,随着管道中的腐蚀缺陷宽度的逐渐增大,不同管材的缺陷管道的生产爆破临界压力均呈现出在小幅度幅值内震荡的趋势。这是因为缺陷宽度的增长对管道中环向应力的影响不大。不同型号及材料的管道对缺陷宽度的尺度变化敏感性大致相同。

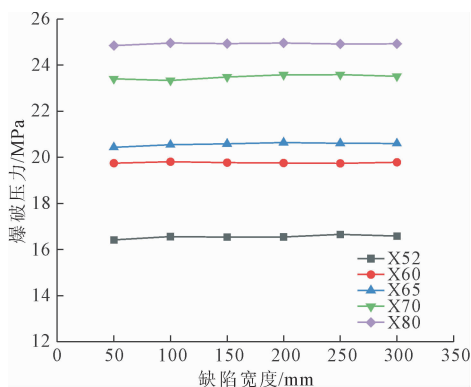


图 11 缺陷宽度对管道爆破压力的影响

3.4 缺陷角度

缺陷角度对管道爆破压力的影响如图 12 所示,由图 12 可知,腐蚀缺陷的缺陷底角从 15° 逐渐增加到 90° ,随着管道中腐蚀缺陷的底角逐渐增大,不同管材的缺陷管道的爆破临界压力均基本保持不变。这是由于缺陷角度所带来的应力集中现象对于缺陷管道最终的爆破压力并没有太大的影响。不同型号及材料的管道对缺陷角度的尺度变化的敏感性一致。

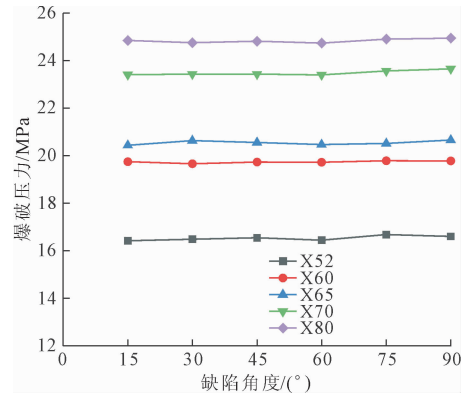


图 12 缺陷角度对管道爆破压力的影响

通过上述对不同管材的缺陷尺度敏感性的有限元计算结果进行分析,发现 X52 管道对管道缺陷尺度的变化具有的敏感性最强,因此选取 X52 管道材料及型号来研究复合缺陷管道的爆破失效机理研究。

4 复合缺陷管道爆破失效

4.1 单缺陷下缺陷位置及尺度敏感性

管道仅含有单一内缺陷的缺陷深度、缺陷长度、缺陷宽度的临界爆破压力整体均小于仅含有单一外缺陷的临界爆破压力。这是由于内缺陷截面处的管道外径大于外缺陷截面处的管道外径,因此在相同压力荷载下内缺陷处所受到的环向应力大于外缺陷,从而使得内缺陷管道更易爆破失效。

4.1.1 缺陷深度

单一内、外缺陷的缺陷深度对管道爆破压力的影响如图 13 所示,由图 13 可知,管道仅含有单一内缺陷的临界爆破压力随着缺陷深度的增加逐渐减小,降低幅值为 12.53%。整体小于仅含有单一外缺陷的临界爆破压力,且随着缺陷深度的增大,单一内、外缺陷的临界爆破压力的差值整体呈现出增大的趋势。当缺陷深度为 4.86 mm 时,单一内、外缺陷的临界压力差值为 0.185 MPa,扩大为缺陷深度为 0.81 mm 时临界压力差值的 2 倍多。

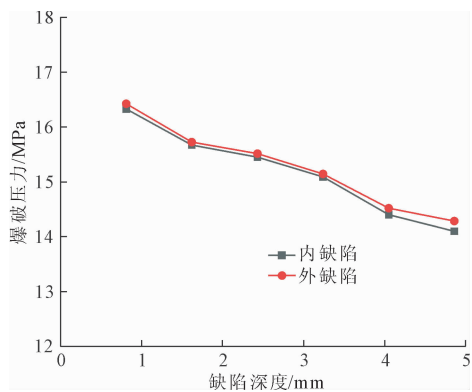


图 13 单一内、外缺陷的缺陷深度对管道爆破压力的影响

4.1.2 缺陷长度

单一内、外缺陷的缺陷长度对管道爆破压力的影响如图 14 所示,由图 14 可知,仅含有单一内缺陷的临界爆破压力随着缺陷长度的增加逐渐减小,降低幅值为 2.01%。临界压力均小于单一外缺陷的临界爆破压力,单一内、外缺陷的临界压力差值的最大值为 0.32 MPa。

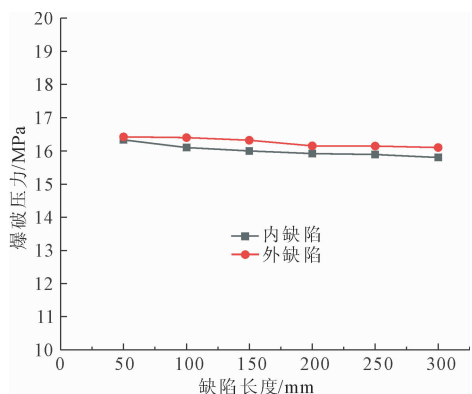


图 14 单一内、外缺陷的缺陷长度对管道爆破压力的影响

4.1.3 缺陷宽度

单一内、外缺陷的缺陷宽度对管道爆破压力的影响如图 15 所示,由图 15 可知,单一内缺陷的临界爆破压力与仅含有单一外缺陷的管道一样整体呈现出在一定幅值内震荡的趋势,但是单一内缺陷的临界爆破压力仍略微小于单一外缺陷的临界爆破压力。

4.2 复合缺陷管道爆破压力

4.2.1 复合缺陷与单一内、外缺陷的结果比较

复合缺陷与管道的单一缺陷不仅在形状和尺寸上有所不同,而且在爆破压力上也有所不同。相同的腐蚀深度下,复合缺陷的管道的爆破压力大多都介于单一外缺陷和单一内缺陷之间。复合缺陷是一种对称缺陷,其中单一内缺陷和单一外缺陷的中心重叠。三种不同类型缺陷的临界爆破压力可以表示

为: $P_{外} > P_{复合} > P_{内}$,如表 5 所示。

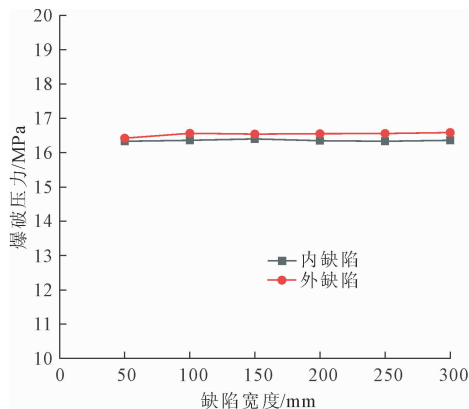


图 15 单一内、外缺陷的缺陷宽度对管道爆破压力的影响

表 5 相同缺陷深度下单一内、外缺陷和复合缺陷的管道的爆破压力

缺陷类型	缺陷长度 /mm	缺陷宽度 /mm	缺陷深度 /mm	爆破压力 /MPa
单一外缺陷	50	50	1.62	15.624
单一内缺陷	50	50	1.62	15.670
复合缺陷	$l_1 = 50$ $l_2 = 50$	$c_1 = 50$ $c_2 = 50$	$d_1 = 0.81$ $d_2 = 0.81$	15.650
单一外缺陷	50	50	2.43	15.516
单一内缺陷	50	50	2.43	15.450
复合缺陷	$l_1 = 50$ $l_2 = 50$	$c_1 = 50$ $c_2 = 50$	$d_1 = 0.81$ $d_2 = 1.62$	15.500
单一外缺陷	50	50	3.24	15.144
单一内缺陷	50	50	3.24	15.090
复合缺陷	$l_1 = 50$ $l_2 = 50$	$c_1 = 50$ $c_2 = 50$	$d_1 = 0.81$ $d_2 = 2.43$	15.140
单一外缺陷	50	50	4.05	14.521
单一内缺陷	50	50	4.05	14.400
复合缺陷	$l_1 = 50$ $l_2 = 50$	$c_1 = 50$ $c_2 = 50$	$d_1 = 0.81$ $d_2 = 3.24$	14.479
单一外缺陷	50	50	4.86	14.285
单一内缺陷	50	50	4.86	14.100
复合缺陷	$l_1 = 50$ $l_2 = 50$	$c_1 = 50$ $c_2 = 50$	$d_1 = 0.81$ $d_2 = 4.05$	14.188

与单一缺陷相比,内、外复合腐蚀缺陷有更多的研究空间。复合缺陷中的内、外缺陷的深度比值和长度比值和内、外缺陷的相对位置也会影响管道的爆破压力,将在下文中将详细讨论。

4.2.2 缺陷深度比对复合缺陷管道爆破压力的影响

当复合缺陷的总深度一定时,复合缺陷的深度比是指外缺陷深度 d_1 和内缺陷深度 d_2 的比值。其中右侧上部数值为单一外缺陷的临界爆破压力,下部数值为单一内缺陷的临界压力。计算结果表明:临界爆破压力随着 d_1/d_2 的增加,近似呈线性增长,

如图 16 所示,三条曲线的斜率不同。此外,具有复合缺陷的管道爆破压力随着总深度的增加而降低 ($d_1 + d_2$)。内缺陷的深度与外缺陷的深度比值降低了管道的爆破压力。

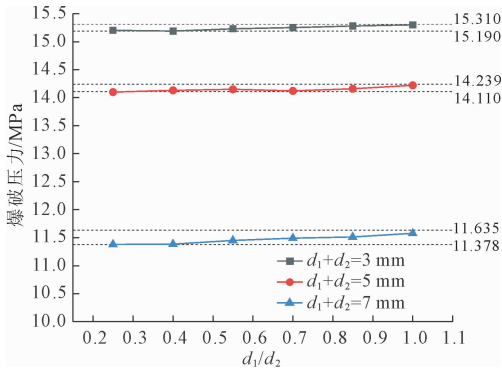


图 16 复合缺陷的深度比值对爆破压力的影响

复合缺陷管道中不同缺陷深度比值的爆破压力的变化幅值如表 6 所示,由表 6 可知,随着复合缺陷的深度比值不断增大,不同缺陷总深度的复合缺陷管道的爆破压力的幅值均呈现正向增长的趋势。缺陷总深度为 3 mm 的复合缺陷管道的爆破压力的最大增长幅值为 0.658%,缺陷总深度为 5 mm 的复合缺陷管道的爆破压力的最大增长幅值为 0.851%,缺陷总深度为 7 mm 的复合缺陷管道的爆破压力的最大增长幅值为 1.169%。

表 6 复合缺陷管道中不同缺陷深度比值的爆破压力的变化幅值

缺陷总深度 d/mm	外缺陷深度 d_1/mm	内缺陷深度 d_2/mm	深度比 d_1/d_2	爆破压力 P/MPa	幅值 /%
3	0.60	2.40	0.25	15.200	0.000
3	0.86	2.14	0.40	15.190	-0.066
3	1.06	1.94	0.55	15.230	0.197
3	1.24	1.76	0.70	15.250	0.329
3	1.38	1.62	0.85	15.280	0.526
3	1.50	1.50	1.00	15.300	0.658
5	1.00	4.00	0.25	14.100	0.000
5	1.43	3.57	0.40	14.130	0.213
5	1.77	3.23	0.55	14.150	0.355
5	2.06	2.94	0.70	14.120	0.142
5	2.30	2.70	0.85	14.160	0.426
5	2.50	2.50	1.00	14.220	0.851
7	1.40	5.60	0.25	11.380	0.000
7	2.00	5.00	0.40	11.386	0.053
7	2.48	4.52	0.55	11.450	0.615
7	2.88	4.12	0.70	11.490	0.967
7	3.22	3.78	0.85	11.513	1.169
7	3.50	3.50	1.00	11.578	1.740

4.2.3 缺陷长度比对复合缺陷管道爆破压力的影响

复合缺陷的长度比值对爆破压力的影响如图 17 所示,由图 17 可知,复合缺陷的长度比是指外缺陷的缺陷长度 l_1 和内缺陷与缺陷长度 l_2 之比。复合缺陷管道的临界爆破压力随 l_1/l_2 的值的增大而减小。表明外缺陷长度和内缺陷长度的比值将降低复合缺陷管道的爆破压力。

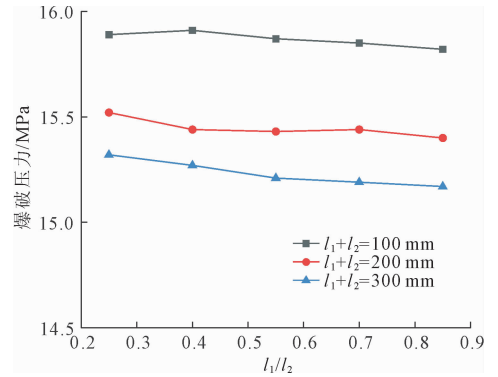


图 17 复合缺陷的长度比值对爆破压力的影响

复合缺陷管道中不同缺陷长度比值的爆破压力的增长幅值如表 7 所示,由表 7 可知,随着复合缺陷的长度比值减小,不同缺陷总长度的爆破压力的幅值整体呈现增长的趋势。缺陷总长度为 100 mm 的复合缺陷管道的爆破压力的最大幅值为 0.379%,缺陷总长度为 200 mm 的复合缺陷管道的爆破压力的最大幅值为 0.714%,缺陷总长度为 300 mm 的复合缺陷管道的爆破压力的最大幅值为 0.922%。

4.2.4 缺陷相对位置对复合缺陷管道爆破压力的影响

为了探讨复合缺陷中内、外缺陷的相对位置对管道爆破压力的影响,假定复合缺陷中的内缺陷是固定的,而复合缺陷中的外缺陷可以沿管道的轴向或环向方向移动。 S_l 是内、外缺陷中心的间距。当 $S_l = 0$ 时,表明内、外缺陷完全重叠。

复合缺陷的内、外缺陷的轴向间距对管道爆破压力的影响如图 18 所示,由图 18 可知,内、外缺陷完全重叠时的复合缺陷的临界爆破压力均小于内、外缺陷含有间距 ($S_l > 0$) 的复合缺陷的临界爆破压力。两者最大的爆破压力差为 0.45 MPa。随着 S_l 的增加,复合缺陷中的内、外缺陷的轴向间距对爆破压力的影响将越来越小,直到 $S_l > 110$ mm 时复合缺陷管道的爆破压力趋于稳定。

复合缺陷管道中不同轴向间距的爆破压力的增长幅值如表 8 所示,由表 8 可知,随着复合缺陷的内、外缺陷的轴向间距的增大,复合缺陷管道的爆破

压力的幅值先呈现出单调增长的趋势随后趋于稳定。复合缺陷管道的爆破压力的最大幅值为 2.902%,此时内、外缺陷的轴向间距 $S_l = 110$ mm。

表 7 复合缺陷管道中不同缺陷长度比值的爆破压力的增长幅值

缺陷总长度 l /mm	外缺陷长度 l_1 /mm	内缺陷长度 l_2 /mm	长度比	爆破压力 P /MPa	幅值 /%
100	20.00	80.00	0.25	15.89	0.252
100	28.57	71.43	0.40	15.91	0.379
100	35.48	64.52	0.55	15.87	0.126
100	41.18	58.82	0.70	15.85	0.000
100	45.95	54.05	0.85	15.82	-0.189
100	50.00	50.00	1.00	15.85	0.000
200	40.00	160.00	0.25	15.52	0.714
200	57.14	142.86	0.40	15.44	0.195
200	70.97	129.03	0.55	15.43	0.130
200	82.35	117.65	0.70	15.44	0.195
200	91.89	108.11	0.85	15.40	-0.065
200	100.00	100.00	1.00	15.41	0.000
300	60.00	240.00	0.25	15.32	0.922
300	85.71	214.29	0.40	15.27	0.593
300	106.45	193.55	0.55	15.21	0.198
300	123.53	176.47	0.70	15.19	0.066
300	137.84	162.16	0.85	15.17	-0.066
300	150.00	150.00	1.00	15.18	0.000

内、外缺陷的环向间距的不断增大,复合缺陷中的内、外缺陷的环向间距对复合缺陷管道的爆破压力的影响将越来越小,当 $S_c > 90$ mm 时,复合缺陷管道的爆破压力几乎恒定。

表 8 复合缺陷管道中不同轴向间距的爆破压力的增长幅值

缺陷深度 d /mm	缺陷长度 l /mm	缺陷宽度 c /mm	内、外缺陷的轴向间距 S_l /mm	爆破压力 P /MPa	幅值 /%
$d_1 = 0.81$	$l_1 = 50$	$c_1 = 50$	0	15.85	0.000
$d_2 = 0.81$	$l_2 = 50$	$c_2 = 50$			
$d_1 = 0.81$	$l_1 = 50$	$c_1 = 50$	10	15.86	0.063
$d_2 = 0.81$	$l_2 = 50$	$c_2 = 50$			
$d_1 = 0.81$	$l_1 = 50$	$c_1 = 50$	20	15.91	0.379
$d_2 = 0.81$	$l_2 = 50$	$c_2 = 50$			
$d_1 = 0.81$	$l_1 = 50$	$c_1 = 50$	30	15.92	0.442
$d_2 = 0.81$	$l_2 = 50$	$c_2 = 50$			
$d_1 = 0.81$	$l_1 = 50$	$c_1 = 50$	40	15.98	0.820
$d_2 = 0.81$	$l_2 = 50$	$c_2 = 50$			
$d_1 = 0.81$	$l_1 = 50$	$c_1 = 50$	50	16.13	1.767
$d_2 = 0.81$	$l_2 = 50$	$c_2 = 50$			
$d_1 = 0.81$	$l_1 = 50$	$c_1 = 50$	70	16.19	2.145
$d_2 = 0.81$	$l_2 = 50$	$c_2 = 50$			
$d_1 = 0.81$	$l_1 = 50$	$c_1 = 50$	90	16.22	2.334
$d_2 = 0.81$	$l_2 = 50$	$c_2 = 50$			
$d_1 = 0.81$	$l_1 = 50$	$c_1 = 50$	110	16.31	2.902
$d_2 = 0.81$	$l_2 = 50$	$c_2 = 50$			
$d_1 = 0.81$	$l_1 = 50$	$c_1 = 50$	130	16.30	2.839
$d_2 = 0.81$	$l_2 = 50$	$c_2 = 50$			
$d_1 = 0.81$	$l_1 = 50$	$c_1 = 50$	150	16.30	2.839
$d_2 = 0.81$	$l_2 = 50$	$c_2 = 50$			
$d_1 = 0.81$	$l_1 = 50$	$c_1 = 50$	170	16.28	2.713
$d_2 = 0.81$	$l_2 = 50$	$c_2 = 50$			

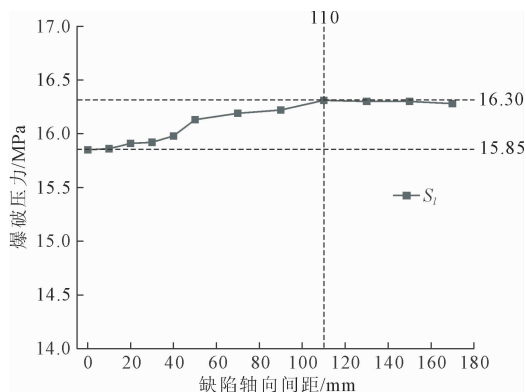


图 18 复合缺陷的内、外缺陷的轴向间距对管道爆破压力的影响

S_c 是复合缺陷中的内、外缺陷中心的间距。当 $S_c = 0$, 表明复合缺陷中的内、外缺陷的中心重叠。

复合缺陷的内、外缺陷的环向间距对管道爆破压力的影响如图 19 所示,由图 19 可知,复合缺陷中的内、外缺陷完全重叠时的临界爆破压力大都小于含有间距的复合缺陷中的临界爆破生产压力,两者之前最大的差值为 0.48 MPa。随着复合缺陷中的

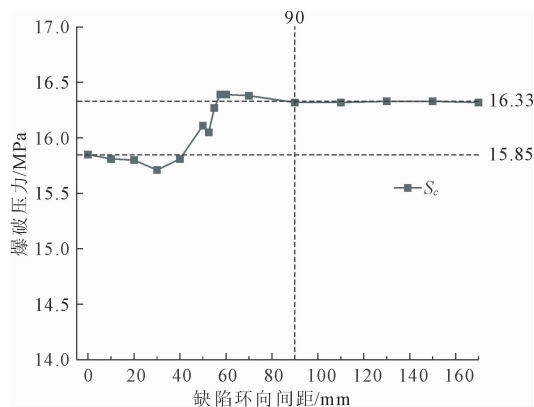


图 19 复合缺陷的内、外缺陷的环向间距对管道爆破压力的影响

复合缺陷管道中不同环向间距的爆破压力的增长幅值如表 9 所示,由表 9 可知,随着内、外缺陷的环向间距的增大,复合缺陷管道的爆破压力的幅值呈现出先降低后增长最后趋于稳定的趋势。复合缺

陷管道的爆破压力的最小幅值为 -0.883% , 此时内、外缺陷的环向间距 $S_c = 30 \text{ mm}$ 。复合缺陷管道的爆破压力的最大幅值为 3.344% , 此时内、外缺陷的环向间距 $S_c = 70 \text{ mm}$ 。

表 9 复合缺陷管道中不同环向间距的爆破压力的增长幅值

缺陷深度 /mm	缺陷长度 /mm	缺陷宽度 /mm	内、外缺陷 的环向间 距 S_c /mm	爆破压力 P /MPa	幅值 /%
$d_1 = 0.81$	$l_1 = 50$	$c_1 = 50$	0	15.85	0.000
$d_2 = 0.81$	$l_2 = 50$	$c_2 = 50$			
$d_1 = 0.81$	$l_1 = 50$	$c_1 = 50$	10	15.81	-0.252
$d_2 = 0.81$	$l_2 = 50$	$c_2 = 50$			
$d_1 = 0.81$	$l_1 = 50$	$c_1 = 50$	20	15.8	-0.315
$d_2 = 0.81$	$l_2 = 50$	$c_2 = 50$			
$d_1 = 0.81$	$l_1 = 50$	$c_1 = 50$	30	15.71	-0.883
$d_2 = 0.81$	$l_2 = 50$	$c_2 = 50$			
$d_1 = 0.81$	$l_1 = 50$	$c_1 = 50$	40	15.81	-0.252
$d_2 = 0.81$	$l_2 = 50$	$c_2 = 50$			
$d_1 = 0.81$	$l_1 = 50$	$c_1 = 50$	50	16.11	1.640
$d_2 = 0.81$	$l_2 = 50$	$c_2 = 50$			
$d_1 = 0.81$	$l_1 = 50$	$c_1 = 50$	70	16.38	3.344
$d_2 = 0.81$	$l_2 = 50$	$c_2 = 50$			
$d_1 = 0.81$	$l_1 = 50$	$c_1 = 50$	90	16.32	2.965
$d_2 = 0.81$	$l_2 = 50$	$c_2 = 50$			
$d_1 = 0.81$	$l_1 = 50$	$c_1 = 50$	110	16.32	2.965
$d_2 = 0.81$	$l_2 = 50$	$c_2 = 50$			
$d_1 = 0.81$	$l_1 = 50$	$c_1 = 50$	130	16.33	3.028
$d_2 = 0.81$	$l_2 = 50$	$c_2 = 50$			
$d_1 = 0.81$	$l_1 = 50$	$c_1 = 50$	150	16.33	3.028
$d_2 = 0.81$	$l_2 = 50$	$c_2 = 50$			
$d_1 = 0.81$	$l_1 = 50$	$c_1 = 50$	170	16.32	2.965
$d_2 = 0.81$	$l_2 = 50$	$c_2 = 50$			

5 结 论

本文分析了压力差下不同管材的缺陷敏感性和复合缺陷对管道爆破压力的影响, 主要结论如下:

(1) 随着管道缺陷深度和长度的增大, 不同管材的爆破压力均呈现出逐渐减小的趋势, 下降幅值分别为 13.02% 、 4.85% 、 5.93% 、 10.11% 、 11.74% 、 3.25% 、 2.83% 、 2.38% 、 2.36% 、 2.70% , 而不同的缺陷宽度、缺陷角度的爆破压力在较小的范围值内震荡变化。综合分析发现 X52 管道对缺陷尺度敏感性较强。

(2) 在单一的腐蚀缺陷形式下内腐蚀缺陷的缺陷深度、缺陷长度和缺陷宽度的爆破临界压力大都小于外腐蚀缺陷的爆破临界生产压力, 复合缺陷的管道的爆破压力则大多都介于单一外缺陷和单一内缺陷之间。三种不同类型缺陷的临界爆破压力可以

表示为: $P_{外} > P_{复合} > P_{内}$ 。

(3) 当复合腐蚀缺陷的总深度恒定时, 爆破压力与复合缺陷中的内外缺陷的深度比呈正相关。内外缺陷的长度比对复合缺陷管道的爆破压力的影响与复合缺陷的总长度有关, 与复合缺陷的总长度呈现出负相关的变化趋势。复合腐蚀缺陷的总长度恒定时, 内外缺陷的长度比越大, 复合缺陷管道的爆破压力越小。

(4) 当复合腐蚀缺陷中的内外腐蚀缺陷的相对位置发生变化时, 管道的爆破压力也会随之变化。内外缺陷的轴向间距和环向间距越大, 则复合缺陷管道的承载能力就越强。当 $S_l > 110 \text{ mm}$ 、 $S_c > 90 \text{ mm}$ 时, 复合缺陷管道的爆破压力几乎趋于恒定。反之内缺陷与外缺陷的轴向间距和环向间距越小, 复合缺陷管道的承载能力越弱。当 $S_l = 0$ 、 $S_c = 0$ 时, 复合缺陷管道的爆破压力最小。

参考文献:

- [1] 王红红, 刘国恒. 中国海油海底管道事故统计及分析[J]. 中国海上油气, 2017, 29(5): 157-160.
- [2] Tang Yuxiang, Huang Ping. Remaining strength evaluation of pipeline containing corrosion defects based on ASME B31G[C]//Proceedings of the 2014 IEEE Symposium on Computer Applications and Communications, F 26-27 July 2014, 2014.
- [3] Zhou Wenxing, Huang G X. Model error assessments of burst capacity models for corroded pipelines[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2012(99-100): 1-8.
- [4] Abdelghani M, Tewfik G, Djahida D, et al. Prediction of the rupture pressure of transmission pipelines with corrosion defects[J]. Journal of Pressure Vessel Technology-Transactions of the ASME, 2018, 140(4): 041701.
- [5] Netto T A, Ferraz U S, Estefen S F. The effect of corrosion defects on the burst pressure of pipelines[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2005, 61(8): 1185-1204.
- [6] Zhang Shulong, Zhou Wenxing. Assessment of effects of idealized defect shape and width on the burst capacity of corroded pipelines[J]. Thin-Walled Structures, 2020, 154: 106806.
- [7] Chiodo M S G, Ruggieri C. Failure assessments of corroded pipelines with axial defects using stress-based criteria: Numerical studies and verification analyses[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2009, 86(2): 164-176.