

表面失效及防护

# 考虑多腐蚀缺陷作用效应的海底管道 失效压力分析

秦鹏程<sup>a</sup>, 熊春宝<sup>a</sup>, 李志<sup>a</sup>, 翟京生<sup>b</sup>

(天津大学 a.建筑工程学院 b.海洋科学与技术学院, 天津 300350)

**摘要:** **目的** 研究多种腐蚀缺陷及多腐蚀缺陷间相互作用对管道失效的影响, 提出考虑多腐蚀缺陷作用效应的管道失效压力计算方法。**方法** 基于腐蚀缺陷压力管道全尺寸压力爆破试验数据, 采用有限元方法分析含不同尺寸多腐蚀缺陷的管道失效压力, 提出重叠腐蚀缺陷相互作用系数概念, 并将其应用到重叠腐蚀缺陷管道失效压力的计算中。**结果** 腐蚀缺陷间不同的轴向间距及环向间距均对多腐蚀缺陷相互作用有显著影响, 从而影响管道失效压力。多腐蚀缺陷间相互作用存在临界范围, 且不同腐蚀缺陷尺寸对其相互作用临界值影响不同。当管道存在“十”字形重叠腐蚀缺陷时, 失效压力明显降低。重叠腐蚀缺陷顶层缺陷的几何尺寸是决定失效压力变化趋势的主要原因, 即随着顶层腐蚀缺陷轴向长度及深度的增加, 失效压力出现大幅降低; 而随着顶层缺陷宽度的增加, 失效压力下降趋势缓慢。**结论** 腐蚀缺陷几何尺寸是影响管道失效压力及腐蚀缺陷间相互作用的重要因素, 结合腐蚀缺陷间相互作用系数能够有效进行多腐蚀缺陷管道的失效压力分析计算。

**关键词:** 海底管道; 多腐蚀缺陷; 有限元分析; 失效压力; 计算方法

**中图分类号:** TG172.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)01-0237-08

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.01.028

## Failure Pressure Assessment of Submarine Pipelines Considering the Effects of Multiple Corrosion Defects Interaction

QIN Peng-cheng<sup>a</sup>, XIONG Chun-bao<sup>a</sup>, LI Zhi<sup>a</sup>, ZHAI Jing-sheng<sup>b</sup>

(a.School of Civil Engineering, b.School of Marine Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

**ABSTRACT:** The paper aims to study the influences of various corrosion defects and the interaction of multiple corrosion defects on pipeline failure, and propose a calculation method of pipeline failure pressure considering the effect of multiple corrosion defects. Based on data of the full-scale pressure burst tests of pressure pipelines with corrosion defects, the failure pressure of pipelines with multiple corrosion defects was analyzed with the finite element method. The concept of interaction coefficient of overlapping corrosion defects was proposed and applied to the calculation of pipeline failure pressure with overlapping corrosion defects. The results revealed that different longitudinal spacing and circumferential spacing of corrosion defects had a significant effect on the interaction of multiple corrosion defects, which affected the failure pressure of pipelines. There was a critical range for the interaction of multiple corrosion defects, and different sizes of corrosion defect also affected

收稿日期: 2019-04-11; 修订日期: 2019-07-06

Received: 2019-04-11; Revised: 2019-07-06

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC1401203)

Fund: National Key Research and Development Plan (2016YFC1401203)

作者简介: 秦鹏程(1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为海底管道安全评估。

Biography: QIN Peng-cheng (1993—), Male, Master, Research focus: safety assessment of subsea pipeline.

通讯作者: 李志(1989—), 男, 博士, 主要研究方向为海底管道完整性管理。邮箱: rangolee@tju.edu.cn.

Corresponding author: LI Zhi (1989—), Male, Doctor, Research focus: subsea pipeline integrity management. E-mail: rangolee@tju.edu.cn.

their interaction critical values. When there was an overlapping corrosion defect with “+” shape in the pipeline, the failure pressure was significantly reduced; the top defect geometry of overlapping corrosion defect was a main reason for determining the trend of the failure pressure, that was, the failure pressure decreased greatly with the increase of longitudinal length and depth of the top corrosion defect; while as the width of the top defect increased, the failure pressure decreased slowly. The geometrical size of corrosion defects is an important factor affecting the interaction of multiple corrosion defects and the pipeline failure pressure. Considering the interaction coefficient of multiple corrosion defects, the failure pressure analysis of multiple corrosion pipelines can be effectively performed.

**KEY WORDS:** submarine pipeline; multiple corrosion defects; finite element analysis; failure pressure; calculation method

海底管道是海上油气资源开发的重要组成部分,然而因其在恶劣的海洋环境下服役,故腐蚀成为影响海底管道长期安全的主要问题之一<sup>[1]</sup>。经现场调查发现,海底管道腐蚀缺陷类型主要为单腐蚀缺陷和多腐蚀缺陷,其中多腐蚀缺陷为管道失效破坏的主要形式<sup>[2-4]</sup>。目前,含腐蚀缺陷的压力管道剩余强度评价规范主要以含单腐蚀缺陷的管道为评价对象,忽略多腐蚀缺陷间存在相互作用的影响,使含多腐蚀缺陷的管道失效压力评估过于保守<sup>[5-7]</sup>。为此, O' Gradv、Bjsrney 等<sup>[8-9]</sup>学者进行了大量研究,提出腐蚀缺陷间距大于 6 倍壁厚时,缺陷间不存在相互作用。随后, Chiodo<sup>[10-11]</sup>等提出利用有限元证实双腐蚀缺陷、多腐蚀缺陷间存在相互作用,并指出腐蚀缺陷间距是影响腐蚀缺陷相互作用的主要因素。Benjamin<sup>[12-14]</sup>等学者通过多腐蚀缺陷管道全尺寸爆破试验和大量的数值模拟分析,证实了仅考虑腐蚀缺陷间距的相互作用评判标准较为保守<sup>[11,15-16]</sup>,指出腐蚀缺陷的几何尺寸也是影响腐蚀缺陷相互作用的重要原因。

轴向长腐蚀缺陷及腐蚀缺陷相互重叠是海底管道常见的腐蚀形式,其中“十”形重叠腐蚀缺陷又是一种典型的多腐蚀缺陷<sup>[17]</sup>。现有腐蚀缺陷相互作用研究的腐蚀形式较为单一,多以轴向短腐蚀缺陷为研究对象<sup>[18-19]</sup>,对腐蚀缺陷轴向长度  $L \geq \sqrt{20Dt}$  的长腐蚀缺陷和几何形式复杂的重叠腐蚀缺陷研究较少<sup>[3]</sup>。含长腐蚀缺陷的管道发生失效破坏时,长腐蚀缺陷处的应力值远大于其周边的应力值,而对周边应力的影响范围较小,故腐蚀缺陷相互作用的评判标准与短腐蚀缺陷有所不同。对于重叠腐蚀缺陷,其几何形式复杂多样,对失效压力的影响与形式单一的多腐蚀缺陷会有差别。因此,本文采用非线性有限元分析方法,研究腐蚀缺陷轴向长度对缺陷相互作用的影响,并且通过分析“十”字形重叠腐蚀缺陷的几何尺寸,确定重叠缺陷几何尺寸对管道失效压力的影响。借鉴腐蚀缺陷相互作用系数,建立一种适应“十”字形重叠腐蚀缺陷油气管道失效压力的计算方法。

## 1 有限元计算模型及验证

### 1.1 本构模型

本文基于 Benjamin<sup>[12-14]</sup>等管材拉伸试验及有限

元模拟分析,采用 Ramberg-Osgod 本构方程来描述大变形钢管材料的应力-应变关系。Ramberg-Osgod 本构方程视总应变为弹性应变和塑性应变之和,其数学表达式为:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} \left[ 1 + \frac{3}{7} \left( \frac{\sigma}{\sigma_R} \right)^{n+1} \right] \quad (1)$$

$$n = \frac{\lg \left( \frac{\varepsilon_u - \sigma_u/E}{\varepsilon_y - \sigma_y/E} \right)}{\lg \left( \sigma_u / \sigma_y \right)} \quad (2)$$

$$\sigma_R = \frac{\sigma_y}{\left[ \frac{7}{3} \left( \varepsilon_y \cdot \frac{E}{\sigma_y} - 1 \right) \right]^{1/(n+1)}} \quad (3)$$

式中:  $\varepsilon$  为实际总应变;  $\varepsilon_y$  为弹性应变;  $\varepsilon_u$  为塑性应变;  $E$  杨氏弹性模量;  $E_0$  为材料初始弹性模量;  $\sigma$  为应力;  $\sigma_y$  为屈服应力;  $\sigma_u$  为材料抗拉强度;  $\sigma_R$  为 Ramberg-Osgod 应力;  $n$  为材料的硬化系数。

### 1.2 失效准则

现有材料失效准则有两种:一种是弹性失效准则;另一种是塑性失效准则。本文所选材料 X80 具有较好的韧性,失效准则多采用塑性失效准则,即当等效应力  $\sigma_{eq} \leq \sigma_u$  时,管线发生失效破坏,其数学表达式为:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\left[ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right] / 2} \leq \sigma_u \quad (4)$$

式中:  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  分别为 3 个方向上的主应力。

### 1.3 有限元计算模型建立

模型验证采用 Benjamin 和 Cunha<sup>[12-14]</sup>发布的腐蚀缺陷相互作用试验数据,建立试验样本模型。管道材料型号为 X80,管道直径  $D=458.8$  mm,管道壁厚  $t=8.1$  mm,相关计算参数见表 1。

表 1 X80 管线钢性能参数  
Tab.1 Performance parameters of X80 pipeline steel

Young's modulus $E/\text{MPa}$	Poisson's ratio $\nu$	Yield strength $\sigma_y/\text{MPa}$	Ultimate tensile strength $\sigma_u/\text{MPa}$
200 000	0.3	534.1	718.2

根据管线结构受力特点及求解的准确性，采用 20 节点六面体单元建立 1/4 管道有限元模型。对缺陷处进行网格加密处理，对管道两端进行位移约束，如图 1 所示。

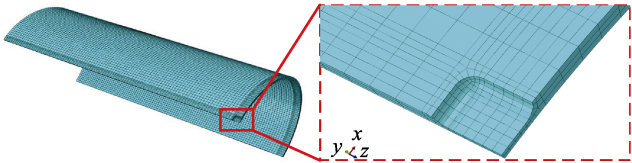


图 1 1/4 管道有限元模型  
Fig.1 Finite element model of 1/4 pipe

本文取缺陷轴向长度  $L \geq \sqrt{20Dt}$  时为轴向长缺陷，反之为轴向短腐蚀缺陷。多腐蚀缺陷间的距离采用腐蚀间轴向间距系数  $K_L$ （见式（5））、环向间距系数  $K_C$ （见式（6））表示<sup>[18]</sup>：

$$K_L = S_L / \sqrt{Dt} \tag{5}$$

$$K_C = S_C / \sqrt{Dt} \tag{6}$$

式中： $S_L$ 、 $S_C$  分别为轴向间距和环向间距，如图 2 所示。

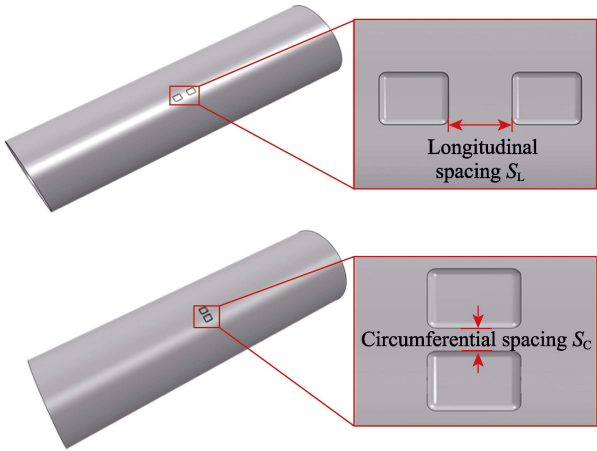


图 2 腐蚀缺陷的轴向间距  $S_L$  及环向间距  $S_C$   
Fig.2 Longitudinal spacing  $S_L$  and circumferential spacing  $S_C$  of corrosion defects

考虑到腐蚀缺陷形状对腐蚀缺陷相互作用的影响可忽略不计<sup>[20]</sup>，为了减少模型计算时间，将腐蚀缺陷形状简化为矩形形状。为分析腐蚀缺陷轴向长度不同时，腐蚀缺陷间距系数对相互作用的影响，建立宽度为 32 mm，深度为 4.05 mm，长度  $L$  为 40、270、280、300 mm 的矩形腐蚀缺陷模型。针对重叠腐蚀缺陷几何形状对相互作用的影响，建立“十”字形重叠腐蚀缺陷模型，如图 3 所示。底层缺陷的长度、宽度和深度分别为  $L_{Base}$ 、 $w_{Base}$ 、 $d_{Base}$ ，顶层缺陷的长度、宽度和深度分别为  $L_{Top}$ 、 $w_{Top}$ 、 $d_{Top}$ ，且均为矩形均匀腐蚀缺陷。根据表 2—5 缺陷的几何尺寸，确定含重叠腐蚀缺陷管道的失效压力。

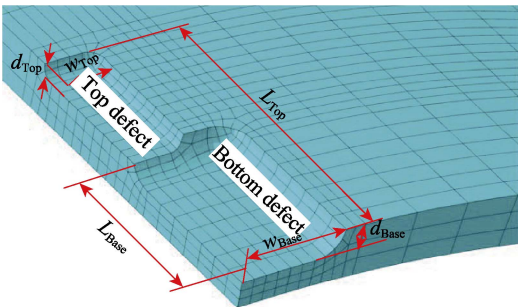


图 3 重叠腐蚀缺陷示意  
Fig.3 Schematic of pipeline with overlapping corrosion defects

表 2 底层缺陷不同几何形状取值  
Tab.2 Value of underlying defects with different geometric shapes

mm							
Samples	Base <sub>1</sub>	Base <sub>2</sub>	Base <sub>3</sub>	Base <sub>4</sub>	Base <sub>5</sub>	Base <sub>6</sub>	Base <sub>7</sub>
$L_{Base}$	40	50	60	40	40	40	40
$w_{Base}$	32	32	32	42	52	32	32
$d_{Base}$	4.05	4.05	4.05	4.05	4.05	3	5.1

表 3 顶层缺陷不同长度工况  
Tab.3 Working conditions of top defects with different lengths

$w_{Top}/w_{Base}$	$d_{Top}/d_{Base}$	$L_{Top}/L_{Base}$
0.25	0.5	
0.5	0.5	1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2, 2.2, 2.4, 2.6
0.625	0.5	

表 4 顶层缺陷不同深度工况  
Tab.4 Working conditions of top defects with different depths

$L_{Top}/L_{Base}$	$w_{Top}/w_{Base}$	$d_{Top}/d_{Base}$
1.4	0.5	
2	0.5	0.25, 0.3, 0.35, 0.4, 0.45, 0.5, 0.55, 0.6
2.6	0.5	

表 5 顶层缺陷不同宽度工况  
Tab.5 Working conditions of top defects with different widths

$d_{Top}/d_{Base}$	$L_{Top}/L_{Base}$	$w_{Top}/w_{Base}$
0.3	2	
0.5	2	0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4, 0.45, 0.5, 0.55
0.6	2	

1.4 模型验证

试验模型中的三种腐蚀缺陷见表 6，管道剩余强度有限元计算结果  $P_{FE}$  和试验结果  $P_{EX}$  见表 7。公式（7）、（8）分别为相对误差及平均误差计算公式：

$$\delta = \frac{|P_{FE} - P_{EX}|}{P_{EX}} \times 100\% \tag{7}$$

$$\delta_{\text{avg}} = (\delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_i) / i \quad (8)$$

式中:  $i$  表示不同工况。

表 6 试验样本模型  
Tab.6 Test sample model

Samples	$d/\text{mm}$	$L/\text{mm}$	$w/\text{mm}$	$S_L/\text{mm}$	$S_C/\text{mm}$	Defect orientation
# 1	5.39	39.6	31.9	0	0	
# 2	5.32	39.6	31.9	20.5	0	
# 3	5.62	39.6	32.0	0	9.9	

表 7 模型失效压力与试验压力定量比较  
Tab.7 Quantitative comparison of failure pressure and test pressure of model

Samples	$P_{FE}/\text{MPa}$	$P_{EX}/\text{MPa}$	$\delta/\%$
# 1	22.18	22.47	1.29
# 2	20.17	20.21	0.20
# 3	21.13	21.39	1.22

由表 7 可知, 计算结果与试验结果相对误差  $\delta$  在 0~5% 之间, 平均误差  $\delta_{\text{avg}}=0.93\%$ 。由此表明, 该有限元模型所测的失效压力与试验值相比, 误差较小, 该模型可以有效和准确地模拟含缺陷管道破坏时的失效压力。

## 2 结果分析及计算方法

为描述腐蚀缺陷间距系数及重叠腐蚀缺陷几何尺寸对腐蚀缺陷相互作用的影响, 采用相互作用系数  $\beta_{\text{Inter}}$  描述腐蚀缺陷相互作用的大小。 $\beta_{\text{Inter}}$  由式 (9) 计算而得,  $\beta_{\text{Inter}}$  越小, 腐蚀缺陷相互作用越大;  $\beta_{\text{Inter}}$  越大, 腐蚀缺陷间的相互作用越减小。故规定当  $\beta_{\text{Inter}} \geq 0.999$  时, 多腐蚀缺陷间将不存在相互作用。反之, 当  $\beta_{\text{Inter}} < 0.999$  时, 多腐蚀缺陷间存在相互作用。

$$\beta_{\text{Inter}} = P_M / P_{\text{Base}} \quad (9)$$

式中:  $P_M$  为多腐蚀缺陷管道失效压力, MPa;  
 $P_{\text{Base}}$  为含单腐蚀缺陷管道的失效压力, MPa。

### 2.1 腐蚀管道失效过程分析

管道在失效荷载作用下, 管道应力沿轴向及环向各点与缺陷区中心间距的变化趋势如图 4 和图 5 所示。由图 4 可知, 失效荷载作用下, 管道腐蚀缺陷中心处的应力值最大, 且达到了管材的抗拉强度。随着管身各点与缺陷中心处的距离增大, 管道应力逐渐减小, 并趋于稳定, 即此处管道应力不受腐蚀缺陷的影响。对于含不同轴向长度的腐蚀缺陷管道, 管道应力趋于稳定时所对应的位置有所不同。由图 5 可知, 短腐蚀缺陷在其缺陷长度和宽度附近的应力值经历了一段较为平缓的递减, 且递减的范围较大。与含轴向短腐蚀缺陷的管道相比, 含轴向长腐蚀缺陷管道的管

身应力分别在其缺陷长度和宽度附近迅速下降, 且下降趋势快于短腐蚀缺陷管道。由此可知, 轴向长腐蚀对其周边应力的影响范围较小。因此, 由于长、短腐蚀缺陷对其周边的应力值影响范围不同, 故双腐蚀缺陷所存在的相互作用临界值将会不同。

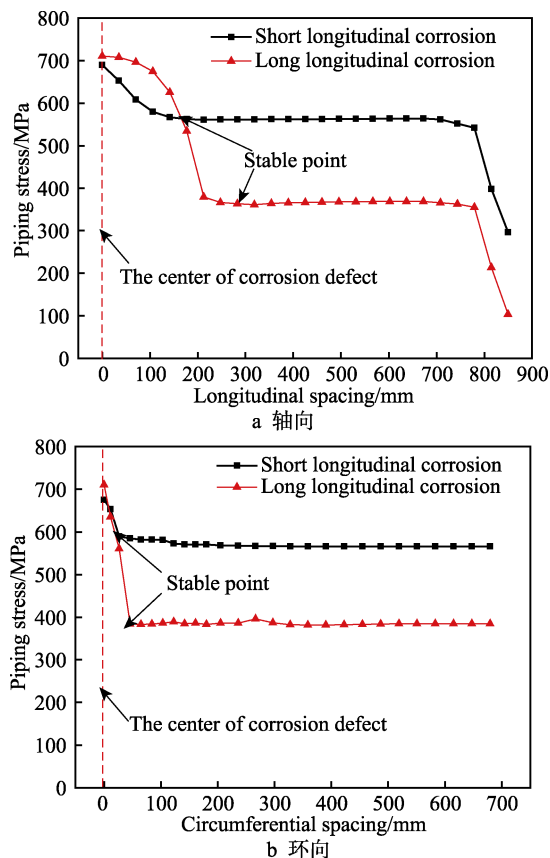


图 4 管道应力沿轴向及环向分布

Fig.4 Distribution of pipeline stress along longitudinal and circumferential directions: a) longitudinal; b) circumferential

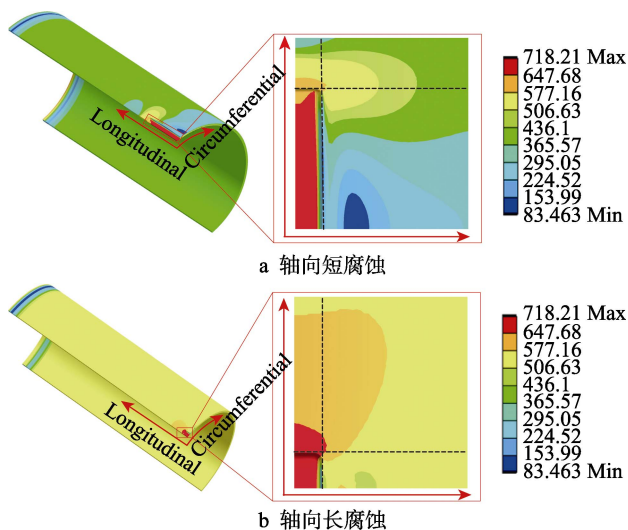


图 5 腐蚀缺陷应力分布

Fig.5 Stress distribution of pipeline with longitudinal corrosion defects: a) short longitudinal corrosion; b) long longitudinal corrosion

## 2.2 轴向及环向腐蚀间距对管道失效压力的影响

当管道含多腐蚀缺陷时,缺陷轴向及环向间距对多腐蚀缺陷相互作用的影响如图 6 所示。由图 6 可知,随着间距系数的增加,腐蚀缺陷相互作用系数  $\beta_{\text{Inter}}$  逐渐增加,即缺陷间相互作用逐渐减小。腐蚀缺陷轴向长度  $L$  不同时,间距系数对腐蚀缺陷相互作用影响程度也不同。

由图 6a 可知,对含多腐蚀缺陷的管道,当腐蚀缺陷轴向排列且缺陷均为轴向短腐蚀缺陷时,随着轴向间距系数  $K_L$  的增加,相互作用系数  $\beta_{\text{Inter}}$  缓慢增加,相互作用减弱得较慢。不存在腐蚀相互作用时的轴向间距系数临界值  $K_L^1, \lim$  较大,  $K_L^1, \lim=2.50$ 。与轴向短腐蚀缺陷比,长腐蚀缺陷间相互作用系数  $\beta_{\text{Inter}}$  趋向于临界值的速度较快,腐蚀缺陷间相互作用不存在时的

轴向间距系数  $K_L^2, \lim$  较小,  $K_L^2, \lim=1.25$ 。因此,随着腐蚀缺陷长度的变化,影响多腐蚀缺陷相互作用的轴向临界值也随之变化。

由图 6b 可知,随着腐蚀缺陷间环向间距系数的增加,腐蚀缺陷相互作用系数  $\beta_{\text{Inter}}$  增大的趋势较为平缓。腐蚀缺陷轴向长度不同时,  $\beta_{\text{Inter}}$  趋于稳定的环向间距系数有所不同,表明腐蚀缺陷相互作用不存在的间距系数临界值不同。故轴向短腐蚀及轴向长腐蚀缺陷不存在相互作用的环向间距系数分别为  $K_C^1, \lim=2.0$  和  $K_C^2, \lim=1.25$ 。

## 2.3 重叠腐蚀对管道失效压力的影响

含“十”字形的重叠缺陷管道处于失效压力时,不同顶层腐蚀缺陷长度和宽度下的等效应力分布如图 7 所示。由图 7 可知,随着顶层腐蚀缺陷轴向长度的增加,管道最大应力分布范围逐渐减小,缺陷对周

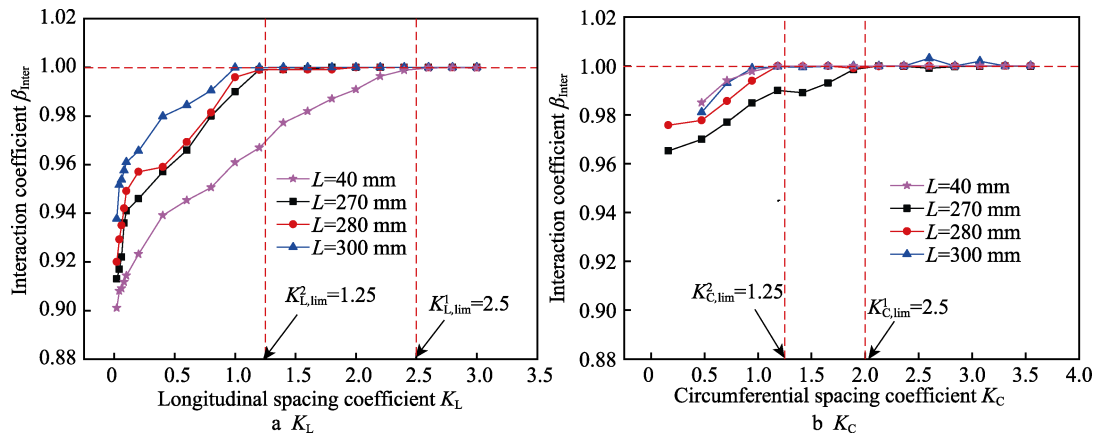


图 6 轴向及环向间距系数对腐蚀间相互作用的影响

Fig.6 Effect of longitudinal and circumferential spacing coefficient on the interaction of multiple corrosion defects

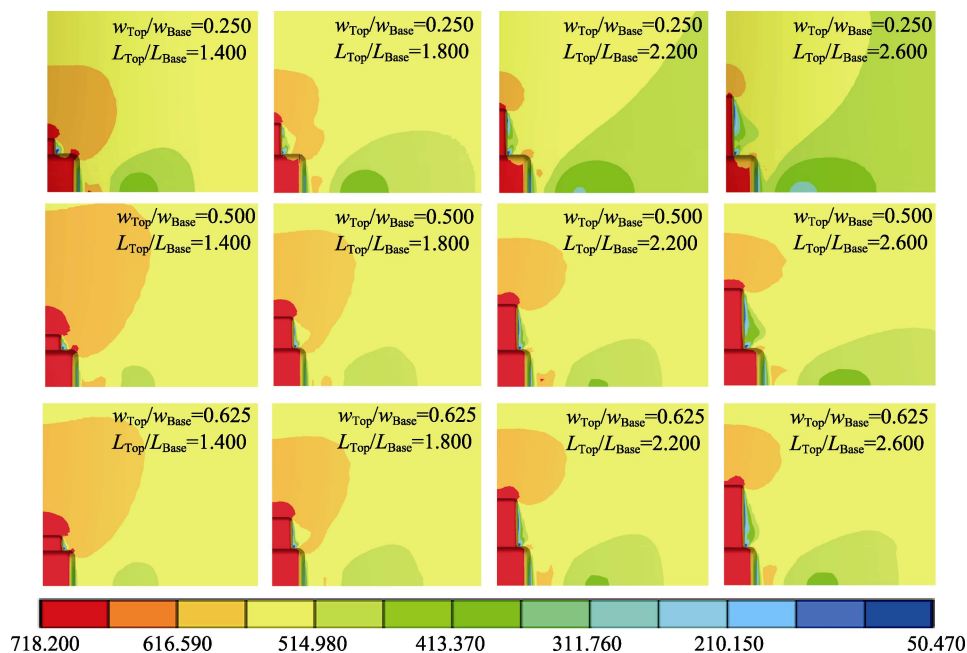


图 7 含重叠腐蚀缺陷的管道应力分布 (MPa)

Fig.7 Stress distribution of pipeline with overlapping corrosion defects (MPa)



边完好管道影响减弱。当顶层腐蚀缺陷宽度增大时,管道最大应力出现位置由缺陷底部发展至缺陷边缘,应力分布范围变大。

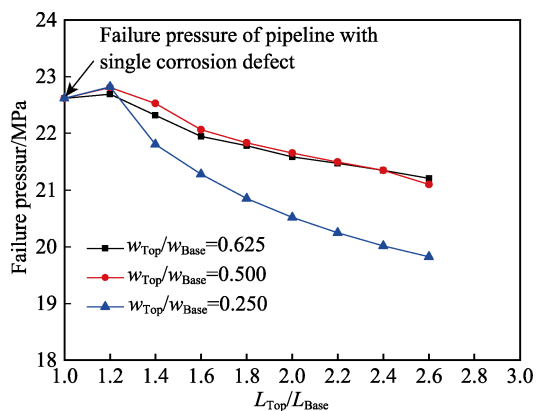


图 8  $L_{Top}/L_{Base}$  对管道失效压力的影响

Fig.8 Effect of  $L_{Top}/L_{Base}$  on pipeline failure pressure

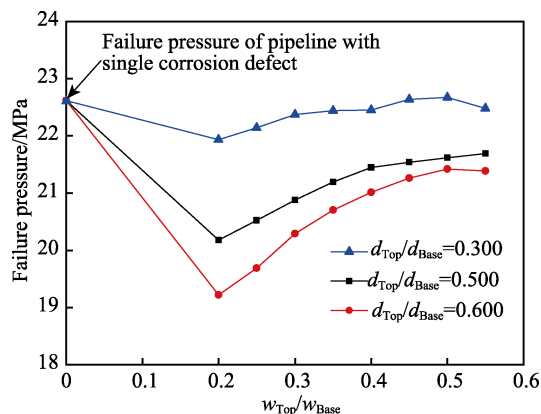


图 10  $w_{Top}/w_{Base}$  对管道失效压力的影响

Fig.10 Effect of  $w_{Top}/w_{Base}$  on pipeline failure pressure

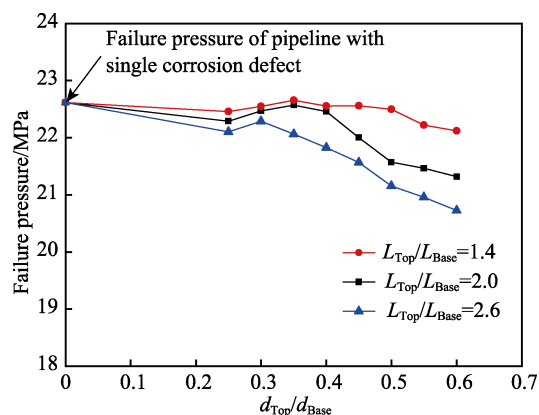


图 12  $d_{Top}/d_{Base}$  对管道失效压力的影响

Fig.12 Effect of  $d_{Top}/d_{Base}$  on pipeline failure pressure

由图 8 可知,与含单腐蚀缺陷管道的失效压力 ( $L_{Top}/L_{Base}=1.0$ ) 相比,随着重叠腐蚀缺陷的  $L_{Top}/L_{Base}$  逐渐增大,管道失效压力显著下降。顶层腐蚀缺陷宽度  $w_{Top}$  不同时,其下降的缓慢程度也不相同。当  $w_{Top}/w_{Base}$  较小时 ( $w_{Top}/w_{Base}=0.25$ ),管道失效压力对

对于含重叠腐蚀缺陷的管道,顶层腐蚀缺陷尺寸变化对失效压力及腐蚀缺陷间相互作用的影响如图 8—13 所示。

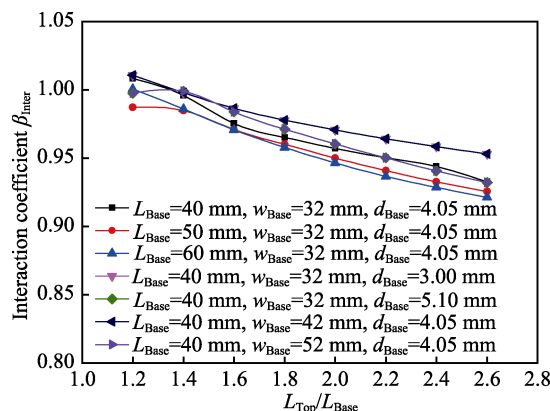


图 9  $L_{Top}/L_{Base}$  对腐蚀缺陷相互作用的影响

Fig.9 Effect of  $L_{Top}/L_{Base}$  on the interaction of corrosion defects

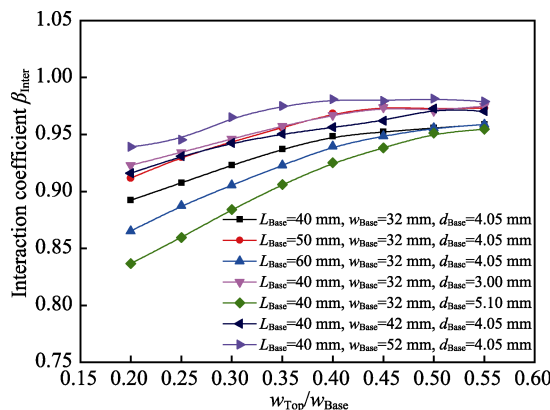


图 11  $w_{Top}/w_{Base}$  对腐蚀缺陷相互作用的影响

Fig.11 Effect of  $w_{Top}/w_{Base}$  on the interaction of corrosion defects

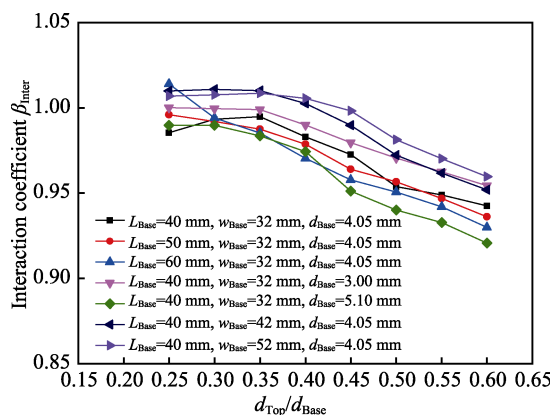


图 13  $d_{Top}/d_{Base}$  对腐蚀缺陷相互作用的影响

Fig.13 Effect of  $d_{Top}/d_{Base}$  on the interaction of corrosion defects

$L_{Top}/L_{Base}$  的增加较为敏感。随着  $L_{Top}/L_{Base}$  的增加,管道失效压力急剧减小。随着  $w_{Top}/w_{Base}$  增加,管道失效压力对  $L_{Top}/L_{Base}$  的增加不敏感,此时失效压力下降的趋势较为平缓,且  $w_{Top}/w_{Base} \geq 0.5$  后,管道失效压力下降的缓慢程度逐渐趋于相同。

由图 9 可知, 对于不同尺寸的底层腐蚀缺陷, 随着  $L_{\text{Top}}/L_{\text{Base}}$  的增加, 腐蚀缺陷相互作用系数  $\beta_{\text{Inter}}$  均呈下降趋势, 腐蚀缺陷间相互作用逐渐增大。底层腐蚀缺陷尺寸不同时,  $\beta_{\text{Inter}}$  随  $L_{\text{Top}}/L_{\text{Base}}$  变化的趋势和程度又有所不同。当  $w_{\text{Base}}$  及  $d_{\text{Base}}$  不同时, 随着  $L_{\text{Top}}/L_{\text{Base}}$  的增大,  $\beta_{\text{Inter}}$  下降的趋势和程度差别较小。与  $d_{\text{Base}}$  及  $w_{\text{Base}}$  相比, 随着  $L_{\text{Base}}$  的增大, 相互作用系数对  $L_{\text{Top}}/L_{\text{Base}}$  较为敏感, 腐蚀缺陷间相互作用系数急剧减小, 腐蚀缺陷间相互作用较大。

由图 10 可知, 当  $w_{\text{Top}}/w_{\text{Base}}=0.2$  时, 管道失效压力及相互作用系数  $\beta_{\text{Inter}}$  较小, 也即腐蚀缺陷相互作用较强。随着  $w_{\text{Top}}/w_{\text{Base}}$  增加, 管道失效压力逐渐增加, 多腐蚀缺陷相互作用逐渐减小, 故与单腐蚀缺陷管道失效压力相比, 其减小的趋势缓慢。顶层腐蚀缺陷深度较浅时 ( $d_{\text{Top}}/d_{\text{Base}}=0.3$ ), 随着  $w_{\text{Top}}/w_{\text{Base}}$  的增加, 管道失效压力的变化程度较小。与之相比, 顶层腐蚀缺陷深度较深时 ( $d_{\text{Top}}/d_{\text{Base}}=0.6$ ), 其管道的失效压力较小, 且随着  $w_{\text{Top}}/w_{\text{Base}}$  增大, 多腐蚀缺陷管道失效压力的减小趋势较快。因此对于不同  $w_{\text{Top}}/w_{\text{Base}}$  的重叠缺陷, 还需考虑顶层缺陷的深度对失效压力变化的影响, 以防  $d_{\text{Top}}/d_{\text{Base}}$  较大而  $w_{\text{Top}}/w_{\text{Base}}$  较小时 ( $d_{\text{Top}}/d_{\text{Base}} \geq 0.5$ 、 $w_{\text{Top}}/w_{\text{Base}} \leq 0.5$ ), 管道的失效压力过小。由图 11 可知, 底层腐蚀缺陷几何尺寸不同时, 随着  $w_{\text{Top}}/w_{\text{Base}}$  的增加, 腐蚀缺陷相互作用系数也呈上升趋势, 对应的腐蚀缺陷相互作用逐渐较弱。当底层腐蚀缺陷深度  $d_{\text{Base}}=5.1$ , 即  $d_{\text{Base}} \geq 0.5t$  时, 腐蚀缺陷相互作用系数对  $w_{\text{Top}}/w_{\text{Base}}$  的增加较敏感, 其上升的速度较快。

由图 12 可知, 随着  $d_{\text{Top}}/d_{\text{Base}}$  的增加, 管道的失效压力呈下降趋势, 对应腐蚀缺陷相互作用越来越强。针对不同的  $L_{\text{Top}}/L_{\text{Base}}$ , 管道失效压力随  $d_{\text{Top}}/d_{\text{Base}}$  的变化趋势不同。当  $L_{\text{Top}}/L_{\text{Base}}$  较小时 ( $L_{\text{Top}}/L_{\text{Base}}=1.4$ ),  $d_{\text{Top}}/d_{\text{Base}}$  对管道失效压力的影响较小, 故管道失效压力减小的趋势较平缓; 而  $L_{\text{Top}}/L_{\text{Base}} \geq 2.0$  时, 管道失效压力对顶层腐蚀缺陷深度极其敏感。随着  $d_{\text{Top}}/d_{\text{Base}}$  的增大, 管道失效压力急剧减小。由图 13 可知, 对于底层腐蚀缺陷尺寸不同的重叠腐蚀缺陷, 随着  $d_{\text{Top}}/d_{\text{Base}}$  的增大, 腐蚀缺陷相互作用系数均呈下降趋势。当  $L_{\text{Base}}$  或  $d_{\text{Base}}$  增加时, 其相互作用系数下降的速度将变快, 对应的缺陷间相互作用越强, 含重叠腐蚀缺陷管道的失效压力就越小。

## 2.4 计算方法

采用有限元分析重叠腐蚀缺陷相互作用, 拟合重叠腐蚀缺陷相互作用系数和失效压力计算公式为:

$$\beta_{\text{Inter}} = p_1 + p_2 \gamma_L \alpha_L + p_3 \gamma_w \gamma_d + p_4 \gamma_w \alpha_w + p_5 \gamma_w \alpha_L + p_6 \gamma_d \alpha_L + p_7 \alpha_d \alpha_L + p_8 \alpha_w \alpha_L \quad (10)$$

式中:  $p_1 \sim p_8$  为待定系数, 将数值分析数据带入式 (10) 拟合得到  $p_1=1.030$ ,  $p_2=-0.012$ ,  $p_3=6.448$ ,  $p_4=-4.908$ ,  $p_5=0.277$ ,  $p_6=-0.127$ ,  $p_7=-0.100$ ,  $p_8=0.141$ ;

$\alpha_d$ 、 $\alpha_w$ 、 $\alpha_L$  分别为顶层缺陷深度、宽度、长度系数,  $\alpha_d=d_{\text{Top}}/d_{\text{Base}}$ ,  $\alpha_w=w_{\text{Top}}/w_{\text{Base}}$ ,  $\alpha_L=L_{\text{Top}}/L_{\text{Base}}$ ;  $\gamma_d$ 、 $\gamma_w$ 、 $\gamma_L$  分别为底层缺陷深度、宽度、长度系数,  $\gamma_d=d_{\text{Base}}/t$ ,  $\gamma_w=w_{\text{Base}}/(D\pi)$ ,  $\gamma_L=L_{\text{Base}}/(Dt)^{1/2}$ 。

根据式 (11) 计算含重叠腐蚀缺陷管道的失效压力  $P_{\text{Inter}}$ , 即:

$$P_{\text{Inter}} = P_{\text{Base}} \cdot \beta_{\text{Inter}} \quad (11)$$

式中:  $P_{\text{Base}}$  为含单腐蚀缺陷管道的失效压力, MPa。

从图 14 可以看出, 拟合公式的拟合效果较好 ( $R^2=0.946$ )。由此可见, 腐蚀间相互作用系数  $\beta_{\text{Inter}}$  能够较好地描述重叠腐蚀缺陷相互作用。

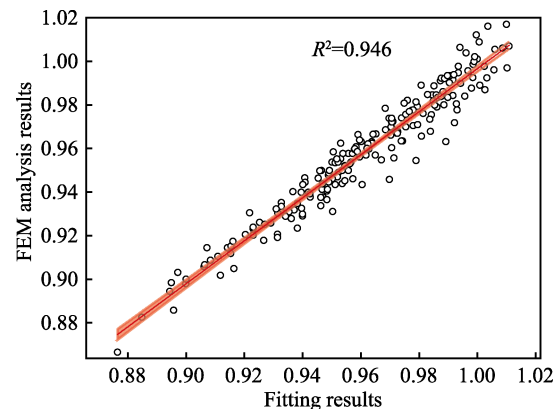


图 14 重叠腐蚀缺陷相互作用系数比较  
Fig.14 Comparison of interaction coefficient of overlapping corrosion defects

## 3 结论

1) 根据腐蚀缺陷的轴向尺寸, 可以将腐蚀缺陷分为轴向长腐蚀缺陷和轴向短腐蚀缺陷。轴向长腐蚀缺陷和轴向短腐蚀缺陷中心处对周边完整管道应力影响范围不同, 长腐蚀缺陷影响较小, 短腐蚀缺陷影响较大。

2) 多腐蚀缺陷间存在一个相互作用区间。随着腐蚀缺陷轴向尺寸的改变, 腐蚀缺陷间相互作用区间临界值随之变化。即对于多个轴向长腐蚀缺陷, 轴向间距  $S_L = 1.25\sqrt{Dt}$  或环向间距  $S_C = 1.25\sqrt{Dt}$  时, 其腐蚀间相互作用不存在; 而当多个腐蚀缺陷为轴向短腐蚀时, 轴向间距  $S_L = 2.50\sqrt{Dt}$  或环向间距  $S_C = 2.00\sqrt{Dt}$  时, 腐蚀缺陷间相互作用不存在。

3) 当重叠腐蚀缺陷顶层的长度、深度增加时, 失效压力降低, 腐蚀缺陷间相互作用变强。随着顶层腐蚀缺陷宽度的增加, 管道失效压力减小趋势缓慢。随着底层腐蚀缺陷长度或深度的增加, 腐蚀间相互作用对顶层腐蚀缺陷几何尺寸的变化越来越敏感。

4) 基于含腐蚀缺陷压力管道全尺寸压力爆破试验数据, 结合有限元方法分析, 提出了腐蚀缺陷间相互作用系数概念, 利用腐蚀缺陷间相互作用系数能有效计算出重叠腐蚀缺陷管道失效压力值。

## 参考文献:

- [1] 黄坤, 吴佳丽, 全恺, 等. 含腐蚀缺陷油气管道评价技术研究进展[J]. 表面技术, 2018, 47(1): 116-122.  
HUANG Kun, WU Jia-li, QUAN Kai, et al. A review on evaluation technology of oil-gas pipelines with corrosion defect[J]. Surface technology, 2018, 47(1): 116-122.
- [2] 崔铭伟, 曹学文, 封子艳, 等. 局部腐蚀油气管道失效压力计算方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2013, 37(6): 123-128.  
CUI Ming-wei, CAO Xue-wen, FENG Zi-yan, et al. Calculation method of oil-gas pipeline failure pressure with localized corrosion[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of natural science), 2013, 37(6): 123-128.
- [3] 陈严飞, 李昕, 周晶. 轴向长腐蚀管道极限承载力研究[J]. 船舶力学, 2009, 13(5): 748-756.  
CHEN Yan-fei, LI Xin, ZHOU Jing. Limit load capacity of pipes with long longitudinal corrosion[J]. Journal of ship mechanics, 2009, 13(5): 748-756.
- [4] BENJAMIN A C, FREIRE J L F, VIEIRA R D, et al. Burst tests on pipeline containing closely spaced corrosion defects[C]// 25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Hamburg, Germany: [s. n.], 2006.
- [5] 崔铭伟, 王媛媛, 贺杰, 等. 相互作用腐蚀管道剩余强度评价方法对比研究[J]. 表面技术, 2016, 45(8): 56-62.  
CUI Ming-wei, WANG Yuan-yuan, HE Jie, et al. Comparison study on assessment methods for residual strength of interaction corroded pipeline[J]. Surface technology, 2016, 45(8): 56-62.
- [6] 黄志强, 谭智勇, 谢豆, 等. 腐蚀管道评价标准 ASME B31G-2009 和 SY/T6151-2009 对比研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(4): 116-122.  
HUANG Zhi-qiang, TAN Zhi-yong, XIE Dou, et al. Contrastive study on evaluation standards ASME B31G-2009 and SY/T6151-2009 for pipeline corrosion[J]. Journal of safety science and technology, 2015, 11(4): 116-122.
- [7] 顾晓婷, 王秋妍, 孙萍萍, 等. 油气管道剩余强度评价方法适用性研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(12): 105-109.  
GU Xiao-ting, WANG Qiu-yan, SUN Ping-ping, et al. Research on applicability of evaluation method for residual strength of oil and gas pipeline[J]. Journal of safety science and technology, 2016, 12(12): 105-109.
- [8] O'GRADY T, HISEY D T, KIEFNER J F. A systematic method for the evaluation of corroded pipelines[J]. Pipeline engineering, ASME, 1992, 46: 27-35.
- [9] BJSRNEY O H, SIGURDSSON G, MARLEY M. Background and development of DNV-RP-F101"Corroded Pipeline"[C]// International offshore and polar engineering conference. Stavanger: [s. n.], 2001.
- [10] 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(2/3): 164-176.
- [11] LI X, BAI Y, SU C, et al. Effect of interaction between corrosion defects on failure pressure of thin wall steel pipeline[J]. International journal of pressure vessels and piping, 2016, 138: 8-18.
- [12] BENJAMIN A C, FREIRE J L F, VIEIRA R D, et al. Interaction of corrosion defects in pipelines—Part 2: MTI JIP database of corroded pipe tests[J]. International journal of pressure vessels and piping, 2016, 145: 41-59.
- [13] BENJAMIN A C, FREIRE J L F, VIEIRA R D, et al. Interaction of corrosion defects in pipelines—Part 1: Fundamentals[J]. International journal of pressure vessels and piping, 2016, 144: 56-62.
- [14] BENJAMIN A C, FREIRE J L F, VIEIRA R D, et al. Burst tests on pipeline containing interacting corrosion defects[C]// 24th international conference on offshore mechanics and arctic engineering: Volume3. Halkidiki, Greece: ASME, 2005: 403-417.
- [15] BENJAMIN A C, CUNHA D J S. New method for the prediction of the failure pressure of interacting corrosion defects[C]// The Seventeenth International Offshore and Polar Engineering Conference. Lisbon, Portugal: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2007.
- [16] SUN J, CHENG Y F. Assessment by finite element modeling of the interaction of multiple corrosion defects and the effect on failure pressure of corroded pipelines[J]. Engineering structures, 2018, 165: 278-286.
- [17] HAN C J, ZHANG H. Failure pressure analysis of the pipe with inner corrosion defects by FEM[J]. International journal of electrochemical science, 2016, 11(6): 5046-5062.
- [18] 崔铭伟, 魏登峰, 高嘉喜, 等. 双腐蚀缺陷管道剩余强度计算方法[J]. 表面技术, 2016, 45(8): 50-55.  
CUI Ming-wei, WEI Deng-feng, GAO Jia-xi, et al. Calculation method for residual strength of pipeline with double corrosion defects[J]. Surface technology, 2016, 45(8): 50-55.
- [19] CHEN Y, ZHANG H, ZHANG J, et al. Failure assessment of X80 pipeline with interacting corrosion defects[J]. Engineering failure analysis, 2015, 47: 67-76.
- [20] SULTAN A O, BECKER A, SUN Wei, et al. An experimental investigation of the effect of defect shape and orientation on the burst pressure of pressurized pipes[J]. Engineering failure analysis, 2018, 93: 200-213.