

# 基于等效形状的不规则缺陷管道 失效压力评估方法

孙明明<sup>1</sup>, 赵海盛<sup>2a,2b</sup>, 方宏远<sup>1</sup>, 李昕<sup>2a,2b</sup>

(1. 郑州大学 水利与土木工程学院, 郑州 450001; 2. 大连理工大学 a. 海岸和近海工程  
国家重点实验室 b. 工程抗震研究所, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** **目的** 提高不规则缺陷管道失效压力评估效率和预测结果的准确度。**方法** 采用实体有限元模型对不规则形状缺陷管道的失效压力进行了实例研究。有限元模型由 1 个浅腐蚀缺陷和 1 个深腐蚀缺陷组成, 其中深腐蚀缺陷包含在浅腐蚀缺陷内。分析了深腐蚀缺陷的长度和深度对不规则形状缺陷管道失效压力的影响。根据缺陷深度剖面的不规则性, 将缺陷分为 3 类, 第 1 类缺陷的不规则度为  $1 \leq d/d_{ave} < 1.2$ , 该类型缺陷的轴向投影形状可以等效为矩形; 第 2 类缺陷的不规则度为  $1.2 \leq d/d_{ave} \leq 1.5$ , 该类型缺陷的轴向投影的等效形状介于矩形和抛物线之间; 第 3 类缺陷的不规则度为  $1.5 < d/d_{ave}$ , 该类型缺陷的轴向投影形状可以等效为抛物线。**结果** 基于等效形状的有效深度和评估长度, 通过改进 DNV-RP-F101 准则提出了一种预测不规则形状缺陷管道失效压力的新方法。该方法首先通过缺陷长度确定评估长度, 然后结合不规则度和有效深度取值模型, 得到该缺陷有效深度数值, 最后将评估长度和有效深度引入 DNV-RP-F101 准则进行失效压力评估。**结论** 采用新的评价方法对不规则形状缺陷管道的失效压力进行了预测, 结果与不同等级管道的试验结果吻合较好。文中方法的平均误差仅为 1.69%, 相比现有评价方法中误差最小的有效面积法, 误差降低了 86.37%。

**关键词:** 钢制管道; 等效形状; 不规则缺陷; 失效压力; 评价方法; 内压

**中图分类号:** TG172 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2022)08-0319-11

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.08.028

## Failure Pressure Evaluation Method of Pipeline with Irregular-shaped Defect Based on Equivalent Shape

SUN Ming-ming<sup>1</sup>, ZHAO Hai-sheng<sup>2a,2b</sup>, FANG Hong-yuan<sup>1</sup>, LI Xin<sup>2a,2b</sup>

(1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. a. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, b. Institute of Earthquake Engineering, Dalian University of Technology, Liaoning Dalian 116024, China)

收稿日期: 2021-08-11; 修订日期: 2022-03-02

Received: 2021-08-11; Revised: 2022-03-02

基金项目: 国家重点研发计划重点专项 (2016YFC0802301); 国家自然科学基金青年基金 (52001056)

Fund: The Ministry of Science and Technology of China (2016YFC0802301); National Natural Science Foundation of China (52001056)

作者简介: 孙明明 (1989—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为管道承载力。

Biography: SUN Ming-ming (1989-), Male, Doctor, Lecturer, Research focus: the bearing capacity of pipeline.

通讯作者: 赵海盛 (1988—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为海洋结构失效分析。

Corresponding author: ZHAO Hai-sheng (1988-), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: failure analysis of offshore structures.

引文格式: 孙明明, 赵海盛, 方宏远, 等. 基于等效形状的不规则缺陷管道失效压力评估方法[J]. 表面技术, 2022, 51(8): 319-329.

SUN Ming-ming, ZHAO Hai-sheng, FANG Hong-yuan, et al. Failure Pressure Evaluation Method of Pipeline with Irregular-shaped Defect Based on Equivalent Shape[J]. Surface Technology, 2022, 51(8): 319-329.

**ABSTRACT:** The relation between the failure pressure of pipeline with irregular-shaped defect and the characteristic geometric parameters is more complex than regular-shaped defect. Therefore, it is necessary to study the evaluation method of failure pressure of pipeline with irregular-shaped defect. The failure pressure of pipeline with irregular-shaped defect is mainly determined by the evaluation range and the irregularity, which is defined as the ratio of the maximum value to the average value of defect depth. In order to improve the efficiency of failure pressure assessment and the accuracy of prediction results of pipeline with irregular-shaped defect, the paper presents a case study on the failure pressure of irregular-shaped defect using solid Finite Element models. The case is composed of shallow patch and deep defect and the deep defect are included in the shallow patch. The effect of the length and depth deep defects on the failure pressure of pipeline with irregular-shaped defect are analyzed. According to the evaluation scope and defect length of irregular defects, the calculation model of evaluation length is proposed. Case 1 and case 2 are composed of a shallow defect and one deep defect, which are used to analyze the relationship between failure pressure and irregularity of the defect. Case 1 is used to analyze the influence of the length of deep defect on the failure pressure, and case 2 is used to analyze the influence of the depth of deep defect on the failure pressure. According to the irregularity of the depth profile, the defect is divided into three categories: the irregularity of the first type of defects is  $1 \leq d/d_{ave} < 1.2$ , and the axial projection shape of this type of defects can be equivalent to a parabola, The irregularity of the second type of defect is  $1.2 \leq d/d_{ave} \leq 1.5$ , the axial projection shape of this type of defects can be equivalent to a rectangle, and the irregularity of the third type of defects is  $1.5 < d/d_{ave}$ . The equivalent shape of the axial projection of this type of defect is between rectangle and parabola. According to the equivalent shape of the defect with different irregularity, the value model of the effective depth of the defect is obtained. Combined with the effective depth of equivalent shape and the evaluation length, a new method is proposed for predicting failure pressure of steel pipeline with irregular-shaped defect by improving the DNV-RP-F101 criterion. Firstly, according to the length of the irregular-shaped defect, the evaluation length is determined. Then the effective depth of the defect is determined by combining the depth ratio of deep and shallow defects. Finally, the evaluation length and effective depth are introduced into the failure pressure calculation formula to evaluate the failure pressure. The predictions of burst capacity with the new method of the pipeline with irregular-shaped defect are in good agreement with experimental results for different steel grades. The average error of the method proposed in this paper is only 1.69%. Compared with the effective area method with the smallest error in the existing evaluation methods, the error is reduced by 86.37%.

**KEY WORDS:** steel pipeline; equivalent shape; irregular-shaped defect; failure pressure; evaluation method; internal pressure

海底管道被称为海上油气开发的命脉,它是远距离运输中比较经济的方式之一<sup>[1-2]</sup>,因此管道结构完整性评价是近年来工业界的一个重要研究领域<sup>[3-4]</sup>。管道内输送的腐蚀性介质和管道外海水、土壤中的腐蚀性物质,常在管道内外壁产生局部腐蚀缺陷。腐蚀会导致管壁整体或局部变薄,降低管道的承载力<sup>[5]</sup>。根据单个腐蚀缺陷在轴向平面上投影的形状,可以分为规则缺陷和不规则缺陷。规则形状的缺陷具有相对平滑的深度剖面,深度上没有多个极值点<sup>[6]</sup>。如果腐蚀缺陷的深度分布呈现一个或多个极值点,则可以将其视为不规则形状。腐蚀是一个复杂而随机的化学过程,随着管道服役时间的增加,相邻的腐蚀缺陷会重叠形成新的腐蚀缺陷,因此真正的腐蚀缺陷通常是具有不同深度极值点的长而不规则形状的腐蚀缺陷,而不是底面光滑的规则缺陷<sup>[7]</sup>。

在管道设计中,内压荷载是决定管壁厚度的关键因素。因此研究内压作用下局部减薄腐蚀管道的承载力和失效模式具有重要意义。规则形状缺陷的内压承载力是最大缺陷深度  $d$  和总长度  $L$  的函数。随着深度  $d$  和长度  $L$  的增加,失效压力  $p_f$  均不断减小。不同的

是  $p_f$  减小的速率随着缺陷深度的增加而增大,而随着缺陷长度的增加而减小<sup>[8-9]</sup>。对于不规则形状缺陷的失效压力  $p_f$  与几何形状参数之间的关系是复杂的。与规则形状缺陷相比,简单参数  $d$  和  $L$  对压力  $p_f$  的影响较小。实际上不规则形状缺陷的内压承载力与缺陷深度轮廓密切相关,随着总长度  $L$  的增加,不规则形状缺陷失效行为的复杂性增加。

20 世纪 90 年代腐蚀管道剩余强度的三级评估方法被提出<sup>[10-12]</sup>。传统的缺陷管道失效压力评价方法是一级评估方法,如 ASME-B31G 方法<sup>[13]</sup>、RSTRENG  $0.85dL$  方法<sup>[14]</sup>、RPA 方法<sup>[15]</sup>和 DNV-RP-F101 单点评价方法<sup>[16]</sup>。二级评估方法用于评估孤立的复杂形状缺陷,如复杂形状缺陷的 DNV-RP-F101 方法<sup>[16]</sup>和有效面积方法<sup>[14]</sup>。为了选择合适的评价方法,巴西国家石油公司开展了试验研究,旨在研究不规则形状缺陷管道的性能<sup>[6,17-19]</sup>。其中一部分试样外部具有火花冲蚀加工而成的不均匀深度缺陷,该缺陷由 2 个或 8 个短而深的缺陷组成,这些缺陷位于一个轴向长而浅的腐蚀区域内;其他试件为从服役管道上截取的具有复杂形状缺陷的腐蚀管段。通过将实验室实测的失效压力

与一级和二级评估方法的预测值进行比较, 发现一级评价方法的平均误差最大, 二级评估方法预测的失效压力更接近实际试验结果。

实际工程中通常采用一级和二级评价方法来预测管道的失效压力<sup>[6,17-20]</sup>。尽管二级评估方法更精确, 但计算的复杂度和工作量远大于一级评估方法, 因此需要一种更有效、更准确的方法来评估不规则形状缺陷的失效压力。本文根据不规则缺陷失效压力的有限元计算结果, 将评估长度范围内不规则形状缺陷的等效形状与缺陷的不规则度相结合。基于等效形状有效深度  $d_{\text{eff}}$  和缺陷评估长度  $L_{\text{eval}}$ , 得到了一种更准确、更有效的评估方法, 并通过与试验结果进行比较, 验证了新方法的有效性。

## 1 不规则形状缺陷失效压力新的评估方法

因为不规则缺陷内存在多个不同深度值, 无法像规则缺陷一样采用最大深度  $d$  和最大长度  $L$  进行评价。针对不规则形状缺陷深度轮廓的复杂性, 不规则缺陷管道失效压力评估的 2 个主要因素为评价范围和有效深度。

### 1.1 评价范围

评价范围是包括失效位置在内的缺陷评估范围。评价范围必须满足 2 个条件: 首先评价范围需要包含缺陷在内压作用下的失效区域; 其次为了防止其他腐蚀深度较浅区域的影响评价结果, 评价范围的评估长度必须有一个上限值。

#### 1.1.1 失效位置的确定

不规则缺陷管道的失效位置主要取决于深腐蚀缺陷位置。Sun 等<sup>[21-22]</sup>采用有限元模型预测 X46、X60 和 X80 钢制不规则缺陷管道的失效压力, 结果显示, 不规则缺陷的失效位置为深腐蚀缺陷所在位置。根据最深点之间的距离, 在达到破坏之前 2 个或多个最深点之间可能发生相互作用<sup>[19]</sup>。Benjamin 等<sup>[17,20]</sup>的研究表明对于浅腐蚀缺陷中含有多个深腐蚀缺陷的不规则缺陷, 深腐蚀缺陷之间会发生相互作用, 而且失效位置可能发生在相互作用的深腐蚀缺陷的中心连接位置。

由此可知对于深腐蚀缺陷深度有明显差异的不规则缺陷, 其失效位置为腐蚀深度最大的深腐蚀缺陷; 而对于深腐蚀缺陷深度相同的不规则缺陷, 其失效位置为产生相互作用的深腐蚀缺陷中心。因为不规则缺陷可以看作浅腐蚀缺陷内存在多个相邻的深腐蚀缺陷, 所以该结论与相同尺寸的相邻缺陷管道<sup>[23-24]</sup>和不同尺寸的相邻缺陷管道<sup>[25-26]</sup>内压爆破试验表现出的特征一致。由此可以得到不同不规则缺陷的失效位置的可能性:

1) 对于内压承载力不同的深腐蚀缺陷组成的不规则缺陷管道, 单个深腐蚀缺陷内压承载力越小, 该缺陷处成为内压破坏位置的概率越大; 内压承载力越大, 该缺陷处为内压破坏位置的概率越小。

2) 考虑到腐蚀缺陷间的相互作用程度与缺陷间距呈负相关, 即: 2 个腐蚀缺陷的距离越近, 失效压力相互影响越显著。因此, 在内压承载力相同的深腐蚀缺陷组成的群腐蚀缺陷中, 与周围相邻腐蚀缺陷距离之和越小的缺陷, 受到相邻腐蚀缺陷的影响越显著, 该腐蚀缺陷越容易产生爆破失效。因此, 对于相同单点深腐蚀缺陷组成的不规则缺陷管道, 离深腐蚀缺陷整体范围的中心位置越近, 缺陷爆破失效的概率越大, 离深腐蚀缺陷整体范围的中心位置越远, 缺陷爆破失效的概率越小。

#### 1.1.2 评估长度的确定

评估范围需要限制在评估长度之内。Souza 等<sup>[17]</sup>认为评估长度为  $\sqrt{320Dt}$ , Kiefner 等<sup>[27]</sup>认为评估长度为  $2D$  而不是  $\sqrt{320Dt}$ 。考虑到在确定失效位置的情况下, 评估长度越短结果越精确, 因此本文选取两者缺陷总长度的较小值作为评估长度, 即:

$$L_{\text{eval}} = \min(\sqrt{320Dt}, 2D, L_s) \quad (1)$$

$$A_{\text{eval}} = L_{\text{eval}} d_s + \sum_{i=n}^{i=m} (d_i - d_s) L_i \quad (2)$$

式中:  $L_s$  为浅腐蚀缺陷的长度, 即为不规则缺陷总长度;  $L_{\text{eval}}$  为评估长度;  $A_{\text{eval}}$  为评估范围内缺陷的轴向投影面积;  $L_i$  和  $d_i$  分别为评价范围内浅腐蚀缺陷中的多个深腐蚀缺陷的长度和深度 ( $i=1,2,\dots$ );  $D$  为管道外径;  $t$  为管道壁厚。

### 1.2 等效形状和有效深度

因为不规则缺陷深度剖面具有不同的深度, 因此很难决定采用哪个深度作为失效压力评估的有效深度值。为此本文考虑将评估范围内的不规则缺陷等效为某个规则形状, 以该规则形状的最大深度作为有效深度。根据 DNV-RP-F101 (单个缺陷)<sup>[16]</sup>、RSTRENG 0.85dL 方法<sup>[14]</sup>和 RPA 方法<sup>[15]</sup>, 缺陷投影的等效形状主要在“矩形”和“抛物线”之间。缺陷的轴向投影面积是评价腐蚀缺陷管道失效压力的关键参数<sup>[14]</sup>, 因此缺陷的轴向投影面积应保持不变。对于轴向投影面积为  $A$  的缺陷, 矩形等效形状的有效深度为  $d_{\text{rect}} = A_{\text{eval}} / L_{\text{eval}}$ , 抛物线等效形状的有效深度  $d_{\text{para}} = A_{\text{eval}} / (2 / 3 L_{\text{eval}})$ , 混合等效形状的有效深度为  $d_{0.85} = A_{\text{eval}} / (0.85 L_{\text{eval}})$ 。不同有效深度如图 1 所示,  $d_{\text{rect}}$  是最小的,  $d_{\text{para}}$  是最大的,  $d_{0.85}$  是中间值。

为了获得不规则形状缺陷的真实有效深度, 采用 DNV-RP-F101 (单个缺陷) 计算失效压力<sup>[28-29]</sup>。不规则形状缺陷的有效深度可按式 (3) 和式 (4) 计算。

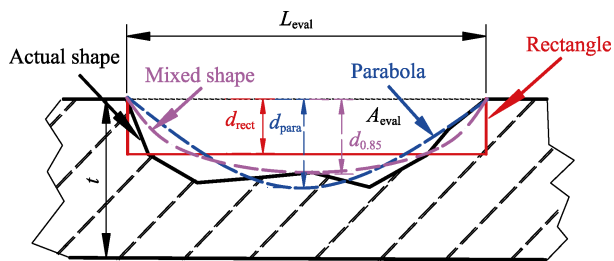


图1 有效深度示意图  
Fig.1 Effective depth diagram

根据有效深度  $d_{\text{eff}}$  与深度参数  $d_{\text{rect}}$ 、 $d_{\text{para}}$ 、 $d_{0.85}$  的关系, 得到不同不规则缺陷的等效形状。

$$p_f = \frac{2t\sigma_u}{D-t} \left( \frac{1 - \frac{d_{\text{eff}}}{t}}{1 - \frac{d_{\text{rect}}}{tQ_{\text{eval}}}} \right) = P_0 \left( \frac{1 - \frac{d_{\text{eff}}}{t}}{1 - \frac{d_{\text{rect}}}{tQ_{\text{eval}}}} \right) \quad [28-29] \quad (3)$$

$$d_{\text{eff}} = \frac{p_0 - p_f}{\frac{p_0}{t} - \frac{p_f}{tQ_{\text{eval}}}} \quad (4)$$

$$Q_{\text{eval}} = \sqrt{1 + 0.31 \left( \frac{L_{\text{eval}}}{\sqrt{Dt}} \right)^2} \quad [28-29] \quad (5)$$

式中:  $p_0$  为无缺陷管道的失效压力;  $p_f$  为不规则缺陷管道的失效压力;  $Q_{\text{eval}}$  为评估长度范围内缺陷的长度修正系数;  $d_{\text{eff}}$  为不规则缺陷有效深度;  $\sigma_u$  为管材抗拉强度。

## 2 不规则缺陷管道的数值分析

为了研究不规则形状缺陷轮廓对失效压力的影响, 建立缺陷管道的有限元模型并进行分析。采用基于通用有限元软件 ANSYS<sup>[30]</sup> 对腐蚀管道的失效行为和失效压力进行研究。

### 2.1 有限元模型的建立

根据 DNV-RP-F101 (复杂缺陷), 不规则形状缺陷可分为矩形浅腐蚀缺陷和深腐蚀缺陷。因此本文对浅腐蚀缺陷中含有深腐蚀缺陷的不规则缺陷进行了研究。管道的外径  $D$  和壁厚  $t$  分别为 457.2 mm 和 9.53 mm。管材采用 API-5L-X80, 实测得到管道屈服强度  $\sigma_y=601$  MPa, 极限抗拉强度  $\sigma_u=684$  MPa<sup>[31]</sup>。材料的弹性模量 ( $E$ ) 为 200 GPa, 泊松比 ( $\nu$ ) 为 0.3。真实应力-应变曲线采用 Ramberg-Osgood 模型进行模拟, 如式 (6) 所示。X80 的真实应力-应变曲线如图 2 所示。

$$\varepsilon_{\text{true}} = \frac{\sigma_{\text{true}}}{E} + 0.0788174 \left( \frac{\sigma_{\text{true}}}{\sigma_{u,\text{true}}} \right)^{12.642026} \quad [31] \quad (6)$$

式中:  $\sigma_{\text{true}}$  和  $\varepsilon_{\text{true}}$  分别为真实应力和真实应变;  $\sigma_{u,\text{true}}$  为实际极限抗拉强度  $\sigma_{u,\text{true}}=718.2$  MPa。

采用 20 节点的六面体实体单元 (SOLID45) 建

立有限元模型。为了验证有限元模型的网格足够精细, 进行了网格收敛性研究。缺陷沿厚度方向分为 4 层, 在远离腐蚀区域处, 单元层数缩减到 1 层。腐蚀缺陷进行倒角处理以最小化应力集中效应, 倒角半径等于缺陷深度的一半。

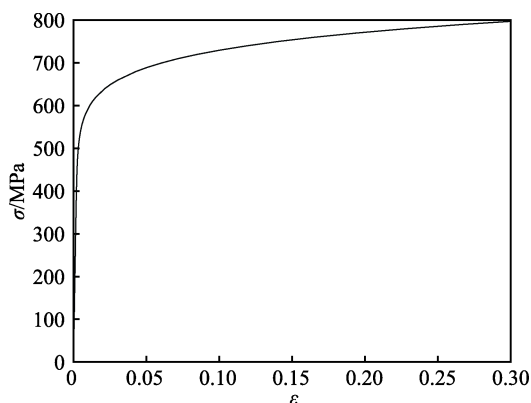


图2 X80 真实应力应变曲线  
Fig.2 True stress-strain relationship for API X80 pipeline steel

由于对称性只有 1/4 的管道被建模, 如图 3 所示。内压是唯一施加的荷载, 采用对称约束的边界条件。管道模型的长度为  $2.2D$ , 以防止边界条件影响腐蚀区域的应力。考虑到问题的高度非线性, 分析中考虑了大应变、大位移、应力硬化和材料非线性。有限元分析中考虑了内压引起的端盖效应, 压力将递增地应用于模型的内表面。采用完全 Newton-Raphson 方法求解非线性平衡方程组, 该方程组在数学上可表示结构问题。

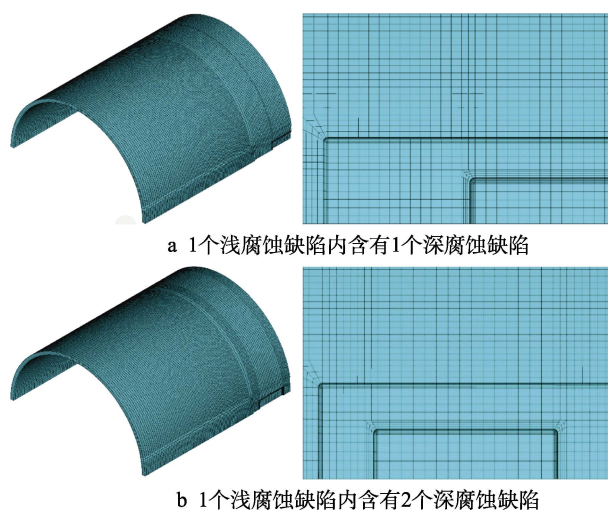


图3 不规则缺陷有限元模型

Fig.3 Finite element model with irregular shaped corrosion defect: a) a long and shallow corrosion patch with one deep defect over it; b) a long and shallow corrosion patch with two deep defects over it

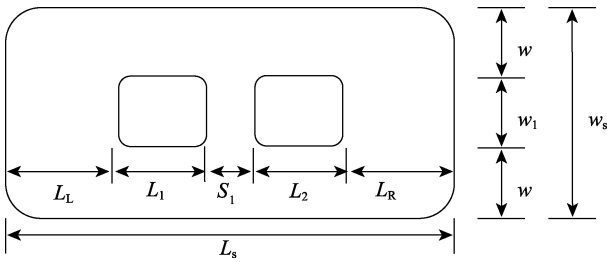
2.2 基于应力的失效准则

采用“剩余壁厚应力准则”作为缺陷管道失效判断准则<sup>[32]</sup>, 即: 当管道内壁的最大 von Mises 应力超过材料的实际极限抗拉强度时, 管道发生破坏<sup>[33-34]</sup>。该准则基于 3 个假设: (1) 腐蚀管道在剩余壁厚开始缩颈时, 将经历局部塑性失稳破坏; (2) 缩颈开始前的应力状态与缺陷区域内每个点的 von Mises 应力相关; (3) 导致缺陷任何点处的 von Mises 应力达到真实极限应力值的压力是破坏压力的近似值<sup>[35]</sup>。Andrade 等<sup>[33-34]</sup>对含有群腐蚀缺陷的 API-5L-X80 等级管道的非线性有限元分析中应用了相同的准则。结果显示, “剩余壁厚应力准则”在 X80 等级的腐蚀管道中能给出准确的失效预测。

2.3 有限元模型验证

Benjamin 等<sup>[33-34]</sup>对仅承受内压的不规则缺陷的管道进行了一系列全尺寸爆破试验。选择 TS5.2 和

TS5.3 对有限元模型进行了验证。TS5.2 和 TS5.3 的不规则形状缺陷如图 4 所示, 数据见表 1。该缺陷由含有 2 个深腐蚀缺陷的浅腐蚀缺陷组成, 浅腐蚀缺陷和深腐蚀缺陷的形状为边缘光滑的矩形。 $w_s$  和  $w_1$  分别为浅腐蚀缺陷和深腐蚀缺陷的宽度,  $L_s$ 、 $L_1$  和  $L_2$  分别为浅腐蚀缺陷、深腐蚀缺陷 1 和深腐蚀缺陷 2 的长度,  $S_1$  是 2 个深腐蚀缺陷之间的轴向间距。



Note:  $L_L = L_R = (L_s - L_1 - L_2 - S_1)/2$ ,  $w = (w_s - w_1)/2$ .

图 4 含有 2 个深腐蚀缺陷的不规则缺陷尺寸示意图  
Fig.4 Dimensions of irregular-shaped defect (two deep defects)

表 1 TS 5.2 和 TS5.3 尺寸数据  
Tab.1 The data of TS 5.2 and TS5.3

Specimen	$D$	$t$	$L_1$ and $L_2$	$L_s$	$L_L$	$L_R$	$S_1$	mm	
								$d_1$ and $d_2$	$d_s$
TS 5.2	323.9	9.89	79.91	255.38	23.78	23.78	48	6.61	2.67
TS 5.3			79.72	527.10	91.77	91.77	184.12	6.67	2.67

表 2 列出了管道失效压力的有限元结果  $p_f$  和在实验室试验中测得的破坏压力  $p_{exp}$ , 这 2 个值之间的平均误差约为 2.8%。

局部断裂和破坏行为的比较如图 5 所示, 可以看出有限元失效模式与实验室试验的实际行为非常相似。进一步验证了该有限元模型的正确性。

表 2 有限元结果和实测结果对比  
Tab.2 Comparison of the FEM result and the measured failure pressure

Condition	$p_{exp}/\text{MPa}$	$p_f/\text{MPa}$	Error/%
TS 5.2	18.763	18.20	3.0
TS 5.3	20.991	20.45	2.6

Notes:  $E = [(p_{exp} - p_f)/p_{exp}] \times 100\%$ .

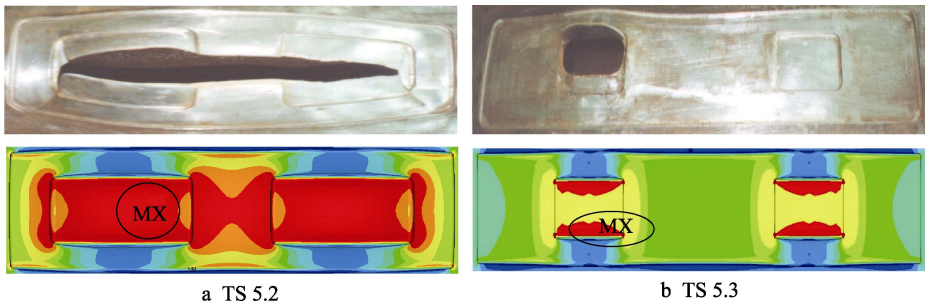


图 5 试验和数值分析结果对比

Fig.5 Comparison of the experimental and numerical results for TS 5.2 and TS 5.3

3 深度剖面的不规则度和等效形状

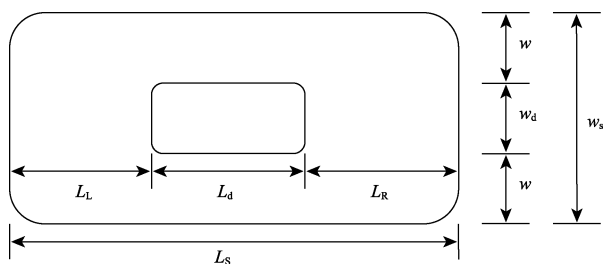
不规则形状缺陷失效压力评估的难点在于缺陷深度剖面的不规则性。最大缺陷深度  $d$  与缺陷平均深度  $d_{ave}$  的比值 ( $d/d_{ave}$ ) 是深度剖面不规则程度的度量。 $d/d_{ave}$  比值大于或等于 1.0 且小于或等于 1.2 的缺陷属

于规则形状缺陷 ( $1.0 \leq d/d_{ave} < 1.2$ ),  $d/d_{ave}$  比值大于 1.2 的缺陷被归类为不规则形状缺陷 ( $d/d_{ave} \geq 1.2$ )<sup>[20]</sup>。

由于多个深腐蚀缺陷的相互作用可以等效为 1 个缺陷, 因此采用浅腐蚀缺陷中含有 1 个深腐蚀缺陷的不规则形状缺陷分析不规则程度与等效形状之间的关系。不规则形状缺陷的形状如图 6 所示, 其中

$w_d$  和  $L_d$  分别为深腐蚀缺陷的宽度和长度和深度,  $w_s$  和  $L_s$  分别为浅腐蚀缺陷的宽度和长度。

由式 (7) 可知, 不规则形状缺陷深度剖面的不



Note:  $L_L = L_R = (L_s - L_d)/2$ ,  $w = (w_s - w_d)/2$ .

图 6 含有 1 个深腐蚀缺陷的不规则缺陷示意图

Fig.6 Dimensions of irregular-shaped defect (one deep defect)

规则程度主要受深腐蚀缺陷和浅腐蚀缺陷的深度比和长度比的影响。本文分析了  $d_d/d_s$  和  $L_d/L_s$  对失效压力的影响, 其中  $d_d$  和  $d_s$  分别为深腐蚀缺陷和浅腐蚀缺陷深度。表 3 列出了深腐蚀缺陷的尺寸和工况, 其中浅腐蚀缺陷的尺寸保持不变。组合 1 中每个工况的  $d_d$  都不同, 用于分析  $d_d/d_s$  对失效压力的影响; 组合 2 中每个工况的  $L_d$  不同, 用于分析  $L_d/L_s$  对失效压力的影响。根据第 2.1.2 节, 评估长度是缺陷的总长度。

$$\frac{d}{d_{ave}} = \frac{d_d}{[L_s d_s + (d_d - d_s) L_s] / L_s} = \frac{d_d/d_s}{1 + (d_d/d_s - 1) \cdot (L_d/L_s)} \quad (7)$$

### 3.1 $d_d/d_s$ 对失效压力的影响

失效压力用无量纲  $p_f/p_0$  表示, 其中  $p_0$  可由式 (3) 计算得到。组合 1 中每种情况的有限元结果见表 4。

表 3 含有 1 个深腐蚀缺陷的不规则缺陷参数  
Tab.3 Parameters of different cases with one deep defect

Case		Size of shallow patch/mm			Size of deep defect/mm			Irregularity parameter
		$L_s$	$w_s$	$d_s$	$L_d$	$w_d$	$d_d$	$d/d_{ave}$
Colony 1	Irregular 1-1	256	86.5	2.9	128	43.25	2.90	1.00
	Irregular 1-2	256	86.5	2.9	128	43.25	3.81	1.14
	Irregular 1-3	256	86.5	2.9	128	43.25	4.77	1.24
	Irregular 1-4	256	86.5	2.9	128	43.25	5.72	1.33
	Irregular 1-5	256	86.5	2.9	128	43.25	6.67	1.39
	Irregular 1-6	256	86.5	2.9	128	43.25	7.62	1.45
	Irregular 1-7	256	86.5	2.9	128	43.25	8.58	1.49
	Irregular 1-8	256	86.5	2.9	128	43.25	9.05	1.51
	Irregular 1-9	256	86.5	2.9	128	43.25	9.53	1.53
Colony 2	Irregular 2-1	256	86.5	2.9	0	43.25	5.72	1.00
	Irregular 2-2	256	86.5	2.9	25.6	43.25	5.72	1.80
	Irregular 2-3	256	86.5	2.9	51.2	43.25	5.72	1.65
	Irregular 2-4	256	86.5	2.9	76.8	43.25	5.72	1.53
	Irregular 2-5	256	86.5	2.9	102.4	43.25	5.72	1.42
	Irregular 2-6	256	86.5	2.9	128	43.25	5.72	1.33
	Irregular 2-7	256	86.5	2.9	153.6	43.25	5.72	1.25
	Irregular 2-8	256	86.5	2.9	179.2	43.25	5.72	1.17
	Irregular 2-9	256	86.5	2.9	204.8	43.25	5.72	1.11
	Irregular 2-10	256	86.5	2.9	230.4	43.25	5.72	1.05
	Irregular 2-11	256	86.5	2.9	256	43.25	5.72	1.00

表 4 组合 1 失效压力  
Tab.4 Failure pressures of the colony 1

Case	$L_d/L_s$	$w_d/w_s$	$d_d/d_s$	$d/d_{ave}$	$p_f/p_0$
Colony 1 (Different $d_d$ )	Irregular 1-1	0.5	0.5	1.00	0.80
	Irregular 1-2	0.5	0.5	1.33	0.77
	Irregular 1-3	0.5	0.5	1.64	0.73
	Irregular 1-4	0.5	0.5	1.97	0.65
	Irregular 1-5	0.5	0.5	2.30	0.49
	Irregular 1-6	0.5	0.5	2.67	0.36
	Irregular 1-7	0.5	0.5	3.00	0.19
	Irregular 1-8	0.5	0.5	3.17	0.10
	Irregular 1-9	0.5	0.5	3.33	0.00



图 7 显示了不规则形状缺陷的破坏压力相对于  $d_d/d_s$  的变化。可以看出, 随着  $d_d/d_s$  的增大, 管道的失效压力明显下降。 $d_d/d_s$  越大, 失效压力  $P_f$  的下降速度越快。

3.2  $L_d/L_s$  对失效压力的影响

图 8 显示了失效压力相对于  $L_d/L_s$  的变化。由图 8 可以看出, 随着  $L_d/L_s$  的增加, 管道的失效压力不断降低。但与图 7 相比, 随着  $L_d/L_s$  的增加, 失效压力的下降速率基本保持不变。组合 2 中每种工况的有限元结果见表 5。

3.3 不规则缺陷的等效形状

根据 2.2 节, 分别计算不同工况的有效深度。组合 1 不同有效深度的对比如图 9 所示。由图 9 可以看出, 抛物线形状的有效深度对预测失效压力最保守, 矩形形状的有效深度对预测失效压力最危险。

从不规则 1-1 到不规则 1-9 工况可以看出, 随着

$d_d/d_s$  的增加,  $d_{eff}$  和  $d_{para}$  逐渐接近,  $d_{eff}$  和  $d_{rect}$  之间的差别越来越大。当  $1.00 < d_d/d_s < 1.64$  时,  $d_{eff}$  与  $d_{rect}$  接近; 当  $1.64 < d_d/d_s < 3.00$  时,  $d_{eff}$  逐渐接近  $d_{para}$ ; 当  $3.00 < d_d/d_s < 3.50$  时,  $d_{eff}$  与  $d_{para}$  接近。这是因为随着  $d_d/d_s$  和  $d/d_{ave}$  的增加, 不规则缺陷的不规则度不断增加。不规则形状缺陷与矩形等效缺陷之间的差异越来越大, 而其等效形状不断接近中间具有深度极值的抛物线形状。

组合 2 不同有效深度的比较如图 10 所示。由图 10 中可以看出,  $d_{eff}$  介于  $d_{rect}$  和  $d_{0.85}$  之间, 且当  $L_d/L_s$  趋于 0 或 1 时,  $d_{eff}$  接近于  $d_{rect}$ 。这是因为随着缺陷不规则度的减小, 不规则形状缺陷在内压作用下的破坏模式与矩形形状缺陷的破坏模式相差越来越远, 不规则形状缺陷与抛物线形状缺陷的破坏模式相差越来越大。

对于组合 2 中的不规则形状缺陷 ( $0.1 \leq L_d/L_s \leq 0.6$ ),  $d_{rect}/d_{eff}$  基本不变。不规则形状缺陷的  $d_{rect}/d_{eff}$  平均值为 0.945, 该值与不规则缺陷工况 1-4

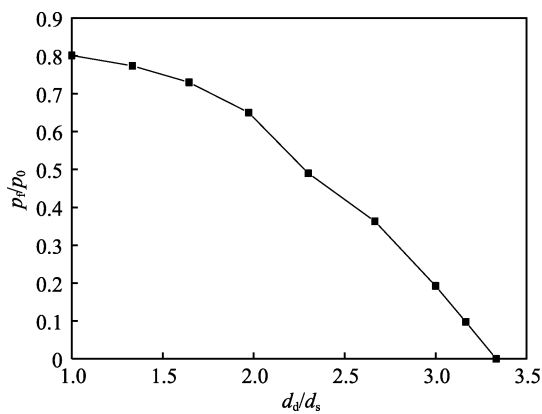


图 7 不同  $d_d/d_s$  工况的失效压力变化  
( $L_d/L_s=0.5, w_d/w_s=0.5$ )  
Fig.7 Variation of burst pressure with respect to  $d_d/d_s$   
( $L_d/L_s=0.5, w_d/w_s=0.5$ )

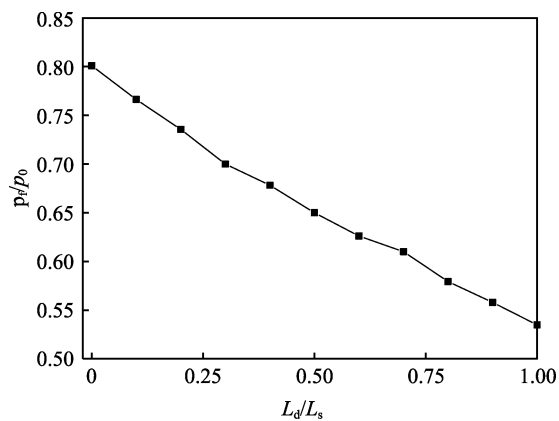


图 8 不同  $L_d/L_s$  工况的失效压力变化  
( $d_d/d_s=1.97, w_d/w_s=0.5$ )  
Fig.8 Variation of burst pressure with respect  
to  $L_d/L_s$  ( $d_d/d_s=1.97, w_d/w_s=0.5$ )

表 5 组合 2 失效压力  
Tab.5 Failure pressures of the colony 2

Case		$L_d/L_s$	$w_d/w_s$	$d_d/d_s$	$d/d_{ave}$	$P_f/P_0$
Colony 2 (Different $L_d$ )	Irregular 2-1	0	0.5	1.97	1.00	0.80
	Irregular 2-2	0.1	0.5	1.97	1.80	0.77
	Irregular 2-3	0.2	0.5	1.97	1.65	0.74
	Irregular 2-4	0.3	0.5	1.97	1.53	0.70
	Irregular 2-5	0.4	0.5	1.97	1.42	0.68
	Irregular 2-6	0.5	0.5	1.97	1.33	0.65
	Irregular 2-7	0.6	0.5	1.97	1.25	0.63
	Irregular 2-8	0.7	0.5	1.97	1.17	0.61
	Irregular 2-9	0.8	0.5	1.97	1.11	0.58
	Irregular 2-10	0.9	0.5	1.97	1.05	0.56
	Irregular 2-11	1	0.5	1.97	1.00	0.53

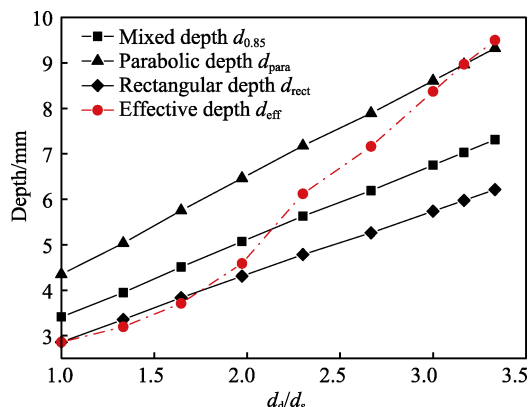


图9 组合1有效深度对比  
Fig.9 Comparison of different effective depths of colony 1

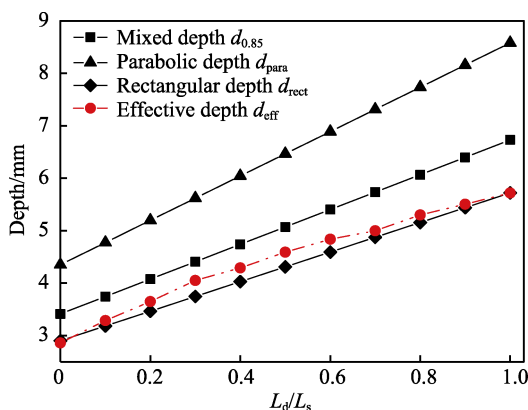


图10 组合2不同有效深度对比  
Fig.10 Comparison of different effective depths of colony 2

( $d_{\text{rect}}/d_{\text{eff}}=0.94$ ) 的值基本一致。不规则工况 1-4 和组合 2 的  $d_d/d_s$  相同, 由此可知不规则形状缺陷的等效形状主要由深腐蚀缺陷与浅腐蚀缺陷的深度比 ( $d_d/d_s$ ) 决定, 与深腐蚀缺陷与浅腐蚀缺陷的长度比 ( $L_d/L_s$ ) 无关。

由于不规则形状缺陷的等效形状主要由深腐蚀缺陷与浅腐蚀缺陷的深度比 ( $d_d/d_s$ ) 决定, 因此采用组合 1 的工况来分析不规则形状缺陷的等效形状。根据图 9 中不同有效深度对比, 抛物线形状的有效深度  $d_{\text{para}}$  为真实有效深度  $d_{\text{eff}}$  的上限, 矩形形状的有效深度  $d_{\text{rect}}$  为真实有效深度  $d_{\text{eff}}$  的下限。不规则形状缺陷的等效形状分为如表 6 所示的 3 类。3 个类别的 2 个分界点是  $d/d_{\text{ave}}=1.2$  和  $d/d_{\text{ave}}=1.5$ , 其中  $d/d_{\text{ave}}=1.2$  为规则形状和不规则形状的分界点。考虑到对于标准抛物线形状  $d/d_{\text{ave}}=d/(A/L)=d/(2/3 \times d)=1.5$ , 因此  $d/d_{\text{ave}}=1.5$  被认为是抛物线形状的分界点。这 2 个分界点与图 9 中有效深度的转折点一致。

为了分析不规则形状缺陷的等效形状, 采用形状参数  $\alpha = d_{\text{rect}}/d_{\text{eff}}$  来表示不同的等效形状。当  $\alpha=1$  时, 等效形状为矩形; 当  $\alpha=2/3$  时, 等效形状为抛物线; 当  $2/3 < \alpha < 1$  时, 等效形状介于矩形和抛物线之间。选

取不规则工况 1-2 到 1-8 ( $1.14 < d/d_{\text{ave}} < 1.51$ ) 分析过渡形状区间  $\alpha$  与  $d_d/d_s$  的关系, 结果如图 11 所示。根据图 11 线性拟合结果得到 2 个分界点的坐标分别为:  $\alpha=1$ ,  $d_d/d_s=1.6$ ;  $\alpha=2/3$ ,  $d_d/d_s=3.1$ 。因此, 当  $1 \leq d_d/d_s \leq 1.6$  时, 等效形状为矩形,  $\alpha=1$ ; 当  $d_d/d_s \geq 3.1$  时, 等效形状为抛物线形,  $\alpha=2/3$ 。由此得到如式 (7) 所示的不规则形状的形状参数  $\alpha$  表达式。

$$\alpha = \begin{cases} 1 & 1 \leq d_d/d_s \leq 1.6 \\ -0.2318d_d/d_s + 1.3742 & 1.6 < d_d/d_s < 3.1 \\ 2/3 & d_d/d_s \geq 3.1 \end{cases} \quad (7)$$

表6 不规则缺陷的等效形状

Tab.6 Equivalent shape of irregular-shaped defect

Irregularity( $d/d_{\text{ave}}$ )	$d_d/d_s$ of colony 2	Equivalent shape
$1 \leq d/d_{\text{ave}} < 1.2$	$1 \leq d_d/d_s < 1.64$	Rectangle
$1.2 \leq d/d_{\text{ave}} \leq 1.5$	$1.64 \leq d_d/d_s \leq 3.0$	Transition shape
$1.5 < d/d_{\text{ave}}$	$3.0 < d_d/d_s$	Parabolic

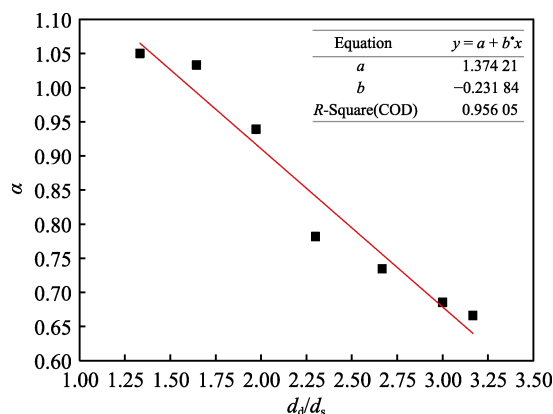


图11  $\alpha$  和  $d_d/d_s$  的关系  
Fig.11 Relationship between  $\alpha$  and  $d_d/d_s$

## 4 不规则形状缺陷失效压力评估实例

新的不规则缺陷管道失效压力的评估步骤为: 首先根据 2.1.1 节确定不规则缺陷失效位置; 其次根据 2.1.2 节确定评估长度, 如果评估长度小于缺陷总长度, 失效位置应位于评估长度中间位置; 然后根据评估长度范围内不规则形状缺陷的不规则性, 将不规则形状缺陷转化为等效形状; 最后根据等效形状的有效深度  $d_{\text{eff}}$  和评估长度  $L_{\text{eval}}$ , 采用 DNV-RP-F101 (单个缺陷) 的评估方法计算失效压力。

### 4.1 新评估方法步骤

**步骤 1** 将不规则形状的缺陷细分为理想的“片腐蚀”和“腐蚀坑”, “片腐蚀”是长度  $L_s$  和深度  $d_s$  的浅腐蚀缺陷, “腐蚀坑”是长度  $L_i$  和深度  $d_i$  ( $i=1,2,3,\dots$ ) 的深缺陷。

**步骤 2** 根据不规则缺陷中深腐蚀缺陷分布模型,



确定失效位置。

**步骤 3** 采用公式 (1) 和公式 (2) 计算不规则形状缺陷的评估长度  $L_{\text{eval}}$  和评估范围内缺陷的轴向投影面积  $A_{\text{eval}}$ 。

**步骤 4** 对于内压承载力相同的深腐蚀缺陷, 因为失效位置为中间位置, 该失效位置受到相邻缺陷的共同作用, 因此需要将该类型缺陷等效为单一缺陷。计算该类型相互作用缺陷  $n$  到  $m$  的有效深度  $d_{nm}$ , 如式 (8) 所示。对于内压承载力不同的深腐蚀缺陷, 因为失效位置为单一缺陷, 不受相邻缺陷干扰, 因此不需要进行等效。

$$d_{nm} = \frac{\sum_{i=n}^{i=m} (d_i - d_s) L_i}{L_{nm}} + d_s \tag{8}$$

**步骤 5** 根据  $d_s$ 、 $d_d$  和式 (7) 计算不规则形状缺陷的形状参数  $\alpha$  ( $d_d = d_{nm}$  或  $d_d = \max(d_i)$ )。

**步骤 6** 根据形状参数  $\alpha$ , 计算有效深度  $d_{\text{eff}}$ 。

$$d_{\text{eff}} = \frac{A_{\text{evalu}}}{\alpha L_{\text{evalu}}} \tag{9}$$

**步骤 7** 结合  $L_{\text{eval}}$  和  $d_{\text{eff}}$  采用公式 (3) 和公式 (4) 计算评估范围内缺陷的失效压力  $p_f$ 。

4.2 不规则形状缺陷失效压力评估实例

以 Benjamin 等<sup>[19]</sup>进行的 TS 5.2 不规则形状缺陷试验为例介绍新的评估方法的步骤。不规则形状缺陷的形状如图 4 所示, 数据见表 1。

**步骤 1** 将不规则形状的缺陷细分为 1 个“浅腐蚀缺陷”和 2 个“深腐蚀缺陷”。浅腐蚀缺陷长 255.38 mm、深 2.67 mm, 深腐蚀缺陷长 79.91 mm、深 6.61 mm。2 个深腐蚀缺陷的轴向间距为 48 mm。

**步骤 2** 计算不规则形状缺陷的评估长度和轴向投影面积  $A_{\text{eval}}$ 。对于试验 TS 5.2,  $L_{\text{eval}}=L_s=255.38$  mm,  $A_{\text{eval}}=1\,311.56$  mm<sup>2</sup>。

**步骤 3** 计算相互作用缺陷形成的组合缺陷的有效深度。对于测试 TS 5.2,  $d_{nm}=5.7$  mm。

**步骤 4** 根据  $d_s$  和  $d_{nm}$ , 计算不规则形状缺陷的形状参数  $\alpha$ 。对于试验 TS 5.2,  $\alpha=0.879$ 。

**步骤 5** 根据形状参数  $\alpha$ , 计算有效深度  $d_{\text{eff}}$ 。对

于测试 TS 5.2,  $d_{\text{eff}}=5.84$  mm。

**步骤 6** 计算评估范围内缺陷的失效压力  $p_f$ 。对于测试 TS 5.2,  $p_f=17.89$  MPa, 试验破坏压力为 18.76 MPa, 误差为 4.65%。

5 评估方法的验证

根据巴西国家石油公司的研究项目, 利用不规则形状缺陷的试验破坏压力数据对本文提出的评价方法进行了验证。试样为采用火花冲蚀法加工的具有外部不规则腐蚀缺陷的管道<sup>[6,19]</sup>。这些管道由中高强度钢 (X60 和 X80) 制成, 试验数据列于表 7。管道的材料性能是通过试样的单轴拉伸试验确定的, 所有管道的试验参数范围和缺陷几何尺寸见表 8。

实测和预测的失效压力见表 9。为了证明新的不规则形状缺陷评估方法的优越性, 不同评估方法的误

表 7 试验数据  
Tab.7 Test data

Experimental data source	Case	Number of burst test	Pipeline material (API-5L)
Freire, et al. <sup>[19]</sup>	TS5.2-5.3	2	X60
Benjamin, et al. <sup>[6]</sup>	ISTS 1-4	4	X80

表 8 管道尺寸和材料性能  
Tab.8 Pipe geometry and mechanical properties

Parameter	min	max
Pipe diameter $D$ /mm	323.9	458.7
Pipe wall thickness $t$ /mm	8.1	9.89
Pipeline material (API 5L)	X60	X80
Yield strength $\sigma_y$ /MPa	452	556.3
Ultimate tensile strength $\sigma_u$ /MPa	542	697.6
Yield-to-tensile ratio $\sigma_y/\sigma_u$	0.61	0.797
Maximun depth $d$ /mm	5.46	6.67
$d/t$	0.668	0.683
$d/d_{\text{ave}}$	1.287	1.72
$L/\sqrt{Dt}$	4.51	9.32
Failure pressure $p_f$ /MPa	13.99	20.99

表 9 实测和预测的失效压力  
Tab.9 Actual and predicted failure pressures

Case	Actual pressure $p_{\text{exp}}$	Predicted pressure $p_f$						
		B31G	0.85dL	DNV (single)	RPA	Effective area	DNV (complex)	New method
TS5.2	18.76	10.07	16.39	15.04	16.05	17.07	15.72	17.89
TS5.3	20.99	9.79	14.89	12.64	11.19	19.21	17.59	19.08
ISTS 1	13.09	7.04	11.23	10.83	10.57	11.31	11.14	13.91
ISTS 2	15.21	6.86	10.64	9.81	8.21	12.69	12.49	15.32
ISTS 3	13.59	6.86	11.07	10.59	10.4	12.09	12.05	14.32
ISTS 4	15.78	6.86	10.64	9.81	8.21	13.29	13.39	14.41

差比较如表 10 所示。由表 9 可知, ASME-B31G、RSTRENG 0.85*dL*、RPA 和 DNV-RP-F101(单个缺陷)评估方法采用最大腐蚀深度 *d* 和缺陷长度 *L* 计算失效

压力, DNV-RP-F101(复杂缺陷)和有效面积评估方法采用缺陷长度 *L* 和深度剖面计算失效压力。本文提出的方法根据 5.2 节的步骤评估失效压力。

表 10 失效压力预测误差  
Tab.10 Error of the failure pressure predictions

Case	B31G	0.85 <i>dL</i>	DNV (single)	RPA	Effective area	DNV(complex)	New method
TS5.2	-46	-12.6	-20	-14.4	-9.0	-16.0	-4.7
TS5.3	-53	-29.1	-40	-46.7	-8.5	-16.0	-9.1
ISTS 1	-46.2	-14.2	-17.3	-19.2	-13.6	-14.9	6.2
ISTS 2	-54.9	-30.1	-35.5	-46.1	-16.5	-17.9	0.7
ISTS 3	-49.5	-18.5	-22	-23.5	-10.9	-11.3	5.4
ISTS 4	-56.5	-32.6	-37.8	-48.0	-15.8	-15.1	-8.6
Standard deviation	4.1	8.0	9.2	14.2	3.1	2.0	6.2
Average error	-51.0	-22.9	-28.8	-33.0	-12.4	-15.2	-1.69

Note:  $E_{\text{error}} = [(p_f - p_{\text{exp}})/p_{\text{exp}}] \times 100\%$ ,  $E_{\text{ave,error}} = \sum |E_{\text{error}}|/6$ .

## 6 结论

1) 对于内压承载力不同的深腐蚀缺陷组成的不规则缺陷管道, 其失效位置为内压承载力最小的深腐蚀缺陷; 对于内压承载力相同的深腐蚀缺陷组成的不规则缺陷管道, 其失效位置为相邻深腐蚀缺陷中心位置。

2) 不规则形状缺陷管道失效压力与最大深度 *d* 和缺陷深度剖面有关。随着深腐蚀缺陷深度和长度的增加, 不规则缺陷管道失效压力降低。

3) 本文结合评估长度和等效形状的计算方法, 得到了一种更准确的不规则形状缺陷腐蚀管道失效压力的评估方法。新方法的计算结果与试验结果吻合较好。

### 参考文献:

- [1] PALMER A C, KING R A. Subsea Pipeline Engineering[M]. Tulsa: PennWell Corp., 2004.
- [2] 周晶, 冯新, 李昕. 海底管线全寿命安全运行的关键问题研究[J]. 工程力学, 2011, 28(S2): 97-108.  
ZHOU Jing, FENG Xin, LI Xin. Research on Critical Issues of life-Cycle Service Safety for Subsea Pipelines[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(S2): 97-108.
- [3] LI Bin, WANG Fu-ming, FANG Hong-yuan, et al. Experimental and Numerical Study on Polymer Grouting Pretreatment Technology in Void and Corroded Concrete Pipes[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 113: 103842.
- [4] FANG Hong-yuan, TAN Pei-ling, DU Xue-ming, et al. Mechanical Response of Buried HDPE Double-Wall Corrugated Pipe under Traffic-Sewage Coupling Load[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 108: 103664.
- [5] 金伟良, 张恩勇, 邵剑文, 等. 海底管道失效原因分析及对策[J]. 科技通报, 2004, 20(6): 529-533.  
JIN Wei-liang, ZHANG En-yong, SHAO Jian-wen, et al. Cause Analysis and Countermeasure for Submarine Pipeline Failure[J]. Bulletin of Science and Technology, 2004, 20(6): 529-533.
- [6] BENJAMIN A C, FRANZOI A R, LEAL C J J, et al. Additional Test Results of Pipeline with Corrosion-Irregular-Shaped Defects[J]. Experimental Techniques, 2010, 34(5): 68-75.
- [7] HAN C J. Failure Pressure Analysis of the Pipe with Inner Corrosion Defects by FEM[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2016: 5046-5062.
- [8] SUN Ming-ming, LI Xin, LIU Jin-kun. Determination of Folias Factor for Failure Pressure of Corroded Pipeline[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2020, 142(3): 526.
- [9] SU Chen-liang, LI Xin, ZHOU Jing. Failure Pressure Analysis of Corroded Moderate-to-High Strength Pipelines[J]. China Ocean Engineering, 2016, 30(1): 69-82.
- [10] CHOUCHAOUIBA P. A Three Level Assessment of the Residual Strength of Corroded Line Pipe[J]. Chanics and Arctic Engineering, 1994, 54: 864.
- [11] CRONIN D S, PICK R J. A New Multi-Level Assessment Procedure for Corroded Line Pipe[C]//Proceedings of 2000 3rd International Pipeline Conference. Calgary: [s. n.], 2016.
- [12] FU B, BATTE A. An Overview of Advanced Methods for the Assessment of Corrosion in Linepipe[J]. HSE Offshore Technology, 1999, 51: 199.
- [13] GAO Song-wei, SHAO Na, YANG Li-jian. Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines with B31G Code and Finite Element Analysis Theory[J]. 2010 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, 2010, 1: 1097-1100.
- [14] KIEFNER J, VIETH P. A Modified Criterion for Evalu-

- ating the Remaining Strength of Corroded Pipe[J]. HSE Offshore Technology, 1989, 45: 189.
- [15] BENJAMIN A, ANDRADE E. Modified Method for the Assessment of the Remaining Strength of Corroded Pipelines[J]. HSE Offshore Technology, 2003, 56: 108.
- [16] VERITAS D. Recommended Practice DNV-RP-F101 Corroded Pipelines[J]. Hovik, 2004, 54: 658.
- [17] DE SOUZA R D, BENJAMIN A C, FREIRE J L F, et al. Burst Tests on Pipeline Containing Long Real Corrosion Defects[C]//Proceedings of 2004 International Pipeline Conference. Calgary: [s. n.], 2008: 1159-1167.
- [18] SOUZA R, BENJAMIN A, VIEIRA R, et al. Burst Tests of Corroded Pipe Segments Removed from Service[J]. Experimental Techniques, 2005, 29(5): 58.
- [19] FREIRE J L F, VIEIRA R D, CASTRO J T P, et al. Part 5: Rupture Tests of Pipeline Containing Complex-Shaped Metal Loss Defects[J]. Experimental Techniques, 2007, 31(2): 57-62.
- [20] BENJAMIN A C, FRANZOI A R, FREIRE J L F, et al. Burst Tests on Pipeline Containing Irregular Shaped Corrosion Defects[C]//Proceedings of 2008 7th International Pipeline Conference. Calgary: [s. n.], 2009: 169-178.
- [21] SUN Jia-lin, 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.
- [22] SUN Jia-lin, CHENG Y F. Modelling of Mechano-Electrochemical Interaction at Overlapped Corrosion Defects and the Implication on Pipeline Failure Prediction[J]. Engineering Structures, 2020, 212: 110466.
- [23] BENJAMIN A C, FREIRE J L F, VIEIRA R D, et al. Burst Tests on Pipeline Containing Interacting Corrosion Defects[C]//Proceedings of ASME 2005 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Halkidiki: [s. n.], 2008: 403-417.
- [24] BENJAMIN A C, FREIRE J L F, VIEIRA R D, et al. Burst Tests on Pipeline Containing Closely Spaced Corrosion Defects[C]//Proceedings of 25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Hamburg: [s. n.], 2008: 103-116.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] KIEFNER J F, VIETH P H, ROYTMAN I. Continued Validation of RSTRENG: Technology for Energy Pipelines[J]. Technology for Energy Pipelines, 1996, 5: 47.
- [28] BJORNOY O, MARLEY M. Assessment of Corroded Pipelines: Past, Present and Future[J]. International Offshore and Polar, 2001, 36: 368.
- [29] ANDRADE E, BENJAMIN A. Structural Evaluation of Corrosion Defects in Pipelines: Comparison of FE Analyses and Assessment Methods[J]. The Fourteenth International Offshore, 2004, 52: 365.
- [30] ANSYS. Users Manual[M]. New York: ANSYS Inc., 2020.
- [31] BENJAMIN A C, FREIRE J L F, VIEIRA R D. Part 6: Analysis of Pipeline Containing Interacting Corrosion Defects[J]. Experimental Techniques, 2007, 31(3): 74-82.
- [32] BATTE D, FU B, KIRKWOOD M. Advanced Methods for Integrity Assessment of Corroded Pipelines[J]. Pipes & Pipelines, 1997, 25: 365.
- [33] BENJAMIN A C, DE ANDRADE E Q, JACOB B P, et al. Failure Behavior of colonies of corrosion defects composed of symmetrically arranged defects[C]// Integrity Management; Poster Session; Student Paper Competition. Calgary: ASMEDC, 2006.
- [34] DE ANDRADE E Q, BENJAMIN A C, MACHADO P R S Jr, et al. Finite Element Modeling of the Failure Behavior of Pipelines Containing Interacting Corrosion Defects[C]// CFD and VIV Symposium. Hamburg: ASMEDC, 2006.
- [35] BENJAMIN A C, DE ANDRADE E Q. Predicting the Failure Pressure of Pipelines Containing Nonuniform Depth Corrosion Defects Using the Finite Element Method[C]// Safety and Reliability, Pipeline Technology. Cancun: ASMEDC, 2003.

责任编辑: 万长清