

# 高钢级含腐蚀缺陷管道在复杂载荷下的极限承载力研究

王鑫鑫<sup>1\*</sup>, 刘 宁<sup>1</sup>, 郭真宇<sup>1</sup>, 秦 霞<sup>2</sup>

<sup>1</sup>重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

<sup>2</sup>中国石油集团测井有限公司制造公司重庆仪器厂, 重庆

收稿日期: 2025年12月19日; 录用日期: 2026年1月22日; 发布日期: 2026年2月10日

## 摘 要

针对内压与弯矩耦合作用下含腐蚀缺陷高钢级管道的极限承载力问题, 建立了X80管道三维非线性有限元模型, 系统分析了径厚比、缺陷深度、长度与宽度等参数对管道失效行为的影响规律。结果表明: 随径厚比增大, 管道剩余强度呈线性下降, 传统ASME B31G准则因未计入弯矩影响, 其预测值偏高12%~18%; 通过引入径厚比修正因子建立的改进剩余强度模型, 可将预测误差降至3%~5%; 缺陷几何参数中, 深度对极限承载力影响最为显著, 极限弯曲应变降幅可达47.6%; 基于损伤累积理论与回归分析建立的弯曲应变预测模型, 决定系数 $R^2$ 为0.96, 验证误差为0.57%。研究成果可为复杂载荷下高钢级含腐蚀缺陷管道的安全评估与运维提供理论依据。

## 关键词

含腐蚀缺陷管道, 复杂载荷, 剩余强度, 弯曲应变, 有限元分析

# Study on Ultimate Bearing Capacity of High-Grade Steel Pipelines with Corrosion Defects under Complex Loading Conditions

Xinxin Wang<sup>1\*</sup>, Ning Liu<sup>1</sup>, Zhenyu Guo<sup>1</sup>, Xia Qin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Petroleum Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

<sup>2</sup>Chongqing Instrument Factory, Manufacturing Company, CNPC Logging Co., Ltd., Chongqing

Received: December 19, 2025; accepted: January 22, 2026; published: February 10, 2026

\*通讯作者。

文章引用: 王鑫鑫, 刘宁, 郭真宇, 秦霞. 高钢级含腐蚀缺陷管道在复杂载荷下的极限承载力研究[J]. 石油天然气学报, 2026, 48(1): 11-19. DOI: 10.12677/jogt.2026.481002

## Abstract

To address the issue of the ultimate bearing capacity of high-grade steel pipelines with corrosion defects under the combined action of internal pressure and bending moment, a three-dimensional nonlinear finite element model of an X80 pipeline was established. The influence patterns of parameters such as the diameter-to-thickness ratio, defect depth, length, and width on pipeline failure behavior were systematically analyzed. The results indicate that as the diameter-to-thickness ratio increases, the residual strength of the pipeline decreases linearly. The traditional ASME B31G criterion, which does not account for the influence of bending moment, yields predicted values that are 12%~18% higher. By introducing a correction factor for the diameter-to-thickness ratio, an improved residual strength model was established, reducing the prediction error to 3%~5%. Among the geometric parameters of defects, depth has the most significant impact on the ultimate bearing capacity, with the ultimate bending strain decreasing by up to 47.6%. A bending strain prediction model based on damage accumulation theory and regression analysis was developed, with a coefficient of determination ( $R^2$ ) of 0.96 and a validation error of 0.57%. The research findings provide a theoretical basis for the safety assessment and maintenance of high-grade steel pipelines with corrosion defects under complex loading conditions.

## Keywords

Pipelines with Corrosion Defects, Complex Loading Conditions, Residual Strength, Bending Strain, Finite Element Analysis

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

石油天然气管道是保障国家能源输送的关键基础设施，其安全稳定运行对经济社会可持续发展具有重要意义[1]。截至 2024 年底，我国油气管道总里程已达约 18 万千米，其中天然气管道约 12.8 万千米[2]。随着管道网络的持续扩展、运行年限的增长以及途经地质环境的日益复杂，由腐蚀与机械载荷耦合作用引发的管道失效风险日趋突出。统计显示，我国埋地天然气管道中约 90%采用 X70 至 X100 高钢级管材，年均腐蚀穿孔率约为 1.2 次/千公里，且 63%的失效与弯曲应变相关。尤其在冻土区、地震带等地质条件复杂区域，以及第三方施工频繁地段，管道常承受附加弯矩，导致局部应力集中与腐蚀加速扩展，严重威胁管道安全。

当前工程规范(如 ASME B31G、DNV-RP-F101)主要针对单一内压载荷下的管道剩余强度评估，难以准确预测含缺陷管道在复杂载荷作用下的极限承载力，增加了突发失效风险。学者们围绕该问题开展了系列研究，如帅健等[3]通过建立非线性有限元模型，提出了基于缺陷参数的失效压力预测公式；杜国锋[4]基于 Tresca 准则推导了内压与轴向力耦合作用下均匀腐蚀管道的剩余强度计算公式；符方杰[5]提出以缺陷中部应力作为失效判据，提升了含缺陷管道的应力评估精度。Zhang 等[6]通过试验证实，0.1%的弯曲应变可使 X70 管道腐蚀速率提高 20%，揭示了力学-化学协同效应。Li 等[7]采用扩展有限元法模拟了弯曲载荷下裂纹的扩展行为，但未界定缺陷尺寸对临界应变的影响阈值；Wang 等[8]所建立的腐蚀管道疲劳寿命模型则未考虑弯矩对腐蚀进程的动态影响。现有研究虽取得重要进展，但在径厚比与缺陷参数的协同作用机制、以及复杂载荷下管道失效预测等方面仍需深入探索。为此，本文构建内压 - 弯矩联合

作用下的三维非线性有限元模型，研究径厚比、缺陷深度、长度及宽度等参数对管道极限承载力的影响，进而提出修正的剩余强度与弯曲应变预测模型，以期为天然气管道现场安全运维提供实用可靠的评估工具。

2. 有限元建模与验证

2.1. 几何模型

以一段外径 711 mm、壁厚 8.8 mm 的 X80 钢级天然气管道作为研究对象，其基本材料参数如表 1 所示。该管段位于季节性冻土区，长度为 6 m，服役环境中土壤 Cl<sup>-</sup> 含量为 0.15%~0.3%，年均冻融循环约 120 次。近三年该管段累计发生腐蚀泄漏事故 6 次，实测最大弯曲应变达 0.12%。

Table 1. Basic parameters of the natural gas pipeline  
表 1. 天然气管道基础参数

钢材	外径 D/mm	壁厚 t/mm	长度 L/m	屈服强度 $\sigma_y$ /MPa	极限抗拉强度 $\sigma_t$ /MPa	杨氏模量 E/Gpa	泊松比 $\nu$
X80	711	8.8	6	450	535	205	0.3

为模拟实际腐蚀缺陷，在管道表面设置三维半椭圆形凹坑，其轴向长度 150 mm、周向宽度 120 mm、深度 4.4 mm (占壁厚 50%)。该管道几何示意如图 1 所示，图中  $d_c$  表示缺陷深度， $L_c$  表示缺陷长度； $W_c$  表示缺陷宽度。

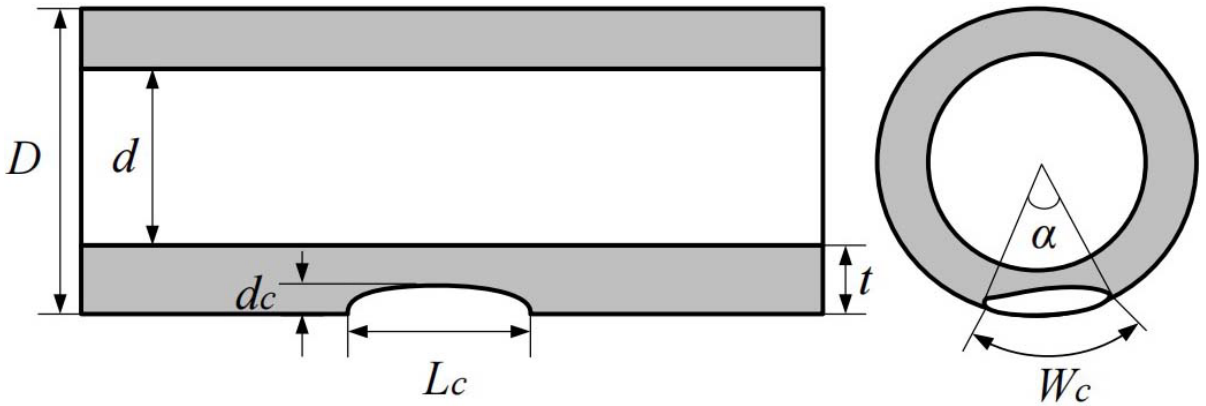


Figure 1. Schematic diagram of the pipeline geometry with corrosion defects  
图 1. 含腐蚀缺陷管道几何示意图

2.2. 网格划分与边界条件

建立含腐蚀缺陷管道模型如图 2 所示。采用高阶 Tet10 四面体单元对其进行网格划分，如图 3。在腐蚀缺陷区域实施局部加密，最小单元尺寸为 4 mm，以准确捕捉应力梯度变化；远离缺陷区域网格尺寸逐步增大至 70 mm，以提升计算效率。

最终模型共划分节点 49,091 个，单元 16,414 个。为验证网格独立性，分别对节点数为 32,000、45,000 和 49,091 的三种网格密度进行对比，结果显示：当节点数超过 45,000 时，缺陷区最大应力变化率小于 2%，应变误差低于 1.5%，表明网格划分满足收敛性要求。

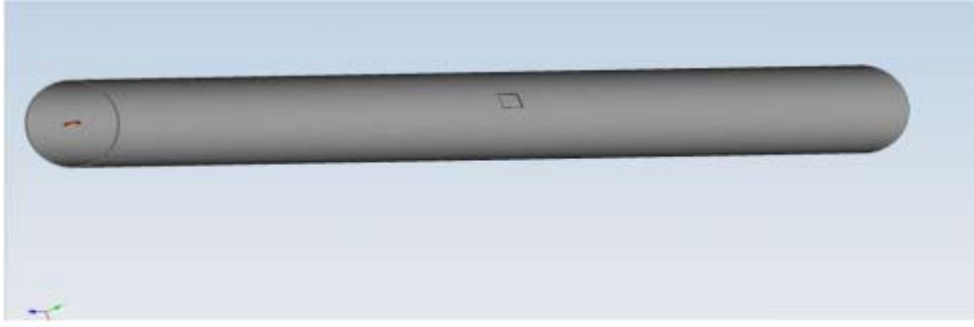


Figure 2. Pipeline model with corrosion defects

图 2. 含腐蚀缺陷管道模型

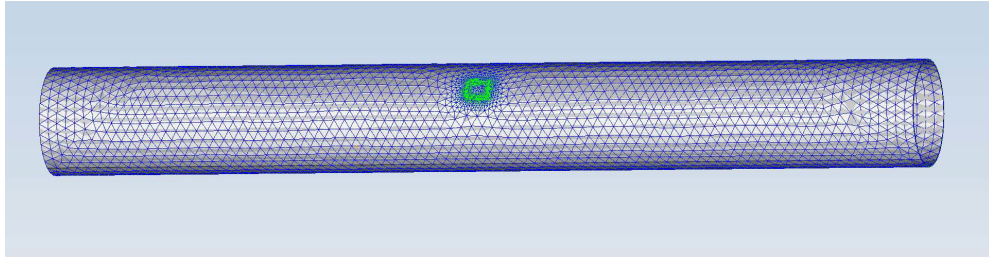


Figure 3. Schematic diagram of the finite element mesh division for the pipeline

图 3. 管道有限元网格划分示意图

边界条件综合考虑内压、弯矩及土壤约束的耦合作用。对管道一端施加全固定约束，限制全部 6 个自由度，模拟埋地管道与土壤的刚性连接；另一端为自由端，允许轴向位移与弯曲变形。根据经典梁理论，将实测弯曲应变 0.125% 等效为弯矩 862.6 kN·m 施加于自由端。内压载荷取设计压力的 80%，即 6.3 MPa，并将其均匀施加于管道内壁。

### 2.3. 失效判据与验证

采用 von Mises 等效应力作为失效判据，即当腐蚀缺陷区域的最大等效应力达到 X80 钢的极限抗拉强度(535 MPa)时，判定管道失效。

考虑内压与弯矩联合作用的 ASME B31G 准则，其剩余强度计算[9]：

$$P'_{safe} = \frac{2t\sigma_y}{D} \cdot \left( \frac{1 - 0.85(d_c/t)}{1 - 0.85(d/t) / \sqrt{1 + 0.8(L/\sqrt{Dt})^2}} \right) - \sigma_b \quad (1)$$

$$\sigma_b = E \cdot \varepsilon_b \quad (2)$$

式中， $P'_{safe}$  为外载荷作用下管道的剩余强度，MPa； $t$  为管道壁厚，mm； $D$  为管道外径，mm； $d_c$  为缺陷深度，mm； $\sigma_y$  为管道屈服强度，MPa； $E$  为管道材料弹性模量，MPa； $\sigma_b$  为管道材料弯曲应力，MPa； $\varepsilon_b$ ：管道材料弯曲应变，MPa。经计算，该管道的理论剩余强度约 545.2 MPa。

基于建立的有限元模型，模拟管道在 0.125% 弯曲应变下的应力分布与应变分布分别如图 4 与图 5 所示。由图可知，缺陷区域的最大 von Mises 应力为 558.4 MPa，与理论计算值 545.2 MPa 的相对误差为 2.5%；应变模拟值为 0.118%，与理论应变 0.125% 的相对误差为 5.6%。两项误差均低于工程中常用的 10% 容许阈值，表明所建立模型具有较好的可靠性。

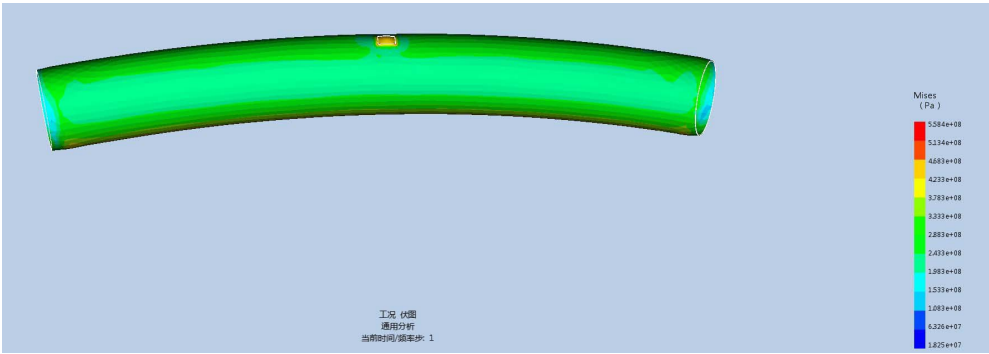


Figure 4. Stress contour of the pipeline under 0.125% bending strain  
图 4. 0.125%弯曲应变下管道应力云图

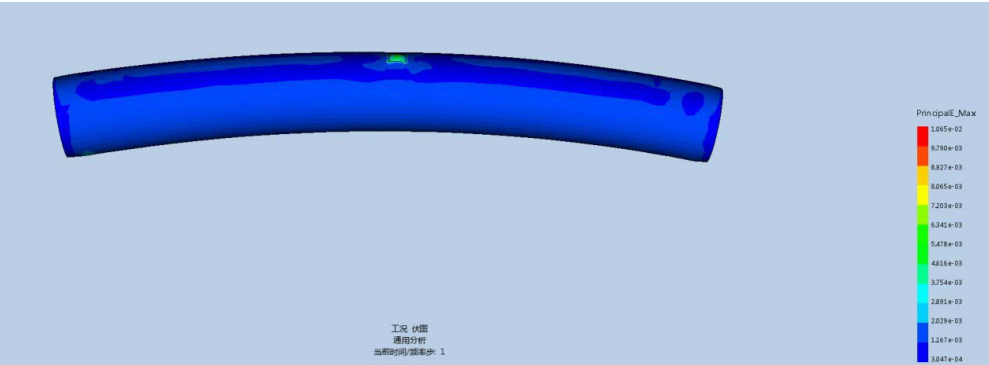


Figure 5. Strain contour of the pipeline under 0.125% bending strain  
图 5. 0.125%弯曲应变下管道应变云图

3. 径厚比对管道剩余强度影响及修正

3.1. 径厚比影响分析

管道径厚比(D/t)是衡量管壁相对厚度的重要参数,对含缺陷管道的剩余强度具有显著影响。在 0.125% 弯曲应变条件下,随着径厚比从 75 逐渐增加至 85,管道缺陷区域的剩余强度呈线性下降趋势,如表 2 所示。

Table 2. Residual strength of pipelines with different diameter-to-thickness ratios under constant external load  
表 2. 恒定外载荷下不同径厚比对应的管道剩余强度

径厚比	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85
剩余强度/MPa	22.69	22.39	22.10	21.82	21.54	21.27	21.01	20.75	20.50	20.26	20.02

分析表明,随着管壁相对减薄(即 D/t 增大),弯曲载荷作用下管道中性轴向腐蚀缺陷侧偏移,导致缺陷区域的环向应力集中逐渐升高,缺陷尖端塑性区扩展速度加快,材料失效进程相应加速。此外,在季节性冻土区的冻融循环环境下,管道承受交变弯曲载荷,缺陷区域的累积塑性应变随径厚比增大呈近似指数增长,进一步加剧了疲劳裂纹的萌生与扩展。

如图 6 所示,将本文模拟结果与 ASME B31G 准则的理论预测值进行对比,发现后者因未考虑弯矩影响,其剩余强度预测值普遍偏高 12%~18%,说明在复杂载荷条件下传统评估方法存在局限性。

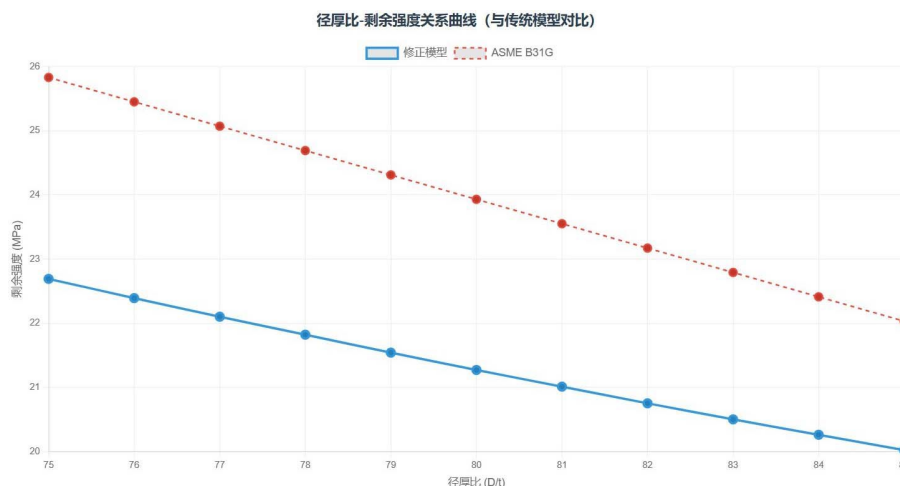


Figure 6. Relationship curve between diameter-to-thickness ratio and residual stress  
图 6. 径厚比与剩余强度关系曲线

### 3.2. 修正剩余强度模型

ASME B31G 准则未系统考虑径厚比的影响, 其剩余强度计算主要基于缺陷几何参数和材料强度。对此, 引入径厚比修正因子, 提出修正模型:

$$P'_{safe} = \alpha \cdot P_{safe} - \sigma_b \quad (3)$$

$$\alpha = 1 - 0.015(D/t - 75) \quad (4)$$

式中,  $\alpha$  为拟合系数, 表征径厚比对剩余强度的削弱效应。

图 7 对比了修正模型与 ASME B31G 传统模型的预测误差。结果显示, 修正后的模型预测误差由原先的 12%~18%降低至 3%~5%, 显著提高了高径厚比( $D/t$  较大)管道的剩余强度评估精度。同时, 在工程实践中, 建议对径厚比  $D/t \geq 80$  的管段加强监测与评估。当剩余强度低于运行压力的 1.3 倍时, 应启动预防性换管或加固措施, 以保障管道安全运行。

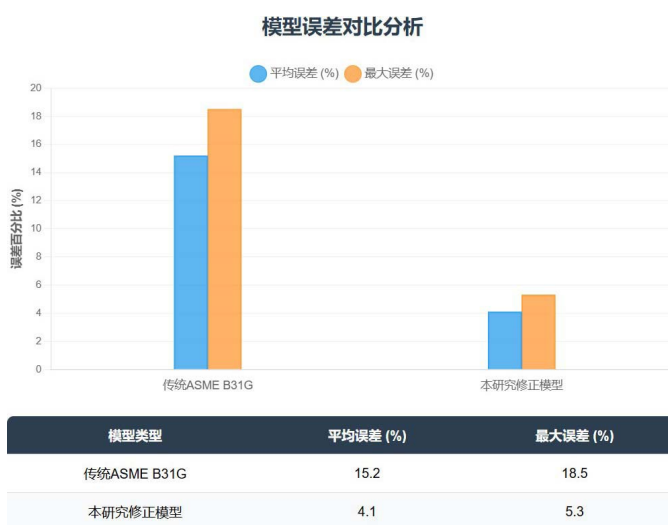


Figure 7. Error comparison between the modified model and the traditional model  
图 7. 修正模型与传统模型误差对比



## 4. 缺陷参数的敏感性分析

### 4.1. 缺陷深度

缺陷深度系数定义为：

$$\lambda = d/t \quad (5)$$

其中， $d$  为缺陷深度，mm； $t$  为管道壁厚，mm。

如图 8 所示，随着缺陷深度系数  $\lambda$  从 0.2 (浅表腐蚀) 增至 0.8 (近穿透腐蚀)，管道的极限弯曲应变由 0.21% 显著下降至 0.11%，降幅达 47.6%，表明缺陷深度对管道承载能力具有关键影响。进一步分析发现，当  $\lambda > 0.5$  时，缺陷区域的应力三轴度超过材料韧性阈值，裂纹萌生与扩展过程显著加快。这为工程实践中腐蚀深度安全阈值的确定提供了量化依据。

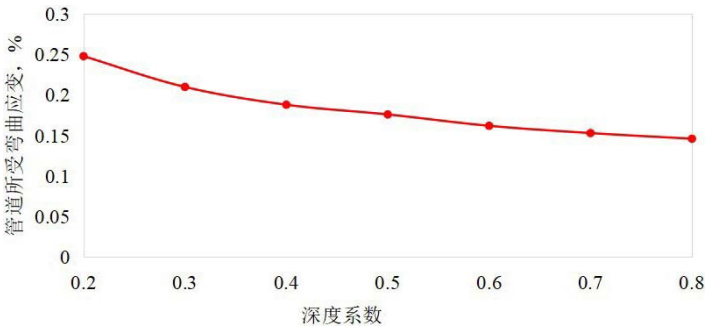


Figure 8. Effect of defect depth on the ultimate bending strain  
图 8. 缺陷深度对极限弯曲应变的影响

### 4.2. 缺陷长度

缺陷长度系数定义为：

$$\eta = L/\sqrt{Dt} \quad (6)$$

式中， $L$  为缺陷轴向长度，mm； $D$  为管道外径，mm； $t$  为壁厚，mm。

如图 9 所示，当缺陷长度系数  $\eta$  在 0.63 至 10 范围内变化时，管道的极限弯曲应变随  $\eta$  增大呈非线性下降趋势；但当  $\eta > 8$  后，应变下降幅度逐渐趋缓。这是由于缺陷长度的增加，管道整体抗弯刚度降低，载荷重新分布至非缺陷区域，导致缺陷局部应变增长受限。进一步分析表明，当  $\eta = 10$  时，缺陷区域的应变仅占总应变的 35%，说明超长缺陷主要影响结构的整体稳定性，而对局部应力集中的影响相对减弱。

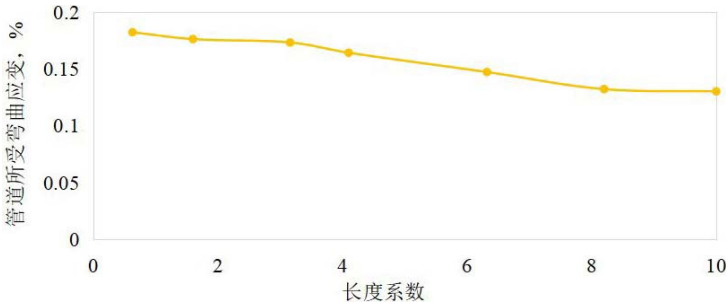


Figure 9. Effect of defect length on the ultimate bending strain  
图 9. 缺陷长度对极限弯曲应变的影响

### 4.3. 缺陷宽度

缺陷宽度系数定义为:

$$\gamma = \beta/360^\circ \quad (7)$$

式中,  $\beta$  为缺陷的周向半角角度,  $^\circ$ 。

如图 10 所示, 当缺陷宽度系数  $\gamma$  超过 0.22 时, 管道周向应力集中因子由 1.8 上升至 2.1, 极限弯曲应变降低 15.2%, 反映出缺陷宽度增大显著减小了材料的有效承载截面, 进而加速整体塑性失稳过程。进一步分析发现, 当缺陷宽度系数  $\gamma$  超过 0.3 时, 应力集中因子趋于稳定, 表明此时宽度变化对局部应力分布的调控能力已达到阈值, 该现象与 Kang 等人[10]关于含缺陷管道疲劳行为的试验结果相符。

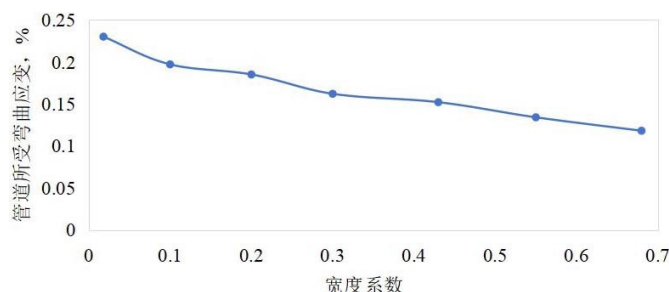


Figure 10. Effect of defect width on the ultimate bending strain

图 10. 缺陷宽度对极限弯曲应变的影响

### 5. 管道弯曲应变预测

管道在服役过程中的失效是弯曲应变持续累积与腐蚀缺陷共同作用下的渐进损伤过程。基于损伤累积理论, 结合有限元模拟结果进行非线性回归分析, 建立适用于含腐蚀缺陷管道的弯曲应变预测模型:

$$\varepsilon_{lim} = 0.22\% - 0.05\left(\frac{d}{t}\right) - 0.1\left(1 - e^{-0.1\frac{L}{\sqrt{Dt}}}\right) - 0.02\left(\frac{\beta}{360^\circ}\right)^2 \quad (8)$$

该模型的决定系数  $R^2 = 0.96$ , 表明其能够解释 96% 的弯曲应变变化, 具有较高的预测可靠性。为验证模型的实际适用性, 将模型应用于前文所述的工程管道案例, 计算得到预测失效弯曲应变为 0.176%, 与实测结果的相对误差为 0.57%。

验证结果表明, 所提出的弯曲应变预测模型具有较好的工程适用性与预测准确性, 可为高钢级含缺陷管道在复杂载荷下的安全评估与剩余寿命预测提供理论依据与实用工具。

### 6. 结论

针对内压与弯矩耦合作用下含腐蚀缺陷高钢级管道的极限承载力问题, 以 X80 天然气管道为例, 建立了三维非线性有限元模型, 系统分析了径厚比、缺陷深度、长度及宽度等参数对管道失效行为的影响规律, 提出了修正的剩余强度与弯曲应变预测方法。

(1) 径厚比是影响管道剩余强度的关键几何参数。研究结果表明, ASME B31G 准则因其未充分考虑弯矩效应, 在实际工况下剩余强度预测值普遍偏高 12%~18%。通过引入径厚比修正因子, 构建的修正模型显著提升了评估精度, 预测误差可降低至 3%~5%, 为高径厚比管段的安全评估提供了更为可靠的理论工具。

(2) 缺陷几何参数对管道极限承载能力的影响具有差异性。其中, 缺陷深度的影响最为显著, 其变化



对极限弯曲应变的影响可达 47.6%；缺陷长度与宽度的影响则呈现非线性特征，并存在明显的效应阈值，反映出在管道整体稳定性和局部应力集中下的作用机制不同。

(3) 基于损伤累积理论构建的含腐蚀缺陷管道弯曲应变预测模型，在数值模拟与试验验证中表现良好，模型决定系数  $R^2$  达到 0.96，工程案例验证误差仅为 0.57%。该模型具备较高的预测精度与工程适用性，可为高钢级管道在复杂载荷作用下的剩余寿命预测与运行风险管理提供支持。

## 基金项目

重庆科技大学 2025 年硕士研究生创新计划项目：YKJCX2520137。

## 参考文献

- [1] 程铖. 油气管道防腐技术的研究现状与发展趋势[J]. 能源技术与管理, 2024, 49(3): 223-225.
- [2] 国家能源局. 中国天然气发展报告(2025) [R]. 北京: 石油工业出版社, 2025.
- [3] 帅健, 张春娥, 陈福来. 非线性有限元法用于腐蚀管道失效压力预测[J]. 石油学报, 2008(6): 933-937.
- [4] 杜国锋, 张东山, 刘广军. 基于 Tresca 屈服准则的均匀腐蚀管道剩余强度计算[J]. 石油机械, 2013, 41(4): 106-109.
- [5] 符方杰. 含腐蚀缺陷管道失效非线性有限元分析[J]. 机械工程师, 2022(6): 59-61.
- [6] Zhang, L., Li, X., Wang, Y., *et al.* (2019) Effect of Bending Strain on the Corrosion Behavior of X70 Pipeline Steel in Near-Neutral pH Environment. *Corrosion Science*, **157**, 108-119.
- [7] Li, S., Zhang, H., Li, Y., *et al.* (2021) Simulation of Crack Propagation in Pipelines under Bending Load Using the Extended Finite Element Method (XFEM). *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, **191**, Article 10438.
- [8] Wang, C., Liu, Z., Chen, G., *et al.* (2022) A Fatigue Life Prediction Model for Corroded Pipelines Subjected to Cyclic Internal Pressure. *Ocean Engineering*, **253**, Article 11287.
- [9] ASME. ASME B31G: 管道系统腐蚀剩余强度确定手册[S]. 2012 版. 纽约: 美国机械工程师协会, 2012.
- [10] Kang, J., Wang, W., Zhang, Q., *et al.* (2020) Experimental Investigation on the Fatigue Behavior of Pressurized Pipes with Corrosion Defects. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **83**, Article 10356.