

X80管道凹陷结构失效与极限凹陷深度研究

金志巍*, 廖一六

重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2025年9月10日; 录用日期: 2025年11月28日; 发布日期: 2025年12月10日

摘要

为精确评估X80输气管道凹陷缺陷的安全状态, 克服传统经验判据(H/D)的局限性, 本文建立了凹陷管道形成与在内压作用下恢复的全过程有限元模型。采用Ramberg-Osgood非线性本构模型描述X80钢的塑性行为, 并以10%等效塑性应变为失效准则, 对某Φ1422×32.1 mm管道进行了安全校核。结果表明: 当凹陷深度达15% D时, 最大塑性应变高达52.76%, 远超限值; 在高压、大口径X80管道工况下, 其极限凹陷深度仅为管径的1.7%, 远低于常用经验值。本研究为在役高强度钢管道的完整性管理提供了科学、可靠的数值评估范式, 并对管道检测、维修与决策提供了重要的量化依据。

关键词

油气管道, 凹陷缺陷, 有限元分析, 极限深度

Study on Structural Failure and Critical Dent Depth in X80 Pipelines

Zhiwei Jin*, Yiliu Liao

School of Petroleum and Natural Gas Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: September 10, 2025; accepted: November 28, 2025; published: December 10, 2025

Abstract

To accurately assess the safety of dent defects in X80 natural gas pipelines and overcome the limitations of traditional empirical criteria (H/D), this paper establishes a full-process finite element model that simulates the formation of a dented pipe and its subsequent recovery under internal

*第一作者。

pressure. The nonlinear Ramberg-Osgood constitutive model was adopted to describe the elasto-plastic behavior of X80 steel, and a failure criterion of 10% equivalent plastic strain (PEEQ) was applied to conduct a safety evaluation on a $\Phi 1422 \times 32.1$ mm pipeline. The results show that when the dent depth reaches 15% D, the maximum plastic strain is as high as 52.76%, far exceeding the allowable limit. The study further demonstrates that, under high-pressure, large-diameter X80 pipeline conditions, the critical dent depth is only 1.7% D, which is significantly lower than commonly used empirical values. This research provides a scientific and reliable numerical evaluation paradigm for the integrity management of in-service high-strength steel pipelines and offers a crucial quantitative basis for pipeline inspection, maintenance, and decision-making.

Keywords

Oil and Gas Pipelines, Dent Defect, Finite Element Analysis, Limit State

Copyright © 2025 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

管道凹陷是输气管道常见的机械损伤形式,对管道结构完整性具有重要影响。传统上,现行标准对凹陷的评价主要依赖于几何参数,如凹陷深度与管径比(H/D)等简单判据。在已有研究中,凹陷深度被认为是影响管道爆破强度和疲劳强度的最关键因素,因此许多评估方法中使用 H/D 作为划分安全与否的准则[1]。例如,一些管道缺陷评估模型将应力集中系数定义为管径壁厚比、凹陷深度比 H/D 及管道工作压力等参数的函数[1]。基于此,诸如 ASME B31.8 等管道设计规范也引入了基于应变极限(如 6%等效塑性应变)的简易准则进行凹陷筛选[2]。然而,仅以几何深度(H/D)作为失效判据的方法存在明显局限:它忽略了材料本身的屈服和硬化特性,未能描述实际应力 - 应变场分布的非均匀性,因而难以准确预测在高强钢管如 X80 管道中凹陷引起的局部强度劣化和失效模式[3]。

近年来,基于应变的失效判据受到越来越多关注,尤其是采用等效塑性应变(PEEQ)作为凹陷失效判据。PEEQ 量化了材料在大变形条件下的累计塑性应变,用于表征管材局部损伤程度。研究表明,在大变形塑性状态下,以应变为基础的失效判据(即当某参考应变达到临界值时认为失效)通常更准确[3]。例如, Tian 和 Zhang (2017)通过实验和有限元分析研究了含划痕复合凹陷管道的失效机理,并提出了基于等效塑性应变的失效准则[3]。该方法可更真实地描述管道凹陷处的应变集中场,从而提高失效预测的可靠性。美国 ASME B31.8 规范(2018 版)附录 R 也引入了 6%等效塑性应变作为凹陷失效的筛选阈值,表明行业正逐步由简单的几何准则向应变准则转变。总之,相较于传统的 H/D 准则,PEEQ 作为新型失效判据在描述复杂应力场和预测破坏时具有更大的优势。

X80 级大口径高压管线钢是当前油气干线的典型管材之一。在满足高压力和大输量需求方面, X80 管线钢以其高强度与良好韧性被广泛采用。据文献报道,中国已建成 X80 输气管道约 1.7 万公里,总里程位居世界前列, X80 钢管成为大型高压输气干线的首选钢级。例如,在我国重要输气工程西气东输二线、中俄东线等项目中均采用 X80 管线钢作为主干管材。因此,研究 X80 大口径高压管道凹陷结构失效及极限凹陷深度具有重要工程意义[4] [5]。X80 钢材典型的高强韧特性与大型管径组合决定了其在凹陷失效分析中需要考虑更严格的安全评估准则。针对 X80 管道,结合上述新型应变判据,可以更准确地评估凹陷缺陷对管道承载力的影响和安全余度。

2. 有限元模型建立

2.1. 几何模型与边界条件

本文选取外径 $D = 1422 \text{ mm}$ 、壁厚 $t = 32.1 \text{ mm}$ 的 X80 管道作为研究对象, 属大口径厚壁管范畴。由于凹陷对称性明显, 为提高计算效率, 建立了关于 xy 平面和 zy 平面对称的 $1/4$ 三维模型, 其有限元模型如图 1 所示, 在编号为 1、2 和 3 的截面上施加对称约束, 在编号为 4 的截面上施加固定约束。管道长度取 $3D$ (4266 mm), 以避免边界效应。模型边界条件设置如下表 1 所示:

Table 1. Boundary condition settings of the finite element model

表 1. 有限元模型边界条件设置

边界位置	约束类型	具体设置
两个对称面	对称约束	限制对称面法向的平移自由度和面内旋转自由度。
管道一端	轴向位移约束	约束管道模型一端的全部平移自由度, 模拟无限长管道的受力状态。
管道外壁与压头	面 - 面接触	定义半径为 $r = 300 \text{ mm}$ 的解析刚体压头作为主面, 管道外表面作为从面, 模拟外部物体压入过程。

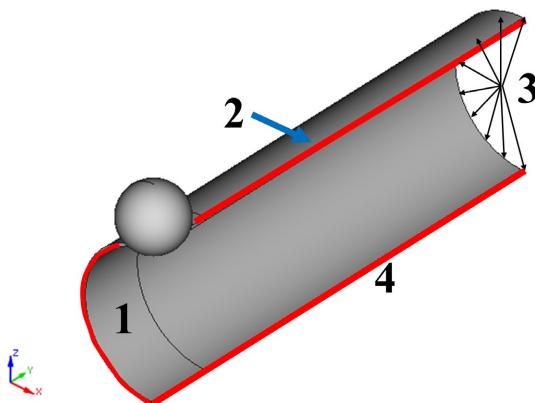


Figure 1. Boundary conditions of the dented-pipe model
图 1. 管道凹陷模型的边界条件

2.2. 材料模型

管道采用 X80 管线钢, 其力学行为具有显著的非线性弹塑性特征。X80 管线钢的力学性能参数和化学组成成分如表 2 和表 3 所示。为准确模拟其在大应变下的响应, 本研究采用 Ramberg-Osgood 本构模型来描述材料的应力 - 应变关系, 该模型能很好地拟合材料在弹塑性阶段的过渡, 其表达式为:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + K \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \quad (1-1)$$

其中: ε 为应变, σ 为应力, E 为弹性模量, σ_0 为屈服强度, K 与 n 为材料常数。

Table 2. Mechanical properties of X80 pipeline steel

表 2. X80 管线钢的力学性能参数

弹性模量(MPa)	屈服强度(MPa)	抗拉强度(MPa)	塑性应变硬化指数	泊松比
206,000	638	739	33.64	0.3

Table 3. Chemical composition of X80 pipeline steel (wt.%)
表 3. X80 管线钢的化学组成成分(质量分数, %)

钢级	Cu	Ni	Mn	Mo	Si	C	Nb + V + Ti
X80	0.24	0.252	0.179	0.241	0.152	0.063	0.04

2.3. 分析工况与加载路径

为准确复现凹陷缺陷在实际工况下的力学行为, 本研究采用多分析步顺序模拟的方法, 完整再现了从凹陷形成至管道在内压作用下恢复的全过程。该过程共包含四个连续的分析步如图 2 所示, 具体设置如下:

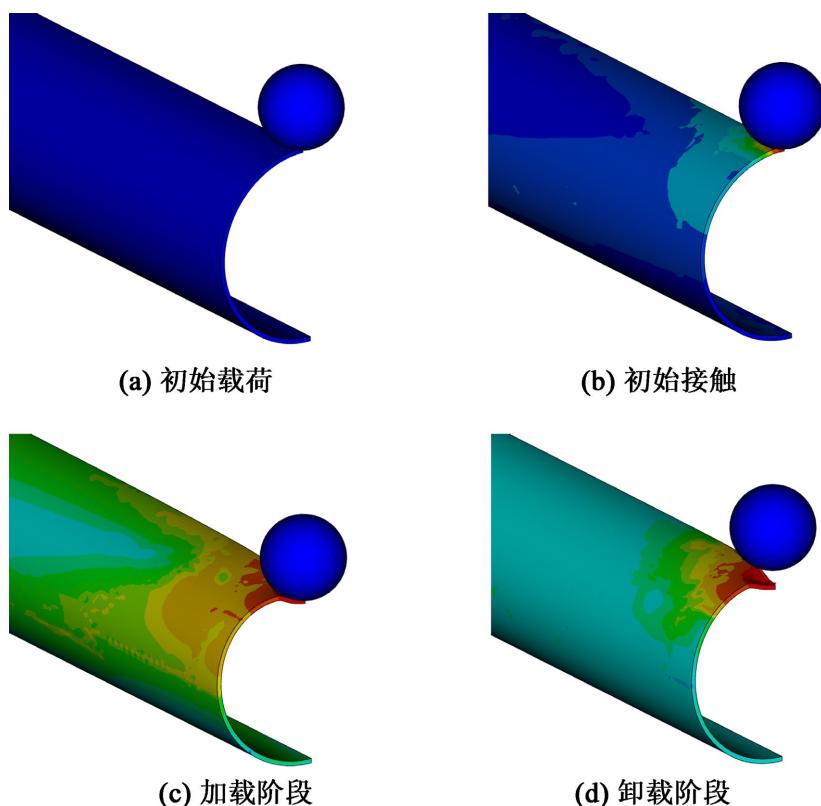


Figure 2. Schematic of dent formation and loading path
图 2. 凹陷形成与加载路径示意图

1. **初始载荷:** 在管道模型的内表面上施加均布载荷, 模拟油气管道运行过程中的工作内压。
2. **初始接触:** 在压头上施加微小的强制位移, 使其与管体表面形成稳定接触。
3. **加载阶段:** 对压头施加强制的位移荷载, 对管体进行挤压, 使管道产生永久的塑性变形, 形成凹陷。
4. **卸载阶段:** 移除压头, 记录管道凹陷处最大等效塑性应变。

2.4. 网格划分

为在计算精度与效率之间取得平衡, 采用了非均匀网格划分策略。对压头接触区域及周边(约 $2r$ 长度, r 为压头半径)的管道进行了显著的网格细化, 该区域采用一阶四面体网格划分。远离接触区的网格逐渐过渡为粗大网格。最终网格划分如图 3 所示, 共 144,402 个网格。

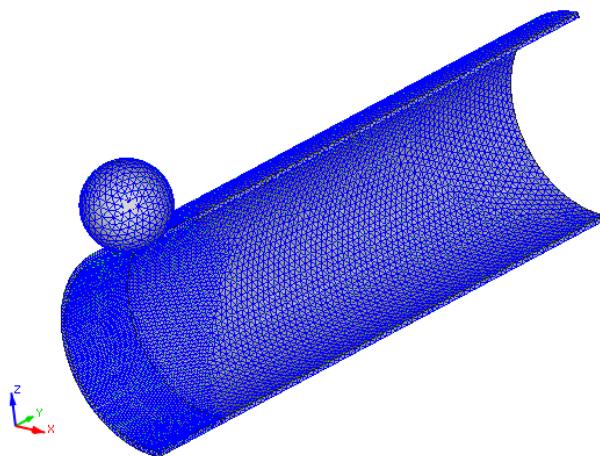


Figure 3. Mesh discretization schematic
图 3. 网格划分示意图

2.5. 失效判定准则

传统的基于应力的强度理论难以准确评估此类经历巨大塑性变形的损伤问题。现代管道完整性评估标准(如 API 579-1/ASME FFS-1)推荐采用基于应变的设计理念。本研究采用最大等效塑性应变准则作为失效判据。参考 API 579-1 等相关规范及 X80 钢的延性性能, 将管道局部区域的许用等效塑性应变极限设置为 10%。即当凹陷区域的最大等效塑性应变值超过此阈值时, 即判定该管道存在失效风险。该准则充分考虑了高强度钢的塑性变形能力, 同时为防止延性撕裂和裂纹萌生保留了必要的安全裕度, 是基于弹塑性力学理论的科学、合理的评估方法。

3. 仿真结果与分析

3.1. 典型工况应变云图与分布特征

为明确凹陷缺陷的力学响应特性, 本研究对凹陷深度为 15% 的典型工况进行了细致分析。图 4 直观呈现了该工况下管道在内压(12 MPa)作用下的等效塑性应变(PEEQ)分布情况。

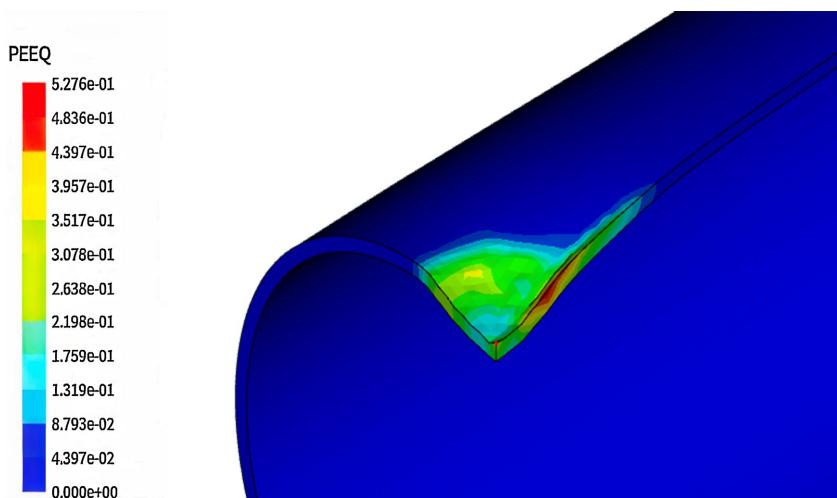


Figure 4. Contour of equivalent plastic strain (PEEQ) in the dent region for a dent depth of 15% D
图 4. 凹陷区域等效塑性应变分布云图(15%D 工况)

如图 4 所示, 塑性应变分布呈现显著的空间不均匀性。最高应变值并非位于凹陷底部中心, 而是集中在凹陷边缘的环向区域, 形成明显的带状应变集中区。该现象的产生源于凹陷形成机理: 当刚性压头压入管壁时, 边缘区域承受强烈的弯曲与拉伸复合作用, 导致材料发生严重塑性变形; 在卸载及内压恢复过程中, 该区域成为应力应变的集中释放区, 从而形成极高的残余应变峰值。这一发现表明, 对管道凹陷的安全评估应重点关注其边缘区域, 而非凹陷最深点。

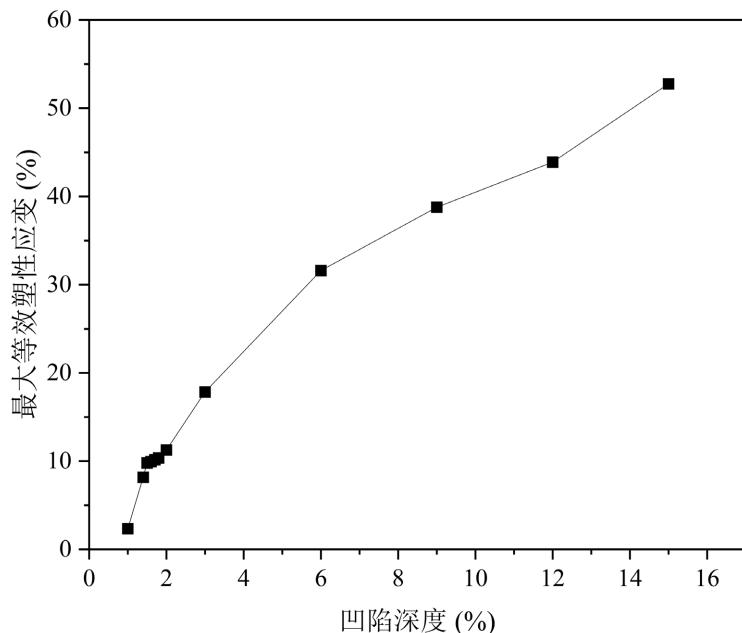


Figure 5. Peak equivalent plastic strain (PEEQ) versus dent depth (H/D)
图 5. 不同凹陷深度下的应变峰值变化曲线

为进一步揭示应变随缺陷尺寸的演化行为, 本研究系统模拟了凹陷深度(H/D)从 1%至 15%的连续变化过程。如图 5 所示, 最大等效塑性应变随凹陷深度增加呈现明显的非线性加速增长趋势。在凹陷深度较低时(<2%), 应变增长较为平缓; 一旦凹陷深度超过约 2%, 应变增长率显著提高, 曲线陡然上升, 表明管道进入敏感变形阶段。这一规律揭示了凹陷损伤的尺寸效应: 浅度凹陷对管道承压能力影响较小; 而当凹陷深度超过临界值后, 材料塑性变形急剧发展, 安全裕度迅速降低, 微小的深度增加即可能导致管道服役性能的显著退化。

3.2. 安全性校核分析

基于 API 579-1/ASME FFS-1 标准的精神并综合考虑 X80 钢的延性能力, 本研究采用 10%的局部等效塑性应变作为管道失效的临界判据。为定量评估各工况的安全性, 表 4 列出了不同凹陷深度下的最大等效塑性应变值及相应的安全判定结果。

由表 4 可知, 在凹陷深度达到管径的 15% 时, 最大等效塑性应变已高达 52.76%, 远超 10%的许用限值, 表明管道已处于极度危险的失效状态。然而, 若依据工程中曾广泛使用的 6%D 的经验判据, 深度在 2%D 至 5%D 之间的凹陷将被判定为“安全”, 而本研究结果表明, 在此区间内管道的最大等效塑性应变早已远超应变失效临界值。这一对比清晰地揭示了传统基于深度比的经验判据存在严重的非保守性风险, 可能将实际上已不安全的管道缺陷误判为安全, 为管道的长期安全运行埋下重大隐患。本研究采用的基于应变的分析方法, 能够更真实地反映材料的损伤程度, 评估结果更为科学和可靠。

Table 4. Maximum equivalent plastic strain and safety assessment under different dent depths
表 4. 不同凹陷深度下的最大等效塑性应变与安全判定

凹陷深度(%)	最大 PEEQ (%)	安全状态	传统经验判据
1	2.34	安全	安全
1.4	8.18	安全	安全
1.5	9.80	安全	安全
1.6	9.95	临界	安全
1.7	10.16	失效	安全
1.8	10.37	失效	安全
2	11.28	失效	安全
3	17.84	失效	安全
6	31.59	失效	失效
9	38.77	失效	失效
12	43.88	失效	失效
15	52.76	失效	失效

3.3. 极限凹陷深度确定

为精确确定给定工况下管道的极限承载能力, 本研究通过迭代仿真, 寻找最大等效塑性应变恰好达到 10%临界值时所对应的凹陷深度, 即极限凹陷深度。对凹陷深度为 1.4%~2.0%区间进行了局部放大分析, 如图 6 所示。可以看到, 在凹陷深度为 1.4%时, 最大等效塑性应变为 8.18%, 仍低于 10%的许用阈值; 当凹陷深度为 1.6%时, 最大等效塑性应变已接近 9.95%, 呈现临界状态; 进一步增大凹陷深度为 1.7%时, 最大等效塑性应变升至 10.16%, 超过阈值, 判定为失效。由此可见, 极限凹陷深度约为 1.7%D。

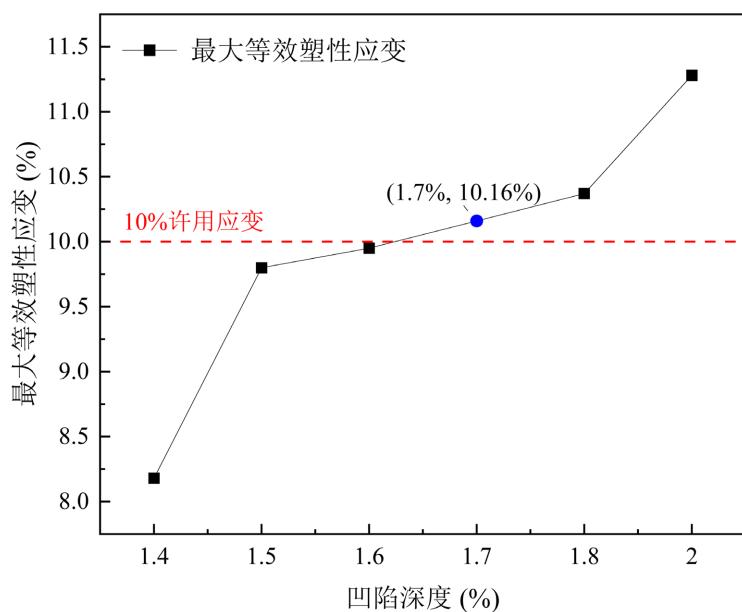


Figure 6. Local magnification of the limit dent depth region
图 6. 极限凹陷深度判定局部放大图

局部放大图清晰显示了最大等效塑性应变在极限点附近的陡增过程(见图 6 中阈值线和标注点), 比全局曲线更直观地反映阈值穿越过程, 便于工程上的精确判定与临界区间的快速定位。

4. 工程意义与讨论

本研究结果对油气管道完整性管理实践具有重要的启示:

1. 评估方法的革新: 应推动管道凹陷评估从传统的、基于几何参数的经验判据, 向基于应变或断裂力学的精细化数值评估转变。尤其是对高风险管线(如高压、大口径、高强钢)和敏感区域(高后果区), 应采用本文所述的有限元分析等方法进行安全校核。

2. 检测与维修策略的优化: 研究确定的极限深度($1.7\%D$)远小于常见经验值, 这意味着在役管道中可能存在大量此前被认定为“安全”但实际上已“超标”的凹陷缺陷。建议:

(1) 对检测发现的深度超过 $1.0\%D$ 的凹陷, 应予以重点关注, 优先采用应变扫描等先进内检测技术进行复验, 获取实际的应变分布数据。

(2) 将基于数值模拟的极限深度图谱或数据库集成到完整性管理系统中, 为不同管段、不同运行压力下的凹陷缺陷提供快速、精准的安全评估工具。

3. 研究的局限性与展望:

(1) 局限性: 本研究未考虑疲劳载荷(压力波动)的影响, 而循环载荷会显著加速凹陷区域的裂纹萌生与扩展。此外, 模型假设材料无初始缺陷, 未考虑凹陷与腐蚀、划伤等缺陷的耦合作用。

(2) 展望: 未来工作可围绕以下方面展开: (a) 开展全尺寸管道试验, 对数值模型进行验证与修正; (b) 进行参数化分析, 系统研究内压、管径壁厚比(D/t)、压头形状等参数对极限深度的影响规律, 并形成设计曲线或公式; (c) 深入研究疲劳寿命预测模型, 评估凹陷管道在循环内压下的服役寿命。

5. 结论

本研究基于有限元仿真方法, 对 X80 高强度钢输气管道凹陷缺陷的力学响应与安全状态进行了深入分析。通过建立凹陷形成、卸载及在内压作用下恢复的全过程模型, 系统研究了凹陷区域的应变分布规律, 并基于应变判据确定了管道的极限承载能力。本章将主要研究结论总结如下:

1. 建立了能够精确反映凹陷力学行为的有限元模型, 揭示了应变分布特征。通过合理设置材料本构(Ramberg-Osgood 模型)、边界条件与复杂的加载路径, 成功模拟了凹陷的“接触-加载-卸载”全过程。结果表明, 塑性应变并非均匀分布, 而是在凹陷边缘的环向区域出现高度集中, 该区域是凹陷缺陷最薄弱的环节, 最大等效塑性应变在此处产生。

2. 明确了传统经验判据的非保守性, 验证了基于应变判据的优越性。仿真结果表明, 当凹陷深度为 $15\%D$ 时, 最大等效塑性应变高达 52.76% , 远超 10% 的许用限值, 管道已处于失效状态。然而, 若依据工程中常用的经验值(如 $6\%D$)进行判定, 深度在 $2\% \sim 5\%D$ 范围内的大量缺陷将被错误地归类为“安全”。这一对比强有力地证实, 单纯依据凹陷深度比的经验判据存在显著风险, 可能严重低估缺陷的危害性, 而基于应变的评估方法能更真实、更科学地反映材料的损伤失效机理。

3. 确定了特定工况下 X80 管道的极限凹陷深度, 为安全评估提供了定量依据。通过迭代计算, 确定了本研究对象($D = 1422 \text{ mm}$, $t = 32.1 \text{ mm}$, $P = 12 \text{ MPa}$)在 10% 等效塑性应变失效准则下的极限凹陷深度为管径的 1.7% 。该值显著低于文献中常见的 $2\% \sim 6\%D$ 的经验值, 凸显了在高强度钢、大口径、高压力工况下, 采用精细化数值分析进行安全判定的必要性和严格性。

4. 研究成果对管道完整性管理具有明确的工程指导价值。本研究为在役管道凹陷缺陷的安全评估提供了一种精准、可靠的数值分析范式。本研究明确启示, 对于高风险管线, 应推动评估方法从“几何经

验型”向“力学应变型”转变。建议对深度超过 1.0%D 的凹陷予以重点关注, 并可考虑将本研究建立的仿真方法集成至管道完整性管理平台, 为维修决策提供直接、量化的科学支撑, 从而有效提升管道的安全运行水平。

参考文献

- [1] Penspen Ltd. (2016) Pipeline Defect Assessment Manual (PDAM)—Dents Chapter [R/Tech Report or Manual]. <https://www.penspen.com>
- [2] ASME (2018) ASME B31.8-Gas Transmission and Distribution Piping Systems. <https://webstore.ansi.org>
- [3] Tian, X. and Zhang, H. (2017) Failure Criterion of Buried Pipelines with Dent and Scratch Defects. *Engineering Failure Analysis*, **80**, 278-289. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.06.049>
- [4] 冯耀荣, 吉玲康, 李为卫, 刘迎来, 霍春勇. 中国 X80 管线钢和钢管研发应用进展及展望[J]. 油气储运, 2020, 39(6): 612-622.
- [5] 张伟卫, 李鹤, 池强, 赵新伟, 霍春勇, 齐丽华, 李炎华, 杨坤. 外径 1422 mm 的 X80 钢级管材技术条件研究及产品开发[J]. 天然气工业, 2016, 36(6): 84-91.