doi:10.3969/j.issn.1001-4837.2025.04.008

设计计算

含划痕-凹陷组合缺陷管道屈曲失稳机理及极限承载能力研究

张俊杰[1,2],曹　胜[3],王俊强[4],帅　义[1,2],周翰宸[1,2],田　野[5],张晓兵[4],任运波[6],卢泓方[7]
(1.中国石油大学(北京)安全与海洋工程学院,北京 102249;2.应急管理部油气生产安全与应急技术重点实验室,北京 102249;3.国家管网集团 东部原油储运有限公司,江苏徐州 221008;4.中国特种设备检测研究院,北京 102249;5.国家管网集团 西部管道有限责任公司,乌鲁木齐 830011;6.中国石油西南油气田公司华油公司,成都 610051;7.中国科学院 宁波材料技术与工程研究所,浙江宁波 315201)

摘　要:为研究含划痕-凹陷组合缺陷管道的弯曲失效规律,基于非线性有限元分析方法,建立含划痕-凹陷组合缺陷管道屈曲失效数值模型,通过计算分析不同参数对含划痕-凹陷组合缺陷管道极限弯矩承载能力的敏感性,揭示组合缺陷管道屈曲失稳机理。研究结果表明,随着凹陷深度的增加,管道屈曲临界弯矩逐渐减小;管道屈曲临界弯矩随着管径和壁厚的增大而增大;内压的增大在一定程度上能够提高管道的屈曲临界弯矩,但当内压增大到一定程度时,管道屈曲临界弯矩将会减小;划痕的长度是影响管道承载能力的主控因素,随着划痕长度的增加,对管道极限弯矩承载能力的削弱效果越明显。研究结果可为含划痕-凹陷组合缺陷管道的完整性评价提供科学依据。

关键词:凹陷-划痕组合缺陷;管道;屈曲失稳;有限元分析;完整性评价
中图分类号:TH49;TE973;O343　　**文献标志码:**A

Study on buckling instability mechanism and ultimate load-bearing capacity of pipelines with dent-gouge combined defects

ZHANG Junjie[1,2],CAO Sheng[3],WANG Junqiang[4],SHUAI Yi[1,2],ZHOU Hanchen[1,2],TIAN Ye[5],ZHANG Xiaobing[4],REN Yunbo[6],LU Hongfang[7]
(1.College of Safety and Ocean Engineering,China University of Petroleum(Beijing),Beijing 102249,China;2.Key Laboratory of Oil and Gas Safety and Emergency Technology,Ministry of Emergency Management,Beijing 102249,China;3.PipeChina Eastern Oil Storage and Transportation Co.,Ltd.,Xuzhou 221008,China;4.China Special Equipment Inspection and Research Institute,Beijing 102249,China;5.West Pipeline Company of PipeChina,Urumqi 830011,China;6.Huayou Company,PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company,Chengdu 610051,China;7.Ningbo Institute of Materials Technology & Engineering,Chinese Academy of Sciences,Ningbo 315201,China)

Abstract: To investigate the bending failure behavior of pipelines with dent-gouge combined defects,a numerical model for buckling failure of pipelines containing dent-gouge combined defects was established based on nonlinear finite element analysis. Sensitivity of different parameters to the ultimate bending moment capacity of pipelines with dent-gouge combined defects was analyzed through calculations,revealing the buckling instability mechanism of defective pipelines.Results show that as dent depth increases,the critical buckling moment of pipelines gradually decreases.The critical buckling moment increases with larger pipe diameter and wall thickness.Increasing internal pressure enhances the critical buckling moment to some extent,but when internal pressure increases beyond a certain level,the critical buckling moment decreases.Gouge length is the dominant controlling factor affecting pipeline load-bearing capacity; as gouge length increases,the weakening effect on ultimate bending moment capacity becomes more pronounced.These findings provide scientific basis for integrity assessment of pipelines with dent-gouge combined defects.

Key words:dent-gouge combined defect;pipeline;buckling instability;finite element analysis;integrity assessment

收稿日期:2024-11-24　**修回日期:**2025-03-20
基金项目:国家重点研发计划项目(2024YFC3014201,2022YFC3004802-4);国家自然科学基金项目(52204071);中国石油大学(北京)优秀青年学者科学基金项目(2462023QNXZ006)

0 引言

划痕和凹陷是管道上常见的缺陷类型。在管道的建设和运行过程中，管线施工或挖掘设备操作不当可能导致管道表面形成凹陷。通过对实际埋地管道开挖检测发现，受岩石挤压或者挖掘设备的刮擦作用，在凹陷区域还会形成划痕缺陷[1-5]。管道作为一种薄壁细长结构，在断层、滑坡、洪水等不稳定条件下，可能使管道产生弯曲，甚至失效[6-10]，对管道的结构完整性和安全性造成巨大威胁[11]。因此，对含划痕-凹陷组合缺陷管道的极限弯矩承载力展开研究具有重要意义。

目前，国内外已有大量针对含缺陷管道极限承载能力的研究。JIAO等[12-14]通过试验与数值模拟方法，深入研究了圆柱体在内压与轴力联合作用下的塑性屈曲行为，揭示了圆柱体在复杂受力条件下的屈曲机理。对于凹陷管道，余建星等[15-16]通过数值模拟，研究了撞击载荷下凹陷损伤的形成机理。IFLEFEL等[17]利用数值模拟的方法，研究凹陷深度和内压对管道极限弯矩的影响，提出弯矩-内压作用下凹陷管道的定量评估方法。BLACHUT等[18]通过试验和数值模拟方法，分析凹陷管道在弯矩和内压作用下的屈曲现象，结果显示数值计算低估了屈曲临界弯矩。BAEK等[19]利用数值模拟的方法，研究了含凹陷管道在带压情况下的极限弯矩，结果表明，凹陷管道的塑性屈曲行为主要受弯矩加载方式和凹陷形状的影响。梁瑞等[20]研究了管道在横向冲击载荷下的整体屈曲与局部屈曲行为，认为管道整体屈曲与局部屈曲的耦合作用随着管道长径比的增加而变得明显，且管道的径厚比越大，管道局部承载能力越小。CAI等[21]的研究结果表明，凹陷宽度对管道的极限强度几乎没有显著影响，而凹陷的长度、深度及角度则对极限强度具有较为明显的影响。陈严飞等[22]利用数值模拟的方法，研究了外压和力偶载荷作用下含凹陷管道的局部屈曲失效行为，结果表明，凹陷深度和外压的增加显著削弱了管道的极限承载能力。

根据文献调研结果来看，目前国内外学者主要集中于平滑凹陷管道的弯曲能力研究[23-24]，而关于含划痕-凹陷组合缺陷管道极限弯曲承载能力研究较少。此外，该领域的大部分研究主要针对小口径管线，且多数为低钢级管道[25]，研究成果难以适用于高钢级、大口径管道。这是因为高钢级管材具有较高的屈服强度，但塑性变形容量低，管道在承受弯矩载荷时缺乏足够的变形冗余，更容易发生屈曲变形失稳。同时，大口径管道的截面惯性矩较大，其抗弯刚度与小口径管道存在显著差异[26]。针对以上问题，本文利用Abaqus软件，建立含划痕-凹陷组合缺陷管道屈曲失效数值模型，研究高强度大口径含划痕-凹陷组合缺陷管道在弯矩载荷作用下的屈曲失效规律，为含组合缺陷管道的完整性评价提供科学依据。

1 有限元数值模型构建

1.1 材料参数

管道材料选用X80高强度大变形管线钢，在实验室进行管材单轴拉伸试验，获取了管材的基本力学性能参数：弹性模量206 GPa，泊松比0.3，屈服强度555 MPa，抗拉强度720 MPa。管材的本构关系采用Ramberg-Osgood方程[27-28]描述：

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}=\frac{\sigma}{\sigma_y}+\alpha\left(\frac{\sigma}{\sigma_y}\right)^n \tag{1}$$

式中，ε为真实应变；ε_0为屈服点的弹性应变，$\varepsilon_0=\sigma_y/E$；σ为真实应力，MPa；σ_y为管材屈服强度，MPa；E为弹性模量；α为硬化系数；n为材料硬化指数。

拟合得到X80管道的应力-应变曲线见图1。

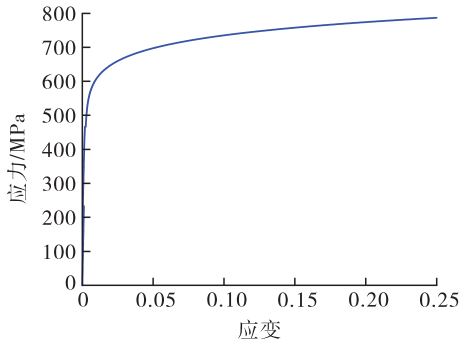


图1 X80管道的应力-应变曲线

Fig.1 Stress-strain curve of X80 pipeline

1.2 含划痕-凹陷复合缺陷管道有限元模型的建立

采用Abaqus建立有限元模型，模拟含划痕-凹陷组合缺陷管道在弯矩载荷作用下的屈曲失效过程。采用8节点六面体线性减缩积分单元（C3D8R）模拟管道实体，管长取4 000 mm，以消除远端边界效应。采用球形压头在管道中心处压制凹陷缺陷，需要注意的是，由于管道在预制凹陷过程中是带压状态，施加内压过程中，管道会发生微小径向位移。因此，在压头加载之前，建模时应使压头初始位置与管道表面保持适当间距（本研

究取10 mm)。划痕是一种典型的体积型缺陷(管道上的划痕大多由于第三方机械划伤产生,基本不会产生材料的劣化,本研究不考虑划痕位置材料的损伤),通过局部削弱管道壁厚来进行建模。为避免划痕端部产生过大的应力集中,划痕缺陷采用两端带有椭球形的圆柱体对管道实体进行切割,划痕长度沿管道轴向。

为了提高缺陷区域应力计算精度,先对缺陷局部区域网格适当加密,而远离缺陷区域网格相对稀疏(见图2),以在保证计算精度的同时,节省计算资源。

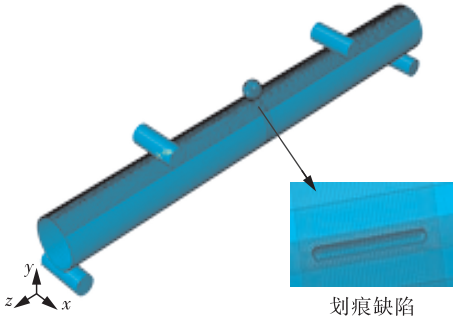


图2 有限元模型及网格划分

Fig.2 Finite element model and mesh division

随后,进行网格敏感性分析,逐渐加密凹陷区域和管道远端网格,当不同网格数量情况下计算得到的管道屈曲临界弯矩趋于稳定时,表明网格收敛。最终,通过多次试算,收敛时凹陷局部区域单元尺寸约为1.17 mm×2.68 mm×3.74 mm,远离凹陷区域的单元尺寸约为1.17 mm×2.68 mm×29.78 mm。

弯矩载荷作用下,含划痕-凹陷组合缺陷管道屈曲失稳过程包括以下加载步骤:

(1)在管道两端施加轴向约束,对管道施加内压,加载完成后,压头表面与管道表面建立接触;

(2)压头加载,在管道底部节点施加垂直方向约束,采用位移加载方法,在管道中心将压头缓慢垂直向下移动至最大加载深度,使管道形成凹陷;

(3)压头卸载,提高压头远离管道表面一定距离,凹陷发生回弹;

(4)删除管道底部节点垂直方向约束,对管道上方2个离散刚体单元施加位移载荷,使管道受到向凹陷侧弯矩作用,直至管道发生屈曲失稳。

1.3 模型有效性验证

为验证有限元模型的准确性及可靠性,对BLACHUT等[18]所做的试验进行数值模拟分析。数值模型根据文献[18]中试验工况建立,管道规格、缺陷尺寸、边界条件及加载方式均与试验保持一致。数值模拟结果与试验结果[18]对比,如表1所示(其中,D为管道的直径)。

表1 数值模拟结果与文献[18]试验结果对比

Tab.1 Comparison of numerical simulation results with test results in reference[18]

试件编号	外载荷F_{max}/kN			加载深度/mm			凹陷深度/mm			极限弯矩/(kN·m)		
	试验	文献有限元	有限元	试验	文献有限元	有限元	试验	文献有限元	有限元	试验	文献有限元	有限元
SP6	21.0	22.4	23.8	16.0%D	16.6%D	16.0%D	10.2%D	11.8%D	9.9%D	5.85	4.9	5.26

当压头加载至预定最大深度(16.0%D)时,试验测得外载荷为21.0 kN,有限元计算结果为23.8 kN,相对误差为13.3%;试验测得凹陷回弹后的深度为10.2%D,有限元计算结果为9.9%D,相对误差为3.1%;管道发生屈曲后,试验测得管道的极限弯矩为5.85 kN·m,数值计算结果为5.26 kN·m,相对误差为10.1%(可接受范围内)。误差产生的可能原因:

(1)管道材料存在不均匀性,导致局部力学性能偏离数值模型中各向同性、均匀连续介质的假设;

(2)试验中加载位置可能因定位误差或加载压头尺寸影响产生不对中,导致管道试样受力状态不完全对称;

(3)管道试样在2个支撑点之间可能会因摩擦发生轻微旋转,导致管道实际受力状态不是纯弯曲加载,进而造成数值模拟与试验结果的偏差。

文献[18]中构建的数值模型模拟的极限弯矩为4.9 kN·m,与试验测试结果相对误差为16.2%,表明本文建立的四点弯曲有限元模型比文献[18]中所建立的悬臂弯曲模型计算结果更接近试验结果,具有更高的精度,所构建有限元模型的单元类型选择、网格划分、边界条件设置及载荷的施加更具合理性,可为后续研究高强度、大口径管道在含划痕-凹陷组合缺陷条件下的屈曲失效机制提供可靠的基础。

2 屈曲临界弯矩的确定方法

采用切片法从管道有限元模型中提取关键截面的弯矩数据，获取管道的弯矩-位移曲线，如图3所示。可以看出，随着管道受拉侧顶点位移的增加，管道中心截面的弯矩逐渐增大，当位移达到274.516 mm时，弯矩强度达到峰值，约为3 282 kN·m；随着管道受拉侧顶点位移继续增大，管道中心截面的弯矩会随之下降，表明管道进入失稳阶段。此时，曲线的峰值时刻即管道屈曲失稳的临界状态，对应管道的屈曲临界弯矩，反映了管道的极限抗弯能力。

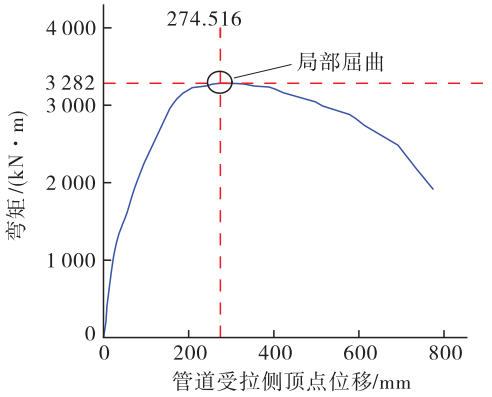


图3 组合缺陷管道弯矩-位移曲线

Fig.3 Bending moment-displacement curve of combined defect pipeline

3 结果与分析

3.1 凹陷深度的影响

为分析凹陷深度对含划痕-凹陷组合缺陷管道极限弯矩承载力的影响，有限元相关计算参数设定如下：管径1 016 mm，壁厚15.3 mm，管道内压7 MPa，压头直径400 mm，划痕长度100 mm、宽度10 mm、深度4 mm，凹陷相对深度取0%D~30%D。此处凹陷深度定义为压头向下的位移距离。值得注意的是，因管壁回弹，凹陷实际剩余深度在移除压头后会有一定的减少。

通过计算，得到不同凹陷深度下含划痕-凹陷组合缺陷管道的屈曲临界弯矩，如表2所示。可以看出，随着凹陷深度的增加，管道的屈曲临界弯矩逐渐降低。当凹陷深度为0时，其屈曲临界弯矩为6 593 kN·m，而当凹陷剩余深度为1.04%D（绝对深度约10.56 mm）时，其屈曲临界弯矩荷为6 564 kN·m，管道的临界弯矩下降了约0.4%；当凹陷剩余深度为23.20%D（绝对深度约235.71 mm）时，其屈曲临界弯矩为6 091 kN·m，管道屈曲临界弯矩降低了7.6%。结果表明，凹陷在一定程度上削弱了管道抵抗弯矩的能力，随着凹陷深度的增加，管道屈曲临界弯矩值逐渐减小，但减小速率和幅度有限。只有当凹陷深度较深时，屈曲临界弯矩的下降才较为明显。

表2 不同凹陷深度下管道屈曲临界弯矩数值模拟计算结果

Tab.2 Numerical simulation results of critical bending moment of pipeline buckling under different dent depths

管径D/mm	凹陷深度H/mm	剩余深度H_0/mm	操作压力P/MPa	屈曲临界弯矩/(kN·m)
1 016	0%D	0%D	7	6 593
1 016	2%D	1.04%D	7	6 564
1 016	4%D	2.50%D	7	6 554
1 016	8%D	5.30%D	7	6 529
1 016	14%D	9.70%D	7	6 465
1 016	24%D	18.51%D	7	6 349
1 016	30%D	23.20%D	7	6 091

3.2 管径和壁厚的影响

为分析管径和壁厚对含划痕-凹陷组合缺陷管道极限弯矩承载力的影响，有限元相关计算参数设定如下：管道内压5 MPa，压头加载深度取8%D（约91.44 mm），压头直径400 mm，划痕长度100 mm、宽度10 mm、深度4 mm。计算管径为720 mm时，不同壁厚（分别为7.2，8.5，10.3，12.8，15.3 mm）下管道的屈曲临界弯矩，如图4所示。可以看出，管径相同时，壁厚越大，管道的屈曲临界弯矩越大，管道的抗弯曲能力越强。

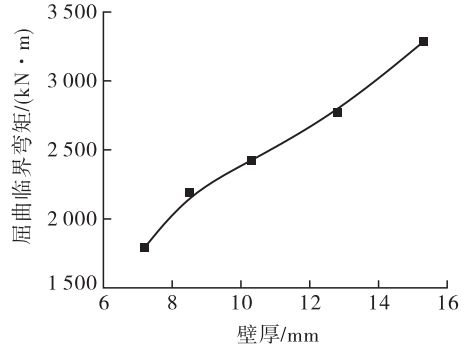


图4 管道屈曲临界弯矩随壁厚变化曲线

Fig.4 Curve of critical bending moment of pipeline buckling with wall thickness

同理，计算壁厚为15.3 mm时，不同管径（分别为720，762，810，920，1 016 mm）下管道的屈曲临界弯矩，如图5所示。可以看出，壁厚相同情况下，管径越大，管道屈曲临界弯矩越大，管道抗弯曲能力越强。

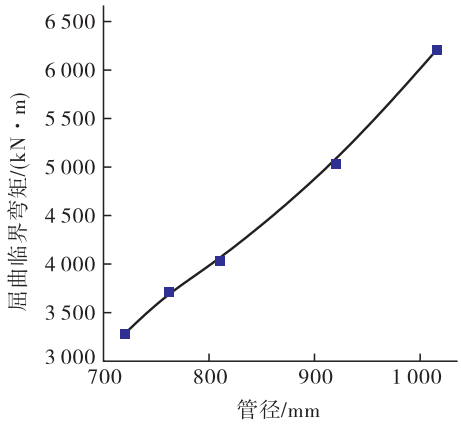


图5 管道屈曲临界弯矩随管径变化曲线

Fig.5 Curve of critical bending moment of pipeline buckling with pipe diameter

总体而言，管径和壁厚的增大显著提高了管道的屈曲临界弯矩，这种现象归因于管径和壁厚在力学性能上的共同作用，有效提升了管道的抗弯刚度和屈曲强度。根据弯曲理论，管道的抗弯刚度与其截面惯性矩密切相关。对于圆形截面管道，随着管径增大，截面惯性矩呈指数性增长，从而提升了管道的抗弯刚度和整体稳定性；壁厚的增加，提高了管道的整体刚度和承载能力，使含划痕-凹陷组合缺陷管道在承受弯矩载荷时，能够更有效地分散应力，降低管道失稳的风险。

3.3 初始内压的影响

管道的初始内压对凹陷的回弹具有直接影响，管道在不同的初始内压条件下，外载荷卸载后凹陷的回弹量会有所不同，导致最终所形成的剩余凹陷深度不同。为分析初始内压对含划痕-凹陷组合缺陷管道极限弯矩承载力的影响，有限元相关计算参数设定如下：管径1 016 mm，壁厚15.3 mm，压头直径400 mm，划痕长度、宽度、深度分别为150，10，4 mm，压头加载深度取8%D（约91.44 mm）。

计算得到初始内压分别为0~12 MPa时管道的屈曲临界弯矩，如图6所示。可以看出，含划痕-凹陷组合缺陷管道的屈曲临界弯矩随着内压的升高呈现出先增大、后减小的变化规律。这是因为内压对管道刚度的影响，当管道处于内压较低阶段，随着内压升高，管道内壁承受的环向应力增加，使管壁产生一定的径向膨胀效应。该效应增强了管道的预应力状态，从而提高管道的抗弯刚度，使其在承受外部弯矩时具有更高的稳定性和更强的承载能力。文献[29]研究表明，圆柱壳体发生屈曲时，其屈曲临界弯矩与此时结构材料的切线模量成正比关系，因此，当管道内压达到一定程度后，管道环向应力增大导致等效应力增大，此时，材料切线模量的减小占主导作用，导致临界弯矩呈下降趋势。

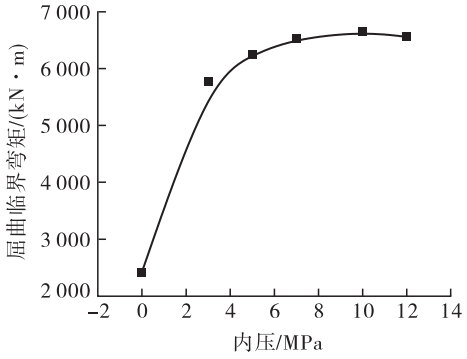


图6 管道屈曲临界弯矩随内压变化曲线

Fig.6 Curve of critical bending moment of pipeline buckling with internal pressure

3.4 压头直径的影响

在含划痕-凹陷组合缺陷管道的屈曲失稳研究中，凹陷的尺寸主要由凹陷深度、长度及宽度决定，其中长度和宽度主要受压头尺寸的影响。因此，为研究方便，文中直接考虑压头直径大小对管道屈曲临界弯矩的影响。有限元计算相关参数：管径1 016 mm，壁厚15.3 mm，管道内压7 MPa，划痕长度、宽度、深度分别为100，10，4 mm，压头加载深度8%D。计算得到压头直径为100~500 mm时管道的屈曲临界弯矩，如图7所示。可以看出，随着压头直径的增大，管道屈曲临界弯矩总体上呈现出下降的趋势，但数值变化并不显著。压头直径分别为100 mm和500 mm时，两者所计算的屈曲临界弯矩仅相差0.58%。说明压头直径对管道的屈曲临界弯矩影响很小，几乎可以忽略。

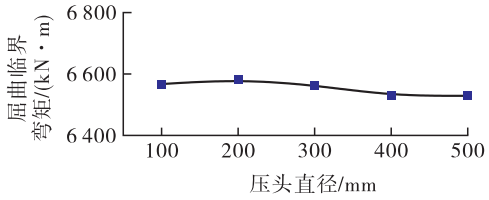


图7 管道屈曲临界弯矩随压头直径变化曲线

Fig.7 Curve of critical bending moment of pipeline buckling with indenter diameter

3.5 划痕尺寸的影响

在含划痕-凹陷组合缺陷管道的屈曲失稳研究中，划痕尺寸是一个关键的影响因素。具体来说，当划痕尺寸增加时，管道的屈曲稳定性会受到一定程度的破坏。这是因为较大的划痕会导致管

道在受到外部加载时，局部的应力集中效应更加显著，降低管道的整体屈曲承载能力。有限元计算相关参数：管径1 016 mm，壁厚15.3 mm，管道内压7 MPa，压头直径400 mm，压头加载深度一致，取8%D。分别改变划痕长度、划痕宽度、划痕深度，研究划痕尺寸对管道屈曲失稳的影响规律。

3.5.1 划痕长度的影响

为分析划痕长度对含划痕-凹陷组合缺陷管道极限弯矩承载力的影响，在划痕深度4 mm、宽度10 mm条件下，计算得到划痕长度为25~200 mm时管道的屈曲临界弯矩，如图8所示。可以看出，随着划痕长度的增加，管道极限弯矩承载力呈逐渐下降的趋势；当划痕长度增大达到一定程度，管道抗弯能力会迅速降低。划痕长度25 mm时，管道的屈曲临界弯矩为6 843 kN·m，而划痕长度为200 mm时，管道的屈曲临界弯矩为6 299 kN·m，管道屈曲临界弯矩降低了7.9%。可见，划痕长度对含划痕-凹陷组合缺陷管道的极限弯矩承载力影响较大，应作为主要考虑因素。

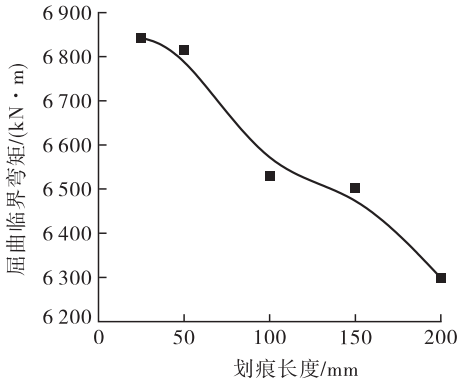


图8 管道屈曲临界弯矩随划痕长度变化曲线

Fig.8 Curve of critical bending moment of pipeline buckling with dent length

3.5.2 划痕宽度的影响

为分析划痕宽度对含划痕-凹陷组合缺陷管道极限弯矩承载力的影响，在划痕长度100 mm、深度4 mm条件下，计算得到划痕宽度为2~10 mm时管道的屈曲临界弯矩，如图9所示。

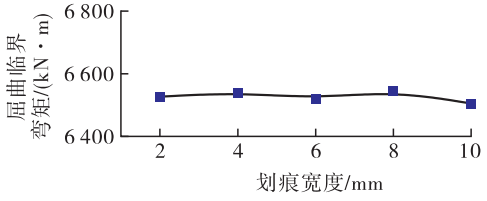


图9 管道屈曲临界弯矩随划痕宽度变化规律

Fig.9 Variation of critical buckling moment of pipeline with dent width

可以看出，随着划痕宽度的增大，管道屈曲临界弯矩虽有一定波动，但波动幅度不大，整体屈曲临界弯矩基本保持稳定。因此，划痕宽度并不是影响管道极限弯矩承载力的主要因素。

3.5.3 划痕深度的影响

为分析划痕深度对含划痕-凹陷组合缺陷管道极限弯矩承载力的影响，在划痕长度100 mm、宽度10 mm条件下，计算得到划痕深度为1~8 mm时管道的屈曲临界弯矩，如图10所示。可以看出，随着划痕深度的增加，管道屈曲临界弯矩呈现出明显的下降趋势。划痕深度为1 mm时，管道的屈曲临界弯矩为6 603 kN·m，而划痕深度为8 mm时，管道的屈曲临界弯矩为6 515 kN·m，管道屈曲临界弯矩降低了1.3%。可见，划痕深度对含划痕-凹陷组合缺陷管道的极限弯矩承载力具有一定的影响。

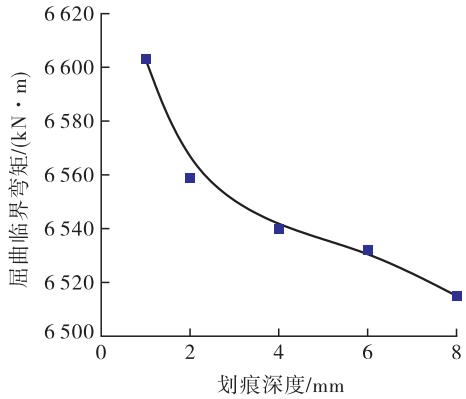


图10 管道屈曲临界弯矩随划痕深度变化规律

Fig.10 Variation of critical bending moment of pipeline buckling with dent depth

4 结论

（1）相较于平滑凹陷，凹陷和划痕组合缺陷在管道局部造成更大的应力集中，显著削弱了管道的抗弯能力。随着划痕深度和长度的增加，管道的屈曲临界弯矩逐渐减小。相对而言，划痕长度对管道抗弯能力的影响大于划痕深度。因此，建议在容易遭受地质灾害载荷区域的管道，对内检测到的凹陷缺陷的完整性评估、维修维护时，要特别重视凹陷上是否有划痕缺陷的筛查，消除安全隐患。

（2）凹陷深度增加会降低管道的极限弯曲承载能力，在进行管道安全评估时要重点考虑凹陷深度的影响；壁厚和管径的增加会增强管道的极限承载能力，在地质不稳定区域的管道可以适当

提高设计壁厚，有助于提高其抗屈曲能力。

（3）在一定范围内提高内压可以增强管道的抗弯能力，但是当内压增大到一定程度，管道屈曲临界弯矩将会逐渐减小，因此，在工程中可以适当控制管道运行内压上限，避免过高的内压引起管道抗弯能力的下降。

（4）主要研究了凹陷和划痕的组合缺陷对管道极限弯曲承载能力的影响，但管道工程中还存在其他类型的凹陷缺陷（如腐蚀-凹陷、焊缝-凹陷等），这些组合缺陷的研究尚未涉及，未来将进一步探索这些组合缺陷对管道屈曲的影响规律。此外，针对多参数耦合作用下含划痕-凹陷复合缺陷管道屈曲行为中存在高度非线性问题，后续将开展大量数值计算，并建立屈曲临界弯矩的定量预测模型，为在役管道的完整性评价提供技术支撑。

参考文献：

[1] YAN S T，SHEN X L，JIN Z J，et al.On elastic-plastic collapse of subsea pipelines under external hydrostatic pressure and denting force [J]. Applied Ocean Research，2016，58：305-321.

[2] GHAEDNIA H，DAS S，WANG R，et al. Safe burst strength of a pipeline with dent-crack defect：Effect of crack depth and operating pressure [J]. Engineering Failure Analysis，2015，55：288-299.

[3] NORONHA D B，MARTINS R R，JACOB B P，et al. Procedures for the strain-based assessment of pipeline dents [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping，2010，87(5)：254-265.

[4] 王富祥，杨辉，臧红，等.基于全尺寸试验的管道凹陷回弹回圆行为研究[J].压力容器，2023，40(10)：9-16.
WANG F X，YANG H，ZANG H，et al. Research on spring-back and re-rounding of pipe dent based on full-size tests [J]. Pressure Vessel Technology，2023，40(10)：9-16.

[5] 田野，邹斌，陈翠翠，等.弯曲载荷作用下含错边缺陷管道环焊缝应力计算[J].压力容器，2023，40(1)：61-67.
TIAN Y，ZOU B，CHEN C C，et al.Stress calculation of girth weld of pipeline with misalignment defect under bending load [J]. Pressure Vessel Technology，2023，40(1)：61-67.

[6] 李康帅，郑召典，邵永波，等.含凹陷管道弯曲承载力研究[J].压力容器，2021，38(7)：17-25.
LI K S，ZHENG Z D，SHAO Y B，et al. Study on bending capacity of pipes with indentation defect [J]. Pressure Vessel Technology，2021，38(7)：17-25.

[7] 曾和友，李铁钉，雷波，等.油气管道球阀结构设计改进及性能试验研究[J].流体机械，2023，51(10)：18-23.
ZENG H Y，LI T D，LEI B，et al. Structural design improvement and experimental study of oil and gas pipeline ball valve [J]. Fluid Machinery，2023，51(10)：18-23.

[8] 吴宏飞，姜永明，赵才甫，等.基于熵产的肘形吸入流道对管道泵性能的影响分析[J].流体机械，2023，51(12)：41-48.
WU H F，JIANG Y M，ZHAO C F，et al. Analysis of the influence of the elbow suction passage on pipeline pump performance based on entropy production [J]. Fluid Machinery，2023，51(12)：41-48.

[9] 冯传智，罗雨，许耀波，等.管道全位置焊接机器人结构设计与运动学分析[J].机电工程，2024，41(8)：1489-1499.
FENG C Z，LUO Y，XU Y B，et al. Structural design and kinematics analysis of pipeline all-position welding robot [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering，2024，41(8)：1489-1499.

[10] 宁壮壮，王晓峰，侯国明，等.连接管道直径等参数对旋风分离器性能的影响[J].机电工程，2023，40(10)：1599-1606.
NING Z Z，WANG X F，HOU G M，et al. Effect of connection pipe diameter on cyclone separator performance [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering，2023，40(10)：1599-1606.

[11] ALLOUTI M，SCHMITT C，PLUVINAGE G，et al. Study of the influence of dent depth on the critical pressure of pipeline [J]. Engineering Failure Analysis，2012，21：40-51.

[12] JIAO R，KYRlAKlDES S. Ratcheting and wrinkling of tubes due to axial cycling under internal pressure：Part II analysis [J]. International Journal of Solids and Structures，2011，48(20)：2827-2836.

[13] PAQUETTE J A，KYRlAKlDES S. Plastic buckling of tubes under axial compression and internal pressure [J]. International Journal of Mechanical Sciences，2006，48(8)：855-867.

[14] JIAO R，KYRlAKlDES S. Ratcheting and wrinkling of tubes due to axial cycling under internal pressure：Part I experiments [J]. International Journal of Solids and Structures，2011，48(20)：2814-2826.

[15] 余建星，李骁，徐立新，等.深水海底管道凹陷机理[J].天津大学学报（自然科学与工程技术版），2015，48(11)：1009-1013.

YU J X，LI X，XU L X，et al. Denting mechanism of deepwater pipeline[J]. Journal of Tianjin University：Science and Technology，2015，48(11)：1009-1013.

[16] 郭涵，郭海燕. 坠物碰撞下海底管道凹陷及损伤区域数值模拟研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版)，2020，50(增刊1)：161-166.
GUO H，GUO H Y. Numerical simulation study on the dent and damage zone of the submarine pipeline impacted by falling objects [J]. Periodical of Ocean University of China，2020，50(Sup.1)：161-166.

[17] IFLEFEL I B，MOFFAT D G，MISTRY J. The interaction of pressure and bending on a dented pipe [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping，2005，82(10)：761-769.

[18] BLACHUT J，IFLEFLE I B. Collapse of pipes with plain or gouged dents by bending moment [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping，2007，84(9)：560-571.

[19] BAEK J H，KIM Y P，KIM W S，et al. Load bearing capacity of API X65 pipe with dent defect under internal pressure and in-plane bending [J]. Materials Science and Engineering：A，2012，540：70-82.

[20] 梁瑞，王利新. 横向碰撞载荷下凹陷油气管道的结构行为分析[J]. 兰州理工大学学报，2015，41(2)：76-79.
LIANG R，WANG L X. Structural behavior analysis of oil-gas pipeline indented due to lateral impact load [J]. Journal of Lanzhou University of Technology，2015，41(2)：76-79.

[21] CAI J，JIANG X L，LODEWUKS G. Numerical investigation of residual ultimate strength of dented metallic pipes subjected to pure bending [J]. Ships and Offshore Structures，2018，13(5/6)：519-531.

[22] 陈严飞，侯富恒，黄俊，等. 外压和力偶荷载组合作用下含凹陷缺陷海底管道的局部屈曲和极限弯矩承载力山[J]. 中国石油大学学报(自然科学版)，2022，46(3)：166-173.
CHEN Y F，HOU F H，HUANG J，et al. Local buckling and ultimate moment capacity of subsea pipelines with dent defects under combined loads including external pressure and couple [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)，2022，46(3)：166-173.

[23] 何璇. 含凹陷海底管道屈曲机理的数值模拟[D]. 杭州：浙江大学，2015.
HE X. Numerical simulation of buckling mechanism on dented subsea pipelines [D]. Hangzhou：Zhejiang University，2015.

[24] 张金龙，魏晨亮，王丹丹，等. 基于有限元的海底管道凹陷评价[J]. 化工管理，2024(3)：127-130.
ZHANG J L，WEI C L，WANG D D，et al. Evaluation of subsea pipelines with dent defects based on the finite element method [J]. Chemical Enterprise Management，2024(3)：127-130.

[25] LIMAM A，LEE L H，KYRlAKlDES S. On the collapse of dented tubes under combined bending and internal pressure [J]. International Journal of Mechanical Sciences，2012，55(1)：1-12.

[26] SHUAI Y，ZHOU D C，WANG X H，et al. Local buckling failure analysis of high strength pipelines containing a plain dent under bending moment [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering，2020，77：103266.

[27] PAREDES M，RUGGIERI C. Engineering approach for circumferential flaws in girth weld pipes subjected to bending load [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping，2015，125：49-65.

[28] SARZOSA D F B，SOUZA R F，RUGGIERI C. *J*-CTOD relations in clamped SE (T) fracture specimens including 3-D stationary and growth analysis [J]. Engineering Fracture Mechanics，2015，147：331-354.

[29] 桂夷斐，马建敏. 弹性介质中受轴向冲击载荷作用的圆柱壳的屈曲临界载荷计算分析[J]. 应用数学和力学，2020，41(4)：353-366.
GUI Y F，MA J M. Buckling critical load calculation and analysis of axially impacted cylindrical shells embedded in elastic media [J]. Applied Mathematics and Mechanics，2020，41(4)：353-366.

作者简介：张俊杰(2000)，男，主要从事油气装备失效分析等方面的研究工作，通信地址：102249 北京市昌平区府学路18号中国石油大学(北京)，E-mail：ayiyuelamian@qq.com。

通信作者：曹胜(1971)，男，经济师，主要从事油气管道等储运设施工程技术与经济性分析方面的工作，通信地址：221008 江苏省徐州市泉山区国家管网集团东部原油储运有限公司，E-mail：caosheng3440@vip.sina.com。

本文引用格式：
张俊杰，曹胜，王俊强，等. 含划痕-凹陷组合缺陷管道屈曲失稳机理及极限承载能力研究[J]. 压力容器，2025，42(4)：56-63.
ZHANG Junjie，CAO Sheng，WANG Junqiang，et al. Study on buckling instability mechanism and ultimate load-bearing capacity of pipelines with dent-gouge combined defects[J]. Pressure Vessel Technology，2025，42(4)：56-63.