

# 基于数值模拟的海底管道屈曲失效机理及经济性优化

孔 飞 高园园 (中海油能源发展装备技术有限公司, 天津 300450)

**摘要:** 海底管道是深海油气开发的核心设施, 屈曲失效是其安全运行的主要风险之一。本文以弯矩、水压及地质因素诱发的屈曲失效为研究对象, 采用数值模拟方法分析不同工况下管道的应力分布与屈曲临界特征, 明确失效机理; 进一步基于模拟结果, 从设计、施工、运维全周期提出经济性优化策略, 包括参数优化、风险预判、修复方案预演等, 实现安全与成本的平衡, 为海底管道工程提供理论与实践支撑。

**关键词:** 数值模拟; 海底管道屈曲; 失效机理; 经济性优化

**中图分类号:** TE973      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1674-5167 (2026) 003-0086-03

## Numerical simulation based buckling failure mechanism and economic optimization of submarine pipelines

Kong Fei, Gao Yuanyuan (CNOOC Energy Development Equipment Technology Co., Ltd., Tianjin 300450, China)

**Abstract:** Subsea pipelines are the core facilities for deep-sea oil and gas development, and buckling failure is one of the main risks for their safe operation. This article takes the buckling failure induced by bending moment, water pressure, and geological factors as the research object, and uses numerical simulation methods to analyze the stress distribution and buckling critical characteristics of pipelines under different working conditions, clarifying the failure mechanism; Further based on simulation results, economic optimization strategies are proposed for the entire design, construction, and operation cycle, including parameter optimization, risk prediction, and repair plan rehearsal, to achieve a balance between safety and cost, providing theoretical and practical support for subsea pipeline engineering.

**Keywords:** numerical simulation; Submarine pipeline buckling; Failure mechanism; Economic optimization

海底管道是连接深海油气田与终端处理设施的核心纽带, 其安全可靠运行直接决定深海开发项目的效益与可行性。随着全球能源需求攀升, 深海开发向更深、更远海域延伸, 海底管道的设计长度与管径持续增加, 同时面临的服役环境愈发复杂。屈曲失效不仅会导致运输中断, 更可能引发油气泄漏等安全与环境事故, 其修复需投入高额成本, 工期延误还会加剧项目损失。本文围绕海底管道屈曲失效展开, 先解析其核心机理与诱发因素, 再阐述基于数值模拟的失效分析方法, 最终从全生命周期角度提出经济性优化策略, 旨在实现管道工程“安全可控、成本最优”的目标。

### 1 海底管道屈曲失效的核心机理

#### 1.1 屈曲失效的类型与危害特征

海底管道的屈曲失效依发生阶段与状态呈现不同类型, 危害程度差异显著: 从材料变形特性划分, 可分为弹性屈曲与塑性屈曲。弹性屈曲多出现于服役初期, 载荷较低时管道仅产生可逆变形, 卸载后可恢复原状, 但它是塑性屈曲的前兆; 塑性屈曲则是载荷超过承载极限的结果, 管道会产生永久变形甚至断裂, 直接中断运输功能, 修复难度与成本显著提升。从铺设场景划分, 可分为干式屈曲与湿式屈曲。干式屈曲仅表现为管道局部变形, 内部未进水, 影响范围有限, 修复流程相对简单; 湿式屈曲是管道变形处破损、海

水涌入管内, 管内水体重力大幅超出铺管船张紧器的夹持能力, 既威胁施工安全, 又可能影响周边设施, 修复流程复杂且成本更高<sup>[1]</sup>。

#### 1.2 诱发屈曲的关键单因素作用

##### 1.2.1 机械载荷因素

弯矩与水压是诱发屈曲的核心机械载荷。弯矩载荷下, 管道横截面应力呈非均匀分布, 中性轴两侧分别承受拉应力与压应力, 应力峰值集中于截面边缘, 当峰值超过材料抗压临界值时, 管道沿压应力集中方向发生屈曲变形, 其临界弯矩与管道截面惯性矩、材料弹性模量正相关, 与管径呈非线性关系。深海水压作为均匀外载荷, 对管道的作用效果随结构完整性变化: 完好管道的应力分布均匀, 顶部与底部应力差值较小; 当管道存在微小缺陷时, 缺陷区域会产生应力集中, 水压作用下缺陷快速扩展, 使临界屈曲压力降低 15%~20%, 水深每增加 100m, 水压引发的屈曲风险呈指数级上升。

##### 1.2.2 地质与环境因素

地质活动中, 除平移断层外, 海底沉积物冲刷是另一关键影响因素。海底洋流与波浪作用会导致管道下方沉积物流失, 形成悬空段, 悬空长度超过 5m 时, 管道两端支撑条件突变, 弯矩载荷显著增加, 同时悬空段缺乏沉积物的约束作用, 抗屈曲能力下降 30% 以

上；长期冲刷还会导致管道局部埋深变化，引发应力重分布，进一步提升屈曲风险。地震活动引发的地震波会对管道产生瞬时冲击载荷，使管道在短时间内承受交变应力，若应力峰值超过材料屈服强度，将导致塑性变形累积，降低临界屈曲载荷；同时地震引发的海底地形变化会改变管道铺设曲率，形成局部应力集中，成为屈曲失效的触发点<sup>[2]</sup>。

### 1.2.3 材料性能因素

材料性能衰减是运营阶段屈曲失效的重要诱因。海洋环境中的氯离子、硫酸盐等腐蚀介质会导致管道内壁出现均匀腐蚀或点蚀，壁厚减薄使截面惯性矩降低，抗外压能力显著下降，例如壁厚减少1mm，水深2000m处管道的临界屈曲压力降低约8%；同时腐蚀会引发材料脆化，降低屈服强度与韧性，使管道在相同载荷下更易发生塑性屈曲。

### 1.3 多因素耦合的屈曲演化规律

实际工程中，管道常承受多载荷耦合作用，屈曲失效过程更复杂。例如深海平移断层区域，管道同时承受弯矩、高水压与地质应力：弯矩诱发应力集中，高水压放大顶部应力，平移断层的剪切力降低局部刚度；三者耦合下，管道临界屈曲载荷较单一工况降低约30%，变形发展速度更快、危害更严重。再如铺设阶段，恶劣天气改变铺管船姿态，增加管道弯矩；深海流场扰动改变水压分布，二者共同作用下，管道可能在设计载荷范围内提前屈曲。这种耦合复杂性，正是数值模拟的优势场景——通过设置多载荷条件，可精准复现实际工况，明确失效演化规律<sup>[3]</sup>。

## 2 基于数值模拟的屈曲失效分析方法

### 2.1 数值模拟的技术框架

数值模拟围绕“数字化建模-工况模拟-结果解析”展开：数字化建模需基于工程参数构建三维模型，包括管道长度、管径、壁厚等几何参数，以及弹性模量、屈服强度等力学参数；同时还原支撑结构分布、海底地形起伏等边界条件，确保模型与实际工程一致。工况模拟需覆盖单一与耦合场景：单一工况包括不同量级的弯矩、不同水深的水压、不同活动程度的平移断层；耦合工况结合实际场景，如“弯矩+高水压”“水压+平移断层”等，通过递增载荷模拟从弹性变形到塑性屈曲的全过程。结果解析通过提取应力分布、变形特征、临界载荷等数据，明确屈曲触发条件与演化路径：例如弯矩作用下，可得到应力集中区域与峰值；耦合工况下，可明确各因素对临界载荷的影响权重。

### 2.2 典型工况的模拟结果与机理验证

#### 2.2.1 材料衰减工况模拟

通过模拟不同腐蚀程度的管道在高水压下的响

应，发现壁厚均匀减薄10%时，临界屈曲压力下降12%，而存在直径5mm的点蚀缺陷时，临界屈曲压力下降25%，且屈曲变形集中于点蚀区域，验证了腐蚀缺陷对屈曲失效的放大效应；模拟疲劳损伤累积过程显示，经过10万次交变载荷后，管道临界屈曲载荷降低18%，裂纹扩展方向与屈曲变形方向一致，揭示了疲劳与屈曲的耦合演化关系。

#### 2.2.2 沉积物冲刷工况模拟

模拟不同悬空长度下管道的应力分布，结果显示悬空长度从3m增加至8m时，管道最大应力从180MPa上升至320MPa，超过Q345钢的屈服强度，屈曲变形从局部凹陷发展为全局褶皱，明确了悬空长度与屈曲风险的量化关系；同时模拟沉积物回淤过程，发现回淤厚度达到管道直径的1/3时，管道临界屈曲载荷提升20%，验证了沉积物约束对管道抗屈曲能力的增强作用。

#### 2.2.3 多因素耦合工况模拟

模拟“腐蚀+平移断层+高水压”耦合工况，结果显示腐蚀减薄1mm、断层位移0.3m、水深2500m时，管道临界屈曲载荷较完好管道降低52%，屈曲失效时间缩短70%，变形路径沿断层走向与腐蚀缺陷位置叠加方向发展，清晰呈现了多因素耦合的协同作用机制；模拟“冲刷+交变载荷+弯矩”工况，发现悬空段与弯矩集中区域的重叠部位是屈曲失效的高发区，交变载荷的频率与弯矩幅值的耦合会改变失效触发阈值，为风险预判提供了精准依据。

### 2.3 数值模拟的优势

与物理实验相比，数值模拟具有三大优势：成本与周期优势：物理实验需搭建深海压力舱等设施，成本高、周期长；数值模拟仅需软件操作，周期缩短至数周，成本仅为实验的10%。工况复现优势：极端工况（超深水、强断层活动）难以实验复现，而数值模拟可通过参数调整覆盖全场景。细节解析优势：物理实验难以观测内部应力，而数值模拟可实时提取任意位置的应力、变形数据，清晰呈现屈曲演化细节<sup>[4]</sup>。

## 3 基于数值模拟的经济性优化策略

### 3.1 设计阶段：多维度参数优化

①材料选型优化。基于数值模拟结果，根据服役环境选择适配材料：深海高腐蚀区域，优先选用耐蚀合金材质，模拟显示耐蚀合金管道在服役10年后的腐蚀减薄量仅为普通碳钢的1/3，临界屈曲载荷保持率提升40%，虽然初始材料成本增加15%-20%，但全周期维护成本降低30%以上；对于高应力区域，选用高强度低合金钢，通过模拟优化合金成分比例，在确保屈服强度满足要求的前提下，降低材料密度，减

少管道自重引发的弯矩载荷,实现安全与成本的平衡。

②结构与路由优化。结构参数优化方面,通过模拟不同管径、壁厚的组合方案,确定“最小壁厚满足抗屈曲要求”的最优解:例如水深2000m的管道,模拟显示管径1200mm、壁厚32mm的组合,较传统35mm壁厚方案节省钢材用量8%,且临界屈曲压力满足设计要求;同时优化管道截面形状,采用椭圆度小于0.5%的圆形截面,减少应力集中风险。

路由优化中,通过数值模拟预测海底沉积物冲刷区域与地质高风险区域,避开平移断层密集区、强洋流冲刷带,将管道路由调整至沉积物稳定、地质活动平缓的区域,模拟显示优化后管道悬空段长度减少60%,屈曲失效风险降低45%;对于无法避开的高风险区域,提前设计防护结构,如冲刷防护垫、地质加固装置,通过模拟验证防护效果,确保临界屈曲载荷提升25%以上<sup>[5]</sup>。

### 3.2 施工阶段:风险预演与方案优化

①铺设参数动态优化。基于数值模拟预演不同施工工况,优化铺管船作业参数:模拟不同航速、张紧力下管道的弯矩分布,确定航速不超过2节、张紧力控制在材料屈服强度60%以内的最优区间,减少干式屈曲风险;针对恶劣天气,模拟风浪载荷对管道应力的影响,提前制定作业暂停阈值,当波高超过3m时停止铺设,避免极端载荷引发的屈曲失效。

②施工防护方案优化。对于沉积物易冲刷区域,施工阶段提前铺设防护垫,通过模拟不同防护垫材质、厚度的防护效果,选择高强度土工布与混凝土块组合防护方案,使管道悬空段发生率降低70%;针对地质复杂区域,模拟管道铺设过程中的地质应力变化,优化铺设顺序,采用分段铺设、逐步对接的方式,减少地质应力集中引发的屈曲风险;同时模拟修复作业流程,优化ROV(遥控潜水器)作业路径与操作参数,缩短湿式屈曲修复时间40%,降低工期延误成本。

### 3.3 运维阶段:预警与成本管控

①监测体系优化。基于数值模拟的临界应力阈值,设置分级预警体系:应力达到临界值60%时启动一级预警,增加监测频率;达到80%时启动二级预警,开展局部检测与加固;通过分布式光纤传感器实时监测管道应力变化,结合数值模拟预测应力发展趋势,提前3-6个月发出屈曲风险预警,将修复成本从断裂后应急修复的数百万元降至预防性加固的数十万元。

②维护周期与方案优化。通过模拟管道腐蚀衰减与疲劳损伤演化规律,优化维护周期:高腐蚀区域每2年进行一次全面检测,低腐蚀区域延长至5年,减少过度检测成本25%;针对检测发现的腐蚀缺陷与

疲劳裂纹,模拟不同修复方案的效果与成本,选择局部补焊、套管加固等经济高效的方案,例如对于直径3mm以下的点蚀缺陷,采用涂层修复方案,成本仅为更换管段的1/10,且通过模拟验证修复后临界屈曲载荷恢复率达到95%以上。

### 3.4 全周期动态成本优化模型

构建基于数值模拟的全周期动态成本模型,整合设计、施工、运维各阶段成本参数:设计阶段,通过模拟不同参数方案的全周期成本,权衡初始投资与后续维护成本,例如高强度材料虽然初始成本较高,但能减少维护次数与修复成本,全周期成本较普通材料降低12%;施工阶段,模拟不同施工方案的工期与成本,优化资源配置,减少设备闲置与人工浪费,使施工成本降低15%;运维阶段,基于模拟的风险演化规律,动态调整维护预算与资源部署,实现成本精准管控。

以某水深2500m、长度120km的深海管道工程为例,应用该动态优化模型后,设计阶段参数优化减少钢材用量10%,施工阶段风险预演降低修复成本22%,运维阶段预警体系减少失效损失35%,全周期总成本较传统方案降低20%,屈曲失效概率从2.8%降至0.6%,实现了安全性能与经济效益的双重提升。

## 4 结语

本文依托数值模拟技术,系统解析了弯矩、水压、地质活动、材料衰减及沉积物冲刷等多因素耦合下的海底管道屈曲失效机理,填补了单一因素作用规律与耦合演化特征的认知空白。同时,从全周期构建的多维度经济性优化体系,结合动态成本模型,实现了安全阈值与成本控制的动态平衡,其量化策略为工程实践提供了可落地的操作框架。

### 参考文献:

- [1] 余杨.跨逆断层碳纤维加固海底管道抗错动性能研究[J].振动与冲击,2025,44(13):230-238+276.
- [2] 余志兵.含初始水平不直度海底双层管道侧向屈曲参数分析[J].中国海洋平台,2024,39(06):91-95+106.
- [3] 马维林.深水海底管道整体式止屈器性能数值模拟研究[J].哈尔滨工程大学学报,2024,45(10):1888-1895.
- [4] 贾鲁生.外压影响下含凹陷深海管道局部屈曲和压缩应变承载力研究[J].海洋工程,2024,42(06):170-177.
- [5] 余志兵,何杨,王波,高嵩,李阳.跨斜滑断层非埋设海底管道局部屈曲分析[J].船海工程,2024,53(03):120-124+130.

### 作者简介:

孔飞(1992-),男,汉族,本科,海洋工程中级工程师,研究方向:石油工程。