

# 油气井管柱安全服役评价技术研究现状及进展

鲁佳伟<sup>1</sup>, 饶瀚博<sup>1</sup>, 韩帅定<sup>1</sup>, 周茂佳<sup>1</sup>, 陈相兵<sup>1</sup>, 黄博深<sup>1</sup>, 周静怡<sup>1</sup>, 苏琴<sup>2</sup>, 吴挺旭<sup>1</sup>, 任家乐<sup>1\*</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>重庆科技大学化学化工学院, 重庆

收稿日期: 2026年4月3日; 录用日期: 2026年5月2日; 发布日期: 2026年5月14日

## 摘要

油气井管柱作为油气生产与流体注入的核心通道, 其服役安全直接决定井筒完整性、生产效率与工程安全性。在高温高压、腐蚀介质、复杂载荷及长期交变工况的叠加作用下, 管柱易发生腐蚀、变形、泄漏、断裂等失效形式, 严重威胁井筒全生命周期安全。本文重点聚焦多场耦合失效机理与智能化监测评价方法, 系统梳理管柱服役安全的核心影响因素, 总结失效机理、评价方法、监测技术与防护措施国内外研究进展, 对比现有技术优缺点, 指出当前面临的技术瓶颈, 并对未来发展方向进行展望。研究表明, 管柱安全服役评价已从单一因素分析向多场耦合、全生命周期、智能化方向演进, 腐蚀与力学耦合失效、在线监测与剩余寿命预测、智能化预警成为研究热点; 现有技术在复杂工况适应性、长效防护、实时预警精度等方面仍存在不足。未来需聚焦多场耦合机理深化、高精度监测装备研发、人工智能与数字孪生融合应用, 推动管柱安全服役评价向精准化、智能化、可视化升级, 为油气高效开发与CCUS、地热等井筒工程安全提供支撑。

## 关键词

油气井管柱, 安全服役, 失效机理, 完整性评价, 智能监测, 剩余寿命

# Research Status and Progress in Safety Service Evaluation Technology for Oil and Gas Well Tubing Strings

Jiawei Lu<sup>1</sup>, Hanbo Rao<sup>1</sup>, Shuaiding Han<sup>1</sup>, Maojia Zhou<sup>1</sup>, Xiangbing Chen<sup>1</sup>, Boshen Huang<sup>1</sup>, Jingyi Zhou<sup>1</sup>, Qin Su<sup>2</sup>, Tingxu Wu<sup>1</sup>, Jiale Ren<sup>1\*</sup>

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

<sup>2</sup>School of Chemistry and Chemical Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

\*通讯作者。

文章引用: 鲁佳伟, 饶瀚博, 韩帅定, 周茂佳, 陈相兵, 黄博深, 周静怡, 苏琴, 吴挺旭, 任家乐. 油气井管柱安全服役评价技术研究现状及进展[J]. 矿山工程, 2026, 14(3): 598-606. DOI: 10.12677/me.2026.143061

## Abstract

As the core channel for oil and gas production and fluid injection, the service safety of oil and gas well tubing strings directly determines wellbore integrity, production efficiency and engineering safety. Under the combined effects of high temperature and high pressure, corrosive media, complex loads and long-term alternating working conditions, tubing strings are prone to failures such as corrosion, deformation, leakage and fracture, which seriously threaten the safety of the wellbore throughout its life cycle. Focusing on the multi-field coupling failure mechanism and intelligent monitoring and evaluation methods, this paper systematically sorts out the core influencing factors of tubing string service safety, summarizes the worldwide research progress of failure mechanisms, evaluation methods, monitoring technologies and protection measures, compares the advantages and disadvantages of existing technologies, points out the current technical bottlenecks, and prospects the future development directions. Studies show that tubing string safety service evaluation has evolved from single-factor analysis to multi-field coupling, full life cycle and intelligent orientation. Coupled corrosion-mechanical failure, online monitoring and residual life prediction, and intelligent early warning have become research hotspots. However, existing technologies still have shortcomings in adaptability to complex working conditions, long-term protection and real-time early warning accuracy. In the future, efforts should focus on in-depth research on multi-field coupling mechanisms, development of high-precision monitoring equipment, and integrated application of artificial intelligence and digital twins, so as to promote the upgrading of tubing string safety service evaluation toward precision, intelligence and visualization, and provide support for the efficient development of oil and gas and the safety of wellbore engineering such as CCUS and geothermal energy.

## Keywords

Oil and Gas Well Tubing String, Service Safety, Failure Mechanism, Integrity Evaluation, Intelligent Monitoring, Residual Life

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

在深层、超深层、非常规油气开发及 CO<sub>2</sub> 地质埋存、地热开采等工程中，井筒管柱长期处于高温、高压、高含腐蚀介质(CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, Cl<sup>-</sup>)、复杂力学载荷(轴向力、内压、外压、弯曲、振动)耦合的严苛环境，服役安全问题日益突出[1]-[4]。管柱失效不仅会导致停产、修井、产量损失，还可能引发流体泄漏、环境污染甚至安全事故[5]。随着井筒工程向深地、复杂地层、低碳资源化利用方向拓展，对管柱服役寿命、安全性与可靠性提出了更高要求[6]。

近年来，国内外学者在管柱失效机理、力学分析、腐蚀评价、完整性监测、寿命预测等方面开展了大量研究，形成了一系列理论、方法与装备[7]-[12]。然而，面对多场耦合、长期交变、多介质共存的复杂工况，仍存在评价精度不足、监测手段有限、防护体系不健全等问题[13][14]。本文聚焦多场耦合失效机理与智能监测评价两大主题，系统梳理技术现状、核心进展、现存瓶颈与发展趋势，旨在为井筒管柱安全设计、施工、运维与延寿提供理论参考与技术支持。

## 2. 管柱安全服役核心影响因素

### 2.1. 力学载荷因素

管柱在全生命周期承受轴向拉力、内压、外压、弯曲、温度应力、活塞效应、鼓胀效应、摩擦效应等复合载荷[15]。起下钻、生产、注气、压裂、关井等工况的交替作用，会引发载荷交变，导致应力集中、疲劳损伤、屈曲变形、螺纹松动与密封失效[16]。在深井超深井、大位移井、水平井中，管柱屈曲、摩阻过大、疲劳断裂风险显著提升，尤其在大曲率井段，弯曲附加应力与轴向载荷的叠加效应极易诱发局部屈服[17]。

### 2.2. 腐蚀环境因素

CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S、高矿化度地层水、酸性流体、注入介质是主要腐蚀介质，可引发均匀腐蚀、点蚀、缝隙腐蚀、应力腐蚀开裂(SCC)、氢致开裂(HIC)、硫化物应力开裂(SSCC)[18]。腐蚀不仅使管柱壁厚减薄、强度下降，还会在材料表面形成微裂纹与缺陷，在力学载荷作用下成为裂纹萌生源，大幅提升失效概率[19]。尤其在含 H<sub>2</sub>S 环境中，硫化物应力开裂具有突发性、脆断性，危害极大[20]。

### 2.3. 结构与材料因素

管柱材质强度、韧性、耐腐蚀性能，螺纹密封结构形式，加工精度，接头质量直接影响服役性能[21]。高强度钢虽可提升承载能力，但对应力腐蚀敏感性增强；不同螺纹结构(如 API 圆螺纹、偏梯形螺纹、特殊气密封螺纹)在密封性能、抗疲劳能力上存在显著差异[22]。劣质材料、密封结构不合理、螺纹损伤易成为失效起源点。

### 2.4. 施工与运维因素

不合理的井下作业、压裂过程中的压力激变、携砂液冲蚀磨损、结垢结蜡堵塞、长期停产导致积液腐蚀、维护不到位等，均会加速管柱性能劣化，降低安全冗余[23]。工程实践表明[24]，相当比例的管柱失效与施工不当或运维疏漏直接相关。

## 3. 管柱失效机理研究进展

### 3.1. 力学失效机理

力学失效以屈曲、疲劳、断裂、密封失效为主[25] [26]。轴向压力过大会引发正弦屈曲、螺旋屈曲，严重时导致管柱锁死或接头过度磨损；交变载荷与温度应力共同作用，易在螺纹根部、壁厚突变处等应力集中区域引发疲劳裂纹扩展[27]。螺纹接头密封失效的核心在于密封面接触比压下降、应力松弛或粘扣，导致密封屏障失效[28]。近年来，学者们建立了考虑几何非线性、接触非线性、温度效应的管柱力学模型，实现了水平井、大位移井、注气井管柱受力的精准分析，为复杂结构井管柱设计提供了理论依据[29]。

### 3.2. 腐蚀失效机理

单一介质腐蚀机理已较为成熟，力学-腐蚀耦合失效成为当前研究的重点[30]-[32]。应力会加速腐蚀坑的形成与扩展，而腐蚀缺陷又会加剧应力集中，形成恶性循环。在 CO<sub>2</sub> 注入井、含硫气井中，超临界流体、多相流与固体颗粒的冲蚀-腐蚀协同作用，使管柱表面损伤速率呈非线性增长[33]。点蚀作为最危险的局部腐蚀形式，其深度与密度直接影响剩余强度与泄漏风险[34]。

### 3.3. 多场耦合失效机理

高温、高压、流体流动、腐蚀介质、力学载荷共同作用下，管柱失效呈现强非线性、强耦合性特征

[26]。温度场改变材料本构关系，压力场影响腐蚀介质分压与相态，流场决定腐蚀产物膜的形成与破坏，应力场主导裂纹萌生与扩展[35]。多场耦合下材料性能劣化、缺陷演化、泄漏通道扩展的机理，是当前管柱安全评价的核心科学问题，也是制约寿命预测精度的关键瓶颈[8]。

## 4. 管柱安全服役评价技术现状

### 4.1. 完整性评价方法

目前已形成以设计校核、强度评定、缺陷评定、剩余寿命预测为主体的评价体系[36]。常用方法包括安全系数法、极限状态法、概率评价法、有限元数值模拟法、损伤力学法、断裂力学法[37]。数值模拟已广泛用于管柱受力分析、密封性能评估、屈曲行为预测及腐蚀扩展模拟[26]。极限状态法将载荷与抗力视为随机变量，引入可靠度指标，使评价结果更符合工程实际[38]。

### 4.2. 剩余强度与剩余寿命评价

基于壁厚测试、缺陷检测、材料性能试验数据，建立剩余强度计算模型与疲劳寿命、腐蚀寿命预测模型[39]-[41]。剩余强度评价通常采用净截面屈服准则、塑性失稳准则或断裂力学方法；寿命预测则涵盖裂纹萌生期与扩展期[42]。部分模型已实现确定性评价与概率评价的结合，通过引入蒙特卡洛模拟等方法量化不确定性，提升评价结果的可靠性[43]。

### 4.3. 螺纹接头密封性能评价

螺纹是管柱最薄弱环节，研究集中在密封结构优化、接触压力分布分析、密封可靠性评价、气密封检测技术等方面[44]-[46]。特殊气密封螺纹通过金属对金属密封结构，大幅提升了高压气井的密封可靠性[47]。室内全尺寸试验与数值模拟相结合的评价流程，已成为螺纹接头研发与选型的重要手段之一[48]。

## 5. 管柱安全监测与检测技术

### 5.1. 井下在线监测

井下在线监测技术主要包括光纤传感(温度、压力、应变、振动)、电磁监测、声波监测等[8]。光纤布拉格光栅可实现关键截面多点应变与温度的精准监测，响应速度快；分布式光纤传感则可实现全井筒分布式测量，其中 DTS 用于温度场监测，DAS 用于振动与声波信号采集，在泄漏识别、气举工况诊断中展现出独特优势[49]-[51]。电磁与声波监测主要用于管柱壁厚、环空液面、泄漏定位等[52]。目前，井下在线监测面临传感器长期稳定性、高温高压环境适应性、数据传输带宽等共性挑战[53]。

### 5.2. 地面与井筒检测

常用检测手段包括多臂井径仪、电磁测厚仪、超声测厚仪、漏磁检测、视觉检测等，通过定期下入工具获取管柱内径、壁厚、腐蚀缺陷、变形等数据[54]。电磁检测对金属损失敏感，超声检测可定量测量壁厚，多臂井径仪对变形与椭圆化有较好识别能力[55]。这类检测技术成熟，但属于离线方式，难以实现实时预警。

### 5.3. 智能化监测系统

基于物联网、边缘计算、云平台，构建管柱安全在线监测 - 数据传输 - 智能分析 - 预警一体化系统，已成为重要发展方向[56]。通过在井口、井下部署多类型传感器，结合实时数据传输与自动分析算法，实现对异常工况的自动识别与报警。部分系统已初步引入机器学习模型，用于失效模式识别与早期预警[57]。

各类监测检测技术的原理与性能对比见表 1。

**Table 1.** Comparison of main monitoring and detection technologies  
**表 1.** 主要监测检测技术对比

技术类型	核心原理	主要特点	技术性能对比
光纤布拉格光栅	光栅反射波长随应变/温度漂移	精度高、响应快，适于关键截面长期监测	精度高；成本中等；可靠性高；适应性较好
分布式光纤传感	光时域反射/散射，连续分布测量	全井筒覆盖、定位精准，数据量大	精度中等；成本高；可靠性受高温影响大；适应性一般
电磁/超声测厚	电磁感应/超声波反射	定量准确、技术成熟，需停井下工具	精度高；成本低；可靠性高；适应性好
多臂井径仪	机械臂接触测量	直观识别变形，仅限内壁检测	精度中等；成本低；可靠性高；适应性差
漏磁检测	缺陷处磁通泄漏信号	对金属损失敏感，适用于铁磁性材料	精度中等；成本低；可靠性中等；适应性一般

## 6. 管柱防护与延寿技术

### 6.1. 材料防护

采用抗硫、抗 CO<sub>2</sub>、抗 H<sub>2</sub>S 腐蚀合金油管、双金属复合管，从材料本质提升耐蚀能力[58]。镍基合金、耐蚀合金在强腐蚀环境中表现优异，但成本高昂[58]；双金属复合管兼顾了基层力学性能与覆层耐蚀性能，在成本与性能之间取得平衡，应用日益广泛[59]。

### 6.2. 表面防护

应用防腐涂层、衬里、渗层、镀覆等技术，阻隔腐蚀介质与管柱基体接触[60]。有机涂层、金属涂层(如铝、锌)、陶瓷涂层等各有适用工况，但涂层在井下易受机械损伤、温度冲击、化学溶蚀，长效可靠性仍是关键制约。

### 6.3. 缓蚀与工艺防护

加注缓蚀剂是当前最灵活、成本相对较低的防护手段，通过形成吸附膜或钝化膜抑制腐蚀反应[61]。优化注采参数、控制压力激变、减少交变载荷、定期检测维护等工艺措施，也可有效延长管柱服役寿命[6]。不同防护技术与评价方法的对比见表 2。

**Table 2.** Comparison of main protection and evaluation methods  
**表 2.** 主要防护与评价方法对比

技术类型	核心原理	主要特点	技术性能对比
耐蚀合金、双金属复合管	选用抗腐蚀材料	本质耐蚀、长效可靠	精度高；成本高；可靠性高；适应性好
防腐涂层	阻隔基体与腐蚀介质	适用性强，易受机械损伤	精度中等；成本低；可靠性低；适应性一般
缓蚀剂加注	表面形成吸附/钝化膜	灵活，需连续注入	精度中等；成本低；可靠性中等；适应性较好
安全系数法	许用应力与工作应力之比	简单易行，偏于保守	精度低；成本极低；可靠性低；适应性好
极限状态法	载荷与抗力概率分布分析	考虑随机性，数据要求高	精度中等；成本中等；可靠性较高；适应性较好

## 7. 现存技术瓶颈

综合上述分析, 当前油气井管柱安全服役评价领域仍面临以下关键技术瓶颈:

1) 多场耦合机理认知不足: 高温高压、腐蚀 - 力学 - 流体多场耦合下管柱损伤演化规律仍不清晰, 现有模型通用性与精度难以满足复杂工况需求。

2) 井下在线监测装备可靠性有限: 长期井下服役的传感器稳定性、环境适应性、使用寿命仍有待提升, 数据传输带宽与井下供电制约了监测系统的效能。

3) 剩余寿命预测精度不高: 现有寿命预测多依赖简化模型, 对复杂工况下材料性能劣化、缺陷演化的表征能力不足, 预测结果误差较大。

4) 智能化评价模型泛化能力弱: 人工智能评价方法高度依赖数据质量与样本量, 现场数据积累不足, 模型跨井、跨区块泛化能力有限。

5) 长效防护技术成本高: 高性能耐蚀材料与长效防护涂层成本高昂, 限制了其在常规油气井中的规模化应用。

6) 全生命周期评价体系不完善: 从设计、选材、施工到运维、弃置的全生命周期安全评价缺乏统一标准与技术规范。

## 8. 发展趋势与展望

面向未来深层复杂油气资源开发与低碳井筒工程需求, 管柱安全服役评价技术将呈现以下发展趋势:

1) 多场耦合机理深化: 聚焦高温高压、腐蚀 - 力学 - 流体多场耦合下管柱材料损伤演化与失效机理, 建立更贴近工程实际的非线性耦合模型, 建立考虑腐蚀产物膜动态演化的热 - 流 - 固 - 化全耦合本构模型, 以及从点蚀到应力腐蚀裂纹转变的定量判据。

2) 高精度感知技术突破: 研发耐高温高压、长期稳定的分布式光纤传感与井下微传感器, 发展无线传输与井下供电技术, 提升在线监测系统可靠性, 研发耐 150°C/100 MPa 以上的光纤传感器封装工艺与长期漂移补偿算法, 以及井下无线供电与低功耗数据传输方案。

3) 智能化评价体系构建: 深度融合人工智能、大数据分析 with 数字孪生技术, 实现管柱缺陷智能识别、剩余寿命动态预测与风险实时预警, 利用迁移学习解决小样本跨区块泛化问题, 发展数字孪生中模型降阶与实时数据同化方法。

4) 全生命周期一体化管控: 建立涵盖设计选型、施工控制、运维监测、延寿决策、弃置评估的全生命周期安全管控体系, 统一数据接口标准, 建立不确定性传递分析方法, 明确弃置阶段管柱完整性判据的量化指标。

5) 低碳场景专用技术研发: 面向 CCUS、地热、储气库等新兴井筒工程, 开发适配超临界 CO<sub>2</sub>、高温热循环等特殊工况的管柱评价与防护技术, 绘制超临界 CO<sub>2</sub> 环境下应力 - 腐蚀 - 冲蚀耦合损伤图谱, 建立长期热循环导致螺纹密封松弛的演化模型。

6) 标准化体系建设: 推动形成统一的管柱安全服役评价方法、监测检测技术、预警指标与防护规范的行业及国家标准, 制定多场耦合仿真结果的验证准则与允许误差范围, 建立智能监测系统的可靠性分级认证标准。

## 9. 结论

油气井管柱安全服役评价是井筒完整性与安全生产的核心保障。当前已形成涵盖失效机理、评价方法、监测检测、防护延寿的技术框架, 正从单一因素分析向多场耦合、从离线评价向在线监测、从经验判断向智能预测的方向演进。面对深层复杂油气开发与低碳井筒工程的需求, 现有技术仍面临机理认知

不足、监测可靠性有限、预测精度不高、智能化程度不足等瓶颈。未来需以多场耦合理论为基础，以高精度感知为手段，以人工智能与数字孪生为支撑，构建精准化、智能化、全生命周期的管柱安全服役评价体系，为油气高效开发与井筒工程长期安全提供坚实技术保障。

## 参考文献

- [1] Fan, X., Hu, Q. and Frank Cheng, Y. (2025) Corrosion and Material Degradation in Geological CO<sub>2</sub> Storage: A Critical Review. *Engineering*, **48**, 41-58. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2025.02.021>
- [2] Citalingam, K., Zeinjahromi, A., Salmachi, A., *et al.* (2025) Wellbore Interface and Cement Defects in CO<sub>2</sub> Geological Storage: A Review. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, **16**, 332-352.
- [3] Zhang, N., Li, Y., Tang, G., Gong, H., Zhu, D. and He, Q. (2025) Prediction of Corrosion Remaining Life of Completion Tubing in High-Sour-Gas Wells. *Processes*, **13**, Article 3569. <https://doi.org/10.3390/pr13113569>
- [4] 付安庆, 史鸿鹏, 胡焱, 等. 全尺寸石油管柱高温高压应力腐蚀/开裂研究及未来发展方向[J]. 石油管材与仪器, 2017, 3(1): 40-46.
- [5] Kiran, R., Teodoriu, C., Dadmohammadi, Y., Nygaard, R., Wood, D., Mokhtari, M., *et al.* (2017) Identification and Evaluation of Well Integrity and Causes of Failure of Well Integrity Barriers (A Review). *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **45**, 511-526. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2017.05.009>
- [6] 冯耀荣, 付安庆, 王建东, 等. 复杂工况油套管柱失效控制与完整性技术研究进展及展望[J]. 天然气工业, 2020, 40(2): 106-114.
- [7] 高德利, 黄文君. 井下管柱力学与控制方法若干研究进展[J]. 力学进展, 2021, 51(3): 620-647.
- [8] 花靖, 靳彦欣, 闫柯乐, 等. 油气井井下管柱损伤检测技术现状及展望[J]. 安全、健康和环境, 2026, 26(2): 1-11.
- [9] 宋学锋, 李志彬, 刘金铭, 等. 深层深井井筒完整性检测技术发展现状[J]. 新疆石油天然气, 2024, 20(4): 8-18.
- [10] Qi, W., Gao, Q., Zhao, Y., Zhang, T. and Wang, F. (2021) Insight into the Stress Corrosion Cracking of HP-13Cr Stainless Steel in the Aggressive Geothermal Environment. *Corrosion Science*, **190**, Article ID: 109699. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109699>
- [11] Yang, X., Shen, X., Cui, X., Wang, K., Shen, G., Wang, Z., *et al.* (2020) Stress and Deformation Characteristics of Completion and Testing Tubing String with Expansion Joints for Ultra-Deep HTHP Gas Wells. *Natural Gas Industry B*, **7**, 101-108. <https://doi.org/10.1016/j.ngib.2019.06.005>
- [12] Chen, S., You, H., Xu, J., Wei, M., Xu, T. and Wang, H. (2025) Leakage Monitoring of Carbon Dioxide Injection Well String Using Distributed Optical Fiber Sensor. *Petroleum Research*, **10**, 166-177. <https://doi.org/10.1016/j.ptlrs.2024.08.003>
- [13] Long, W., Wang, X., Hu, H., Lu, W., Liu, L., Zhou, M., *et al.* (2023) Primary Corrosion Cause of P110S Steel Tubing Corrosion Thinning in CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>S Well and Its Remaining Life Prediction. *Processes*, **11**, Article 333. <https://doi.org/10.3390/pr11020333>
- [14] 郭少坤, 李军, 连威, 等. CCUS 地质封存井筒完整性研究进展及发展建议[J]. 石油钻探技术, 2025, 53(1): 144-154.
- [15] 李昂, 郝涛, 檀朝东, 等. 注水井管柱轴侧向力耦合模型及安全评价研究[J]. 石油机械, 2022, 50(5): 134-141.
- [16] Zhou, X., He, S., Tang, M., Fang, L., Zhou, X. and Liu, Z. (2019) Mechanism of Collapse Failure and Analysis of Yield Collapse Resistance of Casing under Combined Load. *Engineering Structures*, **191**, 12-22. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.03.078>
- [17] 黄文君, 高德利. 大位移井规律性阻卡力学机理与控制措施研究[J]. 石油科学通报, 2020, 5(1): 49-57.
- [18] 杨利萍, 王建海, 李海霞, 等. 酸气回注井管柱剩余寿命预测及选材研究[J]. 石油与天然气化工, 2020, 49(4): 62-68.
- [19] 杨晓龙, 田永强, 王旭, 等. 某 N80 油管接箍腐蚀断裂失效分析[J]. 焊管, 2022, 45(1): 42-48.
- [20] Ziomek-Moroz, M. (2011) Environmentally Assisted Cracking of Drill Pipes in Deep Drilling Oil and Natural Gas Wells. *Journal of Materials Engineering and Performance*, **21**, 1061-1069. <https://doi.org/10.1007/s11665-011-9956-6>
- [21] 黎文奇, 刘洋, 管锋, 等. 复合载荷下小尺寸高强度钻杆螺纹的优化设计与研究[J]. 塑性工程学报, 2025, 32(8): 248-259.
- [22] 袁军涛, 韩燕, 李轩鹏, 等. 深层高含硫气井高强度低合金钢油井管技术现状及展望[J]. 天然气工业, 2024,

- 44(11): 127-135.
- [23] Bunge, J.M., Coloschi, M., Cravero, S., Valdez, M., Reichert, B. and Grimaldo, C. (2022) Coiled Tubing Premature Failure—The Effects of Pressure and Strain. *SPE/ICoTA Well Intervention Conference and Exhibition*, The Woodlands, 22-23 March 2022, SPE-208996-MS. <https://doi.org/10.2118/208996-ms>
- [24] 龚宁, 弋旭博, 张志涛, 等. 孤岛油田绕丝筛管充填防砂常见故障分析与处理[J]. 石油天然气学报, 2011, 33(3): 144-146, 170.
- [25] 安超. 垂直井管柱正弦和螺旋屈曲慢动力法研究[D]: [硕士学位论文]. 大庆: 东北石油大学, 2016.
- [26] 高德利, 李宁, 黄文君, 等. 超深井套管柱力学与控制研究若干进展及展望[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2026, 50(1): 84-98.
- [27] Albdiry, M.T. and Almensorry, M.F. (2016) Failure Analysis of Drillstring in Petroleum Industry: A Review. *Engineering Failure Analysis*, **65**, 74-85. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.03.014>
- [28] 马亮. 高压深井特殊螺纹油管接头上扣性能分析及密封性研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安石油大学, 2016.
- [29] Wu, B., Zhang, Q., Li, J., Ding, L., Wang, J. and Lian, Z. (2021) Study on Nonlinear Buckling Behavior of Tubing String in HPHT Gas Wells. *Arabian Journal for Science and Engineering*, **47**, 11439-11451. <https://doi.org/10.1007/s13369-021-06214-1>
- [30] Wu, Z., Wang, C., Wang, Y., Si, T., Kang, J. and Yuan, G. (2025) Effects of Manganese and Chromium on Sulfide Stress Cracking in 125 ksi Grade High-Strength Low-Alloyed Steel for Oil Country Tubular Goods. *Corrosion Science*, **245**, Article ID: 112718. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2025.112718>
- [31] Tian, Y., Luo, Z., Zeng, T., Shi, X., Yan, W. and Zhao, M. (2024) Microstructural Characterizations and Sulfide Stress Cracking Susceptibility of a High-Strength Oil Country Tubular Goods-Purpose Steel under Different Quenching Conditions. *Metallurgical and Materials Transactions A*, **55**, 1160-1173. <https://doi.org/10.1007/s11661-024-07312-z>
- [32] Davydov, A., Zhitenev, A., Devyaterikova, N. and Laev, K. (2021) Influence of Structural Heterogeneity of High-Strength OCTG Tubes on Sulfide Corrosion Cracking Resistance. *Materials Proceedings*, **3**, Article 5. <https://doi.org/10.3390/iec2m-09386>
- [33] Zhao, M., Zhao, Z., Xie, J., Li, X., Song, W., Zhou, J., et al. (2025) The Synergistic Influence of Trace Impurities and Temperature on the Corrosion Behavior of Tubing in Supercritical CO<sub>2</sub> Environment. *Coatings*, **15**, Article 944. <https://doi.org/10.3390/coatings15080944>
- [34] 林思建, 龙伟, 田大庆, 等. 含点蚀缺陷金属压力管道剩余强度的无缝表征模型[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2013, 45(6): 184-187.
- [35] 王兆会, 马兆忠. 热采井温度对套管性能的影响及预应力值计算方法[J]. 钢管, 2007(4): 24-27.
- [36] 张智, 蔡楠, 赵苑瑾, 等. 四川盆地超深高含硫气田井下管柱完整性设计理念与方法[J]. 天然气工业, 2023, 43(4): 148-156.
- [37] 李子丰. 油气井杆管柱力学研究进展与争论[J]. 石油学报, 2016, 37(4): 531-556.
- [38] 樊恒, 闫相祯, 冯耀荣, 等. 基于分项系数法的套管实用可靠度设计方法[J]. 石油学报, 2016, 37(6): 807-814.
- [39] Hsiao, C.P. and Vargas, P.M. (2003) A Statistical Comparison of Corroded Pipe Remaining Strength Assessment Methods for the Accurate Prediction of Burst Pressures. *ASME 2003 22nd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Cancun, 8-13 June 2003, 849-854. <https://doi.org/10.1115/omae2003-37486>
- [40] Li, H., Huang, K., Zeng, Q. and Sun, C. (2022) Residual Strength Assessment and Residual Life Prediction of Corroded Pipelines: A Decade Review. *Energies*, **15**, Article 726. <https://doi.org/10.3390/en15030726>
- [41] 张认认, 杨尚谕, 王建军, 等. 基于蒙特卡洛方法的油气井管柱可靠性评估[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(12): 55-59.
- [42] 孙振铎, 吕松峰, 庞彬, 等. 基于表面裂纹萌生与扩展的疲劳寿命预测模型[J]. 兵器材料科学与工程, 2024, 47(2): 15-23.
- [43] Han, C., Dai, R., Pu, W., Guan, Z., Tian, Q., Zhao, H., et al. (2024) Casing Reliability Evaluation of HTHP Wells via Uncertainty and Stress-Strength Interference Theories. *Iranian Journal of Science*, **48**, 213-227. <https://doi.org/10.1007/s40995-023-01564-x>
- [44] 王怡, 张建兵, 聂艳, 等. 高温高压井用特殊螺纹接头的设计与评价现状[J]. 钢管, 2020, 49(1): 72-76.
- [45] 孔华, 步玉环, 马明新. 特殊螺纹接头锥面/锥面结构密封特性研究[J]. 石油机械, 2011, 39(4): 14-17, 22, 93-94.
- [46] 张颖, 高安琪, 杨坤, 等. 油井管特殊螺纹力学损伤与控制研究进展[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(30): 13172-13180.
- [47] Inose, K., Sugino, M. and Goto, K. (2016) Influence of Grease on High-Pressure Gas Tightness by Metal-To-Metal Seals

- of Premium Threaded Connections. *Tribology Online*, **11**, 227-234. <https://doi.org/10.2474/trol.11.227>
- [48] 唐家睿, 陈鸥, 苑清英, 等. 高温高压气井用油管特殊螺纹接头密封性能研究[J]. 焊管, 2025, 48(4): 54-60+67.
- [49] Chen, S., Jin, J., Shen, J., Guo, X. and Wang, L. (2022) Monitoring Evolution of Temperature and Strain in Cement Sheath Using Embedded Optical Fiber Bragg Gratings. *SPE Journal*, **28**, 19-31. <https://doi.org/10.2118/212264-pa>
- [50] 邹琦, 辛野, 刘志龙, 等. 井下多元参数长效监测光缆管结构的设计与研制[J]. 测井技术, 2024, 48(1): 53-58.
- [51] 张祥. 声波电磁复合式井筒完整性检测系统[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安石油大学, 2022.
- [52] Mata, J., Guevara, Z., Quintero, L., Vasquez, C., Trujillo, H., Muñoz, A., *et al.* (2021) Combination of New Acoustic and Electromagnetic Frequency Technologies Detects Leaks behind Multiple Casings. Case History. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Dubai, 21-23 September 2021, SPE-206383-MS. <https://doi.org/10.2118/206383-ms>
- [53] Mustafa, M.H., Aliraani, B. and Kazi, S. (2025) Fiber Optics Reservoir Monitoring System Sustainability in Extreme Gas Well Conditions. *Middle East Oil, Gas and Geosciences Show (MEOS GEO)*, Manama, 16-18 September 2025, SPE-226875-MS. <https://doi.org/10.2118/226875-ms>
- [54] 杨旭, 刘书海, 李丰, 等. 套管检测技术研究进展[J]. 石油机械, 2013, 41(8): 17-22.
- [55] 武江鸿, 王亮. 电磁探伤和多臂井径综合评价井下管柱的状况[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2014, 34(2): 108.
- [56] Dong, S., Xu, L., Wei, H., Li, Y., Liu, G., Li, F., *et al.* (2026) Progress in Modern Pipeline Safety and Intelligent Technology. *Sustainability*, **18**, Article 1728. <https://doi.org/10.3390/su18041728>
- [57] Wang, Y., Zhang, Z., Lu, M., Qin, J. and Qin, G. (2025) Interpretable Failure Prediction Modeling of Hydrogen-Blended Natural Gas Pipelines Containing a Crack-In-Corrosion Defect. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **98**, Article ID: 105744. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2025.105744>
- [58] Wang, X., Wang, G., Wang, W., Liu, X., Liu, Y., Jin, Y., *et al.* (2025) Enhancing Corrosion Resistance of Nickel-Based Alloys: A Review of Alloying, Surface Treatments, and Environmental Effects. *Journal of Alloys and Compounds*, **1032**, Article ID: 181014. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.181014>
- [59] 聂向晖, 李亮, 刘迎来, 等. 双金属复合钢管的生产工艺及工业应用[J]. 石油管材与仪器, 2017, 3(1): 14-17.
- [60] 赵毅, 许艳艳, 朱原原, 等. 油气集输管道内防腐技术应用进展[J]. 装备环境工程, 2018, 15(6): 53-58.
- [61] 万红敬, 王晓梅, 黄红军, 等. 缓蚀剂作用机理研究进展[J]. 材料保护, 2013, 46(S1): 112-114.