文章编号:1673-2677(2026)01-0033-07 DOI:10.12388/j.issn.1673-2677.2026.01.004
引用:李晓,赵宇航,张辉,等. 井筒完整性研究现状与技术进展[J]. 新疆石油天然气,2026,22(1):33-39.
Cite: LI Xiao, ZHAO Yuhang, ZHANG Hui, et al. Research status and technical progress of wellbore integrity[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2026, 22(1): 33-39.

井筒完整性研究现状与技术进展

李晓[1],赵宇航[2],张辉[2],吴永川[1],郑挺[1],张懿[1],郑方见[1],陈琦[2]
(1.中海油田服务股份有限公司一体化和新能源事业部,天津塘沽 300459;2.中国石油大学(北京)石油工程学院,北京昌平 102249)

摘 要:井筒完整性是确保油气井在整个生命周期内安全和可持续运营的关键因素。随着全球能源开发向深地、深海及复杂地质条件区域拓展,高温高压、高应力及腐蚀性介质等极端条件对井筒屏障系统提出了前所未有的挑战。近年来,新材料的发展、智能监测技术的应用和风险评估模型的创新,推动井筒完整性研究在材料性能提升、监测与预测智能化以及失效风险管理等方面取得了显著进展。围绕耐高温高压材料、抗氢渗透复合材料、智能传感器与大数据预测模型,以及多因素风险评估方法等方面的研究现状,探讨了当前面临的材料长期耐久性验证、智能监测系统可靠性、多尺度模型适用性等技术挑战,以及面向碳中和背景下新兴应用场景带来的特殊要求。该成果可为油气安全开发及能源转型中的地下储运设施完整性管理提供参考。

关键词:井筒完整性;井筒材料;智能监测;风险评估;发展方向
中图分类号:TE28 **文献标识码**:A

Research Status and Technical Progress of Wellbore Integrity

LI Xiao[1], ZHAO Yuhang[2], ZHANG Hui[2], WU Yongchuan[1], ZHENG Ting[1], ZHANG Yi[1], ZHENG Fangjian[1], CHEN Qi[2]
(1. Integration Solution & New Energy Division, China Oilfield Services Limited, Tanggu 300459, Tianjin, China; 2. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Changping 102249, Beijing, China)

Abstract: Wellbore integrity is a key factor to ensuring the safe and sustainable operation of oil and gas wells throughout the life cycle. As the global energy exploitation expands to regions with deep formations, deep seas and complex geological conditions, the wellbore barrier system is facing unprecedented challenges due to extreme conditions such as high temperature and high pressure (HTHP), high stresses and corrosive media. Over recent years, great progress has been made in research on wellbore integrity thanks to the development of new materials, applications of intelligent monitoring techniques and innovation of risk assessment models. This paper summarizes the research status of multiple aspects of wellbore integrity, such as HTHP-tolerant materials, composite materials resistant to hydrogen penetration, smart sensors and data-driven prediction models, and multi-factor risk assessment methods. Moreover, it reviews the current challenges in long-term durability validation of materials, reliability of intelligent monitoring systems and applicability of multi-scale models as well as special requirements of emerging application scenarios for Carbon Neutrality. This paper provides references for safe development of oil and gas and integrity management of subsurface storage and transportation facilities for energy transformation.

Key words: wellbore integrity; wellbore materials; intelligent monitoring; risk assessment; development direction

基金项目:国家自然科学基金项目"双壁钻杆反循环钻井延伸极限预测与控制方法研究"(52574017)。
第一作者:李晓(1983-),2007年毕业于中国石油大学(华东)石油工程专业,工程师,中海油服一体化和新能源事业部工程设计研究院项目前期研究所所长,目前从事钻井设计及现场管理工作。(E-mail)cnooc_cosl_lx@163.com
通讯作者:张辉(1971-),2006年毕业于中国石油大学(北京)石油与天然气工程专业,博士,教授,目前从事油气田钻采力学及控制工程与油气井管柱力学研究。(E-mail)cup_zhanghui2024@163.com

井筒作为油气资源开发全生命周期的核心通道，其完整性直接决定了油气田开发的安全性、经济性与环保性。井筒完整性被定义为通过技术、操作及组织管理等综合策略，构建并维持有效的物理与功能屏障，使得整个生命周期内从地面到井底的各层井筒结构保持稳定、连续、无裂缝与泄漏的状态，其核心在于建立和保持至少两套相互独立且可验证的屏障体系[1]。

井筒完整性涉及地质、工程、材料等多学科知识，需要综合考虑地质条件、井筒结构设计、材料性能等因素。当前，全球油气资源开发正不断向地质条件更为复杂的领域拓展，深井、超深井、高温高压（HPHT）井以及深海油田的开发日益普遍，这使得井筒完整性面临前所未有的严峻挑战[2-4]。其中，钻井过程中的施工工艺、井眼轨迹及尺寸变化均会对固井井筒完整性产生显著影响[5]。在生产阶段，井筒需长期承受极端温度（超过180 ℃）、极端压力（100 MPa以上）、复杂地应力及富含硫化氢、二氧化碳等腐蚀性介质的耦合作用，极易诱发套管挤毁、水泥环密封失效（如微环隙、渗透性通道）及环空带压等问题[6-9]。这些失效不仅可能导致巨大的经济损失和产能损失，更可能引发严重的环境与安全事故。为应对这些挑战，国内外学术界与工程界在井筒完整性领域开展了广泛而深入的研究，并在多个方向上取得了显著进展。在材料方面，研发重点从传统水泥转向了新型复合材料及树脂基材料；在监测技术上，随着传感器与物联网技术的发展，井筒状态的实时、智能化监测已成为可能；在风险管控方面，基于大数据、机器学习及多物理场耦合数值模拟的失效预测与风险评估模型，正不断提升完整性管理的预见性与科学性。然而，这些新技术、新方法在实际应用中仍面临长期耐久性验证不足、极端环境下可靠性存疑、多尺度模型适用性有限等共性挑战。

鉴于此，本文系统梳理并综合评述近年来井筒完整性领域的研究脉络与技术进展，主要从以下三个核心维度展开：其一，材料创新与密封技术，分析耐高温高压材料、抗氢渗透复合材料、特种树脂及弃井治理材料的最新发展与应用；其二，智能监测与数据驱动预测，探讨智能传感器网络、基于机器学习的失效预测模型以及多尺度多物理场耦合分析方法的现状与趋势；其三，失效风险管理与评估模型，综述多因素综合风险评估方法及贝叶斯网络等不确定性量化技术的应用。最后，本文剖析了当前研究存在的理论争议与技术瓶颈，并展望了在碳中和背景下，面向二氧化碳地质封存（CCUS）等新兴应用场景对井筒完整性提出的特殊要求与未来发展方向，以期为提升油气田安全开发水平及地下储运设施的长期完整性管理提供系统的理论参考与技术借鉴。

1 材料创新与井筒密封技术

1.1 高温高压材料

高温高压井在国外称为HTHP井，图1为斯伦贝谢、贝克休斯和哈里伯顿三大油田服务公司对高温高压、超高温高压和极超高温高压井设定的地层温度和压力门限值。在高温高压井中，井筒完整性对材料的抗压、耐热性能提出了更高要求。刘书杰等[10]研究了深水高温高压环境下传统水泥材料的局限性，发现常规水泥在该类极端条件下容易出现热膨胀不稳定和开裂的问题。为了应对这些挑战，开发出适用于高温高压条件的新型水泥材料成为解决方案之一。例如，改良型水泥中通过添加特种成分增强了其抗热抗压性能，在深水井筒中取得了显著的效果。此外，研究还表明，通过优化水泥配方和使用纳米材料可以提高水泥的性能和适应性。

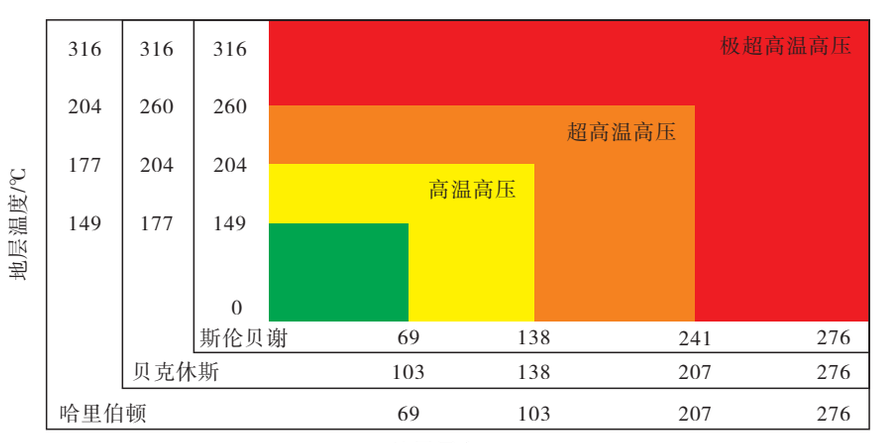


图1 高温高压地层分类

Fig. 1 Classification of HTHP strata

除了水泥材料的改进,其他材料如新型金属合金、复合材料也被引入,以应对高温和高压带来的挑战。例如,加入金属纳米颗粒增强水泥复合材料的热稳定性,这种改良型复合材料展示出更高的强度和耐久性,在极端环境中表现优异。同时,研发人员还在探索不同合金的组合,以增强材料的整体性能,确保其在复杂的地质环境中可靠运行。

1.2　抗氢渗透材料

地下氢储存技术的发展为井筒材料带来了新的挑战。氢气的高渗透性容易导致水泥劣化和密封失效,典型的井筒水泥环劣化和密封失效类型如图2所示。Hussain等[11]和Zamani等[12]的研究表明,氢气对井筒材料的侵蚀问题日益突出,亟需针对性解决方案。开发抗氢渗透的新型水泥和树脂材料成为关键。这些材料在氢气环境中表现出优异的耐氢能力,为氢储存的井筒提供了更好的密封保障。研究人员正在探索如何在水泥中添加各种纳米级填料以改善其物理化学性质,降低氢气的渗透率。

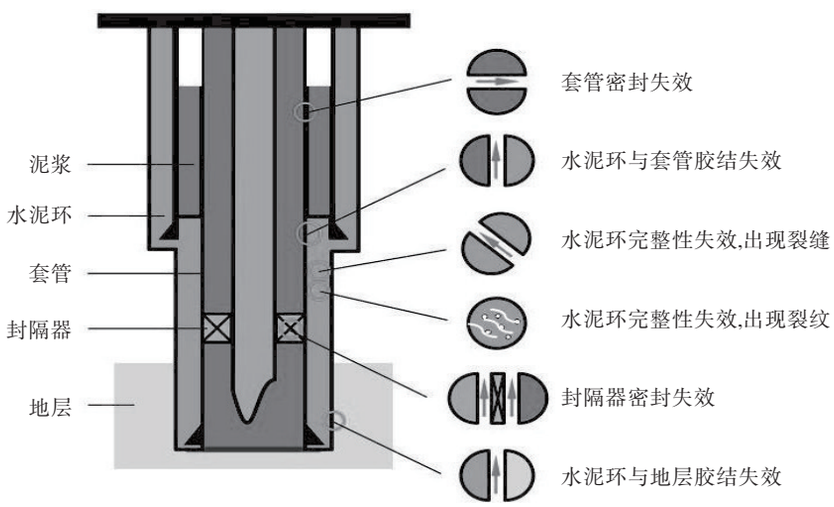


图2　井筒水泥环劣化和密封失效类型

Fig. 2　Types of wellbore cement sheath deterioration and sealing failure

目前,抗氢渗透材料的研发重点在于开发具有低渗透性和高抗腐蚀性的复合材料。例如,研究者致力于在传统水泥配方中加入微米级和纳米级的材料,以增强其密封性能和抗氢扩散的能力。最新的研究还建议采用聚合物改性水泥,这种材料在实验中展示了较好的氢气阻隔能力,尤其是在高温和高压条件下。

1.3　树脂材料应用

树脂材料在腐蚀性地层中展现出了优于传统水泥的特性。Retnanto等[13]指出,树脂材料在酸性环境下的耐腐蚀性和高黏结性能使其成为碳酸盐储层中井筒密封的理想选择。尽管树脂材料表现出优异的耐久性和密封性能,但其高成本和复杂的施工工艺限制了其在广泛应用的可行性。未来的研究可以聚焦于改进树脂的配方,探索新型低成本的树脂材料,以提高经济性。

此外,研究人员也在探索将树脂材料与其他复合材料结合使用,例如与纤维增强材料的结合,以提高其整体性能并降低成本。通过这种复合材料的应用,可以增强井筒的抗冲击性能和抗渗透能力,确保井筒的长期稳定性。树脂材料的进一步优化和实际应用验证将是未来研究的重点,以确保其在不同地质条件下的长期可靠性。

1.4　弃井治理材料

在弃井治理中,井筒完整性的保持同样面临挑战。通过有机材料环氧树脂与水泥浆以一定比例掺混形成的油井用树脂水泥浆,哈里伯顿 LockCem™树脂水泥体系(具体力学性能见表1)被证实能够节省油井弃井的成本。王纯全等[14]研究了油性环氧树脂水泥浆在弃井治理中的应用,特别是在治理环空带压问题方

表1　哈里伯顿LockCem™树脂水泥体系不同配比下力学性能

Tab. 1　Mechanical properties of Halliburton LockCem™ resin cement system in cases of different addition ratios

环氧树脂占比(体积)/%	0	5	25	50	75	95	100
24 h抗压强度/MPa	13.4	12.1	9.7	1.41	ND	ND	ND
48 h抗压强度/MPa	18.4	28	29.7	24	27.4	35.3	18.2
72 h抗压强度/MPa	22.7	28	29.7	37.3	44.4	42.7	15.2
7 d抗压强度/MPa	28.5	35.2	35.9	46.5	57.3	64.2	57.0
7 d弹性模量/GPa	14.0	13.2	10.7	5.8	3.9	3.9	2.7

面。他们发现，油性环氧树脂水泥浆能够有效解决弃井中存在的环空带压问题，提高了弃井的密封性能和长期稳定性。这种材料在施工过程中表现出良好的流动性和强度，适用于多种复杂地层条件。

此外，黄在福[15]在高温高压含硫化氢井的应用实践中探讨了弃井的完整性问题，提出了一系列改进措施来应对高温高压条件下的井筒密封。这些措施包括采用具有更好耐硫化氢腐蚀特性的水泥体系，以及优化固井工艺，以确保弃井在极端条件下的密封效果。针对弃井治理的未来发展，建议结合智能监测技术，对弃井状态进行实时监控，确保长期的完整性和安全性。

2　智能监测与数据驱动预测

2.1　智能传感器与实时监测

智能传感器网络的发展使得对井筒实时数据的采集和分析成为可能。周仕明等[16]强调了智能监测系统在井筒压力、温度和化学反应监测中的应用。智能传感器能够实时采集井下的动态数据，为井筒失效预测提供了重要支持。此外，通过融合分析传感器数据与现场操作数据，可以及时对井筒状况进行预警和评估，避免严重失效的发生。

智能传感器的应用不仅局限于常规的压力和温度监测，还涵盖声发射监测、振动监测、腐蚀传感等新兴技术。这些监测技术的组合可以实现对井筒状况的多方位感知，进而更早地识别潜在的失效迹象，如图3所示，通过井下分布式光纤智能监测系统，可以精确识别井筒温度、应力和应变情况。尽管智能监测系统的应用显示出巨大的潜力，但其在恶劣环境下的长期稳定性仍需进一步验证。

为了提升智能传感器在极端条件下的可靠性，研究人员建议开发具有自我修复能力的传感器材料，并增强其抗干扰能力。例如，在传感器中引入新的纳米涂层技术，使其具有防腐蚀和自我修复的能力，以应对井下的复杂工况。此外，针对深井监测，可以开发更为高效的能量采集和存储系统，以提高传感器的持续运行能力。

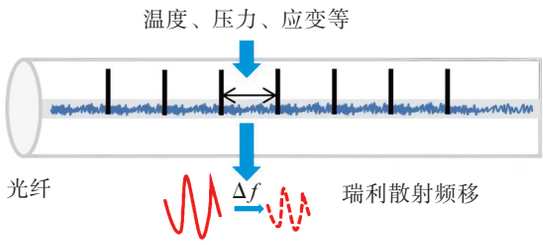


图3　智能监测系统（井下分布式光纤监测原理）

Fig. 3　Intelligent monitoring system (working principles of downhole distributed optical fiber monitoring)

2.2　基于大数据的失效预测模型

丁士东等[17]提出了利用全生命周期数据结合机器学习的方法对井筒失效进行预测。通过积累大量的井筒历史数据，利用机器学习模型能够识别出井筒结构的潜在失效模式，并提前预警。机器学习的应用极大地提高了井筒完整性管理的前瞻性，为决策提供了科学支持。

特别是深度学习模型，能够从海量数据中自动提取特征，显著提高预测准确性，在井筒变形预测等工程场景中展现出极为显著的应用优势。图4展示了典型的深度学习网络模型在井筒变形预测中的技术路线。这些基于神经网络的模型不仅能够捕捉复杂的非线性关系，还能够处理井筒涉及的多种物理场数据。然而，深度学习模型的“黑箱”特性以及对数据量的依赖也带来了挑战，需要在模型的可解释性和鲁棒性方面进行进一步研究。

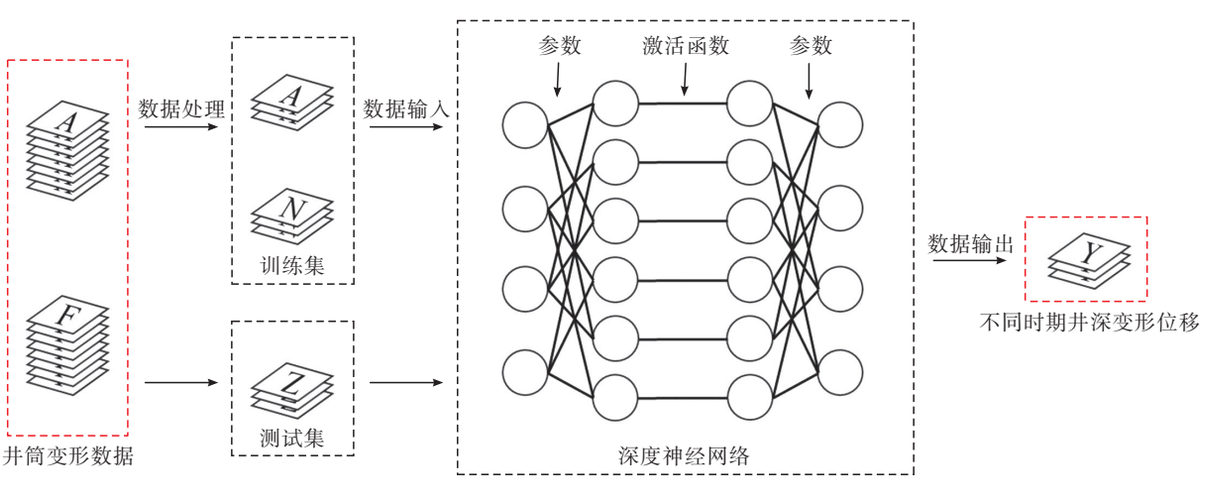


图4　井筒变形预测研究技术路线

Fig. 4　Technical route of wellbore deformation prediction research

为了解决数据稀缺的问题,可以考虑采用迁移学习和增量学习方法。这些方法可以利用已有的井筒监测数据和其他相似井的历史数据提升模型精度。

2.3　多尺度模型与多物理场耦合

Rui等[18]通过多尺度模型和多物理场耦合,将微观材料行为与宏观井筒响应结合,提供了更加准确的井筒失效预测。该模型能够在热-化学-力学耦合条件下评估井筒的长期表现,特别适用于复杂环境。未来,结合多物理场耦合分析将为井筒完整性研究提供更为深入的洞见。

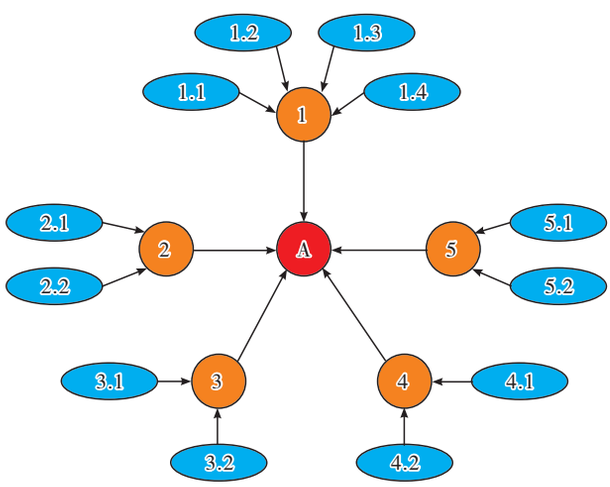
3　失效风险管理与评估模型

3.1　多因素风险评估

张俊成等[19]采用模糊逻辑结合贝叶斯网络等方法进行风险评估,适用于多维度条件下的井筒失效风险量化。但该方法在数据不足的情况下可能产生偏差,未来可以整合更多实测数据以提升模型可靠性。通过对比该模型与其他风险评估模型的结果,探讨其在特定应用场景下的优缺点,将有助于优化风险管理策略。

3.2　贝叶斯网络的应用

贝叶斯网络是一种信度网络,采用具有网络结构的有向无环图来表达各个信息要素之间的关联及相互影响程度,广泛应用于井筒完整性失效风险评估与预测领域,一种典型的井筒完整性失效贝叶斯网络如图5所示。Rui等[20]利用贝叶斯网络处理井筒失效中的不确定性因素,并结合蒙特卡罗模拟增强了预测鲁棒性。这一方法适用于处理多维度因素,但对数据质量依赖较高,建议通过多场景数据扩展提升模型适应性。进一步探索如何结合新的数据源(如实时传感器数据)进行动态更新,以提高模型的准确性和适应性,将是未来的一个重要研究方向。



A　井筒完整性失效
1　管柱失效
1.1　腐蚀环境
1.2　管柱强度不足
1.3　管柱螺纹密封性差
1.4　可能导致套管损坏的地质因素
2　水泥环密封失效
2.1　固井质量差
2.2　作业中可能导致水泥环密封性损坏的因素
3　井口装置失效
3.1　采气树损坏
3.2　井口密封性失效
4　水力屏障失效
4.1　油套环空保护液漏失
4.2　水泥上方保护液漏失
5　其他部件失效
5.1　封隔器密封失效
5.2　井下安全阀失效

图5　井筒完整性风险评估的贝叶斯网络模型

Fig. 5　Bayesian Network for risk assessment of well integrity

4　理论争议与未来发展方向

4.1　材料长期耐久性与多重屏障设计

现有长期研究表明,对于新型材料的长期耐久性仍存在质疑,尤其在高温高压和腐蚀性环境下。多项实验室测试表明,部分纳米增强材料、聚合物改性水泥以及复合材料在短期内具备优异的性能。然而,现实井下环境中的变化和多重因素对材料的老化、劣化及其物理化学性质的影响尚不完全清楚[21-22]。此外,多重屏障设计作为一种提升材料冗余度的策略,是否能够在各种极端条件下实现可靠的井筒完整性,依然缺乏足够的实证支持。建议通过长期现场监测与大规模试验收集材料服役数据,评估不同材料在真实工况下的表现。同时,在材料研发中,基于多重屏障的结构设计也是一个研究热点。结合纳米材料、复合材料等先进材料技术,构建出具有多重保护作用的屏障体系,以延长井筒材料的使用寿命。此外,通过材料力学和环境因素耦合建模,模拟材料在极端环境中的劣化过程,有助于更精确地预测其长期性能[15-16]。

4.2　智能监测系统的适用性

智能监测系统在实验和实际应用中的稳定性仍然备受关注。虽然智能传感器能够提供实时数据和及时预警,但在高温高压或腐蚀性环境中,传感器的长期稳定性和数据传输的连续性存在问题[11,20]。例如,深水井和高温井中的极端环境可能导致传感器损坏,数据传输效率降低,甚至造成监测的中断。此外,传感器材料的可靠性、系统的自修复能力,以及如何处理由海量监测数据带来的数据噪声问题,均存在争

议。未来的研究方向包括研发更具抗干扰能力的传感器材料，例如引入耐腐蚀涂层、纳米复合材料等，以增强其在极端条件下的抗腐蚀、抗高温稳定性。进一步，低功耗和自我修复的智能传感器可以显著提高监测系统的持续运行能力[23]。在数据处理方面，随着人工智能和机器学习的进步，建立高效的数据清洗和分析模型，以滤除噪声、识别关键模式和预测失效风险，将成为智能监测系统发展的关键。多场景实测数据结合深度学习算法的应用，也将进一步提升数据的处理精度与可靠性[20]。

4.3 数据驱动的多尺度模型

多尺度模型和多物理场耦合分析的应用为井筒完整性研究带来了新视角，但也引发了一些理论争议。当前的多尺度模型虽然能够模拟材料从微观到宏观的行为，但其计算复杂度高、数据需求量大，且模型的“黑箱”特性限制了结果的解释性。此外，如何将不同物理场（如热-化学-力学）之间的相互作用准确地耦合在一起，仍是一个技术难题[11,17]。耦合的复杂性可能导致预测结果的可靠性下降，而在缺乏真实数据的情况下，这些多场耦合模型的推广应用受到了质疑。未来可以通过与实验数据的多轮迭代验证，优化多尺度模型的参数和算法结构，以提升其计算效率和预测精度。进一步的发展方向包括采用机器学习算法来自动提取特征，将数据驱动模型与多尺度模拟优势互补，实现更精确的失效预测[13]。此外，可以利用迁移学习等技术，将实验室数据与现场数据结合，改善模型的适应性，使其能够更好地反映井筒在真实环境中的行为。通过不断积累不同条件下的监测数据，逐步构建并完善大数据驱动的动态多尺度模型，从而更有效地预测井筒完整性失效[18,24]。

4.4 新兴应用场景的挑战与要求

在CCUS项目中，注入井和监测井需长期、安全地封存超临界二氧化碳（$scCO_2$）。该介质在高温高压下具有较强的腐蚀性，尤其是遇水形成的碳酸会酸化环境，会对常规水泥和碳钢套管造成严重腐蚀，进而导致胶结界面破坏和管壁减薄，这是CCUS场景下井筒完整性面临的核心风险。同时，封存体在地质构造运动或压力波动下的长期稳定性，也对井筒-地层系统的力学完整性提出考验。为应对这些挑战，未来的发展方向包括：研发耐$scCO_2$腐蚀的固井材料（如高铝酸盐水泥、地质聚合物、抗酸树脂复合材料）和管材；深化对封存条件下水泥-地层-套管多界面长期相互作用机理的认识；发展基于地球物理和化学传感的长期、实时、原位监测技术，以评估封存完整性并预警泄漏风险。

参考文献

[1]高德利，刘奎，王宴滨，等. 页岩气井井筒完整性失效力学机理与设计控制技术若干研究进展[J]. 石油学报，2022，43(12)：1798-1812.
GAO Deli，LIU Kui，WANG Yanbin，et al. Some research advances in the failure mechanism and design & control technologies of shale gas well integrity[J]. Acta Petrolei Sinica，2022，43(12)：1798-1812.

[2]WANG J，ZHANG Z，CHEN X，et al. Research on the impact of overflow well shut-in on wellbore integrity and safety[J]. Geoenergy Science and Engineering，2024，243：213304.

[3]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.
SONG Xuefeng，LI Zhibin，LIU Jinming，et al. Development status of wellbore integrity inspection technology for deep strata and deep wells[J]. Xinjiang Oil & Gas，2024，20(4)：8-18.

[4]MICHAEL A，GUPTA I. Wellbore integrity after a blowout：Stress evolution within the casing-cement sheath-rock formation system[J]. Results in Geophysical Sciences，2022，12：100045.

[5]甘泉，张茂林，张晨，等. 扩眼尺寸在不同工况下的影响分析——以准噶尔盆地南缘H101井为例[J]. 新疆石油天然气，2023，19(3)：10-20.
GAN Quan，ZHANG Maolin，ZHANG Chen，et al. Analysis of the effects for reamer size under different operation conditions：a case study of Well H101 in the southern margin of Junggar Basin[J]. Xinjiang Oil & Gas，2023，19(3)：10-20.

[6]闫炎，管志川，阎卫军，等. 射孔过程中井筒力学响应与完整性失效研究[J]. 石油机械，2022，50(7)：1-9.
YAN Yan，GUAN Zhichuan，YAN Weijun，et al. Mechanical response and integrity failure of wellbore during perforation[J]. China Petroleum Machinery，2022，50(7)：1-9.

[7]练章华，李帅，丁亮亮，等. 高压气井油套环空带压模拟及对井筒完整性影响研究[J]. 安全与环境学报，2022，22(2)：749-755.
LIAN Zhanghua，LI Shuai，DING Liangliang，et al. Study on pressure simulation of sustained casing pressure and its influence on wellbore integrity in high-pressure gas wells[J]. Journal of Safety and Environment，2022，22(2)：749-755.

[8]李军，吴继伟，谢士远，等. 吉木萨尔页岩油井筒完整性失效特点与控制方法[J]. 新疆石油天然气，2021，17(3)：37-43.
LI Jun，WU Jiwei，XIE Shiyuan，et al. Characteristics and control methods of wellbore integrity failure for Jimsar shale oil[J]. Xinjiang Oil & Gas，2021，17(3)：37-43.

[9]ZHENG M, YANG R, ZHANG J, et al. An interface parametric evaluation on wellbore integrity during natural gas hydrate production[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2022, 10(10): 1524.

[10]刘书杰,马传华,唐龙,等. 深水高温高压气井井筒服役安全状态评价[J]. 石油管材与仪器,2023,9(3):58-64.
LIU Shujie, MA Chuanhua, TANG Long, et al. Well integrity risk assessment of deep-water high-temperature and high-pressure gas wells[J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2023, 9(3): 58-64.

[11]HUSSAIN A, EMADI H, THIYAGARAJAN S R, et al. Non-destructive cyclic analysis of sealing ability of well cement for seasonal underground hydrogen storage[J]. Applied Sciences, 2024, 14(17): 7973.

[12]ZAMANI O A M, KNEZ D. Well integrity in salt cavern hydrogen storage[J]. Energies, 2024, 17(14): 3586.

[13]RETNANTO A, YRAC R, CARDENA N, et al. Assessment of resin systems as solution for well integrity challenge in carbonate reservoirs[J]. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 2023, 13(5): 1345-1359.

[14]王纯全,严海兵,张作宏,等. 油性环氧树脂水泥浆弃井治理环空带压的应用[J]. 西部探矿工程,2021,33(12):27-30.
WANG Chunquan, YAN Haibing, ZHANG Zuohong, et al. Application of oily epoxy resin cement slurry in well abandonment treatment of sustained casing pressure[J]. West-China Exploration Engineering, 2021, 33(12): 27-30.

[15]黄在福. 高温高压含硫化氢井的完整性在Y油田钻完井的应用实践[J]. 中外能源,2023,28(10):45-49.
HUANG Zaifu. Application of well integrity management during drilling & completion operations for hydrogen sulfide-containing wells at high temperature and high pressure in Oilfield Y[J]. Sino-Global Energy, 2023, 28(10): 45-49.

[16]周仕明,陆沛青. 井筒密封完整性监测与智能感知技术进展与展望[J]. 石油钻探技术,2024,52(5):35-41.
ZHOU Shiming, LU Peiqing. Advancements and prospects of monitoring and intelligent perception technology for wellbore sealing integrity[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(5): 35-41.

[17]丁士东,陆沛青,郭印同,等. 复杂环境下水泥环全生命周期密封完整性研究进展与展望[J]. 石油钻探技术,2023,51(4):104-113.
DING Shidong, LU Peiqing, GUO Yintong, et al. Progress and prospect on the study of full life cycle sealing integrity of cement sheath in complex environments[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(4): 104-113.

[18]WANG R, KURU E, ZHAO C, et al. Assessment of wellbore integrity failure risk and hazardous zones in depleted reservoirs underground gas storage during the operation processes[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2024, 31(2): 2079-2089.

[19]张俊成,李军,谢士远,等. 考虑井筒完整性的固井方案风险评价方法[J]. 石油钻采工艺,2024,46(1):53-59.
ZHANG Juncheng, LI Jun, XIE Shiyuan, et al. Risk assessment method for cementing program considering well integrity[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2024, 46(1): 53-59.

[20]WANG R, JIN Y, REN D, et al. Risk analysis and assessment of wellbore integrity failure in underground gas storage based on Bayesian Network[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2639(1): 012052.

[21]陈绪龙,牛步能,杜旭,等. 井筒管柱完整性测井评价技术的应用优化[J]. 测井技术,2022,46(4):487-492.
CHEN Xulong, NIU Buneng, DU Xu, et al. Application optimization of wellbore string integrity log evaluation technology[J]. Well Logging Technology, 2022, 46(4): 487-492.

[22]王典,李军,张伟,等. 吉木萨尔页岩油井水泥环性能评价[J]. 新疆石油天然气,2023,19(4):49-55.
WANG Dian, LI Jun, ZHANG Wei, et al. Performance evaluation of the cement sheath in Jimsar shale oil wells[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2023, 19(4): 49-55.

[23]FERNANDEZ D M, EMADI H, HUSSAIN A, et al. A holistic review on wellbore integrity challenges associated with underground hydrogen storage[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 57: 240-262.

[24]DOBLE R, MALLANTS D, HUDDLESTONE-HOLMES C, et al. A multi-stage screening approach to evaluate risks from inter-aquifer leakage associated with gas well and water bore integrity failure[J]. Journal of Hydrology, 2023, 618: 129244.

(修改回稿日期:2025-12-19　编辑:粟刘)