

页岩气水力压裂过程中水泥环裂缝扩展规律研究

黄 熙, 李 猛*, 陶文博, 魏炯宇, 周忠凯, 廖芸嘉

重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2025年5月26日; 录用日期: 2025年8月22日; 发布日期: 2025年9月8日

摘 要

为了提升页岩气井完井固井质量并保障压裂作业安全, 对水力压裂过程中水泥环裂缝扩展规律进行了系统研究。鉴于水泥环在保障系统完整性、井壁稳定性和压裂效果中的关键作用, 分析了温度应力场对组合体力学行为的影响机制。揭示了水泥环厚度、水泥环弹性模量、水泥环泊松比对其自身应力状态的调控规律, 深入探讨水泥环在不同应力状态下的裂缝扩展规律。并且基于多物理场耦合理论, 通过分析理论建模与实验验证相结合的模拟结果, 提出了基于粘聚力模型(CZM)的裂缝扩展预测方法, 实现了压裂过程中水泥环损伤演化的精确模拟。同时构建了包含温度-应力-渗流多场耦合的数值分析体系, 开发了适用于复杂地质条件的裂缝扩展预测模型。研究成果为优化固井工艺参数与井筒完整性保障提供了理论依据, 并展望了高温高压环境下多尺度模拟与智能监测技术的发展方向, 对页岩气安全高效开发具有一定的指导意义。

关键词

页岩气井, 水力压裂, 水泥环裂缝扩展, 温度应力场, 应力状态, 多物理场耦合理论

Study on the Fracture Propagation Mechanisms of Cement Sheath during Shale Gas Hydraulic Fracturing

Xi Huang, Meng Li*, Wenbo Tao, Jiongyu Wei, Zhongkai Zhou, Yunjia Liao

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

Received: May 26th, 2025; accepted: Aug. 22nd, 2025; published: Sep. 8th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 黄熙, 李猛, 陶文博, 魏炯宇, 周忠凯, 廖芸嘉. 页岩气水力压裂过程中水泥环裂缝扩展[J]. 石油天然气学报, 2025, 47(3): 351-358. DOI: 10.12677/jogt.2025.473039

Abstract

To improve the quality of well completion and cementing for shale gas wells and ensure the safety of fracturing operations, this study conducts a systematic research on the crack propagation law of the cement sheath during hydraulic fracturing. Given the critical role of the cement sheath in ensuring system integrity, wellbore stability, and fracturing effectiveness, it analyzes the influence mechanism of the thermal stress field on the mechanical behavior of the composite system. It reveals the regulatory laws of cement sheath thickness, cement sheath elastic modulus, and cement sheath Poisson's ratio on its own stress state, and explores in depth the crack propagation law of the cement sheath under different stress states. Furthermore, based on the multi-physics field coupling theory, by analyzing the simulation results combining theoretical modeling and experimental verification, a crack propagation prediction method based on the Cohesive Zone Model (CZM) is proposed, which realizes the accurate simulation of cement sheath damage evolution during fracturing. Meanwhile, a numerical analysis system involving temperature-stress-seepage multi-field coupling is constructed, and a crack propagation prediction model suitable for complex geological conditions is developed. The research findings provide a theoretical basis for optimizing cementing process parameters and ensuring wellbore integrity, and prospect the development direction of multi-scale simulation and intelligent monitoring technology under high-temperature and high-pressure environments, which have certain guiding significance for the safe and efficient development of shale gas.

Keywords

Coiled Tubing Drilling, Closed-Loop Control, Operational States, Trajectory Correction, Deep Reservoir, Motor Synchronization

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

页岩气水平井分段水力压裂技术是实现非常规油气高效开发的核心手段，而水泥环作为套管与地层间的弹性密封屏障，其力学完整性直接决定压裂作业的安全性与长效性。在压裂过程中，水泥环需承受套管内压、温度骤变及非均匀地应力的多场耦合作用[2] [3]，一旦发生裂缝扩展，将引发环空带压、层间窜流等井筒完整性事故，统计显示 32% 的页岩气井失效源于水泥环密封失效[1]。如何揭示复杂工况下水泥环裂缝扩展的内在规律，成为制约页岩气安全开发的关键科学问题。

随着深层页岩气开发向高温、高压地层延伸，水平井分段压裂技术的广泛应用进一步加剧了水泥环的力学负荷。高压压裂液的周期性注入、长时间施工导致的温度场动态演化，以及多段压裂诱导应力场的叠加，形成了“应力 - 温度 - 渗流”多物理场耦合环境。在此条件下，水泥环的损伤演化呈现高度非线性特征，传统单一力学模型已难以准确描述其裂缝扩展行为，亟需构建多维度的耦合分析框架。

针对上述挑战，本文基于弹性力学与多孔介质耦合场理论，建立考虑温度应力的“套管 - 水泥环 - 地层”组合体力学模型，系统分析温度场对水泥环应力分布的调控机制[2] [3]；通过正交试验量化水泥环厚度、弹性模量、泊松比等参数对应力状态的影响规律[9] [10]；引入粘聚力模型(CZM)并结合 ABAQUS 有限元分析，构建温度 - 应力 - 渗流多场耦合的裂缝扩展预测模型[5] [6]。研究旨在揭示页岩气水力压裂过程中水泥环裂缝扩展的规律，为固井工艺参数优化及井筒完整性监测技术开发提供理论支撑，助力页岩气安全高效开发。

2. 页岩气水力压裂过程中组合体力学模型分析

2.1. 页岩气水力压裂过程中组合体力学模型研究现状

页岩气水力压裂过程中, 套管-水泥环-地层组合体的力学行为直接影响井筒完整性与压裂效率。随着深层页岩气开发的推进, 压裂工况的复杂性(如高温、高压、多物理场耦合)对组合体力学模型的精度提出了更高要求。传统力学模型多忽略温度应力与渗流耦合效应, 仅考虑机械载荷作用, 采用线弹性假设及平面应变简化, 导致预测结果与实际工况存在偏差[7]。随着深层页岩气开发推进, 研究逐步从单一机械模型向多物理场耦合模型演进建立了考虑温度应力的“套管-水泥环-地层”三维力学模型, 分析温度场对组合体应力分布的调控机制, 有利于探讨页岩气水力压裂过程中水泥环的力学响应状况, 为固井工艺优化与压裂安全控制提供理论支撑。

2.2. 不考虑温度应力压裂力学模型研究

在页岩气水平井压裂工况下, 王康构建不考虑温度应力的压裂力学模型时, 基于套管、水泥环、地层均为线弹性材料、水平井分段压裂满足平面应变条件及仅考虑套管内压与地应力机械载荷作用的假设, 未引入温度场影响[2]。模型采用弹性力学平面问题理论, 通过叠加原理将水平井段承受的非均匀应力状态分解为均匀应力分量和偏差应力分量, 分别求解两种应力分量作用下的应力分布, 再线性叠加得到组合系统的总应力分布, 以此分析水泥环在纯机械载荷下的力学响应。

该模型的初步建立成果通过相关研究的数值模拟得到验证: 在同一压裂条件下, 利用 ANSYS 进行数值模拟显示, 水泥环内壁处的 VonMise 等效应力最大值为 37.58 MPa, 位于 $\theta = 50^\circ$ 、 130° 、 230° 、 310° ; 最小值为 28.42 MPa, 位于 $\theta = 0^\circ$ 、 180° , 其等效应力极值点的部位与模型理论计算结果几乎一致, 表明模型能够有效描述不考虑温度应力时水泥环的应力分布特征, 为分析水泥环在机械载荷下的裂缝萌生机制及固井工艺参数优化提供了理论基础。

2.3. 温度应力场的耦合效应

在不考虑温度应力压裂力学模型研究基础上, 王康针对页岩气水平井压裂中温度骤变(ΔT 可达 100°C)引发的热应力问题, 通过引入温度-应力耦合场理论, 系统揭示了温度应力对水泥环力学行为的影响机制[2]。温度应力的产生源于水泥环与套管、地层的热膨胀系数差异, 导致组合体内部产生不均匀变形。根据弹性力学理论, 温度应力的计算公式为:

$$\sigma_r^T = \frac{\alpha E \Delta T}{1-2\mu}, \quad \sigma_\theta^T = \frac{\alpha E \Delta T}{1-2\mu}, \quad \sigma_z^T = \frac{\alpha E \Delta T}{1-2\mu} \quad (1)$$

式(1)中, σ_r^T , σ_θ^T 和 σ_z^T 分别为温度应力的径向、周向和轴向分量, α 为水泥环的热膨胀系数(约 $10^{-5}/^\circ\text{C}$), E 为弹性模量(21 GPa), μ 为泊松比(0.3)。温度应力为压应力, 其数值随温度梯度增大而线性增加。例如, 当 $\Delta T = 50^\circ\text{C}$ 时, 温度应力可达 -30 MPa, 导致水泥环内壁的总周向应力显著增加。这种温度应力与机械载荷的叠加效应显著改变水泥环应力状态。

王康通过构建温度-应力耦合模型, 将机械载荷(套管内压、地应力)与温度应力线性叠加, 发现温度应力的引入使水泥环内壁 VonMises 等效应力从 33.84 MPa 增至 35.68 MPa, 增幅达 6.94% [2], 且应力极值位置从 $\theta = 50^\circ$ 偏移至 $\theta = 60^\circ$ 、 120° 、 240° 、 300° 等方位, 打破了单纯机械载荷下的应力分布对称性[3]。这种应力场重构加剧了水泥环受力不均, 导致临界压裂压力从 103 MPa 降至 100 MPa, 抗裂阈值降低[3]。通过 ANSYS 数值模拟验证, 考虑温度应力的模型预测结果与理论计算高度吻合, 证实了温度-应力耦合效应在裂缝扩展中的关键作用。王康的研究首次将温度场转化为等效载荷纳入力学分析框架, 揭示了多物理场耦合对水泥环完整性的劣化机制, 为固井工艺中温度敏感性参数优化提供了核心理论依据。

2.4. 考虑温度应力时的页岩气水力压裂力学研究

为验证温度-应力耦合模型的准确性,徐申奇通过室内模拟实验,在恒定温度梯度($\Delta T = 50^{\circ}\text{C}$)与非均匀地应力条件下对水泥环试样加载测试,发现当套管内压达 100 MPa 时,水泥环内壁微裂缝萌生位置及临界压裂压力与数值模拟结果高度吻合,声发射监测进一步证实裂缝起始方位与模型预测的应力极值区域一致[3]。徐璧华等针对高温对界面胶结的影响展开研究,发现 150°C 条件下水泥环与地层界面剪切强度从 2 MPa 降至 1.7 MPa,退化幅度达 15%,揭示了温度通过弱化界面胶结间接加剧裂缝扩展的风险[10]。此外,超深储层真三轴实验结合 CT 扫描技术,验证了高温(250°C)下热应力主导裂缝扩展方向的规律,为模型在复杂工况下的适用性提供了实验支撑[3][10]。

3. 水泥环应力状况影响因素研究

3.1. 水泥环应力状况影响因素研究现状

已有研究表明,水泥环作为套管与地层间的关键屏障,其应力状态直接决定裂缝扩展风险与井筒失效模式。针对水泥环应力状况及其影响因素已有初步研究,包括非均匀地应力下水泥环的应力分布规律、失效破坏形式等,其中,水泥环厚度、弹性模量及泊松比是影响其完整性的核心参数。例如,过薄的水泥环易因应力集中引发开裂,而弹性模量与地层不匹配则会加剧界面应力失衡。下面我们主要就水泥环力学物理参数对其自身完整性的影响规律进行探讨。包括水泥环厚度、弹性模量、泊松比在内的一些因素会对水泥环的应力状况产生的影响,从而分析对套管、水泥环和地层组合体的完整性产生影响。

3.2. 水泥环厚度的应力调控与裂缝扩展规律

水泥环厚度与应力状态呈非线性关系,其核心规律表现为内壁等效 VonMise 应力随厚度增加先减小后增大,最优力学状态出现在厚度 20~60 mm 区间[2][9]。

当厚度过薄(<20 mm)时,水泥环刚性不足,无法有效缓冲套管内压与地应力,导致内壁应力集中(如弹性模量 20 GPa、泊松比 0.17 时,10 mm 厚度应力达 42.5 MPa),超过水泥环抗拉强度阈值(约 35 MPa),极易引发拉伸裂缝[9]。

而厚度过大(>60 mm)时,水泥环与地层的刚度差异会加剧界面剪切应力,导致应力二次升高(如弹性模量 20 GPa、泊松比 0.25 时,80 mm 厚度应力回升至 38.7 MPa),可能诱发界面脱粘型裂缝[2]。

参数对比表明,当水泥环弹性模量低于地层($E_r = 15 \text{ GPa}$)且泊松比高于地层($\mu_r = 0.25$)时,50 mm 厚度下应力峰值最低(32.5 MPa),裂缝风险最小;反之,当弹性模量高于地层且泊松比低于地层时,应力峰值达 44.3 MPa,接近水泥环屈服强度(45 MPa),裂缝扩展风险显著增加[2][9]。

3.3. 水泥环弹性模量的应力调控与裂缝扩展规律

弹性模量是影响水泥环应力状态的关键本构参数,其与地层的相对大小直接决定应力集中程度。研究表明,水泥环内壁最大等效 VonMise 应力与其弹性模量呈显著正相关,弹性模量越高,应力值越大。当水泥环厚度固定为 50 mm,泊松比低于地层($\mu_r < \mu_s$)时,弹性模量从 15 GPa 增至 20 GPa,内壁应力增幅达 20%;而当泊松比高于地层($\mu_r > \mu_s$)时,应力增幅约 15% [9]。值得注意的是,当弹性模量低于地层时,应力对模量变化的敏感性更高,小幅度调整即可引发显著应力波动。这种应力差异直接影响裂缝起裂阈值:弹性模量高于地层的水泥环在压裂中更易达到临界应力,导致裂缝提前萌生,而低弹性模量水泥环可通过柔性变形缓解应力集中,降低裂缝风险[2]。郭辛阳等[9]通过实验证实,饱和水泥石弹性模量衰减会加剧完整性劣化,进一步支持弹性模量匹配地层的必要性。

3.4. 水泥环泊松比的应力调控与裂缝扩展规律

泊松比通过影响材料横向变形能力调控应力分布,其核心规律为内壁最大等效 VonMise 应力随泊松比增大呈近似线性下降,且与地层泊松比的相对大小无显著关联[2]。王康研究表明,当弹性模量低于地层($E_r = 15 \text{ GPa}$)时,泊松比从 0.17 增至 0.25,应力从 38.5 MPa 降至 32.5 MPa,应力降幅达 18%;当弹性模量高于地层($E_r = 20 \text{ GPa}$)时,应力从 44.3 MPa 降至 38.7 MPa,应力降幅约 15% [2]。这一现象源于泊松比高的材料在受压时横向膨胀更显著,可通过界面挤压增强约束作用,降低周向拉应力。然而,泊松比的优化效果受弹性模量制约:当弹性模量高于地层时,即使泊松比提升,内壁应力绝对值仍显著高于弹性模量匹配地层的工况[2]。徐璧华等[10]研究发现,泊松比通过影响界面剪切应力间接作用于裂缝扩展:高泊松比水泥环可通过增强横向变形约束降低界面剪切应力来维持胶结完整性;而低泊松比则易导致界面微间隙扩展,使胶结强度退化 10%~15%,加剧窜流风险[10]。

3.5. 水泥环力学参数优化

分析包括水泥环厚度、弹性模量、泊松比在内的一些因素会对水泥环的应力状况产生的影响,对水泥环力学参数进行优化应遵循王康[2]提出的“弹性模量低于地层、泊松比高于地层、厚度 20~60 mm”协同原则。郭辛阳[9]的实验数据表明,该参数组合可使水泥环内壁等效应力控制在 35 MPa 以下(低于抗拉强度),同时通过界面胶结强度维持,显著降低裂缝扩展风险。反之,参数失配(如高弹性模量、低泊松比、厚度<20 mm)会使应力集中系数提高 20%~30%,临界压裂压力降低约 3%,这与四川盆地页岩气井现场监测的环空带压案例吻合[10]。

4. 水力压裂过程中裂缝扩展的数值仿真分析与研究

4.1. 水力压裂过程中裂缝扩展的数值模拟研究现状

基于多孔介质耦合场理论与计算力学方法,页岩气水力压裂中水泥环裂缝扩展的数值模拟已从单一机械场分析发展至多物理场耦合研究。早期研究多采用线弹性模型描述水泥环应力分布,但忽略了温度场、渗流场与应力场的动态交互作用[2]。例如,传统模型仅通过叠加原理分解非均匀地应力,求解水泥环在机械载荷下的应力分布,未考虑压裂液注入导致的温度梯度(ΔT 可达 50°C ~ 100°C)对材料性能的影响[3]。随着计算技术的进步,对于裂缝扩展的数值模拟,逐渐引入热-流-固耦合模型,揭示复杂工况下的裂缝扩展机制。例如,闫炎[6]通过构建包含温度-应力-渗流的三维有限元模型,模拟了分段压裂过程中射孔段水泥环的密封完整性,发现温度梯度可使裂缝扩展速度提升 12%,且裂缝分支数量增加 2~3 条。陈祝兴[5]利用 ABAQUS 软件嵌入粘聚力单元,模拟了水平井压裂中水泥环界面窜流现象,结果表明第一界面裂缝扩展长度较第二界面长 8.5 m,验证了界面力学响应的差异性与材料刚度差异的关联。

但现有研究存在以下不足:多数模型忽略温度场对水泥环材料性能的动态影响;界面裂缝扩展的几何形态与压裂液滤失的关联机制尚不明确;针对页岩气储层非均质性的多尺度模型开发不足。本研究将孔压粘聚力单元与多场耦合理论结合,对界面裂缝扩展进行模拟,分析了温度梯度对界面胶结强度退化的影响,为页岩气压裂设计提供了新思路。

4.2. 多孔介质应力-渗流耦合场控制方程的应用

4.2.1. 应力场控制方程

基于 Biot 多孔介质理论构建的耦合控制方程体系,通过整合应力场、渗流场与温度场的动态交互机制,为页岩气水力压裂中水泥环裂缝扩展的数值模拟提供了精细化分析工具。在应力场建模中,有效应力原理通过公式:

$$\sigma = \sigma' - \alpha p_w I - \beta E (T - T_0) I \quad (2)$$

式(2)中, σ' 为有效应力, α 为 Biot 系数, p_w 为孔隙压力, I 为单位张量, β 为热膨胀系数, E 为弹性模量, T 为温度。其中 Biot 系数 α 反映了孔隙压力对骨架应力的传递效率(通常取值 0.8~1.0), 而热膨胀系数 β (水泥环材料约为 $10^{-5}/^\circ\text{C}$) 则量化了温度梯度诱导的热应变效应[1]。徐申奇[3]的研究表明, 当压裂液注入引发 50°C 温度梯度时, 水泥环内壁 VonMises 应力从纯机械载荷下的 33.84 MPa 增至 35.68 MPa, 增幅达 6.94%, 同时临界压裂压力降低 3%, 揭示了温度应力通过提升有效应力水平降低水泥环抗裂阈值的机制。

4.2.2. 渗流场控制方程

流体连续性方程与 Darcy 定律结合:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\phi \rho_w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_w \mathbf{v}_w) &= 0 \\ \mathbf{v}_w &= -\frac{k}{\mu} (\nabla p_w - \rho_w \mathbf{g}) \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)中, ϕ 为孔隙度, k 为渗透率张量, μ 为流体黏度, $\mathbf{g}$ 为重力加速度。渗流场模型通过 Darcy 定律, 描述压裂液在水泥环孔隙中的流动特性, 其中渗透率 k (水泥环通常为 $10 \sim 18 \text{ m}^2$ 量级) 和孔隙度 ϕ (0.1~0.3) 是控制流体滤失的关键参数。陈祝兴[5]在模拟中设定滤失系数为 $5 \times 10^{-12} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} / \text{Pa}$, 发现裂缝内流体压力沿扩展方向呈指数衰减(衰减系数 $\lambda = 0.05 \text{ m}^{-1}$), 表明压裂液摩阻在裂缝扩展后期主导能量耗散, 这与室内物理模拟中观测到的“压力曲线陡降”现象高度吻合。此外, 渗流场与应力场的耦合效应导致孔隙压力升高诱发附加应力, 进一步加剧水泥环的剪切破坏风险。

4.2.3. 温度场耦合方程

考虑热传导与对流换热, 能量守恒方程为:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_w c_{pw} \mathbf{v}_w \cdot \nabla T = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + Q \quad (4)$$

式(4)中, ρ 为岩石密度, c_p 为比热容, λ 为热导率, Q 为热源项。温度场模型借助能量守恒方程量化热传导与对流换热过程, 王康[2]通过模拟压裂液注入场景(流体温度 20°C , 地层初始温度 80°C), 发现水泥环-地层界面处温度梯度可达 $60^\circ\text{C}/\text{m}$, 导致界面胶结强度下降 12%~15%。这一结果与徐璧华[10]的高温胶结实验数据一致: 当温度从室温升至 150°C 时, 界面剪切强度从 2 MPa 降至 1.7 MPa, 验证了温度场通过弱化化学胶结作用加速裂缝起裂的机制。

4.3. 多物理场耦合模型的进展与实验验证

多物理场耦合模型通过嵌入粘聚力单元(CZM)与孔压动态计算模块, 实现了水泥环界面裂缝从起裂到稳态扩展的全流程模拟。闫炎[6]利用 ABAQUS 构建的三维有限元模型显示, 在温度-应力-渗流耦合作用下, 当套管内压达到 100 MPa 时, 水泥环内壁损伤变量 D 在 10 分钟内从 0 快速升至 0.6, 裂缝沿最大主应力方向($\theta = 60^\circ$)扩展 8.5 m, 而常温工况下同等时间内 D 仅为 0.4, 表明温度场使裂缝初始扩展速率提升 50%。进入稳态扩展阶段(10~30 分钟)后, 渗流-应力耦合导致裂缝转向地层弱面, 周向扩展面积较纯机械场模型增加 30%, 这与川西气井环空带压实验中观测到的“裂缝网络呈放射状扩展”现象一致[8]。

实验验证方面, 李顺雨[8]在高温高压(150°C 、120 MPa)环空带压实验中发现, 水泥环裂缝封堵效率随温度升高下降 30%, 主要原因是温度应力加剧了界面剥离与压裂液滤失的协同破坏作用。陈祝兴[5]通

过大型压裂模拟装置再现了第一界面(套管-水泥环)的裂缝优势扩展特性,实测其极限长度为 20.3 m,是第二界面(11.3 m)的 1.8 倍,与数值模拟结果误差小于 5%,进一步证实了套管与水泥环的刚度差异(弹性模量 210 GPa vs. 21 GPa)对裂缝路径的决定性影响。

5. 未来水泥环裂缝扩展规律研究的发展方向

未来水泥环裂缝扩展规律研究可从多方面展开深入探索。在理论模型完善上,应进一步优化流固耦合及热-流-固等多场耦合模型,充分考虑水泥环界面胶结强度的空间异质性以及高温高压等复杂工况对水泥环力学性能的影响。数值模拟方法层面,需将扩展有限元法(XFEM)与内聚力模型(CZM)等主流技术深度融合,发展更精准且高效的裂缝扩展模拟算法,以精确追踪水泥环裂缝在多孔介质流固耦合场景中的扩展路径、界面剥离行为以及裂缝尖端应力集中和渐进失效过程。实验研究方面,可通过开展不同条件下的物理模拟实验,利用先进监测手段获取水泥环裂缝扩展的动态数据,验证并修正数值模拟结果,明确各因素(如射孔损伤、地应力、水泥环及地层岩石力学参数、压裂施工参数等)对裂缝扩展的定量影响规律[4]。此外,基于大数据、人工智能等新兴技术,建立水泥环裂缝扩展预测模型,实现对裂缝扩展的实时监测与精准预测,为优化水泥环设计及压裂施工方案提供有力支撑,确保井筒长期完整性与压裂作业高效安全。

6. 结束语

目前,页岩气高效开发对井筒完整性提出了更高要求,水泥环作为压裂作业的核心屏障,其裂缝扩展规律研究已从单一力学分析迈向多物理场耦合的精细化建模阶段。通过整合温度-应力-渗流耦合理论、粘聚力模型(CZM)及有限元模拟技术,学界已揭示水泥环厚度、弹性模量、泊松比等参数对应力状态的调控机制,以及温度梯度对界面胶结强度和裂缝扩展路径的显著影响。实验与数值模拟结合的研究方法,为固井工艺参数优化(如推荐“弹性模量低于地层、泊松比高于地层、厚度 20~60 mm”的协同设计)提供了理论支撑,并通过现场案例验证了模型的工程适用性。

然而,现有研究仍存在关键挑战:多场耦合模型对高温高压下水泥环材料性能动态退化的刻画不足,界面裂缝扩展与压裂液滤失的耦合机制尚未完全明晰,且缺乏针对页岩储层非均质性的多尺度模拟方法。未来研究需进一步融合多孔介质耦合场理论与人工智能技术,开发具备实时参数反演能力的智能预测模型,同时加强高温高压环境下水泥环-地层界面损伤的原位监测技术研发。随着多学科交叉与技术创新的深入,水泥环裂缝扩展研究将为页岩气安全高效开发提供更全面的理论与技术保障,推动非常规油气领域向深层、高温、复杂地质条件的前沿领域持续突破。

基金项目

重庆科技大学大学生科技创新训练项目(项目编号: 2024201013)。

参考文献

- [1] 刘奎,王宴滨,高德利,等.页岩气水平井压裂对井筒完整性的影响[J].石油学报,2016,37(3):406-414.
- [2] 王康.页岩气水平井压裂工况下水泥环力学特性研究[D]:[硕士学位论文].北京:中国石油大学(北京),2018.
- [3] 徐申奇.水力压裂过程中水泥环裂缝扩展规律研究[D]:[硕士学位论文].青岛:中国石油大学(华东),2019.
- [4] 张晓诚,李进,韩耀图,等.射孔水泥环损伤评价及压裂裂缝扩展规律[J].钻井液与完井液,2021,38(2):243-248.
- [5] 陈祝兴,李托,付海峰,等.水平井压裂过程中水泥环界面窜流模拟分析[J].石油机械,2023,51(9):87-93.
- [6] 闫炎,刘向斌,李俊亮,等.分段压裂过程中射孔段水泥环密封完整性的数值模拟[J].科学技术与工程,2023,23(23):9903-9910.

- [7] 杨钊, 孙锐, 梁飞, 等. 基于裂缝诱导应力场的套管应力影响因素分析[J]. 石油机械, 2023, 51(4): 135-143.
- [8] 李顺雨, 江涛, 杨桢剑, 等. 川西地区气井环空带压条件下水泥环裂缝封堵规律研究[J]. 钻采工艺, 2024, 47(3): 153-160.
- [9] 郭辛阳, 王晨阳, 张一凡, 等. 饱和水泥石力学特性及其对水泥环完整性的影响[J]. 实验技术与管理, 2025, 42(2): 81-87.
- [10] 徐璧华, 钱思蓓, 罗伟强, 等. 水泥环二界面胶结机理及胶结强度提高方法[J]. 钻采工艺, 2025, 48(2): 200-205.