

水力压裂过程水泥环本体裂缝扩展规律研究

谭 韬, 陈 洁

重庆科技大学安全科学与工程学院, 重庆

收稿日期: 2025年10月17日; 录用日期: 2025年11月11日; 发布日期: 2025年11月20日

摘 要

基于多孔介质-流固耦合方程和CZM (Cohesive Zone Method)方法建立了水力压裂过程中水泥环裂缝扩展的有限元模型, 研究地应力、水泥环泊松比、水泥环弹性模量对水泥环本体裂缝扩展长度和压力等参数的影响揭示裂缝扩展规律。结果显示: 随着压裂的不断进行, 本体裂缝扩展长度有所增加; 在压裂液注入初期, 水泥环本体裂缝在轴向上迅速扩展; 缝口压力在数秒内会急剧上升并在之后稳定在较低水平; 随着X方向地应力的增大, 水泥环本体裂缝在轴向上的扩展长度呈减少趋势; 水泥环泊松比越大, 本体裂缝轴向扩展长度越小; 随着水泥环弹模量的增大, 本体裂缝的轴向扩展距离增大。

关键词

水力压裂, 水泥环, 裂缝拓展, CZM, 数值模拟

Study on Fracture Propagation Mechanism in Cement Ring Bodies during Hydraulic Fracturing Process

Tao Tan, Jie Chen

School of Safety Science and Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: October 17, 2025; accepted: November 11, 2025; published: November 20, 2025

Abstract

A finite element model for cement annulus crack propagation during hydraulic fracturing was established based on the porous medium-fluid-solid coupling equations and the Cohesive Zone Method (CZM). The study investigated the effects of *in-situ* stress, cement annulus Poisson's ratio, and cement annulus elastic modulus on parameters such as crack propagation length and pressure within the cement annulus body, revealing the crack propagation mechanism. Results indicate that as fracturing

文章引用: 谭韬, 陈洁. 水力压裂过程水泥环本体裂缝扩展规律研究[J]. 矿山工程, 2025, 13(6): 1455-1466.

DOI: 10.12677/me.2025.136161

progresses, the propagation length of the body crack increases. During the initial stage of fracturing fluid injection, the axial crack length within the cement annulus expanded rapidly; the fracture tip pressure surged sharply within seconds before stabilizing at a lower level; as the X-direction *in-situ* stress increased, the axial crack length within the cement annulus exhibited a decreasing trend; a higher Poisson's ratio of the cement annulus resulted in a smaller axial crack length; and as the elastic modulus of the cement annulus increased, the axial crack length within the annulus also increased.

Keywords

Hydraulic Fracturing, Cement Ring, Crack Propagation, CZM, Numerical Simulation

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

在油气开发中,射孔技术被认为是建立流动通道的核心工艺,其对水泥环孔眼附近裂缝的生成具有决定性作用。在水力压裂作业期间这些裂缝的存在会明显增加射孔区段水泥环的损伤程度[1]。水力压裂过程对水泥环本体裂缝影响的模拟研究通常涉及有限元分析(FEA)、离散元方法(DEM)、流固耦合、扩展有限元方法(XFEM)、黏聚力模型(CZM)等方法。这些方法或独立使用或综合应用,能够全面评估水力压裂过程对水泥环本体裂缝的影响,为优化压裂设计和提高井筒完整性提供科学依据。Onate 等[2]深入探讨了有限元法与离散元法在经典土力学领域应用的耦合算法,提出了一种创新的联合应用策略,即初步通过有限元法定位潜在破坏区域,继而对这些特定区域应用离散元法以进行深入分析,提高对复杂地质结构模拟的精确性。基于前述方法,Feng 等[3]在研究中,将岩体细分为有限元网格,以离散元法模拟岩体的破坏过程,旨在通过精确模拟破坏机制,提高岩体力学行为预测的准确性。张广清等[4]通过有限元和离散元模型,分析了水泥环的弹塑性变形,评估了水泥环完整性。闫炎等[5]采用流固耦合理论,对水力压裂中水泥环径向裂缝扩展的行为及其驱动因素进行了细致探讨。结果表明,裂缝的扩展主要集中在压裂的早期阶段,且随压裂操作的深入,裂缝口与尖端的压力梯度呈下降趋势。基于此研究,闫炎等[6]又基于热流固耦合数值模型揭示了射孔段水泥环内部温度与应力变化,研究发现调整套管内压和水泥环弹性模量能减轻但难防止压裂初期剪切破坏。目前,国内外对压裂后水泥环本体裂缝发展规律的研究还很少。鉴于射孔作业产生的冲击会导致固井水泥环本体出现微小裂缝后造成压裂失效,探究水力压裂过程对水泥环本体裂缝扩展的影响显得尤为重要。

2. 模型构建与参数设置

2.1. 数学模型

水力压裂过程中,水泥环裂缝的生成和扩展涉及复杂的物理过程,包括流体压力作用、岩石力学响应以及裂缝与周围介质的相互作用,需要综合考虑流体动力学和固体力学的耦合效应,才能准确模拟裂缝行为。多孔介质-流固耦合方法能够准确地模拟压裂液在水泥环裂缝内流体的流动行为以及流体压力对水泥环结构完整性的影响,尤其是在裂缝的起裂、扩展和停止过程中流体的作用机理。相比于经典弹性力学模型无法在高速流体流动和裂缝迅速扩展的情况下有效地处理流体和固体间复杂的相互作用,多

孔介质-流固耦合方法能够更好地考虑到水泥环的非均质性以及实际的物理过程中流体在裂缝内的非线性流动以及裂缝面的复杂相互作用。

2.1.1. 多孔介质有效应力

多孔介质是指由多相物质共存组成的物质, 这些物质孔隙的大小不定, 孔隙间既可能相互连通, 也可能是孤立的, 它们之间的交互作用会对介质的物理及化学属性产生相应的影响。

有效应力与总应力的关系式为:

$$\sigma = \bar{\sigma} + \alpha p_w I \quad (1)$$

式中, p_w 为孔隙压力, MPa; σ 为总应力矩阵; α 为 Biot 系数; $\bar{\sigma}$ 为有效应力矩阵; I 为单位张量。

2.1.2. 流固耦合方程

流固耦合技术模拟压裂液在水泥环中的流动以及其对水泥环结构完整性的影响。这种方法考虑了压裂液的压力分布和流动特性与固体水泥环相互作用的效果。

(1) 应力平衡方程

K. Terzaghi [7] 等认为多孔介质的有效应力可以表示为岩石骨架之间传递的应力, 等于总应力与孔隙水压力的差值。在水力压裂过程中, 任意时刻多孔介质地层岩石骨架的应力平衡方程如下:

$$\int_V \sigma \delta_\epsilon dV = \int_V t \delta_v dS = \int_V f \delta_v dV \quad (2)$$

式中, σ 为总应力矩阵; δ_ϵ 为虚应变率矩阵; t 为表面力向量; δ_v 为虚速度向量; f 为体积力向量; S 为控制体表面积, m^2 ; V 为控制体体积, m^3 。

(2) 连续性方程

压裂液流动的连续性方程表示为:

$$\frac{d}{dt} \left(\int_V \rho_w \phi dV \right) + \int_V \rho_w \phi n v_w dS = 0 \quad (3)$$

式中, ϕ 为孔隙度, 无量纲; ρ_w 为流体密度, kg/m^3 ; S 为控制体表面积, m^2 ; n 为表面 S 的外法线方向向量; v_w 为流体的渗流速度, m/s ; V 为控制体体积, m^3 。

地层岩石和水泥石中流体流动遵循 Darcy 定律:

$$v_w = -\frac{1}{\phi g \rho_w} k \cdot (\nabla p_w - \rho_w g) \quad (4)$$

式中, k 为多孔介质的渗透率向量, m/s ; g 为重力加速度, m/s^2 ; ∇p_w 为多孔介质流体流动方向的压力梯度。

根据公式(1)到(4), 将水泥石与地层岩石在水力压裂过程中的应力场与渗流场通过非线性方式进行耦合得到一组方程组, 采用有限元方法将该方程组进行离散化处理以实现数值求解。

2.2. CZM 方法合理性验证

在水力压裂过程中, 水泥环固井界面的裂缝扩展为环形裂缝扩展。基于此, 本文采用 CZM 方法对文献[8]中研究者 Brice 的物理实验进行有限元模拟, 将实验相关参数带入模拟所得到的裂缝扩展结果与实验进行对比, 比较实验结果和 CZM 方法的表现, 以检验 CZM 方法的有效性。

2.2.1. Brice 物理实验简介

研究者 Brice 等进行了物理实验, 模拟了水泥环界面脱粘及裂缝扩展的过程。研究者 Brice 等首先选

用环氧树脂代表水泥环、使用铝管来模拟地层套管，并利用 PMMA 代表地层的方式进行实验操作，将套管通过水泥环固定在 PMMA 制成的井眼中。通过实验装置图 1 可以看出，该实验装置左端进行孔压调节的操作，右端则进行蓝色压裂液的注入操作以此来代表整个水力压裂过程中压裂液流动过程，通过实验过程中观察蓝色液体在界面处的残留位置可以分析出界面的起裂过程以及脱粘长度。

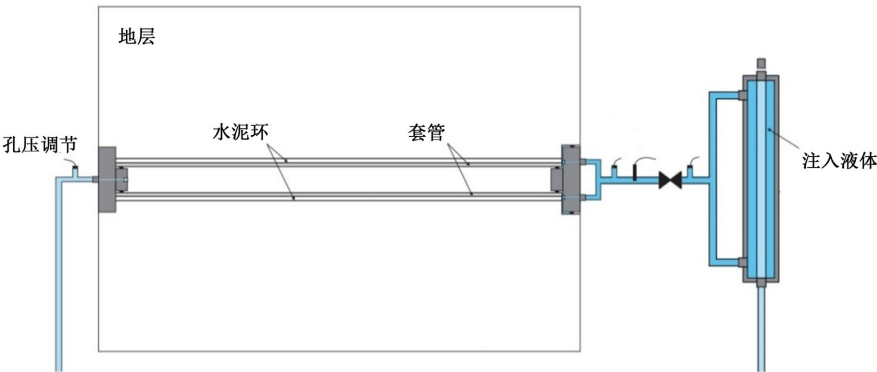


Figure 1. Structure diagram of experimental device
图 1. 实验装置结构示意图

2.2.2. 数值模拟与实验结果对比

初步分析 Brice 的实验流程后，通过实验过程中观察蓝色液体在界面处的残留位置界面的起裂过程以及脱粘长度。采用 CZM 方法，将实验参数带入 ABAQUS 有限元软件进行分析，模拟主要分析在高压压裂液的恒定注入排量下，界面裂缝的脱粘长度。实验装置的相关材料参数于表 1 中所示。图 2 为实验结果与采用 CZM 方法的有限元分析结果的对比图。

Table 1. Experimental device parameters
表 1. 实验装置相关参数

参数	数值	参数	数值
有机玻璃尺寸/mm	175 × 155 × 140	套管厚度/mm	3
有机玻璃泊松比	0.35	套管半径/mm	14
有机玻璃杨氏模量/GPa	3.3	套管泊松比	0.33
水泥环杨氏模量/GPa	2.5	套管杨氏模量/GPa	69
水泥外半径/mm	20	套管内压/MPa	5
水泥环泊松比	0.35	注入液体压力/MPa	10

通过图 2 压裂液注入时间与裂缝脱粘长度的关系可以看出，有限元方法模拟得到的裂缝轨迹之间与 Brice 实验结果呈现出的高度一致性，水力裂缝沿着井筒环空的延伸伴随着其周长的同时增长，随着时间的推移变得越来越慢。表明针对水力压裂过程中的非线性流固耦合问题，CZM 模型能够精确地进行模拟，为后文使用 CZM 方法进行裂缝扩展有限元模拟提供了合理验证。

2.3. 模型假设条件

据西南地区页岩区块某体积压裂井的实际尺寸，选取其中一段长为 15 m 的水平井段作为分析对象，

构建了几何模型, 其涵盖的力学和物理性质以及应力参数均来源于现场数据。

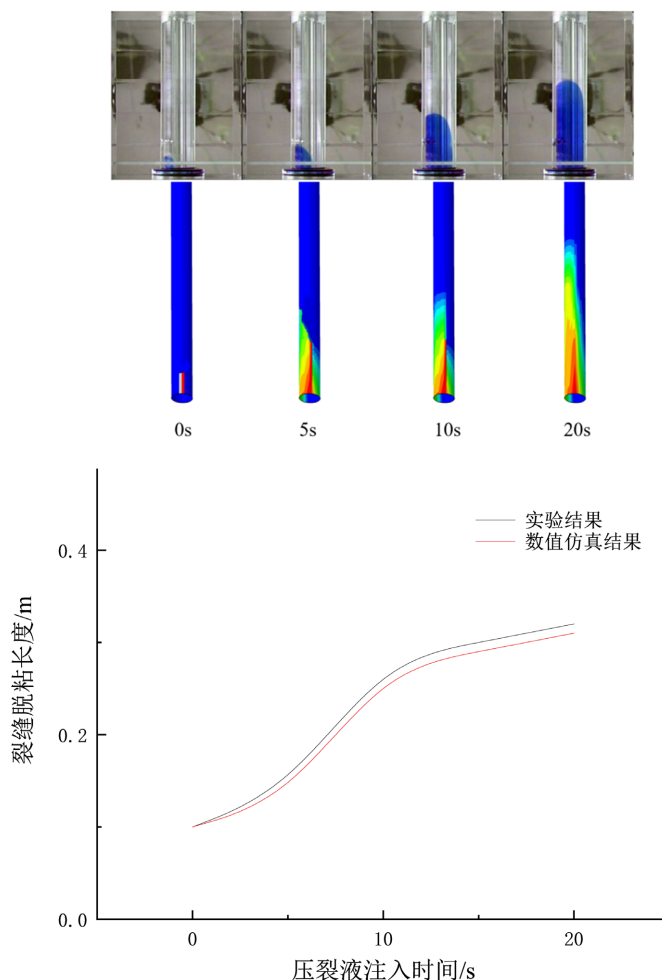


Figure 2. Numerical simulation and experimental results
图 2. 数值仿真与实验结果

为了集中研究重点并简化分析过程, 设定了如下假设:

- (1) 套管、水泥环以及地层均被假定为具有各向同性且均匀连续的线性弹性体。
- (2) 忽略由温度场变化引起的裂缝生成和扩展的影响。
- (3) 岩石与水泥环内部的流体处于完全饱和状态。
- (4) 流体遵循不可压缩的牛顿流体模型。
- (5) 地层的半径显著大于水泥环和套管的半径。

2.4. 套管 - 水泥环 - 地层组合体模型几何与材料参数设置

基于 ABAQUS 平台建立组合体模型, 为最大限度减少边界效应的影响, 组合体的总体尺寸设置为 $10 \times 10 \times 15$ m, 其中包含套管、水泥环初始损伤单元、水泥环和地层四个部分。在预设的水泥环初始损伤单元中心注入压裂液, 以恒定流量缓慢注入, 旨在通过模拟压裂液的注入来模拟微裂缝的扩展, 以深入了解水压驱动下的裂缝扩展行为, 网格划分后的水泥环本体裂缝扩展数值模型如图 3 所示, 模型尺寸及材料参数设置如表 2, 表 3 所示。在设置边界条件方面, 为地层体远场边界施加了全位移约束, 在组合体

模型的上下及左右边界上施加恒定地层孔隙压力, 模型设井眼轴向方向为 X 轴, 垂直方向为 Z 轴, 水平方向为 Y 轴, 在组合体模型的上下设置 Z 方向的位移约束, 在组合体前后设置 X 方向的位移约束, 在组合体左右设置 Y 方向的位移约束, 并设定初始饱和度等参数, 套管内壁上施加了液体压力。

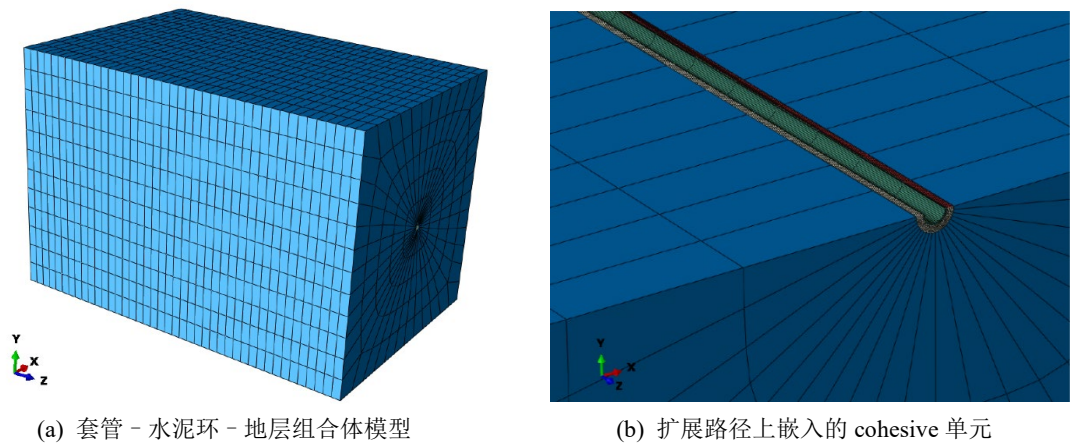


Figure 3. Numerical model of axial fracture propagation of cement ring body during fracturing
图 3. 压裂过程水泥环本体裂缝轴向扩展数值模型

Table 2. Dimensional parameters of each part of the model
表 2. 模型中各部分尺寸参数

参数	数值	参数	数值
套管内径/mm	121.4	水泥环外径/mm	222.4
套管壁厚/mm	12.7	井深/m	2000
水泥环内径/mm	139.7	组合体整体尺寸/m	10 × 10 × 15

Table 3. Material parameters of each part
表 3. 各部分材料参数

参数	数值	参数	数值
水泥环弹性模量/GPa	210	水泥环内聚力/MPa	10
地层弹性模量/GPa	12	地层内聚力/MPa	12
套管弹性模量/GPa	30	水泥环孔隙度/%	0.2
水泥环泊松比	0.27	水泥环渗透率/md	0.01
地层泊松比	0.26	地层内摩擦角/°	26
套管泊松比	0.26	地层内聚力/MPa	12

2.5. 模拟工况设置

针对不同工况条件下水泥环裂缝的扩展行为进行求解, 研究不同影响因素(地应力、水泥环泊松比、水泥环弹性模量)对水泥环裂缝扩展长度和压力等参数的影响, 得出扩展规律以实现单因素的控制。各影响因素模拟工况设置如表 4, 其中 A 代表基础工况。

Table 4. Simulated working condition setup for different influencing factors
表 4. 不同影响因素模拟工况设置

工况编号	地应力/MPa	水泥环泊松比	水泥环弹性模量/GPa
1	28	0.26	12
A	32	0.26	12
3	36	0.26	12
4	40	0.26	12
1	32	0.18	12
2	32	0.22	12
A	32	0.26	12
4	32	0.30	12
1	32	0.26	8
2	32	0.26	10
A	32	0.26	12
4	32	0.26	14

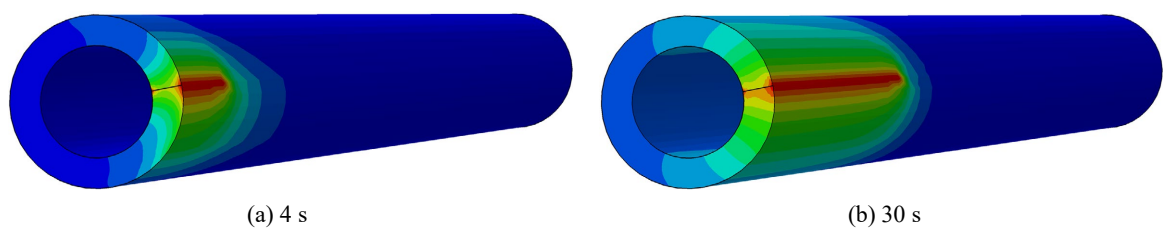
2.6. 网格划分

将视为线弹性材料的套管用 C3D8S 单元进行离散，对视为各向同性多孔介质材料的水泥环和地层岩石用 C3D8P 单元进行离散；在射孔作业中，射孔过程将产生孔眼周围的应力集中区域，会导致水泥环发生初始损伤，为了模拟这种情况，在孔眼附近的水泥环上预设两个单元格的初始损伤单元，有助于更准确地评估水泥环的稳定性和性能。通过对水泥环轴向裂缝的扩展路径上嵌入孔压粘聚力单元 COHD8P 如图 3(b)红色位置来模拟裂缝的起裂与扩展过程。网格划分后的水泥环本体裂缝扩展模型如图 3 所示。

3. ABAQUS 数值模拟结果分析

3.1. 水泥环本体裂缝几何形态分析

如图 4 所示，通过对 4 s、30 s、200 s 和 600 s 四个不同注液的时间点的观察，可以看出，水泥环本体裂缝破坏长度随压裂过程时间的变化而增加，此裂缝扩展过程主要归因于在压裂液注入的初期，液体压力迅速上升，使得水泥环本体的裂缝在轴向上迅速扩展，且扩展速度较快。这种扩展速度的变化可以归因于随着裂缝体积的增加，相同排量的压裂液在裂缝中的压力会下降，从而降低了驱动裂缝进一步扩展的压力。



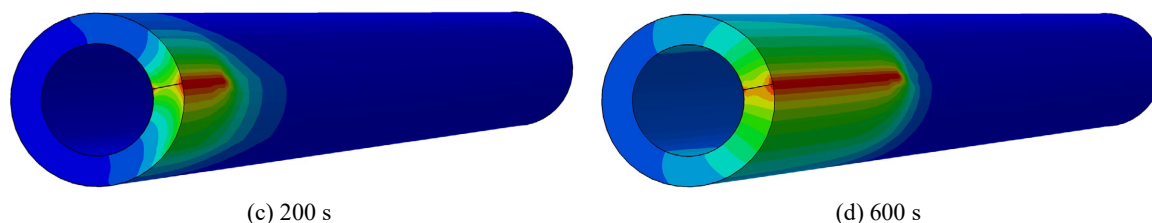


Figure 4. Crack morphology of cement ring body at different time

图 4. 不同时刻水泥环本体裂缝形态

图 5 为水泥环本体裂缝扩展长度与注入时间的关系图, 由图可知, 在注液 30 s 时, 裂缝已经在轴向方向扩展了 4.29 m 的, 随着时间的推移, 裂缝扩展速度开始减缓, 经过大约 200 s 的压裂作用, 水泥环本体裂缝扩展达到了一个极限长度 4.64 m, 并在此后的时间里不再有显著的扩展。这个极限长度标志着水泥环的材料性质和施加压力达到了一种平衡状态, 此时的压裂液排量和施加的液压无法再有效地驱动裂缝扩展, 反映出材料强度和裂缝抗扩展性质的极限, 掌握这一极限对于优化压裂段间距设计至关重要。

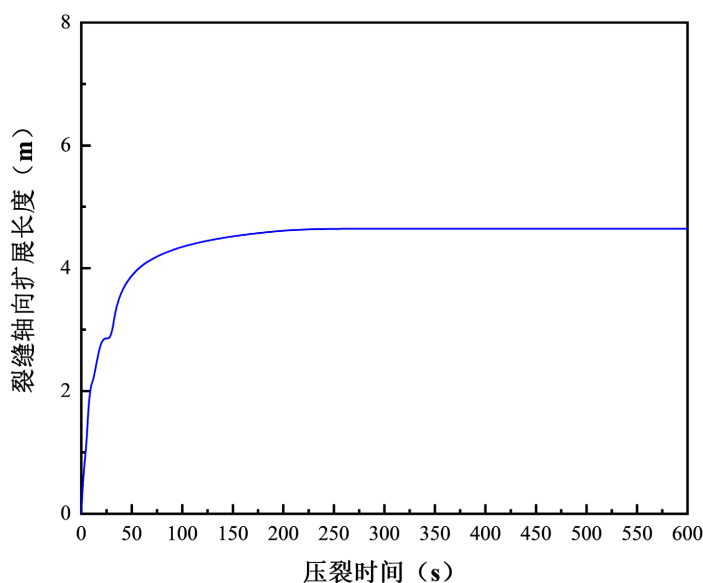


Figure 5. The relationship between the length of cement ring body crack expansion and injection time

图 5. 水泥环本体裂缝扩展长度与注入时间的关系

3.2. 水泥环本体裂缝扩展压力分析

通过绘制缝口压力与压裂液注入时间关系曲线, 可以更直观地了解水泥环裂缝在轴向扩展过程中压力变化的趋势。

从图 6 可以看出, 水泥环本体裂缝在最初的注液阶段尚未开裂, 注入的压裂液在井底的积累导致井内压力迅速升高。这一现象可以通过压力积聚模型来解释, 该模型在裂缝形成之前, 流体在井底部的流动空间受限, 导致缝口处压力快速增加。

图示数据表明, 在短短数秒内, 缝口压力从 0 MPa 急剧上升至 50.45 MPa, 表明了注液过程的动态性和剧烈变化, 一旦缝尖处的压力超越水泥环材料的抗拉强度阈值, 初始微裂缝便会形成, 此刻压力达到水泥环的破裂强度, 随即在缝口处压力快速释放, 引发压力的急剧下降, 随着初始裂缝的形成, 压裂液进一步注入会促使水泥环本体裂缝沿井筒轴向继续扩展。在随后的压裂过程中, 缝口压力在 200 s 后逐

渐稳定在 40.5 MPa 的较低水平, 反映出裂缝扩展过程的稳定性及流体注入压力的平衡状态。该稳定状态表明, 裂缝扩展与流体注入达到了一种动态平衡。

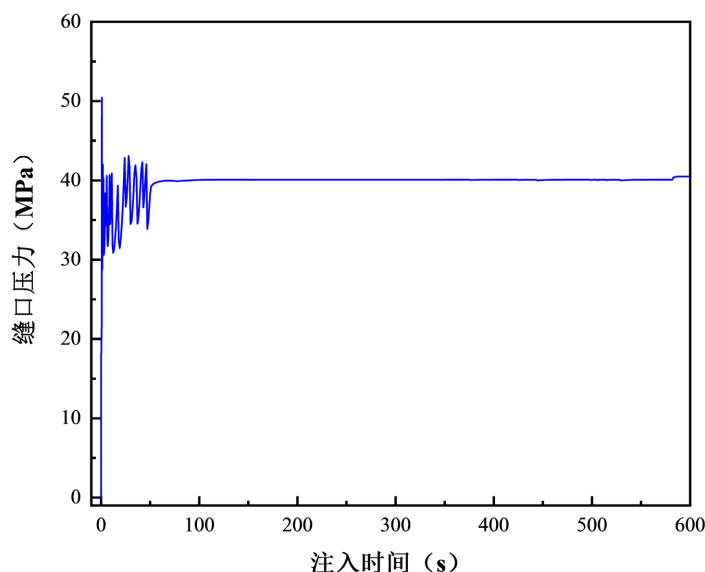


Figure 6. Diagram of the relationship between seam pressure and fracturing fluid injection time
图 6. 缝口压力与压裂液注入时间的关系图

3.3. 水泥环本体裂缝扩展规律影响因素分析

水泥环本体裂缝扩展模型是页岩气开采中关键的研究领域, 受到储层地质参数、水泥环参数以及套管内压等多方面因素的影响。通过建立水泥环本体裂缝扩展模型, 更好地理解水泥环裂缝形成的机制, 有助于制定相应的措施来减少裂缝扩展, 提高油气钻井的安全性和效率。

3.3.1. 地应力对水泥环本体裂缝扩展影响分析

本小节将探讨水平地应力差对水泥环本体轴向裂缝扩展的影响规律。保持 Y 方向的上覆岩层压力恒定, 设定最小水平地应力为 28 MPa, 分别讨论压裂过程中水平地应力差为 0 MPa、4 MPa、8 MPa、12 MPa 条件下, 水泥环本体裂缝轴向扩展情况。

从图 7 中可以看出, 当 Y 方向上覆岩层的压力保持恒定时, 随着 X 方向地应力值从 28 MPa 升至 40 MPa, 水泥环本体裂缝轴向扩展长度显著减少, 由 6.07 m 降低到 3.93 m。此外, 裂缝扩展所需的压力也随着 X 方向地应力的增加而增大, 从 37.3 MPa 升至 44 MPa, 表明裂缝扩展压力与水平地应力之间呈正相关。

3.3.2. 水泥环泊松比对水泥环本体裂缝扩展影响分析

水泥环在外载荷作用下表现的变形能力一般表征为两个方面: 泊松比和弹性模量。泊松比定义为在给定水泥环材料的弹性范围内, 其横向应变与纵向应变绝对值之比。本小节在保持其他参数恒定的条件下, 着重分析了泊松比变化对水泥环本体轴向裂缝扩展的影响。

图 8 是泊松比变化影响了裂缝扩展长度和扩展压力的模拟结果的呈现。当泊松比从 0.18 增加到 0.3 时, 裂缝扩展长度从 5.71 m 降低至 4.29 m, 总体减小了约 1.42 m, 表明随着泊松比的升高裂缝长度趋于缩短, 但影响程度较低。同时, 裂缝扩展所需的压力也有所增加, 从 36.6 MPa 升至 45.8 MPa。这种变化的可能原因是, 泊松比较高的材料在相同纵向拉伸应力下展现出更大的横向变形, 导致裂缝间更难维持开放状态, 因而需要更大的压力来继续推动裂缝扩展。

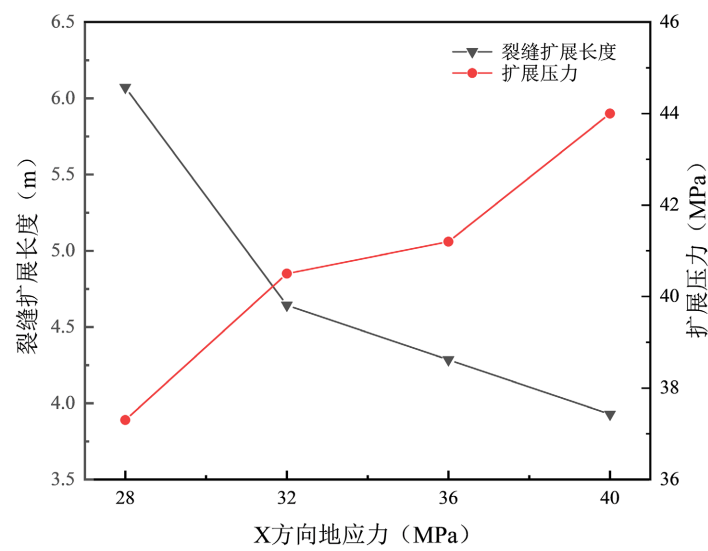


Figure 7. Expansion length and expansion pressure of body crack under different ground stress
图 7. 不同地应力下本体裂缝扩展长度和扩展压力

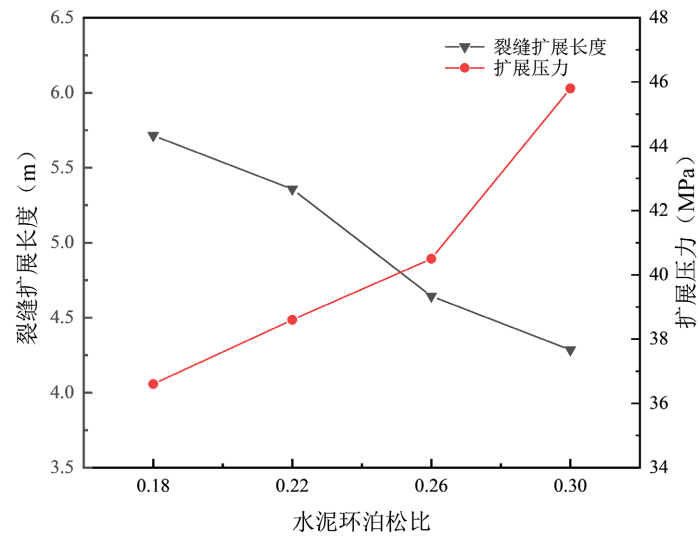


Figure 8. Propagation length and propagation pressure of body crack under different Poisson's ratio
图 8. 不同泊松比下本体裂缝扩展长度和扩展压力

3.3.3. 水泥环弹性模量对水泥环本体裂缝扩展影响分析

在实际现场作业中,水泥环弹性模量是能够被灵活调控的材料参数,而水泥环的弹性模量是水泥环的固有性质,是衡量水泥石变形能力的一种指标。在保持其余参数不变的前提下,分析弹性模量的变化对水泥环本体轴向裂缝扩展的影响。

图 9 为不同弹性模量下本体裂缝扩展长度和扩展压力关系图。分析表明,弹性模量从 8 GPa 增至 14 GPa 时,裂缝长度从 2.41 m 扩展至 6.43 m,增幅达 4.02 m,与此同时,裂缝扩展所需的压力从 43.3 MPa 降至 35.1 MPa。这一现象表明,随着水泥环弹性模量的增加,裂缝扩展长度增加,所需的扩展压力减小。这是因为弹性模量的增加意味着材料整体的刚度提高,使得水泥环在受到同等力的作用时变形更少,尤其是在径向变形方面。因此,当弹性模量增大时,水泥环能够更有效地抵抗外部压力导致的压缩,从而在轴向扩展裂缝时需要较小的压力。

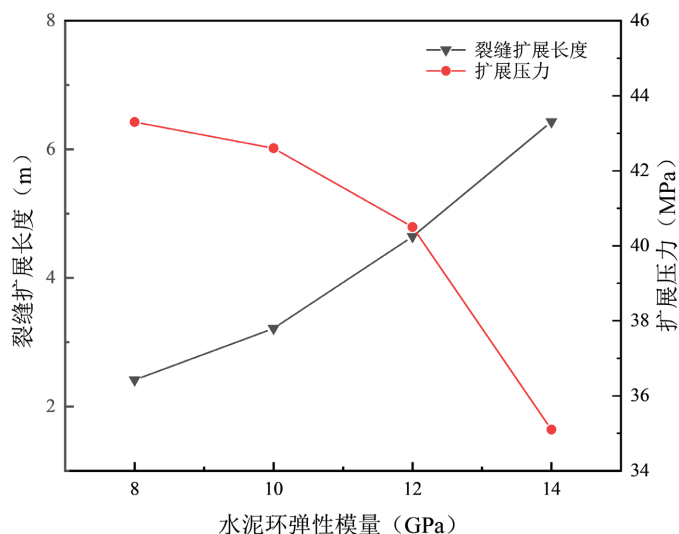


Figure 9. Expansion length and expansion pressure of body crack under different elastic modulus
图 9. 不同弹性模量下本体裂缝扩展长度和扩展压力

4. 结论

(1) 分析了水泥环本体裂缝扩展规律。研究表明：水泥环本体裂缝扩展长度随压裂时间的增加而增加；在压裂液注入初期，水泥环本体裂缝在轴向上迅速扩展，且速度较快；缝口压力在数秒内会急剧上升并在之后稳定在较低水平

(2) 针对地应力、水泥环泊松比、水泥环弹性模量因素对本体裂缝扩展长度的影响规律进行分析。结果显示：① 本体裂缝扩展长度与 X 方向地应力增长呈负相关，裂缝扩展所需的压力也随着 X 方向地应力的增加而增大；② 本体裂缝扩展长度呈现出随水泥环泊松比增加而缩短的趋势，但影响程度较低，裂缝扩展所需的压力也随泊松比增大而增大；③ 本体裂缝扩展长度随着水泥环弹性模量的增加而增大。

项目基金

重庆科技大学硕士研究生创新计划项目(YKJCX2420716)。

参考文献

- [1] 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.
- [2] Oñate, E. and Rojek, J. (2004) Combination of Discrete Element and Finite Element Methods for Dynamic Analysis of Geomechanics Problems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **193**, 3087-3128. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2003.12.056>
- [3] Feng, C., Li, S. and Liu, X. (2015) A Procedure for Transiting FEM into DEM and Its Application. *Rock & Soil Mechanics*, **36**, 1027-1034.
- [4] 张广清, 赵振峰, 王笑笑. 水平井分段压裂过程对水泥环完整性影响[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2021, 43(5): 147-154.
- [5] 闫炎, 管志川, 阎卫军, 等. 水力压裂过程中水泥环裂缝扩展的数值模拟[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(32): 13673-13680.
- [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] Terzaghi, K. (1953) Origin and Functions of Soil Mechanics. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, **118**, 666-696. <https://doi.org/10.1061/taceat.0006957>

- [8] Lecampion, B., Bungler, A., Kear, J. and Quesada, D. (2013) Interface Debonding Driven by Fluid Injection in a Cased and Cemented Wellbore: Modeling and Experiments. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **18**, 208-223.
<https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2013.07.012>