



中国科学引文数据库 (CSCD) 来源期刊
全国中文核心期刊
美国《化学文摘》(CA) 收录期刊
俄罗斯《文摘杂志》(AJ) 收录期刊
EBSCO学术数据库收录期刊 (美)
AAPG协会期刊出版平台收录期刊 (美)
中国科技论文统计源期刊
RCCSE中国核心学术期刊

页岩压裂储层地应力场动态演化规律研究

刘厚彬 王爽 杜爽 李鑫洁 冷程锦

Dynamic Evolution Law of In-situ Stress Field in Fractured Shale Reservoirs

LIU Houbin, WANG Shuang, DU Shuang, LI Xinjie, LENG Chengjin

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2025049>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

压裂工况下近井筒地应力及套管载荷分布规律研究

Study on the Distribution Law of Near-Wellbore in-situ Stress and Casing Load under Fracturing Conditions

石油钻探技术. 2023, 51(5): 106–111 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2023092>

东营凹陷页岩油储层层间干扰及裂缝扩展规律研究

Research on Interlayer Interference and the Fracture Propagation Law of Shale Oil Reservoirs in the Dongying Sag

石油钻探技术. 2021, 49(4): 130–138 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021094>

基于相场法的深层干热岩储层水力压裂模拟研究

Simulation of Hydraulic Fracturing in Deep Hot Dry Rock Reservoir Based on Phase-Field Method

石油钻探技术. 2024, 52(2): 229–235 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2024047>

超深纹层页岩断裂韧性演化规律研究

Study on Evolution Law of Fracture Toughness of Ultra-Deep Laminated Shale

石油钻探技术. 2025, 53(2): 159–167 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2025032>

孔洞型碳酸盐岩储层压裂裂缝转向扩展特征研究

Study on Propagation and Diversion Characteristics of Hydraulic Fractures in Vuggy Carbonate Reservoirs

石油钻探技术. 2022, 50(4): 90–96 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2022084>

武隆区块常压页岩气藏低成本压裂技术

Low-Cost Fracturing Technology in Normal-Pressure Shale Gas Reservoirs in Wulong Block

石油钻探技术. 2022, 50(3): 80–85 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2022011>



扫码关注公众号，获取更多信息！

◀油气开发▶

doi:10.11911/syztjs.2025049

引用格式: 刘厚彬, 王爽, 杜爽, 等. 页岩压裂储层地应力场动态演化规律研究 [J]. 石油钻探技术, 2025, 53(4): 85–93.

LIU Houbin, WANG Shuang, DU Shuang, et al. Dynamic evolution law of in-situ stress field in fractured shale reservoirs [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2025, 53(4): 85–93.

页岩压裂储层地应力场动态演化规律研究

刘厚彬, 王爽, 杜爽, 李鑫洁, 冷程锦

(西南石油大学石油与天然气工程学院, 四川成都 610500)

摘要: 页岩储层应力随着压裂施工不断变化, 易引发井筒、地层损伤, 影响压裂缝网扩展方向与范围, 进而影响后期压裂方案优化与最终开发效果。针对传统地质工程一体化三维静态模型无法准确描述压裂时地应力场动态演化的问题, 综合考虑页岩层理非均质性、地质力学特征和压裂缝网扩展复杂性等因素, 提出了基于有限差分法的从精细化三维地质力学模型到四维动态地应力渗流-应力全耦合的模拟方法, 模拟了真实地层条件下初始地应力场到压裂孔隙压力扩散引发应力扰动的全过程, 多维多尺度地分析了水平井压裂对区域地应力的影响规律。研究表明: 压裂过程中, 随着水力裂缝起裂, 压裂液经井周缝网向地层渗流, 井筒压力逐步向外传递引起孔隙压力升高, 有效应力与地应力呈不同程度降低, 其中最小水平主应力的降低幅度最大; 随着压力波及范围不断扩大, 近井筒区孔隙压力与地应力变化最为集中, 与未波及远场地层形成应力集中与压降漏斗效应, 引起地层变形挤压使地应力方向发生偏转。该精细地质模型与有限元全耦合联合构建的压裂储层动态地应力场模拟方法, 为现场页岩储层压裂优化提供了新的技术思路与参考。

关键词: 页岩储层; 水力压裂; 地应力场; 动态演化; 渗流-地质力学耦合

中图分类号: TE357.1⁺¹ 文献标志码: A 文章编号: 1001-0890(2025)04-0085-09

Dynamic Evolution Law of In-situ Stress Field in Fractured Shale Reservoirs

LIU Houbin, WANG Shuang, DU Shuang, LI Xinjie, LENG Chengjin

(Petroleum Engineering School, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan, 610500, China)

Abstract: The in-situ stress field of shale reservoirs undergoes dynamic changes during hydraulic fracturing operations, potentially inducing wellbore and formation damage. These changes directly influence the orientation and extent of fracture network propagation, subsequently impacting the optimization of fracturing strategies and ultimate development efficiency. Conventional geology-engineering integration 3D static model cannot accurately capture the dynamic evolution of the in-situ stress field during hydraulic fracturing. To address this limitation, this study proposes a fully coupled 4D dynamic seepage-stress simulation workflow based on the finite difference method that integrates high-resolution 3D geomechanical model with shale bedding heterogeneity, geological mechanical characteristics, and the complexity of the fracture network propagation. The method simulates the entire process from the initial in-situ stress field to stress disturbance induced by pore pressure diffusion during fracturing under actual formation conditions, which offers a multi-dimensional and multi-scale analysis of the impact of horizontal well fracturing on regional in-situ stress. Results show that as hydraulic fractures initiate during the fracturing process, the fracturing fluid permeates into the formation through the fracture network around the wellbore, and the wellbore pressure propagates outward, resulting in an increase in pore pressure. Consequently, both effective stress and in-situ stress exhibit varying degrees of decline, with the minimum horizontal in-situ stress showing the greatest drop. As the pressure-affected zone expands, the near-wellbore zone exhibits the most concentrated changes in pore pressure and in-situ stress, resulting in stress concentration and a pressure-drop funnel relative to the undisturbed far-field formation, inducing formation deformation and compression that alter the orientation of the in-situ stress. The simulation method and research

收稿日期: 2024-05-10; 改回日期: 2025-07-04。

作者简介: 刘厚彬 (1980—), 男, 山东泰安人, 2003 年毕业于西南石油学院勘查技术与工程专业, 2009 年获西南石油大学油气井工程专业博士学位, 教授, 主要从事油气井井壁稳定与岩石力学方面的研究工作。E-mail: liuhoubin523@sina.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目“深层页岩表面水化诱发细观结构损伤与宏观力学性能劣化机制研究”(编号: 52474008)、四川省自然科学基金面上项目“泥岩水化学微观作用机理与物理化学耦合井壁稳定研究”(编号: 24NSFSC2397) 资助。

findings, which integrate high-resolution geological model with fully coupled finite element analysis to construct dynamic in-situ stress field for fractured reservoirs, provide new insights and references for optimizing shale reservoir fracturing operations.

Key words: shale reservoir; hydraulic fracturing; in-situ stress field; dynamic evolution; seepage-geomechanical coupling

我国页岩油气资源丰富,开发潜力巨大。近年来,以水平井+水力压裂开发工艺为基础、以地质工程一体化为核心的立体开发技术的应用,大大提升了页岩油气的钻探开发效率。但压裂时地层孔隙压力变化与天然断层裂缝及压裂缝网共同作用形成的扰动应力场、井眼周围应力的实时改变^[1-2],影响了压裂缝网的扩展方向和形态,改变了油气从岩石基质向井筒的流动效率。同时,还会引起地层形变,激活断层^[3-6],使断层失稳错动引发套管变形^[7]。N. P. Roussel 等人^[8-9]结合位移不连续法和有限元法,发现应力场动态变化会导致孔隙、岩体被压缩,对流体流动和裂缝扩展产生影响。Zhang Guangqing 等人^[10]发现地应力差和起裂角会促使新裂缝突破应力屏障后移动至最大水平主应力方向。Su Yu 等人^[11]研究发现压裂时局部地应力动态增大,导致套管根部有效应力增加,更容易发生损坏。Lu Zongyu 等人^[12]认为压裂时地层有效应力减小与断层滑移是造成套管变形的主要原因。因此,准确分析储层不同阶段地应力场的实时状态^[13],是理解和预测页岩储层压裂过程中裂缝扩展行为、防止地层损伤、优化压裂设计的关键。

针对页岩储层压裂与生产过程中地应力动态变化的问题,国内外学者先后提出了多种渗流-应力耦合模拟方法,建立了数值模型。P. Hatchell^[14]、J. Herwanger^[15]、A. Onaisi 等人^[16]将储层模拟器与地震驱动的地质力学模型耦合,构建了考虑生产或注入过程时间效应的四维动态地应力模型。D. Yang 和 Guo Xuyang 等人^[17-18]采用有限元方法,分析了不同水力裂缝参数及岩石力学参数对页岩储层应力变化的影响。张滨海等人^[19]基于有限差分算法,提出了四维地应力渗流-应力耦合建模分析方法。张洪军等人^[20]提出了基于 ECLIPSE-VISAGE 耦合的特低渗透油藏动态裂缝模拟方法,开展了四维应力场耦合模拟分析。朱海燕等人^[21-22]采用 ECLIPSE-ABAQUS 交叉迭代耦合方法,建立了渗流-应力耦合四维地应力演化及复杂裂缝扩展的多物理场模型。李奎东^[23]以涪陵页岩气立体井组为例,建立了渗流-应力交叉耦合的动态地质力学模型,模拟了老井压裂复杂裂缝扩展及压后长期开采四维地应力

的演化过程。然而,上述四维地应力数值模拟方法存在明显不足:1)多采用交叉迭代或单向耦合方法,提高了计算效率,但过程中多假设理想量,计算精度不足;2)渗流与地质力学模型采用不同的处理器独立处理并相互赋值,在耦合模拟过程中由于网格和地质特征,物理场参数映射易产生误差,且需要更新一个物理场参数作为另一个物理场的计算条件,模拟过程繁琐且精度受限。

基于上述现状,笔者综合考虑页岩层理的非均质性、地质力学参数及压裂缝网扩展的复杂性,提出了基于有限差分算法的压裂动态地应力渗流-应力全耦合建模与演化模拟方法,以整合地质建模软件的地层描述能力和有限元软件的多场耦合计算优势,实现三维地质力学模型到四维动态地应力有限元模型的有效转换,建立区域渗流与地质力学共同控制的全耦合模型,并在多孔介质中同时使用不同的控制方程描述物理场,实现多物理场效应在同一迭代过程中的全耦合和动态响应。同时,结合现场施工数据系统分析了压裂过程中地应力场的时空演化规律,以期为页岩储层压裂方案设计与现场施工提供参考。

1 页岩储层压裂渗流-地质力学耦合理论

1.1 地应力演化全耦合模拟方法

页岩储层压裂地应力动态演化渗流-应力全耦合分析方法,综合考虑了地层非均质性、各向异性、物性、地质力学参数及实际压裂制度,可实现从初始地应力场到压裂引发应力扰动的全过程模拟,分析真实地层条件下压裂地应力场的动态变化规律。首先,利用井层数据、地震数据、测井资料等,以岩石力学与物性参数实验数据为校核点,构建包含物性及地质力学参数的压裂区三维精细化地质模型。针对压裂缝网扩展,利用压裂微地震监测点云数据,准确校正压裂改造区缝网扩展范围与空间位置。其次,基于三维静态地质力学模型提取压裂区初始地应力场、孔隙压力分布以及三维属性参数场作为耦合模拟的材料属性与初始条件。

为保证现场适用性和计算精度,采用了全耦合

计算方法, 通过自编程提取转化精细化地质力学模型中的地质构造和网格属性数据, 重构有限元地质模型。结合渗流-应力耦合控制方程设置物理场与边界条件, 利用等效处理对断层与压裂缝网(微地震数据)穿过的网格赋予渗流材料的属性, 在渗流耦合场模拟计算时, 采用孔渗参数应力敏感性模型, 实时更新区域的渗流物性。同时, 以初始孔隙压力与地应力场为有限元地质力学模型的初始力学边界条件^[24], 以渗流模型计算得到的压裂渗流场与孔隙压力变化数据为地应力耦合模型边界条件, 最终建立真实地层尺度下包含地质力学属性与渗流物性的页岩储层四维动态地应力模型, 结合现场施工数据研究压裂行为对井区地层压力与地应力的影响规律。

1.2 渗流-应力耦合数学模型

由于页岩地层的特殊性, 笔者采用等温达西渗流-固体力学全耦合数学模型, 假设孔隙介质中的流体为弱可压缩性流体, 多孔介质为小变形与各向同性弹性材料, 全耦合模拟时将多物理场控制方程组合, 构建固体力学应力场与渗流流体场耦合联合控制方程, 由流体控制、岩体控制以及孔渗实时变化方程共同描述。

1.2.1 岩体控制方程

考虑到页岩的岩性特征, 采用小变形与各向同性弹性假设下的多孔介质变形, 结合 Biot 等效弹性模型, 建立多孔介质有效应力与本构方程:

$$\sigma = \sigma_e - \alpha_B p I \quad (1)$$

$$\alpha_B = 1 - \frac{K_d}{K_s} \quad (2)$$

式中: σ 为总应力张量, Pa; σ_e 为有效应力张量, Pa; α_B 为 Biot 系数; p 为孔隙流体压力, Pa; I 为笛卡尔张量; K_d 为排水后多孔介质整体体积模量, Pa; K_s 为骨架材料的无孔隙固体体积模量, Pa。

将弹性体本构方程的应力张量换成有效应力张量, 把孔隙压力的贡献添加到总应力张量中, 可得储层岩体应力场本构方程。联合小变形多孔弹性模型的控制方程组, 岩体控制方程采用替换后的多孔介质应力场本构方程、平衡微分方程、几何方程:

$$C\varepsilon = \sigma + \alpha_B p I \quad (3)$$

$$\sigma_e = C\varepsilon \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \sigma + F_V = 0 \quad (5)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2} [\nabla U + (\nabla U)^T] \quad (6)$$

式中: C 为弹性张量; ε 为小应变张量; ∇ 为矢量微分算子, $1/m$; $\nabla \cdot \sigma$ 为 ∇ 和 σ 张量的点积运算, Pa/m ; F_V 为体积力矢量, N; U 为位移矢量, m; ∇U 为 $\nabla \otimes U$ 的简写, 即矢量的张量积运算; $(\nabla U)^T$ 为 ∇U 张量的转置。

1.2.2 流体渗流控制方程

求解渗流场时, 需构建流动方程描述流体在孔隙和裂缝中的流动行为, 假设压裂时储层中流体为微可压, 满足达西定律, 且不考虑温度变化, 流体控制方程即达西渗流方程为:

$$\mathbf{u} = -\frac{\mathbf{K}}{\mu} \cdot (\nabla p + \rho g) \quad (7)$$

式中: \mathbf{u} 为渗流速度矢量(孔隙中流体在表征单元体积内流动的平均值), m/s ; \mathbf{K} 为渗透率张量, 在各向同性渗流中 $\mathbf{K} = K I$, m^2 ; K 为渗透率, m^2 ; μ 为动力黏度(由牛顿内摩擦定律定义), $Pa \cdot s$; ∇p 为压力梯度, Pa/m ; ρ 为流体密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 。

不考虑重力时:

$$\mathbf{u} = -\frac{\mathbf{K}}{\mu} \cdot \nabla p \quad (8)$$

根据流体在孔隙中流动时的质量守恒, 可以得到连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \phi) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = Q_m \quad (9)$$

式中: t 为时间, s; ϕ 为多孔介质孔隙度; Q_m 为质量源或汇, kg/s 。

整合达西渗流方程与连续性方程可得:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \phi) + \nabla \cdot \rho \left[-\frac{\mathbf{K}}{\mu} \nabla p \right] = Q_m \quad (10)$$

1.2.3 渗流应力敏感性控制方程

多孔介质渗流场和应力场控制方程都含有孔隙压力变量, 可进行渗流-应力的全耦合。但压裂时压力边界条件的改变与流体渗流会导致地层孔隙压力重新分布, 对于多孔弹性介质, 孔隙压力及应力的变化会使岩体骨架发生变形, 导致孔隙度变化。根据 Kozeny-Carman 公式, 渗透率也相应发生变化, 渗流场再次改变, 与孔隙压力形成新的耦合。因此, 需建立孔隙度、渗透率应力敏感性模型, 对渗流参数实时更新, 其耦合过程如图 1 所示。

孔隙度、渗透率应力敏感性模型可表示为^[25]:

$$\phi = 1 - \frac{\phi_0}{e^{\varepsilon_v}} \quad (11)$$

$$K = K_0 \left[\frac{1}{\phi_0} (1 + \varepsilon_v)^3 - \frac{1 - \phi_0}{\phi_0} (1 + \varepsilon_v)^{-\frac{1}{3}} \right] \quad (12)$$

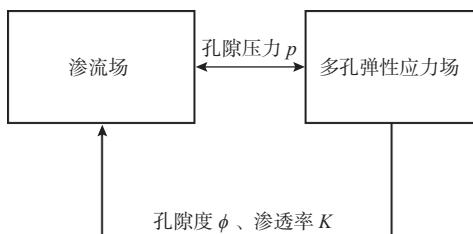


图 1 渗流-应力耦合过程

Fig.1 Seepage-stress coupling process

式中: ε_v 为体积应变; K_0 为初始渗透率, m^2 。

1.2.4 达西渗流-应力耦合

首先, 联立流体控制、岩体控制以及孔渗应力敏感性控制方程(井周渗流场、岩体 Biot 应力场以及应力敏感动态方程), 共同构成页岩地层流-固耦合方程组, 分析未知数与方程数量, 可知方程是封闭的。然后, 给定相应的边界条件和初始条件, 建立了封闭的页岩储层流-固耦合方程, 开展了页岩地层应力场动态展布规律的研究。

2 基于渗流-地质力学耦合的四维地应力模型的建立

2.1 三维地质力学模型的建立

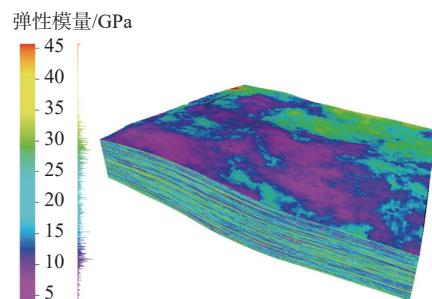
整理储层、井层等资料数据, 重点针对某页岩油储层水平井段层位划定研究区。该层位天然裂隙发育、有机质丰度高, 易于形成压裂缝网。区域储层致密, 地层基质孔隙度主要在 $2.0\% \sim 6.0\%$, 渗透率为 $0.0066 \sim 0.5940 \text{ mD}$, 最大水平主应力、最小水平主应力与垂向应力梯度分别为 $2.30, 2.03$ 和 $2.56 \text{ MPa}/100\text{m}$, 垂向应力>最大水平主应力>最小水平主应力, 属于正断层控制范围。

根据压裂时数值模拟的精度与运行条件要求, 选定构造网格水平方向与垂向平面尺寸为 $25 \text{ m} \times 25 \text{ m} \times 5 \text{ m}$, 以室内试验数据为校核点开展三维构造建模与单井属性数据区域化, 选择指数模型的变差函数分析井区属性主方向和变程, 采用序贯高斯方法对粗化数据进行井间插值, 建立了目的层的三维精细化地质模型(见图 2)。

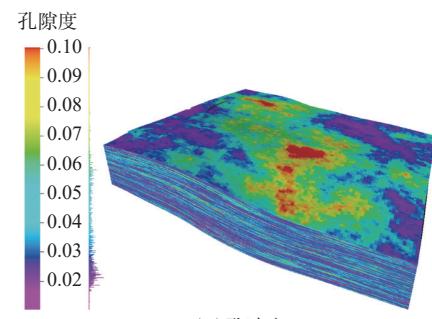
2.2 有限元地质力学模型的建立

2.2.1 压裂区地质构造转换及网格构建

基于压裂区精细地质力学模型进行有限元模型的构建。通过计算机图像学算法处理压裂微地震点云数据, 在宏观模型上采用小定向边界盒方法, 将各压裂段抽象为一个个压裂区, 构建压裂缝网空间几何域(见图 3)。解析地质构造为三角网格(TS 格



(a) 弹性模量



(b) 孔隙度

图 2 压裂区地质力学模型与属性体三维展布

Fig.2 Geomechanical model and 3D distribution of reservoir properties in stimulated zones

式), 经自编程序转化为 STL 文件格式, 转化流程如图 3 所示, 将几何零件导入构建目的层构造几何模型, 还原真实地层。为降低边界效应与薄板效应, 外围增设地面及 $1\sim3$ 倍长度围岩, 组合形成一个更大的几何模型(见图 4(a))。

压裂过程中应力状态不断传递变化, 外部围岩与内部储层网格划分精度相同易造成耦合网格过多, 难以收敛。为平衡模拟计算效率、精度与稳定性, 断层处采用三角网格, 基质面一面采用扫掠自适应四面体网格, 外部地层使用粗网格, 压裂区与井筒的扫掠网格进行局部加密细分(见图 4(b)), 以实现区域针对性的高效计算。

2.2.2 压裂区有限元模型属性场构建

基于压裂区精细化属性地质模型, 进行地质网格到点的属性转换, 形成带属性的点云数据, 提取属性三维插值函数(如渗透率 $K(x,y,z)$), 对目的层有限元网格进行材料属性赋值, 如图 5 所示(其中围岩孔渗参数为致密低值)。

断层裂缝和压裂缝网区域未构建复杂的几何边界, 而是采用等效材料属性形式体现, 根据现场数据与经验公式等效设置为高孔隙度、高渗透率和低弹性模量, 最终通过插值函数将精细化属性模型转换到有限元网格赋值, 重构压裂区有限元材料属性模型, 如图 6 所示。

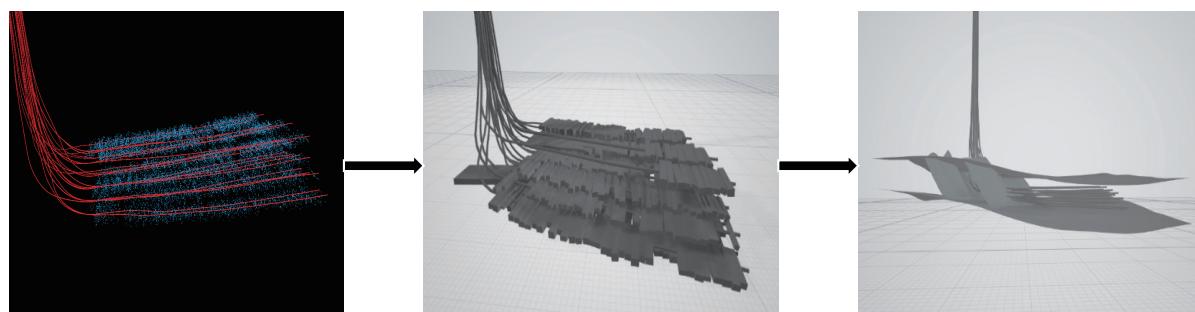


图 3 微地震点云数据监测与压裂区构造的几何构建

Fig.3 Microseismic point cloud data monitoring and geometric construction of stimulated zones

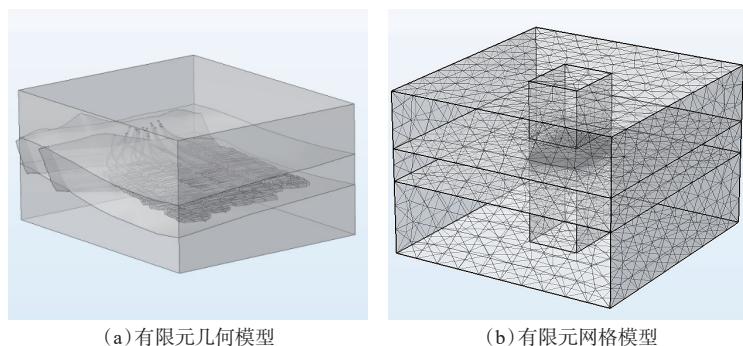


图 4 压裂区有限元地质模型

Fig.4 Finite element geological model of stimulated zones



图 5 有限元网格属性参数赋值方法

Fig.5 Method for assigning attribute parameters to finite element meshes

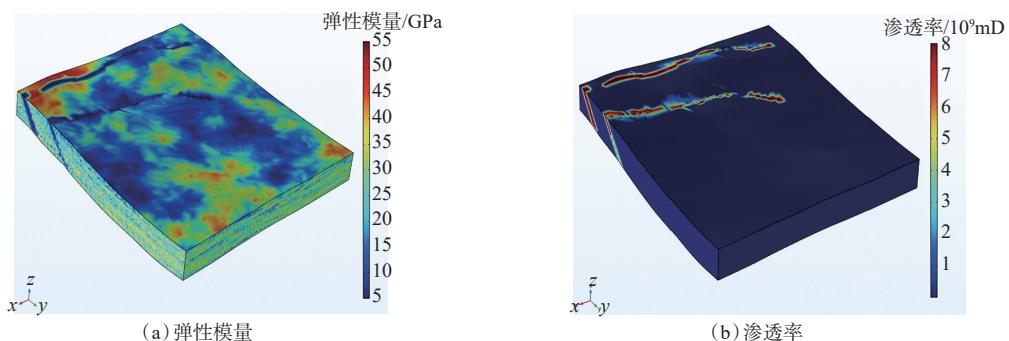


图 6 压裂区有限元属性正演

Fig.6 Forward modeling of finite element attributes in stimulated zones

2.3 渗流-应力耦合物理场与边界条件构建

基于有限元围岩与区域材料参数、裂缝等效材

料参数、初始地应力及孔隙压力，结合压裂水平井分段施工条件，设置耦合模型的力学物性参数、应

力场外边界条件与渗流场内压边界条件，并在耦合场中设置孔隙度、渗透率的更新公式，在每个时间步实时更新孔隙度与渗透率，构建储层四维动态渗流-应力物理场，进行压裂过程中四维动态地应力渗流-应力的全耦合。

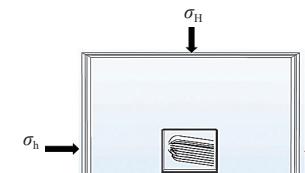
2.3.1 原地应力场与耦合应力场边界条件

压裂前，地质构造在孔隙压力、初始有效地应力及构造应力作用下处于地层位移为0的平衡态，耦合模拟前需开展稳态地应力平衡计算，还原地应力状态。地应力大小和方向由构造应力的方向、梯度和深度决定（见图7(a)），最大水平主应力方向约为NE90°。模拟时目的层位移与应力场会发生变化，每次模拟时需提取模拟结果坐标系下的应力张量场，作为外部应力添加到模型应力张量中再次平衡构造应力边界引起的模型位移，按此步骤多次模拟直至位移为0，还原压裂前地应力与位移状态，如图7所示。最后将孔隙压力与初始地应力引入目的层作为初始地应力场边界条件，并设置构造应力边界作为耦合模拟的应力场外边界条件。

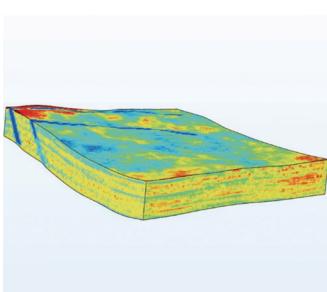
3个方向主应力的大小显示，原地应力模拟结果与压裂前试验地应力误差在8%以内，应力机制为正断层类型，在断层处应力释放显示低值，误差较小，与目的层应力场分布相吻合。

2.3.2 渗流场和边界条件

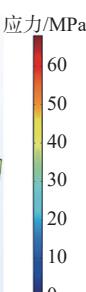
基于孔隙度插值函数 $\phi(x,y,z)$ 、渗透率插值函数



(a) 构造应力边界加载



(c) 最大水平主应力



(d) 垂向应力

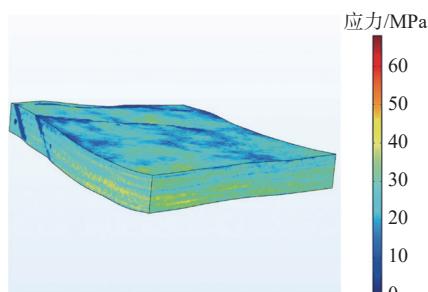
$K(x,y,z)$ ，设置渗流场初始材料参数。边界条件采用内外边界双重约束：渗流场初始压力外边界由三维孔隙压力插值函数 $p_p(x,y,z)$ 确定，内边界条件根据压裂施工曲线设定为压裂工况下水平井筒压力（压裂井口油压 p_{co} + 压裂液液柱压力 ρ_f ）。其中，压裂液密度 0.854 4 kg/L，动力黏度 11.85 mPa·s。压裂时井口油压动态变化（见图8），压裂缝网起裂至扩展的压力范围为 68.5~74.1 MPa，结合井周边界面每点的高度，计算内界面上每一点的压力形成内边界应力场，结果如图9所示。

3 压裂四维地应力动态演化规律

3.1 压裂区地层孔隙压力变化特征

运用四维应力场模拟方法对目的层做切片剖面，分析压裂前后孔隙压力的动态演化过程。压裂时受泵入压裂液与压裂缝网延伸的影响，在井筒内外压力梯度作用下，压裂液与压力沿着高孔隙度、高渗透率的压裂缝网与断层裂缝逐渐向周围地层扩散传递，形成不稳定渗流过程，孔隙压力动态升高，与未波及地层对比形成“应力集中漏斗”，并随着压裂时间增长，应力集中漏斗的半径与压力波及范围不断扩大，如图10所示。从图10可以看出，水平压裂井周地层压力升幅最大。

结合压裂施工曲线，井周压裂段地层取一小块



(b) 最小水平主应力

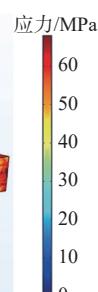
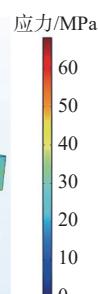


图7 原地应力状态模拟与结果

Fig.7 Simulation and results of in-situ stress state

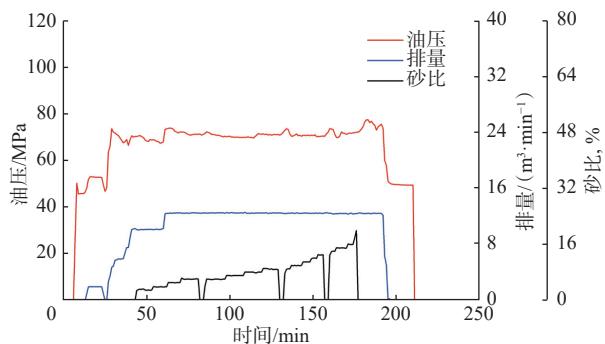


图 8 压裂施工曲线

Fig.8 Fracturing construction curve

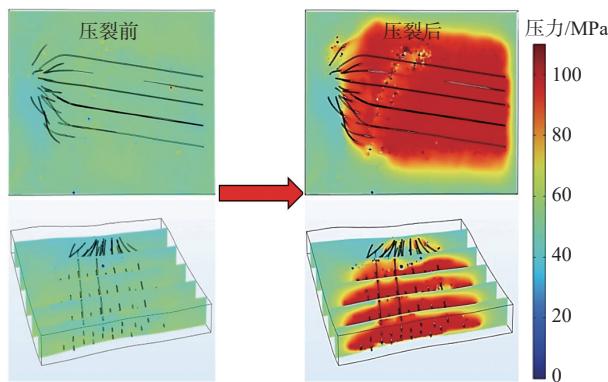


图 10 压裂前后地层孔隙压力四维展布

Fig.10 4D distribution of formation pore pressure before and after fracturing

势趋于平稳, 压裂末期孔隙压力稳定在 88.5 MPa 左右。

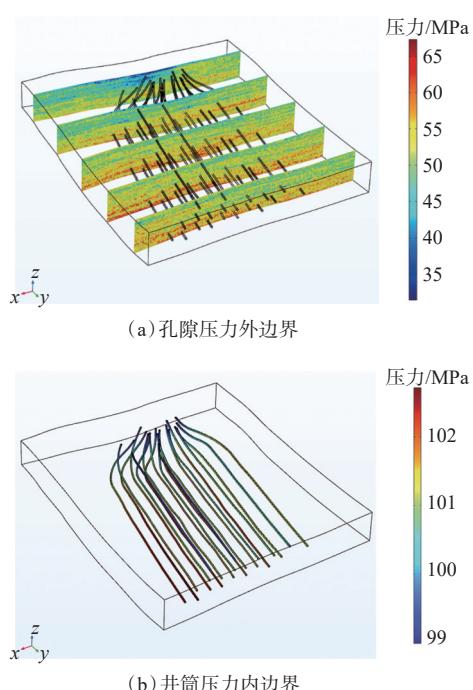


图 9 渗流场内外边界条件示意

Fig.9 Internal and external boundary conditions of seepage field

区域, 对不同时间段的数据点进行分析, 见图 11。由于压裂各阶段的物性参数、水力裂缝位置及扩展情况不同, 孔隙压力变化有所不同。压裂初期, 取点位置地层压力在 47 MPa 左右; 随着压裂液注入井筒内并经过一段时间憋压, 井筒内压力快速升高, 但未达到水力缝网起裂压力, 孔隙压力缓慢升高, 压力未向周围地层扩散, 但井筒内壁压力与周围地层形成较大应力差。到达起裂压力时, 岩石发生破裂形成压裂缝网, 并持续扩展延伸连通天然裂缝及断层, 压裂液大量渗流进入周围地层, 地层能量得到补充, 压力快速向周围传递, 孔隙压力迅速升至 78.3 MPa。随着压裂时间增长, 裂缝逐渐被压裂液填充, 压力传递至基岩, 逐渐形成动态平衡, 上升趋

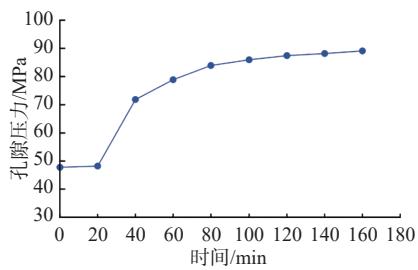


图 11 压裂过程中井周地层孔隙压力变化曲线

Fig.11 Pore pressure variation curve in near-wellbore formation during hydraulic fracturing

3.2 压裂区地层地应力场变化特征

压裂区三向主应力与孔隙压力变化趋势负相关。根据有效应力原理, 孔隙压力升高导致有效应力变化, 地应力场相应减弱, 且孔隙压力变化越剧烈, 孔隙压力梯度越大, 应力变化越明显。上覆地层压力(垂向应力)主要受压实作用影响, 其他各向应力变化对其影响较小, 因此仅展示水平两向主应力切片剖面变化趋势, 如图 12、图 13 所示。在压裂初期, 起裂形成缝网后, 受孔隙压力影响, 水平主应力从井轴开始向两侧呈现快速递减趋势。随压裂时间增长, 井筒和周围地层形成“压降漏斗”并逐渐向周围地层扩散, 波及范围不断扩大, 直至压裂中后期下降趋势趋于平稳, 其中压裂井近井筒区域应力的降低幅度最明显, 如图 14 所示。压裂末期, 最大水平主应力由 45.5 MPa 降至 27.1 MPa; 最小水平主应力由 36.3 MPa 降至 13.6 MPa, 垂向应力与最大水平主应力的降低幅度均小于最小水平主应力。这是由于, 该区域为正断层, 孔隙压力变化会造成最小水平主应力的降低幅度更大, 且根据裂缝扩展力学机制与岩石破裂遵循最小阻力路径的原则, 当压

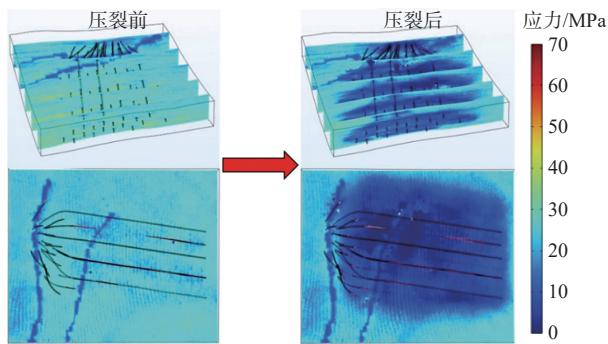


图 12 压裂区最小水平主应力四维展布

Fig.12 4D distribution of horizontal minimum in-situ stress in stimulated zones

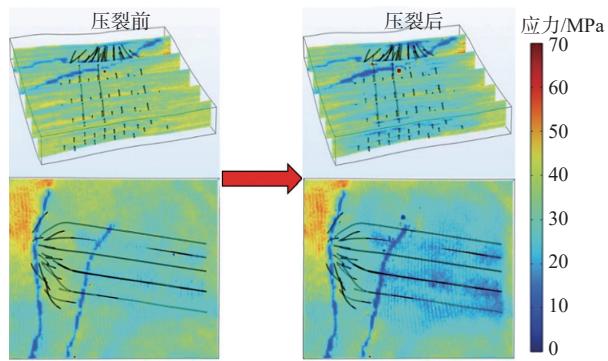


图 13 压裂区最大水平主应力四维展布

Fig.13 4D distribution of horizontal maximum principal stress in stimulated zones

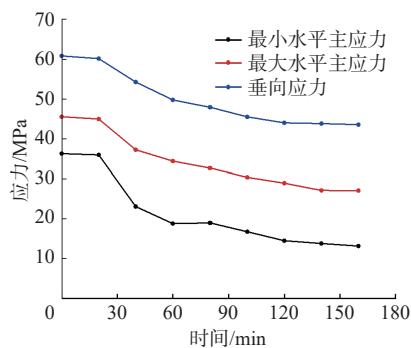


图 14 压裂过程中井周地应力变化曲线

Fig.14 Near wellbore in-situ stress variation curve during hydraulic fracturing

裂液注入地层时, 压裂裂缝更倾向于在垂直最小水平主应力的平面内张开(即沿 σ_h 方向延伸), 形成主裂缝系统, 这一过程中裂缝面张开会导致局部弹性应变能释放, 裂缝壁面附近 σ_h 方向弹性应力场产生“应力卸载效应”, 形成低应力屏蔽区。随着水平主应力进一步降低, 岩石破裂在最小水平主应力方向的阻力最小, 压裂裂缝不断沿最小水平主应力的方向扩展, 压裂液沿优势通道快速渗流, 增大了孔隙压力扰动范围, 加剧了 σ_h 的降低幅度。

地应力数值变小的同时, 地应力方向也发生了变化, 如图 15 所示。从图 15 可以看出, 当“压降漏斗”向井筒周围扩散遇到断层、裂缝发育及压裂缝网区域时, 地应力的方向也会受影响发生偏转。这是因为有效应力降低, 岩石膨胀变形, 地应力方向受挤压发生偏转, 且孔隙压力变化越大, 方向偏转得越明显。

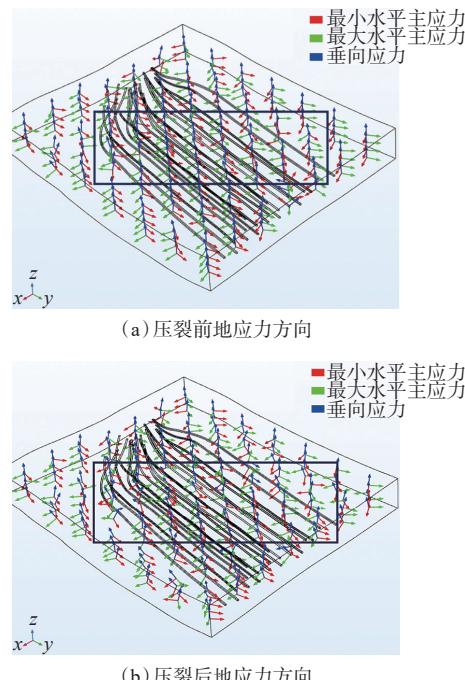


图 15 压裂区地应力方向四维展布

Fig.15 4D distribution of in-situ stress orientation in stimulated zones

4 结论与认识

1) 综合考虑页岩层理非均质性、地质力学特征、压裂缝网扩展复杂性等因素, 提出了页岩储层压裂动态地应力渗流-应力全耦合演化模拟方法, 以指导现场压裂施工和二次压裂优化设计等。

2) 地应力的变化集中分布在各生产井周区域, 同时受到压裂缝网扩展与范围的影响。压裂初期, 井周压裂缝网的高孔高渗使井筒压力快速向周围地层传递扩散, 近井区孔隙压力急剧升高, 逐渐与周围地层形成“应力集中漏斗”; 有效应力与三向主应力出现不同程度的降低趋势, 形成相对称的“压降漏斗”, 二者同步沿着压裂缝网不断扩大波及范围。至压裂中后期, 裂缝被压裂液逐渐填充, 压力传递到基岩, 孔隙压力与地应力场变化逐渐趋于平稳, 其中最小水平主应力的降低幅度最大。

3) 在地应力大小改变的同时, 地应力方向在裂缝断层附近会有偏转现象。

参 考 文 献

References

- [1] ZHANG Peng, MENG Zhaoping, JIANG Shu, et al. Characteristics of in-situ stress distribution in Zhengzhuang Region, southern Qinshui Basin, China and its stress path during depletion[J]. *Engineering Geology*, 2020, 264: 105413.
- [2] ZHAO Jinzhou, QIANG Wang, HU Yongquan, et al. Prediction of pore pressure-induced stress changes during hydraulic fracturing of heterogeneous reservoirs through coupled fluid flow/geomechanics [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2019, 145(12): 05019001.
- [3] ALTMANN J B, MÜLLER B I R, MÜLLER T M, et al. Pore pressure stress coupling in 3D and consequences for reservoir stress states and fault reactivation[J]. *Geothermics*, 2014, 52: 195–205.
- [4] HADDAD M, EICHHUBL P. Poroelastic models for fault reactivation in response to concurrent injection and production in stacked reservoirs[J]. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 2020, 24: 100181.
- [5] SOLTANZADEH H, HAWKES C D. Assessing fault reactivation tendency within and surrounding porous reservoirs during fluid production or injection[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2009, 46(1): 1–7.
- [6] ZHANG Fengshou, YIN Zirui, CHEN Zhaowei, et al. Fault reactivation and induced seismicity during multistage hydraulic fracturing: Microseismic analysis and geomechanical modeling[J]. *SPE Journal*, 2020, 25(2): 692–711.
- [7] HAN Lihong, YIN Fei, YANG Shangyu, et al. Coupled seepage-mechanical modeling to evaluate formation deformation and casing failure in waterflooding oilfields[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 180: 124–129.
- [8] ROUSSEL N P, SHARMA M M. Quantifying transient effects in altered-stress refracturing of vertical wells[J]. *SPE Journal*, 2010, 15(3): 770–782.
- [9] ROUSSEL N P, FLOREZ H A, RODRIGUEZ A A. Hydraulic fracture propagation from infill horizontal wells[R]. SPE 166503, 2013.
- [10] ZHANG Guangqing, CHEN Mian. Dynamic fracture propagation in hydraulic re-fracturing[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2010, 70(3/4): 266–272.
- [11] SU Yu, ZHANG Shilong, FU Jianhong, et al. Analysis of casing stress during multistage fracturing of shale gas horizontal wells considering thermo-hydro-mechanical coupling[J]. *Energy Science & Engineering*, 2023, 11(8): 2851–2865.
- [12] LU Zongyu, LIAN Wei, LI Jun, et al. Analysis of influencing factors of slippage and the dynamic process of fault slip caused by multi-stage fracturing[J]. *Processes*, 2024, 12(3): 448.
- [13] 秦勇, 李保柱, 胡水清, 等. 玛湖凹陷致密砾岩油藏四维地应力场模拟研究与应用 [J]. *石油科技论坛*, 2022, 41(2): 23–31.
- QIN Yong, LI Baozhu, HU Shuiqing, et al. Numerical simulation of four-dimensional stress field for tight glutenite reservoir in Mahu Sag, Junggar Basin[J]. *Petroleum Science and Technology Forum*, 2022, 41(2): 23–31.
- [14] HATCHELL P, BOURNE S. Rocks under strain: strain-induced time-lapse time shifts are observed for depleting reservoirs[J]. *The Leading Edge*, 2005, 24(12): 1222–1225.
- [15] HERWANGER J, KOUTSABEOLULIS N. Seismic geomechanics: how to build and calibrate geomechanical models using 3D and 4D seismic data[M]. Houten: European Association of Geoscientists & Engineers, 2011.
- [16] ONAISI A, FIORE J, RODRIGUEZ-HERRERA A, et al. Matching stress-induced 4D seismic time-shifts with coupled geomechanical models[R]. ARMA 2015-801, 2015.
- [17] YANG D, MORIDIS G J, BLASINGAME T A. A fully coupled multiphase flow and geomechanics solver for highly heterogeneous porous media[J]. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2014, 270: 417–432.
- [18] GUO Xuyang, SONG Hongqiang, WU Kan, et al. Pressure characteristics and performance of multi-stage fractured horizontal well in shale gas reservoirs with coupled flow and geomechanics[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, 163: 1–15.
- [19] 张滨海, 陈峰嵘, 艾传志, 等. 四维动态地应力建模方法及其在寿阳区块煤层气开发中的应用 [J]. 中国海上油气, 2018, 30(4): 144–151.
- ZHANG Binhai, CHEN Zhengrong, AI Chuanzhi, et al. 4D geomechanical modeling technique and its application in the coalbed methane development of Shouyang Block[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2018, 30(4): 144–151.
- [20] 张洪军, 代波, 于春生, 等. 特低渗透油藏动态缝模拟 [J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2020, 22(6): 1–6.
- ZHANG Hongjun, DAI Bo, YU Chunsheng, et al. Simulation method of dynamic fracture in ultra-low permeability reservoirs[J]. *Journal of Chongqing University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2020, 22(6): 1–6.
- [21] 朱海燕, 宋宇家, 唐煊赫, 等. 页岩气藏加密井压裂时机优化: 以四川盆地涪陵页岩气田 X1 井组为例 [J]. 天然气工业, 2021, 41(1): 154–168.
- ZHU Haiyan, SONG Yujia, TANG Xuanhe, et al. Optimization of fracturing timing of infill wells in shale gas reservoirs: a case study on Well Group X1 of Fuling Shale Gas Field in the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(1): 154–168.
- [22] 朱海燕, 宋宇家, 胥云, 等. 页岩气储层四维地应力演化及加密井复杂裂缝扩展规律 [J]. *石油学报*, 2021, 42(9): 1224–1236.
- ZHU Haiyan, SONG Yujia, XU Yun, et al. Four-dimensional in-situ stress evolution of shale gas reservoirs and its impact on infill well complex fractures propagation[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(9): 1224–1236.
- [23] 李奎东. 涪陵页岩气藏开采动态地应力演化规律研究 [J]. *钻采工艺*, 2023, 46(1): 97–102.
- LI Kuidong. Study on dynamic geostress evolution law during Fuling shale gas extraction[J]. *Drilling & Production Technology*, 2023, 46(1): 97–102.
- [24] 朱海燕, 宋宇家, 雷征东, 等. 致密油水平井注采储集层四维地应力演化规律: 以鄂尔多斯盆地元 284 区块为例 [J]. *石油勘探与开发*, 2022, 49(1): 136–147.
- ZHU Haiyan, SONG Yujia, LEI Zhengdong, et al. 4D-stress evolution of tight sandstone reservoir during horizontal wells injection and production: a case study of Yuan 284 Block, Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(1): 136–147.
- [25] ZHU Haiyan, ZHAO Xing, GUO Jianchun, et al. Coupled flow-stress-damage simulation of deviated-wellbore fracturing in hard-rock[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015, 26: 711–724.