

引用格式: 吕琦, 吕晶, 程紫燕, 等. 基于力学时变性的页岩油藏四维地应力演化规律研究[J]. 油气地质与采收率, 2024, 31(5): 56-65.

LÜ Qi, LÜ Jing, CHENG Ziyang, et al. Four-dimensional in-situ stress evolution law of shale reservoirs based on mechanical time-varying characteristics[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2024, 31(5): 56-65.

## 基于力学时变性的页岩油藏四维地应力 演化规律研究

吕琦<sup>1</sup>, 吕晶<sup>1</sup>, 程紫燕<sup>1</sup>, 宋阳<sup>1</sup>, 侯健<sup>2</sup>

(1. 中国石化胜利油田分公司 勘探开发研究院, 山东 东营 257015; 2. 中国石油大学(华东) 石油工程学院, 山东 青岛 266580)

**摘要:** 裂缝对页岩岩石力学性质影响突出, 准确表征含裂缝页岩的岩石力学性质变化是实现页岩油藏压裂-投产过程中四维地应力场精准刻画的重要基础。已有四维地应力研究通常认为应力变化主要源于孔隙压力改变, 未考虑岩石力学性质变化对四维地应力的影响。利用在线CT实验, 明晰了孔隙压力与页岩孔隙体积的关系, 依据应变能理论, 推导了裂缝体积与页岩泊松比、弹性模量的理论关系, 建立了孔隙压力与泊松比、弹性模量的时变理论模型。结果表明, 层理缝开启是页岩岩石力学参数具有时变性的主要原因, 孔隙压力越大, 裂缝开启条数越多, 裂缝空间呈指数型增长。随裂缝体积增加, 页岩泊松比快速增加、杨氏模量快速减小, 页岩强度大幅降低。以济阳拗陷页岩为例开展分析, 裂缝体积占比提高至1%时, 杨氏模量由37.5 GPa下降至15.06 GPa, 泊松比由0.22上升至0.35。依托数值模拟方法对比分析岩石力学参数时变性对四维地应力演化的影响, 考虑岩石力学时变性特征的四维地应力模拟能够更好地表征页岩压裂-投产过程中的应力大小演化与方向偏转的规律, 与实际油藏压裂-投产过程中的四维地应力演化规律更加吻合, 模拟结果更加可靠。研究成果能够为页岩油立体井组合部署、优化设计、风险预警等提供理论支撑。

**关键词:** 页岩油; 四维地应力; 岩石力学性质; 时变性特征; 四维地应力模拟

文章编号: 1009-9603(2024)05-0056-10

DOI: 10.13673/j.pgre.202406005

中图分类号: TE32<sup>+</sup>1

文献标识码: A

## Four-dimensional in-situ stress evolution law of shale reservoirs based on mechanical time-varying characteristics

LÜ Qi<sup>1</sup>, LÜ Jing<sup>1</sup>, CHENG Ziyang<sup>1</sup>, SONG Yang<sup>1</sup>, HOU Jian<sup>2</sup>

(1. Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City,

Shandong Province, 257015, China; 2. School of Petroleum Engineering, China University of

Petroleum (East China), Qingdao City, Shandong Province, 266580, China)

**Abstract:** The influence of fractures on the mechanical properties of shale rocks is prominent. Accurately characterizing the changes in the mechanical properties of fractured shale is an essential basis for precisely depicting the four-dimensional in-situ stress field during the fracturing and production process of shale reservoirs. Existing studies on four-dimensional in-situ stress often attribute stress changes primarily to alterations in pore pressures, neglecting the impact of changes in the mechanical properties of rocks on four-dimensional in-situ stress. The relationship between the pore pressure and the volume of shale pores and fractures was clarified by utilizing online CT experiments. Theoretical relationships among fracture volume, Poisson's ratio, and elastic modulus of shale rocks were derived based on strain energy theory. Furthermore, a time-varying theoretical model was established with pore

收稿日期: 2024-06-05。

作者简介: 吕琦(1984—), 男, 山东桓台人, 副研究员, 硕士, 从事陆相页岩油气开发理论与技术相关研究。E-mail: lvqi.slyt@sinopec.com。

基金项目: 中国石化股份公司课题“东营凹陷页岩油立体开发优化设计关键技术”(P23026)。

pressure, Poisson's ratio, and elastic modulus as variables. The results indicate that the opening of bedding fractures is the primary cause of the time-varying nature of the mechanical parameters of shale rocks. The number of fractures opening increases, and the fracture space exhibits exponential growth as pore pressure increases. With the increase in fracture volume, the Poisson's ratio of shale rocks rapidly increases, while the Young's modulus rapidly decreases, leading to a significant reduction in shale strength. An analysis of the shale in Jiyang Depression reveals that Young's modulus decreases from 37.5 GPa to 15.06 GPa, and the Poisson's ratio increases from 0.22 to 0.35 when the proportion of fracture volume increases to 1%. The influence of the time-varying nature of mechanical parameters of rocks on the evolution of four-dimensional in-situ stress is comparatively analyzed through numerical simulation methods. The four-dimensional in-situ stress simulation, considering the time-varying characteristics of rock mechanics, can better characterize the law of stress evolution and direction deflection during shale fracturing and production. It is more consistent with the evolution law of four-dimensional in-situ stress in the process of fracturing and production, and the simulation results are more reliable. The research results can provide theoretical support for the rational deployment, optimal design, and risk warning of three-dimensional well groups of shale oil.

**Key words:** shale oil; four-dimensional in-situ stress; mechanical properties of rock; time-varying characteristics; four-dimensional in-situ stress simulation

页岩油是重要的战略接替资源,中外大量实践证实水平井体积压裂开发是实现页岩油效益开发的关键<sup>[1]</sup>。压裂过程中,伴随大量压裂液进入地层,人工缝网持续扩展,与天然缝交织形成改造区,其内部孔隙压力持续上升,形成局部高压环境。开采过程中,改造区地层压力因弹性释放、压力扩散等因素持续下降<sup>[2-3]</sup>。孔隙压力上升或下降都将改变三向地应力状态,其大小及方向(即四维地应力)随压裂-放喷过程不断变化。中外研究表明,地应力场变化不仅会影响已有裂缝的有效性、渗透性,还会引起地层变形、断裂激活等地质活动,诱发井间干扰、套管变形等现场问题<sup>[4-7]</sup>。如何准确描述页岩储层四维地应力演化规律,既是实现页岩油立体井网部署、压裂优化设计、开发技术政策优化的重要依据,也是当前页岩油开发领域研究的重点和热点方向。

传统四维地应力耦合研究主要考虑应力-压力-渗流三者之间的耦合关系<sup>[8-10]</sup>。如早期的Terzaghi一维流动-应力耦合理论、Biot三维多孔介质弹性力学模型、Fatt开展的应力变化与岩石渗透率关系研究、Brownell等多相流体渗流与热力学耦合数学模型构建,其核心思想是多孔介质温度、压力变化与岩石有效应力的理论关系<sup>[11-14]</sup>。20世纪90年代开始,中外学者不断对多物理场渗流-力学耦合模型进行完善<sup>[15]</sup>,建立了热-流-固三场耦合以及热-流-固-化四场耦合模型<sup>[16-17]</sup>,其耦合的核心仍是渗流场、应力场、压力场之间的耦合,耦合过程主要考虑流体性质变化、多孔介质形变以及化学反应等,很少考虑压力、应力改变对岩石力学性质的影响。页岩纹层发育,岩相类型多样,微纳米尺度孔缝复杂,应力敏感性强。高压流体注入后,可促进层理缝开启,

内部结构变化大,孔缝体积空间大幅提高,页岩岩石力学性质、强度等发生改变<sup>[18-19]</sup>。弹性开发时,随流体压力降低,层理缝闭合,页岩泊松比、杨氏模量等岩石力学参数持续变化,表现出极强的时变性特征<sup>[20]</sup>。岩石力学参数是计算四维地应力大小及方向的基础,如何表征页岩岩石力学参数的时变性规律,是实现准确刻画页岩油藏四维地应力演化规律的关键。

笔者从四维地应力经典理论出发,明晰孔隙压力改变与四维地应力大小、方向的关系。基于页岩岩石力学实验及在线CT扫描测试,开展页岩岩石力学时变性理论研究,建立考虑时变性的页岩泊松比、杨氏模量表征模型。利用数值模拟实现基于岩石力学时变性的油藏四维地应力演化表征,揭示页岩油水平井压裂-放喷过程中岩石力学性质变化及四维地应力演化规律,为页岩油合理井网部署、优化设计等提供理论支撑。

## 1 四维地应力经典理论

四维地应力是在三维应力场的基础上增加时间维度,通过耦合孔隙压力与岩石骨架应力、岩石总应力的关系,得到油藏地应力大小及方向随开发过程的演化规律,实现油藏开发过程中动态压力场、应力场的有效表征。

### 1.1 孔隙压力对地应力大小的影响

ZOBACK等提出了一种基于多孔弹性理论的压力-应力耦合关系模型<sup>[21]</sup>,假设地层岩石为各向同性的多孔弹性岩石,在上覆岩层压力作用下,岩石受到的垂向有效应力与水平方向有效应力具有如下关系:

$$S_{\text{Hor}} = \frac{\mu}{1-\mu} \cdot S_v + \alpha P_p \left(1 - \frac{\mu}{1-\mu}\right) \quad (1)$$

式中： $S_{\text{Hor}}$ 为水平方向有效应力，MPa； $\mu$ 为泊松比； $S_v$ 为垂向有效应力，MPa； $\alpha$ 为比奥系数，无量纲； $P_p$ 为孔隙压力，MPa。

式(1)表明水平方向有效应力由垂向有效应力在水平方向的分量和孔隙压力2部分组成，假设岩石各向同性， $S_{\text{Hor}}$ 能够同时表征水平方向有效最大和最小主应力，当孔隙压力增大时，根据式(1)可得水平方向有效应力增量为：

$$\Delta S_{\text{Hor}} = \alpha \left( \frac{1-2\mu}{1-\mu} \right) \Delta P_p \quad (2)$$

式中： $\Delta S_{\text{Hor}}$ 为水平方向有效应力增量，MPa； $\Delta P_p$ 为孔隙压力增量，MPa。

由式(2)可知，孔隙压力增量与岩石水平方向有效应力增量呈正相关关系，在不考虑岩石破裂的情况下，孔隙压力增量与水平方向有效应力增量及泊松比直接相关。泊松比越小，相同孔隙压力增量下，水平方向有效应力增量越大(图1)，表明对于力学性质较硬、不易变形的岩石而言，增大孔隙压力将使岩石的应力水平大幅提高。

## 1.2 孔隙压力与地应力方向偏转

当岩石具有一定的非均质性，如存在断层、裂缝等空间时，裂缝内流体压力增大使岩石内部应力场的非均匀性增强，这种非均匀特性将导致地应力方向的偏转。假设水平方向的二维模型中岩石内部的应力沿某一特定笛卡尔坐标系分布，其中 $x$ 方向为水平最大主应力方向， $y$ 方向为水平最小主应力方向，岩石内含有裂缝，裂缝走向与水平最大主应力方向呈一定夹角。当孔隙压力增大时，新的水平地应力分布及其剪应力可写成如下形式：

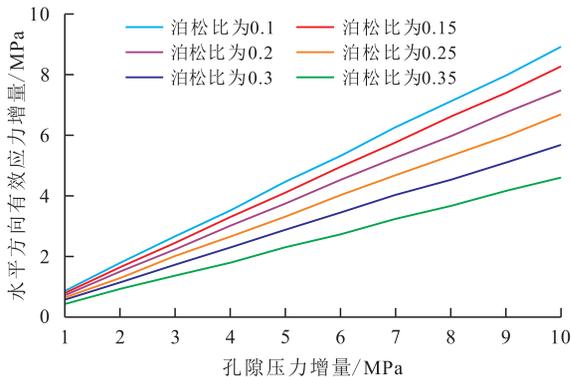


图1 不同泊松比下岩石孔隙压力增量与水平方向有效应力增量曲线

Fig.1 Curve of pore pressure increment and horizontal effective stress increment for rocks with different Poisson's ratios

$$\begin{cases} S_x = (S_{\text{Hmax}} - A \cdot \Delta P_p) - \frac{A \cdot \Delta P_p}{2} (1 - \cos 2\theta) \\ S_y = (S_{\text{Hmin}} - A \cdot \Delta P_p) - \frac{A \cdot \Delta P_p}{2} (1 + \cos 2\theta) \\ \tau_{xy} = \frac{A \cdot \Delta P_p}{2} \sin 2\theta \\ A = \alpha \frac{1-2\mu}{1-\mu} \end{cases} \quad (3)$$

式中： $S_x$ 为新水平最大主应力，MPa； $S_{\text{Hmax}}$ 为原始水平最大主应力，MPa； $A$ 为应力路径，无量纲； $\theta$ 为裂缝与 $x$ 坐标轴的夹角，(°)； $S_y$ 为新水平最小主应力，MPa； $S_{\text{Hmin}}$ 为原始水平最小主应力，MPa； $\tau_{xy}$ 为 $xy$ 面剪应力，MPa。

根据式(3)，在新的水平地应力分布下，水平最大主应力方向的偏转角为：

$$\gamma = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{2\tau_{xy}}{S_x - S_y} \right) = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{A \Delta P_p \sin 2\theta}{S_{\text{Hmax}} - S_{\text{Hmin}} + A \Delta P_p \cos 2\theta} \right) \quad (4)$$

式中： $\gamma$ 为新水平最大主应力偏转角，(°)。

定义 $q$ 为孔隙压力增量与水平应力差的比值，反映孔隙压力增幅，其表达式为：

$$q = \frac{\Delta P_p}{S_{\text{Hmax}} - S_{\text{Hmin}}} \quad (5)$$

式中： $q$ 为孔隙压力增量与水平应力差的比值。

则式(4)可以改写为：

$$\gamma = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{Aq \sin 2\theta}{1 + Aq \cos 2\theta} \right) \quad (6)$$

由式(6)可知，新水平最大主应力偏转角与裂缝走向、孔隙压力增幅、泊松比直接相关。根据式(6)绘制新水平最大主应力偏转角与泊松比、孔隙压力增幅的关系图版(图2)，随泊松比增大，因裂缝导致的新水平最大主应力偏转角变小。相同泊松

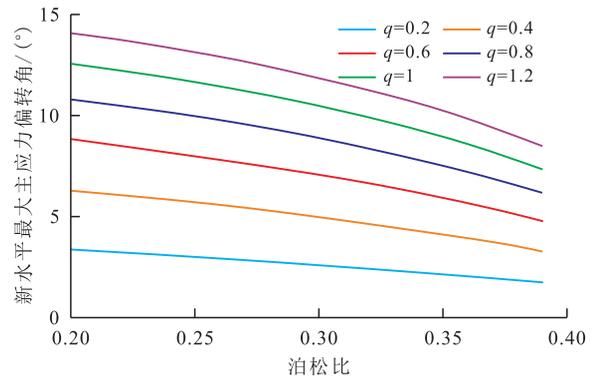


图2 不同泊松比及孔隙压力增幅下新水平最大主应力偏转角图版

Fig.2 Chart of horizontal maximum principal stress deflection angle under different Poisson's ratios and pore pressure increments

比条件下,孔隙压力增幅越大,新水平最大主应力偏转角越大。

## 2 页岩岩石力学参数时变性规律

四维地应力经典理论中假设岩石力学性质不发生变化,该假设适用于岩石强度较高且微裂缝不发育的致密砂岩,而页岩储层岩相变化快、岩石力学性质复杂、层理缝发育。高压流体充注时,能够促进页岩层理缝大量开启,力学强度大幅下降。因此,研究页岩油藏的四维地应力演化时,除考虑孔隙压力、裂缝角度等条件外,还需考虑岩石本身力学性质的变化规律。

### 2.1 页岩岩石力学性质

#### 2.1.1 应力-应变关系

济阳坳陷页岩为灰质纹层与泥质纹层高频互层的层耦结构,单纹层厚度薄,约为0.1~0.5 mm,平均2 000~10 000层/m,以隐晶纹层和亮晶纹层为主,纹层之间以压实-胶结作用连接,这种特有的层耦结构造就其复杂的力学特征及破裂规律。通过在全直径岩心的轴向和径向取平行样(其中轴向为垂直纹层岩心柱样,径向为平行纹层岩心柱样),利用GCTS三轴力学系统测试样品的力学参数。实验结果(图3)显示,纹层对页岩岩石力学性质具有重要影响,25 MPa围压条件下,轴向样品抗压强度为161 MPa,泊松比为0.15,杨氏模量仅为16 GPa;径向样品抗压强度达189 MPa,泊松比为0.17,杨氏模量为31.95 GPa。应力-应变曲线上,轴向样品体现了明显的弹塑性特征,而径向样品展现出线弹性变形规律。该实验充分表明,页岩纹层与载荷边界存在一定角度时将影响岩石强度及破裂等规律。

观察压后岩心破碎照片(图4),岩心受挤压作用后呈现多次破裂,且径向与轴向样品多沿层理破

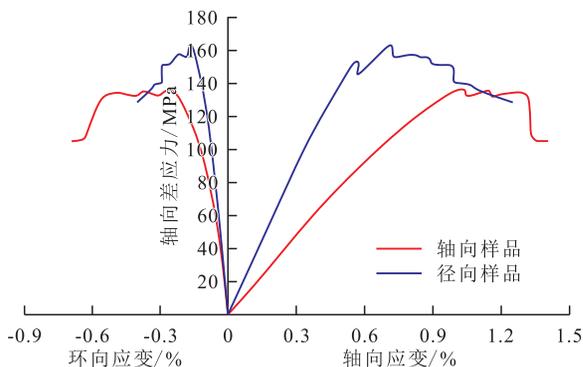
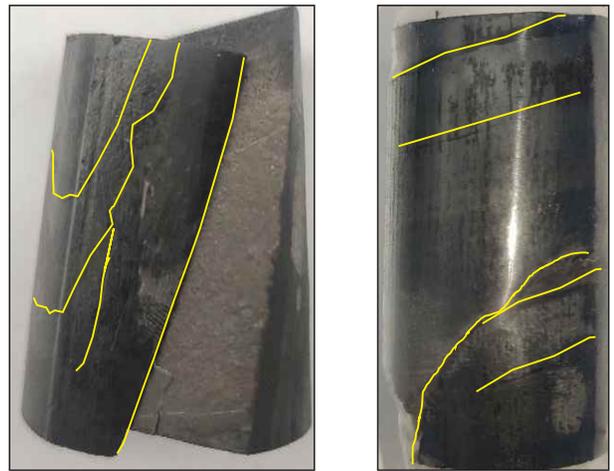


图3 济阳坳陷页岩三轴压缩应力-应变曲线

Fig.3 Triaxial compression stress-strain curve of shale in Jiyang Depression



a.径向样品

b.轴向样品

图4 纹层页岩样品压裂后破碎照片

Fig.4 Photograph of fractured laminated shale samples after fracturing

裂,表明纹层是页岩岩石致裂及裂缝延展的主控因素。岩石破裂后应力跌落速度慢,残余应力相对较高,径向样品残余应力约为150 MPa,轴向样品残余应力为130 MPa,表明纹层破裂对应力释放作用有限,基质岩石压裂后仍能保持较高的应力水平,破裂过程在基质岩石中难以发生。

#### 2.1.2 高压流体充注后的结构变化特征

济阳坳陷页岩层理缝、超压缝、构造缝等多尺度多类型发育,其中层理缝缝长可延伸至数厘米,缝宽一般为1~10 μm;超压缝缝长一般为1~10 cm,缝宽主要为0.01~2 μm,常被方解石、泥质或沥青等充填;构造缝缝长一般为10~50 cm,缝宽一般约为1 mm。原始地层条件下,这些裂缝大多处于闭合失效状态,但随着高压流体注入,孔隙压力升高,闭合的裂缝逐渐张开,形成复杂连通孔缝体。在线CT测试结果(图5)表明,原始条件(14 MPa)基础上孔隙压力升高8和16 MPa后,可识别的裂缝条数分别增加0.6倍和7.5倍,裂缝孔隙度增幅分别可达129%和235%,有效裂缝空间随孔隙压力的增大呈指数型增长。由于有效裂缝空间成倍数增长,且空间内充满了高压流体,对岩石整体力学性质的影响将难以忽略。

由实验可知,页岩岩石力学参数时变的根本原因在于高压流体充注,流体压力增加,裂缝体积占岩石总体积的比例逐渐上升。若定义任意时刻裂缝体积占岩石总体积的比例为裂缝率,且孔隙压力与时间存在函数关系,则页岩裂缝率与孔隙压力应存在如下函数关系:

$$r_{\text{frac}} = f[P_p(t)] \quad (7)$$

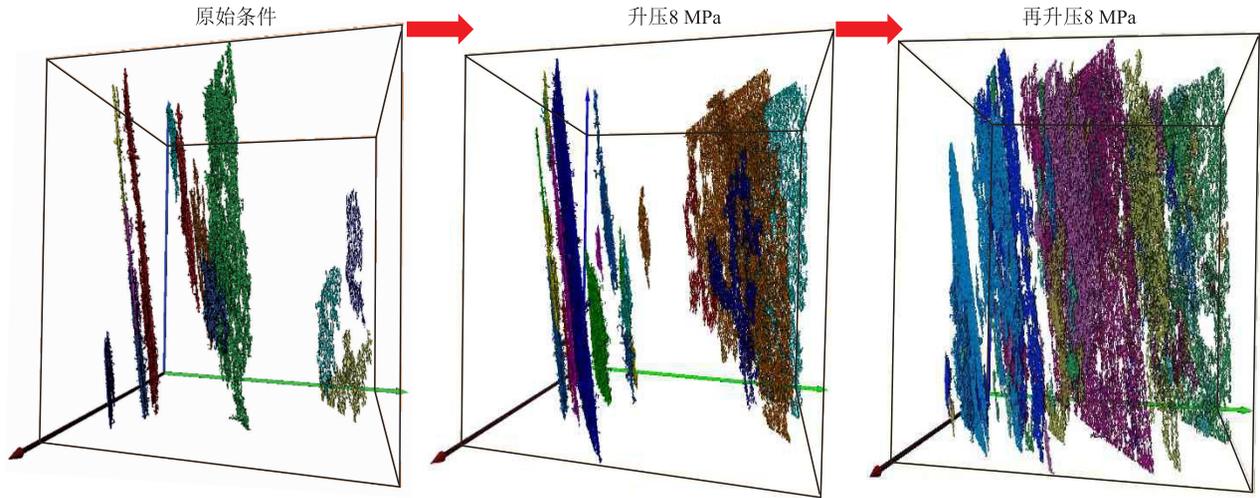


图5 在线CT不同孔隙压力下层理缝变化图像

Fig.5 Images of bedding fracture changes under different pore pressures using online CT

式中： $r_{\text{frac}}$ 为页岩裂缝率，无量纲； $P_p(t)$ 为 $t$ 时刻下的孔隙压力，MPa； $t$ 为时间，s。

## 2.2 页岩岩石力学参数时变性特征

应变能是力学领域的基础概念，表征了以应力和应变形式储存在物体中的势能，反映岩石等材料在受到外部挤压作用下存储的能量大小。应变能密度则是物体变形后单位面积或体积内存储的应变能，其数值只与应力、应变有关，在分析材料断裂韧性、研究复杂应力多介质结构力学性能等方面有着广泛的应用<sup>[22-23]</sup>。根据应变能密度定义，假设某一二维正方形均匀岩石单元，受到 $x$ 和 $y$ 方向挤压应力，岩石单元仅在 $x$ 、 $y$ 方向受挤压作用变形，则岩石总应变能密度表达式为：

$$\bar{\omega} = \frac{1}{2} (\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_y \varepsilon_y) \quad (8)$$

式中： $\bar{\omega}$ 为应变能密度， $\text{J/m}^2$ ； $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 分别为岩石单元在 $x$ 和 $y$ 方向受到的应力，MPa； $\varepsilon_x$ 、 $\varepsilon_y$ 分别为岩石单元在 $x$ 和 $y$ 方向产生的应变，无量纲。

根据广义胡克定律：

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{1}{E} (\sigma_x - \mu \sigma_y) \\ \varepsilon_y = \frac{1}{E} (\sigma_y - \mu \sigma_x) \end{cases} \quad (9)$$

式中： $E$ 为岩石单元杨氏模量，GPa。

将式(9)代入式(8)，经整理可得：

$$\bar{\omega} = \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{E} (\sigma_x^2 + \sigma_y^2) - \frac{2\mu \sigma_x \sigma_y}{E} \right] \quad (10)$$

当岩石存在裂缝时，应力加载过程将使裂缝和基质均发生形变，由形变产生的总应变能包含裂缝应变能和基质应变能2部分。根据式(10)，裂缝和基质的应变能密度可写成如下形式：

$$\begin{cases} \bar{\omega}_i = \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{E_i} (\sigma_x^2 + \sigma_y^2) - \frac{2\mu_i \sigma_x \sigma_y}{E_i} \right] \\ \bar{\omega}_j = \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{E_j} (\sigma_x^2 + \sigma_y^2) - \frac{2\mu_j \sigma_x \sigma_y}{E_j} \right] \end{cases} \quad (11)$$

式中： $\bar{\omega}_i$ 为基质应变能密度， $\text{J/m}^2$ ； $E_i$ 为基质杨氏模量，GPa； $\mu_i$ 为基质泊松比，无量纲； $\bar{\omega}_j$ 为裂缝应变能密度， $\text{J/m}^2$ ； $E_j$ 为裂缝杨氏模量，GPa； $\mu_j$ 为裂缝泊松比，无量纲。

根据能量守恒定律，含裂缝岩石单元总应变能的表达式为：

$$J = J_i + J_j \quad (12)$$

式中： $J$ 为含裂缝岩石单元总应变能， $\text{J}$ ； $J_i$ 为基质应变能， $\text{J}$ ； $J_j$ 为裂缝应变能， $\text{J}$ 。

根据应变能的定义，二维含裂缝岩石单元、裂缝、基质应变能可近似写成如下形式：

$$\begin{cases} J = \bar{\omega} \times S \\ J_i = \bar{\omega}_i \times S_i \\ J_j = \bar{\omega}_j \times S_j \end{cases} \quad (13)$$

式中： $\bar{\omega}$ 为含裂缝岩石单元的总应变能密度， $\text{J/m}^2$ ； $S$ 为含裂缝岩石单元的总面积， $\text{m}^2$ ； $S_i$ 为基质面积， $\text{m}^2$ ； $S_j$ 为裂缝面积， $\text{m}^2$ 。

由于裂缝与应力方向存在夹角，使得裂缝任意一点的应变将产生2个方向的效果，即平行于裂缝的切向应变和垂直于裂缝的法向应变。因此，可根据平行四边形定则将裂缝任意一点的 $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 分别分解为垂直于裂缝的法向应力和平行于裂缝的切向应力。则有：

$$\begin{cases} \sigma_s = \sigma_x \cos \theta - \sigma_y \sin \theta \\ \tau = \sigma_x \sin \theta + \sigma_y \cos \theta \end{cases} \quad (14)$$

式中： $\sigma_s$ 为法向应力，MPa； $\tau$ 为切向应力，MPa。

将式(11)、(13)代入式(12),可得含裂缝岩石单元的总应变能表达式为:

$$\overline{\omega} S = \frac{1}{2} \left\{ \left[ \frac{S_i}{E_i} (\sigma_x^2 + \sigma_y^2) - \frac{2\mu_i S_i \sigma_x \sigma_y}{E_i} \right] + \left[ \frac{S_j}{E_j} (\sigma_s^2 + \tau^2) - \frac{2\mu_j S_j \sigma_s \tau}{E_j} \right] \right\} \quad (15)$$

将式(14)代入式(15),经整理可得:

$$\overline{\omega} S = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{S_i}{E_i} + \frac{S_j}{E_j} \right) (\sigma_x^2 + \sigma_y^2) - \left( \frac{2\mu_i S_i}{E_i} + \frac{2\mu_j S_j}{E_j} \cos 2\theta \right) \sigma_x \sigma_y - \frac{\mu_j S_j}{E_j} (\sigma_x^2 - \sigma_y^2) \sin 2\theta \right] \quad (16)$$

由于裂缝面积的数量级远小于岩石单元总面积( $S_j/S_i < 0.001$ ),则式(16)可简化为:

$$\overline{\omega} = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{S_i}{S E_i} + \frac{S_j}{S E_j} \right) (\sigma_x^2 + \sigma_y^2) - \left( \frac{2\mu_i S_i}{S E_i} + \frac{2\mu_j S_j}{S E_j} \cos 2\theta \right) \sigma_x \sigma_y \right] \quad (17)$$

根据应变能密度的定义,对比式(10)和式(17),得到含裂缝岩石单元的等效杨氏模量和等效泊松比计算公式为:

$$\begin{cases} E' = \frac{S'}{\frac{S_i}{E_i} + \frac{S_j}{E_j}} \\ \mu' = \frac{\frac{\mu_i S_i}{E_i} + \frac{\mu_j S_j}{E_j} \cos 2\theta}{\frac{S_i}{E_i} + \frac{S_j}{E_j}} \end{cases} \quad (18)$$

式中: $E'$ 为含裂缝岩石单元等效杨氏模量, GPa; $\mu'$ 为含裂缝岩石单元等效泊松比,无量纲。

式(18)反映了含裂缝岩石单元等效杨氏模量和等效泊松比不仅与基质和裂缝力学性质有关,还与裂缝面积、裂缝与应力的夹角有关。结合式(7)中定义的裂缝率概念,式(18)的裂缝、基质面积可用裂缝率等效表征,其表达式为:

$$r_{\text{frac}} = \frac{S_j}{S'} \quad (19)$$

将式(19)代入式(18),整理得:

$$\begin{cases} E' = \frac{E_i E_j}{E_i r_{\text{frac}} + E_j (1 - r_{\text{frac}})} \\ \mu' = \frac{\frac{\mu_i}{E_i} (1 - r_{\text{frac}}) + \frac{\mu_j}{E_j} r_{\text{frac}} \cos 2\theta}{\frac{1}{E_i} (1 - r_{\text{frac}}) + \frac{1}{E_j} r_{\text{frac}}} \end{cases} \quad (20)$$

式(20)揭示了岩石单元的力学性质与裂缝的理论关系,岩石不含裂缝时, $r_{\text{frac}}=0$ ,式(20)可简化为

$E'=E_i, \mu'=\mu_i$ ,即岩石单元泊松比为基质泊松比。随着孔隙压力增大,裂缝对岩石单元力学性质的影响逐渐突出,表现为裂缝激活初期岩石单元泊松比快速上升,杨氏模量急剧下降,岩石强度大幅降低。随着开启裂缝逐渐增多,岩石强度降幅逐渐缩小,裂缝率与岩石单元泊松比及杨氏模量的关系曲线如图6所示。

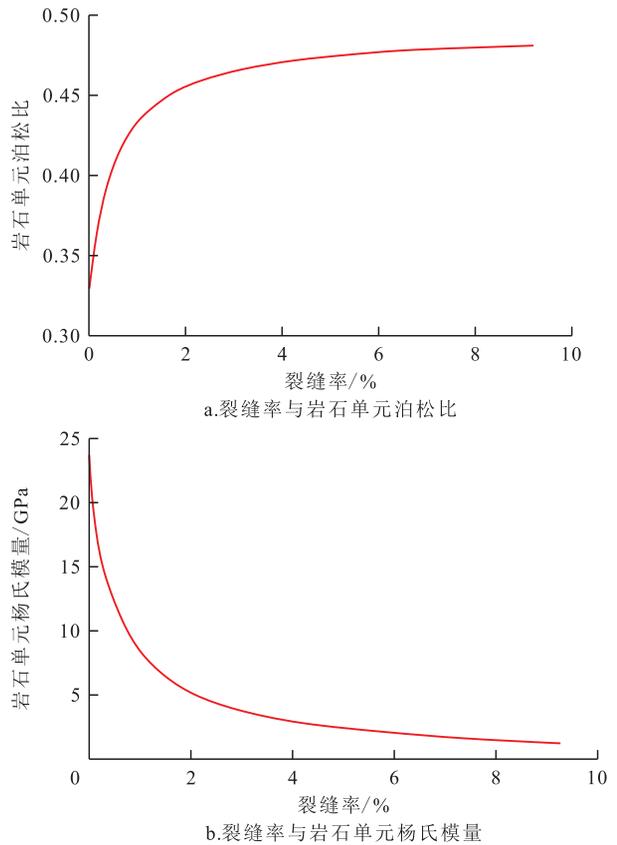


图6 裂缝率与岩石单元泊松比及杨氏模量关系曲线  
Fig.6 Relationship among fracture rate, Young's modulus, and Poisson's ratio of rock unit

将式(7)代入式(20),即可得到页岩泊松比及杨氏模量随时间变化的理论关系:

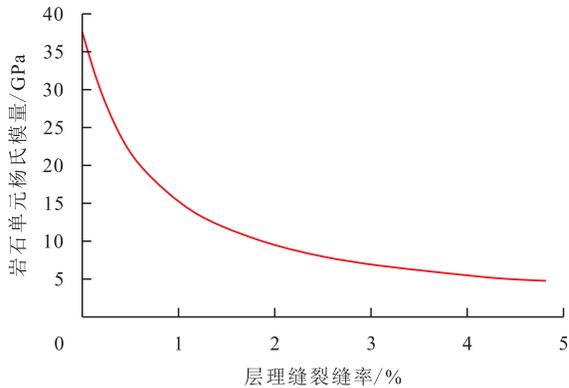
$$\begin{cases} E' = \frac{E_i E_j}{E_i f [P_p(t)] + E_j \{1 - f [P_p(t)]\}} \\ \mu' = \frac{\frac{\mu_i}{E_i} \{1 - f [P_p(t)]\} + \frac{\mu_j}{E_j} \cdot f [P_p(t)] \cos 2\theta}{\frac{1}{E_i} \{1 - f [P_p(t)]\} + \frac{1}{E_j} f [P_p(t)]} \end{cases} \quad (21)$$

### 3 页岩四维地应力应用实例

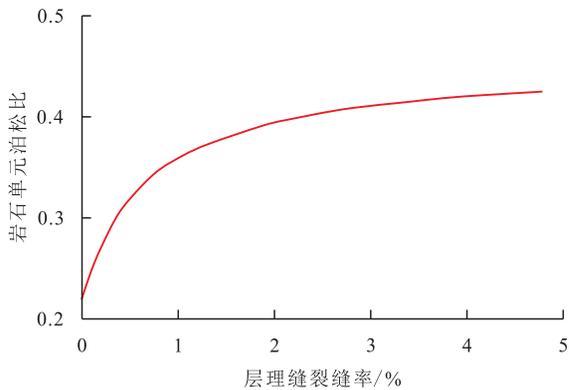
#### 3.1 考虑层理缝开启的岩石力学时变性研究实例

以济阳坳陷某洼陷页岩油藏为例,页岩岩石样品发育多条层理缝。室内在线CT实验表明,在有

效应力为 27 MPa 条件下,样品层理缝裂缝率为 0.23%,4 条层理缝开启。通过对岩心样品注水,增大了孔隙压力,而有效应力持续下降,层理缝开启条数逐渐增多,有效应力为 3 MPa 时,层理缝裂缝率为 1.04%,开启条数达到 119 条。根据三轴压缩实验,页岩基质杨氏模量为 37.5 GPa,泊松比为 0.22。假设层理缝为水平层理,水平方向应力与层理缝之间的夹角为 0°。考虑层理缝强度极低、极易变形的力学性质,设置层理缝杨氏模量为 0.25 GPa,泊松比为 0.45。根据式(18),计算得到济阳坳陷页岩层理缝裂缝率与岩石单元杨氏模量及泊松比关系曲线(图 7)。



a.层理缝裂缝率与岩石单元杨氏模量



b.层理缝裂缝率与岩石单元泊松比

图7 济阳坳陷页岩层理缝裂缝率与岩石单元杨氏模量及泊松比的关系曲线

Fig.7 Relationship among bedding fracture rate, Young's modulus, and Poisson's ratio of shale in Jiyang Depression

根据室内在线 CT 实验,回归孔隙压力与层理缝裂缝率的关系(图 8),孔隙压力与层理缝裂缝率呈 S 型关系特征,即孔隙增压初期,只有少量层理缝缓慢激活。随着孔隙压力逐渐增大,大部分层理缝被激活,裂缝率快速上升。当孔隙压力达到某一水平时,可激活裂缝条数逐渐减少,裂缝率增幅逐渐变缓直至稳定。根据 S 型曲线特征,建立孔隙压力与层理缝裂缝率的有理式统计关系为:

$$r_{\text{frac}} = \frac{0.95P_p^4}{50625 + P_p^4} + 0.22 \quad (22)$$

联立式(21)与式(22),得到济阳坳陷页岩孔隙压力与岩石单元杨氏模量及泊松比的关系曲线(图 9)。

### 3.2 基于页岩力学时变性的四维压力-应力耦合模拟研究

基于页岩力学时变性分析,结合四维地应力经典理论,可以计算出任意孔隙压力条件下应力大小及方向。依托数值模拟技术,建立考虑页岩力学时

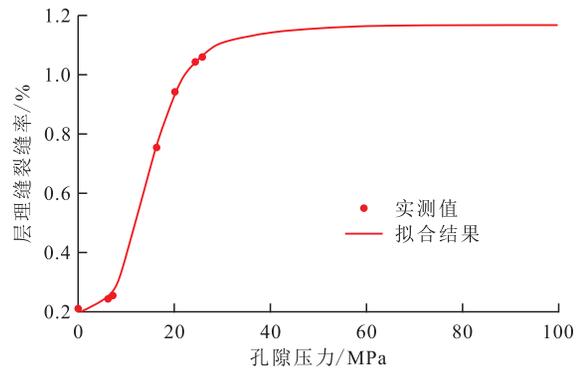
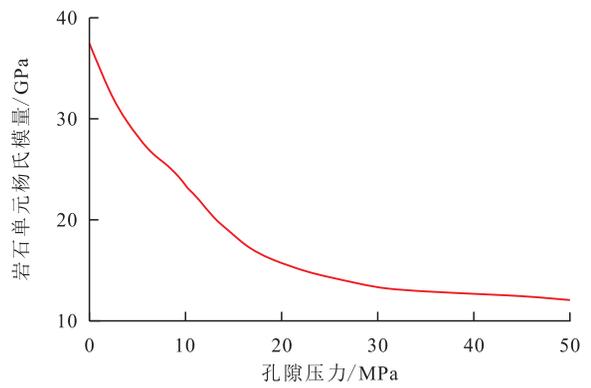
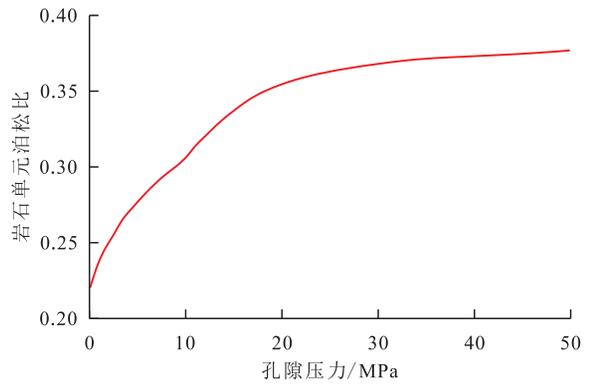


图8 孔隙压力与层理缝裂缝率关系曲线

Fig.8 Relationship between pore pressure and bedding fracture rate



a.孔隙压力与岩石单元杨氏模量



b.孔隙压力与岩石单元泊松比

图9 济阳坳陷页岩孔隙压力与岩石单元杨氏模量及泊松比的关系曲线

Fig.9 Relationship among pore pressure, Young's modulus, and Poisson's ratio of shale in Jiyang Depression

变性的四维压力-应力耦合模型,开展考虑页岩层理缝开启-闭合的四维压力-应力耦合演化规律研究。

模型基础参数如下:孔隙度为5%,渗透率为0.04 mD,泊松比为0.23,杨氏模量为35 GPa,岩石单元泊松比及杨氏模量的时变曲线为图9。模型顶面埋深为3 000 m,垂向应力为60 MPa,水平最大主应力为53 MPa,水平最小主应力为50 MPa,地应力状态满足 $\sigma_z > \sigma_x > \sigma_y$ ,x方向为最大主应力方向。模型中间设置1口水平井,水平井初期注水增压,随后弹性降压开发。分别开展考虑页岩力学时变条件和常数条件模拟研究,以水平最大主应力演化过程为例,分析力学时变性对四维地应力场的影响。

### 3.2.1 力学时变性对四维地应力大小的影响

2种模拟的初期应力大小完全相同,随着水平井注水,孔隙压力不断上升,井筒周围应力水平不断增大,并持续向井筒两侧扩展。若不考虑岩石力学时变条件,水平方向有效应力大小仅与孔隙压力有关,此时有效应力与孔隙压力呈线性关系。考虑岩石力学时变性,水平方向有效应力与垂向应力分量、孔隙压力都有关系,且随着孔隙压力持续增大,由孔隙压力增大引起的水平方向有效应力增大比例逐渐降低。同时,泊松比增大带来的岩石变形能力增强,应力会因岩石强变形而缩小传递范围。因此,在相同孔隙压力传递范围条件下,泊松比增大将导致应力传递范围变小。该认识对页岩油立体井网部署具有重要指导意义,不考虑岩石力学时变性时,应力传递范围偏大,将导致部署水平井井距过大,引起储量失控。

水平井放喷时,随时间延长,孔隙压力逐渐扩散,模型各处压力场相差不大,若不考虑岩石力学时变性,则油藏各处应力大小分布较为均衡。但从实际情况来看,近井筒附近会优先形成低压环境,泊松比低于远离井筒的地层,岩石力学性质差异带来的应力分布非均质性增强。在相同时刻、相同工作制度条件下,不考虑岩石力学时变性时,远近井筒应力差约为8 MPa;考虑岩石力学时变性时,远近井筒应力差可达16 MPa(图10),表明考虑岩石力学时变性能更好地表征页岩储层四维地应力的非均匀演化规律。

### 3.2.2 岩石力学时变性对四维地应力方向的影响

岩石力学时变性对地应力偏转角影响很大,岩石力学参数改变,地应力偏转方向也不相同。初始状态下,水平最大主应力为第二主应力,方向为EW向,与水平段垂直,地应力状态为 $\sigma_z > \sigma_x > \sigma_y$ 。压裂液

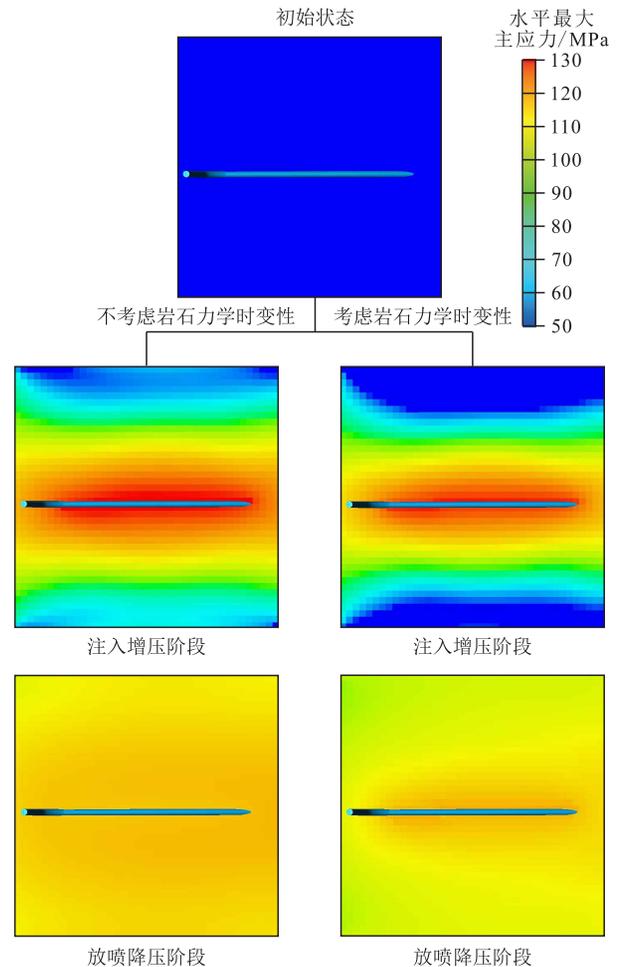


图10 基于岩石力学时变性的四维耦合水平最大主应力大小模拟对比

Fig.10 Simulation comparison of four-dimensional coupled horizontal maximum principal stress based on time-varying shale mechanics

注入增压时,随压力扩散,水平最大和最小主应力数值逐渐超过垂向应力,且近井筒水平最大主应力方向整体与水平井段平行,远离井筒方向与水平段垂直,地应力状态持续改变,增压结束后的地应力状态整体呈 $\sigma_x > \sigma_y > \sigma_z$ 。

放喷降压阶段,随着压力场改变,三向应力方向持续演化。不考虑岩石力学时变性时,随放喷过程进行,近井筒水平最大主应力方向几乎没有改变,保持沿水平井轨迹方向的偏转状态,但产生应力偏转的范围不断扩大,应力状态未发生明显改变,扩展规律与压力扩散规律类似。考虑岩石力学时变性时,泊松比及杨氏模量随放喷过程的进行不断改变,水平最大主应力在压力场、岩石力学参数场的不断演化中方向逐渐恢复至垂直井筒方向(图11)。

模拟结果差异降压的根源在于力学时变性。从实际地层来看,放喷降压阶段伴随孔隙压力下

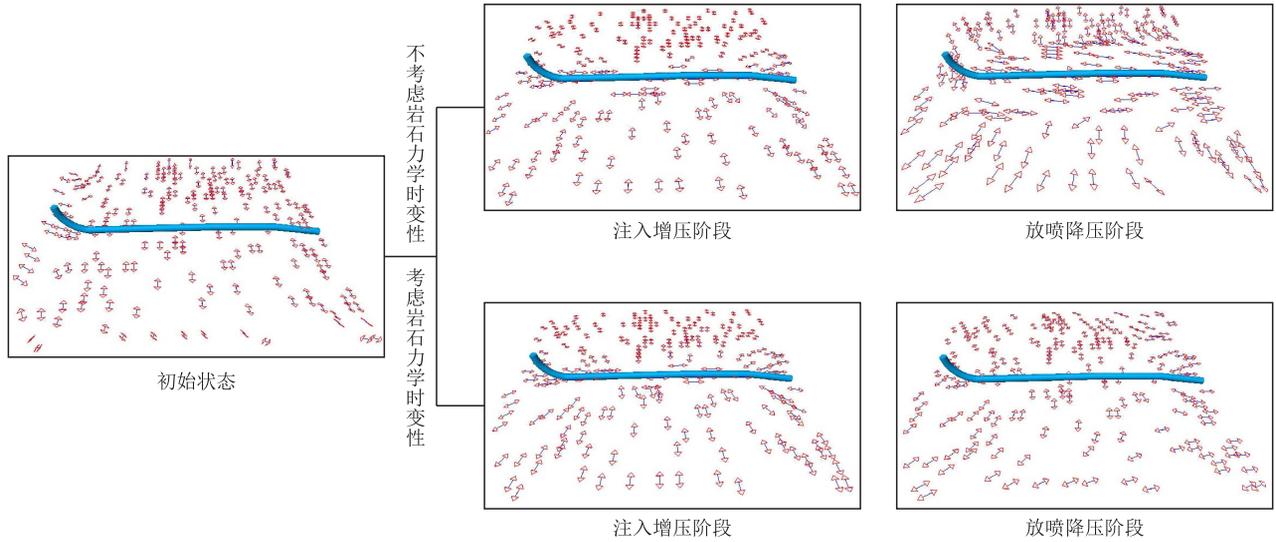


图 11 基于岩石力学时变性的四维耦合水平最大主应力方向模拟对比

Fig.11 Simulation comparison of four-dimensional coupled horizontal maximum principal stress direction based on time-varying rock mechanics

降,三向地应力水平逐渐降低,水平最大主应力方向逐渐恢复至初始垂直井筒状态。不考虑岩石力学时变性时,放喷降压阶段进一步扩大了近井筒水平应力的偏转程度,而考虑岩石力学时变性的模拟结果与实际页岩油藏弹性开发更加吻合,基于岩石力学时变性特征的模拟结果更加可靠。

### 4 结论

(1)油气开发过程中,地层压力改变,应力场随之改变。经典四维地应力以压力为耦合点,实现了孔隙压力变化对应力大小及方向改变程度的有效表征,但缺乏对岩石力学参数时变性的考虑。

(2)页岩孔缝结构复杂,孔隙压力增大将导致大量层理缝开启,对岩石力学性质的影响很大,岩石力学参数呈现时变特征。基于应变能理论,推导建立了页岩孔隙压力与泊松比、杨氏模量的理论关系,能够有效表征页岩岩石力学参数的时变规律。

(3)数值模拟表明力学时变性对应力大小及应力方向偏转影响很大。考虑页岩岩石力学时变性特征的四维地应力模拟结果更加符合生产实践规律。

#### 参考文献

[1] 雷群,胥云,才博,等.页岩油气水平井压裂技术进展与展望[J].石油勘探与开发,2022,49(1):166-172,182.  
LEI Qun, XU Yun, CAI Bo, et al. Progress and prospects of horizontal well fracturing technology for shale oil and gas reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49

(1): 166-172, 182.  
[2] 杨勇.济阳页岩油开发“三元”储渗理论技术与实践[J].石油勘探与开发,2024,51(2):337-347.  
YANG Yong. Shale oil development techniques and application based on ternary-element storage and flow concept in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, East China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(2): 337-347.  
[3] 贾承造,姜林,赵文.页岩油气革命与页岩油气、致密油气基础地质理论问题[J].石油科学通报,2023,5(6):695-706.  
JIA Chengzao, JIANG Lin, ZHAO Wen. The shale revolution and basic geological theory problems of shale and tight oil and gas [J]. Petroleum Science Bulletin, 2023, 5(6): 695-706.  
[4] 刘英君,朱海燕,唐焯赫,等.基于地质工程一体化的煤层气储层四维地应力演化模型及规律[J].天然气工业,2022,42(2):82-92.  
LIU Yingjun, ZHU Haiyan, TANG Xuanhe, et al. Four-dimensional in-situ stress model of CBM reservoirs based on geology-engineering integration [J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(2): 82-92.  
[5] 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.  
[6] 王腾飞.基于有效应力影响的岩石物理建模研究[J].石化技术,2024,31(4):213-215.  
WANG Tengfei. Petrophysical modeling based on effective stress effects [J]. Petrochemical Industry Technology, 2024, 31(4): 213-215.  
[7] 甘仁忠,熊健,彭妙,等.陆相页岩储集层岩石力学特性及能量演化特征[J].新疆石油地质,2023,44(4):472-478.  
GAN Renzhong, XIONG Jian, PENG Miao, et al. Rock mechanical properties and energy evolution of continental shale reservoirs [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2023, 44(4):

- 472-478.
- [8] HUANG S P, LIU D M, YAO Y B, et al. Natural fractures initiation and fracture type prediction in coal reservoir under different in-situ stresses during hydraulic fracturing [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2017, 43(1): 69-80.
- [9] 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.
- [10] ROUSSEL N P, FLOREZ H A, RODRIGUEZ A A. Hydraulic fracture propagation from infill horizontal wells [C]. SPE 166503-MS, 2013.
- [11] BIOT Maurice A. General theory of three-dimensional consolidation [J]. *Journal of Applied Physics*, 1941, 12(2): 155-164.
- [12] GEERTSMA J. The effect of fluid pressure decline on volumetric changes of porous rocks: Petroleum Branch Fall Meeting [C]. Los Angeles: Society of Petroleum Engineers, 1956.
- [13] MERLE H A, KENTIE C J P, VAN Opstal G H C, et al. The bachaquero study-a composite analysis of the behavior of a compaction drive/solution gas drive reservoir [J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1976, 28(9): 1 107-1 115.
- [14] BRUNO M S, NAKAGAWA F M. Pore pressure influence on tensile fracture propagation in sedimentary rock [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1991, 28(1): 261-273.
- [15] LIN T, YU H, LIAN Z, et al. Numerical simulation of the influence of stimulated reservoir volume on in-situ stress field [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 36(1): 1 228-1 238.
- [16] 王志国,张雷,张文福,等.油藏多孔介质热质传递“三箱”分析模型研究[J].*力学学报*,2014,46(3):361-368.  
WANG Zhiguo, ZHANG Lei, ZHANG Wenfu, et al. Study on analysis method of “three box” in heat and mass transfer process of reservoir media [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2014, 46(3): 361-368.
- [17] 朱维耀,陈震,尚新春.非常规油气藏多场耦合渗流理论研究进展[J].*工程科学学报*,2023,45(6):1 045-1 056.  
ZHU Weiyao, CHEN Zhen, SHANG Xinchun. Multiphysical field coupling in unconventional oil and gas reservoirs [J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2023, 45(6): 1 045-1 056.
- [18] 谢建勇,袁珍珠,代兵,等.页岩油储层层理缝渗吸机制和渗吸模式[J].*特种油气藏*,2021,28(5):161-167.  
XIE Jianyong, YUAN Zhenzhu, DAI Bing, et al. Imbibition mechanism and model of bedding fractures in shale oil reservoir [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2021, 28(5): 161-167.
- [19] 刘厚彬,孙航瑞,崔帅,等.层理性页岩变形机理及力学特性研究[J].*地下空间与工程学报*,2023,19(S1):174-180.  
LIU Houbin, SUN Hangrui, CUI Shuai, et al. Study on the deformation mechanism and mechanical properties of bedding shale [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2023, 19(S1): 174-180.
- [20] 杜旭林,程林松,牛焱昱,等.考虑水力压裂缝和天然裂缝动态闭合的三维离散缝网数值模拟[J].*计算物理*,2022,39(4): 453-464.  
DU Xulin, CHENG Linsong, NIU Langyu, et al. Numerical simulation of 3D discrete fracture networks considering dynamic closure of hydraulic fractures and natural fractures [J]. *Chinese Journal of Computational Physics*, 2022, 39(4): 453-464.
- [21] ZOBACK M D, BYERLEE J D. Permeability and effective stress: Geologic notes [J]. *AAPG Bulletin*, 1975, 59(1): 154-158.
- [22] 黎立云,谢和平,鞠杨,等.岩石可释放应变能及耗散能的实验研究[J].*工程力学*,2011,28(3):35-40.  
LI liyun, XIE Heping, JU Yang, et al. Experimental investigations of releasable energy and dissipative energy within rock [J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28(3): 35-40.
- [23] MING Y, JING H G. An improved structural damage detection method based on modal strain energy [J]. *Engineering Mechanics*, 2002, 24(2): 92-94.

编辑 刘北羿