

文章编号: 1001-4888(2023)06-0741-10

考虑油气运移的致密储层岩石流变损伤特性研究^{*}

杨峰¹, 钟安海¹, 丁然¹, 鲁明晶¹, 李静², 吴玉鹏³, 刘伊帅²

(1. 中国石化胜利油田分公司 石油工程技术研究院, 山东东营 257200; 2. 中国石油大学(华东) 储运与建筑工程学院, 山东青岛 266580; 3. 国网山东省电力公司 莘县供电公司, 山东聊城 252400)

摘要: 为研究考虑油气运移致密储层岩石的流变损伤特性, 本文通过 CT 扫描试验及数字图像技术精确表征致密储层岩石真实三维结构, 据此建立真实岩心的三维模型, 根据单轴压缩及流变试验获取模型细观参数, 并基于 PFC^{3D} 开展致密砂岩流变损伤数值模拟研究。研究表明: (1) 致密砂岩细观模型的蠕变曲线随着孔隙压力的增大而逐渐上移, 最终应变趋于稳定, 稳定应变与孔隙压力呈正相关关系。(2) 模型损伤与应变呈正相关关系, 随着试样轴向应变的增长, 损伤逐渐增加。(3) 在相同荷载作用下, 由于孔隙压力随孔隙中油气增加而增大, 但增加幅度逐渐减小, 模型损伤随之增加。此研究成果可为油田储层改造设计提供理论依据。

关键词: 致密储层岩石; 油气运移; CT 扫描; 流变特性; 流变损伤

中图分类号: TU45 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-23-134

0 引言

随着经济的快速发展, 石油和天然气资源的需求日益增加。常规油气资源已不能满足油气需求的持续增长, 面对“石油衰竭论”等消极理论, 非常规油气勘探开发已引起越来越多的关注^[1]。非常规油气多赋存于致密储层中, 储层长期处于应力状态下, 因此研究致密储层岩石流变损伤特性对提高非常规油气勘探开发水平、储层改造、提高油气产能等具有重要的意义。为此, 国内外学者开展了诸多岩石流变试验方面的研究, Wang 等^[2]通过三轴流变试验开展了水化作用对砂岩流变力学特性的研究, 分析了不同围压下 pH 值对流变变化速率的影响; 刘保国等^[3]通过三轴流变试验分析了不同应力作用下岩石力学参数对其流变损伤的影响; Zhang 等^[4]通过三轴蠕变试验发现在稳态蠕变阶段, 砂岩渗透率呈准线性缓慢减小的变化趋势; Bai 等^[5]采用 Burgers 模型描述了泥质细砂岩蠕变特性, 结果表明岩样蠕变曲线与理论曲线基本吻合; 冯晓伟等^[6]通过三轴流变试验分析了水化作用对流变损伤的影响, 并建立了考虑水化作用的岩石流变损伤模型。此外, 还有许多学者结合数值模拟及理论分析等方法研究了岩石流变损伤特性, 张学朋等^[7]采用离散元方法分析了颗粒粒径、摩擦系数等因素对流变特性的影响规律; 李静等^[8]基于三维数字岩心技术及岩石塑性损伤本构模型开展数值模拟研究, 揭示了页岩储层岩石的细观损伤机制; 杨天鸿等^[9]基于老化理论构建了适合弱层流变特性的流变力学模型; 王俊光等^[10]基于 PFC 软件开展单轴压缩与三轴分级加载蠕变模拟, 以此分析了试样破裂形态及破裂机制; 崔玉红等^[11]通过数值模拟手段分析了岩石力学参数对细观损伤的影响。

尽管学者们取得了诸多研究成果, 但目前大多采用室内试验的方式研究岩石的流变损伤特征, 且研究对象多为软岩或硬岩, 而对致密砂岩流变试验鲜有报道; 同时, 传统室内试验无法精确反映流变损伤

^{*} 收稿日期: 2023-06-27; 修回日期: 2023-08-25

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42272153, 41972138)

通信作者: 李静(1967—), 女, 博士, 教授。主要从事岩石力学方面的研究工作。Email: lijing0681@163.com

的演化过程,故需结合数值模拟手段进行深入分析。数值模型的精确与否直接决定模拟结果的可靠性,因此目前亟需构建反映致密储层岩石真实孔隙结构的模型,开展岩石流变损伤特性研究。

本文利用岩石流变试验与 CT 扫描数字图像处理技术相结合的方法,以精确表征致密储层岩石的真实三维结构;基于 PFC 软件建立岩石真实的三维模型,分析不同孔隙压力影响下应变演化过程、裂缝形态及扩展规律等岩石流变损伤特性;综合研究考虑油气运移的致密储层岩石流变损伤特性。

1 岩石流变损伤三维模型的建立及其参数标定

1.1 试验样品的制备

试验用岩心样品取自准噶尔盆地中部 4 区块董 11 井,层位属于侏罗系头屯河组,井深为 4675.5m~5157.0m,岩性为致密砂岩。在岩心相近位置分别取一块直径 $\Phi=2.5\text{mm}$ 、高度 $H=5\text{mm}$ 的圆柱试样,与一组直径 $\Phi=25\text{mm}$ 、高度 $H=50\text{mm}$ 的圆柱试样,如图 1 所示。前者用于 CT 扫描试验,后者用于单轴压缩试验和单轴流变试验。本文试验采用的蠕变试验机如图 2 所示。

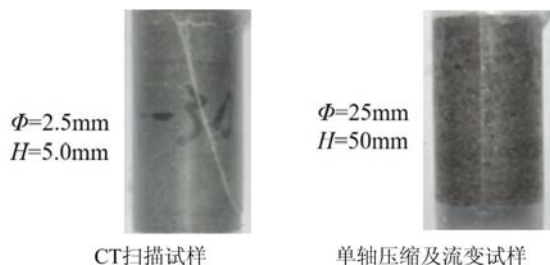


图 1 岩心试样及尺寸

Fig. 1 Core samples and dimensions



图 2 岩石压缩蠕变试验机

Fig. 2 Rock compression creep tester

1.2 岩石流变损伤三维模型的建立

为了能真实地反映岩石的内部孔隙结构,对试样进行 CT 扫描试验以获得岩石真实的孔隙结构。试验采用 MicroXCT-200 型微米 CT 扫描仪进行,仪器分辨率为 $2.5\mu\text{m}$,视角范围为 $2.5\text{mm}\times 2.5\text{mm}$ 。把岩样放入仪器中进行 CT 扫描,仪器从上到下每隔 $5\mu\text{m}$ 输出一张二维灰度图像,除去两端无效的图像最终共得到 950 张有效的二维灰度图像,如图 3(a)所示,图中黑色表示岩石孔隙,其他色表示岩石矿物^[12]。用 MATLAB 对图像进行数字图像处理,通过图像锐化、二值化分割以及降噪等^[13]操作提取出岩石孔隙结构的分布,流程如图 3(b)、(c)所示。为了更加精确地进行模拟,降低模型计算难度,截取 40 张边长为 80pixel 的图像,如图 3(d)所示。利用 Mimics 重构岩石三维孔隙结构模型,如图 4 所示,基于模型分析可知,目的储层致密砂岩孔隙直径多集中于 $20\sim 100\mu\text{m}$,孔喉直径绝大部分集中在 $4\sim 10\mu\text{m}$,微裂缝的宽度主要集中在 $6\sim 15\mu\text{m}$ 。依据 MATLAB 统计结果,得出岩样孔隙度为 6.32%,常规试验测得的孔隙度为 6.53%,绝对误差仅为 0.21%,表明重构孔隙结构与真实岩心孔隙结构基本一致。

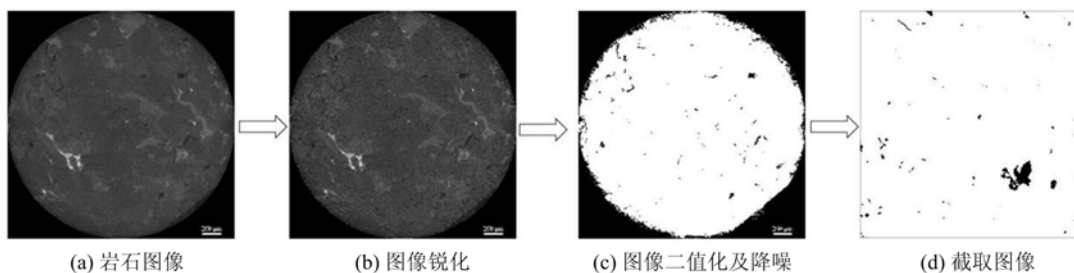


图 3 图像处理

Fig. 3 Image processing

1.3 岩石力学试验及模型参数的确定

1.3.1 岩石力学试验

采用 RTR-1500 岩石力学试验仪进行岩石单轴压缩试验,得到应力-应变曲线与最终破坏形式,如图 5 所示。由图可知,岩石的单轴抗压强度为 57.13MPa,弹性模量为 13.80GPa;由岩石应力-应变曲线可知,曲线大致可以分为压密阶段、弹性阶段及峰后跌落阶段;岩石样品的破坏形式为剪切破坏。

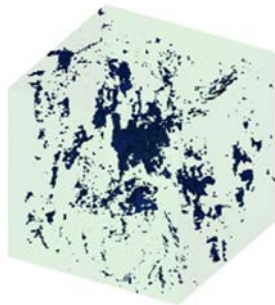


图 4 岩石孔隙结构三维模型
Fig. 4 A three-dimensional model of rock pore structure

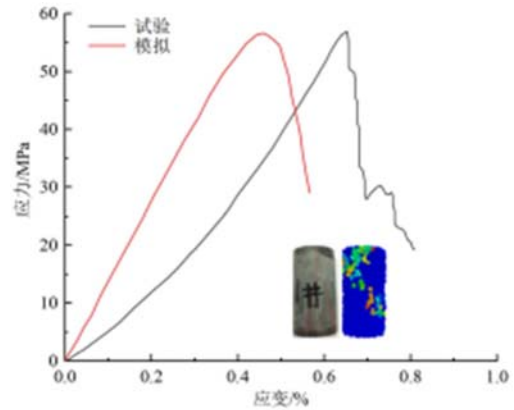


图 5 单轴试验与模拟
Fig. 5 Uniaxial testing and simulation

采用 CT01 型岩石蠕变试验仪进行岩石单轴加载流变试验,试验分别采用岩样单轴压缩时峰值应力的 50%、60%、70%、80%(即 28.57MPa、34.28MPa、39.99MPa、45.70MPa)对岩样进行加载,得到相应加载过程的时间-应变曲线(图 6),当试样的轴向变形在 10h 内的变形小于 0.001%时,可认为蠕变达到稳定状态^[14]。

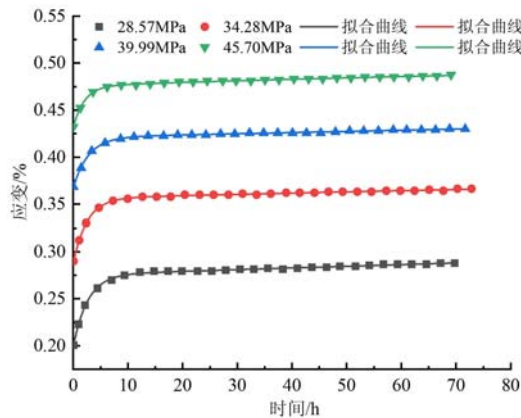


图 6 流变试验曲线与拟合曲线
Fig. 6 Rheological experimental curve and fitting curve

1.3.2 模型参数的确定

麦克斯韦模型及开尔文模型的结构示意图分别如图 7(a)、(b)所示,在恒载作用下,根据胡克定律和牛顿黏性定律可以得出时间与应变的关系,见式(1)、式(2)。

$$\epsilon = \frac{\sigma_0}{\eta_m} t + \frac{\sigma_0}{E_m} \quad (1)$$

$$\epsilon = \frac{\sigma_0}{E_k} [1 - \exp(-\frac{E_k}{\eta_k} t)] \quad (2)$$

式中: ϵ 为模型产生的应变; t 为荷载作用时间; σ_0 为模型所受的荷载作用力; E_m 、 η_m 为 Maxwell 模型中弹簧单元模量与黏壶单元黏度; E_k 、 η_k 为 Kelvin 模型中弹簧单元模量与黏壶单元黏度。

伯格斯模型是由 Maxwell 模型和 Kelvin 模型串联组成的,能够描述岩石蠕变过程中应力应变随时

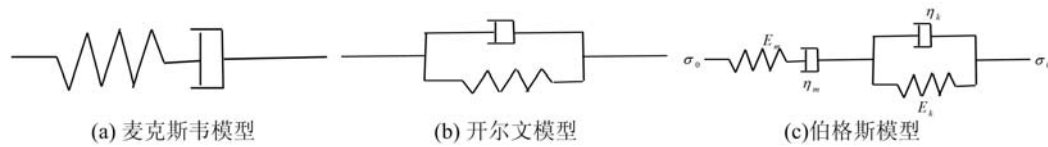


图7 岩石蠕变本构模型

Fig. 7 Rock creep constitutive model

间的变化关系,该模型结构示意图如图7(c)所示。综合式(1)、式(2)得到伯格模型方程为

$$\epsilon = \left[\frac{1}{E_m} + \frac{1}{\eta_m} t \right] \sigma_0 + \frac{\sigma_0}{E_k} \left[1 - \exp \left[-\frac{E_k}{\eta_k} t \right] \right] \quad (3)$$

由于伯格模型参数较少且考虑了岩石的弹性、黏弹性以及弹塑性等多种特性,考虑因素较为全面,适应范围较为广泛,因此本文研究岩石蠕变时也采用伯格模型。

应用非线性最小二乘法根据蠕变方程对试验数据进行拟合^[15],得到岩石蠕变的相关参数见表1,试验曲线与拟合曲线如图6所示。

表1 岩石流变相关参数

Tab. 1 Rock rheological parameters

σ_0 /MPa	E_m /MPa	η_m /(MPa·h)	E_k /MPa	η_k /(MPa·h)	R^2
28.57	14.270	18530.170	37.193	105.942	0.999
34.28	11.905	27391.840	49.822	128.232	0.999
39.99	10.897	28673.227	74.918	203.179	0.999
45.70	10.623	26087.649	100.819	202.479	0.997
平均值	11.92	25170.72	65.69	159.96	

注:表中 R^2 为拟合曲线相关系数,其余参数见式(1)、式(2)。

1.4 细观流变损伤数值模型参数确定

在 PFC 中建立直径为 25mm、高度为 50mm 的圆柱体离散元模型。蒋明镜等^[16]的研究表明采用平行黏结模型能够较好地模拟岩石的单轴抗压强度,故本文模型采用平行黏结模型。Yang 等^[17]的研究表明岩石颗粒间摩擦力对岩石单轴压缩强度影响不大,模型内部颗粒之间的摩擦系数一般取经验值 0.5,加载板与模型之间的摩擦系数取 0.1。故本文模型内部颗粒摩擦系数、加载板与模型之间的摩擦系数分别取 0.5、0.1。赵国彦等^[18]的研究表明最大与最小颗粒半径的比值对参数的影响不大,因此,本文采用 Potyondy 等^[19]的建议值,设最大与最小半径的比值为 1.66。对模型进行单轴压缩数值模拟,根据数值模拟得到的应力-应变曲线以及岩石样品的破坏形式,采用试错法,反复调节模型各项参数使模拟得到的应力-应变曲线和模型破坏形式最为接近真实试验得到的结果,模拟结果如图4所示。由模拟结果可知,模型的单轴压缩强度为 56.77MPa,与试验值相差 0.63%;弹性模量为 13.83GPa,与试验值相差 0.22%;同时,对比试验及模拟条件下的应力-应变曲线可以发现,由于试验中岩样含有的裂隙、孔隙等导致其与数值模拟中模型相比非均质性更强,从而造成应力-应变曲线弹性段与模拟结果相比存在滞后性,且非线性更加显著^[13]。

由于 PFC 微观模型参数无法直接获取,故需建立微观模型参数与宏观试验参数之间的关系,其中 Burger's 模型本构方程^[7]为

$$f_n = C_{nm} \dot{u}_{nc} = u_k K_{kn} + \dot{u}_k C_{kn} = K_{nm} u_{nk} \quad (4)$$

$$f_s = C_{ms} \dot{\delta}_{mc} = \delta_k K_{ks} + \dot{\delta}_k C_{ks} = K_{ms} \delta_{nk} \quad (5)$$

$$u_n = u_k + u_{nk} + u_{nc} \quad (6)$$

$$u_s = \delta_k + \delta_{nk} + \delta_{nc} \quad (7)$$

式中: f_n 、 f_s 分别为接触点处法向和切向接触力; u_n 、 u_s 分别为接触点处法向和切向相对位移; u_k 、 δ_k 分别为 Kelvin 单元中的法向和切向位移; u_{nk} 、 δ_{nk} 分别为 Maxwell 模型中弹簧单元部分的法向和切向位

移; u_{mc} 、 δ_{mc} 分别为 Maxwell 模型中黏壶单元部分的法向和切向位移。

轴向加载条件下, Burger's 模型位移可通过相应应变表示:

$$u_{mc} = \epsilon_{mc} L, u_k = \epsilon_k L, u_{mk} = \epsilon_{mk} L \tag{8}$$

进而得到法向接触力与应变之间的关系:

$$f_n = \dot{\epsilon} C_{mm} L = L \epsilon_k K_{kn} + L \epsilon_k C_{kn} = \dot{\epsilon}_{mk} K_{mm} L \tag{9}$$

式中, L 为黏弹性梁的长度, 即相邻单元的球心距。

PFC 接触模型的切向细观参数为

$$K_{ks} = \frac{K_{kn}}{2(1+\nu)} = \frac{E_2 t}{2(1+\nu)} \tag{10}$$

$$C_{ks} = \frac{C_{kn}}{2(1+\nu)} = \frac{\eta_2 t}{2(1+\nu)} \tag{11}$$

$$K_{ms} = \frac{K_{mm}}{2(1+\nu)} = \frac{E_1 t}{2(1+\nu)} \tag{12}$$

$$C_{ms} = \frac{C_{mm}}{2(1+\nu)} = \frac{\eta_1 t}{2(1+\nu)} \tag{13}$$

式中: K_{ks} 、 K_{kn} 分别为 Kelvin 模型中的切向和法向弹性系数; C_{ks} 、 C_{kn} 分别为 Kelvin 单元中的切向和法向黏性系数; K_{ms} 、 K_{mm} 分别为 Maxwell 模型中的切向和法向弹性系数; C_{ms} 、 C_{mm} 分别为 Maxwell 模型中的切向和法向黏性系数; ν 为泊松比。

Burger's 模型的相关细观参数通过式(4)~(13)由宏观参数计算得出^[20], 最终得到的模型参数见表 2。

表 2 模型的微观参数

Tab. 2 Microscopic parameters of the model

	名称	取值	名称	取值
平行黏结模型	颗粒密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	2.55	颗粒摩擦系数 μ	0.50
	颗粒有效模量 (E^*, \bar{E}^*)/GPa	5.95	颗粒刚度比 ($\kappa^*, \bar{\kappa}^*$)	1.50
	颗粒抗拉强度 $\bar{\sigma}_c$ /MPa	36.60	颗粒黏结强度 $\bar{\tau}_c$ /MPa	9.00
	颗粒摩擦角 $\bar{\phi}/(^{\circ})$	15.00		
麦克斯韦模型	法向弹性系数 K_{mm} /MPa	1.80×10^{-1}	切向弹性系数 K_{ms} /MPa	7.30×10^{-2}
	法向黏性系数 $C_{mm}/(MPa \cdot s^{-1})$	2885.60	切向黏性系数 $C_{ms}/(MPa \cdot s^{-1})$	1295.82
开尔文模型	法向弹性系数 K_{kn} /MPa	8.30×10^{-2}	切向弹性系数 K_{ks} /MPa	3.00×10^{-2}
	法向黏性系数 $C_{kn}/(MPa \cdot s^{-1})$	2550.50	切向黏性系数 $C_{ks}/(MPa \cdot s^{-1})$	1149.30

2 油气运移对岩石流变损伤的影响

2.1 微观孔隙模型的建立及单轴压缩流变数值模拟

根据图 3 重构的岩石三维孔隙结构模型如图 8(a)所示, 其边长为 $200\mu m$ 的立方体。为了能够准确地表征致密砂岩的孔隙结构, 同时考虑到计算机的效率限制, PFC 离散元模型设置颗粒最小直径为 $2\mu m$, 为保证孔隙结构模型尺寸与离散元模型相同, 同样取边长为 $200\mu m$ 的立方体, 如图 8(b)所示。

基于数字岩心技术构建岩石三维孔隙结构模型, 利用 PFC 软件编写 FISH 语句删除孔隙域颗粒, 保证离散元模型孔隙结构与真实岩心相同, 离散元模型如图 8(b)所示。设置模型的颗粒最大直径为 $4\mu m$, 颗粒直径比为 1.66, 采用平行黏结模型与 Burger's 模型相结合的接触模型, 既考虑了模型颗粒的刚度特性, 同时也考虑了岩石流变特性, 以便能够较好地模拟流变试验。在 PFC 中分别按照岩心单轴抗压强度的 70% (即 39.99MPa) 进行加载模拟单轴流变试验, 通过在孔隙中施加孔压来模拟孔隙中是否存在油气以及油气的多少, 从而模拟油气运移对岩石损伤的影响, 并记录模型在加载过程中的应力-

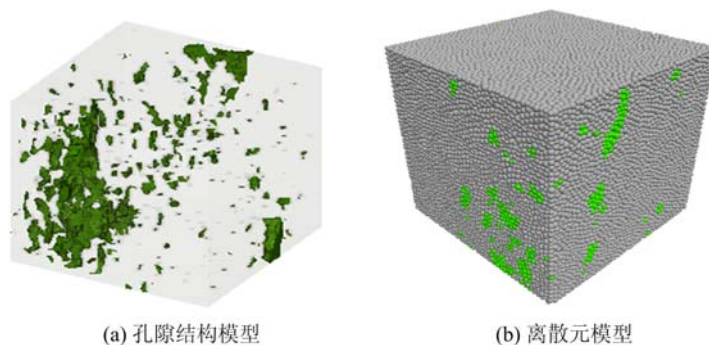


图8 离散元模型

Fig. 8 Discrete element model

应变及模型内部损伤情况。

岩石损伤变量存在多种描述方法,主要以岩石损伤面积、有效应力、细观裂纹密度等表示,考虑到岩石损伤描述难易程度,故本文以岩石的有效变形模量来表示岩石的损伤变量:

$$D = \frac{E_0 - E}{E_0} \quad (14)$$

式中: D 为岩石的损伤变量; E 为岩石的即时有效变形模量; E_0 为岩石的初始变形模量。

2.2 孔隙中油气运移对岩石流变特性的影响

当孔隙中不存在油气时,孔隙中的压力为零;当孔隙中存在油气时,孔隙压力不为零。分析不同孔隙压力条件下的岩石流变特性规律,分别取孔隙压力为 0MPa、3MPa、6MPa、9MPa、12MPa、15MPa 对模型进行单轴流变模拟,得出如图 9 所示的应力-应变曲线。

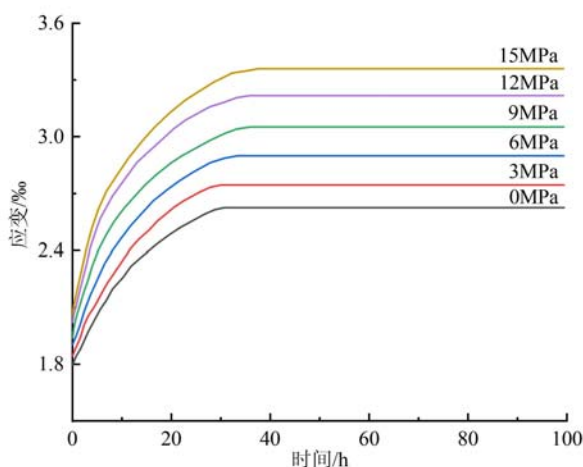


图9 单轴蠕变曲线

Fig. 9 Uniaxial creep curve

由图 9 可知,模型流变随加载应力增大而增加,而流变达到稳定的时间随之减少;在相同应力加载的情况下,随着孔隙中压力的增加,即孔隙中油气量的增加,模型发生的流变也随之增加,而模型流变达到稳定的时间随之减少。稳定应变与孔隙压力呈正相关关系,孔隙压力每增加 3MPa,模型流变约增加 5.95%,孔隙压力 15MPa 相较于 0MPa 时,其模型流变约增加 29.77%,关系拟合曲线呈线性增长关系,拟合相关系数为 0.998,拟合效果较好,拟合结果如图 10 所示。

2.3 孔隙中油气运移对岩石流变损伤的影响

根据数值模拟结果,利用损伤变量式(14)得出细观模型在不同孔压下单轴蠕变过程中损伤变化情况,结果如图 11 所示。由图 11 可知细观模型的蠕变损伤变量随时间增加逐渐增加,并最终达到稳定;同时,流变损伤变量随着孔隙压力增加而逐渐增加,但增加幅度逐渐减小,具体表现为与 0MPa 下流变损伤变量相比,3MPa、6MPa、9MPa、12MPa、15MPa 时流变损伤变量分别增加 2.57%、4.65%、6.00%、

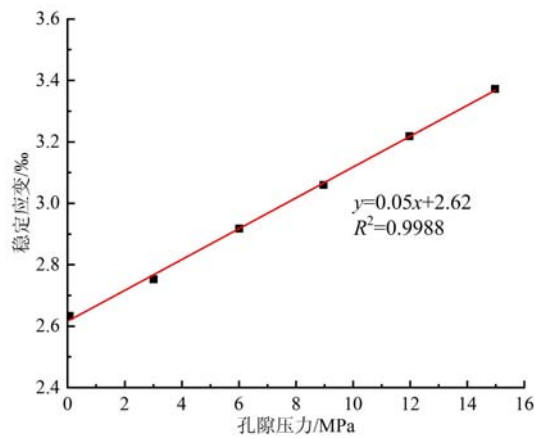


图 10 蠕变曲线稳定应变与孔压关系

Fig. 10 Relationship between stable strain of creep curve and pore pressure

6.61%、7.47%；随着孔隙压力的增加，损伤变量最终的稳定值也逐渐增加，由此可知其变化规律与应变变化规律相似。

统计出孔压为 3MPa 时损伤随应变的变化情况，如图 12 所示，从图中可以看出损伤变量随着应变的增加而增大，两者呈正相关关系，其余孔压作用下模型变化相似，均与宏观试验得出的流变损伤变量与应变关系一致。取模型的中心截面进行裂缝扩展分析，在模型蠕变达到稳定时，模型截面裂缝扩展情况如图 13 所示。

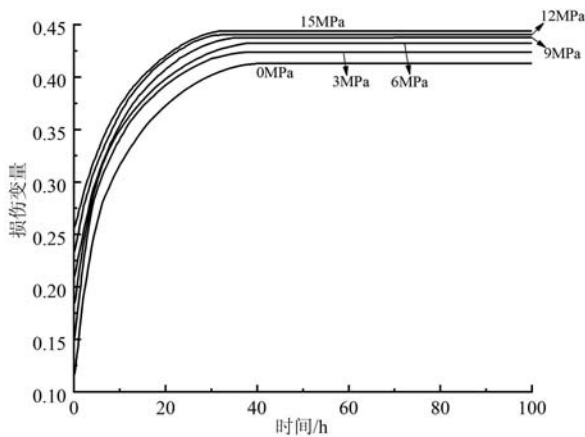


图 11 流变损伤变量与时间的关系

Fig. 11 Rheological damage variables and time

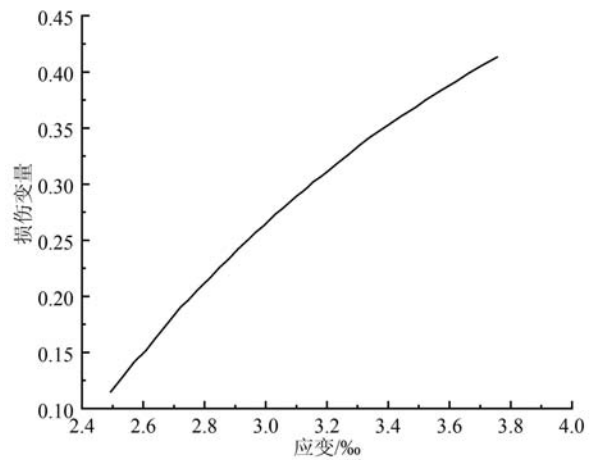


图 12 流变损伤变量与应变的关系

Fig. 12 Rheological damage variables and strain

由图 13 可知，随孔隙压力的增加，即随着孔隙中油气含量的增加，在岩石蠕变达到稳定时岩石内部裂缝的数量、宽度以及长度均有所增加，且裂缝分布多沿原始孔隙分布，即细观模型的损伤增加且损伤沿原始孔隙分布。

本文以试验数据为基础进行了单轴流变模型细观参数的标定，使模型在相同恒定荷载下得到的蠕变曲线与试验曲线最为接近，从而使细观模型的模拟效果达到最好。通过单轴流变试验与离散元细观模型数值模拟，分别从宏观和细观两个角度研究了在单轴流变过程中岩石的损伤演化情况，结果表明两者的损伤变化趋势基本相同，细观模型模拟结果与试验结果得到了相互验证。

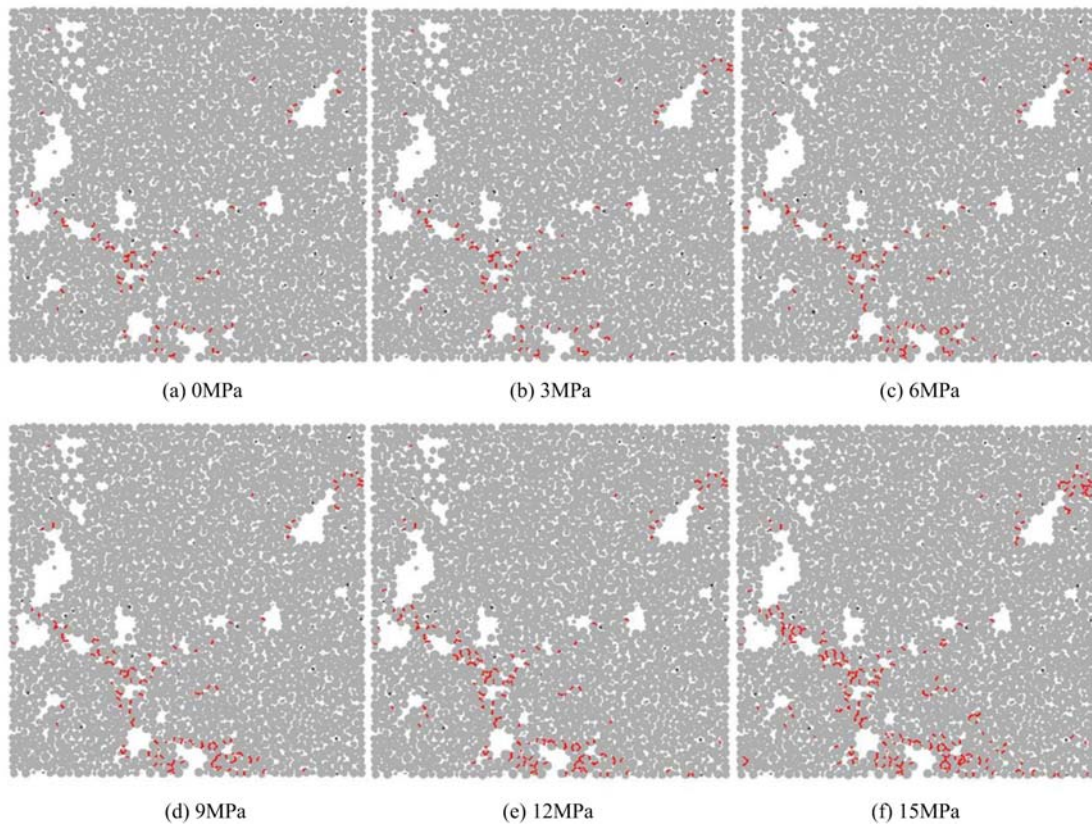


图 13 中心截面裂缝扩展情况

Fig. 13 Crack propagation in the central section

3 结论

通过 CT 扫描及数字图像技术等精确表征致密储层岩石真实三维结构,构建了真实岩心三维模型,利用单轴压缩及流变试验分别获得宏观力学参数及流变特性,在此基础上,基于 PFC^{3D}开展了致密砂岩流变损伤数值模拟研究。主要结论如下:

(1) 通过 CT 扫描试验表征致密储层岩石真实三维结构,得出目的层致密砂岩孔隙直径多集中在 20~100 μm ,孔喉直径集中在 4~10 μm ,微裂缝宽度主要集中在 6~15 μm ;依据 MATLAB 统计结果,得出岩样孔隙度为 6.32%,常规试验测得的孔隙度为 6.53%,两者误差仅为 3.21%,表明重构孔隙结构与真实岩心孔隙结构基本一致。

(2) 致密砂岩细观模型的蠕变曲线随着孔隙压力的增大而逐渐上移,且蠕变增长阶段应变速率随孔隙压力增大而增加,最终应变逐渐趋于稳定,稳定应变值与孔隙压力呈正相关关系,孔隙压力 15MPa 相较于 0MPa 时,其模型流变增加 29.77%,关系拟合曲线呈线性增长,表明增大孔隙压力可提高砂岩蠕变应变量。

(3) 在相同荷载作用下,致密砂岩细观模型的损伤量随着孔隙压力增大而逐渐增加,但增加幅度逐渐减小,与 0MPa 下模型损伤变量相比,3~15MPa 条件下模型损伤变量分别增加 2.57%、4.65%、6.00%、6.61%、7.47%,即油气运移进入储层孔隙后引起孔隙压力增大,进而导致岩石损伤随之增加。

参考文献:

- [1] 贾承造, 郑民, 张永峰. 中国非常规油气资源与勘探开发前景[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(2):129-136 (JIA Chengzao, ZHENG Min, ZHANG Yongfeng. Unconventional hydrocarbon resources in China and the prospect of exploration and development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2):129-136 (in Chinese))

- [2] Wang W, Liu T G, Shao J F. Effects of acid solution on the mechanical behavior of sandstone[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2015, 28(1):04015089-04015089.
- [3] 刘保国, 崔少东. 泥岩蠕变损伤试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(10):2127-2133 (LIU Baoguo, CUI Shaodong. Experimental Study of creep damage of mudstone[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(10):2127-2133 (in Chinese))
- [4] Zhang Y, Shao J, Xu W, et al. Creep behaviour and permeability evolution of cataclastic sandstone in triaxial rheological tests[J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2015, 19(4):496-519.
- [5] Bai Q S, Xia Y Y, Liu X X, et al. The study of the triaxial rheological test of the argillaceous siltstone in Malin mine[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 1615(446-449):2125-2131.
- [6] 冯晓伟, 王伟, 王如宾, 等. 考虑水化学损伤的砂岩流变损伤本构模型[J]. *岩土力学*, 2018, 39(9):3340-3346, 3354 (FENG Xiaowei, WANG Wei, WANG Rubin, et al. A rheological damage model of sandstone under water-rock chemical interaction[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(9):3340-3346, 3354 (in Chinese))
- [7] 张学朋, 蒋宇静, 王刚, 等. 基于颗粒离散元模型的岩石蠕变模拟试验[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2015, 46(10):3914-3921 (ZHANG Xuepeng, JIANG Yujing, WANG Gang, et al. Creep simulation test of rock based on particle discrete element method[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2015, 46(10):3914-3921 (in Chinese))
- [8] 李静, 刘晨, 刘惠民, 等. 基于数字岩心的页岩储层岩石细观损伤机制研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(6):1103-1113 (LI Jing, LIU Chen, LIU Huimin, et al. Study on meso-damage mechanism of shale reservoir rock based on digital cores[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(6):1103-1113 (in Chinese))
- [9] 杨天鸿, 芮勇勤, 朱万成, 等. 炭质泥岩泥化夹层的流变特性及长期强度[J]. *实验力学*, 2008, 23(5):396-402 (YANG Tianhong, RUI Yongqin, ZHU Wancheng, et al. Rheological characteristics and long-term strength of siltized intercalation interbedded in peat mudstone[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2008, 23(5):396-402 (in Chinese))
- [10] 王俊光, 杨鹏锦, 梁冰, 等. 基于颗粒流程序的不同加卸载条件下泥岩蠕变破裂规律研究[J]. *实验力学*, 2019, 34(5):873-882 (WANG Junguang, YANG Pengjin, LIANG Bing, et al. Study on the creep fracture laws of mudstone under different loading and unloading conditions based on particle flow code[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2019, 34(5):873-882 (in Chinese))
- [11] 崔玉红, 周世才, 陈蕴生. 非贯通细观裂纹节理介质 CT 试验的数值模拟及影响参数讨论[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006(3):630-640 (CUI Yuhong, ZHOU Shicai, CHEN Yunsheng. Numerical analysis of meso-crack and meso-damage laws and its influential parameters for non-interpenetrated jointed media based on CT experiment[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006(3):630-640 (in Chinese))
- [12] 王传洋, 杨春和, 衡帅, 等. 压缩荷载下泥岩裂缝演化规律的 CT 试验研究[J]. *岩土力学*, 2015, 36(6):1591-1597, 1605 (WANG Chuanyang, YANG Chunhe, HENG Shuai, et al. CT test for evolution of mudstone fractures under compressive load[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(6):1591-1597, 1605 (in Chinese))
- [13] 李静, 孔祥超, 宋明水, 等. 储层岩石微观孔隙结构对岩石力学特性及裂缝扩展影响研究[J]. *岩土力学*, 2019, 40(11):1-9 (LI Jing, KONG Xiangchao, SONG Mingshui, et al. Study on the influence of reservoir rock micro-pore structure on rock mechanical properties and crack propagation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(11):1-9 (in Chinese))
- [14] 刘晨, 曲险峰, 李静, 等. 致密砂岩蠕变试验及模型研究[J]. *实验力学*, 2020, 35(6):1023-1029 (LIU Chen, QU Xianfeng, LI Jing, et al. Creep experiment and model study of tight sandstone[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2020, 35(6):1023-1029 (in Chinese))
- [15] Li J, Xie Y T, Liu H M, et al. Combining macro and micro experiments to reveal the real-time evolution of permeability of shale[J]. *Energy*, 2023, 262:125509.
- [16] 蒋明镜, 方威, 司马军. 模拟岩石的平行粘结模型微观参数标定[J]. *山东大学学报(工学版)*, 2015, 45(4):50-56 (JIANG Mingjing, FANG Wei, SIMA Jun. Calibration of micro-parameters of parallel bonded model for rocks [J]. *Journal of Shandong University(Engineering Science)*, 2015, 45(4):50-56 (in Chinese))
- [17] Yang B D, Jiao Y, Lei S T. A study on the effects of microparameters on macroproperties for specimens created

- by bonded particles[J]. *Engineering Computations*, 2006, 23(6):607–631.
- [18] 赵国彦, 戴兵, 马驰. 平行黏结模型中细观参数对宏观特性影响研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(7):1491–1498 (ZHAO Guoyan, DAI Bing, MA Chi. Study of effects of microparameters on macroproperties for parallel bonded model[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(7):1491–1498 (in Chinese))
- [19] Potyondy D O, Cundall P A. A bonded-particle model for rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(8):1329–1364.
- [20] Liu Y, Dai Q L, You Z P. Viscoelastic model for discrete element simulation of asphalt mixtures[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2009, 135(4):324–333.

Study on the influence of hydrocarbon migration of tight reservoir rocks on rheological properties and damage

YANG Feng¹, ZHONG Anhai¹, DING Ran¹, LU Mingjing¹, LI Jing², WU Yupeng³, LIU Yishuai²
(1. Research Institute of Petroleum Engineering, Shengli Oil Field, SINOPEC, Dongying 257200, Shandong, China; 2. School of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, Shandong, China; 3. State Grid Shandong Province Electric Power Company Shenxian County Power Supply Company, Liaocheng 252400, Shandong, China)

Abstract: In order to study the rheological damage characteristics of tight reservoir rocks considering oil and gas migration, CT scanning experiments and digital image technology are used to accurately characterize the true three-dimensional structure of dense reservoir rocks in this paper. A three-dimensional model of the real rock core is established, and the microscopic parameters of the model are obtained through uniaxial compression and rheological experiments. Based on PFC^{3D}, numerical simulation research on rheological damage of tight sandstone is carried out. The research result indicates that: (1) The creep curve of the dense sandstone mesoscale model gradually shifts upwards with the increase of pore pressure, and the final strain tends to stabilize. The stable strain is positively correlated with pore pressure. (2) The model damage is positively correlated with strain, and the damage gradually increases with the increase of axial strain of the sample. (3) Under the same load, the pore pressure increases with the increase of oil and gas in the pores, but the increase gradually decreases, leading to an increase in model damage. This research achievement can provide a theoretical basis for the design of oilfield reservoir transformation.

Keywords: tight reservoir rocks; hydrocarbon migration; CT scanning; rheological properties; rheological damage