◀专题论文▶

页岩气水平井脉动水力压裂地应力场扰动机理*

卞小强 张纪龙
（西南石油大学石油与天然气工程学院）

卞小强，张纪龙. 页岩气水平井脉动水力压裂地应力场扰动机理［J］. 石油机械，2025，53（10）：56-63.
Bian Xiaoqiang，Zhang Jilong. Mechanism of in-situ stress field disturbance induced by pulsating hydraulic fracturing in shale gas horizontal wells［J］. China Petroleum Machinery，2025，53（10）：56-63.

摘要：为进一步增强脉动水力压裂技术的作业效果，构建了适用于脉动水力压裂应力干扰模拟的数学模型，并将模型的应力模拟结果与COMSOL软件的模拟结果进行了横向对比。将数学模型转化为程序语言，对COMSOL软件进行二次开发，针对不同的主应力值与泊松比值，模拟分析了脉动水力压裂对地应力场所产生的应力干扰特征。研究结果表明：地应力场的最大与最小水平主应力每增加约1.00 MPa，应力干扰范围会随之缩小，且脉动水力压裂对地应力场所产生的最大切应力约分别下降0.29、0.49 MPa；页岩的泊松比每增加约0.01，脉动水力压裂对地应力场所产生的最大切应力约增加0.58 MPa，且应力干扰范围也呈逐步扩大之势。所得结论可为页岩气水平井脉动水力压裂的高效施工提供理论支撑。

关键词：页岩气水平井；脉动水力压裂；地应力场；应力干扰；模型验证
中图分类号：TE377 **文献标识码：**A DOI：10.12473/CPM.202501016

Mechanism of In-Situ Stress Field Disturbance Induced by Pulsating Hydraulic Fracturing in Shale Gas Horizontal Wells

Bian Xiaoqiang Zhang Jilong
（*School of Petroleum Engineering*，*Southwest Petroleum University*）

Abstract：To further improve the performance of pulsating hydraulic fracturing technology，a mathematical model suitable for the simulation of stress interference of pulsating hydraulic fracturing was constructed，and the stress simulation results of the model were compared with the simulation results of COMSOL software. The mathematical model was transformed into a programming language to conduct secondary development on COMSOL，and the stress interference characteristics of pulsating hydraulic fracturing on the in-situ stress field were simulated and analyzed under varying principal stress magnitudes and Poisson's ratios. The study results show that for every approximate 1.00 MPa increase in the maximum and minimum horizontal principal stresses within the in-situ stress field，the stress interference range decreases correspondingly，and the maximum shear stress generated by pulsating hydraulic fracturing on the in-situ stress field decreases by approximately 0.29 MPa and 0.49 MPa respectively. For every approximate 0.01 increase in the Poisson's ratio of shale，the maximum shear stress generated by pulsating hydraulic fracturing on the in-situ stress field increases by about 0.58 MPa，and the stress interference range also gradually expands. The conclusions provide theoretical support for the efficient operation of pulsating hydraulic fracturing in shale gas horizontal wells.

Keywords：shale gas horizontal well；pulsating hydraulic fracturing；in-situ stress field；stress interference；

* 基金项目：中国石油天然气集团有限公司项目“深层页岩气高效开发技术体系研究及关键装备研发”（2023DJ7512）。

model validation

0　引　言

页岩气的开发对于中国的发展具有重要意义，它不仅增强了国家的能源安全，还促进了相关技术与产业的创新与发展，为区域经济的快速增长提供了新的动力。同时，作为一种清洁能源，页岩气的大规模开发有助于优化中国的能源结构，并在国际能源市场中提升中国的影响力[1-4]。此外，页岩气的开发还能够带动就业，促进地方经济的发展，为中国实现经济社会可持续发展与环境保护目标提供了有力支持[5-8]。在页岩气开发技术中，脉动水力压裂技术对于页岩气的高效开发至关重要[9-11]。脉动水力压裂技术通过周期性的流体注入，有效地提高了裂缝网络的连通性，增大了覆盖面积，极大地提高了页岩气的产量与采收率。长宁页岩气区块现场试验表明[12]，与常规水力压裂相比，脉动水力压裂能够使有效裂缝数量提升 42.00%；北美福特页岩气区块[13]通过同频异相脉动压裂技术的应用，成功将有效裂缝密度从 0.80 条/m 提高至 1.50 条/m，使初始产气量突破 45 万 m^3/d。

学者们已经针对脉动水力压裂技术的优化进行了广泛的研究，并取得了一系列科研成果。林柏泉等[14]通过静载与动载压裂对比试验发现，脉动水力压裂的施工压力要远低于常规水力压裂的施工压力。李全贵等[15-16]同样通过试验验证了上述结论在低频工况下的适用性，并自主研发了脉动水力压裂试验系统。李贤忠等[17]通过试验测试进一步发现，在低频工况下，脉动水力压裂所产生的压力波同样能够形成叠加反射效应。朱红青等[18]通过数值模拟研究发现，脉动水力压裂的施工压力越大，岩石的塑性损伤越严重。F. LUKE 等[19]通过现场试验发现，在常规水力压裂之后再进行脉动水力压裂，能够进一步提高岩石的渗透率。陆沛清等[20-22]通过物理试验测试发现，地应力参数与岩石力学参数均会对脉动水力压裂所产生的应力干扰造成影响。朱葛等[23]通过数值模拟研究揭示了脉动水力压裂在不同储层岩性影响下的应力扰动规律。

上述研究成果已经在一定程度上证实了脉动水力压裂技术的先进性，并在如何提高脉动水力压裂对地应力场所产生的应力干扰上取得了一定的进展。为了进一步增强脉动水力压裂技术的作业效果，笔者在分析现有研究成果的基础上，构建了一套适用于页岩气水平井脉动水力压裂应力干扰模拟的数学模型，通过与 COMSOL 软件的数值模拟结果进行对比，验证了模型的可靠性。其次，通过将自主构建的数学模型转化为程序语言，并对 COMSOL 软件进行二次开发，对比分析了常规水力压裂与脉动水力压裂对地应力场所产生的不同应力干扰特征，在不同的主应力值与泊松比值条件下，模拟分析了脉动水力压裂对地应力场所产生的应力干扰特征。相关研究成果可为页岩气水平井脉动水力压裂的高效施工提供一定的理论支撑。

1　数学模型

1.1　假设条件

为了简化数学模型所耦合的地质-工程参数，提高数学模型的迭代计算速度，在不影响数值模拟结果准确性的前提条件下，提出了以下基本假设条件：①页岩的应力响应规律符合线弹性反应规律；②页岩在自身重力方向上不会随方位的改变而发生变形；③现场实际压裂经验表明[24]，通过控制水平段单簇长度（<2 000.00 m）及采用 2.00~8.00 Hz 特征频率的脉动参数，可使压力波在有效作用范围内的衰减率<15.00%，即可假设脉动水力压裂所产生的压力波不会在水平段产生明显的压力损失；④持续应力干扰会导致页岩整体强度降低，但不会对整体结构造成损伤。

1.2　控制方程

基于弹性波在固体介质中的动态传播特征[25-26]，脉动水力压裂所产生的压力波在页岩中传播时的运动方程组为：

$$\begin{cases}\dfrac{\partial \tau_{11}}{\partial x_1}+\dfrac{\partial \tau_{21}}{\partial x_2}+\dfrac{\partial \tau_{31}}{\partial x_3}+\rho f_1=\rho\dfrac{\partial \boldsymbol{u}_1}{\partial t}\\ \dfrac{\partial \tau_{12}}{\partial x_1}+\dfrac{\partial \tau_{22}}{\partial x_2}+\dfrac{\partial \tau_{32}}{\partial x_3}+\rho f_2=\rho\dfrac{\partial \boldsymbol{u}_2}{\partial t^2}\\ \dfrac{\partial \tau_{13}}{\partial x_1}+\dfrac{\partial \tau_{23}}{\partial x_2}+\dfrac{\partial \tau_{33}}{\partial x_3}+\rho f_3=\rho\dfrac{\partial \boldsymbol{u}_3}{\partial t}\end{cases}\tag{1}$$

式中：τ_{ij}为地应力，MPa；x_i为页岩位移量，m；ρ为页岩骨架密度，kg/cm^3；$\boldsymbol{f}_i$为页岩运动加速度，m/s^2；$\boldsymbol{u}_i$为压裂施工压力波传播速度，m/s；t为压力波传播时间，s；i为笛卡尔坐标系中的空间方向索引，取值 1、2、3 分别对应 x、y、z 方向；j为笛

卡尔坐标系中的空间方向索引，取值1、2、3分别对应x、y、z方向。

页岩在脉动水力压裂过程中发生应变的几何方程组为：

$$\begin{cases} e_{11}=\dfrac{\partial \boldsymbol{u}_1}{\partial x_1}, e_{12}=\dfrac{1}{2}\left(\dfrac{\partial \boldsymbol{u}_1}{\partial x_2}+\dfrac{\partial \boldsymbol{u}_2}{\partial x_1}\right) \\ e_{22}=\dfrac{\partial \boldsymbol{u}_2}{\partial x_2}, e_{13}=\dfrac{1}{2}\left(\dfrac{\partial \boldsymbol{u}_1}{\partial x_3}+\dfrac{\partial \boldsymbol{u}_3}{\partial x_1}\right) \\ e_{33}=\dfrac{\partial \boldsymbol{u}_3}{\partial x_3}, e_{32}=\dfrac{1}{2}\left(\dfrac{\partial \boldsymbol{u}_3}{\partial x_2}+\dfrac{\partial \boldsymbol{u}_2}{\partial x_3}\right) \end{cases} \tag{2}$$

式中：e为页岩形体应变率，s^{-1}。

页岩在脉动水力压裂过程中发生应变的本构方程组为：

$$\begin{cases} \tau_{11}=\lambda\theta t+2Ge_{11}t, \tau_{23}=2Ge_{23}t \\ \tau_{22}=\lambda\theta t+2Ge_{22}t, \tau_{31}=2Ge_{31}t \\ \tau_{33}=\lambda\theta t+2Ge_{33}t, \tau_{12}=2Ge_{12}t \end{cases} \tag{3}$$

式中：G为页岩弹性模量，GPa；θ为页岩弹性应变率，s^{-1}；λ为页岩弹性应变系数，MPa。

将几何方程组代入至本构方程组中，可得到：

$$\tau_{ij}=\lambda u_{ij}\delta_{ij}+\mu\left(u_{ij}+u_{ji}\right) \tag{4}$$

式中：δ为页岩总应变率量，s/m；μ为页岩总应变系数，Pa·s/m。

将式（4）进一步代入至运动方程组中，可得到脉动水力压裂过程中压力波传播与页岩应变的综合特征表达方程：

$$\begin{cases} \lambda u_{i,ij}\delta_{ij}+\mu\left(\boldsymbol{u}_{i,jj}+\boldsymbol{u}_{j,ij}\right)+\rho \boldsymbol{f}_i x=\rho \boldsymbol{u}_j^2 \\ \lambda u_{j,ji}\delta_{ij}+\mu\left(\boldsymbol{u}_{i,jj}+\boldsymbol{u}_{j,ij}\right)+\rho \boldsymbol{f}_i x=\rho \boldsymbol{u}_i^2 \end{cases} \tag{5}$$

1.3　边界与初始条件

为了保障数学模型的封闭性，共设置了2种动力函数作为数学模型迭代计算的内边界条件（水力压裂数学模型中的内边界条件）。由于常规水力压裂与脉动水力压裂施加在井眼上的载荷分别为稳态载荷与非稳态载荷，故将压裂方式为常规水力压裂时的内边界条件设定为定值P_w，而压裂方式为脉动水力压裂时的内边界条件设定为参数随时间迁移而发生改变的简谐波函数。数学模型的内边界条件设定结果为：

$$p=\mathrm{ABS}\left[A\sin\left(2\pi\omega t\right)\right] \tag{6}$$

式中：p为内边界压力，MPa；A为压力波振幅，MPa；ω为压裂频率，Hz；ABS为绝对值符号。

为进一步完善数学模型的封闭性，通过完全匹配层法将数学模型的外边界条件设定为完美匹配层，以模拟井眼四周的无限大地层，并将其几何类型设定为笛卡尔无限域[27-28]。其次，若完美匹配层采用的是常规多项式缩放，则匹配层厚度中需至少含有8个应用要素。若在开展数值模拟的过程中，脉动水力压裂产生的压力波传播效果不理想，则可增加完美匹配层的比例因子或比例曲率。外边界条件的设定结果为：

$$\eta(r)=\begin{cases} -\dfrac{\boldsymbol{v}_{\max}\ln\alpha}{L}\left[a\dfrac{r_i}{L}+b\left(\dfrac{r_i}{L}\right)^2\right] & \text{匹配层参数} \\ 0 & \text{非匹配层参数} \end{cases} \tag{7}$$

式中：$\eta(r)$为径向距离衰减系数，s^{-1}；$\boldsymbol{v}_{\max}$为压力波在地层内的最大波速，m/s；α为压裂方向的倾角，rad；L为完美匹配层的厚度，m；a为第1匹配层的匹配系数，无量纲；b为第2匹配层的匹配系数，无量纲；r为完美匹配层吸收区域边界到内部研究区域边界的径向距离，m。

另外，数学模型驱动的初始条件为：最大水平主应力方向为水平方向，最小水平主应力方向为竖直方向。

2　模型验证

在对水力压裂过程中地应力场所产生的应力干扰进行数值模拟时，所设定的页岩、水泥环与套管的基本物性参数如表1所示。

表1　数值模拟的基本物性参数

Table 1　Basic physical property parameters for numerical simulation

参数名称	数值	参数名称	数值
页岩密度/(kg·m^{-3})	2 500.00	套管密度/(kg·m^{-3})	7 800.00
页岩弹性模量/GPa	30.00	套管弹性模量/GPa	210.00
页岩泊松比	0.18	套管泊松比	0.30
上覆岩层应力/MPa	35.00	水泥环密度/(kg·m^{-3})	3 100.00
套管内壁压力/MPa	20.00	水泥环弹性模量/GPa	10.00
地层孔隙压力/MPa	20.00	水泥环泊松比	0.17
最大水平主应力/MPa	45.00	最小水平主应力/MPa	35.00

为了保障数学模型模拟结果的准确性，需从静力学与动力学两方面对常规水力压裂与脉动水力压裂过程中地应力场所产生的应力干扰进行验证。在开展相关验证工作时，首先通过COMSOL数值模拟软件建立相对应的二维地层模拟；再将自主构建的数学模型转化为程序语言，以实现对COMSOL软件的二次开发；最后将数学模型的应力模拟结果与COMSOL软件的模拟结果进行对比，

以检验数学模型的可靠性。在所设定的数值模拟参数条件下，常规水力压裂与脉动水力压裂效果的模拟结果如图 1 和图 2 所示，且 2 种数值模拟结果的对比情况如图 3 所示。

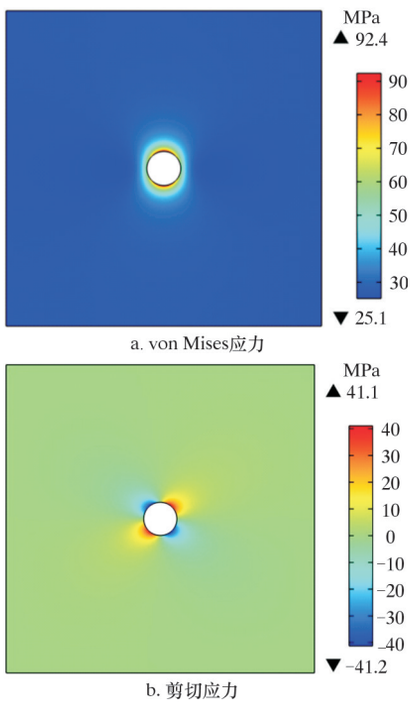


图 1　常规水力压裂效果的模拟结果

Fig. 1　Simulation results of conventional hydraulic fracturing effect

从图 3 可知，在常规水力压裂与脉动水力压裂过程中，数学模型的模拟结果与 COMSOL 软件模拟结果之间的最大相对误差分别为 4.70% 与 3.80%。因此，无论是静力学模拟还是动力学模拟，所构建的数学模型均可对 COMSOL 软件的二次开发进行良好的支撑，并对页岩气水平井脉动水力压裂过程中地应力场所产生的应力干扰进行较为准确的模拟。

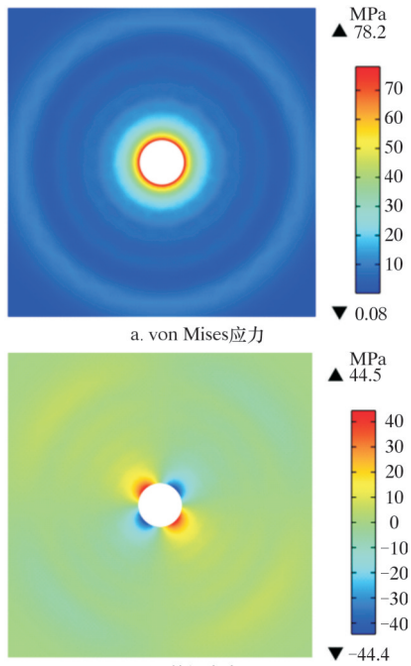


图 2　脉动水力压裂效果的模拟结果

Fig. 2　Simulation results of pulsating hydraulic fracturing effect

3　结果分析

3.1　地应力场扰动特征对比

在相同的地应力场作用下，设定常规水力压裂施加在井眼上的稳态载荷为 45.00 MPa，脉动水力压裂施加在井眼上的非稳态载荷为 10.00 MPa 且频率为 10.00 Hz。通过 COMSOL 软件建立二维地质模型，并搭配自主构建的数学模型进行驱动，所得到的 2 类水力压裂对地应力场所产生的应力干扰如图 4 所示。

从图 4 可知，常规水力压裂对地应力场所产生的应力干扰主要集中在井眼四周；而相比之下，

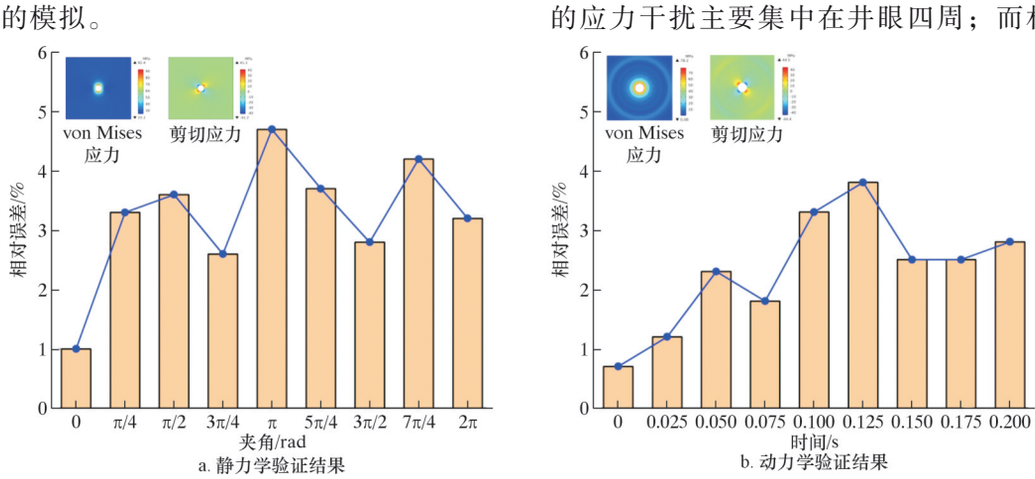


图 3　数学模型可靠性验证结果

Fig. 3　Reliability validation results of mathematical model

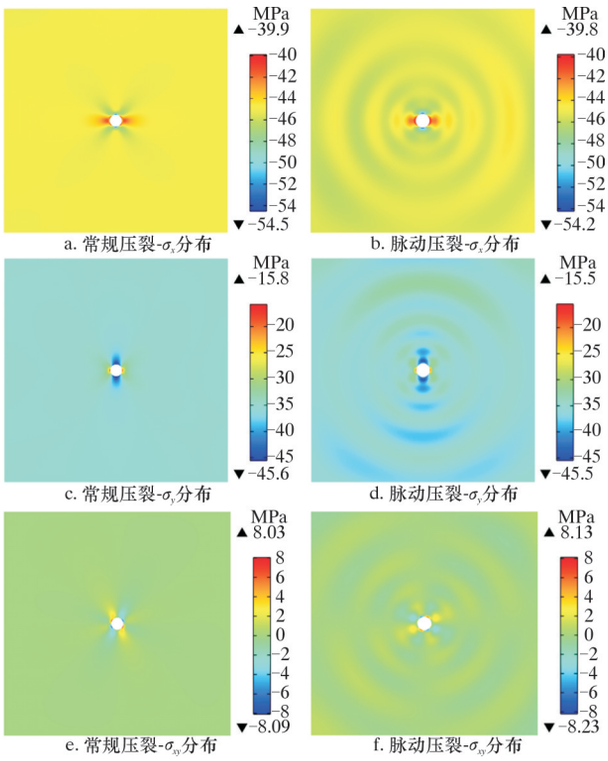


图 4　不同压裂方式对地应力场所产生的应力干扰

Fig. 4　Stress interference on in-situ stress field by different fracturing techniques

脉动水力压裂所产生的压力波能够在距离井眼更远的范围内对地应力场产生应力干扰。

产生上述扰动特征的主要原因是：常规水力压裂主要沿着地应力场的最小水平主应力方向进行裂缝扩展；而在脉动水力压裂过程中，裂缝尖端集中的应力会因周期性的流体注入而发生动态变化，促进裂缝沿着不同的地应力方向发生扩展，进而能够对地应力场产生更大范围的应力干扰。

3.2　主应力的影响分析

设定脉动水力压裂所产生的压力波幅值为 25.00 MPa，频率为 40.00 Hz。在上述压力波作用下，共开展了 4 组数值模拟：在前 3 组数值模拟中，地应力场的最小水平主应力为 35.00 MPa，最大水平主应力分别为 35.00、52.50、70.00 MPa，最后 1 组模拟的最小与最大水平主应力均为 70.00 MPa。在不同主应力值的影响下，脉动水力压裂对地应力场所产生的应力干扰如图 5 所示。

从图 5 可知，当地应力场的最小水平主应力为 35.00 MPa，且最大水平主应力分别为 35.00、52.50、70.00 MPa 时，脉动水力压裂对地应力场所产生的最大切应力分别为 33.70、27.50、23.70 MPa，即最大水平主应力每增加约 1.00 MPa，脉动水力压裂对地应力场所产生的最大切应力约下降 0.29 MPa，且应力扰动范围也逐渐向井眼方向收缩。其次，当地应力场的最小与最大水平主应力均为 70.00 MPa 时，脉动水力压裂对地应力场所产生的最大切应力为 6.45 MPa，即最小水平主应力每增加约 1.00 MPa，脉动水力压裂对地应力场所产生的最大切应力约下降 0.49 MPa，且应力扰动范围同样产生了向井眼方向收缩的趋势。因此，地应力场的最大或最小水平主应力越大，脉动水力压裂对地应力场所产生的切应力及应力干扰范围越小，且最小水平主应力的影响更为显著。

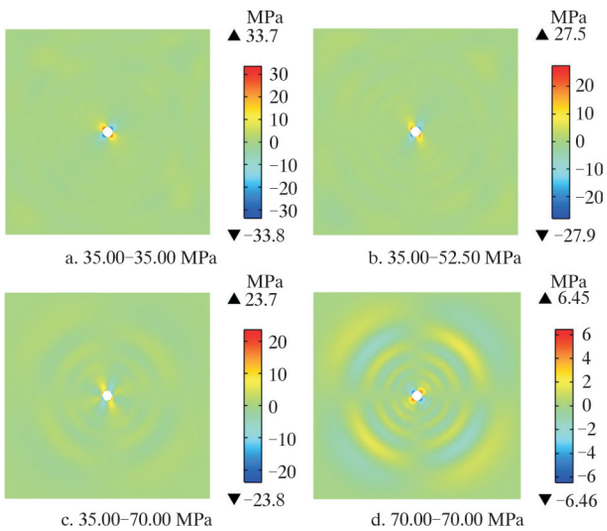


图 5　地应力场在不同主应力条件下所产生的应力干扰

Fig. 5　Stress interference generated by in-situ stress field under different principal stress conditions

产生上述扰动特征的主要原因：在高主应力条件下，页岩的弹性模量增加，脉动水力压裂需要具备更多的能量才能进行裂缝扩展，进而导致应力干扰效果减弱，且应力扰动范围缩小；最小水平主应力方向作为压裂进行裂缝扩展的主要地应力方向，其值越大，地应力场的应力集中现象越发明显，页岩局部变形增加，进而导致最小水平主应力的影响更加显著。

3.3　泊松比的影响分析

设定脉动水力压裂所产生的压力波幅值为 25.00 MPa，频率为 40.00 Hz。在上述压力波作用下，共开展了 4 组模拟，各组模拟的页岩泊松比分别为 0.14、0.20、0.26、0.30。在不同泊松比值的影响下，脉动水力压裂对地应力场所产生的应力干扰如图 6 所示。

从图 6 可知，当页岩的泊松比为 0.14、0.20、0.26、0.30 时，脉动水力压裂对地应力场所产生的最大切应力分别为 27.10、27.80、28.20、36.40 MPa，即页岩的泊松比每增加约 0.01，脉动水力压裂对地应力场所产生的最大切应力约增加

0.58 MPa，且应力干扰范围也呈现出逐步扩大的趋势。因此，页岩的泊松比越大，脉动水力压裂对地应力场所产生的切应力及应力干扰范围越大。

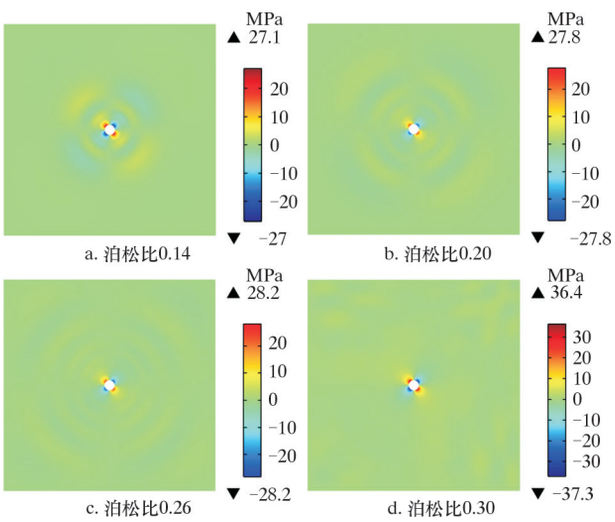


图 6　不同泊松比对地应力场所产生的应力干扰

Fig. 6　Stress interference on in-situ stress field by different Poisson's ratios

产生上述扰动特征的主要原因是：页岩的泊松比越大，其侧向形变能力越强，通过脉动水力压力所形成的裂缝更易沿着页岩的薄弱面产生扩展，进而导致脉动水力压裂对地应力场所产生的应力干扰增强，且干扰范围更广。

4　结　论

（1）与常规水力压裂相比，脉动水力压裂通过输出周期性变化的压力能够在距离井眼较远的地层范围内对地应力场产生应力干扰。

（2）地应力场的最大与最小水平主应力每增加约 1.00 MPa，脉动水力压裂对地应力场所产生的最大切应力约分别下降 0.29 MPa 与 0.49 MPa，即最小水平主应力的改变对脉动水力压裂所产生的应力干扰具有更为显著的影响，且干扰范围会随最大与最小水平主应力的增大而缩小。

（3）页岩的泊松比每增加约 0.01，脉动水力压裂对地应力场所产生的最大切应力约增加 0.58 MPa，且应力干扰范围呈现出逐步扩大的趋势。

参　考　文　献

[1] 何希鹏，蔡潇，高玉巧，等. 页岩气勘探开发实验技术研究进展与发展方向［J］. 天然气工业，2024，44（7）：12-26.
HE X P，CAI X，GAO Y Q，et al. Experimental technologies of shale gas exploration and development：research progress and development direction［J］. Natural Gas Industry，2024，44（7）：12-26.

[2] 毕开原. 我国页岩气钻完井关键技术现状及发展趋势［J］. 石油机械，2024，52（11）：12-20，28.
BI K Y. Current status and trend of key technologies for shale gas well drilling and completion in China［J］. China Petroleum Machinery，2024，52（11）：12-20，28.

[3] 雍锐，吴建发，吴伟，等. 四川盆地寒武系筇竹寺组页岩气勘探发现及其意义［J］. 石油学报，2024，45（9）：1309-1323.
YONG R，WU J F，WU W，et al. Exploration discovery of shale gas in the Cambrian Qiongzhusi formation of Sichuan basin and its significance［J］. Acta Petrolei Sinica，2024，45（9）：1309-1323.

[4] 李世臻，周志，李飞，等. 鄂西—渝东地区上二叠统大隆组页岩气富集条件与勘探有利区［J］. 天然气工业，2024，44（5）：1-15.
LI S Z，ZHOU Z，LI F，et al. Shale gas enrichment conditions and favorable exploration areas of upper Permian Dalong formation in the western Hubei and eastern Chongqing region［J］. Natural Gas Industry，2024，44（5）：1-15.

[5] 唐洪明，刘贤，陈洋，等. 不同构造单元页岩孔隙结构差异及其油气地质意义：以四川盆地泸州地区深层页岩为例［J］. 天然气工业，2024，44（5）：16-28.
TANG H M，LIU X，CHEN Y，et al. Pore structure difference of shale in different structural units and its petroleum geological implications：a case study on deep shale in the Luzhou area，Southern Sichuan Basin［J］. Natural Gas Industry，2024，44（5）：16-28.

[6] 聂海宽，党伟，张珂，等. 中国页岩气研究与发展 20 年：回顾与展望［J］. 天然气工业，2024，44（3）：20-52.
NIE H K，DANG W，ZHANG K，et al. Two decades of shale gas research & development in China：review and prospects［J］. Natural Gas Industry，2024，44（3）：20-52.

[7] 黄福喜，汪少勇，李明鹏，等. 中国石油深层、超深层油气勘探进展与启示［J］. 天然气工业，2024，44（1）：86-96.
HUANG F X，WANG S Y，LI M P，et al. Progress and implications of deep and ultra-deep oil and gas exploration in petro China［J］. Natural Gas Industry，2024，44（1）：86-96.

[8] 王建，郭秋麟，赵晨蕾，等. 中国主要盆地页岩油气资源潜力及发展前景［J］. 石油学报，2023，44（12）：2033-2044.

WANG J，GUO Q L，ZHAO C L，et al. Potentials and prospects of shale oil-gas resources in major basins of China［J］. Acta Petrolei Sinica，2023，44（12）：2033-2044.

［9］ 倪维军，杨国昊，刘刚，等. 井下低频脉动水力压裂技术参数优化及现场应用［J］. 地球科学与环境学报，2023，45（3）：643-652.
NI W J，YANG G H，LIU G，et al. Parameter optimization and field application of downhole low frequency pulsation hydraulic fracturing technology［J］. Journal of Earth Sciences and Environment，2023，45（3）：643-652.

［10］ 聂翠平，兰剑平，王祖文，等. 井下低频水力脉动压裂技术及其应用［J］. 钻采工艺，2021，44（2）：38-42.
NIE C P，LAN J P，WANG Z W，et al. Downhole low frequency hydraulic pulsing fracturing technology and its application［J］. Drilling & Production Technology，2021，44（2）：38-42.

［11］ 聂翠平，兰剑平，王祖文，等. 井下低频水力脉动压裂机理与应用［J］. 西安石油大学学报（自然科学版），2020，35（5）：54-59.
NIE C P，LAN J P，WANG Z W，et al. Mechanism study and application of downhole low-frequency pulsing hydraulic fracturing technology［J］. Journal of Xi'an Shiyou University （Natural Science），2020，35（5）：54-59.

［12］ 李鑫，张杰，唐旭，等. 随钻压力波在用于早期气侵检测时的扰动传播特性研究［J］. 中国安全生产科学技术，2022，18（1）：54-62.
LI X，ZHANG J，TANG X，et al. Research on disturbance propagation characteristics of pressure wave of measurement while drilling used in early gas-kick detection［J］. Journal of Safety Science and Technology，2022，18（1）：54-62.

［13］ 张杰，李鑫，王志伟，等. 无隔水管海底泵举升系统循环温度变化动态模拟［J］. 西南石油大学学报（自然科学版），2022，44（5）：74-84.
ZHANG J，LI X，WANG Z W，et al. Dynamic simulation research on circulating temperature change for riserless mud recovery system［J］. Journal of Southwest Petroleum University （Science & Technology Edition），2022，44（5）：74-84.

［14］ 林柏泉，李子文，翟成，等. 高压脉动水力压裂卸压增透技术及应用［J］. 采矿与安全工程学报，2011，28（3）：452-455.
LIN B Q，LI Z W，ZHAI C，et al. Pressure relief and permeability-increasing technology based on high pressure pulsating hydraulic fracturingand its application［J］. Journal of Mining and Safety Engineering，2011，28（3）：452-455.

［15］ 李全贵，林柏泉，翟成，等. 煤层脉动水力压裂中脉动参量作用特性的实验研究［J］. 煤炭学报，2013，38（7）：1185-1190.
LI Q G，LIN B Q，ZHAI C，et al. Experimental study on action characteristic of pulsating parameters in coal seam pulse hydraulic fracturing［J］. Journal of China Coal Society，2013，38（7）：1185-1190.

［16］ 李全贵，武晓斌，翟成，等. 脉动水力压裂频率与流量对裂隙演化的作用［J］. 中国矿业大学学报，2021，50（6）：1067-1076.
LI Q G，WU X B，ZHAI C，et al. Effect of frequency and flow rate of pulsating hydraulic fracturing on fracture evolution［J］. Journal of China University of Mining & Technology，2021，50（6）：1067-1076.

［17］ 李贤忠，林柏泉，翟成，等. 单一低透煤层脉动水力压裂脉动波破煤岩机理［J］. 煤炭学报，2013，38（6）：918-923.
LI X Z，LIN B Q，ZHAI C，et al. The mechanism of breaking coal and rock by pulsating pressure wave in single low permeability seam［J］. Journal of China Coal Society，2013，38（6）：918-923.

［18］ 朱红青，张民波，顾北方，等. 脉动孔隙水压下低透性松软煤岩损伤变形的实验分析［J］. 煤炭学报，2014，39（7）：1269-1274.
ZHU H Q，ZHANG M B，GU B F，et al. Experimental analysis of damage deformation of low permeability and soft coal under pulsating water pressure［J］. Journal of China Coal Society，2014，39（7）：1269-1274.

［19］ LUKE F，MARTE G，JESSE H，et al. Laboratory-scale - model testing of well stimulation by use of mechanical - impulse hydraulic fracturing［J］. SPE Journal，2015，20（3）：536-549.

［20］ 陆沛青，李根生，黄中伟，等. 脉动水力压裂过程中煤层应力扰动特征的数值模拟分析［J］. 振动与冲击，2015，34（21）：210-216.
LU P Q，LI G S，HUANG Z W，et al. Numerical simulation for stress disturbance features of coal beds during pulsating hydro - fracturing［J］. Journal of Vibration and Shock，2015，34（21）：210-216.

［21］ 陆沛青，李根生，黄中伟，等. 煤层脉动水力压裂动静态响应数值模型及求解［J］. 岩土力学，2015，36（5）：1471-1480.
LU P Q，LI G S，HUANG Z W，et al. Establishment and solution of a dynamic and static response numerical model for pulsating hydro-fracturing in coal seams［J］. Rock and Soil Mechanics，2015，36

(5)：1471-1480.

[22] 陆沛青，李根生，沈忠厚，等. 裂缝充填物对脉动水力压裂应力扰动效果的数值模拟［J］. 中国石油大学学报（自然科学版），2015，39（4）：77-84.
LU P Q，LI G S，SHEN Z H，et al. Numerical simulation of influence of crack fillers on stress disturbance effect during pulsating hydro-fracturing［J］. Journal of China University of Petroleum （Edition of Natural Science），2015，39（4）：77-84.

[23] 朱葛，董世民，潘子卜. 水力压裂非稳定激励下储层内动应力仿真模型［J］. 煤炭学报，2021，46（增刊1）：149-156.
ZHU G，DONG S M，PAN Z B. Simulation model of dynamic stress in reservoir under unsteady excitation of hydraulic fracturing［J］. Journal of China Coal Society，2021，46（Sup. 1）：149-156.

[24] 张杰，王谣，李鑫，等. 超声波作用下页岩气渗流变化规律实验研究［J］. 实验室研究与探索，2021，40（12）：46-50.
ZHANG J，WANG Y，LI X，et al. An experimental study on shale gas seepage under ultrasonic wave［J］. Research and Exploration in Laboratory，2021，40（12）：46-50.

[25] 悦茂苓，鱼则行，孙佳颖，等. 三维曲边界结构波传播分析的时域谱单元方法［J］. 振动与冲击，2024，43（20）：325-333.
YUE M L，YU Z X，SUN J Y，et al. A time-domain spectral element method for wave propagation analysis of three-dimensional curved-edge structures［J］. Journal of Vibration and Shock，2024，43（20）：325-333.

[26] 杨洪升，郑宇轩，周风华，等. 弹性SHPB试件内部纵向应力波传播及所产生的横向约束应力［J］. 固体力学学报，2023，44（6）：815-830.
YANG H S，ZHENG Y X，ZHOU F H，et al. Longitudinal stress wave propagation in an elastic SHPB specimen and the resulted transverse additional stress［J］. Chinese Journal of Solid Mechanics，2023，44（6）：815-830.

[27] 肖勇，曹雨生. 基于浸入界面方法的平面波导模式分析［J］. 物理学报，2023，72（14）：1-8.
XIAO Y，CAO Y S. Modal analysis of planar waveguides by the immersed interface method［J］. Acta Physica Sinica，2023，72（14）：1-8.

[28] 狄宏规，郭慧吉，周顺华，等. 非饱和土-结构动力响应的多耦合周期性有限元法［J］. 力学学报，2022，54（1）：163-172.
DI H G，GUO H J，ZHOU S H，et al. Multi coupling periodic finite element method for calculating the dynamic response of unsaturated soil-structure system［J］. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics，2022，54（1）：163-172.

第一作者简介：卞小强，教授，生于1979年，2011年毕业于西南石油大学油气田开发工程专业，现从事气田开发理论与方法研究工作。地址：（610500）四川省成都市。email：xiaoqiang.bian@swpu.edu.cn。

收稿日期：2025-01-08　　**修改稿收到日期：**2025-04-29
（本文编辑　杨晓峰）

（上接第55页）

[23] 王旱祥，许传宝，于长录，等. 天然气水合物气液分离方案设计与样机试制［J］. 石油机械，2022，50（7）：72-79.
WANG H X，XU C B，YU C L，et al. Gas-liquid separation scheme design and prototype manufacturing for natural gas hydrate［J］. China Petroleum Machinery，2022，50（7）：72-79.

[24] 娄焕伟，张兴凯，刘旭煜，等. 两相出口对轴向涡流分离器的影响研究［J］. 石油机械，2024，52（5）：116-123.
LOU H W，ZHANG X K，LIU X Y，et al. Influences of two-phase outlet on axial vortex separator［J］. China Petroleum Machinery，2024，52（5）：116-123.

[25] 何蕾，张明，衣华磊，等. 基于数字孪生的生产分离器分离效果混合模型［J］. 石油机械，2024，52（8）：15-23.
HE L，ZHANG M，YI H L，et al. A hybrid model for separating effect of production separator based on digital twin［J］. China Petroleum Machinery，2024，52（8）：15-23.

第一作者简介：米凯夫，高级工程师，生于1983年，2012年毕业于北京科技大学机械工程专业，获博士学位，现从事油气钻采新装备、新工具及井下随钻仪器的设计研发工作。地址：（102206）北京市昌平区。电话：（010）80165809。email：mikfdr@cnpc.com.cn。

通信作者：申朋玉，工程师。email：shenpydr@cnpc.com.cn。

收稿日期：2025-03-28　　**修改稿收到日期：**2025-08-01
（本文编辑　任　武）