doi：10. 12068/j. issn. 1005－3026. 2026. 20240231

纹层诱导陆相页岩水力压裂裂缝扩展机理

李连崇[1]，陆天乐[1]，牟文强[1]，张子麟[1,2]
（1. 东北大学 资源与土木工程学院，辽宁 沈阳 110819；
2. 中国石化胜利油田分公司 石油工程技术研究院，山东 东营 257000）

摘　　要：纹层结构显著影响页岩储层水力裂缝的形态与扩展机制．为探究纹层特征对裂缝扩展的控制机理，开展了真三轴水力压裂实验与数值模拟研究，利用声发射（AE）监测和CT扫描重构裂缝形态，结合宏细观力学参数标定，建立三维水力裂缝-纹层交互模型．结果表明：纹层数量和分布主导裂缝扩展路径；适量纹层密度可增强裂缝对层间基质的沟通能力，形成复杂的交叉网络，但过高密度会限制裂缝纵向延伸，降低储层改造体积（SRV）；裂缝长度与纹层张拉强度成反比，张拉强度增加使裂缝倾向于窜层扩展．本研究揭示了纹层诱导水力裂缝扩展的关键规律，为提高油气开采效率提供了理论支撑．

关　键　词：页岩纹层；水力压裂；数值模拟；裂缝扩展；改造体积
中图分类号：TE 377　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1005-3026(2026)04-0111-09

Mechanism of Lamina-Induced Hydraulic Fracture Propagation in Continental Shale

LI Lian-chong[1], *LU Tian-le*[1], *MU Wen-qiang*[1], *ZHANG Zi-lin*[1,2]
（1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Institute of Petroleum Engineering, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying 257000, China. Corresponding author: MU Wen-qiang, E-mail: muwenqiang@mail.neu.edu.cn）

Abstract: The lamina structure significantly influences the morphology and propagation mechanism of hydraulic fractures in shale reservoirs. To investigate the controlling mechanisms of lamina characteristics on fracture propagation, true triaxial hydraulic fracturing experiments and numerical simulations were conducted. The experiments utilized acoustic emission (AE) monitoring and CT scanning to reconstruct fracture morphology, combined with macro- and meso-scale mechanical parameter calibration to establish a three-dimensional hydraulic fracture and lamina interaction model. Results indicate that the number and distribution of laminae dominate the fracture propagation path. Moderate lamina density enhances the connectivity between hydraulic fractures and the inter-lamina matrix, forming a complex cross-fracture network. However, excessive lamina density limits longitudinal fracture propagation, reducing the stimulated reservoir volume (SRV). Fracture length is inversely proportional to the lamina's tensile strength, with increased tensile strength causing fractures to preferentially propagate across layers. This study reveals the critical mechanisms of lamina-induced hydraulic fracture propagation, providing theoretical support for enhancing oil and gas extraction efficiency.

Key words: shale lamina; hydraulic fracturing; numerical simulation; fracture propagation; stimulated reservoir volume

页岩油的广泛分布为全球能源供应提供了坚实基础，加强陆相页岩油的勘探开发，对保障国家能源供应具有战略意义[1-3]．页岩油开采工程通常用到水平井钻井和水力压裂技术[4]，但不同

收稿日期：2024-12-19
基金项目：国家科技重大专项（2024ZD1405105；ZX2024753758-5）；国家自然科学基金资助项目（52374082；52204089）；中央高校基本科研业务费专项资金资助项目（N25LPY002）．
作者简介：李连崇（1978—），男，辽宁朝阳人，东北大学教授，博士生导师．
通信作者：牟文强，E-mail：muwenqiang@mail.neu.edu.cn.

于其他油气开发工程,含纹层陆相页岩非均质性更强[5],增大了页岩油勘探开采工程的不确定性.内部因素如发育程度影响页岩储集性能[6];其弱胶结作用显著影响页岩油的赋存与运移[7],在平行层理方向,其对裂纹扩展的阻滞能力相对薄弱,当水力裂缝与层理面发生相交时,会使泵压出现剧烈的波动,并产生明显的声发射活动[8];纹层厚度[9]影响裂缝空间分布机制.外部因素如纵向应力差越小[10],排量越低[11],层理面越易被激活;高黏度和低黏度压裂液交替能有效调控裂缝内的压力分布等,促使水力裂缝在纵向与横向均衡扩展[12],减小射孔簇间距、增加射孔簇数可显著提高水力裂缝面积[11-13];射孔角度[14]、围压[15]、温度[16]等同样影响裂缝延伸规律.

许多学者采用岩体压缩实验[17]、水力压裂实验[18]及AE监测[19]等方法对页岩性质进行研究.数值模拟方法包括有限元[20]、离散元[21]、有限差分[22]、边界元[23]等.有限元法将物体离散为单元来求解力学行为,对复杂形状和边界条件适应性强,能考虑多物理场耦合;离散元法通过单元间相互作用分析整体行为,但参数确定困难;有限差分法用有限差分近似导数求解,但对复杂几何和多场耦合处理欠佳;边界元法处理无限域问题有优势,但对非线性和复杂耦合问题求解难度大.

对页岩水力裂缝的研究多聚焦在外部因素和低纹层密度的条件下,针对实际地层中存在的高纹层密度情况下纹层特征对水力裂缝的三维特征研究较少.本文开展了室内真三轴水力压裂实验,基于AE监测和CT扫描以及RFPA[24]有限元三维数值模拟,研究不同纹层密度以及在高纹层密度下抗拉强度、裂缝扩展、AE事件和能量变化以及单元损伤规律.

1 水力压裂实验

1.1 岩样制备

根据现场实验和调查,基质和纹层材料的强度差异显著[25].本研究选择标准的425水泥制备中高强度页岩;根据目标页岩的颗粒分布,混合不同粒径的石英砂(0.05~0.2 mm)模拟页岩的细粒结构.将水泥、石英砂、高岭土和水分别按1.5∶1∶0.1∶0.6和1∶1∶0.35∶0.40的质量比放入搅拌机中搅拌均匀,配制强度等级不同的两种材料,分别制成直径50 mm,高100 mm的岩样,经单轴压缩物模实验(图1所示)测其应力-应变曲线,基质和纹层材料的抗压强度分别为31.2和17.4 MPa.制成100 mm×100 mm×100 mm尺寸的3种岩样.浇筑完成后,在标准条件下养护48 h后以环氧树脂作为密封耦合剂封填注浆管,在试样表面贴上声发射磁吸贴片.

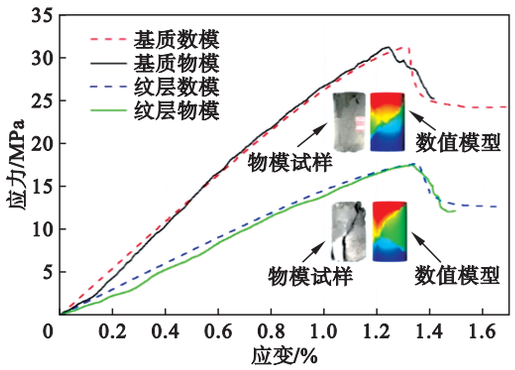


图1 物模与数模对标

Fig. 1 Benchmarking between physical and numerical models

1.2 实验流程

纹层密度分别设置为0,10,20条/m,水平应力差6 MPa,压裂液黏度5 mPa·s,注液速率10 mL/min,开展真三轴水力压裂实验测试,监测压裂曲线及声发射参数数据,将岩样送至CT检测机构完成扫描.

1.3 实验结果分析

1.3.1 岩体破裂模式分析

从外部裂隙、内部裂隙、CT扫描内部裂隙及裂隙重构的角度对3种纹层密度(0,10,20条/m,即对试样分别布设0,1和2条纹层)的试样裂隙分布进行全方位展示(图2).当纹层密度为0条/m时,在相同的泵注条件(注液速率10 mL/min)下,无弱结构体(即无纹层)时,岩样在水力作用下产生明显的张拉劈裂破坏,主要裂缝从射孔处出发在地应力方向上垂直贯穿岩石,此时水力裂隙的扩展形式趋于单一,扩展模式较单调(图2a),无缝网形成.当纹层密度为10条/m时,在岩样中心处布设一条纹层后,弱结构面对水力裂缝的走向具有诱导作用,故在水力压裂作用下开启并穿透了此纹层,同时裂缝在地应力作用下垂直向上扩展近乎到岩体表面,试样不再呈现出明显被单一裂缝贯穿的破坏,主裂缝扩展时伴随有少量细小次要剪切裂缝发育产生(图2b).当纹层密度为20条/m时,试样均匀布设两条纹层,脆性结构和软弱结构交替分布,同样的应力条件下对试样的压实作用增强,压力液从射孔处向下和向上激活并穿透了所布设的两条纹层,同时在两条纹层间形成沟通

基质的水力裂缝,内部裂隙CT扫描结果以及裂隙重构证明该密度下纹层间形成了较为复杂的缝网,岩样内部起裂形成多处破裂面,宏观表现为破裂形成多个块体(图2c).

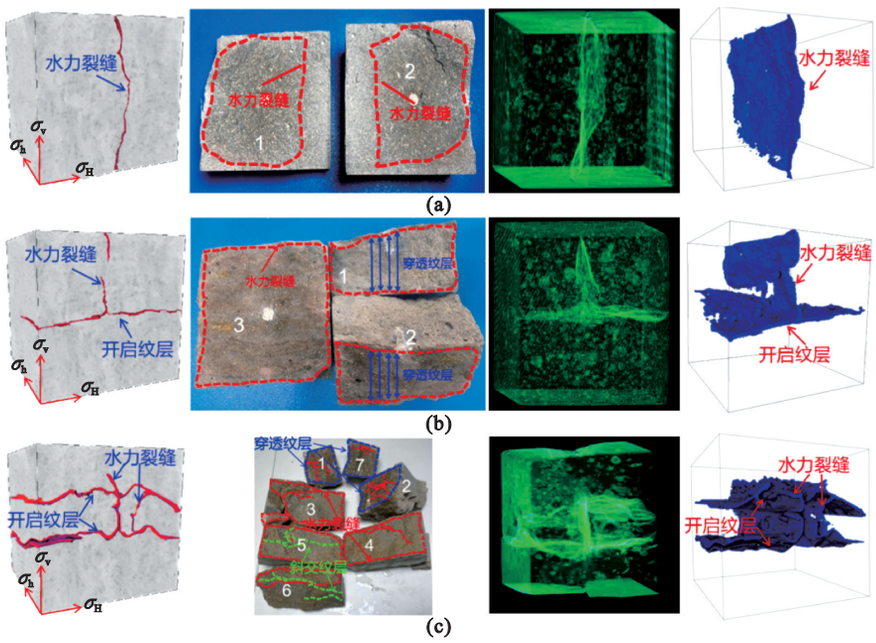


图2　纹层密度对试样水力压裂裂缝形态的影响

Fig. 2　Influence of lamina density on morphology of hydraulic fractures in samples

(a)—纹层密度为0条/m;(b)—纹层密度为10条/m;(c)—纹层密度为20条/m.

根据上述实验结果分析得出纹层面控制岩样的破裂方式.纹层数量和布设位置的变化会使水力裂缝的扩展形式和方向发生显著变化,纹层数量较少时裂缝扩展相对简单直接,增大纹层密度会使裂缝扩展行为变得更加复杂,形成复杂的缝网结构.

1.3.2　泵注压力分析

根据3种纹层密度条件下试样的泵压记录,压裂过程分为4个阶段:①蓄压阶段;②主缝形成阶段;③渗流通道形成阶段;④泄压阶段.如图3a所示,无纹层影响的岩样随着压裂液的注入首先进入蓄压阶段,即启动伺服泵压系统首先会进入短暂的憋压过程,稍后流体压力以低速率缓慢增长,随后以较高速率迅速蓄压达到峰值压力15.26 MPa,主裂缝开始起裂;主裂缝起裂后,沿地应力作用方向扩展延伸,泵注压力由15.26 MPa迅速下降至3.24 MPa;随着主裂缝持续扩展,泵注压力持续波动,在127 s时达到相对稳定值2.74 MPa,当主裂缝延伸至试样表面,压裂液随即渗出,表示渗流通道形成;持续一段时间对泵注压力进行观察,无上升趋势后停泵,此时由于无压裂液补充,泵注压力随即下降.无纹层时压裂曲线表现为简单的单峰波动.

纹层密度为10条/m时(图3b),以泵注压力表征的岩石的压裂过程也可大致分为4个阶段,由于射孔布设在弱结构纹层处,起裂难度低,在43 s处泵注压力达到10.79 MPa时发生第一次起裂,此时纹层被开启,在53 s时主缝形成,达到峰值压力14.77 MPa,比无纹层试样的蓄压时间更短;进入第2阶段后,主裂缝开始扩展至岩体表面,泵注压力曲线斜率更陡;87 s时渗流通道形成,随后泄压.此时压裂曲线表现为双峰波动.

纹层密度为20条/m时(图3c),两条纹层均匀布设在试样上,射孔位于基质部分,起裂难度大,故蓄压时间较纹层密度10条/m的略久,在89 s达到峰值压力13.72 MPa,主缝开始形成;进入第2阶段后,主裂缝开始扩展,两条纹层被开启;主裂缝形成后,纹层间的基质部分开始被细小裂缝沟通,渗流通道逐渐完善;158 s时断崖式泄压.

纹层密度与峰值压力之间的关系如图3d所示,通过拟合曲线对数据点进行了趋势预测,显示两者之间存在负相关关系,随着纹层密度的增大,岩样破裂压力越小,压裂曲线波动越复杂.

1.3.3　矩张量反演分析

基于地震学矩张量算法[26],反演并统计了不同纹层密度条件下水力致裂裂缝的震源半径和破裂机制.用于矩张量分解、确定裂隙方向和破裂类型的方法分别如式(1)和(2)所示:

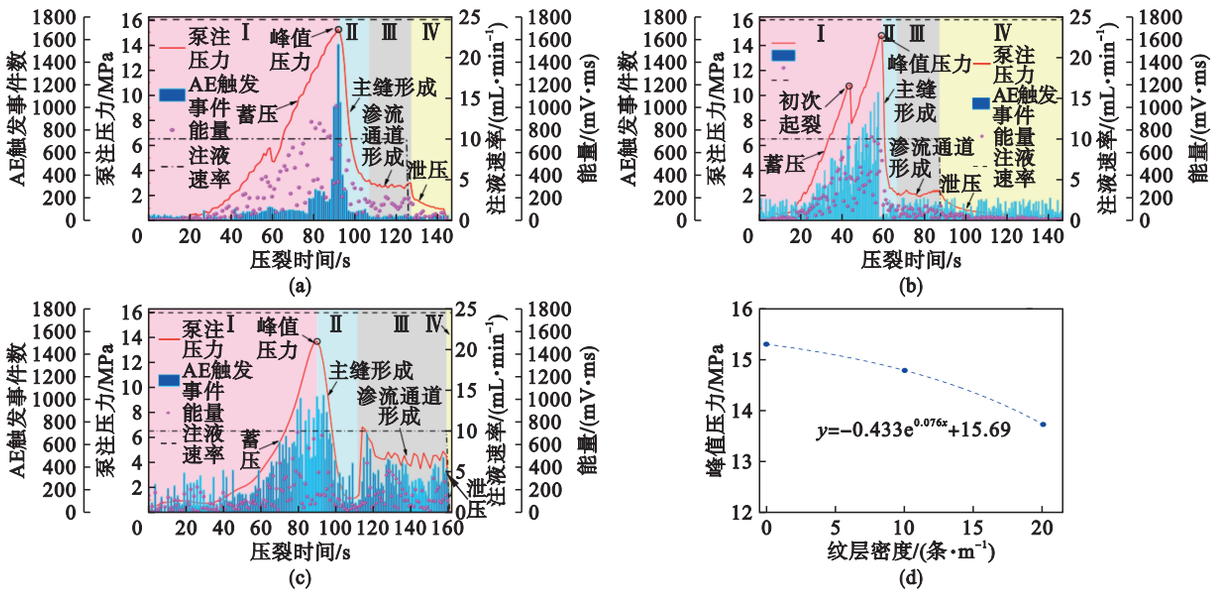


图3 泵注曲线分析

Fig. 3 Pump injection curve analysis

(a)—纹层密度为0条/m;(b)—纹层密度为10条/m;(c)—纹层密度为20条/m;(d)—纹层密度-峰值压力关系.

$$\boldsymbol{M}=\boldsymbol{M}_{\mathrm{ISO}}+\boldsymbol{M}_{\mathrm{DC}}+\boldsymbol{M}_{\mathrm{CLVD}}=\frac{\mathrm{tr}(\boldsymbol{M})}{3}\begin{pmatrix}1&0&0\\0&1&0\\0&0&1\end{pmatrix}+$$

$$(1-2|\varepsilon|)m^{*}_{\max}\begin{pmatrix}-1&0&0\\0&0&0\\0&0&1\end{pmatrix}+|\varepsilon|m^{*}_{\max}\begin{pmatrix}-1&0&0\\0&-1&0\\0&0&2\end{pmatrix},\quad(1)$$

$$R=\frac{\mathrm{tr}(\boldsymbol{M})}{\left(|\mathrm{tr}(\boldsymbol{M})|+\sum|m^{*}_{j}|\right)}\times 100\%.\quad(2)$$

其中:$|m^{*}_{j}|$是偏矩张量$\boldsymbol{M}^{*}$的特征值且$\boldsymbol{M}^{*}$是$\boldsymbol{M}_{\mathrm{DC}}$和$\boldsymbol{M}_{\mathrm{CLVD}}$之和;$\mathrm{tr}(\boldsymbol{M})=\boldsymbol{M}_1+\boldsymbol{M}_2+\boldsymbol{M}_3$.$\varepsilon=-\dfrac{m^{*}_{\min}}{|m^{*}_{\max}|}$,$m^{*}_{\min}$和$m^{*}_{\max}$分别是偏矩张量$\boldsymbol{M}^{*}$分解后特征值的最大值和最小值;$\boldsymbol{M}_{\mathrm{ISO}}$是各向同性分量,表征了裂隙受挤压或拉伸的受力状态;$\boldsymbol{M}_{\mathrm{DC}}$是纯剪切分量,因剪切应力的作用而产生;$\boldsymbol{M}_{\mathrm{CLVD}}$是补偿线性偶极子,一定程度上反映裂隙受力后发生的旋转或扭转.

根据声发射反演分析出试样在3种纹层密度下破坏事件规律(如图4和表1所示),结合重构导出的裂缝改造面积SRA(stimulated reservoir area)和缝高参数,对比发现,无纹层时水力裂缝沿地应力方向进行,缝高达到99.05 mm,SRA为9 458 mm^2,此时岩石材料内部颗粒分子之间相互连接较弱,更容易达到试样的抗拉强度,故张拉破坏比例最高.布设一条纹层后,裂缝沿纹层方向扩展直至完全开启纹层,同时在地应力方向(即σ_v方向)向上扩展贯通岩体的一半,此时缝高为49.3 mm,SRA为15 263 mm^2,水力裂缝缝高减小,纹层显著影响了水力裂缝的扩展路径,剪切破坏比例增加.布设两条纹层后,缝高减小至41.5 mm,SRA增加至18 674 mm^2,裂缝在纹层和纹层间产生交叉网络,声发射事件数增加,此时剪切事件数占主导,进一步证明纹层和纹层之间裂缝沟通增多,即基质部分被更大程度改造.

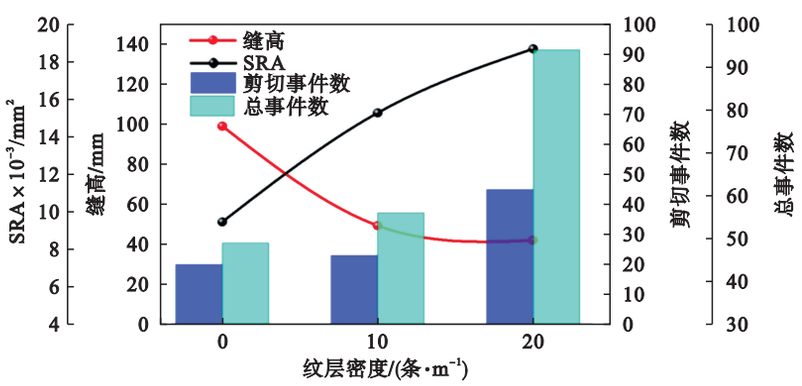


图4 纹层密度与裂缝参数、声发射数据的相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis of lamina density, fracture parameters, and AE data

表 1　破坏事件占比

Table 1　Proportion of destructive incidents　%

纹层密度/(条·m^{-1})	剪切事件	张拉事件	混合破坏事件
0	40.8	2.0	57.2
10	44.6	14.3	41.1
20	47.9	17.0	35.1

2　数值模拟分析

2.1　数值模型

1) 数值模拟原理.本文的数值模拟采用(RFPA3D-HF)(realistic failure process analysis-3D for hydraulic fracturing)软件[27]进行.渗流分析采用流变-应力-损伤(FSD)的耦合作用控制方法[28].

2) 用RFPA软件建立数值岩心并开展单轴压缩数值实验,标定岩石基质细观力学参数.建立直径50 mm,高100 mm的标准圆柱数值岩心模型.在模型顶部施加速率为4×10^{-6} m/步的轴向位移载荷.单轴压缩数值实验的应力-应变响应如图1所示.基质和纹层单轴抗压强度的绝对误差分别为0.66%和0.12%,该误差在允许范围内.因此,岩石基质的细观力学参数适用于压裂模拟.

3) 本文采用平面应变模型,建立标准三轴压缩实验的岩心数值模型,x,y,z三个方向划分100个单元数,σ_v=20 MPa,σ_H=16 MPa,σ_h=10 MPa.基于前述方法,建立了验证模型(图5a),参数如表2所示.力学指标来自上述实验室测试结果.模拟结果如图5b所示,水力裂缝激活了两条纹层并扩展,且在纹层间形成了交叉缝网,与实验结果(图5c)一致,说明了RFPA3D-HF处理三维水力裂缝-纹层交互问题的准确性.

表 2　数值模型的宏细观力学参数

Table 2　Macro- and meso-scale mechanical parameters of numerical model

力学参数	单位	基质	纹层
单轴抗压强度(实验)	MPa	31.2	17.4
弹性模量(实验)	GPa	23.6	12.5
单轴抗压强度(模拟)	MPa	79.4	34.9
弹性模量(模拟)	GPa	27.9	13.8
内摩擦角	(°)	35	30
泊松比	1	0.23	0.27
渗透率	m^2	8e-20	8e-18
孔隙度	%	2.6	6.3
储水系数	m^{-1}	1.4e-6	1.4e-6
压裂液黏度	mPa·s	5	5
泵注排量	m^3/min	1.6e-8	1.6e-8

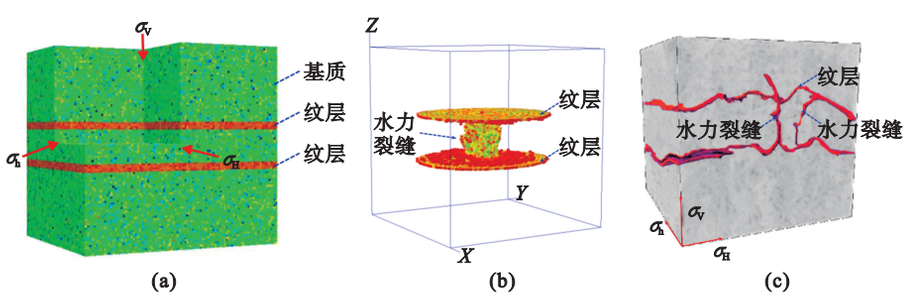


图 5　所构建数值模型的模拟结果与物模验证

Fig. 5　Simulation results and physical model verification of constructed numerical model

(a)—数值模型;(b)—模拟结果;(c)—实验结果.

2.2　纹层密度对裂缝扩展的影响

浇筑岩心试样的纹层密度及纹层厚度受限,无法从物模的角度探究实际工程中高纹层密度对水力压裂的影响,故以表1参数建立标准三轴压缩实验的岩心数值模型,纹层厚度为2 mm,设置100 ,120 和160 条/m纹层密度,控制计算步数为17,岩体破坏的模拟计算结果如图6所示.

当纹层密度为100条/m时,水力裂缝在扩展到纹层处时先后形成了“Ⅰ,Ⅱ”型等分支裂缝;当纹层密度为120条/m时,水力裂缝在扩展到纹层处时先后形成了“Y”形和倒“Y”形分支裂缝;当纹层密度为160条/m时,在扩展到纹层处时先后形成了“Ψ、丰、八”形分支裂缝.纹层分布越密集,开启纹层时形成的分支裂缝越复杂.高纹层密度的页岩呈现出的裂缝复杂程度更高,主剪切裂缝扩展的同时,细小次要裂缝也随之生成.受页岩非均质性的影响,裂缝在开启纹层并沿纹层延伸时表现出不规则扩展,纹层密度越小即纹层间距越大,裂缝不规则扩展越明显,纹层密度为100条/m时的裂缝扩展不均匀性更高.

利用拟合方程对SRV、平均缝高及平均缝长随纹层密度的变化规律进行表征(如图7所示),相同的计算条件下(计算过程控制在17步),平均缝高随纹层密度呈指数形式递减,平均缝长与平均缝高的变化趋势相反.SRV是反映地层储层特性的重要参数,当纹层密度为100条/m时,SRV为502.9 cm^3;当纹层密度为120条/m时,SRV为435.9 cm^3;当纹层密度为160条/m时,SRV为398.7 cm^3,与纹层密度呈负相关关系.由物模实验可知,增加纹层密度可提高裂缝改造体积.数值模拟计算结果表明,当纹层过密时,基质体积减小,水力裂缝更易沿纹层方向扩展,削弱裂缝纵向扩展时对岩体基质地应力方向的沟通程度,不利于体积改造.

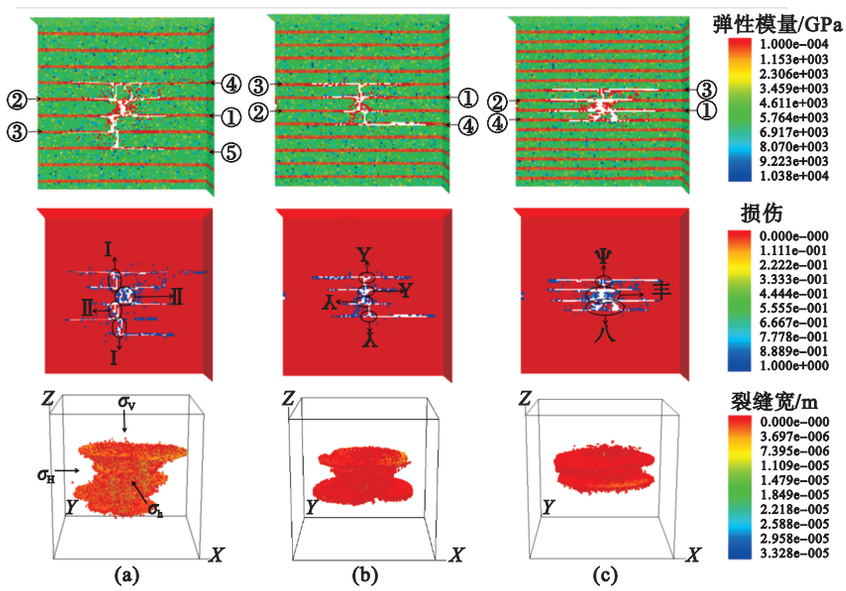


图6 不同纹层密度的水力裂缝分布形态(图中序号表示纹层被开启的顺序)

Fig. 6 Distribution patterns of hydraulic fractures with different lamina densities (numbers in the figure indicate the order in which laminae are opened)

(a)—纹层密度为100条/m;(b)—纹层密度为120条/m;(c)—纹层密度为160条/m.

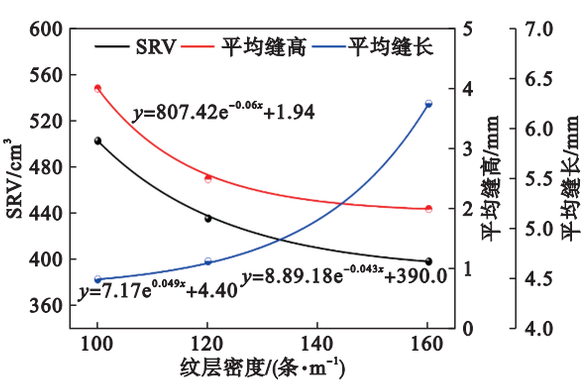


图7 不同纹层密度下裂缝平均缝高、缝长及SRV

Fig. 7 Average fracture height, fracture length, and SRV under different lamina densities

2.3 纹层抗拉强度对裂缝扩展的影响

纹层发育过程中会受到沉积环境变化引起的压实、胶结、溶蚀和重结晶等作用的影响,故其力学特征有较大的差异.控制纹层密度=160条/m,其余输入参数不变,探究纹层抗拉强度分别为1.5,2.0,2.5和3.5 MPa时的裂缝扩展规律.停止加载后4种纹层抗拉强度的模型破裂模式见图8.随着应力不断加载,水力裂缝自射孔出发扩展至纹层发生偏转形成沿纹层的贯穿裂缝,后形成与主裂缝相交的次生裂缝,裂缝相互联通形成网状裂缝,显然纹层的抗拉强度与裂缝高度呈正相关.当纹层抗拉强度为1.5 MPa时穿透纹层能力弱,仅激活2条纹层,所形成的裂缝长为80.2 mm,高为18.33 mm,主峰倾向于随纹层抗拉强度的增大,水力裂缝纵向扩展能力增强,沟通的纹层数增多,但裂缝开启并转向纹层扩展的难度增加,纹层未充分开启,故裂缝缝长减小.当纹层抗拉强度为3.5 MPa时,缝长达34.79 mm,缝高达34.97 mm,形成的缝网更复杂.

随着应力不断加载,岩石内部裂缝产生并不断扩展贯通,这一过程所释放的声发射信号经过模拟软件内声发射监测系统的接收和定位,在计算结束后可形成代表岩石内部损伤的有效参数.声发射事件产生过程中的特征参数作为判断岩石起裂和损伤的信号,声发射计数和累计声发射计数与渗透率演化阶段特征相关联,声发射能量

和声发射累计能量为研究与宏观变形和渗透率演化相关的岩石破裂机制提供了有用的信息.

随着计算步的增加,加载裂缝逐渐扩展交汇,此过程伴随声发射能量间歇性释放,直至最后岩石断裂破坏,释放所累积的声发射能量.不同纹层抗拉强度下的声发射能量特征也不相同(图 9a),σ_t=1.5 MPa 时,加载初期能量曲线快速上升,在第 2 步结束前达到能量高峰,随后开始缓慢释放能量,σ_t=2 MPa 时在第 3 步结束前达到能量峰值,能量骤然释放仅维持了一个步长,后续平缓释放,直到第 16 步重新开始累积能量,有能量波动趋势.σ_t=2.5 MPa 时能量在加载初期小幅度上升后缓慢释放,在第 11 步重新累积能量,在第 12 步达到能量峰值,随后快速释放能量,在加载结束前能量曲线出现 3 次波动.σ_t=3.5 MPa 时加载初期出现短暂能量累积和释放,随后重新进行能量累积,在第 12 步再次出现能量波动,直到第 16 步才出现能量峰值,随后断崖式释放能量直至能量为 0.由能量变化特征可知,各纹层抗拉强度下的模型都经历了能量的累积和释放过程,抗拉强度越大,能量峰值越滞后,产生的能量波动越复杂.

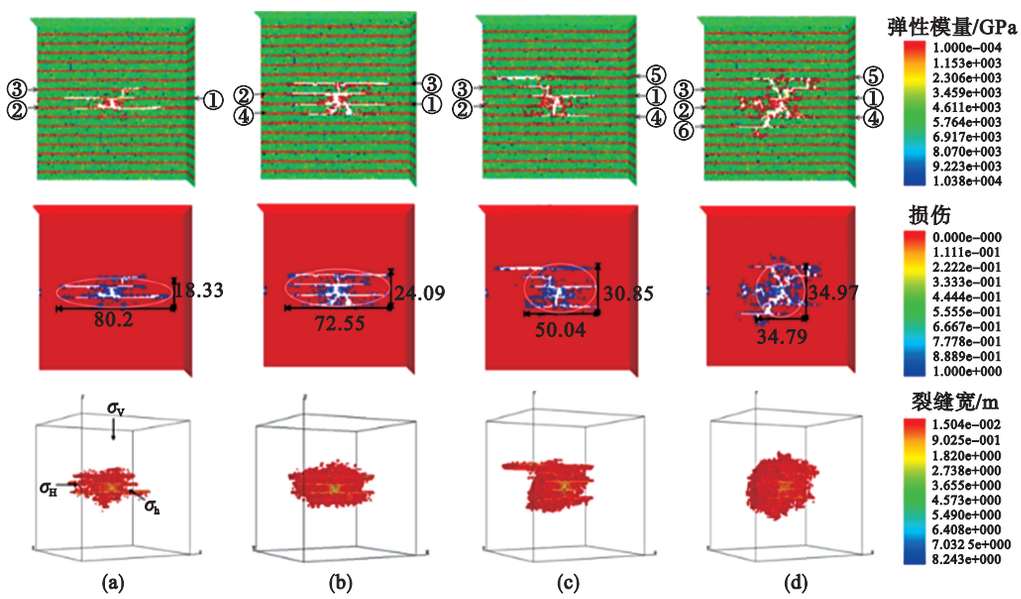


图 8　不同纹层抗拉强度的水力裂缝分布形态(图中序号表示纹层被开启的顺序)

Fig. 8　Distribution patterns of hydraulic fractures with different tensile strengths of laminae (the numbers in the figure indicate the order in which the laminae are opened)

(a)—抗拉强度为 1.5 MPa;(b)—抗拉强度为 2.0 MPa;(c)—抗拉强度为 2.5 MPa;(d)—抗拉强度为 3.5 MPa.

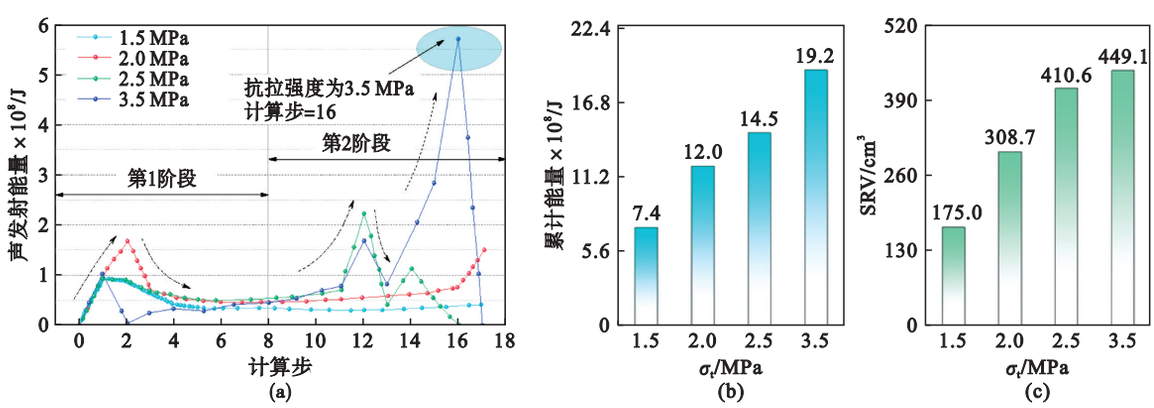


图 9　纹层张拉强度数值模型水力压裂过程中声发射数据和 SRV 演化特征

Fig. 9　AE data and SRV evolution characteristics during hydraulic fracturing process of numerical model for tensile strength of laminae

(a)—声发射能量;(b)—累计声发射能量;(c)—SRV.

声发射事件数是数值模型发生损伤的体现.加载初期应力较低,声发射计数较少,随着加载步的增加,单步与累计声发射计数不断上升.当 σ_t=1.5 MPa 时,在第 1 步声发射计数增加速率最

大,加载结束后的累计声发射计数达到14 700;当σ_t=2.0 MPa时,在第2步声发射计数增加速率最大,累计声发射计数增加22.4%;当σ_t=2.5 MPa时,声发射计数增加率在12步达到峰值,累计声发射计数增加70.1%;当σ_t=3.5 MPa时,声发射计数增加率在16步达到峰值,累计声发射计数增加1.31倍.纹层抗拉强度越大,纹层被开启的难度增大,模型沿纹层方向产生损伤破坏的难度增大,声发射计数增加速率最大值滞后,裂缝纵向扩展的高度随抗拉强度的增大而增大,沟通纹层数更多,形成的裂缝网更复杂,发生的损伤破坏更多,累计产生的声发射事件数更多.

声发射事件数和能量曲线变化吻合,事件数增减和能量高低有良好的一致性.随纹层抗拉强度增加,模型发生损伤破坏后形成的裂缝更复杂,累计能量值和SRV与抗拉强度呈正相关.

3 结 论

1)页岩压裂工程水力裂缝在扩展时优先激活纹层,弱结构面或地层各向异性成为深部储层压裂中的关键因素.

2)随着纹层密度增加,压裂液滤失至纹层的可能性增大,裂缝高度受限,裂缝开启纹层的数量与纹层密度呈正相关.过高的纹层密度会限制裂缝的纵向扩展,降低改造体积.

3)增加纹层抗拉强度使裂缝倾向于沿地应力方向扩展,激活或沿纹层延伸的能力减弱,主裂缝更易横向扩展.抗拉强度与声发射事件数、能量及SRV呈正相关,增大抗拉强度可减轻软弱结构对裂缝扩展路径的控制作用.

4)在实际工程中,适当调整纹层面与水力裂缝的夹角,可降低裂缝偏离预设扩展路径的风险.在高密度纹层页岩储层中,增加施工液量或调整注液时间有助于延伸裂缝高度,沟通更多纵向相邻储层.

参考文献:

[1] Bai B, Dai C C, Hou X L, et al. Authigenic silica in continental lacustrine shale and its hydrocarbon significance [J]. *Petroleum Exploration and Development Online*, 2022, 49(5): 1033-1045.

[2] Mi S Y, Guo Q L, Zhang Q, et al. Classification and potential of continental shale oil resources in China and resource evaluation methods and criteria [J]. *Oil Shale*, 2023, 40(4): 283-320.

[3] Wang M, Li M, Li J B, et al. The key parameter of shale oil resource evaluation: oil content[J]. *Petroleum Science*, 2022, 19(4): 1443-1459.

[4] He X P, He G S, Gao Y Q, et al. Progress in and research direction of key technologies for normal-pressure shale gas exploration and development[J]. *Natural Gas Industry B*, 2023, 10(6): 555-569.

[5] Wang D, Liu Z D. Lamina influences on tensile strength of shallow marine shales from upper Ordovician, Western Ordos Basin[J]. *ACS Omega*, 2023, 8(33): 30024-30036.

[6] Ma X, Xu J Q, Liu W H, et al. Developing characteristics of shale lamination and their impact on reservoir properties in the deep Wufeng-Longmaxi Formation Shale of the Southern Sichuan Basin[J]. *Minerals*, 2024, 14(2): 171.

[7] 万佳林,于志超,黄文辉.陆相纹层型页岩油储集空间特征及其控制因素——以松辽盆地长岭凹陷青山口组页岩为例[J].天然气地球科学, 2024, 35(9): 1671-1687.
(Wan Jia-lin, Yu Zhi-chao, Huang Wen-hui. Characteristics and controlling factors of reservoir space in continental laminated shale oil: a case study of the Qingshankou Formation Shale in the Changling Sag, Songliao Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2024, 35(9): 1671-1687.)

[8] Liu K W, Zou L S, Guo T F, et al. Fracture behavior and acoustic emission characteristics of layered sandstone with a bedding-parallel crack[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2024, 131: 104344.

[9] Zhang Y, Li T Y, Xie L Z, et al. Shale lamina thickness study based on micro-scale image processing of thin sections [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2017, 46: 817-829.

[10] Chang X, Qiu G Z, Li J, et al. Study on the influence of vertical stress difference coefficient on fracture characteristics of shale under high stress [J]. *Energy Science & Engineering*, 2024, 12(8): 3227-3242.

[11] 毕振辉.页岩多簇水力裂缝起裂与扩展实验研究[D].重庆:重庆大学, 2022.
(Bi Zhen-hui. Experimental study on the initiation and propagation of multi-cluster hydraulic fractures in shale [D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.)

[12] 白岳松,胡耀青,李杰.压裂液黏度和注液速率对含层理页岩水力裂缝扩展行为的影响规律研究[J].煤矿安全, 2023, 54(12): 18-24.
(Bai Yue-song, Hu Yao-qing, Li Jie. Research on the influence law of fracturing fluid viscosity and injection rate on the propagation behavior of hydraulic fractures in bedded shale[J]. *Safety in Coal Mines*, 2023, 54(12): 18-24.)

[13] Wang T, Liu Z L, Gao Y, et al. Theoretical and numerical models to predict fracking debonding zone and optimize perforation cluster spacing in layered shale[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2018, 85(1): 011001.

[14] 门晓溪,唐春安,韩志辉,等.射孔角度对水力压裂裂纹扩展影响数值模拟[J].东北大学学报(自然科学版), 2013, 34(11): 1638-1641.
(Men Xiao-xi, Tang Chun-an, Han Zhi-hui, et al. Numerical simulation of the influence of perforation angle on hydraulic fracturing crack propagation [J]. *Journal of Northeastern University* (*Natural Science*), 2013, 34(11): 1638-1641.)

[15] Hou L L, Liu X J, Zeng W, et al. Investigation of the effect of bedding and confining pressure on the energy evolution of shale during the unloading process[J]. *Natural Gas Industry B*, 2024, 11(4): 385-393.

[16] 张洪伟,张通,万志军,等.高温高压下岩石水力压裂实验新型封隔技术[J].东北大学学报(自然科学版), 2021, 42(3): 422-427,443.
(Zhang Hong-wei, Zhang Tong, Wan Zhi-jun, et al. A new

packer technology for rock hydraulic fracturing experiments under high temperature and high pressure[J]. *Journal of Northeastern University*(*Natural Science*), 2021, 42(3): 422-427,443.)

[17] Duan Y T, Zhu C C, Yang B C, et al. Fracture propagation and failure mode characteristics of lamellar lacustrine shale under true triaxial compression conditions [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2024, 83: 96.

[18] Hu Z W, Wang H Y. Feasibility study of energy storage using hydraulic fracturing in shale formations[J]. *Applied Energy*, 2024, 354: 122251.

[19] Guo P, Li X, Li S D, et al. Quantitative analysis of anisotropy effect on hydrofracturing efficiency and process in shale using X-ray computed tomography and acoustic emission [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, 54: 5715-5730.

[20] Cao V H, Go G H. A novel approach to stability analysis of random soil-rock mixture slopes using finite element method in ABAQUS[J]. *Natural Hazards*, 2024, 120: 14381-14407.

[21] Gong B, Zhao T, Thusyanthan I, et al. Integrating RFPA and DEM in adaptive RDFA modeling of rock fracturing process[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2024, 58(2): 2569-2587.

[22] Fayemi O, Di Q Y. 2D multitransient electromagnetic response modeling of South China shale gas earth model using an approximation of finite difference time domain with uniaxial perfectly matched layer [J]. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2016, 2016:6863810.

[23] Zhang M, Ayala L F. The dual-reciprocity boundary element analysis for hydraulically fractured shale gas reservoirs considering diffusion and sorption kinetics[J]. *Transport in Porous Media*, 2022,142(3): 531-557.

[24] Ma T H, Yang J Y, Liang Z Z, et al. Numerical simulation on fracture formation on surfaces of bi-layered materials[J]. *Key Engineering Materials*, 2007, 84: 993-996.

[25] 唐洪明,唐园,郑马嘉,等.页岩纹层与破裂方式实验研究[J].西南石油大学学报(自然科学版), 2022,44(4): 51-61.
(Tang Hong-ming, Tang Yuan, Zheng Ma-jia, et al. Experimental study on shale laminae and fracture modes[J]. *Journal of Southwest Petroleum University* (*Science & Technology Edition*), 2022, 44(4): 51-61.)

[26] 赵永, 文鑫, 薛斌, 等.基于波形主成分提取与混合矩张量的岩石破裂机制反演及其应用[J].岩土工程学报, 2025,47(9): 1834-1844.
(Zhao Yong, Wen Xin, Xue Bin, et al. Inversion of rock fracture mechanism and its application based on waveform principal component extraction and mixed moment tensor [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2025, 47(9): 1834-1844.)

[27] Qian H J, Tan Z, Li B. Stability analysis of surrounding rock in the diversion tunnel at the Xulong hydropower station based on RFPA3D and microseismic monitoring [J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(19): 9939.

[28] 李连崇, 唐春安, 杨天鸿, 等.FSD耦合模型在多孔水压致裂试验中的应用[J].岩石力学与工程学报, 2004, 19: 3240-3244.
(Li Lian-chong, Tang Chun-an, Yang Tian-hong, et al. Application of FSD coupling model in hydraulic fracturing test of porous rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 19: 3240-3244.)