文章编号:1009-9603(2019)04-0132-07

DOI: 10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.2019.04.020

致密砂砾岩压裂裂缝遇砾扩展模式的数值模拟研究

张子麟,陈 勇,张全胜,李爱山,张潦源,李 明,黄 波 (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:由于致密砂砾岩具有超低渗透性,不进行水力压裂难以达到经济开采目标。砂砾岩储层的有效开采需要对水力裂缝扩展规律有清晰认识。考虑砂岩或砾岩材料本身的非均质性以及砂岩与砾岩之间的非均质性,提出一种数字图像技术和有限元软件RFPA(Rock Failure Process Analysis)相结合的数值模拟方法。基于该方法的致密砂砾岩压裂的二维数值模拟结果表明,在不同水平地应力差和砾岩强度条件下,水力裂缝可以穿过砾岩或沿砾岩转向扩展。考虑砾岩分布方位、尺寸和轴比,三维数值模型模拟结果表明,水力裂缝能够穿过砾岩,形成一种在常规压裂实验中不容易观察到的环绕扩展模式,也能够像二维数值模型得到的结果那样沿砾岩转向扩展,即不同的砾岩分布方位、尺寸和轴比使水力裂缝扩展遇到砾岩时呈现不同的扩展模式,包括:①直接穿过砾岩;②沿砾岩转向扩展;③环绕扩展;④模式①和②或者②和③同时出现。

关键词:致密砂砾岩;水力裂缝;数值模拟;砾岩;扩展

中图分类号:TE357.1

文献标识码:A

Numerical simulation on propagation mode of hydraulic fracture approaching gravels in tight glutenite

ZHANG Zilin, CHEN Yong, ZHANG Quansheng, LI Aishan, ZHANG Liaoyuan, LI Ming, HUANG Bo

(Petroleum Engineering Technology Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257000, China)

Abstract: It is difficult to obtain profitable production without the application of hydraulic fracturing in tight glutenites because of their ultra-low permeability. Profitable exploitation of glutenites requires a clear understanding of the hydraulic fracture propagation law in these reservoirs. Considering the heterogeneity of sandstone or gravel and the heterogeneity between sandstone and gravels, a numerical method that integrates the digital image processing technique into a numerical software named rock failure process analysis (RFPA) was proposed. Based on the method, two-dimensional simulation results of the fracturing in the tight glutenites indicate that hydraulic fractures can penetrate or deflect along the gravels depending on the conditions of stress differences and gravel strengths. Three-dimensional simulations considering gravel distribution orientation, gravel size and axial ratio reveal that the hydraulic fractures can penetrate gravels, resulting in a bypass fracture which is difficult to be observed in regular lab experiments, or deflect along the gravel which is similar to that observed in two-dimensional simulations. Main propagation modes under various gravel distribution orientation, size and axial ratio are as follows: ①penetrate gravels directly; ②deflect along the gravels; ③bypass the gravels; ④combination of ① and ②, or ②and ③.

Key words: tight glutenite; hydraulic fracture; numerical simulation; gravel; propagation

水力压裂是实现非常规油气储层增产的主要 改造方法。当高压液注入储层时,储层岩石破裂形 成具有高导流能力的裂缝,实现油气运移,使产量增加。因此,从20世纪40年代开始,水力压裂逐渐

收稿日期:2019-03-12。

作者简介:张子麟(1989—),男,山东莘县人,工程师,从事采油工艺技术研究与应用工作。联系电话:(0546)8788643, E-mail:cyyylzzl@163.com。

基金项目:国家科技重大专项"渤海湾济阳坳陷致密油开发示范工程"(2017ZX05072),国际合作与交流项目"基于连续-非连续模型的超临界CO₃压裂页岩增透机理研究"(51761135102),国家自然科学基金项目"软硬间互地层水力压裂裂缝三维延伸机理研究"(51479024)。

成为油气开发的常规增产技术。水力裂缝的数目、间距、形状等裂缝特征和扩展规律息息相关,对油气的产能有重要影响。油气储层的压裂裂缝扩展规律和众多因素相关,如储层地应力、岩石力学性质(强度、渗透性、脆性等)、储层非均质性(孔隙、天然裂缝、其他非均质构造)、压裂液性质(黏度、滤失性等)和施工参数(排量、压裂时间等)[1-7]。水力裂缝扩展规律的深入研究对致密砂砾岩储层压裂设计参数的优化十分重要。

采用数字图像技术和有限元软件 RFPA(Rock Failure Process Analysis)相结合的数值模拟方法开展研究。基于韦伯分布统计模型, RFPA可以模拟岩石等非均质材料的力学行为。结合数字图像技术, RFPA 能够依据砂砾岩图像中不同的颜色来区分砂岩和砾岩, 之后建立数值模型进行研究。首先进行致密砂砾岩水力压裂的二维数值模拟分析, 考虑地应力差和砾岩强度的影响, 之后建立三维模型进行分析, 重点研究砾岩分布方位、尺寸和轴比对水力裂缝扩展的影响, 总结水力裂缝的扩展模式, 并给出各种模式的发生条件。

1 RFPA数字图像技术

数字图像技术是通过运用电子手段对景象进行捕捉,然后转换处理成可供数学描述的图像的技术^[8]。它可以通过多个图像空间来描述,如灰度空间、RGB空间、HSI空间。在RGB空间中,描述任一像素需要3个独立的整数,R(0,255),G(0,255),B(0,255)。HSI空间同样需要3个独立的整数来描述,H(0,360),S(0,1),I(0,1),为了方便,在RFPA数字图像技术中将此3个整数变化范围标准化为(0,255)。整合了数字图像技术后,RFPA软件能够识别BMP格式的图像并可以据此建立数值模型。

岩石数字图像可以直接通过对岩样拍照获得, 也可通过对 X 射线扫描进行处理或其他方法获得^[9-10]。当这些图像导入到有限元软件 RFPA 中时, 会被离散成多个一定尺寸的方形单元,每一个方形单元对应一个有限单元网格。由于岩石常包含有众多的结构体(如各种矿物、孔隙、天然裂缝等),如果它们在图像中呈现不同的颜色,其离散后的单元将可以根据颜色进行分组,然后进行赋值和计算。

选取东营地区垦761区块一个致密砂砾岩岩心试样(图1a),其截面直径为110 mm,包含深色砾岩和浅色砂岩2种结构体。取部分图像(图1b)作为分析对象,该部分像素为500×500,边长为58 mm。将

其导入有限元软件 RFPA 时,默认情况下将被离散为500×500个有限单元,每个像素都转换为1个单元。由于该图像中的砂岩和砾岩单元在亮度上表现出明显的差异,所以通过亮度值来分组非常方便。根据有限元软件 RFPA 扫描后提供的不同亮度值对应单元数目的统计图(图2),经过尝试和对比,取亮度值为85作为划分砂岩和砾岩的阈值。将单元赋予力学参数后,得到数值模型草图(图3)。

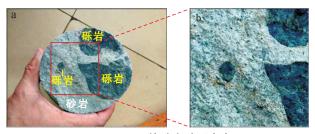


图 1 显 761 区块致密砂砾岩岩心 Fig.1 Tight glutenite core from Block Ken761

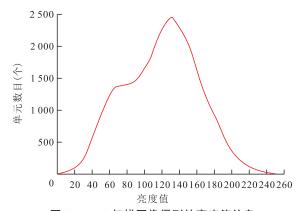


图 2 RFPA 扫描图像得到的亮度值信息 Fig. 2 Lightness value information obtained by RFPA screening image

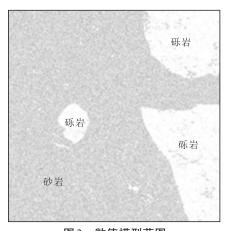


图 3 数值模型草图 Fig.3 Sketch of the numerical model

2 二维数值模拟

根据草图(图3)建立数值模型,研究地应力和

砾岩强度对致密砂砾岩水力裂缝扩展特征的影响。 井筒和水平射孔设置在模型中心,模型边长为58 mm。模型边界施加x方向的地应力 (σ_x) 和 γ 方向的 地应力 (σ_{v}) 。砂岩和砾岩的均质度系数分别设置为 3.0和6.0,其他物理力学参数见表1。井筒水压以 0.1 MPa的增量施加,模型简化为平面应变问题进行 分析。

表1 砂岩和砾岩物理力学参数 Table 1 Physico-mechanical parameters of sandstone and gravel

岩性	0 +	单轴抗 压强度 (MPa)	拉强度	泊松比	内摩 擦角 (°)	孔压 系数	渗透 系数 (m/s)
砂岩	30.0	45.0	4.5	0.22	31	0.7	1×10 ⁻¹⁰
砾岩	55.0	130.0	13.0	0.25	33	0.7	1×10 ⁻¹¹

2.1 地应力差的影响

地应力已被广泛证实是影响水力裂缝扩展的 关键因素[11-14]。水力裂缝总是趋向于最大主应力方 向扩展,因而地应力差是压裂优化设计的关键因 素,在水力压裂过程中应认真考虑。将水平地应力 差异性。根据地应力差条件,设置A,B和C共3个 工况(表2)。

表 2 工况 A, B, C 中施加的地应力条件 Table 2 Stress conditions in Cases A, B and C

工况	$\sigma_{x}(MPa)$	$\sigma_{y}(MPa)$	$\Delta\sigma(ext{MPa})$
A	30.0	15.0	15.0
В	30.0	20.0	10.0
С	30.0	28.0	2.0

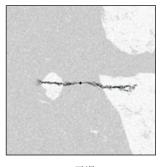
在工况 A 中, 水力裂缝从射孔处沿最大主应力 方向的水平方向起裂并扩展(图 4a),至砾岩处时扩 展方向并没有明显改变,继续延伸进入砾岩。在整 个压裂过程中,水力裂缝并未发生明显转向,砾岩 对水力裂缝的扩展路径没有影响。

与工况 A 相比, 工况 B 地应力差减小, 其对水力 裂缝的控制作用减弱,此时,岩石非均质性的影响 增强,这就是工况B中初始水力裂缝不像工况A那 样平直的原因(图4b)。当扩展至砾岩处时,可观察 到左侧水力裂缝偏离其初始方向,并沿砾岩扩展, 直到再次转向至初始扩展方向延伸。在这种情况 下,砾岩成为水力裂缝扩展的阻碍。右侧水力裂缝 沿砾岩偏移一小段距离后扩展进入砾岩,然后分叉 成多裂缝。需要指出的是,模型中的砾岩并非完全 均质,其内部也广泛存在着诸如孔隙、天然裂缝和 充填物等地质缺陷[15-17],它们的存在使砾岩中的水 力裂缝扩展更加复杂。

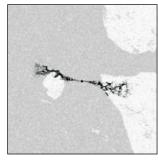
工况 C 的水平地应力差最低,显然此时地应力 的控制作用最弱。同样,砾岩的存在使水力裂缝发 生偏移(图4c)。与工况B相比,左侧水力裂缝沿砾 岩偏转后再次返回到最初扩展方向的速度较慢,形 成较大的转向距离。右侧水力裂缝沿砾岩转向扩 展,同时其分支缝延伸到砾岩内,形成复杂的多裂 缝。可见,致密砂砾岩压裂作业可随地应力条件的 不同改造出不同复杂程度的水力裂缝,从单一的传 统双翼缝到复杂的多裂隙或缝网。高水平地应力 差有利于水力裂缝穿透砾岩,形成较简单的水力裂 缝。低水平地应力差可促使水力裂缝转向和形成 分支,形成高导流能力的复杂缝或缝网。

2.2 砾岩强度的影响

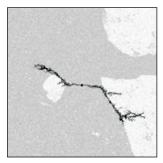
由于矿物成分的不同,即使是同一储层的砾岩 也表现出明显的强度差异。例如,MA等观察到2种 类型砾岩[18],砾岩A和砾岩B,棕红色的砾岩B含有 大量石英,其抗拉强度是含有大量长石的青灰色砾 岩A的3倍。考虑压裂过程中砾岩强度的影响,改 变工况 B 中的砾岩强度,建立工况 D 和 E,并与工况 B的结果进行比较。工况D砾岩单轴抗压强度减少 到 60.0 MPa, 工况 E增加到 200.0 MPa, 保持抗压抗 拉强度比不变。由压裂后得到的裂缝形态可见,水



a—工况A



b—工况B



c—工况C

图 4 裂缝扩展过程的二维数值模拟

Fig.4 Fracture propagation in 2D numerical simulation

力裂缝易于穿过低强度砾岩并继续沿最大主应力 方向扩展(图5a),在遇到高强度砾岩时易发生转向 (图 5b)。由此可见砾岩强度对致密砂砾岩储层中 裂缝的扩展形态有很大影响。

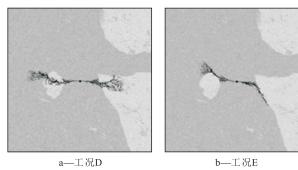


图 5 工况 D 和 E 的二维数值模拟结果

Fig.5 2D numerical simulation results in Case D and Case E

3 三维数值模拟

3.1 三维数值模型

致密砂砾岩储层的压裂裂缝形态具有较明显 的三维效应,某些情况下并不能完全简化为二维模 型来分析,此时依据三维模型进行研究必不可少。 众多研究表明,砾岩的形状和尺寸各异,它可呈准 球状、椭球形或不规则形态,以大兴砾岩为例,其直 径可从2 cm 变化到20 cm,甚至部分可能达到几十 厘米甚至几米[14]。

运用RFPA 数值模拟方法建立三维模型(图 6a)。模型为立方体,边长为0.50 m,划分为125× 125×125共1953125个单元。模型中心设置一直径 为 0.024 m 的空心柱体以模拟井筒,同时设置一条 沿 x 轴方向的水平射孔, 井筒和射孔中施加初始水 压为20.0 MPa,且每个计算步的增量为0.1 MPa。模 型x, y, z方向分别施加 $\sigma_x(30.0 \text{ MPa}), \sigma_x(20.0 \text{ MPa}),$ σ₂(32.0 MPa)的围压以模拟地应力的影响。设置一 个椭球体砾岩(图 6b),其半轴长分别记为a,b和c, 模型形状随其轴向尺寸的改变而改变。为了简化, 半轴长a和b数值相等。根据图6c—6f和表3中描 述的模型中砾岩特征的不同设置F,G,H和I共4个 工况。砾岩抗压强度为200.0 MPa,其他物理力学参 数同表1。

3.2 三维数值模拟结果

当井筒施加初始水压为20.0 MPa时,由4个工 况(图6c—6f)中沿蓝色虚线单元的最大主应力 σ_1 和最小主应力 $\sigma_3(图7)$ 可见,4个模型中砂岩单元的 主应力大小相近,受岩石均质度的影响略有起伏, 但砾岩单元主应力明显高于砂岩单元。4个模型中

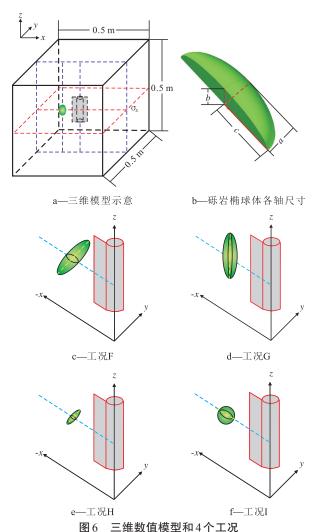


Fig.6 3D numerical model and four cases

表3 工况 F-I 砾岩尺寸及分布参数 Table3 Gravel size and distribution parameters in Case F to I

工况	砾岩长轴方向	$a(\mathrm{mm})$	长短轴比
F	平行于y轴	20	3
G	平行于z轴	20	3
Н	平行于 y 轴	12	3
I		20	1

砾岩分布的差异导致局部主应力分布的不同,最大 主应力分布较高的砾岩单元其最小主应力较低,比 如工况G和I。

取穿过模型中心的横断面和纵断面作为观察 水力裂缝视口。由图8可见,工况F压裂过程中水 力裂缝从射孔起裂后在缝长和缝高方向上延伸,之 后,跨越砾岩的上部和下部水力裂缝向中间扩展并 贯通,最终形成了环绕水力裂缝(图8b,8d)。

该环绕水力裂缝的形成过程和常规裂缝不同, 首先,其形成不仅包含常规水力裂缝沿缝长和缝高 方向的向外扩展过程,还包含向内环绕扩展和贯通 过程,这种扩展过程具有典型的三维空间特征,二

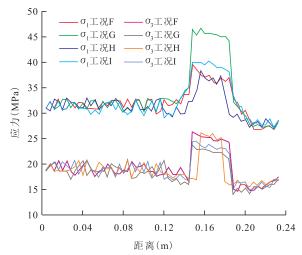
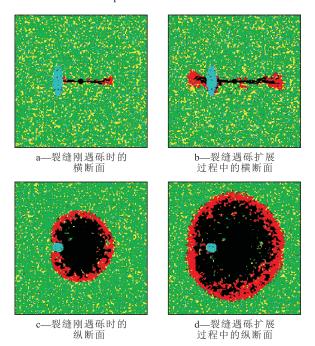


图 7 工况 F—I 中选定单元在初始水压为 20 MPa 下的最大和最小主应力

Fig.7 Maximum and minimum principal stresses of selected units in Case F to I at initial hydraulic pressure of 20 MPa



冷色代表高弹性模量; 暖色代表低弹性模量

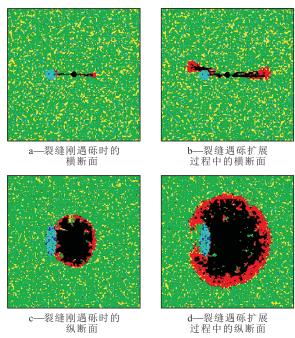
图8 工况F压裂过程中的裂缝形态

Fig. 8 Fracture geometries during the fracturing process in Case F

维模型无法模拟。其次,形成的水力裂缝是被砾岩阻断的,是不连续的(图8b),砾岩好似镶嵌在水力裂缝压开的2块砂岩体中,只留其圆周暴露于压裂液中,这种情况下即使形成的水力裂缝贯穿了整个模型边界,试件也很难沿着水力裂缝被分开,因为砾岩并未破坏。但在大多数水力压裂室内实验中,压裂后的试样通常被人为地沿着主裂缝分开用来观察裂缝形态,这种操作可能会使砾岩沿着裂缝面折断或者沿着砂岩-砾岩界面剥离,形成的环绕裂

缝很可能会被观察者分别误判为裂缝直接穿过砾岩的扩展模式或是裂缝沿着砂岩-砾岩界面发生转向的扩展模式,这也是为何在实验中未发现水力裂缝环绕扩展模式,也很少有相关研究提及的主要原因。

和工况 F 相比,工况 G 只是改变了砾岩的分布方位,其长轴由平行于 y 轴改变为平行于 z 轴,但由此带来的裂缝扩展模式却大相径庭(图 9)。当扩展至砾岩处时,水力裂缝发生转向,沿着砂岩—砾岩界面扩展(图 9a,9b),砾岩上下部水力裂缝保持原有方向继续扩展(图 9c,9d)。



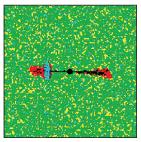
冷色代表高弹性模量; 暖色代表低弹性模量

图9 工况 G 压裂过程中的裂缝形态

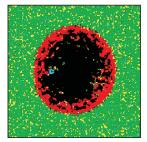
Fig.9 Fracture geometries during the fracturing process in Case G

与工况 F 相比,工况 H 仅仅等比例减小了各轴向尺寸,由形成的水力裂缝形态(图 10a,10b)可见,水力裂缝在水平面内未发生转向,形成环绕裂缝后继续向前扩展,与工况 F 类似。在工况 I 中,砾岩轴比为 1,实际上是一个球体,由压裂裂缝形态(图 10c,10d)可见,当水力裂缝靠近砾岩时分叉为 2 个分支缝,这 2 个分支缝沿砂岩-砾岩界面转向扩展,形成了类似于工况 G 的扭曲裂缝。

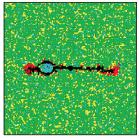
工况 F和 H中, 砾岩分布方位和轴比都一致, 只是尺寸不同, 但水力裂缝遇到砾岩时的扩展方式一致, 可见在一定范围内单纯的砾岩尺寸对砂砾岩储层中水力裂缝的扩展方式影响不大。同样, 分别对比工况 F和 G、工况 F和 I, 这两者的水力裂缝遇到砾岩时都表现出不同的扩展特征, 可见砾岩的分布方



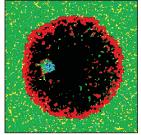
a—工况H裂缝遇砾横断面



b—工况H裂缝遇砾纵断面



c—工况I裂缝遇砾横断面



d—工况I裂缝遇砾纵断面

冷色代表高弹性模量;暖色代表低弹性模量 图 10 工况 H和 I 的最终裂缝形态

Fig.10 Final fracture geometries in Case H and Case I

位和轴比对砂砾岩储层中水力裂缝的扩展方式影响很大。当砾岩长轴在缝宽方向时,往往形成环绕裂缝(砾岩强度大,如工况F)或直接延伸进入砾岩后继续扩展(砾岩强度不够大,如工况A)。当砾岩长短轴轴比减小时,比如从工况F的3减小到工况I的1,水力裂缝在遇砾岩时更易发生偏转,沿着砂岩-砾岩界面扩展。

进一步分析认为,水力裂缝遇到砾岩是否发生偏转往往和砾岩在水力裂缝缝宽和缝高方向上的尺寸优势有关,当缝宽方向的砾岩尺寸较大时,绝大部分压裂液更易沿着主缝扩展而不易转向流入曲折的偏转缝,这样使水力裂缝更易直接穿过砾岩或形成环绕裂缝,即不发生偏转的扩展方式;而缝宽方向砾岩尺寸较小时,水力裂缝更易发生偏转,尤其是在砂岩-砾岩界面未胶结或胶结强度很弱时。

综上所述,在致密砂砾岩储层中水力裂缝遇到 砾岩的扩展模式包括:①直接穿过砾岩;②沿砾岩 转向扩展;③环绕扩展;④模式①和②或者②和③ 同时出现。其中,模式①常发生在水平地应力差 大、砾岩强度不太高、缝宽方向的砾岩尺寸不小的 情况下;模式②常发生在水平地应力差小、砾岩强 度大、缝宽方向的砾岩尺寸不大的情况下;模式③ 常发生在水平地应力差大、砾岩强度大、缝宽方向 的砾岩尺寸不小的情况下;模式④发生在介于各自 相关模式的中间情况。

4 结论

提出一种结合数字图像技术和有限元软件 RF-PA(Rock Failure Process Analysis)的数值模拟方法,并将该方法用于致密砂砾岩水力裂缝扩展模式的研究中。该方法能够通过数字图像技术区分砂砾岩图像中的砂岩和砾岩,并同时运用力学参数的韦伯分布函数来表征砂岩或砾岩的非均质性。

二维数值模拟结果表明,根据水平地应力差和砾岩强度的不同,水力裂缝或是穿过砾岩扩展,或是发生偏转沿砂岩-砾岩界面扩展。高水平地应力差促使水力裂缝穿过砾岩,形成双翼简单缝,低水平地应力差促使水力裂缝发生偏转,更易形成复杂缝。砾岩有天然裂缝时易诱发水力裂缝形成分支缝。而高强度砾岩阻碍水力裂缝扩展并使其发生转向。

三维数值模拟考虑了砾岩的分布方位、尺寸和轴比,模拟结果显示,水力裂缝在遇到砾岩时可以形成环绕裂缝,这在普通的室内实验中是不容易观察到的,也可以像二维模型得到的那样发生偏转,这样的扩展模式与砾岩在水力裂缝的缝高和缝宽方向上的尺寸有关。

致密砂砾岩储层中水力裂缝遇到砾岩的扩展 模式包括:①直接穿过砾岩;②沿砾岩转向扩展;③ 环绕扩展;④模式①和②或者②和③同时出现,并 总结了各扩展模式发生时所依赖的地应力、砾岩强 度、砾岩尺寸等条件。

参考文献

- [1] WENG Xiaowei, KRESSE Olga, CHUPRAKOV Dimitry, et al. Applying complex fracture model and integrated workflow in unconventional reservoirs [J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2014, 124:468–483.
- [2] 魏旭,张永平,尚立涛,等.多段多簇压裂储层改造效果影响因素分析[J].油气地质与采收率,2018,25(2):96-102,114. WEI Xu,ZHANG Yongping,SHANG Litao, et al. Analysis of influencing factors of reservoir stimulation effect in multi-cluster staged fracturing[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2018,25(2):96-102,114.
- [3] LILC, TANG CA, LIG, et al. Numerical simulation of 3D hydraulic fracturing based on an improved flow-stress-damage model and a parallel FEM technique [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2012, 45(5):801-818.
- [4] 金成志,张玉广,尚立涛,等.致密气藏复杂裂缝压裂技术[J]. 大庆石油地质与开发,2018,37(1):154-158. JIN Chengzhi, ZHANG Yuguang, SHANG Litao, et al. Fracturing

- technique for the comprehensive crack in the tight gas reservoir [J].Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2018, 37(1):154-158.
- [5] 李志超,李连崇,唐春安.水平井定向射孔裂缝起裂与穿层特征数值分析[J].石油与天然气地质,2015,36(3):504-509. LI Zhichao, LI Lianchong, TANG Chun'an.Numerical analysis on hydraulic fracture initiation and penetration characteristics in directionally perforated horizontal wells [J]. Oil & Gas Geology, 2015,36(3):504-509.
- [6] 延新杰,李连崇,张潦源,等.岩石脆性对水力压裂裂缝影响的数值模拟实验[J].油气地质与采收率,2017,24(3):116-121. YAN Xinjie, LI Lianchong, ZHANG Liaoyuan, et al. Numerical simulation experiment of the effect of rock brittleness on fracture propagation of hydraulic fracturing[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2017,24(3):116-121.
- [7] LI Tianjiao, LI Lianchong, TANG Chun'an, et al. A coupled hydraulic-mechanical-damage geotechnical model for simulation of fracture propagation in geological media during hydraulic fracturing [J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2019, 173: 1390-1416.
- [8] LI Zhichao, LI Lianchong, HUANG Bo, et al. Numerical investigation on the propagation behavior of hydraulic fractures in shale reservoir based on the DIP technique [J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2017, 154; 302–314.
- [9] ZHU W C, LIU J, YANG T H, et al. Effects of local rock heterogeneities on the hydromechanics of fractured rocks using a digital-image-based technique [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2006, 43(8):1 182-1 199.
- [10] LI Zhichao, LI Lianchong, LI Ming, et al. A numerical investigation on the effects of rock brittleness on the hydraulic fractures in the shale reservoir [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2018, 50: 22-32.
- [11] TAN Xin, KONIETZKY Heinz, CHEN Wei. Numerical simulation

- of heterogeneous rock using discrete element model based on digital image processing [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016,49(12):4 957-4 964.
- [12] BLANTON T L. Propagation of hydraulically and dynamically induced fractures in naturally fractured reservoirs [R]. SPE 15261, 1986.
- [13] 王坤, 葛腾泽, 曾雯婷. 低产油气井强制裂缝转向重复压裂技术[J]. 石油钻探技术, 2018, 46(2):81-86.
 WANG Kun, GE Tengze, ZENG Wenting. Re-fracturing technique using forced frature re-orientation of low production oil and gas wells[J]. Petroleum Drilling Techques, 2018, 46(2):81-86.
- [14] CHUPRAKOV D A, AKULICH A V, SIEBRITS E, et al. Hydraulic-fracture propagation in a naturally fractured reservoir [R]. SPE 128715, 2010.
- [15] LIU H, JIANG Z, ZHANG R, et al. Gravels in the Daxing conglomerate and their effect on reservoirs in the Oligocene Langgu Depression of the Bohai Bay Basin, North China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2012, 29(1):192-203.
- [16] 赵泽辉,徐淑娟,姜晓华,等 松辽盆地深层地质结构及致密砂砾岩气勘探[J].石油勘探与开发,2016,43(1):12-23.

 ZHAO Zehui, XU Shujuan, JIANG Xiaohua, et al.Deep strata geologic structure and tight conglomerate gas exploration in Songliao Basin, East China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016,43(1):12-23.
- [17] 胡超洋,艾池,王凤娇.基于分形方法的水力压裂分支裂缝分布模拟[J].油气地质与采收率,2016,23(5):122-126. HU Chaoyang, AI Chi, WANG Fengjiao.Distribution simulation of branched hydraulic fracture based on fractal theory[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2016,23(5):122-126.
- [18] MA Xinfang, ZOU Yushi, LI Ning, et al. Experimental study on the mechanism of hydraulic fracture growth in a glutenite reservoir [J]. Journal of Structural Geology, 2017, 97:37-47.

编辑 刘北羿