

· 研究进展 ·

基于三维形态仿真的自支撑裂缝闭合规律数值模拟研究

卢 聪^{1*} 罗 扬¹ 郭建春¹ 黄楚溪²
周广清³ 王建东³ 刘彦辉³ 单 昕³

1. 西南石油大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 成都 601500
2. 成都理工大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 成都 610059
3. 中国石化胜利油田分公司 油气勘探管理中心, 东营 257001

[摘 要] 页岩自支撑裂缝闭合过程对于页岩气井产量有着重要影响, 而现有自支撑裂缝闭合数值模拟方法未考虑真实粗糙裂缝形态和岩石塑性变形特征。本文提出了一种基于激光扫描的粗糙裂缝形态三维仿真方法, 建立了考虑塑性特征的真实裂缝面接触变形模型, 模型平均误差 9.4%; 在此基础上分析了页岩自支撑裂缝闭合过程中的应力状态、流动通道和残余宽度变化, 探究了表面粗糙度、滑移量、力学性质对自支撑裂缝闭合过程的影响规律。结果表明, 具备高粗糙度、大滑移量、高杨氏模量特征的自支撑裂缝通常具有较高的残余宽度; 针对四川盆地龙马溪组页岩储层, 自支撑裂缝在 60 MPa 闭合应力作用下的残余宽度仍保持在 0.7 mm 以上, 能够提供一定程度的流动通道和导流能力。

[关键词] 页岩; 自支撑裂缝; 三维仿真; 闭合过程

页岩储层具有非均质性强、脆性高、层理发育等特征, 目前主要采用水平井分段多簇压裂的方式实现有效开发。页岩储层压裂后将形成有支撑剂充填的支撑裂缝与无支撑剂充填的自支撑裂缝相结合的复杂裂缝网络^[1, 2], 其中自支撑裂缝在地应力作用下的变形和闭合过程将显著改变裂缝内部流动通道, 降低裂缝导流能力, 最终限制页岩压后增产效果^[3-5]。

自支撑裂缝内的流体流动通道主要依靠裂缝表面微凸起之间的相互支撑, 这些微凸起在地应力作用下将逐渐变形。部分学者通过室内实验方式研究了不同闭合应力条件下自支撑裂缝的闭合过程, Fredd 等人分析了闭合应力、表面形貌和滑移量对于自支撑裂缝闭合过程的影响, 证实了在无支撑剂充填情况下裂缝表面微凸起可以提供一定的裂缝宽度和导流能力^[6-8]; Dam 等人对自支撑裂缝闭合行为



卢聪 西南石油大学教授、博士生导师, 四川省学术和技术带头人, 国家自然科学基金委员会优秀青年科学基金获得者。主要从事油气藏增产改造理论与技术的教学与研究, 主持或主研国家自然科学基金、国家油气科技重大专项等省部级以上项目 10 余项。发表学术论文 60 余篇, 授权发明专利 40 余件。曾获得国家技术发明奖二等奖、中国专利奖等奖项。

进行了大物模实验测试, 观测到了 15% 的残余裂缝宽度^[9]; Warpinski 等人利用井下倾斜仪阵列开展了矿场测量, 指出自支撑裂缝闭合过程是连续进行的, 通常会 产生 20% ~ 30% 的残余裂缝宽度^[10]; Sakaguchi 等人通过实验指出裂缝表面的微凸起高度主要集中在 1~2 mm 范围内^[11]。然而, 由于测试精度和表征手段的限制, 实验方法难以直接获取裂缝内部的受力状态和流体流动通道。

为了提高对于裂缝闭合过程的描述精度, 部分

收稿日期: 2021-06-30; 修回日期: 2021-10-14

* 通信作者, Email: lucong@swpu.edu.cn

本文受到国家自然科学基金项目(52022087)的资助。

学者尝试采用数值模拟方法分析裂缝面的接触变形过程。Greenwood 等人首先提出了基于 Herzt 弹性接触理论的 GW 模型^[12],该模型将粗糙裂缝表面视为由相同直径的球体组成;随后,裂缝表面被进一步简化为曲面^[13]、不同直径的弹性球体^[14]以及弹性椭球体^[15],并建立了不同的接触模型。为了提高裂缝表面形貌的匹配度,Hanaor 进一步采用分形维数方法重构粗糙裂缝表面^[16],但该方法只能提取有限的裂缝表面特征,并且裂缝表面几何形状是随机生成的,无法实现真实重构。同时,由于裂缝面接触变形过程中存在应力集中现象,岩石可能发生塑性变形,Pullen 等人将微凸体的变形划分为完全弹性和完全塑性两个阶段^[17],Jackson 将岩石视为理想弹塑性材料^[18],但均未考虑岩石实际的弹塑性变形特征。

本文提出了基于岩心实验的裂缝面形态三维仿真方法,实现了页岩自支撑裂缝形态数值重构,在此基础上进一步建立了自支撑裂缝接触变形模型,通过嵌入 Drucker-Prager 屈服准则考虑页岩塑性变形特征,并分析了应力作用下自支撑裂缝闭合过程及影响因素。

1 裂缝面三维仿真方法

1.1 裂缝面点云数据采集

采用三维激光扫描方法获取裂缝面点云数据(图1),数据采集基本原理为激光三角法,线光源从激光扫描系统中发出,经裂缝表面反射后由 CCD 图像感应器接收,通过内部校正系统和图形处理系统综合处理后,最终可得到裂缝面点云数据。所使用的三维激光扫描仪在 X 方向扫描间隔为 0.062 mm, Y 方向扫描间隔为 0.053 mm, Z 方向分辨率为 0.05 mm。

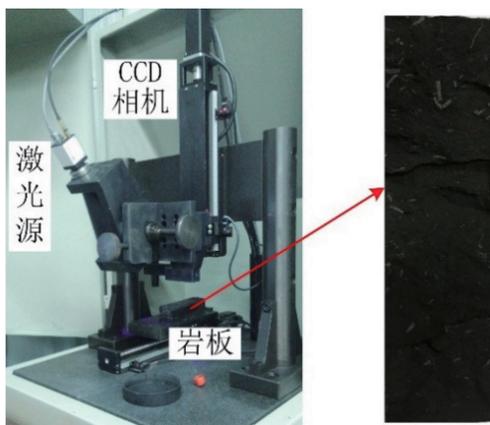


图1 裂缝面点云数据采集

1.2 裂缝面点云数据规整

自支撑裂缝表面凹凸不平,在三维激光扫描过程中容易出现数据点缺失,导致裂缝面点云数据未按规则网格排列。本文采用克里金插值方法将裂缝面点云数据规整为按规则网格排列^[19, 20],规整后的点云数据如图2所示。

1.3 裂缝面点云数据封装

裂缝面点云数据之间不存在边和面的拓扑关系,需进一步开展点云数据封装,生成多边形过渡曲面。曲面生成算法主要有滚球法、蒙皮构造法、能量构造法、偏微分方程法等^[21],本文采用滚球法进行点云数据封装,该方法通过让一个小球在曲面上滚过以形成曲面的包络面,是基于曲面参数构造过渡曲面的经典方法,封装后的过渡曲面如图3所示。

1.4 三维仿真裂缝面生成

为更好地控制生成裂缝面的曲线度,构建出准确的三维仿真裂缝面模型,通过 NURBS 曲面拟合方法在多边形过渡曲面的基础上进一步生成 NURBS 曲面,并添加 X/Y/Z 三个方向的基准面,将 NURBS 曲面投影到 X-Y 基准面上后进行拉伸,从而实现由面到体的转换(图4)。

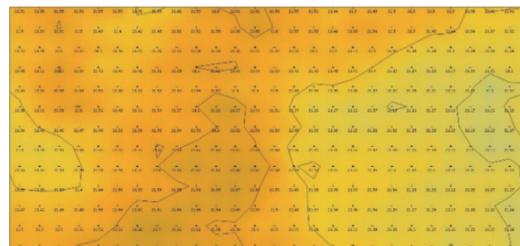


图2 规整后的点云数据

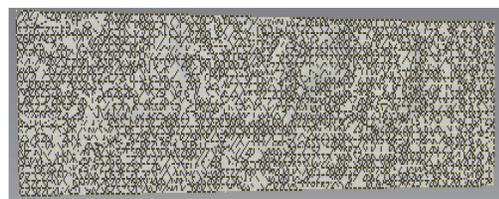


图3 多边形过渡曲面

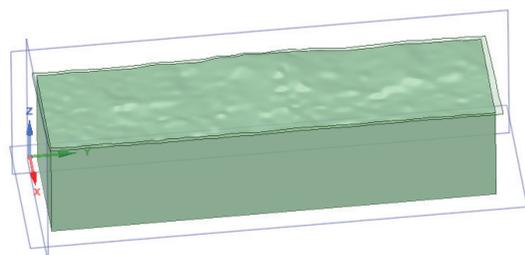


图4 三维仿真裂缝面实体模型

2 裂缝面接触变形模型

2.1 网格划分

将两个裂缝面错位 2.5 mm 后进行非整合接触^[1], 构建出自支撑裂缝模型, 采用六面体缩减积分单元进行网格划分, 网格大小沿裂缝面法线方向变化, 越靠近粗糙裂缝面, 网格划分越精细, 以提高计算过程的收敛性。

2.2 本构方程

页岩裂缝面接触变形过程中的力学本构方程包括弹性和塑性两个阶段, 当岩石处于弹性变形阶段时, 采用广义 Hooke 定律进行描述^[22]:

$$\begin{aligned}\Delta\varepsilon_1 &= \frac{1}{E}[\Delta\sigma_1 - \nu(\Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_3)] \\ \Delta\varepsilon_2 &= \frac{1}{E}[\Delta\sigma_2 - \nu(\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_3)] \\ \Delta\varepsilon_3 &= \frac{1}{E}[\Delta\sigma_3 - \nu(\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2)]\end{aligned}\quad (1)$$

式中, $\Delta\sigma$ 为应力增量, MPa; $\Delta\varepsilon$ 为应变增量, 无量纲; E 为杨氏模量, MPa; ν 为泊松比, 无量纲。

岩石由弹性阶段到塑性阶段的屈服过程采用 Drucker-Prager 屈服准则 (简称 D-P 准则) 进行描述, 屈服条件如下:

$$\alpha I_1 + \sqrt{J_2} = k \quad (2)$$

主变量 I_1 和 J_2 和表达式为:

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (3)$$

$$J_2 = \frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2] \quad (4)$$

常数 α 、 k 的表达式为:

$$\alpha = \frac{\sin\varphi}{\sqrt{3}(\sqrt{3}\cos\theta - \sin\theta\sin\varphi)} \quad (5)$$

$$k = \frac{\sqrt{3}c\cos\varphi}{\sqrt{3}\cos\theta - \sin\theta\sin\varphi} \quad (6)$$

$$\theta = \arctan \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sqrt{3}(\sigma_1 - \sigma_3)} \quad (7)$$

式中, φ 为粘聚力; c 为内摩擦角。

不同 θ 值对应着不同的 α 和 k 值, 反映在 π 平面上则表示不同的圆, 分别适用于不同的岩石状态。本文采用 DP1 屈服准则 (外角点外接圆准则), 该准则下岩石材料满足单向压缩和常规三轴压缩下的 $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$ 条件, 此时 α 和 k 取值如下:

$$\alpha = \frac{2\sin\varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin\varphi)} \quad (8)$$

$$k = \frac{6c\cos\varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin\varphi)} \quad (9)$$

2.3 边界条件

针对下裂缝体, 在 X 和 Y 方向施加对称位移约束, 在下表面施加 Z 方向位移约束, 保持下表面位置固定。针对上裂缝体, 在 X 和 Y 方向同样施加对称位移约束, 并根据闭合应力值对裂缝体上表面施加法向正应力。

3 模型有效性验证

3.1 裂缝闭合数值模拟

数值模拟基础力学参数来源于页岩单轴力学实验 (图 5), 实验岩样取自四川盆地龙马溪组页岩露头, 测试结果如图 6 所示。测试曲线未表现出明显的压实过程, 页岩受压后迅速进入弹性变形阶段, 随后发生塑性变形直至最终破坏。测试得到页岩杨氏模量 18.6 GPa, 泊松比 0.23, 模拟过程中的塑性参数采用塑性变形阶段数据与 D-P 屈服准则拟合得到。

3.2 裂缝闭合物模实验

裂缝闭合物模实验主要测试自支撑裂缝在不同闭合应力作用下的相对位移量, 进而表征裂缝闭合过程。首先将错位后的自支撑裂缝放入图 7 所示加压室, 然后加载测试闭合应力, 通过位移传感器获取不同闭合应力作用下钢块表面的位移量, 并采用式 (10)(11)(12) 进一步计算得到自支撑裂缝的整体形

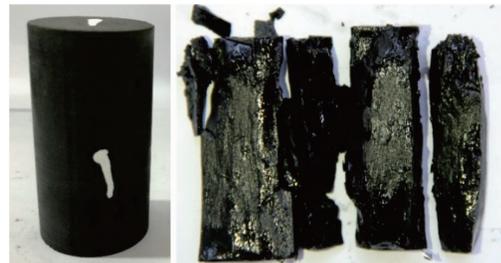


图 5 单轴力学实验岩样

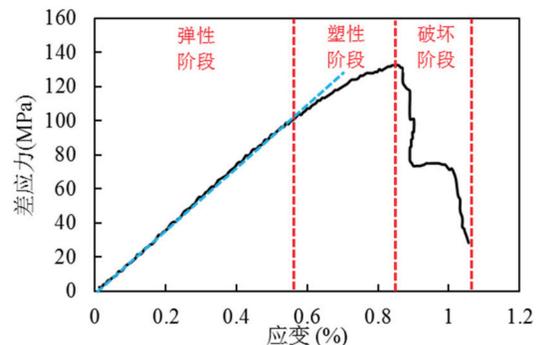


图 6 单轴力学实验结果

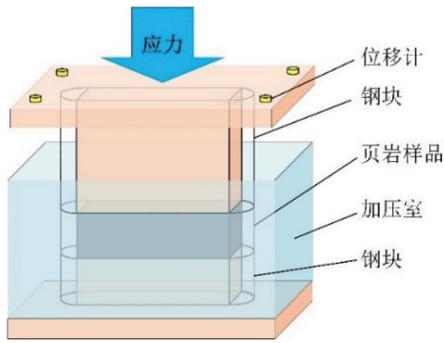


图7 自支撑裂缝闭合测试示意图

变量。

$$\Delta L_s = \Delta L - \Delta L_A - \Delta L_B \quad (10)$$

$$\Delta L_A = \frac{PL_A}{E_m} \quad (11)$$

$$\Delta L_B = \frac{PL_B}{E_m} \quad (12)$$

式中, ΔL_s 为自支撑裂缝变形量, mm; ΔL 为位移传感器测量得到的总位移量, mm; $\Delta L_A, \Delta L_B$ 为上侧和下侧钢块的变形量, mm; L_A, L_B 为上侧和下侧钢块的高度, mm; P 为测试闭合应力, MPa; E_m 为钢块的杨氏模量, MPa。

3.3 结果对比

数值模拟与实验测试结果对比如图 8 所示, 当闭合应力低于 30 MPa 时, 结果差距较大, 误差最高达 16.7%; 当闭合应力高于 30 MPa 时, 误差降低至 8.8%~10.2%。出现这种现象, 一方面是由于低闭合压力下的变形量绝对值较小, 使得相对误差较大; 另一方面是由于本文接触变形模型未考虑岩石破坏, 而裂缝表面承压能力较弱的微凸起在闭合应力加载初始阶段会发生集中破碎(图 9), 导致实验测试得到的变形量明显高于数值模拟结果。随着闭合应力增加, 自支撑裂缝变形量将逐步转变为由弹性和塑性变形所主导, 而非裂缝表面微凸起破碎, 因此实验与数模结果最终呈现出相似的变化趋势。综上

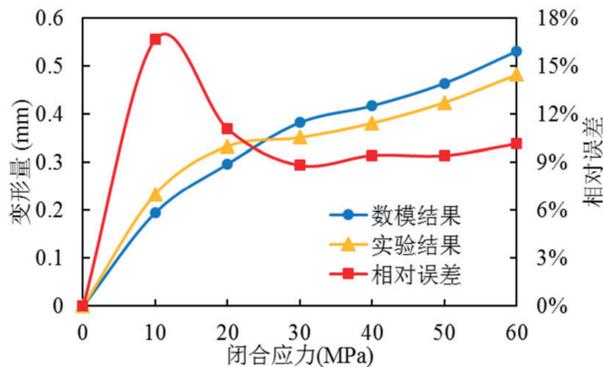


图8 数值模拟与实验测试结果对比

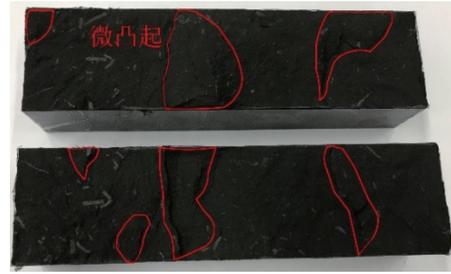


图9 自支撑裂缝表面微凸起

所述, 本文所建立的裂缝面接触变形模型具有较高的准确性和可靠性。

4 页岩自支撑裂缝闭合过程分析

用于模拟计算的页岩取自四川盆地龙马溪组页岩露头, 基本力学和模拟参数如表 1 所示, 裂缝三维仿真后的有限元模型如图 10 所示。

4.1 裂缝面应力分布

页岩自支撑裂缝在不同闭合应力作用下的受力情况如图 11 所示, 由于裂缝表面粗糙不平, 初始施压阶段仅局部接触区域起到支撑作用, 因此存在明显的应力集中现象。随着闭合应力增加, 裂缝面之间的接触和受力区域逐渐扩大, 支撑作用点也相应增加, 同时应力集中现象由靠近裂缝面区域不断向岩板内部传递。在 60 MPa 闭合应力作用下, 裂缝表面接触区域的应力最高达 146.5 MPa, 高于 132.4 MPa 抗压强度, 该部分微凸起在实际承压过程中早已破碎或严重压实(图 11), 由此导致裂缝面之间的接触区域增加, 并减缓裂缝闭合过程。

表1 数值模拟基本参数设置

参数	取值
杨氏模量 (GPa)	23.3
泊松比 (无因次)	0.25
滑移量 (mm)	2.5
闭合应力 (MPa)	10/20/30/40/50/60

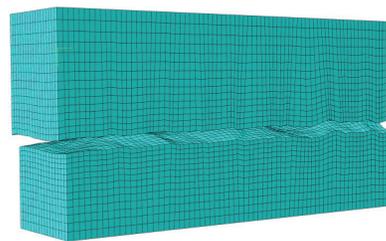


图10 自支撑裂缝有限元模型

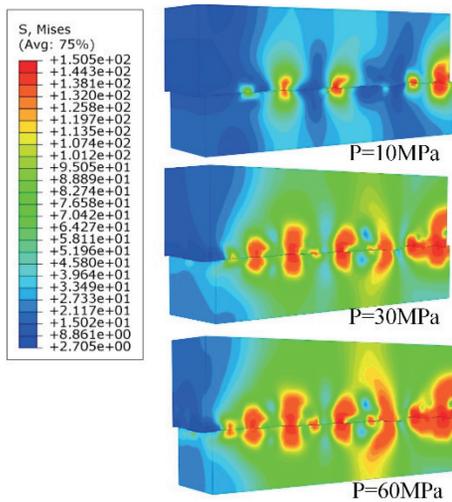


图 11 不同闭合应力下自支撑裂缝受力状态

4.2 裂缝内流动通道变化

将裂缝上、下表面的三维空间坐标相互叠加，并去除接触和重叠区域，获取不同闭合应力作用下自支撑裂缝内部流动空间的变化情况，如图 12 所示。随着闭合应力增加，裂缝面之间的接触区域不断扩大，流动通道逐渐减少，裂缝导流能力不断降低。同时，裂缝内部还存在大量被“孤立”的区域，这些孤立区虽然没有接触，但其周围被接触区域所包围，形成了一个流体无法流入和流出的封闭空腔。裂缝中孤立区域的存在将导致部分非接触区域无法贡献于流体流动，因此直接利用裂缝接触面积计算导流能力的方法^[23-27]可能会高估了裂缝的导流能力。

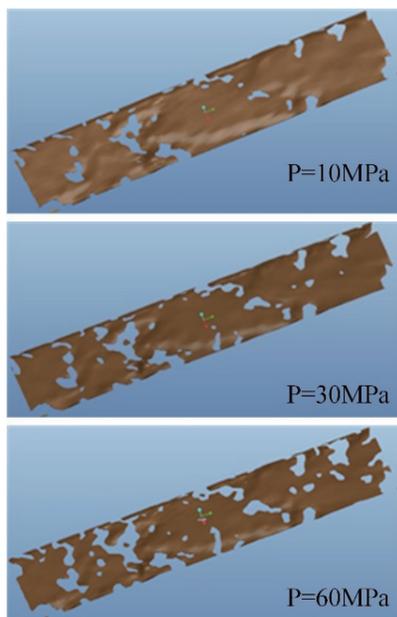


图 12 不同闭合应力下自支撑裂缝内流动通道

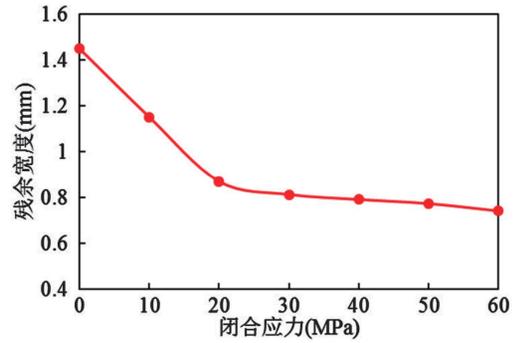


图 13 自支撑裂缝的残余宽度变化情况

4.3 裂缝残余宽度变化

在自支撑裂缝的上下表面均匀设置 100 组记录节点对，模拟过程中实时输出不同闭合应力作用下记录节点对之间的距离，从而获取自支撑裂缝的平均残余宽度，如图 13 所示。从图中可以看出，残余宽度随着闭合应力增加呈现出逐渐减小的趋势。具体而言，当闭合应力低于 30 MPa 时，残余宽度近似呈线性下降；当闭合应力高于 30 MPa 后，残余宽度的下降速率逐渐变缓，该模拟结果与自支撑裂缝导流能力的变化规律非常相似^[7]。另外，针对四川盆地龙马溪组页岩储层，自支撑裂缝在 60 MPa 闭合应力作用下的残余宽度为仍保持在 0.74 mm，由此说明该区域的页岩自支撑裂缝在地层高闭合应力条件下仍然能够提供非常重要的流动通道和导流能力。

5 页岩自支撑裂缝闭合过程影响因素

页岩自支撑裂缝闭合过程的影响因素主要包括裂缝表面粗糙度、滑移量、杨氏模量、泊松比等，本文采用控制变量方法进行深入讨论，模拟参数设置如表 2 所示。

5.1 裂缝面粗糙度影响

裂缝表面形貌非常复杂，本文采用分形维数 (FD) 对进行定量化表征，具有不同分形维数的四组自支撑裂缝在闭合应力作用下的残余宽度变化如图

表 2 影响因素分析过程中的参数设置

参数	取值
杨氏模量 (GPa)	20/25/30/35
泊松比 (无因次)	0.2/0.25/0.3/0.35
滑移量 (mm)	1/2/3/4
闭合应力 (MPa)	10/20/30/40/50/60

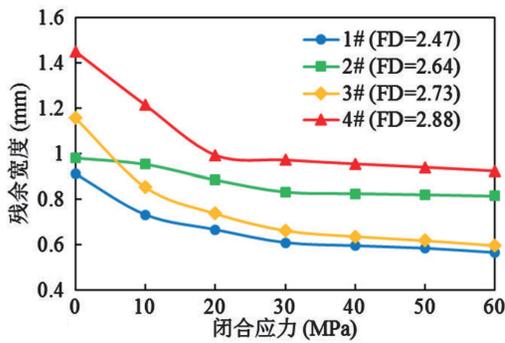


图 14 裂缝面粗糙度对残余宽度的影响

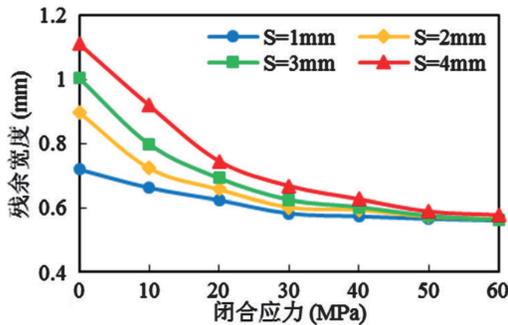


图 15 滑移量对残余宽度的影响

14 所示。可以发现,当未受到闭合应力作用时,高粗糙度裂缝往往具有较大的初始宽度;同时,随着闭合应力增加,模拟结果整体表现出裂缝面越粗糙,残余宽度越大的特征。因此,可以认为自支撑裂缝面越粗糙,其抵抗闭合应力作用的能力越强,越容易保持较大的宽度和较高的导流能力。

5.2 滑移量影响

在分析滑移量、杨氏模量、泊松比对于页岩自支撑裂缝闭合过程的影响时,本文针对上述四组不同粗糙度的裂缝分别开展了数值模拟工作,得到的总体变化规律较为相似,下面以 1# 自支撑裂缝为代表进行详细说明。

滑移量对自支撑裂缝残余宽度的影响如图 15 所示。当未到受闭合应力作用时,自支撑裂缝滑移量越大,其所具备的初始宽度越大。随着闭合应力增加,不同滑移量所对应的残余宽度差异逐渐减小,当闭合应力达 50 MPa 时残余宽度基本趋于一致。由此说明,虽然滑移量在一定程度上能够改变低闭合应力下裂缝的残余宽度,但在高闭合应力下裂缝面粗糙度仍然是主要的影响因素。

5.3 杨氏模量影响

杨氏模量对自支撑裂缝残余宽度的影响如图 16 所示。可以发现,杨氏模量越高,残余宽度越大,并且随着闭合应力增加,不同杨氏模量对应的残余

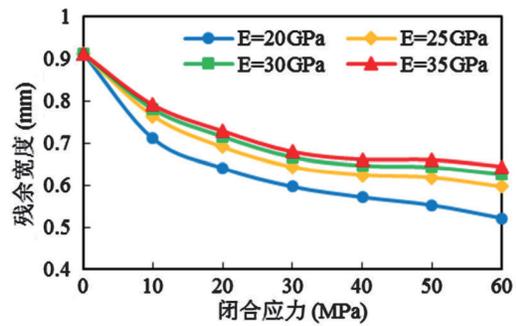


图 16 杨氏模量对残余宽度的影响

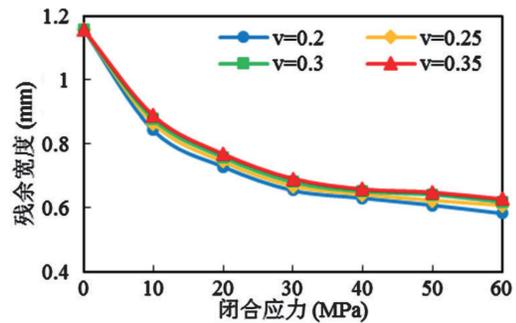


图 17 泊松比对残余宽度的影响

宽度差异逐渐加大。但残余宽度随杨氏模量增加而提升的幅度有限,当杨氏模量高于 25 GPa 时,岩石抵抗变形的能力增加到一定程度,残余宽度继续提升的幅度较小,不同杨氏模量条件下残余宽度的差异也将进一步缩小。

5.4 泊松比影响

泊松比对自支撑裂缝残余宽度的影响如图 17 所示。从图中可以看出,不同泊松比条件下的残余宽度差异非常小。同时,随着闭合应力不断增加,残余宽度的下降规律几乎保持一致,由此说明岩石泊松比对自支撑裂缝形变及闭合过程的影响较小。

5.5 各因素影响程度对比

为进一步比较各因素对于页岩自支撑裂缝闭合过程的影响程度,采用灰色关联法计算了各因素与残余宽度的灰色关联度及影响权重,结果如图 18 所

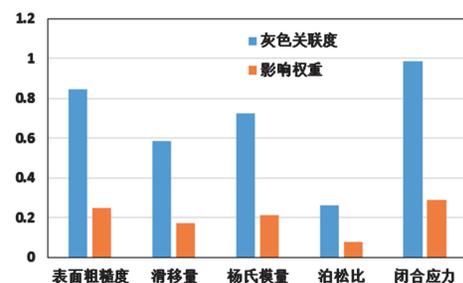


图 18 各因素影响程度对比

示。影响程度从大到小排序依次为：闭合应力、表面粗糙度、杨氏模量、滑移量、泊松比，由此说明页岩储层所在地应力环境及其非均质性对于页岩气井的产量具有重要影响。

6 结 论

(1) 建立了自支撑裂缝面形态三维仿真方法，能够基于岩样三维激光扫描数据准确还原出自支撑裂缝的真实形貌。

(2) 结合 D-P 屈服准则建立了自支撑裂缝在闭合应力作用下的接触变形模型，通过室内物模实验验证了模型的准确性，平均误差 9.4%。

(3) 自支撑裂缝在闭合应力作用下存在明显的应力集中现象。随着闭合应力增加，裂缝面之间的接触区域不断扩大，流动通道和残余宽度逐渐减少；残余宽度在闭合应力低于 30 MPa 时近似呈线性下降，当闭合应力高于 30 MPa 后下降幅度明显减缓。

(4) 具备高粗糙度、大滑移量、高杨氏模量特征的自支撑裂缝通常具有较高的残余宽度，岩石泊松比对自支撑裂缝形变及闭合过程的影响较小。

(5) 页岩储层所在地应力环境及其非均质性对于页岩气井产量具有重要影响。针对四川盆地龙马溪组页岩储层，自支撑裂缝在 60 MPa 闭合应力作用下的残余宽度仍保持在 0.74 mm，能够提供一定的流动通道和导流能力。

参 考 文 献

- [1] Zhang J, Kamenov A, Zhu D, et al. Laboratory measurement of hydraulic-fracture conductivities in the barnett shale. *SPE Production & Operations*, 2014, 29(3): 216—227.
- [2] Develi K, Babadagli T. Experimental and visual analysis of single-phase flow through rough fracture replicas. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2015, 73: 139—155.
- [3] Cook NGW. Natural joints in rock: Mechanical, hydraulic and seismic behaviour and properties under normal stress. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1992, 29(3): 198—223.
- [4] Pyrak-Nolte LJ, Morris JP. Single fractures under normal stress: The relation between fracture specific stiffness and fluid flow. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2000, 37(1/2): 245—262.
- [5] Kamali A, Pournik M. Fracture closure and conductivity decline modeling - Application in unpropped and acid etched fractures. *Journal of Unconventional Oil and Gas Resources*, 2016, 14: 44—55.
- [6] Fredd CN, McConnell SB, Boney CL, et al. Experimental study of fracture conductivity for water-fracturing and conventional fracturing applications. *SPE Journal*, 2001, 6(3): 288—298.
- [7] Fredd CN, McConnell SB, Boney CL, et al. Experimental study of hydraulic-fracture conductivity demonstrates the benefits of using proppants. *SPE Rocky Mountain Regional/Low-Permeability Reservoirs Symposium and Exhibition*, Denver, 2000.
- [8] Guo TK, Zhang SC, Gao J, et al. Experimental study of fracture permeability for stimulated reservoir volume (SRV) in shale formation. *Transport in Porous Media*, 2013, 98(3): 525—542.
- [9] van Dam DB, de Pater CJ, Romijn R. Analysis of hydraulic fracture closure in laboratory experiments. *SPE Production & Facilities*, 2000, 15(3): 151—158.
- [10] Warpinski NR, Branagan PT, Engler BP, et al. Evaluation of a downhole tiltmeter array for monitoring hydraulic fractures. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, 34(3/4): 329.e1—329.e13.
- [11] Sakaguchi K, Tomono J, Okumura K, et al. Asperity height and aperture of an artificial tensile fracture of metric size. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2008, 41(2): 325—341.
- [12] Greenwood JA, Tripp JH. The elastic contact of rough spheres. *Journal of Applied Mechanics*, 1967, 34(1): 153—159.
- [13] Greenwood JA, Williamson J. Contact of nominally flat surfaces. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1966, 295(1442): 300—319.
- [14] Whitehouse DJ, Archard JF. The properties of random surfaces of significance in their contact. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1971, 316(1524): 97—121.
- [15] Bush AW, Gibson RD, Thomas TR. The elastic contact of a rough surface. *Wear*, 1975, 35(1): 87—111.
- [16] Hanaor DAH, Gan YX, Einav I. Contact mechanics of fractal surfaces by spline assisted discretisation. *International Journal of Solids and Structures*, 2015, 59: 121—131.

- [17] Pullen J, Williamson J. On the plastic contact of rough surfaces. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences*, 1972, 327(1569): 159—173.
- [18] Jackson RL, Green I. A statistical model of elasto-plastic asperity contact between rough surfaces. *Tribology International*, 2006, 39(9): 906—914.
- [19] 靳国栋, 刘衍聪, 牛文杰. 距离加权反比插值法和克里金插值法的比较. *长春工业大学学报(自然科学版)*, 2003, 24(3): 53—57.
- [20] 蔡占川, 姚菲菲, 唐泽圣. 基于克里金插值法的图像修复. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2013, 25(9): 1281—1287.
- [21] Vida J, Martin RR, Varady T. A survey of blending methods that use parametric surfaces. *Computer-Aided Design*, 1994, 26(5): 341—365.
- [22] 郑颖人, 沈珠江, 龚晓南. 广义塑性力学—岩土塑性力学原理. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012: 179—193.
- [23] 王媛, 速宝玉. 单裂隙面渗流特性及等效水力隙宽. *水科学进展*, 2002, 13(1): 61—68.
- [24] 速宝玉, 詹美礼, 赵坚. 仿天然岩体裂隙渗流的实验研究. *岩土工程学报*, 1995, 17(5): 19—24.
- [25] 陈益峰, 周创兵, 盛永清. 考虑峰后力学特性的岩石节理渗流广义立方定理. *岩土力学*, 2008, 29(7): 1825—1831.
- [26] 周创兵, 熊文林. 岩石节理的渗流广义立方定理. *岩土力学*, 1996, 17(4): 1—7.
- [27] 周创兵, 陈益峰, 姜清辉, 等. 岩体结构面 HM 耦合分析的界面层模型. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(6): 1081—1093.

Numerical Model of Self-propped Fracture Closure Based on 3D Simulation of Fracture Surface

Lu Cong^{1*} Luo Yang¹ Guo Jianchun¹ Huang Chuha²
Zhou Guangqing³ Wang Jiandong³ Liu Yanhui³ Shan Xin³

1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500

2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059

3. Oil and Gas Exploration Management Center, Sinopec Shengli Oilfield Company, Dongying 257001

Abstract The closure process of unpropped fracture in shale under in situ stress has a significant effect on the eventual well production, but the existing numerical simulation methods of unpropped fracture closure do not consider the real rough surface and plastic deformation of rock. In this paper, a 3D simulation method based on laser scanning was established to construct the unpropped fracture surface numerically. A contact and deformation model of unpropped fracture was built with the consideration of rough surface and plastic characteristics, and its average error is 9.4%. On this basis, the changes of stress state, flow channel and residual width in the closure process of unpropped fracture are analyzed, and the effects of surface roughness, slippage degree and mechanical properties on the closure process are explored. The results show that unpropped fractures with high roughness, large slippage degree and high Young's modulus usually possess high residual width. For shale of deep Longmaxi formation in south Sichuan, China, simulation results show that the unpropped fracture retains a residual width higher than 0.7mm under 60MPa closure stress, which should serve as considerable flow passages for oil and gas in shale.

Keywords shale; unpropped fracture; 3D simulation; closure process

(责任编辑 姜钧译)

* Corresponding Author, Email: lucong@swpu.edu.cn