

压缩应力作用下 I 型裂缝前端拉压分区特征研究

唐梅荣^{1, 2}, 张广清^{1, 3}, 陈磊¹

(1. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249; 2. 中国石油长庆油田分公司, 陕西 西安 710021;

3. 中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249)

摘要: 储层应力条件下水力裂缝前端应力分布特征会影响裂缝扩展及压裂改造效果。为研究水力裂缝前端拉压分区特征, 采用自主设计的可视化压裂试验装置对压缩应力作用下 I 型裂缝前端力学行为进行研究。提出利用数字图像相关法识别裂缝前端拉压分界线的方法, 发现 I 型裂缝前端拉伸区长度与裂缝尖端张开位移呈线性正相关。裂缝起裂前, 拉伸区的范围及长度随着缝尖应力强度因子的增大而增大; 裂缝起裂扩展后, 拉伸区的范围及长度保持恒定。研究表明, 随着裂缝两侧远场压缩应力的增大, I 型裂缝前端拉伸区的范围及长度会减小, 远场应力对拉伸区尺度范围的影响程度会降低。探讨拉伸区内的弹性区与断裂过程区分界, 表征拉伸区与断裂过程区的位置关系, 并提出断裂过程区指数的概念, 发现拉伸区内过程区指数会随着地应力的增大而增大, 表明在高应力作用下拉伸区内以非线性断裂为主导。

关键词: 岩石力学; 水力压裂; 数字图像相关法; 断裂力学; 断裂过程区; 地应力

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2024)02 - 0322 - 11

Experimental investigation on tension zone in front of mode-I fracture under in-situ stresses

TANG Meirong^{1, 2}, ZHANG Guangqing^{1, 3}, CHEN Lei¹

(1. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249, China; 2. Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an, Shaanxi 710021, China; 3. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249, China)

Abstract: The stress distribution characteristics ahead of the hydraulic fracture under in-situ stresses will affect the fracture propagation and stimulation effect. In this paper, the mechanical behaviors and the tension-compression stress distribution ahead of the Mode-I fracture under in-situ stresses were studied using a self-designed visual fracturing experimental device. Based on the digital image correlation, a method to identify the boundary of the tension-compression zones ahead of the Mode-I fracture tip was proposed, from which the positive linear correlation was found between the tension zone length and the fracture tip opening displacement. Before fracture initiation, the range and length of the tension zone will increase with the stress intensity factor. During the fracture propagation, the range and length of the tension zone remain constant. With the increase of in-situ stress, the length of the tension zone will decrease, and the influence of in-situ stress on the tension zone will decrease. The boundary of fracture process zone and elastic zone in tension zone was investigated, and the position of fracture process zone and the

收稿日期: 2023 - 06 - 16; **修回日期:** 2023 - 10 - 01

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(51925405); 中石油战略合作科技专项(ZLZX2020 - 02)

Supported by the National Science Fund for Distinguished Young Scholars(Grant No. 51925405) and Strategic Cooperation Technology Projects of China National Petroleum Corporation and China University of Petroleum-Beijing(Grant No. ZLZX2020 - 02)

作者简介: 唐梅荣(1980 -), 男, 2002年毕业于西安石油大学石油工程专业, 现为博士研究生、高级工程师, 主要从事水力压裂方面的研究工作。E-mail: tmr_cq@petrochina.com.cn. 通讯作者: 张广清(1975 -), 男, 博士, 现任教授、博士生导师。E-mail: zhangguangqing@cup.edu.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2023.0506

tension zone was described. The concept of process zone index in the tension zone was proposed, which was found increase with in-situ stress, indicating that nonlinear fracture is dominant in the tension zone under high in-situ stress.

Key words: rock mechanics; hydraulic fracturing; digital image correlation; fracture mechanics; fracture process zone; in-situ stress

1 引言

水力压裂技术是油气储层增产改造的有效手段^[1], 有利于提高油气产量^[2-3]。其中, 水力裂缝的起裂扩展及裂缝前端的力学行为是压裂过程中的关键力学问题^[4-5]。

水力裂缝主要为 I 型张开裂缝^[6], 由线弹性断裂力学^[7]可知, I 型裂缝前端存在垂直于裂缝扩展方向的拉伸应力^[8], 拉伸应力会促使裂缝前端发生弹性变形及非线性变形。在岩石类脆性材料中, 拉伸区内非线性变形主要以断裂过程区发育为主导, 即微裂缝聚集的非线性发育区^[7, 9]。由内聚断裂模型^[10]可知, 在断裂过程区之外, 存在拉伸弹性区。基于线弹性断裂理论, 若无远场压缩应力作用, I 型裂缝前端在水平方向会存在恒大于 0 的拉伸应力, 且应力大小向无限远处衰减。在实际储层条件下, 由于地应力作用, I 型裂缝会受到远场压缩应力的作用, 因此水力裂缝前端在水平方向的拉伸应力不会恒大于 0, 所以裂缝前端的拉伸应力范围(拉伸区)会存在一定界线, 即拉伸应力区与压缩应力区存在分界线。

针对裂缝前端拉压分界特征, 既有的相关试验研究较少, 特别是水力压裂过程中, 水力裂缝前端拉伸区分布特征缺少试验监测。在室内研究中, G. Zhang 等^[9, 11-13]普遍采用三点弯曲断裂试验去研究裂缝前端的变形特征, 但是三点弯曲断裂试验难以考虑远场压缩应力的影响, 因此难以研究裂缝前端的拉压分区特征^[11-13]。针对 I 型裂缝前端的拉伸力学行为^[11-14], 相关研究普遍没有考虑地应力的影响, 主要集中在缝尖断裂过程区的发育行为^[11-13, 15]。当前, 既有的相关研究主要讨论围压对岩石断裂韧性的影响^[16-17]。

研究远场压缩应力作用下 I 型裂缝前端的拉压分区特性及拉伸区尺度范围具有重要的岩石力学与工程意义。以水力压裂为例, 其能为准确判断水力裂缝的拉伸应力诱导范围提供依据。在天然裂缝发育的储层中, 拉伸区内的拉伸应力是诱导天然裂缝张开的主要因素^[18]。水力裂缝前端拉伸区分布能为判断天然裂缝开启范围提供依据。现场水力压裂取心

发现^[19], 水力裂缝扩展路径较为复杂, 并非常规理论所预测的单缝平面扩展特征, 而拉伸区内天然裂缝开启并沟通主裂缝是形成复杂裂缝的潜在因素^[20]。

在水力压裂中, 拉伸区的尺度关系到天然开启范围的评估。而断裂过程区的尺度则关系到裂缝前端线弹性断裂力学的适用范围的评估^[21]。因此, 准确探究水力裂缝的延伸扩展及形态特征, 需要明确研究 I 型裂缝前端拉伸区尺度与过程区尺度关系。在试验室内研究中, 准确监测 I 型前端的全场变形信息是关键。近年来, 数字图像相关法(digital image correlation, DIC)作为一种光学测量方法被引入到平面变形信息监测中, 目前已广泛应用岩石断裂力学研究^[11-13, 22-23]。相比应变片、光纤等监测方法, DIC 的显著优势是可以高精度表征试件表面的全场变形信息^[24], 为明确裂缝前端的位移场及应变分布提供依据。同时, DIC 测量尺度易调节, 对测试环境要求低, 且不接触干扰试件^[25], 因此是测量试件表面变形的可靠方法。

本文采用数字图像相关法对远场压缩应力作用下 I 型裂缝前端拉伸区进行了研究, 得到了裂缝前端拉压分布特征及拉伸区内过程区分界, 并探究了远场压缩应力对拉伸区及过程区指数的影响, 相关研究对于进一步认识水力裂缝的扩展规律具有重要意义。

2 试验描述

2.1 试验设置

在水力压裂中, 当缝内压力大于最小地应力时, 裂缝前端会产生为正值应力强度因子, 当其大于岩石断裂韧性时会产生 I 型张开裂缝^[26]。储层水平井压裂示意图及其在平面应变下的简化模型如图 1 所示。

砂岩作为油气的重要储存介质之一, 其力学性质及裂缝扩展特征备受关注^[27-29]。本文采用中-细粒岩屑石英砂岩作为试样开展试验研究, 岩石均匀性较好(见图 2)。基于单轴压缩力学参数测试, 发现其单轴压缩强度为 28.33 MPa, 弹性模量为 4.23 GPa。试验采用 400 mm×400 mm×50 mm 的平板状

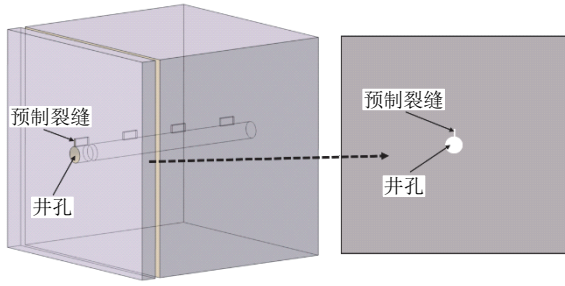


图1 储层水平井压裂示意图及其在平面应变下的简化模型
Fig.1 Diagram of horizontal well fracturing and simplified model under plane strain condition

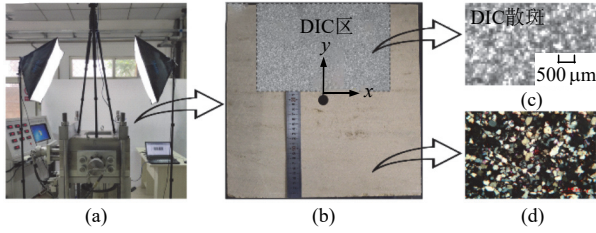


图2 可视化压裂设备、试件及放大图

Fig.2 Visualization of fracturing equipment, specimens, and micrographs

试件(见图 2(b)), 并在平板状试件中心位置钻出直径为 20 mm 的井筒。在井筒中心一侧加工一条长为 10 mm 的预制裂纹, 预制裂纹宽为 2 mm, 裂纹尖端为半圆形, 且预制裂纹方向与试件一侧垂直。对试件 A 施加三向应力, 其中垂直于平面方向(z 方向)施加 5 MPa 应力, y 方向(平行裂缝扩展方向)施加 3 MPa 应力, x 方向(垂直于裂缝扩展方向)施加 1 MPa 应力。作为对照, 试件 B 为无压缩应力作用下的 I 型裂缝扩展试验试件^[15]。

为模拟压裂液支撑作用下产生的张开裂缝, 试验选用岩石无声破碎剂(SCDAs)作为压裂介质。SCDAs 的主要成分为氧化钙, 会在水化的过程中不断膨胀, 并在井筒内部产生径向应力^[30], 随着时间推移, 促使试件产生 I 型张开裂缝。试验装置采用中国石油大学(北京)自主研发的二维岩石可视化压裂设备^[21, 29], 如图 2(a)所示, 可视化压裂试验装置主要用于研究岩石试件在压缩应力状态下的断裂特征, 通过装置的透明窗口可以直接观测到岩石裂缝的起裂及扩展。该装置可以模拟储层条件下的应力状态, 能够实时监测裂缝扩展。在试验过程中, 将岩石试件置入可视化试验平台, 并在井筒中施加水化后的氧化钙。利用亚克力透明盖将试件表面覆盖, 通过加载装置对试件上下表面及侧向施加压缩应力。因此岩石初始应力状态为压缩应力状态, 随着氧化钙水化作用的加强, 井筒内部的膨胀应力会不断增大, 直至预制裂缝前端产生拉伸应力并产生扩

展裂缝。

2.2 监测方法

数字图像相关法作为一种监测物体表面变形信息的非接触式光学测量方法, 近年来被广泛应用于断裂力学研究^[9, 11-13, 31]。基于试件在变形前、后的散斑图案, 可以提取全场变形信息^[25]。在数字图像相关方法中, 物体表面图像被划分为多个子集区间^[25], 子集区间在数值上可以表征为像素点灰度值矩阵。通过概率统计的相关性可以识别子集中心在变形前后的位置变化, 进而确定物体表面的位移, 实现位移场的监测^[25, 32]。在子集的追踪中, 归一化互相关准则广泛应用于 DIC 研究^[32], 计算式为

$$C = \frac{\sum_{(i, j) \in S} [f(\tilde{x}_{\text{ref}}, \tilde{y}_{\text{ref}}) - f_m][g(\tilde{x}_{\text{cur}}, \tilde{y}_{\text{cur}}) - g_m]}{\sum_{(i, j) \in S} [f(\tilde{x}_{\text{ref}}, \tilde{y}_{\text{ref}}) - f_m]^2 \cdot \sum_{(i, j) \in S} [g(\tilde{x}_{\text{cur}}, \tilde{y}_{\text{cur}}) - g_m]^2} \quad (1)$$

式中: C 为子集变形前后相关系数, f 和 g 分别为某一位置(x, y)的参考图像和当前图像的灰度强度, f_m 和 g_m 分别为参考图像和当前图像子集的平均灰度值, $\tilde{x}_{\text{ref}}$ 和 $\tilde{y}_{\text{ref}}$ 分别为变形后子集点坐标, $\tilde{x}_{\text{cur}}$ 和 $\tilde{y}_{\text{cur}}$ 分别为当前子集点坐标, S 为包含子集点的集合, i 和 j 表示某一点相对于子集中心的位置。

目前, 学者们针对 DIC 的算法进行了很多研究和优化^[32-33], 其中 J. Blaber 等^[32]基于互相关算法提出的 DIC 分析程序被广泛使用^[12-13, 29]。依据图片前后子集的变化差异计算位移场, 采用基于应变窗口算法计算格林-拉格朗日应变^[32]确定应变场。

在本文的试验研究中, 通过对岩石试件表面喷涂黑白散斑以促使 DIC 图片像素点灰度值的非均匀分布, 其中 DIC 散斑质量如图 2(c)所示, 试验过程中采用工业相机进行实时拍摄。

3 裂缝前端拉压分区特征研究

在地应力和缝内流体的共同作用下, 油气储层中水力裂缝延伸形态不断变化。以往学者对水力裂缝走向和形态的判断主要基于地应力大小, 即裂缝垂直最小地应力方向延伸。近年来, 随着压后取心技术的发展, 人们对水力裂缝的真实形态又取得新的认识。现场水力压裂取心后发现地层水力裂缝的复杂程度远远超过人们的想象^[9], 发现同时延伸的多条近距离裂缝。其原因存在多种可能性, 如裂缝间歇式延伸^[3]、裂缝动态延伸^[34], 这些均与裂缝前端的应力分布密切相关。识别并描述裂缝前端的拉伸应力区, 是进一步研究水力裂缝延伸扩展的基础。

3.1 裂缝前端拉压分区的识别

对于一维问题, 以弹簧为例, 当弹簧两侧施加压力, 中间施加拉伸应力时, 会出现拉压变形分区典型特征(见图 3(a)), 其位移分布特征如图 3(b)所示, 拉伸区应力值为正(位移斜率为正), 压缩区应力值为负(位移斜率为负)。

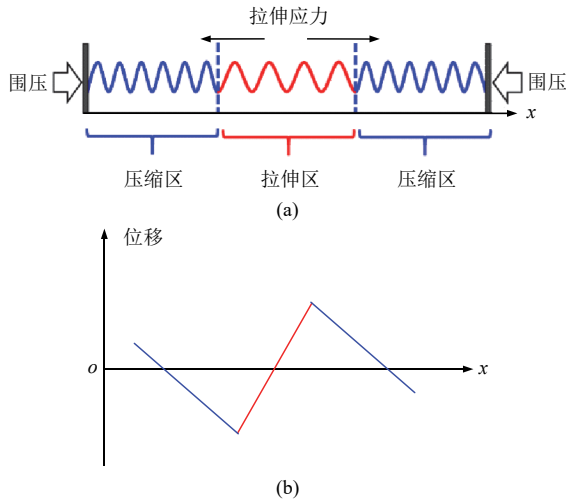


图 3 一维问题中的拉压分区示意

Fig.3 Tension and compression zones in a spring

在二维问题中, 由 I 型裂缝线弹性应力场, 裂缝前端存在拉伸应力区域。但基于下式所讨论得缝尖应力场为不考虑远场压缩应力的缝尖诱导应力:

$$\sigma'_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (2)$$

式中: σ'_x 为裂缝前端 x 方向的弹性应力解, K_I 为水力裂缝前端应力强度因子, r 为裂缝前端任意位置至缝尖的距离, θ 为裂端任意位置到缝尖连线与裂缝扩展方向的夹角。

由式(2)可知, 在垂直于裂缝扩展方向(水平方向), 裂缝前端至无限远处均存在拉伸应力作用, 即 $\sigma'_x \geq 0$ 例如, 当 $r \rightarrow \infty$ 时, $\sigma'_x \rightarrow 0$ 。但在真实地层中, 由于存在地应力作用, 水平方向远场 σ_x 的大小应趋近于水平最小地应力 σ_h 的大小, 因此需要修正 x 方向实际应力的计算公式:

$$\sigma_x = \sigma'_x - \sigma_h \quad (3)$$

式中: σ_x 为裂缝前端 x 方向的实际应力。

当存在压缩应力 σ_h 时, I 型裂缝前端的拉伸应力作用将存在有限边界, 即当 $\sigma_x \geq 0$ 时为拉伸应力区, 当 $\sigma_x \leq 0$ 时为压缩应力区, 因此当裂缝前端水平方向实际应力 $\sigma_x = 0$ 时, 即为拉伸应力与压缩应力区分界处(见图 4(a))。此时, 裂缝前端拉伸应力区边界的极坐标形式曲线方程为

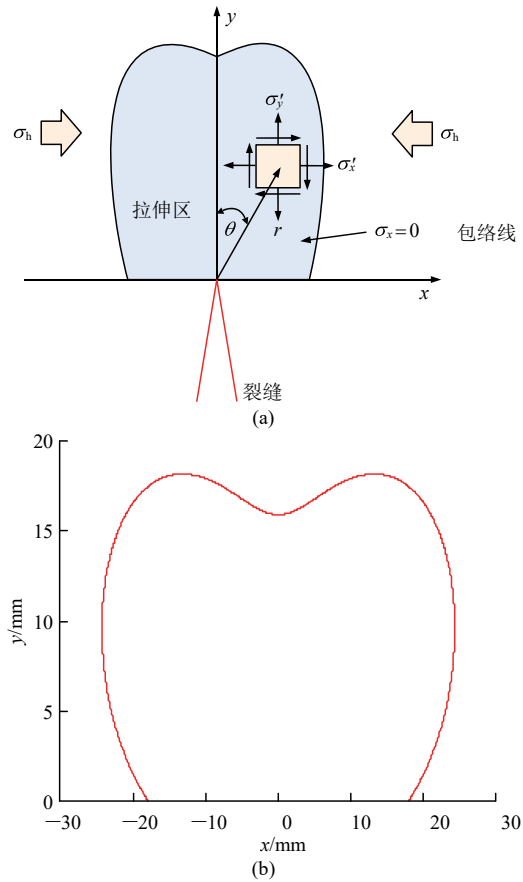


图 4 二维问题中拉压分区示意及其理论分界线

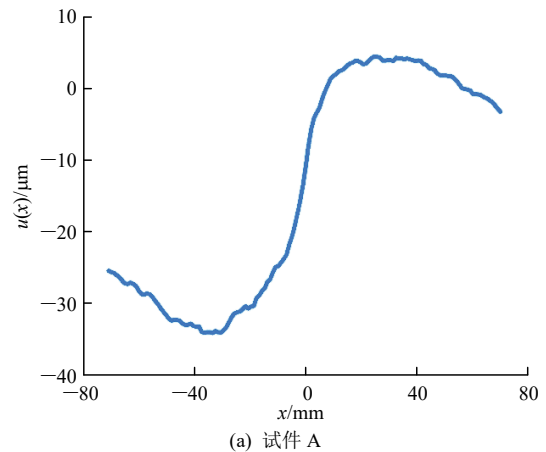
Fig.4 Boundary of tension zone in two-dimensional problems

$$r_t = \frac{K_I^2}{2\pi\sigma_h^2} \left[\cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \right]^2 \quad (4)$$

式中: r_t 为拉伸区边界至缝尖的距离。

由式(4)可知, 裂缝前端的拉伸区形态为一个单侧开口的封闭区域, 当 $K_I / \sigma_h = 1$ 时, 裂缝前端拉伸应力区轮廓理论范围如图 4(b)所示。

对有无远场压缩应力作用下的 I 型裂缝前端水平位移分布特征进行了提取, 发现无压缩应力时 I 型裂缝前端水平位移梯度均为正值, 如图 5(b)所示。表明水平方向缝尖诱导应力均为拉伸应力, 无远场



(a) 试件 A

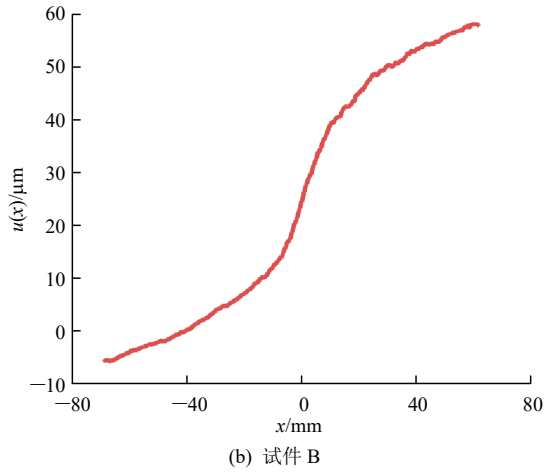


图 5 有无压缩应力作用下 I 型裂缝前端位移分布对比

Fig.5 Comparison of displacement distribution ahead of the mode-I fracture under or without compressive stress

压缩应力时裂缝前端并未出现拉压分界。而当存在压缩应力作用时, I 型裂缝前端水平位移梯度会出现正负交替, 如图 5(a)所示, 在常规的 I 型断裂试验中, 这是 DIC 很少监测到的现象, 表明水平方向存在拉压应力分区, 其水平位移曲线变化特征和抽象化的一维问题中位移分布特征(见图 3(b))相一致。

为直观研究裂缝前端的拉伸应力区的范围, 基于 DIC 应变监测结果对裂缝前端的应力分布进行反演。由于岩石的拉压分界线在断裂过程区之外, 因此拉压分界处尚未达到非线性屈服阶段, 所以本文采用线弹性平面应变条件下的胡克定律进行应力反演^[35], 计算式为

$$\begin{bmatrix} \sigma'_x \\ \sigma'_y \\ \tau'_{xy} \end{bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: σ'_y 为 y 方向弹性应力, τ'_{xy} 为剪切应力, E 为弹性模量, ν 为泊松比, ε_x 和 ε_y 分别为 x 和 y 方向应变, γ_{xy} 为剪切应变。

基于此方法反演的应力在线弹性区域是有效的, 因此可用于判断拉压分界处。图 6(a)为试件 A 起裂后裂缝前端水平位移场, 选取裂缝前端 M 和 N 两处位置作水平监测线, 计算得到 σ_x 应力曲线如图 6(b)所示, 发现监测线 M 位置处的应力 σ_x 出现正负交替。由式(3)可知, $\sigma_x > 0$ 的区域为拉伸应力区, $\sigma_x = 0$ 处为拉压分界处, 监测线 M 位置处左右两侧拉压临界点分别为 $x = -23.78$ 及 13.33 mm。监测线 N 位置处的应力 σ_x 为负, 意味着其所在位置均承受压缩应力。因此, 寻找拉压分区边界线的前提需要确定裂缝前端应力由正至负的相邻子集。由于

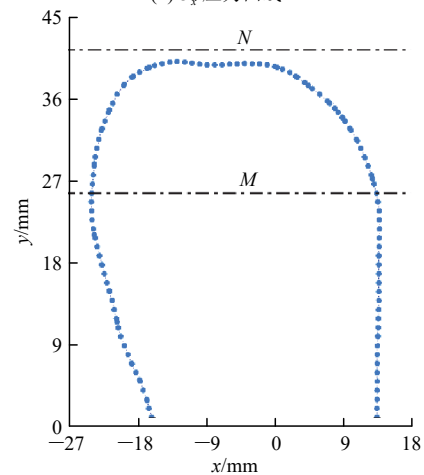
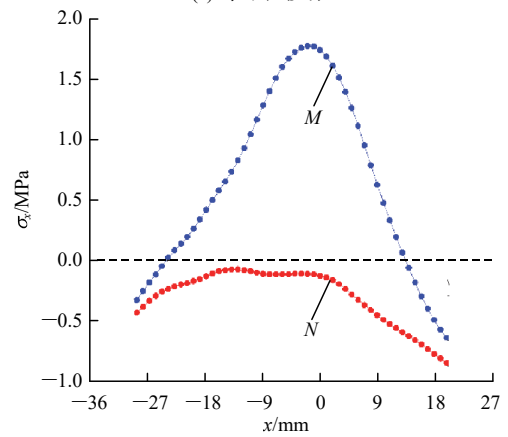
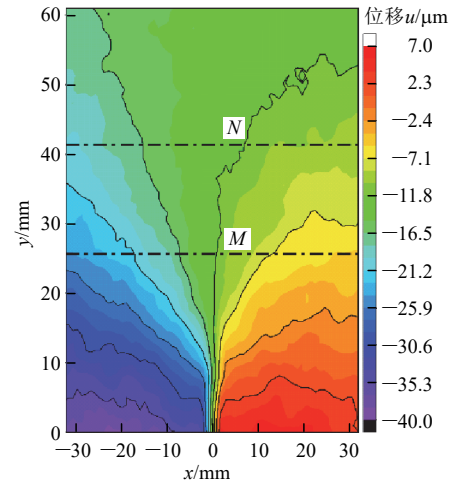


图 6 裂缝前端拉压分界轮廓的识别

Fig.6 Identification of the boundary of tension zone in front of the fracture tip

DIC 监测的每个子集之间存在物理间距, 需要通过子集间坐标位置确定裂缝前端拉压分界线。设 $\sigma_x = 0$ 直线上的相邻子集监测点坐标分别为: $(x_1, \sigma_x(x_1))$ 和 $(x_2, \sigma_x(x_2))$, 则拉压分界点的 x 方向坐标位置计算式为

$$x_c = -\sigma_x(x_1) \frac{x_1 - x_2}{\sigma_x(x_1) - \sigma_x(x_2)} + x_1 \quad (6)$$

式中: x_c 为拉压分界点在 x 方向坐标位置。

图 6(c) 为基于式(6)提取的裂缝前端的拉压分界线, 监测线 M 与拉压分界线交点处水平位置即为 $\sigma_x = 0$ 处, 而监测线 N 所处位置在拉伸区之外, 如图 6(b) 所示。由图 6(c) 发现拉压分界线为单侧开口的包络线。无远场应力作用的裂缝前端应力分布不存在拉压包络线, 说明远场压缩应力的作用是 I 型裂缝前端的存在拉压分区的关键。

3.2 裂缝起裂前后拉伸区变化特征

本文提出的基于 σ_x 应力场识别拉伸 - 压缩边界线的方法, 为准确识别裂缝前端拉伸区尺度及范围提供了依据。在基于 DIC 的水平位移场分析中, 如何确定真实裂缝尖端位置是关键。参考 Q. Lin 等^[36-38]利用 DIC 判断裂缝尖端所做的工作, 本文采用位移场变化特征对裂缝尖端位置进行识别^[36-38]。

为了明确水力裂缝前端拉伸区尺度分布规律, 分析了裂缝起裂前后的拉伸区范围。图 7 为裂缝起裂前不同时刻的位移场及拉伸区轮廓, 发现在裂缝起裂扩展前, 随着缝尖张开位移增大, 拉伸区轮廓不断增大。图 7 中, w 为裂缝尖端张开位移。由线弹性断裂力学可知, 在裂缝起裂前, 随着膨胀应力的增大, 缝尖应力强度因子 K_I 会增大, 由式(4)可

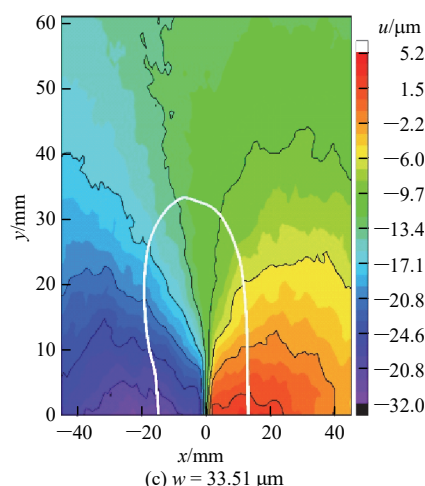
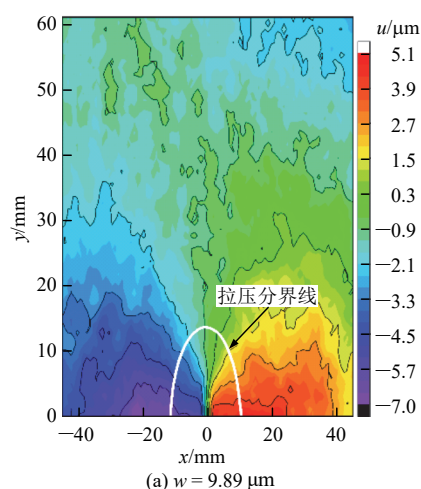


图 7 裂缝起裂前拉伸区分布及位移场特征

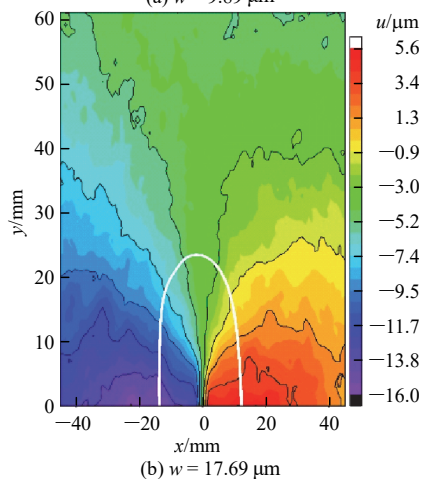
Fig.7 Characteristics of tension zone before fracture initiation

知, 拉伸区的范围及长度会随着 K_I 的增大而增大, 其中拉伸区长度 l_t 即为拉伸区在扩展方向的长度, 即 $\theta = 0$ 时的 l_t 表征。

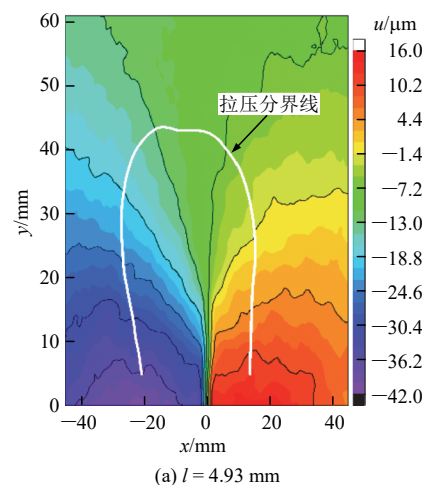
裂缝起裂后裂缝前端拉伸区尺度特征如图 8 所示 (图中, l 为裂缝扩展长度)。发现裂缝起裂后, 拉伸区范围和长度相对保持恒定, 当裂缝长度分别为 4.93, 10.84 及 16.75 mm 时, 裂缝前端拉伸区长度 l_t 分别为 37.78, 38.49 及 37.04 mm。裂缝起裂扩展



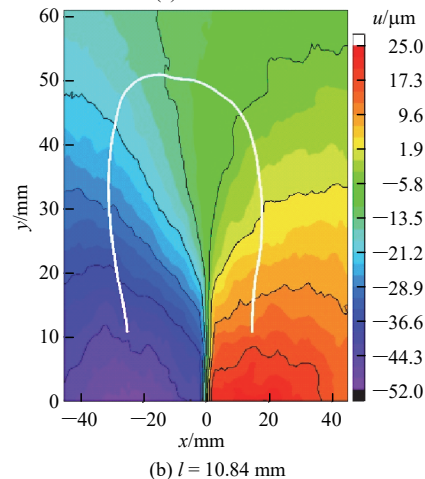
(a) $w = 9.89 \mu\text{m}$



(b) $w = 17.69 \mu\text{m}$



(a) $l = 4.93 \text{ mm}$



(b) $l = 10.84 \text{ mm}$

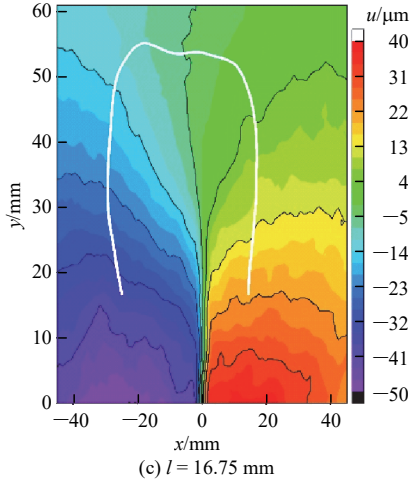


图 8 裂缝起裂后拉伸区分布及位移场特征

Fig.8 Characteristics of tension zone after fracture initiation

后, 裂缝前端应力强度因子 K_I 大小等于断裂韧性 K_{Ic} 值, 则裂缝前端拉伸区长度 l_t 可表征为

$$l_t = \frac{K_{Ic}^2}{2\pi\sigma_h^2} \quad (7)$$

由式(7)可知, 裂缝扩展阶段 l_t 保持恒定, 这与试验结果相一致。

在小范围屈服条件下, I 型裂缝尖端张开位移表征公式^[7]为

$$w = \frac{(1-\nu^2)K_I^2}{E(\sigma_t + \sigma_h)} \quad (8)$$

式中: σ_t 为抗拉强度。结合式(6)得到 l_t 与 w 的关系为

$$l_t = \frac{wE(\sigma_t + \sigma_h)}{2\pi\sigma_h^2(1-\nu^2)} \quad (9)$$

即 l_t 与 w 呈线性关系, 且与岩石的弹性模量, 泊松比, 抗拉强度及地应力有关。

图 9 为裂缝起裂前后拉伸区长度 l_t 与缝尖张开位移 w 的数据关系, 发现线性关系明显, 与理论推导结果一致(图中, COD 为裂缝尖端张开位移)。

3.3 地应力对扩展裂缝前端拉伸区尺度的影响

水平最小地应力 σ_h 对水力裂缝延伸有控制作用, 并且地应力大小随着深度及层位差异而变化, 在水力压裂中, 裂缝主要垂直于水平最小地应力 σ_h 扩展, 本部分重点讨论 σ_h 对拉伸区范围及尺度的影响。

由式(4)或(7)可知, 影响裂缝前端拉伸区尺度的因素是断裂韧性及地应力大小。岩石类材料作为一种静水压力相关的材料^[35], 其力学性质会受到围压影响, 比如, 围压会增加岩石的断裂韧性 K_{Ic} ^[16, 39], 且围压和断裂韧性之间在试验上具有线性关系^[16],

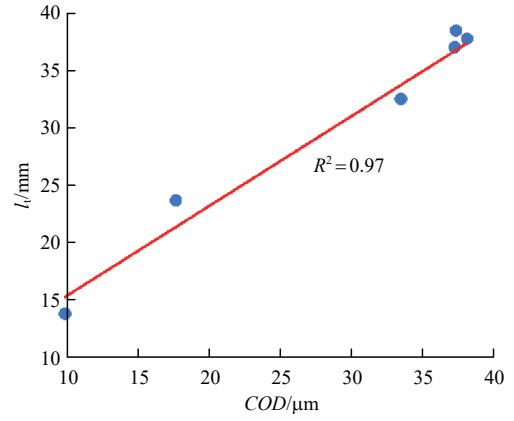


图 9 裂缝尖端张开位移与拉伸区长度关系

Fig.9 Relationship between the fracture tip opening displacement and tension zone length

试验关系的表征式为

$$K_{Ic} = a\sigma_h + b \quad (10)$$

式中: a , b 分别为线性关系参数, 其中 a 反映岩石断裂韧性的静水压力依赖性, b 为围压为 0 的断裂韧性。考虑围压影响下的裂缝前端拉伸区可表示为

$$r_t = \frac{1}{2\pi} \left(a^2 + \frac{b^2}{\sigma_h^2} + \frac{2ab}{\sigma_h} \right) \left[\cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \right]^2 \quad (11)$$

拉伸区长度可表示为

$$l_t = \frac{1}{2\pi} \left(a^2 + \frac{b^2}{\sigma_h^2} + \frac{2ab}{\sigma_h} \right) \quad (12)$$

由式(11), (12)可知, 远场地应力会影响裂缝前端的拉伸区范围, 随着地应力的增大拉伸区的范围会单调减小。式(12)为有下界的单调函数, 当地应力较大时, 裂缝前端的拉伸区范围变化幅度减小。参考既有文献中参数 a , b 试验测试结果^[16], 绘制了地应力影响下的拉伸区范围如图 10, 11 所示, 发现低应力下拉伸区范围较大, 高应力条件下拉伸区范围

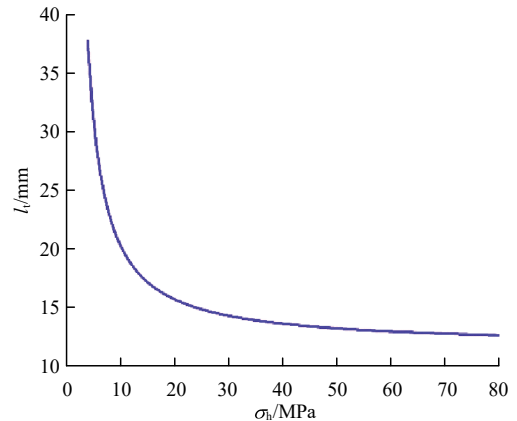


图 10 远场应力对裂缝前端拉伸区长度的影响

Fig.10 Influence of the in-situ stress on the length of tension zone

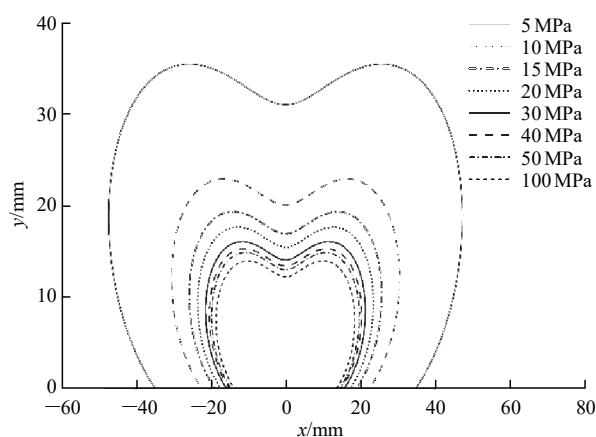


图 11 不同地应力下裂缝前端拉伸区范围

Fig.11 The tension zones ahead of the fracture under different in-situ stresses

更小, 且变化幅度较小, 表明高应力地层中水力裂缝尖端诱导拉伸应力区域较小。因此, 在天然裂缝发育的储层中, 深部超深部地层水力裂缝诱导天然裂缝的开启范围会更小, 表明低应力条件下压裂改造体积及天然裂缝波及范围更大。

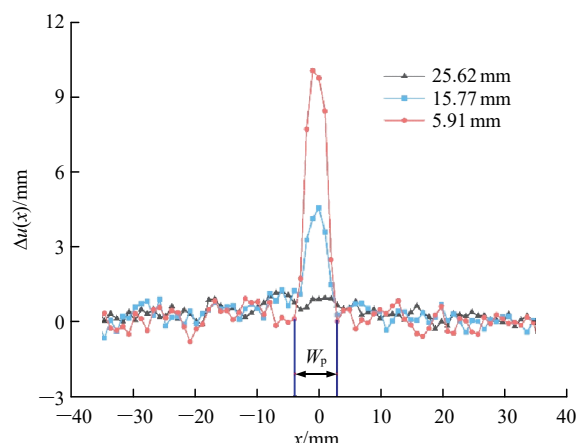
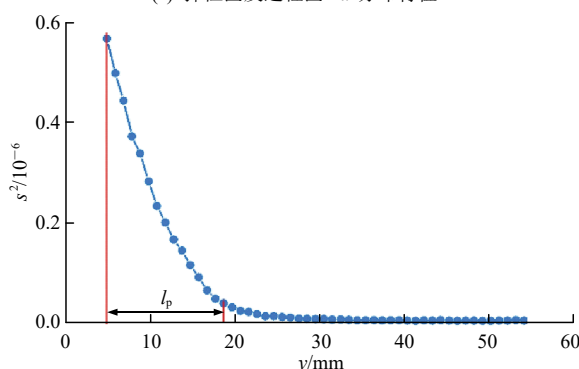
4 拉伸区内断裂过程区研究

4.1 拉伸区内的断裂过程区分界

在岩石类脆性材料中, 裂缝前端会发育有非线性断裂过程区(fracture process zone, FPZ)^[40], FPZ 主要表现为微裂缝聚集^[7, 37], 一般认为由拉伸应力导致^[7, 37, 41], 在力学机制上表现为非线性软化^[37, 41]。相比金属类材料裂缝前端的塑性区分布, 断裂过程区往往表现为条带状^[37], 在储层岩石中 FPZ 的长度往往与脆性有关^[42]。研究拉伸区内的断裂过程区有助于明确裂缝前端线弹性力学的适用范围^[21, 41]。

基于 DIC 识别断裂过程区时^[15, 36-38, 43], L. Chen 等^[37, 43]主要采用基于应变特征及位移特征^[36, 38]的断裂过程区识别方法。结合 L. Chen 等^[15, 36-38, 43]相关研究, 本文采用基于水平位移增量特征的过程区识别方法^[15], 水平位移增量增加表示位移非连续性强, 能反映断裂过程区内的非线性变形特征。

图 12(a)给出了裂缝前端不同位置处的拉伸区内水平位移的增量 Δu 分布。在弹性阶段(如 $y = 25.62$ mm), 水平位移相对均匀分布, Δu 变化不大; 在断裂过程区范围内(如 $y = 15.77$ 和 5.91 mm), Δu 的分布突变显著。参考 L. Chen 等^[15, 36-38]研究, Δu 的突变分布是过程区内位移增量的显著特征^[15], 其中过

(a) 弹性区及过程区 Δu 分布特征(b) 典型拉伸区内 s^2 -y 曲线图 12 拉伸区内的 Δu 分布特征及过程区长度的刻画Fig.12 Distributions of Δu and characterization of fracture process zone length in tension zone

程区的宽度(即 FPZ 在水平方向的尺寸)可以刻画如图 12(a)中的 W_p 所示。

基于水平位移增量的离散程度(方差 s^2) 在裂缝扩展方向的变化可刻画过程区长度^[15], 即 FPZ 在裂缝扩展方向的长度。根据过程区及弹性区内的 Δu 分布差异, s^2 趋近于恒定($s^2 \approx 0$)表示拉伸区内弹性位移, s^2 存在显著的连续变化时($s^2 > 0$)为过程区的位移特征。因此, 拉伸区内 Δu 的方差 s^2 在 y 方向的变化趋势可用于确定过程区长度^[15]。在图 12(b)中, 裂缝前端过程区长度 $l_p = 13.79$ mm。

依据拉伸区及过程区范围的识别方法, 图 13 给出了无内聚裂缝、裂缝前端拉伸区与过程区的位置关系。显然, 过程区的尺度要小于拉伸区的尺度。从图 13 可以直观发现, 远场应力作用下的 I 型裂缝前端存在拉伸区, 拉伸区外部为线弹性压缩应力区(实线分界线); 拉伸区内部存在弹性区与断裂过程区分界, 由内至外可分为拉伸断裂过程区和拉伸弹性区(点连线分界线)。确定过程区与弹性区分界对于明确线弹性断裂力学的应用范围具有重要意义。

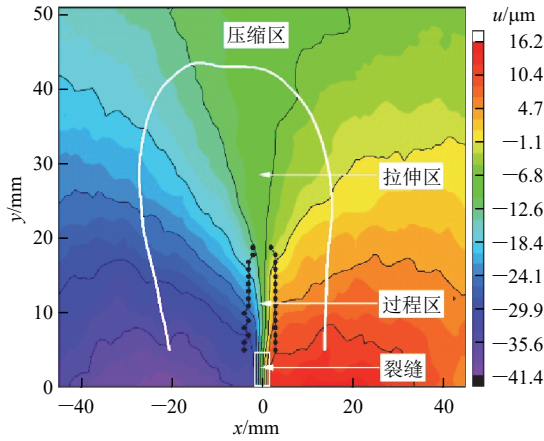


图 13 裂缝、过程区及拉伸区的位置关系

Fig.13 Location relation of fracture, process zone and tension zone

4.2 地应力对岩石断裂过程区指数的影响

节 3.3 讨论了地应力对拉伸区范围和长度的影响。为了研究地应力对拉伸区内弹性区与过程区分界的影响, 需要讨论断裂过程区长度的理论表征。

基于 Irwin 模型, 岩石类材料裂缝前端非线性断裂过程区长度关系可表征^[41]为

$$l_p = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_t} \right)^2 \quad (13)$$

考虑地应力作用的岩石类准脆性材料裂缝前端的过程区长度用下式修正:

$$l_p = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_t + \sigma_h} \right)^2 \quad (14)$$

为研究拉伸区内的 FPZ 发育程度, 本文提出了断裂过程区指数 η 概念, 即断裂过程区长度与拉伸区长度之比, 定义式为

$$\eta = \frac{l_p}{l_t} \quad (\sigma_h \neq 0) \quad (15)$$

结合式(7), (14)及(15), 可以得到考虑地应力影响下的过程区指数:

$$\eta = \left(\frac{\sigma_h}{\sigma_t + \sigma_h} \right)^2 \quad (\sigma_h \neq 0) \quad (16)$$

过程区指数能反应拉伸区内非线性断裂区域的发育占比, 并避免 K_{Ic} 的影响。由式(16)可知, η 仅与 σ_h 与 σ_t 有关。

由式(16)可知, 当抗拉强度保持不变时, 随着远场应力的增大, 过程区指数会单调增大(见图 14)。当地应力相同时, 抗拉强度较大的地层岩石裂缝前端过程区指数较小。在地层中, 地应力会随着深度的增加而增大, 因此, 超深地层岩石裂缝前端拉伸区内将以非线性断裂过程区发育为主导。

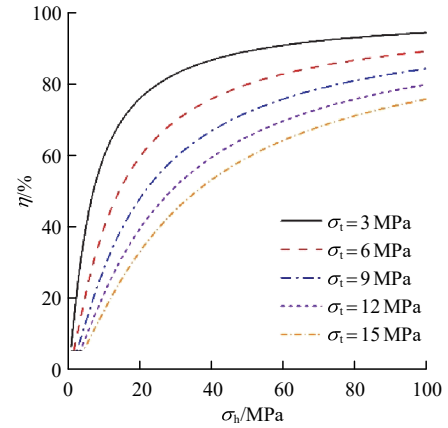


图 14 地应力对过程区指数的影响

Fig.14 Influence of in-situ stress on process zone index

5 结 论

本文采用可视化压裂试验装置对压缩应力作用下的 I 型裂缝前端拉压分区特征进行了研究, 讨论了裂缝前端拉伸区的分布特征及地应力对拉伸区和断裂过程区指数的影响, 所得结论如下:

(1) 基于数字图像相关法得到了远场压缩应力作用下 I 型裂缝前端拉压分区的试验证据。明确了影响拉伸区分布的断裂力学机制, 发现拉伸区长度和裂缝尖端张开位移呈线性正相关; 裂缝起裂前, 拉伸区的范围及长度随着缝尖应力强度因子的增大而增大; 裂缝起裂后, 拉伸区的范围及长度保持恒定。

(2) 明确了远场压缩应力对 I 型裂缝前端拉伸区范围的影响规律, 发现随着远场应力的增大, 拉伸区的范围及长度会减小, 压缩应力对拉伸区尺度范围的影响程度亦会降低。因此, 高应力地层中水力裂缝尖端诱导拉伸应力区域更小。

(3) 讨论了拉伸弹性区与拉伸断裂过程区的分界, 描述了拉伸区与过程区的位置关系。提出了断裂过程区指数的概念, 发现断裂过程区指数会随着地应力的增大而增大, 表明在深部地层中拉伸区内以非线性断裂为主导。

参考文献(References):

- [1] 程远方, 王桂华, 王瑞和. 水平井水力压裂增产技术中的岩石力学问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(14): 2 463 - 2 466.(CHENG Yuanfang, WANG Guihua, WANG Ruihe. Rock mechanics problems in horizontal well fracturing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(14): 2 463 - 2 466.(in Chinese))

- [2] 毕振辉, 王磊, 杨涵志, 等. 多簇水力裂缝起裂与扩展物理模拟试验系统研制及验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(11): 2 273 - 2 285.(BI Zhenhui, WANG Lei, YANG Hanzhi, et al. Development and verification of a physical simulation experiment system for initiation and propagation of multiple clusters of hydraulic fractures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(11): 2 273 - 2 285.(in Chinese))
- [3] 杨潇, 张广清, 刘志斌, 等. 压裂过程中水力裂缝动态宽度试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(9): 2 232 - 2 237.(YANG Xiao, ZHANG Guangqing, LIU Zhibin, et al. Experimental research on the variation of fracture width in hydraulic fracturing process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(9): 2 232 - 2 237.(in Chinese))
- [4] REINICKE A, RYBACKI E, STANCHITS S, et al. Hydraulic fracturing stimulation techniques and formation damage mechanisms—Implications from laboratory testing of tight sandstone-proppant systems[J]. *Geochemistry*, 2010, 70: 107 - 117.
- [5] 郭建春, 何颂根, 邓燕. 弹塑性地层水力压裂起裂模式及起裂压力研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(9): 2 494 - 2 500.(GUO Jianchun, HE Songgen, DENG Yan. Study of hydraulic fracturing initiation mode and initiation pressure of elastoplastic formation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(9): 2 494 - 2 500.(in Chinese))
- [6] 陈勉, 金衍, 张广清. 石油工程岩石力学基础[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011: 75 - 93.(CHEN Mian, JIN Yan, ZHANG Guangqing. *Petroleum rock mechanics*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011: 75 - 93.(in Chinese))
- [7] ATKINSON B K. Fracture mechanics of rock[M]. London: Academic Press, 1989: 12 - 14.
- [8] MARUYAMA T. Stress fields in the neighborhood of a crack[J]. *Bulletin of the Earthquake Research Institute, The University of Tokyo*, 1969, 47: 1 - 29.
- [9] ZHANG G, XING Y, WANG L. Comprehensive sandstone fracturing characterization: Integration of fiber Bragg grating, digital imaging correlation and acoustic emission measurements[J]. *Engineering Geology*, 2018, 246(August): 45 - 56.
- [10] ELICES M, GUINEA G V, GÓMEZ J, et al. The cohesive zone model: Advantages, limitations and challenges[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2001, 69(2): 137 - 163.
- [11] LIN Q, WAN B, WANG S, et al. Visual detection of a cohesionless crack in rock under three-point bending[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2019, 211: 17 - 31.
- [12] NIE Y, ZHANG G, XING Y, et al. Influence of water-oil saturation on the fracture process zone: a modified Dugdale-Barenblatt model[J]. *Energies*, 2018, 11(11), <https://doi.org/10.3390/en11112882>.
- [13] PAN R, ZHANG G, LIS, et al. Influence of the fracture process zone on fracture propagation mode in layered rocks[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 202: 108524.
- [14] 刘志斌, 张广清, 晏小和, 等. 裂纹前端低孔隙压力区对岩石断裂性质的影响[J]. 岩土力学, 2017, 38(增 2): 75 - 81.(LIU Zhibin, ZHANG Guangqing, YAN Xiaohe, et al. Effect of low pore pressure zone around crack front on rock fracture properties[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(Supp.2): 75 - 81.(in Chinese))
- [15] CHEN L, ZHANG G, ZOU Z, et al. Experimental observation of fracture process zone in sandstone from digital imaging[C]// *Proceedings of the 54th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*. Golden: OnePetro, 2020: 1 741.
- [16] 张广清, 陈勉, 金衍, 等. 围压下泥岩断裂韧性测试与解释方法[J]. 工程地质学报, 2004, 12(4): 431 - 435.(ZHANG Guangqing, CHEN Mian, JIN Yan, et al. Measurement and interpretation of shale toughness under confining pressures[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2004, 12(4): 431 - 435.(in Chinese))
- [17] 徐积刚, 华文, 董世明. 围压对巴西圆盘应力强度因子影响的数值分析[J]. 固体力学学报, 2014, (增 1): 147 - 152.(XU Jigang, HUA Wen, DONG Shiming. Numerical analysis of effects of confining pressure on the stress intensity factors for brazil disk[J]. *Chinese journal of solid mechanics*, 2014, (Supp.1): 147 - 152.(in Chinese))
- [18] ZHAO P, GRAY K E. Analytical and machine-learning analysis of hydraulic fracture-induced natural fracture slip[J]. *SPE Journal*, 2021, 26(4): 1 722 - 1 738.
- [19] CIEZOBKA J, COURTIER J, WICKER J. Hydraulic fracturing test site (HFTS)-project overview and summary of results[C]// *Proceedings of the SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference*. [S.l.]: OnePetro, 2018: D023S023R002.
- [20] 赵立强, 刘飞, 王佩珊, 等. 复杂水力裂缝网络延伸规律研究进展[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(4): 8.(ZHAO Liqiang, LIU Fei, WANG Peishan, et al. A review of creation and propagation of complex hydraulic fracture network[J]. *OIL and Gas Geology*, 2014, 35(4): 8.(in Chinese))
- [21] 陈磊, 张广清, 张敏, 等. 水力裂缝穿越非连续面扩展时的断裂过程研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(1): 159 - 170.(CHEN Lei, ZHANG Guangqing, ZHANG Min, et al. Propagation process of hydraulic fracture crossing an orthogonal discontinuity[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 44(1): 159 - 170.(in Chinese))
- [22] LU H, CARY P D. Deformation measurements by digital image correlation: implementation of a second-order displacement gradient[J]. *Experimental mechanics*, 2000, 40(4): 393 - 400.
- [23] CHEN L, ZHANG G, ZHANG M, et al. Experimental investigation on the slip nucleation of laminated shale during fracture propagation[J].

- Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56(5): 3 595 – 3 610.
- [24] 袁 媛, 潘鹏志, 赵善坤, 等. 基于数字图像相关法的含填充裂隙大理岩单轴压缩破坏过程研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(2): 339 – 351.(YUAN Yuan, PAN Pengzhi, ZHAO Shankun, et al. The failure process of marble with filled crack under uniaxial compression based on digital image correlation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(2): 339 – 351.(in Chinese))
- [25] 代树红, 马胜利, 潘一山. 数字图像相关法测定岩石 I – II 复合型裂纹应力强度因子[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(7): 1 362 – 1 368.(DAI Shuhong, MA Shengli, PAN Yishan. Evaluation of mixed-mode I – II stress intensity factors of rock utilizing digital image correlation method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(7): 1 362 – 1 368.(in Chinese))
- [26] HOSSAIN MM, RAHMAN MK, RAHMAN SS. Hydraulic fracture initiation and propagation: roles of wellbore trajectory, perforation and stress regimes[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2000, 27(3/4): 129 – 149.
- [27] 李庆辉, 李少轩. 超深层砂岩储层岩石力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(5): 948 – 957.(LI Qinghui, LI Shaoxuan. Experimental study on mechanical properties of ultra-deep sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(5): 948 – 957.(in Chinese))
- [28] 赵 波, 张广清, 唐梅荣, 等. 长期注水对致密砂岩油藏岩石力学性质影响机制研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(9): 3 344 – 3 350.(ZHAO Bo, ZHANG Guangqing, TANG Meirong, et al. Mechanism of the effect of long-term water injection on mechanical properties of tight sandstone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(9): 3 344 – 3 350.(in Chinese))
- [29] CHEN L, ZHANG G, LYU Y, et al. Visualization study of hydraulic fracture propagation in unconsolidated sandstones[C]// Proceedings of the 53rd U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. New York: OnePetro, 2019: 1 837.
- [30] DE SILVA V R S, RANJITH P G, PERERA M S A, et al. Investigation of the mechanical, microstructural and mineralogical morphology of soundless cracking demolition agents during the hydration process[J]. Materials Characterization, 2017, 130: 9 – 24.
- [31] 孙文进, 金爱兵, 王树亮, 等. 基于 DIC 的高温砂岩劈裂力学特性研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(2): 511 – 518.(SUN Wenjin, JIN Aibing, WANG Shuliang, et al. Study on sandstone split mechanical properties under high temperature based on the DIC technology[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(2): 511 – 518.(in Chinese))
- [32] BLABER J, ADAIR B, ANTONIOU A. Ncorr: Open-Source 2D digital image correlation matlab software[J]. Experimental Mechanics, 2015, 55(6): 1 105 – 1 122.
- [33] 王 博, 俞立平, 潘 兵. 数字图像相关方法中匹配及过匹配形函数的误差分析[J]. 试验力学, 2016, 31(3): 291 – 298.(WANG Bo, YU Liping, PAN Bing. On the error analysis of matched and overmatched shape function in digital image correlation method[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2016, 31(3): 291 – 298.(in Chinese))
- [34] ZHANG G Q, CHEN M. Dynamic fracture propagation in hydraulic re-fracturing[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2010, 70(3/4): 266 – 272.
- [35] CHEN H, YU T, WANG X, et al. Elasticity and plasticity[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2005: 115 – 121.
- [36] LIN Q, LABUZ J F. Fracture of sandstone characterized by digital image correlation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, 60: 235 – 245.
- [37] CHEN L, ZHANG G, ZOU Z, et al. The effect of fracture growth rate on fracture process zone development in quasi-brittle rock[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2021, 258(August): 108086.
- [38] LIN Q, WANG S, PAN P Z, et al. Imaging opening-mode fracture in sandstone under three-point bending: A direct identification of the fracture process zone and traction-free crack based on cohesive zone model[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 136(July): 104516.
- [39] FUNATSU T, SETO M, SHIMADA H, et al. Combined effects of increasing temperature and confining pressure on the fracture toughness of clay bearing rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(6): 927 – 938.
- [40] 傅帅旻, 李海波, 李晓锋. 基于 DIC 方法与声发射的花岗岩断裂过程区范围研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(12): 2 497 – 2 508.(FU Shuaiyan, LI Haibo, LI Xiaofeng. Research on the range of fracture process zone of granite based on DIC and acoustic emission[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(12): 2 497 – 2 508.(in Chinese))
- [41] BAŽANT Z P, PLANAS J. Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials[M]. Florida: CRC Press, 1998: 13 – 16.
- [42] GAO Y, DONG Y, CHEN L, et al. An improved model for evaluating the brittleness of shale oil reservoirs based on dynamic elastic properties: a case study of lucaogou formation, Jimusar sag[J]. Geofluids, 2022: 6711977.
- [43] DUTLER N, NEJATI M, VALLEY B, et al. On the link between fracture toughness, tensile strength, and fracture process zone in anisotropic rocks[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2018, 201(5): 56 – 79.