

层理对页岩水力裂缝扩展的影响研究

衡 帅¹, 杨春和^{1,2}, 郭印同¹, 王传洋¹, 王 磊¹

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;

2. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400041)

摘要:层理、裂隙等结构面的存在是实现页岩气藏储层体积改造的前提。为分析层理对页岩水力裂缝扩展的影响,在各向异性材料裂纹尖端应力场分布特征的基础上,开展切口与层理呈不同方位的圆柱形试样三点弯曲试验,研究页岩断裂韧性的各向异性特征,并揭示其断裂机制的各向异性,进而根据真三轴条件下页岩水力裂缝的延伸规律,探讨了层理在页岩网状压裂缝形成过程中的重要作用,结果表明:(1)各向异性材料裂纹尖端的应力场和位移场不仅由应力强度因子决定,还与材料的弹性常数有关;(2)切口与层理呈 crack-arrester, crack-divider 和 crack-splitter 三种方位时,页岩断裂韧性在 crack-arrester 时最大, crack-splitter 时最小,各向异性显著,而层理面开裂和断裂路径偏移是引起断裂韧性各向异性的主要原因;(3)页岩层理的弱胶结作用使其断裂韧性较小,阻止裂纹失稳扩展的能力较弱,而在垂直层理方向,断裂韧性较大,阻止裂纹扩展的能力较强,当水力裂缝垂直层理扩展时,在弱层理面处会发生分叉、转向,且在继续延伸的过程中会进一步沟通天然裂缝或弱层理面而形成复杂的裂缝网络,达到体积压裂。研究结果可为深入认识页岩气藏储层体积压裂形成条件及机制提供一定参考。

关键词:岩石力学;页岩;层理;水力压裂;裂缝扩展;各向异性;断裂韧性

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2015)02-0228-10

INFLUENCE OF BEDDING PLANES ON HYDRAULIC FRACTURE PROPAGATION IN SHALE FORMATIONS

HENG Shuai¹, YANG Chunhe^{1,2}, GUO Yintong¹, WANG Chuanyang¹, WANG Lei¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. State Key Laboratory for Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The existence of bedding planes, cracks and other structural planes is the precondition of stimulated reservoir volume of shale formations. In order to analyze the effect of bedding planes on propagation of hydraulic fractures in shale formations, three-point bending tests of notched cylindrical specimens with different bedding orientations were carried out, based on the distribution of stress field around a crack tip of anisotropic materials. The mechanisms of anisotropic failure were revealed through the analysis of the anisotropy of Mode-I fracture toughness. The important role of bedding planes in the formation of fracture network was discussed according to the extension of hydraulic fractures in shale formations under true triaxial stress conditions. The results show that the stress and displacement fields around a crack tip of anisotropic materials depend not only on the stress intensity factor but also on the elastic constants. The notable anisotropy of Mode-I fracture toughness of shale is observed with the fracture toughness to be the largest when the pre-crack is crack-arrester orientated and to be the lowest

收稿日期: 2014-04-14; **修回日期:** 2014-06-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51104144); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB226701); 中石化科技部项目(P11015)

作者简介: 衡 帅(1985-), 男, 2009年毕业于中国矿业大学工程力学专业, 现为博士研究生, 主要从事页岩气水力压裂开采过程中的岩石力学问题方面的研究工作。E-mail: shheng@yeah.net

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2015.02.002

when the pre-crack was crack-splitter orientated. The cracking of weak bedding planes and the deflection of fracture path were found to be the main mechanisms led to the strong anisotropy of Mode-I fracture toughness of shale. Bedding planes are weak in preventing crack propagation due to smaller fracture toughness induced by weak cementation, while the matrix is strong in preventing crack propagation due to much larger fracture toughness. Branching and re-orientation of hydraulic fractures in bedding planes and then interconnecting with natural fractures or bedding planes are found to be the main mechanisms of the formation of fracture network when the fractures extending perpendicular to the bedding planes.

Key words : rock mechanics ; shale ; bedding planes ; hydraulic fracturing ; fracture propagation ; anisotropy ; fracture toughness

1 引言

页岩气是指主体位于暗色泥页岩或高碳泥页岩中、以吸附或游离态为主要存在方式的非常规天然气，其分布广泛，开采潜力巨大，是常规石油、天然气的理想接替。但是，页岩气的成藏条件、储集空间、渗流规律及开发模式均有其自身特点，特别是储层的低孔和超低基质渗透率，给其有效开采带来了巨大的困难和挑战^[1-2]。北美地区页岩气商业开发的经验表明，水平井技术和水力压裂技术是获得工业气流的关键^[3]。而以“体积改造”为目的的增产措施又是页岩气压裂技术的核心。我国页岩气资源虽储量丰富，开采潜力巨大，但尚处于起步阶段，仍有许多关键技术亟待解决。因此，借鉴北美页岩气成功开采经验，加快技术研发，尽快形成适合我国页岩气藏储层特征的开采技术，对加快我国页岩气勘探开发步伐具有重要的现实意义。

以“体积压裂”为目的的页岩气藏储层改造，由于形成了复杂的裂缝网络系统，大大增加了裂缝表面与基质体的接触面积，从而加大了储层渗透率，提高了页岩气的初始产量和最终采收率。然而，虽然影响页岩压裂网络形态的因素较多，主要分为储层地质条件、施工因素和工艺技术等^[4]，但储层地质条件是实现页岩气藏体积改造的关键。页岩气藏储层岩性以暗色页岩为主，外观具有明显的层理构造，且有层段微裂隙较发育。层理面胶结强度较低，是地层中的薄弱面，往往会先于页岩基质体破坏，这可能会使水力裂缝易于沿层理面延伸，而影响其在主应力场作用下的扩展规律。因此，了解层理面影响下页岩断裂韧性的各向异性特征及断裂裂缝延伸特点、水力裂缝空间形态对分析页岩水力裂缝扩展规律，进而认识其网络裂缝的形成机制显得

尤为必要。

目前，国内外对结构面等非连续体对岩体水力裂缝扩展的影响已进行了较多研究。A. A. Daneshy^[5]认为地层中天然裂缝对水力裂缝扩展的影响是局部的，不能彻底改变水力裂缝的延伸方位；T. L. Blanton^[6-7]通过含天然裂缝页岩的室内三轴水力压裂试验，研究了天然裂缝对水力裂缝扩展的影响，认为只有在高应力差和大逼近角情形下水力裂缝才会穿过天然裂缝继续扩展，而多数情况下水力裂缝会在天然裂缝处止裂或转向；N. R. Warpinski 等^[8-9]研究了水力裂缝穿越隔层的条件和行为，认为界面的剪应力对裂缝的扩展起着重要作用，裂缝可在界面处穿越隔层或沿界面扩展，而水力裂缝能否穿越界面主要取决于垂向压应力大小和界面的性质；S. C. Blair 等^[10]认为水力裂缝垂直非连续体扩展时，流体首先会沿界面渗透，在界面上渗透一定距离后水力裂缝会突破界面沿原方向继续扩展；A. A. Daneshy^[11]对水力裂缝在层状地层中的扩展规律进行了理论和试验研究，指出强界面不会阻止裂缝的扩展，而弱界面阻止裂缝扩展的规律不会随界面两侧地层性质的变化而改变。而国内方面的研究相对较少，陈治喜等^[12]通过层状介质中水力裂缝垂向扩展的数值模拟，分析了地应力、断裂韧性对裂缝高度的影响，指出地层断裂韧性对缝高有明显的止裂作用；赵海峰等^[13]采用岩石断裂力学方法，分析了水力裂缝与地层界面相交时水力裂缝沿缝高方向可能发生的止裂、转向和穿过界面的 3 种扩展行为；王素玲等^[14]用扩展有限元中的分离裂缝模型研究了裂缝在砂-泥岩界面上的扩展过程，指出裂缝扩展形态主要受界面层力学性质的影响。由此可见，目前国内外对层理等结构面对岩石水力裂缝扩展规律影响的研究还很有限，鉴于层理在页岩水力压裂网状裂缝形成中的重要作用，开展层理对页岩水力

裂缝扩展规律影响的研究具有重要意义。

本文在各向异性材料裂纹尖端应力场分布特征的基础上,分析了层理面影响下页岩 I 型断裂韧性的各向异性特征,从断裂机制的各向异性上揭示了断裂韧性各向异性的原因,并根据张拉裂纹的失稳扩展准则,进一步分析了层理对页岩水力裂缝扩展的影响。

2 各向异性材料裂纹尖端应力场

页岩地层层理发育,其力学性质在垂直层理方向为各向异性,平行层理方向为各向同性,可将其视为横观各向同性材料^[15]。因此,在分析页岩水力裂缝空间形态及延伸规律时应考虑地层中弱胶结层理对水力裂缝扩展的影响。

设 a_{ij} 为各向异性材料的柔度系数,则平面应力状态下应力与应变的关系为

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 \\ a_{12} & a_{22} & 0 \\ 0 & 0 & a_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (1a)$$

其中,

$$\left. \begin{aligned} a_{11} &= \frac{1}{E_1}, a_{12} = -\frac{\nu_{21}}{E_1} = -\frac{1}{\nu_{12}E_{12}} \\ a_{22} &= \frac{1}{E_2}, a_{66} = \frac{1}{G_{12}} \end{aligned} \right\} \quad (1b)$$

式中: E_1 和 E_2 分别为 2 个主方向的弹性模量; E_{12} 为该平面的弹性模量; G_{12} 为该平面的剪切模量; ν_{ij} 为泊松比($i=1, 2; j=1, 2$), 定义为 j 方向作用正应力 σ_j 而无其他应力分量时, i 方向应变与 j 方向应变之比的负值。

对平面应变问题,应用 b_{ij} 来代替 a_{ij} , 其关系式为

$$\left. \begin{aligned} b_{ij} &= a_{ij} - \frac{a_{i3}a_{j3}}{a_{33}} \\ a_{i3} &= -\frac{\nu_{2i}}{E_i} = -\frac{1}{\nu_{i3}E_3} \\ a_{33} &= \frac{1}{E_3} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: E_3 为垂直该平面方向的弹性模量。

图 1 为各向异性材料裂纹尖端示意图, 图中, A 为裂纹尖端, r 为局部坐标系 $x-A-y$ 下任意一点在

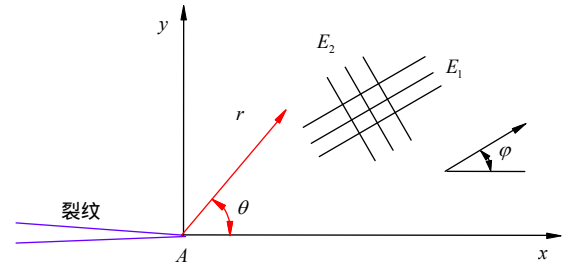


图 1 各向异性材料裂纹尖端示意图

Fig.1 Diagram of crack tip of anisotropic materials

相应极坐标系下的极径, θ 为极角, φ 为材料主方向 1 与局部坐标系下 x 方向的夹角。长度为 $2a$ 的裂纹的尖端应力场和尖端位移场计算式^[16]分别为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \operatorname{Re} \left[\frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \left(\frac{\lambda_2}{\psi_2} - \frac{\lambda_1}{\psi_1} \right) \right] + \\ &\quad \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \operatorname{Re} \left[\frac{1}{\lambda_1 - \lambda_2} \left(\frac{\lambda_2^2}{\psi_2} - \frac{\lambda_1^2}{\psi_1} \right) \right] \\ \sigma_y &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \operatorname{Re} \left[\frac{1}{\lambda_1 - \lambda_2} \left(\frac{\lambda_2}{\psi_2} - \frac{\lambda_1}{\psi_1} \right) \right] + \\ &\quad \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \operatorname{Re} \left[\frac{1}{\lambda_1 - \lambda_2} \left(\frac{1}{\psi_2} - \frac{1}{\psi_1} \right) \right] \\ \tau_{xy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \operatorname{Re} \left[\frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \left(\frac{1}{\psi_1} - \frac{1}{\psi_2} \right) \right] + \\ &\quad \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \operatorname{Re} \left[\frac{1}{\lambda_1 - \lambda_2} \left(\frac{\lambda_1}{\psi_1} - \frac{\lambda_2}{\psi_2} \right) \right] \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} u &= K_I \sqrt{\frac{2r}{\pi}} \operatorname{Re} \left[\frac{1}{\lambda_1 - \lambda_2} (\lambda_1 p_2 \psi_2 - \lambda_2 p_1 \psi_1) \right] + \\ &\quad K_{II} \sqrt{\frac{2r}{\pi}} \operatorname{Re} \left[\frac{1}{\lambda_1 - \lambda_2} (p_2 \psi_2 - p_1 \psi_1) \right] \\ v &= K_I \sqrt{\frac{2r}{\pi}} \operatorname{Re} \left[\frac{1}{\lambda_1 - \lambda_2} (\lambda_1 q_2 \psi_2 - \lambda_2 q_1 \psi_1) \right] + \\ &\quad K_{II} \sqrt{\frac{2r}{\pi}} \operatorname{Re} \left[\frac{1}{\lambda_1 - \lambda_2} (q_2 \psi_2 - q_1 \psi_1) \right] \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中,

$$\left. \begin{aligned} p_i &= a'_{11} \lambda_i^2 + a'_{12} - a'_{16} \lambda_i \quad (i=1, 2) \\ q_i &= a'_{12} \lambda_i + \frac{a'_{22}}{\lambda_i} - a'_{26} \quad (i=1, 2) \\ \psi_i &= \sqrt{\cos \theta + \lambda_i \sin \theta} \quad (i=1, 2) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中：Re 为取复变函数的实部； K_I 为材料 I 型裂纹的应力强度因子(MPa · m^{1/2})； K_{II} 为材料 II 型裂纹的应力强度因子(MPa · m^{1/2})； r 为距裂纹尖端的距离(极径)； λ_1 和 λ_2 为与坐标系有关的材料特征参数，且与各向异性材料特征方程的 2 个根 μ_1 和 μ_2 有关； a'_{ij} 为局部坐标系 $x-A-y$ 下的柔度系数，对各向异性材料，其与主方向下的柔度系数 a_{ij} 的关系^[17] 为

$$a'_{11} = a_{11} \cos^4 \varphi + (2a_{12} + a_{66}) \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi + a_{22} \sin^4 \varphi \tag{6a}$$

$$a'_{22} = a_{11} \sin^4 \varphi + (2a_{12} + a_{66}) \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi + a_{22} \cos^4 \varphi \tag{6b}$$

$$a'_{12} = a_{12} + (a_{11} + a_{22} - 2a_{12} - a_{66}) \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi \tag{6c}$$

$$a'_{66} = a_{66} + 4(a_{11} + a_{22} - 2a_{12} - a_{66}) \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi \tag{6d}$$

$$a'_{16} = [a_{11} \cos^2 \varphi - a_{22} \sin^2 \varphi - (2a_{12} + a_{66}) \cos(2\varphi) / 2] \sin(2\varphi) \tag{6e}$$

$$a'_{26} = [a_{11} \sin^2 \varphi - a_{22} \cos^2 \varphi + (2a_{12} + a_{66}) \cos(2\varphi) / 2] \sin(2\varphi) \tag{6f}$$

各向异性材料的特征方程^[18]为

$$a_{11} \mu^4 + (2a_{12} + a_{66}) \mu^2 + a_{22} = 0 \tag{7}$$

经证明^[18]，式(7)不存在实根，只有共轭的 2 对不等的复根 $\mu_1, \bar{\mu}_1$ 和 $\mu_2, \bar{\mu}_2$ ，且 $\mu_k (k = 1, 2)$ 为各向异性问题的复参数，只取决于材料的弹性常数。

λ_k 与 μ_k 的关系^[18]为

$$\lambda_k = \frac{\mu_k \cos \varphi + \sin \varphi}{\cos \varphi - \mu_k \sin \varphi} \tag{8}$$

由式(3)知，各向异性材料裂纹尖端应力场的强度也由应力强度因子决定，这与各向同性材料相同，但应力分布和位移场不仅与 θ 有关，还与各向异性材料的弹性常数有关，这与各向同性材料不同。

各向异性材料中，各向异性不仅影响裂纹尖端的应力和位移分布，还影响着应力场和位移场的强度，即影响着应力强度因子的大小，而这可通过能反映裂纹失稳扩展能力的断裂韧性得以体现^[19-20]。

在一定的地层特性(原生裂隙、分布特征、应力状况)条件下，特别是在最大和最小地应力相差较大，原生裂隙方位与主应力成 30° ~ 60°，且注入低黏度流体时，地层容易沿原生裂隙诱发剪切破裂，

而一般情况下，地层的张拉破裂更为容易^[21]。然而，本文在讨论层理对页岩水力裂缝扩展的影响时，由于层理发育的页岩试样内微裂缝基本都沿主应力方向，且地应力差异较小，地层沿天然裂缝等发生剪切破裂的可能性较小，主要为地层的张拉破裂，故在分析水力裂缝扩展时，假定水力裂缝的延伸主要为高压水作用下张拉裂纹的失稳扩展，即把水力裂缝的延伸假定为 I 型裂纹的失稳扩展问题，而暂不考虑 II 型裂纹的失稳扩展。因此，研究页岩断裂韧性的各向异性时，仅先考虑 I 型裂纹的断裂韧性。

3 页岩断裂韧性的各向异性

式(3)中，当 $\varphi = 0$ 和 90 时，I 型裂纹应力强度因子的临界值分别为主方向 1 和 2 的断裂韧性。当 1, 2 方向分别为沿层理和垂直层理方向时，其断裂韧性可通过相关的力学试验测定，进而可根据断裂韧性的各向异性特征分析层理对页岩水力裂缝扩展的影响。

3.1 试验方案

岩石断裂韧性的测试较一般力学参数复杂和困难，本文采用直切口的圆柱形试样，通过三点弯曲试验测定页岩的断裂韧性。对于可视为横观各向同性岩体的页岩，当测试其断裂韧性时，应考虑试样切口和层理的相对方向。图 2 给出了试样切口与层理的三种典型的相对关系，图中虚线表示层理面。图 2(a)和(b)中切口平面垂直于层理，分别用代表其相对方位的 crack-arrester 和 crack-divider^[22]来表征裂纹扩展至层理时可能出现的 2 种典型现象，即裂纹在层理处止裂而层理继续开裂的 crack-arrester 方位和裂纹被优先开裂的层理分割为多裂纹的 crack-divider 方位；而图 2(c)中切口平面平行于层理面的方位称为 crack-splitter^[22]，其表征裂缝沿层理直接扩展延伸时的切口方位。

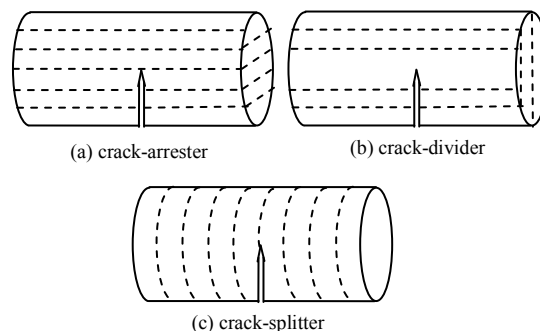


图 2 试样切口与层理的相对方位

Fig.2 Crack orientations with respect to bedding planes in straight notched three-point bend specimens

试验所用岩芯取自重庆彭水页岩气区块储层自然延伸的石柱县漆辽海相志留统龙马溪组露头页岩。该地层为黑色~深黑色碳质页岩，薄层~中厚层平行交互，层理面发育，层间黏结力小且易风化开裂；层理面波痕发育，可见丰富的笔石、放射虫等化石；含星散状黄铁矿、黄铁矿结核及石英、方解石充填裂隙矿脉。清除表面风化层后，选取底部扰动相对较小的页岩。

加工好的页岩试样直径约 50 mm，长度 200~240 mm，切口先用金刚石锯片加工，深度为 17~20 mm，宽度为 2~4 mm，然后再用单面刀片将切槽根部刻画尖锐。在切口加工前事先剔除声波异常的试样，加工后共 3 组 15 个试样。

三点弯曲试验是在美国产 MTS 815 Flex Test GT 岩石力学测试系统的专用三点弯曲试验架上进行，试验架如图 3 所示。试验过程中，用夹式引伸计(精度为 0.001 mm)测量切口张开位移，且加载时采用切口张开位移速率控制模式，控制速率为 0.03 mm/min，这样可以排除试验机及加载滚轴和试样接触部位变形的影响。

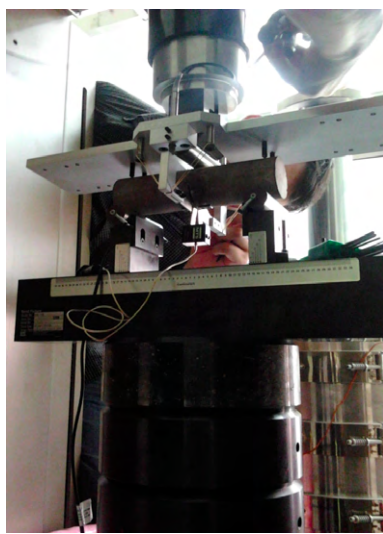


图 3 三点弯曲试验架

Fig.3 Device of three-point bending testing

3.2 试验结果及分析

根据三点弯曲梁测试材料断裂韧性的原理知，断裂韧性与材料本身的物理力学参数无关，而仅与施加于试样上的荷载、试样及裂纹几何形状和尺寸有关。根据规程^[23]，断裂韧性 K_{IC} 的计算公式为

$$K_{IC} = 0.25 \frac{S_d}{D} \frac{P_{max}}{D^{1.5}} y \left(\frac{a}{D} \right) \quad (9)$$

其中，

$$y \left(\frac{a}{D} \right) = \frac{12.75 \left(\frac{a}{D} \right)^{0.5} \left[1 + 19.65 \left(\frac{a}{D} \right)^{4.5} \right]^{0.5}}{\left(1 - \frac{a}{D} \right)^{0.25}} \quad (10)$$

式中： a 为直切口深度； D 为试样直径； S_d 为 2 支撑点间的距离，本次试验中保持恒定为 160 mm； P_{max} 为断裂破坏时荷载大小。

根据式(9)计算的 crack-arrester，crack-divider 和 crack-splitter 三种方位下页岩的断裂韧性如表 1 所示。

表 1 页岩断裂韧性测试结果

Table 1 Test results of fracture toughness of shale

切口与层理 相对方位	D/mm	a/mm	切口宽 度 t/mm	P_{max}/kN	断裂韧性/ ($MPa \cdot m^{1/2}$)	断裂韧性平均值/ ($MPa \cdot m^{1/2}$)
crack- arrester	50.58	18.6	2.70	1.807	1.202	1.146
	50.91	22.78	2.72	1.393	1.165	
	50.30	18.42	2.80	1.680	1.128	
	51.01	16.10	2.76	2.032	1.148	
	50.86	18.80	3.00	1.650	1.088	
crack- divider	51.08	19.90	2.72	1.437	0.993	0.957
	49.90	19.50	2.94	1.236	0.909	
	50.31	19.30	2.85	1.269	0.896	
	50.42	18.47	2.78	1.375	0.918	
	49.86	18.80	2.73	1.512	1.071	
crack- splitter	50.70	17.86	2.74	1.082	0.685	0.566
	50.64	17.36	2.82	0.994	0.615	
	49.62	17.80	2.74	0.834	0.589	
	49.51	16.78	2.87	0.669	0.434	
	50.05	18.34	2.79	0.748	0.509	

由表 1 可知，在切口与层理呈 crack-arrester，crack-divider 和 crack-splitter 三种方位时，crack-arrester 时页岩断裂韧性最大，crack-splitter 时断裂韧性最小，且最大值与最小值之比为 2.025，各向异性较明显。而 crack-divider 的断裂韧性居于二者之间，略小于 crack-arrester 的值，但远大于 crack-splitter 的值。这说明页岩层理面阻止裂缝扩展的能力较弱，裂缝在页岩地层中沿层理较易扩展延伸，而当主裂缝垂直于层理时，裂缝以 crack-arrester 方式扩展延伸时所受到的阻力最大，可能会发生转向现象。

图 4 为切口与层理呈不同方位时页岩三点弯曲试验后的典型断面形态图。由图 4 可知，虽然 3 种切口与层理方位的页岩试样均在预制裂缝处开始宏观断裂，但裂纹的扩展路径和平直程度却差别较大，具体表现为：

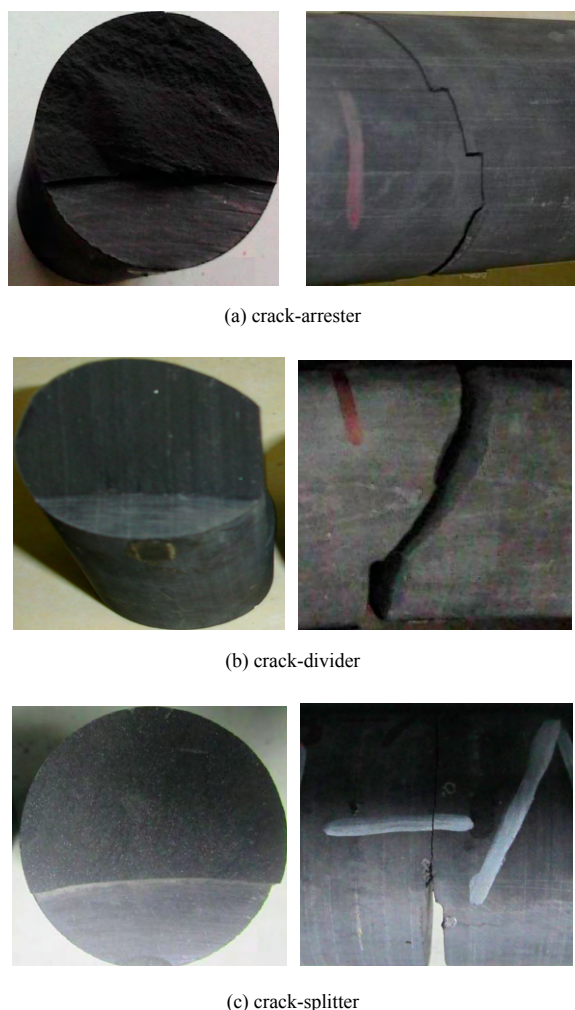


图 4 切口与层理呈不同方位时页岩典型断面形态图
 Fig.4 Typical failure patterns after fracture of notched shale specimens with different bedding orientations

(1) 切口与层理呈 crack-arrester 方位：裂纹在预制裂缝的尖端起裂，并沿该裂缝方向继续扩展，在扩展延伸的过程中，由于层理面的开裂，裂纹发生垂直转向后沿层理方向继续扩展；由于在荷载作用下，裂纹尖端的张拉应力平行于裂纹扩展方向，裂纹继续发生垂直转向，沿近似平行切口方向扩展；而在继续扩展过程中，由于层理面开裂和荷载作用，裂纹又发生 2 次垂直转向，而在整个扩展过程中裂纹不断发生的断裂路径偏移，使试样的断裂路径较弯曲。破裂后的试样形成了与预制裂缝呈一定夹角的阶梯型扩展路径，出现了断裂路径的偏移，断裂面也大致呈不规则的阶梯状倾斜面。

(2) 切口与层理呈 crack-divider 方位：裂纹在预制裂缝的尖端起裂，但起裂方向与预制裂缝有一定夹角，该夹角使裂纹在扩展初期即偏离预制裂缝；由于裂纹尖端张拉应力的方向沿试样轴向，裂纹在

扩展的过程中不断缓慢地发生转向，偏离角度逐渐减小；在靠近试样表面时，裂纹已几乎转向为近似平行于预制裂缝方向，而在继续扩展过程中，垂直止裂于试样表面而使试样完全断裂破坏。破裂后的试样也形成了与预制裂缝呈一定夹角的弧形扩张路径，且出现了断裂路径由陡至缓的缓慢偏移；断裂面相对光滑，没有观察到层理开裂现象，但页岩的层状沉积现象较明显。

(3) 切口与层理呈 crack-splitter 方位：裂纹在预制裂缝的尖端起裂，并沿该裂缝方向继续延伸扩展，直至完全断裂，没有出现断裂路径的偏移。断裂后的试样形成了较平直的扩展路径，扩展路径为层理面，且试样几乎断裂为相等的 2 个部分；断裂面为页岩层理面，较平整光滑，且能观察到笔石和放射虫等化石。

由此可知，页岩断裂韧性的的大小不仅受裂纹扩展路径的影响，还受到层理面开裂的影响。为进一步分析页岩断裂韧性各向异性的原因，深入探究其断裂机制的各向异性是至关重要的。

3.3 断裂机制的各向异性

通过对页岩三点弯曲断裂时切口与层理的相对方位、裂纹扩展路径和断裂面形态进行分析可以发现，断裂韧性的各向异性主要是由不同层理方位页岩裂纹在扩展过程中韧化效应的各向异性引起的。而对页岩这种层状沉积材料，在断裂过程中，其主要的韧化机制有：弱层理面开裂、断裂路径偏移和分层剥离。在页岩断裂时，一般不止一种韧化机制存在，而当这 3 种韧化机制同时存在时，将意味着较强的断裂韧性。对本文试验测试的 3 种切口与层理面方位试样，均没有观察到层理面的分层剥离现象，但层理面的开裂和断裂路径的偏移却引起了断裂韧性的各向异性。crack-arrester 方位试样在裂纹扩展过程中出现的层理面开裂和断裂路径偏移是其断裂韧性最大的原因；crack-divider 方位试样在裂纹扩展过程中出现的断裂路径偏移是引起其断裂韧性较高的主要原因；而 crack-splitter 方位试样在断裂过程中主要为裂纹沿层理面的扩展，没有任何一种韧化机制，且层理面的胶结强度较低，阻止裂纹扩展的能力较弱，因此，该方位页岩的断裂韧性远小于其余二者。

相反，页岩抗拉强度的各向异性则主要受层理面的弱胶结强度影响，而几乎不受另外 2 种以能量耗散为主要特征的韧化机制的影响，这是因为强度

本身并不是一种能量属性。至此，也就可以理解为哪些层状结构材料的断裂韧性各向异性一般要强于抗拉强度的各向异性。

4 层理对页岩水力裂缝扩展的影响分析

根据线弹性断裂力学可知，对于岩石类脆性材料，裂纹尖端塑性区的尺寸相对较小，描述裂纹尖端应力场和位移场只需应力强度因子即可，因此裂纹失稳扩展的判据为

$$K_I \quad K_{IC} \quad (11)$$

对于页岩地层，由于层理面的黏结力较弱，很难钻取三点弯曲试样，而一般只有黏结力较强的层段才能钻取三点弯曲试样。对于大部分层段，其层理胶结强度都较低，且微裂隙发育，水化作用明显，因此，对于实际地层，层理面阻止裂纹扩展的能力可能将更弱，而页岩断裂韧性的各向异性也将更加显著。

为进一步探究层理影响下页岩水力裂缝的扩展规律，开展了页岩室内真三轴水力压裂试验，并对水力裂缝的扩展规律进行了深入分析。由于页岩孔隙度、渗透率非常低，模拟压裂时采用清水作为压裂液，并添加红色示踪剂，通过红色示踪剂来观察页岩水力裂缝的延伸规律。

试验采用室内大型真三轴水力压裂系统，该系统主要由岩土工程真三轴伺服加载系统、伺服泵压控制系统和 Disp 声发射空间定位监测系统组成。压裂试样与三点弯曲试样为同一批次同一现场采得的扰动相对较小的露头页岩。而室内水力压裂试验时，将页岩加工为 300 mm×300 mm×300 mm(长×宽×高)的压裂试样，并在试样内部钻出井下入割缝套管，具体试验步骤及方法参考郭印同等^[24]的研究。

模拟竖直井时，用外径 24 mm 的金刚石钻头垂直层理面钻取深 170 mm 的孔来预制井眼，并用高强度黏结剂将模拟套管的高强度钢管与预制井眼封固固井，加载三向地应力时，沿井眼方向，即垂直层理方向加载垂向地应力，而在平行层理方向分别加载水平最小和水平最大地应力，如图 5(a)所示。而在模拟水平井时，沿平行层理方向钻孔预制井眼并固井后，沿井眼轴线方向加载水平最小地应力，

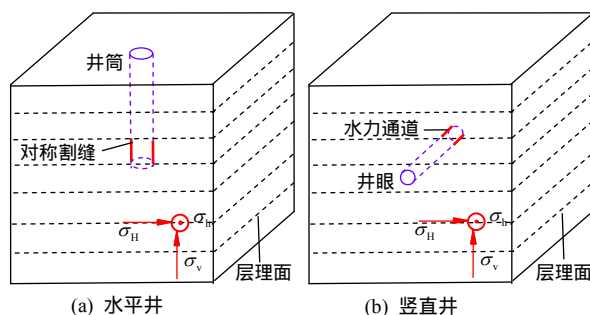


图 5 页岩压裂试验井眼、层理及地应力相对方位示意图 Fig.5 Diagram of the positions and orientations of borehole, bedding planes and in-situ stress of hydraulic fracturing test of shale

垂直层理加载垂向地应力，在垂直井眼轴线的平行层理方向加载水平最小地应力，如图 5(b)所示。试验时，垂向地应力 $\sigma_v = 20 \text{ MPa}$ ，最大和最小水平地应力分别为 $\sigma_{H1} = 19.51 \text{ MPa}$ 和 $\sigma_{H2} = 17.74 \text{ MPa}$ 。

图 6 为模拟页岩水平井和竖直井的水力压裂效果图。由图 6(a)可知，水力裂缝在井眼处同时沿平行层理和近似垂直层理方向起裂。沿层理方向起裂的裂缝在扩展的过程中，尽管最小地应力平行于层理方向，但由于层理面黏结力较弱，其阻止裂缝扩展的能力较弱，该裂缝仍沿层理扩展延伸直至形成贯通试样的水力通道。而与层理面近似正交的裂缝沿最大地应力方向起裂后，首先沿最大地应力方向继续扩展，当其延伸至较弱的层理面时，由于弱层理面的断裂韧性远小于垂直层理方向的断裂韧性，

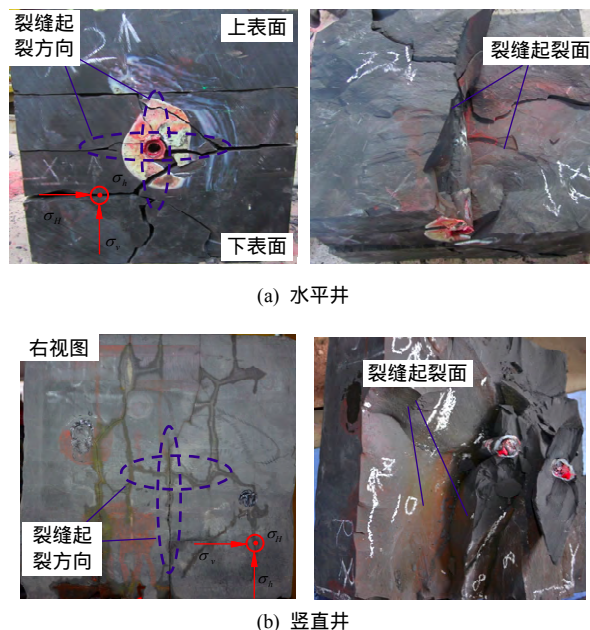


图 6 页岩水力压裂效果图 Fig.6 Fractured results of shale

且尽管裂缝延伸方向为最大地应力方向，但裂缝仍在弱层理面处发生转向；然而，该沿最大地应力方向延伸的裂缝的上、下半支裂缝却出现了不同现象，上半支裂缝在层理面处出现了止裂、转向现象，而下半支裂缝却发生了分叉、转向现象，且沟通了两层理面间的天然裂缝，从而形成了纵横交错的裂缝网络，达到页岩的体积压裂。

页岩压裂试样的尺寸较大、微裂缝较发育等使水力裂缝在扩展的过程中声发射能量相对较低，监测系统较难监测定位到局部复杂次生裂缝的弱声发射信号，因此，声发射系统监测到的事件数不多，事件主要集中在套管割缝处，且随着距水力出口距离的增加，声发射事件数逐渐减少，但仍能从一定程度上分析水力裂缝在水力出口处起裂后的延伸规律。图 7 为正视图中水力压裂物理模拟试验过程中监测到的声发射事件定位及水力裂缝扩展示意图，图 7(a)中，1~4，6~9 均为声发射探头放置位置。

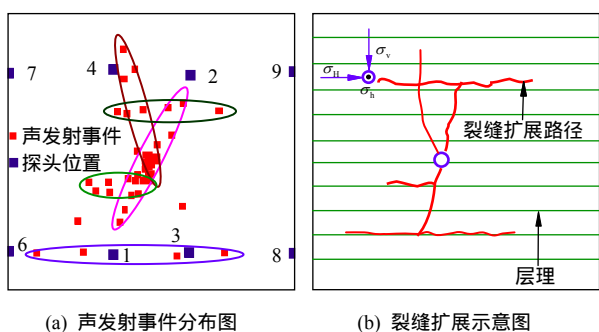


图 7 声发射事件定位及水力裂缝扩展示意图

Fig.7 Spatial distribution of AE events and diagrams of hydraulic fractures propagating

由图 7 可知，页岩水平井水力裂缝在井壁处近似沿最大地应力方向起裂后，由于受层理面引起的页岩力学各向异性的影响，裂缝在沿最大地应力方向扩展的过程中不断发生偏移，逐渐远离最大地应力方向；而裂缝扩展延伸的过程中在弱层理面处会发生分叉、转向或穿过现象，转向后的裂缝沿层理面继续延伸扩展，且在沿层理面继续延伸的过程中会进一步沟通水力裂缝或天然裂缝而形成相对复杂的裂缝网络，这与图 6(a)中显示的压裂后剖切观察到的裂缝扩展规律基本一致，也进一步表明了虽然页岩试样压裂监测到的声发射事件数相对较少，但仍能有效地分析其裂缝的扩展规律。

由图 6(b)可知，页岩竖直井水力压裂后也形成了相对复杂的裂缝网络。水力裂缝在井眼处同时沿

平行层理和近似垂直层理方向起裂。沿平行层理方向起裂的裂缝在扩展的过程中，尽管垂直层理方向为最大地应力方向，裂缝仍沿黏结力较小的层理面延伸而形成贯通的水力裂缝通道；沿垂直层理方向的裂缝起裂后，在扩展的过程中，由于层理面的黏结力较弱，断裂韧性较小，裂缝发生垂直转向而沿层理面继续延伸，在继续延伸的过程中，压裂液通过天然裂缝沟通更多的弱层理面，从而形成纵横交错的裂缝网络，达到页岩的体积压裂。

总之，页岩层理面的弱胶结作用使其断裂韧性较小，阻止裂缝扩展的能力较弱，而在垂直层理方向，断裂韧性较大，阻止裂缝扩展的能力较强，因此，页岩水力压裂过程中，当水力裂缝垂直层理面扩展时，会在弱层理面处发生分叉、转向，且在继续延伸的过程中会进一步沟通天然裂缝而形成复杂的裂缝网络，达到体积压裂。这进一步说明了页岩储层中存在足够的结构弱面(通常表现为天然裂缝、节理及层理)或薄弱点是实现体积压裂的前提^[25]。

5 讨论

材料断裂韧性的大小主要取决于 2 个因素：一是材料微观结构对裂纹扩展的阻力；二是裂纹尖端的应力及应变状态。事实上，当裂纹在层状材料中垂直层面失稳扩展时，由于层间黏结力相对较弱，会发生分层剥离现象，而分层剥离后，主裂纹前端的三向应力状态会得到缓和(开裂钝化)，导致裂纹的扩展受到抑制，宏观上表现为材料断裂韧性的增大，而不利于裂纹扩展。分层剥离现象会引起更强的断裂韧性各向异性，虽然该现象并没有在页岩三点弯曲试验中观察到，但分析其产生原因有助于进一步深入认识层状材料断裂机制的各向异性。分层剥离的 2 种基本模式为 crack-arrester 和 crack-divider。crack-divider 模式为由荷载在缺口或主裂纹前端产生的三向应力中垂直层面的张拉应力使层面剥离而分开。层面剥离的产生和发展不仅能抑制试样的进一步断裂，还能使其开裂为多个平行于轴向拉伸应力的薄片，进而使后续变形都限制在独立的薄片带中，而薄片带间的不连续使主裂纹转变为多个平行的同时扩展的裂纹，这抑制了材料变形的继续进行，使裂纹扩展阻力增大。该方式的分层剥离，随着开裂频度的增加，开裂前端的应力状态由三向应力向平面应力缓和，即实质为有限宽板内单边穿透裂纹

在单向拉应力下的失稳扩展问题,而多个平行裂纹的同时扩展延伸,整体上会抑制材料进一步的变形速度,使其断裂韧性增大。而 crack-arrester 模式为主裂纹尖端产生的层状剥离,该方式的层状剥离使裂纹的扩展被钝化,导致主裂纹前端的应力状态由三向应力缓和为一系列平行的单向抗拉状态,即实质上成为单纯的弯曲变形,从而导致材料主裂纹的扩展延伸受到抑制,宏观上使材料韧性增强,断裂韧性增大。至于 crack-arrester 和 crack-divider 方位下断裂韧性的相对大小,这和层状材料基质体的强度和层间剥离程度等有较大关系^[26]。

页岩储层中天然裂缝、节理和层理的存在是实现体积压裂的前提。这些结构弱面的抗张、抗剪强度都远小于基质体的抗张、抗剪强度,这使其阻止裂纹扩展的能力较弱,水力裂缝在扩展的过程中会优先开启弱的结构面而发生转向,进而引起压裂液的大量滤失并需增加流体压力,从而促使水力裂缝沟通更远区域的天然裂缝或层理面,如此循环进行,直至形成网状裂缝通道,达到页岩的体积压裂。因此,水力裂缝在扩展的过程中,当遇到较弱的层理面或微裂缝时,由于其断裂韧性远小于页岩基质体的断裂韧性,水力裂缝在层理面或天然裂缝处将发生分叉、转向等,进而沟通新的层理面或天然裂缝,而形成网状压裂缝。这说明结构弱面的大量存在是诱导复杂网状裂缝的主要因素,而压裂形成裂缝网的难易程度与天然裂缝、层理等结构面密切相关。

6 结 论

(1) 材料的各向异性不仅影响裂纹尖端应力场和位移场的分布,还影响应力场的强度和位移场的大小。各向异性材料裂纹尖端的应力场和位移场不仅由应力强度因子决定,还与弹性常数有关,这与各向同性材料不同。

(2) 三点弯曲试样切口与层理呈 crack-arrester, crack-divider 和 crack-splitter 三种方位时,页岩断裂韧性在 crack-arrester 时最大, crack-splitter 时最小,且最大值与最小值之比为 2.025,各向异性显著。而 crack-divider 时的断裂韧性略小于 crack-arrester 方位,但远大于 crack-splitter 的值,这说明页岩层理阻止裂纹扩展的能力较弱,水力裂缝沿层理较易扩展延伸,而当主裂缝垂直层理扩展时受到的阻力较大,可能会发生转向。

(3) 层状材料断裂韧性的各向异性主要由裂纹扩展过程中钝化机制的各向异性引起的。弱层理面开裂、断裂路径偏移和分层剥离是层状材料的 3 种主要钝化机制,而对于页岩,层理面开裂和断裂路径偏移是引起断裂韧性各向异性的主要原因。crack-arrester 方位试样同时出现了层理面开裂和断裂路径偏移,断裂韧性最大; crack-divider 仅出现了断裂路径偏移,断裂韧性较高;而 crack-splitter 方位试样的断裂过程主要为裂纹沿层理面的扩展,没有任何一种钝化机制,断裂韧性远小于其余二者。

(4) 页岩层理面的弱胶结作用使其断裂韧性较小,阻止裂纹扩展的能力较弱,而垂直层理方向,断裂韧性较大,阻止裂纹扩展的能力较强,因此,页岩水力压裂过程中,水力裂缝垂直层理扩展时,会在弱层理面处发生分叉、转向,且在继续延伸的过程中会进一步沟通天然裂缝或弱层理面而形成复杂的裂缝网络,达到体积压裂。

参考文献(References):

- [1] 唐颖,唐玄,王广源,等.页岩气开发水力压裂技术综述[J].地质通报,2011,30(2):393-399.(TANG Ying, TANG Xuan, WANG Guangyuan, et al. Summary of hydraulic fracturing technology in shale gas development[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(2): 393-399.(in Chinese))
- [2] 肖钢,唐颖.页岩气及其勘探开发[M].北京:高等教育出版社,2012:21-25.(XIAO Gang, TANG Ying. Shale gas and its exploration and development[M]. Beijing: Higher Education Press, 2012: 21-25.(in Chinese))
- [3] BUSTIN R M. Barnett shale play going strong[J]. AAPG Explorer, 2005, 26(5): 4-6.
- [4] 郭天魁,张士诚,葛洪魁.评价页岩压裂形成缝网能力的新方法[J].岩土力学,2013,34(4):947-954.(GUO Tiankui, ZHANG Shicheng, GE Hongkui. A new method for evaluating ability of forming fracture network in shale reservoir[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(4): 947-954.(in Chinese))
- [5] DANESHY A A. Hydraulic fracture propagation in the presence of planes of weakness[C]// Proceedings of SPE European Spring Meeting. [S. l.]: [s. n.], 1974: 1-8.
- [6] BLANTON T L. An experimental study of interaction between hydraulically induced and pre-existing fractures[C]// Proceedings of SPE Unconventional Gas Recovery Symposium. [S. l.]: [s. n.], 1982: 1-13.
- [7] BLANTON T L. Propagation of hydraulically and dynamically induced fractures in naturally fractured reservoirs[C]// Proceedings of

- SPE Unconventional Gas Technology Symposium. [S. l.] : [s. n.] , 1986 : 1 – 15.
- [8] WARPINSKI N R , CLARK J A , SCHMIDT R A , et al. Laboratory investigation on the-effect of in-situ stresses on hydraulic fracture containment[J]. Society of Petroleum Engineers , 1982 , 22(3) : 333 – 340.
- [9] ANDERSON G D. Effects of friction on hydraulic fracture growth near unbonded interfaces in rocks[J]. Society of Petroleum Engineers , 1981 , 21(1) : 21 – 29.
- [10] BLAIR S C , THORPE R K , HEUZE F E , et al. Laboratory observations of the effect of geological discontinuities on hydrofracture propagation[C]// Proceedings of the 30th US Symposium on Rock Mechanics. Morgantown : [s. n.] , 1989 : 433 – 450.
- [11] DANESHY A A. Hydraulic fracture propagation in layered formations[J]. Society of Petroleum Engineers Journal , 1978 , 18(1) : 33 – 41.
- [12] 陈治喜,陈 勉,黄荣樽,等. 层状介质中水力裂缝的垂向扩展[J]. 石油大学学报:自然科学版, 1997, 21(4) : 23 – 26.(CHEN Zhixi , CHEN Mian , HUANG Rongzun , et al. Vertical growth of hydraulic fracture in layered formations[J]. Journal of the University of Petroleum : Natural Science , 1997 , 21(4) : 23 – 26.(in Chinese))
- [13] 赵海峰,陈 勉,金 衍. 水力裂缝在地层界面的扩展行为[J]. 石油学报, 2009, 30(3) : 450 – 454.(ZHAO Haifeng , CHEN Mian , JIN Yan. Extending behavior of hydraulic fracture on formation interface[J]. Acta Petrolei Sinica , 2009 , 30(3) : 450 – 454.(in Chinese))
- [14] 王素玲,张一鸣,姜民政,等. 裂缝在非均匀岩层内扩展机理研究[J]. 力学与实践, 2012 , 34(6) : 38 – 41.(WANG Suling , ZHANG Yiming , JIANG Minzheng , et al. The mechanism of crack extension in non-uniform rock[J]. Mechanics and Practice , 2012 , 34(6) : 38 – 41.(in Chinese))
- [15] LEE Y K , PIETRUSZCZAK S. Application of critical plane approach to the prediction of strength anisotropy in transversely isotropic rock masses[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences , 2008 , 45(4) : 513 – 523.
- [16] SIH G C , PARIS P C , IRWIN G R. On cracks in rectilinearly anisotropic bodies[J]. International Journal of Fracture Mechanics , 1965 , 1(3) : 189 – 203.
- [17] TAN C L , GAO Y L. Boundary integral equation fracture mechanics analysis of plane orthotropic bodies[J]. International Journal of Fracture , 1992 , 53(4) : 343 – 365.
- [18] LEKHNITSKIJ S G. Theory of the elasticity of anisotropic bodies[M]. [S. l.] : [s. n.] , 1977 : 43 – 52.
- [19] DAI F , XIA K W. Laboratory measurements of the rate dependence of the fracture toughness anisotropy of Barre granite[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences , 2013 , 60 : 57 – 65.
- [20] KENNER V H , ADVANI S H , RICHARD T G. A study of fracture toughness for an anisotropic shale[C]// Proceedings of the 23rd US Symposium on Rock Mechanics. Berkeley : University of California Press , 1982 : 471 – 479.
- [21] 赵阳升. 多孔介质多场耦合作用及其工程响应[M]. 北京 : 科学出版社 , 2010 : 358 – 359.(ZHAO Yangsheng. Multi-field coupling effect and engineering response of porous medium[M]. Beijing : Science Press , 2010 : 358 – 359.(in Chinese))
- [22] CHONG K P , KURUPPU M D , KUSZMAUL J S. Fracture toughness determination of layered materials[J]. Engineering Fracture Mechanics , 1987 , 28(1) : 43 – 54.
- [23] 中华人民共和国行业标准编写组. SL264—2001 水利水电工程岩石试验规程[S]. 北京 : 中国水利水电出版社 , 2001.(The Professional Standard Compilation Group of People's Republic of China. SL264—2001 Specifications for rock tests in water conservancy and hydroelectric engineering[S]. Beijing : China Water Power Press , 2001.(in Chinese))
- [24] 郭印同,杨春和,贾长贵,等. 页岩水力压裂物理模拟与裂缝表征方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014 , 33(1) : 52 – 59.(GUO Yintong , YANG Chunhe , JIA Changgui , et al. Research on hydraulic fracturing physical simulation of shale and fracture characterization methods[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2014 , 33(1) : 52 – 59.(in Chinese))
- [25] 胡永全,贾锁刚,赵金洲,等. 缝网压裂控制条件研究[J]. 西南石油大学学报:自然科学版, 2013 , 35(4) : 126 – 132.(HU Yongquan , JIA Suogang , ZHAO Jinzhou , et al. Study on controlling conditions in network hydraulic fracturing[J]. Journal of Southwest Petroleum University : Science and Technology , 2013 , 35(4) : 126 – 132.(in Chinese))
- [26] LI H X , XIAO X R. An approach on the mode-I fracture toughness anisotropy for materials with layered microstructures[J]. Engineering fracture mechanics , 1995 , 52(4) : 671 – 683.