

不同层理倾角页岩 I 型裂缝断裂表现实验研究

马立科^{1,2}, 曹函^{1,2*}, 张政^{1,2}, 高强^{1,2}, 骆中山^{1,2}

1 中南大学地球科学与信息物理学院, 长沙 410083

2 中南大学有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室, 长沙 410083

* 通信作者, hancock@csu.edu.cn

收稿日期: 2019-07-26

国家自然科学基金项目(41302124)和油气藏地质及开发工程国家重点实验室开放基金项目(PLN201609)共同资助

摘要 不同层理倾角页岩的 I 型裂缝的断裂表现具有明显差异, 进而影响其水力压裂裂缝扩展效果。本文基于页岩层理特性, 采用中心切槽三点弯曲半圆盘实验方法探讨页岩天然层理面与 I 型裂缝的夹角 θ 对其断裂韧性及破坏模式的影响。结果表明: 试样的断裂韧性与夹角 θ 有良好的二次相关性; 同时位移—压力的变化曲线显示, 夹角 θ 的差异对加载过程中的峰值压力、位移和断裂类型有较大影响, 其中夹角 θ 为 45° 和 60° 的试样在峰后压降阶段表现出延性断裂, 而其它角度的试样则表现为脆性断裂; 其次, 断裂应变能随层理倾角的递增呈线性增长; 不同夹角试样裂缝的断裂模式差异性主要表现为具有向层理面倾斜并贯穿的趋势。因此, 开展页岩天然层理面与 I 型裂缝的夹角对页岩的断裂韧性及破坏模式影响的研究, 对水力压裂实施过程中技术参数的选取具有一定的理论指导意义, 从而提升其压裂改造储层的增产效率。

关键词 页岩 I 型裂缝; 层理倾角; 断裂韧性; 断裂应变能; 断裂模式

An experimental investigation of the fracture behaviors of type-I cracks in shales with different bedding angles

MA Like^{1,2}, CAO Han^{1,2}, ZHANG Zheng^{1,2}, GAO Qiang^{1,2}, LUO Zhongshan^{1,2}

1 School of Geosciences and Info-physics, Central South University, Changsha 410083, China

2 Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring(Central South University), Ministry of Education, Changsha 410083, China

Abstract The fracture behaviors of type-I cracks in shales with different bedding angles have obvious differences, which in turn affect hydraulic fracturing crack propagation. This paper is based on shale bedding properties, and uses the three-point bending half-disk experimental method to investigate the effect of the angle θ between the bedding plane and type-I cracks on the fracture toughness and failure mode. The results show that there is a good secondary correlation between the angle θ and the fracture toughness of the sample. Also, the displacement-pressure curve indicates that a different θ will greatly influence the peak pressure, displacement and fracture type during the loading process. Samples with θ of 45° and 60° show ductile fracture in the post-peak pressure drop stage, while the samples at other angles showed brittle fracture. Moreover, the elastic strain energy increases linearly with increasing bedding angles. The difference in failure mode of cracks in different angle specimens is mainly manifested by the tendency to cracks inclined to the bedding plane and then penetrating the bedding plane. Therefore, the investigation of the influence of the angle between the bedding plane and type-I cracks on the fracture toughness and failure mode of

引用格式: 马立科, 曹函, 张政, 高强, 骆中山. 不同层理倾角页岩 I 型裂缝断裂表现实验研究. 石油科学通报, 2019, 04: 347-353

MA Like, CAO Han, ZHANG Zheng, GAO Qiang, LUO Zhongshan. An experimental investigation of the fracture behaviors of type-I cracks in shales with different bedding angles. Petroleum Science Bulletin, 2019, 04: 347-353. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2019.04.031

the shale has certain significance for guiding the selection of technical parameters during the hydraulic fracturing implementation process, which is beneficial to improving the productivity of fracturing and reforming reservoirs.

Keywords type- I shale cracks; bedding angle; fracture toughness; fracture strain energy; fracture mode

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2019.04.031

0 引言

页岩气赋藏于致密的泥页岩中,页岩储层改造是获取高效稳定页岩气流的关键所在。而页岩的层理结构对有效控制岩石中水力裂缝扩展路径至关重要,研究表明压裂过程中,水力裂缝形态主要受到原地应力场^[1-2]、孔隙压力场^[3]、岩石力学性质^[4-5]、天然裂缝^[6]和压裂液性质^[7-9]等控制因素的影响,而层状岩石的断裂性质是影响水力裂缝扩展路径的一种重要因素^[10]。在实践中,断裂韧度代表着材料抵抗裂纹扩张的能力,作为材料的重要力学参数,它是评估材料和结构强度设计的重要依据^[11-12]。目前,已有学者开展泥页岩断裂韧性的相关研究,其中,吕有厂^[13]探究不同加载速率对层理性页岩的I型断裂韧性影响规律。杨健锋等^[14]研究不同程度水损伤作用对泥岩断裂力学特性的影响。赵子江等^[15]分别采用直切槽半圆盘试样(NSCB)和入字形切槽半圆盘试样(CCNSCB),在3种预制切槽布置模式(splitter、arrester、divider型)下,准确测试页岩的I型断裂韧度 K_{IC} 。陈建国等^[16]测定了14块龙马溪组储层页岩的I型(张开型)、II型(划开型)裂缝断裂韧性。赵小平等^[17]通过层状大理岩的断面观察,发现断裂能各向异性主要是由不同的断裂机制导致的:Arrester型试件主要是穿晶断裂与沿晶断裂的耦合作用,Divider型试件主要是沿矿物条带间的沿晶断裂。而天然层理倾角对页岩I型裂缝断裂特性具有怎样的影响,天然层理倾角对I型裂缝断裂韧度的影响规律如何,以及相对应的断裂韧度与波速的关系是怎样的情况,目前尚未有相关报道。

本文基于湘西北牛蹄塘组页岩,采用直切槽半圆盘试件,并设置层理面与直切槽裂缝的夹角 θ 分别为 0° 、 30° 、 45° 、 60° 及 90° 五组试样,开展三点弯曲实验;探索 θ 角对I型裂缝断裂特性的影响。通过本次研究,期为人工扩展裂缝的路径控制提供理论依据。

1 试件制备及断裂韧性计算方法

1.1 实验设计

本实验测试岩石断裂韧性采用国际岩石力学学

会推荐的试验方法,即中心切槽三点弯曲半圆盘法,目前该方法是较为理想的一种方法。考虑页岩的层理特性,控制中心裂缝同层理面夹角 θ 依次呈 0° 、 30° 、 45° 、 60° 及 90° 五种类型(即层理倾角分别为 90° 、 60° 、 45° 、 30° 、 0°),如图1所示。岩石试样的尺寸为:径向方向为50 mm,轴向方向为25 mm的半圆盘,裂缝宽度0.5 mm,两端支撑点之间的距离 S 和裂缝底部至终端的距离 a 分别采用规范推荐公式: $S/2R=0.8$ 、 $a/R=0.5$ 确定。

实验设备采用岩石万能实验机,加载能力上限为100 kN,控制方式为位移控制,实验中控制加载速度为0.02 mm/s,加载平台自主设计并加工,如图2所示,采用高强度钢,两支撑点跨度为40 mm,支撑钢条与平台为一体结构,直径为3 mm。实验中加载速度保持为0.01 kN/s。

1.2 断裂韧性计算方法

对页岩断裂韧性的计算采用国际岩石力学规范中给出的建议公式进行计算,中心切槽半圆盘断裂韧性可由式(1)~(3)计算得到:

$$K_{IC} = \frac{P_{\max} \sqrt{\pi a}}{2RB} \quad (1)$$



图1 层理面与裂缝成不同夹角的半圆盘试样

Fig. 1 Semi-disc samples with different angles between the bedding plane and the cracks

$$Y' = -1.297 + 9.516[S/(2R)] - (0.47 + 16.457[S/(2R)])\beta \quad (2)$$

$$+ (1.071 + 34.401[S/(2R)])\beta^2$$

$$\beta = a/R \quad (3)$$

式中, K_{IC} 为断裂韧性, 单位为 $\text{MPa}\cdot\text{mm}^{1/2}$; P_{\max} 为试样呈现失效不能承载时的峰值载荷, 单位 MPa ; Y' 为量纲为 1 的应力强度因子, 无量纲系数; B 为中心裂缝半圆盘岩石试样的厚度, 单位 m ; R 为中心裂缝半圆盘岩石试样的半径, 单位 m ; a 为裂缝长度, 单位 m ; S 为支撑点间距, 单位 m 。

2 测试结果及实验分析

2.1 不同层理倾角断裂韧性分析

根据式(1)~(3)计算 I 型裂缝与层理面成不同角度时的试样断裂韧度, 其所得结果如表 1 所示。

从表 1 不难看出, 随着 θ 角的递增, 页岩的断裂



图 2 断裂韧性加载平台

Fig. 2 Fracture toughness loading platform

表 1 各向异性断裂韧性计算表

Table 1 Anisotropic fracture toughness calculation table

角度 θ	P_{\max} /kN	强度因子 Y'	断裂韧性 $K_{IC}/(\text{MPa}\cdot\text{mm}^{1/2})$
0°	0.34	6.411	10.933
	0.20	6.411	6.4310
30°	1.17	6.411	37.624
45°	1.10	6.411	35.373
60°	1.54	6.411	49.522
	1.56	6.411	55.311
90°	1.72	6.411	50.165

韧性也逐渐增大, 表明页岩层理面角度对 I 型裂缝断裂韧性有较大的影响。为了定量的描述 I 型断裂韧性随层理倾角的变化, 对不同角度试样所得断裂韧性进行拟合后得到图 3。由图 3 可知, θ 角与断裂韧性有较好的二次相关性, 相关性系数为 0.89; 并获得了断裂韧性与 θ 角的关系式(4)。

$$K_{IC} = 9.474 + 0.936\theta - 0.005\theta^2 \quad (4)$$

式中, θ 为层理面与 I 型裂缝的夹角, 单位 $^{\circ}$ 。

2.2 不同层理倾角页岩加载过程位移—压力曲线分析

获知页岩储层在造缝过程中缝网的形成特点及过程是一个复杂的问题, 同时页岩独特的层理性结构使得问题进一步复杂化, 当前在理论方面的研究也仅停留在借助传统断裂理论知识来解决相关问题。因此我们以传统断裂力学理论为基础, 对试样在加载过程中的位移—压力曲线进行分析, 以期从实验角度定性获知层理倾角对 I 型裂缝的扩展影响规律。实验中不同试样加载过程位移—压力曲线如图 4 所示, 整体上可分为 4 个阶段: (1) 压实阶段, 试样竖向受压, 随着压力的增大, 裂缝逐渐被压实, 呈现出塑性变化, 在位移—压力曲线上表现为向上凹的二次函数线段, 且曲线上对应点的导数值由小变大。(2) 弹性阶段, 曲线为一条直线, 此过程应变能积累, 微裂缝萌生。(3) 屈服阶段, 该阶段较短, 曲线斜率变缓, θ 角为 0° 及 30° 的试样有一小段曲线明显可见, 而 45° 、 60° 和 90° 试样的位移—压力曲线表现则不明显。试样在该阶段进一步萌生更多的裂缝, 同时试样刚度降低。(4) 峰后压降阶段, 此过程 θ 角为 0° 、 30° 和 90° 的试样荷载瞬间

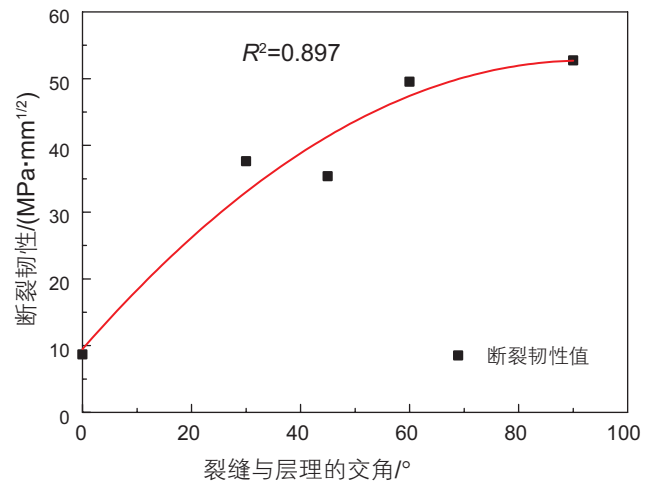


图 3 页岩层理倾角与断裂韧性拟合关系

Fig. 3 The correlation of the angle of bedding plane and the fracture toughness

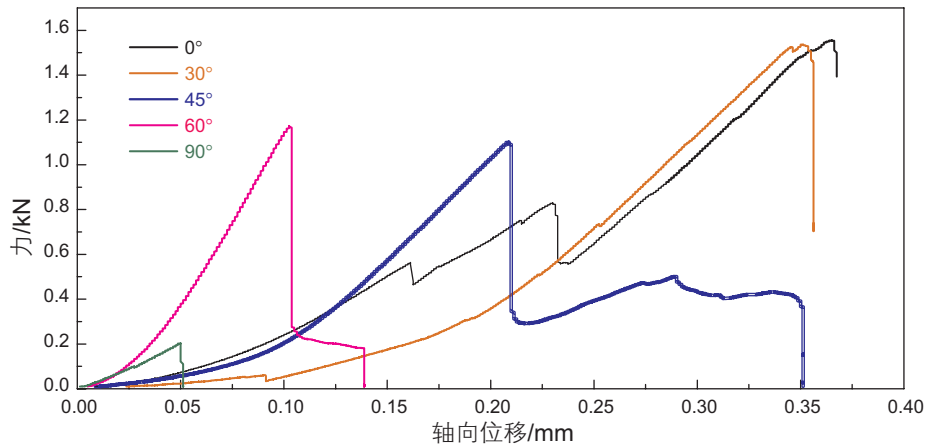


图4 不同层理角度试样位移—压力曲线

Fig. 4 Displacement-pressure curve for different bedding angles

降为零, 这表明试件在屈服过程中产生的裂缝已完全贯通, 即进入破坏阶段。45°、60°试样的位移—压力曲线出现陡降后并未直接降为零, 而是在此荷载下维持了一段位移后才出现瞬间变为零的现象, 说明试件处于一个裂缝逐渐增多并延展发育的过程, 直到裂缝完全贯通发生破坏为止。

由图4也可看出层理倾角对试样断裂荷载有较大影响。随 θ 角的递增, 试样断裂荷载和轴向位移都明显减小, 同时不同层理角度试样承载力的变化也呈现出较大差异, 主要体现在峰值荷载后力随位移的变化, θ 角为45°和60°的试样在峰值后, 位移—压力曲线出现一个台阶, 表明试样在峰值荷载后依然具有一定的承载能力, 随着裂缝的进一步发展承载力最终降低为零, 表现出一定程度的延性断裂。而0°、30°和90°试样在断裂时则在峰值荷载后承载力瞬间降低为零, 表现为脆性断裂。

根据位移—压力曲线图计算出试样的断裂失效总能量, 从而得到总能量与层理倾角的关系曲线图, 如图5所示, 随层理倾角的递增, 断裂失效总能量也呈现递增趋势, 二者总体呈正比例线性关系。通过拟合可得到以层理角度为自变量, 断裂失效总能量为应变量的线性关系式, 见式(5):

$$E = 0.01815 + 0.00253\beta \quad (5)$$

$$\beta = 90 - \theta \quad (6)$$

将式(6)代入式(5)可得:

$$E = 0.01815 + 0.00253(90 - \theta) \quad (7)$$

式中, E 为断裂应变能, 单位J; β 为层理倾角, 单位°。

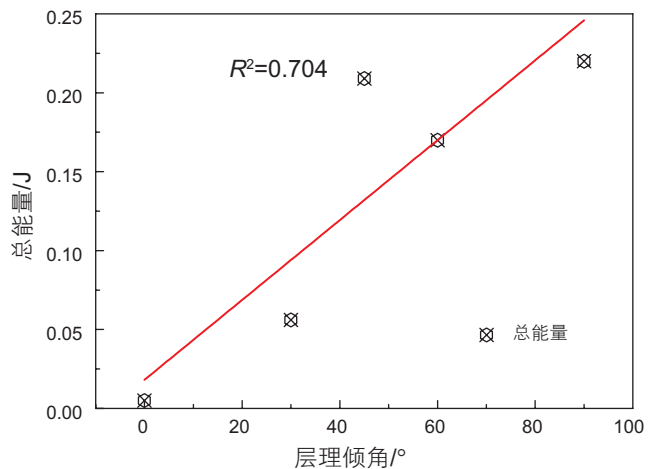


图5 不同层理角度试样断裂失效总能量曲线

Fig. 5 Total energy curve of fracture failure of samples at different bedding angles

从位移—压力曲线定性可知, 试样在断裂过程中, 不同层理角度试样裂缝的能量转化过程存在一定差异, 其中0°、30°及90°试样裂缝在输入总能量达到其断裂应变能时一次性彻底转化为表面能, 而45°和60°试样裂缝的输入总能量则分阶段转化为岩石表面能, 表现出延性。结合后面的试样断裂模式分析可知, 试样裂缝在断裂破坏中能量的释放主要以克服岩石颗粒之间的键能形成断裂面为主, 同时又有部分能量转化为岩石表面能。

2.3 不同层理页岩断裂模式分析

从页岩断裂模式的差异可以获知层理角度对页岩断裂的影响程度, 主要从人造I型裂缝的断裂方向和断裂面形态两个方面分析, 分别如图6、图7所示。

从图 6 可看出, 裂缝断裂方向并不是沿着人工切槽方向即垂直于底面半径方向发展, 而是在层理倾角的影响作用下向层理面方向倾斜, 并有顺着层理面贯穿的趋势。图 7 所示为不同角度试样断裂面形态, 不难看出由于层理倾角的不同, 试样断裂面形态差别较大, 层理面与加载方向一致或角度较小时, 断面较为平直, 而层理面与加载方向角度较大时, 断面突起并形成岩脊。

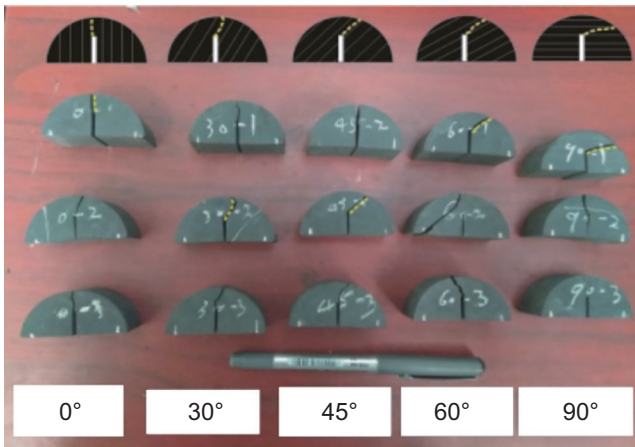


图 6 不同角度断裂破坏试样

Fig. 6 Rupture samples at different bedding angles

3 结论

本文通过测试湘西北页岩层理与 I 型裂缝呈不同夹角时的断裂韧性, 分析层理倾角对断裂韧性、位移—压力曲线、断裂应变能以及断裂失效模式的影响, 得出以下几个基本结论:

(1) 随着 θ 角的增大, 即层理倾角的减小, 页岩断裂韧性逐渐增加, 页岩断裂韧性与 θ 角之间呈二次函数关系变化。

(2) 试样加载时的位移—压力曲线总体上包含四个阶段, 即压实阶段、弹性阶段、屈服阶段、峰后压降阶段。层理倾角的不同引起加载过程中的峰值压力、断裂位移的差异, 随 θ 角的减小, 层理倾角的增大, 峰值压力和断裂位移逐渐增加。同时位移—压力曲线的峰后压降阶段随 θ 角的不同表现出较大差异, θ 角为 0° 、 30° 及 90° 的试样峰后荷载瞬间降低为 0, 而 45° 和 60° 试样的峰后荷载则不直接降为 0, 表现为在一定荷载条件下维持一段时间后才降低为 0。

(3) 试样的断裂应变能与层理倾角呈线性递增关系, 具有良好的相关性。在断裂过程中, 不同层理角度试样裂缝的能量转化过程存在一定差异, 其中 0° 、 30° 及 90° 试样裂缝在输入总能量达到其断裂应变能

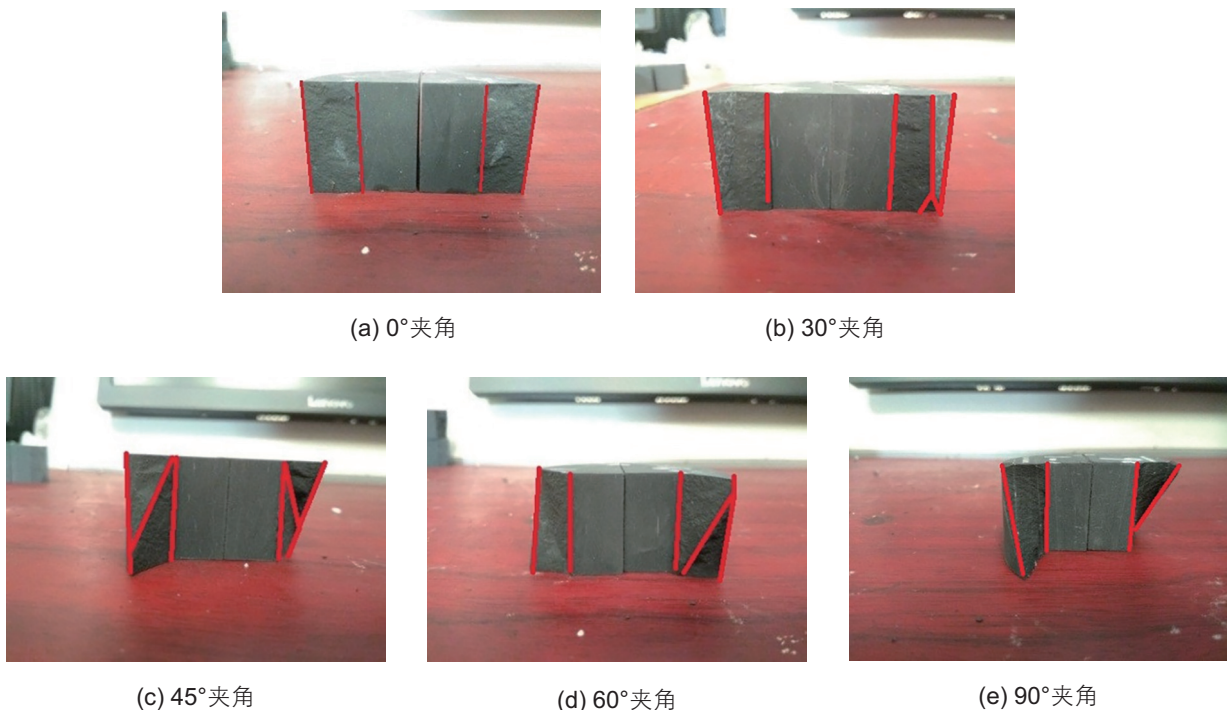


图 7 不同夹角断裂断面图

Fig. 7 Fracture profiles of different angles

时一次性彻底转化为表面能, 而 45° 和 60° 试样裂缝的输入总能量则分阶段转化为岩石表面能, 表现出延性。

(4) 裂缝断裂并不是沿着人造 I 型裂缝的方向即垂直于底面半径方向发展, 而是在层理倾角的影响下

有向层理面方向倾斜并贯穿的趋势。同时, 由于层理倾角的不同, 试样断裂面形态差别也较大, 层理面与加载方向一致或角度较小时, 断面较为平直, 而层理面与加载方向角度较大时, 断面则易形成突起和岩脊。

参考文献

- [1] WARPINSKI N R, SCHMIDT R A, NORTHROP D A. In-situ stresses: The predominant influence on hydraulic fracture containment[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 2013, 34(3): 653–664.
- [2] 杨潇, 张广清, 刘志斌, 等. 压裂过程中水力裂缝动态宽度实验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(9): 2232–2237. [YANG X, ZHANG G Q, LIU Z B, 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): 2232–2237.]
- [3] 周大伟, 张广清, 刘志斌, 等. 致密砂岩多段分簇压裂中孔隙压力场对多裂缝扩展的影响[J]. *石油学报*, 2017, 38(7): 830–839. [ZHOU D W, ZHANG G Q, LIU Z B, et al. Influences of pore-pressure field on multi-fracture propagation during multi-stage cluster fracturing of tight sandstones[J]. *ACTA PETROLEI SINICA*, 2017, 38(7): 830–839.]
- [4] TEUFEL L W, CLARK J A. Hydraulic fracture propagation in layered rock: Experimental studies of fracture containment[J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1981, 24(1): 19–32.
- [5] EEKELEN H A M V. Hydraulic fracture geometry: Fracture containment in layered formations[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1982, 19(6): 127–127.
- [6] FAN T G, ZHANG G Q. Laboratory investigation of hydraulic fracture networks in formations with continuous orthogonal fractures[J]. *Energy*, 2014, 74: 164–173.
- [7] 范铁刚, 张广清. 注液速率及压裂液黏度对煤层水力裂缝形态的影响[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2014, 38(4): 117–123. [FAN T G, ZHANG G Q. Influence of injection rate and fracturing fluid viscosity on hydraulic fracture geometry in coal[J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2014, 38(4): 117–123.]
- [8] ELLA M, JEFFREY R G, HILLIS R, et al. Hydraulic fracture propagation through an orthogonal discontinuity: A laboratory, analytical and numerical study[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2017, 6: 1–18.
- [9] ZHOU Z L, ZHANG G Q, DONG H R, et al. Creating a network of hydraulic fractures by cyclic pumping[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2017, 97: 52–63.
- [10] 潘睿, 张广清. 层状岩石断裂能各向异性对水力裂缝扩展路径影响研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(10): 106–115. [PAN R, ZHANG G Q. The influence of fracturing energy anisotropy on hydraulic fracturing path in layered rocks[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(10): 106–115.]
- [11] 华文, 董世明, 徐积刚. 复合型加载条件下锈岩断裂韧性试验研究[J]. *岩土力学*, 2016, 37(3): 753–758. [HUA W, DONG S M, XU J G. Experimental research on fracture toughness of rust stone under mixed mode loading conditions[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(3): 753–758.]
- [12] 李念斌, 董世明, 华文. 裂纹面接触对中心裂纹圆盘应力强度因子影响分析[J]. *岩土力学*, 2017, 38(8): 2359–2401. [LI N B, DONG S M, HUA W. Analysis of the effect of crack face contact on stress intensity factors for a centrally cracked Brazilian disk[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(8): 2395–2401.]
- [13] 吕有厂. 层理性页岩断裂韧性的加载速率效应试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(6): 1359–1370. [LU Y C. Effect of bedding plane direction on fracture toughness of shale under different loading rates[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(6): 1359–1370.]
- [14] 杨健锋, 梁卫国, 陈跃都, 等. 不同水损伤程度下泥岩断裂力学特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(10): 2431–2440. [YANG J F, LIANG W G, CHEN Y D, et al. Experiment research on the fracturing characteristics of mudstone with different degrees of water damage[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(10): 2431–2440.]
- [15] 赵子江, 刘大安, 崔振东, 等. 半圆盘三点弯曲法测定页岩断裂韧性(K_{IC})的实验研究[J]. *岩土力学*, 2018, 39(S1): 258–266. [ZHAO Z J, LIU D A, CUI Z D, et al. Experimental study of determining fracture toughness K_{IC} of shale by semi-disk three-point bending[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(S1): 258–266.]
- [16] 陈建国, 邓金根, 袁俊亮, 等. 页岩储层 I 型和 II 型断裂韧性评价方法研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(6): 1101–1105. [CHEN J G, DENG J G, YUAN J L, et al. Determination of fracture toughness of modes I and II of shale formation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(6): 1101–1105.]

- [17] 赵小平, 左建平, 裴建良. 锦屏层状大理岩断裂机制的细观试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(3): 534-542. [ZHAO X P, ZUO J P, YAN J L. Meso-experimental study of fracture mechanism of bedded marble in Jinping[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(3): 534-542.]

(责任编辑 李世远 编辑 付娟娟)