



移动扫码阅读

陈立超, 王生维, 张典坤. 褐煤断裂特征半圆弯曲试验研究——以内蒙古胜利煤田为例[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(5): 63–71.

CHEN Lichao, WANG Shengwei, ZHANG Diankun. Experimental investigation on fracture behavior of lignite and its fracturing significance: taking Shengli Coalfield as an example[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(5): 63–71.

褐煤断裂特征半圆弯曲试验研究

——以内蒙古胜利煤田为例

陈立超^{1,2}, 王生维^{2,3}, 张典坤²

(1. 内蒙古工业大学 矿业学院, 内蒙古呼和浩特 010051; 2. 煤与煤层气共采国家重点实验室, 山西 晋城 048204;

3. 中国地质大学(武汉)资源学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:褐煤不同方位上断裂力学性质各向异性对储层体积压裂裂缝网形成具有重要控制, 为探究层面方位对内蒙古胜利煤田褐煤断裂行为特征的影响, 利用三点弯曲加载试验对层面角 θ 分别为 90° 、 60° 、 45° 、 30° 及 divider (切分) 5 种内蒙古胜利煤田 6 煤组褐煤半圆弯曲试样静态断裂行为开展研究, 结果表明: ①层面角 θ 为 90° 、 60° 、 45° 、 30° 及 divider (切分) 情况下, 胜利煤田 6 煤组褐煤 I 型断裂韧度 K_{IC} 分别为 0.045、0.058、0.073、0.084 及 0.096 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$, 整体上切口切分层面型试样断裂韧度高于切口平行层面型试样, 且对于切口平行层面型试样而言, 随着层面角的减小断裂韧度有递增的趋势, 研究区褐煤断裂力学性质具有强烈的各向异性特征; ②加载位移-载荷关系显示, 层面角 θ 分别为 90° 、 60° 、 45° 、 30° 及 divider (切分) 5 种褐煤半圆弯曲试样三点弯加载下其断裂过程均经历孔裂隙缺陷压实阶段、线弹性压缩形变储能阶段、临界断裂破坏阶段以及断后的载荷卸载四大阶段, 且全部试样断裂后期载荷迅速卸载表明煤岩断裂形式均为脆性断裂, 煤岩具有较高的断裂速率, 储层适于开展大规模体积压裂; ③层面角 θ 分别为 90° 、 60° 、 45° 、 30° 及 divider (切分) 5 种褐煤半圆弯曲试样三点弯加载过程断裂能 Γ 分别为 64.38、80.49、112.50、146.66、及 355 J/m^2 , divider (切分) 褐煤试样断裂能远大于切口平行层面型褐煤试样, 同等条件下沿切分褐煤层面方向造缝耗能高, 压裂裂缝延展规模受限; ④试验还发现, 三点弯加载下研究区褐煤半圆弯曲试样断裂模式主要有拉张断裂和剪切断裂两种形式, 褐煤试样的断裂路径受控于外载方向和煤岩层面方位间的空间关系, 当层面角 θ 在 $45^\circ\sim 60^\circ$ 时试样断裂裂缝的曲折程度最高, 在煤层气储层压裂中最易形成裂缝缝网; ⑤基于褐煤断裂力学各向异性, 认为内蒙古胜利褐煤储层采取水平井+分段压裂能够极大提升压裂裂缝的复杂程度, 而且综合颗粒惯性考虑, 井眼方向平行最大水平主应力的水平井压裂携砂顺畅、能够避免裂缝内砂堵, 裂缝充填效果更好。上述认识有望对研究区下一步储层体积压裂改造与压裂缝网营造提供一定科学参考。

关键词:褐煤; 层面方位; 断裂力学; 各向异性; 压裂裂缝曲折度; 内蒙古胜利煤田

中图分类号: TE32; TU45 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2023)05-0063-09

Experimental investigation on fracture behavior of lignite and its fracturing significance: taking Shengli Coalfield as an example

CHEN Lichao^{1,2}, WANG Shengwei^{2,3}, ZHANG Diankun²

(1. School of Mining Technology, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China; 2. State Key Laboratory of Coal and CBM Co-mining, Jinneng Holding Group, Jincheng 048204, China; 3. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

收稿日期: 2022-06-09 责任编辑: 王 凡 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2021-1313

基金项目: 国家科技重大专项专题资助项目(2016ZX05067001-007); 内蒙古自治区科技计划资助项目(2020GG0317); 山西省煤层气联合研究基金资助项目(2016012007)

作者简介: 陈立超(1985—), 男, 内蒙古赤峰人, 副教授, 博士。E-mail: chenlichao@163.com

Abstract: The anisotropy of fracture properties at different bedding orientations of lignite plays an important role in controlling the formation of fracture network of reservoir fracturing. The static fracture behavior of the lignite semi-circular bending specimens of the 6 coal group in the Shengli coalfield, Inner Mongolia, is studied. The results show that: ① Bedding When the angle θ is 90° , 60° , 45° , 30° and divider, the mode I fracture toughness K_{IC} of lignite of Shengli coalfield is 0.045, 0.058, 0.073, 0.084 and $0.096 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$, respectively. on the whole, the fracture toughness of the sample with the notch-cut layered surface is much higher than that of the notch-parallel bedding-surface sample, and for the notch-parallel bedding-surface sample, the There is an increasing trend with decreasing fracture toughness, and the fracture properties of lignite in the study area have strong anisotropic characteristics; ② The displacement-load curves shows that the fracture process of the five lignite semi-circular bending samples under three-point bending loading includes: the compaction stage of pores and cracks, the linear elastic compression deformation energy storage stage, the critical fracture failure stage, and the load unloading stage after fracture. The large stage, and the rapid load unloading of the above samples in the later stage of fracture indicates that the material fracture forms are brittle fractures, the coal has a large fracture rate, and the reservoir is suitable for large-scale volume fracturing; ③ The fracture energy Γ of five kinds of lignite semi-circular bending samples with the bedding angle θ is 90° , 60° , 45° , 30° and dividing during three-point bending loading process is 64.38, 80.49, 112.50, 146.66, and 355.00 J/m^2 , respectively. The fracture energy of the sample with the notch-cut layered surface in the whole process is much larger than that of the lignite sample of the incision-parallel bedding plane. Under the same conditions, the energy consumption of fracturing along the bedding direction of the split lignite is high, and the expansion scale of the fracturing fracture is limited; ④ Under three-point bending loading, the fractures of the lignite semi-circular bending specimens in the study area mainly include tensile fractures and shear fractures. The fracture path of the lignite specimens is controlled by the spatial relations between the external loading direction and the orientation of the coal bedding plane When the bedding angle θ is between 45° and 60° , the degree of tortuosity of the fracture of the sample is the highest, and the fracture network is most likely to be formed in the coal reservoir fracturing; ⑤ Based on the fracture mechanics anisotropy of lignite, this paper believes that horizontal wells + staged fracturing in lignite reservoirs can greatly improve the complexity of fracturing fractures. In addition, considering the inertia of particles, the horizontal wells with the borehole direction parallel to the maximum horizontal principal stress can carry proppant smoothly and avoid plugging, and the fracture filling effect is better. The above understanding is expected to provide a certain scientific reference for the reservoir volume fracturing stimulation and fracturing network construction in the study area.

Key words: lignite; bedding orientation; fracture mechanics; anisotropy; fracture tortuosity; Shengli Coalfield in Inner Mongolia

0 引 言

煤岩断裂力学性质对储层压裂裂缝延展具有重要控制效应, 褐煤变质程度低, 宏观煤岩界面、天然裂隙系统等形成大量组构, 这些组构导致煤岩力学性质存在强烈的各向异性, 进而导致储层压裂裂缝起裂规律、裂缝曲折度及缝网复杂程度存在显著差异。内蒙古东部中生代聚煤盆地褐煤及低阶煤层气资源丰富, 但由于储层非均质性极强、含气量低, 采用大规模水力压裂形成人造裂缝网络是实现煤层气资源高效开发的关键^[1-2]。国内外非常规储层体积压裂经验表明, 储层压裂裂缝转向及复杂缝网的制约因素较为复杂, 其中不同方位的储层岩石断裂力学性质各向异性对于压裂裂缝曲折度及断裂能耗散的影响尤为关键^[3-4], 因此查明不同层面方向褐煤断裂力学性质各向异性及其对岩石断裂路径、断裂能的影响规律, 可为内蒙古褐煤储层压裂改造方案优化及裂缝延展机制分析提供试验尺度的依据。

目前在室内试验尺度上针对岩石断裂力学性质的测试方法和相关计算理论研究较为成熟。针对岩石类材料断裂韧性测试分析方法主要包括: 单边切

口梁、半圆弯曲测试、短柱切口试样测试、巴西圆盘带切口试样等方法, 其中半圆弯曲测试方法由于试样制备相对简单、计算方法简便正越来越受到岩石力学、材料力学领域研究者的青睐。在 KURUPPU 和 CHONG^[5] 较为系统性地提出半圆弯曲测试方法的基本计算方法理论、尺寸效应及在包括测试受腐蚀的岩石、如高温、围压和孔隙水压力等现场条件下的适应性基础上, 国内外诸多学者针对花岗岩^[6]、砂岩和页岩^[7-8] 岩石断裂韧性开展了试验研究, 结合声发射技术分析了岩石断裂韧性的各向异性规律。尤其值得指出的是, 围绕层状岩石断裂力学特征各向异性问题, JIN 等^[9] 利用单轴压缩、直接拉伸、巴西劈裂试验研究了加载方向与岩石层间夹角对页岩静态力学性能的影响, 发现页岩断裂力学性质存在较显著各向异性规律; DUTLER 等^[10]、HUANG 等^[11] 利用三点弯曲加载试验研究了砂岩、花岗岩断裂韧性各向异性, 利用数字图像相关技术表征了试样全场形变, 从而精确识别断裂过程区; 利用“V”型切口巴西圆盘试样, 获得了加载方向与岩石层面夹角为 0° , 30° , 45° 和 90° 条件下的岩石断裂韧性; 利用三点弯曲加载研究了加载方向与岩石层面空间关系

对砂岩 SCB 试样断裂韧度、断裂形式的影响;SUO 等^[12]、YU 等^[13]利用“V”型切口巴西圆盘试样、预制裂缝巴西圆盘试验,分析了预制裂缝与加载方向夹角、预制裂缝充填性等对材料断裂韧度的影响;WANG 等^[14]同时利用半圆弯曲三点弯加载和巴西圆盘试样加载试验,发现页岩断裂韧度与层面及加载方向间夹角敏感性很强。针对煤岩断裂力学测试问题,目前有学者采用三点弯曲加载结合霍普金森压杆冲击试验,对中煤阶烟煤 SCB 试样开展了断裂力学测试,分析了试样切口深度与层面角度对煤样断裂峰值载荷、断裂韧度及裂纹扩展路径的影响规律以及冲击速率、加载率等因素对煤岩动态断裂韧度的影响^[15-17]。近年来由于煤储层压裂领域研究的需求,有学者还利用压痕试验对煤岩断裂力学性质进行微观表征,进而对煤岩脆性进行定量评价^[18]。

综上不难看出,目前关于层状岩石断裂力学各向异性研究的试验方法和研究理论成果较为丰富,然而针对低阶褐煤煤岩断裂力学性质研究甚少,尤其是开展褐煤断裂特性与体积压裂改造裂缝曲折度

关系方面的研究尚未见公开报道。笔者以内蒙古胜利煤田 6 煤组褐煤为研究对象,利用三点弯曲加载对褐煤半圆弯曲试样断裂力学性质进行研究,获取煤岩断裂载荷 P_{max} 与 I 型断裂韧度 K_{Ic} 值,查明加载方位与层面夹角 θ 呈 30° 、 45° 、 60° 、 90° 及 divider 褐煤半圆试样在三点弯作用下断裂裂缝延展路径与破坏模式,利用加载位移-载荷曲线积分法计算获得了不同层面角 θ 褐煤试样的断裂能参数,在此基础上,笔者提出了考虑煤岩断裂特性的煤储层体积压裂改造模式,以期为本区低阶煤层气资源规模化开发中储层高效改造提供科学参考。

1 试样与试验

1.1 煤岩特征

由图 1a 可知,内蒙古胜利煤田 6 煤组褐煤 ($R_{o,max} < 0.45\%$) 厚度较大,煤层层面结构清晰,宏观煤岩条带交互展布。垂直煤层层面方向发育大量高角度构造裂缝,且内生裂隙系统极为发育,裂缝线密度在 $8 \sim 10$ 条/5 cm,内生裂隙缝面延展平直与层面呈垂直空间关系(图 1b)。

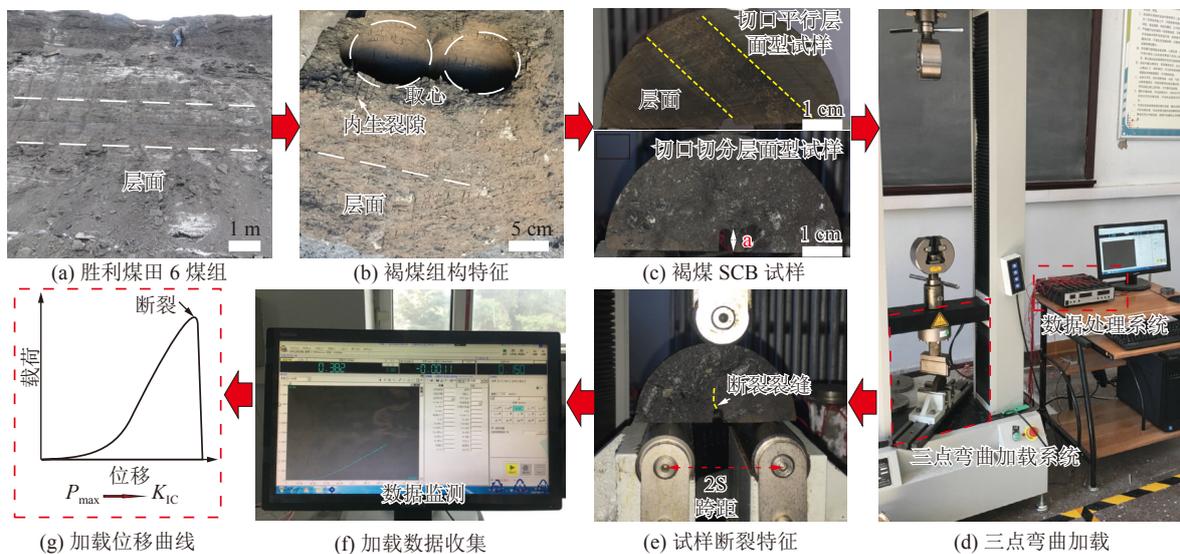


图 1 胜利煤田褐煤煤层剖面、试样制备及三点弯曲加载系统

Fig.1 Lignite formation profile, sample preparation and three-point loading system in Shengli Coalfield

1.2 试样制备

样品取自胜利煤田 6 煤组褐煤顶部分层,该分层煤体结构相对完整,便于样品运输和制样。褐煤 SCB 试样后期室内制备程序为:①用口径 94 mm 取心钻机沿垂直层面方向和平行层面方向钻取岩心;②按厚度 20 mm 以上间距切割成若干圆盘状试样,操作中由于褐煤软分层切割过程中选择性磨损,试样在厚度尺寸上允许有一定偏差;③其中沿平行层

面方向钻取的岩心切割圆盘状试样,再按照层面方向与切割半圆盘直径方向分别呈 30° 、 45° 、 60° 及 90° 沿圆盘直径方向切割成半圆盘(图 1c);沿垂直褐煤层面方向钻取的岩心切割圆盘状试样,再沿圆盘直径方向切割成 divider 半圆盘(图 1c);④上述半圆盘按垂直于半圆盘底边切口,切口形式为直切口。此次笔者共制备褐煤 SCB 试样 50 余个,从中优选无宏观裂缝、结构致密无损伤试样后期进行三点弯曲

加载。

1.3 三点弯曲试验

三点弯曲加载试验在内蒙古工业大学力学实验中心试验机(图1d)完成,试验中下部支撑滚轴跨度 S 设置为30 mm(图1e),为防止加载过快对脆性煤岩试样的惯性影响,位移移动速率设为0.02 mm/min,如图1f、图1g试样加载位移-荷载关系曲线所示,三点加载试验过程中,随着加载位移的增大,荷载 P 以恒定加载速率随之增加直至达到极限荷载 P_{\max} 试样发生断裂,利用极限荷载 P_{\max} 可计算试样材料的I型断裂韧度(K_{IC})^[19]:

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

$$Y' = -1.297 + 9.516(S/R) - \{[0.47 + 16.457 \times (S/R)]\beta + \{[1.071 + 34.401(S/R)]\beta^2\} \quad (2)$$

其中: R 、 B 分别为试样的半径和厚度, a 为试样切口长度, $2S$ 代表下部支撑滚轴的轴距。其中 $\beta = a/R$, Y' 为用有限元法导出了临界无量纲应力强度因子(SIF)^[19]。

共对加载方位与层面方向夹角 θ 为90°、60°、45°、30°及divider(切分)5组23个SCB试样进行三点弯曲加载试验,获取各试样加载位移-荷载关系、断裂荷载、及断裂特征等,并计算试样I型断裂韧度(K_{IC})。

2 试验结果及分析

2.1 层面方向对褐煤试样加载位移-荷载关系影响

不同层面方向褐煤SCB试样加载位移-荷载关系特征如图2所示。整体上,三点弯曲下褐煤试样加载位移-荷载关系可分4个阶段:①加载初期,褐煤试样与压头接触后挤压变形,试样内部的天然缺陷如孔隙、天然裂隙等压缩闭合,该阶段随着加载位移的增大轴向荷载上升速率较慢,该阶段属于孔裂隙体积压缩阶段;②加载中期,由于前期试样被压实,因此压头荷载主要作用于煤岩基质,随着加载位移增大轴向荷载快速升高,二者基本为线性正相关关系。加载位移-荷载关系曲线斜率较大,该阶段属于弹性变形阶段;③当轴向荷载 P 增大至断裂荷载 P_{\max} 后迅速卸载,此时试样瞬时发生破坏,为断裂阶段;④试样断裂后在压头作用下裂缝持续延展,荷载降低整个加载过程结束。从图2看出不同层面方向褐煤试样后期荷载下降速度均较快,说明岩石断裂速度快以及脆性断裂属性显著,表明研究区褐煤脆性较强。据相关理论可知,煤岩脆性强有利于实现煤岩体积破碎,提高储层体积压裂改造效率^[18]。

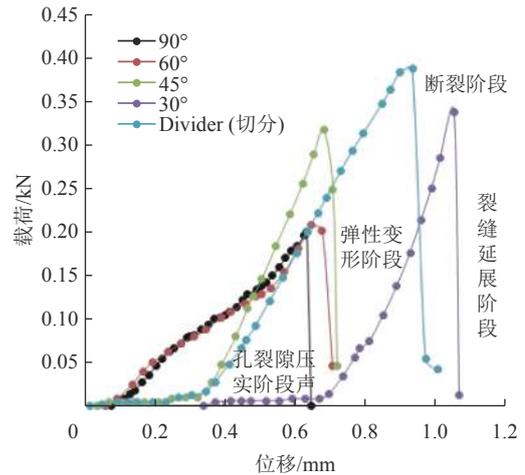


图2 不同层面方位褐煤SCB试样加载位移-荷载关系特征

Fig.2 Loading displacement-load curves of lignite SCB samples with different bedding orientations

不同层面方向胜利煤田褐煤SCB试样断裂荷载特征如图3蓝色曲线所示,图中显示不同层面方向的褐煤SCB试样断裂荷载 P_{\max} 差异很大。其中切口平行层面的4组试样随层面角 θ 增加断裂荷载 P_{\max} 增大,而divider(切分)褐煤试样断裂荷载 P_{\max} 平均为0.39 kN,显著高于切口平行层面型褐煤试样。这一结果与前人一致,亦表明层面方向对褐煤断裂力学性质有明显的制约^[15-16,19]。一般而言,试样的断裂荷载 P_{\max} 与断裂极限位移二者间有一定同步性。然而,研究发现试样HM-17($P_{\max}=0.34$ kN)断裂极限位移反而大于 P_{\max} 为0.39 kN的试样HM-3(图3),笔者认为原因可能是SCB试样切口宽度不同导致压缩作用下在切口端部形成的应力强度因子不同,因而出现试样断裂的滞后性。

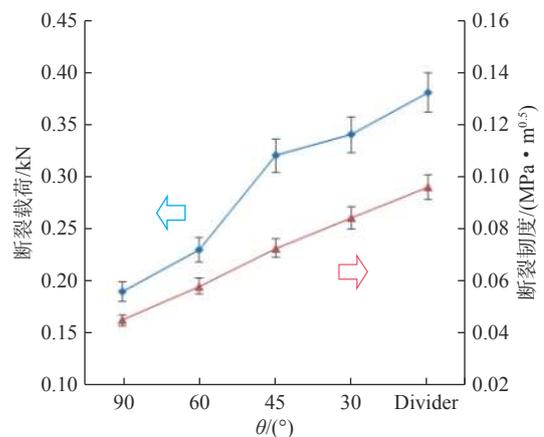


图3 不同层面方位褐煤SCB试样断裂荷载及断裂韧度特征

Fig.3 Fracture load and fracture toughness of lignite SCB samples with different bedding orientations

2.2 层面方向对褐煤SCB试样断裂韧度的影响

图3中红色曲线所示为不同层面方向褐煤SCB

试样断裂韧度。试验得出内蒙古胜利煤田6煤组褐煤I型断裂韧度 K_{IC} 在 $0.038 \sim 0.166 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ ，其中divider(切分)褐煤SCB试样断裂韧度 K_{IC} 值达 $0.098 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ 。而加载方位与层面方向夹角 θ 为 90° 、 60° 、 45° 、 30° 褐煤试样随着夹角 θ 减小，断裂韧度 K_{IC} 由 0.045 增至 $0.084 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ 。整体上切口垂直层面试样断裂韧度显著高于切口平行层面试样。由于煤岩断裂力学性质参数的强烈各向异性，将导致不同层面方向煤岩断裂过程裂缝延展难易程度与能量耗散、裂缝起裂延展压力等方面参数的变化，从而约束储层压裂裂缝的曲折度和缝网复杂度。

相对笔者前期利用压痕法试验获得的煤岩断裂韧度值，本次SCB试验获取的褐煤断裂韧度值相对较低。以下两点可能是三点弯试验煤岩断裂韧度值低于压痕法的原因：①试样尺寸效应。压痕法测试试样尺寸为cm级，压头主要作用于致密煤岩基质部位，因而试验获得煤岩断裂韧度值较大；而SCB试样尺寸较大，试样受压过程中易受材料内部天然缺陷

干扰因而测得的断裂韧度值偏低；②加载惯性效应。压痕法加载中压头与煤岩试样接触速率较快，在较短时间内完成对材料的压缩加载作用，因此受压材料会产生加载惯性，导致试验获得的力学参数值较大；而本次三点弯曲加载加载速率较慢，不易产生载荷回弹效应。

2.3 层面方向对褐煤断裂路径与破坏模式的影响

不同层面方向褐煤SCB试样的断裂路径与破坏模式如图4所示。按照岩石断裂力学机制与断裂方式主要可划分为拉张断裂和拉张剪切断裂两类，按裂缝曲折度可划分为平直型裂缝与曲折性裂缝，整体上层面方位对试样的断裂形式、断裂裂缝曲折度及裂缝整体复杂程度具有较强的影响作用，多组试样出现剪切裂缝和拉张性裂缝共存的情况。且试验发现层面方向相同条件下，褐煤试样断裂特征有共性规律，而非随机性断裂，褐煤外载下其断裂方式具有显著的制约因素和受控性。

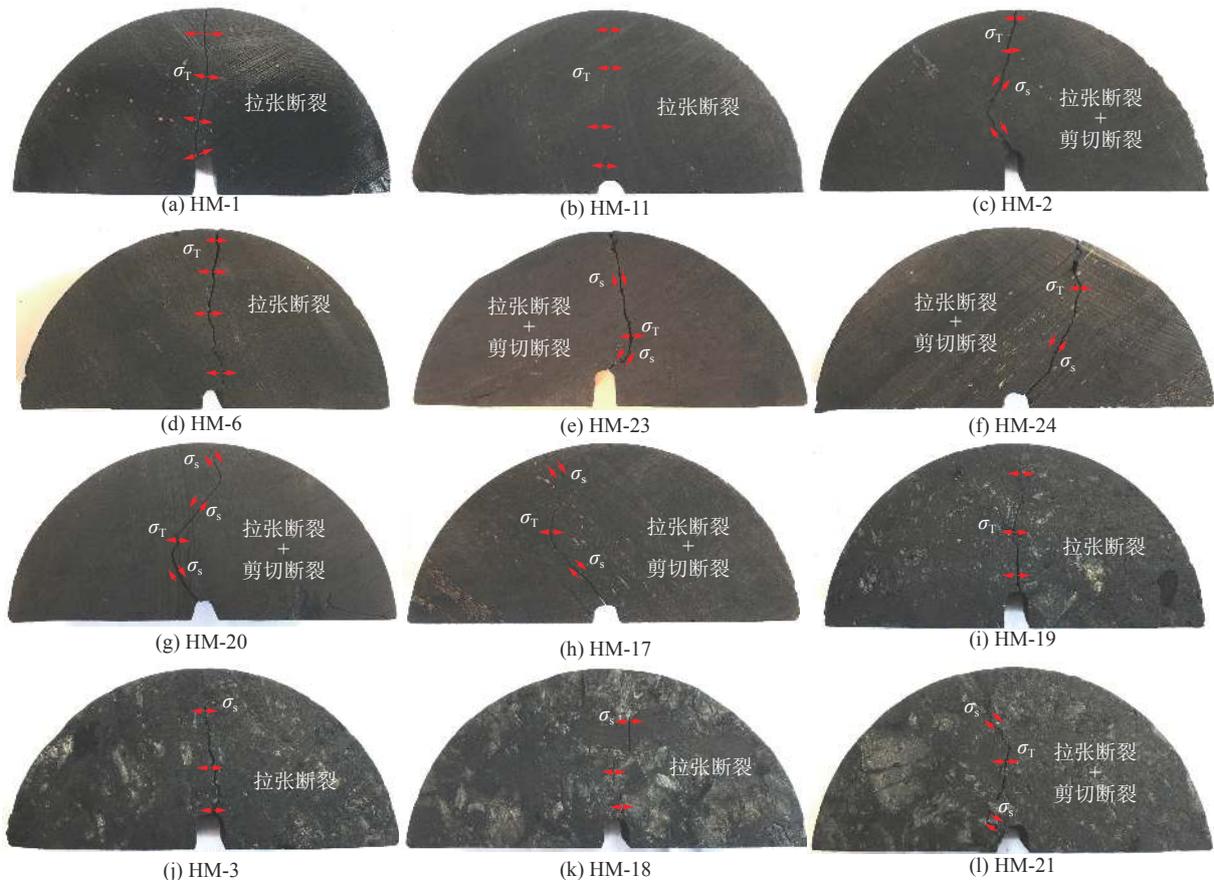


图4 不同层面方位褐煤SCB试样断裂特征与破坏模式

Fig.4 Fracture characteristics and failure modes of lignite SCB samples with different bedding orientations

1) θ 为 90° 褐煤试样断裂特征。该层面方向褐煤试样断裂形式主要为简单裂缝形式：试样沿切

口方向断裂形成简单裂缝(图4a,图4b中试样HM-1、试样HM-11)。整体上,试样断裂裂缝沿平行加载方

位和层面方向延展路径较长,断裂路径上的煤岩断裂韧度较低,裂缝延展阻力较小。由于该试样层面方位(或最大水平主应力方向)与加载方向平行,断裂路径取向受控于加载方位或煤岩层面方向尚无法确定。该角度褐煤试样断裂裂缝曲折度较低,裂缝仅在局部发生较弱的偏转后期回归于平行加载方向延展,因此储层压裂中应分析最大主应力与储层层面的空间关系,避免在二者平行条件下形成简单型裂缝。

2) θ 为 60° 褐煤试样断裂特征。该层面方向褐煤试样破坏形式主要为复杂—中等复杂形势裂缝:试样初期由切口处沿层面方向开裂,后期裂缝稳定地沿层面方向延展,中后期裂缝略有转向平行加载方位形成剪切裂缝,最终形成中等复杂程度裂缝网(图 4c 试样 HM-2)。沿层面方位路径上试样材料断裂韧度低,试样断裂裂缝延展阻力小延展速率快,试样断裂耗时较短。相对而言,试样裂缝后期沿着切割褐煤基质部位断裂,该破坏形式相对耗能较高,断裂耗时较长。总体上,当 θ 为 60° 时褐煤断裂裂缝的曲折度显著提升,但试样破坏过程能量消耗及断裂时间同样明显增大。

3) θ 为 45° 褐煤试样断裂特征。该层面方向褐煤试样破坏形式包括 3 种:①简单裂缝。试样断裂初期裂缝方向受褐煤断裂力学各向异性影响略偏向断裂韧度较低方位,中后期裂缝受轴向载荷控制偏转平行于加载方位(图 4d 试样 HM-6);②中等复杂裂缝。试样初期由切口处沿层面方向开裂形成剪切裂缝,中期裂缝转向形成拉张型裂缝,后期裂缝稳定地沿加载方向延展直至试样完全断开,形成中等复杂程度裂缝网(图 4e, 图 4f 试样 HM-23、HM-24)。③复杂裂缝。试样断裂初期裂缝沿层面方向发展形成剪切裂缝,中后期裂缝转向沿垂直层面方向延展,后期裂缝又转向沿煤岩层面方向延展形成交叉裂缝(图 4g 试样 HM-20)。

4) θ 为 30° 褐煤试样断裂特征。该层面方向褐煤试样破坏形式主要为复杂裂缝形式。试样初期沿褐煤层面开裂发展,形成剪切裂缝,中后期裂缝转向沿加载方位发展形成拉张性裂缝,后期裂缝再次岩煤岩层面发展最终形成复杂裂缝系统(图 4h 试样 HM-17)。整体上夹角越小裂缝转向时间越晚,且裂缝的形态越复杂、曲折度越高。

5) divider 褐煤试样断裂特征。divider(切分)褐煤试样断裂模式为:①简单裂缝。试样断裂路径方向与加载方位基本一致,形成简单张性断裂裂缝(图 4i, 图 4j, 图 4k 中试样 HM-19、HM-18、HM-3),裂缝曲折度与缝网复杂程度低;②中等曲折裂缝。

裂缝基本沿平行加载方向延展,裂缝曲折度高于前种(图 4l 试样 HM-21)。

2.4 层面方向对褐煤 SCB 试样断裂能的影响

如图 5a 所示,据相关理论^[19-20],三点弯曲加载全程加载位移—载荷曲线在横轴上的积分定义为整个加载过程作用于试样的断裂功 E ,按照断裂功在试样的作用阶段分为破裂前弹性储备能 E_{el} 和破裂后裂缝延展能 E_{fr} ,三者满足 $E=E_{el}+E_{fr}$ 的数学关系。断裂功 E 、弹性储备能 E_{el} 、裂缝延展能 E_{fr} 与褐煤试样断裂裂缝表面积 2 倍的比值即为总断裂能、弹性断裂能和延展断裂能。利用上述方法,笔者对各层面方向的褐煤试样的总断裂能、弹性断裂能及延展断裂能进行计算。由图 5b—图 5e 可知,层面角 θ 为 90° 、 60° 、 45° 、 30° 褐煤试样总断裂能分别为 64.38、80.49、112.50、146.66 J/m^2 ,随着层面角的减小褐煤试样断裂耗能增高;图 5f 显示切口切分层面试样 HM-3 的总断裂能为 355.00 J/m^2 ,表明垂直层面方向破岩能耗最大,而沿平行或斜交层面方向时断裂能较低。值得指出的是,对于脆性岩石而言,由于试样断裂后载荷迅速下降因此裂缝延展能 E_{fr} 部分几乎为零,而对于塑性材料裂缝延展能 E_{fr} 的比例却很高,因此依据裂缝延展能与弹性储备能的比值可对试样材料的脆性进行定量评价。由图 5b—图 5f 可知内蒙古胜利煤田 6 煤组褐煤试样加载全程能量消耗主要为断裂前的弹性变形储能阶段, E_{fr} 与 E_{el} 的比值接近为 0,反映研究区褐煤的脆性非常显著。

3 讨论

3.1 褐煤断裂力学各向异性对裂缝曲折度的约束

研究发现,SCB 试样切口(等同于压裂中储层天然裂缝)与煤岩层面的空间关系对断裂路径及后期裂缝的复杂性和曲折度影响深刻,而裂缝复杂性和曲折度对煤储层大规模改造中煤岩的整体破碎效率及解吸面积提升具有重要意义。试验表明:整体上 divider(切分)褐煤试样断裂裂缝形态较简单,无明显的裂缝转向或裂缝转向幅度较小、裂缝曲折度较低;而切口与层面平行或斜交时褐煤试样裂缝形态较为复杂,试验发现层面角 θ 越大的试样三点弯加载下断裂裂缝转向越晚,其中当层面角 θ 为 45° 时褐煤试样裂缝转向最频繁,据有关理论^[20],该条件下褐煤试样在三点弯曲作用下易发生沿层面的“滑移”效应,导致裂缝的频繁转向。同时本次试验还发现次级天然裂缝对褐煤试样断裂裂缝延展的影响较为微弱,裂缝延展主要受控于外载方向(等同于压裂中的最大主应力)和煤岩层面、试样切口(等同于压裂中储层天然裂缝)的空间关系。在褐煤煤储层压裂改

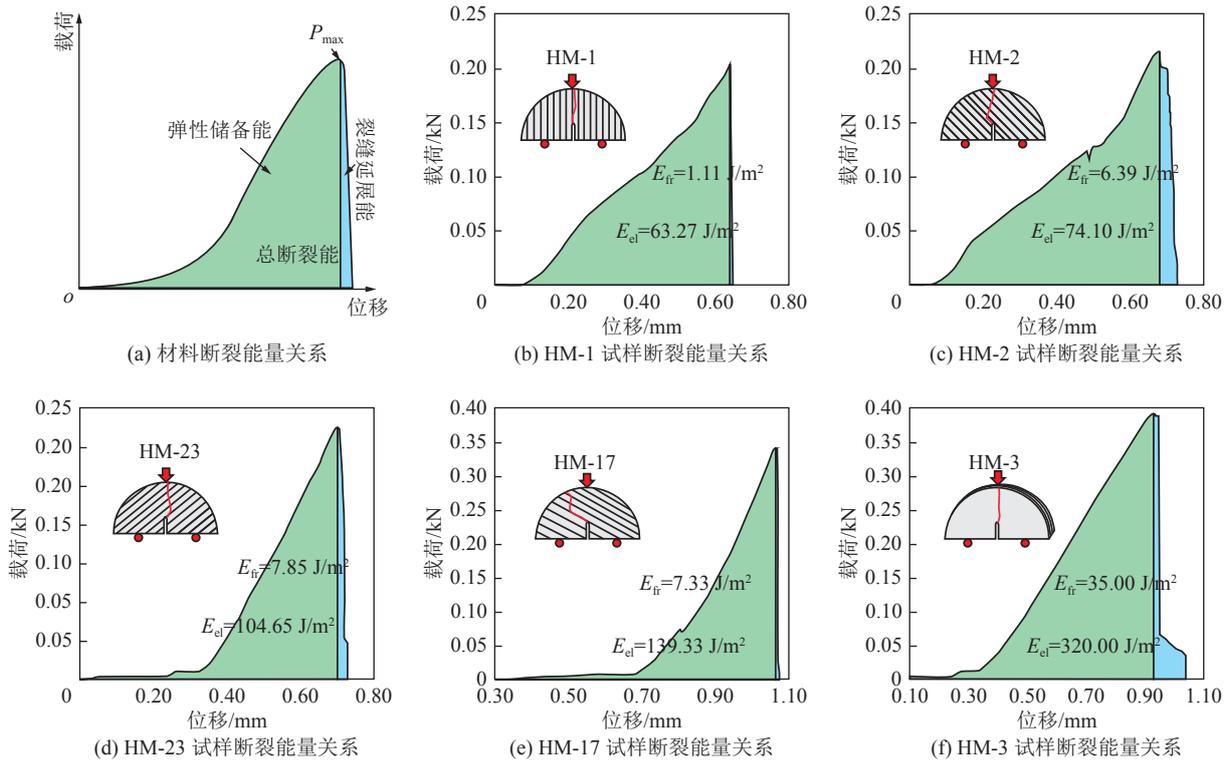


图5 不同层面方向褐煤 SCB 试样断裂能计算原理及结果

Fig.5 Calculation principle and result of fracture energy of lignite SCB samples with different bedding directions

造中可通过优化压裂裂缝壁面与最大主应力、煤层层面三者间的空间关系,实现压裂裂缝系统的复杂性和曲折度的提升。

3.2 基于褐煤断裂特性的煤储层压裂模式的提出

基于褐煤断裂力学分析,提出内蒙古胜利煤田褐煤煤储层压裂裂缝延展特征及改造模式(图6)。

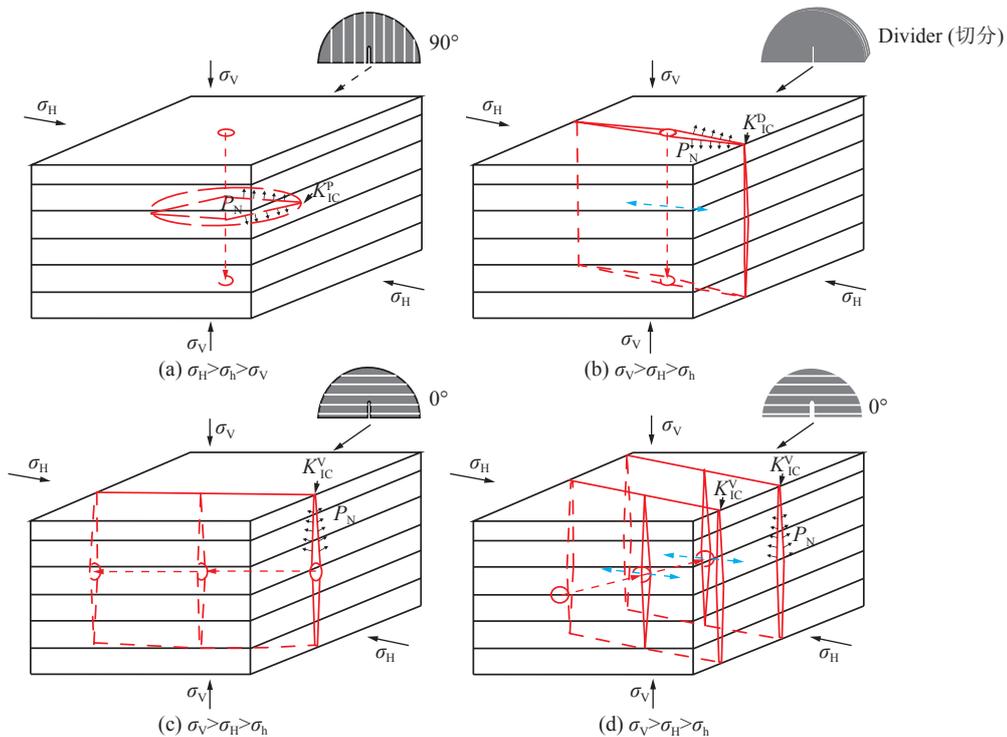


图6 基于断裂力学特性的褐煤储层压裂改造模式

Fig.6 Fracturing modes of coal reservoir considering lignite fracture characteristics

图 6a 为浅部煤层压裂时由于垂向应力为最小应力方向, 因此形成水平裂缝形态, 此时压裂裂缝延展抵抗的是切口平行层面且层面角为 90° 方向上的褐煤断裂韧度 K_{IC}^P , 该层面方向褐煤断裂韧度最低, 因此前部褐煤储层营造水平缝过程中能量消耗最低, 在同等外界功输入前提下造缝规模最大。当煤层深度较大此时最小水平主应力为最小应力方向, 如图 6b 所示, 直井开发形式时压裂裂缝沿最大垂直应力方位延展形成单一垂直裂缝, 裂缝与煤层面为 divider(切分) 关系, 裂缝端部抵抗切分褐煤煤岩层面方向的断裂韧度 K_{IC}^O , 压裂裂缝延展断裂能高、延展难度大, 压裂裂缝造缝规模受限。图 6b, 图 6c 所示分别为平行、垂直最大水平主应力 (σ_H) 方向顺层井开发形式, 该情况下压裂裂缝端部抵抗的切口平行层面且层面角为 0° 方向上的断裂韧度 K_{IC}^V , 该方向褐煤断裂韧度适中, 裂缝延展过程断裂能耗相对较低、裂缝延展难度中等。从断裂能量耗散角度分析, 胜利煤田深部褐煤煤储层压裂改造中采取顺层井更适宜。对于上述平行和垂直最大水平主应力 σ_H 方向 2 种顺层井而言, 平行 σ_H 方向顺层井压裂过程携砂与裂缝充填效果更好, 可以避免砂堵。

4 结 论

1) 加载方位与层面方向夹角 θ 为 90° 、 60° 、 45° 、 30° 内 蒙 古 胜 利 煤 田 6 煤 组 褐 煤 试 样 断 裂 韧 度 分 别 为 0.045 、 0.058 、 0.073 、 $0.084 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$, divider(切分) 褐煤试样断裂韧度 $0.096 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$, 整体上切口切分层型试样断裂韧度高于切口平行层型试样, 层面方向对褐煤断裂力学特性影响显著。

2) 三点弯加载下胜利煤田褐煤试样断裂经历孔裂隙缺陷压缩、弹性变形、断裂破坏及裂缝延展 4 个阶段, 不同层面方位褐煤试样断裂后载荷迅速下降表明本区褐煤断裂速率快、脆性强适于开展体积压裂。

3) 利用加载位移-荷载曲线积分法得出胜利煤田层面角 θ 为 90° 、 60° 、 45° 、 30° 及 divider(切分) 褐煤试样断裂能分别为 64.38 、 80.49 、 112.50 、 146.66 、 355.00 J/m^2 , 垂直褐煤层面方向断裂能耗最大, 而沿平行或斜交层面方向断裂能较低。

4) 胜利煤田褐煤 SCB 试样三点弯加载下断裂裂缝延展方位主要受控于外载方向和层面(或主干天然裂缝)的夹角, 受次级裂缝影响微弱。煤储层压裂中可通过优化压裂裂缝与最大主应力、煤岩层面的空间关系, 提升压裂裂缝曲折度。

5) 胜利煤田浅部褐煤储层压裂中裂缝延展方向

上煤岩断裂韧度最低。深部褐煤储层直井压裂造缝方向上煤岩断裂韧度要大于顺层井形式, 本区建议采取顺层井压裂造缝。同时从流体和颗粒惯性分析, 平行最大水平主应力方向的顺层井压裂中能够避免砂堵, 因而压裂流体携砂及裂缝充填效果更好。

参考文献(References):

- [1] 王生维, 陈立超. 煤储层水力压裂裂缝延展机制[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2017.
WANG S W, CHEN L C. Hydraulic fracturing fracture propagation mechanisms in coal reservoirs [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2017.
- [2] 吕帅锋, 王生维, 刘洪太, 等. 煤储层天然裂隙系统对水力压裂裂缝扩展形态的影响分析[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2590-2601.
LYU S F, WANG S W, LIU H T, et al. Analysis on the influence of natural fracture system of coal reservoir on the fracture propagation form of hydraulic fracturing[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2590-2601.
- [3] 陈立超, 王生维. 煤岩断裂力学性质对储层压裂改造的影响[J]. 天然气地球科学, 2020, 31(1): 122-131.
CHEN L C, WANG S W. Fracture properties of high-rank coal and its constraint on hydraulic fracturing stimulation of coal reservoir[J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31(1): 122-131.
- [4] 程远方, 常 鑫, 孙元伟, 等. 基于断裂力学的页岩储层缝网延伸形态研究[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(4): 603-611.
CHENG Y F, CHANG X, SUN Y W, et al. Research on fracture network propagation pattern of shale reservoir based on fracture mechanics[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(4): 603-611.
- [5] KURUPPU M D, CHONG K P. Fracture toughness testing of brittle materials using semi-circular bend (SCB) specimen[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2012(91): 133-150.
- [6] 赵扬锋, 荆 刚, 李 兵, 等. 花岗岩单轴压缩下电荷信号时频特征研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(9): 47-53.
ZHAO Yangfeng, JING Gang, LI Bing, et al. Charge signal time-frequency characteristics of granite under uniaxial compression[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(9): 47-53.
- [7] 夏彬伟, 刘仕威, 欧昌楠, 等. 综放采动应力路径下单裂隙砂岩力学特性试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(2): 95-105.
XIA Binwei, LIU Shiwei, OU Changnan, et al. Experimental study on mechanical properties of sandstone with single fracture under fully-mechanized top-coal caving mining stress path[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(2): 95-105.
- [8] TIENNOT M, MERTZ J, BOURGÈS A. Influence of Clay Minerals Nature on the Hydromechanical and Fracture Behaviour of Stones[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019(52): 1599-1611.
- [9] JIN Z F, LI W X, JIN C R, et al. Anisotropic elastic, strength, and fracture properties of Marcellus shale[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018(109): 124-137.
- [10] 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): 56–79.
- [11] HUANG D, LI B, MA W Z, *et al.* Effects of bedding planes on fracture behavior of sandstone under semi-circular bending test[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2020(108): 102625.
- [12] SUO Y, CHEN Z, RAHMAN S S, *et al.* Experimental and numerical investigation of the effect of bedding layer orientation on fracture toughness of shale rocks[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020(53): 3625–3635.
- [13] YU J, SHANG X C. Analysis of the influence of boundary pressure and friction on determining fracture toughness of shale using cracked Brazilian disc test[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2019(212): 57–69.
- [14] WANG H, ZHAO F, HUANG Z, *et al.* Experimental study of mode-I fracture toughness for layered shale based on two ISRM-suggested methods[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2017(50): 1933–1939.
- [15] 赵毅鑫, 龚爽, 姜耀东, 等. 基于半圆弯拉试验的煤样抗拉及断裂性能研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(6): 1255–1264.
- ZHAO Y X, GONG S, JIANG Y D, *et al.* Characteristics of tensile strength and fracture properties of coal based on semi-circular bending tests[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(6): 1255–1264.
- [16] ZHAO Y X, GONG S, HAO X J, *et al.* Effects of loading rate and bedding on the dynamic fracture toughness of coal: Laboratory experiments[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2017(178): 375–391.
- [17] 殷志强, 谢广祥, 胡祖祥, 等. 不同瓦斯压力下煤岩三点弯曲断裂特性研究[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(2): 424–431.
- YIN Z Q, XIE G X, HU Z X, *et al.* Investigation on fracture mechanism of coal rock on three-point bending tests under different gas pressures[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(2): 424–431.
- [18] 陈立超, 王生维, 张典坤. 煤岩脆性特征压痕法评价及储层改造意义[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(S2): 955–964.
- CHEN L C, WANG S W, ZHANG D K. Characteristics of coal and rock brittleness indentation method evaluation and reservoir reconstruction significance[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(S2): 955–964.
- [19] 陈立超, 王生维, 张典坤. 层理方位对致密砂岩断裂行为影响及其压裂意义[J]. *地下空间与工程学报*, 2021, 17(S2): 689–695.
- CHEN L C, WANG S W, ZHANG D K. Influence of bedding orientation on fracture behavior of tight sandstone and its fracturing significance[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2021, 17(S2): 689–695.
- [20] KURUPPU M, OBARA Y, AYATOLLAHI M, *et al.* ISRM-suggested method for determining the mode I static fracture toughness using semi-circular bend specimen[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, 47(1): 267–274.