

碎软煤层间接压裂破裂压力及裂缝形态演化试验

朱帝杰^{1,2}, 梁卫国^{1,2}, 牛 栋^{1,2}, 落弘业^{1,2}, 任森涛^{1,2}, 胡善为^{1,2}

(1. 太原理工大学 原位改性采矿教育部重点实验室, 山西 太原 030024; 2. 太原理工大学 矿业工程学院, 山西 太原 030024)

摘 要: 顶板水平井间接压裂是一种碎软低渗煤层气高效开采的有效技术, 确保压裂穿层并在煤层中形成导流能力良好、形态复杂的压裂缝网是该技术的关键。为探究碎软煤层间接压裂不同射孔深度条件下破裂压力和水力裂缝形态的演化规律, 开展了不钻孔深度煤-砂质泥岩组合体真三轴压裂试验, 结合声发射技术监测水力裂缝扩展动态响应, 利用三维形貌扫描技术刻画煤体水力裂缝面形貌特征, 并系统分析了钻孔深度对破裂压力、穿层效果与裂缝面形貌的影响机理。试验结果表明: 随着钻孔深度增大, 砂质泥岩破裂压力和破裂时间显著减小, 水力裂缝面更曲折粗糙。钻孔深度由 25 mm 增至 45 mm 时, 破裂压力降低 1.57 MPa, 破裂时间减少 7 s, 水力裂缝由直接穿层转变为先沿界面扩展一段距离后再穿层, 注入压力曲线出现“二次峰值”, 对应稳定渗流的注入压力更高, 煤体水力裂缝面粗糙度系数增加 12.5, 表明增大钻孔深度可促进砂质泥岩破裂, 有助于在煤体内形成形态复杂、表面粗糙、导流能力良好的水力裂缝。钻孔深度越小, 水力裂缝起裂扩展释放的能量和声发射事件数越多。相较于 45 mm 深钻孔, 25 mm 深钻孔对应声发射累积能量多 0.81 nJ, 对应煤岩组合体声发射事件数多 70 个, 对应煤体声发射事件数多 40 个, 对应水力裂缝形态因砂质泥岩断裂导致的高能冲击效应而更为平直, 表明减小钻孔深度有助于水力裂缝由砂质泥岩穿层进入煤体。煤-砂质泥岩组合体的无量纲弹性参数值为 0.38, 明显小于应力在岩石内部均匀传递所需的 0.5, 导致砂质泥岩内产生张拉型内应力。该内应力是钻孔深度影响砂质泥岩破裂压力的重要原因。间接压裂顶板水平井距煤岩界面越远或射孔深度越小, 水力裂缝越容易由顶板扩展至煤层, 但同时在煤层内的水力裂缝形态更平直, 不利于形成复杂压裂缝网。因此, 间接压裂顶板水平井钻进层位和射孔深度理论上存在一个最优值, 该值的确定需综合考虑穿层效果、煤层压裂缝网复杂程度及其导流能力。研究结果可为间接压裂顶板水平井层位和射孔深度优化提供理论指导。

关键词: 碎软煤层; 间接压裂; 破裂压力; 声发射响应; 裂缝面特征

中图分类号: TE377; TU45 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2025)04-2063-14

Evolution of broken pressure and fracture morphology in indirect fracturing for broken-soft coal

ZHU Dijie^{1,2}, LIANG Weiguo^{1,2}, NIU Dong^{1,2}, LUO Hongye^{1,2}, REN Sentao^{1,2}, HU Shanwei^{1,2}

(1. Key Laboratory of In-Situ Property-Improving Mining of Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

收稿日期: 2024-08-19 策划编辑: 郭晓炜 责任编辑: 刘雅清 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.0990

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目 (52304100); 国家区域创新发展联合基金资助项目 (U22A20167); 山西省基础研究计划面上资助项目 (202103021224059)

作者简介: 朱帝杰 (1990—), 男, 河南商丘人, 讲师, 硕士生导师, 博士。E-mail: zhudijie@tyut.edu.cn

通讯作者: 梁卫国 (1972—), 男, 山西孟县人, 教授, 博士。E-mail: liangweiguo@tyut.edu.cn

引用格式: 朱帝杰, 梁卫国, 牛栋, 等. 碎软煤层间接压裂破裂压力及裂缝形态演化试验[J]. 煤炭学报, 2025, 50(4): 2063-2076.

ZHU Dijie, LIANG Weiguo, NIU Dong, et al. Evolution of broken pressure and fracture morphology in indirect fracturing for broken-soft coal[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(4): 2063-2076.



移动阅读

Abstract: Indirect fracturing using a horizontal well in roof is a promising technology for methane exploitation in broken soft and low-permeability coal seams. Stratum-penetration fracturing and a complex fracture network with good conductivity are two keys for indirect fracturing. To study the evolution of broken pressure and fracture morphology under different perforation depths in indirect fracturing, true triaxial hydraulic fracturing experiments for coal-sandy mudstone blocks with different borehole depths were carried out. The dynamic response for hydraulic fracture propagation was monitored using acoustic emission (AE), and the surface of the hydraulic fracture in coal was reconstructed using 3D topography scanning. In addition, the influence mechanisms of borehole depth on the broken pressure, fracture stratum-penetration behavior, and fracture surface roughness were analyzed. The results show that: As the borehole depth increases, the broken pressure and broken time of sandy mudstone both decrease, and the fracture morphology becomes zigzag and rough. When the borehole depth increases from 25 mm to 45 mm, the broken pressure decreases by 1.57 MPa and the broken time decreases by 7 s. The hydraulic fracture firstly extends along the interface and then penetrates the coal rather than directly penetrating it. The injection pressure-time curve shows an obvious secondary peak, the injection pressure for fluid steady seepage increases, and the roughness of the fracture in coal increases by 12.5. The above phenomena suggest that increasing the borehole depth can facilitate the breakdown of sandy mudstone and complex hydraulic fractures with a rough surface and good conductivity. The released AE cumulative energy and AE events both increase with decreasing borehole depth. Comparing the case with a borehole depth of 25 mm to the case with a borehole depth of 45 mm, the AE cumulative energy of the former is 0.81 nJ larger than that of the latter, and the AE events in coal-rock block and coal of the former are 70 and 40 more than that of the latter, respectively. The fracture shape is straighter because of the more obvious energy impact effect resulting from sandy mudstone failure. The above phenomena suggest that decreasing borehole depth can facilitate fracture penetration. The dimensionless constant characterizing the elastic modulus and Poisson's ratio of the coal-rock block is 0.38, which is obviously smaller than 0.50, which is required for uniform stress transfer in rock, inducing internal tensile stress in sandy mudstone. The induced internal tensile stress in sandy mudstone is a major reason for the influence of borehole depth on the broken pressure. As the distance between the horizontal well and coal-rock interface increases or the perforation depth decreases, the hydraulic fracture is more prone to penetrating into the coal, but the shape of the hydraulic fracture in coal is straighter and smoother, inhibiting the complex fracture network. Therefore, in theory, there is an optimal value for the drilling position of the horizontal well in roof and the perforation depth, the determination of which should include the fracture penetration effect and the complexity and conductivity of the fracture network in coal. The research results can provide theoretical guidance for optimizing the drilling position of the horizontal well in roof and the perforation depth.

Key words: broken-soft coal seams; indirect fracturing; broken pressure; acoustic emission response; fracture surface characteristics

0 引 言

顶板水平井间接压裂是开采碎软煤层煤层气的有效手段^[1-2], 该技术最早由 OLESN 等^[3]提出, 其核心思想是将水平井布置在坚硬顶板中, 通过注水压裂使水力裂缝扩展至煤层并在其中形成复杂压裂缝网。可见, 水力裂缝跨煤岩界面扩展规律与机理是该技术成功实施的关键问题, 国内外学者对此开展了卓有成效的研究。

物理试验方面, 武鹏飞等^[4]研究了水力裂缝由砂质泥岩向煤体越界扩展机理, 指出水力裂缝在煤岩界面处偏转有利于在煤中形成复杂缝网; 姜玉龙等^[5]、JIANG 等^[6-7]和 HE 等^[8]研究了地应力和界面摩擦因

数对压裂裂缝由岩石向煤体扩展的影响规律, 并对比了超临界 CO₂ 和活性水压裂裂缝穿层效果和形态差异, 指出较大的垂向应力与界面摩擦因数有利于压裂裂缝穿层, 相较于活性水, 超临界 CO₂ 不利于压裂裂缝穿层, 但其形成的裂缝更为复杂; ZHAO 等^[9]以煤系地层压裂开采煤系气为工程背景, 研究了压裂层位对水力裂缝穿层效果的影响, 指出以砂岩为压裂层水力裂缝易扩展至煤层, 而以煤层为压裂层水力裂缝难以扩展至砂岩; 高杰等^[10]也得出类似结论, 其研究还表明, 水力裂缝在薄煤层起裂较在厚煤层起裂更易穿层进入砂岩, 高黏度瓜胶较低黏度活性水更利于水力裂缝穿层; TAN 等^[11]分别以页岩、砂岩和石灰岩为压裂层位, 研究了岩层弹性模量对水力裂缝穿层效果的影

响,指出较高的压裂层弹性模量有利于水力裂缝扩展进入煤层;李文达等^[12]研究了 N_2 泡沫对压裂裂缝穿层效果和裂缝形态的影响,结果表明,相较于活性水, N_2 泡沫因其高黏度、低滤失特性更易导致裂缝穿层,形成的压裂裂缝导流能力更强。

数值模拟方面,ZHU等^[13]基于Mohr-Coulomb屈服模型,基于有限元法模拟研究了煤体塑性对水力裂缝跨煤岩界面扩展的影响,指出煤体塑性可促进水力裂缝由顶板向煤层扩展,但会抑制水力裂缝在煤层内扩展;李勇等^[14]基于Cohesive单元模拟研究了起裂位置、有效应力差、煤与顶板弹性模量差、施工排量对水力裂缝形态和扩展速度的影响,确定了适合间接压裂的地应力和煤-顶板岩性组合条件;借助Abaqus软件,许耀波^[15]模拟研究了顶板水平井压裂段间距和压裂施工方式(各段连续压裂、渗流扩散卸压后再压裂下一段)对水力裂缝穿层效果的影响,指出较大压裂段间距和渗流扩散卸压压裂可显著弱化各段之间的应力干扰,有利于水力裂缝由顶板穿层;姜在炳等^[16]模拟研究了地应力和顶板水平井位置对水力裂缝穿层效果的影响,指出为保证水力裂缝穿层,垂向应力需大于最小水平主应力,顶板最小水平主应力需大于煤层,并优选了特定地应力条件下的水平井位置;庞涛等^[17]也模拟研究了顶板水平井空间位置对水力裂缝穿层效果的影响,指出为保证水力裂缝顺利穿层且主要在煤层中扩展,压裂应优选井斜角小、地层倾角小、距煤距离近的井段。

理论分析方面,主要集中在水力裂缝在结构弱面处扩展路径的预测。基于弹性力学,BLANTON^[18-19]假设水力裂缝扩展至弱面时裂尖钝化,分别提出了弱面张开、滑移和水力裂缝的判别准则;WAROINSKI等^[20]考虑弱面渗透率对孔隙压力影响,同样假设水力裂缝尖端在弱面处钝化,建立了界面张开和滑移判别准则。基于断裂力学,针对水力裂缝与界面正交情形,RENSHAW等^[21]不考虑弱面黏聚力,提出了水力裂缝穿过判别准则(R&P准则);SARMADIVALEH等^[22]考虑弱面黏结力,将R&P准则扩展至水力裂缝与弱面非正交情形(S&R准则);ZHU等^[23]考虑水力裂缝尖端应力场非奇异项,修正了S&R准则;CHENG等^[24]将S&R准则扩展至三维空间;王涛等^[25]通过分析弱面两侧岩体受力平衡,建立了弱面张开、滑移和水力裂缝穿过判别准则,该准则为显式表达式,使用方便;ZHAO等^[26-27]综合考虑压裂液流动和水力裂缝弹性变形,针对水力裂缝以任意角度动态逼近弱面情形,建立了弱面稳定性和水力裂缝扩展路径判别准则。

基于上述准则,学者们分析了地应力、弱面倾角与抗剪强度、压裂液排量等对水力裂缝扩展路径的影响。但这些准则均是针对弱面两侧岩性相同情形而建,并不适用间接压裂煤岩界面两侧岩性差异显著的情况。鉴于不同材料内部应力跨界面传递的复杂性,尚难以建立可准确描述顶板和煤层岩性差异的水力裂缝扩展路径理论判别模型。

综上所述,当前关于顶板水平井间接压裂水力裂缝跨界面扩展的研究主要集中在地应力、界面倾角与黏聚力、煤与顶板力学性质差异、压裂参数(排量、压裂液类型)与施工方式(各段连续压裂、渗流扩散卸压后再压裂下一段)、压裂层位优化等方面,且主要关注水力裂缝能否穿层,鲜有涉及顶板水平井位置或射孔深度对破裂压力和煤层水力裂缝形态演化的影响,且缺乏煤岩破裂和水力裂缝形态的定量分析。

笔者以阳泉矿区新景矿3号煤层顶板水平井间接压裂开采煤层气为工程背景,基于煤-砂质泥岩组合体真三轴压裂试验,辅以声发射和三维形貌扫描技术定量刻画煤岩破裂和裂缝面形貌特征,研究了砂质泥岩钻孔深度对破裂压力和水力裂缝形态的影响规律。结合弹性力学和断裂力学理论,讨论了破裂压力和水力裂缝形态的演化机理。研究结果可推动煤系地层水力压裂破裂压力预测模型的发展,并为间接压裂顶板水平井层位和射孔深度优化提供指导。

1 试验

1.1 试验设备

本次试验采用自行研制的TCHFSM-I型大尺寸真三轴压裂渗流模拟装置,如图1所示。该装置由5个伺服控制的高精度油缸对试件进行应力加载,最大荷载达3 000 kN,加载精度为0.01 kN/s。此外,该装置配备了恒流-恒压泵,最大流量为200 mL/min,同时配备有高频压力传感器,可实时采集注入压力。



图1 TCHFSM-I型大尺寸真三轴压裂渗流装置

Fig.1 TCHFSM-I large-size true tri-axial fracturing seepage device

1.2 试件制备

本次试验所用煤和顶板样品取自阳泉矿区新景

矿 3 号煤层 3107 工作面, 其中煤体结构破碎, 属于无烟煤, 顶板为砂质泥岩, 对应基本力学参数见表 1。

表 1 煤岩基本力学参数
Table 1 Mechanics parameters of coal and rock

类型	弹性模量 /GPa	泊松比	抗拉强度 /MPa	断裂韧度 /(MPa · m ^{0.5})	单轴抗压强度 /MPa	坚固性系数 /MPa
3号煤	1.35	0.30	0.60	0.09	5.24	0.52
砂质泥岩	5.61	0.25	3.51	0.62	27.89	2.79

采用 DL 系列环形金刚石线切割机 (图 2) 将原煤和砂质泥岩块样切割成标准型件, 切割机具体参数设置如下: 金刚石线直径为 0.65 mm, 绕线圆盘转速为 20 r/min, 机床平推速度为 20 cm/h。最终加工 100 mm × 100 mm × 100 mm 砂质泥岩立方体试件 6 组 (图 3a), 100 mm × 100 mm × 50 mm 砂质泥岩和煤长方体试件各 9 组。将煤体长方体试件 100 mm × 100 mm 截面向上放置, 均匀涂抹一层厚度为 1 mm 的白乳胶, 然后将砂质泥岩长方体试件叠置其上, 利用砂质泥岩自重黏结, 黏结时间统一为 24 h, 最终制成 100 mm × 100 mm × 100 mm 的煤岩组合体试件 (图 3b)。上述制备方法较大程度上削弱了各试件界面黏结强度差异。此外, 采用高强度黏结剂 (如白乳胶) 制备煤岩组合体试件可避免试验时界面断裂^[28], 加之本试验垂直地应力显著大于水平地应力, 压裂时界面不会发生剪切滑移或张拉破坏。因此, 各试件界面黏结强度差异对试验结果的影响可忽略不计。

端部接触食盐, 室温下用高强度环氧树脂胶固管封孔 48 h。

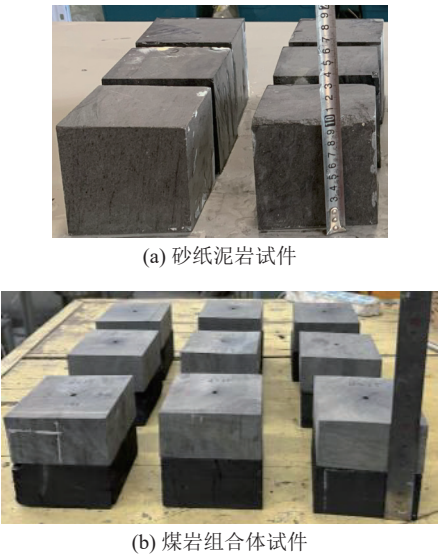


图 3 压裂试验试件

Fig.3 Test specimens for fracturing experiment



图 2 DL 环形金刚石线切割机

Fig.2 DL ring type diamond wire cutting machine

1.3 试验步骤与方案

具体试验步骤如下:

1) 压裂钻孔布置: 利用钻机在图 3 所示压裂试件砂质泥岩表面正中心处钻取直径为 6 mm、深度为 d 的钻孔, 并在其底部铺设厚为 5 mm 的食盐, 即所有试件均预留 5 mm 的压裂段。压裂钻孔布置如图 4 所示。

2) 压裂管埋设: 将外径为 4 mm、内径为 3 mm、长度为 150 mm 的高强度压裂管垂直插入钻孔, 直至

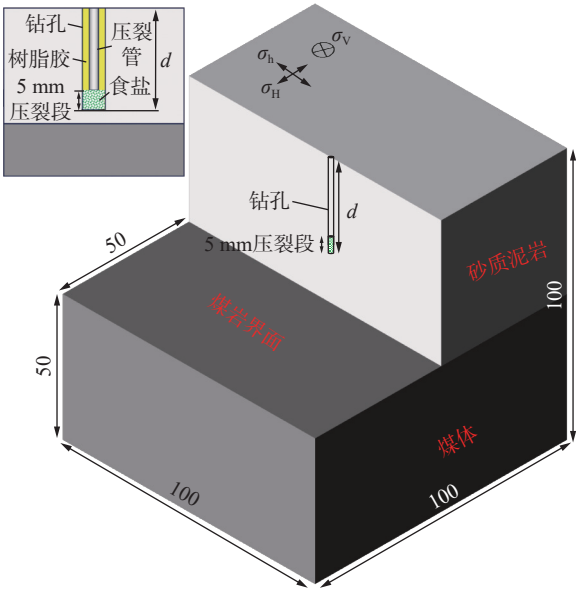


图 4 压裂钻孔布置示意

Fig.4 Diagram of fracturing borehole layout

3) 压裂试件密封: 将埋设好压裂管的试件置于胶

套内, 分别密封试件左右前后和上表面, 以保证后续加载时试件仅受均匀压应力而不受剪应力。其中顶部胶套中心镂空, 以供压裂管穿过, 前胶套设有 3 个圆形孔洞、后胶套中心设有 1 个圆形孔洞, 供后续声发射探头直接布置在试件表面。

4) 声发射探头布置: 将密封好的试件置于压裂腔, 利用压裂管线连接压裂管和恒流-恒压泵。利用 SAEU3H-8 型多通道声发射系统监测试件声发射响应, 声发射探头依据胶套孔洞位置布置, 如图 5 所示。

5) 三轴应力加载: 三轴应力根据 3 号煤层真实地应力设置, 为避免加载时因三轴应力差导致试件压剪破坏, 应力分 3 级加载。先将三轴应力同步加载至最小水平地应力 σ_h 设定值 6 MPa, 稳压 10 min; 然后同步加载垂直地应力 σ_v 和最大水平地应力 σ_H 至设定值 11 MPa, 再稳压 10 min; 最后将 σ_v 缓慢加载至其设定值 15 MPa, 稳压 30 min。

6) 注水压裂: 打开恒流-恒压泵, 同时开启声发射系统, 通过压裂管线向试件注入清水, 所有试件注入速率均为 20 mL/min, 并通过高频压力传感器实时监测注入压力变化。

7) 裂缝面形貌获取: 采用 OKIO-H-200 型 3D 形貌扫描仪对煤体水力裂缝面进行形貌扫描, 获取煤体

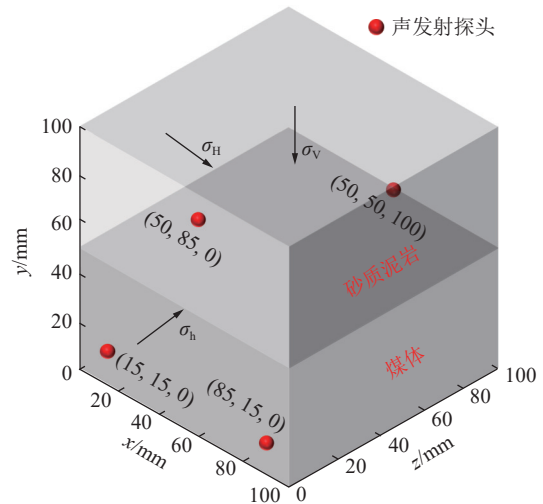


图 5 煤岩组合体声发射探头布置与地应力方向示意
Fig.5 Diagram of the AE sensor arrangement and in-situ stress direction in coal-rock block

水力裂缝面点云数据, 利用 Imageware 和 Surfer 软件对点云数据进行后处理, 获取煤体水力裂缝面形貌云图。

试验以钻孔深度 d 为变量, 分析其对破裂压力和水力裂缝形态的影响规律。具体方案见表 2, 其中试件 R-2~R-6 为砂质泥岩立方体试件, CR-1~CR-9 为煤岩组合体立方体试件。

表 2 水力压裂试验方案

Table 2 Hydraulic fracturing test scheme

试件编号	R-2	R-3	R-4	R-5	R-6	CR-1	CR-2	CR-3	CR-4	CR-5	CR-6	CR-7	CR-8	CR-9
钻孔深度 d /mm	25	25	25	25	25	25	25	25	35	35	35	45	45	45

2 结果分析

通过分析水力裂缝宏观形态、注入压力曲线、声发射响应和煤体水力裂缝面形貌特征, 定量研究了砂质泥岩钻孔深度对水力裂缝跨煤岩界面扩展的影响规律与机理。综合水力裂缝宏观形态、注入压力曲线、声发射监测和煤体水力裂缝形貌扫描试验效果, 且为保证同一试件上述试验结果可相互验证, 后续分别以 CR-1($d=25$ mm)、CR-6($d=35$ mm) 和 CR-7($d=45$ mm) 试件为例对试验结果进行分析。

2.1 水力裂缝宏观形态

CR-1、CR-6 和 CR-7 试件对应的水力裂缝宏观形态 (红色曲线) 如图 6 所示。可知 CR-1 试件水力裂缝在煤岩界面处直接穿层, 且煤体中水力裂缝总体较平直; CR-6 试件水力裂缝同样在煤岩界面处直接穿层, 但煤体中水力裂缝形态相对曲折; 而 CR-7 试件水力裂缝扩展至煤岩界面后, 首先沿煤岩界面扩展一段距离, 然后穿层进入煤体, 且煤体中水力裂缝形态较曲

折。上述现象表明, 在竖向地应力为最大地应力条件下, 钻孔深度越小, 越利于水力裂缝由顶板直接穿层进入煤体, 形成的水力裂缝也越平直。这是由于钻孔深度越小, 砂质泥岩断裂释放弹性能量越大, 较大的弹性能冲击煤岩界面, 从而促进水力裂缝穿层进入煤体, 但其裂缝形态简单, 不利于在煤体中形成复杂压裂缝网。

可见, 25 mm 深钻孔对应水力裂缝在界面处直接穿层进入煤体, 而 45 mm 深钻孔对应水力裂缝先沿界面扩展一段距离后再穿层, 且其对应煤体中的水力裂缝形态较 25 mm 深钻孔更曲折。

2.2 注入压力与裂缝扩展规律

破裂压力和破裂时间是水力压裂过程中 2 个重要参数。其中, 破裂压力对应水力裂缝形成时的最大注入压力, 反映了岩体破裂的难以程度; 破裂时间对应裂缝形成所需的时间, 反映了裂缝起裂扩展的速度。R-4、CR-1、CR-6 和 CR-7 试件对应的注入压力曲线如图 7 所示。可知 4 种试件的破裂压力依次为 30.34、

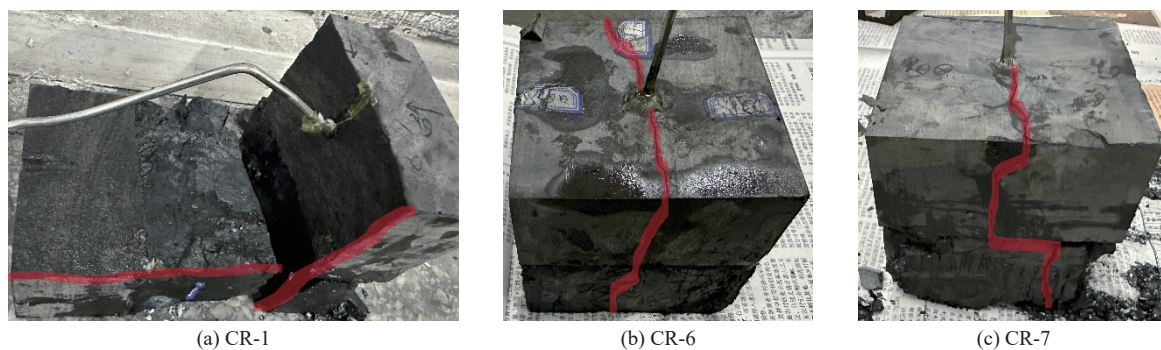


图 6 不同钻孔深度试件水力裂缝宏观形态

Fig.6 Macroscopic shape of the hydraulic fracture in specimens with different borehole depth

28.66、27.11 和 26.32 MPa, 破裂时间依次为 63、60、58 和 51 s。值得注意的是, CR-7 试件的注入压力曲线峰后段先波动约 10 s 而后出现明显的二次峰值, 这是由于该试件水力裂缝先沿界面扩展一段距离, 而后才穿层进入煤体, 二次峰值对应水力裂缝穿层进入煤体时的注入压力。此外, 上述 4 种试件压裂后对应稳定渗流 (注入压力规律波动) 的注入压力值依次增大。

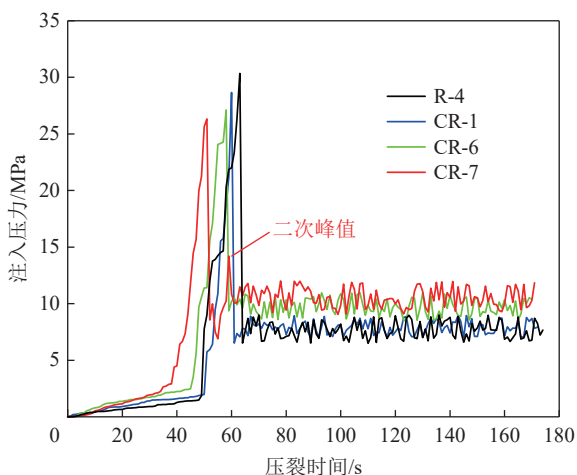


图 7 不同钻孔深度试件注入压力曲线

Fig.7 Injection pressure curves of the specimens with different borehole depth

各试件破裂压力、破裂时间、峰后注入压力演化与裂缝扩展路径统计见表 3, 可知, 砂质泥岩立方体试件破裂压力最大, 平均为 29.18 MPa, 破裂时间最长, 平均为 63 s。而对于煤岩组合体, CR-1~CR-3 试件破裂压力 (平均为 28.40 MPa) 和破裂时间 (平均为 60 s) 最大, 但均小于砂质泥岩立方体试件对应值; CR-4~CR-6 试件破裂压力 (平均为 27.32 MPa) 和破裂时间 (平均为 56 s) 次之; CR-7~CR-9 试件破裂压力 (平均为 26.83 MPa) 和破裂时间 (平均为 53 s) 最小。此外, CR-1~CR-6 试件水力裂缝均直接穿层进入煤体, 而 CR-7~CR-9 试件水力裂缝则首先沿煤岩界面水平

扩展一段距离, 然后才穿层进入煤体。

对于煤岩组合体, 随着钻孔深度增加, 砂质泥岩破裂压力和破裂时间显著减小。相较于 25 mm 深钻孔情况, 45 mm 深钻孔对应破裂压力减小 1.57 MPa, 对应破裂压力减少 7 s, 且其注入压力曲线出现了二次峰值, 对应稳定渗流的注入压力也更高。

上述现象表明, 钻孔深度越大, 砂质泥岩破裂越容易, 在煤体中形成的水力裂缝也更曲折, 但不利于水力裂缝穿层。

2.3 声发射响应特征

本文采用 Geiger 定位算法^[29]反演声发射事件的空间位置, 该算法由于其高精度和对微弱信号的敏感性, 能有效地揭示岩石内部的微小应力变化, 特别适用于小区域微震定位。相较于花岗岩等致密坚硬岩石, 煤体孔裂隙发育, 质地软弱, 其破裂释放的声波信号强度更弱。因此, Geiger 定位算法特别适用于实验室尺度下的煤体试件 (小区域) 破裂产生的微弱声波信号捕捉。Geiger 定位算法是 Gauss-Newton 最小拟合函数的应用之一, 其基本流程是基于最小二乘法, 对给定初始点的位置坐标进行反复迭代并修正, 不断得到新的试验点, 直至该试验点满足要求, 其坐标即为所求声发射事件位置^[30]。

CR-1、CR-6 和 CR-7 试件对应的声发射事件三维定位及其在 z - y 平面上投影结果如图 8 所示, 其中绿色边框反映水力裂缝在 $x=100$ mm 的 z - y 平面上扩展路径。基于图 5 所示三维空间坐标系, 根据声发射事件定位的 y 坐标区分声发射事件发生层位, $y > 50$ 表明发生在砂质泥岩, $y = 50$ 表明发生在煤岩界面处, $y < 50$ 则表明发生在煤体中。总体上, 3 种试件声发射事件总数分别为 250、200 和 180 个, 对应煤体声发射事件数分别为 150、120 和 110 个。可见, 钻孔深度越小, 水力裂缝起裂扩展诱发的声发射事件数越多, 25 mm 深钻孔对应煤岩组合体和煤体声发射事件数较 45 mm 分别多 70 个和 40 个。结合图 7 所示注入

表 3 破裂特征值与裂缝扩展路径统计

Table 3 Statistics of the rupture characteristic values and fracture propagation path

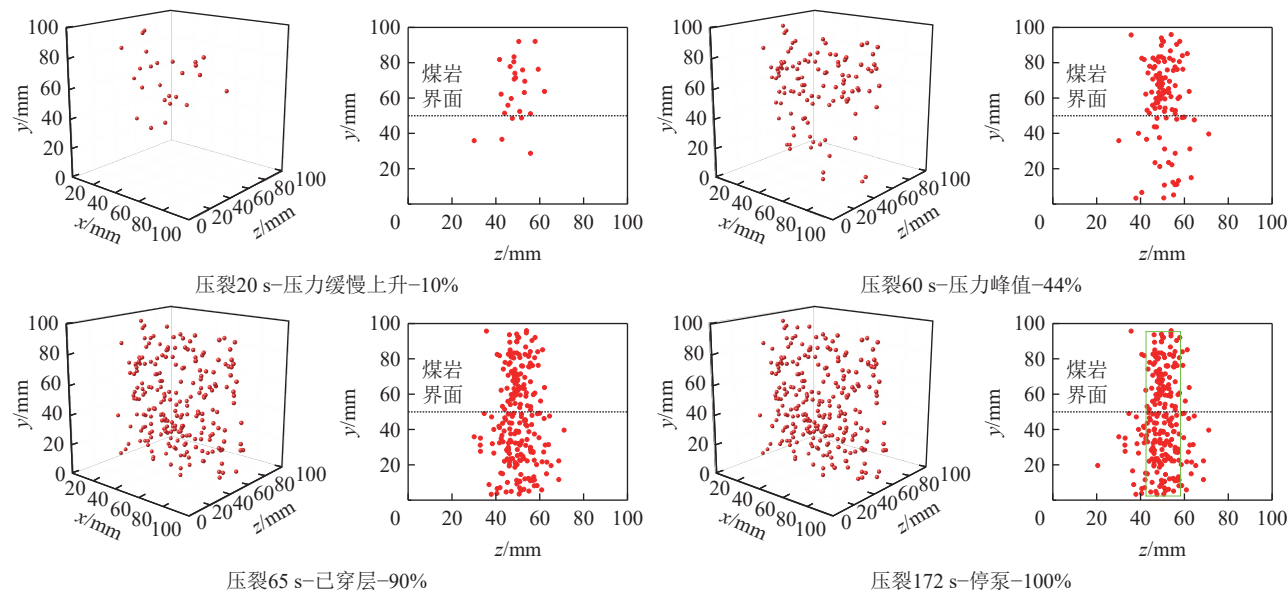
试件 编号	破裂压力 /MPa		破裂时间/s		峰后压力演化与裂缝扩展路径
	试验值	平均值	试验值	平均值	
R-2	30.02		62		注入压力达到峰值后骤降, 最终在6~9 MPa规律波动; 水力裂缝垂直于 σ_h , 且形态平直
R-3	29.18		69		
R-4	30.34	29.18	63	63	
R-5	28.52		60		
R-6	27.86		61		
CR-1	28.66		60		注入压力达到峰值后骤降, 最终在6~10 MPa规律波动; 水力裂缝直接穿层且在煤体中形态较为平直
CR-2	28.02	28.40	56	60	
CR-3	28.52		64		
CR-4	26.97		52		注入压力达到峰值后骤降, 最终在7~12 MPa规律波动; 水力裂缝直接穿层且在煤体中形态相对曲折
CR-5	27.88	27.32	58	56	
CR-6	27.11		58		
CR-7	26.32		51		注入压力达到峰值后骤降, 而后在8~13 MPa波动10 s左右后出现 二次峰值, 并最终在9~12 MPa规律波动; 水力裂缝沿煤岩界面 水平扩展一段距离后穿层, 且在煤体中形态较曲折
CR-8	26.39	26.83	53	53	
CR-9	27.78		55		

压力曲线, 具体声发射响应特征如下:

对于 CR-1 试件, 压裂 20 s 时, 注入压力处于缓慢上升阶段, 压裂液以滤失为主, 煤岩声发射事件占累计声发射事件数的 10%; 压裂 60 s 时, 注入压力达到峰值, 此时煤岩声发射事件占比骤增至 44%, 且大多数发生在上部砂质泥岩中, 表明砂质泥岩已开始破裂; 压裂 65 s 时, 砂质泥岩中的声发射事件较 60 s 时无明显增加, 但煤体声发射事件急剧增多, 导致煤岩声发射事件占比骤增至 90%, 表明水力裂缝已穿层进入煤体; 压裂 172 s 时停泵, 此时声发射事件占比较 65 s 时

仅增加 10%, 表明压裂 60 s 后已形成稳定渗流通道, 压裂液稳定渗流。此外, 由绿色边框内声发射事件分布可看出, 最终水力裂缝由砂质泥岩直接穿层进入煤体, 形成的水力裂缝应较为平直, 这与图 6a 所示宏观裂缝形态一致。

对于 CR-6 试件, 压裂 20 s 时, 注入压力缓慢上升, 煤岩声发射事件占比仅 12%; 压裂 58 s 时, 注入压力达到峰值, 此时煤岩声发射事件占比高达 45%, 且多分布在砂质泥岩中, 表明砂质泥岩开始破裂; 压裂 65 s 时, 煤岩声发射事件占比骤增至 85%, 且主要发生在



(a) CR-1

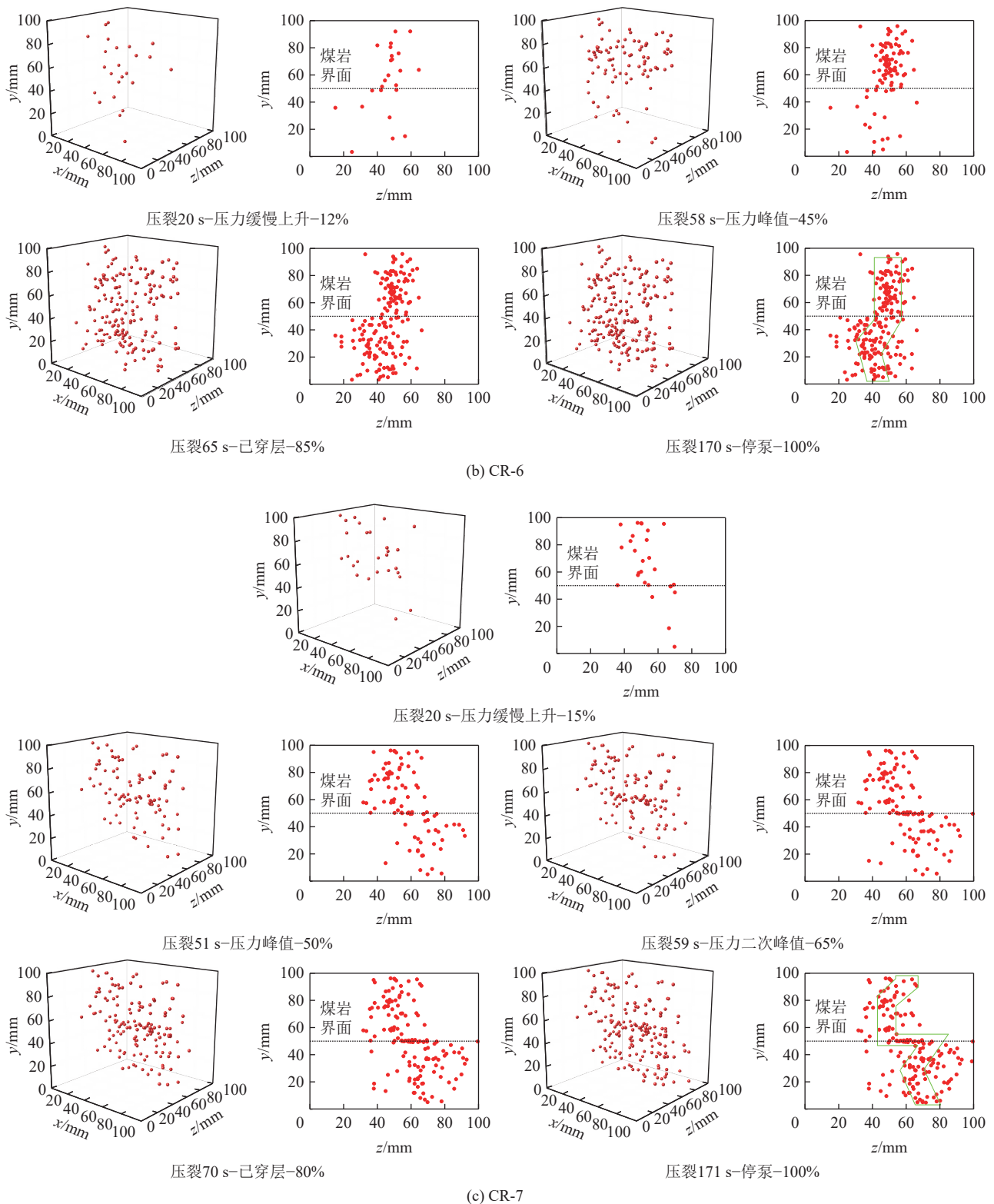


图8 声发射事件演化

Fig.8 AE events evolution

煤体中,表明水里裂缝已穿层进入煤体;压裂170 s时停泵,此时声发射事件占比较65 s时仅增加15%,表明压裂65 s后压裂液已开始稳定渗流。另从绿色边框内声发射事件总体分布来看,声发射监测的水力裂缝扩展路径与图6b所示宏观裂缝形态吻合较好。

对于CR-7试件,压裂20 s时,注入压力缓慢上升,煤岩声发射事件占比仅15%;压裂51 s时,注入压力达到峰值,煤岩声发射事件占比达50%,且主要分布在砂质泥岩中;压裂59 s时,注入压力开始出现二次峰值,煤岩声发射事件占比为65%,煤岩界面处的声

发射事件数增加明显,表明水力裂缝沿煤岩界面扩展;压裂 70 s 时,煤岩声发射事件占比较增至 80%,且主要发生在煤体中,表明水力裂缝已穿层进入煤体;压裂 171 s 时停泵,煤岩声发射事件占比较 70 s 增加 20%,表明压裂 70 s 后压裂液已开始稳定渗流。另从绿色边框内声发射事件分布来看,声发射监测的水力裂缝扩展路径与图 6c 所示宏观裂缝形态一致。

总体来看,钻孔深度越小,水力裂缝的扩展路径越简单,且会产生更多的声发射事件。而钻孔深度较大的情况下,水力裂缝的扩展路径更加复杂,声发射事件数较少。这一现象表明,水力裂缝的扩展受应力、钻孔深度以及岩层特性的共同影响。

为进一步分析钻孔深度对水力裂缝跨煤岩界面扩展的影响机理,以 CR-1、CR-6、CR-7 试件为例,统计了压裂过程中声发射累积能量变化规律,如图 9 所示。可知压裂之初 3 种试件的声发射累积能量均呈缓慢增长趋势。不同之处在于,对于 CR-1 试件,其累积能量在压裂 60 s 时骤增至 3.50 nJ,此后直至压裂结束累积能量增加极少,表明砂质泥岩在压裂 60 s 后破裂,破裂释放能量对煤岩界面具有强冲击效应,导致水力裂缝直接穿层并在煤体中形成平直裂缝,最终形成稳定渗流通道;对于 CR-6 试件,其累积能量在压裂 58 s 时骤增至 2.57 nJ,表明此时砂质泥岩破裂。此后数秒内累积能量曲线斜率减小而后累积能量又骤增至 3.00 nJ,表明水力裂缝扩展至煤岩界面后压裂液先短暂憋压一段时间,然后水力裂缝穿层进入煤体。此后直至压裂结束累积能量增加极少,表明形成了稳定渗流通道;对于 CR-7 试件,其累积能量在压裂 51 s 时骤增至 2.03 nJ,表明砂质泥岩破裂。此后数秒内曲线出现明显台阶,累积能量增幅较小,表明水力裂缝扩展至煤岩界面后沿界面扩展一段距离。而后累积能

量又骤增至 2.50 nJ,表明水力裂缝由界面进入煤体。此后直至压裂结束累积能量增加极少,表明形成了稳定渗流通道。

另外,对比 CR-6 与 CR-7 累积能量曲线可知,其大部分能量均是在穿层之前释放,穿层之后释放的能量相对较少。即尽管水力裂缝在煤体中扩展形成的破裂事件相对砂质泥岩较多,但煤体破裂释放能量要比砂质泥岩破裂释放能量小的多。主要原因在于砂质泥岩相对煤体弹脆性更强,其破裂释放能量自然也更多,这也是最终形成稳定渗流时累积能量 CR-1 > CR-6 > CR-7 的主要原因。

综上所述,钻孔深度越小,水力裂缝起裂扩展释放的能量越多,25 mm 深钻孔对应最终累积释放能量 (3.60 nJ) 较 45 mm 深钻孔 (2.79 nJ) 多 0.81 nJ。

2.4 煤体水力裂缝面形貌特征

煤体水力裂缝面形貌处理步骤如下:

1) 首先采用 OKIO-H-200 型 3D 形貌扫描仪对煤体水力裂缝面进行形貌扫描,获得 3D 点云数据;

2) 然后采用 Imageware 软件删除 3D 点云的杂乱点和多余点,之后再通过旋转、平移等空间坐标变化,确保 x 、 y 坐标沿裂缝面方向, z 坐标垂直于裂缝面方向;

3) 采用 Sufer 软件,基于空间自协方差最佳插值法,即克里金法,将步骤 2) 处理后的 3D 点云离散成 x - y 面上的规则点云;

4) 针对步骤 3) 获得的规则点云,根据式 (1)、式 (2) 计算纵向测线粗糙度系数 C_{JR} (Joint Roughness Coefficient),根据式 (1)、式 (3) 计算横向测线 C_{JR} [31],并对所有测线 C_{JR} 取平均得到煤体水力裂缝面 C_{JR} 。

$$C_{JR} = 32.2 + 32.47 \lg Z \quad (1)$$

$$Z = \left[\frac{1}{(N-1)(x_{i+1} - x_i)^2} \sum_{i=1}^{N-1} (z_{i+1} - z_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$Z = \left[\frac{1}{(N-1)(y_{i+1} - y_i)^2} \sum_{i=1}^{N-1} (z_{i+1} - z_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中: x_i 为水力裂缝面测点沿 σ_H 方向坐标; y_i 为水力裂缝面测点沿 σ_v 方向坐标; z_i 为水力裂缝面测点沿 σ_h 方向坐标 (即水力裂缝面测点高程); N 为每条测线上测点数量; Z 为裂缝面轮廓高度的均方根的一阶导数。

CR-1、CR-6 和 CR-7 试件对应的煤体水力裂缝面高程云图和 C_{JR} 计算结果如图 10 所示。可知 CR-1、CR-6 和 CR-7 试件煤体水力裂缝面 C_{JR} 分别为 15.39、17.18 和 27.89,即 45 mm 深钻孔对应煤体水力裂缝面

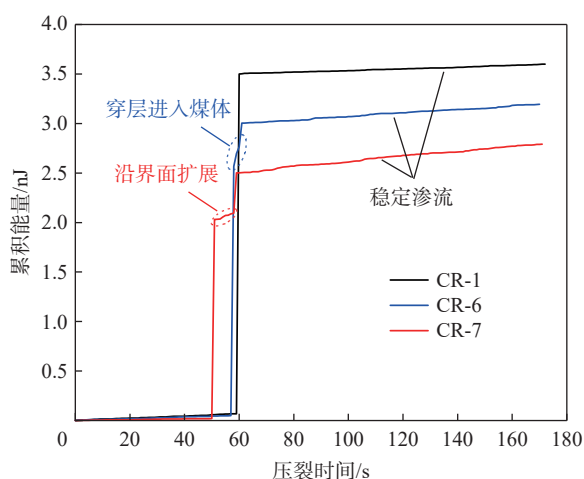


图9 声发射累积能量演化

Fig.9 AE cumulative energy evolution

C_{JR} 较 25 mm 深钻孔增加 12.5, 表明钻孔深度越大, 煤体中形成的水力裂缝面越粗糙, 上下裂缝面间的凸体可形成自支撑。这种自支撑效应可确保注入压力撤除后, 水力裂缝在较高的地应力作用下仍保有相当的张开度, 缓解支撑剂嵌入煤体导致的裂缝张开度减小问题。张开度较大的水力裂缝一方面可为煤层气运移提供良好通道, 另一方面, 有利于压裂液的返排, 而煤层气和压裂液的顺利排出可有效降低煤层气的解吸压力^[32]。因此, 较大的钻孔深度有利于保持裂缝的导流能力, 并促进煤层气的解吸。

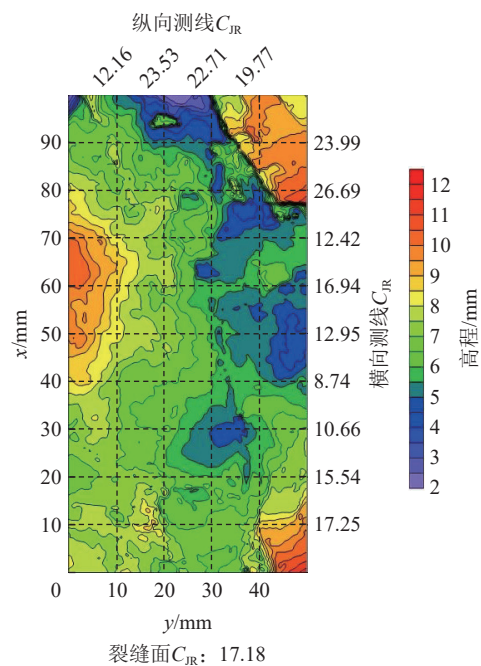
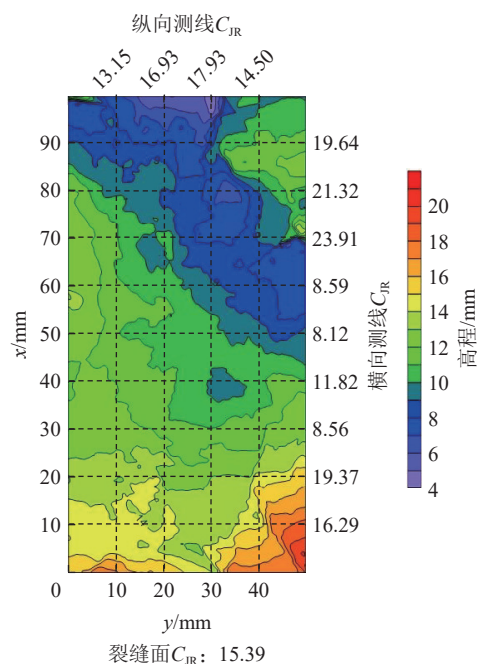
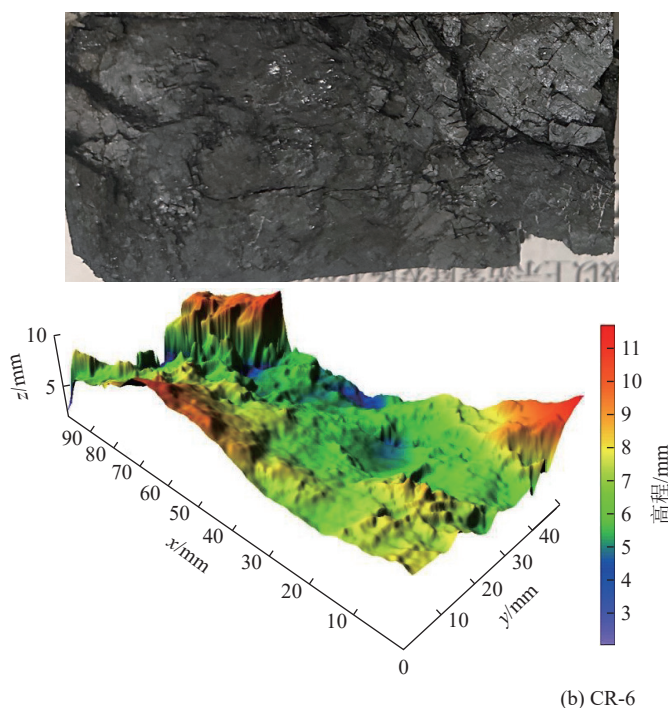
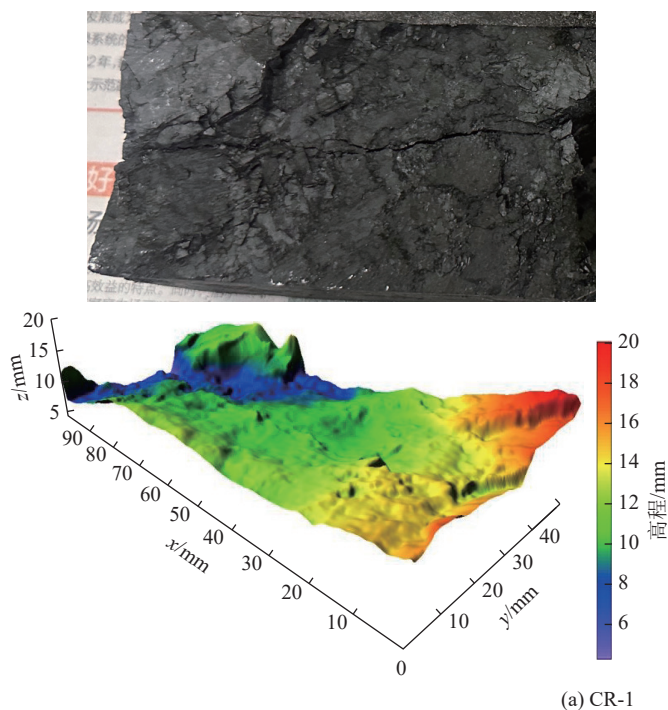
3 讨 论

2.2 节研究表明, 钻孔深度越大, 砂质泥岩破裂压力越小, 破裂时间也越短, 其机理解释如下:

对于不同材料组合体, 界面两侧材料力学性质差异大小可由无量纲弹性参数 λ 表征, 其值可由式 (4) 计算^[33-34]:

$$\cos \lambda \pi = \frac{2(\beta - \alpha)}{1 + \beta}(1 - \lambda)^2 + \frac{\alpha + \beta^2}{1 - \beta^2} \quad (4)$$

式中: α 、 β 为 Dundurs 参数, 由式 (5) 计算^[35]:



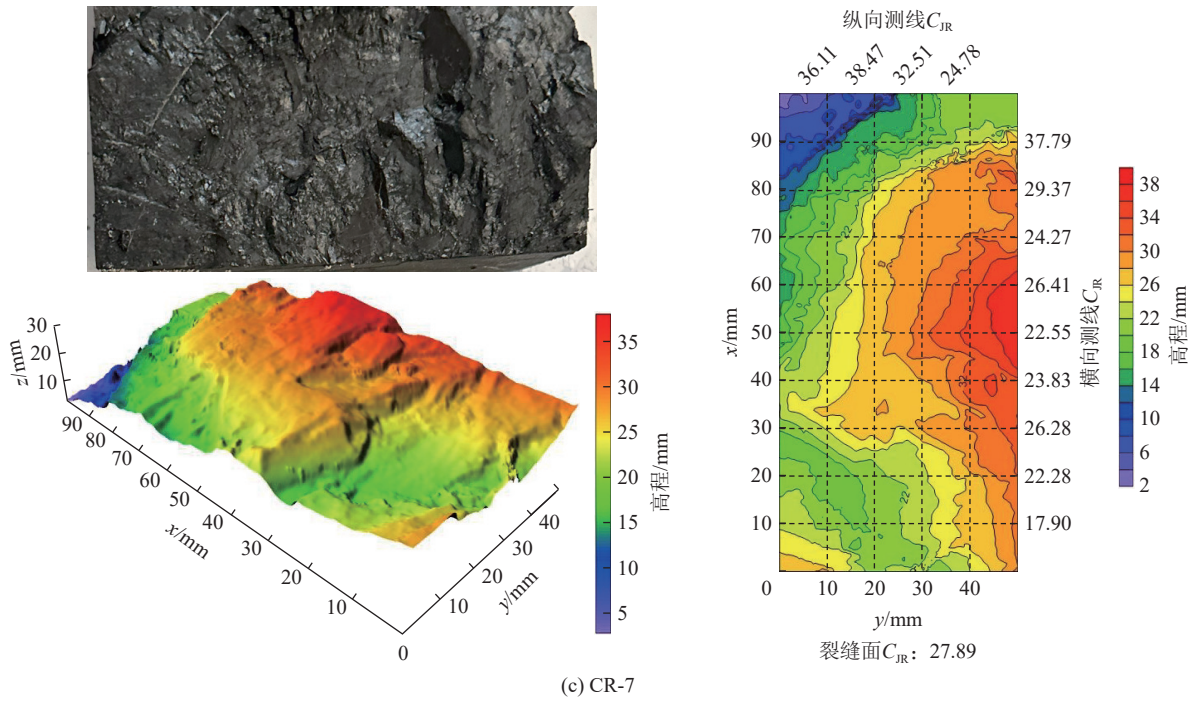


图10 煤体水力裂缝面形貌与粗糙度系数

Fig.10 Morphology and roughness coefficient of the hydraulic fracture surface in coal

$$\begin{cases} \alpha = \frac{G_r(1-v_c) - G_c(1-v_r)}{G_r(1-v_c) + G_c(1-v_r)} \\ \beta = \frac{G_r(1-2v_c) - G_c(1-2v_r)}{2[G_r(1-v_c) + G_c(1-v_r)]} \end{cases} \quad (5)$$

式中: G_r 、 G_c 分别为砂质泥岩和煤体的剪切模量, GPa; v_r 、 v_c 分别为砂质泥岩和煤体的泊松比。其中剪切模量 G 与弹性模量 E 和泊松比 ν 关系如下:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (6)$$

本文砂质泥岩和煤体弹性模量分别为 5.61、1.35 GPa, 对应泊松比分别为 0.25、0.30, 将其代入式 (4)—式 (6), 计算得到煤岩组合体的无量纲弹性参数 $\lambda = 0.38$ 。理论研究表明, 对于不同材料组合体, 只有当 $\lambda \approx 0.50$ 时, 应力才可跨越界面连续均匀地传递^[21]。本文煤岩组合体材料 $\lambda = 0.38$, 明显小于 0.5, 可见三轴应力和注水压力在砂质泥岩和煤体中引起的应力场是非均匀分布的。数值模拟也表明, 由于煤岩组合体力学性质差异, 煤岩非协调变形会导致煤体中产生压缩型内应力, 而相对坚硬顶板中产生张拉型内应力, 且这种张拉型内应力距离煤岩界面越近值越大^[18], 这就是本文试验中煤岩组合体试件破裂压力低于纯砂质泥岩试件和破裂压力随钻孔深度增大而降低的本质原因。

2.1 节宏观裂缝形态和 2.3 节声发射事件分布均表明, 钻孔深度越小, 越有利于水力裂缝直接穿层进

入煤体, 其机理解释如下:

根据 Griffith 能量断裂准则^[36], 裂缝扩展导致固体弹性能减少, 弹性能减少量 ΔU 与裂缝扩展长度 a 关系为

$$\Delta U = \frac{\sigma_{\text{driv}}^2}{E} \pi a^2 \quad (7)$$

式中: σ_{driv} 为裂缝扩展驱动力, MPa, 对应本文注入压力与最小水平地应力之差; 裂缝扩展长度 a 反映的是本文钻孔距界面距离, mm, 其与钻孔深度 d 的关系为

$$a = 50 - d \quad (8)$$

由式 (7)、式 (8) 可知, 钻孔深度越小, 砂质泥岩破裂释放弹性能越多, 这些释放的弹性能驱动水力裂缝在煤岩界面处直接穿层。因此, 将水平井布置在距离煤岩界面较远的顶板岩层或者控制射孔深度有助于水力裂缝穿层进入煤体。

2.4 节煤体水力裂缝面 C_R 计算结果表明, 煤体水力裂缝面粗糙度随钻孔深度增加而增大。这是由于砂质泥岩破裂释放的弹性能冲击煤体, 钻孔深度越小, 砂质泥岩破裂释放的弹性能越多, 冲击效应越强, 使得水力裂缝直接冲断煤基质晶体颗粒扩展, 形成的水力裂缝面较平直; 反之, 钻孔深度越大, 冲击效应越弱, 水力裂缝易绕过煤基质晶体颗粒扩展, 形成的水力裂缝面较粗糙。我国许多煤层气压裂井存在单井产气量低、产期衰减快等问题^[37], 其根本原因是相较于煤

体, 支撑剂质地坚硬, 易嵌入质地松软的煤体中, 导致压裂裂缝张开度急剧减小, 导流能力大幅下降^[38-42]。闭合应力作用下, 粗糙裂缝上下表面之间凸体存在自支撑效应。因此, 将水平井布置在距离煤岩界面较近的顶板岩层或者增大射孔深度, 通过在煤层中形成粗糙的水力裂缝, 充分利用其自支撑效应保持裂缝张开度, 有助于维持裂缝导流能力, 缓解因支撑剂嵌入煤体导致的产气衰减快问题。

综上所述, 间接压裂时顶板水平井钻进层位或射孔深度存在一个最优值。该值的确定需综合考虑水力裂缝穿层效果、压裂缝网复杂性及其导流能力。可按如下方法来进行定量优化: 对于某一水平井钻进层位或射孔深度, 分析对应注入压力曲线, 如果注入压力曲线出现二次峰值且停泵后压力较高、波动明显, 则表明水力裂缝顺利穿层且煤层缝网形态复杂; 反之, 如果注入压力曲线没有出现二次峰值且停泵后压力低、波动幅度小, 则表明水力裂缝直接穿层且煤层缝网形态简单, 此时需降低水平井钻进层位以靠近煤岩界面, 或者增大射孔深度。

需要注意的是, 不同地应力条件下水平井钻进层位或射孔深度最优值的变化趋势不同。对于类似本文 $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$ 的地应力条件, 从确保水力裂缝穿层角度分析, 水平井钻进层位应远离煤岩界面, 减小射孔深度; 从追求煤层压裂缝网复杂性和导流能力角度分析, 则水平井钻进层位应靠近煤岩界面, 增大射孔深度。对于 $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$ 的地应力条件, 从确保水力裂缝穿层角度分析, 水平井钻进层位应靠近煤岩界面, 增大射孔深度。因为该地应力条件下, 水力裂缝长度沿 σ_H 所在水平方向, 裂缝面垂直于 σ_h 所在水平方向, 高度沿垂直方向。如果水平井钻进层位远离煤岩界面或射孔深度过小, 则可能由于“马太效应”, 即强者愈强, 弱者愈弱, 导致水力裂缝持续沿水平方向扩展, 而在竖直方向停止扩展, 最终无法实现穿层。从追求煤层压裂缝网复杂性和导流能力角度分析, 水平井钻进层位也应靠近煤岩界面, 增大射孔深度; 对于 $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$ 的地应力条件, 容易形成水平缝, 即水力裂缝长度和高度沿水平方向, 裂缝面垂直于竖直方向, 水力裂缝很难扩展至界面。即使能扩展至界面, 由于界面力学强度弱于煤基质, 也极有可能导致水力裂缝持续沿界面水平扩展而无法穿层。因此, 这种地应力条件不宜采用顶板水平井间接压裂技术。

此外, 本试验声发射响应规律是基于竖向地应力为最大地应力、煤质松软、煤与顶板力学性质差异显著的地质条件得到的。对于构造地应力、煤层坚硬、煤与顶板力学性质差异较小等地质条件, 该规律是否

适用需进一步研究。

4 结 论

1) 砂质泥岩破裂压力和破裂时间随钻孔深度增大而减小, 当钻孔深度由 25 mm 增至 45 mm 时, 破裂压力降低 1.57 MPa, 破裂时间减少 7 s, 注入压力曲线出现“二次峰值”, 对应稳定渗流的注入压力增加 3 ~ 6 MPa, 对应煤体水力裂缝面更曲折, 粗糙度系数增加 12.5。即增大钻孔深度有助于在煤体内形成形态复杂、表面粗糙、导流能力良好的水力裂缝。

2) 煤岩破裂释放的声发射累积能量随钻孔深度减小而增大, 相较于 45 mm 深钻孔, 25 mm 深钻孔对应声发射累积能量多 0.81 nJ, 对应煤岩体声发射事件总数多 70 个, 对应煤体声发射事件数多 40 个, 对应砂质泥岩破裂释放能量更多, 水力裂缝对界面冲击效应更强, 导致其直接穿层且形态更为平直。即减小钻孔深度有助于水力裂缝穿层进入煤体。

3) 煤-砂质泥岩组合体的无量纲弹性参数值为 0.38, 明显小于应力在岩石内部均匀传递所需的 0.5, 导致间接压裂时煤和砂质泥岩内的应力不能跨界面均匀传递, 从而在砂质泥岩内产生张拉型内应力, 该内应力是钻孔深度影响砂质泥岩破裂压力的重要原因。

4) 碎软煤层间接压裂时顶板水平井距煤岩界面越远或射孔深度越小, 水力裂缝越容易穿过界面进入煤层, 但同时煤层内形成的压裂缝网形态更简单、裂缝面更平滑。因此, 水平井钻进层位和射孔深度理论上存在一个最优值, 该值的确定需综合考虑穿层效果、煤层压裂缝网的复杂程度及其导流能力。

参考文献(References):

- [1] 张群, 葛春贵, 李伟, 等. 碎软低渗煤层顶板水平井分段压裂煤层气高效抽采模式[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 150-159.
ZHANG Qun, GE Chungui, LI Wei, et al. A new model and application of coalbed methane high efficiency production from broken soft and low permeable coal seam by roof strata-in horizontal well and staged hydraulic fracture[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 150-159.
- [2] 张群, 孙四清, 降文萍. 碎软低渗煤层煤矿区煤层气勘探开发关键技术及发展方向[J]. 石油学报, 2024, 45(5): 855-865.
ZHANG Qun, SUN Siqing, JIANG Wenping. Key technology and development direction of coalbed methane exploration and development in coal mining area with broken soft and low permeability coal seam[J]. China Industrial Economics, 2024, 45(5): 855-865.
- [3] OLSEN T N, BRENNER G, FRENZEL T. Improvement processes for coalbed natural gas completion and stimulation[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. SPE, 2003: SPE-84122-MS.

- [4] 武鹏飞, 梁卫国, 廉浩杰, 等. 大尺寸煤岩组合体水力裂缝越界形成缝网机理及试验研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(5): 1381–1389.
WU Pengfei, LIANG Weiguo, LIAN Haojie, et al. Mechanism and experimental investigation of the formation of hydro-fracture system by fracturing through the interface of large-size coal-rock[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(5): 1381–1389.
- [5] 姜玉龙, 梁卫国, 李治刚, 等. 煤岩组合体跨界面压裂及声发射响应特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(5): 875–887.
JIANG Yulong, LIANG Weiguo, LI Zhigang, et al. Experimental study on fracturing across coal-rock interfaces and the acoustic emission response characteristics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(5): 875–887.
- [6] JIANG Y L, LIAN H J, NGUYEN V P, et al. Propagation behavior of hydraulic fracture across the coal-rock interface under different interfacial friction coefficients and a new prediction model[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2019, 68: 102894.
- [7] JIANG Y L, LIANG W G, CAI T T, et al. Fracture growth and acoustic emission response in natural coal-rock blocks with different stress, fracturing medium and injection rates[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2023, 220: 111228.
- [8] HE W, LIAN H J, LIANG W G, et al. Experimental study of supercritical CO₂ fracturing across coal-rock interfaces[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2023, 56(1): 57–68.
- [9] ZHAO H F, LIU C S, XIONG Y G, et al. Experimental research on hydraulic fracture propagation in group of thin coal seams[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2022, 103: 104614.
- [10] 高杰, 侯冰, 谭鹏, 等. 砂煤互层水力裂缝穿层扩展机理[J]. 煤炭学报, 2017, 42(S2): 428–433.
GAO Jie, HOU Bing, TAN Peng, et al. Mechanism of hydraulic fracture propagation in sand-coal interbeds[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(S2): 428–433.
- [11] TAN P, JIN Y, HAN K, et al. Vertical propagation behavior of hydraulic fractures in coal measure strata based on true triaxial experiment[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, 158: 398–407.
- [12] 李文达, 肖贺成, 梁卫国, 等. N₂ 泡沫穿层压裂煤岩组合体试验研究[J]. 煤炭学报, 2023, 48(12): 4499–4511.
LI Wenda, XIAO Hecheng, LIANG Weiguo, et al. Experimental investigation of fracture propagation in N₂ foam integrated layer-penetration fracturing of coal-rock combination body[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(12): 4499–4511.
- [13] ZHU D J, ZHANG L F, SONG X X, et al. Propagation mechanism of the hydraulic fracture in layered-fractured-plastic formations[J]. *International Journal of Fracture*, 2023, 241(2): 189–210.
- [14] 李勇, 陈涛, 马啸天, 等. 煤层顶板间接压裂裂缝扩展机制及影响因素[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(2): 171–182.
LI Yong, CHEN Tao, MA Xiaotian, et al. Extension mechanism and influencing factors of indirect fracturing fractures on coal seam roof[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(2): 171–182.
- [15] 许耀波. 应力干扰下煤层顶板水平井穿层分段压裂规律[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(4): 11–18.
XU Yaobo. Layer-penetrating staged fracturing law of horizontal wells within roof of coal seams under stress interference[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2020, 48(4): 11–18.
- [16] 姜在炳, 李浩哲, 许耀波, 等. 煤层顶板分段压裂水平井地质适应性分析与施工参数优化[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(3): 183–192.
JIANG Zaibing, LI Haozhe, XU Yaobo, et al. Geological adaptability analysis and operational parameter optimization for staged fracturing horizontal wells in coal seam roof[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(3): 183–192.
- [17] 庞涛, 姜在炳, 李浩哲, 等. 碎软煤层顶板水平井空间位置对压裂裂缝扩展的影响[J]. 煤炭学报, 2022, 47(S1): 196–203.
PANG Tao, JIANG Zaibing, LI Haozhe, et al. Influence of the spatial position of horizontal well in roof strata of crushed soft coal seam on the propagation of fracturing fractures[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(S1): 196–203.
- [18] BLANTON T L. An experimental study of interaction between hydraulically induced and pre-existing fractures[C]//SPE Unconventional Gas Recovery Symposium. SPE, 1982: SPE-10847-MS.
- [19] BLANTON T L. Propagation of hydraulically and dynamically induced fractures in naturally fractured reservoirs[C]//SPE Unconventional Gas Technology Symposium. SPE, 1986: SPE-15261-MS.
- [20] WARPINSKI N R, TEUFEL L W. Influence of geologic discontinuities on hydraulic fracture propagation (includes associated papers 17011 and 17074)[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1987, 39(2): 209–220.
- [21] RENSCHAW C E, POLLARD D D. An experimentally verified criterion for propagation across unbounded frictional interfaces in brittle, linear elastic materials[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1995, 32(3): 237–249.
- [22] SARMADIVALEH M, RASOULI V. Modified reinshaw and pollard criteria for a non-orthogonal cohesive natural interface intersected by an induced fracture[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, 47(6): 2107–2115.
- [23] ZHU D J, DU W S. A criterion for a hydraulic fracture crossing a frictional interface considering T-stress[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 209: 109824.
- [24] CHENG W, JIN Y, CHEN M, et al. A criterion for identifying hydraulic fractures crossing natural fractures in 3D space[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(3): 371–376.
- [25] 王涛, 柳占立, 高岳, 等. 基于给定参数的水力裂缝与天然裂缝相互作用结果的预测准则[J]. 工程力学, 2018, 35(11): 216–222.
WANG Tao, LIU Zhanli, GAO Yue, et al. A prediction criterion for the interaction between hydraulic fractures and natural fractures based on given parameters[J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(11): 216–222.
- [26] ZHAO Y, HE P F, ZHANG Y F, et al. A new criterion for a toughness-dominated hydraulic fracture crossing a natural frictional interface[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52(8): 2617–2629.
- [27] ZHAO Y, ZHANG Y F, HE P F. A composite criterion to predict subsequent intersection behavior between a hydraulic fracture and a natural fracture[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2019, 209: 61–78.

- [28] 樊玉峰, 肖晓春, 丁鑫, 等. 岩煤接触面力学性质对组合煤岩力学行为影响机制[J]. 煤炭学报, 2023, 48(4): 1487–1501.
FAN Yufeng, XIAO Xiaochun, DING Xin, et al. Influence mechanism of contact surface mechanical properties on mechanical behavior of coal rock combination[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(4): 1487–1501.
- [29] GEIGER L. Probability method for the determination of earthquake epicenters from the arrival time only[J]. Bulletin of St. Louis University, 1912, 8(1): 60–71.
- [30] 左建平, 裴建良, 刘建锋, 等. 煤岩体破裂过程中声发射行为及时空演化机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(8): 1564–1570.
ZUO Jianping, PEI Jianliang, LIU Jianfeng, et al. Investigation on acoustic emission behavior and its time-space evolution mechanism in failure process of coal-rock combined body[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(8): 1564–1570.
- [31] TSE R, CRUDEN D M. Estimating joint roughness coefficients[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1979, 16(5): 303–307.
- [32] MEHRJOO H, NOROUZI-APOURVARI S, JALALIFAR H, et al. Experimental study and modeling of final fracture conductivity during acid fracturing[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 208: 109192.
- [33] ZAK A R, WILLIAMS M L. Crack point stress singularities at a bi-material interface[J]. Journal of Applied Mechanics, 1963, 30(1): 142–143.
- [34] HE M Y, HUTCHINSON J W. Crack deflection at an interface between dissimilar elastic materials[J]. International Journal of Solids and Structures, 1989, 25(9): 1053–1067.
- [35] DUNDURS J. Discussion: “Edge-bonded dissimilar orthogonal elastic wedges under normal and shear loading” [J]. Journal of Applied Mechanics, 1969, 36(3): 650–652.
- [36] GRIFFITH A A. The phenomena of rupture and flow in solids[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A, 1921, 221: 163–198.
- [37] 阎纪伟, 宋晓夏, 梁卫国, 等. 西山煤田煤层气井水力压裂效果剖析及启示[J]. 煤炭学报, 2024, 49(8): 3546–3560.
YAN Jiwei, SONG Xiaoxia, LIANG Weiguo, et al. An comprehensive analysis of the hydraulic fracturing behavior of coalbed methane wells of Xishan coalfield and its revelation[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(8): 3546–3560.
- [38] 邹雨时, 马新仿, 王雷, 等. 中、高煤阶煤岩压裂裂缝导流能力实验研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(3): 473–476.
ZOU Yushi, MA Xinfang, WANG Lei, et al. Experimental evaluation of conductivity of fracturing in medium and high-rank coal beds[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(3): 473–476.
- [39] 黄炳香, 李浩泽, 程庆迎, 等. 煤层压裂裂缝内支撑剂的压嵌特性[J]. 天然气工业, 2019, 39(4): 48–54.
HUANG Bingxiang, LI Haoze, CHENG Qingying, et al. Compaction and embedment characteristics of proppant in hydraulic fractures of coal seams[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(4): 48–54.
- [40] WU Y T, PAN Z J, ZHANG D Y, et al. Experimental study of permeability behaviour for proppant supported coal fracture[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2018, 51: 18–26.
- [41] LAMEI RAMANDI H, PIRZADA M A, SAYDAM S, et al. Digital and experimental rock analysis of proppant injection into naturally fractured coal[J]. Fuel, 2021, 286: 119368.
- [42] AHAMED M A A, PERERA M S A, ELSWORTH D, et al. Effective application of proppants during the hydraulic fracturing of coal seam gas reservoirs: Implications from laboratory testings of propped and unpropped coal fractures[J]. Fuel, 2021, 304: 121394.