

文章编号:1673-9469(2024)06-0008-10

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2024.06.002

压裂路径对水力压裂裂纹扩展影响试验研究

刘剑¹, 邵振宝¹, 付京斌², 吴珍锁², 王耀宗^{1,3}, 王会昊¹

(1. 河北工程大学 地球科学与工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 冀中能源峰峰集团有限公司, 河北 邯郸 056008;
3. 河北省地质矿产勘查开发局地质勘查技术中心, 河北 石家庄 050081)

摘要: 为深入探究煤岩体弹塑性对结构弱面的影响效果,按照起裂位置、压裂方向与层理方向的组合关系开展了压裂试验,利用非金属超声探测仪和声发射对压裂过程进行监测,从裂纹扩展形态、缝宽、渗透流量等方面对压裂效果进行综合评价,并从能量角度进行了相应解释。试验结果显示,顶板覆岩起裂优于本煤层起裂,垂直层理压裂优于平行层理压裂。垂直层理方向的压裂效果最好,裂纹扩展形态更为复杂,呈“O”字形,其渗透系数均值为6.6 mm/s,是平行层理的1.10倍。裂纹由顶板覆岩起裂越界传递至煤块,相同起裂能量情况下可在煤块中形成3.08~3.38倍的当量长度裂纹。

关键词: 煤层气; 水压致裂; 裂隙缝网; 煤岩层理

中图分类号: P642

文献标识码: A

Experimental Study on the Influence of Hydraulic Fracturing Path on Crack Propagation of Hydraulic Fracturing

LIU Jian¹, SHAO Zhenbao¹, FU Jingbin², WU Zhensuo², WANG Yaozong^{1,3}, WANG Huihao¹

(1. School of Earth Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China;
2. Jizhong Energy Fengfeng Group Co., Ltd., Handan, Hebei 056008, China; 3. Geological Exploration Technology Center, Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources, Shijiazhuang, Hebei 050081, China)

Abstract: In order to deeply explore the effect of coal rock mass elastic-plastic deformation on structural weak planes, fracturing experiments were conducted according to the combination relationship of crack initiation position, fracturing direction, and bedding direction. Non-metallic ultrasonic detectors and acoustic emission were used to monitor the fracturing process, and the fracturing effect was comprehensively evaluated from the aspects of crack propagation morphology, crack width, and permeability flow rate. Corresponding explanations were given from the perspective of energy. The experimental results show that the fracturing of the overlying strata is better than that of the coal seam, and vertical bedding fracturing is better than parallel bedding fracturing. The fracturing effect is best in the vertical bedding direction, and the crack propagation morphology is more complex, forming an “O” shape. Its average permeability coefficient is 6.6 mm/s, which is 1.10 times that of parallel bedding. The cracks propagate from the overlying rock of the roof to the coal block, and under the same initiation energy, 3.08 to 338 times equivalent length cracks can be formed in the coal block.

Key words: coal bed methane; hydraulic fracturing; fissure network; coal bedding

能源是社会发展的物质基础,随着常规油气资源日益匮乏,越来越多的目光汇聚到非常

规油气资源领域。煤层气是赋存在煤层及煤系地层中的烃类气体,是优质的清洁能源^[1]。水力压

收稿日期:2023-11-18

基金项目:河北省自然科学基金资助项目(E2019402361, E2020402075);河北省重点研发计划项目(21374104D);河北省高等学校科学技术研究项目(ZD2021309)

作者简介:刘剑(1983-),男,山西偏关人,博士,副教授,研究方向:水力压裂。

裂是煤层气开采的重要技术手段^[2-5],该技术手段源自石油天然气等常规能源开采,相关理论研究较为成熟^[6-9]。我国地质储层不完整、低渗等特点决定其水力压裂技术绝不能照搬国外技术,亟需研究出适合我国地质储层的压裂技术。

煤层气储层属于非贯通裂隙岩体^[10],存在较为发育的层理结构,对水力压裂裂纹扩展具有重要影响^[11]。Daneshy^[12]与Wu等^[13]研究了层理结构面对水力裂纹的影响,认为煤层水力压裂裂缝主要存在水平裂缝、垂向裂缝和复杂裂缝三种形态。Zou等^[14-15]通过水力压裂试验研究,指出裂纹扩展碰到界面或层理等天然弱结构面时,裂纹扩展形态分布可能会出现穿过、止裂、偏转、转向四种情况。Wang等^[16]通过数值模拟,发现天然裂缝、层理等弱结构面对水力裂纹扩展形态的分布有极大的影响,水力裂隙网络在遇到天然弱结构面时会出现三种扩展形式,即沿天然弱结构裂缝延伸、穿过天然弱结构裂缝延伸和混合型延伸,与Zou等^[14-15]试验结果吻合。Wan等^[17]采用真三轴水力压裂及声发射监测模拟页岩水力裂纹的扩展延伸,研究表明天然裂缝的存在对水力裂纹的扩展方向影响很大。综上可知,当前研究热点主要集中在层理结构对本煤层水力压裂裂纹扩展的影响,但受起裂岩体介质自身弹塑性的影响,本煤层起裂与顶板脆性覆岩起裂的裂纹扩展形态势必会有所差异,尤其是顶板覆岩起裂条件下层理结构弱面对裂纹扩展的影响,这方面的研究报道较少。为深入探究煤岩体弹塑性对结构弱面的影响效果,本研究按照起裂位置、压裂方向与层理方向的组合关系,设计了水力压裂试验,通过非金属超声探测仪和声发射对压裂过程进行监测,从裂纹扩展形态、缝宽、渗透流量等方面对压裂效果进行综合评价,并从能量角度进行了相应解释。本研究对优化压裂设计、提高煤层气开采率具有重要意义。

1 试验方案及方法

1.1 试验方案设计

在水力压裂过程中,受煤岩体自身弹塑性的影响,压裂能量在不同煤岩介质中的传递差异明显。此外,层理作为煤岩体的自生结构弱面,对水力裂纹的延伸路径及裂隙网络的复杂程度也有很大影响。鉴于此,本研究按照起裂介质的不同,将水力压裂试验分为两类,即本煤层压裂和顶板覆

岩压裂;根据压裂方向与层理方向的组合关系,又将每一类水力压裂分为两小类,即平行层理压裂和垂直层理压裂。详细水力压裂试验设置见表1。

表1 煤岩复合体水力压裂方案

Tab.1 Hydraulic fracturing scheme for coal rock composite

压裂路径	压裂管路与层理关系	试件编号	试件尺寸/mm
纯混凝土压裂	—	1#	200×200×200
本煤层压裂	平行	2#	200×200×200
	垂直	3#	200×200×200
顶板覆岩压裂	平行	4#	200×200×200
	垂直	5#	200×200×200

试验所用煤样取自邯郸九龙矿2#肥煤,将煤块(100 mm×100 mm×100 mm)置于模具中,并用混凝土代替顶板覆岩^[18],浇筑封裹成立方体试件(200 mm×200 mm×200 mm),制作相同配比、相同尺寸的混凝土试件进行对比分析。煤及混凝土样品相关物理参数见表2。养护完成后,在试件表面中心部位进行钻孔,钻孔直径为14 mm,孔深为11 mm,选用外直径、内直径、长分别为12、8、150 mm的不锈钢管作为压裂管,利用高强度结构胶将不锈钢管封于钻孔内,钢管与孔底预留3 mm的自由段,待结构胶彻底凝固后进行压裂试验。

表2 煤及混凝土样品物理参数

Tab.2 Physical parameters of coal and concrete samples

样品名称	加载方向	弹性模量/MPa	抗拉强度/MPa
2#肥煤	平行层理	1 879	0.93
	垂直层理	2 354	1.17
混凝土	—	10 798	4.10

1.2 试验方法

压裂设备选用Supcxt-20型水力压裂测试系统;为反演试件水力压裂裂纹的三维空间形态及裂缝开度,利用非金属超声探伤仪将立方体试件表面按40 mm等距划分为5×5的网格,将试件上下、左右、前后六个表面依次编号为1—6,将所有奇数面的小网格按照从左到右、从上到下依次编号1—25,按编号对试样依次进行测试,通过分析压裂试验前后声时变化,利用波速计算得出压裂等效缝宽;为实时监测压裂过程中裂缝的形成与延伸扩展情况,利用声发射对试验过程中声发射特征参数进行收集。

2 纯混凝土水力压裂试验研究

根据试验方案,开展了纯混凝土(1#试件)的水力压裂试验。图1为1#试件压裂的压力-时间曲线及声发射特征参数,可以看出,前期压力增长迅速,主要为压裂液填充井筒所致;7~85 s,压力曲线波动式增加至4 MPa,为试件憋压阶段所致;85~90 s迅速失压是因为主裂缝扩展到试件外部边缘,导致试件破坏。本次试验采用声发射特征参数,即累计振铃计数、累计能量、计数率和能量率来分析试验过程,其中累计振铃计数和计数率分别代表整个试验过程和单位时间内超过设定门值的振荡次数,累计能量和能量率分别代表整

个试验过程和单位时间内声发射事件的相对能量强度。从图1可以看出,整个试验过程中声发射的特征参数随时间的变化规律与压力-时间曲线变化趋势近似,试验前期,压裂液填充井筒,试件无破损,无声发射信号产生;试验中期,试件憋压起裂破坏,产生阶段性的声发射信号;当压力值达到4 MPa时,声发射信号也达到峰值;此后声发射信号减弱直至消失。

根据图2(a)(b),反演裂缝三维内部和外部裂纹形态近似一致,1、4、5表面均有裂纹的产生,裂纹的整体形态呈倒“U”形。起裂位置由井筒产生并沿着4、5表面对角延伸扩展,最终止裂于4、5表面。结合三维反演裂纹形态图来看,分析出现

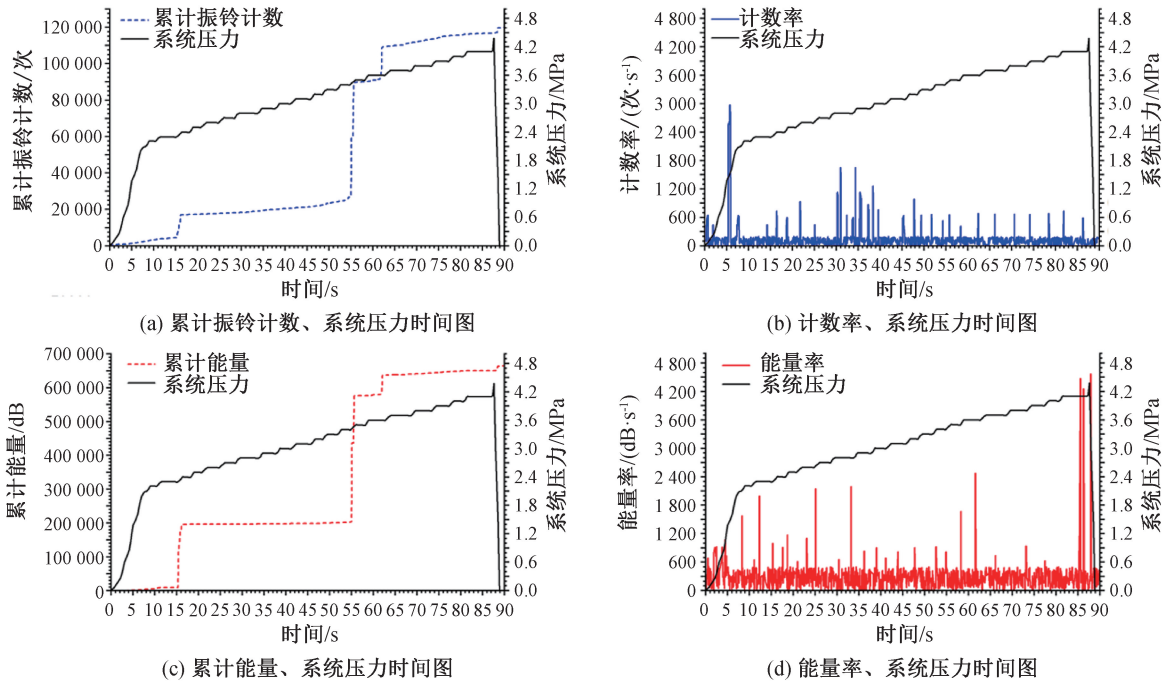


图1 1#试件压力-时间曲线及声发射特征参数

Fig. 1 Pressure-time curve and acoustic emission characteristics parameter of specimen 1#

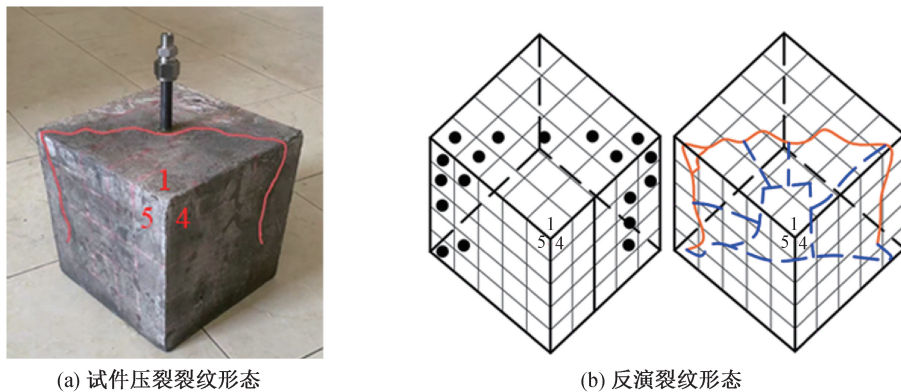


图2 1#试件压裂裂纹形态及超声波测试点位变化下反演裂纹形态

Fig. 2 Fracture morphology of specimen 1# and inversion of fracture morphology under changes in ultrasonic testing points

此情况的原因是试件内部产生相对复杂的裂缝,裂缝直接从内部向外延伸扩展,最终与外部裂纹交会于一点,导致试件破坏。

3 本煤层水力压裂试验研究

3.1 水力裂纹在本煤层平行层理方位扩展特征

将立方体煤块浇筑于混凝土中心位置,并在煤块中钻取压裂孔,使压裂孔与煤块层理平行,记为 2#试件。

图 3 为 2#试件压裂的压力-时间曲线及声发射特征参数,2#试件的压裂-时间曲线较纯混凝土复杂,图中的系统压力有三个峰值强度,分别是

2.1、3.1、3.6 MPa。结合本次试验过程可知,按照时间顺序三个峰值强度分别为平行煤块层理起裂压力、混凝土起裂压力和混凝土完全破坏时的极限压力。声发射特征参数变化趋势与压力-时间曲线变化一致,在三个峰值点处都采集到较强的声发射信号,其余时间点信号较弱甚至没有信号产生。

图 4(a)(b)分别为 2#试件压裂后表面裂纹形态和超声波测试反演的裂纹延伸扩展形态。整体上的反演裂缝三维内部和外部裂纹形态近似一致。结合图 4 可知,2#试件 1、4、6 表面均有裂纹产生,分析水力裂纹从压裂管边缘起裂,主裂纹分别

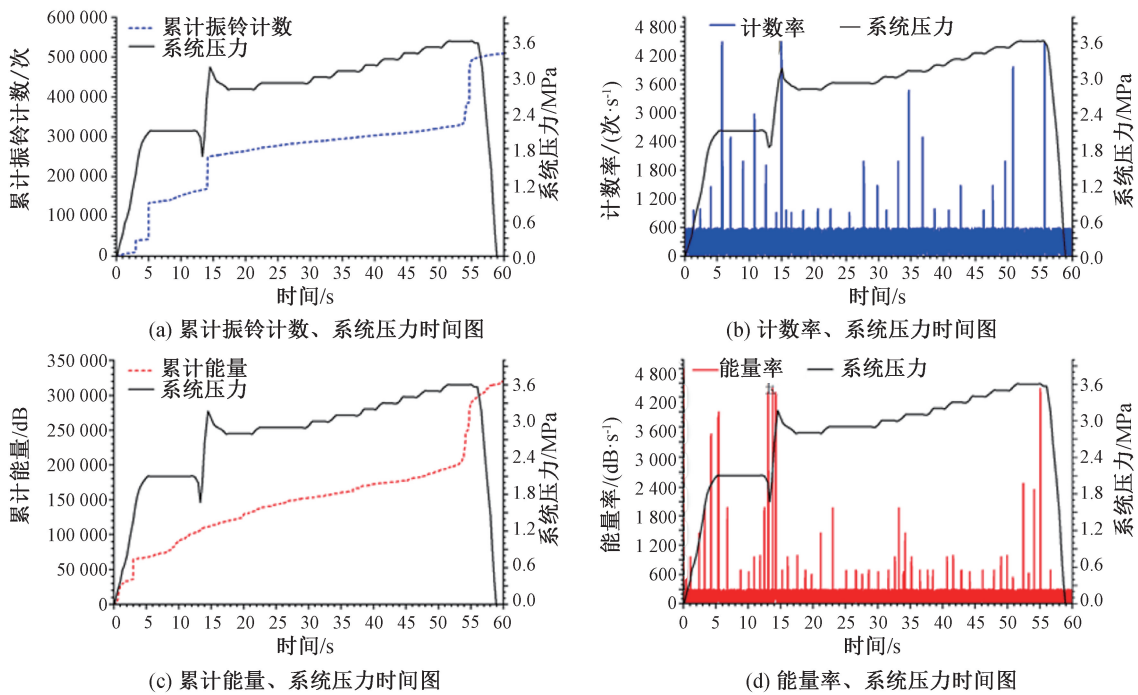


图 3 2#试件压力-时间曲线及声发射特征参数

Fig. 3 Pressure-time curve and acoustic emission characteristics parameter of specimen 2#

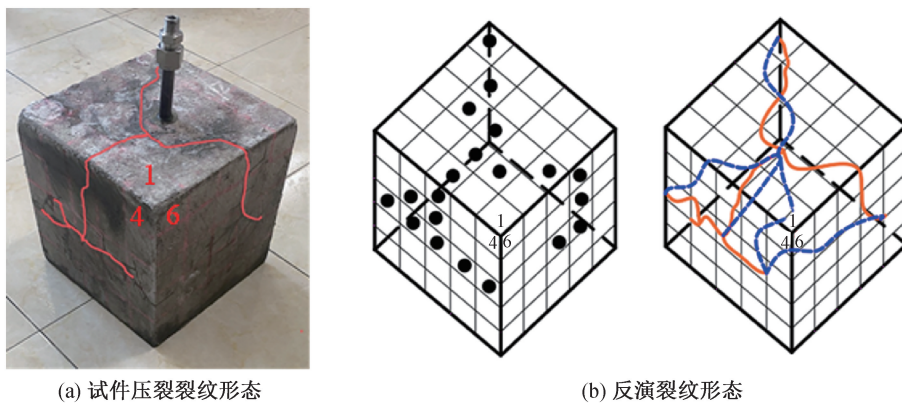


图 4 2#试件压裂裂纹形态及超声波测试点位变化下反演裂纹形态

Fig. 4 Fracture morphology of specimen 2# and inversion of fracture morphology under changes in ultrasonic testing points

向着4、5、6表面延伸扩展。其中向5、6表面延伸扩展的裂纹均发生了小角度的偏转,最终裂纹止裂于1、6表面;向着4表面延伸扩展的裂纹没有发生大角度的偏转,而是直接越过1、4表面交界边缘向着2表面延伸扩展,最终裂纹止裂于4表面中部。裂纹的整体形态呈“工”字形。反演裂缝三维内部和外部裂纹形态近似一致。

3.2 水力裂纹在本煤层垂直层理方位扩展特征

将立方体煤块浇筑于混凝土中心位置,并在煤块中钻取压裂孔,使压裂孔与煤块层理垂直,记为3#试件。

图5为3#试件压裂的压力-时间曲线及声发射特征参数,压力-时间曲线与2#试件趋势相似,压裂过程的三个峰值分别为2.7、3.6、3.4 MPa,不同的是该试件压力曲线在开始和结束阶段有部分峰值。结合本试验过程分析可知,3 s左右出现的峰值0.6 MPa为煤块中较脆弱部分的起裂强度;48 s时的峰值1.9 MPa为混凝土破裂后的残余抗拉强度。而声发射特征参数变化趋势与压力-时间变化趋势一致,在五个峰值点处都采集到较强的声发射信号,其余时间点信号较弱。

图6中(a)(b)分别为3#试件压裂后表面裂纹形态和超声波测试反演的裂纹延伸扩展形态。

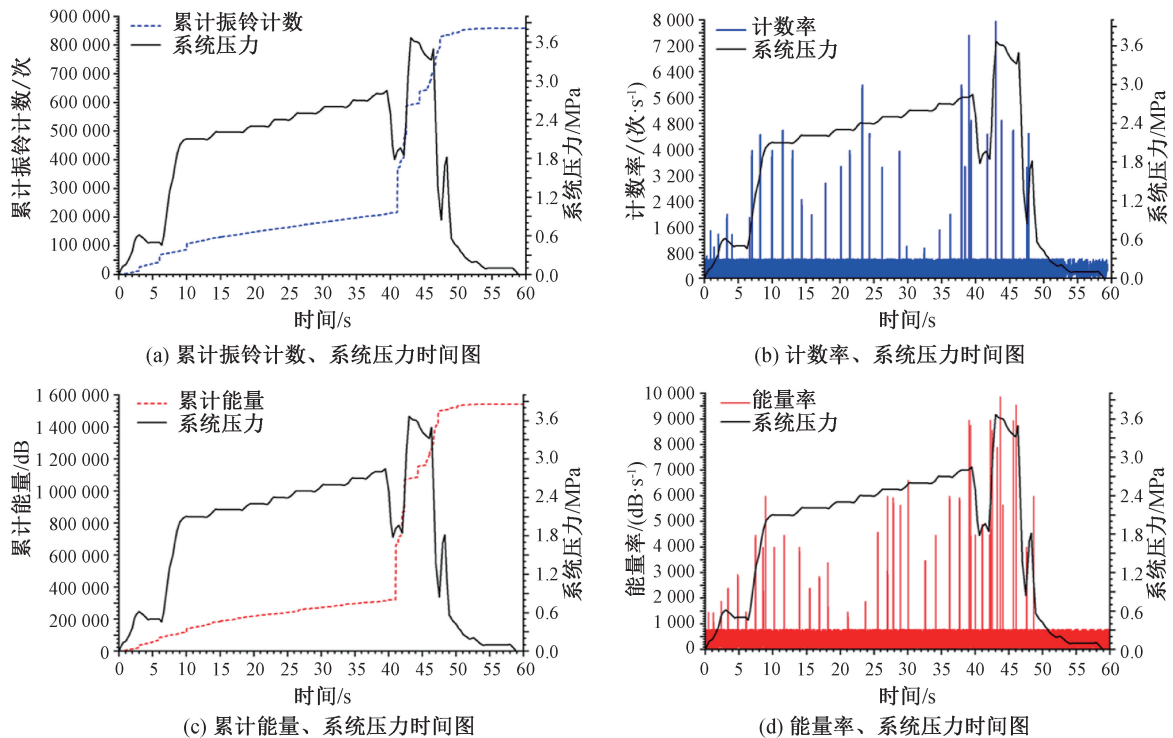


图5 3#试件压力-时间曲线及声发射特征参数

Fig. 5 Pressure-time curve and acoustic emission characteristics parameter of specimen 3#

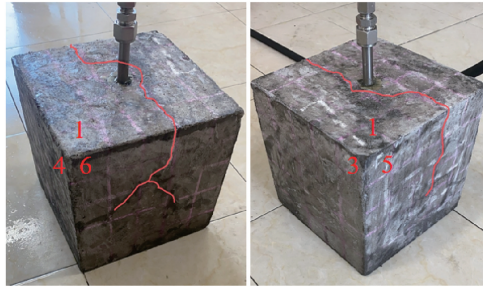
3#试件反演的裂缝三维内部形态和外部裂纹形态稍有偏差,反演的裂纹延伸扩展形态在5表面右边出现分叉,显示两条裂纹,但实际情况为5表面仅出现一条裂纹;超声波数据反演其他点位的裂纹形态基本上与外部的裂纹形态相一致。结合三维反演裂纹形态图来看,从试件表面没有看到裂缝贯穿整个试件,主要为试件内部产生的相对复杂的裂缝,裂缝直接从内部向外延伸扩展,最终和外部裂纹交于一点形成一个破裂面,导致试件失稳破坏。裂纹整体呈“人”字形。

4 顶板覆岩水力压裂试验研究

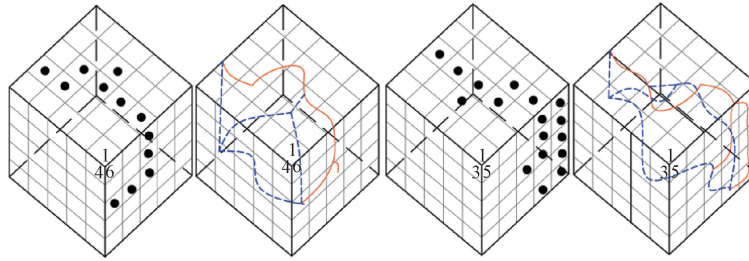
4.1 水力裂纹在顶板覆岩平行层理方位扩展特征

将立方体煤块浇筑在混凝土稍偏一侧,并将压裂孔打在顶板中(没有打在煤块上),使压裂孔与煤块层理平行,记为4#试件。

图7为4#试件压裂的压力-时间曲线及声发射特征参数,压力-时间曲线与2#试件趋势相似含三个峰值,分别为3、2.4、3.2 MPa,结合本试验过程分析可知,峰值3、3.2 MPa为混凝土起裂压力,峰值2.4 MPa为平行煤块层理起裂压力;声发射特征参数变化趋势与压力-时间曲线变化相一致,在三个峰值点处都采集到较强的声发射信号,其余时间点信号较弱甚至没有信号产生。



(a) 试件压裂裂纹形态



(b) 反演裂纹形态

图 6 3#试件压裂裂纹形态及超声波测试点位变化下反演裂纹形态

Fig. 6 Fracture morphology of specimen 3# and inversion of fracture morphology under changes in ultrasonic testing points

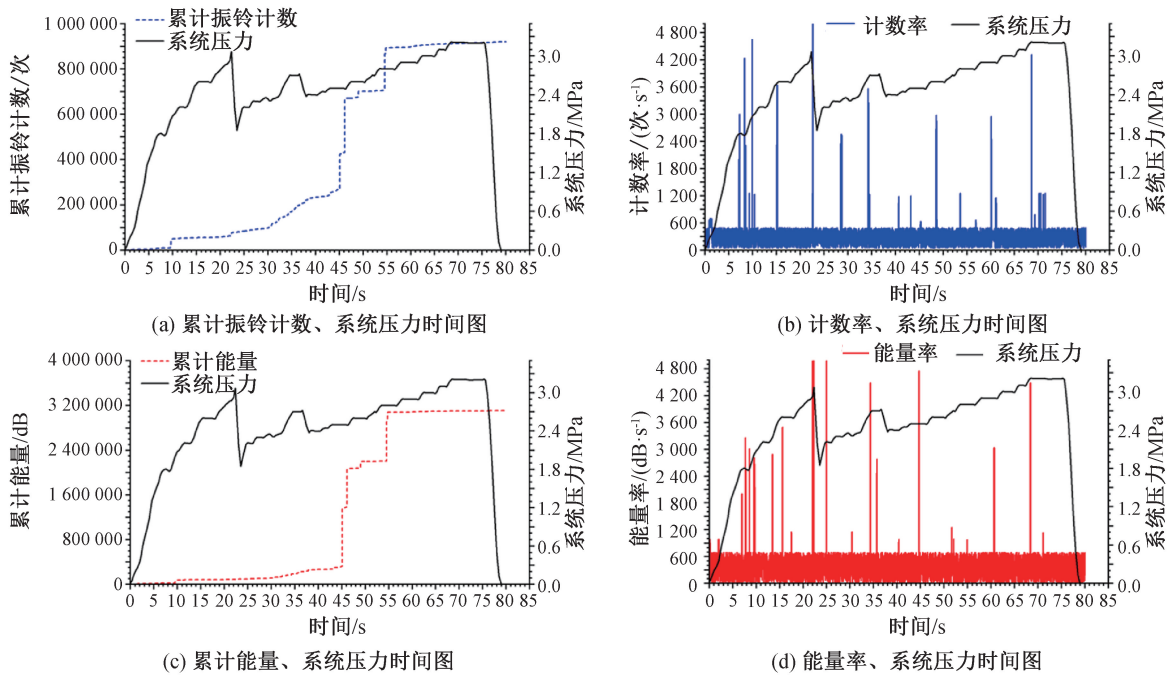


图 7 4#试件压力-时间曲线及声发射特征参数

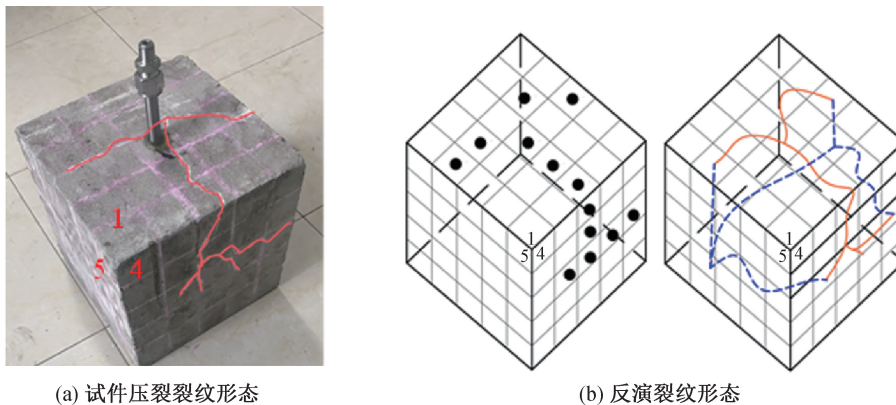
Fig. 7 Pressure-time curve and acoustic emission characteristics parameter of specimen 4#

图 8 中(a) (b) 分别为 4#试件压裂后表面裂纹形态和超声波测试反演的裂纹延伸扩展形态。4#试件反演裂缝三维内部和外部裂纹形态有所偏差,主要区别在 4 表面,反演的三维裂纹形态只有三条裂缝,而实际水力压裂却产生了四条裂缝,超声波数据反演其他点位的裂纹形态基本上与外部的裂纹形态一致。结合三维反演裂纹形态图来看,从试件表面没有看到裂缝贯穿整个试件,其原

因主要是试件内部产生相对复杂的裂缝,裂缝直接从内部向外延伸扩展,最终和外部裂纹交于一点,形成一个破裂面,导致试件失稳破坏。裂纹整体呈“X”字形。

4.2 水力裂纹在顶板覆岩垂直层理方位扩展特征

将立方体煤块浇筑在混凝土稍偏一侧,并将压裂孔打在顶板中(没有打在煤块上),使压裂孔



(a) 试件压裂裂纹形态

(b) 反演裂纹形态

图 8 4#试件压裂裂纹形态及超声波测试点位变化下反演裂纹形态

Fig. 8 Fracture morphology of specimen 4# and inversion of fracture morphology under changes in ultrasonic testing points

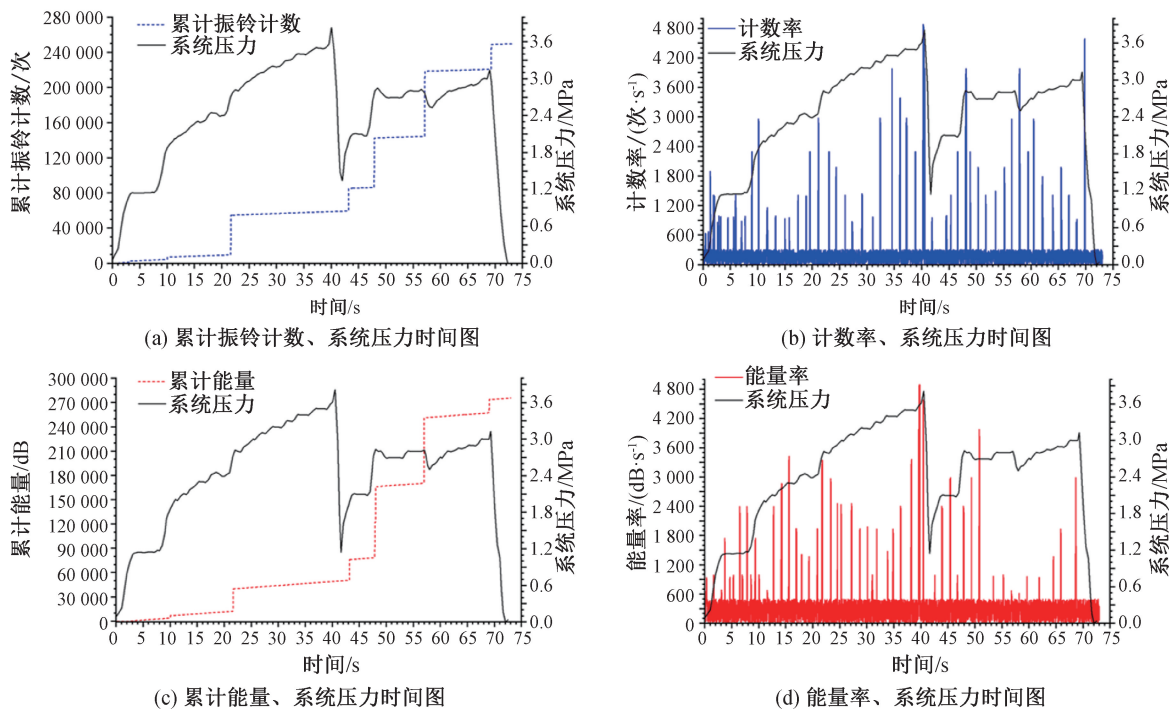
与煤块层理垂直,记为 5#试件。

图 9 为 5#试件压裂的压力-时间曲线及声发射特征参数,压力-时间曲线同样包含三个峰值,分别为 3.7、2.7、3.3 MPa,结合纯混凝土压裂试验分析可知,峰值 3.7、3.3 MPa 为混凝土起裂压力,峰值 2.7 MPa 为垂直煤块层理起裂压力;相较 4#试件具有更高的起裂压力。声发射特征参数变化趋势与压力-时间曲线变化相一致,在三个峰值点处都采集到较强的声发射信号,其余时间点信号较弱甚至没有信号产生。

图 10(a)(b)分别为 5#试件压裂后表面裂纹形态和超声波测试反演的裂纹延伸扩展形态。5#

试件反演裂缝的三维内部和外部裂纹形态近似一致,1、4、5 表面均有裂纹的产生,主裂纹在向 4 表面以双“U”形延伸扩展,最后以小角度偏转向着 4 表面延伸扩展,该试件一共产生五条裂纹,且裂纹的延伸扩展情况较复杂。结合三维反演裂纹形态图来看,从试件表面没有看到裂缝贯穿整个试件,其原因主要是试件内部产生相对复杂的裂缝,裂缝直接从内部向外延伸扩展,最终和外部裂纹交于一点,形成一个破裂面。裂纹整体呈“O”字形,且含有较多细小分叉裂纹。

通过以上试验表明垂直层理压裂效果明显优于平行层理压裂,通过分析垂直层理的 3#、5#试件



(a) 累计振铃计数、系统压力时间图

(b) 计数率、系统压力时间图

(c) 累计能量、系统压力时间图

(d) 能量率、系统压力时间图

图 9 5#试件压力-时间曲线及声发射特征参数

Fig. 9 Pressure-time curve and acoustic emission characteristics parameter of specimen 5#

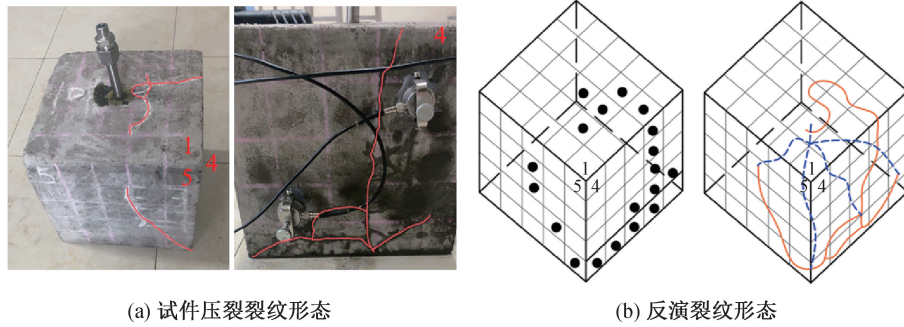


图 10 5#试件压裂裂纹形态及超声波测试点位变化下反演裂纹形态

Fig. 10 Fracture morphology of specimen 5# and inversion of fracture morphology under changes in ultrasonic testing points

和相应平行层理的 2#、4#试件表明,垂直层理起裂压裂的压力较平行层理均高 13.56%,裂纹扩展形态较为复杂,呈“人”“O”形;就起裂介质而言,由硬质材料(混凝土)到较软材料(煤层)压裂产生的裂纹扩展形态更为复杂,呈“X”“O”形,且产生裂纹条数比由软到硬的裂纹多约 50%。

5 压裂效果评价

5.1 达西定律评价

为了对上述试件的压裂效果作出评价,本节设计压水试验,在相同的压力下测得过水断面的流量,通过达西定律^[19]计算压裂后煤岩渗透系数,对不同压裂试验试件进行定量的压裂效果评价。

$$Q = kA(\Delta h)/L \quad (1)$$

式中: Q 为渗流量, mL/s; Δh 为水头差, mm; L 为渗流流径, mm; A 为过水断面面积, mm²; k 为渗透系数, mm/s。

压水试验过程中水压值恒定,可通过下式换算得到水头差 Δh :

$$P = \rho g \Delta h \quad (2)$$

式中: P 为压裂水压, MPa; ρ 为水的密度, kg/m³; g 为重力加速度, N/kg。

本节利用 Supcxt-20 计算机水压测试系统装置进行压水试验,设定 $P = 2$ MPa,记录渗流量 Q ;利用非金属超声无损探伤仪刻画裂纹间接描述渗流流径 L 。经计算便可得出总过水断面的渗透流量。为了更好地描述裂纹缝宽,将声波在直线距离内单条裂纹的最小值定义为最小等效裂缝宽度,将声波在直线距离内单条裂纹的最大值定义为最大等效裂缝宽度。本节选取 2#试件的压水试验数据及超声波数据,对煤层的压裂效果加以评价。压水试验得出 2#试件单位时间内的渗流量 Q 为 12.01 mL/s。表 3 为压裂前后 5、6 面声时、声速变化,根据压裂前后声时变化计算可得,最大等效缝宽为 1.616 mm,最小等效缝宽为 0.402 mm,渗流流经 L 为 40 mm,过水断面面积 A 为 40.36 mm²,将以上数据代入式(1)(2)中即可得 2#试件得渗透系数为 5.95 mm/s。剩余试件渗透流量的计算过程与 2#试件相同,在此不再计算。相关试件的渗透流量及最大、最小等效缝宽计算结果详见表 4。

表 3 2#试件 5、6 面超声波数据参数

Tab. 3 Ultrasonic data parameters on sides 5,6 of specimen 2#

网格序号	压裂前		压裂后		压裂前后 声时变化量/us	裂缝宽度/ mm
	声时/us	声速/(km · s ⁻¹)	声时/us	声速/(km · s ⁻¹)		
7	56.0	3.571	60.8	3.289	4.8	1.632
8	59.6	3.356	62.5	3.200	2.9	0.987
9	59.2	3.378	60.9	3.280	1.7	0.578
12	57.2	3.497	59.0	3.390	1.8	0.612
13	61.2	3.268	63.0	3.175	1.8	0.612
14	57.6	3.472	59.3	3.373	1.7	0.578
17	54.8	3.650	56.8	3.521	2.0	0.680
18	54.0	3.704	55.6	3.597	1.6	0.544
19	54.8	3.650	56.4	3.546	1.6	0.544

表4 渗透系数及缝宽计算结果

Tab. 4 Calculation results of permeability coefficient and crack width

序号	渗流量/ (mL · s ⁻¹)	渗流 流径/mm	最大等效 缝宽/mm	最小等效 缝宽/mm	过水断面 面积/mm ²	渗透系数/ (mm · s ⁻¹)
1#	13.53	56.6	2.860	0.136	84.79	4.52
2#	12.01	40.0	1.616	0.402	40.36	5.95
3#	12.03	125.3	1.816	0.134	122.17	6.17
4#	12.22	122.3	1.632	0.408	114.54	6.00
5#	12.79	116.6	1.496	0.340	107.04	6.97

对比4#、5#试件与2#、3#试件的渗透系数可知,顶板覆岩起裂比本煤层起裂的压裂效果好;垂直煤体层理压裂裂纹的渗透系数及最小缝宽均高于平行煤体层理方向压裂裂纹,其渗透系数均值为6.6 mm/s,是平行层理的1.10倍,反映出垂直煤体层理方向的压裂效果较好。

5.2 能量法评价

根据 Griffith^[20]理论,理想条件下,驱动裂纹的动力与阻止裂纹扩展的阻力是相对平衡的。在本节中,假设裂纹扩展发生的是完全线弹性变形,根据 Griffith^[20]理论,当裂纹起裂后,相当量的应变能将被释放,比较裂纹起裂前后应变能的变化便可计算能量释放率(驱动裂纹扩展动力),假设单位板厚裂纹扩展长度为 b ,裂纹延伸扩展过程中,产生与 b 相关的表面能,最终可得下式:

$$\frac{\partial(Q_1 + V_e)}{\partial b} = 2\gamma - \frac{\sigma_f^2}{E}\pi a \quad (3)$$

式中: σ_f 为裂纹起裂临界拉应力,MPa; E 为弹性模量,MPa; γ 为单位表面积能,J/m²; Q_1 为表面能,J/m; V_e 为体积,m³; b 裂纹扩展长度,m; a 为常数,无量纲。

令式(3)为0,即可获得裂纹临界长度值。经过此种换算,裂纹尖端释放的应变能在数值上便等于形成裂纹面积所需的表面能:

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{EG_c}{\pi b}} \quad (4)$$

式中: G_c 为满足线弹性能量耗散的能量释放率,N/m。 σ_f 可近似用煤、岩体的抗拉峰值强度 σ_1 代替:

$$G_c = \frac{\sigma_1^2}{E}\pi a \quad (5)$$

根据表2中基本物理参数,相关能量释放率计算结果详见表5。表5说明了混凝土中扩展单位长度的裂缝所释放的能量为煤块垂直层理方位扩展单位长度所释放的能量的3.08倍。换言之在混

凝土起裂的能量用于煤样垂直层理方位起裂,在煤样中造成的裂纹长度大约为混凝土裂纹的3.08倍。如果混凝土起裂的能量用于煤样平行层理方位起裂,在煤样中造成的裂纹长度大约为混凝土裂纹的3.38倍。在相对理想情况下,裂缝从硬质材料(混凝土)扩展到相对较软的材料时(煤块),假设能量在跨越界面处没有损失,即从硬质材料传输的能量全部用于在较软结构面制造裂缝,能在较软材料上制造出更复杂的裂隙网络或形成更长的裂隙。这与达西定律评价结果相吻合。

表5 煤样与混凝土的能量释放率比值

Tab. 5 Energy release rate ratio of coal sample to concrete

试件种类	弹性 模量/MPa	抗拉 强度/MPa	能量释放 率比值
混凝土	1 879	0.93	$G_{c\text{混凝土}} =$ $3.08G_{c\text{煤块-垂直层理}}$
煤块-垂直层理	2 354	1.17	$G_{c\text{混凝土}} =$ $3.38G_{c\text{煤块-平行层理}}$
煤块-平行层理	10 798	4.10	$G_{c\text{煤块-垂直层理}} =$ $1.26G_{c\text{煤块-平行层理}}$

6 结论

1)垂直层理压裂效果明显优于平行层理压裂,垂直层理起裂较平行层理起裂具有更高的起裂压力,平均高13.56%;裂纹扩展形态较为复杂,呈“人”“O”形,其渗透系数均值为6.6 mm/s,是平行层理的1.10倍。

2)起裂介质由硬到软的压裂效果明显优于由软到硬压裂,由硬到软起裂具有较高的压力,平均高9.95%;由硬到软压裂产生的裂纹扩展形态更为复杂,呈“X”“O”形,且产生裂纹条数比由软到硬压裂裂纹多约50%。

3)从能量角度解释来看,在相同起裂能量情况下,煤体中产生的裂纹长度是顶板覆岩起裂裂纹长度的3.08~3.38倍;垂直层理起裂的裂纹长

度是平行层理起裂裂纹长度的 1.26 倍。

4) 建议最佳的起裂方式为顶板覆岩起裂且垂直煤体层理方向, 该种情况下, 压裂的裂隙缝网形态较为复杂且裂纹延伸长度较长。

5) 九龙矿 2# 肥煤在开采煤层气时可以考虑在垂直煤体层理上的顶板覆岩上钻井并布置压裂井管, 该条件下水力裂隙网络复杂程度较高, 为煤层气提供运移通道。

参考文献:

- [1] 陈天, 易远元, 李甜甜, 等. 中国煤层气勘探开发现状及关键技术展望[J]. 现代化工, 2023, 43(9): 6-10.
- [2] HUANG B X, LIU C Y, FU J H, et al. Hydraulic fracturing after pressure control blasting for increased fracturing [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(6): 976-983.
- [3] 王浩. 分支钻孔分段水力压裂技术研究及应用[J]. 煤炭技术, 2020, 39(1): 138-140.
- [4] 赵阳升, 杨栋, 胡耀青, 等. 低渗透煤储层煤层气开有效技术途径的研究[J]. 煤炭学报, 2001, 26(5): 455-458.
- [5] 高鑫浩, 王明玉. 水力压裂-深孔预裂爆破复合增透技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(7): 318-324.
- [6] ZENG X G, WEI Y J. Crack deflection in brittle media with heterogeneous interfaces and its application in shale fracking[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2017, 101: 235-249.
- [7] 侯冰, 张其星, 陈勉. 页岩储层压裂物理模拟技术进展及发展趋势[J]. 石油钻探技术, 2023, 51(5): 66-77.
- [8] 李云鹏, 张宏伟, 苏怀瑞, 等. 复杂坚硬岩层井上下联合水力压裂控制技术研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(4): 704-713.
- [9] 王礼恒, 董艳辉, 杨春, 等. 页岩气水力压裂开发的环境效应研究进展[J]. 工程地质学报, 2024, 32(4): 1447-1458.
- [10] 张同景, 郑永香, 郑超越, 等. 注液速率对页岩水力压裂起裂的影响规律研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2022, 39(4): 100-105.
- [11] 侯冰, 程万, 陈勉, 等. 裂缝性页岩储层水力裂缝非平面扩展实验[J]. 天然气工业, 2014, 34(12): 81-86.
- [12] DANESHY A A. Hydraulic fracture propagation in layered formations [J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1978, 18(1): 33-41.
- [13] WU X, XI C F, WANG G Q. The mathematic model research of complicated fractures system in coalbed methane wells[J]. Natural Gas Industry B, 2006, 26(12): 124-126.
- [14] ZOU Y S, ZHANG S C, MA X F, et al. Numerical investigation of hydraulic fracture network propagation in naturally fractured shale formations [J]. Journal of Structural Geology, 2016, 84: 1-13.
- [15] ZOU Y S, ZHANG S C, ZHOU T, et al. Experimental investigation into hydraulic fracture network propagation in gas shales using CT scanning technology[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49: 33-45.
- [16] WANG T, HU W R, DEREK, et al. The effect of natural fractures on hydraulic fracturing propagation in coal seams[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017, 150: 180-190.
- [17] WAN C, YAN J, MIAN C. Experimental study of step-displacement hydraulic fracturing on naturally fractured shale outcrops[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2015, 12(4): 714-723.
- [18] 战新宇, 高林, 赵芳昊, 等. 大相似比模型试验用超高强相似材料配比试验研究[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(11): 109-118.
- [19] 李明, 缪海宾, 马明康, 等. 基于达西定律的渗流边坡稳定性分析[J]. 煤矿安全, 2021, 52(5): 238-241+249.
- [20] 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.

(责任编辑 张爱丽)