

文章编号: 1001-4888(2018)01-0150-09

预制裂缝对煤系页岩水力 压裂效果影响的试验研究^{*}

唐巨鹏, 路江伟, 许鹏, 丁佳会

(辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁阜新 123000)

摘要: 为研究预制裂缝对煤系页岩水力压裂效果的影响,以阜新孙家湾矿煤系页岩为研究对象,采用三轴水力压裂试验设备进行实验室压裂模拟试验。以清水为压裂液,通过对试件施加轴压和围压模拟煤系页岩所处地应力状态。利用声发射仪监测试验过程中的能量释放特征,分析了预制裂缝布置方式和水平应力差对注水压力及声发射能量信号的影响。研究表明:采用双预制裂缝180°相位角的布置方式,试件裂缝扩展程度最高,水力压裂效果最佳;模拟试验中,声发射能量曲线峰值之后的平稳阶段与水力裂缝二次扩展阶段相对应;水平应力差增大使最大注水压力降低,加快了预制裂缝的扩展速度,有利于水力裂缝的起裂扩展和二次扩展;水平应力差为0.2MPa时预制裂缝扩展最快,裂缝扩展程度最大,压裂效果较好。

关键词: 煤系页岩; 页岩气开采; 水力压裂; 预制裂缝; 声发射; 水平应力差

中图分类号: TD845

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-16-225

0 引言

煤系页岩气是指富有机质的煤系泥页岩经过生、排烃作用后残留在泥页岩层段(包含砂岩薄层)内的天然气^[1],属于煤系非常规气的一种。煤系页岩的干酪根以Ⅲ型为主,有机碳含量高,其生成环境主要为海陆交互相与陆相湖盆沉积,含气页岩在垂向上与砂岩、煤层呈互层分布。水力压裂是页岩气储层改造增透开采核心技术,预制裂缝是有效提高水力压裂效果的重要手段。页岩水力压裂技术是指在高压水作用下页岩层微裂缝产生、扩展、贯通^[2,3],经压裂改造后产生大量裂缝系统,改变页岩低孔、低渗特征,有助于储层中游离态页岩气体积增加和吸附态天然气解吸^[4,5]。

国内外学者对页岩水力压裂开展了一系列的工作。Gu等^[6]采用 UFM 模型进行计算,结果表明水平面主应力差、缝内净压力、天然裂缝密度以及岩性是影响裂缝形态的主要因素。王志军等^[7]通过分析裂隙导控煤体水力压裂过程中的声发射及剪应力特征,研究了裂隙扩展动态特征。赵振峰等^[8]采用有限元和离散元混合方法建立了体积压裂扩展模型,对水平井多簇压裂进行了裂缝扩展模拟研究。朱宝存、唐书恒等^[9,10]运用有限元模拟方法,计算了不同地应力条件下煤岩的破裂压力,分析了水力压裂过程中地应力、天然裂缝对煤岩破裂压力的影响。宋晨鹏等^[11]采用理论分析与数值模拟相结合的方法,对裂缝扩展规律及天然裂缝破坏机理进行了研究。曾青冬等^[12]建立了页岩人工裂缝扩展数学模型,求解了裂缝流场和岩石应力场。周建等^[13]研究了裂缝性储层水力压裂过程中天然裂缝张开和剪切破坏

^{*} 收稿日期: 2016-10-29; 修回日期: 2017-03-11

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51374119),国家重点研发计划专项(2016YFC0600901),辽宁省自然科学基金(2014020156),辽宁省高等学校优秀人才支持计划(LR2015028)

通讯作者: 唐巨鹏(1976—),男,教授,博士生导师。主要从事煤层气、页岩气开采相关理论及试验研究。Email: jupengt@126.com

机制。杨焦生等^[14]采用大尺寸真三轴试验系统,研究了地应力、天然割理裂缝等因素对水力裂缝扩展行为及形态的影响。郭印同等^[15]采用页岩水力压裂大型物理模拟试验方法,得出压裂压强大小和地应力状态对裂缝形态有显著影响,其中地应力对裂缝的延伸有较大影响。张吉振等^[16]对海陆过渡相煤系页岩的成藏条件及储层特征进行了研究。张宏学等^[17]利用脉冲衰减渗透率仪测得煤系页岩的渗透率,并提出了页岩储层渗透率模型。邓荣贵等^[18]利用模拟实验对层状岩石的力学与变形特征进行了研究。秦虎等^[19]通过实验得出了不同含水率煤岩破坏过程中的声发射特征。

国内外学者虽然对页岩水力压裂开展了大量研究工作,在海、陆相页岩气方面取得了较大进展,但对于海陆过渡相煤系页岩气研究还较少。进行预制裂缝是水力压裂的必要条件,预制裂缝对水力压裂效果具有重要影响,中国煤系泥页岩发育,泥岩总厚度大,且有机质丰度高,为煤系页岩气的发育提供了基础条件。煤系页岩气储量占我国总页岩气储量的30%,储量丰富,煤系页岩气的开采研究势必成为科研领域里重要课题之一。

综上所述,我国对页岩气的储量勘探和技术开发还处在初步阶段,针对煤系页岩气藏的相关研究以及技术拓展尚有不足,进行预制裂缝对水力压裂影响效果分析具有实际工程意义。因此,本文从实验室模拟试验角度,分析给出了预制裂缝对煤系页岩水力压裂效果的影响规律,获得一些新认识,以期对后续的试验和研究提供参考。

1 试样制备和试验过程

1.1 煤系页岩试件

试验的研究对象为阜新孙家湾矿沙海组四段煤系页岩层,该层以泥岩、粉砂岩为主,主要为生气岩,致密均匀,总厚度在400m左右,全区发育,沉积稳定。沙海组四段页岩最大孔隙为 $0.0382\mu\text{m}$,排替压力为3.14MPa,有机碳含量平均为2.98%,有效孔隙度为1.7%~5.3%,单轴抗压强度平均为31.49MPa,弹性模量平均为10.37GPa,泊松比为0.26。本文试验采用相似模拟材料的煤系页岩型岩试件,型岩与原岩的密度和泊松比相等,根据试验条件选取应力、弹性模量相似比为 $C_\sigma = C_E = 15$,经测定试件单轴抗压强度平均为2.1MPa, $C_\sigma = 14.99$,弹性模量平均为0.63GPa, $C_E = 16.4$,误差在10%以内,孔隙度为5%左右。在试件上预制裂缝,研究其对煤系页岩水力压裂效果的影响,分析相关规律。试件规格为 $\phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$,在试件的中心位置打注水孔,注水孔直径10mm,深度为40mm,试件如图1所示。



图1 试件实物

Fig. 1 Picture of specimen

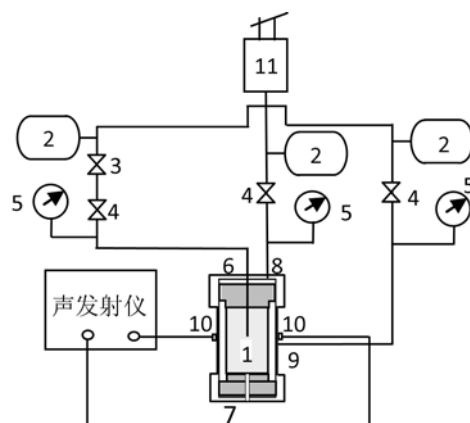
1.2 试验系统

为研究注水压力作用下煤系页岩体的压裂特征及破坏机制,试验采用辽宁工程技术大学自主研制的能够改变轴压、围压和注水压力的三轴水力压裂试验设备。试验中轴压、围压、水力压强均由水压执行机构、水压控制,围压、轴压的大小可通过阀门调整。为保证轴压、围压维持在稳定值,在轴压、围压管路上连接蓄能器,维持试件受力条件,并在管路上装有电子压力表,监测轴压、围压的变化。为得到较稳定注水压力,考虑实验室条件,采用大型号蓄能器储能,并在注水压力管路上装置调控流量的节流阀,从而得到试验要求的水流量,并在注水压力管路上安装存储型数字压力表,实时监测注水压力的变化并记录试验读数。采用SAEU2S声发射设备监测试件破坏过程声发射能量释放规律,研究注水压力作用下页岩破坏机制,AE传感器探头固定于放置试件的缸体两侧,两者之间涂抹耦合剂以减少声发射信号的损失。设备连接布置如图2所示。

1.3 参数选取及试验过程

(1) 参数选取

选择声发射设备的波形门限、参数门限、前放增益分别为42dB、42dB、45dB,滤波器选择20kHz~



1. 试件; 2. 蓄能器; 3. 节流阀; 4. 截止阀; 5. 存储型数字压力表;
6. 压裂注水口; 7. 出水口; 8. 轴压口; 9. 围压口; 10. AE 传感器探头; 11. 水压泵

图 2 试验设备连接示意图

Fig. 2 Schematic diagram of test equipment connection

1.2MHz。调节流量为 0.5ml/s,并使其保持稳定。试件预制裂缝数设置为 0、2、3、4,预制裂缝深度为 35mm,宽度约 1mm。考虑到试件较小,施加过高应力会对试件造成损坏,不利于试验的进行,针对试件特征和试验条件选取围压(σ_h)为 1.0MPa,轴压(σ_H)分别为 1.0MPa、1.2MPa、1.4MPa。

(2) 试验过程

为防止声发射信号被外界干扰,试验在相对安静的时段进行。打开声发射设备,调节各项参数,并检测传感器是否能够测得声发射信号。测试存储型数字压力表是否可正常记录数据及读取数据,并调零。检查各管路气密性,保证管路密封良好,检查完毕后,关闭所有阀门。

先将轴压施加到设定压力,再将围压施加到设定压力,调节节流阀,测试注水压力速率是否达到要求,之后开始试验,期间保持安静。同时开启声发射设备和计数压力表实时记录,打开注水压力管路上的截止阀,开始注水,随着水液进入管路,注水压力不断上升,直至水压突然降低或不再上升,此时试件破坏。迅速关闭注水压力管路上的截止阀,停止施加注水压力,并停止声发射信号和压力表数据采集,存储试验数据。按注水压力、围压、轴压的顺序卸载。卸载完成后,迅速将试件从试验设备腔体中取出,拆开封装热缩管,取出破坏试件,防止残留水浸润试件。

2 试验结果分析

2.1 预制裂缝数量的影响

为研究预制裂缝布置方式对煤系页岩水力压裂的影响规律,分别进行了无预制裂缝、双预制裂缝、三预制裂缝和四预制裂缝水力压裂模拟试验,后三组预制裂缝夹角分别为 180° 、 120° 和 90° ,试验施加轴压为 1.0MPa,围压为 1.0MPa,图 3 为预制裂缝布置实物图。

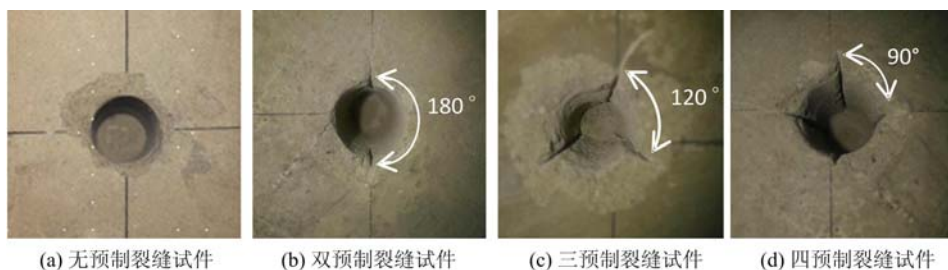


图 3 预制裂缝布置实物图

Fig. 3 Pictures of pre-cracks arrangement mode

试验过程中采用声发射手段监测试件破坏情况,所得注水压力与声发射能量曲线如图 4~图 7 所示。由图 4~图 7 分析可知,预制裂缝条件下水力压裂分为以下 5 个阶段:试验开始阶段几乎没有声发

射信号,该阶段水进入钻孔、预制裂缝以及少量渗入试件中,如图中0时间点到A段;第二个阶段注水压力不断增大,试件开始受注水压力作用,此阶段声发射信号无明显变化,试件并没有发生破坏,如图中A-B;第三个阶段注水压力继续增加至最大值,声发射能量信号逐渐增强,并有较大能量信号出现,说明试件内部有裂缝的起裂与扩展,如图中B-C段;第四个阶段注水压力达到最大值后开始下降,但仍然有较多声发射能量信号,说明此时水力裂缝二次扩展,如图中C-D段,试件趋于破坏;最后阶段,注水压力迅速下降,声发射能量信号明显变弱,说明试件不再产生较大裂缝扩展,关闭截止阀,试验结束,如图中D-E段。

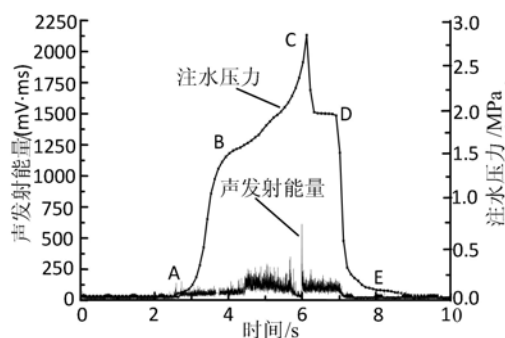


图4 无预制裂缝试件水力压裂试验结果

Fig. 4 Hydraulic fracturing test result of no pre-crack specimen

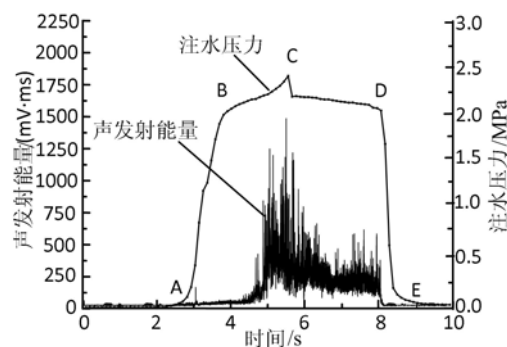


图5 双预制裂缝试件水力压裂试验结果

Fig. 5 Hydraulic fracturing test result for double pre-cracks specimen

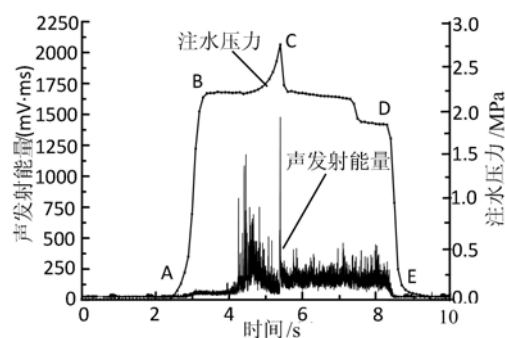


图6 三预制裂缝试件水力压裂试验结果

Fig. 6 Hydraulic fracturing test result for three pre-cracks specimen

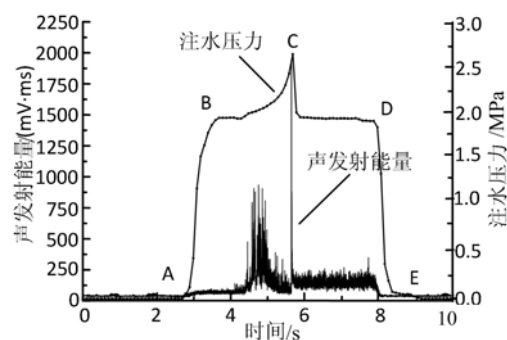


图7 四预制裂缝试件水力压裂试验结果

Fig. 7 Hydraulic fracturing test result for four pre-cracks specimen

由图4~图7可以看出注水压力曲线变化规律具有相似性,均存在一个注水压力峰值,分别为2.73MPa、2.43MPa、2.72MPa、2.68MPa。注水压力峰值与最大声发射能量发生时间点重合。声发射能量大小可以表征试件破坏程度,因此注水压力峰值可以认为是试件产生最大程度裂缝扩展所需最大值。预制裂缝对该值会产生影响,降低所需的注水压力,由试验结果可知,相比于无预制裂缝试件,其降低的幅值为10.99%、0.37%、1.83%。双预制裂缝试件降低的最为明显,另外两组降幅较小。由图4~图7中的声发射能量曲线图中可以看出,无预制裂缝试件所产生的声发射能量信号少于其他三组,说明预制裂缝有利于煤系页岩水力压裂裂缝的起裂和扩展。

图8给出了4个组别的声发射能量总值的柱状图,可以看出,双预制裂缝试件产生的破坏量是最大的,相比于无预制裂缝试件其声发射能量总值高出了104.18%,三、四预制裂缝试件分别高出了61.77%和30.58%。试验结束后观察发现四预制裂缝试件的预制裂缝有闭合现象,如图9所示,多裂缝之间会出现优势裂缝扩展,劣势裂缝受到抑制的现象,裂缝并未充分扩展,导致其扩展程度降低。

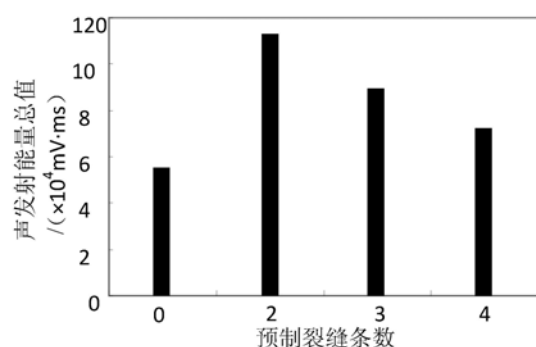


图 8 各组试验的声发射能量总值

Fig. 8 Total acoustic emission energy of each group



图 9 四预制裂缝试件试验结果

Fig. 9 Test result of four pre-cracks specimen

为了进一步分析声发射能量信号变化特征,从而给出裂缝扩展规律。将试验中的声发射能量曲线分为 4 个阶段,第一个阶段有少量声发射能量产生,称为填充阶段,如图 4~图 7 中 0 时间点到 B 段;第二个阶段为声发射能量信号大量产生到峰值的阶段,称为升压起裂阶段,如图 4~图 7 中 B-C 段;第三个阶段为声发射能量信号平稳产生的阶段,称为裂缝充分扩展阶段,如图中 C-D 段;第四个阶段声发射能量信号减弱直到试验结束,称为卸压结束阶段,如图中 D 点到试验结束。

图 10 给出的是 4 个阶段的声发射能量值占总声发射能量值的比例,文献[20,21]指出页岩水力压裂过程中水力裂缝自割缝处起裂并扩展,在扩展的同时,会产生新的水力裂缝和次生裂缝。本文有与之相似的结论,在升压起裂阶段,无预制裂缝试件在水的不断注入下注水孔孔壁发生破坏,产生裂缝,有预制裂缝试件的水力裂缝自预制裂缝处起裂,继而扩展。裂缝扩展阶段,已有水力裂缝会发生二次扩展。从图 10 中可以看出无预制裂缝试件水力裂缝的初次扩展程度要大于二次扩展的起裂扩展,而有预制裂缝试件的结果与之相反,在压裂过程中,试件积累应变能,当达到注水孔壁的强度极限时,应变能释放,孔壁产生裂缝并扩展,这个过程的耗能要比裂缝充分扩展阶段的耗能高;而由于预制裂缝的存在,水力裂缝更易起裂,耗能要小于二次扩展,利于水力裂缝充分扩展。

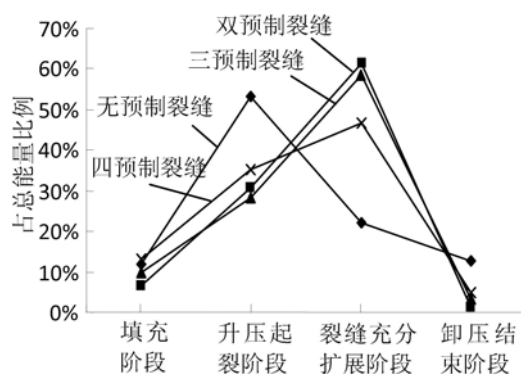


图 10 各阶段声发射能量比例

Fig. 10 Acoustic emission energy ratio curve at each stage

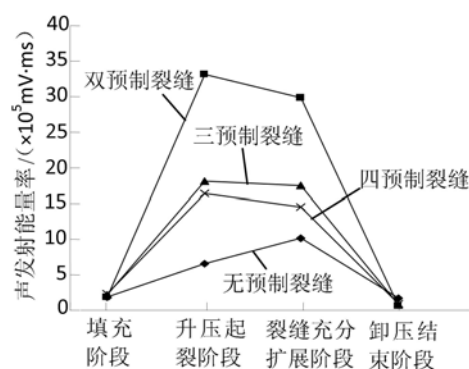


图 11 各阶段声发射能量率曲线图

Fig. 11 Acoustic emission rate curve of each stage

将 4 个阶段的声发射能量总值与其所用时间的比值称为声发射能量率,其反映的是各阶段裂缝扩展的剧烈程度。4 个阶段的声发射能量率曲线如图 11 所示,可以看出无预制裂缝试件的二次扩展比初次扩展更加剧烈,但扩展的程度低。对于有预制裂缝的试件次生裂缝起裂与扩展的剧烈程度则要弱于预制裂缝的扩展,二次扩展和次生裂缝扩展程度高,过程平缓。双预制裂缝试件的声发射能量率最高,其破坏最为剧烈,裂缝更易于扩展。

由上述分析可知:当煤系页岩水力压裂的声发射能量进入峰值之后的平缓期时,水力裂缝会充分扩展,预制裂缝有利于水力裂缝的起裂扩展与二次扩展,其扩展进程较为平缓,有利于提高煤系页岩水力

压裂效果;双预制裂缝以 180° 相位角布置于注水孔两侧时,裂缝扩展程度最好,扩展速度最大,且易形成垂直于注水孔的裂缝面,与文献[22]中所描述的理想裂缝形态类似。表明该种方式适合煤系页岩的水力压裂作业。

2.2 水平应力差的影响分析

水平应力差($\sigma_H - \sigma_h$)是影响水力压裂裂缝扩展的重要因素,其往往影响裂缝形态和开裂程度。试验设水平应力差分别为 0MPa、0.2MPa 和 0.4MPa。在上述条件下,进行了水力压裂试验,所得注水压力曲线图如图 12~图 15 所示,图中横轴时间自起裂阶段算起。

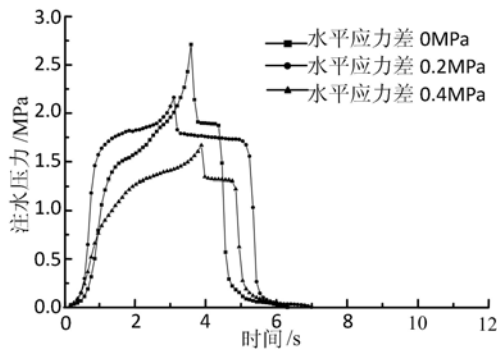


图 12 无预制裂缝试件注水压力曲线图

Fig. 12 Water injection pressure curve of no pre-crack specimen

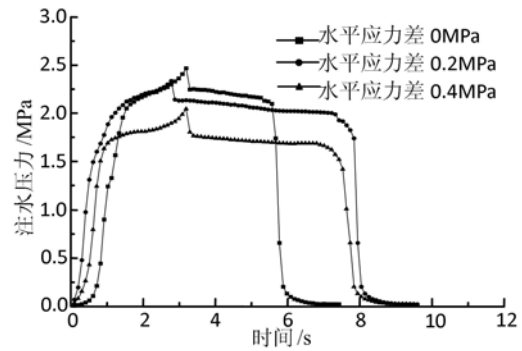


图 13 双预制裂缝试件注水压力曲线图

Fig. 13 Water injection pressure curve of double pre-cracks specimen

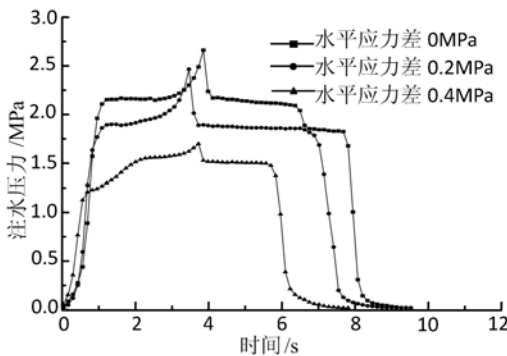


图 14 三预制裂缝试件注水压力曲线图

Fig. 14 Water injection pressure curve of three pre-cracks specimen

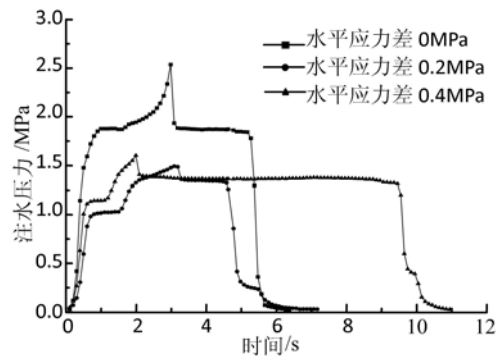


图 15 四预制裂缝试件注水压力曲线图

Fig. 15 Water injection pressure curve of four pre-cracks specimen

从不同水平应力差的各组注水压力曲线图中可以看出,其变化的趋势与前述注水压力曲线图一致,同样具有 5 个阶段。当水平应力差增大时,最大的注水压力均有不同程度的减小,说明水平应力差增大更易促进预制裂缝起裂和扩展。分析上述曲线图可知,注水压力达到最大值后发生压力陡降,说明预制裂缝起裂后沿着裂缝面开始扩展,压裂水进入新生裂缝面,降低了注水压力,这与文献[23]所述结论相似。注水压力陡降之后的压力稳定阶段在试验中对应水力裂缝二次扩展的过程,分析图 12~图 15 可知,该阶段平均持续时间分别为 2.05s、2.73s、2.07s,水平应力差为 0.2MPa 时起裂时间最长,应变能平稳释放,裂缝扩展平稳进行。

图 16 给出了试验声发射能量总值变化曲线图,可以看出,有预制裂缝试件更易发生破坏,裂缝产生和扩展程度比无预制裂缝试件明显要高;有预制裂缝试件在水平应力差为 0.2MPa 时声发射能量总值最大,说明此时水力压裂效果最好。

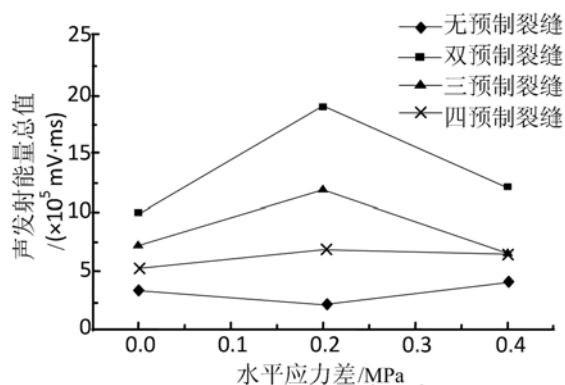


图 16 不同水平应力差下的声发射能量总值

Fig. 16 Total acoustic emission energy of different horizontal stress difference

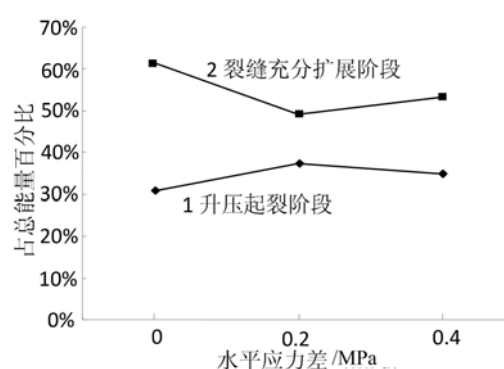


图 17 双预制裂缝试件两阶段声发射能量比例

Fig. 17 Acoustic emission energy ratio of two stage for double pre-cracks specimen

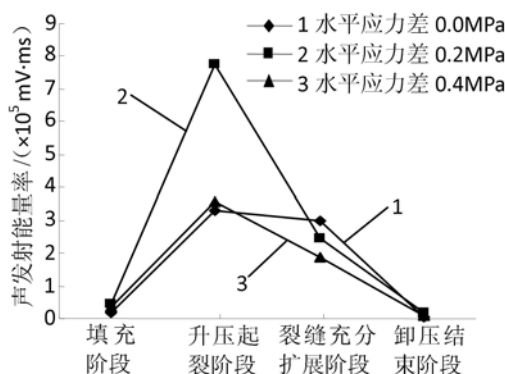


图 18 不同水平应力差下双预制裂缝能量率曲线图

Fig. 18 The different horizontal stress difference ratio curve of double pre-cracks

双预制裂缝的布置方式对水力压裂的效果提升最为明显,其曲线更有代表性,下面加以具体分析。图 17 给出了不同水平应力差下双预制裂缝试件升压起裂、裂缝充分扩展两个阶段声发射能量与总能量的比例曲线图。可以看出两个阶段曲线变化规律相反,水平应力差增加使试件首次扩展程度先增大后减小,二次扩展所处的裂缝充分扩展阶段与之相反,水平应力差为 0.2MPa 时,有利于预制裂缝的起裂和扩展。图 18 为不同水平应力差下双预制裂缝试件 4 个阶段的声发射能量率曲线图,从图中可以看出水平应力差为 0.2MPa 时预制裂缝初始扩展最为剧烈,即预制裂缝扩展的最快。裂缝充分起裂扩展阶段,水平应力差的增加会使该阶段

声发射能量率降低,水平应力差为 0.2MPa、0.4MPa 时,声发射能量率分别下降了 18.45% 和 23.03%,水平应力差的增大会使水力裂缝二次扩展更加平稳。

3 结论

(1) 对含有不同数量预制裂缝的试件进行试验,结果表明预制裂缝对煤系页岩水力压裂效果有明显的提高作用,其中双预制裂缝 180°相位角布置方式压裂效果最佳,相比无预制裂缝试件,压裂效果提高了 104.18%;试验所得声发射能量曲线图中,峰值之后的平稳阶段与水力裂缝二次扩展阶段相对应。

(2) 水平应力差的提高使最大注水压力降低,更易促进预制裂缝起裂和扩展,二次扩展过程更加平稳,利于煤系页岩水力压裂的进行。

(3) 试验结果表明,水平应力差为 0.2MPa 时预制裂缝扩展所用时间最短,预制裂缝起裂扩展和二次扩展程度最大,压裂效果较好。

参考文献:

- [1] Cao D Y, Li J, Wei Y C, et al. Study on the forming conditions of shale gas in coal measure of Wuli area, Qinghai Province, China[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 295:2770—2773.
- [2] 张大伟. 加强中国页岩气资源管理的思路框架[J]. 天然气工业, 2011, 31(12):115—118, 133 (ZHANG Dawei. Framework for strengthening the management of shale gas resources in China[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(12):115—118, 133 (in Chinese))

- [3] 张金川, 金之钧, 袁明生. 页岩气成藏机理和分布[J]. 天然气工业, 2004, 24(7):15—18, 131—132 (ZHANG Jinchuan, JIN Zhijun, YUAN Mingsheng. Accumulation mechanism and distribution of shale gas[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(7):15—18, 131—132 (in Chinese))
- [4] 张金川, 薛会, 张德明, 等. 页岩气及其成藏机理[J]. 现代地质, 2003, 17(4):466 (ZHANG Jinchuan, XUE Hui, ZHANG Deming, et al. Shale gas and its accumulation mechanism[J]. Geoscience, 2003, 17(4):466 (in Chinese))
- [5] 王鸿勋. 重复压裂技术的几项最新进展[M]. 世界石油工业, 2000, 7(9):41—45 (WANG Hongxun. Several recent important technical progress of refracturing[M]. World Petroleum Industry, 2000, 7(9):41—45 (in Chinese))
- [6] Gu H, Weng X. Criterion for fractures crossing frictional interfaces at non-orthogonal angles[R]. ARMA 10-198, 2010.
- [7] 王志军, 张瑞林, 张森, 等. 含瓦斯煤体定向水力压裂裂隙导控的数值分析[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2013, 32(4):373—379 (WANG Zhijun, ZHANG Ruilin, ZHANG Sen, et al. Numerical analysis of fracture guide and control of directional hydraulic fracturing in coal body containing gas[J]. Journal of Henan Polytechnic University(Nature Science), 2013, 32(4):373—379 (in Chinese))
- [8] 赵振峰, 王文雄, 邹雨时, 等. 致密砂岩油藏体积压裂裂缝扩展数值模拟研究[J]. 新疆石油地质, 2014, 35(4):447—451 (ZHAO Zhenfeng, WANG Wenxiong, ZOU Yushi, et al. Numerical simulation research of fracture propagation in tight sand reservoir by volume fracturing process[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2014, 35(4):447—451 (in Chinese))
- [9] 朱宝存, 唐书恒, 颜志丰, 等. 地应力与天然裂缝对煤储层破裂压力的影响[J]. 煤炭学报, 2009, 34(9):1199—1202 (ZHU Baocun, TANG Shuheng, YAN Zhifeng, et al. Effects of crustal stresses and natural fractures on fracture pressure of coal reservoirs[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(9):1199—1202 (in Chinese))
- [10] 唐书恒, 朱宝存, 颜志丰. 地应力对煤层气井水力压裂裂缝发育的影响[J]. 煤炭学报, 2011, 36(1):65—69 (TANG Shuheng, ZHU Baocun, YAN Zhifeng. Effect of crustal stress on hydraulic fracturing in coalbed methane wells[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(1):65—69 (in Chinese))
- [11] 宋晨鹏, 卢义玉, 夏彬伟, 等. 天然裂缝对煤层水力压裂裂缝扩展的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2014, 35(5):756—760 (SONG Chenpeng, LU Yiyu, XIA Binwei, et al. Effects of natural fractures on hydraulic fractures propagation of coal seams[J]. Journal of Northeastern University(Nature Science), 2014, 35(5):756—760 (in Chinese))
- [12] 曾青冬, 姚军. 基于扩展有限元的页岩水力压裂数值模拟[J]. 应用数学和力学, 2014, 11(35):1239—1247 (ZHEN Qingdong, YAO Jun. Numerical simulation of shale hydraulic fracturing based on the extended finite element method[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2014, 11(35):1239—1247 (in Chinese))
- [13] 周健, 陈勉, 金衍, 等. 压裂中天然裂缝剪切破坏机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008(s1):2637—2641 (ZHOU Jian, CHEN Mian, JIN Yan, et al. Mechanism study of shearing slippage damage of natural fracture in hydraulic fracturing [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008(s1):2637—2641 (in Chinese))
- [14] 杨焦生, 王一兵, 李安启, 等. 煤岩水力裂缝扩展规律试验研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(1):73—77 (YANG Jiaosheng, WANG Yibing, LI Anqi, et al. Experimental study on propagation mechanism of complex hydraulic fracture in coal-bed[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(1):73—77 (in Chinese))
- [15] 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))
- [16] 张吉振, 李贤庆, 王元, 等. 海陆过渡相煤系页岩气成藏条件及储层特征——以四川盆地南部龙潭组为例[J]. 煤炭学报, 2015, 40(8):1871—1878 (ZHANG Jizhen, LI Xianqing, WANG Yuan, et al. Accumulation conditions and reservoir characteristics of marine-terrigeneous facies coal measures shale gas from Longtan Formation in South Sichuan Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(8):1871—1878 (in Chinese))
- [17] 张宏学, 刘卫群, 朱立. 页岩储层裂隙渗透率模型和试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(3):719—729 (ZHANG

- Hongxu, LIU Weiqun, ZHU Li. Fracture permeability model and experiments of shale gas reservoirs[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(3):719—729 (in Chinese))
- [18] 邓荣贵, 付小敏. 层状岩体力学特性模拟实验研究[J]. 实验力学, 2011, 26(6):721—729 (DENG Ronggui, FU Xiaomin. On the simulative experimental study of mechanical properties of stratified rock mass[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26(6):721—729 (in Chinese))
- [19] 秦虎, 黄滚, 王维忠. 不同含水率煤岩受压变形破坏全过程声发射特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6):1115—1120 (QIN Hu, HUANG Gun, WANG Weizhong. Experimental study of acoustic emission characteristics of coal samples with different moisture contents in process of compression deformation and failure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 31(6):1115—1120 (in Chinese))
- [20] 侯振坤, 杨春和, 王磊, 等. 大尺寸真三轴页岩水平井水力压裂物理模拟试验与裂缝延伸规律分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(2):407—414 (HOU Zhenkun, YANG Chunhe, WANG Lei, et al. Hydraulic fracture propagation of shale horizontal well of by large-scale true triaxial physical simulation test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(2):407—414 (in Chinese))
- [21] 姜浒, 刘书杰, 何宝生, 等. 定向射孔对水力裂缝起裂与延伸的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(7):1321—1326 (JIANG Hu, LIU Shujie, HE Baosheng, et al. Experiments of the oriented perforating impact on the multi-fracture pattern of hydraulic fracturing treatment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(7):1321—1326 (in Chinese))
- [22] Katelyn M N. Shale gas development[M]. Nova Science Publishers, 2010.
- [23] 王磊, 杨春和, 郭印同, 等. 基于室内水力压裂试验的水平井起裂模式研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015 (S2):3624—3632 (WANG Lei, YANG Chunhe, GUO Yintong, et al. Investigation on fracture initiation modes of horizontal wells based on laboratory hydraulic fracturing test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015(S2):3624—3632 (in Chinese))

Experimental investigation on the effect of prefabricated cracks on hydrofracture of coal measure shale

TANG Ju-peng, LU Jiang-wei, XU Peng, DING Jia-hui

(School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: In order to study the effect of prefabricated cracks on hydrofracture of coal measures shale, taking coal measures shale of Fuxin Sun jiawan coal mine as object of study, tri-axial hydrofracture simulation experiment was carried out in laboratory. Taking water as fracturing fluid, in-situ earth stress of coal measures shale was simulated by applying axial pressure and confining pressure to specimen. The characteristics of energy release during experiment process were monitored and measured by acoustic emission instrument. The influence of prefabricated cracks arrangement and the horizontal stress difference on water injection pressure and acoustic emission energy signal were analyzed. Experimental results show that under the condition of double prefabricated cracks with 180° phase angle, specimen's crack propagation degree is the highest, and hydrofracture effect is the best. In simulation experiment, stable stage after the peak value of acoustic emission energy curve corresponds to the secondary expansion phase of hydrofracture. The increase of horizontal stress difference decreases the maximum water injection pressure and accelerates propagation of prefabricated cracks, which is beneficial to crack initiation and secondary expansion of hydrofracture. When horizontal stress difference is 0.2MPa, the crack propagation is the fastest, and crack propagation degree and hydrofracture effect are the best.

Keywords: coal measures shale; shale gas exploitation; hydrofracture; prefabricated cracks; acoustic emission; horizontal stress difference