

文章编号:1001-4888(2020)04-0639-11

基于声发射能量分析的周期注水应力改造下 煤系页岩裂缝扩展规律试验研究^{*}

唐巨鹏¹, 齐桐¹, 代树红¹, 潘一山², 路江伟¹

(1. 辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁阜新 123000; 2. 辽宁大学 物理学院, 辽宁沈阳 110000)

摘要: 周期注水作为一种有效开采页岩气的应力改造技术, 其对页岩裂缝起裂扩展影响机制尚不明确。基于页岩储层真实三维应力环境, 研制了真三轴水力压裂试验系统, 以黑龙江双鸭山矿区煤系页岩为研究对象, 制作了煤系页岩相似材料模型, 进行了先周期注水应力改造、后水力压裂的页岩裂缝扩展模拟试验。利用声发射技术监测了应力改造阶段和压裂阶段裂缝起裂扩展过程, 根据声发射能量变化和频谱特征, 分析了应力改造和水力压裂阶段的裂缝特征、起裂扩展规律, 提出了基于声发射能量分析的水力压裂裂缝由起裂阶段进入扩展阶段的判别指标和判定方法。试验结果表明: 应力改造阶段裂缝尺寸以微裂缝为主, 随周期注水压力增加, 张拉型裂缝占比减少, 剪切型裂缝占比增加; 压裂阶段裂缝尺寸以宏观裂缝为主, 随周期注水压力增加, 张拉型裂缝占比增加, 剪切型裂缝占比减少, 当周期注水压力为 1.6 MPa 时为最优, 易形成缝网。提出以平均声发射能量能率 k 作为裂缝起裂判据, 发现当 k 降幅超过 26.87% 时, 裂缝由起裂阶段进入扩展阶段。周期注水应力改造可以产生微裂缝, 沟通水力裂缝降低压裂时裂缝起裂难度, 从而提高页岩气开采率。所得结论可为水力压裂应力改造效果评价与裂缝控制提供参考。

关键词: 周期注水; 应力改造; 裂缝扩展; 声发射; 煤系页岩

中图分类号: TE377 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-18-256

0 引言

煤系页岩气是页岩气重要组成部分, 其可采储量占到了全国页岩气资源的 30% 左右^[1], 由于页岩气储层致密低渗, 常规天然气的开采方法无法实现页岩气的商业开采, 利用水力压裂技术对页岩储层进行压裂改造是目前开采煤系页岩气的主要方式, 压裂改造效果最佳的手段是体积压裂。而体积压裂效果影响页岩气开采率, 因此通过改造应力改变页岩孔隙压力, 研究裂缝起裂与扩展情况具有重要意义。

国内外学者针对水力压裂已开展了大量研究^[2,3], 机理方面: 金衍等^[4]通过对水力裂缝与天然裂缝的研究发现, 水力裂缝在井壁处的起裂有 3 种方式, 并对 3 种起裂方式的起裂压力计算模型给定了起裂方式和压力的判定方法。Wong 等^[5]对岩心开展了低应力条件下的三轴试验, 对岩心试验前后的微观破坏进行了分析。唐世斌等^[6]对裂缝尖端应力分布表达式中的非奇异应力项 (T 应力) 进行了深入研究, 在考虑 T 应力基础上结合最大拉应变准则建立了水力压裂起裂准则, 推导出临界起裂压力和起裂角度计算表达式。试验方面: 李庆辉等^[7]通过对北美 Barnett, Haynesville, Eagle Ford 和中国南方龙马

^{*} 收稿日期: 2018-11-23; 修回日期: 2019-01-10

基金项目: 国家重点研发计划资助(2016YFC0600901, 2017YFC0804208), 国家自然科学基金资助(51374119)

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

溪组含气页岩进行三轴压缩试验,得到了含气页岩破坏形式与力学特征与所受应力条件之间的关系。杨焦生等^[8]通过大尺寸真三轴试验系统研究了地应力、天然割理裂缝、隔层及界面性质对煤岩体水力裂缝形态和扩展过程的影响。郭印同等^[9]采用多通道声发射采集仪对水力压裂进行了三维空间定位监测,对裂缝实时起裂位置进行了有效观测。孙可明等^[10,11]利用三轴水力压裂系统进行了含层理的页岩水力压裂试验,对层理与裂缝扩展之间的关系进行了研究。

目前相关学者对水力压裂的试验研究主要集中于水力压裂下天然裂缝、层理、压裂液等因素对裂缝起裂扩展的影响,对于压裂前储层周期注水应力改造效果评价和裂缝控制关注较少,常规应力改造是利用地表可控流体注入,在压裂前调解井周围岩的孔隙压力从而改变岩石所处有效应力状态。周期注水是通过循环水压将液体注入到岩石中,有利于产生地质力学扩容和张剪裂缝,有利于微裂缝的形成,从而增加缝网形成的可能性。前人对周期注水应力改造与水力压裂裂缝特征、起裂扩展及缝网形成影响机制的研究尚不深入,对裂缝由起裂阶段进入扩展阶段鲜有研究。因黑龙江双鸭山矿区煤系页岩具有典型性,因此本文以黑龙江双鸭山矿区煤系页岩为研究对象,考虑煤系页岩裂隙发育各向异性和易破碎性,为实现试验结果可比性,研制相似模拟材料代替原岩,利用课题组自主研发的真三轴水力压裂模拟试验系统,进行了煤系页岩储层三维应力环境下,先周期注水应力改造、后水力压裂模拟试验。试验过程中利用声发射技术实时采集了声发射能量信号变化。据此分析应力改造阶段和水力压裂阶段裂缝尺寸、裂缝发育程度和裂缝类型的变化特征,分析相关影响规律,以期对周期注水应力改造效果评价和裂缝控制提供科学参考。



图 1 煤系页岩岩样

Fig. 1 Coal shale rock sample



图 2 煤系页岩试件

Fig. 2 Coal shale specimen



1 水力压裂试验

1.1 试件制备

采集黑龙江双鸭山矿区原岩样,采集完成后用保鲜膜包裹并运至实验室(如图 1、图 2 所示),因为原页岩脆性强不易切割,并且从地下采出后改变了其受力环境,因此用相似材料进行试验。为了获取煤系页岩的单轴抗压强度、抗拉强度、弹性模量和泊松比等参数,开展了单轴压缩和巴西劈裂试验。利用岩石切割机切取 $50\text{mm} \times 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ 尺寸的长方体试件进行单轴压缩试验。将不足 100mm 的断裂柱状试件切割打磨成 $20\text{mm} \times 50\text{mm}$ 的巴西劈裂试件进行巴西劈裂试验(结果如图 3 所示),单轴压缩试验结果列于表 1,水力压裂试验中抗拉强度是影响水力压裂裂缝起裂扩展的主要因素,所以本文通过制作多组不同配比模型试样,利用巴西劈裂试验确定模型试样抗拉强度 σ_t ,计算公式为:

$$\sigma_t = \frac{2F_{\max}}{\Omega D h} \quad (1)$$

式中, $F_{\max}$ 为加载曲线峰值; D 为试件直径; h 为试件厚度。进而选取与煤系页岩抗拉强度相匹配的材料配比。对各组试验数据进行计算,求解抗拉强度 σ_t ,将原岩与相似材料的巴西劈裂试验结果对比列于表 2。

表 1 原岩单轴压缩试验结果

Tab. 1 Original rock uniaxial compression test results

编号	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	单轴抗压强度 σ_c/MPa
1	0.15	0.221	5.04
2	0.4	0.213	16.30
3	0.76	0.191	20.76

表 2 原岩与相似材料抗拉强度对比

Tab. 2 Comparison of tensile strength between original rock and similar model

组数	1	2	3	平均值
原岩	4.579	3.911	4.622	4.371
相似材料 1	1.122	0.917	0.959	0.999
相似材料 2	1.018	0.987	1.138	1.048
相似材料 3	0.753	0.857	0.794	0.801
相似材料 4	0.682	0.626	0.629	0.646
相似材料 5	0.616	0.503	0.525	0.551
相似材料 6	0.510	0.483	0.434	0.476



图 3 相似模型巴西劈裂试验

Fig. 3 Similar model brazil splitting test



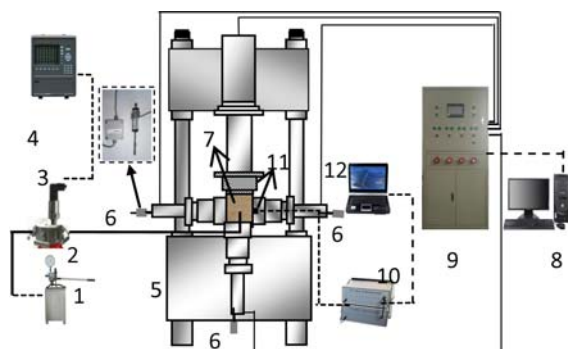
图 4 完成后的试件

Fig. 4 Completed test specimen

基于相似性原理确定几何相似比为 $C_L=10$, 应力比 $C_\sigma=10$, 抗拉强度比 $C_t=10$ 。结合煤系页岩原岩的抗拉强度测定, 经反复摸索相似材料配比进行抗拉强度测定试验, 由表 2 可以发现, 相似材料 6 配比模型抗拉强度 $\sigma_t=0.476\text{MPa}$, 与原岩抗拉强度相似比最为接近。该相似模型选择粒径小于 1mm 的石英砂作骨料, 以水泥作胶结剂, 并在其中添加一定量石膏模拟岩样的脆性, 水泥 : 石英砂 : 水 = $1 : 6 : 0.6$ 。试验采用水平井模拟真实地矿, 因此注水孔需要平行放置, 从三轴加载腔处进行注水, 在试件制作完成后制作注水孔, 钻孔深度为 120mm , 钻孔直径为 6mm , 之后将注水孔上端部直径扩大至 14mm , 深度为 12mm , 用于放置内螺纹螺母。钻取完毕后, 利用棉签清理钻孔。钻孔清理完毕后将带有卡套的注水管线放置固定于钻孔内, 预留 20mm 的裸眼压裂段, 注水管线与井壁之间的环空利用高强度环氧树脂胶封固。之后将内螺纹螺母固定于注水管线上, 内螺纹螺母与井壁之间的空隙同样利用高强度环氧树脂胶封固, 待高强度环氧树脂胶凝固后试件制作完毕, 如图 4 所示。

1.2 试验装置

本文试验在自主研发的三轴加载系统上进行, 整体连接示意图如图 5 所示。



1. 注水系统; 2. 六通阀; 3. 压力传感器; 4. 多通道数据采集仪; 5. 压机; 6. 位移传感器; 7. 试件;
8. 控制台数据采集系统; 9. 液压控制台; 10. 声发射仪; 11. 声发射探头; 12. 采集电脑

图 5 真三轴水力压裂试验系统

Fig. 5 True triaxial hydraulic fracturing test system

1.3 试验参数设计

油气田开采中,用周期注水进行应力改造可有效提高油气藏采收率,因此深入掌握周期注水应力改造对裂缝特征影响十分必要。我国页岩气资源埋深较大,多在 1500m~5000m 之间,因此模拟了 3000m 埋深下正常地应力机制($\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$)的应力条件。根据李新平等^[12]和赵德安等^[13]对地应力分布的研究,取垂向地应力 $\sigma_v = 60\text{MPa}$,最大水平地应力 $\sigma_H = 50\text{MPa}$,最小水平地应力 $\sigma_h = 30\text{MPa}$,根据相似比为 10 确定试验的 $\sigma_v = 6\text{MPa}$ 、 $\sigma_H = 5\text{MPa}$ 、 $\sigma_h = 3\text{MPa}$,应力改造阶段周期注水压力取值分别为 0MPa、0.4MPa、0.8MPa、1.2MPa、1.6MPa、2.0MPa,压裂阶段注水压力为 10MPa,试件编号 K0~K5。K0 试件是对照组试验,无应力改造阶段。

2 试验结果分析

利用声发射技术提取声发射能量信号特征判断裂缝特征信息,包括:裂缝尺寸、裂缝发育程度、裂缝类型、裂缝起裂与扩展,进而分析周期注水应力改造对裂缝起裂扩展影响规律,对提高页岩气采收率具有重要意义。

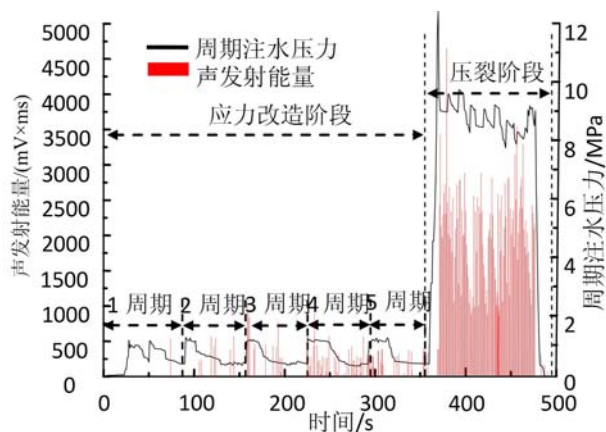


图 6 周期注水压力与声发射能量关系曲线

Fig. 6 Cycle water injection pressure and acoustic emission energy curve

2.1 周期注水应力改造与裂缝特征关系

为了对水力压裂全过程的周期注水压力和声发射能量进行说明,以试件 K1 为例进行详细描述,其他试件不再赘述。

试验表明周期注水压力与裂缝特征关系的规律为:

(1) 水力裂缝起裂时最大声发射能量值的出现具有一定滞后性,且应力改造阶段以微裂缝为主,压裂阶段以宏观裂缝为主。

由图 6 可知,压裂阶段开始时刻声发射能量值是整个过程中最大的,裂缝扩展过程中声发射能量比起裂过程小,同时周期注水压力在某一数值附近波动,在应力改造阶段出现了一定数量的微裂缝,这些微裂缝使声

发射辐射波发生衰减和延迟到达,从而出现滞后性。

确定应力改造阶段与压裂阶段的裂缝尺寸,首先根据 Cai 等人^[14]的研究表明快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform,FFT)谱图中的高频常对应于小尺寸破坏,低频常对应于大尺寸破坏的规律,对应力改造阶段和压裂阶段的裂缝尺寸进行判断。但是从主频上无法判断注入压力对裂缝尺寸变化有何影

响,根据 Kanamori 和 Anderson^[15]统计发现地震中应力降具有尺度不变性,声发射测量系统与地震观测系统相似,借鉴地震学中震级概念,自定义了用于进行裂缝尺寸分析的能级表达式如下:

$$M_e = \lg(E_A) \tag{2}$$

式中, M_e 为自定义能级,无量纲; E_A 为声发射能量, $\text{mV} \times \text{ms}$ 。

第一周期主频反映裂缝起裂时的裂缝发育情况,通过其特点可以对应力改造阶段和压裂阶段的裂缝尺寸进行判断,如图 7、图 8 所示。

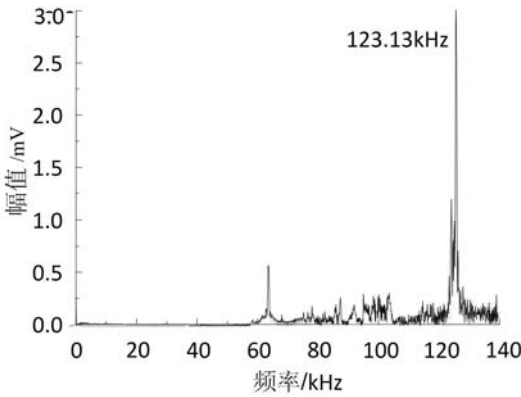


图 7 试件 K1 应力改造第 1 周期 FFT 频谱图
Fig. 7 Specimen K1 stress transformation first period FFT spectrogram

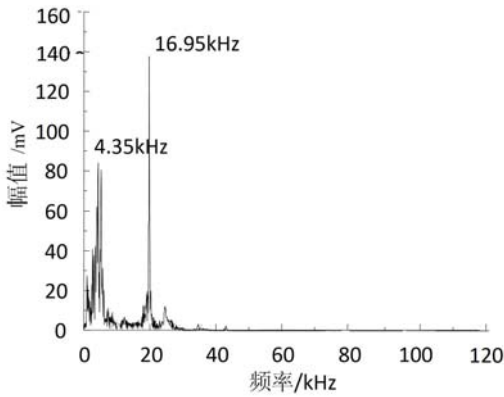


图 8 试件 K1 压裂阶段 FFT 频谱图
Fig. 8 Specimen K1 fracturing stage FFT spectrogram

从图 7 中可以看出,第 1 周期内声发射信号主频为 123.13kHz,属于高频信号,FFT 谱图中除了主频外没有幅值较大的信号,应力改造阶段属于高频范围,裂缝以微裂缝为主。从图 8 中可以看出,FFT 谱图中的主频为 16.95kHz,且在 4.35kHz 出现第二大幅值点,幅值较大的信号均出现在 0~20kHz 频率范围内且较为集中于 4.35kHz 和 16.95kHz 两个频率附近。压裂阶段的主频值属于低频,对应于大尺寸破坏,说明压裂阶段裂缝以宏观裂缝为主,表 3 为 K1 各周期主频范围。

表 3 K1 各周期主频范围

Tab. 3 K1 cycle fracturing stage

	周期 1	周期 2	周期 3	周期 4	周期 5	压裂阶段
主频范围/kHz	61.59~127.50	121.15~123.64	84.86~160.42	61.03~136.87	28.3~103.39	4.35~18.09

不同注水压力的能级变化规律如图 9 所示。

压裂阶段裂缝尺寸随周期注水压力的增加而增大,应力改造阶段微裂缝尺寸随注水压力增加先减小后增大,应力改造阶段微裂缝尺寸主要受注入压力影响,根据 Kanamori 和 Anderson^[15]对能级的研究,结合前人对裂缝尺寸的总结,推导归纳出应力改造阶段能级在 3 以下,以小于 0.1mm 的微裂缝为主;压裂阶段能级在 3 以上,以大于 0.1mm 的宏观裂缝为主。

(2) 裂缝发育程度随着周期注水压力的增加而增加,应力改造阶段周期注水压力作用主要体现在产生扩容和产生微裂缝。

断裂力学从能量平衡的角度出发,认为破裂扩展是由于外加能量增长率大于岩体本身应变能增长率,从而产生新的表面,以增加表面能的方式达到新的能量平衡,所以各阶段声发射总能量可以反映形成的裂缝面大小,称之为裂缝发育程度。

从图 10 中可以看出,对照组声发射能量小于具有应力改造阶段的试件,并随着周期注水压力增加,声发射总能量逐渐增大,增幅分别为 18.58%、15.91%、54.83%、33.63%、29.92%,增幅不均,总体呈增加趋势,周期注水压力为 0.8MPa 及以下时增幅较小,1.2MPa 及以上时增幅较大。通过对试件 K1 试验结果的分析可知,应力改造阶段周期注水压力作用主要体现在产生扩容和产生微裂缝两个方面,那

么当周期注水压力增大时有以下情况发生:第一,产生扩容效应的区域增加,由于试件颗粒排列方式有限,孔隙体积增大是有限度的,周期注水压力增大会导致更多孔隙体积增加。第二,周期注水压力增大导致颗粒间胶结物质更易破坏,从而产生更多微裂缝,当水力裂缝扩展时可以沟通这些微裂缝形成更多裂缝面。

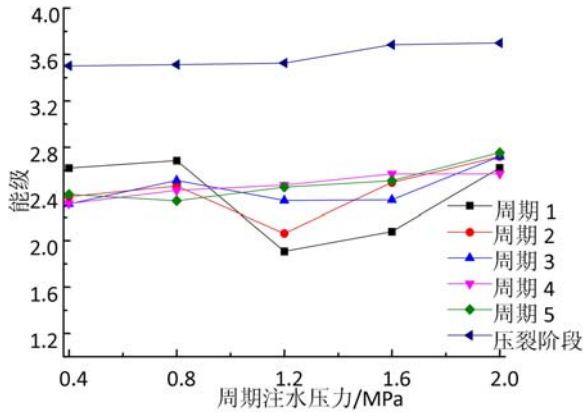


图 9 不同周期注水压力下的能级曲线

Fig. 9 Energy levels under cyclic water injection pressure

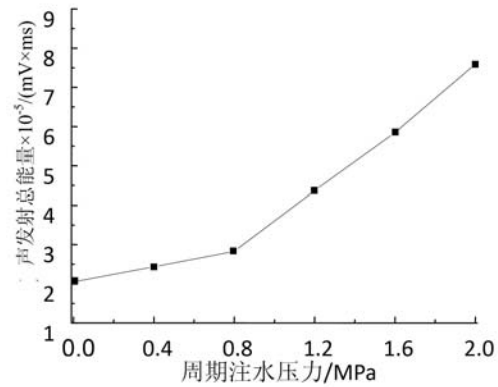


图 10 周期注水压力对水力压裂全过程声发射能量的影响

Fig. 10 Effect of cyclic water injection pressure on acoustic emission energy in the whole process of hydraulic fracturing

随着周期注水压力的增加,水力压裂所产生的裂缝发育程度增加,经过计算得出周期注水压力由 0MPa 增加至 2.0MPa 的五个区间中裂缝发育程度平均增加了 53.89%。声发射总能量变化说明周期注水压力对水力压裂全过程所产生的裂缝发育程度具有明显影响。

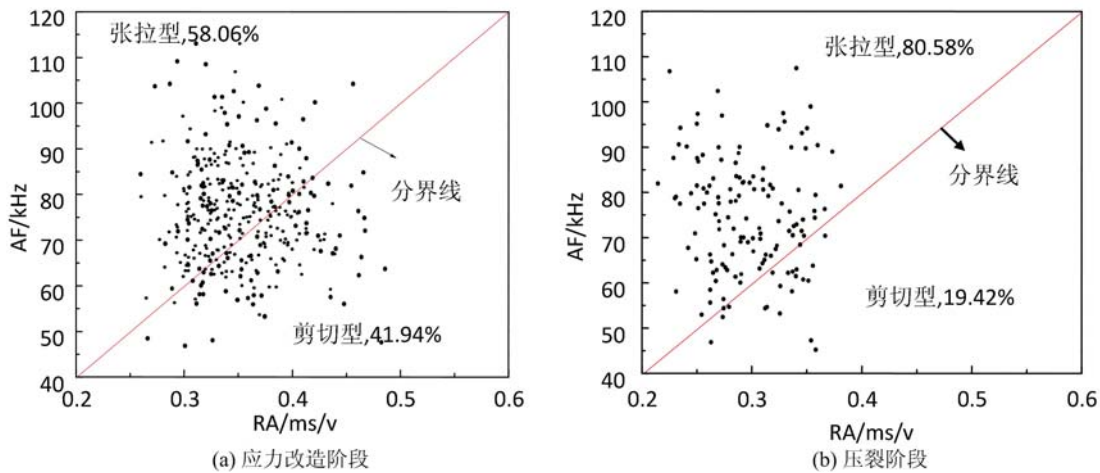


图 11 试件 K1 水力压裂全过程 RA-AF 关系图

Fig. 11 Specimen K1 RA-AF relation diagram of stress transformation stage and fracturing stage

(3) 周期注水压力为 1.6MPa 时,应力改造阶段剪切型微裂缝占比大,微裂缝形成较多;压裂阶段张拉型裂缝占比越大,缝网形成越容易。

考虑不同类型的裂缝产生的声发射信号特征不同,利用 Ohno 等^[16]提出的 RA-AF 分布区分动态裂缝类型的方法对本文试验结果的裂缝类型进行区分,首先将 AF 刻度大小与 RA 刻度大小之间确定为 200 倍关系,之后将 RA-AF 图中对角线作为区分裂缝类型的分界线。在分界线上面一侧信号具有高 AF 低 RA 特征,对应于张拉型裂缝,分界线下侧信号具有低 AF 高 RA 特征,对应于剪切型裂缝。下面以试件 K1 为例,利用 RA-AF 分布分析应力改造阶段和压裂阶段的动态裂缝类型,见图 11 所示。

K1 试件应力改造阶段所形成的微裂缝中,张拉型裂缝占比 58.06%,剪切型裂缝占比 41.94%,在

压裂阶段所形成的裂缝中张拉型裂缝占比 80.58%, 剪切型裂缝占比 19.42%; K2 试件在应力改造阶段张拉型裂缝占比 46.11%, 剪切型裂缝占比 53.89%, 压裂阶段张拉型裂缝占比 83.53%, 剪切型裂缝占比 16.47%; K3 试件在应力改造阶段张拉型裂缝占比 40.25%, 剪切型裂缝占比 59.75%, 压裂阶段张拉型裂缝占比 83.70%, 剪切型裂缝占比 16.30%; K4 试件在应力改造阶段张拉型裂缝占比 45.27%, 剪切型裂缝占比 54.73%, 压裂阶段张拉型裂缝占比 92.77%, 剪切型裂缝占比 7.23%; K5 试件在应力改造阶段张拉型裂缝占比 35.46%, 剪切型裂缝占比 64.54%, 压裂阶段张拉型裂缝占比 53.57%, 剪切型裂缝占比 46.43%。由以上裂缝类型变化可知, 随着周期注水压力增大, 在应力改造阶段剪切型裂缝占比增加, 张拉型裂缝占比减少; 压裂阶段拉张裂缝占比增加, 剪切型占比较少, 当达到 2MPa 时, 压裂阶段拉张裂缝占比微降, 说明周期注水压力不是越大越能达到理想效果。剪切型微裂缝在水力裂缝形成和扩展中是不可忽略的, 其有利于水力裂缝的转向和非平面扩展, 是形成缝网的一个关键因素。

图 12 为应力改造阶段裂缝类型占比变化曲线, 可以看出在周期注水压力增加过程中张拉型微裂缝呈下降趋势, 而剪切型微裂缝呈上升趋势, 但两者均不是线性关系, 数据分布具有一定波动特征。剪切型裂缝有利于水力裂缝的转向与非平面扩展, 是缝网形成的一个关键因素, 说明周期注水压力有利于剪切型裂缝产生。

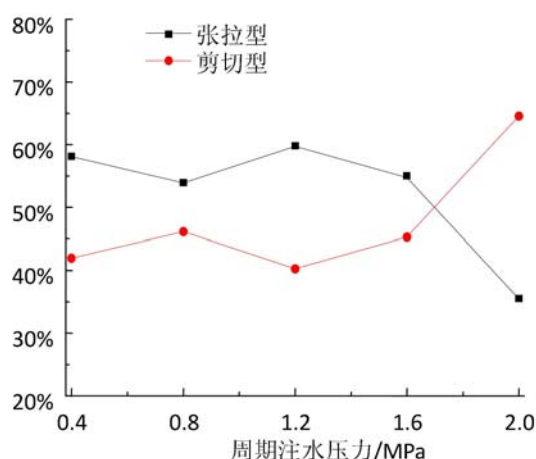


图 12 周期注水压力对应力改造阶段裂缝类型的影响

Fig. 12 Effect of cyclic water injection pressure on crack type in stress transformation stage

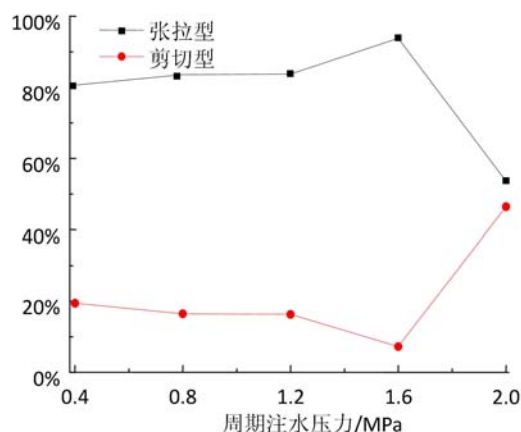


图 13 周期注水压力对压裂阶段裂缝类型的影响

Fig. 13 Effect of cyclic water injection pressure on crack type in fracturing stage

图 13 为压裂阶段裂缝类型占比变化曲线图, 可以看出周期注水压力小于 2.0MPa 时, 随着周期注水压力增加, 张拉型裂缝占比具有增加趋势, 剪切型裂缝占比具有减少趋势。周期注水压力为 2.0MPa 时, 压裂阶段剪切型裂缝大量增加, 本文认为这是由于应力改造阶段所形成的大量剪切型微裂缝所造成的。从总体上看, 张拉型裂缝在压裂阶段始终占据主导地位, 张拉型裂缝越多水力裂缝形成越容易。

由图 12、图 13 可知, 随着周期注水压力增加, 应力改造阶段和压裂阶段裂缝类型占比均呈现波动变化, 说明周期注水压力与裂缝类型占比呈非线性关系。当注水压力增大时反而抑制裂缝生成, 因为裂缝增多, 会导致地层页岩气向上移动, 从而降低页岩气开采率。综上所述, 周期注水压力为 1.6MPa 时, 应力改造阶段剪切型裂缝占比相对较大, 同时压裂阶段张拉型裂缝占比最大, 为本试验最优周期注水压力。

2.2 周期注水应力改造与压裂阶段起裂扩展的关系

压裂阶段以裂缝起裂扩展为主, 研究其变化规律可以加深对裂缝形成规律的了解, 以试件 K1 为例进行详细说明(见图 14), 其他不再赘述。

从图 14 可以看出, 压裂阶段前期周期注水压力快速升高, 之后发生陡降, 声发射累积能量曲线无明显变化, 周期注水压力达到最大值后, 声发射累积能量曲线开始上升, 这些变化是由裂缝自井壁处起裂形成的。裂缝形成后在水压作用下开始扩展, 周期注水压力曲线波动变化, 声发射累积能量曲线逐渐升

高,斜率基本稳定。扩展阶段的声发射总能量占整个阶段总能量的绝大部分,达到 83.27%。

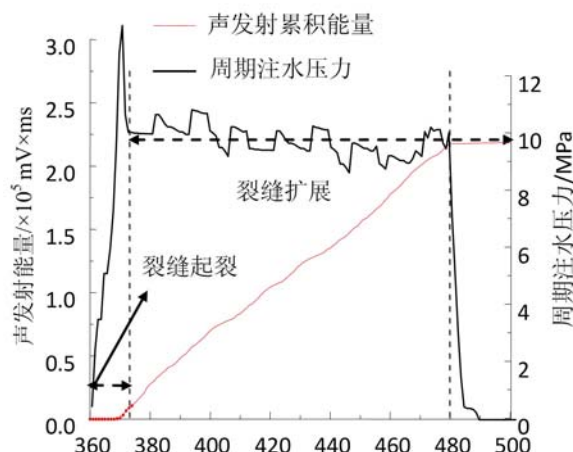


图 14 压裂阶段声发射能量累积曲线

Fig. 14 Cumulative energy curve of acoustic emission in fracturing stage

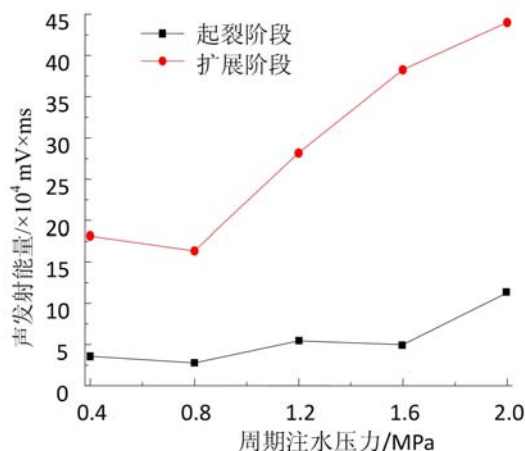


图 15 周期注水压力对起裂与扩展阶段的影响

Fig. 15 Total energy in initiation and propagation stage under different injection pressures

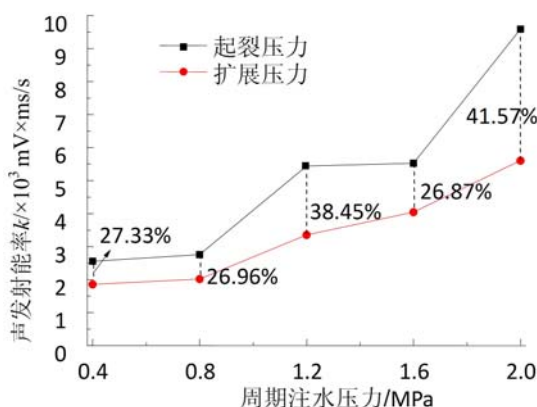


图 16 周期注水压力下起裂与扩展阶段声发射能率 k

Fig. 16 Acoustic emission energy rate k under crack initiation and expansion during cyclic water injection pressure

由试验结果可知,周期注水应力改造与压裂阶段起裂扩展变化规律为:

(1) 起裂阶段声发射总能量小于扩展阶段;随着周期注水压力增加,压裂阶段和扩展阶段声发射总能量差别在逐渐增大,如图 15 所示。

起裂阶段比扩展阶段声发射能量低是因为裂缝起裂阶段的时间短,所以能量累积较低。随着周期注水压力增大,起裂阶段声发射总能量呈波动上升趋势,说明当压裂阶段注水压力相同时,应力改造周期注水压力越大,起裂时裂缝发育程度越高,起裂难度越低。扩展阶段声发射总能量随周期注水压力增大逐渐增加,注水压力越大,试件内部裂缝产生越容

易,并且扩展阶段声发射总能量占压裂阶段的大部分,所以扩展阶段声发射能量随着注水压力增加而增大。随着周期注水压力增加,压裂阶段和扩展阶段声发射总能量差别在逐渐增大,说明随着周期注水压力增大,裂缝扩展更为充分。

(2) 当声发射能率 k 降幅在 26.87% 以上时,裂缝由起裂阶段进入扩展阶段。

为更准确地判断起裂扩展阶段,本文提出以各阶段声发射平均能量,即声发射能率 k 为指标对起裂与扩展阶段进行判断。试验结果如图 16 所示:周期注水压力由 0.4MPa 增至 2.0MPa 过程中,扩展阶段声发射能率相比于起裂阶段分别下降了 27.33%、26.96%、38.45%、26.87% 和 41.57%,降幅均超过了 26.87%,降幅随着周期注水压力的增大而增大。起裂阶段声发射能率 k 要大于扩展阶段,结合起裂阶段声发射能量特征可知,起裂阶段时间短,能量释放剧烈。起裂阶段 k 值随周期注水压力增大呈升高趋势,增幅变化大,具有一定阶梯性,扩展阶段 k 值则随着周期注水压力增大持续升高。

2.3 周期注水应力改造与起裂压力、扩展压力的关系

压裂阶段两个重要参数分别为起裂压力与扩展压力。起裂压力反映了水力裂缝产生难易程度,起裂压力越大表示水力裂缝产生越困难;扩展压力反映了水力裂缝在水压驱动下扩展的难易程度,因此研

究周期注水压力对起裂和扩展压力的影响十分必要。

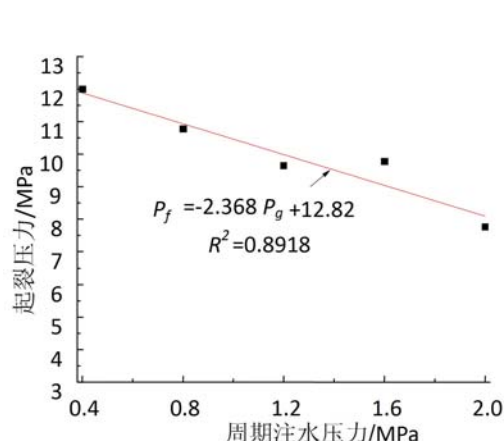


图 17 不同周期注水压力下的起裂压力

Fig. 17 Crack initiation pressure at different injection pressure

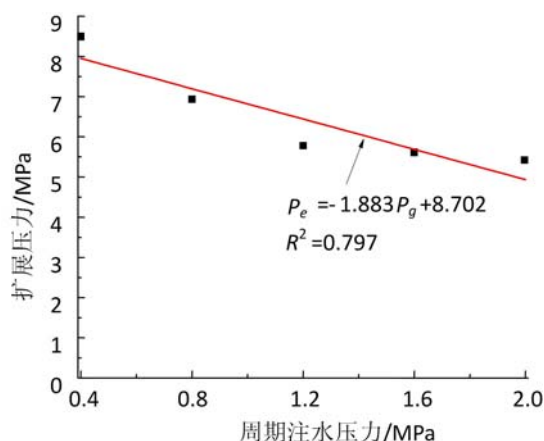


图 18 不同周期注水压力下的扩展压力

Fig. 18 Extended pressure under different cycle water injection pressure

通过图 17、图 18 得到周期注水压力对起裂压力、扩展压力的影响有如下规律:

(1) 随着周期注水压力增加,起裂压力降低,两者拟合曲线表达式为:

$$P_f = -2.368 P_g + 12.825, R^2 = 0.8918 \quad (3)$$

式中, P_f 代表起裂压力, MPa。起裂压力随周期注水压力增大而减小的原因有两个方面: 第一, 周期注水压力与孔隙压力作用相似, 周期注水压力增加, 意味着岩体骨架所承担的有效应力减少, 裂缝起裂和扩展与其所处应力状态具有直接联系, 低有效应力状态下岩石更易发生破坏, 所以起裂压力下降。第二, 应力改造阶段微裂缝的产生导致岩石性质劣化, 抗拉强度降低, 更易发生破裂产生裂缝。从上述分析可知, 在压裂开始前对储层进行应力改造有利于后期压裂进行, 降低起裂难度, 试验结果与侯冰等^[17]关于孔隙压力对起裂压力影响的研究结果一致。

(2) 扩展压力随周期注水压力的增加而降低, 两者之间的拟合曲线近似线性, 其表达式为:

$$P_e = -1.883 P_g + 8.702, R^2 = 0.797 \quad (4)$$

式中, P_e 代表扩展压力, MPa。扩展压力随周期注水压力升高而降低, 这是因为扩展不同于起裂, 裂缝起裂是自孔壁处在水压作用下发生破裂形成裂缝, 是一种从无到有的过程; 裂缝扩展实质是已有裂缝在水压持续作用下不断向前扩展的过程。

2.4 讨论

本文以黑龙江双鸭山矿区煤系页岩为研究对象, 考虑煤系页岩裂隙发育各向异性, 为便于结果比较分析, 保证试件物理力学性质和裂隙发育的均一性, 根据相似理论, 采用相似模拟材料制作了型页岩试件, 在室内进行了真三轴水力压裂模拟试验。试验过程利用声发射监测和频谱分析等手段, 重点考察了周期注水压力对应力改造下的煤系页岩裂缝起裂扩展影响, 得到了一些新结论。但限于水力压裂技术的复杂性, 影响因素较多, 尚未考虑储层温度、压裂液工艺参数等对其的影响, 加之试件并非原页岩, 所得结论还需进一步现场验证。

3 结论

(1) 应力改造阶段裂缝尺寸以微裂缝为主, 裂缝尺寸随周期注水压力增加先减小后增大, 裂缝发育程度随其增大而逐渐增大; 压裂阶段裂缝尺寸以宏观裂缝为主, 裂缝尺寸与发育程度随周期注水压力增大而增加。

(2) 应力改造阶段张拉型和剪切型裂缝类型占比相差不大, 随着周期注水压力增大, 张拉型占比减少, 剪切型占比增加; 压裂阶段以张拉型裂缝类型为主, 随着周期注水压力增大, 张拉型占比增加, 剪切

型占比减少。

(3) 根据声发射能量变化特征提出了起裂阶段与扩展阶段的声发射判断方法,定义平均声发射能量为声发射能率 k ,当 k 降幅超过 26.87%时,裂缝由起裂阶段进入扩展阶段。起裂压力随周期注水压力的增大而减小,扩展压力随周期注水压力增大而减小,应力改造可以降低压裂时的裂缝起裂难度,提高压裂效果。

参考文献:

- [1] 傅雪海,德勒恰提·加娜塔依,朱炎铭,等. 煤系非常规天然气资源特征及分隔合采技术[J]. 地学前缘, 2016, 23(3):36—40 (FU Xuehai, Deleqati JIANATAYI, ZHU Yanming, et al. Resouces characteristics and separated reservoirs' drainage of unconventional gas in coal measures[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(3):36—40 (in Chinese))
- [2] 王俊光,梁冰,田蜜. 含水状态下油页岩非线性损伤蠕变特性研究[J]. 实验力学, 2014, 29(1):112—118 (WANG Junguang, LIANG Bing, TIAN Mi. Study of creep characteristics produced by nonlinear damage of oil shale in hydrous state[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2014, 29(1):112—118 (in Chinese))
- [3] 张志英,杨盛波. 页岩气吸附解吸规律研究[J]. 实验力学, 2012, 27(4):492—497 (ZHANG Zhiying, YANG Shengbo. On the adsorption and desorption trend of shale gas[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2012, 27(4):492—497 (in Chinese))
- [4] 金衍,张旭东,陈勉,等. 天然裂缝地层中垂直井水力裂缝起裂压力模型研究[J]. 石油学报, 2005, 26(6):113—114, 118 (JIN Yan, ZHANG Xudong, CHEN Mian. Initiation pressure models for hydraulic fracturing of vertical wells in naturally fractured formation[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(6):113—114, 118 (in Chinese))
- [5] Wong R C K, Barr W E, Kry P R. Stress-strain response of Cold Lake oil sands[J]. Canadian Geotech Journal, 2011, 30(2):220—235.
- [6] 唐世斌,张恒. 岩石材料裂纹尖端起裂特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017(3):552—561 (TANG Shibin, ZHANG Heng. The characteristics of crack initiation at the crack tip in rock material[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017(3):552—561 (in Chinese))
- [7] 李庆辉,陈勉,金衍,等. 含气页岩破坏模式及力学特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(2):3763—3771 (LI Qinghui, CHEN Mian, JIN Yan, et al. Experimental research on failure modes and mechanical behaviors of gas-bearing shale[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(2):3763—3771 (in Chinese))
- [8] 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))
- [9] 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))
- [10] 孙可明,张树翠,辛利伟. 页岩气储层层理方向对水力压裂裂纹扩展的影响[J]. 天然气工业, 2016(2):45—51 (SUN Keming, ZHANG Shucui, XIN Liwei. Impacts of bedding directions of shale gas reservoirs on hydraulically induced crack propagation[J]. Natural Gas Industry, 2016(2):45—51 (in Chinese))
- [11] 孙可明,张树翠. 含层理页岩气藏水力压裂裂纹扩展规律解析分析[J]. 力学学报, 2016, 48(5):1229—1237 (SUN Keming, ZHANG Shucui. Hydraulic fracture propagation in shale gas bedding reservoir analytical analysis [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2016, 48(5):1229—1237 (in Chinese))
- [12] 李新平,汪斌,周桂龙. 我国大陆实测深部地应力分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(S1):2875—2880 (LI Xinping, WANG Bin, ZHOU Guilong. Research on distribution rule of geostress in deep stratum in chinese mainland[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(S1):2875—2880 (in Chinese))
- [13] 赵德安,陈志敏,蔡小林,等. 中国地应力场分布规律统计分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007(6):1265—1271 (ZHAO Dean, CHEN Zhimin, CAI Xiaolin, et al. Analysis of distribution rule of geostress in China[J]. Chinese

- Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007(6):1265—1271 (in Chinese))
- [14] Cai M, Kaiser P K, Morioka H, et al. FLAC/PFC coupled numerical of AE in large-scale underground excavations[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, 44(4):550—564.
- [15] Kanamori H, Anderson D L. Theoretical basis of some empirical relation in seismology[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1975, 65(5):1073—1095.
- [16] Ohno K, Ohtsu M. Crack classification in concrete based on acoustic emission[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(12):2339—2346.
- [17] 侯冰, 谭鹏, 陈勉, 等. 致密灰岩储层压裂裂缝扩展形态试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016(2):219—225 (HOU Bing, TAN Peng, CHEN Mian, et al. Experimental investigation on propagation geometry of hydraulic fracture in compact limestone reservoirs[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016(2):219—225 (in Chinese))

Experimental study on crack propagation of coal shale under stress transformation of cyclic water injection based on acoustic emission energy

TANG Ju-peng¹, QI Tong¹, DAI Shu-hong¹, PAN Yi-shan², LU Jiang-wei¹

(1. School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China;

2. Department of Physics, Liaoning University, Shenyang 110000, Liaoning, China)

Abstract: Cyclic water injection can be served as a new stress transformation technology of mining shale. The influence mechanism of cyclic water injection on crack initiation and propagation of the shale is not clear. A true triaxial hydraulic fracturing testing system is developed based on true three-dimensional stress conditions of coal shale. A similar simulation model of the coal shale based on the Shuangyashan coal mine in Heilongjiang province is developed, and the cyclic water pre-flooding stress transformation and hydraulic fracturing of laboratory simulation tests are carried out. The acoustic emission technology is used to monitor the whole process of crack initiation and propagation in stress transformation stage and the fracturing stage. Based on the energy variation of the acoustic emission and the spectrum characteristics, the effect of the water injection pressure on crack size, the degree of crack development and the crack type of stress transformation stage are analyzed, and a discrimination method and the parameter index of hydraulic fracturing from the initiation stage to the propagation stage are presented. The experimental results show that the size of the cracks in the stress transformation stage is mainly determined by micro-cracks. As the water injection pressure increases, the proportion of tension cracks decreases and that of shear cracks increases. The size of the cracks in the fracturing stage is mainly determined by macro-cracks. As the water injection pressure increases, the proportion of shear cracks decreases and that of tension cracks increases. The optimized situation happens when the water injection pressure is about 1.6 MPa, in which cracks can be easily formed. The average of the acoustic emission energy rate k is used to determine the crack initiation. When the decreasing amplitude of k is more than 26.87%, the cracks change from the initiation stage into the propagation stage. Cycle water injection for stress transformation can produce micro-cracks. The difficulty of initiation decreases with stress transformation, so the mining rate of the shale gas will increase. The conclusions provide an important reference for design of volume fracturing transformation.

Keywords: cyclic water injection; stress transformation; crack propagation; acoustic emission; coal shale