孟尚志,侯　冰,张　健,等.煤系“三气”共采产层组压裂裂缝扩展物模试验研究[J].煤炭学报,2016,41(1):221-227.doi:10.13225/j.cnki.jccs.2015.9006

Meng Shangzhi,Hou Bing,Zhang Jian,et al.Experimental research on hydraulic fracture propagation through mixed layers of shale,tight sand and coal seam[J].Journal of China Coal Society,2016,41(1):221-227.doi:10.13225/j.cnki.jccs.2015.9006

煤系“三气”共采产层组压裂裂缝扩展物模试验研究

孟尚志[1],侯　冰[2],张　健[1],谭　鹏[2],熊振宇[2]

(1.中联煤层气有限责任公司,北京　100011;2.中国石油大学(北京)油气资源与国家重点实验室,北京　102249)

摘　要: 硬脆性砂岩、页岩储层与塑性的煤层组合开发时,层间应力差、岩性差异、界面性质等因素会对水力裂缝扩展产生较大影响,复合储层人工裂缝扩展规律存在认识不清的难点,给储层改造方案的合理设计带来了难度。基于此,选取鄂尔多斯盆地东缘临兴地区天然露头岩石进行不同岩性组合,开展室内大尺寸真三轴水力压裂物理模拟试验,研究不同地应力差、弹性模量差异、煤岩割理等参数对水力裂缝起裂及扩展的影响。结果表明:水力裂缝起裂方向受地应力条件及近井筒天然弱面共同控制;当应力差在 4~6 MPa 时,既能保证裂缝穿透界面,又能保证高效沟通煤岩中天然弱面形成网络裂缝;层间弹性模量差异越大,缝内流体压力越高,穿透界面时释放的压力脉冲有助于激活煤岩中的微裂缝形成复杂的裂缝网络。水力裂缝在煤岩中的扩展路径受割理影响较大,易发生转向或者分叉扩展;水力裂缝穿透界面时压裂曲线存在明显的 2 次憋压,沟通煤岩割理过程中压裂曲线上下波动明显。研究复合储层水力裂缝起裂及扩展规律可为油田现场预测裂缝形态以及优化泵注程序提供参考。

关键词: 三气共采;复合储层;组合压裂;裂缝扩展;地应力差;弹性参数

中图分类号: P618.11;P618.33　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 0253-9993(2016)01-0221-07

Experimental research on hydraulic fracture propagation through mixed layers of shale,tight sand and coal seam

MENG Shang-zhi[1],HOU Bing[2],ZHANG Jian[1],TAN Peng[2],XIONG Zhen-yu[2]

(1.*China United Coalbed Methane Co.,Ltd.,Beijing*　100011,*China*;2.*Sate Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting,China University of Petroleum(Beijing),Beijing*　102249,*China*)

Abstract: When multi-layers strata with shale gas,tight gas and coal bed gas are developed together,differential stress between interlayer,lithology difference,interfacial property and other factors have great impacts on hydraulic fracture geometry.So it is difficult to understand the fracture propagation rule in composite reservoir,which brings great challenges in planning for reservoir stimulation.In this paper,the natural outcrop rocks from the eastern margin of Ordos Basin are excavated and mixed in a certain way to carry out the physical simulation experiments with a true tri-axial fracture system.The effects of differential stress,differential elastic modulus and cleats on the hydraulic fracture initiation and propagation are studied.The result shows that the stress condition and natural weak plane commonly control the propagation direction of hydraulic fracture.When the stress difference ranges from 4 MPa to 6 MPa,the hydraulic fracture can not only penetrate the interface in vertical direction but also activate the natural fractures in coal to form a complex fracture network.The higher elastic modulus difference between layers brings a higher pressure in fracture,when the

收稿日期: 2015-07-08　　**修回日期:** 2015-11-12　　**责任编辑:** 许书阁

基金项目: 中国海油石油总公司“煤层气/页岩气/致密砂岩气三气共采先导性试验研究”资助项目

作者简介: 孟尚志(1973—),男,天津人,高级工程师,博士。Tel:010-64265253,E-mail:mszlily@126.com

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

hydraulic fracture reaches interface pressure releases to generate pressure wave which can contribute to activate the micro fracture in coal.The expansion path of hydraulic fracture in coal rock is greatly influenced by cutting principle, and could easily deflect to form branches.There are obvious hold pressure for two times when hydraulic fracture penetrates interface, and the fluctuation of fracturing curve is obvious when the weak planes in coal is activated.The study of hydraulic fracture initiation and propagation in multi-layers reservoir can provide a reference for the field prediction of fracture morphology and optimize pump injection program.

Key words: commingling production; compound reservoir; combination fracturing; fracture propagation; stress difference; elastic parameter

我国以鄂尔多斯盆地东缘为主的煤层气田广泛分布含煤系的煤层气、致密气、页岩气，气量丰富，开发潜力巨大[1-2]。由于煤层厚度变化大、层数多，层间发育的页岩气、致密气与煤层气具有连续成藏、区内共存的特点，达不到机械分层压裂条件，难以单独开采煤层气[2-3]。“十三五”提出将煤层气与周边的页岩气、致密气 3 种气体组合开采(即“三气共采”)，实施滑套连续多层水力压裂改造技术，综合开发非常规资源。

复合储层组合压裂设计中水力裂缝垂向扩展范围是需要重点考虑的因素之一，它在一定程度上影响着水力压裂的效率，也是决定压裂作业成败的关键因素[4-5]。因此在进行压裂作业之前必须判断裂缝是否穿透隔层，对裂缝垂向扩展范围及裂缝形态进行预测，以便确定合理的参数作业。水力裂缝在多储层之间的扩展行为受地层条件和施工条件共同控制，国内外学者开展了相关理论及实验研究。Van 等[6]从理论方面对影响分层介质缝高扩展的因素进行了分析，认为模量差对裂缝高度扩展的影响不大，水平应力差对分层界质中缝高扩展的影响较大。Biot 等[7]采用剪切模量及扩展能给出了穿层扩展判别条件，但模型比较简单，忽略了层间物性差等重要因素。Teufel 等[8]通过水力压裂实验及弹性有限元研究表明，分层岩石中裂缝的扩展很大程度上受交接面两边岩石力学性质的差异、穿过交接面时水平应力状态的改变及交接面的剪切强度的影响。Rueda 等[9]采用数值模型对储隔层应力差、流体黏度、杨氏模量、射孔位置、压裂液效率对压裂净压力、裂缝宽度、裂缝高度的影响进行了分析研究。Suarez-Rivera 等[10]通过室内实验得到在不受围压条件下，当裂缝扩展遭遇交接面时，裂缝扩展或受阻，或沿交接面延伸。Zhang 等[11]认为水力裂缝与由摩擦产生的地质不连续性相互之间的作用同样可能导致裂缝扩展受阻、穿过、进入不连续面的交接处 3 种情况。Athavale 等[12]通过人造试样的室内实验得到分层介质物性差异以及应力差会导致分层岩块中形成的裂缝比较复杂(弯曲，分支等)并可能伴随着沿交接界面出现剪切滑移。Zhao 等[13]通过应力强度因子叠加建立数学模型，认为裂缝扩展遇到分层界面时存在 1 个扩展停止的临界长度，当裂缝的扩展长度大于该临界长度时，裂缝可沿交接面扩展或穿透交接面。Russel 等[14]通过实验(试件：中间为砂岩，上下隔层为水泥)观察和声发射监测，对层状介质裂缝扩展形态进行分析。

上述研究多以理论研究为主，以致数学模型以及判别准则得不到有效的验证；少数的试验研究也主要针对混凝土等造试件，与真实岩石的性质差异显著。另外，目前研究多以裂缝是否穿透界面作为重点，对穿透前后的裂缝形态研究甚少。因此，笔者采用大尺寸真三轴压裂设备对由不同天然岩性露头组合的分层试件开展物模试验，试验参数依据相似准则[15]而定，研究地应力差、弹性模量差、天然弱面等因素对水力裂缝起裂方向、穿层条件以及扩展规律的影响。试验结果可为论证理论研究、认识裂缝扩展规律以及指导现场压裂施工提供参考。

1 试验准备及方案设置

1.1 试样制备及试验装置

试件采用鄂尔多斯盆地东缘地区的天然页岩、煤岩、砂岩以及灰岩露头加工组合而成，具体组合形式有 3 种：煤岩-灰岩-煤岩组合、煤岩-页岩-煤岩组合、煤岩-砂岩-煤岩组合，将灰岩、页岩以及砂岩作为中间层进行钻完井作业以确保钻孔过程中井壁的稳定。在 15 MPa 围压条件下，利用三轴实验测得岩石力学参数：煤岩抗压强度为 0.09 GPa，弹性模量为 4.05 GPa，泊松比为 0.25；页岩抗压强度为 174 MPa，弹性模量为 30.55 GPa，泊松比为 0.094；砂岩抗压强度为 137 MPa，弹性模量为 10.5 GPa，泊松比为 0.15；灰岩抗压强度为 250 MPa，弹性模量为 39.07 GPa，泊松比为 0.075。试件具体制备方法如下：① 借助大型岩石切割机辅助加工，将不规则的露头岩石切割成尺寸为 10 cm×30 cm×30 cm 的长方体薄板；② 采用直径为 2 cm、长度为 20 cm 的空心钻头

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

沿页岩、砂岩以及灰岩试样的窄面钻取长度为 16 cm 的沉孔,模拟钻井井眼; ③ 将内径为 0.6 cm、外径为 1.6 cm、长度为 18 cm 的模拟井筒固结于孔眼中,固结深度为 13 cm,井筒下方预留 3 cm 作为裸眼段,上方预留 5 cm 用作后期水泥包裹层的厚度; ④ 以固结好井筒的页岩、砂岩以及灰岩薄板作为中间层,在靠近井筒两侧的宽面上用粘接剂将试样与煤岩薄板进行粘接,形成尺寸为 30 cm×30 cm×30 cm 的立方块; ⑤ 采取混凝土将粘接牢固的立方块均匀包裹成尺寸为 40 cm×40 cm×40 cm 压裂试件。如图 1 所示。

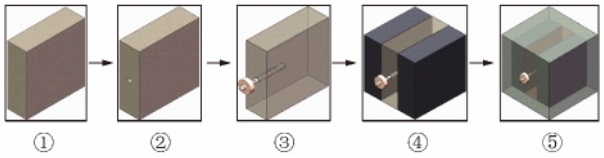


图 1　试件制备流程

Fig. 1　Process of preparing specimen

注: 中间层岩性为页岩、砂岩或者灰岩,上下层岩性为煤岩

试验设备采用中国石油大学(北京)岩石力学实验室设计、组建的一套大尺寸真三轴模拟试验系统。试验过程中,为模拟水平井压裂,在施加三向应力时,沿着井筒方向施加最小水平地应力,沿垂直岩面的水平方向施加上覆岩层压力,沿平行岩面的水平方向施加最大水平地应力(图 2)。为便于在压裂试验结束后观察水力裂缝扩展几何形态,在压裂液中添加一定量荧光粉作为裂缝示踪剂,以获得良好的裂缝监测效果。

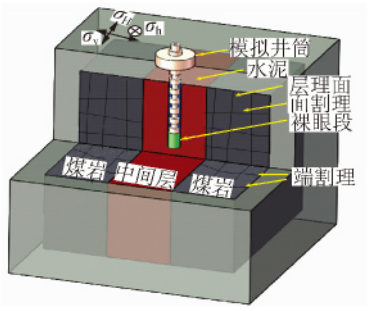


图 2　试件示意

Fig. 2　Schematic drawing of specimen

1.2　试验方案

试验设置了 3 种组合共 6 组试验,考察不同组合形式条件下地应力差、弹性参数差异、岩性界面、煤岩割理等因素对水力裂缝起裂及垂向延伸规律的影响,试验参数依据相似准则[15]而定,具体试验参数设置见表 1。

表 1　试验参数设置

Table 1　Summary of experimental parameters

试样编号	组合形式	三向应力($\sigma_v/\sigma_H/\sigma_h$)/MPa	完井方式	注入排量/(mL·min^{-1})	黏度/(mPa·s)
1 号	煤岩-灰岩-煤岩	9/7/3	裸眼完井	20	35
2 号	煤岩-灰岩-煤岩	9/7/5	裸眼完井	20	35
3 号	煤岩-页岩-煤岩	9/7/3	裸眼完井	20	35
4 号	煤岩-页岩-煤岩	9/7/5	裸眼完井	20	35
5 号	煤岩-致密砂岩-煤岩	9/7/3	裸眼完井	20	35
6 号	煤岩-致密砂岩-煤岩	9/7/5	裸眼完井	20	35

2　试验结果及其分析

2.1　水力裂缝在中间层中的起裂及扩展

试验结束后,沿着裂缝面将试件劈裂,观察水力裂缝的起裂及扩展形态。发现水力裂缝的起裂方向主要有沿井筒水平向起裂与纵向起裂 2 种方式,起裂后裂缝在灰岩及砂岩中的扩展形态相对单一,在页岩层中受天然裂缝影响扩展形态复杂; 裂缝垂向扩展至岩性界面处总体表现为穿透界面扩展或者沿界面扩展; 穿透岩性界面进入煤层后裂缝扩展路径受煤岩割理等弱面影响较大。试件压后裂缝形态如图 3 所示。

图 3(a) ~(f)中左侧为沿垂直井筒方向投影的平面图,其中,中间深蓝色矩形框表示中间层(页岩、砂岩或者灰岩),上下灰色矩形框表示煤岩,白色圆形表示模拟井眼,白色虚线为岩性界面或者天然裂缝,绿色实线为水力裂缝; 图 3(a) ~(f)中右侧为各真实试件压后裂缝形态。

(1) 地应力差对裂缝起裂及扩展的影响。

地应力差不仅决定水力裂缝的总体延伸方向,也是影响裂缝起裂方向的重要因素之一。试验中观察到主要有 3 种起裂方向: 张开基质水平向起裂、张开基质纵向起裂、沿近井筒天然裂缝起裂。试验结果表明,在不同的地应力差异条件下,裂缝的起裂方向不同。

当地应力差($\Delta\sigma=\sigma_v-\sigma_h$)较小时(4 MPa),地应力对水力裂缝的起裂方向的控制力相对较弱,起裂方向具有随机性,既可沿水平向起裂(图 3 的 2 号试样),也可沿纵向起裂(图 3 的 4,6 号试样)。

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

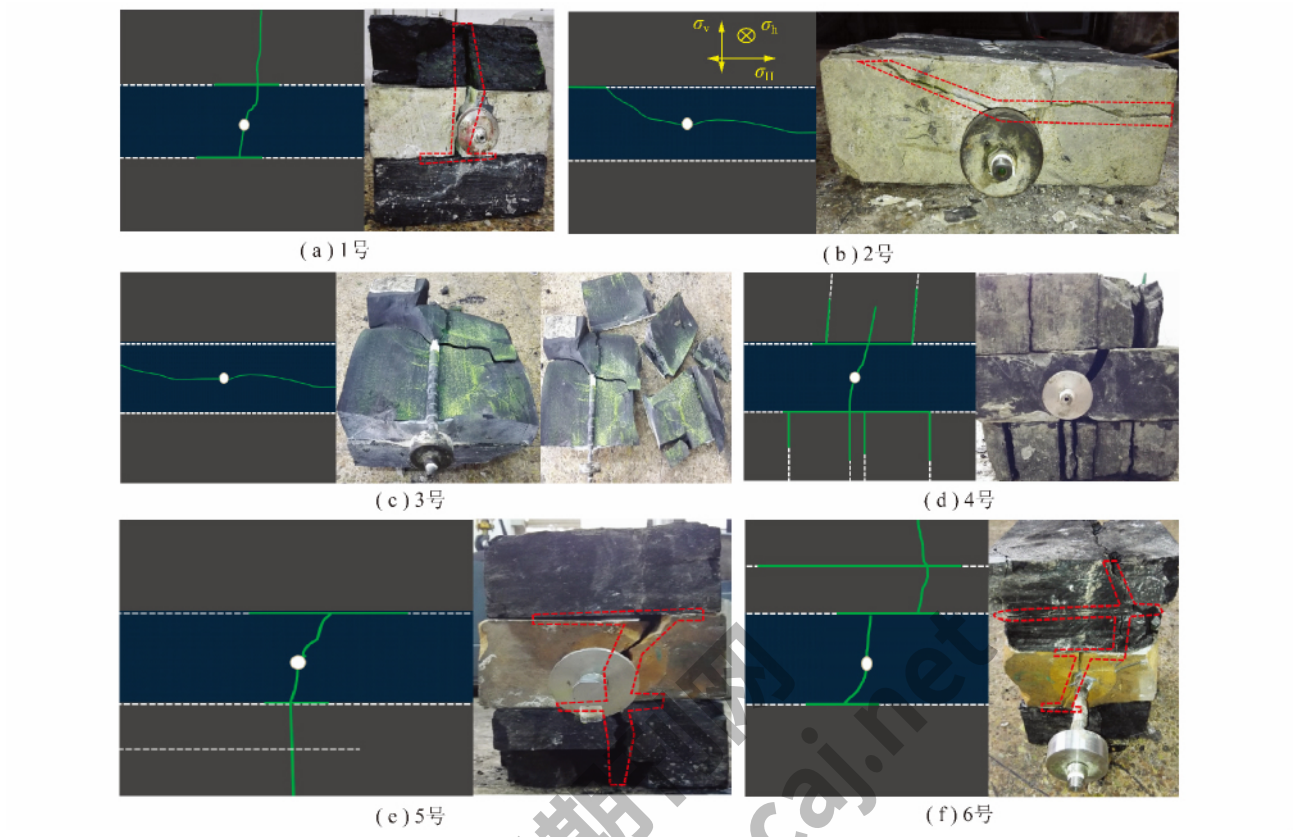


图 3 试样压后裂缝形态

Fig. 3 Fracture geometry after hydraulic fracturing

当地应力差($\Delta\sigma=\sigma_v-\sigma_h$)较大时(6 MPa),地应力对裂缝起裂方向的控制力增强,裂缝几乎都沿纵向起裂(图 3 的 1,5 号试样)。3 号试样在较大的应力差异条件下沿水平向起裂后发生转向,这主要是受到了近井筒天然弱面的影响,分析认为,裂缝扩展路径局部受天然弱面影响,整体走向受地应力控制。页岩储层天然裂缝发育,钻完井后井筒附近或多或少存在微裂缝,这些天然裂隙会影响裂缝的起裂方向,导致井筒附近裂缝形态复杂。大量的室内和现场实验[8,16-18]表明在裂缝性储层中不连续间断面会影响裂缝起裂方向及扩展路径,裂缝呈非平面形式扩展。

基于含煤系多种气体资源综合开发的理念,复合储层组合压裂技术不仅要求压裂中间岩层开采致密气或页岩气,更要求裂缝能够穿透岩性界面,在煤层中形成复杂缝网获得丰富的煤层气资源。当应力差较小裂缝沿水平向起裂并扩展时(图 3 的 2 号试样),裂缝不能或者以小逼近角[19-21]扩展至交界面,裂缝易转向沿界面扩展。特别是当页岩作为中间层时(图 3 的 3 号试样),发育的层理、节理等弱面会加剧水力裂缝的偏转,耗散水力能量,降低穿层扩展几率。从这种意义考虑,较大地应力差对获得更长的裂缝延伸距离、穿透岩性界面更为有利。

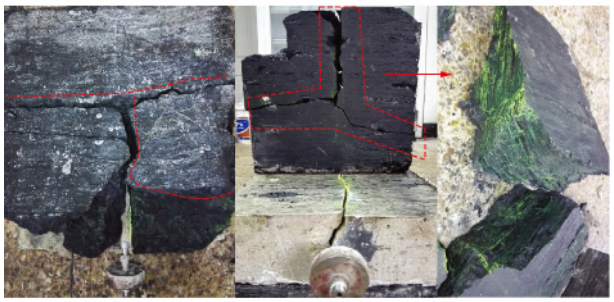
(2)弹性参数差异对裂缝穿层的影响。

理论和实验研究表明[22-23]表明,层间模量差会影响裂缝垂向穿层的效果,水力裂缝从高弹性模量岩石扩展至低弹性模量岩石时裂缝穿透界面继续扩展,而从低弹性模量岩石扩展至高弹性模量岩石时可能会受阻。本文设置 6 组试验,对比在不同层间模量差异条件下,研究裂缝穿层情况以及穿层水力裂缝在煤岩中的造缝行为。

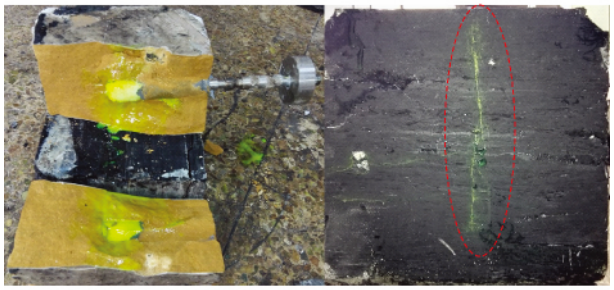
在地应力差为 6 MPa 的条件下,当弹性模量差值($\Delta E=E_2-E_1$)较小时,进入煤层后缝宽变化不大,缝内流体压力几乎不变,水力裂缝沿原路径继续扩展,裂缝形态相对简单(图 3(c),图 4(b));当弹性模量差值($\Delta E=E_2-E_1$)较大时,中间岩层模量大缝宽相对小,缝内流体压力高,穿透界面时水力能量突然释放,形成压力脉冲,有助于激活煤岩天然裂缝、割理等弱面,形成复杂的网络裂缝。如图 4(a)所示,水力裂缝在延伸过程中沟通天然裂缝,遇到面割理时发生动态转向和分叉扩展,形成了“工”字型复杂裂缝。由于裂缝的转向与扭曲扩展,会加剧裂缝面的粗糙程度,粗糙不平的裂缝表面提高了裂缝的弯曲摩阻,为避免过大的弯曲摩阻影响压裂施工,建议采用多级支撑剂段塞进行打磨。

地应力差为 4 MPa 与地应力差为 6 MPa 时的试验现象相似,层间模量差异越小,在煤层形成的裂缝

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(a) 1号



(b) 5号

图 4　1 号、5 号试样压后裂缝形态

Fig. 4　Fracture geometry of specimen Nos. 1 and 5 after fracturing

形态越简单(图 3 的 6 号试样); 模量差异越大,裂缝形态越复杂(图 3 的 4 号试样)。分析认为,弹性模量反映维持裂缝扩展的能力,弹性模量与岩石破坏前弹性蓄能能力有关,弹性越好,累积的可恢复的变形能力越大,裂缝扩展致裂岩石时作为释放的能量可有效使地层多维破裂,进而形成网状裂缝。以 4 号试样中缝网形成机制为例进行分析,由于脆性页岩与塑性煤岩的弹性模量差异较大,当裂缝垂向扩展至界面时,缝内流体压力存在 1 个突降过程,水力能量释放并产生压力脉冲,由于垂向地应力较小,岩性界面会不同程度的张开并开启界面附近煤岩中的微裂缝,压裂液向界面及微裂缝中渗透; 当压力再次升高时,在界面附近多裂缝同时起裂并扩展,从而大大提高了裂缝网络的扩展规模。

2.2　水力裂缝在煤岩中的扩展

影响裂缝性储层水力裂缝扩展形态的影响因素[24]主要包括储层地质条件(岩石力学性质、地应力等)和工程条件(压裂液性质、排量、砂比等)。研究[25-27]认为,地应力差和储层裂缝发育程度是决定网络裂缝扩展规模的最关键因素。基于此,试验重点考察了在多岩性复合条件下,应力差和模量差对水力裂缝在煤岩中扩展行为的影响。在 2.1 节中已经详细分析了模量差对裂缝扩展的影响,在此仅讨论地应力差的作用机制。

上文分析得到,地应力差值越大,越有利于水力裂缝穿层扩展,但是在高应力差条件下($\Delta\sigma$ = 6 MPa,图 3 的 5 号试样),水力裂缝纵向延伸过程中垂直穿透天然裂缝,未沟通天然裂缝,压裂后形成的是一条简单的垂直平面缝,没有形成复杂的水力裂缝,如分支缝,分段缝,偏移缝等。在低应力差条件下($\Delta\sigma$ = 4 MPa,图 3 的 6 号试样),水力裂缝在井底起裂并穿层后,向前扩展遇到天然裂缝时,由于低应力差对主裂缝的控制作用较弱,容易沟通天然裂缝形成复杂裂缝。但是,天然裂缝的开启会引起压裂液的分流,分支裂缝数量越多,分流作用越强,导致主裂缝内的压裂压力降低,引起缝长变短、缝宽变窄,进而引发支撑剂动移困难,在局部区域形成堵塞,影响最终施工质量。另外,过低的应力差会导致裂缝起裂方向的随机性,影响裂缝穿透岩性界面。因此,过低或者过高的应力差都不利于最优缝网的形成,试验结果表明当应力差在 4~6 MPa 时,既能保证裂缝穿透界面,又能有效沟通煤岩天然弱面形成裂缝网络。

2.3　水力裂缝穿层扩展规律

实验结果表明,对于上下岩性相同的分层试件,水力裂缝在垂向扩展过程中并没有表现出对称扩展的特点,如图 3 所示(1 号,5、6 号试样),水力裂缝在中间层中对称起裂后,一端扩展至界面时停止,另一端则穿透继续扩展。

通过分析认为,由于岩石自身非均质性以及层间物性差异显著,水力裂缝的扩展遵循阻力最小性、优先性以及扩展路径最短性的原则进行延伸,即水力压裂过程中裂缝首先在阻力最小区域起裂扩展,如果在各起裂方向上水力裂缝扩展阻力同等小,如图 3(1 号、4 号、5 号、6 号试样)中井筒附近沿井筒对称的双翼缝,则缝内的压裂液会优先向最先形成的压裂通道内流动,在满足阻力最小及优先性的条件下裂缝最终沿扩展路径最短的方向延伸,一旦压裂液流动的最终水力通道形成,那么其他方向的扩展通道就会延迟或者停止,除非缝内流动压力变得异常大,否则延迟或者停止扩展的裂缝很难继续向前延伸。

2.4　压裂曲线分析

观察试样的压后压裂曲线发现,当裂缝从高模量的岩层中起裂并穿透界面进入低弹性模量的煤岩扩展时,穿透岩性分界面时压裂曲线存在明显的 2 次憋压过程,水力裂缝在煤岩中扩展并不断沟通割理等弱面时压力曲线发生明显的上下波动,沟通程度越大,波动幅度越大。以 1 号试样压后曲线为例进行分析,如图 5 所示。a-b-c 表示随着压裂的不断注入,井筒内压力持续增大。当液压升到第 1 个峰值 c 点时,井筒裸眼段开始破裂。c-d 表示水力裂缝在中间层中的扩展,在 d 点与岩性界面相遇。d-e 表示水力裂缝

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

扩展并穿透岩性界面。*e*–*f* 表示进行 2 次憋压，当泵压到达第 2 个峰值 *f* 时，煤岩破裂。*f*–*g* 表示水力裂缝继续在煤岩中扩展，在不断沟通天然弱面的过程中，泵压波动幅度较大。水力裂缝在煤岩中的延伸压力超过了最大主应力，一方面是由于随着裂缝不断扩展缝内流体流动摩阻增大，另一方面由于裂缝的分叉、转向以及多裂缝同时扩展导致主多裂缝共同分配水力能量。基于以上分析可知，通过压裂曲线上的 2 次憋压过程可定性的判断水力裂缝是否穿透界面进入煤岩，为油田现场分析压裂曲线提供参考。

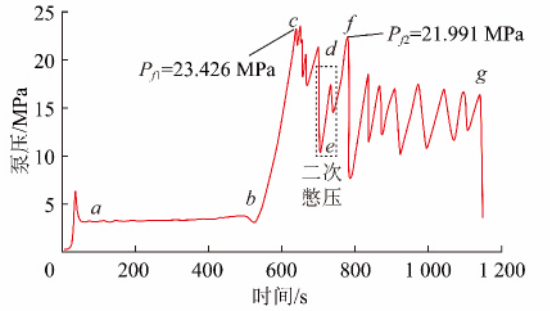


图 5 1 号试样压后曲线

Fig. 5 Fracturing curve of specimen No. 1

5 结论与认识

(1) 页岩层理及煤岩割理等弱面会影响裂缝起裂及扩展几何形态，但是水力裂缝的整体扩展方式是由天然裂缝和地应力的双重作用结果，局部小裂缝受弱面影响，宏观大裂缝受地应力控制。过低或者过高的应力差都不利于最优缝网的形成，试验结果表明当应力差在 4~6 MPa 时，既能保证裂缝穿透界面，又能保证有效沟通煤岩天然弱面形成裂缝网络。

(2) 中间岩层的弹性模量相对上下煤岩的弹性模量越大，缝内流体压力越高，越容易穿透界面。穿透界面时突然释放水力能量，产生的压力脉冲能够激活煤岩中发育的微裂缝以及割理等弱面，形成复杂的裂缝网络。煤岩中裂缝的转向以及扭曲扩展会加剧裂缝面的粗糙程度、提高裂缝的弯曲摩阻，为避免过大的弯曲摩阻影响压裂施工，建议采用多级支撑剂段塞进行打磨。

(3) 试验结果表明中间层中发育天然裂缝会严重影响裂缝垂向扩展，建议油田现场在压裂选层时尽量规避裂缝系统发育且层厚较大的岩层。

(4) 复合储层压裂水力裂缝垂向延伸过程中，由于岩石自身非均质性以及层间物性差异显著，水力裂缝的扩展遵循阻力最小性、优先性以及扩展路径最短性的原则进行延伸。

(5) 水力裂缝穿透岩性界面时，压裂曲线上存在明显的 2 次憋压过程，水力裂缝不断沟通割理等弱面时压力曲线发生明显的波动，沟通程度越大，波动幅度越大。通过压裂曲线上的 2 次憋压特点可定性的判断水力裂缝是否穿透界面进入煤岩，为指导油田现场压裂施工提供参考。

参考文献:

[1] 杨华，李士祥，刘显阳.鄂尔多斯盆地致密油、页岩油特征及资源潜力[J].石油学报，2013，34(1)：1-11.
Yang Hua，Li Shixiang，Liu Xianyang. Characteristics and resource prospects of tight oil and shale oil in Ordos Basin [J]. Acta Petrolei Sinica，2013，34(1)：1-11.

[2] 冯三利，叶建平，张遂安.鄂尔多斯盆地煤层气资源及开发潜力分析[J].地质通报，2002，21(10)：658-662.
Feng Sanli，Ye Jianping，Zhang Suian. Coalbed methane resources in the Ordos basin and its development potential [J]. Geological Bulletin of China，2002，21(10)：658-662.

[3] 刘贵红，张泓.鄂尔多斯盆地东缘煤层气成因机制[J].中国科学：地球科学，2013，43(8)：1359-1364.
Li Guihong，Zhang Hong. The origin mechanism of coalbed methane in the eastern edge of Ordos Basin [J]. Science China：Earth Science，2013，43(8)：1359-1364.

[4] 周健，陈勉，金衍，等.裂缝性储层水力裂缝扩展机理实验研究[J].石油学报，2007，28(5)：109-113.
Zhou Jian，Chen Mian，Jin Yan，et al. Experimental study on propagation mechanism of hydraulic fracture in naturally fractured reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica，2007，28(5)：109-113.

[5] 张广清，陈勉，赵艳波.新定向井射孔转向压裂裂缝起裂与延伸机理研究[J].石油学报，2008，29(1)：116-119.
Zhang Guangqing，Chen Mian，Zhao Yanbo. Study on initiation and propagation mechanism of fractures in oriented perforation of new wells [J]. Acta Petrolei Sinica，2008，29(1)：116-119.

[6] Van Eekelen H A M. Hydraulic fracture geometry：Fracture containment in layered formations [J]. Society of Petroleum Engineers Journal，1982，22(3)：341-349.

[7] Biot M A，Medlin W L，Masse L. Fracture penetration through an interface [J]. Society of Petroleum Engineers Journal，1983，23(6)：857-869.

[8] Teufel L W，Clark J A. Hydraulic fracture propagation in layered rock：Experimental studies of fracture containment [J]. Society of Petroleum Engineers Journal，1984，24(1)：19-32.

[9] Rueda J I，Rahim Z. Development and testing of a semi-analytical hydraulic fracture model for multistress media [A]. the SPE Mid-Continent Gas Symposium [C]. Amarillo，Texas，1994.

[10] Suarez R，Roberto G，Sidney K J，et al. Laboratory experiments of hydraulic fracturing on glass plates help investigating basic conditions for fracture branching and fracture containment along interfaces [A]. the 41st U. S. Symposium on Rock Mechanics [C]. Golden，Colorado，2006.

[11] Zhang X，Thiercelin M J，Jeffrey R G. Effects of frictional geological discontinuities on hydraulic fracture propagation [A]. the Spe Hydraulic Fracturing Technology Conference [C]. College Station，Tex-

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

as,2007.

[12] Athavale A S,Miskimins J L.Laboratory hydraulic fracturing tests on small homogeneous and laminated blocks [A].Paper was presented at the 42nd U S Rock Mechanics Symposium [C].San Francisco,California,2008.

[13] Zhao H F,Chen M.Extending behavior of hydraulic fracture when reaching formation interface [J].Journal of Petroleum Science and Engineering,2010,74(1):26-30.

[14] Roundtree R,Miskimins J L.Experimental validation of microseismic emissions from a controlled hydraulic fracture in a synthetic layered medium [A].the SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference [C].The Woodlands,Texas,USA,2011.

[15] 柳贡慧,庞飞,陈治喜.水力压裂模拟实验中的相似准则 [J].石油大学学报(自然科学版),2000,24(5):45-50.
Liu Gonghui,Pang Fei,Chen Zhixi.Fracture simulation tests [J].Journal of China University of Petroleum,2000,24(5):45-50.

[16] 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.

[17] Anderson G D.Effects of friction on hydraulic fracture growth near unbonded interfaces in rocks [J].Society of Petroleum Engineers Journal,1981,21(1):21-29.

[18] Jeffrey Jr R G,Brynes R P,Lynch P J,et al.An analysis of hydraulic fracture and mineback data for a treatment in the german creek coal seam [A].SPE Rocky Mountain Regional Meeting [C].Casper,Wyoming,1992.

[19] Lamont N,Jessen F.The effects of existing fractures in rocks on the extension of hydraulic fractures [J].Journal of Petroleum Technology,1963,15(2):203-209.

[20] Blanton T L.An experimental study of interaction between hydraulically induced and pre-existing fractures [A].SPE unconventional gas recovery symposium [C].Pittsburgh,Pennsylvania,1982.

[21] Zhou J,Chen M,Jin Y,et al.Analysis of fracture propagation behavior and fracture geometry using a tri-axial fracturing system in naturally fractured [J].International Journal of Rock mechanics and Mining Sciences,2008,45(7):1143-1152.

[22] Palmer I D,Carroll J R H B.Three-dimensional hydraulic fracture propagation in the presence of stress variations [J].Society of Petroleum Engineers Journal,1983,23(6):870-878.

[23] Smith M B,Bale A B,Britt L K,et al.Layered modulus effects on fracture propagation,proppant placement,and fracture modeling [A].the SPE Annual Technical Conference and Exhibition [C].New Orleans,Louisiana,2001.

[24] 侯冰,陈勉,李志猛,等.页岩储集层水力裂缝网络扩展规模评价方法 [J].石油勘探与开发,2014,41(6):763-768.
Hou Bing,Chen Mian,Li Zhimeng,et al.Propagation area evaluation of hydraulic fracture networks in shale gas reservoirs [J].Petroleum Exploration and Development,2014,41(6):763-768.

[25] Abass H H,Hedayati S,Kim C M.Mathematical and experimental simulation of hydraulic fracturing in shallow coal seams [A].SPE Eastern Regional Meeting [C].Lexington,Kentucky,1991.

[26] 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.

[27] 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 proapagation mechaism of complex hydraulic fracture in coal-bed [J].Journal of China Coal Society,2012,37(1):73-77.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net