文章编号:1001-4888(2020)02-343-06

页岩层理方位及强度对水力压裂的影响*

孙可明[1,2], 冀洪杰[1], 张树翠[3]

(1.辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁阜新 123000; 2.青岛理工大学 理学院,山东青岛 266520;
3.安阳工学院 机械工程学院, 河南安阳 45500)

摘要: 为了研究页岩天然层理倾角及强度等对水力压裂裂纹扩展的影响,采用室内水力压裂实验,通过监测孔直接对裂纹扩展的实时监测和注水压力信息及试件压裂后的剖切,分析层理倾角、强度等对压裂裂纹扩展的影响。实验结果表明:水力压裂过程中,垂直最小地应力稳定扩展的主裂缝遇层理时,层理面与主裂缝初始扩展方向夹角越小,主裂缝越易沿着层理面方向扩展,层理面与主裂缝初始扩展方向夹角越大,主裂缝遇层理面时越易贯穿层理面沿原方向扩展;层理方位,地应力及基质抗拉强度不变,层理的抗拉强度远弱于基质抗拉强度时,主裂缝与层理面相遇后越易沿着层理面方向扩展,层理抗拉强度与基质抗拉强度越相近,主裂缝遇层理时越易贯穿层理沿原方向扩展;层理方位和强度不变,地应力及应力差越大,主裂缝遇层理后越易贯穿层理面沿原方向扩展。

关键词: 页岩; 水力压裂; 层理倾角; 层理强度; 垂向地应力

中图分类号: O39 **文献标识码:** A DOI: 10.7520/1001-4888-18-153

0 引言

为了缓解能源短缺与环境污染压力,寻求高效清洁能源成为各国能源发展的主题,清洁高效的页岩气能源在我国储量巨大,位居世界首位[1]。页岩储层具有致密而且渗透性低的特性,且埋深多处在3000m~5000m[2]范围,需要用水力压裂技术对储层进行改造。很多学者在水力压裂裂纹扩展规律方面进行了大量的研究。考佳玮等[3]实验分析了高地应力差对裂纹扩展的影响。解经宇等[4]以马龙溪组页岩为对象,分析了人工造缝以及页岩物性对水力压裂裂纹的影响。Desheng Zhou 等[5]分析了水力裂缝形成缝网的因素。付海峰等[6]实验研究了天然裂隙与压裂参数等对水力裂缝的影响。侯冰等[7]实验研究了水力裂缝扩展规律。李芷等[8]实验研究了天然层理弱面对水力压裂的影响。王磊等[9]采用室内实验对井筒壁处压裂裂纹的起裂与延伸进行了研究。Ali Naghi Dehghan 等[10]研究了天然裂缝水力压裂的影响。侯振坤等[11]采用真三轴加载实验的方法,对水力压裂裂纹的延伸规律和裂纹网的形成机理进行了研究。衡帅等[12,13]利用真三轴水力压裂系统研究了井筒数量及水平地应力差等因素对水力压裂的影响。孙可明等[14,15]在理论计算上分析了页岩水力压裂时层理走向对压裂裂纹的影响。

目前,多数学者对水力压裂影响因素的研究多集中在压裂参数、人工造缝等因素对裂纹扩展的影响,关于层理方位以及层理物性对水力压裂裂纹扩展的实验较少。同时页岩原岩具有非均质性,层理方位和层理强度具有一定的随机性,难以实现大尺寸试件层理方位和层理强度对裂纹扩展影响的单因素对比实验。页岩试件压裂时的各向异性使声发射裂纹定位方法准确度较差,为了解决上述问题,本项目

* **收稿日期:** 2018-06-26; **修回日期:** 2018-08-18
基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51574137);"十三五"国家油气重大专项(2017ZX05037-001)
通讯作者: 孙可明(1968—),教授,博士生导师,主要研究方向:多场耦合渗流力学及应用。Email: sskkmm11@163.com

组制作层状页岩相似材料模型,采用表面监测与试件剖切追踪裂纹的方式监测采集裂纹扩展信息,研究了层理倾角、层理强度和地应力对水力压裂裂纹扩展的影响。

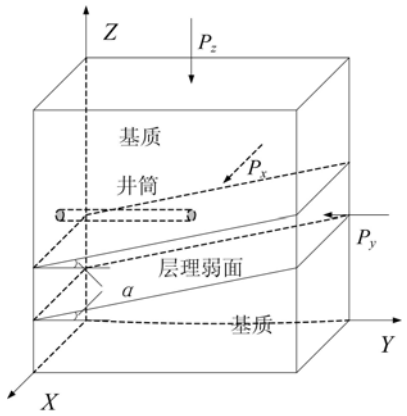


图 1 加载示意图

Fig. 1 Loading schematic diagram

1 实验方案及过程

1.1 实验方案

(1) 加载设计方案

实验采用真三轴加载,加载方式如图 1 所示,其中 P_z 是竖向应力; P_x、P_y 是水平方向上的应力;α 是层理倾角。相似试件工况分组如表 1 所示。

(2) 确定相似材料配比。

页岩相似试件抗拉强度确定依据为四川长宁页岩原岩力学参数,其基质抗拉强度分别为 7.37MPa 和 11MPa,层理抗拉强度分别为 3.27MPa 和 6.22MPa。首先制作 28 个 Φ30mm×20mm 的不同配比试件进行巴西劈裂实验,确定抗拉强度,由原岩物理参数及相似准则,确定基质与层理的材料配比,配比如表 2 所示。基于页岩层理结构,制作三组 400mm×400mm×400mm 压裂的分层相似试件,层理间由云母粉标记,脱模后养护备用。

表 1 不同基质、层理强度参数和加载条件工况组合表

Tab. 1 Combined table of different substrates, bedding strength parameters and loading conditions

编号	一组			二组			三组			
	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3	3-1	3-2	3-3	3-4
基质抗拉强度/MPa	0.775	0.775	0.775	0.775	0.775	0.775	0.775	0.775	0.775	0.775
层理抗拉强度/MPa	0.344	0.344	0.344	0.344	0.344	0.344	0.177	0.256	0.344	0.438
层理倾角/°	20	20	20	10	20	30	20	20	20	20
加载 P_x/MPa	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
加载 P_y/MPa	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
加载 P_z/MPa	7	8	9	7	7	7	7	7	7	7

表 2 页岩相似模型基质和层理弱面配比方案

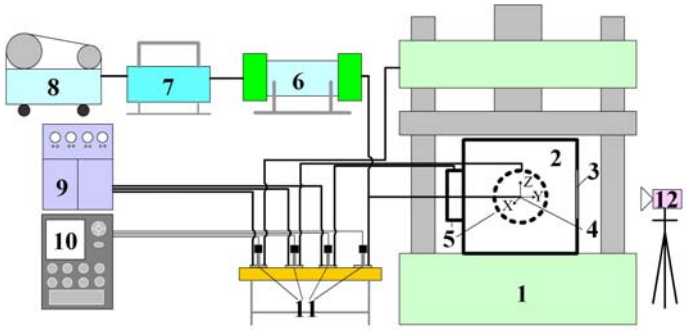
Tab. 2 Design scheme of the material ratio of shale similar model matrix and bedding plane

		$m_{砂}$: $m_{石膏}$: $m_{水泥}$: $m_{缓凝剂}$: $m_{水}$	抗拉强度/MPa
基质		1 : 1 : 0.3 : 0.5% : 0.25	0.775
层理弱面	1	8 : 1 : 0.0 : 0.5% : 0.25	0.177
	2	4 : 1 : 0.0 : 0.5% : 0.25	0.256
	3	2 : 1 : 0.0 : 0.5% : 0.25	0.344
	4	1 : 1 : 0.0 : 0.5% : 0.25	0.438

在试件的左面形心钻取直径 10mm、深 260mm 的水平孔,采用外径 6mm 的不锈钢管作为注液通道,用强粘合剂进行密封备用。

1.2 实验系统

实验系统包括三部分,由压力机和自主研制的真三轴加载室组成加载系统,由空气压缩机,增压泵和贮液罐组成注液系统,采用多通道数据记录仪,实时观测孔等组成裂纹监测系统。系统结构如图 2 所示。



1. 压力机，2. 真三轴加载腔，3. 监测孔，4. 井筒，5. 围压加载器，6. 贮液罐，7. 增压泵，
8. 空气压缩机，9. 加载稳压器，10. 多通道记录仪，11. 压力传感器，12. CCD 成像仪

图 2　室内水力压裂实验系统图

Fig. 2　Schematic diagram of hydraulic fracturing experiment system

1.3　实验步骤

（1）组装实验仪器并调试。

（2）在贮液罐中加入压裂液，对试件稳步加载，加载至实验方案中应力水平时进行稳压。

（3）启动多通道数据记录仪，打开影像系统实时记录。进行压裂操作。

（4）压裂结束后，停止注液，将加载系统卸载归零后移除注液系统。

（5）将试件取出加载腔，对整体进行初步观察并记录试件外表的开裂情况。

（6）对试件进行剖切处理，观察记录试件内部裂纹扩展情况。

（7）更换试件，重复步骤(2)～(6)。

（8）对实验数据进行处理分析。

2　实验结果及分析

第一组实验，试件的层理弱面抗拉强度相同，层理倾角均为 20°，采用不同的竖向地应力加载，试件 1-1 的竖向加载最小，压裂裂纹是沿着层理弱面的方向扩展，试件 1-2 和 1-3 的裂纹穿过层理弱面沿原方向扩展，如图 3 所示，通过对试件 1-3 的剖切，压裂液主要存在贯穿基质与弱层的垂向裂纹中，而在其他方向没有发现大量的压裂液，可以证明水力压裂裂纹是贯穿层理沿原方向扩展。从而验证了本课题组论文[15]的结论。随着竖向应力的增大，试件所需的起裂压力逐渐降低，试件 1-3 的起裂压力甚至低于试件的扩展压力，实验结果如表 3 所示。

表 3　第一组实验结果

Tab. 3　Experimental results of the first group

编号	起裂压力/MPa	扩展压力/MPa	裂纹扩展方向
1-1	15.6	9～12	沿层理
1-2	12.2	10～12	贯穿层理
1-3	—	11～13	贯穿层理



图 3　试件 1-3 剖切图

Fig. 3　1-3 Anatomical diagram of experimental sample

压裂裂缝在试件中扩展需要克服试件本体抗拉强度和外部地应力二者共同的作用。在均质储层中，水力压裂裂缝是沿着垂直最小地应力方向扩展，但层理弱面倾角与竖向应力共同作用下，竖向应力较小时，压裂裂缝与层理弱面相遇，水力裂缝在层理中扩展所需的扩展压力较小，导致水力裂缝更容易在层理弱面内扩展，此时裂缝转向沿层理扩展。随着竖向应力增大，压裂裂缝在基质与层理中扩展所需的扩展压力逐渐一致，导致压裂裂缝随着竖向应力的增大越易穿过层理扩展。

第二组中三块试件采用相同配比的基质与层理弱面，层理弱面的倾角不同，试件 2-1、2-2、2-3 的层理倾角分别为 10°、20°、30°。由第一组实验可知，为了使压裂裂缝平稳扩展，第二、三组实验采用最小竖

向地应力加载方式。在相同的地应力加载下,试件 2-1 和 2-2 的起始裂缝在与层理弱面相遇时,裂缝转向并沿着层理弱面进行扩展,图 4 为试件 2-2 压裂的外部演化过程。试件 2-3 的起始裂缝与层理弱面相遇时穿过层理沿着原方向扩展。实验结果如表 4 所示。

表 4 第二组实验结果

Tab. 4 Experimental results of the second group

编号	起裂压力/MPa	扩展压力/MPa	裂纹扩展方向
2-1	14.9	10～12	沿层理
2-2	15.6	9～12	沿层理
2-3	15.4	8～10	贯穿层理



图 4 试样 2-2 裂纹动态扩展演化过程

Fig. 4 Crack dynamic propogation evolution process of 2-2 sample

第二组实验,压裂裂缝与层理相遇时,层理倾角 20°与 10°相比,扩展压力变化范围依次增大并产生波动,这是由于在压裂过程中,压裂液会进入一些天然微裂隙内,产生滤失引起扩展压力波动,直至试件压开泵注压力达到稳定。在相同的地应力条件下,试件 2-1 和 2-2 的层理方向与压裂裂缝初始扩展方向夹角较小,压裂裂缝与层理相遇时,与基质相比层理抗拉强度较小,压裂裂纹更易破开层理扩展,此时压裂裂纹无法穿透层理仅能沿层理扩展。试件 2-3 的层理方向与压裂裂缝初始扩展方向夹角较大,压裂裂缝遇层理时沿层理的扩展压力高于沿基质的扩展压力,压裂裂缝在基质中更易扩展,此时压裂裂缝贯穿层理沿原方向扩展。

第三组试件的层理倾角均为 20°,在相同的基质强度、相同的地应力加载条件下,试件的层理抗拉强度依次增加。试件 3-1、3-2 和 3-3 的压裂裂纹沿着层理弱面扩展,如图 5 所示,通过对试件 3-3 的剖切,蓝色示踪剂主要存在层理弱面中的裂缝中,而在基质中没有示踪剂的存在,证明水力压裂裂纹沿着层理弱面扩展,试件 3-4 中压裂裂缝贯穿层理弱面沿原方向扩展。实验结果如表 5 所示。



图 5 试件 3-3 剖切图

Fig. 5 3-3 anatomical diagram of experimental sample

表 5 第三组实验结果

Tab. 5 Experimental results of the third group

编号	起裂压力/MPa	扩展压力/MPa	裂纹扩展方向
3-1	14.7	7～10	沿层理
3-2	15.6	9～12	沿层理
3-3	15.3	9～12	沿层理
3-4	14.4	10～13	贯穿层理

第三组实验,试件 3-1 的层理强度最弱,裂缝与层理相遇时压裂裂缝的起裂压力最容易满足沿着层理弱面方向的扩展压力,此时裂缝直接沿着层理走向扩展。而试件 3-2 和 3-3 的层理强度处于中间区域,虽然裂缝沿着层理弱面方向需要的扩展压力较大,但仍比裂缝在基质中需要的扩展压力小,裂缝与层理相遇时更易沿着层理走向扩展。而对于试件 3-4,层理的抗拉强度与基质的抗拉强度最相近,裂缝在层理中的扩展压力与其他试件相比需要更大,与层理相遇时压裂裂缝在层理中的扩展压力已达到基质的扩展压力,层理对裂缝扩展的影响不足以改变裂缝走向,裂缝瞬间压开层理沿原方向扩展。

3　结论

采用室内水力压裂实验，通过监测孔直接对裂纹扩展的实时监测和注水压力信息采集，及试件压裂后的剖切观察裂纹形态的综合实验手段，分析了水力压裂过程中，垂直最小地应力稳定扩展的主裂缝遇层理时层理倾角、强度等对压裂裂纹扩展的影响。实验结论如下：

（1）层理面倾角与地应力共同影响水力压裂裂纹扩展，最大地应力越小，主压裂裂缝与最大地应力方向夹角越大，主裂缝与层理相遇后易沿层理方向扩展，最大地应力越大，主压裂裂缝与最大地应力方向夹角越小，主裂缝与层理相遇后越易贯穿层理沿原方向扩展。

（2）水力压裂作业时，层理面与主裂缝初始扩展方向夹角越大，主裂缝在层理中的扩展压力就越大，主压裂裂缝与层理相遇时越易贯穿层理沿原方向扩展，层理面与主裂缝初始扩展方向夹角越小，主裂缝在层理中的扩展压力就越小，主压裂裂缝与层理相遇时越易沿着层理方向扩展。

（3）层理走向相同时，层理弱面的抗拉强度与基质相比，层理抗拉强度越弱，影响主压裂裂缝的走向能力越强，主压裂裂纹越易沿层理方向扩展，层理的抗拉强度与基质抗拉强度越相近，裂缝与层理相遇后越易穿过层理沿原方向扩展。

参考文献：

[1] 柳占立，庄茁，孟庆国，等. 页岩气高效开采的力学问题与挑战[J]. 力学学报，2017，49(3)：507－516（LIU Zhanli，ZHUANG Zhuo，MENG Qingguo，et al. Problems and challenges of mechanics in shale gas efficient exploitation[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics，2017，49(3)：507－516 (in Chinese)）

[2] 柳占立，王涛，高岳，等. 页岩水力压裂的关键力学问题[J]. 固体力学学报，2016，37(1)：34－49（LIU Zhanli，WANG Tao，GAO Yue，et al. The key mechanical problems on hydraulic fracture in shale[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics，2016，37(1)：34－49 (in Chinese)）

[3] 考佳玮，金衍，付卫能，等. 深层页岩在高水平应力差作用下压裂裂缝形态实验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2018，37(6)：1332－1339（KAO Jinwei，JI Yan，FU Weineng，et al. Experimental research on the morphology of hydraulic fractures in deep shale under high difference of in-situ horizontal stresses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2018，37(6)：1332－1339 (in Chinese)）

[4] 解经宇，蒋国盛，王荣璟，等. 射孔对页岩水力裂缝形态影响的物理模拟实验[J]. 煤炭学报，2018，43(3)：776－783（XIE Jingyu，JIANG Guosheng，WANG Rongjing，et al. Experimental investigation on the influence of perforation on the hydraulic fracture geometry in shale[J]. Journal of China Coal Society，2018，43(3)：776－783 (in Chinese)）

[5] Desheng Zhou，Peng Zheng，Pei He，et al. Hydraulic fracture propagation direction during volume fracturing in unconventional reservoirs[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering，2016，141：82－89.

[6] 付海峰，刘云志，梁天成，等. 四川省宜宾地区龙马溪组页岩水力裂缝形态实验研究[J]. 天然气地球科学，2016，27(12)：2231－2236（FU Haifeng，LIU Yunzhi，LIANG Tiancheng，et al. Laboratory study on hydraulic fracture geometry of longmaxi formation shale in Yibin area of Sichuan Provinc[J]. Natural Gas Geoscience，2016，27(12)：2231－2236 (in Chinese)）

[7] 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 Zhiming，et al. Propagation area evaluation of hydraulic fracture networks in shale gas reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development，2014，41(6)：763－768 (in Chinese)）

[8] 李芷，贾长贵，杨春和，等. 页岩水力压裂水力裂缝与层理面扩展规律研究[J]. 岩石力学与工程学报，2015，34(1)：12－20（LI Zhi，JIA Changgui，YANG Chunhe，et al. Propagation of hydraulic fissures and bedding planes in hydraulic fracturing of shale[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2015，34(1)：12－20 (in Chinese)）

[9] 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，2015，34(2)：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，2015，34(2)：3624－3632 (in Chinese)）

[10] Dehghan A N, Goshtasbi K, Ahangari K, et al. The effect of natural fracture dip and strike on hydraulic fracture propagation[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2015, 75:210－215.

[11] 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 by large-scale true triaxial physical simulation test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(2):407－414 (in Chinese))

[12] 衡帅，杨春和，郭印同，等. 层理对页岩水力裂缝扩展的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报，2015，34(2):228－237 (HENG Shuai, YANG Chunhe, GUO Yintong, et al. Influence of bedding planes on hydraulic fracture propagation in shale formations[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(2):228－237 (in Chinese))

[13] 衡帅，杨春和，曾义金，等. 页岩水力压裂裂缝形态的试验研究[J]. 岩土工程学报，2014，36(7):1243－1251 (HENG Shuai, YANG Chunhe, ZENG Yijin, et al. Experimental study on hydraulic fracture geometry of shale [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(7):1243－1251 (in Chinese))

[14] 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，2016，36(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, 36(2):45－51 (in Chinese))

[15] 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 Kemin, 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))

Influence of bedding azimuth and strength on hydraulic fracturing in shale

SUN Ke-ming[1,2], JI Hong-jie[1], ZHANG Shu-cui[3]

(1. School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China; 2. School of Science, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, Shandong, China; 3. School of Mechanical Engineering, Anyang Institute of Technology, Anyang 455000, Henan, China)

Abstract: In order to study the influences of shale natural bedding inclination angle and strength on hydraulic fracturing crack growth, indoor hydraulic fracturing experiment was performed. Real-time monitoring of crack growth and water injection pressure information and sample cutting after fracturing were conducted through monitoring holes to analyze the influence of bedding inclination angle and strength on fracturing crack growth. The results indicate that in the hydraulic fracturing process, when the main crack with stable expansion of minimum vertical ground stress is encountered with the bedding plane, the smaller the angle between the bedding plane and the initial fracture expansion direction is, the more easily the main crack will be expanded along the direction of the bedding plane. The greater the angle between the bedding plane and the initial fracture expansion direction is, the more easily the main crack will be expended through the bedding plane in the original direction. When the bedding azimuth, the ground stress and the tensile strength do not change, and the tensile strength of bedding plane is far weaker than the tensile strength of the matrix, the main crack encountering the bedding plane is much easier to extend in the direction of the bedding plane. The closer the tensile strength of bedding plane approaches to that of the matrix, the more easily the main crack will be extended through the bedding plane along the original direction. When the bedding azimuth and strength do not change, the main crack is much easier to expend through the bedding plane along the original direction for the greater ground stress and stress difference.

Keywords: shale; hydraulic fracturing; bedding dip angle; bedding strength; vertical ground stress