

引用格式:柴妮娜,李嘉瑞,张力文,等. 夹层型陆相页岩油储层压裂裂缝扩展实验研究[J]. 油气藏评价与开发, 2025, 15(1): 124-130.

CHAI Nina, LI Jiarui, ZHANG Liwen, et al. Experimental study on hydraulic fracture propagation in interbedded continental shale oil reservoirs[J].

Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2025, 15(1): 124-130.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2025.01.016

夹层型陆相页岩油储层压裂裂缝扩展实验研究

柴妮娜¹, 李嘉瑞¹, 张力文¹, 王俊杰², 刘亚鹏², 朱伦²

(1. 中国石化华北油气分公司石油工程技术研究院, 河南 郑州 450006; 2. 东北石油大学石油工程学院, 黑龙江 大庆 163318)

摘要:鄂尔多斯盆地延长组沉积了一套泥页岩及细粒砂质岩, 具有丰富的页岩油资源, 勘探开发评估资源量合计达十几亿吨。但页岩油储层可动性差、地层埋深浅, 水平段层理、断缝、断层发育, 裂缝扩展形态未知, 体积压裂改造难度大。针对长7段井下储层获取的全直径致密砂泥岩岩心和页岩岩心, 利用水泥包裹岩心方法开展真三轴室内压裂物模实验, 获取水力裂缝形态, 揭示弱应力场下页岩油储层水力裂缝扩展机理。实验发现, 页岩油储层层状结构较密集, 岩石颗粒之间胶结性较弱, 压裂液容易沿着层理渗透, 在垂向应力与最小水平主应力之差小于2 MPa时, 水力裂缝形态多为水平缝, 压裂液主要沿层理或水平的天然裂缝渗透; 垂向应力与最小水平主应力之差增加到7 MPa时, 会出现垂向穿层缝, 形成局部台阶, 最后被弱胶结层理面捕获后, 沿层理渗透延展。因此, 压裂施工时, 优选垂向应力与最小水平主应力差值较大的区域进行施工(井口位于山顶), 有利于水力裂缝垂向延展, 增加储层的体积压裂效果, 提高页岩油产量和增大经济效益。

关键词: 夹层型页岩油储层; 水力压裂实验; 最大水平主应力; 水力裂缝形态; 天然裂缝; 数值模拟

中图分类号: TE357

文献标识码: A

Experimental study on hydraulic fracture propagation in interbedded continental shale oil reservoirs

CHAI Nina¹, LI Jiarui¹, ZHANG Liwen¹, WANG Junjie², LIU Yapeng², ZHU Lun²

(1. Petroleum Engineering Technology Research Institute, Sinopec North China Oil and Gas Company, Zhengzhou, Henan 450006, China;

2. School of Petroleum Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China)

Abstract: The Yanchang Formation in the Ordos Basin has deposited a set of mudshales and fine-grained sandy rocks, rich in shale oil resources, with an estimated resource potential exceeding billions of tons. However, shale oil reservoirs exhibit poor mobility, shallow burial depths, the development of bedding, fractures, and faults in horizontal sections, and unknown fracture propagation patterns, making volumetric fracturing challenging. To address this, cement-encased cores of full-diameter tight sandstone-mudstone and shale from the sublayer in the seventh member of the Yanchang Formation (Chang 7) were used in actual triaxial hydraulic fracturing physical model experiments. These experiments revealed hydraulic fracture morphologies and the fracture propagation mechanism under weak stress fields in shale oil reservoirs. The experiments found that shale oil reservoirs had tight layered structures and weak bonding between rock grains, causing fracturing fluid to easily infiltrate along bedding planes. When the difference between vertical stress and minimum horizontal principal stress was less than 2 MPa, hydraulic fractures predominantly formed horizontal fractures, with the fluid primarily infiltrating along bedding planes or horizontal natural fractures. When this stress difference increased to 7 MPa, vertical cross-layer fractures appeared, forming localized steps that eventually became captured by weakly bonded bedding planes, propagating horizontally along the layers. For fracturing operations, regions with a larger difference between vertical stress and minimum horizontal principal stress, such as wellheads at hilltops, are preferred. This facilitates vertical fracture propagation, improves volumetric fracturing effectiveness in reservoirs, enhances shale oil production, and increases economic benefits.

Keywords: interbedded shale oil reservoir; hydraulic fracturing experiment; maximum horizontal principal stress; hydraulic fracture morphology; natural fractures; numerical simulation

收稿日期: 2024-06-05。

第一作者简介: 柴妮娜(1981—), 女, 硕士, 副研究员, 主要从事油气储层改造工艺技术研究工作。地址: 河南省郑州市中原区陇海西路199号中国石化华北分公司, 邮政编码: 450006。E-mail: 1037277836@qq.com

通信作者简介: 王俊杰(1997—), 女, 硕士, 助理工程师, 主要从事非常规油藏压裂数值模拟方面研究工作。地址: 黑龙江省大庆市高新技术产业开发区学府街99号, 邮政编码: 163318。E-mail: 511306672@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金项目“万米深井PDC钻头冲击破岩机理及提速方法研究”(52274005)。

随着美国在页岩油气资源开采技术方面取得了显著进展,这一领域在全球范围内迅速引起广泛的关注^[1]。页岩油气开采技术的不断突破使得世界各国争相投入大量资源开展页岩油气勘探和开采工作。中国页岩油气可采资源量约 44×10^8 t,页岩油储量位居世界第三^[2]。这些页岩储层主要发育区为古生界海相页岩和中生界陆相页岩^[3],其中,鄂尔多斯盆地中生界延长组呈现出广覆式的沉积特征,油藏资源量大,具有重要的工业开采价值^[4-6]。但由于页岩储层的非均质性及各向异性特征显著,导致常规方法在页岩油气藏开发中的效果不佳,难以满足开发需求^[7]。另外,页岩发育较多的天然裂缝、层理缝,缝网相对复杂,因此,页岩油气藏主要采用人工压裂技术增产^[8]。夹层型页岩油岩层交替分布,层理和天然裂缝发育,故分析夹层型页岩储层的裂缝扩展规律对开采施工极为关键^[9]。

近年来,中国在页岩油开采技术及工艺方面已经取得了一定的进展,但在夹层型页岩储层的开采过程中仍然面临以下两方面的问题:①夹层型页岩储层的砂泥岩互层发育,裂缝垂向扩展规律认识不清^[10];②储层断缝及天然裂缝发育,增加了压裂裂缝扩展的复杂性和不确定性。

在水力压裂过程中,夹层型储层的页岩层理作为页岩内部固有的分层结构,会影响裂缝扩展的方向和速度^[11]。此外,天然裂缝、地应力大小和方向、压裂施工参数同样对水力裂缝的扩展产生重要影响^[12]。国内外学者通过理论分析、数值模拟和现场试验等手段,深入探讨了水力压裂过程中各因素的作用机理和相互影响关系。WARPINSKI等^[13-14]根据井场试验场的实验研究发现,压裂初始阶段的水力裂缝主要沿井筒方向(向最大主应力方向)扩展,而层间应力差和地层互层特性均会影响缝高的发展。SIMONSON等^[15]在1978年提出了一个基于断裂力学的缝高平衡模型,结果显示,裂缝的扩展方向并不是随意的,而是受到流体压力梯度和最小水平主应力梯度的共同影响。DANESHY等^[16]采用黏结和不黏结2种类型的岩石对薄互层地层中的水力裂缝扩展规律进行了研究,结果表明,水力裂缝的扩展可以穿过黏结类型的岩石,而无法穿过不黏结类型的岩石,与两层间的力学性质差异无关。侯冰等^[17]探究出了在低水平应力差的情况下,裂缝更容易沿着不同的方向扩展。常鑫等^[18]在压裂实验中发现当射孔方位角增大时,地层破裂压力也会随之增大。ZHAO^[19]等通过在实验岩样上进行预制裂缝,发现当应力差较小时,预制裂缝对其扩展具有导向作用。TANG等^[20]采用无黏结界面的有机玻璃三层块体,模拟黏性主导的裂缝穿层扩展,探究了层间弱界面、应力差和力学性质的差异性。

尽管已有的研究已经对常规页岩储层的裂缝扩展规

律进行了探究^[21-22],但由于夹层型页岩油储层具有其独特的地质特征和储层结构,导致裂缝在其中的扩展规律可能与常规页岩储层存在显著差异,仍需进行进一步的探索,并且已有的研究更多的是以页岩天然露头岩样为对象开展实验^[23-24],与井下真实储层所处的岩石力学环境有一定差异。因此,研究基于井下全直径真实岩样,针对鄂尔多斯盆地延长组长7段页岩,进行了水力压裂实验研究,明确了夹层型陆相页岩油储层水力压裂裂缝扩展规律,为指导页岩压裂工艺提供参考。

1 页岩油水力压裂模拟实验

1.1 试样装置

水力压裂试验在东北石油大学岩石力学实验室进行,采用的是自行组建的真三轴模拟实验系统,该系统核心组成部分主要包括三轴压力加载系统、水力压裂系统以及数据采集处理系统,能够在3个方向上通过独立的轴向加载系统施加压力,从而精准地模拟地下岩层在不同方向上的受力情况,而通过这些系统之间的相互配合,可以实现全直径岩心水力压裂实验。

1.2 试样制备

实验样品取自鄂尔多斯盆地延长组长7段页岩,对原始岩样进行切割、研磨与抛光,并加工成长12 cm、直径10 cm的试验岩样。然后,使用外径为10 mm的钻头垂直于层理在岩样中心钻取一个8 cm深的圆柱孔(模拟钻井井眼),采用长100 mm,外径8 mm,内径4 mm的特殊形状钢管(钢管底部封死,四周布满孔眼)模拟垂直井套管,再用高强度环氧树脂将套管与预制井筒进行密封,在岩样表面进行脲胶密封处理,然后使用水泥模具在岩样周围进行水泥浇筑,最终,加工成300 mm×300 mm×300 mm的标准立方体岩样,以模拟垂直井的压裂试验(图1)。在试验开始之前在钢管中施加0.3 MPa的压力,检测岩样的密封性,防止出现泄漏。

1.3 实验参数

模拟利用真三轴压裂实验模拟系统,进行3个方向的水力压裂模拟实验。根据现场施工钻井过程中测得的地应力数据,结合实验系统的功能参数,以尽可能还原现场压裂施工环境,确定模拟实验排量为18 mL/min的情况。由于鄂尔多斯盆地延长组长7段沉积的广覆式页岩埋深介于600~1 100 m,埋藏较浅,上覆压力较小,因此,地应力设置参考井场数据,全直径砂泥岩地应力设置为垂向应力为13 MPa,最大水平主应力为16 MPa,最小水平主应力为11 MPa;全直径页岩地应力设置为垂向应力

为13 MPa,最大水平主应力为14 MPa,最小水平主应力为11 MPa。利用不同实验岩心研究天然裂缝、层理对压裂裂缝扩展形态的影响,具体实验参数见表1。

表1 压裂实验方案

Table 1 Hydraulic fracturing experimental schemes

序号	岩心类型	裂缝发育	层理发育	水平应力差/ MPa	垂向应力差/ MPa	泵注排量/ (mL/min)
1号岩样	砂泥岩	无	中	5	2	18
2号岩样	砂泥岩	中	中	5	2	18
3号岩样	砂泥岩	无	低	5	2	18
4号岩样	砂泥岩	高	低	5	2	18
5号岩样	页岩	无	高	8	7	18
6号岩样	页岩	中	中	3	2	18

1.4 压裂过程

通过真三轴物理模型试验机完成3个方向地应力条件的加载,确保岩样在水平方向和垂直方向上均受到与地下实际环境相近的应力作用,待达到实验所指定的水平应力差后,再等待0.5 h,确保3个方向伺服系统应力稳定,从而模拟出真实的地下应力环境,然后,在水力压裂装置上加装压裂液,设定相关参数至设计值,启动水力压裂泵,进行水力压裂,观察压力随时间的变化曲线,在这一过程中电脑会实时同步采集压裂过程中的各项数据,最后,压裂完成后,停止水力压裂系统,稳定泄压,再将压后岩样进行CT扫描。

2 储层裂缝扩展形态影响因素分析

2.1 水力裂缝扩展形态

实验岩样压裂后出现的裂缝扩展形态共有6类:单

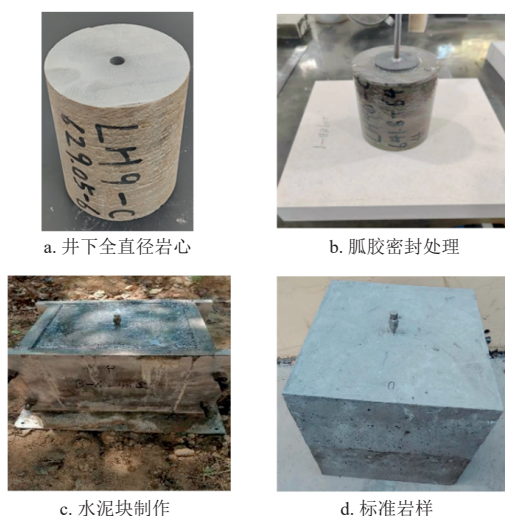


图1 标准实验岩样制备过程

Fig. 1 Preparation process of standard experimental rock samples

一水平体积缝网(图2a)、轻微跳跃台阶缝(图2b)、高倾角半扇水平缝(图2c)、复杂水平缝网(图2d)、高跳跃台阶缝(图2e)、双平行水平缝(图2f)。实验发现:鄂尔多斯盆地的页岩矿藏埋藏浅,层理发育明显,在无天然裂缝且层理发育程度较弱的情况下,岩样易在应力差的作用下产生高倾角缝;在无天然裂缝且层理发育程度较强的情况下,岩样首先沿着高倾角缝向外延伸,由于垂向压力较小,不能贯穿较厚的胶结层理,只能沿着厚胶结层理向外延伸,最终形成无倾角或较弱倾角的水平缝。因此,水平缝的扩展形态主要受到垂向应力和最小水平主应力之差、天然裂缝和层理的影响。

2.2 应力差对水力裂缝的影响

对于水力压裂施工而言,水平两向应力差异越小,水力裂缝的扩展越复杂,反之,两向应力差越大,水力裂缝就会沿着最大水平主应力扩展,从而形成单一的裂缝扩展形态。

在水力压裂物理模拟实验中,5号岩样的应力差为7 MPa,裂缝的形态为高跳跃的台阶缝,分析可知,垂向应力差的增大使水力裂缝可以穿透部分薄层理面,产生台阶缝,但由于层理发育程度较高,部分区域层理厚度较大,水力裂缝最终被弱胶结的厚层理捕获,裂缝无法继续穿透层理面,只能沿着层理面进行扩展(图3a、图3c);6号岩样的应力差为2 MPa,水力裂缝的形态为平行的双水平缝,裂缝面与水平面基本平行,分析可知,垂向应力差较小,水力裂缝无法穿透天然裂缝,水力裂缝沿着天然裂缝的方向向外扩展(图3b、图3d)。

综上所述,页岩层理发育程度较高,层理面较厚,胶结的层理面强度较弱,需要更大的应力差才能使水力裂缝穿透层理面或天然裂缝,从而形成垂直缝或者复杂缝,以达到较好的改造效果。

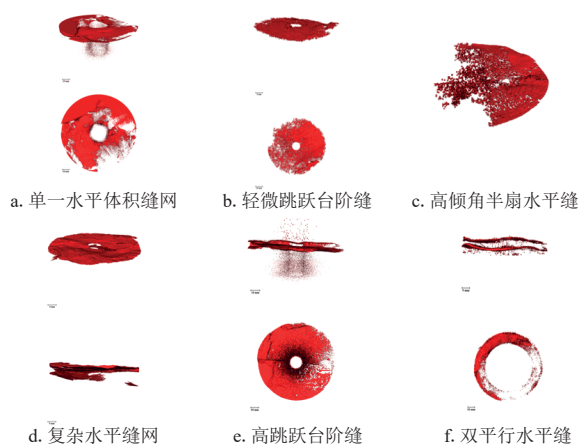


图2 水力裂缝扩展形态

Fig. 2 Hydraulic fracture propagation morphologies

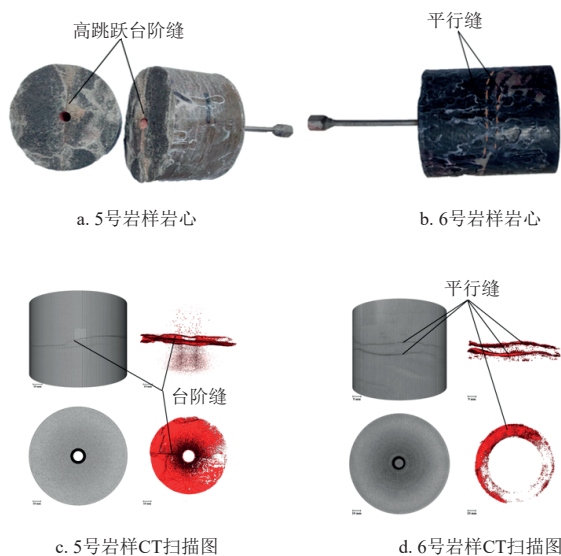


图3 不同应力差下页岩岩心和CT扫描对比
Fig. 3 Comparison of shale cores and CT scans under different stress differences

2.3 层理对水力裂缝的影响

层理是试样沿垂直方向变化所产生的层状构造,其类型以页岩和泥岩为主,是裂缝扩展的主要控制因素之一,层理面会局部捕获水力裂缝,影响裂缝的扩展路径,使水力裂缝穿透或者绕过层理,或是转向,这都会增加水力裂缝与天然裂缝相遇的概率,提高储层改造的效果。

在水力压裂物理模拟实验中,3号岩样的层理发育适中,裂缝形态表现为单一的水平缝,局部出现体积压裂缝网,分析可知,层理发育程度适中,水力裂缝无法贯穿层理面向垂直方向进行扩展,只能沿着层理面进行延展,由于岩样整体层理发育适中,在外围局部区域出现层理发育较弱的地方,水力裂缝对较弱的层理面进行破碎,最终形成局部的体积压裂缝网(图4a、图4d);1号岩样的层理发育较弱,裂缝形态表现为具有高倾角特征,占据试样一半区域的半扇水平缝,从岩石表面来看,裂缝主要沿着斜向上的层理进行延展,层理面与水平面具有一定夹角,分析可知试样的整体层理发育较弱,裂缝开裂位置位于层理面夹层,由于垂向应力差较弱,水力裂缝无法穿透层理面,只能沿着层理面的夹层倾斜向上进行扩展(图4b、图4e);5号岩样的层理发育程度较高,岩样中部出现高跳跃的台阶缝,裂缝在整个岩样中对层理进行穿层破碎的可能性较弱,促使岩样整体展现的是单一水平缝形态,而台阶缝可能是因为岩样胶结程度较强,在垂直应力差的作用下出现了穿层现象(图4c、图4f)。

综上所述,层理发育程度是影响水力压裂改造效果的关键因素,大部分水力裂缝都会沿着水平的弱胶结层

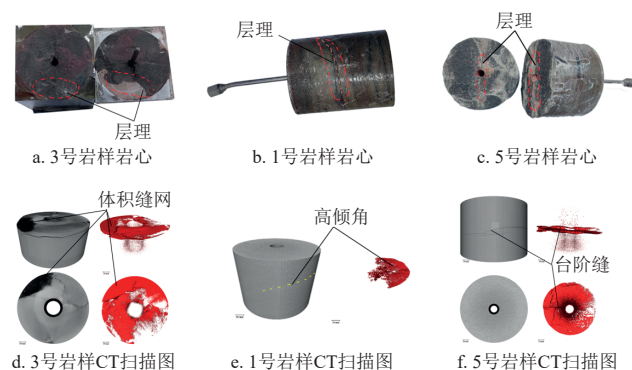


图4 不同层理发育程度下页岩岩心和CT扫描对比
Fig. 4 Comparison of shale cores and CT scans with different degrees of bedding development

理面进行延展,在垂向应力差加大的情况下,试样穿层的概率逐渐加大,会在局部地区发生部分穿层,但整体的趋势还是以沿层理延展为主。

2.4 天然裂缝对水力裂缝的影响

页岩油储层中发育有大量的天然裂缝,水力压裂裂缝受天然裂缝的影响主要取决于二者之间的相对位置和距离。当水力裂缝与天然裂缝距离较远时,天然裂缝对水力裂缝扩展的影响较弱;当水力裂缝与天然裂缝相距很近甚至相交时,天然裂缝对水力裂缝扩展影响较强。水力裂缝与天然裂缝距离较近时,主要有3种裂缝扩展模式:①水力裂缝被天然裂缝捕获;②水力裂缝穿过天然裂缝;③水力裂缝先被天然裂缝捕获,沿天然裂缝扩展一段距离后,又穿过天然裂缝继续扩展。总的来说,天然裂缝的存在可以影响水力裂缝的扩展路径和形态,使得裂缝网络变得更加复杂。

为了探究天然裂缝对岩样水力裂缝扩展的影响,开展了3组水力压裂物模实验,2号岩样在局部区域出现了轻微跳跃的台阶缝,水力裂缝主要沿着天然裂缝进行延展,在右侧天然裂缝不连续位置,水力裂缝在诱导应力场的作用下进行了穿层,使两段天然裂缝进行了联通,形成了局部区域的台阶缝(图5a、图5d);4号岩样在外围展现出了复杂的水平缝网形态,岩样外围存在多个位置的水平天然裂缝,水力裂缝主要沿着水平层理向外延展,在岩样外围沟通天然裂缝,从而形成水平缝网(图5b、图5e);6号岩样一侧为两条平行的水平缝,水力裂缝主要通过沟通两条水平的天然裂缝向外延展(图5c、图5f)。

综上所述,天然裂缝发育的程度极大影响着水力裂缝的扩展形态,在该地区天然裂缝多为水平形态,水力裂缝主要通过沟通天然裂缝向外扩展,部分情况为了沟通天然裂缝,会在诱导应力的作用下进行穿层。



图5 2号、4号、6号试样的压后实物和CT扫描
Fig. 5 Post-fracturing physical samples and CT scans of specimens 2, 4, and 6

3 压裂裂缝垂向扩展数值模拟研究

针对夹层型页岩油储层样品开展水力压裂裂缝垂向扩展实验,采用离散元水力压裂软件进行数值模拟,建立了相应等尺度数值模型,岩石力学性能参数与压裂参数均与现场施工保持一致,模拟压裂裂缝垂向扩展过程,开展垂向应力差和中间地应力等影响因素敏感性分析,为储层压裂改造工艺优化设计提供技术指导。

3.1 数值模型建立

设置夹层型岩石储层水力压裂裂缝扩展数值模拟模型,模型尺寸设置为 $3\text{ m}\times 3\text{ m}\times 3\text{ m}$,模型设置3层,每层厚度均为 1 m ,3层均可输入不同的岩石力学参数,设置密度为 $2\ 400\text{ kg/m}^3$ 、泊松比为 0.25 、单轴抗压强度为 116 MPa 、抗拉强度为 5.44 MPa 、孔隙度为 8.1% 、渗透率为 $0.384\times 10^{-15}\text{ m}^2$,模型中心设置井筒,半径为 0.1 m ,在井筒中心设置垂直于井筒的割缝。地应力设置参考井场数据,设置垂向应力为 13 MPa 、最大水平主应力为 16 MPa ,最小水平主应力为 11 MPa 。

3.2 模型验证

通过与上述水力压裂模拟实验的对比,验证了离散格子压裂数值模拟结果的合理性,其中工型为压裂裂缝基本形态,上下层理无限接近时,形成单一层理缝,高垂向应力差时,模型中裂缝可以观察到了垂向扩展,与实验结果相对应。在此模型的基础上对垂向应力差和中间地应力影响因素进行敏感性分析(图6)。

3.3 垂向应力差对裂缝突破层理影响

根据地质模型确定参数取值,以工型层理缝为基本形态建立数值模型,改变水平最小主应力的参数,使垂向

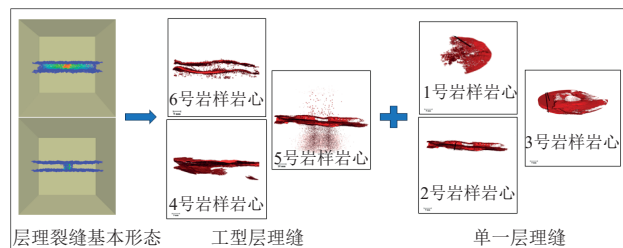


图6 模拟与实验验证
Fig. 6 Simulation and experimental validation

应力和水平最大地应力参数发生变化,从而探究垂向应力差对压裂裂缝突破层理的影响(表2)。

由图7a可知:随着地层垂向应力差从 2 MPa 增加到 8 MPa ,水力裂缝形态从位于层间到穿透上下层,且裂缝在上下层的扩展面积随着地层垂向应力差的增加在不断增加,从图中可以看出,上下层垂向应力差 4 MPa 时,裂缝的垂向扩展距离增加,下层穿透夹层,横向扩展微弱;而当上下层垂向应力差增加至 6 MPa ,裂缝在中间层的垂向距离继续增加,上层突破层间,但趋势比较微小,裂缝扩展形态整体呈椭圆状。而当上下层垂向应力差增加至 8 MPa 时,裂缝在中间层的垂向距离继续增加,最终上下层完全穿透夹层,表示裂缝发育明显。

由图7b可知:随着地层垂向应力差从 3 MPa 增加到 9 MPa ,水力裂缝形态从位于层间到穿透上下层间。从图中可以看出,地层垂向应力差 5 MPa 时,裂缝的垂向扩展距离增加不明显,主要以水平方向扩展;当地层垂向应力差增加至 7 MPa ,裂缝在中间层扩展的垂向距离大幅度增加,上下层均突破层间,形成接近圆状裂缝扩展网络。而当上下层垂向应力差增加至 9 MPa 则上下层完全穿透夹层,相较于 7 MPa 时,裂缝发育更加完整。

综上所述,无论最大地应力位于垂向或水平方向,高垂向应力差均有利于压裂裂缝突破层理,增大裂缝的垂向扩展,从而增加复杂缝网形成概率。

3.4 中间地应力对裂缝突破层理影响

根据地质模型确定参数取值,与应力差分析的角度不同,应力差改变的水平最小主应力的值,从而改变应力差;中间地应力重点研究3个方向地应力中中间值的变

表2 应力场参数设置
Table 2 Stress field parameter settings

方向	垂向应力/ MPa	水平最大 地应力/MPa	水平最小 主应力/MPa
最大地应力位于垂向	17	15	9、11、13、15
最大地应力位于水平	17	18	9、11、13、15

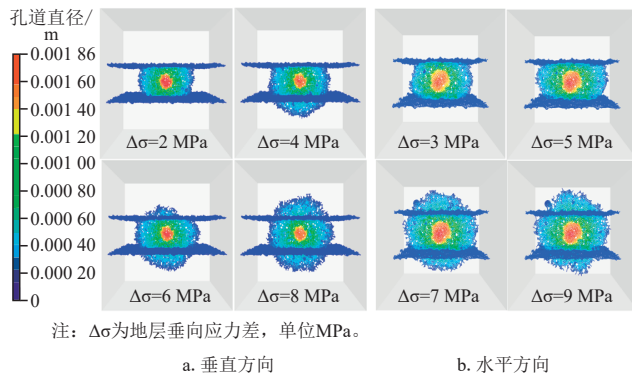


图7 最大地应力位于垂直、水平方向时垂直应力差对裂缝突破层理影响

Fig. 7 Influence of vertical stress difference on fracture penetration through bedding with maximum principal stress in vertical or horizontal direction

化对裂缝突破层理造成的影响。应力场参数设置表如表3所示。

由图8a可知:当最大地应力位于垂直方向时,当中间地应力 $\sigma_m=17$ MPa时,裂缝的垂向扩展距离增加不明显,主要以水平方向扩展;当中间地应力 σ_m 减小到15 MPa时,裂缝在中间层扩展的垂向距离小幅度增加,上下层边缘地区局部突破层间,整体仍为工型裂缝扩展网络;当中间地应力 σ_m 减小到13 MPa时,裂缝在中间层扩展的垂向距离进一步增加,则穿透夹层的程度明显增加;当中间地应力为 $\sigma_m=11$ MPa时,裂缝发育完全。总的来看,随着中间地应力从 $\sigma_m=17$ MPa减小到 $\sigma_m=11$ MPa,水力裂缝形态从位于层间到穿透上下层,且裂缝在垂向方向和水平方向的扩展面积随着中间地应力的减小在不断增加。

由图8b可知:当最大地应力位于水平方向时,当中间地应力 $\sigma_m=12$ MPa时,裂缝的垂向扩展距离增加不明显,主要以水平方向扩展;当中间地应力 σ_m 增加到14 MPa时,裂缝在中间层扩展的垂向距离小幅度增加,下层突破层间,上层扩展不明显;当中间地应力 σ_m 增加到16 MPa时,裂缝在中间层扩展的垂向距离进一步增加,上下层均穿透夹层,同时水平方向也有所扩展,整体呈圆状扩展形态,表明裂缝发育完全。总的来说,随着中间地应力从 $\sigma_m=10$ MPa增加到 $\sigma_m=16$ MPa,水力裂缝形态从位于层间到穿透上下层,且裂缝在垂直方向和水平方向的扩展面积随着中间地应力的增加在不断增加。

表3 应力场参数设置

Table 3 Stress field parameter settings

方向	垂向应力/MPa	水平最大主应力/MPa	水平最小主应力/MPa
最大地应力位于垂向	18	11、13、15、17	9
最大地应力位于水平	10、12、14、16	18	9

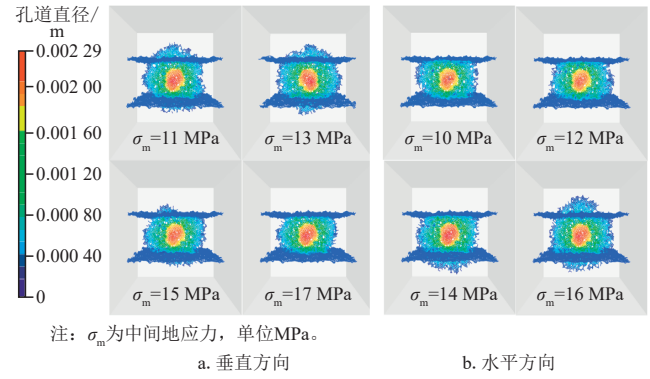


图8 最大地应力位于水平、垂直方向时中间地应力对裂缝突破层理影响

Fig. 8 Influence of intermediate principal stress on fracture penetration through bedding with maximum principal stress in horizontal or vertical direction

综上所述,中间地应力对压裂裂缝突破层理有一定影响。最大地应力位于垂直方向时,中间地应力越小,越有利于压裂裂缝突破层理;最大地应力位于水平方向时,中间地应力越大,越有利于压裂裂缝突破层理。

4 结论

1) 页岩油储层层理呈“千层饼”状发育,裂缝扩展形态受层理胶结性和天然裂缝形态影响较大,低垂向应力差条件下,水力裂缝扩展形态主要以水平缝为主,高垂向应力差条件下可以产生垂向缝。

2) 页岩油储层压后水力裂缝扩展形态包括单一水平体积缝网、轻微跳跃台阶缝、高倾角半扇水平缝、复杂水平缝网、高跳跃台阶缝以及呈平行状态的双层水平缝,裂缝形态主要以水平缝为主。

3) 基于夹层型陆相页岩储层全直径岩心的水力压裂物理模拟实验,建议在实际现场作业的时候,选择垂向应力与最小水平主应力差较大的区域进行施工。

4) 地应力分布对水力裂缝扩展的影响:最大地应力位于垂直方向时,高应力差有利于压裂裂缝突破层理,中间地应力越小,越有利于压裂裂缝突破层理;最大地应力位于水平方向时,高应力差有利于压裂裂缝突破层理,中间地应力越大,越有利于压裂裂缝突破层理。

参考文献

- [1] 马永生,黎茂稳,蔡勋育,等. 中国海相深层油气富集机理与勘探开发: 研究现状、关键技术瓶颈与基础科学问题[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(4): 655-672.
MA Yongsheng, LI Maowen, CAI Xunyu, et al. Mechanisms and exploitation of deep marine petroleum accumulations in China: Advances, technological bottlenecks and basic scientific problems[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(4): 655-672.
- [2] 晁晖. 中国新能源发展战略研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2015.

- CHAO Hui. The research of new energy source development strategy of China[D]. Wuhan: Wuhan University, 2015.
- [3] 王建, 郭秋麟, 赵晨蕾, 等. 中国主要盆地页岩油气资源潜力及发展前景[J]. 石油学报, 2023, 44(12): 2033-2044.
- WANG Jian, GUO Qiulin, ZHAO Chenlei, et al. Potentials and prospects of shale oil-gas resources in major basins of China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(12): 2033-2044.
- [4] 姚泾利, 邓秀芹, 赵彦德, 等. 鄂尔多斯盆地延长组致密油特征[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(2): 150-158.
- YAO Jingli, DENG Xiuqin, ZHAO Yande, et al. Characteristics of tight oil in Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(2): 150-158.
- [5] 庞正炼, 陶士振, 张琴, 等. 鄂尔多斯盆地延长组7段夹层型页岩层系石油富集规律与主控因素[J]. 地学前缘, 2023, 30(4): 152-163.
- PANG Zhenglian, TAO Shizhen, ZHANG Qin, et al. Interbedded shale formation of the 7th member of the Yanchang Formation in the Ordos Basin: Petroleum accumulation patterns and controlling factors[J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(4): 152-163.
- [6] 白江. 鄂尔多斯盆地吴起地区延长组长6段储层特征研究[J]. 非常规油气, 2024, 11(2): 46-55.
- BAI Jiang. Reservoir characteristics of Chang6 Member of Yanchang Formation in Wuqi Area, Ordos Basin[J]. Unconventional Oil & Gas, 2024, 11(2): 46-55.
- [7] 彭紫燕, 谢斐, 王炜肖, 等. 页岩储层压裂裂缝形态描述及流动模拟方法研究现状[J]. 石油地质与工程, 2023, 37(5): 120-126.
- PENG Ziyan, XIE Fei, WANG Weixiao, et al. Research status of fracture morphology description and flow simulation method in shale reservoirs[J]. Petroleum Geology & Engineering, 2023, 37(5): 120-126.
- [8] 袁士义, 雷征东, 李军诗, 等. 陆相页岩油开发技术进展及规模效益开发对策思考[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2023, 47(5): 13-24.
- YUAN Shiyi, LEI Zhengdong, LI Junshi, et al. Progress in technology for the development of continental shale oil and thoughts on the development of scale benefits and strategies[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2023, 47(5): 13-24.
- [9] 陈刚. 准噶尔盆地玛湖页岩油地质工程甜点地震一体化预测方法研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2023.
- CHEN Gang. Study on seismic integrated prediction method for geological-engineering sweet spot of Mahu shale oil in the Junggar Basin[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2023.
- [10] 崔壮, 侯冰, 付世豪, 等. 页岩油致密储层一体化压裂裂缝穿层扩展特征[J]. 断块油气田, 2022, 29(1): 111-117.
- CUI Zhuang, HOU Bing, FU Shihao, et al. Fracture cross-layer propagation characteristics of integrated fracturing in shale oil tight reservoir[J]. Fault-Block Oil & Gas Fields, 2022, 29(1): 111-117.
- [11] 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 Jiawei, JIN 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.
- [12] 盛广龙, 黄罗义, 赵辉, 等. 页岩气藏压裂缝网扩展流动一体化模拟技术[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2021, 43(5): 84-96.
- SHENG Guanglong, HUANG Luoyi, ZHAO Hui, et al. Integrated simulation approach for fracture network propagation and gas flow in shale gas reservoirs[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2021, 43(5): 84-96.
- [13] WARPINSKI N R. Investigation of the accuracy and reliability of in situ stress measurements using hydraulic fracturing in perforated cased holes[C]// Paper ARMA-83-0773 presented at the 24th U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS), College Station, Texas, USA, June 1983.
- [14] WARPINSKI N R, CLARK J A, SCHMIDT R A. Laboratory investigation on the effect of in-situ stresses on hydraulic fracture containment [J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1982, 22(3): 333-340.
- [15] SIMONSON E R, ABOUSAYED A S, CLIFTON R J. Containment of massive hydraulic fractures[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1978, 18(1): 27-32.
- [16] DANESHY A A. Hydraulic fracture propagation in layered formations [J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1978, 18(1): 33-41.
- [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, 38(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 Geotechnical Engineering, 2016, 38(2): 219-225.
- [18] 常鑫, 程远方, 时贤, 等. 定向射孔体积压裂复杂裂缝扩展机理试验研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(20): 116-122.
- CHANG Xin, CHENG Yuanfang, SHI Xian, et al. Experimental study of fracture initiation and propagation mechanisms by oriented perforation technology for SRV fracturing[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(20): 116-122.
- [19] ZHAO Y S, MAO R B, LIU Z H, et al. Laboratory hydraulic fracturing test on largescale pre-cracked granite specimens[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2017, 44: 278-286.
- [20] TANG J Z, WU K, ZUO L H, et al. A coupled three-dimensional hydraulic fracture propagation model considering multiple bedding layers[C]// Paper URTEC-2901905-MS presented at the SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference, Houston, Texas, USA, July 2018.
- [21] 聂云丽. 页岩油气藏水力压裂裂缝的分布量化方法研究[D]. 武汉: 长江大学, 2023.
- NIE Yunli. Study on methods to determine the spatial distribution of fractures due to hydraulic fracturing in shale reservoirs[D]. Wuhan: Yangtze University, 2023.
- [22] 张皓宇. 陆相页岩油储层密切割体体积压裂缝网演化机理研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2023.
- ZHANG Haoyu. Study on the evolution mechanism of intensive cutting volumetric fracturing fracture network in continental shale oil reservoirs[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2023.
- [23] 孔祥伟, 严仁田, 张思琦, 等. 真三轴大物模水力压裂裂缝起裂及扩展模拟实验[J]. 石油与天然气化工, 2023, 52(3): 97-102.
- KONG Xiangwei, YAN Rentian, ZHANG Siqi, et al. Simulation experiment of fracture initiation and propagation of hydraulic fracturing with true triaxial large physical model[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2023, 52(3): 97-102.
- [24] 乔玲茜, 王本强, 陈雨松, 等. 页岩气藏暂堵转向压裂裂缝扩展规律模拟[J]. 断块油气田, 2024, 31(2): 241-245.
- QIAO Lingxi, WANG Benqiang, CHEN Yusong, et al. Fracture propagation laws simulation of temporary plugging and diverting fracturing in shale gas reservoir[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2024, 31(2): 241-245.