

文章编号: 0253-2697(2024)03-0559-15 DOI:10.7623/syxb202403006

页岩油多岩性交互储层径向井穿层压裂裂缝扩展特征

武晓光¹ 龙腾达¹ 黄中伟¹ 高文龙² 李根生¹ 谢紫霄¹ 杨芮¹ 鲁京松¹ 马金亮¹

(1. 油气资源与工程全国重点实验室, 中国石油大学(北京) 北京 102249; 2. 中国石油集团长城钻探工程有限公司 北京 100101)

摘要:中—高成熟陆相页岩油是中国油气勘探开发的重大接替领域,但存在多岩性交互、纵向改造程度低的难题。充分动用纵向产层是实现页岩油体积压裂、获得高产与稳产的关键。为此,提出了径向井穿层压裂新思路,旨在通过径向井眼穿透隔夹层和岩性界面,引导纵向多层系起裂,解决缝高延伸受限的难题。为探究方法的可行性,开展了真三轴径向井穿层压裂实验,借助CT扫描和裂缝三维重构技术,阐明了径向井引导裂缝穿层起裂及扩展特征,分析了垂向应力差异、压裂液排量、径向井长度等参数对径向井诱导裂缝穿层的影响规律。研究表明:径向井具有导向裂缝扩展和诱导裂缝纵向穿层的特性,可有效降低裂缝穿层难度,提升纵向扩展高度;垂向应力差异增加,径向井诱导裂缝穿层效果增强,裂缝由跨层起裂向各层同时起裂转变,突破岩性界面;小排量下裂缝以低强度岩层跨层起裂为主,提高排量有助于裂缝纵向穿层扩展;径向井长度增加,诱导裂缝穿层能力增强。研究结果有望为中国陆相页岩油储层纵向改造高度受限的难题提供解决思路。

关键词:页岩油;径向井;穿层压裂;裂缝扩展;多岩性层

中图分类号:TE357

文献标识码:A

Characteristics of fracture propagation in radial wellbores of shale oil reservoirs with multiple lithologic layers

Wu Xiaoguang¹ Long Tengda¹ Huang Zhongwei¹ Gao Wenlong² Li Gensheng¹
Xie Zixiao¹ Yang Rui¹ Lu Jingsong¹ Ma Jinliang¹

(1. *National Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China*; 2. *CNPC Great Wall Drilling Engineering Co., Ltd., Beijing 100101, China*)

Abstract: Medium-high mature continental shale oil is a major substituted field in oil and gas exploration and development, but facing some challenges such as multi-lithology interaction and low degree of longitudinal reformation. How to fully activate longitudinal production zone is the key to achieve volume fracturing and obtain high and stable production of shale oil. For this reason, a novel idea of cross-layer fracturing in radial wells was proposed, which aims to guide longitudinal multi-layer fracture initiation by penetrating the interlayer and lithologic interface through radial borehole, thus solving the problem of limited fracture height. In order to determine the feasibility of above idea, a true tri-axial cross-layer fracturing experiment was conducted. By means of CT scanning and 3D fracture reconstruction technology, the paper clarifies the characteristics of fracture initiation and penetration induced by radial well, and analyzes the influence law of vertical stress difference, displacement and radial well length on the fracture initiation and penetration. The results indicate that the radial well has the ability of guiding fracture propagation and promoting longitudinal fracture penetration, which can effectively reduce the difficulty of fracture penetration through layers and increase the longitudinal fracture propagation height. With the increase of vertical stress difference, the effect of fracture propagation induced by radial well is enhanced, and the fracture initiation changes from cross-layer cracking mode to simultaneous multi-layer cracking mode, crossing the lithology interface. The fracture is dominated by low-strength layers under low displacement, and increasing displacement is conducive to longitudinal fracture propagation across layers. With the increase of radial length, the wellbore has the enhanced ability of inducing fractures to cross the layer interface. The key findings are expected to provide solutions to the limitation of longitudinal fracture propagation height in continental shale oil reservoirs.

Key words: shale oil; radial well; cross-layer fracturing; fracture propagation; multi-lithology layer

引用:武晓光,龙腾达,黄中伟,高文龙,李根生,谢紫霄,杨芮,鲁京松,马金亮.页岩油多岩性交互储层径向井穿层压裂裂缝扩展特征[J].石油学报,2024,45(3):559-573,585.

Cite:WU Xiaoguang, LONG Tengda, HUANG Zhongwei, GAO Wenlong, LI Gensheng, XIE Zixiao, YANG Rui, LU Jingsong, MA Jinliang. Characteristics of fracture propagation in radial wellbores of shale oil reservoirs with multiple lithologic layers[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(3): 559-573, 585.

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(No. 52204019)、国家自然科学基金重点国际(地区)合作项目(No. 52020105001)、国家自然科学基金青年科学基金重大项目(No. 52192624)和中国石油大学(北京)前瞻导向项目(2462022QZDX005)资助。

第一作者:武晓光,男,1991年12月生,2020年获中国石油大学(北京)博士学位,现为中国石油大学(北京)碳中和示范性能源学院特任岗位副教授,主要从事新型射流钻完井和非常规油气储层改造理论与技术研究工作。Email:wuxg@cup.edu.cn

通信作者:黄中伟,男,1972年4月生,2006年获中国石油大学(华东)博士学位,现为中国石油大学(北京)石油工程学院教授,主要从事高压水射流技术在石油工程中的理论与应用研究工作。Email:huangzw@cup.edu.cn

陆相页岩油是中国陆上潜力最大、最具战略性的石油接替资源之一。根据有机质成熟度差异,可划分为中—高成熟($R_o > 1.0\%$)和中—低成熟(R_o 为 $0.5\% \sim 1.0\%$)两种类型^[1]。其中,中—高成熟页岩油热演化程度更高,是近期勘探开发的现实领域。中国中—高成熟页岩油储量丰富,是陆相页岩油革命成功的基础条件之一^[2],其资源量达 $100 \times 10^8 \text{ t}$ ^[3]。水力压裂改造已成为实现页岩油工业开采价值的有效手段^[4]。近年来先后建立了新疆吉木萨尔和庆城油田页岩油压裂开发示范区,掀起了页岩油勘探开发热潮^[5]。实现陆相页岩油的高效开发,对于夯实中国能源自我供给基础,保障国家能源战略安全具有重大意义。

水平井体积压裂是当前页岩油高效开发的有效手段^[6-7]。不同于北美地区海相页岩油,中国陆相页岩油地质条件复杂、纵向产层多且平面分布广^[8]，“甜点”体呈现明显的薄互层特征,充分动用纵向产层是实现页岩油体积压裂、获得高产与稳产的关键。但由于页岩油层间普遍发育高强度的隔夹层和岩性界面,致使水力压裂裂缝扩展受到遮挡,造成储层纵向改造困难,裂缝延伸高度受限,严重制约了页岩油体积压裂效果^[9-11]。

岩性界面是页岩油等层状岩体的特有结构,水力裂缝扩展至这些弱胶结面时裂缝形态、缝内压力可发生明显的变化,对缝高延伸行为具有重要影响^[12-13]。穿层压裂是实现多岩性层状岩体高效开发的重要手段。许多学者针对不同的层状岩体中水力裂缝纵向扩展形态和穿层特征开展了大量研究,系统分析了水平应力差、夹层厚度、地层倾角等地质因素^[14-17],以及压裂液排量、黏度等工程因素^[18-21]对裂缝穿层的影响规律。研究表明,通过改变压裂工艺参数和压裂液特性可一定程度上实现水力裂缝穿层扩展,但穿层效果取决于储层地质条件及隔夹层/岩性界面的力学性质,常规压裂手段下同一套压裂工艺参数往往难以适

用于不同的储层和区块。因此,亟需探索能够有效动用页岩油纵向多层系穿层压裂的新方法。

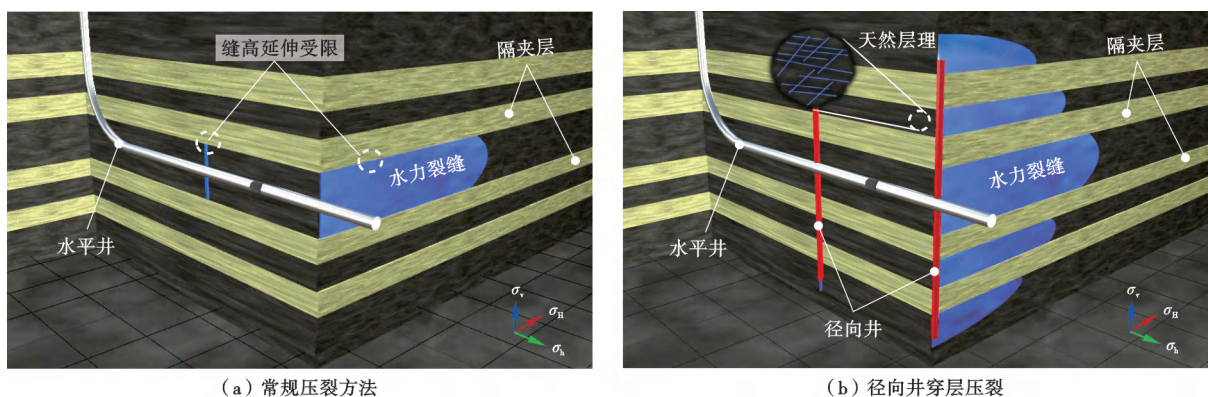
结合笔者课题组前期水力喷射径向井技术的研究基础^[22-24],提出了页岩油储层径向井穿层压裂新思路。该技术是在径向钻出分支孔眼的基础上,进一步实施水力压裂,在径向井附近形成高导流裂缝的一种储层改造方法^[25-29],能够显著降低裂缝破裂压力,引导裂缝定向扩展^[30-31]。在煤层工业性试验中,径向井具有优良的增透效果^[32]。前人针对岩性界面干扰下水力裂缝扩展行为及径向井压裂裂缝扩展特征开展了大量研究^[14-21,30-31],但研究对象主要针对单一岩性岩石,鲜有考虑隔夹层和多层系岩性的影响,多岩性储层中径向井引导裂缝起裂及扩展特征尚不明确。

为揭示页岩油多岩性储层径向井穿层压裂的可行性,笔者采用砂/页岩多层叠置岩样,开展了真三轴径向井穿层压裂实验研究。基于CT扫描和裂缝三维重构技术,通过与常规水力压裂裂缝扩展行为对比,系统论证了径向井在多层系地层中特有的多层起裂模式,探究了径向井引导裂缝穿层扩展特征,分析了垂向应力差异、压裂液排量、径向井长度等参数对其诱导裂缝穿层的影响规律。

1 技术思路与实验设计

1.1 技术思路

为解决页岩油储层中常规压裂缝高受限难题[图1(a)],笔者在水平井基础上提出纵向分支径向井穿层压裂技术思路[图1(b)]。首先,通过水力喷射沿垂直于水平主井筒方向钻出一个或多个几十米长的微小分支井眼(直径为 $3 \sim 5 \text{ cm}$),其纵向穿透隔夹层和岩性界面,连通页岩油多个层系;继而针对径向井实施水力压裂,使压裂液直接作用于多个产层,促使页岩油纵向多层系起裂,从而解决隔夹层/岩性界面对裂缝高度限制的



(a) 常规压裂方法

(b) 径向井穿层压裂

图1 页岩油多岩性储层常规压裂和径向井穿层压裂三维示意

Fig. 1 Three-dimensional schematics of conventional fracturing and cross-layer fracturing in radial wellbore of multi-lithology shale oil reservoir

难题,最大程度提升产层的纵向动用程度,大幅提高页岩油储层体积改造效果,兼备多层合采高效开发的优势^[33],同时进一步降低施工成本。

1.2 实验岩样

采集鄂尔多斯盆地庆阳地区页岩和砂岩天然露头岩样,制备岩性交互的压裂物理模拟试件。对两种岩石开展基础力学参数测试,每种岩样重复3组(表1)。页岩样品层理结构发育,内部存在天然弱面,单轴抗压和抗拉强度显著低于砂岩,分别为 (37.8 ± 6.90) MPa和 (3.56 ± 1.31) MPa,与该地区X-2井延长组7段井下泥页岩性质相似^[34]。砂岩和页岩弹性模量分别为 (11.30 ± 1.66) GPa和 (3.10 ± 0.88) GPa,力学特性差异明显。

表1 砂岩和页岩基本力学参数

Table 1 Mechanical parameters of sandstone and shale

岩性	抗压强度/ MPa	弹性模量/ GPa	泊松比	抗拉强度/ MPa
砂岩	55.4 ± 9.40	11.3 ± 1.66	0.33 ± 0.05	4.25 ± 0.43
页岩	37.8 ± 6.90	3.10 ± 0.88	0.36 ± 0.06	3.56 ± 1.31

模拟多层砂/页岩叠置型页岩油储层,按照图2所示的组合方式,将页岩和砂岩岩样分别加工成尺寸为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ 、 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 36\text{ mm}$ 、 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ 的方形岩板,制备3层和5层两种岩性交互物理模拟试件(图2)。在中间页岩岩板垂直顶面位置钻出直径为16 mm、长度为60 mm的孔眼,模拟水平主井眼。主井眼中下入不锈钢井筒模拟套管,采用植筋胶固井,下部预留20 mm裸眼段,用于注液压裂。在主井筒裸眼段中部位位置,沿垂直主井筒方向钻出2个相位 180° 分布的侧向孔眼,垂直穿透页岩和砂岩之间的岩性界面,模拟径向双分支井眼。

径向井尺寸按照相似准则设计,物理模拟试样中径向井与主井筒的直径比,与实际工况保持一致。对于 $\Phi 127\text{ mm}$ 主井筒,水力喷射径向井孔眼尺寸直径通常在 $3 \sim 5\text{ cm}$ ^[13]。实验中模拟实际工况下127 mm主井筒和 $\Phi 32\text{ mm}$ 径向孔眼的尺寸配合,按照相似比8:1进行等比例缩放,由此设置径向井和主井筒直径分别为4 mm和16 mm。此外,由于物理模拟试件尺寸限制,径向孔眼长度设置在 $23.5 \sim 40.0\text{ mm}$,确保其穿过试样的岩性界面,以实现径向井诱导裂缝穿层/跨层特性的探究。

对于多岩性层人工物理模拟试件,还原其岩性界面性质是整个实验研究的关键。笔者借鉴多岩性层物理模拟试件制作方法^[35],通过环氧树脂粘接多岩性层模拟层间界面。同时,为了确定胶结界面的合理性,分别针对砂岩、页岩和带有胶结面的试样进行取心(图3),开展巴西劈裂及直剪测试,累计18组。测试结果如图4所示。胶结面的抗剪强度处于砂岩和页岩基质的抗剪强度之间,反映了砂/页岩岩性“过渡区”力学性质梯度变化的特点^[17];而胶结面的抗拉强度则低于两种岩性基质的抗拉强度,呈现一定的弱面特征,验证了实验中人工胶结界面的合理性。

1.3 实验设备

采用图5(a)所示的真三轴压裂实验设备开展研究。该实验设备主要包括压裂液注入、三轴应力加载、真三轴围压釜、数据采集及控制系统4大模块,可以实现恒压和恒流两种流体注入模式,最高注液排量为 100 mL/min 。通过三轴应力加载系统和围压釜为岩样施加围压,模拟地层三向应力,最高应力可达50 MPa。

实验流程为:①启动注液系统[图5(b)],同时开启真空泵,将带有染色剂的压裂液充注至注液罐;②连

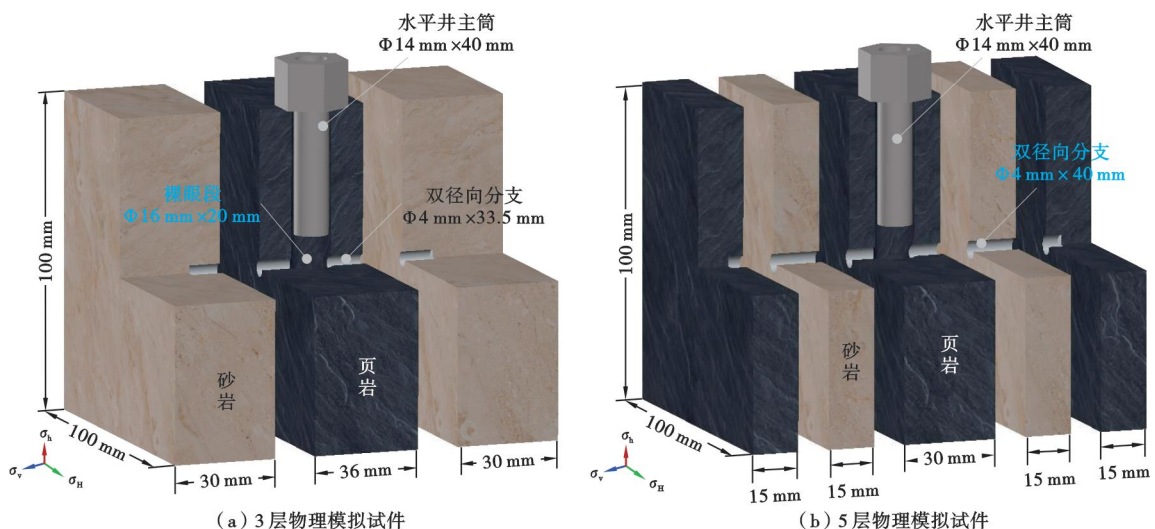
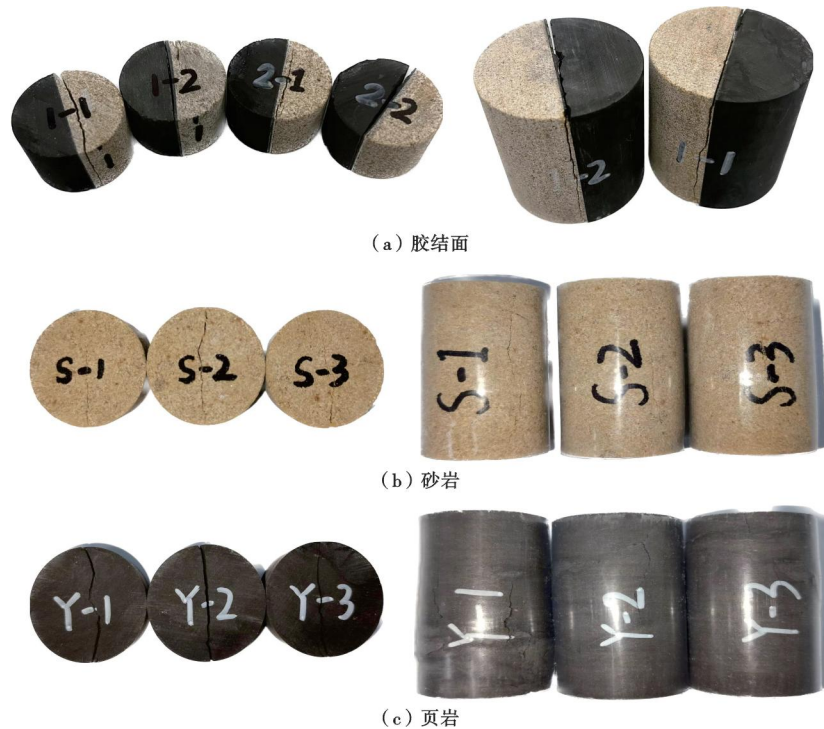


图2 径向井穿层压裂多层岩性物理模拟试件及井筒结构

Fig. 2 Schematic diagram of multi-layer lithologic model sample and wellbore structure for radial wellbore cross-layer fracturing



注:岩心直径为 25 mm。

图 3 砂/页岩及胶结面力学测试实验岩样实物

Fig. 3 Sandstone/shale and cementation plane used for mechanical test

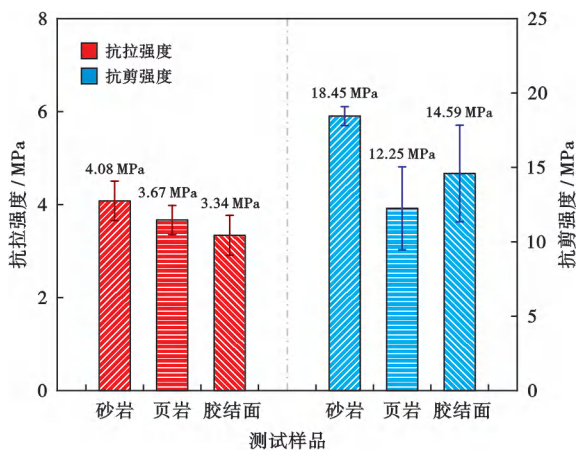


图 4 砂/页岩及胶结面力学强度柱状对比

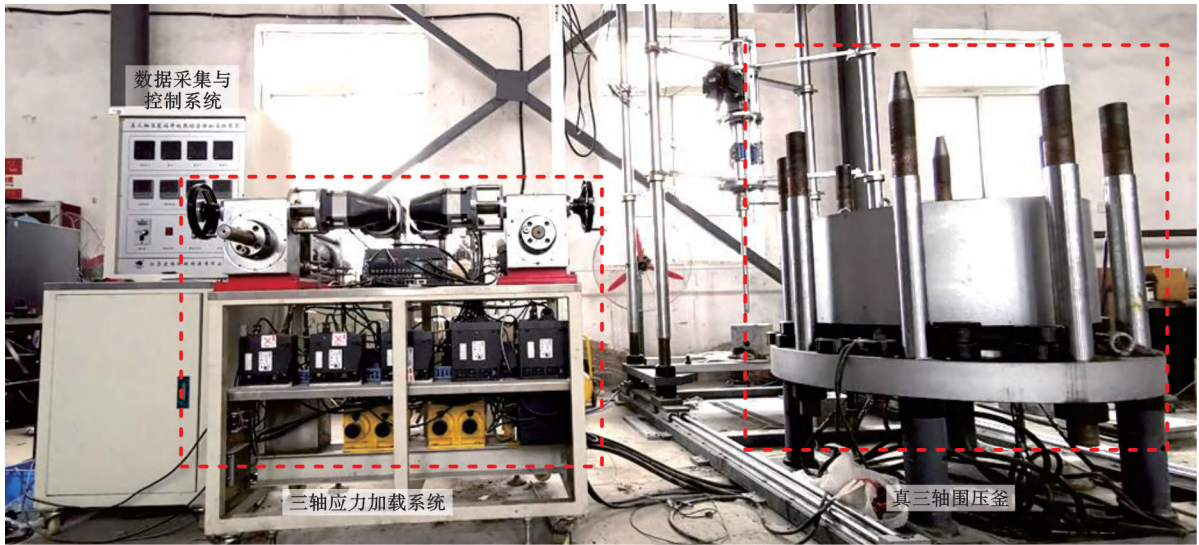
Fig. 4 Comparison of mechanical strength of sandstone/shale and cementation plane

接数据采集与控制系统,调整压裂液注入模式,并控制注液速率,同时监测井筒压力变化;③将物理模拟试件放入围压釜[图 5(c)],关闭釜腔盖,连接注液管线与井筒;④开启三轴应力加载系统,按照预定方案加载三向主应力至目标值;⑤设置注液速率,开启注液阀,开始压裂实验,待井筒压力回落稳定后,停止注入,保存并导出数据;⑥开启排空阀门,拆除井筒与注液管线,打开围压釜,取出岩样,观察裂缝形态,一组实验结束。

为更好地评价岩样内部裂缝的扩展形态和穿层特征,采用 YXLON FF85 型高精度 CT 扫描仪对压后岩样进行成像分析,结合数字岩心技术,重构了裂缝的三维形态结构。扫描过程中采用的脉冲频率为 100 Hz,射线焦点到探测器的距离(SDD)和到物体的距离(SOD)分别设置为 4 600 mm 和 3 780 mm,探元矩阵尺寸为 1 848 mm × 1 848 mm,系统最大识别精度约为 50 μm。

1.4 实验方案

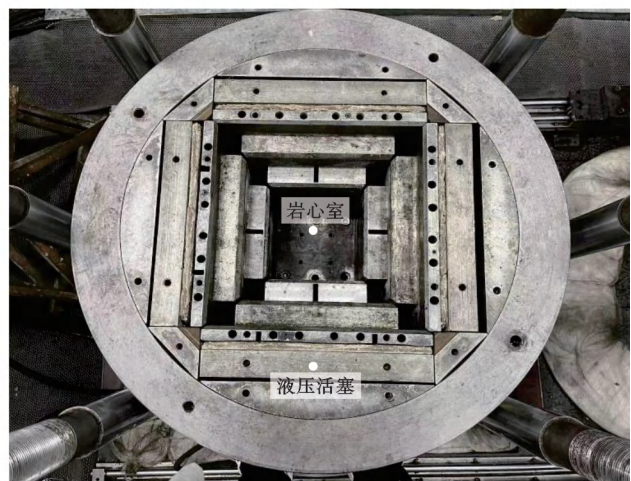
实验方案见表 2。实验参数的选取根据相似准则确定^[36],排量为 5 mL/min、20 mL/min、50 mL/min 分别对应现场排量为 0.25 m³/min、2.50 m³/min、7.00 m³/min。其中,岩样 W1-1 和 W1-2 为无径向井条件下的常规穿层压裂实验,通过与带有径向井的岩样 R1-1 和 R1-2 对比,揭示径向井诱导裂缝穿层扩展的能力和特征;岩样 R2-1—R2-3 用于开展不同垂向应力差异系数下的径向井穿层压裂实验,获得应力差异对径向井诱导裂缝穿层扩展的影响规律;岩样 R3-1 与岩样 R1-1 对比,分析径向井长度对裂缝穿层扩展的影响;岩样 R4-1 和 R4-2 对比了不同排量下径向井诱导裂缝穿层的扩展模式;不同于岩样 R1-1—R4-2 的 3 层物理模拟岩样,岩样 R5-1—R5-4 采用 5 层物理模拟试件,通过开展不同排量和垂向力差异系数下径向井穿层压裂实验,重点分析了裂缝跨层起裂特征。



(a) 真三轴压裂物理模拟系统



(b) 压裂液注入系统



(c) 围压釜俯视图

图 5 真三轴径向井穿层压裂实验系统

Fig. 5 Experimental system of true tri-axial radial wellbore cross-layer fracturing

表 2 径向井穿层压裂实验方案

Table 2 Fracturing test scheme for radial wellbore cross-layer fracturing

岩样编号	σ_v / MPa	σ_H / MPa	σ_h / MPa	压裂液排量/ (mL/min)	径向井长度/ mm	垂向应力 差异系数 K_v	物理模拟 层数
W1-1	9	8	6	20	无径向井	0.50	3
W1-2	15	9	3	50	无径向井	4.00	3
R1-1	9	8	6	20	33.5	0.50	3
R1-2	15	9	3	20	33.5	4.00	3
R2-1	10	8	6	20	33.5	0.67	3
R2-2	12	8	6	20	33.5	1.00	3
R2-3	14	8	6	20	33.5	1.33	3
R3-1	9	8	6	20	23.5	0.50	3
R4-1	9	9	3	20	33.5	2.00	3
R4-2	9	9	3	5	33.5	2.00	3
R5-1	12	10	8	20	40.0	0.50	5
R5-2	12	10	6	20	40.0	1.00	5
R5-3	12	10	4	20	40.0	2.00	5
R5-4	12	10	8	5	40.0	0.50	5

2 实验结果与分析

2.1 径向井诱导裂缝穿层特征

为揭示径向井诱导裂缝穿层能力和扩展特征,以常规压裂为对照组,开展了有/无径向分支条件下的穿层压裂对比实验(图6)。图6中三向应力为岩样顶面(带有井筒)的应力加载方向,黄色虚线代表径向分支的相对位置。对压后岩样进行重注测试,标记出岩样表面的渗漏位置(图6中红线),获得裂缝的扩展模式。对于无径向井的常规水平井压裂情况,裂缝穿层难度极大。在垂向应力差异系数为0.50、排量为20 mL/min的条件下[图6(a)],裂缝在页岩层内裸眼段起裂,并优先沿层理弱面横向扩展,无明显纵向延伸,难以发生穿层行为;而在高垂向压力差、高排量条件下[图6(b)],页岩内发育的层理弱面诱导裂缝先横向扩展,延伸一定距离后向最大主应力方向偏转(纵向扩展),但受高强度砂岩遮挡,裂缝到达岩性界面后停止扩展,缝高不再继续增大,纵向上依然难以贯穿界面。

不同于常规压裂情况,对于径向井穿层压裂,无论是高垂向应力差还是常规垂向应力差,裂缝均发生了纵向穿层现象,主裂缝缝高得以增大,提升了储集层的连通性。在垂向应力差异系数为0.50时[图6(c)],主裂缝在径向井的诱导下由根端起裂,垂向应力差异不明显导致裂缝走向并没有平行最大主应力方向扩展,在页岩层水平扩展一段距离后纵向延伸,发生单侧穿层行为;在垂向应力差异系数为4.00时[图6(d)],径向井诱导主裂缝由径向井指端及根端同时起裂,纵向横断岩样,扩展呈“双翼型”穿层缝,缝高进一步增大。因此,上述实验结果表明,径向井具有导向裂缝扩展和诱导裂缝纵向延伸穿层的特性,这与数值模拟条件下径向井对裂缝扩展的纠偏效果是相似的^[37]。页岩层中主井筒与径向井交界(径向井根端)受到双重应力集中效果,且由于页岩具有脆性高、强度低的力学特性,因此该区域最先出现裂缝起裂现象,并在径向井的诱导下扩展延伸。对于砂岩及岩性界面,径向井周边岩体的应力集中会极大降低水力裂缝扩展难度,而常规水

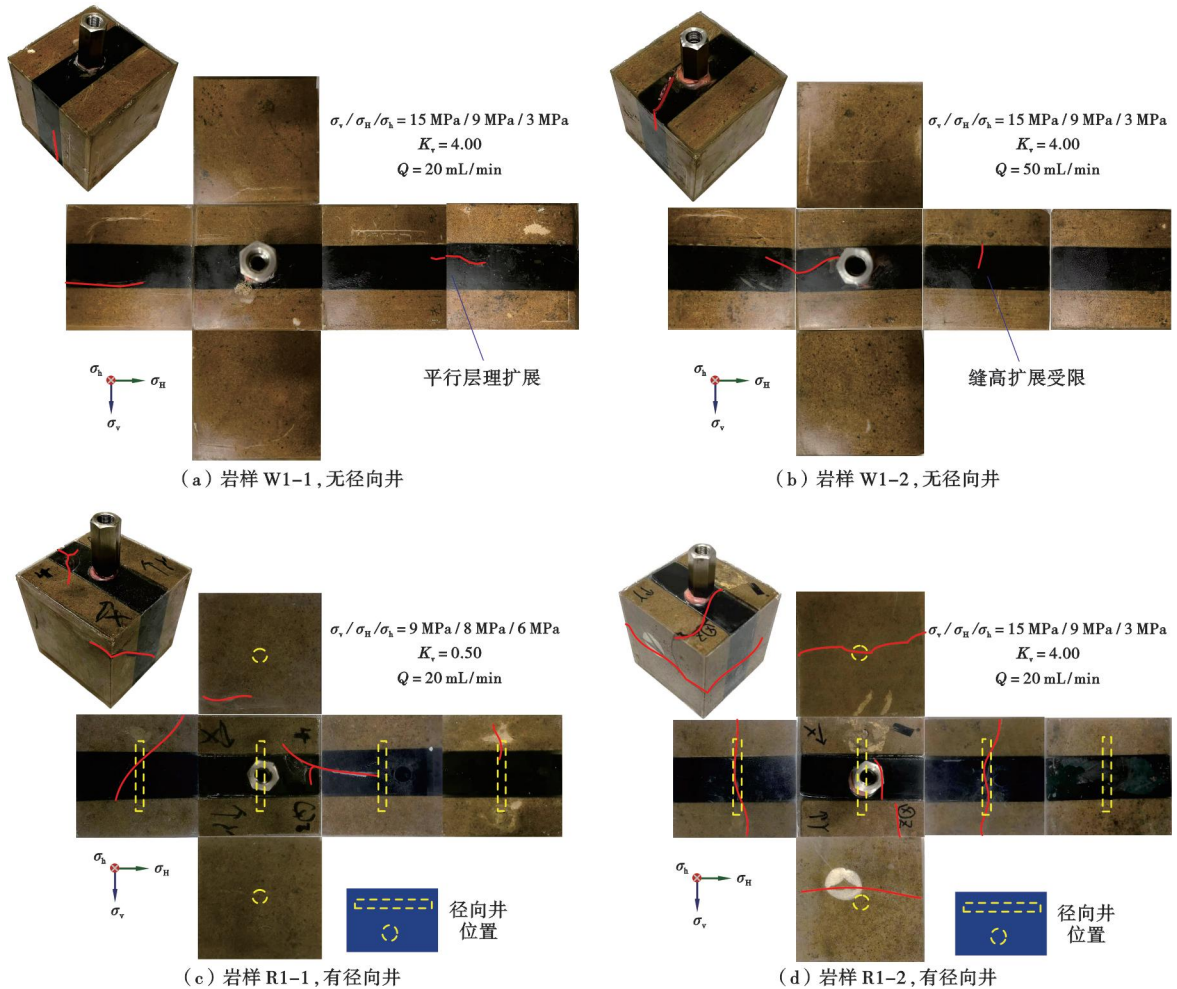


图6 有/无径向井情况下穿层压裂裂缝扩展模式对比

Fig. 6 Comparison of fracture propagation patterns with/without the presence of radial wellbores

平井压裂不具备该种特性,裂缝起裂及扩展消耗的水力能量大,穿层行为发生难度相对较高。因此,在多岩性叠置层系中实施径向井穿层压裂,可极大程度降低裂缝的穿层难度,提升裂缝纵向扩展高度,实现多个含油储集层纵向沟通。

2.2 穿层裂缝形态三维重构

为更加直观地观察径向井诱导下水力裂缝的扩展形态,对岩样 R1-2 的压后裂缝进行 CT 扫描,基于得到的压裂裂缝二维灰度图,调整颜色对图片进行对比增强,获得岩样不同截面位置的裂缝图片(图 7)。XY 平面 3 组切片垂直水平井方向,分别对应岩样底部、中部裸眼及水平井井口位置,其中底部及井口产生纵向穿层缝,但走向并不垂直最小水平主应力,这是由于水平井裸眼部分和径向井作用相似,使岩样产生局部应力集中,对裂缝具有一定的诱导作用,沿着裸眼方向扩展,继而发生局部穿层行为。井口位置的纵向裂缝为

非平面缝,在砂/页岩胶结弱面位置连通呈阶梯型扩展模式。以裂缝间连通传递水力能量为基本假设,可以判断阶梯穿层缝间存在胶结面起裂现象,而由于胶体透明的特点,因此滤失裂缝难以被 CT 识别和显示。根据力学测试结果(图 4),可以判断径向井胶结面位置以拉张破坏为主要起裂模式(界面抗拉强度 < 抗剪强度)。XY 平面中部切片显示了纵向主裂缝根端起裂情况,裂缝具有向两侧砂岩扩展趋势,后续与砂岩起裂缝连通。XZ 平面切片方向垂直径向井方向,分别为两侧径向井指端及裸眼段。其中两侧砂岩裂缝围绕径向井指端起裂,纵向扩展横断砂岩隔层。页岩裸眼段的纵向主裂缝走向与砂岩层一致,后续连通产生穿层行为。YZ 切片方向垂直水平最大主应力,最直观展示各层之间裂缝连通情况,无论是两侧还是中部的纵向主裂缝都完全贯穿 3 层岩样,形成典型的“双翼型”穿层缝。

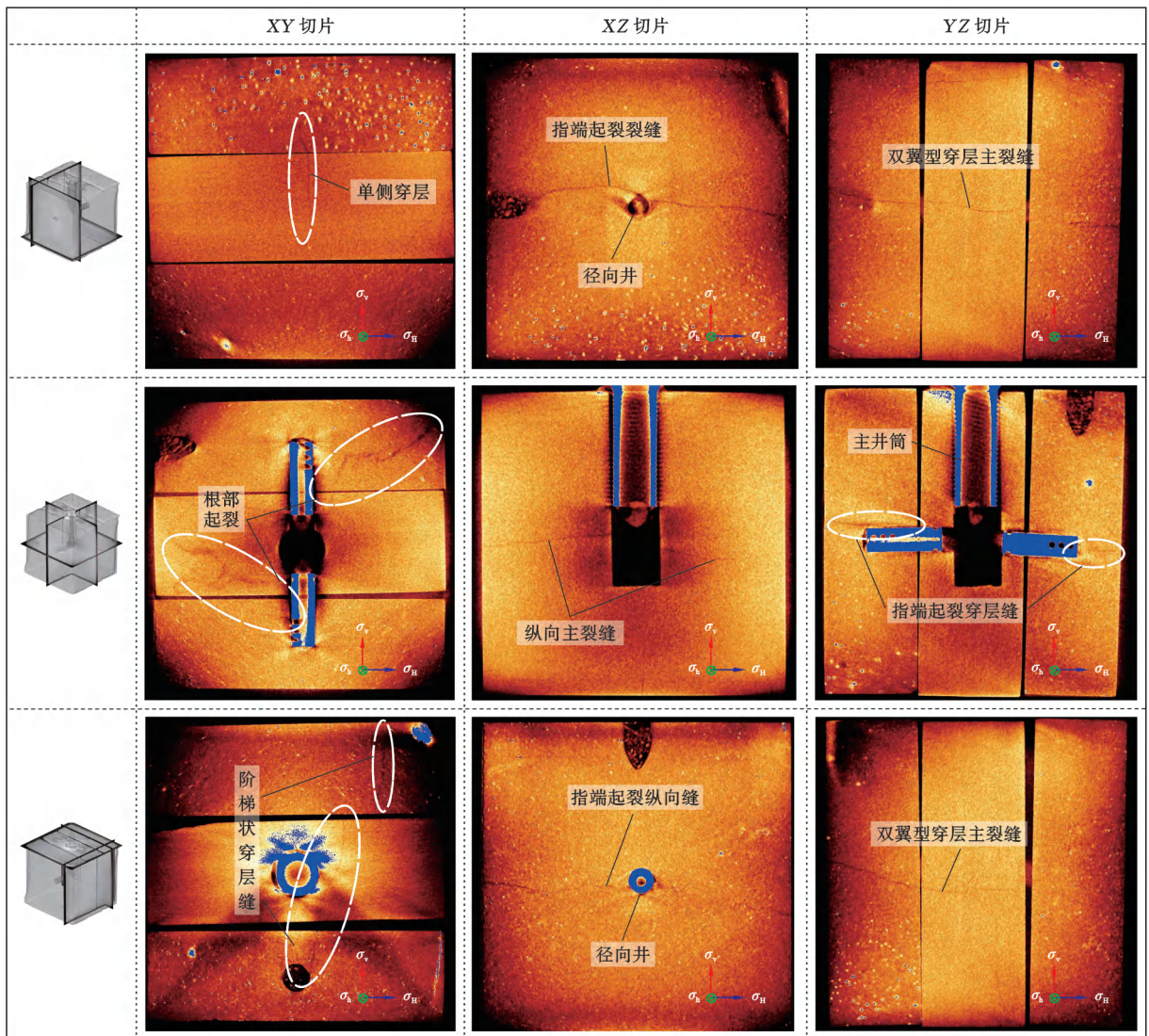


图 7 径向井穿层压裂裂缝二维 CT 切片

Fig. 7 Two-dimensional CT slides of fractures created by radial wellbore cross-layer fracturing

提取二维扫描切片,堆叠获得三维裂缝形态结构,以更直观地观察贯穿岩样内部裂缝起裂及扩展情况(图8)。图8中黄色为双翼型穿层主裂缝,砂岩和页岩层裂缝起裂位置不同,两侧砂岩为径向井指端起裂,而页岩层为径向井根端起裂,最终主裂缝交汇形成穿层纵向缝。图8中蓝色为页岩层次生裂缝,是水平井裸眼段起裂裂缝,纵向扩展至整个页岩层,但由于缺乏径向井引导作用,裂缝未能穿层,纵向缝高相对偏低。

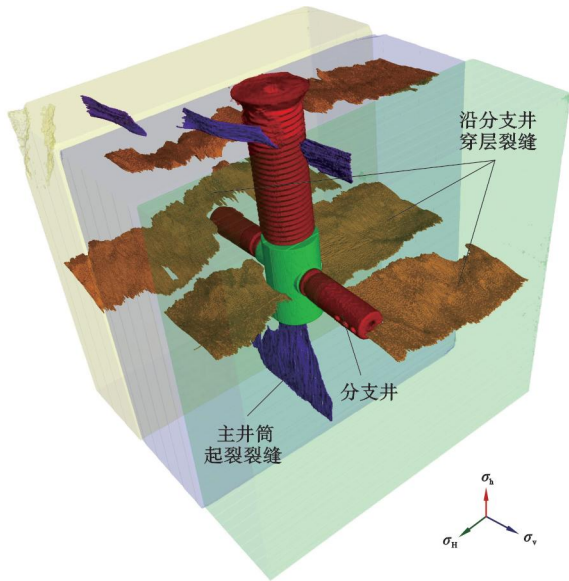


图8 径向井穿层压裂后岩样裂缝形态三维重构(岩样 R1-2)

Fig. 8 Three-dimensional reconstruction of fracture morphology of rock samples after radial wellbore cross-layer fracturing

2.3 关键参数影响规律

2.3.1 垂向应力差异的影响

垂向应力差异系数表征了垂向主应力与最小水平主应力的差异程度,是影响裂缝穿层的重要参数,直接决定了水力裂缝的扩展形态。为探究垂向应力差异系数对径向井穿层压裂裂缝扩展特征的影响规律,笔者设置了4组垂向应力差异梯度实验,即 K_v 分别为 0.50、0.67、1.00、1.33,岩样压后六视图和三维裂缝展布结果如图6(c)及图9所示,三维展布图中红色代表砂岩层中裂缝,蓝色代表页岩层中裂缝,黄色为胶结面滤失缝。当 $K_v = 0.50$ 时[图6(c)],裂缝由径向井根端起裂,纵向缝单侧穿层,页岩层存在一段水平缝;当 $K_v = 0.67$ 时[图9(a)],分支井引导裂缝穿层能力增强,径向井根端起裂的纵向双翼主裂缝均发生穿层行为;当 $K_v > 1.00$ 时[图9(b)~图9(c)],裂缝在径向井根端及指端均出现裂缝起裂,裂缝形态复杂化,同时出现穿层裂缝和跨层起裂裂缝,裂缝波及面积进一步提升。可以看出,随垂直应力差异系数增加,径向井由局

部起裂逐步过渡到根端/指端同时起裂,沿层理弱面的横向裂缝减少,裂缝由纵向单侧穿层扩展转变为两侧双翼穿层扩展,径向井诱导裂缝穿层效果增强,缝高得到明显提升。垂向应力差异对纵向裂缝影响穿层效果的内在机理在于,水力裂缝垂向扩展至砂岩/页岩交界面后,结构面是否发生剪切滑移与作用在结构面的有效正应力有关,垂向应力差系数越大,则作用在结构面的有效正压应力越大,界面越不易发生剪切滑移,水力裂缝越容易穿透扩展^[38]。

对于垂向多岩性叠置储层,径向井不仅可以诱导裂缝纵向穿层,同时还可能诱发裂缝跨层起裂,实现纵向多层系开发。为探究径向井诱导多岩性储层跨层起裂裂缝扩展特征,在3层物理模拟试件的基础上,预置了5层物理模拟试件,即岩样 R5-1—R5-3。开展了不同垂向应力差异系数下的3组对比实验(K_v 分别为 0.50、1.00 和 2.00),岩样压后裂缝的扩展形态如图10(a)~图10(c)所示。从岩样 R5-1[图10(a), $K_v = 0.50$]可以观察到,裂缝于径向井根端及指端同时起裂,两指端页岩层内裂缝走向不规则,形成复杂裂缝网络,隔层砂岩未发生起裂,中间层页岩主裂缝纵向扩展,各页岩层裂缝不沟通,径向井诱导裂缝发生跨层起裂;增加垂向应力差异系数至 $K_v = 1.00$ [图10(b)],岩样 R5-2 内水力裂缝为径向井根端及指端同时起裂,一侧页岩层裂缝与中间层页岩纵向沟通,隔层砂岩被打开,形成穿层缝,同时中间页岩层出现明显的沿层理面扩展的水平缝发育明显;当垂向应力差异系数达到 $K_v = 2.00$ 时,压后裂缝形态如图10(c)所示。裂缝纵向完全贯穿所有层系,横断整个岩样,缝网发育相对于前两者更为复杂,裂缝有效高度和沟通面积显著大于岩样 R5-1 和 R5-2。由于页岩油薄互层存在岩性交界天然弱面的地质特点,局部人工裂缝易于“阶梯”形式穿层扩展^[39]。因此,对于径向井连通的多岩性层系,低强度储层(页岩)优先起裂,垂向应力差异对于径向井诱导裂缝纵向扩展起到关键作用,随差异系数增大,裂缝由跨层起裂向各层同时起裂转变,突破高强度岩性界面。相较于3层岩样的单一裂缝,5层岩样次生裂缝发育明显,更易形成复杂裂缝网络。

2.3.2 注入排量的影响

排量是影响压裂裂缝穿层效果的重要参数。针对3层和5层物理模拟试件,分别开展了5 mL/min 和 20 mL/min 两种排量下的压裂对比实验(图11)。

对于3层物理模拟试件,在20 mL/min 的注入排量下[图11(a)],裂缝起裂位置为砂/页岩层的径向井根端及指端同时起裂,裂缝连通呈单翼型,发生单侧穿层行为;而在5 mL/min 的较低注入排量下[图11(b)],裂缝

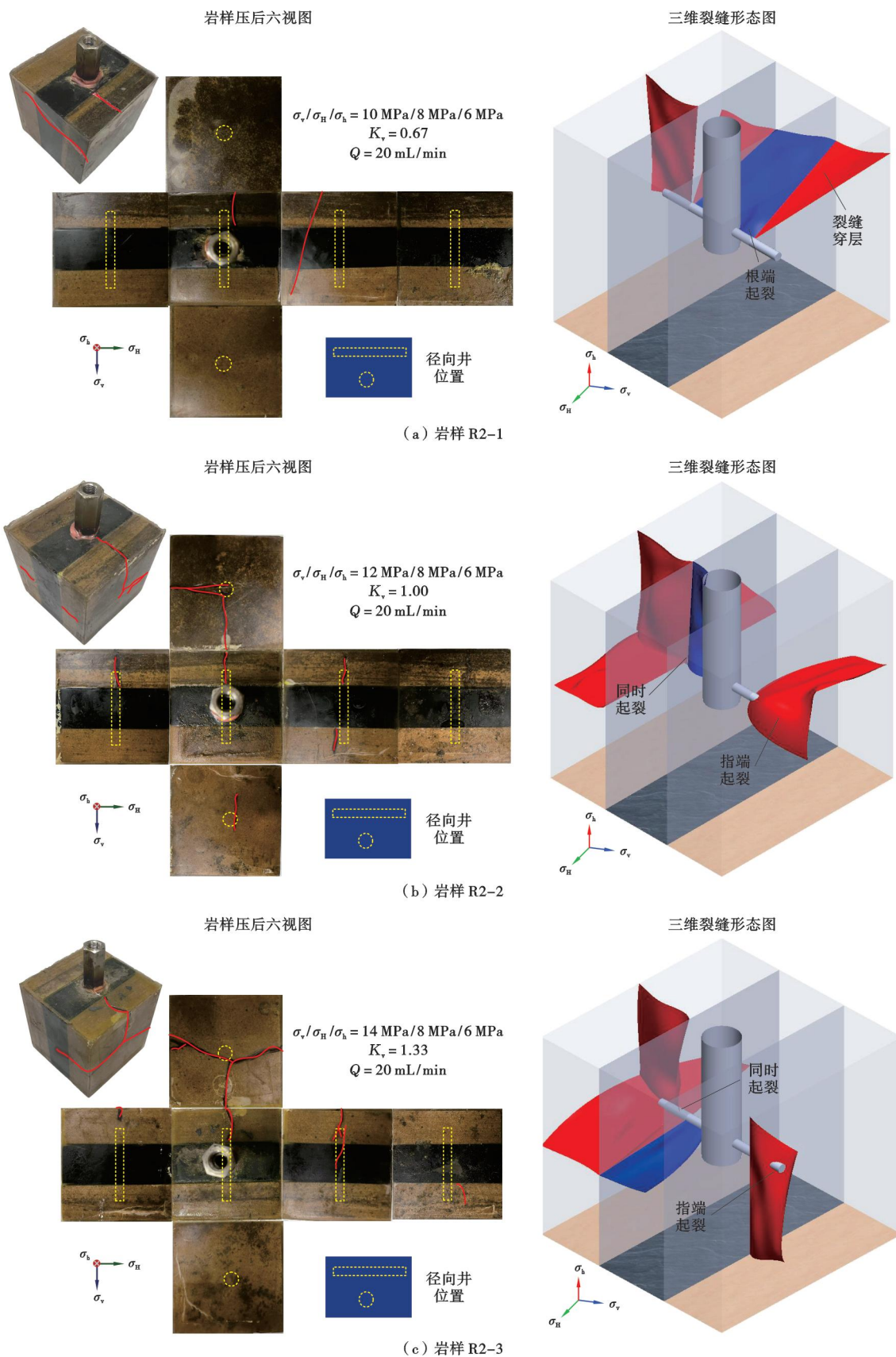


图 9 不同垂向应力下 3 层岩样径向井穿层压裂裂缝扩展形态

Fig. 9 Fracture propagation morphology of three-layer rock samples after radial wellbore cross-layer fracturing under different vertical stresses

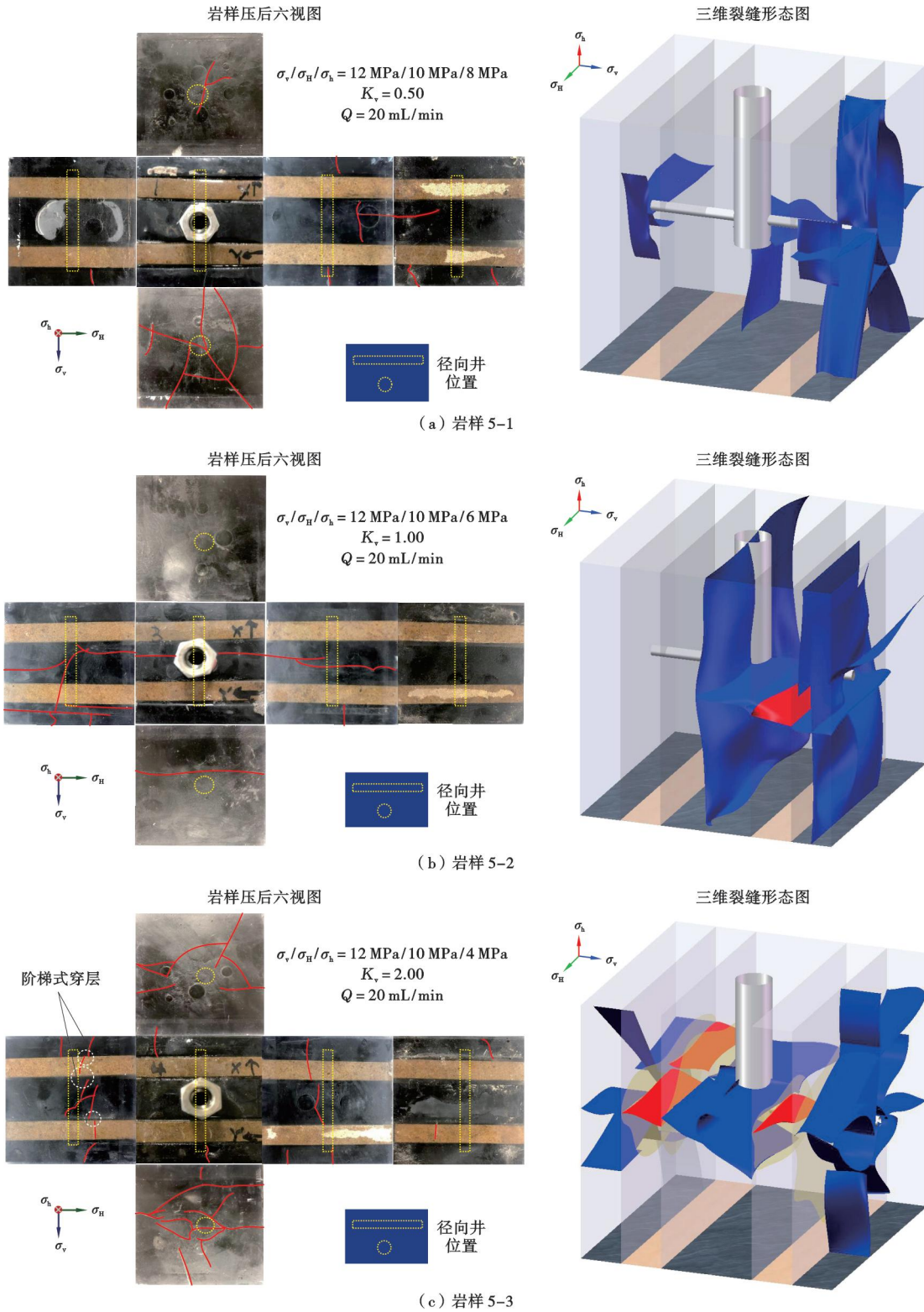


图 10 不同垂向应力差下 5 层岩样径向井穿层压裂裂缝扩展形态

Fig. 10 Fracture propagation patterns of five-layer rock samples in radial wellbore cross-layer fracturing under different vertical stress differences

由径向井根端起裂,沿层页岩层理面水平扩展,纵向缝高受限,未发生穿层。水力裂缝起裂及扩展形态差异在于,过低的排量使得压裂液在井筒内难以快速形成高压环境,而在页岩水平层理面内滤失量增加,裂缝于根端起裂水平扩展;而高排量下主井筒及分支井内憋

压迅速,富余的水力能量使径向井根端及指端应力集中显著,造成同时起裂并在径向井的诱导下连通呈单一主裂缝,由于滤失量降低导致水力能量耗散减少,裂缝纵向扩展范围提高。压裂液注入排量对裂缝扩展的影响规律在前人的数值模拟中也得到了验证^[40-41]。同样,

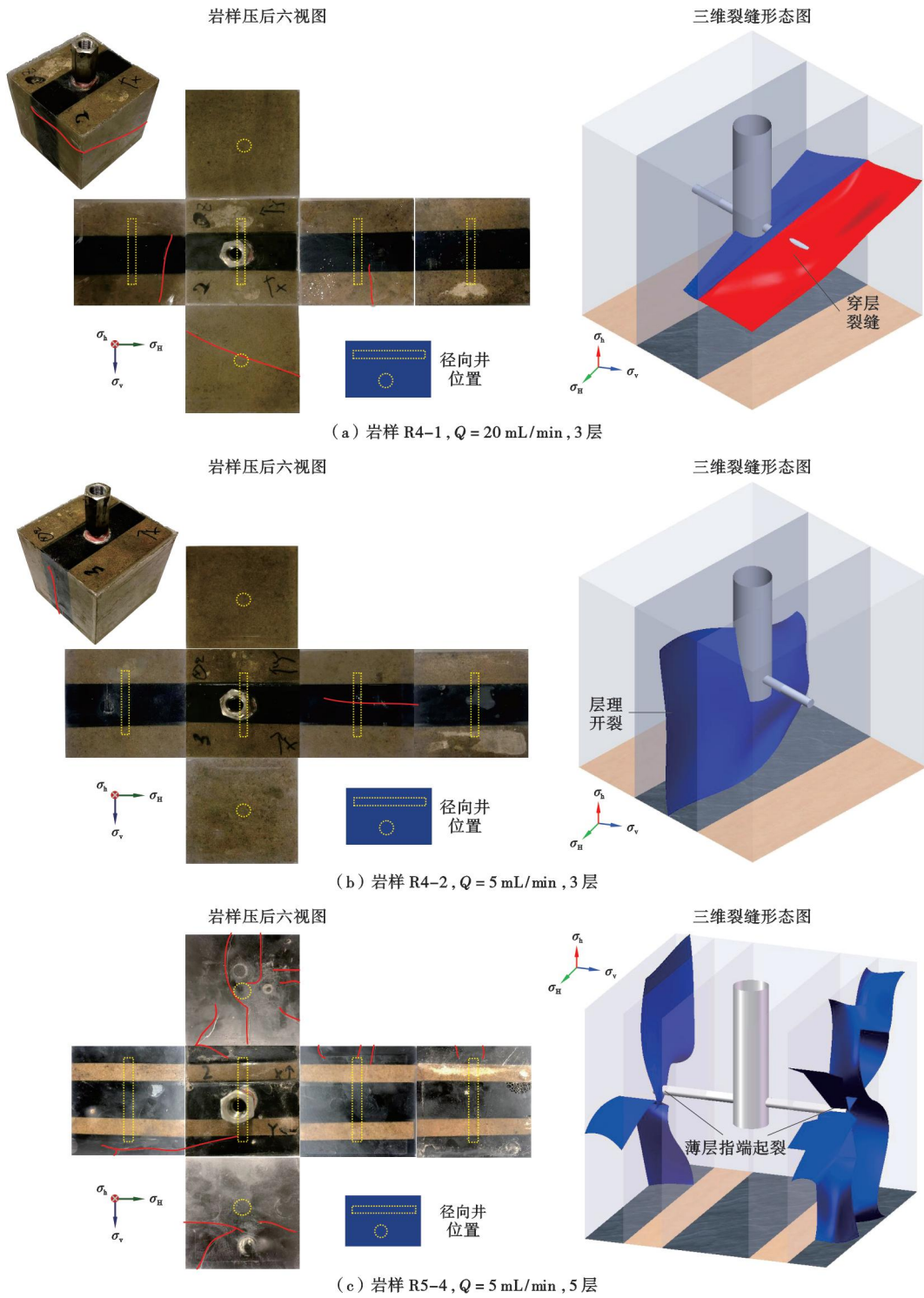


图 11 不同压裂液排量下 3 层和 5 层岩样压后裂缝扩展形态

Fig. 11 Fracture propagation morphology of three-layer and five-layer rock samples under different fracturing fluid displacement

对于 5 层物理模拟试件,当压裂液排量低至 5 mL/min 时,水力裂缝于两侧页岩较薄层径向井指端起裂,仅在两层页岩中扩展,难以打通隔层砂岩连通中间页岩层[图 11(c)].因此,在径向井的诱导作用下,小排量下裂缝以低强度储层跨层起裂为主,提高排量更有助于裂缝纵向延伸,实现穿层扩展,最大程度提升储集层的连通程度。

2.3.3 径向井长度的影响

为研究径向井长度对裂缝穿层效果的影响,笔者设计了 2 组径向井长度下的对比实验。在岩样 R1-1(径向井长度为 33.5 mm)的基础上缩短径向井长度至 23.5 mm (岩样 R3-1),其压后裂缝形态如图 12 所示。可以发现,不同于岩样 R1-1[图 6(c)]所形成的穿层裂缝,在较小的径向井长度下水力裂缝由径向井根端起裂,扩展至单侧砂岩,发

生穿层行为,而由于径向井长度的缩短,应力集中区域变小,诱导范围降低,纵向缝难以扩展至砂岩上表面。缩短径向井长度,在一定程度上降低了其诱导裂缝穿层扩展的能力。前人^[29]基于三维数值模型发现,径向井孔长与

裂缝有效延伸距离呈正相关,有助于提高径向井对于裂缝的引导效果,这与笔者的实验结果是一致的。因此,在实际工程当中,最大程度提升径向井孔眼长度更有利于提高径向井引导裂缝穿层效果,增大有效裂缝高度。

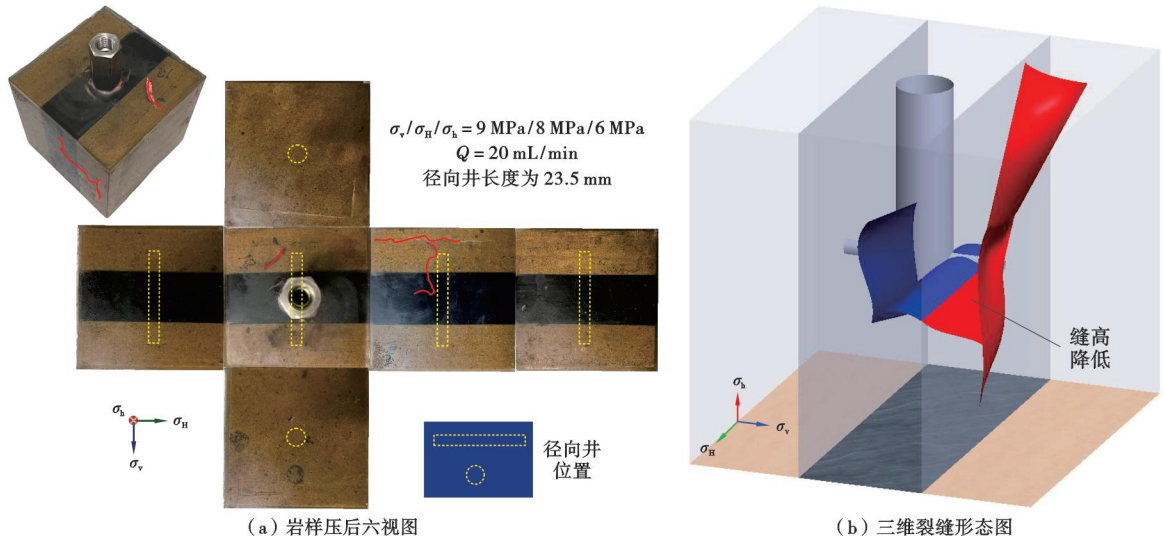


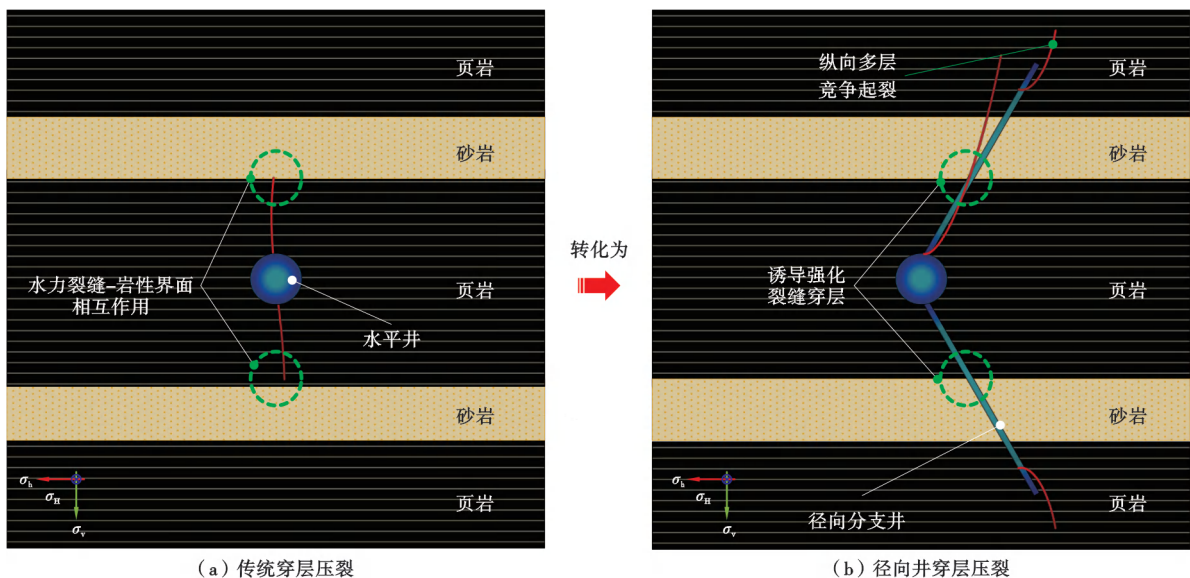
图 12 径向井长度对裂缝形态的影响(岩样 R3-1)

Fig. 12 Effect of radial wellbore length on fracture morphology

3 讨论

通过在岩体内钻孔引起地应力场扰动,是实现水力裂缝导控的重要手段。当孔眼轴心面为主要应力面时,流体内压作用下的轴心面方向将产生较强的应力叠加,轴心面交叉的井壁区域所受拉应力更大,更易于发生断裂^[42-43]。通过合理布置钻孔孔距、孔深和方位,可以达到控制压裂裂缝走向的目的,辅助裂缝突破原始地应力限制,促使其向有利目标方向延伸^[44-45],该方法在煤层瓦斯

增透等领域已具备现场应用^[46-48],为所提出的径向井穿层压裂方法的可行性提供了支撑。对于页岩油多岩性叠置储层,实施径向井压裂会极大降低裂缝的穿层扩展难度,同时诱导多层系竞争起裂,有利于提升储层纵向改造高度。不同于传统的穿层压裂方法,径向井穿层压裂实质上是“水力裂缝突破隔夹层/岩性界面”的问题转化为“径向井引导裂缝突破界面+纵向多层系竞争起裂”的复合问题,裂缝起裂及扩展过程涉及分支孔眼和岩性界面双重扰动,机理更为复杂、影响参数更多(图 13)。



(a) 传统穿层压裂

(b) 径向井穿层压裂

图 13 多岩性储层传统水力压裂和径向井压裂机理示意

Fig. 13 Schematic diagram of fracturing mechanisms of conventional hydraulic fracturing and radial well cross-layer fracturing

垂向应力差异及排量对径向井诱导裂缝穿层效果具有重要影响,为更加直观地展示上述因素的复合影响规律,根据上述实验结果汇总并整理形成了径向井诱导裂缝起裂扩展的示意图版(3层物理模拟实验,图14)。在较小排量下(5 mL/min),裂缝以根端起裂为主(紫色区域),伴随着页岩层理弱面的开启(蓝色虚线),诱导形成水平缝;提高排量到20 mL/min,当 $K_v \leq 0.50$ 时,裂缝仍优先于径向井根端起裂,该位置受主井筒和径向井双重应力集中效应影响,形成单侧纵向穿层裂缝,同时伴随着层理水平缝;增大垂向应力差异系数大于0.67时,径向井指端应力集中作用增强,导致高强

度砂岩发生同步起裂,裂缝垂向扩展能力显著提升,波及范围更广(红色面积),根端及指端裂缝在径向井的诱导下扩展相连,垂向上沟通了多个层系。由于笔者主要目标是研究径向井穿层压裂方法的可行性,重点关注多岩性叠置储层内径向井诱导裂缝穿层和跨层能力,因此仅聚焦于径向井垂直于主井筒的情况,而未针对径向井倾斜条件下裂缝穿层扩展特征开展研究。根据前人针对倾斜井筒条件下(定向井)水力压裂裂缝扩展的研究^[49],倾斜的分支井可能会造成裂缝迂曲度增强和缝内压力阻滞,从而对径向井导控裂缝穿层效果造成影响。

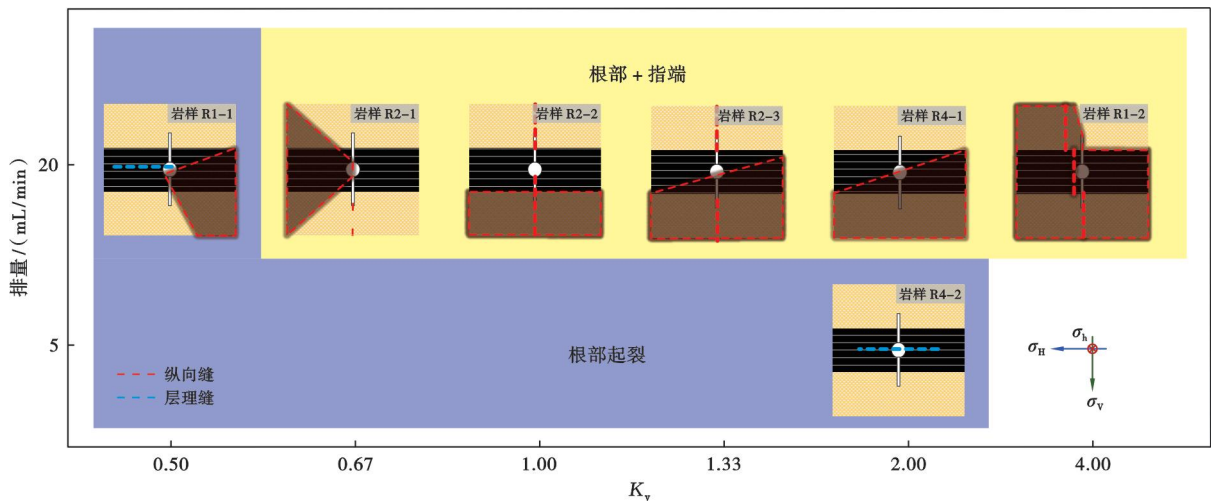


图14 垂向应力差异及排量对径向井诱导裂缝起裂扩展的影响示意

Fig. 14 Effects of vertical stress difference and displacement on initiation location of radial wellbore induced fractures

此外,在技术工艺方面,水力喷射超短半径径向水平井技术是实现径向井穿层压裂的基础。笔者团队前期针对径向井穿层压裂方法,研发了“半刚性管+磨料射流”的水力喷射微小井眼技术^[14],以刚性管代替高压软管、以磨料射流代替纯水力喷射,克服高压软管易于弯曲、无法承受轴向载荷和难以实现垂向钻进的弊端,突破了原技术仅能应用于垂直井的技术壁垒,开创了水力喷射多分支微小井眼技术水平井应用模式。

4 结论

(1) 径向井具有导向裂缝扩展和诱导裂缝纵向延伸穿层的特性。在多岩性叠置层系中实施径向井穿层压裂,可极大程度降低裂缝的穿层难度,提升裂缝纵向扩展高度,实现多个含油储集层纵向沟通。

(2) 垂向应力差异对裂缝起裂位置和纵向扩展穿层影响显著。随垂直应力差异系数增加,径向井由局部起裂逐步过渡到根端/指端同时起裂,沿层理弱面的横向裂缝减少,同时径向井诱导裂缝穿层效果增强,裂缝由跨层起裂向各层同时起裂转变,突破高强度岩性

界面,形成横断岩样的双翼穿层裂缝。

(3) 在径向井的诱导作用下,小排量注入压裂液,裂缝以低强度储层跨层起裂为主,提高排量更有助于裂缝纵向延伸,实现穿层扩展,最大程度提升储集层的连通程度。

(4) 减小径向井长度,会降低其诱导裂缝穿层的能力,在实际工程当中,建议最大程度提升径向井孔眼延伸长度,以提高径向井引导裂缝穿层效果,增大有效裂缝高度。

符号注释: K_v —垂向应力差异系数, $K_v = (\sigma_v - \sigma_h) / \sigma_h$; σ_v —垂向地应力, MPa; σ_h —水平最小主应力, MPa; σ_H —水平最大主应力, MPa; Q —排量, mL/min; R_o —镜质体反射率。

参考文献

[1] 金之钧,王冠平,刘光祥,等. 中国陆相页岩油研究进展与关键科学问题[J]. 石油学报,2021,42(7):821-835.

JIN Zhijun, WANG Guanping, LIU Guangxiang, et al. Research

- progress and key scientific issues of continental shale oil in China [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(7): 821-835.
- [2] 孙龙德, 刘合, 朱如凯, 等. 中国页岩油革命值得关注的十个问题 [J]. *石油学报*, 2023, 44(12): 2007-2019.
SUN Longde, LIU He, ZHU Rukai, et al. Ten noteworthy issues on shale oil revolution in China [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(12): 2007-2019.
- [3] 胡素云, 赵文智, 侯连华, 等. 中国陆相页岩油发展潜力与技术对策 [J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(4): 819-828.
HU Suyun, ZHAO Wenzhi, HOU Lianhua, et al. Development potential and technical strategy of continental shale oil in China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(4): 819-828.
- [4] 翁定为, 雷群, 管保山, 等. 中美页岩油气储层改造技术进展及发展方向 [J]. *石油学报*, 2023, 44(12): 2297-2307.
WENG Dingwei, LEI Qun, GUAN Baoshan, et al. Progress and development directions of reservoir stimulation techniques for shale oil and gas in China and the United States [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(12): 2297-2307.
- [5] 雷群, 翁定为, 熊生春, 等. 中国石油页岩油储集层改造技术进展及发展方向 [J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(5): 1035-1042.
LEI Qun, WENG Dingwei, XIONG Shengchun, et al. Progress and development directions of shale oil reservoir stimulation technology of China National Petroleum Corporation [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(5): 1035-1042.
- [6] 刘合, 匡立春, 李国欣, 等. 中国陆相页岩油完井方式优选的思考与建议 [J]. *石油学报*, 2020, 41(4): 489-496.
LIU He, KUANG Lichun, LI Guoxin, et al. Considerations and suggestions on optimizing completion methods of continental shale oil in China [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(4): 489-496.
- [7] 陈作, 刘红磊, 李英杰, 等. 国内外页岩油储层改造技术现状及发展建议 [J]. *石油钻探技术*, 2021, 49(4): 1-7.
CHEN Zuo, LIU Honglei, LI Yingjie, et al. The current status and development suggestions for shale oil reservoir stimulation at home and abroad [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2021, 49(4): 1-7.
- [8] 朱相羽, 段宏亮, 孙雅雄. 苏北盆地高邮凹陷古近系陆相页岩油勘探突破及意义 [J]. *石油学报*, 2023, 44(8): 1206-1221.
ZHU Xiangyu, DUAN Hongliang, SUN Yaxiong. Breakthrough and significance of Paleogene continental shale oil exploration in Gaoyou sag, Subei Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(8): 1206-1221.
- [9] 闫林, 陈福利, 王志平, 等. 我国页岩油有效开发面临的挑战及关键技术研究 [J]. *石油钻探技术*, 2020, 48(3): 63-69.
YAN Lin, CHEN Fuli, WANG Zhiping, et al. Challenges and technical countermeasures for effective development of shale oil in China [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(3): 63-69.
- [10] 管保山, 刘玉婷, 梁利, 等. 页岩油储层改造和高效开发技术 [J]. *石油钻采工艺*, 2019, 41(2): 212-223.
GUAN Baoshan, LIU Yuting, LIANG Li, et al. Shale oil reservoir reconstruction and efficient development technology [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2019, 41(2): 212-223.
- [11] 张士诚, 李四海, 邹雨时, 等. 页岩油水平井多段压裂裂缝高度扩展试验 [J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2021, 45(1): 77-86.
ZHANG Shicheng, LI Sihai, ZOU Yushi, et al. Experimental study on fracture height propagation during multi-stage fracturing of horizontal wells in shale oil reservoirs [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2021, 45(1): 77-86.
- [12] 侯冰, 武安安, 常智, 等. 页岩油储层多甜点压裂裂缝垂向扩展试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(7): 1322-1330.
HOU Bing, WU An'an, CHANG Zhi, et al. Experimental study on vertical propagation of fractures of multi-sweet spots shale oil reservoir [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(7): 1322-1330.
- [13] 谭鹏. 多岩性组合层状储层水力裂缝垂向扩展的力学行为研究 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019.
TAN Peng. Mechanical behavior of hydraulic fracture vertical propagation for layered formation with multi-lithology combination [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2019.
- [14] 夏磊. 层状岩体力学特性及水力压裂应力阴影效应研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2019.
XIA Lei. Research on mechanical characteristics and stress shadow effect in hydraulic fracturing of layered rock masses [D]. Wuhan: Wuhan University, 2019.
- [15] 王焱钊, 侯冰, 王栋, 等. 页岩油多储集层穿层压裂缝高扩展特征 [J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(2): 402-410.
WANG Yizhao, HOU Bing, WANG Dong, et al. Features of fracture height propagation in cross-layer fracturing of shale oil reservoirs [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(2): 402-410.
- [16] EL RABAA W. Hydraulic fracture propagation in the presence of stress variation [R]. SPE-16898-MS, 1987.
- [17] 孟勇, 贾庆升, 张濂源, 等. 东营凹陷页岩油储层层间干扰及裂缝扩展规律研究 [J]. *石油钻探技术*, 2021, 49(4): 130-138.
MENG Yong, JIA Qingsheng, ZHANG Liaoyuan, et al. Research on interlayer interference and the fracture propagation law of shale oil reservoirs in the Dongying sag [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2021, 49(4): 130-138.
- [18] 侯冰, 常智, 武安安, 等. 吉木萨尔凹陷页岩油密切割压裂多簇裂缝竞争扩展模拟 [J]. *石油学报*, 2022, 43(1): 75-90.
HOU Bing, CHANG Zhi, WU An'an, et al. Simulation of competitive propagation of multi-fractures on shale oil reservoir multi-clustered fracturing in Jimsar sag [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(1): 75-90.
- [19] 王永辉, 刘玉章, 丁云宏, 等. 页岩层理对压裂裂缝垂向扩展机制研究 [J]. *钻采工艺*, 2017, 40(5): 39-42.
WANG Yonghui, LIU Yuzhang, DING Yunhong, et al. Research on influence of shale bedding to vertical extension mechanism of hydraulic fracture [J]. *Drilling & Production Technology*, 2017, 40(5): 39-42.
- [20] 宋晨鹏, 卢义玉, 贾云中, 等. 煤岩交界面对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(9): 1340-1345.
SONG Chenpeng, LU Yiyu, JIA Yunzhong, et al. Effect of coal-rock interface on hydraulic fracturing propagation [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2014, 35(9): 1340-1345.
- [21] TANG Jizhou, WU Kan, ZENG Bo, et al. Investigate effects of weak bedding interfaces on fracture geometry in unconventional reservoirs [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*,

- 2018,165:992-1009.
- [22] BALCH R S, RUAN Tongjun, SAVAGE M, et al. Field testing and validation of a mechanical alternative to radial jet drilling for improving recovery in mature oil wells[R]. SPE-180410-MS, 2016.
- [23] 李根生, 黄中伟, 李敬彬. 水力喷射径向水平井钻井关键技术研究[J]. 石油钻探技术, 2017, 45(2): 1-9.
LI Gensheng, HUANG Zhongwei, LI Jingbin. Study of the key techniques in radial jet drilling [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017, 45(2): 1-9.
- [24] 李根生, 黄中伟, 田守增, 等. 水力喷射径向钻孔与压裂一体化方法: CN103883293B[P]. 2017-02-15.
LI Gensheng, HUANG Zhongwei, TIAN Shouceng, et al. Integrated method of hydraulic jet radial drilling and fracturing: CN103883293B [P]. 2017-02-15.
- [25] 曲占庆, 王涛, 郭天魁, 等. 平面多径向井水射流辅助压裂构造多缝机理[J]. 断块油气田, 2019, 26(3): 404-408.
QU Zhanqing, WANG Tao, GUO Tiankui, et al. Mechanism of realizing multiple fractures by water jet assisted fracturing for planar multi-radial wells[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2019, 26(3): 404-408.
- [26] 田雨, 曲占庆, 郭天魁, 等. 径向井引导水力压裂裂缝定向扩展技术[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(20): 154-159.
TIAN Yu, QU Zhanqing, GUO Tiankui, et al. Theoretical research on radial wells orientating hydraulically created fracture directional extended [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(20): 154-159.
- [27] 田守增, 黄中伟, 李根生, 等. 径向井复合脉动水力压裂煤层气储层解堵和增产室内实验[J]. 天然气工业, 2018, 38(9): 88-94.
TIAN Shouceng, HUANG Zhongwei, LI Gensheng, et al. Laboratory experiments on blockage removing and stimulation of CBM reservoirs by composite pulsating fracturing of radial horizontal wells[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(9): 88-94.
- [28] 胡胜勇. 水力喷射钻孔定向压裂技术试验研究[J]. 钻采工艺, 2014, 37(5): 59-62.
HU Shengyong. Experimental study of hydraulic jet drilling and directional fracturing technology [J]. Drilling & Production Technology, 2014, 37(5): 59-62.
- [29] 刘普国. 水力喷射钻孔后多裂缝压裂技术研究[J]. 化学工程与装备, 2015(12): 144-146.
LIU Pugu. Research on multi-fracture fracturing technology after hydraulic jet drilling [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2015(12): 144-146.
- [30] ABASS H H, SOLIMAN M Y, TAHINI A M, et al. Oriented fracturing: a new technique to hydraulically fracture an openhole horizontal well[R]. SPE-124483-MS, 2009.
- [31] 曲占庆, 李小龙, 李建雄, 等. 基于扩展有限元法的多径向井压裂裂缝形态[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2018, 42(1): 73-81.
QU Zhanqing, LI Xiaolong, LI Jianxiong, et al. Crack morphology of multiple radial well fracturing based on extended finite element method [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2018, 42(1): 73-81.
- [32] 陈宾, 展勤建. 立井快速揭煤中径向井压裂增透技术[J]. 煤矿安全, 2017, 48(11): 76-79.
CHEN Bin, ZHAN Qinjian. Fracturing and permeability increasing technology for radial well in rapid unconverging coal of shaft [J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(11): 76-79.
- [33] 崔传智, 孙莲婷, 单高军, 等. 多层合采油井的多措施同步优化方法[J]. 石油学报, 2023, 44(8): 1356-1364.
CUI Chuazhi, SUN Lianting, SHAN Gaojun, et al. Multi-measure simultaneous optimization method for multi-layer commingled producing wells [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(8): 1356-1364.
- [34] 李振华, 陈占军, 李向阳. 鄂尔多斯盆地庆阳地区长7页岩岩石力学参数研究[J]. 陇东学院学报, 2021, 32(2): 45-48.
LI Zhenhua, CHEN Zhanjun, LI Xiangyang. Rock mechanics parameters of Chang 7 shale in Qingyang area in Ordos Basin [J]. Journal of Longdong University, 2021, 32(2): 45-48.
- [35] 高杰, 侯冰, 谭鹏, 等. 砂煤互层水力裂缝穿层扩展机理[J]. 煤炭学报, 2017, 42(S2): 428-433.
GAO Jie, HOU Bing, TAN Peng, et al. Propagation mechanism of hydraulic fracture in sand coal interbedding [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(S2): 428-433.
- [36] 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): 45-48.
LIU Gonghui, PANG Fei, CHEN Zhixi. Development of scaling laws for hydraulic fracture simulation tests [J]. Journal of China University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2000, 24(5): 45-48.
- [37] 王天宇, 郭肇权, 李根生, 等. 径向井立体压裂裂缝扩展数值模拟[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(2): 1-11.
WANG Tianyu, GUO Zhaoquan, LI Gensheng, et al. Numerical simulation of three-dimensional fracturing fracture propagation in radial wells [J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(3): 613-623.
- [38] 周健, 陈勉, 金衍, 等. 裂缝性储层水力裂缝扩展机理试验研究[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.
- [39] 邹雨时, 石善志, 张士诚, 等. 薄互层型页岩油储集层水力裂缝形态与支撑剂分布特征[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(5): 1025-1032.
ZOU Yushi, SHI Shanzhi, ZHANG Shicheng, et al. Hydraulic fracture geometry and proppant distribution in thin interbedded shale oil reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(5): 1025-1032.
- [40] 李小龙, 李建雄, 王涛, 等. 基于数值模拟的径向井压裂裂缝形态[J]. 大庆石油地质与开发, 2018, 37(3): 90-95.
LI Xiaolong, LI Jianxiong, WANG Tao, et al. Crack morphology of the radial well fracturing based on the numerical simulation [J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2018, 37(3): 90-95.
- [41] 褚春波, 郭权, 黄小云, 等. 有限元分析径向水力压裂裂缝扩展影响因素[J]. 油气井测试, 2018, 27(2): 59-66.
CHU Chunbo, GUO Quan, HUANG Xiaoyun, et al. Finite-element analysis on influencing factors for propagation of fractures induced in radial jet hydraulic fracturing [J]. Well Testing, 2018, 27(2): 59-66.