

致密储层体积压裂作用范围及裂缝分布模式

——基于压裂后实际取心资料

牛小兵^{1,2},冯胜斌^{1,2},尤源^{1,2},梁晓伟^{1,2},辛红刚^{1,2},谈卫东^{1,2},李廷艳^{1,2},任继胜³

(1. 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院,陕西西安710018; 2. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室,陕西西安710018;

3. 中国石油集团渤海钻探工程有限公司第二录井分公司,河北任丘062550)

摘要: 体积压裂在地层中的有效作用范围和压裂缝特征是非常规油气勘探、开发非常关注的问题。本文依据长庆油田在鄂尔多斯盆地致密油试验区完钻的取心井岩心资料、测井资料和分析化验资料,对经大规模体积压裂后储层中产生的人工压裂缝进行了识别和表征,进而分析了致密储层体积压裂改造区人工裂缝发育特征,探讨了体积压裂的有效作用范围、压裂缝的空间分布等关键问题。观察结果表明,X233致密油试验区长7段体积压裂后油层段块状砂岩中发育长度0.13 m近垂直的张性微裂缝,邻近长度1.49 m油层见大量层理缝顺层或斜交延伸,油气外渗显著,为压裂改造后形成的人工缝。综合分析认为,长7段致密油层体积压裂后,由有限数量的主缝、压裂影响形成的大量微裂缝及受压裂影响延伸或扩展的层理缝共同构成了改造后储层的裂缝特征;现阶段技术条件下,体积压裂改造区宏观裂缝网络扩展范围有限,微裂缝分布较广,油层剩余油饱和度依然很高,表明致密油藏体积压裂效果还有进一步优化的空间。

关键词: 微裂缝;压裂缝;体积压裂;储层;致密油;延长组长7段;鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE357

文献标识码: A

Fracture extension and distribution pattern of volume fracturing in tight reservoir: An analysis based on actual coring data after fracturing

Niu Xiaobing^{1,2}, Feng Shengbin^{1,2}, You Yuan^{1,2}, Liang Xiaowei^{1,2}, Xin Honggang^{1,2},Dan Weidong^{1,2}, Li Tingyan^{1,2}, Ren Jisheng³

(1. Exploration and Development Research Institute of Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an, Shaanxi, 710018, China;

2. National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low-Permeability Oil & Gas Fields, Xi'an, Shaanxi 710018, China;

3. No. 2 Mud Logging Branch Company, CNPC Bohai Drilling Engineering Co., Ltd., Renqiu, Hebei, 062550, China)

Abstract: The extension and distribution of hydraulic fractures in stimulated reservoir volume (SRV) after volume fracturing are the key for unconventional oil and gas exploration and development. The artificial fractures created in reservoirs after volume fracturing were identified and characterized based on the actual coring data, logging data and laboratory data of the coring wells completed in the tight oil pilot area of the Ordos Basin. Subsequently, the development characteristics of artificial fractures in the simulated reservoir volume (SRV) were analyzed, and the effective extension and spatial distribution of the hydraulic fractures were discussed. The results show that under volume fracturing, the nearly vertical extensional micro-fractures of 0.13 m in length were created in the oil-bearing massive sandstones in the Chang 7 of the tight oil pilot zone X233, and many bedding-parallel or -crossing fractures were observed in oil layers about 1.49 m away from the operational area. Hydrocarbon extravasation along these fractures is significant, indicating that they are the artificial fractures generated by fracturing. By comprehensive analysis, we found that a hydraulic fracture network consists of limited number of main fractures, a large number of micro-fractures generated and bedding-parallel fractures extended or expanded by fracturing. Meanwhile, the extension range of macro-fracture network in the SRV is limited, but the micro-fractures are widely developed, and the remaining oil saturation of the reservoir stays high, all of which indicate that there

收稿日期:2019-02-15;修订日期:2019-03-27。

第一作者简介:牛小兵(1977—),男,高级工程师,低渗透-致密油气田勘探和评价。E-mail: nxb_cq@petrochina.com.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05046-005);中国石油天然气股份有限公司重大科技专项(2016E-0501)。

is still room to optimize the volume fracturing technology for tight oil reservoir.

Key words: micro-fracture, hydraulic fracture, volume fracturing, reservoir, tight oil, the 7th member of the Yanchang Formation, Ordos Basin

非常规油气勘探、开发的成功得益于采用大规模体积压裂(体积改造)有效地“解放”了致密储层^[1-3]。一般认为,储层改造体积越大,形成的有效裂缝网络范围越大,致密(页岩)油产量就越高^[1]。近年来,压裂技术的重要发展方向是不断寻求有效的措施来增大改造体积^[1]。目前,增大改造体积主要通过加大压裂规模,诱导裂缝转向,优化压裂设计参数,如:增加簇数或减小压裂缝间距等形成复杂缝网来实现。实际地层的改造体积及改造后储层中裂缝的分布情况则需要通过压裂效果检测得出^[1,4]。目前,压裂效果检测最直观的方法就是井下微地震方法^[5],获得压裂缝的高度、宽度、改造体积等重要参数。而实际储层中的压裂缝是否和微地震解释的一样,也没有实物证据。近年来,有研究表明,通过井下微地震监测解释出的压裂改造范围^[6]过于乐观,一些微地震响应点实际并没有产生裂缝,只是检测器接收到了微地震声波信号。也有研究认为,含支撑剂的压裂缝长度只有微地震解释得到的水力缝长^[7]一半左右。此外,普遍认为体积压裂后形成的压裂缝主要是复杂的宏观缝^[8],甚至认为通过体积压裂形成了大量具有支撑剂支撑的人工裂缝网络。那么,实际地层中的压裂缝究竟如何,对于合理优化压裂设计,判断压裂后的储层特征,分析油藏动用范围和效果,确定单井控制储量等方面都具有重要的指导意义^[1,9,10]。基于以上考虑,长庆油田在致密油试验区针对不同的压裂井型,部署了两种方式的取心井,依据实际取心资料和详细的测试分析来研究压裂改造区压裂缝的类型、体积压裂有效作用范围和油藏动用情况等。本文正是基于这些实际取心井观测及研究的成果,并结合测井、岩石分析测试等资料深入分析体积压裂改造后的储层裂缝发育特征,探讨压裂缝的有效作用范围,分析压裂缝分布模式等,以期对相关研究及生产部署提供依据。

1 试验井地质概况和取心井的部署

1.1 试验区地质特征

鄂尔多斯盆地中生界延长组长7段发育陆相致密油(页岩油)^[11-16],其中陇东地区主要发育重力流成因的致密砂岩油,陕北地区主要发育三角洲前缘

成因的致密砂岩油(图1a)。2011年以来,长庆油田针对长7段致密油开展了体积压裂试验攻关^[2],早期在陕北地区开展的直井体积压裂试验,随后在陇东地区开展的水平井体积压裂试验,均取得了较好的效果,单井产量大幅度提高,且有一定时间的稳产期,实现了致密油的有效动用^[17-19]。2010~2011年,陕北姬塬地区A83井区(图1a)开展的定向井滑溜水缝网压裂试验,初步见到效果。2011~2012年,在陇东地区的X233井区实施的10口水平井,水平段平均长度1500m,开展了速钻桥塞分段多簇压裂、不同改造体积及改造参数等攻关试验,最终单井平均试油日产量超过100t,开创了致密油有效提高单井产量的新途径,被列为中国石油首个致密油水平井技术攻关示范区(图1a)。目前,X233试验区10口水平井已连续生产7~8年,初期平均单井日产油13t,已有6口井单井累计产油突破 1×10^4 t,3口井突破 2×10^4 t,最高超过 3×10^4 t,呈现出良好的稳产潜力。虽然试验取得了较好的效果,但对于致密油地质研究及储层改造来说,关切的问题是:大规模体积压裂作用范围究竟有多大,真实地层中的压裂缝如何分布,目前的压裂方法能否实现油藏充分改造和动用。围绕这些问题,2017年,长庆油田选择了致密油试验区,部署了两口不同类型的取心井,来获取相关研究资料:在陇东地区的X233试验区部署了YJ井(直井),获取水平井体积压裂后的储层岩心;而在陕北地区的A83试验区部署了AJ井(水平井),获取直井体积压裂后的储层岩心。

1.2 压裂改造方法及监测结果

陇东地区X233试验区的10口水平井采用了不同的压裂工艺和参数(表1,图1b—c)。YP1、YP2采用水力喷射分段多簇压裂,两口井均为13段26簇压裂,其中YP1井第7、8、9、10段与YP2井第6、7、8、9段同步压裂。YP3井、YP4井、YP5井,采用水力喷射分段多簇压裂工艺,交错布缝,单井水平段改造7~8段(2簇/段),单段入地液量600~700m³,排量6.0~8.0m³/min,详细的压裂施工参数见表1。

在这些井压裂施工的同时,通过部署的监测井(同时也是导眼井和后期开发的注水井)YC1、YC2、YC3井对YP1和YP2井压裂效果进行监测,结果显示裂缝

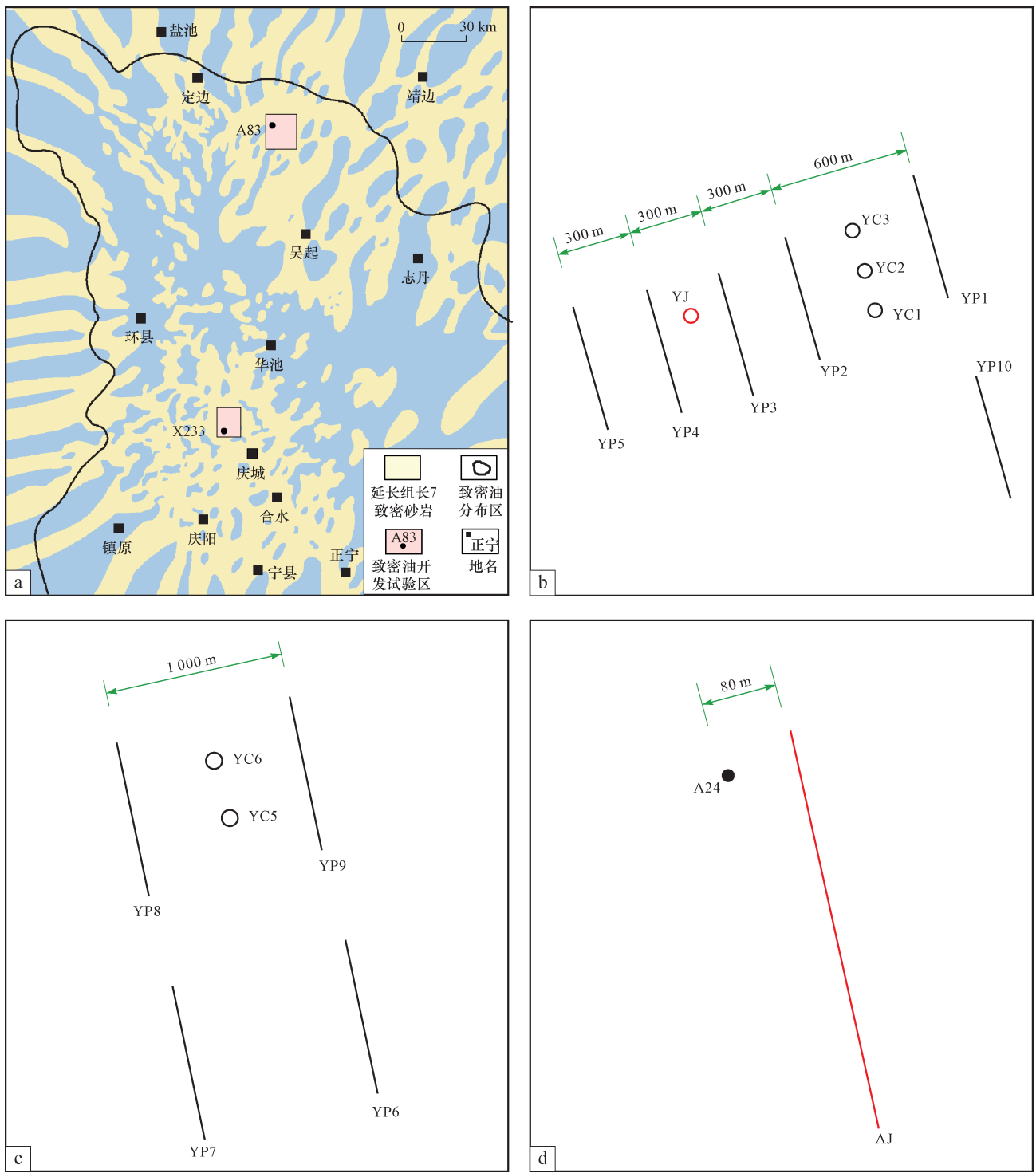


图1 鄂尔多斯盆地致密油试验区位置及井位分布

Fig.1 The location of the tight oil pilot areas and relevant wells in Ordos Basin

(图中红色显示的井为取心井;黑色显示为采油井圈及井轨迹;蓝色显示为射孔段的延伸线;绿色显示为井距标注线。)

主要呈带状分布(图2),平均裂缝半长200~300 m,缝网宽度80~110 m,缝高70~80 m。YP3井、YP4井、YP5井压裂时微地震监测也显示,裂缝主要呈带状展布,裂缝半长主要为150~200 m,缝网宽度为30~60 m,缝高为150~170 m。

为了对比分析方便,在此也介绍一下陕北地区A83试验区的直井压裂参数。典型采油直井A24井的压裂参数如下:加砂50 m³,入地液量222.9 m³,砂比25%,排量2.0 m³/min,通过微地震监测,压裂缝也是带状展布(图2),解释改造体积达到了310×81×42 m。

表1 鄂尔多斯盆地X233试验区压裂参数及试油效果

Table 1 Statistical table of fracturing parameters and production test results of X233 pilot area, Ordos Basin

序号	井号	水平段长/m	压裂工艺	压裂参数					裂缝解释结果				试油效果
				压裂段/簇	加砂/ m ³	入地液/ m ³	砂比/ %	排量/(m ³ · min ⁻¹)	监测井	平均裂缝 半长/m	缝网 宽度/m	缝高/ m	
1	YP1	1 500	水力喷射 分段多簇	13段26簇	519.9	7 794.4	9.3	6.3	YC1、YC2、 YC3	257	110	72	1 24.51
2	YP2	1 500		13段26簇	515.1	7 472.1	9.5	6.2		272	89	78	103.11
3	YP3	1 500	交错布缝 水力喷射 分段多簇 环空加砂		483.4	6 559.5	10.5	6.0	YP4	143	48	163	132.60
4	YP4	1 500		7段~8段 14~16簇	438.8	7 652.8	8.5	6.0		162	34	159	154.20
5	YP5	1 500			438.5	5 898.5	8.8	6.0		185	62	168	140.80
6	YP7	1 500	大排量体 积压裂	8段39簇	1 488.3	13 611.4	14.3	7.6	YC5	—	—	—	136.80
7	YP8	1 500		8段39簇	1 447.8	12 582.2	14.2	7.5		453	84	72	151.51
8	YP6	1 500		9段44簇	1 274.0	12 875.8	13.7	15.0		285	122	45	142.20
9	YP9	1 500		8段39簇	1 019.2	10 270.4	14.3	15.0		341	140	55	128.40
10	YP10	1 500	密集型体积压裂	21段42簇	1 058.0	16 047.0	8.8	6.0	—	—	—	—	184.05
平均值	—	1 500	—	10段	868.30	10 076.41	11.19	8.16	—	—	—	—	139.82

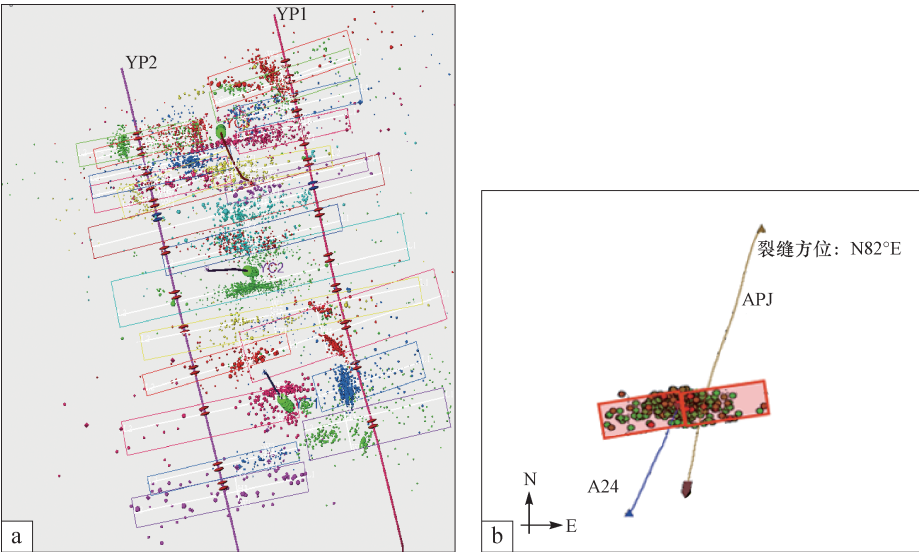


图2 鄂尔多斯盆地致密油试验区直井和水平井体积压裂微地震监测

Fig. 2 Micro-seismic monitoring of volume fracturing in vertical and horizontal wells in tight oil pilot area, Ordos Basin

a. YP1与YP2井压裂微地震监测;b. A24井压裂微地震监测结果

1.3 取心井部署及实际取心情况

设计取心井井位时主要考虑以下因素:1)取心井反映油藏代表性特征,且区块地质资料较为齐全;2)压裂方式为大规模体积压裂;3)生产动态符合现阶段衰竭特征,对试验区正常生产不构成影响;4)对邻井的水平井(或直井)井距、储量控制范围和采出程度综合对比优选;5)考虑压裂参数和微地震裂缝监测结果;6)地面条件符合现场施工要求;7)兼顾检查井后期用途等。最终,在陇东地区X233试验区YP3井和YP4井中间部署了一口评价井——YJ井(直井)(图1b)。该井距离邻

近的两口水平井井距基本相等,约为150 m,截止部署取心井前,邻近的两口水平井单井日产油1~2 t/d。YJ井设计在长7段连续取心,其中油层段密闭取心。2017年10月YJ井完钻,在长8段顶部到长6段底部连续取心141.95 m(图5),其中长8段16.75 m,长7段99.20 m,长6段26.00 m。同时,在陕北地区的A83试验区针对直井压裂改造区部署一口水平井AJ井取心(图1d)。该井距邻近直井A24井垂直距离80 m,设计针对A24井长7²段体积压裂后微地震解释的带宽范围内进行水平井取心,最终AJ井在长7²段取心长度85 m。考虑到取心过程中可能会造成岩心的破损,给

人工裂缝的判识带来影响,两口井在实际工程作业时,尽量避免采用长筒取心,且岩心出筒时禁止直接敲击岩心筒,技术人员均在出筒的第一时间观察和记录岩心中裂缝的情况。

2 裂缝识别和评价

2.1 裂缝类型

通过 YJ 井岩心观察及实际测试,在取心段共识别出裂缝 8 处(表 2,图 3,图 4),其中 7 处为天然裂缝,仅 1 处确定为人工裂缝。在 AJ 井水平段取心 85 m 的岩心中,仅见 3 条天然裂缝(图 4),未见到人工压裂缝。

鄂尔多斯盆地延长组的天然构造裂缝较为普遍,一般具有裂缝面平直、光滑,一部分裂缝具有方解石、石英等矿物充填,裂缝常在岩性变化界面终止及高角度发育等特征^[20]。YJ 井岩心中观测到的天然裂缝长度相对较短,砂岩中天然裂缝面齐整,偶见矿物充填,泥岩中只是见到裂缝印痕(图 4)。

通过观察并经测试分析,在 YJ1 井长 7² 段 2 039.80~2 041.54 m 见人工压裂形成的裂缝及受压裂影响扩展的层理缝(图 5)。其中,2 041.29~2 041.54 m 块状砂岩中发育长度 0.13 m 近垂直的张性微裂缝,邻近长度 1.49 m 均见大量层理缝顺层或斜交延伸,油气外渗显著,判断为压裂改造后形成的人工缝(图 5a)。应用工业 CT 对 2 041.29~2 041.54 m 块状砂岩进行扫描,发现裂缝不平直,宽度不均一,空间分布扭曲、交汇,显示张性裂缝特征(图 5b)。其中较宽的一条微裂缝开度为 676 μm。通过成像测井,在该井长 7 段未见规模较大的天然裂缝特征,在 2 039.80~2 041.54 m 有疑似纵向裂缝的响应特征。

2.2 人工压裂缝的判别

综合 YJ 井岩心特征、分析测试结果及现场观察含

油气性特征,判定长 7² 段 2 039.80~2 041.54 m 处观察到的就是压裂改造缝。主要证据如下:1)按照邻井海拔比对,观察到的人工裂缝位置恰好对应于邻井长 7² 段体积压裂改造段,水平井钻遇及射孔改造层段深度与 YJ 井的该段油层匹配;2)观察到的垂直张性裂缝发育在块状细砂岩上,这在以往本地区大量岩心观察中并未见到,可以排除层理缝和构造裂缝的可能性;3)该段人工裂缝面并不平直,宽度不均一,两侧尖灭,空间分布扭曲、交汇,具张性裂缝性质(图 4b);4)该段观察到的层理缝多顺层或斜交延伸,与以往本地区岩心观察见到的原生层理缝不同,显示受外力影响;5)该段岩心观察到的裂缝中见明显的油气外渗现象,渗出的速度和趋势与该区域其他取心井现场观察到的情况明显不同。

3 体积压裂有效作用范围和压裂缝发育模式

3.1 有效作用范围

体积压裂的目的是最大程度地增加改造体积,解放致密储层,形成“人工储层”,从而提升油气渗流能力^[1,20]。目前的研究认为,按现阶段的工艺技术水平,在长 7 段进行体积压裂,裂缝的半缝长^[20]一般为 150~240 m,缝高为 50~80 m(隔层较好的情况),带宽为 20~80 m。按照 YP3 和 YP4 井的微地震监测解释结果,位于这两口水平井中间的 YJ 井位置处压裂缝已经覆盖到。而实际上,并未在 YJ 井的岩心中观察到宏观裂缝。此外,AJ 井也位于 A24 井压裂缝波及范围(图 2b),实际取心也未观察到明显的人工裂缝。可以说明压裂后宏观裂缝波及范围并未像微地震解释的那么大。根据大量压后测井检测的结果,缝高的范围可信度相对较高,而对于缝长和缝宽的分布范围则没有足够的实际证据。同时,在 YJ 井中观察到压裂影响

表 2 鄂尔多斯盆地致密油试验区 YJ 井取心段天然裂缝统计

Table 2 Statistics of natural fractures in the coring interval of Well YJ in the tight oil pilot area, Ordos Basin

序号	层位	顶深/m	底深/m	岩性	裂缝长度/cm	裂缝倾角/(°)	裂缝类型	裂缝性质
1	长 6 ³	1 966.65	—	凝灰岩	12	88	剪切裂缝	天然裂缝
2	长 7 ¹	1 999.96	—	粉砂岩	13	90	剪切裂缝	天然裂缝
3	长 7 ¹	2 001.27	—	粉砂岩	8	88	剪切裂缝	天然裂缝
4	长 7 ¹	2 002.46	—	细砂岩	6	83	剪切裂缝	天然裂缝
5	长 7 ²	2 022.30	—	页岩	—	90	—	天然裂缝
6	长 7 ²	2 041.08	2 041.29	细砂岩	13	90	张性裂缝	人工裂缝
7	长 7 ²	2 044.52	—	页岩	—	90	—	天然裂缝
8	长 7 ³	2 081.60	—	粉砂岩	7	66	剪切裂缝	天然裂缝

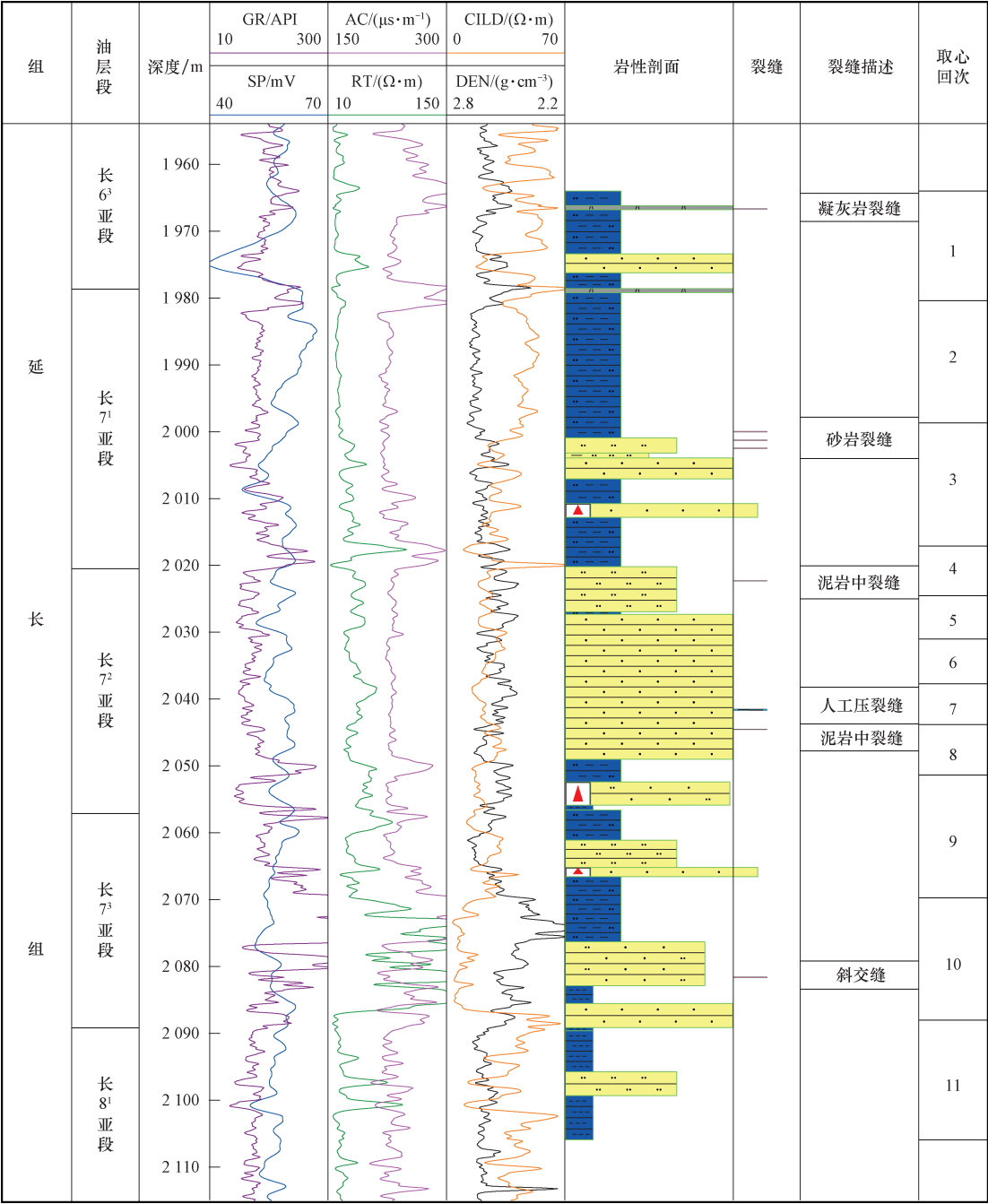


图 3 鄂尔多斯盆地致密油试验区 YJ 井单井综合柱状图
Fig. 3 An integrated histogram of Well YJ in the tight oil pilot area, Ordos Basin

下形成的微裂缝,说明储层中受到了压裂的影响范围至少达到了两口水平井中间,长度约 150 m。综合了陇东地区 YJ 井和陕北地区 AJ 井岩心中观察结果和测试结果推测,目前体积压裂技术条件下,主缝并没有解释的那么多,但微裂缝波及范围较大,推测微地震监测解释范围内基本都可波及到。

3.2 压裂缝分布模式

一般认为,体积压裂可以形成尺度较大的宏观缝

网络^[21]。按照微地震的解释结果,长 7 段压裂形成了以主缝为主,分支缝为辅的裂缝系统^[20]。然而,在陇东地区 YJ 井和陕北地区 AJ 井取心中,都没有观察到宏观裂缝(无论是主缝还是分支缝),说明宏观裂缝发育的几率不高。作者认为宏观缝发育范围是较为局限的,很可能仅局限于射孔段(或喷射段)附近;进一步分析认为,受压裂缝影响而形成的微裂缝则非常普遍。因为,井眼的尺寸相对于整个改造区域非常小,在实际取心中恰好取到人工压裂形成的微裂缝,从概率论的

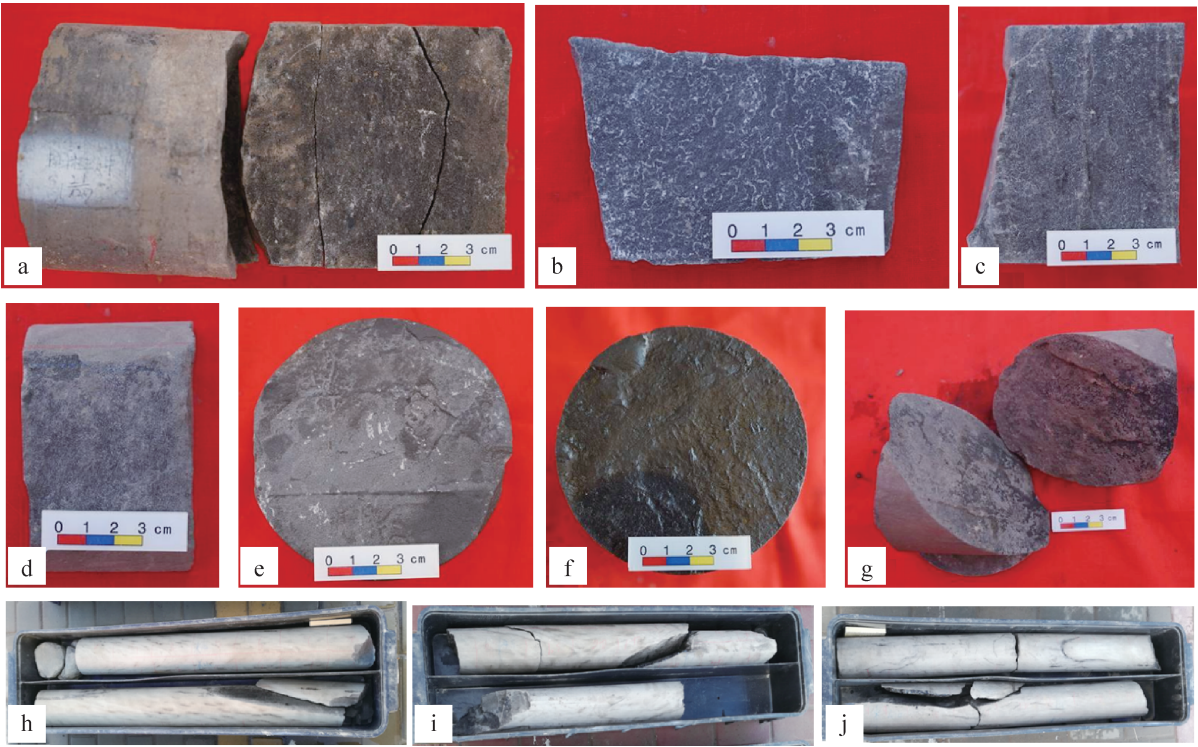


图4 鄂尔多斯盆地致密油试验区 YJ 井和 AJ 井岩心中的天然裂缝照片

Fig. 4 Photos of natural fractures in the cores of Wells YJ and AJ in the tight oil pilot area, Ordos Basin

a. YJ 井,长⁶亚段,埋深1 966.65 m,凝灰岩裂缝;b. YJ 井,长⁷¹亚段,埋深1 999.96 m,裂缝,方解石半充填;c. YJ 井,长⁷¹亚段,埋深2 001.27 m,裂缝;d. YJ 井,长⁷¹亚段,埋深2 002.46 m,裂缝;e. YJ 井,长⁷²亚段,2 022.30 m 裂缝压痕;f. YJ 井,长⁷²亚段,埋深2 044.52 m,裂缝痕迹;g. YJ 井,长⁷³亚段,2 081.60 m,斜交缝;h. AJ 井,长⁷²亚段,埋深2 495.00~2 580.60 m,天然裂缝,裂缝面整齐;i. AJ 井,长⁷²亚段,埋深2 495.00~2 580.60 m,天然裂缝; j. AJ 井,长⁷²亚段,埋深2 495.00~2 580.60 m,天然裂缝,见沥青充填

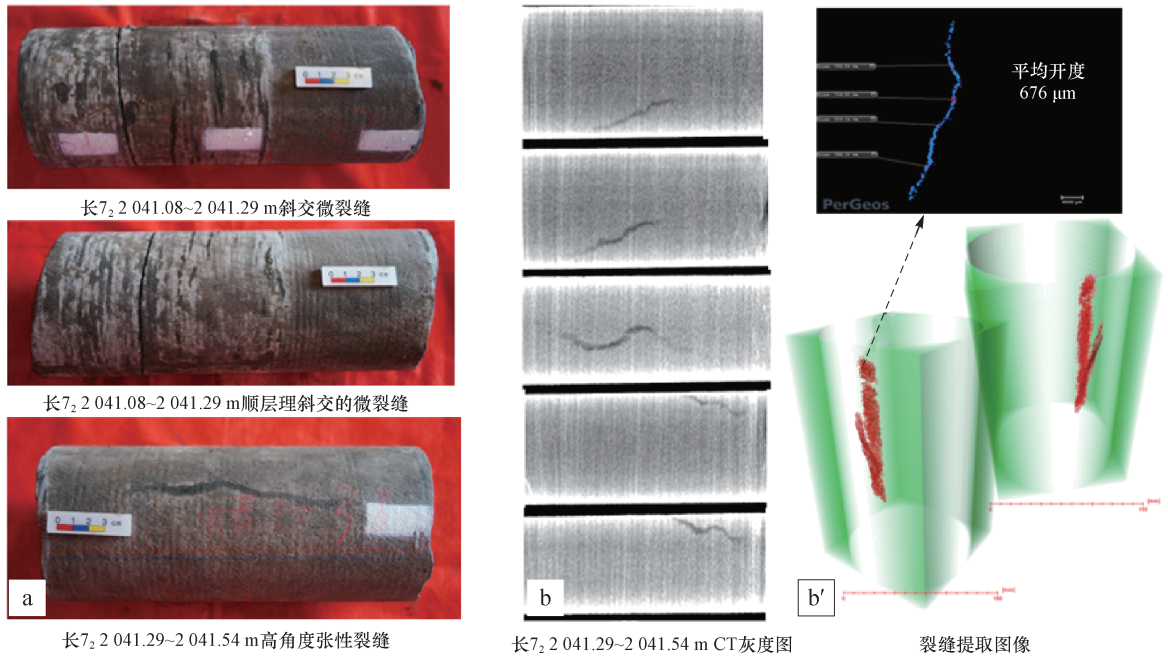


图5 鄂尔多斯盆地致密油试验区 YJ 井长⁷²段岩心中的人工压裂缝特征

Fig. 5 Characteristics of artificial fractures in the cores from Well YJ (Chang 7²) in the tight oil pilot area, Ordos Basin

a. 压裂改造后形成的人工缝;b-b'. 张性裂缝特征特征

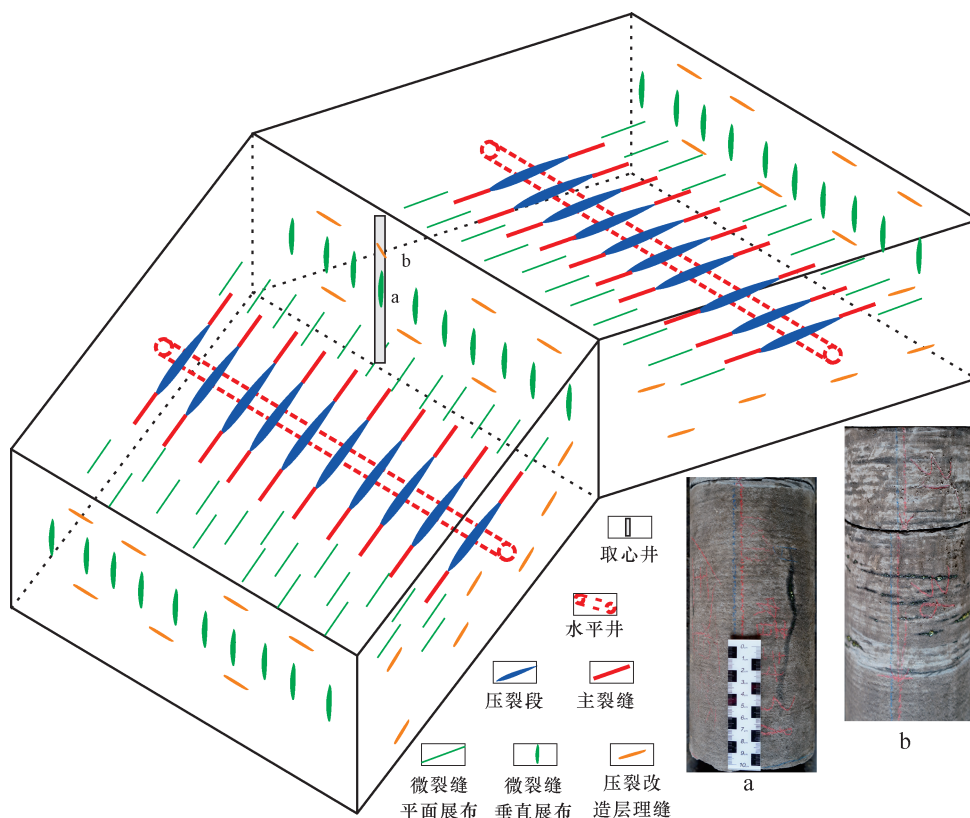


图6 致密油体积压裂人工裂缝分布模式

Fig.6 Distribution model of artificial fractures created by volume fracturing in tight oil reservoir

角度,这并不是“运气好”,而是说明微裂缝发育的几率高。因此,本文认为在体积压裂改造区,这种微裂缝是普遍存在的,且分布范围较大。也有必要在未来的攻关研究中探究如何形成更多的微裂缝,并使主裂缝与微裂缝匹配,共同发挥作用。据以上分析,本文还提出了致密油层体积压裂压裂缝分布模式(图6),即:致密油层体积压裂形成了少量的主缝及与主缝伴生形成的大量微裂缝,且受压裂影响,原有的层理缝延伸和张开,形成了改造区,提高油气渗流能力。此外,YJ井油层段密闭取心平均含油饱和度超过70%,与该区未开发前的油藏含油饱和度相差不大,油层开发潜力依然很高。按照这种分析,目前致密油储层体积压裂效果远没有达到形成“裂缝网络”和油藏整体动用的理想状态,现阶段技术开发后油藏还有进一步提高开发效果的潜力,需要未来在压裂方法和工艺设计上进一步优化。

4 结论

1) 在鄂尔多斯盆地陇东地区 X233 致密油体积压裂试验区长7段体积压裂后油层段块状砂岩中首次观察到长度0.13 m近垂直的张性微裂缝,邻近长度1.49 m油层均见大量层理缝顺层或斜交延伸,油气外

渗显著,判断为压裂改造后形成的人工缝。

2) 长7段致密油层体积压裂形成的压裂缝分布模式是数量有限的主缝、大量与主缝伴生的微裂缝及原有层理缝延伸和张开,共同构成改造区的裂缝特征,增强了油气渗流能力。

3) 长7段致密油层体积压裂宏观主裂缝分布有限,作用范围小于微地震解释结果,而微裂缝分布广泛,作用范围可达100~200 m,体积压裂后的致密油储层相关评价研究应予以重新认识。

4) 按照致密油层体积压裂形成缝网来实现油藏高效动用的理念,现阶段压裂技术和参数具有进一步优化的空间,从而可以进一步提高致密油动用效果。

参 考 文 献

- [1] 吴奇,胥云,刘玉章,等. 美国页岩气体积改造技术现状及对我国的启示[J]. 石油钻采工艺, 2011, 33(2): 1-7.
Wu Qi, Xu Yun, Liu Yuzhang, et al. The current situation of stimulated reservoir volume for shale in U. S. and its inspiration to China [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2011, 33(2): 1-7.
- [2] 李宪文,张矿生,樊凤玲,等. 鄂尔多斯盆地低压致密油层体积压裂探索研究及试验[J]. 石油天然气学报, 2013, 35(3): 142-147.
Li Xianwen, Zhang Kuangsheng, Fan Fengling, et al. Study and experiment on volumetric fracturing in low pressure tight formation of

- Ordos Basin[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2013, 35(3): 142-147.
- [3] 赵金洲,任岚,沈骋,等. 页岩气储层缝网压裂理论与技术研究新进展[J]. 天然气工业, 2018, 38(3): 1-13.
- Zhao Jinzhou, Ren Lan, Shen Cheng, et al. Latest research progresses in network fracturing theories and technologies for shale gas reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(3): 1-13.
- [4] 陈作,薛承瑾,蒋廷学,等. 页岩气井体积压裂技术在我国的应用建议[J]. 天然气工业, 2010, 30(10): 30-32.
- Chen Zuo, Xue Chengjin, Jiang Tingxue, et al. Proposals for the application of fracturing by stimulated reservoir volume(SRV) in shale gas wells in China[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(10): 30-32.
- [5] 傅成玉. 非常规油气资源勘探开发[M]. 北京: 中国石化出版社, 2015.
- Fu Chengyu. Exploration and development for unconventional hydrocarbons[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2015.
- [6] Mayerhofer M J, Lolon E P, Warpinski N R, et al. What is stimulated Reservoir volume(SRV)[R]. SPE 119890, 2008.
- [7] Rickman R, Mullen M, Peter E, et al. A Practical use of shale petrophysics for stimulation design optimization: All shale plays are not clones of the Barnett[R]. SPE 115258, 2008.
- [8] 商校森,丁云宏,卢拥军,等. 一种页岩体积压裂复杂裂缝的量化表征[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(1): 189-195.
- Shang Xiaosen, Ding Yunhong, Lu Yongjun, et al. Quantitative characterization of complex fractures after volume fracturing in shale[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(1): 189-195.
- [9] 杜保健,程林松,曹仁义,等. 致密油藏体积压裂水平井开发效果[J]. 大庆石油地质与开发, 2014, 33(1): 96-102.
- Du Baojian, Cheng Linsong, Cao Renyi, et al. Development effects of the volumetric fracturing horizontal well in tight oil reservoirs[J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2014, 33(1): 96-102.
- [10] 张士诚,郭天魁,周彤,等. 天然页岩压裂裂缝扩展机理试验[J]. 石油学报, 2014, 35(3): 496-503.
- Zhang shicheng, Guo Tiankui, Zhou Tong, et al. Fracture propagation mechanism experiment of hydraulic fracturing in natural shale[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(3): 496-503.
- [11] 付金华. 鄂尔多斯盆地致密油勘探理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- Fu Jinhua. Exploration theory and technology of tight oil in Ordos Basin[M]. Beijing: China Science Press, 2018.
- [12] 杨华,梁晓伟,牛小兵,冯胜斌,尤源. 陆相致密油形成地质条件及富集主控因素——以鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7段为例[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(1): 12-20.
- Yang Hua, Liang Xiaowei, Niu Xiaobing, et al. Geological conditions for continental tight oil formation and the main controlling factors for the enrichment: A case of Chang7 Member tight oil, Upper Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(1): 12-20.
- [13] 杨华,牛小兵,罗顺社,等. 鄂尔多斯盆地陇东地区长7段致密砂体重力流沉积模拟实验研究[J]. 地学前缘, 2015, (3): 322-332.
- Yang Hua, Niu Xiaobing, Luo Shunshe, et al. Research of simulated experiment on gravity flow deposits of tight sand bodies of Chang7 formation in Longdong area, Ordos Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2015, (3): 322-332.
- [14] 付金华,喻建,徐黎明,等. 鄂尔多斯盆地致密油勘探开发新进展及规模富集可开发主控因素[J]. 中国石油勘探, 2015, 20(5): 9-19.
- Fu Jinhua, Yu Jian, Xu Liming, et al. New progress in exploration and development of tight oil in Ordos Basin and main controlling factors of large-scale enrichment and exploitable capacity[J]. China Petroleum Exploration, 2015, 20(5): 9-19.
- [15] 付金华,罗顺社,牛小兵,等. 鄂尔多斯盆地陇东地区长7段沟道型重力流沉积特征研究[J]. 矿物岩石地球化学学报, 2015, 34(1): 29-37.
- Fu Jinhua, Luo Shunshe, Niu Xiaobing, et al. Sedimentary characteristics of channel type gravity flow of the member 7 of Yanchang Formation in the longdong area, Ordos Basin[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2015, 34(1): 29-37.
- [16] 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): 1-10.
- 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): 1-10.
- [17] 梁晓伟,郝炳英,杨孝,等. 鄂尔多斯盆地致密油水平井体积压裂试验区开发特征分析[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2017, 47(2): 259-264.
- Liang Xiaowei, Hao Bingying, Yang Xiao, et al. The characteristics of tight oil development by horizontal well with domain stimulation in the pilot test in Ordos Basin[J]. Journal of North west University (Natural Science edition), 2017, 47(2): 259-264.
- [18] 牛小兵,冯胜斌,尤源,等. 鄂尔多斯盆地致密油地质研究与试验攻关实践体会[J]. 石油科技论坛, 2016, 4: 38-45.
- Niu Xiaobing, Feng Shengbin, You Yuan, et al. Geological study and pilot test of tight oil in Ordos Basin[J]. Oil Forum, 2016, 4: 38-45.
- [19] 韩永林,刘军锋,余永进,等. 致密油藏储层驱替特征及开发效果——以鄂尔多斯盆地上里塬地区延长组长7油层组为例[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(2): 207-211.
- Han Yonglin, Liu Junfeng, Yu Yongjin, et al. Displacement characteristics and development effect of tight oil reservoir: a case from Chang7 oil layer of the Yanchang formation in Shangliyuan area, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(2): 207-211.
- [20] 白晓虎,齐银,陆红军,等. 鄂尔多斯盆地致密油水平井体积压裂优化设计[J]. 石油钻采工艺, 2015, 37(4): 83-88.
- Bai Xiaohu, Qiyin, Lu Hongjun, et al. Optimization design for volume fracturing of horizontal wells in tight oil reservoir of Ordos Basin[J]. Oil Drilling & Production technology, 2015, 37(4): 83-88.
- [21] 王仲茂,胡江明. 水力压裂形成裂缝形态的研究[J]. 石油勘探与开发, 1994, 21(6): 66-69.
- Wang Zhongmao, Hu Jiangming. A study on the fracture types induced by hydrofracturing[J]. Petroleum Exploration and Development, 1994, 21(6): 66-69.