

引用: 张云逸. 页岩油水平井穿层压裂先导性试验: 以鄂尔多斯盆地庆城油田华 H100 平台为例 [J]. 中国石油勘探, 2023,28(4):92-104.

Zhang Yunyi. Pilot test of cross-layer fracturing in horizontal shale oil well: a case study of Hua H100 platform in Qingcheng Oilfield[J]. China Petroleum Exploration, 2023,28(4):92-104.

页岩油水平井穿层压裂先导性试验 ——以鄂尔多斯盆地庆城油田华 H100 平台为例

张云逸

(中国石油集团川庆钻探工程有限公司长庆井下技术作业公司)

摘 要: 鄂尔多斯盆地庆城油田华 H100 平台密集布井 31 口水平井, 选取该平台因钻遇非储层即出层而导致低钻遇率的 4 口水平井, 首次开展穿层压裂现场试验, 同时应用示踪剂分段产能测试技术, 研究穿透泥岩沟通相邻砂岩潜力储层的工程可行性, 以及压裂后裂缝形成渗流通道的有效性, 并对穿层压裂段是否有产量贡献进行确定性评价。试验结果表明: 非储层段中水平井井眼轨迹与砂岩储层距离小于 3m、泥质含量小于 40% 即可开展穿层压裂; 试验 14 段、成功 12 段, 成功率为 85.7%, 证实穿层压裂具有可行性。根据示踪剂监测解释结果, 穿层压裂段有持续的返排产水, 表明焖井之后支撑形成了有效渗流通道; 各穿层压裂段不同程度的产油量也表明穿层压裂缝沟通了砂岩储层, 具有确定的产能贡献。与同平台钻遇率大于 80% 的 4 口邻井对比, 穿层压裂井累计产油量处于中等偏上水平。华 H100 平台穿层压裂试验的成功, 从工程实践角度证明了穿层压裂是低钻遇率水平井提高单井产量的有效手段。

关键词: 页岩油; 水平井; 穿层压裂; 华 H100 平台; 庆城油田

中图分类号: TE348

文献标识码: A

DOI:10.3969/j.issn.1672-7703.2023.04.009

Pilot test of cross-layer fracturing in horizontal shale oil well: a case study of Hua H100 platform in Qingcheng Oilfield

Zhang Yunyi

(Changqing Downhole Technology Company, CNPC Chuanqing Drilling Engineering Co., Ltd.)

Abstract: A total of 31 horizontal wells have been drilled on Hua H100 platform in Qingcheng Oilfield in Ordos Basin. For the first time, the cross-layer fracturing is tested in four horizontal wells on this platform with low drilling rate of reservoir. Meanwhile, by applying tracer monitoring technology, the engineering feasibility of penetrating mudstone and communicating the adjacent sandstone reservoirs and the effectiveness of flow pathway after fracturing are analyzed, and the production contribution of the cross-layer fracturing stage is evaluated. The pilot test results show that when the distance between the horizontal well trajectory in the non-reservoir interval and the sandstone reservoir is less than 3 m and the clay content is lower than 40%, the cross-layer fracturing engineering is feasible. A total of 14 stages have been tested and good results have been achieved in 12 stages, with a success rate of 85.7%, confirming the feasibility of cross-layer fracturing operation. The tracer detection and interpretation results show that continuous water flowback has been monitored in cross-layer fracturing stages, which indicate that an effective flow pathway has been formed after soaking the well. The varying amounts of oil production in various cross-layer fracturing stages also demonstrate that the sandstone reservoirs have been communicated by cross-layer fractures, with a definite production contribution. Compared with another four offset wells with drilling rate of higher than 80% on the same platform, the cumulative oil production of cross-layer fracturing wells is above the average level. The successful pilot

基金项目: 国家自然科学基金项目“致密油储层人工裂缝网络形成机制及其流体多场耦合渗流理论研究”(52074226)。

作者简介: 张云逸 (1991—), 男, 甘肃镇原人, 硕士, 2016 年毕业于中国石油大学 (北京), 工程师, 现主要从事储层地质评价及储层压裂改造设计方面的工作。地址: 陕西省西安市未央区未央路 151 号长庆大厦, 邮政编码: 710018。E-mail: 610799690@qq.com

收稿日期: 2023-01-04; 修改日期: 2023-06-01

test of Hua H100 platform proves that the cross-layer fracturing is an effective engineering means to increase single well production of horizontal wells with low drilling rate of reservoir.

Key words: shale oil, horizontal well, cross-layer fracturing, Hua H100 platform, Qingcheng Oilfield

0 引言

鄂尔多斯盆地庆城油田 10 亿吨级页岩油已进入规模开发阶段,开发对象为三叠系延长组长 7 段源内多期叠置砂岩型 I 类页岩油^[1-2],储层砂岩、泥岩交互频繁,单砂体薄且分布不稳定,采用水平井和多段体积压裂的开发方式,最长水平段已达到 5060m,加上“三低”油藏特征,水平井钻井和压裂改造的难度陡然增加^[2-6]。钻进过程中不可避免的由于钻遇非储层即出层而错过油层,直接影响有效储层的钻遇^[7]。目前采用的体积压裂技术无法直接用于水平井局部出层段的改造,穿层压裂成为这类非储层段沟通相邻有效油层砂体、提高低钻遇率井页岩油藏动用程度的有效手段。

国内外学者目前对穿层压裂的研究主要是针对煤层气顶板水平井和砂泥岩薄互层多储层沟通^[8-10],以室内物理模拟实验和数值模拟为主^[11-12],鲜有工程生产实践。郭天魁等^[13]在煤层顶板水平井穿层压裂适应性数值模拟研究过程中,提出了水平井穿层压裂裂缝扩展模型;范明福^[14]在安徽省淮北芦岭煤矿区 LG-X-H 井煤层气穿层压裂现场应用中,指出水平井井眼轨迹控制在距离煤层顶面 1~3m 最为合适。李浩哲等^[15]采用裂缝尖端应力强度因子理论对地层界面处裂缝穿层扩展行为特征进行研究分析;王燚钊等^[16]利用东濮凹陷页岩油压裂直井岩心进行水力压裂物理模拟实验,对水力裂缝穿层扩展特征进行分析,发现砂岩、页岩两层同时压裂纵向连通后缝高延伸最大,提高压裂排量能够增加页岩油直井多储层缝高的延伸能力;陈相君等^[17]运用复势叠加方法推导出了穿层压裂水平井产能理论计算公式。然而以往的研究没有涉及页岩油低钻遇率水平井穿层压裂工程可行性及产量贡献确定性研究。

庆城油田国家级页岩油示范区华 H100 平台上多口井发生出层现象,钻遇率不到平均值的一半。本文针对该平台低钻遇率水平井,利用裂缝扩展模拟,并结合地震剖面、测井曲线、靶点地震切片等数据进行单井穿层压裂优化设计,同步配套示踪剂监测技术,从压裂过程、压后焖井、压后排液及投产全生命周期跟踪分析,以工程实践先导性试验定量评价穿层压裂效果。

1 研究区地质概况

国家级页岩油示范区华 H100 平台位于庆城油田华池区块,构造上位于鄂尔多斯盆地伊陕斜坡。目的层为长 7₁ 亚段和长 7₂ 亚段,局部油层较薄,纵横向砂体变化快、储层非均质性强。其中,长 7₁ 亚段发育一套主力油层,单油层厚度为 1.5~8.0m,隔夹层厚度为 0.5~2.0m;长 7₂ 亚段发育两套主力油层,两套油层间隔 5.0~8.0m,单油层厚度为 2.0~6.0m,隔夹层厚度为 0.5~2.0m。平台部署完钻的 31 口水平井,平均油层钻遇率为 82.1%。其中,H5 井目的层为长 7₁ 亚段,实钻水平段长 1961m,钻遇油斑 195m、油迹 744m,测井 I+II 类油层钻遇率仅为 37.4%。H23 井目的层为长 7₂ 亚段,实钻水平段长 2165m,钻遇油斑 516m、油迹 349m,测井 I+II 类油层钻遇率为 33.7%。H9 井目的层为长 7₁ 亚段,实钻水平段长 2045m,有效储层钻遇率为 75%。H25 井目的层为长 7₂ 亚段,实钻水平段长 2510m,有效储层钻遇率为 69%。这 4 口井钻遇率远低于平台整体平均钻遇率,井轨迹出层导致储层在井轨迹上方或者下方。

2 穿层压裂设计方法

2.1 穿层位置优选

水平井井眼轨迹与相邻砂体的距离及相对位置是穿层射孔位置选择的关键因素。假定井筒钻进过程出层位于砂体上部,地层接触关系为上部泥岩、下部砂岩互层,钻遇的泥岩段应力为 44.55MPa,杨氏模量为 45.4GPa,泊松比为 0.25;对应目的层砂体应力为 30.19MPa,杨氏模量为 35.0GPa,泊松比为 0.17。利用 FracPro 软件模拟井筒位置在距离砂体顶面 3m、5m、7m 时的穿层裂缝扩展,结果显示随穿层厚度增加,井筒位置及砂体处的导流能力均下降,且井筒位置处的导流能力下降幅度更大。同正常压裂段相比,井筒位置距离砂体顶面 3m 时,其导流能力下降了 36%,而距离 5m 时井筒位置导流能力下降了 67%,距离 7m 时井筒位置导流能力下降了 73% (图 1),只有在距离 3m 时才能满足缝口高导流的需求,因此水平段距离砂体 3m 时才可能建立有效渗流通道。

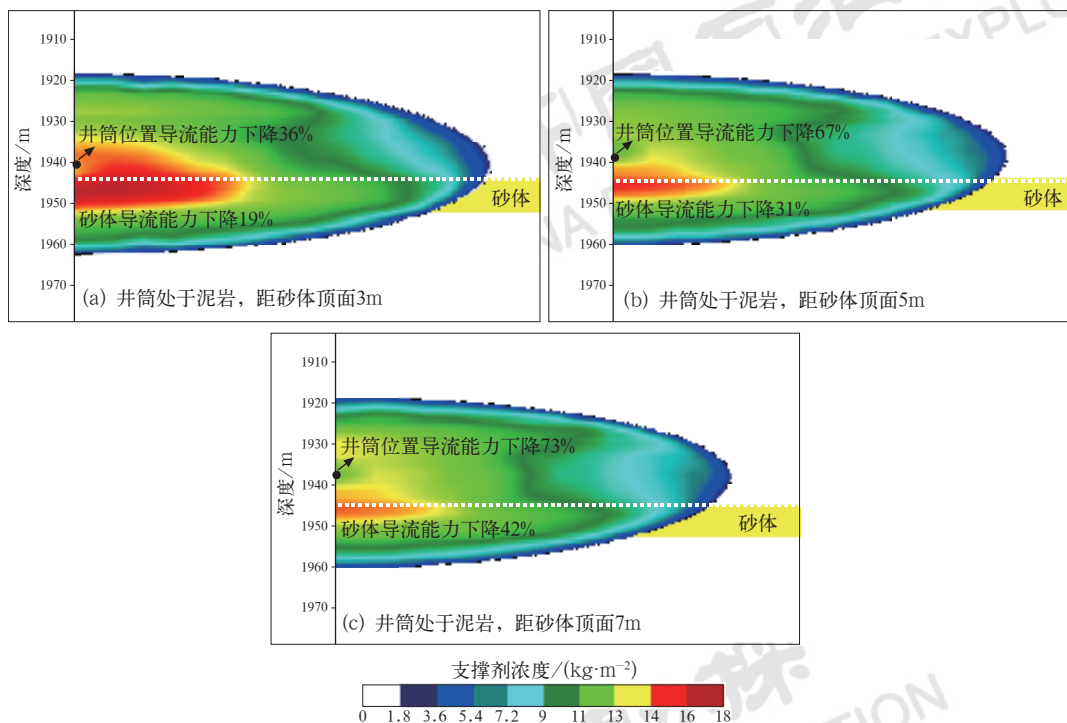


图1 水平段钻遇泥岩段时穿层压裂裂缝扩展模拟图

Fig.1 Fracture propagation simulation in cross-layer fracturing of mudstone interval

水平段出层位置上下砂体发育情况是决定穿层之后是否具有产量贡献潜力的根本要素。以 H23 井为例, 根据测井解释及分级结论, 发现井深 2750~3325m 井轨迹出层, 解释为非储层, 岩性为砂岩、泥岩互层, 泥质含量为 18%~96%。结合地震剖面、靶点地震切片对这部分井段进行重点挖潜, 分析发现靶点 10、10-1 区间内, 距离井筒上方约

1.8m 处发育砂体 (第 9 段); 位于靶点 8、8-1 之间, 距离井筒下方约 1.6m 处存在砂体 (第 10 段); 位于靶点 7、7-1 区间内, 距离井筒下方约 2.0m 处发育砂体 (第 11 段); 位于靶点 6、6-1 之间, 距离井筒下方约 1.5m 处存在砂体 (第 12 段); 据此优选出 4 段可作为穿层压裂改造目标, 提高资源利用率 (图 2)。

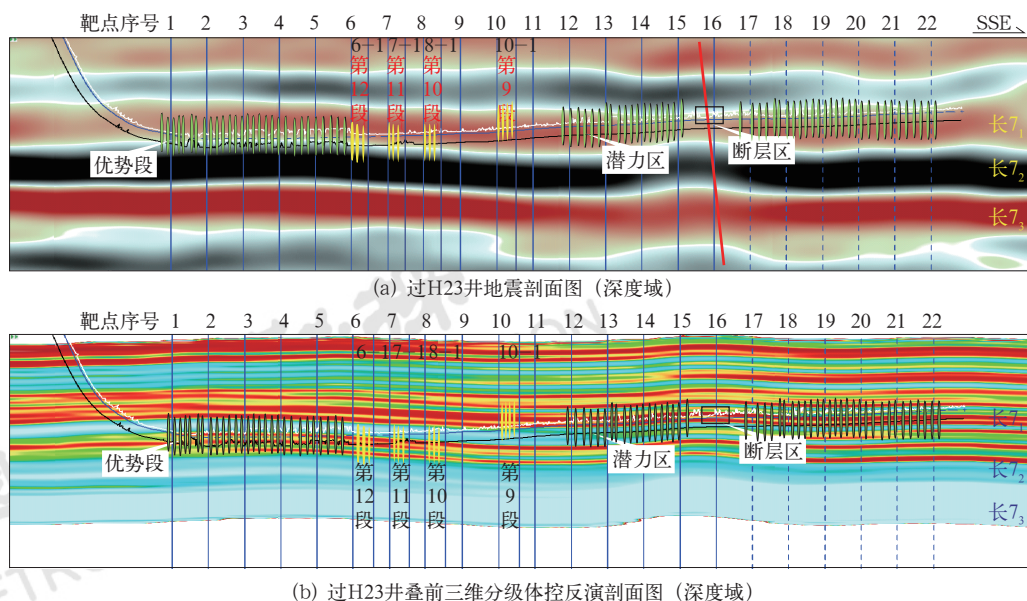


图2 基于三维地震剖面的穿层位置优选图

Fig.2 Optimization of cross-layer fracturing position based on 3D seismic profile

2.2 压裂关键参数设计

2.2.1 射孔工艺优化

为了探索页岩油水平井穿层造缝射孔手段,在 H5 井采用连续油管底封拖动压裂工艺,射孔采用水力喷枪喷砂射孔(表 1);在 H23 井采用桥射联作压裂工艺,

定制等孔径定向火力射孔枪(表 2)。根据井眼钻遇非储层段泥岩、砂岩接触产状关系决定射孔方向^[18]。穿层压裂井主要有两种接触关系,一类是薄砂体发育在泥岩层上方,采用向上定向射孔;另一类是薄砂体在钻遇泥岩层的下方,采用向下定向射孔(图 3)。两种方式在穿层时主要受到来自泥质围岩地应力的阻碍。

表 1 H5 井单段单簇水力喷砂穿层压裂射孔参数表

Table 1 Hydraulic sand-jet perforation parameters of cross-layer fracturing in single cluster and single stage in Well H5

压裂工艺	射孔技术	喷嘴结构		射孔砂	射孔排量 / ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)	砂浓度 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
		个数	直径 /mm			
连续油管底封拖动	水力喷砂	6	4.3	40/70 目石英砂	0.9~0.95	120.0

表 2 H23 井分段多簇穿层压裂射孔参数表

Table 2 Perforation parameters of multi-cluster and multi-stage cross-layer fracturing in Well H23

压裂工艺	砂体相对位置	射孔技术	射孔枪	弹型	孔密度 / ($\text{个} \cdot \text{m}^{-1}$)
桥射联作	水平段上方	等孔径定向火力射孔	89-16-90U-105	S3406D	16
	水平段下方		89-16-90D-105		

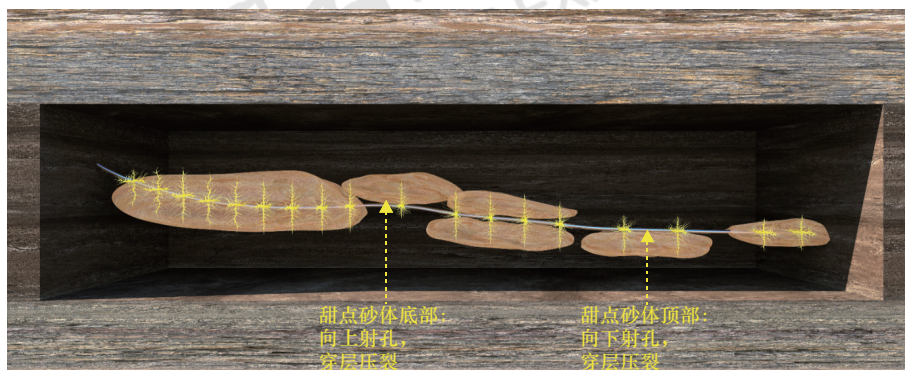


图 3 水平井“隐蔽性”甜点穿层压裂模型示意图

Fig.3 Schematic diagram of cross-layer fracturing model in horizontal well with “subtle” sweet spot

2.2.2 施工参数优化

水平段出层大多钻遇的是泥岩段,以黏土矿物为主的泥岩经过后期压实作用、重结晶作用,具有极小的粒径,和砂岩基质一样没有孔渗能力,也不具备砂岩岩石骨架的滑移变形特征,穿层的瓶颈就在于突破泥岩高应力层。因此,排量、施工规模等参数不能继续沿用砂岩储层综合甜点分级设计方法^[19],而要按照“先穿泥岩、后压砂岩”两种岩性压裂的思路进行设计。由泥岩穿透到砂岩的裂缝规模必然小于纯砂岩层,且裂缝到达泥岩、砂岩界面时会与界面斜交,发生转折后进入硬度较大的砂岩继续扩展^[20],对应所需的支撑剂量也减小,但泥岩可压裂性差,需要足够

的破裂造缝能量,液量需求随之增加。

基于此,穿层段支撑剂量、砂比参考砂岩储层Ⅲ类甜点,前置液比例参照Ⅰ类甜点,施工排量按单井最大排量设计,形成“控砂增液”的设计思路,这与常规页岩油体积压裂“控液增砂”的改造方法恰好相反^[21]。

3 现场实施情况

3.1 穿层压裂可行性分析

针对华 H100 平台低钻遇率的 4 口水平井共设计穿层压裂 14 段(表 3),其中采用连续油管底封拖动压裂工艺的有 8 段(层位为长 7₁ 亚段)、桥射联作压

Table 3 Geological-engineering parameters and pilot test results of cross-layer fracturing stages on Hua H100 platform

井号	穿层段次	地质参数							可压裂性评价参数		压裂施工参数							示踪剂监测 解释结果		试验结果		
		渗透率/ mD	孔隙度/%	含油饱和度/%	泥质含量/%	垂向应力/ MPa	最大水平主应力/ MPa	最小水平主应力/ MPa	脆性指数	断裂韧性/ (MPa·m ^{1/2})	设计砂量/m ³	实际砂量/m ³	设计液量/m ³	实际液量/m ³	破裂压力/MPa	工作压力/ MPa	平均砂比/%	产水贡献率/%	产油贡献率/%			
H5	第8段	0.16	10.3	62	21.4	50.16	43.12	33.73	0.1981	0.8094	52	52	620.1	619.7	30.7	24.9	15.9			成功		
	第17段	0.01	0.1	0.01	42.0	50.11	43.88	34.50	0.1578	0.8968	52	0	615.7	621.9 (挤酸3.0)	破裂失败	—	—			未压开		
	第19段	0.08	8.2	71.60	23.2	50.12	42.90	33.52	0.3205	0.9163	52	52	614.9	629.9	63.3	33.6	15.5	—	—	成功		
	第20段	0.21	11.1	65.80	28	50.12	43.73	34.34	0.2127	0.8983	52	52	614.3	622.9	60.5	37.1	15.7			成功		
	第21段	0.01	0.1	0.01	33.2	50.11	43.99	34.60	0.1528	0.7935	52	52	613.9	625.5	55.2	38.1	16.0			成功		
	第33段	0.10	8.7	57.20	27.1	50.02	42.93	33.57	0.3992	1.0150	52	52	608.3	636.3	41.5	34.5	15.2			成功		
	第36段	0.12	9.4	53.10	29.5	50.02	43.14	33.78	0.4050	1.0470	52	52	606.2	620.3	53.6	27.9	15.8			成功		
	第39段	0.04	6.2	40.70	15.6	50.38	42.56	33.13	0.6039	1.0510	52	52	610.5	612.7	53.2	36.4	15.9	—	—	成功		
	H23	第9段 (4簇)	0.01	0.1	0.01	46.5	48.35	41.38	32.35	0.2178	0.9970	115	0	1178.2	756.8	破裂失败	—	—	12.0	0	未压开	
		第10段 (3簇)	0.07	7.6	37.40	20	48.42	41.10	32.05	0.4736	0.9961		100	100	1027.9	1131.2	24.1	38.1	14.8	0.6	2.3	成功
第11段 (3簇)		0.01	0.1	0.01	39.6	48.43	41.09	32.04	0.6332	1.2980	100			100	1026.6	1024.3	25.7	32.8	16.9	0.9	7.7	成功
		0.07	7.5	44.60	23.3	48.43	41.06	32.01	0.3892	0.9538				100	100	1024.4	1022.6	29.7	36.7	16.9	0.8	11.9
H25	第9段 (3簇)	0.15	10	58.10	15.9	48.44	41.71	32.66	0.3006	0.8546	112	112			1011.7	1010.2	29.9	30.4	15.0	0.3	0.2	成功
	第12段 (3簇)	0.07	7.7	45.30	17.1	48.44	41.11	32.07	0.4916	0.9852		100	100	1024.4	1022.6	29.9	36.7	16.9	0.8	11.9	成功	
		0.09	8.4	49.30	23.5	48.46	41.30	32.25	0.3243	0.9132			100	100	1024.4	1022.6	29.9	36.7	16.9	0.8	11.9	成功
	0.07	7.7	47.30	21.2	48.46	41.13	32.08	0.4369	0.9772	100		100		1024.4	1022.6	29.9	36.7	16.9	0.8	11.9	成功	
桥射联作	第9段 (3簇)	0.07	7.9	46.20	17.3	48.46	41.20	32.15	0.4146		0.9307	112	112	1011.7	1010.2	29.9	30.4	15.0	0.3	0.2	成功	
		0.05	6.7	42.50	25.8	49.63	42.07	32.78	0.6757	1.2060	115		115	1027.9	1030.9	25.9	28.8	15.3	10.2	0.6	成功	
		0.13	9.6	56.80	19.9	49.65	42.93	33.64	0.2608	0.8610			100	100	1024.4	1022.6	29.9	36.7	16.9	0.8	11.9	成功
		0.09	8.5	43.90	19	49.66	42.65	33.36	0.2002	0.7300				100	100	1024.4	1022.6	29.9	36.7	16.9	0.8	11.9
桥射联作	第10段 (3簇)	0.06	7.3	35	19.8	49.68	42.28	32.98	0.5594	1.0660		115	115		1027.9	1030.9	25.9	28.8	15.3	10.2	0.6	成功
		0.17	10.5	54.50	16	49.68	43.17	33.87	0.2198	0.8094	100		100	1024.4	1022.6	29.9	36.7	16.9	0.8	11.9	成功	
		0.13	9.6	54.20	17.6	49.69	42.93	33.63	0.5207	1.0430			100	100	1024.4	1022.6	29.9	36.7	16.9	0.8	11.9	成功
		0.06	7.3	35	19.8	49.68	42.28	32.98	0.5594	1.0660	100			100	1024.4	1022.6	29.9	36.7	16.9	0.8	11.9	成功

裂工艺的有6段(层位为长7₂亚段)。通过加酸处理、脉冲式段塞成功破开高应力的泥岩段,进入相对低应力的砂岩段,裂缝不断延伸扩展,并完成设计加砂,最终穿层成功12段、失败2段,成功率为85.7%,证实了页岩油水平井穿层压裂具有工程可行性。

3.2 穿层压裂失败原因分析

对压裂成功的12段施工曲线进行分析,射孔完成之后憋压压开地层时压力陡升,破裂压力较高,各段平均破裂压力为42.2MPa。前置液阶段裂缝在泥

岩中刚开始起裂,随排量稳步提升表现出明显的压力敏感性,施工压力很快升高。此时以小排量脉冲式加入多个1.0~5.0m³石英砂段塞打磨裂缝毛刺,帮助压力降低到安全范围,随后提高排量到设计值(图4)。泥岩中主裂缝扩展过程远比砂岩储层复杂困难,砂塞数量也多出2~3倍,压力持续波动。支撑剂进入裂缝铺置过程中,虽然已经设计了较低的平均砂比,但在阶梯抬升过程中也只能小幅度、多频次提高砂浓度,每个阶段持续时间不能太长。主裂缝扩展质量越高,压力敏感性就越低,越有利于以高浓度携砂液方式向裂缝加入支撑剂。

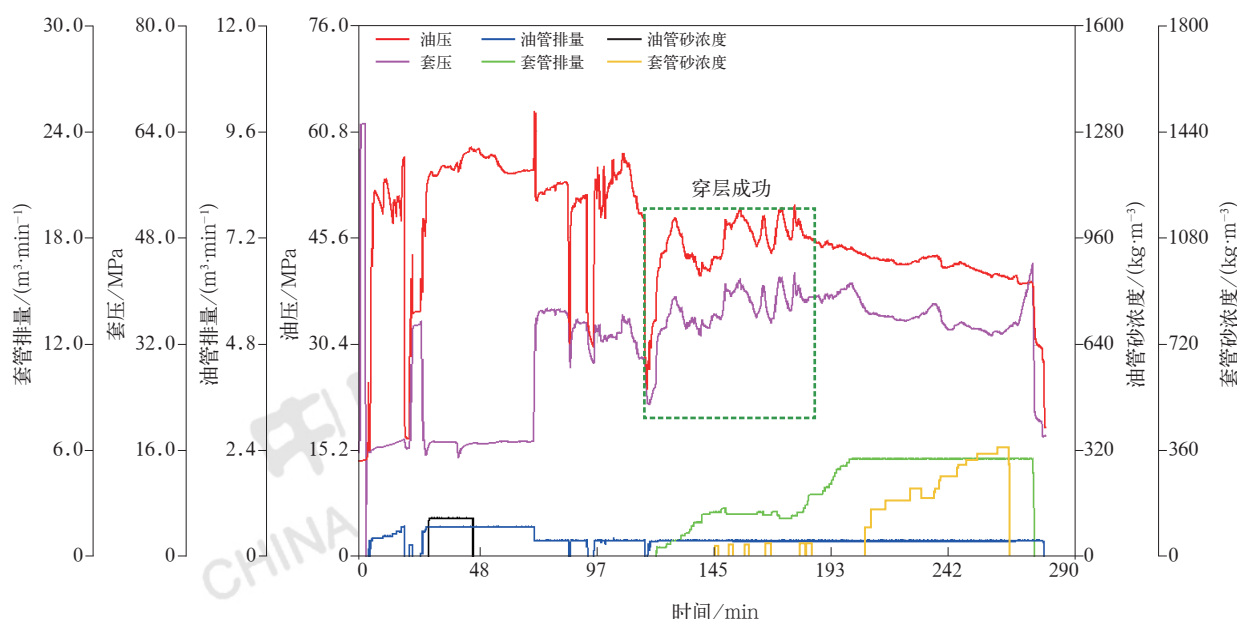


图4 H5井穿层压裂成功段施工曲线特征图

Fig.4 Construction curve of successful cross-layer fracturing stage in Well H5

可压裂性与岩石脆性和韧性有关,脆性指数越大、断裂韧性越小,可压裂性越好。利用测井数据计算各段岩石力学参数,再基于弹性参数法计算得到脆性指数、断裂韧性,将二者绘制交会图(图5),可以发现穿层失败的H5井第17段、H23井第9段均位于脆性指数较小、断裂韧性较大的难压区,断裂韧性成为泥岩裂缝开启的突出矛盾,最大水平主应力均比相邻穿层压裂段高,水平主应力差也均高于9.0MPa,裂缝很难开启形成复杂缝。

此外,还可以发现这两段泥质含量均超过40%,且孔隙度、渗透率远远低于有效储层物性下限^[22]。这在地层破裂过程中成为突出矛盾,在前置液阶段高速流体进入泥岩并持续冲击,流体逐渐泥质化削弱了对地层的破裂能力,裂缝尖端推进缓慢。采用

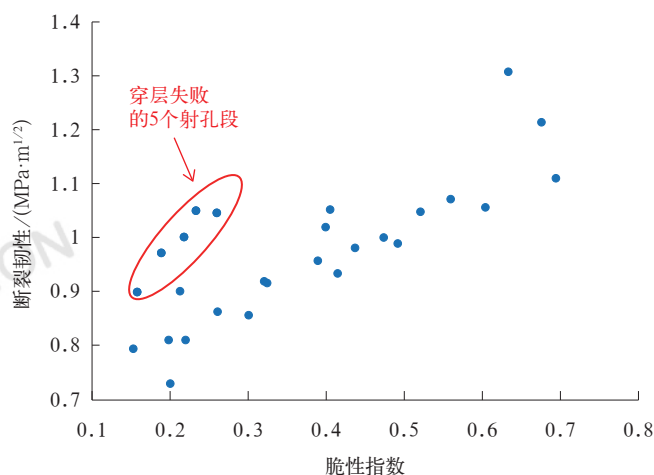


图5 穿层压裂段可压裂性评价参数交会图

Fig.5 Crossplot of reservoir fracability evaluation parameters of cross-layer fracturing stage

桥射联作压裂工艺进行穿层压裂时,有部分压裂段采用向上定向射孔,这样在有限的裂缝空间内流体容易回流,会二次减弱破裂效果。此时挤酸或砂塞打磨对经过强烈冲刷的泥岩裂缝面也收效甚微,异常高压、提升排量困难导致的长时间低排量无法供给足够能量^[23]。因此,高泥质含量成为制约穿层压裂成功的主要因素。

最后,从压裂曲线动态变化特征分析,并且为了排除段内簇间非均质性引起的缝间干扰对穿层压裂失败原因分析的影响^[24],选取采用连续油管底封拖动压裂工艺的压裂井H5井作为分析目标。H5井第17段喷砂射孔之后油压曲线有瞬时掉落,但实际上是

由于泥岩多发育薄层理,受挤压张开而吸收压力,出现了地层压开的假象。紧接着在前置液阶段排量逐步提升至设计排量过程中,工作压力持续升高,在加入两个砂塞之后仍没有改善,裂缝扩展不佳,多次出现异常高压。从连续油管以 $0.4\sim 2.0\text{m}^3/\text{min}$ 排量挤酸 3.0m^3 之后,继续尝试破裂地层,此时套管压力由 45.6MPa 升高到 53.2MPa ;后续经历两次前置液造缝过程持续高压、套压达到 54.0MPa ,逼近施工限压 55.0MPa (图6)。泥岩地层对压裂液吸收困难、出现憋压现象,波浪式造缝依然无法突破泥岩,只压开了分支的微裂缝、没有形成主裂缝,最终无法加砂、放弃压裂。

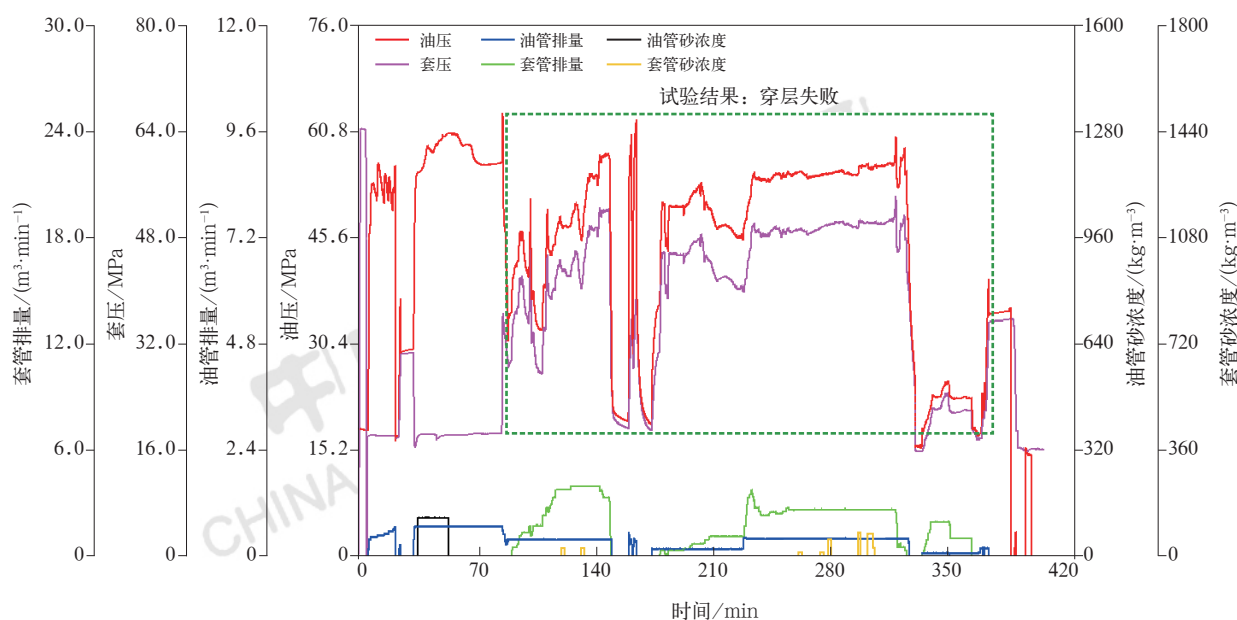


图6 H5井穿层压裂失败段施工曲线特征图

Fig.6 Construction curve of failure cross-layer fracturing stage in Well H5

3.3 压裂施工特征分析

应用统计学方法对每段压裂前置液阶段、携砂液阶段压力秒点数据求取均方差,表征整个裂缝扩展、支撑剂铺置过程压力波动性,并结合单段地质属性、破裂压力、平均施工压力综合分析单段非均质性加砂难易情况。

H5井共完成压裂41段,其中对第8、17、19、20、21、33、36段进行穿层压裂,除第17段外均试验成功。穿层成功的6段均方差平均为4.2,破裂压力平均为 50.8MPa ,工作压力平均为 33.0MPa ;对比所有段平均均方差4.4、平均破裂压力 56.9MPa 、平均工作压力 31.1MPa 相差不大(图7)。H23井

共完成压裂18段,其中第9段共4簇穿层失败,第10、11、12段(每段3簇)穿层成功。这4段均方差平均为7.6,破裂压力平均为 27.7MPa ,工作压力平均为 40MPa ;对比所有段平均均方差7.6、平均破裂压力 31.2MPa 、平均工作压力 34.0MPa 也是较为接近(图8)。这表明,非储层厚度不超过2m时,没有表现出强非均质性,压裂过程中压力变化特征与常规砂岩段基本相符。同时考虑孔渗物性、泥质含量、储层综合甜点因素,没有发现与压力变化有明显相关性(表3)。从两种不同压裂工艺穿层试验压力特征来看,非储层段可以发生裂缝扩展行为,但在压裂关键参数设计方法上要区别于砂岩储层进行针对性优化。

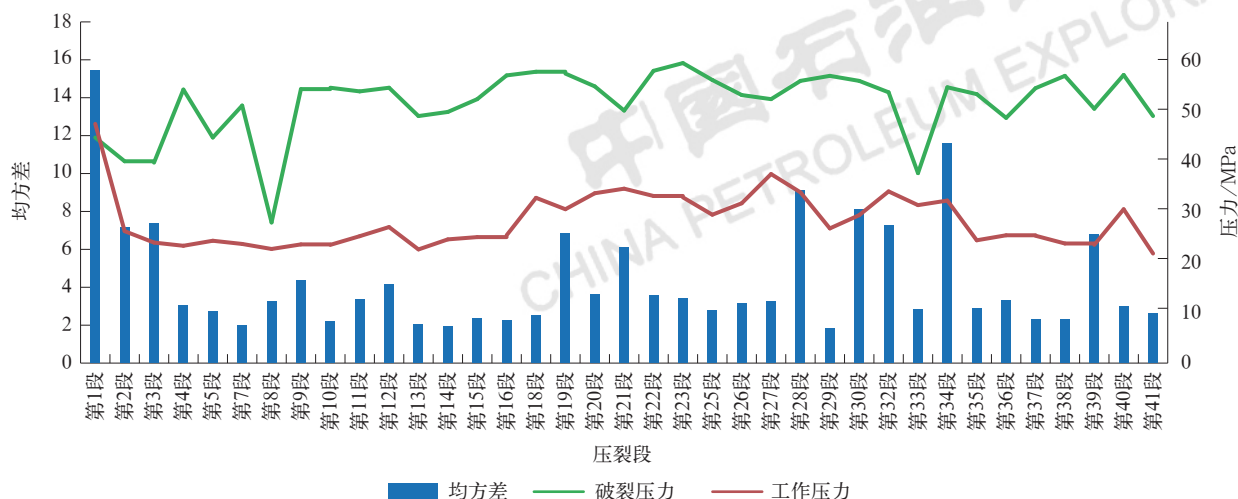


图7 H5井单段单簇压裂数据统计分析图

Fig.7 Statistics of fracturing engineering data of single cluster and single stage in Well H5

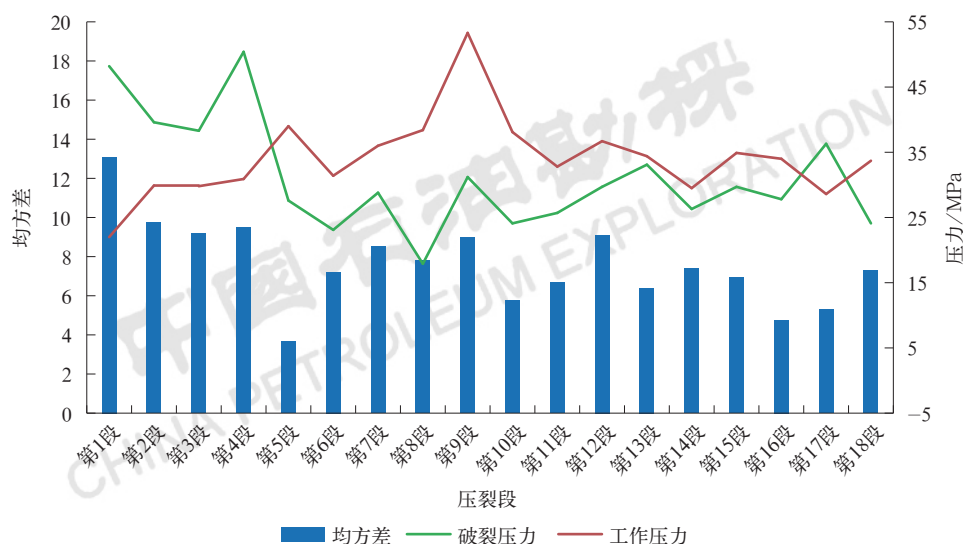


图8 H23井分段多簇压裂数据统计分析图

Fig.8 Statistics of fracturing engineering data of multi-cluster and multi-stage in Well H23

另外,将两种工艺对比发现,采用水力喷砂射孔的单段单簇穿层压裂段破裂压力远大于工作压力,而等孔径定向火力射孔的分段多簇穿层压裂段破裂压力却小于工作压力(图7、图8)。H5井采用6个4.3mm喷嘴、40/70目石英砂 0.8m^3 、射孔排量 $0.9\sim 0.95\text{m}^3/\text{min}$ 进行水力喷砂射孔,虽然射孔瞬时穿透不如等孔径定向火力射孔,但井下电视能清晰观察到3个孔眼(图9a),水力喷砂射孔孔眼形态正常,有明显过砂冲蚀现象,对孔眼磨蚀程度相对均匀,这样不会因为孔眼问题影响裂缝起裂及后续均衡扩展。单一裂缝更容易克服地应力,裂缝尖端能量集中保持相对稳定的扩展方向,有利于后期突破泥岩、砂岩界面,裂缝宽度、长度也优于多簇穿层压裂。

H23井采用89-16-90U/D-105射孔枪、S3406D射孔弹进行等孔径定向火力射孔,孔眼形态差异性大、有明显毛刺(图9b-e)。在泥质含量较高的穿层压裂段,深穿透的等孔径定向火力射孔对压开泥岩有较好的效果,但簇间非均质性导致射孔质量差异。在泥岩段同时开启3~4条裂缝会发生竞争扩展,各簇应力不均耦合孔眼动态磨蚀的影响,较高应力簇裂缝扩展受到抑制,甚至可能出现停止进液、裂缝不能充分扩展的情况^[25],这样导致突破泥岩并持续扩展到砂岩层相对困难。

4 穿层压裂效果评价

压裂过程压力数据和加砂结果已经证明裂缝可以穿透泥岩进入砂岩储层扩展,但在完成压裂施工之后

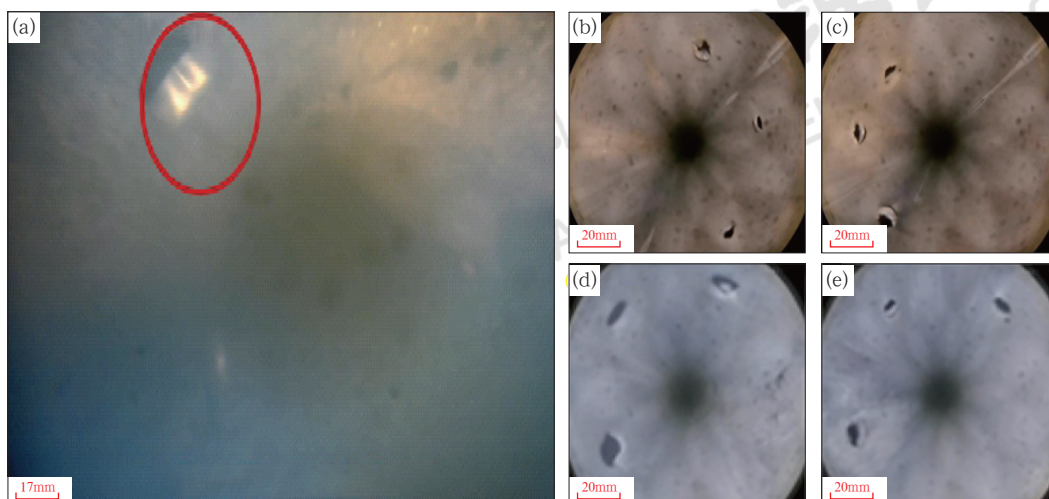


图9 不同射孔方式孔眼图像对比

Fig.9 Comparison of borehole images with different perforation methods

(a) H5 井, 2346.2m, 水力喷砂射孔孔眼; (b) H23 井, 3208.7m, 等孔径定向火力射孔孔眼; (c) H23 井, 3001.6m, 等孔径定向火力射孔孔眼; (d) H23 井, 2899.6m, 等孔径定向火力射孔孔眼; (e) H23 井, 2785.6m, 等孔径定向火力射孔孔眼

裂缝是否还能维持并能构建有效渗流通道, 是穿层压裂有效的重要评价指标。为此, 采用示踪剂分段产能测试定量分析穿层压裂段产液、产油贡献情况^[26]。

在 H23 井、H25 井全井段加入示踪剂, 用以监测每段产出情况。在每段压裂前置液阶段开始伴注水相示踪剂直至加砂结束, 从低黏携砂液开始伴注油相示踪剂直至加砂结束, 每段依靠封隔工具确保对应示踪剂注入指定层段。其中, H23 井共压裂 18 段, 分别投加 18 种水相示踪剂、18 种油相示踪剂; H25 井共压裂 27 段, 分别投加 27 种水相示踪剂、27 种油相示踪剂。

4.1 穿层压裂有效性评价

H23 井压后焖井 140 天, 见油时间 27 天, 见油时返排率为 6.4%。穿层的第 10、11、12 段施工规模小于其余段的平均水平, 示踪剂综合解释结果显示第 9~12 段产水贡献率分别是 12.0%、0.6%、0.9%、0.8% (表 3、图 10)。H25 井压后焖井 38 天, 见油时间 61 天, 见油时返排率为 7.7%。穿层的第 9、10 段施工规模小于其余段的平均水平, 第 9 段产水贡献率为 0.3%、第 10 段产水贡献率为 10.2% (表 3), 超过该井单段平均水平。

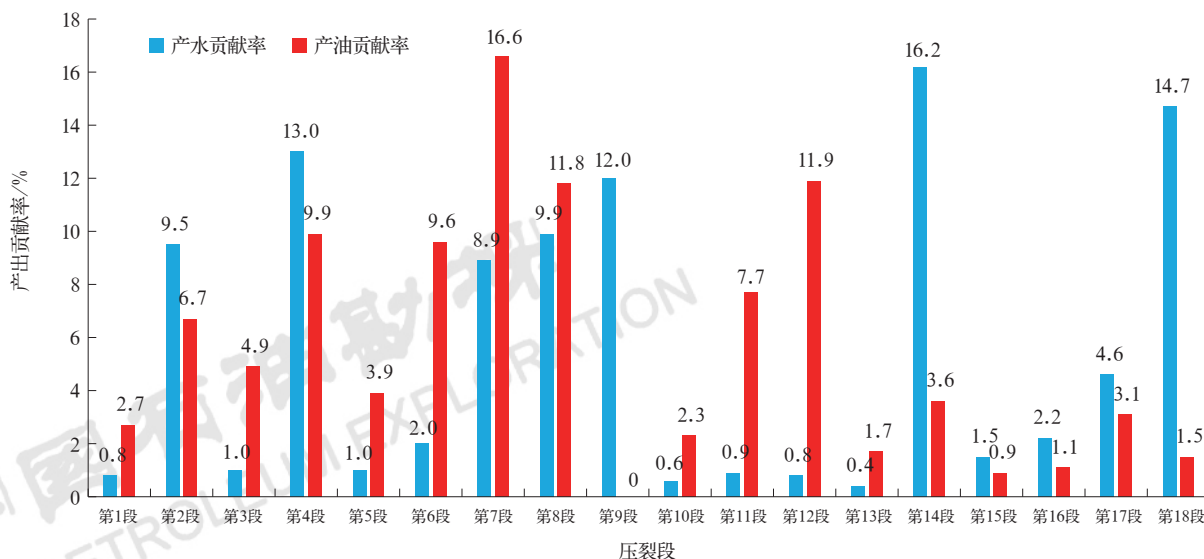


图10 H23 井各段产出贡献率柱状图

Fig.10 Output contribution of various stages in Well H23

H23 井穿层压裂的第 10~12 段产水贡献率均不超过 1%, 但同样进行穿层压裂的第 9 段却出现产水贡献率异常高值 12%。这种明显的差距是因为向上穿层的第 9 段没有加砂, 未形成有效主裂缝。前置液实际入地 756.8m^3 , 是设计量 440.0m^3 的 1.7 倍, 其中以滑溜水为前置液加入 141.8m^3 时施工压力已经开始上升, 为了降低滤失和摩阻, 临时更换注入高黏液 615.0m^3 。液体全部进入泥岩部分开启的微小裂缝、层理中, 裂缝延展末端的泥质上部顶板成为遮挡条件。在放喷排液初期第 9 段产水量持续高位, 且日产水量波动较大 (图 11a), 这是储存的大量高黏液

在压差下依靠液体自身弹性能快速流动, 靠近井筒的液体最先沿相对较好裂缝排出, 随深部液体不断流动, 对分布不均、规模差异大的泥质破碎带再次动态改造, 表现出日返排量波动变化。到排液后期穿层的 4 段产水量都极少, 但还是有持续产水流动。H25 井穿层的第 9 段只在初期产水、后期产水量较少, 第 10 段产水持续 (图 11b)。

基于穿层压裂段压后返排持续产水, 反映出经过焖井、压力扩散之后, 泥岩段、砂岩段的裂缝没有受应力闭合, 仍然存在有效渗流通道^[27]。各段产水贡献率对比发现, 穿层压裂缝的质量差异很大 (图 12)。

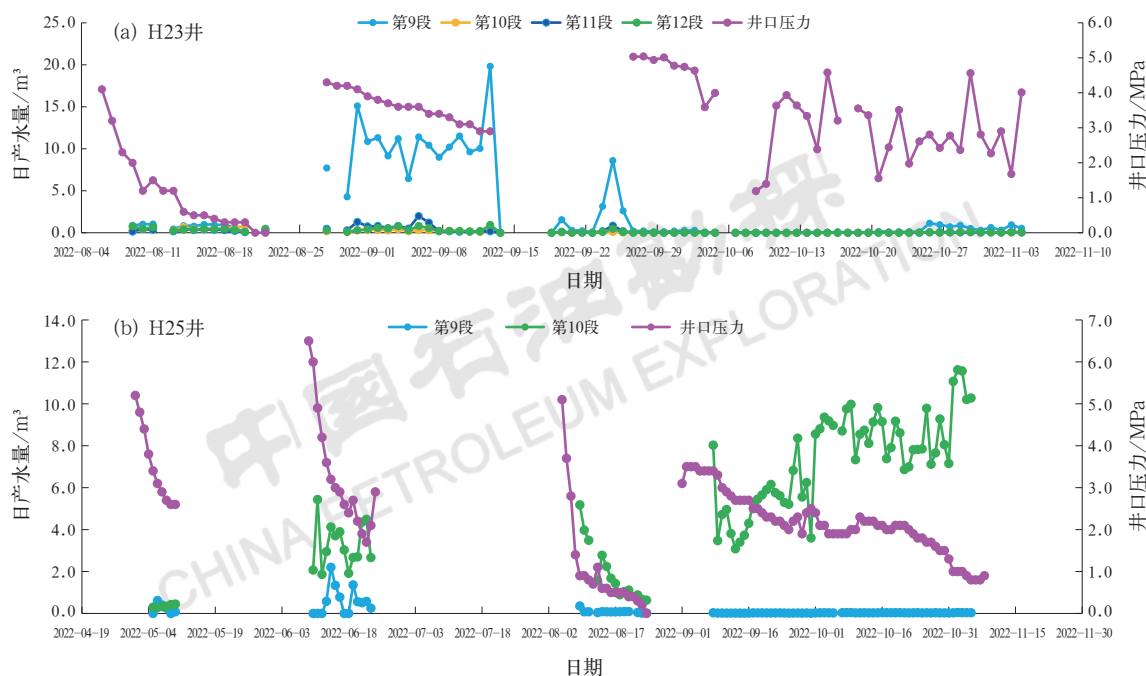


图 11 穿层段日产水量曲线图

Fig.11 Water rate curve of cross-layer fracturing stages

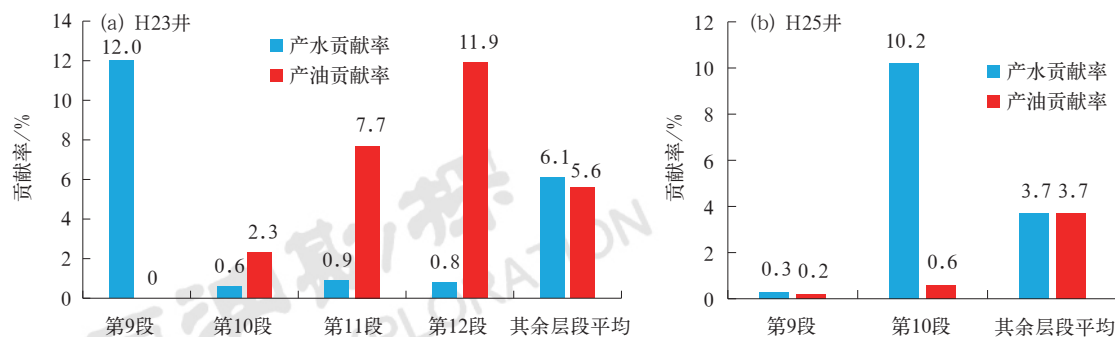


图 12 穿层压裂段产出贡献率对比图

Fig.12 Comparison of output contribution rates of cross-layer fracturing stages

4.2 产能贡献确定性评价

根据油相示踪剂解释结果分析, H23 井第 9 段未

检测到产油, 穿层的第 10~12 段产油贡献率分别是 2.3%、7.7%、11.9%。实际产油曲线显示第 10、12 段最先见油, 且第 12 段生产后期也持续产油, 第 10

段后期产油较少,第11段产油波动较大(图13a)。结合第11、12段泥质含量分别平均为18.7%、20.7%,含油饱和度分别平均为49.3%、47.6%,具有较好的穿层和产油条件,试验结果表明第11、12段穿层效果较好,第9、10段相对一般。H25井穿层压裂的第9段、第10段见油时间明显比H23井穿层压裂段长,这两段储层孔渗等条件相近,产油曲线表现出基本一致的变化趋势(图13b),但日产量还处于初期低产阶段。

H25井穿层的第9、10段产油贡献率分别是0.2%、0.6%。这两段泥质含量分别平均为21.6%、17.8%,含油饱和度分别平均为47.7%、47.9%,地层条件与H23井第11、12段相当,但产油能力却较差(图14)。这表明经过穿层压裂已经建立了沟通砂岩储层的有效裂缝,形成了稳定的渗流通道,各段已有确定性产能贡献;贡献率大小的不同反映出主裂缝质量参差不齐、导流能力差异较大^[28],但也有部分压裂段成为主产油层段,具备压裂改造的经济性。

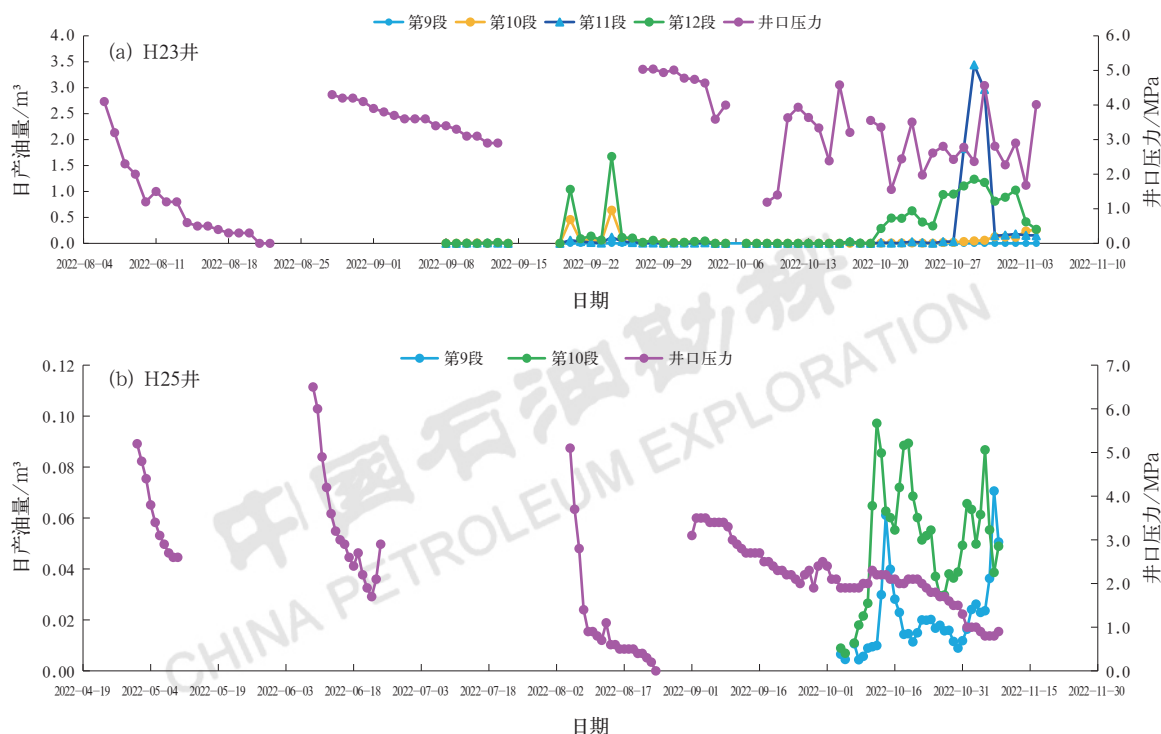


图13 穿层压裂段日产油量曲线图

Fig.13 Oil rate curve of cross-layer fracturing stages

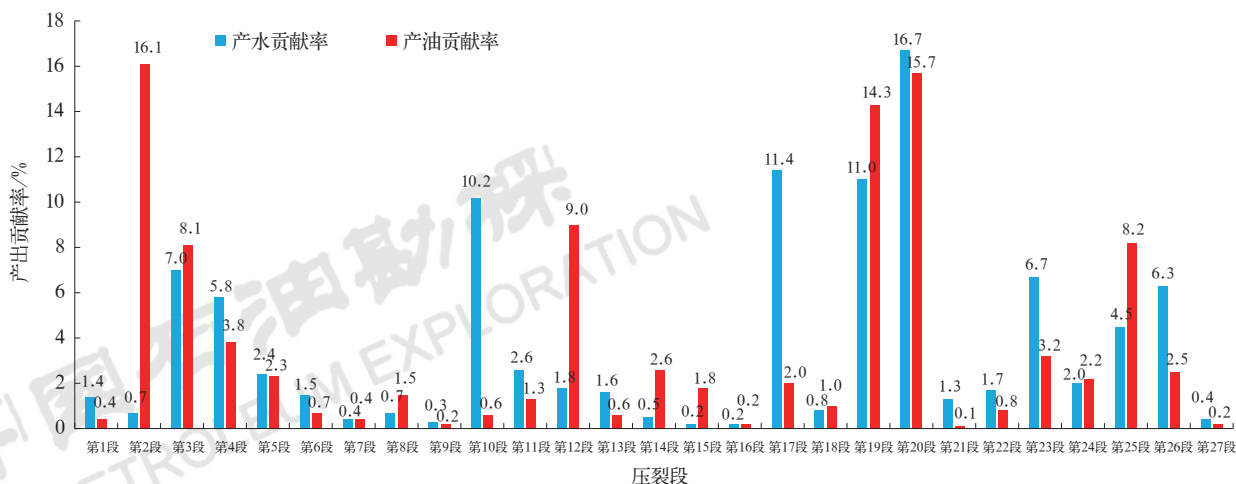


图14 H25井各段产出贡献率柱状图

Fig.14 Output contribution of various stages in Well H25

4.3 产油效率对比

H5井实施穿层压裂6段,占总压裂段数的14.6%。在投产245天后该井累计产油1422t,与同平台同一时间投产、钻遇率均超过80%的4口邻井

对比,累计产油量处于中等偏上水平,比H1井、H7井高出近一倍(表4)。此外,该井平均百米油层日产油量达到0.65t,要高于邻井,产油效率有明显优势。因此,对于有效储层短、钻遇率低的水平井采用穿层压裂,可对单井产量具有明显贡献。

表4 穿层压裂井H5井产油效率对比表

Table 4 Comparison of oil production efficiency between cross-layer fracturing well H5 and offset wells

类别	井号	层位	钻遇情况				改造参数			投产情况			
			水平段长度/m	I类油层厚度/m	II类油层厚度/m	钻遇率/%	段数	入地液量/m ³	加砂量/m ³	投产时间	投产天数/d	累计产油/t	百米油层日产油量/t
试验井	H5	长7 ₁	1961	292.7	441.3	37.4	41	24797	2433	2022-02-19	245	1422	0.65
邻井	H1	长7 ₁	2064	1530	454	96.1	64	44321	4819	2022-02-19	245	677	0.14
	H7	长7 ₁	2035	1087	554	80.6	51	34648	3841	2022-02-19	245	711	0.18
	H9	长7 ₁	2045	1232	464	82.9	60	34880	3723	2022-02-19	245	2371	0.57
	H11	长7 ₁	2041	1429	331	86.2	54	34544	3692	2022-02-19	245	1682	0.39

5 结论

(1) 页岩油水平井出层段穿层压裂不仅要考虑井眼轨迹与相邻砂岩储层距离,还必须分析非储层段泥岩的可压裂性。庆城油田华池区块在井眼距相邻砂岩储层不超过3m、泥质含量不高于40%,且有一定含油饱和度时,具备穿层压裂的可行性。

(2) 穿层压裂成功的评价条件不能仅依靠裂缝实现突破地层界面、扩展延伸至相邻储层行为的完成,而要持续关注经过焖井、压力扩散之后,在岩性非均质性、应力差、强断裂韧性条件下穿层裂缝的保留度。在上下不同岩层段裂缝都没有发生闭合、仍然保持有效渗流通道,这样才表明穿层压裂成功。

(3) 受砂泥互层非均质性、射孔质量、可压裂性影响,穿层压裂段表现出较强的产水、产油贡献差异,但可以证实非储层段穿层压裂后是具有确定性产能贡献的,可以提高低钻遇水平井单井产量。

参考文献

- [1] 付金华,李士祥,牛小兵,等.鄂尔多斯盆地三叠系长7段页岩油地质特征与勘探实践[J].石油勘探与开发,2020,47(5):870-883.
Fu Jinhua, Li Shixiang, Niu Xiaobing, et al. Geological characteristics and exploration of shale oil in Chang 7 member of Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020,47(5):870-883.
- [2] 付金华,刘显阳,李士祥,等.鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7段页岩油勘探发现与资源潜力[J].中国石油勘探,2021,26(5):1-11.
Fu Jinhua, Liu Xianyang, Li Shixiang, et al. Discovery and

resource potential of shale oil of Chang 7 member, Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021,26(5):1-11.

- [3] 王瑞杰,王永康,马福建,等.页岩油地质工程一体化关键技术研究与应用:以鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7段为例[J].中国石油勘探,2022,27(1):151-163.
Wang Ruijie, Wang Yongkang, Ma Fujian, et al. Research and application of key technologies of geology and engineering integration for shale oil development: a case study of Chang 7 member of the Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2022,27(1):151-163.
- [4] 石道涵,张矿生,唐梅荣,等.长庆油田页岩油水平井体积压裂技术发展与应用[J].石油科技论坛,2022,41(3):10-17.
Shi Daohan, Zhang Kuangsheng, Tang Meirong, et al. Development and application of shale oil horizontal well volume fracturing technology in Changqing Oilfield[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2022,41(3):10-17.
- [5] 张益,卜向前,齐银,等.鄂尔多斯盆地姬塬油田长7段页岩油藏地质工程一体化油藏开发对策:以安83井区为例[J].中国石油勘探,2022,27(5):116-129.
Zhang Yi, Bu Xiangqian, Qi Yin, et al. Geology and engineering integrated development countermeasures of Chang 7 member shale oil reservoir in Jiyuan Oilfield, Ordos Basin: a case study of An 83 well block[J]. China Petroleum Exploration, 2022,27(5):116-129.
- [6] 文志刚,罗雨舒,刘江艳,等.陇东地区三叠系长7段页岩油储层孔隙结构特征及成因机制[J].岩性油气藏,2022,34(6):47-59.
Wen Zhigang, Luo Yushu, Liu Jiangyan, et al. Pore structure characteristics and genetic mechanism of Triassic Chang 7 shale oil reservoir in Longdong area[J]. Lithologic Reservoirs, 2022, 34(6):47-59.
- [7] 张矿生,王文雄,徐晨,等.体积压裂水平井增产潜力及产能影响因素分析[J].科学技术与工程,2013,13(35):10475-10480.
Zhang Kuangsheng, Wang Wenxiong, Xu Chen, et al. Analysis on stimulation potential and productivity influencing factors of network fractured horizontal well[J]. Science Technology and Engineering, 2013,13(35):10475-10480.

- [8] 朱庆忠, 杨延辉, 左银卿, 等. 中国煤层气开发存在的问题及破解思路[J]. 天然气工业, 2018, 38(4): 96–100.
Zhu Qingzhong, Yang Yanhui, Zuo Yinqing, *et al.* CBM development in China: challenges and solutions[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(4): 96–100.
- [9] 许耀波, 朱玉双, 张培河. 紧邻碎软煤层的顶板岩层水平井开发煤层气技术[J]. 天然气工业, 2018, 38(9): 70–75.
Xu Yaobo, Zhu Yushuang, Zhang Peihe. Application of CBM horizontal well development technology in the roof strata close to broken-soft coal seams[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(9): 70–75.
- [10] 单学军, 张士诚, 李安启, 等. 煤层气井压裂裂缝扩展规律分析[J]. 天然气工业, 2005, 25(1): 130–132.
Shan Xuejun, Zhang Shicheng, Li Anqi, *et al.* Analyzing the fracture extend law of hydraulic fracturing in coalbed gas wells[J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(1): 130–132.
- [11] 李爱波. 薄互层致密砂岩水平井穿层压裂影响因素研究[J]. 江汉石油职工大学学报, 2020, 33(5): 10–13.
Li Aibo. Study of influence factors for horizontal well layer-penetration fracturing in thin interbed tight sand reservoirs[J]. Journal of Jiangnan Petroleum University of Staff and Workers, 2020, 33(5): 10–13.
- [12] 唐书恒, 朱宝存, 严志丰. 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.
- [13] 郭天魁, 王云鹏, 陈铭, 等. 煤层顶板水平井穿层压裂适应性数值模拟[J]. 天然气工业, 2021, 41(11): 74–85.
Guo Tiankui, Wang Yunpeng, Chen Ming, *et al.* Numerical simulation of adaptability of horizontal well layer-penetrating fracturing in the roof of coal seam[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(11): 74–85.
- [14] 范明福. 煤层气顶板水平井穿层压裂技术的应用[J]. 天然气勘探与开发, 2022, 45(2): 122–132.
Fan Mingfu. Layer-penetrating fracturing for horizontal well in roof of coal seam[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2022, 45(2): 122–132.
- [15] 李浩哲, 姜在炳, 范耀. 基于裂缝尖端应力强度因子的裂缝穿层行为分析[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2019, 34(1): 76–82, 126.
Li Haozhe, Jiang Zaibing, Fan Yao. Analysis of crack across-layer extension behavior based on stress intensity factor at crack tip[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2019, 34(1): 76–82, 126.
- [16] 王赓钊, 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.
- [17] 陈相君, 穆朗枫, 吴忠宝, 等. 穿层压裂水平井产能计算方法[J]. 大庆石油地质与开发, 2019, 38(3): 65–72.
Chen Xiangjun, Mu Langfeng, Wu Zhongbao, *et al.* Calculating method of the productivity for the trans-layer fractured horizontal wells[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2019, 38(3): 65–72.
- [18] 陈峥嵘, 邓金根, 朱海燕, 等. 定向射孔压裂起裂与射孔优化设计方法研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(8): 2309–2316.
Chen Zhengrong, Deng Jingen, Zhu Haiyan, *et al.* Research on initiation of oriented perforation fracturing and perforation optimization design method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(8): 2309–2316.
- [19] 李忠兴, 屈雪峰, 刘万涛, 等. 鄂尔多斯盆地长7段致密油合理开发方式探讨[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(2): 217–221.
Li Zhongxing, Qu Xuefeng, Liu Wantao, *et al.* Development modes of Triassic Yanchang Formation Chang 7 member tight oil in Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(2): 217–221.
- [20] 唐鹏飞. 致密油水平井裂缝穿层及延伸规律[J]. 大庆石油地质与开发, 2019, 38(6): 169–174.
Tang Pengfei. Fracture penetration and propagation laws in tight-oil horizontal wells[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2019, 38(6): 169–174.
- [21] 焦方正. 鄂尔多斯盆地页岩油缝网波及研究及其在体积开发中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(5): 1181–1188.
Jiao Fangzheng. FSV estimation and its application to development of shale oil via volume fracturing in the Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(5): 1181–1188.
- [22] 马俊修, 兰正凯, 王丽荣, 等. 有效改造体积压裂效果评价方法及应用[J]. 特种油气藏, 2021, 28(5): 126–133.
Ma Junxiu, Lan Zhengkai, Wang Lirong, *et al.* Evaluation method and application of ESRV fracturing effect[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2021, 28(5): 126–133.
- [23] 陈超峰, 王波, 王佳, 等. 吉木萨尔页岩油下甜点二类区水平井压裂技术[J]. 石油钻探技术, 2021, 49(4): 112–117.
Chen Chaofeng, Wang Bo, Wang Jia, *et al.* Fracturing technologies of horizontal well in the second-class shale oil reservoirs of the lower sweet spot areas in Jimusaer[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(4): 112–117.
- [24] 慕立俊, 赵振峰, 李宪文, 等. 鄂尔多斯盆地页岩油水平井细切割体体积压裂技术[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(3): 626–635.
Mu Lijun, Zhao Zhenfeng, Li Xianwen, *et al.* Fracturing technology reservoir volume with subdivision cutting for shale oil horizontal wells in Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(3): 626–635.
- [25] 张士诚, 杨鹏, 邹雨时, 等. 考虑射孔孔眼磨蚀对多裂缝扩展的影响规律[J]. 天然气工业, 2022, 42(10): 63–73.
Zhang Shicheng, Yang Peng, Zou Yushi, *et al.* Influence laws of perforation erosion on multi-fracture propagation[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(10): 63–73.
- [26] 钟萍萍, 陆峰, 游雨奇, 等. 基于示踪剂监测的压裂裂缝体积的拟合方法及应用[J]. 钻采工艺, 2022, 45(4): 109–113.
Zhong Pingping, Lu Feng, You Yuqi, *et al.* Fitting method of fracture volume calculation based on tracer monitoring and its application[J]. Drilling and Production Technology, 2022, 45(4): 109–113.
- [27] 姚旭. 致密油水平井分段压裂裂缝延伸规律数值模拟[J]. 大庆石油地质与开发, 2019, 38(6): 162–168.
Yao Xu. Numerical simulation of the fracture extension law for the staged fracturing in the tight-oil horizontal well[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2019, 38(6): 162–168.
- [28] 陈铭, 张士诚, 胥云, 等. 水平井分段压裂平面三维多裂缝扩展模型求解算法[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(1): 163–174.
Chen Ming, Zhang Shicheng, Xu Yun, *et al.* A numerical method for simulating planar 3D multi-fracture propagation in multi-stage fracturing of horizontal wells[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(1): 163–174.