

·油气钻采工程·

东营凹陷多薄层低渗透滩坝砂 储层分层压裂工艺优化

马庆利

(中国石化胜利石油工程有限公司 井下作业公司, 山东 东营 257077)

摘要:滩坝砂储层具有纵向跨度大、薄层多、物性差及非均质性强等特征,常规笼统压裂效果差,逐级压裂改造费用高、操作复杂,开展分层压裂工艺优化研究具有重要的生产意义。以东营凹陷滩坝砂为例,针对压裂纵向改造程度低、有效裂缝长度和导流能力不足的难点,首先,通过分层地应力剖面确定、分层集中射孔优化和分层压裂临界施工排量优化,从而优化纵向压裂裂缝参数,提高长井段多薄层分层压裂纵向改造程度;然后,通过对裂缝参数、施工参数、支撑剂和低伤害压裂液体系的优选,实现层内支撑剂铺置优化,提高层内压裂改造程度。在滨438井区的分层压裂现场应用结果表明,实施分层压裂3个月,平均产油量是邻井常规笼统压裂产油量的2.2倍,充分说明了该方法的有效性。

关键词:多薄层 低渗透 滩坝砂 分层压裂 工艺优化 东营凹陷

中图分类号:TE357.13

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2017)02-0121-06

Optimization of separate layer fracturing technology in multi-thin-layer and low-permeability beach-bar sandstone reservoirs in Dongying sag

Ma Qingli

(Downhole Operation Company, Shengli Petroleum Engineering Company, Ltd., SINOPEC,
Dongying City, Shandong Province, 257077, China)

Abstract: Beach-bar sandstone reservoirs are characterized by large longitudinal span, multiple thin layers, poor physical properties and strong heterogeneity. Traditional integral fracturing has poor effect. Step-by-step fracturing costs high with complex operation. Optimization of the separate layer fracturing technology has crucial significance on production. Aimed at the difficulty about low degree of longitudinal stimulation, lacking of effective fracture length and flow conductivity, the beach-bar sandstone reservoirs in Dongying sag were researched. First, in-situ stress profile was determined, concentrated perforation and critical discharge capacity in various layers was optimized. Fracture parameters of the vertical fracturing were optimized. The degree of longitudinal stimulation of long-section and multi-thin-layer reservoir was improved using separate layer fracturing. Second, the effective placement of proppant was realized and the degree of layer stimulation was improved by optimizing the fracture parameters, operation parameters, proppant and low-damage fracturing fluid system. The application result of separate layer fracturing in Bin 438 well block show that the average oil production after three months of the separate layer fracturing is 2.2 times of that of the integral fracturing in adjacent wells, which demonstrates the effectiveness of this method.

Key words: multi-thin layers; low permeability; beach bar sand; separate layer fracturing; technology optimization; Dongying sag

收稿日期:2016-12-12。

作者简介:马庆利(1967—),男,山东博兴人,高级工程师,硕士,从事与压裂和试油相关的油气勘探与开发技术研究。联系电话:(0546)8747933, E-mail: maqingli.slyt@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项“低渗砂岩储层提高压裂裂缝复杂程度工艺技术研究”(2016ZX05006-002),国家杰出青年科学基金项目“低渗与致密油气藏压裂酸化”(51525404)。

滩坝砂储层是发育于滨浅湖地带的一种重要储集体,是滩砂和坝砂的总称^[1]。胜利油区东营凹陷和沾化凹陷广泛分布滩坝砂储层,以沙四段和沙二段发育为主。由于沉积碎屑经过滨湖水体环境的反复冲洗,储层以薄互层为主,岩性相对复杂,主要为泥质砂岩和灰质砂岩组合,同时具有低孔、低渗透—特低渗透及非均质性强等特征^[2-5]。针对该类多薄层低渗透储层,常规笼统压裂纵向改造程度低、层内裂缝长度不够,压裂效果差,而逐级压裂改造费用高、操作复杂,开展分层压裂工艺优化研究具有重要的生产意义^[6-7]。为此,针对滩坝砂薄层多的储层特征,选用机械分层压裂工艺,优化施工参数,得到合理的裂缝形态,完成油井的经济化开发,以期多薄层储层开采提供参考和依据。

1 储层特征

东营凹陷滩坝砂储层埋深为2 800~4 000 m;主力含油层系为沙四段上亚段1,2和3砂组,含油井段长度为60~120 m,平均为85 m,油藏原始地层压力为30~46 MPa,压力系数为1.3~1.5,随着埋深的增加,压力系数增大,油藏饱和压力为11.6 MPa,地饱压差高达30 MPa。地层以高压—异常高压为主、地饱压差大、充满度高。

东营凹陷滩坝砂储层纵向上呈单层厚薄不均(0.5~10 m)、砂泥岩互层分布,横向上呈土豆状、条带状相间分布,连续性较差,隔层厚度为3.2~11.2 m。滩砂岩心渗透率为 $0.3 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $0.47 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔隙度平均为9.1%;最大孔喉半径一般约为0.5 μm ,平均为0.2 μm 。坝砂岩心渗透率为 $1.1 \times 10^{-3} \sim 13 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $5.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔隙度平均为13.3%;最大孔喉半径为3 μm ,平均为1.2 μm ,发育少量的微裂缝。滩坝砂储层岩性主要为含泥质不等粒岩屑长石砂岩和灰色致密砂岩,粒径主要为0.06~0.13 mm,以极细砂岩为主。矿物以石英为主,其次为斜长石、白云石和方解石。粘土矿物含量差异大,粘土矿物以伊利石和伊/蒙混层为主,伊利石含量为63%~92%,平均为74.8%;伊/蒙混层含量为7%~36%,平均为20.8%,含少量高岭石和绿泥石。储层敏感性为:无到弱速敏、中等偏弱到中等偏强水敏、弱应力敏感、无到弱碱敏和中等偏弱酸敏。储层岩石力学特征在平面上表现为:地应力分布复杂,人工裂缝方位为NE30°—NE110°,主要受大型断裂系统控制,局部方向一致,规律性强;纵向上,由于砂泥岩交互,岩性和矿物成

分差异大,岩石力学参数和地应力呈现分层差异的特征。东营凹陷滩坝砂储层整体上具有分布范围广、埋藏深、含油井段长、砂泥岩互层、单层厚度不均、物性差、低孔低渗透—特低渗透等特征。

2 储层改造难点

纵向改造程度低 滩坝砂储层纵向上含油井段较长,储层单层厚薄不均,层多且薄,砂泥岩互层分布。由于纵向上岩性及矿物成分复杂,岩石力学参数和地应力差异大,因此,进行多层笼统射孔、压裂可能导致储层不完全起裂,部分层段未能形成人工裂缝。

层内有效裂缝长度不足 由于层间存在应力差,造成裂缝开口程度差异大、流动分配不均,各层间裂缝长度不均。同时由于纵向上多层同时压裂,裂缝高度失控,部分非储层被压开,大量支撑剂分流进入隔层。说明各层间裂缝延伸不均、形成的裂缝形态与产能所需裂缝不匹配。

裂缝导流能力损失严重 储层致密、孔喉小,储层中粘土矿物吸水膨胀、分散运移,水锁伤害严重,胍胶等高分子压裂液及裂缝支撑剂嵌入、破碎等对裂缝导流能力的伤害大,导致裂缝导流能力损失严重。

3 分层压裂工艺优化

东营凹陷滩坝砂储层总跨度大、层系多、纵向和平面非均质性强,为提高储层动用程度,须采用分层压裂工艺。分层压裂工艺优化设计最终要实现2个目标:①纵向上最大程度动用所有层系;②平面上实现人工裂缝按产能需要在层内实现有效铺置。

3.1 纵向压裂裂缝有效匹配优化

3.1.1 分层地应力剖面确定

为了优化纵向分层射孔和压裂设计,须确定分层地应力剖面^[8]。首先,利用声波和密度测井数据计算动态岩石力学参数(动态泊松比和动态杨氏模量),利用三向地应力计算式得到动态岩石应力曲线;然后,通过岩石力学实验得到静态泊松比和静态杨氏模量,测试分析拟合得到动静力学参数的转换关系式;最后,通过三向地应力模型,确定静态岩石地应力曲线,其中构造应力系数通过前期压裂数据反演获取。动态岩石力学参数计算式、动静力学参数转换关系式和三向地应力计算式分别为

$$\begin{cases} \mu_d = \frac{\Delta t_s^2 - 2\Delta t_p^2}{2(\Delta t_s^2 - \Delta t_p^2)} \\ E_d = a \times 9.290\ 304 \times 10^7 \times \frac{\rho}{\Delta t_s^2} \times \frac{3\Delta t_s^2 - 4\Delta t_p^2}{\Delta t_s^2 - \Delta t_p^2} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \mu_s = 1.187\mu_d - 0.168 & R^2 = 0.819 \\ E_s = 0.857E_d - 2\ 261 & R^2 = 0.829 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \sigma_v = \int_0^H \rho(H)g dH \\ \sigma_h = \frac{\nu}{1-\nu}(\sigma_v - \alpha p_p) + K_H \frac{EH}{1+\nu} + \alpha p_p \\ \sigma_H = \frac{\nu}{1-\nu}(\sigma_v - \alpha p_p) + K_z \frac{EH}{1+\nu} + \alpha p_p \end{cases} \quad (3)$$

式中： μ_d 为动态泊松比； Δt_s 为地层横波时差， $\mu s/ft$ ； Δt_p 为地层纵波时差， $\mu s/ft$ ； E_d 为动态杨氏模量，MPa； a 为Biot系数； ρ 为测井体积密度， g/cm^3 ； μ_s 为静态泊松比； E_s 为静态杨氏模量，MPa； σ_v ， σ_h ， σ_H 分别为垂向、最小水平和最大水平主应力，MPa； H 为地层厚度，m； $\rho(H)$ 为上覆岩石的密度， kg/m^3 ； g 为重力加速度， m/s^2 ； ν 为泊松比； α 为孔隙弹性系数； p_p 为孔隙压力，MPa； K_H 为水平渗透率， $10^{-3} \mu m^2$ ； E 为杨氏模量，MPa； K_z 为垂直渗透率， $10^{-3} \mu m^2$ 。

利用停泵压力，可计算压力梯度从而得到测试点处的压力；根据实验室岩心差应变测试可以得到该点的地应力。由图1可以看出，根据停泵压力梯度和差应变测试计算得到的应力值与动态参数计算结果相吻合，充分说明计算模型准确可靠。

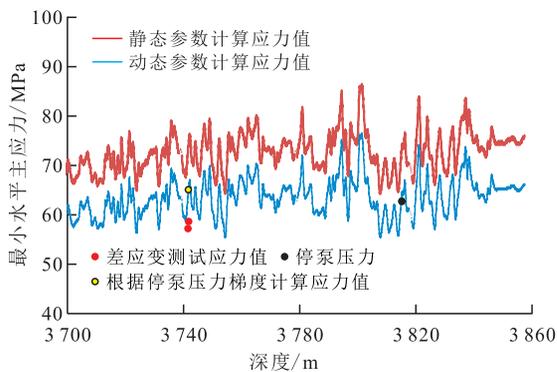


图1 夏353井地应力曲线
Fig.1 In-situ stress profile of Well Xia353

3.1.2 分层集中射孔优化

东营凹陷滩坝砂储层在具备分层压裂实施条件的同时，也存在缝高失控风险，因此需要优化射孔位置^[9-10]。总体原则为：保证相邻压裂层段不出现裂缝窜层。具体操作时，为了防止多裂缝和缝高失控，应尽量集中射孔打开主力层位，适当射开次要层位；当隔层厚度和产隔层应力差较小时，相邻

压裂段须对上压裂段底部和下压裂段顶部采取避射。同时，可根据储层层系分布、岩石力学参数、地应力剖面模拟优化射孔打开程度和位置。模拟结果(图2)表明，上压裂段裂缝底深必须大于下压裂段裂缝顶深，2条裂缝刚好相接时为临界状态。

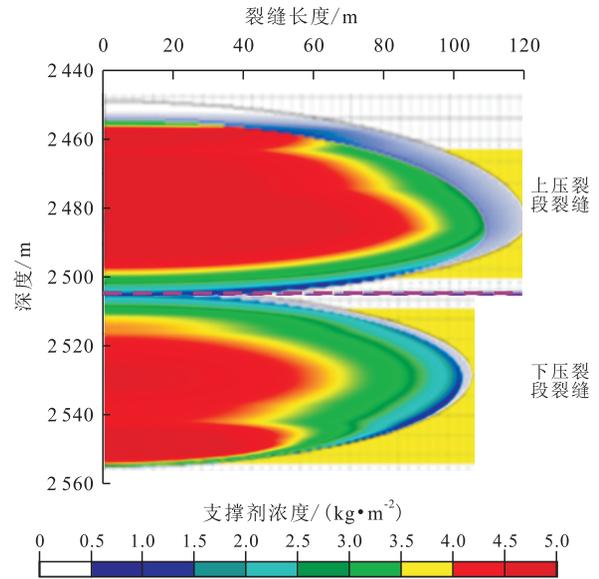


图2 夏353井上压裂段与下压裂段裂缝窜层临界状态

Fig.2 Critical state of interzone fractures at upper and lower sections in Well Xia353

3.1.3 分层压裂临界施工排量优化

根据分层集中射孔优化结果，结合不窜层的临界条件进行模拟分析，可以获得临界施工排量，从而为施工参数设计提供依据。分层压裂缝高主要受地层因素(隔层厚度和产隔层应力差)和施工因素(施工排量和压裂液粘度)影响^[11-14]。压裂液粘度通常受携砂需求量控制，变化空间不大，因此施工参数主要是确定临界施工排量。在计算得到产隔层厚度和应力差条件下，采用图2的方法，模拟不同施工排量上下压裂段裂缝底深与下压裂段裂缝顶深延伸结果，2条裂缝延伸曲线交会处即为临界施工排量。模拟结果(图3)表明，在计算得到的产隔

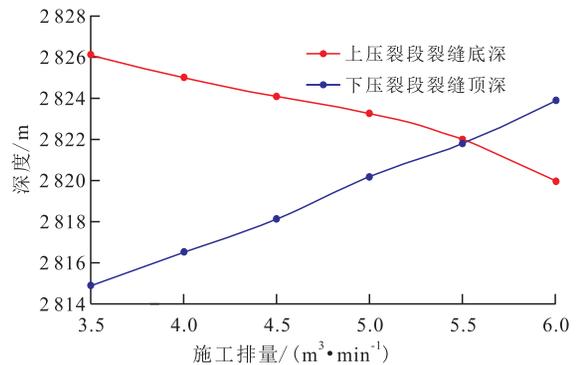


图3 不同施工排量下裂缝交会模拟结果

Fig.3 Simulation result of fracture heights intersection under different discharge conditions

层条件下,临界施工排量为 $5.5 \text{ m}^3/\text{min}$ 。某井上压裂段层厚为 26 m 、下压裂段层厚为 18 m ,分别计算上、下2条裂缝高度延伸所需的施工排量(表1),在临界施工排量条件下存在压窜风险,当施工排量大于临界施工排量时,上、下压裂段会发生压窜,当施工排量小于临界施工排量时,上、下压裂段未压窜,根据模拟结果可以更好地优化施工排量。

表1 不同储层条件下临界施工排量分析结果
Table1 Result of critical discharge under different reservoir conditions

隔层厚度/m	产隔层应力差/MPa	施工排量/($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)					
		3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
6	5	√	√	√	√	√	√
8	4	√	√	√	√	√	!
6	4	√	√	!	×	×	×

注:√为上、下压裂段未压窜;×为上、下压裂段压窜;!为上、下压裂段存在压窜风险。

3.2 层内压裂裂缝有效铺置优化

3.2.1 层内裂缝参数优化

压裂裂缝参数包括裂缝长度和裂缝导流能力,层内裂缝参数优化设计目标是得到与渗流能力匹配的裂缝长度与导流能力组合。

东营凹陷滩坝砂储层薄层多、物性差异大、非均质强,对裂缝参数的需求不同,单独一套裂缝参数优化结果无法满足全区储层差异化的需要。因此,根据测井和测试等资料得到储层物性的统计结果,将各个储层段按不同孔隙度、渗透率进行细化分类,进而根据每个小类储层的物性参数,分别优化对应最优的裂缝参数,为分层压裂设计提供理论依据。通过模拟计算不同裂缝长度和导流能力下的单井累积产油量,即可得到最优的裂缝长度和导流能力(图4)。

根据储层物性,将东营凹陷沙四段滩坝砂储层分为4个小类。每个小类储层的最优裂缝长度和最优导流能力如表2所示,进行分层压裂设计时,根据压裂段内各小层孔隙度、渗透率计算加权平均即可确定每个压裂段最优的裂缝参数。

3.2.2 层内施工参数优化设计

基于表2中的裂缝参数优化结果,结合临界施工排量优化结果,以裂缝不出现窜层、同时裂缝长度和导流能力达到裂缝参数优化结果为目标,最终通过压裂模拟软件模拟确定前置液量、携砂液量、砂量和施工排量等施工参数。

3.2.3 压裂材料优选

支撑剂优选 为保证层内裂缝具有足够的导

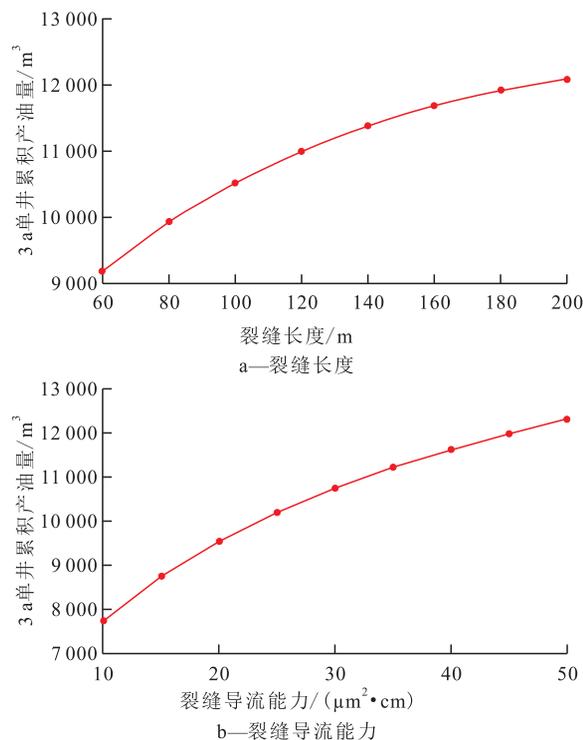


图4 不同裂缝长度和导流能力下的单井累积产油量
Fig.4 Single-well cumulative production under different fracture lengths and different conditions of flow conductivity

表2 压裂裂缝参数优化结果

Table2 Optimization result of hydraulic fracture parameters

储层分类	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	孔隙度, %	最优裂缝长度/m	最优裂缝导流能力/($\mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$)
A	>12	>14	120	45
B	5~12	11~14	140	40
C	1~5	9~11	160	35
D	<5	<9	180	30

流能力,根据储层深度和闭合应力,支撑剂选用Carprop20/40目高强陶粒。要求20/40目支撑剂密度小于等于 $1810 \text{ kg}/\text{m}^3$,在压力为 69 MPa 的条件下破碎率小于等于7%。

压裂液体体系优化 滩坝砂压裂液体体系分为羟丙基胍胶压裂液、羧甲基羟丙基胍胶压裂液和聚合物—表面活性剂压裂液3类。羟丙基胍胶压裂液由质量分数为0.5%~0.6%的HPG,0.3%SL-P,0.3%FP-II,1%~2%KCl,pH调节剂和0.3%FYC-160组成;羧甲基羟丙基胍胶压裂液由质量分数为0.5%~0.6%的JK-1002,0.3%FP-2,0.3%SL-P,0.6%JK-03,pH调节剂,0.6%JK-02和杀菌剂组成;聚合物—表面活性剂压裂液由0.6%疏水缔合聚合物和0.6%表面活性剂构成。优化后的压裂液体体系极大降低了对储层的伤害,不仅提高了储层改造效果,而且能够满足滩坝砂不同井温的需要。

4 现场应用

4.1 单井优化设计

滨438井位于济阳坳陷东营凹陷利津洼陷西坡滨438井区,是利津生油洼陷油气运移的有利部位。该井区沙河街组自西向东倾,地层逐渐加厚。滨438井区目的层位于沙四段上亚段纯下次亚段,沙四段发育滨浅湖相滩坝砂岩,其岩性细、单层薄、横向变化大且连通性较差,平面上叠合连片分布。

根据物性特征将储层分为2段,按照上述方法模拟得到第1段和第2段的最优裂缝长度分别为130和100 m(图5),最优裂缝导流能力分别为40和35 $\mu\text{m}^2\cdot\text{cm}$ 。同时根据测井曲线计算得到纵向地应力差为3~6 MPa,根据储层厚度、地应力差,模拟计算得到缝高扩展临界施工排量为4.5 m^3/min 。为避免纵向应力干扰和缝高扩展,在临界施工排量下采取变排量施工。在控制裂缝垂向延伸的同时,可增加支撑裂缝长度,提高裂缝内支撑剂浓度,从而有效地提高增产效果。

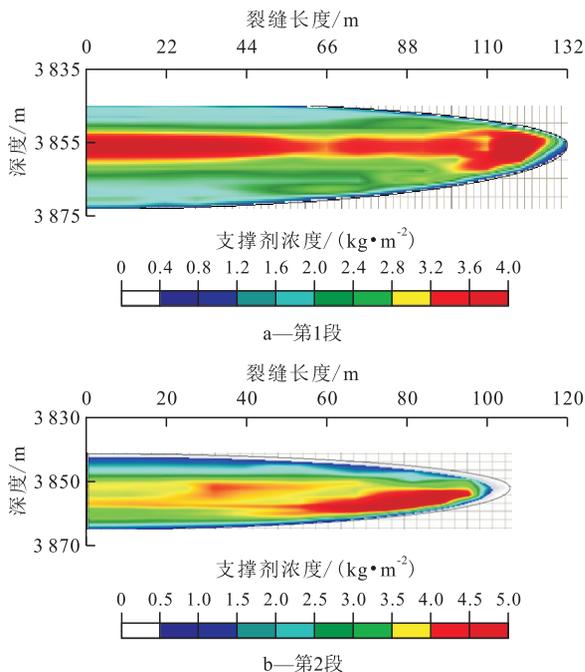


图5 滨438井裂缝形态模拟结果

Fig.5 Simulation results of fracture configuration in Well Bin438

4.2 应用效果对比

滨438井区共有压裂井31口,现场施工排量约为5.5 m^3/min ,常规笼统压裂后储层改造效果不明显。2015年11月对其中26口实施机械分层压裂,其余5口仍为常规笼统压裂,施工排量平均为4 m^3/min 。统计结果表明,实施分层压裂3个月后的平均

产油量是邻井常规笼统压裂产油量的2.2倍(图6),充分说明分层压裂的有效性以及所建分层压裂优化方法的有效性。

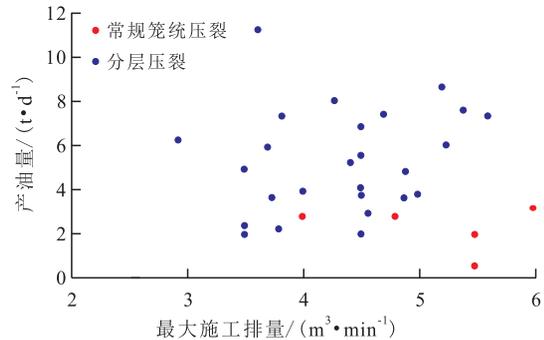


图6 滨438井区不同压裂工艺产油量对比

Fig.6 Comparison of production rates using different fracturing technologies in Bin438 well block

5 结论

东营凹陷滩坝砂储层具有纵向跨度大、薄层多、物性差和非均质性强的特征,常规笼统压裂纵向改造程度低、有效裂缝长度和导流能力不足,需要采用分层压裂工艺。

通过地应力剖面计算、分层集中射孔优化和临界施工排量确定,可以实现纵向分层压裂缝与多薄层储层的有效匹配,提高纵向改造程度。通过裂缝参数、施工参数和压裂材料优化,可以实现层内低伤害高导流压裂裂缝的有效铺置,提高层内压裂改造效果。

现场应用结果表明,综合纵向压裂裂缝优化匹配、层内压裂缝优化铺置的分层压裂设计优化方法,能极大地改善分层压裂效果,对于提高滩坝砂储层动用程度具有重要意义。

参考文献:

[1] 操应长,王健,刘惠民,等.东营凹陷南坡沙四上亚段滩坝砂体的沉积特征及模式[J].中国石油大学学报:自然科学版,2009,33(6):5-10.
Cao Yingchang, Wang Jian, Liu Huimin, et al. Sedimentary characteristics and models of beach-bar sandbodies in the upper part of the fourth member of Paleogene in the south slope of Dongying depression [J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2009, 33(6): 5-10.

[2] 温长云.东营凹陷滩坝砂低渗透油藏储层改造方法研究及应用[D].成都:西南石油大学,2014.
Wen Changyun. The research on reservoir fracture method and applications of low permeability reservoirs of beach bar sand in Dongying depression [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2014.

- [3] 杨鹏,丁晓琪,张峭楠,等.张家垛油田阜三段湖相滩坝砂储层特征[J].石油与天然气地质,2015,36(3):456-462.
Yang Peng, Ding Xiaoqi, Zhang Shaonan, et al.Characteristics of lacustrine beach-bar sandstone reservoirs in the 3rd Member of the Funing Formation in Zhangjiaduo oilfield[J].Oil & Gas Geology, 2015, 36(3):456-462.
- [4] 刘江涛,邓大伟,廖东良,等.沾化凹陷沙四段上亚段滩坝沉积特征及其主控因素[J].油气地质与采收率,2015,22(1):42-46.
Liu Jiangtao, Deng Dawei, Liao Dongliang, et al.Sedimentary characteristics and main controlling factors of the upper fourth member of Shahejie Formation in Zhanhua depression [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(1):42-46.
- [5] 张守鹏,滕建彬,尹玉梅,等.胜利探区低渗透油层产液量不足的原因及改造对策[J].石油实验地质,2015,37(4):518-524.
Zhang Shoupeng, Teng Jianbin, Yin Yumei, et al.Causes and countermeasures for low liquid production in low-permeability reservoirs in Shengli region[J].Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(4):518-524.
- [6] 李阳,曹刚.胜利油田低渗透砂岩油藏开发技术[J].石油勘探与开发,2005,32(1):123-126.
Li Yang, Cao Gang.Development technology for low-permeability sandstone reservoirs in Shengli Oilfield[J].Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(1):123-126.
- [7] 邓燕,郭建春,赵金洲.综合求取地应力剖面新方法及其在应用[J].岩性油气藏,2011,23(2):124-127.
Deng Yan, Guo Jianchun, Zhao Jinzhou.New method for calculating in-situ stress profile and its application[J].Lithologic Reservoirs, 2011, 23(2):124-127.
- [8] 尹建,郭建春,曾凡辉.低渗透薄互层压裂技术研究及应用[J].天然气与石油,2012,30(6):52-54.
Yin Jian, Guo Jianchun, Zeng Fanhui.Research and application of low permeability and thin interbed fracturing technology[J].Natural Gas and Oil, 2012, 30(6):52-54.
- [9] 雷鑫,张士诚,许国庆,等.射孔对致密砂岩气藏水力压裂裂缝起裂与扩展的影响[J].东北石油大学学报:自然科学版,2015, 39(2):94-101.
Lei Xin, Zhang Shicheng, Xu Guoqing, et al.Impact of perforation on hydraulic fracturing initiation and propagation in tight gas reservoir [J].Journal of Northeast Petroleum University: Edition of Natural Science, 2015, 39(2):94-101.
- [10] 黄超,李威明,李雪原,等.水力压裂缝高控制技术发展现状[J].西部探矿工程,2011,23(1):37-39.
Huang Chao, Li Weiming, Li Xueyuan, et al.Development status of fracture high control technology for hydraulic fracturing [J].West-China Exploration Engineering, 2011, 23(1):37-39.
- [11] 郭小勇,赵振峰,徐创超,等.有限元法超低渗油藏体积压裂裂缝参数优化[J].大庆石油地质与开发,2015,34(1):83-86.
Guo Xiaoyong, Zhao Zhenfeng, Xu Chuangchao, et al.Optimization of the fracture parameters in the volume fracturing of ultra-low permeability oil reservoir by finite element method [J].Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2015, 34(1):83-86.
- [12] 吴百烈,周建良,曹砚锋,等.致密气水平井分段多簇压裂关键参数优选[J].特种油气藏,2016,23(4):127-130.
Wu Bailie, Zhou Jianliang, Cao Yanfeng, et al.Key parameter optimization of horizontal well multi-stage multi-cluster fracturing in tight gas reservoir [J].Special Oil & Gas Reservoirs, 2016, 23(4):127-130.
- [13] 卢拥军.压裂液对储层的损害及其保护技术[J].钻井液及完井液,1995,12(5):36-43.
Lu Yongjun.Reservoir damage due to fracturing fluids and its protection [J].Drilling Fluid and Completion Fluid, 1995, 12(5):36-43.
- [14] 李向平,齐银,李转红,等.鄂尔多斯盆地安83区块致密油藏老井暂堵混合水体积压裂技术[J].油气地质与采收率,2016,23(6):120-126.
Li Xiangping, Qi Yin, Li Zhuanhong, et al.Temporary plugging and mixed water volume fracturing technology of tight oil reservoirs in An83 block, Ordos basin [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(6):120-126.

编辑 常迎梅