

低产油气井强制裂缝转向重复压裂技术

王 坤^{1,2}, 葛腾泽³, 曾雯婷³

(1. 中国石油集团川庆钻探工程有限公司钻采工程技术研究院, 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. 中石油煤层气有限责任公司, 北京 100011)

摘 要:为提高低产油气井产能和延缓压裂后产量递减速度,在分析重复压裂技术原理和存在问题的基础上,提出了增大改造体积的强制裂缝转向重复压裂技术。首先计算满足裂缝转向所需的限定最高压力,然后利用研制的水溶性转向剂在原有裂缝中形成憋压,直至压力达到新裂缝开启的压力条件,从而实现强制裂缝转向、增大压裂改造体积的目的。该技术在 DJ 气田 3 口井进行了现场试验,加入转向剂后井口压力平均上升幅度达到 12.8 MPa,压裂后平均单井产气量增加 3 000 m³/d。研究结果表明,强制裂缝转向重复压裂技术具有转向成功率高、转向剂用量少和适用性强等技术优势,增产效果显著,为低产油气井重复改造提供了新的技术手段。

关键词:低产油气井;裂缝转向;重复压裂;转向剂

中图分类号:TE357.1⁺3 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-0890(2018)02-0081-06

Re-Fracturing Technique Using Forced Fracture Re-Orientation of Low Production Oil and Gas Wells

WANG Kun^{1,2}, GE Tengze³, ZENG Wenting³

(1. Technology & Engineering Research Institute, CNPC Chuanqing Drilling Engineering Company Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710018, China; 2. National Engineering Laboratory of Low-Permeability Oil & Gas Fields Exploration and Development, Xi'an, Shaanxi, 710018, China; 3. PetroChina Coalbed Methane Co. Ltd., Beijing, 100011, China)

Abstract: To improve the productivity of low production gas and oil wells and to delay or mitigate the post-fracturing production decline rate, a re-fracturing technique using forced fracture re-orientation to enlarge the stimulated volume was proposed based on the analysis of the principle of the re-fracturing technique and the existing problems. By first calculating the maximum pressure for re-orientation, the newly-constituted water soluble diverting agent was applied to build the pressure in original fractures until the pressure was high enough to create a new fracture, thereby accomplishing the objective to forcibly divert fractures and enlarge fractured volume. This technique has been put into practice in three wells of the DJ Gasfield, resulting in the average wellhead pressure increasing up to 12.8 MPa and the average single-well gas production increasing by 3 000 m³/d after the adding the diverting agent. The research and application results indicated that this re-fracturing technique using forced fracture re-orientation has the technical advantages such as achieving a high success rate of re-orientation operation, reducing the amount of diverting agent used, being suitable for extensive applications, with an obvious production increase. Thus the re-fracture technique using forced fracture re-orientation provides a new technical method in restimulation of low production wells.

Key words: low production gas and oil well; fracture re-orientation; re-fracturing; diverting agent

低产油气井压裂改造开采一段时间后,压裂裂缝逐渐失效,导致油气井产量降低,为了提高单井产量,需要采用重复压裂技术再次进行储层改造^[1-7]。国内外重复压裂的方式主要有 2 种:重新张开原裂缝和裂缝转向压裂。其中,裂缝转向压裂技术能够有效增大泄流面积,增产效果显著,在老油田剩余油

收稿日期:2017-09-11;改回日期:2018-01-12。

作者简介:王坤(1984—),男,陕西西安人,2009年毕业于西安石油大学油气田开发工程专业,工程师,主要从事完井及储层改造技术研究工作。E-mail:wk_gcy@cnpc.com.cn。

基金项目:国家科技重大专项“鄂东缘深层煤层气与煤系地层天然气整体开发示范工程”(编号:2016ZX05065)部分研究内容。

动用、低产井增产方面应用较广。Dowell 公司的模拟试验研究表明,初次压裂裂缝(简称初次裂缝)改变了井眼附近的应力场,新裂缝将在垂直于初次裂缝的方位起裂,延伸一定距离发生转向,与初次裂缝平行延伸;Chevron 公司重复压裂现场测试结果表明,新裂缝方位在初次裂缝方位上偏离 30° ^[8];国内的大庆、胜利、长庆等油田广泛开展了老油井裂缝转向压裂施工作业,从裂缝监测和改造效果方面证实了裂缝转向压裂的可行性^[3-4]。但随着裂缝转向压裂技术的不断发展,现场压裂施工存在转向剂加入后裂缝转向迹象不明显、转向成功率低和施工工艺不完善等问题^[9-12]。为此,笔者进行了低产油气井裂缝转向重复压裂技术研究,提出了强制裂缝转向工艺新思路,自主研发了水溶性转向剂,优化了强制裂缝转向重复压裂施工工艺,提高了裂缝转向压裂的成功率和有效率,并在 3 口井进行了现场试验,取得了较好的增产效果。

1 重复压裂技术原理及存在问题

低产油气井初次压裂后,地应力状态受原地应力、人工裂缝诱导应力场及地层压力诱导应力场等因素影响^[13-16]。重复压裂过程中,压开的初次裂缝周围会产生诱导应力场,其与原地应力场共同作用,在局部形成协同应力场。在这个协同应力场中,应力会在井筒和初次裂缝周围的椭圆形区域内二次定向^[17-18],水平方向应力随地层压力下降而降低,且最大水平主应力下降幅度比最小水平主应力大。因此,地应力发生变化后,当原始最小水平主应力大于最大水平主应力时,重复压裂裂缝就可能发生转向。

强制裂缝转向重复压裂技术是在重复压裂时应用化学转向剂对初次裂缝进行暂堵,当缝内净压力超过水平方向应力差时,裂缝发生转向,形成新的裂缝,在油气层中形成新的油气流通道;对新缝进行改造,可以沟通、动用剩余油气富集区和动用程度低甚至未动用的储层,实现低产油气井增产的目的(见图 1)。

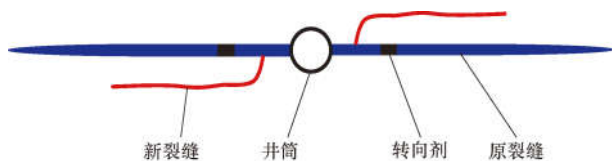


图 1 裂缝转向重复压裂裂缝转向示意

Fig. 1 Diagram of fracture re-orientation

随着裂缝转向压裂技术的不断发展,形成了多缝转向压裂、暂堵体积压裂和暂堵酸压等重复压裂技术,并取得了显著的增产效果。但是转向剂采用传统的人工加入方式,加入速度依靠个人经验控制。若转向剂加入速度过慢,未在原裂缝内形成桥堵,井口压力无升高迹象;若转向剂加入速度过快,会造成砂堵,导致施工不连续。

2 强制裂缝转向压裂技术

在分析常规转向压裂技术存在问题的基础上,以提高裂缝转向成功率为目标,优化了裂缝转向压裂施工工艺,研制了水溶性转向剂,形成了强制裂缝转向压裂技术。

2.1 工艺原理

强制裂缝转向压裂首先通过计算重复压裂目的层最大和最小水平主应力差,确定能够满足裂缝转向所需的最高限定压力。压裂过程中在前置液阶段开启初次裂缝后加入水溶性转向剂,转向剂在裂缝或近井地带堆积桥堵产生升压效应^[19-22],直至井口压力达到限定最高压力后停泵,随后通过多次启泵,瞬间提高缝内压力达到新裂缝开启所需的压力,强制裂缝转向,从而形成新的油气流通道。

2.2 水溶性转向剂

常规油井用转向剂是以石蜡、松香为骨架形成的颗粒材料,遇油后溶解,能够满足常规油井转向压裂要求,但不适用于气井。结合强制裂缝转向压裂工艺特点,以水溶性树脂和天然植物胶等为原料,研制了一种适用于气井低温条件(地层温度小于 70°C)的组合粒径颗粒水溶性转向剂 ZJ-1。ZJ-1 的体积密度 $0.90\sim 1.00\text{ g/cm}^3$,视密度 $1.05\sim 1.15\text{ g/cm}^3$,软化温度 50°C , 65°C 下溶解时间为 183 min,水不溶物 0.15%,突破压力可达 13.8 MPa,较常规油气层水平方向应力差高,能够满足裂缝转向的承压要求。

转向剂 ZJ-1 具有以下特点:1)常温条件下具有一定强度,不粘泵、易于泵送;2)地层温度下可产生变形,且变形后有一定承压强度,具有塑性特征;3)可在压裂液或破胶液中溶解,排液过程中转向剂易解除。

2.3 压裂液优选

室内评价试验结果表明,水溶性转向剂 ZJ-1 与瓜胶压裂液、聚合物压裂液及清洁压裂液等常用压裂液的配伍性好,水不溶物含量低,对储层伤害小。因此,主要考虑施工区块的储层地质特征来优选压裂液。

2.4 压裂施工参数优化

强制裂缝转向重复压裂技术适用性强,能够适用于低产油气井重复压裂的各种工艺。单井压裂施工参数应根据储层物性条件和人工裂缝最佳长度所需的施工规模、排量等确定。裂缝转向的关键是确定满足裂缝转向所需的限定最高压力,其可以根据目的层最大和最小水平主应力差、设计施工排量下裂缝延伸压力和附加安全压力求取,计算公式为:

$$p_1 = p_e + |\sigma_x - \sigma_y| + p_b \tag{1}$$

式中: p_1 为裂缝转向所需的施工限定最高压力,MPa; p_e 为裂缝延伸压力,MPa; σ_x 和 σ_y 分别为最大、最小水平主应力,MPa; p_b 为附加安全压力,MPa。

2.5 施工流程

强制裂缝转向压裂的施工流程为:

- 1) 根据岩石力学参数计算目的层的最大和最小水平主应力差,结合初次裂缝延伸压力,确定满足裂缝转向所需的限定最高压力;
- 2) 前置液阶段注入压裂液开启初次裂缝;
- 3) 降低压裂液注入排量,加入水溶性转向剂 ZJ-1,转向剂产生桥堵作用在老缝内形成憋压,直至井口施工压力达到裂缝转向所需的施工限定最高压力,压裂机组停泵;
- 4) 反复启停泵,脉冲式泵入压裂液,在裂缝内反复憋压,裂缝内净压力大于最大和最小水平主应力差时即满足新缝开启条件,裂缝转向产生新裂缝。

2.6 技术特点

与常规转向压裂技术相比,强制裂缝转向压裂技术具有以下技术特点:

- 1) 转向成功率高。施工压力达到压裂前计算的限定最高压力后,反复启停泵进行脉冲式憋压,从而实现裂缝的强制转向,大幅提高了裂缝转向的成功率。

- 2) 转向剂用量少。不需要控制转向剂加入速度,加入少量的高浓度转向剂即可实现缝内憋压,转向剂用量较传统方式大幅降低。

- 3) 适用性强。低产油气井高水平应力差储层均适用该技术;可利用混砂车绞笼系统代替人工加入转向剂,这样可利用绞笼转速控制转向剂加入速度,消除了人工加入速度的不稳定性;施工限定最高压力低于压裂车组、压裂井口及地面管汇的耐压等级,对设备、井口、管线无损害,适用性强。

3 现场试验

3.1 总体试验情况

DJ 气田位于鄂尔多斯盆地伊陕斜坡东部,主要采用直井开发,主力气层为山西组山 2³ 段,气藏埋深 2 000.00 ~ 2 500.00 m,中部深度约为 2 250.00 m,孔隙度 1.8%~8.9%,平均为 5.6%;渗透率 0.05~0.70 mD,平均为 0.20 mD,地层压力系数 0.78~0.89,地层温度 60~70 ℃,是典型的低压、低孔、低渗透储层。储层非均质性较强,部分位于构造高点或“甜点区”的气井压裂后产量高,平均单井产气量大于 2×10⁴ m³/d,而储层物性差、气层有效厚度小的气井压裂后产量递减快,生产 1~3 月后产气量即低于工业气流。

DJ 气田 3 口井应用了强制裂缝转向重复压裂技术,平均单井转向剂用量 340 kg,加入转向剂后井口油压平均上升幅度达到 12.8 MPa,压裂后平均单井日增产气量 3 000 m³,取得了显著的增产效果(见表 1)。下面以 DJ3-2 井为例对该技术现场应用效果进行分析。

表 1 强制裂缝转向压裂技术应用效果统计
Table 1 Statistics of application performance of re-fracturing techniqueusing forced fracture re-orientation

井号	转向剂 用量/kg	加入转向剂后井口 油压上升幅度/MPa	日增产气量/ (m ³)
DJ3-2	450	18.2	4800
DJ4-8	260	11.3	3100
DJ19-6	310	8.9	1100
平均	340	12.8	3000

3.2 DJ3-2 井实例分析

DJ3-2 井是 DJ 气田的一口开发井,目的层为山西组山 2³ 段,气藏埋深 2 223.00~2 226.50 m,气层

有效厚度 3.50 m,孔隙度 6.5%,渗透率 0.30 mD,测井解释为差气层。该井初次压裂改造时,采用了瓜胶压裂液,施工排量 3.8 m³/min,加砂量 23.7 m³,入地液量 313.5 m³,平均砂比 17.8%,初次压裂施工曲线如图 2 所示。

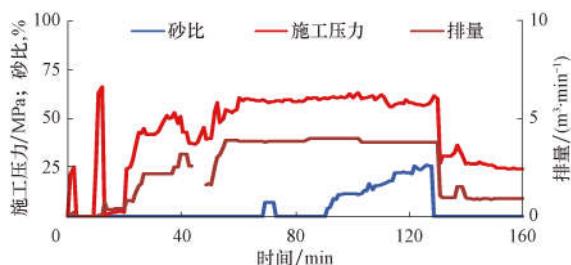


图 2 DJ3-2 井初次压裂施工曲线

Fig. 2 Initial fracturing curve of Well DJ3-2

DJ3-2 井位于河道边缘,目的层最大主应力方向为 NW 向,与河道走向一致,裂缝仅能沿砂体边缘延伸,初次压裂改造后无阻流量为 0.86×10^4 m³/d,转向压裂前产气量已低于 3 000 m³/d。为沟通河道中部厚砂体,提高该井产能,拟对该井实施强制裂缝转向重复压裂技术。

3.2.1 可行性分析

重复压裂可行性主要考虑以下 2 方面:

1) 重复压裂后增产的可行性。首先分析邻井的生产情况,DJ3-2 井所在井组共有 3 口开发井,位于河道中部的同层位 2 口邻井初次压裂后无阻流量为 1.2×10^4 和 1.5×10^4 m³/d,累计产气量分别达到 32×10^4 和 54×10^4 m³。DJ3-2 井初次压裂后无阻流量仅为 0.86×10^4 m³/d,累计产气量 7×10^4 m³。因此,可通过转向压裂沟通河道中部有利砂体,从而提高单井产气量。

2) 转向压裂工艺实施的可行性。最大和最小水平主应力随气井生产和地层压力下降而降低,最大水平主应力的降低幅度往往比最小水平主应力大。考虑到极端状况,以新井初期的最大和最小水平主应力差为临界点,当缝内净压力超过新井初期的最大和最小水平主应力差时,人工裂缝可以转向。DJ3-2 井岩石力学参数计算结果表明,目的层最小水平主应力为 44.8 MPa,最大水平主应力为 53.6 MPa,最大和最小水平主应力差为 8.8 MPa。因此通过人工干预的方式,加入转向剂将缝内净压力提高 8.8 MPa 以上即满足裂缝转向的要求。因此,实施转向压裂具有可行性。

3.2.2 配套压裂液

压裂液选用有机硼交联剂羟丙基瓜胶压裂液,破胶剂为过硫酸铵,加量为 0.3%~0.5%。压裂液在地层温度 65℃下,以 170 s⁻¹剪切速率剪切 120 min 后的黏度为 120 mPa·s,压裂液破胶液的表面张力为 27.6 mN/m,破胶液残渣含量 216 mg/L,破胶液黏度 3.4 mPa·s,破胶液对岩心的伤害率 21.6%,表明压裂液具有较好的携砂、抗剪切和破胶性能。

3.2.3 压裂施工参数优化

DJ3-2 井重复压裂以开启老缝后造新缝为主,设计施工排量 2.5~3.0 m³/min,加砂量 4.5 m³/m,平均砂比 15%。为保证裂缝转向效果,设计转向剂在前置液阶段分 2 级加入,第 1 级加入 200 kg,第 2 级加入 250 kg,转向剂携带液 70 m³。

初次压裂施工排量 3.8 m³/min 下裂缝延伸压力在 60.0 MPa 左右,计算设计排量 3.0 m³/min 下裂缝延伸压力约为 53.0 MPa,通过测井曲线计算的最大和最小水平主应力差为 8.8 MPa。因此,满足裂缝转向所需的限定最高压力为 61.8 MPa,附加 1.2 MPa 安全压力,确定施工限定最高压力为 63.0 MPa。

3.2.4 现场施工

DJ3-2 井施工过程按照设计在前置液阶段泵注 30 m³ 瓜胶压裂液开启初次裂缝后,将施工排量降至 2.0 m³/min(A 点)。缓慢加入转向剂,第 1 级转向剂加入 200 kg,加入速度 30 kg/min,其进入地层后井口未见明显升压迹象;第 2 级转向剂加入速度提高至 105 kg/min,转向剂进入地层后井口施工压力快速上升,压力升至 63.0 MPa 后超压停泵(B 点)。随后反复启停泵,脉冲式注入压裂液,采用间歇式启泵超压,瞬间提高缝内压力达到裂缝转向所需净压力后强制裂缝转向,憋压 3 次后井口油压显示有新缝开启的特征(C 点)。

加入转向剂后地面施工压力升幅超过 15.0 MPa,远高于裂缝转向所需的最大和最小水平主应力差 8.8 MPa,满足初次压裂裂缝转向开启新裂缝的条件。

对比转向剂加入前后压力的变化情况,转向剂加入前,施工排量为 3.0 m³/min 时裂缝延伸压力 49.0 MPa(A 点),加入转向剂后,施工排量为 2.7 m³/min 时裂缝延伸压力达到 60.0 MPa(C 点),初步判断加入转向剂后有新缝开启(见图 3)。

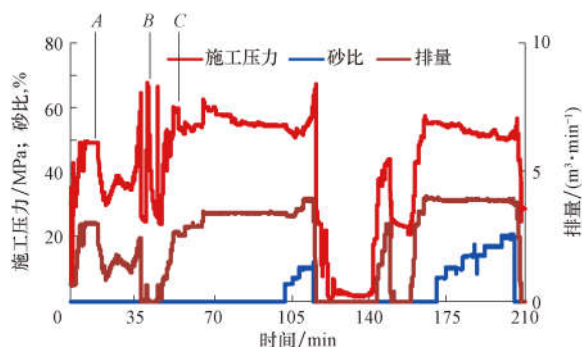


图3 强制裂缝转向重复压裂施工曲线

Fig. 3 Fracturing curve by the re-fracturing technique using forced fracture re-orientation

为进一步判断新缝是否开启,对加入转向剂后井口施工压力达到限定最高压力后的压降曲线进行分析。通过压降曲线 G 函数分析,对地面压力叠加导数作切线,与正常滤失数据部分重合后,发现压力叠加导数特性曲线有非常明显的“隆起”,表明重复压裂时在原有裂缝的基础上产生了新的裂缝(见图4)。

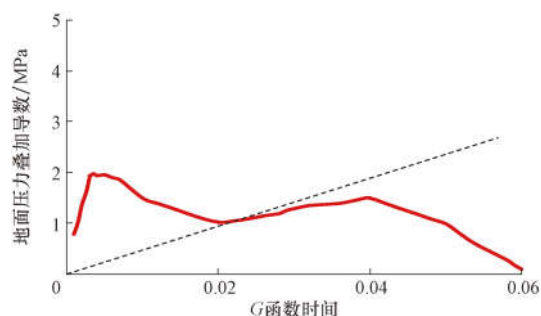


图4 压降曲线 G 函数分析

Fig. 4 Analysis of G function pressure decline curve

DJ3-2 井重复压裂改造共加砂 24.0 m^3 ,压裂前产气量为 $1\,200 \text{ m}^3/\text{d}$,井口油压 0.8 MPa ,间歇式开井。重复压裂后井口油压 3.5 MPa ,产气量保持在 $6\,000 \text{ m}^3/\text{d}$,日产气量增加 $4\,800 \text{ m}^3$,重复压裂取得了显著效果。测井曲线表明,目的层上下并无其他气层,增产的主要贡献来自于转向所形成的新裂缝,表明强制裂缝转向重复压裂施工达到了预期目标,实现了裂缝转向、开启新缝、提高单井产量的目的。

4 结 论

1) 现场施工表明,强制裂缝转向重复压裂技术作为重复压裂增产的一项技术手段,能够提高低产油气井单井产量。

2) 强制裂缝转向重复压裂技术具有转向成功率高、转向剂用量少和适用性强的技术特点,提高了裂缝转向压裂的成功率和有效率,增产效果显著。

3) 转向剂的加入速度是保证裂缝转向成功的重要参数,需进一步研究转向剂加入速度与裂缝转向成功率的相关性,以提高裂缝转向压裂的改造效果。

参 考 文 献

References

- [1] 刘雨,艾池. 多级压裂诱导应力作用下天然裂缝开启规律研究[J]. 石油钻探技术, 2015, 43(1): 20-26.
LIU Yu, AI Chi. Opening of natural fractures under induced stress in multi-stage fracturing[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43(1): 20-26.
- [2] 赵崇镇. 深层砂砾岩水平井组立体缝网压裂优化技术[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(5): 95-99.
ZHAO Chongzhen. 3D fracturing network optimization techniques for horizontal wells in sandstone-conglomerate formations[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(5): 95-99.
- [3] 达引朋,陆红军,杨博丽,等. 低渗透老油田新型多缝重复压裂技术研究与应用[J]. 石油钻探技术, 2015, 43(3): 65-70.
DA Yinpeng, LU Hongjun, YANG Boli, et al. Research and application of new refracturing technology in low permeability oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43(3): 65-70.
- [4] 张骏,李文彬,刘亭. 缝内转向技术在老井缝网压裂中的应用[J]. 钻采工艺, 2016, 39(4): 41-44.
ZHANG Tao, LI Wenbin, LIU Ting. Application of fracturing turnaround technology in old wells crack network fracturing[J]. Drilling & Production Technology, 2016, 39(4): 41-44.
- [5] 苏良银,庞鹏,达引朋,等. 低渗透油田暂堵重复压裂堵剂用量优化与现场试验[J]. 断块油气田, 2014, 21(1): 114-117.
SU Liangyin, PANG Peng, DA Yinpeng, et al. Usage optimization and field test of blocking agent for temporal-blocked re-fracturing in low permeability oilfield[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2014, 21(1): 114-117.
- [6] 郭春华,刘林,李玉华. 场气田致密低渗透气藏重复压裂工艺技术[J]. 石油钻探技术, 2006, 34(4): 77-79.
GUO Jianchun, LIU Lin, LI Yuhua. The research and application of re-frac in Xinchang Gas Field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2006, 34(4): 77-79.
- [7] 刘艳艳,刘大伟,刘永良,等. 水力压裂技术研究现状及发展趋势[J]. 钻井液与完井液, 2011, 28(3): 75-78.
LIU Yanyan, LIU Dawei, LIU Yongliang, et al. Study progresses of hydraulic fracturing technology[J]. Drilling Fluid & Completion, 2011, 28(3): 75-78.
- [8] 钟烨,郭建春,杨林,等. 川西重复压裂气井应力场分析[J]. 钻采工艺, 2013, 36(3): 35-37, 48.
ZHONG Ye, GUO Jianchun, YANG Lin, et al. Stress field analysis of re-fracturing gas well in Western Sichuan[J]. Drill-

- ing & Production Technology, 2013, 36(3): 35-37, 48.
- [9] 才博, 丁云宏, 卢拥军, 等. 提高改造体积的新裂缝转向压裂技术及其应用[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(5): 108-110.
CAI Bo, DING Yunhong, LU Yongjun, et al. Study and application of new in-fissure fracturing technique for improving stimulated reservoir volume[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(5): 108-110.
- [10] 李玮, 纪照生. 暂堵转向压裂机理有限元分析[J]. 断块油气田, 2016, 23(4): 514-517.
LI Wei, JI Zhaosheng. Finite element analysis of temporary plugging and fracturing mechanism[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2016, 23(4): 514-517.
- [11] 李宪文, 樊凤玲, 赵文, 等. 转向压裂工艺在长庆油田的适应性分析[J]. 油气地质与采收率, 2010, 17(5): 102-104.
LI Xianwen, FAN Fengling, ZHAO Wen, et al. Adaptability analysis on oriented fracturing technique in Changqing Oilfield[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2010, 17(5): 102-104.
- [12] 谢朝阳, 尚立涛, 唐鹏飞, 等. 大规模缝内转向压裂技术与试验[J]. 大庆石油地质与开发, 2016, 35(2): 66-69.
XIE Chaoyang, SHANG Litao, TANG Pengfei, et al. Research and test of large-scale inside-seam steering fracturing technique[J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2016, 35(2): 66-69.
- [13] 杨昕谅, 周洪亮, 肖立国, 等. 转向压裂井裂缝转向影响因素分析[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(32): 192-196.
YANG Xinliang, ZHOU Hongliang, XIAO Liguang, et al. The analysis of fracture reorientation influence factors in turn-around fracture well[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(32): 192-196.
- [14] 翁定为, 雷群, 李东旭, 等. 缝网压裂施工工艺的现场探索[J]. 石油钻采工艺, 2013, 35(1): 59-62.
WENG Dingwei, LEI Qun, LI Dongxu, et al. Network fracturing field test[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2013, 35(1): 59-62.
- [15] 李士斌, 王昶皓, 张立刚. 重复压裂裂缝转向机理及储层评价方法[J]. 断块油气田, 2014, 21(3): 364-367.
LI Shibin, WANG Changhao, ZHANG Ligang. Fracture reorientation of refracturing and reservoir evaluation methods[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2014, 21(3): 364-367.
- [16] 唐述凯, 李明忠, 蔡民辉, 等. 重复压裂前诱导应力影响新裂缝转向规律[J]. 断块油气田, 2017, 24(4): 557-560.
TANG Shukai, LI Mingzhong, CAI Minhui, et al. Study of fracture reorientation caused by induced stress before re-fracturing[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2017, 24(4): 557-560.
- [17] SIEBRITS E, ELBEL J L, HOOVER R S, et al. Refracture reorientation enhances gas production in Barnett shale tight gas wells[R]. SPE 63030, 2000.
- [18] 刘洪, 易俊, 李文华, 等. 重复压裂气井三维诱导应力场数学模型[J]. 石油钻采工艺, 2004, 26(2): 57-61.
LIU Hong, YI Jun, LI Wenhua, et al. Mathematical model of 3D induced stress field in refracturing gas well[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2004, 26(2): 57-61.
- [19] 刘立峰, 张士诚. 通过改变近井地应力场实现页岩储层缝网压裂[J]. 石油钻采工艺, 2011, 33(4): 71-74.
LIU Lifeng, ZHANG Shicheng. Net fracturing by changing the surrounding in-situ stress in shale reservoirs[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2011, 33(4): 71-74.
- [20] 杨宇, 郭建春, 康毅力, 等. 重复压裂工艺在川西致密低渗气藏中的应用分析[J]. 断块油气田, 2006, 13(4): 64-66.
YANG Yu, GUO Jianchun, KANG Yili, et al. Application of refracturing technology in tight gas reservoir of West Sichuan[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2006, 13(4): 64-66.
- [21] 达引朋, 李志航, 姚百胜, 等. 安塞油田中高含水期油井重复压裂技术研究与应用[J]. 石油地质与工程, 2008, 22(2): 74-76.
DA Yinpeng, LI Zhihang, YAO Baisheng, et al. Study on refracturing technique and its application in oil well with medium-high water content at ansai oilfield[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2008, 22(2): 74-76.
- [22] 苏良银, 白晓虎, 陆红军, 等. 长庆超低渗透油藏低产水平井重复改造技术研究及应用[J]. 石油钻采工艺, 2017, 39(4): 521-527.
SU Liangyin, BAI Xiaohu, LU Hongjun, et al. Study on repeated stimulation technology and its application to in low-yield horizontal wells in ultra low permeability oil reservoirs, Changqing Oilfield[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2017, 39(4): 521-527.

[编辑 滕春鸣]