

福山复杂断块油气藏大型压裂工艺技术

李素珍¹, 曾思云², 邓效国², 王辽¹, 王婷婷³, 卢新卫¹

1. 中国石油勘探开发研究院压裂酸化技术服务中心 河北廊坊 065007

2. 中国石油南方石油勘探开发有限责任公司工程技术处 海南海口 570216

3. 中国石油华北油田分公司勘探开发研究院 河北任丘 062550

通讯作者: Email: lsz69@petrochina.com.cn

项目支持: 国家科技重大专项“储层改造关键技术及装备”(2016ZX05023)、国家科技重大专项“低渗、特低渗透油气储层高效改造关键技术”(2011ZX05013)

引用: 李素珍, 曾思云, 邓效国, 等. 福山复杂断块油气藏大型压裂工艺技术[J]. 油气井测试, 2019, 28(1): 60-66.

Cite: LI Suzhen, ZENG Siyun, DENG Xiaoguo, et al. Large-scale fracturing technology for Fushan complex fault block oil and gas reservoir [J]. Well Testing, 2019, 28(1): 60-66.

摘要 针对海南福山油田储层温度高、孔喉细小、多薄层、油气井斜度大、射孔跨度大、塑性强等特点, 分析了在该油田实施大型加砂压裂存在着大跨度多段连续射孔且无法分层的斜井容易出现早期砂堵、高温条件下长时间施工液体携砂难度大、大液量注入储层伤害大等难题。增加前置液段塞级数和砂量打磨近井多裂缝降低弯曲摩阻, 采用 30~50 目和 20~40 目支撑剂组合, 降低施工砂堵风险; 优选耐高温低伤害压裂液体系, 提高携砂流变能力和返排效率, 降低储层伤害, 在实现深度改造储层的同时, 提高了多薄层储层纵向剖面动用程度。该技术在福山油田实施 12 口井, 成功率和有效率均达到 100%, 大幅度提高了油气井单井产能, 较好地解决了大跨度多段连续射孔斜井的增产改造难题, 对类似油气井的增产改造方案设计提供一定的借鉴作用。

关键词 福山油田; 高温; 大型压裂; 砂堵; 斜井; 压裂液; 支撑剂; 多级段塞

中图分类号: TE353 文献标识码: B DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2019.01.010

Large-scale fracturing technology for Fushan complex fault block oil and gas reservoir

LI Suzhen¹, ZENG Siyun², DENG Xiaoguo², WANG Liao¹, WANG Tingting³, LU Xinwei¹

1. Fracturing and Acidizing Technology Service Center, PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Langfang, Hebei 065007, China

2. Engineering Technology Department, PetroChina Southern Petroleum Exploration and Development Co., Ltd. Haikou, Hainan 570216, China

3. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Huabei Oilfield Company, Renqiu, Hebei 062550, China

Abstract: In view of the features of high reservoir temperature, small pore throat, thin layer, high inclination, large perforation span and strong plasticity, large sand fracturing operation of the Fushan oilfield in Hainan, problems including early sand plugging due to the large span multistage continuous perforation and inclined wellbore that cannot be layered, high difficulty in sand carrying due to long time under high temperature conditions, and formation damage due to large liquid injection into the reservoir have been analyzed. The number of preflushfluid slug stages and the amount of sand are increased to grind near-well multi-cracks to reduce bending friction. The proppants of 30-50 mesh and 20-40 mesh are combined to reduce the risk of sand plugging. High temperature and low damage fracturing fluid system was selected to improve the sand carrying rheology and flowback efficiency to reduce formation damage. While the reservoir is deeply stimulated, the development of the vertical section of multi-thin reservoirs is expanded. This technology has been applied in 12 wells in Fushan Oilfield with a success rate and efficiency of 100%. It has greatly enhanced the productivity of oil and gas wells and has addressed the problems of stimulation of large-span multistage continuous perforated inclined well, which provides a reference for the stimulation design of similar oil and gas wells.

Keywords: Fushan Oilfield; high temperature; large scale fracturing; sand block; inclined well; fracturing fluid; proppant; multistage slug

福山凹陷位于海南岛琼北地区和琼州海峡之中,为北部湾盆地一部分,是一个以第三系沉积为主的小盆地。目前该凹陷投入滚动开发的主要有花场、白莲、美台三个油气田,是南方石油勘探开发公司的主要勘探开发区块。福山凹陷的油气勘探自1958年开始到1999年取得商业性勘探突破,经历了中外几代人的努力。自从1999年9月花1井发现具有商业价值的高产油气流后,已找到了一些油气储量,形成了一定的产能,而目前存在储层品质下降、物性变差,导致大部分油气井自然产能低或没有自然产能等问题。2003年、2006年和2009年福山油田曾经在该凹陷进行过水力压裂改造尝试,但由于对该地区储层改造难度预期不足,储层特征分析、增产措施工艺技术方法、压裂施工规模、液体体系、施工参数优选和压后返排管理缺乏相应的针对性,导致压裂施工成功率不高,增产有效率低,且压后出现不同程度的产水,压后增产效果不明显。

在吸取前期对储层特点和改造难点认识不足、增产改造效果不佳的基础上,2010–2011年再次开展储层改造技术研究。根据大量室内实验的分析结果,结合钻完井、测井、油气井生产动态分析,认识了复杂断块高温凝析气储层的特点,提出了与不同类型储层特征相匹配的“前置液投球分层”、“变排量+人工隔层控缝高”、“大型压裂”、“探断层压裂”等针对性压裂工艺技术,实现了压裂增产改造效果的历史性突破^[1–3],并在花东Ax井、花Ax井和莲Ax井成功实施了大型压裂改造,获得了较为显著的增产效果,其中,花Ax井和莲Ax井的压后增产有效期超过了36个月。

大型压裂是指压裂施工规模远大于常规压裂,一般需要的压裂液量大于 500 m^3 ,加砂规模大于 60 m^3 ,支撑裂缝半长超过 300 m 。其中,裂缝半长指标最为重要,其它指标会受到裂缝高度和裂缝宽度等因素的影响。该项技术最初在美国丹佛盆地Wattenberg气田压裂技术研究与应用的基础上形成,由于在该地区增产效果显著而迅速得到推广应用^[4]。杨怀成等^[5]和曾雨辰等^[6]报道了大型压裂技术在页岩气井彭页HF-1井的应用,压后通过测试,取得了 $20\,000\text{ m}^3/\text{d}$ 的高产。周德华等^[7]报道了大型压裂技术在涪陵地区第一口海相页岩气水平井JY1HF井的应用,放喷测试获得无阻流量 $16.7\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 的高产页岩气流。卢聪等^[8]报道了大型压裂

技术在渤南地区砂砾岩油藏义104-1侧井的应用,压裂后30 d的平均自喷产液量为 $45.2\text{ t}/\text{d}$,平均产油量为 $31.7\text{ t}/\text{d}$,增产效果显著。肖晖等^[9]报道了F142区块完成了22井次大型压裂现场试验,压前平均单井产油量 $0.8\text{ t}/\text{d}$,压后初期平均单井产油量 $22\text{ t}/\text{d}$,取得了显著的增产效果。刘鹏等^[10]以钻井平台为载体,对渤中25-1油田沙三段2口套管完井的水平井开展大型加砂压裂先导性试验,为海上低渗储层高效开发提供了可靠的技术保证。由此可见,大型压裂技术为页岩气、致密砂岩气的高效开发提供了技术支撑。据此,大型压裂工艺技术在福山油田得到了很好的推广与应用,先后在花东Ax、花Ax和朝Ax等12口井实施,均取得了较好的增产效果。本文从福山复杂断块油气藏实施大型压裂工艺的难点、技术对策、现场应用和效果进行分析,为今后复杂断块该类井层的改造提供可靠的借鉴资料。

1 凝析气藏概况

福山凹陷位于海南岛琼北地区和琼州海峡之中,为北部湾盆地一部分,以第三系沉积为主,具有区块多、断块小且碎、流体性质复杂、岩性多变等特点。

1.1 储层基本特征

由于福山凹陷地处岛屿,征地受限,油气井主要以定向井为主,井眼斜度较大,最大达到 39.68° 。该凹陷以三角洲前缘水下分河道沉积相为主,发育4套含油层系,分为九个亚段,16个主力油组,其中流二段、流三段为凝析气藏储层。储层在平面上广泛分布,但由于受断层控制因素影响,储层在不同断块分布无规律可循,导致不同气井间的储层厚度、物性差异较大,存在明显的薄互层特点。纵向上单层厚度小,层数多,层间跨度大,部分井10~20个小层跨度超过 80 m 。整体上表现为断块小、储层变化快,物性岩性变化大,油气藏类型复杂,多薄层特征明显,储层距离断层近($80\sim 100\text{ m}$),地应力方位复杂^[11]。

1.2 储层岩性和物性特点

储层以中细粒、粉细粒和含砾长石岩屑砂岩或岩屑砂岩为主,主要矿物成份为石英,次为钾长石,由于靠近物源,储层矿物整体上成熟度低、分选差。储集空间是以次生孔隙为主的粒间孔,可见少量粒内溶孔、填隙物内溶孔、晶间孔及铸模孔;孔喉变化

大,以中细孔喉为主;储层类型以中孔低渗、低孔低渗透为主^[12]。

1.3 储层温度压力特征

储层埋深 3 300~4 000 m,压力系数在 0.8~1.2 之间分布,为常压系统。地层温度高,达到 120~179 ℃,地温梯度为 3.53~4.57 ℃/100 m,个别层超过 6 ℃/100 m,属于高地温梯度储层^[13]。

1.4 生产动态

由于衰竭式开采,地层驱动能量较弱,花场流三段气藏产量递减较快,凝析油与凝析气的递减率均较高,导致反凝析越来越严重、积液井增加,目前积液井已经超过总井数的 50%。

2 福山凹陷大型压裂改造工艺技术难点

大型压裂这一技术的应用受到储层沉积和物性特征的限制。一般适宜采取大型压裂增产技术的储层具有以下特点:①储层气测渗透率小于 0.1mD;②砂层厚度一般达到 20 m 以上,且平面上分布连续稳定、纵向没有明显隔挡层;③人工裂缝方位与有利砂体展布方向一致。同时,实施大型压裂需要满足以下关键技术条件:①施工时间长,压裂液携砂流变性能要求高;②压裂液用量大;③支撑剂用量大;④压裂液在地层内滞留时间长,对液体伤害及返排控制要求更加严格;⑤对设备连续工作能力要求高^[14]。因此,在福山凹陷实施大型压裂具有如下难点:

(1)储层为中低孔、低渗特低渗砂岩储层,需要长的人工裂缝来沟通远井储层,增加油气井渗流面积,提高单井产量,需要实施大型压裂,但由于射孔段上下无明显隔挡层,裂缝高度难以控制,大型压裂形成适合储层需求的长人工裂缝难度大。

(2)由于海岛征地困难,80%以上为井斜较大的定向井(39.68°)、裂缝弯曲较为严重,且岩石力学试验曲线表明有显著的塑性特征、难以形成宽缝,提高砂浓度和支撑剂输送难度大、大型压裂施工时间长、容易砂堵。

(3)射孔层段多、跨度大、单层厚度小、层间应力差大、隔层厚度小、多薄层特征明显,合层压裂小层动用程度差。

(4)断块小,岩性变化大,储层距离断层近,且地应力方位难以确定,大型压裂遭遇断层导致的砂堵风险大^[15]。

(5)储层原始压力系数不高,气井生产时间长,地层能量不足,且储层孔隙喉道细小、容易造成伤害,压裂后液体返排难度大。

(6)地层温度高达 140~174 ℃,地温梯度达到 (3.53~4.57) ℃/100 m,压裂液高温携砂难度大。

3 大型压裂优化设计方法

由于实施大型压裂增产技术一般要求储层砂层平面上分布连续稳定、纵向没有明显隔挡层;同时实施大型压裂的施工时间长,需要压裂液应具有良好的携砂流变性,而且压裂液在地层内滞留时间长,对液体伤害及返排控制要求更加严格^[16-18]。因此,根据该油田储层特征及改造难点,提出了大型压裂优化设计技术对策与方法。

3.1 福山凹陷大型压裂施工井选择标准

根据大型压裂施工井储层特点要求,在结合生产动态分析、压力测试等参数的基础上选择高压低产、低产稳产、泄油面积大、见到初产的井层,保证改造的井层具有一定的物质基础和能量基础。同时针对福山凹陷存在断块复杂、纵向上单层厚度小、层数多、隔层厚度小、层间跨度大、非均质性强、层间与井间参数可比性差等特点,优选小层间跨度大、射孔层段多、薄层纵向分布较连续、上(下)无水层、距离断层较远的气井实施大型压裂增产技术。

3.2 大型压裂的耐高温低伤害压裂液体系优选

根据储层温度高、流体为凝析气、孔隙吼道狭小、容易受到伤害的特点,针对 150~160 ℃的温度区间,优选了胍胶浓度为 0.5%的低浓度耐高温低伤害压裂液体系,大幅度降低了胍胶浓度,减少了对地层的伤害。该套压裂液体系在 150 ℃温度条件下剪切 2 h 后液体黏度保持在 80 mPa·s 以上(图 1),保证了大规模加砂压裂的施工安全,同时在降摩阻、低伤害、易返排、降滤失等方面都有大幅度的提高,压裂液伤害率小于 25%^[19]。

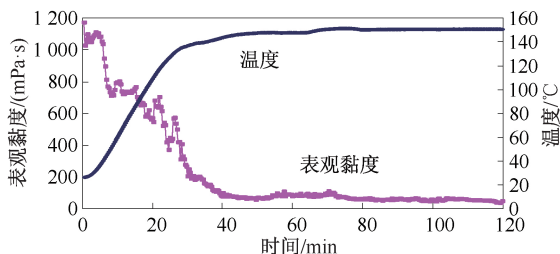


图1 低伤害压裂液体系耐温耐剪切曲线
Fig.1 Temperature and shear resistance curve of low damage fracturing fluid system

3.3 施工成功的针对性措施

(1) 考虑到压裂井射孔段较多,部分井层间跨度超过 80 m,为了有效压开储层,选择填砂封堵下部射孔段等方式减少裂缝扩展层段,同时优化施工排量控制缝高过度延伸^[20-22],在保证裂缝宽度的同时降低施工风险,实现大规模施工深度改造,提高了小层动用程度。

(2) 针对定向井斜度大、弯曲摩阻大、且存在多砂泥薄互层导致的裂缝宽度不均匀等特点,在前置液阶段加入支撑剂多级段塞打磨近井裂缝降低弯曲摩阻、避免多裂缝影响、降低施工摩阻;同时加大前置液段塞阶段的支撑剂用量形成不连续加砂、实现前置加砂造缝,增加有效缝长^[23-25]。

(3) 利用 30~50 目和 20~40 目支撑剂组合按 1:4 的比例组合方式加入,前期用小粒径,降低由于地层强塑性造成的缝宽不足而导致的砂堵风险,待形成一定宽度后,加入 20~40 目陶粒,提高施工成功率、保证裂缝导流能力^[26-27]。

4 应用实例与效果分析

2010 年以来,大型加砂压裂技术分别在花东、花东、白莲和朝阳等复杂断块气藏成功应用十余口井,施工成功率达到 100%,累计液量超过 10 000 m³,加砂量超过 1 000 m³,最高砂液比达到 24.2%。

经过大型加砂压裂改造后,油气井增产效果显著,部分井增产有效期超过 3 年。针对增产有效期不理想的油气井,分析认为与断层的不确定性、断块面积大小以及地层能量等各方面因素关系密切,需要进一步加强储层认识,优化选井选层。

4.1 花 Ax 井

该井压裂井段 3 585.2~3 669.2 m,地层温度 141 ℃。测井解释油气同层 28.2 m/12 层,有效孔隙度 10.7%~16.2%;差油层 3.5 m/2 层,有效孔隙度 7.2%~10.1%。

该井在 2007 年试油投产,射孔厚度 34 m/12 层,跨度 84 m,射孔后自喷,初期日产油约 7.0 m³、日产气约 6 500.0 m³。随着生产时间的延长,油气日产量逐渐降低,日产油大约 3.0 m³、日产气约 4 000.0 m³,且一直处于低产稳产状态。

4.1.1 压裂施工概况

本井射孔段多达 12 层,射孔小层跨度达到 84 m,且单层储层较厚。为了有效压开储层,降低施工

风险,设计填砂封堵下部 2 个射孔段(砂面 3 658.0 m),合压上部的 3 585.2~3 653.0 m 井段。

2012 年 1 月 10 日对花 Ax 井进行了小型测试压裂施工和主压裂施工。主压裂施工时挤入地层的净液总量 618.5 m³,其中前置液 280 m³,携砂液 321 m³,泵注排量 4.0~5.0 m³/min,泵压 53.7~78.0 MPa,平均砂液比 24.2%,共挤入地层砂量 84.0 m³(图 2)。

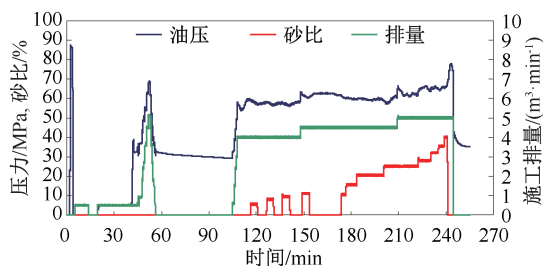


图 2 花 Ax 井压裂施工曲线

Fig.2 Fracturing pressure curve of Well Hua Ax

4.1.2 压裂效果

该井改造后增产效果明显,日产油量和气量都得到大幅度提高,日产油量由压前 4 mm 油嘴 2.86 m³ 增加到压后 5 mm 油嘴 15.78 m³,日产气量由 0.32×10⁴ m³ 增加到 1.2×10⁴ m³,油压由 1.6 MPa 增加到 7.1 MPa。该井在压后 10 个月累产气 184.2×10⁴ m³、油 1 798.4 m³,远远超过该井压前 24 个月的累积油气产量(累产气 130.1×10⁴ m³、油 1 318.2 m³),大大加快了油气采速和投资成本的回收。目前,该井增产有效期已经超过 36 个月(图 3),而且油气产量基本保持稳定。

4.2 花东 Ax 井

该井压裂井段 3 468.2~3 505.2 m,地层温度 142.9 ℃,测井解释油气同层 14.0 m/4 层,有效孔隙度 12.4%~14.5%;差油层 7.4 m/5 层,有效孔隙度 11.5%~12.4%。

本井于 2013 年 8 月 9 日对流三段 3 468.2 m~3 505.2 m、18.8 m/6 层进行射孔作业。射孔后 8 mm 油嘴放喷,油压 2.8 MPa,套压 5.5 MPa,出口液量 28.04 m³,其中油 4.75 m³、水 23.29 m³,产气 21 133 m³。至 2013 年 8 月 29 日累计出液 62.07 m³,其中油 36.57 m³、水 25.50 m³、气 86 683 m³,试油结论为油气同层。该井投产后日产气和日产油量逐渐下降,压裂前日产气下降到小于 3 500 m³,日产油不足 1.2 m³。截至到 2015 年 8 月 19 日,已累计产油 2 033.82 m³,累计产气 4 400 127 m³,累计产水 60.41 m³。

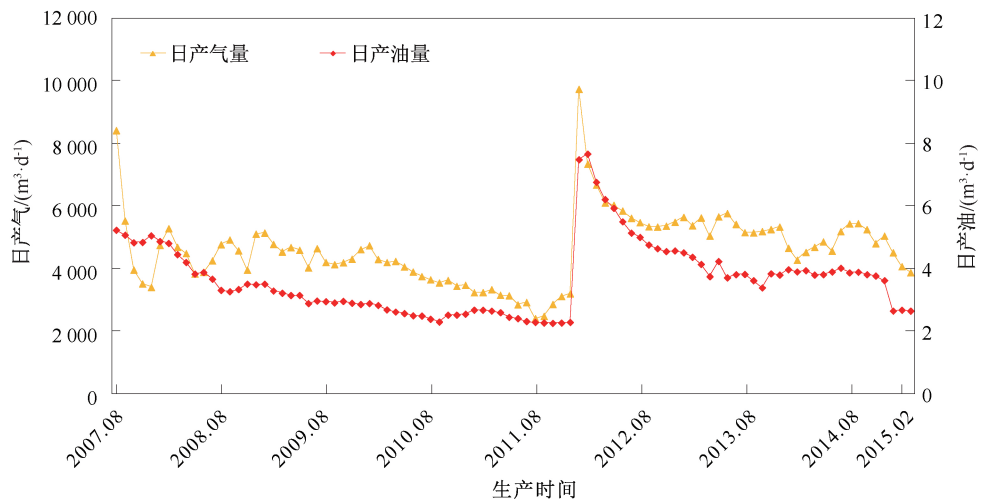


图 3 花 Ax 井压裂后 36 个月产量变化曲线

Fig.3 Yield curve of 36 months after fracturing of Well Hua Ax

4. 2. 1 压裂施工概况

2016 年 1 月 9 日对该井进行了压裂施工,共挤入地层净液总量 712.4 m³,其中前置液 365.0 m³,携砂液 330.0 m³,泵注排量 6.0 m³/min,平均砂液比 17.5%,共挤入地层砂量 57.9 m³。

从该井施工曲线可以看出(图 4),储层具有较为明显的塑性特征,对砂液比较敏感,尤其是当砂液比超过 20%时,施工压力随着砂液比的提高缓慢上升。为了应对地层塑性特征引起的裂缝延伸困难、从而导致加砂困难的问题,避免出现砂堵,施工后期针对施工压力上升较快的问题采取了停止加砂、待施工压力平稳后再继续加砂,最终顺利完成压裂施工。

4. 2. 2 压裂效果

施工结束后开始放喷,在 4 mm 油嘴情况下产

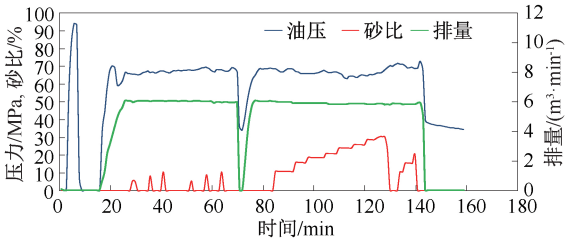


图 4 花东 Ax 井压裂施工曲线

Fig.4 Fracturing pressure curve of Well Huadong Ax

气量逐渐上升,压裂后第 11 d 日产气量达到 15 964 m³、日产油量上升到 4.54 t。通过压裂后排液求产曲线观察和压前压后产量对比可以看出,压后产量有了大幅度的提高,增产效果较为明显。该井在压后 17 个月累产气 407.3×10⁴ m³、油 2 770.1 t。目前,该井增产有效期已经超过 17 个月,而且油气产量基本保持稳定,预计增产有效期将超过 24 个月(图 5)。

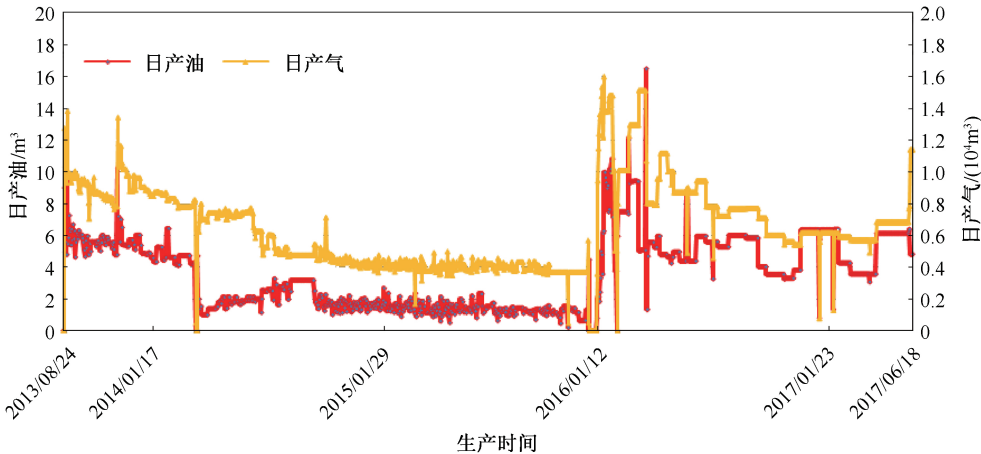


图 5 花东 Ax 井压后 17 月产量变化曲线

Fig.5 Yield curve of 17 months after fracturing of Well Huadong Ax

5 结论

(1)大型加砂压裂技术在花 Ax 等十余口井得到成功应用,施工成功率达到 100%,最大加砂量达到了 84.0 m^3 ,为今后复杂断块该类井层的改造提供了可靠的借鉴资料。

(2)经过大型加砂压裂改造后,油气井增产效果显著,部分井增产有效期超过 3 年。针对增产有效期不理想的油气井,分析认为与断层的不确定性、断块面积大小以及地层能量等各方面因素关系密切,需要进一步加强储层认识,优化选井选层。

(3)耐高温低伤害压裂液体系具有耐温性能好、携砂能力强、破胶彻底的特点,解决了福山凹陷高温凝析气藏深井压裂加砂困难、压后液体返排率低、对储层伤害大的难题。

致谢:感谢中国石油南方石油勘探开发有限责任公司同意公开发表;感谢福山凹陷低渗透储层压裂改造工艺研究项目支持;感谢严玉忠、舒玉华、鄢雪梅、黄立宁等同事提供的数据支撑。

参考文献

- [1] LI Suzhen, YAN Xuemei, XU Yun, et al. Successful massive hydraulic fracturing of deviated wells in Fushan complex fault-block reservoir, Hainan Island [C]. SPE 183300, 2016.
- [2] 鄢雪梅, 李素珍, 祝道平, 等. 海南福山复杂断块储层压裂技术研究[J]. 油气井测试, 2016, 25(2): 37-40.
YAN Xuemei, LI Suzhen, ZHU Daoping, et al. Fracturing technology research of complicated fault reservoir in Fushan block of Hainan [J]. Well Testing, 2016, 25(2): 37-40.
- [3] 汪国庆, 周承富, 王玉忠, 等. 福山凹陷小断块油藏储层压裂技术研究与应用[J]. 断块油气田, 2011, 18(6): 813-816.
WANG Guoqing, ZHOU Chengfu, WANG Yuzhong, et al. Research and application on fracturing of small fault block reservoir in Fushan depression [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2011, 18(6): 813-816.
- [4] GIDLEY J L, MUTTI D H, NIERODE D E, et al. Stimulation of low-permeability gas formations by massive hydraulic fracturing a study of well performance [C]. SPE 6867, 1979.
- [5] 杨怀成, 毛国扬, 宋其仓, 等. 彭页 HF-1 井页岩气藏大型压裂工艺技术[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2014, 36(5): 117-122.
YANG Huaicheng, MAO Guoyang, SONG Qicang, et al. Large scale fracturing technology of well Pengye HF-1 shale gas [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2014, 36(5): 117-122.
- [6] 曾雨辰, 杨保军, 王凌冰. 涪页 HF-1 井泵送易钻桥塞分段大型压裂技术[J]. 石油钻采工艺, 2012, 34(5): 75-79.
ZENG Yuchen, YANG Baojun, WANG Lingbing. Large-scale staged fracturing technology with pump-down drillable bridge plug for Well Fuye HF-1 [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2012, 34(5): 75-79.
- [7] 周德华, 焦方正, 贾长贵, 等. JY1HF 页岩气水平井大型分段压裂技术[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(1): 75-80.
ZHOU Dehua, JIAO Fangzheng, JIA Changgui, et al. Large-scale multi-stage hydraulic fracturing technology for shale gas horizontal well JY1HF [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(1): 75-80.
- [8] 卢聪, 郭建春, 王建, 等. 义 104-1 侧井砂砾岩储层大型压裂技术研究与应用[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(4): 103-105.
LU Cong, GUO Jianchun, WANG Jian, et al. Study and application of massive hydraulic fracturing technique in Y104-1C well conglomerate formation [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(4): 103-105.
- [9] 肖晖, 郭建春, 卢聪, 等. F142 区块大型压裂技术研究与应用[J]. 石油钻探技术, 2012, 40(6): 90-95.
XIAO Hui, GUO Jianchun, LU Cong, et al. Research and application of large-scale fracturing in Block F142 [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(6): 90-95.
- [10] 刘鹏, 许杰, 徐刚, 等. 渤中 25-1 油田低渗透储层水平井分段压裂先导试验[J]. 油气井测试, 2018, 27(03): 52-57.
LIU Peng, XU Jie, XU Gang, et al. Pilot test of horizontal well staged fracturing for low permeability reservoirs in BZ25-1 oilfield [J]. Well Testing, 2018, 27(03): 52-57.
- [11] 廖飞燕, 马庆林, 孙新销, 等. 北部湾盆地福山凹陷古近系流沙港组岩性油气藏勘探[J]. 中国石油勘探, 2015, 20(2): 43-50.
LIAO Feiyan, MA Qinglin, SUN Xinxiao, et al. Study of lithologic reservoir of paleogene Liushagang formation in Fushan depression of Beibu bay basin [J]. China Petroleum Exploration, 2015, 20(2): 43-50.
- [12] 岳绍飞, 刘杰, 马丽娜, 等. 福山凹陷流沙港组三段储层四性关系及有效厚度下限标准[J]. 油气地质与采收率, 2013, 20(4): 42-45.
YUE Shaofei, LIU Jie, MA Lina, et al. Four - property relationship and lower limit standard of effective thickness of reservoir in 3rd member of Liushagang in Fushan sag [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20(4): 42-45.
- [13] 张磊, 孟元林, 曲国辉, 等. 福山凹陷异常高孔带成因与勘探深度下限[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2018, 37(1): 87-93.
ZHANG Lei, MENG Yuanlin, QU Guohui, et al. Origin of anomalously high porosity zones in the Fushan sag and

- its constrains on lower limit of exploration depth [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2018,37(1):87-93.
- [14] FAST C R, HOLMAN G B, COVLIN R J. The application of massive hydraulic fracturing to the tight muddy "J" formation, Wattenberg field, Colorado [C]. SPE 5624, 1977.
- [15] 祝道平, 王辽, 李素珍, 等. 福山油田复杂断块油气藏压裂砂堵原因分析及对策[J]. 录井工程, 2016, 27(3):31-35.
- ZHU Daoping, WANG Liao, LI Suzhen, et al. Analysis and counter measures for fracturing sand plug causes in complex fault block oil-gas reservoirs in Fushan oilfield [J]. *Mud Logging Engineering*, 2016, 27(3):31-35.
- [16] LEI Q, JIANG T, XU Y, et al. The study and application of low-damage and massive hydraulic fracturing technique in tight gas formations with high temperature and high pressure [C]. SPE 114303, 2008.
- [17] JOSEF S, MICHAEL R, WINSTON S, et al. Massive hydraulic fracturing unlocks deep tight gas reserves in India [C]. SPE 107337, 2007.
- [18] 牟善波, 刘晓宇. 高 89 块低孔、特低渗薄互层大型压裂技术研究与应用 [J]. 断块油气田, 2006, 13(2):74-76.
- MOU Shanbo, LIU Xiaoyu. Study and application of big-fracturing treatment technology on the thin oil sandwiches of low porosity and extra-low permeability in block Gao 89 [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2006,13(2):74-76.
- [19] 郭建春, 辛军, 王世彬, 等. 异常高温胍胶压裂液体系研制与应用 [J]. 石油钻采工艺, 2010, 32(3):64-67.
- GUO Jianchun, XIN Jun, WANG Shibin, et al. Research and application of gum/borate gelling fracturing fluid system for abnormal high temperature use [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2010,32(3):64-67.
- [20] 魏斌, 陈平. 变排量压裂技术及其现场应用 [J]. 石油钻采工艺, 2000, 22(6):70-71.
- WEI Bin, CHEN Ping. Fracturing technology with alteration discharge capacity and it's field application [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2000, 22(6):70-71.
- [21] 赖海涛, 梁凌云, 李照允, 等. 苏里格气田裂缝高度延伸模拟分析与控缝高技术 [J]. 石油化工应用, 2011, 30(3):47-49.
- LAI Haitao, LIANG Lingyun, LI Zhaoyun, et al. Sulige gasfield simulation of crack extension and control of high-tech [J]. *Petrochemical Industry Application*, 2011, 30(3):47-49.
- [22] TEUFEL L W, CLARK J A. Hydraulic fracture propagation in layered rock: Experimental studies of fracture containment [C]. SPE 9878, 1984.
- [23] 牛增前, 隋向云, 张平. 大斜度井压裂工艺研究 [J]. 石油钻采工艺, 2005, 27(6):61-63.
- NIU Zengqian, SUI Xiangyun, ZHANG Ping. Research on fracturing technics for high angle deviated hole [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2005, 27(6):61-63.
- [24] 贾长贵, 李明志, 李凤霞, 等. 低渗裂缝型气藏斜井压裂技术研究 [J]. 天然气工业, 2007, 27(5):106-108.
- JIA Changgui, LI Mingzhi, LI Fengxia, et al. A study on fracturing technology of deviated wells in low-permeability fractured gas reservoirs [J]. *Natural Gas Industry*, 2007, 27(5):106-108.
- [25] 曾雨辰. 砂段塞工艺在中原油田斜井压裂中的应用 [J]. 天然气工业, 2004, 24(9):60-63.
- ZENG Yuchen. Application of sand-slug technology in deviated well fracturing in Zhongyuan oilfield [J]. *Natural Gas Industry*, 2004,24(9):60-63.
- [26] 钟安海. 多尺度支撑剂组合加砂技术在压裂过程中的应用研究 [J]. 内蒙古石油化工, 2012(7):91-93.
- ZHONG Anhui. Study on applying the technology of assembling different sizes of proppant using in fracturing [J]. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 2012(7):91-93.
- [27] 金智荣, 郭建春, 赵金洲, 等. 不同粒径支撑剂组合对裂缝导流能力影响规律实验研究 [J]. 石油地质与工程, 2007, 21(6):88-90.
- JIN Zhirong, GUO Jianchun, ZHAO Jinzhou, et al. Experimental study on influence of different particle size proppant combination on fracture conductivity [J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2007,21(6):88-90.

编辑 刘述忍

第一作者简介:李素珍,女,1967年3月出生,硕士,高级工程师,2005年获中国地质大学油气田开发专业硕士学位,主要从事油气井压裂酸化增产改造技术研究与现场实施工作。电话:010-69213440,13832657996;Email:lsz69@petrochina.com.cn。通信地址:河北省廊坊市广阳区万庄石油分院D座,邮政编码:065007。