

大王北油田多薄层暂堵压裂技术研究与应用

张群双

捷贝通石油技术集团股份有限公司, 四川 成都

收稿日期: 2021年10月9日; 录用日期: 2021年11月4日; 发布日期: 2021年11月11日

摘要

被称作“千层饼”的多薄层低渗透油气藏, 压裂改造难度很大。为了实现常规油气产能的顺利接替, 多薄层储层的有效开发, 对大王北油田应用的压裂工艺技术进行了对比分析, 优选了多薄层暂堵压裂技术。从暂堵材料优选、技术参数优化等方面进行研究, 形成了针对性的暂堵压裂方案, 特别是建立了层间暂堵和缝内暂堵堵剂用量计算模型和优化图版, 应用于现场, 升压明显, 增产显著, 对比邻井日增产达2倍。表明暂堵压裂对于多薄层储层具有适应性, 通过匹配针对性的暂堵压裂方案, 可以有效实现增储上产的目的。

关键词

多薄层, 低渗透储藏, 转向压裂, 重复压裂, 暂堵剂

Research and Application of Temporary Plugging Fracturing Technology for Multi Thin Layer Reservoir in Dawangbei Oilfield

Qunshuang Zhang

Gepetto Oil Technology Group Co., Ltd., Chengdu Sichuan

Received: Oct. 9th, 2021; accepted: Nov. 4th, 2021; published: Nov. 11th, 2021

Abstract

It is very difficult to fracture the multi thin layer of low permeability oil and gas reservoir, called “thousand layer cake”. In order to realize the smooth replacement of conventional oil and gas production capacity and the effective development of multi thin layer reservoir, the fracturing technology applied in Dawangbei oilfield is compared and analyzed, then the multi thin layer temporary plugging fracturing technology is optimized. Through the research on the optimization

of temporary plugging materials and technical parameters, a targeted temporary plugging fracturing scheme is formed. In particular, the calculation model and optimization chart of the amount of temporary plugging agent between layers and in fractures are established. When applied to the field, the pressure rise is obvious and the production increase is significant. Compared with the adjacent wells, the daily production increase is up to twice. It shows that the temporary plugging fracturing has adaptability for multi thin layer reservoirs. By matching the targeted temporary plugging fracturing scheme, the purpose of increasing reserves and production can be effectively realized.

Keywords

Multi Thin Layer, Low Permeability Reservoir, Divert Fracturing, Refracturing, Temporary Plugging Agent

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着油田开发进入中后期，多薄层低渗透油气藏作为产量接替领域得到重视开发[1]。目前在多薄层油气藏领域，国内外已经发展了多套压裂工艺技术。按照分层工艺分，主要有多级封隔器分层压裂[2]、暂堵球分层压裂[3]、液体胶塞分层压裂[4]、填砂分层压裂、水力喷射分层压裂、桥塞分层压裂等；按照裂缝扩展特点分类，主要有控缝高压裂技术、穿层压裂技术[5]、体积压裂技术等。这些工艺技术都有其适应性。如：多级封隔器分压对于深井、高温井工程风险大，暂堵球分压转向效果差，液体胶塞分压易造成储层伤害[6]，填砂分层压裂施工周期长[7]，水力喷射压裂不适用于套管抗内压强度低的井。

针对多薄层储层，需要优选出更有适应性和针对性的压裂改造工艺。笔者通过对胜利油田大王北油田多薄层储层进行分析评价，提出了多薄层暂堵压裂工艺技术，因为暂堵压裂工艺具备多项技术优势，如分层灵活，可与机械封隔器、填砂、桥塞等分层工艺进行复配；适应性广，可应用于直井、水平井、深井、高温井、套变井等各种井型；施工工艺简单、增产效果明显等。

2. 大王北油田多薄层储层分析评价

2.1. 大王北油田多薄层储层特点

大王北油田地理位置位于山东省东营市河口区境内，构造上位于渤海湾盆地济阳拗陷车镇凹陷，处于下降盘，是一个被断层复杂化的鼻状构造一岩性大型低渗透稀油油藏。其中大王北大 37 断块为主力区块，含油面积 17.7 平方公里，储量 1738 万吨[8]。

大 37 断块滨、浅湖沉积，主力含油层系为沙河街组沙二段，顶面埋深 2600~2800 米，厚度 300~400 m。储层岩性为灰色粉细砂岩与灰色泥岩不等厚互层，有效孔隙度主要分布在 15%~20%，渗透率主要分布在 $1.0\sim 51.3 \times 10^{-3} \text{ um}^2$ 之间，孔喉较小，连通性较差，非均质性强。纵向上被划分为 7 个砂层组 44 个小层 63 个砂体，平均单井钻遇砂体 34 个，单砂体厚度一般 1.2~4.6 m，最厚的为 13.7 m，最薄的仅 0.6 m，是典型的多薄层发育的“千层饼”低渗透油田[9]。平面上断裂系统发育，内部被 10 多条断层切割成“棋盘状”小断块，砂体展布主要呈北西 - 南东向，形态主要为席装、条带状，少数呈孤立的土豆状，砂体控制储量大小不一，没有明显的油水界面，油水关系复杂，注采配套难。如图 1。

大王北油田大37块过大北15-3—大北5-13的油藏剖面图(南北向)

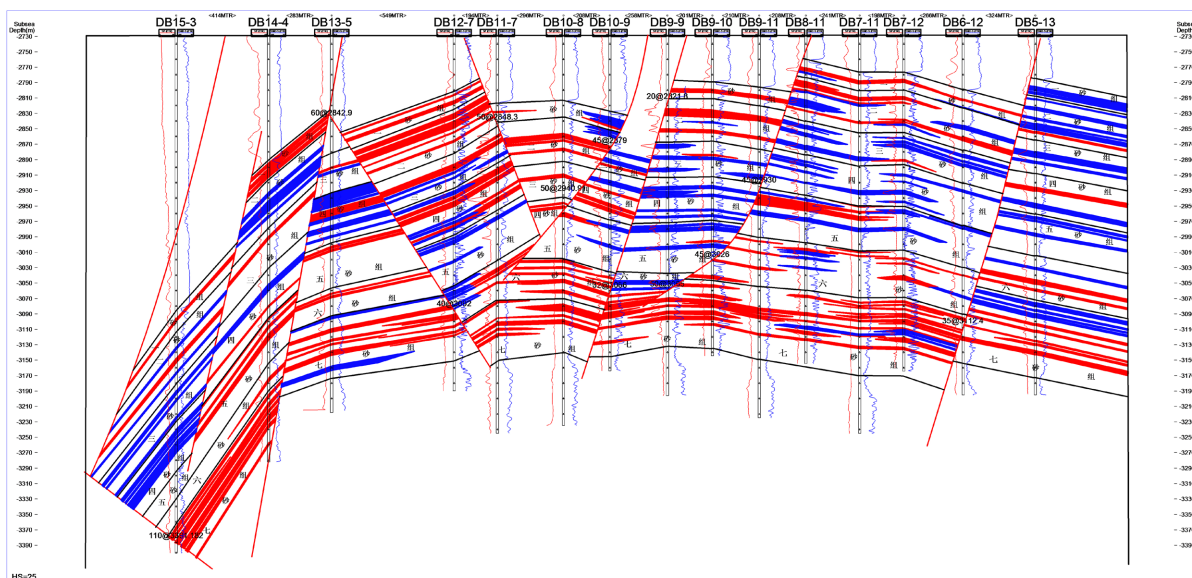


Figure 1. Reservoir profile of well DB15-3 and well DB5-13 of block D37 in Dawangbei Oilfield

图 1. 大王北油田大 37 块过大北 15-3 井——大北 5-13 井的油藏剖面图

该断块为常温常压系统。脆性矿物组分较高，粘土矿物以伊/蒙间层和伊利石为主，储层敏感性为中等偏弱水敏、无速敏、偏弱盐敏、弱碱敏和无酸敏。最小主应力范围为 50~65 MPa，最大主应力方位为北东东向，平均 54 MPa。

2.2. 多薄层储层压裂改造难点及对策

大王北油田多为老井、斜井、储层埋藏较深、跨度较大、多薄层发育、部分井层出砂。初期开发因层优、地层能量较好，压裂取得较好效果，后随着井层品质下降，层间非均质性强，注水对应差，井间矛盾突出，均匀充分改造难，压裂效果变差，其主要改造难点如下。

- 1) 储层跨度大、多薄层发育，机械分层压裂实施难，笼统压裂非主力层动用差。
- 2) 深井、高温井、套变井、出砂井等机械分层工程风险大。
- 3) 薄层发育，层间应力差值小，缝高控制难，易形成无效支撑。
- 4) 断裂系统发育，砂体控制储量大小不一，油水关系复杂，注采对应难，能量补充差。

针对目标工区改造难点问题，笔者就目前在该类储层上应用的暂堵压裂技术进行了优化改进，一是通过建立层间暂堵和缝内暂堵堵剂用量计算模型和优化图版，弥补了技术参数推演依据不足、优化不合理的问题，二是通过暂堵机理的推论，优化了现场不同粒径暂堵剂的投放顺序，并在现场进行了应用推广。

3. 多薄层暂堵压裂技术

3.1. 多薄层针对性暂堵压裂方案

针对大王北油田不同井层特点，可针对性地实施暂堵压裂工艺：

- 1) 针对跨度较大的储层，实施“封隔器 + 暂堵”[10]、“填砂 + 暂堵”和“桥塞 + 暂堵”等复合工艺，灵活分层压裂；

- 2) 对于部分薄层分布相对零散的储层，实施中“低排量控缝高压裂 + 层间暂堵分压多层” [11]；
- 3) 对于部分薄层分布相对集中的薄互层储层，实施“高排量穿层压裂 + 缝内暂堵造复杂缝” [5]；
- 4) 针对厚薄层发育的储层，厚层实施缝内暂堵，提高裂缝复杂程度；薄层实施层间暂堵，提高储层纵向动用率；
- 5) 针对重复压裂井层，实施“大规模 + 多级缝内暂堵”工艺，充分挖潜平面剩余油；
- 6) 针对已充分改造层或中高含水层，实施“前期暂堵转向”，避免过度压裂改造。

3.2. 多薄层暂堵压裂技术优化

暂堵压裂技术是在压裂过程中，加入可降解材料，在缝口或缝内形成致密暂堵体，阻止先压裂缝在原来方向上进一步扩展，并开启新的裂缝，从而实现多缝或复杂缝的改造目的。其核心环节是“封堵”与“转向”，依据暂堵体形成位置不同分为层间暂堵(缝口)和缝内暂堵(缝内)。

3.2.1. 暂堵材料优选

由于水溶性磺酸盐类暂堵剂在封堵率、降解率以及抗压强度等方面性能优异，且现场试验井应用效果良好，故优选了HHTP-90A (20/60 目粉末)、HHTP-90B (1~3 mm 颗粒)、HHTP-90C (8 mm, 13 mm, 15 mm) 系列堵剂材料。

3.2.2. 技术参数优化

层间暂堵有单投暂堵剂和暂堵球+暂堵剂复合暂堵两种形式，后者暂堵效率更高。缝内暂堵只单投暂堵剂，不投暂堵球。

暂堵球的层间封堵方式可以分为射孔孔眼内封堵和射孔孔眼口封堵两种。暂堵球尺寸选择与射孔孔径相关。大王北油田射孔多采用 89 枪 89 弹，其射孔孔径在 10.6 mm 左右，考虑到该油田多为斜井，射孔枪偏心，射孔孔径存在大小不均的情况 [12]。如图 2。

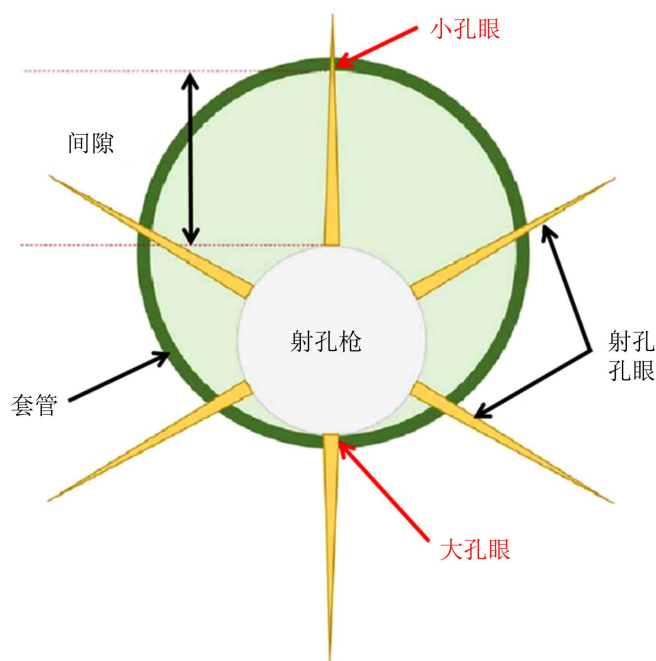


Figure 2. Diagram of off-center perforating gun
图 2. 射孔枪偏心示意图

根据大王北油田多薄层地应力解释结果, 优化暂堵球技术参数。层间应力差 > 2 MPa 时, 小层开启顺序比较明确, 可以选择孔眼口封堵, 大球组合的方式; 层间应力差 ≤ 2 MPa 时, 小层开启顺序不好预判, 可以选择孔眼内封堵, 投小球的方式。具体优化方案, 如表 1。

Table 1. Optimization table of size of temporary plugging ball

表 1. 暂堵球尺寸优化方案表

暂堵球封堵方式	射孔孔径	暂堵球优化方案	备注
射孔孔眼内封堵	10.6 mm 左右	8 mm 小球, 可降解, 1.2 倍射孔孔眼数	层间应力差 ≤ 2 MPa
射孔孔眼口封堵	10.6 mm 左右	13 mm 与 15 mm 大球组合, 可降解, 配比 2:3, 1.2 倍射孔孔眼数	层间应力差 > 2 MPa

暂堵剂封堵机理, 国内外有关学者进行了很多研究, 建立了单颗粒架桥理论、多颗粒的架桥理论、三分之二架桥理论、D90 理论等[13]。研究表明, 较大范围的颗粒尺寸分布, 有利于获得更多颗粒尺寸组合, 封堵大范围的裂缝宽度, 但是只有合适尺寸的颗粒才能产生稳定的架桥, 颗粒状材料的浓度不会明显影响桥堵的承压能力, 但会增加桥堵形成的可能性。

由于封堵位置差异, 层间暂堵主要考虑的是缝口的缝宽, 即最大动态缝宽, 而缝内暂堵主要考虑的是裂缝内部缝宽, 即平均动态缝宽。通过裂缝模拟, 大王北油田多薄层储层裂缝模拟最大动态缝宽约为 6~7 mm, 平均动态缝宽约为 4~5 mm。对照不同缝宽条件下的堵剂粒径匹配关系图版可知, 如图 3, 优选堵剂粒径范围为 1~6 mm, 其中有两个主要粒径中值, 分别为 1 mm 和 3 mm。因此, 针对大王北油田优选 HHTP-90A (20/60 目粉末)、HHTP-90B (1~3 mm 颗粒), 且层间暂堵推荐配比为 HHTP-120A:HHTP-120B = 1:2, 缝内暂堵推荐配比为 HHTP-120A:HHTP-120B = 1:1。

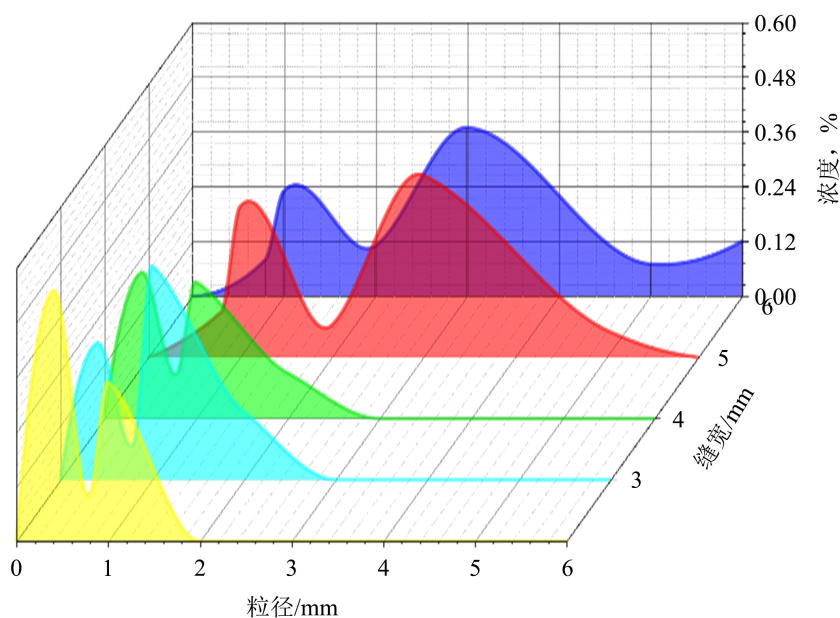


Figure 3. Relationship among of particle size, concentration of plugging agent and dynamic fracture width

图 3. 堵剂粒径、浓度与动态缝宽关系图

为了优化堵剂用量，分别建立层间暂堵和缝内暂堵计算模型，如图4、图5，并通过公式计算得到用量优化模板，如图6、图7。

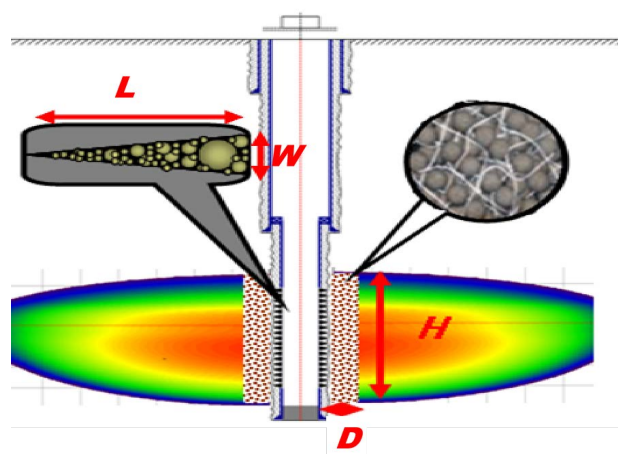


Figure 4. Calculation model of temporary plugging agent of interlayer
图4. 层间暂堵剂计算模型

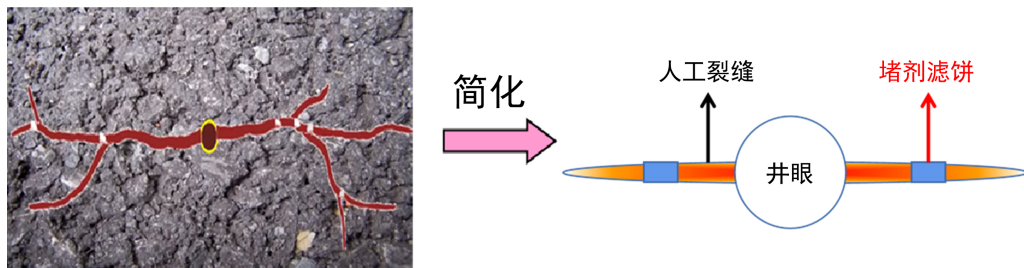


Figure 5. Calculation model of temporary plugging agent in fracture
图5. 缝内暂堵剂计算模型

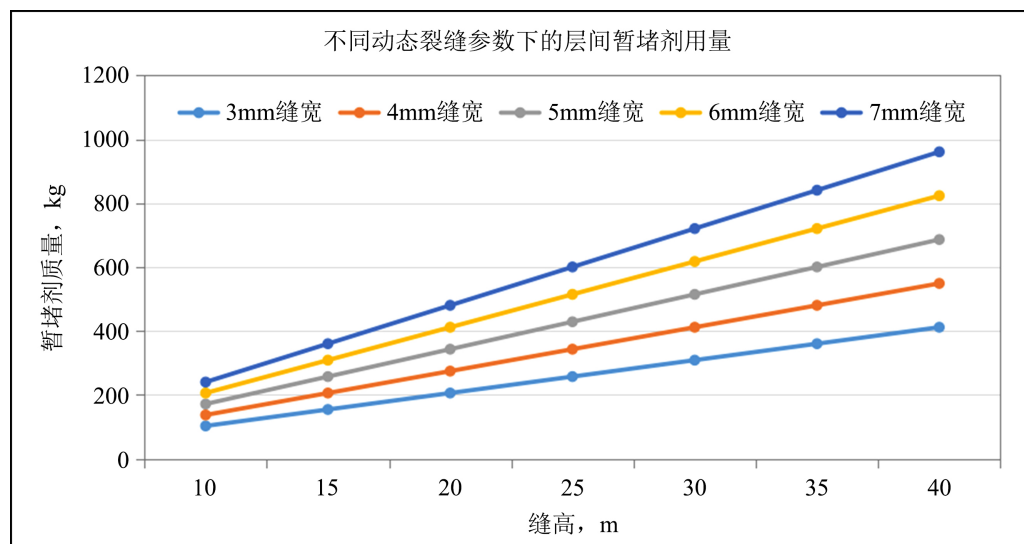


Figure 6. Chart of temporary plugging agent at seam under different dynamic fracture parameters
图6. 不同动态裂缝参数下的层间暂堵剂用量图版

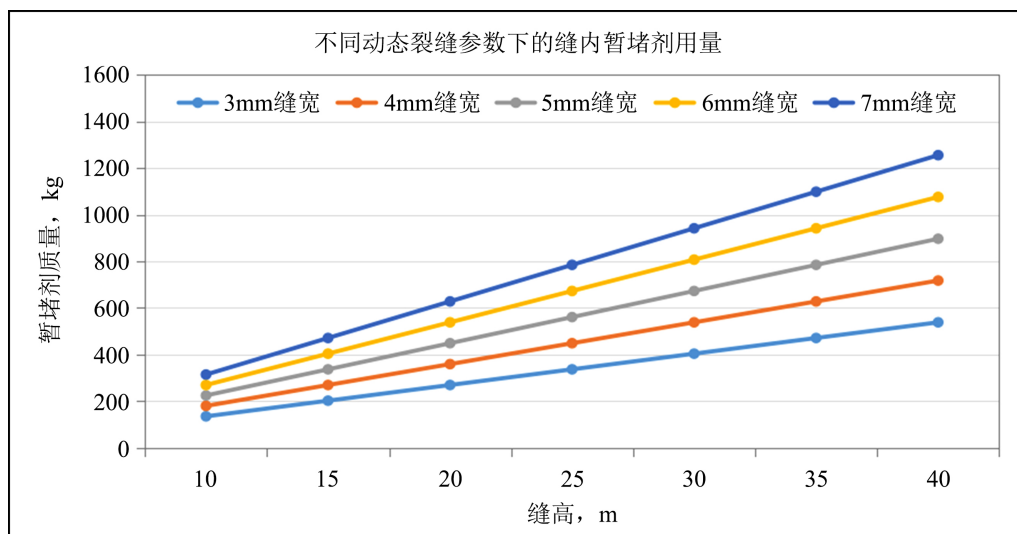


Figure 7. Chart of temporary plugging agent in fracture under different dynamic fracture parameters
图 7. 不同动态裂缝参数下的缝内暂堵剂用量图版

计算公式:

$$G = (2 \times H \times W \times D) \times \rho \times (1 + q) \times (1 + k) \quad (1)$$

其中: G 为暂堵剂质量, kg; H 为动态缝高, m; W 为动态缝宽, mm; D 为滤饼厚度, cm; ρ 为暂堵剂视密度, g/cm^3 ; q 为嵌入裂缝比例, %; k 为附加比例, %。

因层间暂堵 HHTP-120A:HHTP-120B = 1:2, 大粒径堵剂占比相对较大, 嵌入裂缝比例较小, 故 D 取值 10 cm, q 取值 10%, k 取值 20%。缝内暂堵 HHTP-120A:HHTP-120B = 1:1, 大粒径堵剂占比相对较小, 嵌入裂缝比例较大, 故 D 取值 10 cm, q 取值 15%, k 取值 50%。

3.2.3. 现场操作流程优化

按照暂堵理论, 颗粒暂堵剂需要经历架桥、填充和密封三个过程, 才能形成有效封堵[14]。这就对应着大、中、小三种粒径的暂堵剂的应用, 大粒径暂堵剂架桥, 中粒径暂堵剂填充, 小粒径暂堵剂(粉末)密封。因此, 现场操作流程应为: 先投入大粒径暂堵剂, 再投入小粒径暂堵剂。

4. 现场应用效果

在大王北油田应用多薄层暂堵压裂技术 10 多口井。经统计, 压裂井段 2800~3600 m, 射孔厚度 14.7~33.3 m, 跨度 36.0~337.5 m, 小层数 3~16 个, 采用机械封隔器 + 暂堵分层复合工艺, 封隔器最多 2 级, 以暂堵分层为主, 单井压裂 3~5 级。缝内暂堵和层间暂堵相结合, 平面上造复杂缝, 纵向上分多层, 从而实现立体改造, 暂堵压裂后, 平均升压 3 MPa 以上, 对比邻井常规压裂增产倍数高出 2 倍。见图 8、表 2。

Table 2. Optimization table of size of temporary plugging ball
表 2. 暂堵球尺寸优化方案表

类别	统计井数(井)	前 30 天平均日产油(t/d)	增产倍数(倍)
暂堵压裂井	5	15.6	5.8
常规压裂井(对应邻井)	5	9.1	3.4

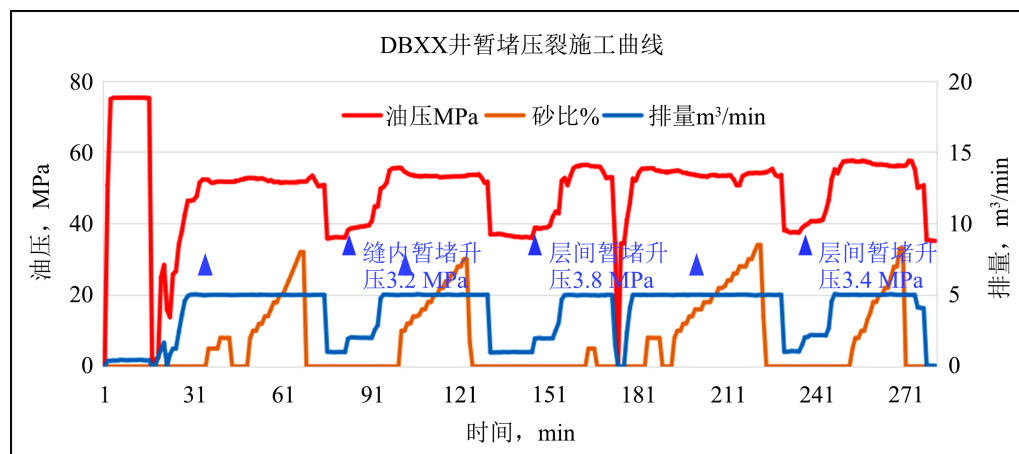


Figure 8. Fracturing curve and pressure rise after temporary plugging in DBXX well
图 8. DBXX 井压裂施工曲线及暂堵升压情况

5. 结论

1) 多薄层储层机械分层压裂实施难, 笼统压裂非主力层动用差, 可以优选暂堵压裂技术, 针对不同井层特点, 采取不同的暂堵压裂工艺, 如厚层缝内暂堵造复杂缝、多薄层层间暂堵分层、重复压裂多级缝内暂堵等, 从而实现多薄层储层的有效改造。

2) 针对层间应力差 ≤ 2 MPa 的多薄层, 小层开启顺序不好预判, 可以优化应用小尺寸暂堵球, 实施射孔孔眼内封堵, 提高封堵效率, 从而实现有效转层。

3) 较大范围的颗粒尺寸分布, 有利于获得更多颗粒尺寸组合, 封堵大范围的裂缝宽度, 对于大王北油田, 推荐应用 HHTP-90A (20/60 目粉末) 和 HHTP-90B (1~3 mm 颗粒)。

4) 通过建立层间暂堵和缝内暂堵计算模型, 推出计算公式, 可以得到堵剂用量优化模板, 对于 10~15 m 的裂缝缝高, 堵剂用量优化范围在 200~360 kg。

5) 大王北油田多薄层应用暂堵压裂技术结果表明, 技术可行, 升压明显, 增产有效, 对比邻井增产倍数可提高 2 倍。

参考文献

- [1] 孙西东. Q 区直井薄层压裂多裂缝延伸模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2016.
- [2] 黄伟, 詹鸿运. 逐级开启式封隔器及滑套多级压裂管柱的研制与应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2019, 39(2): 178-179.
- [3] 金智荣, 包敏新, 李升芳, 张华丽, 臧春. 暂堵转向分层压裂工艺在薄互层油藏中的应用研究[J]. 复杂油气藏, 2019, 12(4): 76-78.
- [4] 张宏岩. 水平井液体胶塞分段压裂工艺及应用[J]. 石油矿场机械, 2013, 42(12): 81-83.
- [5] 修书志, 陈守雨, 龙长俊, 郝艳, 周汉. 可控穿层压裂技术在砂泥岩互层储层改造应用[J]. 中外能源, 2015, 20(10): 60-64.
- [6] 张倩, 李年银, 李长燕, 王永清, 赵立强. 中国海相碳酸盐岩储层酸化压裂改造技术现状及发展趋势[J]. 特种油气藏, 2020, 27(2): 1-7.
- [7] 李玲. 细分层压裂工艺技术研究与应[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2011, 31(4): 258-259.
- [8] 刘斌, 季敏. 大王北大 37 块低渗透油藏稳油控水的策略研究[J]. 内江科技, 2013, 34(10): 89+96.
- [9] 黄秀芹, 刘承红, 路香丽, 孙波. 多薄层低渗断块油藏大 37 块精细油藏描述方法及成果应用[C]//中国石油学会. 中国石油学会石油工程专业委员会 2013 年精细油藏描述技术研讨会. 北京: 中国石油学会, 2013: 390-398.

-
- [10] 何乐, 寇双锋, 陈锐, 等. 低品位致密砂岩气藏压后综合评价与经济高效压裂技术——以苏里格气田桃7区块为例[C]//中国石油学会天然气专业委员会. 2018年全国天然气学术年会论文集(03非常规气藏). 北京: 中国石油学会天然气专业委员会, 2018: 318-328.
- [11] 万有余, 张玉香, 张力, 刘永, 谢贵琪. 低应力差薄互层控缝高压裂技术研究及应用[J]. 石油工业技术监督, 2021, 37(1): 57-60.
- [12] 谢荣华, 王文军. 偏心射孔对水平井压裂的影响[J]. 测井技术, 2015, 39(5): 660-664.
- [13] 李家学. 裂缝地层提高承压能力钻井液堵漏技术研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2011.
- [14] 王博. 暂堵压裂裂缝封堵与转向规律研究[D]: [博士学位论文]. 青岛: 中国石油大学, 2019.