

# 海上特低渗油藏压裂水平井开发效果评价 ——以渤海BZ油田沙三段5井区为例

汪全林, 邓 琪, 周军良, 张运来, 耿红柳  
(中海石油(中国)有限公司天津分公司渤海石油研究院, 天津300452)

**摘要:** 随着越来越多的海上特低渗储量被发现, 如何对其有效开发, 亟需开展相关的研究及实践。渤海BZ油田沙三段5井区是典型的特低渗薄互层油藏, 在方案研究的基础上实施了两口水平井多级压裂实践, 投产后采用油藏工程、数值模拟等手段对压裂效果、生产规律进行了研究。结果表明: 多级压裂对特低渗油藏产能有明显的改善作用, 施工中要根据储层物性特征优选最优压裂井型, 并尽量增加裂缝高度, 且在生产过程中应尽早注水补充地层能量, 降低裂缝导流能力下降速率, 使得多级压裂井产能最大化。研究成果与矿场实践基本保持一致, 对海上其他特低渗油藏的开发具有一定的借鉴意义。

**关键词:** 海上特低渗油藏; 水平井; 多级压裂; 裂缝参数

**中图分类号:** TE357 **文献标志码:** A

## Evaluation of development effect of fracturing horizontal wells in offshore ultra-low permeability reservoirs: A case study of well block 5 of Sha3 member in BZ Oilfield, Bohai Sea

WANG Quanlin, DENG Qi, ZHOU Junliang, ZHANG Yunlai, GENG Hongliu  
(Bohai Petroleum Research Institute, Tianjin Branch of CNOOC Ltd., Tianjin 300452, China)

**Abstract:** It is critical to conduct relevant research and practice on how to efficiently develop offshore ultra-low permeability reserves as more and more of them are discovered. The third member of the Shahejie Formation's well block 5 in the Bohai BZ Oilfield is an example of a typical ultra-low permeability thin interbedded reservoir. Based on the program study, two horizontal wells were treated to multi-stage fracturing, and following production, reservoir engineering and numerical modeling were used to investigate the fracturing effect and production rule. The results show that ultra-low permeability reservoir productivity can be greatly increased through multi-stage fracturing. According to the reservoir's physical characteristics, the best type of fracturing well should be chosen during construction, and the fracture height should be raised as much as possible. To supplement the formation energy, slow the rate of fracture conductivity decrease, and increase the productivity of multi-stage fracturing wells, water should be injected into the production process as soon as possible. The study's results are in line with actual field practice and have some significance for the development of other offshore ultra-low permeability reservoirs.

**Key words:** offshore ultra-low permeability reservoirs; horizontal well; multistage fracturing; fracture parameter

随着海洋油气勘探开发的深入, 海上越来越多的低渗油田呈现在眼前, 逐渐成为海上石油工业发展的重要潜力, 开发好海上低渗油田具有重要的现实意义和深远的战略意义。人们对陆上低渗油田开采特征的研究已经相当深入, 形成了较完整的体系<sup>[1-6]</sup>, 但海上油田受经济、环境等多因素影响, 开发方式不能直接套用陆地已成熟的低渗油田开发模式, 应探索出符合“少井多控、高效开发”的海上合理开发模式, 特别是海上特低渗油藏的开发更多集中在理论研究<sup>[7-8]</sup>, 缺乏矿场实践。为探索海上

低渗油田的开发, 本文以渤海BZ油田沙三段5井区为先导试验区, 在理论研究的基础上实施两口多级压裂水平井, 为海上特低渗油藏的开发提供可借鉴的经验。

收稿日期: 2021-08-25; 改回日期: 2021-10-11。

**第一作者简介:** 汪全林(1982—), 硕士, 工程师, 现从事油气田开发及油藏渗流研究工作。E-mail: wangql@cnooc.com.cn。

**基金项目:** 中国海洋石油科技重大专项“渤海典型低孔低渗油藏勘探开发关键技术研究与实践”(CNOOC-KJ-125-ZDXM-07)。

1 地质油藏特征

矿场试验区为渤海BZ油田沙三段特低渗区块,埋深为3 700~3 900 m,主要发育扇三角洲沉积相。储层纵向跨度大(3 660~3 845 m),小层数多,平均厚度3.0 m,为典型的砂泥薄互油藏。储层物性差,平均孔隙度为14.5%,平均渗透率为 $1.0\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。原始地层压力57.0 MPa,压力系数1.59。综上所述,矿场试验区为典型的异常高温高压特低渗油藏。

2 压裂方案设计与实施

针对该区块物性差的特点,对有效驱替系统进行了深入研究<sup>[9-19]</sup>,结合储层纵向跨度大、薄互层的特点,再考虑地应力方向,设计两口多级压裂水平井(A1H、A2H)增加动用储量,注采井距400.0 m,水

平段长度分别为560.0、310.0 m,裂缝数分别为5、3条,裂缝长度100~150 m,裂缝高度50~70 m,为防止水窜,裂缝等间距交错分布。根据方案设计,在先导试验区首次实现了海上压裂“千方液、百方砂”的规模。现场压裂施工曲线表明,压裂裂缝延伸及几何形态良好,两口先导试验井自喷投产后平均日产油60 m<sup>3</sup>。

3 多级压裂水平井效果分析

3.1 水平井多级压裂产能评价

将多级压裂水平井与未压裂直井(5井)产能进行对比,多级压裂对特低渗储层产能有明显的改善作用,压裂增产倍数为3~4倍。其中3级压裂水平井A2H基本达到钻前配产,5级压裂水平井A1H较钻前预测稍差(见表1),因此,有必要对两口多级压裂井产能影响因素进行深入研究。

表1 多级压裂水平井与未压裂直井产能对比

井号	地层压力/MPa	产层厚度/m	流压/MPa	生产压差/MPa	日产油/m <sup>3</sup>	比采油指数/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> ·MPa <sup>-1</sup> ·m <sup>-1</sup> )
A1H	57.2	34.0	36.2	21.0	58	0.081
A2H	58.0	32.0	36.6	21.3	75	0.110
5井	57.5	20.4	22.2	35.3	19	0.026

3.2 水平井多级压裂产能影响研究

3.2.1 渗流机理研究

为减少因素的干扰又不脱离实际,本文以先导试验区地质数据为基础,利用Petrel RE软件建立了特低渗薄互层油藏机理模型(见图1)。模型大小为1 500 m×1 000 m×289 m,平面网格大小为30 m×20 m,纵向按实际地层分为77小层,平均孔隙度14.5%,渗透率变化范围为 $(0.3\sim4.3)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。

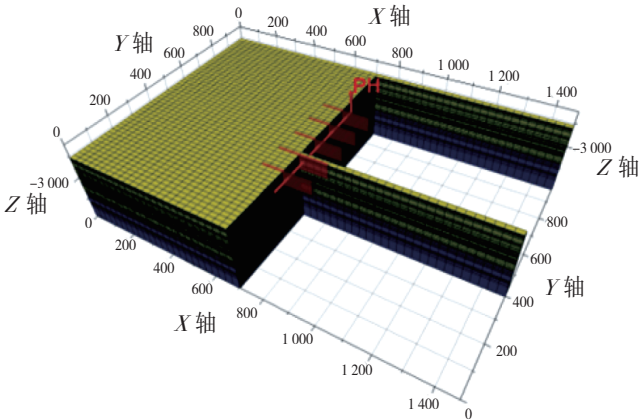


图1 特低渗薄互层油藏机理模型

通过数值模拟研究表明,多级压裂水平井渗流主要分为两个阶段(见图2)。

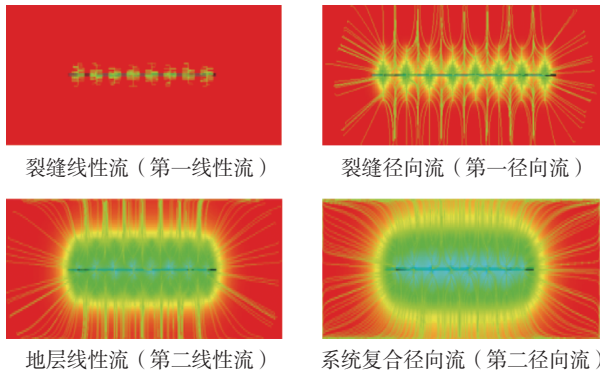


图2 特低渗油藏多级压裂水平井渗流阶段

第一阶段为生产裂缝渗流阶段,产量高但递减快(月递减率30%~40%),本阶段分为裂缝线性流(第一线性流)与裂缝径向流(第一径向流)两个阶段,持续时间一般半年左右;第二阶段为基质与裂缝共同渗流阶段,产量较低但生产较平稳(月递减率5%~10%),本阶段分为地层线性流(第二线性流)与系统复合径向流(第二径向流)两个阶段,持续时间较长,是生产稳定的关键。因此,地层线性流与系统复合径向流平稳续流是单井稳产的关键。

两口压裂井实际生产数据与机理研究渗流阶段非常吻合,压裂投产生产呈现两个阶段:①产量

快速递减期:初期4~5个月,生产压差15~20 MPa,平均产油60.0 m<sup>3</sup>/d,月递减率30%;②生产平稳期:生产6个月及以后,生产压差5~10 MPa,平均产油25.0 m<sup>3</sup>/d,月递减率5%~10%(见图3)。为保障油井平稳生产,应尽量保持平稳期的稳定续流。

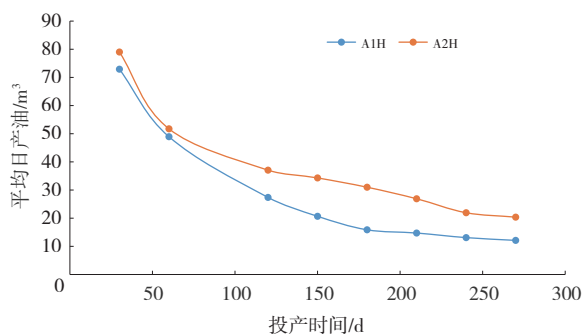


图3 特低渗两口多级压裂水平井实际生产曲线

### 3.2.2 产能影响因素研究

#### 3.2.2.1 裂缝导流能力对产能的影响

裂缝导流能力随时间不断变化,称为裂缝导流能力时变性<sup>[20]</sup>。其随时间的变化关系如下:

$$K_f w = K_{f0} w_0 [1 - \beta \lg(t + 1)] \quad (1)$$

式中, $K_f w$ 为任意时刻裂缝导流能力, $\mu\text{m}^2$ ;  $K_{f0} w_0$ 为裂缝初始导流能力, $\mu\text{m}^2$ ;  $\beta$ 为实验条件相关参数。

裂缝导流能力时变性对压裂水平井产能影响较大(见图4、图5)。

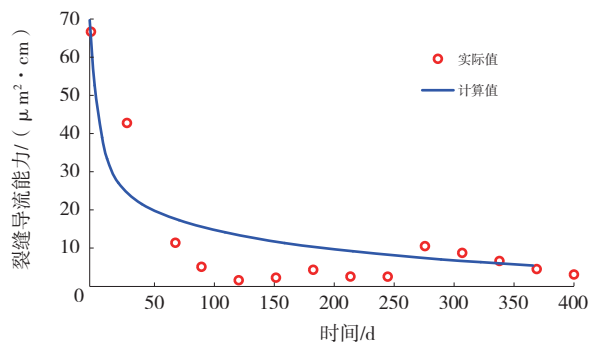


图4 裂缝导流能力与时间的关系

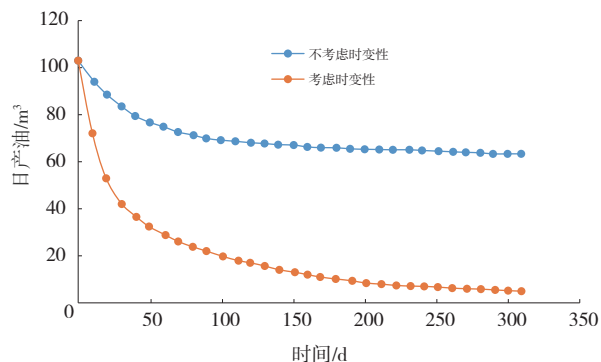


图5 裂缝导流时变性对压裂水平井产量影响

考虑裂缝导流能力的时变性,生产初期日产量较未考虑裂缝导流能力时变急剧下降,生产后期递减相对变缓,但仍较不考虑裂缝导流能力时变性强。因此,低渗透油田压裂开发应尽早注水补充地层能量,降低裂缝导流能力下降速率,减缓油井递减。

#### 3.2.2.2 裂缝参数对产能的影响

水平井压裂时裂缝参数主要有裂缝宽度、高度和长度,但压裂过程中裂缝宽度改变不大,利用Petrel RE软件分别设计裂缝高度为55.0, 75.0, 100.0 m,裂缝长度为100.0, 120.0, 150.0 m多个机理模型,研究裂缝高度与长度对产能的影响(见图6、图7)。研究表明,裂缝高度对产能的影响较裂缝长度大,在裂缝改造过程中要尽量增加裂缝高度,以提高储量纵向动用程度,提高单井产能。因此,要求压裂施工中提高泵排量和压裂瞬间压力,以达到增加裂缝高度的目的。

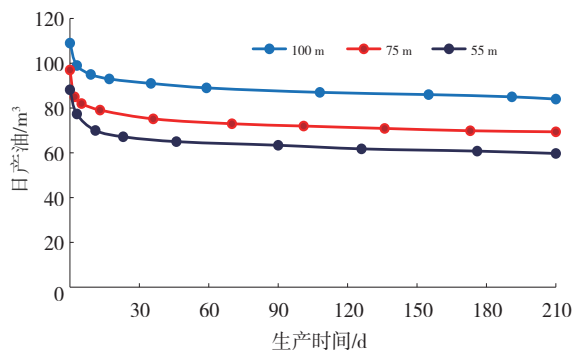


图6 裂缝高度对单井产能的影响

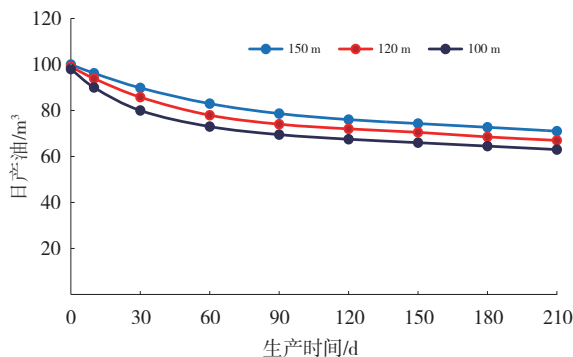


图7 裂缝长度对单井产能的影响

#### 3.2.2.3 压裂井型对产能的影响

两口先导试验井均为水平井,生产实践表明井型存在优化空间。一方面压裂液返排时容易在水平段根端处堆积堵塞;另一方面水平井段容易出现固井质量问题(见图8),若射孔段固井质量差,存在窜槽,压裂后返排容易将套管与地层间自由空间内物质在原油的裹挟下逐渐带出,在低产或停井状态



下容易堵塞油流通道,同时后期注水管理难度大。两口井投产实际压裂液返排率仅15.0%,严重低于正常压裂液返排率,也证实了这一点。

试验区目的层中有一套厚8.6 m的泥岩,海上压裂泵排量有限的情况下极有可能限制裂缝的纵

向延伸,减小纵向储量程度,影响单井产能。因此,实际施工中必须根据储层物性特征,进一步优化压裂井型。对砂泥互层可考虑应用大斜度井,甚至大斜度多分支井,提高纵向动用程度,且预留口袋,减少堵塞油流通道风险。

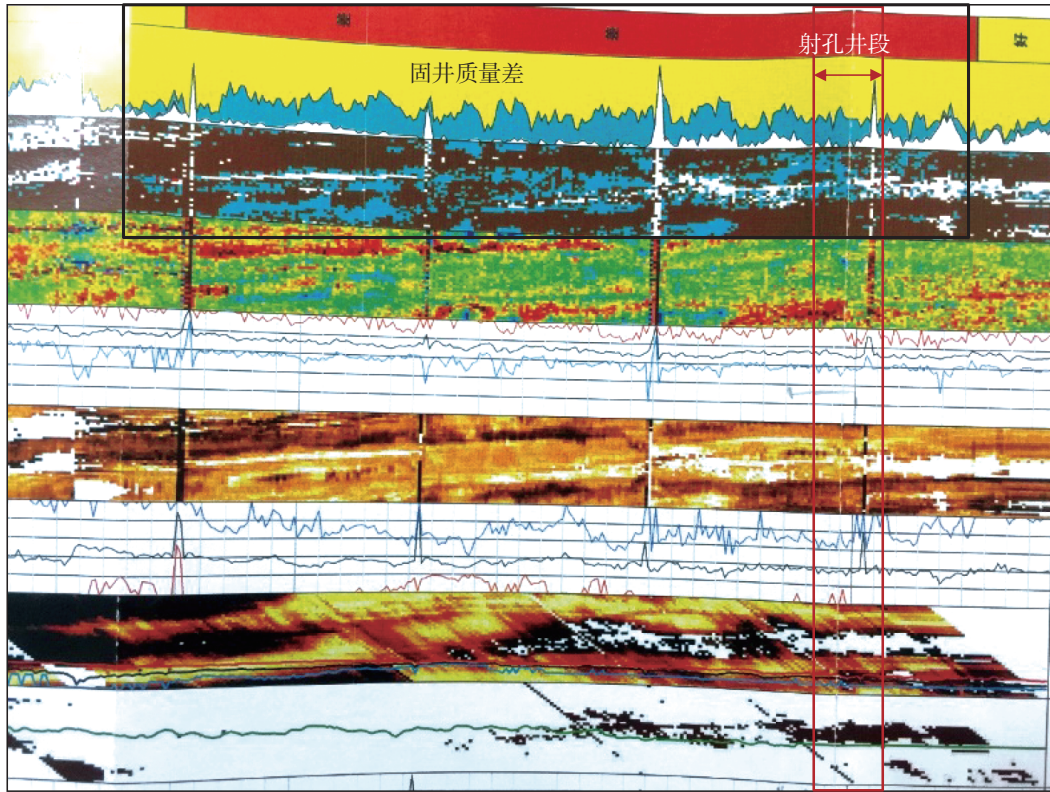


图8 多级压裂水平井固井质量监测

## 4 结论及建议

(1)多级压裂对特低渗储层产能有明显的改善作用,压裂增产倍数为3~4倍。

(2)确保多级压裂井平稳的地层线性流与系统复合径向流是稳产的关键。

(3)低渗透油田压裂后应尽早注水补充地层能量,降低裂缝导流能力下降速率。

(4)裂缝高度对单井产能的影响较裂缝长度大,压裂过程中应尽量提高造缝能力,以提高储量纵向动用程度和单井产能。根据储层物性优化压裂井型,提高纵向动用程度,且预留口袋,减少堵塞油流通道风险。

### 参考文献:

[1] 陈荣芹. 复杂断块油藏细分注水开发方案优化研究[J]. 断块油气田, 2006, 13(1): 29-30.

[2] 李道品. 低渗透砂岩油田开发[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 1-10.  
[3] 黄延章. 低渗透油层渗流机理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998: 18-20.  
[4] 汪全林, 唐海, 吕栋梁, 等. 低渗透油藏启动压力梯度实验研究[J]. 油气地质与采收率, 2011, 18(1): 97-100.  
[5] 何琰, 伍有佳, 吴念胜. 特低渗透油藏开发技术[J]. 钻采工艺, 1999, 22(2): 20-24.  
[6] 罗二辉, 王晓冬. 双重低渗介质含启动压力梯度不定常渗流研究[J]. 中国海上油气, 2011, 23(5): 318-321.  
[7] 汪全林, 赵秀娟, 薛艳霞, 等. 特低渗透互层油藏多级压裂水平井优化研究[C]//第五届全国特种油气藏技术研讨会论文集. 南宁: 中国石油学会, 2012: 537-540.  
[8] 王传军, 赵秀娟, 雷源, 等. 渤海BZ油田高效开发策略研究[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2012, 14(2): 36-39.

[9] 汪全林, 柴世超, 程自力, 等. 基于两相流低渗油藏合理

(下转第104页)

- [6] 韩卓明. 确定稠油油藏地层原油粘度的方法[J]. 石油勘探与开发, 1988(1): 56-60.
- [7] 苏继红, 易斌, 史继忠. 确定地层原油粘度的经验方法[J]. 石油勘探与开发, 1999, 26(5): 53-55.
- [8] 周庆军, 张甲清, 马华丽. 原油高压物性参数计算方法及对比[J]. 油气井测试, 2003, 12(2): 31-34.
- [9] 张义堂, 王星, 于立君, 等. 动态分析法在地层原油粘度评价上的应用[J]. 中国海上油气. 地质, 2003(4): 34-36.
- [10] BEAL C. The viscosity of air, water, natural gas, crude oil and its associated gases at oil field temperatures and pressures[J]. Transactions of the AIME, 1946, 165(1): 94-115.
- [11] BEGGS H D, ROBINSON J R. Estimating the viscosity of crude oil systems[J]. Journal of Petroleum Technology, 1975, 27(9): 1140-1141.
- [12] GLASO O. Generalized pressure-volume-temperature correlations[J]. Journal of Petroleum Technology, 1980, 32(5): 785-795.
- [13] SUTTON R P, FARSHAD F F. Evaluation of empirically derived PVT properties for gulf of Mexico crude oils[J]. SPE Reservoir Engineering, 1984, 5(1): 79-86.
- [14] CHEW J N, CONNALLY C A. A viscosity correlation for gas-saturated crude oils[J]. Transactions of the AIME, 1959, 216(1): 23-25.
- [15] KHAN S A, AL-MARHOUN A, DUFFUAA S O, et al. Viscosity correlation for Saudi Arabian crude oils[C]. The Middle East Oil Show. Bahrain: SPE, 1987: SPE-15720-MS.
- [16] VASQUEZ M, BEGGS H D. Correlations for fluid physical property prediction[J]. Journal of Petroleum Technology, 1980, 3(6): 968-970.
- [17] 董长银, 张宗元, 张琪. 脱气原油粘度计算的校正方法及对比分析[J]. 石油钻探技术, 2005(1): 52-54.
- [18] 方开泰. 实用多元统计分析[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 1989.
- [19] 唐守正. 多元统计分析法[M]. 北京: 中国林业出版社, 1986.
- [20] 陈忠, 黄惠. 求解非线性最小二乘问题的迭代法[J]. 武汉大学学报(理学版), 2003, 49(1): 14-16.
- (编辑 韩 枫)

(上接第 77 页)

- 注采井距确定方法[J]. 东北石油大学学报, 2012, 36(4): 45-48, 115.
- [10] 汪全林, 廖新武, 赵秀娟, 等. 低渗油藏水平井注水合理井距研究[J]. 新疆石油地质, 2012, 33(6): 727-729.
- [11] 何更生, 唐海. 油层物理[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011.
- [12] 刘鹏, 徐刚, 陈毅, 等. 渤海低渗透储层水平井分段压裂实践与认识[J]. 天然气与石油, 2018, 36(4): 58-63.
- [13] 黄鑫, 董秀成, 肖春跃, 等. 非常规油气勘探开发现状及发展前景[J]. 天然气与石油, 2012, 30(6): 38-41.
- [14] 窦宏恩, 杨旸. 低渗透油藏流体渗流再认识[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(5): 633-640.
- [15] 李志明, 杨磊, 张金庆, 等. 海上低渗透油田特点及开发策略探讨[J]. 山东国土资源, 2011, 27(4): 18-21, 25.
- [16] 曾祥林, 梁丹, 孙福街. 海上低渗透油田开发特征及开发技术对策[J]. 特种油气藏, 2011, 18(2): 66-68.
- [17] WESTERMARK R V, ROBINOWITZ S, WEYLAND H V. Horizontal waterflooding increases injectivity and accelerates recovery[J]. World Oil, 2004, 225(3): 81-82.
- [18] SWANSON B F. Visualizing pores and non-wetting phase in porous rocks[J]. JPT, 1979, 31(1): 10-18.
- [19] 李中锋, 何顺利. 低渗透储层非达西渗流机理探讨[J]. 特种油气藏, 2005, 12(2): 35-38.
- [20] 谢丽沙, 胡勇, 何逸凡, 等. 考虑裂缝导流能力时效的海上压裂井产能研究[J]. 天然气与石油, 2016, 34(5): 50-55.
- (编辑 谢 葵)