

Research and Practice on Tapping Potential of Remaining Oil in Offshore Low Permeability Oilfields

Quanquan Liang, Yue Gu, Xiao Chen, Chenglin Liu

Shenzhen Branch of CNOOC Ltd., Shenzhen Guangdong
Email: liangqq4@cnooc.com.cn

Received: Feb. 13th, 2020; accepted: Mar. 11th, 2020; published: Mar. 23rd, 2020

Abstract

Aiming at the problems of low production capacity, low production and high water cut in the late development of low permeability reservoir in the LFQ oilfield in the east of the south China sea, this paper studied the distribution of remaining oil by using numerical simulation technology on the basis of fine description of the reservoir, and put forward appropriate technical countermeasures for exploiting the potential of remaining oil based on the characteristics of offshore oilfield development. The results show that: because the LFQ oilfield is in the later stage of development, the well pattern is relatively perfect, and the remaining oil has the characteristics of small scale and scattered distribution, the recovery rate can be further improved by using the adjustment well technology, but the economic benefit is low. However, Maximum Reservoir Contact (MRC) technology makes full use of the existing production well sections, increases the drainage area, improves the well productivity and reservoir recovery, and has the advantages of low cost and high profit. Therefore, for such offshore low-permeability oil fields in the later stage of development, it is recommended to use MRC reservoir reconstruction technology to carry out residual oil exploration.

Keywords

Low Permeability Reservoir, Fine Reservoir Description, Residual Oil Saturation, MRC Multi-Branch Technology

海上低渗油田剩余油挖潜技术研究与实践

梁全权, 谷悦, 陈肖, 刘成林

中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 广东 深圳
Email: liangqq4@cnooc.com.cn

收稿日期: 2020年2月13日; 录用日期: 2020年3月11日; 发布日期: 2020年3月23日

摘要

本文针对南海东部LFQ油田低渗储层开发后期面临低产能、低采出、高含水的开发难题, 在油藏精细描述的基础上, 利用数值模拟技术开展剩余油分布研究, 结合海上油田开发特点, 提出相适应的剩余油挖潜技术对策。研究表明: 由于LFQ油田处于开发后期, 井网相对完善, 剩余油具有规模小、分布散等特点, 利用调整井技术挖潜可进一步提高采收率, 但经济效益偏低; 而MRC储层改造技术充分利用现有生产井段, 增大泄油面积, 提高油井产能与油藏采收率, 具有低成本、高收益等优势。因此, 对于此类处于开发后期的海上低渗油田, 推荐采用MRC储层改造技术开展剩余油挖潜。

关键词

海上低渗储层, 油藏精细描述, 剩余油饱和度, MRC技术

Copyright © 2020 by author(s), Yangtze University 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

我国海上低渗油田储量规模巨大, 大多数油田开发进入高含水期后产量递减快, 而陆上低渗油田的开发经验不适用于海上低渗油田的经济有效开发[1] [2] [3]。因此, 亟需一种应用于海上低渗油田开发中后期的提高采收率方法。目前, 陆上各油田普遍都开展了剩余油分布及挖潜政策研究, 通过剩余油精细描述, 针对目标区实施增产措施, 提高了高含水期的开发效益与水平, 而海上低渗开发后期油田也亟需经济有效剩余油挖潜措施[3] [4] [5] [6]。本文在油藏精细描述和剩余油精细表征的基础上, 提出了应用MRC储层改造技术改善海上低渗油田开发中后期的开发效果, 分析了该技术的海上适用性和提高采收率水平[7] [8]。

2. 油田开发现状

LFQ油田位于南海珠江口盆地北部坳陷带内珠I坳陷的惠陆低凸起带上。2500油藏位于LFQ油田珠江组下部, 为一完整的穹隆背斜构造, 走向近东西向, 属构造顶部较缓, 翼部稍陡的短轴背斜, 构造圈闭面积16.4~19.9 km², 构造平缓倾角小于3°, 构造完整, 圈闭范围内未发现断层。按油层物性特征可分为上部及下部: 2500油藏下部物性较好, 是油田早期开发的主力油层, 采出程度较高; 2500油藏上部又称为 α 层, 是油田目前开发的主力油层。

2500 油藏 α 层各小层渗透率在 40~207 mD, 70% 区域的井点渗透率低于 50 mD, 少部分区域井点渗透率甚至低于 10 mD, 导致油井投产后产能严重不足, 含水上升快, 单井累积产油量低。 α 层地质储量为 $646.47 \times 10^4 \text{ m}^3$, 目前采出程度仅为 20.2%, 综合含水 96.1%, 具有较大挖潜空间, 亟需开展储层描述与剩余油分布研究, 寻找经济有效的挖潜技术, 释放单井产能、提高油田采收率。图 1 为低渗油田开发后期剩余油挖潜综合技术路线图, 首先通过储层精细描述及剩余油表征寻找剩余油潜力区块, 再通过数值模拟进行开发方式的优选, 结合经济评价选出最佳的开发方式, 最后通过现场实践验证开发方式的合理性。

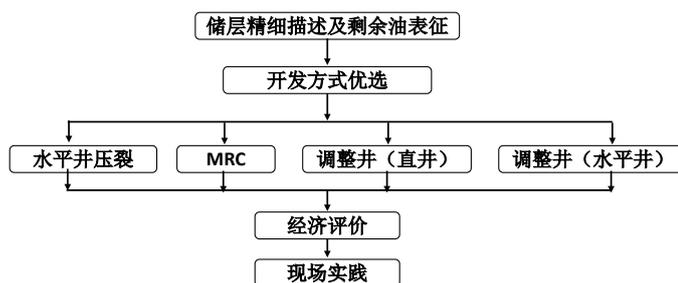


Figure 1. Comprehensive technology roadmap
图 1. 综合技术路线图

3. 储层精细描述及剩余油表征

本文以 LFQ 油田 α 层为研究对象, 结合地震、测井等静态资料, 及开发评价井资料, 开展测井资料合理应用技术、储层沉积(微)相研究、储层精细预测研究、隔夹层精细研究、强非均质储层地质模型优选和特高含水期剩余油精细表征及其挖潜技术研究, 形成一套特高含水期储层精细描述、剩余油精细表征及其精细挖潜技术, 指导油田后续增产措施方案的实施, 提高油田产量和采收率。

3.1. 储层精细预测

如图 2 所示, 根据储层特征与资料实际情况, 本次研究从地震、井两方面的分析与处理入手, 针对目标储层, 采用概率神经网络方法(PNN)分别进行了密度体和自然伽马体的预测。

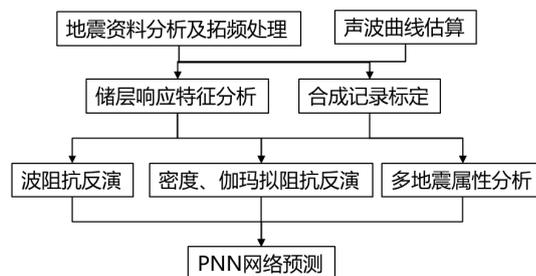


Figure 2. Technology roadmap
图 2. 技术路线图

1) 地震资料分析与拓频处理。本次研究搜集了 2014 年采集处理的单方位地震处理成果及新老资料双方位融合地震处理成果, 双方位融合处理成果比单方位处理成果拥有更多的细节。对于薄储层预测来说, 有必要提高地震资料高频部分的能量, 以增强预测效果。目前, 拓频算法有很多, 单纯通过数学算法盲目提高地震频率是不可接受的。本次研究采用谱兰化方法, 通过对井震综合分析, 对地震频谱进行

整形,在确保不把噪声水平提高到不可接受的水平前提下,改善地震资料的分辨率。

2) 声波时差曲线重构。研究区钻穿、钻遇目的层的井有 14 口具有实测的声波时差曲线,分析发现,在 α 层顶部附近部分井的声波时差曲线受井眼扩径影响严重,这种影响会导致合成记录与井旁道相关性差,也会导致初始反演模型失真,有必要通过重构消除井眼扩径对声波时差曲线的影响。

3) 储层响应特征分析。通过不同岩性的密度-自然伽马交汇图分析,发现:密度曲线对 α 层的砂岩与钙质砂岩具有较好的分辨性,大于 2.42 g/cm^3 基本为钙质夹层,反之为砂岩储层;自然伽马曲线对 2500 下部的砂岩与泥质夹层具有较好分辨性,大于 110 API 基本为泥质夹层,反之为砂岩储层。因此,应对 α 层和 2500 下部分别预测密度体和自然伽马体,以实现储层及夹层预测。

4) 概率神经网络预测。PNN 网络预测需要在井旁地震道提取大量的 RSA (Rock Solid Attribute) 属性,包括:瞬时属性、子波属性、几何属性、地球物理属性、AVO 属性、功率谱属性、波形统计属性等等。由于本次研究只对叠后资料进行属性分析,因此提取了除 AVO 属性和几何属性外的所有其他属性。

3.2. 精细地质建模

1) 构造建模; 2) 属性建模; 3) 储量计算; 4) 模型粗化; 5) 模型优选。

3.3. 剩余油表征

在精细地质研究和地质建模成果基础上,针对 LFQ 油田 α 层开展数值模拟研究,实现了剩余油精细表征(如图 3 所示)。在遵循数值模拟历史拟合原则的前提下,定油进行单井含水率、井底流压拟合。数值模拟的拟合结果经过与深度井以及过路井不同完钻时间的含水饱和度测井结果相比较,验证了数值模拟的可靠性。

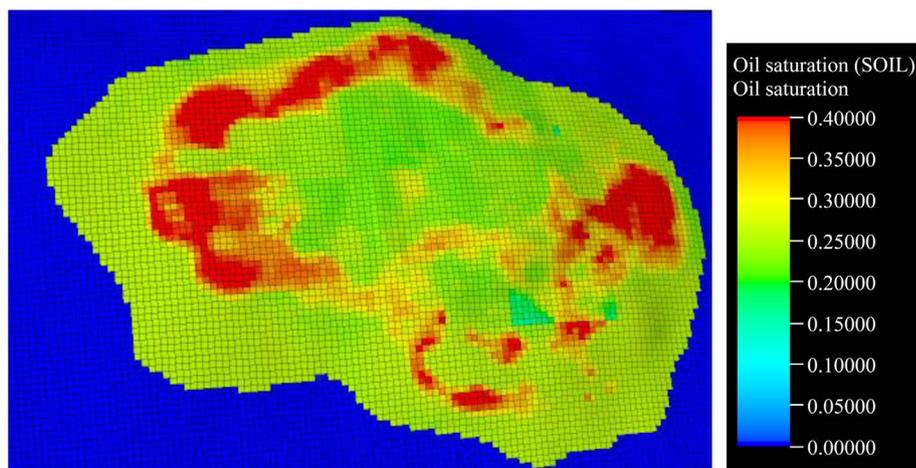


Figure 3. Residual oil saturation field diagram of α layer in LFQ oilfield
图 3. LFQ 油田 α 层剩余油饱和度场图

4. 油藏数值模拟研究

在储层精细描述及剩余油表征的基础上,采用数值模拟技术,研究了采用原水平井水力压裂、调整井(直井和水平井)及 MRC (老井眼上侧钻一个或多个分支井眼)的增产规律和经济效益,并优选措施。

4.1. 数值模拟方案设计

此次数值模拟研究以 LFQ 油田 α 层 20H2 井为例,研究海上低渗油田开发后期,生产井暴性水淹后,

剩余油经济挖潜措施。图 4 为 20H2 井的生产动态曲线,可以看出 20H2 井含水率极高,经济效益差,亟需增产改造措施。在本节将以 20H2 井为目标,研究针对海上低渗老油田天然能量开采后期的剩余油挖潜对策及效果评价。

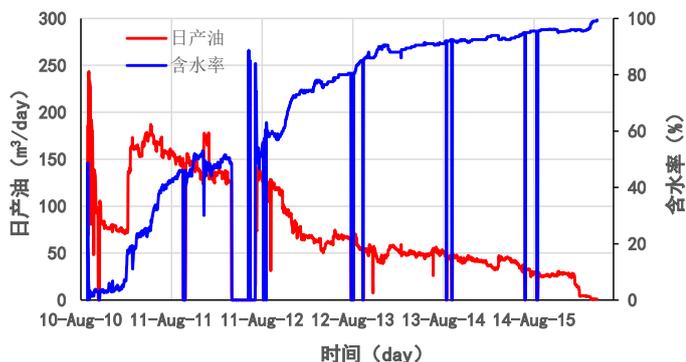


Figure 4. Production dynamic curve of Well 20H2 in alpha layer of LFQ oilfield

图 4. LFQ 油田 α 层 20H2 井生产动态曲线

措施评价: 1) 原水平井压裂; 2) 调整井(直井); 3) 调整井(水平井); 4) MRC(多分支水平井)。

评价指标: 1) 增产效果; 2) 经济增效。

4.2. 增产效果对比

通过数值模拟分析了 LFQ 油田 α 层 20H2 井在 2016 年 6 月后各类增产措施的效果,如图 5 各类增产措施的生产动态曲线所示,原方案继续生产时,由于原水平井附近剩余油饱和度低,且暴性水淹,产油速度接近 0,含水率接近 100%,剩余油挖潜效果极差;当在原水平井基础上进行水力压裂措施时,瞬时产油量高,但含水率上升速度快,产油速度下降快,剩余油挖潜改善效果差;当在原水平井基础上采用 MRC 技术改造措施时,提高了产油速度,剩余油挖潜改善效果好;当采用直井挖潜时,提高了产油速度,但剩余油挖潜改善效果差于 MRC;因此,采用 MRC 多分支技术后,剩余油挖潜效率高,增产效果好。

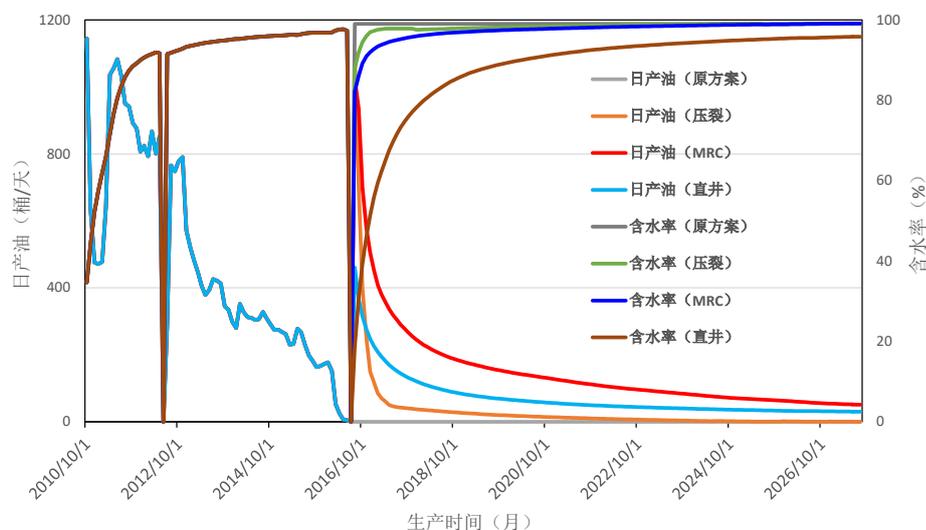


Figure 5. Production dynamic curves of various production increase measures

图 5. 各类增产措施的生产动态曲线

4.3. 经济增效对比

如表 1 各类增产措施的经济增效对比所示, 对于海上低渗油田开发后期, 剩余油饱和度低, 含水率高, 当在原水平井基础上进行压裂措施时, 海上压裂措施费用高, 虽然瞬时产油量增高明显, 但累积增油量低, 经济增效差; 当采用 MRC 多分支技术时, 利用分支水平井动用了更多的剩余油, 累积增油量高, 且相对于布置一口水平井, 增产措施费用低, 经济增效更高; 当布置一口直井挖潜剩余油时, 有效动用面积小, 累积增油量较水平井低, 经济增效差于 MRC 多分支井; 因此, 采用 MRC 多分支技术时, 增产措施费用低, 剩余油动用储量大, 经济开采效益最佳。

Table 1. Comparison of economic efficiency of various production increase measures

表 1. 各类增产措施的经济增效对比

增产措施	累积增油量(桶)	油价(元/桶)	增产措施费用(万元)	利润(万元)
原水平井压裂	92,711	442	10,000	-5902
MRC	220,126	442	1500	8230
调整井(水平井)	220,126	442	5000	4730
调整井(直井)	146,066	442	3000	3456

数值模拟结果表明, 海上低渗油田开发后期, 开发水平井附近剩余油饱和度低, 含水率高, 为改善生产动态, 在原水平井基础上进行水力压裂增产措施时, 虽然增油量得到大幅度提升, 但由于开发水平井附近剩余油饱和度低, 导致了产油量递减速度快, 含水率急剧上升, 且海上压裂成本极高, 所以采用压裂措施不具备经济性; 当采用调整井(直井)开发时, 较采用调整井(水平井)开发动用程度更低, 经济效益较差; 当采用 MRC 多分支技术时, 剩余油挖潜效果好, 较调整井(水平井)增产措施费用低, 更适用于海上低渗油田开发后期的剩余油经济挖潜。

5. 现场实践及认识

MRC 技术是集精细地质油藏描述、井眼轨道设计、侧钻技术、钻井液设计、精确地质导向技术、多分支独立完井技术等多项技术于一体的技术集成, 各技术不断发展完善, 使得 MRC 作业越来越高效, 效果不断提升。精细地质油藏描述技术对零星剩余油分布进行准确刻画, 又为 MRC 作业提供了物质基础, 是油井取得高产的保障。

5.1. MRC 技术实施策略

精细地质油藏描述技术对零星剩余油分布进行准确刻画, 为 MRC 作业提供了物质基础, 是油井取得高产的保障。井眼轨道设计在防碰的前提下, 结合钻井工具的造斜能力保证能达到设计靶点。悬空划槽侧钻技术依靠钻具自重实现划槽, 使分支井眼与老井眼分离。在悬空划槽时, 当划槽点狗腿度小于 $4.5^{\circ}/30\text{m}$, 采用牙轮钻头+带弯角的马达钻具进行作业; 当划槽点狗腿度大于 $4.5^{\circ}/30\text{m}$, 采用 PDC 钻头 + 旋转导向工具进行作业。钻井液性能对 MRC 井的效果具有重要影响, 既要保证井壁稳定、井眼清洁, 又要满足润滑防卡、防漏堵漏和储层保护的要求。精确地质导向是 MRC 作业实施效果的保证, 也是整个作业的关键所在。MRC 作业的储层一般较薄, 且作业过程中要追求更好物性的储层, 这就要求导向工具及时反馈可靠的地质数据, 随钻跟踪人员利用这些数据对地质导向进行实时控制, 保证分支井眼有效长度尽可能长。在作业过程中, 向已打开的分支中替入合适的暂堵剂, 形成暂时的屏蔽作用, 避免另一分支返出的泥浆、岩屑进入该分支, 造成二次污染。

5.2. MRC 技术实施效果

目前, MRC 技术已在 LFQ 油田进行了工业化推广应用, 主要用于老井通过 MRC 技术改造储层, 实现剩余油经济开采。如表 2 所示, 自 2012 年第一口 MRC 井成功实施以来, LFQ 油田共实施了 9 井次 MRC 作业, 平均分支数 2 条, 平均分支长度 580 米, 均取得了较好的增产效果, 累计增油 $36.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。由图 6 作业前与作业后日产油与含水率的关系曲线中可以看出, 老井通过 MRC 技术改造后, 产油量提高了 491%, 单井含水率平均下降 18%, 极大的提升了剩余油挖潜效率。

Table 2. Statistics of the implementation effect of MRC technology in LFQ oil field

表 2. MRC 技术在 LFQ 油田实施效果统计

井号	分支数	平均分支长度 (m)	作业前产油量 (bbl/d)	作业后产油量 (bbl/d)	作业前含水率 (%)	作业后含水率 (%)	累计增油 ($\times 10^4 \text{ m}^3$)
5H2	2	622	128	829	74.6	66.0	3.85
12H1	2	687	184	963	94.6	79.5	1.98
13H	2	404	190	916	81.0	53.4	5.83
16MH	2	681	94	902	94.0	64.6	4.09
20H2	2	645	86	1203	95.2	79.4	4.48
21H1	1	867	187	827	80.3	55.5	3.90
24H1	2	501	39	446	78.6	66.4	2.36
27H2	2	400	210	624	94.9	92.0	1.25
29H1	2	402	217	1179	53.0	25.3	8.75

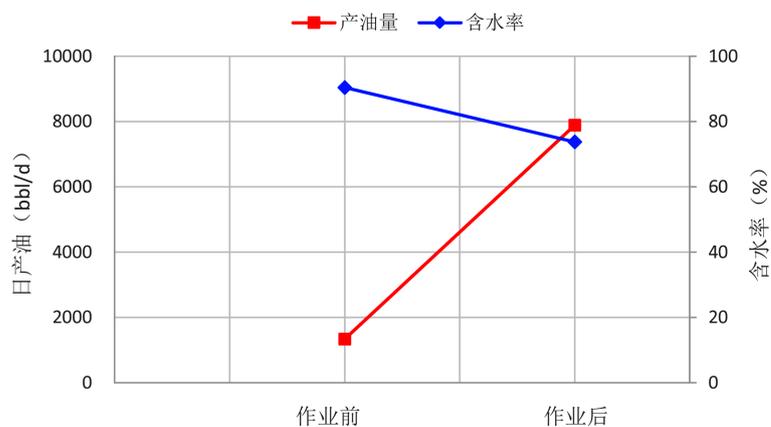


Figure 6. Daily oil production and water cut before and after well operation in 9 LFQ oilfields

图 6. LFQ 油田 9 口 MRC 技术实施井作业前后的日产油和含水率

MRC 技术在 LFQ 油田取得了显著的增产成效, 且其施工工期短, 成本低, 已经成为 LFQ 油田挖潜剩余油最有效的技术手段。后期还将在已实施 MRC 的井再次进行 MRC 作业, 进一步增大油藏接触面积, 建立立体渗流体系, 进一步增大泄油面积, 提高最终采收率。

6. 结论

- 1) 结合地震、测井等动静态资料, 及开发评价井资料, 开展测井资料合理应用技术、储层沉积(微)

相研究、储层精细预测研究、隔夹层精细研究、强非均质储层地质模型优选和特高含水期剩余油精细表征及其挖潜技术研究,形成一套特高含水期储层精细描述、剩余油精细表征及其精细挖潜技术,指导油田后续增产措施方案的实施,提高油田产量和采收率。

2) 在精细储层描述研究的基础上,研究了各增产措施的经济开发有效性,数值模拟结果表明 MRC 储层改造技术可有效动用井周围剩余油,经济效益最佳,适合海上低渗油田开发后期剩余油挖潜。

3) MRC 储层改造技术在老井眼上侧钻出一个或多个分支井眼,能有效增大油层接触面积,提高低渗透油藏剩余油动用程度,并提高油田最终采收率。MRC 技术的各个环节都影响着最终实施效果,确保各个环节最优化,才能实现产能最大化。

4) MRC 技术工期短、成本低,增产效果显著,经济效益巨大,是低渗透油藏高效开发的重要技术手段,在 LFQ 油田区域具有很大的推广空间。

参考文献

- [1] 邹信波,杨云,许庆华,等.珠江口盆地难采储层工业化试采矿场实践——以陆丰凹陷 LFC13-1 油田 α 层为例[J].中国海上油气,2011,23(3): 166-169.
- [2] 江怀友,沈平平,裘怿楠,等.世界石油工业 MRC 技术及中国陆相储层应用模式研究[J].大庆石油地质与开发,2008,27(3): 78-82.
- [3] 沈平平,江怀有,赵文智,等.MRC 技术在全球油田开发中的应用[J].石油钻采工艺,2007,29(2): 95-99.
- [4] 邹信波,许庆华,李彦平,等.珠江口盆地(东部)海相砂岩油藏在生产井改造技术及其实施效果[J].中国海上油气,2014,26(3): 86-92.
- [5] 郑延超,王婷婷,王中华,等.MRC 技术及应用[J].中外能源,2015,20(3): 32-37.
- [6] 李庆,耿应春,王敏生.MRC 技术及其在胜利油田的应用[J].石油钻采工艺,2009,31(4): 109-112.
- [7] 李皋,孟英峰,钟水清,等.MRC 井与 UBD 相结合的技术潜力研究[J].钻采工艺,2010,33(1): 28-30, 35.
- [8] 许红林,熊继有,阳星,等.MRC 油井稳态产能计算与对比[J].大庆石油地质与开发,2014,33(6): 69-74.