

空心斜向器定向射孔技术在文昌海域油田的应用

邓华根

中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 广东 湛江

收稿日期: 2024年10月31日; 录用日期: 2024年12月17日; 发布日期: 2024年12月31日

摘要

文昌海域油田大部分平台已无可用槽口, 部分平台短期无低效井侧钻, 迫切需要一种经济且高效的技术实现油藏开采的快速推进目标。在本项研究中, 采用空心斜向器定向射孔技术以进行井下作业。通过综合评估井控需求、井筒完整性以及射孔效率, 并与现有分支技术方案进行对比分析, 我们发现该技术在成本效益上具有明显优势, 对侧钻作业的场地条件要求较低, 且在操作过程中的难度也相对较小。此项技术在B4S2井的应用, 使射孔后的产量远超配产且生产压差与前期井保持一致, 产油量由 $72 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 提高至 $185 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。该技术有效解决了经济性问题, 满足了提高采收率的要求, 为海上油气田的经济高效率开发提供了参考。

关键词

文昌海域油田, 分支井技术, 空心斜向器, 定向射孔

Application of Directional Perforating Technology with Hollow Whipstock in Wenchang Offshore Oilfield

Huagen Deng

Zhanjiang Branch Company, CNOOC (China) Co., Ltd., Zhanjiang Guangdong

Received: Oct. 31st, 2024; accepted: Dec. 17th, 2024; published: Dec. 31st, 2024

Abstract

Most of the platforms in the Wenchang sea field have no more available slots, and some platforms have no short-term inefficient wells for side track drilling, so there is an urgent need for an

economical and efficient technology to realize the goal of rapid advancement of reservoir recovery. In this study, the directional perforating technology with hollow whipstock is used in order to carry out downhole operations. By comprehensively evaluating the well control requirements, wellbore integrity, and perforation efficiency, and comparing it with the existing branch technology solutions, we found that this technology has obvious advantages in terms of cost-effectiveness, low requirements for the site conditions of the side track drilling operation, and relatively low difficulties in the operation process. The application of this technology in the B4S2 well has resulted in the production rate after perforation injection far exceeding the allotted production rate and the production differential pressure is consistent with that of the previous wells, and the oil production rate has increased from $72 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ to $185 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$. This technology effectively solves the problem of economy, meets the requirements of enhanced recovery, and provides a reference for the economic and efficient development of offshore oil and gas fields.

Keywords

Wenchang Offshore Oilfield, Branching Well Technique, Hollow Whipstock, Directional Perforation

Copyright © 2024 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

文昌 19-1 油田地质储量约为 $2000 \times 10^4 \text{ m}^3$, 储层平均孔隙度为 23.4%; 平均渗透率 $353.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 属中高孔中渗储层。随着开发的深入, 海上油田的井槽口数量减少, 导致无法快速且经济地开发剩余的大量油藏。为了提高槽口的利用率和单井的泄油面积, 老井侧钻分支井眼成为了提升低产低效井和挖掘剩余油藏的有效方法[1]-[4]。多分支井技术通过在一个主井眼中侧钻多个分支井眼来实现对多个油气层的开采, 达到一井多靶和立体开采的效果[5]。然而, 传统分支井技术在实现井眼连通和隔离方面存在难点, 尤其是四级以上的分支井, 虽然能够保证连通性和隔离性, 但作业难度和成本都很高[6][7]。为了解决这一问题, 采用了定向射孔技术, 通过射穿尾管和空心斜向器, 实现了井眼的连通, 并保证了窗口的密封性, 从而实现了四级完井。与使用分支井工具的钻完井技术相比, 空心斜向器定向射孔技术具有成本低和作业难度小的优势[8][9]。相比采用分支井工具实现分支井钻完井技术, 采用空心斜向器定向射孔技术费用低, 作业难度小。在国内, 定向射孔工艺适用于尾管固井且井斜较小的情况, 通常采用陀螺校深[8]。南海西部某油田 A 区块基于油藏地质特征, 首次在简易导管架上采用空心斜向器与定向射孔工艺, 成功提高了单井产能, 为海上油气的低成本、高效率开发提供了参考和借鉴[10]。为此, 针对经济性差以及作业难度高的问题, 本文在经过井控分析、井筒完整性及射孔能力分析后, 通过打靶实验确定采用空心斜向器定向射孔技术解决槽口限制问题, 以达到稳产增产的目的。

2. 储层基本资料及井筒情况

2.1. 储层基本资料

文昌海域油藏类型属于中、高孔中渗型, 原油粘度低, 含蜡量高, 天然气中不含 H_2S 。地层原油密度为 $(0.760 \sim 0.766) \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 粘度 $(1.5 \sim 1.8) \text{ mPa} \cdot \text{s}$, 饱和压力 $(7.48 \sim 9.07) \text{ MPa}$, 地饱压差 $(8.26 \sim 9.46) \text{ MPa}$, 溶解气油比 $48 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。原始地层压力系数 $1.017 \sim 1.038$, 属于正常压力系统。目前各生产井的地层压力系数在 $0.89 \sim 0.96$ 之间, 平均地层压力系数为 0.93, 压力保持较好。油田具有正常温度系统, 地温梯度 $3.2^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ 。

详细数据见表 1 与表 2。

Table 1. Stratigraphic data
表 1. 地层物性资料

油组	地层温度/℃	孔隙度/%	地层压力/MPa	渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$	原始压力系数
ZH2I	23.4	353	88.66	17.87	1.017~1.038

Table 2. Fluid physical properties
表 2. 流体物性资料

流体	饱和压力 (MPa)	Rs (m^3/m^3)	Bo (m^3/m^3)	密度($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	粘度($\text{mPa}\cdot\text{s}$)	析蜡点	含蜡量 (%)	沥青质 含量/%	天然气 相对密度 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	CO ₂ 含量 (%)
油	9.07	25	地层压 力下 1.199 饱和压 力下 1.214	地层 0.76 地面 0.8532	地面 9.74 油层 1.5	43℃	19.11	1.44	\	\
气				\					0.928	29.76

2.2. 井筒完整性情况及射孔能力分析

B5 井的井身结构为 20"套管 268.7 m + 9-5/8"套管 1242.7 m + 7"尾管 1101.7~1963 m。9-5/8"套管设计为单级双封，1.58S.G 的首浆封固 9-5/8"套管鞋以下 150 m 至 20"套管鞋以上 50 m，1.90S.G 的尾浆封固至 9-5/8"套管鞋以上 300 m。具体数据见表 3，示意图见图 1。结合射孔方案，对数据分析可知，B5 井侧钻点 1057 m 上下均有水泥良好封隔，空心斜向器采用常规固井工艺，可进一步保证窗口封隔；从 9-5/8"套管侧钻，下入 7"套管，满足下入 5"射孔枪要求，该尺寸射孔枪已有较多定向射孔案例，满足射孔要求。

Table 3. B5 well borehole data
表 3. B5 井井身数据

井眼尺寸 in	套管尺寸 in	下深 m	钢级	磅级	扣型
26	20	268.8	X56	202.92	JV-LW
12-1/4	9-5/8	1242.7	L80-1Cr /L80-13Cr	47	Hunting/ NK3SB
8-1/2	7	1101.7~1963	L80-1Cr	29	VamTop

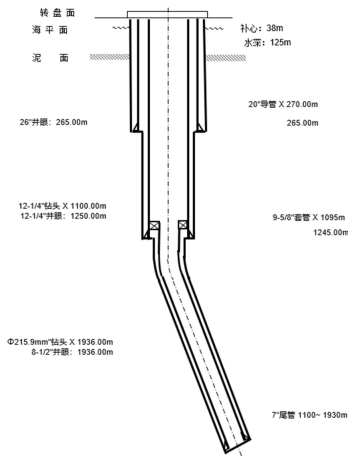


Figure 1. Borehole structure diagram of well B5
图 1. B5 井井身结构示意图

3. 空心斜向器定向射孔技术

3.1. 井控分析

B5 井从垂深 1025 m 开始侧钻，射孔底部垂深为 1790 m，垂深距离差 765 m；原始地层压力系数 1.017~1.038，属于正常压力系统，目前各生产井的地层压力系数在 0.89~0.96 之间，平均地层压力系数为 0.93 (按照 0.93 计算)，压力保持较好。对表 4 数据进行计算，计算结果显示：常规比重完井液即可满足井控要求，满足钻完井及后期修井作业要求。

Table 4. Basic data required for calculation

表 4. 计算所需基础数据

井名	井型	12-1/4"井眼深(m)	9-5/8"套管下深(m)	8-1/2"井眼深(m)	7"尾管下深(m)
B5	定向井	1246	1242	1965	1963
B4S2		960	侧钻点 1057 m (垂深 1025 m)	2010	2005

3.2. 空心斜向器

本次使用的斜向器盖板中空长度为 3.25 m，斜面角度 2°，空心斜向器预留安装同位素贴片位置(分别在正面和背面)，两个同位素间距为 4.4 m。设计斜向器密封正向承压 35 MPa，耐温等级：150℃，材质为 42 CrMo，双卡瓦设计，满足承压和防腐需求。示意图见图 2。

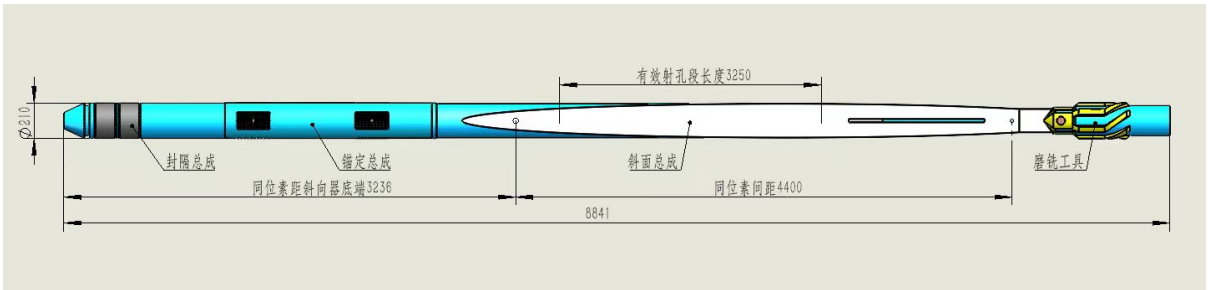


Figure 2. Diagram of the hollow whipstock

图 2. 空心斜向器示意图

3.3. 定向射孔技术

3.3.1. 空心斜向器射孔流程

空心斜向器射孔需要进行准备工作，包括安装同位素贴片、测量 MWD 和斜向器工具面之间的角差并记录斜向器工具面作为射孔基值。接着，将空心斜向器下入井中调整至所需角度，随后进行钻井、固井作业。在射孔前，使用电缆和陀螺或 MWD 进行校深与方位校正，保证射孔弹朝向正确。射孔作业包括组装射孔枪、点火射开斜向器、循环压井以及起出射孔枪。射孔后，若漏失变化不明显，可使用插入密封方法验证。最后，进行后续作业，包括下入防砂管柱、斜向器射孔管柱、中部分层管柱和生产管柱，完成整个射孔流程。

3.3.2. 现场射孔作业

定向射孔目的是沟通主井眼与分支井眼，射穿 7“尾管和水泥环以及空心斜向器，不射穿斜向器背面及 9-5/8”套管。在上部 9-5/8”套管内下入顶部封隔器，通过定位密封隔离密封以及滑套控制两支分采合

采作业。推荐采用油管传输射孔(TCP), 电缆校深; 点火方式为压力开孔起爆装置点火; 使用 4-1/2"~5"射孔枪, 选择深穿透射孔弹。

选择正高边开窗以保证射孔效果, 如图 3 所示。(1) 正高边开窗可以使射孔后孔径最大化, 因为射孔枪与斜向器压力盘之间的距离最短, 且两者之间的流道最小; (2) 由于重力的原因, 尾管与斜向器压力盘最接近; (3) 斜向器压力盘的射孔段最大。

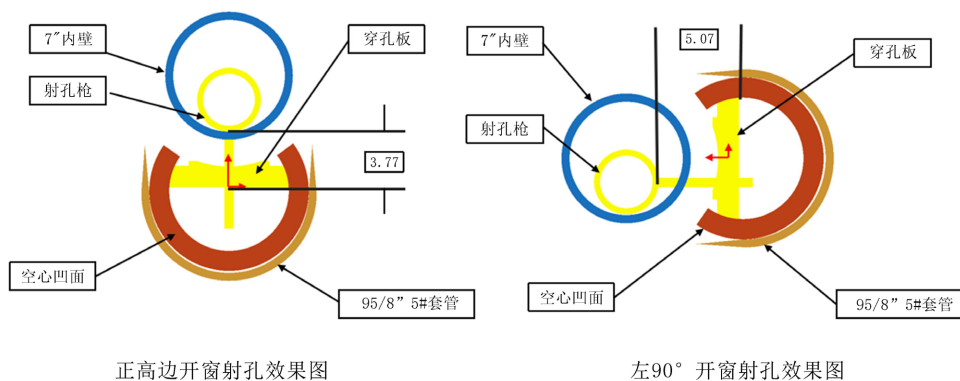
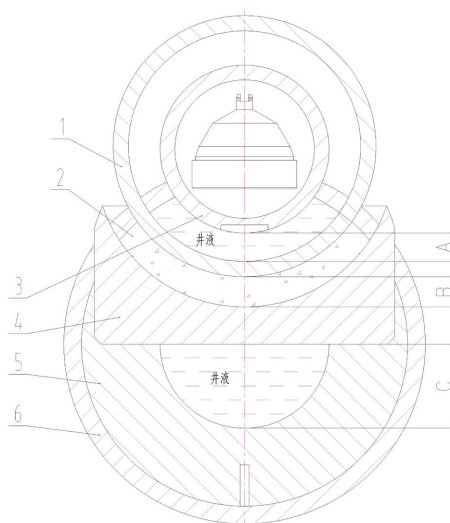


Figure 3. Effect of a perforation with a positive height side window and a left 90° window
图 3. 正高边开窗射孔与左 90° 开窗射孔效果图

3.4. 打靶实验

本次作业使用的是国产化空心斜向器, 打靶实验必要性强。实验要求射孔弹依次射开 4-1/2"射孔枪、7"29ppf 套管、水泥层、1"厚斜向器盖板, 且不损伤外层 9-5/8"套管。

射孔器在井下的示意图如图 4 所示, 需在斜向器盖板上射孔, 连通主井眼和分支井眼。



1. 9-5/8"套管; 2. 混凝土层; 3. 4-1/2"射孔枪串; 4. 斜向器盖板; 5. 斜向器背托; 6. 7"套管。

Figure 4. Section of the perforation section

图 4. 射孔段截面图

其中 A 为射孔枪与 7"套管的距离, $0 \leq A \leq 42.8 \text{ mm}$, 介质为完井液; B 为 7"套管与斜向器盖板的距离, $0 \text{ mm} \leq B \leq 38.1 \text{ mm}$, 介质为水泥环; C 为斜向器盖板与斜向器背托间的距离, $13 \leq C \leq 115 \text{ mm}$, 为

了井下射孔时 9-5/8"套管不被损伤，地面模拟试验选择最严苛条件，即 C 取最小值，若 C 为最小值时 9-5/8"套管未损伤，则 C 为其余值时也不会损伤。

为了验证极限条件下射孔器的射孔可靠性，选择 3 种试验状态，具体状态见表 5 所示。

Table 5. Full gun perforation test status
表 5. 整枪射孔试验状态

序号	A 值(mm)	B 值及介质种类(mm)	C 值(mm)	备注
1	0	0	13	近间隙状态
2	42.8	38.1/混凝土	13	远间隙状态
3	42.8	38.1/混凝土	13	远间隙偏离 10°状态

根据最远端偏移 10°打靶结果，要满足至少 2.441"通径的流通截面积(3017 mm²)，按照 13 孔/米的 4-1/2"射孔枪进行空心斜向器射孔长度最多 2.77 m 即可满足要求。

本次采用 13 孔/米的 4-1/2"射孔枪，射孔长度 3.05 m，空心斜向器上下各预留 10 cm 作为校深误差，保证射孔后空心斜向器孔眼流通截面积满足要求。实验结果见表 6 所示，结果表明，在所有测试状态下，9-5/8"套管均未受到损伤，证明了空心斜向器定向射孔技术的安全性和可靠性。射孔后的流通截面积均满足作业要求，表明该技术能够有效地沟通主井眼与分支井眼，提高油井的产油量。

Table 6. Results of target shooting experiment
表 6. 打靶实验结果

序号	状态	7"套管平均 孔径(mm)	盖板平均 孔径(mm)	背托平均 深度(mm)	9-5/8"套管 损伤情况	所需射孔 长度(m)	射孔长度 3.05 m 流通截面积, (mm ²)
1	近间隙	22.5	13	12.6	无损伤	1.69	5260.17
2	远间隙	21.1	10.5	1.8	无损伤	2.62	3431.56
3	远间隙偏离 10°	22.4	10.3	1	无损伤	2.77	3302.08

4. 现场应用

B4S2 井的井身结构和地层环境都与 B5 井类似，因此先对 B4S2 下入空心斜向器并进行射孔。管柱内加压至 2500 psi 点火射孔，钻台有明显震感，射孔起爆监测装置监测到射孔动作，判断射孔成功，同时射孔前测静漏失 0.3 m³·h⁻¹，射孔后测静漏失 4 m³·h⁻¹，射孔后漏失明显变大，判断射穿空心斜向器。

分支井眼以 30 Hz 生产，测试产液 232 m³·d⁻¹，产油 185 m³·d⁻¹，配产油 72 m³·d⁻¹，产量远超配产；分支井眼生产稳定后停泵关井，钢丝作业换层，主井眼排液，目前测试产液 240 m³·d⁻¹，生产压差与前期井保持一致。

5. 结论与建议

5.1. 结论

(1) 本次作业的成功，解决了文昌海域油田无槽口导致的低经济性问题，满足了油藏开发快速推进要求，在保持生产压差与前期一致的同时，单井产油量由 72 m³·d⁻¹ 提高至 185 m³·d⁻¹。

(2) 提出了国产化空心斜向器进行定向射孔方案，实现了“一井多眼”、“少井高产”。

5.2. 后续作业建议

为了提高定向射孔的精度和效果，后续优化方向应包括减少空心斜向器与定向接头或 MWD 之间引线的误差，以提高射孔的精确度；同时也可通过扩大流通截面积增强射孔后的油流能力以提升效果。

参考文献

- [1] 王晓鹏, 许杰, 张彬奇, 等. 渤海油田井筒及井槽优化利用技术研究进展及展望[J]. 中国海上油气, 2022, 34(1): 134-140.
- [2] 杨文领, 张恒, 王玥, 等. 青海油田第一口分支水平井钻完井工程实践[J]. 石油钻采工艺, 2015, 37(6): 5-8.
- [3] 李涛, 徐卫强, 苏强, 等. 四川盆地高温高压含硫气井五级分支井钻完井技术[J]. 石油钻采工艺, 2022, 44(3): 269-275.
- [4] 杨继明, 苏峰, 李波. 流花 4-1 油田双分支井钻井技术[J]. 钻采工艺, 2018, 41(1): 25-27.
- [5] 苑珊珊, 刘启国, 熊景明. 多分支井技术发展综述[J]. 国外油田工程, 2010, 26(12): 42-44+47.
- [6] 陈杰, 武广瑗, 左凯, 等. 国内外分支井五级完井技术发展趋势[J]. 石油矿场机械, 2019, 48(4): 80-84.
- [7] 马英文, 王昆剑. 四级分支井钻完井技术在曹妃甸 11-1 油田的应用[J]. 中国海上油气, 2020, 32(3): 124-129.
- [8] 范白涛. 定向射孔技术在四级完井中的应用[J]. 油气井测试, 2012, 21(5): 47-49.
- [9] 姚元文, 汪长栓, 冯国富, 等. 造斜器定向射孔技术探讨[J]. 测井技术, 2009, 33(6): 593-596+604.
- [10] 薛洋. WC-X1 井空心斜向器与定向射孔技术研究及应用[J]. 复杂油气藏, 2023, 16(1): 114-117+122.