

◀ 钻井新技术 ▶

SAGD 平行水平井和直井连通钻井技术

张文波^{1 2} 路宗羽² 王朝飞² 吴继伟² 刘颖彪²

(1. 西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室 2. 中国石油新疆油田公司勘探开发研究院)

摘要 为了解决 SAGD 平行水平井在后期采油过程中遇到的采油泵下入困难、抽油杆磨损以及沉没度不够等问题,提出了 SAGD 平行水平井和直井连通的钻井试验方案,即下方的采油水平井与直井连通,利用直井采油,从而有利于简化有杆泵举升工艺。在试验中,采用了大尺寸套管段铣、连通井段扩孔、水平井与直井的连通以及井下砾石充填等技术,均获得圆满成功,为新疆油田浅层超稠油的有效开发提供了新的技术途径。

关键词 超稠油 SAGD 热采 平行水平井 直井 连通

0 引言

蒸汽辅助重力泄油 (Steam - Assisted Gravity Drainage, SAGD) 是通过升高地层温度加热原油,降低原油粘度,使原油在重力作用下流入生产井中。SAGD 技术分为 4 种井网类型: ①直井井组联采; ②丛式井/斜直水平井联合开采; ③U 形井,直井火烧油层,水平井采油; ④平行水平井,上注下采。其中以平行水平井对采收率的贡献最大。模拟分析表明,单位水平进尺的产量每米为 $0.1 \sim 0.2 \text{ m}^3/\text{d}^{[1]}$ 。新疆风城油田利用直井和水平井热采开发效果不理想,故在重 32 井区首先成功钻成 4 对平行水平井的 SAGD 试验井组,随后又在重 37 井区部署了 7 对双水平井的试验井组,其中为解决井眼曲率过大导致的采油泵下入困难、抽油杆磨损以及沉没度不够等问题,在 2 对水平井中采用了 SAGD 平行水平井加直井连通的钻井试验方案,即下方的采油水平井与直井连通,利用直井采油,从而有利于简化有杆泵举升工艺。把井下连通技术应用与新疆油田石油开发和钻井中在国内尚属首次,也是一次大胆尝试,为 SAGD 开发工艺的逐步成熟提供了新的技术思路。

1 平行水平井 + 直井连通试验

1.1 地质概况

新疆风城油田重 37 井区依次沉积了侏罗系齐

古组和白垩系吐谷鲁群地层。吐谷鲁群、齐古组底界构造形态基本为东南倾的单斜,地层倾角为 $4 \sim 5^\circ$ 。重 37 井区 SAGD 先导试验区主要目的层为齐古组,顶部埋深 $220 \sim 250 \text{ m}$,沉积厚度 $82 \sim 90 \text{ m}$;有效厚度 $27.0 \sim 33.5 \text{ m}$ 。 50°C 时地面脱气原油粘度在 $25.3 \sim 39.2 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 之间,属于超稠油油藏。齐古组平均油层中部压力为 2.88 MPa ,压力系数为 0.93 ,油层温度为 19°C 。

1.2 试验思路

总体设计为: 1 口注汽水平井、1 口泄油水平井和 1 口采油直井的组合配套方式,如图 1 和图 2 所示。主要目标是通过段铣和扩眼作业使直井的连通井段的直径达到 2 m ,从而保证水平井与直井的有效连通,实现 SAGD 水平井泄油和直井开采的目标。

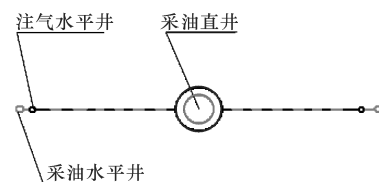


图 1 SAGD 水平井 + 直井采油示意图

1.3 试验目的

连通试验的主要目的是要解决以下存在的一些问题: ①采油井所需要的下泵沉没度不够,后期生产测试困难。②SAGD 技术开采浅层超稠油存在井身轨迹对泵的下入及正常运行的影响、有杆泵杆柱断落、地层出砂埋生产管柱和双管作业工艺复杂等问题。

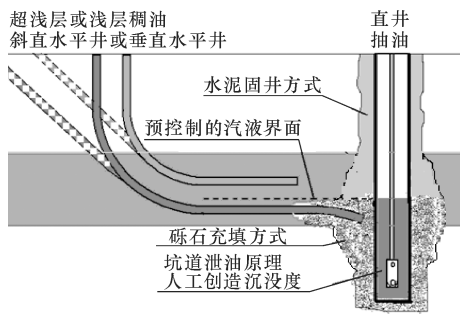


图2 SAGD 水平井 + 直井采油原理示意图

1.4 井身结构

SAGD 平行水平井 + 直井连通井组井身结构如图3所示。一开采用 $\phi 444.5$ mm 钻头钻至井深 40 m, 下入 $\phi 339.7$ mm 表层套管, 水泥浆返至地面。

二开采用 $\phi 311.2$ mm 钻头钻至 A 点, 下入 $\phi 244.5$ mm 技术套管, 水泥浆返至地面。三开使用 $\phi 215.9$ mm 钻头钻至设计水平段靶窗终点 (B 点) 完钻, FHW207P 井水平段最后 50 m 采用扩眼器扩眼至 $\phi 310$ mm, 与直井连通后, 完井悬挂 $\phi 177.8$ mm 尾管 (筛管), 筛管距 FH207VP 直井 2 m。

SAGD 连通直井的井身结构为: 一开采用 $\phi 604.4$ mm 钻头钻至井深 30 m, 下入 $\phi 508.0$ mm 表层套管, 水泥浆返至地面。二开采用 $\phi 444.5$ mm 钻头钻至完钻井深 450 m, 下入 $\phi 339.7$ mm 油层套管, 水泥浆返至地面。在油层段段铣和扩孔与采油水平井连通, 再下入 $\phi 244.5$ mm 防砂管柱 (套管 + 筛管), 采用砾石充填完井。

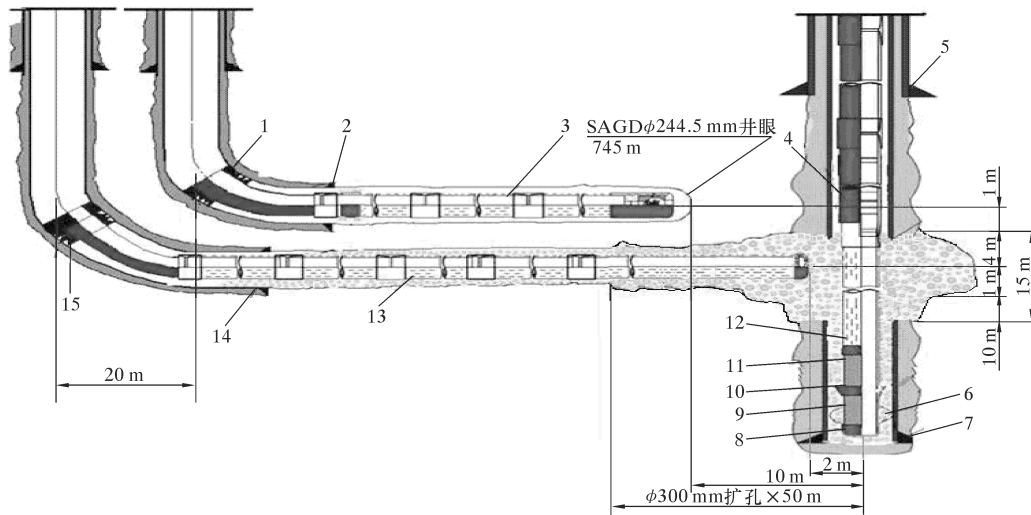


图3 SAGD 平行水平井 + 直井连通井组井身结构示意图

1— $\phi 245$ mm \times 178 悬挂封隔器 (303 m); 2— $\phi 244.5$ mm 套管 (333 m); 3— $\phi 177.8$ mm 筛管 (333 ~ 743 m); 4—热力补偿器; 5— $\phi 508$ mm 表层套管 \times 30 m; 6—扶正器; 7— $\phi 339.7$ mm 套管; 8—丝堵 (435 m); 9—套管短节; 10—充填工具; 11—套管短节; 12—防砂筛管 (250 ~ 300 m); 13— $\phi 177.8$ mm 筛管 (352 ~ 770 m); 14— $\phi 244.5$ mm 套管 (352 m); 15— $\phi 245$ mm \times 178 mm 悬挂封隔器 (322 m)。

1.5 SAGD 双水平井井眼轨迹参数

SAGD 双水平井井眼轨迹参数见表 1。

表1 SAGD 双水平井井眼轨迹参数

井段	井深 / m	井斜角 / (°)	方位角 / (°)	垂深 / m	位移 / m	北坐标 / m	东坐标 / m	每 30 米 曲率 / (°)	段长 / m
直井段	95.00	0.00	64.85	95.00	0.00	0.00	0.00	0.00	95.00
造斜段	249.80	60.00	64.85	223.02	73.91	31.41	66.91	11.63	154.80
稳斜段	274.80	60.00	64.85	235.52	95.56	40.61	86.50	0.00	25.00
造斜段	352.99	90.00	64.85	255.60	170.13	72.30	154.00	11.53	78.09
水平段	773.04	90.00	64.85	255.60	590.18	250.82	534.23	0.00	420.05

2 SAGD 水平井加直井连通技术难点及主体钻井技术

2.1 技术难点

(1) 水平距离近 600 m 的水平井与直井实现

完全连通, 对井眼轨迹精度控制要求高。

(2) 扩孔施工难度大。施工中需要对采油直井下部与水平生产井末端进行扩孔, 扩孔段井眼直径达到 1 m, 扩孔段中部井眼直径达到 2 m。

(3) $\phi 339.7$ mm 套管段铣国内外很少见, 因此工具在设计 and 制造过程中存在很多未知因素。

(4) 铁屑循环出井的问题。段铣套管过程中形成的铁屑密度大，容易下沉，并且在循环过程中贴在井壁上，对后期的磁导向作业有影响。

(5) 沉砂清理问题。沉砂主要是指在扩眼过程中，由于扩眼作业导致井眼直径急剧加大，致使井眼内钻井液循环携带岩屑的能力大幅下降，由此造成大量的岩屑沉入井底，或依附在已经扩眼的井段，可能会引发井下事故。

2.2 直井和水平井连通技术

2.2.1 连通工艺基本原理

利用仿真坑道泄油原理，解决超浅层稠油开采大排量举升问题。SAGD 水平井加直井施工主要使用段铣和扩眼造穴 2 种工具。目的是在采油直井中对特定井段套管段进行段铣，然后对该井段造穴扩孔，扩孔段井眼直径达 2 m。直井下部留足口袋，其目的是为扩孔后更好沉砂和为采油提供更大沉没度。扩眼井段位置根据电测数据确定，顶部低于注汽水平井水平段垂深 1 m，底部在泥岩层上部 1 m 处。SAGD 水平井加直井连通方案原理示意图如图 1 所示。

2.2.2 连通工艺步骤

(1) 直井首先钻至设计井深固井；注汽水平井完成造斜，下技术套管固井，钻机搬迁至采油水平井，进行造斜钻进并在下技术套管中完井、固井，等待连通直井施工。

(2) 直井进行套管段铣施工。

(3) 直井进行段铣井段扩孔施工。

(4) 利用磁导向轨迹控制技术进行 2 井连通，直井中下入磁导向接收仪器，采油水平井带强磁接头水平钻进。连通后，水平井先下入 $\phi 177.8$ mm 筛管完井，然后直井下入 $\phi 244.5$ mm 筛管完井。

(5) 利用磁导向技术，完成注汽水平井水平段施工。

(6) 对连通直井进行砾石填充施工。

2.3 大尺寸套管段铣技术

根据 $\phi 339.7$ mm 套管段铣要求，研制应用 TDX-340 段铣器，段铣工具最大外径为 310 mm，最大段铣外径 465 mm，待扩眼井井径为 444.5 mm，尽管存在一定的井径扩大率，但是段铣器在段铣掉套管的同时，也能够将大部分固井水泥环清除，有利于下一步扩眼作业。因没有段铣 $\phi 339.7$ mm 套管的经验，需要根据实际情况在现场调整。

直井套管切割和段铣工具为随钻液压式结构，段铣效果明显，同时可以扩出较大尺寸的井眼。采用液压驱动和硬质合金高效切削单元，段铣直径稳定。

2.4 扩眼技术

为满足大尺寸裸眼扩孔的需要，提出分段扩孔工艺方案，使用 $\phi 311.2$ mm 裸眼扩孔的加强型工具，研制了 ZXQ-280-1000 及 ZXQ-280-2000 这 2 种规格扩孔工具，分别用于 $\phi 311.2$ mm 井眼中使扩孔段井眼直径达到 1 和 2 m。

该工具的工作原理是利用钻井液流过喷嘴产生的压差，使工具心轴的活塞产生下推力，通过连杆的传递作用，使切刀在切削地层的同时逐步张开，扩出所需要直径的洞穴，再通过上提钻具扩出具有一定直径和高度的洞穴。

2.5 砾石充填完井技术

为了达到支撑井壁和防砂的目的，采用砾石充填完井技术，砾石充填完井工艺流程如下：①在直井中下入防砂完井管柱；②在直井中下入防砂服务管柱；③给采油水平井通井；④在采油水平井中下入防砂服务管柱；⑤连接地面管线；⑥做好防砂施工准备工作；⑦起出循环充填防砂服务管柱；⑧探冲砂。

2.6 磁导向钻井技术

1993 年 Sperry Sun 钻井服务公司在加拿大第 1 次使用磁导向系统工具技术钻成 SAGD 平行水平井。磁导向系统工具由一个 MGT 磁场发射源和一个磁场接收传感器组成。位于下部采油水平井中的 MGT 磁场源产生一个已知强度和方位的磁场，在上部注汽水平井中通过一个经过特殊改装过的 MWD 传感器来检测这个电磁场强度和方位^[2]。

该技术是利用一个旋转的磁性接头在正钻井中产生一个可以探测到的随时间变化的主动磁场信号。带有三轴重力加速度计和多频率磁力计的有线探管在目标井中测量磁场强度和方向，测量结果与井深有关。

图 4 为磁导向钻井技术应用示意图。利用磁导向钻井技术，实现精确定位，但是由于测量方面的

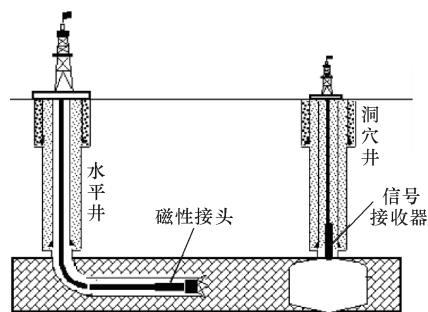


图 4 磁导向钻井技术应用示意图

误差，精度能够控制在 0.5 m 范围内，要实现 2 井眼完全连通仍然具有一定难度。为了减小井眼轨迹

控制系统误差,采用扩孔技术来增大2井连通的概率。

3 现场钻井实施情况

3.1 实钻井眼轨迹剖面

图5为重37井区FHW200井组垂直剖面图,该井组水平段最大间距5.71 m,最小间距4.58 m;图6为FHW207井组垂直剖面图,该井组水平段最大间距6.14 m,最小间距4.52 m。2井组都满足了开发设计要求,实现了井眼轨迹精细控制。

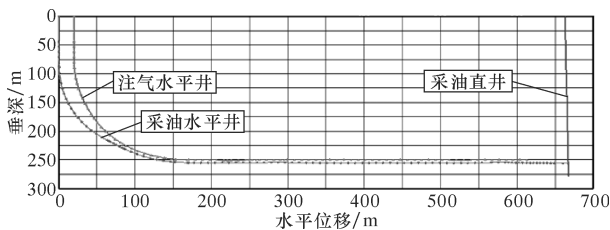


图5 重37井区FHW200井组垂直剖面图

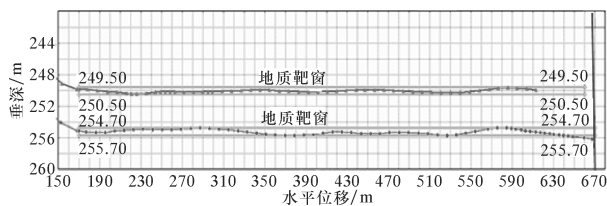


图6 重37井区FHW207井组垂直剖面图

3.2 施工完成情况

表2给出了F200VP/F207VP直井实施段铣和扩孔数据。水平井与直井连通后,为了保持扩孔连通井段井壁的稳定,以及起到防砂的作用,需要对直井进行砾石填充,填充技术数据如表3所示。

表2 F200VP/F207VP直井段铣和扩孔数据

井号	段铣井段/m	套管钢级	扩孔井段/m	扩孔尺寸/mm
F200VP	243.0~256.4	P110	245.0~256.1	1 000
F207VP	265.0~280.2	J55	265.8~276.3	600

表3 F200VP/F207VP直井砾石填充技术数据

井号	砂砾直径/mm	填砂量/m ³	注液量/m ³
F200VP	0.6~1.2	12	120
F207VP	0.6~1.2	6	90

在水平井水平段后期钻进过程中需要通过磁导向钻井技术来实现与直井的连通。FHW200P井与F200VP井顺利实现了连通。由于F207VP井段铣

套管过程中,剩余铁屑较多对磁导向仪器产生磁干扰,未能将2井直接连通,之后通过井筒加压实现了连通。

4 结论与认识

(1) 针对浅层超稠油SAGD开采技术存在的问题,提出了SAGD水平井加直井连通的技术方案。即在SAGD生产水平井末端钻一口直井,水平井和直井形成有效连通,利用直井采油。该技术可以有效解决抽油泵沉没度不够和油井维护的难题。

(2) 直井与采油水平井的有效连通,是SAGD水平井加直井钻井方案的关键步骤之一。水平井水平段后期钻进过程中需要通过磁导向钻井技术来实现2井之间的连通。

(3) 根据套管段铣要求,研制了 $\phi 339.7$ mm套管段铣和扩孔工具,首先段铣对应井段套管本体和接箍,然后扩孔至1 m。

(4) 形成了一套完整的适合SAGD水平井加直井砾石充填的完井技术方案。其中SAGD水平井采用割缝筛管,直井采用冲缝筛管防砂,防砂筛管缝宽为0.4 mm。

(5) 双水平井与直井连通技术为新疆油田浅层超稠油的有效开发提供了新的技术途径。

参 考 文 献

- [1] 杨睿,关志刚,蒋刚,等. 新疆风城油田SAGD平行水平井钻井技术[J]. 石油机械, 2009, 37(8): 79-82.
- [2] 杨明合,夏宏南,屈胜元,等. 磁导向技术在SAGD双水平井轨迹精细控制中的应用[J]. 钻采工艺, 2010, 33(3): 12-14.

第一作者简介: 张文波,高级工程师,生于1968年,1989年毕业于西南石油学院钻井工程专业,2008年获得中国石油大学(北京)石油与天然气工程硕士学位,目前是西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室在读博士研究生,从事钻井工程科研和设计工作,任副总工程师。地址:(834000)新疆克拉玛依市。电话:(0990)6880254。E-mail: zwb00@petrochina.com.cn。

收稿日期: 2011-01-24

(本文编辑 赵连禄)

ABSTRACTS OF SELECTED ARTICLES

Zhang Baosheng(*College of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Petro-chemical Technology, Beijing*), Chen Jiaqing, Liu Zhenyu, et al. **Research on the finite element model of single-metal floating seal.** *CPM*, 2011, 39(6): 1-3, 18

Considering the situation that there is a certain gap between the theoretical data and real value of rubber's parameter, the precise values of parameters of rubber spare parts in single-metal floating seal were determined by means of theoretical calculation and experimental comparison. The result shows that the optimal parametric values of rubber material for the support ring are $C_{10}=0.246$ and $C_{01}=0.142$; the optimal parametric values of rubber material for the O-ring are $C_{10}=0.667$ and $C_{01}=0.318$. It indicates that the calculation model established can precisely reflect the stress condition in the practical assembly. This conclusion is of vital importance to the quantitative analysis of the mechanical properties of single-metal floating seal.

Key words: single metal, floating seal, quantitative analysis, finite element model

Cao Jianping(*Department of Engineering Technology, Research Institute of Petroleum Exploration & Development, CNPC, Beijing*), Meng Qingkun, Wang Xiangdong, et al. **A comparative analysis of the equal-wall thickness downhole screw pump and the normal downhole screw pump.** *CPM*, 2011, 39(6): 4-7, 44

The uneven rubber thickness of the conventional screw pump's stator leads to its uneven stress, cooling and swelling, but the equal-wall thickness screw pump can ensure the evenness of the stator rubber's thickness through change of the pump structure so as to improve the operating performance of screw pump. The ANSYS software was applied to study the stress and deformation of the stator bushing of the equal-wall thickness downhole screw pump and the normal downhole screw pump, finding out the stress condition and deformation law of the bushing of both pumps, obtaining the deformation law of the profile of the cross section of both pumps and providing the basis for the profile design. Finally, the laboratory comparative experiment of the performance of both pumps was conducted. The result showed that under the same pressure the equal-wall thickness pump had a higher volume efficiency and a stronger loading capacity with the permissible volume efficiency.

Key words: equal wall thickness, screw pump, finite element, rubber bushing, stator

Zhang Wenbo(*State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu*), Lu Zongyu, Wang Chaofei, et al. **The drilling technology of connecting the SAGD parallel horizontal well and the straight well.** *CPM*, 2011, 39(6): 8-11

To solve the problems of the pump running difficulty of

the SAGD parallel horizontal well at the later stage of oil production, the abrasion of the sucker rod and the insufficient submergence depth, the test scheme of connecting the SAGD parallel horizontal well and the straight well was formulated. In other words, the lower oil recovery horizontal well was connected with the straight well which was then utilized to extract oil so as to facilitate the simplification of the rod pump lifting technology. The technologies of the large-size casing milling, connected well section reaming, connection of horizontal well and straight well and downhole gravel packing were adopted in the test, with a great success. The test provides a new technological orientation for the effective development of the shallow-layer super-heavy oil in Xinjiang Oilfield.

Key words: super-heavy oil, SAGD, thermal recovery, parallel horizontal well, straight well, connection

Yang Yuping(*CNPC Drilling Research Institute, Beijing*), Jin Bo, Jiang Huan, et al. **The research and application of the fast drilling fluid technology in Hailaer Basin.** *CPM*, 2011, 39(6): 12-14

In Hailaer area there exists serious mud-making in the borehole upper formation and mud ring is easily formed to give rise to serious sticking. The poor drillability and strong abrasiveness in the middle and lower formations lead to the low penetration rate as well as long drilling cycles. It is easy for the well wall to collapse and blocks to fall seriously in the lower formation. All these seriously affect the progress of exploration and development in Hailaer. Therefore, the fast drilling fluid technology was adopted to conduct the field test to improve the penetration rate in Well 126-88 of Hailaer Basin. The result showed that the fast drilling agent had a desirable compatibility with the amphoteric compound ion drilling fluid system applied on the spot. The agent had no effect on the normal performance and rheological property of the drilling fluid, thus effectively solving the problems of the instability of the well wall and the sticking in the process of tripping. The borehole of the test section was regular, the average penetration rate was improved by over 23.31% and the drilling cycle was shortened effectively.

Key words: fast drilling agent, penetration rate, well wall stability, Hailaer Basin

Liu Jian(*Research Center of China National Offshore Oil Corp., Beijing*), Qi Mingxia, Zhao Huanjuan. **An analysis of the structural reliability of the offshore drilling rig on the basis of stress analysis.** *CPM*, 2011, 39(6): 15-18

According to the actual situation of derrick resistance and loading effect, the operating condition required by the analysis of the structural reliability of the offshore rig derrick was determined. With the ABAQUS software as the tool, a finite element analysis of the rig's tower-shaped derrick was conducted and the stress required by the operating condition was extracted. The verified program was adopted to calculate