

海上油田丛式井网整体加密调整技术研究

张凤久¹, 罗宪波², 刘英宪², 赵春明², 苏彦春², 李其正²

(1. 中海石油(中国)有限公司,北京 100010; 2. 中海石油(中国)有限公司天津分公司,天津 300452)

[摘要] 以绥中36-1为代表的海上稠油油田已经进入开发中后期,逐步暴露出注采矛盾突出、层间和平面上储量动用差异大、单井控制储量过高、采油速度和采收率较低、综合含水上升快、产量递减快等问题,针对中国海油稠油开发面临的挑战,首次提出海上油田大规模综合调整研究,由于海上油田特殊的开发方式,陆地油田综合调整工作中成熟的研究思路和技术路线无法复制到海上油田,海上油田整体加密调整技术研究面临诸多技术难点,因此,本次研究结合绥中36-1油田I期自身特点和开发方式,针对油田开发存在的问题,创新性地提出一整套海上油田的整体挖潜和调整的技术思路和研究方法,完成绥中36-1油田I期整体加密调整方案,调整后油田井网由反九点面积注水井网转变成行列注水井网,探索“定向井+水平井”开发模式,整体加密实施效果良好,油田水驱状况明显改善,水驱储量动用程度从调整前的80.5%提高到调整后的91.3%,采收率大幅度提高,预计提高采收率10.4%,整体加密调整技术必将在同类油田中推广应用。

[关键词] 稠油油藏;整体加密;井网调整;水驱;数值模拟

[中图分类号] TE53 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2011)05-0034-07

1 前言

据统计,中国海洋石油总公司在已发现和正在开发的油田中,80%以上是稠油油田。由于海洋环境、地质条件和原油品质等原因导致开发难度大,采收率仅为20%左右^[1],而且综合含水超过60%的油田已经达到了59%。由于受到环境和技术条件的限制以及投资回报率的约束,海上油田还没有开展大规模井网加密提高采收率的矿场实践。

以绥中36-1为代表的海上稠油油田已经进入开发中后期,逐步暴露出注采矛盾突出、层间和平面上储量动用差异大、单井控制储量过高、采油速度和采收率较低、综合含水上升快、产量递减快等问题^[2]。“如何大幅度提高原油采收率,如何高效开发稠油油田”直接决定着大量的海上稠油储量能否有效开发动用和原油产量持续接替。“海上油田丛式井网整体加密调整技术研究”是针对中国海油稠油开发面临的挑战所提出的,是我国海上整装油田

的第一次大规模调整,无经验可供借鉴,同时海上油田由于开发方式以及工程设施的原因,在陆地油田综合调整工作中成熟的研究思路和技术路线无法复制到海上油田,进行海上油田大规模整体加密调整技术研究面临着诸多技术难点,主要体现在:a. 井距大、大段合采、监测资料较少,对非均质性严重的稠油油田剩余油分布规律认识难度大;b. 海上油田尚缺乏水淹层判断标准和水淹层测井解释方法;c. 对纵向上不同水淹程度的复杂水淹层选择性射孔原则缺乏系统研究和认识。因此,必须因地制宜探索海上油田丛式井网整体加密调整总体思路和技术路线,丰富和发展海上稠油高效开发新模式,为海上油田“十一五”原油产量持续增长、“十二五”原油产量持续稳定提供强有力的保障。

2 油田概况及开发存在的问题

2.1 油田概况

绥中36-1油田I期位于渤海辽东湾海域辽西

[收稿日期] 2010-01-20

[作者简介] 张凤久(1964—),男,吉林扶余县人,高级工程师,主要从事海上油气田开发工程、油气资源开发战略和油气资产评估等领域的技术研究和管理工作;E-mail: zhangfj@cnooc.com.cn

低凸起中段,构造形态为北东走向的半背斜。该油田主力含油层段为古近系东营组下段,埋深 1 300 ~ 1 600 m,自上而下分为 4 个油组,即 0、I、II、III;油藏类型为受岩性影响的构造层状油藏。绥中 36-1 油田 I 期储层物性好,孔隙度 26% ~ 37%,渗透率 $20 \times 10^{-3} \sim 5\,000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;地下原油粘度 23.5 ~ 452.0 mPa·s。

2.2 油田开发存在的问题

1) 油层非均质性严重,层间及层内水驱状况不均衡。从取心井水淹剖面上,纵向上层内水驱状况不均衡,以第 4 小层为例,小层内部既有未见水段,又有水洗段。

2) 单井控制剩余地质储量大,采油速度低。在剩余油富集区单井控制剩余地质储量高达 $194.1 \times$

10^4 m^3 ,采油速度较低,只有 1.03%。

3) 预测采收率低。绥中 36-1 油田 I 期目前井网条件下预测采收率仅有 24.2%,根据经验公式计算及陆上同类油田对比分析,I 期的目标采收率可达到 33.34%。

3 整体加密调整模式

针对绥中 36-1 油田 I 期开发存在的问题,结合油田自身特点和开发方式,提出以精细地质研究为基础,剩余油定量描述为主线,提高油田开发效果为目标、多学科交叉协作为依托的一整套海上油田整体加密调整的总思路及技术路线(如图 1 所示),完成整体加密调整方案的研究。

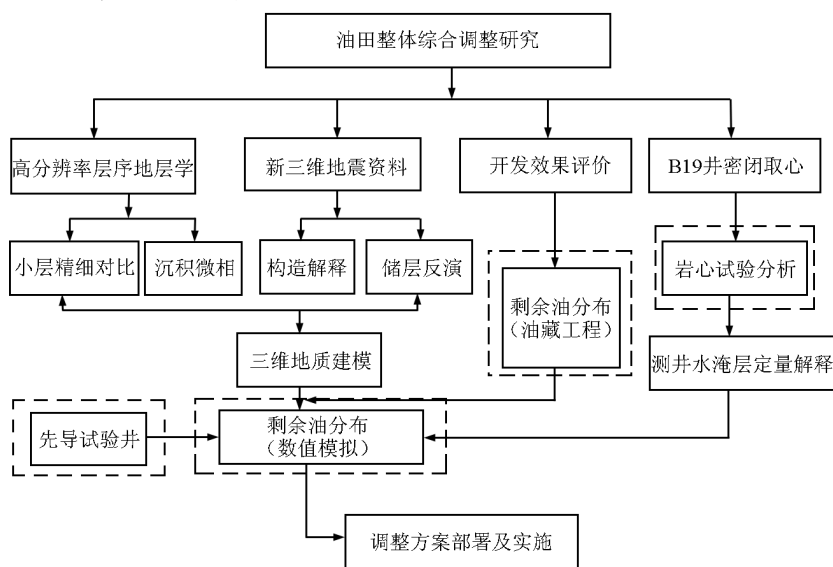


图 1 海上油田整体加密调整技术路线

Fig. 1 The technology roadmap of offshore oilfield overall encryption adjustment

绥中 36-1 油田 I 期整体加密调整方案的部署和实施是随着油田开发形势以及地质油藏研究过程逐步深化的,整体加密调整方案采用目前油田井网油井间加密油井,同时转注目前井网边井,调整后油田井网由反九点面积注水井网转变成成为行列注水井网(如图 2 所示),在底部强水淹的厚油层采取水平井开发,探索“定向井+水平井”开发模式(如图 3 所示),整体加密调整方案加密 58 口井,数值模拟预计采收率提高 10.4%,极大地改善油田开发效果,提高油田开发水平。

4 整体加密调整关键技术研究

4.1 大井距多层合采稠油油藏剩余油定量描述技术

绥中 36-1 油田 I 期井网部署基本上采用反九点法面积注采井网,注采井距 350 m,由于受到海上开发条件的限制,开发井为多段防砂完井、多层合采,同时由于层间和平面非均质性较强,加上多层合注合采导致吸水性和产出剖面极不均匀,注入水单向突进和单层突进现象明显,导致剩余油分布规律复杂,如何定量描述多层油藏剩余油分布状态,总结剩

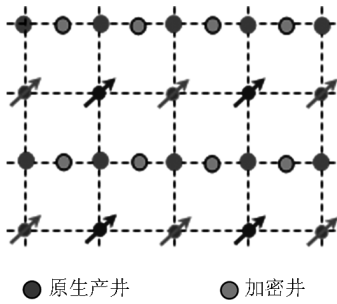


图2 整体加密调整井网变换示意图

Fig. 2 Overall encryption adjustment well pattern conversion schematic diagram

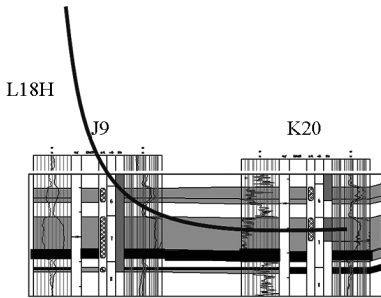


图3 “定向井+水平井”开发模式

Fig. 3 “Directional well & Horizontal well” development mode

余油分布规律,以指导后期调整井的部署和实施,是油田综合调整工作的重中之重。

受海上生产条件以及测试工艺的限制,油田测试资料极少,为弥补测试第一手资料的不足,需要拓宽剩余油研究思路、多种研究方法并行并相互验证以确保研究精度。

鉴于此,采用“地质-油藏-动态”三位一体、点面结合的立体剩余油研究思路,创新性地提出理论与试验相结合、物模与数模相结合、理论化、公式化、模块化的剩余油定量描述技术。

1) 密闭取心法剩余油定量评价技术。首次在渤海油田开展密闭取心和岩心剩余油实验研究,建立了一整套从井位设计到后期水淹评价的密闭取心技术方法和工作流程标准,以直观手段揭示地下真实水淹规律并指导油田综合调整实践(如图4所示)。

2) 精细油藏数值模拟技术。应用饱和度端点标定技术、API自动追踪技术和动态数据虚拟实现与拟合技术等先进的数值模拟技术,通过对油藏生产历史的拟合,得到绥中36-1油田I期的剩余油分布规律,如图5和图6所示。

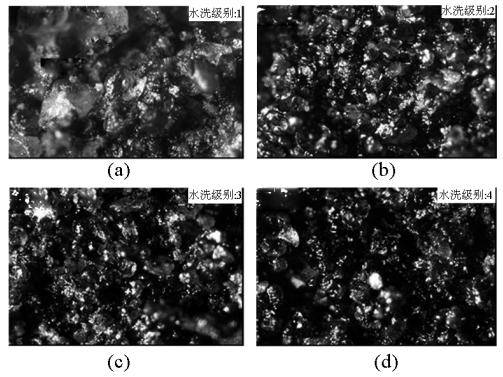


图4 不同水淹级别镜下照片

Fig. 4 Different flooded grade microscope photographs

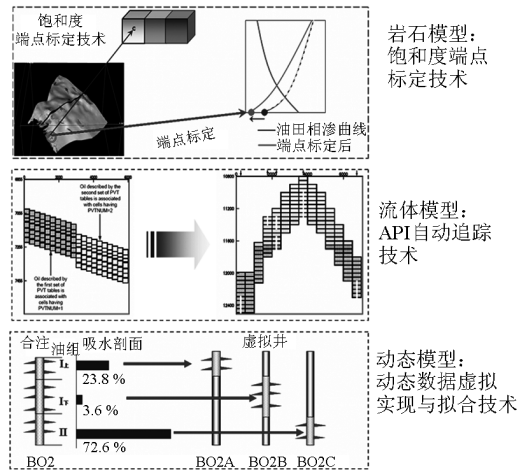


图5 先进的数值模拟技术

Fig. 5 Advanced numerical simulation technology

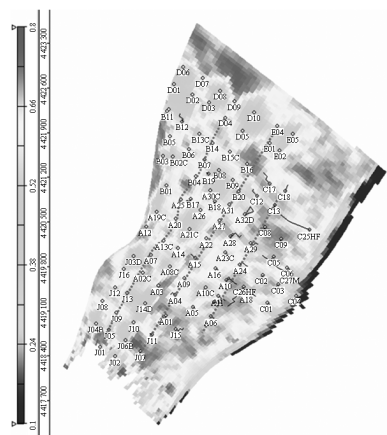


图6 主力小层剩余油饱和度分布

Fig. 6 Major layers remaining oil saturation distribution

3)油藏工程综合分析方法。油藏工程综合分析方法是研究剩余油分布的经典方法^[3],反映最基本的动态认识,是油田加密调整部署的主要依据和重要参考之一。与陆地油田不同,由于缺少最直接的测试资料的支持,该方法在渤海的运用面临很大挑战,通过技术攻关,提出海上特色的油藏工程综合分析方法研究思路,如图7所示,它运用经典油藏工程方法以及地质、动态、测试以及水驱油试验研究成果,结合油水井各项生产资料及油藏构造、储层、沉积相等地质研究结果绘制小层含水等值线图,如图8所示。

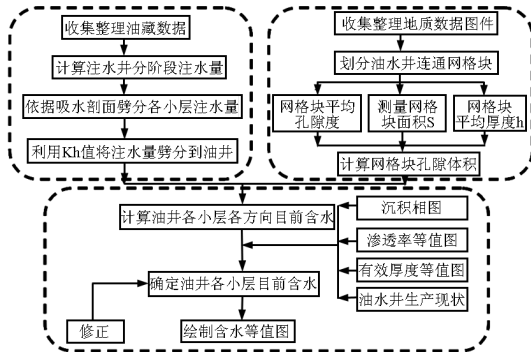


图7 油藏工程综合分析方法

Fig.7 Reservoir engineering analysis method

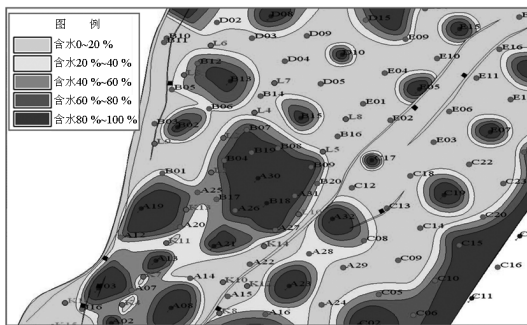


图8 主力小层含水等值线图

Fig.8 Major layer water cut contour map

为了验证含水等值图的精确程度,根据调整并实钻后的测井解释水淹级别,与含水等值图进行对比,吻合率可以达到85%。不符合的层段主要集中在那些多期砂体叠置、非均质性较强的小层中,储层物性及压力分布的差异导致水淹机理复杂,层内纵向上存在多段水淹且水淹程度差别较大,从而整个小层的含水不易预测。

4.2 地质模型与油藏数值模拟耦合技术

目前流行的建模数模一体化综合研究流程是从地质到油藏的单向流程,上一阶段油藏数值模拟研究获得的井间储层连通性认识无法反馈到新一轮地质模型中。因此,文章首次提出储层三维地质模型与油藏数值模拟耦合技术,并借助 Petrel 一体化综合地质建模软件,以绥中 36-1 油田 I 期为实例进行攻关研究,提高数值模拟效率和质量,为开发过程中油藏动态研究及井网加密确定提供科学的依据。

通过对比初始地质模型与油藏数值模拟结果,分析历史拟合过程中对储层参数模型的调整与修改,识别与地质因素相关的变化,将认可的变化转化为相应的地质趋势,更新地质认识,实现了地质模型与油藏数值模拟结果的双向耦合,如图9所示。

4.3 复杂水淹层测井解释技术

绥中 36-1 油田 I 期已注水开发 10 余年,新钻调整井纵向上不可避免的存在不同程度的水淹情况,如何运用测井方法评价水淹状况并指导后期射孔以及产能预测是国际国内公认的技术难题,也是调整方案能否顺利实施并获得成功的决定性因素。目前陆地油田采用实测水淹层电阻率计算当前含水饱和度,用油田已有资料建立水淹层原始含水饱和度求取方法并计算出水淹层原始含水饱和度,利用两者之间的差异程度大小,结合油田水淹级别判别表,建立水淹级别定量解释方法。

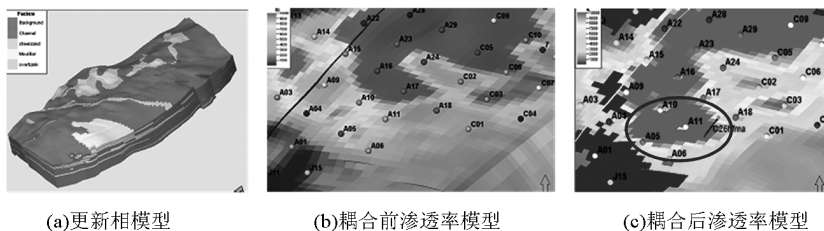


图9 地质模型与油藏数值模拟结果的双向耦合

Fig.9 Two-way coupling of geological model and numerical simulation results

问题的关键是绥中 36-1 油田在投产初期没有密闭取心资料,无法建立束缚水饱和度计算方法,需要另辟蹊径。在研究中发现,绥中 36-1 油田深电阻率和有效孔隙度相关性规律较好(见图 10),这种规律在全油田所有生产井的产油层中都普遍存在,考虑到绥中 36-1 油田属三角洲沉积,储层分布稳定,地层所处沉积相、岩性、物性类似,首次提出利用常规测井资料进行水淹层定量解释^[4],即采用反演法计算水淹层原始电阻率,代入印尼公式,技术路线如图 11 所示,便可算出水淹层原始含水饱和度,从而计算出驱油效率,判断水淹级别。

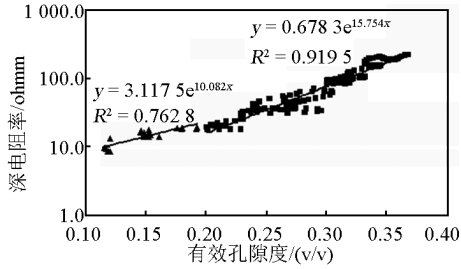


图 10 绥中 36-1 油田深电阻率和有效孔隙度关系
Fig. 10 The relationship of resistivity and effective porosity

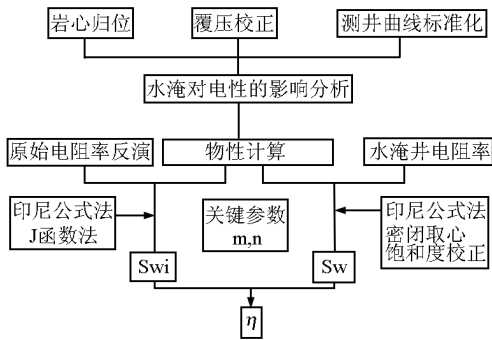


图 11 复杂水淹层测井解释技术研究技术路线
Fig. 11 The roadmap of complex flooded layer log interpretation technology

以“原始电阻率反演法求取原始含水饱和度”为核心的反演法复杂水淹层测井解释技术,其解释结果经生产测试验证吻合程度高达 90%。

4.4 复杂水淹层选择性射孔技术

绥中 36-1 油田 I 期通过先导试验井证实油田平面以及纵向局部区域已经处于强水淹,整体表现为开发井已经进入高含水阶段,对调整井进行选择射孔,避免调整井高含水的同时充分发挥油藏潜能,使调整井产能最大化,其重要性关乎油田综合调

整成败。由于地质条件以及开发方式的不同,陆地油田选择性射孔原则可供借鉴的意义不大,因此,必须结合绥中 36-1 油田 I 期本身的地质油藏特点,在水淹规律的基础上,利用数值模拟技术开展水淹层避射研究,结合先导试验井动态分析及总结,首次形成长井段多油层复杂水淹层选择性射孔原则,技术路线如图 12 所示。

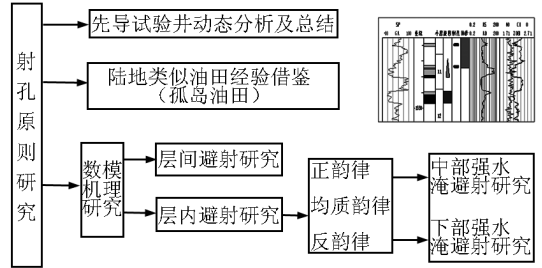


图 12 复杂水淹层射孔原则研究技术路线图
Fig. 12 The roadmap of complex flooded layer perforation principle research

复杂水淹层射孔原则如下:

- 1) 强水淹层段不射开;
- 2) 厚度小于 3 m 的砂体内部存在强水淹条带,砂体不射开;
- 3) 厚度大于 3 m 的砂体下部存在强水淹条带,避射强水淹层以上剩余厚度的 1/3;
- 4) 对于边水油藏,纵向上射孔段与目前油水界面垂向距离至少 10 m;平面上射孔段距目前油水边界要大于 100 m;
- 5) 油层集中段之外物性较差的薄油层(0.5m 以下)不射开,油层集中段之内物性较差的薄油层射开;

复杂水淹层选择性射孔技术有效地控制了调整井初期含水,保障了投产初期的较高的单井产能,调整井产能均超过周边老井,含水大幅下降(见图 13)。

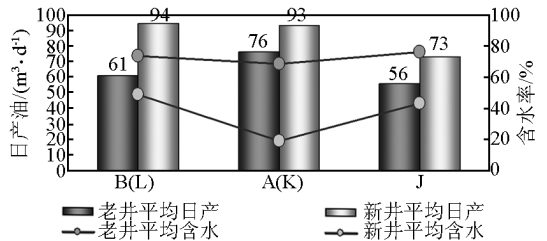


图 13 调整井与老井投产初期含水和日产量对比
Fig. 13 The contrast of water cut and daily oil production in initial stage between adjustment well and old well

5 整体加密综合调整效果评价

1) 油田产量大幅上升,开发效果明显变好。绥中36-1油田I期调整井自2009年11月陆续投产,截至目前已实施调整井46口,产油量从调整前的 $2\,948\text{ m}^3/\text{d}$ 增加到 $6\,501\text{ m}^3/\text{d}$,采油速度从调整

前的0.9%增加到1.9%,增加了111%,油田产量、采油速度大幅上升,加密调整充分释放了油田潜力;含水与采出程度关系曲线中,实际曲线向采出程度方向偏离,明显优于加密前的理论曲线,显示了较好的开发效果。

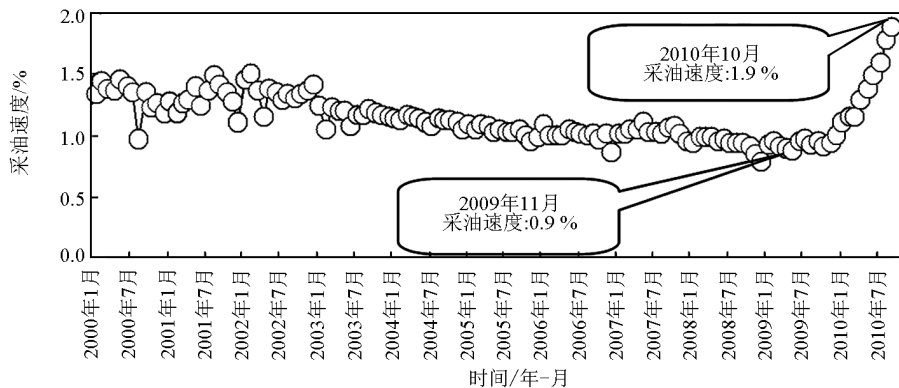


图14 绥中36-1油田I期采油速度曲线

Fig. 14 The oil production rate curve of SZ36-1 oilfield I stage

2) 新井产能高,有力地保证了油田的高产。L平台投产初期单井平均日产油达到 $100\text{ m}^3/\text{d}$,K平台投产初期单井日产油达到 $94\text{ m}^3/\text{d}$,是ODP设计单井产能的1.5~2倍。

3) 油田水驱状况明显改善。绥中36-1油田I期调整井实施1年后甲型水驱特征曲线斜率明显变小,水驱储量动用程度从调整前的80.5%提高到调整后的91.3%(见图15),说明绥中36-1油田I期井网整体加密调整初见成效。

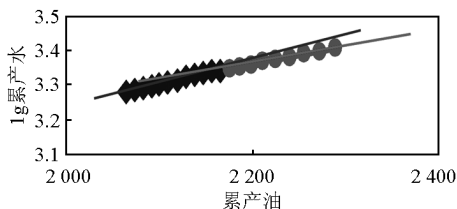


图15 绥中36-1油田I期甲型水驱曲线

Fig. 15 The first water drive curve of SZ36-1 oilfield I stage

4) 提高采收率幅度。投产的调整井,生产状况良好,数值模拟预测提高采收率幅度是10.4%(甲型水驱曲线预测提高采收率幅度13.0%),极大地改善了油田开发效果,提高了油田开发水平。

6 结语

1) 绥中36-1油田I期整体加密调整首开海上整装油田整体调整之先河,创新并实施了一整套整体加密调整技术体系。

该技术体系综合集成了地球物理、岩石物理、石油地质、油藏工程多学科的研究思路和方法,涵盖了地震、测井、地质、油藏多个学科的研究领域,在项目实施过程中进行大井距多层合采稠油油藏剩余油定量描述技术、地质模型与油藏数值模拟耦合技术、复杂水淹层测井解释技术和复杂水淹层选择性射孔技术四项关键技术创新攻关,关键技术的攻关研究为油田开发效果的改善提供技术支持。

2) 通过井网加密调整,油田水驱状况明显改善,水驱储量动用程度从调整前的80.5%提高到调整后的91.3%,采收率大幅度提高,预计提高采收率10.4%,改善了油田开发效果,有力地保证了油田的持续高产。

3) 在绥中36-1油田I期整体加密调整油田井网由反九点面积注水井网转变成为行列注水井网,在底部强水淹的厚油层采取水平井开发,探索“定向井+水平井”开发模式,整体加密良好的效果证明了这种开发模式的优越性,同时这种整体加密调

整的开发模式可供其他同类注水开发油田借鉴。

参考文献

- [1] 周守为. 中国海洋石油高新技术与实践[M]. 北京:地质出版社,2005.
- [2] 周守为. 中国近海典型油田开发技术[M]. 北京:地质出版

社,2009.

- [3] 陈元千. 实用油藏工程方法[M]. 东营:石油大学出版社,1998.
- [4] 顾保祥. 利用原始电阻率反演定量评价水淹层[J]. 中国海上油气,2009,21(2):105-108.

Research on overall encryption adjustment technology of offshore oil field

Zhang Fengjiu¹, Luo Xianbo², Liu Yingxian²,
Zhao Chunming², Su Yanchun², Li Qizheng²

(1. CNOOC Co., Ltd., Beijing 100010, China;

2. Tianjin Branch of CNOOC Ltd., Tianjin 300452, China)

[**Abstract**] Take SZ36-1 oilfield as an example, offshore fields of heavy oil have stepped into later stage in development life and revealed problems gradually for serious injection/production contradiction, big variation for producing reserves in interlayer and plane, much higher for well-controlled reserves, lower for both of oil production rate and oil recovery, changing fast for composite water cut rising and production decline. In view of the challenge for development of offshore fields of heavy oil in China, we put forward the study of comprehensive adjustment for offshore fields in large scale firstly. Because of the special development mode of offshore fields, the proven research thinking and technical route for comprehensive adjustment used by onshore oilfields could not be copied to offshore fields. The research technology of comprehensive adjustment for integral well pattern thickening faces many technical difficulties, so now this research makes a combination of self-characteristics and development mode of SZ36-1 oilfield to put forward a full suite of research thinking and research methods for integral potential tapping and adjustment, and completes the proposal of comprehensive adjustment for integral well pattern thickening in SZ36-1 oilfield phase I. A water injection well pattern of inverted nine spot is transformed into a well pattern of line drive after pattern adjustment to try a development modes of "direction well & horizontal well network". The implementation effect of integral well pattern thickening makes a good effect for greatly improved state of water flooding, improved from 80.5 % before adjustment to 91.3 % after adjustment for producing degree of water flooding, forecasting greatly improved recovery for 10.4 %. The technique of adjustment for integral well pattern thickening is sure to be popularized and applied among the similar oilfields.

[**Key words**] heavy oil; overall encryption; well pattern adjustment; water flooding; simulation