

渤海油田稳产增产钻完井技术进展与展望

刘东东^{1,2} 张启龙^{1,2} 翁昊阳^{1,2} 余建生^{1,2} 温海涛^{1,2}

1. 中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300459;
2. 海洋油气高效开发全国重点实验室, 北京 102209

摘要:为了解决渤海在生产油田面临的井槽、井筒资源紧张,储层产能释放程度受限,水淹储层高含水加剧等问题,通过技术攻关和工程实践,形成了以井槽、井筒高效利用,海上压裂增产,水淹储层高效控水为代表的渤海油田稳产增产钻完井技术体系。主要技术成果指标包括:中短半径侧钻技术全角变化率可达到 $18.97^{\circ}/30\text{ m}$,近钻头测斜盲区由 23 m 缩短至 0.6 m ,突破技术瓶颈;压裂充填技术可实现 177.8 mm 套管内的1趟6层压裂充填作业,突破作业极限;可充填式自适应防砂控水一体化技术创新采用“双层筛管、内层基管不打孔”的形式结构,实现了控水和防砂双重目标。基于油田未来面临的工程技术难题,建议在浅水水下井口开采模式、精细化可控超短半径侧钻技术、海上大规模压裂作业模式和多专业协同控水模式等方面持续攻关,为渤海油田实现稳产增产目标提供技术保障。

关键词:渤海油田;钻完井;井槽资源;控水;压裂

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2024.04.004

Progress and prospects of drilling and completion technologies for stabilizing and increasing production in Bohai Oilfield

LIU Dongdong^{1,2}, ZHANG Qilong^{1,2}, WENG Haoyang^{1,2}, YU Jiansheng^{1,2}, WEN Haitao^{1,2}

1. CNOOC China Ltd., Tianjin Branch, Tianjin, 300459, China;
2. State Key Laboratory of Offshore Oil and Gas Exploitation, Beijing, 102209, China

Abstract: During the production process, Bohai Oilfield faced many challenges, such as tight well slot resources, restrained reservoir production capacity release, and intensified high water cut in water flooded reservoirs. Through technical research and engineering practice, a production-enhancing drilling and completion technology system had been developed in Bohai Oilfield, characterized by efficient utilization of well slots and wellbore, offshore hydraulic fracturing, and efficient water control technology for flooded reservoirs. The main technical achievement indicators include: The full angle change rate of medium and short radius sidetracking technology reached up to $18.97^{\circ}/30\text{ m}$, and the blind spot of near-bit inclination measurement was shortened from 23 m to 0.6 m , overcoming the technical bottleneck; The fracturing and packing technology enabled a single six-layer fracturing and packing operation within the 177.8 mm casing,

收稿日期:2023-12-05

基金项目:国家自然科学基金重大项目“高温岩体复杂缝网造储理论与技术”(52192621);海洋油气高效开发全国重点实验室开放基金(CCL2023RCPS0169RQN)

作者简介:刘东东(1990-),男,辽宁建昌人,工程师,学士,主要从事海洋钻完井作业及技术创新工作。E-mail:liudd10@cnooc.com.cn

surpassing the operational limit; The integrated technology innovation of packing adaptive sand control and water control adopted a structure of “double layer screen tube, inner layer base tube without drilling”, achieving the dual goals of water control and sand control. Faced with the engineering and technical challenges in the future, it is recommended to continue to tackle key issues in shallow water wellhead mining mode, refined and controllable ultra-short radius sidetracking technology, large-scale offshore fracturing operation mode, and multi-disciplinary collaborative water control mode to provide technical support for achieving stable and increased production targets in Bohai Oilfield.

Keywords: Bohai Oilfield; Drilling and completion; Well slot resources; Water control; Fracturing

0 前言

目前渤海部分油田逐渐进入开发中后期,生产油田年递减率高达 14.7%,面临严峻的稳产增产压力和挑战,亟待开展剩余油挖潜工作。但由于渤海独特的地层环境和复杂多变的地质油藏条件,剩余油高效挖潜存在技术难题^[1-4];井槽资源是海上油田开发的核心资源,开发中后期井槽资源紧张,已动用储量由于平台井槽受限无法深度挖潜;海上油田开发要求少井高产、多层同采,开发中后期层间矛盾突出,薄/差层等低品位储层动用难度大、经济性差,挖潜增产困难;储层水淹严重,整体综合含水率高达 88.7%,甚至部分油田超过 95%,稳油控水开发难度大。针对渤海在生产油田稳产增产钻完井技术面临的难题,国内外尚未取得突破性进展,没有成熟的成果可供借鉴,极大地制约了在生产油田的可持续发展。因此,通过技术创新实现在生产油田剩余油的高效挖潜迫在眉睫。渤海油田技术人员在井槽、井筒高效利用,海上压裂增产以及水淹储层高效控水等核心技术领域不断取得突破,形成了渤海油田稳产增产钻完井技术体系。其中,超短半径钻完井、海上压裂裂缝检测、1 趟多层压裂充填等多项技术打破国外垄断,成为渤海油田实现稳产增产目标的强有力技术基础。

本文对渤海油田稳产增产钻完井技术体系的成果进行了梳理和总结,展望了未来攻关的技术方向,以期通过工艺技术的突破,为渤海油田上产 $4\,000 \times 10^4$ t、保障中国能源安全和能源经济发展提供技术支撑。

1 渤海在生产油田面临的问题和挑战

随着生产油田的持续开发,剩余油挖潜工作面临着平台槽口紧张、层间矛盾突出、低品位储层动用困难、水淹层稳油控水开发难度大等问题,对钻完井工程提出了更高要求。

1.1 海上井槽、井筒资源紧张

随着开发步入中后期,渤海在生产油田平台槽口和井筒资源紧张的情况日益凸显,已动用储量由于平台井槽受限无法深度挖潜,单井增油量呈下降趋势,薄层和

物性较差层等低品位储层动用难度大、单井开发成本高、经济性评估受限。目前海上油气田主要通过新建平台、外挂/内挂井槽、侧钻等手段解决井槽受限问题^[5-6],但新建平台增加槽口和外挂槽口方式投资规模大、成本高,内挂槽口受平台结构强度制约,亟需开展低成本井槽和井筒高效利用技术攻关。

1.2 储层产能释放程度受限

渤海油田浅层疏松砂岩储量占总探明储量 84% 以上,为渤海油田稳产上产的主力军,但该储层胶结性能差、出砂风险高,而常用的防砂方式如独立筛管简易防砂、砾石充填防砂等都会在近井筒产生附加表皮,影响单井产量。另外,由于海上每米钻井成本较高,加密井网以实现增产的手段受到经济性制约,所以渤海油田多采用丛式井网、少井高产的开发模式,这就放大了不同储层物性差异的影响,开发中后期往往层间矛盾突出,导致部分井剩余油无法有效开采^[7],制约疏松砂岩储层产能的释放。

同时,渤海油田低渗探明原油地质储量超过 2×10^8 t,是实现上产 $4\,000 \times 10^4$ t 目标重要的产量接替点,但由于储层渗透率低、物性差,常规的开采方式难以取得经济效益,而陆地实践证明压裂为高效开发低渗油田的必经之路,但海上受限于作业环境和载体,在作业成本、淡水水源、裂缝检测等多方面存在挑战,制约低渗储层产能的释放^[8]。

1.3 水淹储层高含水问题突出

以秦皇岛油田为代表的部分渤海在生产油田逐渐进入“双高阶段”,储层水淹严重,呈现高含水、高采出程度特征,油田整体综合含水高达 88.7%,很大一部分井投产 3 个月内含水即迅速上升超过 95%^[9-11]。高含水对油田产生的影响体现在两方面:一是高含水导致油水相对渗透率发生变化,水相渗透率的快速升高导致剩余油的有效挖潜程度大幅降低;二是高含水井为了保持产油量,往往采取大排量、高采出的开发策略,加大的生产压差导致井下出砂问题加剧,对井下完井和井上生产设备造成损害^[12]。因此,高含水问题已成为渤海在生产油田低产低效和关停的首要原因。

2 渤海在生产油田稳产增产钻完井技术进展

渤海油田以科研专项为依托,组织多学科多专业开展专项研究,历经多年的攻关实践,形成了一套适用性强的稳产增产钻完井技术体系,在超短半径钻完井、海上压裂裂缝检测、1 趟多层压裂充填等多方面取得重要技术突破。

2.1 海上井槽、井筒高效利用技术体系

为了提高单井产能、实现少井高产、高效利用平台井槽和降低单井成本,渤海油田创建了以海上分支井四级完井增产技术、中短半径侧钻技术、超短半径侧钻钻完井技术为核心的海上井槽井筒高效利用技术。

2.1.1 海上分支井四级完井增产技术

针对海上井槽和井筒资源紧缺、老井侧钻后原井眼储量浪费的问题,形成了海上分支井四级完井增产技术,通过分支井尾管下入管柱的创新组合,具体组合管柱见图1。该技术解决了分支井眼选择性进入、分支井眼砾石充填、主井眼暂堵及清洁等技术难题,首次实现了四级完井分支井眼充填防砂完井作业,实现了主井眼和分支井眼的“轮采”“分采”与“合采”,达到了“一井多用”的目的^[13]。该技术在渤海 CFD 油田成功应用3井次,大幅提高单井的可采储量控制范围,平均产油超过 $250\text{ m}^3/\text{d}$,较老井产量提升3.7倍,在渤海油田中后期的大规模调整开发中有广阔的应用前景。

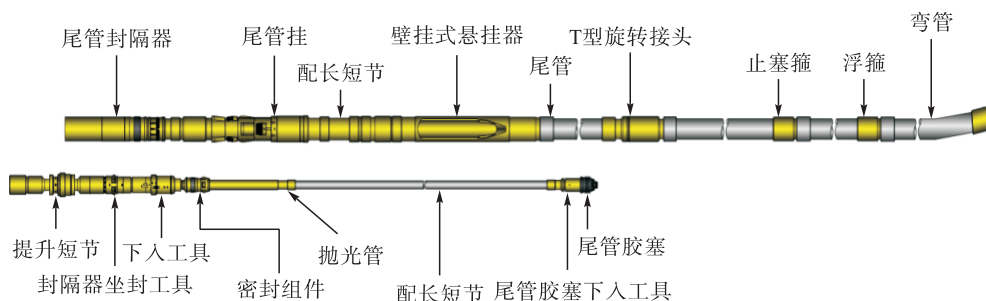


图1 分支井尾管下入管柱图

Fig. 1 The pipe string diagram of running the tail pipe into a branch well

2.1.2 中短半径侧钻技术

渤海油田侧钻井常采用在井眼上部进行侧钻的中短半径侧钻技术,老井眼利用程度低、侧钻成本高,而在下部侧钻同样也面临转弯半径小、造斜困难、工具稳定性差等问题。为解决这些问题,优化形成了高造斜率近钻头测斜钻具组合,发明了电磁波跨距遥传工具,形成了海上中短半径侧钻技术,全角变化率可达到

$18.97^\circ/30\text{ m}$,近钻头测斜盲区由23 m缩短至0.6 m,突破了作业极限^[13]。高造斜率近钻头测斜钻具组合见图2。该技术助力中海油首口中短半径水平井SZ-X1井的成功实施,并推广至渤中、南浦等油田成功应用12井次,累计节省井眼进尺约7 000 m,钻完井费用降本超过2.5亿元,实现了井筒重复利用,丰富了剩余油挖潜手段。

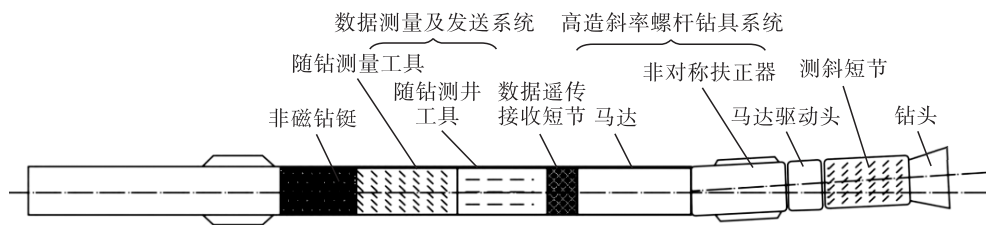


图2 高造斜率近钻头测斜钻具组合图

Fig. 2 Assembly diagram of inclinometer drilling tool with high slope building rate near drill bit

2.1.3 超短半径侧钻钻完井技术

为了最大程度利用老井眼进尺、降低钻完井作业成本,渤海油田创新形成超短半径侧钻钻完井技术,通过柔性钻具结构性优化、投入式轨迹测量研发以及柔性筛管砾石充填技术创新等手段,达到了曲率半径 $\leq 3.6\text{ m}$ 、井斜误差 $\leq 1^\circ$ 、方位误差 $\leq 3^\circ$ 的技术指标,并实现了井筒砾石充填、井眼轨迹测量等功能,解决了制约

该技术推广应用的井筒防砂困难、轨迹测量难度大等问题^[14]。该技术在渤海 PL-X2 井进行了现场应用,井身结构见图3。该井首次实现柔性筛管丢手、柔性自膨胀封隔器坐封等功能,顺利完成了柔性筛管砾石充填防砂作业,并且T1分支进尺超过92 m,打破海上油田超短半径单分支最长进尺记录,为低成本剩余油挖潜开辟了新途径。

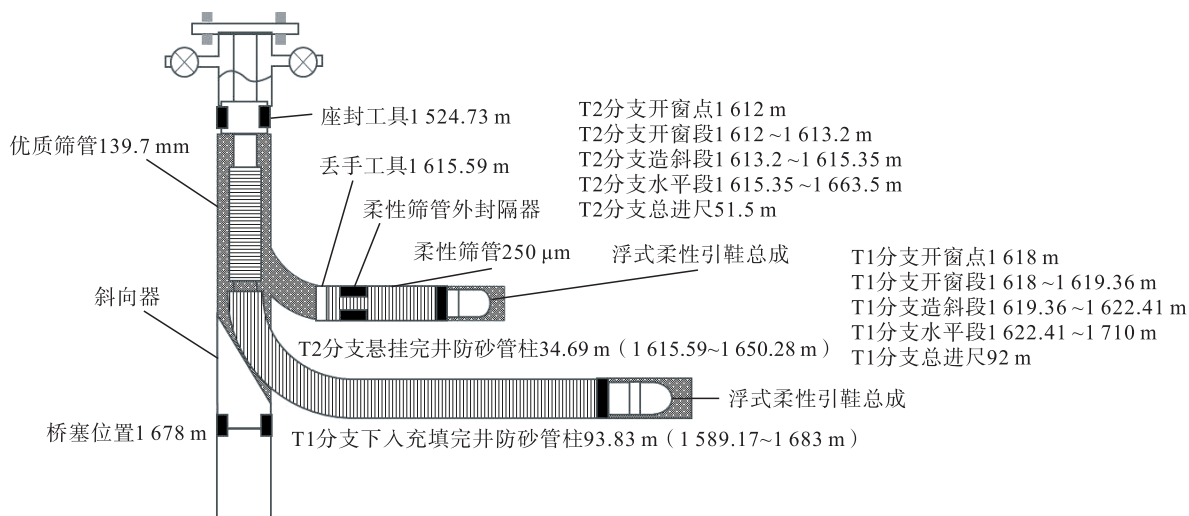


图 3 渤海 PL-F39M1 井井身结构图

Fig. 3 Borehole structure of Bohai PL-F39M1 well

2.2 海上压裂增产技术体系

为了实现海上油田少井高产、多层同采的开发要求,渤海油田创新形成了以疏松砂岩压裂充填增产技术、低渗油田水力喷砂压裂技术、海水基压裂液技术和压裂裂缝检测技术为代表的海上压裂增产技术体系。

2.2.1 疏松砂岩压裂充填增产技术

渤海油田疏松砂岩压裂充填可实现防砂和增产双重目标,成为渤海油田高效开发的主流方式,但在前期实践中出现了以下问题:作业参数设计以经验为主,缺乏理论支撑和系统的工艺技术研究;压裂充填工具对外依赖度高,且 177.8 mm 套管井无法实现 1 趟多层压裂充填作业。为解决以上问题,采用室内实验和数值模拟结合的方法,综合考虑了压裂充填过程中的剪切、拉伸、压实变形破坏机制,揭示了疏松砂岩裂缝起裂延伸机理,形成了压裂充填参数优化设计方法。而为了满足压裂充填作业大排量、高压力的作业要求,研发形成了渤海油田一趟多层压裂充填工具体系:244.5 mm 套管一趟多层充填防砂工具全面升级换代,解决了循环摩阻大、稳定性差、工具冲蚀严重等问题,满足 1 趟 6 层压裂充填要求;全球首次实现了 177.8 mm 套管 1 趟多层压裂充填防砂完井作业,防砂内通径由 82.6 mm 提高至 98.6 mm,可实现最长 250 m 中心管以内的 6 层压裂充填防砂作业,突破技术瓶颈。基于以上创新,压裂充填技术在渤海蓬莱、绥中、锦州等油田成功应用 177 井次,取得较好的增产效果,实现增油量超过 $160 \times 10^4 \text{ m}^3$,成为渤海油田实现稳产增产目标的关键技术^[15]。

2.2.2 低渗油田水力喷砂压裂技术

常规低渗油田压裂采用炮弹射孔与分段压裂结合的方法进行作业,而海上井斜较大,射孔作业常采用油管下入方式,作业周期较长,海上作业日费高,造成海上

成本较高。同时,分段压裂时常采用压缩式封隔器,而海上作业衔接性较差,层间压裂间隔时间较长,易造成封隔器处发生卡钻事故。

为解决以上问题,创新形成海上低渗油田全套管尺寸水力喷射压裂技术,该技术可 1 趟管柱实现射孔、压裂和水力封隔,提高了作业效率的同时,解决了常规机械封隔容易发生砂卡的问题^[16-17]。该技术通过材质优化(硬质合金一体化喷嘴)和结构优化(内置 3.175 mm 级差的备用喷砂滑套),提高了工具的整体过砂量,通过过砂冲蚀实验证明,工具允许的单级过砂量超过 150 m^3 ,可满足 1 趟管柱多段大规模压裂的要求。该技术在渤海油田现场应用 3 口井,单段加砂量超过 40 m^3 ,超过海上常规井;推广至陆地煤层气应用 6 口井,取得较好应用效果,实现了国产化水力喷射压裂工具在海上的现场应用。

2.2.3 海水基高温压裂液技术

目前海上压裂作业以淡水基压裂液为主,淡水水源主要依靠拖轮运输和钻井船水舱储存,无法满足大液量压裂作业要求,海水基压裂液成为发展必然趋势。但在海水基压裂液配置过程中发现,其耐温性、溶胀性难以满足海上作业要求,为此通过在瓜尔胶分子链引入抗盐基团,研制出抗盐植物胶压裂液 PA-SRT,溶胀 5 min 内黏度可达到最终黏度的 80%,综合耐温达到 180°C ,满足海上深部储层连续混配作业的温度和溶胀性能要求。该体系可由矿化度 40 000 mg/L 以内的海水直接配制,其 180°C 下的剪切黏度 $>60 \text{ mPa}\cdot\text{s}$,残渣含量 $<45 \text{ mg/L}$,综合性能与淡水基压裂液基本持平,经过行业鉴定达到国际领先水平^[18]。该技术目前在渤海渤中、绥中等油田成功应用 30 井次,整体取得较好的压裂效果,为后续海上大规模压裂提供了重要技术支撑。

2.2.4 海上压裂裂缝检测技术

压裂裂缝检测对于压裂作业后评估、压裂模型校正、作业效果评价至关重要,陆地油田常用的微地震监测、井温监测、放射物检测等手段受限于海上作业环境和成本,不具备适用性,亟需创新攻关新的裂缝检测技术。基于压裂前后径向速度剖面、各向异性等参数的变化,创新提出水力压裂效果评价技术体系,见图4。

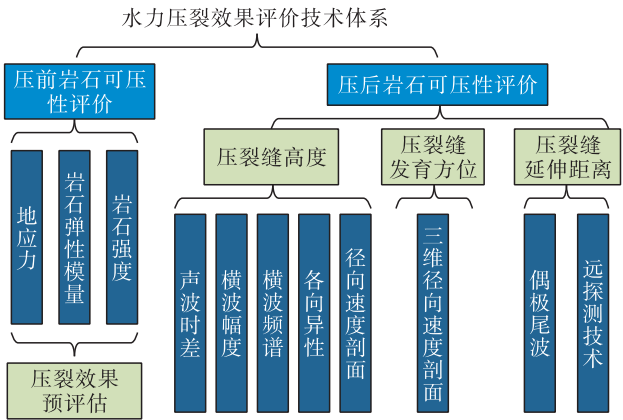


图4 水力压裂效果评价技术体系图

Fig. 4 Technical system for evaluating hydraulic fracturing effectiveness

通过压裂前后阵列声波测井数据的变化,实现了压裂裂缝缝高、裂缝位置、方位等参数的定量化表征,水力压裂效果评价指标见表1。利用该技术解决了海上压后缝高、方位等参数的检测难题^[19]。

表1 水力压裂效果评价指标表

Tab.1 Evaluation indicators for hydraulic fracturing effectiveness

压裂效果可评价指标	评价精度	误差值
裂缝高度 /m	0.1	<10%
裂缝长度 /m	<40	—
裂缝方位 /(°)	45	—
储层可压性指数	—	<10% (对比可压性评估曲线 ^[20])

海上压裂裂缝检测技术在渤海渤中区域5口井中进行了现场应用,实现了海上压裂后缝高的定量化评估,取得了较好应用效果,为压裂后裂缝评价和模型校正提供了数据基础,解决了困扰海上多年的压裂裂缝检测难题。

2.3 水淹储层高效控水开发技术体系

渤海部分在生产油田逐渐进入“双高阶段”——呈现高含水、高采出程度特征,严重影响油田的高效开发。为了实现“双高”油田稳油控水开发,创新形成了以连续封隔体技术、可充填式自适应防砂控水一体化技术为代表的水淹储层高效控水开发技术体系。

2.3.1 连续封隔体技术

为了实现渤海油田水淹储层的高效控水目标,先后尝试了中心管控水、变密度筛管控水、流入控制阀(Inflow Control Device, ICD)控水等技术,由于中心管和变密度筛管技术的控水能力有限,无法满足高含水储层的控水需求,而 ICD 能够产生附加摩阻来控制高含水层的产出,起到有效控水、平衡产液剖面的目标,但其作业关键为井筒环空横向封隔设计的合理性和封隔工具的有效性,易因设计不合理或者封隔失效而导致控水失败。为解决上述问题,创新采用“环空亲油疏水颗粒充填+ICD 控水”的组合控水方式,又称为连续封隔体控水技术,其管柱结构见图5。

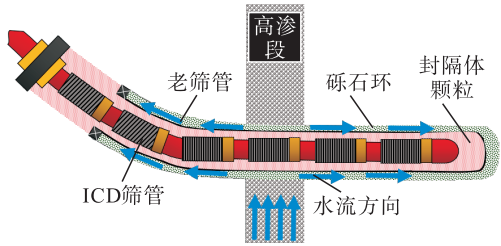


图5 连续封隔体控水管柱结构图

Fig.5 The pipe string structure of continuous packer water control

该技术通过充填亲油疏水颗粒(封隔体颗粒),起到环空横向阻流的作用,再配合 ICD 筛管的纵向阻流能力,实现了“轴向无限封隔、纵向多级控水”的理念。环空充填的亲油疏水颗粒能够自适应封隔井下不规则炮眼或者井眼,弥补了常规机械封隔器的技术缺陷^[21]。该技术在渤海 QHD 油田成功应用 23 井次,作业控水见效率超过 80%,有望成为渤海“双高”油田的控水利器。

2.3.2 可充填式自适应防砂控水一体化技术

高含水井为了满足生产需求,往往采用大泵提液的形式进行开采,高生产压差易加剧井下的出砂风险。为了满足疏松砂岩高含水储层“控水+防砂”双重开发需求,创新形成了基于可充填式自适应控水装置的新型控水防砂一体化技术。管柱创新采用“双层筛管、内层基管不打孔”的形式结构,基管内置自适应控水阀(Autonomous Inflow Control Device, AICD)和生产滑套,其管柱结构见图6。AICD 控水阀可在生产过程中基于油水黏度差自动调节开度以实现含水地层自适应控水的目的,降低了人为设计因素对控水效果的影响,配合亲油疏水颗粒的充填作业,实现了控水和防砂的双重目标^[22]。同时,通过打开筛管上的生产滑套,可降低大排量流入产生的节流摩阻,从而满足大泵提液的生产要求,解决了传统控水工具提液困难的问题。该技术先后在渤海埕北和曹妃甸油田应用2井次,措施后含水平均降低55%,且后期大泵提液后未出现出砂现象,取得了

较好的控水和防砂效果,有望成为高效开发水淹疏松砂岩储层的重要技术手段。

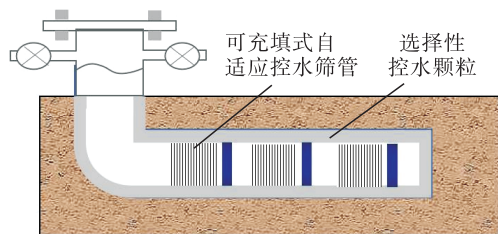


图 6 可充填式自适应控水防砂一体化管柱结构图

Fig. 6 The pipe string structure of adaptive water control and sand control integrated

3 渤海油田钻完井技术未来展望

随着渤海油田开采程度的加深和井下环境复杂程度的加剧,渤海油田在稳产增产方面必将面临新的挑战 and 困难,如井槽资源进一步紧张、剩余油储层持续变薄、低渗储层渗透率进一步下探、高含水油田比例持续走高等,需要不断深化技术创新和科研攻关,可从以下重点技术攻关方向展开^[23-24]。

3.1 浅水水下井口开采模式探索

随着海上井槽核心资源的进一步紧缺,常规井槽开采模式难以满足作业要求,浅水水下井口开采模式成为扩充井槽资源、解决受限区内储量开发的关键技术手段。目前已完成浅水水下井口和生产系统的国产化研发,并在渤海 JZ 气田成功示范应用,为特殊地区的剩余油挖潜开辟了全新的道路。但前期实践中也暴露了工具成本高、水下作业服务团队能力有限、技术受气象和海况影响大等问题,亟需在进口零部件国产化、服务团队能力快速培养、浅水水下井口自动化工具研发(替代潜水员水下作业)等方面开展持续攻关。

3.2 精细化可控超短半径侧钻技术探索

随着海上资源的进一步开发,渤海油田剩余油储层持续变薄趋势明显,常规侧钻或增产技术难以取得经济效益,超短半径侧钻技术应用前景光明。但受限于柔性钻具的结构特征,以及井下小井眼尺寸下的随钻测斜难度大,超短半径侧钻技术目前只能在地层中“盲打”,无法实现井眼轨迹的实时监测和调控,因此无法保证超薄储层段的持续钻遇,影响剩余油的高效挖潜。未来应重点攻关超短半径侧钻精细化控制技术、小尺寸井斜方位随钻测量技术以及小尺寸随钻测井技术,实现地下剩余油薄层在钻进过程中的精细化识别、精确化测量、精准化控制。

3.3 海上大规模压裂作业模式探索

目前海上压裂作业载体为“钻井船”“修井机+拖轮”“模块钻机+支持船”等,由于海上作业空间和管线

尺寸等条件限制,压裂规模受限^[25](液量 $\leq 400\text{ m}^3$ 、砂量 $\leq 40\text{ m}^3$ 、排量 $\leq 6\text{ m}^3/\text{min}$)。随着低渗储层渗透率的进一步下探,现有压裂规模无法实现此类储层的有效开发,亟需进一步加大压裂规模。为此渤海油田正在建造大型压裂船,其参数选择和功能定位为满足海上低渗储层实施大型体积压裂的作业需求,可实现装载及连续输砂 600 m^3 、连续配液 $6\,000\text{ m}^3$ 、施工排量 $12\text{ m}^3/\text{min}$ 的大规模压裂作业,有望大幅提升海上压裂作业水平,实现渤海油田特低渗储层的有效开发。未来,可重点在压裂生产一体化管柱、海水基变黏压裂液体系、大排量压裂地面安全控制、批量化作业模式等方面开展研究,以匹配压裂船进行大规模压裂作业时的技术需求。

3.4 多专业协同控水模式探索

随着开采程度的逐渐加深,渤海在生产油田必然逐步进入“双高阶段”,高含水油田比例必将持续走高,在常规完井阶段进行控水措施已经无法彻底解决问题。储层水淹受地质油藏、流体性质、钻完井工程和开采生产等复杂因素综合影响,而完井控水只能改变近井筒的含水剖面。因此要取得良好的控水效果,需要多专业的协助,探索形成多专业协同控水模式:油藏专业充分考虑隔层和水层位置,合理布井、合理配产、合理注采,以实现远端油水剖面的有效控制;生产采油专业根据油水剖面位置,合理控制生产压差,减小关井幅度和频率,延缓油水剖面的锥进速度;钻井专业通过地质导向钻井,紧贴油藏顶部钻井,并尽可能增大水平段的井眼直径,增加油水剖面锥进的位移;完井专业通过完井工具调节流体进入水平井水平段内的附加压力,均衡产出剖面,从而在近井筒维度降低油井含水。

4 结论与建议

1) 渤海在生产油田面临着井槽井筒资源紧张,储层产能释放程度受限,水淹储层高含水加剧等问题,历经多年的技术攻关和工程实践,在海上井槽井筒高效利用、海上压裂增产、水淹储层高效控水开发等方面取得突破,在多个区块推广应用中剩余油挖潜效果大幅提升,形成了渤海油田稳产增产钻完井系列技术。

2) 渤海稳产增产钻完井系列技术主要包括海上分支井四级完井增产技术、中短半径侧钻技术、超短半径侧钻技术等井槽井筒高效利用系列技术,疏松砂岩压裂充填增产技术、低渗油田水力喷砂压裂技术、海水基高温压裂液技术、海上压裂裂缝检测技术等水力压裂增产技术,连续封隔体技术、可充填式自适用防砂控水一体化技术等高效控水开发技术,这些技术的应用满足渤海油田高效开发、少井高产的需求。

3) 为给渤海油田稳产增产提供强有力的技术支持

并持续研发打破国外技术垄断,未来仍需以问题为导向,坚持自主创新,在浅水水下井口开采模式、精细化可控超短半径侧钻技术、海上大规模压裂作业模式和多专业协同控水模式等方面持续攻关,为渤海油田上产 $4\,000 \times 10^4$ t、发展能源经济贡献更大力量。

参考文献:

- [1] 范白涛. 渤海油田钻完井技术现状及发展趋势[J]. 中国海上油气, 2017, 29(4): 109-117.
FAN Baitao. Current status and developing trend of drilling and completion technologies in Bohai oilfield [J]. China Offshore Oil and Gas, 2017, 29 (4): 109-117.
- [2] 韩耀图, 庞明越, 林家昱, 等. 井槽高效利用技术在渤海油田海上平台的应用[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2017, 19(3): 12-18.
HAN Yaotu, PANG Mingyue, LIN Jiayu, et al. Application of efficient utilization technology of well slots in offshore platform of Bohai Oilfield [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition), 2017, 19 (3): 12-18.
- [3] 陈亮, 袁则名, 张彬奇, 等. 渤海油田中曲率半径侧钻井关键技术[J]. 石油工业技术监督, 2023, 39(4): 72-77.
CHEN Liang, YUAN Zeming, ZHANG Binqi, et al. Key technology of mid-curvature radius sidetracking well in Bohai Oilfield [J]. Technology Supervision in Petroleum Industry, 2023, 39 (4): 72-77.
- [4] 张俊廷, 王公昌, 王立垒, 等. 渤海稠油油田高含水期低产低效井综合治理技术[J]. 石油钻采工艺, 2021, 43(5): 687-692.
ZHANG Juntong, WANG Gongchang, WANG Lilei, et al. Comprehensive treatment technologies for the stripped and deficient wells of Bohai heavy oil field in high water cut stage [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2021, 43 (5): 687-692.
- [5] 王晓鹏, 韩耀图. 渤海油田低效井侧钻技术应用前景分析[J]. 非常规油气, 2015, 2(5): 61-65.
WANG Xiaopeng, HAN Yaotu. Application prospect of sidetrack drilling technology for inefficient wells in Bohai Oilfield [J]. Unconventional Oil & Gas, 2015, 2 (5): 61-65.
- [6] 付建民, 韩雪银, 范白涛, 等. 海上平台井槽高效利用关键技术[J]. 中国海上油气, 2016, 28(2): 103-108.
FU Jianmin, HAN Xueyin, FAN Baitao, et al. Key technology for efficient utilization of offshore platform well slots [J]. China Offshore Oil and Gas, 2016, 28 (2): 103-108.
- [7] 程飞. 海上高渗地层水平套管井压裂充填技术实践[J]. 海洋石油, 2020, 40(3): 31-36.
CHENG Fei. Practice of frac-packing and sand control for horizontal casing wells in offshore high permeability formation [J]. Offshore Oil, 2020, 40 (3): 31-36.
- [8] 汪全林, 邓琪, 周军良, 等. 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[J]. 复杂油气藏, 2022, 15(3): 74-77.
WANG Quanlin, DENG Qi, ZHOU Junliang, et al. Evaluation of development effect of fracturing horizontal wells in offshore ultra-low permeability reservoirs: A case study of well block 5 of Sha 3 member in BZ Oilfield, Bohai Sea [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2022, 15 (3): 74-77.
- [9] 龚宁, 李进, 陈娜, 等. 渤海油田水平井出水特征及控水效果评价方法[J]. 特种油气藏, 2019, 26(5): 147-152.
GONG Ning, LI Jin, CHEN Na, et al. Water breakthrough patterns and water control evaluation of horizontal wells in Bohai Oilfield [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26 (5): 147-152.
- [10] 邓建明. 渤海油田低产低效井综合治理技术体系现状及展望[J]. 中国海上油气, 2020, 32(3): 111-117.
DENG Jianming. Status and prospect of comprehensive treatment technologies for low production and low efficiency wells in Bohai Oilfield [J]. China Offshore Oil and Gas, 2020, 32 (3): 111-117.
- [11] 周军良, 何康, 舒晓, 等. 渤海Q油田特高含水期水淹特征与剩余油挖潜[J]. 天然气与石油, 2021, 39(2): 54-61.
ZHOU Junliang, HE Kang, SHU Xiao, et al. Flooding and residual oil recovery during ultra-high water-cut period in Bohai Q oil field [J]. Natural Gas and Oil, 2021, 39 (2): 54-61.
- [12] 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.
WANG Xiaopeng, XU Jie, ZHANG Binqi, et al. Study progress and outlook of wellbore and well slot optimization technique in Bohai oilfield [J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34 (1): 134-140.
- [13] 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.
MA Yingwen, WANG Kunjian. Application of TAML-4 drilling and completion technology in CFD11-1 oilfield [J]. China Offshore Oil and Gas, 2020, 32 (3): 124-129.
- [14] 王经武, 窦蓬, 刘海龙, 等. 超短半径侧钻技术在渤海油田的适用性分析[J]. 石化技术, 2022, 29(6): 66-68.
WANG Jingwu, DOU Peng, LIU Hailong, et al. Applicability analysis of ultra-short radius sidetracking

- technology in Bohai Oilfield [J]. Petrochemical Industry Technology, 2022, 29 (6): 66-68.
- [15] 张晓诚, 王晓鹏, 李进, 等. 渤海油田疏松砂岩压裂充填技术研究与应用[J]. 石油机械, 2021, 49(9): 66-72.
ZHANG Xiaocheng, WANG Xiaopeng, LI Jin, et al. Research and application of fracturing filling technology for loose sandstone in Bohai Oilfield [J]. China Petroleum Machinery, 2021, 49 (9): 66-72.
- [16] 王绪性, 冯青, 李湾湾, 等. 海上中低渗透储层水力喷射压裂技术[J]. 油气井测试, 2021, 30(1): 46-51.
WANG Xuxing, FENG Qing, LI Wanwan, et al. Hydraulic jet fracturing technology for offshore medium and low permeability reservoirs [J]. Well Testing, 2021, 30 (1): 46-51.
- [17] 张启龙, 徐刚, 霍宏博, 等. 渤海中深层探井水力喷射压裂可行性研究[J]. 天然气与石油, 2020, 38(5): 64-70.
ZHANG Qilong, XU Gang, HUO Hongbo, et al. Feasibility study on hydraulic jet fracturing technology for exploration wells targeting middle and deep layer in Bohai Oilfield [J]. Natural Gas and Oil, 2020, 38 (5): 64-70.
- [18] 陈磊, 鲍文辉, 郭布民, 等. 缔合型超高温海水基压裂液的性能研究[J]. 石油化工高等学校学报, 2020, 33(4): 57-61.
CHEN Li, BAO Wenhui, GUO Bumin, et al. The performance of an associative seawater based fracturing fluid with ultra-high temperature [J]. Journal of Petrochemical Universities, 2020, 33 (4): 57-61.
- [19] 张明, 刘峰, 张博, 等. 利用阵列声波测井技术精细评价压裂缝高度的方法及应用[J]. 当代化工, 2022, 51(12): 2893-2897.
ZHANG Ming, LIU Feng, ZHANG Bo, et al. An evaluation method of fracture height with array acoustic logging technology and its application [J]. Contemporary Chemical Industry, 2022, 51 (12): 2893-2897.
- [20] 张明, 马英文, 张璋, 等. 海上中、高孔渗砂岩压裂效果预评估方法: CN113703052B[P]. 2023-07-25.
ZHANG Ming, MA Yingwen, ZHANG Zhang, et al. Fracturing effect pre-evaluation method for offshore medium and high porosity and permeability sandstone reservoirs: CN113703052B [P]. 2023-07-25.
- [21] 吴绍伟, 万小进, 周泓宇, 等. 连续封隔体控水工艺技术在海上油田的应用[J]. 钻采工艺, 2021, 44(4): 47-51.
WU Shaowei, WAN Xiaojun, ZHOU Hongyu, et al. Application of continuous packer water control technology in offshore oilfield [J]. Drilling & Production Technology, 2021, 44 (4): 47-51.
- [22] 李进, 王昆剑, 张晓诚, 等. 基于可充填 AICD 筛管的防砂控水一体化技术[J]. 石油机械, 2021, 49(10): 45-50.
LI Jin, WANG Kunjian, ZHANG Xiaocheng, et al. Integrated sand prevention and water control technology based on fillable AICD screen [J]. China Petroleum Machinery, 2021, 49 (10): 45-50.
- [23] 范白涛. 渤海油田钻完井技术现状及发展趋势[J]. 中国海上油气, 2017, 29(4): 109-117.
FAN Baitao. Current status and developing trend of drilling and completion technologies in Bohai oilfield [J]. China Offshore Oil and Gas, 2017, 29 (4): 109-117.
- [24] 李中, 谢仁军, 吴怡, 等. 中国海洋油气钻完井技术的进展与展望[J]. 天然气工业, 2021, 41(8): 178-185.
LI Zhong, XIE Renjun, WU Yi, et al. Progress and prospect of CNOOC's oil and gas well drilling and completion technologies [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41 (8): 178-185.
- [25] 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.
LIU Peng, XU Gang, CHEN Yi, et al. Practice and understanding on horizontal well staged fracturing in bohai low permeability reservoirs [J]. Natural Gas and Oil, 2018, 36 (4): 58-63.