



胜利海上疏松砂岩油藏分层防砂分层采油技术

何海峰

Separate Layer Sand Control and Oil Production Technology in Offshore Unconsolidated Sandstone Reservoirs of Shengli Oilfield

HE Haifeng

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021027>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

投球式井下智能分控开关系统的研制及功能试验

Development and Function Test of an Intelligent Split-Control Switch for Separate-Layer Oil Production

石油钻探技术. 2017, 45(4): 87-92 <http://doi.org/10.11911/syztjs.201704015>

胜利海上油田安全可控长效分层注水技术

Safe and Controllable Long-Term Layered Water Injection Technology for the Shengli Offshore Oilfield

石油钻探技术. 2019, 47(1): 83-89 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018149>

海上油田爆燃压裂技术研究现场试验

Research and Field Test of Deflagration Fracturing Technology in Offshore Oilfields

石油钻探技术. 2019, 47(5): 91-96 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019087>

海上油田剖面调整用分散共聚物颗粒体系的研制

Development of Dispersed Copolymer Particle System for Profile Control in Offshore Oilfield

石油钻探技术. 2020, 48(2): 118-122 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020019>

分层注水井测调一体化新技术

A New Integrated Measuring and Adjusting Technology of Separate Layer Water Injection Well

石油钻探技术. 2018, 46(1): 83-89 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018020>

海上油田注水井液控式环空安全封隔器的研制与应用

Development and Application of a Hydraulic Control-Type Safety Annulus Packer for Water Injectors in Offshore Oilfields

石油钻探技术. 2017, 45(5): 103-107 <http://doi.org/10.11911/syztjs.201705018>



扫码关注公众号，获取更多信息！

◀油气开发▶

doi:10.11911/syztjs.2021027

引用格式: 何海峰. 胜利海上疏松砂岩油藏分层防砂分层采油技术 [J]. 石油钻探技术, 2021, 49(6): 99-104.

HE Haifeng. Separate layer sand control and oil production technology in offshore unconsolidated sandstone reservoirs of Shengli Oilfield [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(6): 99-104.

胜利海上疏松砂岩油藏分层防砂分层采油技术

何海峰

(中国石化胜利油田分公司孤东采油厂, 山东东营 257237)

摘 要: 胜利海上疏松砂岩油藏存在油层多、井段长、夹层厚、层间非均质性强和易出砂等问题, 采用笼统防砂电动潜油泵合采, 层间矛盾突出, 不能充分发挥各产层的作用, 制约了其有效开发。为此, 进行了适用于海上疏松砂岩油藏的分层防砂分层采油技术研究。针对笼统防砂充填不密实、防砂后通径小的问题, 研发了大通径分层充填防砂技术, 实现了分层防砂, 并增大了防砂后的通径, 方便了后期实施分层采油; 研制了遇油遇水膨胀封隔器和在线电动调节阀, 形成了分层采油技术, 实现了分层开采和各层流量的在线调节。在海上的埕北 20C-A 井进行了分层防砂试验, 各油层实现了差异充填防砂, 使各油层潜能得到了释放; 在与胜利海上疏松砂岩油藏储层物性相近、油井的完井工具尺寸相同的陆上 GO2-17-A 井和 GO4-19-B 井, 进行了分层采油试验, 2 口井均实现了分层开采和各油层产液量的精确调控, 提高了产油量, 降低了含水率。现场试验表明, 采用分层防砂分层采油技术解决了海上疏松砂岩油藏合采层间矛盾突出的问题, 可以充分挖掘各油层的潜能, 提高开发效果。

关键词: 海上油田; 疏松砂岩油藏; 电动潜油泵; 分层防砂; 分层采油

中图分类号: TE35 文献标志码: A 文章编号: 1001-0890(2021)06-0099-06

Separate Layer Sand Control and Oil Production Technology in Offshore Unconsolidated Sandstone Reservoirs of Shengli Oilfield

HE Haifeng

(Gudong Oil Production Plant, Sinopec Shengli Oilfield, Dongying, Shandong, 257237, China)

Abstract: The offshore unconsolidated sandstone reservoirs in Shengli are characterized as having multiple oil layers, long well sections, thick interlayers, strong inter-layer heterogeneity, and easy sand production. Electric submersible pumps are used for commingling production with overall sand control, accompanied by prominent inter-layer contradictions, but they cannot give full play to each producing layer and restrict the development of offshore oil fields. Therefore, separate layer sand control and oil production technology for the offshore unconsolidated sandstone reservoirs was studied. Considering the loose compaction of packing and small diameter after overall sand control, a large diameter separate layer packing sand control method was developed. With the method, separate layer sand control was achieved and the diameter was enlarged for following separate layer oil production. In addition, an oil and water swelling packer, and an online electric regulating valve were developed. A separate layer production technology was then formed, with which the separate layer production and online regulation of the flow from each layer were realized. The separate layer sand control test was done on Well 20C-A of Chengbei Sag offshore, resulting in differentiable packing sand control and thus exploiting the potential of production for each layer. The separate layer production tests were conducted on GO2-17-A and GO4-19-B onshore, for they have the similar formation physical properties and the same size of completion tools for oil wells of the offshore unconsolidated sandstone reservoirs in Shengli. Both the wells achieved separate layer oil production and accurate regulation of liquid-producing capacity for each layer, with increasing oil production and decreasing water content. The field application shows that the technology has solved the prominent inter-layer contradictions in commingling production of offshore unconsolidated sandstone reservoirs, and it can fully exploit the production potential of each layer, which resulted in oil production improvement.

Key words: offshore oilfield; unconsolidated sandstone reservoir; electric submersible pump; separate layer sand

收稿日期: 2021-02-25; 改回日期: 2021-08-20。

作者简介: 何海峰 (1979—), 男, 河南洛阳人, 2002 年毕业于长江大学石油工程专业, 2005 年获长江大学油气田开发工程专业硕士学位, 高级工程师, 主要从事采油工艺技术方面的管理和研究工作。E-mail: 1164833714@qq.com。

基金项目: 中国石化科技攻关项目“海上油田精细分层高效防砂技术研究与应用”(编号: P18023-2)和中国石化胜利油田分公司科技攻关项目“海上油井在线调节分采关键技术研究”(编号: YKC1411)部分研究内容。

control; separate layer oil production

胜利海上油田主力层系馆陶组为疏松砂岩油藏,具有油层多、井段长、夹层厚、层间非均质性强和易出砂等特点,开发过程中因油井出砂和渗透率差异大造成的层间矛盾是影响其生产的主要因素^[1-3]。特别是经过多年强注强采,层间矛盾更加突出,注入水单层突进或局部突进比较严重,开发效果变差。目前,胜利油田98%的海上油井采用电动潜油泵合采^[4],在海上8口油井进行了分层产液测试,测试发现,合采产液量为579.8 t/d,分层采产液量合计为1 256.2 t/d,合采产液量为分层采累计产液量的46.2%。测试结果表明,多层合采对油井产量产生了较大影响。因此,为使各油层均衡生产,充分发挥中低渗透层的产能,有必要进行分层采油。针对海上疏松砂岩油藏,目前国内外仅有中国海油应用了分层防砂分层采油技术^[5-6]。中国海油应用分层防砂分层采油技术井的生产套管为 $\phi 244.5$ mm套管,防砂后通径达120.7 mm,满足分层采油管柱下入要求。而胜利油田海上油井的生产套管主要为 $\phi 177.8$ mm套管,防砂后通径仅76.0 mm,无法直接应用中国海油分层防砂分层采油技术。国内陆上成熟的分层采油技术采用机械或液压滑套控制各层的开关,主要针对的是有杆泵采油井,且不能在线调节流量^[7-14]。因此,为满足胜利海上电动潜油泵井分采要求,笔者研究了 $\phi 177.8$ mm生产套管大通径一步法分层充填防砂技术,确保防砂后通径在90.0 mm以上,并下入具有自膨胀封隔功能的在线调节分层采油管柱,实现了在 $\phi 177.8$ mm生产套管内分层防砂分层采油。

1 大通径分层充填防砂技术

目前胜利海上油田主要采用分层挤压充填+全井循环充填防砂技术^[15-17],需要分2步完成,留井管柱为笼统防砂完井管柱,无法实现分层采油,同时该技术还存在以下问题:1)完成分层挤压充填、起出分层充填管柱后,再次下入全井循环充填防砂管柱过程中地层易吐砂,导致近井地带充填不密实;2)环空和炮眼采用笼统充填,由于层间差异大,易形成砂桥,造成环空充填不密实;3)留井防砂管柱通径小,仅为76.0 mm,无法满足后期分层采油管柱下入要求。因此,研发了大通径分层充填防砂管柱,一趟管柱可实现3层以上的挤压充填与循环充填施工,确保各层充填密实,同时留井管柱通径达

到98.6 mm,为后期分层采油提供了空间。

1.1 大通径分层充填防砂管柱

大通径分层充填防砂管柱由内外服务管柱构成(见图1):外服务管柱主要包括分层封隔器、外充填工具、反洗工具及防砂筛管等工具;内服务管柱包括挤充转换工具、开关控制装置及内充填工具等。通过拖动内服务管柱,依次实现各层差异化防砂(压裂、挤压、循环或挤压循环一体化),具备不动管柱快速充填及反洗井等功能,安全可靠。

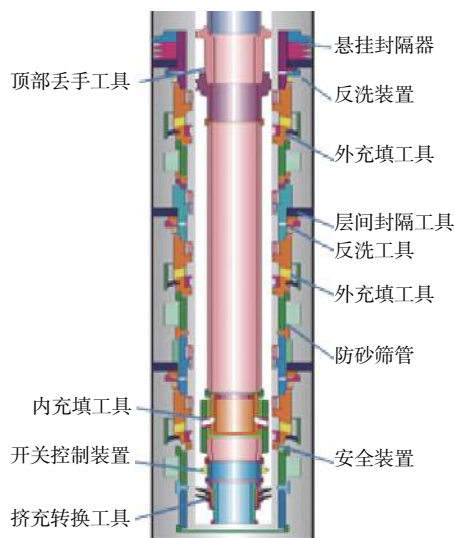


图1 大通径分层充填防砂管柱

Fig.1 Separate layer packing sand control pipe string with large diameter

1.2 分层充填防砂流程

在井口将内外服务管柱连接好,下至设计位置,通过油管加压至8 MPa坐封顶部封隔器,继续加压至18 MPa打开内充填滑套,正转油管实现丢手;上提内服务管柱至定位装置处,通过油管加压至18 MPa坐封层间封隔器;下放管柱至外充填口位置进行充填,充填结束后,不动管柱反洗井至出口处的洗井液不含砂,上提管柱充填上层,起出内服务管柱,即可下入分层采油管柱。

1.3 分层充填防砂技术的特点

1)采用高承压强悬挂分层封隔系统,解决了海上大排量地层充填过程中产生的25 MPa以上的工作压差、500 kN上顶力。

2)采用不动管柱快速反洗井系统,解决了海上大斜度井施工过程中出现砂堵导致的反洗井困难等问题,确保了施工安全可靠。

3)采用挤压循环充填一体化装置。针对国内外分

层防砂管柱采用拖动内管方式实现挤压循环转换时施工过程复杂、施工风险高的问题,优化设计了柔性挤充转换工具,实现了原位挤压、循环充填工序转换。

1.4 分层充填防砂技术参数

分层充填防砂管柱适用于 $\phi 177.8$ mm 生产套管,可实现 2~4 层分层充填防砂,层间封隔密封压力达到 35 MPa,施工排量 $3 \sim 5$ m³/min,最高砂比可达 80% 以上,留井管柱通达达 98.0 mm,为后期下入分层采油管柱提供了空间。

2 在线调节分层采油技术

该技术利用机电一体化原理^[18-24],采用电控方式在线调控井下流量阀。首先,将井下分层采油管柱下入留井分层防砂管柱内,利用自膨胀封隔器实现层间封隔,实现油层分层;其次,在地面利用生产管柱携带的信号电缆控制井下流量阀的开关,实现分层采油,生产过程中还可以根据需要调整井下流量阀的开度,从而调节对应油层的产液量,或直接关闭任一油层暂停生产,而单独生产另一油层,实现选择性换层(调节)采油。

2.1 在线调节分层采油管柱

在线调节分层采油管柱主要由安全阀、过电缆封隔器、电动潜油泵机组、电动潜油泵加强装置、井下线缆分接器、测试仪、在线调节阀、开启滑套、分层膨胀封隔器及配套的安全接头和其他管柱辅助工具组成,如图 2 所示。

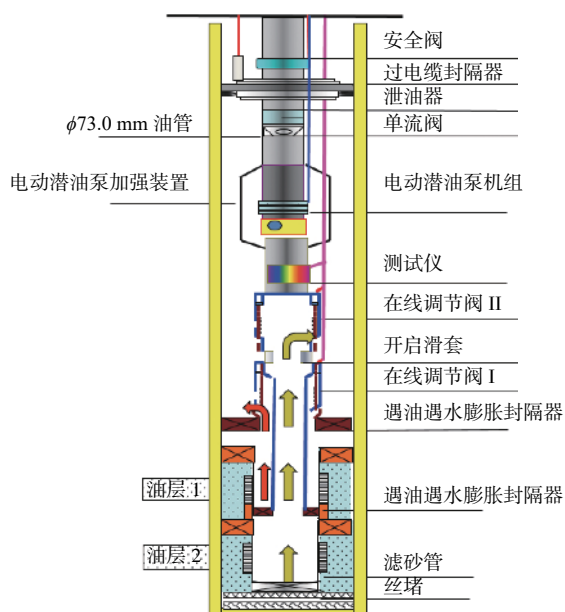


图 2 电动潜油泵井分层采油管柱

Fig.2 Separate layer oil production pipe string of a well with electric submersible pump

2.2 工作原理

采用遇油遇水膨胀封隔器分隔不同生产层位,实现分层,上遇油遇水膨胀封隔器在防砂管柱以上位置;下遇油遇水膨胀封隔器及配套安全接头在防砂管柱内腔,便于起出采油管柱遇阻时采取措施。分层采油管柱下至设计位置后,无需加压坐封封隔器就能实现分层生产。

安装在分层采油管柱上的井下在线调节阀可以调节不同层位液流通道大小,实现流量在线调节功能。调节时,地面测控系统硬件模块(控制箱)在地面通过信号电缆将控制指令发送给井下微型电机,通过井下微型电机调整井下流量阀的开度,并对操作过程进行记录和存储。

2.3 主要技术特点

- 1) 采用遇油遇水膨胀封隔器进行分层,完井作业相关工具下至设计位置后无需加压坐封,施工工艺简便;
- 2) 采用在线电动调节阀,实现了单层液量通道的实时在线调节;
- 3) 管柱配套安全接头具有安全拔断功能,确保后期处理安全可靠;
- 4) 采用电动潜油泵加强装置,提高了电动潜油泵机组尾管的承重能力;
- 5) 采用液压式同心双管液控安全开启滑套,地面加压后油层与油套环空同时提供备用液流通道,确保管柱无隐患正常生产。

2.4 技术指标

分层采油管柱适用于 $\phi 177.8$ mm 生产套管,承压压力达到 35 MPa,耐温达 120 ℃,适用于井斜角不大于 60° 的油井。

2.5 关键工具研制

2.5.1 遇油遇水膨胀封隔器

对于需要重新进行防砂的井,可以在防砂管柱中配套密插筒,利用密插密封方式分隔油层,实现分层采油。但大部分已防砂油井在检修电动潜油泵时由于底部防砂管柱下入时间短,仍然有效,无须重新防砂,因此研制了遇油遇水膨胀封隔器,以充分利用现有防砂管柱实现分层采油。

遇油遇水膨胀胶筒封隔器主要由上接头、中心管、上挡帽、下挡帽和固定销钉等组成,如图 3 所示。

油井实施分层采油时,可充分利用现有防砂管柱,在防砂管柱内上下层中间无节箍位置下入小型遇油遇水膨胀封隔器,生产后遇油遇水膨胀胶筒与井内液体充分接触,可自行膨胀,形成分层密封。

采用遇油遇水膨胀封隔器分层时,封隔器不需

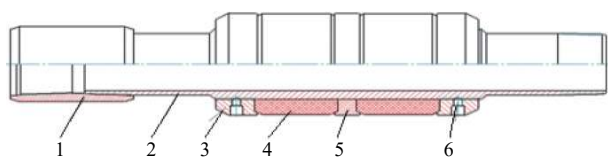


图 3 遇油遇水膨胀封隔器的结构

Fig. 3 Structure of oil and water swelling packer

1.上接头; 2.中心管; 3.上挡帽; 4.胶筒; 5.分隔环; 6.下挡帽

加压坐封即可膨胀实现密封分层, 施工工艺简单; 遇油遇水膨胀胶筒与井内液体充分接触 7 d 即可达到要求的分隔效果。

遇油遇水膨胀封隔器的技术参数见表 1。

表 1 遇油遇水膨胀封隔器的技术参数

Table 1 Technical parameters of oil and water swelling packer

型号	最大外径/ mm	最小通径/ mm	额定压力/ MPa	连接螺纹	坐封膨胀 时间/d
QHSF-70	70	38	25	φ48.3 mm TBG	7
QHSF-152	152	76	25	φ88.9 mm TBG	7

2.5.2 在线电动调节阀

在线电动调节阀主要由压环、上接头、连接头、电机管、电动机、转动轴、弹簧、外管、滑套、限位套、活塞、T 形盘根和下接头等组成, 如图 4 所示。

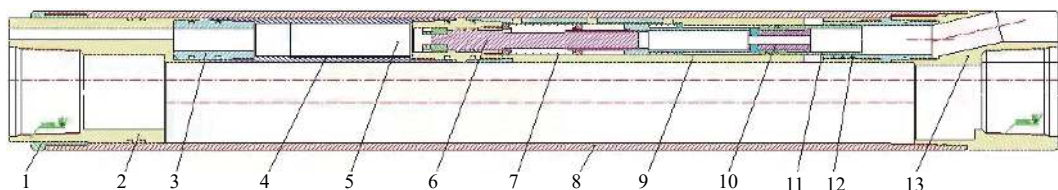


图 4 在线电动调节阀的结构

Fig.4 Structure of online electric regulating valve

1.压环; 2.上接头; 3.连接头; 4.电机管; 5.电动机; 6.转动轴; 7.弹簧;
8.外管; 9.滑套; 10.限位套; 11.活塞; 12.T 形盘根; 13.下接头

在线电动调节阀连接于分层采油管柱需控制产液量油层的位置, 关闭生产油层时, 地面控制仪发出控制信号, 控制信号通过信号电缆输送至井下在线电动调节阀, 控制井下在线电动调节阀电动机正反转, 电动机带动传动轴转动, 限位套在传动轴转动过程中与滑套发生相对移动, 同时带动活塞移动, 活塞与滑套相互配合, 实现在线电动调节阀连通与关闭状态的转换。电动机正转时, 在线电动调节阀进行打开动作; 电动机反转时, 在线电动调节阀进行关闭动作。通过电动机正反旋转的圈数控制电动调节阀打开和关闭的程度。

在线电动调节阀内部无复杂电路元器件, 可靠性较高; 其内部设计有限位防卡堵机构, 活塞轴向运动到达全开或全关位置时不会发生卡堵现象; 在线电动调节阀的开度可调, 可根据实际需要调节, 以改变对应油层的产液量。

在线电动调节阀的最大外径 139.0 mm, 最小通径 62.0 mm, 额定压力 25 MPa, 连接螺纹为 φ48.3 mm TBG, 最高耐温 125 ℃。

3 现场试验

在胜利埕岛油田埕北 20C-A 井进行了分层防砂试验, 该井共钻遇油层 33.60 m/12 层, 于 2012 年

10 月采用电动潜油泵投产, 防砂方式为精密复合滤砂管循环充填防砂。2015 年 7 月由于砂埋油层躺井, 躺井前日产液量 148 t, 日产油量 7.3 t, 含水率 95.1%。为提高不同油层的开发效果, 采用大通径分层充填防砂管柱进行分层防砂, 通过差异化充填防砂, 改造近井地带的地层, 释放油层潜能, 同时提高近井地带渗流能力及挡砂屏障强度, 以满足油井生产需求, 延长防砂有效期。根据地质要求及测井解释结果, 将 8#、13#等 5 个小层(1 816.30~2 019.40 m 井段)作为 1 个层(以下简称为下层)进行循环充填防砂, 将 6#、7#作为 1 个层(1 742.50~1 755.00 m 井段)(以下简称为上层)进行挤压充填防砂。

下层循环充填陶粒 2.8 m³, 上层挤压充填陶粒 22.4 m³。分层防砂施工后 3 个月平均日产液量 130 t, 日产油量 26 t, 含水率 80%, 比分层防砂前日增油 18.7 t, 含水率降低 15.1 百分点, 较大程度地发挥了各层的产能。分层防砂在海上油井的成功实施, 验证了分层防砂技术的可靠性。

此后, 又在陆上 2 口井进行了分层采油试验。之所以选择在陆上油井进行现场试验, 是为了降低试验成本。但选择的试验井(GO2-17-A 井和 GO4-19-B 井), 其所钻遇的储层与胜利海上疏松砂岩油藏储层物性相近, 完井工具尺寸也相同。以 GO4-19-A 井为例介绍试验情况, 其生产层位情况见表 2。

表 2 GO4-19-A 井生产层位
Table 2 Production layer of Well GO4-19-A

层位	油层井段/m	砂体厚度/m	有效厚度/m	射开井段/m	射孔厚度/m	渗透率/mD
3 ²	1 297.20~1 301.40	4.20	4.00	1 297.20~1 301.40	4.20	1 116
5 ²	1 318.80~1 325.60	6.80	5.00	1 319.00~1 324.00	5.00	1 498

该井 2 个生产层位的渗透率分别为 1 116 和 1 498 mD, 在该井进行分层采油和分层测试, 验证电动潜油泵井分层采油技术的可行性。该井完井生产初期对 5² 层进行了单采, 日产液 42.5 t, 日产油 0.5 t, 含水率 98.8%。5² 层单采完成后, 关闭 5² 层, 对 3² 层进行了单采, 日产液量 38.7 t, 日产油量 0.8 t, 含水率 97.9%。地面控制逐层单采生产, 利用逐层单采生产资料, 优化 5² 层和 3² 层的产液量, 根据优化结果调节 5² 层流量阀开度, 将该层产液量控制在 37.5 t, 3² 层流量阀全部打开。优化后 5² 层含水率由 98.8% 降至 96.0%, 3² 层含水率不变, 两层分采合计日产油量 2.3 t, 比两层合采平均日增油 1.0 t, 取得了较好的控水增油效果。

4 结 论

1) 针对胜利海上疏松砂岩油藏现有笼统充填防砂不密实、防砂通径小的问题, 研发了内通径为 98.0 mm 的分层充填防砂管柱, 增大了防砂后的通径, 实现了分层防砂, 便于后期实施分层采油。

2) 研制了遇水遇油膨胀封隔器, 其膨胀胶筒与井内液体充分接触后可自行膨胀, 实现密封。

3) 研制了井下在线电动调节阀, 通过地面控制仪控制井下在线电动调节阀的开度, 调控油井各层段产液量。

4) 现场试验表明, 采用分层防砂分层采油技术可解决层间矛盾, 充分发挥各油层的作用, 提高产油量, 降低含水率。

参 考 文 献

References

[1] 宋明水. 渤海海域埕岛东坡东营组砂体成因及油气富集特征 [J]. 中国石油勘探, 2020, 25(4): 31-42.
SONG Mingshui. Sand body genesis and hydrocarbon accumulation characteristics of Dongying Formation in the east slope of Chengdao Area, Bohai Sea[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(4): 31-42.

[2] 牛明超, 李现根, 余子牛. 埕岛油田馆陶组高含水期优势流动通道识别与应用 [J]. 石油地质与工程, 2020, 34(1): 67-69.

NIU Mingchao, LI Xiangen, YU Ziniu. Identification and application of dominant flow channels in Guantao Formation of Chengdao Oilfield during high water cut stage[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2020, 34(1): 67-69.

[3] 秦永辉. 埕岛油田 CB11 区开发一体化治理技术研究 [D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2017.
QIN Yonghui. Research on integrated management technology of development CB11 District of Chengdao Oilfield[D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2017.

[4] 田俊, 聂飞朋, 石琼, 等. 胜利海上举升工艺适应性分析及区块提液潜力探讨 [J]. 内蒙古石油化工, 2014, 40(8): 79-81.
TIAN Jun, NIE Feipeng, SHI Qiong, et al. Adaptability analysis of Shengli Offshore lifting process and discussion on block liquid extraction potential[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2014, 40(8): 79-81.

[5] 王平双, 郭士生, 范白涛, 等. 海洋完井手册 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2019.
WANG Pingshuang, GUO Shisheng, FAN Baitao, et al. Handbook of offshore well completion[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2019.

[6] 范白涛, 陈胜宏, 马英文, 等. 一种注水井大通径分层防砂工艺管柱 [J]. 石油钻采工艺, 2019, 41(6): 802-805.
FAN Baitao, CHEN Shenghong, MA Yingwen, et al. A kind of large-bore separate-layer sand control string used in water injectors[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2019, 41(6): 802-805.

[7] 王超, 彭红波. 多层系油藏分层采油工艺技术 [J]. 化学工程与装备, 2016, 7(7): 73-75.
WANG Chao, PENG Hongbo. Separated layer production technology of multilayered reservoir[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2016, 7(7): 73-75.

[8] 李大建, 牛彩云, 何森, 等. 几种分层采油工艺技术在长庆油田的适应性分析 [J]. 石油地质与工程, 2011, 25(6): 124-127.
LI Dajian, NIU Caiyun, HE Miao, et al. Adaptability analysis of several separated layer production technologies in Changqing Oilfield[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2011, 25(6): 124-127.

[9] 魏金辉, 李淑红. 高含水后期机采方式下分层采油技术的实践与认识 [J]. 大庆石油地质与开发, 2006, 25(增刊 1): 32-34.
WEI Jinhui, LI Shuhong. Separate zone production with mechanical oil production in the late high water cut period[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2006, 25(supplement 1): 32-34.

[10] 卫秀芬, 陈凤. 大庆油田机械堵水技术的发展及展望 [J]. 新疆石油天然气, 2007, 3(2): 43-46.
WEI Xiufen, CHEN Feng. Development and outlook of mechanic water-plugging technology in Daqing Oilfield[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2007, 3(2): 43-46.

[11] 付亚荣, 李仰民, 马永忠, 等. 斜井分层采油与防砂联作工艺技术

- [J]. 石油矿场机械, 2018, 47(4): 80–83.
- FU Yarong, LI Yangmin, MA Yongzhong, et al. Technology of combined production and sand control in inclined wells[J]. *Oil Field Equipment*, 2018, 47(4): 80–83.
- [12] 余梅卿, 申秀丽, 视道钧, 等. 分层采油技术的研究与应用[J]. 石油机械, 1995, 23(12): 43–49.
- SHE Meiqing, SHEN Xiuli, SHI Daojun, et al. Research and application of layered oil recovery technology[J]. *Petroleum machinery*, 1995, 23(12): 43–49.
- [13] 刘合, 郑立臣, 杨清海, 等. 分层采油技术的发展历程和展望[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(5): 1027–1038.
- LIU He, ZHENG Lichen, YANG Qinghai, et al. Development and prospect of separated zone oil production technology[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(5): 1027–1038.
- [14] 刘合, 裴晓含, 罗凯, 等. 中国油气田开发分层注水工艺技术现状与发展趋势[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(6): 733–737.
- LIU He, PEI Xiaohan, LUO Kai, et al. Current status and trend of separated layer water flooding in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(6): 733–737.
- [15] 吕超, 尚岩, 魏芳, 等. 埕岛油田分层防砂提液技术研究及应用[J]. 特种油气藏, 2016, 23(5): 144–146.
- LYU Chao, SHANG Yan, WEI Fang, et al. Liquid extraction with separate-zone sand-control and its application[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2016, 23(5): 144–146.
- [16] 张太斌. 一次挤压充填防砂工艺技术研究及应用[J]. 钻采工艺, 2004, 27(5): 64–66.
- ZHANG Taibin. Study and application of primary squeeze packing sand control technique[J]. *Drilling & Production Technology*, 2004, 27(5): 64–66.
- [17] 韦敏, 和忠华, 杨松, 等. 疏松砂岩高密实两步法防砂工艺优化与应用[J]. 内蒙古石油化工, 2015, 41(3): 17–20.
- WEI Min, HE Zhonghua, YANG Song, et al. The optimization and application of unconsolidated sand control technology with a high-density[J]. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 2015, 41(3): 17–20.
- [18] 邹慧君, 廖武, 郭为忠, 等. 机电一体化系统概念设计的基本原理[J]. 机械设计与研究, 1999(3): 14–17.
- ZOU Huijun, LIAO Wu, GUO Weizhong, et al. Basic principle of conceptual design of mechatronics system[J]. *Machine Design and Research*, 1999(3): 14–17.
- [19] 徐顺. 机电一体化系统概念设计的基本原理[J]. 电子测试, 2021(14): 139–140.
- XU Shun. The basic principles of conceptual design of mechatronics systems[J]. *Electronic Test*, 2021(14): 139–140.
- [20] 杨玲智, 刘延青, 胡改星, 等. 长庆油田同心验封测调一体化分层注水技术[J]. 石油钻探技术, 2020, 48(2): 113–117.
- YANG Lingzhi, LIU Yanqing, HU Gaixing, et al. Stratified water injection technology of concentric seal-check, logging and adjustment integration in Changqing Oilfield[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(2): 113–117.
- [21] 耿海海, 肖国华, 宋显民, 等. 同心测调一体分注技术研究与应[J]. 断块油气田, 2013, 20(3): 406–408.
- GENG Haitao, XIAO Guohua, SONG Xianmin, et al. Research and application of concentric testing and regulating in separate layer injection[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2013, 20(3): 406–408.
- [22] 刘义刚, 陈征, 孟祥海, 等. 渤海油田分层注水井电缆永置智能测调关键技术[J]. 石油钻探技术, 2019, 47(3): 133–139.
- LIU Yigang, CHEN Zheng, MENG Xianghai, et al. Cable implanted intelligent injection technology for separate injection wells in Bohai Oilfield[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(3): 133–139.
- [23] 刘义刚, 孟祥海, 张志熊, 等. 海上油田小井眼分注井测调一体化工艺研究[J]. 石油机械, 2021, 49(3): 90–94.
- LIU Yigang, MENG Xianghai, ZHANG Zhixiong, et al. Study on the integrated measurement and adjustment technology for slim hole separate injection wells in offshore oilfield[J]. *China Petroleum Machinery*, 2021, 49(3): 90–94.
- [24] 刘红兰. 分层注水井测调一体化新技术[J]. 石油钻探技术, 2018, 46(1): 83–89.
- LIU Honglan. A new integrated measuring and adjusting technology of separate layer water injection well[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2018, 46(1): 83–89.

[编辑 刘文臣]