

◀油气开发▶

doi:10.11911/syztjs.2021077

引用格式: 王栋, 赖学明, 唐庆, 等. 沧东凹陷页岩油水平井不压井作业技术 [J]. 石油钻探技术, 2021, 49(4): 150-154.

WANG Dong, LAI Xueming, TANG Qing, et al. Technologies for snubbing services in horizontal shale oil wells in the Cangdong Sag [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(4): 150-154.

沧东凹陷页岩油水平井不压井作业技术

王 栋, 赖学明, 唐 庆, 周俊杰

(中国石油大港油田分公司采油工艺研究院, 天津 300280)

摘 要: 沧东凹陷孔二段页岩油储层属于特低孔、特低渗储层, 泥质含量高, 作业过程中极易因压井液等外来流体侵入造成污染。针对这一问题, 对页岩油井常用的有杆泵、电动潜油泵举升工艺及其生产管柱和井下工具进行优化设计, 形成了由预制内防喷工具不压井作业技术、可控桥塞暂闭井筒完井技术和敷缆连续油管带压下泵技术等组成的沧东凹陷页岩油水平井不压井作业技术。现场应用结果表明, 不压井作业技术可以解决有杆泵井内衬油管无法有效密封、电动潜油泵井无法带压作业等问题, 作业后储层零污染, 无需等待完全泄压结束再下泵投产。

关键词: 页岩油; 水平井; 不压井作业; 防止地层损害; 沧东凹陷

中图分类号: TE358⁺.4 文献标志码: A 文章编号: 1001-0890(2021)04-0150-05

Technologies for Snubbing Services in Horizontal Shale Oil Wells in the Cangdong Sag

WANG Dong, LAI Xueming, TANG Qing, ZHOU Junjie

(Oil Production Technology Research Institute, Petrochina Dagang Oilfield Company, Tianjin, 300280, China)

Abstract: The shale oil reservoir in the Kong-2 member of the Cangdong Sag has ultra-low porosity, ultra-low permeability and high shale content, and thus, it is prone to be contaminated by invasion of fluids including killing fluid during operations. Regarding this problem, the sucker rod pumps, the lift technology of electric submersible pumps, and the associated production string and downhole tools commonly used in shale oil wells were optimized. Then, the technologies for snubbing services in the horizontal shale oil wells in the Cangdong Sag were formed with snubbing service with prefabricated inner blowout preventers, completion with controllable bridge plugs that can temporarily close wellbore, and under-pressure pumping-down operation with cable-laying coiled tubing. Field applications showed that this technologies could successfully address the problems such as lined tubing sealing failures of sucker rod pumps and under-pressure operation failures of electric submersible pumps, etc. After the operations, the reservoir was not contaminated and the pumping-down operation were free from waiting for complete pressure relief.

Key words: shale oil; horizontal well; snubbing services; formation damage prevention; Cangdong Sag

我国页岩油资源丰富, 中高成熟度页岩油地质资源量约 132.0×10^8 t, 其中沧东凹陷孔二段页岩油资源量达 6.8×10^8 t^[1-2]。沧东凹陷孔二段页岩油储层埋深 3 000.00~5 000.00 m, 孔隙度 2%~5%, 渗透率 0.56 mD, 属于特低孔、特低渗储层, 平均黏土含量 16.4%^[3]。因泥质含量较高, 作业过程中一旦有压井液等外来流体侵入, 就会污染油层, 影响产能的释放。沧东凹陷新钻页岩油井均采用大规模体积压裂

方式开发^[4], 压后放喷排液周期较长, 放喷后期产量贡献能力逐渐降低, 为了提高开发效果, 需要在完全停喷之前带压下泵, 而目前国内外以压井下泵作业为主, 投产时间较长, 加之压井液易污染储层, 无法满足页岩油高效建产要求。

不压井作业技术已经应用于注水井、高压注水井和欠平衡钻井, 但应用于页岩油井的情况未见报道。分析认为, 不压井作业技术应用于页岩油井时

收稿日期: 2021-02-18; 改回日期: 2021-07-09。

作者简介: 王栋 (1988—), 男, 山东滨州人, 2011年毕业于中国石油大学 (华东) 石油工程专业, 2015年获中国石油大学 (华东) 石油与天然气工程专业工程硕士学位, 工程师, 主要从事采油工程方案设计与页岩油举升工艺研究工作。E-mail: dg_wdong@petrochina.com.cn。

还存在许多技术难点,如:有杆泵井不压井作业时,常规内堵塞器无法有效堵塞内衬油管;电动潜油泵井不压井作业时,电缆等形状不规则部件带压下入困难。为此,笔者针对页岩油常规压井作业易导致油层污染的问题,根据有杆泵和电动潜油泵举升工艺带压作业的技术难点,研究形成了由预制内防喷工具不压井作业技术、可控桥塞暂闭井筒完井技术和敷缆连续油管带压下泵技术等组成的沧东凹陷页岩油水平井不压井作业技术,实现了下泵作业储层零污染和页岩油快速建产。

1 页岩油水平井带压作业技术难点

1.1 常规压井作业易导致油层污染

沧东凹陷页岩油储层以长英质页岩、灰云质页岩及混合质页岩为主,长英质页岩占 58.4%(黏土含量 6.07%),灰云质页岩占 23.2%(黏土含量 8.12%),混合质页岩占 18.4%(黏土含量 9.11%)^[4]。由于页岩油储层泥质含量较高,孔隙结构复杂,渗透性差,下泵作业过程中极易因压井液等外来流体侵入储层而产生水锁损害储层。储层一旦受到损害将难以恢复,水锁损害率一般为 70%~90%^[5]。

水锁损害的本质是,水滴运移至孔喉处时其界面发生变形,前后端弯曲液面的曲率出现差别,毛细管压力会产生一个附加表皮压降,导致水相渗透率升高、油相渗透率降低^[6-8]。而页岩油藏与常规油藏的不同之处在于,流体流动时需要启动压力,但由于污染后渗透率急剧下降,污染区的启动压力要远大于未污染区的启动压力^[9]。因此,储层渗透率越低、孔隙度越小、泥质含量越高,污染越严重,渗透率伤害越大,启动压力梯度就越大,油井产能也就越小。

沧东凹陷早期部分页岩油预探井采用了常规压井下泵作业,但由于压井液对页岩储层造成了污染,作业后含水率较高、产油量较低、产量恢复时间较长,影响了开发效果。

1.2 常规不压井作业时内衬油管无法有效堵塞

常规不压井作业时,首先用内堵塞器密封油管内压力,然后在井口安装整套带压作业装置,用环形防喷器密封油管和套管环空。内衬油管由高密度聚乙烯(PE)衬管插入普通油管内制成。

现有堵塞器为挂壁式,通过金属爪抓住油管内壁,通过加压压缩橡胶件实现密封。而内衬油管的内壁为 PE 材料而非金属材质,金属爪无法抓牢,而

且加压过程中易导致 PE 衬管脱落,故无法实现内衬油管的有效堵塞。这会导致地层压力通过油管释放,易发生溢流或井喷等井控事故。即使作业过程中实现了油管内堵塞,由于金属爪易使油管内壁 PE 材料损坏,会缩短油管使用寿命,导致油井检修周期变短。

1.3 常规不压井作业时电动潜油泵带压下入困难

沧东凹陷页岩油井多以水平井配合大规模体积压裂的方式进行开发,储层埋藏深、单井液量大,有带压下入电动潜油泵的需求。由于地层压力高于油管内液柱压力,下电动潜油泵的作业过程中地层流体会推动电动潜油泵叶导轮转动,从而进入油管并喷出井口。带压作业过程中,整套带压作业装置安装完毕后,防喷器一直处于密封状态。采用动密封方式下入油管,期间可以用环形防喷器交替导出油管接箍,也可以用环形防喷器直接过接箍。但是,电动潜油泵油管外有电缆,电缆为柔性材料,通过电缆卡子固定在油管外壁,在环形防喷器密封时,无法通过动密封方式正常下入。若强行下入,则会出现电缆堆积或断裂等故障,导致电动潜油泵带压下入失败。

2 不压井作业关键技术

不压井作业是指在井筒内有压力存在的情况下,利用专门的管柱起下设备,配合使用油管内堵塞器和不压井作业设备,克服井筒内液柱的上顶压力,完成生产或作业管柱的带压起出或下入的一种作业方法^[9]。不压井作业可以解决修井作业中由于压井工序带来的油层污染及产量下降等问题^[10],是一种适用于页岩油藏下泵的作业工艺。针对页岩油水平井带压作业技术难点,开展了技术攻关,研究形成了由预制内防喷工具不压井作业技术、可控桥塞暂闭井筒完井技术和敷缆连续油管带压下泵技术等组成的沧东凹陷页岩油水平井不压井作业技术。

2.1 预制内防喷工具不压井作业技术

国外的油井管柱底部大都安装有循环开关阀,因此带压下泵作业时不需要下入堵塞器堵塞油管,只需加压关闭油管柱底部的循环开关阀^[11],下泵完成后,再加压将循环开关阀打开,即可以开井正常生产。目前国内油田尚无此类循环开关阀,页岩油井常用的内衬油管无法实现有效的油管内堵塞,成为制约国内带压作业技术发展的瓶颈^[12-13]。

为此,设计了一种预制内防喷工具。该工具为机械式开关装置,依靠换向滑套开启或关闭地层与油管内部的连通通道(见图1);下入、换向操作之前和起出时,该装置均处于关闭状态,起到保护油层的作用。

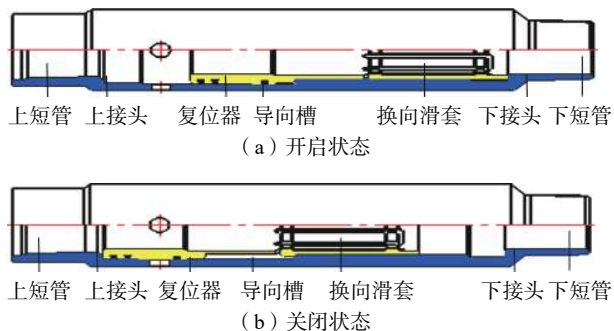


图1 预制内防喷工具开启和关闭状态示意

Fig.1 Opening and closing status of prefabricated internal blowout preventers

预制内防喷工具不压井作业管柱由内衬油管、抽油泵、内防喷工具、筛管和丝堵构成,如图2所示。其中,筛管和丝堵的作用是阻挡压裂砂,防止返吐压裂砂进泵。内防喷工具安装在泵下面,位于管柱底部,入井时处于关闭状态,起到油管内防喷的作用。下至预定位置后,完成井口安装,向油管内加压,当油管内压力差超过1 MPa时内防喷工具打开,实现正常的生产。需要检泵作业时,再向油管内加压,内外压力差超过1 MPa时内防喷工具关闭,封堵油管内部空间。这样就解决了常规不压井作业时内衬油管无法有效堵塞的问题,可以实现不压井作业,有效保护页岩油储层。



图2 预制内防喷工具不压井作业管柱

Fig.2 Pipe string of a prefabricated inner blowout preventer for snubbing services

2.2 可控桥塞暂闭井筒完井技术

沧东凹陷页岩油主要采用水平井大型分段体积压裂方式开发^[14]。生产初期产量高,采用电动潜油泵可以最大限度地发挥储层能量,实现高产。但是电动潜油泵具有传感器、电机、保护器等部件,管柱外壁形状不规则,并且管壁外附有提供动力或者测试生产参数^[15]的电缆、控制管线等。通常井控难度比较大,在关闭防喷器的情况下,无法通过地面带压作业装置实现管柱下入时的动密封。因此,设计了一种可控桥塞。该桥塞的关键部件为可开关式滑套,在下泵作业之前可以暂时封闭套管,封隔地层压力,从而进行不压井下电泵作业,待生产时再打开滑套,进行生产。该技术称为可控桥塞暂闭井筒完井技术。

可控桥塞完井管柱由电动潜油泵(ESP)生产管柱和可控桥塞暂闭井筒管柱组成,如图3所示。可控桥塞接在生产管柱的底部。生产管柱下入后,打开可控桥塞的滑套沟通油藏。进行修井作业时,关闭滑套通道,隔离油藏,直接上提生产管柱,不需要压井。可控桥塞暂闭井筒完井技术对套管内壁光洁度要求较高,若套管内壁附着有死油或压裂砂颗粒时,可能会导致桥塞坐封失败。下入可控桥塞前,应进行洗井、刮削等井筒预处理措施,以保障不压井作业的成功率。

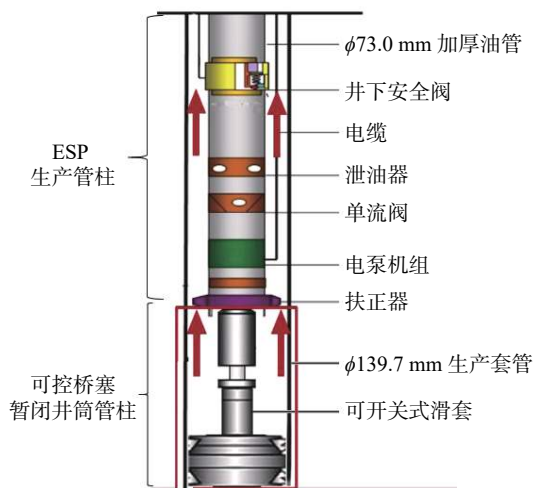


图3 可控桥塞完井管柱示意

Fig.3 Pipe string with controllable bridge plugs for completion

2.3 敷缆连续油管带压下电泵技术

电动潜油泵的管柱外附有电缆、控制管线等,管壁形状不规则,无法通过带压作业装置下入。为解决该问题,设计了敷缆连续油管,研究了敷缆连

续油管下入技术。敷缆连续油管主要由内衬层、纤维增强层、电缆层和外保护层构成(见图 4)。



图 4 敷缆连续油管的结构
Fig.4 Structure of cable-laying coiled tubing

敷缆连续油管(又称挠性油管)用低碳合金钢制成,有很好的挠性,一卷连续油管可长达几千米。该连续油管还具有抗结垢结蜡、保温性、耐腐蚀和避免电缆磕碰等优势。同时,敷缆连续油管作业设备具有可带压连续起下的特点,设备体积小,作业周期短,费用低^[16]。而且,由于敷缆连续油管的外壁连续光滑,在关闭环形防喷器的情况下,仍然可通过动密封下入电动潜油泵。

敷缆连续油管需要采用专用的配套作业装置下入,其主要由卷盘及敷缆连续油管、鹅颈管、注入头、液压工作站和电气控制柜组成,如图 5 所示。

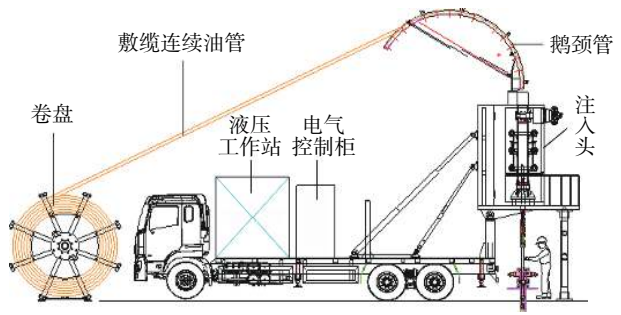


图 5 敷缆连续油管作业装置
Fig.5 Operation unit of cable-laying coiled tubing

为了便于敷缆连续油管与井下电动潜油泵快速、安全连接,设计了一种扣压式、具备导线穿越功能的井下连接接头。该连接接头具有良好的密封性,可以防止井筒流体进入插头内部,保障电动潜油泵正常生产。

3 现场应用

沧东凹陷页岩油水平井不压井作业技术已应用 16 口井,成功率 100%,取得了非常好的效果。作业最高关井压力 17 MPa,少用压井液 4 125.9 m³,单井产量恢复期平均缩短 7.12 d,多生产原油 5 105 t

以上。应用证明,不压井作业实现了储层零污染,作业后日产液量和日产油量均有了大幅度提升,并且无产量恢复期,实现了在压裂放喷期下泵,无需等待放喷结束之后再下泵,实现了快速建产。

表 1 为 5 口应用井(GD1701H 井、Y2-1-1H 井、Y2-1-2H 井和 Y2-1-3H 井为水平井,G32-62 井为直井)不压井作业前后的生产情况。

表 1 沧东凹陷 5 口井应用页岩油不压井作业技术前后的生产情况
Table 1 Production situation before and after the application of the technologies for snubbing services to five wells in the Cangdong Sag

井名	层位	层厚/ m	产油量/ (t·d ⁻¹)		产液量/ (m ³ ·d ⁻¹)		产量恢 复期/d
			作业前	作业后	作业前	作业后	
GD1701H井	孔二段	60.40	8.47	32.07	24.40	56.00	
Y2-1-1H井	孔二段	79.20	6.23	14.08	6.80	17.60	
Y2-1-2H井	孔二段	27.90	11.80	41.10	14.00	52.50	0
Y2-1-3H井	孔二段	36.70	11.34	25.13	13.40	31.10	
G32-62井	孔二段	18.50	油花	1.61	20.00	25.10	

由表 1 可知,4 口水平井应用沧东凹陷页岩油水平井不压井作业技术后,产油量和产液量都显著提高,应用效果明显。如典型井 GD1701H 井,不压井作业后当天日产油量提高 23.60 t/d,提高幅度 278.6%,产量恢复期为 0,实现了提产提效。直井 G32-62 井应用该不压井作业技术后,产油量和产液量也有所提高,但增产效果不如水平井。

4 结论与建议

1)沧东凹陷孔二段页岩油储层的孔隙度和渗透率特低,泥质含量较高,作业过程中极易因压井液等外来流体侵入造成储层污染,影响产能的释放。为此,研究形成了可最大程度保护储层的沧东凹陷页岩油水平井不压井作业技术。

2)沧东凹陷页岩油水平井不压井作业技术主要包括预制内防喷工具式不压井作业技术、可控桥塞暂闭井筒完井技术和敷缆连续油管带压下泵技术。现场应用表明,该技术可以解决内衬油管无法有效密封、电动潜油泵无法带压作业等问题,同时可实现停喷之前带压下泵,保护储层,达到页岩油快速建产的目的。

3)可控桥塞暂闭井筒完井技术对套管内壁光洁

度要求较高,若套管内壁附着有杂质,存在桥塞坐封失败的风险,建议作业前进行洗井、刮削等井筒预处理措施,并持续加强桥塞坐封工艺优化研究,进一步提高工艺适应性和不压井作业效果。

参考文献

References

- [1] 闫林,陈福利,王志平,等.我国页岩油有效开发面临的挑战及关键技术研究[J].石油钻探技术,2020,48(3):63-69.
YAN Lin, CHEN Fuli, WANG Zhiping, et al. Challenges and technical countermeasures for effective development of shale oil in China[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(3): 63-69.
- [2] 赵贤正,周立宏,赵敏,等.陆相页岩油工业化开发突破与实践:以渤海湾盆地沧东凹陷孔二段为例[J].中国石油勘探,2019,24(5):589-600.
ZHAO Xianzheng, ZHOU Lihong, ZHAO Min, et al. Breakthrough and practice of industrial development on continental shale oil: a case study on Kong-2 Member in Cangdong Sag, Bohai Bay Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(5): 589-600.
- [3] 周立宏,赵贤正,柴公权,等.陆相页岩油效益勘探开发关键技术与工程实践:以渤海湾盆地沧东凹陷古近系孔二段为例[J].石油勘探与开发,2020,47(5):1059-1066.
ZHOU Lihong, ZHAO Xianzheng, CHAI Gongquan, et al. Key exploration & development technologies and engineering practice of continental shale oil: a case study of Member 2 of Paleogene Kongdian Formation in Cangdong Sag, Bohai Bay Basin, East China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(5): 1059-1066.
- [4] 田福春,刘学伟,张胜传,等.大港油田陆相页岩油滑溜水连续加砂压裂技术[J/OL].石油钻探技术:1-10.(2021-02-04)[2021-02-15]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=SYZT20210203000&DbName=CAPJ2021>.
TIAN Fuchun, LIU Xuewei, ZHANG Shengchuan, et al. Research on the whole process of slick water fracturing technology of continental shale oil in Dagang Oilfield[J/OL]. Petroleum Drilling Techniques: 1-10. (2021-02-04) [2021-02-15]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=SYZT20210203000&DbName=CAPJ2021>.
- [5] 蒋官澄,王晓军,关键,等.低渗特低渗储层水锁损害定量预测方法[J].石油钻探技术,2012,40(1):69-73.
JIANG Guancheng, WANG Xiaojun, GUAN Jian, et al. The quantitative prediction method of water blocking damage in low and extra-low permeability reservoir[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(1): 69-73.
- [6] 张振华,鄢捷年.低渗透砂岩储集层水锁损害影响因素及预测方法研究[J].石油勘探与开发,2000,27(3):75-78.
ZHANG Zhenhua, YAN Jienian. The study of influence factors and predicting method of water blocking in the low-permeable sandstone formations[J]. Petroleum Exploration and Development, 2000, 27(3): 75-78.
- [7] 何勇明,樊中海,孙尚如,等.低渗透油藏污染井污染前后的产能预测新模型[J].石油钻探技术,2009,37(4):93-95.
HE Yongming, FAN Zhonghai, SUN Shangru, et al. A new model of productivity prediction for low permeability reservoirs before and after damage[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 37(4): 93-95.
- [8] 王敏生,光新军,耿黎东.页岩油高效开发钻井完井关键技术及发展方向[J].石油钻探技术,2019,47(5):1-10.
WANG Minsheng, GUANG Xinjun, GENG Lidong. Key drilling/completion technologies and development trends in the efficient development of shale oil[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(5): 1-10.
- [9] 刘东明.不压井工艺在海洋油田不同管柱的应用分析[J].石油钻采工艺,2016,38(2):191-194.
LIU Dongming. Application of snubbing process in different pipe strings in offshore oilfields[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2016, 38(2): 191-194.
- [10] 曲绍刚.高温不压井作业工艺技术研究及试验[J].石油矿场机械,2006,35(5):93-95.
QU Shaogang. The research and testing of high-temperature snubbing operation technology[J]. Oil Field Equipment, 2006, 35(5): 93-95.
- [11] 孙永明,李迪洋.带压作业现状与发展浅析[J].油气田环境保护,2011,21(6):78-79.
SUN Yongming, LI Diyang. The current operation situation with pressure and development[J]. Environmental Protection of Oil & Gas Fields, 2011, 21(6): 78-79.
- [12] 王伟.不压井作业装置技术现状与应用分析[J].石油机械,2014,42(10):86-89.
WANG Wei. The technical status and application analysis of snubbing operation device[J]. China Petroleum Machinery, 2014, 42(10): 86-89.
- [13] 王伟佳,熊江勇,张国锋,等.页岩气井连续油管辅助压裂试气技术[J].石油钻探技术,2015,43(5):88-93.
WANG Weijia, XIONG Jiangyong, ZHANG Guofeng, et al. Auxiliary fracturing and testing of gas in shale gas well with coiled tubing[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43(5): 88-93.
- [14] 尹洪军,赵二猛,李兴科,等.致密油藏分段压裂水平井合理试采方式研究[J].特种油气藏,2016,23(3):79-82.
YIN Hongjun, ZHAO Ermeng, LI Xingke, et al. Reasonable production test of multi-stage fractured horizontal well in tight oil reservoir[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2016, 23(3): 79-82.
- [15] 刘东明,张锐,胡伟杰,等.海上油气田不压井作业工艺的可行性试验研究[J].中外能源,2014(4):55-60.
LIU Dongming, ZHANG Rui, HU Weijie, et al. The feasibility research of the snubbing operation technology in the offshore oil & gas field[J]. Sino-Global Energy, 2014(4): 55-60.
- [16] 王伟佳.页岩气水平井连续油管带压打捞长电缆技术[J].石油钻探技术,2018,46(3):109-113.
WANG Weijia. The technology of long cable snubbing fishing through coiled tubing in horizontal shale gas wells[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(3): 109-113.

[编辑 令文学]