

水力泵排液测试中的不压井作业技术

肖志永,李超,刘皓,刘喆,焦金龙,钱虎

中国石油大庆油田有限责任公司试油试采分公司 黑龙江大庆 163412

通讯作者:Email:490085630@qq.com

项目支持:中国石油天然气股份有限公司科学研究与技术开发项目“气井带压作业技术推广”(2020B-4121(GF))

引用:肖志永,李超,刘皓,等.水力泵排液测试中的不压井作业技术[J].油气井测试,2021,30(4):26-31.

Cite: XIAO Zhiyong, LI Chao, LIU Hao, et al. Snubbing technology in hydraulic pump discharge test [J]. Well Testing, 2021,30(4):26-31.

摘要 高压油气井压井作业易造成地层污染,导致油气井在一段时间内难以恢复到施工前的产能状态,不利于油、气井求产。通过分析不压井作业工程参数,使用不压井作业设备下入水力泵排液测试管柱,只要压力在额定压力之内,即可进行不压井作业下水力泵排液。通过4井次不压井作业现场应用,及对2015年、2016年水平井施工动态数据的收集整理发现,使用不压井作业后,从钻完桥塞开始放喷至下完水力泵排液管柱的平均时间由904 h缩短至190 h。水力泵排液测试中的不压井作业技术可有效减少地层污染,缩短施工周期,是未来测试地层产能的发展趋势。

关键词 不压井作业;水力泵;排液;压裂;地层污染;产能;施工周期

中图分类号:TE358 **文献标识码**:B **DOI**:10.19680/j.cnki.1004-4388.2021.04.005

Snubbing technology in hydraulic pump discharge test

XIAO Zhiyong, LI Chao, LIU Hao, LIU Zhe, JIAO Jinlong, QIAN Hu

Testing Branch, PetroChina Daqing Oilfield Co., Ltd., Daqing, Heilongjiang 163412, China

Abstract: The killing operation of high-pressure oil and gas wells is easy to cause formation pollution and make it difficult for oil and gas wells to return to the pre-construction productivity state in a period of time, which is not conducive to the production of oil and gas wells. By analyzing the engineering parameters of snubbing operation, using the snubbing equipment to run the hydraulic pump discharge test string, if the pressure is within the rated pressure, the hydraulic pump discharge can be carried out under the snubbing operation. Through the field application of four wells of snubbing operation and the collection and collation of the dynamic data of horizontal well construction in 2015 and 2016, it is found that after using snubbing operation, the average time from the start of blowout after drilling bridge plug to the completion of discharge after run in hydraulic pump string is shortened from 904 h to 190 h. The snubbing technology in hydraulic pump discharge test can effectively reduce the formation pollution and shorten the construction period, which is the development trend of formation productivity test in the future.

Keywords: snubbing operation; hydraulic pump; drainage; fracturing; formation pollution; capacity; construction period

自油田开发生产以来,在常规作业过程中,自喷油气井、高压油气井进行起下作业施工是短板。以前,这类井施工主要采用放喷降压至可施工条件,或用适当密度压井液压井后进行作业,施工过程中对设备、压井液消耗较大,施工成本较高;压井液进入地层后,对地层可能产生较大污染,影响油气产能,给后续生产造成不可估量的损失。同时,常规下水力泵排液管柱前的放喷周期过长,达不到及时排液求产的要求。

不压井作业就是在施工井内有压力的情况下进行起下作业施工。不压井作业相比较于传统井下作业,完全避免压井施工,可减少压井液对地层

的污染,改善现场环保现状,保证后期水力泵测试施工效果,有利于油气井修复后稳产、高产^[1-2]。同时,不压井作业无需放喷至无压,可以缩短施工周期,节约成本^[3-4]。1929年,美国奥蒂斯公司发明钢丝绳式起下装置,主要用于辅助钻机带压起下管柱作业,安全性较差。目前,带压技术和装备在国外已非常成熟^[5-8],辅助式和独立式设备及其配套工具序列齐全,设备实现了全液压举升,最高提升力达2 669 kN,最大下推力达1 157 kN,已普遍应用于陆地和海洋作业,最高作业井压力可达140 MPa。无需压井施工,可减少压井液对地层的污染,改善现场环保现状,保证后期水力泵测试施工效果。不

压井作业自 20 世纪 20 年代开始发展,目前这项技术在外国的推广应用率已经达到 90% 以上。我国不压井作业技术在 20 世纪 50 年代开始,经过 70 年的发展,不压井作业技术已经得以大规模应用^[9-12]。

1 不压井作业介绍

不压井作业是在井内有压力的条件下,由专业人员操作专用系统配套设备,完成钻井、完井、修井或其他措施作业的过程。不压井作业技术可以为油田生产解决许多难题,具体可以应用于油气田的高产井、重点井;用于欠平衡钻井、注水井作业;实现不压井状态下的分层压裂;可用于带压完成事故处理等修井作业;用于大规模压后,求产管柱的起下作业等^[13-15]。

1.1 不压井设备组成

不压井作业装置分为独立式和辅助式两种。前者可独立完成修井、起下钻等作业;后者需要其他设备(如修井机、钻机)配合才成完成相应作业^[16-19]。现使用的辅助式—撬装式不压井作业机如图 1 所示,用于非自喷井或高压油气井,能够承受静负荷压力 21 MPa,动负荷压力 14 MPa,总体高度约 7 100 mm,公称通径 $\phi 186$ mm。不压井作业装置通过变径法兰安装在施工井压后自带 KYS130/70 闸门上端进行施工,闸门公称通径 $\phi 130$ mm。变径法兰型号:130-70 \times 180-70 及 180-70 \times 180-35 组合型。

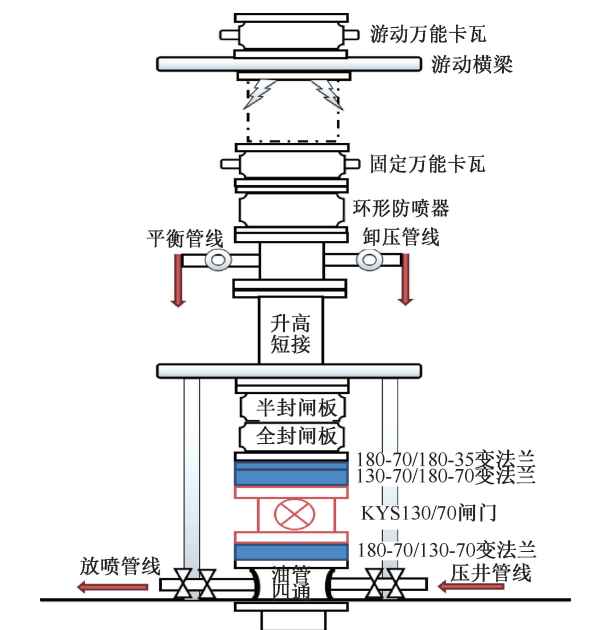


图 1 不压井装置主体结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of main structure of snubbing device

不压井作业装置一般由动力系统、液控系统、辅助装置(1 个上平台笼梯,1 个逃生滑道,1 个油管滑道,1 个下平台爬梯和底部支腿),以及不压井作业装置主体(从上至下:1 个上平台,1 个游动万能卡瓦,1 个游动横梁,2 个升降油缸,1 个游动防顶卡瓦,4 根支撑立柱,1 个固定万能卡瓦,1 套防喷器组合,1 个下平台,4 个支腿油缸)等四部分组成。

动力系统及部分控制系统装在一个集装箱内,主要控制系统装在上层平台上及主支架上;液控制系统与作业主机由液压管路相连,分别控制 2FZ18-35 双闸板防喷器, FH18-35 环形防喷器,游动万能卡瓦,游动防顶卡瓦,固定万能卡瓦,平衡/防喷闸阀,支腿油缸,升降油缸等。

1.2 不压井作业工程参数

掌控管柱在井内受力变化是保证施工顺利进行的重要手段,不压井作业施工时,管柱在井内受力情况可根据现场情况计算得出。

1.2.1 管柱受力分析

施工过程中,带压作业时,管柱受力情况可通过管柱受力分析图体现(图 2)。管柱受力主要有: F_{sn} (不压井作业需要的力), F_{fr} (管柱通过防喷器的摩擦力,与管柱运动方向相反), W (管柱重力), F_{dr} (套管阻力,与管柱运动方向相反), F_{wp} (作用在管柱截面的压力,当接箍在防喷器中时,受力最大)。

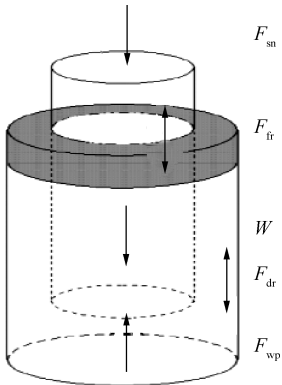


图 2 管柱受力分析示意图(管柱向下运动)
Fig.2 Stress analysis diagram of pipe string (Pipe string moves downward)

1.2.2 管柱截面力计算

管柱在井筒内受到井筒液浮力取决于管柱横截面及井口压力,即

$$F_{wp} = \pi d^2 p / 4\ 000$$

式中: F_{wp} 为管柱截面力, kN; π 为圆周率(值取 3.14); d 为配套防喷器密封油管外径, mm; p 为井口压力, MPa。

1.2.3 防喷器对管柱的摩擦力获取

油管通过密封防喷器时所受的摩擦力大小与防喷器选择类型及井口压力参数、油管规格有关,防喷器对管柱的摩擦力 F_{fr} 通常取管柱上顶力的 20%。

1.2.4 平衡点计算

当重管柱与轻管柱转换,需要计算中和点。管柱轴向力为零时的管柱长度被称为管柱中和点,即

$$l = F_{wp} / \gamma_F$$

式中: l 为管柱中和点,m; γ_F 为油管浮重,kN/m。

1.2.5 液缸下推力计算

不压井设备液缸下推力可根据下式计算得出,即

$$F_{sn} = F_{wp} - W - F_{fr} - F_{dr}$$

式中: F_{sn} 为液缸下推力,kN; W 为管柱重力,kN; F_{fr} 为管柱通过防喷器的摩擦力,kN; F_{dr} 为套管阻力,kN。

因此,液压缸的最大下推力等于井内压力作用在管柱最大密封横截面上的上顶力,通常下工具时为最大下推力。

1.2.6 油管无支撑长度获取

油管无支撑长度是指游动卡瓦距最上面密封防喷器之间的距离。无支撑油管受到的应力大于临界应力,油管就会发生形变。

该套不压井作业设备的最大行程为 3.5 m,对应的 $\phi 73.0$ mm EUE 油管压曲力为 75 kN(图 3),井筒最大压力为 17.9 MPa。考虑到附加 20% 安全系数,油管的安全无支撑长度,也即液缸最大行程在 3.5 m 时,井筒内压力控制在 14 MPa 之内。

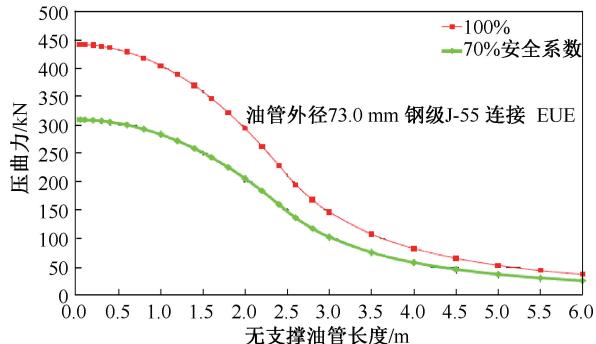


图 3 压曲力与无支撑油管长度关系曲线

Fig. 3 Curve of buckling force and unsupported length

2 使用不压井作业设备排液管柱

水力泵排液是大规模压裂后常用的求产方式,而使用不压井作业设备下水力泵排液管柱更高效、

环保,是未来测试地层产能的趋势^[20-21]。

2.1 施工概况

在井口压力值、日产液量较高时入水力泵排液管柱,可以有效缩短放喷周期,尽快求得地层产能。其优点在于:常规下水力泵排液管柱必须在日产液量 20.0 m³ 左右才能施工,但是不压井作业打破常规,现使用的不压井作业机能够承受静负荷压力 21 MPa、动负荷压力 14 MPa,只要压力在额定压力之内,即使产液量较高,也可进行不压井作业下水力泵排液管柱。

2.2 工具串入井操作步骤

(1) 连接工具。根据井下工具结构图(图 4),连接好入井工具。

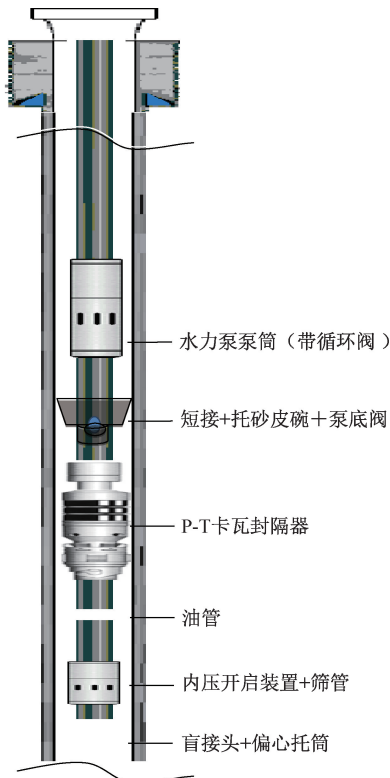


图 4 水力泵排液管柱结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of hydraulic pump discharge string structure

(2) 下入连接偏心托筒及盲接头的油管 1 根。将工具串送入不压井作业装置内,到达 KYS130/78 闸门顶部,关闭环形防喷器、固定万能卡瓦,缓慢打开 KYS130/78 闸门,直至井内流体完全充满不压井作业内腔,升液压缸置顶,关闭游动万能卡瓦及防顶卡瓦,打开固定卡瓦,降液压缸,将工具串完全送入半封闸板之下,关闭半封闸板,打开放喷阀泄压,打开环形防喷器,将偏心托筒及盲接头下入井内。

(3)继续下入油管 1 根。丝扣上满上紧,打开游动万能卡瓦及防顶卡瓦,升液压缸置顶,关闭游动万能卡瓦及防顶卡瓦,打开固定万能卡瓦,缓慢将油管接箍下放至半封闸板之上,关闭环形防喷器,关闭固定万能卡瓦,打平衡压入作业装置腔,打开游动万能卡瓦及防顶卡瓦,升液压缸置顶,关闭游动万能卡瓦及防顶卡瓦,打开半封闸板,打开固定卡瓦,降液压缸,将油管接箍下入半封闸板之下。

(4)下入底部带 P-T 卡瓦封隔器的油管 1 根。同步步骤(3)。

(5)下入底部带泵底阀和托砂皮碗的短节 1 根。同步步骤(3)。

(6)下入底部带水力泵泵筒的油管 1 根。同步步骤(3)。

(7)下油管至预定深度(当下至水力泵以上 10 根油管时,向油管内加满水垫)。

3 施工情况

2016 年,在实验井进行组装、起下管柱及拆卸试验。于 2017 年 10 月前完成带压下水力泵排液管柱 4 井次。以 ZP8 井为例进行分析。

ZP8 井位于松辽盆地中央凹陷宋芳屯鼻状构造上。该井于 2016 年 1 月 5 日开钻,3 月 20 日完钻,为三级套管完井,完钻井深 2 992.00 m,于 29 日完井。造斜位置 1 587.89 m,于井深 2 044.00 m 进入水平段(入靶点 2 044.00 m/垂深 1 918.54 m),最大井斜 90.9°。水平段长 948.00 m。水平段钻遇砂岩 660.00 m,钻遇含油砂岩 646.00 m,其中油浸砂岩 451.0 m,油斑砂岩 167.0 m,油迹砂岩 28.0 m,砂岩钻遇率 69.6%,油层钻遇率 68.1%。

3.1 基本数据

ZP8 井井况基础数据见表 1。本井 23 级压裂,共打入压裂液 9 900 m³。目前,井口压力 4.5 MPa,日排液 168 m³(返排压裂液)。井内为空井筒,井口装 KYS130/70 平板阀门。ZP8 井固井质量合格,满足施工要求(图 5)。

表 1 ZP8 井基础数据表
Table 1 Basic data of well ZP8

套管名称	外径/ mm	壁厚/ mm	钢级	下入 深度/m	水泥 返深/m	阻流 环深/m
表层套管	339.70	9.65	J55	198.84	地面	/
技术套管	244.50	10.03	N80	1 939.90	地面	1 926.11
油层套管	139.70	9.17	P110	2 989.14	地面	2 967.91

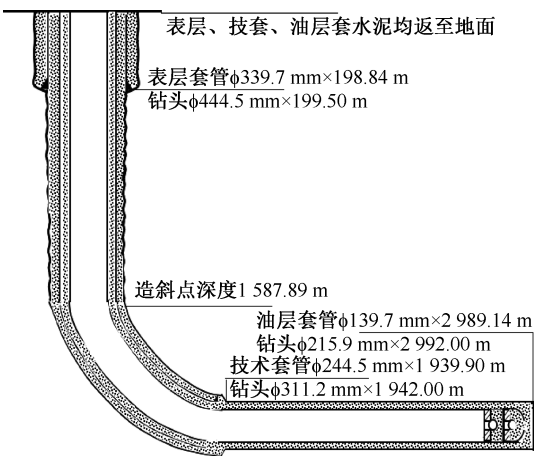


图 5 ZP8 井井身结构示意图
Fig.5 Wellbore structure of Well ZP8

3.2 施工过程

ZP8 井进行连续油管水力喷砂压裂,累计入井压裂液 9 900 m³。该井施工历时 8 d,带压作业施工 3 d,周期较长。分析原因如下:

- (1)天气原因。风大造成油管容易偏扣。
- (2)设备磨合。新设备的发动机、防喷器、液压缸等都需要前期试验磨合。
- (3)井场拥挤。该井口周围摆放液罐,管汇等造成场地非常紧张,油管摆放太紧凑,下单根油管有时对井口设备刮碰等。改进加工专业工具撬等配套设备,规范井场摆放、利于施工。
- (4)工具准备不全。没有单根小吊卡,每次都需解开油管吊装带。估计每根油管耽误 30 s。吊装配件在后期施工过程中进行改进。
- (5)人员操作设备不熟练。第一天大约 6 根/h,第二天最快能达到 15 根/h。

如果随着设备正常运转和人员操作熟练程度提高等上述问题的解决,施工周期有望缩短至 5 d,作业时间 2 d,甚至更短。

截止至 2017 年 10 月,施工不压井作业 4 井次,施工概况总结见表 2。从表 2 中可以看到,施工的 4 口不压井作业周期 5~8 d 不等,在工作量接近的情况下,不压井作业周期均为 3 d,25 t 吊车配合效率较高,风力较大对施工具有一定影响。

针对出现的问题,进行了改进:(1)根据设备实际规格完成加工作业装置主体撬,专门的工具筐撬(压力管线圆形筐、工具设备长方体筐),大漏斗(带压起管时接管内液体),液压管线保护盖板(防止人员踩踏损坏液压管线),设备梯子加长改造,集装箱

工具房改造,上单根固定绳索支架,踢蹬。根据施工井井口高低不同,加工制作了伸缩支腿 4 支、支腿底座 4 支,原井井口在 1~2 m 都可以达到使用要求。(2)研制了专用辅助单根吊卡,取代了吊装带,从根本上杜绝了上单根时油管掉落的发生,提高了

施工效率。(3)针对普通油管挂无法通过 130 闸门,以致无法坐油管挂进行水力泵排液的问题,加工特殊转换法兰(130-70×18-35),上法兰平面自带顶丝及油管挂配套设备,能够满足水力泵排液需要坐油管挂的要求。

表 2 不压井作业 4 井次施工统计表
Table 2 Operation statistics of four wells without well killing

井号	井口 压力/MPa	产量/m ³	出口液性	施工 周期/d	不压井作业 周期/d	施工作业 油管数量	施工期间 天气状况	配合施工 方式	方余/m	坐封 重量/t
ZP8	4.5	168.0	返排压裂液	8	3	175	风 4~5 级	修井机	0.85	11(油管悬重)
ZP12	3.2	72.0	返排压裂液	6	3	179	风 5~6 级	25 t 吊车	0.85	12(油管悬重)
ZP15	3.0	142.0	返排压裂液	7	3	191	风 2~3 级	25 t 吊车	0.75	8
ZP20	1.0	50.4	返排压裂液	5	3	182	风 3~4 级	25 t 吊车	0.75	10

还存在几点问题仍需继续改进:(1)不压井作业的操作杆台面没有护盖,长时间暴露在外,容易造成生锈,导致操作杆失效。(2)不压井作业动力机使用 4 井次后,高温高压导致其内部分胶圈不密封。因此,需要相应的标准配件。

通过 4 井次的 不压井作业现场应用,及对 2015 年、2016 年水平井施工动态的收集整理,总结出从钻完桥塞开始放喷至下完水力泵排液管柱的平均时间为 904 h,而使用不压井作业后这段时间缩短至 190 h,大大减少了施工周期。

4 结论

(1)不压井作业技术可为油气田开发提供准确的基础资料,能够最大限度较少污染,保持油气层原始状态,为评价油气藏提供可靠依据。

(2)不压井作业技术的应用从极大程度上降低了对环境可能造成的伤害;解决了压井作业时造成地层污染的技术难题;同时,缩短施工周期,降低施工成本,提高了施工生产效率。

(3)目前带压作业主要针对压后下水力泵排液管柱。未来以扩大施工范围为目标,向高压复杂井、气井带压施工领域方向努力,它的发展趋势是高效化、高安全化和智能化。

致谢:感谢大庆油田试油试采分公司同意本文公开发表;感谢施工队伍在本文现场试验数据统计分析中付出的努力;感谢试油试采分公司技术专家给予的相关指导。

参考文献

[1] 文浩,杨存旺. 试油作业工艺技术[M]. 北京:石油工业出版社,2002:340-345.
[2] 于大伟. 带压作业装备的过去、现在与未来[J]. 石油和化工设备,2019,22(2):49-51.

YU Dawei. The past, present and future of pressure equipment [J]. Petro & Chemical Equipment, 2019,22(2):49-51.
[3] 刘柏超. 大庆油田电缆带压直读技术[J]. 油气井测试,2021,30(1):36-40.
LIU Baichao. Direct reading technology of cable under pressure in Daqing Oilfield [J]. Well Testing, 2021, 30 (1):36-40.
[4] 孙海林,白田增,吴德,等. 大套变井连续油管带压注水泥塞技术[J]. 油气井测试,2017,26(1):51-54.
SUN Hailin, BAI Tianzeng, WU De, et al. Under Pressure Cementing for the Severe Casing Deformation Well Through CT [J]. Well Testing, 2017,26(1):51-54.
[5] 彭勇,王进全,蔡彬,等. 不压井修井装置举升系统液压控制方案设计[J]. 石油机械,2008,36(9):43-46.
PENG Yong, WANG Jinquan, CAI Shan, et al. Hydraulic control scheme for lifting system of non-well-killing workover device [J]. China Petroleum Machinery, 2008, 36(9):43-46.
[6] 石伟,颜廷龙,唐义祥. 油田注水井带压作业技术研究与应 用[J]. 中国石油和化工标准与质量,2012,32 (8):67.
SHI Wei, YAN Tinglong, TANG Yixiang. Research and application of pressure operation technology in oilfield water injection wells [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2012,32(8):67.
[7] 寇富. 不压井作业装置的技术分析及应用探讨[J]. 设备管理与维修,2018(15):132-134.
KOU Fu. Technical analysis and application of non-kill equipment [J]. Plant Maintenance Engineering, 2018 (15):132-134.
[8] 李金霜. 不压井起下管柱作业技术推广应用前景分析探讨[J]. 广东化工,2011,38(4):55,59.
LI Jinshuang. Analysis and discussion on the prospect of popularization and application of snubbing pipe string operation technology [J]. Guangdong Chemical Industry, 2011,38(4):55,59.

- [9] 孙起. 浅谈不压井带压作业技术的发展[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2011, 31(12): 63.
SUN Qi. Talking about the development of snubbing operation technology under pressure [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2011, 31(12): 63.
- [10] 王炜. 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.
- [11] 李明皓. 水井带压作业技术研究与应用[J]. 大科技, 2017(30): 343.
LI Minghao. Research and application of water well pressure operation technology [J]. Super Science, 2017(30): 343.
- [12] 李昀城. 油田试油试采作业的安全环保措施优化[J]. 化工管理, 2019(6): 75.
LI Yuncheng. Optimization of safety and environmental protection measures for oilfield testing and production [J]. Chemical Enterprise Management, 2019(6): 75.
- [13] 李均强. 带压作业在油气水井中的应用[J]. 石油化工应用, 2010, 29(4): 93-95.
LI Junqiang. Application of pressure operation in oil, gas and water wells [J]. Petrochemical Industry Application, 2010, 29(4): 93-95.
- [14] 赵臻. 井下作业压井作业技术措施的选择及使用[J]. 数字化用户, 2019, 25(5): 124.
ZHAO Qin. Selection and application of well killing technical measures in underground operation [J]. Digital Users, 2019, 25(5): 124.
- [15] 严德熙. 浅谈不压井作业的应用和存在的问题[J]. 科学时代, 2012(12): 1-2.
YAN Dexi. Talking about the application and existing problems of snubbing operation [J]. The Age of Science, 2012(12): 1-2.
- [16] 刘潜, 刘晓明, 陈和平. 江汉油田不压井作业技术引进探讨[J]. 江汉石油职工大学学报, 2009, 22(2): 83-86.
LIU Qian, LIU Xiaoming, CHEN Heping. On introducing snubbing operation technology in Jianghan Oilfield [J]. Journal of Jianghan Petroleum University of Staff and Workers, 2009, 22(2): 83-86.
- [17] 王继伟, 张啸, 王海楼, 等. 注水井不泄压修井作业工艺技术研究[J]. 油气井测试, 2007, 16(S1): 15-18.
WANG Jiwei, ZHANG Xiao, WANG Hailou, et al. Study on work-over tech without pressure relief for water injection well [J]. Well Testing, 2007, 16(S1): 15-18.
- [18] 张志恺. 可控不压井作业技术研究与应用[J]. 化工管理, 2013(20): 138.
ZHANG Zhikai. Research and application of controllable snubbing operation technology [J]. Chemical Enterprise Management, 2013(20): 138.
- [19] 姚金剑, 罗敏, 岳欠杯, 等. 不压井作业管柱下压力分析及应用[J]. 石油矿场机械, 2011, 40(3): 77-81.
YAO Jinjian, LUO Min, YUE Qianbei, et al. Downward pressure analysis and application of snubbing string [J]. Oil Field Equipment, 2011, 40(3): 77-81.
- [20] 蒋晓波. 辽河油田带压作业技术的完善与应用[J]. 油气井测试, 2013, 22(5): 63-65.
JIANG Xiaobo. Improvement and application of operation with pressure technology in Liaohe Oilfield [J]. Well Testing, 2013, 22(5): 63-65.
- [21] 高辉. 螺杆泵与水力泵在水平井排液求产中的适应性分析[J]. 油气井测试, 2018, 27(3): 22-27.
GAO Hui. Adaptability analysis of screw pump and hydraulic pump during the production of horizontal wells [J]. Well Testing, 2018, 27(3): 22-27.
- [22] 马金良, 刘泽宇, 李春宁, 等. 一趟管柱分层射孔与水力泵排液联作技术[J]. 油气井测试, 2018, 27(2): 22-26.
MA Jinliang, LIU Zeyu, LI Chunling, et al. Integration of layered perforation and flowback by hydraulic pump in one trip [J]. Well Testing, 2018, 27(2): 22-26.

编辑 王 军

第一作者简介: 肖志永, 男, 1984 年出生, 工程师, 2008 年毕业于西南石油大学石油工程专业, 现主要从事油气勘探开发和管理工作。电话: 0459-5672042, 13766784402; Email: xiaozhiyong1206@163.com。通信地址: 黑龙江省大庆市让胡路区银浪乘南 18 街 18 号大庆油田有限责任公司试油试采分公司, 邮政编码: 163412。