

连续油管水平井滑套钻铣工艺技术

郑道明¹, 贺绍华², 贾光亮¹

1. 中石化华北石油工程有限公司技术服务公司 河南郑州 450006

2. 中石化华北石油工程有限公司井下作业公司 河南郑州 450006

通讯作者: Email: 373050728@qq.com

项目支持: 中国石油化工集团华北石油工程公司科技研发项目“水平井滑套钻铣关键技术研究”(HBGC18-09K)

引用: 郑道明, 贺绍华, 贾光亮. 连续油管水平井滑套钻铣工艺技术[J]. 油气井测试, 2019, 28(2): 45-50.

Cite: ZHENG Daoming, HE Shaohua, JIA Guangliang. Technology of sliding sleeve milling in horizontal well using coiled tubing [J]. Well Testing, 2019, 28(2): 45-50.

摘要 水平井裸眼封隔器分段压裂中, 压裂滑套导致水平段井径不统一, 后期作业管柱无法下入; 地层砂、压裂砂在滑套台阶处沉积易造成井眼堵塞, 生产无法正常运行, 需要在压裂后钻除压裂滑套。利用连续油管作业效率高、可带压作业的优点, 优化管柱结构, 优选磨鞋、工作液及施工排量, 制定施工作业要求, 形成了连续油管水平井滑套钻铣工艺技术。该工艺在东胜气田一口水平井中成功钻除水平段的 8 级压裂滑套, 钻铣工具选用 $\phi 89$ mm 的高效五翼平底磨鞋, 冲砂液选择含有 1% KCl 的 25 MPa·s 胍胶, 施工排量为 350~400 L/min, 放喷试气计算无阻流量为 6.3506×10^4 m³/d, 解除了油气通道障碍。该技术为裸眼封隔器分段压裂水平井油气开发提供了技术方案。

关键词 水平井; 分段压裂; 压裂滑套; 连续油管; 钻铣; 管柱优化

中图分类号: TE353 文献标识码: B DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2019.02.008

Technology of sliding sleeve milling in horizontal well using coiled tubing

ZHENG Daoming¹, HE Shaohua², JIA Guangliang¹

1. Technical Service Company of SINOPEC North China Petroleum Engineering Co., Ltd., Zhengzhou, Henan 450006, China

2. Downhole Operation Company of SINOPEC North China Petroleum Engineering Co., Ltd., Zhengzhou, Henan 450006, China

Abstract: In the open-hole multistage fracturing of horizontal well, the conventional fracturing sliding sleeve often results in a non-uniform borehole diameter, which may lead to inability of later operation string running, and hinder production due to the borehole blockage caused by formation sand and fracturing proppant deposition at the sliding sleeve. Therefore, the conventional fracturing sliding sleeve needs to be milled after fracturing. Taking the advantage of high efficiency and snubbing operation of the coiled tubing, a sliding sleeve milling technology for horizontal well using coiled tubing was established through optimizing the string configuration, selecting milling shoe, working fluid and displacement, and formulating operation requirements, by this technology successfully drilled the eight-stage fracturing sliding sleeves of a horizontal well in Dongsheng Gas Field, with the milling tool of high-efficiency $\phi 89$ mm five-blade flat-profile milling shoe, and the sand washing liquid of 25 MPa·s silicone with 1% KCl, and the displacement of 350~400 L/min. The absolute open flow potential of the gas well testing is 6.3506×10^4 m³/d, which indicates a non-barrier oil and gas passage. This technology provides a technical solution for the oil and gas production in open-hole multistage fracturing horizontal wells.

Keywords: horizontal well; multistage fracturing; fracturing sliding sleeve; coiled tubing; milling; string configuration optimization

目前, 水平井分段压裂已成为提高油气田勘探开发效果的重要途径, 经过多年的发展形成多项针对性的储层改造工艺技术, 在国内各大油气田均有较为广泛的应用。陈作等^[1]对国内外水平井分段压裂的工艺技术方法进行了归纳及展望, 其中重点介绍了水平井裸眼封隔器分段压裂技术。该工艺具有改造面积大、单井产量高, 入井工具简单、作业

高效等优势, 近年来在国内开始推广应用^[2-3]。腾春鸣等^[4]、詹鸿运等^[5]对水平井裸眼封隔器分段压裂工具、工艺管柱、管串结构、工具开发及技术关键点和难点进行了研究, 并详述了现场应用情况。任勇等^[6]针对页岩层气套变水平井连续油管钻磨桥塞的风险事件, 提出地面流程、钻磨工作液性能参数、钻磨工具选择、施工排量、钻压优选、短起以及

打捞钻屑等方面的技术要求,为套变水平井的桥塞钻磨提供技术方案。

东胜气田 2010 年 9 月开始引入该项工艺,自 2011 年 12 月应用水平井裸眼分段压裂技术获得 $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的无阻流量以来,截止 2017 年 10 月底,进行了近百口井的应用,单井无阻流量最高可达 $48.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,取得了突出的压裂增产效果。但由于压裂滑套的存在造成了水平段井筒井径不统一,导致后期作业管柱无法下入井内,增产、稳产措施无法进行^[7];另外,地层砂、压裂砂在滑套台阶处沉积易造成井眼的堵塞,直接影响到油气井的生产^[8]。因此,钻除井内压裂滑套显得尤为必要。

前期的水平井滑套钻铣作业主要以常规油管带钻铣工具来完成。但因钻压不易控制、设备复杂、作业风险高、占用人员多等问题导致施工成本高、效率低,钻铣液长时间的浸泡还易导致地层污染,影响油气井最终产能。而连续油管工艺技术的发展为水平井滑套钻铣作业提供了新的技术途径。王海涛等^[9]、赵晓波^[10]对连续油管的特点、发展、在井下作业施工中的应用现状及趋势进行了全面总结。邹先雄等^[11]给出了连续油管钻塞技术的影响因素、参数等方面的优化,但并未对连续油管水平井滑套钻铣方面进行相关研究。

本文首先对东胜气田水平井裸眼封隔器分段压裂工艺管柱的结构、原理、参数进行了分析,结合连续油管作业效率高、可带压作业的优点,在考虑

环空返速、施工排量、作业环境、作业安全等影响因素的基础上,通过对入井工具的优选、配套,形成了连续油管水平井滑套钻铣工艺管柱,并在东胜气田一口水平井中应用成功,钻除水平段的 8 级压裂滑套,解除了油气通道障碍,为油气生产提供了条件,证明了该工艺技术的实用性。

1 水平井裸眼封隔器分段压裂工艺管柱

对水平井裸眼封隔器分段压裂工艺管柱结构及主要组成工具有较为全面的认识,为后期滑套钻铣作业在工具的选取、钻铣液的优选、施工参数的优化等方面提供依据。

1.1 管柱结构

水平井裸眼分段压裂工艺管柱的设计是以储层条件、水平段有效长度为基础,结合水平段与储层主应力方位关系等因素,综合考虑确定的^[12]。图 1 是一口井裸眼封隔器分段压裂工艺管柱,其结构为:浮鞋浮箍+井筒隔离阀+ $\phi 114.3 \text{ mm}$ 套管+压差滑套+ $\phi 114.3 \text{ mm}$ 套管+裸眼封隔器+ $\phi 114.3 \text{ mm}$ 套管+投球滑套 1+ $\phi 114.3 \text{ mm}$ 套管+裸眼封隔器+ $\phi 114.3 \text{ mm}$ 套管+投球滑套 2+...+尾管悬挂封隔器+ $\phi 89 \text{ mm}$ 油管至井口。裸眼封隔器将每层封隔开,每个滑套内装有一个球座,球座往上依次加大,级差为 $1/8$ 或 $3/16$,压裂时通过投球打开滑套,进行有针对性的储层改造。

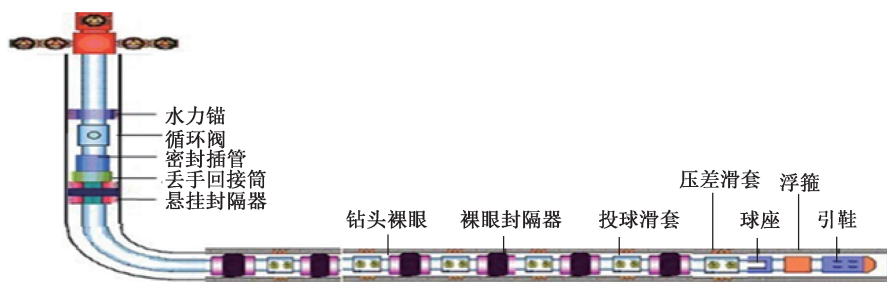


图 1 水平井裸眼分段压裂工艺管柱结构

Fig.1 String configuration of open-hole multistage fracturing of horizontal well

1.2 主要工具原理与参数

水平井裸眼分段压裂工艺管柱中主要工具是裸眼封隔器和压裂滑套。

1.2.1 裸眼封隔器

(1) 功能原理

裸眼封隔器是一种液压式封隔器,通过液压方式挤压胶筒变形胀封,对各施工层段进行有效的封隔^[13]。凭借其紧凑和可靠的设计在裸眼井里可承

受 70 MPa 的上下压差,用于裸眼井中进行多级封隔、压裂,也可用于套管的封隔^[14]。其结构如图 2 所示。

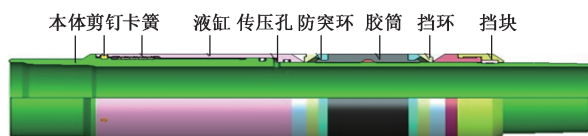


图 2 裸眼封隔器结构示意图

Fig.2 Structural schematic of the open-hole packer

(2) 技术参数

适用井径:177.8 mm 套管,153~165 mm 裸眼;
金属材质钢级:P110;
承压级别:70 MPa;
最大外径:146.05 mm;
最小内径:101.60 mm;
坐封启动压力:16.5 MPa;
坐封压力:26 MPa;
额定工作温度:150 ℃。

1.2.2 压裂滑套

(1) 功能原理

根据需要将多级滑套串接在分段压裂管柱中,压裂滑套开始处于关闭状态。当投球作用在球座表面后,打压使活塞产生滑移,泄流孔打开,形成一个储层与压裂滑套内腔之间的通道,进而对储层进行改造^[15]。其结构如图 3 所示。

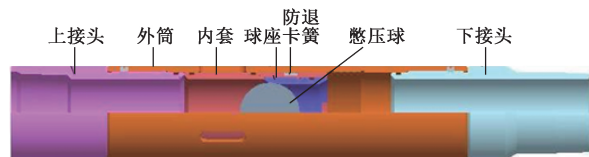


图 3 压裂滑套结构示意图

Fig.3 Structural schematic of the fracturing sliding sleeve

(2) 技术参数

金属材质钢级:P110;
承压级别:70 MPa;
最大外径:139.70 mm;
滑套钻除后内通径:97.00~101.60 mm;
投球直径:28.75~95.25 mm;
开启压力:19.3~20.7 MPa。

2 水平井压裂滑套钻铤工艺

水平井压裂滑套钻铤工艺主要有两种,分别是常规油管钻铤工艺及连续油管钻铤工艺。虽然常规油管钻铤工艺在作业中具有管柱强度高、施工压力较低等优点,但由于该工艺存在钻压不能精确控制、施工周期长,井控风险高,设备、人员占用率大,作业强度大、成本高等一系列问题^[16],在现场应用中逐步被连续油管水平井滑套钻铤工艺所代替。

2.1 连续油管钻铤滑套工艺管串结构

考虑到井身结构、环空返速、施工排量等作业环境、施工参数、作业安全等方面影响因素,钻铤管串通常设计为:磨鞋+马达+分流短节(施工排量超过马达排量增加分流短节)+双作用循环阀+液力振

荡器+液压丢手+震击器+双瓣单流阀+卡瓦连接器+ $\phi 45$ mm 连续油管。

(1) 马达的作用是给磨鞋提供动力,外径小于磨鞋外径^[17]。

(2) 循环阀(或分流阀)的作用使驱动马达的流量在合理的范围内,同时多余的流量经过分流阀进入油套环空,确保环空流量能满足携砂的需要^[18];循环阀另外一个作用是钻铤完后冲砂时液流不经过马达,减少马达的磨损。

(3) 液力振荡器的核心原理是通过压力脉冲产生水击效果,这种水击效果会沿着连续油管产生拉伸载荷,其主要作用有两个:一是因为压缩载荷明显减少,连续油管能下入井筒更深位;二是黏着滑动的现象直到油管下入井筒更深处才会出现,钻磨深处滑套时作业效率更高。

(4) 液压丢手是确保连续油管的安全,在管串被卡时连续油管可以脱开管串提出井外。

(5) 震击器的作用是在管柱遇卡时,通过提放或下压管柱启动震击器,产生向上或向下推力,辅助解卡^[19]。

(6) 双瓣单向阀的作用是防止液体倒流,起到防止油管井喷的作用。

2.2 磨鞋、工作液及施工排量的选择

(1) 结合回插接头内径尺寸、滑套最大可钻范围、钻铤管串的可通过性以及井底可能存在压裂球等基本情况,为实现性最大钻铤效果选择外径为 $\phi 89$ mm 的高效五翼平底磨鞋作为钻铤工具。

(2) 压裂砂的粒径为 0.45~0.90 mm,要保证砂粒能返出地面,在垂直井段,液流的速度为砂粒沉降速度的 2 倍;在水平井段,液流的速度为砂粒沉降速度的 10 倍^[20-21],需要对现场常用的几种工作液体的临界携砂排量和相应施工状态下的压力进行计算(表 1、表 2)。通过计算选择 25 mPa·s 胍胶(加入 1%KCl,黏土稳定剂)作为冲砂液可满足施工要求。而考虑到井筒球座、磨鞋孔眼变径工具节流阻力的因素及上流体摩阻损失,施工排量在 300~400 L/min 之间较为合适,预计井口压力在 50 MPa 左右。

2.3 施工作业要求

(1) 磨鞋的选择既要考虑到钻铤效果的最大化,又要保证磨鞋能在当前的井身结构下能顺利的完成起下。

(2) 井口的选择应满足管串的顺利起下。

表 1 $\phi 45\text{ mm}$ 连续油管冲砂环空返排临界流量计算

Table 1 Calculation of critical annular flowback rate of sand washing using $\phi 45\text{ mm}$ coiled tubing

冲砂液	砂粒沉降速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	垂直段临界流速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	水平段临界流速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	临界排量/ $(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$
1%KCl 溶液	0.059 8	0.119 6	0.598	235
黏度 4 mPa·s 胍胶液	0.037 7	0.075 4	0.377	148
黏度 10 mPa·s 胍胶液	0.015 4	0.030 8	0.154	61
黏度 20 mPa·s 胍胶液	0.008 0	0.016 0	0.080	31
黏度 25 mPa·s 胍胶液	0.006 0	0.012 0	0.060	24

表 2 采用 $\phi 45\text{ mm}$ 连续油管时不同工作液及排量对应的井口压力

Table 2 Wellhead pressures corresponding to different working fluids and displacements using $\phi 45\text{ mm}$ coiled tubing

排量/ $(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$	下深/ m	井口压力/MPa				
		1%KCl 溶液	4 mPa·s 胍胶	10 mPa·s 胍胶	20 mPa·s 胍胶	25 mPa·s 胍胶
200		13.11	9.17	9.30	9.56	11.1
300		21.83	13.97	14.15	14.47	16.9
400	2 950	33.25	20.40	20.63	21.05	24.5
500		47.21	27.43	27.72	28.26	32.9
600		63.60	39.25	39.62	40.29	46.9

(3) 考虑到作业安全,每钻除一级滑套后应进行往复通过试验以确保后续施工安全。

(4) 由于水平段可能有压裂砂,因此在钻铣过程中要考虑钻铣液对压裂砂的携带性。

(5) 保证循环排量,避免沉沙造成井下卡钻事故。

(6) 在不影响施工安全的条件下将外径较大的工具边缘进行均匀切削,形成 45° 倒角,防止工具串在起下过程中发生挂卡^[22]。

3 现场应用情况

XX 井为东胜气田的一口开发水平井,斜深 4 039 m,垂深 2 577 m,采用水平井裸眼封隔器预置管柱完井工艺,设计压裂段数为 8 段(图 4),XX 井分段压裂完井工具参数见表 3。

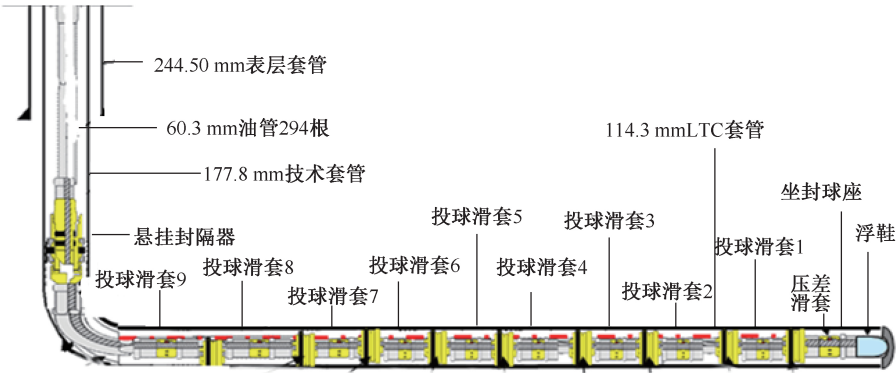


图 4 XX 井裸眼分段压裂工具示意图

Fig.4 Schematic diagram of the open-hole multistage fracturing tool of Well XX

表 3 XX 井分段压裂完井工具参数表

Table 3 Parameters of multistage fracturing completion tool of Well XX

名称	尺寸			初始剪切 压力/MPa	坐封球 外径/mm
	长度/m	外径/mm	内径/mm		
压差滑套 1#	4.11	146	25.40	—	—
投球滑套 2#	3.61	142	48.26	20	41.275
投球滑套 3#	3.60	142	51.31	20	44.450
投球滑套 4#	3.60	142	54.61	20	47.625
投球滑套 5#	3.61	142	57.66	20	50.800
投球滑套 6#	3.61	142	60.96	20	53.975
投球滑套 7#	3.60	142	64.10	20	57.150
投球滑套 8#	3.60	142	67.275	20	60.325
投球滑套 9#	3.61	142	70.40	20	63.500

完井管柱结构为:引鞋锁定球座+ $\phi 114.3\text{ mm}$ LTC 套管+压差滑套 1+ $\phi 114.3\text{ mm}$ LTC 套管+裸眼

锚定封隔器+ $\phi 114.3\text{ mm}$ LTC 套管+裸眼封隔器 1+ $\phi 114.3\text{ mm}$ LTC 套管+投球滑套 2+ \cdots + $\phi 114.3\text{ mm}$ LTC 套管+投球滑套 9+ $\phi 114.3\text{ mm}$ LTC 套管+裸眼封隔器 9+ $\phi 114.3\text{ mm}$ LTC 套管+悬挂封隔器+回插接头+ $\phi 89\text{ mm}$ EUE 油管+短节+油管挂(至井口)。该井压裂后经过放喷、冲砂、抽汲排液等作业,无天然气、水产出,与预期产量相差较大,怀疑放喷期间由于压裂砂在压裂滑套台阶处沉积导致井筒砂埋所致。因此,决定将井内滑套钻除后恢复产能。

3.1 技术措施

(1) 钻铣作业前起出原井筒抽汲、生产管柱;

(2) 考虑到钻屑、压裂砂携带性、确保环空液体返速、钻铣管串的通过性,回插 $\phi 114.3\text{ mm}$ 套管至

井口并更换 KQ65-103 型的井口采气树;

(3) 钻铤水平段投球滑套,以及井内压裂用球,疏通水平段通道,压差滑套内径 $\phi 101.6$ mm 无需钻铤;

(4) 钻铤作业采用正循环泵注,即从连续油管注入钻铤液,从环空返出钻铤液;

(5) 每钻除一级滑套,反复刮削通过 2 次,确保畅通,并循环洗出钻铤碎屑;

(6) 钻铤作业应保证上返排量,避免因漏失造成返排不足,碎屑堆积引发的卡钻事故。

3.2 入井管串

(1) 根据该井施工的深度要求,准备满足强度要求长度为 4 000 m 的 $\phi 45$ mm 连续油管;

(2) 钻铤作业管串:由下至上为: $\phi 89$ mm 五翼平底磨鞋 0.31 m+ $\phi 73$ mm 马达 3.47 m+ $\phi 54$ mm 双作用循环阀 0.19 m+ $\phi 54$ mm 液压丢手 0.48 m+ $\phi 54$ mm 双瓣单流阀 0.22 m+ $\phi 54$ mm 连续油管连接器 0.33 m+ $\phi 45$ mm 连续油管,工具总长 5 m。

3.3 钻铤液配方

采用钻铤液配方如下:0.25%瓜胶+1%氯化钾+0.1%杀菌剂,循环使用,确保其黏度不低于 20 mPa·s,并根据需要及时补充。

3.4 施工过程

该井滑套钻铤施工作业累计用时 4 d,由 2 940 m 钻铤至 3 913 m,共钻除井内滑套 8 个。施工过程中钻压 5~10 kN,排量 350~400 L/min,泵压 21~25 MPa。期间,在钻至第 4 级滑套时进尺缓慢,上提管串检查发现磨鞋磨损较为严重,更换磨鞋后继续钻铤至预定位置,并进行 2 个循环的井筒清洗后,提出井内钻铤工具串,洗井过程中返出压裂砂及钻屑约 1.8 m^3 。

3.5 施工效果

在拆除连续油管设备,提出井内回接管柱,组下 $\phi 63$ mm 抽汲、生产管柱后进行抽汲作业,套压为 14.6 MPa 时抽喷导入试气流程。放喷 10 d 后,在油压为 6.0~6.2 MPa、套压为 10.0~9.8 MPa 的情况下,最终计算无阻流量为 $6.3506\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 。

4 结论

(1) 该工艺的运用解决了水平井在作业过程中压裂砂、地层砂在滑套台阶处沉积造成生产无法正常运行的问题,保证了水平段的畅通。

(2) 钻铤工具,尤其是磨鞋的选取上要结合井身结构以及作业井口的实际情况,既要保证整个管串的通过性,又要实现钻铤效果的最大化;作业过程中要

保证钻屑及压裂砂、地层砂的携带性,因此根据实际情况对施工排量、钻铤液的黏度要有具体要求。

(3) 由于在水平段进行钻铤作业,管串更为贴近井筒底部,存在磨损套管的风险,因此应考虑增加扶正工具,以降低套管磨损的风险,同时入井工具多,管串整体长度增加,作业风险随之增加,应考虑优化工艺管柱,实现钻铤管串长度的降低。

(4) 由于经过压裂改造,存在不同程度的钻铤液漏失现象,不仅造成对地层的伤害,严重时还会发生液体失返现象,给作业安全带来极大隐患。因此,应考虑在钻铤液中添加暂堵剂,以降低作业风险。

致谢:本文通过单位保密审查;在本文撰写过程中,华北石油工程有限公司技术服务公司给予了很大帮助,在此表示感谢。

参考文献

- [1] 陈作,王振铎,曾华国.水平井分段压裂工艺技术现状及展望[J].天然气工业,2007,27(9):78-80.
CHEN Zuo, WANG Zhenduo, ZENG Huaguo. Status quo and prospect of staged fracturing technique in horizontal wells [J]. Natural Gas Industry, 2007,27(9):78-80.
- [2] 周鹏遥,程远方,杨向同,等.全通径裸眼封隔器水平井分段改造工艺在塔里木油田的应用[J].油气井测试,2016,25(2):57-60.
ZHOU Pengyao, CHENG Yuanfang, YANG Xiangtong, et al. Application of segmented transformation technology with full bore open-hole packer to horizontal well in the Tarim Oilfield [J]. Well Testing, 2016,25(2):57-60.
- [3] 陈现义.水平井预置管柱完井与连续油管带底封分段压裂一体化技术[J].石油钻采工艺,2017,39(1):66-70.
CHEN Xianyi. Preset string completion for horizontal wells and staged fracturing integrated technology of coiled tubing with bottom packer [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2017,39(1):66-70.
- [4] 滕春鸣,杜泽宏,施凌丽,等.水平井裸眼封隔器多级分段压裂技术在苏 75 区块的应用[J].钻采工艺,2012,35(6):31-33,40.
TENG Chunming, DU Zehong, SHI Lingli, et al. Application of open hole packer multistage fracturing technology in horizontal well of Su 75 block [J]. Drilling & Production Technology, 2012,35(6):31-33,40.
- [5] 詹鸿运,刘志斌,程智远,等.水平井分段压裂裸眼封隔器的研究与应用[J].石油钻采工艺,2011,33(1):123-125.
ZHAN Hongyun, LIU Zhibin, CHENG Zhiyuan, et al. Research on open hole packer of staged fracturing technique in horizontal wells and its application [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2011,33(1):123-125.
- [6] 任勇,郭彪,石孝志,等.页岩气套变水平井连续油管钻磨复合桥塞技术[J].油气井测试,2018,27(4):61-66.

- REN Yong, GUO Biao, SHI Xiaozhi, et al. Technology of coiled-tubing drilling composite bridge plug in the shale gas horizontal well with casing deformation [J]. Well Testing, 2018, 27(4): 61-66.
- [7] 朱正喜, 李永革. 水平井裸眼完井分段压裂技术研究 [J]. 石油矿场机械, 2011, 40(11): 44-47.
- ZHU Zhengxi, LI Yongge. Study of multistage fracturing of horizontal bare hole wells [J]. Oil Field Equipment, 2011, 40(11): 44-47.
- [8] 申志伟. RFID 技术在压裂滑套中的应用研究与实现 [D]. 成都: 西南石油大学, 2017.
- SHEN Zhiwei. Application and research of RFID technology in fracturing sleeve [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.
- [9] 王海涛, 李相方. 连续油管技术在井下作业中的应用现状及思考 [J]. 石油钻采工艺, 2008, 30(6): 120-124.
- WANG Haitao, LI Xiangfang. Application situation and thinking about coiled tubing techniques in downhole operation [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2011, 33(1): 123-125.
- [10] 赵晓波. 井下作业中连续油管技术的应用 [J]. 石化技术, 2018, 25(7): 226.
- ZHAO Xiaobo. Application of coiled tubing technology in downhole operation [J]. Petrochemical Technology, 2018, 25(7): 226.
- [11] 邹先雄, 卢秀德, 刘洪彬. 连续油管钻磨复合桥塞效率影响因素分析及提效措施研究 [J]. 钻采工艺, 2018, 41(2): 110-112.
- ZOU Xianxiong, LU Xiude, LIU Hongbin. Analysis of factors affecting the efficiency of coiled tubing drilling and grinding compound bridge plugs and research on improving measures [J]. Drilling & Production Technology, 2018, 41(2): 110-112.
- [12] 娄明. 浅析水平井分段压裂投球滑套的研制与应用 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2013, 34(2): 106.
- LOU Ming. Analysis and application of staged fracturing ball-sliding sleeve for horizontal well [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2013, 34(2): 106.
- [13] 张鹏, 程智远, 刘志斌, 等. 水平井裸眼分段压裂坐封球座的研制与应用 [J]. 石油钻采工艺, 2011, 33(2): 131-132, 136.
- ZHANG Peng, CHENG Zhiyuan, LIU Zhibin, et al. Development and application of setting ball seat for open hole staged fracturing in horizontal wells [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2011, 33(2): 131-132, 136.
- [14] 许国林, 李博, 王洪潮, 等. $\phi 140$ 型裸眼分段压裂套管外封隔器的研制 [J]. 石油机械, 2011(7): 54-55.
- XU Guolin, LI Bo, WANG Hongchao, et al. Research on $\phi 140$ external casing packer for open hole staged fracturing [J]. China Petroleum Machinery, 2011(7): 54-55.
- [15] 张平过. 水平井套管内多级压裂技术在江汉油田的应用 [J]. 江汉石油职工大学学报, 2013, 26(1): 36-39.
- ZHANG Pingguo. On application of multiple-stage fracturing technology inside the casing of horizontal wells in Jiangnan oilfield [J]. Journal of Jiangnan Petroleum University of Staff and Workers, 2013, 26(1): 36-39.
- [16] 裴晓含, 魏松波, 石白茹, 等. 投球滑套分段压裂用可分解压裂球 [J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(6): 738-741.
- PEI Xiaohan, WEI Songbo, SHI Bairu, et al. Disintegrating fracturing ball used in ball injection sliding sleeve for staged fracturing [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(6): 738-741.
- [17] 郭瑞华, 黄杰, 姚传高, 等. 连续管磨钻工艺的研究与应用 [J]. 石油机械, 2013, 41(8): 87-89.
- GUO Ruihua, HUANG Jie, YAO Chuangao, et al. Research and application of downhole milling technology with coiled tubing [J]. China Petroleum Machinery, 2013, 41(8): 87-89.
- [18] 郝琼, 王伟佳, 王汤, 等. 连续油管钻复合桥塞工艺研究 [J]. 钻采工艺, 2016, 39(1): 68-71.
- SHANG Qiong, WANG Weijia, WANG Tang, et al. Research on composite bridge plug process of coiled tubing drilling [J]. Drilling & Production Technology, 2016, 39(1): 68-71.
- [19] 杨山, 杨松枫. 连续油管装置及配套工具在油田的应用 [J]. 石油钻采工艺, 1995, 17(5): 70-75.
- YANG Shan, YANG Songfeng. Application of coiled tubing unit and its necessary tools in oilfields [J]. Oil Drilling & Production Technology, 1995, 17(5): 70-75.
- [20] 叶长青, 熊杰, 康琳洁, 等. 川渝气区排水采气工具研制新进展 [J]. 天然气工业, 2015, 35(2): 54-58.
- YE Changqing, XIONG Jie, KANG Linjie, et al. New progress in the R & D of water drainage gas recovery tools in Sichuan and Chongqing gas zones [J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(2): 54-58.
- [21] 付民, 高通路, 张松明, 等. 水平井冲砂技术的应用与改进 [J]. 油气井测试, 2011, 20(5): 59-61.
- FU Min, GAO Tonglu, ZHANG Songming, et al. Application and improvement of horizontal well sand washing technology [J]. Well Testing, 2011, 20(5): 59-61.
- [22] 章伟. 水平井多级滑套钻铣和冲砂工艺的研究与应用 [J]. 中小企业管理与科技, 2014(5): 211-212.
- ZHANG Wei. Research and application of multi-stage sliding sleeve drilling and milling and sand washing technology in horizontal well [J]. Management & Technology of SME, 2014(5): 211-212.

编辑 穆立婷

第一作者简介: 郑道明, 男, 1986 年出生, 硕士研究生, 工程师, 2018 年毕业于中国地质大学(武汉)石油与天然气工程专业, 现主要从事井下作业相关的技术研究工作。电话: 0371-58556775, 15737186162; Email: 373050728@qq.com。通信地址: 河南省郑州市中原区淮河西路 23 号 820 室, 邮政编码: 450006。