

连续油管长水平段防自锁技术

王方祥¹, 张乾¹, 姜有才¹, 郝华松², 杨鑫¹, 李道松¹

- 1. 中国石油集团渤海钻探工程公司井下技术服务公司 天津 300280
- 2. 中国石油集团渤海钻探工程公司油气井测试分公司 河北廊坊 065007

通讯作者: Email: wangfangxiangcnpc@126.com
项目支持: 中国石油集团渤海钻探工程有限公司重大工艺研究项目“页岩气长水平段连续油管压裂前作业技术及套变防治研究”(2019ZD18K-04)
引用: 王方祥, 张乾, 姜有才, 等. 连续油管长水平段防自锁技术[J]. 油气井测试, 2021, 30(2): 25-29.
Cite: WANG Fangxiang, ZHANG Qian, JIANG Youcai, et al. Anti-self-locking technology for long horizontal section of coiled tubing [J]. Well Testing, 2021, 30(2): 25-29.

摘要 连续油管在长水平井段施工时,经常因螺旋变形而自锁,无法下到预定位置,严重影响施工进度和施工质量。为解决连续油管在长水平井段自锁的问题,利用弹簧蓄能和齿形交错结构,设计了频率可调、振动稳定、适用性强的机械振荡器,研发了新型金属降阻剂配方,总结了矿化度、pH 值、温度等对摩擦系数的影响规律,形成连续油管在长水平井段推进的防自锁技术。应用于 N×3 井连续油管钻塞施工中,机械振荡器振动频率 25~37 Hz,金属降阻剂最佳浓度 1.0%~1.5%,降低摩擦系数 40% 以上。机械振荡器与金属降阻剂共同使用,可降低连续油管与井壁之间的摩擦力,增加其在水平井段的推进深度,缩短连续油管施工周期,提高施工质量。

关键词 水平井段; 连续油管; 自锁; 机械振荡器; 金属降阻剂; 摩擦系数; 现场应用

中图分类号: TE357 **文献标识码**: B **DOI**: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2021.02.005

Anti-self-locking technology for long horizontal section of coiled tubing

WANG Fangxiang¹, ZHANG Qian¹, JIANG Youcai¹, HAO Huasong², YANG Xin¹, LI Daosong¹

- 1. Downhole Technical Service Branch, CNPC Bohai Drilling Engineering Company, Tianjin 300280, China
- 2. Well Testing Branch, CNPC Bohai Drilling Engineering Company, Langfang, Hebei 065007, China

Abstract: Coiled tubing is often self-locking due to spiral deformation when operation in long horizontal sections of horizontal wells, and cannot reach the predetermined position, which seriously affects the operating progress and quality. In order to solve the self-locking problem of coiled tubing in long horizontal sections, a mechanical oscillator with adjustable frequency, stable vibration and strong applicability was designed using spring energy storage and tooth-shaped staggered structure, and a new type of metal resistance reducer formula was developed. The influence of salinity, pH value, temperature, etc. on the friction coefficient was summarized. An anti-self-locking technology for coiled tubing was founded during advancing in long horizontal sections. The technology was applied to the plug drilling operation with coiled tubing of Well N×-3. The vibration frequency of the mechanical oscillator was 25-37 Hz, the optimal concentration of metal resistance reducer was 1.0%-1.5%, and the friction coefficient was reduced by more than 40%. The combination of mechanical oscillator and metal resistance reducer can reduce the friction between the coiled tubing and the wellbore, increase its advancement depth in the horizontal section, shorten the coiled tubing operating period, and improve the operating quality.

Keywords: horizontal well section; coiled tubing; self-locking; mechanical oscillator; metal resistance reducer; friction coefficient; field application

为满足油气勘探开发的需求,长水平段的水平井数量逐渐增多^[1-2]。如四川页岩气井的水平井段长度约为 1 400~2 400 m,单井段数大多在 25 段以上,最高达到 46 段。利用连续油管在长水平井段进行洗井、刮削、测声幅等施工时,由于管柱本体弯曲螺旋变形,使得其与井壁的摩擦力增加,施加在管

柱上的钻压被摩擦力抵消,导致连续油管无法在水平段推进,形成自锁现象^[3]。如 H23 平台的 2、3、4 三口上倾井,平均井深 4 500 m,平均井斜 102.13°,连续油管下入多次遇阻,反复试下,距离预定位置仍有 200 m 的距离,最长达 450 m,严重影响施工进度和施工质量。

为解决连续油管在井内自锁的问题,一般在入井管串上安装水力振荡器。利用工具内泵注液体流通面积周期性的改变,对管柱产生周期性的振动载荷,使管柱轴向振动,从而降低连续油管本体与井壁之间的摩擦力,提高在水平井段的推进距离^[4]。王力等^[5]针对管柱大摩阻的问题,研制了小直径通缆水力振荡器,并采用理论分析和数值模拟相结合的方法分析了工具的激振力、激振频率等关键技术参数。吴志勇等^[6]利用有限元数值模拟的方法研究了激振力、振动频率及安放位置对水力振荡器减阻效果的影响规律,为工具的合理选用提供了参考。李斌等^[7]基于 LuGre 摩擦理论建立了管柱摩擦力的计算模型,并采用正交方法,分析了振动强度、振幅、振动频率的综合作用对摩擦力的影响规律。王建龙等^[8-9]基于管柱所受摩阻和振荡力,建立了水力振荡器在管串上的安装位置计算模型,计算获得了安装位置优选图版,并与井眼清洁工具进行集成,解决了大斜度井管柱下入过程中的定向托压问题。欧阳勇等^[10]则综合采用 Dahl 动态摩擦模型和常规刚杆模型分析了水平井摩擦力的分布特征,以此为基础优化了水力振荡器的安放位置。罗鹏等^[11]以 YSX 井的实际施工为例,分析了水力振荡器在连续油管页岩气水平井中的应用情况。以上所说的水力振荡器均为螺杆动力水力振荡器^[12-13],现场应用中发现,由于泵注液体的压力和流量波动,使得该工具的振动频率不稳定,不易调整,并且要求修井液为无固相液体,导致施工过程中的操作难度大,对连续油管现场复杂工况的适用性较差,未能达到理想的防自锁应用效果^[14]。

本文摒弃水力振荡器的固有思路,结合弹簧蓄能和齿形交错结构,设计了一种易于控制的机械振荡器,并研发了一种新型的金属降阻剂,将两者结合使用,形成了连续油管在长水平井段推进的防自锁技术,可缩短施工周期,提高施工质量,并在现场推广应用。

1 机械振荡器的结构及原理

井下振荡器之所以能够降低管柱与井壁之间的摩擦力,主要是依靠振荡使管柱产生轴向运动^[15]。而齿形交错的机械结构能够利用两齿的啮合和交错,将旋转运动改变为轴向运动,从而实现管柱的轴向振动。

1.1 整体设计

机械振荡器的结构主要包括上接头、短螺杆、转接头、旋转传动轴、扶正轴承、弹性元件、齿形冲击体、被冲击体和下接头(图1),通过上接头连入连续油管的管串,下接头可连接螺杆马达等井下工具。在机械振荡器内,短螺杆内的转子通过转接头连接旋转传动轴。转接头可为万向接头,并为软连接,具有一定的轴向活动空间。旋转传动轴内为流道结构,可为流过短螺杆的液体提供向下部工具流动的流道。在旋转传动轴的中间部位安装扶正轴承,保证旋转运动的稳定性,底部套入弹性元件后,安装齿形冲击体。弹性元件可为矩形弹簧或碟簧,为弹簧蓄能结构,根据齿形交错结构的轴向运动距离而定。在工具外筒的最下部,通过花键结构套装被冲击体,使得被冲击体能够沿轴向直线运动,而不能旋转运动。齿形冲击体的下端和被冲击体上端为相互啮合的齿形结构。花键结构能够承受较大的扭矩,使整个工具不会发生变形,保证轴向振动的稳定性。在被冲击体的下部连接下接头,中间留有一定的轴向运动空间。

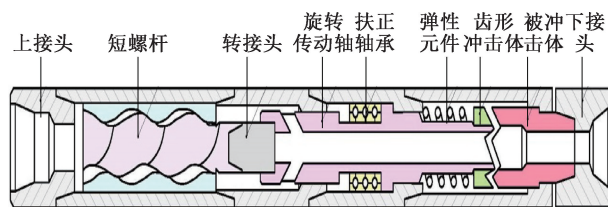


图1 机械振荡器的结构示意图

Fig. 1 Structure of mechanical oscillator

1.2 工作原理

机械振荡器的工作原理如图2所示。

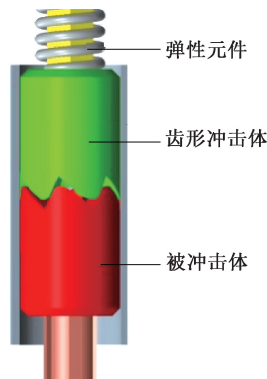


图2 机械振荡器的工作原理示意图

Fig. 2 Working principle of mechanical oscillator

当地面泵注的流体流过短螺杆时,使短螺杆内的转子旋转,从而带动转接头和旋转传动轴旋转。旋转传动轴带动底部的齿形冲击体相对被冲击体

旋转,旋转过程中,两者的齿形结构相互交错、啮合。由于限制了被冲击体的旋转运动,在两者齿形结构交错时,齿形冲击体沿被冲击体的齿面向上爬升,从而压缩弹性元件,使其蓄能。当到达两齿交错的顶端后,弹性元件突然释放,在弹力推动下,齿形冲击体向下冲击被冲击体,使其带动下接头及之后的工具串产生轴向运动,两者齿形结构相互啮合。之后,齿形冲击体继续沿齿面爬升,重复交错和啮合过程,从而形成周期性的轴向振动,使管柱与井壁间的静摩擦变为动摩擦,降低摩擦力,解除连续油管的自锁现象,延长其在长水平段的推进距离。

1.3 技术特点

(1) 频率可调。该机械振荡器的振荡频率可调,只需通过更换不同的齿形、齿数或者改变修井液的循环流量即可调节;

(2) 振动稳定。该工具依靠两齿的重复性交错、啮合实现周期性的轴向振动,为纯机械运动,该硬特性决定了振动的稳定性强。

(3) 结构简单。该工具的零部件结构简单,对齿形冲击体和被冲击体的齿形、齿数无具体要求,只要二者可以交错、啮合即可。

(4) 工作寿命长。该工具内的齿形结构部件内部镶嵌硬质合金块,且短螺杆的扭矩小,使工具的工作寿命延长。

(5) 适用性强。该工具对修井液的固含量、泵送压力和流量无特殊要求,只需满足螺杆钻具的使用要求即可,具有良好的现场适用性。

1.4 技术参数

机械振荡器的振动频率为短螺杆的转速与齿数的乘积,即

$$f = nN/60 = \eta NQ/q \quad (1)$$

式中: f 为振动频率, Hz; n 为短螺杆转速, r/min; N 为齿数; η 为短螺杆传动效率系数; Q 为泵注排量, L/s; q 为短螺杆的每转排量, L/r。

短螺杆的转速主要受泵注流体的排量影响,可通过更换齿形冲击体和被冲击体变换齿数,从而控制振动频率。

根据机械振荡器在连续油管上的使用工况,泵注排量为 5~9 L/s,短螺杆的转速为 255~364 r/min,设计齿形冲击体的齿数为 6 个均布,工具的振动频率为 25~37 Hz。该工具外径 73 mm,齿高 20 mm,弹性元件的预紧力 2.4 kN,弹性系数 10.5×10^9 N/m²。

2 金属降阻剂的研制

连续油管完全依靠机械振荡器在长水平段推

进,其应用效果可能会受到限制。为了尽量多的延长连续油管的推进深度,研制一种金属降阻剂,从流体的角度降低井壁对管柱的摩擦力^[16]。

2.1 金属降阻剂的制备

金属降阻剂为水溶性液体,以水为基液,配方为:基础改性植物油(蓖麻酸硫酸酯钠盐)82%~90%,油溶性乳化剂(非离子表面活性剂)4%~10%,温度稳定剂(磺化酚醛树脂)1%~2%,金属缓蚀剂(十八烷胺缓蚀剂)2%~5%,消泡剂(改性有机聚硅氧烷消泡剂)0.1%~1%,各组分按质量百分比计。

在配制金属降阻剂母液时,首先按比例(100份)量取清水,在 8 000 r/min 的高速搅拌下,加入 4~10 份的非离子表面活性剂 Span20,搅拌 10 min 后,加入 82~90 份的改性植物油,搅拌 10 min 使溶液均匀稳定,之后加入 1~2 份的磺化酚醛树脂,搅拌 5 min 后加入 2~5 份的十八烷胺缓蚀剂,搅拌 5 min 后加入 0.1~1 份的改性有机聚硅氧烷消泡剂,搅拌 5 min,待溶液稳定即可。

2.2 金属降阻剂的性能评价

室内通过金属摩擦实验评价金属降阻剂的性能。实验发现,使用金属降阻剂后,随着井内液体矿化度的升高,摩擦系数逐渐升高。当井内液体的 pH 值在 10 以上时,摩擦系数最高,与 H₂O 中的摩擦系数相当,表明金属降阻剂已失效,其最佳使用 pH 值范围为 1~10。当井内温度在 120 ℃ 以下时,随着温度的升高,摩擦系数基本温度,变化不大,超过 120 ℃ 后,摩擦系数急剧上升,所以,该金属降阻剂的耐温为 120 ℃。

将金属降阻剂稀释成不同浓度的工作液后,测试其摩擦系数(图 3)。

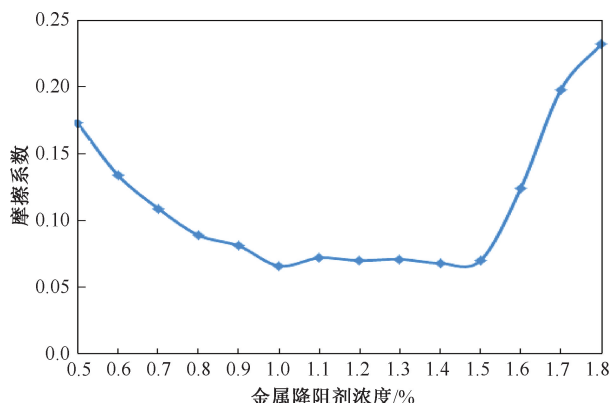


图3 金属降阻剂的浓度对摩擦系数的影响

Fig. 3 Influence of the concentration of the metal resistance reducer on the friction coefficient

由图3可见,该金属降阻剂体系在较低的浓度

下就能实现良好的降阻效果,稀释后的最佳浓度控制在 1.0%~1.5%之间,能够降低摩擦系数在 40%以上。

3 防自锁技术的应用

将设计的机械振荡器配合研发的金属降阻剂,在页岩气井的连续油管施工过程中推广应用,以 N×-3 井的施工为例,说明防自锁技术的应用效果。

3.1 N×-3 井的应用实例

N×-3 井为一口页岩气开发井,位于四川省宜宾市珙县沐滩镇中山村 4 组,长宁背斜构造中奥顶构造南翼,目的是开发长宁地区龙马溪组页岩气资源。该井实际完钻井深 5 100.00 m,完钻垂深 2 323.64 m,现人工井底为 5 058.20 m,造斜点深 2 270.00 m,最大井斜 100.56°,最大井斜井深 4 980.40 m,方位 211.17°,闭合方位 193.63°,属上倾形,水平井段全长 2 300 m。井身结构如图 4 所示。

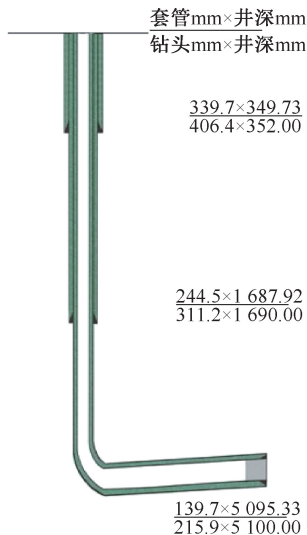


图 4 N×-3 井身结构示意图

Fig. 4 Structure of Well N×-3

该井试油井段 2 748.00~5 058.00 m,段总长 2 310.00 m,分为 40 段施工,平均段长 57.8 m,每段射孔 3~6 簇,平均簇间距 17.4 m,优选高孔隙度、高含气量、高有机碳、高脆性、低破裂压力部位进行射孔,避开套管节箍和固井质量差位置,通过合理的加砂压裂改造,获取工业性气流,并按要求取全取准各项试油资料。

水力加砂桥塞分段压裂改造后,使用连续油管钻除井内全部桥塞,并通井至人工井底,以利于后期排采作业。2019 年 8 月,连续油管钻磨桥塞施工。该井地面流程组装、试压完毕后,在油层套管内下入钻磨工具串(φ50.8 mm 连续油管底带

φ73 mm 铆钉连接器+φ73 mm 马达总成(丢手+单流阀)+φ73 mm 震击器+φ73 mm 马达+φ95 mm 磨鞋),未安装机械振荡器。下至 2 600.00 m 后,泵车开泵,出口使用 7~9 mm 油嘴控制出口排量略大于进口泵注排量,用滑溜水循环洗井一周以上,保持泵压、排量稳定,控制钻压,继续下放连续油管。至深度 2 829.71 m(距桥塞深度 69.29 m)时,加钻压 30 kN 无法推进,发生连续油管自锁现场。

起出连续油管工具串,在 φ73 mm 马达总成(丢手+单流阀)和 φ73 mm 震击器之间安装 φ73 mm 机械振荡器,以 7 L/s 的泵注排量、30 MPa 的泵压下入连续油管,中途加钻压不超过 30 kN。同时,现场准备充足的金属降阻剂。当连续油管下入到 2 600.00 m 后,按照 1.0%~1.5%的比例泵入金属降阻剂 3 m³,控制泵压在 40 MPa 以下,井口压力在 30 MPa 以下,注完金属降阻剂后,停泵静置 30 min 以上,以利于金属减阻剂更好的吸附在管壁上,然后活动管柱,继续下放连续油管。在井深 2 899.00 m 钻遇第一个桥塞,顺利钻穿后持续下放,一趟钻共钻穿 32 个桥塞,探到人工井底 5 058.20 m,施工过程中无连续油管自锁现象。

连续油管长水平段防自锁技术在长宁、威远等多口页岩气井应用,表明机械振荡器与金属降阻剂配合使用,可大大降低连续油管与井壁之间的摩擦力,彻底解决连续油管在长水平井段的自锁问题,增加其在水平井段的推进深度。

4 结论

(1)利用弹簧蓄能和齿形交错结构,设计了一种频率可调、振动稳定、适用性强的机械振荡器,振动频率为 25~37 Hz。

(2)研发了一种新型的金属降阻剂,最佳使用浓度控制在 1.0%~1.5%之间,能够降低摩擦系数 40%以上。

(3)将机械振荡器与金属降阻剂联合使用,形成了连续油管在长水平井段推进的防自锁技术,适用于页岩气井等长水平井段的连续油管施工,可大大降低连续油管与井壁之间的摩擦力,增加其在水平井段的推进深度,对指导连续油管在长水平井段的施工具有重要意义。

致谢:感谢渤海钻探井下技术服务公司同意本文公开发表。

参考文献

[1] 单锋,陈军,李有伟,等. 碳酸盐岩超深超长水平井完井

- 模拟通井技术[J]. 油气井测试, 2015, 24(1): 54-56.
- SHAN Feng, CHEN Jun, LI Youwei, et al. Simulation drift technology of well completion for long of ultra deep horizontal well with carbonate rock [J]. Well Testing, 2015, 24(1): 54-56.
- [2] 杨海平, 游云武. 焦页 2-5HF 长水平井钻完井关键技术[J]. 钻采工艺, 2018, 41(3): 5-8.
- YANG Haiping, YOU Yunwu. Critical drilling technology for drilling super-long horizontal well JY 2-5 HF [J]. Drilling & Production Technology, 2018, 41(3): 5-8.
- [3] 李宗田. 连续油管技术手册[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 13-17.
- [4] HU Y, ZHAO J, ZHAO J Z, et al. Coiled tubing friction reduction of plug milling in long horizontal well with vibratory tool [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019: 452-465.
- [5] 王力, 徐保龙, 王毅, 等. 井下定向钻进用小直径通缆水力振荡器的研制[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(2): 30-35.
- WANG Li, XU Baolong, WANG Yi, et al. Development of small diameter hydraulic agitator with cable for directional drilling in underground coal mine [J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(2): 30-35.
- [6] 吴志勇, 李军, 倪红坚, 等. 水力振荡器性能影响因素研究[J]. 石油机械, 2018, 46(3): 7-11.
- WU Zhiyong, LI Jun, NI Hongjian, et al. Research on the influencing factors of performance of hydraulic oscillator [J]. China Petroleum Machinery, 2018, 46(3): 7-11.
- [7] 李斌, 刘胜, 沈恒宇, 等. 水力振荡器振动特性对减阻规律的影响研究[J]. 应用力学学报, 2018, 35(3): 650-654.
- LI Bin, LIU Sheng, SHEN Huanyu, et al. Effects of vibration characteristics of hydraulic oscillator on friction reduction law [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2018, 35(3): 650-654.
- [8] 王建龙, 于志强, 郑永锋, 等. 基于摩阻和振荡力的水力振荡器安放位置计算方法[J]. 石油矿场机械, 2019, 48(4): 35-38.
- WANG Jianlong, YU Zhiqiang, ZHENG Yongfeng, et al. Calculation method of hydraulic oscillator placement position based on friction and oscillation force [J]. Oil Field Equipment, 2019, 48(4): 35-38.
- [9] 王建龙, 陶成学, 王志玲, 等. 水力振荡器与井眼清洁工具集成缓解托压技术研究[J]. 钻采工艺, 2019, 42(1): 21-23.
- WANG Jianlong, TAO Chengxue, WANG Zhiling, et al. Hydraulic oscillator integrated with wellbore cleaning tool to reduce upward pressure on drill string [J]. Drilling & Production Technology, 2019, 42(1): 21-23.
- [10] 欧阳勇, 段志锋, 陈春宇, 等. 水平井钻井水力振荡器安放位置优化与试验[J]. 钻采工艺, 2019, 42(5): 1-4.
- OU Yangyong, DUAN Zhifeng, CHEN Chunyu, et al. Optimization and field test of hydraulic oscillator placement during forizontal well drilling [J]. Drilling & Production Technology, 2019, 42(5): 1-4.
- [11] 罗鹏, 宋丹, 李晨阳, 等. 浅谈连续油管水力振荡器在页岩气水平井中的应用—以 YSX 井为例[J]. 海峡科技与产业, 2017, (9): 148-149.
- LUO Peng, SONG Dan, LI Chenyang, et al. Talking about the application of coiled tubing hydraulic oscillator in shale gas horizontal well—Take the YSX well as an example [J]. Technology and Industry Across the Straits, 2017, (9): 148-149.
- [12] 孔令镨, 王瑜, 邹俊, 等. 水力振荡减阻钻进技术发展现状与展望[J]. 石油钻采工艺, 2019, 41(1): 23-30.
- KONG Lingrong, WANG Yu, ZOU Jun, et al. Development status and prospect of hydro-oscillation drag reduction drilling technology [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2019, 41(1): 23-30.
- [13] GEE R, HANLEY C, HUSSAIN R, et al. Axial oscillation tools vs. lateral vibration tools for friction reduction—what's the best way to shake the pipe? [J]. Journal of Tsinghua University, 2015, 51(11): 1557-1561.
- [14] 玄令超, 管志川, 呼怀刚, 等. 弹性蓄能激发式旋冲钻井工具特性分析[J]. 石油钻探技术, 2016, 44(3): 61-66.
- XUAN Lingchao, GUAN Zhichuan, HU Huaigang, et al. Analysis of the characteristics of the rotary impact drilling tool with an elastic element accumulator [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(3): 61-66.
- [15] 王鹏, 倪红坚, 王瑞和, 等. 调制式振动对大斜度井减摩阻影响规律[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38(4): 93-97.
- WANG Peng, NI Hongjian, WANG Ruihe, et al. Influence-laws of modulated vibration on friction reduction in inclined-wells [J]. Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition), 2014, 38(4): 93-97.
- [16] DENISE G N, ANDREIA D P, JOAO C, et al. Influence of glycerides-xanthan gum synergy on their performance as lubricants for water-based drilling fluids [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2014, 131(22): 1-9.

编辑 穆立婷

第一作者简介: 王方祥, 男, 1987 年出生, 博士, 工程师, 2017 年毕业于中国石油大学(华东)油气井工程专业, 现从事石油井下相关工具设备的设计与技术研究工作。电话: 022-25934595, 15822162989; Email: wangfangxiangcnpc@126.com。通信地址: 天津市滨海新区港西大道 640 渤海钻探工程公司井下技术服务公司测试工程作业部, 邮政编码: 300280。