

# 旋冲螺杆钻具在临盘油田的试验应用

王甲昌, 张海平, 张仁龙, 玄令超

(中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101)

**摘要:** 本文阐述了旋冲螺杆钻具的结构原理及主要性能参数, 该工具可以将冲击破岩和 PDC 钻头剪切破岩相结合, 集合冲击钻井和螺杆钻井的各自优势, 改善钻头的工作状态, 大幅度提高机械钻速; 该工具降低钻具摩阻, 应用于定向井可以提高定向钻井效率。该工具冲击力与钻压成正相关关系, 冲击频率与马达转速成正比。Ø178 mm 旋冲螺杆钻具分别在临盘油田直井和定向井进行了试验应用, 复合钻进机械钻速与邻井相比提高了 22.1%~41.8%, 滑动钻进机械钻速同比提高了 51.1%, 对加快油田勘探开发速度、降低钻井成本有积极的意义。

**关键词:** 旋冲螺杆钻具; 旋冲钻井技术; 冲击性能; 临盘油田

**中图分类号:** P634.3; TE242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2019)12-0044-06

## Field testing of rotary-percussive PDM in Linpan Oilfield

WANG Jiachang, ZHANG Haiping, ZHANG Renlong, XUAN Lingchao

(Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing 100101, China)

**Abstract:** The structural principle and main performance parameters of the rotary-percussive PDM are elaborated in this paper. With the combination of impact rock crushing with shear rock cutting of the PDC bit, the tool can provide both the advantages of percussion drilling and PDM drilling, and improve the drill bit's working performance, resulting in higher ROP. It can also reduce drag forces; thus increasing directional drilling efficiency. The tool impact force has a positive correlation with the weight on bit while the impact frequency is directly proportional to the motor rpm. Tests of the Ø178mm drilling motors have been carried out in drilling vertical and directional wells in Linpan Oilfield respectively. ROP in compound drilling was improved by 22.1%~41.8% compared with that of the adjacent well, while the slide drilling ROP was increased by 51.1%, which is of positive significance for speeding up the oilfield exploration and development and reducing drilling cost consequently.

**Key words:** rotary-percussive PDM; rotary-percussive drilling technology; impact performance; Linpan Oilfield

## 0 引言

国内外的理论研究和试验均证明, 旋冲钻井技术可以大幅度提高硬地层钻井效率<sup>[1-4]</sup>, 降低钻井成本, 但目前国内外冲击钻井工具普遍存在寿命低、技术不成熟等问题。旋冲螺杆钻具作为国内最新研制的一种新型冲击钻井工具, 集合了冲击钻井和螺杆钻井的各自优势, 能够适用于直井、定向井以及水平井钻井, 可以有效解决硬地层提速、定向钻进托压<sup>[5]</sup>等钻井难题。旋冲螺杆钻具在临盘油田直井和定向井的试验应用, 提高了试验井段钻进速度, 降低了定向钻进摩阻, 取得了良好的提速提效效果, 显示

了该工具良好的应用前景。

## 1 旋冲螺杆钻具结构原理

### 1.1 主要结构

旋冲螺杆钻具主要由旁通阀及马达动力总成、马达驱动轴总成、冲击发生机构组成(如图 1 所示)。该工具上部与钻铤或钻杆连接, 下部与钻头连接。

旁通阀及马达总成为常规螺杆钻具的上部主要部件, 马达驱动轴总成由常规螺杆钻具部件改制而成, 由上述部件组成的特制螺杆钻具为钻头和冲击发生机构提供转速和输出扭矩。旋冲螺杆钻具马达

收稿日期: 2019-01-07; 修回日期: 2019-09-23 DOI: 10.12143/j.tkge.2019.12.009

基金项目: 国家科技重大专项课题“复杂地层钻井提速提效关键工具与装备”(编号: 2016ZX05021-003)

作者简介: 王甲昌, 男, 汉族, 1970 年生, 高级工程师, 主要从事钻井井下工具相关研究工作, 北京市朝阳区北辰东路 8 号北辰时代大厦 701 室, wangjc.sripe@sinopec.com。

引用格式: 王甲昌, 张海平, 张仁龙, 等. 旋冲螺杆钻具在临盘油田的试验应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(12): 44-49.

WANG Jiachang, ZHANG Haiping, ZHANG Renlong, et al. Field testing of rotary-percussive PDM in Linpan Oilfield[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(12): 44-49.

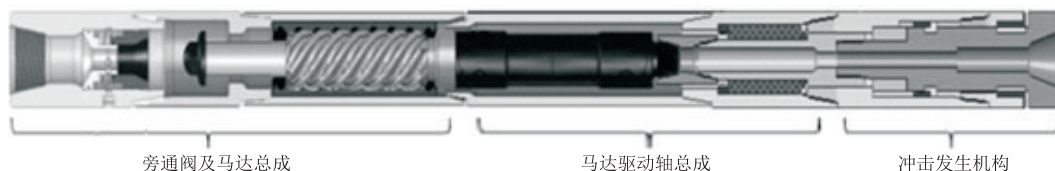


图 1 旋冲螺杆钻具结构

Fig.1 Structure of rotary-percussive PDM

驱动轴总成的传动轴(见图 2)由常规螺杆钻具驱动轴总成改制而成,其输出主轴与冲击发生机构主轴通过花键联接;马达驱动轴总成外壳可以根据现场需要选择直外壳或弯外壳,以满足直井或定向井钻

进需求<sup>[6-7]</sup>。冲击发生机构内部设计有一对啮合的凸轮机构,上凸轮体固定在工具外壳上,下凸轮体与工具输出轴通过螺纹连接为一体,可以实现既驱动钻头旋转,又对钻头产生轴向冲击(如图 3 所示)。

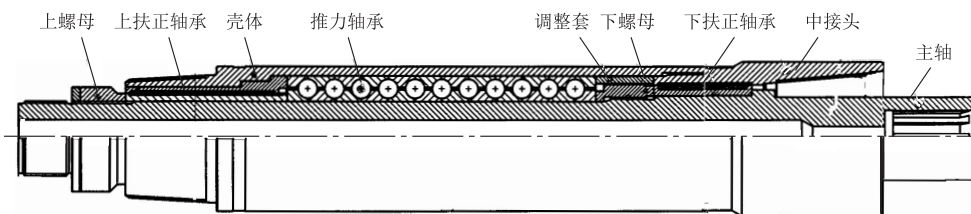


图 2 旋冲螺杆钻具传动轴结构

Fig.2 Structure of the drive shaft of the rotary-percussive PDM

### 1.2 工作原理

旋冲螺杆钻具既可用于复合钻进,也可以用于滑动钻进。钻进时钻井液驱动特制螺杆钻具输出扭矩和转速,通过特制螺杆输出主轴驱动冲击发生机构下凸轮体及输出轴总成和钻头同步转动,同时依靠冲击发生机构上、下凸轮体的啮合驱动工具外壳及上部钻具产生轴向往复运动,实现钻头高速旋转条件下的冲击破岩(见图 3)。

上行,上凸轮则驱动冲击发生机构外壳体、特制螺杆钻具及与螺杆上部相连接的钻具同步上行;到达上止点后,在钻压的作用下,上凸轮与特制螺杆钻具及与螺杆上部相连接的钻具将下行对钻头产生轴向冲击;如此往复,实现钻头高转速下的高频旋冲钻进,提高破岩效率及钻进速度。为了提高冲击寿命,需避免凸轮组啮合齿面受到轴向冲击,因此将工具的冲击面设计在特制螺杆传动轴主轴与冲击发生机构输出轴的连接花键轴肩处,为此需合理选择、优化花键联接长度,使输出轴与螺杆传动轴的花键轴向滑动距离  $L$  小于凸轮啮合面的螺旋升程  $S$ 。当工具脱离井底循环时上、下凸轮体不再啮合,停止冲击,以延长工具的冲击寿命;工具在冲击作用失效后(上、下凸轮体啮合齿磨损),可相当于常规螺杆钻具继续使用。

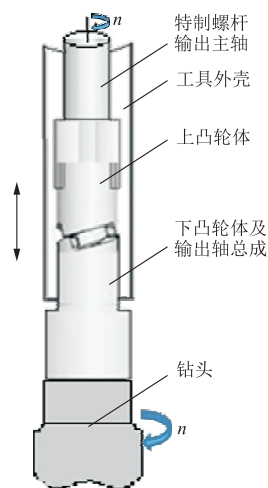


图 3 旋冲螺杆钻具工作原理示意

Fig.3 Working principle of the rotary-percussive PDM

如图 4 所示,钻进过程中,假定输出轴开始转动时下凸轮与上凸轮齿面啮合,下凸轮将驱动上凸轮

由于该工具为纯机械装置组成,在对钻头产生冲击的同时,还可以驱动井底钻具产生轴向良性振动,且对 MWD/LWD 没有影响。应用于大摩阻定向井段滑动钻进时,工具产生的轴向振动将钻具与井眼之间的静摩擦转变为动摩擦<sup>[8-10]</sup>,降低钻具摩阻,既可以有效传递钻压,保护钻具及钻头,又可以在大斜度井或水平井中替代水力振荡器+导向马达钻具组合<sup>[11-12]</sup>,提高定向钻进效率。

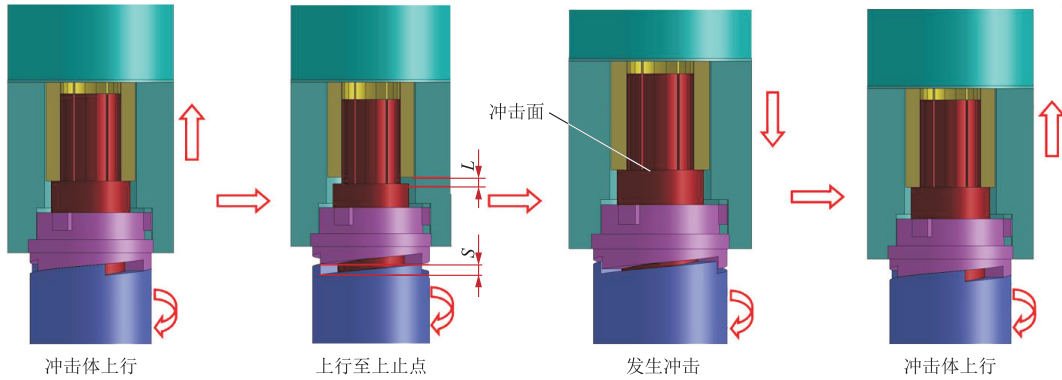


图4 旋冲螺杆钻具冲击过程

Fig.4 Impact process of the rotary-percussive PDM

## 2 工具的冲击性能分析

工具冲击原理表明,其冲击功和冲击力的大小与钻压正相关,钻压愈大,冲击功和冲击力越大。现场可以根据实际工况选择不同参数的螺杆马达、钻进参数,以适应不同钻头、不同地层的破岩需要。

通过理论计算分析,当旋冲螺杆钻具上部钻具长度超过 300 m 时,钻柱长度对冲击功的影响可以忽略,凸轮机构推动钻柱上移所需要的推力基本等于钻压值,工具冲击功  $W$  的值也基本等于钻压与冲程的乘积,即:

$$W = Tgh$$

式中: $W$ ——冲击功, J;  $T$ ——钻压, N;  $h$ ——冲程, m。

实际钻井中,可以通过调整钻压随时改变冲击

功的大小,可以实现旋冲钻井及时根据地层岩性的变化调整冲击功大小。

基于冲击破岩理论研究成果,对于  $\varnothing 215.9$  mm 井眼,中硬地层冲击破岩的冲击功一般为 300~450 J。本工具冲程为 10 mm,按实际钻压一般取值 40~60 kN,此时工具冲击功  $W$  为 400~600 J,可以满足中硬地层冲击破岩需要。

为了评价 PDC 钻头与旋冲螺杆钻具之间匹配的可靠性,在模拟试验井测量了旋冲螺杆钻具工作时对钻头的冲击力数值。图 5 是旋冲螺杆钻具在钻压 50 kN、某一排量条件下的冲击力数据采集曲线,可以看出旋冲螺杆钻具的冲击力曲线为正弦曲线,亦即在实钻中钻头承受的是按正弦曲线周期性变化的钻压,这种周期性变化的钻压对于减少钻头周向粘滑振动、保护钻头是有益的<sup>[13]</sup>。

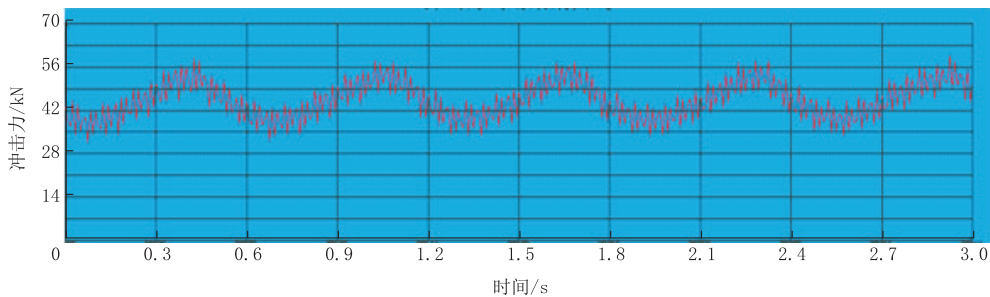


图5 冲击力采集曲线

Fig.5 Sampling curve of impact forces

图 6 是排量为 7、10 L/s 下最大冲击力与钻压的关系曲线图,可以看出旋冲螺杆钻具的最大冲击力与钻压成线性关系,钻压越大冲击力越大,但与排量关系不明显,且由图 5 和图 6 可看出最大冲击力比钻压高出 15~20 kN。为了保护 PDC 复合片,建议旋冲螺杆钻具匹配 PDC 钻头钻进时钻压适当降

低。

工具的冲击频率与马达转速成正比,马达转一圈工具会产生 3 次轴向冲击,因此工具冲击频率=马达转速 $\times 3/60$ 。由于工具马达具有硬特性,即马达转速在负载不超过滞动扭矩的情况下,受负载影响不大,随着负载的增加,转速下降很小<sup>[14-15]</sup>。因

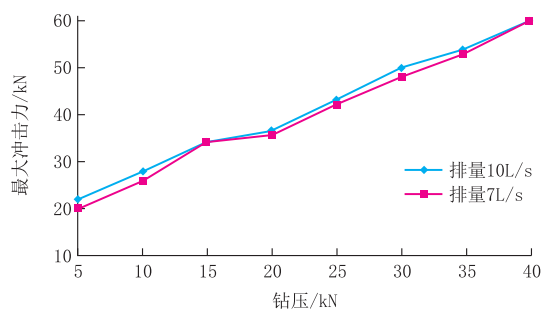


图 6 不同排量下最大冲击力与钻压的关系曲线

Fig.6 Relationship curves of maximum impact force vs WOB at different displacement volumes

此,同一排量下,随着钻压的增加,冲击频率基本不变;随着排量的增加,马达转速增加<sup>[16]</sup>,冲击频率也增加。

### 3 现场试验

使用旋冲螺杆钻具钻井时,马达驱动冲击发生机构产生冲击运动,需要消耗一定的输出扭矩(低于 $1000 \text{ N} \cdot \text{m}$ ),与同规格的螺杆钻具相比,在钻井液性能、钻压、排量等参数相同的情况下,泵压增加值一般不超过 $0.5 \text{ MPa}$ 。由于使用旋冲螺杆钻具会增加对钻头的冲击力,同时可改善钻具组合的钻压传递,因此,建议钻压值比常规螺杆钻具钻井钻压值小;旋冲螺杆钻具对钻头、排量和钻井液性能的要求与常规螺杆钻具相同。在对原理样机室内试验验证的基础上,研制出旋冲螺杆钻具工程样机,先后在临盘油田 2 口井进行了试验应用,分别验证了工具安全性、工作可靠性及适用性,显示了其在直井和定向井中良好的提速效果和降摩阻效果,试验取得了圆满成功。

#### 3.1 临 969 井试验

表 1 临 969 井旋冲螺杆钻具试验井段与邻井同井段钻速对比

Table 1 ROP comparison for the same sections of Well Lin969 drilled with the rotary-percussive PDM and the adjacent well

井号	钻井方式	钻进井段/m	地层	进尺/m	钻时/h	平均钻速/( $\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$ )	提速效果/%
临 969	PDC+旋冲螺杆钻具	596~2218	明化镇组、馆陶组	1622	46.7	34.73	+22.1
临 45-斜 230	PDC+螺杆钻具	398~2008	陶组、东营组	1610	56.6	28.45	

#### 3.2 盘 40-斜 511 井试验

盘 40-斜 511 井是胜利油田一口二开定向井,该井二开初始井深 301 m,设计造斜点 1673.31 m,定向段为 1673.31~2273.67 m,井斜角 $48.92^\circ$ 。本井二开即使用一根 $1.5^\circ$ 旋冲螺杆钻具钻进,钻具组合为 $\text{O}215.9 \text{ mm}$  PDC 钻头+ $\text{O}178 \text{ mm}$  旋冲螺

杆钻具(弯角 $1.5^\circ$ ) + 411X4A10(回压凡尔) + 4A11X410(座键) +  $\text{O}178 \text{ mm}$  无磁钻铤 $\times 1$ 根 +  $\text{O}214 \text{ mm}$  扶正器 +  $\text{O}178 \text{ mm}$  钻铤 $\times 9$ 根 + 411X4A10 +  $\text{O}165 \text{ mm}$  钻铤 $\times 6$ 根 + 4A11X410 +  $\text{O}127 \text{ mm}$  钻杆 + 方钻杆,钻压 30~50 kN,转盘转速 80 r/min。

本次试验钻进井段为 596~2546 m,地层为明化镇组、馆陶组、东营组。在试验初期,钻台上可以观察到钻具产生明显的纵向振动,且随着时间推移,井深越来越深,这种纵向振动越来越小;钻进至井深 1800 m 左右,由于井深太深,传导至井口的振动衰减越来越大,且凸轮的磨损也使工具振幅逐渐减小,井口钻柱纵向振动现象逐渐消失。钻至井深 2546 m,考虑到下部地层倾角大,当前钻具组合控制井斜难度越来越大,决定终止试验,起钻。本趟钻工具井下工作时间 103 h,其中纯钻时 65 h,循环时间 38 h,总进尺 1950 m,平均机械钻速 30 m/h。

由于本区块目前主要以斜井为主,直井段井深约 2000 m,为分析本工具提速效果,与邻井临 45-斜 230 井的二开上部同井段进行了机械钻速对比分析,对比情况见表 1。由表 1 可见,临 969 井采用旋冲螺杆钻具钻井与邻井临 45-斜 230 井同比提高 22.1%。尽管试验井段地层可钻性较好,提速潜力小,但使用本工具钻进后仍然显示出了冲击破岩的良好提速效果,机械钻速提速达到 20% 以上。

钻具(弯角 $1.5^\circ$ ) + 411X4A10(回压凡尔) + 4A11X410(座键) +  $\text{O}165 \text{ mm}$  无磁钻铤 $\times 1$ 根 + 4A11X410 +  $\text{O}127 \text{ mm}$  加重钻杆 $\times 24$ 根 +  $\text{O}127 \text{ mm}$  钻杆 + 方钻杆,钻进井段 301~3043 m,最大井斜 $49.2^\circ$ ,钻压 30~60 kN,转盘转速 50~60 r/min。

本井使用旋冲螺杆钻具累计钻进总进尺 2742

m, 累计进尺工作时间 155 h, 其中纯钻时 106 h, 平均机械钻速 25.87 m, 与本区块邻井盘 40-斜 412

井二开定向复合钻进井段同比提高 25.4%, 对比情况见表 2。

表 2 盘 40-斜 511 井旋冲螺杆钻具试验井段与邻井同井段钻速对比

Table 2 ROP comparison for the same sections of Well Pan40-X511 drilled with the rotary-percussive PDM and the adjacent well

井号	钻井方式	钻进井段/m	地层	进尺/m	钻时/h	平均钻速/(m·h <sup>-1</sup> )	提速效果/%
盘 40-斜 511	PDC+1.5°旋冲螺杆钻具	301~3043	明化镇组、馆陶组	2742	106	25.87	+25.4
临 45-斜 230	PDC+1.5°螺杆	302~2819	沙三段、沙四段	2517	122	20.63	

本井在试验中还显示出良好的降摩阻效果, 试验井段定向滑动钻进较本区块同类型定向井不仅钻进速度快, 而且工具面稳定, 有效消除或减轻了钻具托压现象, 大幅提高了定向效率。为了更合理地评价使用旋冲螺杆钻具复合钻进和定向钻进提速效

果, 对比分析了本井与邻井盘 40-斜 511 井工况条件基本相同的 2200 m 以深稳斜井段钻速, 对比情况见表 3。由表 3 可以看出, 本井应用旋冲螺杆钻具复合钻进较邻井盘 40-斜 511 井复合钻进钻速同比提高 41.8%, 滑动钻进钻速同比提高 51.1%。

表 3 盘 40-斜 511 井与盘 40-斜 412 井下部稳斜段钻速对比

Table 3 ROP comparison for the lower hold-sections of directional wells Pan40-X511 and Pan40-X412

井号	钻井方式	钻进井段/m	工况	进尺/m	钻时/h	平均钻速/(m·h <sup>-1</sup> )	提速效果/%
盘 40-斜 511	PDC+1.5°旋冲螺杆钻具	2200~3043	复合	806	29.72	27.11	+41.8
			滑动	26	6.62	3.93	+51.1
盘 40-斜 412	PDC+弯螺杆	2200~2819	复合	535	27.98	19.12	
			滑动	65	25.00	2.60	

#### 4 结论及建议

(1) 旋冲螺杆钻具可以实现双驱复合钻进条件下的新型冲击破岩方式, 具有螺杆复合钻进和高频冲击等双重功能, 结构简单、技术优势明显。

(2) 旋冲螺杆钻具动力输出特性参数与同型号马达的螺杆钻具基本相当, 冲击力与钻压正相关, 冲击频率与马达转速成正比关系, 整体性能满足现场复合、定向钻进工况要求。

(3) 现场试验显示旋冲螺杆钻具具有较好的提速效果, 复合钻进机械钻速同比提高了 22.1%~41.8%, 滑动定向机械钻速同比提高了 50%以上, 对加快油田勘探开发速度、降低钻井成本有积极的意义。

(4) 旋冲螺杆钻具应用于定向井施工, 可以降低钻具摩阻, 有效消除或缓解钻具托压现象, 提高定向施工效率, 大大拓宽了其应用范围, 具有良好的应用前景。

#### 参考文献(References):

[1] 李国华, 鲍洪志, 陶兴华. 旋冲钻井参数对破岩效率的影响研究[J]. 石油钻探技术, 2004, 32(2): 4-7.  
LI Guohua, BAO Hongzhi, TAO Xinghua. Effects of drilling conditions on crushing rock while rotary percussion drilling

[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2004, 32(2): 4-7.  
[2] 陶兴华. 液动射流式冲击器工作数学模型的建立[J]. 石油钻探技术, 2005, 33(1): 44-47.  
TAO Xinghua. A mathematic model of hydraulic percussion tool[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2005, 33(1): 44-47.  
[3] 索忠伟, 王甲昌, 张海平, 等. 旋冲钻井在塔河工区超深井段的应用[J]. 石油钻采工艺, 2013, 35(4): 45-46.  
SUO Zhongwei, WANG Jiachang, ZHANG Haiping, et al. Application of rotary percussion drilling on the super deep section in Tahe Field[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2013, 35(4): 45-46.  
[4] 王建艳. 液动旋冲工具在徐深 1-平 3 井中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2015, 42(4): 16-20.  
WANG Jianyan. Application of hydraulic rotary tool in well of Xushen1-Ping 3[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2015, 42(4): 16-20.  
[5] 张璠, 张金成, 王甲昌. AG-Itator 水力振荡器及其在我国的试验应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2015, 42(7): 54-57.  
ZHANG Cui, ZHANG Jincheng, WANG Jiachang. Experimental application of AG-Itator hydraulic oscillator in China[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2015, 42(7): 54-57.  
[6] 梁奇敏, 周芷仪, 吴秋来, 等. 浅谈螺杆钻具的选择[J]. 石油机械, 2017, 45(2): 28-31.  
LIANG Qimin, ZHOU Zhiyi, WU Qiulai, et al. Discussion on the selection of PDM[J]. China Petroleum Machinery, 2017, 45(2): 28-31.  
[7] 曹阳, 狄勤丰, 朱卫平, 等. 高效导向螺杆钻具的研究与应用[J]. 钻采工艺, 2011, 34(3): 67-70.  
CAO Yang, DI Qinfeng, ZHU Weiping, et al. Research and

- application of effective steering PDM[J]. *Drilling & Production Technology*, 2011, 34(3):67-70.
- [8] 冯强,陈世春,王建龙,等.振动减摩阻工具振动参数及安放位置研究[J].*石油钻探技术*,2018,46(4):78-83.  
FENG Qiang, CHEN Shichun, WANG Jianlong, et al. Research on vibration parameters and determining the position of a vibration friction reducing tool[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2018, 46(4):78-83.
- [9] 王建龙,刘学松,于志强,等.机械方式缓解定向托压技术原理与应用[J].*石油化工应用*,2017,36(10):1-4.  
WANG Jianlong, LIU Xuesong, YU Zhiqiang, et al. Principle and application of mechanical modification of backing pressure[J]. *Petrochemical Industry Application*, 2017, 36(10):1-4.
- [10] 王先洲,蒋明,邓增库,等.苏 76-1-20H 井钻井技术[J].*石油钻采工艺*,2013,35(2):26-30.  
WANG Xianzhou, JIANG Ming, DENG Zengku, et al. Drilling technology for Well Su76-1-20H[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2013, 35(2):26-30.
- [11] 杨决算,陈绍云,韩福彬,等.定向井钻井中水力振荡器安放位置优化设计方法[J].*长江大学学报(自科版)*,2018,15(19):48-52.  
YANG Juesuan, CHEN Shaoyun, HAN Fubin, et al. The optimized design of a hydro-oscillator placement in directional wells[J]. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)*, 2018, 15(19):48-52.
- [12] 孙庆春,郭宝林,赵利锋.水力振荡器降低摩擦阻力影响的分析[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2015,42(12):69-71,75.  
SUN Qingchun, GUO Baolin, ZHAO Lifeng. Analysis on the influence of frictional resistance reduction by hydraulic oscillator[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2015, 42(12):69-71,75.
- [13] 马广军,王甲昌,张海平.螺杆驱动旋冲钻井工具设计及试验研究[J].*石油钻探技术*,2016,44(3):50-55.  
MA Guangjun, WANG Jiachang, ZHANG Haiping. The design and experimental study of pdm driven rotary percussion drilling tool[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2016, 44(3):50-55.
- [14] 苏义脑.螺杆钻具的工作特性[J].*石油钻采工艺*,1998,20(6):11-15.  
SU Yinao. Performance of screw drill tools[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 1998, 20(6):11-15.
- [15] 于连江,陈国良.螺杆钻具特性分析[J].*石油机械*,1995,23(8):86-90.  
YU Lianjiang, CHEN Guoliang. Characteristic analysis of screwdrills[J]. *China Petroleum Machinery*, 1995, 23(8):86-90.
- [16] 苏义脑.导向钻具选型与总体设计的原则和方法[J].*石油钻采工艺*,1999,21(3):86-90.  
SU Yinao. The principle and method for selection and master design of guide drill tool[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 1999, 21(3):86-90.

(编辑 韩丽丽)

**(上接第 43 页)**

- [11] 宋询成,李同同,管志川,等.一种涡轮扭转冲击发生器:201320838873.0[P]. 2014-05-28.  
SONG Xuncheng, LI Tongtong, GUAN Zhichuan, et al. One kind of turbine torsional impact generator: 201320838873.0[P]. 2014-05-28.
- [12] 刘升旗,周加银,高光亮,等.一种钻井水压扭转冲击装置:201310108104.X[P]. 2013-09-11.  
LIU Shengqi, ZHOU Jiayin, GAO Guangliang, et al. The drilling water pressure torsion impact device: 201310108104.X[P]. 2013-09-11.
- [13] 耿云鹏,李丹丹,樊艳芳. TorkBuster 扭力冲击器+PDC 钻头泥包问题分析及对策[J].*石油天然气学报*,2014,36(8):154-158,9.  
GENG Yunpeng, LI Dandan, FAN Yanfang. Cause analysis and balling prevention of TorkBuster drilling tools[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2014, 36(8):154-158,9.
- [14] 许京国,尤军,陶瑞东.扭力冲击器在玉门油田鸭西 102 井的应用[J].*钻采工艺*,2013,36(5):81-83,121,15-16.  
XU Jingguo, YOU Jun, TAO Ruidong. Application of torkbuster in Well Yaxi102 of Yumen Oilfield[J]. *Drilling & Production Technology*, 2013, 36(5):81-83,121,15-16.
- [15] 齐列锋,冯进,董斌,等.回转式扭力冲击器结构设计及碰撞分析[J].*机械工程师*,2016(4):75-77.  
QI Liefeng, FENG Jin, DONG Bin, et al. Structural design and impact analysis of the rotary torsional impactor[J]. *Mechanical Engineer*, 2016(4):75-77.
- [16] 杨镇榜,朱忠喜,林瀚.扭力冲击器在新疆地区的应用研究[J].*长江大学学报(自科版)*,2017,14(15):43-45,93.  
YANG Zhenbang, ZHU Zhongxi, LIN Han. Application of torque impactor in Xinjiang Area[J]. *Journal of Yangtze University(Natural Science Edition)*, 2017, 14(15):43-45,93.

(编辑 韩丽丽)