

# 万米科学钻探关键机具优化措施研究

尹浩<sup>1,2</sup>, 梁健<sup>1,2</sup>, 李宽<sup>1,2</sup>, 吴纪修<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北廊坊 065000; 2. 自然资源部定向钻井工程技术创新中心, 河北廊坊 065000)

**摘要:** 科学钻探是获取地下实物资料、认知地下结构与验证重要地质理论的有效技术手段, 井下关键机具是保证钻探工程顺利实施的重要基础保障, 而万米科学钻探实施过程中的井下高温、高压、长周期、大规格参数的工况与工艺要求对机具的持续稳定性提出了严峻的挑战。本文针对万米钻探工况需求, 分析了钻杆柱、井下动力钻具、提速增效钻具等关键机具的结构特点和失效原因, 提出了优化钻杆接头结构、设计全金属齿轮马达钻具、改进水力振荡器及射吸式扭力冲击器阀控机构、优选材质及配套表面强化技术等相应优化措施, 为后续深地探测工程的实施提供技术储备。

**关键词:** 科学钻探; 万米工况; 关键机具; 钻杆接头; 全金属齿轮马达钻具; 全金属水力振荡器; 射吸式扭力冲击器; 优化措施; 深地探测

中图分类号: P634; TE24 文献标识码: A 文章编号: 2096-9686(2023)04-0016-09

## Research on optimization measures of key instrument for myriametric scientific drilling

YIN Hao<sup>1,2</sup>, LIANG Jian<sup>1,2</sup>, LI Kuan<sup>1,2</sup>, WU Jixiu<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China;

2. Directional Drilling Technology Innovation Center, Ministry of Natural Resources, Langfang Hebei 065000, China)

**Abstract:** Scientific drilling is an important technical means for obtaining underground physical data, analyzing underground structures, and verifying important geological theories. The key underground instrument is an important basic guarantee for ensuring the smooth implementation of drilling projects. However, during the myriametric scientific drilling process, the requirements of underground working conditions and craftwork such as high temperature, high pressure, long drilling period, and large specification parameters seriously challenge the working performance of underground instrument. To the end, this paper analyses the structural characteristics and failure reasons of key underground instrument such as drill string, downhole mud motor, and auxiliary synergistic tools under the myriametric drilling working condition, and proposes corresponding measures on optimizing the structure of drill pipe joint, designing metal gear drill, improving the structure of hydraulic oscillator and injection-type torque thruster, and materials selection and setting up surface strengthening techniques, which can provide technical reserves for earth interior detection.

**Key words:** scientific drilling; myriametric working condition; key instrument; drill pipe joint; metal gear drill; metal hydraulic oscillator; injection-type torque thruster; optimization measures; deep earth exploration

## 0 引言

作为“伸入地壳的望远镜”, 科学钻探在解决

“向地球深部进军”战略科技问题上发挥着不可替代的作用, 其发展可大幅提升地球深部探测技术水

收稿日期: 2023-06-13; 修回日期: 2023-07-02 DOI: 10.12143/j.ztgc.2023.04.003

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“深部钻探装备磨损冲蚀空蚀失效规律及其表面强化机理研究”(编号: 52175196); 中国地质调查局地调项目“深海钻探工程关键技术支撑”(编号: DD20221721)、“青海共和盆地贵德—达连海地区干热岩资源调查评价”(编号: DD20211337)

第一作者: 尹浩, 男, 回族, 1987年生, 工程师, 硕士, 地质工程专业, 从事钻探工艺和钻具研发工作, 河北省廊坊市金光道77号, 837275137@qq.com。

引用格式: 尹浩, 梁健, 李宽, 等. 万米科学钻探关键机具优化措施研究[J]. 钻探工程, 2023, 50(4): 16-24.

YIN Hao, LIANG Jian, LI Kuan, et al. Research on optimization measures of key instrument for myriametric scientific drilling[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(4): 16-24.

平、深化对地球深部结构与过程的认知程度,为验证重要科学理论提供更可靠的地质资料,具有重要的科学意义与工程价值。科学钻探作为获取地球内部信息的最直接和最重要技术手段,在国外多个深部探测工程中得到了普遍应用<sup>[1]</sup>。

中国大陆科学深钻将以9000~15000 m特深井为目标<sup>[2]</sup>。作为一项庞大而复杂的系统性工程,在钻入地下上千米深度的过程中,将遇到复杂而多变的地层,井下温度高、地层压力大、实施周期长、规程参数大,限制了常规井下机具在千米钻探工程的直接应用,因此亟需根据千米钻探工况及工艺需求研发超高温、超高压环境下的钻井技术装备,促使我国深地探测能力和水平实现进一步提升。

千米科学钻探因井深和井径需求而带来的工程技术特点是管柱自重、循环压耗大、碎岩扭矩大、井下温度高、地层强度高、钻压控制难,即“三大、两高、一难”。由此导致井下关键机具在高温、高压、高应力作用下快速失效,这对关键机具的服役性能极端的提升提出了更严峻的挑战<sup>[3]</sup>。

在千米钻探工况下,超长长径比的管柱在自身拉压弯扭、内外压差、地层磨阻等载荷作用下的强度与密封性有所降低;用于螺杆钻具和涡轮钻具实现液能转化的内部执行机构无法同时满足耐高温与大扭矩输出的需求;水力振荡器和扭力冲击器内部阀控结构的耐温性与耐冲蚀性需要进一步改进<sup>[4-5]</sup>。

为了突破大深度复杂地层恶劣的外部载荷、地温梯度、环境介质对千米以深钻探关键机具使用性能的限制,本研究通过开展常规钻探机具的结构特点和在千米科学钻探工况下的失效分析,提出关键机具改进的关键技术问题,在此基础上给出了机具在新结构、新材料、新技术上的优化措施,为千米科学钻探机具改进提供思路。

## 1 关键机具的结构特点

目前科学钻探实施过程中用到的各种井下机具包括钻杆柱、井下动力钻具、提速增效钻具等,各自的结构特点决定了其无法很好地适用于千米钻探工程。

### 1.1 钻杆柱

通过接头螺纹副将若干钻杆首尾相连组成钻杆柱,为了保证整体强度与密封性能,对组成钻杆柱的每根钻杆杆体及接头连接部位均有严格的承载要

求。钻杆接头采用旋转台肩式螺纹结构,作为变截面异构体,其几何特征复杂<sup>[6]</sup>(见图1),导致应力分布集中,成为钻杆柱的薄弱环节。随着两根钻杆上扣拧紧,接头台肩面与螺纹牙之间由于结构的约束产生一对相互作用力,并随着接头旋紧的程度增加而变大,这个力的存在保证了台肩面的紧密贴合及螺纹牙之间的预紧力,对实现接头的密封性能和在外力作用下降低螺纹受到的交变应力幅值是必不可少的。

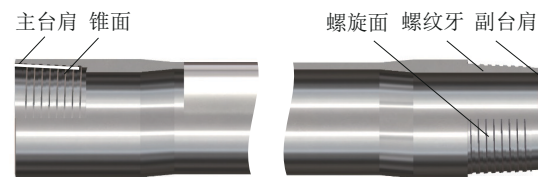


图1 钻杆接头螺纹副结构示意图

Fig.1 Diagram of thread pair structure of drill pipe joint

### 1.2 井下动力钻具

井下动力钻具主要包括螺杆钻具和涡轮钻具。

#### 1.2.1 螺杆钻具

螺杆钻具是一种容积式井下动力钻具,由旁通阀、螺杆马达、万向轴、传动轴等组成,其中螺杆马达由转子、定子及附着在定子内表面的橡胶衬套组成<sup>[7]</sup>(见图2),螺杆钻具的转子与定子相互啮合,两者间形成若干螺旋密封腔,以完成能量转换,耐温能力不超过180℃。转子与定子的运动副表面质量对螺杆钻具整体工作至关重要<sup>[8]</sup>。



图2 螺杆钻具结构示意图

Fig.2 Structure diagram of screw drill

在服役过程中,由于定转子表面损伤导致的螺杆马达密封腔泄流成为螺杆钻具失效的主要原因之一。

#### 1.2.2 涡轮钻具

涡轮钻具是一种轴流式井下动力钻具,由涡轮节、支承节、万向弹性轴等组成(见图3),其中涡轮节由壳体、转子叶片、定子叶片和涡轮轴构成,支承

节由径向轴承、推力轴承等组成,涡轮钻具的定子装在固定不转的外壳内,转子装在可旋转的涡轮轴上,通过液力传动,将高压流体的水力能转换成驱动钻头的机械能,耐高温能力可达到 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。轴承的寿命及叶片的完整性对涡轮钻具工作性能至关重要<sup>[9]</sup>。



图3 涡轮钻具结构示意图

Fig.3 Structure diagram of turbo drill

在服役过程中,由于叶片冲蚀损坏或轴承磨损导致输出扭矩不足或转动遇卡成为涡轮钻具失效的主要原因之一<sup>[10]</sup>。

### 1.3 提速增效钻具

随着钻井深度的增加,复杂的地层与增大的地应力导致钻杆柱托压和钻头刻取地层难度越来越大,对于缓解钻杆柱磨阻,水力振荡器具有显著的效果;对于提高钻头碎岩效率,扭力冲击器能起到事半功倍的效果。

#### 1.3.1 水力振荡器

通过在钻柱合适位置安放振荡器,将液压能转换为振荡器中关键部件的高频振动,从而带动钻柱产生振动,可以有效地降低钻柱与井壁之间的摩擦,提高有效作用在井底钻压的稳定性,从而提高钻井效率。常规水力振荡器由动力短节、盘阀总成、碟簧、密封件等组成(见图4),通过螺杆定转子转阀实现阀的周期开关,从而实现上流道压力的周期变换,驱动弹簧单元振动<sup>[11]</sup>。

由于橡胶件的存在,限制了常规水力振荡器应用于高温井的使用性能和服役寿命;由于螺杆定转子结构的偏心结构,增加了振荡器的横向振动,而加剧了钻柱的整体振动。针对上述缺陷,金属、无偏心的水力振荡器的研制对深井高温工况下的钻探效率提升具有重要工程意义。

#### 1.3.2 扭力冲击器

随着井深增加,岩石的塑性强度和硬度增大,导

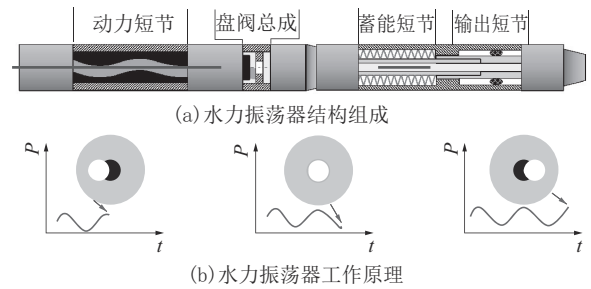


图4 常规水力振荡器示意

Fig.4 Diagram of conventional hydraulic oscillator

致钻头的钻进效率降低和粘滑振动问题严重。作为提高碎岩效率和削弱粘滑振动的有效工具,扭力冲击器的选配对缩短钻井周期及缓解钻头井下工具的失效具有重要作用。

常规扭力冲击器的基本组成包括配流器、动力冲击组件、驱动短节及输出接头,工作原理是通过配流器将钻井液一部分送入置有启动锤的启动导向腔,一部分通过喷嘴产生压降后送入驱动短节,在压力降作用下驱动短节内的两个液动锤沿相反方向周向转动而产生冲击,并通过输出接头传递给钻头<sup>[12-13]</sup>。

在服役过程中,阀控机构受到高频冲击和液流冲蚀而带来的疲劳失效和密封失效是影响扭力冲击器服役寿命和工作性能的主要因素。

## 2 万米工况机具失效分析

万米科学钻探施工过程中,井下温度超过 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,管柱自重不低于 $220\text{ t}$ ,循环压耗超过 $40\text{ MPa}$ ,碎岩扭矩达到 $10000\text{ N}\cdot\text{m}$ 以上<sup>[6]</sup>,同时地层致密坚硬(部分地层强度超过 $5000\text{ MPa}$ )<sup>[14]</sup>,井眼轨迹冗长多变,这将导致钻压控制难、进尺速度慢、钻井周期长,井下关键机具在高温、高压、高应力作用下快速失效。

### 2.1 大载荷加剧机具内部承载变化

对于钻杆柱,在轴向重载的作用下,钻杆柱接头螺纹副的密封台肩面之间的压力将减小甚至降为零导致脱开,接头短路而无法维持正常钻井液循环;另外,螺纹副各圈螺纹因应力分布不均而产生塑性变形,降低连接强度。对于井下动力钻具,地层难破碎、井径大、钻压不稳定,导致钻头碎岩产生的反扭值大且不稳定,螺杆钻具无法在额定范围内稳定输出扭矩,同时在钻具内部产生大而交变的压力降,加

速橡胶老化及密封失效;而涡轮钻具叶轮转速降低或卡死,叶片受到过高的扭矩和液流冲击而加速疲劳失效。

## 2.2 恶劣环境因素

高温环境导致机具内部组件材质发生物理性质改变,如钻杆内部晶格变化及内部裂纹发育而降低结构强度、螺杆钻具定子内的丁晴橡胶件膨胀变性失去原有材料力学性能而使容积马达密封失效。大规模参数钻井的大循环流量钻井液对机具流道产生冲蚀,如对钻杆柱内外表面、涡轮钻具叶片、阀控机构等产生强液力冲刷,地层侵入的硫化氢、二氧化碳和空气混入的游离氧加剧了这一作用。

## 2.3 运动副磨损

钻探过程中,钻杆柱与井壁之间、螺杆钻具的定子与转子之间、涡轮钻具的轴承内部、提速增效钻具的阀控机构之间存在多对运动副,相互之间不可避免的产生滚动或滑动,这对构件表面产生一定的磨损,而大载荷与恶劣环境的作用又加剧了磨损程度的发展。

通过上述分析,机具失效是力学、化学、高温、高压联合作用的结果,外部载荷、周围环境和内部结构是影响机具失效的关键因素。因此,从内部运动副的组件结构优化设计与材质优选着手,缓解大载荷与恶劣环境对井下机具的影响,是研制万米科学钻探关键机具的突破口。

## 3 机具优化措施

基于上述机具结构特点和失效分析,通过优化钻杆接头结构、设计全金属齿轮马达钻具、改进水力振荡器及射吸式扭力冲击器阀控机构、优选材质及配套表面强化技术,开展提高关键机具工作性能的措施探讨,进而为优化设计适应更恶劣工况的万米科学钻探用井下机具提供研究思路。

### 3.1 钻杆接头优化措施

#### 3.1.1 分离台肩结构<sup>[15]</sup>

随着轴向载荷的增加,台肩面压紧力减小,在轴向载荷增大到某一个值时,台肩面压紧力降到临界值而导致接头密封失效。为了解决这一问题,提出一种分离台肩式钻杆接头的方案(见图5),通过将台肩面进行分离并采用低于主体弹性模量的材料,实现更大回弹量,提高钻杆接头承受轴向载荷而不密封失效的上限,进而增强钻杆接头在万米深井中

的适用性。

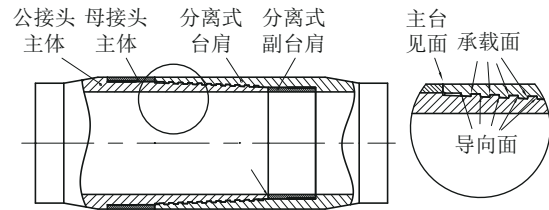


图5 分离台肩式钻杆接头结构

Fig.5 Structure diagram of drill pipe joint with assembled shoulder

分离台肩式钻杆接头由4部分组成,包括公接头主体、母接头主体、分离式主台肩、分离式副台肩,其中公接头主体与分离式主台肩螺纹连接固定,母接头主体与分离式副台肩螺纹连接固定,公接头与母接头通过螺纹副实现连接。

公接头主体与分离式主台肩的外径相同,母接头主体与分离式副台肩的内径相同,连接固定后的分离式主台肩与公接头主体形成一个整体为公接头,连接固定后的分离式副台肩与母接头主体形成一个整体为母接头,连接固定后的分离式主台肩右端面形成公接头的主台肩面,连接固定后的分离式副台肩左端面形成母接头的副台肩面。分离式主台肩的无螺纹部分的端面到公接头副台肩面的轴向距离小于相同规格的常规双台肩接头的主台肩面与副台肩面距离,差值为0~0.2 mm,分离式副台肩的无螺纹部分的端面到母接头主台肩面的轴向距离小于相同规格的常规双台肩接头的主台肩面与副台肩面距离,差值为0~0.2 mm,即分离式台肩在原常规双台肩接头结构分离出来的尺寸基础上沿轴向增材伸长0~0.2 mm。

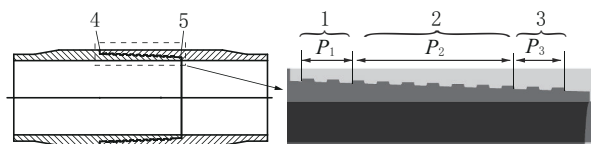
公接头主体与母接头主体材质为钢,分离式主台肩与分离式副台肩的材质可选钢材质或弹性模量低于钢的轻质合金,优选钛合金。从而,通过台肩面的弹性模量降低及台肩面与钻杆接头主体分离,削弱台肩面刚度,使得在相同上扣扭矩下的台肩面具有更大的轴向变形量,从而可以承受更大的轴向载荷而台肩面不脱开。

#### 3.1.2 分段式钻杆接头螺纹副结构<sup>[16]</sup>

对于双台肩螺纹(主、副台肩均接触),各圈螺纹受力分布呈“两头大、中间小”的状态,对于单台肩螺纹(只有主台肩接触),各圈螺纹受力分布呈“一头

大、一头小”的状态,这种现象加剧了螺纹受力复杂程度和工作过程中的疲劳失效,导致部分区域提前失效,降低了钻杆接头整体强度。针对这一问题,提出一种分段式钻杆接头螺纹副,各段不等螺距螺纹部分连续连接,选取适当差值螺距而使各段螺纹之间产生预紧力,明显降低两端螺纹承载面的接触应力而提高中段螺纹的承载面接触应力,缓解螺纹副的应力集中问题,其推广应用具有一定的工程价值。

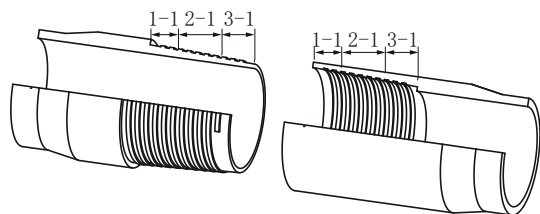
本措施的实现主要是选取3段不同螺距 $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ ( $P_2 > P_3 > P_1$ )的分布设计而实现的。分段式钻杆接头螺纹副由3段连续的螺纹组成,包括左部螺纹1、中部螺纹2、右部螺纹3、主台肩4、副台肩5(见图6和图7),其中1、2、3为从左向右依次连续连接的空间螺旋曲面,主台肩为公接头左部螺纹1-1左端面与母接头左部螺纹1-2左端面组成,副台肩为公接头右部螺纹3-1右端面与母接头右部螺纹3-2右端面组成,公接头与母接头通过螺纹副上扣拧紧时,主台肩与副台肩为接触压紧状态。



1—左部螺纹;2—中部螺纹;3—右部螺纹;4—主台肩;  
5—副台肩

图6 分段式绳索取心钻杆接头螺纹副结构

Fig.6 Structure diagram of wireline coring rod with segmented thread pair



1-1—公接头左部螺纹;2-1—公接头中部螺纹;  
3-1—公接头右部螺纹;1-2—母接头左部螺纹;  
2-2—母接头中部螺纹;3-2—母接头右部螺纹

图7 分段式螺纹副四分之一剖切示意

Fig.7 Structure diagram of segmented thread pair with quarter section

基本原理:公接头左部螺纹1-1、母接头左部螺纹1-2的螺距为 $P_1$ ,公接头中部螺纹2-1、母接头中

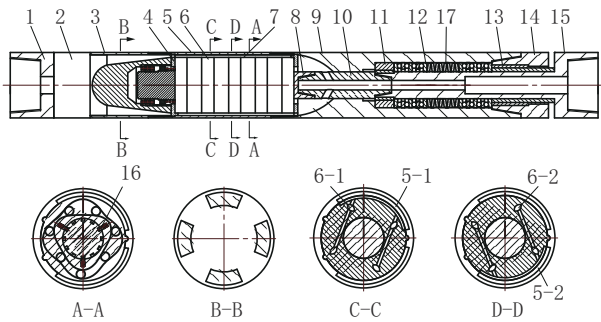
部螺纹2-2的螺距为 $P_2$ ,公接头右部螺纹3-1、母接头右部螺纹3-2的螺距为 $P_3$ ,且 $P_2 > P_3 > P_1$ ,从而控制内外螺纹牙进入工作承载的顺序。在公接头与母接头通过螺纹副旋紧的过程中,先将公、母接头手动拧紧,此时主台肩面与承载面均处于接触状态,副台肩面具有0.1~0.2 mm间隙,然后母接头固定而对应公接头旋入角度 $\theta$ ,1-1产生轴向位移 $S_1$ ,2-1产生轴向位移 $S_2$ ,3-1产生轴向位移 $S_3$ ,且 $S_1 = P_1\theta/(2\pi)$ , $S_2 = P_2\theta/(2\pi)$ , $S_3 = P_3\theta/(2\pi)$ ,根据 $P_2 > P_3 > P_1$ ,所以 $S_2 > S_3 > S_1$ ,即2-1相对于1-1、3-1产生向右的位移,这将使1-1受到向右的拉力和3-1受到向右的推力,从而减少旋紧后的1-1与3-1的承载面受到的接触压力,同时增加2-1承载面的接触压力,实现螺纹承载面应力集中的缓解。

### 3.2 动力钻具优化措施<sup>[17]</sup>

为了解决孔底动力钻具在高温、高压、大载荷下失效的难题,提出一种全金属大扭矩非圆齿轮井下动力钻具(见图8),通过合理的配流机构设计与传动机构设计,将全金属非圆行星齿轮节合理排列组合,实现过流通道并联设计,在解决耐高温问题的同时和满足钻具外径匹配并径的限制下,通过创新配流方案实现多节齿轮节并联,达到大排量设计;相较于螺杆钻具的偏心转子机构和橡胶定子,可大大降低横向振动和提高耐高温性;相较于涡轮钻具的高转速、低扭矩,可实现低转速、大扭矩输出,作为优选井下动力钻具,为进一步推进深部地壳探测工程计划提供技术支持。

上接头1连接旁通阀2,旁通阀2连接上导流体3,上导流体3通过螺纹连接配流筒5,上导流体3与配流筒5之间压紧放置堵流片4,配流盘6与齿轮节7依次间隔轴向布置在配流筒5内,配流盘与齿轮节端面为金属密封,通过配流盘6、齿轮节7外表面的三个圆弧棱与配流筒内表面的圆弧槽配合实现周向定位;配流筒5下端与下导流体9螺纹连接并压紧堵流片4,实现配流盘6与齿轮节7轴向定位;过流轴10上端与传动轴8螺纹连接,下端与下接头15连接,在过流轴10上设置有通孔,联通配流筒5流出的钻井液到下接头内孔;下接头15通过滑动轴承11、13与推力轴承12,实现稳定旋转与承载钻头轴向反钻压。

为实现多节非圆行星齿轮节并联,通过上导流体3、堵流片4、配流筒5、配流盘6实现配流,并通过



1—上接头;2—旁通阀;3—上导流体;4—堵流片;5—配流筒;5-1—配流筒入流通道;5-2—配流筒出流通道;6—配流盘;6-1—配流盘入流口;6-2—配流盘出口;7—非圆行星齿轮节;8—传动轴;9—下导流体;10—过流轴;11—上滑动轴承;12—推力轴承;13—下滑动轴承;14—固定接头;15—下接头;16—伸缩块;17—减震碟簧

图8 全金属大扭矩非圆行星齿轮井下动力钻具结构  
Fig.8 Structure diagram of metal and hi-torque downhole motor with non-circular planetary gear

堵流片4、下导流体9、过流轴10保证钻井液循环流动,持续推动各齿轮节转动,并通过传动轴8、过流轴10、下接头15将扭矩传递给钻头,实现碎岩钻进。

通过堵流片4将配流筒5上端的出流通道5-2封堵,并将配流筒5下端的入流通道5-1封堵,保证钻井液经过上导流体3从入流通道5-1流入,流入5-1的钻井液通过各配流盘6的入流口进入齿轮节7的高压腔,并推动行星轮7-2带动太阳轮7-3转动;随着行星轮转动,低压腔中的钻井液从配流盘出口6-2流出到出流通道5-2,并从配流筒下端的出流通道流出到下导流体,流经过流轴10到下接头15孔内,从钻头水眼经过环空返出井口。

本并联结构的优点如下:

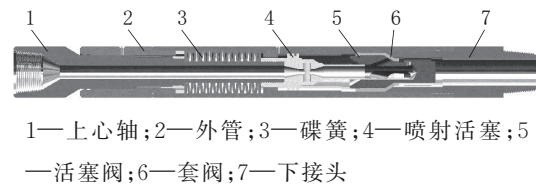
(1)分流之前的高压腔与分流流出后汇总的低压腔之间密封路径长,且配流筒与马达外齿圈、配流盘为静密封,密封结构更可靠、不易失效和泄露,实现在细长空间的钻具内的多个全金属非圆行星齿轮液压马达的可靠、稳定的并联输出,保证了动力钻具的高容积率。

(2)独特结构的配流盘依次、有序的与非圆行星齿轮节排布在配流筒内而实现符合非圆齿轮马达结构特点的配流,结构紧凑,即同规格钻具输出定量扭矩时,轴向长度更短,刚度更好,服役更可靠。

### 3.3 提速增效器具优化措施

#### 3.3.1 全金属水力振荡器<sup>[18]</sup>

针对现有水力振荡器包含螺杆定转子转阀而限制其耐温性和产生横向振动的问题,设计了一种全金属、无偏心转动的水力振荡器(见图9),为实现水力振荡器在万米工况下的良好应用提供了解决方案。



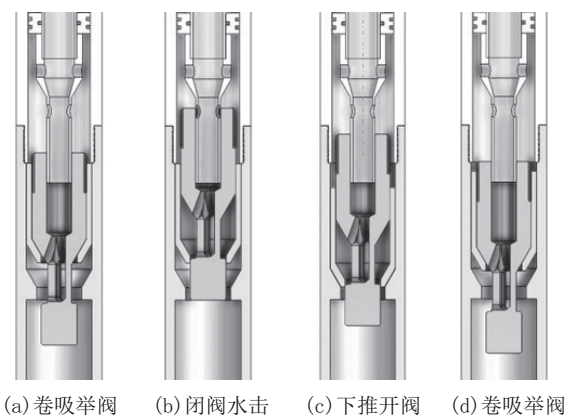
1—上心轴;2—外管;3—碟簧;4—喷射活塞;5—活塞阀;6—套阀;7—下接头

图9 全金属水力振荡器结构示意图  
Fig.9 Structure diagram of metal hydraulic oscillator

设计的全金属水力振荡器由上心轴1、外管2、碟簧3、喷射活塞4、活塞阀5、套阀6及下接头7组成,利用卷吸作用的工作原理和射吸式阀控机构作用,实现水路的高频开启、闭合。

阀控机构工作过程如下:在开泵后,活塞阀与套阀一同向上运动,直到如图10(a)所示位置,随后,活塞阀继续上行到如图10(b)所示位置,上部水道封死,在上腔内产生高压,随后活塞阀与套阀一起下行到如图10(c)所示位置,随后,活塞阀继续下行,且活塞阀与套阀受到向上压差作用力,活塞阀开始减速,套阀开始向上运动,直到两者锥面接触开始一起向上运动,开始下一个周期循环,如图10(d)所示。

基于上述方案,开展了 $\varnothing 172$  mm规格全金属水



(a) 卷吸举阀 (b) 闭阀水击 (c) 下推开阀 (d) 卷吸举阀

图10 阀控机构开/关阀原理示意

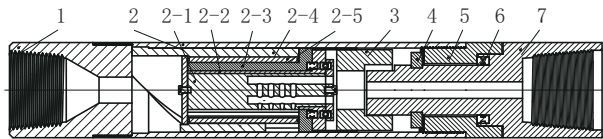
Fig.10 Principle diagram of valve control mechanism

力振荡器研制,并通过台架测试分析,验证了其工作性能稳定性,可实现16~30 L/s流量下11~21 Hz的振荡频率和10~65 kN的激振力,单件质量<240 kg,总长度<1.85 m,优于常规振荡器性能参数。

相对于常规水力振荡器,改进的水力振荡器由于全部采用金属组件,大大提升了耐高温能力和大规程参数工况下的服役能力,其推广应用具有一定的工程价值。

### 3.3.2 射吸式扭力冲击器<sup>[19]</sup>

国内在扭力冲击相关工具研究领域取得了一定的进展,但距离突破国外技术封锁、走向成熟还有较大差距。本文中扭力冲击器方案是基于卷吸作用原理提出的(见图11),为相关研发人员形成解决方案和较为成熟的技术提供借鉴。



1—上接头;2—周向阀控机构;2-1—封隔心轴;  
2-2—快阀;2-3—慢阀;2-4—导流管;2-5—封  
隔管;3—砧子;4—卡瓦;5—中接头;6—推力轴  
承;7—下接头

图11 射吸式扭力冲击器结构示意图

Fig.11 Structure diagram of injection-type torque thruster

射吸式扭力冲击器包括上接头1、周向阀控机构2、砧子3、卡瓦4、中接头5、推力轴承6和下接头7。钻井液从上接头1流入,驱动周向阀控机构2产生周期性流道开关及阀件转动,砧子通过外表面周向圆周阵列均布的螺钉与周向阀控机构2的慢阀2-3固定,周向阀控机构2的外管与中接头5螺纹连接,卡瓦为两半片式结构,推力轴承6套于下接头7上并分别与中接头5和下接头7面接触,中接头花键5-1与下接头花键7-2插接配合实现传扭,砧子打击面对下接头打击面产生周期性冲击,并传递给钻头。

周向阀控机构的工作原理如下:砧子3随着慢阀2-3周期性转动而转动,并在周向阀控机构运动过程中的推阀阶段末期、流道打开时,砧子打击面撞击下接头打击面产生冲击,钻井液从上接头1流入周向阀控机构2,再从砧子3内通孔、下接头7内通孔流出。从左到右沿着轴线方向看,慢阀3右端面

与阀芯键槽对称轴的夹角为 $\theta_1$ ,快阀2右端面与阀芯键槽对称轴的夹角为 $\theta_2$ , $\theta_1$ 的变化范围为 $30^\circ \sim 120^\circ$ , $\theta_2$ 的变化范围为 $20^\circ \sim 100^\circ$ ,下接头打击面与阀芯键槽对称轴的夹角为 $30^\circ$ 。

阀控机构工作过程见图12。

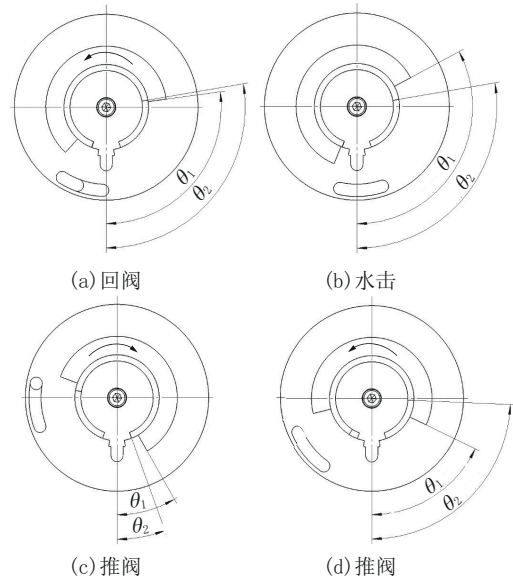


图12 扭力冲击器阀控机构工作过程示意

Fig.12 Working process of valve control mechanism on torque thruster

(a)回阀:快阀、慢阀逆时针转动, $\theta_1$ 由 $30^\circ$ 增大到 $120^\circ$ , $\theta_2$ 由 $20^\circ$ 增大到 $100^\circ$ ;

(b)水击: $\theta_1$ 变为 $120^\circ$ , $\theta_2$ 变为 $100^\circ$ ,弧形通道完全错开而外流道关闭并产生水击,腔室产生高压;

(c)推阀:快阀、慢阀顺时针转动, $\theta_1$ 由 $120^\circ$ 减小到 $30^\circ$ , $\theta_2$ 由 $100^\circ$ 减小到 $20^\circ$ ; $\theta_1$ 减小到 $30^\circ$ 时,砧子打击面撞击下接头打击面产生冲击;

(d)回阀:快阀、慢阀均逆时针转动, $\theta_1$ 由 $30^\circ$ 增大到 $120^\circ$ , $\theta_2$ 由 $20^\circ$ 增大到 $100^\circ$ ,进入下一个循环。

本文提出的射吸式扭力冲击器创新性地将卷吸作用下的阀控机构由轴向差动改为周向差动,缓解了钻井液对阀体的直接冲蚀、降低了阀体闭阀后到开阀所需排量、提高了周向阀控机构的开关频率,这为本扭力冲击器方案适配多种地层/钻头和延长服役寿命奠定了基础。

### 3.4 材料及表面技术优化措施

除了在结构设计优化方面开展相关工作,在常规井下关键机具或改进后的井下关键机具的基础

上,对易损零部件选配合适的材质并对运动副进行表面处理,是提高机具工作性能的有效措施,包括铝合金钻杆外表面超声波冷锻与阳极氧化处理<sup>[20]</sup>、螺杆钻具定子采用钛合金制造、涡轮钻具叶片表面实施超音速火焰喷涂或冷喷涂金属涂层、提速增效钻具阀控机构的高频运动副组件选用钛合金材质或采用激光熔覆/渗氮等化学热处理工艺以提高表面的耐磨抗蚀性能<sup>[21-22]</sup>。

#### 4 结语

通过钻探关键机具的结构特点与万米工况下的失效分析,开展了相关改进措施研究,对提高机具的工作性能,使其更安全可靠、持续稳定的应用于万米科学钻探,具有一定的科学意义与工程价值。

(1)重载工况下,常规钻杆柱接头密封失效和螺纹副强度降低将影响万米科学钻探工程的安全顺利实施,开展分离台肩式钻杆接头和分段式螺纹副结构优化研究,可提高钻杆柱服役于万米深钻的可靠性。

(2)耐高温和大扭矩输出的全金属井下动力钻具更适用于万米科学钻探,为此提出了非圆齿轮井下动力钻具,通过多级齿轮节并联的配流结构与动力传输结构设计,为耐高温大扭矩井下动力钻具的研发提供思路。

(3)为应对万米科学钻探的大深度和大井径带来的钻探效率问题,增速提效工具的研发与应用必不可少,对此给出了全金属水力振荡器与射吸式扭力冲击器的结构设计,为适用于万米科学钻探的增速提效工具的研制提供了解决方案。

(4)上述关键机具的结构优化措施结合其材质优选及表面处理技术,将有效缓解万米科学钻探的管柱自重大、循环压耗大、碎岩扭矩大、井下温度高、地层强度高、钻压控制难等“三大、两高、一难”问题,为深部科学钻探的高质量发展提供技术支撑。

#### 参考文献(References):

- [1] 王达,张伟,贾军. 特深科学钻探的关键问题[J]. 科学通报, 2018,63(26):2698-2706.  
WANG Da, ZHANG Wei, JIA Jun. The key problems of ultra-deep drilling engineering[J]. Chinese Science Bulletin, 2018,63(26):2698-2706.
- [2] 邹长春,王成善,彭诚,等. 中国大陆科学深钻发展的若干思考与建议[J]. 现代地质,2023,37(1):1-14.

ZOU Changchun, WANG Chengshan, PENG Cheng, et al. Development of the Chinese continental scientific deep drilling: Perspectives and suggestions[J]. Geoscience, 2023,37(1):1-14.

- [3] YAO Genshun, WU Xianzhu, SUN Zandong, et al. Status and prospects of exploration and exploitation key technologies of the deep petroleum resources in on shore China[J]. Journal of Natural Gas Geoscience, 2018,3(1):25-35.
- [4] 胡芳婷,刘洪涛,赵密锋,等. 复杂超深井钻工具失效原因分析及预防措施探讨[C]. 国际石油石化技术会议论文集,2022:337-348.  
HU Fangting, LIU Hongtao, ZHAO Mifeng, et al. Failure analysis and preventive measures of drilling tools for complex ultra deep wells[C]. International Petroleum and Petrochemical Technology Conference, 2022:337-348.
- [5] 杨明清,杨一鹏,卞玮,等. 俄罗斯超深井钻井进展及技术进步[J]. 石油钻采工艺,2021,43(1):15-20.  
YANG Mingqing, YANG Yipeng, BIAN Wei, et al. Drilling progress and technological improvement of ultradeep wells in Russia[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2021,43(1):15-20.
- [6] 尹浩,梁健,孙建华,等. 万米科学钻探钻杆柱的优化配置发展趋势[J]. 科技导报,2023,41(6):108-120.  
YIN Hao, LIANG Jian, SUN Jianhua, et al. Development trend of drill string optimal configuration in myriametre scientific drilling[J]. Science & Technology Review, 2023,41(6):108-120.
- [7] 杨森,赵映辉. 螺杆钻具失效情况统计分析[J]. 钻采工艺, 2010,33(3):81-82,144.  
YANG Sen, ZHAO Yinghui. Statistical analysis of the screw drill failure[J]. Drilling & Production Technology, 2010,33(3):81-82,144.
- [8] 李明谦,赵红超. 螺杆钻具马达定子失效机理及措施分析[J]. 石油机械,2008(10):8-11,44.  
LI Mingqian, ZHAO Hongchao. Failure mechanism and measure analysis of motor stator of screw drill[J]. China Petroleum Machinery, 2008(10):8-11,44.
- [9] 管锋,万锋,吴永胜,等. 涡轮钻具研究现状[J]. 石油机械, 2021,49(10):1-7.  
GUAN Feng, WAN Feng, WU Yongsheng, et al. Research status of turbodrill[J]. China Petroleum Machinery, 2021,49(10):1-7.
- [10] 冯定,刘统亮,王健刚,等. 国外涡轮钻具技术新进展[J]. 石油机械,2020,48(11):1-9.  
FENG Ding, LIU Tongliang, WANG Jiangang, et al. Advances in foreign turbodrill technology[J]. China Petroleum Machinery, 2020,48(11):1-9.
- [11] 孔令箭,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.



- [12] 韩飞,罗淮东,张全立,等.扭力冲击器设计与仿真分析[J].石油机械,2019,47(3):19-23.  
HAN Fei, LUO Huaidong, ZHANG Quanli, et al. Design and simulation analysis of torque thruster[J]. China Petroleum Machinery, 2019,47(3):19-23.
- [13] 周祥林,张金成,张东清.TorkBuster扭力冲击器在元坝地区的试验应用[J].钻采工艺,2012,35(2):15-17,7.  
ZHOU Xianglin, ZHANG Jincheng, ZHANG Dongqing. Experimental application of TorkBuster torsional impactor in Yuanba Region[J]. Drilling & Production Technology, 2012,35(2):15-17,7.
- [14] 李瑞营,王峰,陈绍云,等.大庆深层钻井提速技术[J].石油钻探技术,2015,43(1):38-43.  
LI Ruiying, WANG Feng, CHEN Shaoyun, et al. ROP improvement in deep formations in the Daqing Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015,43(1):38-43.
- [15] 中国地质科学院勘探技术研究所.一种分离台肩式钻杆接头:202310270077X[P].2023-03-20.  
Institute of Exploration Techniques, CAGS. Drill pipe joint with assembled shoulder: 202310270077X[P]. 2023-03-20.
- [16] 中国地质科学院勘探技术研究所.一种钻杆和适用于钻杆接头的连接机构:2023102283625[P].2023-03-10.  
Institute of Exploration Techniques, CAGS. Drill pipe and connecting mechanism for drill pipe joint: 2023102283625 [P]. 2023-03-10.
- [17] 中国地质科学院勘探技术研究所.一种全金属大扭矩非行星齿轮井下动力钻具:2020108466999[P]. 2022-11-22.  
Institute of Exploration Techniques, CAGS. Metal and hi-torque downhole motor with non-circular planetary gear: 2020108466999 [P]. 2020-08-21.
- [18] 中国地质科学院勘探技术研究所.一种石油钻井用水力振荡器:2022113705772[P]. 2022-11-04.  
Institute of Exploration Techniques, CAGS. Hydraulic oscillators for oil drilling: 2022113705772[P]. 2022-11-04.
- [19] 中国地质科学院勘探技术研究所.一种高频扭力冲击器:中国:2022113714112[P]. 2022-11-04.  
Institute of Exploration Techniques, CAGS. High frequency torque thruster: 2022113714112[P]. 2022-11-04.
- [20] 梁健,顾艳红,岳文,等.科学超深井钻探铝合金钻杆的腐蚀失效分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(2):60-66.  
LIANG Jian, GU Yanhong, YUE Wen, et al. Analysis on corrosion failure of aluminum alloy drill pipe for scientific ultra-deep well drilling [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunelling), 2017,44(2):60-66.
- [21] 蔡振,张建鑫,郭少璞.油田超深井钻井关键技术研究与分析[J].石化技术,2023,30(4):101-103.  
CAI Zhen, ZHANG Jianxin, Guo Shaopu. Research and analysis on key technologies of ultra deep well drilling in oilfield[J]. Petrochemical Industry Technology, 2023,30(4):101-103.
- [22] 邹德永,于鹏,杨光.硬地层破岩工具最新进展[J].石油机械,2013,41(6):1-5.  
ZOU Deyong, YU Peng, YANG Guang. The latest development of hard rock breaking tools[J]. China Petroleum Machinery, 2013,41(6):1-5.

(编辑 王文)