

# 全金属螺杆钻具研究现状与关键技术

刘璐<sup>1,2</sup>, 王瑜<sup>1,2</sup>, 王镇全<sup>3</sup>, 路家兴<sup>1,2</sup>, 张凯<sup>1,2</sup>, 刘宝林<sup>1,2</sup>

(1.中国地质大学(北京)工程技术学院,北京 100083; 2.自然资源部深部地质钻探技术重点实验室,北京 100083;  
3.中国石油大学(北京)石油工程学院,北京 102249)

**摘要:**螺杆钻具作为一种容积式动力钻具,具有良好的输出硬特性,是当前应用最广泛的井下动力钻具之一。螺杆钻具的耐温性是其研究的热点所在,可扩大其应用范围和延长工作寿命,在深部高温钻探领域,具有良好的发展前景。本文在阐明螺杆钻具的基本原理和特性基础上,调研分析了常规螺杆钻具的发展现状,重点调研分析了美国全金属螺杆钻具的研发现状与国内全金属螺杆钻具的发展,提出了全金属螺杆钻具的关键技术,为国内开展这项前沿钻具技术的研发提供参考。

**关键词:**深部钻探;高温高压;全金属螺杆钻具;容积马达

**中图分类号:**P634.4<sup>+</sup>2 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2020)04-0024-07

## Research status and key technology of metal-to-metal screw PDM drills

LIU Lu<sup>1,2</sup>, WANG Yu<sup>1,2</sup>, WANG Zhenquan<sup>3</sup>, LU Jiaying<sup>1,2</sup>, ZHANG Kai<sup>1,2</sup>, LIU Baolin<sup>1,2</sup>

(1. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;  
2. Key Laboratory of Deep Geodrilling Technology, Ministry of Natural Resources, Beijing 100083, China;  
3. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

**Abstract:** As a volumetric power drill, the screw PDM has good output hard characteristic and is one of the most widely used downhole power tools. The heat resistance of the screw drill is the research hot spot, improvement of which can expand its application scope and extend its working life. It has a good development prospect in the field of deep high temperature drilling. This paper introduces the basic principle and characteristics of screw drilling tools, and investigates the current development of conventional screw drill tools with the focus on the development status quo of all metal screw drilling tools and the development of domestic metal screw drilling tools. The development trend and key technology of the all metal screw drilling tool are put forward to provide reference for domestic research and development of the leading edge tool.

**Key words:** deep drilling; high temperature and high pressure; metal screw drill tool; positive displacement motor

## 0 引言

螺杆钻具作为一种容积式动力钻具,具有良好的输出硬特性,是当前应用最广泛的井下动力钻具之一<sup>[1]</sup>。随着钻井深度和井下温度的不断提高,特别是在地质超深钻探、高温地热井等高温场合,常规螺杆钻具的橡胶定子的耐温局限性,无法满足钻井需求,螺杆钻具的耐温性是其研究的热点所在。全金属螺杆钻具由于采用金属定子,使其具有良好的

耐温性,国内外对这项新型钻具均进行了科技攻关,目前已经在钻井现场得到了成功应用。

本文重点调研分析了全金属螺杆钻具的研究现状,包括美国贝克休斯全金属螺杆钻具和国内全金属螺杆钻具的发展,并分别从水力结构设计、定子制造技术、表面强化技术以及金刚石轴承技术等 4 个方面分析了全金属螺杆钻具制造的关键技术,对国内全金属螺杆钻具的研发、制造和测试均具有重要

收稿日期:2020-02-11 DOI:10.12143/j.tkgc.2020.04.004

基金项目:国家重点研发计划项目“5000 米智能地质钻探技术装备研发及应用示范”课题四“小口径高效系列钻具研究”(编号:2018YFC0603404);中央高校基本业务费优秀教师基金项目“全金属动力钻具水力部件旋转振动模型研究”(编号:292018093)

作者简介:刘璐,女,汉族,1997 年生,在读硕士研究生,地质工程专业,主要从事井下钻具方面的研究工作,北京市海淀区学院路 29 号,1349843852@qq.com。

引用格式:刘璐,王瑜,王镇全,等.全金属螺杆钻具研究现状与关键技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):24-30.

LIU Lu, WANG Yu, WANG Zhenquan, et al. Research status and key technology of metal-to-metal screw PDM drills[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(4): 24-30.

意义。

## 1 螺杆钻具概述

### 1.1 工作原理

螺杆钻具,又称定排量马达,是一种容积式的井

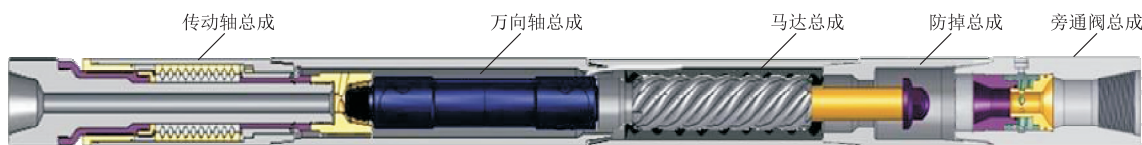


图 1 螺杆钻具结构<sup>[3]</sup>

Fig.1 Structure of the screw drill

钻井作业时,高压钻井液通过钻杆注入螺杆钻具,流经旁通阀总成后,进入螺杆钻具马达总成,螺杆钻具的马达是由定子与转子组成,定子和转子的螺旋表面相互啮合形成空间共轭曲面,共轭曲面上形成多个封闭且可容纳高压钻井液流通的密封腔,其高压腔和低压腔不断转换,从而利用钻井液水力静压能驱动转子在定子内作行星运动,产生转速和扭矩,最终,由底端的万向轴总成和传动轴总成将螺杆马达产生的扭矩和转速不间断地传递给钻头,从而驱动底部钻头完成破岩过程<sup>[3]</sup>。

### 1.2 工作特性

螺杆钻具的马达属于容积式马达,图 2 为其理论工作特性曲线,其理论转速仅跟排量  $Q$  有关,而与钻压无关,若固定流量,则理论转速基本不变;理论扭矩与入口和出口的压力差  $\Delta P$  呈正线性相关。而涡轮钻具虽然是全金属结构,但其为非容积式钻具,转速高、扭矩小,过载能力差、钻头阻力矩过大会造成“制动”。相比于涡轮钻具,螺杆钻具具有硬机械特性,输出扭矩和转速成反比,且可方便地面通过泵压观测底部钻具状态,十分适合钻井,如能实现全

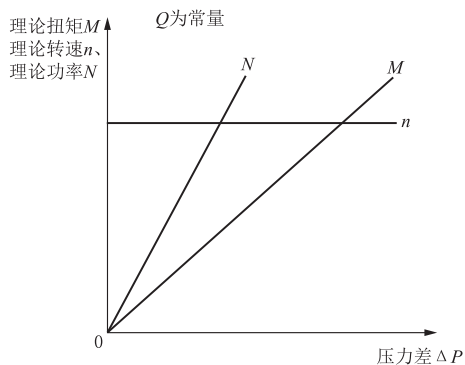


图 2 螺杆钻具的理论工作特性曲线

Fig.2 Theoretical operating characteristic curve of the screw drill

下动力钻具,简单来说,螺杆钻具就是一种能将高压钻井液的水力能经螺杆马达转换为钻进所需机械能的能量转换装备<sup>[1]</sup>。螺杆钻具如图 1 所示,主要由旁通阀总成、防掉总成、马达总成、万向轴总成以及传动轴总成等五部分组成<sup>[2]</sup>。

金属结构,克服高温应用难题,则具有良好的应用前景。

## 2 螺杆马达耐温技术进展

螺杆马达由定子和转子组成,是螺杆钻具最关键的部件,也是螺杆钻具中对温度最敏感的部件。定子中橡胶衬套的耐温性和寿命直接影响螺杆马达的使用寿命,螺杆马达主要是通过对定子部件的优化提高其耐温能力。

### 2.1 结构优化

目前常用的定子结构有常规定子和等壁厚定子,常规螺杆马达的定子如图 3 所示,定子外套是一根等壁厚且内表面平滑的钢管,内壁是一层具有螺旋线且薄厚不均的橡胶衬套,这种橡胶定子受热膨胀变形不均匀且极易老化,使得螺杆钻具的输出效率大大降低<sup>[4]</sup>。之后美国学者研发出了等壁厚螺杆马达如图 4 所示,这种等壁厚定子衬套变形相比常规定子衬套,受内压作用的影响小,具有很好的抗压能力和密封性能,且随着压力增加,定子内轮廓线各点法向位移增加较均匀,从而保证了衬套橡胶层的线型精度,因此,采用等壁厚定子衬套可以提高螺杆钻具的钻进效率和使用寿命<sup>[5-6]</sup>。

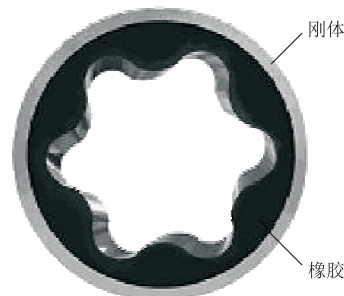


图 3 常规马达定子<sup>[4]</sup>

Fig.3 Conventional motor stator

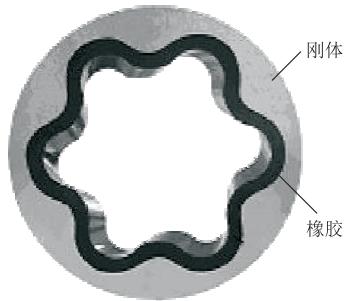
图4 等壁厚定子<sup>[4]</sup>

Fig.4 Even wall stator

## 2.2 材料改性

目前,国外常用的定子橡胶包括氢化丁腈橡胶和羧基丁腈橡胶等,二者具有优异的耐高温性和耐腐蚀性,但成本较高;国内仍以丁腈橡胶为主,而单一的丁腈橡胶并不能持续在高温中工作很长时间,因此需要对橡胶改性,从而使其保持较强的力学性能<sup>[7-8]</sup>。

目前,提高橡胶定子的耐温性一般采用如下方法<sup>[9-10]</sup>:

(1)硫化:包括过氧化物硫化和硫磺硫化,通过硫化来提高分子间交联结构的耐温性能;

(2)加入补强填料:如纳米  $\text{CaCO}_3$ 、纳米  $\text{ZnO}$ 、纳米炭黑等能够阻隔橡胶表面温升的纳米级材料;

(3)添加防老化剂:常采用多种防老化剂同时添加来减缓橡胶在井底的老化;

(4)添加耐热剂:如氧化镁和甲基丙烯酸镁等等;

(5)添加高沸点的增塑剂,防止胶料快速硬化;

(6)引入或接枝上高饱和度的高聚物或者并用其他高饱和性橡胶,提高丁腈分子链的饱和度和键能。

## 2.3 当前耐高温技术局限性

目前,常规定子和等壁厚定子是应用较为广泛的两种定子结构,但二者都存在不耐高温的橡胶结构,因此,需要研发橡胶新配方或者对其进行改性,并根据所钻采的油田成分来选择合适的橡胶配方。同时,还需要对定子的金属外壳与橡胶衬套间的粘接技术进行深度的理论研究和实验测试<sup>[11]</sup>。另外,普通螺杆钻具的定子橡胶即使经过改性处理,也只能在低于  $180\text{ }^\circ\text{C}$  的环境下工作,当井底温度  $>180\text{ }^\circ\text{C}$  时,弹性橡胶不再适用,这就推动了全金属螺杆马达的产生。

## 3 全金属螺杆钻具

针对普通螺杆马达对高温的不适应性,国内外分别对普通螺杆马达进行了再设计,研发了全金属螺杆马达,这种全金属的螺杆马达去除了橡胶部件,利用金属定子和金属转子之间的相互啮合进行钻井工作,具有很好的耐高温性。目前,国内外对于全金属螺杆马达的研发现状如下。

### 3.1 国外全金属螺杆钻具

2014年,美国贝克休斯公司开发了一种能够适应高温  $300\text{ }^\circ\text{C}$  的定向钻井系统,包括钻头、马达和钻井液。其中,马达选用了专门为增强型地热系统(EGS)开发的金属马达,并成功制造出世界上第一台精密加工的全金属螺杆马达,解决了定转子加工精度控制、定转子表面耐磨技术、金属定转子的装配技术等3个主要问题<sup>[12]</sup>。

贝克休斯公司研发的全金属螺杆马达的头数为5/6,样机首先在贝克休斯试验测试中心进行了花岗岩钻进测试,之后又在德国贝克休斯的Celle技术中心进行了100多个小时的性能测试<sup>[12]</sup>,得到的马达输出特性如图5、图6所示。

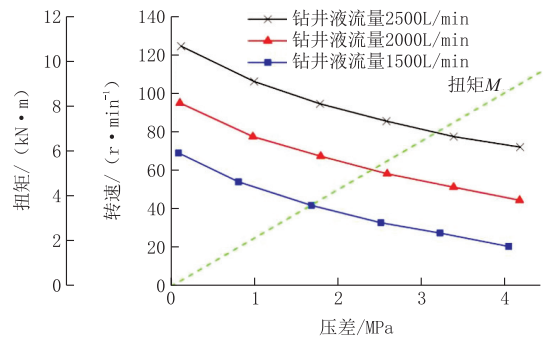
图5 全金属马达输出特性变化曲线<sup>[12]</sup>

Fig.5 Output characteristic curve of the metal-to-metal motor

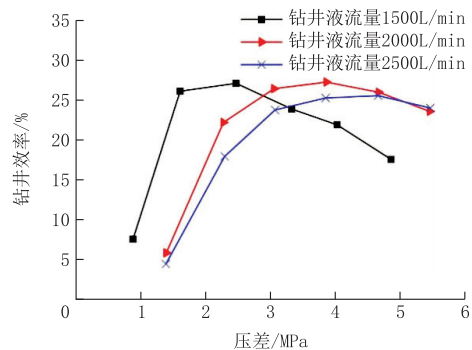
图6 全金属马达工作效率变化曲线<sup>[12]</sup>

Fig.6 Working efficiency curve of the metal-to-metal motor

图5是全金属马达的扭矩与转速在不同压差下



的变化曲线。从图 5 中可以看出:全金属马达随着压差的增加,扭矩基本呈线性增长,趋势与常规螺杆马达基本一致;但转速会随着压差的增大而下降,且马达转速曲线的曲率与常规马达相反,这是因为全金属马达采用的不是过盈配合,而是间隙配合,由于高压钻井液在密封腔内高速流动,导致金属转子和金属定子之间产生磨损,造成钻井液漏失严重。另外,从图 5 中可知,当钻井液流量增大时,马达转速也会相应提高<sup>[12]</sup>。

图 6 是全金属马达的效率与压差之间的关系曲线。由图可知,当压差增加到一定程度时,工作效率存在一个最大峰值,之后又慢慢下降,这一点与普通螺杆马达相似;但可以发现,这种马达的整体工作效率比常规螺杆马达低了 25%~30%。同时,全金属螺杆马达的容积效率并不随流量的增大而提高,如果想提高钻进效率,需要在马达间隙配合、流量、扭矩性能以及马达可靠性之间找寻最佳配合方案<sup>[12]</sup>。

研制的全金属螺杆钻具在 Baker 测试区进行了井下试验,深度约 1500 m,如图 7、图 8 所示。首次测试钻进 16 h,进尺 57 m,第二次现场测试对水力部件强化层厚度进行调整之后,耗时 11 h,进尺 55 m,且此次转子和定子表面涂层并未出现磨损失效迹象<sup>[12]</sup>。尽管如此,全金属螺杆马达仍需在工作效率提高、使用寿命提升以及相关成本降低等方面进行改进<sup>[13-16]</sup>。



图 7 Baker 测试区<sup>[15]</sup>

Fig.7 Baker testing area

### 3.2 国内全金属螺杆钻具

西南石油大学张茂等人<sup>[17]</sup>2006 年申请了全金属定子的发明专利,这种定子由金属材料制成,并且其内外壁均有螺旋槽,外壁螺旋槽主要供钻井液返回,提高了螺杆钻具工作时的散热性能,保证了马达的型线和密封性能;之后刘永峰等人<sup>[18]</sup>通过移动并改进旁通阀总成阀体上弹簧挡圈的位置,提高了旁



图 8 全金属螺杆钻具<sup>[16]</sup>

Fig.8 Metal-to-metal screw drill tool

通阀阀体外螺纹的抗扭强度,从而提供了一种耐高温、长寿命的全金属螺杆钻具;张小俊等人<sup>[19]</sup>利用内啮合齿轮将金属转子下端与导流套总成相连,将转子的偏心运动转化为导流套的定轴运动,从而缓解了定子和转子之间的相互挤压以及马达内部热量聚集的问题;李红等人<sup>[20]</sup>利用液压成形、自蔓延反应等将壳体和金属衬套连接成一整体,发明了一种工艺简单且无需后处理与机械加工的全金属螺杆钻具加工方法,这种方法成本较低且环保,适合大规模生产;祝效华等人<sup>[21]</sup>将金属定子分为多个定子短节,利用短节定子外表面的长键与定子壳体内表面上键槽相连的方法,提供了一种组合型的全金属螺杆定子,这种定子结构简单且加工方便,容易获得较高的精度;易先中等人<sup>[22]</sup>采用定子分块数控加工技术,定子的分块数目依据定子头数而定,分块后的金属体经铣削加工之后,焊接成一体,这种方法可以提高定子的加工精度,而且方便操作、经济实用、应用效果好。

2016 年西安石油大学刘思瀛<sup>[23]</sup>分析了单级全金属螺杆马达的性能参数,设计了马达轮廓线性,利用相关软件建立了不同间隙值下的单级金属螺杆马达的三维实体模型,然后进行了流场仿真分析,初步得到了不同定、转子间隙值以及钻井液粘度对马达压降的影响,最后利用电解加工工艺对全金属螺杆马达定子进行了试样加工(见图 9、图 10),之后又进行了常温增压性能测试研究,但目前尚未见到相关产品投入应用。

中国地质大学(北京)根据螺杆外径、输出扭矩

图9 金属定子<sup>[23]</sup>

Fig.9 Metal stator

图10 金属转子<sup>[23]</sup>

Fig.10 Metal rotor

和压差等要求,设计了转子和定子头数分别为 3/4 和 4/5 的 2 种金属螺杆钻具图纸,其设计基本参数为:外径 95 mm,输出扭矩 $\geq 600$  N·m,适用转速 150~300 r/min,水力部件长度约为同规格常规螺杆钻具的 1.4 倍。

同时,在金属螺杆钻具定子的制造方面,中国地质大学(北京)提出了轴向拼接式制造方法,对于这种等长定子短节的加工,可以选择数控铣床加工或者拉刀铣削的方式,这样在选好定子短节的加工长度后,每次只需设置一个数控加工程序,多次循环加工之后再组装连接便可得到较高精度、特定长度的金属定子<sup>[24-25]</sup>,这种方法克服了电解加工长孔件难以保证直线度的缺陷,但显著降低了水力部件的强度。

金属螺杆钻具定、转子配合间隙是流体设计的关键之一,中国地质大学(北京)所设计的螺杆钻具水力部件,通过对不同间隙的定转子配合开展全尺寸的流固耦合仿真研究,结合加工能力制约,优选出该规格定、转子间最佳间隙值为 0.3~0.4 mm。

## 4 关键技术

### 4.1 水力设计技术

全金属螺杆马达水力设计的目的是尽可能提高容积效率和机械效率,其定、转子间隙的取值是定、转子设计的关键之一。当定、转子之间的间隙选取过大时,将导致钻井液漏失过大,从而影响马达容积效率;而定、转子间隙较小又给加工制造带来难题,同时使得两者之间的机械摩擦加大,机械效率降低,相反降低了其工作效率和寿命。考虑到螺杆钻具的转子受力条件复杂,工作状态多变,需要采用流固耦合仿真技术进行水力设计研究,优选出不同钻井条件下的定、转子配合间隙;同时,定转子型线设计的

时候要特别注意局部曲线的优化,避免运动中发挥“打扣”问题。

### 4.2 定子制造技术

常规螺杆钻具的定子为橡胶制造,定、转子之间为过盈配合,橡胶的弹性对两者之间的配合做了很好的补偿,而全金属螺杆钻具的定子和转子均为金属制造,尤其是定子作为复杂的长内孔曲线,加工制造难度极大。当前定子的加工方法包括电解加工、拉削铣削加工<sup>[26-28]</sup>、精密铸造加工、薄壁滚压加工、分段加工组装、精密锻造方法等,这些方法均有缺陷,笔者的意见是需要综合其中的两种加工工艺进行多次加工成型。

### 4.3 表面强化技术

全金属螺杆钻具工作时定、转子之间产生金属-金属摩擦和冲击,且承受着钻井液高速流动产生的冲蚀作用,使得金属定、转子快速失效,前期美国贝克休斯的全金属螺杆钻具的主要失效形式即为磨损,需要对定、转子的表面进行强化处理,提高其工作寿命。常见的表面强化工艺包括:渗碳、渗氮、激光强化、热喷涂工艺等<sup>[29-30]</sup>。目前,美国主要采用热喷涂的方法进行表面强化,工作寿命约为 220 h,基本满足井下的要求。还需要研究新的表面强化工艺方法,甚至多种工艺组合的表面强化工艺,对定、转子进行强化,提高工作寿命。

### 4.4 长寿命轴承技术

井下动力钻具轴承在井下既受轴向载荷又受径向载荷,导致轴承易磨损失效。早期国外的螺杆钻具轴承系统通常采用推力球轴承和橡胶径向轴承<sup>[31-32]</sup>,在短时间内磨损变形较为严重;金刚石轴承虽耐磨性好、寿命长<sup>[33]</sup>,但其制造工艺,尤其是多个 PCD 复合片平面度的精度还需要提高<sup>[34]</sup>。此外,金刚石轴承在使用过程中启动阻力矩大也是其需要克服的缺点。美国已经研制出了径向一直推复合轴承,这类轴承将承受推力载荷的 PCD 复合片与承受径向载荷的 PCD 复合片装配在一个载体环上,代替之前使用两个载体环来承受两个方向载荷的配置,这样一个单一的轴承单元便可以同时承受径向载荷和轴向载荷,且这类轴承已成功得到了工业应用,这项技术也是未来动力钻具轴承发展的方向之一。

## 5 结论与展望

(1) 国外已经成功研制出全金属螺杆钻具, 并成功进行了井下试验, 目前正处于产业化推广阶段, 证明该型钻具的研制具有可行性。国内对于全金属螺杆钻具的研究, 主要还停留在试制阶段, 已经研制出一些物理样机, 但经过试验, 仍然存在效率低、寿命短、成本高等问题, 还需要进行技术攻关。

(2) 全金属螺杆钻具研制难点主要在于金属定子的制造加工, 这是保证全金属螺杆钻具工作性能的前提, 需要开发出一种成本低、精度高、加工周期短, 适应长螺旋内孔的制造工艺。国内在电解加工螺旋曲线方面具有较好的技术沉淀, 可以考虑以电解加工进行适当改进, 开发全金属定子加工工艺。

(3) 研制全金属动力钻具, 必须在流固耦合水力设计技术、金属部件表面强化技术、长寿命轴承技术等方面进行技术攻关, 需要多学科之间的协同创新研究。同时, 应注重对全金属螺杆钻具的钻探工艺研究, 开发针对不同地层条件的系列钻具, 发挥其最大工作效率。

## 参考文献 (References):

- [1] 苏义脑. 螺杆钻具研究及应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001:1-14.  
SU Yinao. Study and application of screw drill[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001:1-14.
- [2] 谭逢林. 螺杆钻具在油气钻井中的理论分析和应用选型[D]. 成都: 西南石油大学, 2017.  
TAN Fenglin. Downhole motor of theoretical analysis and application in petroleum and natural gas drilling[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.
- [3] 刘德. 基于流固耦合方法分析单头螺杆钻具马达的输出功率特性[D]. 大庆: 东北石油大学, 2019.  
LIU De. Analysis of influence related parameters of single-head screw motor on output power based on fluid-structure coupling[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2019.
- [4] 王鹏飞. 螺杆钻具定子橡胶衬套热老化实验与数值模拟研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2017.  
WANG Pengfei. Thermal aging experiment and numerical simulation of the rubber bushings of screw drilling tool stators[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.
- [5] 张涛. 等壁厚定子螺杆泵节能效果分析[J]. 石油石化节能, 2017, 7(1):21-23.  
ZHANG Tao. The energy saving effort of even wall stator PCP[J]. Energy Conservation in Petroleum & Petrochemical Industry, 2017, 7(1):21-23.
- [6] 祝效华, 石昌帅, 董华, 等. 等壁厚螺杆钻具定子衬套变形规律研究[J]. 石油机械, 2011, 39(12):5-8.  
ZHU Xiaohua, SHI Changshuai, TONG Hua, et al. Research on the deformation law of the stator lining in screw drill with equal wall thickness[J]. China Petroleum Machinery, 2011, 39(12):5-8.
- [7] 许鑫江. 高性能螺杆橡胶研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2017.  
XU Xinjiang. Research on high performance of stator rubber for screw[D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2017.
- [8] 康宏强. 定子橡胶配方优化及其对性能影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.  
KANG Hongqiang. Formula optimization of stator rubber and its influence on performance[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [9] 冯晓萌. 耐高温丁腈橡胶性能的研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2017.  
FENG Xiaomeng. Study on properties of high temperature resistant nitrile rubber[D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2017.
- [10] 高福年. 耐热丁腈胶料的配方设计及应用[J]. 中国橡胶, 2007, 23(10):34-36.  
GAO Funian. The formulation design and application of heat-resisting NBR[J]. China Rubber, 2007, 23(10):34-36.
- [11] 迟博. 螺杆马达定子衬套热力耦合数值分析研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2015.  
CHI Bo. Numerical analysis of the thermally coupled stator bushings of screw motors[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015.
- [12] Kamalesh Chatterjee, Aaron Dick, Harald Grimmer, et al. High Temperature 300°C Directional Drilling System, Including drill bit, steerable motor and drilling fluid, for Enhanced Geothermal Systems[R]. Portland, Oregon (US): Baker Hughes Oilfield Operations Final Scientific Report, 2015:1-33.
- [13] Aaron Dick, Jochen Schnitger, Mike Otto, et al. Progress on a 300°C Directional Drilling System for EGS Well Installation[J]. GRC Transactions, 2013, 37:83-86.
- [14] Aaron Dick, Mike Otto, Kyle Taylor, et al. A 300°C Directional Drilling System for EGS Well Installation[J]. GRC Transactions, 2012, 36:393-398.
- [15] Ari Stefansson, HS Orka, Ralf Duerholt, et al. A 300 Degree Celsius Directional Drilling System[J]. Society of Petroleum Engineers, 2018, 96:1-20.
- [16] Kamalesh Chatterjee, Aaron Dick. High-Temperature, 300°C Directional Drilling System Including Drill Bit, Steerable Motor, and Drilling Fluid[J]. GRC Transactions, 2014, 38:245-248.
- [17] 张茂, 韩传军, 宋晓琴, 等. 一种全金属定子螺杆钻具: 200610021439.8[P]. 2006-07-21.  
ZHANG Mao, HAN Chuanjun, SONG Xiaoqin, et al. The utility model relates to a metallic stator of the screw drill: 200610021439.8[P]. 2006-07-21.
- [18] 刘永峰, 屈文涛, 董赵朋, 等. 一种耐高温长寿命全金属螺杆钻具: 201620738392.6[P]. 2016-07-13.  
LIU Yongfeng, QU Wentao, DONG Zhaopeng, et al. The utility model relates to an all-metal screw drilling tool with long life and high temperature resistance: 201620738392.6[P]. 2016



- 07-13.
- [19] 张小俊,程永,关勤勤.一种全金属螺杆钻具;201510186402[P].2015-04-20.  
ZHANG Xiaojun, CHENG Yong, GUAN Qinqin. The utility model relates to a metallic screw drill; 201510186402[P]. 2015-04-20.
- [20] 李红,刘运荣,任小玲,等.全金属螺杆定子的加工方法;201510182480.2[P].2015-04-17.  
LI Hong, LIU Yunrong, REN Xiaoling, et al. Processing method of metallic screw stator; 201510182480.2[P]. 2015-04-17.
- [21] 祝效华,李佳南,石昌帅.一种组合型全金属螺杆定子;201120377132.8[P].2011-10-09.  
ZHU Xiaohua, LI Jianan, SHI Changshuai. The utility model relates to a assembled metallic screw stator; 201120377132.8[P]. 2011-10-09.
- [22] 易先中,常玮.金属螺杆钻具定子螺旋曲面内腔的分块数控加工方法;201310388588.8[P].2013-08-30.  
YI Xianzhong, CHANG Wei. Numerical control machining method of stator cavity in spiral surface of metal screw drill; 201310388588.8[P]. 2013-08-30.
- [23] 刘思瀛.7LZ172 金属螺杆马达研制[D].西安:西安石油大学,2016.  
LIU Siying. Design and manufacture of 7LZ172 metallic Displacement positive motor[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2016.
- [24] 路家兴,王瑜,王志乔,等.一种装配式螺杆钻具金属定子;201920367038.7[P].2019-03-22.  
LU Jiaying, WANG Yu, WANG Zhiqiao, et al. The utility model relates to an assembled screw drill tool metal stator; 201920367038.7[P]. 2019-03-22.
- [25] 孔令镛,王瑜,路家兴,等.一种装配式螺杆钻具金属定子及其轴向加工装配工艺;201910219930.9[P].2019-03-22.  
KONG Lingrong, WANG Yu, LU Jiaying, et al. The invention relates to an assembly type screw drill tool metal stator and its axial processing and assembly technology; 201910219930.9[P]. 2019-03-22.
- [26] 王贺.螺杆钻具马达定子内螺旋曲面铣削加工技术研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2012.  
WANG He. Research on inner helical surface milling processing technology of screw drilling tool motor stator[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2012.
- [27] 刘希敏,王树强.内螺旋齿面非典型成形铣削方法及应用技术研究[J].现代制造工程,2014(5):81-84.  
LIU Ximin, WANG Shuqiang. Research on atypical form milling of inner spiral gear surface and the application technology[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2014(5):81-84.
- [28] 王树强,乔金梦,刘希敏,等.等壁厚金属定子内螺旋曲面内外高压充模胀形仿真研究[J].锻压技术,2018,43(6):67-70.  
WANG Shuqiang, QIAO Jinmeng, LIU Ximin, et al. Simulation research on internal and external high pressure filling-die bulging inner spiral curved surface of metal stator with equal wall thickness[J]. Forging & Stamping Technology, 2018,43(6):67-70.
- [29] 陈洋洋,刘前程,刘仲玉,等.变速器定子齿轮渗碳、渗氮硬化表面耐磨性研究[J].热加工工艺,2018,47(4):207-211.  
CHEN Yangyang, LIU Qiancheng, LIU Zhongyu, et al. Research on wear resistance of stator gear surface for transmission with carburizing and nitriding[J]. Hot Working Technology, 2018,47(4):207-211.
- [30] 王豫跃,牛强,杨冠军,等.超高速激光熔覆技术绿色制造耐蚀抗磨涂层[J].材料研究与应用,2019,13(3):165-172.  
WANG Yuyue, NIU Qiang, YANG Guanjun, et al. Investigations on corrosion-resistant and wear-resistant coatings-environmental-friendly manufactured by a novel super-high efficient laser cladding[J]. Materials Research and Application, 2019,13(3):165-172.
- [31] 符达良.国外螺杆钻具发展近况[J].石油矿场机械,1985,14(3):37-46.  
FU Daliang. Recent development of screw drill tools abroad [J]. Oil Field Equipment, 1985,14(3):37-46.
- [32] 易先中.现代井下动力钻具发展的四大特征[J].石油机械,1994,22(11):48-52.  
YI Xianzhong. Four characteristics of the advancement in modern downhole power drilling tools[J]. China Petroleum Machinery, 1994,22(11):48-52.
- [33] 王镇全,王克雄,翟应虎,等.新型金刚石孕镶块的研究[J].石油机械,1999,27(10):11-14.  
WANG Zhenquan, WANG Kexiong, ZHAI Yinghu, et al. New diamond impregnated matrix[J]. China Petroleum Machinery, 1999,27(10):11-14.
- [34] 钱程远,王瑜,张凯,等.井下动力钻具轴承发展现状调研[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(2):46-51.  
QIAN Chengyuan, WANG Yu, ZHANG Kai, et al. Research on the development status of bearings for downhole motor[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(2):46-51.

(编辑 韩丽丽)