

# 全金属螺杆马达线型及输出性能分析

高运浩<sup>1,2</sup>, 王 瑜<sup>1,2</sup>, 路家兴<sup>1,2</sup>, 孔令榕<sup>1,2</sup>, 龚 能<sup>1,2</sup>, 王仕豪<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)

**摘要:**随着油气资源开采深度的增加,常规螺杆马达无法解决其组成部件的橡胶衬套高温失效问题,设计全金属螺杆马达具有重要的意义。本文选用 7LZ178 全金属螺杆马达,从其定子、转子端面线型设计与定子、转子间隙配比 2 个方面分析其对于马达的性能输出的影响。从螺杆马达端面线型入手,对比分析了 4 种线型形成原理以及优缺点。选用普通内摆型定、转子线型建立了三维模型,进行流体仿真,简要分析了螺杆马达随定子、转子间隙改变压力、扭矩等输出参数变化情况。探究全金属螺杆马达在不同间隙值下的压降变化趋势,为确定对应设计参数下螺杆马达间隙配合的最佳范围提供了参考意义。

**关键词:**全金属螺杆马达;定子;转子;端面线型;间隙配比;输出性能

**中图分类号:**P634 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2023)S1-0169-06

## Line type and output performance analysis of all metal screw motor

GAO Yunhao<sup>1,2</sup>, WANG Yu<sup>1,2</sup>, LU Jiaying<sup>1,2</sup>, KONG Lingrong<sup>1,2</sup>, GONG Neng<sup>1,2</sup>, WANG Shihao<sup>1,2</sup>

(1. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory on Deep GeoDrilling Technology, MNR, Beijing 100083, China)

**Abstract:** With the increase of mining output of shallow and middle oil and gas resources, oil and gas resources exploitation gradually extends to deep and ultra deep layers. With the increase of depth, for conventional screw motors, it is impossible to solve the problem of high temperature failure of rubber bushings of its components. Therefore, designing an all metal screw motor is of great significance. This article selects the 7LZ178 all metal screw motor and analyzes its impact on the performance output of the motor from two aspects: the linear design of the stator and rotor end faces of the screw motor and the clearance ratio of the stator and rotor of the all metal screw motor. This article starts with the end face shape of the screw motor and compares and analyzes the formation principles of four types of shape, as well as the advantages and disadvantages of the four types of shape. A three-dimensional model was established using a common internal swing type stator and rotor line shape for fluid simulation. The changes in output parameters such as pressure and torque of the screw motor with changes in stator and rotor clearances were briefly analyzed. Exploring the pressure drop variation trend of metal screw motors under different clearance values provides reference significance for determining the optimal range of clearance fit of screw motors under corresponding design parameters.

**Key words:** all metal screw motor; stator; rotor; line type of face; gap ratio; output performance

收稿日期:2023-05-30 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.S1.025

基金项目:国家自然科学基金面上项目“高温全金属马达定转子高速冲蚀与冲滑磨损耦合作用机理研究”(编号:42172343)

第一作者:高运浩,男,汉族,2000年生,在读硕士研究生,地质工程专业,从事全金属螺杆马达研究,北京市海淀区学院路29号,gyh10602022@163.com。

通信作者:王瑜,男,汉族,1979年生,教授,博士生导师,地质工程专业,博士,研究方向为钻探技术与装备,北京市海淀区学院路29号,wangyu203@Cugb.Edu.cn。

引用格式:高运浩,王瑜,路家兴,等.全金属螺杆马达线型及输出性能分析[J].钻探工程,2023,50(S1):169-174.

GAO Yunhao, WANG Yu, WANG Yu, et al. Line type and output performance analysis of metal screw motor[J]. Drilling Engineering, XXXX, XX(XX):1-6.

## 0 引言

常规螺杆马达中,定、转子采用过盈配合,过盈配合的范围与合理性直接影响马达的输出性能<sup>[1]</sup>。配合过盈量小,造成泥浆泄露,转子钻速降低,容易制动。过盈量太大,密封性能较好,但会导致定、转子之间摩擦产生热量,由于橡胶是粘弹性材料,会形成热量的滞留,进一步升高温度,形成恶性循环<sup>[2]</sup>。所以常规螺杆马达的配合过盈量是影响螺杆钻具高温下工作的重要工作指标。油气资源开采逐步向深层、超深层延伸,随着深度的增加,常规螺杆马达无法解决其组成部件的橡胶衬套高温失效问题,因此设计全金属螺杆马达具有重要的意义。对于全金属螺杆马达而言,定、转子之间采用的是间隙配合,间隙配合的范围会影响到马达输出特性,配合间隙过大导致定子、转子之间的容腔变大,造成泄露,进而导致马达效率变低;由于全金属螺杆马达的定子、转子均由金属材料制成,配合间隙过小会使得定、转子发生磨损进而导致端面线型失真和内壁磨损,大大降低马达输出性能。因此,配合范围的大小是全金属螺杆马达性能的关键参数<sup>[3]</sup>。

## 1 螺杆马达的基本原理

螺杆钻具又称排量马达,是一种容积式井下动力钻具<sup>[4]</sup>。由旁通阀、马达、万向轴及传动轴四大总成组成。其中螺杆马达是将液体压力能转换为机械能的核心部件。常规螺杆马达由定子、转子和橡胶衬套等组成,全金属螺杆马达则是由定子、转子两部分直接构成,如图1所示。定子、转子两部分由金属材料制成,通过间隙配合。间隙配合与端面的线型设计有直接的关系,因此开展其定、转子线型的分析和研究具有重要的理论意义和实用价值。

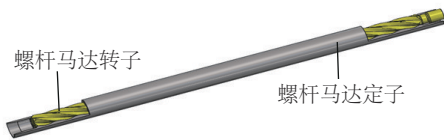


图1 全金属螺杆马达三维模型

马达工作原理就是转子与定子的原理<sup>[5]</sup>,马达的转子部分实际上是一个螺旋外齿轮,定子是一个螺旋内齿轮,要想形成一个容积式液压马达,转子和定子应该满足以下基本条件:

(1)转子与定子的端面曲线即线型为一共轭曲线,即首先满足齿轮传动的要求,如果定子不动,转子可以在定子内作平面行星运动。

(2)线型要满足隔离条件和消失条件。隔离条件是转子在定子中任意位置时,转子线型和定子线型有若干个接触点,把过流面积即定子孔的横截面中未被转子占据的部分面积分割成若干个互不联通的区域。而消失条件是各区域的面积均能变小为零。与此同时,又有新的区域产生。

## 2 马达线型曲线分析

### 2.1 复平面坐标系

基于复平面坐标系,用复数运算规则对平面矢量和曲线进行分析计算<sup>[5]</sup>。复平面柱坐标系是通过复平面 $l-o-j$ 坐标系取代直角 $x-o-y$ 坐标系,并取向下为 $z$ 轴的正向。如图2所示为复平面柱坐标系,图中 $o-l$ 轴为复平面的实轴,单位是1, $o-j$ 轴为复平面的虚轴,单位为 $j(j=\sqrt{-1})$ 。

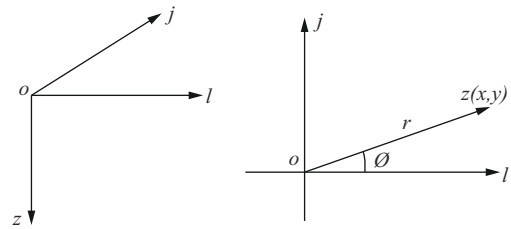


图2 复平面柱坐标系和复矢量坐标系

设复平面上的点对应于一对有序实数 $(x, y)$ ,其对应的复数 $z$ ,如图2所示,可表示为:

$$z = x + jy \quad (1)$$

复数 $z$ 的模 $r$ 为:

$$|z| = r = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{\text{Re}^2(z) + \text{Im}^2(z)} \quad (2)$$

式中: $\text{Re}(z)$ —— $z$ 的实部 $x$ ; $\text{Im}(z)$ —— $z$ 的虚部 $y$ 。

$$x = \text{Re}(z), \quad y = \text{Im}(z) \quad (3)$$

根据直角坐标系与极坐标的关系,结合欧拉方程(Euler)公式:

$$\begin{cases} [x = r \cos \varphi, & y = r \sin \varphi] \\ [e^{j\varphi} = \cos \varphi + j \sin \varphi] \end{cases} \quad (4)$$

可将复数 $z$ 转化为指数形式:

$$z = re^{j\varphi} \quad (6)$$

幅角 $\varphi$ :

$$\varphi = \arctg \frac{y}{x} \quad (7)$$

### 2.2 摆线方程

摆线方程是建立螺杆马达转子曲线方程的基础<sup>[6]</sup>,如图3所示,设导圆半径为 $R_1$ ,滚圆半径为 $R_2$ ,动点距为 $d$ ,发生点为 $M$ ,即周期为 $R_1/R_2=N$ (自然数),等效动点 $1, M$ 为点的轨迹为 $N$ 头单循环外摆线。

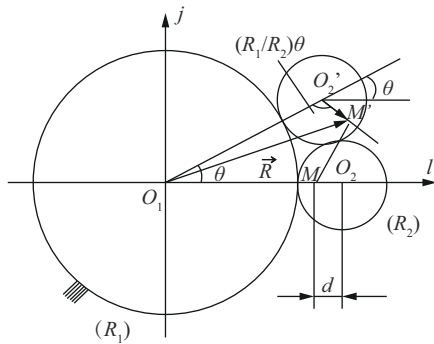


图3 摆线方程<sup>[6]</sup>

以导圆滚角 $\theta(0 \leq \theta < 2\pi)$ 为参数,当形成 $\theta$ 时,根据复矢量法,中心距矢量:

$$\overrightarrow{O_1O_2'} = (R_1 + R_2)e^{j\theta} = R_2(N + 1)e^{j\theta} \quad (8)$$

同理,动点距矢量:

$$\overrightarrow{O_2'M'} = -de^{j(\frac{R_1}{R_2}\theta + \theta)} = -de^{j(N+1)\theta} \quad (9)$$

摆线矢量方程:

$$\vec{R}(\theta) = \overrightarrow{O_1O_2'} + \overrightarrow{O_2'M'} = R_2(N + 1)e^{j\theta} - de^{j(N+1)\theta} \quad (10)$$

令 $n = N + 1$ ,又因 $K = d/R^n = d/R_2^n$ ,式(10)写为:

$$\vec{R}(\theta) = R_2(ne^{j\theta} - Ke^{jn\theta}) \quad (11)$$

得到:

$$\vec{R}(\theta) = R_2 \cdot \vec{R}^0(\theta) \quad (12)$$

通过上述公式推导可以得到矢量坐标系下的摆线方程,将矢量方程转化为直角坐标系下,需通过欧拉公式,转化方式如下:

$$\begin{cases} x = \text{Re}[\vec{R}(\theta)] = R_2(ncos\theta - Kcosn\theta) \\ y = \text{Im}[\vec{R}(\theta)] = R_2(nsin\theta - Ksin n\theta) \end{cases} \quad (13)$$

式中:Re——实部系数;Im——虚部系数; $R_2$ ——滚圆半径; $\vec{R}(\theta)$ ——单位摆线方程。

### 2.3 摆线方程类型

#### 2.3.1 普通内摆等距线型

普通内摆线等距线型具有较大的工作容积,从端面线型分析,具有较大的过流面积,因而在钻具外径相同时具有较高的输出扭矩。从理论上分析,普通内摆线等距线型,无论等距半径系数选择如何,始终存在等距曲线打扣的现象<sup>[7]</sup>,对于普通内摆转子骨线方程推导为: $i = N/(N + 1)$ 。转子骨线的方程推导是通过无包心法摆线方程得到。这里简化问题设滚圆半径 $R_2 = 1$ ,无包心法导圆半径为 $N$ , $d = R_2 \cdot K$ ,然后取 $\theta_0 = 0, a_0 = 0$ ,得到普通内摆等距线型转子骨线的矢量方程为:

$$\vec{R}^0(\theta) = ne^{j\theta} + e^{-jn\theta} \quad (14)$$

通过欧拉方程转化为直角坐标系下的参数方程:

$$\begin{cases} x = ncos\theta + cosn\theta \\ y = nsin\theta - sin n\theta \end{cases} \quad (15)$$

这里采用转子头数 $N = 7, n = N - 1$ ,代入式(15),得到参数方程:

$$\begin{cases} x = 6cos\theta + cos6\theta \\ y = 6sin\theta - sin6\theta \end{cases} \quad (16)$$

通过MATLAB软件得到定、转子曲线如图4所示

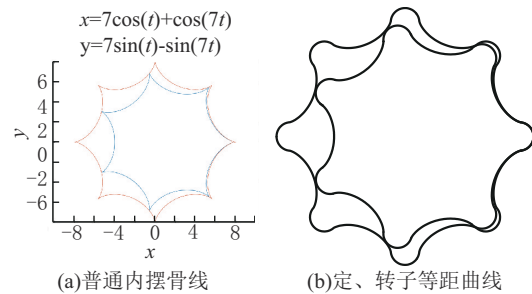


图4 普通内摆骨线图 and 定、转子等距曲线

#### 2.3.2 普通外摆等距线型

普通外摆线在马达线型理论研究中,打扣现象严重无法应用于实际工程设计中,但这种线型的理论分析结果对于内外摆线法线型、短副外摆等距线型的发展起了过度和引导作用。

同理可得到普通外摆线型转子骨线方程,设滚圆半径 $R_2 = 1$ ,无包心法导圆半径为 $N$ ,其矢量方程为:

$$\vec{R}^0(\theta) = ne^{j\theta} - e^{jn\theta} \quad (17)$$

其中  $n = N + 1$ ,  $0 \leq \theta \leq 2\pi$ , 其包心法导圆半径  $R_2 = N$ 。然后得到直角坐标系下参数方程为:

$$\begin{cases} x = n\cos\theta - \cos n\theta \\ y = n\sin\theta - \sin n\theta \end{cases} \quad (18)$$

取  $N = 7$ , 参数方程为:

$$\begin{cases} x = 8\cos\theta - \cos 8\theta \\ y = 8\sin\theta - \sin 8\theta \end{cases} \quad (19)$$

利用 MATLAB 得到曲线方程如图 5 所示。

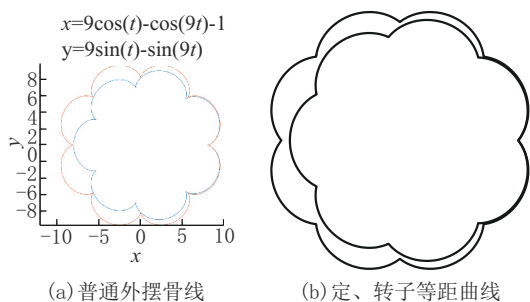


图 5 普通外摆骨线和定、转子等距曲线

### 2.3.3 短幅内摆等距线型

短幅内摆线等距线型, 其定子曲线是短幅内摆线的等距曲线, 而转子曲线则是定子曲线按外滚法运动所得的内包络线。与普通内摆线等距线型、短幅外摆线等距线型相比, 它具有线型光滑、不打扣或打扣轻微、偏心距较小、过流面积一般较小等特点, 曲线方程如下。

矢量方程:

$$\vec{R}^0(\theta) = ne^{j\theta} + Ke^{-jn\theta} \quad (20)$$

其中  $n = N - 1$ ,  $0 \leq \theta \leq 2\pi$ ,  $0 < K < 1$  ( $K$  为幅长系数), 然后得到直角坐标系下的参数方程:

$$\begin{cases} x = n\cos\theta + K\cos n\theta \\ y = n\sin\theta - K\sin n\theta \end{cases} \quad (21)$$

分别取  $N = 7, K = 0.5, N = 7, K = 0.8$ , 生成如图 6 所示曲线。

### 2.3.4 短幅外摆等距线型

短幅外摆线等距线型和普通内摆线线型、普通外摆线线型及内外摆线法线型, 均属普通摆线线型的范畴, 其主要缺点是骨线共扼副上存在着曲率半径为零的点, 它们的等距曲线不可避免地存在着不同程度的打扣现象, 这样会给共扼副的接触状况带来不良影响, 造成共扼副的较快磨损, 导致马达和钻具性能指标下降。曲线方程如下。

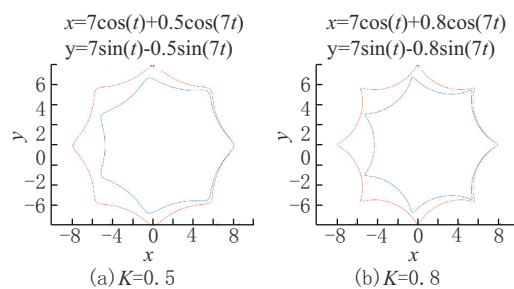


图 6 短幅内摆骨线

短幅外摆等距线型等距转子骨线复矢量方程:

$$\vec{R}^0(\theta) = ne^{j\theta} - Ke^{jn\theta} \quad (22)$$

其中  $n = N + 1$ ,  $0 \leq \theta \leq 2\pi$ ,  $0 < K < 1$ , 然后得到直角坐标系下的参数方程:

$$\begin{cases} x = n\cos\theta - K\cos n\theta \\ y = n\sin\theta - K\sin n\theta \end{cases} \quad (23)$$

取  $N = 7, K = 0.5, N = 7, K = 0.7$ , 生成如图 7 所示曲线。

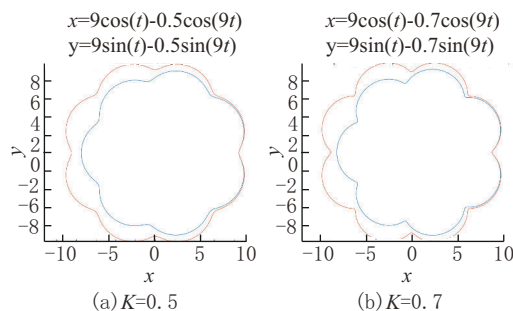


图 7 短幅外摆骨线

通过上述对 4 种线型的介绍, 因为普通外摆在实际工程中打扣现象严重而无法使用, 目前常用于螺杆钻具马达设计的 3 种线型 (普通内摆等距线型, 短幅内摆等距线型, 短幅外摆等距线型)。其中速比  $i$ 、等距半径  $r$ 、幅长系数  $K$ 、或外摆线段的滚圆半径系数  $a$  等几何参数均可以在一定范围选择, 从而各自构成长系列。线型的几何参数影响钻具马达的理论参数, 从而影响钻具的性能指标。对于短幅内摆线等距线型, 其优点是可以保证线型的光滑连续性, 但其过流面积等参数劣于普通内摆线等距线型。对于普通内摆线等距线型, 其过流面积等参数虽然优于两种短幅摆线线型, 但其主要缺点在于曲线存在打扣现象, 对于常规螺杆马达而言, 线型存在的打扣现象可以由定子内壁橡胶衬套的变形进行抵消, 而对于全金属螺杆马达, 定子与转子之间通过间隙配

合,没有橡胶衬套进行变形抵消,所以普通内摆等距线型通常需要通过优化后进行使用。

### 3 全金属螺杆马达流场分析

此研究以7LZ178螺杆马达为研究对象,定、转子头数比=7/8,偏心距 $e=6.5$  mm,定、转子的螺距 $h=107$  mm;定、转子间隙选定0.3~0.6 mm共4组。通过建立三维模型,生成流体域进行分析。

#### 3.1 马达模型的建立

使用SolidWorks建立了不同间隙下金属螺杆马达模型如图8所示,间隙为0.3 mm为例。由于马达定、转子采用间隙配合,所以马达的密封腔室之间因存在间隙而相互连通,使得金属螺杆马达的流体区域是一个整体<sup>[8]</sup>。

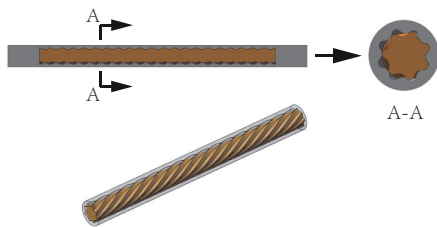


图8 螺杆马达三维模型

#### 3.2 螺杆马达仿真分析

使用ANSYS Fluent软件进行螺杆马达流场分析。进行模拟流场分析之前通过Workbench Mesh功能对所建立的金属螺杆马达形成的区域进行网格划分,所采用的Advanced Size Function中选择on:Adaption Relevance Center设置为Fine,其余为默认设置<sup>[9]</sup>。图9为0.3 mm间隙马达流体初始网格,网格划分后三维模型效果见图9。

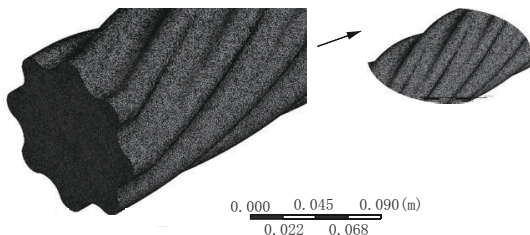


图9 0.3 mm间隙模型流体域网格

使用Fluent对螺杆马达的流场进行分析,需要对流场特性进行适当简化,本文分析非定常时间下螺杆马达的压降变化,以及转子扭矩变化<sup>[10]</sup>。Solution Methods的设置中,压力与速度的关联形式

Pressure-Velocity Coupling,选用的是PISO,此类型应用于非定常运算中,其显著优势是可以处理网格畸变Skewness较大的问题,结合螺杆马达网格划分的形成。选用PISO类型进行求解,插值方法选用了Green-Gauss Node-Based的方法。选用了使用三角形/四面体网格的二阶迎风格式Second-Order Upwind,二阶迎风格式Second-Order Upwind的特点是保留了Taylor级数的第一项和第二项。保留二阶精度可以提高运算精度。

#### 3.3 马达流场分析

对于马达的流场分析,本文取0.3~0.6 mm四组不同间隙进行分析对比,分析了随着间隙增大马达压力分布情况,以及扭矩变化趋势,这里设定了进出口压差10 MPa,入口流量设定为6 L/s,分析顺态变化情况下,螺杆马达参数变化情况。图10为间隙最小值0.3 mm、最大值0.6 mm下螺杆马达压力云图<sup>[11]</sup>。

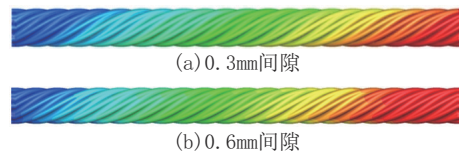


图10 最小、最大间隙下螺杆马达压力云图

从图中可以看出,随着间隙增大,流场压力分布总体趋势没有发生很大的变化,进口处平均压力值最高,然后由红色逐渐变为蓝色。出口处平均压力值最小。这是因为钻井液通过进口处进入,驱动转子绕定子发生公转,其本身做自传运动,将水力能转化为转子机械能,反应到云图中由红色区域变为黄色区域然后逐步到出口的蓝色区域,平均压力降至最小。

从间隙配比分析来看,0.3 mm间隙下定子、转子间隙较小,红色区域较小,整体压力区域过渡相对迅速。这是因为马达腔室的密封性能相对较好,每个腔室内的压力值大,钻井液能够有效地驱动转子做功,使得高压区域可以快速过渡到低压区域;在0.6 mm间隙下,红色区域较大,定子与转子之间的间隙增大,定、转子之间构成得腔室密封性减弱,钻井液泄露严重,腔室压力不足,进而导致钻井液将水力能转化为机械能的效率降低,一部分钻井液没有

有效做功,进口处压强与出口处压强的压降较小,云图上显示整体层次分明,压力云图压力值过渡区域平缓,导致红色区域范围较大。

#### 4 结论与展望

对于全金属螺杆马达的流体域分析,本文模拟了在不同间隙下,马达压降变化,定性分析了随着间隙变化时,螺杆马达压力云图整体压降趋势。进而可以分析出输出性能的扭矩变化规律,当间隙为0.6 mm时泄露较大,高压区域增多,转子做功效率降低。所以装配间隙范围应小于0.6 mm,具体间隙应该结合不同的介质进行确定。

目前,国外在全金属螺杆马达方面发展迅速,已经进行了井下实验,攻克了许多全金属螺杆马达的难题,国内对于全金属螺杆钻具的研究相对落后,仍然存在许多问题有待攻克。笔者总结全金属螺杆马达的技术难点以及未来努力方向如下。

(1)对于马达在实际工况中受高温变形后膨胀变化并没有考虑;对于介质的密度和粘度等参数对马达输出性能影响没有提到<sup>[12]</sup>。考虑实际情况,这也是需要考虑的问题。

(2)全金属螺杆钻具首先难点在于螺杆马达定子、转子的制造加工,其加工精度的准确性将直接影响螺杆马达工作输出特性<sup>[13]</sup>,特别是对于定子加工,这种复杂的内壁长孔螺旋曲面,加工难度极高,需要找到一种低成本、精度高、适合加工复杂长孔曲线的加工工艺。

(3)全金属螺杆马达主要应用于深井、超深井的高温井情况下,要想模拟实际工况,需要将仿真分析螺杆马达置于高温场中<sup>[14]</sup>,才能更接近于实际工况。其次,对于定、转子表面的耐磨性、耐腐蚀等方

面也需要提高要求。对于常规螺杆马达,转子表面通常进行镀铬处理来提高耐腐蚀性能等,对于全金属马达的表面处理工艺也是一个关键技术问题。

#### 参考文献:

- [1] 符达良. 国外螺杆钻具发展近况[J]. 石油矿场机械, 1985(3): 36-46.
- [2] 祝效华, 石昌帅, 童华. 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.
- [3] 易先忠. 现代井下动力钻具发展的四大特征[J]. 石油机械, 1994(11): 48-52.
- [4] 孔令雄. ZJ90/6750D 直流电驱动超深井钻机的研制及应用[J]. 机械研究与应用, 2016, 29(1): 153-155.
- [5] 苏义脑, 于炳忠, 谢竹庄. 单螺杆钻具马达线型分析[J]. 石油学报, 1986(4): 95-109.
- [6] 路玥. 螺杆马达转子的线型分析[D]. 西安: 西安石油大学, 2010: 17-24.
- [7] 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.
- [8] 屈文涛, 解林, 董卫国. 全金属螺杆马达定子配合间隙优化[J]. 机械研究与应用, 2017, 30(1): 156-157.
- [9] 郑磊, 吴晓东, 韩国庆, 等. 全金属螺杆泵间隙漏失模型[J]. 石油科学通报, 2018, 3(3): 320-331.
- [10] 刘思瀛. 7LZ172 金属螺杆马达研制[D]. 西安: 西安石油大学, 2016: 28-31.
- [11] 姜东. 全金属螺杆泵漏失规律及配合间隙优化研究[J]. 石油机械, 2019, 47(3): 93-98.
- [12] 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.
- [13] 王春阳, 李连强, 李良君, 等. 井温对螺杆钻具使用性能的影响[J]. 石油矿场机械, 2012, 41(11): 9-11.
- [14] 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, 356(10): 8-11.

(编辑 李艺)