

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2022.06.016

两种采油螺杆泵定子摩擦特性 对比分析*

黄勇淇,王世杰*

(沈阳工业大学 机械工程学院,辽宁 沈阳 110870)

摘要:在采油过程中,螺杆泵定子容易因为磨损而导致失效,针对这一问题,对螺杆泵常规定子与等壁厚定子的摩擦特性进行了研究。首先,利用有限元分析软件对两种定子进行了热力耦合仿真;然后,分析了两种定子在工作过程中的摩擦应力状态,以及过盈量和温度对其摩擦性能的影响;最后,对两种定子的摩擦特性进行了综合对比,分析了两种定子分别在过盈量和温度范围内的适宜工作区间。研究结果表明:与常规定子相比,等壁厚定子的摩擦应力分布更为均匀;随着过盈量和温度的升高,两种定子的摩擦应力均呈逐渐增大的趋势;当过盈量低于0.3 mm,温度高于40℃时,等壁厚定子的摩擦性能优于常规定子;两种定子摩擦特性的对比研究结果对于定子结构设计优化及不同工况下定子样式选取具有一定的参考价值。

关键词:容积泵;螺杆泵定子衬套;摩擦性能;磨损失效;摩擦应力状态;热力耦合仿真

中图分类号:TH327;TH117.1;TE933

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2022)06-0826-07

Comparative analysis of friction characteristics of two stators of screw pumps for oil extraction

HUANG Yong-qi, WANG Shi-jie

(School of Mechanical Engineering, Shenyang University of
Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: Aiming at the problem that the stator of the screw pump was prone to wear and fail in the process of oil production, the friction characteristics of the conventional stator of the screw pump and the stator with constant wall thickness were studied. Firstly, the thermal-mechanical coupling simulation of the two stators was carried out by using the finite element analysis software. Then the frictional stress state of the two stators in the working process was analyzed, as well as the influence of the interference and temperature on their frictional performance. Finally, the frictional characteristics of the two stators were analyzed. A comprehensive comparison was carried out to analyze the suitable working range of the two stators in the range of interference and temperature respectively. The research results show that comparing with the conventional stator, the friction stress distribution of the stator with equal wall thickness is more uniform; with the increase of the interference and temperature, the frictional stress of the two stators shows a gradual increasing trend. When the temperature is lower than 0.3 mm and the temperature is higher than 40℃, the friction performance of the stator with constant wall thickness is better than that of the conventional stator. The comparative study of the friction characteristics of the two stators has a certain reference value for the optimization of the stator structure design and the selection of the stator style under different working conditions.

Key words: positive displacement pump; screw pump stator lining; friction performance; wear failure; frictional stress state; thermo-mechanical coupling simulation

收稿日期:2021-12-21

基金项目:辽宁省“揭榜挂帅”科技攻关项目(2021JH1/10400084)

作者简介:黄勇淇(1996-),男,辽宁鞍山人,硕士研究生,主要从事采油螺杆泵定子衬套摩擦学性能方面的研究。E-mail:2272290339@qq.com

通信联系人:王世杰,男,博士,教授。E-mail:wang_shijie@263.net

0 引言

随着油田举升技术的高速发展和高黏度、高含砂稠油的开采,螺杆泵得到了广泛的应用。

螺杆泵作为一种人工举升设备,在工作过程中,通过转子与定子衬套间形成的密封腔室的不断推移实现对油液的抽取^[1,2]。

螺杆泵转子在定子内表面运动时具有滚动和滑动的性质,使油液中的砂粒不易沉积。螺杆泵抽吸平稳、排量稳定且兼具离心泵和容积泵的优点,因此,其在一般原油井和高黏度、高含砂量油井的采油作业中得到了广泛应用^[3-5]。

等壁厚定子橡胶衬套是近年来应用于螺杆泵和螺杆钻具的新型衬套。相比常规定子衬套,等壁厚定子衬套具有检泵周期长、调参效果明显等优势^[6]。

在工作过程中,螺杆泵定子受到转子的周期性载荷作用,容易发生磨损,使工作性能降低甚至失效,严重影响螺杆泵定子的使用寿命。

目前,有部分学者对螺杆泵定子衬套的摩擦性能进行了研究。王哲等人^[7]分析了干摩擦状态下定子橡胶磨损形式及特点。孙艳萍等人^[8]分析了定子橡胶各位置磨损类型及特点。刘增辉等人^[9]采用摩擦磨损试验的方法,研究了接触力和转速对定子橡胶摩擦磨损的影响。韩传军等人^[10-11]研究了过盈量和摩擦系数对螺杆泵定子磨损的影响。

由于定子所处工况复杂,现有的关于定子摩擦的研究大多针对定子材料进行常规磨损试验,未考虑定子形状的影响。且现有的研究中,仿真大多采用二维模型,无法对定子整体的摩擦状态进行研究。

基于以上原因,笔者利用有限元分析软件中的热力耦合方法,对螺杆泵常规定子和等壁厚定子运动过程中的整体摩擦状态进行研究,并对比过盈量和温度对其摩擦性能的影响,分析两种定子分别在过盈量和温度范围内的适宜工作区间。

1 螺杆泵定转子有限元模型

1.1 定子几何模型

由于螺杆泵定子具有材料非线性、型面复杂性和转子运动复杂性等特点,如今螺杆泵定子的有限元分析模型大多简化为二维结构,无法体现出定子的整体状态。为了能反映出定子的复杂型面及摩擦特性分析的完整性,笔者对定子的三维模型进行研究。

两种定转子的三维几何模型如图1所示。

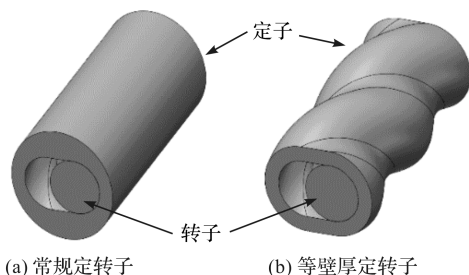


图1 两种螺杆泵定转子几何模型

图1是螺杆泵定子一个导程的三维模型,常规定子内轮廓为双线螺旋面,外轮廓为圆柱面。

等壁厚定子内外轮廓均为双线螺旋面,因此等壁厚定子各处壁厚一致,其受力、温度分布和温胀溶胀相比于常规定子更加均匀。

转子轮廓为单线螺旋面,旋向与定子一致,定转子间产生密封线,形成密封腔,如图2所示。

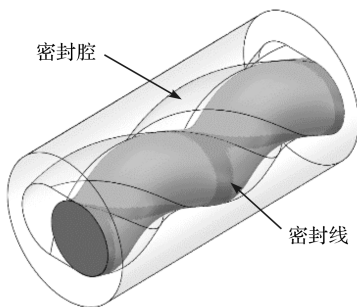


图2 常规螺杆泵定转子几何透视模型

1.2 材料属性

螺杆泵定子材料为丁腈橡胶,是一种超弹性材料,具有良好的耐磨性和耐油性,广泛应用于采油器械之中^[12-17]。

由于丁腈橡胶在受力过程中表现出较强的非线性,为准确反映其力学行为,笔者选择三次 Yeoh 模型作为螺杆泵定子橡胶的本构模型,该模型在分析超弹性材料时具有较高的准确性^[18,19]。

其应变能密度函数为:

$$W = \sum_{i=1}^N C_{i0} (I_1 - 3)^i + \sum_{i=1}^N \frac{1}{d_i} (J - 1)^{2i} \quad (1)$$

式中: W —应变能密度; C_{i0} —Yeoh 模型系数; N —Yeoh 模型阶数, N 取 3; J —体积压缩比,对于不可压缩的材料, J 取 1。

将参数值代入,则有:

$$W = C_{10} (I_1 - 3) + C_{20} (I_1 - 3)^2 + C_{30} (I_1 - 3)^3 \quad (2)$$

笔者通过力学性能实验获得丁腈橡胶在不同温度下的 Yeoh 模型系数^[20],如表1所示。

表 1 丁腈橡胶不同温度下的本构模型参数

温度/℃	C_{10}	C_{20}	C_{30}
20	1.195 2	-1.343 5	0.597 9
40	1.384 7	-1.066 8	0.597 9
60	1.674 8	-0.466 4	0.534 8
80	2.002 8	-0.332 8	0.448 3

表 1 中,螺杆泵定子为超弹性、各向同性材料,密度为 $1\,200\text{ kg/m}^3$ 。螺杆泵转子材料为钢,是线弹性、各向同性材料,其弹性模量为 210 GPa ,泊松比为 0.3 ,密度为 $7\,800\text{ kg/m}^3$ ^[21]。

笔者对螺杆泵定子进行热力耦合仿真,获取螺杆泵定子材料的热性能参数^[22,23]。其相关参数如表 2 所示。

表 2 螺杆泵定子-转子材料性能参数

热性能参数/单位	定子	转子
导热系数 $k/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	0.146 5	49.3
比热容 $c/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	840	564
热膨胀系数 $\alpha/^\circ\text{C}^{-1}$	5.7×10^{-5}	1×10^{-5}

1.3 有限元模型

由于螺杆泵定子是一个循环结构,为提高求解效率,笔者选取其中的一个导程进行仿真。

笔者在定子外表面施加完全位移约束,用以模拟缸套对定子的作用力,并在定子两端面施加对称位移约束;将定子内表面和转子外表面通过面与面的接触方式设为接触对,为防止发生穿透现象,选择刚度较大的转子表面为主面,定子内表面则设置为从面;

接触面的法向行为设置为“硬”接触,切向行为采用罚函数摩擦模型,该模型允许接触表面存在弹性滑移,摩擦系数设为 0.3 ;

定子与转子之间是过盈配合,为了准确模拟这种配合关系,在建模时根据实际尺寸进行建模,使两者形成干涉,之后通过设置干涉功能,软件会自动调整干涉部分,完成定转子的初始装配过程。

在工作过程中,螺杆泵转子绕定子中心线做公转运动的同时完成自转,与定子配合组成多个密封腔,从而实现采油功能。为了实现这种运动,需要在转子和其公转中心之间创建铰连接,之后对其施加转动边界条件。

笔者在预定义场中设置定子的初始温度,并在后续分析步中施加温度载荷,模拟实际工况中的温度。上述边界条件完成后即可对定转子划分网格。

网格划分结果如图 3 所示。

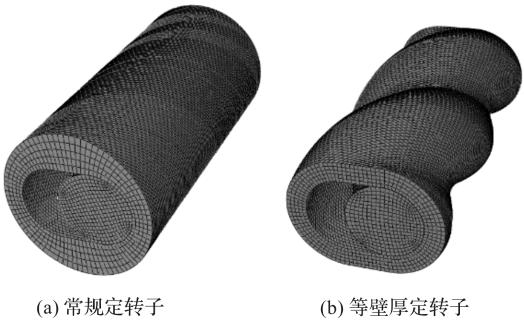


图 3 两种螺杆泵定子三维网格模型

此处采用六面体网格进行划分。由于是热力耦合分析,定子为橡胶材料,在为定子模型划分网格时,笔者设置网格单元为 C3D8RHT;转子材料为钢,设置网格单元为 C3D8RT。

2 螺杆泵定子数值模拟

螺杆泵定子的摩擦性能由摩擦应力进行描述^[24],笔者通过进行热力耦合仿真获取定子受到的摩擦应力(即 CSHEAR1),其可直接输出^[25]。为了便于比较分析,在后处理自定义输出中,笔者对摩擦应力做绝对值处理,即 $\text{abs}(\text{CSHEAR1})$ 。

2.1 常规定子数值模拟

在过盈量为 0.2 mm ,温度为 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下,螺杆泵转子运行一个周期后的常规定子计算结果如图 4 所示。

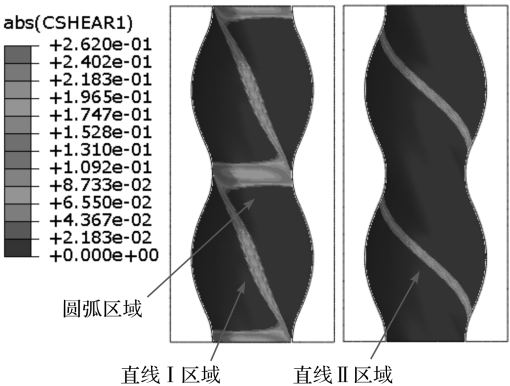


图 4 螺杆泵常规定子摩擦应力分布

从图 4 可以看出:常规定子总体的摩擦应力呈不均匀分布,直线区域和圆弧区域交界位置应力较小,直线区域和圆弧区域的中间附近位置应力较大;摩擦应力最大值位于直线 II 区域中间偏左位置,最大值为 $0.262\,0\text{ MPa}$;

圆弧区域与直线区域的应力值相差较大,其主要原因在于常规定子壁厚不均匀,直线部分厚度大,热变

形相对较大,导致其所受摩擦应力较大。

2.2 等壁厚定子数值模拟

在过盈量为 0.2 mm,温度为 50 ℃ 条件下,螺杆泵转子运行一个周期后,等壁厚定子计算结果如图 5 所示。

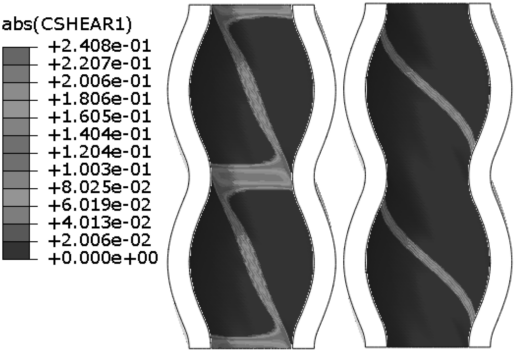


图5 螺杆泵等壁厚定子摩擦应力分布

图 5 中,等壁厚定子总体的摩擦应力分布与常规定子相同。

与常规定子相比,等壁厚定子在圆弧区域的摩擦应力分布更为均匀,但其应力值更大,与直线区域的应力值接近;摩擦应力最大值位置与常规定子相同,仍位于直线Ⅱ区域中间偏左位置,最大值为 0.240 8 MPa,低于常规定子。

以上结果说明:等壁厚定子圆弧处的磨损均匀,但其磨损比常规定子更严重;常规定子圆弧处的磨损主要发生在中间区域,其直线区域的磨损程度高于等壁厚定子。

3 螺杆泵定子摩擦性能影响因素

3.1 常规定子摩擦性能影响因素

3.1.1 过盈量的影响

随着过盈量增大,常规定子摩擦应力变化趋势如图 6 所示(选取计算的过盈量范围为 0.2 mm ~ 0.5 mm)。

从图 6 可以看出:在取值范围内,随着过盈量的增大,常规定子各区域摩擦应力均呈现增大的趋势;定子直线Ⅰ区域和直线Ⅱ区域的应力增长速度接近,直线Ⅱ区域略大一些;圆弧区域的应力增长速度明显高于直线区域,导致过盈量升至 0.5 mm 时,圆弧区域的摩擦应力已高于直线Ⅰ区域,与直线Ⅱ区域基本持平。

该结果说明,随着过盈量的增大,圆弧区域磨损加剧程度高于直线区域,更易受到过盈量的影响。

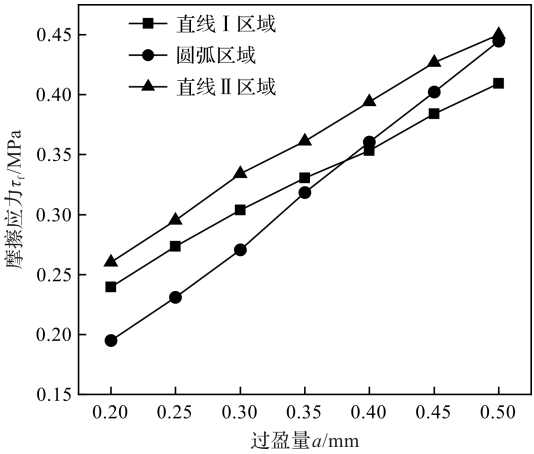


图6 常规定子摩擦应力随过盈量变化曲线

3.1.2 温度的影响

随着温度升高,常规定子摩擦应力变化趋势如图 7 所示(选取计算的温度范围为 20 ℃ ~ 80 ℃)。

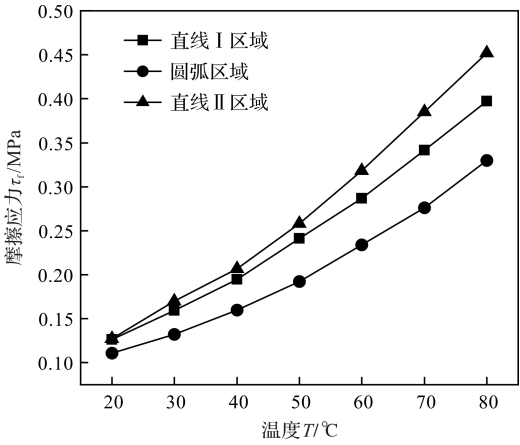


图7 常规定子摩擦应力随温度变化曲线

由图 7 可知:随着温度从 20 ℃ 升至 80 ℃,常规定子各区域的摩擦应力均呈逐渐增大的趋势;定子各区域的摩擦应力增长幅度皆随温度升高而逐渐增大,直线区域的应力增长速度明显高于圆弧区域,且直线Ⅱ区域增长速度最快。

该结果说明,常规定子直线区域相比圆弧区域受温度影响更大,磨损更严重。

3.2 等壁厚定子摩擦性能影响因素

3.2.1 过盈量的影响

随着过盈量增大,等壁厚定子摩擦应力变化趋势如图 8 所示。

从图 8 可以看出:随着过盈量的增加,等壁厚定子各区域应力表现出相同的增长趋势,其圆弧区域的摩擦应力增长速度最快。过盈量为 0.3 mm 时,等壁厚定子圆弧区域的摩擦应力已与直线区域持平;大于 0.3 mm 时,摩擦应力最大值位置由直线Ⅱ区域变为圆弧区域。

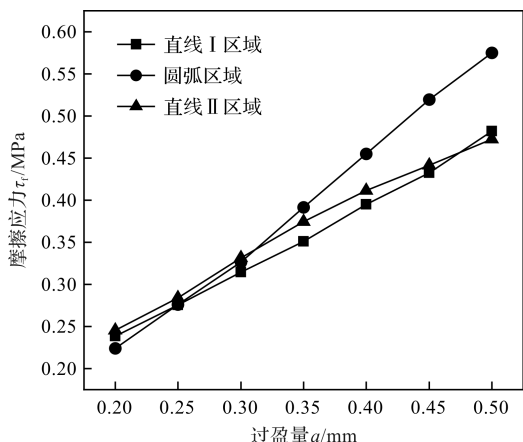


图 8 等壁厚定子摩擦应力随过盈量变化曲线

由上述结果可知,等壁厚定子圆弧区域的摩擦性能相比常规定子更易受到过盈量的影响。

3.2.2 温度的影响

随着温度升高,等壁厚定子摩擦应力变化趋势如图 9 所示。

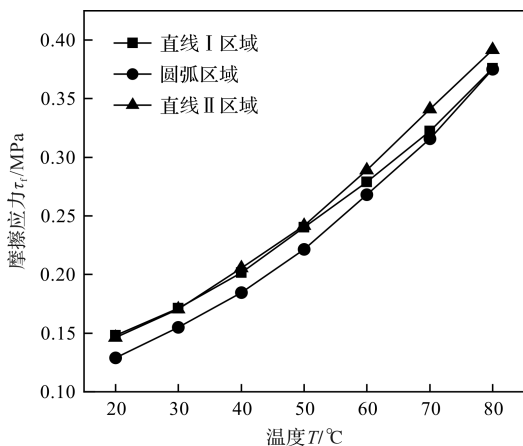


图 9 等壁厚定子摩擦应力随温度变化曲线

由图 9 可知:等壁厚定子的摩擦应力随着温度的升高呈逐渐增大的趋势,且增长幅度逐渐增大;等壁厚定子直线 II 区域和圆弧区域的应力增长速度基本保持一致,直线 I 区域略低一些。

与常规定子相比,等壁厚定子总体上的应力变化更均匀。

由于常规定子直线区域的摩擦性能受温度影响较大,而等壁厚定子克服了这一缺陷。因此,在高温工况下,等壁厚定子具有更好的使用效果。

4 定子摩擦性能对比分析

对比两种定子的摩擦性能可知,常规定子与等壁厚定子的摩擦应力分布差异主要体现在圆弧区域的受力状态。常规定子圆弧区域摩擦应力较大值集中分布在圆弧中间位置,而等壁厚定子圆弧区域的摩擦应力

值分布较为均匀,但等壁厚定子圆弧区域的摩擦应力要高于常规定子,磨损更严重。

温度为 50 °C 时,两种螺杆泵定子最大摩擦应力随过盈量变化曲线如图 10 所示。

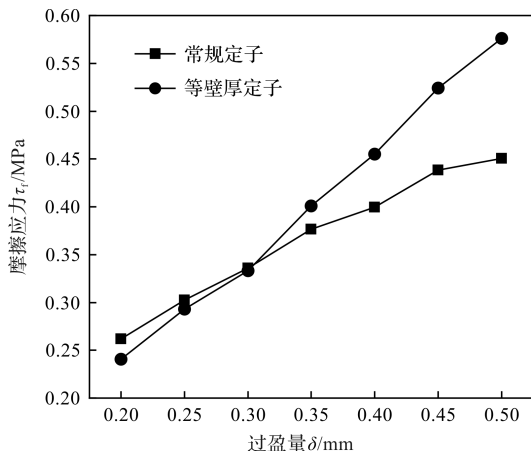


图 10 螺杆泵定子最大摩擦应力随过盈量变化曲线

由图 10 可知:在过盈量 0.2 mm ~ 0.5 mm 范围内,随着过盈量的增大,常规定子和等壁厚定子的摩擦应力都呈逐渐增大的趋势,且等壁厚定子的增长速度高于常规定子;过盈量低于 0.3 mm 时,常规定子的摩擦应力大于等壁厚定子,常规定子磨损更为严重;过盈量等于 0.3 mm 时,两种定子的摩擦应力值接近,两者磨损相当;高于 0.3 mm 时,等壁厚定子的摩擦应力大于常规定子,等壁厚定子磨损更为严重。

因此,在只考虑过盈量对定子摩擦性能影响的情况下,过盈量高于 0.3 mm 时,常规定子更适用,反之等壁厚定子更适用。

过盈量为 0.2 mm 时,两种螺杆泵定子最大摩擦应力随温度变化曲线如图 11 所示。

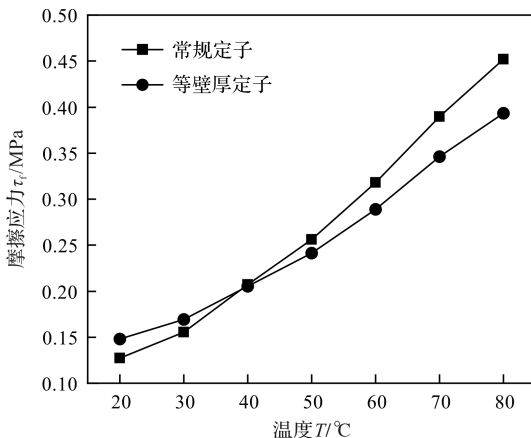


图 11 螺杆泵定子最大摩擦应力随温度变化曲线

从图 11 可以看出:随着温度从 20 °C 升至 80 °C,常规定子和等壁厚定子皆呈快速上升的趋势,且常规

定子的增长速度高于等壁厚定子;两条曲线在温度为40℃时出现交点,在温度低于40℃时,常规定子的摩擦应力低于等壁厚定子,其原因是在温度较低时,两种定子的热变形都不明显,等壁厚定子直线区域的壁厚较规定子要小,相同的过盈量下,等壁厚定子的摩擦应力更大一些;当温度高于40℃后,热变形的影响已超过了因壁厚引起的应力差异,且随着温度的升高,两种定子的应力差越来越大。

因此,在只考虑温度对定子摩擦性能影响的情况下,温度低于40℃时,常规定子更适用,反之等壁厚定子更适用。

综上所述,在对比常规定子与等壁厚定子摩擦性能时,过盈量0.3 mm和温度40℃是其重要参数;当过盈量低于0.3 mm,温度大于40℃的工况下,常规厚定子更易磨损;其余情况下,等壁厚定子更易磨损。

5 结束语

针对螺杆泵定子 in 采油过程中易发生磨损失效的问题,笔者采用热力耦合仿真的方法,研究了螺杆泵常规定子和等壁厚定子运动过程中的摩擦应力分布特点,对比分析了过盈量和温度对其摩擦特性的影响,讨论了两种定子在不同工况下的适用性。

研究结果表明:

(1)常规定子与等壁厚定子的摩擦应力分布具有一定差异。常规定子直线区域与圆弧区域的摩擦应力相差较大,而等壁厚定子直线区域和圆弧区域的摩擦应力较为接近;常规定子圆弧区域较大的摩擦应力集中分布在圆弧中间位置,而等壁厚定子圆弧区域的摩擦应力分布较为均匀,且等壁厚定子圆弧区域的摩擦应力要高于常规定子;

(2)随着过盈量增大,常规定子和等壁厚定子的摩擦应力相应增大。两种定子圆弧区域的应力增长速度均高于直线区域,尤其是等壁厚定子。在实际工作中,应在允许范围内尽量降低过盈量以减少定子磨损,尤其是在选用等壁厚定子情况下;

(3)常规定子和等壁厚定子的摩擦应力都随着温度升高而增大,常规定子直线区域的增长速度高于圆弧区域,而等壁厚定子直线区域和圆弧区域的增长速度相近。在高温工况下,为减小螺杆泵定子磨损,应尽量选用等壁厚定子。

在后续研究中,笔者拟综合考虑两种定子的摩擦特性,对螺杆泵定子的结构进行优化设计,提高定

子的摩擦性能,同时搭建实验平台,进行必要的实验研究。

参考文献(References):

- [1] 王世杰,李勤. 潜油螺杆泵采油技术及系统设计[M]. 北京:冶金工业出版社,2006.
- [2] RAMOS M A, BROWN J C, ROJAS M D C, et al. Producing Extra Heavy Oil using Bottom Drive Progressive Cavity Pump from Orinoco Belt Cerro Negro Area, Venezuela[C]. SPE International Thermal Operations and Heavy Oil Symposium. OnePetro,2005.
- [3] 万仁溥. 采油工程手册[M]. 北京:石油工业出版社,2003.
- [4] 金红杰,吴恒安,曹刚,等. 螺杆泵系统漏失和磨损机理研究[J]. 工程力学,2010,27(4):179-184.
- [5] DENNEY D. Fourteen years of progressing cavity pumps[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 2003, 55(5): 63-65.
- [6] 何艳,魏纪德,孙延安,等. 等壁厚定子螺杆泵举升技术研究[C]. 油气田勘探与开发国际会议(IFEDC 2018)论文集. 西安:西安石油大学,2018.
- [7] 王哲,王世杰,吕晓仁. 潜油螺杆泵定子橡胶摩擦磨损行为研究[J]. 机械设计与制造,2014(2):163-166.
- [8] 孙艳萍,屈文涛,赵宁,等. 煤层气排采螺杆泵定子磨损研究[J]. 煤炭技术,2017,36(2):222-224.
- [9] 刘增辉,谈金祝,刘欣,等. 接触力和转速对螺杆泵定子材料摩擦磨损性能影响研究[J]. 流体机械,2019,47(9):1-6.
- [10] 韩传军,任旭云,郑继鹏,等. 稠油开采中常规螺杆泵定子衬套磨损研究[J]. 润滑与密封,2018,43(5):25-29.
- [11] 韩传军,任旭云,郑继鹏. 高温含砂原油中等壁厚螺杆泵定子衬套磨损分析[J]. 中国机械工程,2017,28(4):446-450.
- [12] 王超,谈金祝,刘欣,等. 氯化钙溶液环境下单螺杆泵定子材料的损伤研究[J]. 流体机械,2021,49(3):27-33.
- [13] AMANCIO-FILHO S T, DOS SANTOS J F. Joining of polymers and polymer-metal hybrid structures: recent developments and trends[J]. *Polymer Engineering & Science*, 2009,49(8):1461-1476.
- [14] VOZNIAKOVSKII A A, VOZNIAKOVSKII A P, KIDALOV S V, et al. Characteristics and mechanical properties of composites based on nitrile butadiene rubber using gra-

- phene nanoplatelets [J]. **Journal of Composite Materials**, 2020, 54(23): 3351-3364.
- [15] 司佳鑫, 杨小成, 翁泽文, 等. 干气密封两种典型螺旋槽摩擦振动试验分析 [J]. 流体机械, 2020, 48(12): 1-6, 21.
- [16] 谭 蔚, 陈晓宇, 樊显涛. 摩擦阻尼器对塔器风致振动的减振试验研究 [J]. 压力容器, 2020, 37(2): 11-16, 23.
- [17] 张 静, 张思涵, 朱鹏程. 轴向柱塞泵空化现象的研究现状 [J]. 液压气动与密封, 2021(9): 56-62.
- [18] YEOH O H. Some forms of the strain energy function for rubber [J]. **Rubber Chemistry and Technology**, 1993, 66(5): 754-771.
- [19] 石昌帅, 陈凯林, 祝效华. 螺杆定子衬套热老化本构参数及内腔变形规律研究 [J]. 润滑与密封, 2019, 44(4): 33-39.
- [20] 李豪豪. 气缸密封圈动态摩擦特性仿真及试验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [21] 赵永强, 朱博文, 刘 智, 等. 三螺杆泵的温度场及热力耦合分析 [J]. 机床与液压, 2021, 49(3): 133-139.
- [22] 薛建泉, 张国栋, 吴慎渠, 等. 双热源作用下螺杆泵定子非稳态温度场数值模拟 [J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2012, 36(3): 130-134.
- [23] 祖海英. 采油螺杆泵定子疲劳寿命预测及试验研究 [D]. 大庆: 东北石油大学, 2018.
- [24] 李 波, 李圣鑫, 张执南, 等. 热氧老化作用对丁腈橡胶力学性能和摩擦学行为的影响 [J]. 材料工程, 2021, 49(5): 114-121.
- [25] 陈 龙. 航空轮胎胎面高速摩擦磨损试验与仿真研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.

[编辑: 雷 敏]

本文引用格式:

黄勇淇, 王世杰. 两种采油螺杆泵定子摩擦特性对比分析 [J]. 机电工程, 2022, 39(6): 826-832.

HUANG Yong-qi, WANG Shi-jie. Comparative analysis of friction characteristics of two stators of screw pumps for oil extraction [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2022, 39(6): 826-832.《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>