

1-2-2019

Linear Design and Simulation Analysis for Harmonic-distance Rubber Bushing of PDM

Tong Hua

School of Mechanical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

Guoyin Chen

School of Mechanical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

Xiaohua Zhu

School of Mechanical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Linear Design and Simulation Analysis for Harmonic-distance Rubber Bushing of PDM

Abstract

Abstract: For the problem of fatigue failure in stator rubber bushing of PDM, which reduces motor efficiency and restricts the rate of penetration, a numerical model of PDM's stator-rotor is established. The thermal coupling problem of rubber bushing working in a well is analyzed. The displacement, temperature and stress distribution of rubber bushing under different conditions and interferences are calculated. *A new harmonic-distance rubber bushing* was designed based on the structure of rubber bushing, and a finite element simulation on it is taken. The research indicates that *the harmonic-distance rubber bushing not only has the advantage of equal-distance rubber bushing, but also has higher life of fatigue and anti-wear than the equal-distance rubber bushing; the displacement distribution is more uniform than the equal-distance rubber bushing; the new structure can guarantee the stability and efficiency of PDM stator and increase the rate of penetration.*

Keywords

rubber bushing, fatigue failure, one direction decoupling, finite element simulation

Recommended Citation

Tong Hua, Chen Guoyin, Zhu Xiaohua. Linear Design and Simulation Analysis for Harmonic-distance Rubber Bushing of PDM[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(2): 647-653.

谐壁厚螺杆钻具橡胶衬套线型设计与仿真分析

童华, 陈国银, 祝效华

(西南石油大学机电工程学院, 四川 成都 610500)

摘要: 针对螺杆马达定子橡胶衬套易发生疲劳失效, 导致马达工作效率降低, 制约钻进速度的问题。建立马达定转子数值模型, 分析橡胶衬套工作时的热力耦合问题, 并计算橡胶衬套在不同工况及过盈量下的位移、温度及应力分布情况。基于橡胶衬套结构, 提出一种新型谐壁厚橡胶衬套结构, 并对其进行有限元模拟计算。结果表明, 谐壁厚橡胶衬套不仅具有等壁厚橡胶衬套的优点, 而且抗磨损寿命及疲劳强度均高于等壁厚, 位移分布也较等壁厚均匀, 可保证马达的工作稳定性和效率, 提高钻进速度。

关键词: 橡胶衬套; 疲劳失效; 单向解耦; 有限元模拟

中图分类号: TE924

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 02-0647-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201802034

Linear Design and Simulation Analysis for Harmonic-distance Rubber Bushing of PDM

Tong Hua, Chen Guoyin, Zhu Xiaohua

(School of Mechanical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: For the problem of fatigue failure in stator rubber bushing of PDM, which reduces motor efficiency and restricts the rate of penetration, a numerical model of PDM's stator-rotor is established. The thermal coupling problem of rubber bushing working in a well is analyzed. The displacement, temperature and stress distribution of rubber bushing under different conditions and interferences are calculated. A new harmonic-distance rubber bushing was designed based on the structure of rubber bushing, and a finite element simulation on it is taken. The research indicates that the harmonic-distance rubber bushing not only has the advantage of equal-distance rubber bushing, but also has higher life of fatigue and anti-wear than the equal-distance rubber bushing; the displacement distribution is more uniform than the equal-distance rubber bushing; the new structure can guarantee the stability and efficiency of PDM stator and increase the rate of penetration.

Keywords: rubber bushing; fatigue failure; one direction decoupling; finite element simulation

引言

螺杆钻具是井下动力钻井最常用的钻具, 使用螺杆钻具可以提高钻头转速、增加钻头扭矩的功

率, 由于螺杆钻具在井底直接提供动力, 因而可以减少钻柱磨损^[1]。螺杆钻具马达主要由转子和定子(定子金属外壳和橡胶衬套)组成, 定子是在金属管内壁上压注橡胶衬套而成^[2], 转子则是一根镀有耐磨材料的螺杆。由于螺杆钻具经常在高温高压的复杂地层中工作, 橡胶衬套在受到转子周期性挤压的过程中极易发生失效^[3], 据业界统计橡胶磨损失效占失效频次的 44.86%, 定子脱胶及整泵失效占总



收稿日期: 2016-02-22 修回日期: 2016-05-16;
基金项目: 国家自然科学基金(51222406);
作者简介: 童华(1979-), 女, 四川, 硕士, 副研究员, 研究方向为管柱力学、井下工具设计; 陈国银(1990-), 男, 四川, 硕士, 助理工程师, 研究方向为井下工具设计及安全性评价等。

<http://www.china-simulation.com>

失效频次的 30.67%^[4]。橡胶失效后，定转子之间形成的密封腔室将会蹿液，最终导致螺杆钻具传递到钻头的扭矩急剧下降，甚至导致钻无进尺。为了解决上述问题，许多专家学者在橡胶变形方面做了相关研究。如李增亮等^[5]设计了一种阶梯型变容积螺杆衬套副；祝效华等^[6]对等壁厚螺杆钻具定子衬套变形规律进行了研究；韩传军等^[7]对常规螺杆钻具定子衬套进行了热力耦合分析；曹刚等^[8]对螺杆泵动力学热力耦合分析方法进行了相关研究。这些理论分析表明等壁厚螺杆钻具马达定子工作性能均高于常规壁厚螺杆钻具马达，但等壁厚螺杆钻具马达定子橡胶衬套挤压应力较大，定子橡胶衬套内腔位移还不太均匀。本文设计出了一种工作时橡胶变形更为协调且橡胶所受挤压应力较小的新型谐波壁厚橡胶衬套，并与等壁厚衬套对比分析了其技术参数指标优势。

1 热力学理论

1.1 力学分析

橡胶是一种粘弹性材料，在受到转子周期性挤压过程中，会产生粘弹性响应，其中弹性响应会完全恢复，粘性响应会导致橡胶分子结构发生破坏，最终引起橡胶能量的损失。本文假设损失掉的能量完全转化为热量^[8]，分析过程中，采用轮胎热力耦合经典分析方法，及单向解耦分析^[9]。单向解耦分析包括三部分，变形分析、损耗分析、热传导分析。

转子在周期性挤压橡胶衬套过程中，橡胶衬套所受的应变 ε 、应力 σ 分别为：

$$\varepsilon = \varepsilon_{\max} \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$\sigma = \sigma_{\max} \sin(\omega t + \delta) \quad (2)$$

式中： ω 为角频率； δ 为滞后角^[8]。

泊松比和应变的关系可表示为^[6]：

$$\mu = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{1}{1 + \varepsilon}} \right) \quad (3)$$

根据弹塑性力学知识可得每个周期橡胶衬套所产生的应变能为：

$$U = \int_0^{2\pi} \sigma \frac{d\varepsilon}{dt} \cdot dt \quad (4)$$

变形分析过程中，将有限元软件计算出的应力、应变代入公式(4)可得到转子在一个周期内挤压定子橡胶衬套所产生的应变能。

1.2 热传导分析

将力学分析所得到的应变能带入热传导方程即可得到橡胶衬套受挤压所产生的热量，这部分热量以内热源的形式存在于橡胶内部。

热传导方程为：

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a^2 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + f(x, y, z, t) \quad (5)$$

式中： $a^2 = \frac{k}{c\rho}$ ， $f(x, y, z, t) = \frac{F(x, y, z, t)}{c\rho}$ ， $F(x, y, z, t)$

为内热源； ρ 是密度； c 是比热容； k 是热传导系数。

2 有限元模型参数

以 5/6 头螺杆钻具为例，定子金属外壳外径 $D=172$ mm，定转子偏心距 $e=7.5$ mm，定子圆弧段半径 $r=14$ mm，等壁厚定子橡胶衬套壁厚为 9 mm。定子橡胶密度 $\rho=1200$ Kg/m³，弹性模量 $E=11.5$ MPa，泊松比 $\mu=0.499$ ，传导率 $k=0.25$ W/(m·°C)，衬套与流体之间的换热系数取 $h=40$ W/(m²·°C)，橡胶衬套与定子金属外壳接触面散热系数取 $h=20$ W/(m²·°C)^[10]，膨胀系数 $\alpha=1 \times 10^{-5}$ ，比热容 $c=840$ J/(Kg·°C)，损耗因子 $\tan(\delta)=0.075$ ^[11]。定子橡胶衬套采用二维四边形结构网格，转子采用解析刚体。

边界条件：橡胶外侧为固定边界，内侧为钻井液压力，转子转速 15.708 rad/s，转子与衬套之间过盈量 0.5 mm。

3 定子橡胶衬套热力学性能评价

3.1 温度场分布

螺杆钻具在井下工作时，随着井深的增加，地层温度逐渐升高。假定地层温度由 35°C 逐渐升高至 65°C，螺杆马达定子橡胶衬套所受钻井液液柱压力由 25 MPa 逐渐升高至 55 MPa。图 1 为常规壁

厚、等壁厚螺杆马达定子橡胶衬套在钻井液液柱压力为 55 MPa, 地层温度为 65 °C 时温度分布云图。

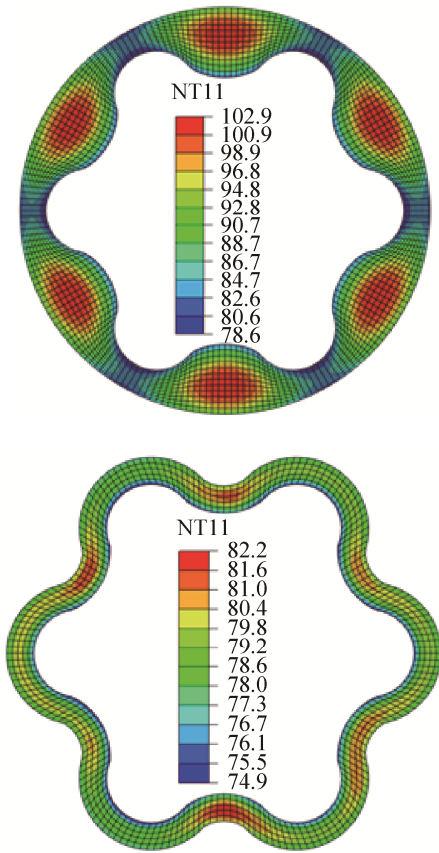


图 1 温度场分布
Fig. 1 Temperature field distribution

由图 1 可见, 常规壁厚螺杆马达橡胶衬套在厚壁中心处温度最高, 达到 102.9 °C; 在薄壁处温度最低, 温度为 78.6 °C。最低温度高于地层温度的主要原因为: 一、橡胶材料的粘弹性, 导致橡胶衬套在受到转子周期性挤压的过程中粘性损耗而生热。二、橡胶衬套的散热性较差。等壁厚螺杆马达橡胶衬套温度集中现象得到了明显的改善, 最高温度分布于内腔弧顶处, 温度为 82.2 °C, 最低温度为 74.9 °C。

图 2 为常规壁厚螺杆马达定子橡胶衬套的实际失效部位, 从图中可以看出, 在常规壁厚定子橡胶衬套厚壁处发生了失效破坏, 这与仿真结果吻合。因此, 温度过高是导致常规壁厚螺杆马达定子橡胶衬套失效的主要因素之一。

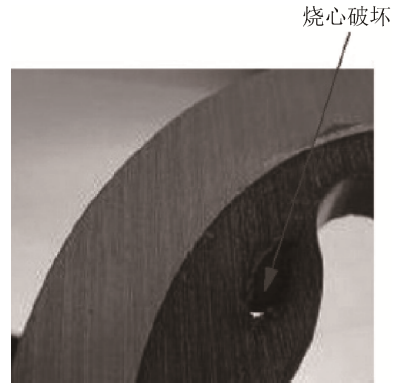


图 2 常规壁厚失效图
Fig. 2 General-distance failure image

3.2 应力分析

图 3 为钻井液液柱压力为 55 MPa, 地层温度为 65 °C 时常规壁厚与等壁厚定子橡胶衬套应力分布云图。

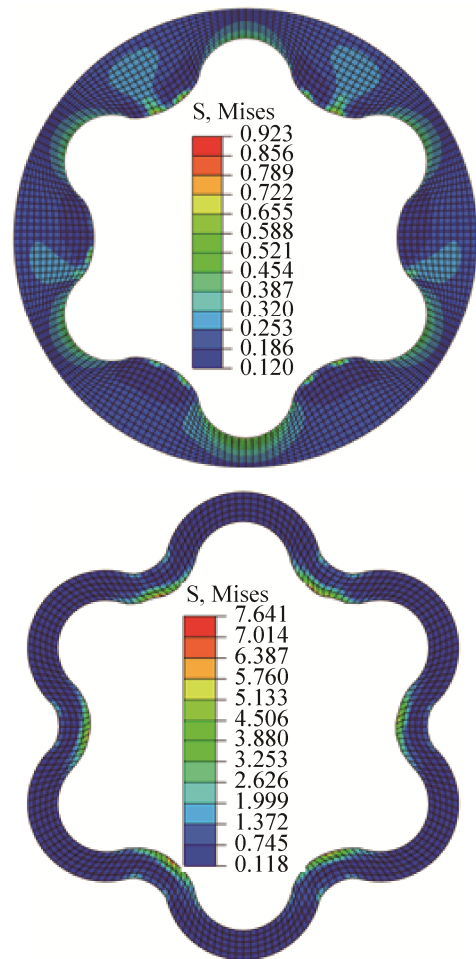


图 3 应力分布云图
Fig. 3 Stress distribution cloud image

从图3中可以看出,常规壁厚定子橡胶衬套最大应力为0.923 MPa,最小应力为0.120 MPa;等壁厚定子橡胶衬套最大应力7.641 MPa,最小应力0.118 MPa。等壁厚定子橡胶衬套的最大应力是常规壁厚定子橡胶衬套的8倍,这将导致等壁厚定子橡胶衬套内腔表面磨损严重。图4所示为等壁厚定子橡胶衬套失效图,从图中可以看出失效部位与有限元分析结果吻合。



图4 等壁厚失效图
Fig. 4 equal-distance failure image

4 定子橡胶衬套结构优化

温度场分布以及应力分析可以看出,常规壁厚定子橡胶衬套主要失效形式为烧心破坏,等壁厚定子橡胶衬套主要失效形式为内腔磨损。根据两者在结构上的差异,本文设计出了一种谐壁厚定子橡胶衬套,其横截面线型示意图如图5所示,其内腔线型与等壁厚相同,与金属定子接触的表面EF与EK均为圆弧。EF圆弧段半径分别取5 mm、7 mm、10 mm、12 mm、14 mm、16 mm、18 mm、20 mm、22 mm、26 mm,并依次命名为XR5、XR7、XR10……。从图中可以看出这种结构是常规壁厚与等壁厚的一个过渡。为了便于对比分析,有限元计算过程中,谐壁厚所需参数与等壁厚相同。

4.1 内腔位移分析

定子橡胶衬套内腔径向位移是决定螺杆马达工作稳定性的主要因素,内腔径向位移大于定转子初始过盈量,定转子所形成的密封腔室内的钻井液将会泄露,导致马达输出扭矩不稳定。假设井深从1 000 m增加到4 000 m,钻井液液柱压力从25 MPa升高至55 MPa,地层温度从35 °C升高至65 °C。

图6为常规壁厚螺杆马达定子在不同井深处定腔内腔相角与橡胶衬套径向位移的关系曲线图。

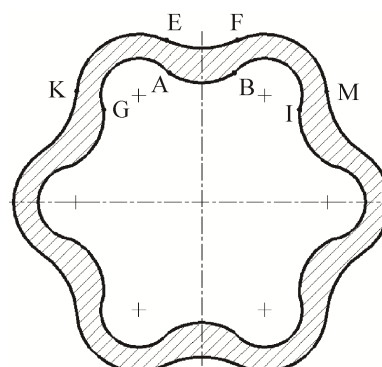


图5 谐壁厚示意图
Fig. 5 Harmonic-distance Schematic diagram

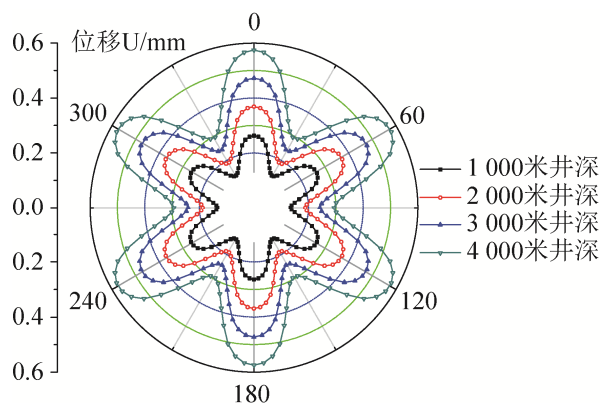


图6 常规壁厚位移-井深
Fig. 6 Displacement-well depth of general-distance

从图6中可以看出,随着井深的增加,橡胶衬套的径向位移逐渐增大,在4000米的时候径向位移的最大值达到0.57 mm,已经超出了过盈量的设定值0.5 mm。此时转子与定子形成的部分独立密封腔室之间将会串通,螺杆马达的扭矩将会迅速减小,在地面表现出来的现象就是钻无进尺。

图7为等壁厚螺杆马达与谐壁厚螺杆马达橡胶衬套在液柱压力为55 MPa,地层温度为65 °C时的内腔相角与橡胶衬套径向位移的关系曲线图。

从图7中可以看出等壁厚与谐壁厚的橡胶衬套径向位移值均小于定转子初始设定过盈量0.5 mm。谐壁厚圆弧半径为14 mm~22 mm区间时径向位移值较等壁厚更加均匀,最大位移为0.281 mm,最小位移为0.255 mm。当圆弧半径值

在这个范围之外时, 径向位移波动较大。因此, 在相同工况下, 等壁厚和谐壁厚均不会因内腔位移过大导致密封腔室钻井液泄露, 从而可以保证输出稳定的扭矩值。

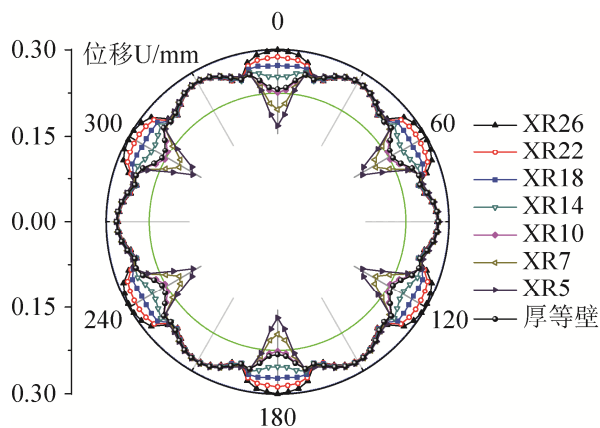


图 7 相角与位移关系曲线图

Fig. 7 Relationship diagram of phase angle and displacement

4.2 应力对比分析

内腔位移分析可知, 谐壁厚在圆弧半径为 14~22 mm 区间时, 径向位移值较等壁厚更加均匀, 因此取 XR18 进行应力对比分析。表 1 为等壁厚、XR18 在钻井液液柱压力为 55 MPa, 地层温度为 65 °C 时最大应力与最小应力有限元计算结果。

表 1 等壁厚、谐壁厚应力计算结果
Tab. 1 Stress calculation result of equal-distance and harmonic-distance

衬套结构	最大应力/MPa	最小应力/MPa
等壁厚	7.641	0.118
XR18	5.972	0.124

从表 1 可以看出 XR18 最大应力为 5.972 MPa, 最小应力为 0.124 MPa, 最大应力比相同工况下等壁厚低 1.669 MPa, 最大应力的降低将有助于提高橡胶衬套的抗磨损寿命, 因此, XR18 相比等壁厚橡胶衬套抗磨损寿命将大大提高。

图 8 表示在不同过盈量情况下, 不同半径谐壁厚在液柱压力为 55 MPa, 地层温度为 65 °C 时, 最大应力与半径的关系曲线图。从图中可以看出, 最大应力随半径的增大而减小, 相同半径的橡胶衬

套, 最大应力随过盈量的增加而增大。过盈量为 0.5 mm 时, XR14 橡胶衬套最大应力为 6.3 MPa, 等壁厚橡胶衬套最大应力为 7.641 MPa。因此, 相同工况下谐壁厚在圆弧半径为 14~22 mm 区间将会有比等壁厚更高的抗磨损寿命。

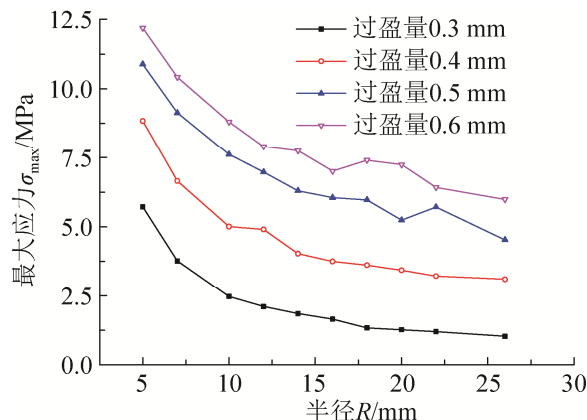


图 8 应力-半径关系曲线图

Fig. 8 Relationship diagram of stress and radius

4.3 温度场对比分析

从内腔位移分析和应力对比分析可以看出, 谐壁厚在圆弧半径为 14~22 mm 区间时, 径向位移值较等壁厚更加均匀, 并且具有更高的抗磨损寿命, 因此, 取 XR18 螺杆马达定子橡胶衬套进行温度场对比分析, 表 2 为等壁厚、XR18 在钻井液液柱压力为 55 MPa, 地层温度为 65 °C 时最高温度与最低温度有限元计算结果。

表 2 等壁厚、XR18 温度计算结果
Tab. 2 Temperature calculation of equal-distance and XR18

衬套结构	最高温度(°C)	最低温度(°C)
等壁厚	82.2	74.9
XR18	83.8	75.2

由表 2 可见, XR18 最高温度与等壁厚最高温度相差无几。因此, 温度对 XR18 的影响与等壁厚相同。

图 9 所示为钻井液液柱压力为 55 MPa, 地层温度为 65 °C 时不同半径谐壁厚的最高温度与半径的关系曲线。

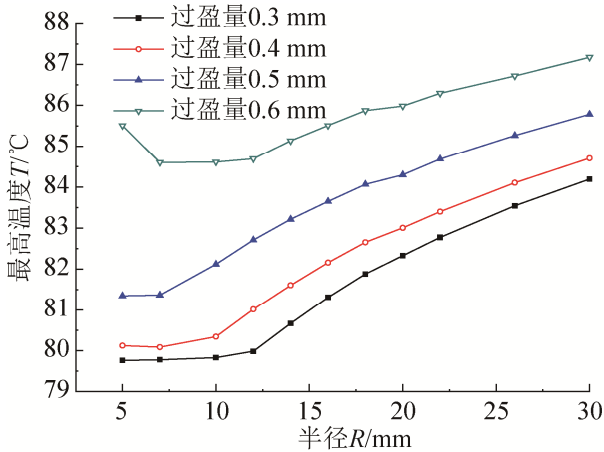


图9 最高温度-半径关系曲线图

Fig. 9 Relationship diagram of the highest temperature and radius

从图9中可以看出随着半径的减小最高温度逐渐降低,这些温度均和等壁厚最高温度接近;同一半径的谐壁厚定子随过盈量的增加最高温度呈上升趋势。

4.4 疲劳强度分析

螺杆钻具工作过程中,定子橡胶衬套受转子周期性挤压而导致疲劳失效是影响其寿命的主要因素。研究发现,最大应变一定时,提高最小应变可以很大程度上延长橡胶疲劳寿命^[12]。最小应变等于最大应变时,所受载荷即为静载,部件将不会因为疲劳而破坏。因此,在相同工况下,减小应变变化范围可以在一定程度上延长橡胶衬套疲劳寿命。

为了便于对比分析,定义橡胶衬套最大应变与最小应变的差为应变差。图10表示钻井液液柱压力为55 MPa,地层温度为65 °C时,谐壁厚与等壁厚定子橡胶衬套过盈量与应变差关系曲线图。从图中可以看出,应变差随过盈量的增加而增大,在相同过盈量的情况下,谐壁厚定子应变差随圆弧半径的增加而减小。当谐壁厚圆弧半径大于14 mm时,谐壁厚应变差明显小于相同工况下等壁厚定子橡胶衬套,在这个区间段内的橡胶衬套疲劳寿命将高于等壁厚定子橡胶衬套。

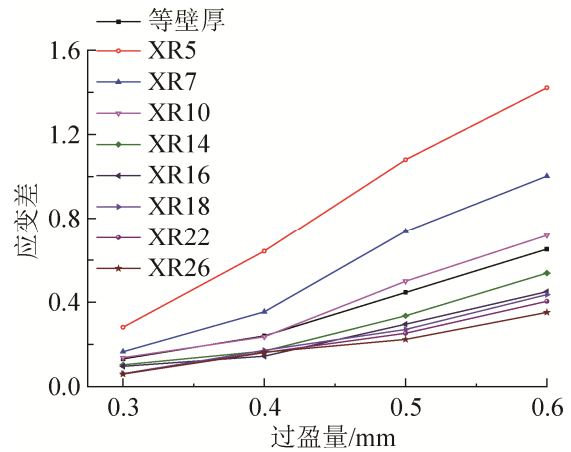


图10 过盈量-应变差关系曲线图

Fig. 10 Relationship diagram of interference and strain difference

5 结论

本文基于ABAQUS软件,通过对定子金属外壳外径 $D=172$ mm规格常规壁厚、等壁厚、谐壁厚螺杆马达定子橡胶衬套在不同工况及过盈量下的温度、位移及应力分析得出以下结论:

1) 通过对常规壁厚、等壁厚温度及应力分布研究得出,常规壁厚橡胶衬套主要失效形式为“烧心”破坏,等壁厚橡胶衬套主要失效形式为内腔磨损失效。

2) 通过对常规壁厚、等壁厚、谐壁厚的位移研究得出,内腔位移量随井深的增加而增加,在4 000 m井深处,常规壁厚内腔最大位移为0.57 mm,超出初始设定过盈量值0.5 mm,定转子密封腔室将会蹿液;而等壁厚与谐壁厚在4 000 m井深处最大位移仅为0.3 mm左右,从而可以保证定转子形成的密封腔室内的钻井液不泄露,并且谐壁厚在圆弧半径为14~22 mm范围时,定子橡胶衬套内腔位移较等壁厚更加均匀。

3) 通过对等壁厚、XR18定子橡胶衬套挤压应力研究得出,XR18定子橡胶衬套最大挤压应力相比等壁厚橡胶衬套降低22%,随半径的增加,最大挤压应力逐渐降低;相同工况下谐壁厚在圆弧半径为14~22 mm区间将会有比等壁厚更高的抗磨损寿命。

4) 通过对常规壁厚、等壁厚、XR18 定子橡胶衬套温度场研究得出, 在液柱压力为 55 MPa, 地层温度为 65 °C, 过盈量取 0.5 mm 时, 常规壁厚定子衬套在壁厚处最高温度达到 102.9 °C; 而等壁厚和 XR18 最高温度分别只有 82.2 °C、83.8 °C, 相对于常规壁厚降低了近 20%。并且谐壁厚随着半径的减小, 最高温度逐渐降低。

5) 通过对等壁厚、谐壁厚疲劳强度分析研究得出, 螺杆马达定子橡胶衬套的疲劳寿命随过盈量的增加而减小; 当谐壁厚圆弧半径大于 14 mm 时, 谐壁厚橡胶衬套疲劳寿命将高于等壁厚定子橡胶衬套。

参考文献:

- [1] 李增亮, 姜明云, 禹超, 等. 准等壁厚螺杆钻具马达断面线型设计[J]. 石油矿场机械, 2014, 43(5): 45-48.
Li Zengliang, Jiang Mingyun, Yu Chao, et al. Section Line Designing of Screw Drill Motor with Quasi Thickness Rubber Bush[J]. Oil Field Equipment, 2014, 43(5): 45-48.
- [2] 苏义脑. 螺杆钻具研究及应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001: 1-2.
Su Yinao. Research and application of PDM[M]. Bei Jing: Petroleum Industry Press, 2001:1-2.
- [3] 杨秀萍, 郭津津. 单螺杆泵定子橡胶温度场分析[J]. 润滑与密封, 2008, 33(7): 53-55.
Yang Xiuping, Guo Jinjin. Study of Temperature Field for Stator Rubber of Eccentric Screw Pump[J]. Lubrication Engineering, 2008, 33(7): 53-55.
- [4] 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.
Yang Sen, Zhao Yinghui. Failure Statistics and Analysis of Screw Drilling Tools[J]. Drilling & Production Technology, 2010, 33(3): 81-82.
- [5] 李增亮, 陈猛. 阶梯形螺杆衬套副的设计及有限元分析[J]. 石油机械, 2011, 39(1): 28-31.
Li Zengliang, Chen Meng. Design and Finite Element Analysis of Stepped Screw Bushing[J]. China Petroleum Machinery, 2011, 39(1): 28-31.
- [6] 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.
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] 韩传军, 张杰, 刘洋. 常规螺杆钻具定子衬套的热力耦合分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(6): 2311-2317.
Han Chuanjun, Zhang Jie, Liu Yang. Thermal-structure coupling analysis for general stator lining of PDM[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(6): 2311-2317.
- [8] 曹刚, 刘合, 金红杰, 等. 螺杆泵动力学热力耦合分析方法研究[J]. 计算力学学报, 2010, 27(5): 930-935.
Cao Gang, Liu He, Jin Hongjie, et al. Thermal-structure coupling analysis of PCP dynamics[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2010, 27(5): 930-935.
- [9] 王晓军, 李炜, 夏源明. 基于实验的数值反演的滚动轮胎稳态温度场的有限元分析[J]. 实验力学, 2005, 20(1): 1-9.
Wang Xiaojun, Li Wei, Xia Yuanming. Finite Element Analysis for Steady Temperature on the Rolling Tire Based on the Numerical Inverse of Tests[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2005, 20(1): 1-9.
- [10] 邢涛, 钟萍. 橡胶散热系数测量方法的研究[J]. 橡胶工业, 2001, 48(5): 266-269.
Xing Tao, Zhong Ping. The measuring methods' research of coefficient of heat transfer for rubber[J]. Rubber Industry, 2001, 48(5): 266-269.
- [11] 魏纪德, 郑学成, 岳莉. 采油螺杆泵定子温度场数值模拟分析[J]. 石油机械, 2006, 34(2): 11-14.
Wei Jide, Zheng Xuecheng, Yue Li. Numerical simulation for temperature field of a progressive cavity pump(PCP) stator[J]. China Petroleum Machinery, 2006, 34(2): 11-14.
- [12] N Saintier, G Cailletaud, R Piques. Multiaxial fatigue life prediction for a natural rubber[J]. International Journal of Fatigue(S0142-1123), 2006, 28: 530-539.