

DOI: 10.7511/jslx201704010

基于热老化实验的螺杆马达定子橡胶本构模型研究

祝效华*, 王鹏飞, 石昌帅

(西南石油大学 机电工程学院, 成都 610500)

摘要:随着我国油气资源勘探开发向深部地层迈进, 螺杆钻具定子橡胶井下高温热老化问题日益凸显, 导致螺杆钻具输出性能衰减, 严重影响钻进效率, 迫切需要揭示热老化对螺杆钻具定子橡胶力学性能的影响, 以在设计之初提出可减小螺杆钻具输出性能衰退的综合方案。本文开展了螺杆马达定子橡胶在不同温度下的热老化实验, 通过拉伸实验得出应力应变数据并拟合出 Mooney-Rivlin 模型常数和 Yeoh 模型常数; 再对所得实验数据及所求得的模型常数数据进行分析; 最后, 使用确定了基本常数的模型开展了数值计算。计算结果表明, 随着温度的上升, Mooney-Rivlin 模型常数 C_1 增大、 C_2 减小, C_1 和 C_2 呈明显相反变化的趋势, Yeoh 模型常数 C_{10} 和 C_{20} 增大, C_{30} 减小; 通过模型计算结果与室内实验测定结果的对比, 证明了 Mooney-Rivlin 模型较 Yeoh 模型更适合于螺杆马达定子橡胶的力学分析。不考虑环境温度热老化和考虑环境温度热老化, 螺杆钻具定子衬套的计算结果存在很大差别, 研究工作不仅证明了螺杆钻具定子橡胶热老化研究的必要性, 更为螺杆钻具定子橡胶的线型设计和过盈量选取提供了参考。

关键词: 螺杆钻具; 热老化实验; Mooney-Rivlin 模型; 模型常数; 数值计算

中图分类号: TE921; O242

文献标志码: A

文章编号: 1007-4708(2017)04-0459-07

1 引言

螺杆钻具已成为石油天然气开采中应用最为广泛的井下动力钻具。但是, 目前的螺杆钻具在工作 100 多小时后, 其机械效率往往会从 50% 左右下降到 35% 左右, 性能衰退严重影响钻井效率, 定子橡胶的热老化是导致螺杆钻具机械效率衰退的重要原因之一。螺杆马达定子橡胶主要遭受井下环境温度和定子橡胶滞后生热的共同老化作用, 其中井下环境温度热老化是定子橡胶热老化的主要原因。目前, 国内外螺杆钻具定子橡胶的环境温度热老化的实验研究工作鲜见文献发表。井越深井下温度越高, 我国勘探开发深井比重越来越大, 对螺杆钻具定子橡胶进行热老化实验研究, 分析环境温度对橡胶的热老化及其力学性能的变化规律等研究迫在眉睫。

在现有的国内外研究中, 赵娇红等^[1]发现了橡胶热老化过程实际是发生化学交联的过程, 交联度和交联密度随着温度的升高及老化时间增加而变

化, 它们共同影响着橡胶硬度及其力学性质的变化。文献^[2-5]对橡胶 Mooney-Rivlin 模型常数的确定方法进行了不同研究, 韩佳轩^[7]对螺杆马达定子橡胶做了 20 °C, 50 °C 和 90 °C 三组低中温老化实验, 得出了三组温度下的 Mooney-Rivlin 模型常数, 但没有对更高温度进行研究, 所以并没有得出螺杆马达定子橡胶材料的力学性能随温度的变化规律。

本文在已有研究^[1-21]的基础上, 对目前国内螺杆马达常用的定子硫化丁腈橡胶进行了不同温度的热老化实验研究。分析了橡胶材料力学性能随温度的变化规律, 并拟合出了不同温度螺杆马达定子橡胶 Mooney-Rivlin 模型常数和 Yeoh 模型常数。将两种模型的计算结果与室内实验测定结果对比, 表明 Mooney-Rivlin 模型较 Yeoh 模型更适合于螺杆马达定子橡胶的力学分析, 之后使用 Mooney-Rivlin 模型进行了不同井深的螺杆马达定子橡胶仿真研究。

2 橡胶本构及拟合理论

橡胶材料是一种复合材料, 本身属于一种高分子化合物, 在不考虑橡胶材料的蠕变、应力松弛以及 Mullins 效应等与时间相关的特点时, 可以近似地认为橡胶是完全超弹性材料。

收稿日期: 2016-07-01; 修改稿收到日期: 2016-09-22.

基金项目: 国家自然科学基金(51674214, 51604234); 四川省青年科技创新团队(2017TD0014)资助项目.

作者简介: 祝效华*(1978-), 男, 教授, 博士生导师
(E-mail: zxhth113@163.com);
王鹏飞(1991-), 男, 硕士, 助教;
石昌帅(1984-), 男, 博士, 讲师.

2.1 Mooney-Rivlin 模型

一般用应变能密度函数来表征超弹性材料的力学特性。应变能函数可以近似表示为

$$W = \sum_{i=0, j=0}^{\infty} C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (1)$$

式中 C_{ij} ($C_{00} = 0$) 为常数, I_1 和 I_2 分别为第一和第二应变不变量。

令 λ_1, λ_2 和 λ_3 分别为 x_1, x_2 和 x_3 三个主方向的拉伸比, 则

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2, \quad I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_1^2 \lambda_3^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 \quad (2)$$

式中 I_3 为第三应变不变量。对于不可压缩的橡胶材料, $I_3 = 1$ 。

按 Mooney-Rivlin 方程常用的简化形式, 硫化橡胶应变能 W 可表示为

$$W = C_1 (I_1 - 3) + C_2 (I_2 - 3) \quad (3)$$

式中 C_1 和 C_2 为力学性能常数。该模型能很好地描述变形小于 150% 的橡胶材料力学性能, 完全能满足橡胶材料实际力学性能情况。

由 Kirchhoff 应力张量 t_{ij} 和 Green 应变张量 γ_{ij} 之间的关系得

$$t_{ij} = \frac{\partial W}{\partial I_1} \frac{\partial I_1}{\partial \gamma_{ij}} + \frac{\partial W}{\partial I_2} \frac{\partial I_2}{\partial \gamma_{ij}} + \frac{\partial W}{\partial I_3} \frac{\partial I_3}{\partial \gamma_{ij}} \quad (4)$$

橡胶材料主应力 t_i 与其主伸长比 λ_i 之间的关系为

$$t_i = 2 \left[\lambda_i^2 \frac{\partial W}{\partial I_1} + \frac{1}{\lambda_i^2} \frac{\partial W}{\partial I_2} \right] + P \quad (5)$$

式中 P 为任意流体静压力。

由式(5)可得出主应力差值为

$$t_1 - t_2 = 2(\lambda_1^2 - \lambda_2^2) \left[\frac{\partial W}{\partial I_1} + \lambda_3^2 \frac{\partial W}{\partial I_2} \right] \quad (6)$$

对于单轴拉伸试验可知, $t_2 = t_3 = 0$, 则 $\lambda_2^2 = \lambda_3^2 = 1/\lambda_1$ 因此

$$t_1 = 2 \left[\lambda_1^2 - \frac{1}{\lambda_1} \right] \left[\frac{\partial W}{\partial I_1} + \frac{1}{\lambda_1} \frac{\partial W}{\partial I_2} \right] \quad (7)$$

对式(3)两边分别求 I_1 和 I_2 偏导得

$$\frac{\partial W}{\partial I_1} = C_1, \quad \frac{\partial W}{\partial I_2} = C_2 \quad (8)$$

将式(8)代入式(7)得

$$t = 2 \left[\lambda^2 - \frac{1}{\lambda} \right] \left[C_1 + \frac{1}{\lambda} C_2 \right] \quad (9)$$

根据力学公式, 真实应力 t 和工程应力 σ 的关系为

$$t = \lambda \sigma \quad (10)$$

所以, 得出工程应力与工程应变关系为

$$\sigma = t \frac{1}{\lambda} = 2 \left[\lambda - \frac{1}{\lambda^2} \right] \left[C_1 + \frac{1}{\lambda} C_2 \right] \quad (11)$$

式(11)即是单向拉伸试验确定 Mooney-Rivlin 模型常数 C_1 和 C_2 的方法, 以 $1/\lambda$ 为横坐标参数 x ,

以 $\sigma/[2(\lambda - 1/\lambda^2)]$ 为纵坐标参数 y , 拟合出一条直线, C_1 为该直线的截距, C_2 为该直线的斜率。

2.2 Yeoh 模型

Yeoh 模型的橡胶应变能密度函数为

$$W = \sum_{i=1}^N C_{i0} (I_1 - 3)^i + \sum_{i=1}^N \frac{1}{d_i} (J - 1)^{2i} \quad (12)$$

式中 C_{i0} 为 Yeoh 模型系数, N 一般为 3, 对于不可压缩材料 J 为 1, 则有

$$W = C_{10} (I_1 - 3) + C_{20} (I_1 - 3)^2 + C_{30} (I_1 - 3)^3 \quad (13)$$

对式(13)两边求 I_1 和 I_2 的偏导, 得出

$$\begin{aligned} \frac{\partial W}{\partial I_1} &= C_{10} + 2C_{20} (I_1 - 3) + 3C_{30} (I_1 - 3)^2 \\ \frac{\partial W}{\partial I_2} &= 0 \end{aligned} \quad (14)$$

采用单轴拉伸实验进行 Yeoh 模型常数 C_{10} , C_{20} 和 C_{30} 的测定, 即可按照 Mooney-Rivlin 模型相同的计算方法, 得出式(7)。

将式(14)代入式(7)可推出

$$t_1 = 2(\lambda_1^2 - 1/\lambda_1) [C_{10} + 2C_{20} (I_1 - 3) + 3C_{30} (I_1 - 3)^2] \quad (15)$$

将式(2)代入 $\lambda_2^2 = \lambda_3^2 = 1/\lambda_1$ 可得

$$I_1 = \lambda_1^2 + 2/\lambda_1 \quad (16)$$

将式(10, 16)代入式(15)可推出

$$C_{10} + 2C_{20} (\lambda^2 + 2/\lambda - 3) + 3C_{30} (\lambda^2 + 2/\lambda - 3)^2 = \sigma/[2(\lambda - 1/\lambda^2)] \quad (17)$$

式(17)即是单轴拉伸实验确定 Yeoh 模型常数 C_{10} , C_{20} 和 C_{30} 的方法, 以 $\lambda^2 + 2/\lambda - 3$ 为横坐标参数 a , 以 $\sigma/[2(\lambda - 1/\lambda^2)]$ 为纵坐标参数 b , 拟合出一条二次曲线, C_{10} 为零次项系数值, C_{20} 为 1/2 一次项系数值, C_{30} 为 1/3 二次项系数值。

3 热老化实验研究

实验材料为硫化丁腈橡胶, 实验设备为上海叶拓仪表仪器公司生产的 U5202 橡胶热老化实验箱和济南耐而试验机公司生产的 WDW-10E 橡胶拉伸实验机。实验步骤如下。

(1) 将硫化丁腈橡胶按 ASTM 标准裁成如图 1(a)所示的哑铃型拉伸试件。

(2) 如图 1(b)所示, 将试样放置在老化试验箱里进行 24 小时的热老化处理。实验分别进行了除常温 (30 °C) 以外的 60 °C, 90 °C, 105 °C 和 120 °C 四组温度的热老化处理。

(3) 将热处理后的试样在橡胶拉伸实验机上进行图 1(c)所示的拉伸试验, 得出工程应力 σ 和工程应变 ϵ 数据。

每组温度拉伸 5 个不同试样,采用均值将实验所得应力应变数据按式(11,17)分别计算得出拟合 Mooney-Rivlin 模型常数所需的横纵坐标参数和拟合 Yeoh 模型常数所需的横纵坐标参数。

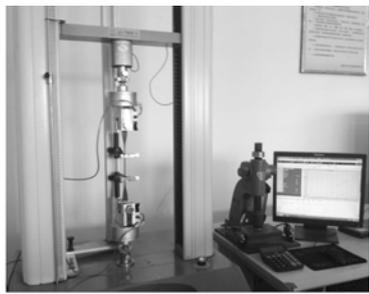
将上述计算所得的拟合 Mooney-Rivlin 模型常数所需的横纵坐标参数 x 和 y 数据拟合成一条直线,如图 2 所示,直线的截距为 C_1 ,斜率为 C_2 ,分别得出不同温度螺杆马达定子橡胶 Mooney-Rivlin 模型的 C_1 和 C_2 并列入表 1。由表 1 可知,随着温度的上升, C_1 增大, C_2 减小, C_1 和 C_2 呈明显的相反变化的趋势。



(a) 橡胶标准试样



(b) 热老化处理



(c) 橡胶拉伸试验

图 1 实验过程

Fig. 1 Chart of the experiment process

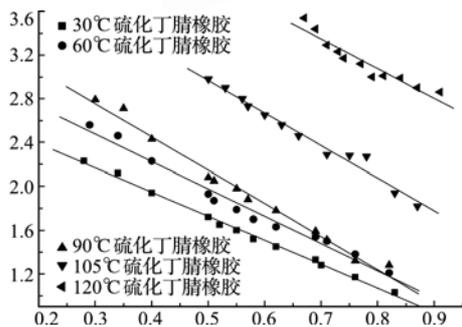


图 2 不同温度硫化丁腈橡胶 M-R 模型拟合直线

Fig. 2 Fitting line of vulcanized acrylonitrile butadiene rubber M-R model in different temperatures

将上述计算所得的拟合 Yeoh 模型常数所需的横纵坐标参数 x 和 y 数据拟合成一条二次曲线,如图 3 所示,分别得出不同温度螺杆马达定子橡胶 Yeoh 模型的 C_{10} , C_{20} 和 C_{30} , 列入表 2。由表 2 可知,随着温度的上升, C_{10} 和 C_{20} 增大, C_{30} 减小。

4 Mooney-Rivlin 模型和 Yeoh 模型对马达定子橡胶力学分析的适用性

按照试验试样尺寸建立拉伸试样有限元模型,如图 4 所示。模拟单轴拉伸试验,有限元模型左端为全约束,右端的节点施加拉应力载荷。本构模型分别选用 Mooney-Rivlin 模型和 Yeoh 模型,模型常数分别选用实验所得 30 °C 硫化丁腈橡胶数据和 90 °C 硫化丁腈橡胶数据,利用 Abaqus 软件对试样进行各个水平拉应力下的单轴拉伸实验模拟仿真。仿真数据分别与实际实验数据对比分析。

表 1 不同温度下的定子橡胶 M-R 模型常数值
Tab. 1 M-R model constants of stator rubber in different temperatures

常数	硫化丁腈橡胶				
	30 °C	60 °C	90 °C	105 °C	120 °C
C_1	2.86	3.38	3.72	4.87	6.14
C_2	-2.31	-2.86	-3.31	-3.76	-4.48

表 2 不同温度下的定子橡胶 Yeoh 模型常数值
Tab. 2 Yeoh model constants of stator rubber in different temperatures

常数	硫化丁腈橡胶				
	30 °C	60 °C	90 °C	105 °C	120 °C
C_{10}	1.147	1.307	1.316	1.975	2.520
C_{20}	0.141	0.175	0.209	0.385	0.572
C_{30}	-0.006	-0.008	-0.009	-0.038	-0.114

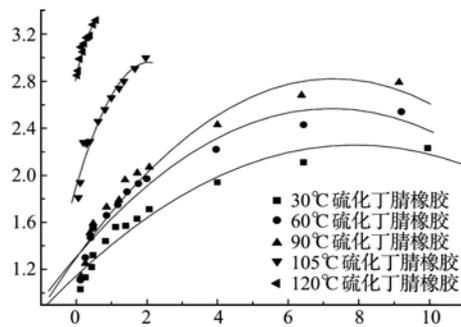


图 3 不同温度硫化丁腈橡胶 Yeoh 模型拟合二次曲线

Fig. 3 Fitting conic of vulcanized acrylonitrile butadiene rubber Yeoh model in different temperatures

图5中30℃常温定子橡胶,M-R模型应力应变曲线和Yeoh模型应力应变曲线与实验应力应变曲线都有一定的差距,但能明显看出M-R模型应力应变曲线与实验应力应变曲线更相近。对于90℃热老化的定子橡胶,M-R模型应力应变曲线在应变为0~1.5区间与实验应力应变曲线更相近,Yeoh模型应力应变曲线在应变为1.5~2.5区间与实验应力应变曲线更相近,考虑到马达定子橡胶工作时变形小的特点,同样选择M-R模型进行仿真研究。

综上所述,无论是常温橡胶还是热老化橡胶,M-R模型都更适合于马达定子橡胶的力学分析。

5 不同井深考虑和不考虑环境温度热老化定子橡胶仿真研究

建立计算模型如图6所示,几何参数和物理参数选取如下,外壳体直径172 mm,弹性模量210 GPa,泊松比0.3;橡胶衬套的内腔轮廓尺寸取决于转子半径 r 和偏心距 e , r 取39 mm, e 取7.99 mm;本构模型选用M-R模型,模型常数根据不同温度取上述实验所得值。文献[7]对单头螺杆泵衬套分别进行了三维和二维模型的有限元计算,结果表明两者差别很小,为提高计算效率,本文的5/6头螺杆马达定子衬套分析也按平面模型求解。



图4 试样网格模型
Fig. 4 Mesh model of the sample

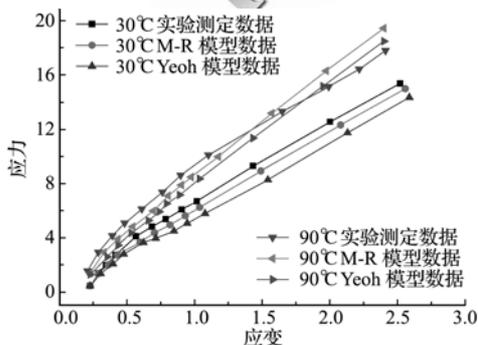


图5 M-R模型数据、Yeoh模型数据及实验数据的对比
Fig. 5 M-R model data, Yeoh model data and the comparison of experimental data

求解过程分两步,第一步向螺杆马达定子衬套施加相应的均匀内压,第二步施加0.8 MPa的压差。由施工经验计算可知温度60℃,90℃,105℃和120℃时,其对应井深分别约为1.75 km,3.25 km,4 km和4.75 km,按钻井液密度为1200 kg/m³计算得静压分别为21 MPa,39 MPa,48 MPa和57 MPa。

如图7所示,同一井深时,不考虑环境温度热老化的定子法向位移较考虑环境温度热老化定子橡胶法向位移大,且随着井深的增大,两者差值逐渐增大,4.75 km井深时,不考虑环境温度热老化比考虑环境温度热老化定子橡胶最大法向位移大200%左右。不考虑环境温度热老化的定子橡胶法向位移随井深增加逐渐增大,考虑环境温度热老化定子橡胶法向位移在1.75 km~3.25 km井深时逐渐增大,在3.25 km~4.75 km井深时逐渐减小。

不考虑环境致热老化,计算出来的法向变形量偏高,这给螺杆钻具线型设计者一个误导,设计者为了提高产品的输出机械效率,错误地采用大的过盈量,从而加剧了定转子之间的挤压,会导致定子橡胶表面层过早撕裂。采用更加真实的考虑环境致热老化模型后,计算的法向变形量更接近实际,从数值上看几乎缩小1/2,这为线型设计者提供更加正确的参考,从而可以延长使用寿命。

如图8所示,类似法向位移,同一井深时不考虑环境温度热老化的定子切向位移同样比考虑环境温度热老化定子橡胶切向位移大,且同样随着井深的增大,两者差值逐渐增大。不考虑橡胶环境温度热老化的定子橡胶切向位移同样随井深增加逐渐增大,考虑橡胶环境温度热老化定子切向位移也同样在1.75 km~3.25 km井深时逐渐增大,在3.25 km~4.75 km井深时逐渐减小。

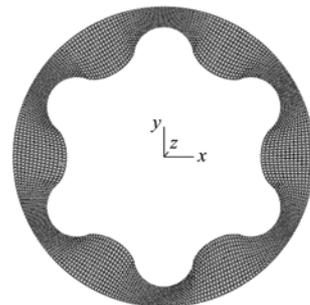


图6 橡胶定子衬套的有限元模型
Fig. 6 Finite element model of screw drill's stator bushing

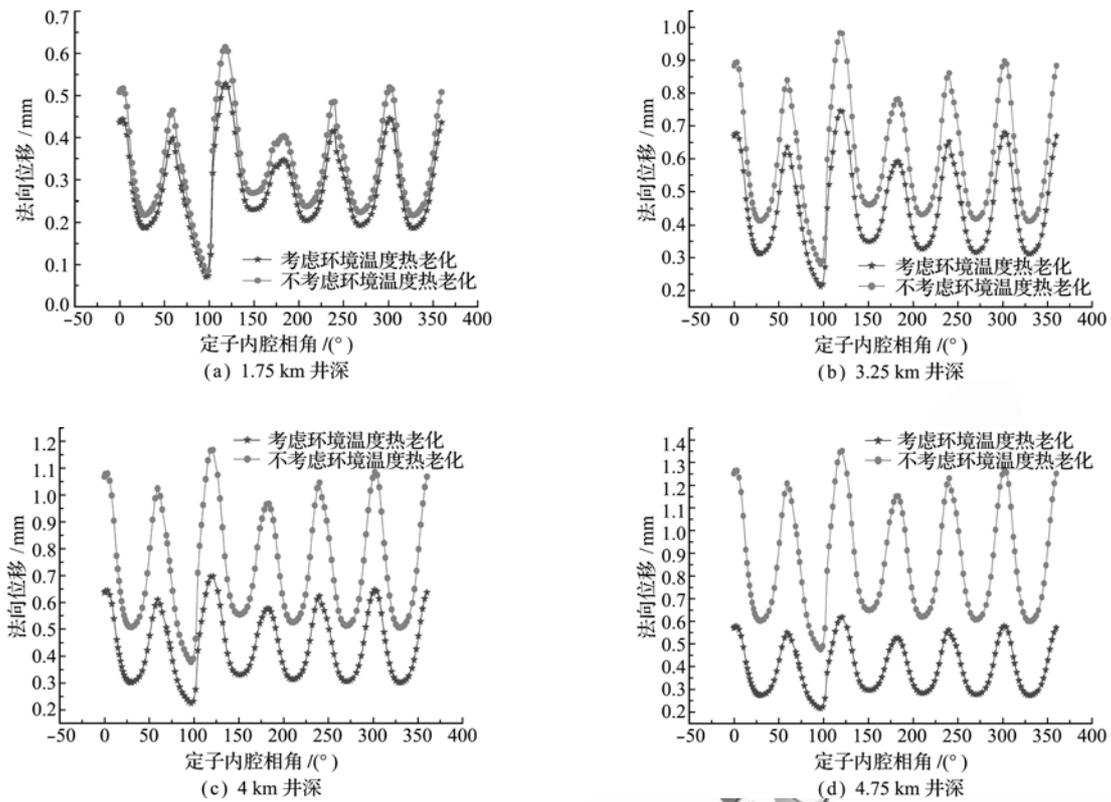


图7 不同井深考虑和不考虑环境温度热老化时定子衬套法向位移对比

Fig. 7 Stator bushing normal displacement's comparison chart of considering and not considering the thermal aging of ambient temperature in various depth

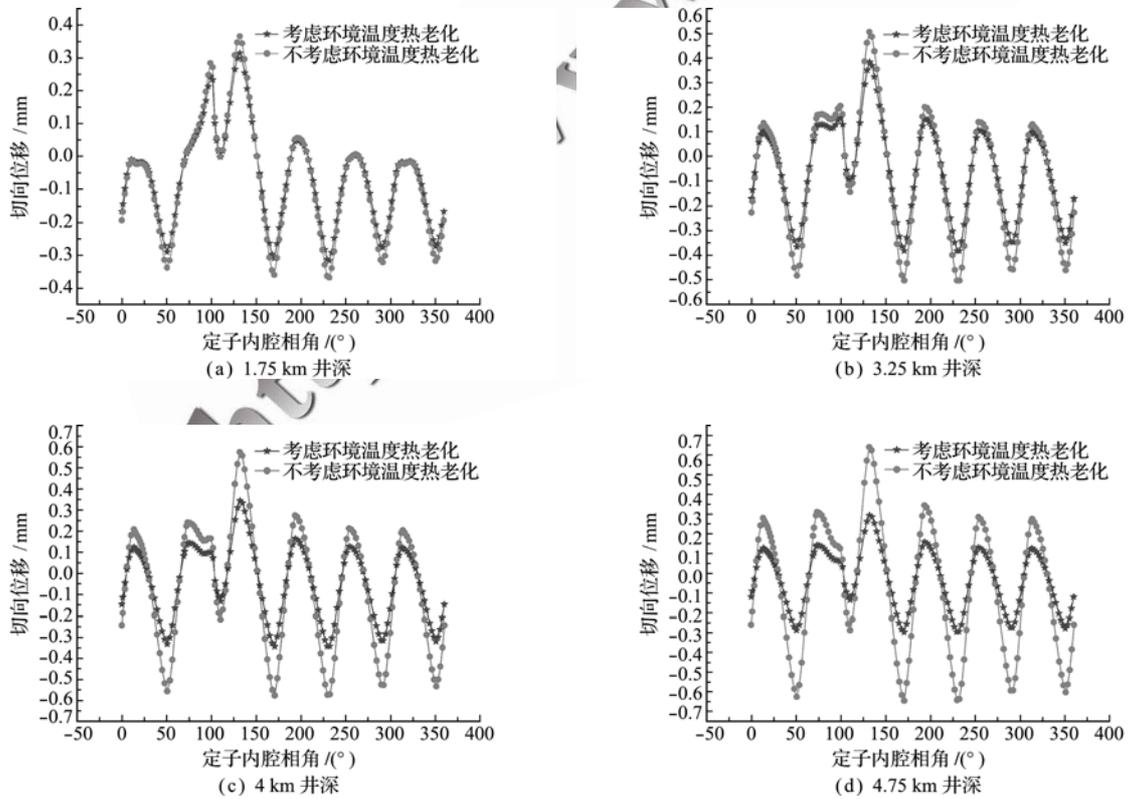


图8 不同井深考虑和不考虑环境温度热老化时定子衬套切向位移对比

Fig. 8 Stator bushing tangent displacement's comparison chart of considering and not considering the thermal aging of ambient temperature in various depth

6 结 论

(1) 计算得出了螺杆马达定子橡胶不同温度工况时的 Mooney-Rivlin 模型常数和 Yeoh 模型常数。研究表明,随着温度的上升,Mooney-Rivlin 模型常数 C_1 增加, C_2 减小, C_1 和 C_2 呈明显相反变化的趋势, Yeoh 模型常数 C_{10} 和 C_{20} 增大, C_{30} 减小。将模型计算结果和室内实验测定对比,发现 Mooney-Rivlin 模型比 Yeoh 模型更适合于螺杆马达定子橡胶的力学分析。本文确定了最适宜的螺杆马达定子橡胶本构模型,且提供了不同温度下不同的本构模型常数,与现有模型相比,本文为线型设计提供了计算精度更高的本构模型。

(2) 数值计算表明,考虑环境温度热老化时,计算得出的法向位移和切向位移,与不考虑环境温度热老化时相差很大,几乎相差 2 倍。不考虑环境温度热老化,将导致错误的过盈量参数选择,从而导致定转子之间的超过盈配合,使得输出效率快速衰减,大幅度降低定子使用寿命。

在环境温度导致热老化研究(本文研究工作)的基础上,如果再深入研究定转子碾压撞击导致的定子橡胶心部热滞导致的热老化,将为定转子线型设计提供更为精准的理论参考。

参考文献(References):

- [1] Zhao J H, Yang R, Iervolino R, et al. Investigation of crosslinking in the thermooxidative aging of nitrile-butadiene rubber[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2015, **132**(3): 41319.
- [2] 左 亮,肖绯雄. 橡胶 Mooney-Rivlin 模型材料系数的一种确定方法[J]. *机械制造*, 2008, **46**(7): 38-40. (ZUO Liang, XIAO Fei-xiong. A method of determining of material coefficient of rubber's Mooney-Rivlin model [J]. *Machinery*, 2008, **46**(7): 38-40. (in Chinese))
- [3] 郑明军,王文静,陈政南,等. 橡胶 Mooney-Rivlin 模型力学性能常数的确定[J]. *橡胶工业*, 2003, **50**(8): 462-465. (ZHENG Ming-jun, WANG Wen-jing, CHEN Zheng-nan, et al. Rubber's Mooney-Rivlin model's mechanical properties constants's determination[J]. *China Rubber Industry*, 2003, **50**(8): 462-465. (in Chinese))
- [4] 何春明,郑慕侨. 测定橡胶 Mooney-Rivlin 模型常数的一种新方法[J]. *北京理工大学学报*, 1997, **17**(2): 142-146. (HE Chun-ming, ZHENG Mu-qiao. A new method for determining the Mooney-Rivlin model constants of rubber[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 1997, **17**(2): 142-146. (in Chinese))
- [5] 王 伟,邓 涛,赵树高,等. 橡胶 Mooney-Rivlin 模型中材料常数的确定[J]. *特种橡胶制品*, 2004, **25**(4): 8-10. (WANG Wei, DENG Tao, ZHAO Shu-gao, et al. Determination of material constants of rubber Mooney-Rivlin model[J]. *Special Rubber Products*, 2004, **25**(4): 8-10. (in Chinese))
- [6] 方庆红,张凤鹏,黄宝宗. 不同温度条件下硫化橡胶拉伸特性的研究[J]. *建筑材料学报*, 2005, **8**(4): 383-386. (FANG Qing-hong, ZHANG Feng-peng, HUANG Bao-zong. Study on tensile properties of vulcanized rubber under different temperature conditions [J]. *Journal of Building Materials*, 2005, **8**(4): 383-386. (in Chinese))
- [7] 韩佳轩. 螺杆泵定子橡胶的疲劳寿命研究[D]. 东北石油大学, 2013. (HAN Jia-xuan. Study on the Fatigue Life of the Screw Pump Stator Rubber [D]. Northeast Petroleum University, 2013. (in Chinese))
- [9] 王 锋,董玉华,郭文娟,等. 氯丁橡胶的老化和寿命预测研究[J]. *弹性体*, 2013, **23**(1): 22-25. (WANG Feng, DONG Yu-hua, GUO Wen-juan, et al. Study on the aging and life prediction of the static pressure of the static pressure of the rubber[J]. *Elastomer*, 2013, **23**(1): 22-25. (in Chinese))
- [10] Liu X, Zhao J H, Liu Y, et al. Volatile components changes during thermal aging of nitrile rubber by flash evaporation of Py-GC/MS [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2015, **113**: 193-201.
- [11] Liu J, Zhang L W, Wang B, et al. Effect of thermal aging on mechanical properties of EPDM rubber[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, **727**: 318-321.
- [12] 张 劲,张士诚. 常规螺杆泵定子有限元求解策略[J]. *机械工程学报*, 2004, **40**(5): 189-193. (ZHANG Jin, ZHANG Shi-cheng. Finite element method for solving the conventional screw pump stator [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2004, **40**(5): 189-193. (in Chinese))
- [13] 张 劲,张士诚. 等壁厚螺杆泵定子的有限元分析[J]. *中国机械工程*, 2004, **5**(16): 1462-1464. (ZHANG Jin, ZHANG Shi-cheng. Finite element analysis of the stator of equal thickness screw pump [J]. *China Mechanical Engineering*, 2004, **15**(16): 1462-1464. (in Chinese))
- [14] 任全彬,蔡体敏,安春利,等. 硅橡胶 O 形密封圈 Mooney-Rivlin 模型常数的确定[J]. *固体火箭技术*, 2006, **29**(2): 130-134. (REN Quan-bin, CAI Ti-min, AN Chun-li, et al. The determination of the O-shaped sealing ring of silicone rubber Mooney-Rivlin model's constants[J]. *Solid Rocket Technology*, 2006, **29**(2): 130-134. (in Chinese))
- [15] 杨晓翔. 非线性橡胶材料的有限单元法[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999. (YANG Xiao-xiang. *Finite Element Method for Nonlinear Rubber Materials* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999. (in Chinese))

- [16] 洪升,张小鹏,杨全生. 橡胶大变形力学常数测试研究[J]. 大连理工大学学报, 1989, **29**(6): 629-673. (HONG Sheng, ZHANG Xiao-peng, YANG Quan-sheng. Study on the mechanical constants of rubber large deformation[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 1989, **29**(6): 629-673. (in Chinese))
- [17] 危银涛,杨挺青,杜星文. 橡胶类材料大变形本构关系及其有限元方法[J]. 固体力学学报, 1999, **20**(6): 281-289. (WEI Yin-tao, YANG Ting-qing, DU Xing-wen. Constitutive relation and finite element method for large deformation of rubber materials[J]. *Journal of Solid Mechanics*, 1999, **20**(6): 281-289. (in Chinese))
- [18] 黄建龙,解广娟,刘正伟. 基于 Mooney-Rivlin 模型和 Yeoh 模型的超弹性橡胶材料有限元分析[J]. 橡胶工业, 2008, **55**(8): 467-471. (HUANG Jian-long, XIE Guan-juan, LIU Zheng-wei. Finite element analysis of super elastic rubber based on Mooney-Rivlin model and Yeoh model [J]. *Rubber Industry*, 2008, **55**(8): 467-471. (in Chinese))
- [19] 朱艳峰,王红. 橡胶材料硬化的本构模型与有限元分析[J]. 武汉工程大学学报, 2008, **30**(1): 34-36. (ZHU Yan-feng, WANG Hong. Constitutive model and finite element analysis of the hardening of rubber materials[J]. *Journal of Wuhan Institute of Technology*, 2008, **30**(1): 34-36. (in Chinese))
- [20] 祝效华,石昌帅,童华. 静压/压差与泊松比对定子衬套变形的影响[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2010, **32**(6): 175-179. (ZHU Xiao-hua, SHI Chang-shuai, TONG Hua. Effect of static pressure/pressure difference and Poisson's ration the deformation of stator bushing [J]. *Journal of Southwest Petroleum University(Natural Science Edition)*, 2010, **32**(6): 175-179. (in Chinese))
- [21] 郭辉,郭文军,陶俊林. 泡沫橡胶材料的超弹性本构模型[J]. 计算力学学报, 2013, **30**(4): 575-579. (GUO Hui, GUO Wen-jun, TAO Jun-lin. Elastic constitutive model of foam rubber[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2013, **30**(4): 575-579. (in Chinese))

Study on the constitutive model of the screw motor's stator rubber based on thermal aging experiment

ZHU Xiao-hua*, WANG Peng-fei, SHI Chang-shuai

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

Abstract: With the exploration and development of the oil and gas resources to the deep formation in China, high temperature-induced thermal aging problem of the screw drill's stator rubber in the underground becomes increasingly prominent. This causes serious deterioration of the screw drill's output performance and seriously affects drilling efficiency. It is urgent to know the influence of thermal aging on the mechanical properties of the screw drill's stator rubber. We propose a comprehensive scheme that decreases the decline of the screw drill's output properties at the beginning of the design stage. This paper carried out thermal aging experiments of screw motor's stator rubber at different temperatures, derived stress-strain data for tensile tests and fitted the Mooney-Rivlin model and Yeoh model. Then the test data and the model constants are analyzed. At last numerical calculations are performed by using the models. Calculation results show that: With increasing temperature, the screw drill's stator rubber is in a state of continuous hardening, and the average hardening rate at moderate and high temperatures (90 °C ~ 120 °C) is 116% higher than the average hardening rate at low temperatures (30 °C ~ 90 °C); for Mooney-Rivlin model, constants C_1 increases and C_2 decreases. C_1 and C_2 have an obviously opposite trend; Yeoh model constants C_{10} and C_{20} increase, but C_{30} decreases. Through the comparison between calculation results of the model and the indoor experimental results, we proved that Mooney-Rivlin model is more suitable for the screw motor's stator rubber than the Yeoh model. Consideration of thermal aging at ambient temperature or omission makes a great difference in the calculation results of screw drill's stator bushing. This research work not only proves that the thermal aging research of screw drill's stator rubber not only is necessary, but also provides reference for the design of screw drill's stator rubber and the selection of interference magnitude.

Key words: screw drill; experiment; thermal aging; M-R model; numerical analysis

引用本文/Cite this paper:

祝效华,王鹏飞,石昌帅. 基于热老化实验的螺杆马达定子橡胶本构模型研究[J]. 计算力学学报, 2017, **34**(4): 459-465.

ZHU Xiao-hua, WANG Peng-fei, SHI Chang-shuai. Study on the constitutive model of the screw motor's stator rubber based on thermal aging experiment [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2017, **34**(4): 459-465.