

文章编号: 0253-2697(2024)10-1538-14 DOI:10. 7623/syxb202410008

基于溶胀老化实验的螺杆钻具橡胶衬套性能

王国荣^{1,2} 徐简繁^{1,2} 米凯夫³ 胡 刚^{1,2} 文新铭^{1,2} 刘业鹏^{1,2}

(1. 西南石油大学机电工程学院 四川成都 610500;

2. 西南石油大学能源装备研究院 四川成都 610500; 3. 北京石油机械有限公司 北京 102200)

摘要:随着油气资源勘探技术的不断发展,中国油气资源逐步从浅层油气井开发迈向到深层、超深层油气井开发的阶段,螺杆钻具橡胶衬套井下高温热老化和油基钻井液溶胀问题显著,导致螺杆钻具输出性能衰减,严重影响钻进效率。因此,亟需揭示高温条件下溶胀作用对橡胶衬套性能的影响。通过开展橡胶材料高温溶胀老化实验和材料性能实验,优选出了超弹本构模型为 Yeoh 模型,使用不同溶胀时长的本构参数和溶胀当量温度建立有限元模型,分析了不同溶胀时长对橡胶衬套内腔变形、力学性能、密封性能、过流面积和滞后生热的影响。研究结果表明,随着溶胀时长的增加:①内腔变形量先逐渐升高,后趋于平缓;②Von Mises 应力和接触应力逐渐增大;③过流面积逐渐减小,并趋于平缓,在溶胀饱和状态时,过流面积降低了 12.2%;④热滞后最高温升逐渐增大。

关键词:橡胶衬套;溶胀老化实验;Yeoh 模型;温度当量法;有限元分析

中图分类号:TE921

文献标识码:A

Performance of rubber stator bushing in screw drilling tools based on swelling and aging experiments

Wang Guorong^{1,2} Xu Jianfan^{1,2} Mi Kaifu³ Hu Gang^{1,2} Wen Xinming^{1,2} Liu Yepeng^{1,2}

(1. School of Mechatronic Engineering, Southwest Petroleum University, Sichuan Chengdu 610500, China;

2. Energy Equipment Research Institute, Southwest Petroleum University, Sichuan Chengdu 610500, China;

3. Beijing Petroleum Machinery Co., Ltd., Beijing 102200, China)

Abstract: With the continuous advancement of oil and gas exploration technology, China's oil and gas resources development has entered the stage of gradually shifting from shallow wells to deep and ultra-deep wells. This transition has brought about the forefront significant issues regarding rubber stator bushing in screw drilling tools, such as high-temperature thermal aging, and swelling in oil-based drilling fluids. These issues lead to the performance deterioration of drilling tools, thus severely affecting drilling efficiency. Therefore, it is urgent to understand the impact of swelling on the performance of rubber stator bushing at high temperatures. Through high-temperature swelling and aging experiments on rubber materials and subsequent performance testing, Yeoh model was selected as the hyperelastic constitutive model. Finite element models were established using constitutive parameters and swelling equivalent temperatures for different swelling durations. The effects of swelling duration on the inner cavity deformation of the rubber stator bushing mechanical properties, sealing performance, flow area, and hysteretic heating were analyzed. The research results show that with the increasing of swelling duration, the inner cavity deformation is initially increased and then begins to level off; the Von Mises stress and contact stress gradually increase; the flow area gradually decreases and then tends to be stabilized, which is reduced by 12.2% in case of swelling saturation; the maximum temperature rise due to hysteresis heating gradually increases. This study provides a guidance for the design and application of rubber stator bushing in screw drilling tools under harsh conditions of high-temperature and high-pressure drilling fluids.

Key words: rubber stator bushing; swelling and aging experiment; Yeoh Model; temperature equivalence method; finite element analysis

引用:王国荣,徐简繁,米凯夫,胡刚,文新铭,刘业鹏. 基于溶胀老化实验的螺杆钻具橡胶衬套性能[J]. 石油学报, 2024, 45(10): 1538-1551.

Cite: WANG Guorong, XU Jianfan, MI Kaifu, HU Gang, WEN Xinming, LIU Yepeng. Performance of rubber stator bushing in screw drilling tools based on swelling and aging experiments[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(10): 1538-1551.

基金项目:四川省科技厅自然科学基金创新研究群体项目(2023NSFSC1980)资助。

第一作者:王国荣,男,1977年9月生,2004年获西南石油学院机械设计及理论专业博士学位,现为西南石油大学机电工程学院教授、博士生导师,主要从事钻柱/隔水管柱动力学、摩擦学理论及应用、钻头与井下工具、石油天然气装备现代化设计理论及方法研究。Email: swpi2002@163.com

通信作者:胡 刚,男,1987年10月生,2018年获西南石油大学机械工程专业博士学位,现为西南石油大学机电工程学院副教授、硕士生导师,主要从事橡胶密封机理、智能完井工具等研究。Email: swpu_hugang@163.com

中国是全球原油和天然气进口量最大的国家之一。为了保障能源安全,亟需加大深井、超深井及定向井的勘探开发^[1-2]。而螺杆钻具作为主要的井下动力钻具,在深井、超深井及定向井的勘探开发时,长期处于高温、高压和油基钻井液的环境中,橡胶衬套易发生溶胀老化现象,衬套材料性能下降,体积膨胀会加剧金属转子对橡胶衬套的挤压,最终致使橡胶衬套发生磨损、疲劳、脱胶、烧心等失效^[3]。因此,有必要研究橡胶衬套材料在高温、高压和油基钻井液环境下产生的溶胀老化现象,并研究其对橡胶衬套性能的影响。

油基钻井液中含有烃类化合物、有机溶剂等物质^[4],螺杆钻具橡胶衬套长期处于其中,橡胶材料难以避免溶胀老化现象的发生。王慧明等^[5]研究了不同丙烯腈含量的丁腈橡胶(N18、N26 和 N41)在不同温度下原油介质中的溶胀行为,并用环块试验机研究了溶胀后丁腈橡胶(NBR)的摩擦磨损行为。研究结果表明,N18 和 N26 的质量变化率随温度的升高呈线性增加,而 N41 的质量变化率略有下降;随着浸泡温度的升高,NBR 的磨损量增加,而摩擦系数逐渐降低;丙烯腈含量越高,NBR 的抗溶胀性和耐磨性越好。李波等^[6]研究不同饱和度的氢化丁腈橡胶(HNBR)在水基钻井液中的耐高温性能发现,在水基钻井液中,水的浸入对胶料的硬度、体积等指标影响很大。另外,杜斌等^[7]探究 HNBR 在油田介质中的性能变化发现,180 ℃时 HNBR 在柴油中的体积变化率较小,而在油基钻井液和水基钻井液中的体积变化率较大,其性能上也发生很大改变。郝艳捧等^[8]研究了水和盐水对三元乙丙橡胶密封圈热老化特性的影响,对密封圈进行了湿压缩与热压缩等多因素加速老化实验的结果表明,水和盐水会腐蚀密封圈,加剧橡胶材料的断链和氧化反应,产生裂纹;橡胶会吸水膨胀,压缩永久变形变大,密封性能严重下降。

综上所述,橡胶材料在高温介质中会产生溶胀老化现象,在微观上影响橡胶材料内部分子链结构,进而

影响橡胶材料的宏观力学性质,最终导致橡胶制品工作性能的下降。但许多学者在螺杆钻具橡胶衬套的材料配方^[9-10]、过盈量设计^[11]、变形规律^[12]、热滞后温升^[13-16]、疲劳性能^[17-21]等方面进行了大量的研究,却很少考虑到在高温情况下橡胶材料的溶胀作用对橡胶衬套的影响。因此,笔者开展螺杆钻具定子橡胶材料的溶胀老化试验和材料力学性能试验,分析了橡胶材料在不同溶胀时长下的性能变化,拟合出了溶胀老化后的橡胶材料本构模型参数;基于二维及三维有限元模型,研究不同溶胀时长对常规壁厚衬套的内腔变形、力学特性、密封性能、过流面积以及滞后生热的影响。

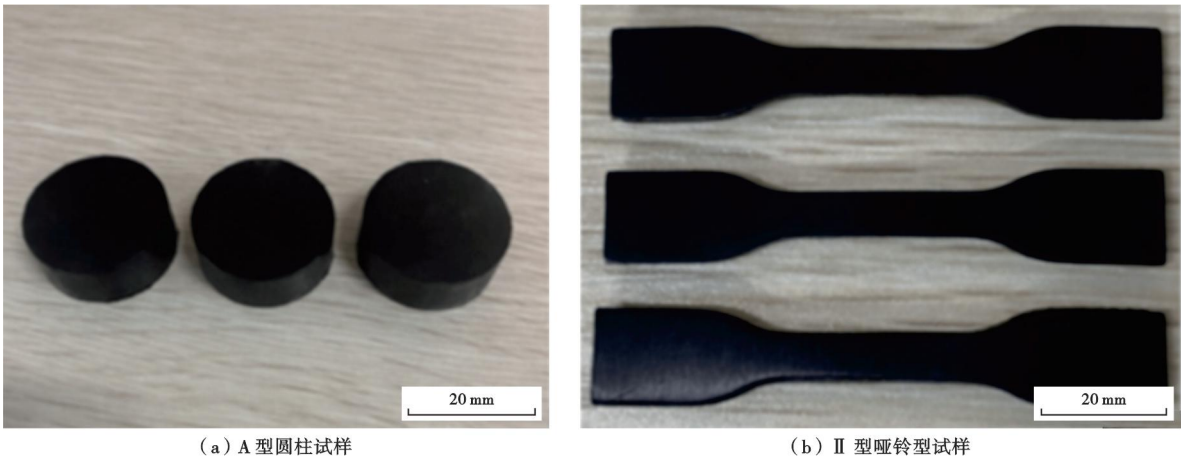
1 实 验

实验材料为丁腈橡胶^[22-23]和油基钻井液。实验设备为:中兴 101 型电热鼓风干燥箱,北京中兴伟业仪器有限公司;岛津 AG-50KNXPLUS 电子万能试验机,岛津(上海)实验器材有限公司;天津凯尔 M-3000 动态力学试验机,凯尔测控试验系统(天津)有限公司。具体实验步骤为:

(1) 根据 GB/T 1690—2010^[24] 和 GB/T 7757—2009^[25] 标准,选用标准 A 型圆柱试样。根据 GB/T 528—2009^[26] 标准,选用 II 型哑铃型试样测试橡胶材料拉伸性能。两种试件如图 1 所示。

(2) 根据 GB/T 2941—2006^[27] 标准的规定,而且 Φ172 螺杆钻具普遍适用于 3 000~4 000 m 井段,因此当地面温度为 25 ℃时,按 3 ℃/hm 温度梯度进行计算,实验温度设置为 120 ℃±2 ℃,试样完全浸没在油基钻井液中,实验时长分别为 8 h、16 h、24 h、48 h、72 h 以及 168 h。为了降低实验数据分散性的影响,每组测试用 3 个试样。溶胀老化实验如图 2 所示。

(3) 将溶胀老化后的试件在电子万能实验机和动态力学试验机分别进行压缩试验和单轴拉伸试验,测出工程应力和工程应变(图 3)。



(a) A 型圆柱试样

(b) II 型哑铃型试样

图 1 橡胶标准试样

Fig. 1 Rubber standard specimens

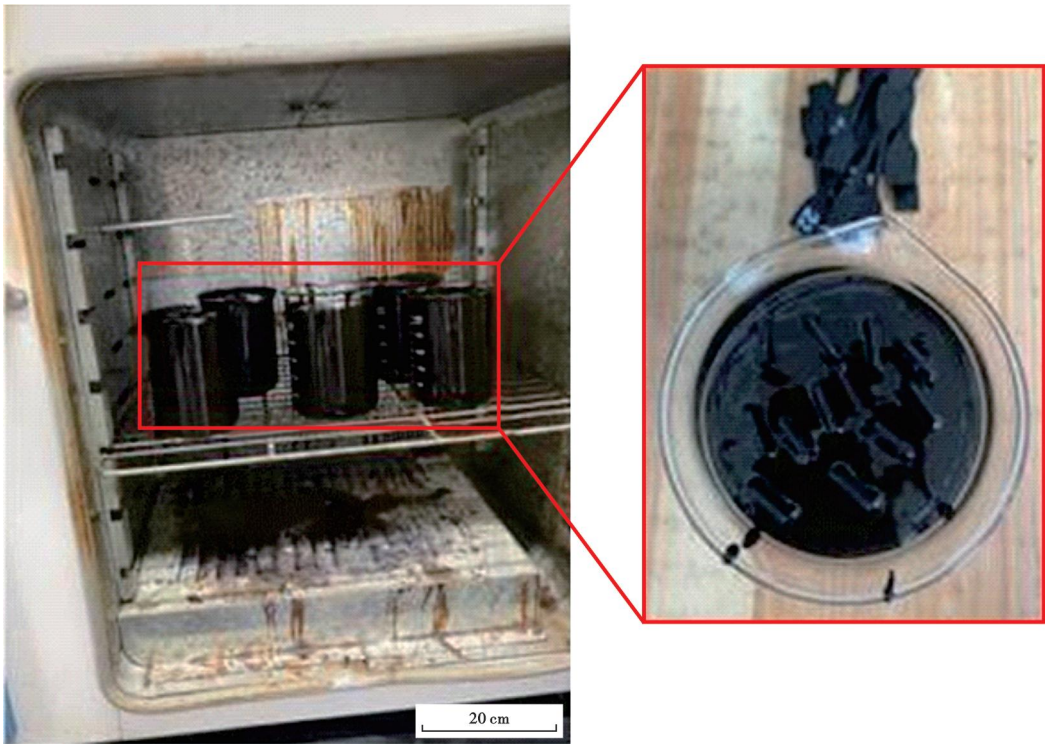


图 2 溶胀老化实验
Fig. 2 Swelling and aging test

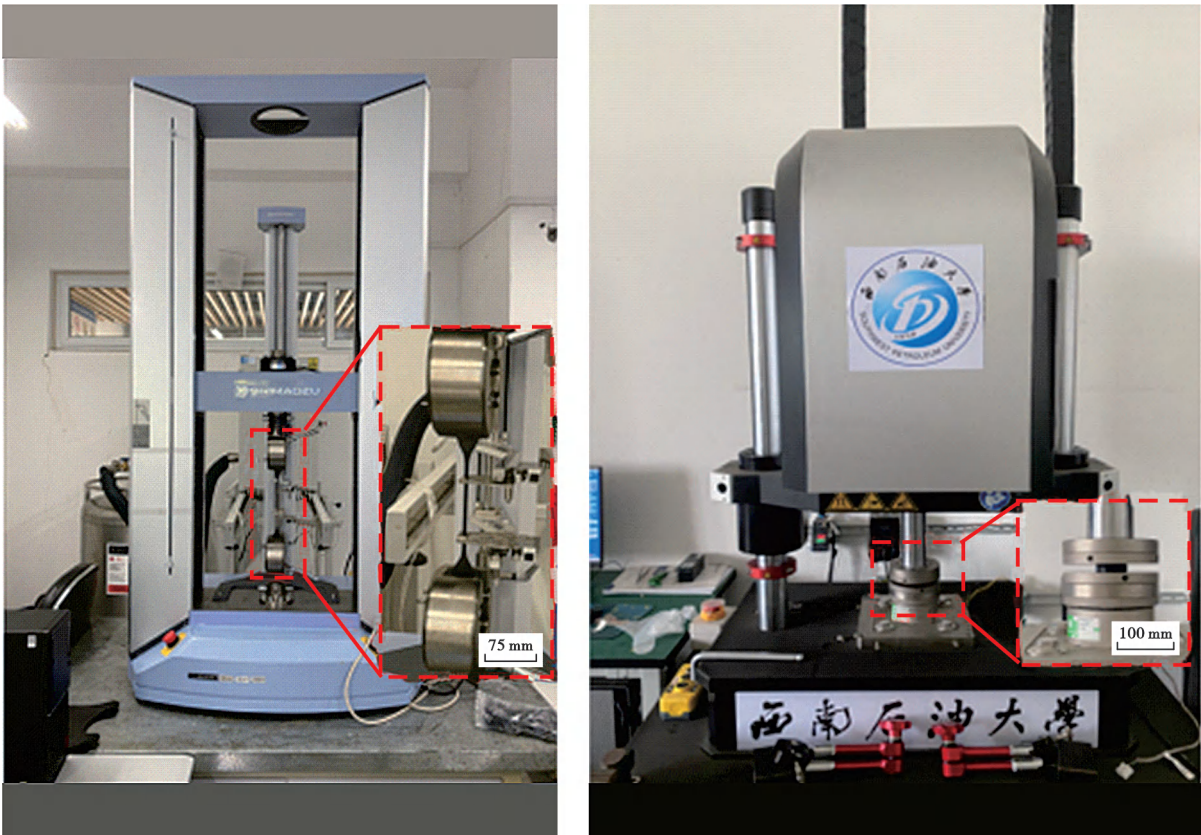


图 3 橡胶拉伸与压缩试验
Fig. 3 Rubber tensile and compression tests

2 实验结果及讨论

2.1 质量与体积变化

橡胶试样在溶胀老化后的质量变化率与体积变化率见图 4 和表 1。在 120 ℃ 和油基钻井液环境条件下,橡胶材料的质量变化率和体积变化率会随着溶胀老化时长的增加而逐渐升高,前期增长较快,后期增长缓慢。这是由于在高温环境中,油分子、烃类小分子等不断侵入橡胶材料内部分子链间隙内;随着油液分子和烃类分子不断向橡胶材料内部分子链渗透,有限空间内的可渗透区间趋于饱和,后期进入橡胶内部分子链的小分子逐渐减少。

溶胀老化 72 h 的质量变化率与体积变化率分别是溶胀老化 168 h 的 96.1%、94.8%。因此,将 72 h 后的溶胀状态视为近似饱和状态。

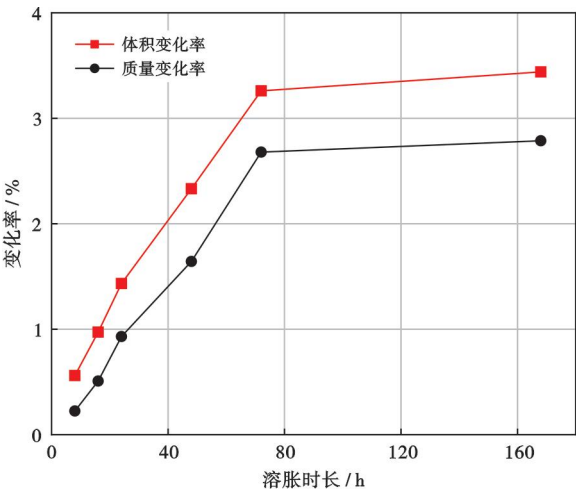


图 4 质量变化率与体积变化率
Fig. 4 Rate of change of mass and volume

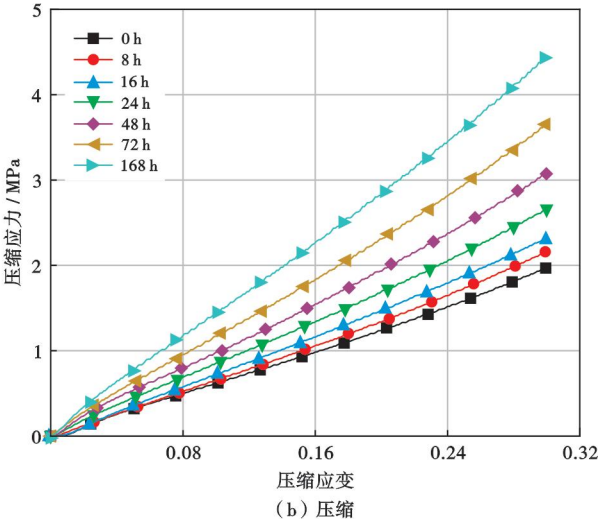
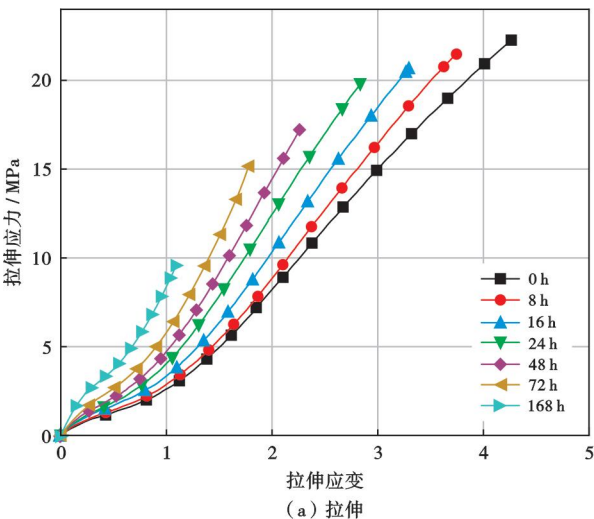


图 5 拉伸和压缩应力—应变曲线
Fig. 5 Stress-strain curve of tension and compressive

表 1 橡胶材料的质量变化率与体积变化率
Table 1 Mass change rate and volume change rate of rubber material

溶胀时长/h	$\Delta m/\%$	$\Delta V/\%$
8	0.224	0.560
16	0.508	0.972
24	0.931	1.433
48	1.642	2.332
72	2.679	3.260
168	2.787	3.439

2.2 拉伸和压缩性能

取 3 个实验数据中最接近的两个数据计算平均值,最终得到橡胶材料拉伸与压缩应力—应变曲线。由不同溶胀老化时长下橡胶材料拉伸应力—应变曲线[图 5(a)]可以看出,随着溶胀老化时长的增加,橡胶材料的扯断伸长率以及拉伸强度不断降低。由不同溶胀老化时长下橡胶材料压缩应力—应变曲线[图 5(b)]可以看出,橡胶材料在压缩应变为 0.3 的范围内近似于线性变化,随着压缩应变的增大,压缩应力逐渐增大。对比图 5(a)和图 5(b)发现,随着溶胀老化时长的增加,在相同的拉伸/压缩应变状态下,拉伸/压缩应力逐渐升高,说明橡胶材料的拉伸和压缩性能都体现了橡胶材料随着溶胀老化时长的增加,展现出“硬化”的趋势。不同点在于拉伸应力—应变曲线表现出橡胶材料的非线性特征,而由于压缩应变较小,表现出近线性变化。这说明,橡胶材料在大变形下呈现非线性特征,在小变形下呈现线性特征。

由橡胶材料扯断伸长率在不同溶胀老化状态下的变化趋势(图 6)可以看出,随着溶胀老化时长的增加,扯断伸长率在前期下降较快,后期下降缓慢。168 h 溶胀状态下的扯断伸长率下降 74.3%。这表明,在高温

条件下,168 h 的溶胀老化时长对橡胶材料抵抗变形的能力造成了严重影响。这是由于在溶胀老化过程中橡胶材料发生了交联反应,使交联密度增大,最终导致扯断伸长率下降。

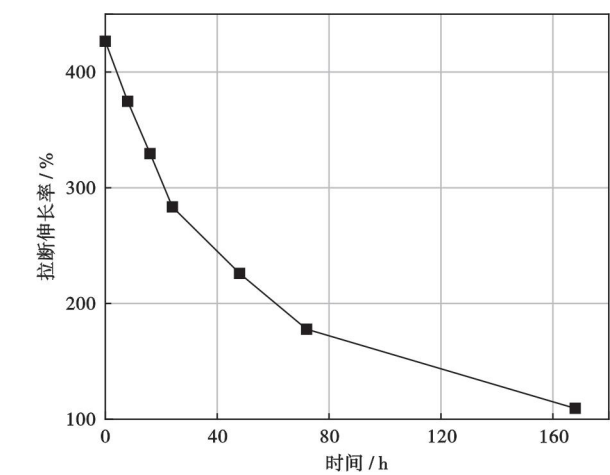


图 6 扯断伸长率变化
Fig. 6 Change curve of tearing elongation

由橡胶材料拉伸强度在不同溶胀老化状态下的变化(图 7)可以看出,在 0~48 h 范围内,橡胶材料的拉伸强度随溶胀老化时间的增加呈线性下降,下降速度较快;在 48~168 h 范围内,橡胶材料的拉伸强度下降缓慢。这是由于溶胀老化过程中油分子及烃类小分子在进入橡胶材料内部分子链间隙后,使得橡胶材料分子链出现断裂与降解,造成了橡胶材料的拉伸强度急剧下降。

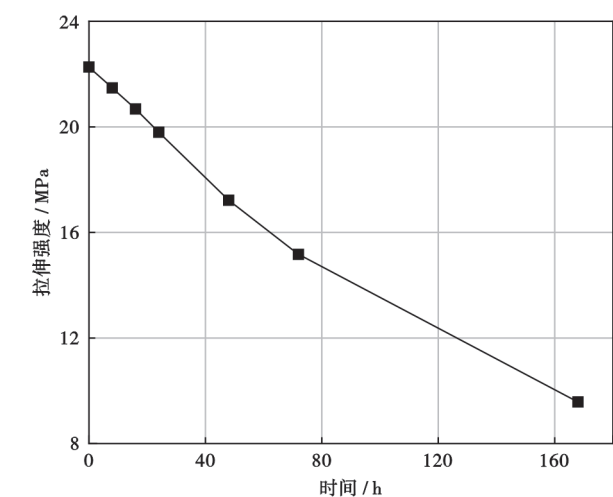


图 7 拉伸强度变化
Fig. 7 Change curve of tensile strength

由图 8 可以看出,随着溶胀老化时间增加,橡胶材料的 100%定伸应力不断增大。对比图 6 与图 8 可以看出,橡胶材料的扯断伸长率与 100%定伸应力随溶胀老化时长的变化趋势正好相反,说明在高温溶胀老化过程中,橡胶分子链的交联反应总在发生,最终导致交联密度增大,定伸强度增大,扯断伸长率减小。

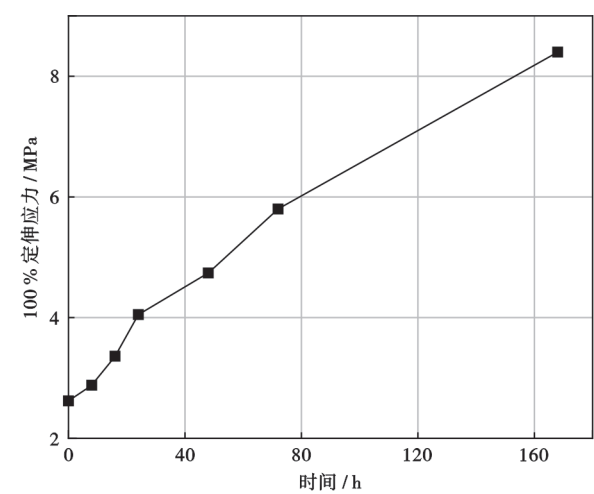


图 8 100%定伸应力变化曲线
Fig. 8 Change curve of 100% constant tensile strength

2.3 橡胶超弹本构模型的确定与参数拟合

橡胶材料超弹性本构模型的选择对有限元模拟结果的准确性十分重要,因此选择 Arruda-Boyce 模型等 8 个模型来拟合原始橡胶材料的压缩和拉伸实验数据,拟合结果以及分析见图 9 和表 2。

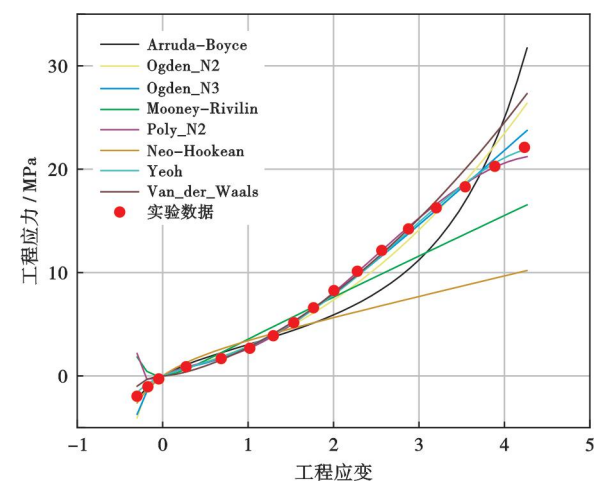


图 9 原始橡胶材料超弹本构模型拟合结果
Fig. 9 Fitting results of hyperelastic constitutive model of the original rubber material

表 2 超弹本构模型拟合结果

Table 2 Analysis of fitting results of the hyperelastic constitutive model		
超弹本构模型	拉伸阶段	压缩阶段
Arruda-Boyce	超过 1.3 拟合差	
Neo-Hookean	超过 1.3 拟合差	
Mooney-Rivlin	超过 1.9 拟合差	
Ogden_N2、Ogden_N3	超过 3.5 拟合差	应力值远大于实验值
Van Der Waals	超过 3.5 拟合差	应力值远小于实验值
Ploy_N2		拟合差
Yeoh		拟合效果都较精确

选择 Yeoh 模型分析橡胶衬套材料的力学行为：
$$W = C_{10} (I_1 - 3) + C_{20} (I_1 - 3)^2 + C_{30} (I_1 - 3)^3 \tag{1}$$

采用 Yeoh 模型对不同溶胀老化时长下橡胶材料的压缩和拉伸实验数据进行拟合,模型参数见表 3。

表 3 不同溶胀老化时长 Yeoh 模型参数
Table 3 Parameters of Yeoh model for different swelling and aging time

溶胀时长/ h	C_{10} / MPa	C_{20} / 10^{-2} MPa	C_{30} / 10^{-3} MPa
0	0.543	7.17	-1.080
8	0.604	7.56	-1.040
16	0.731	8.24	-1.000
24	0.963	7.28	0.470
48	1.046	7.48	3.620
72	1.428	-2.34	0.224
168	2.083	-31.50	133.000

从表 3 可以看出,随着溶胀老化时长的增加,模型参数 C_{10} 为正值并逐渐增大;模型参数 C_{20} 先为正值后变化为负值;模型参数 C_{30} 先为负值后变化为正值,且逐渐增大。

3 常规壁厚橡胶衬套有限元模型

3.1 当量温度法

橡胶材料在高温油基钻井液中,产生温胀的同时,还会发生溶胀现象。当复杂的内轮廓线型在温胀和溶胀同时存在时,很难通过理论计算得到变形规律。因此,使用温度当量法^[28],将螺杆钻具橡胶衬套溶胀变形用温度升高引起的变形等效替代。

为了分析橡胶材料溶胀当量温度,建立二维对称有限元模型(图 10)。橡胶材料密度取 $\rho = 1\,200\text{ kg/m}^3$,橡胶材料热力学参数^[29]:膨胀系数 $\alpha = 5.7 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$,导热系数 $k = 0.1465\text{ W/(m}\cdot^\circ\text{C)}$,比热容 $c = 8\,400\text{ J/(kg}\cdot^\circ\text{C)}$,初始温度为 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 。

通过将温胀变形后计算出的体积变化率(表 4)与实验体积变化率(表 1)进行对比,得到橡胶材料的溶

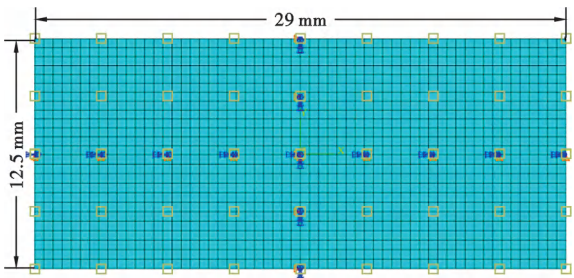


图 10 当量温度计算有限元模型
Fig. 10 Finite element model for equivalent temperature calculation

胀当量温度。由不同溶胀当量温度对应的位移云图(图 11)可以看出,圆柱试样截面中心到外表面的位移量逐渐增大,中心截面变形关于径向与轴向中心线对称分布;与轴向变形量相比,径向变形量更大;当量温度越大,变形量越大。不同溶胀时长对应的当量温度见表 5。其中,仿真温度为 $120\text{ }^\circ\text{C}$ 时表示橡胶材料未发生溶胀作用,只有地层环境温度存在。

表 4 不同当量温度时试样变形后的径向及高度尺寸

Table 4 Radial and height dimensions of specimens after deformation at different equivalent temperatures

当量温度/ $^\circ\text{C}$	直径/ mm	高度/ mm	体积变化率/ %
58	29.054 5	12.523 5	0.56
82	29.094 2	12.540 6	0.98
108	29.137 2	12.559 1	1.43
160	29.223 2	12.596 2	2.33
214	29.312 4	12.634 4	3.26
236	29.328 9	12.641 8	3.44

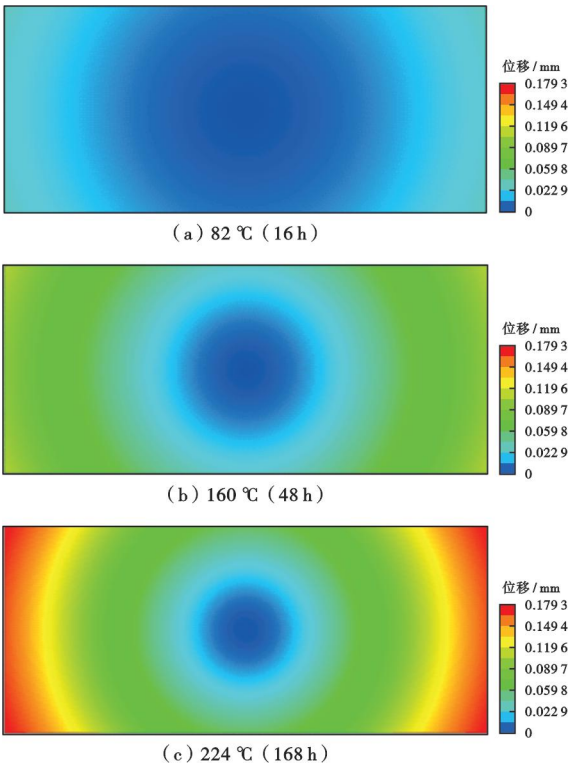


图 11 不同溶胀当量温度时的位移分布

Fig. 11 Displacement distribution at different swelling equivalent temperatures

3.2 有限元模型

以 7/8 头螺杆钻具为研究对象,衬套线型为短幅内摆线线型。偏心距 $e = 4.93\text{ mm}$,短幅系数 $K = 0.75$,等距圆半径 $r_e = 11.5\text{ mm}$,过盈量 $\delta = 0.5\text{ mm}$ 。转子为金属材质,弹性模量 $E = 210\text{ GPa}$,泊松比 $\mu = 0.3$;衬套橡胶的材料密度和热力学参数与上文的一

表 5 不同溶胀时长对应的当量温度
Table 5 Equivalent temperatures corresponding to different swelling time

溶胀时长/h	当量温度/℃	仿真温度/℃
0	0	120
8	58	178
16	82	202
24	108	228
48	160	280
72	214	334
168	224	344

致,橡胶材料的本构模型参数见表 3。橡胶材料的弹性模量一般比较低,远低于金属转子的弹性模量,故将转子设置为刚体;由于转子和定子之间存在接触,因此在 Abaqus 商业软件中的法向接触模型为“硬”接触,

切向接触模型为“罚”摩擦模型,摩擦系数为 0.3。由于转子与橡胶衬套在不同横截面时具有相同的啮合特征,为了提高计算效率,将转子及橡胶衬套的长度均设置为 100 mm。常规螺杆钻具橡胶衬套二维及三维有限元模型如图 12 所示。

用 4 个分析步来模拟螺杆钻具橡胶工作,分析步①用于模拟定转子间的自动过盈装配。在分析步②对橡胶衬套内表面施加内压,钻井液液柱压力采用 $p = \rho gh$ 进行计算。其中,钻井液密度 ρ 为 $1\,100\text{ kg/m}^3$,重力加速度 $g = 9.81\text{ m/s}^2$,损耗后的泵压为 15 MPa。经计算钻井液液柱压力取 50 MPa^[21,30]。分析步③用于橡胶衬套的温胀及溶胀模拟,温胀对应的井下环境温度为 120 ℃,溶胀按当量温度进行选取。分析步④用于模拟转子的转动,转速取 2.5 r/s,转子旋转 1 周所需时间为 0.4 s。

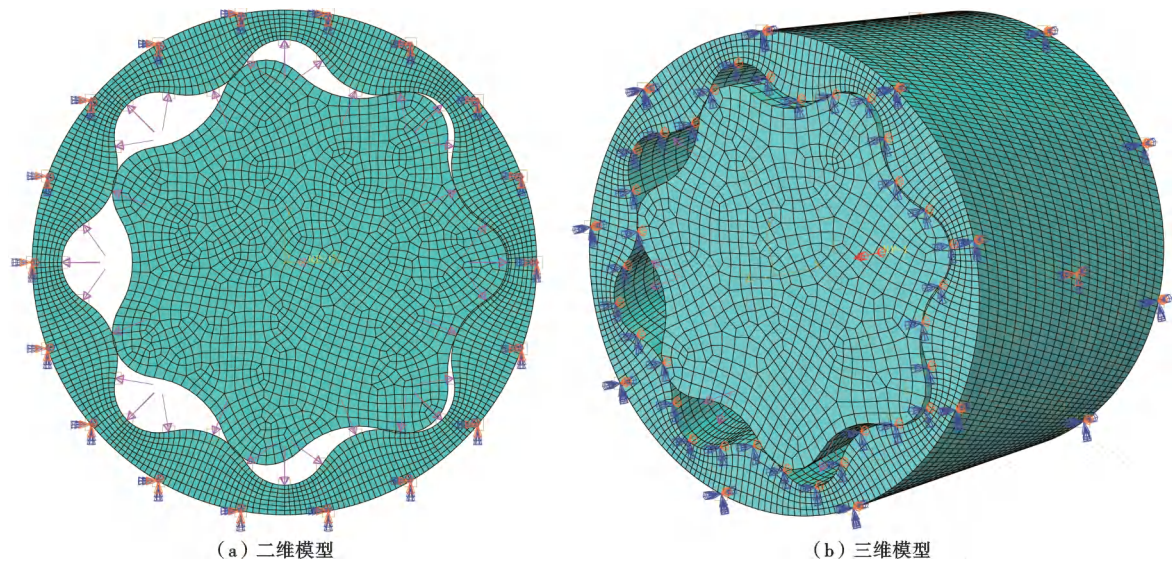


图 12 常规螺杆钻具橡胶衬套有限元模型示意
Fig. 12 Finite element model of rubber bushing of conventional screw drill

由于橡胶衬套的形状较为规整,三维网格类型选用 C3D8RH 单元,二维网格类型为 CPE4RH 单元,其能够较大程度上保证有限元计算的精度。对于螺杆马达转子,三维网格类型选用 C3D8R 单元,二维网格类型 CPE4R 单元。在三维模型中,将橡胶衬套划分为 22 260 个单元,转子划分为 17 472 个单元;在二维模型中,将橡胶衬套划分为 1 904 个单元,转子划分为 1 559 个单元。

4 有限元结果与讨论

4.1 溶胀时长对常规壁厚衬套内腔变形的影响

图 13 是液柱压力为 50 MPa 时常规壁厚衬套在不同溶胀时长下的径向位移云图,图 14 为液柱压力为 50 MPa 时常规壁厚衬套在不同溶胀时长下圆周方向

上的位移分布。将图 13(b)中变形放大 200 倍,其他图中的变形放大 20 倍,结合图 14 进行分析可以看出,常规壁厚衬套在圆周方向上变形不均匀,溶胀变形最大值出现在衬套的弧顶部位,弧底变形较小,这与衬套在圆周上厚度分布不均相关。如图 13(a)所示,在钻井液液柱压力及环境温度的作用下,常规壁厚衬套位移为压缩位移,最大压缩位移为 0.151 3 mm,这意味着当定转子间过盈量小于 0.151 3 mm 时,难以保证螺杆钻具橡胶衬套产生有效密封腔。随着溶胀时长的增加,衬套逐渐向内腔进行膨胀变形,在溶胀时长为 8 h 时,温胀及溶胀变形与液柱压力挤压变形大致相抵,衬套内线型近似恢复至原始形状。在溶胀时长为 0 h 与 24 h 时,衬套在圆周方向上的位移绝对值差别不大,如图 14 所示。在溶胀时长 0~8 h 内,在钻井液压力与

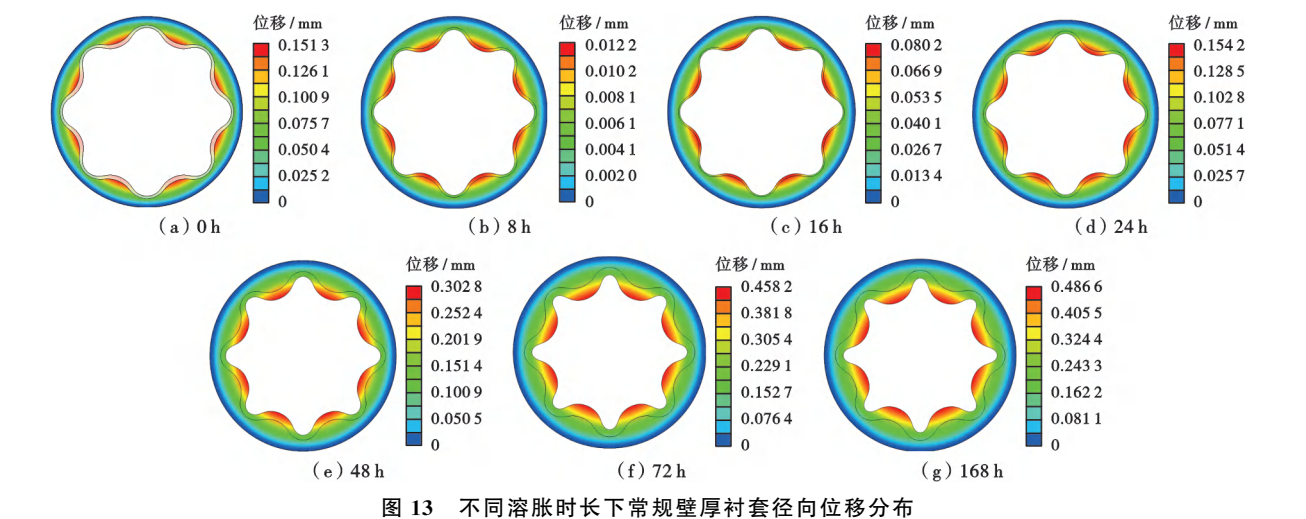


图 13 不同溶胀时长下常规壁厚衬套径向位移分布

Fig. 13 Radial displacement distribution of rubber bushing with regular wall thickness at different swelling time

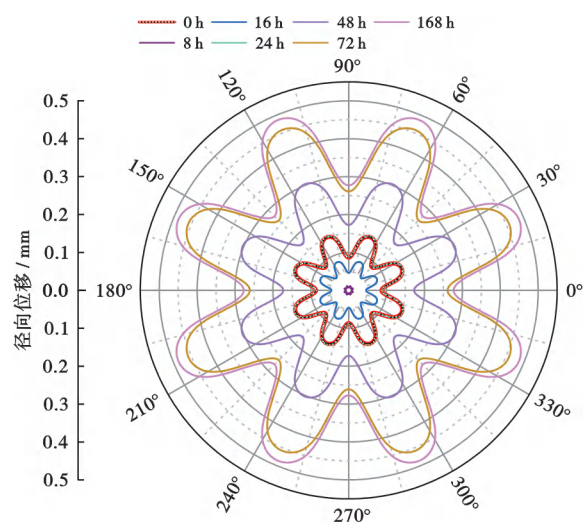


图 14 不同溶胀时长下常规壁厚衬套径向位移绝对值分布

Fig. 14 Distribution of absolute values of radial displacements of rubber bushing with regular wall thickness at different swelling time

温度共同作用下,衬套向外变形,在一定程度上会降低衬套的磨损,但在溶胀 8 h 后,随着溶胀时长的增加,衬套向内腔的变形逐渐增大,这会加剧衬套的磨损。在温胀及溶胀作用下,衬套变形较大且周向差异较大。因此,在常规壁厚衬套的过盈量选取时,也应该考虑橡胶材料的温胀与溶胀作用。

为了分析出常规壁厚衬套在圆周方向上变形分布不均匀的情况,提取径向位移的峰值、谷值、峰—峰值(峰值与谷值之差)(图 15),其中,负值代表衬套向外变形。由图 15 可以看出,随着溶胀时长的增加,衬套上径向位移峰值、谷值、峰—峰值均先逐渐升高,后趋于平缓,这与橡胶材料的体积变化率变化规律相似。由此可以推断,在螺杆钻具定子与转子周期性啮合运动中,由于钻井液中小分子不断渗入到衬套内部,会造

成常规壁厚衬套溶胀变形的不均匀效应逐渐加剧,变形幅值逐渐增大,从而加速衬套疲劳失效。

从过盈量为 0.5 时,定子和转子装配后,常规壁厚衬套在未溶胀[图 16(a)]和完全溶胀[图 16(b)]下的变形分布云图可以看出,常规壁厚衬套在圆周方向上的变形分布是不对称的,衬套上最大变形出现在弧顶处,并且在未发生溶胀时,最大变形量为 0.74 mm,完全溶胀后,最大变形量为 0.53 mm。结合图 13 可以得出,转子的存在限制了定子橡胶在挤压区的自由变形,而未挤压区的变形没有受到限制,使得变形情况变得更加复杂,但变形规律没有发生改变,溶胀导致的最大变形还是出现在弧顶位置。最大变形量的减少是由于转子的挤压使得定子橡胶向外变形,而溶胀变形使得定子橡胶向内变形,两者的相互抵消,使得挤压区的向外变形量降低。

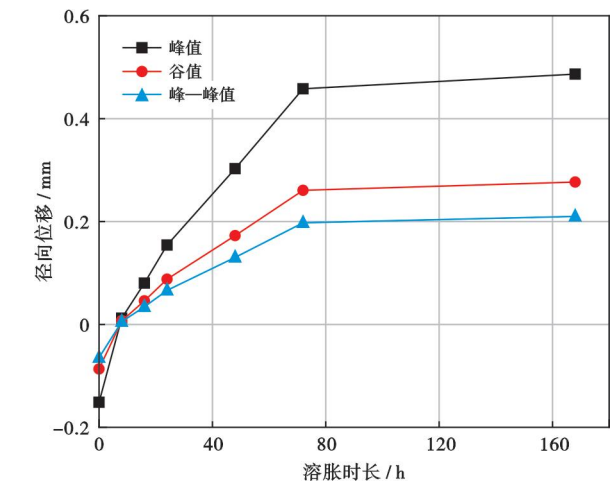


图 15 不同溶胀时长下常规壁厚衬套径向位移峰值、谷值和峰—峰值的变化

Fig. 15 Variation curves of peak value, valley value and peak-peak value of radial displacements of rubber bushings with regular wall thickness at different swelling time

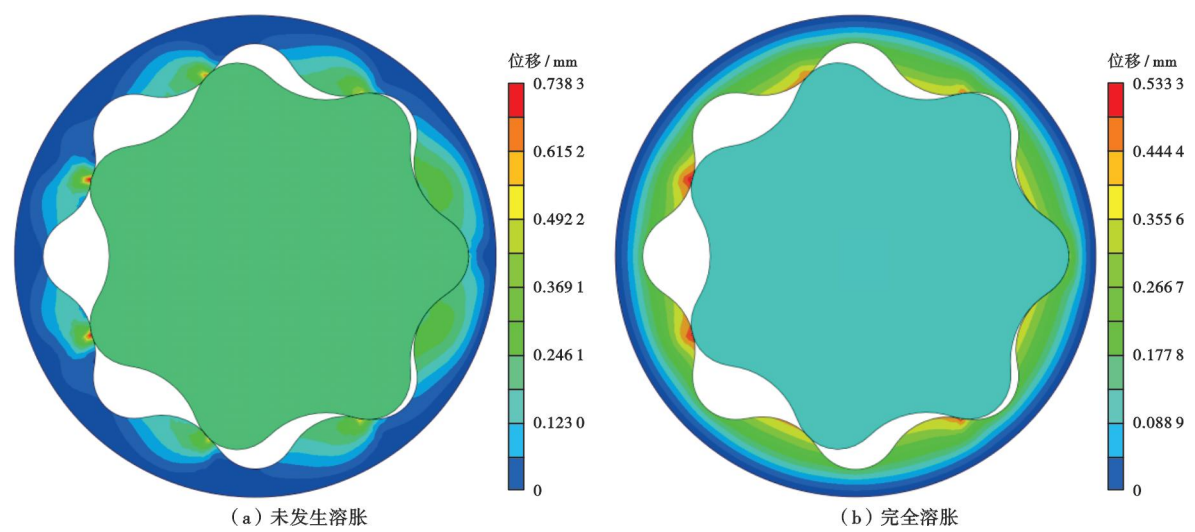


图 16 定子橡胶与转子配合后的变形分布
Fig. 16 Deformation distribution of stator rubber after matching with rotor

4.2 溶胀时长对常规壁厚衬套力学性能的影响

在压力、温胀与溶胀的综合作用下,橡胶衬套会产生压缩变形和向内膨胀变形。为了衡量橡胶衬套的应力状态,笔者采用第四强度理论重点研究了橡胶衬套在工作过程中的峰值 Von Mises 应力的变化。由常规壁厚衬套在溶胀饱和状态下的 Von Mises 应力分布(图 17)可以发现,常规壁厚衬套在圆周方向上的应力分布是不对称的,衬套上最大 Von Mises 应力出现在弧顶处。这是由于定子与转子在啮合过程中,橡胶衬套受到金属转子的挤压与摩擦,啮合区的衬套部位应力较大。当啮合区到达弧顶位置时,由于此处衬套的温胀变形与溶胀变形最大,转子为了保持转动,需克服更大的挤压力与摩擦力,故弧顶部位应力值最大;而针对于非啮合区,橡胶衬套的变形得以恢复,从而表现

出应力较小的特征。

由不同溶胀时长下常规壁厚衬套上的峰值 Von Mises 应力变化曲线(图 18)可以看出,随着溶胀时长的增加,峰值 Von Mises 应力逐渐增大。其中,在溶胀时长 48 h 前,橡胶衬套上峰值 Von Mises 应力增幅较小,在溶胀时长 48 h 之后,峰值 Von Mises 应力增幅较大。在螺杆钻具的后期工作中,峰值 Von Mises 应力急剧增大意味着在钻井液中固相颗粒嵌入定转子啮合区时橡胶衬套易出现材料掉块、脱落等现象,从而影响螺杆钻具的正常工作。

4.3 溶胀时长对常规壁厚衬套密封性能的影响

橡胶衬套具备良好的密封性是螺杆钻具正常工作的必要条件,笔者以接触应力为指标衡量密封性能^[31-32]。当螺杆钻具定子与转子存在接触时,会形成

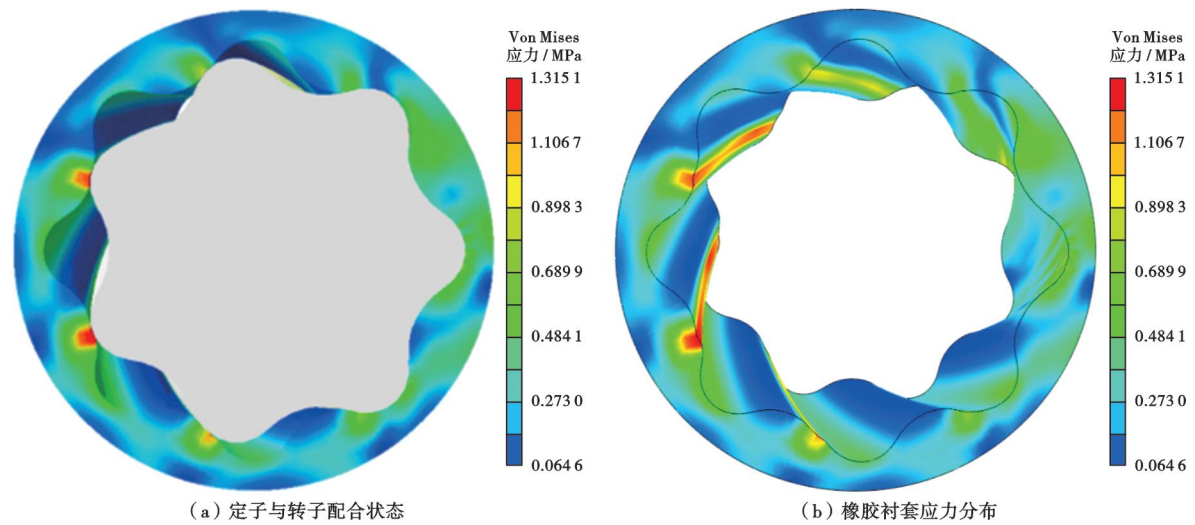


图 17 溶胀饱和状态时常规壁厚衬套 Von Mises 应力分布

Fig. 17 Von Mises stress distribution for bushing with regular wall thickness under swelling saturation

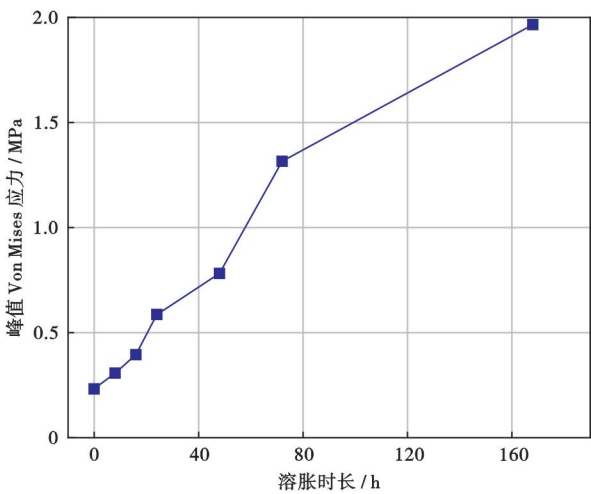


图 18 不同溶胀时长下峰值 Von Mises 应力
Fig. 18 Peak Von Mises stress at different swelling time

密封接触面。此时,接触应力大于 0 MPa,接触应力越大,密封性越好;若接触应力等于 0 MPa,则表明该处定转子未形成有效密封^[33]。由常规壁厚衬套在溶胀饱和状态下的接触应力分布云图(图 19)可以看出,7/8 头螺杆钻具形成了 7 个有效的独立密封腔室,峰值接触应力出现在弧顶处,满足摆线类橡胶衬套的工作条件。由橡胶衬套接触应力在圆周方向上的变化曲线(图 20)可以看出,在相同的密封面上,溶胀饱和状态下橡胶衬套接触应力均大于只考虑温胀时的橡胶衬套。这是由于在溶胀饱和状态时,橡胶衬套会发生向内变形,加剧了橡胶衬套和转子的挤压,因此在相同的密封面上,溶胀饱和状态下橡胶衬套接触应力均大于只考虑温胀时的橡胶衬套。

由不同溶胀时长下常规壁厚衬套上的峰值接触应力变化曲线(图21)可以看出,随着溶胀时长的增加,

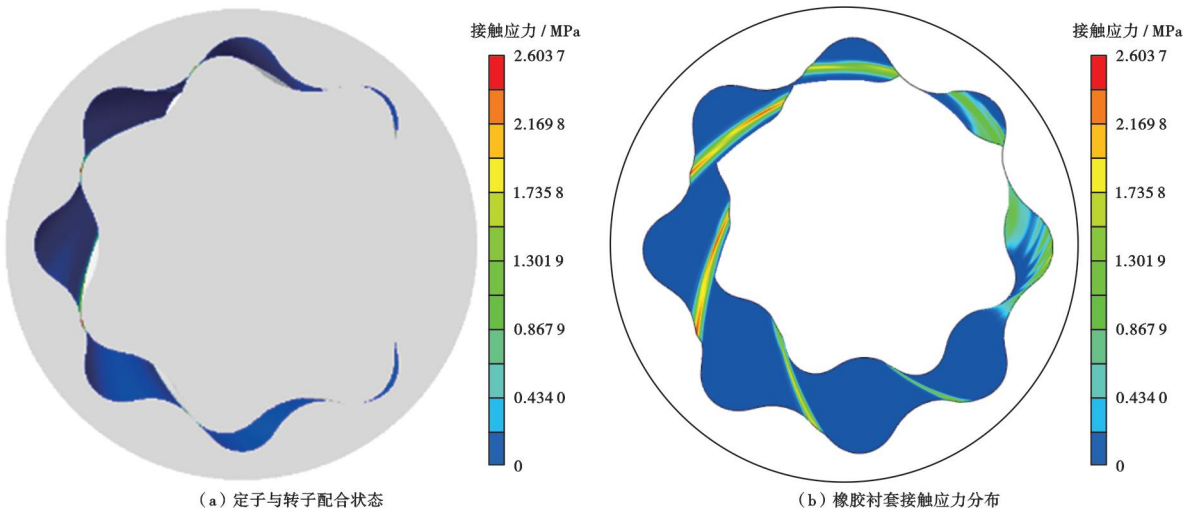


图 19 溶胀饱和状态时常规壁厚衬套接触应力分布
Fig. 19 Contact stress distribution of bushing with regular wall thickness under swelling saturation

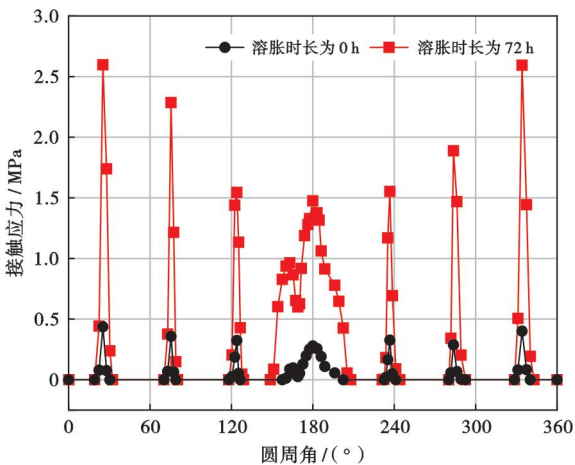


图 20 常规壁厚衬套圆周方向上接触应力分布
Fig. 20 Contact stress distribution in the circumferential direction of bushing with regular wall thickness

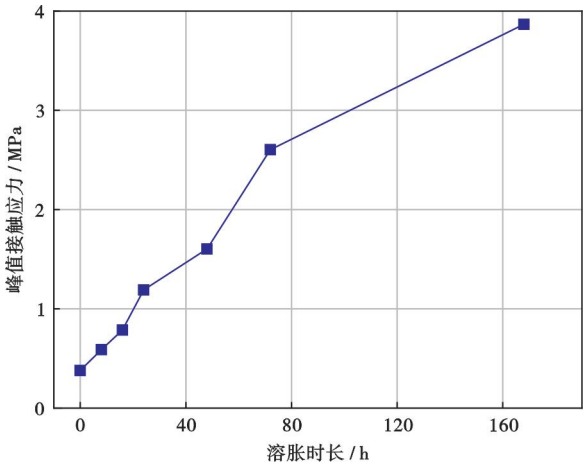


图 21 不同溶胀时长下常规壁厚衬套峰值接触应力变化
Fig. 21 Variation curve of peak contact stress of bushing with regular wall thickness at different swelling time

橡胶衬套上峰值接触应力逐渐增大,与峰值 Von Mises 应力的变化趋势相似。在相同的钻井液液柱压力作用下,随着橡胶衬套溶胀变形的进行,螺杆钻具中钻井液漏失的可能性逐渐变小。

4.4 溶胀时长对常规壁厚橡胶衬套过流面积的影响

过流面积作为螺杆钻具线型设计的关键指标,与所设计出的螺杆钻具工作性能密切相关。过流面积会因橡胶衬套的温胀及溶胀变形而发生改变,从而影响螺杆钻具的性能。因此,为研究在不同溶胀时长下常规螺杆钻具橡胶衬套过流面积的变化规律,采用上述的二维有限元模型进行数值计算,提取出常规壁厚衬套在不同溶胀变形状态下的橡胶衬套与转子的横截面积,并计算出过流面积(图 22)。

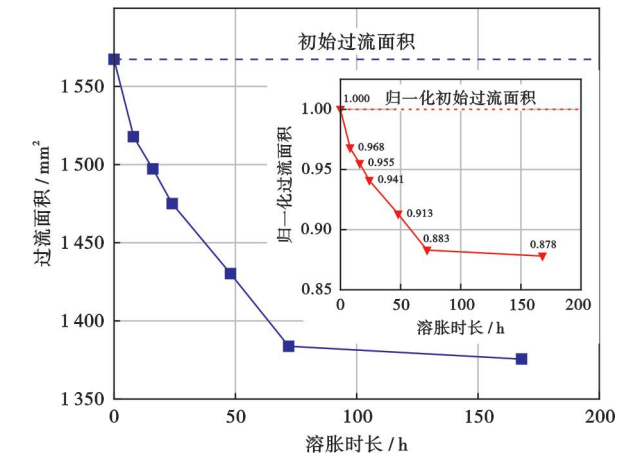


图 22 不同溶胀时长下常规钻具橡胶衬套过流面积变化趋势
Fig. 22 Changing trend for flow area of rubber bushing of conventional screw drill at different swelling time

由图 22 可以看出,随着溶胀时长增加,常规壁厚橡胶衬套的过流面积逐渐减小,并趋于平缓;在溶胀饱和状态时,过流面积降低了 12.2%。由此可见,橡胶材料的温胀及溶胀对螺杆钻具橡胶衬套性能的影响较大,这很好地解释了常规螺杆钻具在使用后期出现动力不足的问题。

4.5 溶胀时长对常规壁厚橡胶衬套滞后生热的影响

采用单向解耦法对螺杆钻具橡胶衬套进行热滞后分析^[34-35]。由常规壁厚衬套在溶胀饱和状态时的热滞后后温度场云图(图 23)可以看出,在溶胀饱和状态时,常规壁厚衬套上最高温度为 141.46℃,最大温升为 21.46℃,其出现在橡胶衬套厚壁处。其原因在于橡胶衬套厚壁处的应力与变形较大,且散热相对困难,热量积累较多;在衬套薄壁处,其散热较好,热量积累较少,故温度较低。橡胶衬套在周期性挤压过程中产生的应变能有一部分以热能的形式耗散,使得橡胶衬套不断产生热量,且很难被耗散,因此最低温度仍然高于环境温度。

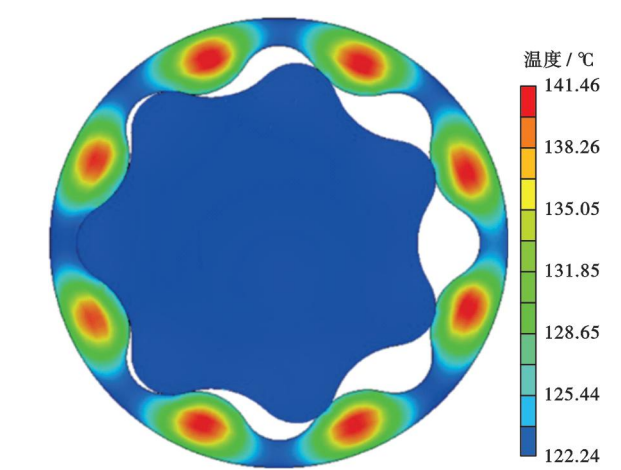


图 23 溶胀饱和状态时常规壁厚衬套热滞后温度场分布
Fig. 23 Distribution of thermal hysteresis temperature field of bushing with regular wall thickness under swelling saturation

由常规壁厚衬套在不同溶胀时长下的较环境温度升高的变化曲线(图 24)可以看出,随着溶胀时长的增加,常规壁厚衬套上热滞后最高温升逐渐增大。

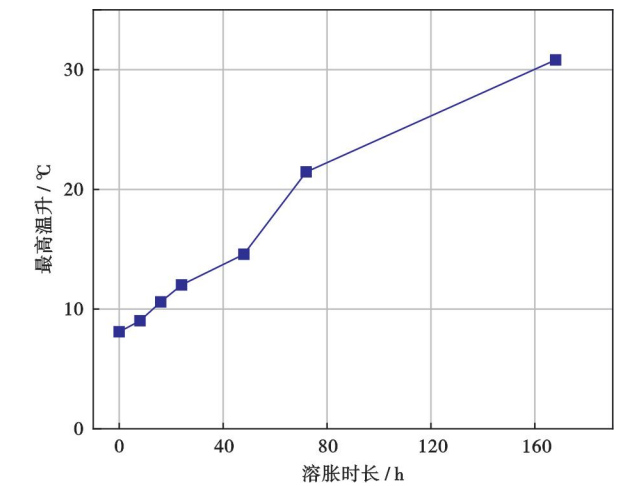


图 24 不同溶胀时长下常规壁厚衬套较环境温度升高的变化
Fig. 24 The change curve of normal wall thickness bushings with different swelling time compared with ambient temperature

在 168 h 的溶胀时,橡胶衬套上最高温度达到 150.81℃,最高温升为 30.81℃。这与橡胶衬套在不同溶胀时长下的应力应变情况相关。在定子初始过盈量不变的情况下,随着溶胀时长的增加,橡胶衬套逐步向内腔膨胀变形,橡胶衬套与转子间的实际配合更加紧密,热滞后效应源于橡胶衬套与转子间的挤压作用,因此表现出最高温升变化趋势(图 24)。

由常规壁厚定子橡胶烧心失效实物^[21](图 25)可以看出,衬套烧心失效位置与图 23 中最高温度分布位置基本一致,最高温升的增大加速了橡胶衬套发生烧

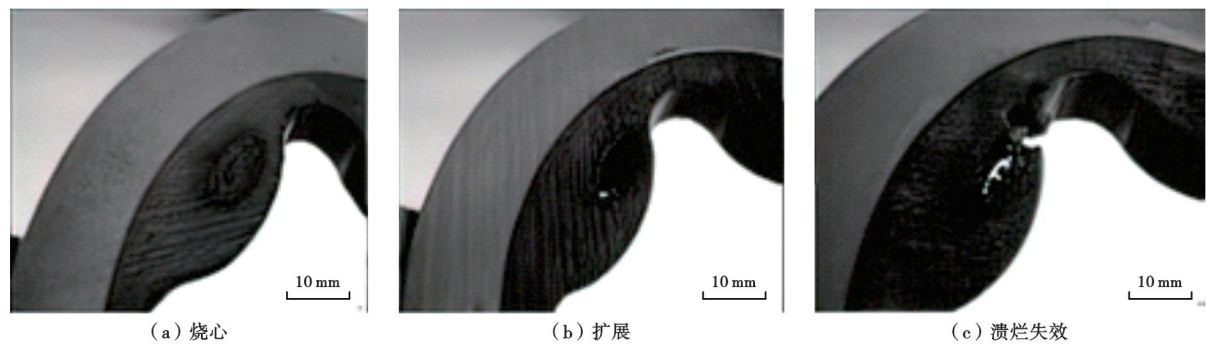


图 25 常规壁厚定子橡胶烧心失效

Fig. 25 Diagram of core failure for stator rubber with regular wall thickness

心至溃烂的进程。这表明,热滞后是造成常规壁厚衬套失效的重要原因之一,同时也说明了仿真结果的可靠性。

5 结 论

(1) 橡胶试样质量变化率及体积变化率随着溶胀时长先升高后趋于稳定,橡胶材料在 72 h 达到溶胀饱和状态。单轴拉伸与压缩应力—应变曲线均表明,橡胶材料随着溶胀时长的增加而呈现出“硬化”趋势。

(2) 对 Arruda-Boyce 模型等 8 个超弹本构模型进行数据拟合,最终优选出最合适的超弹本构 Yeoh 模型,确定了不同溶胀老化状态的橡胶材料超弹本构模型参数。对标准 A 型圆柱试样进行了温胀变形研究,以体积变化率为衡量标准,确定了不同溶胀时长下对应的溶胀当量温度。

(3) 温胀及溶胀变形增大了衬套与转子间实际过盈量,因此在过盈量设计时应充分考虑温压、溶胀变形。

(4) 常规壁厚橡胶衬套的过流面积随着溶胀时长的增加而逐渐降低,在溶胀饱和状态时,过流面积较初始过流面积降低了 12.2%。为螺杆钻具钻井后期动力不足现象提供了理论依据,要保证钻井效率,应选择受温胀及溶胀影响小的橡胶材料。

(5) 随着溶胀时长的增加,常规壁厚衬套上热滞后最高温升逐渐增大,热滞后温度分布不均,热滞后最高温升出现在衬套弧顶位置,进一步揭示了定子橡胶烧心现象产生的原因。

(6) 为减少橡胶材料溶胀作用对橡胶衬套的影响,在内轮廓理论线型设计时应考虑橡胶衬套的温压-溶胀耦合作用。

符号注释: W —超弹性应变能密度, J/m^3 ; Δm —质量变化率; ΔV —体积变化率; I_1 —Cauchy-Green 变形张量第一不变量; C_{10} 、 C_{20} 、 C_{30} —Yeoh 模型参数, MPa ; p —压力, Pa ; ρ —密度, kg/m^3 ; α —膨胀系数, $^{\circ}\text{C}^{-1}$; k —导

热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$; c —比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$; h —井下深度, m ; e —偏心距, mm ; K —短幅系数; r_e —等距圆半径, mm ; δ —过盈量, mm ; E —弹性模量, GPa ; μ —泊松比; g —重力加速度, m/s^2 。

参 考 文 献

[1] 刘岩生,张佳伟,黄洪春. 中国深层—超深层钻完井关键技术与发展方向[J]. 石油学报, 2024, 45(1): 312-324.
LIU Yansheng, ZHANG Jiawei, HUANG Hongchun. Key technologies and development direction for deep and ultra-deep drilling and completion in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(1): 312-324.

[2] 张抗,张立勤,刘冬梅. 近年中国油气勘探开发形势及发展建议[J]. 石油学报, 2022, 43(1): 15-28.
ZHANG Kang, ZHANG Liqin, LIU Dongmei. Situation of China's oil and gas exploration and development in recent years and relevant suggestions[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(1): 15-28.

[3] ZHANG Jie, HAN Chuanjun, LIANG Zheng. Physics of failure analysis of power section assembly for positive displacement motor[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2016, 44: 414-423.

[4] 任妍君,翟玉芬,路岩岩. 抗高温高密度可逆油基钻井液体系[J]. 石油学报, 2023, 44(5): 841-851.
REN Yanjun, ZHAI Yufen, LU Yanyan. Reversible oil-based drilling fluid with high-temperature resistance and high density[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(5): 841-851.

[5] 王慧明,吕晓仁,王世杰. 原油温度对丁腈橡胶溶胀及耐磨损性能的影响[J]. 润滑与密封, 2015, 40(9): 30-34.
WANG Huiming, LÜ Xiaoren, WANG Shijie. Effects of temperature on swelling and wear resistance properties of nitrile rubber in the crude oil[J]. Lubrication Engineering, 2015, 40(9): 30-34.

[6] 李波,杜斌,周雷,等. 不同饱和度氢化丁腈橡胶耐高温性能[J]. 弹性体, 2018, 28(2): 52-56.
LI Bo, DU Bin, ZHOU Lei, et al. High temperature resistance of hydrogenated nitrile-butadiene rubber with different saturation degree[J]. China Elastomerics, 2018, 28(2): 52-56.

[7] 杜斌,闫功臣,李伟东,等. 氢化丁腈橡胶在油田介质中的性能变化研究[J]. 橡胶科技, 2018, 16(10): 16-19.
DU Bin, YAN Gongchen, LI Weidong, et al. Study on properties change of hydrogenated nitrile rubber after soaking in various oil

field medium[J]. Rubber Science and Technology, 2018, 16(10): 16-19.

[8] 郝艳捧, 彭家豪, 张智敏, 等. 水和盐水对 GIS 用三元乙丙密封圈热老化特性的影响[J]. 广东电力, 2021, 34(4): 94-100.

HAO Yanpeng, PENG Jiahao, ZHANG Zhimin, et al. Influence of water and saline on thermal aging characteristics of EPDM seal rings in GIS[J]. Guangdong Electric Power, 2021, 34(4): 94-100.

[9] 欧阳江林. 耐高温柴油螺杆钻具定子橡胶材料的研究[J]. 中国科技信息, 2018(14): 98-99.

OUYANG Jianglin. Study on the rubber material of high temperature resistant diesel screw drilling tool stator[J]. China Science and Technology Information, 2018(14): 98-99.

[10] 宋焘, 郭海春, 王春阳, 等. 螺杆钻具用 HNBR 在柴油中的老化性能研究[J]. 特种橡胶制品, 2019, 40(3): 17-19.

SONG Ye, GUO Haichun, WANG Chunyang, et al. Study on aging properties of HNBR in diesel oil for screw driller[J]. Special Purpose Rubber Products, 2019, 40(3): 17-19.

[11] 钟良春, 况雨春, 舒峰, 等. 考虑压力与温度影响的螺杆马达过盈量设计方法[J]. 工程设计学报, 2021, 28(3): 321-328.

ZHONG Liangchun, KUANG Yuchun, SHU Feng, et al. Design method of screw motor interference considering the influence of pressure and temperature[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2021, 28(3): 321-328.

[12] 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.

SHI Changshuai, CHEN Kailin, ZHU Xiaohua. Research on thermal ageing constitutive parameters and inner cavity deformation of screw stator bushings[J]. Lubrication Engineering, 2019, 44(4): 33-39.

[13] SHI Changshuai, CHEN Yike, ZHU Xiaohua. Applicability evaluation and hysteresis heat effect of rubber constitutive model of PDM stator bushing at high temperature in deep well[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2019, 44(6): 6057-6066.

[14] SHI Changshuai, CHEN Kailin, ZHU Xiaohua, et al. Thermal failure of 2/3 PCP in high temperature environment and optimization analysis of stator and rotor meshing parameters[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2019, 61: 174-182.

[15] 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 thermal coupling of screw motor stator bushing[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015.

[16] 石昌帅, 陈凯林, 祝效华. 基于单向解耦法的等壁厚螺杆泵橡胶衬套热滞后研究[J]. 工程科学与技术, 2021, 53(4): 217-225.

SHI Changshuai, CHEN Kailin, ZHU Xiaohua. Research on thermal hysteresis behavior of single-head PCP with equal thickness of hydrogenated nitrile in heavy oil recovery[J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, 53(4): 217-225.

[17] 祖海英, 耿春丽, 李大奇, 等. 基于 Fe-safe 螺杆泵定子橡胶疲劳裂纹形成寿命预测[J]. 机械强度, 2018, 40(1): 195-199.

ZU Haiying, GENG Chunli, LI Daqi, et al. Research on fatigue performance test and life prediction for stator rubber of PCP[J]. Journal of Mechanical Strength, 2018, 40(1): 195-199.

[18] SHI Changshuai, WAN Xiaofeng, DENG Juan, et al. Research on fatigue lifetime prediction of stator rubber bushing based on rubber aged experiment[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2022, 50(4): 2209-2226.

[19] 裴硕. 螺杆泵橡胶定子疲劳寿命预测方法研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2020.

PEI Shuo. Research on the fatigue life prediction method of rubber stator of screw pump[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2020.

[20] TAVOSI S, ALIMARDANI M, GHOREISHY M H R, et al. Fatigue failure modeling in rubber stator of downhole motors: dependency to materials and geometry, and its application to life prediction[J]. Engineering Failure Analysis, 2024, 159: 108072.

[21] 陈逸珂. 螺杆马达定子衬套工作力学特性及疲劳寿命研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2019.

CHEN Yike. Study on the working mechanical characteristics and fatigue life of screw motor stator bushings[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2019.

[22] 宋焘, 王春阳, 魏向辉, 等. 螺杆钻具定子用 NBR 高硬度橡胶胶料的研制[J]. 特种橡胶制品, 2022, 43(1): 24-25.

SONG Ye, WANG Chunyang, WEI Xianghui, et al. Development of NBR high hardness rubber compound for screw drill stator[J]. Special Purpose Rubber Products, 2022, 43(1): 24-25.

[23] 宋建, 罗西超, 刘欣欣, 等. 丁腈橡胶衬套产品的寿命预测方法探讨[J]. 橡胶工业, 2022, 69(7): 527-531.

SONG Jian, LUO Xichao, LIU Xinxin, et al. Discussion on life prediction method of product with NBR bushing[J]. China Rubber Industry, 2022, 69(7): 527-531.

[24] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 硫化橡胶或热塑性橡胶 耐液体试验方法: GB/T 1690—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Rubber, vulcanized or thermoplastic-Determination of the effect of liquids: GB/T 1690-2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.

[25] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 硫化橡胶或热塑性橡胶 压缩应力应变性能的测定: GB/T 7757—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Rubber, vulcanized or thermoplastic-Determination of compression stress-strain properties: GB/T 7757-2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.

[26] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 硫化橡胶或热塑性橡胶 拉伸应力应变性能的测定: GB/T 528—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Rubber, vulcanized or thermoplastic-Determination of tensile stress-strain properties: GB/T 528-2009[S]. Beijing: Standards Press of Chi-

na,2009.

[27] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 橡胶物理试验方法试样制备和调节通用程序:GB/T 2941—2006[S]. 北京:中国标准出版社,2007.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People’s Republic of China, Standardization Administration of the People’s Republic of China. Rubber-General procedures for preparing and conditioning test pieces for physical test methods:GB/T 2941-2006[S]. Beijing:Standards Press of China,2007.

[28] 贺向东,吴恒安,刘合,等. 基于温胀和溶胀特性的螺杆泵定子型线设计[J]. 工程力学,2011,28(7):196-202.

HE Xiangdong,WU Heng’an,LIU He,et al. Design of stator of PCP based on expansion and swelling analysis[J]. Engineering Mechanics,2011,28(7):196-202.

[29] 祖海英,冉中霖,宋玉杰,等. 螺杆泵定子温胀溶胀耦合变形及密封特性[J]. 润滑与密封,2022,47(4):22-27.

ZU Haiying,RAN Zhonglin,SONG Yujie,et al. Coupling deformation of thermal expansion and swelling and sealing characteristics of progressive cavity pump stator[J]. Lubrication Engineering,2022,47(4):22-27.

[30] 祝效华,迟博. 螺杆钻具定转子热力耦合行为[J]. 石油学报,2016,37(8):1047-1052.

ZHU Xiaohua,CHI Bo. Thermal-mechanical coupling behavior for screw drill stator and rotor[J]. Acta Petrolei Sinica,2016,37(8):1047-1052.

[31] 李明. 影响螺杆泵密封性能的直接因素分析[J]. 化学工程与装备,2016(3):136-138.

LI Ming. Analysis of direct factors affecting the sealing performance of screw pumps[J]. Chemical Engineering and Equipment,2016(3):136-138.

[32] 操建平,孟庆昆,高圣平,等. 螺杆泵漏失机理研究[J]. 机械设计与制造,2012(4):153-155.

CAO Jianping,MENG Qingkun,GAO Shengping,et al. Research on slippage mechanism of progressing cavity pump[J]. Machinery Design and Manufacture,2012(4):153-155.

[33] 叶卫东,宋玉杰,杜秀华,等. 单螺杆泵密封性能的有限元分析[J]. 润滑与密封,2008,33(4):91-94.

YE Weidong,SONG Yujie,DU Xiuhua,et al. Finite element analysis of sealing performance of single progressive cavity pump[J]. Lubrication Engineering,2008,33(4):91-94.

[34] WEI Y T,TIAN Z H,DU X W. A finite element model for the rolling loss prediction and fracture analysis of radial tires[J]. Tire Science and Technology,1999,27(4):250-276.

[35] MCALLEN J,CUITINO A M, SERNAS V. Numerical investigation of the deformation characteristics and heat generation in pneumatic aircraft tires;part I. Mechanical modeling. Finite elements in analysis and design,1996,23(2/4):241-263.

(收稿日期 2023-07-19 改回日期 2024-08-09 编辑 王培玺)

(上接第 1521 页)

[47] LI Mingsong,HINNOV L,KUMP L. Acycle;time-series analysis software for paleoclimate research and education[J]. Computers & Geosciences,2019,127:12-22.

[48] BEERBOWER J R. Cyclothem and cyclic depositional mechanisms in alluvial plain sedimentation[C]//Merriam D F. Symposium on Cyclic Sedimentation. Kansas:Geological Survey,1964:31-32.

[49] 李晓静,刘莹,王东东,等. 能源岩系沉积序列中旋回类型及其非对称性成因[J]. 中国煤炭地质,2019,31(10):1-7.

LI Xiaojing,LIU Ying,WANG Dongdong,et al. Sedimentary cycle types and genesis of their asymmetry in energy rock series sedimentary sequence[J]. Coal Geology of China,2019,31(10):1-7.

[50] 纪友亮,吴胜和,张锐. 自旋回和异旋回的识别及其在油藏地层对比中的作用[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2012,36(4):1-6.

JI Youliang,WU Shenghe,ZHANG Rui. Recognition of auto-cycle and Allo-cycle and its role in strata correlation of reservoirs[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science),2012,36(4):1-6.

[51] 姜在兴,张建国,孔祥鑫,等. 中国陆相页岩油气沉积储层研究进展及发展方向[J]. 石油学报,2023,44(1):45-71.

JIANG Zaixing,ZHANG Jianguo,KONG Xiangxin,et al. Research progress and development direction of continental shale oil and gas deposition and reservoirs in China[J]. Acta Petrolei Sinica,2023,44(1):45-71.

[52] 王奉安. 太阳黑子与地球环境[J]. 环境保护与循环经济,2011,31(3):28-30.

WANG Feng’an. Environment protection and circular economy[J]. Environmental Protection and Circular Economy,2011,31(3):28-30.

[53] ZHONG Qi,ZHANG Jianguo,WANG Siqi,et al. Depositional evolution of Eocene deep-lake mudrock lithofacies driven by astronomical forcing in the Dongying depression,China[J]. Marine and Petroleum Geology,2023,158:106516.

[54] SHI Juye,JIN Zhijun,LIU Quanyou,et al. Cyclostratigraphy and astronomical tuning of the Middle Eocene terrestrial successions in the Bohai Bay Basin,Eastern China[J]. Global and Planetary Change,2019,174:115-126.

[55] 邹才能,朱如凯,董大忠,等. 页岩油气科技进步、发展战略及政策建议[J]. 石油学报,2022,43(12):1675-1686.

ZOU Caineng,ZHU Rukai,DONG Dazhong,et al. Scientific and technological progress, development strategy and policy suggestion regarding shale oil and gas[J]. Acta Petrolei Sinica,2022,43(12):1675-1686.

[56] CATUNEANU O,ABREU V,BHATTACHARYA J P,et al. Towards the standardization of sequence stratigraphy[J]. Earth-Science Reviews,2009,92(1/2):1-33.

(收稿日期 2024-01-19 改回日期 2024-06-12 编辑 雷永良)