

产品·设计

丁腈橡胶衬套产品的寿命预测方法探讨

宋建, 罗西超, 刘欣欣, 郭添鸣, 孙晓亮, 张一帆

(北京石油机械有限公司, 北京 102206)

摘要:以常规型号的油田钻井用螺杆钻具的发动机定子为例,结合丁腈橡胶(NBR)胶料的物理性能检测,初步建立定子NBR衬套的配合尺寸在时间效应下的变化模型,探讨在定转子的设计配合尺寸下发动机的寿命预测方法。结果表明:发动机定转子出厂前的配合尺寸直接影响其寿命;发动机定子NBR衬套的配合尺寸的主要影响因素有物理力、温升、介质、压变和磨损;通过测定NBR胶料的物理物性,结合油田实际打井数据,可以预测在定转子的设计配合尺寸下发动机的寿命。

关键词:丁腈橡胶;衬套;定转子;发动机;螺杆钻具;配合尺寸;寿命

中图分类号:TQ336.4⁺1

文献标志码:A

文章编号:1000-890X(2022)07-0527-05

DOI:10.12136/j.issn.1000-890X.2022-07-0527



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

丁腈橡胶(NBR)作为高分子弹性体,凭借其优异的耐温、耐油和高弹性,在油田钻井作业工具中得到广泛应用^[1-2]。NBR是螺杆钻具发动机中定子橡胶衬套的主体材料,定子注胶成型后内部形成螺旋形橡胶空腔,其与螺旋形转子合理配合(一般是过盈配合)形成有效密封^[2]。作业时,橡胶衬套受到复杂工况作用,即井温的阶梯上升、高温介质的长期腐蚀、转子的高频剪切压缩、转子波峰峰顶与钻井液共同产生的旋转力作用,导致定子橡胶衬套发生热膨胀、介质浸泡溶胀、压缩永久变形和磨损损失,其尺寸发生变化^[3]。

本工作以常规型号的定子为例,结合NBR胶料的物理性能检测,初步建立定子NBR衬套的配合尺寸在时间效应下的变化模型,从而预测在定转子的设计配合尺寸下螺杆钻具发动机的寿命^[4]。

1 实验

1.1 影响因素

172螺杆钻具的初始定子小径是选择转子中

径的主要参考数据,在螺杆钻具下井作业时,定子小径发生变化,初始定转子过盈配合关系变化。探究NBR衬套的尺寸变化情况,需要从NBR胶料的温升线膨胀、热介质浸泡溶胀、压缩永久变形和磨损损失4个方面进行叠加计算^[5-9]。

1.2 试验设备

低温膨胀系数测定仪、高温滚子加热炉、磨损试验机。

1.3 测试分析

(1)线膨胀系数采用GB/T 1036—2008《塑料—30~30℃线膨胀系数的测定 石英膨胀计法》测定。试样尺寸为50 mm×6.3 mm×6.3 mm,硫化条件为175℃×15 min,硫化试样室温停放24 h后进行测试,试验温度范围0~150℃,记录温度间隔为1℃。

试样的膨胀量按式(1)计算:

$$\Delta H = H_t - H_0 \quad (1)$$

式中 ΔH ——试样在各温度点的膨胀量, μm ;

H_t ——试样在加热膨胀后的高度, μm ;

基金项目:中国石油天然气集团有限公司科学研究与技术开发项目(2018E-2108)

作者简介:宋建(1975—),女,山东济宁人,北京石油机械有限公司工程师,学士,主要从事油井相关的高分子材料的研究工作。

E-mail: kongkongmum@126.com

引用本文: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.

Citation: 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.

H_0 ——试样在室温下的原始高度, μm 。

试样的线膨胀系数按式(2)计算:

$$\alpha = \Delta H / (H_0 \times \Delta T) \quad (2)$$

式中 α ——试样的平均每摄氏度的线膨胀系数, $^{\circ}\text{C}^{-1}$;

ΔT ——试验温度+1.8 $^{\circ}\text{C}$ 。

试样的体膨胀系数按式(3)计算:

$$\beta = \Delta H \times \Delta S / (H_0 \times \Delta T) \quad (3)$$

式中 β ——试样的平均每摄氏度的体膨胀系数, $^{\circ}\text{C}^{-1}$;

ΔS ——试样的底面积膨胀倍数。

试样的膨胀率按式(4)计算

$$\gamma = \Delta H / H_0 \times 100\% \quad (4)$$

式中 γ ——试样在某一温度下的膨胀率, %。

(2) 热介质浸泡溶胀试验按照GB/T 1690—2010《硫化橡胶或热塑性橡胶 耐液体试验方法》进行。试样尺寸为20 mm×20 mm×2 mm, 硫化条件为175 $^{\circ}\text{C}$ ×15 min, 硫化试样室温停放24 h后进行测试, 试样在钻井液中完成48 h的热介质浸泡溶胀。

(3) 压缩永久变形采用GB/T 7759.1—2015《硫化橡胶或热塑性橡胶 压缩永久变形的测定 第1部分: 在常温及高温条件下》测定。试样为直径29 mm、高12.5 mm的圆柱体, 硫化条件为175 $^{\circ}\text{C}$ ×10 min, 硫化试样室温停放24 h后分别进行室温、70 $^{\circ}\text{C}$ 和150 $^{\circ}\text{C}$ 下的压缩永久变形测试, 压缩率为10%~25%。

(4) 阿克隆磨耗量采用GB/T 1689—2014《硫化橡胶耐磨性能的测定(用阿克隆磨耗试验机)》测定。试样尺寸为233.6 mm×12.7 mm×6 mm, 硫化条件为175 $^{\circ}\text{C}$ ×10 min, 硫化试样室温停放24 h后进行测试, 磨耗时间为98 min。

2 结果与讨论

2.1 NBR胶料性能

2.1.1 温升线膨胀性

NBR胶料的温升线膨胀性试验结果如表1所示。

由表1可知: 随着温度的升高, NBR胶料的线膨胀量和线膨胀率基本呈线性增大趋势; 线膨胀

表1 NBR胶料的温升线膨胀性试验结果

Tab. 1 Temperature rise linear expansion test results of NBR compound

温度/ $^{\circ}\text{C}$	线膨胀量/ μm	线膨胀系数× $10^6/^{\circ}\text{C}^{-1}$	膨胀率/ %	体膨胀系数 ¹⁾ × $10^7/^{\circ}\text{C}^{-1}$
0	0.038	0.422	0	12.667
30	256.684	161.436	0.513	4 843.080
45	397.004	169.660	0.794	5 089.800
90	703.972	153.371	1.407	4 601.129
100	792.188	155.636	1.584	4 669.080
110	874.398	156.422	1.748	4 692.660
120	954.614	156.751	1.909	4 702.530
130	1 016.830	154.299	2.033	4 628.970
140	1 063.046	149.936	2.126	4 498.080
150	1 101.264	145.094	2.202	4 352.820

注: 1) 低温膨胀仪自动计算所得, 自动代入的试样的底面积膨胀倍数为3。

系数先增大, 温度升至45 $^{\circ}\text{C}$ 时线膨胀系数达到最大值, 然后变化不大。分析认为, 在温度升至45 $^{\circ}\text{C}$ 后, NBR胶料的弹性模量变小, NBR胶料变软^[10], 受压力影响, 橡胶分子间运动增长幅度与温度不呈线性变化^[11]。

2.1.2 在热介质浸泡溶胀性

NBR胶料的热介质浸泡溶胀性试验结果如表2所示。

表2 NBR胶料的热介质浸泡溶胀性试验结果

Tab. 2 Thermal medium immersion swelling test results of NBR compound

温度/ $^{\circ}\text{C}$	体积溶胀率/%	理论计算自由线溶胀率/%
90	3.3	1.09
100	3.5	1.15
111	3.5	1.15
117	3.6	1.19
121	3.7	1.22
125	3.8	1.23
131	3.9	1.27
135	4.0	1.30
141	4.1	1.34
148	4.2	1.39

由表2可知: NBR胶料在90 $^{\circ}\text{C}$ 以上的介质中浸泡48 h, 溶胀达到平衡; 随着介质温度的升高, NBR胶料的溶胀率呈小幅上涨趋势^[12]。分析认为: 介质温度升高一方面促使介质粘度降低, 流动性增强, 更多的介质小分子溶剂渗入NBR胶料表面并向内部扩散; 另一方面橡胶分子的活动能力增强,

促使NBR胶料内部网络结构增大,可以容纳更多的介质小分子^[13]。

2.1.3 压缩永久变形

NBR胶料的压缩永久变形试验结果如表3所示。

表3 NBR胶料压缩永久变形试验结果 Tab.3 Compression set test results of NBR compound			
试验条件	压缩率/ %	初始高度/ mm	压缩永久 变形/%
室温×72 h	10	12.40	1.78
室温×72 h	15	12.30	1.78
室温×72 h	25	12.40	2.03
70 ℃×24 h	10	12.30	4.90
70 ℃×24 h	15	12.46	3.20
70 ℃×24 h	25	12.31	2.40
150 ℃×24 h	10	12.39	8.56
150 ℃×24 h	15	12.34	8.15
150 ℃×24 h	25	12.66	8.82

由表3可知:在相同压缩时间下,NBR胶料的压缩永久变形随着试验温度的升高而增大;在相同温度下,不同压缩率的NBR胶料的压缩永久变形变化小,即压缩率对同一温度下NBR胶料的永久变形影响不大^[14-16]。分析认为,在高温下,NBR胶料达到一定压缩永久变形所需的时间缩短,因此在同一压缩时间下,NBR胶料的压缩永久变形与温度密切相关,温度高,压缩永久变形大,反之温度低,压缩永久变形小。

2.1.4 磨耗性能

NBR胶料的阿克隆磨耗量如表4所示,预磨前试样需在双头磨片机上打磨出粗糙面,打磨后试样厚度变小。

表4 NBR胶料的阿克隆磨耗量 Tab.4 Akron abrasions of NBR compound			
试样编号	磨耗量/mg	损失比 ¹⁾ ×10 ⁵	线磨耗率 ²⁾ ×10 ⁵
1	0.50	4.59	2.81
2	0.48	4.18	2.56
3	0.47	4.48	2.74
4	0.46	4.39	2.69
5	0.48	4.47	2.73
平均值	0.48	4.42	2.71

注:1)损失比=磨耗量/(密度×试样体积),打磨后试样1—5的厚度分别为3.11,3.28,3.00,2.99,3.07 mm;2)线磨耗率=损失比×60/98。

从表4可以看出,NBR的阿克隆磨耗量平均值为0.048 g。

2.2 定转子的配合尺寸变化规律

定子用橡胶衬套在井下主要受高温、高频剪切、钻井液腐蚀等作用,发生热膨胀、介质浸泡溶胀、压缩永久变形和磨耗损失,以一个直径为172 mm的定子为例,通过实验室数据推测在特定井下的定子NBR衬套的配合尺寸变化规律,如表5所示。NBR衬套的配合尺寸与时间关系模型是按照以下规定建立的。

(1)设定定子的初次下井井温为90 ℃,初次下

表5 不同钻井时间的定子NBR衬套尺寸 Tab.5 Sizes of NBR bushing for stator with different drilling time									
钻井时间/d	井温/ ℃	衬套初始厚度/mm	衬套升温线膨胀量×10 ³ /mm	衬套介质线溶胀量/mm	衬套压缩永久变形/mm	衬套线磨耗量/mm	衬套阶段终厚度/mm	衬套阶段终过盈量/mm	过盈量为零时衬套厚度/mm
0	90	20.75	3.18	0	0	0	20.75	0.41	20.55
2	94	20.80	3.21	0.233 2	0.128 3	0.027 1	20.89	0.67	20.55
4	98	20.83	3.23	0.233 4	0.280 6	0.054 2	20.73	0.36	20.55
6	102	20.68	3.23	0.238 5	0.193 6	0.080 7	20.65	0.19	20.55
8	106	20.62	3.23	0.237 9	0.131 3	0.107 3	20.63	0.15	20.55
10	109	20.61	3.23	0.237 7	0.108 7	0.134 1	20.61	0.12	20.55
12	113	20.60	3.22	0.237 6	0.084 3	0.160 8	20.59	0.09	20.55
14	117	20.58	3.23	0.244 1	0.058 9	0.187 4	20.58	0.07	20.55
16	121	20.57	3.22	0.250 6	0.035 7	0.214 1	20.57	0.05	20.55
18	125	20.56	3.21	0.253 8	0.013 8	0.240 7	20.56	0.02	20.55
20	129	20.56	3.18	0.259 0	0.000 0	0.267 3	20.54	-0.01	20.55

井底温度不高于150℃时,垂直深度每增大100 m,钻井液温度升高3℃;井底温度高于150℃时,钻井液温度恒定。

(2) 钻井液温度梯度与时间公式如下:

$$t_n - t_{n-1} = (T_n - T_{n-1}) \times 100 / 3V_{n-1} \quad (5)$$

式中 t_n ——完成钻井时间;

t_{n-1} ——开始钻井时间;

T_n ——完成钻井时钻井液温度;

T_{n-1} ——开始钻井时钻井液温度;

V_{n-1} ——开始钻井速度。

(3) NBR衬套磨耗试片的密度为1.18 $\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 长度为233.6 mm, 宽度为12.7 mm, 磨耗时间规为98 min。NBR衬套磨耗试片每小时的磨耗厚度=磨耗体积 $\times 60 / (\text{长度} \times \text{宽度} \times 98) = (\text{磨耗前质量} - \text{磨耗后质量}) \times 60 / (\text{长度} \times \text{宽度} \times 98 \times \text{密度}) = \text{损耗质量} \times 60 / (\text{长度} \times \text{宽度} \times 98 \times \text{密度})$ 。磨耗厚度是在一定压力下室温无介质滚动摩擦理想值。NBR胶料的每小时线磨耗率理想值为0.000 002 710 164。

(4) 不考虑转子的热膨胀。

(5) NBR衬套的温升线膨胀量为无介质下的纯温升线膨胀量。

(6) NBR衬套介质浸泡溶胀的理想情况为在每个温度阶段(浸泡48 h)均达到溶胀平衡,在48 h内NBR衬套的尺寸设定为匀速变化。

(7) 理想的NBR衬套的尺寸变化顺序为:初始钻井尺寸-热膨胀、介质浸泡溶胀尺寸-压变尺寸-磨耗尺寸。

(8) NBR衬套的压缩永久变形在温度低于30℃时视作标准样固定值的20.3%,温度不低于30℃时视作标准样固定值的88.2%,不考虑压缩率、温度和介质的影响。

(9) 定转子出现间隙配合时,视作发动机密封失效。

由表5可知:在钻井2 d内,发动机定子NBR衬套受剪切热膨胀和介质浸泡溶胀影响大,表现出厚度增大;之后,热膨胀和介质浸泡溶胀基本达到饱和,此时摩擦和压变逐步成为NBR衬套的尺寸变化主导因素,NBR衬套的厚度变小;在钻井8 d左右,NBR衬套的压变量也基本稳定,NBR衬套以磨

耗为主;在钻井20 d后,终过盈量为负数,定转子出现间隙配合,密封失效^[17-18],发动机丧失功能。

3 结论

(1) 螺杆钻具发动机定转子出厂前的尺寸配合直接影响其寿命。

(2) 在井下使用中,螺杆钻具发动机定子NBR衬套受复杂的地质因素影响,这些影响因素有物理力、温升、介质、压变和磨耗。

(3) 通过测定NBR胶料的物理性能,结合油田实际打井数据,可以预测出厂螺杆钻具在定转子的设计配合尺寸下发动机的寿命。

参考文献:

- [1] 韩珩,王世杰,吕晓仁.表面改性对丁腈橡胶耐油及耐磨性能的影响[J].橡胶工业,2015,62(10):587-591.
HAN H, WANG S J, LYU X R. Effect of surface modification on oil resistance and wear resistance of NBR[J]. China Rubber Industry, 2015, 62(10):587-591.
- [2] 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 C J, ZHANG J, LIU Y. Thermal-structure coupling analysis for general stator lining of PDM[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(6):2311-2317.
- [3] 童华,陈国银,祝效华.等壁厚螺杆钻具橡胶衬套失效研究[J].西南石油大学学报(自然科学版),2017,39(6):154-165.
TONG H, CHEN G Y, ZHU X H. Study on rubber bushing failure of PDM having uniform wall thickness[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2017, 39(6):154-165.
- [4] 魏纪德,郑学成,岳莉,等.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 J D, ZHENG X C, YUE L, et al. Numerical simulation for temperature field of a progressive cavity pump (PCP) stator[J]. China Petroleum Machinery, 2006, 34(2):11-14.
- [5] 刘建勋,黄友剑,刘柏兵,等.一种橡胶弹性元件疲劳寿命预测方法的研究[J].电力机车与城轨车辆,2011,34(3):12-14,27.
LIU J X, HUANG Y J, LIU B B, et al. Research on fatigue life prediction method of rubber components[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2011, 34(3):12-14, 27.
- [6] 李颖妮,杨学军,刘锋.酚醛纤维和芳砜纶纤维对丁腈橡胶耐烧蚀性能的影响[J].应用化工,2013,42(7):1287-1290.
LI Y N, YANG X J, LIU F. Effect of phenolic fiber and polysulfonamide fiber on ablative performance of NBR[J]. Applied Chemical Industry, 2013, 42(7):1287-1290.

- [7] 宋崇健, 张炜, 莫纪安. 填充短纤维对NBR基绝热材料性能的影响[J]. 固体火箭技术, 2004, 27(1): 73-76.
SONG C J, ZHANG W, MO J A. Effect of short fiber filler on the properties of NBR-matrix insulator[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2004, 27(1): 73-76.
- [8] 张春梅, 杜华太, 庞明磊, 等. 有机蒙脱土/氢化丁腈橡胶纳米复合材料的结构和性能[J]. 航空材料学报, 2013, 33(5): 66-71.
ZHANG C M, DU H T, PANG M L, et al. Structure and performance of OMMT/hydrogenated nitrile rubber nano-composite material[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2013, 33(5): 66-71.
- [9] 章菊华, 王珍, 张洪雁, 等. 氢化丁腈橡胶的结构与性能研究[J]. 材料工程, 2011(2): 31-34, 51.
ZHANG J H, WANG Z, ZHANG H Y, et al. Molecular structure and properties of hydrogenated nitrile rubber[J]. Journal of Materials Engineering, 2011(2): 31-34, 51.
- [10] 苗恩铭. 材料热膨胀系数影响因素概述[J]. 工具技术, 2005, 39(5): 26-29.
MIAO E M. Applicability analysis and extension choice of using thermal expansion character parameter[J]. Tool Engineering, 2005, 39(5): 26-29.
- [11] 乔博, 赵秀英, 高悦凯, 等. 密封橡胶材料的压力-体积-温度关系的研究[J]. 高分子学报, 2012(9): 1015-1020.
QIAO B, ZHAO X Y, GAO Y K, et al. Study on the pressure-volume-temperature properties of sealing rubber materials[J]. Acta Polymerica Sinica, 2012(9): 1015-1020.
- [12] 黄安民, 王小萍, 贾德民. 氢化丁腈橡胶耐热和耐介质性能[J]. 弹性体, 2006, 16(2): 63-68.
HUANG A M, WANG X P, JIA D M. Heat and medium-resistance performance of HNBR[J]. China Elastomerics, 2006, 16(2): 63-68.
- [13] 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 H M, LYU X R, WANG S J. Effects of temperature on swelling and wear resistance properties of nitrile rubber in the crude oil[J]. Lubrication Engineering, 2015, 40(9): 30-34.
- [14] 崔俞, 冯圣玉, 杜华太, 等. 橡胶压缩永久变形性能影响因素分析及研究[J]. 航天制造技术, 2014(3): 2-5.
CUI Y, FENG S Y, DU H T, et al. Analysis and research of influence factors of rubber compression set[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2014(3): 2-5.
- [15] 刘明, 辛丽红, 詹正云. 氢化丁腈橡胶压缩永久变形的研究[J]. 橡胶科技, 2020, 18(6): 322-324.
LIU M, XIN L H, ZHAN Z Y. Study on compression set of HNBR[J]. Rubber Science and Technology, 2020, 18(6): 322-324.
- [16] 谢可勇, 李晖, 庞明磊, 等. 橡胶压缩永久变形率测定常用标准分析与解读[J]. 高分子材料科学与工程, 2015, 31(5): 93-98.
XIE K Y, LI H, PANG M L, et al. Analysis and interpretation of standards commonly used for determination of compression set for vulcanized rubber[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2015, 31(5): 93-98.
- [17] 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, 36(10): 8-11, 44.
LI M Q, ZHAO H C. Failure mechanism and measure analysis of motor stator of screw drill[J]. China Petroleum Machinery, 2008, 36(10): 8-11, 44.
- [18] 刘欣, 谈金祝, 张武建, 等. 螺杆泵定子氢化丁腈橡胶材料的制备与压缩力学性能[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2020, 42(5): 580-585.
LIU X, TAN J Z, ZHANG W J, et al. Fabrication and compressive mechanical properties of hydrogenated nitrile rubber for screw pump stator[J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition), 2020, 42(5): 580-585.

收稿日期: 2022-03-01

Discussion on Life Prediction Method of Product with NBR Bushing

SONG Jian, LUO Xichao, LIU Xinxin, GUO Tianming, SUN Xiaoliang, ZHANG Yifan

(Beijing Petroleum Machinery Co., Ltd, Beijing 102206, China)

Abstract: Taking the engine stator of a conventional screw drill for oil field drilling as an example, combined with the physical property test of nitrile rubber (NBR) compound, a model of the change of the matching size of the NBR bushing of the stator under the effect of time was initially established, and the life prediction method of engine under the design matching sizes of the stator and rotor was discussed. The results showed that the matching size of the engine stator and rotor before leaving the factor directly affected its life. The main factors influencing the matching size of the NBR bushing of the engine stator were physical force, temperature rise, medium, pressure change and wear. By measuring the physical properties of NBR compound and combined with the actual drilling data in the oilfield, the life of the engine under the design matching sizes of stator and rotor could be predicted.

Key words: NBR; bushing; stator and rotor; engine; screw drill; matching size; life