

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2024.204

引用格式: 梁校瑞, 陈立杉, 孟凡明, 等. 氟醚唇形油封摩擦磨损及老化性能试验分析[J]. 重庆大学学报, 2026, 49(1): 32-39.



氟醚唇形油封摩擦磨损及老化性能试验分析

梁校瑞^{1,2}, 陈立杉³, 孟凡明¹, 高致远^{1,2}, 杨圣¹

(1. 重庆大学高端装备机械传动全国重点实验室, 重庆 400044; 2. 重庆长安汽车股份有限公司, 重庆 401120;
3. 中国船舶集团有限公司第 705 研究所, 西安 710077)

摘要: 针对氟醚橡胶材质的唇形油封, 基于多用途传动摩擦试验台, 结合唇形油封不同过盈量与耐介质老化时间参数, 开展变转速干摩擦试验, 分析耐介质老化时间、过盈量对油封安装主轴转矩、振动及摩擦磨损的影响。试验结果表明: 在本试验选用的参数范围内, 随着老化时间延长, 主轴转矩随之降低, 振动呈先减后增的趋势; 随着过盈量的增大, 主轴转矩、振动随之增大; 老化时间越长, 过盈量越低, 油封磨损量越小。此外, 随着耐介质老化时间增长, 试件摩擦区域表面越光滑, 溶胀现象越显著。

关键词: 油封; 摩擦磨损; 耐介质老化; 氟醚橡胶; 振动试验

中图分类号: TH133.33

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2026)01-032-08

Friction, wear and aging performance of fluoroether lip oil seals

LIANG Xiaorui^{1,2}, CHEN Lishan³, MENG Fanming¹, GAO Zhizyuan^{1,2}, YANG Sheng¹

(1. State Key Laboratory of Mechanical Transmission for Advanced Equipment, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 2. Chongqing Chang'an Automobile Co., Ltd., Chongqing 401120, P. R. China;
3. The 705 Research Institute, China State Shipbuilding Corporation Limited, Xi'an 710077, P. R. China)

Abstract: Using a multi-purpose transmission friction test bench, variable-speed dry friction tests were conducted on lip-type oil seals composed of fluoroether rubber, with considering different interference levels and media-aging durations. The effects of aging time and interference on spindle torque, vibration, and frictional wear were systematically analyzed. Results show that, within the tested parameter range, spindle torque decreases with prolonged aging time, while vibration initially decreases and subsequently increases. Increasing interference leads to higher spindle torque and vibration. Moreover, longer aging time and lower interference correspond to reduced wear of the oil seal. Surface observations further indicate that extended aging time produces smoother frictional surfaces and more pronounced swelling.

Keywords: oil seal; friction and wear; resistance to medium aging; fluoroether rubber; vibration test

收稿日期: 2023-08-25 网络出版日期: 2024-04-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52175160)。

Supported by the National Natural Science Foundation of China (52175160).

作者简介: 梁校瑞(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事摩擦学相关研究, (E-mail)1492237505@qq.com。

通信作者: 孟凡明, 男, 教授, 博士生导师, (E-mail)fmmeng@cqu.edu.cn。

随着电动汽车技术的发展,传统的驱动方式逐渐被轮毂内置电驱动技术取代^[1-3]。为了进一步提高电驱动轮毂的性能,轮毂内单级、多级减速器已经应用于各种类型的电驱动轮毂中^[4-6]。随着轮毂内减速器的广泛应用,使用油封防止轮毂内减速器润滑油泄漏是不可或缺的一环^[7-8]。

目前,唇形油封的研究多侧重于唇形油封结构本身对摩擦磨损性能的影响。Kim等^[9]用有限元法模拟静态唇形油封状态,结果表明,最大接触压力在弹簧槽处和油封的密封区域,接触压力的大小与弹簧劲度和前、后唇角等油封结构参数有关。张佳佳等^[10]和赵向雷等^[11]建立唇形油封数值模型,研究了油封结构参数和轴转速对接触区温度及温度对密封性能的影响规律。张付英等^[12]通过有限元与润滑条件下的数值仿真模型结合,分析了油封在润滑条件下磨损过程中密封性能参数的变化趋势。

国内外学者大多研究氟橡胶或丁腈橡胶的老化性能,对氟醚橡胶材料研究较少。杜钢等^[13]对丁腈橡胶、氟橡胶、三元乙丙橡胶进行了湿热老化试验,发现三元乙丙橡胶的抗湿热老化性能最好。Alves等^[14]将2种橡胶试件在柴油中完全浸没老化5 h,结果发现丁腈橡胶在老化后其质量、拉伸强度和硬度均有所降低,而氟橡胶的性能保持相对良好。此外,张录平等^[15]对特种氟橡胶耐机油老化进行了试验研究,结果表明,氟橡胶试件性能的拉伸强度随着老化时间的延长而降低,压缩永久变形、硬度和回弹性随之增大。陈玉如等^[16]考察氟橡胶在150 °C的航空煤油和航空润滑油中浸泡试验,发现氟橡胶的力学性能变化幅度较大,耐热性能基本保持不变。已有的研究表明,氟醚橡胶相对于传统橡胶具有耐高低温及更好的化学稳定性^[17-18]。同时,氟醚橡胶与氟橡胶老化试验对比中,氟醚橡胶老化后更耐磨^[19]。

上述关于氟醚唇形油封的研究多基于材料块试验,针对氟醚橡胶油封试件级的具体研究较少。在考虑耐介质老化和不同过盈量的情况下,针对氟醚橡胶材料唇形油封的摩擦磨损性能试验研究还未出现。因此,文中将基于由孟凡明等^[20]研制的SKLMT多用途传动摩擦学试验台,在考虑耐介质老化和不同过盈量的情况下,通过试验的方法对比研究耐介质老化及不同过盈量对氟醚油封摩擦磨损性能及表面形貌的影响,以期为唇形油封的选用及设计提供一定的理论依据。

1 实验部分

1.1 试验及试验设备

氟醚唇形油封摩擦振动及老化性能试验在SKLMT多用途传动摩擦学试验台CQU-AMH-195上开展,该试验装置主要由试验台本身及其控制台组成。试验台床身由转轴1传动部分床身和转轴2传动部分床身组成。试验中,用于氟醚唇形油封摩擦振动试验的是转轴

2。操作人员可通过控制台能调节转轴2的转速,观察主轴转矩和振动。

如图1所示,将轴承座固定在自主加工设计的试验台基座上,并将基座固定在试验台床身上。转轴2与电机的连接部分有转矩传感器和加速度传感器,可以在转轴2旋转时测量其工作转矩和振动加速度。试验过程中,试验台通过转轴2提供不同的转速,使转轴2产生周向运动,模拟油封工作状态,以便较准确地分析转轴转矩及振动与唇形油封老化时间的相互关系和影响规律。

摩擦磨损试验后,通过超景深三维显微系统对磨损后的油封唇口表面进行观察,该装置主要由超景深显微镜、控制手柄和计算机制成。试验中,用超景深显微镜观察试件表面的磨损形貌,并通过内置辅助测量程序测量其磨痕宽度,进而计算油封磨损深度,分析油封老化时间与磨损深度的影响规律及其内在机理。

1.2 试验材料及参数条件

氟醚唇形油封由中国兵器工业集团北方车辆研究所提供,为内包式骨架压力油封,其弹性模量为7.2 MPa,硬度为75 shore A,拉伸伸长率为150%;油封内径为75 mm,外径为100 mm,宽度为10 mm。3根

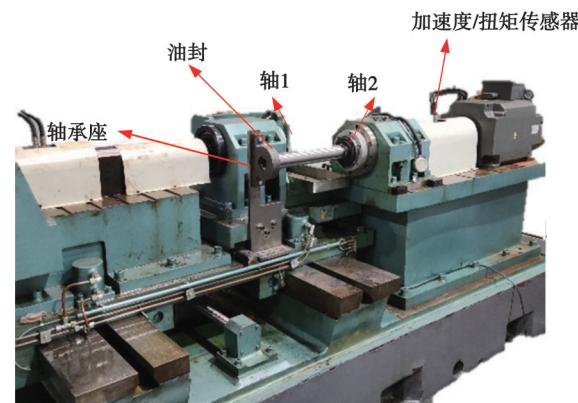


图1 油封的安装

Fig. 1 Oil seal installation

试验用轴采用38CrSi,先车削加工至轴径 φ 为75.2 mm,最终磨削至f6、h6、js6配合对应公差,其表面粗糙度Ra为0.2 μm 。

图2(a)为试验用氟醚唇形油封,红色圆圈为油封主唇口,唇口位置与试验轴进行相对摩擦。图2(b)为氟醚唇形油封截面结构示意图。图中, α 、 β 分别为主唇流体侧夹角和空气侧夹角; t 为油封腰部厚度; L 为油封腰部长度。

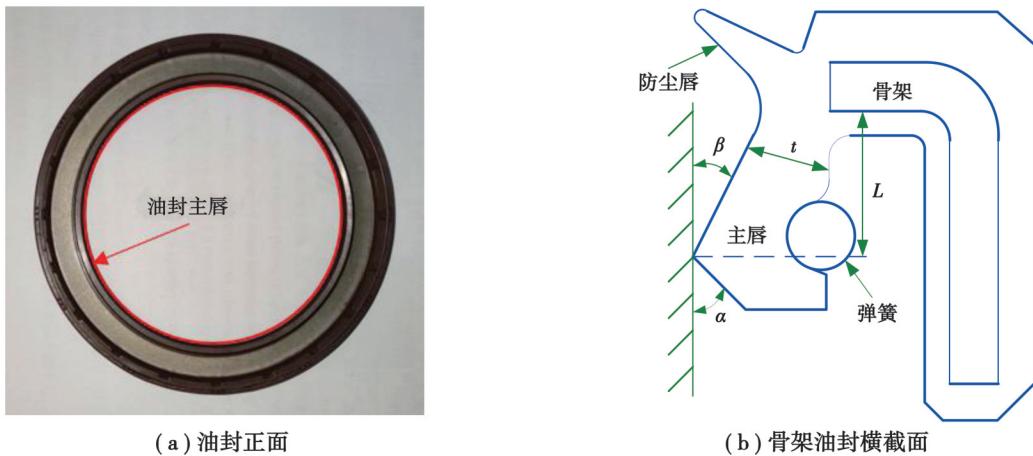


图2 试验所用唇形油封类型

Fig. 2 Lip shaped oil seal used in the experiment

试样老化参数考虑其自身性质,在同一老化温度(室温20 $^{\circ}\text{C}$)下分别将各个老化组别的氟醚唇形油封完全浸没入4050航空润滑油中,测试不同老化处理时间对其摩擦振动性能的影响,老化时间依次设定为6、12、24、48 h,与未进行老化处理的试样摩擦振动实验进行对比,试样取出后在恒温条件下进行实验,并在试验前利用酒精对试件进行超声波清洗。

实验中各个试验件的实验条件和分组如表1所示。5个实验分组主要按照老化处理时间、氟醚唇形油封和轴颈配合的公差进行分组。表1中,以配合公差 $\Phi 75\text{f}6\left(\begin{array}{c} 0 \\ -0.019 \end{array}\right)$ 为例,表示与唇形油封相配合的轴的公称直径为75 mm,公差带为f6,公差上限为0,公差下限为-0.019 mm。公差带f6的轴与唇形油封配合的过盈量最小,公差带js6的轴与唇形油封配合的过盈量最大。Case 1代表未进行老化的对照组,Case 2、Case 3、Case 4和Case 5代表进行老化处理的组别,并且老化处理时间随序号的增加而延长。

表1 唇形油封老化实验条件及分组

Table 1 Aging experimental conditions and grouping of lip oil seal

工况	老化时间/h	配合公差
Case 1	0	$\Phi 75\text{f}6\left(\begin{array}{c} 0 \\ -0.019 \end{array}\right)$, $\Phi 75\text{h}6\left(\begin{array}{c} -0.03 \\ -0.049 \end{array}\right)$, $\Phi 75\text{js}6\left(\begin{array}{c} +0.00095 \\ -0.00095 \end{array}\right)$
Case 2	6	$\Phi 75\text{f}6\left(\begin{array}{c} 0 \\ -0.019 \end{array}\right)$, $\Phi 75\text{h}6\left(\begin{array}{c} -0.03 \\ -0.049 \end{array}\right)$, $\Phi 75\text{js}6\left(\begin{array}{c} +0.00095 \\ -0.00095 \end{array}\right)$
Case 3	12	$\Phi 75\text{f}6\left(\begin{array}{c} 0 \\ -0.019 \end{array}\right)$, $\Phi 75\text{h}6\left(\begin{array}{c} -0.03 \\ -0.049 \end{array}\right)$, $\Phi 75\text{js}6\left(\begin{array}{c} +0.00095 \\ -0.00095 \end{array}\right)$
Case 4	24	$\Phi 75\text{f}6\left(\begin{array}{c} 0 \\ -0.019 \end{array}\right)$, $\Phi 75\text{h}6\left(\begin{array}{c} -0.03 \\ -0.049 \end{array}\right)$, $\Phi 75\text{js}6\left(\begin{array}{c} +0.00095 \\ -0.00095 \end{array}\right)$
Case 5	48	$\Phi 75\text{f}6\left(\begin{array}{c} 0 \\ -0.019 \end{array}\right)$, $\Phi 75\text{h}6\left(\begin{array}{c} -0.03 \\ -0.049 \end{array}\right)$, $\Phi 75\text{js}6\left(\begin{array}{c} +0.00095 \\ -0.00095 \end{array}\right)$

为探究老化处理时间、转速及过盈量对油封摩擦振动性能的影响,每组试验均从100 r/min启动,然后逐渐升至800 r/min,进行变转速试验,试验时待振动及主轴扭矩基本稳定后,再调整至下一工况。

2 结果与讨论

2.1 对转矩的影响

试验对比了在f6配合工况下,随着转速逐渐增加,氟醚油封在不同耐介质老化时间下随转速的变化趋势。对比过程中,轴承转速从100 r/min逐渐升至800 r/min。取磨合较长时间后的300~800 r/min进行研究,图3中看到,随着转速逐渐增加,不同耐介质老化组的主轴转矩均逐渐上升,并且随着转速增加,其转矩增长幅度逐渐变小,上述现象与董慧芳等^[21]的研究结论一致。在未进行老化处理的对照组中达到最大转矩;同一转速下,随着耐介质老化时间延长,各个老化组的主轴转矩均随之减小,即随着老化时间的延长,氟醚唇形油封与主轴的摩擦减小。出现以上现象是因为:在实验转速范围内,随着主轴转速的提高,氟醚唇形油封唇口接触区的界面温度因热量带走较快而变化较小,同时耐介质老化浸入油封表面的油膜黏度变化较小,因此随转速增大主轴转矩逐渐升高。同时,相同转速下,由于各老化组中产生了橡胶溶胀现象,随着老化时间的延长油封唇口接触区表面粗糙度幅值降低,接触压力下降,因此主轴转矩减小。这表明,氟醚唇形油封在使用时间较长后,会因唇口接触压力降低而失效。

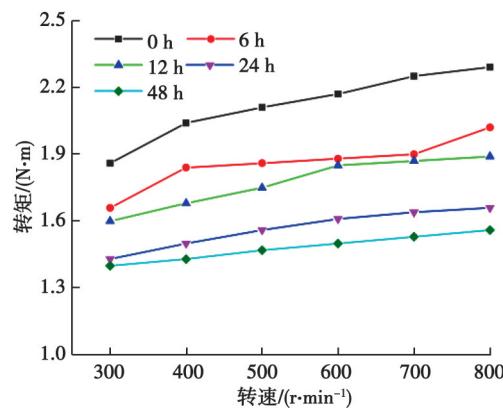


图3 不同老化时间下转速对轴转矩的影响

Fig. 3 Effect of rotating speed on shaft torque under variable different aging times

试验进一步对比了在轴径与轴配合公差为f6、h6、js6(过盈量顺序增大)下,每组试验在800 r/min转矩波动稳定后的主轴转矩大小。不同老化时间下过盈量对转矩的影响如图4所示。

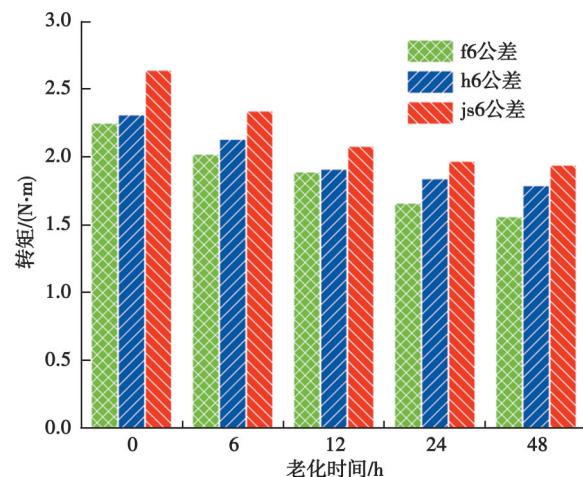


图4 不同老化时间下过盈量对转矩影响

Fig. 4 Influence of aging time on shaft torque under variable different interference amounts

从图4可知,在不同耐介质老化组中,随着老化时间的延长,主轴转矩逐渐减小,且主轴转矩变化幅度也逐渐减小,直到24 h组与48 h组中主轴转矩并无显著差别。随着过盈量的增大,主轴会因接触压力的增大而使转矩逐渐增大。因此,一定范围内过盈量的增加有助于延长氟醚唇形油封的密封性及使用寿命。

2.2 对振动的影响

除了对主轴转矩的影响,由于唇形油封具有一定的随动性,能够影响主轴的振动幅度,因此氟醚唇形油封的过盈量和耐介质老化时间还会对主轴振动产生影响。由于试验中振动幅值波动较大,图中唇形油封每个转速下的振动由振幅基本稳定后的振动均方根表示。图5(a)、(b)和(c)分别为油封与主轴配合为f6、h6、js6下不同转速下各老化组主轴振动均方根。从图5(a)中可以看出,同一转速下,未老化的对照组振动均方根最大,各老化组的振动均方根大小随老化时间增加而增大,但均未超过对照组。从图5(b)和5(c)中可以看出,随着过盈量的增大,主轴振动均方根也在增大,且老化组中24 h及48 h组中振动均方根大小逐渐超过对照组。

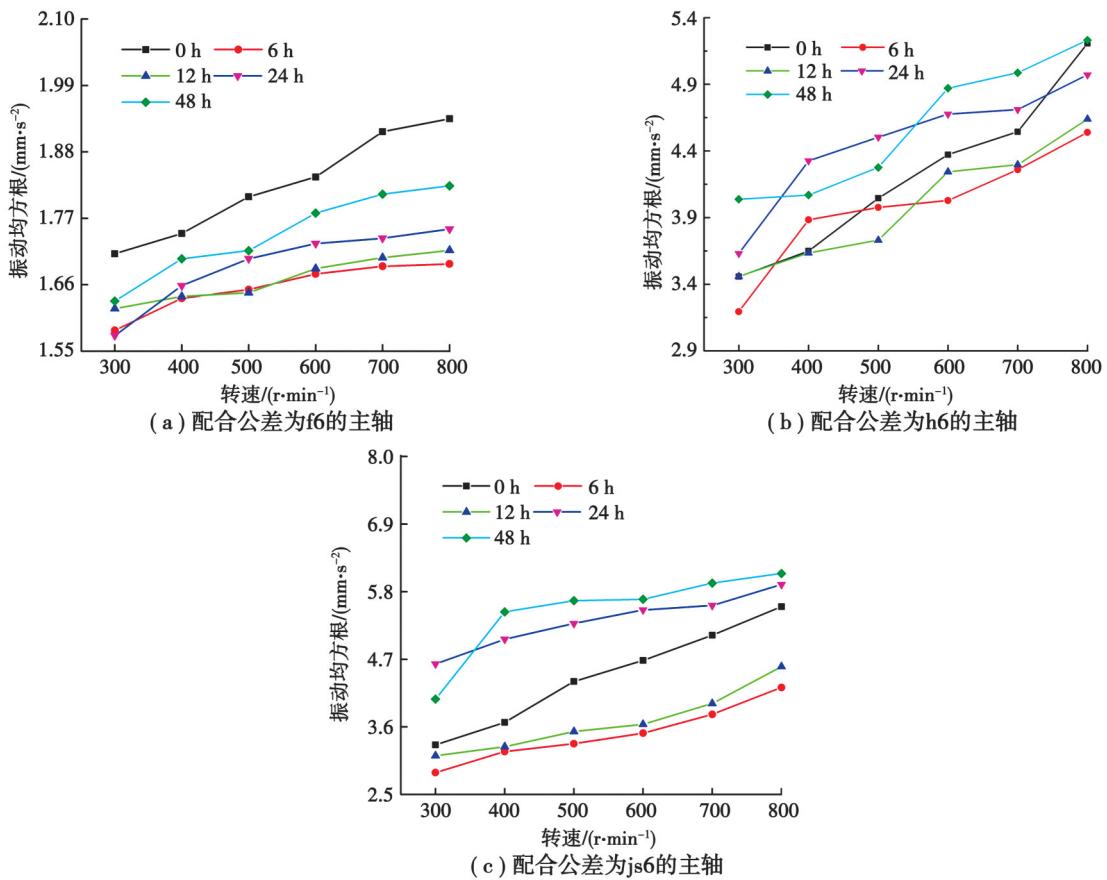


图5 不同过盈量下老化时间对振动均方根影响

Fig. 5 Influence of aging time on vibration root mean square of rotating shaft under different interference amounts

不同过盈量、不同老化组中,试验在800 r/min转速波动稳定后的主轴振动均方根如图6所示。可以看出,同一老化时间下,过盈量较大的h6、js6组别振动均方根明显大于f6组别;总体随着过盈量的增大,振动均方根幅值增大。此外,随着耐介质老化时间由0 h到48 h,振动均方根幅度总体呈增大趋势,这是因为随着主轴转速的提高,各老化组中老化引起氟醚唇形油封拉伸强度降低^[21],油封随动性下降,因而其振动均方根幅度随之增大。其中,在48 h老化组中,h6和js6相对于f6配合公差下振动均方根幅值增加最大,分别达到289%和336%,这说明过盈量的增大会导致在老化后随动性的下降趋势变得更剧烈。

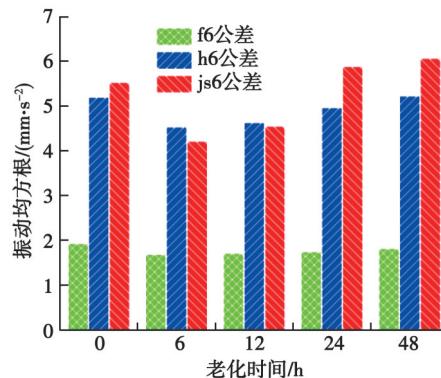


图6 不同老化时间下过盈量对振动均方根影响

Fig. 6 Influence of tolerance on vibration root mean square under different aging times

2.3 对油封磨损及形貌影响

图7为配合公差为f6、未进行老化处理的油封在变转速摩擦磨损试验后油封唇口接触区磨痕。可以看出,油封唇口的磨痕宽度有一定波动,但总体均衡,因此可以通过多次测量磨痕宽度取均值分析磨痕变化规律。

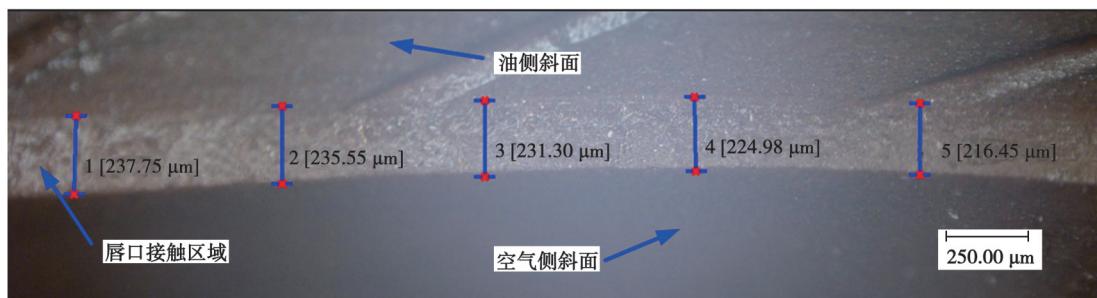


图7 未老化、f6配合公差的油封磨痕宽度

Fig. 7 Width of oil seal wear marks and f6 fit tolerance without aging

进而可通过氟醚唇形油封的唇口几何形貌计算出油封唇口在试验前后的磨损深度为

$$h = \frac{S}{\tan(90 - \alpha) + \tan(90 - \beta)}, \quad (1)$$

式中: h 为磨损深度,μm; S 为磨痕宽度,μm; α 、 β 分别为油封唇口空气侧夹角、流体侧夹角,(°),试验件的两侧角度分别为25.1°、26.7°。

不同过盈量下不同老化组氟醚唇形油封试验后磨损深度如图8所示。

可以看出,同一老化时间下,随着过盈量的增大,变转速实验后的磨损深度逐渐增大;随着老化时间的增加,h6和js6相对f6的磨损深度增大幅度增加,在48 h老化时间达到最大值,分别为132%和160%;同一过盈量下,随着各老化组耐介质老化时间的延长,油封唇口磨损深度逐渐减小,这同样是由于橡胶膨胀引起的唇口表面粗糙度降低,从而导致摩擦系数降低,进而减小磨损量。

通过超景深三维显微系统,对f6公差配合下各老化组的氟醚唇形油封试验后表面形貌进行观察。图9中从左至右依次为无老化的对照组、12 h、24 h及48 h耐介质老化组。可以

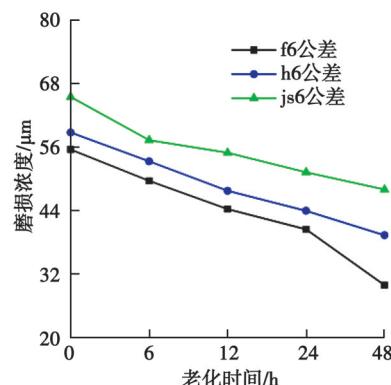


图8 不同过盈量下老化时间对油封磨损深度影响

Fig. 8 Effect of aging time on wear width of oil seal under different interference amounts

看出,随着老化时间的延长,氟醚唇形油封唇口的表面形貌由干燥粗糙逐渐变得光滑湿润,乃至发生明显的溶胀现象,这与赵国栋^[19]的研究结果一致,同时也进一步证实了由于溶胀现象引起的表面粗糙度变小,减小了唇口与主轴的摩擦力,从而影响了主轴转矩随着老化时间变化,增强了实际使用中油封的耐磨性。

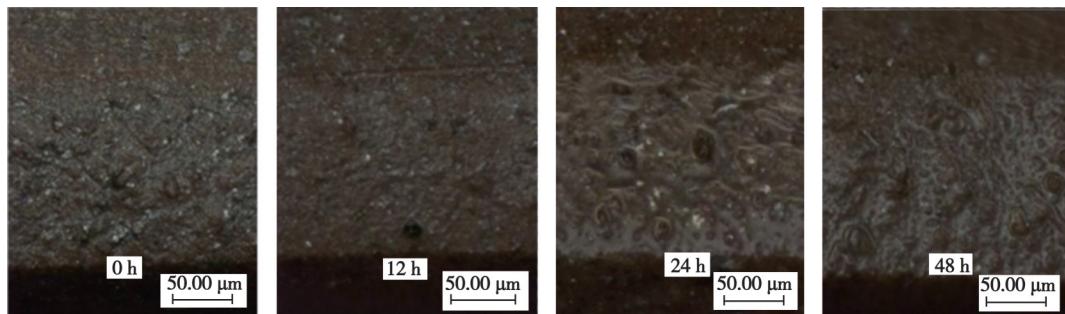


图9 老化时间对磨损后油封表面形貌的影响

Fig.9 Effect of aging time on the surface morphology of worn oil seal

3 结 论

- 1) 过盈量的增大会导致老化后的油封随动性下降愈发显著,进而振动加剧,在48 h老化组中,h6和js6相对于f6配合公差下振动均方根幅值增加最大,分别达到289%和336%。
- 2) 油封耐介质老化时间小于6 h时,随老化时间的增加,主轴转矩减小、振动均方根变大。
- 3) 在h6、js6配合公差下相对于f6时氟醚唇形油封唇口磨损更大;h6和js6相对f6配合公差下的磨损深度增幅更大,在48 h老化时间达到最大值,分别为132%和160%;耐介质老化时间从0 h到48 h变长,会使氟醚唇形油封唇口摩擦区域表面溶胀现象更加明显,从而减缓油封唇口磨损。
- 4) 通过减小氟醚唇形油封与轴的过盈量、增加耐介质老化时间,可抑制氟醚唇形油封唇口磨损、减小其振动,从而提高其密封性能和使用寿命。

参考文献

- [1] Wang J N, Wang K, Guo D C, et al. Two-speed transmission system integrated with inner rotor hub motor and electric vehicle using same[P]. US 11358468 B2, 2019.
- [2] Arto H, Thomas A, Mats A. A wheel hub unit[P]. EP 3393837 B1, 2015.
- [3] Zhang R J. Structure design and coordinated control of electromagnetic and frictional braking system based on a hub motor[J]. Science Progress, 2021, 104(1): 0036850421998483.
- [4] Takahiro M, Kohsuke M. In-wheel motor vehicle drive apparatus[P]. US 2021001711 A1, 2021.
- [5] Dong W C, Ma Y, Chen H Y, et al. Electric vehicle and hub drive mechanism thereof[P]. WO 2019037744 A1, 2019.
- [6] Li J Q, Hu J Y, Cai B K, et al. Electric wheel assembly with integrated hub motor[P]. WO 2019196395 A1, 2018.
- [7] 谭迪. 内置悬置的轮毂电机驱动系统动力学特性及结构优化[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- Tan D. Dynamics and structure optimization of the in-wheel motor system with rubber bushing[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [8] Shimizu, Hiroshi. Kamakura S, et al. Hub Motor for Electric Vehicle[P]. DE 2019128182 T2, 2001.
- [9] Kim C K, Shim W J. Analysis of contact force and thermal behaviour of lip seals[J]. Tribology International, 1997, 30(2): 113-119.
- [10] 张佳佳, 赵良举, 杜长春, 等. 唇形油封结构参数对摩擦面温度的影响[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2011, 34(10): 1470-1473.
- Zhang J J, Zhao L J, Du C C, et al. Influence of structure parameters of lip seal on the temperature of friction area[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2011, 34(10): 1470-1473. (in Chinese)
- [11] 赵向雷, 赵良举, 杜长春, 等. 考虑唇口温度变化时的油封摩擦学性能研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2013,

- 36(12): 1422-1427.
- Zhao X L, Zhao L J, Du C C, et al. Study of tribological properties of the seal considering the change of lip temperature[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2013, 36(12): 1422-1427. (in Chinese)
- [12] 张付英, 马骏, 张志祥, 等. 润滑条件下旋转轴唇形密封件磨损分析[J]. 润滑与密封, 2023, 48(6): 104-109.
- Zhang F Y, Ma J, Zhang Z X, et al. Wear analysis of lip seal of rotating shaft under lubrication[J]. Lubrication Engineering, 2023, 48(6): 104-109. (in Chinese)
- [13] 杜钢, 李光茂, 周鸿铃, 等. 湿热环境下密封橡胶的老化特性研究[J]. 高压电器, 2022, 58(6): 112-120.
- Du G, Li G M, Zhou H L, et al. Study on aging characteristics of sealing rubber in damp heat environment[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(6): 112-120. (in Chinese)
- [14] Alves S M, Mello V S, Medeiros J S. Palm and soybean biodiesel compatibility with fuel system elastomers[J]. Tribology International, 2013, 65: 74-80.
- [15] 张录平, 李晖, 庞明磊, 等. 特种氟橡胶耐油介质老化性能研究[J]. 世界橡胶工业, 2011, 38(1): 27-30.
- Zhang L P, Li H, Pang M L, et al. Study on the aging properties of special fluoroelastomers in the of oil medium[J]. World Rubber Industry, 2011, 38(1): 27-30. (in Chinese)
- [16] 陈玉如, 王云英, 孙旭, 等. 航空密封级氟橡胶耐热氧环境行为试验研究[J]. 南昌航空大学学报(自然科学版), 2015, 29(3): 52-56.
- Chen Y R, Wang Y Y, Sun X, et al. Thermo-oxidative ageing behaviors for the seal-grade fluoroelastomer[J]. Journal of Nanchang Hangkong University (Natural Sciences), 2015, 29(3): 52-56. (in Chinese)
- [17] Harald K, Guy V G, Allan T W, et al. Fluoroelastomers having low temperature characteristics and solvent resistance[P]. ZA, 200502922 B, 2003.
- [18] Atkinson S. Insight into the evolution of subsea sealing technology[J]. Sealing Technology, 2017, 2017(12): 6.
- [19] 赵国栋. 热油老化对氟橡胶和氟醚橡胶摩擦学特性的影响研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2020.
- Zhao G D. Effect of hot oil aging on tribological properties of fluororubber and fluoroether rubbe[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [20] 孟凡明, 刘忠, 程志涛, 等. 一种多用途机械零部件传动与摩擦实验台: 201410335820.6[P]. 2014-11-19.
- Meng F M, Liu Z, Cheng Z T, et al. A multi-purpose friction test bench for mechanical components power transmission: 201410335820.6[P]. 2014-11-19. (in Chinese)
- [21] 董慧芳, 孔俊超, 胡健, 等. 轴表面微织构对唇形油封的密封性能影响研究[J]. 热加工工艺, 2022, 51(10): 98-103.
- Dong H F, Kong J C, Hu J, et al. Research on influence of micro-textured shaft surface on sealing performance of lip seal[J]. Hot Working Technology, 2022, 51(10): 98-103. (in Chinese)

(编辑 詹燕平)