

某船用唇形密封失效因素试验及仿真模拟研究

杨立强¹, 叶辉², 刘震^{2*}, 冯健², 贾龙凯², 封富顺²,
曾昭勇², 陈洁², 牟沛², 宋金朋²

(1.海军装备部驻广州地区军事代表局, 广州 510300; 2.重庆齿轮箱有限责任公司, 重庆 402263)

摘要: **目的** 针对船用唇形密封使用过程中的唇口破坏问题, 研究唇形密封失效影响因素及唇形密封应力、位移、接触压力分布特性。**方法** 模拟实船齿轮箱输入结构搭建试验台, 进行密封失效因素分析, 并利用有限元分析软件建立旋转唇形密封的二维轴对称模型, 分析过盈量及橡胶本体材料参数对唇形密封应力、位移、唇尖接触压力分布的影响。**结果** 除密封材料及密封接触应力因素不确定外, 其他所列因素几乎均未发生泄漏, 因此进一步对不同材料及接触特性进行有限元分析。研究表明, 3种材料中, 2号材料的 Von Mises 应力值最大, 且不管何种材料, 随着过盈量增加, 唇尖应力沿着参考线先增大后、逐渐减小、再增大, 并呈现非对称分布, 过盈量超过 0.4 mm 时, 唇形密封的最大应力出现在骨架与橡胶本体接触圆角处。随着过盈量的增加, 3种材料唇尖最大接触压力的变化趋势不同, 最大 Von Mises 接触应力逐渐增大, 且过盈量在 0.6 mm 之后增速较快, 唇尖接触线位置接触压力先减小、后逐渐增大, 拐点在接触线位置 0.25~0.3 mm 处。**结论** 油温、油压、安装方式、偏心量、转速对于唇形密封失效的影响较小。材料属性与过盈量都会引起唇形密封 Von Mises 应力及唇尖接触压力发生较大变化, 只是影响应力峰值大小不同, 材料属性对于唇形密封本体位移的影响较小, 过盈量会引起位移较大变化, 且会引起最大应力位置变化, 同时接触线接触应力与接触压力大小没有相关性。对于唇形密封安装来说, 在过盈量为 0.8 mm 左右时较为合理。

关键词: 唇形密封; 失效因素分析; 正交试验; 接触分析; 非线性材料; 有限元仿真

中图分类号: TJ07 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9242(2023)11-0098-09

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.11.013

Experiment and Simulation on the Failure Factors of a Marine Lip Seal

YANG Li-qiang¹, YE Hui², LIU Zhen^{2*}, FENG Jian², JIA-Long-kai², FENG Fu-shun²,
ZENG Zhao-yong², CHEN Jie², MOU Pei², SONG Jin-peng²

(1. Bureau of Military Representative of the Naval Armaments Department in Guangzhou, Guangzhou 510300, China;

2. Chongqing Gear Box Co. Ltd., Chongqing 402263, China)

ABSTRACT: The work aims to study the affecting factors of lip seal failure and the distribution characteristics of stress, displacement and contact pressure of lip seal, so as to solve the problem of lip breakage during the use of marine lip seal. A test bench was built to simulate the input structure of a real marine gear box to analyze the failure factors of the seal. A

收稿日期: 2023-05-25; 修订日期: 2023-08-14

Received: 2023-05-25; Revised: 2023-08-14

基金项目: 国家重点研发计划(202119ZZ)

Fund: National Key Program of Research and Development Funded Project (202119ZZ)

引文格式: 杨立强, 叶辉, 刘震, 等. 某船用唇形密封失效因素试验及仿真模拟研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(11): 98-106.

YANG Li-qiang, YE Hui, LIU Zhen, et al. Experiment and Simulation on the Failure Factors of a Marine Lip Seal[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(11): 98-106.

*通信作者(Corresponding author)

two-dimensional axisymmetric model of the rotary lip seal was established by finite element analysis software to analyze the effects of interference and rubber body material parameters on the stress distribution, displacement distribution and lip tip contact pressure distribution of the lip seal. Almost no leakage occurred under the factors except the uncertain factors such as sealing material and sealing contact stress. Therefore, the finite element analysis of different materials and contact characteristics was further carried out, and the study showed that the Von Mises stress value of No. 2 material was found to be the largest after calculation of the three materials, and for any kind of material, with the increase of the interference, the lip tip stress increased firstly along the reference line, then gradually decreased and then increased, and presented an asymmetric distribution. When the interference exceeded 0.4 mm, the maximum stress of the lip seal appeared at the rounded corner of the contact between the skeleton and the rubber body. With the increase of interference, the change trend of the maximum contact pressure at the lip tips of three materials was different and the maximum Von Mises contact stress gradually increased, the interference increased faster after 0.6 mm, and the contact pressure at the lip tip contact line firstly decreased and then gradually increased. The inflection point was between 0.25 mm and 0.3 mm at the position of the contact line. It is found that oil temperature, oil pressure, installation mode, eccentricity and rotating speed have little effect on the failure factors of lip seal. The Von Mises stress and the contact pressure of the lip tip of the lip seal will change greatly due to the material property and interference, but the peak value of the stress will be different. The displacement of the lip seal body will not be affected by the material property, but the interference will cause a large change in displacement and the maximum stress position, and there is no correlation between contact stress and contact pressure. For the installation of lip seal, it is reasonable when the interference is about 0.8 mm.

KEY WORDS: lip seal; failure factor analysis; orthogonal experiment; contact analysis; nonlinear material; finite element simulation

唇形密封是保证舰船可靠运行的重要部件, 被广泛应用于船用齿轮箱输入轴高速密封。相关研究表明^[1], 齿轮箱输入轴在高速旋转的过程中, 会使得唇口温度急剧上升, 进而导致唇口加速磨损而破坏, 严重影响其使用寿命。对于提升舰船齿轮箱可靠性来讲, 唇形密封件的失效因素试验研究及仿真模拟研究对于提升设备可靠运行具有重要意义。

对于密封圈的环境试验、使用条件试验及寿命评估是研究其使用、储存维修的主要手段^[2-6]。张付英等^[7]利用试验研究了唇形密封结构参数对密封可靠性的影响。周新建等^[8]利用试验研究了唇形密封结构参数及唇形密封的密封性能及破损特性。Kim 等^[9]利用有限元方法及试验方法研究了唇形密封接触压力及唇尖摩擦生热量与过盈量的变化关系。张灿等^[10]使用有限元软件以及编写程序来模拟唇形密封件的动态磨损过程, 进而观察了唇口接触压力随着时间变化的规律。Frölich 等^[11]用不同方法建立了一种多效应宏观模型来模拟旋转轴封在不同温度状态下的磨损量以及接触压力。康帅等^[12]建立了唇形密封的二维轴对称模型, 并利用有限元方法分析了收紧弹簧劲度系数、过盈量等参数对唇口接触宽度以及接触压力的影响。Salant 等^[13]对于唇形密封的研究进行了综述, 并阐明了唇形密封接触的物理行为。张付英等^[14]利用 Abaqus 软件对唇形密封优化前后瞬态温度场进行了分析, 得到了优化前后在不同油压转速下与温度变化的曲线关系, 温度场变化均满足要求。施雷等^[15]提出了一种带有副唇的唇形密封来消除唇形密封在装配

及加工制造过程中存在误差的情况, 并利用有限元方法分析了接触应力。江华生等^[16]利用不同方法对唇形密封静态接触特性、密封性能以及轴表面结构开展了研究, 并取得了一定成绩。闫传祥等^[17]提出了一种唇形密封性能的解析模型, 可以给唇形密封的工程设计提供参考。陈建奎等^[18]利用 Abaqus 软件对唇口接触压力进行了计算, 并对 2 种不同参数的唇形密封进行了有限元分析, 并说明了优化后的性能。桑建斌等^[19]利用有限元分析工具建立了唇形密封的二维轴对称模型, 并分析了过盈量与唇形密封的应力分布情况。吴庄俊等^[20]利用理论推导分析了唇形密封结构参数与唇形密封性能的关系。陈敏等^[21]对于唇形密封应力应变进行了有限元分析。谭晶等^[22]、孟理华等^[23]利用有限元方法对 T 形密封进行了优化设计。李建国等^[24]对于唇形密封动态密封性能进行了有限元分析, 得到的仿真结果与实验结果一致, 证明了有限元方法在唇形密封性能仿真领域的可行性。纪佳馨等^[25]对于唇形密封温度场及摩擦力矩、泄漏率等关键性能参数进行了流固热耦合仿真模拟研究, 对唇形密封性能进行了定量预测与描述。

综上所述, 主要是对密封圈的使用环境及寿命进行试验研究, 并对唇形密封使用过程动态磨损、结构参数进行仿真与模拟, 但没有对模拟实际使用环境下的密封失效因素及相关材料、不同过盈量多层次系统进行分析来研究。本文从模拟实际环境条件下的船用齿轮箱唇形密封使用工况出发, 搭建唇形密封模拟实船环境下密封失效影响因素试验台, 研究唇形密封失

效的主要影响因素。利用有限元分析软件建立了旋转唇形密封的二维轴对称模型,对常见的3种不同橡胶本体材料及其不同过盈量下的 Von Mises 应力及位移分布、唇口接触线接触压力分布进行了仿真计算,分析其对于唇形密封性能的影响及唇形密封破坏机理,对于实际工程中唇形密封的结构优化设计及安装使用具有指导意义。

1 唇形密封的材料及基本结构

齿轮箱输入端设置有2道密封,外侧唇形密封唇口朝外端,主要作用为防尘封水,靠内侧唇形密封唇口朝内,主要作用为封油。2道密封之间添加有润滑脂润滑唇形密封。某船用齿轮箱输入轴密封结构如图1所示。

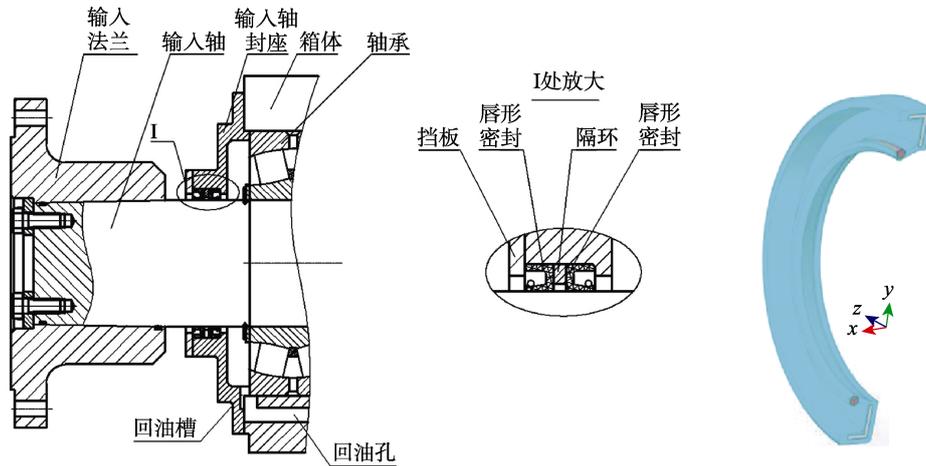


图1 某船用齿轮箱输入轴密封
Fig.1 Input shaft seal of a marine gear box

其中某船用唇形密封主要由唇封主体、唇口、金属骨架及紧固弹簧等结构组成,紧固弹簧可将唇口紧贴在轴上,输入轴高速运转时,油封唇口与轴相对运动,通过润滑脂或润滑油在轴上形成的油膜进行润滑,以防止唇形密封唇口与轴的相对干摩擦造成唇形密封破坏,使轴承润滑油外泄。某船用二维轴对称模型及详细尺寸如图2所示,其中尺寸内径×外径×宽度为 $\phi 200\text{ mm} \times \phi 470\text{ mm} \times 18\text{ mm}$,具体详细尺寸根据 GB/T 9877—2008 要求确定。

部分润滑油主要从端盖上的回油槽、轴承座上回油孔直接回到齿轮箱箱体内,小部分润滑油被高速旋转轴带回到箱体,极小部分通过内侧唇形密封储存到2道密封之间,用于润滑唇形密封。达到一定量后,再通过唇形密封往外泄漏出齿轮箱,原则上要求 1000 h 泄漏量不能超过 100 mL,不能呈线状流出。

唇形密封本体材料采用丁晴橡胶,其材料的邵尔硬度为 75 MPa,属于超弹性非线性材料,具有高度的非线性材料的分析特性。目前,对于超弹性材料的应力应变本构关系一般用应变密度能函数进行描述。其中,两参数及三参数 Mooney-Rivlin 本构模型进行简化后可以表述为:

$$W=C_{10}(I_1-3)+C_{01}(I_2-3)$$

$$W=C_{10}(I_1-3)+C_{01}(I_2-3)+C_{11}(I_1-3)(I_2-3)$$

式中: C_{10} 、 C_{01} 及 C_{11} 为 M-R 超弹性系数; W 为应变能密度; I_1 、 I_2 为第1、第2应变不变量。

2 密封失效因素试验

为了研究唇形密封失效影响因素,根据实船唇形密封使用环境,提出影响唇形密封失效的主要因素,主要有密封本体材料、齿轮箱振动、油温、油压、转速、流量、偏心量、安装方式、进行正交试验。按照齿轮箱输入端的结构,搭建了唇形密封试验台,唇形密封试验台的搭建如图3所示。

对各失效因素进行失效参数正交试验,结果见表1。结果表明,除了密封材料及接触行为无法试验确定

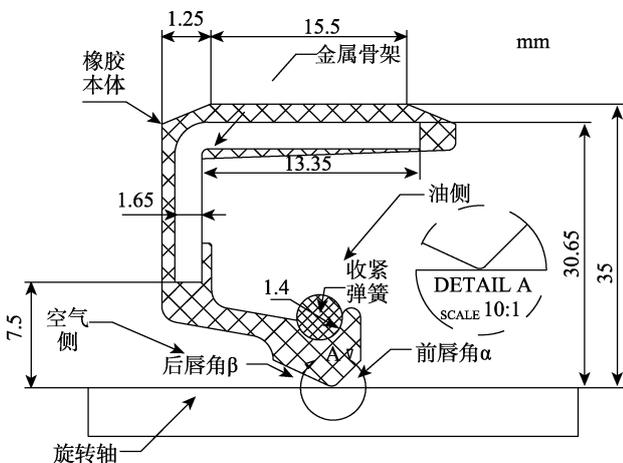


图2 二维轴对称几何模型
Fig.2 Two-dimensional axisymmetric geometric model

主要的工作原理: 0.45~0.55 MPa 压力的润滑油,从箱体进油口到旋转部件,至旋转的轴承中流出,大

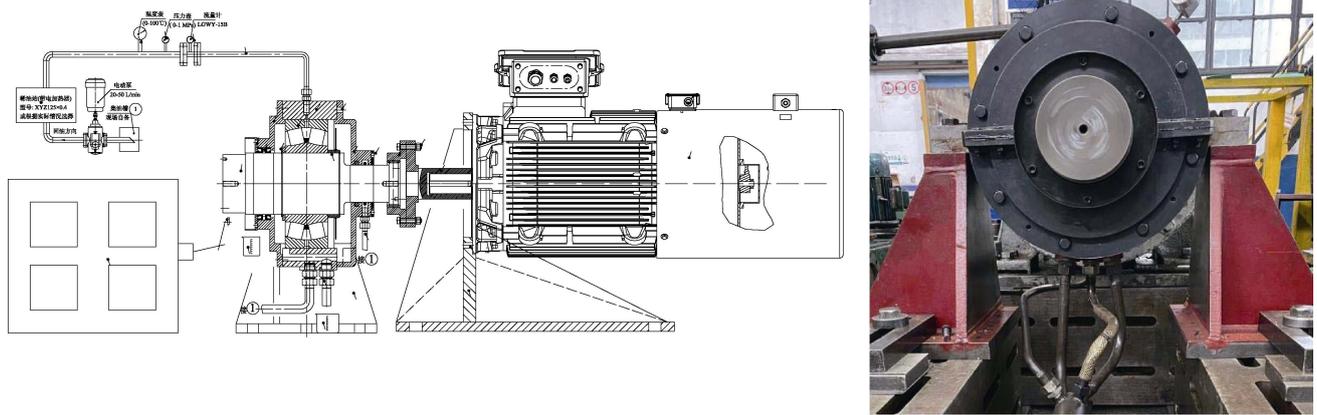


图 3 唇形密封试验台搭建
Fig.3 Layout of the lip seal test bench

表 1 模拟实船环境下唇形密封失效因素试验
Tab.1 Test of failure factors of lower lip seal in simulated real marine environment

工况	油温/°C	油压/MPa	安装方式	偏心量/mm	转速/(r·min ⁻¹)	失效情况
1	45~55	0.5	整体	0	400~1 050	否
2	45~55	0.5	整体	0	400~1 050	否
3	45~55	0.5	整体	0	400~1 050	否
4	25~35	0.2	整体	0.2	400~1 050	否
5	25~35	0.5	整体	0.5	400~1 050	否
6	25~35	0.2	整体	0.2	400~1 050	否
7	45~55	0.5	整体	0.5	400~1 050	否
8	25~35	0.2	剖分	0.2	400~1 050	否
9	25~35	0.5	剖分	0.5	400~1 050	否
10	45~55	0.2	剖分	0.2	400~1 050	否
11	45~55	0.5	剖分	0.5	400~1 050	否

之外, 其他正交试验因素均对唇形密封失效无影响。

3 有限元分析

3.1 有限元模型建立

3.1.1 网格划分

首先对某船用齿轮箱输入轴唇式密封进行模型简化, 本文利用 UG 三维建模软件建立唇形密封三维模型, 并将三维模型导入到 ANSYS 软件中进行网格划分, 如图 4 所示。使用平面壳单元划分, 进行网格无关性检查, 确立唇形密封及轴网格数量 21 467 个, 节点为 65 308 个。

3.1.2 材料设置

轴的材料为 42CrMoA, 弹性模量为 200 GPa; 泊松比为 0.3。唇形密封中橡胶为丁晴橡胶, 其参数设置如下。

1) 超弹性系数。根据参考文献的数据^[12,26], 丁晴橡胶材料 M-R 超弹性系数为 C_{10} 、 C_{01} 及 C_{11} 。本次

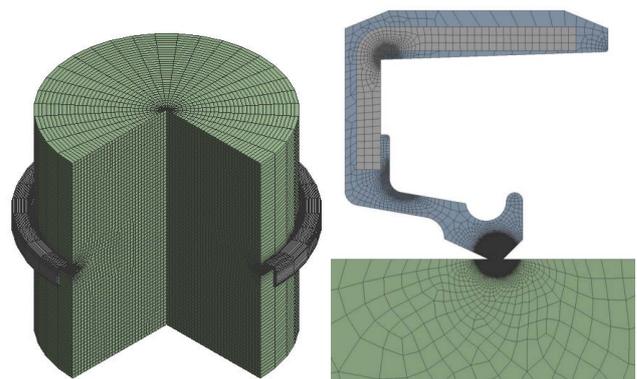


图 4 网格划分
Fig 4 Grid division

仿真分析的 3 种材料的 M-R 超弹性系数值见表 2。

2) 密度。超弹性橡胶密度 $\rho_1=1\ 400\ \text{kg/m}^3$, 金属骨架密度 $\rho_2=7800\ \text{kg/m}^3$ 。

3.2.3 过盈量设计

将唇口与轴接触区域设置过盈配合, 单边过盈量

表2 不同材料参数
Tab.2 Parameters of different materials

材料编号	C_{10}/MPa	C_{01}/MPa	C_{11}/MPa
1号	0.213	0.853	0
2号	0.930	0.465	0
3号	0.944	0.236	0

设计为6档,分别为0.2、0.4、0.6、0.8、1、1.2 mm进行计算。

3.2.4 边界条件设置

油封外侧设置固定约束,弹簧预紧力转化成均匀分布压力,忽略滑油压力对其影响,内骨架与唇形密封内侧进行无滑移边界接触。根据相关公式,将施加在弹簧槽内接触面上的收紧简化为均布压力,为0.15 MPa。唇尖与轴接触通过接触对来实现唇尖与旋转轴的相互接触时的相切,设定刚性体旋转轴为目标面,非线性橡胶材料为接触面,保证了非线性柔性体唇形密封与刚性体不能发生渗透。本节设定非线性接触为摩擦接触,摩擦系数设定为0.1,采用法向拉格朗日接触算法来保证唇形密封与旋转轴的接触状态,最后设定可移动位移边界来使得旋转轴进行轴向移动,进而模拟唇形密封与轴接触过程。

3.2 有限元计算结果

唇形密封橡胶本体与金属骨架 Von Mises 应力以及唇尖接触压力是表征唇形密封性能的主要量, Von Mises 应力越大,会引起密封本体橡胶刚度下降,唇形密封唇尖位置越容易出现微小裂纹,在高频振动下,会引起唇形密封本体疲劳破坏,进而导致失效现象发生。唇形密封接触压力是反应唇形密封静止状态的主要量。根据上述有限元模型,按照相同过盈量不同材料、相同材料不同过盈量分别进行橡胶本体与金属骨架 Von Mises 应力分布、唇尖接触压力、位移分布进行了有限元计算,其中接触线位置最大接触压力见表3,密封本体变形结果见表4。

表3 接触线位置最大接触压力对比
Tab.3 Comparison of the maximum contact pressure at the position of contact line

过盈量 δ/mm	MPa		
	1号	2号	3号
0.2	1.405	1.556	1.416
0.4	1.401	1.559	1.455
0.6	1.394	1.554	1.451
0.8	1.368	1.534	1.424
1	1.359	1.531	1.413
1.2	1.52	1.47	1.51

表4 密封橡胶本体最大变形对比
Tab.4 Maximum deformation comparison of sealing rubber bodies

过盈量 δ/mm	1号	2号	3号
0.2	0.38	0.34	0.36
0.4	0.61	0.57	0.59
0.6	0.84	0.80	0.82
0.8	1.06	1.02	1.05
1	1.28	1.25	1.27
1.2	1.52	1.47	1.51

4 对比分析

4.1 不同材料对唇形密封性能影响

唇形密封橡胶本体材料是影响唇形密封性能的重要因素。通过 Von Mises 应力分布、唇尖沿着参考线的接触应力变化以及唇口位移分布对比,见表5和图5~7。

1) 不管任何材料,过盈量超过0.4 mm时,唇形密封最大应力出现在骨架与橡胶本体接触圆角处,如图5所示。经分析原因是金属骨架圆角处是应力集中的位置,并且橡胶本体的所受的外部挤压力在达到一定值时,容易传递到金属骨架。

2) 由表5可知,唇形密封橡胶本体及金属骨架的最大 Von Mises 应力为2号材料。说明橡胶超弹性系数对唇形密封的影响较大。

3) 唇尖应力沿着参考线先增大后逐渐减小再增大,并呈现非对称分布,2号材料唇尖接触应力值最大,如图6所示。

4) 唇尖位移随着参考位置先增大、后逐渐减小,唇尖位移是指唇形密封唇口变形量,如图7所示。材料属性并不会引起接触应力以及唇口位移沿着参考位置分布不均变化,只引起接触应力在接触宽度上的最大值的改变,如图7所示。

表5 不同材料参数结果对比
Tab.5 Comparison of parameters of different materials

材料编号	最大 Von Mises 应力/MPa	唇口最大 Von Mises 应力/MPa	接触线最大接触压力/MPa
1号	1.267	0.806	1.368 9
2号	1.415	0.891	1.534 1
3号	1.316	0.837	1.423 9

4.2 过盈量对唇形密封性能影响

唇形密封在实际安装过程中,不同的过盈量是影响唇形密封性能的重要因素,对比分析如下:

1) 随着过盈量不断增加,最大 Von Mises 应力也不断增加。过盈量在0.6 mm之前,变化相对平稳,但之后快速上升,如图8所示。

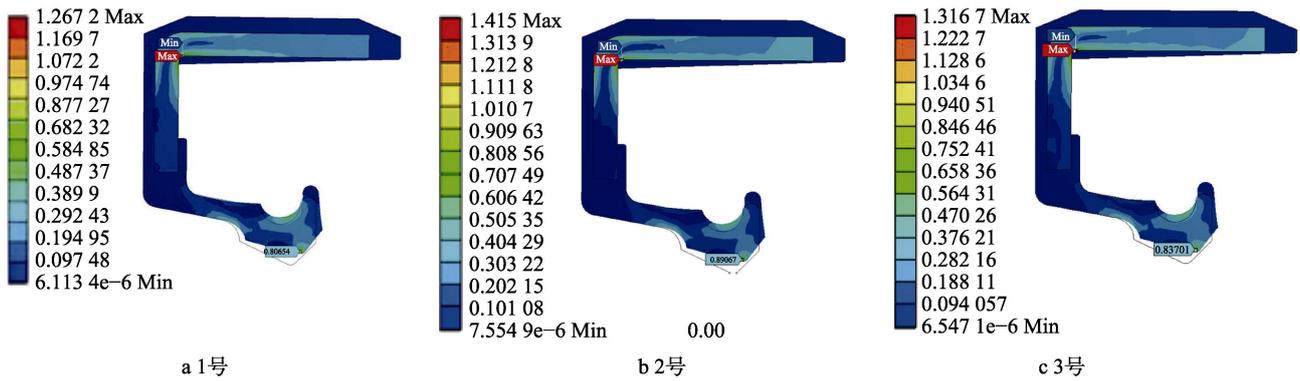


图 5 不同材料 Von Mises 应力分布

Fig.5 Von Mises stress distribution of different materials: a) No. 1; b) No. 2; c) No. 3

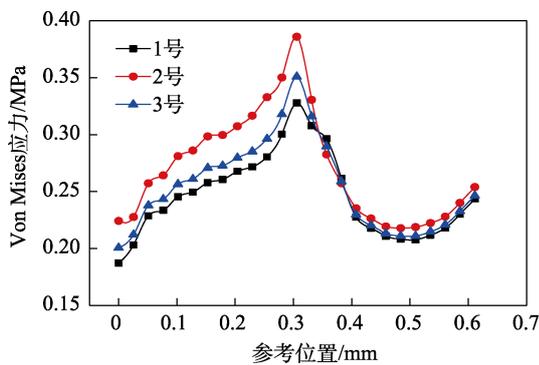


图 6 唇尖应力沿着参考位置变化

Fig.6 Change of lip tip stress along the reference position

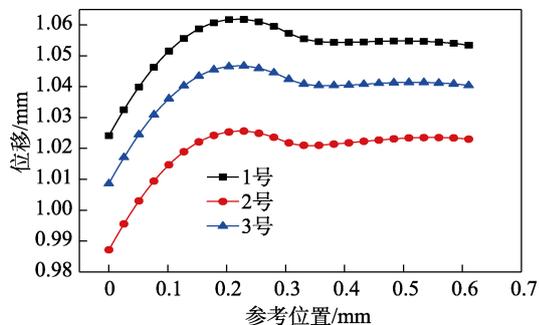


图 7 唇尖位移沿着参考位置变化

Fig.7 Change of lip tip displacement along the reference position

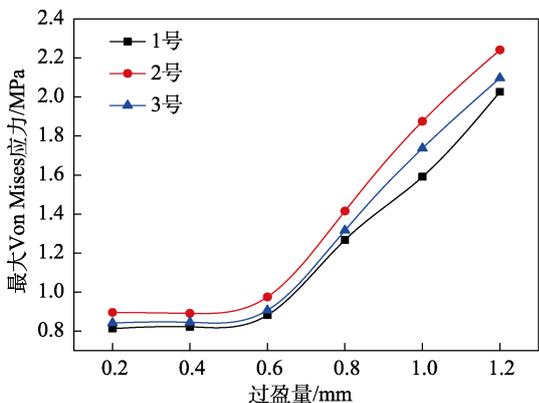


图 8 最大 Von Mises 应力随着过盈量变化

Fig.8 Change of maximum Von Mises stress with interference

2) 随着过盈量不断增加, 1 号材料唇尖最大接触压力逐渐减小, 2 号及 3 号材料先逐渐增大、后逐渐减小, 见表 3。随着过盈量增大, 橡胶本体变形逐渐增大, 见表 4。唇尖位移逐渐增大, 如图 14 所示。位移增大会使接触宽度增大, 接触宽度的增加会导致一定接触压力的变化, 并且在不同过盈量下, 唇尖位移随着参考线位置的变化较小, 如图 10 所示。

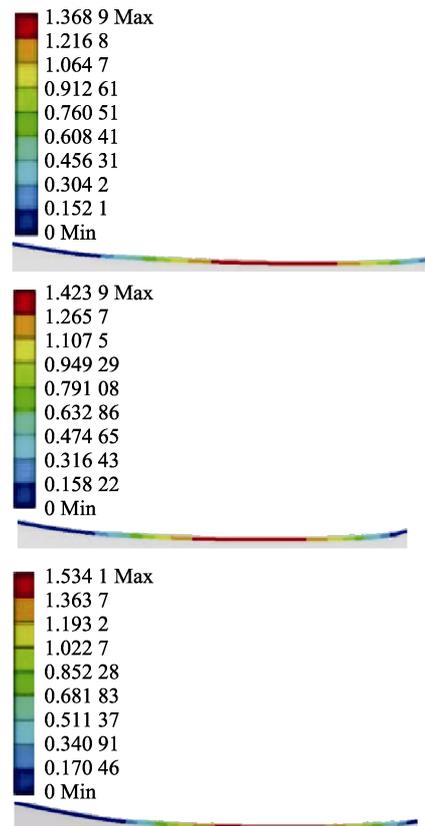


图 9 不同材料最大位移沿着参考线分布

Fig.9 Distribution of maximum displacements of different materials along reference lines

3) 在一定过盈量下, 接触线处 Von Mises 接触应力随着参考线位置先增大后减小, 过盈量不同, 会引起不同位置出现接触应力的峰值, 说明接触应力峰

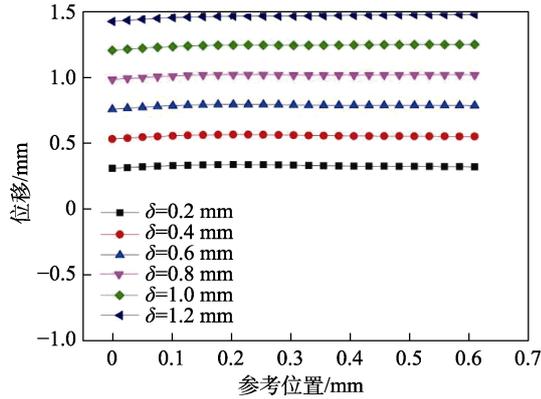


图 10 唇尖位移沿着参考位置变化
Fig.10 Change of lip tip displacement along the reference position

值主要影响因素是过盈量，材料属性只是影响峰值大小。同时，接触线接触应力与接触压力大小没有相关性，拐点在接触线位置 0.25~0.3 mm 处，如图 11 所示。

4) 当过盈量超过 0.4 mm 时，3 号材料最大 Von-Mises 应力出现在内金属骨架圆角处（如图 12 所示），说明唇形密封的最大应力随着过盈量的增加而存在位置转移现象。

5) 较大的接触压力会造成唇形密封静止状态性能变差，而较大过盈量会导致唇形密封沿着唇尖位移增大，进而接触宽度增加加速唇形密封磨损，最终导致唇形密封本体破坏。通过分析可知，该船用齿轮箱输入轴唇形密封过盈量 δ 在 0.8 mm 为最佳，这样既能保证唇尖接触线位置接触应力较小时，还能保证最

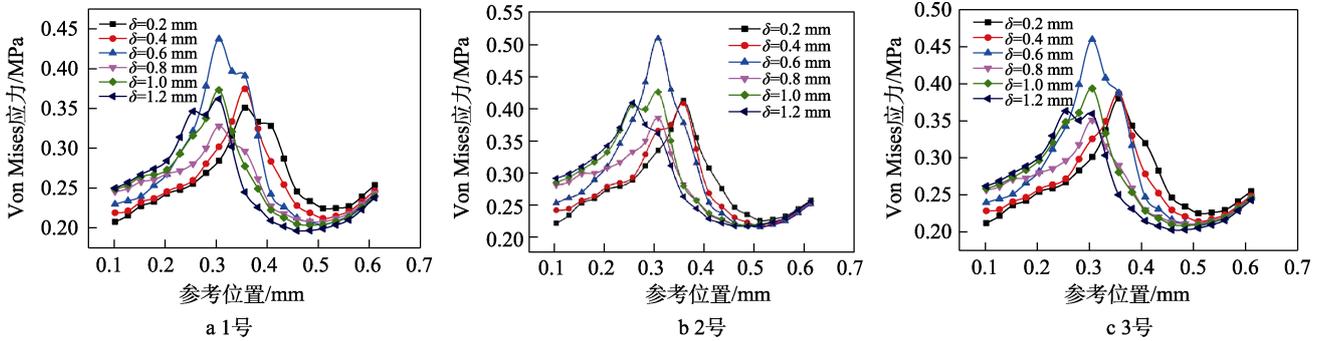


图 11 材料唇尖接触应力沿着参考位置变化
Fig.11 Change of lip tip contact stress along the reference position: a) No. 1; b) No. 2; c) No. 3

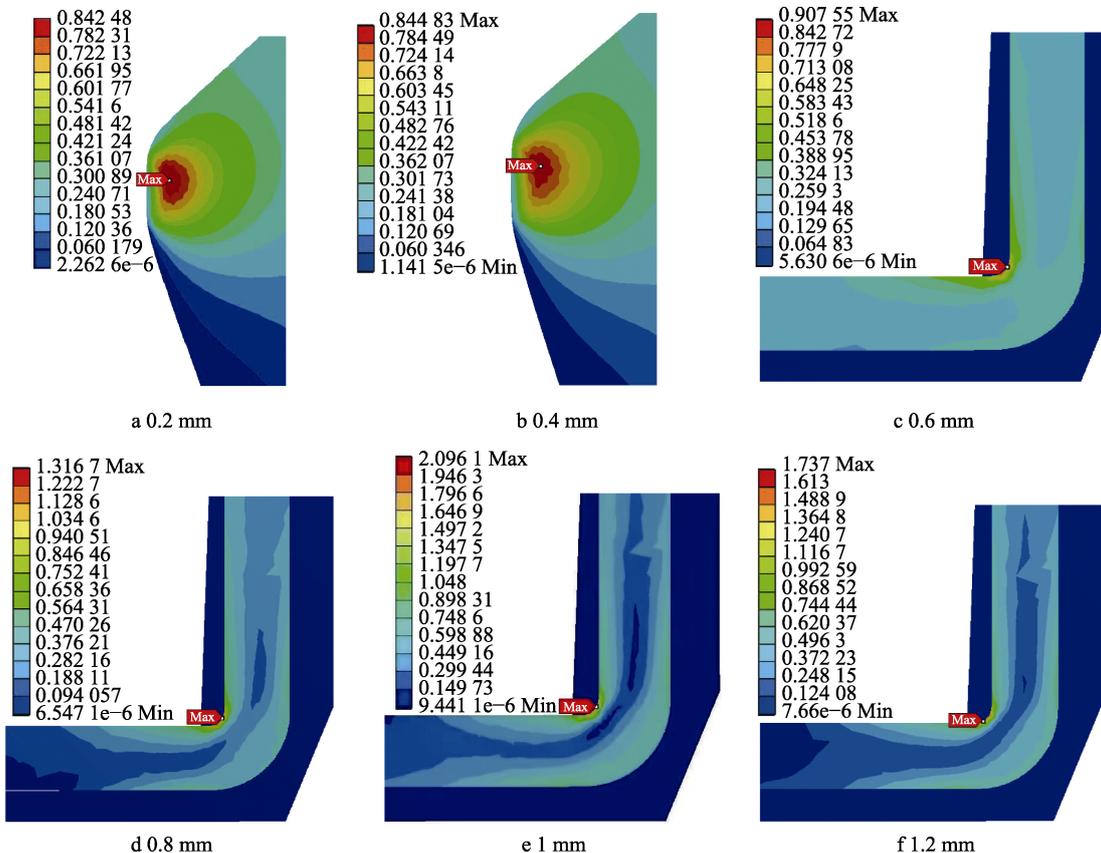


图 12 3 号材料不同过盈量 Von-Mises 应力分布
Fig.12 Von Mises stress distribution of No. 3 material with different interference

大接触压力较小。

5 结论

根据模拟实船环境下的唇形密封失效因素试验结果发现, 油温、油压、安装方式、偏心量、转速对于唇形密封失效因素的影响较小。对于不可排除因素的唇形密封本体材料及接触特性进行仿真模拟研究后发现, 材料属性与过盈量都会引起唇形密封 Von Mises 应力及唇尖接触压力发生较大变化, 材料属性对于唇形密封本体位移的影响较小, 过盈量会引起位移较大变化。材料属性只是影响峰值大小, 过盈量会引起最大应力位置变化, 同时接触线接触应力与接触压力大小没有相关性。

通过分析可知, 船用齿轮箱输入轴唇形密封过盈量 δ 在 0.8 mm 最佳, 这样既能保证唇尖接触线位置接触应力较小时, 还能保证最大接触压力较小, 计算结果可以作为唇形密封结构优化设计及现场安装提供指导。

参考文献:

- [1] 孙健伟. 高温高速旋转轴接触式密封材料研制及其密封性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
SUN Jian-wei. Development of Contact Sealing Material for High Temperature and High Speed Rotating Shaft and Its Sealing Performance[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [2] 吴云章, 李健, 李昌范, 等. 主减速器橡胶密封圈性能衰减模型及日历寿命评估[J]. 装备环境工程, 2023, 20(4): 40-47.
WU Yun-zhang, LI Jian, LI Chang-fan, et al. Performance Attenuation Model and Calendar Life Evaluation for Rubber Seal Ring of Main Reducer[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(4): 40-47.
- [3] 蒲亚博, 王艳艳, 刘伟, 等. 某型装备用硅橡胶密封圈热氧老化试验与寿命评估[J]. 装备环境工程, 2022, 19(6): 52-58.
PU Ya-bo, WANG Yan-yan, LIU Wei, et al. Thermal Oxygen Aging Test and Life Evaluation of Silicone Rubber Seal Ring for a Certain Type of Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(6): 52-58.
- [4] 王艳艳, 秦朝轩, 赵方超, 等. 基于循环冲击加速试验的某 O 型橡胶密封圈寿命评估方法[J]. 装备环境工程, 2023, 20(1): 1-7.
WANG Yan-yan, QIN Chao-xuan, ZHAO Fang-chao, et al. Life Evaluation Method of O-type Rubber Seal Ring Based on Cyclic Impact Acceleration Test[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(1): 1-7.
- [5] 党晓勇, 赵英, 庞明磊, 等. 橡胶密封件加速老化试验影响因素分析及验证[J]. 装备环境工程, 2013, 10(4): 5-8.
DANG Xiao-yong, ZHAO Ying, PANG Ming-lei, et al. Analysis and Verification of Influencing Factors of Accelerated Aging Tests for Rubber Seals[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(4): 5-8.
- [6] 罗勇, 何建新, 赵全成, 等. 某型导弹橡胶密封件剩余贮存寿命预测[J]. 装备环境工程, 2014, 11(4): 12-15.
LUO Yong, HE Jian-xin, ZHAO Quan-cheng, et al. Prediction of Remaining Shelf-Life for a Missile Rubber Sealing Material[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(4): 12-15.
- [7] 张付英, 高勇新, 贺余燕, 等. 基于正交试验的旋转轴唇形密封可靠性影响因素研究[J]. 润滑与密封, 2022, 47(5): 112-120.
ZHANG Fu-ying, GAO Yong-xin, HE She-yan, et al. Study on Influencing Factors of Reliability of Rotary Shaft Lip Seal Based on Orthogonal Test[J]. Lubrication Engineering, 2022, 47(5): 112-120.
- [8] 周新建, 邵宏斌. 基于正交试验的纯水液压缸缸形密封结构改进[J]. 润滑与密封, 2022, 47(6): 94-100.
ZHOU Xin-jian, SHAO Hong-bin. Improvement of Drum Seal Structure of Pure Water Hydraulic Cylinder Based on Orthogonal Test[J]. Lubrication Engineering, 2022, 47(6): 94-100.
- [9] CHUNG KYUN KIM, WOO JEON SHIM. Analysis of Contact Force and Thermal Behaviour of Lip Seals[J]. Tribology International, 1997, 30(2): 113-119.
- [10] 张岫, 吴振, 尚闫, 等. 旋转轴唇形密封件磨损仿真分析[J]. 润滑与密封, 2021, 46(3): 119-123.
ZHANG Shen, WU Zhen, SHANG Yan, et al. Wear Simulation of Rotary Shaft Lip Seal[J]. Lubrication Engineering, 2021, 46(3): 119-123.
- [11] FRÖLICH D, MAGYAR B, SAUER B. A Comprehensive Model of Wear, Friction and Contact Temperature in Radial Shaft Seals[J]. Wear, 2014, 311(1/2): 71-80.
- [12] 康帅, 赵良举, 杜长春, 等. 旋转唇形油封密封性能的有限元分析[J]. 机械科学与技术, 2015, 34(9): 1375-1380.
KANG Shuai, ZHAO Liang-ju, DU Chang-chun, et al. Finite Element Analysis of Sealing Performances of the Rotary Lip Seal[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2015, 34(9): 1375-1380.
- [13] SALANT R F. Soft Elastohydrodynamic Analysis of Rotary Lip Seals[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2010, 224(12): 2637-2647.
- [14] 张付英, 陈建垒, 宋娜娜, 等. 基于 ABAQUS 的旋转轴唇形油封温度场分析[J]. 润滑与密封, 2018, 43(3): 69-74.
ZHANG Fu-ying, CHEN Jian-lei, SONG Na-na, et al. Temperature Field Analysis of Rotary Shaft Lip Seal Based on ABAQUS[J]. Lubrication Engineering, 2018, 43(3): 69-74.
- [15] 施雷, 冯一璟, 冯定, 等. 旋转轴唇形密封接触分析[J].

- 中国科技论文, 2017, 12(5): 570-573.
SHI Lei, FENG Yi-jing, FENG Ding, et al. Rotary Shaft Lip Seal Contact Analysis[J]. China Sciencepaper, 2017, 12(5): 570-573.
- [16] 江华生, 孟祥铠, 沈明学, 等. 唇形密封轴表面方向性微孔的润滑特性[J]. 化工学报, 2015, 66(2): 678-686.
JIANG Hua-sheng, MENG Xiang-kai, SHEN Ming-xue, et al. Hydrodynamic Lubrication Performance of Lip Seal with Inclined Micropores Manufactured on Rotary Shaft Surface[J]. CIESC Journal, 2015, 66(2): 678-686.
- [17] 闫传祥, 贾晓红, 郭飞, 等. 一种基于反向泵送机制的唇形密封解析模型[J]. 润滑与密封, 2018, 43(12): 22-26.
YAN Chuan-xiang, JIA Xiao-hong, GUO Fei, et al. An Analytical Model of Lip Seals Based on Reverse Pumping Mechanism[J]. Lubrication Engineering, 2018, 43(12): 22-26.
- [18] 陈建垒, 张付英, 宋娜娜, 等. 2种结构参数旋转轴唇形油封的密封性能研究[J]. 流体机械, 2018, 46(9): 31-37.
CHEN Jian-lei, ZHANG Fu-ying, SONG Na-na, et al. Research on Sealing Performance of the Rotary Lip Seal with Two Structure Parameters[J]. Fluid Machinery, 2018, 46(9): 31-37.
- [19] 桑建兵, 邢素芳, 刘宝会, 等. 旋转轴唇形密封圈的有限元分析与仿真[J]. 液压与气动, 2013(5): 114-117.
SANG Jian-bing, XING Su-fang, LIU Bao-hui, et al. Finite Element Analysis and Simulation of Lip Seal Ring of Rotating Shaft[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2013(5): 114-117.
- [20] 吴庄俊, 赵良举, 杜长春, 等. 结构参数对径向唇形密封圈密封性能的影响研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2012, 35(11): 1451-1455.
WU Zhuang-jun, ZHAO Liang-ju, DU Chang-chun, et al. Study of the Influence of Structure Parameters on Sealing Performance of Radial Lip Seal[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2012, 35(11): 1451-1455.
- [21] 陈敏, 姜小敏, 赵祖欣, 等. 唇形橡胶密封圈非线性接触有限元分析[J]. 润滑与密封, 2009, 34(11): 76-79.
CHEN Min, JIANG Xiao-min, ZHAO Zu-xin, et al. The Non-Linear Contact Finite Element Analysis of the Mouth Shaped Rubber Sealing Ring[J]. Lubrication Engineering, 2009, 34(11): 76-79.
- [22] 谭晶, 周华, 杨卫民, 等. 油封动态密封性能的分析[J]. 特种橡胶制品, 2008, 29(1): 44-49.
TAN Jing, ZHOU Hua, YANG Wei-min, et al. Finite Element Analysis of Dynamic Sealing Performance of Oil Seal[J]. Special Purpose Rubber Products, 2008, 29(1): 44-49.
- [23] 孟理华, 刘浩阔, 边智, 等. T型槽密封结构的有限元分析及试验验证[J]. 装备环境工程, 2020, 17(7): 57-63.
MENG Li-hua, LIU Hao-kuo, BIAN Zhi, et al. Finite Element Analysis and Test Verification of T-Groove Seal Structure[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(7): 57-63.
- [24] 李建国, 丁玉梅, 杨卫民, 等. 油封动密封机制的有限元分析[J]. 润滑与密封, 2007, 32(1): 96-98.
LI Jian-guo, DING Yu-mei, YANG Wei-min, et al. Finite Element Analysis of the Dynamic Sealing Mechanism of Oil Seal[J]. Lubrication Engineering, 2007, 32(1): 96-98.
- [25] 纪佳馨, 苏世东, 项冲, 等. 盾构机唇形密封流固热耦合仿真研究[J]. 润滑与密封, 2023, 48(3): 48-54.
JI Jia-xin, SU Shi-dong, XIANG Chong, et al. Study on Fluid-Solid-Thermal Coupling Simulation of Shield Machine Lip Seal[J]. Lubrication Engineering, 2023, 48(3): 48-54.
- [26] 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. Determination for Mechanical Constants of Rubber Mooney-Rivlin Model[J]. China Rubber Industry, 2003, 50(8): 462-465.

责任编辑: 刘世忠