

基于多尺度分析的径向唇形密封摩擦行为研究

吴健¹, 王永刚¹, 张传兵², 王友善^{1,2}, 粟本龙¹

[1. 哈尔滨工业大学(威海) 橡胶复合材料与结构研究所, 山东 威海 264209; 2. 哈尔滨工业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001]

摘要:以VL型径向唇形密封结构为研究对象,采用数值仿真和试验研究相结合的方法,基于多尺度分析聚四氟乙烯(PTFE)密封材料的宏观和微观摩擦特性。结果表明,磷酸酯液压油润滑的PTFE密封材料的摩擦力较干摩擦平均下降28.7%,在磷酸酯液压油润滑下PTFE密封材料的宏观和微观接触压力和摩擦功密度均随着温度的升高而减小。

关键词:径向唇形密封;聚四氟乙烯;摩擦;多尺度分析;数值仿真;润滑

中图分类号:TQ336.4⁺2

文献标志码:A

文章编号:1000-890X(2020)10-0769-04

DOI:10.12136/j.issn.1000-890X.2020.10.0769



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

径向唇形密封制品在航天领域相关装备中应用广泛,其具有密封性好、结构紧凑和易于更换等特点。随着航空航天装备朝着高速化和高压化方向发展,其密封制品面临严峻的考验。摩擦磨损是密封制品密封失效的重要诱因。研究^[1]表明,60%~80%的密封制品密封失效是由摩擦导致的。因此,针对应用广泛的径向唇形密封结构开展复杂服役工况下的摩擦行为研究十分必要。

董元元等^[2]采用ANSYS软件建立了C形密封环的三维有限元模型,并分析了其在压缩状态和回弹状态下的应力分布和变形情况,然而该模型并未考虑部件接触时的摩擦效应。李苗苗等^[3]对唇形密封圈的仿真研究表明,唇口的接触宽度和最大接触压力均随安装过盈量和介质压力的增大而增大。T. Shimomura等^[4]开展了机械端面密封结构的表面形貌参数对摩擦磨损性能的影响规律研究。王建磊等^[5]针对火箭发动机涡轮泵的机械密封磨损问题开展了宏观和微观试验分析。

聚四氟乙烯(PTFE)具有摩擦因数小、自润滑性能优良和耐高温等性能,在航空航天领域备受

青睐。Z. H. Li等^[6-7]研究了PTFE复合材料的物理性能和摩擦磨损性能。汪怀远等^[8]研究了PTFE复合材料的摩擦磨损性能,但该研究并未探讨介质温度对摩擦磨损行为的影响规律。

为此,针对VL型径向唇形密封结构(由PTFE密封环、橡胶O形圈、镀铬钢密封槽和密封挡板组成),本工作采用多尺度分析方法,基于有限元技术建立数值仿真模型,结合摩擦试验研究油润滑状态和温度等对密封结构的PTFE密封材料宏观和微观摩擦特性影响规律,进而为高性能密封结构的设计和制备提供依据。

1 试验设计

1.1 力学性能测试

采用哑铃形拉伸试样和圆柱形压缩试样,以高低温拉伸试验机开展PTFE密封材料的力学行为研究,获取不同环境条件下PTFE密封材料的应力-应变关系,为多尺度仿真研究提供材料数据基础。PTFE密封材料的力学性能测试如图1所示。

1.2 摩擦试验

采用自主研发的综合测试平台开展PTFE密封材料的往复摩擦试验。摩擦试验用PTFE试样的具体尺寸如图2所示。

结合实际工况,确定与PTFE密封材料摩擦的金属采用表面粗糙度为Ra 0.1 μm的镀铬钢板。试

基金项目:国家自然科学基金重大项目专项课题(51790502);山东省自然科学基金资助项目(ZR2018QEE004);威海市市级科技计划资助项目(2017DXGJ011)

作者简介:吴健(1984—),男,浙江义乌人,哈尔滨工业大学(威海)副教授,博士,主要从事橡胶及其复合材料和轮胎力学等研究工作。

E-mail:wujian@hitwh.edu.cn

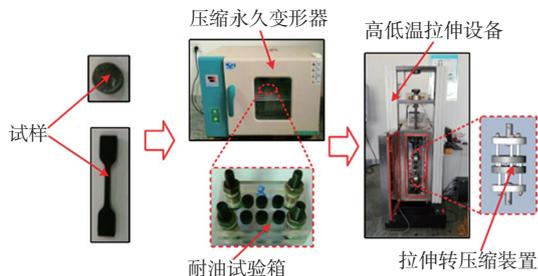


图1 PTFE密封材料的力学性能测试示意

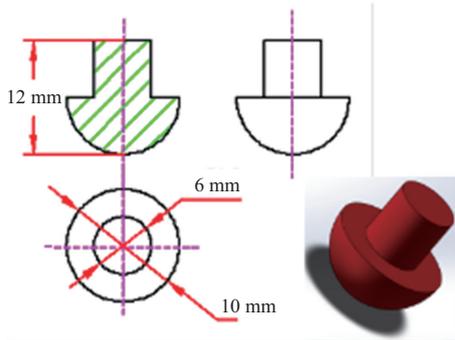


图2 摩擦试验用试样的尺寸

样表面滑动方向垂直于金属表面的纹理方向,采用质量分数为0.198的磷酸酯液压油进行润滑。为保证试验数据有效性,试验前采用去离子水对试样表面超声清洗。

试样与镀铬钢板之间的滑移速度为 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,试验负荷为40 N,温度分别为20, 50, 80, 110和140 $^{\circ}\text{C}$ 。

2 多尺度仿真模型

2.1 本构模型

根据密封结构实际服役环境,PTFE密封材料的应变范围较小,其应力-应变关系基本呈线性。因此,可用弹性模量来表征其力学性能。PTFE密封材料弹性模量与温度的关系曲线见图3。

从图3的试验点拟合得到PTFE密封材料的拉伸曲线方程为 $E = 105.33 - 0.454T$,相关因数(r^2)为0.992 13;压缩曲线方程为 $E = 316.96 - 0.741T$, r^2 为0.995 33。式中, E 和 T 分别为弹性模量和温度。

2.2 宏观模型

考虑到VL型径向唇形密封结构的轴向对称性,采用Abaqus软件建立了其1/4有限元模型,如图4所示。

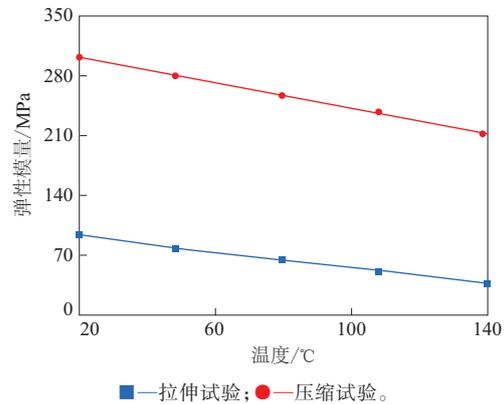


图3 PTFE密封材料的弹性模量-温度关系曲线

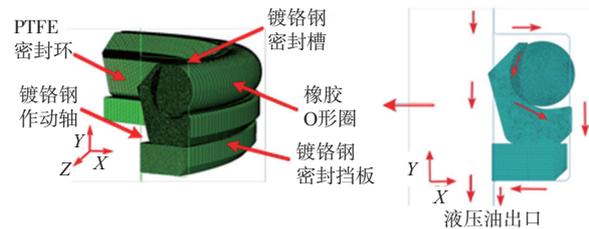


图4 VL型径向唇形密封结构宏观有限元模型

在该模型中,忽略密封槽和作动轴的表面粗糙度,将其简化为解析刚体。沿密封结构轴向共划分200等份,网格单元类型选取C3D8RH。

密封结构各部件之间的接触均使用Penalty模型。其中,结合摩擦试验,镀铬钢作动轴表面与PTFE密封环表面的摩擦因数设为0.02;橡胶O形圈表面与镀铬钢密封槽表面的摩擦因数设为0.1;橡胶O形圈与PTFE密封环表面的摩擦因数设为0.2。此外,采用流体压力渗透法实现10 MPa的液压边界条件^[9]。

2.3 微观模型

粗糙表面上的微凸体形貌具有分型特征,可以采用Majumdar-Bhushan (M-B)模型进行表征。采用Python进行二次开发,实现分形表面的构造。因为微观角度的磨损现象一般为微凸体剥落,该剥落体可近似为半径为 R 的半圆柱体^[10]。基于PTFE密封环表面粗糙度的分布统计,建立了PTFE密封环与镀铬钢作动轴微观接触的简化模型,如图5所示。

在该模型中,微凸体网格单元类型和接触条件的选取与宏观结构有限元模型一致。微凸体表面完全固定(即限定6个自由度);在镀铬钢轴表面

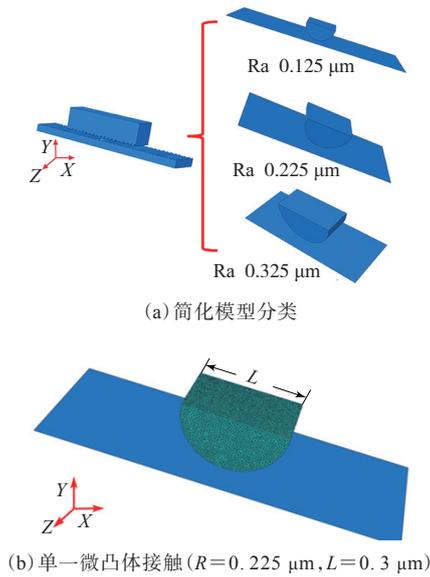


图5 PTFE密封环与金属作动轴表面微观接触模型

施加 $0.02 \mu\text{m}$ 位移载荷,以模拟压缩密封作用。

3 结果与讨论

3.1 摩擦力

PTFE密封材料摩擦力-温度的变化曲线如图6所示。

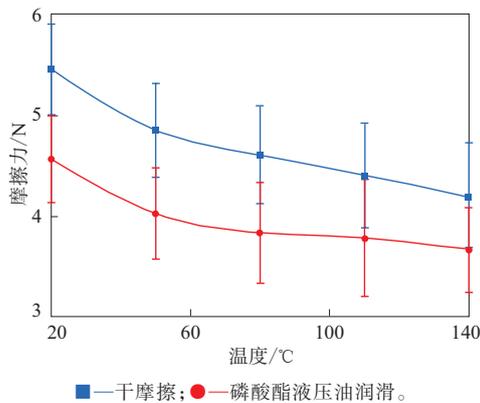


图6 PTFE密封材料摩擦力-温度变化曲线

从图6可以看出,在磷酸酯液压油润滑和干摩擦2种状态下,PTFE密封材料的摩擦力均随着温度的升高而减小,磷酸酯液压油润滑的PTFE密封材料的摩擦力明显减小,较干摩擦平均减小28.7%。

这是因为温度升高,PTFE的分子链更易进行热运动,其因相对运动而积累的应力也更容易释放^[11]。此外,油润滑下存在混合摩擦状态(边界摩擦和干摩擦),降低了微凸体直接接触的

几率。

3.2 接触特性

温度对PTFE密封材料(磷酸酯液压油润滑)宏观及微观接触压力和摩擦功密度的影响分别如图7和8所示。

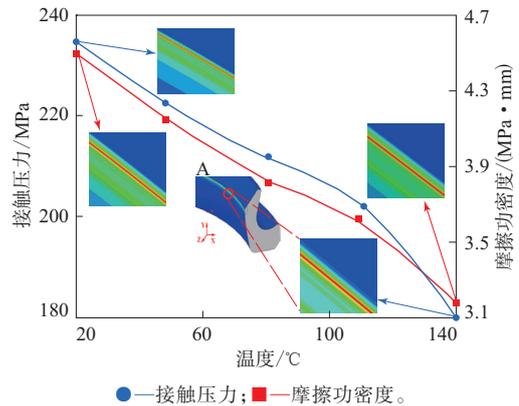


图7 温度对PTFE密封材料宏观接触压力和摩擦功密度的影响

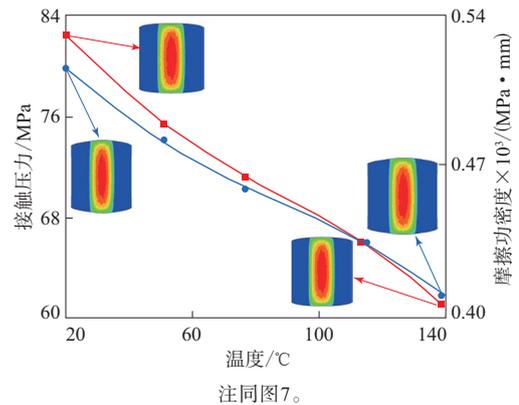


图8 温度对PTFE密封材料微观接触压力和摩擦功密度的影响

从图7和8可以看出,温度升高,PTFE密封材料与金属表面的接触压力和摩擦功密度均显著减小。一方面,温度升高导致PTFE密封材料的力学性能下降;另一方面,由于密封结构部件的形状不规则,在区域A位置易出现应力集中现象。

4 结论

(1)在磷酸酯液压油润滑和干摩擦下PTFE密封材料的摩擦力均随着温度的升高而减小,磷酸酯液压油润滑的PTFE密封材料的摩擦力较干摩擦平均减小28.7%。

(2)在磷酸酯液压油润滑下PTFE密封材料的宏观和微观接触压力和摩擦功密度均随着温度的升高而显著减小。

参考文献:

- [1] Guo Y B, Cao Z Q, Wang D G, et al. Improving the Friction and Abrasion Properties of Nitrile Rubber Hybrid with Hollow Glass Beads[J]. Tribology International, 2016, 101 (4) : 122-130.
- [2] 董元元, 罗英, 张丽屏. C形密封环密封特性数值计算方法研究[J]. 核动力工程, 2015, 36 (2) : 155-159.
- [3] 李苗苗, 陈蔚芳, 崔惠婷, 等. 安装过盈量和介质压力对旋转轴唇形橡胶密封圈密封性能的影响[J]. 橡胶工业, 2019, 66 (6) : 450-455.
- [4] Shimomura T, Hirabayashi H, Nakajima T. A Study of the Relationship between Sealing Performance and Surface Condition of Mechanical Face Seals[J]. ASLE Transactions, 1991, 35 (4) : 659-666.
- [5] 王建磊, 张琛, 王晓虎, 等. N_2O_4 环境下液体火箭发动机涡轮泵机械密封浸渍石墨的磨损机理研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55 (7) : 119-127.
- [6] Li Z H, Rong R Y, Li Y X, et al. Effect of Fiber Length on Mechanical Properties of Short Carbon Fiber Reinforced PTFE Composites[J]. Advanced Materials Research, 2011, 311-313 (2) : 193-196.
- [7] Wang W X. The Effect of CF Modification on the Flexural and Tribological Properties of PTFE Composites[J]. Advanced Materials Research, 2011 (299-300) : 17-20.
- [8] 汪怀远, 冯新, 史以俊, 等. 不同介质中聚四氟乙烯复合材料的摩擦磨损性能[J]. 化工学报, 2007, 58 (4) : 1053-1058.
- [9] Wang B, Pillai K M. Numerical Simulation of Pressure Infiltration Process for Making Metal Matrix Composites Using Dual-scale Fabrics. Metallurgical and Materials Transactions A, 2013, 44 (13) : 5834-5852.
- [10] 冯剑军, 谭援强. 基于Hertz理论圆柱和平面之间的滑动接触分析[J]. 摩擦学学报, 2009, 29 (4) : 346-350.
- [11] 张传兵. 组合式动密封结构摩擦磨损仿真及试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.

收稿日期: 2020-05-12

Research on Friction Behavior of Radial Lip Seal Based on Multi-scale Analysis

WU Jian¹, WANG Yonggang¹, ZHANG Chuanbing², WANG Youshan^{1,2}, SU Benlong¹

[1. Center for Rubber Composites and Structure, Harbin Institute of Technology (Weihai), Weihai 264209, China; 2. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China]

Abstract: Taking the VL radial lip seal structure as the research object, using a combination of numerical simulation and experimental research, the macro and micro friction characteristics of polytetrafluoroethylene (PTFE) sealing material was studied based on multi-scale analysis. The results showed that, the friction force of PTFE sealing material lubricated by phosphate ester hydraulic oil was 28.7% lower than that of dry friction on average. Under the lubrication of phosphate ester hydraulic oil, the macro and micro contact pressure and friction work density of PTFE sealing material decreased with the increase of temperature.

Key words: radial lip seal; PTFE; friction; multi-scale analysis; numerical simulation; lubrication

一种废弃橡胶塑料裂解设备 由南通星铃橡塑制品有限公司申请的专利(公布号 CN 209456371U, 公布日期 2019-10-01)“一种废弃橡胶塑料裂解设备”, 涉及的废弃橡胶塑料裂解设备包括进料模块、裂解模块和废气处理模块。进料模块包括壳体、进料口、第一腔口、第二腔口、第一螺杆、第二螺杆、进料仓和油气出口管 I, 裂解模

块包括燃烧室、燃烧进料口、加热炉、油气出口管 II、导流装置和废渣出口管, 废气处理模块包括油气缓冲罐和废气处理装置。其中, 进料模块右侧设置裂解模块, 裂解模块上方设置废气处理模块, 燃烧进料口与进料模块相连接, 油气出口管 II 与废气处理模块连接。

(本刊编辑部 赵敏)