



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2401783

引用格式: 吴越, 张帆, 唐冀川, 等. 唇口喷涂 PTFE 材料对高速旋转密封性能影响[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(4): 1475-1481.

Wu Yue, Zhang Fan, Tang Jichuan, et al. Effect of lip spraying PTFE material on the performance of rotary seal under high speed and bad lubrication[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(4): 1475-1481.

能源与动力工程

## 唇口喷涂 PTFE 材料对高速旋转密封性能影响

吴越<sup>1,2</sup>, 张帆<sup>1</sup>, 唐冀川<sup>3</sup>, 贾兴运<sup>4\*</sup>, 秦庆旺<sup>4</sup>, 何洪<sup>5</sup>, 许桂哲<sup>5</sup>

(1. 中国船舶集团有限公司第 703 研究所, 哈尔滨 150000; 2. 北京航空航天大学交通科学与工程学院, 北京 100191;

3. 哈尔滨广瀚燃气轮机有限公司, 哈尔滨 150000; 4. 北京化工大学化工安全教育部工程研究中心, 北京 100029;

5. 广东天诚密封件股份有限公司, 揭阳 522000)

**摘要** 为解决高压高速与介质腐蚀的耦合作用下旋转密封可靠性与寿命不足的技术难题, 针对旋转唇形密封开展试验研究, 设计搭建带压高速旋转唇形密封试验台, 开展唇形密封泄漏与摩擦转矩特性试验, 开展唇形密封仿真计算, 并创新性地提出一种带有低摩擦涂层的新密封件, 开展传统密封和喷涂新型密封在不同转速下密封温升和扭矩对比试验。实验结果显示: 唇口喷涂聚四氟乙烯 (PTFE) 材料可有效降低密封温升, 转速每增加 1 000 r/min, 在达到热平衡温度后, 喷涂唇形密封较传统唇形密封温升降低 2.4 °C, 带压工况下, 涂层唇形密封较传统唇形密封温度低约 3.48 °C, 高速且恶劣润滑条件, 喷涂唇形密封较传统唇形密封温度降低约 4.61 °C, 但密封扭矩增加约 0.03 N·m。从密封温升与密封摩擦转矩两方面评价密封性能, 为解决高参数旋转密封技术难题提供理论支撑。

**关键词** 唇形密封; 唇口喷涂; 旋转密封; 温升; 摩擦转矩

中图分类号 TK471;

文献标志码 A

## Effect of Lip Spraying PTFE Material on the Performance of Rotary Seal under High Speed and Bad Lubrication

WU Yue<sup>1,2</sup>, ZHANG Fan<sup>1</sup>, TANG Ji-chuan<sup>3</sup>, JIA Xing-yun<sup>4\*</sup>, QIN Qing-wang<sup>4</sup>, HE Hong<sup>5</sup>, XU Gui-zhe<sup>5</sup>

(1. China State Shipbuilding Corporation 703 Research Institute, Harbin 150000, China; 2. Transportation Science and

Engineering College, Beihang University, Beijing 100191, China; 3. Harbin Guanghan Gas Turbine Co., Ltd., Harbin 150000, China;

4. Ministry of Chemical Safety Education Engineering Research Centre, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;

5. Guangdong Tiancheng Seal Co., Ltd., Jieyang 522000, China)

**[Abstract]** In order to solve the technical problem of insufficient reliability and life of rotary seal under the coupling effect of high pressure and high speed and medium corrosion, experimental research on rotary lip seal was carried out, a high-speed rotary lip seal test bed with pressure was designed and built, leakage and friction torque characteristic tests of lip seal were carried out, simulation calculation of lip seal was carried out, and a new type of seal with low friction coating was innovatively proposed. The temperature rise and torque comparison test of traditional seal and spraying new seal at different speeds were carried out. The experimental results show that the lip spraying tetrafluoroethylene (PTFE) material can effectively reduce the temperature rise of the seal. When the rotational speed increases by 1 000 r/min, after reaching the heat balance temperature, the temperature rise of the spray lip seal is 2.4 °C lower than that of the traditional lip seal. Under the pressure condition, the temperature of the coated lip seal is about 3.48 °C lower than that of the traditional lip seal. Under the condition of high speed and poor lubrication, the temperature of the spray lip seal is about 4.61 °C lower than that of the traditional lip seal, but the sealing torque increases by about 0.03 N·m. The sealing performance is evaluated from two aspects of sealing temperature rise and sealing friction torque, which provides theoretical support for solving the technical problems of high parameter rotary seal.

收稿日期: 2024-03-13; 修订日期: 2024-11-21

基金项目: 国家自然科学基金(52305176)

第一作者: 吴越(1992—), 男, 汉族, 湖南湘潭人, 硕士, 工程师。研究方向: 振动噪声控制。E-mail: wyharbin@126.com。

\* 通信作者: 贾兴运(1992—), 男, 汉族, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 副教授。研究方向: 旋转机械减振密封技术。E-mail: jiaxingyun92@gmail.com。

[Keywords] lip seal; lip spray; rotary seal; temperature rise; frictional torque

唇形密封作为接触式旋转密封中技术较成熟的密封形式,在工业领域被广泛应用。在实际工程应用中,设备的工作压力、工作转速、工作介质性质、温度以及润滑条件是影响唇形密封圈寿命的关键。当唇形密封线速度较大或密封压力较大时,密封与转轴摩擦剧烈,密封件温升较大,橡胶材料易出现老化,唇口与转轴接触部位出现较严重的磨损,严重影响唇形密封的使用寿命。此外,当密封介质具有一定的腐蚀性时,高压高速工况与腐蚀介质的耦合作用下,会进一步影响旋转密封的可靠性与使用寿命。当旋转密封处于不良的摩擦环境时会引发严重磨损,常会引发介质泄漏,甚至影响整套设备的正常运行。

在唇形密封的理论研究方面,陈再胜<sup>[1]</sup>研究了水泥混凝土搅拌运输车中的液压油泵油封泄漏这一关键技术问题,揭示了液压油泵轴端唇形油封的失效原因,并指明如果液压油泵的油封出现泄漏,可能会对系统的功能造成损害,严重时会使系统失效。张启鑫<sup>[2]</sup>运用数值模拟的方法,针对旋转式唇形油封的功能影响因素与密封性能之间的关系展开了详尽研究,最后概括出各项设计参数对油封性能产生的规律性影响。杨化林等<sup>[3]</sup>对旋转式唇形密封的关键设计参数对主唇过盈配合区变形和应力的影响开展探究,结果表明,当密封与轴之间的过盈量、弹簧中心与唇尖轴向距离增大、弹簧刚度系数增强以及油面角增大时,再加上各参数变化几乎不会影响油侧接触宽度,主唇的最大应力和最大接触压力呈现类似的变化趋势。Day等<sup>[4]</sup>建立了包含流体黏度-温度关系、流体动力学分析和变形分析的热弹流润滑模型。Jian等<sup>[5]</sup>提出了一种混合润滑条件下旋转唇形密封的多物理场密封机理模型,考虑了流体-热-结构耦合关系,数值分析了轴转速和密封唇粗糙度对密封性能的影响。Omar等<sup>[6]</sup>利用油液温度、油液压力和转速的参数扫描,研究了海洋特定参数对唇形密封性能的影响。

润滑油泄漏潜藏着唇形密封的失效问题,许增祥<sup>[7]</sup>采用8D法对故障的根本原因进行探究,并制定出切实可行的解决方案。密封在发生硫化时,每个部位都会出现不同水平的紧缩现象,由于唇形密封的这一特点,在参数化建模中很难对其进行精确的控制,杨化林等<sup>[8]</sup>以变形复杂的唇口部位为研究重点,分析回转式唇形密封制品的收缩变形规律,构建了一套用于描述唇口部位收缩变形特性的数学模型。这一科研成果提升了唇形密封设计领域

的技术水平。

在唇形密封故障分析与技术改进研究方面,徐斌云等<sup>[9]</sup>详细检测并分析了齿轮泵的唇形密封开裂的原因,结果表明,唇形密封的唇口部位缺乏必要的导向设计,加上橡胶材质硬度偏低,这些因素导致了油封唇口区域的质量问题。为解决这一问题,后续通过在主动齿轮轴上增设一种花键护套,借此改善了齿轮轴渐开线花键的有效长度,同时引入斜面导向设计至唇形密封的侧唇部位,并对将唇口的厚度和高度适当提升,以增加其强度,通过这一系列改进措施,有效提升了唇形密封在实际应用中的密封效果和使用寿命,经过改造后的唇形密封已成功应用在齿轮泵总成上。张胜有等<sup>[10]</sup>对轨道平车在使用时频繁出现的轴箱唇形密封脱落故障进行调查,详细分析了脱落的原因,发现了轴箱唇形密封在组装工艺方面存在的不足之处,进而有针对性地提出了整改策略。轴箱唇形密封组装工艺的改进,解决了唇形密封脱落的故障,有力保障了车辆的稳定运行。刘建刚<sup>[11]</sup>通过结合唇形密封的密封原理,开展了对刮板输送机减速器唇形密封出现漏油问题的研究,对漏油原因和安装结构进行了简要分析。针对唇形密封早期出现失效、漏油的问题,提出了工艺改进措施,以避免在运行过程中对整机造成损坏。

密封件喷涂改性技术方面,在机械密封件喷涂技术领域有相关资料以及工程应用<sup>[12-15]</sup>,但是关于在橡胶密封材料上喷涂聚四氟乙烯(PTFE)等低摩擦系数材料的公开报道较少。杜娟等<sup>[16]</sup>介绍了一种橡胶基密封材料,这种材料呈粉末状,其黏度在20~200 Pa·s/100℃,该材料是在不高于橡胶材料的脆化温度下,通过粉碎制成的,此类材料具有广泛的适用性。采用先进的喷涂工艺,能够将其均匀、紧密地附着于各类目标表面。李增荣等<sup>[17]</sup>为减小发动机磨损,在发动机缸体内壁通过电弧喷涂耐磨合金。通过实验证明涂层孔隙结构和表面氧化物能够有效减小磨损。张云鹏等<sup>[18]</sup>通过有限元模拟和实验验证,发现改变喷涂角度可以有效避免螺栓表面喷涂涂层厚度不均匀,并得到了螺栓喷涂时喷嘴的最佳喷涂角度。Shabbir<sup>[19]</sup>通过在轴套筒上喷涂不同材料的涂层,研究唇形密封的泄漏和密封性能。

为解决高压高速工况、弱腐蚀性介质与恶润滑条件耦合作用下旋转唇形密封出现的可靠性差与寿命短的现象,针对唇形密封开展试验研究,设计搭建了高速旋转唇形密封试验台,开展唇形密封泄

漏与摩擦转矩特性试验,提出了一种密封唇口带有低摩擦涂层的新唇形密封结构,在不改变唇形原有结构的基础上,唇口表面喷涂具备良好自润滑性能和低摩擦系数的 PTFE 材料,降低了密封唇口与轴摩擦系数,改善了唇形密封唇口耐磨性,极大提高唇形密封在汽车、机床等装备中恶润滑条件下的使用寿命和封严效果。为验证喷涂工艺对唇形密封性能的影响,与传统唇形密封开展对比试验,从密封温升与密封摩擦转矩两方面评价密封性能,为提高恶润滑条件下工作的高参数旋转唇形密封可靠性与寿命、拓宽唇形密封技术的性能边界提供新思路。

## 1 密封唇口喷涂改性

通过特殊工艺在传统唇形密封唇口部位喷涂 PTFE 材料,以期改善唇口摩擦状态,控制密封温度升高,最终实现密封延寿增效。PTFE 材料喷涂区域如图 1 所示。在密封唇口局部喷涂 PTFE 材料进行改性的好处是不会影响密封原有刚性,也不改变唇形密封的基本工作原理,局部喷涂的方法相对于将整个密封唇片改为较硬的 PTFE 材料,延续了橡胶材料为主体的唇形密封对抗轴系偏心、跳动或不对中的优势,即可以在复杂的轴系中进行补偿并维持优秀的密封效果。此外,在唇口即相对运动发生的摩擦磨损区域,喷涂 PTFE 这类的低摩擦系数材料可以实现自润滑,通过降低摩擦系数降低摩擦转矩,改善摩擦副摩擦状态,降低温升,并在恶润滑条件下保障密封效果。



图 1 低摩擦涂层唇形密封喷涂区域

Fig. 1 Low friction coating lip seal spray area

## 2 数值计算模型与温度特性分析

开展旋转密封试验装置改进设计与旋转密封试验设计工作前,利用数值计算方法对唇形密封-转子系统进行建模并开展温度场、应力场与变形量的数值计算研究。采用动力学分析方法开展温度场仿真计算,关键材料属性如表 1 所示,转轴转速设置为 1 000 ~ 4 000 r/min,环境的初始温度设置为 22 ℃,鉴于旋转唇形密封与转轴之间是过盈配合,

将过盈量设置为 1 mm。由于唇口喷涂的 PTFE 材料具有一定的自润滑性,故摩擦系数取值为 0.05,橡胶的摩擦系数选择为 0.25。

为更加真实地预测试验中密封与空气及介质之间热量交换,选择介质与密封的对流换热系数  $\alpha = 530 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ <sup>[20]</sup>,与空气的对流换热系数为  $40 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,基于动力学计算的温度场计算结果作为载荷输入密封静力学计算模型中,施加径向位移使旋转密封达到理想的预紧状态以模拟真实密封与转子之间的压缩率。在转轴转速 2 000 r/min 与应力 0.2 MPa 工况下唇形密封温度场与应力场计算结果如图 2 所示。

通过数值计算(图 2)可以发现,唇形密封接近唇口的摩擦位置的局部温度最高。由于橡胶材质

表 1 计算模型材料性能参数设置

Table 1 Calculation model material property parameter Settings

材料参数	丁腈橡胶	聚四氟乙烯粉末	旋转轴
弹性模量/MPa	7.08	$2.8 \times 10^2$	$2.0 \times 10^5$
密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	1 000	2 200	7 780
泊松比	0.499 5	0.400 0	0.300 0
比热容/( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	1 700	960	470
导热系数/( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	0.25	0.24	39.2

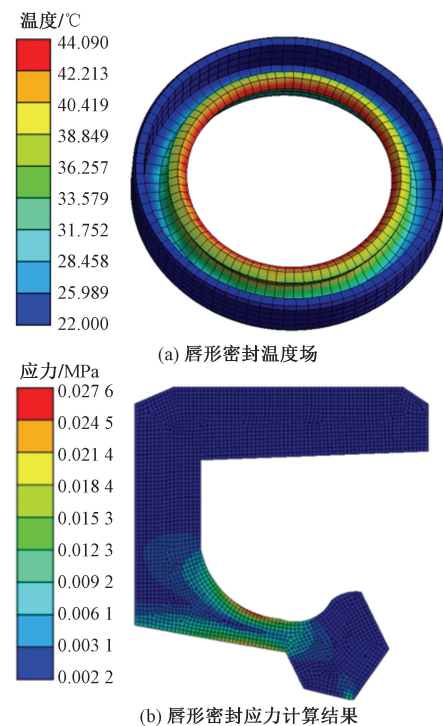


图 2 旋转唇形密封数值计算结果

Fig. 2 Numerical results of rotary lip seal

的老化过程对温度极度敏感,在运行中由摩擦产生的高温会加速唇形密封材料的老化失效,从而影响其使用寿命。此外,唇形密封的热应力极易受到温度的影响,高温使得唇形密封的热应力变化值大,容易造成唇形密封出现应力松弛并产生裂纹。

### 3 低摩擦涂层唇形密封实验研究

#### 3.1 旋转密封实验台改进设计

为验证唇口喷涂 PTFE 材料实现传统旋转密封“提质增效”的可行性,改进设计了旋转唇形密封试验装置,如图 3 所示,该实验台可对不同转速、不同压力、不同介质、不同尺寸下旋转唇形密封及其替代产品的泄漏量、温度以及扭矩进行高精度测试,实现对传统唇形密封及低摩擦涂层唇形密封的对比测试,进而准确地评价密封性能。

该唇形密封实验台主要包括实验段和数据采集软件两部分,其中实验段包括高速变频电机、温度传感器、温度采集模块、扭矩传感器、扭矩采集模块、压力表、密封、实验腔、介质进出口管道、齿轮泵等,数据采集软件则包括温度数据采集软件和扭矩数据采集软件。

密封评价的实验流程简述如下,首先开启齿轮泵为实验腔内的待测密封提供带有一定压力的循环介质,然后开启变频器调整至试验转速,让实验腔两端的待测密封在相同的介质压力和实验转速下工作,设备调试达到试验点参数后,通过温度采集软件和扭矩采集软件采集实验过程中密封的

温度和扭矩数据,密封的泄漏流体则通过小容器收集捕捉,达到一定时间后测量泄漏流体的重量,通过计算得到密封的泄漏量数据,最后,在实验结束后对传统唇形密封及低摩擦涂层唇形密封的泄漏量、温度和扭矩数据结果进行处理,为开展密封性能对比分析提供数据支撑。

#### 3.2 旋转密封实验结果分析

某设备中,两道串联的唇形密封用于密封常压润滑油介质,其中,靠外部的唇形密封基本处于干摩擦状态或恶润滑状态。试验中,首先开展了无润滑条件下传统唇形密封实验研究,旋转密封试验件的温度和扭矩测试结果如图 4 所示,结果显示,随着时间的增加,传统唇形密封的温度和扭矩的变化趋势都趋于平稳,最后达到比较稳定的数值。随着转速的增加,传统唇形密封的温度也在不断增加,转速每增加 1 000 r/min 传统唇形密封的温度增加约 6.04 °C,此外,实验中动态测试了不同转速下的扭矩,结果显示,实验初始密封的摩擦扭矩较大,达到约 0.4 N·m,随着实验时长的增加,密封与旋转轴摩擦界面跑合后,扭矩测试结果趋于稳定,此外,当转速为 500 r/min 时扭矩较大,转速增大后,转速对传统唇形密封的扭矩影响不明显。

与图 2 仿真结果比较,发现在 2 000 r/min 无润滑条件下,传统唇形密封最大温度仿真结果和实验结果误差较小,仿真结果为 44.09 °C,实验中密封温度稳定时温度为 45.01 °C,误差仅为 2%。

介质带压且恶润滑条件下(如密封介质为水或

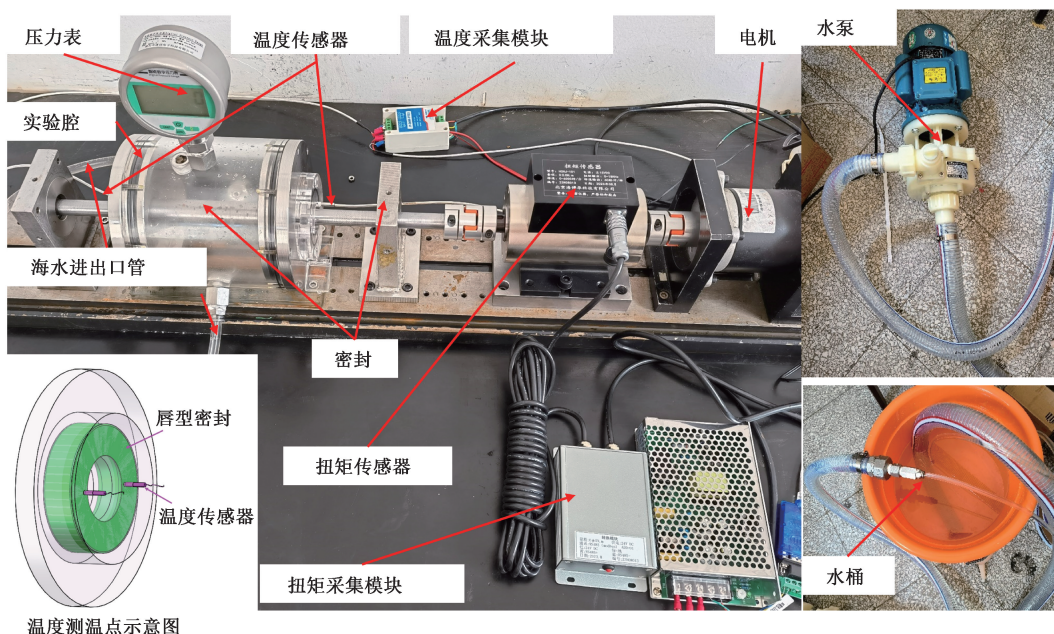


图 3 旋转唇形密封测试实验台实验段部分

Fig. 3 Part of the test section of the rotary lip seal test bench

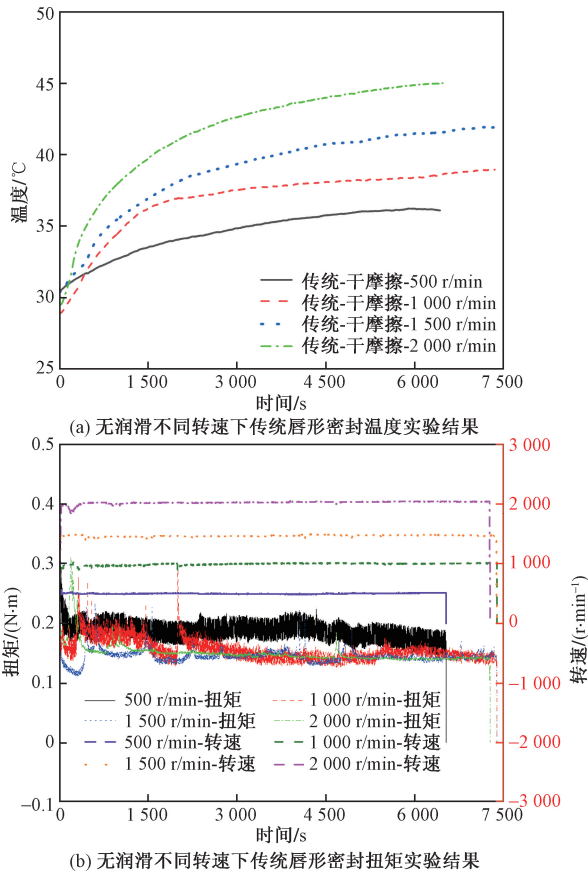


图4 传统旋转唇形密封温度与扭矩测试结果  
Fig. 4 Temperature and torque test results of conventional rotary lip seal

者海水情况下),对传统唇形密封与低摩擦涂层唇形密封进行对比。对比试验结果(图5)显示,随着测试时间的增加,唇口喷涂 PTFE 材料的低摩擦涂层唇形密封的温度和扭矩的变化趋势与传统唇形密封一样趋于平稳,最后达到比较稳定的数值。随着测试转速的增加,低摩擦涂层唇形密封的温度也在不断增加,转速每增加 1 000 r/min,喷涂唇形密封的温度增加约 3.64 °C。温度结果显示,介质带压且恶润滑工况下,低摩擦涂层唇形密封的温度都低于传统唇形密封的温度。与传统唇形密封相比,低摩擦涂层唇形密封可以使平衡温度降低约 0.99 ~ 4.61 °C,这对提高密封寿命有积极作用。

如图6、图7所示,测试中一侧带有低摩擦涂层唇形密封时的试验扭矩大于传统唇形密封的扭矩,相对于传统唇形密封,唇口喷涂 PTFE 会导致唇形密封扭矩增加约 0.03 N·m。带压工况相对常压工况下,低摩擦涂层唇形密封和传统唇形密封的扭矩均增加约 0.08 N·m。

综上所述,对比试验结果说明,低摩擦涂层唇形密封试验件的扭矩大于传统唇形密封的扭矩,低摩擦涂层唇形密封的温度则要小于传统唇形密封的

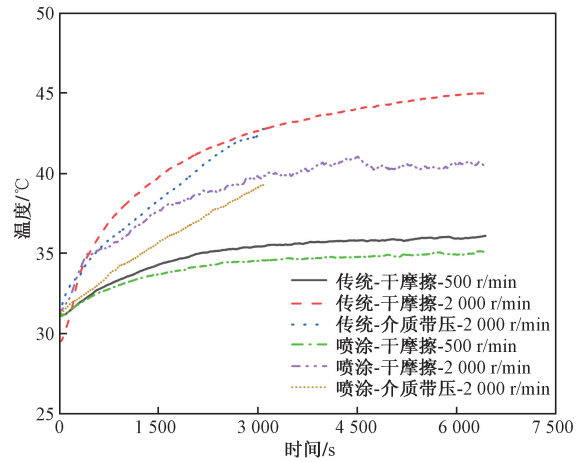


图5 恶润滑条件下低摩擦涂层唇形密封与传统唇形密封的温度变化对比  
Fig. 5 Comparison of temperature variation between low friction coating lip seal and traditional lip seal under bad lubrication condition

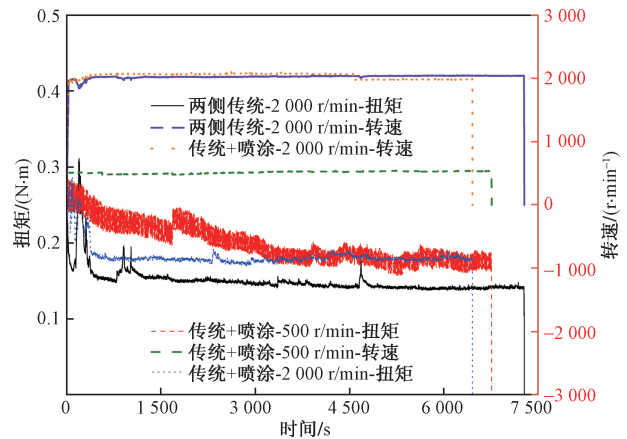


图6 传统唇形密封与低摩擦涂层唇形密封扭矩对比结果  
Fig. 6 Comparison of torque between traditional lip seal and low friction coating lip seal

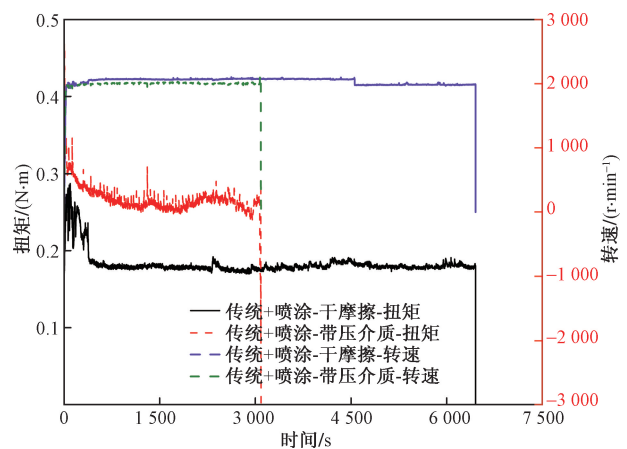


图7 恶润滑条件下带压与常压工况下扭矩测试结果对比  
Fig. 7 Comparison of torque test results under bad lubrication condition with pressure and under normal pressure

温度,由于唇形密封的唇口与轴接触且摩擦磨损区域喷涂 PTFE 材料实际上增加了唇口的厚度,缩小了密封唇口的内径,造成密封与轴之间的过盈量加大,增大了密封与轴的抱紧程度,导致了唇口喷涂 PTFE 唇形密封扭矩增大。温度方面,由于唇口喷涂的 PTFE 材料具有良好的自润滑性,在恶润滑条件下保证了低摩擦系数,使其摩擦升温较低,因此低摩擦涂层唇形密封的平衡温度低于传统唇形密封。

## 4 结论

为解决恶润滑条件传统唇形密封使用寿命不足的难题,改造旋转唇形密封试验台,按照实际密封运行工况开展了旋转唇形密封试验研究,研究唇形密封的温升特性与扭矩特性,提出在密封唇口喷涂 PTFE 材料的减摩延寿的想法,并开展初步的对比试验研究,得出如下主要结论。

(1)唇口喷涂 PTFE 材料可以降低摩擦系数以改善旋转唇形密封温升,旋转密封达到热平衡温度后,转速每增加 1 000 r/min 传统唇形密封的温度增加约 6.04 °C,转速每增加 1 000 r/min 低摩擦涂层唇形密封增加约 3.64 °C,带压工况下,低摩擦涂层唇形密封相较传统唇形密封温度降低约 3.48 °C,高转速且恶润滑条件,唇口喷涂 PTFE 唇形密封相较传统唇形密封温度降低约 4.61 °C。

(2)唇口喷涂会导致密封内径变小,过盈量加大,密封跑合后,低摩擦涂层唇形密封相较传统唇形密封扭矩增加约 0.03 N·m,转速对传统唇形密封和低摩擦涂层唇形密封的扭矩基本无影响。

(3)唇口喷涂 PTFE 材料可能是旋转唇形密封改善唇口摩擦磨损状态、减摩延寿的有效途径,值得注意的是,不建议在唇形密封标准件上喷涂后使用,尺寸变化易造成扭矩增大,唇口喷涂 PTFE 唇形密封需要考虑涂层厚度后重新设计密封本体尺寸,此外,应注意涂层脱落问题,耐刮耐磨不脱落的 PTFE 喷涂技术是极为需要的。

## 参 考 文 献

- [1] 陈再胜. 基于有限元分析液压油泵骨架油封漏油研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.  
Chen Zaisheng. Research on oil leakage of hydraulic oil pump skeleton seal based on finite element analysis[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- [2] 张启鑫. 旋转式骨架油封密封性能分析及其产品设计技术研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2018.  
Zhang Qixin. Research on sealing performance analysis and product design technology of rotary frame oil seal[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2018.
- [3] 杨化林, 张启鑫, 宋正朴. 旋转式骨架油封关键参数对主唇配合区的影响分析[J]. 橡胶工业, 2018, 65(8): 927-931.  
Yang Hualin, Zhang Qixin, Song Zhengpu. Analysis of influence of key parameters of rotary frame oil seal on main lip fitting zone[J]. China Rubber Industry, 2018, 65(8): 927-931.
- [4] Day K, Salant R F. Thermal elastohydrodynamic model of a radial lip seal: part 1: analysis and base results[J]. Journal of Tribology, 1999, 121(1): 1-10.
- [5] Jian S, Xiaochuan D, Di L, et al. A multiphysics sealing mechanism model of rotary lip seals under mixed lubricating conditions considering the effects of the meniscus[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2022, 48(9): 11727-11739.
- [6] Omar M, Vesa S, Raine V. Performance characterization of marine lip seals: contact temperature and frictional torque[J]. Wear, 2023, 523: 204763.
- [7] 许增祥. 8D 法分析解决骨架油封失效问题[J]. 水泵技术, 2021(S1): 68-71, 77.  
Xu Zengxiang. To analyze and solve the failure problem of skeleton oil seal with 8D method[J]. Pump Technology, 2021(S1): 68-71, 77.
- [8] 杨化林, 王伟, 陶丽娜, 等. 回转式骨架油封收缩变形模型研究[J]. 润滑与密封, 2015, 40(8): 31-34, 39.  
Yang Hualin, Wang Wei, Tao Lina, et al. Research on shrinkage model of rotary skeleton oil seal[J]. Lubrication Engineering, 2015, 40(8): 31-34, 39.
- [9] 徐斌云, 邹云斌, 甘德飞, 等. 一种齿轮泵骨架油封试验测试中的问题分析[J]. 工程机械, 2022, 53(10): 138-142, 15.  
Xu Binyun, Zou Yunbin, Gan Defei, et al. Problem analysis in the test of a gear pump skeleton oil seal[J]. Construction Machinery and Equipment, 2022, 53(10): 138-142, 15.
- [10] 张胜有, 张进昌, 陈勇强. 轨道平车轴箱骨架油封脱落原因分析及处理[J]. 机车车辆工艺, 2020(3): 57-58.  
Zhang Shengyou, Zhang Jinchang, Chen Yongqiang. Cause analysis and treatment of oil seal falling off of axle box frame of track flat car[J]. Locomotive and Rolling Stock Technology, 2020(3): 57-58.
- [11] 刘建刚. 骨架油封早期失效漏油的分析与对治措施[J]. 科技创新与应用, 2016(19): 124.  
Liu Jianguang. Analysis and treatment of oil leakage in early failure of skeleton oil seal[J]. Technology Innovation and Application, 2016(19): 124.
- [12] 郑烧, 付光卫, 赵祥, 等. 浸渍石墨/38CrMoAlA(喷涂)配对密封摩擦副的干摩擦性能[J]. 润滑与密封, 2020, 45(12): 52-59.  
Zheng Rao, Fu Guangwei, Zhao Xiang, et al. Dry friction properties of impregnated graphite/38CrMoAlA(sprayed) paired sealed friction pairs[J]. Lubrication Engineering, 2020, 45(12): 52-59.
- [13] 黄宇生, 柏洪武, 邱晓来, 等. 超音速火焰喷涂 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr 涂层性能及其在金属硬密封球阀上的应用[J]. 材料保护, 2020, 53(9): 50-55.  
Huang Yusheng, Bai Hongwu, Qiu Xiaolai, et al. Performances and application on the metal seal ball valve of Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr coating deposited by high velocity oxygen fuel spray process[J]. Materials Protection, 2020, 53(9): 50-55.
- [14] 李灿. 动密封用 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/C 复合涂层摩擦磨损性能研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2016.

- Li Can. Study on the friction and wear performance of  $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{C}$  composite coatings used as dynamic sealing[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016.
- [15] 朱希玲. 等离子喷涂技术在油膜轴承密封件上的应用[J]. 轴承, 2011(10): 14-16.
- Zhu Xiling. Application of plasma spraying technology for seals of oil film bearings[J]. Bearing, 2011(10): 14-16.
- [16] 杜娟, 王晓霞, 刘英梅. 粉末喷涂橡胶密封材料[J]. 世界橡胶工业, 2011, 38(10): 18-20.
- Du Juan, Wang Xiaoxia, Liu Yingmei. Powder sprayed rubber sealing material[J]. The World Rubber Industry, 2011, 38(10): 18-20.
- [17] 李增荣, 李德元, 王骞, 等. 电弧喷涂铁基减摩涂层磨损性能的分析[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(33): 34-40.
- Li Zengrong, Li Deyuan, Wang Qian, et al. Analysis on wear resistance of iron-based antifriction coating by arc spraying[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(33): 34-40.
- [18] 张云鹏, 万冰华, 赵彦伟, 等. 喷涂角度对螺栓表面涂层厚度均匀性的影响[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(6): 2362-2366.
- Zhang Yunpeng, Wan Binghua, Zhao Yanwei, et al. Effect of spraying angle on thickness uniformity of bolt surface coating[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(6): 2362-2366.
- [19] Shabbir S. Experimental study of radial lip seals with different sleeve coatings[J]. Sealing Technology, 2020, 3: 5-10.
- [20] 张付英, 陈建奎, 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 Fuying, Chen Jianlei, Song Nana, et al. Temperature field analysis of rotary shaft lip seal based on ABAQUS[J]. Lubrication Engineering, 2018, 43(3): 69-74.