

某液体火箭发动机涡轮泵球轴承故障机理及改进方案

张文虎^{1,2}, 李文超⁴, 邓四二^{1,3}, 张松², 郑艳伟⁴

(1. 河南科技大学 机电工程学院, 河南 洛阳 471003;

2. 常州光洋轴承股份有限公司, 江苏 常州 213022;

3. 河南科技大学 高端轴承摩擦学技术与应用国家地方联合工程实验室, 河南 洛阳 471003;

4. 洛阳轴承研究所有限公司 技术中心, 河南 洛阳 471003)

摘 要: 针对某型号液体火箭发动机涡轮泵球轴承在试验过程中出现的故障, 在进行轴承故障机理分析的基础上, 对轴承关键结构参数进行了改进, 使用滚动轴承动力学分析软件 SARB(simulation and analysis of rolling bearings)对比分析了改进前后轴承的接触应力、接触角、旋滚比、保持架打滑率和质心轨迹等性能参数, 并通过试验手段验证轴承改进方案和动力学分析结果的正确性。结果表明: 轴承结构参数改进后, 内接触角减小, 保持架打滑率由 10% 下降到 4%, 钢球旋滚比和打滑速度均降低, 钢球和保持架运转稳定性均提高。

关 键 词: 液体火箭发动机; 涡轮泵; 球轴承; 故障机理; 动力学

中图分类号: V231.96; TH133.33 **文献标志码:** A

Failure mechanism and improvement of ball bearing in a liquid rocket engine turbopump

ZHANG Wenhui^{1,2}, LI Wenchao⁴, DENG Sier^{1,3},

ZHANG Song², ZHENG Yanwei⁴

(1. School of Mechatronics Engineering,

Henan University of Science and Technology, Luoyang Henan 471003, China;

2. Changzhou Guangyang Bearing Company Limited, Changzhou Jiangsu 213022, China;

3. National United Engineering Laboratory for Advanced Bearing Tribology,

Henan University of Science and Technology, Luoyang Henan 471003, China;

4. Technology Centrer,

Luoyang Bearing Research Institute Company Limited, Luoyang Henan 471003, China)

Abstract: In view of the fault of ball bearing in a liquid rocket engine turbopump during the experiment, the failure mechanism of bearing was analyzed, the key structural parameters of bearing were optimized. The contact stress, contact angle, spin-to-roll ratio, slip ratio of cage and orbit trajectory of cage's centroid were compared and analyzed by means of SARB (simulation and analysis of rolling bearings) software. Experiment was done to verify

收稿日期: 2020-07-13

基金项目: 中国博士后科学基金(2020M671276); 国家自然科学基金青年科学基金(51905152)

作者简介: 张文虎(1987—), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为滚动轴承设计理论与仿真分析技术。

通信作者: 李文超(1983—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为滚动轴承设计及理论。E-mail:ssdf0531@163.com

引用格式: 张文虎, 李文超, 邓四二, 等. 某液体火箭发动机涡轮泵球轴承故障机理及改进方案[J]. 航空动力学报, 2021, 36(2): 396-404. ZHANG Wenhui, LI Wenchao, DENG Sier, et al. Failure mechanism and improvement of ball bearing in a liquid rocket engine turbopump[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(2): 396-404.

the improvement and the dynamic analysis results of ball bearing. Results showed that after the structural parameters of the bearing were improved, the contact angle between steel ball and inner ring was reduced, the cage slip rate declined from 10% to 4%, and the spin-to-roll ratio and slip speed were reduced, and the stability of steel ball and cage was improved.

Key words: liquid rocket engine; turbopump; ball bearing; failure mechanism; dynamics

涡轮泵轴承失效是一种重要的故障模式,占发动机系统故障的 15.64%^[1-2]。液体火箭发动机涡轮泵用球轴承一般工作在 $-253 \sim -183\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的超低温液体介质中,通常采用滚道镀膜和聚四氟乙烯(poly tetra fluoroethylene,PTFE)保持架转移膜的方式进行轴承润滑。该类型轴承的使用寿命并不取决于其疲劳寿命,往往是轴承各元件接触界面磨损过度或润滑与冷却不足引起的典型故障:滚道磨损、钢球环带以及保持架引导面磨损等。

Wilson、Martin 等^[3]对液氮介质中的球轴承进行了试验研究,分析了套圈材料、保持架材料和结构对轴承使用寿命的影响,为该类型轴承的选材和结构设计提供了指导意见;Herbert、William^[4]对液氢介质中的高速球轴承 $Dn=1.6 \times 10^6\text{ mm} \cdot \text{r/min}$ (D 表示轴承内径, n 表示转速)进行了试验研究,分析了工况条件、径向游隙、保持架结构和材料对轴承使用寿命的影响;Nosaka、Oike、Kikuchi 等^[5-7]针对 LE-7 型火箭发动机用高速球轴承 ($Dn=2.0 \times 10^6\text{ mm} \cdot \text{r/min}$),在液氢和液氮介质中进行了试验研究,通过监测轴承外圈温度、摩擦力矩以及轴承电阻变化来研究 PTFE 转移膜的自润滑特性、成膜和破膜特性,给出了液氢和液氧介质中 PTFE 转移膜的最大承载能力;Nosaka、Kikuchi、Oike^[8]试验研究了钢制球轴承和混合陶瓷球轴承的自润滑性能,使用 X 射线光谱仪分析了 PTFE、 CaF_2 、 $\text{CaF}_2/\text{FeF}_2$ 在液氢、液氧、液氮中的成膜能力;Nosaka 等^[9]试验研究了液氢、液氧、液氮介质中 440C 球轴承滚道 FeF_2 镀层的自润滑特性和耐久性,给出了 FeF_2 镀层的使用工作环境;Nosaka、Takada、Kikuchi 等^[10]试验对比了 $Dn=3 \times 10^6\text{ mm} \cdot \text{r/min}$ 混合陶瓷球轴承和钢制球轴承的温度,研究了冷却介质流量对轴承温度的影响;Subramonian、Kato、Adachi 等^[11]试验研究了液氮介质中高速涡轮泵 440C 球轴承的离子镀 Au、离子镀 Pb、射频溅射 PTFE 等镀膜的摩擦磨损特性,并提出了 MoSTi

和离子镀 Pb 两种镀膜方法用于涡轮泵球轴承的表面镀膜;Masataka^[12]总结了日本液体火箭发动机高速轴承的技术特点,分析了 LE-5 和 LE-7 低温球轴承的摩擦磨损特性,以及超低温轴承中存在的摩擦问题,研究了 440C、 ZrO_2 、 Al_2O_3 等材料的磨损特性,为新一代低温轴承的设计指明方向;Servais、Bozet、Kreit 等^[13]向建立了钢球与滚道的热接触分析模型,研究了低温轴承滚道与钢球接触处的闪温变化;Solji、Bokseong、Jeonkook 等^[14]试验研究了超低温深沟球轴承的保持架兜孔形状、兜孔间隙和低温介质流量对轴承摩擦系数和保持架不稳定性的影响;Bokseong、Jeonkook 等^[15]在使用流体分析软件计算保持架流体作用力的基础上,研究了不同拖动系数下保持架兜孔间隙和引导间隙对保持架质心轨迹的影响;Bokseong、Jeonkook、Wonil、Doyoung^[16-17]使用试验手段研究了超低温环境下球轴承 PTFE 保持架的引导间隙、兜孔间隙以及动不平衡量对保持架质心轨迹、涡动频率以及轴承的摩擦力矩和磨损状态的影响;Gupta、Gibson^[18]在试验研究液氧介质中 440C 拖动系数的基础上,建立了超低温介质的高速球轴承动力学分析模型,研究了超低温轴承的生热率,并进行了试验验证;Kwak 等^[19]试验研究了超低温流体介质中固体(Ag 和 PTFE)拖动系数的变化规律,分析了超低温轴承的动力学行为;苗旭升、胡明、李爱民等^[20]试验研究了超低温 PTFE 自润滑球轴承的润滑特性,分析了 PTFE 转移膜和镀膜 Ag 层在滚道上的分布情况;古乐、王黎钦、李秀娟^[21]分析了超低温轴承的工况特征、轴承元件材料、润滑技术、主要失效形式与其机理以及研究进展,并预测了未来超低温轴承的发展趋势;马美玲、邓四二、梁波等^[22]探讨了影响液体火箭发动机超低温轴承的关键影响因素,采用多目标优化方法对轴承进行了结构优化设计;李鸿亮、张旭、马美玲等^[23]针对某涡轮泵角接触球轴承在液氮台架试验后钢球表面出现环带和部分钢球发黄的故障模式,分析了钢球表面故

障产生的原因;周琼、李正美、张而耕^[24]以高可靠性要求下提高轴承寿命为研究重点,综述了固体润滑下涡轮泵轴承的磨损寿命和疲劳寿命的进展状况,并对涡轮泵轴承在高可靠性、高寿命下的研究方向进行展望;刘洪杰、吴霖、刘洋等^[25]针对某超低温轴承工况大幅度提升后,芳纶纤维弥散增强 PTFE 复合材料保持架多次断裂甚至破裂的问题,制备新型的玻璃纤维布层压 PTFE 复合材料保持架,实现了在液氢轴承中的应用。上述大部分研究采用试验手段研究超低温轴承的自润滑特性、磨损特性、疲劳特性以及温度变化规律,在理论研究方面较为匮乏。同时,对于轴承故障的机理研究多采用测试化验手段进行定性分析,很少从轴承动力学特性进行其故障机理的定量分析。

鉴于此,本文在进行某液体火箭发动机涡轮泵用球轴承故障机理分析的基础上,借助 SARB 轴承动力学仿真分析软件研究改进前后轴承的接触应力、接触角、旋滚比、保持架打滑率和质心轨迹等性能参数,对轴承的改进方案进行性能评估,为该类型轴承的故障机理研究、性能评估和优化设计提供理论依据和技术手段。

1 轴承故障表征分析

某液体火箭发动机涡轮泵用三点接触球轴承的主要结构参数见表 1,套圈和钢球材料均为 G95Cr18,保持架材料为 PTFE+12Cr18Ni9(保持架两侧加强环+铆钉),套圈沟道表面镀银。使用如图 1 所示的超低温试验装置对轴承进行试验,试验工况如下:轴向力 $F_a=40\,000\text{ N}$,径向力 $F_r=20\,000\text{ N}$,内圈转速 $n=16\,000\text{ r/min}$,介质为液氮,其质量流量为 9.5 kg/s 。当试验进行到 30 s

表 1 轴承主要结构参数

Table 1 Major parameters of bearing

参数	数值
轴承外径/mm	215
轴承内径/mm	120
外圈宽度/mm	40
钢球直径/mm	30.162
保持架外径/mm	185.4
保持架内径/mm	159
保持架宽度/mm	40.2
兜孔直径/mm	31.80

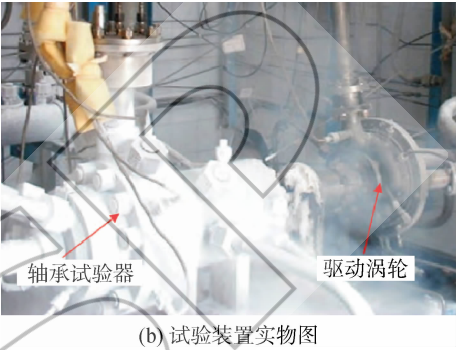
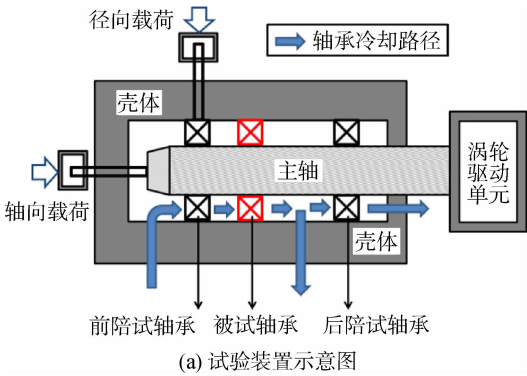


图 1 轴承超低温试验装置
Fig. 1 Cryogenic experiment system for bearing

时,试验装置的振动值超出其安全警戒线,故停车对试验装置的故障原因进行分析。试验机拆解后对被试验轴承进行送检,送检的轴承零件为:受载内圈、保持架和 1 粒钢球。

1.1 外观检查以及扫描电镜分析

受载内圈的表面外观如图 2 所示:钢球运转轨迹位于受载内圈沟道中上部,宽度约为 7 mm ,距挡边约为 3 mm ,距小端约 $3\sim 4\text{ mm}$,无偏斜;钢球运转轨迹偏大端面一侧,颜色较重,中部相对比较粗糙,其余部分光亮,未见材料剥落;受载内圈的端面和挡边外径面均未见明显异常。

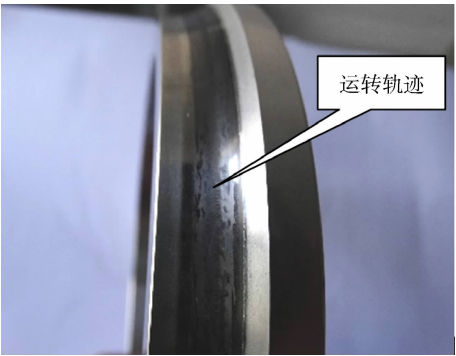
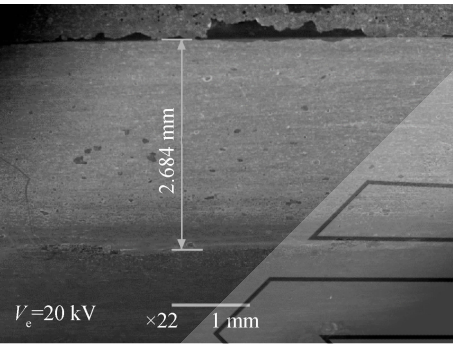
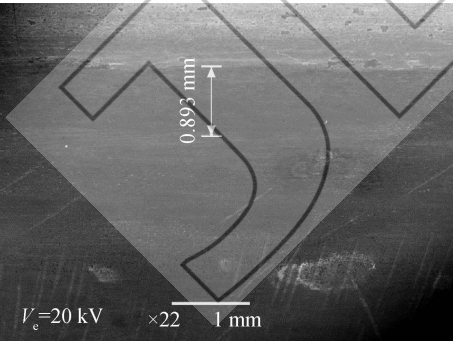


图 2 受载内圈沟道的钢球运转轨迹
Fig. 2 Steel ball running path on the raceway of loaded inner-ring

对受载内圈切割取样,采用超声波清洗、烘干后依次放置在 JSM-5610LV 扫描电子显微镜下观察其工作面的微观形貌,电镜电压 V_e 设置为 20 kV,放大倍数为 22($\times 22$),比例尺为 1 mm,如图 3 所示:受载内圈的运转轨迹距大端面 2.684 mm,运转轨迹的上部颜色略重,宽度约为 0.893 mm,未见材料明显剥落;运转轨迹中部较为粗糙,损伤程度略重,局部可见压痕,运转轨迹的下部则相对比较平整,原始周向磨削痕迹清晰可见。采用能谱仪对运转轨迹不同部位的表面成分进行能谱分析:受载内圈整个运转轨迹均含有银,相比之下运转轨迹中部银质量分数最高,为 4.23%,而颜色较重部分,银质量分数最低,为 1.52%,其他部位银质量分数则均处于两者之间,分别为 2.08%和 1.92%,这说明受载内圈沟道中部的粗糙部位及压痕均为镀银层缺陷,颜色最重的部分为磨损最严重部位。



(a) 受载内圈上运转轨迹与大端面的距离

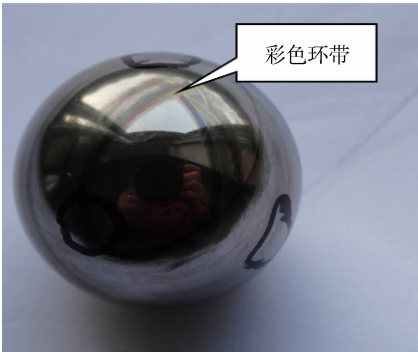


(b) 运动轨迹上重颜色区域的宽度

图 3 受载内圈沟道形貌及相关尺寸

Fig. 3 Topography and dimensions of loaded inner-ring raceway

钢球、保持架的表面外观如图 4 所示:钢球表面有较明显的带状和局部交叉旋转环带、呈深灰色或彩色,宽度约为 1.5~4.0 mm;交叉环带在低倍下呈现为彩色状,变倍观察发现其形貌为轻微的浅层状磨损,局部有线状划伤和点状缺陷,其最大尺寸为 21 μm ;较宽的深灰色环带,变倍观察发



(a) 钢球表面彩色环带



(b) 钢球表面深灰色环带



(c) 保持架引导面碰磨

图 4 钢球与保持架表面外观

Fig. 4 Surface appearance of steel ball and cage

现其形貌为磨损,但程度比交叉环带更轻微;另外,还发现一处条状缺陷,其长度尺寸约为 48.1 μm ;保持架引导面有较明显的碰磨痕迹,呈褐色,其余部位碰磨痕迹较轻。

1.2 硬度检查以及金相组织检验

使用 HR-150A 洛氏硬度计(负荷为 150 kg)测定送检内圈和钢球的洛氏硬度(HRC),内圈的测试部位为滚道的运转轨迹区域,钢球的测试部位为光亮区域和深灰色区域(即运转环带区域),测试结果见表 2。由检测结果可知:①受力内圈和钢球的硬度值及其均匀性均符合 JB/T 1460-

2011 标准要求;②钢球运转环带处的硬度值与光亮区域数值基本相当。

表 2 受载内圈和钢球的表面硬度
Table 2 Surface hardness of loaded inner-ring and steel ball

参数	受力内圈	钢球光亮区	钢球深灰色区
硬度(HRC)	测点Ⅰ	60.2	60.8
	测点Ⅱ	59.9	60.1
	测点Ⅲ	59.6	60.6
同一零件硬度差(HRC)	0.6	0.7	0.8
硬度标准要求(HRC)	≥58	≤2	≤2

受载内圈和钢球的金相组织检验在显微镜下进行,腐蚀剂采用盐酸苦味酸酒精溶液,评定标准为 JB/T 1460-2011,检验结果见表 3。

表 3 受载内圈和钢球的金相检验结果
Table 3 Metallographic test results of loaded inner-ring and steel ball

零件名称	淬回火组织等级/级	工作面缺陷及烧伤情况
受载内圈	3	未见缺陷及烧伤组织
钢球	3	未见缺陷及烧伤组织

注:淬回火组织等级标准要求为 2~5 级,工作面不允许存在缺陷及烧伤。

由表 3 结果知:①受载内圈和钢球的淬回火组织均符合 JB/T 1460-2011 标准要求;②受载内圈和钢球表面运转轨迹磨损区域剖面均未见缺陷及烧伤组织。

1.3 故障表征分析

1) 受载内圈运转轨迹位于半内圈的沟道中部,均匀、无偏斜,呈现不同程度的磨损状态。其中,滚道偏大端面一侧运转轨迹磨损相对较为严重,银质量分数也最低,运转轨迹中部较为粗糙,为镀银层脱落所致,银质量分数最高,整个滚道工作带无明显材料剥落;

2) 钢球表面存在有因定轴旋转而形成的彩色或深灰色环带,且局部存在交叉,彩色环带磨损较为严重,局部存在少量线状、条状及点状缺陷;

3) 通过对受载内圈和钢球运转轨迹处的洛氏硬度检测、剖面金相分析判定:送检零件均无明显烧伤层存在,钢球表面环带的异常色泽为钢球定轴旋转引起轴承接触界面的瞬间温升所致;

4) 受载内圈和钢球的热处理质量均符合 JB/T 1460-2011 标准要求,不存在质量问题;

5) 保持架引导面有较明显的碰磨痕迹,说明保持架引导面与外圈引导面发生了比较严重的摩擦接触。

1.4 故障机理分析

1) 引起钢球环带的原因:在离心力的作用下,轴承外接触角减小,内接触角增大,钢球相对外沟道的运动方式为近乎纯滚动,但因内接触角较大,钢球除承受滚动力矩外还承受一个附加力矩(即陀螺力矩),该力矩使钢球在内圈沟道上产生自旋运动,该运动绕钢球与内圈的接触点及钢球中心点的联线轴旋转(即定轴旋转),同时钢球的定轴旋转使其与内滚道接触区出现大的滑动摩擦,引起接触区的闪温较高(500~600℃),导致钢球表面环带。

2) 引起保持架引导面磨损的原因:保持架引导间隙过小或保持架运行稳定性差,引起保持架引导面与外圈引导面发生严重的摩擦磨损。

2 轴承动态性能分析

为消除钢球定轴旋转和保持架引导面磨损,根据以往该类型轴承的设计经验,采用以下改进方案:①减小钢球直径,降低钢球自旋和旋滚比;②减小轴承初始接触角,增加垫片角,取内沟曲率半径大于外沟曲率半径;③增大保持架引导间隙,减小保持架引导面与外圈引导面之间的滑动摩擦。轴承改进前后关键结构参数如表 4 所示。

表 4 球轴承关键结构参数
Table 4 Key structural parameters of ball bearing

状态	内沟曲率系数	外沟曲率系数	钢球直径/mm	保持架外径/mm
改进前	0.53	0.53	30.162	185.4
改进后	0.54	0.52	26.988	184.4

使用 SARB 轴承动力学仿真分析软件^[26]进行轴承动力学性能仿真分析仿真过程中钢球与内圈的作用力(N)和钢球运行轨迹如图 5 所示。

钢球与内、外滚道的接触应力、接触角如图 6 和图 7 所示,保持架打滑率和保持架质心轨迹如图 8 和图 9 所示,钢球与内、外滚道的旋滚比(简称内、外旋滚比,即钢球相对于内、外滚道的自旋分量与滚动分量之比)以及钢球公转速度如图 10 和图 11 所示。

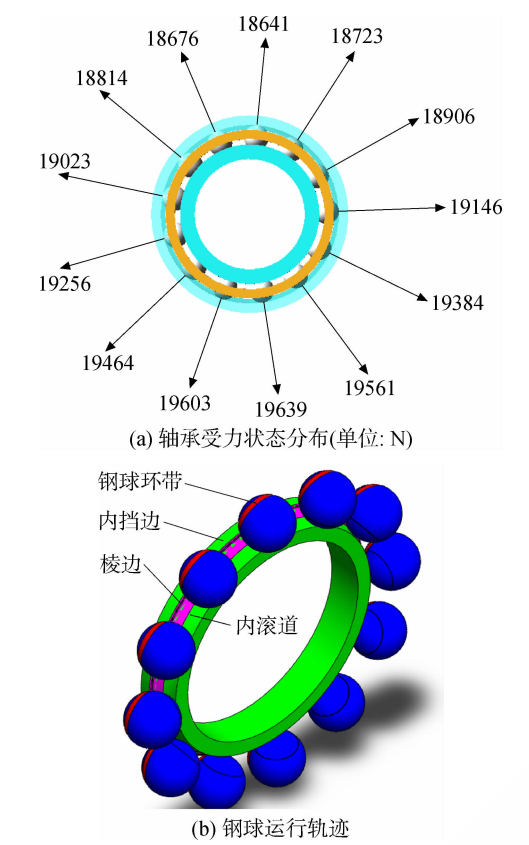


图 5 轴承仿真分析示意图

Fig. 5 Schematic diagram of bearing simulation analysis

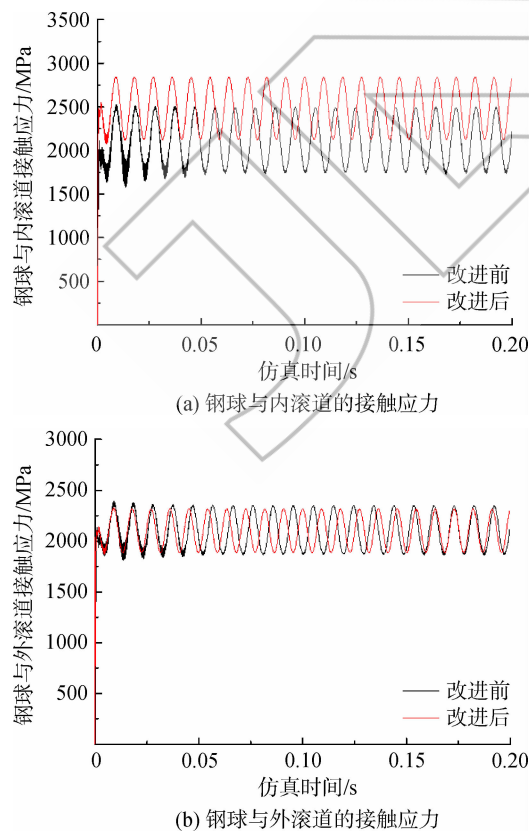


图 6 钢球与滚道的接触应力

Fig. 6 Contact stress between steel ball and raceways

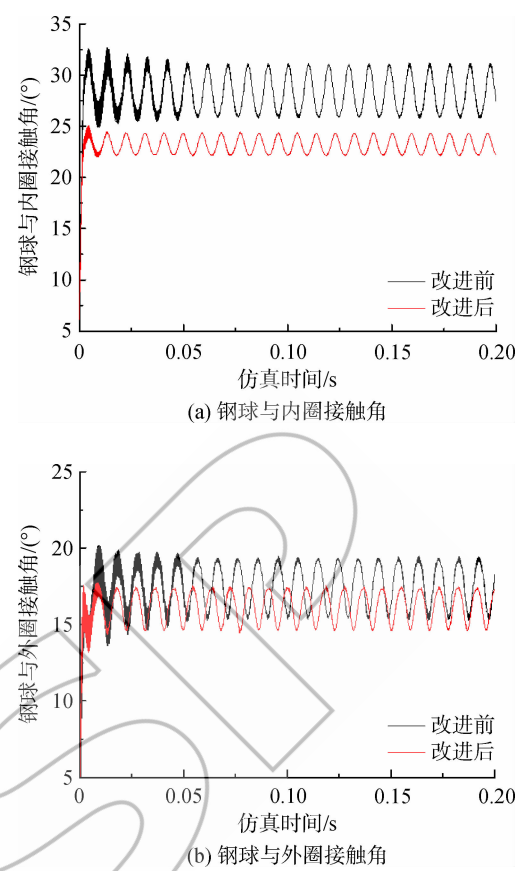


图 7 钢球与滚道的接触角

Fig. 7 Contact angle between steel ball and raceways

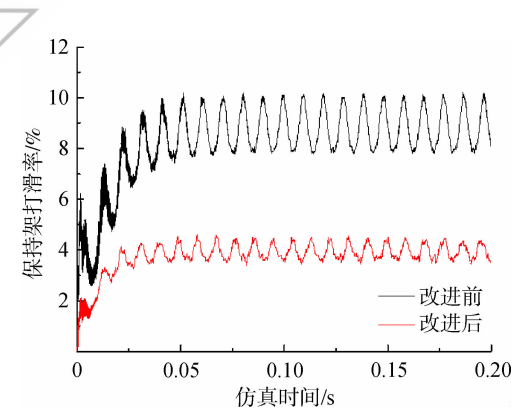


图 8 保持架打滑率

Fig. 8 Cage slip ratio

由图 6 和图 7 可知:在轴承结构参数改进后,钢球与外滚道的接触应力相当,而内接触应力增大,但均不大于 2 800 MPa,满足该类型轴承的设计原则。内接触角大大降低,由于轴承高速运转时,钢球“外抛”严重,内接触角较大,外接触角较小,通过改变结构参数使得内接触角减小,避免钢球在高速时出现爬坡现象。

由图 8 和图 9 可知:轴承改进后,保持架打滑率由 10%下降到 4%,保持架质心由混乱运动转变

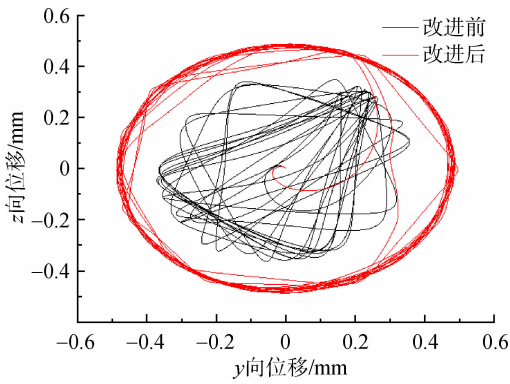
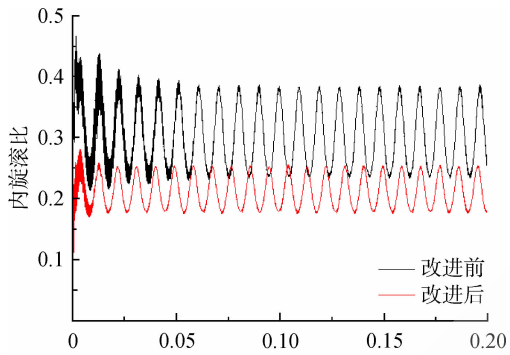
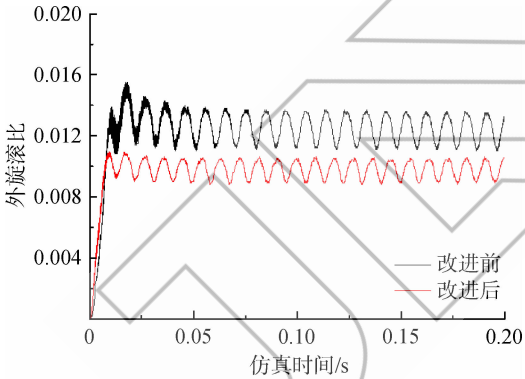


图 9 保持架质心轨迹

Fig. 9 Orbit trajectory of cage's centroid



(a) 内旋滚比



(b) 外旋滚比

图 10 钢球旋滚比

Fig. 10 Ratio of spin and rolling of ball

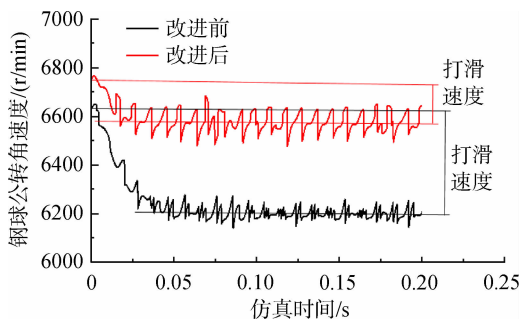


图 11 钢球公转速度

Fig. 11 Revolution velocity of steel ball

为在狭窄的区域范围内涡动,表明保持架运行稳定。

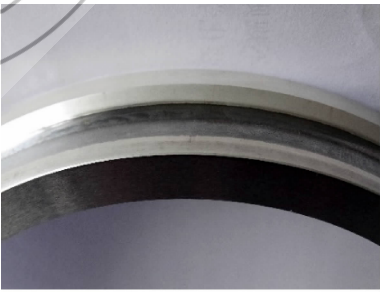
由图 10 和图 11 可知:轴承改进后,钢球旋滚比和打滑速度均降低,轴承摩擦发热减小,钢球运转稳定提高。

3 试验验证

采用图 1 所示的试验装置对改进后三点接触球轴承进行试验,试验过程中未出现试验机振动异常的现象,通过性能试验考核,试验后对轴承进行拆解和目视检查,如图 12 所示。



(a) 试验后改进轴承的钢球外观



(b) 试验后改进轴承的滚道外观



(c) 试验后改进轴承的保持架外观

图 12 试验后改进轴承的表面外观

Fig. 12 Surface appearance of improved bearing after experiment

从图 12 可知:钢球表面光亮,未出现较深灰色或彩色环带和局部交叉旋转环带,内圈滚道运转轨迹银层磨损均匀,保持架外引导面无明显磨损痕迹。说明轴承的改进方案有效避免了轴承钢球的定轴旋转,减小了保持架与外圈引导面的滑动磨损,验证了改进方案和轴承仿真分析结果的正确性。

4 结 论

在进行某液体火箭发动机涡轮泵用三点接触球轴承故障机理分析基础上,对轴承关键结构参数进行了改进,使用 SARB 轴承动力学分析软件对改进前后轴承的性能参数进行了对比分析,轴承结构参数改进后,内接触角减小,保持架打滑率由 10% 下降到 4%,钢球旋滚比和打滑速度均降低,钢球和保持架运转稳定提高。对改进后的轴承进行了试验研究,成功排除了该类型轴承钢球环带和保持架引导面严重磨损的故障,验证了轴承改进方案和轴承动力学仿真分析结果的正确性,为液体火箭发动机涡轮泵球轴承的性能评估和排故提供了有效的技术工具。

参考文献:

[1] 刘士杰,梁国柱. 航天飞机主发动机高压燃料涡轮泵的故障模式[J]. 航空动力学报,2015,30(3):611-626.
LIU Shijie,LIANG Guozhu. Failure modes of space shuttle main engine high-pressure fuel turbopump[J]. Journal of Aerospace Power,2015,30(3):611-626. (in Chinese)

[2] 侯金丽,金平,蔡国飙. 基于模糊故障树和因子化分析的重复使用火箭发动机失效模式[J]. 航空动力学报,2014,29(4):987-992.
HOU Jinli,JIN Ping,CAI Guobiao. Failure mode of reusable rocket engine based on fuzzy fault tree and factor analysis[J]. Journal of Aerospace Power,2014,29(4):987-992. (in Chinese)

[3] WILSON W A,MARTIN K B,BRENNAN J A,et al. Evaluation of ball bearing separator materials operating submerged in liquid nitrogen[J]. ASLE(Association for the Study of Literature and Environment) Transactions,1961,4(1):50-58.

[4] HERBERT W S,WILLIAM J A. Evaluation of ball-bearing performance in liquid hydrogen at dn values to 1.6 million[J]. Tribology Transactions,1962,5(1):220-232.

[5] NOSAKA M. Tribo-characteristics of self-lubricating ball bearings for the LE-7 liquid hydrogen rocket-turbopump[J]. Tribology Transactions,1993,36(3):432-442.

[6] NOSAKA M,OIKE M,KIKUCHI M,et al. Self-lubricating performance and durability of ball bearings for the LE-7 liquid oxygen rocket-turbopump[J]. Lubrication En-

gineering,1993,49(9):677-688.

[7] NOSAKA M,OIKE M,KIKUCHI M,et al. Evaluation of durability for cryogenic high-speed ball bearings of LE-7 rocket turbopumps[J]. Lubrication Engineering,1996,52(3):221-233.

[8] NOSAKA M,KIKUCHI M,OIKE M,et al. Tribo-characteristics of cryogenic hybrid ceramic ball bearings for rocket turbopumps;bearing wear and transfer film[J]. Tribology Transactions,1999,42(1):106-115.

[9] NOSAKA M,KIKUCHI M. Effects of iron fluoride layer on durability of cryogenic high-speed ball bearings for rocket turbopumps[J]. Tribology Transactions,2000,43(2):163-174.

[10] NOSAKA M,TAKADA S,KIKUCHI M,et al. Ultra-high-speed performance of ball bearings and annular seals in liquid hydrogen at up to 3 million DN (120,000 rpm)[J]. Tribology Transactions,2004,47(1):43-53.

[11] SUBRAMONIAN B,KATO K,ADACHI K,et al. Experimental evaluation of friction and wear properties of solid lubricant coatings on SUS440C steel in liquid nitrogen[J]. Tribology Letters,2005,20(3/4):263-272.

[12] MASATAKA N. Cryogenic Tribology of high-speed bearings and shaft seals in liquid hydrogen[J]. Tribology Online,2011,6(2):133-141.

[13] SERVAIS C,BOZET J L,KREIT P,et al. Experimental validation of a thermal model of a LOX flooded ball bearing[J]. Tribology International,2014,80:71-75.

[14] SOLJI R,BOKSEONG C,JEONKOOK L,et al. Correlation between friction coefficient and sound characteristics for cage instability of cryogenic deep groove ball bearings[R]. Cham,Switzerland: the 9th IFToMM International Conference on Rotor Dynamics,2015.

[15] BOKSEONG C,JEONKOOK L,DOYOUNG J,et al. Numerical study of cage dynamics focused on hydrodynamic effects of guidance land clearances for different ball-pocket clearances in cryogenic environments[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power,2017,140(4):042502.1-042502.11.

[16] BOKSEONG C,JEONKOOK L,DOYOUNG J,et al. Experimental study on dynamic behavior of ball bearing cage in cryogenic environments;Part I effects of cage guidance and pocket clearances[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2019,115:545-569.

[17] BOKSEONG C,WONIL K,DOYOUNG J,et al. Experimental study on dynamic behavior of ball bearing cage in cryogenic environments;Part II effects of cage mass imbalance[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2019,116:25-39.

[18] GUPTA P K,GIBSON H G. Real-time modeling of thermal interactions in cryogenic ball bearings[R]. NASA Technical Reports Server,NTRS 20190001244,2019.

[19] KWAK W,LEE J,LEE Y B. Theoretical and experimental approach to ball bearing frictional characteristics compared

with cryogenic friction model and dry friction model[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 124(1): 424-438.

[20] MIAO X S, HU M, LI A M, et al. Investigation on the lubricity of self-lubricating ball bearings for cryogenic turbine pump[J]. Tribology International, 2018, 121: 45-53.

[21] 古乐, 王黎钦, 李秀娟. 超低温氢氧泵轴承技术研究及进展[J]. 中国机械工程, 2002, 13(7): 620-623.

GU Le, WANG Liqin, LI Xiujuan. Study and review of liquid hydrogen/oxygen turbo-pump cryogenic bearing technology[J]. China Mechanical Engineering, 2002, 13(7): 620-623. (in Chinese)

[22] 马美玲, 邓四二, 梁波, 等. 火箭发动机低温轴承的设计[J]. 轴承, 2006(6): 13-15.

MA Meiling, DENG Sier, LIANG Bo, et al. Design of lower temperature bearings in rocket engine[J]. Bearing, 2006(6): 13-15. (in Chinese)

[23] 李鸿亮, 张旭, 马美玲, 等. 低温高速球轴承钢球环带分析[J]. 轴承, 2011(3): 29-30.

LI Hongliang, ZHANG Xu, MA Meiling, et al. Analysis on circumferential belt of steel balls for high-speed ball bearings under low temperature[J]. Bearing, 2011(3): 29-30. (in Chinese)

[24] 周琼, 李正美, 张而耕. 涡轮泵轴承寿命预测及研究进展[J]. 应用技术学报, 2017, 17(4): 352-357.

ZHOU Qiong, LI Zhengmei, ZHANG Ergeng. Review on the turbopump bearing life prediction[J]. Journal of Technology, 2017, 17(4): 352-357. (in Chinese)

[25] 刘洪杰, 吴霖, 刘洋, 等. 玻璃布 PTFE 复合保持架在高速液氢轴承中的应用[J]. 低温工程, 2018(1): 53-55.

LIU Hongjie, WU Lin, LIU Yang, et al. Application of resin PTFE retainer reinforced with laminated glass cloth in ultra-speed cryogenic bearings[J]. Cryogenics, 2018(1): 53-55. (in Chinese)

[26] 邓四二, 杨海生, 王恒迪, 等. 轴承动力学分析软件: 2014SR188383[P]. 2015-07-31.

(编辑: 王碧琚)