

空间环境因素对涂层型自润滑关节 轴承磨损寿命影响规律及机理

魏澳博^{1,2a}, 马国政^{2a}, 李国禄¹, 雍青松³,
郭伟玲^{2a}, 邢志国^{2a}, 王海斗^{2a,2b}

(1.河北工业大学 材料科学与工程学院, 天津 300130; 2.陆军装甲兵学院 a.装备再制造技术国防科技重点实验室 b.机械产品再制造国家工程研究中心, 北京 100072;
3.中国空气动力研究与发展中心 设备设计与测试技术研究所, 四川 绵阳 621000)

摘要: **目的** 探究典型空间环境因素对涂层型自润滑关节轴承寿命的影响。**方法** 通过非平衡磁控溅射技术在 GE17 型关节轴承表面沉积了 H-DLC (含氢类金刚石) 薄膜, 并使用自主研发的关节轴承磨损试验机, 分别在大气、真空、原子氧侵蚀、紫外辐照 4 种环境下, 对关节轴承进行了全寿命试验, 通过扫描电子显微镜和白光三维轮廓仪等仪器, 对关节轴承内外圈磨痕进行了表征。**结果** 在不同环境下关节轴承磨损过程中的摩擦扭矩信号和摩擦面温度信号都可以作为轴承磨损失效的物理信号, 但是温度信号的突变点要早于扭矩信号; 在大气、真空、原子氧侵蚀、紫外辐照 4 种环境下, 关节轴承平均磨损寿命分别为 87.48、30.55、17.06、29.37 h, 轴承在 4 种环境下都主要发生黏着磨损和磨粒磨损, 在原子氧侵蚀后的轴承还存在一定的氧化磨损。此外, 轴承内圈磨损比轴承外圈更加严重, 轴承外圈更容易吸附大量球状磨屑。**结论** 真空环境导致轴承内外圈产生的摩擦热不能快速排出, 因此轴承摩擦接触面温度较高, H-DLC 薄膜性能下降, 导致轴承磨损寿命大幅度降低, 原子氧侵蚀会导致 H-DLC 薄膜部分氧化分解, 在原子氧侵蚀后轴承磨损寿命进一步降低, 而紫外辐照对轴承磨损寿命影响不大。

关键词: 空间环境; H-DLC 薄膜; 关节轴承; 自润滑; 磨损寿命; 磨损机制

中图分类号: TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2022)11-0010-10

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.11.002

Spatial Environmental Factors on the Wear Life of Coated Self-lubricating Joint Bearings Influence Law and Mechanism

WEI Ao-bo^{1,2a}, MA Guo-zheng^{2a}, LI Guo-lu¹, YONG Qing-song³,
GUO Wei-ling^{2a}, XIN Zhi-guo^{2a}, WANG Hai-dou^{2a,2b}

收稿日期: 2022-07-27; 修订日期: 2022-10-17

Received: 2022-07-27; Revised: 2022-10-17

基金项目: 国家自然科学基金 (52122508、52005511、51905533)

Fund: The National Natural Science Foundation of China (52122508, 52005511, 51905533)

作者简介: 魏澳博 (1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为摩擦学、表面工程。

Biography: WEI Ao-bo (1997-), Male, Postgraduate, Research focus: surface engineering.

通讯作者: 王海斗 (1969—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为再制造工程、表面工程。

Corresponding author: WANG Hai-dou (1969-), Male, Doctor, Researcher, Research focus: remanufacturing engineering, surface engineering.
引文格式: 魏澳博, 马国政, 李国禄, 等. 空间环境因素对涂层型自润滑关节轴承磨损寿命影响规律及机理[J]. 表面技术, 2022, 51(11): 10-19.

WEI Ao-bo, MA Guo-zheng, LI Guo-lu, et al. Spatial Environmental Factors on the Wear Life of Coated Self-lubricating Joint Bearings Influence Law and Mechanism[J]. Surface Technology, 2022, 51(11): 10-19.

(1. School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China; 2. a. Key Laboratory of National Defense Science and Technology of Equipment Remanufacturing Technology, b. National Engineering Research Center for Mechanical Product Remanufacturing, Army Academy of Armored Forces, Beijing 100072, China; 3. Facility Design and Instrumentation Institute of China Aerodynamics Research and Development Center, Sichuan Mianyang 621000, China)

ABSTRACT: Self-lubricating joint bearings have replaced traditional ball bearings in some weapons and equipment, aerospace, large water conservancy equipment and other fields because of their strong load-bearing capacity, simple structure, no regular lubrication, high reliability and other advantages. In recent years, with the rapid development of aerospace technology, aerospace vehicles have increasingly high performance requirements for self-lubricating joint bearings. At present, a type of self-lubricating joint bearings with self-lubricating coating as wear-reducing lubricating material has attracted the attention of researchers and has been extensively researched.

In this study, the GE17 type joint bearing produced by Fujian Longxi Bearing Co., Ltd. is used as the research object. The self-lubricating material is selected as hydrogen-containing diamond-like film, and the preparation process is non-equilibrium magnetron sputtering technology, and the inner and outer rings of the bearing are coated separately, and then the inner and outer rings of the bearing are assembled together by professional equipment. The self-lubricating joint bearing wear life test device is used with MST-1 multi-functional vacuum friction and wear tester to realize the wear life test of self-lubricating joint bearing with coupled space environment factors. The full-life wear test was conducted in four environments: atmosphere, vacuum, atomic oxygen erosion and ultraviolet irradiation, respectively, during which the vacuum was no greater than 10^{-4} Pa, the atomic oxygen and ultraviolet test parameters were: atomic oxygen energy 5 eV, flux density $\geq 2.0 \times 10^{15}$ atoms/(cm²·s), ultraviolet irradiation intensity 5 solar constants, and irradiation time 12 h. The measured the operating parameters of the bearings were: oscillation angle $\pm 15^\circ$, oscillation frequency of 2 Hz, radial load of 150 N. At the end of the test, the wear marks of the inner and outer rings of the joint bearings with wear loss under different environments were characterized by means of a swept electron microscope and a white light three-dimensional profiler.

It was found that both the friction torque signal and the friction surface temperature signal during the wear process of the joint bearing in different environments can be used as the physical signal of the bearing wear loss, but the abrupt change point of the temperature signal is earlier than the torque signal; the average wear life of the joint bearing in the four environments of atmosphere, vacuum, atomic oxygen erosion and UV irradiation were 87.48 h, 30.55 h, 17.06 h and 29.37 h. Adhesive wear and abrasive wear mainly occurred in all four environments, and some oxidation wear also existed in the bearings after atomic oxygen erosion. In addition, the inner ring of the bearing wears more seriously than the outer ring of the bearing, and the outer ring of the bearing is more likely to adsorb a large amount of spherical abrasive chips. Therefore, it is concluded that the frictional heat generated by the inner and outer rings of the bearing cannot be discharged quickly due to the vacuum environment, so the temperature of the frictional contact surface of the bearing is higher and the performance of the H-DLC film decreases, which leads to a significant decrease in the bearing wear life. UV irradiation has little effect on bearing wear life.

KEY WORDS: space environment; H-DLC film; joint bearing; self-lubrication; wear life; wear mechanism

自润滑关节轴承是一种特殊的滑动轴承, 主要由轴承外圈、轴承内圈和内外圈之间的自润滑材料组成, 由于其承载能力强、结构简单、无需定期润滑、可靠性高等优点, 目前已经在一些航天运动部件(如太阳能展开机构、天线、门锁机构、机械臂、着陆器等)取代了传统的滚珠轴承^[1-3]。按所用自润滑材料, 自润滑关节轴承可分衬垫型自润滑关节轴承和涂层型自润滑关节轴承两类。其中, 衬垫型自润滑关节轴承因其高承载能力以及高频重载适应性强而被广泛应用于各类飞机^[4-6]。但是, 对于航天领域, 高分子自润滑衬垫材料在受到原子氧、紫外等射线作用后, 易发生降解挥发, 导致轴承快速磨损失效, 危害航天

器运行可靠性^[7-9]。随着航天事业的快速发展, 研究人员越来越关注如何在苛刻的航天环境(高真空、原子氧侵蚀、紫外辐射、宽温域等)下实现关键运动部件的高服役可靠性和长寿命。因此, 一种以 MoS₂、新型碳膜、软金属涂层等为自润滑材料的涂层型自润滑关节轴承引起了研究人员的关注, 并对其进行了广泛研究。

Qiu 等^[10-13]对以 MoS₂ 涂层为自润滑材料的关节轴承进行了大量研究, 其通过在 MoS₂ 涂层中加入石墨、稀土氧化物、PTFE 织物、石墨烯等材料, 对 MoS₂ 涂层进行改性, 并都制备到了关节轴承内外圈表面, 直接进行关节轴承零件级的磨损寿命试验。研

究发现,当石墨与 MoS_2 比例为 3:1 时,得到的自润滑关节轴承磨损寿命最佳,涂层结合力也最优; La_2O_3 和 CeO_2 等稀土氧化物可以抑制 MoS_2 涂层摩擦过程中的氧化,在摩擦过程中可以很好地形成转移膜,提升轴承磨损寿命。Liu 等^[14]以 Mn-P 涂层为自润滑材料的关节轴承为研究对象,通过全寿命和分阶段的磨损寿命试验,研究了涂层型自润滑关节轴承的损伤和失效的演变过程,研究发现摩擦面温升和摩擦扭矩可以作为涂层型自润滑关节轴承磨损失效的判据,并且讨论了摩擦扭矩的变化与轴承不同磨损阶段的对应关系。但是,目前的这些研究并没有针对航天条件下服役的自润滑关节轴承,首要原因在于,国内目前还没有可以实现耦合太空环境因素的关节轴承摩擦磨损试验机,因此无法在进行自润滑关节轴承磨损寿命试验时耦合典型空间环境因素。

本研究中选择关节轴承为福建龙溪轴承有限公司生产的 GE17 型关节轴承,自润滑材料选择含氢类金刚石薄膜(H-DLC),制备工艺为非平衡磁控溅射技术,在轴承内外圈分别镀膜。首先利用自主设计研发的一台自润滑关节轴承磨损寿命试验装置,并与目前已有的 MSTS-1 型多功能真空摩擦磨损试验机^[15]相结合,实现了在地面模拟太空环境下服役的自润滑关节轴承磨损寿命试验。然后使用该设备进行了大气、真空、原子氧侵蚀和紫外辐照 4 种环境下的自润滑关节轴承磨损寿命试验,进行了轴承的全寿命试验,使用摩擦扭矩和摩擦面接触温升作为轴承运行状态的主要判据。试验结束对轴承内外圈磨痕进行了扫描电子显微镜分析、能量色散 X 射线光谱分析等微观表征,以探究不同环境下轴承失效机理。

1 试验

1.1 薄膜制备

DLC 薄膜制备工艺为非平衡磁控溅射技术,设备为中科院兰州化学物理研究所的非平衡磁控溅射系统(UPD650-4, Teer, UK),为了增加 DLC 薄膜与轴承基体的结合力,同时降低 DLC 薄膜的残余应力、提高薄膜韧性,设计了一种由纯 Cr 层的结合层、Cr-C 和 Cr-H-DLC 的过渡层以及 H-DLC 的功能层,三层结构组成的含氢类金刚石薄膜(H-DLC)体系,在之前的研究中已经在 GCr15 试样片上成功制备了上述 H-DLC 薄膜,并对该薄膜体系进行了详细说明及性能测试^[16],这里不再赘述。以下重点介绍关节轴承上 H-DLC 薄膜的沉积过程。

试验中使用的 GE17 型关节轴承其结构尺寸如图 1a 所示,在镀膜前,关节轴承内外圈是没有装配到一起的。首先,将关节轴承内外圈放在石油醚和无水乙醇溶液中超声清洗 20 min,以去除表面吸附的油渍和污染物,然后将清洗好的轴承内外圈装进夹具中

(如图 1b、图 1c 所示),放入设备样品室中,将样品室抽真空至 10^{-3} Pa,然后通入 Ar 等离子体轰击样品表面 20 min,进一步去除轴承表面的杂质和氧化物,下一步准备沉积薄膜。

在非平衡磁控溅射系统中放置 3 块靶材,分别是 2 块石墨靶和 1 块铬靶,通过控制不同靶材的沉积偏压,制备出多层结构的 DLC 薄膜,详细沉积参数如表 1 所示。同时,在系统中通入的异丁烷(C_4H_{10})气体,是 H-DLC 薄膜中 H 元素的来源。薄膜沉积完成后,再经由专用的关节轴承装配设备^[17],将关节轴承内外圈装配到一起,就构成了一套自润滑关节轴承成品(如图 1d 所示)。

1.2 辐照试验

采用自主研发的 MSTS-1 型多功能真空摩擦磨损试验机配套的原子氧侵蚀(AO erosion)系统^[18]和紫外辐照(UV irradiation)系统^[19]对关节轴承进行地面模拟太空原子氧和紫外辐照试验。由于关节轴承内圈为凸表面,便于实施辐照试验,因此,辐照试验只将关节轴承内圈暴露,对内圈上的 H-DLC 薄膜进行辐照。试验参数为:真空度 10^{-4} Pa,原子氧能量 5 eV,通量密度 $\geq 2.0 \times 10^{15}$ atoms/($\text{cm}^2 \cdot \text{s}$),紫外辐照强度 5 个太阳常数,原子氧和紫外辐照时间 12 h。辐照试验结束后将关节轴承真空保存,以进行下一步磨损寿命试验。

1.3 磨损寿命测试

自主研发设计了一套关节轴承磨损寿命试验装置^[20],该装置最大特点是体积小,可以放入 MSTS-1 型多功能真空摩擦磨损试验机的真空室中,进而实现关节轴承磨损寿命测试同典型空间环境因素的耦合试验。而且,该装置可同时检测关节轴承磨损过程中的摩擦扭矩和摩擦温升 2 种信号,在笔者之前的研究中发现这 2 种信号可以作为关节轴承失效的物理标准^[21]。利用该试验装置,对被测自润滑关节轴承(以下简称“被测轴承”)分别进行大气、真空、真空+原子氧、真空+紫外 4 种环境下的磨损寿命试验。被测轴承的运动形式是旋转摆动,摆动角度为 $\pm 15^\circ$,摆动频率为 2 Hz,同时还施加了 150 N 的径向载荷。每种环境下进行至少 3 组重复试验,取最为典型的一组数据用作分析。

1.4 结构形貌表征

通过原子力显微镜(Dimension Icon, BRUKER, GER)和场发射扫描电子显微镜(GeminiSEN 300, ZEISS, GER)对沉积在关节轴承内圈的 H-DLC 薄膜表面形貌进行表征。通过扫描电镜对被测轴承内外圈磨痕形貌进行表征,同时使用该设备配备的能谱仪对不同区域元素组成以及元素含量进行定量分析。使用

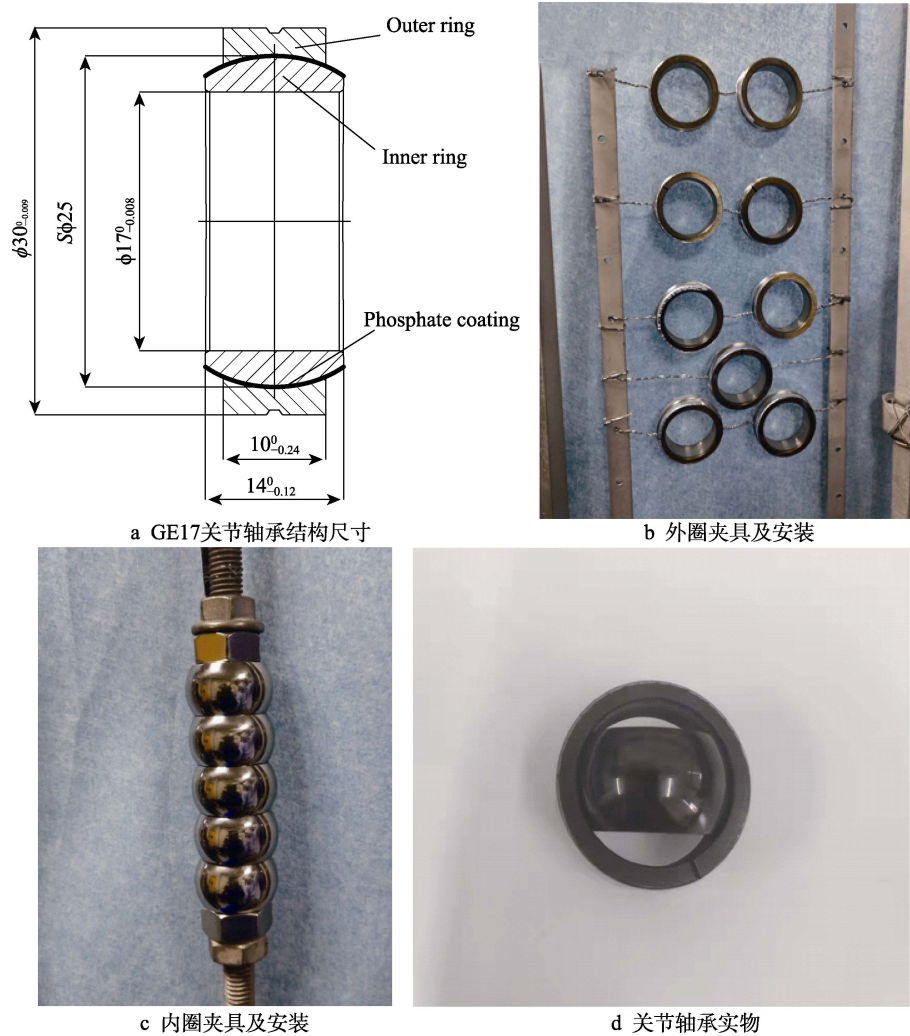


图 1 GE17 型关节轴承结构示意图、镀膜前实物以及镀膜后实物图
Fig.1 Schematic diagram of GE17 spherical plain bearing structure, before coating and after coating: a) GE17 spherical plain bearing structure dimensions; b) clamping and installation of outer ring; c) inner ring clamp and installation; d) joint bearing

表 1 H-DLC 薄膜沉积参数
Tab.1 H-DLC films deposition parameters

Films	Substrate bias voltage/V	Target current/A	Deposition time/min	C ₄ H ₁₀ gas flow/(mL·min ⁻¹)
Cr	-70	Cr:3.0	10	0
C/Cr		C:0→0.35 Cr:3→1.5	10	
Cr/a:C-H		C:3.5 Cr:1.5→0	10	16
H-DLC		C:3.5	420	16

白光干涉仪 (Counter GT-X, Bruker, GER) 表征轴承内外圈磨痕三维形貌。采用激光拉曼光谱仪 (LabRAM HR Evolutio, HORIBA, JPN) 对辐照前后 H-DLC 薄膜的结构进行分析表征, 还对轴承内圈磨痕进行拉曼测试分析, 测试所用激光器激发波长为 532 nm, 扫描范围为 1 000~2 000 cm⁻¹。

2 结果与分析

图 2a 为关节轴承内圈表面 H-DLC 薄膜的表面扫描电镜图像以及原子力显微镜表征结果。从表面 SEM 图像可以看到, H-DLC 薄膜的表面由菜花状颗粒紧密聚集。图 2c 为原子力显微镜观察到薄膜三维形貌, 可以发现薄膜表面颗粒分布均匀、排列致密, 无明显大颗粒, 同时测得表面粗糙度 R_a 和 R_q 的值分别为 7.73 nm 和 6.05 nm, 说明薄膜沉积状态良好, 表面光滑, 粗糙度很低。图 2b 为关节轴承内圈表面 H-DLC 薄膜的拉曼光谱测试结果, 对得到的拉曼谱线进行高斯分峰拟合, 可以得到 2 个峰, 分别是在 1 380 cm⁻¹ 附近的 D 峰和在 1 560 cm⁻¹ 附近的 G 峰, 分别对应 DLC 薄膜中芳环的呼吸振动模式和芳环或烯链中 sp² 位点的拉伸振动模式^[22]。分峰拟合后还可以得到 D 峰与 G 峰的强度比 (I_D/I_G)、峰位置和半高宽等信息, 这些信息可以有效地反映薄膜内部键结构。

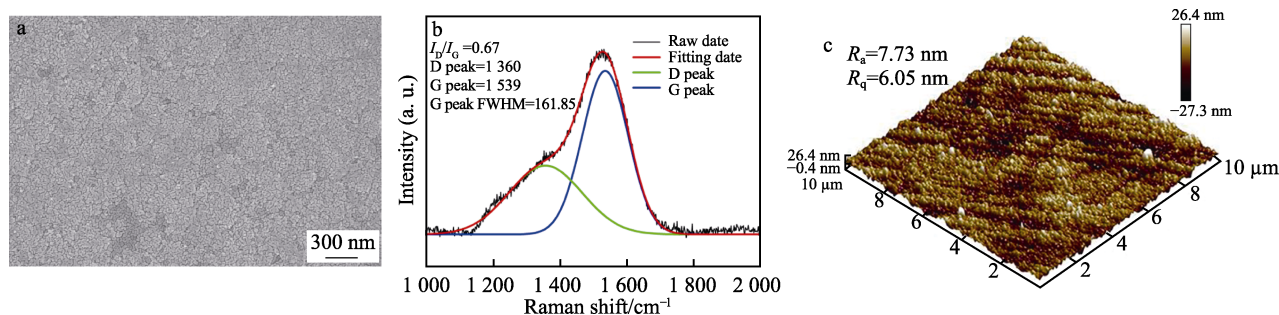
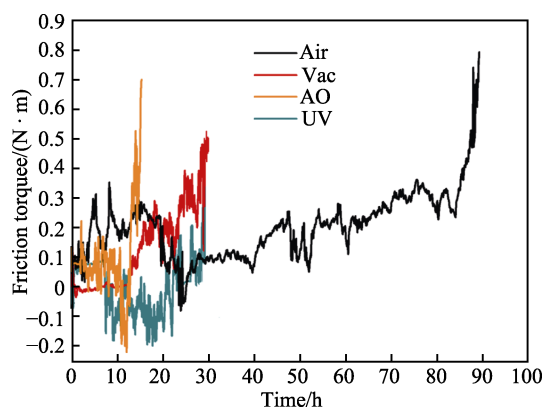
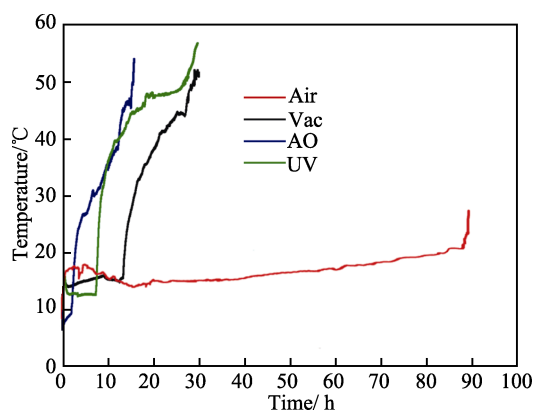


图2 关节轴承内圈 H-DLC 薄膜表面形貌及薄膜拉曼光谱

Fig.2 Surface morphology and Raman spectra of H-DLC films on the inner ring of the joint bearing

根据上文所述,自主研发关节轴承磨损寿命试验机可以采集被测轴承在磨损过程中的摩擦温度和摩擦扭矩信号,当被测轴承扭矩或温度信号突然提高时,即判定该测试轴承磨损失效。图3、图4为在大气、真空、原子氧和紫外4种环境下,被测轴承的摩擦扭矩和接触面温度随时间的变化曲线。其中,温度曲线上的数值是已经将环境温度减去,目的是只考虑摩擦接触面的摩擦温升。

图3 4种环境下被测轴承摩擦扭矩随时间的变化曲线
Fig.3 Frictional torque versus time curve of the measured bearing under four environments图4 4种环境下被测轴承摩擦接触面温度随时间的变化曲线
Fig.4 Temperature variation curve of the frictional contact surface of the tested bearing under four environments with time

自润滑关节轴承的摩擦过程可分为磨合期、稳定期和失效期3个阶段^[23]。从图3所示的摩擦扭矩变化曲线来看:在大气环境下磨损的被测轴承,在前20 h为轴承磨损的磨合期,在20~85 h为轴承的稳定期,在85~90 h为轴承的失效期;在真空环境下磨损的轴承,具有很短的磨合期,只有0.5 h左右,在磨损的前13 h,摩擦扭矩数值都十分平稳,在13~22 h内,摩擦扭矩数值波动变大,在22 h左右位置摩擦扭矩再次上升,到28 h左右,摩擦扭矩上升到0.6 N·m,此时可以判定被测轴承已经失效;经过原子氧侵蚀的被测轴承没有明显的磨合期,并且摩擦扭矩仅在前2 h左右内保持平稳状态,随后摩擦扭矩就开始大幅度的波动,到12 h左右摩擦扭矩开始快速提高,到15 h左右时,摩擦扭矩发生突变,判定该轴承失效;经过紫外辐照的被测轴承的磨合期也只有0.5 h左右,摩擦扭矩在前6 h内保持平稳状态,这个时间是介于真空和原子氧侵蚀之间的,随后摩擦扭矩开始大幅度的波动,到27 h左右摩擦扭矩开始快速提高。

从图4所示摩擦接触面温度随时间变化曲线也可以看出:在大气环境下磨损的被测轴承,前17 h内温度先上升后下降,此段时间为磨合期;在17~88 h期间,摩擦面温度呈线性上升,此阶段为稳定期;在88~90 h,摩擦接触面温度突然剧烈上升,此阶段是失效期;在真空环境下磨损的轴承,前15 h内摩擦面温度升高幅度很小,在15 h后,摩擦面温度突然快速升高,到27 h左右,摩擦温度升高速率再次增大,试验停止时轴承接触面温度已经升高到54 °C,而在大气环境下这一数值是25 °C;经原子氧侵蚀后的被测轴承,在前2 h内,接触面温度只是小幅度上升,在2~15 h内,接触面温度迅速上升,到摩擦试验进行15 h时,摩擦接触面温度就已经升高到了50 °C左右;经紫外辐照后的被测轴承,在试验的前6 h内,温度基本保持不变;达到6 h后,温度开始呈指数上升;到12 h左右,摩擦温升速率又有所降低,在28 h左右,摩擦面温度再次呈指数上升,在30 h左右摩擦接触面温度已经升高到了58 °C左右。

可以看出,在4种不同环境下,摩擦面接触温度和摩擦扭矩2种信号都可以作为衡量被测轴承磨损

失效的指标, 但是温度信号比摩擦扭矩信号更加敏感, 因为在不同环境下, 温度信号的磨合期、稳定期和失效期的变换点都要早于扭矩信号。表 2 为被测轴承在 4 种环境下的平均磨损寿命, 在大气环境下被测轴承的磨损寿命最长, 而随后的 3 种环境中, 共同的特征是都在高真空环境下, 被测轴承磨损寿命大幅度下降, 其中在经过原子氧侵蚀后的被测轴承的磨损寿命进一步下降, 经紫外辐照后的被测轴承摩擦扭矩稳定期较短, 但是轴承磨损寿命与在单纯真空环境下测试的轴承的磨损寿命没有明显差距, 即: 真空环境会明显降低被测轴承的磨损寿命, 原子氧侵蚀会进一步降低轴承磨损寿命, 而紫外辐照对被测轴承磨损寿命影响不大。

表 2 4 种环境下被测轴承的平均磨损寿命
Tab.2 Average wear life of the tested bearings under four environments

Atmosphere	Vacuum	AO	UV
87.48 h	30.55 h	17.06 h	29.37 h

在真空环境下, 轴承内外圈摩擦产生的热量不易排出, 导致在摩擦接触面形成了不稳定的高温温度场。研究表明, H-DLC 薄膜热力学性能并不稳定, 高温会导致 H-DLC 薄膜性能下降^[24]。因此, 在真空环境下, 被测轴承磨损寿命大幅度下降; 原子氧侵蚀又会严重降低 H-DLC 薄膜的磨损性能^[25-27], 所以被测轴承在经过原子氧侵蚀后, 磨损的稳定期明显变短, 磨损寿命进一步下降, 而紫外辐照对 H-DLC 薄膜磨损性能影响不大^[28-29], 并且紫外辐照对 H-DLC 薄膜的影响仅作用于薄膜表层。随着摩擦的进行, 当被紫外辐照影响的表层材料被磨损排出后, 被测轴承相当于只在真空环境下磨损, 因此, 紫外辐照后的轴承磨损寿命与真空下的相差不大。

图 5 为 4 种环境下被测轴承内圈和外圈的磨损形貌 SEM 表征结果。图 5a、图 5b 是在大气环境下磨损的轴承内外圈, 结合 EDS 点扫描结果, 可以看出: 内圈和外圈磨痕上已经看不到完整的 DLC 薄膜, GCr15 基体大面积暴露, 内圈表面存在大量的球状磨粒, 表面材料随着摩擦力的作用产生了大量的裂纹和塑性变形。外圈表面也存在大量的球状磨粒, 并存在明显的沿运动方向的划痕, 还伴随有大量的断裂分层。可见在大气环境下, 被测轴承的磨损机制主要是黏着磨损和少量的磨粒磨损。图 5c、图 5d 是真空环境下被测轴承内圈磨痕形貌, 在内圈表面上可以观察到大量形状不规则的凸起, 从 EDS 点扫描结果来看, 铁元素是其主要成分, 说明薄膜被磨穿, 并且由于摩擦力作用, 基体发生了严重的塑性变形, 在局部放大图中还可以发现少量的球状磨粒。在外圈的磨痕处, 发现了大量的球状磨粒, 并且成团簇聚集状态, 同时,

在外圈表面可以观察到明显的沿运动方向的划痕, 在真空环境下, 接触面摩擦温度的快速升高, 轴承内外圈摩擦过程中产生的磨屑不能及时排出, 导致大量磨屑黏黏在外圈上, 并发生团簇聚集, 导致轴承发生严重的磨粒磨损, 从而使轴承快速失效。

图 5e、图 5f 是经原子氧侵蚀后磨损失效的被测关节轴承的内圈和外圈磨痕形貌, 从图中可以看出: 内圈表面较为平坦光滑, 可以发现明显的沿运动方向的磨痕和磨损导致的犁沟, 在犁沟高倍数图像中, 还发现了少量的磨屑。从 EDS 测试结果来看, 光滑区域的主要元素也是 Fe 元素, 只有少量的 C 元素, 说明 DLC 薄膜已经被磨穿, 轴承已经完全失效。图 5f 为原子氧侵蚀后被测轴承外圈的磨痕形貌, 不同于真空环境下外圈表面上存在大量的球状磨屑, 经过原子氧侵蚀后的关节轴承外圈表面磨屑形状不规则, 且体积更大, 在原子氧辐照后的外圈上看不见明显的沿运动方向上的磨痕, 在外圈表面还可以发现少量的断裂分层。因为原子氧侵蚀后轴承磨损寿命最短, 磨损进行的时间最短, 因此基体还未发生严重磨损, 黏着磨损和磨粒磨损是主要的磨损机制, 由于原子氧的作用, 磨痕处 O 元素含量较高, 因此还伴随着氧化磨损。

在紫外辐照后, 被测关节轴承内外圈磨损形貌如图 5g、图 5h 所示。在图 5g 所示的内圈的磨痕形貌中可以看到: 内圈表面存在明显的沿运动方向的划痕, 划痕中存在少量的球状磨屑, 表面还可以看到明显的断裂分层, 是磨损导致钢基体发生了塑性变形。在图 5h 中外圈的磨痕形貌与内圈相似, 可以发现明显的沿运动方向上的划痕和一些大尺寸的磨粒, 以及材料的断裂分层, 紫外辐照后关节轴承内外圈的磨损形貌与在真空环境下被测轴承的磨损形貌类似, 主要发生严重的黏着磨损和磨粒磨损。

图 6 为 4 种环境下关节轴承内外圈的磨损三维形貌。图 6a、图 6b 分别为在大气环境下磨损的轴承内圈外圈三维形貌, 可以看到内外圈表面都出现了较深的沟壑, 内圈表面材料的去除程度明显大于外圈, 说明内圈磨损情况比外圈更严重。图 6c、图 6d 分别为被测轴承在真空环境下磨损的轴承内圈外圈三维形貌, 磨损导致轴承内圈表面出现了大量的、较深的、沿运动方向的划痕, 外圈表面相对平整, 但是存在局部凸起, 由上述磨痕的 SEM 图可知, 这些突起可能是球状磨粒的大规模团簇。原子氧侵蚀后被测轴承内外圈磨痕三维形貌如图 6e、图 6f 所示, 与 SEM 测试结果类似, 磨痕较为平整, 无明显突起, 在外圈上可以看到明显沿运动方向的划痕, 并存在少量磨屑团聚。图 6g、图 6h 分别为被测轴承在紫外辐照后磨损的轴承内圈外圈三维形貌, 内外圈表面都存在较深的沟壑, 同样地, 内圈表面磨痕的深度和表面材料的去除都比外圈严重。因此, 不难看出, 在 4 种环境下, 被测轴承内圈的磨损都要比外圈更严重, 内圈材料会

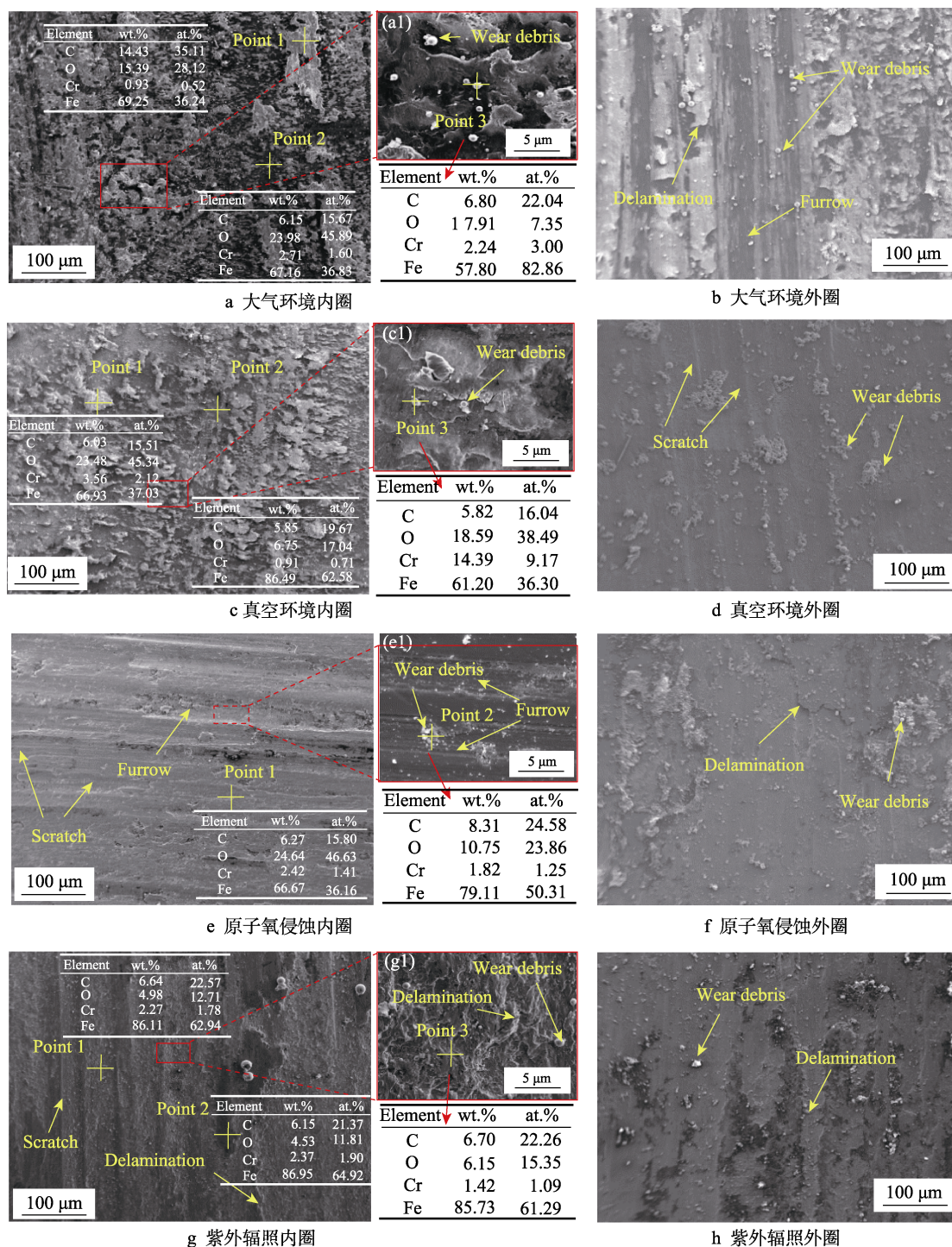


图5 不同环境下关节轴承内外圈的磨损形貌

Fig.5 Wear profile of inner and outer rings of spherical bearings under different environments

在摩擦力作用下向外圈转移, 由于轴承的运动形式(外圈保持相对静止的, 内圈做旋转摆动), 以及摩擦热的作用, 在外圈表面更容易吸附磨屑, 这些磨屑不易从内外圈间隙排出, 并发生聚集, 从而加剧内圈磨损, 导致内圈表面产生较深的磨痕。

为了进一步分析原子氧侵蚀和紫外辐照对关节轴承内圈上 H-DLC 薄膜磨损作用机制, 对内圈磨痕处进行拉曼光谱表征, 结果如图 7a 所示; 对光谱进

行高斯洛伦兹拟合, 计算结果如图 7b 所示。对比图 2b 所示薄膜的原始拉曼光谱, 可以看到: 磨损后薄膜的 I_D/I_G 值变大, I_D/I_G 值可以间接反映薄膜中 sp^2 杂化键和 sp^3 杂化键的相对比例, I_D/I_G 值增大说明在磨损过程中发生了 sp^3 杂化键向 sp^2 杂化键的转变^[30,31], 也就是说在摩擦过程中, 大量的 sp^3C-H 、 sp^3C-C 键被打断, 在薄膜内应力作用下, 又重新组合形成更多的 $sp^2C=C$ 、 $sp^2C=O$ 键; 同时可以看到磨痕处薄

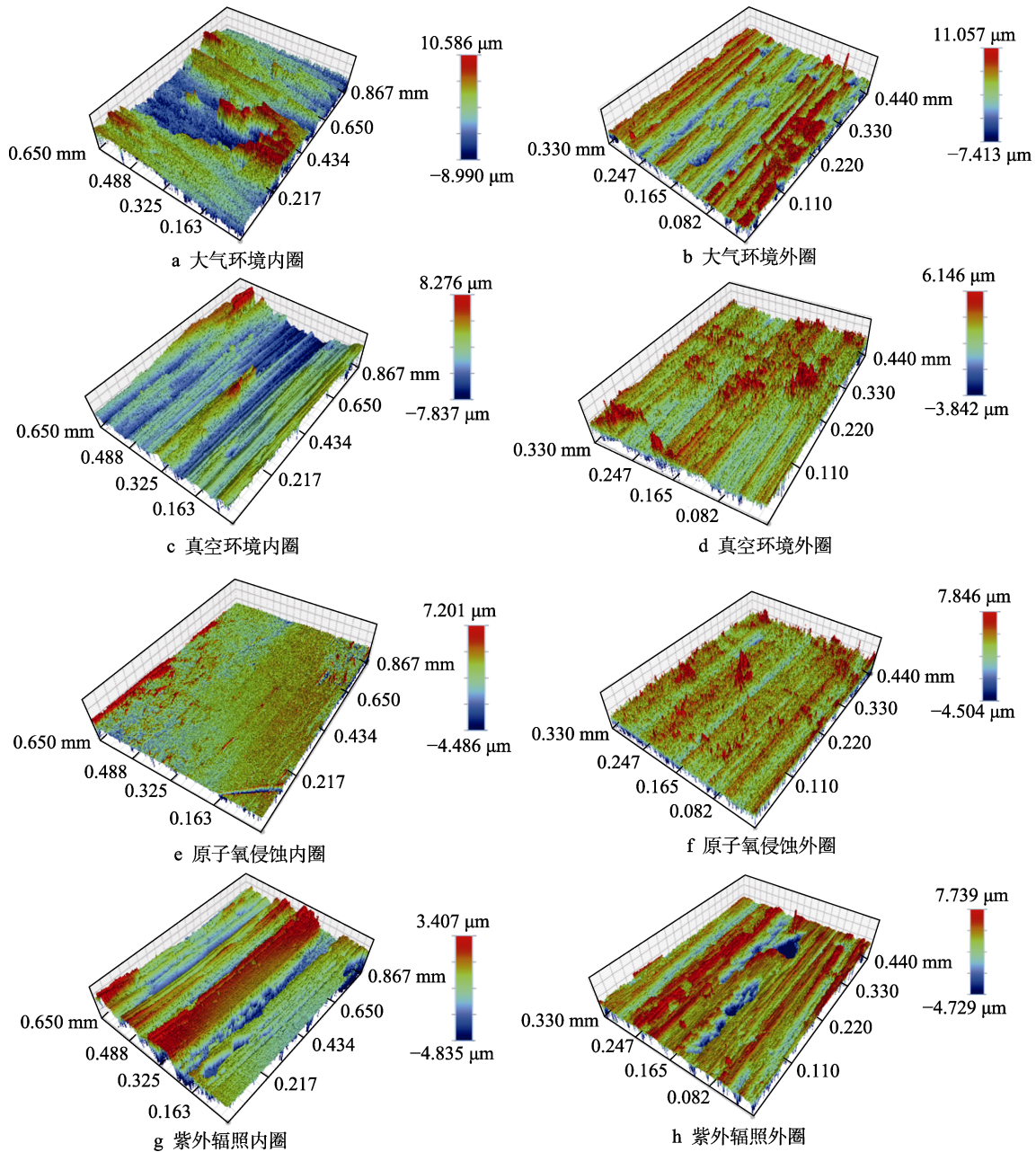


图 6 不同环境下关节轴承内外圈的磨损三维形貌

Fig.6 Three-dimensional shape of wear of inner and outer rings of spherical bearings under different environments: a) inner circle of atmospheric environment; b) outer circle of atmospheric environment; c) inner ring in vacuum environment; d) outer ring in vacuum environment; e) atomic oxygen erodes the inner ring; f) atomic oxygen erodes the outer ring; g) ultraviolet irradiation inner ring; h) ultraviolet irradiation outer ring

膜的 G 峰半峰宽降低,这也与 C=C 键含量增多有关,因为 C=C 键增多薄膜有序度提高,薄膜中键型更加单一,导致 G 峰半峰宽降低^[32]。

从原子氧侵蚀后的内圈磨痕的拉曼光谱可以看到,经过原子氧侵蚀后,薄膜磨痕处的 I_D/I_G 值变大、G 峰向高波数移动、G 峰半峰宽降低,可见内圈 H-DLC 薄膜在原子氧侵蚀后,薄膜中产生了更多的 sp^2 杂化碳, C=C 和 C=O 键的结合能都高于 C—H

和 C—C 键,因此原子氧侵蚀后的轴承摩擦扭矩最高,磨损寿命也最短。紫外辐照后轴承内圈磨痕的 I_D/I_G 值、G 峰位置和 G 峰半高宽等与真空下未辐照的轴承相比,基本没变,证实了紫外辐照无法作用到薄膜深处位置,随着薄膜表面部分被磨损去除,薄膜内部键结构并未发生改变,即磨损过程与真空环境类似,所以紫外辐照后关节轴承磨损寿命没有出现明显降低,只是在磨损初期摩擦因数波动较大。

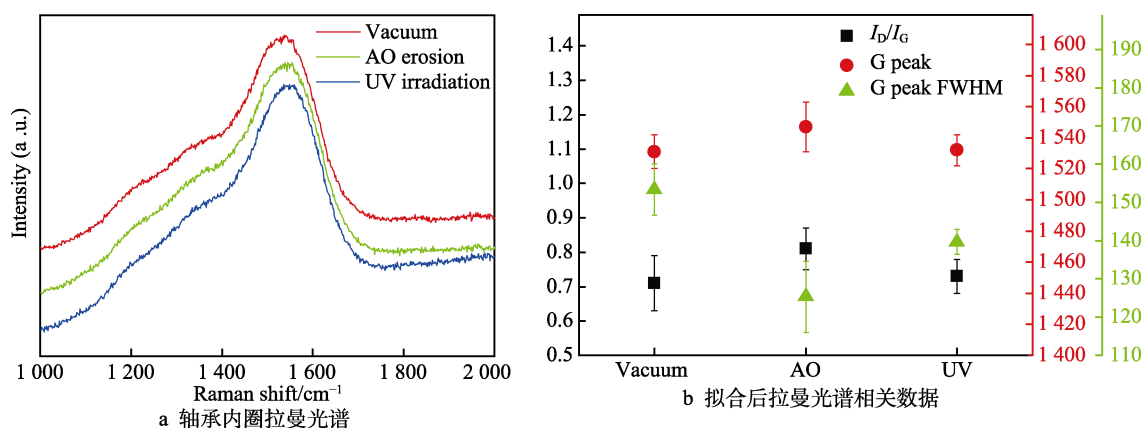


图7 不同环境下轴承内圈磨痕拉曼光谱

Fig.7 Raman spectra of bearing inner ring wear marks under different environments: a) Raman spectrum of bearing inner race; b) Raman spectrum correlation data after fitting

3 结论

1) 在不同环境下, 摩擦过程中的摩擦扭矩和摩擦面温度 2 种物理信号都可以作为涂层型自润滑关节轴承的失效判断依据, 并且温度信号比扭矩信号更敏感, 因为温度信号的转变点都要比扭矩信号早。

2) 在大气环境下, 被测轴承具有最长的磨损寿命, 平均磨损寿命可达 87.48 h, 失效原因主要是内外圈表面发生严重的黏着磨损和磨粒磨损。在真空环境下, 被测轴承磨损寿命出现严重下降, 平均寿命为 30.55 h, 被测轴承接触面摩擦产生的热量无法快速排出, 导致在被测轴承摩擦接触面形成了不稳定的高温温度场, 从而降低了自润滑涂层的摩擦学性能, 最终导致被测轴承磨损寿命降低。经原子氧侵蚀后, 轴承平均磨损寿命仅为 17.06 h, 因为原子氧侵蚀会氧化 H-DLC 薄膜, 导致薄膜性能下降, 从而导致轴承磨损寿命进一步降低。紫外辐照仅会使被测轴承的摩擦扭矩稳定期较短且波动较大, 但是不会影响其磨损寿命, 在紫外辐照后被测轴承平均磨损寿命为 29.37 h, 与真空环境未辐照的轴承磨损寿命相差不大。

3) 在不同环境下, 被测轴承内圈的磨损都比外圈更严重, 因为自润滑关节轴承的运动形式以及摩擦热作用, 内圈材料会在摩擦力作用下向外圈转移, 同时摩擦产生的磨屑也更容易在外圈表面吸附团聚, 因此会加剧内圈磨损, 导致内圈表面磨痕较深。

参考文献:

- [1] 杨育林, 祖大磊, 黄世军. 自润滑关节轴承现状及发展[J]. 轴承, 2009(1): 58-61, 65.
- [2] YANG Yu-lin, ZU Da-lei, HUANG Shi-jun. Status and Development of Self-Lubricating Spherical Plain Bearings[J]. Bearing, 2009(1): 58-61, 65.
- [3] 韩翠红, 石佳东, 刘云帆, 等. 关节轴承自润滑材料摩擦学性能及轴承寿命预测研究现状[J]. 材料导报,

2021, 35(5): 5166-5173.

HAN Cui-hong, SHI Jia-dong, LIU Yun-fan, et al. Research Progress of Tribological Properties and Life Estimation Methods of Self-Lubricating Spherical Plain Bearings[J]. Materials Reports, 2021, 35(5): 5166-5173.

- [3] 李俊超, 朱丽娜, 马国政, 等. 自润滑关节轴承质量检测及寿命评估研究现状[J]. 材料导报, 2018, 32(21): 3796-3804.

LI Jun-chao, ZHU Li-na, MA Guo-zheng, et al. Research Status on Quality Inspection and Life Evaluation of Self-Lubricating Spherical Plain Bearings[J]. Materials Review, 2018, 32(21): 3796-3804.

- [4] 马春山, 吴进军. 关节轴承磨损失效的研究现状及进展[J]. 内燃机与配件, 2018(18): 90-91.

MA Chun-shan, WU Jin-jun. Research Status and Progress of Wear Failure of Joint Bearings[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2018(18): 90-91.

- [5] 柏耀星, 邱明, 李迎春, 等. 关节轴承磨损失效的研究现状及进展[J]. 现代制造工程, 2012(4): 138-142.

BAI Yao-xing, QIU Ming, LI Ying-chun, et al. Study Status and Development of the Wear Failure of Spherical Plain Bearing[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2012(4): 138-142.

- [6] 刘云帆, 秦红玲, 韩翠红, 等. 自润滑关节轴承寿命试验及损伤失效机理研究现状[J]. 材料导报, 2021, 35(1): 1036-1045.

LIU Yun-fan, QIN Hong-ling, HAN Cui-hong, et al. Research Status of Life Test and Damage Failure Mechanism of Self-Lubricating Spherical Plain Bearings[J]. Materials Reports, 2021, 35(1): 1036-1045.

- [7] LIU Lian, DUAN Hai-tao, ZHAN Wen, et al. Effects of UV Irradiation Time on the Molecular Structure of Typical Engineering Plastics and Tribological Properties under Heavy Load[J]. High Performance Polymers, 2022, 34(3): 352-362.

- [8] VASILETS V N, SHULGA Y M, KABACHKOV E N, et al. Photooxidative Resistance of Polytetrafluoroethylene-Graphene Nanocomposites to Vacuum Ultraviolet Radiation[J]. High Energy Chemistry, 2021, 55(4): 280-284.

- [9] YU Chuan-yong, JU Peng-fei, WAN Hong-qi, et al. Tribological Properties of the Polyacrylate/PTFE Coating Modified by POSS in the Space Environment[J]. Journal

- of Applied Polymer Science, 2020, 137(21): 48730.
- [10] 邱明, 张瑞, 李迎春, 等. 稀土氧化物改性 MoS_2 基复合涂层的制备及其摩擦学特性研究[J]. 中国稀土学报, 2018, 36(2): 221-228.
QIU Ming, ZHANG Rui, LI Ying-chun, et al. Preparation and Tribological Properties of MoS_2 Based Composite Coatings Modified by Rare Earth Oxide[J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 2018, 36(2): 221-228.
- [11] 程蓓, 李迎春, 邱明, 等. 石墨烯/ MoS_2 复合涂层多环境下的摩擦学性能[J]. 润滑与密封, 2021, 46(1): 66-73.
CHENG Bei, LI Ying-chun, QIU Ming, et al. Tribological Properties of Graphene/ MoS_2 Composite Coatings in Multiple Environments[J]. Lubrication Engineering, 2021, 46(1): 66-73.
- [12] 郭培锐, 邱明, 李迎春, 等. MoS_2 对 PTFE 基黏结固体润滑涂层摩擦学和附着性能的影响[J]. 机械工程材料, 2015, 39(7): 82-85.
GUO Pei-rui, QIU Ming, LI Ying-chun, et al. Effects of MoS_2 on Tribology and Adhesion Properties of Polytetrafluoroethylene Base Bonded Solid Lubrication Coating[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2015, 39(7): 82-85.
- [13] QIU Ming, LU Jian-jun, LI Ying-chun, et al. Investigation on MoS_2 and Graphite Coatings and Their Effects on the Tribological Properties of the Radial Spherical Plain Bearings[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016, 29(4): 844-852.
- [14] LIU Yun-fan, MA Guo-zheng, ZHU Li-na, et al. Structure-Performance Evolution Mechanism of the Wear Failure Process of Coated Spherical Plain Bearings[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 135: 106097.
- [15] 马国政, 徐滨士, 王海斗, 等. MSTS-1 型多功能真空摩擦磨损试验机的研制[J]. 真空科学与技术学报, 2013, 33(2): 162-167.
MA Guo-zheng, XU Bin-shi, WANG Hai-dou, et al. Development of a Novel Multifunctional Vacuum Tribometer[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2013, 33(2): 162-167.
- [16] LI Zhen, MA Guo-zheng, XING Zhi-guo, et al. The Effects of Cr and B Doping on the Mechanical Properties and Tribological Behavior of Multi-Layered Hydrogenated Diamond-Like Carbon Films[J]. Surface and Coatings Technology, 2022, 431: 127977.
- [17] 黄文雄. 自润滑关节轴承装配方式及专用装配工装的设计和应用[J]. 中国高新技术企业, 2013(12): 25-27.
HUANG Wen-xiong. Design and Application of Self-Lubricating Joint Bearing Assembly Mode and Special Assembly Tooling[J]. China High-Tech Enterprises, 2013(12): 25-27.
- [18] WANG Hai-dou, MA Guo-zheng, XU Bin-shi, et al. The Erosion Effect of Kapton Film in a Ground-Based Atomic Oxygen Irradiation Simulator[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science Edition), 2014, 29(6): 1277-1282.
- [19] WEI Ao-bo, LIU Qian, MA Guo-zheng, et al. Development and Verification Experiment of In-Situ Friction Experiment Device for Simulating UV Irradiation in Space[J]. Materials, 2022, 15(6): 2063.
- [20] 李国祿, 魏澳博, 马国政, 等. 一种关节轴承摩擦磨损试验机: CN215985190U[P]. 2022-03-08.
YANG Yu-lin, LIU Xi-ping, HUANG Shi-jun. Centering Double-Oscillating-Follower Double-Swash-Plate-End-Face-Cam Knuckle Bearing High-Speed Testing Machine: CN215985190U[P]. 2022-03-08.
- [21] LIU Yun-fan, MA Guo-zheng, QIN Hong-ling, et al. Research on Damage and Failure Behaviour of Coated Self-Lubricating Spherical Plain Bearings Based on Detection of Friction Torque and Temperature Rise[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2022, 236(3): 514-526.
- [22] TAKABAYASHI S, JEŠKO R, SHINOHARA M, et al. Chemical Structural Analysis of Diamondlike Carbon Films: II. Raman Analysis[J]. Surface Science, 2018, 668: 36-41.
- [23] LANCASTER J K. Accelerated Wear Testing of PTFE Composite Bearing Materials[J]. Tribology International, 1979, 12(2): 65-75.
- [24] ZENG Qun-feng, NING Ze-kun. High-Temperature Tribological Properties of Diamond-Like Carbon Films: A Review[J]. Reviews on Advanced Materials Science, 2021, 60(1): 276-292.
- [25] LIU Xiu-fang, WANG Li-ping, XUE Qun-ji. High Vacuum Tribological Performance of DLC-Based Solid-Liquid Lubricating Coatings: Influence of Atomic Oxygen and Ultraviolet Irradiation[J]. Tribology International, 2013, 60: 36-44.
- [26] LIU Xiu-fang, WANG Li-ping, PU Ji-bin, et al. Surface Composition Variation and High-Vacuum Performance of DLC/ILs Solid-Liquid Lubricating Coatings: Influence of Space Irradiation[J]. Applied Surface Science, 2012, 258(20): 8289-8297.
- [27] HALE J S, SYNOWICKI R A, NAFIS S, et al. Atomic Oxygen Plasma Effects on CVD Deposited Diamond-Like Carbon Films[J]. MRS Online Proceedings Library, 1991, 235(1): 769-774.
- [28] SHI Peng-fei, SUN Jun-hui, YAN Wen-meng, et al. Roles of Phase Transition and Surface Property Evolution in Nanotribological Behaviors of H-DLC: Effects of Thermal and UV Irradiation Treatments[J]. Applied Surface Science, 2020, 514: 145960.
- [29] JI Li, LI Hong-xuan, ZHAO Fei, et al. Influences of Ultraviolet Irradiation on Structure and Tribological Properties of Diamond-Like Carbon Films[J]. Applied Surface Science, 2009, 255(20): 8409-8413.
- [30] IRMER G, DORNER-REISEL A. Micro-Raman Studies on DLC Coatings[J]. Advanced Engineering Materials, 2005, 7(8): 694-705.
- [31] FERRARI A C, ROBERTSON J. Interpretation of Raman Spectra of Disordered and Amorphous Carbon[J]. Physical Review B, 2000, 61(20): 14095-14107.
- [32] ROUHANI M, HOBLEY J, HONG F C N, et al. Novel Spatially Coordinated In-Situ Raman and Nanoscale Wear Analysis of FCVA-Deposited DLC Film[J]. AIP Advances, 2019, 9(6): 065215.