

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20221118001

苛刻空间环境下固体润滑涂层在谐波齿轮 减速器表面的服役性能评价*

孙繁新¹ 史彦斌² 蒲吉斌² 穆晓彪³ 孙伟⁴

- (1. 北京空间飞行器总体设计部 北京 100094;
2. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所 宁波 315201;
3. 北京中技克美谐波传动股份有限公司 北京 101300;
4. 国防科工局军工项目审核中心 北京 100039)

摘要: 随着航天技术和深空探测的发展,传统的脂润滑材料已难以满足谐波减速器在真空宽温区的润滑需求,固体润滑涂层是一种非常理想的太空润滑方式,具有较宽的温度使用范围,且润滑性能受工况的影响也较小,广泛应用于空间运动机构。目前固体润滑谐波减速器在苛刻空间环境下的服役性能(传动精度和传动效率)还鲜有报道,通过物理气相沉积技术分别在XBS-40-100型和XBS-60-120型谐波减速器制备MOSTP&MOSTP和DLC&MOSTP两种固体润滑涂层,并对润滑前后的谐波齿轮减速器的传动精度、传动效率及真空高、低温适应性进行对比研究。研究表明:谐波减速器的传动误差不仅没受到润滑涂层的影响,其传动精度还远优于脂润滑的同型号谐波减速器;固体润滑谐波减速器具有优异的温度适应性,XBS-40-100型和XBS-60-120型谐波减速器在-90℃~100℃温度范围内,传动效率分别为69.4%~82.8%和66.2%~86.7%,远高于全氟聚醚(-90℃,效率在30%左右)和多烷基化环戊烷(-90℃,效率基本在15%左右)润滑的同型号谐波减速。系统研究了固体润滑谐波减速器的服役性能和温度适应性,可为空间谐波减速器润滑材料的选取提供试验依据。

关键词: 谐波减速器; MoS₂基固体润滑涂层; DLC固体润滑涂层; 温度适应性; 传动效率

中图分类号: TG156; TB114

Service Performance Evaluation of Solid-lubrication Coating on Harmonic Gear Reducer Surface in Harsh Space Environment

SHUN Fanxin¹ SHI Yanbin¹ PU Jibin² MU Xiaobiao³ SUN Wei⁴

- (1. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China;
2. Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering,
Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China;
3. Beijing CTKM Harmonic Drive Co., Ltd., Beijing 101300, China;
4. Military Industry Program Evaluation Center, State Administration of Science, Technology
and Industry for National Defense, Beijing 100039, China)

Abstract: A harmonic gear reducer has the advantages of a large transmission ratio range, high transmission efficiency, high motion accuracy, and small size, with wide use in spacecraft drive mechanisms, space docking mechanisms, and high-precision mechanism components. However, tooth profile interference caused by elastic deformation in the meshing process causes considerable wear between the teeth, reducing the transmission efficiency and accuracy and producing vibration, which greatly reduces the reliability of the driving mechanism. Thus, the choice of lubricating material is vital for the performance of a harmonic reducer. With development of space technology and deep space exploration, traditional grease lubrication materials have been unable to meet the requirements for

* 国家重点研发计划资助项目(SQ2022YFB3400149)。

Fund: Supported by National Key Research and Development Program of China (SQ2022YFB3400149).

20221118收到初稿,20230625收到修改稿

harmonic reducer lubrication in a vacuum-wide temperature zone. Solid-lubrication coating is an ideal space lubrication method, with a wide temperature range and lubrication performance less affected by working conditions; it is widely used in space motion mechanisms. However, the service performance (transmission accuracy and transmission efficiency) of solid-lubricated harmonic reducers has rarely been reported, especially in extremely low-temperature, high-vacuum environments, with large temperature changes, or in other extreme space environments. Fundamental studies of structure and tribological properties of MoS_2 -based coatings (MoS_2/Zn , $\text{TiN}+\text{MoS}_2/\text{Zn}$, and MOSTP solid-lubrication coatings) were conducted in high-vacuum environments at different temperatures. The influences of substrate material, surface roughness, storage environment, sliding speed, and load on the tribological properties of solid-lubrication coatings were systematically investigated. The results show that temperature has no effect on the coating structure, but has an obvious effect on the friction coefficient and wear. The MoS_2/Zn superlattice coating maintained a friction coefficient less than 0.01 at $-100\text{ }^\circ\text{C}$. Preparation of a hard TiN bearing layer can effectively reduce the wear of a solid-lubrication coating. However, the friction coefficient of MoS_2/Zn superlattice coating rapidly increased to 0.04 when the temperature increased to $100\text{ }^\circ\text{C}$. The MOSTP solid-lubrication coating demonstrated good environmental adaptability. The coating structure and friction coefficient hardly changed after storage at cryogenic temperature ($-100\text{ }^\circ\text{C}$) or alternating between cryogenic temperature and $100\text{ }^\circ\text{C}$. Although the friction coefficient of MoS_2/Zn coating was still less than 0.01 at $-100\text{ }^\circ\text{C}$ after storage, it increased from 0.04 to 0.05 at $100\text{ }^\circ\text{C}$. The experimental results also show that a higher substrate surface roughness is beneficial in further reducing the friction coefficient, and that a greater sliding speed increases the friction coefficient. Two solid-lubrication coating strategies, MOSTP&MOSTP and LC&MOSTP, were used with XBS-40-100 and XBS-60-120 harmonic gear reducer, respectively, through physical vapor deposition technology. The transmission accuracy, transmission efficiency, adaptability to extremely low-temperature, high-vacuum environments, and large temperature changes of the harmonic gear reducer were compared before and after lubrication. The results show that the transmission error of the harmonic reducer is not affected by the solid-lubrication coating, and transmission accuracy is much better than that of common grease-lubricated harmonic reducers of the same type. Moreover, a solid-lubrication harmonic reducer has excellent temperature adaptability. For XBS-40-100 and XBS-60-120 harmonic reducer, the transmission efficiency was 69.4%–82.8% and 66.2%–86.7%, respectively, from $-90\text{ }^\circ\text{C}$ – $100\text{ }^\circ\text{C}$, much higher than for perfluorinated polyether (at $-90\text{ }^\circ\text{C}$, the efficiency is approximately 30%) and polyalkylated cyclopentane (at $-90\text{ }^\circ\text{C}$, the efficiency is approximately 15%) lubrication with the same type of harmonic deceleration. The service performance and temperature adaptability results for solid-lubricated harmonic reducers provide a test basis for selection of harmonic reducer lubrication materials in harsh working conditions.

Keywords: harmonic reducer; MoS_2 -based coating; DLC coating; temperature adaptability; transmission efficiency

0 前言

谐波齿轮减速器是一种通过波发生器驱动柔性齿轮产生可控弹性变形, 并与刚性齿轮相啮合来传递运动和动力的传动装置^[1-3]。它具有传动比范围大、传动效率高、运动精度高、传动平稳和体积小等优点, 已广泛应用于航天器驱动机构、天线指向机构、空间对接机构等高精密机构部件中^[4-5]。然而, 在啮合过程中弹性变形引起的齿廓干涉会使得柔轮与刚轮齿间存在较为严重的磨损, 这不仅会降低其传动效率及精度, 还会引发动作, 极大地降低了驱动机构的可靠性^[6]。尤其工作在空间环境下的谐波减速器, 苛刻的工况条件和工作环境以及在轨服役的驱动机构的高可靠性要求, 对润滑材料的性能和温度适应性提出了愈加严峻的考验^[7-8]。

目前, 关于空间环境下谐波减速器的润滑材料已开展了广泛研究^[9], 根据其具体使用环境和服役工况, 主要采用液体润滑、固体润滑以及固-液复合润滑等三种润滑策略^[10-11]。液体润滑剂通常采用以 PFPE (全氟聚醚) 和 MACs (多烷基化环戊烷) 为主的润滑脂, 具有实用性强、成本低、便于补充的优点^[12-13]。然而, 随着空间探索的越发深入, 润滑材料的温度适应性越发重要。在真空低温下, 润滑脂黏度的增大会导致阻力矩变大, 使得谐波减速器出现转动不平稳、输出力矩下降等异常现象, 并且其使用寿命也会大大缩短^[14]。相对而言, 固体润滑剂通常具有较宽的温度适用范围, 并且其减摩耐磨性能受工况条件影响较小, 被认为是一类非常理想的谐波减速器用空间润滑材料^[15]。李波等^[16]研究表明谐波减速器在超载 150% 条件下, PFPE 基润滑脂

易被从齿面挤压到边缘区域,并且差的流动性使谐波减速器出现乏油现象,柔轮与刚轮齿面啮合区域磨损严重,传动效率随之退化。而固体润滑谐波减速器的齿面上有固体润滑涂层起作用,无剥落、撕裂等异常磨损现象出现。GILL 等研究表明液体润滑剂的黏温效应使得 Braycote 601 脂润滑减速器的传动效率受温度影响明显^[17]。寿命试验后,谐波减速器的柔轮内壁与柔性轴承外圈之间出现表面烧伤。然而,使用 MoS_2 涂层润滑的谐波减速器会在齿面接触区域形成一层薄的 MoS_2 膜,改善齿面间磨损。孙晓军等考察了不同 MoS_2 涂层的润滑性能,试验结果发现表面粗糙度较高的齿面轮廓容易产生明显的磨粒磨损,从而导致固体润滑薄膜失效^[18]。另外,柔轮和刚轮齿面润滑涂层的匹配性也是影响谐波减速器润滑状态和运行寿命的重要因素^[19]。总体而言,采用固体润滑的谐波减速器的温度适应性、承载能力、传动效率和传动稳定性具有明显优势,但是其磨损寿命还有待提高^[20]。特别的是,在真空、极低温($-90\text{ }^\circ\text{C}$)以及大温差交变($-90\text{ }^\circ\text{C}\sim 100\text{ }^\circ\text{C}$)的空间苛刻环境下,使用涂层润滑和脂润滑的谐波减速器的传动效率,传动精度和服役寿命的相关研究还未见有报道,而这将对深空探测航天器用谐波减速器具有深远意义。

本文针对深空低温环境,提出低温长寿命谐波齿轮减速器固体润滑涂层设计方案,试验筛选柔轮和钢轮摩擦配副的涂层体系,并对优化后固体润滑涂层开展模拟工况条件下的谐波齿轮减速器验证试验,系统分析了宽温区谐波减速器传动精度和传动效率。研究工作为确定苛刻空间环境服役的谐波减速器的固体润滑技术提供了试验依据,也为后续其他航天器驱动机构的固体润滑技术提供了一定的试验支撑。

1 试验准备

1.1 样品制备

DLC 涂层制备:采用 Hauzer Flexicoat 850 型多功能离子镀膜系统在柔轮材料样块(40CrNiMoA),刚轮材料样块(20Cr13)和硅片 3 种基底上沉积 DLC 涂层,该系统包含用于等离子体清洗样品表面的离子源,用于沉积 DLC 涂层的辅助非平衡磁控溅射装置。首先,将基底置于丙酮进行超声波震荡清洗 30 min 以去除油污,再将基底擦拭干并置于乙醇中

进行二次超声波震荡清洗 30 min 以去除杂质。将清洗后的基底固定在反应腔室的样品台架上,待反应腔室的真空度小于 2.0 mPa 时,对基底进行等离子体刻蚀清洗以去除表面的杂质及氧化物,随后进行涂层的制备。首先,采用磁控溅射方法在基底表面依次制备 Cr 粘接层、WC 承载层和 WC/DLC 梯度过渡层,之后通过反应磁控溅射沉积了含氢类金刚石表面层,其中 DLC 表面层工艺参数如下:高纯的 CH_4 气体作为反应气体源,腔室气压为 0.4 Pa,并对基底施加 80 V 偏压,直至镀膜结束,随炉冷却。

MoS_2 基涂层:通过 Teer Plas Mag CF-800 闭合场不平衡磁控溅射系统在柔轮材料样块(40CrNiMoA),刚轮材料样块(20Cr13)和硅片 3 种基底上沉积 MoS_2/Zn 超晶格涂层, $\text{TiN}+\text{MoS}_2/\text{Zn}$ 叠层涂层和 $\text{MoS}_2/\text{Pb-Ti}$ 纳米多层涂层(MOSTP)。首先,将基底置于丙酮进行超声波震荡清洗 30 min 以去除油污,再将基底擦拭干并置于乙醇中进行二次超声波震荡清洗 30 min 以去除杂质。将清洗后的基底固定在双轴旋转样品支撑架上。随后启动真空程序,在真空度小于 50 mPa 时,引入工作气体 Ar(纯度 99.99%)。在基底上施加-500 V 的直流偏压进行氩等离子体刻蚀 30 min,以去除附在基底上的氧化物或杂质。随后利用 Ar 等离子体对靶材表面进行 15 min 溅射清洗,除去靶材表面杂质。 MoS_2/Zn 超晶格涂层制备时使用一个钛靶(Ti,纯度为 99.9%)、一个锌靶(Zn,纯度为 99.9%)和四个 MoS_2 靶(纯度为 99.9%),共 6 个靶材。首先启动 Ti 靶程序,在 5 A 电流下制备钛过渡层。接着, MoS_2 和 Zn 靶材的电流从 0 开始,逐渐增大到 1.6 A 和 0.6 A,同时 Ti 靶材的电流逐渐减小至 0,沉积梯度过渡层,以增强基底与涂层的结合性能。随后,保持 MoS_2 靶和 Zn 靶电流不变,持续 120 min,制备出 MoS_2/Zn 超晶格涂层。 $\text{TiN}+\text{MoS}_2/\text{Zn}$ 叠层涂层制备时采用与 MoS_2/Zn 超晶格涂层相同的靶材布局,经过靶材清洗后,对 Ti 靶施加 5 A 的靶电流,同时通入 30 L/min 的氮气,制备氮化钛过渡层,后续镀膜程序与 MoS_2/Zn 超晶格涂层相同。MOSTP 涂层制备时使用一个钛靶(Ti,纯度为 99.9%)、一个 Pb-Ti 靶(纯度为 99.9%)和 4 个 MoS_2 靶(纯度为 99.9%),共 6 个靶材。首先启动 Ti 靶程序,在 5 A 电流下制备钛过渡层。随后, MoS_2 和 Pb-Ti 靶材的电流从 0 开始,逐渐增大到 1.6 A 和 1.2 A,同时 Ti 靶材的电流逐渐减小至 0,沉积梯度

过渡层,以增强基底与涂层的结合性能。随后,保持 MoS₂ 靶和 Pb-Ti 靶电流不变,持续 120 min,制备出 MOSTP 涂层。

1.2 结构表征及力学性能测试

涂层基础性能表征:使用 Zeiss Auriga 场发射扫描电子显微镜表征制备的 DLC 涂层, MoS₂/Zn 超晶格涂层, TiN+MoS₂/Zn 叠层涂层和 MOSTP 涂层的截面微观结构,并使用配备的 Oxford X-Max 50 能谱对涂层的元素含量进行分析。进一步,涂层的晶体结构由 Bruker AXS 制造商生产的 D8 Advance X 射线衍射仪进行分析, X 射线源 Cu K α ($\lambda=0.154$ nm),步进方式扫描 5°~90°范围内衍射峰。薄膜的纳米硬度与弹性模量由 MTS 制造商生产的 NANO G200 型纳米压痕测量仪进行测量,压头为 Berkovich 金刚石压头,采用连续刚度法对涂层的显微硬度与弹性模量进行自动测量,压入深度为 200 nm,每个样品至少测量 6 次。通过 Revetest 划痕测试系统测试涂层与基体的结合强度,压头选用半径 0.2 mm 和 120°锥角的锥形金刚石压头。

涂层摩擦学性能测试:涂层的真空高、低温摩擦学性能是由安东帕生产的 HVTRB 型 CSM 摩擦试验机进行测试。其技术指标为:载荷范围为 0~60 N,线性往复模式频率范围为 1~10 Hz,温度范围为-100~400 °C,真空度最高可达 0.1 mPa。选用 AlphaStep IQ 型表面轮廓仪对涂层磨痕的截面形貌进行接触式测量,进而通过计算公式 $W=V/(N \times L)$ 可得出涂层的磨损率 (W 为磨损率, mm³/(N·m); V 为磨损体积; N 为法向载荷; L 为摩擦振幅)。为了减小误差,通过多次摩擦试验得到多组磨损率,并取磨损率的平均值。

柔轮和刚轮涂层储存稳定性:将涂层在-70 °C 环境存储 1 h (采用液氮浸泡试验)后,测试涂层 30 min 的摩擦因数和磨损;再将经 1 h 低温存储的样品置于 70 °C 环境存储 1 h 后,测试涂层 30 min 的摩擦因数和磨损。

1.3 谐波减速器宽温区适用性试验

本研究选用了 XBS-40-100 和 XBS-60-120 型两种谐波减速器,分别在其刚轮和柔轮表面进行固体润滑涂层沉积,对 XBS-40-100 型谐波减速器的柔轮和刚轮均沉积制备了 MOSTP 润滑涂层,对 XBS-60-120 型谐波减速器的刚轮和柔轮表面分别沉积了 DLC 涂层和 MOSTP 涂层。首先,对上述两种镀膜后的谐波减速器的传动精度进行测试,并与脂润滑谐波减速器进行对比。之后,依次对镀膜后

的 XBS-40-100 和 XBS-60-120 型谐波减速器进行高低温效率测试和热真空试验,并再次对其传动精度进行测试。

高低温效率测试:先进行常温条件下传动效率测试,再按照低温至高温的顺序进行测试,测试温度点依次如下:-90、-80、-70、-60、-50、-40、-30、-20、-10、0、10、30、40、50、60、70、80、90、100 °C。在测试过程中,每个工况条件下谐波减速器运转时间为 1 min,并试验后保温 30 min。XBS-40-100 型谐波减速器输入转速为 500 r/min,输出扭矩分别为 5、10、15、19 和 23 N·m; XBS-60-120 型谐波减速器输入转速为 500 r/min,输出扭矩分别为 15、30、50、60 和 67 N·m。

热真空试验:谐波减速器热真空试验过程中,依次进行了抽真空、升温 and 降温,共 1 个循环。在整个试验过程中真空度一直优于 6.65 mPa,低温端温度在-90 °C~-94 °C,高温端温度在 100 °C~104 °C。高低温端各启动 3 次,每次 5 min。XBS-40-100 和 XBS-60-120 型谐波减速器的转数均为 500 r/min,负载分别为 23、87 N·m。

2 结果与讨论

2.1 涂层的微观形貌、结构和力学性能

图 1 所示为 DLC 涂层、MoS₂/Zn 超晶格涂层、TiN+MoS₂/Zn 叠层涂层和 MOSTP 涂层 4 种涂层的表面形貌,可以看出涂层表面光滑均匀,且柔轮和刚轮的基底材料对涂层的均匀性无明显影响。图 2 所示为 4 种涂层的截面显微图和元素面分布图, DLC 涂层厚度为 2.4 μ m, MoS₂/Zn 涂层厚度为 2.2 μ m, MoS₂/Zn 叠层涂层总厚度为 2.2 μ m, MOSTP 涂层厚度为 2.6 μ m。而且,可以看出 4 种涂层与基底结合紧密,截面结构致密,内部元素分布均匀,无明显空洞或裂纹。

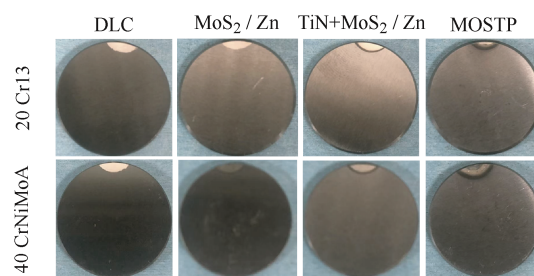


图 1 两种基底材料上的 4 种固体润滑涂层的表面形貌图

Fig. 1 Surface morphologies of four solid lubrication coatings on two substrate materials

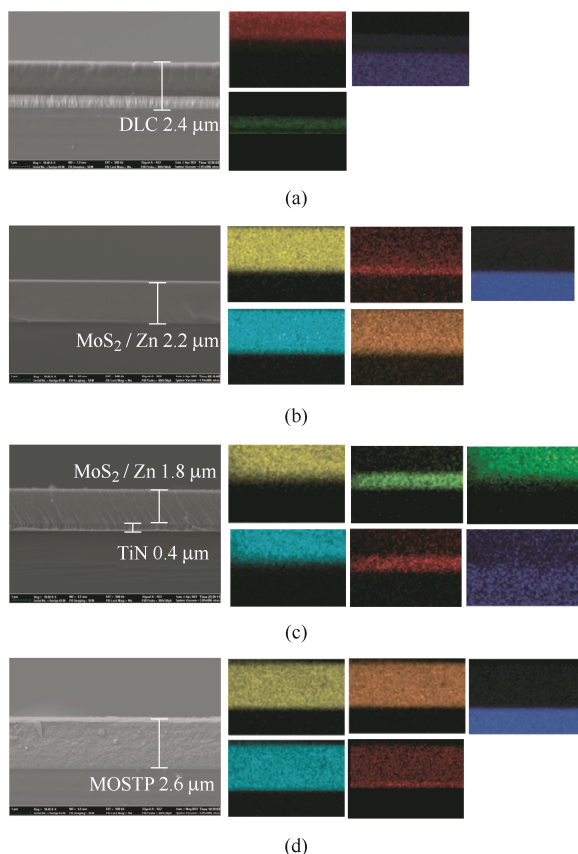


图2 四种固体润滑涂层的截面显微图和元素面分布图

Fig. 2 Cross-section micrographs and elemental surface distributions of four solid lubrication coatings

图3所示为两种基底材料上的4种固体润滑涂层的X射线衍射图谱,可以看到DLC涂层为非晶涂层,而在 MoS_2/Zn 涂层、 $\text{TiN}+\text{MoS}_2/\text{Zn}$ 叠层涂层和MOSTP涂层中,可以看出 MoS_2 具有强烈的沿(002)面的择优取向,其中MOSTP涂层表现出最强的 $\text{MoS}_2(002)$ 晶面的衍射峰,结晶性最好,这可能意味着它具有更优异的减摩耐磨性能。此外,两种基底材料上制备的涂层的XRD图谱无明显变化,说明基底材料对涂层结构无明显影响,TiN承载层对 MoS_2/Zn 超晶格涂层的晶体结构也无明显影响。

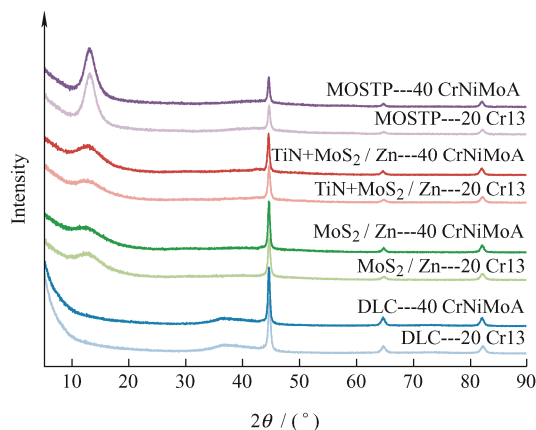


图3 两种基底材料上的4种固体润滑涂层的XRD图

Fig. 3 XRD patterns of four solid lubrication coatings on two substrate materials

图4所示为CSM纳米压痕仪测得的4种涂层的硬度和弹性模量,为消除基底影响,压入深度控制在200 nm,小于涂层厚度的1/10。其中,DLC涂层表现出优异的力学性能,其平均弹性模量约为307.8 GPa,平均硬度约为29.5 GPa,二者均显著高于二硫化钼基固体润滑涂层。 MoS_2/Zn 超晶格涂层、 $\text{TiN}+\text{MoS}_2/\text{Zn}$ 叠层涂层和MOSTP涂层的平均弹性模量分别为98.5、105.7、71.4 GPa,平均硬度分别为7.5、7.7、6 GPa。对比 MoS_2/Zn 超晶格涂层和 $\text{TiN}+\text{MoS}_2/\text{Zn}$ 叠层涂层可以看出,TiN过渡层明显提升了涂层的微观力学性能,这将有助于改善涂层的承载能力和服役寿命。

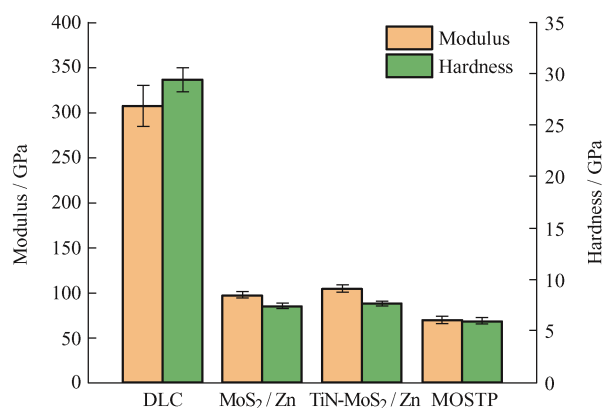


图4 四种涂层的平均弹性模量和硬度

Fig. 4 Average elastic modulus and hardness of the four coatings

2.2 环境对涂层摩擦学性能的影响

首先,采用CSM球盘式摩擦机考察 MoS_2/Zn 涂层、 $\text{TiN}+\text{MoS}_2/\text{Zn}$ 叠层涂层和MOSTP三种 MoS_2 基固体润滑涂层在真空100℃和-100℃条件下的摩擦学性能,筛选出具有优异摩擦学性能的二种 MoS_2 基涂层。试验中,对偶材料为柔轮材料40CrNiMoA,基底为刚轮材料20Cr13,施加载荷为1.5 N,滑动速度为5 cm/s。图5所示为三种 MoS_2 基润滑涂层在真空高温、低温环境下,经过30 min摩擦后的摩擦曲线,表1为三种 MoS_2 基润滑涂层在真空高温、低温环境下,经过30 min摩擦后的平均摩擦因数和磨损率。试验结果表明二硫化钼基涂层在真空低温环境下均具有更低的摩擦因数,尤其是 MoS_2/Zn 涂层和 $\text{TiN}+\text{MoS}_2/\text{Zn}$ 叠层涂层在真空100℃下的摩擦因数分别为0.032和0.020,而在真空-100℃下的摩擦因数可低至0.007和0.009,实现了超润滑。然而, MoS_2/Zn 涂层在真空高、低温下的磨损率均较大。

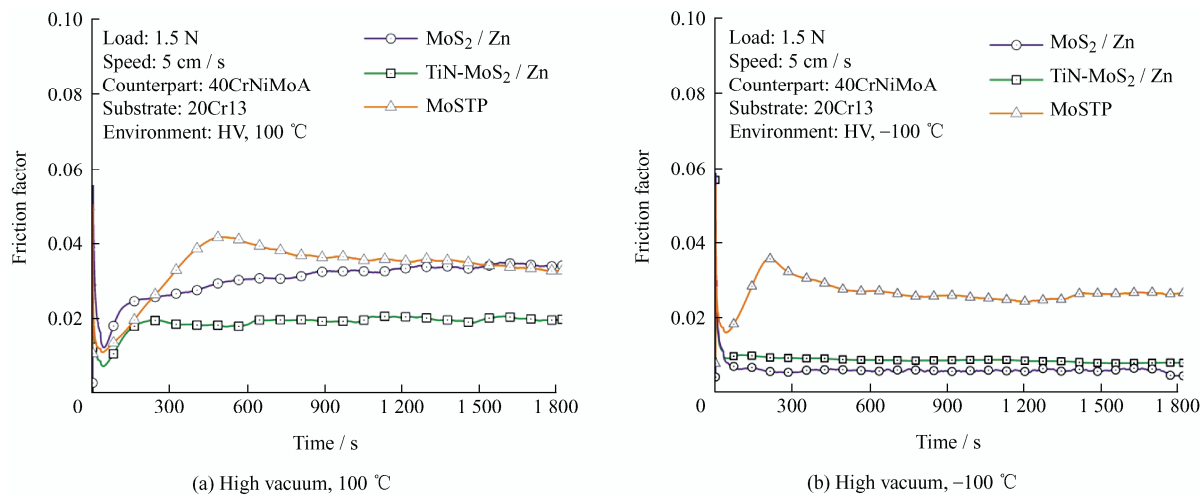


图 5 三种 MoS₂ 基涂层的摩擦学性能

Fig. 5 Tribological properties of three MoS₂-based coatings

表 1 三种 MoS₂ 基固体润滑涂层的平均摩擦因数和磨损率

Table 1 Average friction coefficient and wear rate of three MoS ₂ -based solid lubrication coatings				
No.	Coatings	Temperature / °C	Friction factor	Wear / (mm ³ · N ⁻¹ · m ⁻¹)
1	MoS ₂ / Zn	100	0.032	1.2 × 10 ⁻⁶
2	TiN + MoS ₂ / Zn	100	0.020	4.0 × 10 ⁻⁷
3	MOSTP	100	0.035	7.7 × 10 ⁻⁷
4	MoS ₂ / Zn	-100	0.007	1.6 × 10 ⁻⁶
5	TiN + MoS ₂ / Zn	-100	0.009	3.1 × 10 ⁻⁷
6	MOSTP	-100	0.027	7.8 × 10 ⁻⁷

试验条件下 (1.5 N, 5 cm / s, 真空 100 °C 和 -100 °C), TiN+MoS₂ / Zn 涂层具有最优异摩擦学性能, 摩擦因数和磨损率均最低, MOSTP 次之。之后对涂层的匹配性进行了考察, 将 DLC 固体润滑涂层与综合摩擦学性能较优的 TiN+MoS₂ / Zn 和 MOSTP 涂层组成柔轮&刚轮涂层摩擦副: DLC&TiN + MoS₂ / Zn、DLC&MOSTP、TiN+MoS₂ / Zn&DLC、MOSTP& DLC、TiN+MoS₂ / Zn&TiN+MoS₂ / Zn 和 MOSTP& MOSTP。

表 2 和表 3 为 TiN+MoS₂ / Zn 和 MOSTP 涂层与 DLC 涂层组成的柔轮&刚轮涂层摩擦副平均摩擦因数和磨损率, 图 6 为其对应的摩擦因数曲线。对于球-盘式摩擦, 当采用 MoS₂ 涂层 (球) 与 DLC 涂层 (盘) 对磨时, 无论对偶球上为 TiN+MoS₂ / Zn 还是 MOSTP 涂层, 在较短的时间内会迅速磨穿, 之后即为对偶材料与 DLC 涂层发生对磨。由于 DLC 涂层在真空环境下的摩擦学性能较差, 涂层摩擦因数较高, 并且短时间内 DLC 涂层就被磨穿, 润滑失效。

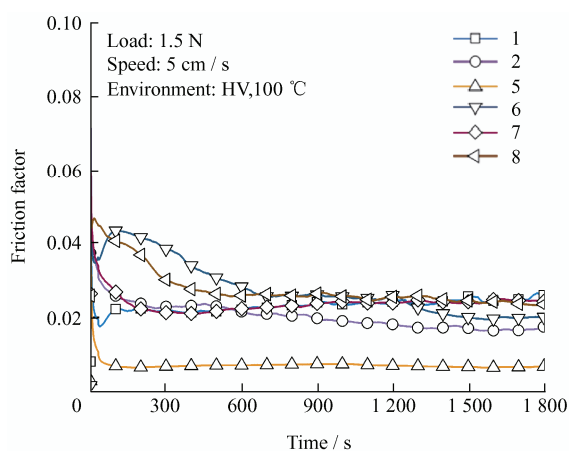
表 2 柔轮&刚轮涂层摩擦副在真空 100 °C 条件下的摩擦学性能

Table 2 Tribological properties of flexspline and rigid wheel coating friction pairs at vacuum and 100 °C				
No.	Counterpart	Substrate	Friction factor	Wear / (mm ³ · N ⁻¹ · m ⁻¹)
1	Flexspline(DLC)	Rigid wheel(TiN + MoS ₂ / Zn)	0.023	1.2 × 10 ⁻⁶
2	Flexspline(DLC)	Rigid wheel(MOSTP)	0.020	1.5 × 10 ⁻⁶
3	Flexspline(TiN + MoS ₂ / Zn)	Rigid wheel(DLC)	-	Wear out
4	Flexspline(MOSTP)	Rigid wheel(DLC)	-	Wear out
5	Flexspline(TiN + MoS ₂ / Zn)	Rigid wheel(TiN + MoS ₂ / Zn)	0.007	2.0 × 10 ⁻⁷
6	Flexspline(MOSTP)	Rigid wheel(MOSTP)	0.028	7.0 × 10 ⁻⁷
7	Rigid wheel(DLC)	Flexspline(TiN + MoS ₂ / Zn)	0.024	1.6 × 10 ⁻⁶
8	Rigid wheel(DLC)	Flexspline(MOSTP)	0.028	1.8 × 10 ⁻⁶
9	Rigid wheel(TiN + MoS ₂ / Zn)	Flexspline(DLC)	-	Wear out
10	Rigid wheel(MOSTP)	Flexspline(DLC)	-	Wear out

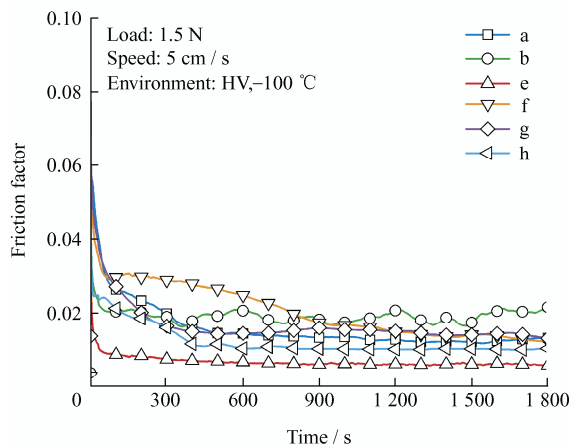
表 3 柔轮&刚轮涂层摩擦副在真空-100 °C条件下的摩擦学性能

Table 3 Tribological properties of flexspline and rigid wheel coating friction pairs at vacuum and -100 °C

No.	Counterpart	Substrate	Friction factor	Wear / ($\text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)
a	Flexspline(DLC)	Rigid wheel(TiN+MoS ₂ /Zn)	0.016	8.1×10^{-7}
b	Flexspline(DLC)	Rigid wheel(MOSTP)	0.019	8.3×10^{-7}
c	Flexspline(TiN+MoS ₂ /Zn)	Rigid wheel(DLC)	—	Wear out
d	Flexspline(MOSTP)	Rigid wheel(DLC)	—	Wear out
e	Flexspline(TiN+MoS ₂ /Zn)	Rigid wheel(TiN+MoS ₂ /Zn)	0.006	3.0×10^{-7}
f	Flexspline(MOSTP)	Rigid wheel(MOSTP)	0.020	1.9×10^{-6}
g	Rigid wheel(DLC)	Flexspline(TiN+MoS ₂ /Zn)	0.016	1.5×10^{-6}
h	Rigid wheel(DLC)	Flexspline(MOSTP)	0.012	9.2×10^{-7}
i	Rigid wheel(TiN+MoS ₂ /Zn)	Flexspline(DLC)	—	Wear out
j	Rigid wheel(MOSTP)	Flexspline(DLC)	—	Wear out



(a) High vacuum, 100 °C



(b) High vacuum, -100 °C

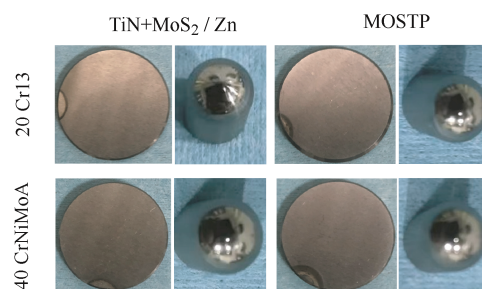
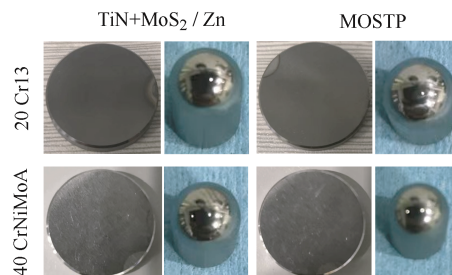
图 6 不同固体润滑涂层配副的摩擦曲线

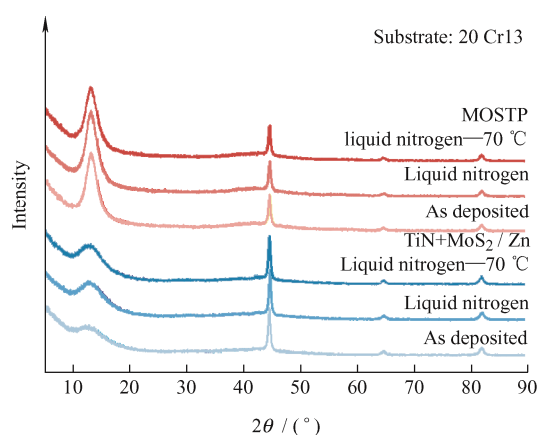
Fig. 6 Friction curves of different solid lubrication coatings

2.3 储存环境和试验条件对涂层摩擦学性能的影响

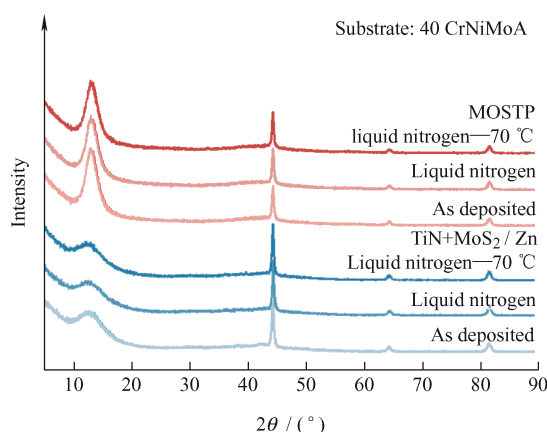
将 TiN+MoS₂/Zn 和 MOSTP 涂层在 -170 °C 环境存储 1 h (采用液氮浸泡试验) 后, 测试涂层 30 min 的摩擦学性能; 再将经 1 h 低温存储的样品置于 70 °C 环境存储 1 h, 测试涂层 30 min 的摩擦学性能, 考察高、低温环境储存对涂层性能的影响。

40CrNiMoA 栓 (和盘) 和 20Cr13 栓 (和盘) 上的 TiN+MoS₂/Zn 和 MOSTP 两种固体润滑涂层经过 -170 °C 环境存储 1 h 的涂层的状态如图 7 所示, 检查样块表面无缺陷, 涂层形貌完整。再将其置于 70 °C 环境存储 1 h 后的涂层的状态如图 8 所示, 经检查后样块表面无缺陷, 涂层形貌完整。同时对不同状态的样块进行了 X 射线衍射 (图 9), 试验结果表明样块涂层结构在经过液氮浸泡和 70 °C 储存 1 h 后均无明显变化。

图 7 两种基底材料上的 TiN+MoS₂/Zn 和 MOSTP 固体润滑涂层经过液氮浸泡 1 h 时的表面形貌图Fig. 7 Surface morphologies of TiN+MoS₂/Zn and MOSTP solid lubricating coatings on the two substrates after soaking in liquid nitrogen for 1 h图 8 两种基底上 TiN+MoS₂/Zn 和 MOSTP 固体润滑涂层经液氮浸泡 1 h 后, 再经过 70 °C 储存 1 h 后的表面形貌图
Fig. 8 Surface morphologies of TiN+MoS₂/Zn and MOSTP solid lubricating coatings on the two substrates after being soaked in liquid nitrogen for 1 h and then stored at 70 °C for 1 h



(a) Substrate: 20 Cr13

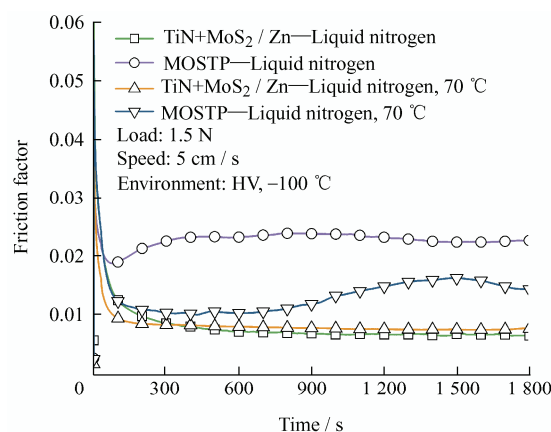


(b) Substrate: 40 CrNiMoA

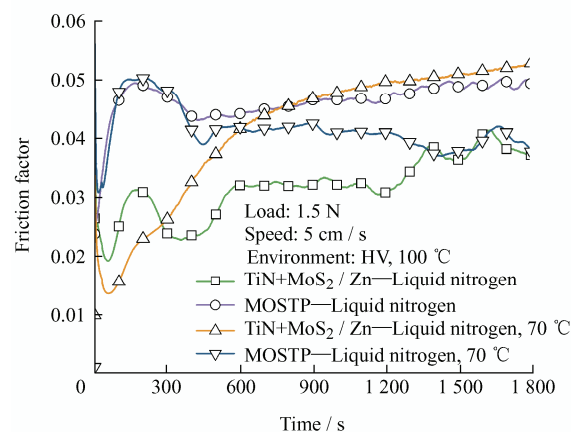
图9 两种基底材料上的 TiN+MoS₂ / Zn 和 MOSTP 固体润滑涂层经液氮浸泡 1 h 后和再经过 70 °C 储存 1 h 后 XRD 图谱

Fig. 9 XRD patterns of TiN+MoS₂ / Zn and MOSTP solid lubricating coatings on the two substrates after immersion in liquid nitrogen for 1 h and storage at 70 °C for 1 h

之后, 对经过环境储存试验的样块进行了摩擦学性能测试, 测试条件同上。摩擦因数曲线如图 10 所示。试验结果表明, 高温和低温的储存环境对于 TiN+MoS₂ / Zn 涂层和 MOSTP 涂层的真空低温环境下的摩擦学性能无明显影响, 摩擦因数与储存试验前几乎一致; 但是储存试验对于真空高温 (100 °C) 环境下的摩擦学性能影响很大, 经液氮浸泡后 TiN+MoS₂ / Zn 摩擦副的真空高温摩擦因数曲线波动明显, 并且升高至 0.035, MOSTP 摩擦副的摩擦因数升高至 0.045; 进一步进行 70 °C 储存后的样块的摩擦因数分别升高至 0.05 和 0.04, 这主要是由于长时间极端储存环境会引起二硫化钼基涂层内掺杂金属的扩散, 使得涂层超晶格结构失效。



(a) High vacuum, -100 °C



(b) High vacuum, 100 °C

图10 两种基底上的 TiN+MoS₂ / Zn 和 MOSTP 固体润滑涂层经过液氮浸泡 1 h 后和再经过 70 °C 储存 1 h 后的摩擦曲线图

Fig. 10 Friction curves of TiN+MoS₂ / Zn and MOSTP solid lubricating coatings on the two substrates after immersion in liquid nitrogen for 1 h and storage at 70 °C for 1 h

之后, 对经过环境储存试验的样块进行了摩擦学性能测试, 测试条件同上。摩擦因数曲线如图 10 所示。试验结果表明, 高温和低温的储存环境对于 TiN+MoS₂ / Zn 涂层和 MOSTP 涂层的真空低温环境下的摩擦学性能无明显影响, 摩擦因数与储存试验前几乎一致; 但是储存试验对于真空高温 (100 °C) 环境下的摩擦学性能影响很大, 经液氮浸泡后 TiN+MoS₂ / Zn 摩擦副的真空高温摩擦因数曲线波动明显, 并且升高至 0.035, MOSTP 摩擦副的摩擦因数升高至 0.045; 进一步进行 70 °C 储存后的样块的摩擦因数分别升高至 0.05 和 0.04, 这主要是由于长时间极端储存环境会引起二硫化钼基涂层内掺杂金属的扩散, 致使涂层超晶格结构失效。

针对柔轮&刚轮涂层体系, 进一步研究柔轮和

刚轮材料样块表面粗糙度、摩擦测试载荷和速度对涂层摩擦性能的影响规律。其中表面粗糙度分别为 $Ra=0.8\ \mu\text{m}$ (常规的) 和 $Ra=1.6\ \mu\text{m}$; 载荷设定为 0.5 N 和 1.5 N; 速度设定为 5 cm/s 和 13.3 cm/s, 其他测试条件同前。图 11 所示为两种摩擦副在不同

测试条件下的摩擦因数, 可以看出真空高温环境下两种涂层的摩擦因数明显高于它们在真空低温环境下的摩擦因数。此外, 较高的粗糙度通常有利于涂层获得更低的摩擦因数, 而过高的滑动速度则会导致涂层的摩擦因数大幅升高。

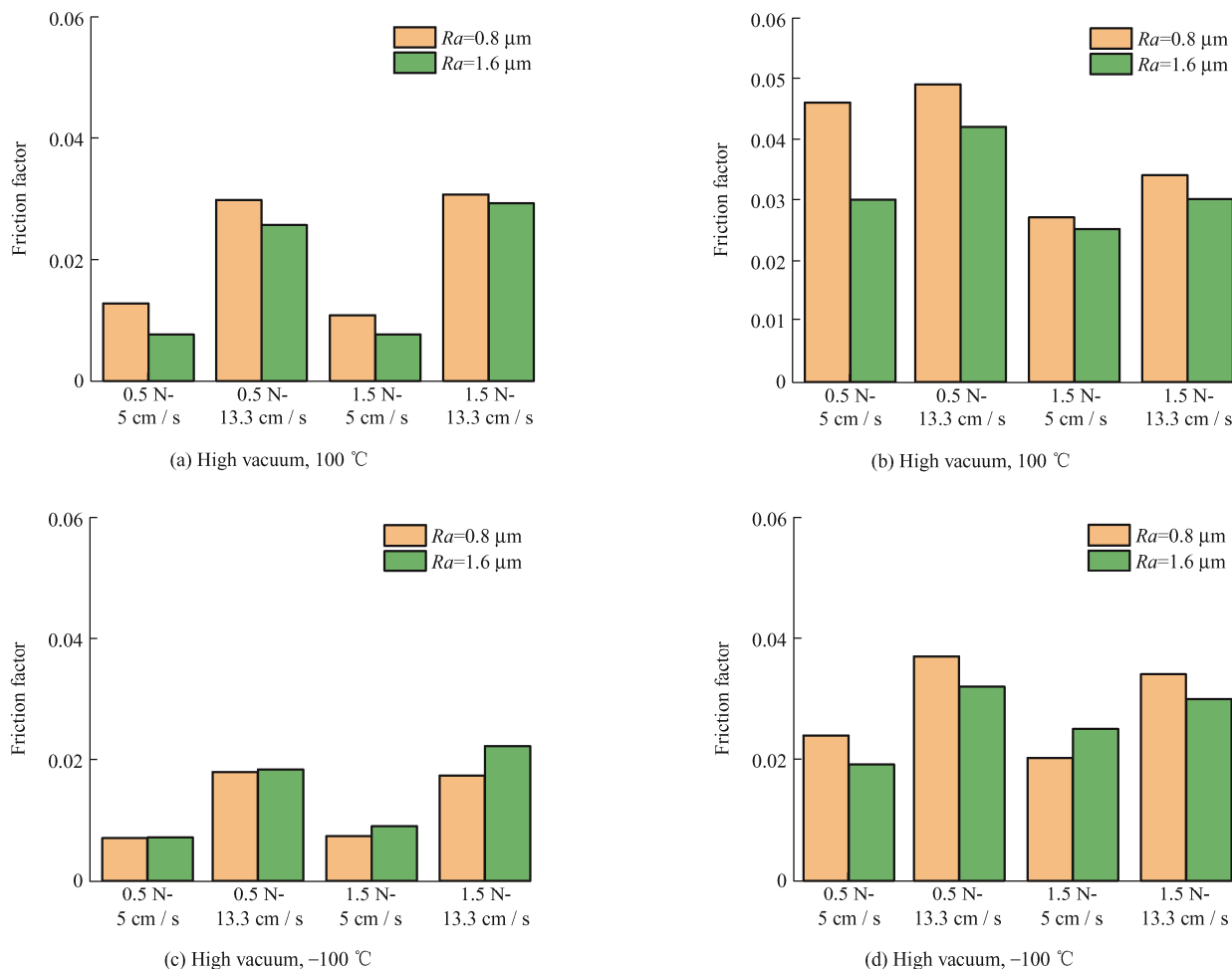


图 11 两种摩擦副在不同测试条件下的摩擦因数

Fig. 11 Friction factors of the two coatings under different test conditions

2.4 固体润滑谐波减速器宽温区适用性

基于上述 MoS_2 基涂层以及不同摩擦副的摩擦学性能, 可知 $\text{TiN}+\text{MoS}_2/\text{Zn}$ 和 MOSTP 两种摩擦副展现出最优的摩擦学性能, 但在后续的环境存储试验中发现 $\text{TiN}+\text{MoS}_2/\text{Zn}$ 涂层在经过低温、高温存储后会使其在真空 100 °C 条件下摩擦因数的急剧升高, 稳定性差于定型 MOSTP 涂层。

因此, 在 XBS-40-100 型、XBS-60-120 型 2 套谐波加速器分别提供 MOSTP&MOSTP 和 DLC&MOSTP 两种摩擦副固体润滑技术, 并对润滑前后以及常规脂润滑 (PFPE 和 MACS) 的谐波齿轮减速器的传动精度、传动效率以及真空高、低温适应性进行对比研究。表 4 为 XBS-40-100 / XBS-60-120 型谐波减速器润滑情况。

表 4 XBS-40-100 / XBS-60-120 型谐波减速器润滑情况

Table 4 Lubrication condition of XBS-40-100 / XBS-60-120 harmonic reducer

Type	Code	Components	Components Number	Lubrication method
XBS-40-100	2101803	Rigid wheel	2101803	MOSTP
		Flexspline	2101802	MOSTP
		Wave generator	2101808	LWYZ-5
XBS-60-120	2101518	Rigid wheel	2101518	DLC
		Flexspline	2101513	MOSTP
		Wave generator	2101538	LWYZ-5

表 5 为镀膜前、后、热试验后以及脂润滑 XBS-40-100 型和 XBS-60-120 型谐波齿轮减速器真空试验前传动精度测试结果。采用 MOSTP&MOSTP 摩擦配副固体润滑技术的 XBS-40-100 型谐波齿轮减速器的传动误差和回差在镀膜前分别为 1'34"和 1'29", 镀膜后分别为≤1'35"和 1'18", 这说明固体润滑涂层几乎不会对谐波减速器的传动精度造成不利影响, 并且其传动精度远远优于采用脂润

滑的同型号谐波减速器 (2'30"和 2'55")。此外, 它在经过热试验后的传动误差和回差分别为 1'29"和 1'15", 表现出优异的环境适应性。同样的, 采用 DLC&MOSTP 摩擦配副固体润滑技术的 XBS-60-120 型谐波齿轮减速器的传动误差和回差在镀膜前、后和热试验后也无明显变化, 不过它与采用脂润滑的同型号谐波减速器相比无明显优势。

表 5 XBS-40-100 型和 XBS-60-120 型谐波减速器传动精度测试结果

Table 5 Test results of transmission accuracy of XBS-40-100 and XBS-60-120 harmonic reduce

Test items	Code	Measured value		Test items	Code	Measured value	
Transmission error	2101803	Before coating film	≤1'34"	Transmission error	2101518	Before coating film	≤1'45"
Clearance			≤1'29"	Clearance			≤1'22"
Transmission error		After coating film	≤1'35"	Transmission error		After coating film	≤1'30"
Clearance			≤1'18"	Clearance			≤1'44"
Transmission error		After thermal cycling	≤1'29"	Transmission error		After thermal cycling	≤1'33"
Clearance			≤1'15"	Clearance			≤1'42"
Transmission error	2101806 grease	Before thermal vacuum test	≤2'30"	Transmission error	2101517 grease	Before thermal vacuum test	≤1'34"
Clearance			≤2'55"	Clearance			≤1'37"
Transmission error	2101807 grease	After thermal vacuum test	≤2'50"	Transmission error	2101526 grease	After thermal vacuum test	≤1'41"
Clearance			≤2'43"	Clearance			≤1'26"

高低温传动效率测试结果表明 (表 6), XBS-40-100 型谐波减速器 (2101803) 在输入转速 500 r/min, 输出扭矩 23 N·m 条件下, 高低温传动效率为 69.4% (−20 ℃) ~82.8% (+100 ℃), 其中在−70 ℃时传动效率为 74.4%, 在+100 ℃时传动效率为 82.8%; XBS-60-120 型谐波减速器 (2101518) 在输入转速 500 r/min, 输出扭矩 67 N·m 条件下, 高低温传动效率为 66.2% (+40 ℃) ~

86.7% (+100 ℃), 其中在−70 ℃时传动效率为 78.8%, 在+100 ℃时传动效率为 86.7%。然而, 采用 PFPE 和 MACS 脂润滑的同型号谐波减速器, 在−90 ℃的效率明显要比固体润滑的效率下降很多, PFPE 脂润滑谐波减速器在低温的效率在 30% 左右, MACS 脂润滑谐波减速器在低温效率只有 15% 左右, 这说明真空润滑脂不适用与超低温情况使用。

表 6 XBS-40-100 型和 XBS-60-120 型谐波减速器高低温传动效率测试结果

Table 6 Test results of high and low temperature transmission efficiency of XBS-40-100 and XBS-60-120 harmonic reducer

Number	Type	Code	Lubrication method of rigid wheel	Lubrication method of flexspline	Transmission efficiency
1	XBS-40-100	2101803	MOSTP	MOSTP	69.4%~86.1%
2	XBS-60-120	2101518	DLC	MOSTP	65.2%~86.7%
3	XBS-40-100	2101807	PFPE	PFPE	32.4%~82.4%
4		2101806	MACs	MACs	15.3%~81%
5	XBS-60-120	2101617	PFPE	PFPE	32.8%~82.4%
6		2101526	MACs	MACs	15.1%~81.5%

3 结论

空间谐波减速器是空间机构中重要的组成部

分, 随着空间探索的越发深入, 谐波减速器在空间温度适应性上的能力越发重要。首先针对于 MoS₂ 基固体润滑涂层进行了优选, 对比 MOSTP 涂层与 MoS₂ / Zn 超晶格涂层和 TiN+MoS₂ / Zn 叠层涂层

的固体润滑性能。优选了不同柔轮&钢轮摩擦副方案,并对其进行了环境储存试验,证明固体润滑涂层优异的温度适应性。针对实际应用情况,对比研究基底粗糙度、载荷和速度条件等因素对涂层摩擦学性能的影响。最终,以 XBS-40-100、XBS-60-120 两款机型谐波减速器为试验件,研究不同润滑方式的谐波减速器在真空高低温条件下的性能指标及温度适应性。主要结论如下:

(1) 固体润滑涂层在真空高、低温条件下表现出极其优异的摩擦学性能,其中 MoS_2/Zn 超晶格涂层表现出优于 MOSTP 的摩擦因数,在经过 TiN 叠层设计后,其摩擦因数和磨损率进一步降低,在真空低温环境下实现超滑,并且耐磨性相较于 MOSTP 也提高了 2 倍。

(2) 真空低温、高温 ($100\text{ }^\circ\text{C}$) 的储存环境对于固体润滑涂层的结构无明显影响,涂层表面形貌完整,无剥落。环境储存试验后, MOSTP 涂层的摩擦学性能无明显变化,但 $\text{TiN}+\text{MoS}_2/\text{Zn}$ 叠层涂层在真空高温环境下的摩擦学性能变差,摩擦因数不稳定,这是由于温度引起掺杂元素 Zn 与 MoS_2 之间的互扩散影响了涂层的超晶格结构,致使其摩擦学性能变差。

(3) 通过谐波减速器的高、低温端的热试验可知,使用 MOSTP 润滑膜整体的热试验时间更长,载荷更大,相较于 DLC 润滑体现出一定的优势。此外,PFPE (全氟聚醚) 在低温的效率在 30% 左右,MACS (多烷基化环戊烷) 在低温效率只有 15% 左右,从产品效率分析,真空润滑脂不适用与超低温情况使用。然而,固体润滑谐波减速器相对于脂润滑谐波减速器在真空低温条件下,传动精度和传动效率具有明显的提升。通过对谐波减速器不同润滑方式的环境适应性的最大包络试验,可指导苛刻空间环境下谐波减速器润滑方式的使用。

参 考 文 献

- [1] MUSSER C M. The Harmonic drive breakthrough in mechanical drive design[J]. Machine Design, 1960, 14: 89-93.
- [2] KEIJI U, SLATTER R. Development of harmonic drive gear for space applications[C]//European Space Mechanisms and Tribology Symposium, 8th, Toulouse, France, Sep. 29-Oct. 01, 1999, 259-264.
- [3] 伊万诺夫, 沈允文, 李克美. 谐波齿轮传动[M]. 北京: 国防工业出版社, 1987.
- [4] 沈允文, 叶庆泰. 谐波齿轮传动的理论和设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1985.
- [5] 周晖, 温庆平, 张伟文. 谐波减速器在空间飞行器中的应用[J]. 真空与低温, 2004, 10(4): 187-192.
- [6] 崔博文, 沈允文. 谐波齿轮传动的接触状态分析及侧隙计算[J]. 机械科学与技术, 1996, 15(4): 569-572.
- [7] 周晖, 孙京, 温庆平, 等. 谐波减速器空间润滑及性能研究[J]. 宇航学报, 2009, 30(1): 378-394.
- [8] UEURA K, KIYOSAWA Y, KUROIJI J, et al. Tribological aspects of a strain wave gearing system with specific reference to its space application[J]. Part J: J. Engineering Tribology, 2008, 222: 1051-1061.
- [9] 付景国, 徐长旗, 朱新河, 等. 表面微织构复合固体润滑材料的摩擦学性能研究进展[J]. 中国表面工程, 2020, 33(2): 15-28.
- [10] MANIWA K. Study on lubrication mechanisms of strain wave gearing for space applications[D]. Tokyo: Tokyo Metropolitan Institute of Technology, 2006.
- [11] MANIWA K, OBARA S. Mixed lubrication analysis between wave generator and flexspline in strain wave gearing(numerical analysis under load-torque applying operation) [J]. Soc. Tribol., 2007, 52(1): 51-61.
- [12] CORTI C, SAWELLI P. Perfluoropolyether lubricants[J]. Journal of Synthetic Lubricant, 1993, 9(4): 310-330.
- [13] 冯大鹏, 翁立军, 刘维民. 全氟聚醚润滑油的摩擦学研究进展[J]. 摩擦学学报, 2005, 25(6): 597-602.

- FENG Dapeng, WONG Lijun, LIU Weimin. Research progress in tribology of perfluorinated polyether lubricants[J]. Tribology, 2005, 25(6): 597-602. (in Chinese)
- [14] ZARETSKY E V. Liquid lubrication in space[J]. Tribology International, 1990, 23(2): 75-93.
- [15] MEEKS C R, BOHNER J. Predicting life of solid-lubricated ball bearings[J]. ASLE Transactions, 1986, 29(2): 203-213.
- [16] 李波, 李瑞祥. 超载条件下空间润滑谐波减速器传动性能及摩擦磨损性能研究[J]. 摩擦学学报, 2011, 31(3): 216-220.
- LI Bo, LI Ruixiang. Study on drive performance and friction and wear performance of space lubricated harmonic Reducer under overload condition[J]. Tribology, 2011, 31(3): 216-220. (in Chinese)
- [17] GILL S, FORSTER D J, ROWNTREE R A. Thermal vacuum performance of cycloid and harmonic gearboxes with solid(MoS_2) and liquid(Braycote 601) lubrication[C]//Proceedings of the 5th ESMATS Symposium, Noordwijk, Netherlands, Oct 28-30, 1993. 1993: 334.
- [18] 孙晓军, 翁立军, 于德洋, 等. 固体润滑谐波减速器真空运行性能的试验[J]. 机械传动, 1988, 22(4): 22-25.
- SHUN Xiaojun, WONG Lijun, Yu Deyang, et al. Test on vacuum performance of solid lubricated harmonic reducer[J]. Mechanical Drive, 1988, 22(4): 22-25. (in Chinese)
- [19] 鞠永青, 孔宪, 胡元中. 谐波齿轮传动轮齿润滑研究[J]. 机械传动, 1992, 16(3): 29-34.
- JU Yongqing, KONG Xian, HU Yuanzhong. Study on tooth lubrication of harmonic gear Drive[J]. Mechanical Drive, 1992, 16(3): 29-34. (in Chinese)
- [20] SCHAFER I, BOURLIER P. Space lubrication and performance of harmonic drive gears[C]//Proceedings of the 11th ESMATS Symposium, Lucerne, Switzerland, Sep 21-23, 2005. 2005: 591.
-
- 作者简介: 孙繁新, 男, 1985 年出生, 硕士, 高级工程师。主要研究方向为空间运动机构的设计与验证。
- 蒲吉斌 (通信作者), 男, 1979 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为固体润滑涂层。
- E-mail: pujibin@nimte.ac.cn