

真空原子氧辐照下 MoS₂/Zn 薄膜的摩擦磨损性能

朱千业¹ 冯上郁^{1,2} 史彦斌^{1*} 蒲吉斌¹

1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所海洋关键材料全国重点实验室, 宁波, 315201
2. 宁波大学机械工程与力学学院, 宁波, 315211

摘要:采用磁控溅射技术制备了 MoS₂/Zn 润滑薄膜,研究了原子氧 MoS₂ 薄膜摩擦磨损性能的影响规律。结果显示,Zn 的掺入促使 MoS₂ 沿平行于(002)晶面的方向择优生长,薄膜结构致密有序,可有效抑制原子氧向薄膜内部侵蚀。转速 2 r/min、MoS₂ 靶电流 1.6 A、Zn 靶电流 0.3 A 的 MoS₂/Zn 多层薄膜的摩擦系数为 0.02、磨损率为 $1.9 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。原子氧环境中,MoS₂/Zn 多层薄膜展示出更好的摩擦学性能,在 $6.12 \times 10^{20} \text{ atoms/cm}^2$ 的辐照剂量下,MoS₂/Zn 多层薄膜的平均摩擦系数降至 0.01,其性能提升主要源于辐照产生的 MeO_x 和 MoS₂ 的协同作用。

关键词:磁控溅射;二硫化钼;滑动摩擦磨损;原子氧试验

中图分类号:TH117

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.01.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Friction and Wear Properties of MoS₂/Zn Films under Vacuum Atomic Oxygen Irradiation

ZHU Qianye¹ FENG Shangyu^{1,2} SHI Yanbin^{1*} PU Jibin¹

1.State Key Laboratory of Advanced Marine Materials, Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo, Zhejiang, 315201
2.College of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang, 315211

Abstract: MoS₂/Zn lubricating films were prepared by magnetron sputtering, and the influences of atomic oxygen on tribological properties of the films were investigated. Results show that Zn incorporation promotes the preferential growth of MoS₂ along the direction parallel to the (002) crystal plane, resulting in a dense and ordered film structure that effectively suppresses atomic oxygen erosion into the film. The friction coefficient of the MoS₂/Zn multilayer film is as 0.02 and the wear rate is as $1.9 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ under atomic oxygen conditions (rotation speed is as 2 r/min, MoS₂ target current is as 1.6 A, and Zn target current is as 0.3 A). The MoS₂/Zn multilayer films exhibit better tribological properties in atomic oxygen environment. Under an irradiation dose of $6.12 \times 10^{20} \text{ atoms/cm}^2$, the average friction coefficient of the MoS₂/Zn multilayer film decreases to 0.01. This performance improvement mainly stemmed from the synergistic lubrication effects between MeO_x formed after irradiation and the residual MoS₂.

Key words: magnetron sputtering; MoS₂; sliding friction and wear; atomic oxygen test

0 引言

摩擦磨损是造成航空航天领域能源耗散和运动部件失效的最直接原因,合理使用润滑材料可有效降低摩擦、减少磨损^[1-2]。固体润滑剂具有自润滑、使用寿命长、稳定性好等优点,广泛用于机械零部件的防护。MoS₂具有六方层状结构,层内以较强的 Mo-S 化学键结合,层间以较弱的范德华力结合,这种特殊的结构使 MoS₂具有良好的自润滑性^[3-4]。纯 MoS₂薄膜在生长过程中存在结构疏松、环境适应性弱等缺点,在空间环境服役时薄

膜暴露于空间辐照环境会引发化学组成和显微结构的变化,从而导致摩擦磨损性能恶化。其中,原子氧(atomic oxygen, AO)是最具破坏性的环境因素,近地轨道 AO 含量高达 80%,其强氧化性会导致 MoS₂薄膜发生氧化失效^[5-8]。

相关研究表明,复合结构和多层结构可抑制薄膜内部发生氧化反应^[9-13]。已有的研究证实原子氧辐照会引起 MoS₂基薄膜的氧化,而薄膜表面的氧化层能起到保护薄膜的作用^[14-15]。例如 GAO 等^[16]将 Sb₂O₃引入 MoS₂薄膜,制备了 MoS₂-Sb₂O₃复合薄膜,提高了耐磨性和抗氧化能力。在约为 $1.90 \times 10^{19} \text{ atoms/cm}^2$ 的辐照剂量下,AO 辐照的影响仅作用于薄膜的表层,薄膜主体结构基本保持稳定,表明该复合薄膜在 AO 环境中具有

收稿日期:2024-10-18

基金项目:国家重点研发计划(2022YFB3402800);浙江省自然科学基金(LDG25E050001)

较好的抗氧化能力。FAN等^[17]人在 5.4×10^{19} atoms/cm²的原子氧辐照条件下对WS₂/MoS₂复合薄膜进行了研究,发现薄膜表面的氧化层厚度仅为20 nm,且薄膜的摩擦磨损性能和未辐照样品几乎相同。GAO等^[18]通过磁控溅射技术制备的WS₂/MoS₂纳米多层薄膜有致密的结构和(002)择优取向, 2.23×10^{19} atoms/cm²的辐照剂量只引起薄膜表层氧化,而氧化层对薄膜有较好的保护作用。为改善MoS₂薄膜的结构致密性和抗氧化能力,相关研究中常采用Zn作为掺杂元素。JIANG等^[19]发现Zn作为添加元素保证了铜合金的腐蚀性,提高了耐腐蚀性。SONG等^[20]使用电磁沉积工艺合成了Zn-Mg涂层,结果表明软金属Zn作为中间层能显著改善涂层的附着力和成膜均匀性。现有研究^[14-18]多引入Sb₂O₃、WS₂等第二相改善薄膜性能,但多数研究采用短期低通量模拟辐照,这与在轨辐照量差距显著,且薄膜的摩擦磨损性能在原子氧辐照下并未得到改善。

基于此,本文采用多靶非平衡磁控溅射技术制备了MoS₂薄膜和MoS₂/Zn薄膜,分析了Zn元素掺杂对薄膜的成分、微观结构和力学性能的影响和薄膜耐辐照性能的影响规律。

1 试验部分

1.1 薄膜制备

采用磁控溅射系统,在316不锈钢和单晶硅片上制备了MoS₂薄膜和MoS₂/Zn薄膜。薄膜沉积前,为去除基底表面的杂质,分别在乙醇、丙酮溶液中超声清洗30 min后,用氮气吹干基底表面。薄膜沉积之前,使用Ar等离子体清洁靶材表面。将固定在双轴转架的基底移至磁控溅射腔室内,在-500 V的偏压下用Ar等离子体蚀刻基底,去除基底表面的氧化物。随后,为增强基底与薄膜之间的结合强度,在基底表面沉积Ti过渡层。沉积过程中,Ti的靶电流为5.0 A;Ti的靶电流降至0后,Zn、MoS₂的靶电流分别升至0.3 A和1.6 A,开始沉积MoS₂/Zn薄膜。制备MoS₂薄膜(1号薄膜)时,需要关闭Zn靶,薄膜沉积的实验装置如图1所示,薄膜的总沉积时间为180 min,样品架转速0.5、5、2 r/min对应2~4号薄膜。

1.2 基础表征

使用热场扫描电子显微镜表征薄膜表面和截面的微观形貌,采用X射线能谱仪(EDS)分析薄膜截面的成分。通过扫描探针显微镜测量薄膜表面的粗糙度。利用X-射线衍射仪表征薄膜的物

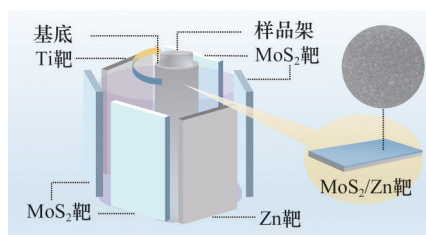


图1 薄膜沉积示意图

Fig.1 Schematic diagram of film deposition

相结构。采用纳米压痕仪测量薄膜的硬度 H 和弹性模量 E ,测量时的薄膜压入深度为200 nm(小于薄膜厚度的10%),每个薄膜测量6个压痕。采用Revetest划痕测试系统测量薄膜与基底之间的结合强度。采用共聚焦拉曼光谱仪分析薄膜磨损磨痕的组成。采用表面轮廓仪测量薄膜磨损轨迹的宽度和深度。

1.3 原子氧辐照试验

在ECR AB-700地面原子氧模拟试验舱中进行原子氧辐照试验。原子氧产生的碰撞动能和近地轨道空间器件表面受到的动能相当。近地轨道的原子氧以较高的通量撞击空间器,通量范围在 $10^{14} \sim 10^{15}$ atoms/(cm²·s),碰撞动能为5 eV^[21]。试验采用Kapton质量损失法^[22-23]标定的原子氧辐照通量为 1.7×10^{16} atoms/(cm²·s),真空压力为 1×10^{-3} Pa,原子氧碰撞动能为5 eV,持续辐照时间为3 h、10 h(对应 1.84×10^{20} atoms/cm²和 6.12×10^{20} atoms/cm²的辐照剂量)。

1.4 真空摩擦试验

采用真空摩擦试验机对原子氧辐照前后的薄膜进行真空摩擦试验。试验条件如下:温度为25℃,真空室压力约为 5×10^{-3} Pa,载荷为5 N,频率5 Hz(滑动速度为7.85 cm/s),对偶球为 $\phi 6$ mm的GCr15钢球。薄膜的磨损率 $W = V/(FL)$,其中, V 为磨损体积, F 为载荷, L 为总滑动距离。采用表面轮廓仪分析薄膜磨损轨迹,并计算磨损体积。

2 结果与分析

2.1 薄膜结构、成分和形貌

MoS₂薄膜、MoS₂/Zn薄膜的XRD谱如图2所示,12.3°、33.3°、59.6°处出现的衍射峰分别为MoS₂的(002)、(100)、(110)晶面衍射峰^[24],43.4°、50.5°和74.2°处出现了基底材料的衍射峰。基底材料的衍射峰出现的原因是X射线穿透薄膜后,照射到下面的基底材料并被基底反射。引入Zn元素后,MoS₂/Zn薄膜中MoS₂的(002)晶面衍射峰强度均大于MoS₂薄膜,(100)和(110)晶面的衍射峰却完全消失。这表明,适量掺杂Zn元素能显

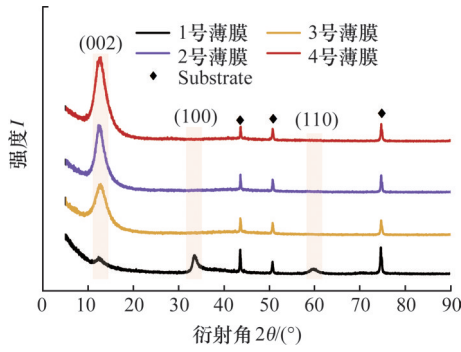


图2 纯 MoS₂和 MoS₂/Zn 薄膜的 XRD 谱图

Fig.2 XRD patterns of pure MoS₂ and MoS₂/Zn films

著提高薄膜在生长过程中(002)晶面的有序度。4号薄膜 MoS₂的(002)晶面衍射峰强度达到峰值,表明 Zn 与 MoS₂共溅射条件下,薄膜能实现高度有序的(002)晶面排列。这一生长模式有利于薄膜在平行于(002)晶面的方向上优先生长,有效抑制 MoS₂的随机取向生长,减少柱状晶界缺陷的产生^[25-26]。具有(002)择优取向的薄膜在生长过程中的孔隙和缺陷较少,有着优异的摩擦学性能^[27]。

如表 1 所示,MoS₂薄膜以 Mo、S 元素为主,MoS₂/Zn 薄膜以 Mo、S 元素为主,Zn 为掺杂元素。MoS₂/Zn 薄膜的厚度均小于 MoS₂薄膜,其中,4号 MoS₂/Zn 薄膜的厚度最小。图 2 中薄膜的(002)衍射峰强度增大,表明薄膜生长过程中晶体取向有序性提升,薄膜生长更倾向于沿 MoS₂(002)晶面择优取向发展,晶体结构排列更为紧密有序。

表 1 薄膜的元素含量、厚度和表面粗糙度

Tab.1 The elemental composition, thickness, and surface roughness of the films

薄膜	原子百分数/%			粗糙度/nm	厚度/ μm
	Mo	S	Zn		
No.1	33.02	66.98		22.10	3.38
No.2	43.11	55.82	1.07	4.22	2.33
No.3	34.84	59.54	5.62	2.42	2.42
No.4	35.58	58.28	6.14	2.08	2.05

图 3 所示为 Si 基底上沉积的薄膜表面与截面的形貌及薄膜表面粗糙度。4 种薄膜的表面粗糙

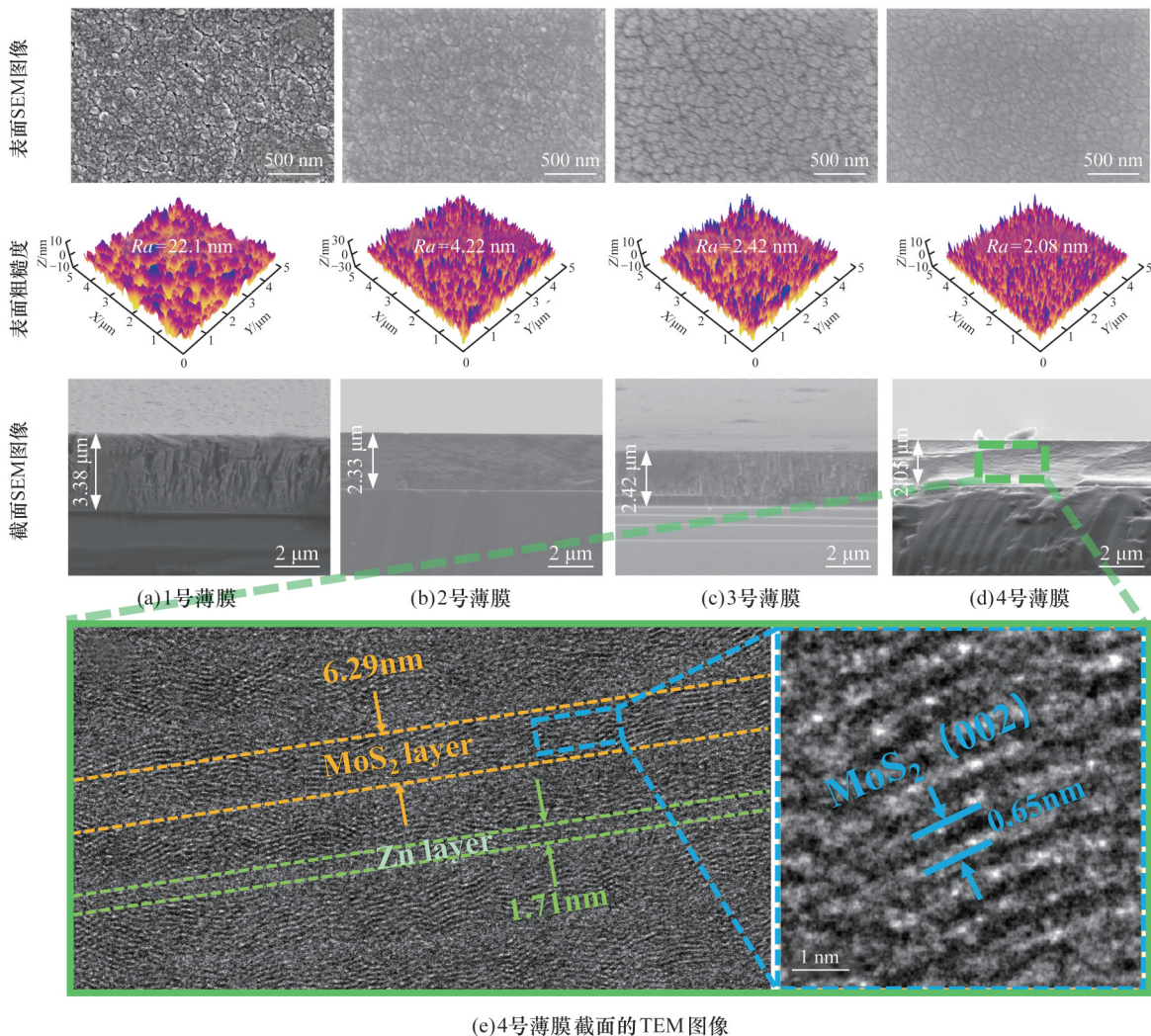


图 3 薄膜的 SEM 图像和表面粗糙度及 4 号薄膜截面的 TEM 图像

Fig. 3 SEM images of the film, surface roughness, and TEM images of cross-section of film No. 4

度 Ra 在 2.08~22.10 nm 之间,薄膜的厚度为 2.05~3.38 μm 。相比于1号薄膜,4号薄膜的表面颗粒较小,孔隙和缺陷较少。4号薄膜的表面粗糙度 Ra 最小,为 2.08 nm,说明薄膜表面均匀光滑、致密度高。4号薄膜截面的 TEM 图中,薄膜为 6.29 nm 厚 MoS_2 层、1.71 nm 厚 Zn 层交替构成的多层结构。在 MoS_2 层中,测得 MoS_2 的晶面间距约为 0.65 nm,对应其(002)晶面取向。从薄膜表面的微观形貌及截面的结构分析可知,在 MoS_2 中掺杂 Zn 可提高薄膜质量,减少薄膜生长过程中的缺陷和孔洞。4号薄膜的表面和截面微观结构更加致密平整,表面光滑均匀,由此推断4号薄膜具有更优异的摩擦学性能。

2.2 薄膜的机械性能

薄膜与基底之间的结合强度直接影响薄膜的质量和性能。薄膜制备通过沉积 Ti 中间层来增强薄膜与基底之间的结合力。如图 4a 所示,4 种薄膜的结合力在 6.27~17.29 N 内, MoS_2/Zn 的薄膜结合力显著大于 MoS_2 薄膜的薄膜结合力 6.27

N。4号薄膜的结合力高达 17.29 N,说明 Zn 层和 MoS_2 层交替沉积提高了薄膜的承载和耐磨性能。多层界面能抑制疲劳裂纹扩展,提高薄膜的摩擦学性能^[28]。薄膜的硬度和弹性模量如图 4 所示。 MoS_2 薄膜具有较低的硬度(2.17 GPa)和弹性模量(50.98 GPa)。 MoS_2/Zn 薄膜的硬度和弹性模量相对较大,其中,4号薄膜具有最大的硬度(6.00 GPa)和弹性模量(68.30 GPa)。图 4c 给出 4 种薄膜的 H/E 和 H^3/E^2 ,其中, H 为薄膜的硬度, E 为薄膜的弹性模量。 H/E 可衡量材料抵抗塑性变形的能力, H^3/E^2 综合了硬度和弹性模量对材料能量耗散的贡献,是评估材料抗冲击和抗损伤能力的重要参数^[29-30]。4号薄膜的 H/E (0.088)和 H^3/E^2 (46 MPa)远大于 MoS_2 薄膜的 H/E (0.043)和 H^3/E^2 (4 MPa)。4号多层薄膜优异的机械性能归因于:①Zn 引入 MoS_2 ,形成更致密的多层薄膜结构,阻止 MoS_2 生长过程中柱状晶的形成;②薄膜沿平行于(002)晶面的生长方式,使 MoS_2 晶粒细化,减少空隙和缺陷的生成。

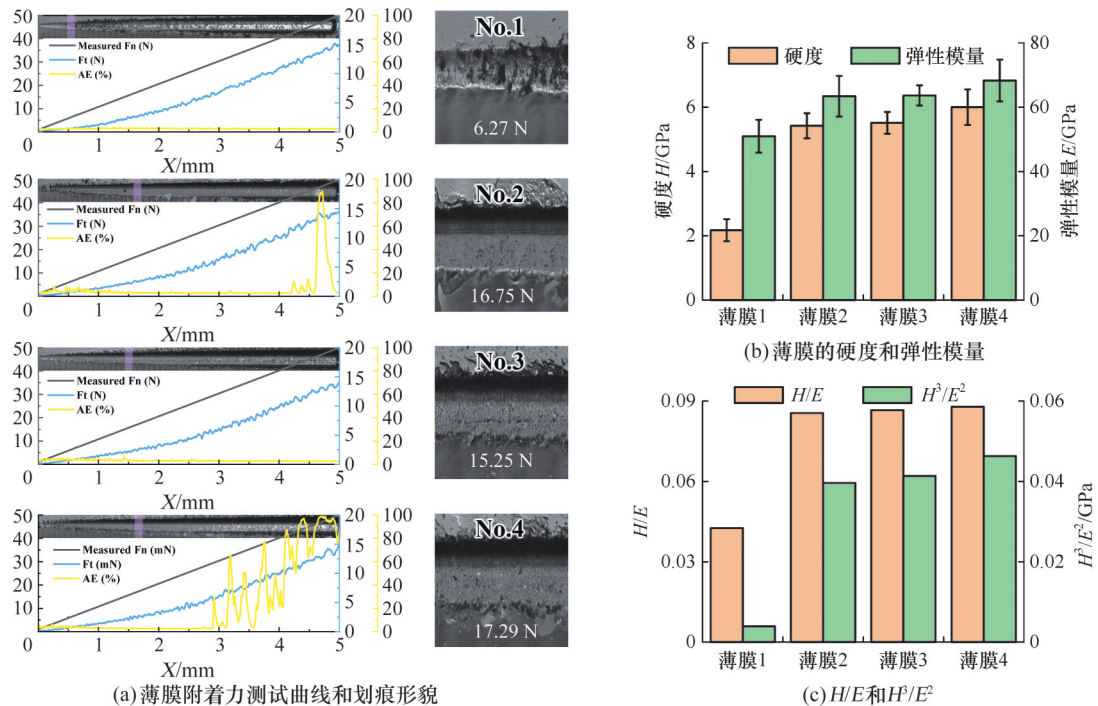


图 4 薄膜的力学性能

Fig.4 Mechanical properties of the films

2.3 薄膜的摩擦学性能

为探究 MoS_2/Zn 薄膜的摩擦磨损性能,进行了薄膜的往复滑动摩擦试验。图 5a 展示了 3 种 MoS_2/Zn 薄膜的摩擦曲线,其中,3号薄膜的摩擦曲线波动较大,在摩擦初期(0~2000 次滑动循环),摩擦系数由 0.015 升至 0.045,2000~12 000 次循环的摩擦系数逐渐减小,12 000~18 000 次

循环阶段的摩擦系数出现较大的波动。相较于 3 号薄膜,2 号、4 号薄膜的摩擦曲线波动较小。图 5b 所示为薄膜的平均摩擦系数和磨损率,薄膜的平均摩擦系数均小于 0.04,磨损率小于 $3 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$ 。4 号薄膜具有较小的摩擦系数(0.02)和磨损率($1.9 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$)。相关研究表明, MoS_2 薄膜的摩擦系数在 0.045 左右^[17]。

掺杂 Zn 之后的薄膜摩擦因数均减小,表明掺杂 Zn 极大改善了 MoS₂ 薄膜的摩擦磨损性能,可起到减摩耐磨的作用。图 5c 所示为 2~4 号薄膜的磨痕光学形貌。2 号薄膜的磨痕宽度在 156 μm 左右。2 号薄膜的磨痕宽于 3 号、4 号薄膜的原因是其机械性能差、表面承载能力较弱,摩擦过程中发生的塑性变形导致严重的黏着磨损。4 号薄膜磨痕宽度仅为 140 μm,磨痕区域光滑平整,说明其独特的薄膜结构提高了薄膜的抗磨损性能。

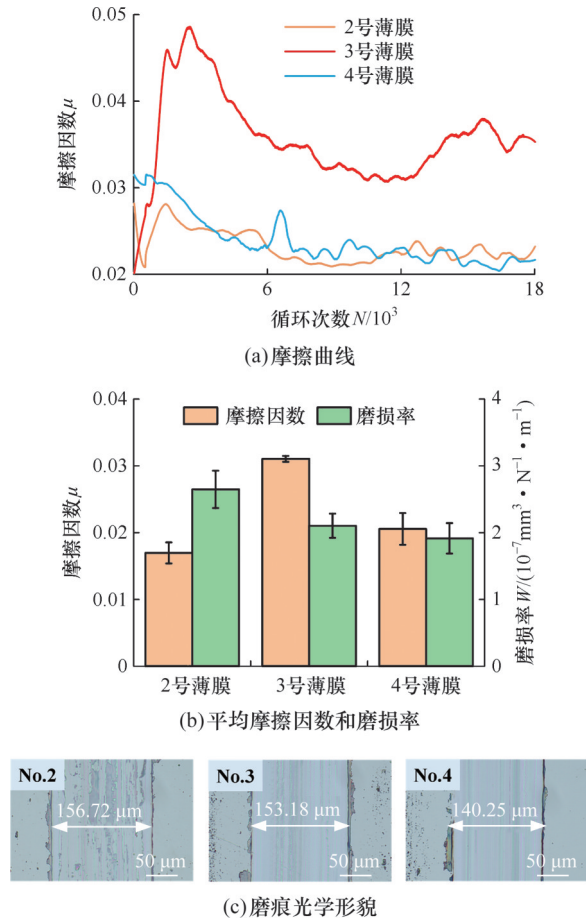


图 5 MoS₂/Zn 薄膜的摩擦磨损性能

Fig.5 Tribological properties of MoS₂/Zn films

为深入探讨薄膜的摩擦学行为,使用 EDS、拉曼光谱仪和光学显微镜分析摩擦后的磨斑。图 6 所示为磨斑的光学显微形貌和拉曼信息。光学图像中,转移膜边缘出现大量的磨屑;拉曼谱图中,2~4 号薄膜的转移膜都存在 MoS₂ 的特征峰: 375 cm⁻¹ 处的 E_{2g}¹、415 cm⁻¹ 处的 A_{1g}¹ [31-32]。拉曼谱图中没有出现其他拉曼峰,说明摩擦过程中形成的转移膜以 MoS₂ 为主。4 号薄膜的转移膜中的 A_{1g} 峰强度最大,表明转移膜中 MoS₂ 的结晶性较好。4 号薄膜特殊的薄膜结构和(002)择优取向也有益于改善薄膜的摩擦磨损性能。

图 7 为 2~4 号薄膜的 EDS 图像,观察发现磨

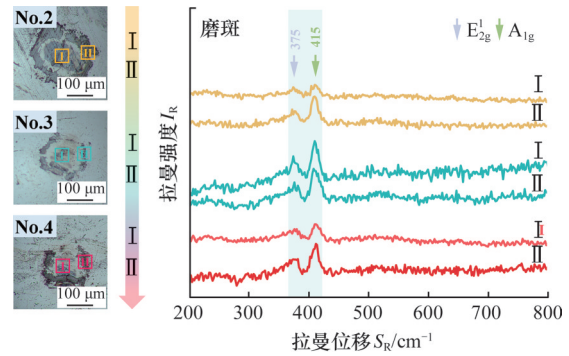


图 6 三种薄膜摩擦副表面磨斑的光学形貌及相应的拉曼光谱

Fig.6 Optical morphology and corresponding Raman spectra of surface wear scars on three types of film friction pairs

斑上的转移膜以 S、Mo 元素为主,Zn 元素极少,O 元素几乎不存在,这说明薄膜在摩擦过程中产生的转移膜的主要成分是 MoS₂。磨斑中心的转移膜较少,转移膜集中在磨斑边缘的磨屑中,这种现象出现的原因主要是由于摩擦过程中转移膜逐渐在接触表面累积所致,但随着摩擦的进行,转移膜不断被推至磨斑边缘,所以摩擦界面不稳定、摩擦曲线波动较大,如图 5 所示。

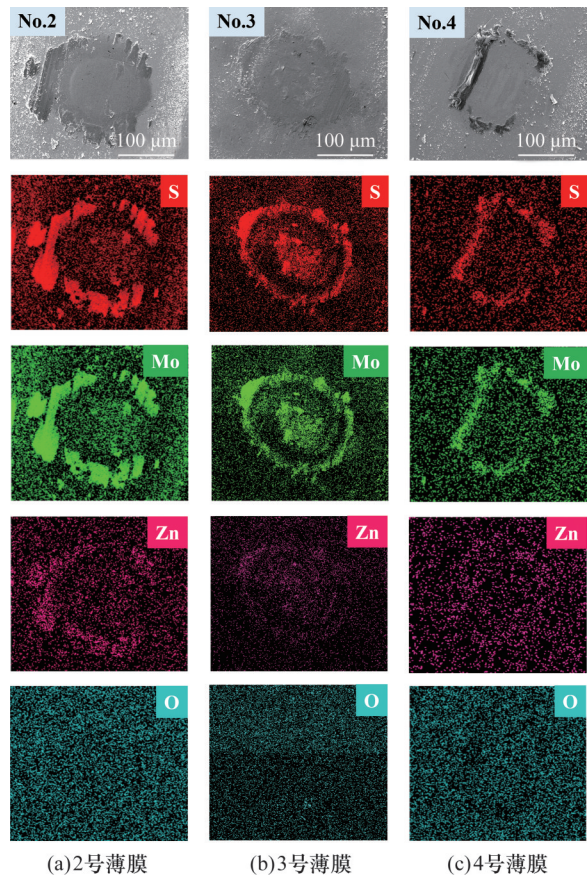


图 7 薄膜摩擦副表面磨斑的 EDS 图像

Fig.7 EDS images of wear scars on the friction pair surfaces of the films

2.4 薄膜的耐辐照性能

为评估 MoS₂/Zn 薄膜的耐辐照性能,进行原子氧辐照试验,其中,原子氧辐照剂量分别设为 1.84×10²⁰ atoms/cm²(持续辐照 3 h)和 6.12×10²⁰ atoms/cm²(持续辐照 10 h)。图8展示了2号、3号薄膜在不同辐照剂量下的摩擦曲线。与未辐照薄

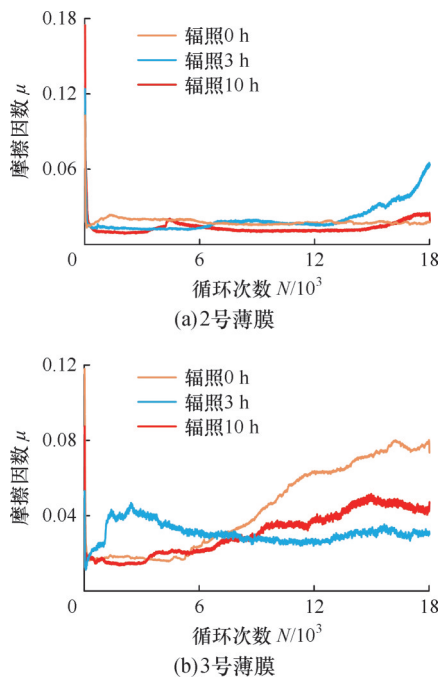
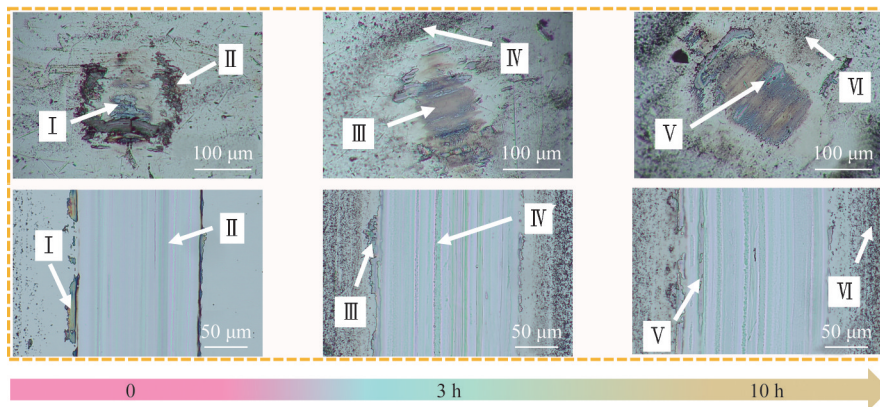
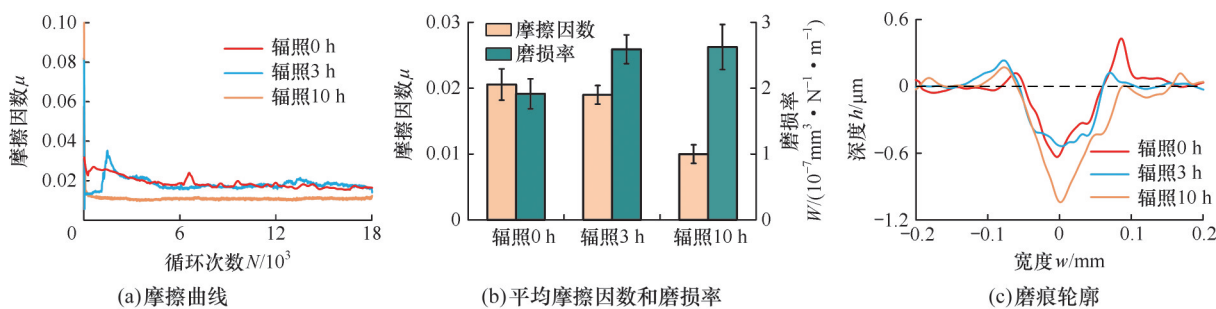


图8 薄膜原子氧辐照前后的摩擦曲线

Fig.8 The friction curves of the films before and after atomic oxygen irradiation



(d) 磨痕磨斑光学形貌

图9 4号薄膜的摩擦学性能

Fig.9 Tribological properties of the No.4 film

膜相比,辐照后的2号薄膜在摩擦初始阶段(0~3300次滑动循环)的摩擦因数随辐照时间的延长而减小。辐照3 h后的薄膜在6000~18 000次滑动循环的摩擦曲线波动较大,且随着滑动循环次数的增加,摩擦曲线呈上升趋势,最后的摩擦因数大于0.06。辐照10 h薄膜的摩擦曲线在4500次滑动循环出现凸点,此时的摩擦因数约为0.02;7500~13 500次滑动循环的摩擦曲线比较平稳,摩擦因数稳定在0.012左右;13 500~18 000次滑动循环的摩擦曲线呈上升趋势,最后的摩擦因数在0.022左右。辐照后的3号薄膜在摩擦初始阶段的摩擦因数均小于未辐照薄膜,之后,摩擦因数持续增大且大幅波动,7500~18 000次滑动循环的摩擦因数远大于未辐照的薄膜。

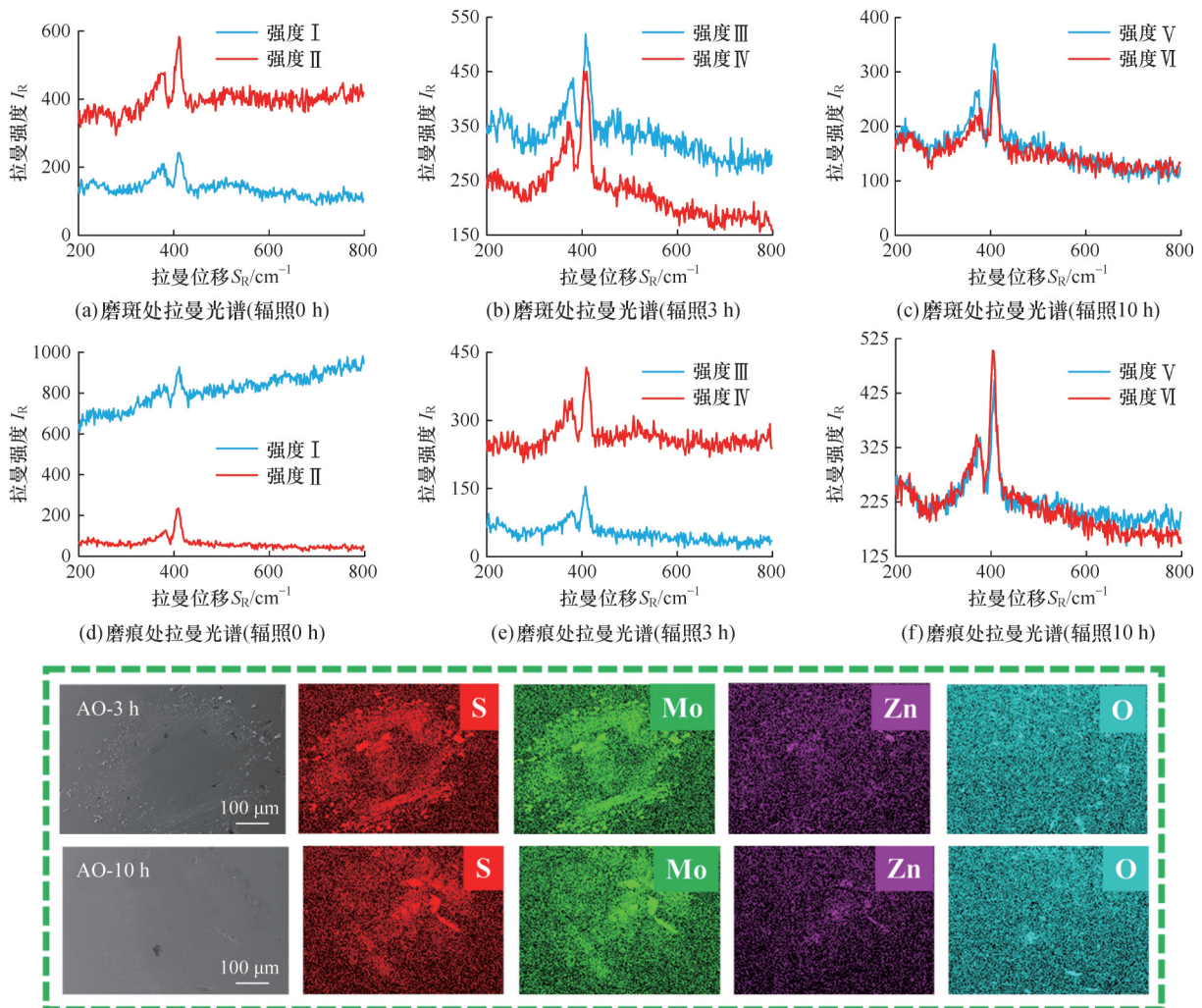
辐照处理后的2号薄膜和3号薄膜在摩擦初始阶段0~6000次滑动循环中均表现出较小的摩擦因数,随着辐照时间的延长,摩擦因数进一步减小。然而,在摩擦后期阶段即9000~18 000次滑动循环,摩擦因数出现明显的波动,辐照后薄膜的摩擦因数显著大于未辐照薄膜。对比辐照后薄膜的摩擦因数发现,随着辐照时间的延长,薄膜的平均摩擦因数呈减小趋势。

4号薄膜的摩擦学性能见图9。如图9a所示,辐照3 h的薄膜摩擦曲线显示出较大的波动;辐照10 h后,薄膜的摩擦曲线在整个测试过程趋于稳

定,摩擦因数稳定在 0.012。如图 9b 所示,4 号薄膜的平均摩擦因数随辐照时间延长而减小,辐照 10 h 薄膜的摩擦因数低至 0.01。相比于未辐照的薄膜,辐照后薄膜的磨损率随辐照时间延长而逐渐增大,但辐照 3 h 和 10 h 后的磨损率变化并不大。根据已有研究结果^[16-33],原子氧会导致薄膜表面在几十纳米的范围内发生氧化。由此推测,薄膜表面在原子氧辐照下可能发生氧化,导致磨损率变大,但氧化仅发生在薄膜表面,因此随辐照剂量的增大,薄膜的磨损率并没有增大。图 9c 中,辐照 3 h 的薄膜截面轮廓比未辐照的薄膜宽,但深度差别不大,而辐照 10 h 的薄膜截面轮廓有较大的深度。这表明辐照后薄膜表面形成的氧化物颗粒可能是摩擦因数减小的原因。随着辐照剂量的增加,摩擦因数降至 0.01,这表明辐照过程并未对薄膜的摩擦性能造成不利影响。如图 9d 所示,未辐照的薄膜磨斑较小,磨痕较窄。 $1.84 \times$

10^{20} atoms/cm² 的辐照剂量下,磨斑上的转移膜逐渐分布均匀,磨痕宽度增大,磨痕边缘的磨屑也明显增多。 6.12×10^{20} atoms/cm² 的剂量下,磨斑的表面转移膜的均匀性进一步提高,但磨痕宽度变化不明显。

图 10 所示为 4 号薄膜辐照前后的磨痕和磨斑区域的拉曼图谱, 375 cm^{-1} 处的 E_{2g}^1 和 415 cm^{-1} 处的 A_{1g} 是 MoS₂ 的两个典型拉曼峰^[31-32]。原子氧辐照后,MoS₂/Zn 多层薄膜转移膜的拉曼谱图只有属于 MoS₂ 的 2 个特征峰,几乎没有氧化物峰。在 6.12×10^{20} atoms/cm² 的辐照剂量下,薄膜也没有出现氧化峰。在 EDS 图(图 10g)中发现原子氧辐照后的对偶球磨斑区域有少量的 O 元素富集,对应区域也有 Zn 元素和 Mo 元素富集,说明有 Mo 和 Zn 的氧化物生成。结合拉曼和 EDS 信息可知,辐照后薄膜的摩擦界面以 MoS₂ 为主,且辐照后的 4 号薄膜摩擦界面中还夹杂着少量的氧化



(g) 3 h和10 h磨斑标记处对应的EDS

图 10 原子氧辐照前后 4 号薄膜磨痕和磨斑标记处(在图 9d 中标记)的拉曼光谱及磨斑 EDS 图像

Fig.10 Raman spectra and EDS images of the wear scars and wear tracks (marked locations in Fig. 9d) on the No.4 film before and after atomic oxygen irradiation

物颗粒 MeO_x 。分析薄膜辐照后的拉曼和EDS信息,薄膜的摩擦界面以 MoS_2 为主导并弥散分布着微量氧化物颗粒 MeO_x , MeO_x 颗粒可增大 MoS_2 层与层之间的剪切作用,进而提高薄膜的润滑性能^[33-36]。如图11所示, MeO_x 颗粒和 MoS_2 层的协同作用再加上摩擦过程中诱导产生的 MoS_2 高度有序排列,共同促成了辐照后薄膜摩擦学性能的优化。这为理解原子氧辐照下 MoS_2 基薄膜摩擦因数减小的机制提供了线索。

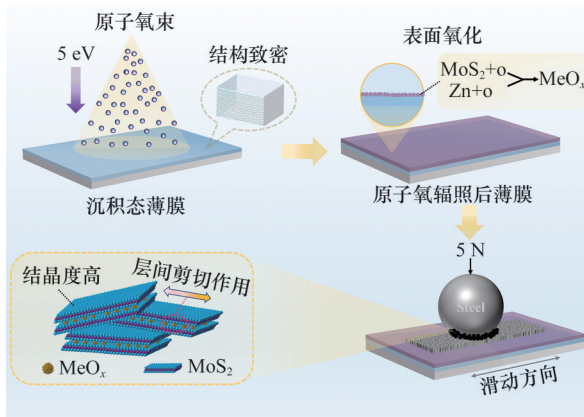


图11 原子氧辐照下 MoS_2/Zn 多层薄膜的摩擦机理图

Fig.11 Schematic diagram of friction mechanism of MoS_2/Zn multilayer films under atomic oxygen irradiation

3 结论

通过对薄膜结构的精确调控,设计了 MoS_2 - Zn - MoS_2 多层结构。具有这种结构的 MoS_2/Zn 纳米多层薄膜在真空环境中展现出优异的摩擦磨损性能。 Zn 的添加明显促进了 MoS_2 的(002)择优取向,使薄膜在生长过程中朝着平行于(002)晶面方向生长,有效避免了柱状晶的形成,减少了 MoS_2 中的孔隙和缺陷,使薄膜结构更加致密有序。转速2 r/min、 MoS_2 靶电流1.6 A、 Zn 靶电流0.3 A的 MoS_2/Zn 多层薄膜具有更小的摩擦因数(0.02)和磨损率($1.9 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$)。在原子氧环境中, MoS_2/Zn 多层薄膜呈现优异的摩擦学性能,在 $6.12 \times 10^{20} \text{ atom/cm}^2$ 的辐照剂量下,薄膜的摩擦性能更好,摩擦曲线趋于稳定,摩擦因数约为0.01。这主要归因于原子氧辐照产生的 MeO_x 在摩擦过程中被 MoS_2 包裹,增大了 MoS_2 层间的剪切作用,减小了滑动阻力。

参考文献:

[1] 蒲吉斌,王立平,薛群基. 石墨烯摩擦学及石墨烯复合润滑材料的研究进展[J]. 摩擦学学报, 2014, 34(1): 93-112.

PU Jibin, WANG Liping, XUE Qunji. Progress of Tribology of Graphene and Graphene-based Composite Lubricating Materials[J]. Tribology, 2014, 34(1): 93-112.

[2] 范昕,任思明,王海新,等. MoS_2/WS_2 复合薄膜的环境适应性和摩擦学性能[J]. 中国机械工程, 2022, 33(12): 1468-1476.

FAN Xin, REN Siming, WANG Haixin, et al. Environmental Adaptability and Tribological Properties of MoS_2/WS_2 Composite Films[J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(12): 1468-1476.

[3] AHMAD K, SHINDE M A, KIM H. Molybdenum Disulfide/Reduced Graphene Oxide: Progress in Synthesis and Electro-catalytic Properties for Electrochemical Sensing and Dye Sensitized Solar Cells [J]. Microchemical Journal, 2021, 169: 106583.

[4] JIANG Y, SRIDHAR S, LIU Z, et al. The Interplay of Intra- and Inter-layer Interactions in Bending Rigidity of Ultrathin 2D Materials [J]. Applied Physics Letters, 2023, 122(15): 153101.

[5] OHMAE N. Influence of Atomic Oxygen on Space Tribology in a Low Earth Orbit [J]. Wear, 1993, 168(1/2): 99-103.

[6] LYU Mei, WANG Qihua, WANG Tingmei, et al. Effects of Atomic Oxygen Exposure on the Tribological Performance of ZrO_2 -reinforced Polyimide Nanocomposites for Low Earth Orbit Space Applications [J]. Composites Part B: Engineering, 2015, 77: 215-222.

[7] SHIN K B, KIM C G, HONG C, et al. Prediction of Failure Thermal Cycles in Graphite/Epoxy Composite Materials under Simulated Low Earth Orbit Environments [J]. Composites Part B: Engineering, 2000, 31(3): 223-235.

[8] LIU Guanghai, CHENG Laifei, LUAN Xingang. Radiation Damage Behavior of Carbon/Carbon Composite in Low Earth Orbit Environment [J]. Ceramics International, 2019, 45(13): 16088-16096.

[9] FAN Hengzhong, HU Tianchang, WAN Hongqi, et al. Surface Composition-Lubrication Design of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ni}$ Laminated Composites—Part II: Tribological Behavior of LaF_3 -doped MoS_2 Composite Coating in a Water Environment [J]. Tribology International, 2016, 96: 258-268.

[10] HAN Cuihong, LI Guolu, MA Guozheng, et al. Research on Atomic Oxygen Erosion Influence of Structural Damage and Tribological Properties of Mo/MoS_2 - Pb - PbS Thin Film [J]. Materials, 2022, 15(5): 1851.

[11] FREY G L, TENNE R, MATTHEWS M J, et al. Raman and Resonance Raman Investigation of MoS_2 Nanoparticles [J]. Physical Review B, 1999, 60(4): 2883-2892.

[12] ZHU Qianye, LIU Xi, WANG Yunfeng, et al. Effect of Vacuum Atomic Oxygen Irradiation on Tribological Properties of MoS_2/WC Multilayer Films [J]. Ceramics International, 2024, 50(14): 25103-25114.

[13] GAO Zhenrong, NIE Weiming, WANG Haixin, et al. Enhancing Mechanical Performance and High-temperature Lubrication Enabled by MoS_2/WB_2 Nanolayered Films [J]. Composites Part B: Engineering, 2024, 275: 111350.

[14] CROSS J B, MARTIN J A, POPE L E, et al. Atomic Oxygen- MoS_2 Chemical Interactions [J]. Surface and Coatings Technology, 1990, 42(1): 41-48.

[15] TAGAWA M, YOKOTA K, MATSUMOTO K, et al. Space Environmental Effects on MoS_2 and Diamond-like Carbon Lubricating Films: Atomic Oxygen-induced Erosion and Its Effect on Tribological Properties [J]. Surface and Coatings Technology, 2007, 202(4/5/6/7): 1003-1010.

- [16] GAO Xiaoming, HU Ming, FU Yanlong, et al. MoS₂-Sb₂O₃ Film Exhibiting Better Oxidation-resistance in Atomic Oxygen Environment[J]. Materials Letters, 2018, 219: 212-215.
- [17] FAN Xin, SHI Yanbin, CUI Mingjun, et al. MoS₂/WS₂ Nanosheet-based Composite Films Irradiated by Atomic Oxygen: Implications for Lubrication in Space [J]. ACS Applied Nano Materials, 2021, 4(10): 10307-10320.
- [18] GAO Xiaoming, FU Yanlong, JIANG Dong, et al. Constructing WS₂/MoS₂ Nano-scale Multilayer Film and Understanding Its Positive Response to Space Environment [J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 353: 8-17.
- [19] JIANG Yun, ZHANG Wenjing, MI Xujun, et al. Antibacterial Property, Corrosion and Discoloration Resistance of Pure Copper Containing Zn or Ni[J]. Rare Metals, 2022, 41(12): 4041-4046.
- [20] SONG M, KIM H, LEE S. Effect of a Zn Interlayer on the Adhesion Strength and Corrosion Resistance of Zn - Mg Coated TRIP Steel[J]. ISIJ International, 2019, 59(6): 1113-1118.
- [21] GAO Kaixiong, WANG Yongfu, ZHANG Bin, et al. Effect of Vacuum Atomic Oxygen Irradiation on the Tribological Properties of Fullerene-like Carbon and MoS₂ Films [J]. Tribology International, 2022, 170: 107499.
- [22] HU Ming, GAO Xiaoming, SUN Jiayi, et al. The Effects of Nanoscaled Amorphous Si and SiNx Protective Layers on the Atomic Oxygen Resistant and Tribological Properties of Ag Film[J]. Applied Surface Science, 2012, 258(15): 5683-5688.
- [23] ZHANG Wen, YI Min, SHEN Zhigang, et al. Graphene-reinforced Epoxy Resin with Enhanced Atomic Oxygen Erosion Resistance[J]. Journal of Materials Science, 2013, 48(6): 2416-2423.
- [24] DENG Wen, ZHAO Xiaoqin, AN Yulong, et al. Improvement of Tribological Properties of As-sprayed 8YSZ Coatings by In-situ Synthesis C/MoS₂ Composite Lubricant [J]. Tribology International, 2018, 128: 260-270.
- [25] REN S, CUI M, MARTINI A, et al. Macroscale Superlubricity Enabled by Rationally Designed MoS₂-based Superlattice Films[J]. Cell Reports Physical Science, 2023, 4(5): 101390.
- [26] YANG Xing, LI Ruiyun, WANG Yongfu, et al. Tunable, Wide-temperature, and Macroscale Superlubricity Enabled by Nanoscale van Der Waals Heterojunction-to-homojunction Transformation [J]. Advanced Materials, 2023, 35(39): e2303580.
- [27] REN Siming, CAO Wentao, CUI Mingjun, et al. Environmentally Adaptive Lubrication Enabled by Gradient Structure Design of TiN-MoS₂/Ti[J]. Surface and Coatings Technology, 2023, 458: 129317.
- [28] MBAM S O, GOU X. Interface Crack Growth Rate and Fatigue Life of Multilayer-coated Conductor Tapes[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2020, 228: 106910.
- [29] PAUSCHITZ A, ROY M. Mechanical and Friction Properties of Mo-Se-C Film at Low Load[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 405: 126730.
- [30] ZHANG Rui, QIAO Li, ZHANG Hong, et al. Influence of Au²⁺ Ions Irradiation on the Structure and Wear Resistance of Amorphous MoS₂ Films[J]. Applied Surface Science, 2022, 583: 152497.
- [31] XIA Ming, LI Bo, YIN Kuibo, et al. Spectroscopic Signatures of AA' and AB Stacking of Chemical Vapor Deposited Bilayer MoS₂ [J]. ACS Nano, 2015, 9(12): 12246-12254.
- [32] CHAKRABORTY B, MATTE H S S R, SOOD A K, et al. Layer-dependent Resonant Raman Scattering of a Few Layer MoS₂ [J]. Journal of Raman Spectroscopy, 2013, 44(1): 92-96.
- [33] 胡汉军, 张凯锋, 周晖, 等. 原子氧对非平衡磁控溅射 MoS₂-Ti 复合薄膜真空摩擦学性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2021, 41(5): 627-635.
- HU Hanjun, ZHANG Kaifeng, ZHOU Hui, et al. Influence of Atomic Oxygen on the Vacuum Tribological Performance of MoS₂-Ti Composite Films Deposited by Unbalanced Magnetron Sputtering[J]. Tribology, 2021, 41(5): 627-635.
- [34] ZHANG Haijing, REN Siming, PU Jibin, et al. Barrier Mechanism of Multilayers Graphene Coated Copper Against Atomic Oxygen Irradiation [J]. Applied Surface Science, 2018, 444: 28-35.
- [35] CHENG Li, SHI Yanbin, HAO Yu, et al. Multilayer Boron Nitride Nanofilm as an Effective Barrier for Atomic Oxygen Irradiation [J]. Applied Surface Science, 2020, 504: 144394.
- [36] FU Yanlong, JIANG Dong, WANG Desheng, et al. Tribological Performance of MoS₂-WS₂ Composite Film under the Atomic Oxygen Irradiation Conditions [J]. Materials, 2020, 13(6): 1407.

(编辑 张 洋)

作者简介:朱千业,男,1996年生,硕士研究生。研究方向为材料表面防护。发表论文2篇。E-mail: zhuqianye@nimte. ac. cn。
史彦斌(通信作者),男,1996年生,博士研究生。研究方向为极端环境新型功能防护涂层。发表论文5篇。E-mail: shiyanbin@nimte. ac. cn。

本文引用格式:

朱千业,冯上郁,史彦斌,等. 真空原子氧辐照下 MoS₂/Zn 薄膜的摩擦磨损性能[J]. 中国机械工程,2026,37(1):83-91.

ZHU Qianye, FENG Shangyu, SHI Yanbin, et al. Friction and Wear Properties of MoS₂/Zn Films under Vacuum Atomic Oxygen Irradiation[J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(1): 83-91.