0254-6124/2023/43(5)-0899-08 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

LIU Jian, YAN Zhen, HAO Junying, LIU Weimin. Response Mechanism of Tribological Properties of Al:WS_2 Film under Different Ambient Thermal Shock (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2023, **43**(5): 899–906. DOI:10.11728/cjss2023.05.2022–0037

不同气氛热冲击下 Al:WS_2 薄膜摩擦学性能的响应机理*

刘 建[1,2,3] 剡 珍[1,3] 郝俊英[1,3] 刘维民[1]

1(中国科学院兰州化学物理研究所 固体润滑国家重点实验室 兰州 730000)

2(中国科学院大学 北京 100049)

3(青岛市资源化学与新材料研究中心 青岛 266000)

摘 要 采用磁控溅射技术制备了 Al:WS_2 薄膜。为考查不同气氛热冲击下 Al:WS_2 薄膜摩擦学性能的响应机理，采用自行研制的温度交变真空摩擦试验机开展了真空、氮气及氧气气氛的–100～+250℃ 的热冲击试验，并对热冲击后 Al:WS_2 薄膜结构、成分以及摩擦学性能进行了研究。研究发现，热冲击后，Al:WS_2 薄膜柱状晶长大，S 含量减少，部分 WS_2 被氧化为 WO_3，薄膜硬度增加。经氮气热冲击后，薄膜的（002）衍射峰强度明显增强，使得摩擦系数降低。经真空热冲击后，在薄膜表面形成的 WO_3 起到磨粒磨损作用，减少了薄膜寿命；经氧气热冲击后，Al:WS_2 薄膜中大量起润滑作用的 WS_2 被氧化为 WO_3，薄膜的寿命显著缩短。

关键词 Al:WS_2 薄膜，热冲击，气氛，摩擦

中图分类号 V519.11

Response Mechanism of Tribological Properties of Al:WS_2 Film under Different Ambient Thermal Shock

LIU Jian[1,2,3] YAN Zhen[1,3] HAO Junying[1,3] LIU Weimin[1]

1(*State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou* 730000)

2(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

3(*Qingdao Center of Resource Chemistry and New Materials, Qingdao* 266000)

* 国家自然科学基金项目（51835012，51975554），甘肃省自然科学基金项目（21JR7RA093）和青年人才托举工程项目共同资助

2022-08-07 收到原稿，2022-11-30 收到修定稿

E-mail：jliu@licp.cas.cn. 通信作者 郝俊英，E-mail：jyhao@licp.cas.cn

©The Author(s) 2023. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Abstract Al:WS_2 films were prepared by magnetron sputtering technology. In order to investigate the response mechanism of the tribological properties of Al:WS_2 film under different ambient thermal shock, the thermal shock tests of –100～+250℃ in vacuum, nitrogen and oxygen were carried out using the temperature altering vacuum tribometer developed, and the structure, composition and tribological properties of Al:WS_2 films after thermal shock were mainly studied. It was found that the columnar crystal of Al:WS_2 film grows, S content decreases, part of WS_2 is oxidized to WO_3, and the hardness of film increases after thermal shock. After thermal shock under nitrogen atmosphere, the intensity of (002) diffraction peak of Al:WS_2 film is obviously enhanced, and the friction coefficient decreased. After thermal shock with vacuum, WO_3 appears on the surface of Al:WS_2 film plays the role of abrasive wear, which reduces the life of film. After oxygen thermal shock, a large number of WS_2 is oxidized to WO_3, and the wear life of the film is significantly shortened due to the serious abrasive wear.

Key words Al:WS_2 film, Thermal shock, Atmosphere, Friction

0 引言

几乎所有的航天器运动机构都需要润滑[1–5]。航天器受到运行轨道、方位、姿态等的影响，全日照时温度可达 150℃ 以上，处于阴影时温度低至–100℃ 以下，对航天器润滑材料的稳定性及可靠性提出了极高要求[5–7]。此外，航天器在发射过程中，会经历不同气氛环境的影响。因此，深入研究热气氛对润滑材料的作用机理可为改善润滑材料的空间环境适应性提供理论依据。

二硫化钨（WS_2）是典型的过渡金属二硫属化合物（Transitional metal dichalcogenide, TMD），具有与二硫化钼（MoS_2）相似的层状六方晶体结构，S-W-S 薄层单元内由强的 W-S 共价键结合，层间以弱的范德华力结合，易于滑移并表现出低摩擦，具有良好的润滑性能[8,9]。在大气环境下，WS_2 具有比 MoS_2 更高的抗氧化温度，表现出较优的热氧化稳定性，因此近年来受到了广泛关注[10–13]。通过复合化引入少量的金属 Al 可以有效阻止薄膜柱状晶的生长，增加致密层的厚度，优化 WS_2 薄膜微观结构，改善薄膜的力学性能，使得薄膜在原子氧辐照后仍具有良好的摩擦学性能，在空间中具有潜在的应用[14,15]。

此前，大量研究表明，WS_2 和 MoS_2 薄膜在空气尤其是潮湿空气中会经历严重的氧化，生成不利于润滑的 WO_3 和 MoO_3，进而降低薄膜的润滑性能[16,17]。然而，真空热处理能够优化 MoS_2 薄膜的结构，出现利于润滑的纳米晶，从而大大提高薄膜的摩擦学性能[16]。显然热气氛下过渡金属二硫属薄膜的结构和性能会发生显著变化，但是这方面的研究还比较少。本文开展了不同气氛热冲击下 Al:WS_2 薄膜摩擦学性能的响应机理研究。通过对真空、氮气和氧气热冲击下 Al:WS_2 薄膜结构、成分以及摩擦学性能等方面的研究，揭示 Al:WS_2 薄膜摩擦学性能的响应机制。

1 试验

1.1 薄膜制备

采用等离子体增强化学气相沉积（Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD）设备在 n-型硅片（100）以及 9 Cr18 钢（Φ 25×8 mm, $Ra \approx$ 0.03 μm）基体上沉积 Al:WS_2 薄膜，分别用于微观形貌分析和摩擦学性能研究。沉积前，基体分别在石油醚和无水乙醇中超声清洗 30 min。沉积室的背底真空抽至 1.0×10^{-3} Pa 时，基体由 Ar^+清洗，以除去表面污染，提高膜–基结合强度。随后，开始 Al:WS_2 薄膜的沉积，溅射沉积工艺参数列于表 1。

1.2 Al:WS_2 薄膜的不同气氛热冲击试验

在自行研制的温度交变真空摩擦试验机上开展真空、氮气及氧气气氛于–100～+250 ℃ 温度范围的热冲击试验，将钢基体与硅基体的 Al:WS_2 薄膜放入试验机的热沉中，分别采用液氮和红外灯进行降温和加热，降温与升温速率分别为 –1 ℃·min^{-1} 和 +3 ℃·min^{-1}，保温时间为 60 min。未处理及在真空、氮气与氧气气氛热冲击的样品分别标记为 Al:WS_2, Vacuum, N_2 和 O_2。

1.3　薄膜的表征

采用 JSM-7610 F 型场发射扫描电子显微镜(FE-SEM)观察薄膜的微观结构以及磨痕与磨斑的磨损形貌,通过附带的 X 射线能量色散谱(EDS)对对偶球磨斑的主要元素组成进行分析;采用掠入射 X 射线衍射仪(GIXRD,入射角 1°)表征薄膜的晶体结构;用布洛维显微硬度仪(JMHVS-100 ZCCD,试验力 0.098 N(10 gf,gf 表示克力,即 1 g 物体所受的重力),保荷时间 10 s)测量薄膜的硬度;使用 X 射线光电子能谱仪(XPS, ESCALAB 250, Al kα)分析薄膜表面的元素含量及化学状态。

1.4　摩擦学性能测试

通过真空球–盘摩擦试验机测试未处理 Al:WS_2 薄膜及不同气氛热冲击薄膜在真空环境下的摩擦学性能,对偶摩擦副为直径 6 mm 的 9 Cr18 钢球。试验条件为转速 500 r·min^{-1},法向载荷 5 N,旋转半径 4 mm,真空度 5.0×10^{-5} Pa,试验温度为 20±5 ℃。利用非接触式表面三维轮廓仪对磨损表面和磨损体积进行测试并计算磨损率。

表 1　磁控溅射沉积 Al:WS_2 薄膜的工艺参数

Table 1　Deposition parameter of Al:WS_2 film by magnetron sputtering system

Deposition parameters	Values
WS_2 target power/W	600
Al target current/A	0.15
Working pressure/Pa	6.0×10^{-3}
Bias voltage/V	–20
Ar flow/(mL·min^{-1})	70
Substrate rotation speed/(r·min^{-1})	1
Deposition time/min	150

2　结果与讨论

2.1　薄膜结构

图 1 给出的是未处理及经不同气氛热冲击 Al:WS_2 薄膜表面和断面的形貌,可以看出,制备的 Al:WS_2 薄膜表面呈现枝状晶结构,表面存在大量孔隙;断面则由下层近基底的致密层和上层柱状晶层组成,薄膜厚度为 1.65 μm。相比未处理的薄膜表面,经真空与氮气热冲击的样品形貌几乎没有变化,然而经氧气热冲击的薄膜表面孔隙尺寸明显增大。此外,薄膜的厚度在热冲击后减小,细小的柱状晶表现出长大的趋势,尤其是经氧气热冲击后,薄膜厚度明显减小,柱状晶长大较为明显。

图 2 给出了未处理与热冲击 Al:WS_2 薄膜的 GIXRD 谱图。沉积的 Al:WS_2 薄膜不仅有(100)和(112)棱面取向的生长,还有以(002)基面取向的生长,出现沿着(002)基面的生长将有利于薄膜的润滑性能[11]。可以看出,经真空与氮气热冲击后,薄膜的结晶性有所改善。经氮气热冲击后,薄膜的(002)衍射峰强度明显增强,并且由于 WO_3 生成导致的(002)衍射峰向低角度偏移,表明层间尺寸增大,这些或许可以带来更好的摩擦学性能[9,18]。经氧气热冲击后的薄膜中,WO_3 的衍射峰强度明显增加,有利于润滑性能的(002)基面取向的衍射峰几乎消失,预示着薄膜摩擦学性能的严重退化。

图 3 给出了未处理及不同气氛热冲击后 Al:WS_2 薄膜的硬度。制备的 Al:WS_2 薄膜的硬度为 144 Hv,经真空、氮气和氧气热冲击后,薄膜的硬度分别提高到 169 Hv, 182 Hv 和 239 Hv,热冲击后薄膜的硬度

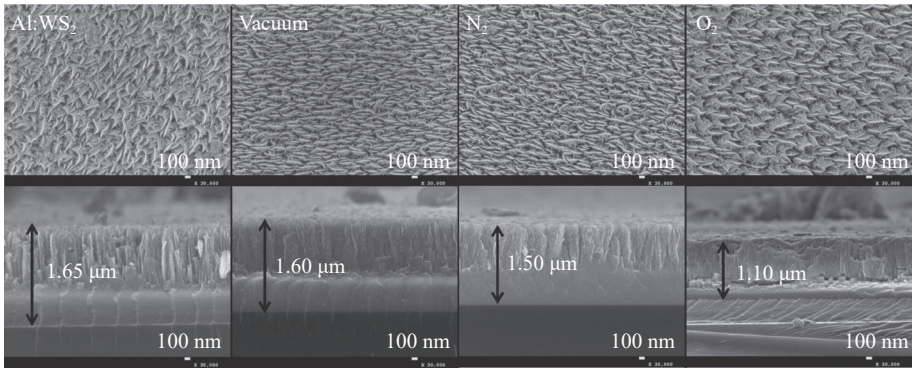


图 1　未处理及经热冲击的 Al:WS_2 薄膜表面与断面形貌

Fig. 1　FESEM morphologies of surface and cross-section of untreated and thermal shocked Al:WS_2 films

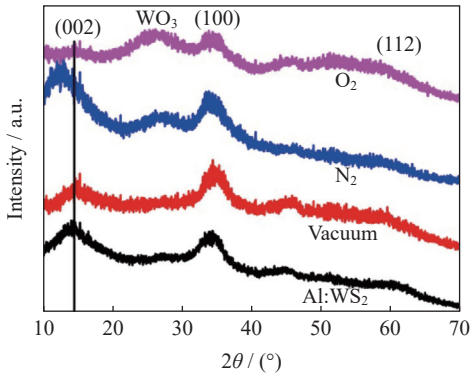


图 2 未处理与热冲击 Al:WS_2 薄膜的 GIXRD 谱

Fig. 2 GIXRD patterns of untreated and thermal shocked Al:WS_2 films

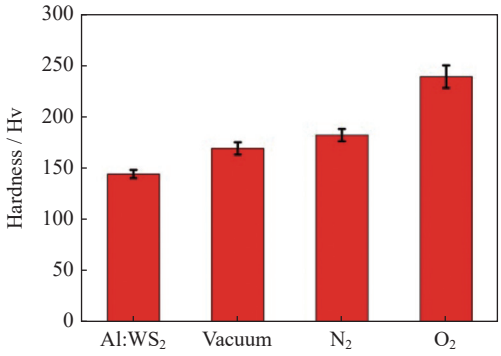


图 3 未处理及不同气氛热冲击后 Al:WS_2 薄膜的硬度

Fig. 3 Hardness of untreated and thermal shocked Al:WS_2 films

提高，这与薄膜柱状晶长大导致的薄膜结构致密化和 WO_3 的出现呈现固溶强化效应有关[19]。

图 4 所示为未处理及不同气氛热冲击后 Al:WS_2 薄膜的 XPS 全谱、W 4f 和 W 5s 高分辨谱。采用 C 1 s 284.8 eV 进行峰位校准。从全谱中可以看到，所有的样品中均探测到薄膜组成元素 W 和 S 的谱峰和污染 C 与 O 的谱峰。对 W, S, Al, C, O 等元素的高分辨谱进行采集，并计算了相对元素含量，结果列于表 2。可从未处理及真空、氮气热冲击 Al:WS_2 薄膜 W 5s 高分辨谱右侧拖尾处分辨出 Al 2p 的信号。相比未处理的 Al:WS_2 薄膜，经真空、氮气和氧气热冲击后，薄膜中 S 的谱峰强度减弱，这可能是由于 S 与 O 反应后有气体逸出导致 S 元素含量的减少[20,21]。C 元素含量的增加可以归因于反应后暴露的新鲜表面吸附了空气中的碳氢化合物。在氧气气氛中，大量 O_2 吸附于薄膜表面，使得 O 元素的含量增加。

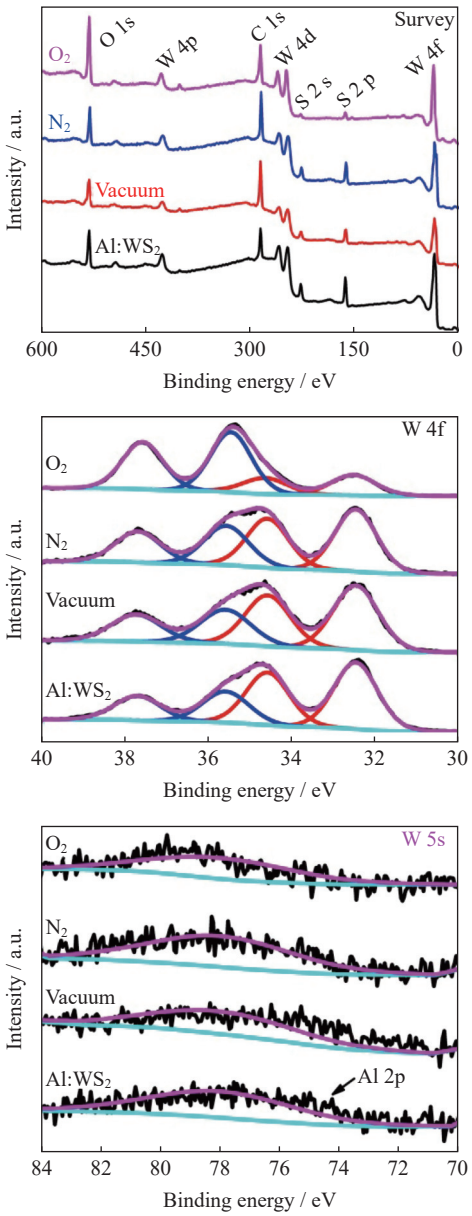


图 4 未处理及不同气氛热冲击后 Al:WS_2 薄膜的 XPS 全谱、W 4f 和 W 5s 高分辨谱

Fig. 4 Survey, fitted high-resolution W 4f and W 5s XPS spectra of untreated and thermal shocked Al:WS_2 films

对 W 4f 精细谱进行分峰拟合处理，可以将 W 4f 分为 2 组双峰，结合能值位于 32.4 eV(34.4 eV)的峰来自 WS_2 的贡献，结合能值在 35.5 eV(37.6 eV)的峰归属于 WO_3[22]。拟合数据列于表 3。可以看出，所有的样品均含有 WS_2 和 WO_3。未处理的 Al:WS_2 薄膜中 W 元素主要以 WS_2 的形式存在并含有少量 WO_3，热冲击后，薄膜中 WO_3 的含量增加。尤其是经

表 2　由 XPS 计算得到的未处理及不同气氛热冲击后 Al:WS_2 薄膜的相对元素含量(原子百分数)

Table 2　Calculated element content (atom percent) of untreated and thermal shocked Al:WS_2 films

Specimen	W	S	Al	C	O
Al:WS_2	12.43	19.71	0.92	44.54	22.40
Vacuum	7.73	9.85	1.31	61.86	19.25
N_2	10.42	13.51	0.53	54.54	21.00
O_2	9.43	4.85	0	49.88	35.84

表 3　未处理及不同气氛热冲击后 Al:WS_2 薄膜的 W 4f XPS 拟合数据

Table 3　Fitted W 4f XPS data of untreated and thermal shocked Al:WS_2 films

Specimen	W 4f	
	WS_2 (atom percent)	WO_3 (atom percent)
Al:WS_2	66.72	33.28
Vacuum	62.91	37.09
N_2	59.56	40.44
O_2	27.14	72.86

氧气热冲击后，薄膜中大量的 WS_2 被氧化为 WO_3，WO_3 也成为 W 元素的主要存在形式。此外，薄膜经真空、氮气和氧气热冲击后，随着 WO_3 含量的增加，WO_3 可使得薄膜反应后新鲜表面覆盖的面积增大，因此，经真空热冲击后，薄膜表面较少的 WO_3 不能有效阻止空气中碳氢化合物的吸附，然而氧气热冲击后，薄膜表面较多的 WO_3 可以有效阻止污染碳的吸附，从而使 C 含量减少[22,23]。

2.2　摩擦学性能

图 5 所示为未处理及不同气氛热冲击后 Al:WS_2 薄膜的真空摩擦曲线。沉积的 Al:WS_2 薄膜的摩擦系数和寿命分别为 0.026 和 1.86×10^5 r（r 表示转），展现出较好的摩擦学性能。经真空和氮气热冲击后，薄膜的摩擦系数有所降低，分别为 0.022 和 0.021，这与薄膜（002）衍射峰强度增强以及其结晶性能优化相关。经氧气热冲击后，薄膜的摩擦系数为 0.015，降低较为明显，可能与 WO_3 的生成导致的薄膜晶体结构改变有关[9,18]。经氮气热冲击后，薄膜寿命略有增加，为 2.01×10^5 r。在真空摩擦过程中，真空室残留与薄膜表面释放的微量水蒸气和氧气会恶化薄膜的摩擦学性能。可能得益于氮气热冲击导致生成了覆盖薄膜表面的 WO_3，其在摩擦过程中起到阻碍作用，使得薄膜寿命延长[22]。经真空热冲击后，薄膜的寿命减少

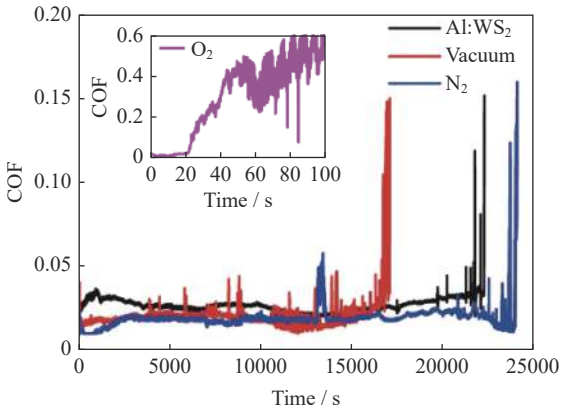


图 5　未处理及不同气氛热冲击后 Al:WS_2 薄膜的真空摩擦曲线

Fig. 5　Friction curves of untreated and thermal shocked Al:WS_2 films

到 1.43×10^5 r，可能由于热冲击导致的薄膜表面生成的 WO_3 含量较少，不足以覆盖薄膜表面且充当了磨粒的作用，加速了薄膜的磨损[6,14,20]。尤其是，经氧气热冲击后，薄膜的寿命减少到 200 r 以下，这可能是由于薄膜中大量的 WS_2 被氧化为 WO_3 而起润滑作用的 WS_2 含量较低所致[5]。

图 6 为未处理及不同气氛热冲击后 Al:WS_2 薄膜的 3D 形貌。可以看出，Al:WS_2 薄膜的磨痕较窄且光滑，这与薄膜中较高的 WS_2 含量相关。经真空、氮气和氧气热冲击后，磨痕的宽度增加，犁沟出现，呈现明显的磨粒磨损，这与由于热冲击导致在薄膜表面生成的 WO_3 相关。薄膜磨损率计算公式为 $W = V/(F{\cdot}L)$，结果如图 7 所示。未处理及经真空和氮气热冲击后 Al:WS_2 薄膜的磨损率分别为 2.86×10^{-7} $mm^3{\cdot}N^{-1}{\cdot}m^{-1}$，$4.06\times10^{-7}$ $mm^3{\cdot}N^{-1}{\cdot}m^{-1}$ 和 3.51×10^{-7} $mm^3{\cdot}N^{-1}{\cdot}m^{-1}$。可以看出，未经处理的 Al:$WS_2$ 薄膜具有最低的磨损率，这与其稳定的摩擦系数和光滑的磨痕相关；然而经真空热冲击后的薄膜有最高的磨损率，这由其波动

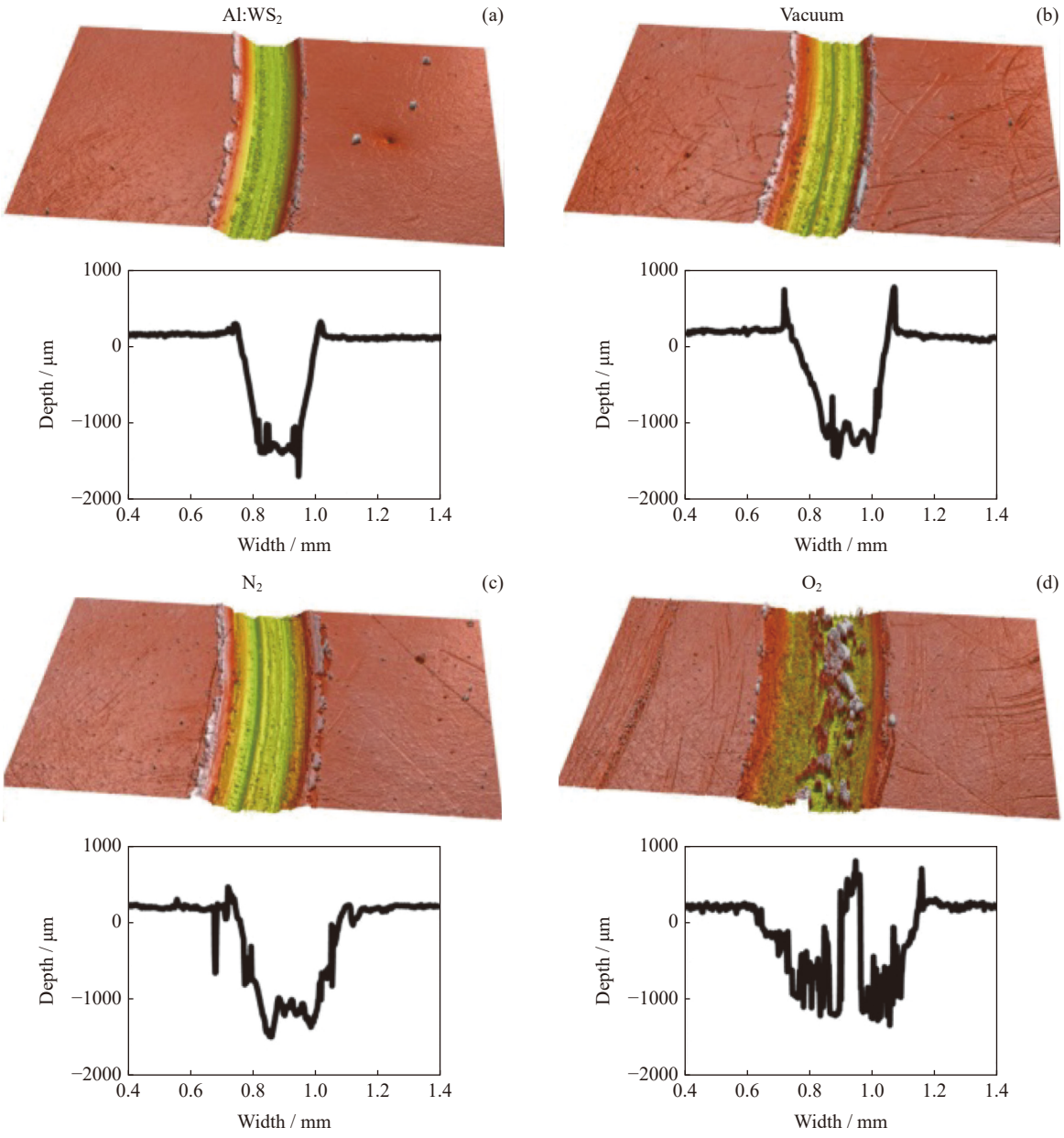


图 6 未处理及不同气氛热冲击后 Al:WS_2 薄膜的 3D 形貌

Fig. 6 3D profiles of wear tracks of untreated and thermal shocked Al:WS_2 films

较大的摩擦系数导致。

图 8 为未处理及不同气氛热冲击后薄膜的磨痕与对偶球磨斑形貌的 SEM 照片。可以看出，沉积的 Al:WS_2 薄膜的磨痕较窄，磨痕表面较为光滑，有颗粒状的摩擦膜存留，对偶球磨斑周围有磨屑出现，为颗粒状且尺寸较小，对磨斑进行 EDS 成分测试，结果列于表 4，结果表明对偶球上有转移膜形成。经真空热冲击后薄膜的磨痕宽度增加，由于 WO_3 的磨粒磨损作用，磨痕表面粗糙，磨斑周围磨屑增多，磨斑的主要成分为 Fe（83.3%），W 和 S 只占少部分（W+S: 1.2%），表明转移膜消失。经氮气热冲击后，薄膜的磨痕宽度增加，磨痕表面粗糙，有明显的片层状的摩擦膜存留；磨斑周围有大量较大尺寸片层状的磨屑形成，磨斑上有高含量的 W 和 S，说明有转移膜形成。此外，新鲜的 WS_2 转移膜吸附了较多的 C 和 O 污染物。经氧气热冲击后薄膜的磨痕表面有部分摩擦膜存留；磨斑周围散落了少量颗粒状磨屑，对偶球上无转移膜形成。

3　结论

采用自行研制的温度交变真空摩擦试验机开展了真空、氮气及氧气气氛–100～+250℃ 的热冲击试验，热冲击对 Al:WS_2 薄膜的结构和性能具有明显影响，得出如下结论。

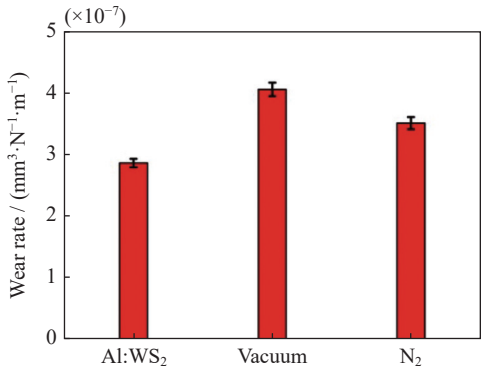


图 7　计算未处理及不同气氛热冲击后 Al:WS_2 薄膜的磨损率

Fig. 7　Calculated wear rates of untreated and thermal shocked Al:WS_2 films

（1）经热冲击后，Al:WS_2 薄膜结晶性改变，S 与 O 发生反应并逸出气体导致 S 含量的减少，WS_2 被氧化为 WO_3，薄膜硬度增加。

（2）未处理的 Al:WS_2 薄膜展示了稳定的摩擦系数与低磨损率，综合摩擦学性能表现最佳。经氮气热冲击后，薄膜的(002)衍射峰强度明显增强，使得摩擦系数降低；尽管薄膜表面生成的 WO_3 会产生磨粒磨损，然而也起到阻止空气中污染碳及摩擦过程中水汽、氧气吸附的作用，使得薄膜寿命有所增加。

（3）经真空热冲击后，薄膜表面发生氧化形成 WO_3，同时摩擦过程中水汽、氧气吸附在薄膜上，产生磨粒磨损，减少了薄膜寿命；经氧气热冲击后，Al:WS_2 薄膜中大量起润滑作用的 WS_2 被氧化为 WO_3，产生严重的磨粒磨损，薄膜的寿命显著缩短。

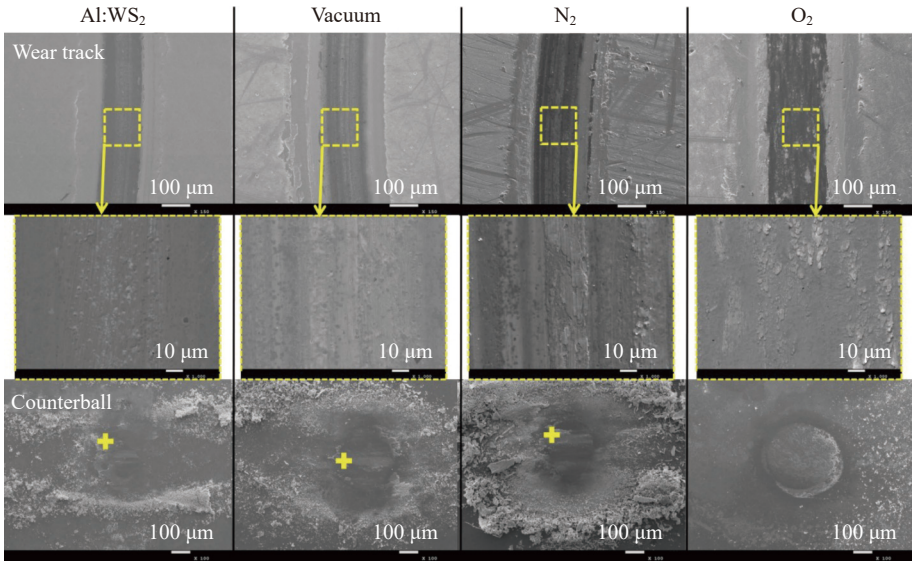


图 8　未处理及不同气氛热冲击后 Al:WS_2 薄膜的磨痕与对偶球磨斑形貌的 SEM

Fig. 8　SEM micrographs of wear track and wear scar of untreated and thermal shocked Al:WS_2 films

表 4　未处理及不同气氛热冲击后 Al:WS_2 薄膜的磨斑转移膜 EDS 元素成分分析(原子百分数)

Table 4　Element content (atom percent) from EDS analysis of transfer films on wear scars of untreated and thermal shocked Al:WS_2 films

Specimen	Al	W	S	C	O	Fe
Al:WS_2	0.2	6.3	5.9	5.5	15.4	66.6
Vacuum	0.1	0.9	0.3	5.0	10.4	83.3
N_2	0.2	21.1	19.0	8.0	24.6	27.0

参考文献

[1] JOST H P. Tribology-origin and future[J]. *Wear*, 1990, **136**(1): 1-17

[2] MATSUMOTO K, TAGAWA M, AKIYAMA M. Tribological characteristics of bonded MoS_2 film exposed to AO, UV and real LEO environment in SM/SEED experiment[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2009, **1087**(1): 148-153

[3] VAZIRISERESHK M R, MARTINI A, STRUBBE D A, *et al*. Solid lubrication with MoS_2: a review[J]. *Lubricants*, 2019, **7**(7): 57

[4] CAI M R, YU Q L, LIU W M, *et al*. Ionic liquid lubricants: when chemistry meets tribology[J]. *Chemical Society Reviews*, 2020, **49**(21): 7753-7818

[5] SERLES P, GABER K, PAJOVIC S, *et al*. High temperature microtribological studies of MoS_2 lubrication for low earth orbit[J]. *Lubricants*, 2020, **8**(4): 49

[6] GAO Xiaoming, HU Ming, SUN Jiayi, *et al*. Space environment effects on lubricants[J]. *Materials China*, 2017, **36**(7/8): 481-491 (高晓明, 胡明, 孙嘉奕, 等. 润滑材料的空间环境效应[J]. 中国材料进展, 2017, **36**(7/8): 481-491)

[7] ZHANG Aiwen, YAO Pingping, XIAO Yelong, *et al*. Research status and developing trend of space tribology and tribological materials[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2017, **37**(2): 88-99 (钟爱文, 姚萍屏, 肖叶龙, 等. 空间摩擦学及其材料的研究进展[J]. 航空材料学报, 2017, **37**(2): 88-99)

[8] YANG J, WANG D S, FU Y L, *et al*. Improving the tribological and anti-corrosion property of the WS_2 film through Ta doping[J]. *Vacuum*, 2021, **192**: 110485

[9] FAN X, SHI Y B, CUI M J, *et al*. MoS_2/WS_2 nanosheet-based composite films irradiated by atomic oxygen: implications for lubrication in space[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2021, **4**(10): 10307-10320

[10] MARIAN M, BERMAN D, ROTA A, *et al*. Layered 2 D nanomaterials to tailor friction and wear in machine elements—a review[J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2022, **9**(3): 2101622

[11] YAN Z, SUI X D, YAN M M, *et al*. Dependence of friction and wear on the microstructures of WS_2 films under a simulated space environment[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, **12**(50): 56632-56641

[12] FU Y L, JIANG D, WANG D S, *et al*. Tribological performance of MoS_2–WS_2 composite film under the atomic oxygen irradiation conditions[J]. *Materials*, 2020, **13**(6): 1407

[13] LINCE J R. Effective application of solid lubricants in spacecraft mechanisms[J]. *Lubricants*, 2020, **8**(7): 74

[14] XU S S, GAO X M, HU M, *et al*. Dependence of atomic oxygen resistance and the tribological properties on microstructures of WS_2 films[J]. *Applied Surface Science*, 2014, **298**: 36-43

[15] GAO X M, FU Y L, JIANG D, *et al*. Structural, mechanical, and tribological properties of WS_2-Al nanocomposite film for space application[J]. *Tribology Letters*, 2018, **66**(4): 137

[16] ZHANG R, CUI Q F, WENG L J, *et al*. Modification of structure and wear resistance of closed-field unbalanced-magnetron sputtered MoS_2 film by vacuum-heat-treatment[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2020, **401**: 126215

[17] DONG Chunmeng, GAO Xiaoming, YU Bing, *et al*. Structure and tribological behaviors of MoS_2 films treated by water bath[J]. *Tribology*, 2020, **40**(2): 166-174 (董春萌, 高晓明, 余兵, 等. 水浴对MoS_2薄膜结构及摩擦学性能影响的研究[J]. 摩擦学学报, 2020, **40**(2): 166-174)

[18] LIU J, SUI X D, YAN Z, *et al*. Cr doped MoS_2 films: tribological properties, microstructure, and electronic structure[J]. *Journal of Tribology*, 2021, **143**(9): 091401

[19] DING X Z, ZENG X T, HE X Y, *et al*. Tribological properties of Cr- and Ti-doped MoS_2 composite coatings under different humidity atmosphere[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2010, **205**(1): 224-231

[20] XU S S, GAO X M, SUN J Y, *et al*. Comparative study of moisture corrosion to WS_2 and WS_2/Cu multilayer films[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2014, **247**: 30-38

[21] CAI H C, XUE Y J, LI H, *et al*. Friction and wear behavior of self-lubricating La-Ti/WS_2 films by unbalanced magnetron sputtering[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2021, **50**(8): 2708-2714

[22] LIU J, YAN Z, HAO J Y, *et al*. Two strategies to improve the lubricating performance of WS_2 film for space application[J]. *Tribology International*, 2022, **175**: 107825

[23] NEVSHUPA R A, DE SEGOVIA J L, ROMAN E. Surface-induced reactions of absorbed hydrogen under mutual mechanical forces[J]. *Vacuum*, 2005, **80**(1/2/3): 241-246