

表面摩擦磨损与润滑

MoS₂-Al 复合薄膜高温摩擦学性能研究杨保平¹, 高斌基^{1,2}, 张斌², 强力², 高凯雄², 张俊彦²

(1. 兰州理工大学 石油化工学院, 兰州 730050;

2. 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)

摘要: 目的 提升 MoS₂ 薄膜在高温环境下的润滑性能。方法 应用非平衡磁控溅射技术共溅射 MoS₂ 靶和 Al 靶沉积 MoS₂-Al 复合薄膜。通过场发射扫描电子显微镜 (SEM)、X 射线衍射仪 (XRD)、X 射线光电子能谱仪 (XPS)、纳米压入仪和 CSM 牌高温摩擦磨损试验机, 评价 MoS₂-Al 复合薄膜表面及断面形貌、微观结构、机械性能和高温环境下的摩擦学性能, 并通过奥林巴斯显微镜观察磨痕及磨斑形貌。结果 温度超过 400 °C 时, Al 含量 (原子数分数) 为 18.3% 的 MoS₂-Al 复合薄膜表现出了优异的高温润滑性能, 摩擦初始阶段的摩擦系数保持在 0.07 左右, 平均摩擦系数低至 0.172, 比纯 MoS₂ 薄膜的摩擦系数降低了 64%, 摩擦曲线十分稳定。结论 当薄膜中 Al 的添加量为 18.3% 时, Al 的引入在不破坏 MoS₂ 结构时起到了自身优先氧化的作用, 从而保护了 MoS₂ 结构不被破坏, 使 MoS₂-Al 复合薄膜在高温环境下的润滑能力得到了显著提升。

关键词: MoS₂-Al 复合薄膜; 高温; 摩擦磨损; 润滑

中图分类号: TG174.45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)03-0140-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.03.023

Tribological Properties of MoS₂-Al Composite Films at High TemperatureYANG Bao-ping¹, GAO Bin-ji^{1,2}, ZHANG Bin², QIANG Li², GAO Kai-xiong², ZHANG Jun-yan²

(1. School of Petrochemical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

ABSTRACT: The work aims to enhance lubrication properties of MoS₂ films in high temperature environment. Co-sputtering MoS₂ and Al targets were used to deposit MoS₂-Al composite films by adopting unbalanced magnetron sputtering. Surface, sectional morphology, microstructure, mechanical property and tribological property in high temperature environment of the MoS₂-Al composite films was evaluated with field emission scanning electron microscope (SEM), X-ray diffractometer (XRD), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), nano indenter and CSM high temperature friction and wear tester, respectively. Morphology of grinding cracks and spots was observed with Olympus microscope. When the temperature exceeded 400 °C, the

收稿日期: 2017-11-03; 修订日期: 2017-12-05

Received: 2017-11-03; Revised: 2017-12-05

基金项目: 国家自然科学基金 (51205383); 甘肃省自然科学基金 (1501RJZA012); 中国科学院“青年促进会” (2017459); 中国科学院“西部之光”。

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51205383), Natural Science Foundation of Gansu Province (1501RJZA012), Youth Innovation Promotion Association, CAS(2017459), "Western Light" of Chinese Academy of Sciences

作者简介: 杨保平 (1968—), 男, 硕士, 教授, 主要研究方向为高分子化学化工。

Biography: YANG Bao-ping(1968—), Male, Master, Professor, Research focus: polymer chemistry and chemical engineering.

通讯作者: 张俊彦 (1968—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为薄膜材料的微细结构构筑与摩擦学研究。

Corresponding author: ZHANG Jun-yan(1968—), Male, Doctor, Professor, Research focus: microstructure construction and tribology of thin film materials.

MoS₂-Al composite films with Al content of 18.3 at.% exhibited excellent lubrication property at high temperature, friction coefficient maintained at nearly 0.07, and average friction coefficient was 0.172, which decreased by 64% compared with that of pure MoS₂ films. Friction curve of the composite films was steady. The optimum amount of Al in the film is 18.3%, the addition of Al has the effect of preferential oxidation while preserving the MoS₂ structure, thus protecting the MoS₂ structure from being destroyed, and significantly enhancing lubrication capacity of MoS₂-Al composite films in high temperature environment.

KEY WORDS: MoS₂-Al composite films; high temperature; friction and wear; lubrication

过渡族金属二硫化物作为一类固体润滑材料，具有良好的润滑特性，在航空航天、核工业领域得到了广泛应用。从辉钼矿中提取到的二硫化钼（Molybdenum disulfide, MoS₂）作为典型代表，解决了诸多行业遇到的润滑问题，并受到了众多研究学者的关注^[1]。1923 年，Dickinson 和 Pauling 两位学者首次发现二硫化钼是一种层状结构的化合物，每个单元层由 S-Mo-S 三个平面层组成^[2]。单元层之间相距 1.230 nm，以较弱的范德华力连接，因此层之间的移动非常容易。这样特殊的层状结构赋予了二硫化钼优异的润滑性能。

然而，MoS₂ 涂层在高温下容易氧化，其摩擦学性能受温度的影响较大。Wong 等人考察了 MoS₂ 薄膜在高温下的摩擦学性能：当温度为 320 ℃时，在摩擦对偶转移膜中发现了硫富集现象，摩擦系数达到 0.11；当温度为 400 ℃时，MoS₂ 薄膜开始逐渐被氧化为 MoO₃，润滑能力逐渐降低，摩擦系数增加至 0.35^[3]。大量研究表明，在 MoS₂ 中掺杂金属元素 Ti^[4-6]、Cr^[7,8]、Ni^[9]、Nb^[10]、Zr^[11]、Au^[12]、Pb^[13]，非金属元素 C^[14]及化合物 TiN^[15]等制备的复合薄膜，润滑性能均优于纯 MoS₂。

对于 MoS₂/金属复合薄膜的研究通常考察掺杂金属的最佳含量、结构表征及其在室温环境下的摩擦学行为，而对 MoS₂/金属复合薄膜在高温环境下摩擦学行为的研究较少。但是，部分机械运动部件在 500 ℃以下的润滑仍然需要固体润滑剂来解决，MoS₂ 就成为了首选，因此拓展 MoS₂ 薄膜在高温环境下的应用显得尤为重要。付英英等^[16]向 CrN 薄膜中掺杂 Al 得到了 CrAlN 薄膜，显著改善了薄膜的机械性能、耐摩擦磨蚀性能和抗氧化性能。Qi 等人^[17]发现，MoS₂ 和 Al 组合导致了涂层硬度下降，而且软质相 Al₅Mo 的存在使摩擦系数显著降低、磨损量增加。Holbery 等人^[18]溅射沉积了无定型多层构筑的 MoS₂-Al 薄膜，在 RH50%下测试时，这些薄膜的磨损寿命显著增加，这主要归因于 Al 界面间的融合和粗糙度的增加使纳米硬度提高，进而使薄膜的耐磨性能提高。Nainaparampil 等人^[19]利用脉冲激光烧蚀（PLA）技术制备了 MoS₂-Al 复合薄膜，重点研究了其在潮湿环境下的摩擦学行为。结果表明，适当 Al 含量（原子

数分数为 8%）的薄膜在潮湿环境（RH40%）中的摩擦系数在 0.15 附近波动较大，但磨损寿命得到了显著提高。这主要是因为 Al 容易与(OH)结合，并且可以形成 AlO_x 和 Al(OH)_x，而氢氧化物粘合行为的增加是 MoS₂-Al 复合薄膜在潮湿环境下磨损寿命增加的关键因素。上述研究主要集中于不同环境下 MoS₂-Al 复合薄膜的摩擦学行为，Al 的引入均显著提升了薄膜的相应性能，但关于薄膜高温摩擦磨损性能的研究极少。

本文利用磁控溅射技术将 Al 添加到 MoS₂ 中，以优化提升 MoS₂ 在高温下的润滑性能。重点考察了不同 Al 含量（原子数分数，全文同）的 MoS₂ 薄膜的高温摩擦学行为和最适宜 Al 含量的 MoS₂ 薄膜在不同温度下的摩擦学性能，并揭示了其相关机理。

1 实验

1.1 MoS₂-Al 复合薄膜的制备

实验选用高温合金钢（型号为 GH4169，18 mm×18 mm×2 mm）和单晶硅（100）为基底材料。其中，单晶硅试样用于材料的表征测试。利用非平衡磁控溅射在基底表面沉积 MoS₂-Al 复合薄膜，薄膜沉积之前，先后使用丙酮和乙醇超声清洗各 15 min，氮气吹干后，将其置于镀膜腔体内。然后，利用 Ar 等离子体清洗 15 min 以除去基底表面的氧化物和污染物。薄膜沉积时，溅射气体为 Ar，具体的沉积参数如表 1 所示。

表 1 MoS₂-Al 复合薄膜的沉积参数
Tab.1 Deposition parameters of MoS₂-Al composite films

Parameter	Value
Working pressure/Pa	0.5~0.6
Bias voltage/V	-200
MoS ₂ target current/A	1.5
Al target current/A	0.2/0.4/0.6/0.8/1.0
Substrate temperature/℃	150

1.2 MoS₂-Al 复合薄膜表征与测试

采用 JS-6710F 型冷场发射扫描电子显微镜（FESEM）观察 MoS₂-Al 复合薄膜的断面及表面形

貌。采用 X'Pert Pro 型 X 射线衍射仪 (XRD) 分析薄膜的晶体结构, 测试参数为: Cu Ra 辐照, 波长 0.1544 nm, 掠射角度 2° , 电压 40 kV, 电流 60 mA, 扫描速度 $5^\circ/\text{min}$ 。采用 PHI-5702 型多功能 X 射线光电子能谱仪 (XPS, Physical Electronics, USA) 测定薄膜的化学成分和元素含量, 以 Al-K α (光子能量 1476.6 eV) 为激发源, 通能 29.4 eV, 步长 0.125 eV, 功率 250 W, 以污染碳的 C1s 峰 (284.8 eV) 校正。采用 TI-950 型纳米压入仪 (Triboindenter) 分析薄膜的硬度和弹性模量, 压入深度 100 nm, 测量 5 个点, 取平均值。

采用 CSM 牌高温摩擦磨损试验机 (THT01-04015 型, 瑞士) 进行摩擦学性能测试, 摩擦对偶选用 Al_2O_3 球 ($\phi 3\text{ mm}$)。滑行距离、平均速率、载荷、摩擦半径和相对湿度依次为 100 m、5 cm/s、2 N、5 mm 和 RH35%, 测试温度为室温和 150、250、350、450 $^\circ\text{C}$ 。利用奥斯巴林显微镜 (BX53F) 观察薄膜磨痕及对偶磨斑的形貌。

2 结果与讨论

2.1 MoS_2 -Al 复合薄膜的结构分析

MoS_2 -Al 复合薄膜的表面及断面形貌如图 1 所

示。由图可见, MoS_2 -Al 薄膜的表面呈现典型的“羽毛状”结构特征。从断面形貌来看, 薄膜呈柱状晶生长。同时, MoS_2 薄膜中具有明显的孔隙和空洞, 随着掺杂 Al 含量的增加, 薄膜中的空隙减小, 致密度增加。这说明 Al 的掺杂改善了 MoS_2 薄膜的疏松结构, 且改善程度在适当范围内随着 Al 含量的增加而增大。

从薄膜断面的元素分布图 2 可以看出, 在薄膜的生长过程中, Al 元素均匀地分布于薄膜中, 未发现 Al 元素团聚的现象, 这为薄膜在高温下表现出优异的润滑性能奠定了基础。

利用 XPS 技术分析 MoS_2 -Al 复合薄膜的化学组成和键合状态, 结果如图 3 所示。图 3a 中位于 $\sim 72\text{ eV}$ 的尖峰表明 Al 元素成功地添加到了 MoS_2 薄膜中, 并能稳固地停留。图 3b—3d 分别给出了不同 Al 含量薄膜中 Al2p 谱的变化情况, 均为位于 $\sim 74.20\text{ eV}$ 的 Al_2O_3 峰和位于 $\sim 74.60\text{ eV}$ 的 Al_2S_3 峰^[20]。当 Al 含量为 1% 和 18.3% 时, MoS_2 -Al 复合薄膜中 Al_2S_3 峰的强度较弱, 说明较低含量 Al 的掺入并没有显著改变 MoS_2 的结构。然而, 当 Al 含量增加至 41.7% 时, 薄膜中 Al_2S_3 峰的强度迅速增加, 说明此时 MoS_2 的结构已经被 Al 原子破坏。

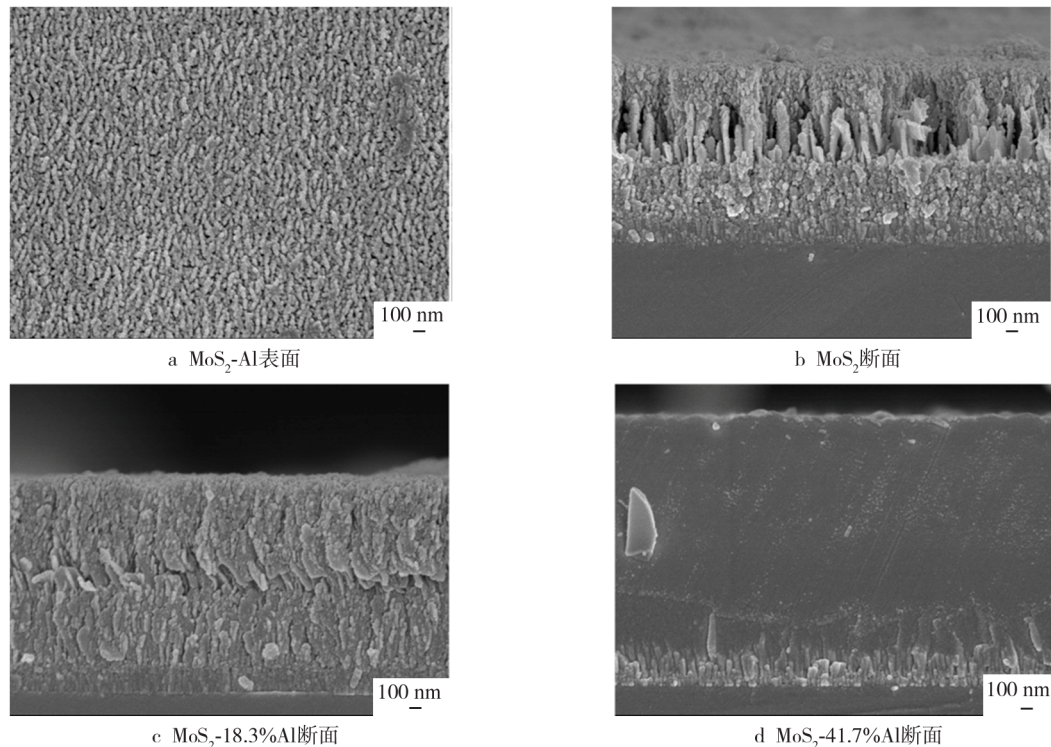


图 1 MoS_2 -Al 复合薄膜的表面及断面形貌图

Fig.1 Surface and sectional morphology of MoS_2 -Al composite films: a) surface morphology of MoS_2 -Al, b) sectional morphology of MoS_2 -Al films, c) sectional morphology of MoS_2 -Al films with 18.3 at.%, d) sectional morphology of MoS_2 -Al films with 41.7 at.%

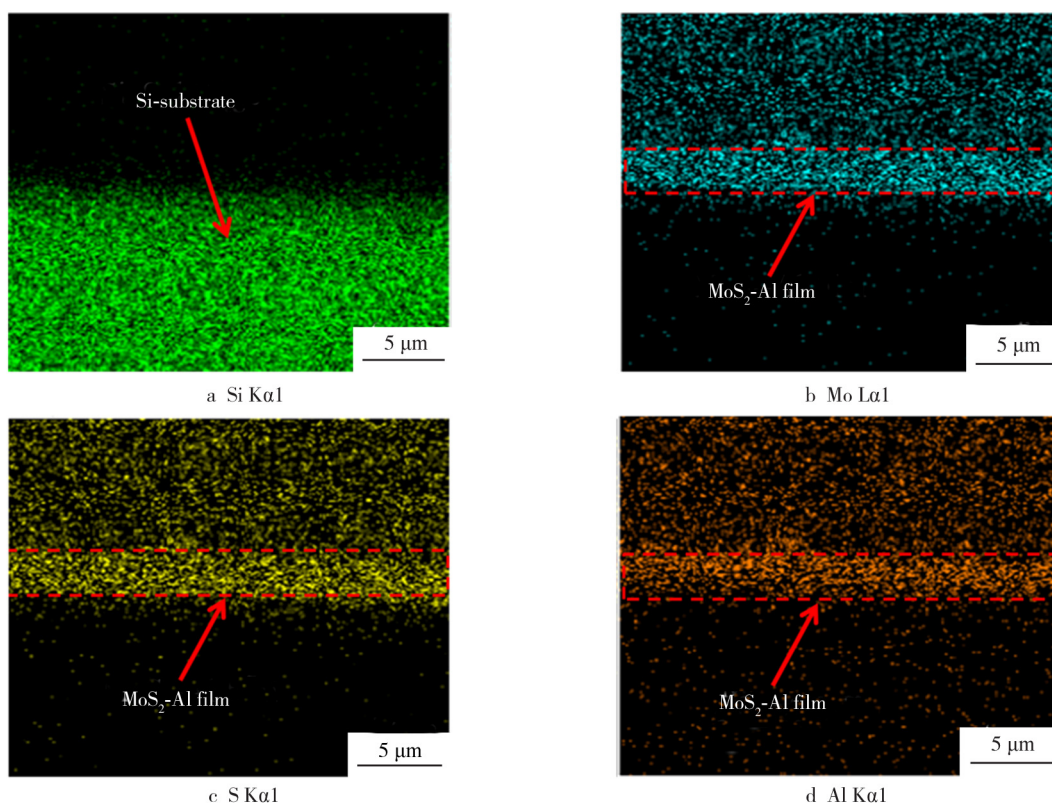


图 2 薄膜断面的元素分布图

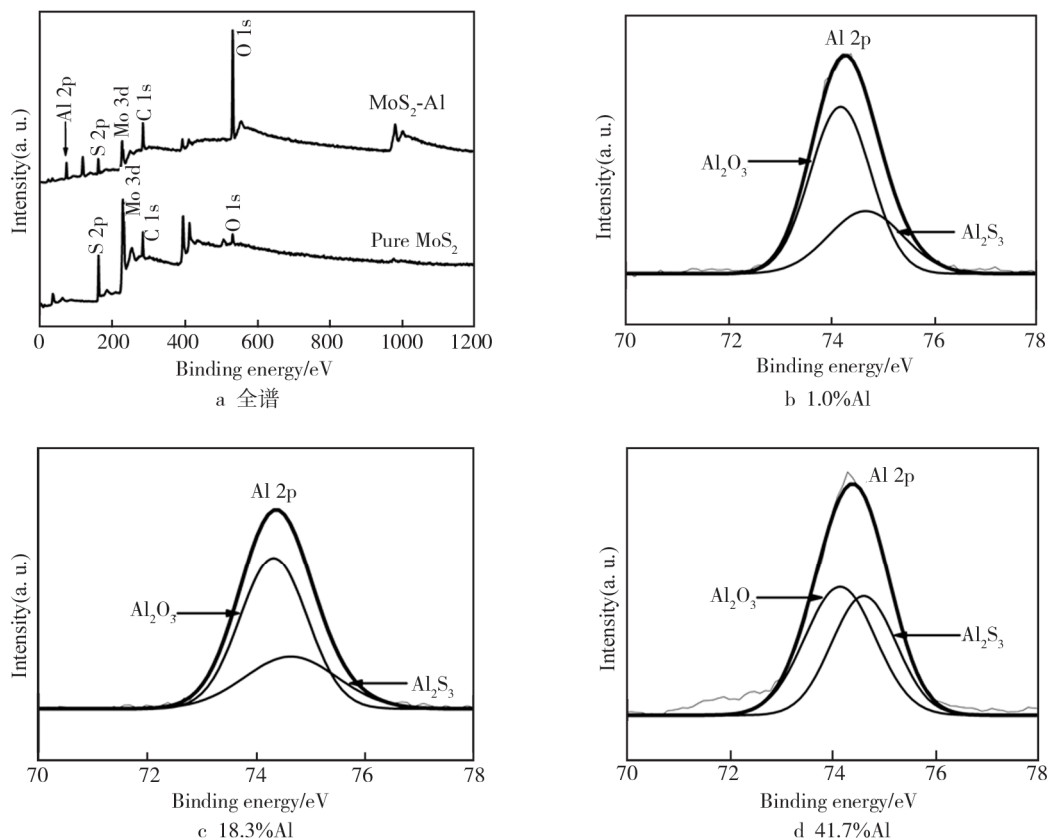
Fig.2 Sectional elemental distribution of MoS₂-Al composite films图 3 MoS₂-Al 复合薄膜的 XPS 谱图

Fig.3 XPS spectrum of MoS₂-Al composite films: a) full spectrul of MoS₂-Al composite films, b) Al₂p spectrul of MoS₂-Al composite films with 1.0 at.%, c) Al₂p spectrul of MoS₂-Al composite films with 18.3 at.%, d) Al₂p spectrul of MoS₂-Al composite films with 41.7 at.%

不同 Al 含量 MoS₂-Al 复合薄膜的 XRD 谱图如图 4 所示。其中, $2\theta=13^\circ$ 左右的衍射峰对应 MoS₂ 的 (002) 晶面, $2\theta=33^\circ$ 和 $2\theta=59^\circ$ 左右的衍射峰分别对应 MoS₂ 的 (100) 和 (110) 晶面^[21]。当薄膜中的 Al 含量从 1.0 % 增加到 41.7% 时, MoS₂ 的 (100) 衍射峰向高角度方向偏移, 这是由 MoS₂-Al 复合薄膜中 Al-S 共价键的增加导致 MoS₂ 晶格收缩引起的; MoS₂ 的 (002) 晶面衍射峰逐渐消失, 原因可能是 (002) 晶面的择优取向被削弱, 逐渐被其他晶面的择优取向所取代。对于薄膜的择优取向有多种理论进行解释, 在没有离子束轰击的条件下, 薄膜生长应遵循能量最低原理, 表面能最小或应变能最小的面将择优生长。在薄膜沉积的开始阶段, 厚度较小, 应力较小, 表面能较小的晶面能择优生长。而随着厚度的增加, 应力增加, 应变能较小的晶面则择优生长^[22,23]。

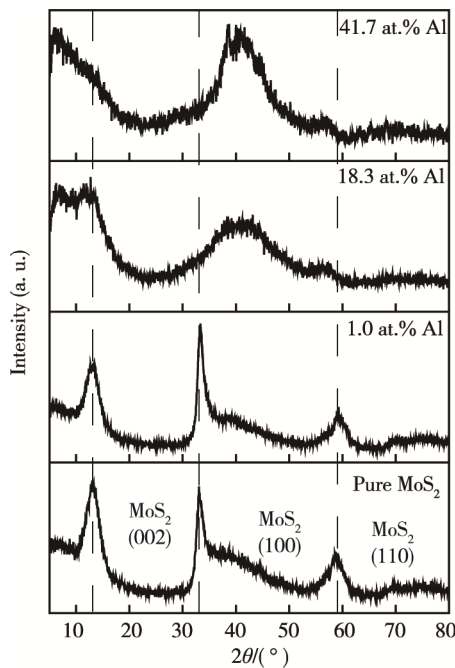


图 4 不同 Al 含量 MoS₂-Al 复合薄膜 XRD 谱图
Fig.4 XRD spectrum of MoS₂-Al composite films with different Al contents

2.2 MoS₂-Al 复合薄膜的力学性能分析

图 5 为不同 Al 含量 MoS₂-Al 复合薄膜的硬度及弹性模量。从图中可知, 当 Al 含量为 1.0% 和 18.3% 时, 薄膜的硬度和弹性模量未发生明显变化, 说明适量 Al 元素的添加对薄膜机械性能不会产生显著影响。这是因为此时 Al 的引入尚未明显地改变 MoS₂ 结构, 与 XPS 分析结果一致。另外, 从薄膜断面的 SEM 图可以看出, 当 Al 含量在 18.3% 时, MoS₂-Al 薄膜虽然仍呈现出疏松结构, 但相比 MoS₂ 薄膜而言, 空洞和间隙已经少了许多。当 Al 含量增加到 41.7% 时, 薄膜的硬度和弹性模量显著增大, 分别达到了 6.26、66.79 GPa, 原因是该 Al 含量下的 MoS₂-Al 薄

膜致密度很高, 结构也发生了严重破坏。

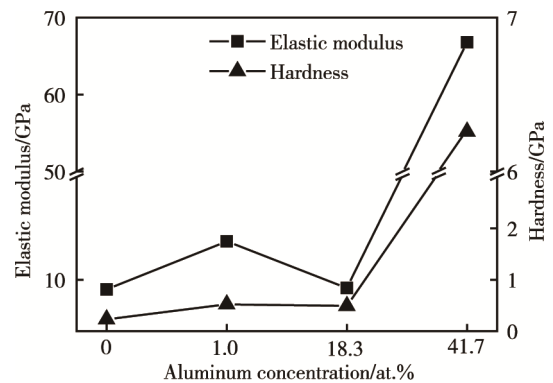


图 5 不同 Al 含量 MoS₂-Al 复合薄膜硬度及弹性模量
Fig.5 Hardness and elastic modulus of MoS₂-Al composite films with different Al contents

分析硬度与弹性模量的比值 (H/E , 塑性因子) 可以有效预判薄膜的耐磨性。因此, 通过研究 MoS₂-Al 复合薄膜的 H/E 值, 可以初步分析 Al 含量对 MoS₂-Al 复合薄膜磨损行为的影响。表 2 为不同 Al 含量 MoS₂-Al 复合薄膜的机械性能, 由表可知, 随着 Al 含量的增加, MoS₂-Al 复合薄膜的 H/E 值呈现上升趋势。这表明在不考虑其他因素的情况下, 随着 Al 含量的增加, MoS₂-Al 复合薄膜的耐磨性将会增强。同时, 随着 Al 含量的增加, H^3/E^2 的值也呈现出上升的趋势, 说明 Al 元素的掺入提高了薄膜抵抗塑性形变的能力。

表 2 不同 Al 含量 MoS₂-Al 复合薄膜机械性能
Tab.2 Mechanical properties of MoS₂-Al composite films with different Al contents

Al contents/at. %	0	1.0	18.3	41.7
H/GPa	0.23	0.52	0.49	6.26
E/GPa	9.05	13.74	9.19	66.79
H/E	0.025	0.038	0.053	0.094
H^3/E^2	0.0001	0.0007	0.0014	0.0550

2.3 MoS₂-Al 复合薄膜的摩擦学性能分析

考察了不同 Al 含量 MoS₂-Al 复合薄膜在室温及 150、250、350、450 °C 条件下的摩擦磨损性能, 其摩擦系数如表 3 所示。由表可知, MoS₂-Al 复合薄膜中的 Al 含量对薄膜的摩擦系数有显著影响。高温 450 °C 下,

表 3 不同 Al 含量 MoS₂-Al 复合薄膜在不同温度下的摩擦系数

Tab.3 Friction coefficient of MoS₂-Al composite films with different Al contents at various temperature

Al contents/at. %	Room temperature	150 °C	250 °C	350 °C	450 °C
0	0.121	0.039	0.062	0.275	0.477
1.0	0.123	0.036	0.069	0.117	0.493
18.3	0.067	0.044	0.061	0.086	0.172
41.7	0.061	0.606	0.350	0.453	0.676

Al 含量为 18.3% 时, 复合薄膜的摩擦系数最低。

图 6 为 Al 含量为 18.3% 时 MoS₂-Al 复合薄膜在

不同温度下的摩擦曲线。图 7 给出了 Al 含量为 18.3% 的薄膜摩擦磨损试验后的磨痕及对偶磨斑形貌。

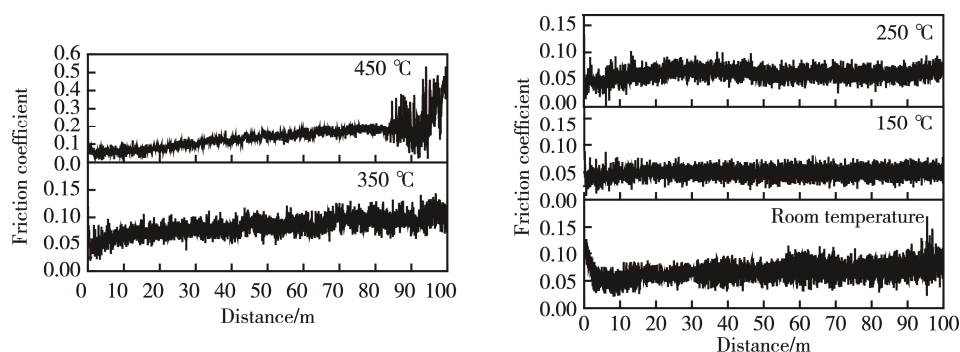


图 6 Al 含量为 18.3% 的 MoS₂-Al 复合薄膜在不同温度下的摩擦曲线

Fig.6 Friction curves of MoS₂-Al composite films with Al content 18.3 at.% at different temperature



图 7 Al 含量为 18.3% 的 MoS₂-Al 复合薄膜的摩擦试验磨痕及对应磨斑形貌

Fig.7 Morphology of grinding cracks and spots of MoS₂-Al composite films with Al content of 18.3 at.% in friction test: a) room temperature, grinding crack, b) 150 °C, grinding crack, c) 250 °C, grinding crack, d) 350 °C, grinding crack, e) 450 °C, grinding crack, f) room temperature, spot, g) 150 °C, spot, h) 250 °C, spot, i) 350 °C, spot, j) 450 °C, spot

由图 6 和表 3 可知, 温度在 450 °C 时, 该复合薄膜表现出了优异的高温润滑性能, 在摩擦初始阶段, 摩擦系数保持在 0.07 左右, 平均摩擦系数低至 0.172。这可能是由于适当含量的 Al 引入后, 在未破坏 MoS₂ 结构时, Al 自身优先氧化, 保护了 MoS₂ 结构不被高温环境破坏, 使 MoS₂-Al 复合薄膜在 450 °C 时仍然保持着优异的润滑性能。

通过观察图 7 发现, 在薄膜磨痕周边均弥散分布着碎状磨屑, 在对偶磨斑的周围有片状转移膜。而对偶表面转移膜的存在是获得较低摩擦系数的关键因素。另外, 随着温度的升高, 磨痕宽度增加。这是因为温度升高, 薄膜被进一步氧化, 结构也随之发生转变, 并在内部产生了裂纹的扩散, 从而使磨痕变得更宽。

3 结论

采用非平衡磁控溅射制备的 MoS₂-Al 复合薄膜具有良好的结构。适当含量 Al 的引入并没有引起 MoS₂ 结构的显著改变, 但随着 Al 含量进一步增大, MoS₂ 结构变得十分致密, 机械性能也迅速提升。

通过共溅射 MoS₂ 靶和 Al 靶可以有效地将 Al 元素掺杂进入 MoS₂ 中, 并通过可以调节 Al 靶电流控制薄膜中 Al 元素的含量。

当复合薄膜中 Al 元素含量适当时, Al 的引入在未破坏 MoS₂ 结构时起到了自身优先氧化的作用, 从而保护了 MoS₂ 结构不被高温环境破坏。温度在 450 °C 时, Al 含量为 18.3% 的 MoS₂-Al 复合薄膜表现出了优异的高温润滑性能, 摩擦初始阶段的摩擦系数保持在 0.07 左右, 平均摩擦系数低至 0.172, 比纯 MoS₂ 薄膜的摩擦系数降低了 64%。因此, 通过 Al 掺杂提升 MoS₂ 薄膜在高温下的润滑性能, Al 的最适宜添加量应当在 18.3%。

参考文献:

- [1] GONG Z, JIA X, MA W, et al. Hierarchical Structure Graphitic-like/MoS₂ Film as Superlubricity Material[J]. *Applied Surface Science*, 2017, 413: 381-386.
- [2] DICKINSON R G, PAULING L. The Crystal Structure of Molybdenite[J]. *Acta Crystallographica*, 2001, 45 (4): 207-210.
- [3] WONG K C, LU X, COTTER J, et al. Surface and Friction Characterization of MoS₂ and WS₂ Third Body

- Thin Films under Simulated Wheel/Rail Rolling-sliding Contact[J]. *Wear*, 2008, 264(7-8): 526-534.
- [4] QIN X, KE P, WANG A, et al. Microstructure, Mechanical and Tribological Behaviors of MoS₂-Ti Composite Coatings Deposited by a Hybrid HIPIMS Method[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2013, 228(9): 275-281.
- [5] STOYANOV P, STRAUSS H W, CHROMIK R R. Scaling Effects between Micro-and Macro-tribology for a Ti-MoS₂ Coating[J]. *Wear*, 2012, s274-275(3): 149-161.
- [6] BANERJI A, BHOWMICK S, ALPAS A T. Role of Temperature on Tribological Behaviour of Ti Containing MoS₂ Coating against Aluminum Alloys[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2017, 314: 2-12.
- [7] KAO W H, SU Y L. Optimum MoS₂-Cr Coating for Sliding against Copper, Steel and Ceramic Balls[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2004, 368(1): 239-248.
- [8] DING X Z, ZENG X T, HE X Y, et al. Tribological Properties of Cr- and Ti-doped MoS₂ Composite Coatings under Different Humidity Atmosphere[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2010, 205(1): 224-231.
- [9] 孙建荣, 李长生, 郭志成, 等. MoS₂/Ni 复合膜的微结构与摩擦学性能[J]. *机械工程材料*, 2013(6): 68-71.
- SUN Jian-rong, LI Chang-sheng, GUO Zhi-cheng, et al. Micro Structure and Tribological Properties of MoS₂/W Composite Films by Magnetron Sputtering[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2013(6): 68-71.
- [10] ARSLAN E, BARAN Ö, EFEOGLU I, et al. Evaluation of Adhesion and Fatigue of MoS₂-Nb Solid-lubricant Films Deposited by Pulsed-dc Magnetron Sputtering [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2008, 202(11): 2344-2348.
- [11] 欧文敏, 韦春贝, 代明江, 等. MoS₂-Zr 复合薄膜的摩擦学性能研究[J]. *表面技术*, 2017, 46(1): 93-99.
- OU Wen-min, WEI Chun-bei, DAI Ming-jiang, et al. Tribological Properties of MoS₂-Zr Composite Films [J]. *Surface Technology*, 2017, 46(1) : 93-99.
- [12] STOYANOV P, GUPTA S, CHROMIK R R, et al. Microtribological Performance of Au-MoS₂ Nanocomposite and Au/MoS₂ Bilayer Coatings[J]. *Tribology International*, 2012, 52(3): 144-152.
- [13] LI H, ZHANG G, WANG L. Low Humidity-sensitivity of MoS₂/Pb Nanocomposite Coatings[J]. *Wear*, 2016, s350-351: 1-9.
- [14] WU Y, LI H, JI L, et al. Preparation and Properties of MoS₂/a-C Films for Space Tribology[J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 2013, 46(42): 5301P.
- [15] STRAPASSON G, BADIN P C, SOARES G V, et al. Structure, Composition, and Mechanical Characteriza-

- tion of DC Sputtered TiN-MoS₂ Nanocomposite Thin Films[J]. Surface & Coatings Technology, 2011, 205 (13-14): 3810-3815.
- [16] FU Y, LI H, JI L, et al. Insight into Al Existing form and Its Role on Microstructure and Properties of Cr_{1-x}Al_xN Films[J]. Surface & Interface Analysis, 2016, 48 (1): 26-33.
- [17] QI X Q, ZHANG X P. Mechanical and Friction-Wear Properties of MoS₂ Al-matrix Self-lubricating[J]. Advanced Materials Research, 2011, 304: 6-11.
- [18] HOLBERY J D, PFLUEGER E, SAVAN A, et al. Alloying MoS₂ with Al and Au: Structure and Tribological Performance[J]. Surface & Coatings Technology, 2003, s169-170(3):716-720.
- [19] NAINAPARAMPIL J J, PHANI A R, KRZANOWSKI J E, et al. Pulsed Laser-ablated MoS₂-Al Films: Friction and Wear in Humid Conditions[J]. Surface & Coatings Technology, 2004, 187(2-3): 326-335.
- [20] MCGUIRE G E, SCHWEITZER G K, CARLSON T A. Core Electron Binding Energies in Some Group IIIA, VB, and VIB Compounds[J]. Chemischer Informationsdienst, 1973, 48(4): 2450-2453.
- [21] LI H, ZHANG G, WANG L. The Role of Tribo-pairs in Modifying the Tribological Behavior of the MoS₂/Ti Composite Coating[J]. Journal of Physics D—Applied Physics, 2016, 49(9): 095501.
- [22] MIN J J, NAM K H, YUN M J, et al. Nucleation and Growth Behavior of Chromium Nitride Film Deposited on Various Substrates by Magnetron Sputtering[J]. Surface & Coatings Technology, 2003, 171(1-3): 59- 64.
- [23] YU C, WANG S, TIAN L, et al. Microstructure and Mechanical Properties of CrAlN Coatings Deposited by Modified Ion Beam Enhanced Magnetron Sputtering on AISI H13 Steel[J]. Journal of Materials Science, 2009, 44(1): 300-305.