

铝合金不同氧化处理工艺对其表面溅射 MoS₂ 膜层耐磨性的影响

李忠建, 肖金涛, 鞠鹏飞, 臧旭升, 徐州, 刁磊

(上海航天设备制造总厂有限公司, 上海 200245)

摘 要: **目的** 探究铝合金表面不同氧化处理工艺对磁控溅射制备 MoS₂ 固体润滑膜层性能的影响。**方法** 在溅射 MoS₂ 膜层前, 对铝合金基底分别采用硫酸阳极氧化、微弧氧化、硬质氧化三种不同的氧化工艺进行预先表面处理, 然后在其表面溅射沉积一层 MoS₂ 润滑薄膜。通过摩擦磨损试验对其耐磨性能进行评价, 并通过 SEM、XRD、EDS 对薄膜表面形貌、结构及磨痕形貌、成分进行分析。**结果** 铝合金采用不同的氧化方式处理对表面 MoS₂ 膜层的结构不会产生影响。硫酸阳极氧化处理+磁控溅射双重表面处理技术制备的 MoS₂ 膜层表面最为致密均匀, 粗糙度较低, 呈花菜状。截面 SEM 照片显示, 溅射膜层与基体之间结合紧密, 溅射膜层厚度为 2 μm。在 10、20、30 N 高载荷下, 试样摩擦系数均小于 0.1, 磨损寿命分别高于 45 万转、30 万转和 9 万转, 均高于其他试样, 且不同膜层试样均具有较好的耐环境湿热性能。在摩擦过程中, 试样承受的载荷基本转移到氧化膜上, 阳极氧化后镀膜试样表面粗糙度较小, 在滑动运动过程中, 所受切向应力较小, 不会产生较严重的粘着磨损, 从而使磨损损耗速度较慢, 因此耐磨寿命较长。**结论** 铝合金阳极氧化预处理对提高铝合金表面溅射 MoS₂ 膜层耐磨性能的效果最佳。

关键词: 铝合金; 阳极氧化; 微弧氧化; 硬质氧化; 磁控溅射; 二硫化钼薄膜; 固体润滑

中图分类号: TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)12-0023-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.12.004

Effect of Different Aluminum Oxidation Treatments on Abrasion Resistance of MoS₂ Film Prepared by Magnetron Sputtering

LI Zhong-jian, XIAO Jin-tao, JU Peng-fei,
ZANG Xu-sheng, XU Zhou, DIAO Lei

(Shanghai Aerospace Equipments Manufacture Co., Ltd, Shanghai 200245, China)

ABSTRACT: To explore the effect of different oxidation treatments on the wear resistance of MoS₂ solid lubrication film

收稿日期: 2020-11-04; 修订日期: 2020-12-08

Received: 2020-11-04; Revised: 2020-12-08

基金项目: 国家自然科学基金 (51771122); 上海市优秀技术带头人计划 (20XD1431400); 上海市浦江人才计划 (19PJ1431500)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51771122), Shanghai Excellent Technology Leader Program (20XD1431400) and Sponsored by Shanghai Pujiang Program (19PJ1431500)

作者简介: 李忠建 (1991—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为空间固体润滑。

Biography: LI Zhong-jian (1991—), Male, Master, Research focus: space solid lubrication.

通讯作者: 鞠鹏飞 (1987—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为空间表面工程。邮箱: jupengfei10@163.com

Corresponding author: JU Peng-fei (1987—), Male, Doctor, Researcher, Research focus: space surface engineering. E-mail: jupengfei10@163.com

引文格式: 李忠建, 肖金涛, 鞠鹏飞, 等. 铝合金不同氧化处理工艺对其表面溅射 MoS₂ 膜层耐磨性的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(12): 23-29.

LI Zhong-jian, XIAO Jin-tao, JU Peng-fei, et al. Effect of different aluminum oxidation treatments on abrasion resistance of MoS₂ film prepared by magnetron sputtering[J]. Surface technology, 2020, 49(12): 23-29.

prepared by magnetron sputtering. Before sputtering the MoS₂ film, the aluminum alloy was pre-treated by anodic oxidation, micro arc oxidation and hard oxidation, and then a layer of MoS₂ lubrication film was deposited on the surface by sputtering. The wear resistance of the film was evaluated by friction and wear test, and analyze the surface morphology, structure and wear scar morphology and composition of the film by SEM, XRD, EDS. The XRD pattern shows that aluminum alloys treated with different oxidation methods will not affect the structure of the MoS₂ film. The surface of MoS₂ film on aluminum alloy was prepared by sulfuric acid anodizing and magnetron sputtering is the most compact, uniform, low roughness, cauliflower like. The cross-section SEM photos show that the sputtering film and the substrate are closely combined, The thickness of the sputtered film is 2 μm, The friction coefficient of the samples is less than 0.1 and the wear life was more than 450 000 r, 300 000 r and 90 000 r respectively under high loads of 10, 20, 30 N, which were all higher than other samples. All film samples have excellent environmental resistance to humidity and heat. In the process of friction, the load borne by the sample is basically transferred to the oxide film. After anodizing, the surface roughness of the coated sample is small, which will not produce large adhesive wear as the tangential stress is small, so the wear loss speed is slow and the wear life is long. Therefore, the anodic oxidation pretreatment of aluminum alloy has the best effect on improving the friction resistance of sputtering MoS₂ film.

KEY WORDS: aluminum alloy; anodic oxidation; micro arc oxidation; hard oxidation; magnetron sputtering; molybdenum disulfide film; solid lubrication

随着我国航天事业的不断发展,各类航天器向高可靠、长寿命、轻量化的方向发展^[1]。铝合金材料具有高的比强度、耐蚀性和低密度等优点,在空间系统诸如反作用轮、陀螺仪、齿轮、泵、传动装置、密封装置等运动部件中得到了越来越多的应用^[2-3]。但是铝合金作为摩擦学材料,存在着质软、摩擦系数高、磨损大、容易拉伤且难以润滑等问题,因此研究铝基材料的润滑技术具有重要的意义^[4]。

铝合金的硬质阳极氧化技术是以阳极氧化膜与耐磨性作为首要性能目标的阳极氧化技术,除了可明显提高铝合金材料的表面硬度和耐磨性以外,同时也提高了耐腐蚀性、耐热性及电绝缘性能等。铝合金的微弧氧化技术是在普通阳极氧化技术的基础上,通过升高外加电压等措施发展起来的,高温高压条件下,使原来无定型结构的氧化膜产生 γ-Al₂O₃ 相或 α-Al₂O₃ 相等结晶相,硬度和耐磨性都得到明显提高。氧化技术虽然提高了铝合金的硬度和耐磨性,但没有改善其润滑性能,通过在多孔结构的氧化膜层中原位合成或沉积润滑性物质的技术,有效地将摩擦系数降至 0.3,但摩擦系数依然偏高,而且耐磨寿命不足^[5-11],难以满足航天工程的发展需求。

液体润滑材料在真空环境下因为具有较高的饱和蒸气压而逐渐挥发,不能满足长时间工作要求,因此固体润滑材料是空间润滑材料的首选。享有“润滑之王”美誉的 MoS₂,是目前为止空间飞行器运动部件应用最多的固体润滑剂。PVD 溅射 MoS₂ 具有高致密性、厚度精准可控^[12-14]等特点,是空间精密运动部件防冷焊润滑表面改性的主要手段,航天器所经历的环境除了在轨运行的空间环境外,还必须经历地面环境和发射环境。在地面环境中,润滑材料要经历贮存、

运输和试验跑合,在氧和水汽的作用下,MoS₂ 薄膜容易氧化和吸潮,润滑性能和寿命大幅下降,特别是随着海南文昌发射基地的投入使用,对耐环境湿热性能的要求越来越高。

为了解决铝合金材料难以润滑的问题,本文采用氧化加固体润滑膜层双重表面处理技术对铝合金进行表面改性。在分别采用硫酸阳极氧化、硬质氧化、微弧氧化和不做氧化处理的 2A14 铝合金表面磁控溅射沉积 MoS₂ 固体润滑膜层,系统考察铝合金不同的氧化处理方式对其表面溅射 MoS₂ 膜层摩擦学性能的影响,并对其摩擦机理进行分析。

1 试验

1.1 试样氧化处理

采用单晶硅片和 2A14 铝合金圆形试片作为溅射 MoS₂ 膜层的基底材料,利用单晶硅片为镀膜基底的试样用于形貌分析,2A14 铝合金圆形试片用于摩擦学性能分析和结构分析。铝合金试片直径 50 mm,厚度 2 mm,表面粗糙度 Ra=1.6 μm。对铝合金试片分别进行硫酸阳极氧化处理、微弧氧化处理、硬质氧化处理,具体氧化处理参数详见表 1—表 3^[15-19]。

表 1 铝合金 2A14 阳极氧化工艺参数
Tab.1 Anodizing oxidation process parameters of aluminum alloy 2A14

Solution	Concentration (g·L ⁻¹)	Temperature /°C	Voltage /V	Time /min
H ₂ SO ₄	190	15	15	45

表 2 铝合金 2A14 微弧氧化工艺参数
Tab.2 Micro arc oxidation process parameters of aluminum alloy 2A14

Solution	Temperature /℃	Positive current density/(A·dm ⁻²)	Positive voltage /V	Negative current density/(A·dm ⁻²)	Negative voltage /V	Time /min
Na ₂ O·nSiO ₂ , NaOH	25	4	500	-4	-250	40

表 3 铝合金 2A14 硬质氧化工艺参数
Tab.3 Hard oxidation process parameters of aluminum alloy 2A14

Solution	Concentration/(g·L ⁻¹)	Temperature/℃	Voltage/V	Maximum current density/(A·dm ⁻²)
H ₂ SO ₄	230	-3	18	3

1.2 MoS₂ 固体润滑膜层制备

采用英国 Teer 公司生产的 CF-800 闭合磁场非平衡磁控溅射镀膜设备制备 MoS₂ 固体润滑膜层样品。镀膜设备沉积室中央为工作台，周围内壁上布置 4 个溅射靶，其中两个为金属钛靶，另外两个为 MoS₂ 靶，如图 1 所示。

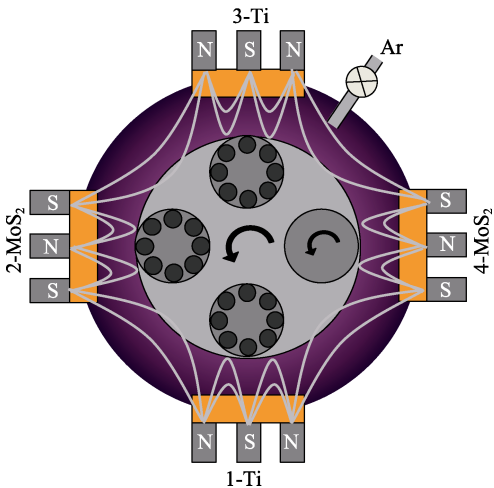


图 1 闭合磁场非平衡磁控溅射镀膜设备示意图
Fig.1 Schematic diagram of closed magnetic field unbalanced magnetron sputtering coating equipment

先将镀膜基体放入丙酮中超声清洗 10 min，除去基体表面污染物，然后装入真空腔室内的工件转盘上。利用辉光放电效应对样品表面进行辉光等离子体清洗^[20]，清洗 10 min 后，开启 Ti 靶工作，在基体表面沉积厚约 100 nm 的 Ti 中间层，来提高 MoS₂ 膜层与基体的结合力。最后 4 个靶同时开启，镀膜基体随工件转盘低速旋转，依次通过各溅射靶形成复合共溅射薄膜。表 4 为膜层试样基体的氧化处理状态。

表 4 MoS₂ 膜层试样基体状态
Tab.4 Matrix state of MoS₂ coating sample

Number	Matrix	Oxidation treatment process	Coating time/h
1	Si		2
2	2A14		2
3	2A14	Micro-arc oxidation	2
4	2A14	Anodizing oxidation	2
5	2A14	Hard oxidation	2

1.3 试样表面形貌与性能评价

采用美国 Zeiss Nova Nano SEM 450 型扫描电子显微镜进行膜层形貌与厚度表征。采用日本理学 X 射线粉末衍射仪 Smart Lab 对 MoS₂ 膜层进行结构表征。采用美国布鲁克 UMT-Tribolab 摩擦磨损试验机进行大气摩擦学性能测试，测试条件为球-盘式摩擦测试，对偶球为 9Cr18 轴承钢球，钢球直径 8 mm，摩擦学测试法向载荷采用高载荷，分别为 10、20、30 N，球相对于盘试样的滑动转速为 1000 r/min。参照 GJB 3032—97《溅射 MoS₂ 基自润滑固体薄膜规范》，对试样的摩擦学性能进行评价。

2 结果及分析

2.1 膜层形貌及厚度

图 2 是以单晶硅（图 2a）、2A14 铝合金（图 2b）和分别做微弧氧化（图 2c）、阳极氧化（图 2d）、硬质氧化（图 2e）处理的铝合金为镀膜基体，再在其表面磁控溅射制备的 MoS₂ 润滑膜层的表面与截面扫描电镜微观形貌照片。

图 2a 表面图为单晶 Si 基体上磁控溅射制备的 MoS₂ 润滑膜层放大 3 万倍的微观照片。由图可见，膜层表面平整，呈花菜状^[21]，且晶粒细致均匀，晶粒尺寸在 100~200 nm 之间，无裂纹、凹坑等缺陷。截面照片显示，溅射膜层内部呈柱状结构，无孔洞、缝隙，致密度较高，膜层厚度约为 2 μm。

铝合金表面 MoS₂ 膜层放大 2 万倍的微观照片（图 2b—e 表面图）显示，铝合金的氧化工艺会影响表面溅射膜层的微观形貌。未做氧化处理的铝合金膜层表面有小球状突起和犁沟存在。铝合金微弧氧化后溅射 MoS₂ 膜层表面最为粗糙，呈丘状突起^[22]，截面照片显示微弧氧化膜层表面呈波纹状，溅射膜层的波纹状态与微弧氧化膜层一致。阳极氧化后，溅射膜层表面观最为致密均匀，粗糙度较低，截面照片显示溅射膜层与基体之间紧密结合、无缝隙。此外，微弧氧化膜层内部有孔洞缺陷存在。基体材料的状态对溅射膜层的厚度（均为 2 μm 左右）影响较小。

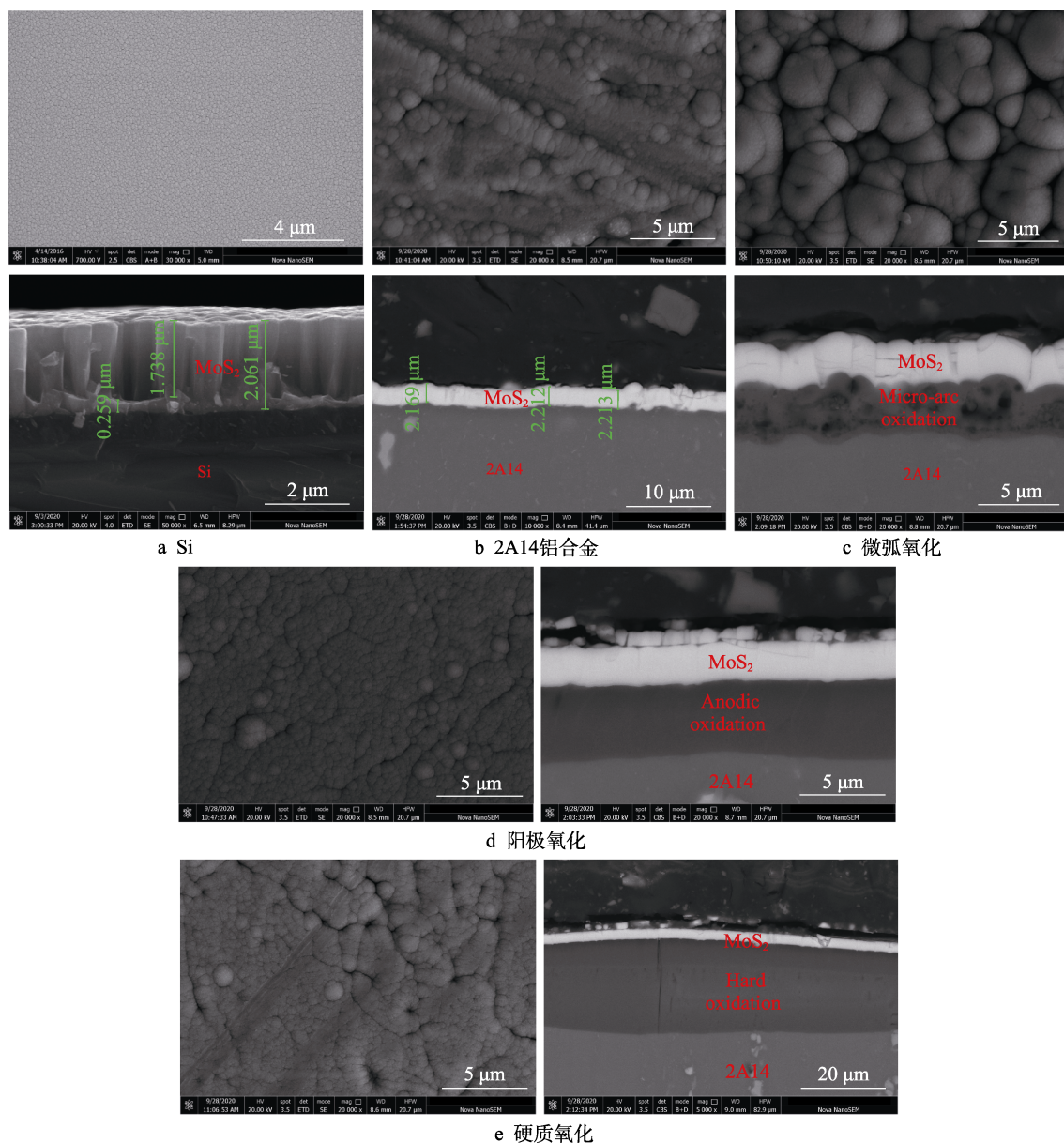
图2 MoS₂膜层表面及截面 SEM 照片

Fig.2 SEM photos of surface section of MoS₂ film: a) Si; b) 2A14 aluminum alloy; c) micro arc oxidation; d) anodic oxidation; e) hard oxidation substrate

2.2 不同试样 MoS₂膜层结构分析

图3为不同试样表面 MoS₂膜层 XRD 图谱,不同试样的 XRD 图谱相近,具有相同的晶体结构,说明铝合金不同的氧化方式不会对表面沉积 MoS₂膜层的晶体结构产生影响。 2θ 在 12° 左右存在一个明显的衍射峰,对应于薄膜的(002)晶面,而在 33° 和 59° 分别对应薄膜的(100)和(110)晶面,但这两个衍射峰强度较低。这表明薄膜主要以(002)晶面取向为主,验证了 Muratore 的观点^[23]。Zhang 等^[24]发现这种以(002)晶面择优取向为主的 MoS₂,处于低能状态,具有化学惰性,在各种环境下均具有较低的摩擦系数和磨损率。在 $30^\circ \sim 50^\circ$ 出现的包峰表明,薄膜内部存在随机取向的 S-Mo-S 片层结构,片层尺寸在 $0.7 \sim 7$ nm^[25]。

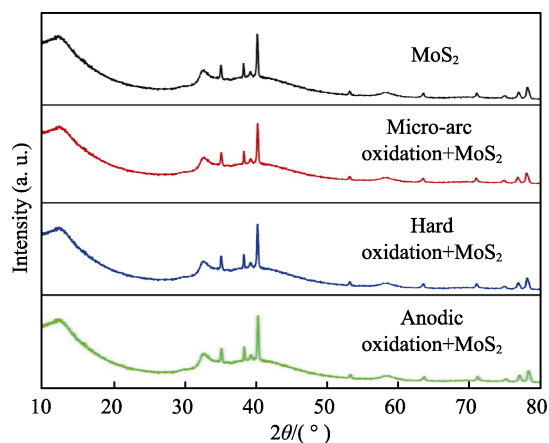


图3 不同试样表面 MoS₂膜层 XRD 图谱
Fig.3 The XRD patterns of MoS₂ film on different samples

2.3 铝合金双重表面处理试样不同载荷下的摩擦学特性及耐湿热性能

图 4 为不同双重表面处理的试样分别在 10、20、30 N 法向载荷下的摩擦学曲线。由图可知, 铝合金表面的不同氧化处理工艺对 MoS₂ 膜层的摩擦系数影响较小, 均在 0.1 左右。在不同的法向载荷下, 氧化处理后的铝合金基体上的 MoS₂ 固体润滑膜层的滑动磨损寿命明显高于未氧化而直接镀膜的试样, 未氧化直接镀膜的试样在摩擦测试过程中很快被磨穿。采用阳极氧化处理后镀膜的试样的磨损寿

命明显高于其他氧化处理后镀膜的膜层试样。在 10 N 和 20 N 高载荷下, 阳极氧化处理后镀膜的试样磨损寿命分别高于 45 万转和 30 万转, 硬质氧化处理后镀膜的试样磨损寿命分别为 17 万转和 6 万转左右, 微弧氧化处理后镀膜试样的磨损寿命均低于 10 万转。在 30 N 重载荷下, 阳极氧化处理后镀膜试样的磨损寿命可达 9 万转以上, 摩擦系数有下降趋势, 微弧氧化处理后镀膜试样的磨损寿命可达 5 万转以上。采用阳极氧化后溅射 MoS₂ 固体润滑膜层的双重改性表面处理工艺, 改善铝合金润滑性能的效果最佳。

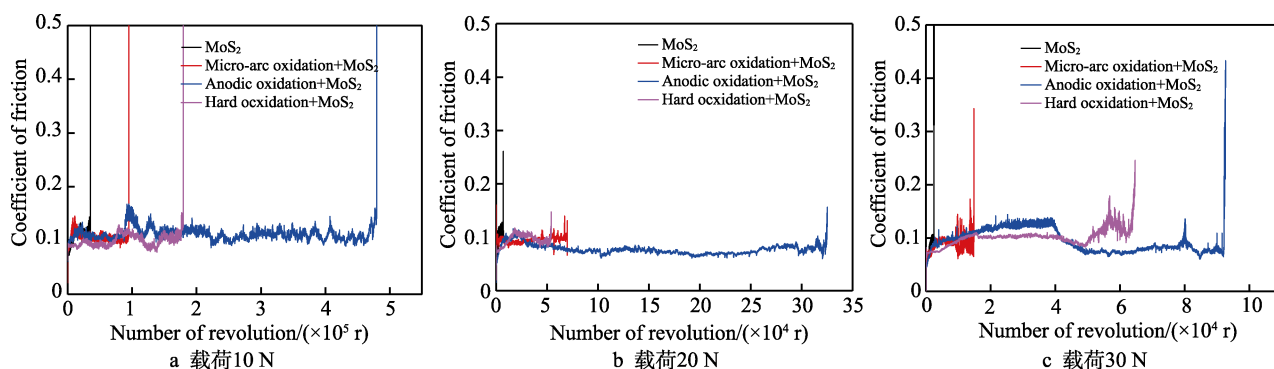


图 4 溅射膜层分别在 10、20、30 N 法向载荷下的摩擦学曲线
Fig.4 Tribological curves of sputtered films under normal loads of 10, 20 and 30 N

参照 GJB 3032—97, 将膜层试样放入 40 °C、80% RH 环境下存储 720 h, 再进行摩擦学性能测试, 测试结果如图 5 所示。与图 4a 相比, 湿热存储试验对不同膜层的摩擦系数与磨损寿命不产生影响, 这是由于 MoS₂ 薄膜中掺杂金属 Ti 后, 由于对 O 的捕获以及钝

化 MoS₂ 棱面活性生长点等效效应, 有效地阻断了薄膜柱状晶优势生长, 限制了薄膜颗粒尺寸, 从而使薄膜的结构致密度明显提高, 而且 Ti 对 O 具有强烈的捕获作用, 从而大大降低了 MoS₂ 发生氧化反应的几率, 薄膜在大气潮湿环境中的摩擦学性能得到很好的改善^[26]。

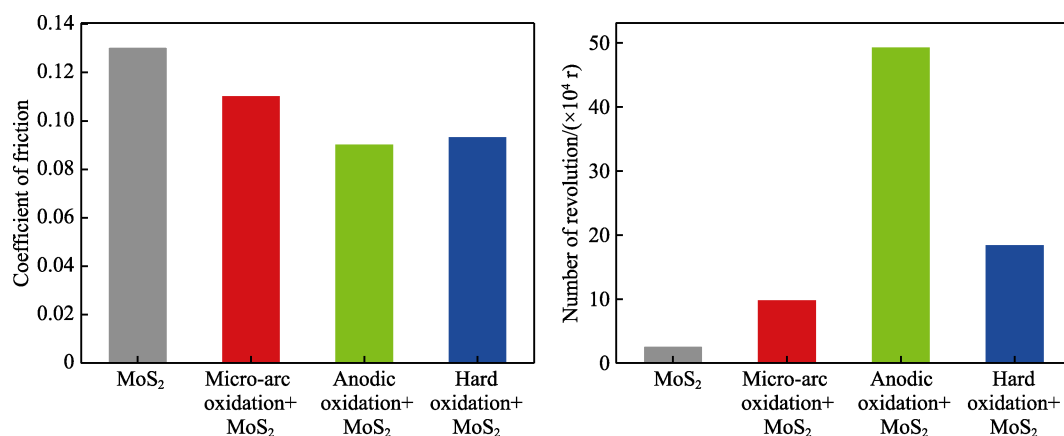


图 5 湿热存储后不同膜层试样在 10 N 载荷下的摩擦系数与摩擦寿命
Fig.5 Friction coefficient and wear life of different film samples under 10 N load after wet heat storage experiment

2.4 磨痕形貌分析

将 10 N 载荷下磨痕表面元素分析结果列于表 5, 试样在摩擦测试过程中, 表面的 MoS₂ 膜层逐渐耗损, 经过一定次数的摩擦后, MoS₂ 润滑膜层已基本消耗

殆尽, 但润滑并未失效, 这表明润滑膜层转移到偶件的表面, 仍然起润滑作用。图 6 给出了 10 N 载荷下摩擦测试不同转动次数的阳极氧化+溅射 MoS₂ 双重处理试样的磨痕 SEM 照片, 由图清晰地看到试样与

钢球对膜的犁沟,磨痕呈现出鳞片状和峰状形貌,在磨痕边缘处可以看到不规则断面,这证明在摩擦过程中发生了粘着磨损,反映了润滑材料由摩擦副一方转移到另一方^[27]。粘着磨损与其他磨损形式的很大不同在于,其他磨损形式一般都需要一些时间来扩展或达到临界破坏值,而粘着磨损则发生得非常突然。整个摩擦过程中,氧化膜层完好,并未出现裂纹和剥落^[28]。

表 5 阳极氧化后镀膜试样 10 N 载荷下磨痕表面 EDS 分析结果统计

Tab.5 EDS analysis results statistics of wear scar surface of coated samples after anodizing under 10 N load

Wear rotations/r	(Mo+S+Ti)/%	(Al+O)/%
1×10^5	95.6	4.4
2×10^5	49	50.5
3×10^5	17.4	77.5
4×10^5	1.9	93.4

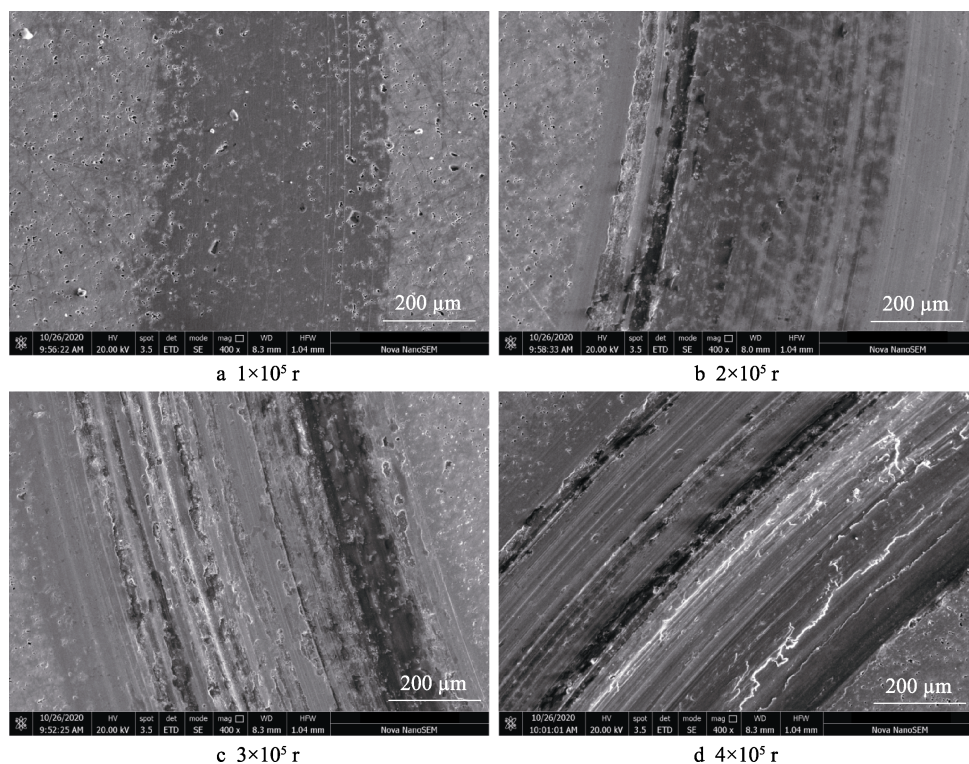


图 6 阳极氧化后镀膜试样在 10 N 载荷下的磨痕表面形貌照片

Fig.6 Surface morphology of wear marks of coated sample after anodizing under 10 N load

通过以上试验结果分析表明,经过氧化+溅射 MoS_2 润滑膜双重处理的铝合金试样与直接镀膜的试样相比,耐磨性能明显提高。分析认为,铝基底材料质软,直接镀膜的试样在摩擦试验过程中承受的载荷基本上由较薄的溅射 MoS_2 膜层承担,在法向载荷和切向载荷的反复作用下,润滑膜层很快失效^[29]。摩擦磨损受许多因素的影响,它不仅依赖于参与摩擦磨损过程的材料,而且与运行条件、材料的表面状态等相关,只要某一影响因素发生微小变化,摩擦副的磨损量或摩擦系数就会发生明显的变化。采用阳极氧化后镀膜的双重氧化处理方式进行处理的事样的耐磨性能和摩擦系数,都明显优于其他试样。阳极氧化膜为硬质膜层,在摩擦过程中,试样承受的载荷基本转移到氧化膜上,并且由图 2 可知,阳极氧化后镀膜试样表面粗糙度较小,平整度较高,无明显裂纹和缺陷,在滑动运动过程中,所受切向应力较小,不会产生较大的粘着磨损,从而使磨损损耗速度较慢,因此耐磨寿命较长。

3 结论

1) 磁控溅射制备的 MoS_2 润滑膜层断面呈细柱状且排列致密均匀,以(002)晶面择优取向为主,晶粒尺寸在 100~200 nm 之间,膜层厚度约为 2 μm,不同氧化处理方式不会对 MoS_2 膜层的厚度和结构产生影响。

2) 铝合金的氧化方式直接影响表面溅射 MoS_2 膜层的微观形貌,阳极氧化后溅射膜层表现最为致密均匀,光滑度提高,溅射膜层与基体之间结合紧密,无裂缝,且溅射膜层厚度不受基体的影响。

3) 采用阳极氧化后溅射 MoS_2 固体润滑膜层的双重表面处理方式,可使铝合金在不同的载荷下均具备较长的耐磨寿命和较低摩擦系数,且具有较好的耐环境湿热性能,摩擦过程产生粘着磨损,润滑膜发生了转移。

参考文献:

- [1] 周晖, 温庆平, 郝宏, 等. 非平衡磁控溅射沉积 MoS₂-Ti 复合薄膜结构与摩擦磨损性能研究[J]. 摩擦学学报, 2006, 26(3): 89-93.
ZHOU Hui, WENG Qing-ping, HAO Hong, et al. Study of structural and tribological properties of MoS₂-Ti composite coatings deposited by unbalanced magnetron sputter[J]. Tribology, 2006, 26(3): 89-93.
- [2] 翁立军, 刘维民, 孙嘉奕, 等. 空间摩擦学的机遇和挑战[J]. 摩擦学学报, 2005, 25(1): 92-95.
WENG L J, LIU W M, SUN J Y, et al. Opportunities and challenges to space tribology[J]. Tribology, 2005, 25(1): 92-95.
- [3] 钱建才, 邹洪庆, 马春华, 等. 封闭处理对铝合金硬质阳极氧化膜防护性能的影响研究[J]. 装备环境工程, 2019, 16(12): 80-85.
QIAN Jian-cai, ZOU Hong-qing, MA Chun-hua, et al. Effects of sealing treatment on protective properties of hard anodic oxide coatings on aluminum alloy[J]. Equipment environmental engineering, 2019, 16(12): 80-85.
- [4] QU S. The effect of various cyclic wet-dry exposure cycles on the failure process of organic coatings[J]. International journal of electrochemical science, 2019, 14: 10754-10762.
- [5] YU C, JU P, WAN H, et al. Tribological properties of the polyacrylate/PTFE coating modified by POSS in the space environment[J]. Journal of applied polymer science, 2020, 10: 1002.
- [6] 郭清兵, 袁海兵, 李翠金, 等. 自润滑型铝合金硬质阳极氧化膜的摩擦磨损性能[J]. 表面技术, 2010, 39(2): 21-23.
GUO Qing-bing, YUAN Hai-bing, LI Cui-jin, et al. Sliding wear performance of self-lubricating aluminum alloy hard anodic oxidation film[J]. Surface technology, 2010, 39(2): 21-23.
- [7] ERDEMIR A, BINDAL C, FENSKE G R. Formation of ultralow friction surface films on boron carbide[J]. Applied physics letters, 1996, 68: 1637.
- [8] 王曼. 2A12 铝合金硬质阳极氧化工艺及复合自润滑膜的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
WANG Man. 2A12 aluminum alloy hard anodizing process and composite research of self-lubricating film[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016.
- [9] 陈建敏, 王安钧. 铝制材料的摩擦学表面改性[J]. 摩擦学学报, 1994(2): 259-270.
CHEN Jian-min, WANG An-jun. Tribological surface modification of aluminum materials[J]. Tribology, 1994(2): 259-270.
- [10] DEFEOA M, DEBAOSBOUCHE M I, MINFRAY C, et al. Mo DTC lubrication of DLC-involving contacts. Impact of Mo DTC degradation[J]. Wear, 2016, 348-349: 116-125.
- [11] 付景国, 马圣林, 朱新河, 等. 固体润滑剂 WS₂ 对铝合金微弧氧化陶瓷膜摩擦学性能的影响[J]. 表面技术, 2019(7): 150-157.
FU Jing-guo, MA Sheng-lin, ZHU Xin-he, et al. Influence of solid lubricant WS₂ on the tribological properties of micro-arc oxidation ceramic coating of Al alloy[J]. Surface technology, 2019, 48(7): 150-157.
- [12] SPALVINS T. A review of recent advances in solid film lubrication[J]. Journal of vacuum science & technology A, 1987, 5(2): 212-219.
- [13] LIU X, WANG L, XUE Q. A novel carbon-based solid-liquid duplex lubricating coating with super-high tribological performance for space applications[J]. Surface & coatings technology, 2011, 205(8-9): 2738-2746.
- [14] 李浩. MoS₂ 基薄膜可控制备及其摩擦学性能研究[D]. 兰州: 中国科学院兰州化学物理研究所, 2016.
LI Hao. Controllable preparation and tribological performance of MoS₂-based coating[D]. Lanzhou: Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [15] 肖金涛, 陈妍, 邢明秀, 等. 工艺参数对 2195 铝锂合金阳极氧化膜的耐蚀性影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2019, 39(5): 431-438.
XIAO Jintao, CHEN Yan, XING Ming-xiu, et al. Effect of process parameters on corrosion resistance of anodizing film on 2195 Al-Li alloy[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2019, 39(5): 431-438.
- [16] 朱祖芳. 铝合金阳极氧化与表面处理技术[D]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
ZHU Zu-fang. Anodizing and surface treatment of aluminum alloy[D]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010.
- [17] 崔宝磊, 王赫男, 巩校良, 等. 温度对 2198 铝锂合金硫酸阳极氧化膜性能的影响[J]. 电镀与涂饰, 2018, 37(4): 168-172.
CUI Bao-lai, WANG He-nan, GONG Xiao-liang, et al. Effect of temperature on properties of oxide film formed on 2198 aluminum-lithium alloy by anodization in sulfuric acid[J]. Electropating & finishing, 2018, 37(4): 168-172.
- [18] 赵红锦. 7075 铝合金表面阳极氧化膜的制备及其摩擦学性能的研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2018.
ZHAO Hong-jin. Preparation and tribological properties of anodic oxide film on 7075 aluminum alloy[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2018.
- [19] 杨斌. 铝合金表面阳极氧化膜的制备、性能及应用研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2019.
YANG Bin. Study of the preparation, properties and application of anodic oxide film on aluminum alloy surface[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2019.
- [20] KIM S K, AHN Y H, KIM K H. MoS₂-Ti composite coatings on tool steel by DC magnetron sputtering[J]. Surface & coatings technology, 2003, 169: 428-432.
- [21] KOGOVŠEK J, REMŠKAR M, KALIN M. Lubrication of DLC-coated surfaces with MoS₂ nanotubes in all lubrication regimes: Surface roughness and running-in effects[J]. Wear, 2013, 303: 361-370.
- [22] GUPTA M K, MIA M, PRUNCU C I, et al. Modeling and performance evaluation of Al₂O₃, MoS₂ and graphite nanoparticle-assisted MQL in turning titanium alloy: An intelligent approach[J]. J braz soc mech sci eng, 2020, 42(4): 207.
- [23] MURATORE C, VOEVODIN A. Control of molybdenum disulfide basal plane orientation during coating growth in pulsed magnetron sputtering discharges[J]. Thin solid films, 2009, 517(19): 5605-5610.
- [24] ZHANG X, VITCHEV R, LAUWERENS W, et al. Effect of crystallographic orientation on fretting wear behaviour of MoS₂ coatings in dry and humid air[J]. Thin solid films, 2001, 396(1): 69-77.
- [25] BELL M, FINDLAY J. Molybdenite as a new lubricant[J]. Phys rev, 1941, 59(11): 922.
- [26] ALI M K A, HOU X J, MAI L Q, et al. Reducing fictional power losses and improving the scuffing resistance in automotive engines using hybrid nanomaterials as nano-lubricant additives[J]. Wear, 2016, 364-365: 270-281.
- [27] ZHOU J F, YANG J J, ZHANG Z J, et al. Study on the structure and tribological properties of surface-modified Cu nanoparticles[J]. Mater res bull, 1999, 34(9): 1361-1367.
- [28] WU H X, QIN L G, ZENG Q F, et al. Understanding the physical adsorption action mechanism of MoS₂ nanoparticles in boundary lubrication with different polyisobutyleneamine succinimide (PIBS) concentrations[J]. Tribol lett, 2015, 60(2): 26.
- [29] WU H X, LI X, HE X L, et al. An investigation on the lubrication mechanism of MoS₂ nanoparticles in unidirectional and reciprocating sliding point contact: The flow pattern effect around contact area[J]. Tribol Int, 2018, 122: 38-45.