

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

付景国, 马圣林, 朱新河, 马春生, 徐长旗, 朱嘉琪

(大连海事大学 轮机工程学院, 辽宁 大连 116026)

摘要: **目的** 改善微弧氧化陶瓷膜层的摩擦学性能。**方法** 采用微弧氧化技术和抛磨技术相结合的方法在 ZL109 合金表面制备微弧氧化陶瓷和固体润滑剂复合膜层。利用粗糙度仪检测试样表面粗糙度, 并在球盘往复摩擦磨损试验机下检测复合膜层的摩擦学性能。使用扫描电镜 (SEM) 分析试验前后试样表面微观形貌及对磨钢球磨斑形貌, 并利用能谱分析仪 (EDS) 对试样膜层化学成分进行分析。**结果** 在抛磨纳米 WS₂ 粉体过程中, WS₂ 可有效填充陶瓷膜疏松层上的放电微孔以及经抛光的陶瓷膜层表面残留的微孔缺陷, 并极大地降低试样表面粗糙度, 进而影响实验前期的摩擦系数及抗粘着时间。试样 MAO-W 比试样 MAO 粗糙度降低约 34.2%, 摩擦系数降低 79.2%, 抗粘着时间增加 900%。试样 P-MAO-W 比试样 P-MAO 粗糙度降低约 41.3%, 摩擦系数降低 93.6%, 抗粘着时间增加 233%。另外, 制备的试样可以有效减轻对磨钢球的磨损, 并且试样的磨痕宽度及对磨钢球的磨斑直径变化规律与摩擦过程中的摩擦系数变化及粗糙度变化趋势相吻合。**结论** 在铝合金微弧氧化陶瓷膜层表面抛磨纳米 WS₂ 自润滑粉体可有效降低摩擦, 延长抗粘着时间并减轻对磨件的磨损。

关键词: 微弧氧化; 陶瓷膜; 抛磨; WS₂; 摩擦学性能; 铝合金

中图分类号: TG174.44 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)07-0150-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.07.016

Influence of Solid Lubricant WS₂ on the Tribological Properties of Micro-arc Oxidation Ceramic Coating of Al Alloy

FU Jing-guo, MA Sheng-lin, ZHU Xin-he, MA Chun-sheng, XU Chang-qi, ZHU Jia-qi

(School of Marine Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the tribological properties of micro-arc oxidation (MAO) ceramic coatings. The MAO ceramic and solid lubricant composite layer was prepared on the surface of ZL109 alloy by micro-arc oxidation and polishing technology. The roughness of the samples was measured by roughness tester. The tribological properties of the composite layer were evaluated by ball-disk friction and wear tester. The surface morphology of the samples before and after the test and the morphology of the coupling steel balls were analyzed by scanning electron microscopy (SEM). The chemical composition of the layer was analyzed by energy dispersive spectrometer (EDS). The discharge micro-pores on the porous MAO ceramic layer and

收稿日期: 2019-03-24; 修订日期: 2019-06-11

Received: 2019-03-24; Revised: 2019-06-11

作者简介: 付景国 (1986—), 男, 硕士, 讲师, 主要研究方向为船舶节能减排、船机零件摩擦控制。

Biography: FU Jing-guo (1986—), Male, Master, Lecturer, Research focus: ship energy conservation, machine parts friction control.

通讯作者: 朱新河 (1964—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为船机零件故障诊断及摩擦控制。邮箱: xinhe@dlnu.edu.cn

Corresponding author: ZHU Xin-he (1964—), Male, Doctor, Professor, Research focus: machine parts fault diagnosis and friction control. E-mail: xinhe@dlnu.edu.cn

the micro-dimple defects remaining on the surface of the polished ceramic layer could be effectively filled by WS₂ during the polishing of WS₂ nano-powders. The surface roughness of the sample was greatly reduced through this method. The friction coefficient in the early stage of the experiment and anti-adhesion time were affected. Compared with sample MAO, the roughness of sample MAO-W was about 34.2% lower, the friction coefficient was reduced by 79.2%, and the anti-adhesion time was increased by 900%. Compared with sample P-MAO, the roughness of sample P-MAO-W was reduced by about 41.3%, friction coefficient was reduced by 93.6%, and anti-adhesion time was increased by 233%. Beside this, the wear on the coupling steel ball could be effectively reduced by prepared samples. The variation of the width of wear scar of the samples and the diameter of the wear spot of coupling steel ball coincided with the change trends of the friction coefficient and the roughness of the samples during the friction process. Polishing WS₂ self-lubricating nano-powders on aluminum MAO ceramic coatings of Al alloy can effectively reduce friction, improve wear life and mitigate wear on abrasive parts.

KEY WORDS: MAO; ceramic coating; polishing; WS₂; tribological properties; aluminium alloy

镁、铝、钛等金属合金及其复合材料因具有密度小、比强度高等优点,常用来代替高强度钢等传统材料,制造相对运动部件,在航天航空、舰船、汽车等行业的节能减排、轻量化减重增效中发挥了重要作用^[1]。但在较高摩擦温度和接触应力时,由于其化学性质较为活泼、稳定性差、硬度低等因素,会导致摩擦系数高、粘着磨损严重等问题的出现,限制了其广泛使用^[2]。而利用微弧氧化技术在其表面生成结合强度高且抗磨、耐腐蚀的陶瓷膜层,是目前公认具有较大潜力的表面处理技术^[3]。但是,在微弧氧化过程中,表面放电微孔处形成的“火山口”状形貌会导致微弧氧化陶瓷膜层粗糙度升高。此外,膜层在干摩擦工况下表现出较高的摩擦系数,不仅会增加摩擦功耗,还会加剧两种耦合材料的磨损,造成部件失效^[4-6]。因此,微弧氧化复合膜层用以改善陶瓷膜层的减摩性能被广泛研究。

目前用于改善微弧氧化陶瓷膜层减摩性能的技术可分为 2 类: 1) 直接将功能性微纳米颗粒添加到电解液中,在微弧氧化过程中使微纳米颗粒掺入到陶瓷层中,形成复合膜层。在摩擦磨损过程中,释放掺入的微纳颗粒,以达到减摩的效果。魏国栋等^[7]在铝合金微弧氧化电解液中添加不同浓度的纳米 BN,发现随着颗粒的加入,干摩擦工况下摩擦系数均有所降低,添加量为 3 g/L 时,摩擦系数可降低为 0.55。张玉林等^[8]在铝合金微弧氧化电解液中添加石墨烯,研究表明,在相同摩擦条件下,复合陶瓷膜层的摩擦系数仅为 0.09,是空白陶瓷层摩擦系数值的 1/3。Chen 等^[9]研究了 PTFE 颗粒添加在镁合金微弧氧化电解液中对陶瓷层摩擦系数的影响。结果表明,当微弧氧化时间为 5 min 时,PTFE 颗粒能较好地降低陶瓷层的摩擦系数,且减摩效果稳定。于光宇等^[10]发现电解液中添加纳米 SiC 颗粒也能较好的改善微弧氧化复合膜层的减摩性能。2) 对微弧氧化后的陶瓷膜层进行后处理,形成复合膜层。常见的后处理技术有电泳沉积、磁控溅射、热喷涂、织构填充等。Ma 等^[11]以铝合金微弧氧化陶瓷层作为基底,利用电泳沉积技术制

备出 MoS₂ 复合膜层。在干摩擦实验工况下,其摩擦系数降低了 35%。楼白杨等^[12]在镁基体表面微弧氧化后,通过磁控溅射技术制备出 MAO/CrN 复合膜层。在干摩擦实验工况下,其摩擦系数降低了 32.3%。Hu 等^[13]研究了在不同粗糙度钛合金基体上制备微弧氧化陶瓷膜层,然后采取喷涂方式制备 MoS₂ 面漆复合涂层,其摩擦系数显著降低,且复合涂层的耐久性受基底粗糙度和加工痕迹的影响。秦永坤等^[14]则是对具有微造型的钛合金表面进行微弧氧化处理,然后机械涂覆 MoS₂ 粉体。结果显示,此种方法制备的复合涂层具有较低的摩擦系数以及较长的磨损寿命。

上述研究表明,利用微弧氧化陶瓷膜层的多孔结构储存具有自润滑作用的颗粒而制备复合膜层,可以在保证复合膜层的耐磨、耐擦伤性能的同时,还能降低摩擦系数。第 1 类处理方法较为简单,但需要解决微纳颗粒在电解液中的分散稳定问题,并且研究发现,掺入微弧氧化陶瓷膜层中的微纳颗粒存在分布不均且含量较低的现象^[15],减摩效果有限。第 2 类处理方法尽管减摩效果较好,但工艺相对复杂。因此,本文提出在铝合金微弧氧化陶瓷膜层表面直接抛磨纳米固体润滑剂,以陶瓷膜层自身多孔结构作织构基底,利用抛磨工艺的高速、挤压作用,使纳米 WS₂ 颗粒在抛磨面滚动的同时,挤压到陶瓷膜层的多孔通道及凹坑缺陷内,最终在陶瓷膜表层抛磨成膜,此工艺简单且膜层中自润滑材料含量及结合强度较高,复合陶瓷膜层展现出较好的摩擦学性能。

1 实验

1.1 陶瓷膜层的制备

铝合金样品牌号为 ZL109,其化学成分见表 1。铝合金板用电火花线切割机切割成 40 mm×10 mm×10 mm 的长方体试样。在微弧氧化前,将试样分别用 200#、500#、1000# 的砂纸打磨,之后再抛光,最后依次使用丙酮、无水乙醇超声清洗 10 min。

表 1 试样化学成分
Tab.1 Chemical composition of samples

Component	Si	Cu	Mg	Ni	Al
Content/wt%	11.0~13.0	0.5~1.5	0.8~1.3	0.8~1.5	Bal.

微弧氧化设备由双极性脉冲电源、电解槽、搅拌系统和水冷系统组成。实验中所用的电解液为 Na_2SiO_3 -KOH 体系，电源采用恒压模式，氧化温度控制在 $30\sim 40\text{ }^\circ\text{C}$ 。电解液组成为硅酸钠 8 g/L，钨酸钠 5 g/L，氢氧化钾 2 g/L，EDTA-2Na 2.5g/L。电参数设置为：正向电压 420 V，负向电压 120 V，频率 500 Hz，正向占空比 20%，负向占空比 20%，正负向脉冲比 1:1。氧化时间为 40 min。

1.2 抛光陶瓷膜层的制备

先将微弧氧化试样在无水乙醇溶液中超声清洗 15 min 并晾干，作为对照组试样 MAO；选用 800#、1000# 水磨砂纸依次对微弧氧化 MAO 试样直接进行抛光，得到试样 P-MAO；在此基础上，将试样 P-MAO 表面以一定压力贴合在涂覆 WS_2 纳米粉体的抛光布上，并使抛光机以一定速度转动，抛光 10 min，得到试样 P-MAO-W。另外，实验还制备了在微弧氧化试样 MAO 表面直接抛光 WS_2 纳米粉体的试样 MAO-W。使用的 WS_2 纳米颗粒经粒度仪检测，92% 的粒径分布在 100 nm 范围内。

1.3 摩擦磨损试验

摩擦磨损试验在 CFT-1 材料表面性能综合试验机上进行，试样作为下表面，对磨偶件为 GCr15 轴承钢球，直径为 4 mm，硬度为 61HRC，运动形式为往复运动，实验装置如图 1 所示。试验在干摩擦条件

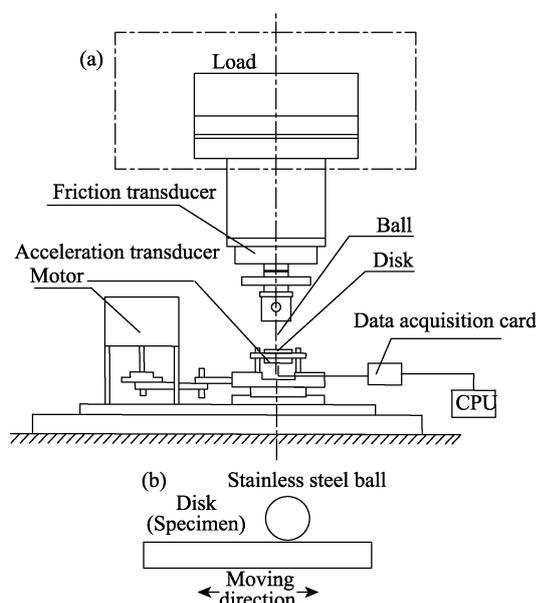


图 1 摩擦磨损试验机示意图

Fig.1 Schematic diagram of friction and wear tester

下进行，加载力为 10 N，电机转速为 400 r/min，往复运动距离为 5 mm。

1.4 膜层性能评价

采用粗糙度仪 (TR200) 测试膜层表面粗糙度；运用电子扫描电镜 (TESCAN VEGA3) 对试样表面及对磨钢球磨斑的形貌进行观察分析；采用能谱仪 (OXFORD) 对试样表面元素进行分析。

2 结果与讨论

2.1 复合陶瓷膜层微观结构分析

通过扫描电镜对所制备的试样表面进行观察，结果如图 2 所示。可以发现，试样 MAO 表面分布着大量无规则的放电微孔，微孔周围有凸起的熔融物，呈现出类似“火山口”的形态，孔的直径约为 $5\sim 10\text{ }\mu\text{m}$ ，表面粗糙不平，粗糙度约为 $3.5\text{ }\mu\text{m}$ ，为典型的铝合金微弧氧化表面形貌 (图 2a)。而对其使用水砂纸抛磨后，微弧氧化陶瓷膜层表面凸起的疏松层结构被抛磨掉，试样 P-MAO 表面变得相对光滑，表面粗糙度降低为 $0.75\text{ }\mu\text{m}$ ，但表面仍有少量凹坑状缺陷存在，分析认为是熔融物“火山口”被抛磨之后的底部凹坑，其直径在 $2\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 之间，如图 2b 所示。在此基础上，使用纳米 WS_2 粉体对试样 P-MAO 进行抛磨，结果显示，表面残留的“火山口”底部凹坑状缺陷几乎被完全覆盖，且表面粗糙度进一步降低为 $0.44\text{ }\mu\text{m}$ 。通过能谱仪对表面成分进行分析，结果表明，除部分微弧氧化陶瓷膜基体 (图 2c 中黑色平滑区域) 裸露在外，大部分表面被 WS_2 固体粉体所覆盖。分析认为，在抛光过程中，纳米 WS_2 粉体对“火山口”底部凹坑缺陷进行了封装填充。而直接在 MAO 表面抛磨 WS_2 的试样 MAO-W，其表面的多孔现象消失不见，粗糙度变为 $2.3\text{ }\mu\text{m}$ ，如图 2d 所示。通过能谱仪对表面成分分析可知，微弧氧化陶瓷膜几乎全被 WS_2 纳米粉体所覆盖。分析认为，这是由于微弧氧化陶瓷膜层的粗糙多孔表面为引入固体润滑剂创造了较好的自然条件，使固体纳米颗粒在抛磨过程中更容易进入微弧氧化疏松层内。能谱分析结果显示，W 元素含量比试样 P-MAO-W 增了近 7%。

由此可以证实，陶瓷膜层表面抛磨 WS_2 自润滑粉体可有效降低试样表面粗糙度，MAO-W 比 MAO 粗糙度降低约 34.2%，P-MAO-W 比 P-MAO 粗糙度降低约 41.3%。

对所制备试样的剖面形貌进行观察，结果如图 3 所示。从中可以看出，微弧氧化陶瓷膜层与铝基体结合处无明显界限，过渡平滑，说明结合强度较好，并且从图 3a 中可以看出，陶瓷膜分为两层，内层较为致密，外层组织疏松，这也较好地解释了膜层表面的多孔结构。对于本实验参数下制备的陶瓷膜层而言，

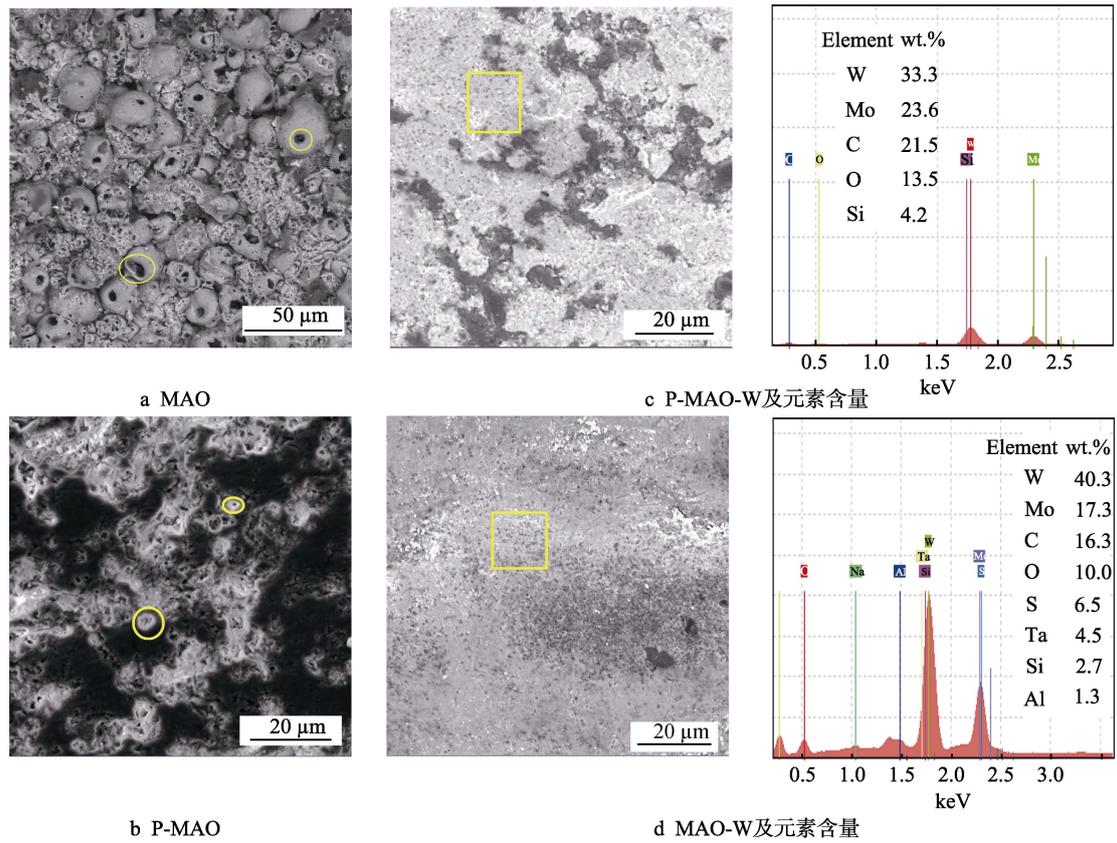


图 2 试样的表面形貌及成分

Fig.2 Surface morphology and composition of samples: a) MAO; b) P-MAO; c) P-MAO-W and element content; d) MAO-W and element content

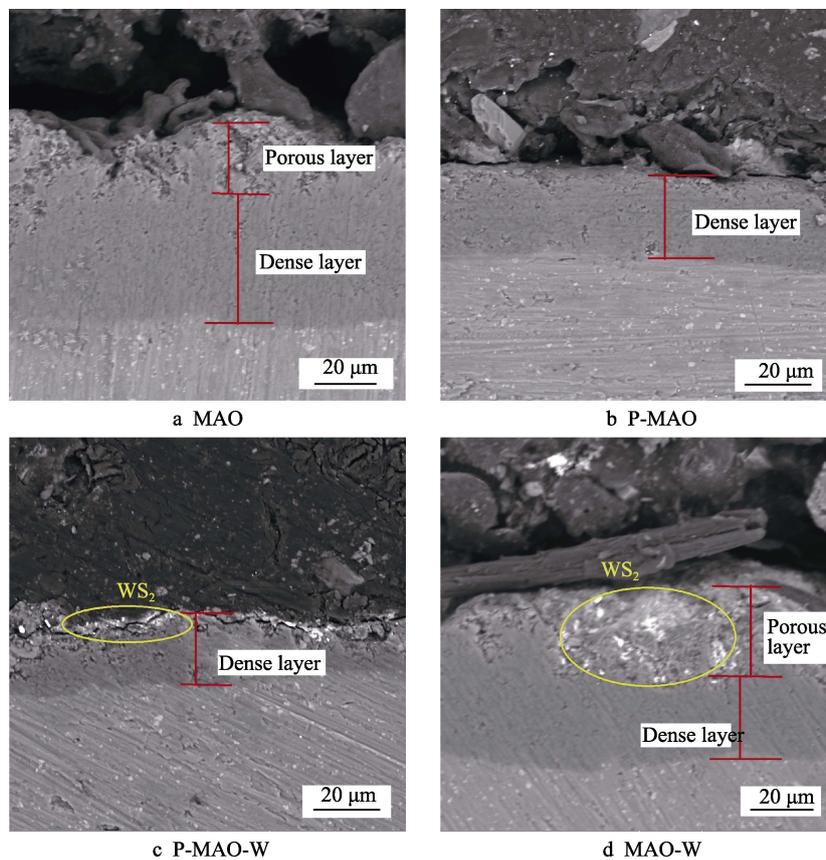


图 3 试样的剖面形貌

Fig.3 Profile morphology of samples

致密层的厚度约为 50 μm ，疏松层厚度约为 20 μm 。经水磨砂纸机械抛磨后的试样 MAO，其表面疏松层被抛磨掉，只留下致密层，厚度约为 30 μm ，如图 3b 所示。而再经纳米 WS_2 粉体抛磨后的试样 P-MAO-W，可在致密层表面发现少许 WS_2 存在（图 3c 中黄色标识区域），但 WS_2 膜层并不连续，并且从剖面图中还可以看出，致密层表面粘附的 WS_2 在镶样过程中，已经有部分转移至镶样粉上，说明试样 P-MAO-W 表面与 WS_2 粉体结合强度不高。对在微弧氧化表面直接抛磨 WS_2 的 MAO-W 试样而言，其表面陶瓷膜的致密层和疏松层都仍然存在，可以观察到， WS_2 被抛磨进疏松层内的微孔内，且抛入量较多（图 3d 中黄色标识区域）。

2.2 摩擦学性能分析

通过球盘摩擦磨损实验，在干摩擦状态下对试样的摩擦性能进行分析，结果如图 4 所示。从中可以看出，试样 MAO 的摩擦系数在开始阶段就急剧上升，经过 140 s 后，摩擦系数上升到 1.2。试样 P-MAO 在干摩擦状态下，摩擦系数上升也较为迅速，上升趋势与试样 MAO 相似，经过 240 s 后，摩擦系数上升到 1.1，持续时间比试样 MAO 增加了 41.7%。而试样 P-MAO-W 的摩擦系数呈现出不同的变化趋势：在初始阶段较为稳定且数值极低，约为 0.07，比试样 P-MAO 降低了约 93.6%，在实验中期出现短暂上升后，又降至 0.2 左右，直到 800 s 时才呈现出急剧上升的趋势，持续时间比试样 P-MAO 增加了约 233%。试样 MAO-W 的摩擦系数在前期实验过程中一直处在一个平缓上升的稳定状态，摩擦系数从 0.2 上升到

0.3 左右，比试样 MAO 降低了约 79.2%，比试样 P-MAO-W 增加了约 76%，且试样持续时间较长，直至 1400 s 时，摩擦系数才开始发生突变而急剧上升，比试样 MAO 增加了 900%，比试样 P-MAO-W 增加了 75%。

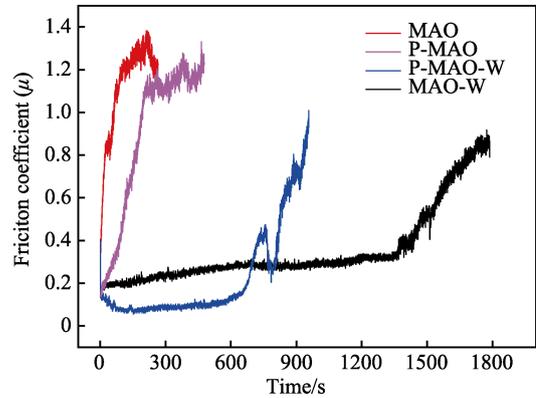


图 4 摩擦磨损实验过程中试样的摩擦系数
Fig.4 Friction coefficient of samples in friction and wear tests

结合各试样的表面粗糙度，可知试样处理后的表面粗糙度是影响实验前期摩擦系数大小的关键因素，试样 P-MAO 和试样 P-MAO-W 均比试样 MAO 和试样 MAO-W 的摩擦系数低。而表面抛磨 WS_2 对实验后期的持续性有较大的影响，试样 MAO-W 和试样 P-MAO-W 均比试样 MAO 和试样 P-MAO 的抗粘着时间长，并且 WS_2 粉体含量越多，抗粘着时间越长。

图 5 展示了不同微弧氧化试样经摩擦磨损实验后的表面磨痕以及对磨钢球的磨斑直径。因陶瓷膜层表面硬度高，磨损较轻，实验主要以对磨钢球的磨斑

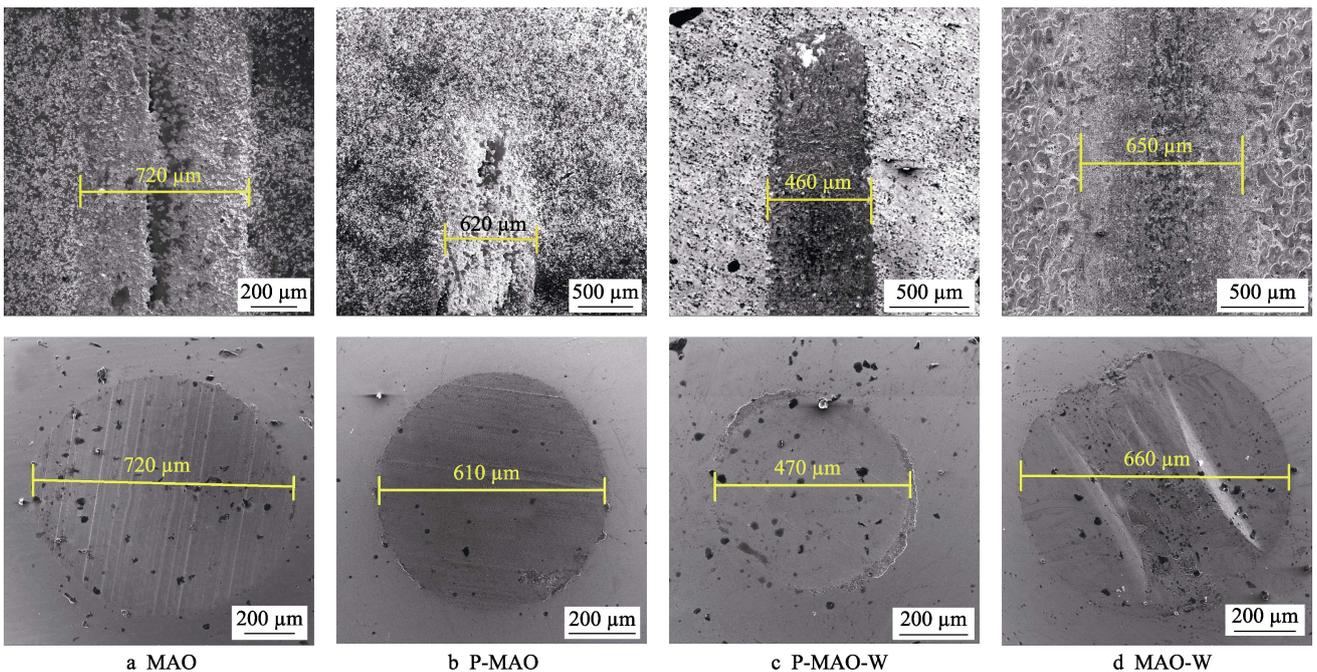


图 5 摩擦磨损实验后试样的表面磨痕及对磨钢球的磨斑直径

Fig.5 Surface wear scar of samples after friction and wear tests and the diameter of abrasion spots on grinding steel balls

直径作为磨损量指标，对比不同试样的减摩性能。从图 5a、b 中可以看出，试样 MAO 的磨痕较宽，约为 720 μm，磨痕中部有较为明显的粘着现象，磨痕边缘有少许磨屑存在。尽管 MAO 摩擦实验时间最短，但对磨钢球的磨损程度却最大，磨斑直径与磨痕宽度相当，约为 720 μm，且钢球表面沟槽较多且深。经水磨砂纸抛磨后的试样 P-MAO，其火山口微凸起被磨平（图 2b），表面粗糙度降低，磨痕相对较窄，约为 620 μm，与其对磨的钢球表面沟槽浅且数量减少，磨斑直径约为 610 μm，如图 5b 所示，磨痕宽度及钢球磨斑直径比试样 MAO 降低约 13.9%。而经过水磨砂纸和纳米 WS₂ 粉体相继抛磨之后的试样 P-MAO-W，其表面粗糙度变得更低（见图 2c），又因表面抛磨 WS₂ 固体润滑剂的作用，尽管实验时间相对较长，其磨损程度相比仍有降低，表面磨痕宽度最窄，为 460 μm，与其对磨的钢球表面沟槽最少，磨斑直径也相应降低至 470 μm（如图 5c 所示），磨痕宽度及钢球磨斑直径比试样 P-MAO 分别降低约 25.8% 和 22.9%。经纳米 WS₂ 粉体抛磨后的试样 MAO-W，表面粗糙度也有所降低（见图 2d），对磨钢球的表面沟槽也较浅，磨痕宽度约为 650 μm，对磨的钢球磨斑直径上升至 660 μm，但对磨钢球表面出现凹凸现象，如图 5d 所示。分析认为，尽管表面抛磨的 WS₂ 起固体润滑剂的作用，但随着实验时间的延长，表面固体润滑剂被挤压至磨痕边缘位置，导致磨损区域中间位置的疏松层裸露出来，与对磨钢球直接接触，致使对磨钢球表面中间部位磨损较多，出现凹槽，表面磨痕宽度及钢球的磨斑直径也相应变大。

由此看出，试样的磨痕宽度与对磨钢球的磨斑直径大小相当，但从试样磨痕上仍可以看出，接触区域

中间部位摩擦相对较严重，边缘部位仅发生轻微磨损，并且试样的磨痕宽度及对磨钢球的磨斑直径变化规律，与摩擦过程中的摩擦系数变化及粗糙度变化趋势相吻合。

2.3 摩擦磨损机理分析

试样摩擦区域内的表面形貌及部分区域的表面成分如图 6 所示。对应的对磨钢球的磨斑表面形貌如图 7 所示。对于试样 MAO 在摩擦过程中的摩擦学性能，分析认为其摩擦系数快速上升，磨痕较宽以及对磨钢球磨斑直径较大主要与陶瓷膜表面疏松层有关。在干摩擦状态下，钢球与粗糙度较大的陶瓷膜疏松层直接接触，疏松层在高剪切应力作用下容易破坏，产生硬质磨屑进入摩擦表面（图 6a 和图 7a 中红色标识部分），形成磨粒磨损；再者由于陶瓷层的硬度高于硬质钢球，其表面熔岩状“火山口”凸起，在摩擦过程中还能对钢球表面产生犁削作用，破坏钢球基体（如图 7a），最终引起摩擦系数的急剧上升，这也表明较高的表面粗糙度会增加摩擦系数。摩擦区域内的表面形貌显示出有部分表面变得平滑（图 6a 中黄色标识部分），对其进行能谱分析，结果显示 Fe 元素含量为 38.3%，并伴有大量的 O 元素出现，基体合金主要元素 Al、Si 等的含量非常低，这表明在摩擦过程中，钢球基材向陶瓷面发生了转移，并在表面磨平的区域形成转移膜；而 O 元素的出现，说明在转移过程中发生了高温氧化反应。

经过水磨砂纸抛磨的试样 P-MAO，其陶瓷膜层表面疏松层被除去，摩擦表面变为微弧氧化致密层，粗糙度大幅度降低，减少了表面粗糙度对摩擦系数的

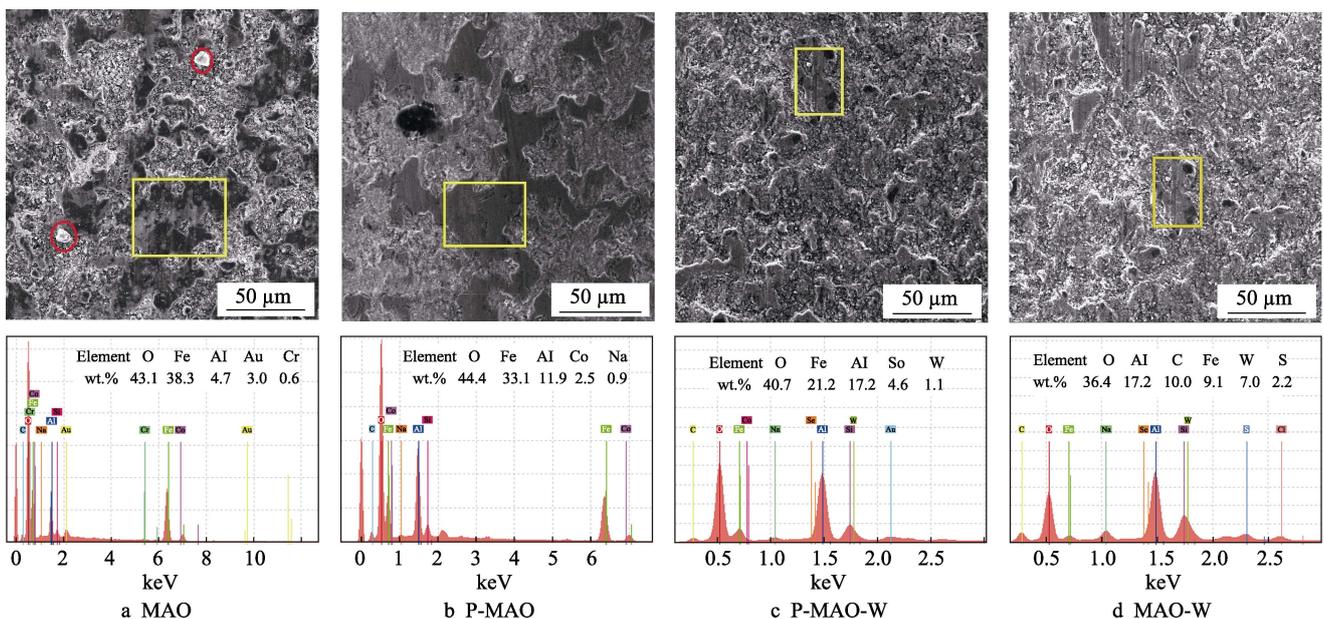


图 6 摩擦区域内试样的表面形貌及成分

Fig.6 Surface morphology and composition of samples in friction zone



图7 钢球的磨斑表面形貌

Fig.7 SEM of abrasion spot on steel balls

影响,摩擦系数上升速率相对减缓。试样摩擦区域内的表面形貌也显示出更多的平滑区域,如图6b所示。钢球磨斑表面也有层片状磨损产物存在,如图7b所示。同样对试样平滑区域(图6b中黄色标识部分)进行能谱分析,结果显示Fe元素含量为33.1%,相对试样MAO而言,钢球基材转移量仅少降低。分析原因可能是在干摩擦过程中,表面粗糙度降低虽减轻了摩擦过程中对钢球基体的破坏,表面划痕变少,但抛磨后的陶瓷表面仍有“火山口”硬质底部微坑缺陷的存在,当其与相对较软的钢球接触时,会在钢球表面沿滑动方向形成细小的划痕,进而形成轻微粘着磨损。另外,在粘着磨损过程中,较软的钢球基体会往较硬的陶瓷膜层转移,并在转移过程中发生氧化,膜层的转移使陶瓷膜层-钢之间的摩擦转变为钢-钢之间的摩擦^[16]。在连续摩擦的情况下,被转移膜层堆积到一定程度后,会由于疲劳断裂或机械断裂而剥离,形成松散磨屑,从而使得磨损加剧,最终导致摩擦系数急剧上升。

对试样P-MAO-W而言,经纳米 WS_2 粉体的再次抛磨后,其粗糙度进一步降低,并使部分 WS_2 粉体残留在表面的“火山口”底部微坑缺陷内(见图2b中标注位置)。在干摩擦过程中,陶瓷基体承载能力提高的同时,表面上 WS_2 粉体展现出润滑特性,使摩擦系数在初始阶段极低,随着实验时间的延长,

摩擦系数经历波动后急剧上升(见图4中曲线的P-MAO-W)。分析认为,摩擦过程中产生的磨屑会增加摩擦表面粗糙度,导致摩擦系数在该时间段出现突变,而此时残存在表面“火山口”底部缺陷内的固体润滑剂在摩擦过程中被捎带出来,继续起到减摩作用,使摩擦系数开始下降。但由于表面缺陷微坑仅能残存少量固体润滑剂,在经过一段时间的干摩擦后,钢球与微弧氧化致密层发生轻微的磨粒磨损和粘着磨损,摩擦系数急剧上升,如图7c所示。对摩擦区域内的平滑区域(图6c中黄色标识部分)进行能谱分析,结果显示表面Fe元素含量为21.2%,W元素含量为1.1%。Fe元素含量较前两种情况降低较多,说明摩擦系数虽急剧上升,但因表面固体润滑剂的存在,磨损程度有很大程度降低,摩擦表面平滑区域的数量较少,试样表面的磨痕宽度和对磨钢球的磨斑直径较小(见图5c)。而W元素的存在,也证明了摩擦过程中 WS_2 固体润滑剂起到了减摩抗磨作用。

试样MAO-W由于表层放电微孔和凹坑缺陷的存在,在直接抛磨 WS_2 粉体的过程中, WS_2 粉体进入其中。在摩擦磨损实验后,试样表面摩擦区域内平滑的区域面积相对较少,如图6d所示,而对磨钢球磨斑表面内出现层片状聚集物,如图7d所示。分析认为,在摩擦过程中,存于微孔中的 WS_2 粉体作为固体润滑剂,不断地补给到摩擦表面,并一直维持着

一层固体润滑膜,所以在实验过程前期,试样 MAO-W 与对磨钢球之间并未发生较严重的磨损,其摩擦系数也长期稳定在较低的水平。在经过前期的低摩擦后,钢球与试样 MAO-W 膜层接触区域内的固体润滑剂在压力及剪切作用下,被挤压出接触面,使钢球与陶瓷膜层中的“火山口”凸起产生直接接触,并对钢球产生切削作用,使摩擦系数逐渐上升,形成的磨屑与试样表面被挤出的固体润滑剂在加载力作用下形成层片状,聚集物残留在表面。对试样表面平滑区域(图 6d 中黄色标识部分)进行能谱分析,结果显示表面 Fe 元素含量仅为 9.1%,W 元素含量却上升到 7.0%,说明 WS₂ 固体润滑剂的增多,减少了钢球基材往试样 MAO-W 表面的转移,证实了表面抛磨 WS₂ 形成的固体润滑膜可以对基体产生保护作用,且随着固体润滑剂含量的增加,减摩效果更明显。

3 结论

在 ZL109 合金微弧氧化陶瓷层表面抛磨 WS₂ 纳米固体润滑剂,制备自润滑膜层,利用球盘摩擦磨损试验机研究了其摩擦学性能,得出以下结论:

1) 在陶瓷膜层表面抛磨纳米 WS₂ 固体润滑粉体,能有效减小试样表面粗糙度,降低摩擦系数,同时还可有效减轻对磨钢球的磨损,达到减摩效果。

2) 抛磨的 WS₂ 自润滑粉体可在表面形成自润滑膜层,与 MAO-W 复合膜层相比,P-MAO-W 复合膜层在试验前期表现出更为出色的减摩及抗磨损性能,但 MAO-W 复合膜层在试验后期表现出更优异的抗粘着性能。

3) 以陶瓷膜层作硬质基底,提高承载能力,以微弧氧化自生微孔作固体润滑粉体的储池,增加固体润滑剂含量及结合强度,两者相互作用可达到微弧氧化陶瓷膜层复合固体润滑剂的减摩耐磨效果。

参考文献:

- [1] 王亚明, 邹永纯, 王树棋, 等. 金属微弧氧化功能陶瓷涂层设计制备与服役性能研究进展[J]. 中国表面工程, 2018, 31(4): 20-45.
WANG Ya-ming, ZOU Yong-chun, WANG Shu-qi, et al. Design, fabrication and performance of multifunctional ceramic coatings formed by microarc oxidation on metals: A critical review[J]. China surface engineering, 2018, 31(4): 20-45.
- [2] 徐滨士, 谭俊, 陈建敏. 表面工程领域科学技术发展[J]. 中国表面工程, 2011, 24(2): 1-12.
XU Bin-shi, TAN Jun, CHEN Jian-min. Science and technology development of surface engineering[J]. China surface engineering, 2011, 24(2): 1-12.
- [3] 薛文斌, 邓志威, 来永春, 等. 有色金属表面微弧氧化技术评述[J]. 金属热处理, 2000(1): 1-3.
XUE Wen-bin, DENG Zhi-wei, LAI Yong-chun, et al. Review of microarc oxidation technique on surface of non-ferrous metals[J]. Heat treatment of metals, 2000(1): 1-3.
- [4] ZHANG D Y, GE Y F, LIU G L, et al. Investigation of tribological properties of micro-arc oxidation ceramic coating on Mg alloy under dry sliding condition[J]. Ceramics international, 2018, 44(14): 16164-16172.
- [5] JIN J, LI H, LI X H. Friction and wear behavior of micro arc oxidation coatings on magnesium alloy at high temperature[J]. Rare metal materials and engineering, 2017, 46(5): 1202-1206.
- [6] QIN Y K, XIONG D S, LI J L, et al. Compositions and tribological properties of PEO coatings on Ti6Al4V alloy[J]. Surface engineering, 2017, 33(12): 895-902.
- [7] 魏国栋, 曹晓明, 马瑞娜, 等. 纳米 BN 对 1060 铝微弧氧化膜层性能的影响[J]. 表面技术, 2017, 46(5): 40-46.
WEI Guo-dong, CAO Xiao-ming, MA Rui-na, et al. Effect of nano BN additive on performance of micro-arc oxide film formed on 1060 aluminum[J]. Surface technology, 2017, 46(5): 40-46.
- [8] 张玉林, 于佩航, 韦银河, 等. 石墨烯添加剂对铝合金表面微弧氧化膜耐磨耐蚀性的影响[J]. 材料热处理学报, 2017, 38(8): 103-109.
ZHANG Yu-lin, YU Pei-hang, WEI Yin-he, et al. Influence of graphene additive on wear resistance and corrosion resistance of micro arc oxidation coating formed on LY12 aluminum alloy surface[J]. Transactions of materials and heat treatment, 2017, 38(8): 103-109.
- [9] CHEN Y, LU X, BLAWERT C, et al. Formation of self-lubricating PEO coating via in-situ incorporation of PTFE particles[J]. Surface and coatings technology, 2018, 337: 379-388.
- [10] 于光宇, 朱新河, 郑世斌, 等. SiC 复合微弧氧化陶瓷层制备及其摩擦学性能[J]. 材料导报, 2018, 32(S1): 289-293.
YU Guang-yu, ZHU Xin-he, ZHENG Shi-bin, et al. Preparation and tribological properties of SiC composite micro-arc oxidation ceramic coating[J]. Materials reports, 2018, 32(S1): 289-293.
- [11] MA C S, CHENG D, ZHU X H, et al. Investigation of a self-lubricating coating for diesel engine pistons, as produced by combined microarc oxidation and electrophoresis[J]. Wear, 2018, 394-395: 109-112.
- [12] 楼白杨, 杜敬平, 赵杰, 等. 微弧氧化/磁控溅射复合涂层对镁微观结构与摩擦性能的影响[J]. 真空科学与技术学报, 2017, 37(4): 430-436.
LOU Bai-yang, DU Jing-ping, ZHAO Jie, et al. Synthesis and tribological behavior of CrN coatings on micro-arc oxidized Mg-substrate[J]. Chinese journal of vacuum science and technology, 2017, 37(4): 430-436.
- [13] HU H J, CAO Z, LIU X G, et al. Effects of substrate roughness on the vacuum tribological properties of duplex PEO/bonded-MoS₂ coatings on Ti6Al4V[J]. Surface and coatings technology, 2018, 349: 593-601.
- [14] QIN Y, XIONG D, LI J. Characterization and friction behavior of LST/PEO duplex-treated Ti6Al4V alloy with burnished MoS₂ film[J]. Applied surface science, 2015, 347: 475-484.
- [15] CHEN L, LIU Z, SHEN Q. Enhancing tribological performance by anodizing micro-textured surfaces with nano-MoS₂ coatings prepared on aluminum-silicon alloys[J]. Tribology international, 2018, 122: 84-95.
- [16] ZHANG Y L, CHEN F, ZHANG Y, et al. Influence of graphene oxide on the antiwear and antifriction performance of MAO coating fabricated on MgLi alloy[J]. Surface and coatings technology, 2019, 364: 144-156.