

# 基于不同表面状态下的 TC4 钛合金 螺栓摩擦机理研究\*

高学敏<sup>①②</sup> 姚建革<sup>①②</sup> 冯韶伟<sup>③</sup> 冯德荣<sup>①②</sup> 沈鹏<sup>①②</sup> 郭超越<sup>①②</sup>

(①河南航天精工制造有限公司, 河南 信阳 464000; ②河南省紧固连接技术重点实验室, 河南 信阳 464000; ③北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

**摘要:** 针对钛合金紧固件易发生的黏着和“咬死”等问题, 文章研究在 TC4 表面未处理(LT)、脉冲阳极氧化(PA)、脉冲阳极氧化+涂铝(PA-Al)和脉冲阳极氧化+涂 MoS<sub>2</sub>(PA-MoS<sub>2</sub>)等 4 种表面状态样品不同测试条件下的摩擦磨损特性, 揭示不同表面状态条件对摩擦磨损机理的影响。选用摩擦磨损试验机(UMT-3)开展球-盘摩擦磨损实验, 利用 SEM-EDS、三维白光干涉形貌仪、光学显微镜仪器等对样品的磨痕形貌进行表征。通过对摩擦系数、磨损率、磨损形貌进行分析研究, 探究不同表面状态下钛合金摩擦副的摩擦特性和磨损机理。研究表明, 应避免 TC4 和 TC4 材料直接接触可以有效防止黏着磨损发生, 脉冲阳极氧化(PA)样品减摩耐磨性最佳, 阳极氧化涂 MoS<sub>2</sub> 样品次之。

**关键词:** 脉冲阳极氧化; MoS<sub>2</sub>; 钛合金紧固件; 耐磨性; 磨损形貌; 测试条件

**中图分类号:** TH212, TH213.3 **文献标识码:** A

**DOI:** 10.19287/j.mtmt.1005-2402.2024.06.016

## Research on friction mechanism of TC4 titanium alloy bolt based on different surface states

GAO Xuemin<sup>①②</sup>, YAO Jiange<sup>①②</sup>, FENG Shaowei<sup>③</sup>, FENG Derong<sup>①②</sup>, SHEN Peng<sup>①②</sup>, GUO Chaoyue<sup>①②</sup>

(①Henan Aerospace Precision Machining Co., Ltd., Xinyang 464000, CNH; ②Henan Key Laboratory of Fastening Connection Technology, Xinyang 464000, CNH; ③Beijing Institute of Aerospace Systems Engineering, Beijing 100076, CNH)

**Abstract:** Aiming at the problems of adhesion and “bite” that are prone to occur in titanium alloy fasteners, this study investigates the friction and wear characteristics of four surface state samples under different testing conditions: untreated TC4 surface (LT), pulse anodizing (PA), pulse anodizing+aluminum coating (PA-Al), pulse anodizing+MoS<sub>2</sub> coating (PA-MoS<sub>2</sub>), and reveals the influence of different surface state conditions on the friction and wear mechanism. Using a friction and wear testing machine (UMT-3), a ball disc friction and wear experiment was conducted, and the wear morphology of the sample was characterized using SEM-EDS, three-dimensional white light interferometry, optical microscopy instruments, etc. By analyzing and studying the friction coefficient, wear rate, and wear morphology, this study explores the friction characteristics and wear mechanism of titanium alloy friction pairs under different surface states. The results show that the direct contact between TC4 and TC4 materials can effectively prevent adhesive wear. Pulse anodizing (PA) samples have the best friction and wear resistance, followed by anodized MoS<sub>2</sub> coated samples.

**Keywords:** pulse anodizing; MoS<sub>2</sub>; titanium alloy fasteners; wear resistance; wear morphology; test conditions

在航空航天领域, 紧固件产品“数以万计、类以群分、连结构、接系统、小物大为”, 铸就了型号的钢筋铁骨, 保障了装备的质量可靠性<sup>[1]</sup>。特别

是钛合金紧固件, 由于其具备耐蚀、轻质、比强度高及高温稳定性好等优点, 在航空航天中至关重要。但钛合金材料存在滑动摩擦系数大、摩擦学性能差、

\* 中国科协青年托举人才工程资助项目(2017QNRC001)

导热系数小及化学活性高的缺点,在飞机结构破坏中涉及摩擦磨损的比例高达90%,摩擦磨损不仅影响零件尺寸,降低精度,使配合零件间产生松动,还易引起应力集中,促使微裂纹萌生扩展,由此导致的损伤会严重影响构件的正常工作和安全寿命。当钛合金螺栓与钛合金自锁螺母配合时,在一定的力矩拧紧下易产生黏着和“咬死”现象。因此,进行不同表面状态下的TC4钛合金螺栓摩擦机理研究是航空航天领域重要的研究课题。

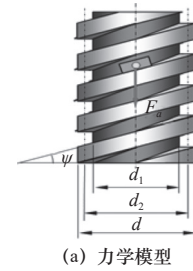
国内在20世纪90年代开始对钛合金展开相关研究。1991年,北京航空航天大学王世洪等对TC4和Ti-1023合金摩擦磨损特点及常温高温环境下的摩擦疲劳性质,提出表层交应变切应力作用导致的疲劳脱层是其主要损伤性质,初步证明喷丸处理虽能提高摩擦疲劳强度,却无法改善摩擦磨损性能的试验结果<sup>[2]</sup>。2001年,西北工业大学刘道新等综述了影响TC4钛合金FF行为的各因素及其相互联系,提出FF寿命随压力与位移幅的变化是非单调的,且接触几何通过改变接触区应力集中而影响裂纹萌生概率<sup>[3]</sup>。2006年,卫中山等研究了TC4在柱面-平面接触条件下的FF,通过观察摩擦区域的磨损形貌来分析损伤机制,对磨屑的形成及其对FF行为影响进行分析,结果表明,TC4摩擦区的损伤机制主要以粘着、磨粒磨损为主,硬质氧化颗粒会加速表面磨粒磨损,促进疲劳失效<sup>[4]</sup>。后续冯慧娇、曲璇中、应扬等也开展了钛合金的摩擦磨损的相关研究<sup>[5-10]</sup>,但还未开展不同表面状态下的TC4钛合金螺栓摩擦机理研究。

综上,本文以TC4钛合金为基体,对其表面未处理(LT)、脉冲阳极氧化(PA)、脉冲阳极氧化+涂铝(PA-Al)和脉冲阳极氧化+涂MoS<sub>2</sub>(PA-MoS<sub>2</sub>)这4种表面状态样品进行摩擦学性能测试,对摩擦系数、磨损率、磨损形貌进行分析研究,探究不同表面状态下钛合金摩擦副的摩擦特性和磨损机理。其研究成果不仅保障国家型号的质量可靠性,也具有重要学术理论价值和广泛的应用前景。

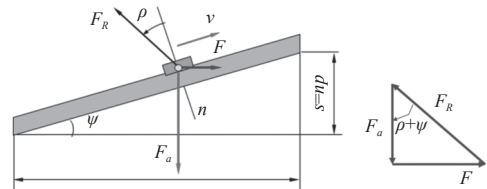
## 1 试验

### 1.1 试验力学模型

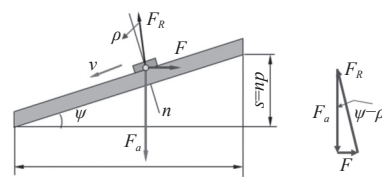
螺栓内外螺纹形成的螺旋副在拧入拧出过程中,通过驱动力矩和轴向力发生相对运动,力学模型可以简化为作用在中径上的直线运动,即水平推力推动滑块沿中径展开的斜面上的运动,如图1a所示。



(a) 力学模型



(b) 拧紧时相当于滑块沿斜面匀速上升



(c) 拧松时相当于滑块沿斜面匀速下滑

图1 力学模型图

拧紧时等效为滑块沿斜面匀速上升,维持滑块匀速运动所需的推力为 $F = F_a \tan(\psi + \rho)$ ,产生的螺纹扭矩为 $T_{th} = F \frac{d_2}{2} = F_a \frac{d_2}{2} \tan(\psi + \rho)$ ,如图1b所示。

拧松时等效为滑块沿斜面匀速下降,维持滑块匀速运动所需的平衡力为 $F = F_a \tan(\psi - \rho)$ 。产生的螺纹扭矩为 $T_{th} = F \frac{d_2}{2} = F_a \frac{d_2}{2} \tan(\psi - \rho)$ ,如图1c所示。

为了摸索螺栓螺旋副在不同表面状态下的摩擦机理,通过使用摩擦磨损试验机(UMT-3)对制备不同表面状态的TC4样品,采用球盘旋转摩擦的方式,表征螺栓螺旋副在不同测试条件下的摩擦学性能进行测试。

### 1.2 试验原理方法

摩擦磨损试验机(UMT-3)测试原理如图2所示,上试样选择直径为10 mm的TC4钛合金小球。选取1 N作为测试载荷,试验所选运动形式为旋转模式,旋转半径为3 mm,旋转速度为20 r/min(线速度6.28 m/s),测试时间20 min,温度为室温。选择LT、PA、PA-Al、PA-MoS<sub>2</sub>四种不同表面状态进行对比研究分析。

### 1.3 试样制备

PA试样的制备工艺流程为:装挂→除油→流动热水洗→酸腐蚀→流动冷水洗→阳极氧化→流动冷水洗→封闭→干燥→交检。零件阳极氧化前

需要除油干净，酸洗时间按要求控制防止氢含量超标。

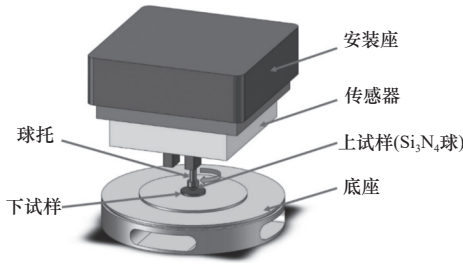


图2 摩擦磨损试验机 (UMT-3) 工作原理图

PA-Al 试样制备中的脉冲阳极氧化按上述要求执行，涂铝采用离心浸涂或喷涂。离心浸涂工艺是将试样浸泡在涂料中，待涂料完全覆盖全试样后，将试样取出放置于离心机中，通过离心力的作用将附着于工件表面的涂料均匀化，并将多余的涂料抛出；喷涂工艺分为手工喷涂和设备喷涂，主要靠人工和设备来获得较为均匀的表面涂层厚度，满足标准要求。

PA-MoS<sub>2</sub> 试样制备中的脉冲阳极氧化按上述要求执行，涂二硫化钼采用浸涂或喷涂工艺方法，按前处理→检验→装挂→涂覆→固化→交检等工艺流程制备，一般钛合金类材料紧固件涂 MoS<sub>2</sub> 前处理状态为喷砂+脉冲阳极氧化。

对制备完成的 PA、PA-Al、PA-MoS<sub>2</sub> 试样表面性能指标及厚度进行测试，附着力采用 3M 公司 250 号胶带贴于产品表面，未出现涂层与基体金属分离的现象。PA-MoS<sub>2</sub> 镀层厚度典型图如图 3 所示，试样强度及镀层厚度等测试数据见表 1。

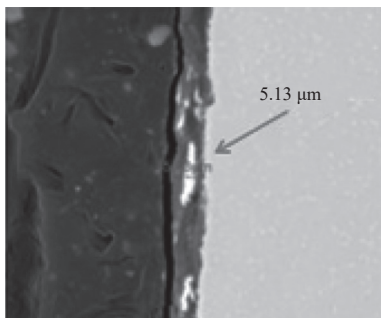


图3 PA-MoS<sub>2</sub> 镀层厚度典型图

### 1.4 试验参数确定

图 4 所示为表面状态 4 组样品 (LT、PA、PA-Al、PA-MoS<sub>2</sub>) 的原始样品表面三维形貌图，可以看出 4 组粗糙度有很大的差别。每组样品取 4 个 150 μm × 300 μm 的区域，测表面粗糙度 S<sub>a</sub>，具体

数值见表 1、表 2，绘制柱状图如图 5 所示。虽然本组变量为表面处理方式 (表面状态)，但甲方提供样品的表面粗糙度差异明显，对摩擦实验结果可能会产生一定影响。

表 1 试样强度及镀层厚度

表面状态	强度/MPa	镀层厚度/μm
PA	1 186	2
PA-Al	1 185	5.25
PA-MoS <sub>2</sub>	1 185	5.13

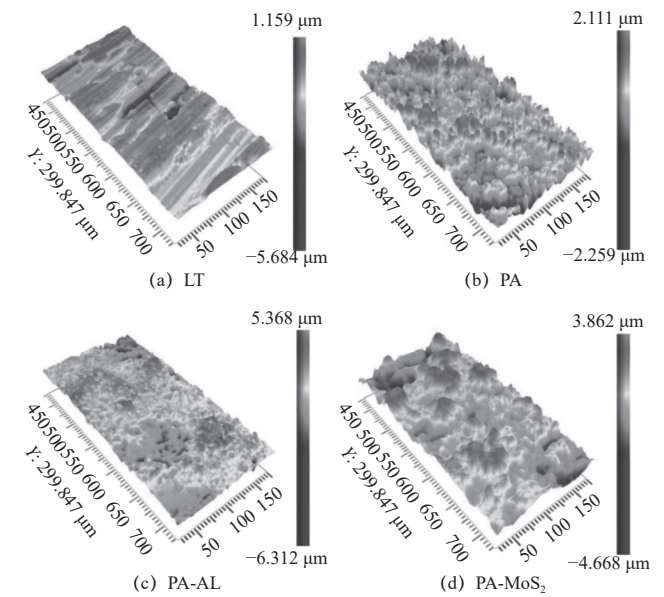


图4 不同表面状态样品粗糙度三维图

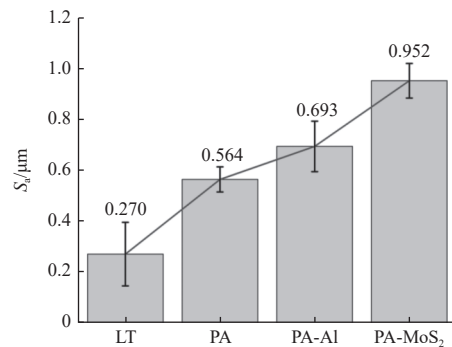


图5 不同表面状态样品粗糙度

表 2 三维白光测得 4 组样品的表面粗糙度 S<sub>a</sub>

粗糙度	LT	PA	PA-Al	PA-MoS <sub>2</sub>
S <sub>a</sub> /μm	0.269 5	0.563 5	0.693 3	0.951 5
标准偏差/μm	0.125 1	0.049 4	0.099 3	0.068 1

### 1.5 磨损形貌分析表征

使用超景深显微镜 (VHX-6000, 日本) 表征



样品磨痕及磨球磨斑的宏观磨损形貌；使用三维白光干涉形貌仪（Nexview，美国）表征磨损区域三维形貌和表面粗糙度，并计算样品的磨损体积及磨损率。使用聚焦离子束扫描电镜（LYRA3，捷克）拍摄磨损区域，观察样品磨损的微观形貌，并使用配套的EDS能谱仪分析样品磨损区域的元素组成。综合分析各种测试结果，探究不同表面状态样品的减摩耐磨机理。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 摩擦系数

图6所示为载荷1 N、速度20 r/min、室温条件下，4个不同表面状态的样品的摩擦系数曲线。实验结果重复性好，此处展示每组的一个样品测试结果。随着摩擦时间的增加，其COF都呈现增大的趋势。LT试样的摩擦系数波动剧烈，且COF相对较大，最后稳定在0.55附近，主要原因为LT与

TC4球对摩件发生明显的黏着磨损。PA的摩擦系数最低，范围仅仅在0.1~0.15，且非常平稳，并无剧烈波动，说明PA的表面处理对于降低涂层表面COF有着非常好的效果。经过PA-Al表面处理的COF上升明显，600 s时升高到0.53，最终稳定在0.6，说明涂层随着实验的进行逐渐失效。PA-MoS<sub>2</sub>样品的COF同样较低，在0.2~0.25，无波动和快速上

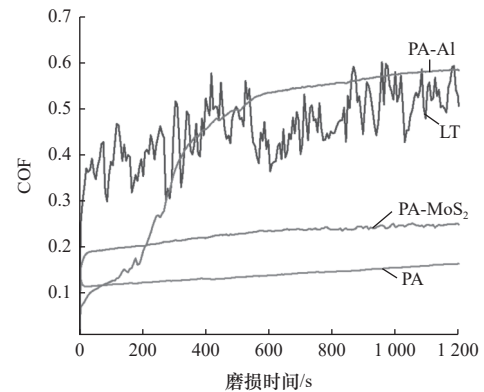


图6 不同表面状态摩擦系数对比

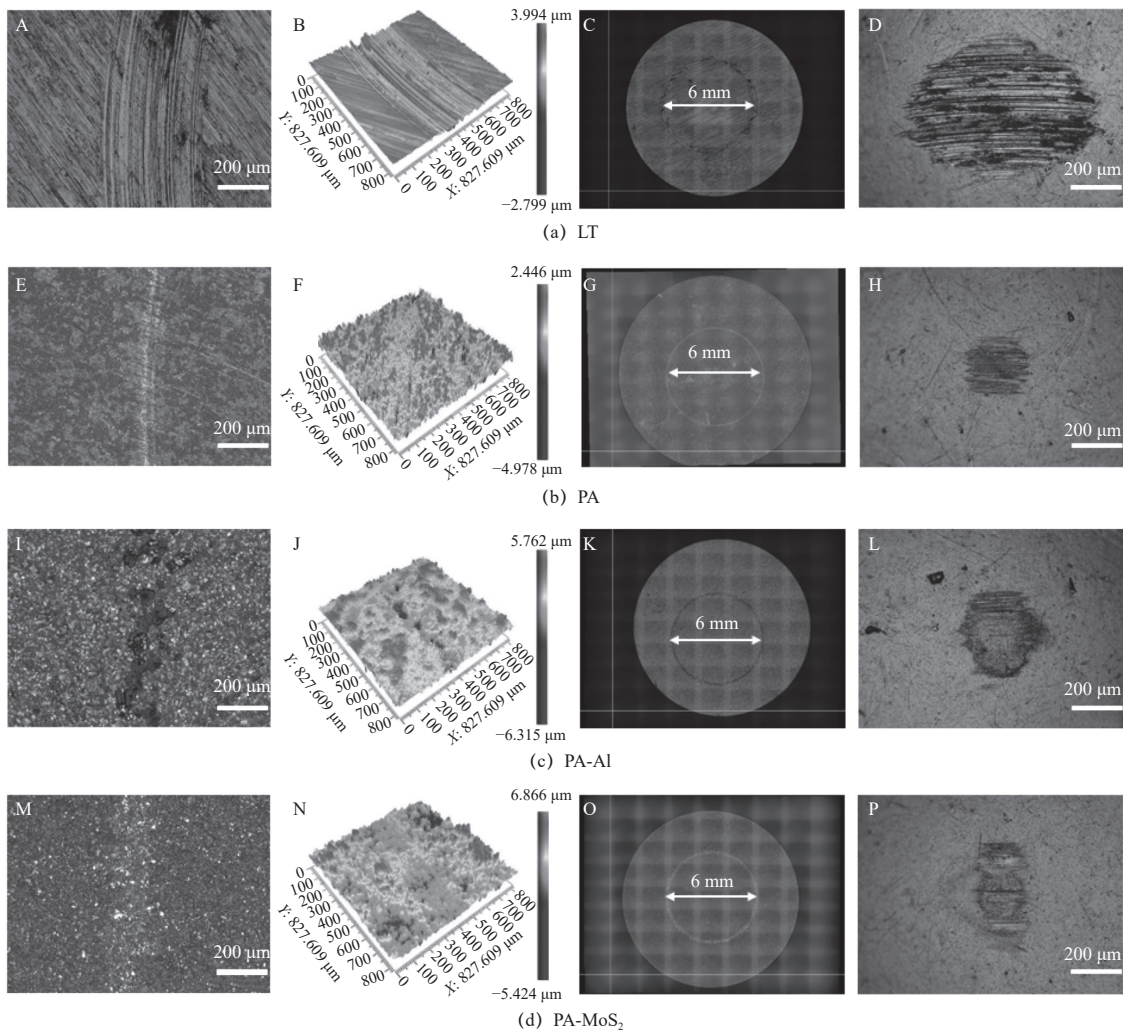


图7 4组不同表面状态的样品的磨痕形貌、磨球形貌、宏观形貌及三维形貌图

升的趋势，COF 比较稳定。由 COF 变化可以看出，从减摩角度考虑，PA 和 PA-MoS<sub>2</sub> 样品均有明显减摩效果，PA 样品减摩效果最佳。

### 2.2 磨痕宏观形貌及磨损率

图 7 所示为 4 组不同表面状态的样品的磨痕形貌、磨球形貌、宏观形貌及三维形貌图，可以看出 LT 样品磨痕最宽、磨痕最深，同时磨球的磨斑也最大，磨损明显；PA 样品磨痕较浅且最窄，同时磨球的磨斑也最小；PA-Al 样品磨痕为黑色，不连续，磨球磨斑较大；PA-MoS<sub>2</sub> 样品磨痕宽度与 PA-Al 样品相近，磨痕连续，磨球磨斑较小。

不同表面状态样品的磨损体积和磨损率如图 8 所示，PA-Al 样品表面生成氧化铝，其硬度高、脆性大，降低了样品的耐摩擦性能，磨损体积与磨损

率最大，耐磨性比 LT 差；LT 和 PA-MoS<sub>2</sub> 磨损率相当，PA-MoS<sub>2</sub> 并未提高裸钛的耐磨性。PA 样品表面覆盖硬度高、润滑性好的 TiO<sub>2</sub>，耐磨性最好。

### 2.3 磨痕微观形貌分析

如图 9a 所示，LT 样品表面磨痕最宽，大部分较平整，但有许多突起的黏着物黏附在表面，指示

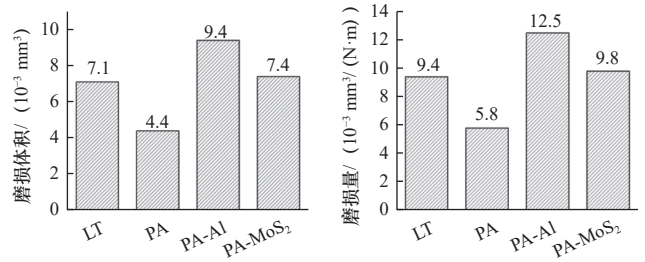


图 8 不同表面状态样品磨损体积及磨损率

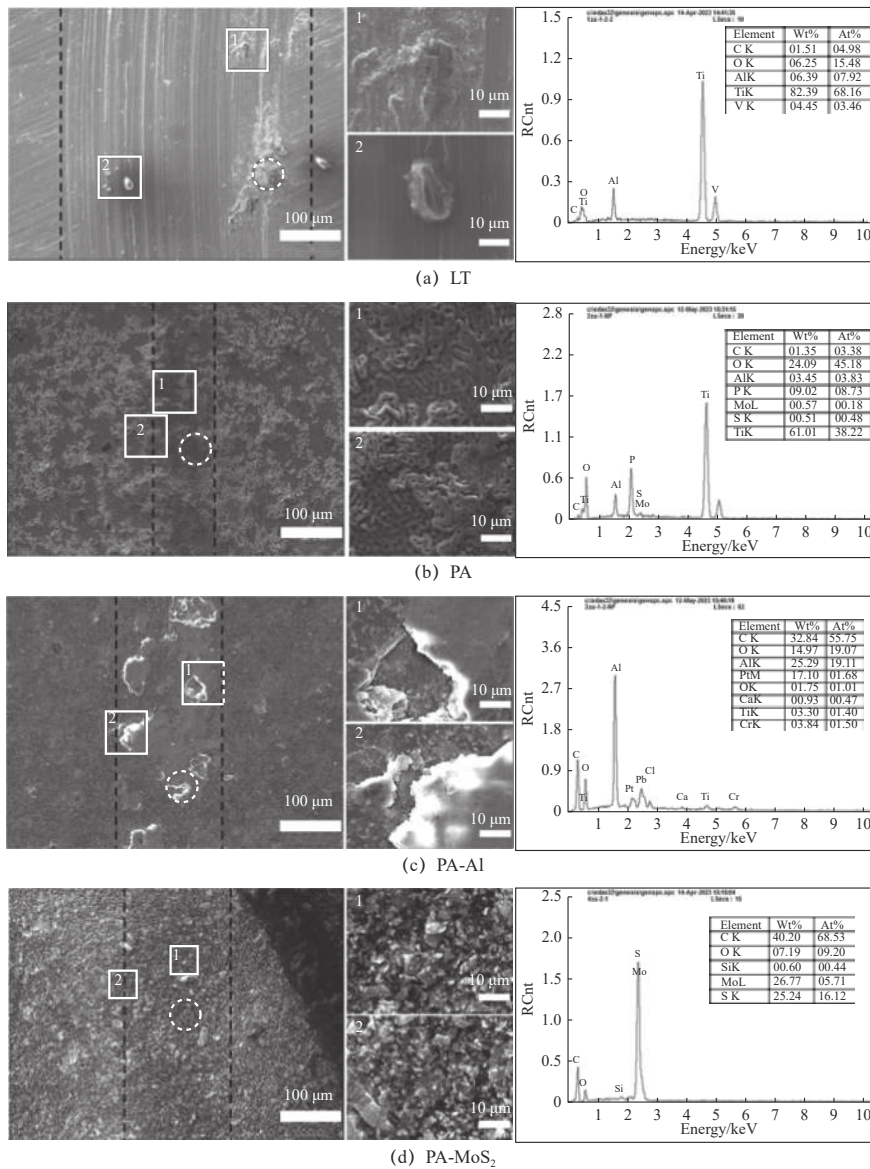


图 9 不同表面状态样品 SEM 图及 EDS 能谱图



黏着磨损可能性。元素组成主要以 Ti 元素为主，并存在 Al、V、O 和 C。

如图 9b 所示，PA 样品表面磨痕最窄，磨痕轻微，细微粉末脱落。元素组成主要以 Ti 为主，并存在 Al、O 和 C，检测到明显 P 元素存在，推测可能由于脉冲阳极氧化过程使用磷酸盐溶液。

如图 9c 所示，PA-Al 样品表面磨痕宽度居中，磨损形貌为片层状，有大块的剥落孔洞和块状物，未磨损区域较平整，可能由于涂敷 Al 质量差、表面脆性高导致。元素组成含有大量 Al，并存在 Ti、O、C 和 Pb。检测到 Pt 元素是由于样品导电性不好表面喷 Pt 所致，非样品本身元素。

如图 9d 所示，PA-MoS<sub>2</sub> 样品表面磨痕较窄，表面平整，放大图能看出表面由许多不规则的块状物组成。元素组成以 S 和 Mo 为主，并存在 C、O 和 Si。

## 2.4 摩擦机理分析

根据本课题的实验结果，提出不同表面状态下 TC4-TC4 钛合金摩擦副的磨损机理图。

(1) LT 样品表面与 TC4 小球发生黏着磨损，磨损率和摩擦系数较高，如图 10a 所示。

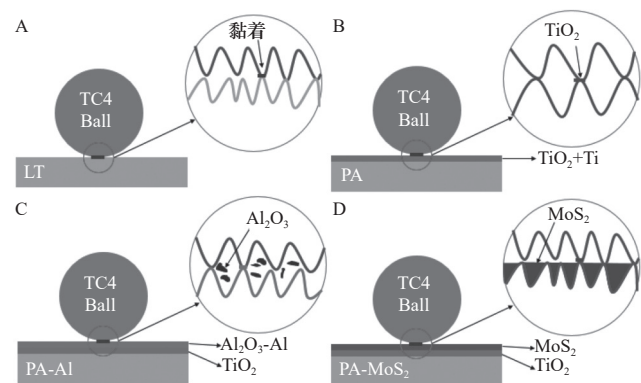


图 10 不同表面状态的 TC4-TC4 钛合金摩擦副磨损机理

(2) PA 样品的表面会生成 TiO<sub>2</sub>，其硬度高，减摩性好，可以大幅提高材料的耐摩擦性能，磨损率和摩擦系数最低，磨损机理如图 10b 所示。

(3) PA-Al 样品表面会生成 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>，其具有高硬度，可以提高材料力学性能，但其韧性低，容易发生脆裂，在表面形成剥落坑，反而降低了材料的耐磨特性；相对于 LT，PA-Al 的摩擦系数和磨损率均有增加，未显示减摩耐磨特性，为非有效涂层，磨损机理如图 10c 所示。

(4) PA-MoS<sub>2</sub> 样品表面存在 MoS<sub>2</sub> 润滑膜，通过层间滑移剪切的形式降低摩擦系数，提高耐磨性，

磨损机理如图 10d 所示。

## 3 结语

通过对 LT、PA、PA-Al、PA-MoS<sub>2</sub> 四种不同表面状态进行对比研究，针对摩擦系数、磨痕宏观形貌及磨损率、磨痕微观形貌进行表征分析，揭示不同表面状态下 TC4-TC4 钛合金摩擦副的磨损机理，对工程应用建议如下：

(1) 根据实验结果分析，避免 TC4 和 TC4 材料直接接触可以有效防止黏着磨损发生，采用易加工材料表面涂镀层是很好的方式。

(2) 在紧固件给定的工况载荷下，PA 对于 TC4 合金的减摩耐磨性提高最为明显，PA-MoS<sub>2</sub> 样品次之。

通过开展四种不同表面状态下的摩擦机理研究，取得了一定的成果，其研究成果不仅保障国家型号的质量可靠性，也具有重要学术理论价值和广泛的应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] 李英亮. 紧固件概论 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
  - [2] 王世洪, 叶斌, 梁佑明, 等. 钛合金的摩擦磨损疲劳及其防护工艺 [J]. 稀有金属材料与工程, 1991(1): 21-25.
  - [3] 刘道新, 陈华, 何家文, 等. 离子渗氮与喷丸强化复合改进钛合金抗摩擦损伤性能 [J]. 材料热处理学报, 2001, 22(3): 49-54.
  - [4] 卫中山, 王珉, 左敦稳, 等. Mo 离子注入提高 TC4 合金摩擦磨损抗力的研究 [J]. 机械科学与技术, 2005, 24(6): 679-681.
  - [5] 冯慧娟, 张旭, 师玉英, 等. Ti-6Al-4V 钛合金脉冲阳极氧化工艺 [J]. 电镀与环保, 2016, 36(5): 40-42.
  - [6] 曲璇中. 钛合金螺纹表面硼化与 MoS<sub>2</sub> 润滑和摩擦学性能研究 [J]. 航天标准化, 2003(6): 1-6.
  - [7] Sun Q C, Hu T C, Fan H Z, et al. Dry sliding wear behavior of TC11 alloy at 500 °C: influence of laser surface texturing [J]. Tribology International, 2015, 92: 136-145.
  - [8] 张秋阳, 丁红燕, 张满, 等. 不同滑动速度下两种钛合金的磨损行为 [J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(8): 1631-1639.
  - [9] 李新星, 施剑峰, 王红侠, 等. Ti6Al4V 合金干滑动磨损过程中摩擦层及摩擦氧化物的作用 [J]. 表面技术, 2019, 48(12): 233-239.
  - [10] 应扬, 李磊, 赵彬, 等. 钛合金的摩擦磨损性能及其改善方法 [J]. 有色金属材料与工程, 2019, 40(3): 49-54.
- 第一作者/通信作者: 高学敏, 男, 1983 年生, 本科, 高级工程师, 主要研究方向为试验技术与失效分析。E-mail: gaouxemin694@126.com

(编辑 曲书瑶)

(收修改稿日期: 2024-01-30)

文章编号: 20240616

如果您想发表对本文的看法, 请将文章编号填入读者意见调查表中的相应位置。