

# 旋翼轴用 Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PTFE 复合镀层的制备与摩擦学性能

刘李<sup>1</sup>, 孙炫琪<sup>1</sup>, 陈子豪<sup>2</sup>, 戴庆文<sup>2</sup>, 黄巍<sup>2</sup>, 王晓雷<sup>2</sup>

(1. 中国航发湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412002; 2. 南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016)

**摘要:** 针对国内航空传动系统翻修间隔时间短的不足, 以硬质颗粒 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和润滑材料 PTFE 作为微粒, 采用电刷镀技术在旋翼轴常用过渡层金属材料 T2 紫铜片表面, 制备 Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ni-PTFE, Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PTFE 复合镀层, 采用扫描电镜、显微硬度仪表征分析镀层微观形貌、元素含量分布及硬度; 采用自制的销盘式摩擦磨损试验机对镀层试样进行摩擦磨损试验, 探究镀层摩擦学性能及其磨损机理。结果表明: 随 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒含量的提高, Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PTFE 复合镀层表面微晶单元尺寸减小, 硬度提高, Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PTFE (3:1) 显微硬度最大为 236 HV, 相比于 Ni-PTFE 复合镀层提升约 66%; Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PTFE 复合镀层结合了 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 PTFE 两者的优势, 在具有减摩的同时, 还具有良好的耐磨性能, Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PTFE (1:1) 复合镀层的减摩性能最优, 相比于 Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 其摩擦系数降低约 52%; Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PTFE (3:1) 复合镀层的耐磨性能最优, 相比于 Ni-PTFE 其磨损率降低约 85%; Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PTFE 复合镀层的磨损形式主要是机械磨损, 存在轻微的氧化磨损和黏着磨损, 复合镀层表面微凸体的塑性变形可为摩擦表面提供润滑膜, 其中 PTFE 是自润滑颗粒, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒起到支撑与强化的作用, 保护镀层免受磨损。

**关键词:** 航空传动系统; 旋翼轴; 复合镀层; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; PTFE; 电刷镀; 摩擦磨损

**中图分类号:** TG 174; TQ 153 **文献标志码:** A **doi:** 10.12415/j.issn.1671-7872.24031



## Preparation and Tribological Properties of Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PTFE Composite Coatings for Rotor Shaft

LIU Li<sup>1</sup>, SUN Xuanqi<sup>1</sup>, CHEN Zihao<sup>2</sup>, DAI Qingwen<sup>2</sup>, HUANG Wei<sup>2</sup>, WANG Xiaolei<sup>2</sup>

(1. Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Aero Engine Corporation of China, Zhuzhou 412002, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Aiming at the drawback of short repair intervals of domestic aviation transmission systems, the hard particles Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and lubrication material PTFE were used as particles, employed with the brush plating technology to prepare Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ni-PTFE and Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PTFE composite coatings on the surface of T2 copper sheet, which is a commonly used transition layer metal material on the rotor shaft. Scanning electron microscopy and microhardness instruments were employed to characterize and analyze the microstructure, element content distribution, and hardness of the coatings. The friction and wear tests on the coated samples were conducted with a self-made pin plate friction and wear testing machine to explore the frictional properties and wear mechanism of the coating. The results

收稿日期: 2024-03-04

基金项目: 直升机传动技术国防科技重点实验室基金项目 (HTL-A-22G14)

作者简介: 刘李 (1984—), 男, 湖北黄冈人, 高级工程师, 主要研究方向为直升机传动系统设计。

通信作者: 黄巍 (1979—), 男, 江苏南通人, 博士, 教授, 主要研究方向为摩擦学与表面工程。

引文格式: 刘李, 孙炫琪, 陈子豪, 等. 旋翼轴用 Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PTFE 复合镀层的制备与摩擦学性能 [J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2024, 41(3):276-286.

show that with the increase of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle content, the surface microcrystalline unit size of Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PTFE decreases and the microhardness increases. The maximum microhardness of Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PTFE (3:1) is 236 HV, which is about 66% higher than that of Ni-PTFE composite coating. The Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PTFE composite coating combines the advantages of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and PTFE, which not only reduces friction, but also has excellent wear resistance. The anti-friction performance of Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PTFE (1:1) composite coating is the best, with a friction coefficient reduction of about 52% compared to Ni-PTFE composite coating. The wear resistance of Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PTFE (3:1) composite coating is the best, and its wear rate is reduced by about 85% compared to Ni-PTFE composite coating. The wear form of Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PTFE composite coating is mainly mechanical wear, with slight oxidative wear and adhesive wear. The micro-convex plastic deformation on the surface of composite coating can provide a lubrication film for the friction surface, of which PTFE is a self-lubricating particle, and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles play a role in supporting and strengthening the coating, preventing the coating from wear.

**Keywords:** aviation transmission system; rotor shaft; composite coating; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; PTFE; brush plating; friction and wear

摩擦磨损是导致零件表面失效的主要原因之一,80%的机械失效是由部件磨损造成的。据统计,全世界约1/3的一次性能源是在摩擦过程中被消耗的,摩擦磨损造成的经济损失占工业国家GDP的4%~7%<sup>[1]</sup>。随着我国国防工业的发展,航空传动系统中的磨损问题凸显。以武装直升机传动系统为例,其关键零部件翻修间隔期在1 000~2 000 h,有的甚至只有几百小时,与国外4 000~5 000 h翻修间隔期甚至视情维护的现状差距较大。制约传动系统翻修间隔期延长的主要因素为旋翼轴与连接件之间的磨损,主要发生在齿轮、花键、轴承、机匣衬套以及离合器等部位。目前解决材料表面摩擦磨损的方法主要有2种<sup>[2-3]</sup>:在摩擦表面添加液体或固体润滑剂,减轻切向滑动阻力,达到减摩的目的;提升材料表面的力学性能,增强抗磨损能力,延长材料的服役寿命。近年来,在材料表面制备复合镀层来提升材料的减摩耐磨能力备受关注<sup>[4]</sup>,性能优异的镀层可有效提升材料表面的摩擦学性能。因此,研究在旋翼轴表面制备复合镀层对延长航空传动系统翻修间隔期有重要意义。

复合镀层的摩擦学性能与微颗粒组分密切相关。添加PTFE<sup>[5]</sup>, MoS<sub>2</sub><sup>[6]</sup>, WS<sub>2</sub><sup>[7]</sup>, 石墨<sup>[8]</sup>等软质微粒可获得低摩擦和自润滑性能涂层;添加Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>[9]</sup>, SiO<sub>2</sub><sup>[10]</sup>, SiC<sup>[11]</sup>, 金刚石<sup>[12-13]</sup>等硬质颗粒可提高镀层自身硬度和耐磨性,延长服役时间。佘亚婷等<sup>[14]</sup>采用化学复合镀工艺制备Ni-P-PTFE复合镀层,发现随PTFE添加量的增加,镀层中颗粒含量增多,但硬度下降;在干摩擦试验下,Ni-P-PTFE复合镀层具有较好的减摩特性,摩擦系数低至0.1,磨损率也相对较低。Vasconcelos等<sup>[15]</sup>为增强丁腈橡胶的摩擦学性能,在

其表面沉积Ni-P-PTFE复合镀层,结果表明:Ni-P-PTFE复合镀层与基体的结合力高于Ni-P镀层20%左右,且摩擦系数较低,磨损表面更光滑,碎屑和裂纹较少。将软硬质颗粒组合添加到镀层中可获得优异的摩擦学性能,然而目前将硬质颗粒与润滑材料共沉积于复合镀层中的相关研究较少。电刷镀技术具有镀覆速度快、镀层质量高、工艺简单、适用于现场抢修等优点<sup>[16]</sup>。为提高镀层的综合性能,以硬质颗粒Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和润滑材料PTFE作为微粒,采用复合电刷镀技术制备Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PTFE复合镀层,综合评价镀层的表面质量、显微硬度、摩擦磨损等性能,分析镀层的摩擦磨损机理,以期对旋翼轴用低摩擦高耐磨涂层设计提供新思路。

## 1 试验原料与过程

### 1.1 试验原料

基体材料为T2紫铜片,其常作为旋翼轴镀层的过渡层材料,试样尺寸为20 mm×40 mm×2 mm,主要化学成分如表1。

表1 T2紫铜片的主要化学组分 w/%

Tab.1 Main chemical component of T2 purple copper sheet w/%

Cu+Ag	Bi	Sb	As	Fe	Pb	S
99.9	0.001	0.002	0.002	0.005	0.005	0.005

选用的氧化铝颗粒为质量分数20%的 $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>分散液,粒径为30 nm;选用的PTFE颗粒为质量分数60%的分散液,粒径为220 nm;选用十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)为表面活性剂。为提高颗粒在镀液中的悬浮稳定性,采用NH<sub>3</sub>·H<sub>2</sub>O(100 mL/L)溶

液调节镀液的 pH, 至 pH 为 7.5 时持续搅拌 20 min, 得到分散均匀的基质镀液, 其主要组分如表 2。电净液组成为氢氧化钠 (25 g/L)、磷酸三钠 (50 g/L)、碳酸钠 (22 g/L)、氯化钠 (2.5 g/L), 3 号活化液组成为氯化钠 (2.5 g/L)、柠檬酸钠 (142 g/L)、柠檬酸 (94 g/L)。

表 2 基质镀液组分及其浓度

Tab. 2 Composition and concentration of substrate bath

组分	化学式	质量浓度/(g/L)
主盐	$\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	254
络合剂	$\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7(\text{NH}_4)_3$	56
络合剂	$(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4$	0.1
缓冲剂	$\text{CH}_3\text{COONH}_4$	23

## 1.2 试验过程

### 1.2.1 镀层制备

采用电刷镀技术制备复合镀层, 工艺流程和参数如表 3。采用型号为 8LWM-3030 单脉冲电源为电刷镀电源, 电压可在 0~30 V 范围无级调节, 阳极为冷压高纯石墨。

表 3 电刷镀工艺流程及参数

Tab. 3 Process flow and parameters of electric brush plating

工艺流程	镀液	电压/V	施镀时间/min	镀笔相对移动速度/( $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ )
电净	电净液	10	0.5	6~8
活化	3号活化液	-10	0.5	6~8
工作镀层	复合镀液	8	10.0	8

### 1.2.2 性能表征

采用扫描电子显微镜 (SCIOS-2) 观察镀层表面截面形貌及元素含量分布, 采用显微硬度计 (HVS-1000) 测试镀层硬度。Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PTFE 镀层表面粗糙度较高, 难以捕捉到清晰的图像, 需对其进行抛光处理。考虑到基体对测试结果的影响, 设置载荷为 50 g、保压时间为 10 s; 为保证测试结果的准确性, 沿试样刷镀方向等距选取 7 个点进行测试, 去除最大值和最小值, 取剩余 5 个点的平均值作为镀层硬度值。

### 1.2.3 摩擦磨损试验

采用自制的销盘式摩擦磨损试验机进行摩擦磨损试验, 将镀层试样与直径为 8 mm 的 GCr15 试样球组成摩擦副, 参照文献 [17-19], 确定试验参数, 如表 4。测试时间为 30 min、载荷为 2 N, 运动形式为单向圆周运动, 滑动线速度和滑行距离分别为 0.08 m/s 和 150 m, 试验机采样频率为 100 ms, 试验均在干摩擦条件下进行, 环境温度保持在 25 ℃。

在镀层制备前, 需对基体试样进行预处理。依次使用 W20, W10, W7, W5, W3.5 的金相砂纸打磨试样表面, 使表面粗糙度  $R_a$  小于 100 nm; 随后在无水乙醇中超声清洗, 烘干备用。采用电净液去除烘干试样表面的油脂, 电化学处理 30 s, 电压为 10 V、移动速度为 6~8  $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ , 再用去离子水清洗, 去除试样表面残留的电净液; 采用 3 号活化液进一步去除试样表面氧化膜, 电化学处理 15 s, 电压为 -10 V、移动速度为 6~8  $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ , 再用去离子水清洗, 去除试样表面残留的活化液。设计 3 种二元颗粒复合镀层, PTFE 分散液的体积分数均为 40 mL/L, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 与 PTFE 的体积比为 1:1, 2:1, 3:1, 按设计比例将颗粒分散液和表面活性剂倒入基质镀液, 再将其放入水浴磁力搅拌器搅拌即可制得复合镀层。搅拌速度为 350  $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、水温为 30 ℃, 镀笔与铜片垂直距离为 2~3 mm、电镀电压为 8 V、电镀时间为 10 min、电镀液流量为 30  $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 。将采用相同工艺制备的 Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Ni-PTFE 复合镀层作为对照组, 其中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 PTFE 分散液体积分数分别为 120, 40 mL/L。

表 4 摩擦磨损试验参数

Tab. 4 Friction and wear test parameters

试验参数	数值
测试时间/min	30
载荷/N	2
滑动线速度/(m/s)	0.08
滑行距离/m	150
采样频率/ms	100
环境温度/℃	25

采用光学显微镜 (VHX-500) 和扫描电镜 (SCIOS-2) 观察镀层二维磨损形貌, 采用三维形貌仪 (Contour GT-K) 拍摄镀层磨痕三维形貌并测量镀层的磨损体积。在镀层磨痕三维轮廓上选取对称的 4 个位置, 由仪器软件 (Vision 64) 计算出单个位置的磨损体积, 取平均值, 用以估算整个磨痕的磨损体积。上试样球的磨损体积可近似成球缺来计算, 镀层和对磨球的耐磨性通常用磨损率来评价, 磨损体积 ( $V$ ) 和磨损率 ( $\delta$ ) 计算公式如下:

$$V = \frac{\pi h^3 (3R - h)}{3} \quad (1)$$

$$\delta = \frac{V}{FL} \quad (2)$$

式中:  $R$  为对磨球半径;  $h$  为球冠高度, 可利用磨斑直径求取, 上试样球直径为 8 mm;  $F$  为试验载荷;  $L$  为滑行距离。

## 2 结果和讨论

### 2.1 镀层结构

图 1 为复合镀层表面、截面的扫描电镜 (scanning electron microscope, SEM) 形貌和能谱 (energy dispersive spectrometer, EDS) 分析结果。

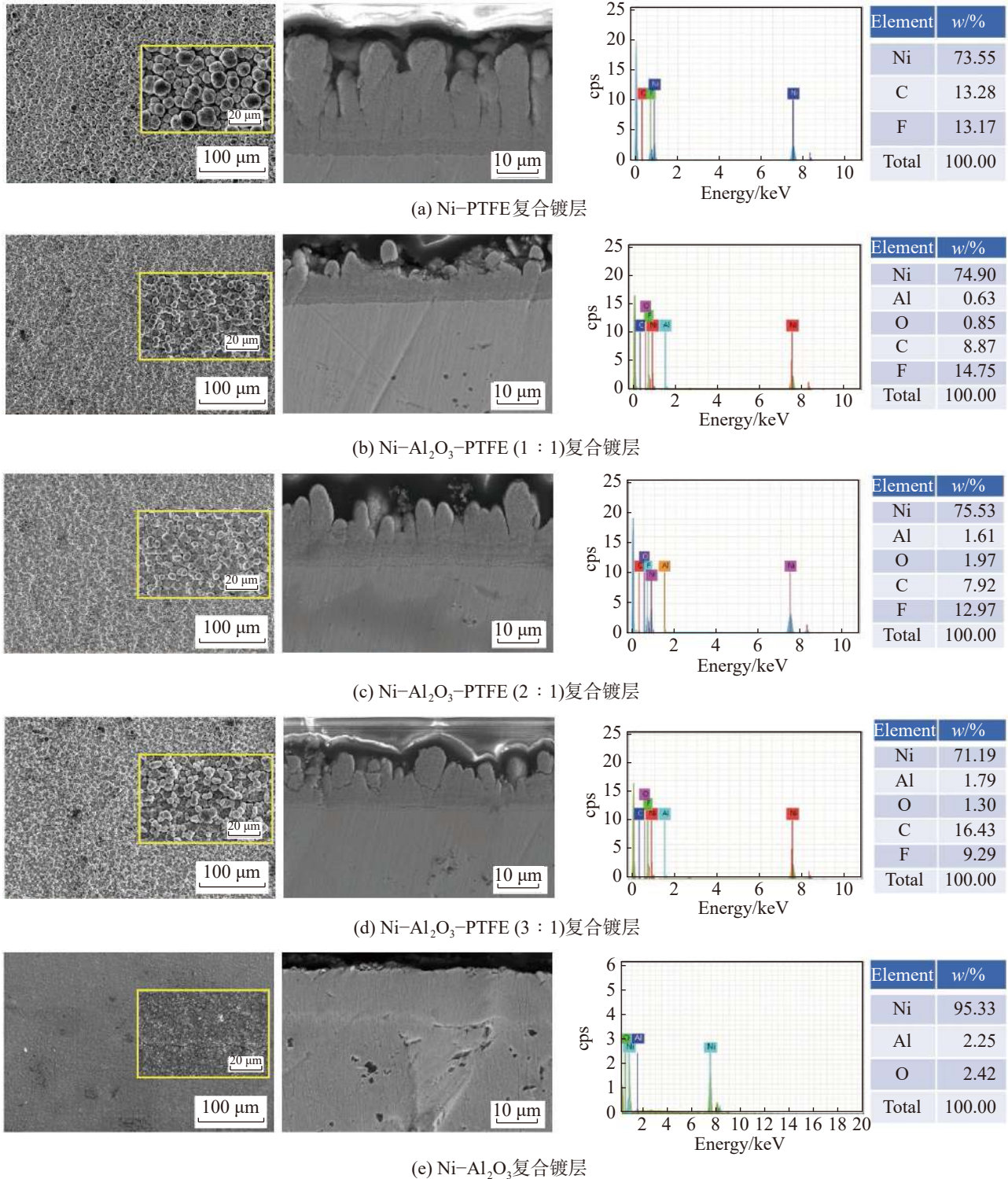


图 1 复合镀层表面与截面形貌的 SEM 图像及对应镀层 EDS 检测结果

Fig. 1 SEM images of surface and cross-section morphology of composite coatings and corresponding EDS detection results

图1中镀层表面形貌显示: Ni-PTFE复合镀层表面较粗糙,多晶单元尺寸大,孔隙率高;在PTFE基础上加入 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 颗粒,镀层表面转变为致密的网状结构,表面多晶单元呈现“碗豆状”,排列较疏松,多晶单元之间空缺处存在类似被“破坏”的形态,但整体表面较致密,即Ni- $\text{Al}_2\text{O}_3$ 复合镀层表面相较于添加PTFE颗粒的镀层表面更致密光滑。

图1中截面形貌显示: Ni- $\text{Al}_2\text{O}_3$ -PTFE复合镀层与基体结合良好,靠近基体一侧,镀层均匀生长,没有出现裂纹和凹坑等缺陷;远离基体一侧,组织粗糙疏松,镀层呈“树枝状”生长,相邻2个“树枝”单元间存在裂缝。这种“树枝状”形貌与Ni-PTFE形貌相似;而Ni- $\text{Al}_2\text{O}_3$ 截面镀层均匀生长,不存在较粗大的组织,这与镀层中颗粒的复合量相关。 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 颗粒的添加会增加不溶性颗粒的含量,颗粒间相互接触、堆积和团聚的可能性增加,这种不均匀的颗粒分布致使镀层生长不规则。此外,PTFE颗粒尺寸较 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 颗粒大,镀层中复合较多的PTFE颗粒时,镀层中颗粒尺寸分布范围变大,而颗粒是在镀层晶粒生长间隙处共沉积的,故较大的颗粒尺寸影响镀层的正常生长,且在截面生成粗大的组织。

图1中EDS结果显示:复合的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 和PTFE颗粒进入镀层时,随 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 颗粒含量的增加,镀层中F元素含量逐渐减少,Al元素含量逐渐增多,镀层中F含量高于Al含量,说明镀层中PTFE的复合量高于 $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,且随 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 颗粒含量的增加,Al元素含量略有增加,而F元素含量减少,这就意味着 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的加入对PTFE颗粒的沉积量有一定的抑制作用;值得关注的是,Ni- $\text{Al}_2\text{O}_3$ (120 mL/L)复合镀层表面Al元素的质量分数为2.25%,与Ni- $\text{Al}_2\text{O}_3$ -PTFE相差不大,说明并不是PTFE颗粒导致镀层中氧化铝颗粒复合量的不足,这与添加的颗粒性质及镀层制备工艺有关。但相对低复合量的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 颗粒也会影响镀层组织的形貌和性能,文献[20-22]中也有类似报道。

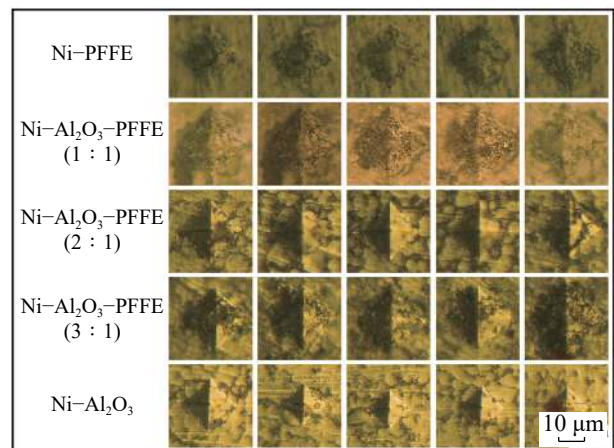
## 2.2 镀层显微硬度

图2为复合镀层的菱形压痕形貌和显微硬度。

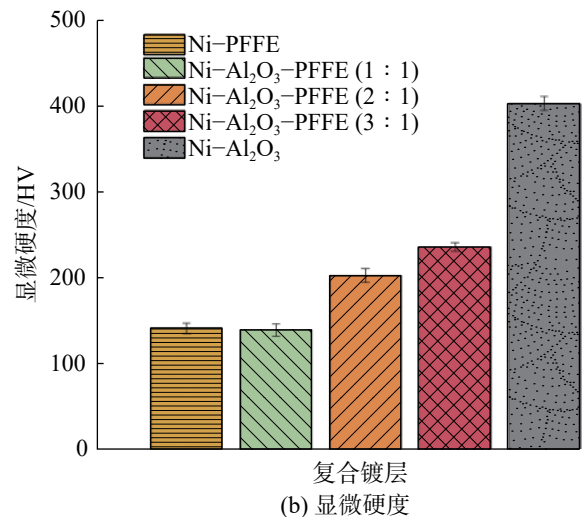
由图2(a)可看出: Ni-PTFE和Ni- $\text{Al}_2\text{O}_3$ -PTFE(1:1)复合镀层压痕形貌中菱形较大且边界不清,镀层PTFE含量较高,压头压到的PTFE颗粒较多,镀层硬度较低;随 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 颗粒加入量的增加,菱形对角线长度减小,且轮廓较清晰,说明压头压入深度变小,硬度增加。这主要是因为 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 颗粒含量高,镀层中PTFE复合量降低,压头压到的PTFE面积较少;

另一方面,镀层中 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 复合量增加,压头压入时起到一定的支撑作用,减小了菱形对角线长度,由此导致Ni- $\text{Al}_2\text{O}_3$ 复合镀层菱形对角线长度最短、硬度最大。

由图2(b)可发现:与压痕形貌规律一致,Ni-PTFE复合镀层硬度较低(142 HV),与Ni- $\text{Al}_2\text{O}_3$ -PTFE(1:1)复合镀层硬度相差不大,随 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 颗粒加入量的增加,镀层硬度增大, $V(\text{Al}_2\text{O}_3):V(\text{PTFE})=3:1$ 时,Ni- $\text{Al}_2\text{O}_3$ -PTFE复合镀层硬度最大,为236 HV,相比于Ni-PTFE复合镀层提升约66%,但低于Ni- $\text{Al}_2\text{O}_3$ 复合镀层显微硬度(403 HV)。



(a) 菱形压痕形貌



(b) 显微硬度

图2 复合镀层的菱形压痕形貌和显微硬度

Fig. 2 Diamond indentation morphology and microhardness of composite coatings

## 2.3 镀层摩擦学性能

### 2.3.1 摩擦磨损性能

图3为载荷2 N、线速度0.08 m/s的试验条件下匀速滑动30 min后复合镀层的摩擦学试验结果。

从图3(a)可发现: Ni- $\text{Al}_2\text{O}_3$ -PTFE复合镀层的摩擦系数介于Ni- $\text{Al}_2\text{O}_3$ 和Ni-PTFE之间,且随镀液中 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量的提高而逐渐增大;5种镀层的初始摩

擦系数均在 0.2 左右, Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合镀层经 8 min 的剧烈磨损进入稳定阶段, 而 Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PTFE 复合镀层需 22 min 才能进入稳定磨损期, Ni-PTFE 复合镀层较为稳定, 摩擦系数一直保持在 0.2 左右。由于 Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PTFE 镀层表面粗糙度较大, 上试样需较长时间才能将镀层表面磨平, 而 Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PTFE 中润滑颗粒 PTFE 含量较高且分布不均匀, 导致摩擦磨损过程不稳定。此外, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒可提高镀层的耐磨性, 使镀层稳定磨损阶段较长, 这也是摩擦系数波动的原因。

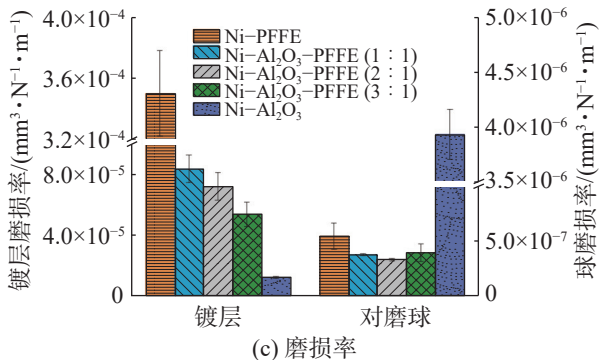
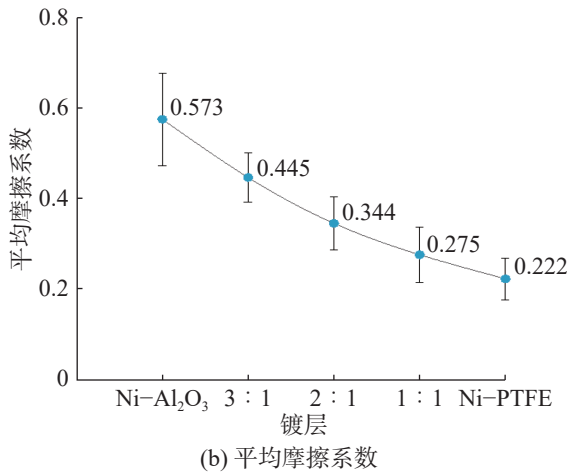
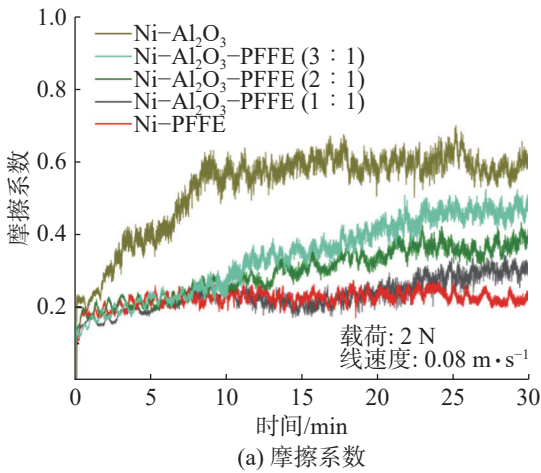


图 3 复合镀层与对磨球的摩擦磨损性能曲线

Fig. 3 Curves of friction and wear properties of composite coating against ball

从图 3(b) 可看出: 与镀层摩擦曲线规律一致, Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合镀层摩擦系数最大 (0.573), Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PTFE 摩擦系数次之, 不含 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒的 Ni-PTFE 最小; Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PTFE 摩擦系数分别为 0.275 (1:1), 0.344 (2:1), 0.445 (3:1), 相比于 Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合镀层, 幅度分别降低了 52%, 40%, 22%, 说明 PTFE 颗粒起到一定的减摩作用。与不加 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒的 Ni-PTFE 相比, Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PTFE 复合镀层中 PTFE 的添加量相同, 但减摩性能却不相同, 说明 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒的加入一定程度增加了镀层的摩擦系数。这与 Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PTFE 复合镀层中颗粒种类和含量相关, Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PTFE 截面中 F 元素的质量分数分别为 14.76% (1:1), 12.96% (2:1), 9.29% (3:1); Al 元素的质量分数分别为 0.63% (1:1), 1.61% (2:1), 1.79% (3:1)。由此推断: 镀层中 PTFE 颗粒含量降低, 润滑性能减弱; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒是硬质颗粒, 部分 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒黏附在上试样表面, 加速镀层的磨损, 增大了摩擦副的接触面积。因此, Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PTFE 摩擦系数高于 Ni-PTFE, 且随着镀液中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量的提高而逐渐增大。

从图 3(c) 可看出: Ni-PTFE 复合镀层的磨损率最大, 为  $34.97 \times 10^{-5} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ , Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒的加入显著降低了镀层磨损率, 且随其含量的增加磨损率逐渐降低, Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PTFE (3:1) 为 2 种颗粒的复合镀层, 磨损率最小, 为  $5.34 \times 10^{-5} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ; 相比于 Ni-PTFE, Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PTFE 的磨损率分别降低约 76% (1:1), 80% (2:1), 85% (3:1)。添加 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 PTFE 颗粒的镀层中 PTFE 含量比 Ni-PTFE 有所降低, 但 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量提高, 一方面增大了镀层硬度, 提高了镀层的承载能力; 另一方面, 磨损过程中 PTFE 能形成润滑膜, 有效减少了摩擦力, 减缓磨损。Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合镀层磨损率较低, 仅  $1.2 \times 10^{-5} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ , 耐磨性最好, 这归功于镀层致密紧凑的镀层结构和硬度, 另 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒在磨损时起到的支撑作用。由此可看出, Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PTFE 复合镀层的损率较小, 当 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 与 PTFE 的体积比为 3:1 时, 磨损率最小, 为  $3.28 \times 10^{-7} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ , 是 Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 球磨损的 8.35%, 表明 Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PTFE 润滑膜的存在可减缓上试样球的磨损, 降低磨损率。

图 4 为复合镀层磨痕形貌。由图 4 可发现: Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PTFE 磨痕区域呈暗黑色, 与镀层表面灰白色形成明显的视觉差异, 这一现象在 Ni-PTFE 中也有出现, 唯有 Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 磨痕与镀层表面相差不大。从前文分析可知含有 PTFE 颗粒的镀层, F 元素含量较高, 导致 PTFE 颗粒在镀层表面堆积, 上试样磨去镀层表面 PTFE 薄层后, 显露出与表面不同的颜色;

Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合镀层 Al 元素含量较少, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒分布均匀, 磨痕表面不会有太多变化。

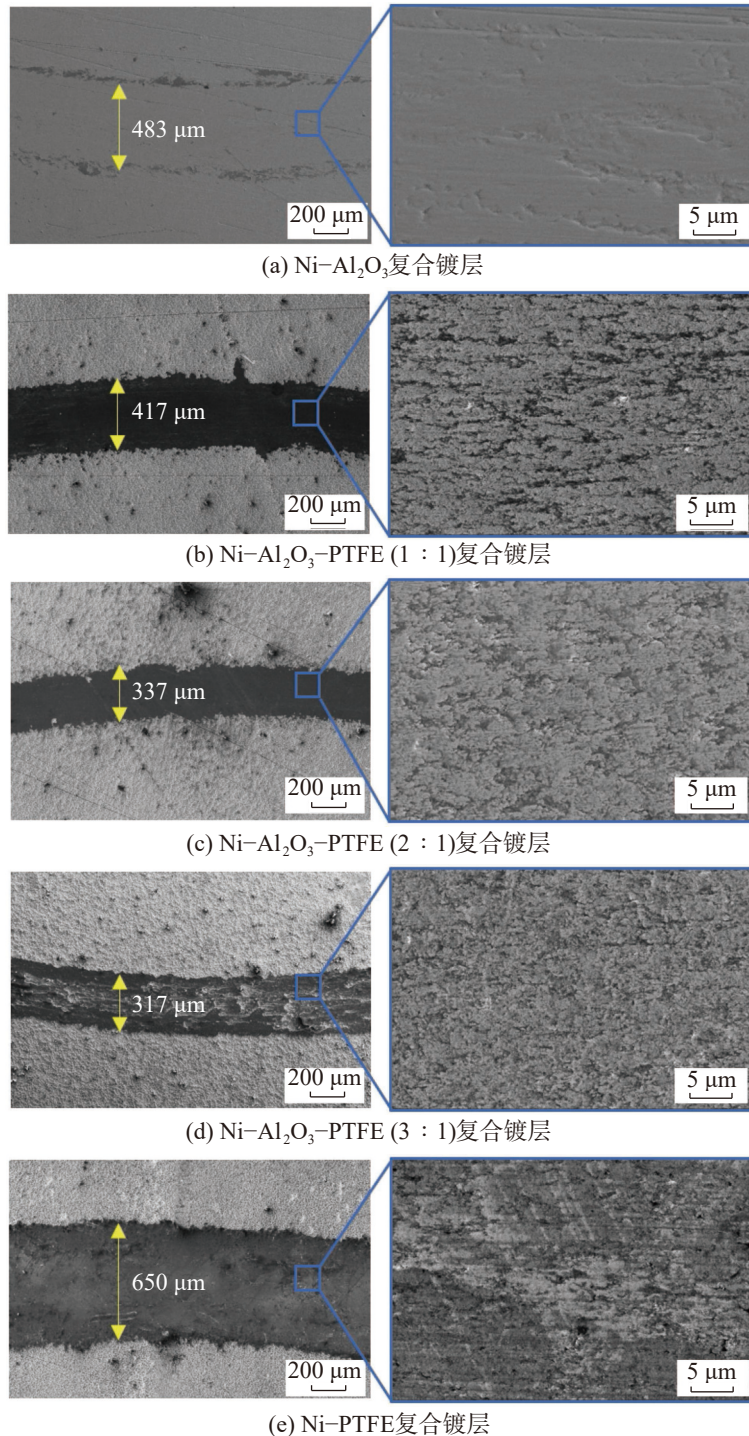


图4 复合镀层磨痕形貌

Fig. 4 Wear morphology of composite coatings

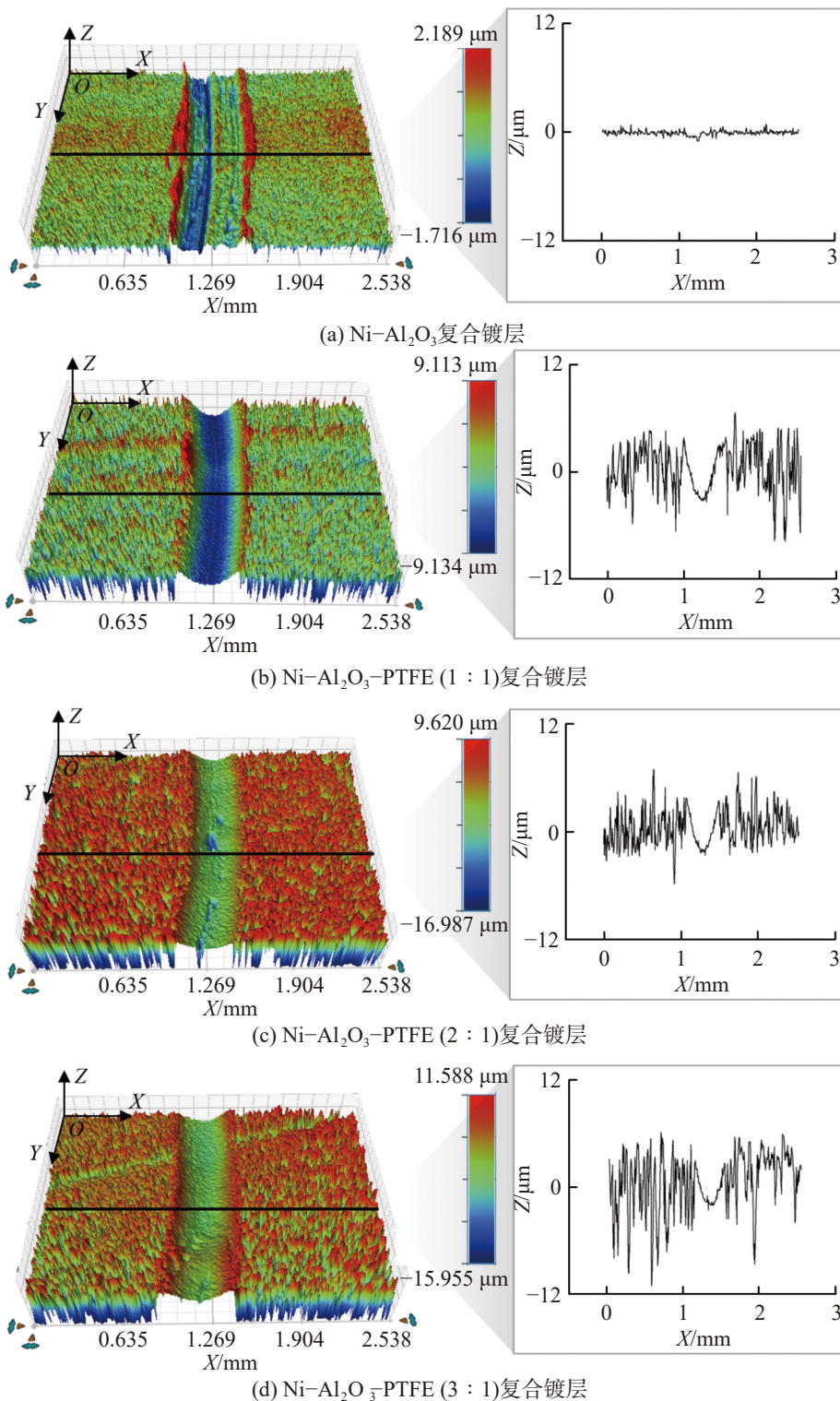
测量镀层磨痕宽度发现: Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PTFE 磨痕宽度较小, 且随 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量的提高, 磨痕宽度逐渐减小; Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PTFE (3:1) 磨痕宽度最小, 为 417 μm, 而 Ni-PTFE 磨痕宽度最大。这是由于镀层 F 元素含量越高, PTFE 复合量越多, 镀层越软, 耐磨性越差; Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PTFE 镀层中的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒有利于增强镀

层硬度, 对基体起到一定的支撑作用, 从而可减小镀层磨痕宽度。放大镀层磨痕区域可发现: Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PTFE (1:1) 磨痕存在许多不连续比较明显的划痕, 与摩擦副滑动方向平行, 在 Ni-PTFE 中同样存在, 这是因为镀层中 PTFE 含量较高而 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量较少, 导致镀层硬度较低, 易被刮花, 且摩擦副接触面温度

上升也易导致划痕产生; Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PTFE (2:1) 磨痕存在较浅的划痕和凹坑, 相比于 Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PTFE (1:1) 磨痕有明显的改善; Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PTFE (3:1) 磨痕表面划痕和缺陷细小, 镀层支撑性能良好, 耐磨性较好; Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合镀层磨痕表面光滑, 存在轻微的划痕和凹坑。

图 5 为复合镀层磨痕三维形貌及对应断面轮廓。从图 5 可发现: Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 镀层磨痕较浅, 但磨痕宽度较大, 与图 4 中 Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 镀层磨痕电镜照片相符,

这是因为上试样球磨损剧烈, 磨斑直径大, 在镀层上划擦痕迹较宽所致; Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PTFE 镀层磨痕形貌均匀, 在截取长度方向磨痕深度和宽度大致相同, 不存在很深的划痕和缺陷, 表明颗粒分布较均匀且润滑效果良好。综上可看出: Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PTFE 镀层磨痕深度介于 Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Ni-PTFE 之间, 且随 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒含量的提高, 磨痕有逐渐减小的趋势, 镀层耐磨性逐渐增强。

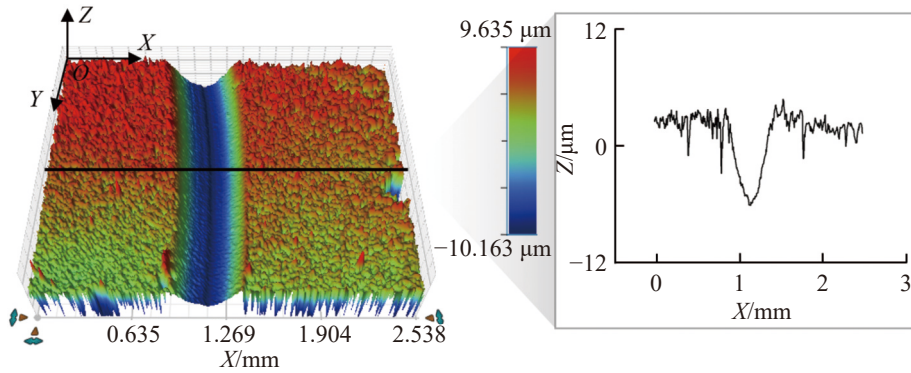


(a) Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>复合镀层

(b) Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PTFE (1 : 1)复合镀层

(c) Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PTFE (2 : 1)复合镀层

(d) Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PTFE (3 : 1)复合镀层



(e) Ni-PTFE复合镀层

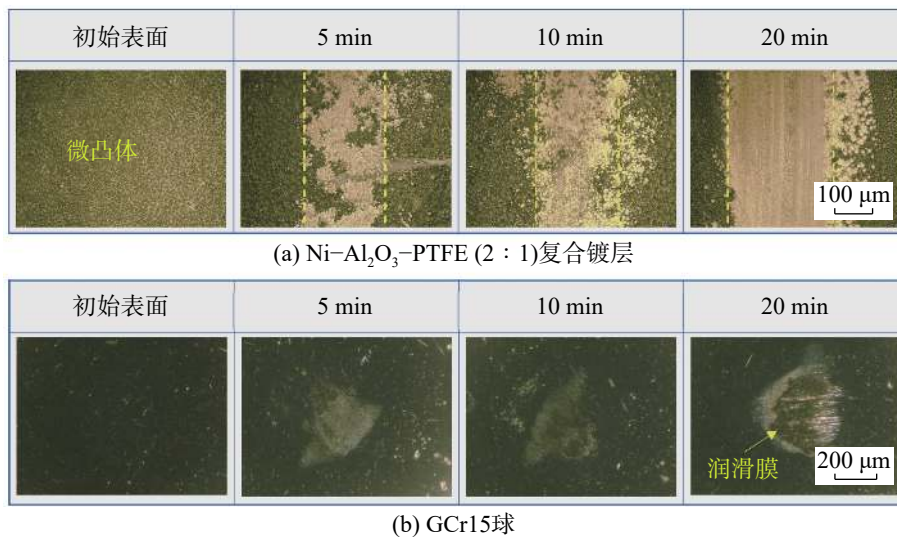
图5 复合镀层磨痕三维形貌及对应断面轮廓

Fig. 5 Three-dimensional morphology of wear marks of composite coating and corresponding section profile

### 2.3.2 磨损机理

$V(\text{Al}_2\text{O}_3):V(\text{PTFE})=2:1$  时, Ni- $\text{Al}_2\text{O}_3$ -PTFE 复合镀层的减摩和耐磨性能介于 (1:1) 和 (3:1) 之间, 故以 Ni- $\text{Al}_2\text{O}_3$ -PTFE (2:1) 为例分析复合镀层的抗

磨损机理。使用显微镜拍摄不同阶段镀层和上试样球的磨损图像 (线速度为 0.08 m/s、载荷为 2 N), 结果如图 6。

图6 Ni- $\text{Al}_2\text{O}_3$ -PTFE (2:1) 复合镀层与 GCr15 球对摩擦副不同阶段磨痕和对应形貌Fig. 6 Wear marks and corresponding spherical morphology at different stages of Ni- $\text{Al}_2\text{O}_3$ -PTFE (2:1) composite coating against GCr15 ball

由图 6 可发现: Ni- $\text{Al}_2\text{O}_3$ -PTFE 复合镀层表面存在许多大小不一致的微凸体, 镀层初始表面粗糙度较大; 5 min 时镀层表面出现磨痕, 磨痕区域不连续, 宽度窄且深度较浅, 部分区域未与上试样球接触, 保持微凸体状态, 对应的球磨痕形状不规则、面积较小, 没有剧烈磨损的划痕; 10 min 时, 微凸体与上试样球充分接触, 磨痕较连续, 但仍有少部分区域未参与磨损, 划痕较细小, 且黏附少部分镀层磨屑; 20 min 时磨痕区域光滑, 微凸体基本被磨平, 磨痕宽度和深度增加, 结合摩擦系数曲线推断此时已进入稳定磨损阶段, 对应球斑磨痕接近圆形, 面积增大。值得关注的是, 此时球磨痕图像上划痕较长, 且

黏附较多的上试样磨屑, 说明磨损形式中包括黏着磨损。

图 7 为模拟磨损过程镀层表面变化示意图。由图 7 可看出: 试验开始阶段, 上试样球向镀层施加法向载荷, 与表面微凸体接触; 一段时间后, 上试样磨平部分微凸体, 表面微凸体发生塑性变形, 并为摩擦副接触面提供润滑膜, 由于微凸体形状尺寸不一致, 导致初期磨损阶段摩擦曲线波动, 摩擦系数上升; 进入稳定磨损期, 镀层表面微凸体被完全磨平, 变形的微凸体在剪切力作用下逐渐形成连续的 PTFE 固体润滑膜, 润滑膜中还有部分  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒, 支撑镀层免受磨损。

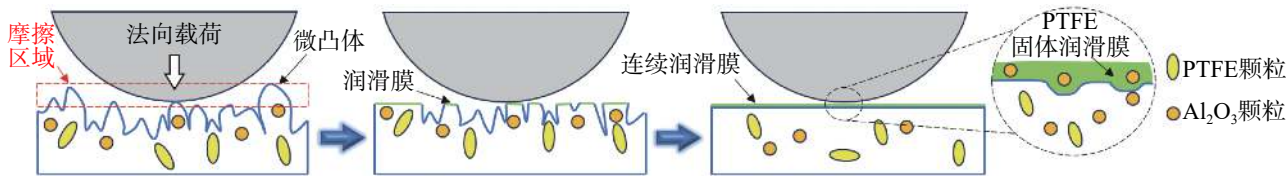


图7 Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PTFE 复合镀层表面变化示意图

Fig. 7 Schematic diagram of surface changes in Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PTFE composite coating

为进一步探究复合镀层的摩擦磨损机制,对Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PTFE (2:1)的磨痕形貌和能谱进行分析,结果如图8。从图8可发现:镀层磨痕表面含有Ni, C, F, Al, O, Fe 6种元素,其中Ni为基质金属;C, F元素来自于PTFE颗粒;Al, O元素来自于Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>颗粒;Fe元素为上试样球GCr15材料成分,质量分数仅0.41%,说明少部分上试样磨屑黏附在镀层磨痕

表面,证实磨损形式中存在黏着磨损,但复合镀层磨痕表面Fe元素含量较少,表明黏着磨损比较轻微,这可能是镀层中硬质颗粒Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>所致。值得关注的是,磨痕中O元素的含量比Al元素高,说明磨损过程中随摩擦表面温度的升高,摩擦副中活泼金属与O元素结合,发生了氧化磨损。

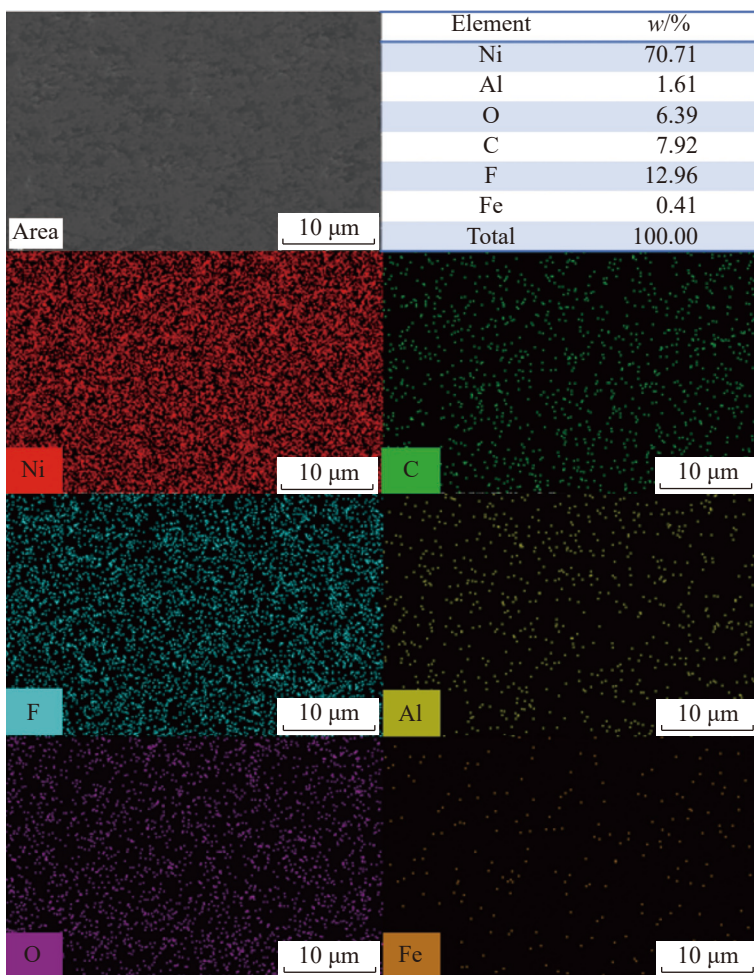


图8 Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PTFE(2:1)复合镀层表面磨痕形貌和元素分布

Fig. 8 Surface abrasion morphology and element distribution of composite coatings of Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PTFE(2:1)

综上所述: Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PTFE 复合镀层磨损过程中,镀层表面微凸体塑性变形为摩擦表面提供润滑膜,并沿滑动方向不断铺展,直至形成光滑、稳定的润滑界面;复合镀层中,PTFE为自润滑颗粒,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>颗粒起到支撑、强化的作用,保护镀层免受磨损;

Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PTFE 复合镀层的磨损形式主要为机械磨损,存在轻微的氧化磨损和黏着磨损。

### 3 结论

基于Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>颗粒的耐磨性和PTFE颗粒的自润

滑特性,采用复合电刷镀技术在 T2 紫铜片表面制备 Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PTFE 复合镀层,且以 Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ni-PTFE 镀层作为参照,分析复合镀层的表面质量、显微硬度、摩擦磨损等性能,探究复合镀层的摩擦磨损机理,所得主要结论如下:

1) Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PTFE 复合镀层的硬度与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒含量正相关,掺入的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 与 PTFE 体积比为 3:1 时 Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PTFE 复合镀层的显微硬度最大,为 236 HV,相比于 Ni-PTFE 复合镀层提升约 66%。

2) 掺入的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 与 PTFE 体积比为 1:1 时, Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PTFE 复合镀层的减摩性能最优,摩擦系数相比于 Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合镀层降低约 52%;掺入的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 与 PTFE 体积比为 3:1 时, Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PTFE 复合镀层的耐磨性能最优,磨损率相比于 Ni-PTFE 降低约 85%; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 PTFE 颗粒的复合加入可使镀层在保持减摩的同时具有一定的耐磨性。

3) Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PTFE 复合镀层的磨损形式主要为机械磨损,存在轻微的氧化磨损和黏着磨损;磨损过程中镀层表面微凸体塑性变形可为摩擦表面提供润滑膜,其中 PTFE 为润滑颗粒, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒起到支撑、强化的作用,保护镀层免受磨损。

#### 参考文献:

- [1] 雒建斌. 影响制造业发展的新技术[J]. *中国市场监管研究*, 2020(10):12-14.
- [2] 刘一帆, 常涛, 刘秀波, 等. 高熵合金涂层的摩擦学性能研究进展[J]. *表面技术*, 2021, 50(8):156-169.
- [3] 陈忠, 郑笑芳, 崔磊, 等. 奥氏体化时间对铝硅镀层热成形钢组织及性能的影响[J]. *安徽工业大学学报(自然科学版)*, 2021, 38(4):361-366.
- [4] 李鹏程, 汪雪涛, 左汪楠, 等. 不同锌浴成分下钢中 Mn 对热浸镀锌层的影响[J]. *安徽工业大学学报(自然科学版)*, 2021, 38(6):138-143.
- [5] KUMAR S, SAMANTA S, DAS A K, et al. Electrodeposited SiC-graphene oxide composite in nickel matrix for improved tribological applications[J]. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 2019, 7(3):035004.
- [6] CHENG Y, CHEN H, HAN D, et al. Effect of PTFE addition on the properties of electroless Ni-Cu-P-PTFE deposits[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2014, 43(5):1025-1030.
- [7] 林翠, 张弘弘, 李进, 等. 钛合金表面化学镀 Ni-P-MoS<sub>2</sub> 耐磨性能研究[J]. *南昌航空大学学报(自然科学版)*, 2014, 28(3):51-56.
- [8] SIVANDIPOOR I, ASHRAFIZADEH F. Synthesis and tribological behaviour of electroless Ni-P-WS<sub>2</sub> composite coatings[J]. *Applied Surface Science*, 2012, 263:314-319.
- [9] HOU B, ZHANG N, ZHI Q, et al. Role of Cr-carbide coating on graphite particles in the mechanical and wear behavior of graphite/copper composites[J]. *Tribology Letters*, 2024, 72:8.
- [10] 郑晓华, 刘辉, 章荣, 等. 不同纳米氧化铝含量 Ni-P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 化学镀层的高温磨损性能[J]. *中国有色金属学报*, 2014, 24(7):1804-1811.
- [11] NAN F, WANG D. Tribological properties of attapulgite nanofiber as lubricant additive for electric-brush plated Ni coating[J]. *Lubricants*, 2023, 11(5):204.
- [12] VETRIVEZHAN P, AYYANAR C, ARUNRAJ P V, et al. Electroless deposition of aluminium alloy LM25 by SiC and Ni-P nano coating[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 45:6449-6453.
- [13] CLAVER A, FERNANDEZ I, SANTIAGO J A, et al. Corrosion and tribological performance of diamond-like carbon-coated ZK 60 magnesium alloy[J]. *Coatings*, 2023, 13(11):1871.
- [14] 作亚婷, 刘磊, 高加强, 等. 自润滑 Ni-P-PTFE 化学复合镀工艺及镀层性能[J]. *上海交通大学学报*, 2005(2):206-210.
- [15] VASCONCELOS B, SERRA R, OLIVEIRA J, et al. Characterization and tribological behavior of electroless-deposited Ni-P-PTFE films on NBR substrates for dynamic contact applications[J]. *Coatings*, 2022, 12(10):1410.
- [16] DHANUMALAYAN E, JOSHI G M. Performance properties and applications of polytetrafluoroethylene (PTFE): a review[J]. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2018, 1(2):247-268.
- [17] 宾胜武等. 刷镀技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [18] HUANG L, DAI Q W, HUANG W, et al. Ni/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> composite coatings and their water lubrication behaviors, *Applied Surface Science*, 2022, 572:151534.
- [19] ZHANG Z C, MA C B, DAI Q W, et al. A two-stage approach to Ni-P-SiC coatings and their friction against SiC in water[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2023, 457(25):129268.
- [20] NOSEWICZ S, PIOTR J, BARBARA R B, et al. The influence of spark plasma sintering on multiscale mechanical properties of nickel-based composite materials[J]. *Materials Science and Engineering:A*, 2024, 891:146001.
- [21] TAN N, LIU J, LOU L, et al. Synthesis of Ni/nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coatings by brush plating with magnetic fields[J]. *Royal Society Open Science*, 2021, 8(3):202089.
- [22] LI Y, WANG Y, ZHANG M, et al. Effect of pretreatment process on the performance of Ni-Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(sol) nanocomposite coatings via electrobrush plating on steel substrate[J]. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 2024, 28:525-534.

责任编辑: 何莉