

TC4 合金表面 Cu/石墨复合镀层的组织结构和摩擦磨损行为

赵东平¹, 郭金强¹, 李 轩²

(1. 西安航空学院, 陕西 西安 710077)

(2. 四川轻化工大学, 四川 自贡 643000)

摘 要: 采用无氰电镀工艺在 TC4 合金表面制备了 Cu/石墨复合镀层, 研究了镀层的组织结构和摩擦磨损行为。结果表明, 采用无氰电镀方法能够在 TC4 合金表面制备出组织致密且与基体结合紧密的 Cu/石墨复合镀层, 但增加镀层中石墨的含量会降低镀层与基体合金的结合强度, 并导致硬度小幅下降。摩擦磨损实验结果表明, Cu/石墨复合镀层具有优良的摩擦磨损防护性能, 归因于石墨有效降低了镀层的摩擦系数和磨损率; 对镀层磨损形貌、磨损产物和摩擦系数的综合分析结果表明, 纯铜镀层的摩擦磨损机制主要为犁削磨损、黏着磨损和剥层磨损, Cu/石墨复合镀层的磨损机制为轻微的削层磨损和疲劳磨损。

关键词: TC4 合金; 无氰电镀; Cu/石墨复合镀层; 摩擦磨损; 磨损机制

中图分类号: TG174.441

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2020)08-2861-08

TC4 合金是目前应用最为广泛的钛合金, 具有低密度、高比强度、优良的耐蚀性、较高的韧性和较好的焊接性能, 在航空航天、石油化工、造船和生物医药等领域均有重要的应用^[1,2]。特别是在航空航天领域, TC4 合金正受到越来越多的重视, 是制造飞机机身、液压管道、座舱窗户框架、蒙皮、紧固件、舱门等的重要材料^[3,4]。但 TC4 合金的耐磨性能很差, 该合金的弹性模量较低且黏性较高, 导致零部件的连接区域或表面过早出现划伤、咬合甚至粘扣失效^[5,6]。此外, 王兰等的研究表明, TC4 合金较高的表面活性会导致其磨损表面在摩擦热作用下出现氧化和氮化, 所形成的 TiO₂ 和 TiN 脆性很高且疏松多孔, 保护效果很差, 因此磨损表面始终处于磨损→氧化→再磨损→再氧化的动态过程, 进一步加剧了合金的表面磨损失效^[7]。

制备表面涂层是提高 TC4 合金耐磨性能的有效途径。国内外的科研工作者采用表面激光熔覆、等离子体烧结、物理气相沉积、化学气相沉积、离子注入等多种工艺在 TC4 合金表面制备了种类繁多的耐磨涂层, 如铝化物涂层、硅化物涂层、渗氮或渗硼涂层、各种金属基复合涂层和陶瓷基复合涂层等, 取得了良好的进展, 大幅提高了 TC4 合金的耐磨性能^[8-12]。但限于制备技术或涂层自身的缺陷, 这些涂层或内应力

大、或结合强度低、或显著削弱基体的力学性能、或涂层较薄而保护效果有限、或制备工艺繁复, 因此探索耐磨性能优良的 TC4 合金表面防护涂层体系及其简单、高效、可重复性强的制备技术, 依然是目前研究的热点^[13,14]。

铜的导热性好且耐磨性能优良, 利用电镀简单、高效、成本低廉且可重复性强的技术优势, 在 TC4 合金表面制备镀铜层, 是提高该合金耐磨性能的可靠途径^[15,16]。西北工业大学的姚小飞等^[15]和沈志超等^[16]采用电镀方法在 TC4 合金表面制备了铜镀层, 显著提高了其耐磨性能, 与 GCr15 球对磨时, 铜镀层试样的磨损率仅为相同摩擦条件下 TC4 基体的 1/10(磨损体积减小法计算所得)。但目前鲜见有关 TC4 合金表面镀铜技术及其实际工程应用的公开报道, 一方面是由于钛合金的表面活性高, 采用电镀方法制备与基体结合强度高的铜镀层比较困难; 另一方面, 纯铜镀层的硬度较低且有一定的黏性, 在摩擦过程中容易产生塑性变形和黏着磨损失效, 限制了其实际应用^[15]。

在镀铜层中添加适量的石墨, 利用其优良的减磨润滑作用, 可望大幅降低镀层的摩擦系数、提高镀层的摩擦防护性能^[17,18]。但石墨亲水性很差, 电镀过程中不易在基体合金表面吸附, 因此制备组织致密、与

收稿日期: 2019-12-18

基金项目: 国家自然科学基金(51961003); 陕西省自然科学基金基础研究计划(2019JM-435)

作者简介: 赵东平, 男, 1982 年生, 博士, 讲师, 西安航空学院飞行器学院, 陕西 西安 710077, 电话: 0086-29-84258718, E-mail: zhaodongping1982@sina.com

基体合金结合紧密的 Cu/石墨复合镀层比较困难。本研究采用一种无氰的绿色电镀技术,在 TC4 合金表面制备出了组织致密、石墨分散均匀且与基体结合紧密的 Cu/石墨复合镀层,旨在通过研究该镀层的摩擦磨损行为和石墨的减磨润滑机制,拓展 TC4 合金在航空航天领域的工程应用。

1 实验

实验基体材料为 12 mm×8 mm×4 mm 的片状 TC4 合金,名义成分为:Ti-6Al-4V (质量分数, %);实验前采用 400#、800#和 1000# SiC 水砂纸将试样表面依次打磨光滑,置于丙酮溶液中超声波清洗 10 min 后冷风吹干备用。

采用一种无氰电镀工艺进行 Cu/石墨复合镀。镀前对 TC4 合金试样依次进行表面除油→碱洗→酸洗→活化处理;其中酸洗为将试样在体积比为 HF:HNO₃:H₂O=1:2:4 的混合溶液中浸泡 20~30 s,活化为将试样置于 400 g/L 的 Na₂Cr₂O₇ 和 80 mL/L 的 HF 混合溶液中浸泡 30 min。复合镀时试样作为阴极,100 mm×50 mm×5 mm 的纯铜板作为阳极。镀液成分为:CuSO₄ 为 30 g/L、CuCl₂ 为 20 g/L、酒石酸钾为 160 g/L、H₃BO₃ 为 30 g/L、糖精钠 0.8 g/L 和石墨粉 2~10 g/L;复合镀工艺为:阴极电流密度 3.5 A/dm²,镀液温度 25 ℃,搅拌速度 300 r/min,电镀时间 20 min。镀前将颗粒尺寸≤74 μm 的石墨粉在 400 ℃灼烧 2 h,然后采用玛瑙磨球在转速为 200 r/min 的行星式球磨机中进行 2 h 球磨细化,加入镀液后搅拌均匀。上述灼烧和球磨处理能够在石墨表面引入亲水性的含氧官能团并获得粒径适中的石墨微粒,有

利于增加石墨的润湿性和形成稳定的悬混镀液^[19-21]。

采用 HT-1000 型摩擦磨损试验机进行摩擦磨损试验。由于球-平面的接触状态良好,损伤形式容易分析,本实验中的摩擦磨损试验采用球-盘方式进行。具体的摩擦磨损条件为:摩擦载荷 4.9 N,回转半径 6 mm,转速 224 r/min,磨损时间 30 min;摩擦配副为 GCr15 球,直径 4.76 mm,硬度约 62 HRC。

采用精度为 0.01 mg 的电子分析天平称取磨损前后试样的质量,为减小误差,每组数据均测量 5 次后取平均值。采用 3D 激光共聚焦显微镜 (CLSM, OPTELCSC130) 测量电镀前后试样的粗糙度。采用 Anton Paar RST3 型划痕仪测试镀层的结合强度,起始载荷为 1 N,终止载荷为 50 N,加载速率为 245 N/min,划痕长度为 5 mm。采用 HV-1000 型显微硬度仪测量合金和镀层的硬度,加载载荷为 0.49 N,保持时间为 20 s;采用飞利浦 X'Pert-Pro 型 X 射线衍射仪 (XRD) 分析镀层的相组成 (Cu 靶, 40 kV);采用 JSM-6360LV 型扫描电子显微镜 (SEM/EDS) 分析镀层的组织、磨痕形貌和成分。

2 结果与分析

2.1 Cu/石墨复合镀层的组织

图 1 给出了 TC4 合金表面纯铜镀层和 Cu/石墨复合镀层 (以复合镀层 1#、2#和 3#分别代表镀液中石墨含量为 2、5 和 10 g/L 时所制备的复合镀层) 的表面 SEM 形貌和 3D 激光共聚焦形貌,图 2 为镀层的表面 XRD 谱;制备镀层前后试样的表面粗糙度测试结果见表 1。

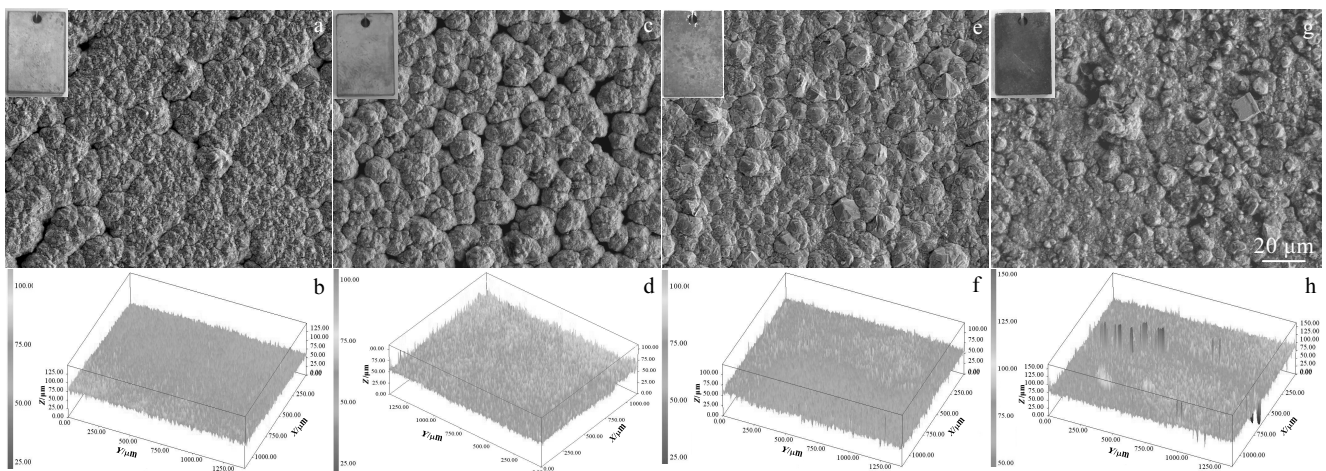


图 1 TC4 合金纯铜镀层和 Cu/石墨复合镀层的表面 SEM 形貌及 3D 激光共聚焦形貌

Fig.1 SEM (a, c, e, g) and 3D CLSM (b, d, f, h) images of the pure copper coating (a, b) and Cu/graphite composite coatings with different contents of graphite electroplated on TC4 alloy: (c, d) 2 g/L, (e, f) 5 g/L, and (g, h) 10 g/L

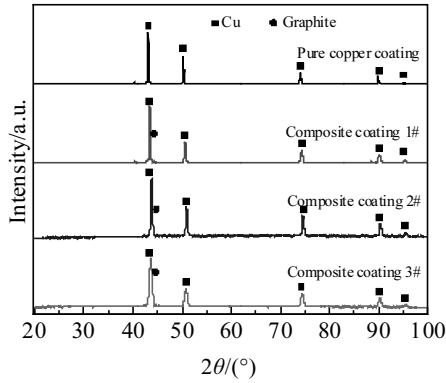


图 2 TC4 合金纯铜和 Cu/石墨复合镀层的表面 XRD 图谱
Fig.2 Surface XRD patterns of the pure copper coating and Cu/graphite composite coatings electroplated on TC4 alloy

表 1 制备镀层前后试样的表面粗糙度

Table 1 Surface roughness values of the specimens without and with coating

Specimen	$R_a/\mu\text{m}$	$R_z/\mu\text{m}$	$R_{Sm}/\mu\text{m}$
Substrate	0.9	7.3	8.6
Pure copper coating	1.2	8.9	9.7
Composite coating 1#	1.2	9.1	10.4
Composite coating 2#	1.4	10.1	13.2
Composite coating 3#	1.5	11.6	13.1

图 1 中镀层的表面 SEM 形貌和宏观形貌表明,纯铜镀层和 Cu/石墨复合镀层的组织均比较致密,其中 Cu/石墨复合镀层表面呈明显的岛状形貌。图 2 中的 XRD 分析结果表明,Cu/石墨复合镀层的表面 XRD 衍射峰明显宽于纯铜镀层,且镀液中石墨含量越高,衍射峰的宽化现象越明显,这是由于 Cu 的主衍射峰与石墨的主衍射峰非常接近,导致了 Cu/石墨复合镀层衍射峰变宽并略向右迁移。基于 3D 激光共聚焦的表面粗糙度测试结果(表 1)表明,制备纯铜镀层和 Cu/石墨复合镀层均会导致试样的表面粗糙度增加,并且镀液中石墨含量越高,镀层粗糙度越大。试样表面粗糙度增加会造成摩擦系数和磨损率增加,特别是在磨损初期这种影响会更加明显^[18]。

图 3 给出了纯铜镀层和 Cu/石墨复合镀层截面组织的 SEM 形貌。由图 3a 可见,纯铜镀层的组织比较致密,镀层与基体合金的界面区域未见明显的裂纹,说明纯铜镀层与基体的结合状态良好。图 3b~3d 中的截面形貌表明,镀液中石墨的含量对其在复合镀层中的含量及镀层组织均有明显影响。复合镀层中的石墨含量随镀液中石墨含量的增加呈增加趋势(复合镀层中的黑色颗粒相为石墨);镀液石墨含量为 2 和 5 g/L 时制备的复合镀层中石墨含量分别约为 1.2 vol%和 1.7 vol%;镀液石墨含量为 10 g/L 时制备的复合镀层中石墨含量增加至约 3.6 vol%。此外,镀液中石墨含量低于 5 g/L 时制备的复合

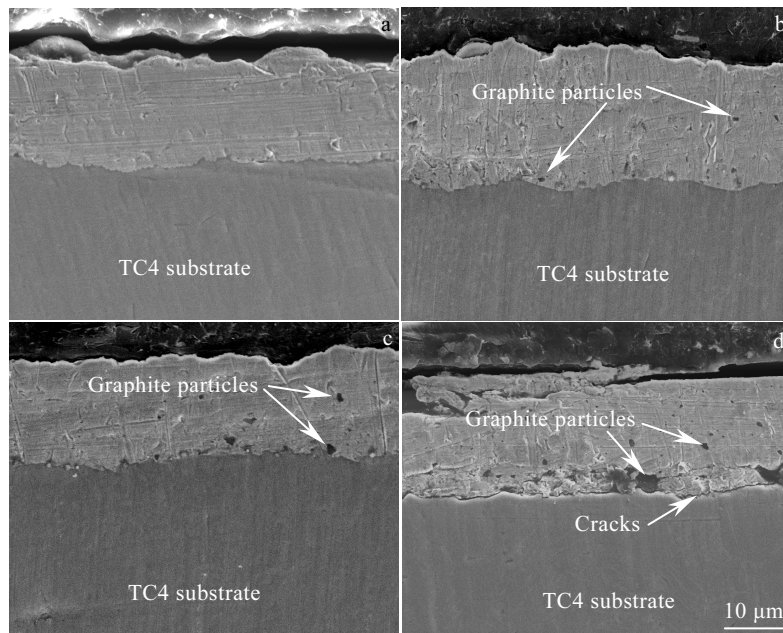


图 3 TC4 合金纯 Cu 镀层和 Cu/石墨复合镀层的截面 SEM 形貌

Fig.3 Cross-sectional SEM images of the pure copper coating (a) and Cu/graphite composite coatings electroplated on TC4 alloy: (b) composite coating 1#, (c) composite coating 2#, and (d) composite coating 3#

渗层组织致密且石墨分布较为均匀,但镀液石墨含量较高时(10 g/L)复合镀层中出现明显的石墨团聚现象,且镀层/基体界面区域也产生了明显的裂纹。

分析认为,复合镀过程中,镀液中的各种电解离子吸附于石墨微粒表面使之成为带电粒子,这些带电的石墨粒子在搅拌作用下与阴极(基体合金)表面发生碰撞,并在电场力作用下完成阴极吸附;由于石墨自身良好的导电性,吸附的石墨微粒可以看成是阴极的一部分,Cu离子可以直接在其表面析出沉积,形成岛状晶粒^[19]。随沉积不断进行,各岛状晶粒的横向和纵向生长促使其连结成块,逐渐埋覆石墨微粒和阴极表面。此外,共沉积过程中金属离子还会优先在粒径较大或发生团聚的微粒表面析出,造成复合镀层的表面粗糙度增加甚至产生结瘤现象^[19]。上述沉积机制很好地解释了图 1 中 Cu/石墨复合镀层表面岛状组织的形成原因,也能够解释镀层表面粗糙度随石墨含量增加而明显增加的现象。

2.2 Cu/石墨复合镀层的结合强度和硬度

2.2.1 Cu/石墨复合镀层的结合强度

对镀层进行的划痕实验结果如图 4 所示,可见纯铜镀层和复合镀层 1#的声信号曲线未出现明显波动,即未出现因镀层突然破裂而产生的强烈声信号,表明

铜镀层纯铜镀层和复合镀层 1#在 50 N 载荷下未被划破;复合镀层 2#和 3#的声信号曲线分别在 38 和 32 N 处产生了较大的波动,说明镀层中石墨含量增加降低了镀层与基体的结合强度,这与图 3 中镀层截面形貌的分析结果一致。

2.2.2 Cu/石墨复合镀层的硬度

图 5 对比了 TC4 合金、纯铜镀层和 Cu/石墨复合镀层的显微硬度(HV_{0.05})。可见 TC4 的硬度最高,约 2900 MPa,纯铜镀层的硬度约为 1100 MPa;Cu/石墨复合镀层的显微硬度与纯铜镀层差异不大,但增加石墨含量会导致复合镀层硬度小幅下降,这与石墨较低的硬度有关^[22]。

2.3 Cu/石墨复合镀层的摩擦磨损行为

2.3.1 摩擦系数和磨损失重

图 6 给出了 TC4 合金及其表面纯铜镀层和 Cu/石墨复合镀层的摩擦系数随时间的变化曲线。TC4 合金的平均摩擦系数约为 0.60,波动幅度较大。纯铜镀层的平均摩擦系数在摩擦开始前 7 min 内只有约 0.34 且波动很小,此后快速增加至约 0.80,磨损 14 min 后小幅度下降至 0.7,然后趋于稳定;产生该现象的主要原因可能是纯铜镀层的塑性变形和磨损产物堆积,这在后面的磨损形貌分析中将获得进一步证明。Cu/石墨复

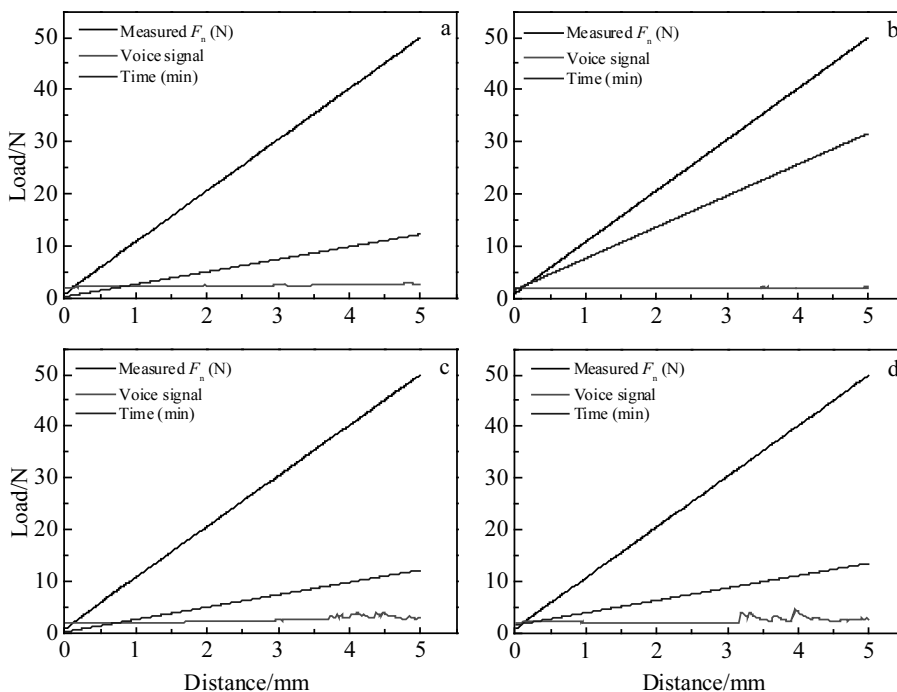


图 4 TC4 合金纯 Cu 镀层和 Cu/石墨复合镀层的划痕声信号曲线

Fig.4 Scratch voice signal curves of the pure copper coating (a) and Cu/graphite composite coatings electroplated on TC4 alloy: (b) composite coating 1#, (c) composite coating 2#, and (d) composite coating 3#

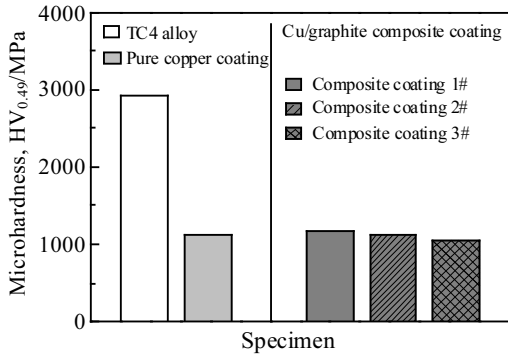


图 5 TC4 合金及其纯铜镀层和 Cu/石墨复合镀层的显微硬度
Fig.5 Microhardness of the TC4 substrate and its pure copper coating and Cu/graphite composite coatings

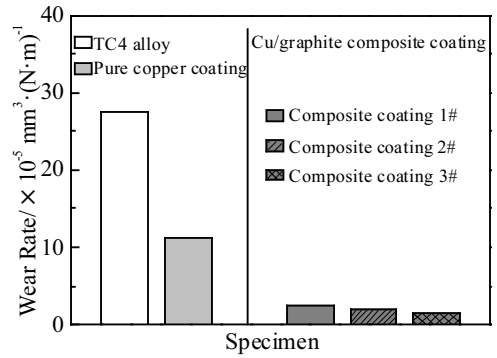


图 7 TC4 合金及其纯铜镀层和 Cu/石墨复合镀层的磨损率
Fig.7 Wear rates of TC4 alloy and its pure copper coating and Cu/graphite composite coatings

合镀层的摩擦系数较低，并且在整个摩擦过程中比较平稳；此外，随镀层中石墨的含量增加，其平均摩擦系数呈降低趋势。

采用磨损失重法计算 TC4 基体合金和镀层的磨损率，结果如图 7 所示。TC4 基体合金的磨损率约为 $27.5 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$ ，纯铜镀层的磨损率显著低于 TC4 基体合金，约为 $11.3 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$ （考虑到本研究中纯铜镀层在磨损后期已经失效，其在未失效时的磨损率或将远低于此值^[15]）。与纯铜镀层相比，Cu/石墨复合镀层的磨损率更低，并且随镀层中石墨含量的增加而降低：复合镀层 1#的磨损率约为 $2.5 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$ ，仅为 TC4 基体合金的 9.1%，纯铜镀层的 22.1%；随镀层中石墨含量增加磨损率进一步降低，复合镀层 3#的磨损

率只有约 $1.6 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$ 。

上述摩擦系数和磨损率结果表明，Cu/石墨复合镀层的摩擦系数和磨损率均显著低于 TC4 合金及其表面纯铜镀层，可见其能够为 TC4 合金提高优良的摩擦磨损防护，也说明在镀铜涂层中添加少量的石墨能够起到显著的减磨润滑效果，提高镀层的摩擦磨损防护性能。

2.3.2 磨损形貌和磨损机制

图 8 为 TC4 合金表面纯铜镀层和 Cu/石墨复合镀层(选取复合镀层 2#进行对比分析)与 GCr15 球对磨 30 min 后的磨痕形貌和磨损面典型组织的 EDS 成分分析结果。

由图 8a、8a₁ 和 8a₂ 中的磨损形貌可见，纯铜镀层的磨损面存在 2 种典型区域：其一是镀层未发生剥落的区域，如图 8a₁ 所示，该区域表面显见较深的犁沟和黏着凹坑，磨损面组织的塑性变形痕迹明显；其二是镀层剥落或磨穿区域，如图 8a₂ 所示，对该区域典型组织进行 EDS 面扫描分析结果如图 8c 所示，可见除 Cu 元素外，还含有基体合金元素 Ti、Al 和 V 等，说明该区域的镀层已经剥落或被磨穿。结合图 8a 中显见的腐蚀产物堆积现象，8a₂ 中磨痕两侧明显的镀层撕裂痕迹和磨损面上大量的蜂窝撕裂状形貌，可判断该区域的镀层主要是在磨损产物堆积和黏着的作用下出现了整体撕裂剥落，而非磨穿失效。

Cu/石墨复合镀层的磨损表面形貌如图 8b 和 8b₁ 所示。与纯铜镀层相比，Cu/石墨复合镀层的磨损面更为光滑和完整，犁沟更细小，并且无明显的黏着凹坑和磨损组织堆积；磨痕表面粘附的磨损产物主要呈细小的片状，有明显的塑性变形痕迹，可见这些磨屑经过了二次研磨和碾压。上述结果表明复合镀层中的石墨缓解了磨损面的黏着现象，并避免了塑性变形导致

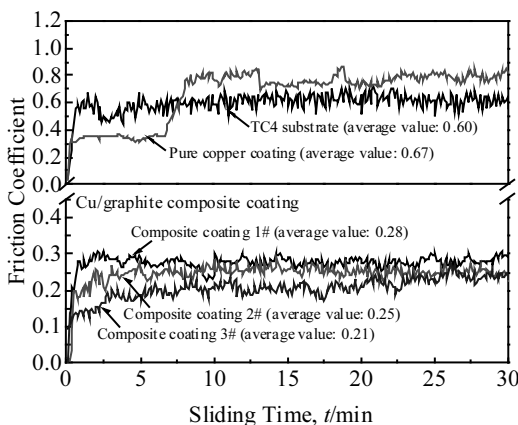


图 6 TC4 合金及其纯铜镀层和 Cu/石墨复合镀层的摩擦系数曲线
Fig.6 Friction coefficients of TC4 alloy and its pure copper coating and Cu/graphite composite coatings

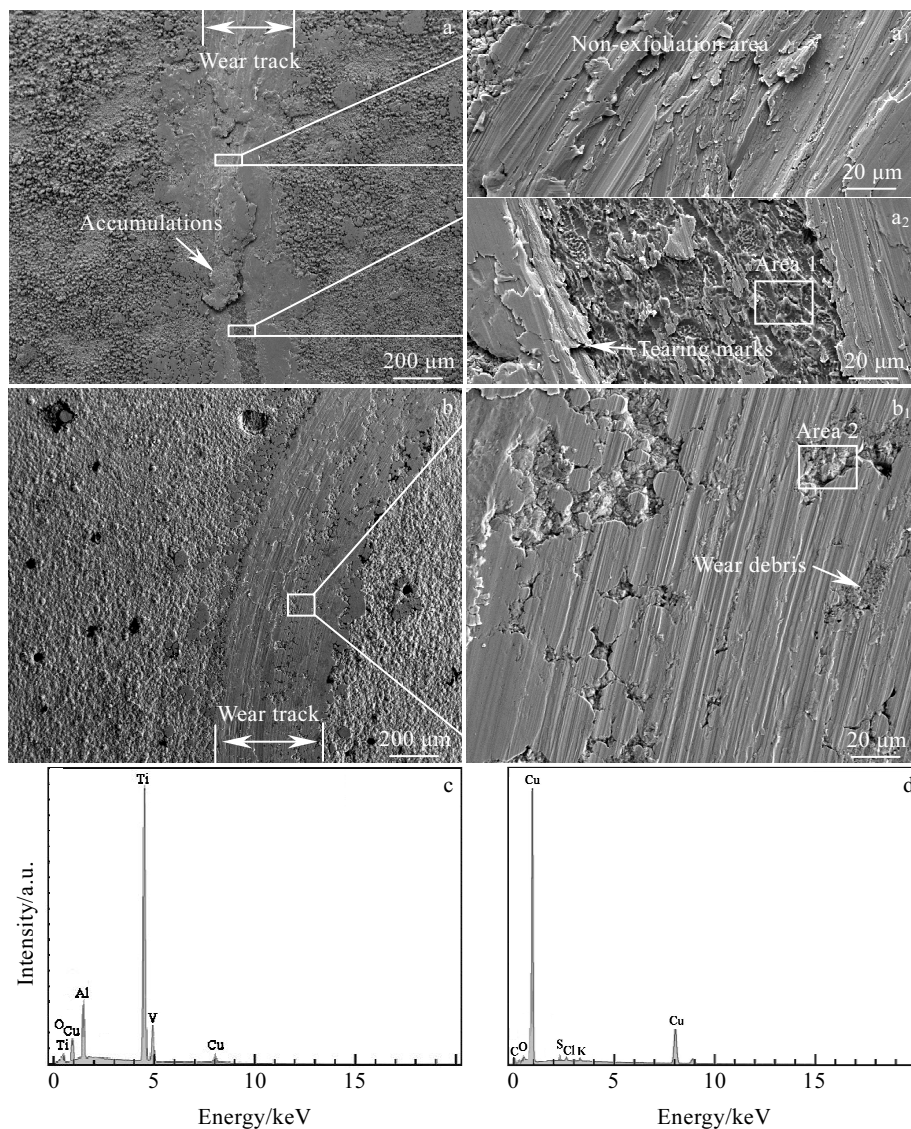


图 8 TC4 合金表面纯铜镀层和 Cu/石墨复合镀层与 GCr15 球对磨 30 min 后的磨痕形貌和磨损面典型组织的 EDS 成分分析结果
 Fig.8 Worn surface morphologies of the pure copper coating (a, a₁, a₂) and Cu/graphite composite coating (b, b₁) electroplated on TC4 alloy sliding against GCr15 ball counterpart for 30 min; EDS analysis results of area 1 in Fig.8a₂ (c) and area 2 in Fig.8b₁ (d)

的组织堆积，起到了明显的润滑作用。对磨损表面典型区域(图 8b₁ 中区域 2 所示)进行 EDS 面分析结果如图 8d 所示，可见除 Cu 和 C 外，还存在少量的 S, K, Cl 和 Ca 等镀液成分的元素，说明磨损面的凹坑区域未发生磨损，也从侧面证明了 Cu/石墨复合镀层优良的耐磨性能和石墨显著的减磨润滑效果。

分析认为，纯铜镀层虽然能够有效降低 TC4 合金的磨损率，并且在磨损开始阶段(图 6 中磨损开始 7 min 内)显著降低摩擦系数，但其较高的塑性使得摩擦配副在正应力作用下容易切入磨损面，在相对滑动过程中产生较强烈的犁削作用，导致较深的犁沟和较大的表层塑性变形。同时，纯铜镀层的磨屑由于具有较强的

吸附性而容易粘附于磨损表面^[23]；随磨损过程进行，不断堆积的磨屑和表面塑性变形会造成摩擦阻力的显著增加，一旦摩擦阻力高于涂层的强度或涂层/基体合金的结合强度，磨损黏着和切向应力的作用会造成镀层组织的撕裂性剥落，图 8a、8a₁ 和 8a₂ 中的磨损形貌及剥落区域的 EDS 成分分析结果很好地证明了这一点。因此，TC4 合金表面纯铜镀层的摩擦磨损机制可以归结为犁削磨损、黏着磨损和剥层磨损；上述磨损机制也很好地解释了图 6 中纯铜镀层在磨损 7 min 后，摩擦系数急剧增加的现象。

Cu/石墨复合镀层的硬度虽然较低，但石墨优良的减磨润滑作用大幅降低了摩擦阻力，表现为摩擦系数

的显著降低,如图6所示。因此,Cu/石墨复合镀层磨损表面始终处于较低的应力水平,磨损表面的塑性变形也较小,破坏主要源自于滑动摩擦后产生的轻微擦伤。得益于石墨的润滑作用,这些磨屑在摩擦过程中不会产生集聚和堆积,而是被反复地碾压和研磨并最终发生剥落,这种磨损实质是疲劳破坏的过程^[24,25],因此Cu/石墨复合镀层的磨损机制主要表现为轻微的削层磨损和疲劳磨损。

3 结 论

1) 采用无氰复合镀技术能够在TC4钛合金表面制备出石墨颗粒分布均匀、组织致密、且与基体结合紧密的Cu/石墨复合镀层;增加镀层中石墨的含量会降低镀层与基体合金的结合强度,并导致硬度小幅下降。

2) Cu/石墨复合镀层的摩擦系数和磨损率均显著低于纯铜镀层和TC4基体合金,且随镀层中石墨含量的增加而降低:镀层中石墨含量约为1.2 vol%时,复合镀层的磨损率约为 $2.5 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$,仅为TC4基体合金的9.1%,纯铜镀层的22.1%;镀层中石墨含量增加至约3.6 vol%时,镀层的磨损率降低进一步至约 $1.6 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$ 。

3) Cu/石墨复合镀层能够为TC4合金提供良好的摩擦磨损防护,归因于石墨优良的减磨润滑作用;TC4合金表面纯铜镀层的摩擦磨损机制表现为犁削磨损、黏着磨损和剥层磨损,Cu/石墨复合镀层的磨损机制主要为轻微的削层磨损和疲劳磨损。

参考文献 References

- [1] Chern A H, Nandwana P, Yuan T *et al.* *International Journal of Fatigue*[J], 2019, 119: 173
- [2] Harun W S W, Manam N S, Kamariah M S *et al.* *Powder Technology*[J], 2018, 331: 74
- [3] Wang S G, Wu X Q. *Materials & Design*[J], 2012, 36: 663
- [4] Xie Linjun(谢林均), Liu Wei(刘伟). *China Titanium Industry*(中国钛业)[J], 2017(1): 24
- [5] Alam M O, Haseeb A S M A. *Tribology International*[J], 2002, 35(6): 357
- [6] Straffelini G, Molinari A. *Wear*[J], 1999, 236(1-2): 328
- [7] Wang Lan(王兰), Zhang Qiuyang(张秋阳), Li Xinxing(李新星) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2015, 44(2): 480
- [8] Kgoete M, Popoola A P I, Fayomi O S I. *Data in Brief*[J], 2018, 19: 1989
- [9] Wilson A, Matthews A, Housden J *et al.* *Surface & Coatings Technology*[J], 1993, 62(1-3): 600
- [10] Li Xuan(李轩), Tian Jin(田进), Tian Wei(田伟) *et al.* *Journal of Inorganic Materials*(无机材料学报)[J], 2017, 32(10): 1102
- [11] Mello C B, Ueda M, Silva M M *et al.* *Wear*[J], 2009, 267(5-8): 867
- [12] Li H, Ramezani M, Chen Z W. *Wear*[J], 2019, 440-441: 203
- [13] Dixit T, Singh I, Prasad K E. *Wear*[J], 2019, 420-421: 207
- [14] Ge Xiaolan(戈晓岚), Zhong Yiying(仲奕颖), Xu Xiaojing(许晓静) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(8): 2266
- [15] Yao Xiaofei(姚小飞), Xie Faqin(谢发勤), Wang Yifei(王毅飞) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(12): 2135
- [16] Shen Zhichao(沈志超), Xie Faqin(谢发勤), Wu Xiangqing(吴向清) *et al.* *China Surface Engineering*(中国表面工程)[J], 2012, 25(5): 45
- [17] Lee C K. *Tribology International*[J], 2012, 55: 7
- [18] Wang Y F, Li G, Shi Z Q *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2014, 610: 713
- [19] Bai Xiaojun(白晓军). *Electroplating & Pollution Control*(电镀与环保)[J], 1993, 13(2): 8
- [20] Gao Ruijuan(高瑞娟), Hang Jianzhong(杭建忠), Shi Liyi(施利毅) *et al.* *Journal of Shanghai University: Natural Science Edition*(上海大学学报:自然科学版)[J], 2011, 17(6): 762
- [21] Wang Wu(王武), Xi Duoqing(席国强), Guo Bingyan(郭丙炎) *et al.* *China Powder Science and Technology*(中国粉体技术)[J], 2020, 26(3): 48
- [22] Huang Kai(黄凯), Bai Hua(白华), Zhu Yingbin(朱英彬) *et al.* *Acta Materiae Compositae Sinica*(复合材料学报)[J], 2018, 35(4): 920
- [23] Sun Jiashu(孙家枢). *Wear of Metals*(金属的磨损)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1992: 118
- [24] Ran Xu(冉旭), Liu Yongbin(刘勇兵), Bao Xiaojun(包晓军) *et al.* *Transactions of Materials and Heat Treatment*(材料热处理学报)[J], 2007, 28(2): 12
- [25] Zhang Y Y, Choudhuri D, Scharf T W *et al.* *Materials & Design*[J], 2019, 182: 108 009

Structure and Wear Behavior of Cu/Graphite Composite Coating Electroplated on TC4 Alloy

Zhao Dongping¹, Guo Jinqiang¹, Li Xuan²

(1. Xi'an Aeronautical University, Xi'an 710077, China)

(2. Sichuan University of Science and Engineering, Zigong 643000, China)

Abstract: Cu/graphite composite coatings with different graphite contents were prepared on TC4 alloy by cyanide free electroplating. The microstructure, wear behavior and wear mechanisms of the coatings were investigated. The results show that Cu/graphite composite coatings with compact structure and relatively strong coating/substrate combination can be obtained by cyanide free electroplating on TC4 alloy. However, increasing the graphite content in the coating would reduce the bonding strength between the coating and the substrate, and lead to a small decrease in coating hardness. The wear tests show that Cu/graphite composite coating can protect the TC4 substrate from wear effectively, demonstrated by its much lower friction coefficients and wear rates than those of both TC4 substrate and the pure copper coating. Based on a comprehensive analysis of the wear morphologies, wear products and friction coefficients of the coatings, the main wear mechanisms of the pure copper coating can be deduced as ploughing wear, adhesion wear and peeling wear, while those of the Cu/graphite composite coating are concluded as slight layer cutting wear and fatigue wear.

Key words: TC4 alloy; cyanide free electroplating; Cu/graphite composite coating; friction and wear; wear mechanism

Corresponding author: Zhao Dongping, Ph. D., Lecturer, School of Aircraft Engineering, Xi'an Aeronautical University, Xi'an 710077, P. R. China, Tel: 0086-29-84258718, E-mail: zhaodongping1982@sina.com