

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2022.09.012

TC4钛合金表面电沉积Co-W/MoS₂复合镀层及摩擦磨损性能研究

安娜¹, 花珂^{2*}, 史洪源¹, 李驰³

(1. 西安航空职业技术学院, 陕西 西安 710089; 2. 西北工业大学 凝固技术国家重点实验室先进润滑与密封材料研究中心, 陕西 西安 710072; 3. 西安兵器工业特种设备检测有限责任公司 陕西 西安 710043)

摘要: 为了有效改善TC4钛合金的摩擦磨损性能, 在TC4钛合金表面电沉积掺杂自润滑MoS₂颗粒的Co-W/MoS₂复合镀层。研究了镀液中的MoS₂颗粒浓度对复合镀层的物相结构、结合强度、微观形貌、成分及摩擦磨损性能的影响。结果表明: 添加2.5 g/L MoS₂颗粒制备的复合镀层与钛合金基体结合紧密, 晶粒呈长条状与团簇胞状, 主要物相为fcc-Co、hcp-Co和Co₃W, 其中MoS₂颗粒含量接近3%。该复合镀层稳定状态时摩擦系数仅为0.34, 并且磨损率最低, 仅为 9.50×10^{-4} mm³/N, 表现出优异的耐磨性能, 能有效改善TC4钛合金的摩擦磨损性能。MoS₂颗粒参与共沉积可能影响结晶形核过程, 还会掺杂在Co晶格间隙引起晶格畸变, 有利于提高复合镀层致密度, 从而改善复合镀层性能。包覆在复合镀层中的MoS₂颗粒在摩擦过程中还可以起到自润滑减摩作用, 从而减轻复合镀层磨损程度。

关键词: TC4钛合金; Co-W/MoS₂复合镀层; MoS₂颗粒浓度; 磨损率; 磨痕形貌

中图分类号: TG178

文献标识码: A

Electrodeposition of Co-W/MoS₂ Composite Coatings on TC4 Titanium Alloy and Their Tribological Performance

AN Na¹, HUA Ke^{2*}, SHI Hongyuan¹, LI Chi³

(1. Xi'an Aeronautical Polytechnic Institute, Xi'an 710089, China; 2. State Key Laboratory of Solidification Processing, Center of Advanced Lubrication and Seal Materials, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 3. Xi'an Ordnance Industry Special Equipment Testing Co., Ltd., Xi'an 710043, China)

Abstract: Co-W/MoS₂ composite coatings doped with self-lubricating MoS₂ particles were electrodeposited on the surface of TC4 titanium alloy in order to effectively improve the tribological performance of TC4 titanium alloy. The effects of the concentration of MoS₂ particles in plating solution on the phase structure, bonding strength, microstructure, composition and tribological performance of the composite coatings were studied. The results show that the composite coating prepared by adding 2.5 g/L MoS₂ particles is closely combined with the titanium alloy matrix, and the grains are in the shape of long

收稿日期: 2022-05-29

修回日期: 2022-06-19

作者简介: 安娜(1990—), 女, 硕士, 讲师, 主要研究方向: 复合材料及制备工艺、表面工程等, email: Polytechnic_1990@163.com

*通信作者: 花珂(1990—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 航空航天高性能金属结构材料、表面工程等, email: 576420562@qq.com

基金项目: 陕西省教育厅资助项目(21JK0706)

strips and clusters. The main phases are fcc-Co, hcp-Co and Co_3W , in which the content of MoS_2 particles is close to 3%. The composite coating exhibits excellent wear resistance with the minimum friction coefficient of 0.34 and the lowest wear rate of $9.50 \times 10^{-4} \text{ mm}^2/\text{N}$, and it can effectively improve the tribological performance of TC4 titanium alloy. The participation of MoS_2 particles in co-deposition may affect the crystallization nucleation process and enter in Co lattice gap to cause lattice distortion, which is beneficial to improve the compactness of composite coating and thus improve its performance. Furthermore, the MoS_2 particles coated in the composite coating can also play a role of self-lubrication and friction reduction in the friction process, so as to reduce the wear degree of the composite coating.

Keywords: TC4 titanium alloy; Co-W/ MoS_2 composite coating; MoS_2 particle concentration; wear rate; wear crack morphology

钛合金的强度和硬度高,耐腐蚀和耐高低温性能优异,但缺点是耐磨性能差,对微动磨损非常敏感,表面容易形成麻面等缺陷^[1-3]。为此,改善钛合金的摩擦磨损性能具有重要意义。研究表明,采用微弧氧化、电沉积、真空渗氮、等离子喷涂等工艺制备功能性涂层,是改善钛合金摩擦磨损性能的有效途径^[4-8]。其中,电沉积具有设备简单、易于操作、能耗低等优点,镀层结晶细致、厚度可控性好且性能优良,对于改善钛合金的摩擦磨损性能具有良好效果。

近些年,在钛合金表面电沉积耐磨或减摩镀层引起了研究人员的关注。汪建琦等^[9]在钛合金表面电沉积Ni-SiC复合镀层,摩擦磨损测试表明:该复合镀层能有效提高Ni-SiC复合镀层的耐磨性能。高鑫^[10]在钛合金表面电沉积Ni-cBN复合镀层,研究表明:采用最佳工艺参数制备的Ni-cBN复合镀层具有优异的耐磨性能。李轩等^[11]在钛合金表面电沉积Ni-SiC- Y_2O_3 复合镀层,研究表明:该复合镀层在常温 and 高温下对钛合金均具有一定的减摩作用。沈志超等^[12]在钛合金表面电沉积纯铜镀层,摩擦磨损测试表明:纯铜镀层通过减摩作用明显的改善钛合金的摩擦磨损性能。

目前有关钛合金表面电沉积耐磨或减摩镀层的报道主要针对镍基复合镀层,鲜见在钛合金表面电沉积钴基耐磨或减摩镀层的报道。实际上,钴基镀层也具有较好的摩擦磨损性能。本文以有效的改善TC4钛合金的摩擦磨损性能为目标,在TC4钛合金表面电沉积掺杂自润滑 MoS_2 颗粒的Co-W/ MoS_2 复合镀层。主要研究镀液中添加的 MoS_2 颗粒浓度对复合镀层摩擦磨损性能的影响,旨在为改善TC4钛合金的摩擦磨损性能提供可供选择的途径。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

裁切50 mm×24 mm×2 mm的TC4钛合金试片作为实验基材,其化学成分(元素质量分数)为:Al 5.5%~6.8%、V 3.5%~4.5%、Fe 0.3%、C 0.1%、余量为Ti。试片预处理流程如下:机械抛光→碱液中化学除油→混合酸中活化→依次在无水乙醇、去离子水中超声波清洗→冷风吹干。表1列出化学除油和活化工序的溶液成分和工艺参数。

表1 化学除油和活化工序的溶液成分和工艺参数

Tab.1 Solution composition and process parameters of chemical degreasing and activation processes

工序	溶液成分	工艺参数
化学除油	氢氧化钠 40 g/L, 碳酸钠 25 g/L, 硅酸钠 6 g/L	70 °C 浸泡 10 min
活化	氢氟酸 20 mL/L, 盐酸 60 mL/L	常温 浸泡 40 s

1.2 电沉积Co-W/ MoS_2 复合镀层

在预处理后的TC4钛合金试片表面电沉积Co-W/ MoS_2 复合镀层,阳极为铂板,极间距为30 mm。镀液主要成分为:硫酸钴 20 g/L、钨酸钠 12 g/L、硫酸钠 18 g/L、柠檬酸钠 50 g/L、硼酸 40 g/L。将盛放镀液的容器置于超声波水槽中,然后添加 MoS_2 颗粒(粒径约为30 nm、纯度高于99.9%),通过超声波振荡方式实现 MoS_2 颗粒在镀液中较均匀分散和悬浮。实验过程中,电流密度 $2 \text{ A}/\text{dm}^2$ 及温度 $(60 \pm 1)^\circ\text{C}$ 保持不变,只改变镀液中的 MoS_2 颗粒质量浓度(0.5~6 g/L)获得5个试样。

1.3 Co-W/MoS₂复合镀层性能测试

1.3.1 物相结构

采用D8 Advance型X射线衍射仪获得不同Co-W/MoS₂复合镀层的XRD谱,靶材为铜靶,电压和电流分别设置40 kV、30 mA,扫描速度为4°/min,步长为0.02°,角度范围20°至90°。将测试数据导入Jade软件中分析不同Co-W/MoS₂复合镀层的物相结构。

1.3.2 结合强度

根据GB 5933—1986《轻工产品金属镀层的结合强度测试方法》,采用划痕法定性评价不同Co-W/MoS₂复合镀层与钛合金基体的结合强度。测试步骤如下:采用锐利的钢刀在每个试样表面划4条垂直交错的平行线围成网格形区域,划破镀层触及基体。借助显微镜观察网格区域内被分割的镀层边缘是否翘起或完全脱落。

1.3.3 微观形貌及MoS₂颗粒质量分数

采用EV018型扫描电镜放大5000倍观察不同Co-W/MoS₂复合镀层的微观形貌,同时用X-max80型能谱仪进行成分分析,根据相对分子量关系估算复合镀层中MoS₂颗粒质量分数。

1.3.4 摩擦磨损性能

在UMT-2型摩擦试验机上进行干摩擦实验,环境温度为25℃,相对湿度为30%~40%,对磨件为直径4 mm的钢球,往复运动频率为5 Hz,行程5 mm。法向载荷设置10 N,摩擦时间为420 s。实验结束后清理磨屑,采用VHX-5000型3D显微镜观察不同复合镀层的磨痕形貌,然后用Micro Xam-800型三维轮廓仪测量不同Co-W/MoS₂复合镀层的磨痕长度和面积,并根据如下公式计算不同复合镀层的磨损率 K 。

$$K = \frac{V}{F \cdot S} \quad (1)$$

式中: V 表示磨痕体积,单位为mm³; F 表示法向载荷,单位为N; S 表示磨痕长度,单位为mm。

2 结果与讨论

2.1 Co-W/MoS₂复合镀层的物相结构

图1所示为不同Co-W/MoS₂复合镀层的XRD谱。由图1可知,不同复合镀层都具有晶态结构,呈现明显的择优取向,主要沿(200)晶面生长,对应物相为fcc-Co(面心立方结构)。除此之外,不同复合

镀层中都含有Co₃W相,是由于W固溶Co晶格中形成。但都未出现MoS₂相,可能由于复合镀层中MoS₂颗粒含量较低。对比发现,添加2.5 g/L MoS₂颗粒制备的复合镀层中还含有hcp-Co(密排六方结构),新物相出现表明Co晶格畸变,可能是MoS₂颗粒参与共沉积掺杂在Co晶格间隙而引起。研究表明,晶格畸变会导致晶粒形态发生变化,进而影响镀层性能。

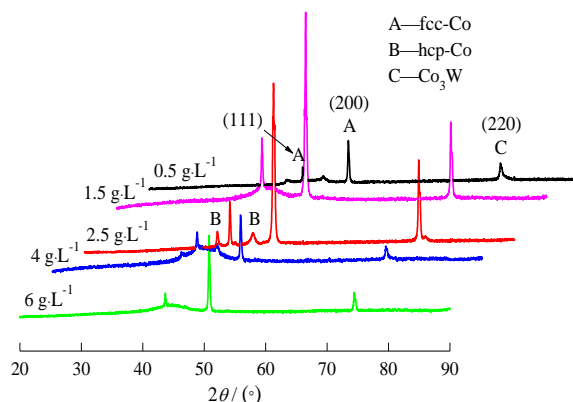
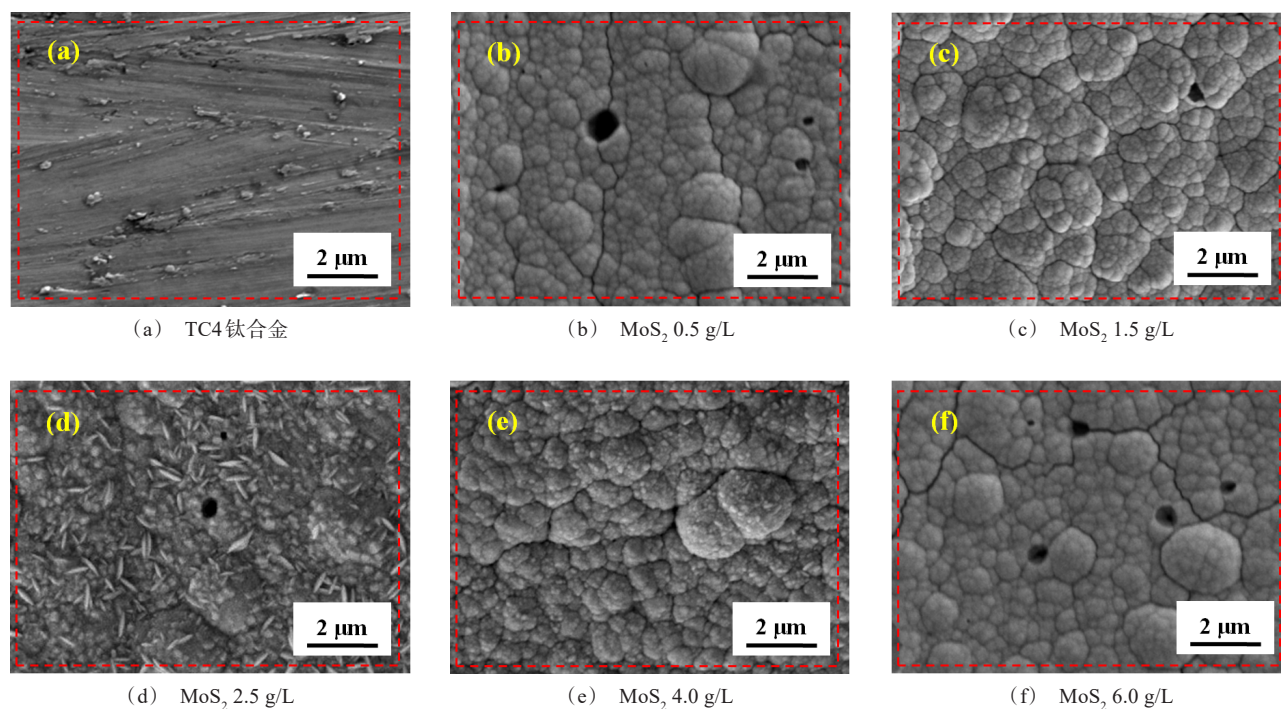


图1 不同Co-W/MoS₂复合镀层的XRD谱

Fig.1 XRD patterns of different Co-W/MoS₂ composite coatings

2.2 Co-W/MoS₂复合镀层的微观形貌及MoS₂颗粒质量分数

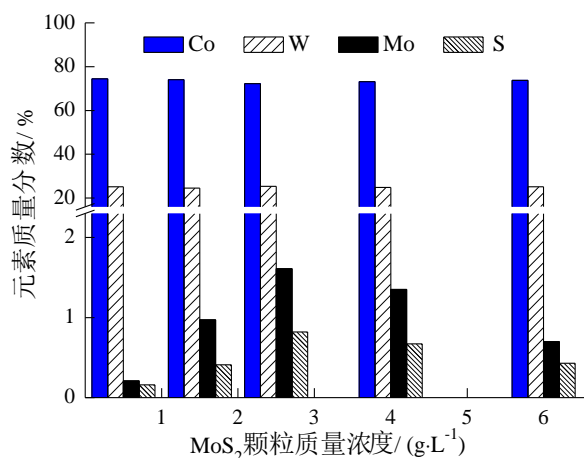
图2所示为TC4钛合金和不同Co-W/MoS₂复合镀层的微观形貌。观察发现,当镀液中MoS₂颗粒浓度为0.5~6.0 g/L时,电沉积制备的不同Co-W/MoS₂复合镀层都完全覆盖钛合金表面,无漏镀区域,且不同复合镀层表面都存在近似圆形的孔洞,孔洞是在电沉积过程中发生析氢副反应形成,不可避免。然而,晶粒形态和复合镀层表面致密度有所不同,随着镀液中的MoS₂颗粒浓度从0.5 g/L增加到2.5 g/L,晶粒由团簇胞状变成长条状与团簇胞状共存,复合镀层表面变得致密。当MoS₂颗粒的质量浓度为2.5 g/L时,可能是MoS₂颗粒参与共沉积掺杂在Co晶格间隙引起晶格畸变,导致结晶位错塞积使得晶粒形态发生变化。另外,MoS₂颗粒被Co-W镀层包覆还会影响结晶形核过程,可能趋向于瞬时成核,也有利于改善复合镀层致密度。长条状晶粒分布在胞状晶粒表面,形成较平整致密的复合镀层。但MoS₂颗粒质量浓度超过2.5 g/L时,晶粒都呈团簇胞状,复合镀层表面结晶缺陷增多,致密度降低。这是由于颗

图2 TC4钛合金和不同Co-W/MoS₂复合镀层的微观形貌Fig.2 Microstructure of TC4 titanium alloy and different Co-W/MoS₂ composite coatings

粒浓度过高时团聚效应加剧,导致参与共沉积被Co-W镀层包覆以及掺杂在Co晶格间隙的颗粒很少,难以引起晶格畸变,起到的晶粒细化作用有限。另外,若团聚态颗粒被Co-W镀层包覆,可能阻碍结晶形核过程,形成结晶缺陷的几率升高,导致复合镀层致密度降低。

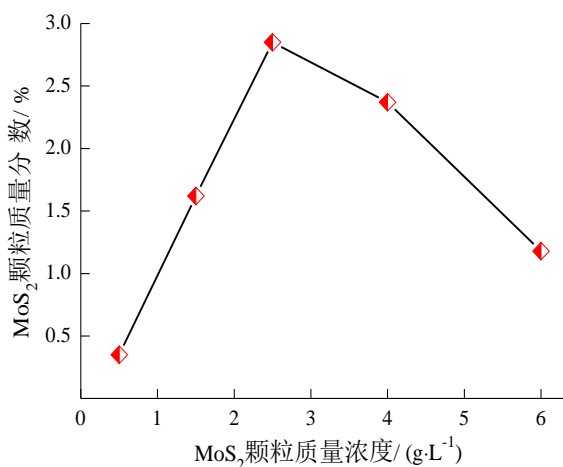
图3所示为不同Co-W/MoS₂复合镀层选区(图2中各小图虚线框区域)能谱分析结果。由图3可知,不同复合镀层都含有Co、W、Mo和S四种元素,其中Co和W元素来源于镀液中的钴盐和钨酸盐,Mo和S元素来源于添加到镀液中的MoS₂颗粒。随着镀液中的MoS₂颗粒浓度增加,Mo和S元素质量分数都呈先升高后降低的趋势,这表明参与共沉积被Co-W镀层包覆的MoS₂颗粒先增多后减少。根据Mo元素质量分数以及相对分子量关系估算出复合镀层中MoS₂颗粒质量分数如图4所示,由图4可知,当MoS₂颗粒质量浓度为2.5 g/L时,复合镀层中MoS₂颗粒质量分数最高,接近3%。但当MoS₂颗粒质量浓度超过2.5 g/L,复合镀层中MoS₂颗粒质量分数逐渐降低,印证了上述分析结果。由于MoS₂颗粒质量浓度过高时碰撞团聚效应加剧,导致参与共沉

积被Co-W镀层包覆的几率降低,进入镀层中的颗粒减少。

图3 不同Co-W/MoS₂复合镀层选区能谱分析结果Fig.3 Energy spectrum analysis results of selected area of different Co-W/MoS₂ composite coatings

2.3 Co-W/MoS₂复合镀层的结合强度

图5所示为不同Co-W/MoS₂复合镀层表面划痕区域。观察发现,划痕边缘毛刺很少,横纵向垂直交错的平行线围成较规整的网格形区域。被分割的镀

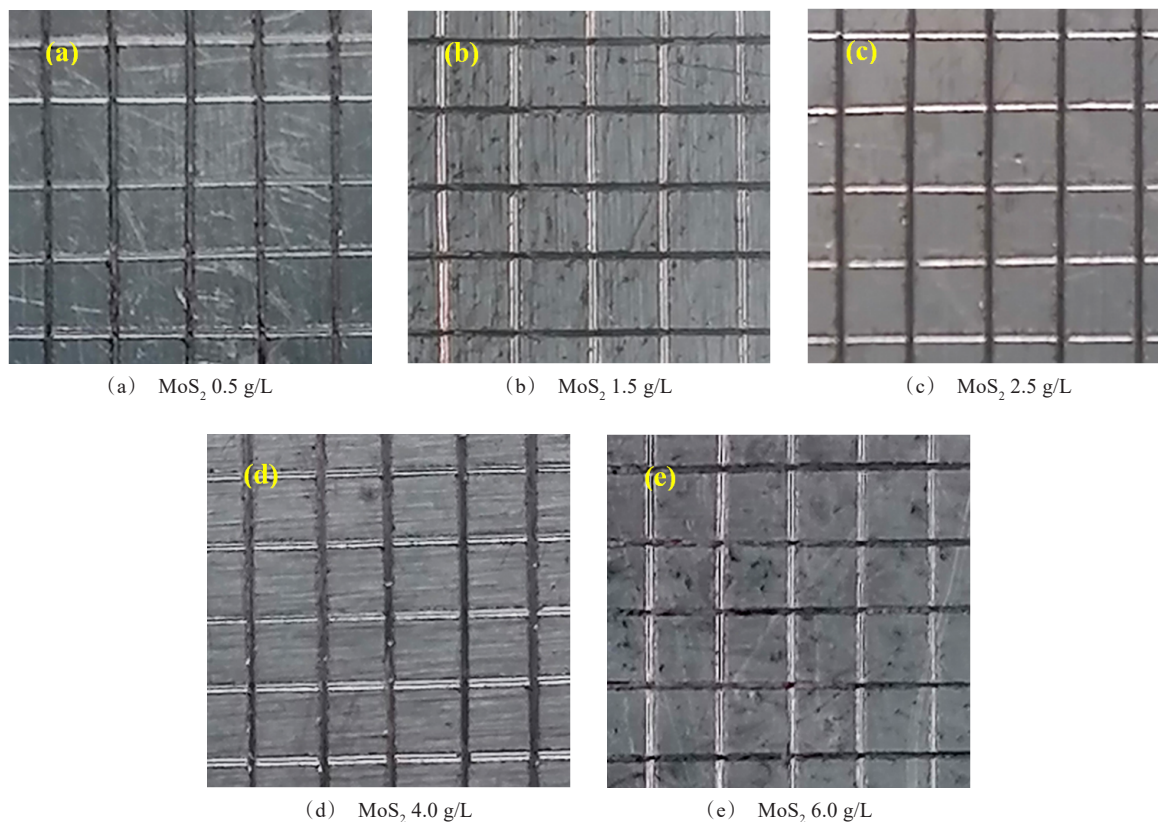
图 4 不同 Co-W/MoS₂ 复合镀层中 MoS₂ 颗粒质量分数Fig.4 Mass fraction of MoS₂ particles in different Co-W/MoS₂ composite coatings

层未出现翘起和脱落现象,表明不同 Co-W/MoS₂ 复合镀层都与钛合金基体结合紧密。较高的结合强度可以保证复合镀层充分发挥减摩作用。

2.4 Co-W/MoS₂ 复合镀层的摩擦磨损性能

2.4.1 摩擦系数分析

图 6 所示为 TC4 钛合金和不同 Co-W/MoS₂ 复合镀层的摩擦系数变化曲线。观察发现,随着摩擦时间延长,钛合金和不同复合镀层的摩擦系数都呈现波动性增大然后趋于稳定的趋势。这是由于摩擦开始阶段的阻力较小,随着摩擦时间延长磨屑逐渐增多,起到一定的阻碍作用导致摩擦系数增大。但当摩擦副达到稳定接触状态,摩擦系数随之趋于稳定。钛合金的稳定摩擦系数约为 0.6,而不同复合镀层的稳定摩擦系数明显减小,且随着复合镀层中 MoS₂ 颗粒含量不同呈现先减小后增大的趋势。当镀液中的 MoS₂ 颗粒浓度为 2.5 g/L,复合镀层中 MoS₂ 颗粒含量最高,对应最低的稳定摩擦系数,仅为 0.34。摩擦过程中,在挤压作用下使得包覆在复合镀层中的 MoS₂ 颗粒参与磨屑转移到摩擦副接触面,并在机械剪切力作用下发生分层断裂^[13-14],分散在接触面形成固体润滑膜,可以起到减摩作用,从而降低复合镀层的摩擦系数。复合镀层中 MoS₂ 颗粒

图 5 不同 Co-W/MoS₂ 复合镀层表面划痕区域Fig.5 Surface scratch area of different Co-W/MoS₂ composite coatings

含量越高,在摩擦过程中发生转移和分层断裂的颗粒自然越多,促使摩擦副接触面形成较大面积固体润滑膜,起到有效的减摩作用^[15-17],从而使摩擦系数减小。另外,复合镀层中 MoS_2 颗粒含量升高还会引起晶格畸变导致晶粒形态变化,形成较平整致密的复合镀层,抵抗塑性变形能力增强,也使得摩擦系数减小。但复合镀层中 MoS_2 颗粒含量较低时,摩擦过程中在挤压和机械剪切力作用下发生分层断裂并转移到摩擦副接触面的颗粒很少,起到的自润滑减摩作用有限。另外, MoS_2 颗粒含量较低时形成的复合镀层结晶缺陷多、致密度不佳,抵抗局部塑性变形能力较差,共同导致摩擦系数增大。

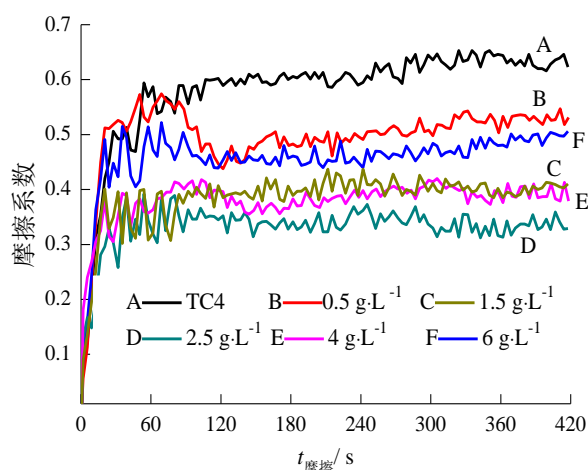


图6 TC4钛合金和不同Co-W/ MoS_2 复合镀层的摩擦系数变化曲线

Fig.6 Friction coefficient variation curves of TC4 titanium alloy and different Co-W/ MoS_2 composite coatings

2.4.2 磨痕形貌分析

图7所示为TC4钛合金和不同Co-W/ MoS_2 复合镀层的磨痕形貌。从图7(a)看出,钛合金表面形成

的磨痕最宽,可观察到犁沟和局部剥落等磨损特征,边缘伴有磨屑堆积。这表明钛合金表面磨损程度较严重,原因是钛合金黏性大、耐磨性能较差^[18-21],在摩擦过程中容易发生黏着磨损和磨粒磨损,同时在挤压和犁削作用下形成犁沟,并伴随着局部剥落现象。从图7(b)~图7(f)看出,随着镀液中的 MoS_2 颗粒浓度从0.5 g/L增加到6.0 g/L,复合镀层表面形成的磨痕宽度先减小后增加,这与复合镀层中 MoS_2 颗粒含量不同以及颗粒在摩擦过程中起到的自润滑减摩作用存在差异有关。结合上述分析,包覆在复合镀层中的 MoS_2 颗粒在挤压和机械剪切力作用下发生分层断裂并转移到摩擦副接触面,形成固体润滑膜起到自润滑减摩作用,从而减轻复合镀层的磨损程度。复合镀层中 MoS_2 颗粒含量越高,在摩擦过程中可以起到有效的自润滑减摩作用,因此复合镀层表面磨损程度较轻,表现为磨痕宽度减小。但复合镀层中 MoS_2 颗粒含量较低时,摩擦过程中只有少量颗粒发生分层断裂并转移到摩擦副接触面,自润滑减摩作用有限,导致复合镀层的磨损程度加重,磨痕宽度增加。

2.4.3 磨损率分析

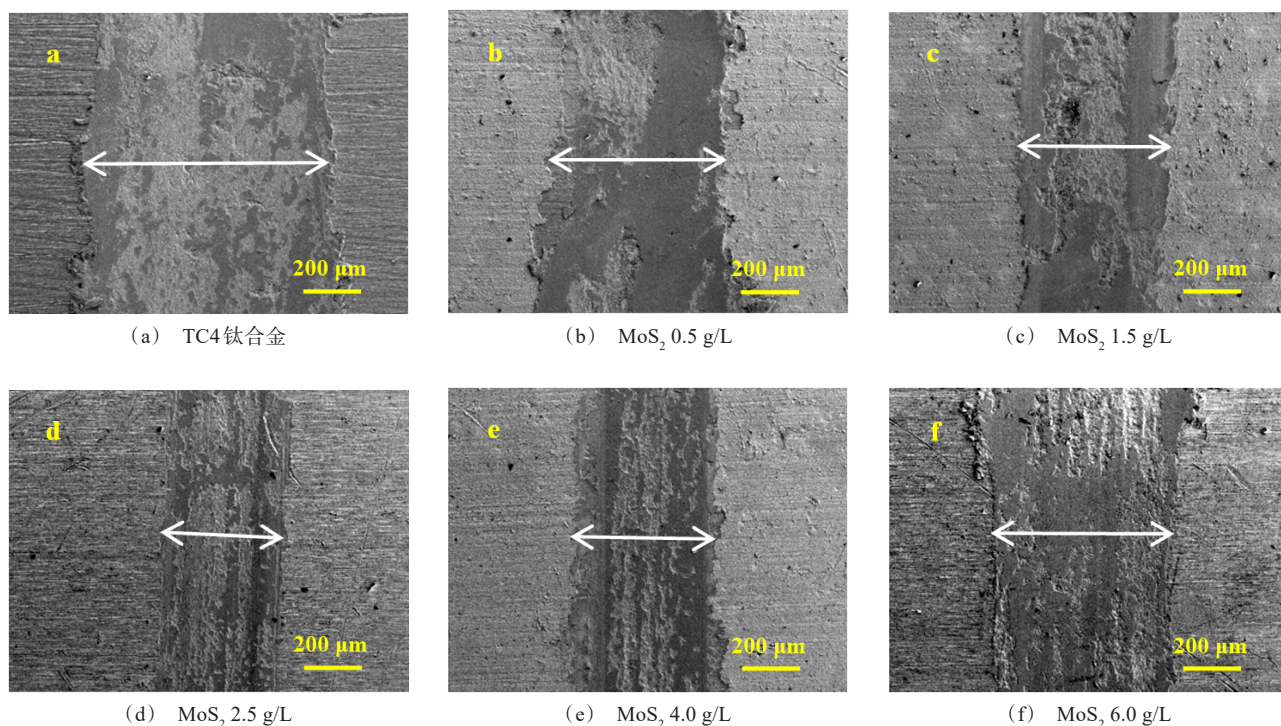
为进一步评价不同Co-W/ MoS_2 复合镀层的摩擦磨损性能,对磨损率进行分析。表2列出TC4钛合金和不同Co-W/ MoS_2 复合镀层的磨痕特征参数。

根据磨痕特征参数得到钛合金的磨损率最高,达到了 $2.32 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{N}$,而不同复合镀层的磨损率明显降低,尤其当镀液中 MoS_2 的颗粒浓度为2.5 g/L时,复合镀层的磨损率最低,仅为 $9.50 \times 10^{-4} \text{ mm}^2/\text{N}$,是钛合金磨损率的1/20左右,这进一步证实该复合镀层的耐磨性能最好。但是,当 MoS_2 颗粒浓度超过2.5 g/L时,复合镀层的磨损率反而增加,相应的从

表2 TC4钛合金和不同Co-W/ MoS_2 复合镀层的磨痕特征参数

Tab.2 Wear characteristic parameters of TC4 titanium alloy and different Co-W/ MoS_2 composite coatings

不同试样			磨痕宽度/ μm	磨痕长度/mm	磨痕面积/ mm^2	磨损率/ $(\text{mm}^2 \cdot \text{N}^{-1})$
TC4钛合金			830	6	2.32×10^{-2}	2.32×10^{-3}
Co-W-P/ MoS_2 复合镀层	镀层中 MoS_2 颗粒质量浓度/ $(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	0.5	650	6	1.48×10^{-2}	1.48×10^{-3}
		1.5	520	6	1.16×10^{-2}	1.16×10^{-3}
		2.5	430	6	9.50×10^{-3}	9.50×10^{-4}
		4.0	510	6	1.02×10^{-2}	1.02×10^{-3}
		6.0	620	6	1.30×10^{-2}	1.30×10^{-3}

图7 TC4钛合金和不同的Co-W/MoS₂复合镀层的磨痕形貌Fig.7 Wear crack morphology of TC4 titanium alloy and different Co-W/MoS₂ composite coatings

$9.50 \times 10^{-4} \text{ mm}^2/\text{N}$ 增加到 $1.30 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{N}$, 表明复合镀层的磨损程度加重, 与上述分析结果一致。

3 结论

(1) 采用电沉积工艺在TC4钛合金表面制备出掺杂自润滑MoS₂颗粒的Co-W/MoS₂复合镀层, 镀液中的MoS₂颗粒质量浓度对复合镀层的物相结构、微观形貌、成分及摩擦磨损性能都有一定影响, 但是对复合镀层与钛合金基体的结合强度基本无影响。MoS₂颗粒被Co-W镀层包覆可能影响结晶形核过程, 使复合镀层趋向于瞬时成核, 还会掺杂在Co晶格间隙引起晶格畸变, 有利于形成较平整致密的复合镀层, 从而改善摩擦磨损性能。另外, 包覆在复合镀层中的MoS₂颗粒在摩擦过程中容易分层断裂并转移到摩擦副接触面, 形成固体润滑膜起到减摩作用, 也使复合镀层的抗磨损能力提高。

(2) 添加2.5 g/L MoS₂颗粒制备的复合镀层晶粒形态明显不同, 长条状与团簇胞状晶粒共存, 主要物相为fcc-Co、hcp-Co和Co₃W。该复合镀层较平整致密, 所含MoS₂颗粒质量分数接近3%, 抵抗塑性变形能力增强, 稳定状态时摩擦系数仅为0.34, 磨损率仅

为 $9.50 \times 10^{-4} \text{ mm}^2/\text{N}$, 表现出优异的耐磨性能, 能有效改善TC4钛合金的摩擦磨损性能。

参考文献

- [1] 张冬冬, 史昆玉, 汤皓晨. TC4钛合金表面沉积TiCN涂层及其耐磨耐腐蚀性能研究[J]. 表面技术, 2020, 49(6): 297-304.
- [2] 李小妮, 罗志峰. 阳极氧化对TC4钛合金力学与耐磨性能的影响[J]. 电镀与涂饰, 2020, 39(7): 416-420.
- [3] Ren Z J, Lai F Q, Qu S G, et al. Effect of ultrasonic surface rolling on surface layer properties and fretting wear properties of titanium alloy Ti₃Al₄Mo₆V₂Nb1Fe[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 389: 125612.
- [4] 张玉林, 庞雅洁, 海潮, 等. 钛合金表面微弧氧化涂层在模拟海洋环境下摩擦腐蚀规律研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(6): 42-50.
- [5] Yang Y F, Wen Z H, Li Q G. Electrodeposition of Ni-Co alloy films onto titanium substrate[J]. Rare Metals, 2014, 33(4): 442-447.
- [6] 杨闯, 彭晓东, 刘静, 等. TC4钛合金低压真空氮化改性层的制备与性能[J]. 材料工程, 2015, 43(3): 78-82.
- [7] Feng J, Wang J, Yang K L, et al. Microstructure and performance of YTaO₄ coating deposited by atmospheric

- plasma spraying on TC4 titanium alloy surface[J]. Surface and Coatings Technology, 2022, 431: 128004.
- [8] 王少鹏, 李争显, 杜继红. 钛合金表面等离子喷涂涂层材料的研究进展[J]. 表面技术, 2013, 42(5): 93-97.
- [9] 汪建琦, 刘浩, 李家柱. TC4钛合金表面Ni-SiC复合电沉积[J]. 电镀与涂饰, 2021, 40(11): 834-837.
- [10] 高鑫. 电沉积Ni-cBN复合镀层及其性能研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- [11] 李轩, 李辉, 王凯强, 等. TC4合金表面Ni-SiC-Y₂O₃复合镀层的摩擦磨损性能[J]. 中国表面工程, 2018, 31(2): 94-102.
- [12] 沈志超, 谢发勤, 吴向清, 等. TC4钛合金铜镀层的性能[J]. 中国表面工程, 2012, 25(5): 45-49.
- [13] 西振宇. MoS₂基复合材料结构及其性能的研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2020.
- [14] 马浩, 杨瑞霞, 李春静. 层状二硫化钼材料的制备和应用进展[J]. 材料导报, 2017, 31(3): 7-14.
- [15] 李秀兵, 高义民, 邢建东, 等. 树脂基复合材料中石墨与MoS₂的减摩作用机理[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(5): 452-456.
- [16] Wang Y X, Du Y Y, Deng J N, et al. Friction reduction of water based lubricant with highly dispersed functional MoS₂ nanosheets[J]. Colloids and Surfaces A: Physico-chemical and Engineering Aspects, 2019, 562: 321-328.
- [17] 黄敦新, 白越, 黎海文, 等. 溅射二硫化钼膜在不同润滑条件下的摩擦学性能分析[J]. 润滑与密封, 2010, 35(10): 18-21.
- [18] 赵林. 钛合金Ti-6Al-4V混粉电火花加工与表面改性研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2017.
- [19] 常小龙. TC4钛合金工件超声振动电火花复合加工试验研究[D]. 太原: 中北大学, 2016.
- [20] 高天悦. 体育器械用TC4钛合金的力学与耐磨性能研究[J]. 合成材料老化与应用, 2021(2): 112-114.
- [21] 孙静, 齐元甲, 刘辉, 等. 海洋环境下钛及钛合金的腐蚀磨损研究进展[J]. 材料保护, 2020, 53(1): 151-156.