

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2024.11.009

钛合金脉冲电沉积 Cu-WC 复合镀层的硬度与摩擦磨损性能

封旭佳¹, 孙浩^{1*}, 高晨静², 朱庆芹¹

(1. 沧州交通学院 机械与动力工程学院, 河北 沧州 061199; 2. 沧州交通学院 化学与制药工程学院, 河北 沧州 061199)

摘要: 为有效提高钛合金的抗摩擦磨损性能, 在钛合金表面脉冲电沉积 Cu-WC 复合镀层。分别研究了平均电流密度、脉冲占空比对复合镀层的微观形貌、WC 颗粒含量、硬度以及摩擦磨损性能的影响。结果表明: 当平均电流密度为 1.5 A/dm²、脉冲占空比为 20% 时, 电沉积的 Cu-WC 复合镀层致密性最好, WC 颗粒含量接近 2.4%, 其硬度 (240.4 HV) 约为纯 Cu 镀层的 2 倍, 还表现出良好的抗摩擦磨损性能, 平均摩擦系数较钛合金降低约 38%。适当增大平均电流密度 (0.5~1.5 A/dm²) 或提高脉冲占空比 (10~20%) 能使较多 WC 颗粒参与电沉积过程, 起到明显细化晶粒作用和弥散强化作用, 促进形成结构致密的 Cu-WC 复合镀层, 因而具有较高硬度和良好的抗摩擦磨损性能。

关键词: Cu-WC 复合镀层; 钛合金; 脉冲电沉积; 硬度; 摩擦磨损性能

中图分类号: TQ153

文献标识码: A

Hardness and friction and wear property of Cu-WC composite coating on titanium alloy prepared by pulse electrodeposition

Feng Xujia¹, Sun Hao^{1*}, Gao Chenjing², Zhu Qingqin¹

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Cangzhou Jiaotong College, Cangzhou 061199, China; 2. School of Chemical and Pharmaceutical Engineering, Cangzhou Jiaotong College, Cangzhou 061199, China)

Abstract: Cu-WC composite coating was prepared on titanium alloy by pulse electrodeposition in order to effectively improve the friction and wear property of titanium alloy, and the effect of average current density or pulse duty cycle on the microstructure, content of WC particles, hardness and friction and wear property of the composite coating was investigated respectively. The results show that the Cu-WC composite coating electrodeposited under the condition of average current density 1.5 A/dm² and pulse duty cycle 20% has compact structure with the content of WC particles close to 2.4%, and the hardness reaches 240.4 HV, which is twice the hardness of pure Cu coating. Moreover, the Cu-WC composite coating possesses good friction and wear property, and the average friction coefficient is about 38% lower than that of pure Cu coating. Appropriately increasing the average current density (0.5 – 1.5 A/dm²) or the pulse duty cycle (10–20%) can urge more WC particles participate in the electrodeposition process, which plays a significant role in refining grains and strengthening dispersion, and promote the formation of dense Cu-WC composite coating that shows high hardness and good friction

收稿日期: 2024-04-18

修回日期: 2024-06-25

作者简介: 封旭佳 (1992—), 硕士, 讲师, 主要研究方向: 纳米材料制备、材料表面改性, email: Feng_tech1992@126.com

*通信作者: 孙浩 (1989—), 硕士, 讲师, 主要研究方向: 先进材料成形、表面工程, email: Edu_061199tech@126.com

基金项目: 河北省教育厅河北省高等学校科学技术研究项目 (ZC2023077); 沧州市科技计划项目 (222107010); 沧州交通学院科研基金资助项目 (CJ202301003)

and wear resistance.

Keywords: Cu-WC composite coating; titanium alloy; pulse electrodeposition; hardness; friction and wear property

钛合金存在黏性强、导热性能和抗摩擦磨损性能较差等缺陷,限制了应用广度^[1-3]。当钛合金用于制造滑动式轴类零件或带有螺纹的连接件,表面容易发生划伤、黏着等现象,导致零件可靠性很难满足使用要求。为了弥补钛合金固有的缺陷以保证在使用阶段的可靠性,需对钛合金进行表面处理。目前,电沉积、激光熔覆、等离子喷涂、阳极氧化、微弧氧化等技术已经被证实都适用于钛合金表面处理^[4-10],通过增材原理在钛合金表面形成一层功能性涂层达到有效改善其抗摩擦磨损性能的效果。

相比较而言,电沉积技术的成本低、可靠性好而且简单高效,在钛合金表面处理中具有优越性。沈志超等^[11]采用电沉积技术在钛合金表面制备Cu镀层,发现利用Cu镀层良好的导热性能可以减小摩擦阻力,有效提高钛合金抗摩擦磨损性能。然而,Cu镀层的硬度较低,容易发生局部塑性变形限制其减摩效果。为了提高Cu镀层的硬度同时保持良好导热性能,梁银^[12]对Cu镀层进行热处理,发现通过热处理使Cu镀层的硬度明显增大,抗摩擦磨损性能进一步提高。但由于热处理过程能耗高,并且容易造成镀层开裂,因而并非提高Cu镀层抗摩擦磨损性能的理想途径。通过电沉积将硬质颗粒掺入Cu镀层中,有望提高Cu镀层的硬度并使其保持良好的导热性能。对电沉积过程而言,为了保证较多硬质颗粒参与电沉积过程从而起到明显的细化晶粒作用和弥散强化作用,需要对电沉积工艺参数进行优化。笔者选用成本低、硬度高且热稳定性好的WC颗粒作为复合相,在钛合金表面脉冲电沉积Cu-WC复合镀层。平均电流密度和脉冲占空比是脉冲电沉积工艺的重要参数,对复合镀层中颗粒含量、颗粒分布状况以及复合镀层的结构与性能具有较大影响,因而受到关注。本文通过研究平均电流密度、脉冲占空比对Cu-WC复合镀层的影响,以期获得具有较高硬度和良好抗摩擦磨损性能的Cu-WC复合镀层,能够有效提高钛合金的抗摩擦磨损性能。

1 实验

1.1 Cu-WC复合镀层制备

1.1.1 基体预处理

40 mm×25 mm×3 mm的钛合金试片(TC4型号)作为基体,预处理流程如下:用1000#、2000#砂纸逐级打磨→除屑(无水乙醇,常温浸泡3 min)→水洗→除油(丙酮,常温浸泡10 min)→酸洗(体积分数15%的氢氟酸与体积分数30%的硝酸混合溶液,常温浸泡40 s)→碱洗(质量浓度50 g/L的氢氧化钠溶液,60℃浸泡1 min)→水洗→活化(体积分数40%的氢氟酸与质量浓度250 g/L的铬酸钠混合溶液,50℃浸泡10 min)→水洗→吹干。

1.1.2 镀液配制

依次称取55 g焦磷酸铜、200 g焦磷酸钾、90 g柠檬酸氢二铵、30 g硼酸,加到40℃的去离子水中,每种试剂添加过程中都不间断搅拌直至完全溶解。然后添加8 g WC颗粒(粒径为1 μm~2 μm,纯度高于99.9%),通过超声波振荡使WC颗粒呈良好分散状态。最后补加去离子水定容到1000 mL,完成镀液配制。

1.1.3 脉冲电沉积

采用单脉冲电源,正极通过导线与电解铜板(阳极)相连,负极通过导线与钛合金试片(阴极)相连。阳极与阴极的间距为3 cm,镀液温度调控在40±1℃。设定平均电流密度分别为0.5 A/dm²、1.0 A/dm²、1.5 A/dm²、2.0 A/dm²、3.0 A/dm²,脉冲占空比分别为10%、20%、40%、60%、80%。仅改变平均电流密度或脉冲占空比情况下进行两组脉冲电沉积实验,每组实验都制备5个Cu-WC复合镀层试样。

1.2 Cu-WC复合镀层性能检测

1.2.1 微观形貌、成分和物相

采用MERLIN Compact型扫描电镜设置自动聚焦模式观察Cu-WC复合镀层的微观形貌,并用扫描电镜配备的Xplore型能谱仪获取Cu-WC复合镀层的EDS图谱,图谱上只显示与复合镀层成分相关的元素特征峰。根据W元素与WC化合物的相对分

子质量关系,可以推算出复合镀层中WC颗粒含量,参见公式(1)。采用D8 Advance型X射线衍射仪获取Cu-WC复合镀层的XRD图谱,扫描进一步分析复合镀层的物相。衍射角度为 $25^{\circ}\sim 90^{\circ}$,扫描速度为 $4^{\circ}/\text{min}$ 。

$$w_{\text{WC}} = \frac{195.84}{183.84} w_{\text{W}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: w_{WC} 、 w_{W} 分别表示WC颗粒含量和W元素的质量(通过对复合镀层进行面扫描获得)。

1.2.2 硬度

采用THVS-50型维氏硬度计检测Cu-WC复合镀层的硬度,设定条件为:施加垂直于复合镀层表面的载荷 0.49 N 、保持 15 s 后卸载。每个试样选择性测5个点,取检测结果的平均值并计算误差棒。

1.2.3 摩擦磨损性能

采用DSR-II型直线往复摩擦试验机检测Cu-WC复合镀层在室温、无润滑条件下的摩擦磨损性能。选用直径 4 mm 的陶瓷球作为对磨件,在恒定法向载荷(3 N)作用下挤压复合镀层,并以恒定频率(5 Hz)沿着直线往复滑动。电脑端自动控制摩擦实验过程,获取动态摩擦系数。实验结束后,采用扫描电镜观察复合镀层表面磨痕形貌。

2 结果与讨论

2.1 Cu-WC复合镀层的微观形貌

2.1.1 平均电流密度的影响

WC的颗粒微观形貌如图1(a)所示,钛合金的微观形貌如图1(b)所示,纯Cu镀层的微观形貌如图1(c)所示。固定脉冲占空比为 20% ,仅改变平均电流密度电沉积的不同Cu-WC复合镀层微观形貌如图1(d)~1(h)所示。可知纯Cu镀层和不同Cu-WC复合镀层都完全覆盖钛合金基体。从图1(c)看出,纯Cu镀层的晶粒呈块状,边角圆滑但大小不均匀,较小晶粒尺寸为亚微米级,而大晶粒的尺寸接近 $2\text{ }\mu\text{m}$ 。从图1(d)看出,当平均电流密度为 $0.5\text{ A}/\text{dm}^2$,复合镀层的晶粒呈瘤状,但与纯Cu镀层相比未明显细化。另外不难看出,通过共沉积进入复合镀层中的WC颗粒量少。虽然WC颗粒与Cu镀层发生共沉积可能引起形核增殖,导致晶粒形态发生变化,但少量WC颗粒难以有效提高形核率进而起到细化晶粒的作用。从图1(d)~1(f)看出,随着平均电流密度逐渐增大到 $1.5\text{ A}/\text{dm}^2$,复合镀层的晶

粒明显细化并且大小趋于均匀,致密性明显好于纯Cu镀层。另外,通过共沉积进入复合镀层中的WC颗粒增多并且呈分散状态,复合镀层表面平整度和致密性逐步改善。研究表明^[13],平均电流密度(J_{m})与峰值电流密度(J_{p})和脉冲占空比(γ)存在一定关系,即 $J_{\text{m}} = J_{\text{p}} \cdot \gamma$ 。脉冲占空比不变的情况下,平均电流密度越大则峰值电流密度越大。而峰值电流密度增大能提高阴极过电位,使新晶核加速形成并提高形核密度,有利于形成致密结构镀层。

适当增大平均电流密度($0.5\text{ A}/\text{dm}^2 \sim 1.5\text{ A}/\text{dm}^2$),阴极过电位随之提高使新晶核加速形成,而已经形成的晶核因被挤压其生长过程受阻。加之较多WC颗粒进入复合镀层中,呈分散状态的WC颗粒能提供一些新的形核质点,使形核密度提高,并且凭借高硬度的特性抑制已经形成的晶核生长,最终实现晶粒细化并且晶粒大小趋于均匀。因此,复合镀层表面平整度和致密性逐步改善。但当平均电流密度超过 $1.5\text{ A}/\text{dm}^2$,复合镀层的晶粒粗化且大小不均匀,通过共沉积进入复合镀层中的WC颗粒减少,如图1(g)和1(h)所示。这是由于平均电流密度超过限度导致过大的峰值电流密度, Cu^{2+} 在阴极发生还原反应速度很快,镀液本体中 Cu^{2+} 很难及时输送到阴极附近供给还原反应,造成严重程度浓差极化,致使新晶核形成变慢并且形核密度降低。而已经形成的晶核得以自由生长,变得粗大且大小不均匀。加之进入复合镀层中的WC颗粒减少,对结晶形核及晶核生长过程的影响作用减弱,导致复合镀层表面变得粗糙,致密性变差。通过微观形貌分析得知,电沉积Cu-WC复合镀层最佳平均电流密度为 $1.5\text{ A}/\text{dm}^2$ 。

2.1.2 脉冲占空比的影响

固定平均电流密度为 $1.5\text{ A}/\text{dm}^2$,仅改变脉冲占空比电沉积的不同Cu-WC复合镀层微观形貌如图2所示。从图2(a)和2(b)看出,当脉冲占空比不超过 20% ,复合镀层的晶粒细小且大小趋于均匀,表面平整度和致密性较好。由于低占空比创造较长电沉积中断时间^[14],阴极附近因还原反应消耗的 Cu^{2+} 和WC颗粒得以及时补充,扩散层减薄从而降低浓差极化程度,新晶核持续较快的形成并且形核密度高。加之较多WC颗粒参与共沉积过程,在复合镀层形成过程中起到明显的提高形核密度、促进新晶核加速形成并抑制已经形成的晶核生长等作用,从而实现细化晶粒效果。因此,复合镀层具有较好的

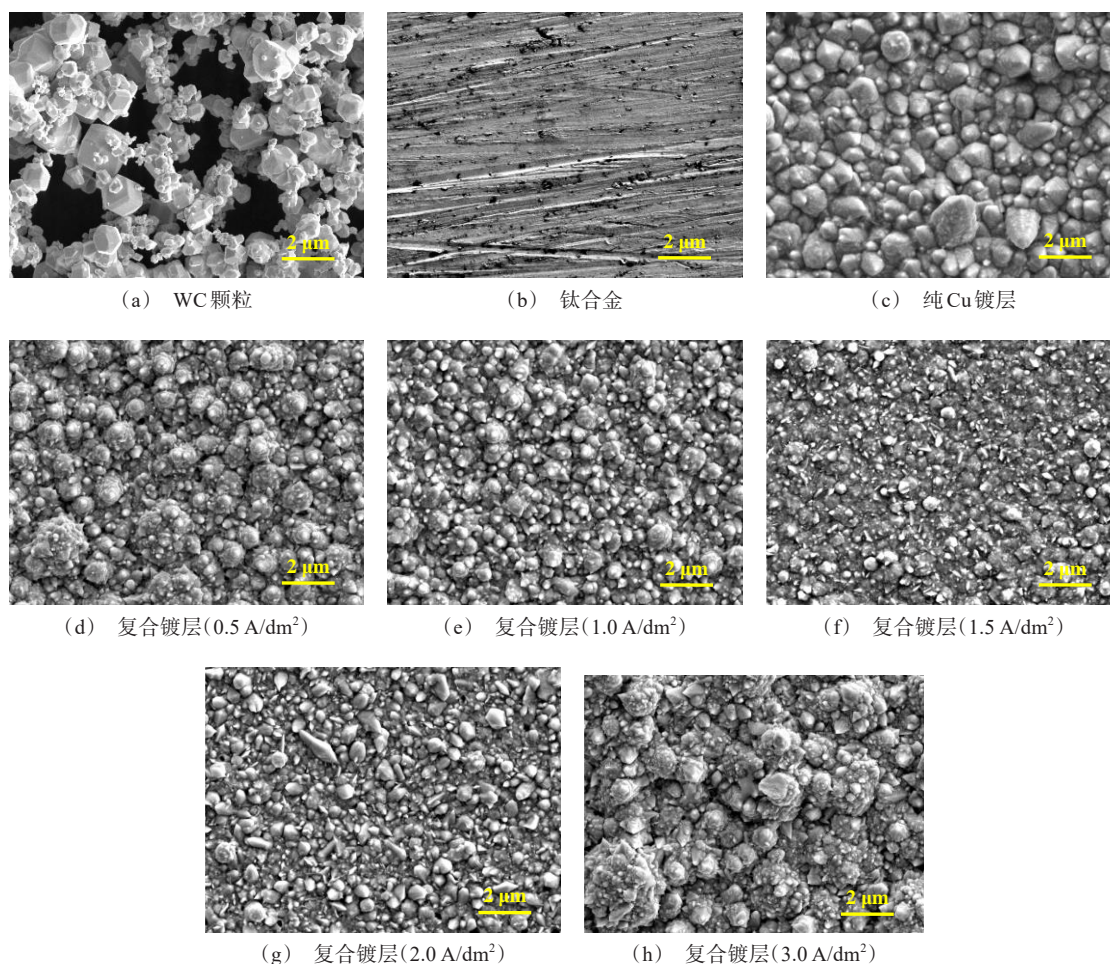


图1 WC颗粒、钛合金、纯Cu镀层以及不同平均电流密度下电沉积的Cu-WC复合镀层的微观形貌

Fig.1 Microstructure of WC particles, titanium alloy, pure Cu coating and different Cu-WC composite coatings electrodeposited by changing average current density

表面平整度和致密性。

从图2(c)、2(d)和2(e)看出,当脉冲占空比超过20%情况下电沉积的复合镀层晶粒粗化且大小不均匀,致密性变差。另外,通过共沉积进入复合镀层中的WC颗粒呈减少趋势。由于脉冲占空比越大意味着电沉积过程导通时间越长,而中断时间缩短,有限的中断期内阴极附近消耗的 Cu^{2+} 和WC颗粒难以及时补充,造成严重程度浓差极化,致使新晶核形成速度变慢,而已经形成的晶核得以自由生长变得粗大且大小不均匀。加之只有少量WC颗粒参与共沉积过程,对结晶形核及晶核生长过程的影响作用减弱,因而复合镀层的致密性变差。通过微观形貌分析得知,电沉积Cu-WC复合镀层最佳的脉冲占空比为20%。

2.2 Cu-WC复合镀层的物相和成分

在最佳条件(平均电流密度为 1.5 A/dm^2 、脉冲占空比为20%)下电沉积的Cu-WC复合镀层的XRD图谱如图3所示。图3显示Cu相和WC相的衍射峰,相比之下,WC相的衍射峰强度较弱,但可以证实镀液中的WC颗粒在电场牵引作用下吸附在基体表面并被逐渐沉积的Cu镀层包覆,从而形成Cu-WC复合镀层。

在最佳条件下(平均电流密度为 1.5 A/dm^2 、脉冲占空比为20%)电沉积的Cu-WC复合镀层的EDS图谱如图4所示。图4显示C、Cu和W三种元素的特征峰,由于W元素只来源于WC颗粒,进一步证实WC颗粒被逐渐沉积的Cu镀层包覆从而形成Cu-WC复合镀层。

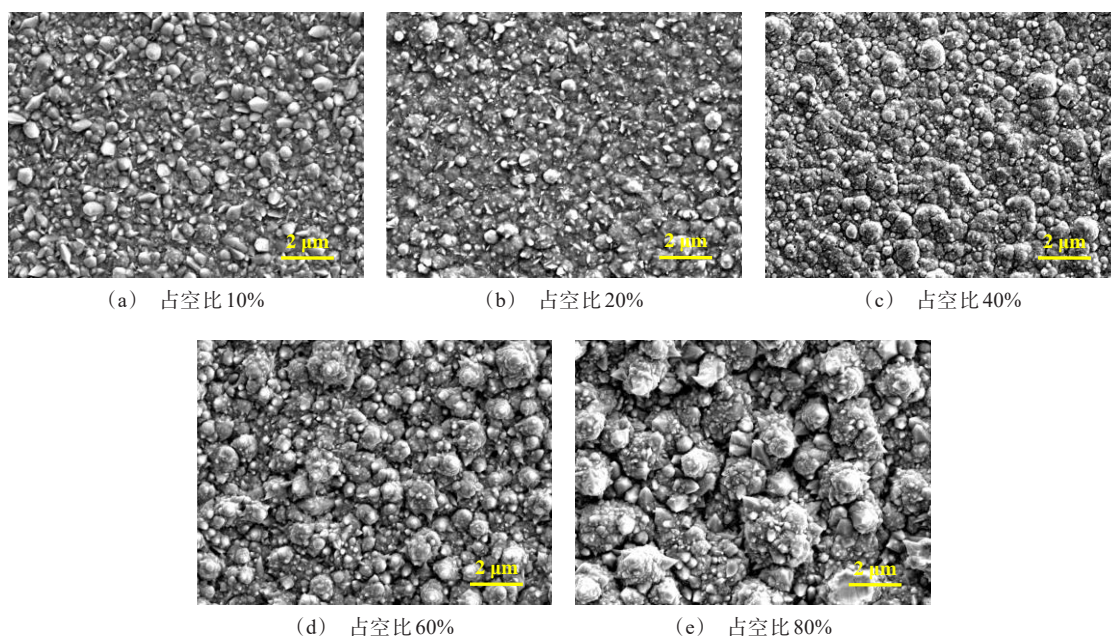


图2 仅改变脉冲占空比电沉积的不同Cu-WC复合镀层微观形貌

Fig.2 Microstructure of different Cu-WC composite coatings electrodeposited by changing pulse duty cycle

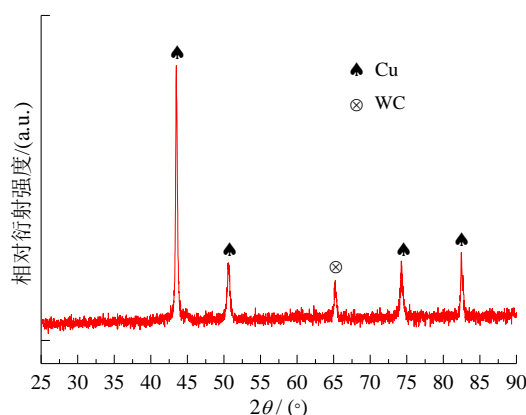


图3 Cu-WC复合镀层的XRD图谱

Fig.3 XRD pattern of Cu-WC composite coating

通过计算得到仅改变平均电流密度下电沉积得到的不同Cu-WC复合镀层中WC颗粒含量如图5所示。由图5可知,复合镀层中WC颗粒含量随着平均电流密度增大呈现先升高后降低趋势。出现该现象的原因是,适当增大平均电流密度使阴极过电位随之提高,电场作用牵引着吸附 Cu^{2+} 的WC颗粒以较快速度向阴极附近输送,伴随着 Cu^{2+} 在阴极还原,逐渐沉积增厚的Cu镀层将越来越多颗粒包覆。因此,复合镀层中WC颗粒含量升高。如图1(f)所示,较多WC颗粒被包覆并且呈较均匀分散状态。但当平均电流密度超过限度,由于过大的峰值电流密度

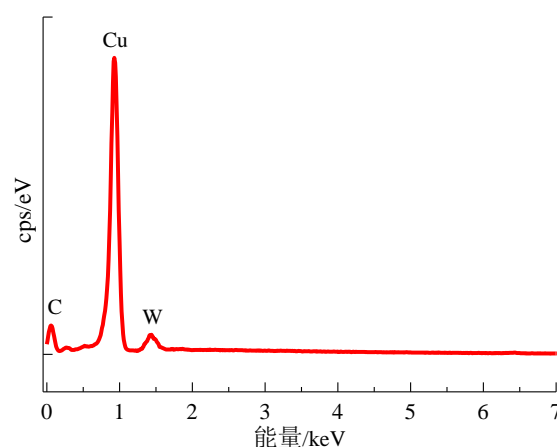


图4 Cu-WC复合镀层的EDS图谱

Fig.4 EDS spectra of Cu-WC composite coating

导致发生较强烈析氢反应,产生的气泡量增多,会干扰WC颗粒在阴极表面吸附及被Cu镀层包覆,可能造成部分已经吸附的颗粒回到镀液中,使复合镀层中WC颗粒含量降低。

不同脉冲占空比下电沉积得到的Cu-WC复合镀层中WC颗粒含量如图6所示。复合镀层中WC颗粒含量随着脉冲占空比升高呈现先趋于稳定然后降低的趋势。研究表明,电沉积过程中充裕的中断时间可以提供足够能量使颗粒在阴极表面牢固吸附^[15],为颗粒被不断沉积的Cu镀层包覆创造良好前

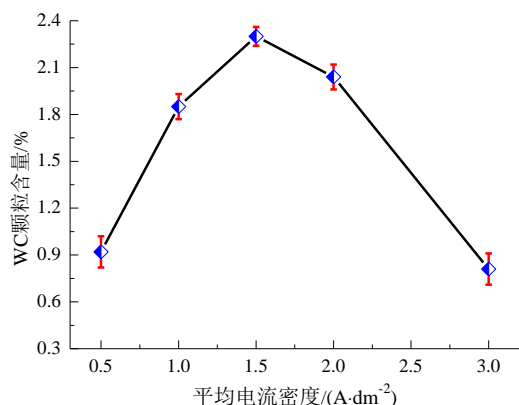


图5 改变平均电流密度电沉积的不同Cu-WC复合镀层中WC颗粒含量

Fig.5 Content of WC particles in different Cu-WC composite coatings electrodeposited by changing average current density

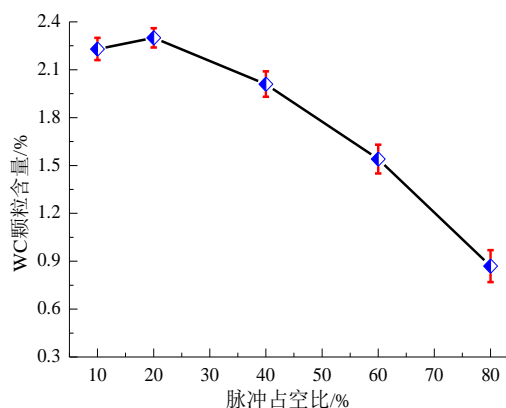


图6 改变脉冲占空比电沉积的不同Cu-WC复合镀层中WC颗粒含量

Fig.6 Content of WC particles in different Cu-WC composite coatings electrodeposited by changing pulse duty cycle

提条件。当脉冲占空比不超过20%,充裕的中断时间使WC颗粒得以牢固吸附在阴极表面。由于电沉积过程导通时间延长使Cu镀层持续沉积,能包覆较多WC颗粒,因而复合镀层中WC颗粒含量相对高。但当脉冲占空比超过20%,可能由于WC颗粒尚未牢固吸附于阴极表面,加之电沉积过程中断时间缩短导致阴极附近消耗的 Cu^{2+} 和WC颗粒难以及时补充,造成严重程度浓差极化。虽然吸附着 Cu^{2+} 的WC颗粒在搅拌镀液产生的扰动作用下仍然能向阴极附近输送,但由于严重浓差极化的情况下会发生较强烈析氢副反应,不断产生的气泡会驱离吸附在阴极表面的WC颗粒,也使复合镀层中WC颗粒含

量降低。

2.3 Cu-WC复合镀层的硬度

2.3.1 平均电流密度的影响

固定脉冲占空比为20%,仅改变平均电流密度电沉积的不同Cu-WC复合镀层硬度如图7所示。由图7可知,随着平均电流密度从0.5 A/dm²逐渐增大到1.5 A/dm²,复合镀层的硬度相对应从142.6 HV升至240.4 HV,明显高于纯Cu镀层的硬度(约120 HV)。由此表明,适当增大平均电流密度能增强复合镀层抵抗塑性变形能力,从而提高其硬度。然而,纯Cu镀层和不同Cu-WC复合镀层的硬度均低于钛合金基体(硬度为300~350 HV)。

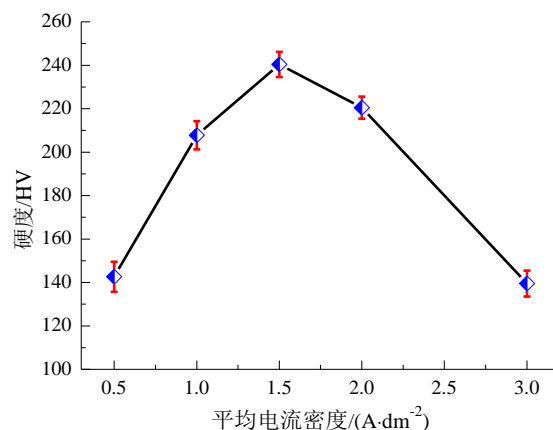


图7 改变平均电流密度电沉积的不同Cu-WC复合镀层硬度

Fig.7 Hardness of different Cu-WC composite coatings electrodeposited by changing average current density

WC颗粒在Cu-WC复合镀层形成过程中能起到细化晶粒改善致密性的作用^[16-18],促进形成致密结构复合镀层。另外,由于WC颗粒本身硬度很高(约2000 HV),被包覆呈分散状态的WC颗粒凭借高硬度特性能有效阻碍晶粒发生位错滑移,进而对复合镀层起到弥散强化作用。适当增大平均电流密度使复合镀层的晶粒细化并且大小趋于均匀,致密性逐步改善。加之复合镀层中WC颗粒含量升高,呈分散状态的颗粒起到明显细化晶粒作用和弥散强化作用,因此复合镀层抵抗塑性变形能力增强,具有较高硬度。然而,随着平均电流密度从1.5 A/dm²增大到3.0 A/dm²,复合镀层的硬度相对应从240.4 HV降至139.5 HV。由此表明,平均电流密度超过限度导致复合镀层抵抗塑性变形能力下降,其硬度降

低。这是由于平均电流密度超过限度导致复合镀层的晶粒粗化且大小不均匀,致密性变差。加之复合镀层中WC颗粒含量降低,颗粒在复合镀层形成过程中所起到的细化晶粒作用和弥散强化作用较弱。

2.3.2 脉冲占空比的影响

固定平均电流密度为 1.5 A/dm^2 ,仅改变脉冲占空比电沉积的不同Cu-WC复合镀层硬度如图8所示。由图8可知,随着脉冲占空比从10%升高到80%,复合镀层的硬度相对应从240 HV左右逐渐降至137.6 HV。当脉冲占空比不超过20%,电沉积的两种复合镀层致密性无显著性差异,加之WC颗粒含量接近,抵抗塑性变形能力相当,因而都具有较高硬度。但当脉冲占空比超过20%,由于复合镀层的致密性变差,加之WC颗粒含量降低,颗粒在复合镀层形成过程中所起到的细化晶粒作用和弥散强化作用较弱,因而复合镀层的硬度降低。

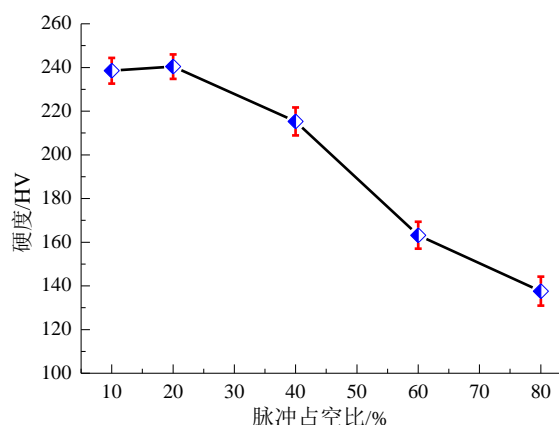


图8 改变脉冲占空比电沉积的不同Cu-WC复合镀层硬度

Fig.8 Hardness of different Cu-WC composite coatings electrodeposited by changing pulse duty cycle

2.4 Cu-WC复合镀层的摩擦磨损性能

2.4.1 摩擦系数

图9为钛合金、纯Cu镀层以及在最佳条件下电沉积的Cu-WC复合镀层摩擦系数变化曲线。从图9看出,在开始磨损阶段(0~60 s),钛合金、纯Cu镀层和Cu-WC复合镀层的摩擦系数都迅速增大然后呈现波动性变化。出现该现象可能是由于钛合金、纯Cu镀层和Cu-WC复合镀层表面存在不同程度突起,当突起部位与对磨件接触时,由于接触面积较小受对磨件持续挤压产生的塑性变形程度轻,因而摩

擦系数较低。但在摩擦过程中产生的磨屑转移到钛合金、纯Cu镀层或Cu-WC复合镀层与对磨件接触面可能发生黏附现象形成结点,从而造成摩擦系数波动性变化。

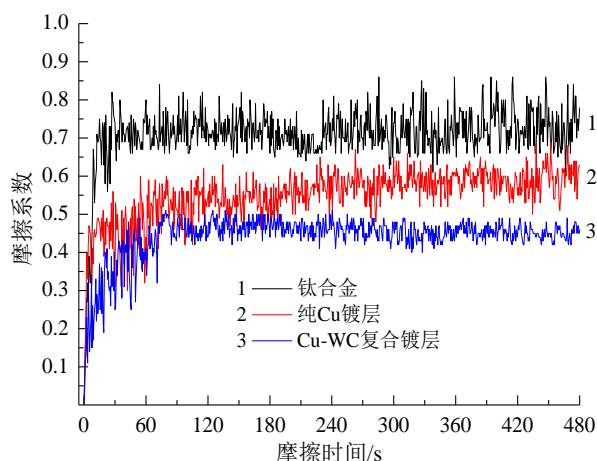


图9 钛合金、纯Cu镀层和Cu-WC复合镀层的摩擦系数变化曲线

Fig.9 Friction coefficient variation curves of titanium alloy, pure Cu coating and Cu-WC composite coating

随着持续摩擦,钛合金、纯Cu镀层或Cu-WC复合镀层表面突起部位逐渐被磨平,与对磨件接触面积增加,摩擦阻力增大,因而摩擦系数较高。由于钛合金的导热性差且黏附性强,加之磨损面氧化后会形成疏松的表层结构,受对磨件持续挤压情况下容易发生剥落现象,脱落物转移到摩擦接触面连同在摩擦过程中产生的磨屑被往复碾压造成摩擦系数升高并且波动。因此,即便处于磨损后期,钛合金的摩擦系数仍然呈现波动性变化。纯Cu镀层的硬度较低,随着持续摩擦表层发生较大程度塑性变形,导致摩擦阻力增大,容易发生撕裂现象。脱落物转移到与对磨件接触面遭受反复碾压,同样会导致摩擦系数波动性变化。Cu-WC复合镀层的硬度明显高于纯Cu镀层,在摩擦过程中能承受对磨件持续挤压从而降低表层发生塑性变形程度,有效的抑制撕裂现象。转移到摩擦接触面的脱落物量少并且被往复碾压过程中对复合镀层造成的磨损程度较轻。另外,复合镀层中弥散分布的WC颗粒在摩擦过程中逐渐显露,作为硬质突起能起到一定的承载作用,减少复合镀层与对磨件接触面积,综合作用使摩擦系数降低。

从图9看出,不同于钛合金和纯Cu镀层磨损后期的摩擦系数曲线形态,Cu-WC复合镀层在磨损后期的摩擦系数曲线较平滑,摩擦系数基本保持稳定,波动幅度小。整个摩擦实验过程,钛合金、纯Cu镀层、Cu-WC复合镀层的平均摩擦系数分别为0.71、0.55、0.44,Cu-WC复合镀层的平均摩擦系数最低,较钛合金降低约38%,较纯Cu镀层降低20%。由此表明,在钛合金基体上电沉积Cu-WC复合镀层并非通过提高钛合金基体表面硬度改善其耐磨性能,而是凭借Cu-WC复合镀层起到减摩作用从而提高钛合金抗摩擦磨损性能。

2.4.2 磨痕形貌

图10为钛合金、纯Cu镀层以及在最佳条件下电沉积的Cu-WC复合镀层表面磨痕形貌。从图10(a)看出,钛合金表面形成连续状犁沟,在犁沟区域发生严重剥落,伴随着形态不规则的坑洞形成及脱落物附着。由于钛合金的导热性差且黏附性强,在摩擦过程中会发生局部过热造成磨损面氧化形成疏松的表层结构,受对磨件持续挤压情况下容

易剥落。脱落物转移到与对磨件接触面被往复碾压,对钛合金表面造成犁削。加之对磨件的持续挤压作用,从而导致钛合金表面磨损程度严重。从图10(b)看出,纯Cu镀层表面也发生剥落,形成集中分布且形态不规则的坑洞,并附着颗粒状的脱落物。另外,还形成一些细长条状沟槽向周围扩展。从图10(c)看出,Cu-WC复合镀层表面同样发生剥落,形成一些细长条状沟槽向周围扩展,但形成的坑洞较浅并且附着少量颗粒状脱落物。由于Cu-WC复合镀层的致密性较好,其硬度明显高于纯Cu镀层,抵抗塑性变形能力强,因此在摩擦过程中能承受对磨件持续挤压从而降低表层发生塑性变形程度,有效抑制了剥落现象。在摩擦过程中产生的脱落物量少,即使转移到摩擦接触面被往复碾压,也不会对复合镀层表面造成严重磨损。另外,由于复合镀层中弥散分布着WC颗粒,在摩擦过程中WC颗粒逐渐显露能减少对磨件与复合镀层接触面积,使摩擦阻力减小。因此,复合镀层表面磨损程度与纯Cu镀层相比较轻,其抗摩擦磨损性能良好。

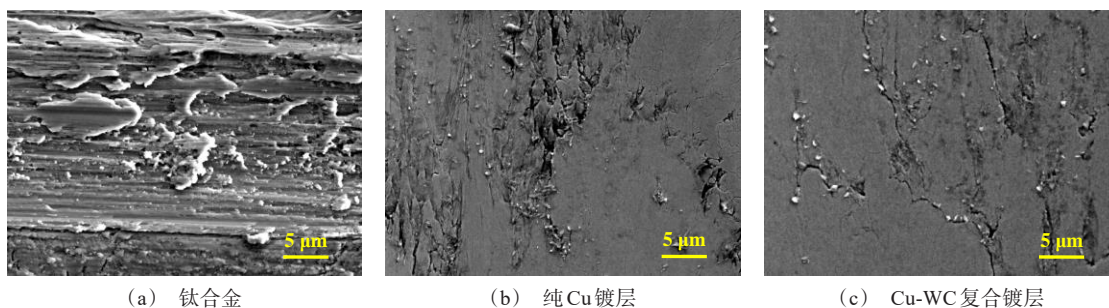


图10 钛合金、纯Cu镀层和Cu-WC复合镀层表面磨痕形貌

Fig.10 Morphology of surface wear of titanium alloy, pure Cu coating and Cu-WC composite coating

3 结论

(1)适当增大平均电流密度($0.5\sim 1.5\text{ A/dm}^2$)或提高脉冲占空比(10~20%)都能提高复合镀层中WC颗粒含量,呈分散状态的WC颗粒起到明显细化晶粒作用和弥散强化作用,促进形成致密结构Cu-WC复合镀层,因而具有较高硬度和良好的抗摩擦磨损性能。

(2)在平均电流密度为 1.5 A/dm^2 、脉冲占空比为20%条件下电沉积的Cu-WC复合镀层晶粒细小且晶粒大小趋于均匀,WC颗粒含量接近2.4%,具有

致密结构、较高硬度(240.4 HV)和良好的抗摩擦磨损性能(平均摩擦系数仅为0.44)。在钛合金基体上电沉积该复合镀层能起到减摩作用,有效提高钛合金抗摩擦磨损性能。

参考文献

- [1] 邓敏先,代燕,刘港,等. TC4钛合金的机械-化学复合强化及耐磨性[J]. 金属热处理, 2023, 48(9): 225-232.
- [2] 胡波,徐辰,刘斌,等. TC4钛合金的机械-化学复合强化及耐磨性[J]. 材料保护, 2023, 56(4): 131-137.
- [3] 丁旭,王匀,杜道忠,等. 快速渗氮处理下的TC4钛合

- 金的摩擦磨损性能[J]. 复合材料学报, 2023, 42(0): 1-10.
- [4] Mindivan H, Ozkan O. An electrodeposition method of nickel-graphene composite coatings on Ti-6Al-4V alloy [J]. Bilge International Journal of Science and Technology Research, 2018(2): 45-52.
- [5] Ganesan P, Sivanantham A, Shanmugam S. Nanostructured nickel-cobalt-titanium alloy grown on titanium substrate as efficient electrocatalyst for alkaline water electrolysis[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9 (14): 12416-12426.
- [6] 高炜, 俞宏英, 蒋旭洲, 等. 激光功率对低碳钢表面激光熔覆钛合金涂层组织和性能的影响[J]. 表面技术, 2023, 52(3): 246-254.
- [7] 周志强, 郝娇山, 宋文文, 等. 钛合金表面等离子喷涂 Al_2O_3 -40% TiO_2 陶瓷涂层的高温摩擦磨损性能[J]. 表面技术, 2023, 52(12): 351-359.
- [8] Jáquez-Muñoz J M, Gaona-Tiburcio C, Chacón-Nava J, et al. Electrochemical corrosion of titanium and titanium alloys anodized in H_2SO_4 and H_3PO_4 solutions[J]. Coatings, 2022, 12(3): 325.
- [9] 徐晓梅, 陈同彩, 张玉清, 等. 氧化电压对钛合金彩色阳极氧化膜性能的影响[J]. 电镀与精饰, 2022, 44(6): 1-6.
- [10] 冀鹏飞, 吕凯, 陈伟东, 等. 纳米二氧化锆对 TC4 钛合金微弧氧化膜的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2023, 52(5): 1583-1592.
- [11] 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.
- [12] 梁银. 热处理温度/时间对 TC4 钛合金铜镀层结构的影响[D]. 西安: 长安大学, 2016.
- [13] 杨亚慧, 李庆林. 脉冲电沉积制备非晶态 Ni-Mo 合金及析氢性能[J]. 兰州理工大学学报, 2022, 48(2): 16-20.
- [14] 范铭远. 脉冲电沉积制备 SiC-TiN 颗粒增强 Ni-Mo 纳米复合镀层及性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2021.
- [15] 孟庆波, 齐海东, 卢帅, 等. 脉冲占空比对电沉积 Sn-Ni-Mn 合金镀层的影响[J]. 湿法冶金, 2018, 37(2): 160-164.
- [16] Jin H, Ji R J, Dong T C, et al. Efficient fabrication and characterization of Ni-Fe-WC composite coatings with high corrosion resistance[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022(16): 152-167.
- [17] Jin H, Ji R J, Dong T C, et al. Fabrication and characterization of WC particles reinforced NiFe composite coating by jet electrodeposition[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 421: 127368.
- [18] Humam S B, Gyawali G, Joshi B, et al. Influence of WC and TaC particles on the microstructure and scratch resistance of electrodeposited nickel-tungsten alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 893: 162371.
- [19] 王大月, 顾静怡, 徐雁斌, 等. 热氧化对 TA18 钛合金耐腐蚀磨损性能的影响[J]. 航空制造技术, 2023, 66(5): 103-106.
- [20] 李新星, 王红侠, 施剑峰, 等. TC11 钛合金表面保护性摩擦氧化层的形成及作用[J]. 材料工程, 2020, 48 (10): 141-147.