

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2022.08.005

## 铜合金的表面化学镀层制备与摩擦学性能研究

孔 丹<sup>1\*</sup>, 罗志强<sup>2</sup>, 金胜然<sup>2</sup>

(1. 河南农业职业学院, 河南 郑州 451450; 2. 郑州大学材料科学与工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 采用化学复合镀的方法在铜合金表面制备了Ni-P-TiN-Re化学镀层, 考察了 $\text{NH}_4\text{ReO}_4$ 添加量和镀后热处理温度对化学镀层物相组成、显微形貌、硬度和摩擦学性能的影响。结果表明, 热处理前不同 $\text{NH}_4\text{ReO}_4$ 添加量的化学镀层表面主要由基体CuZn相和非晶态Ni相组成, 镀液中加入不同添加量 $\text{NH}_4\text{ReO}_4$ 后, 镀层表面胞状颗粒减少, 镀层致密程度相对有所提高; 当 $\text{NH}_4\text{ReO}_4$ 添加量为0、1、2、3和4 g/L时, 化学镀层的截面厚度分别为11.9  $\mu\text{m}$ 、15.8  $\mu\text{m}$ 、16.2  $\mu\text{m}$ 、15.6  $\mu\text{m}$ 和15.3  $\mu\text{m}$ , 磨痕宽度分别为136  $\mu\text{m}$ 、148  $\mu\text{m}$ 、128  $\mu\text{m}$ 、93  $\mu\text{m}$ 和125  $\mu\text{m}$ ; 添加 $\text{NH}_4\text{ReO}_4$ 后, 化学镀层的硬度都有不同程度提高, 且 $\text{NH}_4\text{ReO}_4$ 添加量越大则镀层硬度越高;  $\text{NH}_4\text{ReO}_4$ 为3 g/L时, 镀层磨痕宽度最小且磨痕相对更加平整, 磨损率相对较低。热处理后,  $\text{NH}_4\text{ReO}_4$ 为3 g/L时化学镀层在温度升高至400  $^{\circ}\text{C}$ 及以上时, 化学镀层中开始出现晶态 $\text{Ni}_3\text{P}$ 相, 且随着热处理温度升高, 化学镀层的显微硬度呈现先升高后减小特征, 在温度为400  $^{\circ}\text{C}$ 时取得最大值(1178 HV), 此时化学镀层的稳定摩擦系数最小、磨损率最低, 具有最佳的耐磨性能, 磨损机制为氧化磨损+黏着磨损。

**关键词:** 铜合金; 化学镀层; 显微形貌; 硬度; 摩擦学性能

**中图分类号:** TB306

**文献标识码:** A

## Preparation and Tribological Properties of Electroless Plating on Copper Alloy

KONG Dan<sup>1\*</sup>, LUO Zhiqiang<sup>2</sup>, JIN Shengran<sup>2</sup>

(1. Henan Vocational College of Agriculture, Zhengzhou 451450, China; 2. School of Material Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Ni-P-TiN-Re electroless coatings were prepared on copper alloy by electroless composite plating, the effects of  $\text{NH}_4\text{ReO}_4$  addition and heat treatment temperature on the phase composition, microstructure, hardness and tribological properties of the electroless coatings were investigated. The results show that the surface of electroless coating with different addition of  $\text{NH}_4\text{ReO}_4$  before heat treatment is mainly composed of CuZn phase and amorphous Ni phase. After adding different amount of  $\text{NH}_4\text{ReO}_4$  into the plating bath, the cellular particles on the surface of the coating decrease and the compactness of the coating is relatively improved. When the addition amount of  $\text{NH}_4\text{ReO}_4$  is 0, 1, 2, 3 and 4 g/L, the section thickness of the electroless coating is 11.9, 15.8, 16.2, 15.6 and 15.3  $\mu\text{m}$ , The wear scar widths were 136, 148, 128, 93 and 125  $\mu\text{m}$ , respectively. The results show that the hardness of the electroless coating increases with the addition of  $\text{NH}_4\text{ReO}_4$ , and the hardness of the coating increases with the addition of  $\text{NH}_4\text{ReO}_4$ . When the content of  $\text{NH}_4\text{ReO}_4$  is 3 g/L, the width of wear scar is the smallest and the wear scar is relatively smooth and the wear rate is relatively low. After heat treatment,

收稿日期: 2020-07-01

修回日期: 2020-09-30

作者简介: 孔丹(1986-), 女, 硕士, 讲师。email: 13523504720@139.com

基金项目: 郑州市科技攻关项目(173SGZG23115), 中国博士后基金项目(20171520986)

when the temperature of  $\text{NH}_4\text{ReO}_4$  is 3 g/L, crystalline  $\text{Ni}_3\text{P}$  phase begins to appear in the electroless coating when the temperature rises to 400 °C. With the increase of heat treatment temperature, the microhardness of the electroless coating first increases and then decreases, and reaches the maximum value (1178 HV) at 400 °C. At this time, the electroless coating has the lowest stable friction coefficient and wear rate, and has the best wear resistance, the wear mechanism is oxidation wear and adhesive wear.

**Keywords:** copper alloy; electroless coating; microstructure; hardness; tribological properties

铜及其合金由于具有耐蚀性好、导电导热性能优良以及兼具良好的加工性能等特性而被广泛应用于汽车、交通运输和电子电气等领域。作为目前需要与摩擦副材料具有稳定较高的摩擦系数以及较高的耐磨性<sup>[1]</sup>的同步环中应用最为广泛的材料,铜合金相较钢基喷钼、新型碳纤维材料等具有可加工性能和导热性更加优越等特性<sup>[2]</sup>,但是其较差的耐磨性和较低的摩擦系数的问题在很大程度上影响了同步器的稳定性、安全性和使用寿命,如何采用有效的方法改善同步环用铜合金的摩擦学性能是亟需解决的技术难题<sup>[3-4]</sup>。

化学镀 Ni-P 作为目前较为常见的表面改性方法,可通过在镀液中加入不同微粒等方法制得复合镀层,结合相应的镀后热处理来改善镀层的致密性、硬度和耐磨性能等,而目前关于 Ni-P 镀层中加入 TiN 和引入 Re 元素的研究鲜有报道<sup>[5-7]</sup>。在此基础

上,本文通过在同步环用 ZCuZn20Mn8Al5Si1.5 铜合金表面制备 Ni-P-TiN-Re 化学复合镀层的方法,考察了  $\text{NH}_4\text{ReO}_4$  添加量和镀后热处理温度对复合镀层物相组织、显微形貌和摩擦学性能的影响,结果将有助于解决同步环用铜合金耐磨性差、摩擦系数较低等问题,推动 Ni-P-TiN-Re 化学复合镀层在相关领域的应用。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

试验基材为 ZCuZn20Mn8Al5Si1.5 铜合金,采用电感耦合等离子发射光谱法测得主要元素化学成分如表 1。采用线切割方法将铜合金加工成 25 mm×25 mm×4 mm,采用砂纸打磨和抛光后进行清水和酒精超声冲洗,吹干后置于干燥皿中备用。

表 1 ZCuZn20Mn8Al5Si1.5 铜合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of ZCuZn20Mn8Al5Si1.5 copper alloy

元素	Mn	Al	Si	Fe	Pb	Sn	Ni	Zn	Cu
质量分数/%	8.23	5.02	1.27	0.60	0.41	0.38	0.42	11.17	余量

### 1.2 化学镀层制备

铜合金的表面化学镀层制备主要分为前期表面预处理和化学镀两部分,(1)预处理:碱性化学水溶液(WX-脱脂剂)脱脂 4 min、CY-25 型活化剂进行活化 2 min、清水冲洗、A0311 型氧化剂氧化 2 min、清水冲洗、HY-701 型褪膜剂褪膜 2 min、去离子水冲洗和吹干;(2)化学镀: Ni-P 合金打底层(纯 Ni-P 镀液中镀 30 min)、化学复合镀 120 min(在镀液中加入直径约 40 nm 的 TiN 微粒和纯度 99.99% 的  $\text{NH}_4\text{ReO}_4$  粉末)、清水冲洗和酒精超声波清洗、吹干。制备化学镀层,其中 TiN 添加量都为 7.5 g/L,  $\text{NH}_4\text{ReO}_4$  添加量分别为 0、1、2、3 和 4 g/L,制得镀层分别为 A、B、

C、D 和 E。镀液成分为: 28 g/L  $\text{NiSO}_4$ 、32 g/L  $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ 、18 g/L  $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$ 、7 g/L  $\text{C}_2\text{H}_3\text{NaO}_2$ 、9 g/L  $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH}$ 、4 g/L  $\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{SO}_4\text{Na}$ 、2 g/L  $\text{CN}_2\text{H}_4\text{S}$ ,制备过程中镀液 pH 值控制在 4.7 附近,并保持恒温均速搅拌,镀液温度为 80 °C。为了进一步提升化学镀层的性能,将化学镀后的试件置于真空加热炉中进行 200~600 °C 保温 1 h 的热处理,随炉冷却至室温。

### 1.3 测试与表征

采用帕纳科 Empyrean 锐影 X 射线衍射仪对镀层物相组成进行分析, Cu 靶  $\text{K}\alpha$  辐射,扫描速度 5 °/min;化学镀层的表面形貌和截面形貌采用日立 S-4800 型扫描电镜观察,并用牛津 X-max 50 能谱仪

分析微区成分;显微硬度测试在 HV-1000 型数显维氏硬度计上进行,载荷 100 g,保持载荷时间 15 s,取 5 点的平均值作为测试结果;磨损试验在 UT-3000 型摩擦磨损试验机上进行,对磨球为  $\phi$  5 mm GCr15,热处理前和热处理后镀层的摩擦磨损载荷分别为 2 N 和 4 N、转盘转速分别为 400 r/min 和 200 r/min,磨损时间都为 30 min,磨损前后采用 Sartorius 电子天平称量磨损失重并计算磨损率<sup>[8]</sup>。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 热处理前的化学镀层组织结构与摩擦学性能

图 1 为化学镀层的 X 射线衍射分析结果。对比分析可见,不同  $\text{NH}_4\text{ReO}_4$  添加量的化学镀层表面都主要由基体 CuZn 相和非晶态 Ni 相组成,在镀层 A 的基础上添加  $\text{NH}_4\text{ReO}_4$  不会改变化学镀层的物相组成,但是 CuZn 相的衍射峰强度会随着  $\text{NH}_4\text{ReO}_4$  添加量增加而逐渐降低,这可能与  $\text{NH}_4\text{ReO}_4$  的加入有助于提升铜合金表面镀层的生长速率<sup>[9]</sup>,添加  $\text{NH}_4\text{ReO}_4$  的镀层厚度相较于未添加  $\text{NH}_4\text{ReO}_4$  的镀层 A 更大,因此 X 射线穿透至铜合金基体的难度增加,基体 CuZn 相的衍射峰强度相应会有所减弱。

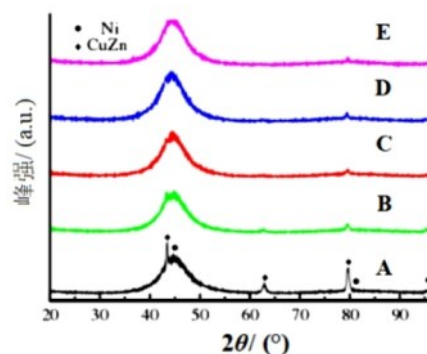


图 1 化学镀层表面的 XRD 图谱

Fig. 1 XRD pattern of the surface on electroless coating

图 2 为不同  $\text{NH}_4\text{ReO}_4$  添加量的化学镀层的表面形貌。对于未添加  $\text{NH}_4\text{ReO}_4$  的镀层 A,镀层表面可见尺寸不等的胞状颗粒,除少量胞状颗粒脱落残留的凹坑外,未见明显孔洞或者微裂纹等缺陷存在,整体镀层质量较好;在镀液中加入不同添加量  $\text{NH}_4\text{ReO}_4$  后,镀层表面胞状颗粒减小,表面平整度增加,镀层致密程度相对有所提高,这主要与的  $\text{NH}_4\text{ReO}_4$  加入有助于 Ni、P 和 TiN 的均匀沉积,提高了镀层表面质量有关<sup>[10]</sup>。

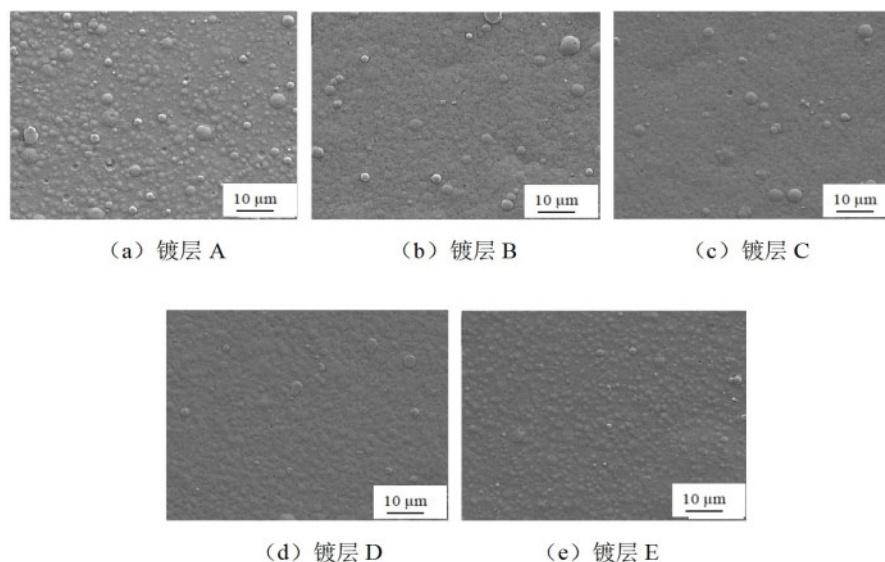


图 2 不同  $\text{NH}_4\text{ReO}_4$  添加量的化学镀层的表面形貌

Fig. 2 Surface morphology of electroless coatings with different  $\text{NH}_4\text{ReO}_4$  contents

表2中列出了不同 $\text{NH}_4\text{ReO}_4$ 添加量的化学镀层表面的能谱分析结果。可见,随着 $\text{NH}_4\text{ReO}_4$ 添加量的增大,化学镀层表面P含量从21.22 at.%逐渐降低至14.37 at.%,5种化学镀层表面P含量都较高,表明化学镀层依旧保持着非晶形态。

表2 不同 $\text{NH}_4\text{ReO}_4$ 添加量的化学镀层的能谱分析结果

Tab.2 Results of energy spectrum analysis on the electroless coating with different content of  $\text{NH}_4\text{ReO}_4$

$\text{NH}_4\text{ReO}_4$ 添加量/( $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )	Ni/(at.%)	P/(at.%)	Ti/(at.%)	Re/(at.%)
0	77.78	21.22	1.00	-
1	78.85	18.78	0.79	1.58
2	79.22	16.30	1.03	3.45
3	78.24	15.72	1.11	4.93
4	76.68	14.37	1.61	7.34

图3为不同 $\text{NH}_4\text{ReO}_4$ 添加量的化学镀层的截面形貌与相应的Ni、P元素面扫描。可见,当 $\text{NH}_4\text{ReO}_4$ 添加量为0、1、2、3和4 g/L时,化学镀层的截面厚度分别为11.9  $\mu\text{m}$ 、15.8  $\mu\text{m}$ 、16.2  $\mu\text{m}$ 、15.6  $\mu\text{m}$ 和15.3  $\mu\text{m}$ ,可见,镀层厚度随着 $\text{NH}_4\text{ReO}_4$ 添加量增加,呈现出先增加后减小特征,在 $\text{NH}_4\text{ReO}_4$ 添加量为2 g/L时取得最大值;此外,添加 $\text{NH}_4\text{ReO}_4$ 的化学镀层厚度要明显高于未添加 $\text{NH}_4\text{ReO}_4$ 的镀层A,这主要与 $\text{NH}_4\text{ReO}_4$ 的加入有助于增加铜合金表面Ni和P原子的沉积速率并提升镀层的生长速率有关<sup>[11]</sup>,这与前述的XRD图谱分析结果相吻合。从截面镀层质量来看,镀层与基体界面结合良好,镀层中或者界面处都未见异常孔洞或者裂纹缺陷,且镀层中Ni元素分布均匀,而P元素存在靠近铜基体一侧的打底层中P含量较高的现象,Ni-P打底层后的约为4.0  $\mu\text{m}$ 。

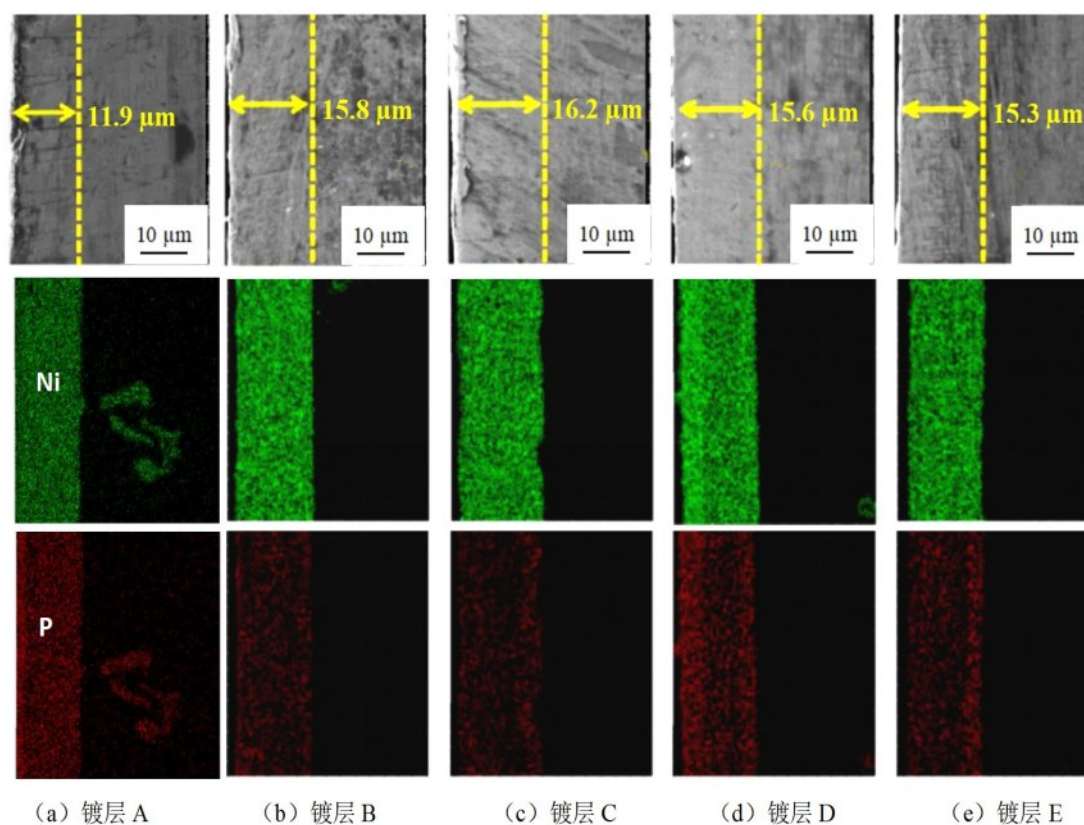


图3 化学镀层的截面形貌与相应的Ni、P元素面扫描(a)镀层A(b)镀层B(c)镀层C(d)镀层D(e)镀层E

Fig. 3 Cross section morphology of electroless coating and scanning of corresponding Ni and P elements  
(a) coating A (b) coating B (c) coating C (d) coating D (e) coating E



图 4 为不同  $\text{NH}_4\text{ReO}_4$  添加量的化学镀层的硬度测试结果。添加  $\text{NH}_4\text{ReO}_4$  后化学镀层的硬度都有不同程度提高,且  $\text{NH}_4\text{ReO}_4$  添加量越大则镀层硬度越高。究其原因,这主要与  $\text{NH}_4\text{ReO}_4$  加入后镀层厚度增加和致密度提高的同时,促进了镀层中高硬度 TiN 颗粒的沉积,镀层显微硬度会高于未添加  $\text{NH}_4\text{ReO}_4$  的镀层。

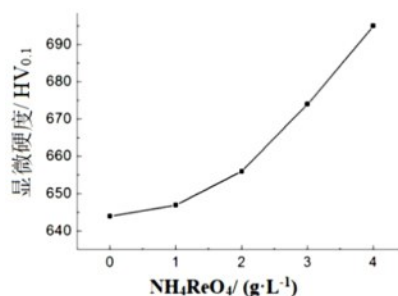
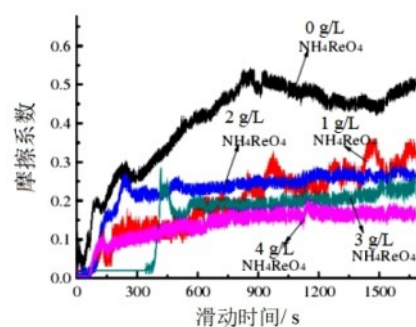


图 4 不同  $\text{NH}_4\text{ReO}_4$  添加量的化学镀层的硬度测试结果

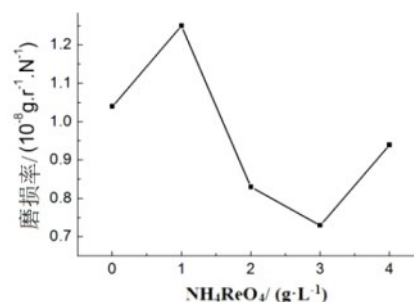
Fig. 4 Hardness test results of electroless coatings with different  $\text{NH}_4\text{ReO}_4$  contents

图 5 为不同  $\text{NH}_4\text{ReO}_4$  添加量的化学镀层的摩擦系数曲线和磨损率测试结果。图 6 为添加  $\text{NH}_4\text{ReO}_4$  的化学镀层的摩擦磨损形貌。摩擦系数曲线中可见,除  $\text{NH}_4\text{ReO}_4$  为 0 g/L 和 1 g/L 时镀层的摩擦系数曲线有少量波动外,其余化学镀层的摩擦系数曲线都较为稳定,所有镀层都未出现由于镀层磨穿而产生的摩擦系数大幅度波动现象,添加  $\text{NH}_4\text{ReO}_4$  的化学镀层的稳定摩擦系数都小于未添加  $\text{NH}_4\text{ReO}_4$  的化学镀层。磨损率测试结果可知,相较于未添加  $\text{NH}_4\text{ReO}_4$  的镀层,除  $\text{NH}_4\text{ReO}_4$  为 1 g/L 时镀层的磨损率稍高外,其余镀层的磨损率都有不同程度降低,且  $\text{NH}_4\text{ReO}_4$  为 3 g/L 时磨损率最低。如图 6 所示当  $\text{NH}_4\text{ReO}_4$  添加量为 1 g/L、2 g/L、3 g/L 和 4 g/L 时,磨痕宽度分别为 148、128、93 和 125  $\mu\text{m}$ ,除  $\text{NH}_4\text{ReO}_4$  为 1 g/L 时镀层的磨痕宽度大于未添加  $\text{NH}_4\text{ReO}_4$  镀层的磨痕宽度(136  $\mu\text{m}$ )外,其余镀层的磨损宽度都相对较小。结合表 4 的能谱分析结果可知,摩擦磨损过程中,化学镀层的磨痕表面都形成了一层致密氧化膜,  $\text{NH}_4\text{ReO}_4$  为 1 g/L 时镀层中除犁沟外,还可见氧化膜边缘出现了裂纹和局部脱落;  $\text{NH}_4\text{ReO}_4$  为 2 g/L 时,磨痕宽度较小但是氧化膜边缘处仍然存在裂纹和脱落;  $\text{NH}_4\text{ReO}_4$  为 3 g/L 时,镀层磨痕宽度最小且磨痕相对更加平整,边缘氧化膜除少量裂纹外,未出现明显脱落,此时磨损率相对较

低;  $\text{NH}_4\text{ReO}_4$  为 4 g/L 时,镀层磨痕宽度有所增加,氧化膜边缘出现大面积裂纹,此时磨损率相对较高,这可能与此时镀层的韧塑性有关<sup>[12]</sup>,即虽然此时镀层硬度较高,但是由于韧塑性不好而容易在摩擦磨损过程中出现开裂,造成磨损率不降反升。



(a) 摩擦系数曲线



(b) 磨损率

图 5 不同  $\text{NH}_4\text{ReO}_4$  添加量镀层的摩擦系数曲线和磨损率

Fig. 5 Friction coefficient curve and wear rate of electroless coating with different  $\text{NH}_4\text{ReO}_4$  content

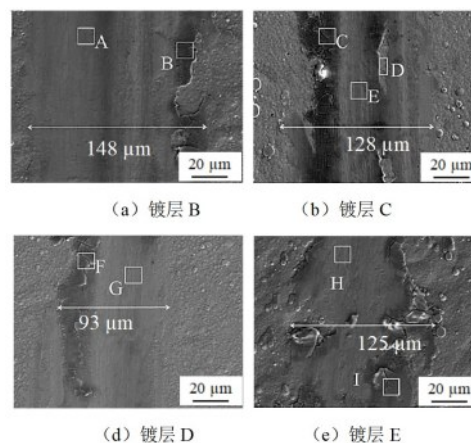


图 6 添加  $\text{NH}_4\text{ReO}_4$  的化学镀层的摩擦磨损形貌

Fig. 6 Friction and wear morphology of electroless coating with  $\text{NH}_4\text{ReO}_4$  addition

## 2.2 热处理后的化学镀层组织结构与摩擦学性能

由热处理前化学镀层的硬度和摩擦磨损性能测试结果可知,当 $\text{NH}_4\text{ReO}_4$ 为3 g/L时,化学镀层可以取得较好的耐磨性能,在此基础上,进一步研究了化学镀后热处理对镀层物相组成和摩擦学性能的影响。图7为不同温度热处理后化学镀层的X射线衍射分析结果。在较低的热处理温度下(200 °C),化学镀层仍然保持着与热处理前相同的非晶态结构;当温度升高至300 °C时,化学镀层物相组成为晶态Ni和基体CuZn相,但是Ni衍射峰底部较宽表明此时仍然有非晶特征;在温度升高至400 °C及以上时,化学镀层中开始出现晶态 $\text{Ni}_3\text{P}$ 相,即出现镀层晶化转变,并在热处理温度为600 °C时镀层晶化转变完成(衍射峰尖锐)<sup>[13]</sup>,此时Ni衍射峰强度要明显高于 $\text{Ni}_3\text{P}$ 相。

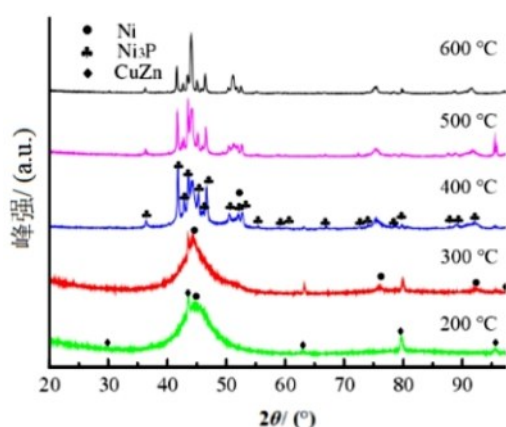


图7 不同温度热处理后化学镀层的XRD图谱

Fig. 7 XRD patterns of electroless coatings after heat treatment at different temperatures

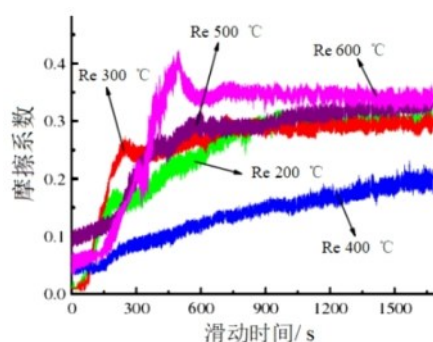
表3为不同温度热处理后化学镀层的显微硬度测试结果。可见,随着热处理温度升高,化学镀层的显微硬度呈现先升高后减小特征,在温度为400 °C时取得最大值(1178 HV);相较于热处理前化学镀层的硬度(674 HV),不同温度热处理后镀层的硬度都有不同程度提高,这主要是因为热处理过程中化学镀层会发生非晶态向晶态的转化,且镀层中晶态Ni相和 $\text{Ni}_3\text{P}$ 相的存在会在一定程度提高镀层硬度<sup>[14]</sup>,但是当热处理温度超过400 °C时,Ni相和 $\text{Ni}_3\text{P}$ 相会发生粗化与长大,镀层硬度反而会有所减小。

表3 不同温度热处理后化学镀层的显微硬度

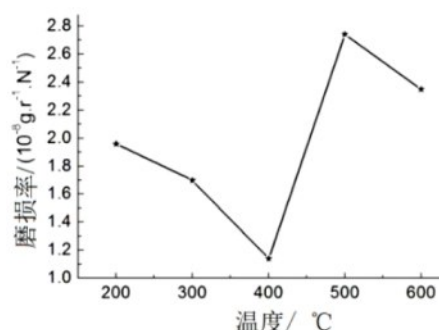
Tab.3 Microhardness of electroless coating after heat treatment at different temperatures

温度/°C	200	300	400	500	600
显微硬度/HV	724	815	1178	1146	1093

图8为不同温度热处理后化学镀层的摩擦系数曲线和磨损率。除热处理温度为400 °C时镀层的稳定摩擦系数约在0.2,其余温度下化学镀层的稳定摩擦系数都在0.3附近,整体摩擦系数的波动幅度较小,摩擦磨损过程中未出现镀层磨穿而产生的摩擦系数大幅度波动现象;从磨损率测试结果可知,热处理温度为200、300、400、500和600 °C时化学镀层的磨损率分别为1.96 g/(r·N)、1.70 g/(r·N)、1.14 g/(r·N)、2.74 g/(r·N)和 $2.35 \times 10^{-8}$  g/(r·N)。热处理温度为400 °C时化学镀层的稳定摩擦系数最小、磨损率最低,具有最佳的耐磨性能。



(a) 摩擦系数曲线



(b) 磨损率

图8 不同温度热处理后化学镀层的摩擦系数曲线和磨损率

Fig.8 Friction coefficient curve and wear rate of electroless coating after heat treatment at different temperatures

图9为不同温度热处理后化学镀层的摩擦磨损形貌。热处理温度为200℃、300℃、400℃、500℃和600℃时化学镀层的磨痕宽度分别为158 μm、150 μm、125 μm、197 μm和175 μm,热处理温度为400℃时化学镀层的磨痕宽度最小。当热处理温度为200℃时,化学镀层磨痕中可见犁沟和氧化膜破损现象,且能谱分析结果表明边部区域的氧化磨损相较磨痕中部更加严重,但是镀层并未穿透至基体;当热处理温度升高至300℃时,化学镀层发生了非晶转化,晶态Ni的形成一定程度上提升了镀层硬度和耐磨性<sup>[15]</sup>,但是由于此时镀层中并未形成晶态

Ni<sub>3</sub>P,此时的磨损形貌与200℃时相似,且从磨痕边缘处能谱分析结果可知此时的氧化磨损进一步加剧<sup>[16]</sup>;当热处理温度升高至400℃时,镀层已转变为晶态结构且镀层中形成了Ni<sub>3</sub>P相,镀层硬度提高的同时耐磨性增强,磨损边缘处同时含有较高含量O以及少量Fe元素,此时的磨损机制为氧化磨损加粘着磨损<sup>[17-20]</sup>;继续升高热处理温度至500℃及以上,磨损形貌与400℃时相似,但是由于晶体Ni和Ni<sub>3</sub>P相在高温下会发生粗化与长大,硬度降低的同时耐磨性有所降低,磨损机制则与400℃相同。

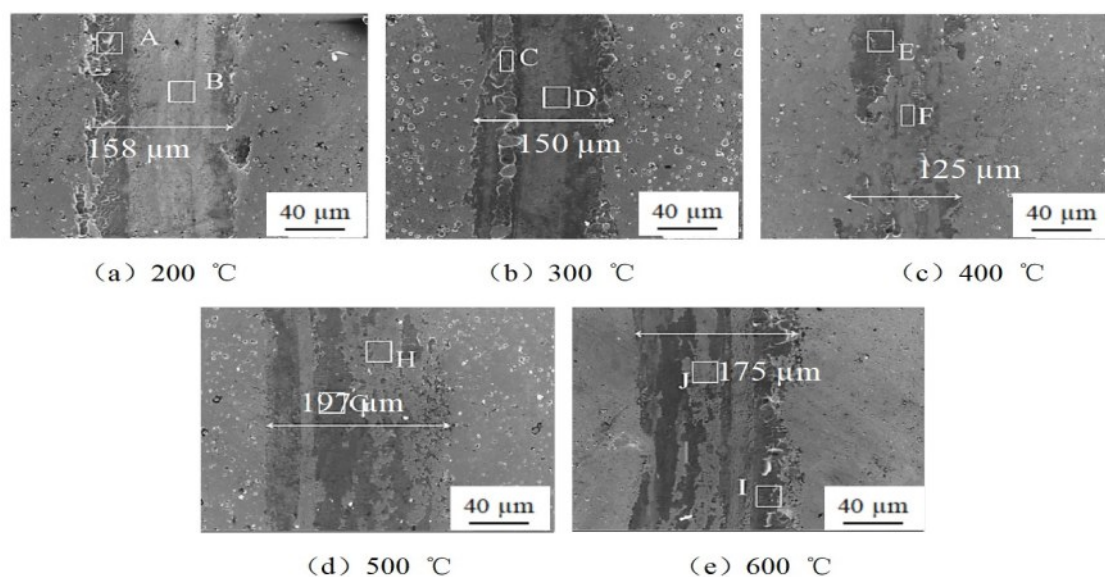


图9 不同温度热处理后化学镀层的磨痕形貌

Fig. 9 Wear scar morphology of electroless coating after heat treatment at different temperatures

### 3 结论

1)不同NH<sub>4</sub>ReO<sub>4</sub>添加量的化学镀层表面都主要由基体CuZn相和非晶态Ni相组成;在镀液中加入NH<sub>4</sub>ReO<sub>4</sub>,镀层表面胞状颗粒减小,表面平整度增加,镀层致密程度相对有所提高。

2)添加NH<sub>4</sub>ReO<sub>4</sub>后化学镀层的硬度都有不同程度提高,且NH<sub>4</sub>ReO<sub>4</sub>添加量越大则镀层硬度越高;NH<sub>4</sub>ReO<sub>4</sub>为3 g/L时,镀层磨痕宽度最小且磨痕相对更加平整,边缘氧化膜除少量裂纹外,未出现明显脱落,此时磨损率相对较低。

3)当NH<sub>4</sub>ReO<sub>4</sub>为3 g/L时,温度升高至400℃及以上,化学镀层中开始出现晶态Ni<sub>3</sub>P相;随着热处理温度升高,化学镀层的显微硬度呈现先升高后减

小特征,在温度为400℃时取得最大值(1178 HV);热处理温度为400℃时化学镀层的稳定摩擦系数最小、磨损率最低,具有最佳的耐磨性能,此时的磨损机制为氧化磨损和黏着磨损。

### 参考文献

- [1] 李文平,鹿云,柴之龙,等.同步环摩擦材料摩擦学特性的研究[J].汽车工艺与材料,2013,5: 53-57.
- [2] Chen B F, Guo J H, Yan M F, et al. Study on a Ni-P-nano TiN composite coating for significantly improving the service life of copper alloy synchronizer rings[J]. Applied Surface Science, 2020, 504: 144-146.
- [3] 王敏,刘锦云.铜及铜合金化学镀Ni-P合金镀层的诱发方法[J].电镀与环保,2017,37(1): 4-6.



- [4] 祝凤莲, 李梁. 时效处理对化学镀 Ni-P 合金镀层结构及其性能的影响[J]. 科技信息, 2012, 4: 155-156.
- [5] 朱厚菲, 黄文全, 杨超, 等. 钨铜合金表面化学镀 Ni-P 镀层性能研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2009, 21(3): 347-349.
- [6] 汪建华, 谭敦强. 铜合金化学镀 Ni-P 镀层的结构及性能研究[J]. 世界有色金属, 2008, 12: 28-29.
- [7] Farzaneh A, Mohammadi M, Ehteshamzadeh M, et al. Electrochemical and structural properties of electroless Ni-P-SiC nanocomposite coatings[J]. Applied Surface Science, 2013, 276: 697-704.
- [8] Baskaran I, Narayanan T, Stephen A. Effect of accelerators and stabilizers on the formation and characteristics of electroless Ni-P deposits[J]. Materials Chemistry and Physics, 2006, 99(1): 117-126.
- [9] Abdoli M, Sabour Rouhaghdam A. Preparation and characterization of Ni-P/nanodiamond coatings: Effects of surfactants[J]. Diamond & Related Materials, 2013, 31: 30-37.
- [10] Xia F, Li Q, Ma C, et al. Preparation and characterization of Ni-AlN nanocoatings deposited by magnetic field assisted electrodeposition technique[J]. Ceramics International, 2019, 46(2): 92-96.
- [11] Xia F F, Liu C, Wang F, et al. Preparation and characterization of Nano Ni-TiN coatings deposited by ultrasonic electrodeposition[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2010, 490(1-2): 430-435.
- [12] Yu L, Huang W, Zhao X. Preparation and characterization of Ni-P-nanoTiN electroless composite coatings[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2011, 509(10): 4154-4159.
- [13] Ma C, Yu W, Jiang M, et al. Jet pulse electrodeposition and characterization of Ni-AlN nanocoatings in presence of ultrasound[J]. Ceramics International, 2018, 44(5): 5163-5170.
- [14] Aal A A, Bahgat M, Radwan M. Nanostructured Ni-AlN composite coatings[J]. Surface & Coatings Technology, 2006, 201(6): 2910-2918.
- [15] 祁子泷, 于大海, 李世亮, 等. 联轴节端盖 Ni-P 化学镀镀层再制造工艺研究[J]. 材料保护, 2019, 52(12): 116-119.
- [16] 王健, 张凤林, 刘文广, 等. Ni-P 金刚石化学复合镀层制备及摩擦磨损性能分析[J]. 表面技术, 2017, 46(9): 18-25.
- [17] Luo H, Leitch M, Behnamian Y, et al. Development of electroless Ni-P/nano-WC composite coatings and investigation on its properties[J]. Surface & Coatings Technology, 2015, 277: 99-106.
- [18] Zhou H H, Zhang C P, Fang C X, et al. Study of the corrosion resistance of electroless amorphous Ni-P and Ni-Sn-P coatings in weak acidic medium[J]. Journal of Hunan University, 2015, 42(12): 59-63.
- [19] Sun W C, Tan M F, Lu J H, et al. Corrosion and oxidation resistance of electroless Ni-P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite coatings on carbon steel[J]. Applied Mechanics & Materials, 2010, 34-35: 831-835.
- [20] Wojewoda-Budka J, Wierzbicka M A, Kwiecien I, et al. Reactivity with tin and corrosion resistance of electroless Ni-P and Ni-P-Re coatings plated on copper[J]. Electrochimica Acta, 2022, 406: 139850-139861.