

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2025.11.006

# 不同电沉积参数下 Ni-P-MoS<sub>2</sub> 合金装饰镀层的性能研究

张宇彤<sup>1\*</sup>, 熊强强<sup>2</sup>

(1. 运城职业技术大学 建筑工程学院, 山西 运城 044000; 2. 南昌理工学院 电子与信息学院, 江西 南昌 330044)

**摘要:** Ni-P-MoS<sub>2</sub> 合金作为一种新型复合材料, 其性能受到电流密度、镀液温度和镀液 pH 值等多种因素影响, 这些因素影响电镀过程中的沉积机制、镀层成分和结构变化等方面, 最终决定镀层的性能。为提升 Ni-P-MoS<sub>2</sub> 合金装饰镀层的硬度与耐磨特性, 对不同电沉积参数下的 Ni-P-MoS<sub>2</sub> 合金装饰镀层性能进行研究。采用硫酸镍、次亚磷酸钠、柠檬酸钠等试剂, 并添加 MoS<sub>2</sub> 微粒配制 Ni-P-MoS<sub>2</sub> 镀液。试验材料选择 6061 铝合金和镍板, 通过直流稳压电源进行电沉积过程。通过调整不同电沉积参数, 制备一系列 Ni-P-MoS<sub>2</sub> 合金装饰镀层, 并对这些镀层在不同电沉积参数下的硬度和耐磨性进行测试。测试结果显示: 当电流密度为 1.0 A/dm<sup>2</sup> 时, 镀层的硬度显著提升, 相较于 0.5、2.0、3.0、4.0 A/dm<sup>2</sup> 的电流密度条件下, 其硬度更高, 同时磨损量和摩擦系数也相对较低。当镀液 pH 值为 5.5 时, 镀层展现出更高的硬度和更优的耐磨性能。在镀液温度设置为 70 °C 的条件下, 镀层的性能也更为优异。因此, 当电流密度为 1.0 A/dm<sup>2</sup>、pH 值为 5.5、镀液温度为 70 °C 时, 为制备 Ni-P-MoS<sub>2</sub> 合金装饰镀层的最优电沉积方案。

**关键词:** 电沉积参数; Ni-P-MoS<sub>2</sub> 合金; 柠檬酸钠; 镀层硬度; 耐磨性能; 磨损量

**中图分类号:** TH117 **文献标识码:** A

## Properties of decorative coatings of Ni-P-MoS<sub>2</sub> alloy under different electrodeposition parameters

Zhang Yutong<sup>1\*</sup>, Xiong Qiangqiang<sup>2</sup>

(1. College of Architecture and Engineering, Yuncheng Vocational and Technical College, Yuncheng 044000, China; 2. College of Electronics and Information Technology, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330044, China)

**Abstract:** As a new type of composite material, the performance of Ni-P-MoS<sub>2</sub> alloy is influenced by various factors such as current density, plating solution temperature, and plating solution pH value. These factors affect the deposition mechanism, coating composition, and structural changes during the electroplating process, ultimately determining the performance of the coating. To improve the hardness and wear resistance of Ni-P-MoS<sub>2</sub> alloy decorative coatings, the performance of Ni-P-MoS<sub>2</sub> alloy decorative coatings under different electrodeposition parameters was studied. Using reagents such as nickel sulfate, sodium hypophosphite, and sodium citrate, and adding MoS<sub>2</sub> particles to prepare Ni-P-

收稿日期: 2025-02-06 修回日期: 2025-03-05

通信作者: 张宇彤(1992—), 女, 硕士研究生, 讲师, 研究方向为建筑设计及其理论、建筑装饰材料、风景园林, email: clq525222881@163.com

基金项目: 中国职业技术教育学会分支机构科研课题(ZJ2024B017)

引用信息: 张宇彤, 熊强强. 不同电沉积参数下 Ni-P-MoS<sub>2</sub> 合金装饰镀层的性能研究[J]. 电镀与精饰, 2025, 47(11): 47-53, 99.

Zhang Yutong, Xiong Qiangqiang. Properties of decorative coatings of Ni-P-MoS<sub>2</sub> alloy under different electrodeposition parameters[J]. Plating and Finishing, 2025, 47(11): 47-53, 99.

MoS<sub>2</sub> plating solution. 6061 aluminum alloy and nickel plate were selected as experimental materials, and the electrodeposition process was carried out using a DC stabilized power supply. A series of Ni-P-MoS<sub>2</sub> alloy decorative coatings were prepared by adjusting different electrodeposition parameters, and the hardness and wear resistance of these coatings were tested under different electrodeposition parameters. The test results show that when the current density is 1.0 A/dm<sup>2</sup>, the hardness of the coating is significantly improved. Compared with the current density conditions of 0.5, 2.0, 3.0, and 4.0 A/dm<sup>2</sup>, the hardness is higher, and the wear amount and friction coefficient are relatively lower. When the pH value of the plating solution is 5.5, the coating exhibits higher hardness standards and better wearing resistance. Under the condition of setting the plating solution temperature to 70 °C, the performance of the coating is also more excellent. Therefore, when the current density is 1.0 A/dm<sup>2</sup>, the pH value is 5.5, and the plating solution temperature is 70 °C, the optimal electrodeposition scheme is provided for the preparation of Ni-P-MoS<sub>2</sub> alloy decorative coatings.

**Keywords:** electrodeposition parameters; Ni-P-MoS<sub>2</sub> alloy; sodium citrate; coating hardness; wear resistance; wearing loss

现代工业技术的持续进步与人们对材料性能要求的不断提升,使得开发高性能表面装饰镀层材料成为了当前研究的热点之一<sup>[1]</sup>。其中,Ni-P合金镀层因其广泛的应用领域而备受关注<sup>[2]</sup>。然而,传统的Ni-P合金镀层在高负荷、高摩擦等特定应用环境下,其性能仍存在一定的局限性<sup>[3]</sup>。因此,如何在保持Ni-P合金镀层原有优势的基础上,进一步提升其耐磨性和硬度,成为了亟待解决的关键问题。近年来,通过向Ni-P合金镀层中添加MoS<sub>2</sub>等第二相粒子来改善其性能的方法备受瞩目。MoS<sub>2</sub>的加入能显著提升镀层的润滑性和耐磨性,并能在一定程度上调节镀层的微观结构,进而优化其力学性能<sup>[4]</sup>。电沉积作为一种高效且环保的表面处理技术,在合金镀层的制备中得到了广泛应用<sup>[5]</sup>。通过精确调控电沉积过程中的参数,可以实现对镀层性能的精细控制。因此,探究不同电沉积参数下Ni-P-MoS<sub>2</sub>合金装饰镀层的性能变化,对于开发高性能表面装饰镀层材料具有重要意义。

目前,有较多学者对电沉积状态下不同合金镀层性能进行研究,杨悦澜等<sup>[6]</sup>研究Ni-P合金和Ni-Co-P合金电沉积工艺优化,该方法通过调整电解液沉积参数,优化了合金的电沉积工艺,尽管该研究在工艺优化和性能评估方面取得了显著成果,但缺乏对镀液在不同pH值下的耐磨性能变化分析。周国庆等<sup>[7]</sup>研究电沉积Zn-Fe合金镀层性能,该方法通过控制水含量、沉积电位和沉积时间等变量,制备了不同条件下的Zn-Fe合金镀层,虽然该方法考虑了水对镀层性能的影响,但未全面探讨其它环境因素(如温度、pH值等)对镀层性能的潜在影响。李宏亮等<sup>[8]</sup>

研究电沉积电位对镍钴合金超疏水镀层耐蚀性的影响,该方法通过改变电沉积电位,制备了具有不同微观结构的镍钴合金超疏水镀层,并评估了镀层的耐蚀性,该研究虽然深入探讨了电沉积电位对镀层耐蚀性的影响,但可能未考虑镀液温度对镀层性能的协同作用,且并未分析镀层的硬度变化。Krim S等<sup>[9]</sup>研究铝合金电沉积镍涂层的退火:富镍铝化物层的显微组织性能和耐磨性,该方法采用电沉积技术在铝合金表面制备了镍涂层,并通过退火处理研究了富镍铝化物层的显微组织性能和耐磨性,但该方法未充分考虑电沉积过程中,电流密度对试样产生的影响。

为此,本文通过调整电沉积过程中的关键参数,制备出具有高耐磨、高硬度的Ni-P-MoS<sub>2</sub>合金装饰镀层。通过对镀层的硬度、耐磨性等关键性能指标进行测试和分析,探索不同电沉积参数对镀层性能的影响规律,并据此确定最优的电沉积参数组合。

## 1 Ni-P-MoS<sub>2</sub>合金装饰镀层制备和性能分析

本文研究不同电沉积参数下Ni-P-MoS<sub>2</sub>合金装饰镀层的性能,通过调整电沉积参数,开发出具有高耐磨、高硬度特点的装修材料,以此满足不同应用场景的需求。

### 1.1 Ni-P-MoS<sub>2</sub>合金装饰镀层设计

#### 1.1.1 镀液配制

本文选择以下试剂作为试验材料,在镀液配制时,采用去离子水作为溶剂。具体准备的材料及参数如表1所示。

表1 Ni-P-MoS<sub>2</sub>合金镀层镀液配比Tab.1 Solution ratio of Ni-P-MoS<sub>2</sub> alloy coating

| 序号 | 材料名称  | 添加量/(g·L <sup>-1</sup> ) |
|----|---|--------------------------|
| 1  | 硫酸镍(NiSO <sub>4</sub> ·6H <sub>2</sub> O)                           | 30                       |
| 2  | 次亚磷酸钠(NaH <sub>2</sub> PO <sub>2</sub> ·H <sub>2</sub> O)           | 30                       |
| 3  | 柠檬酸钠(C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> Na <sub>3</sub> O <sub>7</sub> ) | 20                       |
| 4  | 乙酸钠(CH <sub>3</sub> COONa·3H <sub>2</sub> O)                        | 15                       |
| 5  | MoS <sub>2</sub> 微粒   | 10                       |
| 6  | 阴离子表面活性剂  | 少量                       |
| 7  | 非离子表面活性剂  | 少量                       |

为了增强镀层的性能,在镀液配制时选用MoS<sub>2</sub>微粒作为添加剂,其粒度范围在1~5 μm之间。MoS<sub>2</sub>微粒的加入能够显著提高镀层的润滑性和耐磨性<sup>[10]</sup>。

### 1.1.2 MoS<sub>2</sub>微粒预处理

MoS<sub>2</sub>微粒中常含有杂质,这些杂质可能影响微粒的表面特性,降低其分散性或引入活性位点<sup>[11-12]</sup>。因此,必须采取预处理措施,清除杂质及不利于分散的表面基团。

本文对施镀前微粒进行处理:通过20% NaOH溶液浸泡微粒;用去离子水清洗,直至微粒达到中性状态;将微粒置于HCl溶液中浸泡,再次清洗后,将微粒烘干。

考虑MoS<sub>2</sub>微粒具有疏水性,且其粉末形态的比表面积远大于固体形态<sup>[13]</sup>,因此在施镀过程中,为了提升微粒在镀液中的分散效果,需向MoS<sub>2</sub>中添加表面活性剂。在实验中,本文尝试使用阴离子表面活性剂、非离子表面活性剂以及两者的复合形式,以此显著优化镀层的表面质量<sup>[14]</sup>。施镀前,对MoS<sub>2</sub>微粒处理后,缓缓地向少量基础镀液中加入这些微粒,并继续搅拌;待微粒和基础镀液混合均匀后,再加入剩余的全部基础镀液,并进行充分地搅拌;最后,对混合液进行加热处理。

### 1.1.3 镀层制备

本文采用3 cm<sup>2</sup>的6061铝合金作为镀层阴极材料。6061铝合金因其良好的机械性能和耐腐蚀性,可作为理想的阴极材料。阳极则选用一块6 cm<sup>2</sup>的镍板,其纯度高达99.99%。高纯度的镍板能够确保电镀过程中镍离子的稳定供应,从而获得高质量的镀层。为了优化电镀效果,阴极与阳极之间的距离设定为2 cm。这一距离的选择有助于确保电镀过程中电流分布的均匀性,从而提高镀层的质量。

除上述的阴极和阳极材料外,还准备了直流稳压电源与电镀槽作为实验设备。

在开展电沉积工艺前,需对铝合金进行预处理,以增强复合镀层与基材的结合强度<sup>[15-17]</sup>。预处理步骤包括:首先进行除油处理,彻底清除表面油污,并通过水洗确保表面洁净;接着进行酸洗,进一步清理金属表面,再经水洗;之后进行碱洗,调节表面状态,水洗后,进入浸镍阶段,以增强镀层附着力;最后再次水洗,并预镀一层镍作为底层。

电沉积阶段,采用直流稳压电源,在镍板阳极与铝合金片阴极之间施加直流电<sup>[18-20]</sup>。通过精确调控镀液中的电流密度、pH值以及温度,制备出具有不同特性的Ni-P-MoS<sub>2</sub>合金装饰镀层,为了探索并确定最优的电沉积参数组合,设计不同电沉积参数,如表2所示。

表2 不同电沉积参数设计

Tab.2 Design of different electrodeposition parameters

| 参数                         | 数值   |      |      |      |      |
|----------------------------|------|------|------|------|------|
| 电流密度/(A·dm <sup>-2</sup> ) | 0.5  | 1.0  | 2.0  | 3.0  | 4.0  |
| 镀液温度/°C                    | 50.0 | 60.0 | 70.0 | 80.0 | 90.0 |
| 镀液 pH 值                    | 3.5  | 4.5  | 5.5  | 6.5  | 7.5  |

## 1.2 Ni-P-MoS<sub>2</sub>合金装饰镀层性能测试

### 1.2.1 硬度测试

采用TEST-1000型号硬度计对Ni-Co-MoS<sub>2</sub>合金装饰镀层的硬度进行测量。在测试环节中,设定一个恒定的0.98 N载荷,并在施加这一载荷后,保持15 s的时间,随后再缓慢地卸载。

### 1.2.2 耐磨性能测试

采用UMT型摩擦试验机对Ni-Co-MoS<sub>2</sub>合金装饰镀层在无润滑条件下的耐磨性能进行评估,并深入探究其磨损机制。测试期间,设定恒定载荷为1 N,设定滑动行程为5 mm。通过这些精确控制的测试条件,可以有效地分析镀层的耐磨性能,并进一步研究其磨损过程中的具体机理。

## 2 试验分析

### 2.1 X射线衍射结果

采用X射线荧光光谱仪分析镀层的衍射结果,如图1所示。

根据图1的X射线衍射结果可知,Ni-Co-MoS<sub>2</sub>合金装饰镀层为非晶态结构。非晶态结构的形成与镀层制备过程中的电沉积和合金成分有关,无序的原

子排列导致长程周期性缺失，从而抑制了布拉格衍射现象，而MoS<sub>2</sub>的引入进一步增强了镀层的自润滑性能，使镀层更具耐磨性。

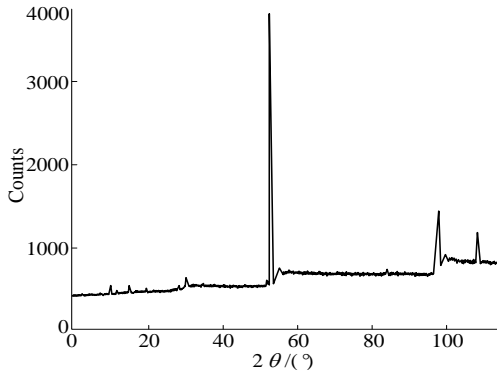


图1 X射线衍射结果

Fig.1 Result of X-ray diffraction

### 2.2 电流密度下镀层的性能变化分析

设定镀液温度为50 °C、pH值为3.5，分别调整不同电流密度，以此评估不同电流密度下，合金装饰镀层性能变化。

(1) 硬度分析：研究不同电沉积电流密度下镀层的硬度变化，分析结果如表3所示。

表3 镀层硬度分析

Tab.3 Analysis of coating hardness

| 序号 | 电流密度/(A·dm <sup>-2</sup> ) | 显微硬度/HV |
|----|----------------------------|---------|
| 1  | 0.5                        | 303.4   |
| 2  | 1.0                        | 314.2   |
| 3  | 2.0                        | 304.5   |
| 4  | 3.0                        | 302.1   |
| 5  | 4.0                        | 301.6   |

通过表3可知，当电流密度为1.0 A/dm<sup>2</sup>时，镀层硬度达到最高值，而其它电流密度下，镀层硬度相对较低。这一结果清晰地表明，在电沉积参数中，电流密度对合金装饰镀层的硬度具有显著影响。因此，从硬度性能的角度考虑，电流密度为1.0 A/dm<sup>2</sup>是制备高性能合金装饰镀层的优选参数。

(2) 摩擦性能分析：在电沉积过程中，对不同电流密度下合金装饰镀层的摩擦系数进行评估，结果如图2所示。

通过图2可知，在0~70 min的摩擦试验过程中，当电流密度为1.0 A/dm<sup>2</sup>时，对应的摩擦系数在整个时间段内均保持最低，且始终未超过0.55，表明其耐磨性能更佳。相比之下，当电流密度为4.0 A/dm<sup>2</sup>

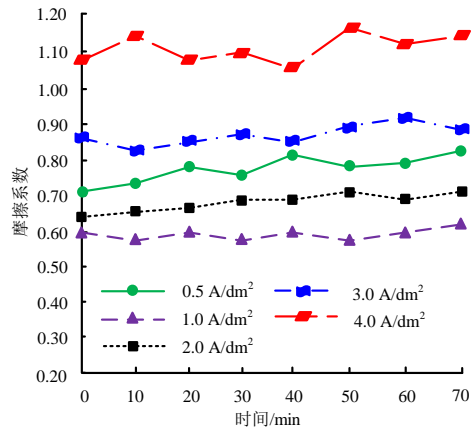


图2 镀层摩擦系数分析

Fig.2 Analysis of friction coefficient of coating

时，摩擦系数最高，处于1.00~1.20之间，耐磨性能相对较差。因此，从摩擦性能的角度考虑，在电沉积参数中，将电流密度设定为1.0 A/dm<sup>2</sup>时，合金装饰镀层的摩擦系数最低，展现出最优的性能。

分析在不同电流密度下，合金装饰镀层的磨损量，进一步评估每种电流密度对镀层耐磨性能的影响，分析结果如表4所示。

表4 镀层磨损量

Tab.4 Wear amount of coatings

| 序号 | 电流密度/(A·dm <sup>-2</sup> ) | 磨损量/(mg·min <sup>-1</sup> ) |
|----|----------------------------|-----------------------------|
| 1  | 0.5                        | 0.064                       |
| 2  | 1.0                        | 0.058                       |
| 3  | 2.0                        | 0.068                       |
| 4  | 3.0                        | 0.075                       |
| 5  | 4.0                        | 0.162                       |

通过表4可知，在电流密度介于0.5 A/dm<sup>2</sup>至4.0 A/dm<sup>2</sup>的范围内，镀层的磨损量并非随着电流密度的增加呈现单一的上升或下降趋势。当电流密度从0.5 A/dm<sup>2</sup>提升至1.0 A/dm<sup>2</sup>时，磨损量有所减少，显示出耐磨性能的提升；但随着电流密度进一步增加至2.0 A/dm<sup>2</sup>和3.0 A/dm<sup>2</sup>，磨损量逐渐增加，耐磨性能开始下降；当电流密度达到4.0 A/dm<sup>2</sup>时，磨损量显著增大，耐磨性能明显恶化。在本实验条件下，当电流密度为1.0 A/dm<sup>2</sup>时，镀层的磨损量达到最小，表明此时镀层的耐磨性能最优。因此，从提升耐磨性能的角度考虑，选择1.0 A/dm<sup>2</sup>作为电流密度是较为合适的。

### 2.3 pH 值对合金装饰镀层性能的影响

通过上述研究发现，在电沉积参数中，当电流

密度设定为 $1.0 \text{ A/dm}^2$ 时,合金装饰镀层的性能最佳。基于这一试验结果,本研究进一步将电流密度固定在 $1.0 \text{ A/dm}^2$ ,镀液温度设定为 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ ,并分别调整pH值,以分析不同pH值对镀层性能的具体影响。

(1) 硬度分析:分析不同pH值条件下镀层的硬度变化,具体结果如表5所示。

表5 不同pH值下镀层硬度

Tab.5 Coating hardness at different pH values

| 序号 | pH 值 | 合金装饰镀层显微硬度/HV |
|----|------|---------------|
| 1  | 3.5  | 314.2         |
| 2  | 4.5  | 315.6         |
| 3  | 5.5  | 316.8         |
| 4  | 6.5  | 315.3         |
| 5  | 7.5  | 314.8         |

pH值作为电镀过程中的关键参数,对镀层的组织结构、成分分布及晶粒大小等方面具有显著影响,这些影响进而决定了镀层的硬度性能。根据表5的数据,在pH值从3.5增加至8.5的过程中,合金装饰镀层的显微硬度逐渐上升,达到峰值 $316.8 \text{ HV}$ ;而当pH值继续上升至6.5和7.5时,镀层的显微硬度虽略有下降,但仍维持在较高水平。因此,可以明确看出,在pH值为5.5的条件下,镀层的硬度性能达到最优。从提升硬度性能的角度考虑,选择pH值为5.5作为电解液的适宜pH值。

(2) 摩擦性能分析:在电沉积过程中,分析不同pH值变化下合金装饰镀层的摩擦系数变化,结果如图3所示。

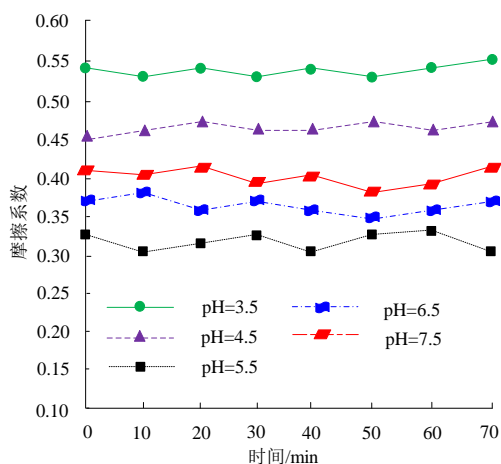


图3 不同pH值变化下镀层摩擦系数分析

Fig.3 Analysis of friction coefficient of coating under different pH values

通过图3可知,在电沉积过程中,合金装饰镀层的摩擦系数随时间变化呈现出一定的波动。对比不同pH值下的摩擦系数值,可以发现pH值为5.5时的镀层摩擦系数在相同时间点上保持最低,其值始终在0.30至0.35的范围内波动。而在其它pH值条件下,镀层的摩擦系数相对较高,这意味着这些镀层的耐磨性能相对较弱。因此,可得出,当pH值设定为5.5时,镀层的摩擦性能表现最佳。

分析不同pH值条件下镀层在摩擦试验过程中的磨损量变化,以此全面评估pH值对镀层性能的影响,具体结果如表6所示。

表6 不同pH值下镀层磨损性能

Tab.6 Wearing property of coating at different pH values

| 序号 | pH 值 | 磨损量/( $\text{mg} \cdot \text{min}^{-1}$ ) |
|----|------|---|
| 1  | 3.5  | 0.058                                     |
| 2  | 4.5  | 0.054                                     |
| 3  | 5.5  | 0.048                                     |
| 4  | 6.5  | 0.055                                     |
| 5  | 7.5  | 0.056                                     |

通过表6可知,在pH值为3.5和4.5的酸性环境中,镀层的磨损量相对较高,分别为 $0.058 \text{ mg/min}$ 和 $0.054 \text{ mg/min}$ 。这可能是由于酸性介质对镀层表面产生了腐蚀作用,导致镀层在摩擦过程中更易受损。当pH值提升至6.5和7.5时,虽然镀层的磨损量略有增加,但仍低于酸性环境下的数值,表明在中性及弱碱性环境中,镀层的耐磨性能相对较好。但与pH值为5.5时的性能相比,这些条件下的耐磨性能仍显不足。在pH值为5.5时,镀层的磨损量达到最低值,可能是由于在该pH值下,镀层表面的化学反应更为稳定,从而增强了其对磨损的抵抗能力。因此,可得出,在pH值为5.5的条件下,镀层的耐磨性能最优。

## 2.4 温度对合金装饰镀层性能的影响

基于上述研究,本文设置电流密度为 $1.0 \text{ A/dm}^2$ ,pH值为5.5,调整不同镀液温度,评估温度对镀层的影响。

(1) 硬度分析:分析在电沉积过程中,不同镀液温度下的合金硬度变化,分析结果如表7所示。

通过表7可知,镀液温度对合金镀层的显微硬度有显著影响。当镀液温度从 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 逐渐提升至 $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,合金的显微硬度呈现出缓慢上升的趋势,由 $316.8 \text{ HV}$ 增加至 $320.3 \text{ HV}$ 。这一变化表明,在 $50 \text{ }^\circ\text{C}$

表7 镀层硬度分析

Tab.7 Hardness analysis of coatings

| 序号 | 温度/°C | 合金装饰镀层显微硬度/HV |
|----|-------|---------------|
| 1  | 50    | 316.8         |
| 2  | 60    | 317.5         |
| 3  | 70    | 320.3         |
| 4  | 80    | 318.2         |
| 5  | 90    | 314.4         |

至70 °C的温度范围内,适当提高镀液温度有助于增强合金镀层的硬度。然而,当镀液温度进一步升高至80 °C和90 °C时,合金的显微硬度开始下降,分别降至318.2 HV和314.4 HV。这一现象表明,过高的镀液温度对镀层的硬度产生不利影响。由于高温下镀液中离子的运动过于剧烈,导致沉积过程变得不稳定,镀层中可能出现缺陷或应力分布不均情况,进而降低了镀层的硬度。因此,可以确定在70 °C条件下,镀层的硬度能够达到并保持最高水平。

(2) 摩擦性能分析:分析不同温度下,镀层在摩擦过程中的摩擦系数变化,结果如图4所示。

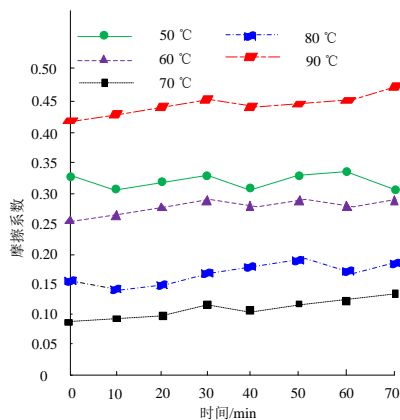


图4 镀层摩擦系数分析

Fig.4 Analysis of friction coefficient of coating

通过图4分析可知,当镀液温度设定为90 °C时,镀层的摩擦系数达到最高值,这表明较高的温度对镀层的抗摩擦性能有着显著的不利影响。相比之下,镀液温度为50 °C时的摩擦系数明显高于60 °C、70 °C以及80 °C条件下的数值,这说明适当提高镀液温度有助于改善镀层的耐摩擦性能。当镀液温度达到70 °C时,镀层的摩擦系数在所有测试条件中保持最低,且始终未超过0.15。因此,可认为在70 °C的条件下,镀层的摩擦性能和耐磨性能得到一定程度的优化。

分析不同镀液温度条件下,各种合金装饰镀层的磨损量,以此充分验证每种镀液温度对镀层的影响,分析结果如表8所示。

表8 不同温度下镀层磨损性能

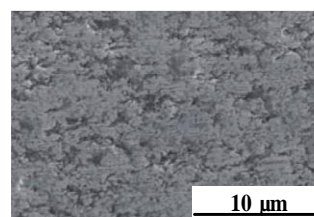
Tab.8 Wearing property of coating at different temperatures

| 序号 | 温度/°C | 磨损量/(mg·min <sup>-1</sup> ) |
|----|-------|-----------------------------|
| 1  | 50    | 0.048                       |
| 2  | 60    | 0.046                       |
| 3  | 70    | 0.039                       |
| 4  | 80    | 0.042                       |
| 5  | 90    | 0.088                       |

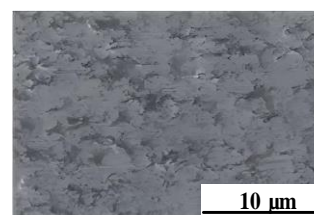
通过表8可知,镀液温度对镀层磨损量的影响呈现一定规律。当镀液温度从50 °C上升至70 °C时,镀层的磨损量逐渐下降。在50 °C时,镀层的磨损量为0.048 mg/min,而当温度升高至70 °C时,磨损量降低至0.039 mg/min。当镀液温度进一步升高至80 °C和90 °C时,镀层的磨损量开始显著增加。在80 °C时,磨损量回升至0.042 mg/min,而在90 °C时,磨损量更是高达0.088 mg/min。这一变化表明,过高的镀液温度会对镀层的耐磨性能产生不利影响。因此,可以确定在70 °C的条件下,镀层展现出最佳的耐磨效果。

### 2.5 镀层微观形貌分析

结合上述实验结果,在电流密度为1.0 A/dm<sup>2</sup>、pH值为5.5、镀液温度为70 °C时对合金装饰表面进行电镀,分析电镀前后合金装饰表面的磨损形貌,如5所示。



(a) 电镀前



(b) 电镀后

图5 镀层微观形貌分析

Fig.5 Microstructure analysis of coating

由图5(a)可见, 电镀前的合金装饰表面呈现出明显的磨损痕迹和粗糙不平的结构, 这些磨损痕迹是由于合金在使用过程中受到机械摩擦、腐蚀或其它环境因素的作用而产生的; 而电镀后的合金表面磨损痕迹显著减少, 这种变化主要归因于Ni-P-MoS<sub>2</sub>合金镀层的沉积。镀层中的Ni和P元素形成了致密的金属结构, 提高了表面的硬度和耐磨性。同时, MoS<sub>2</sub>微粒的加入进一步增强了镀层的润滑性和耐磨性能。MoS<sub>2</sub>具有层状结构, 层与层之间易于滑动, 因此能够在摩擦过程中起到润滑作用, 减少摩擦阻力和磨损量。所以在电流密度为1.0 A/dm<sup>2</sup>、pH值为5.5、镀液温度为70 °C时制备的镀层, 在经过磨损处理后, 具有更平整光滑的表面形貌、致密的微观结构和优异的物理化学性能。

### 3 结语

本研究不同电沉积参数对Ni-P-MoS<sub>2</sub>合金装饰镀层性能的影响, 旨在开发出具有高耐磨性、高硬度的装饰材料。通过调整电流密度、镀液pH值及温度等关键参数, 对镀层的硬度和耐磨性进行了全面深入的评估。

在电流密度的分析中, 研究发现当电流密度设定为1.0 A/dm<sup>2</sup>时, 镀层展现出更为可靠的性能。同时, 在pH值的影响研究中, 发现当镀液pH值调整为5.5时, 镀层表现出出色的抗磨损能力。在温度的研究中, 当镀液温度为70 °C时, 镀层性能达到最佳状态。为此, 本研究得出以下结论: 在制备Ni-P-MoS<sub>2</sub>合金装饰镀层时, 通过优化电沉积参数, 即将电流密度设定为1.0 A/dm<sup>2</sup>、镀液pH值调整为5.5、镀液温度控制在70 °C, 可以显著提升镀层的硬度和耐磨性能。展望未来, 研究可进一步探索其它电沉积参数对镀层性能的影响, 以及镀层在实际应用场景中的长期稳定性和耐久性。

### 参考文献

[1] 皇保欢, 张彦敏, 李吉宝, 等. 均匀化退火对 Cu-Ni-P 合金组织和性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2024, 45(1): 87-94.

[2] 夏雨, 韦春贝, 林松盛, 等. 化学复合镀 Ni-Mo-P(h)BN 镀层的宽温域摩擦学性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2024, 53(10): 2860-2872.

[3] 王楠, 宋贵宏, 陈雨, 等. Ni 掺杂对  $\beta$ -Cu<sub>2</sub>Se 薄膜微观结构和热电性能的影响[J]. 稀有金属, 2024, 48(3): 365-

377.

- [4] 赵薛生, 游志勇, 刘涛, 等. 化学镀 Ni-P 对挤压铸造固-液复合 Cu/Al 双合金界面的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(2): 206-210.
- [5] 张斌, 郭宇会, 杨小平, 等. 辊径对 Cu-Fe-P 铜合金轧制带材表面微观缺陷及性能的影响[J]. 锻压技术, 2024, 49(9): 122-128.
- [6] 杨悦澜, 何湘柱, 袁惠彬, 等. Ni-P 合金和 Ni-Co-P 合金电沉积工艺优化及其性能[J]. 电镀与涂饰, 2023, 42(13): 18-24.
- [7] 周国庆, 向倩, 秦水平, 等. 水对低共熔溶剂中电沉积 Zn-Fe 合金镀层性能的影响[J]. 表面技术, 2023, 52(3): 237-245, 265.
- [8] 李宏亮, 刘胜达, 崔孟超, 等. 电沉积电位对镍钴合金超疏水镀层耐蚀性的影响[J]. 功能材料, 2024, 55(11): 11158-11163.
- [9] Krim S, Giljean S, Marsiquet C, et al. Annealing of electro-deposited nickel coatings on aluminum alloy: Microstructural properties and wear resistance of nickel-rich aluminate layers[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2024, 33(20):10712-10725.
- [10] 张宇焯, 韩鹏, 王文, 等. 水下搅拌摩擦加工 CoCr-FeNiMn 高熵合金微观组织及力学性能[J]. 塑性工程学报, 2024, 31(2): 86-90.
- [11] 王宇, 娄延春, 赵岭, 等. 电渣熔铸 ZG14Ni3CrMoV 低合金高强度钢力学性能研究[J]. 铸造, 2023, 72(8): 956-962.
- [12] 安敏荣, 姚俊凡, 陈轩, 等. CoCrFeNiMn 高熵合金拉伸力学性能和塑性变形机理对尺寸的依赖研究[J]. 钢铁钒钛, 2023, 44(6): 179-185.
- [13] Len K K, Dikici T. Evaluation of the shielding effectiveness of electrodeposited Zn-Ni, Zn-Co, Ni-Co, and Zn-Ni-Co alloy coatings[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2024, 35(19):1-13.
- [14] 陈嘉琳, 李述涛, 陈叶青. 考虑晶体取向的 Al<sub>0.3</sub>CoCr-FeNi 高熵合金动态力学性能研究[J]. 爆炸与冲击, 2024, 44(3): 4-28.
- [15] 项辉宇, 黄辉琼, 冷崇杰, 等. 模具和工艺参数对铝合金成形件回弹仿真研究[J]. 计算机仿真, 2024, 41(2): 386-390, 434.
- [16] 周绍安, 贾卫平, 陈伟荣. 磁场强度对铜基电沉积 Ni-ZrO<sub>2</sub> 复合镀层性能的影响[J]. 功能材料, 2020, 51(7): 7208-7213.