

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2025.12.015

电沉积参数对 Ni-Co-P 复合电镀层性能的影响

杨亭^{1*}, 龙汉², 张云云¹, 陈尚升¹, 陈俊艺¹, 王广银³

(1. 广东开放大学 机电工程学院, 广东 广州 510091; 2. 国防科技大学 理学院, 湖南 长沙 410003;
3. 陆装驻北京地区第五军代室, 北京 100005)

摘要: 为深入探究电沉积参数与 Ni-Co-P 复合电镀层性能之间的关联, 本研究选取电流密度、镀液成分、温度等电沉积参数作为研究对象, 采用系统实验与理论分析相结合的方法, 研究电沉积参数对 Ni-Co-P 复合电镀层显微硬度、耐腐蚀性及耐磨性的影响。测试结果表明: 在电流密度为 5 A dm^{-2} 、电镀温度为 140°C 、电镀时间为 30 min 的条件下, 镀层的显微硬度达到更优; 在电流密度为 5 A dm^{-2} 、电镀温度为 100°C 、电镀时间为 40 min 的条件下, 镀层的耐腐蚀性表现更佳; 当电流密度为 6.6 A dm^{-2} 、电镀温度为 116°C 、电镀时间为 33 min 时, 镀层的耐磨性最为优异。

关键词: 电沉积参数; 电镀液; 镀层性能

中图分类号: TQ51.66 文献标识码: A

Influence of electrodeposition parameters on the properties of Ni-Co-P composite electroplating coatings

Yang Ting^{1*}, Long Han², Zhang Yunyun¹, Cheng Shangsheng¹,
Cheng Junyi¹, Wang Guangyin³

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Guangdong Open University, Guangzhou 510091, China; 2. College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410003, China; 3. The Fifth Military Representative Office of the Land Force Stationed in the Beijing Area, Beijing 100005, China)

Abstract: To investigate the correlation between electrodeposition parameters and the properties of Ni-Co-P composite electroplating coatings, this study selected electrodeposition parameters such as current density, plating solution composition, and temperature as research objects. A combination of systematic experiments and theoretical analysis was used to study the effects of electrodeposition parameters on the microhardness, corrosion resistance, and wear resistance of Ni-Co-P composite electroplating coatings. The test results show that under the conditions of a current density of 5 A dm^{-2} , an electroplating temperature of 140°C , and an electroplating time of 30 minutes, the microhardness of the coating reaches a better level. Under the conditions of a current density of 5 A dm^{-2} , electroplating temperature of 100°C , and electroplating time of 40 minutes, the corrosion resistance of the coating is better. When the current density is 6.6 A dm^{-2} , plating temperature is 116°C , and plating time is 33 min, the coating exhibits optimal wear resistance.

Keywords: electrodeposition parameters; electroplating solution; layer plating performance

收稿日期: 2025-02-25

修回日期: 2025-04-28

通信作者: 杨亭(1973—), 男, 硕士, 副教授, 研究方向为智能控制、电镀生产和电路板设计, email: jiajiabb3255@163.com

基金项目: 国家自然科学基金委员会联合基金项目(U20A20286)

引用信息: 杨亭, 龙汉, 张云云, 等. 电沉积参数对 Ni-Co-P 复合电镀层性能的影响[J]. 电镀与精饰, 2025, 47(12): 117-123.

Yang Ting, Long Han, Zhang Yunyun, et al. Influence of electrodeposition parameters on the properties of Ni-Co-P composite electroplating coatings[J]. Plating and Finishing, 2025, 47(12): 117-123.

电沉积技术作为现代表面工程的核心工艺之一，因其工艺可控性强、设备成本低、可实现复杂构件均匀镀覆等优势，在航空航天、电子封装、海洋工程高端装备制造领域具有不可替代的作用。Ni-Co-P三元合金镀层因其独特的非晶/纳米晶复合结构，展现出显著优于传统二元合金镀层的综合性能，在精密模具、石油钻探工具等苛刻工况下具有重要应用价值。

近年来，国内外学者围绕Ni-Co-P合金镀层的制备工艺、性能优化及应用拓展等方面开展了系统研究，并取得了显著进展。丁耀等^[1]采用新型电镀配方在黄铜基体上制备了Ni-Co-P镀层，通过热处理工艺调控镀层性能，并综合运用多种表征手段对镀层的微观结构、力学性能和耐蚀性进行系统分析，但该研究仅局限于单一基体材料，缺乏对不同基体适用性的探讨，应用效果不佳。高昌琦等^[2]采用化学镀工艺在玄武岩纤维表面制备超薄Ni-Co-P镀层，并将其应用于铝基复合材料的增强改性，深入研究了镀层对复合材料界面结构和力学性能的影响机制，然而该工艺的规模化生产可行性仍有待验证。杨悦澜等^[3]通过正交试验优化了紫铜表面Ni-P和Ni-Co-P合金电沉积工艺参数，系统考察了镀层的组织结构和耐蚀性能，但未涉及镀层在动态载荷条件下的性能演变规律研究。王国峰等^[4]针对钛合金高温连接的技术难题，开发了一种Ni-Co纳米镀层作为扩散连接中间层的方式，以有效降低连接温度并改善接头性能。该方法对镀层成分的梯度设计及其对连接界面影响的机理研究不够深入，难以大范围推广应用。

Ni-Co-P复合镀层的关键特征参数均直接受控于电流密度、镀液pH值、温度等电沉积参数，且这些参数间存在显著的交互作用。因此，开展电沉积参数对镀层性能的影响研究非常重要。在该背景下，研究电沉积参数对Ni-Co-P复合电镀层性能的影响，希望通过设计合理的试验方案，全面考察电流密度、电镀温度及电镀时间等关键参数对镀层性能的影响作用，以优化Ni-Co-P复合镀层的制备工艺。

1 试验部分

1.1 试验材料与设备

本次试验所用的基体材料为45钢，具体成分见表1。针对基体材料45钢进行预处理^[5-6]，流程如图1所示。

表 1 45 钢基体材料成分表

Tab.1 Composition of 45 steel matrix materials

元素	含量范围(质量分数)
C	0.42%~0.50%
S _i	0.17%~0.37%
Mn	0.50%~0.80%
P	≤0.035%
S	≤0.035%
C _r	≤0.25%
Ni	≤0.30%

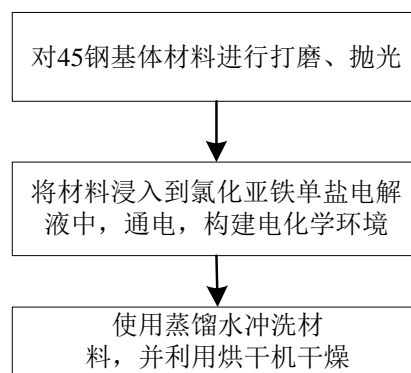


图 1 基体材料 45 钢预处理流程图

Fig.1 Schematic diagram of base material 45 steel pretreatment process

1.2 试验试剂

本次试验所需试剂如下表2所示，试剂纯度均为AR级。

表 2 试验试剂表

Tab.2 Test reagent list

试剂	化学式	生产厂家
氯化亚铁	FeCl ₂ ·4H ₂ O	辽宁科隆精细化工股份有限公司
抛光膏	Al ₂ O ₃ /CeO ₂	湖北东曹化学科技有限公司
次亚磷酸钠	Na ₂ H ₂ PO ₂ ·H ₂ O	福晨(天津)化学试剂有限公司
硫酸钴	CoSO ₄ ·7H ₂ O	武汉楚江浩宇化工科技发展有限公司
硼酸	H ₃ BO ₃	廊坊乾耀科技有限公司
氯化镍	NiCl ₂ ·6H ₂ O	山东信恒化工有限公司
硫酸镍	NiSO ₄ ·6H ₂ O	山东欣合新材料有限公司
表面活性剂	C ₁₂ H ₂₅ OSO ₄ Na	杭州益民化工有限公司
柠檬酸钠	C ₆ H ₅ Na ₃ O ₇ ·2H ₂ O	山东欣合新材料有限公司

1.3 试验设备

本次试验所需设备如表3所示。

表3 试验设备表

Tab.3 Test equipment list

仪器	型号	生产厂家
抛光机	SH300A-40	湖北科沃德化工有限公司
超声波清洗机	PS-80	上海洽姆分析技术有限公司
电子分析天平	HR-250AZ	深圳市京都玉崎电子有限公司
烘干箱	FZG	常州市盛丰干燥设备有限公司
电镀槽	FB2023	陕西瑞特热工机电设备科技有限公司
电极	—	上海晶抗生物工程有限公司
恒温水浴锅	WBK-3B	上海坤诚科学仪器有限公司
显微硬度计	HVS-1000	关河仪器设备(上海)有限公司
磨损试验机	MM-200	济南恒瑞金试验机有限公司
盐雾试验箱	GX-3040	上海培因实验仪器有限公司

1.4 电镀液配制

在Ni-Co-P复合电镀层制备前,需配置电镀液。本次研究中的电镀液为硫酸盐-氯化物电镀液,配制过程如下:分别用电子分析天平称取47.5 g硫酸镍、2.5 g硫酸钴、5 g氯化镍、0.1 g表面活性剂,并将其溶解在250 mL去离子水中^[7-8]。然后加入2 g次亚磷酸钠,通过降低镀液析氢电位,使金属离子更顺畅地沉积^[9]。最后加入15 g柠檬酸钠和7.5 g硼酸。硼酸作为缓冲剂,主要用于调节镀液的pH值,确保电镀过程在pH值为3.3~3.5范围内进行^[10-11]。配制完成后,通过过滤彻底清除镀液中的杂质,确保镀液的纯净度与均匀性,最后让镀液自然冷却至室温^[12],以备后续处理。

1.5 电沉积参数设定

1.5.1 电流密度

适当的电流密度能引导镀液中的金属离子在基体材料表面以均匀、有序的方式沉积,从而形成均匀、致密微观结构的镀层。这种微观结构不仅赋予了镀层良好的外观,还显著提升了镀层的性能。然而,若电流密度超出一定范围,镀液中的金属离子会迅速且无序地在基体表面沉积,导致镀层表面

变得粗糙不平。这种粗糙表面不仅增加了镀层的孔隙率,使得镀层更容易受到外界环境侵蚀,还有可能引发镀层与基体之间的结合力下降,导致镀层在受到外力作用时发生剥落。因此电镀过程中,必须严格控制电流密度,确保其在适宜的范围内波动^[13]。

1.5.2 温度

适当的温度可提高电解液的电导率和离子的扩散速率,从而有利于电沉积过程的进行,但过高的温度可能导致镀液中的化学反应加速,产生不必要的副反应,影响沉积层的质量^[14]。

1.5.3 电镀时间

过短的电镀时间可导致镀层厚度不足,无法满足使用要求;而过长的电镀时间则可能导致镀层过厚,增加成本并可能引发镀层剥落等问题^[15]。基于上述,对3个参数的设定方案如下表4所示。

表4 电沉积参数设定方案

Tab.4 Parameter setting scheme for electrodeposition

方案	电流密度/ (A·dm ⁻²)	电镀温度/ °C	电镀时间/ min
1	2~8	55	35
2	2	40~160	35
3	2	55	20~40

1.6 电沉积技术流程

通过电镀槽、电极、恒温水浴锅、数字恒流电源等设备搭建电镀装置,如图2所示。



图2 电镀装置图

Fig.2 Electroplating device diagram

Ni-Co-P复合电镀层主要由Ni、Co和P这3种元素组成。其中,Ni和Co是主要的金属成分,而P则以非金属的形式存在于镀层中^[16]。利用图1电镀装置对基体材料45钢进行施镀,制备Ni-Co-P复合电镀层,流程如图3所示。

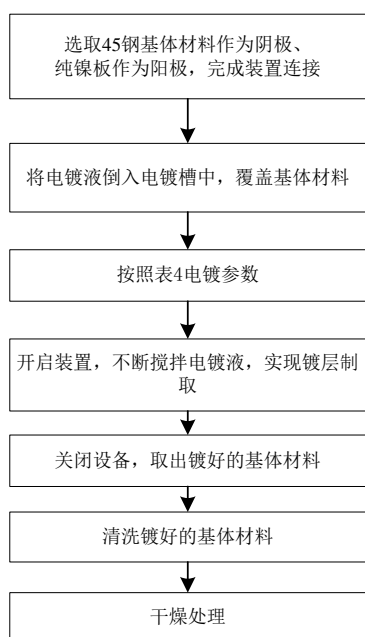


图3 Ni-Co-P 复合电镀层制备流程图

Fig.3 Schematic diagram of Ni-Co-P composite plating process

1.7 Ni-Co-P 复合电镀层性能测试

1.7.1 显微硬度

本次采用维氏硬度仪进行镀层的硬度测试，为保障其处于良好的工作状态，设置载荷500 g，持续时间10 s。将镀层样品平整地放置在载物台上，确保样品稳固且不会移动。使用维氏硬度仪的金刚石压头，在镀层的4个角和中央位置分别施加载荷，并持续10 s。每个测试点都会形成一个菱形的压痕^[19]。根据压痕的对角线长度 d ，计算硬度值，其公式如下：

$$A_i = \frac{1.85 \cdot B}{d_i^2} \quad (1)$$

式中： A_i 为测试点 i 的维氏硬度值， kgf/mm^2 ； B 为施加的载荷，N。

以此为基础，计算 A_i 的均值作为镀层的显微硬度，公式如下：

$$\bar{A} = \frac{\sum_{i=1}^5 A_i}{5} \quad (2)$$

1.7.2 耐腐蚀性

通过电化学工作站测试镀层的耐腐蚀性能^[20]，其测试过程如下：利用盐雾试验箱模拟腐蚀过程，随后将其浸入到预先准备好的电解质溶液中，施加电位，记录数据并绘制Tafel极化曲线。

1.7.3 耐磨性

用MM-200磨损试验机对镀层进行耐磨性测

试，过程如下：

(1) 试样准备：将镀层试样作为下试样，通过夹具固定在转盘上；上试样通常采用标准摩擦副材料，采用GCr15轴承钢球，通过夹具固定在弹性悬臂梁上，使得上下试样之间形成点接触。

(2) 测试参数设置：根据镀层特性与测试需求，设置测试参数为旋转半径20 mm，转速200 r/min，载荷50 N，采样间隔1 s，摩擦时间30 min。

(3) 测试过程：启动试验机，电机通过带轮驱动转盘旋转，带动下试样转动。同时，上试样在施加的载荷作用下与下试样接触并产生相对摩擦。在摩擦过程中，通过传感器实时采集摩擦力和正压力数据，用于后续分析和评估。

(4) 计算摩擦系数 (ψ) ，公式如下：

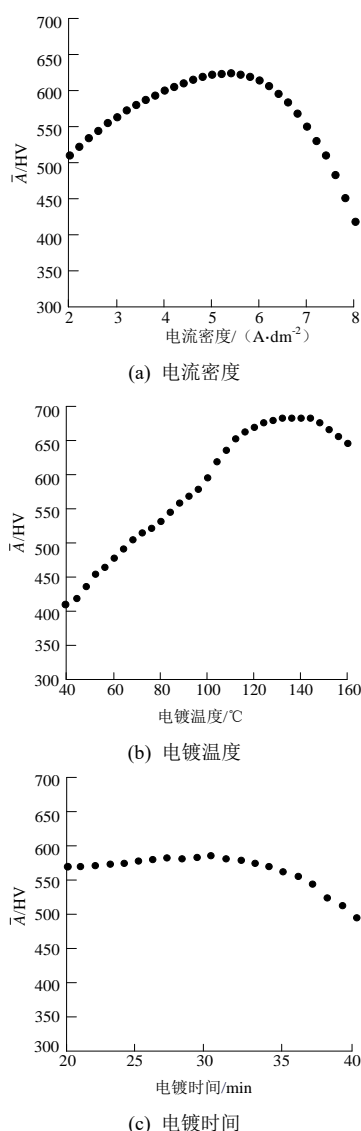
$$\psi = \frac{G_f}{G_n} \quad (3)$$

式中： G_f 为摩擦力，N； G_n 为正压力，N。

2 结果与分析

2.1 对显微硬度的影响

通过测试，得到电沉积参数与 \bar{A} 之间的影响关系，如图4所示。在电镀起始阶段，单一控制变量下，随着电流密度的逐步提升、电镀温度的逐渐升高、电镀时间的持续延长，其显微硬度均会呈显著上升趋势。并且，当电流密度为 $5 \text{ A} \cdot \text{dm}^{-2}$ 、电镀温度为 $140 \text{ }^\circ\text{C}$ 、电镀时间为30 min时，达到一个临界点，此时，显微硬度达到最高。表明在适当范围内增加电流密度、提高电镀温度和延长电镀时间均有助于提升显微硬度。分析电流密度可知，在低电流密度阶段 $(2 \sim 3 \text{ A} \cdot \text{dm}^{-2})$ ，其沉积速率较慢导致晶粒粗大，显微硬度较低；在优化阶段 $(3 \sim 5 \text{ A} \cdot \text{dm}^{-2})$ ，电流密度增加促进形核率提高，通过Hall-Petch效应实现晶粒细化和镀层致密化，显著提升显微硬度；而在过载阶段 $(5 \sim 8 \text{ A} \cdot \text{dm}^{-2})$ ，则因氢析出加剧和孔隙率增加导致性能下降。分析电镀温度可知，在低温阶段 $(40 \sim 100 \text{ }^\circ\text{C})$ 电镀过程中，存在离子迁移率不足的问题，使得镀层结晶不完整；在优化阶段 $(100 \sim 140 \text{ }^\circ\text{C})$ ，因温度升高会促进原子扩散和择优生长，同时抑制氢脆；在过热阶段 $(140 \sim 160 \text{ }^\circ\text{C})$ 则因Ostwald熟化导致晶粒粗化。分析电镀时间可知：在短时间 $(20 \sim 25 \text{ min})$ 镀层厚度不足，在优化阶段 $(25 \sim 30 \text{ min})$ 可实现厚度均匀化和内应力释放，而在过长时间 $(30 \sim 40 \text{ min})$ 则引入残余应力。当参数超过临界值后，镀层结构从“致密细化”转变为“缺陷

图4 电沉积参数与 \bar{A} 之间的影响关系曲线Fig.4 Influence relationship curve between electrodeposition parameters and \bar{A}

主导”模式，表现为高电流密度导致多孔结构、过高温度削弱晶界强化、过长时间引发微裂纹。当工艺参数为 $5 \text{ A} \cdot \text{dm}^{-2}$ 、 $140 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 30 min 时，可通过晶粒细化与致密化的协同作用实现显微硬度的最大化。

2.2 对耐腐蚀性的影响

基于电化学工作站，通过测试得到电沉积参数在不同取值下的Tafel极化曲线，如图5所示。

分析图5可知，当电流密度被调控至 $5 \text{ A} \cdot \text{dm}^{-2}$ 、电镀温度维持在 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ ，并且电镀时间设定为 40 min 时，Ni-Co-P复合电镀层的腐蚀电位偏向于正电位，意味着这些参数组合下制备的镀层表面的电子云密度更高，对腐蚀介质的吸附能力更弱，具有更好的耐腐蚀性能。这一优化效果源于多尺度协同

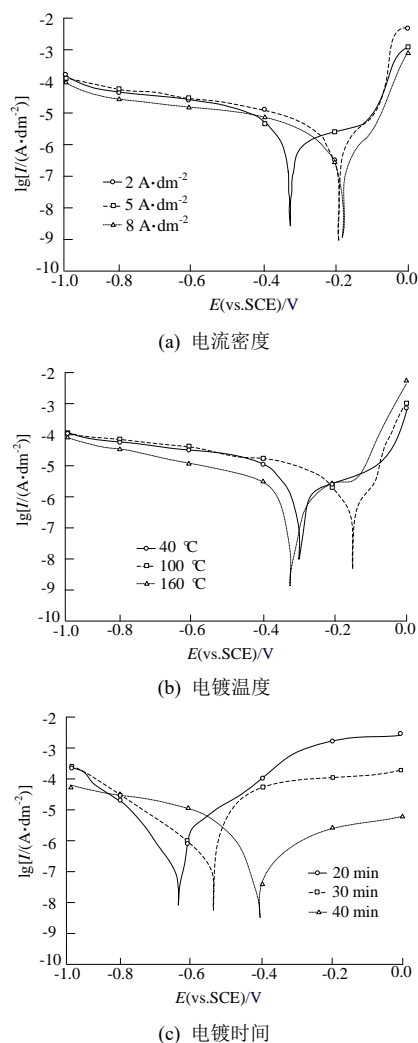


图5 电沉积参数不同取值下 Tafel 极化曲线对比

Fig.5 Comparison of Tafel polarization curve under different values of the electrodeposition parameters

作用机制，分析其电子结构层面， $5 \text{ A} \cdot \text{dm}^{-2}$ 电流密度促进了[Ni,Co]-P金属键网络形成， $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 热处理温度诱导P原子晶界偏聚， 40 min 沉积时间可确保镀层厚度均匀，共同提升表面电子云密度。最终获得的优化参数可使镀层对 $3.5\% \text{ NaCl}$ 溶液的接触角提升至 102° ， Cl^- 吸附量降低 72% ，表面功函数提高 0.45 eV ，有效抑制腐蚀介质吸附。

2.3 对耐磨性的影响

通过测试，得到电沉积参数与摩擦系数 ψ 之间的影响关系曲线，如图6所示。

分析图6可知，随着电流密度和电镀温度的增加，镀层的摩擦系数呈现出了下降的趋势，反映了镀层在摩擦过程中的阻力减小，耐磨性能得到显著提升。但是当电流密度达到 $6.6 \text{ A} \cdot \text{dm}^{-2}$ 、电镀温度达到 $116 \text{ }^\circ\text{C}$ 时，镀层质量会下降，镀层可能出现裂纹、

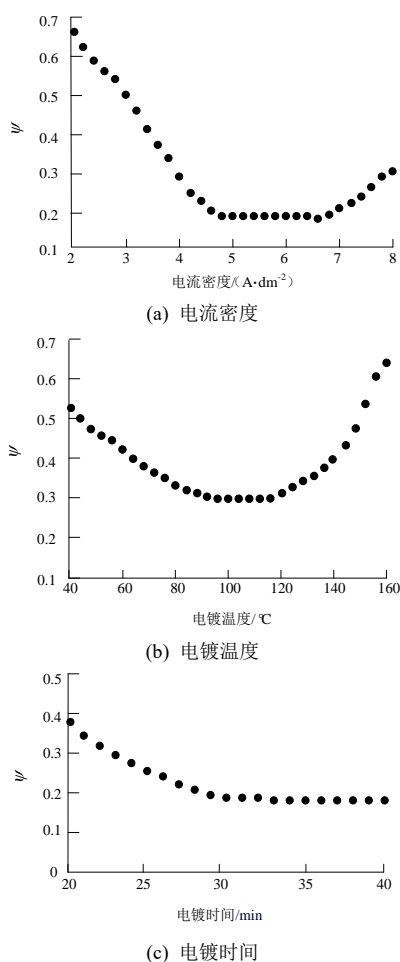


图6 电沉积参数与 ψ 之间的影响关系曲线
Fig.6 Influence relationship curve between electrodeposition parameters and ψ

剥落或过度粗糙等问题，摩擦系数升高，降低耐磨性。电镀时间与摩擦系数之间存在负相关关系，随着电镀时间地延长，摩擦系数逐渐降低，并在33 min时趋于平稳。这是因为镀层逐渐增厚并变得更加均匀和平滑，从而降低了摩擦阻力。即当电流密度达到 $6.6 \text{ A}\cdot\text{dm}^2$ 、电镀温度达到 $116 \text{ }^\circ\text{C}$ ，电镀时间为33 min时，镀层的耐磨性最优。

2.4 镀层性能测试

根据上述研究可知，在电流密度为 $5 \text{ A}\cdot\text{dm}^2$ 、电镀温度为 $140 \text{ }^\circ\text{C}$ 、电镀时间为30 min的条件下，镀层的显微硬度达到更优；在电流密度为 $5 \text{ A}\cdot\text{dm}^2$ 、电镀温度为 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 、电镀时间为40 min的条件下，镀层的耐腐蚀性表现更佳；当电流密度为 $6.6 \text{ A}\cdot\text{dm}^2$ 、电镀温度为 $116 \text{ }^\circ\text{C}$ 、电镀时间为33 min时，镀层的耐磨性最为优异。分别将其命名为工况1、工况2和工况3，对上述3种工况下的镀层进行显微性能测试，获取XRD图谱如图7所示。

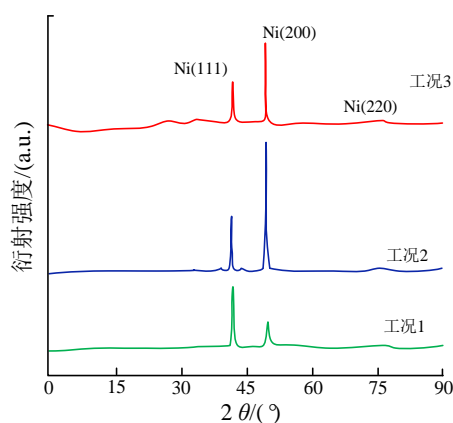


图7 镀层 XRD 图谱结果
Fig.7 XRD diffractogram of coating

分析图7可知，在工况1下，Ni(111)和Ni(200)衍射峰较弱且宽化，这是由于 $140 \text{ }^\circ\text{C}$ 的高温促进了镀层晶粒粗化，而30 min的短时间限制了晶粒完全生长，导致晶粒尺寸较小，从而提升了显微硬度。在工况2下，衍射峰强度适中且峰形尖锐，表明较低温度($100 \text{ }^\circ\text{C}$)和较长时间(40 min)使晶粒生长均匀致密，晶界减少，从而降低腐蚀介质渗透，提高耐腐蚀性。而在工况3下，衍射峰强度最强且尖锐，说明电流密度为 $6.6 \text{ A}\cdot\text{dm}^2$ 时会促进快速沉积，如Ni(111)等晶粒尺寸较大且择优取向，晶界减少，进而增强镀层的抗磨损能力，使其耐磨性最优。

3 结论

本研究深入探讨了电沉积参数对Ni-Co-P复合电镀层性能的综合影响。结果显示，电流密度的优化能够显著提升电镀层的致密度和硬度，从而在摩擦磨损测试中表现出更为出色的耐磨性能。电镀温度的调控则对电镀层的晶粒尺寸和相组成产生了显著影响，进而影响了其整体的机械性能和耐腐蚀性。电镀时间的合理延长确保了电镀层达到足够的厚度，提供了必要的物理屏障，增强了电镀层的保护性能。该研究不仅为Ni-Co-P复合电镀层的工业化应用提供了有力的理论支撑，也为其他复合电镀体系的研究提供了参考思路与方法。

参考文献

[1] 丁耀, 沈岳军, 付定国, 等. 热处理温度对电镀 Ni-Co-P 镀层的性能影响[J]. 电镀与精饰, 2024, 46 (8): 25-29.
[2] 高昌琦, 马勤, 魏玉鹏, 等. Ni-Co-P 中间层优化玄武岩纤维增强铝基复合材料的界面结构和力学性能[J]. 稀

- 有金属材料与工程, 2023, 52(12): 4013-4020.
- [3] 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.
- [4] 王国峰, 刘永康, 刘青, 等, 王月林. Ni-Co 纳米镀层为中间层的 TC4 钛合金低温扩散连接[J]. 锻压技术, 2022, 47(11): 239-245.
- [5] 张璐, 余云丹, 卫国英. 电流密度对电沉积钴-铁-二氧化锆复合镀层性能的影响[J]. 电镀与涂饰, 2023, 42(9): 1-6.
- [6] 赵显蒙, 李长青, 鞠辉, 等. 不同因素对电沉积镍-钨合金镀层性能的影响[J]. 电镀与涂饰, 2023, 42(5): 14-18.
- [7] 马春阳, 何泓鑫, 夏法锋, 等. 超声波辅助射流电沉积 Ni-W-Al₂O₃ 纳米复合镀层工艺参数优化及性能研究[J]. 东北农业大学学报, 2024, 55(7): 93-102.
- [8] 卢帅, 孙晓伟, 薛伟, 等. 沉积参数对阴极等离子电解沉积 Ni 涂层的影响[J]. 稀有金属, 2024, 48(6): 761-773.
- [9] 李子豪, 彭文海, 王艳虎, 等. 射流电沉积流场变化对铜沉积层的影响[J]. 表面技术, 2024, 53(14): 207-215.
- [10] 刘涛, 贾卫平, 吴蒙华, 等. 工艺参数对定间距电沉积微镍柱表面形貌的影响[J]. 工具技术, 2023, 57(3): 39-44.
- [11] 薛建超, 贾波, 王亚菲, 等. 阴极等离子电解沉积制备 Al₂O₃-Ru 复合涂层的机理与性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2024, 53(12): 3306-3312.
- [12] 余本潮, 李维, 刘星, 等. 电沉积法制备 FeNiCo 片状粒子及其涡流抑制和磁导率增强[J]. 包装工程, 2024, 45(23): 110-119.
- [13] 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.
- [14] 段淑茹, 朱开金, 孙心, 等. 电沉积法制备 Ce-Ps-LaCoO₃/Al₂O₃ 及臭氧催化降解焦化废水尾水研究[J]. 现代化工, 2024, 44(11): 148-152, 158.
- [15] 李岳, 闵洛夫, 张文, 等. 电沉积制备高活性高稳定性镍铁合金析氧电极[J]. 化学工业与工程, 2024, 41(5): 51-60.
- [16] 何萌, 贾淑果, 朱倩倩, 等. 阴极钛材表面处理工艺对其表面状态及铜离子电沉积初期行为的影响[J]. 精密成形工程, 2024, 16(9): 56-64.
- [17] 杨西荣, 楚小晴, 李兆. 电解液温度和 pH 值对铜电沉积行为及性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2024, 53(6): 1685-1692.
- [18] 孙诗成, 张朝阳, 吴予澄, 等. 激光电沉积复合制备定域微纳结构及其超疏水性能研究[J]. 表面技术, 2024, 53(13): 64-74, 95.
- [19] 陈志翔, 赵远涛, 田冉, 等. 不同电流密度下电沉积金刚石增强镍基复合涂层的微观结构与耐磨性能[J]. 机械工程材料, 2024, 48(5): 90-96.
- [20] 胡越, 梁智鹏, 李继东, 等. 电沉积制备 Ni-Co-Ce 复合镀层及其耐蚀性能研究[J]. 稀有金属与硬质合金, 2024, 52(2): 38-44.