热处理对低磷化学镀镍层硬度及磁性能影响的研究

张云飞，吕小虎，吴远进，马　兴
（贵州振华群英电器有限公司，贵州 贵阳　550024）

[摘　要]电磁继电器作为航空航天及武器装备系统中的关键自动控制元件，铁心与轭铁的性能直接决定了继电器的可靠性。以电工纯铁 DT4E 制成的铁心与轭铁为研究对象，采用 SEM，XRD 和显微维式硬度计等手段，分析不同热处理温度（200~450 ℃）对低磷（3.2%，质量分数）化学镀镍磷合金层的微观结构、显微硬度及电磁吸力的影响。结果表明：镀态下的镍磷合金层呈现微晶与非晶的混合结构，硬度约 480 HV。随着热处理温度的升高，镀层经历了完整的晶化过程。250 ℃左右镀层内应力释放，硬度出现短暂下降；350 ℃时开始析出弥散分布的 Ni_3P 硬质相；400 ℃时镀层完成再结晶，Ni_3P 相大量弥散析出，硬度达到峰值 700 HV；450 ℃时，镀层内应力积聚，产生微观裂纹，硬度略有下降。在电磁性能方面，热处理温度对电磁吸力的影响相对有限，电磁吸力随温度升高仅有小幅提升，在 400 ℃时达到最大值，相较于镀态，电磁性能整体变化较小。

[关键词]电磁继电器；低磷化学镀镍；硬度；电磁吸力；热处理
[中图分类号] TG153.14　　[文献标识码] A　　doi：10.26935/j.issn.2097-5317.2026.0013
[文章编号] 2097-5317(2026)03-0007-06

Effects of Heat Treatment on the Hardness and Magnetic Properties of Low-Phosphorus Electroless Nickel Plating Layer

ZHANG Yunfei, LYU Xiaohu, WU Yuanjin, MA Xing
(Guizhou Zhenhua Qunying Electrical Appliance Co., Ltd., Guizhou 550024, China)

Abstract: As a critical automatic control component in aerospace and weapon equipment systems, the performance of the core and yoke in electromagnetic relays directly determines the operational reliability of the entire system. This study took DT4E iron cores and yokes as research objects. SEM, XRD and micro-vickers hardness tester methods were used to investigate the effects of different heat treatment temperatures (200-450 ℃) on the microstructure, microhardness, and electromagnetic attraction force of low-phosphorus (3.2%, mass fraction) electroless nickel-phosphorus alloy coatings. The results indicated that the as-plated nickel-phosphorus alloy coating presented a mixed microstructure of microcrystalline and amorphous phases, with a microhardness of approximately 480 HV. With the elevation of heat treatment temperature, the coating underwent complete crystallization. At around 250 ℃, the internal stress within the coating was released, causing a temporary decline in microhardness. At

收稿日期：2025-12-04
Received：2025-12-04
通信作者：张云飞(1992-)，中级工程师，研究领域：金属表面处理，E-mail：1139864530@qq.com
Corresponding Author：ZHANG Yunfei (1992-), Intermediate Engineer, Research Focus: Metal Surface Treatment, E-mail: 1139864530@qq.com

350 ℃, finely dispersed Ni_3P hard phases start to precipitate within the coating. When the temperature reached 400 ℃, the coating completed recrystallization, accompanied by massive precipitation of finely dispersed Ni_3P phases, and its microhardness peaked at 700 HV. At 450 ℃, internal stress accumulated in the coating, leading to the formation of microcracks and a slight reduction in microhardness. Regarding electromagnetic performance, the variation in heat treatment temperature exerted a relatively limited effect on the electromagnetic attraction force. The electromagnetic attraction force increased slightly with rising temperature and reached the maximum value at 400 ℃; nevertheless, its electromagnetic performance showed no significant change compared with the as-plated state.

Key words: electromagnetic relay; low-phosphorus electroless nickel plating; hardness; electromagnetic suction force; heat treatment

0 前 言

电磁继电器作为现代自动控制系统与电路中的核心执行与信号转换单元,其工作机理在于利用输入回路电磁铁铁心与衔铁间产生的电磁吸力,驱动输出回路的触点动作,从而实现被控电路的“通”与“断”。这种“以小控大”“以弱控强”的特性,使其在航空、航天、武器装备、工业自动化及通讯设备等对可靠性要求极端苛刻的领域,扮演着不可或缺的角色[1]。铁心和轭铁作为磁路的关键导磁部件,其材料选择与表面处理工艺至关重要。电工纯铁凭借高饱和磁感应强度、高磁导率及低矫顽力等优异软磁性能,成为制备铁心和轭铁的理想材料[2]。然而,纯铁化学性质活泼,极易在潮湿环境中发生氧化、腐蚀,不仅影响构件外观,还会严重劣化其表面磁导率、增大磁阻,导致继电器吸合电压升高、释放电压降低,甚至出现动作失效问题。因此,需在保证其优异磁性能的前提下,对铁心和轭铁实施有效的表面防护处理。低磷化学镀镍层因磷含量较低,可保留镍固有的铁磁性,同时具备优良的可焊性,是电磁继电器铁心、轭铁等导磁部件表面防护的优选工艺之一[3]。但镀态化学镀镍层的硬度与耐磨性较差,无法适配继电器频繁动作产生的冲击与摩擦作用,需通过后续热处理进行性能强化。热处理是调控化学镀镍层综合性能的关键工艺,热处理过程中,镀层非晶/微晶结构会向晶态转变,同时伴随金属间化合物(主要为 Ni_3P)析出,可显著改变镀层的力学与物理性能[4]。现有研究多聚焦于热处理对中、高磷化学镀镍层硬度及耐蚀性的影响,针对兼具导磁性能要求的低磷化学镀镍层,如何通过热处理工艺实现硬度提升与磁性能保持的最优平衡,仍缺乏系统性研究。基于电磁继电器实际生产需求,本研究以电工纯铁 DT4E 表面低磷化学镀镍层为研究对象,开展不同温度真空热处理试验,通过显微硬度计、X 射线衍射仪(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)及专用电磁吸力测试装置,系统分析热处理温度对镀层微观结构、力学性能及电磁性能的影响规律与内在机理,为电磁继电器关键导磁部件表面镀层的优化处理提供理论依据与工艺支撑。

1 试 验

1.1 试样制备与镀层处理

本试验基体材料选用电磁继电器量产所用 DT4E 电工纯铁铁心与轭铁零件,该材料化学成分纯净、碳含量极低,具备优异的软磁特性。零件表面预处理及镀覆工艺步骤如下:

(1)化学除油:采用碱性除油剂,在 60 ℃条件下浸泡 5 min,彻底去除零件表面油脂与污物。

(2)酸洗除锈:采用质量分数 10%稀硫酸溶液,室温浸泡 30~60 s,去除表面薄氧化膜。

(3)化学抛光:在专用化抛液中短时浸渍,获得光亮活化表面,提升镀层结合力。

(4)活化处理:采用质量分数 30%稀盐酸活化,去除表面钝化膜,获得高反应活性的纯铁表面。

(5)化学镀镍磷合金:将预处理后试样浸入自制低磷化学镀镍液,镀液主要成分为硫酸镍、次亚磷酸钠、复合配位剂及稳定剂。镀液温度恒定为(85±2)℃,pH 值控制在 4.6~5.0。经原子吸收光谱法检测,所得镀层磷质量分数为 3.2%,属于典型低磷镍磷合金镀层。采用涡流测厚仪多点测试,镀层厚度均匀稳定在 2~5 μm 的设计范围内。

1.2 热处理工艺

为避免高温氧化对镀层及纯铁基体性能产生干扰,所有热处理试验均在真空炉内开展,真空度不低于 1×10^{-2} Pa。将镀后试样分为多组,分别在 200、

250、300、350、400、450 ℃温度下保温 1 h,热处理完成后随炉冷却至室温,取出备用,用于后续性能测试与表征。

1.3 性能测试与表征

(1)显微硬度测试 采用 HVS-1000 型显微维氏硬度计测试镀层硬度,试验载荷 50 gf,保压时间 10 s。每组试样选取至少 5 个平整区域测试,剔除异常值后取算术平均值,试验重复 3 次以保证数据可靠性。

(2)电磁吸力测试 为直观表征热处理对器件最终服役性能的影响,将不同热处理工艺处理后的铁心、轭铁与线圈、衔铁等配件组装为完整电磁继电器单元。采用专用电磁吸力测试系统,对线圈施加额定电压,通过高精度力传感器测试衔铁吸合过程的电磁吸力。每组工艺测试 5 个样品,取平均值消除装配个体差异。

(3)表面形貌分析(SEM) 采用 ZEISS Sigma 300 场发射扫描电子显微镜,观测不同热处理状态下镀层的表面形貌,分析镀层胞状结构尺寸、形态及孔隙、裂纹等缺陷的演变规律。

(4)显微结构分析(XRD) 采用 Rigaku SmartLab X 射线衍射仪表征镀层物相组成与晶体结构。测试参数:Cu Kα 射线(λ = 1.540 6 Å),管电压 40 kV,管电流 40 mA,扫描角度 2θ = 15.0°~70.0°,扫描速率 2.0 (°)/min。通过分析衍射峰位置、强度及半高宽,判定镀层晶化程度、物相转变及 Ni_3P 相析出特征。

2 结果与讨论

2.1 镀层微观结构分析

图 1 为不同热处理温度下镍磷镀层的 XRD 谱。镀态试样衍射峰呈现典型的非晶“馒头峰”特征,在 45.0°附近出现宽化弥散衍射包,为非晶及纳米微晶材料的典型表征[5]。低磷化学镀镍层为镍、磷原子快速共沉积形成的亚稳态过饱和固溶体,磷原子无序固溶于面心立方(f.c.c)镍晶格中,抑制晶粒长大,形成尺寸小于 10 nm 的纳米晶粒与大量晶界,因此 XRD 图谱呈现宽化衍射特征。热处理温度升至 200~300 ℃时,Ni(111)晶面衍射峰小幅窄化、强度提升;随温度升高,Ni(111)、Ni(200)衍射峰持续锐化,同时在 40.8°、44.6°、47.2°位置出现微弱新衍射峰。对照标准 PDF 卡片(Ni_3P,PDF#74-1384),可确定该组衍射峰对应 Ni_3P 相的(231)、(240)、(330)晶面,表明 350 ℃条件下镀层开始析出亚稳态金属间化合物 Ni_3P[6],且 Ni_3P 相以超细弥散形态分布于镍晶粒内部及晶界处[7]。当热处理温度升至 400 ℃时,Ni_3P 各衍射峰强度显著增强,镍基体衍射峰锐化、窄化效果进一步提升[8]。

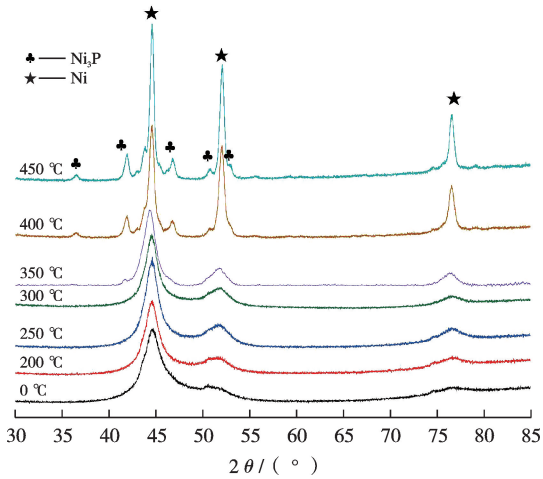


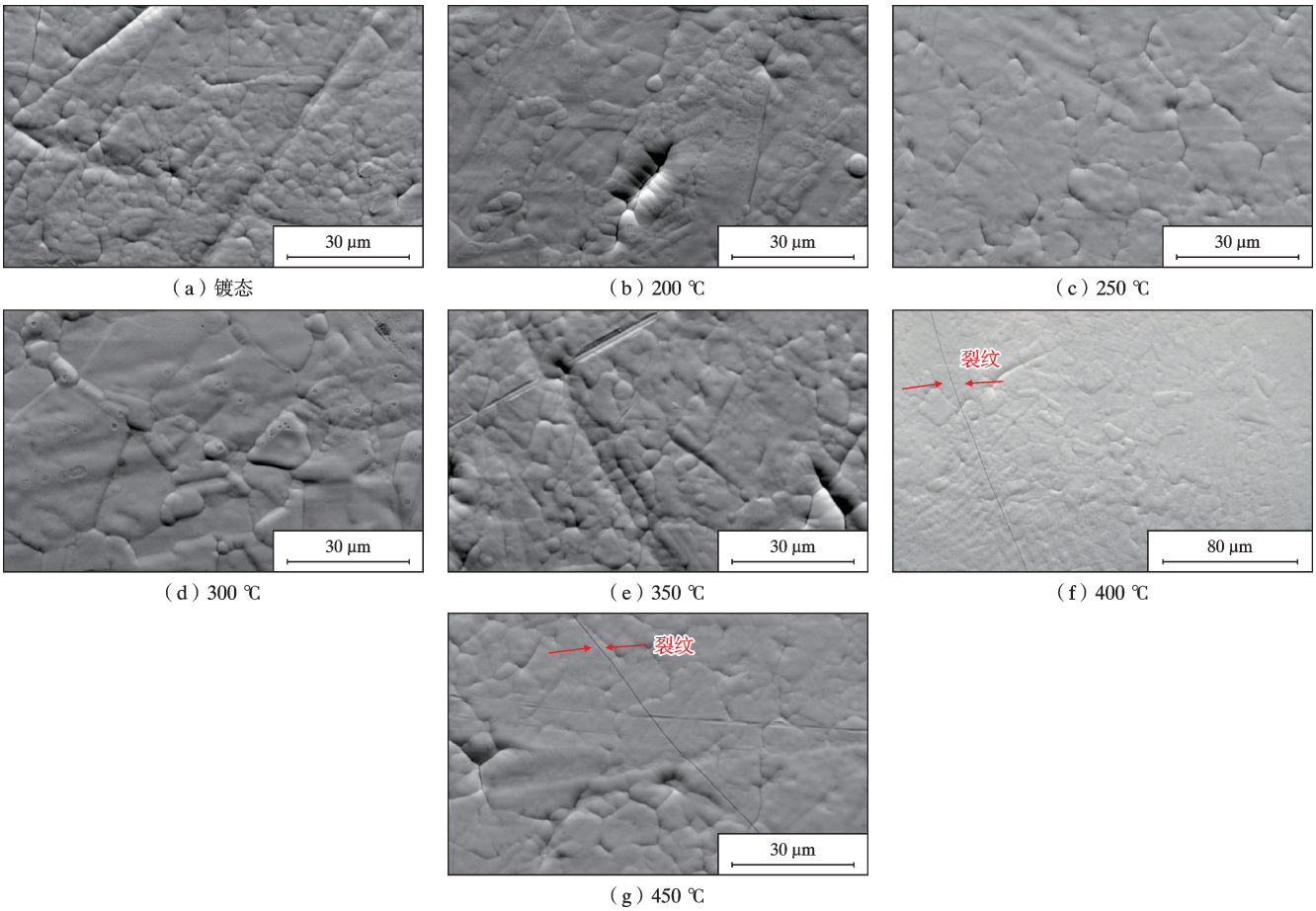
图 1 不同热处理温度镍磷合金 XRD 分析
Fig. 1 XRD analysis of nickel-phosphorus alloy at different heat treatment temperatures

2.2 镀层表面形貌分析

图 2 为不同热处理温度下镀层的 SEM 形貌,反映了热处理工艺对镀层微观形貌的调控规律。镀态镀层表面呈现化学镀镍典型的致密胞状结构(图 2a),胞状晶粒尺寸细小均匀、堆积紧密,但高倍视野下可观察到微小凹坑、结节等沉积缺陷,源于沉积过程速率不均,为镀层固有微观缺陷[9]。200~300 ℃热处理后,镀层胞状结构清晰完整,整体形貌与镀态基本一致,仅胞状晶粒边界略微模糊、棱角趋于圆滑,为原子表面扩散引发的微观形貌演变。350~400 ℃热处理后,镀层原始细小胞状结构逐渐消失,表面趋于平整光滑。450 ℃高温热处理后,平整的镀层表面出现网状微裂纹(图 2g),裂纹贯穿多个原始胞状晶粒,为析出应力与热应力叠加所致,当叠加总应力超过镀层断裂强度时,镀层发生脆性开裂。

2.3 热处理对镀层硬度的影响

图 3 为镀层显微硬度随热处理温度的变化曲线。随热处理温度升高,镀层硬度整体呈上升趋势,250 ℃



（a）镀态　（b）200 ℃　（c）250 ℃
（d）300 ℃　（e）350 ℃　（f）400 ℃
（g）450 ℃

图 2　不同热处理温度镀层 SEM 分析
Fig. 2　SEM analysis of coatings at different heat treatment temperatures

时硬度出现小幅下降，原因是镀层内部氢原子扩散析出、晶粒轻微长大，释放了镀层内应力与界面能，导致硬度小幅降低[10]，该规律可由图 1 中 45.0°附近衍射峰锐化、图 2c 中胞状晶粒边界模糊的微观特征佐证。350~400 ℃区间镀层硬度急剧提升，该阶段以析出强化效应为主，大量超细弥散的 Ni_3P 硬质相在镍基体中析出[11]。400 ℃条件下，图谱中40.8°、44.6°、47.2°处 Ni_3P 衍射峰锐化程度最高，Ni_3P 析出量与弥散度达到峰值，强化效果最优，镀层硬度达到 700 HV 峰值。450 ℃时镀层硬度小幅回落，主要归因于高温引发 Ni_3P 晶粒粗化，弥散强化效果减弱[12,13]，对应微观形貌为镀层胞状结构完全消失、表面趋于平整。

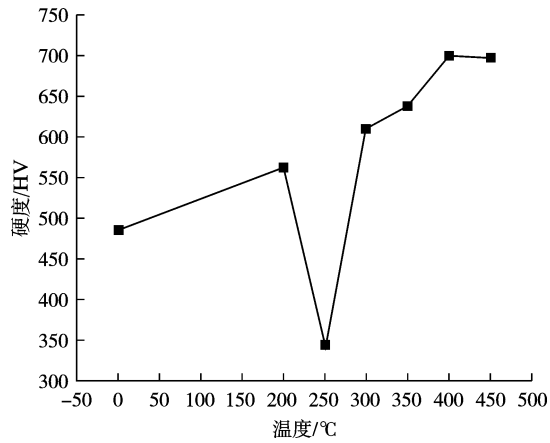


图 3　热处理温度对镍磷合金硬度的影响
Fig. 3　Effect of heat treatment temperature on hardness of nickel-phosphorus alloy

2.4　热处理对电磁吸力影响性分析

图 4 电磁吸力测试结果表明：热处理温度对继电器电磁吸力的影响远弱于其对镀层硬度的调控作用。电磁吸力与磁通密度平方成正比，磁通密度由磁路磁动势与总磁阻共同决定。镀层对磁阻的影响主要分为本征磁阻与界面气隙磁阻 2 方面。本征磁阻层面：化学镀镍层磁性能高度依赖磷含量，磷为非磁性元素，会破坏镍基体铁磁性长程有序结构，当磷质量分数超过 3.0%时，镀层饱和磁化强度与磁导率显著下

降[3,14]。本研究镀层磷质量分数为 3.2%,处于铁磁性临界区间。热处理仅改变镀层晶体结构,未改变化学成分,非磁性 Ni_3P 相的析出会在磁性镍基体中引入非磁性夹杂,理论上小幅降低磁导率,但因 Ni_3P 相弥散度高、镀层厚度薄,该负面影响被其他因素抵消。气隙磁阻层面:300 ℃以上热处理可有效消除镀层表面微孔与微观缺陷,细化平整镀层表面,减小表面粗糙度引发的分布式气隙,降低磁路气隙磁阻,这是电磁吸力随热处理温度升高小幅提升的核心原因。综合作用下,镀层电磁吸力整体波动较小,热处理对磁性能的调控效果有限。

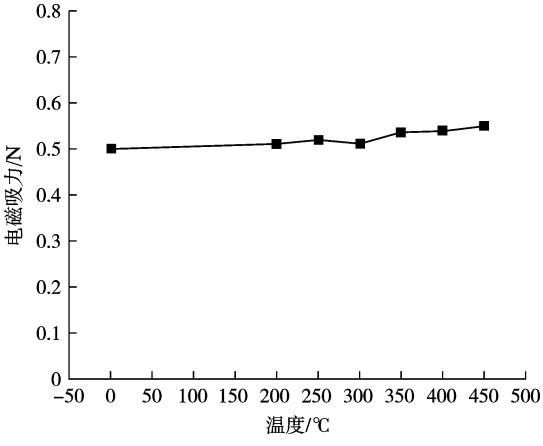


图 4 不同热处理温度电磁吸力测试

Fig. 4 Electromagnetic attraction test at different heat treatment temperatures

3 结 论

通过对 DT4E 电工纯铁表面低磷化学镀镍磷合金层的热处理工艺试验,系统探究了热处理温度对镀层微观结构、力学性能及磁性能的影响规律,得出主要结论如下:低磷化学镀镍层晶化遵循“亚稳态过饱和固溶体(微晶/非晶)→镍晶粒回复与长大→Ni_3P 相形核析出(350 ℃起始)→Ni+Ni_3P 完全晶化复相组织(400 ℃完成)”的演变规律。400 ℃热处理可使镀层析出高度弥散的 Ni_3P 强化相,镀层硬度达到峰值;450 ℃高温条件下,Ni_3P 晶粒粗化且镀层产生微观裂纹,导致硬度小幅下降。

热处理温度对镀层表面形貌影响显著,中低温热处理(≤400 ℃)可通过原子表面扩散修复镀层微观缺陷,获得平整致密的镀层表面;高温热处理(450 ℃)会引发析出应力与热应力叠加,使镀层产生微裂纹,破坏镀层结构完整性与防护性能。

200~400 ℃热处理可小幅提升镀层电磁吸力,核心原因是热处理优化了镀层表面形貌、降低了磁路气隙磁阻。但整体吸力提升幅度有限,表明低磷化学镀镍层磁性能主要由磷含量(本研究为 3.2%)决定,热处理并非调控其磁性能的核心手段。

综合考量镀层硬度、表面结构完整性及电磁服役性能,电磁继电器 DT4E 铁心与轭铁低磷化学镀镍层的最优真空热处理工艺为:400 ℃、保温 1 h。

[参 考 文 献]

[1] 肖 斌, 刘 雷, 谢林伟. 基于工艺特性的电磁吸力仿真分析研究[J]. 电子器件, 2020, 43(6): 1 239-1 243.
XIAO B, LIU L, XIE L W. Simulation Analysis of Electromagnetic Attraction Based on Process Characteristics [J]. Electronic Devices, 2020, 43(6): 1 239-1 243.

[2] 刘类翔, 任 璐, 简 玮. 耐腐蚀性化学镀镍基镀层研究进展[J]. 表面技术, 2025(1): 33-46.
LIU L X, REN L, JIAN W. Research Progress on Corrosion-Resistant Electroless Nickel-Based Coatings [J]. Surface Technology, 2025(1): 33-46.

[3] 王更杰, 叶金祥, 李佳蔚, 等. 航空用铝合金表面化学镀镍磷层的制备及其耐蚀性[J]. 腐蚀与防护, 2022, 43(6): 67-70.
WANG G J, YE J X, LI J W, et al. Preparation and Corrosion Resistance of Electroless Ni-P Coating on Aviation Aluminum Alloy [J]. Corrosion & Protection, 2022, 43(6): 67-70.

[4] 戴建华, 王 涛, 王翠凤. 退火处理对模芯化学镀镍磷镀层机械性能影响研究[J]. 中国机械, 2024(19): 88-91.
DAI J H, WANG T, WANG C F. Effect of Annealing on Mechanical Properties of Electroless Ni-P Coating on Mold Core[J]. China Machinery, 2024(19): 88-91.

[5] 岳丽杰, 薛广成, 谢 鲲, 等. TWIP 钢表面 Ni-P 化学镀层组织结构及性能研究[J]. 表面技术, 2023, 53(16): 89-102.
YUE L J, XUE G C, XIE K, et al. Microstructure and Properties of Electroless Ni-P Coating on TWIP Steel[J]. Surface Technology, 2023, 53(16): 89-102.

[6] 王 朋, 刘 宏, 吕媛媛, 等. 化学沉积 Ni-Mo-P 和 Ni-P镀层退火晶化组织及耐蚀性[J]. 表面技术, 2015, 44(10): 7-15.
WANG P, LIU H, LYU Y Y, et al. Annealed Microstructure and Corrosion Resistance of Electroless Ni-Mo-P and Ni-P Coatings[J]. Surface Technology, 2015, 44(10):

7-15.

[7] MAHALLAWY N E, BAKKAR A, SHOEIB M, et al. Electroless Ni-P coating of different magnesium alloys[J]. Surface and Coatings Technology, 2008, 202(21): 5 151-5 157.

[8] 张韵波, 左寒阳, 肖吉源, 等. 润滑油介质下热处理改性钛合金 Ni-P 镀层的摩擦性能研究[J]. 热加工工艺, 2025, 54(24): 19-23.
ZHANG Y B, ZUO H Y, XIAO J Y, et al. Friction Properties of Heat-Treated Ni-P Coating on Titanium Alloy in Lubricating Oil[J]. Hot Working Technology, 2025, 54(24): 19-23.

[9] 何一鹏. 热处理对化学镀 Ni-P 镀层的组织结构和阻氢渗透性能影响研究[D]. 南昌: 南昌工业大学, 2024.
HE Y P. Effect of Heat Treatment on Microstructure and Hydrogen Permeation Resistance of Electroless Ni-P Coating[D]. Nanchang: Nanchang University of Technology, 2024.

[10] 杨西荣, 田倩炆, 刘晓燕, 等. 热处理对 Ni-W-P 镀层组织与性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2022, 43(6): 148-153.
YANG X R, TIAN Q W, LIU X Y, et al. Effect of Heat Treatment on Microstructure and Properties of Ni-W-P Coating[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2022, 43(6): 148-153.

[11] 贾启华, 高 丹. 热处理对镁合金化学镀 Ni-P 镀层性能的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2019, 42(6): 35-37.
JIA Q H, GAO D. Effect of Heat Treatment on Properties of Electroless Ni-P Coating on Magnesium Alloy[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2019, 42(6): 35-37.

[12] 田 华. 热处理温度对网球拍用钛合金表面 Ni-P 合金镀层性能的影响[J]. 腐蚀与防护, 2018, 39(6): 467-469.
TIAN H. Effect of Heat Treatment Temperature on Properties of Ni-P Alloy Coating on Tennis Racket Titanium Alloy[J]. Corrosion & Protection, 2018, 39(6): 467-469.

[13] 金世伟, 康 敏, 邵 越, 等. 热处理非晶态 Ni-P 合金镀层的晶化过程[J]. 材料工程, 2016, 44(9): 115-120.
JIN S W, KANG M, SHAO Y, et al. Crystallization Process of Amorphous Ni-P Alloy Coating During Heat Treatment[J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44(9): 115-120.

[14] 张允诚, 胡如南, 向 荣. 电镀手册[M]. 第三版. 北京: 国防工业出版社, 2007.
ZHANG Y C, HU R N, XIANG R. Electroplating Handbook[M]. 3rd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2007.

[编校:陈 鸣]