

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2026.06.004

不同工艺参数下 Ni-P 复合镀层对柴油机气缸套表面耐用性影响

王尧¹, 郑成博²

(1. 银川科技学院 能源与动力工程学院, 宁夏 银川 750021; 2. 华北理工大学 冶金与能源学院, 河北 唐山 063210)

摘要: 为提高柴油机气缸套的耐用性, 系统研究了工作温度、镀液 pH 值、工作电流密度及施镀时间等关键工艺参数对柴油机气缸套表面 Ni-P 复合镀层微观结构及耐用性的影响。结果表明: 各参数对镀层性能均存在显著影响, 工作温度 50 ℃ 与 pH=3.5 的镀液有助于形成表面光滑、结构致密和无微观裂纹的镀层; 2.0 A·dm⁻² 电流密度下可使镀层获得高含量的 Ni₃P 硬质相, 从而实现约 660 HV 的显微硬度。进一步对不同施镀时间(6、8 和 10 h)的研究发现, 8 h 的施镀时间可使镀层获得最佳的综合性能, 其结晶度高达 69.1%, 结合强度临界载荷达 77 N, 展现出卓越的耐磨性与耐腐蚀性。

关键词: 气缸套; Ni-P 复合镀层; 相结构; 结合强度

中图分类号: TQ153; TG178 **文献标志码:** A

Influence of different process parameters of Ni-P composite coating on durability of diesel engine cylinder liner surface

WANG Yao¹, ZHENG Chengbo²

(1. School of Energy and Power Engineering, Yichuan University of Science and Technology, Yinchuan 750021, China; 2. College of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China)

Abstract: In order to improve the durability of diesel engine cylinder liners, the effects of key process parameters such as working temperature, pH value of plating solution, working current density, and plating time on the microstructure and durability of Ni-P composite coating on the surface of diesel engine cylinder liners were systematically studied. The research results indicate that all parameters have a significant impact on properties of the coating. The working temperature of 50 ℃ and pH=3.5 contribute to the formation of a coating with a smooth surface, a dense structure, and no micro-cracks. A current density of 2.0 A·dm⁻² enables the attainment of a high content of Ni₃P hard phase within the coating, thereby achieving a maximum microhardness of approximately 660 HV. Further investigations into different plating durations (6, 8 and 10 h) reveal that an 8 h plating time can make the coating obtain optimal comprehensive performance, with a crystallinity as high as 69.1% and a critical load for bonding strength reaching 77 N, and it shows exceptional wear resistance and corrosion resistance.

Keywords: cylinder liner; Ni-P composite coating; phase structure; bonding strength

柴油机气缸套内壁长期处于高温、高压及强摩擦磨损的极端工况, 工作条件苛刻, 因此, 提升其表面耐磨、抗腐蚀性能并延长使用寿命, 是内燃机制造业的关键技术挑战。化学镀镍-磷(Ni-P)合金镀

收稿日期: 2025-11-04 修回日期: 2026-01-28

通信作者: 王尧(1985—), 男, 本科, 讲师, 研究方向为机械工程、单片机原理与应用, e-mail: yangguangelc@163.com

基金项目: 宁夏自治区级一流课程研究项目(宁教办函(2023)103 号)

引用信息: 王尧, 郑成博. 不同工艺参数下 Ni-P 复合镀层对柴油机气缸套表面耐用性影响[J]. 电镀与精饰, 2026, 48(6): 31-39.
WANG Yao, ZHENG Chengbo. Influence of different process parameters of Ni-P composite coating on durability of diesel engine cylinder liner surface[J]. Plating and Finishing, 2026, 48(6): 31-39.

层,因高硬度、优异耐蚀性及良好镀层均匀性,成为极具潜力的表面强化手段,但其最终性能高度依赖制备工艺参数。工作温度、pH值、电流密度及施镀时间等因素通过影响电沉积过程的动力学与热力学,直接决定了镀层的微观结构、结构组成及残余应力状态,进而影响其宏观性能^[1-2]。尽管已有大量研究关注单一参数的影响,但系统性地协同优化多个关键工艺参数,并明确其与柴油机气缸套专用Ni-P复合镀层性能之间的构效关系,对于实现该技术的精准应用至关重要。因此许多学者对此展开研究。崔凯等^[3]为提高模具的耐磨性能,将PTFE颗粒和Ni-P分别加入模具钢中,使用相同步骤制备PTFE以及Ni-P复合镀层试件,利用电子显微镜等不同仪器对其进行表面形貌、硬度分析以及化学成分表征等不同试验,得到PTFE颗粒制成的模具钢镀层耐磨损效果最佳。宫璇等^[4]为提高铝合金表面耐磨性能,利用电沉积法将Ni-P以及金刚石复合镀层施镀在铝合金表面,并使用扫描电子显微镜、波长色散X射线光谱分析仪以及维氏硬度仪等试验设备,对两种施镀后试件分别进行表面形貌分析、耐磨性计算等试验,得到金刚石添加量为1 g/L时的铝合金镀层磨损程度最低。李卓等^[5]为探究铝合金金属表面施加Ni-P镀层的最优施镀时长,于不同施镀时间段分别制备多种Ni-P镀层试件,并开展截面厚度测定、显微硬度检测、相结构剖析以及沉积速率测算等试验。结果表明,施镀时长为8 h时,所制备的金属Ni-P镀层表面致密性最优,其纤维结构与厚度等指标表现亦较为出色。原征宇等^[6]将不同粒径的金刚石与Ni-P镀液相混合,制成3种不同复合镀液,分别将其施加在不同钢金属表面,以此制备出3种不同镀层试件,使用磨损试验仪以及抗疲劳试验机等试验仪器对其进行不同试验,结果表明金刚石粒径为8 μm 的镀层试件具备最佳的抗摩擦力以及抗腐蚀性能。

本文系统研究工作温度、镀液pH值、工作电流密度及施镀时间等关键工艺参数对柴油机气缸套表面Ni-P复合镀层微观结构、相组成、硬度、结合强度及耐磨耐蚀性能的影响,明确各参数对镀层性能的作用规律,并通过多参数协同优化,获得综合性能优异的镀层工艺组合,从而显著提升柴油机关键部件的经济性、可靠性与耐久性^[7]。

1 Ni-P复合镀层制备及试验方法

1.1 原材料选择

为研究柴油机气缸套表面Ni-P复合镀层的制备

与性能,选用内径150 mm的38CrMoAl镜面氮化气缸套作基材。经氮化处理后,其表面形成高硬度氮化层^[8]。在氮化层上进行Ni-P复合镀,能有效提升气缸套耐用性。气缸套表面主要成分(质量分数)分别为:2.52% C、2.12% N、0.91% Al和94.45% Fe;其表面硬度为983.6 HV_{0.3},表面粗糙度 R_a 为0.102 μm 。

$\text{NiCO}_3 \cdot 2\text{Ni}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 作为柴油机气缸套表面Ni-P复合镀层中的Ni主要源头,选用湖北拓邦化工有限公司生产的 $\text{NiCO}_3 \cdot 2\text{Ni}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 作为主要原材料之一。该材料镍纯度高,可以有效减少试件制备和镀层时的杂质相生成,减少杂质含量,以此有效提高试件稳定性^[9]。其具体化学性质如下:纯度为99%,摩尔质量是304.118 g/mol,沸点在标准大气压下为333.6 $^{\circ}\text{C}$,镍含量(质量分数,下同)不低于45%,氯化物含量不超过0.05%,铁含量不超过0.008%,钴含量不超过0.005%。

NaH_2PO_2 是柴油机气缸套表面Ni-P复合镀层中P元素的主要来源,选用济南乐斌化工有限公司生产的 NaH_2PO_2 作为试验主要原材料之一。该材料兼具磷源与还原剂双重功能,其特性与气缸套对高耐磨、耐腐蚀以及强结合力等工况需求相匹配^[10]。其具体化学性质如下:纯度为99%,摩尔质量是105.99 g/mol,熔点为90 $^{\circ}\text{C}$,粒度为1 $^{\circ}$,相对密度为1.388。

此外,选用山东旭晨化工科技有限公司生产的HF作为主要原材料。该材料能显著提升Ni-P复合镀层和柴油机气缸套机体的结合能力,为优化机体表面状态、改善镀层性能奠定良好基础^[11]。其摩尔质量为20.01 g/mol,熔点是-83.3 $^{\circ}\text{C}$,沸点为19.54 $^{\circ}\text{C}$,密度为1.15 g/mL,闪点为112.2 $^{\circ}\text{C}$,等级为工业级。

除上述介绍的主要原材料外,试件制备还包括义乌市为溢商贸有限公司出售的10%稀盐酸溶液、苏州启鼎化工有限责任公司生产的柠檬酸、揭阳市佳鑫化工有限公司生产的氢氟酸铵以及实验室自来水等其他原材料,利用这些原材料制备柴油机气缸套表面Ni-P复合镀层,并结合一系列实验分析其性能,为柴油机气缸套表面良好复合镀层提供可靠基础^[12]。

1.2 试件制备

柴油机气缸套表面用Ni-P复合镀层的制备材料配合比如下: $\text{NiCO}_3 \cdot 2\text{Ni}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 的浓度为15 g/L, NaH_2PO_2 的浓度为28 g/L,柠檬酸的浓度为10 g/L,氢氟酸铵的浓度为12 g/L,HF的浓度为15 g/L。

柴油机气缸套表面用Ni-P复合镀层的制备步骤如下:

(1) 基体材料处理。为使Ni-P复合镀层稳定附着于气缸套表面,先将气缸套削薄至6 mm厚,之后用电火花切割机沿气缸套轴向和周围,将其6等份切割,切割成42 mm等长的段,切割完成后使用细砂纸或抛光机对气缸套待镀表面进行轻微抛光,去除宏观毛刺和氧化层,获得光滑平整的表面。将气缸套浸入碱性除油液中,加热至60~80℃,浸泡10~20 min,以去除表面油污。完成后用大量清水冲洗。

(2) 将工件设为阴极,放入碱性电解液中,于5~10 A/dm²的电流密度下电解1~3 min,利用析出气体(H₂或O₂)的机械剥离作用提升除油效果。电解完成后,用去离子水冲洗干净。把除油后的气缸套置于体积比10%的稀盐酸里浸泡0.5~1 min,以去除表面极薄氧化膜,实现基体活化,之后立即用去离子水洗净,并迅速移至电镀槽。

(3) 进行电镀液调配。按制备材料配合比称取药品,加入1 L去离子水,用机械搅拌器以300 r/min的转速搅拌,待药品完全溶解,得到澄清绿色电镀液。接着,用稀硫酸溶液,将镀液pH调节至1.5~2.5范围。

(4) Ni-P复合镀层施镀。将前处理好的气缸套作为阴极(连接电源负极)安装在电镀槽中^[13]。采用镍板或镍网作为阳极(连接电源正极)安装妥当。实验时,首先固定pH值为3.5、阴极电流密度为2.0 A/dm²、施镀时间8 h,研究30~70℃不同温度的影响。随后,固定镀液温度50℃、阴极电流密度2.0 A/dm²、施镀时间8 h,考察pH值1.5~5.5的作用。接着,固定镀液温度50℃、pH值3.5、施镀时间8 h,分析1.2~3.5 A/dm²不同电流密度的影响。最后,在优化条件(50℃、pH=3.5、2.0 A/dm²)下,进行6、8和10 h的电沉积。施镀过程中进行轻微搅拌,以保证镀液成分和温度的均匀性。

(5) 后处理。达到施镀时间后,切断电源,将镀覆好的气缸套从电镀槽中取出。立即用大量去离子水冲洗,以洗去表面附着的残余镀液。将试件放入烘箱中,在60~80℃下低温烘干。避免温度过高导致镀层内应力变化。

(6) 在实验室常温下,观察试件A-1、试件A-2以及试件A-3镀层表面是否存在脱落或气泡等不稳定现象发生,以此完成3种试件的最终制备。

1.3 试验方法

1.3.1 SEM 表征

使用深圳市善时仪器有限公司生产的SS-150系列扫描电子显微镜对Ni-P镀层进行SEM表观结构观察分析,可了解镀层的晶粒形态、大小及微观内部结构分布^[14]。该SEM试验参数如下:分辨率5 nm,有自动偏压系统;最大放大倍数30~150 000倍;载物台为3轴或5轴;加速电压1~30 kV可调;样本高35 mm、最大直径80 mm;聚光镜是2段式磁线圈透镜,试验于室温开展。

1.3.2 XRD 试验

使用安徽国科仪器科技有限公司生产的MiniSAXS型X射线衍射仪分析Ni-P镀层的组织结构^[15],特别是针对镀层煅烧后的硬质相展开分析,同时观察了不同制备条件下镀层析出物相的差异。该MiniSAXS型X射线衍射仪试验相关参数如下:动态范围为32 bits,像素是75 μm×75 μm,SD范围在40~350 nm,散射矢量为6.3~0.063 nm⁻¹,表征尺度为1~100 nm,仪器规格为840 mm×750 mm×700 mm,功率是2 kW,光源靶材可选Cu、Ag以及Mo等。

1.3.3 显微硬度

使用显微硬度计测量Ni-P镀层显微硬度^[16-18],加载压力设为300 g,加载时间为15 s。选取5个点进行测定,去除最高与最低值后,计算剩余数值均值。为保证数据真实,各测量点间应尽量保持较大间隔。

1.3.4 相结构试验

基于Ni-P镀层试件的XRD图谱^[19],分析复合镀层的结晶状态和物相组成。通过相结构试验,测定并计算3个试件中各元素的特征衍射峰位置及峰宽,据此量化晶粒尺寸与结晶度。结合微观致密性分析^[20],评估比较镀层的结构稳定性与结晶度,确定最优试件。与此同时,采用深圳市台正鑫制造有限公司生产的TZX-45C1型光学显微镜开展观察,放大倍数处于7~45倍区间,搭配辅助物镜后,放大倍数可达28~180倍。在10倍目镜下分析镀层晶粒表征图,将微观结构与宏观性能精准关联,为柴油机气缸套表面工艺优化提供针对性依据。Ni-P镀层结晶度计算公式如下:

对试件镀层的平均晶粒尺寸进行计算,其计算公式为:

$$A = \frac{\alpha\chi}{\delta \cos \varepsilon} \quad (1)$$

式中: A 为平均晶粒尺寸, nm; δ 是衍射峰半高宽, °; ε 为XRD衍射的布拉格角, °; χ 是X射线波长, Å; α 为形状因子。

计算各个试件镀层的结晶度, 其计算公式为:

$$H_c = \frac{E_c}{E_c + BE_a} \quad (2)$$

式中: H_c 代表结晶度, B 代表单位质量样品中晶像散射强度系数和非晶像散射强度系数的比值, E_c 代表晶像散射强度, cps; E_a 代表非晶像散射强度, cps。

1.3.5 结合强度试验

运用标格达精密仪器有限公司制造的BGD520型自动划痕仪, 针对Ni-P镀层试件实施结合强度测试。测试伊始, 借助热处理炉对Ni-P镀层开展热处理操作, 把试件放进加热炉, 升温至220 °C后保持1 h, 随后将其置于冷水中冷却10 min, 此过程循环

3次。接着, 对仪器参数进行设定, 试验载荷设为100 N, 往复次数定为2, 加载速率调整为60 N/min, 划痕长度设置为5 mm, 依此条件开展测试, 进而获取镀层与柴油机气缸套机体的结合强度。该自动划痕仪的试验相关参数如下: 划针尖头材质为金刚石, 尖头半径0.03 mm, 行程100 mm, 划痕速度10 mm/s, 电机功率60 W, 电机频率50 Hz, 试验样品最大尺寸为200 mm×100 mm。

2 不同参数下柴油机气缸套表面用 Ni-P 复合镀层的制备

2.1 工作温度对 Ni-P 镀层的影响

在镀液pH值固定为3.5、阴极电流密度固定为2.0 A·dm⁻²、施镀时间固定为8 h的条件下, 研究了工作温度(30、40、50、60和70 °C)对Ni-P镀层表面形貌的影响, 其SEM结果如图1所示。

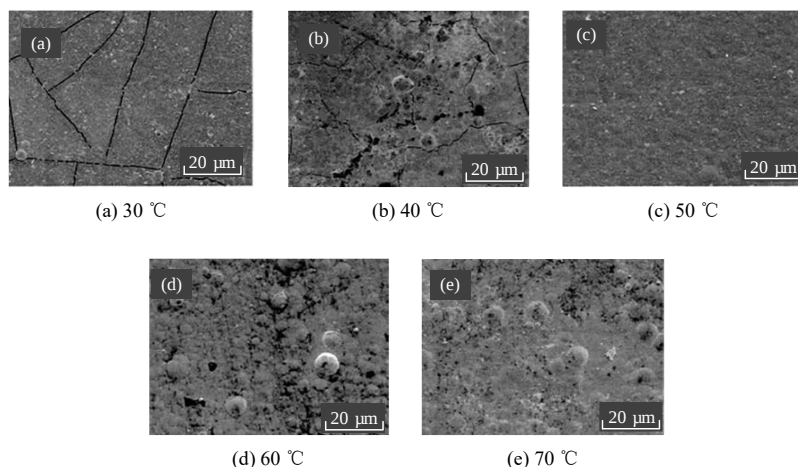


图1 不同工作温度下 Ni-P 镀层的 SEM 形貌

Fig.1 SEM images of Ni-P coating at different working temperatures

如图1所示, 工作温度对镀层表面微观形貌具有明显的作用。在图1(a)~(b)中, 当工作温度控制在30~40 °C范围内时, Ni-P镀层表面呈现出明显的微裂纹结构。其成因在于, 较低的温度抑制了电沉积的动力学过程, 导致沉积速率缓慢。与此同时, 阴极析氢副反应愈发剧烈, 产生的氢气渗入镀层, 使镀层内部形成较大内应力。当内应力超过镀层材料屈服强度, 就会以微裂纹形式释放, 损害镀层致密性与完整性。由图1(c)可知, 50 °C时Ni-P镀层表面平整光滑, 此时沉积速率与离子扩散速度达到理想平衡。一方面, 足够的能量促进了晶粒的均匀、致密生长; 另一方面, 氢气的析出速率得到有效控制, 内应力显著降低。因此, 所得镀层表面光滑平

整, 微裂纹与团状沉积物均显著减少, 形成了高质量的表面形貌。从图1(d)~(e)能够看出, 当工作温度在60~70 °C这个范围时, 沉积速率处于较快水平, 晶粒尺寸相对较大, 镀层表面呈现出较为粗糙的状态。高温环境会加剧镍盐的水解趋势, 使其容易生成氢氧化物或者碱式盐沉淀。这些无法溶解的杂质混入镀层内部, 会引发针孔状缺陷, 极大地削弱电解液的分散能力。最终造成镀层变得疏松多孔, 质量显著下降。总体而言, 电镀工作温度是影响Ni-P镀层微观结构与表面质量的关键工艺要素, 温度过低容易产生微裂纹, 温度过高会导致镀层粗糙多孔, 只有在50 °C左右的环境下, 才能获得结构致密、表面光滑的高质量镀层。

2.2 镀液pH对Ni-P镀层的影响

镀液pH的调控是电沉积工艺研究的重要部分,这是因为在电沉积过程中,阴阳极材料表面发生各种化学反应,会导致附近酸碱度的变化,而酸碱度影响各个物质的电极电势,造成析出结构组成的变化,从而影响了电沉积镀层的质量。

本实验中,固定镀液温度为50℃、阴极电流密度为 $2.0\text{ A}\cdot\text{dm}^{-2}$ 、施镀时间为8 h。将电沉积药剂完全溶解至电镀槽,用NaOH溶液调控电镀液pH值,在pH计辅助下使其达到实验所需数值。不同pH值对其微观形貌与镀层厚度的作用见图2。

在图2(e)中,当镀液pH值为5.5时,Ni-P镀层的厚度相对较薄大约 $3.5\text{ }\mu\text{m}$,而且镀层表面出现了微裂纹以及分布比较均匀的团状沉积结构。如图2(d)所示,当镀液pH为4.5时,Ni-P镀层的表面依然会有部分微裂纹和少量团状沉积结构的存在,但微裂纹的尺寸会有所减小。图2(c)表明,镀液pH值为3.5时,

氢离子浓度适宜。既能有效抑制剧烈的析氢反应,又能保证磷酸根(H_2PO_4^-)有足够活性,维持镍与磷理想的共沉积速率。此时,晶核形成与晶粒生长速率相匹配,促使镀层致密、均匀外延生长,最终获得厚度约 $11\text{ }\mu\text{m}$ 、表面光滑、结构致密的高质量镀层。如图2(b)所示,当镀液pH为2.5时,Ni-P镀层的厚度大约 $9.5\text{ }\mu\text{m}$ 且表面相对较粗糙,其表面存在一些尺寸较小且分散不均匀的团状沉积结构,所以Ni-P镀层的表面质量相对不高。如图2(a)所示,当pH进一步降至1.5时,阴极析氢已占据绝对主导地位,Ni-P的沉积反应被严重抑制,导致无法形成连续的镀层,仅能获得一层极薄且不完全的预镀层,使得基体金属表面暴露无遗,完全丧失了保护功能。

因此,不同的镀液pH制备的Ni-P镀层的表面微观形貌会有所不同,根据实验结果,为了获得表面质量相对较高的Ni-P镀层,镀液的pH值应控制在3.5左右。

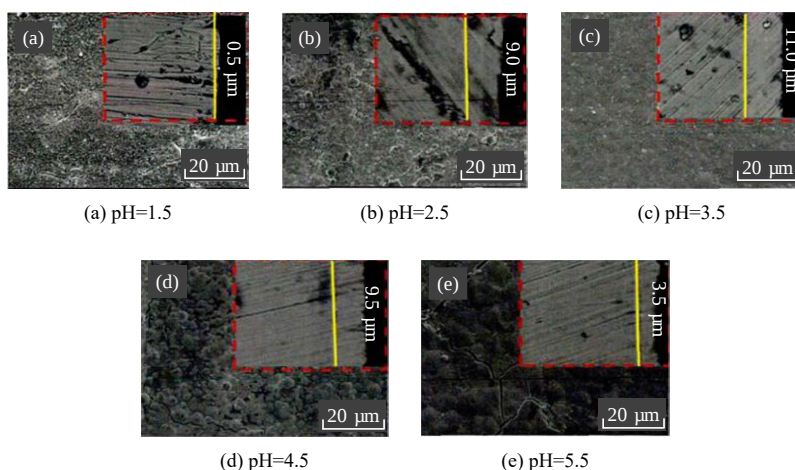


图2 不同pH值制备的Ni-P镀层的SEM表面形貌和截面形貌

Fig.2 SEM images and cross-sectional images of Ni-P coatings prepared at different pH values

2.3 工作电流密度对Ni-P镀层的影响

为研究工作电流密度对Ni-P镀层物质结构的作用,在最佳温度(50℃)与最佳pH值(3.5)条件下,固定施镀时间为8 h,以不同电流密度制备镀层,其XRD图谱如图3所示。如图3的XRD图谱所示,在 $2\theta=44.5^\circ$ 、 51.8° 和 76.4° 附近出现的3个明显衍射峰,分别对应面心立方结构镍的(111)、(200)和(220)晶面。该系列峰在所有样品中均存在且强度最高,表明镀层中镍主要以结晶态形式存在。在 $2\theta=40^\circ\sim 41^\circ$ 附近观察到一个相对宽化且强度较弱的衍射峰,这与 Ni_3P 相的主要衍射峰位相符,表明镀层中生成了作为硬质强化相的金属间化合物。在 $2\theta=30^\circ\sim 35^\circ$ 范

围内存在一个宽化的“馒头峰”,这是非晶态或极细纳米晶Ni-P合金基体典型的散射特征。同时,Ni和 Ni_3P 衍射峰的宽化现象也暗示了晶粒尺寸细小或存在微观应变。尽管不同电流密度下制备的镀层其基本结构组成未发生改变,但 Ni_3P 相衍射峰的强度随电流密度的增加呈现出先增强后减弱的非单调性变化趋势。这一现象是阴极界面反应与沉积动力学共同作用的结果。电流密度过低或者过高不利于镍原子的还原,进而影响磷原子的沉积。增大工作电流密度,阴极表面过电势随之提高,镍(磷)成核速率加快,利于形成晶粒细小、组织致密的镀层。不过,当电流密度超出合适范围,阴极表面析氢反应

会更剧烈,使附近pH值升高,氢氧化物或碱式盐在阴极表面生成。这些物质被阴极吸附并混入镀层,造成Ni-P镀层中Ni和NiP结构含量降低。可见,电沉积工作电流密度对Ni-P镀层结构组成和组织形态影响突出。

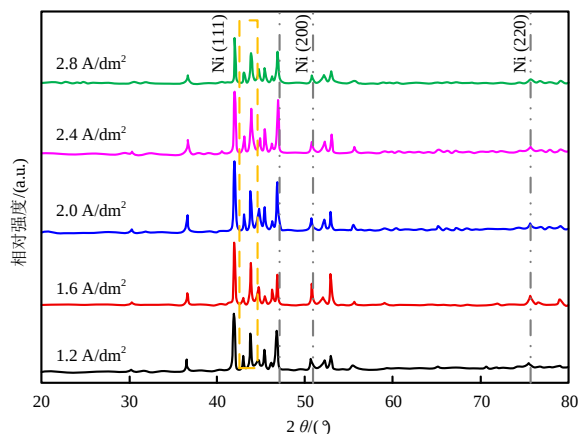


图3 不同电流密度下 Ni-P 镀层的 XRD 图谱

Fig.3 XRD patterns of Ni-P coatings at different current densities

不同电流密度制备的Ni-P镀层的显微硬度结果如图4所示。镀层的显微硬度是其微观结构与结构组成的直接体现。如图4所示, Ni-P镀层的显微硬度随电流密度的变化曲线与XRD中NiP相的强度变化趋势高度吻合, 同样表现为先升高后降低, 并在 $2.0 \text{ A} \cdot \text{dm}^{-2}$ 时达到约 660 kg/mm^2 的峰值。这是因为低电流密度下镀层中起主要强化作用的 Ni_3P 硬质相含量不足, 且镀层结构本身较为疏松、存在不均匀的团状沉积物, 无法提供有效的抵抗塑性变形的能力, 因而硬度值偏低。在 $2.0 \text{ A} \cdot \text{dm}^{-2}$ 下, 镀层同时具备了两大强化机制。原因在于低电流密度时, 镀层中起主要强化作用的 Ni_3P 硬质相含量少, 其结构疏松, 有不均匀团状沉积物, 无法有效抵抗塑性变形, 致使硬度低。而当电流密度达 $2.0 \text{ A} \cdot \text{dm}^{-2}$, 镀层会同时呈现出两种强化机制。其一是细晶强化, 由高的形核率所带来的细小晶粒尺寸所致; 其二是第二相强化(或沉淀强化), 源于镀层中高含量的、弥散分布的硬质NiP/ Ni_3P 相。这两种机制的协同效应, 使得镀层获得了卓越的显微硬度。而过高的电流密度导致镀层产生微观裂纹、高的内应力以及杂质夹杂。这些结构缺陷成为应力集中点, 显著降低了镀层抵抗外力压入的能力。同时, XRD分析结果表明, 此时硬质NiP相含量降低, 强化作用被弱化, 进而共同引发了显微硬度的降低。由此可见, 不同电流密度下

制备的Ni-P镀层, 其显微硬度存在差异。为制备出显微硬度最优的Ni-P镀层, 电沉积电流密度宜设定为 $2.0 \text{ A} \cdot \text{dm}^{-2}$ 。

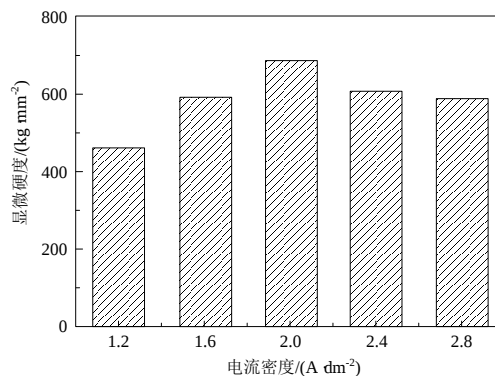


图4 不同电流密度制备的 Ni-P 镀层的显微硬度

Fig.4 Microhardness of Ni-P coatings prepared at different current densities

综上, 在工作温度 50°C 、镀液pH值3.5、电沉积电流密度 $2.0 \text{ A} \cdot \text{dm}^{-2}$ 的条件下, 通过改变施镀时间制备了3个对比试件, 以研究施镀时间对镀层结构与性能的影响。其中, 试件A-1施镀时间为6 h; 试件A-2施镀时间为8 h; 试件A-3施镀时间为10 h。

3 不同施镀时间下柴油机气缸套表面用 Ni-P 复合镀层的耐用性分析

3.1 XRD 试验分析

为从3个试件中找出具备最佳耐磨性和耐腐蚀性能的试件, 验证最佳施镀时间, 使用MiniSAXS型X射线衍射仪, 得到3个试件中主要元素的衍射峰。利用其详细分析各个试件中Ni元素以及P元素的微观含量及其相对强度, 以此找出3种试件中具备最高相对强度的试件。不同角度下3个试件的相对强度峰值如图5所示。

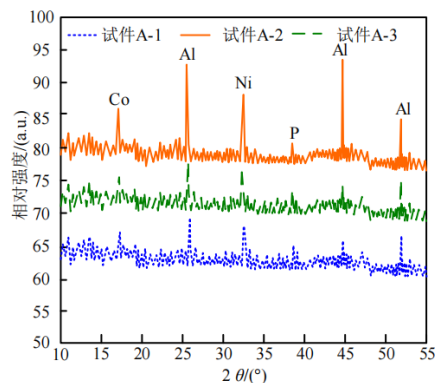


图5 不同角度下 3 个试件的 XRD 图谱

Fig.5 XRD patterns of three specimens at different angles

分析图5可知:不同角度下试件A-2的XRD峰值最高,且其中Ni和P的峰值明显高于其他两种试件。更高的衍射峰强度直接反映了镀层更优的结晶质量与更完整的微观结构。其中,高衍射峰强表明镀层具有更高的结晶度、更充分的晶粒生长以及更低的微观缺陷密度。尖锐的峰形与高结晶度意味着原子排列更规整,镀层结构更致密。这种致密且均匀的复合结构能有效抵抗磨损过程中的塑性变形、脆性剥落及疲劳裂纹萌生,同时能显著阻隔腐蚀介质的渗透与扩散。因此,试件A-2施镀时间为8 h时的复合镀层耐腐蚀性能和耐磨性能最强。具体分析如下:

(1) 试件A-1经过6 h施镀后,处于形核初期,镀液中的Ni元素与P元素的还原状态刚刚进入稳定态,此时复合镀层的晶核密度低且分散,所以此时镀层厚度不足,内部孔隙率较高,导致试件A-1的XRD衍射峰强度较低。

(2) 试件A-2经过8 h施镀后,镀层进入稳定生长阶段,此时镀液中的Ni元素与P元素维持动态平衡,内部原子排列规整,非晶结构短程有序度最优,这既增强了XRD衍射的相干叠加效应,又赋予了整个复合镀层良好的力学稳定性,故试件A-2的XRD相对强度最高。

(3) 试件A-3经过长达10 h施镀后,镀液中P元素和Ni元素浓度过高,发生失衡现象,使其沉降速

率下降,镀层内部应力不断累积,使内部结构连续性遭到破坏,导致XRD信号因散射紊乱,峰值降低。

3.2 相结构试验分析

为从3个试件中找出可使柴油机气缸套表面结晶状态与结构组成最佳的试件,进而确定最佳Ni-P复合镀层施镀时间,依据3种试件的XRD图谱,分别算出其结晶度以及Ni、P元素的平均晶粒尺寸,结果列于表1。采用TZX-45C1型光学显微镜,在10倍目镜下,得到Ni-P晶粒100 P大小的表征图,如图6所示,图6(c)中红圈标记的是Ni-P晶粒出现的破裂现象。

表 1 不同试件的平均晶粒尺寸和结晶度计算结果

Tab.1 Calculation results of average grain size and crystallinity of different specimens

名称			数值
平均晶粒尺寸/nm	Ni	试件 A-1	4.5
		试件 A-2	29.6
		试件 A-3	24.1
	P	试件 A-1	30.7
		试件 A-2	49.8
		试件 A-3	35.1
结晶度/%		试件 A-1	17.2
		试件 A-2	69.1
		试件 A-3	52.3

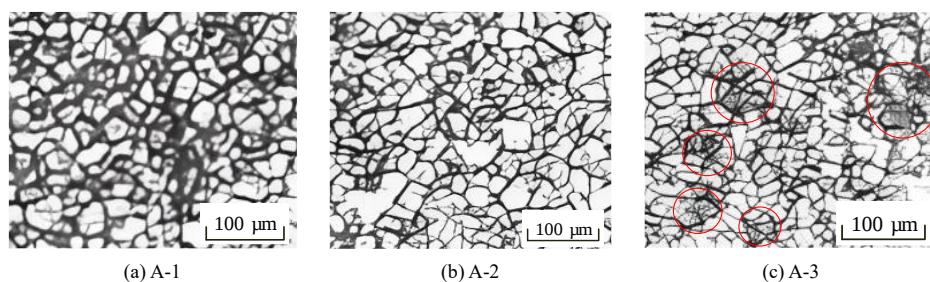


图 6 Ni-P 晶粒表征

Fig.6 Characterization of Ni-P Grains

分析表1可知:试件A-2的Ni元素和P元素平均晶粒尺寸最大,且结晶度高达69.1%,远远大于其他两种试件,证明在柴油机气缸套表面施镀Ni-P复合镀层8 h为最佳施镀时间,具体原因如下:

(1) 结合图6(a)和表1分析可知,试件A-1中Ni元素和P元素的平均晶粒尺寸为4.5和30.7 nm, Ni-P晶粒尺寸在3个试件中属于较小形态,且结晶度为17.2%,此时还原反应刚进入稳定态,新晶核生成速

率远高于原有晶体成长速度,6 h的施镀时间并不能使Ni元素和P元素充分长大,故此时Ni-P复合镀层的相结构并不稳定,镀层结构分散,6 h的施镀时间并不充足。

(2) 结合图6(b)和表1分析可知,试件A-2中Ni元素和P元素的平均晶粒尺寸为29.6和49.8 nm, Ni-P晶粒尺寸在3个试件中属于较大形态,且结晶度为69.1%,结晶比例较高,不存在明显破损情况,说明

此时Ni-P复合镀层处于动态平衡状态,形核后镀层中晶粒获得了充足的生长时间,使其成分均匀性最佳,证明8 h的施镀时间充足,形成“非晶基体+弥散晶态颗粒”的复合结构。

(3) 结合图6(c)和表1分析可知,试件A-3中Ni元素和P元素的平均晶粒尺寸为24.1和35.1 nm,尺寸均较小,结晶度为52.3%,且Ni-P晶粒尺寸在3个试件中属于较大形态,但存在明显破裂现象,这是由于此时镀层因长期反应出现杂质积累现象,晶体沉降生成速率下降的同时,应力累积产生二次形核,破坏了Ni-P复合镀层原有生长规律,晶态相分布不均,导致晶粒尺寸和结晶度回落,大大破坏了柴油机气缸套表面Ni-P复合镀层结构连续性。

3.3 结合强度试验分析

为探究A-1、A-2和A-3这3种试件的结合强度,进而确定最佳Ni-P复合镀层施镀时间,采用BGD520型自动划痕仪开展实验。设定实验载荷为100 N、加载速率为60 N/min、往复次数为2次、划痕长度为5 mm。在动态负载递增过程中,记录该仪器对热处理后的3种试件测试时的磨损量变化及临界载荷,据此分析结合强度,不同动态负载下各试件所受磨损量,结果见图7。

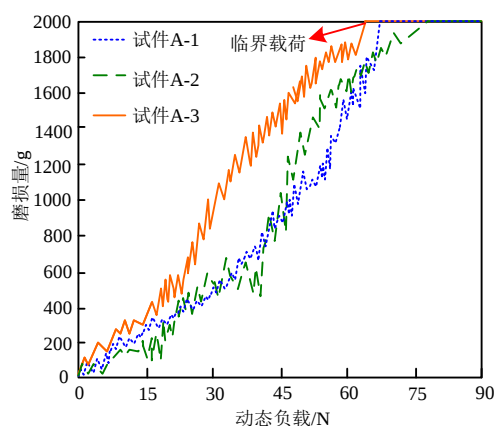


图7 不同动态负载下的不同试件所受磨损量大小结果

Fig.7 Results of the wear amounts of different specimens under different dynamic loads

分析图7可知:在达到磨损量临界载荷后,复合镀层为8 h的试件A-2所受动态负载高达77 N,证明试件A-2结合强度最高,证明试件A-2的界面键合最强,且涂层内部缺陷最少,抵抗界面分离的能力最优,进一步表明8 h的施镀时间可使Ni-P复合镀层获得更佳的效果,主要原因是8 h的施镀时间使复合镀层界面原子发生互扩散现象,可以有效提升化

学键内部结合度;加之,充分的施镀时间令Ni-P复合镀层渗透到柴油机气缸套表面粗糙纹理中,以此可显著提升机械锚定作用,从而显著增强了界面结合力,因此试件A-2的结合强度最佳,进一步证明8 h的施镀时间可以有效避免柴油机气缸套表面Ni-P复合镀层使用时的“涂层剥落-磨粒入侵-腐蚀加速”连锁失效情况发生。

3.4 镀层 SEM 微观结构分析

为全面分析3个试件的Ni-P复合镀层表面分布,利用SS-150系列扫描电子显微镜,在放大倍数为25倍情况下,对3个试件的表面形态进行SEM微观结构分析,以此从3个试件中找出具备最佳结构分布特征的试件,确定哪一施镀时间可以使其具备最佳耐磨性能,在放大倍数为25倍情况下,对不同试件的微观表征结果如图8所示。

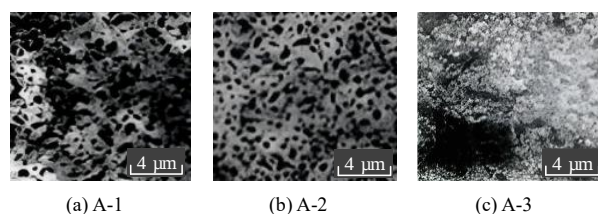


图8 不同试件的 SEM 微观表征结果

Fig.8 SEM microscopic characterization results of different specimens

分析图8可知:在25倍放大倍数下,柴油机气缸套表面Ni-P复合镀层SEM图像被放大进行观察,可见试件A-2的孔隙分布最为均匀,证明该试件的耐磨性能最佳,其具体分析如下:

(1) 从试件A-1的SEM图像中可看出,其表面呈现孔隙不均和团簇聚集形态,其中深色团簇(Ni-P沉积相)大小悬殊,且团簇间浅色孔隙尺寸差异大、分布无规律,会导致剥层磨损加速和承载能力分布不均等现象,故此时施镀时间并不足以令其结构致密和应力均匀分散;而试件A-3表面结构深浅变化区域过大,结构十分杂乱,孔隙大小突变,局部连通呈大孔洞,这是由于施镀时间过长导致的团簇无规则聚集现象,证明试件A-3的施镀时间并不能令其内部结构规律化分布。

(2) 试件A-2SEM图像和试件A-1和A-3的SEM图像相比,深浅变化较规律,团簇分布明显更加细密分散、孔隙更加均匀,无明显薄弱区,该均匀结构可以使试件A-2在受到摩擦载荷时,对载荷力进行平均分配,形成润滑膜,降低摩擦系数,明显提

升镀层应力分散能力,所以试件A-2的施镀时间可以使Ni-P复合镀层具备更加耐磨损性能,有效提升气缸套使用寿命。

4 结论

为明确柴油机气缸套表面Ni-P复合镀层的最佳施镀时间,对制备试件A-1、试件A-2和试件A-3开展多项性能测试与分析。通过试验得到以下结论:

(1) 试件A-2的衍射峰最高,表明其力学稳定性最优。该试件在动态负载测试中可承受高达77 N的载荷,说明在8 h施镀条件下,镀层界面结合强度最高,内部缺陷最少,抗界面分离能力最强。

(2) 试件A-2中Ni和P元素的平均晶粒尺寸分别为29.6和49.8 nm,结晶度为69.1%,在3个试件中晶粒尺寸最大、结晶度最高,且未观察到明显结构破损。证明8 h的施镀时间可使镀层处于良好的动态平衡状态,为晶粒提供充分的生长时间,从而获得成分均匀的镀层结构。

(3) SEM微观结构分析显示,试件A-2镀层团簇分布细密均匀,孔隙大小一致,无明显薄弱区域,进一步表明8 h施镀时间有助于形成结构稳定、耐腐蚀性能优异的Ni-P复合镀层。

本研究提出的工艺方案可有效强化柴油机气缸套表面性能,并推动Ni-P复合镀层在高压、高温和高腐蚀环境中的更广泛应用,具有重要的工程应用价值。

参考文献

- [1] 黄嘉乐,陈德馨,王启伟,等. 活塞表面 Ni-P-SiC 复合镀层的电沉积及性能表征[J]. 电镀与涂饰, 2021, 40(9): 669-673.
- [2] 李昆达,张建强,赵慧敏,等. AZ31B 镁合金表面镍基复合镀层的制备及耐蚀性能研究[J]. 热加工工艺, 2024, 53(10): 22-27.
- [3] 崔凯,任伟和. Cr12MoV 模具钢化学镀 Ni-W-P/PTFE 复合镀层及耐磨性能研究[J]. 电镀与精饰, 2023, 45(10): 32-39.
- [4] 宫璇,刘家辰,崔彦,等. 2014 铝合金表面 Ni-P/金刚石复合镀层的制备和性能[J]. 材料保护, 2024, 57(9): 148-153, 160.
- [5] 李卓,坚增运,田梅娟. 施镀时间对 SiCp/Al 复合材料化学镀 Ni-P 镀层的影响[J]. 电镀与精饰, 2023, 45(2): 65-71.
- [6] 原征宇,范亚洲. Ni/P 金刚石复合镀层的抗接触疲劳性能研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2025, 48(1): 33-38.
- [7] 李亚钧,王志广. 机械泵旋片基材表面化学镀 Ni-P/PTFE 复合镀层[J]. 电镀与环保, 2020, 40(2): 13-15.
- [8] 韦佳,王苗,丁雪峰,等. 基于组织-工艺协同优化的 C60 钢带氮化层质量控制[J]. 热加工工艺, 2025, 54(15): 162-167.
- [9] 叶为辉,吕琪,龙长江. 高密度类球形碱式碳酸镍快速制备工艺研究[J]. 无机盐工业, 2021, 53(5): 69-72.
- [10] 张雅妮,王思敏,樊冰,等. Ni-W-Mo-P 四元合金镀层的制备工艺优化[J]. 机械工程材料, 2025, 49(10): 18-24.
- [11] 李杰,王赫男,李明升,等. 超声功率对化学镀 Ni-W-P 镀层微观结构及性能的影响[J]. 表面技术, 2024, 53(24): 120-132.
- [12] DAS S, SATPATHY M P, ROUTARA B C, et al. Ultrasonic metal welding of Al/Cu joints with Ni coating: parametric effects on joint performance and microstructural modifications[J]. International Journal of Materials Research, 2024, 115(11/12): 1105-1115.
- [13] 任鑫,王港,孙涛,等. 纳米 TiC 浓度对双脉冲电沉积 Ni-TiC 复合镀层结构及性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2024, 45(4): 167-173.
- [14] 陈兆奇,肖娜,韩平,等. 多孔陶瓷磨具孔隙结构设计与仿真分析[J]. 计算机仿真, 2025, 42(4): 315-321.
- [15] 何林飞,李晓飞,韩俊博. 一种 X 波段星载数传发射机成形滤波设计[J]. 电子设计工程, 2023, 31(17): 30-34, 39.
- [16] 柏沁,杨麟,邓飞远,等. 施镀时间对 0Cr13Ni5Mo 不锈钢表面化学镀 Ni-P 镀层的影响[J]. 电镀与精饰, 2025, 47(9): 106-111.
- [17] 张雅妮,张成鑫,宋伟,等. Ni-Cu-P 复合镀层在硫酸盐还原菌环境下的腐蚀特性[J]. 表面技术, 2025, 54(12): 72-84.
- [18] 周柏玉,黄仁超. 低浓度硫酸铜对化学镀 Ni-P 镀层微观结构及性能的影响[J]. 材料保护, 2024, 57(6): 147-153.
- [19] 张恒,坚佳莹,吴沛文,等. 化学镀工艺对 Al 合金表面 Ni-P 镀层形貌和性能的影响[J]. 西安工业大学学报, 2025, 45(5): 792-801.
- [20] 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, 2024, 53(16): 89-102.