

文章编号 1004-924X(2026)01-0061-11

铝基碳化硅表面活化与镍磷非晶膜制备

张兆谦^{1,2}, 周天丰^{1,2}, 吴驯未^{1,2}, 于 谦^{1,2}, 赵 斌^{1,2*}

(1. 北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081;

2. 北京理工大学 先进光场显示芯片与系统全国重点实验室, 北京 100081)

摘要: 铝基碳化硅因其高模量、轻量化特征, 成为新一代空间光学反射镜理想材料, 但表层氧化铝及多相界面缺陷使其很难达到光学镜面要求。为了满足铝基碳化硅反射镜的光学性能需求, 对铝基碳化硅(SiC_p 体积分数为 20%) 表面镍磷非晶膜的制备技术进行优化, 采用“清洗-初次浸锌-退锌-二次浸锌-化学镀镍”的工艺路径, 重点解决氧化膜去除、界面活化、界面强度提升及镀层厚度控制等核心问题。铝基碳化硅基体表层经初次浸锌产生碎屑状化合物, 可部分去除氧化铝薄膜层, 但形成的活化层厚度浅且易剥落。硝酸退锌处理能够清除化合物层并暴露基体材料。二次浸锌后实现大范围全覆盖活化, 且碳化硅颗粒表面也被活化层覆盖, 界面结合强度较未活化处理前得到提升。 L_9 正交实验结果表明, 化学镀时间对镀层厚度影响最显著, 其次为二次浸锌时间和初次浸锌时间。最优参数组合为化学镀 8 h、初次浸锌 10 s、二次浸锌 2 min, 镀层厚度约为 50~60 μm 。本工艺通过分步活化与晶胞堆叠生长机制, 协同提升了镀层界面结合强度与材料致密度, 为空间光学反射镜的高稳定性需求提供了表面改性方案。

关键词: 铝基碳化硅; 复合材料; 表面活化; 化学镀镍; 镀层厚度

中图分类号: TB331; TQ153.1 **文献标识码:** A

doi: 10. 37188/OPE. 20263401. 0061

CSTR: 32169. 14. OPE. 20263401. 0061

Surface activation of aluminum-based silicon carbide and preparation of nickel-phosphorus amorphous

ZHANG Zhaoqian^{1,2}, ZHOU Tianfeng^{1,2}, WU Xunwei^{1,2}, YU Qian^{1,2}, ZHAO Bin^{1,2*}

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. National Key Laboratory of Advanced Light Field Display Chips and Systems,

Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

* Corresponding author, E-mail: bin.zhao@bit.edu.cn

Abstract: Aluminum-based silicon carbide is an attractive material for next-generation space optical mirrors because of its high specific stiffness and low density; however, surface alumina and multiphase interfacial defects hinder the attainment of optical-grade surfaces. To meet the optical finishing requirements of aluminum-based silicon carbide mirrors, an electroless nickel-phosphorus amorphous film was deposited on aluminum-based silicon carbide substrates for surface modification. The deposition technology for an amorphous Ni-P film on aluminum-based silicon carbide (SiC_p volume fraction: 20%) was investigated using the process route of cleaning-primary zinc immersion-dezincification-zinc removal-secondary zinc im-

收稿日期: 2025-08-19; 修订日期: 2025-09-19.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目 (No. 52205441)

mersion-electroless nickel plating, with emphasis on oxide-film elimination, interface activation, enhancement of interfacial bonding strength, and coating-thickness control. During primary zinc immersion, the surface oxide layer was partially removed via the formation of a friable reaction layer; however, the resulting activation layer was shallow and prone to peeling. Zinc nitrate dezincification effectively removed the reaction layer and exposed the substrate. Secondary zinc immersion enabled large-area, continuous activation, and an activation layer was also formed on the surfaces of silicon carbide particles. Consequently, the interfacial bonding strength was markedly improved relative to the untreated substrate. An L9 orthogonal design indicated that electroless plating time exerted the greatest influence on coating thickness, followed by secondary and primary zinc-immersion times. The optimal parameter set comprised 8 h electroless plating, 10 s primary zinc immersion, and 2 min secondary zinc immersion, yielding a coating thickness of approximately 50-60 μm . The proposed process enhances coating density and interfacial bonding through stepwise activation and a crystal-cell stacking growth mechanism, providing an effective surface-modification strategy for the high-stability requirements of space optical mirrors.

Key words: aluminum-based silicon carbide; composite materials; surface activation; electroless nickel plating; plating thickness

1 引言

随着科技不断进步,空间光学系统在精密观测、遥感等领域的应用日益广泛,对核心元件——光学反射镜的轻量化性能也提出了更高要求^[1-2]。铝基碳化硅作为轻量化复合材料的代表,因兼具铝合金的轻质与碳化硅的高热导率、低热膨胀系数特性,成为制备高精度反射镜的理想基材。然而,铝合金表面易氧化,铝基碳化硅的多相界面结构则可能导致表面缺陷,从而直接影响反射镜的光学效率与使用寿命,因此需通过表面处理技术实现性能提升。

化学镀镍技术可在材料表面形成均匀致密的镍镀层,既能通过金属镜面特性显著提高反射率,又能凭借镀层的物理屏障作用增强耐磨损、抗腐蚀能力。以铝基碳化硅反射镜为例,其轻质且具有高稳定性的材料优势^[3-5],配合化学镀镍层的表面改性效果,可满足空间光学系统对反射镜“高反射效率和长服役寿命”的双重需求。镀层不仅填补了复合材料表面微观缺陷,更能通过金属膜层的光学反射特性,使反射镜在复杂空间环境中保持稳定的光学性能。王丽雪等^[6]提高了 2024 铝合金表面镍磷合金镀层的沉积效率,并优化了其性能,所研究的镀层形貌均匀、硬度高、耐腐蚀性好,表现出优异的综合性能。刘冰洋等^[7]研究了镀层厚度对铝基化学镀镍磷合金导电性

和耐蚀性的影响。李佳蔚^[8]在航空铝合金 2A11 表面制备高耐蚀耐磨的化学镀镍磷组合镀层,该组合镀层具有致密的表面形貌和非晶态结构,表现出优异的耐蚀性和耐磨性。Liu 等^[9]针对 6061 铝合金化学镀镍层质量问题开展研究,证明了浸锌前处理步骤能够显著提升镀层结合力和厚度。

随着铝合金化学镀镍技术的成熟,研究人员逐渐将目光转向更具挑战性的铝基碳化硅复合材料的化学镀镍。这一过渡不仅体现了技术上的进步,也反映了材料科学领域对更高性能的追求。从铝合金到铝基碳化硅,化学镀镍技术经历了从单一金属基体到金属基复合材料表面的转变,但仍需克服碳化硅颗粒与铝基体之间界面特性差异的难点。李卓^[10]在 SiC_p/Al 复合材料表面制备 Ni-P 镀层,以改善其耐蚀、耐磨和抛光性能。研究表明,采用柠檬酸和乳酸作为双络合剂,在 pH 值为 4.5 ± 0.1 、温度为 $(88 \pm 1)^\circ\text{C}$ 、化学镀时间为 3 h 条件下,可获得表面致密且连续的非晶态高磷镀层,其硬度为 SiC_p/Al 复合材料基底的 3 倍。李岳^[11]研究了在 SiC_p/Al 复合材料表面化学镀镍磷层的前处理工艺及其对镀层性能的影响。研究表明,碱性除油和酸洗能增强镀层与基体的结合力;二次浸锌前处理工艺获得镀层沉积速率最快、结合力最好、耐蚀性好、硬度高,且表面平整致密无孔隙;镀液成分对镀层热膨胀系数、硬度、相结构、表面形貌及磷含量均有显著

影响。张恒^[12]研究了SiC_p/Al复合材料表面镍磷非晶镀层的制备工艺,发现pH值为4.8时镀层表面形貌最佳。冯立团队^[13]研究了在高体积分数SiC_p/Al复合材料表面浸锌前处理后,进行化学镀镍层的沉积行为。研究表明,镀层初始沉积优先发生在Al相表面,并通过二维生长实现SiC颗粒表面覆盖。Shoeib等^[14]发现镍磷合金薄膜对铝基碳化硅的断裂强度及耐磨性的提升具有显著影响。Sarath等^[15]研究了镍磷合金对铝基碳化硅腐蚀性能的影响,其镍磷合金层表现出极强的耐腐蚀性和包裹性。

本文针对粉末冶金铝基碳化硅表面镀覆镍磷非晶膜的制备需求,优化了化学镀镍技术方案,包括前处理、施镀及后处理等工艺流程,系统研究了铝基碳化硅表面惰性氧化膜的去除机制、界面活化行为以及镀层生长规律。通过划痕测试、微观表征与正交实验,重点揭示了分步活化对界面结合强度与镀层致密生长的协同作用,明确了各工艺参数对镀层质量的影响程度,为铝基碳化硅表面改性提供了清晰的工艺路径与参数优化依据。

2 材料与方 法

2.1 实验材料

实验采用铝基碳化硅作为基体材料,其中碳化硅颗粒体积分数约为20%,采用粉末冶金工艺成形,试件尺寸为18 mm×12 mm×5 mm,表面经研磨处理。

2.2 实验方法

图1为试件化学镀镍的主要工艺规程,包括清洗-初次浸锌-退锌-二次浸锌-化学镀镍。其中,清洗过程是将试样放入无水乙醇并在室温下超声清洗5 min,然后用去离子水超声清洗1 min。浸锌液组分为氢氧化钠(0.12 g/mL)、氧化锌(0.02 g/mL)、三氯化铁(0.002 g/mL)、酒石酸钾钠(0.05 g/mL),温度为室温,溶液应呈乳红色。退锌液组分为浓硝酸与去离子水按1:1稀释,温度为室温,退锌时间为3~5 s。化学镀镍溶液组分为深圳市富顺泰科技有限公司生产的FST-1A(其组分为硫酸镍及乳酸并加入适量光亮剂,调配浓度6%)以及FST-1B(其组分为次亚磷酸钠、醋酸钠、苹果酸及乳酸并加入络合剂适

量,调配浓度15%),混合溶液呈透绿色,pH值为4.5~5。化学镀镍时设置水浴温度为88℃,并通过磁力转子对溶液进行搅拌。

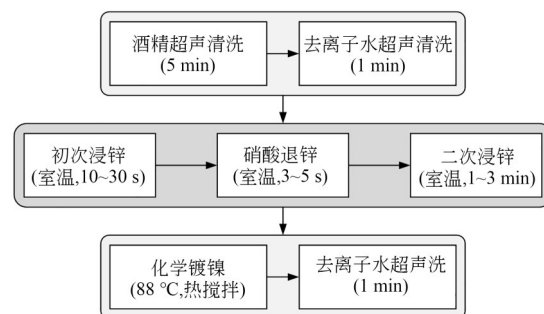
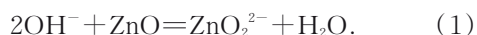


图1 化学镀镍及前处理工艺流程

Fig. 1 Process flow for electroless nickel plating and pre-treatment

初次浸锌和二次浸锌的化学反应主要方程如下:

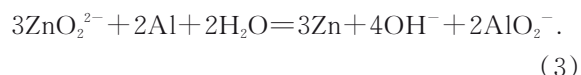
浸锌液中,氢氧化钠与氧化锌反应:



在强碱溶液中,氧化铝被溶解:



锌酸钠与暴露的铝反应,发生置换反应:



为了验证浸锌活化工序的合理性与必要性,采用对照实验的形式,设置初次浸锌10 s、二次浸锌1 min、化学镀镍时间2 h为工艺组,并设置不施加浸锌活化工序为对照组(化学镀镍时间为2 h)进行对比。采用Anton Paar RST3型划痕仪评估两组镀层的界面结合力。划痕实验参数如下:载荷为1~11 N,载荷增速10 N/min,刻划长度5 mm。采用共聚焦显微镜对划痕末端形貌特征进行观察。

如表1所示,在验证活化工序有效性基础上,设置三因素三水平 L_9 正交实验,主要研究初次浸锌时间、二次浸锌时间和化学镀镍时间三因素对镍磷镀层厚度的影响。通过观察以上化学镀镍工艺规程中试样表面微观形貌,分析各工艺环节的作用机制与镍磷非晶膜的生长规律。采用扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)与能谱仪(Energy Dispersive Spectroscopy, EDS)对实验过程中的试件进行形貌观测和

元素分析。其中,采用能谱仪分析试件不同特征点位或区域的元素含量变化,结合 SEM 观测结果,共同表征不同工艺条件下的试样表面形貌变化。在铝基碳化硅表面浸锌活化形貌演变分析过程中,为了确保过程样件在测试 SEM 及 EDS 过程中尽可能不被空气再次氧化,本文采取用 5 个相同块件同步进行实验,每完成一步提取出其中一个样品进行真空封装处理,确保实验数据的可靠性。

表 1 三因素三水平正交实验

Tab. 1 Orthogonal experiments of three factors at three levels

组号	化学镀镍 时间/h	初次浸锌 时间/s	二次浸锌 时间/min
L ₁	6	10	1
L ₂	6	20	2
L ₃	6	30	3
L ₄	7	10	2
L ₅	7	20	3
L ₆	7	30	1
L ₇	8	10	3
L ₈	8	20	1
L ₉	8	30	2

3 结果与分析

3.1 表面浸锌活化对镀层界面结合力的影响

为了明确表面活化工艺对镀层质量与界面结合强度的影响,对比了活化工艺处理(工艺组)和无活化处理(对照组)后铝基碳化硅试样的化学镀镍结果。

图 2 为两种对比工艺下的镀层宏观形貌。从图中可以看出,无活化处理的对照组试样经化学镀镍后,表面镀层不完整,只存在于边缘区域,中心区域未见镀层覆盖,暴露出铝基碳化硅基体。该现象表明,在具有惰性氧化铝膜的铝基碳化硅基体表面上,镍磷非晶膜的形成与生长受到抑制,仅能在局部区域发生沉积。相比之下,工艺组试样表面实现了均匀且连续的镀层全覆盖,证明“初次浸锌-退锌-二次浸锌”的活化工艺有效去除了表面氧化膜,为镀层的均匀形成提供了必要的活性基底。

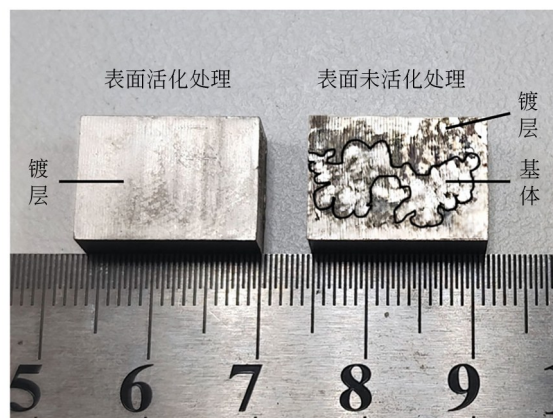


图 2 活化与未活化工艺镀层宏观形貌对比

Fig. 2 Macroscopic morphology comparison of coatings under activated and non-activated process

图 3 为镀层界面结合力划痕测试曲线。根据声信号,表面活化处理的镀层(工艺组)划痕在 2 909.424 μm 处发生突变,对应临界载荷 $L_{C1}=6.825\text{ N}$;未进行表面活化处理的镀层(对照组)划痕在 1 572.279 μm 处发生突变,对应临界载荷 $L_{C2}=4.140\text{ N}$ 。与对照组相比,表面活化处理的工艺组镀层临界载荷提升了约 65%,表明铝基碳化硅表层活化处理能够显著提升镀层与基体界面的结合强度。

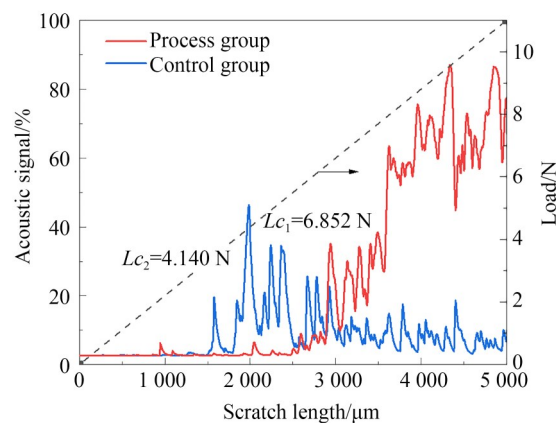
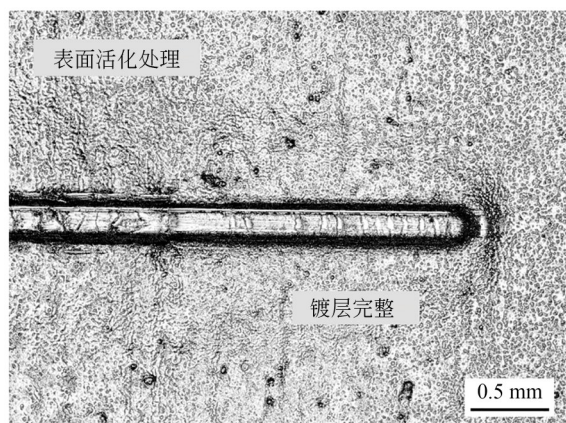


图 3 镀层界面结合力划痕测试曲线

Fig. 3 Scratch test curve of interfacial adhesion of coating

图 4 为镀层划痕轨迹末端的共聚焦显微镜测试结果。从图 4(a)可以看出,工艺组划痕轨迹末端仅见小面积镀层塑性变形,没有出现大规模剥落,表明此时镀层与基体界面结合牢固。从图 4(b)可以看出,在划痕试验后,未进行活化处理的对照组划痕轨迹末端及周边出现大面积、连续性的剥落,表明此时镀层与基体界面结合较弱。

的镀层剥落,暴露出底层基体,呈现出典型的界面黏附失效。该现象表明镀层与铝基碳化硅基体的自然氧化膜之间的结合强度非常微弱,表面浸锌活化工艺使镀层与基体的结合力得到了根本性改善,其结合强度已能够满足镀层在机械应力下保持完整性的要求。



(a) 工艺组划痕末端形貌

(a) Microscopic of scratch end in process group



(b) 对照组划痕末端形貌

(b) Microscopic of scratch end in control group

图4 镀层结合强度直观对比

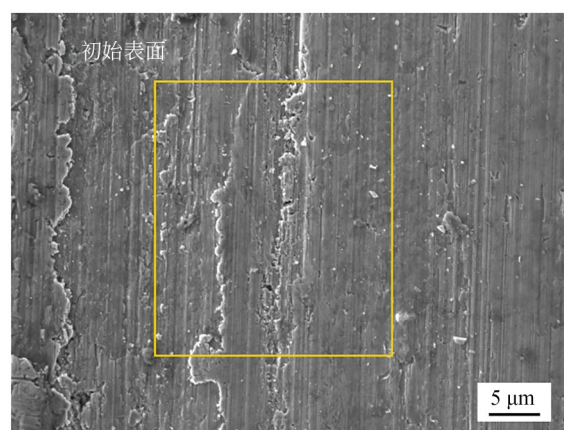
Fig. 4 Intuitive comparison of coating adhesion strength

综上所述,未进行活化预处理虽可在铝基碳化硅表面实现局部的镍磷非晶膜镀覆,但所得镀层存在两大问题:一是宏观覆盖不完整,二是界面结合强度弱。本文采用的“初次浸锌-退锌-二次浸锌”的活化工艺,通过去除氧化膜并构建均匀的锌过渡层,从根本上解决了镀层均匀形成与强界面结合的难题,是获得连续、牢固镍磷非晶膜的必要条件。

3.2 表面形貌演变与镀层生长规律分析

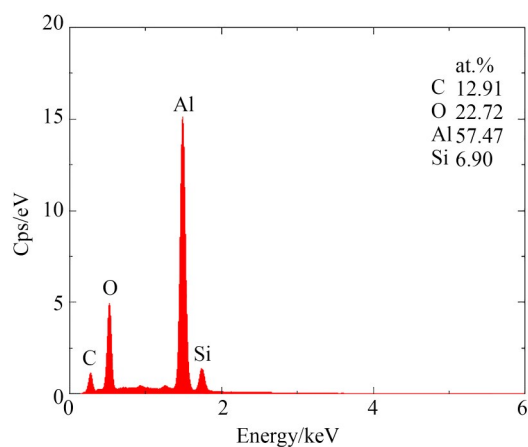
在对表面活化预处理工艺进行实验验证的基础上,取化学镀镍时间为8 h、初次浸锌时间为10 s、二次浸锌时间为2 min作为实验组,分析预处理工艺对试样表面形貌及镍磷非晶膜生长规律的影响。

图5所示为清洗后试件基体的表面形貌。已知基体是由粉末冶金方法制成的铝基碳化硅颗粒复合材料基,取图5(a)方框区域进行能谱分析,如图5(b)所示。根据能谱图可推测,除铝基碳化硅外,基体表面还存在少量自然氧化铝。由于碳化硅颗粒与铝基体在SEM下的对比度较低,且表面进行了研磨处理,因此图中没有显现出清晰的碳化硅颗粒。因氧化铝活性低,难以在



(a) 基体表面SEM观测

(a) SEM observation of substrate surface



(b) 基体表面EDS能谱

(b) EDS spectra on substrate surface

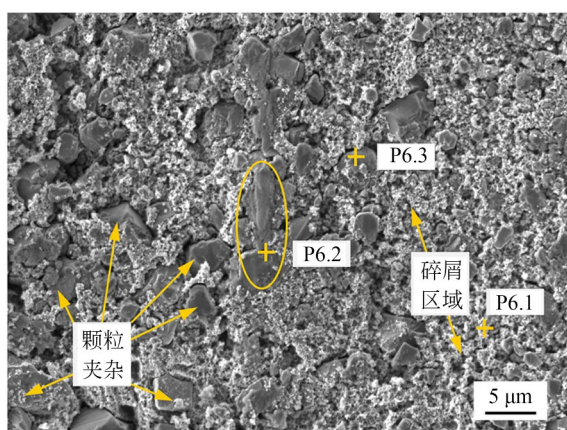
图5 基体表面形貌及能谱

Fig. 5 Surface morphology and energy spectra of substrate

其表面很好镀覆镍磷非晶膜,而经研究发现锌及锌化合物对于镍磷非晶膜的镀覆能力较强,活性较高,故采取浸锌工艺将氧化物去除,从而转换为更利于镀覆的锌及锌化合物,达到活化目的。

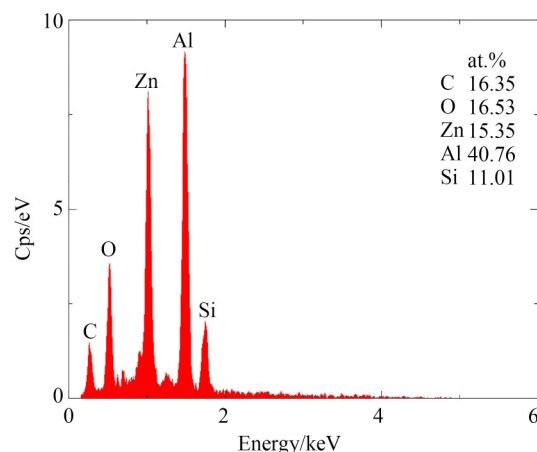
对经初次浸锌后试件进行表面清洗,然后进行观测,从图 6(a)可以看出,此时表面形貌主要分为两类:一是碎屑状颗粒,二是碎状颗粒中夹杂的较大尺寸颗粒。结合图 6(b)可知,碎屑状颗粒区域(P6.1)主要含有 40.76% Al, 16.53% O 和 15.35% Zn 等元素。由图 6(c)可知,椭圆区域

(P6.2)含有较高含量 O 元素和 Al 元素(Si 元素含量仅为 1.32%),由此推断该区域为铝基碳化硅表面残留的氧化铝惰性层。结合图 6(b)和 6(c)可知,铝基碳化硅试件表面经初次浸锌后产生大量锌化合物,并以碎屑状颗粒形式覆盖在材料表面,但由于初次浸锌时间较短,表面惰性氧化膜并不能完全去除。由图 6(d)可知,大尺寸颗粒(P6.3)主要含有较高含量的 Si(46.31%)和 C(50.41%)元素,为经过初次浸锌后暴露出的基体中碳化硅晶粒。碳化硅晶粒表面轮廓清晰,表明初次浸锌对碳化硅晶粒表面活化产生显著影响。



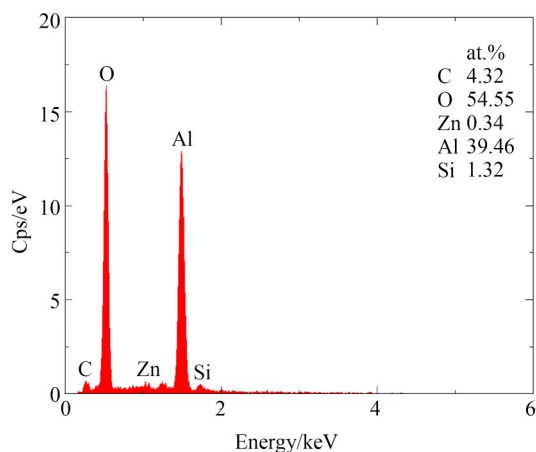
(a) 初次浸锌后表面SEM观测

(a) SEM observation of surface after initial galvanization



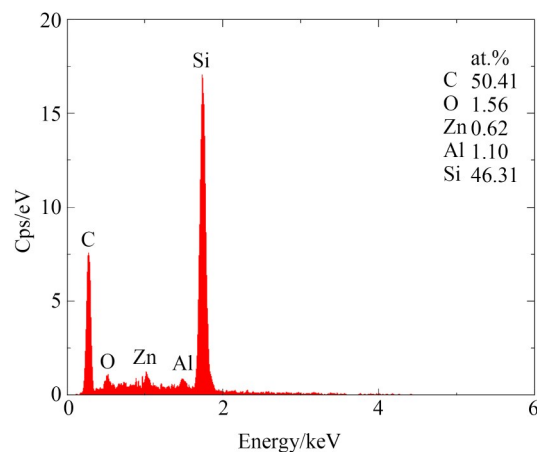
(b) P6.1点位EDS能谱

(b) EDS spectra at point P6.1



(c) P6.2点位EDS能谱

(c) EDS spectra at point P6.2



(d) P6.3点位EDS能谱

(d) EDS spectra at point P6.3

图 6 初次浸锌后表面形貌及能谱

Fig. 6 Surface morphology and energy spectra after initial galvanization

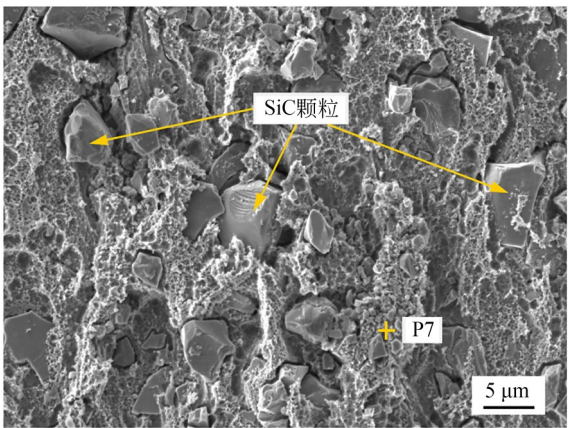
初次浸锌时间太短不能完全改善表面,此时表面仍残留部分基体表面特征,且碎屑状的铝锌化合物也存在易剥落的问题,故考虑加入退锌步骤。用强酸将铝锌化合物全部去除,暴露纯铝基体及碳化硅颗粒,增加再次浸锌活化的效果。

对退锌后试件进行表面清洗并观察其表面形貌,如图 7 所示。从图 7(a)可以看出,与图 6(a)相比,碳化硅晶粒表面和轮廓更清晰,大部分碎屑状颗粒被去除,形成具有密集凹坑的非光滑表面。结合图 7(b)可知,该区域主要含有 Al 元素和 Si 元素,试件表面没有 Zn 元素。由此表明,经过退锌处理后,试件表面碎屑状区域绝大部分低结合力的锌化合物被除去,形成具有密集

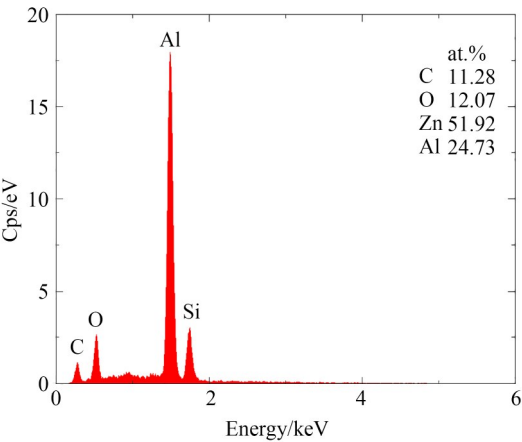
凹坑的创成表面,验证了初次浸锌及退锌步骤的必要性。

由于初次浸锌形成的锌层往往粗糙、不均匀且与基体结合力较弱,且该锌层不能有效在碳化硅颗粒上进行附着,通过退锌步骤将其去除后,铝基碳化硅表面状态(微观结构和活性)比原始状态更均匀理想。在此优化后的表面上进行二次浸锌,能够沉积出一层更均匀、致密且与基体结合力更强的锌层。这层高质量的锌层为后续化学镀镍提供了更优异的基底环境,确保了镍镀层的质量和结合力。

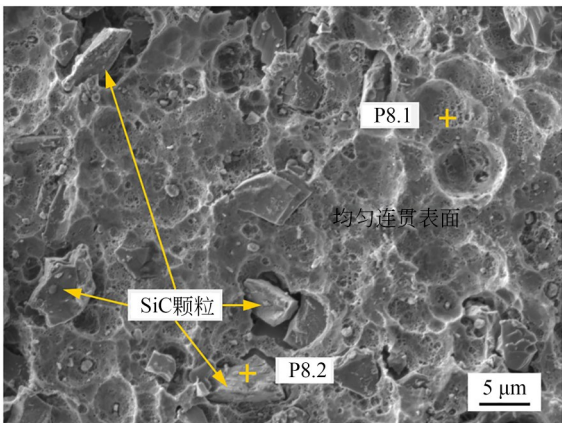
图 8 为经二次浸锌后铝基碳化硅试样的表面形貌。从图 8(a)中可以看出,与初次浸锌相比,二次浸锌处理后的表面均匀连贯,碎屑状颗粒消失,凹坑尺寸增加,而碳化硅晶粒表面增加了附



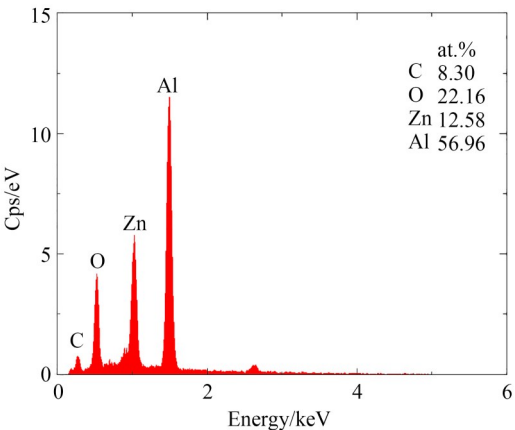
(a) 退锌后表面SEM观测
(a) SEM observation of surface after zinc removal



(b) P7点位EDS能谱
(b) EDS spectra at point P7



(a) 二次浸锌后表面SEM
(a) SEM of surface after secondary galvanization



(b) P8.1点位EDS能谱
(b) EDS spectra at point P8.1

图 7 退锌后表面形貌及能谱
Fig. 7 Surface morphology and energy spectra after zinc removal

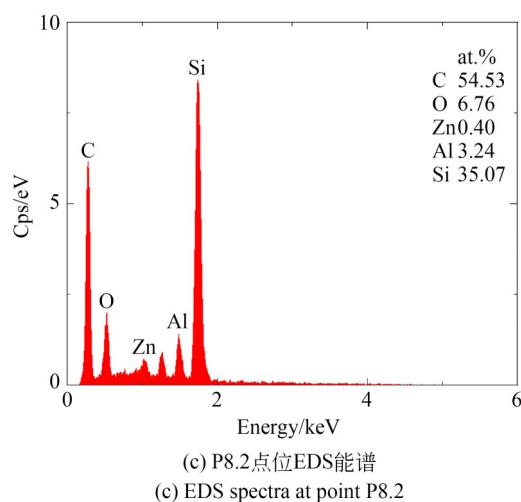


图8 二次浸锌后表面形貌及能谱

Fig. 8 Surface morphology and energy spectra after secondary galvanization

着物。对均匀连续基体区域P8.1和碳化硅晶粒区域P8.2进行能谱分析,如图8(b)和图8(c)所示。由能谱测量结果可知,较初次浸锌时呈现的碎屑状零散分布完全不同,铝基碳化硅表面基本被均匀连续铝锌化合物包裹,活化效果显著。碳化硅颗粒表面的锌化合物附着表明,初次浸锌工艺主要是对低活性的惰性氧化铝膜进行去除并转化为活性较高的锌及锌化合物,二次浸锌使碳化硅颗粒包覆小部分的锌化合物,进而提高了铝基碳化硅表面的活化效果。

最后,对活化处理后试件进行化学镀镍,并观察表面形貌。图9为经化学镀镍后铝基碳化硅试样的表面形貌,从图中可以看出试件表面完全

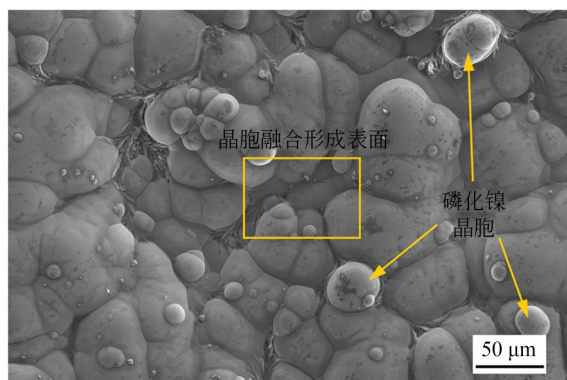


图9 化学镀镍后试样表面SEM图

Fig. 9 SEM image of sample surface after electroless nickel plating

被镍磷非晶膜包裹,镍磷非晶膜以晶胞态生成,并向四周扩大直至互相融合以形成完整平面。在镀覆过程中,镍磷非晶膜的晶胞生长时,可以将前4步中残余的碳化硅突出颗粒完全包裹,且镀层呈现均匀无气孔的微观形貌,最终达到了优化表面的效果。

3.3 镀层厚度的影响规律分析

采用线切割的加工方式将试件按长边对半裁开并加以抛磨,通过基恩士显微镜观察截面并测量镀层厚度,结果如表2所示。

表2 各组镀层厚度实验结果

Tab. 2 Experimental results of coating thickness of each group (μm)

组号	镀层厚度
L ₁	29.880
L ₂	13.272
L ₃	30.753
L ₄	42.447
L ₅	40.956
L ₆	42.872
L ₇	56.736
L ₈	41.673
L ₉	35.547

运用极差分析法计算各因素各水平的平均镀层厚度,以确定各因素的最优水平。根据表3数据,计算各因素的最优水平如下:

因素A:水平3(44.652) > 水平2(42.092) > 水平1(24.635), A3为最优;

因素B:水平1(43.021) > 水平3(36.391) > 水平2(31.967), B1为最优;

因素C:水平2(42.815) > 水平1(38.142) > 水平3(30.422), C2为最优。

计算极差(R),以确定各因素对镀层厚度的影响程度大小。结合表3及表4数据可以得出:化学镀镍时间对镀层厚度的影响最大,对镀层厚度结果起主导作用,镀镍时间越长,镀层厚度越大;二次浸锌时间与初次浸锌时间在对镀层厚度的影响上差异不大,其中二次浸锌时间的影响稍大。最优施镀参数组合为A3B1C2,即化学镀镍时间为8 h、初次浸锌时间为10 s、二次浸锌时间为2 min时镀层厚度可达最优值,约为50~

表 3 各因素各水平平均镀层厚度
Tab. 3 Average coating thickness of each factor and each level

因素	水平 1	水平 2	水平 3
A(化学镀镍时间/h)	24. 635	42. 092	44. 652
B(初次浸锌时间/s)	43. 021	31. 967	36. 391
C(二次浸锌时间/min)	38. 142	42. 815	30. 422

表 4 极差分析
Tab. 4 Range analysis

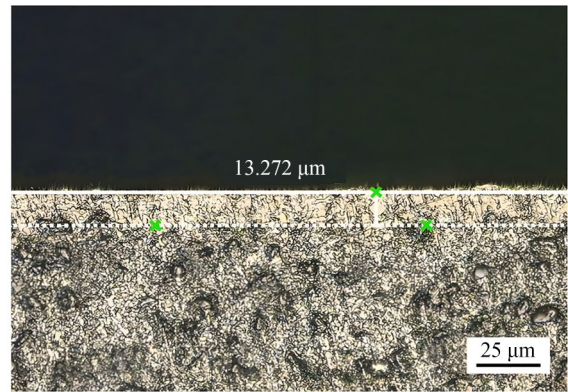
因素	极差 R	影响程度排序
A(化学镀镍时间/h)	20. 017	1
B(初次浸锌时间/s)	11. 054	3
C(二次浸锌时间/min)	12. 393	2

60 μm。

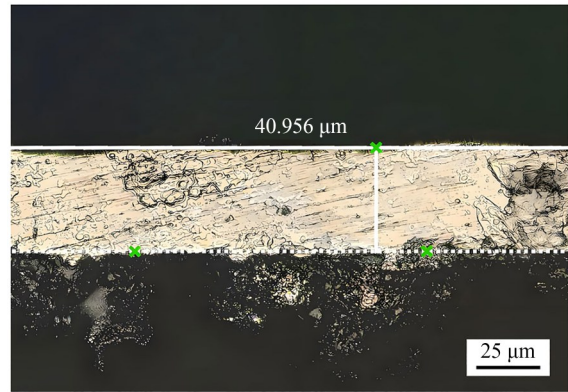
为了更直观地验证并展示化学镀镍时间对镀层厚度的影响规律(见表 4 极差分析结果),特别选取了化学镀镍时间分别为 6 h(L₂组,图 10(a))、7 h(L₅组,图 10(b))和 8 h(L₇组,图 10(c))的 3 组正交实验的试样进行截面镀层厚度的纵向对比分析,如图 10 所示。这 3 组试样对应的实测镀层厚度依次为:L₂组为 13.272 μm,L₅组为 40.956 μm,L₇组为 56.736 μm。图 10 清晰展示了化学镀镍时间从 6 h 增至 8 h,镀层厚度呈现出显著的阶梯式增长趋势。这一直观的形貌对比结果定量印证了表 3 中因素 A(即,化学镀镍时间)的各水平平均厚度(水平 1:24.635 μm,水平 2:42.092 μm,水平 3:44.652 μm)随水平升高递增的规律,更有力地支撑了前述结论,即延长化学镀镍时间是获得更厚镀层的关键工艺参数。

浸锌工艺的作用亦不容忽视。极差分析(表 4)显示,二次浸锌与初次浸锌时间的极差分别为 12.393 与 11.054,与化学镀镍时间的极差保持在同一数量级,这表明二者也是影响镀层厚度的显著因素。具体而言,浸锌工艺的协同效应体现在其对沉积速率的调控上。尽管化学镀镍时间决定镀层厚度增长的上限,但浸锌所准备的表面状态则决定了接近此上限的效率。对比固定化学镀时间下的实验结果(表 2):在 7 小时条件下,具有较优浸锌参数的 L₄组(42.447 μm)其厚度显著优于 L₅组(40.956 μm);在 6 小时条件下,L₁组(29.880 μm)与 L₂组(13.272 μm)的差异更为显

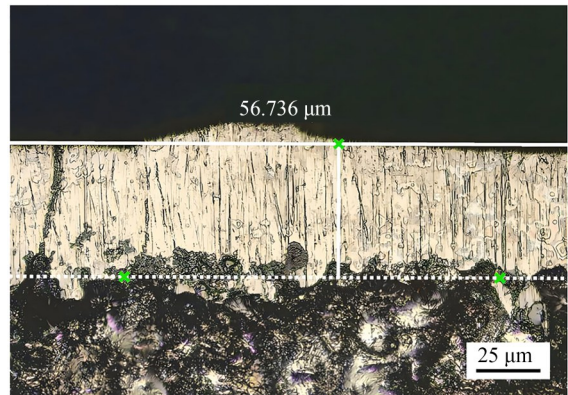
著。这与此前提及的活化机理相呼应:优化的浸锌工艺(如初次浸锌 10 s、二次浸锌 2 min)能形成均匀、致密的锌层(图 8),为镍磷晶胞提供高密度的形核位点,从而加速镀层生长。因此,最优镀层厚度的获得可归因于一个协同机制:优化的浸



(a) L₂组试件截面厚度
(a) Cross-sectional thickness of L₂ specimens



(b) L₅组试件截面厚度
(b) Cross-sectional thickness of L₅ specimens



(c) L₇组试件截面厚度
(c) Cross-sectional thickness of L₇ specimens

图 10 不同化学镀镍时间下试件镀层厚度

Fig. 10 Specimen coating thickness under different electroless nickel plating times

锌工艺为非晶膜的形核与生长提供了理想的活化基底,而充足的化学镀镍时间则确保了晶胞得以充分堆叠至目标厚度。

本研究通过正交试验筛选出较优的工艺参数组合。然而,受正交实验局限性影响,初次浸锌时间优化结果处于范围最小值。因此,后续将采用单因素法优化初次浸锌时间等参数($<10\text{ s}$),进一步完善铝基碳化硅表面镍磷非晶膜制备工艺。

4 结 论

本文研究了铝基碳化硅表面活化演变过程与化学镀镍工艺优化,通过浸锌预处理方案有效清除了惰性自然氧化膜,并显著提升了表面活性。通过镀镍工艺参数优化,筛选出最优参数组合,为获得预期厚度镍磷非晶膜提供了可靠依据。铝基碳化硅表面自然氧化膜影响化学镀镍施镀效果,通过初次浸锌-退锌-二次浸锌步骤可以基本将氧化膜退除,解决了因氧化膜活性低导致难以镀覆

的问题。其中,加入二次浸锌步骤会显著增强活化效果。与未活化处理工艺相比,表面活化处理的镍磷非晶膜临界载荷约提升了 65%。通过二次浸锌,在优化后的铝基碳化硅表面构建了均匀致密且结合力强的连续锌层,并同步实现了碳化硅颗粒的锌化合物包覆,显著提升了铝基碳化硅表面整体活化效果,为化学镀镍提供了高质量基底。化学镀镍时间对镍磷非晶膜厚度的影响占主导作用,二次浸锌时间次之,初次浸锌时间对其影响程度最低。通过提高化学镀镍时间可以增大非晶膜厚度。最优施镀工艺参数组合为:化学镀镍时间 8 h,初次浸锌时间 10 s,二次浸锌时间 2 min。

作者贡献声明:

张兆谦:方法提出,论文构思和撰写;
周天丰:正交实验数据分析;
吴驯未:正交实验设计,数据整理和分析;
于谦:实验实施;
赵斌:论文审校与编辑。

参考文献:

- [1] ZHANG H L, LIU H, XU W B, *et al.* Large aperture diffractive optical telescope: a review [J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 130: 106356.
- [2] VISHWESHWAR RAO B, KIRAN M, VENKATESWARAN R, *et al.* Convex optical free-forms using fringe Zernike overlay approach for two-mirror and three-mirror telescopes for space applications [J]. *Optics Communications*, 2023, 541: 129533.
- [3] 马建平,傅丹鹰,邢绍美. SiC_p/Al 复材光机结构件及光学反射镜的制造研究 [J]. *航天工艺*, 2000 (2): 1-4.
MA J P, FU D Y, XING S H M. Study on manufacturing of SiC_p/Al composite optical machine structure and optical mirror [J]. *Aerospace Manufacturing Technology*, 2000(2): 1-4. (in Chinese)
- [4] 赵洪波. 大口径空间灵巧望远镜系统中主反射镜的研究 [D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2007.
ZHAO H B. *Research on the Main Mirror in the Large-Aperture Space Dexterity Telescope System* [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2007. (in Chinese)
- [5] SWEENEY M N, COLLING S, SCHMIDT J, *et al.* Application and testing of SupremEX 640XA and AyontEX 13 for mirrors and precision structures [C]. *Advanced Optics for Imaging Applications: UV through LWIR IX*. April 21-26, 2024. *National Harbor, USA*. SPIE, 2024: 21.
- [6] 王丽雪,于久灏,王慧文,等. 2024 铝合金表面镍磷合金化学镀加速剂实验研究 [J]. *轻合金加工技术*, 2022, 50(6): 48-52.
WANG L X, YU J H, WANG H W, *et al.* Experimental study on accelerator for electroless Ni-P alloy plating on 2024 aluminum alloy [J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 2022, 50(6): 48-52. (in Chinese)
- [7] 刘冰洋,周根树,任颖,等. 镀层厚度对铝基化学镀镍导电性和耐腐蚀性的影响 [J]. *表面技术*, 2020, 49(6): 276-283.
LIU B Y, ZHOU G S H, REN Y, *et al.* Effect of coating thickness on conductivity and corrosion resistance of electroless Ni-P on aluminum alloy [J]. *Surface Technology*, 2020, 49(6): 276-283. (in Chinese)

- [8] 李佳蔚. 航空铝合金高耐蚀耐磨化学镀镍磷组合镀层的制备及性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2021.
- LI J W. *Study of Preparation and Performance of Electroless Ni-P Combined Gradient Coatings on Aviation Aluminum Alloy Parts with High Corrosion and Wear Resistance* [D]. Changsha: Hunan University, 2021. (in Chinese)
- [9] LIU Z H, LIU Z K, WANG D L, *et al.* Surface state study of the pre-treatment process for electroless plated aluminum alloys for EP mandrels[J]. *Radiation Detection Technology and Methods*, 2025, 9(2): 312-323.
- [10] 李卓. SiCp/Al基复合材料表面Ni-P镀层的制备工艺与性能研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2021.
- LI ZH. *Preparation and Properties of Ni-P Coating on the Surface of Sicp/Al Composite* [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2021. (in Chinese)
- [11] 李岳. SiCp/Al基复合材料化学镀镍-磷镀层的前处理工艺与性能研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2022.
- LI Y. *Study on the Pretreatment Technology and Properties of Electroless Nickel-Phosphorus Coating on Sicp/Al Matrix Composite* [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2022. (in Chinese)
- [12] 张恒. SLM成形SiCp/Al复合材料表面镍-磷非晶镀层的制备与光学加工工艺[D]. 西安: 西安工业大学, 2024.
- ZHANG H. *Preparation and Optical Processing of Ni-P Amorphous Coating on Sicp/Al Composite by SLM Forming* [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2024. (in Chinese)
- [13] 冯立, 杨鑫, 庞健, 等. 高体积分数SiCp/Al复合材料浸锌前处理化学镀镍层的沉积行为[J]. 材料保护, 2022, 55(10): 11-16.
- FENG L, YANG X, PANG J, *et al.* Deposition behavior of electroless nickel coating on high volume fraction SiCp/Al composites pretreated with zinc immersion[J]. *Materials Protection*, 2022, 55(10): 11-16. (in Chinese)
- [14] SHOEIB M, SOROR T Y, MAAMOUN M A, *et al.* Aluminum metal-ceramic matrix composites reinforced by using electroless nickel plating on ceramic particles and fibers[J]. *Materials Research Innovations*, 2005, 9(2): 51-52.
- [15] KOLLABATHINI S S C, DORA S P, CHINTADA S. Corrosion behaviour of advanced composites containing surface modified SIC as reinforcement[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2025, 1010: 177423.

作者简介:



张兆谦(2000—),男,陕西西安人,硕士研究生,2022年于北京理工大学获得学士学位,主要从事非球面铝基碳化硅反射镜表面镀层加工工艺的研究。E-mail:1324819790@qq.com

通讯作者:



赵斌(1991—),男,山东德州人,博士,副教授,博士生导师,2018年于山东大学获得博士学位,主要研究方向为难加工材料切削刀具与工艺。E-mail:bin.zhao@bit.edu.cn