

电沉积制备高耐蚀性镍基复合镀层及其性能研究

卢含源

金华市东恩环保科技有限公司 浙江 金华 321000

【摘要】：针对传统镍镀层在苛刻腐蚀环境中易失效的问题，以瓦特镀液为基础，采用直流电沉积技术分别引入纳米 Al_2O_3 与 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{MXene}$ 颗粒，制备两种镍基复合镀层。通过单因素与正交实验优化工艺参数，结合 SEM、XRD、EDS 表征微观结构，并利用动电位极化、电化学阻抗谱及中性盐雾试验评估耐蚀性能。结果表明，复合镀层结构致密、颗粒分散良好、晶粒显著细化，耐蚀性明显优于纯镍镀层，其中 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{MXene}$ 增强型镀层表现更优。复合相通过物理阻隔与晶界强化协同提升耐蚀性， $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{MXene}$ 还具备钝化膜修复效应，进一步增强防护能力，为高性能镍基复合镀层的开发与应用提供理论与技术支撑。

【关键词】：镍基复合镀层；电沉积；耐蚀性；纳米颗粒； $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{MXene}$ ；微观结构

DOI:10.12417/2705-0998.25.23.049

引言

在现代工业中，金属腐蚀尤其在海洋、化工等苛刻环境中严重制约装备寿命与安全。镍镀层因良好的力学性能和基础防护能力被广泛应用，但传统纯镍镀层易发生孔隙腐蚀、晶间腐蚀，难以满足高端装备对长效防护的需求。复合电沉积技术通过引入功能性颗粒与金属共沉积，实现性能协同提升，是增强耐蚀性的有效途径。常用增强相包括纳米 Al_2O_3 等陶瓷颗粒及 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{MXene}$ 等新型二维材料：前者化学稳定性好、成本低；后者具有高比表面积、优异阻隔性及表面活性，展现出独特优势。然而，当前研究仍存在不足：不同颗粒对耐蚀性的调控规律不清，传统与新型颗粒的增强机理缺乏系统对比；颗粒分散性与界面结合仍是性能瓶颈；耐蚀机理多聚焦单一效应，缺乏多机制协同分析。为此，本文选取纳米 Al_2O_3 与 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{MXene}$ 为增强相，采用直流电沉积制备镍基复合镀层，优化工艺参数，探究颗粒类型对微观结构与耐蚀性能的影响，揭示其协同增强机制，为高性能耐蚀镀层的开发与应用提供理论与技术支撑。

1 研究背景与意义

1.1 镍镀层的应用现状与腐蚀问题

镍镀层因其优异的耐磨性、导电性和装饰性，广泛应用于机械制造、海洋工程、电子设备及化工装备等领域，常用于海洋环境中机械零部件或化工反应釜内壁等易腐蚀部件的表面防护。然而，在高盐、高湿或强腐蚀介质等苛刻环境下，传统纯镍镀层易因电沉积过程中形成的孔隙、微裂纹等结构缺陷而成为腐蚀介质侵入的通道，加之镍本身热力学稳定性有限，易发生点蚀或均匀腐蚀，最终导致镀层失效、基体腐蚀，严重制约工件寿命与安全性。因此，提升镍镀层耐蚀性能已成为表面工程领域亟待突破的关键问题。

1.2 复合电沉积技术的研究进展

复合电沉积技术是一种通过在镀液中添加不溶性固体颗粒，使颗粒与金属离子共沉积形成复合镀层的表面改性技术。该技术借助金属基体与复合相颗粒的协同作用，可同时提升镀

层的耐蚀性、耐磨性等综合性能，且具有工艺简单、成本低廉、易于工业化应用等显著优势，已成为镀层性能优化的重要技术路径。

目前，用于镍基复合镀层的复合相颗粒主要分为两大类：一类是陶瓷颗粒，如氧化铝、碳化硅、二氧化钛等，这类颗粒具有高硬度、化学稳定性好等特点，其中纳米氧化铝因成本低廉、来源广泛，被广泛用于提升镀层的耐磨性与耐蚀性，但在实际应用中存在颗粒易团聚、与基体结合力不足等问题；另一类是碳材料，如石墨烯、碳纳米管、 MXene 等，其中新型二维碳材料 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{MXene}$ 具有高比表面积、良好的导电性与化学稳定性，其独特的层状结构可形成物理阻隔屏障，表面丰富的官能团有助于改善颗粒与基体的结合力，近年来逐渐成为复合镀层领域的研究热点。

1.3 研究不足与本文研究内容

尽管镍基复合镀层的研究已取得一定进展，但在实际应用与理论研究中仍存在诸多不足：不同类型复合相颗粒对镀层耐蚀性能的影响规律尚未得到系统明确，缺乏针对性的对比分析； $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{MXene}$ 在镍基复合镀层中的耐蚀机理研究较为匮乏，其与传统陶瓷颗粒的性能差异及内在原因缺乏深入探讨；颗粒分散性与工艺参数的匹配性仍需进一步优化，以实现镀层性能的最大化提升。

基于上述研究现状，本文选取纳米氧化铝与 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{MXene}$ 为复合相颗粒，开展针对性研究工作：通过系统优化电沉积工艺参数，改善颗粒在镀层中的分散性；全面表征复合镀层的微观结构与元素组成，明确工艺参数对结构的调控规律；对比分析两种复合镀层的耐蚀性能，揭示性能差异的内在原因；深入探讨复合相颗粒对镀层耐蚀性的增强机理，为高性能耐蚀镍基复合镀层的开发提供实验依据与理论支持。

2 实验方案

2.1 实验材料与设备

选用低碳钢作为基体材料，尺寸标准化，化学成分符合普

通结构钢标准。实验试剂均为分析纯，包括瓦特镀液组分（主盐、导电盐、缓冲剂）、纳米 Al_2O_3 与实验室自制 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{MXene}$ 颗粒、分散剂及表面处理试剂，所有溶液均使用去离子水配制。实验设备包括：直流稳压电源、恒温水浴锅、磁力搅拌器和超声清洗器用于电沉积；扫描电子显微镜（SEM）、X 射线衍射仪（XRD）和能谱仪（EDS）用于微观结构表征；电化学工作站与中性盐雾试验箱用于性能测试。

2.2 基体预处理工艺

基体预处理流程包括：依次用不同目数碳化硅砂纸干湿打磨至表面光滑；去离子水中超声清洗去除磨屑；碱性脱脂液中加热除油后多次水洗；盐酸溶液中酸洗除氧化膜并快速冲洗；最后在稀盐酸中短时活化，随即入槽电沉积，防止表面二次氧化，确保镀层结合力。

2.3 电沉积工艺设计

采用经典瓦特镀液为基础体系，调节 pH 至适宜范围。分别向镀液中添加纳米 Al_2O_3 或 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{MXene}$ 颗粒，并加入分散剂，先经超声分散破坏团聚，再通过磁力搅拌维持均匀悬浮。以镀层致密性、颗粒分散性及耐腐蚀性为评价指标，设计单因素实验考察电流密度、温度、颗粒添加量和搅拌速率的影响，并针对 Al_2O_3 复合镀层开展正交实验，优化参数组合。电沉积时间、极间距及高纯镍阳极等条件保持恒定，以维持 Ni^{2+} 浓度稳定。

2.4 性能测试与表征方法

微观结构表征：SEM 观察镀层表面与截面形貌；EDS 进行元素面/点扫描，验证颗粒共沉积与分布；XRD 分析晶体结构，通过衍射峰半高宽计算晶粒尺寸，评估细化效果。耐腐蚀性能测试：采用三电极体系（样品为工作电极，饱和甘汞为参比，铂片为辅助），在 3.5wt%NaCl 溶液中测动电位极化曲线与电化学阻抗谱（EIS），拟合获取腐蚀参数；同时按国家标准进行中性盐雾试验，记录初蚀与全面腐蚀时间，综合评估长期防护能力。

3 实验结果与分析

3.1 电沉积工艺参数优化结果

（1）纳米氧化铝增强型复合镀层最优工艺

通过正交实验确定，颗粒添加量对镀层性能影响最显著，其次为电流密度、镀液温度与搅拌速率。添加量过低共沉积不足，过高则引发团聚；电流密度过高导致烧焦，过低则致密性差；温度影响离子扩散与颗粒共沉积效率；搅拌速率不当易造成针孔或团聚。综合优化后获得最佳参数组合，兼顾颗粒分散性与镀层致密性。

（2） $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{MXene}$ 增强型复合镀层最优工艺

$\text{Ti}_3\text{C}_2\text{MXene}$ 的二维结构需特别关注抑制片层堆叠与氧化。

电流密度宜温和，避免阴极极化引发团聚；温度过高会氧化其表面官能团，削弱界面结合；添加量需适中以形成连续阻隔结构；搅拌速率应温和，防止破坏片层完整性。通过单因素实验明确各参数影响规律，最终确定适配其特性的最佳工艺条件。

3.2 镀层微观结构与元素组成分析

（1）表面形貌特征

纯镍镀层呈胞状结构，但存在孔隙与微裂纹。纳米 Al_2O_3 复合镀层中颗粒均匀嵌入基体，有效填充缺陷，结构更致密，无明显团聚。 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{MXene}$ 复合镀层呈现“层状-胞状”复合结构，片层与镍基体紧密结合，形成类“三明治”形态，显著提升致密性。

（2）元素组成分析

能谱分析证实两种复合镀层中均含有对应特征元素（Al 或 Ti），且分布均匀，无局部富集，表明颗粒成功共沉积，工艺优化有效改善了分散性，保障了结构均匀性与稳定性。

（3）晶体结构与晶粒尺寸

XRD 结果显示三类镀层均为面心立方镍结构，复合相未改变晶体类型。相比纯镍，复合镀层衍射峰强度减弱、半高宽增大，表明晶粒显著细化。 Al_2O_3 镀层未见明显氧化铝衍射峰，可能因含量低、分散好； Ti_3C_2 镀层出现微弱 Ti_3C_2 特征峰，证明其晶体结构在共沉积中得以保留。

3.3 镀层耐腐蚀性能分析

（1）动电位极化曲线分析

纯镍自腐蚀电位低、电流密度高，耐蚀性最差； Al_2O_3 复合镀层电位正移、电流密度降低，耐蚀性提升； Ti_3C_2 复合镀层电位正移更显著，电流密度最低，且钝化区更宽，表明其钝化膜更稳定，耐蚀性最优。

（2）电化学阻抗谱分析

Nyquist 图均呈单容抗弧。纯镍容抗弧半径最小； Al_2O_3 复合镀层显著增大； Ti_3C_2 复合镀层最大，说明其层状结构形成高效物理阻隔，极大抑制电荷转移，阻隔能力最强。

（3）中性盐雾试验分析

纯镍短时间内出现红锈； Al_2O_3 复合镀层腐蚀潜伏期和全面腐蚀时间明显延长； Ti_3C_2 复合镀层经长时间盐雾仍无明显腐蚀点，全面腐蚀时间最长，长期防护性能最优，与电化学结果高度一致。

3.4 耐蚀机理分析

结合微观结构与耐蚀性能测试结果，镍基复合镀层的耐蚀机理可归纳为以下三个方面的协同作用：

（1）物理阻隔效应

纳米氧化铝颗粒与 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{MXene}$ 片层均匀分散在镍基体

中,形成连续的物理阻隔屏障。纳米氧化铝颗粒填充了纯镍镀层的孔隙与缺陷,减少了腐蚀介质的侵入通道; Ti_3C_2MXene 的二维层状结构具有更大的比表面积,形成“迷宫式”阻隔路径,显著延长了腐蚀介质向基体扩散的距离,有效抑制了腐蚀反应的发生。两种颗粒的物理阻隔作用均能延缓腐蚀介质与基体的接触,降低腐蚀反应速率。

(2) 晶界强化效应

复合相颗粒作为异质形核点,显著细化了镍镀层的晶粒尺寸。晶粒细化后,晶界数量增多且分布均匀,腐蚀介质在晶界的局部富集现象得到抑制,减少了点蚀等局部腐蚀的萌生;同时,细化的晶粒使镀层结构更致密,缺陷密度降低,进一步提升了镀层的耐蚀稳定性。晶界强化效应通过改善镀层微观结构,从本质上提升了镀层的抗腐蚀能力。

(3) 钝化膜修复效应

Ti_3C_2MXene 表面富含活性官能团,在腐蚀过程中展现出独特的钝化膜修复效应。腐蚀初期,镍基体表面会形成钝化膜,但该钝化膜存在缺陷,易被腐蚀介质破坏;而 Ti_3C_2 表面的官能团能与腐蚀产物发生化学反应,生成致密的复合钝化膜,该复合钝化膜化学稳定性更高,能有效覆盖镀层表面的缺陷与腐蚀位点,实现钝化膜的自我修复,从而阻止腐蚀介质进一步向基体扩散。相比之下,纳米氧化铝颗粒化学惰性较强,仅通过物理阻隔作用增强耐蚀性,缺乏类似的钝化膜修复效应,因此其耐蚀性能提升效果不如 Ti_3C_2MXene 增强型复合镀层。

4 结论与展望

4.1 主要结论

(1) 采用直流电沉积技术成功制备了纳米氧化铝增强型与 Ti_3C_2MXene 增强型两种镍基复合镀层,通过系统优化电沉积工艺参数,有效解决了纳米颗粒易团聚的技术难题,实现了复合相颗粒在镍基体中的均匀分散,为镀层耐蚀性能的提升奠

定了结构基础。

(2) 复合相颗粒的加入对镍镀层的晶体结构产生了显著影响,通过异质形核作用细化了镀层晶粒尺寸,减少了晶体缺陷,使镀层的微观结构更加均匀致密,这种微观结构的优化是镀层耐蚀性能提升的重要内在原因。

(3) 两种复合镀层的耐蚀性能均较纯镍镀层得到了显著提升,其中 Ti_3C_2MXene 增强型复合镀层的表现更为突出,在短期电化学测试与长期中性盐雾试验中均展现出更优异的耐蚀能力,证明了 Ti_3C_2MXene 作为复合相颗粒在增强镍基镀层耐蚀性能方面的独特优势。

(4) 镍基复合镀层的耐蚀性提升是多种效应协同作用的结果,物理阻隔效应延缓了腐蚀介质的扩散,晶界强化效应抑制了局部腐蚀的萌生,而 Ti_3C_2MXene 特有的钝化膜修复效应则进一步增强了镀层的腐蚀稳定性,三者共同构成了复合镀层优异耐蚀性能的机理基础。

4.2 研究展望

(1) 拓展复合相颗粒类型,探索多元复合颗粒的协同增强效应,例如将 Ti_3C_2MXene 与纳米氧化铝复合添加,探究不同类型颗粒之间的协同作用机制,进一步提升镀层综合性能。

(2) 优化 Ti_3C_2MXene 的表面改性工艺,通过表面功能化处理进一步改善其在镀液中的分散性与与基体的结合力,为镀层性能的进一步提升提供空间。

(3) 开展高温、酸性/碱性等特殊腐蚀介质下的耐蚀性能测试,全面评估复合镀层在不同苛刻环境中的适应性,拓展复合镀层的应用场景。

(4) 进行工业化放大实验,验证工艺的可行性与稳定性,解决工业化生产过程中可能出现的技术问题,推动 Ti_3C_2MXene 增强型镍基复合镀层在海洋工程、化工装备等领域的实际工程应用。

参考文献:

- [1] 王文鑫,阚洪敏.镍基复合镀层电沉积工艺及应用进展[J].热加工工艺,2025,54(5):1-5,23.
- [2] 陈硕,阚洪敏.电沉积制备镍基复合镀层工艺与性能研究进展[J].科技创新与应用,2023,13(32):22-25.
- [3] 郑立辉,杜博奥,冯薪宇,等.Co-Mo-P/CeO₂纳米复合镀层的制备及性能研究[J].电镀与精饰.2025,47(7).
- [4] 林诗翔,土旗,惠佳博,等.Zn-Ni复合涂层的制备及其防腐耐磨性能研究[J].组合机床与自动化加工技术.2022,(6).