

不锈钢紧固件的表面改性处理与耐腐蚀性能提升的研究

王海斌 李兴标 葛少辉

浙江高强度紧固件有限公司 浙江 绍兴 312000

【摘要】：不锈钢紧固件因具备优良力学性能与基础耐腐蚀性，在机械制造、建筑工程、海洋装备等领域应用广泛，其耐腐蚀性能关乎服役安全与寿命。然而，在潮湿、盐雾、酸碱等复杂环境下，它易出现点蚀、缝隙腐蚀、应力腐蚀等失效问题，传统表面处理技术难以提供长期有效的耐腐蚀防护。本文依托材料科学、表面工程和腐蚀电化学理论，搭建起“腐蚀机理-改性理论-性能提升”的完整学术体系。系统剖析不锈钢紧固件的腐蚀类型与演变机理，阐述表面改性处理的理论框架与适配逻辑，深入探究不同改性方法提升耐腐蚀性能的内在机制及多技术协同路径。研究显示，科学的表面改性处理能显著增强其耐腐蚀能力，为复杂环境应用及金属构件表面防护技术升级提供参考。

【关键词】：不锈钢紧固件；表面改性；耐腐蚀性能；腐蚀机理；表面工程；电化学防护

DOI:10.12417/3083-5526.26.01.045

1 引言

不锈钢紧固件在工业生产和基础设施建设中至关重要，服役环境复杂多样。其表面虽有自然氧化膜提供一定耐腐蚀性，但膜薄且不稳定，恶劣环境下易破损致腐蚀失效，会削弱力学强度，引发连接松动等问题，造成经济损失与安全隐患。工业领域对装备可靠性和寿命要求提高，强化其耐腐蚀防护是关键。当前研究多侧重单一改性技术，存在诸多局限，协同效应探究少。开展相关研究，构建协同改性体系，能填补理论空白，引领精准防护，推动金属连接部件表面防护技术高质量发展。

2 不锈钢紧固件的腐蚀机理与表面特性

2.1 核心腐蚀类型与演化机理

不锈钢紧固件腐蚀失效是表面电化学与环境协同的渐进过程，图1展示了四类核心腐蚀形式。点蚀最常见，源于表面氧化膜局部破损，氯离子等在缺陷处聚集，形成微电池效应，腐蚀坑加深扩展，削弱紧固件性能。缝隙腐蚀多发生于接触间隙，因环境封闭，引发钝化膜破坏与电化学腐蚀，更具隐蔽性与破坏性。应力腐蚀开裂是腐蚀与应力协同作用，应力使氧化膜产生微裂纹，腐蚀介质渗透引发阳极溶解，导致突发性断裂。均匀腐蚀是表面整体缓慢溶解，多见于强酸碱环境，长期削弱构件强度。各类腐蚀相互关联，点蚀与缝隙腐蚀可成为应力腐蚀开裂裂纹源，均匀腐蚀加速其他腐蚀演化。

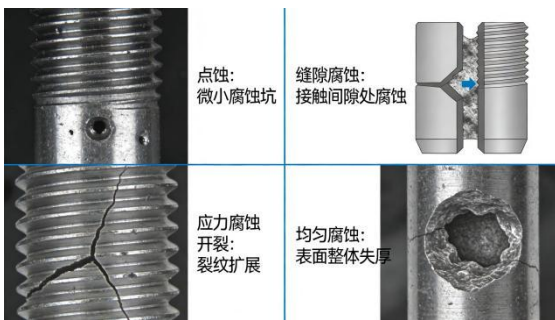


图1 不锈钢紧固件表面腐蚀示意图。

2.2 腐蚀失效的核心影响因素

不锈钢紧固件腐蚀失效受环境、材料特性与结构因素协同影响，图2可直观体现其关联。环境因素是外部驱动力，介质中的氯离子浓度升高会加速点蚀与缝隙腐蚀；pH值降低破坏氧化膜稳定性；温度与湿度增大则加速电化学腐蚀反应速率，海洋盐雾、化工介质等会加剧腐蚀风险。材料特性决定本征耐腐蚀能力，合金成分中铬、镍等元素影响钝化膜稳定性与修复能力，成分失衡会增加腐蚀敏感性，晶粒缺陷等会成为腐蚀萌生源，粗糙表面会降低防护稳定性。结构因素方面，螺纹结构、头部与杆部过渡区域易应力集中、产生缝隙，为腐蚀提供条件，安装工艺产生的表面划伤等也会破坏氧化膜，加剧腐蚀失效。

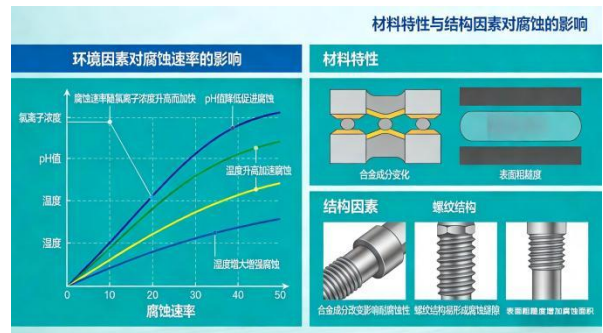


图2 腐蚀失效的核心影响因素示意图

2.3 不锈钢紧固件的表面特性与防护短板

不锈钢紧固件的耐腐蚀基础能力由表面特性决定，核心在于表面钝化膜性能、粗糙度与界面结合状态。其表面自然形成的铬氧化物钝化膜有一定化学稳定性，能阻碍腐蚀介质与基体接触，但厚度薄、有缺陷，在腐蚀性离子和应力下易破损且自修复能力差，难以长期防护。表面粗糙度对腐蚀性能影响双向，适度粗糙可提升防护层结合力，过高则会增加缺陷、降低钝化膜完整性，加速局部腐蚀。传统表面处理技术有防护短板，电镀等防护层结合力弱、易脱落，化学转化膜耐磨与耐环境稳定

性差，单一涂层相容性差、易老化，难以满足复杂工况需求，需构建高性能防护体系。

3 核心理论支撑体系

3.1 不锈钢紧固件表面改性处理的理论基础

不锈钢紧固件表面改性处理的理论支撑，源于表面工程、腐蚀电化学、材料科学与界面科学四大领域。图3 闭环关联示意图展示了其相互融合、支撑的关系，为改性技术提供科学依据。表面工程明确改性目标，即通过多种方法构建具优异性能的功能层，涵盖多种技术路径；腐蚀电化学解析改性层防护机理，通过调控电位等抑制阳极溶解，为成分设计与优化提供依据；界面科学保障改性层与基体结合质量，优化结合方式，避免脱落失效；材料科学支撑性能适配，指导材料选型等，确保与基体相容。四大理论协同，构成完整理论框架，为精准提升不锈钢紧固件耐腐蚀性能提供保障。

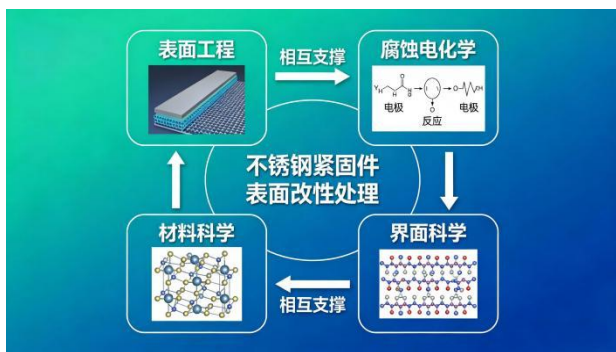


图3 四大理论相互融合示意图

3.2 表面改性处理的核心原则

不锈钢紧固件表面改性处理要遵循“防护适配、界面协同、性能兼容、工艺可行”原则。防护适配，需让改性方案精准匹配服役环境的腐蚀特性，依不同腐蚀类型与强度选技术材料，如海洋环境提升抗氯离子腐蚀能力，化工环境强化化学稳定性。界面协同，强调优化改性工艺，实现界面原子扩散、化学键合与机械啮合协同，提升结合力，避免防护失效。性能兼容，要求改性不牺牲原有核心性能，保障力学强度等，兼顾耐磨等辅助性能，实现协同优化。工艺可行，需适配工业化生产，兼顾效率、成本与环保。四大原则相互约束、协同，确保改性处理满足防护需求且有工程应用价值。

3.3 表面改性的关键维度与理论逻辑

不锈钢紧固件表面改性有四大关键维度，理论逻辑为“技术适配腐蚀类型、成分决定防护性能、界面保障结构稳定、微观结构强化功能”。改性技术选型要依据腐蚀机理与服役工况，化学改性靠表面化学反应构建防护层，适配轻中度腐蚀；物理改性以物理沉积形成致密层，适配中重度腐蚀；复合改性融合多种优势，应对极端复杂腐蚀。成分设计基于腐蚀电化学理论，添加铬等元素提升钝化与化学稳定性，引入惰性成分抑制腐

蚀，针对氯离子腐蚀引入钼等元素。界面结合优化借助预处理和优化工艺参数，促进原子扩散与化学键合，强化结合强度。微观结构调控优化晶粒等，减少介质渗透，提升防护寿命。

4 表面改性提升耐腐蚀性能的理论机理与协同路径

4.1 化学改性的耐腐蚀提升机理

化学改性通过表面化学反应在不锈钢紧固件表面构建化学转化膜或钝化膜，其耐腐蚀提升核心在于“钝化强化 - 介质阻隔”。化学转化膜改性借助磷酸化、铬酸盐化等反应，形成致密无机转化膜，与基体化学键合，阻隔腐蚀介质，且化学稳定性好，能抑制电化学腐蚀，如铬酸盐转化膜可自修复维持完整。钝化处理用强氧化剂增厚强化自然钝化膜，提升稳定性与自修复能力，降低阳极溶解速率，改变电化学电位，减少点蚀等。其效果取决于膜层致密度、厚度与结合力，但膜层较薄、耐磨性有限，易在摩擦冲击下破损，更适用于无剧烈摩擦、轻中度腐蚀环境，需协同其他技术拓展应用范围。

4.2 物理改性的耐腐蚀提升机理

物理改性借助物理沉积、溅射等在不锈钢紧固件表面形成功能涂层，耐腐蚀提升机理是“致密阻隔 - 电化学防护 - 力学强化”协同作用。物理气相沉积在真空环境下，将耐腐蚀材料沉积于表面，涂层致密、孔隙率低，能有效阻隔腐蚀介质渗透，且材料多为惰性金属或陶瓷，化学稳定性好，可降低电化学腐蚀活性，如氮化钛、碳化钛涂层还能提升硬度与耐磨性。热喷涂通过高温熔融材料并高速喷射，形成均匀防护层，与基体结合力强，能抵御强腐蚀介质，极端环境可选耐蚀合金等材料。物理改性涂层厚度可控、性能稳定，但结合力受工艺参数影响大，需优化参数，控制内应力。

4.3 复合改性的协同提升机理

单一改性技术有性能短板，复合改性融合化学与物理改性优势，构建“底层钝化 - 中间结合 - 表层防护”多层复合体系，协同提升机理为“各层功能互补 - 界面协同强化 - 整体性能优化”。典型路径是先化学钝化处理形成稳定底层钝化膜，提升基体耐腐蚀能力并激活表面；再用物理沉积技术制备中间结合层，增强结合力、减少界面应力；最后沉积表层防护层，构建阻隔屏障。各层功能协同关键在于，底层填补缺陷抑制局部腐蚀，中间层缓解性能差异，表层提供主要防护。如钝化 + 物理气相沉积体系，显著提升防护寿命。复合改性核心是各层性能与工艺精准适配，实现耐腐蚀性能最大化提升。

4.4 改性层性能的稳定性调控机理

表面改性层耐腐蚀性能稳定性，取决于服役时膜层结构与化学稳定性的维持，其调控机理聚焦“缺陷修复 - 环境适配 - 应力缓释”。缺陷修复方面，在改性层引入自修复成分，膜层微小破损时，其通过扩散、反应填补缺陷，重建防护屏障，如在涂层中添加可降解腐蚀抑制剂微胶囊，破损释放抑制剂形成

钝化膜。环境适配上,优化改性层成分与微观结构,提升对服役环境的适应性,确保化学稳定性,防止老化降解。应力缓释则调控改性层内应力与弹性模量,减少裂纹与脱落,如优化沉积工艺、引入弹性成分。此外,调控改性后表面清洁度与粗糙度,可降低局部腐蚀风险,提升防护稳定性。

5 应用价值与保障体系

5.1 核心应用价值:安全与效益协同提升

不锈钢紧固件表面改性对提升耐腐蚀性能意义重大,核心价值在于协同提升工业装备运行安全性与企业经济效益。安全性上,科学改性处理可延长其在复杂腐蚀环境中的服役寿命,降低连接松动、结构失稳等风险,保障装备稳定运行,尤其在海洋、化工等高危腐蚀领域,能避免因紧固件腐蚀断裂引发的设备故障与安全事故,提升安全生产水平,还可拓展其在极端腐蚀环境的应用范围,支撑工业装备结构优化。经济效益方面,能减少紧固件更换与维护成本,降低生产损失,可用普通不锈钢替代高端耐蚀不锈钢降低成本,还能提升装备可靠性与寿命,增强市场竞争力,相关技术推广应用可推动多领域技术升级与绿色低碳发展。

5.2 技术保障:理论落地的规范与支撑

表面改性理论与技术有效落地,离不开完善的技术保障体系,涵盖改性工艺规范、性能评价标准与仿真验证流程。改性工艺规范明确不同技术的操作流程、参数范围与质量控制要求,像预处理脱脂除锈标准、物理沉积参数、化学改性反应条件等,保证工艺稳定和改性层性能一致。性能评价标准构建科学评估体系,明确点蚀速率等核心指标检测方法与量化标准,模拟实际环境加速腐蚀试验,真实反映服役性能。仿真验证流程借助腐蚀电化学等技术构建演化模型,预测性能衰减,提前发现问题,优化工艺与结构,降低成本、缩短周期。此外,原材料质量控制、设备校准等环节,也为理论成果工程转化提供全方位支撑。

5.3 管理保障:全生命周期的防护管控

不锈钢紧固件改性后的耐腐蚀性能,需全生命周期管理保障,涵盖研发、生产、安装与运维。研发时,组建跨学科团队整合专业资源,确保理论与需求适配;建立评审机制,从耐腐蚀性能等多维度评审改性方案,保障方向科学。生产阶段,严

控原材料质量,保证基体与改性材料性能一致;加强过程监控,实时调整参数避免缺陷;建立检验机制,抽样检测改性层各项指标。安装时,规范流程防划伤磕碰,控制扭矩与预紧力减少应力残留;加强质量检验,避免缝隙腐蚀。运维时,建立监测维护机制,用无损检测实时监测;制定针对性维护措施;建立性能跟踪数据库,持续优化方案,提升防护性能。

6 研究结论与展望

6.1 研究结论

本文依托表面工程、腐蚀电化学及材料科学理论,对不锈钢紧固件表面改性处理与耐腐蚀性能提升的理论体系展开系统研究,得出以下主要结论:其一,不锈钢紧固件腐蚀失效是多种腐蚀协同作用、受环境、材料和结构多因素耦合影响的结果。传统表面处理技术存在防护短板,难以满足复杂工况下长期防护需求。其二,表面改性以四大核心理论为支撑,遵循防护适配、界面协同等原则,从技术选型、成分设计、界面优化和微观结构调控四个维度,能够构建高性能防护体系。其三,不同改性技术耐腐蚀提升机理不同,化学改性侧重钝化强化,物理改性侧重致密阻隔,复合改性通过多层协同实现性能最优,稳定性调控可保障防护效果持久。其四,理论体系有效落地需技术与管理协同保障,可提升装备安全性与经济效益,为不锈钢紧固件耐腐蚀防护提供有力理论支撑。

6.2 研究展望

本文研究成果为不锈钢紧固件表面改性与耐腐蚀性能提升筑牢了理论根基,未来研究可沿以下方向深入推进:在智能化领域,引入机器学习算法构建改性工艺、微观结构与耐腐蚀性能的映射模型,实现改性方案智能优化;借助数字孪生技术,打造紧固件腐蚀演化数字孪生体,实时监测改性层性能衰减,达成动态防护与精准维护。绿色环保方面,开发无铬、低污染的化学改性工艺与环保型改性材料,在提升性能的同时降低环境影响,契合绿色制造理念;探索可降解改性层的设计与应用,实现服役后的环境友好处理。针对极端工况,深入研究深海、高温高压等环境下的腐蚀与改性耦合机理,构建适配的复合改性体系,增强紧固件环境适应性。此外,开展多功能协同改性研究,突破单一性能局限,构建集多种功能于一体的改性体系,满足高端装备多元化需求,推动技术全面升级。

参考文献:

- [1] 梁娅莉. 不锈钢紧固件的耐腐蚀性能提升及表面处理技术研究[J]. 五金科技,2025,53(2).
- [2] 解光瑞,杨盼盼,孙吉,等. 30CrNi2MoVA 钢等离子体渗氮层表征及其对宏观力学性能的影响[J]. 材料导报,2025.
- [3] 付煜哲. 风电机组变桨螺栓疲劳寿命与影响因素研究[D]. 重庆:重庆大学,2023.
- [4] 张德美,梁晓东,张焰. 某塔筒螺栓断裂原因分析[J]. 金属热处理,2025,50(2).
- [5] 董震. 风机法兰螺栓断裂静动力特性及疲劳分析[D]. 辽宁:大连理工大学,2024.