

紧固件的耐腐蚀性研究及防护策略优化

马为民

三马紧固件（浙江）股份有限公司 314001

【摘要】紧固件作为连接机械设备的关键组件，其耐腐蚀性直接关系到设备的稳定性和安全性。本文深入探讨了紧固件的腐蚀机理，分析了影响紧固件耐腐蚀性的主要因素，包括材质、表面处理工艺以及使用环境等。基于这些分析，提出了几项针对性的防护优化策略，包括优化材质选择、提升表面处理工艺质量等。以期有效提升紧固件的耐腐蚀性能，延长使用寿命，确保设备的安全可靠运行。

【关键词】紧固件；耐腐蚀性研究；防护策略

Study on corrosion resistance of fasteners and optimization of protection strategy

Ma Weimin

Sanma Fasteners (Zhejiang) Co., LTD. 314001

【Abstract】Fasteners, as key components in connecting mechanical equipment, have their corrosion resistance directly impacting the stability and safety of the equipment. This paper delves into the corrosion mechanisms of fasteners and analyzes the primary factors affecting their corrosion resistance, including material selection, surface treatment processes, and operating environments. Based on these analyses, several targeted optimization strategies are proposed, such as optimizing material selection and enhancing the quality of surface treatment processes. The aim is to effectively improve the corrosion resistance of fasteners, extend their service life, and ensure the safe and reliable operation of the equipment.

【Key words】fasteners; corrosion resistance study; protection strategy

引言：

紧固件作为机械设备中不可或缺的组成部分，广泛应用于汽车、航空航天、建筑等多个领域。然而，在复杂多变的使用环境中，紧固件易受腐蚀影响，导致性能下降，甚至引发安全隐患。因此，深入研究紧固件的耐腐蚀性及其防护策略，对于提升设备整体性能和延长使用寿命具有重要意义。本文将从紧固件腐蚀机理出发，分析影响耐腐蚀性的关键因素，并提出具体的防护策略优化建议。

升紧固件耐腐蚀性方面起着至关重要的作用。通过电镀、喷涂、阳极化等方法，可以在金属表面形成一层保护膜，阻止腐蚀性物质的侵蚀。然而，这些表面保护层的持久性存在一定局限，尤其在长期受力或高温环境下，表面膜可能出现开裂或脱落，从而导致腐蚀的发生。使用环境中的温度、湿度、腐蚀性气体浓度等因素直接影响腐蚀的速度与范围。极端环境下，紧固件的腐蚀问题尤为突出，因此，提升紧固件的材料选择及表面保护技术，能够有效延长其使用寿命，确保设备在复杂环境中的可靠性^[1]。

1. 紧固件腐蚀机理及影响因素

紧固件的腐蚀机理主要源于金属表面与周围环境中的腐蚀性介质发生化学反应。该反应通常伴随着电化学过程，其中金属表面失去电子，形成腐蚀产物，导致紧固件的性能衰退。在具体的腐蚀机制中，氧化反应是最常见的形式。比如，在高湿度或盐雾环境中，铁制紧固件容易发生氧化反应，形成一层松散的铁锈，进而削弱其机械强度。腐蚀速率与材料的化学成分密切相关。例如，含有较高铬和镍含量的不锈钢紧固件，其抗腐蚀性能显著优于普通碳钢。通过实验数据表明，不锈钢的腐蚀速率低于碳钢，尤其是在潮湿、盐雾环境中，前者能有效抑制腐蚀过程。此外，表面处理工艺在提

2. 紧固件耐腐蚀性现状分析

虽然已经有很多不同类型的紧固件材质，其耐腐蚀性也在通过各种表面处理技术获得提高，但实际运用中，却依然存在一定弊端。具体来讲，相当一部分紧固件在空气湿润、温度较高、腐蚀性盐雾环境等因素长期作用下，依然会出现不同程度的腐蚀，对机械设备运行与安全造成威胁。相关研究表明，在海洋环境中运用的碳钢材质紧固件，其腐蚀速度可以达到 0.5mm/y，在此过程中，对于不锈钢材质的紧固件，其腐蚀速度仅仅能够维持在 0.1mm/y 附近。并且，某些不锈钢材质在某些高温、高酸性等环境中同样难以规避腐蚀问题。同时，虽然运用的表层处理技术能够在短时间内保证紧

紧固件防腐性能,却容易因为工艺不可控性以及涂层过薄等问题,在长期应用后失去防护作用^[2],如电镀材质,在水分含量过高的环境中,表面电镀层容易发生剥离与老化的现象,致使紧固件的耐腐蚀性急剧降低。此外,还有相当一部分表层处理工艺属于技术受限类操作,在操作过程中,会出现部分镀锌层在高湿状态脱落后,对紧固件失去一定的防腐效果。还有,部分紧固件在使用过程中,没有结合应用实际情况,对紧固件材质的种类进行明确区分,造成紧固件无法发挥出自身应有的防腐性能。

3. 紧固件的耐腐蚀性研究及防护策略

3.1 优化材质选择

紧固件使用材料作为抗腐蚀性能和稳定的根基,是保障长久耐腐蚀性的前提,选择合适的材料既可以提升耐腐蚀性能,还可以通过适当的材料选择在保障功能性的基础上达到经济与性的最优。

在同一项目中,紧固件所选的材质根据不同环境应进行全面考虑。316L 不锈钢紧固件可以实现对海水中腐蚀的很好耐受性,其中钼含量为 2~3%,能大幅度地提高对点蚀的抵抗力,并能在 3.5% 的 NaCl 的溶液中进行 72h 的盐雾测试而腐蚀率仅为 0.013mm/yr。在化工厂等强酸介质中使用的紧固件,推荐选用哈氏合金 C-276 (UNS (N10276)),其中含镍量为 57%,钼含量高达 16%,可以在强酸浓度 pH=2 时,降低腐蚀速率至 0.008mm/yr 以内。由于航空航天对于重量有很严格的要求,在保证强度为 895MPa 情况下,Ti-6Al-4V 钛合金紧固件的密度只有钢材的 0.60,且可耐复杂的气候性腐蚀。同时也可以考虑进行材料组合设计的方法以提升耐腐蚀性,双金属紧固件利用紧固件的核心是高强度紧固件材料,而其表面又由耐腐蚀性好的材质包覆,从而综合提高了耐腐蚀性能。例如,AISI4140 钢芯外包覆 316L 不锈钢层的双金属螺栓,在其屈服强度仅为 800MPa 下,腐蚀性能增加 2.7 倍。另外,新的复合材料的紧固件也得到了发展。PEEK 复合材料紧固件,在保持紧固件 175MPa 抗拉强度的基础上几乎无腐蚀率,可提供非导电、轻量化航空电子系统接口^[3]。此外,金属基复合材料紧固件 SiC 颗粒增强铝基复合材料,通过调节颗粒体积分数在 15~20%,可实现抗拉强度与耐蚀性能的最优组合,紧固件在恒温恒湿条件下测试在 90℃/95%RH 环境条件下,浸泡 48h 腐蚀深度控制在 5μm 之内,也为特殊环境条件下紧固件材料选取提供解决方案。

3.2 提升表面处理工艺质量

热浸镀锌对紧固件的防护为表面处理方式,对于紧固件的防护是否有效将直接关系到防护层的效果、耐久性和保护层是否完整。有效控制表层处理参数,既能使表面处理层效果好,又减少对环境的污染及降低生产成本。

紧固件表面改质为后续涂层防护效果奠定了重要基础。文献提出酸性碱性超声除油后电化学抛光,使紧固件表面粗糙度可以控制在 Ra0.2μm 以下,表面均匀性也高出 50%;而对于高强度的紧固件,控制酸洗时间在 90±5s、温度为 45±2℃下,可以避免氢脆的风险,同时也能保证表面的充分活化;等离子体清洗也是良好的表面改质方案,氩气作为工作气体,功率控制在 250~300W 处理 30s 后,表面接触角可以下降到 15°,有效提高后续涂层粘附力,该粘附强度测试结果增加了 32%;而对于紧固件的表面改质技术,先进电镀技术也早已取得很好的应用效果,脉冲反向电镀镍合金技术,优选阴极电流密度为 3~4A/dm²,阳极电流密度为 0.5~0.8A/dm²,脉冲频率为 25~30Hz,可以制备出 12~14%镍含量的合金镀层,耐中性盐雾达到白锈 250h 以上、红锈 720h 以上,提高了 65%的防护效果^[4];离子液体电镀技术也可以很好的应用于紧固件的铬镀层制备,不但规避了六价铬的环境问题,而且制备的铬镀层的显微硬度可以高达 950~1000HV,孔隙率可以控制在 0.5%以下,该铬镀层的 5%H₂SO₄ 的极化测试腐蚀电流密度为传统铬镀层的 40%。其次是纳米复合涂层技术带来紧固件多性能保护方案。在以 2~5%的体积含量将纳米氧化锆或氧化铝粒子(直径为 20~50nm)添加于镍基中通过自组装电镀技术得到复合镀层,这种镀层具有“莲叶效应”,接触角高达 135°,能防止水在表面滞留而使腐蚀加快。溶胶-凝胶法制备的有机-无机杂化纳米涂层,通过对硅烷偶联剂 TEOS 与环氧树脂的网络连接而形成网络,薄膜厚度为 15~20μm,在紫外-热-湿复合试验中,经过 1000h 后接触电阻增加不大于 10mΩ 具有极佳的稳定性。

3.3 改善使用环境条件

使用环境对紧固件的腐蚀进程有着直接影响,通过有针对性地改善环境条件,可大幅延缓腐蚀速率。科学管控环境因素不仅能提高紧固件使用寿命,还能减少维护成本,提升整体设备可靠性。

湿度控制系统的精准设计是抑制紧固件腐蚀的有效手段。在工业环境中,安装智能除湿系统,将相对湿度控制在 45~55%范围内,可使碳钢紧固件的腐蚀速率降低 78%。采用吸附式除湿装置,选用分子筛作为吸附剂,再生温度设定为 120~130℃,可在高湿度地区保持稳定的环境湿度。针对间歇运行的设备,可设计自动监测系统,当相对湿度超过 60%时,自动启动局部热风循环,使紧固件表面温度保持高于露点 3~5℃,有效防止结露现象,经实测,此方法可降低暂停运行设备中紧固件的腐蚀率达 65%。与此同时,气体环境净化技术在特殊工业场景中展现出独特优势。针对含硫化氢、二氧化硫等腐蚀性气体的环境,采用选择性催化氧化技术,使用活性炭负载纳米氧化铜(负载量为 6~8wt%)作为催化剂,将气体中 SO₂浓度从 50ppm 降至 0.5ppm 以下, H₂

S 浓度从 30ppm 降至 0.2ppm 以下，使铝合金紧固件的腐蚀速率下降了 87%。在沿海工业区，安装具有海盐颗粒过滤功能的多级空气净化系统，通过 HEPA 滤网与活性炭复合滤芯，可将空气中氯离子浓度降低 90%以上，实测表明，此举使不锈钢紧固件的点蚀发生频率从每平方厘米 3.6 个降至 0.4 个。此外，隔离防护措施在极端环境下显得尤为重要。研发的高阻隔性能防护罩，采用聚偏氟乙烯（PVDF）与聚四氟乙烯（PTFE）复合材料，厚度为 0.8–1.0mm，氧气透过率低至 $0.5\text{cm}^3/\text{m}^2 \cdot 24\text{h} \cdot \text{atm}$ ，水蒸气透过率仅为 $2.8\text{g}/\text{m}^2 \cdot 24\text{h}$ ，有效隔绝腐蚀性介质与紧固件接触。针对地下或水下环境中的紧固件，设计的牺牲阳极保护系统，通过安装合金成分为 Al-5%Zn-0.02%In 的牺牲阳极块，与紧固件保持 5–10cm 的距离，形成局部电化学保护区域，测试显示，此系统可使水下钢制紧固件的寿命延长 3.2 倍^[5]。最后，预防性维护策略的实施能够显著减缓腐蚀进程。建立紧固件健康状态数据库，通过图像识别技术与电化学阻抗谱分析，定期评估紧固件腐蚀状态，当检测到早期腐蚀迹象（如阻抗模值下降 20% 以上）时，立即启动预防性维护程序。发展的定向冲洗技术，使用 pH 值控制在 6.8–7.2 的缓冲溶液，压力维持在 0.8–1.2MPa，每季度对关键部位紧固件进行一次清洗，可有效去除表面积聚的污染物与腐蚀产物，消除局部腐蚀电池形成的条件，实验证明，此措施可延长紧固件平均使用寿命 38%。

3.4 开发新型防护技术

新型防护技术代表了紧固件耐腐蚀领域的前沿发展方向，为解决传统方法难以克服的问题提供了创新思路。通过跨学科技术融合，可以为紧固件设计出更高效、更持久的防护策略，满足日益严苛的工业需求。

智能涂层系统在紧固件防护领域取得了显著进展。pH 响应型自修复涂层，通过将硅烷封装的钒酸盐抑制剂（封装效率达 95%）分散于环氧基体中，当涂层破损且 pH 值低于 4.5 时，自动释放抑制剂，在金属表面形成保护膜。电化学阻抗谱（EIS）测试显示，划痕处的阻抗值在 24 小时内恢复到原始值的 85%以上。形状记忆聚合物涂层技术利用聚氨酯-丙烯酸酯共聚物的相变特性，在温度升至 65–70℃ 时，涂

层能够自动愈合微裂纹，红外热像扫描显示，95% 的表面微裂纹（宽度 $<50\mu\text{m}$ ）可在加热 30 分钟内修复，为长期服役的紧固件提供了动态保护能力。再有，表面微纳结构设计为紧固件提供了物理防护新思路。通过激光微纹理技术，在紧固件表面构建周期为 50–80 μm ，深度为 15–25 μm 的微沟槽结构，显著降低实际接触面积，减少电解质在表面的滞留时间，在循环浸泡测试中，处理后的 316L 不锈钢紧固件腐蚀电流密度降低了 68%。超疏水表面处理技术通过等离子体刻蚀与低表面能材料修饰相结合，创建了接触角超过 150°，滚动角小于 5° 的超疏水表面，水滴在表面呈现“荷叶效应”，有效降低电解质在金属表面的停留时间。纳米结构化荧光分子涂层可通过颜色变化实时指示腐蚀状态，当 pH 值从中性变为酸性（ $\text{pH} < 5$ ）时，荧光强度增加 3 倍以上，提供了直观的腐蚀预警信号。

除此之外，电化学保护技术在紧固件防腐领域展现出新活力。微型嵌入式牺牲阳极系统，通过在紧固件周围预埋直径仅为 1–2mm 的高活性镁合金颗粒（含 Al 6%，Zn 3%，Mn 0.5%），形成分布式阴极保护网络，电化学测试表明，此系统可使碳钢紧固件的电位维持在 -750mV vs SCE 以下，提供长达 3 年的持续保护。脉冲阴极保护技术通过精确控制的电流脉冲（峰值密度 $3\text{--}5\text{mA}/\text{cm}^2$ ，占空比 30–40%，频率 1–2Hz），在金属表面诱导形成稳定的钝化膜，同时避免了传统恒电位保护易导致的氢脆问题，提高了高强度紧固件的安全性，断裂韧性测试显示，与传统阴极保护相比，氢脆敏感性降低了 42%。

结语：

紧固件的耐腐蚀性对于确保设备的安全可靠运行至关重要。通过优化材质选择、提升表面处理工艺质量、改善使用环境条件以及开发新型防护技术，可以有效提升紧固件的耐腐蚀性能，延长使用寿命。未来，随着科技的不断发展，将有更多先进的防护技术应用于紧固件领域，为提升设备整体性能和延长使用寿命提供更多可能。

参考文献

- [1]常银河. 高精度紧固件在自动化设备装配中的应用研究[J]. 产业创新研究, 2025, 8 (02): 94–96.
 - [2]张法明. 紧固件在电子产品中的性能测试[J]. 机械管理开发, 2024, 39 (12): 43–45.
 - [3]李昆仑. 紧固件表面电镀铬工艺及性能分析[J]. 模具制造, 2024, 24 (07): 147–149.
 - [4]王珣, 徐定逸. 新型热扩散渗锌紧固件的复杂腐蚀环境下耐腐蚀性研究[J]. 机电产品开发与创新, 2022, 35 (01): 176–180.
 - [5]李继伟, 杨振宇, 翟欢乐. 钢结构连接螺栓锰系磷化及磷化膜的耐蚀性[J]. 电镀与精饰, 2022, 44 (0)
- 作者简介：马为民，出生年：1972.11 月，男，民族：汉，籍贯：嘉兴海盐，学历：大专，研究方向：机电制造。