

# 航空结构腐蚀的日常维护与预防策略研究

刘明起

北京飞机维修工程有限公司 北京 101300

**摘要:** 航空结构腐蚀影响飞行安全。本文阐述航空结构材料特性、腐蚀类型及影响因素,提出日常维护策略,包括检查监测、清洁保养、腐蚀部位处理;探讨预防策略,涉及材料选型优化、结构设计改进、环境控制防护;构建维护与预防管理体系,涵盖框架设计、人员培训、风险评估预警,为保障航空结构安全提供参考。

**关键词:** 航空结构; 腐蚀; 日常维护; 预防策略; 管理体系

引言: 航空业发展迅速,航空结构安全至关重要。航空器运行环境复杂,结构易受腐蚀侵害,腐蚀不仅影响结构性能,更威胁飞行安全。目前航空结构腐蚀问题备受关注,深入探究日常维护与预防策略,对提升航空器安全性、可靠性,降低维护成本,延长使用寿命,推动航空业健康发展具有重要意义。

## 1 航空结构腐蚀基础理论

### 1.1 航空结构材料特性

航空领域对结构材料的性能要求极为严苛,常用材料主要包括铝合金、钛合金及复合材料等。铝合金凭借质量轻、强度高和加工性能好等优势,在航空结构中应用广泛。其主要成分为铝,并通过添加铜、镁、锌等元素提升特定性能。钛合金具有高强度、耐高温和耐腐蚀等特性,以钛为基体并加入铝、钒等元素,广泛应用于发动机等关键部位<sup>[1]</sup>。复合材料由两种以上不同性质材料组成,能综合各组分优点实现性能优化,在航空结构中的应用日益增多。不同材料在腐蚀环境中的敏感性差异明显,易腐蚀部位也各具特征。铝合金在潮湿大气或含盐环境中容易发生腐蚀,其边缘、缝隙及表面划伤等缺陷部位因电化学条件改变,更易成为腐蚀起始点。钛合金虽然耐腐蚀性较强,但在高温或强氧化介质中表面氧化膜可能受损,导致腐蚀发生,其中焊缝与热影响区相对更易受影响。复合材料的基体与增强体界面是薄弱环节,在湿热或化学介质侵蚀下易发生界面降解,引发腐蚀问题。

### 1.2 腐蚀类型

航空结构常见的腐蚀类型多样,均匀腐蚀是材料表面整体均匀地遭受腐蚀,导致厚度减薄,这种腐蚀相对容易察觉和评估。点蚀则是在材料表面形成小而深的蚀孔,初期难以发现,但会逐渐向深处发展,严重破坏材料结构。缝隙腐蚀多发生在结构缝隙处,如铆接、螺栓连接部位,缝隙内溶液成分与外部不同,形成浓差电池,

引发腐蚀。应力腐蚀开裂是材料在拉应力和特定腐蚀介质共同作用下产生的裂纹,裂纹扩展迅速,可能导致结构突然失效,危害极大。从发生机理来看,电化学腐蚀是航空结构腐蚀的主要形式,不同部位因电极电位差异形成微电池,阳极区发生氧化反应,材料不断溶解。化学腐蚀是材料与周围介质直接发生化学反应而引起的腐蚀,如高温下金属与氧气反应生成氧化物。物理腐蚀则是由于物理溶解或机械作用导致材料损失,如液态金属对固态金属的侵蚀。

### 1.3 腐蚀影响因素分析

环境因素对航空结构腐蚀影响显著。温度升高会加速化学反应速率,使腐蚀进程加快;湿度增大为电化学腐蚀提供了必要的水分条件;大气成分中,氧气是电化学腐蚀的去极化剂,二氧化硫、氮氧化物等污染物会增强介质的腐蚀性;盐雾环境中的氯离子具有很强的侵蚀性,能破坏材料表面氧化膜,加剧腐蚀;工业污染产生的酸性气体和颗粒物,也会对航空结构造成腐蚀损害。机械因素同样不可忽视。应力作用会使材料内部晶格发生畸变,降低材料耐腐蚀性,促进应力腐蚀开裂等腐蚀形式的发生。振动会导致材料表面保护膜破损,使新鲜金属暴露在腐蚀介质中,加速腐蚀。摩擦作用不仅会直接磨损材料表面,还会产生热量,改变局部环境条件,进一步促进腐蚀。材料因素与腐蚀紧密相关。材料成分决定了电极电位和化学活性,不同元素含量变化会影响材料耐腐蚀性。组织结构方面,晶粒大小、相组成等会影响腐蚀的均匀性和速率。表面状态对腐蚀也有重要影响,表面粗糙度大、存在缺陷或污染物时,更易引发腐蚀。

## 2 航空结构腐蚀日常维护策略

### 2.1 日常检查与监测

为及时发现航空结构潜在腐蚀问题,需制定科学合理的日常检查计划。明确检查周期至关重要,对飞行频繁、环境恶劣的航空器应缩短检查间隔;飞行次数少、

环境良好的则可适当延长周期。检查需覆盖机身蒙皮、机翼梁、起落架等关键部位，重点关注缝隙、铆钉连接处和焊缝附近等易腐蚀区域。检查方法应多样化。目视检查作为基础手段，通过观察表面是否出现变色、起泡或剥落等迹象判断腐蚀状况。无损检测技术能更精准发现隐蔽问题：涡流检测适用于金属表面及近表面缺陷识别；超声检测可探测材料内部腐蚀；射线检测则对结构内部裂纹和腐蚀损伤具有良好效果。电化学监测通过测量腐蚀电流、电位等参数，实现腐蚀状态的实时评估。建立腐蚀监测数据库对管理腐蚀数据十分关键。需准确记录每次检查的时间、部位、方法及腐蚀程度等信息。借助数据分析工具深入挖掘规律与趋势，通过定期评估判断结构腐蚀是否处于可控范围，为后续维护决策提供可靠依据。

## 2.2 清洁与保养

航空结构清洁的频率与方法需根据实际情况确定。飞行后，若结构表面附着有油污、灰尘、盐分等污染物，应及时进行清洁。对于不同部位和污染程度，要选择合适的清洁剂与清洁工具。例如，对于机身蒙皮等大面积部位，可使用专用的航空清洁剂和软毛刷进行清洗，清洁剂的使用量根据污染程度而定，一般每平方米使用50-100ml；对于精密的电子设备区域，则需采用温和的清洁剂和柔软的擦拭布，清洁剂要符合环保和安全要求，其酸碱度（pH值）应控制在6-8之间。保养措施能有效减缓腐蚀速率<sup>[2]</sup>。在航空器停放期间，可涂覆临时防护涂层，为结构表面提供一层保护屏障，隔绝外界腐蚀介质的侵蚀，临时防护涂层的厚度一般控制在5-15 $\mu\text{m}$ 。涂抹防锈油也是一种常用的保养方法，尤其适用于金属部件，能在金属表面形成一层油膜，防止水分和氧气的接触，防锈油的涂覆厚度约为2-5 $\mu\text{m}$ 。清洁与保养过程中要格外注意，避免对航空结构造成二次损伤。清洁工具要柔软，避免刮伤结构表面；操作时要轻柔细致，确保每一个部位都得到妥善处理，清洁和保养操作的时间一般控制在2-4小时内完成。

## 2.3 腐蚀部位处理

针对不同程度的腐蚀，需制定相应的处理方案。对于轻微腐蚀，可采用喷丸或打磨处理的方法，去除表面腐蚀产物，需注意要彻底去除腐蚀以免腐蚀继续深入。打磨时要注意控制力度和范围，避免过度打磨导致结构厚度减薄过多，一般打磨深度不超过材料厚度的10%。在打磨过程中一定要注意对施工区域的保护，包括但不限于周围可能存在的电子设备、线束、管路开口。更重要的避免打磨产生的腐蚀产物粉末都周围结构的再腐蚀威

胁。所以保护和清洁这两个步骤在施工过程性必不可少。严重腐蚀的部件则需及时更换，以确保航空器的飞行安全，当腐蚀导致结构强度下降超过30%时，必须进行部件更换。处理过程中要严格遵守工艺要求与质量控制要点。

## 3 航空结构腐蚀预防策略

### 3.1 材料选型与优化

航空器运行环境复杂多变，从潮湿沿海到干燥高原，从高温热带至寒冷极地，不同环境对结构材料耐腐蚀性能提出差异化要求。选材需充分考虑这些因素，确保材料适应特定环境。如在海洋环境中飞行的航空器，宜选用耐海水腐蚀性能优异的铝合金或钛合金。表面改性是提升材料耐腐蚀能力的重要途径。阳极氧化处理可在金属表面形成致密氧化膜，该膜层硬度高、耐腐蚀性好，能有效阻隔腐蚀介质。化学转化膜技术通过化学反应生成防护性膜层，增强材料抗腐蚀能力。电镀工艺可在基体表面形成耐腐蚀金属镀层，如镀镍、镀铬等，提供可靠保护。热喷涂技术则将耐腐蚀材料加热熔化后喷射至工件表面，形成特性优异的保护涂层。复合材料凭借优异性能，在降低航空结构腐蚀风险方面潜力显著。这类材料由两种以上不同性质材料组成，能综合各组分优点。以纤维增强复合材料为例，不仅具有高强度和刚度，其耐腐蚀性能同样突出，可有效减缓因腐蚀导致的结构性退化。

### 3.2 结构设计改进

现有航空结构设计中存在一些容易引发腐蚀的缺陷与不足。缝隙设计不合理会导致腐蚀介质积聚，形成缝隙腐蚀；积液部位若排水不畅，会长期处于潮湿环境，加速腐蚀进程；不同金属直接接触时，在腐蚀介质作用下易发生电偶腐蚀。针对这些问题，需提出结构优化设计方案。改进连接方式，采用密封性能更好的连接结构，减少缝隙的产生，使缝隙宽度控制在0.1-0.5mm以内。增加排水通道，确保积液部位的水分能及时排出，避免积水，排水通道的直径一般不小于5mm。在设计阶段尽量避免不同金属直接接触，若无法避免，可采取绝缘措施，如在接触面间添加绝缘垫片，降低电偶腐蚀的风险，绝缘垫片的厚度一般控制在0.5-2mm。

### 3.3 环境控制与防护

航空器停放与维护场所的环境条件对航空结构腐蚀有着重要影响。采取环境控制措施十分必要，通过安装除湿设备控制湿度，避免结构表面因潮湿而发生电化学腐蚀，将相对湿度控制在40%-60%之间；利用空调系统调节温度，防止高温加速腐蚀反应，将温度控制在15-30 $^{\circ}\text{C}$ 之间。减少灰尘与腐蚀性气体的积聚，可安装空气净化设备，过

滤空气中的杂质和有害气体。安装防护设备能为航空器提供物理防护。遮雨棚可防止雨水直接冲刷航空结构,减少水分接触;防尘罩能阻挡灰尘附着,降低灰尘对结构的磨损和腐蚀作用。研究新型防护涂层技术也是关键,开发具有长效、自修复、环保等特点的防护涂层,能在较长时间内为航空结构提供可靠防护,且当涂层出现轻微损伤时能自动修复,减少维护成本和对环境的影响。

#### 4 航空结构腐蚀维护与预防管理体系构建

##### 4.1 管理体系框架设计

构建科学全面的航空结构腐蚀维护与预防管理体系,需要统筹考虑组织架构、职责分工、流程规范和资源保障等关键要素。组织架构上应设立专业腐蚀管理小组,由经验丰富人员组成,负责整体工作的统筹协调。各相关部门需明确对接人员,形成上下贯通、协同配合的管理网络。职责分工应当清晰界定各部门与人员的具体职责和权限<sup>[3]</sup>。设计部门需确保结构设计满足耐腐蚀要求;生产部门要严格遵循工艺规范,防止制造缺陷导致腐蚀问题;维护部门则负责执行定期检查与维护任务。明确的职责划分有助于避免管理空白或重叠,保障工作高效推进。流程规范是管理体系的重要支撑。应制定覆盖设计、生产、使用到维护全过程的腐蚀管理流程,明确各环节的工作内容、操作标准和完成时限。资源保障方面要确保充足资金投入,用于腐蚀研究、设备采购和人员培训,同时配备先进检测设备和防护材料,为管理工作提供坚实的物质基础。

##### 4.2 人员培训与教育

人员是航空结构腐蚀维护与预防工作的执行主体,制定系统的人员培训计划至关重要。针对不同岗位人员,开展有针对性的培训内容。对于设计人员,重点培训腐蚀基础知识、新型耐腐蚀材料和结构的设计方法;生产人员则侧重于腐蚀预防工艺和质量控制要点;维护人员要掌握腐蚀检测技术、常见腐蚀问题的处理方法以及新型防护涂层的应用技能。为确保培训效果,建立严格的培训考核机制。考核方式可包括理论考试、实际操作考核

和案例分析等,全面评估人员对培训内容的掌握程度和应用能力。只有通过考核的人员,才能获得相应的资质认证,从事腐蚀维护与预防相关工作。通过持续的培训与考核,不断提升人员的专业素质与能力,使其能够正确执行各项工作任务。

##### 4.3 风险评估与预警

建立科学合理的航空结构腐蚀风险评估模型是有效预防腐蚀的关键。该模型需综合考虑材料特性、所处环境条件、使用频率与工况等多种因素,对腐蚀风险进行定量评估。通过收集大量的历史数据和实际案例,运用先进的数学方法和计算机技术,不断优化评估模型的准确性和可靠性。依据风险评估结果,制定完善的风险预警机制。设定不同级别的风险预警阈值,当腐蚀风险达到相应阈值时,及时发出预警信号。预警信号可通过多种方式传达,如短信、邮件、系统提示等。接到预警后,相关人员要迅速采取针对性的防范措施,如加强检查频率、调整维护计划、采取临时防护措施等,将腐蚀风险降至最低,保障航空结构的安全可靠运行。

##### 结束语

航空结构腐蚀维护与预防工作意义重大。通过明确日常维护策略,可及时发现并处理腐蚀问题;实施有效预防策略,可降低腐蚀发生概率。构建完善的维护与预防管理体系,强化人员培训与风险评估预警,能提升整体管理水平。做好这些工作,可保障航空结构安全,为航空业稳定运行奠定坚实基础。

##### 参考文献

- [1]史洪微,崔常京,韦涛,等.严酷环境下飞机典型结构异种材料电偶腐蚀特点与防护对策[J].装备环境工程,2020,17(5):52-57.
- [2]孙才,叶永健.空客A320飞机常见结构腐蚀和预防措施[J].全面腐蚀控制,2025,39(8):1-6,26.
- [3]朱金华,刘建辉,张秋生.老龄飞机起落架系统结构腐蚀问题研究[J].全面腐蚀控制,2022,36(2):48-52.