

直升机腐蚀原因分析及全寿命周期防护技术

崔腾飞¹, 吴建国¹, 成洁楠², 宋健¹, 曹真¹

(1. 中国直升机设计研究所, 江西 景德镇 333000; 2. 天津渤海化工集团有限责任公司, 天津 300040)

摘要: 通过直升机实际使用过程中暴露的腐蚀问题, 分析了直升机全寿命期的腐蚀防护应对方法和思路。对陆地环境和海洋环境使用直升机的腐蚀情况进行了汇总, 并对直升机典型腐蚀问题及改进措施进行了研究。在此基础上, 进一步分析了导致直升机发生腐蚀的环境、设计、生产、制造、维护等原因, 总结了直升机易腐蚀部位、腐蚀特点以及危害性。提出了采用“设计保证、生产实现、维护保持”的综合手段来提升直升机全寿命期的腐蚀防护能力。最后, 对外场维护维修过程中需要重点关注的腐蚀控制手册、清洗、涂镀层修复、密封剂/缓蚀剂等问题进行了思考和分析, 提出了需加快推进先进的防腐技术在直升机防腐中的应用, 对有效开展直升机全寿命周期的腐蚀防护工作具有一定指导意义。

关键词: 直升机; 海洋环境; 腐蚀; 防护; 设计; 维修技术

中图分类号: TG172.3

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2024)05-0066-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.05.008

Corrosion Causes and Full Life Cycle Protection Technology of Helicopters

CUI Tengfei¹, WU Jianguo¹, CHENG Jienan², SONG Jian¹, CAO Zhen¹

(1. China Helicopter Research and Development Institute, Jiangxi Jingdezhen 333000, China;

2. Tianjin Bohai Chemical Industry Group Co., Ltd., Tianjin 300040, China)

ABSTRACT: The work aims to analyze the methods for corrosion protection throughout the full life cycle of helicopters based on the corrosion problems exposed during their actual use. By summarizing the corrosion situation of helicopters used on land and at sea, typical corrosion problems and improvement measures of helicopters were studied. On this basis, the reasons of helicopter corrosion were further analyzed in terms of environment, design, production, manufacturing and maintenance. The easily corroded parts, corrosion characteristics and hazards of helicopters were summarized. A comprehensive approach of "design assurance, production implementation, and maintenance" was proposed to enhance the full life cycle corrosion protection capability of helicopters. And an analysis was conducted on the corrosion control manual, cleaning, coating repair, sealants/corrosion inhibitors and other issues that needed to be focused on during the maintenance and repair process in the field. It was proposed to accelerate the application of advanced anti-corrosion technology in helicopter anti-corrosion. It has certain guiding significance for effectively carrying out full life cycle corrosion protection throughout the full life cycle of helicopters.

KEY WORDS: helicopter; marine environment; corrosion; protection; design; maintenance techniques

收稿日期: 2024-04-10; 修订日期: 2024-04-29

Received: 2024-04-10; Revised: 2024-04-29

引文格式: 崔腾飞, 吴建国, 成洁楠, 等. 直升机腐蚀原因分析及全寿命周期防护技术[J]. 装备环境工程, 2024, 21(5): 66-73.

CUI Tengfei, WU Jianguo, CHENG Jienan, et al. Analysis of Helicopter Corrosion and Full Life Cycle Protection Technology[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(5): 66-73.

直升机由于使用其使用特点, 如无起降场地限制、可悬停、航速低、低空飞行时间长等特点, 在应急救援、人员/装备运输、警用搜索、巡逻、灭火、医疗救护等众多领域均发挥着重要的作用^[1-3]。然而, 这也导致了直升机所遭遇的环境相比于固定翼飞机恶劣很多, 其中腐蚀环境对直升机的影响尤为突出^[4-8], 尤其是在沿海或海上环境执行任务时, 大气温度高, 相对湿度大, 侵蚀性离子含量高, 再加上低空飞行时海水可能会喷溅到机体表面, 使用环境十分恶劣^[9-10]。腐蚀损伤是直升机结构环境损伤的主要形式之一^[11-14], 会造成结构表面防护体系退化, 进而对基体结构产生损伤, 严重时会影响机体强度, 对直升机结构安全产生巨大影响。常见的腐蚀损伤有点蚀、电偶腐蚀、缝隙腐蚀、应力腐蚀、腐蚀疲劳等^[15-16]。

一架直升机设计完成后, 其腐蚀防护能力就已经基本确定, 后期的维护维修也只是起到保持和恢复作用, 很难通过后期手段进一步提高一架机腐蚀防护能力^[17]。因此, 在现代直升机设计时, 已经将腐蚀防护设计以及如何在各结构中实现, 提升到了与功能设计、疲劳强度设计、静强度设计等同等重要的位置, 是保证直升机日历寿命和结构完整性的重要环节, 也是直升机可靠性、维修性、安全性的重要保证, 更是降低维护成本、提升经济性的重要手段^[18-20]。

1 直升机实际腐蚀案例

1.1 直升机腐蚀概况

在前期直升机腐蚀调研的过程中发现, 在海洋环境中使用的直升机腐蚀情况如下: 机外结构腐蚀占比最高, 为 25%, 然后是机外的紧固件, 为 18.33%, 机内结构、动力舱及旋翼系统的紧固件均为 14.17%, 起落架结构为 7.5%, 动力舱及旋翼结构和管接头均为 5.83%, 机外管接头为 4.17%, 起落架紧固件为 3.33%, 腐蚀最少的机内紧固件和管接头, 只有 0.83%。通过表 1 的统计分析可以发现, 在海洋环境使用的直升机, 腐蚀主要集中在机外结构、紧固件以及旋翼系统等外露部位。

表 1 海洋环境下直升机各部位腐蚀情况统计
Tab.1 Corrosion statistics of each helicopter part in marine environment

%				
海洋环境下 直升机腐蚀情况	结构	紧固件	管路接头	总计
机内	14.17	0.83	0.83	15.83
机外	25	18.33	4.17	47.5
动力舱及旋翼	5.83	14.17	5.83	25.83
起落架	7.5	3.33	0	10.83
总计	52.5	36.67	10.83	100

对于内陆环境下使用的直升机, 其腐蚀情况如下: 动力舱及旋翼结构腐蚀的占比最高, 达到 26.04%, 然后是机外、动力舱及旋翼的紧固件均为 16.67%, 机内结构为 14.58%, 机外结构为 7.29%, 起落架结构为 5.21%, 动力舱及旋翼管接头为 3.12%, 机外管接头和起落架管接头最好, 均只有 1.04%。通过表 2 的统计分析可以发现, 在内陆环境使用的是直升机, 旋翼系统、紧固件腐蚀的占比较大。

表 2 内陆环境下直升机各部位腐蚀情况统计
Tab.2 Corrosion statistics of each helicopter part in inland environment

%				
内陆环境下 直升机腐蚀情况	结构	紧固件	管接头	总计
机内	14.58	6.25	0	20.83
机外	7.29	16.67	1.04	25
动力舱及旋翼	26.04	16.67	3.12	45.83
起落架	5.21	2.08	1.04	8.33
总计	53.12	41.67	5.21	100

1.2 典型腐蚀部位

在检修中发现, 直升机驾驶舱某处地板铝合金轨道发生了腐蚀, 如图 1 所示。主要是由于在地板上的漆层受到了机械损伤, 在接触到含盐的潮湿空气后, 铝合金轨道和钛合金紧固件接触, 形成电偶对, 导致铝合金发生腐蚀。另外, 在此部位的紧固件装备装配时, 需要使用密封剂, 但是在检查时发现实际上并没有这么做, 这也是导致结构腐蚀的重要原因之一。后续改进主要是通过增加密封装配, 控制腐蚀。

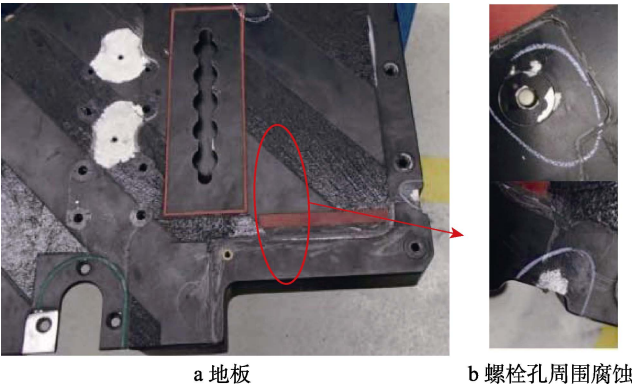


图 1 地板轨道腐蚀
Fig.1 Corrosion of floor tracks: a) floor;
b) corrosion around bolt holes

某处天线与复合材料机身连接结构发生腐蚀, 如图 2 所示。主要是由于水通过舱门或者地板间的缝隙进入机身位置较低的部位形成积液, 导致镀层损伤, 随后积水沿镀层裂纹或者密封剂缺陷进入内部, 与天线接触, 导致其发生腐蚀。后续改进主要是通过替换



图2 天线连接结构腐蚀
Fig.2 Corrosion of antenna connection structure

天线用自流平颜料,避免积水沿着紧固件和垫圈(天线连接部位)结合处进入内部,防止腐蚀的发生。

桨毂变矩杆发生的腐蚀如图3所示。主要是由于变矩杆与多种材料偶接,水通过排水孔进入变矩杆内部,导致了经过阳极氧化的铝合金叉型结构和钢棒的腐蚀。从图3中可以看出,只有固定杆没有腐蚀,主要是因为套筒阻止了水的进入,其他地方由于防护不到位,腐蚀较为严重。主要是因为该结构应该使用套筒或者密封胶覆盖变矩杆带螺纹的部分,来阻止水的进入,但是设计时并没有考虑密封变矩杆,因此结构发生了腐蚀。后续改进主要是增加结构密封,防止水汽进入。



a 叉型结构



b 变矩杆内部

图3 变矩拉杆腐蚀

Fig.3 Corrosion of variable pitch pull rod: a) forked structure; b) inside the variable pitch rod

桨叶折叠机构发生的腐蚀如图4所示。折叠结构本体是铝合金,安装在上面的紧固件是钢制的。在使用过程中,由于漆层受到工具的磨损而发生破坏,紧接着紧固件附近的涂层失效,最终导致铝合金结构件发生电偶腐蚀。后续主要是通过增加隔离密封,降低漆层发生破坏的可能性,从而避免腐蚀。后续改进主要是在维护维修时,去除腐蚀产物,重新喷漆,装配后在紧固件周围使用密封胶。



a 折叠结构



b 螺栓孔周围腐蚀

图4 桨叶折叠机构腐蚀

Fig.4 Corrosion of blade folding mechanism: a) folding structure; b) corrosion around bolt holes

2 直升机腐蚀的原因

2.1 使用环境恶劣

直升机使用环境复杂,需要在海上、船上、城市、戈壁、沙漠、高原、山区等环境中使用,即使针对同一架直升机,根据所执行的任务不同,其使用环境往往是多变的。可见直升机使用环境十分多变,而这其中又以腐蚀环境的影响最为突出。

由于材料本身表面防护层的存在,使得其在一般的环境中具有良好的耐蚀性,但是在含有 Cl^- 等侵蚀性离子的环境中则会发生较为严重的腐蚀^[21]。对直升机产生腐蚀作用的介质主要是水,由于雨水、冷凝水、相对湿度较大的空气、盐雾、冰雪融化等附着在机体表面^[22],再加上其中溶解的侵蚀性离子,如沿海空气中蕴含的 Cl^- 等,或者由于有工业排放气体的影响,还有的一定量的 SO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 、 NO_x 等,这种电解液

在机体表面形成连续液膜,会对机体结构中的材料产生严重的腐蚀作用^[23]。这主要是因为环境中的 Cl^- 会破坏防护层的完整性,降低防护层的防护能力,导致受损部位局部电化学活性升高,与其他未腐蚀部位形成腐蚀原电池,加速腐蚀进程^[24]。除了积水和侵蚀性离子外,温度也是影响直升机腐蚀的重要因素,直升机所处的环境温度越高、相对湿度越大,结构材料的腐蚀也会越快,主要是因为温度会增加离子扩散速率,从而加快阴极去极化反应速度,提升整个腐蚀的反应速率。研究表明,温度每升高 $10\text{ }^\circ\text{C}$,腐蚀反应速率就会提升1倍,直升机经常在高温高湿的沿海或海上使用,其面临的腐蚀环境十分严酷。另外,较大的温差也会影响直升机的腐蚀防护能力,主要是因为较大的温差会使材料表面的涂镀层更快地失效,温差越大,温度变化越快,涂镀层失效的时间就越短。

此外,严酷的力学环境,也是造成直升机腐蚀的重要因素之一。由于直升机构型特点,旋翼转动会引

发结构的周期振动, 振动会使涂镀层产生微裂纹, 侵蚀性电解质沿着裂纹进入内部, 与基体材料接触, 造成基体腐蚀。另外, 在振动应力的和腐蚀的双重作用下, 结构易发生腐蚀疲劳, 使疲劳强度远低于设计强度。振动还会引起直升机连接螺栓或衬套的微动磨损和微动疲劳, 管路接头松脱等。可见, 直升机在恶劣环境因素的联合作用下, 会发生十分明显的腐蚀破坏^[25]。

2.2 设计存在缺陷

直升机结构在最初进行设计时, 除了要考虑结构本身的强度外, 还应考虑腐蚀防护问题。良好的腐蚀防护设计, 是保证直升机全寿命周期腐蚀环境适应性能力的基础^[26-28]。常见的设计缺陷有: 材料选择不当, 直升机结构设计时, 优先选择耐蚀性良好的材料, 若选材不当, 如选用了耐蚀性较差的镁合金、碳钢等材料, 或电位差较大的 2 种材料 (如铝合金和不锈钢) 接触, 将会影响整体结构的耐腐蚀能力; 表面防护体系选择不当, 一般设计时, 材料表面均需要选择合适的防护体系, 如阳极化、镀镉、钝化等, 若表面防护体系选择不当, 如镀锌等阳极化镀层, 或者与基体材料不匹配的漆层, 也会影响整体结构的耐蚀性; 防/排水设计不当, 直升机结构要设置合理的排水通道, 使积水能顺利排出机外, 若排水设计不合理, 如排水孔过大或过小、位置不在最低处等, 会影响整体的排水能力^[29-31]。

2.3 工艺控制不严

在生产阶段能否完整准确地实现腐蚀防护设计, 也是影响直升机服役后腐蚀防护能力的关键, 生产工艺不严格或不规范, 也会降低直升机的腐蚀防护能力。如结构件加工过程中有划伤、腐蚀、腐蚀介质残留, 结构件加工完成后未清除干净毛刺, 表面有锈蚀缺陷, 都会引起腐蚀。表面处理前未彻底清洗构件, 尤其是孔隙、缝隙与盲孔部位要重点清洗, 除去腐蚀介质, 然后进行干燥。涂层施工环境条件、使用要点、涂漆前的表面准备、涂料的准备和涂层检查等, 未严格按照相关工艺规范执行, 会降低漆层结合力。应特别注意涂漆前结构件的表面处理, 结构件的表面处理和清洁度, 会影响涂层的附着力。涂漆工艺间隔时间过长, 会影响整体涂漆效果^[32]。

2.4 维护维修不到位

直升机维护的意义非常重要。直升机作为一种高度复杂的航空装备, 动部件多, 服役环境复杂, 后期维护的难度也相对较高。一般直升机维护手册或者腐蚀控制手册都制定了详细的检查周期和维护维修内容, 需要严格按照规定对各部件进行定期检查、保养、维护、更换、维修。只要按照规定的保养周期进行维

护, 就可以延长直升机的使用寿命^[33-34], 降低运营成本。但若维护工作不到位, 如忘检、漏检、未及时涂油涂漆、未及时清洗、未及时处理腐蚀故障点, 都会影响直升机的腐蚀防护能力, 进而影响直升机的使用安全、使用寿命和使用成本^[35-36]。因此, 直升机维护对于确保飞行安全、延长使用寿命、降低运营成本和提高效率等方面都具有非常重要的意义。

3 直升机腐蚀的危害

从前面的调研、总结、分析可以发现, 直升机的易腐蚀位置主要集中在以下部位。

1) 结构中异种材料接触部位。如复材-金属连接、铝合金-不锈钢连接、铝合金-钛合金连接、铝合金-结构钢连接、结构钢-不锈钢连接、结构钢-钛合金连接等处。异种金属接触, 当防护体系老化或失效时, 结构在腐蚀环境中易腐蚀。

2) 设备安装部位。直升机上的设备与机体连接的部位、紧固件、卡箍等。由于连接部位材料不同, 且在拆装的过程中, 表面防护层易受到损伤, 同时紧固件、卡箍等基础产品防护较为困难, 因此这些部位易腐蚀。

3) 电气连接部位。电气设备与线缆连接部、接插件、插座、插头等。由于易在这些部位形成积水, 且不易排出, 因此这些部位易腐蚀。

4) 电搭接部位。电搭接接触面要求将搭接面或搭接紧固件的表面防护层打磨掉, 露出金属基体, 因此这些部位易腐蚀。

5) 活动部位。合页、口盖、快卸结构、雨刷等经常开合活动的部位, 由于反复运动造成表面防护层磨损, 因此这些部位易腐蚀。

6) 排水通道。直升机在设计时, 依据水流的流动特性, 设计了排水通道, 可将积水排出机外。由于经常受积水的影响, 因此这些部位易腐蚀。

腐蚀会影响直升机的使用安全, 严重的结构腐蚀甚至可导致直升机提前退役。同时, 不良的设计会增加使用过程中的维护维修工作, 占用大量维修工时, 严重时可能导致机群性的腐蚀问题, 全面整改会大大增加使用成本, 影响型号寿命期的经济性。通过分析, 总结出了直升机易腐蚀部位、易腐蚀部位的腐蚀特征以及腐蚀后对直升机产生的危害等, 见表 3。

4 提升直升机腐蚀防护能力的途径

通过对直升机腐蚀问题的整理和分析发现, 要保证直升机全寿命周期的腐蚀防护性能, 需要从设计、生产、维护维修等各方面发力, 以“设计保证、生产实现、维护保持”的综合手段来保证直升机全寿命期的腐蚀防护能力。

表3 直升机典型腐蚀特征及危害
Tab.3 Typical corrosion characteristics and hazards of helicopters

易腐蚀部位	主要腐蚀特征	危害
结构中异种材料接触部位	电偶腐蚀、晶间腐蚀、剥蚀	结构强度降低
设备安装部位	磨损、点蚀、电偶腐蚀	设备安装不牢
电气连接部位	点蚀、电偶腐蚀	影响电气系统输入、输出
电搭接部位	电偶腐蚀	影响搭接效果
活动部位	磨损、腐蚀	活动关键卡滞
排水通道	浸泡导致的腐蚀	材料、零件、结构腐蚀

4.1 准确的腐蚀防护设计

直升机腐蚀防护设计需要从选材、表面防护、结构/密封设计等方面进行,并综合考虑与功能设计、强度设计、电磁设计等其他设计协调统一,在使腐蚀防护设计融入到其他设计当中,下面列出了常见的腐蚀防护设计方法。

1) 材料选用。选用材料时,在满足强度、功能要求的前提下,优先选用耐蚀性好的材料。一般会在材料选用目录的基础上,对所使用的结构钢、不锈钢、铝合金、铜合金、钛合金、复合材料、塑料、橡胶、黏结剂等材料进行分析,根据材料的耐蚀性,推荐优先使用的材料以及不建议使用的材料等。设计人员可在此基础上进行设计选材。如机外结构为复合材料、7075 铝合金、0Cr17Ni12Mo2 不锈钢,紧固件选用不锈钢,铆钉用钛合金,螺栓螺母用 0Cr17Ni4Cu4Nb 不锈钢等,结构钢选用 30CrMnSiA、30CrNi4MoA,而不建议使用 45#等。另外,选材时还要考虑与其接触材料间的电偶序,电位差较大的 2 种金属禁止接触使用。

2) 表面防护。一般情况下,材料禁止裸露使用,都要进行相应的表面处理。如铝合金阳极化、钛合金阳极化、结构钢镀镉/镉-钛、不锈钢钝化、铜合金镀镍等,并在允许的表面喷涂符合要求的底漆和面漆。尤其是异种金属接触时,必须要进行表面防护,防止材料发生电偶腐蚀。

3) 结构/密封设计。进行防水排水设计,设计排水通道,将直升机积水排出机外,或对重要部位进行防水隔离。结构密封是保证直升机腐蚀防护能力的重要手段,需要根据结构特点,在必要的部位进行密封处理。根据不同使用环境选择不同的密封剂,如 HM119、HM317 等。根据结构特点在接触材料间涂抹密封剂,将 2 种材料隔离,避免电接触,或者在整个外露部位涂抹密封剂,避免与溶液接触。

4) 关注基于系统工程的腐蚀防护设计。随着工作进步,基于系统工程的设计理念逐步贯彻到直升机设计当中,这就要求腐蚀防护设计也要有遵循相应的设计思路。在开展设计前,需要针对使用场景,对直升机可能遭遇的腐蚀环境及其环境因子强度进行分析,并研究其对直升机各结构的影响。在此基础上,根据腐蚀环境影响的大小对直升机结构进行分区,之

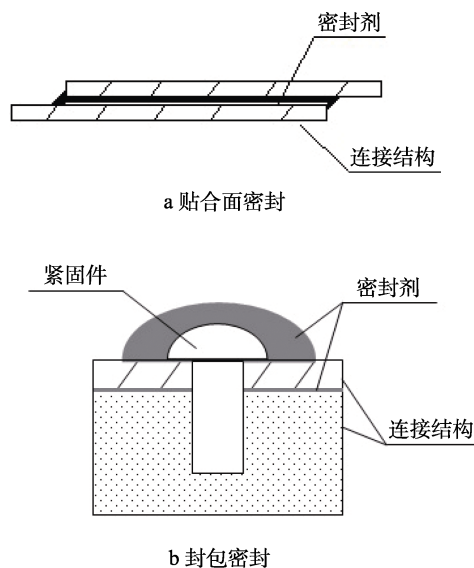


图5 常见的密封形式

Fig.5 Common sealing forms: a) bonding surface seal; b) packaging seal

后再对每个区域进行针对性的腐蚀防护设计。如机身下表面受盐雾蒸发的影响较大,腐蚀情况较为严重,则需要增加镀层厚度、全面隔离密封、应用重防腐涂层;而针对客舱,由于其结构相对封闭,盐雾影响较小,则可以考虑简化密封,以降低全机重量。

5) 关注基于数字化验证的腐蚀防护设计快速迭代技术。随着数字化仿真技术的发展,其在设计验证环节也起到了越来越重要的作用。传统腐蚀防护设计验证,主要依赖试验,试验周期长、成本高、迭代速度慢,不利于腐蚀防护设计的快速改进。利用数字化仿真技术,可实现设计-验证的快速迭代,发现腐蚀防护设计薄弱环节,并进行改进,可有效提升腐蚀防护设计的效率。

6) 关注新型防护基础的应用。目前直升机涂层体系已经较为完善,能满足直升机腐蚀设计的基本需求,但是针对某些特殊结构的防护需求还存在欠缺。如直升机桨叶迎风面,转动时会受到雨滴的冲刷腐蚀,需要强韧性好的耐雨蚀涂层;座椅的某链接机构,由于经常活动,还需要兼顾导电,因此需要满足耐腐蚀-耐磨损-导电性好的防护涂层;某平台钛合金结构,在高温环境下使用,需要高温性能稳定的耐腐蚀涂层。因此,复合环境工况的防护涂层需求十分迫切。

4.2 严格的生产制造工艺

在生产制造过程中,也要考虑腐蚀防护问题。如材料加工前应进行检查,材料本身不能有锈蚀、损伤;加工过程不能损伤零件表面;需要制定工序间的腐蚀控制程序,保证零件在工序转移、周转中不发生腐蚀;如存在焊接等特殊工艺,要制定合理的工艺程序,焊接后要对焊接部位进行防护;要十分注意需要进行密封处理的部位,按要求密封到位,前期调研发现有很多腐蚀是由于密封缺失引起的。

4.3 合理的使用维护维修

除了材料、表面防护、结构/密封设计外,直升机在实际使用过程中,还要进行合理的腐蚀控制和维修。比如清洗、腐蚀打磨、补漆、密封修补等,这些都是非常关键的腐蚀防护手段。同时,还需要关注以下几个方面。

1) 制定型号腐蚀控制手册。手册需明确检查时机、检查部位、发现腐蚀后的处理方法、腐蚀维修用品等信息,并且明确各重点部位的材料、表面处理方式、连接形式、连接件种类、密封方式等,以便后续在维修过程中,能准确确定维修方法和涂镀层恢复方法,提高手册的适用性和可操作性。同时,建议在手册中明确腐蚀检查和维护维修所需的工具和产品,如密封剂、缓蚀剂、清洗剂、油漆等用品的牌号,以便采购和使用。

2) 合理规划直升机清洗策略。清洗直升机是去除腐蚀介质及其他污染物,保持涂镀层防护效果的重要步骤,是一种简单、有效的外场腐蚀防护措施,能有效减少腐蚀的发生。清洗周期和清洗部位需要科学合理,清洗周期过长,不利于污染物的即使去除,但过于频繁的清洗又会对表面漆层和镀层产生损伤,因此需要根据直升机服役的环境特点,针对不同地域制定不同的清洗周期,实现精准、高效清洗。同时,针对外场实际操作过程中反映的清洗用品不明确、手动清洗工作量大等问题,还需要研制新型清洗剂、自动化清洗设备,提高直升机清洗效率。

3) 完善表面涂镀层修复技术及设备。目前,外场十分缺乏涂镀层修复技术,只有阿洛丁可用于对铝合金表面的氧化,而其他的镀层,如镀镉、镀锌、阳极化、钝化等,均无法修复,尤其是针对结构钢,这就造成结构钢表面镀层损伤后,没有有效的修复手段,只能直接涂漆,修复效果难以保证。另外,当发现结构有漆层破损时,机务人员一般只能根据经验自行调制油漆,用刷子或毛笔补漆,漆层的颜色和质量难以控制一致,补漆后的漆层附着力有限,在使用很短的一段时间后就会脱落。因此,需要考虑研制便携式镀层修复设备,用于材料表面镀层修复,以及自动调漆、喷漆设备,以提高外场补漆质量和工作效率。

4) 关注密封剂/缓蚀剂等防护用品的应用。密封

剂/缓蚀剂作为腐蚀控制重要方法,具有操作简便、防护效果好、易于实施等优点,在外场腐蚀维护中发挥了重要的作用。如在紧固件安装时,涂覆 HM119、HM120 等密封剂,或者安装完成后对螺栓头进行包覆,均能起到很好的防护效果。同样,采用硬膜缓蚀剂(如 YTF-1,针对不经常拆装的部位)、软膜缓蚀剂(如 TSN5,针对经常拆装的部位)等,对结构部位进行喷涂,也能起到很好的防护效果。但是在实际使用过程中,也出现了软膜缓蚀剂易脱落,防护时间不长,硬膜缓蚀剂较硬,维修时不易清除等问题,因此后续可考虑在已有密封剂/缓蚀剂基础上发展性能更好、使用更便捷的防护用品。

5 结语

直升机腐蚀防护工作贯穿直升机全生命周期,对直升机使用安全和使用效率的影响很大。通过合理的手段提升和保持直升机腐蚀防护效果,不仅可以延长直升机各部件的使用寿命,还能降低后期维护成本,减少人员工作消耗。笔者主要分析了直升机腐蚀概况和典型腐蚀形式,以及导致直升机产生腐蚀的原因,并介绍了常见的腐蚀防护控制方法及发展思路。希望通过这些分析,使直升机的防腐工作能够科学、合理地开展。

参考文献:

- [1] 高扬. 欧洲直升机 EC225 的防腐现状研究[J]. 科技创新导报, 2013, 10(28): 74.
GAO Y. Study on Corrosion Protection Status of European Helicopter EC225[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2013, 10(28): 74.
- [2] 丁清苗, 秦永祥, 崔艳雨. 大气环境中飞机构件的电偶腐蚀研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2020, 40(5): 455-462.
DING Q M, QIN Y X, CUI Y Y. Galvanic Corrosion of Aircraft Components in Atmospheric Environment[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2020, 40(5): 455-462.
- [3] CHEN Y L, HUANG H L, ZHANG Y, et al. A Method of Atmospheric Corrosion Prediction for Aircraft Structure[J]. Materials and Corrosion, 2019, 70(1): 79-90.
- [4] 张勇, 陈跃良, 王晨光. 模拟沿海大气环境下铝合金搭接件电偶腐蚀行为研究[J]. 材料导报, 2016, 30(10): 152-155.
ZHANG Y, CHEN Y L, WANG C G. Study on Galvanic Corrosion of Aluminum Alloy Related Joint in Simulated Coastal Wet Atmosphere[J]. Materials Review, 2016, 30(10): 152-155.
- [5] 穆志韬, 熊玉平. 飞机结构主体材料腐蚀损伤特点分析[J]. 材料保护, 2001, 34(12): 49-50.
MU Z T, XIONG Y P. Analysis of Corrosion Damage

- Characteristics of Main Materials of Aircraft Structure[J]. *Materials Protection*, 2001, 34(12): 49-50.
- [6] BARTER S A, MOLENT L. Fatigue Cracking from a Corrosion Pit in an Aircraft Bulkhead[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2014, 39: 155-163.
- [7] ROUT P K, GHOSH M M, GHOSH K S. Effect of Solution pH on Electrochemical and Stress Corrosion Cracking Behaviour of a 7150 Al-Zn-Mg-Cu Alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2014, 604: 156-165.
- [8] 崔继红, 蔡建平, 贾成广. 盐雾环境下高强度铝合金的点蚀行为[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2010, 30(3): 197-202.
- CUI J H, CAI J P, JIA C C. Pitting Corrosion of High Strength Aluminum Alloys in Salt Spray Test[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2010, 30(3): 197-202.
- [9] DAN Z H, MUTO I, HARA N. Effects of Environmental Factors on Atmospheric Corrosion of Aluminium and Its Alloys under Constant Dew Point Conditions[J]. *Corrosion Science*, 2012, 57: 22-29.
- [10] 柳文林, 穆志韬, 段成美. 现役直升机结构腐蚀原因及控制[J]. *腐蚀科学与防护技术*, 2005, 17(5): 358-359.
- LIU W L, MU Z T, DUAN C M. Corrosion Control and Causation Analysis for Helicopter Structures in Service[J]. *Corrosion Science and Protection Technology*, 2005, 17(5): 358-359.
- [11] 崔腾飞, 高蒙, 胡建清, 等. 海洋环境对直升机基础产品腐蚀行为影响研究[J]. *装备环境工程*, 2023, 20(5): 19-25.
- CUI T F, GAO M, HU J Q, et al. Effect of Marine Environment on Corrosion Behavior of Helicopter Foundation Products[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2023, 20(5): 19-25.
- [12] 李晓宁, 李云涛, 包俊成, 等. 2024 铝合金在模拟大气环境下的腐蚀性分析[J]. *热加工工艺*, 2015, 44(16): 93-95.
- LI X N, LI Y T, BAO J C, et al. Analysis on Corrosion Behavior of 2024 Al Alloy in Simulated Atmosphere[J]. *Hot Working Technology*, 2015, 44(16): 93-95.
- [13] 邓斌, 易丹青, 杨胜, 等. 2E12 铝合金加速腐蚀环境谱下的疲劳裂纹扩展[J]. *材料科学与工程学报*, 2009, 27(5): 770-773.
- DENG B, YI D Q, YANG S, et al. Effect of Accelerated Corrosive Environment Spectrum on Fatigue Crack Growth of 2E12 Aluminum Alloy[J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2009, 27(5): 770-773.
- [14] 李涛, 李晓刚, 董超芳, 等. Cl^- 含量对 2A12 铝合金初期腐蚀行为的影响[J]. *北京科技大学学报*, 2009, 31(12): 1576-1582.
- LI T, LI X G, DONG C F, et al. Influence of Cl^- Concentration on the Initial Corrosion Behavior of 2A12 Aluminum Alloy[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2009, 31(12): 1576-1582.
- [15] 崔常京, 史洪微, 倪波, 等. 严酷环境中飞机异种材料连接结构的防腐蚀措施[J]. *腐蚀与防护*, 2021, 42(12): 55-59.
- CUI C J, SHI H W, NI B, et al. Protective Measures of the Different Materials Joint Structure of Aircraft in Harsh Environment[J]. *Corrosion & Protection*, 2021, 42(12): 55-59.
- [16] 王安东, 陈跃良, 卞贵学, 等. 飞机用高强度铝合金腐蚀疲劳研究进展[J]. *航空制造技术*, 2017, 60(20): 95-103.
- WANG A D, CHEN Y L, BIAN G X, et al. Research Progress on Corrosion Fatigue of High Strength Aluminum Alloy of Aircraft[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017, 60(20): 95-103.
- [17] 沈军, 魏荣俊, 边英杰, 等. 直升机在海洋气候环境下的腐蚀防护对策研究[J]. *装备环境工程*, 2017, 14(3): 71-74.
- SHEN J, WEI R J, BIAN Y J, et al. Corrosion Control of Helicopter in Environment of Marine Climate[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2017, 14(3): 71-74.
- [18] 沈军, 李健, 魏荣俊, 等. 某型直升机内部结构腐蚀防护与修理对策研究[J]. *装备环境工程*, 2016, 13(1): 45-50.
- SHEN J, LI J, WEI R J, et al. Corrosion Protection and Repairing Countermeasures of Internal Structure of a Certain Type of Helicopter[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2016, 13(1): 45-50.
- [19] 李宗原, 李健, 石金大, 等. 某型直升机尾减速器从动机匣腐蚀故障分析及预防对策研究[J]. *装备环境工程*, 2014, 11(6): 105-109.
- LI Z Y, LI J, SHI J D, et al. Corrosion Failure Analysis and Preventive Measure of a Type of Helicopter Tail Gearbox Casing Assembly[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2014, 11(6): 105-109.
- [20] 瞿新辉, 韩志忠, 谌广昌. 直升机材料防护技术及设想[J]. *装备环境工程*, 2008, 5(6): 108-111.
- QU X H, HAN Z Z, CHEN G C. Helicopter Material Protection Technologies and Relevant Consideration[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2008, 5(6): 108-111.
- [21] GUILLAUMIN V, MANKOWSKI G. Localized Corrosion of 2024 T351 Aluminium Alloy in Chloride Media[J]. *Corrosion Science*, 1998, 41(3): 421-438.
- [22] 王晨光, 陈跃良, 张勇, 等. 表面涂层破损对 7B04 铝合金点蚀的影响及仿真研究[J]. *航空材料学报*, 2016, 36(6): 48-53.
- WANG C G, CHEN Y L, ZHANG Y, et al. Influence and Simulation Study of Surface Coating Damage on Pitting Corrosion of 7B04 Aluminum Alloy[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2016, 36(6): 48-53.
- [23] 贾静焕, 刘明, 骆晨, 等. 2A97 铝锂合金典型防护涂层热带海洋大气环境腐蚀老化行为[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2023, 43(1): 143-151.
- JIA J H, LIU M, LUO C, et al. Corrosion and Aging Behavior of 2A97 Al-Li Alloy with Typical Protective Coat-

- ings in Tropical Marine Atmosphere Environment[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2023, 43(1): 143-151.
- [24] 张晓云, 孙志华, 刘明辉, 等. 环境对高强度铝合金应力腐蚀行为的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2007, 27(6): 354-362.
- ZHANG X Y, SUN Z H, LIU M H, et al. Influence of Different Environments on Stress Corrosion Cracking of High Strength Aluminum Alloys[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2007, 27(6): 354-362.
- [25] 张天宇, 张腾, 王长凯, 等. 腐蚀疲劳交替环境下 $0\text{Cr}_{16}\text{Ni}_5\text{Mo}_1$ 不锈钢的损伤行为研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(12): 54-62.
- ZHANG T Y, ZHANG T, WANG C K, et al. Damage Behaviour of $0\text{Cr}_{16}\text{Ni}_5\text{Mo}_1$ Stainless Steel under Alternating Corrosion and Fatigue Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(12): 54-62.
- [26] 孙志华, 汤智慧, 李斌. 海洋环境服役飞机的全面腐蚀控制[J]. 装备环境工程, 2014, 11(6): 35-39.
- SUN Z H, TANG Z H, LI B. Comprehensive Corrosion Control of Naval Aircraft[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(6): 35-39.
- [27] DAN Z H, MUTO I, HARA N. Effects of Environmental Factors on Atmospheric Corrosion of Aluminium and Its Alloys under Constant Dew Point Conditions[J]. Corrosion Science, 2012, 57: 22-29.
- [28] 曹真, 崔腾飞, 徐璐. 舰载直升机雷达罩新型腐蚀防护技术验证研究[J]. 环境技术, 2020, 38(1): 111-117.
- CAO Z, CUI T F, XU L. A New Type of Corrosion Protection Technology for Radome of Shipboard Helicopter[J]. Environmental Technology, 2020, 38(1): 111-117.
- [29] 马红星, 刘成臣, 刘元海, 等. 关于海洋环境下飞机腐蚀防护与控制体系的思考[J]. 环境技术, 2022, 40(1): 7-11.
- MA H X, LIU C C, LIU Y H, et al. Thoughts on Aircraft Corrosion Protection and Control System in Marine Environment[J]. Environmental Technology, 2022, 40(1): 7-11.
- [30] 张幸, 何卫平, 张登. 某型飞机典型连接结构防腐密封改进及验证[J]. 装备环境工程, 2016, 13(1): 24-28.
- ZHANG X, HE W P, ZHANG D. Improvement and Validation about Anti-Corrosion Sealing of Typical Assembly Structure of a Certain Aircraft[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(1): 24-28.
- [31] 孙盛坤, 孙志华, 汤智慧, 等. 舰载飞机腐蚀控制与防护技术[J]. 装备环境工程, 2017, 14(3): 18-22.
- SUN S K, SUN Z H, TANG Z H, et al. Corrosion Control and Protection Technology of Carrier-Borne Aircraft[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(3): 18-22.
- [32] 王春晖, 蓝启城, 何卫平, 等. 典型连接件防腐密封剂在加速环境下的失效分析[J]. 装备环境工程, 2013, 10(3): 47-50.
- WANG C H, LAN Q C, HE W P, et al. Failure Analysis of Typical Adapting Piece Anticorrosion Sealant in Accelerated Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(3): 47-50.
- [33] 张蕾, 刘慧丛, 朱立群, 等. 局部修复对典型环境中飞机外部结构件腐蚀的影响及腐蚀当量关系修正[J]. 腐蚀与防护, 2014, 35(8): 833-837.
- ZHANG L, LIU H C, ZHU L Q, et al. Effect of Local Repair on Corrosion of Airplane External Structure in a Typical Environment and Correction of Corrosion Equivalent Relationship[J]. Corrosion & Protection, 2014, 35(8): 833-837.
- [34] 李东帆, 陈跃良, 花海城. 海军某型飞机腐蚀的修理与防护[J]. 装备环境工程, 2019, 16(8): 58-64.
- LI D F, CHEN Y L, HUA H C. Repair and Protection of Certain Naval Aircraft Corrosion[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(8): 58-64.
- [35] 陈群志, 房振乾, 康献海. 军用飞机外场腐蚀防护方法研究[J]. 装备环境工程, 2011, 8(2): 72-77.
- CHEN Q Z, FANG Z Q, KANG X H. Methods for Military Aircraft Field Corrosion Prevention and Control[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(2): 72-77.
- [36] 高延达, 李健, 李宗原, 等. 浅析直升机的外场腐蚀防护[J]. 装备环境工程, 2014, 11(6): 135-139.
- GAO Y D, LI J, LI Z Y, et al. Brief Analysis of Helicopter Field Corrosion Prevention[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(6): 135-139.