

直升机外场腐蚀防护研究

鲁时寒 徐赛奎 王晓翔
61902部队 四川 宜宾 644000

摘要：直升机外场面临复杂严苛腐蚀环境，腐蚀会降低结构强度、影响飞行安全、引发系统失效甚至灾难性事故，开展防护研究至关重要。其外场腐蚀类型多样，受环境、材料与设计、使用与维护等因素影响。防护需采取综合技术措施，包括应用先进防护涂层技术，制定科学日常维护与清洗规程，运用腐蚀检测与监控技术，构建完备腐蚀防护管理体系，以提升防护水平，保障直升机安全可靠运行。

关键词：直升机；外场维护；腐蚀防护；防护涂层；腐蚀检测

引言：直升机作为关键航空装备，外场执行任务时面临海洋大气、工业污染、湿热气候等复杂严苛的腐蚀环境，其铝合金结构、钢制部件及连接部位等极易出现多种腐蚀损伤，不仅降低结构强度、影响系统功能，甚至可能引发灾难性事故。因此，开展直升机外场腐蚀防护研究意义重大。为有效应对外场腐蚀挑战，需深入剖析其腐蚀类型、特征及关键影响因素，进而从先进防护涂层、日常维护清洗、腐蚀检测监控以及构建防护管理体系等多方面，采取综合技术措施，保障直升机安全可靠运行。

1 直升机外场腐蚀防护的重要性

直升机作为重要的航空装备，在外场执行任务时，面临着极为复杂且严苛的腐蚀环境挑战。其长期暴露于海洋大气环境，海水中富含的盐分以气溶胶形式弥漫于空气中，会加速金属部件的电化学腐蚀进程；工业污染区域中，各类酸性、碱性气体以及粉尘颗粒，会对直升机表面材料产生侵蚀作用；湿热气候条件下，高湿度环境为腐蚀的发生提供了充足的水分条件，进一步加剧了腐蚀的危害。（1）直升机的铝合金结构、钢制部件以及众多连接部位，在这些恶劣环境的共同作用下，极易出现多种形式的腐蚀损伤。例如，铝合金结构可能发生点蚀、晶间腐蚀等，导致材料强度大幅降低；钢制部件则可能出现均匀腐蚀、缝隙腐蚀，影响其承载能力；连接部位的腐蚀还会破坏结构的完整性，引发应力集中等问题。（2）腐蚀问题所带来的后果极为严重，不仅会使直升机结构强度下降，影响飞行安全，还可能导致系统功能失效，如电气系统短路、液压系统泄漏等，进而影响任务的正常执行。更为严重的是，腐蚀可能引发灾难性事故，造成不可挽回的损失。（3）开展直升机外场腐蚀防护研究至关重要。有效的腐蚀防护措施能够显著减缓腐蚀速度，延长直升机的使用寿命，降低全寿命周期内

的维护成本。同时，还能提高装备的出勤率，确保直升机在关键时刻能够迅速投入使用，提升任务执行的可靠性，是保持直升机持续作战能力不可或缺的重要保障^[1]。

2 直升机外场腐蚀的主要类型与特征

2.1 均匀腐蚀与点蚀

在直升机外场腐蚀类型中，均匀腐蚀与点蚀较为典型。均匀腐蚀是指腐蚀作用均匀地分布于结构表面，导致材料相对均匀地减薄。它通常出现在涂层出现破损或者未施加有效保护措施的金属表面。当直升机长期处于外场恶劣环境，如海洋大气、工业污染大气等，涂层一旦受损，金属便直接暴露其中，逐渐发生均匀腐蚀。点蚀则呈现出与均匀腐蚀截然不同的特征，它是在金属表面局部区域形成的深孔状腐蚀形态。点蚀具有极强的隐蔽性，在初期往往不易被察觉，然而其穿透速度却极快。这种腐蚀形式对于直升机的薄壁结构以及承力构件危害巨大，一旦发生，可能迅速削弱结构强度。在直升机的蒙皮、框架等大面积暴露于外场环境的部位，这两种腐蚀形式较为常见，严重影响直升机的结构完整性与安全性。

2.2 电偶腐蚀与缝隙腐蚀

在直升机外场腐蚀的复杂体系中，电偶腐蚀与缝隙腐蚀是两种不容忽视的类型。电偶腐蚀的产生，根源在于不同金属材料在电解液环境中存在电位差。在直升机上，钢制螺栓与铝合金结构的连接部位是电偶腐蚀的高发区。当这两种不同金属相互接触并处于潮湿、含盐等电解液环境时，电位较低的金属会作为阳极加速腐蚀，而电位较高的金属作为阴极受到保护，进而导致钢制螺栓等部位快速腐蚀，影响连接可靠性。缝隙腐蚀则通常发生在紧密结合的金属表面之间，比如金属片搭接形成的狭窄缝隙处。由于缝隙内外氧气浓度存在差异，会形成腐蚀电池，缝隙内缺氧区域成为阳极，发生剧烈腐

蚀。在直升机的紧固件连接处、结构搭接区域，这两种腐蚀形式表现尤为突出，会逐渐侵蚀金属材料，致使结构连接强度显著降低，威胁直升机的飞行安全^[2]。

2.3 应力腐蚀与腐蚀疲劳

在直升机复杂的外场服役环境里，应力腐蚀与腐蚀疲劳是极具危害性的两种腐蚀类型。应力腐蚀指的是材料在持续拉应力和特定腐蚀介质的双重作用下，发生的脆性断裂现象。直升机的一些关键结构，如旋翼系统的某些部件，长期承受较大的拉应力，当处于含有氯离子等特定腐蚀介质的环境中时，就极易引发应力腐蚀。这种腐蚀往往在无明确预兆的情况下突然发生断裂，严重威胁飞行安全。腐蚀疲劳则是交变应力与腐蚀环境协同作用的结果，它会大幅降低材料的疲劳寿命。直升机的传动部件在运转过程中承受着交变载荷，同时外场的腐蚀环境又不断侵蚀材料，两者相互作用，使得传动部件更容易出现疲劳裂纹并快速扩展，进而影响直升机的正常传动和飞行性能，对直升机的关键承力结构造成了不可忽视的潜在危害。

3 影响外场腐蚀的关键因素分析

3.1 环境因素影响

环境因素在直升机外场腐蚀进程中扮演着极为关键的角色，其中环境温湿度、盐雾浓度以及工业污染物等，是影响腐蚀速率的核心要素。（1）高温高湿的环境条件会显著加速电化学反应的进程。在高温环境下，分子的热运动加剧，化学反应活性增强；而高湿度则为电化学反应提供了充足的水分，使得金属表面更容易形成电解液膜，从而加快了腐蚀的速率。（2）海洋大气中富含的氯离子具有极强的侵蚀性，它能够破坏金属表面形成的钝化膜，使金属直接暴露在腐蚀环境中，进而引发严重的腐蚀问题。（3）工业环境中存在的硫化物等污染物，会促进酸性腐蚀的发生。这些污染物与金属表面接触后，会形成具有腐蚀性的酸性环境，对金属材料造成持续的损害。不同部署地区的环境特性差异明显，这也决定了直升机腐蚀防护工作需因地制宜，确定重点与策略^[3]。

3.2 材料与设计因素

在直升机外场腐蚀的诸多影响因素中，材料与设计因素起着基础性且关键的作用。（1）不同金属材料在耐腐蚀性方面存在显著差异，例如，某些不锈钢在特定环境下具有出色的抗腐蚀能力，而普通碳钢则相对容易生锈。而且，材料间的相容性对电偶腐蚀倾向有着直接影响，当不同电位的金属相互接触并处于腐蚀环境中时，电位较低的金属会加速腐蚀，因此合理搭配材料至关重要。（2）结构设计方面，排水通路、密封措施以及缝隙

控制等因素，决定了腐蚀介质在结构表面的滞留情况。良好的排水设计能及时排走积水，减少腐蚀发生；有效的密封措施可阻止外界腐蚀介质侵入；合理的缝隙控制能避免形成利于腐蚀发生的狭小空间。所以，只有进行合理的材料选择与科学的结构设计，才能从根源上控制直升机的外场腐蚀。

3.3 使用与维护因素

在直升机外场腐蚀的复杂影响体系中，使用与维护因素占据着举足轻重的地位。飞行任务剖面是重要影响因素之一，频繁执行海上飞行任务的直升机，长期处于高盐雾环境，盐雾中的氯离子会加速金属部件的腐蚀进程，使其腐蚀速率大幅增加。（1）停放环境也不容忽视，若直升机长期停放在潮湿、多尘或具有腐蚀性气体排放的场所，腐蚀介质会不断侵蚀机身结构。（2）维护质量更是关键，不当的清洗维护操作，如使用强腐蚀性清洁剂或清洗工具使用不当，极易导致涂层损伤，使金属表面失去保护屏障。而滞后的腐蚀检查，会让初期腐蚀得不到及时处理，进而发展成严重的腐蚀问题。因此，规范的使用操作和及时有效的维护干预，是控制直升机外场腐蚀发展的关键所在。

4 外场腐蚀防护综合技术措施

4.1 先进防护涂层技术

在直升机外场腐蚀防护中，先进防护涂层技术是极为关键的防线。（1）多采用由高耐蚀底漆、阻隔型中间漆以及耐候性面漆共同构成的多层涂层体系。高耐蚀底漆能够紧密附着在金属基材表面，有效隔绝金属与外界腐蚀介质的直接接触，为后续涂层提供良好的附着基础；阻隔型中间漆可进一步增强涂层的阻隔性能，减缓腐蚀介质的渗透速度；耐候性面漆则能抵御紫外线、风雨等自然环境的侵蚀，保持涂层外观和性能的稳定。（2）积极开发自修复涂层、智能涂层等新型防护材料。自修复涂层在受到轻微损伤后，能够自动修复裂缝，恢复防护性能；智能涂层则可实时监测腐蚀状态，并根据环境变化调整自身性能。此外，考虑到直升机不同部位的结构特点和使用要求存在差异，如旋翼系统承受交变应力大、机身蒙皮暴露面积广等，需制定差异化的涂层防护方案，确保各部位都能得到精准有效的防护，延长直升机的使用寿命。

4.2 日常维护与清洗规程

在直升机外场腐蚀防护工作中，科学规范的日常维护与清洗规程是保障其结构完整性和性能稳定性的重要环节。（1）要建立科学的外场清洗制度。依据直升机的使用频率、所处环境等因素，确定合理的清洗周期。清

洗时,应选用中性清洗剂,这类清洗剂化学性质温和,不会对直升机的涂层和金属结构造成损害,能够有效清除直升机表面积聚的盐雾、灰尘、油污等腐蚀介质,减少腐蚀发生的诱因。(2)制定详细的涂层损伤修复流程至关重要。在日常检查中发现涂层出现划痕、剥落等损伤时,要严格按照修复流程操作,及时对损伤部位进行清理、打磨、补漆等处理,确保损伤部位得到及时有效的修复,恢复涂层的防护功能。(3)还需加强排水孔、缝隙等关键部位的清洁维护。这些部位容易积聚水分和腐蚀介质,若不及时清理,会加速腐蚀的发生。定期对这些部位进行细致检查和清理,可有效防止腐蚀介质滞留,降低腐蚀风险,延长直升机的使用寿命^[4]。

4.3 腐蚀检测与监控技术

在直升机外场腐蚀防护体系里,腐蚀检测与监控技术是精准掌握腐蚀状况、及时采取防护措施的关键手段。(1)运用内窥镜、涡流检测、超声波检测等多种先进的无损检测方法,定期对直升机开展全面细致的腐蚀检查。内窥镜可深入直升机内部复杂结构,清晰查看隐蔽部位的腐蚀情况;涡流检测能快速检测金属表面及近表面的缺陷和腐蚀;超声波检测则可精准探测材料内部的腐蚀损伤程度,为评估腐蚀状况提供可靠依据。(2)建立腐蚀监控点体系,针对直升机上典型且易发生腐蚀的部位,如旋翼连接处、机身蒙皮边缘等,进行重点监控。通过对这些部位腐蚀数据的长期收集和分析,开展趋势研究,提前预判腐蚀发展态势。(3)开发基于大数据分析的腐蚀预测模型。将大量的腐蚀检测数据、环境数据、使用维护数据等输入模型,利用先进的算法进行分析处理,实现对直升机腐蚀情况的精准预测,从而变被动修复为主动预防,有效提升直升机外场腐蚀防护水平,保障其安全可靠运行。

4.4 腐蚀防护管理体系

构建一套科学完备的腐蚀防护管理体系,是直升机外场腐蚀防护工作有序、高效开展的重要保障。(1)制定全面且细致的腐蚀防护大纲,明确各级维护人员在腐蚀防护工作中的具体职责和工作标准。从日常巡检到

定期深度维护,从简单清洁到复杂修复,每个环节都应清晰界定责任主体与操作规范,确保腐蚀防护工作无遗漏、无死角。(2)建立腐蚀数据管理系统。该系统要能够详细记录每一次腐蚀发现的时间、位置、程度,所采取的处理措施以及处理后的效果评估等信息。通过对这些数据的长期积累和分析,可精准掌握直升机各部位的腐蚀规律,为后续防护策略的制定提供有力依据。(3)加强维护人员培训至关重要。定期组织专业培训课程,提升维护人员对不同类型腐蚀的识别能力,以及针对各类腐蚀问题的处理技能。同时,通过宣传教育等方式,营造全员参与的腐蚀防护文化氛围,让每一位与直升机接触的人员都树立起腐蚀防护意识,共同保障直升机的安全运行。

结束语

直升机外场腐蚀防护意义重大且任务艰巨。外场复杂严苛的环境、多样的腐蚀类型以及众多影响因素,时刻威胁着直升机的结构安全与性能稳定。而先进防护涂层、规范日常维护、精准检测监控以及完备管理体系等综合技术措施,为应对腐蚀挑战提供了有力支撑。只有将这些措施全面、深入且持续地落实到位,从材料、设计、使用维护等各个环节协同发力,才能有效减缓腐蚀速度,延长直升机使用寿命,降低维护成本,提高出勤率与任务执行可靠性,确保直升机在各种复杂环境下始终保持强大的持续作战能力,为航空事业发展保驾护航。

参考文献

- [1]孙志娟,戴京涛.飞机复合材料层合板胶结修理有限元分析[J].机械工程师,2020,(11):22-24.
- [2]高志刚,何宇廷,马斌麟,等.机翼用铝合金材料原始疲劳质量对比[J].航空学报,2021,42(05):337-346.
- [3]戴京涛,孙志娟.复合材料修复飞机损伤孔有限元分析[J].装备制造技术,2020,(03):139-142.
- [4]秦文峰,范宇航,韩孝强,等.一种飞机结构用铝合金表面镀层的制备及其耐蚀性[J].腐蚀与防护,2020,41(03):43-47.