

舰载直升机旋翼迎风面防护技术研究进展

张黎明, 张继垒

(海军 92635 部队, 山东 青岛 266041)

摘要: 舰载直升机是舰载飞机的重要组成部分, 但受到舰基恶劣腐蚀环境和旋翼振动载荷的双重作用, 直升机旋翼迎风面的损伤成为制约飞行任务顺利进行的重要影响因素。针对该技术难题, 概述了某型直升机旋翼迎风面出现的腐蚀现象, 从装备维护角度出发, 系统归纳了腐蚀发生的原因, 并分析了国内外针对此类问题采用的不同腐蚀防护措施及优缺点。在此基础上, 提出了对于直升机旋翼迎风面的防腐工作目前面临的挑战及未来研究方向。

关键词: 直升机旋翼; 迎风面; 腐蚀现象; 腐蚀机理; 腐蚀防护技术; 装备维护

中图分类号: V252; TG172

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2023)07-0063-09

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.07.009

Research Progress on Protection Technology for Ship-based Helicopter Rotor Leading Edge

ZHANG Li-ming, ZHANG Ji-lei

(Navy Force 92635, Shandong Qingdao 266041, China)

ABSTRACT: The ship-based helicopter is an indispensable part of the ship-based aircraft, while the corrosion of helicopter rotor leading edge has become an important factor restricting the flight mission due to the corrosion environment and the rotor vibration load. In view of this technical problem, the corrosion on the rotor leading edge of certain helicopter was summarized, the reasons for the corrosion were systematically summed up from the perspective of equipment maintenance, and the different corrosion protection measures adopted in China and abroad and their advantages and disadvantages were analyzed. On this basis, the current challenges and future research directions for the corrosion resistance of the helicopter rotor leading edge were methodically put forward.

KEY WORDS: helicopter rotor; leading edge; corrosion; corrosion mechanism; corrosion protection technology; equipment maintenance

腐蚀是导致飞机零部件使用寿命缩短、设备故障以及安全事故发生的主要原因。随着深海远海战略的

实施, 为维护国家安全, 我国舰载飞机每年的出海时间均在 200 d 以上。海洋的高温度、高湿度和高盐度

收稿日期: 2022-11-16; 修订日期: 2022-12-30

Received: 2022-11-16; Revised: 2022-12-30

作者简介: 张黎明 (1982—), 男。

Biography: ZHANG Li-ming (1982-), Male.

通讯作者: 张继垒 (1976—), 男, 博士。

Corresponding author: ZHANG Ji-lei (1976-), Male, Doctor.

引文格式: 张黎明, 张继垒. 舰载直升机旋翼迎风面防护技术研究进展[J]. 装备环境工程, 2023, 20(7): 063-071.

ZHANG Li-ming, ZHANG Ji-lei. Research Progress on Protection Technology for Ship-based Helicopter Rotor Leading Edge[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(7): 063-071.

环境会加速飞机的腐蚀。旋翼是舰载直升机的主要升力源,它不仅给舰载直升机提供飞行所需的升力,同时还给舰载直升机提供机动飞行所需的主要操纵力。旋翼在工作时,要承受强大的离心力和复杂多变的空气动力,是舰载直升机上最大的承力部件。对旋翼的维护是保证舰载直升机飞行安全的重要基础,而旋翼的防腐蚀工作则是维护中的重中之重^[1-2]。

鉴于此,针对高温、高湿和高盐雾的环境,开展对新型舰载机旋翼腐蚀防护的研究和设计,对于减轻腐蚀对旋翼的危害,避免出现重大腐蚀故障,延长使用寿命,保障飞行安全具有重要意义^[3-5]。针对在高温、高湿度和高盐度的海洋环境中新型舰载直升机旋翼腐蚀严重的问题,对材料本身、使用过程防护监控和处理方法进行评估和分析。结合旋翼腐蚀的特点和原因,提出了合理化的建议和修改方向,确定了加强设计工艺和加大腐蚀防护力度为今后的重点改善方向。

1 直升机旋翼迎风面腐蚀机理

1.1 腐蚀现象

在军用领域,旋翼迎风面的侵蚀和腐蚀行为备受关注。公开文献中却很少有关于叶片迎风面侵蚀的详细和全面记录的例子,人们普遍认为,叶片迎风面侵蚀是相关设备制造商和运营商面临的一个重

要挑战^[6]。

随着航母训练常态化,舰载直升机海上飞行时间的不断增长和活动范围的不断增加,旋翼腐蚀问题十分广泛,主要有以下4种现象:旋翼迎风面陆续出现了点蚀,通常是由湍流引起的,表明其金属防护件已被腐蚀;旋翼后缘调整片的漆层脱落,调整片产生锈蚀;旋翼个别固定支座镀层脱落,紧固件发生腐蚀;旋翼桨叶销有不同程度的磨损或磨蚀^[7]。

考虑到飞行过程和停放期间所涉及的各类情况,旋翼的常见腐蚀类型大致可以分为以下几种^[5]:

1)旋翼结构件在飞行过程中受力(拉伸或压缩),在腐蚀介质共同作用下引起的应力腐蚀。

2)因停放于潮湿环境下引发的腐蚀,特别是舰载直升机所处的服役环境是高温、高湿、高盐的海洋环境,因此叶片的腐蚀也涉及基于氯离子相关的电化学腐蚀^[8]。

3)腐蚀介质进入旋翼表面的加工或磨损产生的缝隙所导致的缝隙腐蚀。其中,喷有漆层的铝合金老化后,表面会呈现丝状或网状的丝状腐蚀。这类腐蚀是由于漆层老化或外力因素引起开裂后形成缝隙,潮气(水蒸气或雨水等)、液压油等进入后形成的一种缝隙腐蚀,如图1a、b所示。

4)旋翼表面大部分不发生腐蚀或腐蚀很轻微,但局部区域会出现腐蚀小孔,并向深处发展的坑点腐蚀。

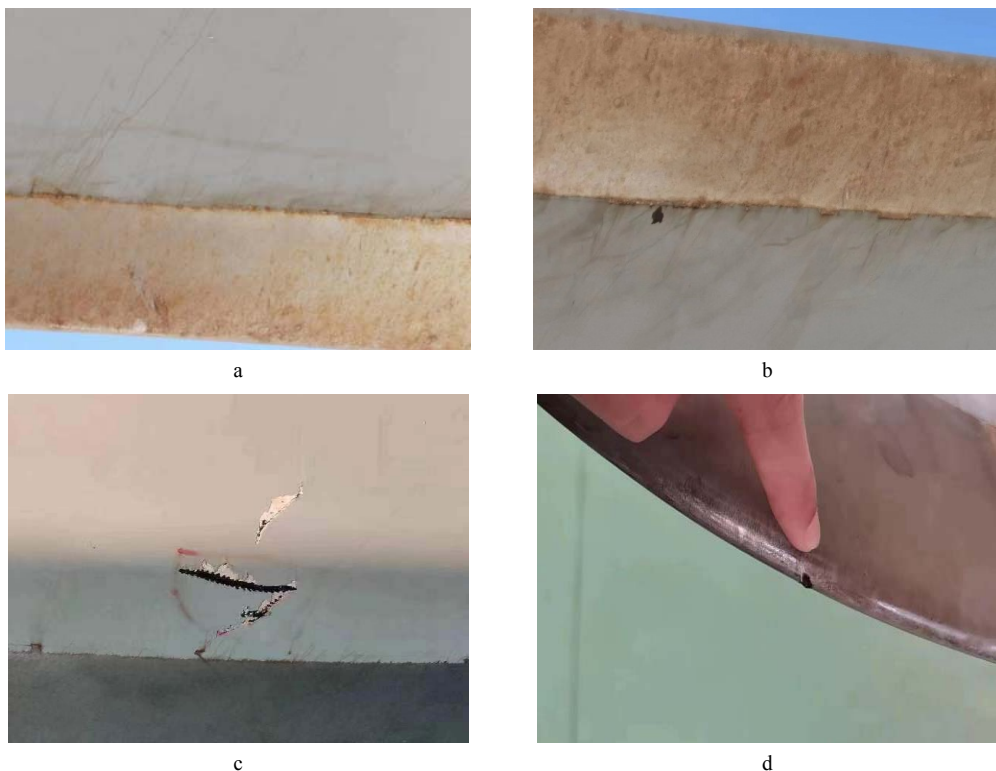


图1 旋翼迎风面腐蚀现状
Fig.1 Corrosion status of rotor leading edge

5) 旋翼金属材料微观层面晶界腐蚀导致的剥落腐蚀。

处于飞行状态下的直升机,其旋翼迎风面的腐蚀现象通常是由腐蚀和侵蚀引起的综合效应而导致的,即侵蚀腐蚀。侵蚀腐蚀是由金属表面上湍流的快速流动引起的,湍流条件下的侵蚀速率会增加,在旋翼表面发现的点蚀通常是由湍流造成的。受外界尖锐物造成的物理破损(如图1c所示),若不及时修补,飞行中产生的湍流会使得腐蚀介质进一步侵入叶片,加速不可逆的腐蚀过程。此外,迎风面的腐蚀也可能是由于工艺不良造成的。如果在安装过程中未除净迎风面的毛刺,这些毛刺就会导致飞行状态下的局部湍流,阻碍流体的顺利流动,导致点蚀率增高,加速缩减旋翼的使用寿命。当流体流经旋翼迎风面时,流体的速度及其表面上运动的物理效应与运动流体的腐蚀作用相结合,这反过来将导致金属的加速损失。金属通常有一层保护膜,这是第一个被流体侵蚀的部分。一旦薄膜消失,裸露的金属就会受到腐蚀。这种类型的腐蚀在狭窄区域很常见,如堵塞、入口端、泵叶轮以及其他流速高的地方^[9]。侵蚀形式中最常见的是空泡腐蚀,这是一种由高速叶轮产生的气泡引起的特殊类型,会导致金属表面形成凹坑^[10]。由图1d可见,叶片迎风面边缘处排列着密密麻麻的小凹坑,这是典型的空泡腐蚀。作为流体的空气和水一样,局部的湍流都会增加点蚀的风险,压强的变化会破坏叶片表面的保护层,从而侵蚀叶片。

1.2 迎风面腐蚀危害

为了更好地理解迎风面腐蚀或侵蚀对叶片的危害性,需要考虑这种腐蚀或侵蚀对叶片的性能和寿命以及进一步对整个直升机的飞行性能所产生的影响。旋翼叶片重要的特性之一是其空气动力学性能,如果叶片迎风面发生损坏,那么由于叶片表面粗糙化,可能会对其空气动力学性能构成严重威胁,从而影响叶片的性能。这一方面会影响机组的任务调用,同时也可能给直升机本身带来不能预见的设计之外的载荷,这些均不利于直升机更好地发挥其基本的空气动力学性能。

1) 影响设备寿命。在风力发电方面,根据丹麦公司 Blade Dynamic 在 2015 年的一项统计,迎风面腐蚀问题可能会带来 5% 甚至更多的年发电量损失^[11]。Dalili 等^[12]指出,仅叶片上的昆虫碎片就可能导致涡轮机输出功率减少 50%,这对任何风力涡轮机的效率都是一个重大打击。如果腐蚀过于严重,长时间得不到妥善处理,会进一步影响叶片的其他部分,引起局部膨胀、积水,最终导致叶片整体受损,难以修复。为了了解侵蚀对叶片的危害,有必要考虑这种侵蚀对叶片性能和寿命的影响。虽然危害影响不能完全消除,但通过对翼型的选择、叶片设计及操作策略,可

以大大降低叶片对表面粗糙度或污染的敏感度^[13]。

2) 影响叶片性能。Sareen 等^[14]发现,风力涡轮机翼的迎风面侵蚀可以产生明显的空气动力性能退化。在这项研究中,对不同侵蚀程度的迎风面侵蚀类型的机翼进行了测试,以评估侵蚀对性能的影响,发现这种影响导致了迎风面阻力的大幅增加和失速的早期发生(即在较低的攻角)。研究结果显示,由于不同程度的迎风面侵蚀,其受到的阻力增加了 6%~500%,可能导致每年能源产量减少约 5%^[15]。为了评估其迎风面保护产品的优势,Grasso 等^[16]研究了迎风面侵蚀可能对涡轮机功率输出产生的影响。叶片迎风面的具体腐蚀情况取决于位置和面积大小,亟待进一步研究,以确定一种最佳方案,从而最大限度地减少任何有害的空气动力学影响。

3) 影响维护成本。迎风面损坏的发生不仅带来了与叶片材料性能退化有关的问题,而且还带来了与此类损坏的后续修复和相关的预防性维护等一系列问题。特别的,在腐蚀预警以及突发或例行的修复工作中,所需相关材料和工艺的选择直接影响到了设备的维护成本和维护后的使用体验。Bladena 等^[17]的叶片检查说明书提供了一个检查和分类叶片损坏的指南,可以用来确定何时需要开展修复工作,以及修复工作的具体内容,将维护成本降到最低。其中,该手册认为,侵蚀渗透到叶片受损的迎风面保护层,应在 6 个月内修复,当损坏穿过第一层层压板时,应在 3 个月内进行修理,只有当损坏穿过整个层压板厚度时,才需要立刻进行修理。

综上所述,旋翼腐蚀若不及时发现、不采取预防措施以及不及时修理,不仅会造成更大规模和程度的结构修理,甚至危及舰载直升机安全及机组人员的生命安全。因此,腐蚀的预防和早发现、早修理就显得尤其重要。若发现旋翼存在腐蚀隐患,在严格执行相关维护手册中旋翼结构件修理要求的前提下,清除腐蚀或更换腐蚀件,并对旋翼受损处给以及时的防护措施。正确使用防腐蚀的相关技术,可以大大地抑制腐蚀形成的条件,延缓腐蚀的发生。此外,考虑到腐蚀对旋翼空气动力学的危害性,降低腐蚀造成的能源及性能的损失,笔者认为:加强在设计阶段的舰载直升机制造工艺水平,从源头建立舰载直升机腐蚀防护体系;建议提高机务人员在旋翼防腐蚀工作上的能力;将腐蚀检查作为检查舰载直升机的一项重要内容和指标;建立旋翼腐蚀监控制度,收集整理旋翼腐蚀信息,及时总结积累旋翼腐蚀防护经验和修理工艺,有利于旋翼腐蚀防控的系统化、规模化。

1.3 腐蚀原因

主旋翼叶片是直升机结构中受力较大的部件之一,因此与其他部件相比,它们在运行期间要接受更频繁的检查。检查过程中检测到的一种损坏是防腐蚀

层碎片从迎风面局部剥离,这种看起来无害的损伤是非常危险的,因为它很快会导致叶片的层间分离。没有金属外壳或其他保护膜保护的迎风面会迅速腐蚀,而高速抛出的分离层会危及直升机的其他部件,比如尾翼。如果编队飞行,可能会对其他直升机造成损坏^[18]。侵蚀和磨损所造成的劳动力和物质资源浪费是十分可观的。侵蚀是一种磨损,通常指小颗粒撞击材料表面的磨损现象^[19]。直升机旋翼的腐蚀和磨损不仅会造成能源浪费,还会增加设备维护频率,甚至引发安全事故。颗粒和目标材料性质的变化会影响材料侵蚀速率的变化^[20]。

经过对某型直升机腐蚀状况调查的深入分析,笔者总结出该型直升机旋翼产生的腐蚀、侵蚀行为主要来自以下几种原因:

1) 停放环境相对恶劣。舰载直升机大部分时间停放在航母甲板上,经常遭受高温、高湿、高盐以及持续干湿交替循环的环境侵蚀,严重时在旋翼表面上冷凝着一层薄薄的盐层。同时,航母动力燃烧的废气,以及舰载战斗机在起飞、着舰过程中,尾气中的硫、氮氧化物与海洋盐雾组合成的高酸潮湿层,会在旋翼表面形成酸性液膜,一定程度上加速了腐蚀。

2) 制造工艺不恰当。该型舰载直升机旋翼迎风面的厚度较大,后缘厚度小,后缘常有细小的裂纹或缺口,容易受到腐蚀的侵入。旋翼的钢紧固件采用镀锌、镀镉工艺进行表面处理,由于镀层的耐磨性能较差,多次拆卸后,容易脱落,如图2所示。旋翼桨叶销主要采用硬质阳极化、电镀硬铬工艺,在海洋性环境中的耐蚀性较差。造成腐蚀发生的重要因素还有叶片的制造工艺。比如,叶片制造过程中是否包含了迎风面保护的工序,在制造过程中的微小瑕疵,可能也会造成腐蚀,比如加工过程中那些微小的气泡。



图2 直升机中热渗锌紧固件的腐蚀

Fig.2 Corrosion of hot-dip galvanized fastener in helicopter

3) 腐蚀监控不到位。机务人员对研究“三高”环境下的旋翼腐蚀防护工作重视程度不够,部队在旋翼腐蚀防护基础理论知识、探测诊断方式方法、旋翼腐蚀防护处理等方面的认知比较薄弱。旋翼检查不到

位,如某部机务人员在检查旋翼时,只注重检查迎风面有无损伤,而忽略了对后缘的维护和检查,导致后缘调整片的漆层脱落未能及时修复,调整片锈蚀而提前返厂进行修理。

4) 处理方法简单有限。日常机务维护工作中,缺乏旋翼腐蚀防护系统的理论培训和实操带教。对旋翼发生的腐蚀,部队没有一套完善的腐蚀处理方法,主要是采用打磨、涂漆或油脂的方式,腐蚀处理与防护手段简单有限。因此,加强该型舰载直升机旋翼的腐蚀防护工作,有效提升机务人员腐蚀防护水平显得尤为重要^[21]。

2 直升机旋翼迎风面腐蚀防护技术

某型直升机旋翼由主桨叶、主桨毂以及旋翼折叠系统组成。主桨叶采用先进复合材料结构,典型剖面采取多闭腔结构设计,提高了主桨叶的损伤容限能力。主桨叶设有静、动平衡调整措施,具有单片互换的能力。主桨毂采用了球柔性桨毂构型,具有结构简单、维护性好、质量轻等优点,装有液压驱动的桨叶自动折叠系统^[22-23]。

2.1 改进结构设计

为防止舰载直升机旋翼腐蚀,在设计制造时采取了很多保护措施。如作为主桨叶主要承力构件的大梁,铺设在主桨叶内部迎风面,由玻璃无纬带构成,蒙皮由玻璃布和碳布混合铺设而成。桨尖蒙皮表面布置铜网,部位有2个静、动平衡配重支座,由复合材料制成,内填不锈钢平衡配重。在桨尖、桨根迎风面有聚氨酯保护带、不锈钢包片和金属镍包片,这些材料可有效提高主桨叶抗雨水、砂尘磨蚀能力。同时,在维护手册上规定,对主桨叶的保养要用海绵蘸取中性水基清洁剂擦洗,经清水冲洗后,用吸水性较好的无绒软布擦拭干净。禁止使用任何对主桨叶有腐蚀、渗透和溶解的溶液(如汽油、煤油、酒精等)清洗桨叶。拆卸过程中,要特别注意不能损坏主桨叶,包括碰伤、刮伤、损伤漆层和主桨叶后缘等,防止因损坏、漆层脱落而造成主桨叶的腐蚀^[24]。

2.2 腐蚀后物理修复

旋翼叶片局部损坏后,仅对迎风面玻纤布受损区域进行修复。具体操作步骤如下:1) 对迎风面受损玻纤布区域进行打磨、清理,确保受损区域无残留破损玻纤;2) 根据具体受损情况,决定需铺布的玻纤层数;3) 待铺布的玻纤布干透之后,进行表面打磨;4) 对新铺布区域刮腻子,腻子干透之后打磨。该方案的优点是施工相对简单,费用相对较低,但是没有从根本上解决迎风面风蚀的问题,运行3~4 a后,可能要面临同样的维护^[25]。

2.3 刷涂基体防护漆

基体防护漆通常由抗冲击材料组成,可以应用到叶片的表面。该涂料按应用情况可分模内技术和模后技术。

模内技术是在模具制造过程中将涂料(即胶衣)应用于基体材料,涂料通常是环氧树脂、聚酯或聚氨酯^[26]。胶衣是模具的第一层,纤维铺在上面。然后将纤维注入树脂,与整个系统进行固化,在胶衣和基体材料之间形成化学键。当叶片从模具中取出时,胶衣就变成了外层。模内技术的优点是无需额外的制造步骤,即可在叶片表面施加保护涂层。为了确保叶片的力学性能和耐久性,复合材料层压板和胶衣之间需要有最佳的附着力^[27]。在模后技术中,将柔性涂层(如聚氨酯)在产品成形之后应用于叶片表面,通常通过滚筒或喷涂方式实施涂布。这种涂布是多层的,需要将复合填料层涂敷在叶片上,从而为柔性涂层的涂布提供光滑的表面^[28]。聚氨酯被广泛用于防腐涂层,它们在许多情况下具有类似复合材料的分段微结构,是由硬段和软段组成的一种互穿网络,硬段的占比对聚合物的刚度和强度正相关,而软段控制着韧性和材料的阻尼性能,聚氨酯材料对于开发坚韧的涂层提供了很好的选择^[29]。Keegan等^[30]通过建立有限元模型以区别分析胶衣和柔性涂层的损伤机制,无论是在单独使用的情况下,还是应用于叶片表面时,胶衣的主要损坏形式都是表面退化和侵蚀,而柔性涂层通过形变使冲击响应更平滑,减少了表面损伤。

相比之下,模内技术制成的胶衣通常很脆,具有很高的声阻抗,而模后技术得到的柔性涂层通常更具延展性,且阻抗低。柔性涂层表现出高应变失效率,并降低了冲击表面的应力,有效抑制了振荡的应力波,确保冲击能量迅速消散,减少迎风面的磨损。胶衣和柔性涂层的不同性质使得它们在颗粒撞击下表现出不同的响应,同时也取决于旋翼的具体运行环境。基于化学键相互作用实现基体材料粘接的策略,使得胶衣材料有很好的附着能力,有利于抵抗旋翼运

转过程中基于物理运动的侵蚀作用。基于搭建分子链互穿网络的柔性涂层,通过二维网络中硬段和软段的合理分配,受到外力冲击时进行分子链间相互作用的能量耗散和重组,也能够有效地降低外力引起的损伤,从而实现迎风面防护的目的,但是复合基材的加入,会导致涂层与基材之间的结合力减弱。因此,只有在确保粘结牢固且持久的前提下,加入适量的复合基材,避免发生剥离,从而利用涂层减少叶片表面损伤保护。

迎风面玻纤布受损区域修复完后,对叶尖迎风面15 m左右区域(根据运行历年的运行情况,该区域腐蚀较严重)刷防腐漆(迎风面保护漆)。对于使用漆膜进行表面防护,缺点是增加了施工难度、工期和费用,但能延长维修周期(3~5 a),且施工难度和费用相比较于物理修复低,应用更广。目前,时代新材新出产叶片在叶尖迎风面都涂刷了迎风面保护漆。

2.4 修复后贴膜

对叶片进行涂层防护后,通常还需要将另一种高度柔性的膜(通常是聚氨酯)应用到叶片的迎风面上。与柔性涂层类似,这类保护膜也具有低阻抗和良好的延展性,可通过变形来减弱飞行过程中招致的初始冲击。在贴膜方面,市场上常规采用的为3M保护膜对迎风面玻纤布受损区域进行修复,修复完后,对叶尖迎风面15 m左右区域增加保护膜(3M),如图3所示。贴膜和涂层涂布无一例外,都需要考虑与叶片表面的附着力、耐磨程度以及抗化学腐蚀能力。目前市场上品质优良且应用广泛的保护膜材料多为3M品牌,该品牌的保护膜在耐磨技术、粘接技术、超细涂布以及基体材料的设计与工艺都在世界前列。在机翼防护的应用方面,3M可以提供超轻耐磨的保护膜,同时对紫外线、潮湿、低温环境等加速腐蚀或侵蚀过程的外界因素有很好的屏蔽的作用。此外,作为一种非金属性隔热膜,它不会对电子设备、GPS或卫星无线电接收造成干扰,适用于舰载直升机的服役和停放环境。



图3 在旋翼迎风面贴膜
Fig.3 Film in the rotor leading edge

如上所述,减少材料内部的缺陷是提高材料本身保护寿命的关键。保护膜本身是在受控车间的环境下生产的,其本身的质量受到环境湿度和人工操作的影响。合理完善的车间环境和政策对于高质量保护膜的生产起着决定性作用,最直接的影响就是减少保护膜本身由于生产条件原因引入的缺陷。此外,与化学涂层不同,保护膜的应用不受天气条件的影响,因此被认为是一个更可靠的维修解决方案,适用于现场维修^[31]。贴膜本身是一个极度依赖手工操作的过程,涂布器需要确保表面光滑,从而避免贴膜时由于膜本身大小不匹配被贴的区域而引起褶皱和收缩。此外,还建议使用封边器来保护膜的边缘,以免后续的贴膜引入人为的风险,例如带入气泡等。因此,贴膜在现场维修的情况下显得极具挑战性,一个区域粘合力的下降可能会导致保护膜沿着整个叶片的方向脱粘。

2.5 主桨毂定期维护

对于主桨毂(如图4所示),维护手册^[32]规定,应定期对主桨毂液压阻尼器进行换油,目视检查主桨毂连接件组件与液压阻尼器连接耳片部位耐磨垫圈的固定和磨损情况,如果磨损处边沿厚度小于规定或发生松动,应更换耐磨垫圈。检查主桨毂变距摇臂止动垫圈的固定和磨损情况,如果磨损处边沿厚度小于规定或发生松动,应更换耐磨垫圈。起吊主桨毂的过程中,要避免对中央件和旋翼轴造成损害(撞击、擦伤、花键损坏),拆下的主桨毂散装零件应进行油封,并妥善保存,防止因松动磨损、保管不善而造成主桨毂连接件、摇臂、零件的腐蚀。



图4 旋翼主桨毂
Fig.4 Rotor hub

事实上,对主桨毂的定期维护不仅仅是为了保证主桨毂与旋翼连接部位的有效运作而减少安全隐患,更重要的是基于一系列的零件维护,极大程度地降低旋翼在除飞行、静置之外的腐蚀风险,尤其是轴承部分零件的老化或磨损会增加旋翼的运作负担,从而加速被侵蚀进程^[33]。这些措施和规定都为旋翼的腐蚀防护打下了良好的基础。

3 直升机旋翼防腐工作建议

3.1 加强设计制造工艺水平

受科技水平、材料及工艺等多方面限制,舰载直升机在型号设计阶段,缺少专门的防腐蚀设计,还存在着诸如防护工艺设计不足、材料选用方面较少考虑耐腐蚀性等问题。由于制造工艺的缺陷引入微小瑕疵,以及出厂前的迎风面保护不完善,都会给后期实际飞行和使用过程中的迎风面腐蚀埋下隐患。

建议首先从设计阶段入手,加强舰载直升机制造工艺水平,加大部队在设计论证阶段的参与度,从源头建立舰载直升机腐蚀防护体系,从根本上对旋翼的腐蚀问题予以解决。另外,建立技术支援与信息反馈机制,部队应将收集的旋翼腐蚀情况反馈给舰载直升机设计生产厂所,协调其设计、技术人员到现场了解旋翼的腐蚀情况,并对旋翼的腐蚀情况进行全面普查,通过归纳整理,共同分析旋翼腐蚀产生的原因,制定外场腐蚀处理的措施,提出设计改进方案。

3.2 加强旋翼腐蚀防护力度

高温、高湿、高盐环境对旋翼性能的影响很大,在日常维护中,机务人员应加强旋翼的腐蚀防护力度。一方面,做好旋翼的清洁工作,越是正确地、彻底地清洁旋翼,并完全清除嵌入旋翼中的腐蚀物,发生腐蚀的可能性就越小。要做到海上飞行1次,地面清洁1次,防护检查1次。另外,将旋翼腐蚀防护工作列入机械日、定检等工作内容中,定期对旋翼进行扩大面检查与维护。把旋翼的腐蚀检查作为干部检查飞机的一项重要内容和指标,加强领导干部检查督促的力度。

3.3 加强机务人员防腐培训

通过定期频繁的目视检查,是发现腐蚀前兆、防患未然的一个先决条件。一方面,工业部门要向部队提供关于旋翼腐蚀防护和处理的技术资料,并加强对机务人员旋翼腐蚀防护和处理的理论培训和实操带教,使机务人员能够系统掌握旋翼腐蚀防护工作知识和处理措施,做到会预防、能发现、敢处理。另一方面,部队应收集整理因旋翼腐蚀发生的严重问题,组织机务人员学习,提高机务人员对旋翼腐蚀及其危害性的认识,并请相关领域专家进行旋翼腐蚀防护和处理的授课,学习成熟的技术经验和成果,切实提高机务人员在旋翼防腐蚀工作上的能力。因此,只有多发现、懂发现、能发现,才能更好做到腐蚀现象的防患未然,并针对相应的情况及时做出合适的处理,减少腐蚀损失,并延长使用寿命。

3.4 建立旋翼腐蚀监控制度

旋翼的防腐蚀工作是舰载直升机防腐蚀工作的

关键,对保障飞行安全尤为重要。为预防旋翼腐蚀和加强外场检查,建议建立旋翼腐蚀监控制度,收集整理旋翼腐蚀信息,建立旋翼腐蚀档案,结合旋翼防护工作特点和部队实际工作,及时总结积累旋翼腐蚀防护经验和修理工艺。建立旋翼腐蚀处理工艺卡片,机组按卡片内容完成腐蚀的检查、处理和照相保存工作,有效地控制腐蚀的发生^[34]。

在确保监测制度合理开展的前提下,应用不同的物理、化学监测手段,能够更有效及时地传达腐蚀状况信息,有利于提前做好应急处理。应用基于离子浓度检测的pH值传感器^[35],检测由电化学过程导致的腐蚀离子浓度的变化,并输出可视信号。在旋翼迎风面处涂布一层腐蚀指示漆^[36],这种指示漆通过荧光或者变色的方式反映腐蚀环境化学变化,并产生易于人眼辨别的反应,从而达到便于观察和及时反馈腐蚀信息的效果。这类化学变化通常包括引起腐蚀发生的pH值、氧化或离子配位等的变化。此外,也可以将光学传感器和腐蚀监测相结合,利用光纤腐蚀传感器对水和pH值的敏感作用,精确定位水汽渗透等腐蚀发生位置,向维护人员及时传递观察盲区的腐蚀情况^[37]。

4 结论

旋翼叶片迎风面的腐蚀过程是一个复杂的多尺度过程,对设备的寿命、叶片的性能以及旋翼和直升机本身的维护成本都有着举足轻重的影响。这一过程受一系列机制的影响和控制,诸如设备停放环境的相对恶劣、叶片制造工艺的不恰当、腐蚀的监控不到位以及腐蚀处理方法的简单有限,都极大地阻碍了叶片迎风面腐蚀现象的及时控制。舰载直升机旋翼的防腐工作研究涉及力学、化学、材料学和热学等多个学科,目前国内该方面的研究和设计较少。本文主要从旋翼的腐蚀特点和现象、结构特点和防腐设计、防腐工作存在的问题和工作建议等方面进行了分析,并得出一些有益的结论。其中,加强设计制造工艺水平、旋翼腐蚀防护力度以及相关机务人员防腐培训,建立起旋翼腐蚀监控制度都能够客观上控制腐蚀现象的发生或加剧。改进旋翼结构设计、腐蚀后的简单修复、刷涂基体防护漆以及破损处修复后的贴膜处理则能在一定程度上将腐蚀过程带来的危害降到最低。总的来说,处理这一系列问题的流程可以概括为:预防和监测,如建立腐蚀安全监测机制以制约各方面腐蚀因素;判断和定性,如预测腐蚀强度,定期对设备进行维护,并及时给以物理性修复;必要时开展系统的修复工作,如通过在受损区域涂布涂层或贴膜等手段,实现有效的事后修复工作。在这一系列的工作中,详细了解相关的腐蚀和控制机制至关重要。此外,应对舰载直升机的服役环境,笔者提出以下几点总结和建议:

1) 在高温、高湿和高盐以及持续的干湿交替循环的海洋环境,舰载直升机旋翼被腐蚀,会造成其功能性能产生较大的影响,甚至导致故障和失效,造成飞行事故的发生。

2) 舰载直升机旋翼现阶段的设计不当和监控力度较小,在严酷的环境中无法满足相应的使用要求,而且缺乏有效的防护手段和处理方法简单有限。在物理修复的基础上,对叶尖迎风面做了加强,根据行业内的整改情况,整改效果与绝缘保护器的效果相差无几,整改完后叶片迎风面能得到3~5 a的有效保护。

3) 经过调查研究发现了该方面存在的问题,并提出了合理化的建议和修改方向。确定了加强设计工艺、加大腐蚀防护力度和相关工作人员的培训,为今后重点的改善方向。

参考文献:

- [1] 葛漫江. 贝尔 206BⅢ 直升机主旋翼桨叶前缘梁防腐类型和方案[J]. 民航飞行与安全, 1999, 10(1): 33-34.
GE Man-jiang. Anticorrosion Type and Scheme of Leading Edge Beam of Main Rotor Blade of Bell 206BⅢ Helicopter[J]. Journal of Civil Aviation Flight University of China, 1999, 10(1): 33-34.
- [2] 宋亚平. 浅谈旋翼的防腐维护[J]. 航空维修与工程, 2004(4): 64-65.
SONG Ya-ping. Brief Talk on Protect Against Corrosion Maintenance of Rotor[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2004(4): 64-65.
- [3] ALAMRI A H. Localized Corrosion and Mitigation Approach of Steel Materials Used in Oil and Gas Pipelines - an Overview[J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 116: 104735.
- [4] SRI RAM VIKAS K, VENKATA RAMANA V S N, MOHAMMED R, et al. Influence of Post Weld Heat Treatment on Microstructure and Pitting Corrosion Behavior of Dissimilar Aluminium Alloy Friction Stir Welds[J]. Materials Today: Proceedings, 2019, 15: 109-118.
- [5] 张巧凤. 机载电子设备结构单元的防腐蚀设计[J]. 机械研究与应用, 2018, 31(3): 106-107.
ZHANG Qiao-feng. Anti-Corrosion Design of Airborne Electronic Equipment Structure[J]. Mechanical Research & Application, 2018, 31(3): 106-107.
- [6] KEEGAN M H, NASH D H, STACK M M. On Erosion Issues Associated with the Leading Edge of Wind Turbine Blades[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2013, 46(38): 383001.
- [7] 刘诗碧, 陈宣任, 王进成. 某型直升机尾梁一起非典型腐蚀故障修理研究[J]. 航空维修与工程, 2016(8):

- 80-82.
- LIU Shi-bi, CHEN Xuan-ren, WANG Jin-cheng. Analysis on Atypical Corrosion Failure for a Certain Type of Helicopter Tail Beam[J]. *Aviation Maintenance & Engineering*, 2016(8): 80-82.
- [8] TAN Hai, WANG De-guo, GUO Yan-bao. Investigation of Graphene Effect on the Anti-Corrosion Behaviour of Polyurethane Coatings in Sea-Water[J]. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 2019, 66(6): 853-60.
- [9] KHOSHNAW F, GUBNER R. Corrosion Atlas Case Studies[M]. Amsterdam: Elsevier, 2020.
- [10] GEITNER F K, BLOCH H P. Machinery Failure Analysis and Troubleshooting[M]. Amsterdam: Elsevier, 2012: 87-293.
- [11] MISHNAEVSKY L, BRANNER K, PETERSEN H N, et al. Materials for Wind Turbine Blades: An Overview[J]. *Materials*, 2017, 10(11): 1285.
- [12] DALILI N, EDRISY A, CARRIVEAU R. A Review of Surface Engineering Issues Critical to Wind Turbine Performance[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13(2): 428-438.
- [13] HUANG Chen-wu, YANG Ke, LIU Qiang, et al. A Study on Performance Influences of Airfoil Aerodynamic Parameters and Evaluation Indicators for the Roughness Sensitivity on Wind Turbine Blade[J]. *Science China Technological Sciences*, 2011, 54(11): 2993-2998.
- [14] SAREEN A, SAPRE C A, SELIG M S. Effects of Leading Edge Erosion on Wind Turbine Blade Performance[J]. *Wind Energy*, 2014, 17(10): 1531-1542.
- [15] MISHNAEVSKY L, HASAGER C B, BAK C, et al. Leading Edge Erosion of Wind Turbine Blades: Understanding, Prevention and Protection[J]. *Renewable Energy*, 2021, 169: 953-969.
- [16] GRASSO F, BAK C, SMAERUP A, et al. Leading Edge Protection Impact on Airfoil Performance: An Experimental Investigation[C]// *Proceedings of the AIAA SCITECH 2022 Forum*. San Diego: AIAA, 2022.
- [17] HERRING R, DYER K, MARTIN F, et al. The Increasing Importance of Leading Edge Erosion and a Review of Existing Protection Solutions[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 115: 109382.
- [18] 冯逸骅. 基于旋翼无人机的烟囱内壁腐蚀监测可行性研究[D]. 杭州: 中国计量学院, 2016.
- FENG Yi-hua. Practicability Research about Monitoring Corrosion Situation of the Inner of the Chimney Based on Four-Rotor UAV[D]. Hangzhou: China University of Metrology, 2016.
- [19] SALACIŃSKI M, PUCHAŁA K, LESKI A, et al. Technological Aspects of a Reparation of the Leading Edge of Helicopter Main Rotor Blades in Field Conditions[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(9): 4249.
- [20] HUTCHINGS I M, WINTER R E. Particle Erosion of Ductile Metals: A Mechanism of Material Removal[J]. *Wear*, 1974, 27(1): 121-128.
- [21] YAO Yong-ming, BAI Xu-peng, LIU Hui-ying, et al. Solid Particle Erosion Area of Rotor Blades: Application on Small-Size Unmanned Helicopters[J]. *Symmetry*, 2021, 13(2): 178.
- [22] 邹小玲. 直升机旋翼/斜梁折叠控制系统原理与改进措施[J]. *直升机技术*, 2011(3): 20-24.
- ZOU Xiao-ling. The Analysis and Mend of the Helicopter Rotor/Pylon Folding System[J]. *Helicopter Technique*, 2011(3): 20-24.
- [23] 陈利国, 吴丽媛, 王伟, 等. 高可靠性旋翼折叠软件控制逻辑设计[J]. *电子制作*, 2022, 30(7): 50-52.
- CHEN Li-guo, WU Li-yuan, WANG Wei, et al. Control Logic Design of High Reliability Rotor Folding Software[J]. *Practical Electronics*, 2022, 30(7): 50-52.
- [24] 张航, 宋笔锋, 王海峰, 等. 固旋翼无人机垂直起降阶段抗风特性及其影响因素[J]. *系统工程与电子技术*, 2019, 41(7): 1525-1535.
- ZHANG Hang, SONG Bi-feng, WANG Hai-feng, et al. Wind Resistance and Influencing Factors of Quadrotor Fixed-Wing Vertical Take-off and Landing Hybrid Unmanned Aerial Vehicle[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2019, 41(7): 1525-1535.
- [25] 吴光军, 吴鸣寰, 罗浩然. 风机叶片损坏分析及修复方法[J]. *水电与新能源*, 2018, 32(7): 72-75.
- WU Guang-jun, WU Ming-huan, LUO Hao-ran. Analysis and Treatment of Blade Damage of Wind Turbine Unit[J]. *Hydropower and New Energy*, 2018, 32(7): 72-75.
- [26] Lucena Juliana de Almeida Yanaguizawa. Recent Advances and Technology Trends of Wind Turbines[M]// *Recent Advances in Renewable Energy Technologies*. Amsterdam: Elsevier, 2021: 177-210.
- [27] GOMBOS Z J, SUMMERSCALES J. In-Mould Gel-Coating for Polymer Composites[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2016, 91: 203-210.
- [28] CORTÉS E, SÁNCHEZ F, O'CARROLL A, et al. On the Material Characterisation of Wind Turbine Blade Coatings: The Effect of Interphase Coating-Laminate Adhesion on Rain Erosion Performance[J]. *Materials*, 2017, 10(10): 1146.
- [29] YILGÖR I, YILGÖR E, WILKES G L. Critical Parameters in Designing Segmented Polyurethanes and Their Effect on Morphology and Properties: A Comprehensive Review[J]. *Polymer*, 2015, 58: A1-A36.
- [30] FIELD J E. ELSI Conference: Invited Lecture[J]. *Wear*, 1999, 233-235: 1-12.

- [31] MISHNAEVSKY L. Repair of Wind Turbine Blades: Review of Methods and Related Computational Mechanics Problems[J]. Renewable Energy, 2019, 140: 828-839.
- [32] HOLZMAN J C, KISH B A, KIMBERLIN R D, et al. Robinson R44 Performance Flight Test[C]// 2021 IEEE Aerospace Conference (50100). Big Sky: IEEE, 2021.
- [33] 刘景深. 某型直升机旋翼轴销出现凹坑问题的探讨[J]. 航空工艺技术, 1989, 32(1): 41-42.
LIU Jing-shen. Discussion on the Pit Problem of a Helicopter Rotor Shaft Pin[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 1989, 32(1): 41-42.
- [34] 于海蛟, 王逾涯, 陈群志. 飞机结构腐蚀监测技术现状及发展趋势[J]. 装备环境工程, 2014, 11(6): 70-78.
YU Hai-jiao, WANG Yu-ya, CHEN Qun-zhi. Progress and Prospect of Corrosion Monitoring Techniques of Aircraft Structure[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(6): 70-78.
- [35] GOTOU T, NODA M, TOMIYAMA T, et al. In Situ Health Monitoring of Corrosion Resistant Polymers Exposed to Alkaline Solutions Using pH Indicators[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2006, 119(1): 27-32.
- [36] HAUTEFEUILLE M, O'FLYNN B, PETERS F, et al. Miniaturised Multi-MEMS Sensor Development[J]. Microelectronics Reliability, 2009, 49(6): 621-626.
- [37] FORSYTH D S. Nondestructive Testing of Corrosion in the Aerospace Industry[M]//Corrosion Control in the Aerospace Industry. Amsterdam: Elsevier, 2009: 111-130.

责任编辑: 刘世忠