

腐蚀防护与控制技术在某型水陆两栖飞机研制中的应用研究

李超,冯万喜

(中航通飞华南飞机工业有限公司制造工程部,珠海 519040)

[摘要] 为满足水陆两栖飞机飞行安全、机体结构总寿命和返修间隔时间等技术要求,针对水陆两栖飞机较严酷的使用环境以及飞机典型结构部位防护体系失效的特点,参照国内外同类防护技术方法,根据腐蚀防护与控制预研成果、水轰-5飞机综合治理与国内外民机工程应用经验,综合考虑具体工程应用实际,通过材料选用、表面防护、防腐蚀密封、通风排水、缓蚀剂选用等技术的应用研究,按全寿命周期的腐蚀防护思想开展水陆两栖飞机腐蚀防护与控制技术应用研究。截至目前,机体结构的表面防护和密封情况正常且有效。防护体系优选及验证系列试验和水密、油密试验的结果表明,该防护技术的应用实现了预期的6年首翻的防腐蚀研制目标。

关键词: 腐蚀防护与控制; 表面防护; 密封; 排水; 缓蚀剂; 水陆两栖飞机

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.20.070



李超

高级工程师,主要研究方向为飞机结构腐蚀防护与控制、表面工程应用技术等。曾参与大型灭火/水上救援水陆两栖飞机结构防腐蚀方案设计,负责表面防护体系优选及验证系列试验方案策划及试验、防腐蚀密封和表面防护体系设计等工作。目前主要负责大型灭火/水上救援水陆两栖飞机表面处理、喷漆、密封相关工艺、制造过程中飞机结构腐蚀防护与控制 and 型号特殊过程确认策划与实施工作。

腐蚀预防和控制(Corrosion Prevention and Control, CPC)是一项庞大的系统工程,从飞机设计阶段开始,贯穿于飞机整个制造、使用和维修阶段。腐蚀预防和控制已经成为现代民用飞机设计、制造以及使用、维修阶段主要关注的问题。

水陆两栖飞机一般在陆上机场和内河、湖泊、水库、近海水域滑行、起飞、降落和停泊,长期在湿热、盐雾和高 Cl^- 浓度环境条件下工作和停放。使用环境具有高湿热、高盐雾、高工业废气含量、多降雨天数、频繁气候变化等特点,海洋大气环境含盐量高且温暖潮湿,其温度、湿度、 Cl^- 浓度高;近海高湿环境是各种微生物快速生长的温床;海/水面起降,机身结构大部分处于海/水雾中,诱发结构振动、冲击、冲蚀、腐蚀介质沉积。此外,大量的盐雾甚至海水在起降中被卷入发动机进气口或机身缝

隙中,这些腐蚀性极强的介质会在结构缝隙流动,因毛细效应和飞机的机动到达机体各个部位,加速结构和各系统的腐蚀。

腐蚀对飞机的危害不仅表现在增加使用维护成本,而且危及飞机的安全。水陆两栖飞机原型机水轰-5飞机服役以来,很快就暴露出了存在的严重腐蚀问题:该机服役2~3年后,船底结构就已经出现大面积较为严重的腐蚀。2007年6月,用户对飞机腐蚀情况进行了普查,该次普查共发现飞机腐蚀部位880余处。其中,严重腐蚀部位共180余处。机身龙骨梁、桁条、框和机翼梁缘条等重要结构均存在严重腐蚀,严重危及飞行安全,腐蚀情况如图1和图2所示。水轰-5型飞机结构普遍存在腐蚀,维修频率较高,腐蚀维修周期也很长,严重制约了该型飞机的出勤率。因此,水陆两栖飞机必须提升结

构抗腐蚀能力,采用有效手段控制/延缓结构的腐蚀问题,才能满足使用寿命和安全的要求。

因水轰-5原有防护体系抗腐蚀能力不足,曾在2007年进行了综合治理,治理后截至该机型停止服役的6年时间里,结构腐蚀得到了有效遏制,治理效果得到了用户的认可和满意评价。水陆两栖飞机腐蚀防护与



图1 典型机身框腐蚀

Fig.1 corrosion of typical body frame



图2 船底蒙皮、龙骨梁及框缘条腐蚀

Fig.2 Corrosion of bottom skin, keel beam and frame flange

控制技术是在水轰-5综合治理和国外民机工程先进应用经验的基础上,对全机结构进行腐蚀防护与控制的全面升级和优化设计。因水陆两栖飞机腐蚀防护与控制要求高,技术复杂、难度大,因此需要采用多技术并用和系统工程方法来达到腐蚀预防与控制的目的。研制人员通过合理选材、表面防护、排水、密封、缓蚀剂选用等细节设计/制造手段,最大限度地预防和控制腐蚀,实现型号抗腐蚀品质提升的研制目标。

材料选用

选择合适的耐蚀性材料是民用飞机腐蚀防护与控制的一项重要工作。然而与一般民机相比,水陆两栖飞机经常在湿热和盐雾环境下工作和长时间停放,使用环境较为严酷,对选材的耐蚀性提出了更高的要求。材料在满足必要的静强度/刚度、制造工艺和结构功能性要求的前提下,优先考虑其耐腐蚀性能。

借鉴水轰-5飞机选材经验、教训,参考国外先进飞机材料选用建议,按照部件受力特性及材料性能特点,同时综合考虑材料工艺性和经济性进行选材。根据水陆两栖飞机特

殊的使用环境及特点,查阅国内外材料标准、手册和相关资料,包括项目团队已有的预研成果,归纳、总结飞机常用材料的耐腐蚀特性、材料限用要求和选材建议。重点选用耐腐蚀性能优异的材料,为相关设计工作提供参考。因水陆两栖飞机在工作时船体和浮筒受到海水或湖水的冲蚀作用,在抗腐蚀的基础上,对该区域的涂层增加了抗冲蚀要求。经综合分析该机型的特点和各部位的选材需考虑因素,确定的选材方案建议如表1和图3所示。

表面防护技术

镀层和漆层等结构表面保护措施,不仅可以避免电位差较大的结构材料直接接触,减小、甚至避免不同导电材料之间电位差,还可以有效防止电解液直接接触金属材料,从而达到腐蚀防护与控制目的。因此,结构表面保护是防腐技术的基本方法。

水陆两栖飞机总体技术要求的设计原则规定:有针对性地吸收国外先进技术,采用国内成熟且先进的设计、生产制造和工艺技术,实现飞机的最优设计和综合性能与功能;充分利用预研成果,加强腐蚀防护与控制设计,提高机体结构寿命^[1]。经济性要求的规定为:在选用新材料、

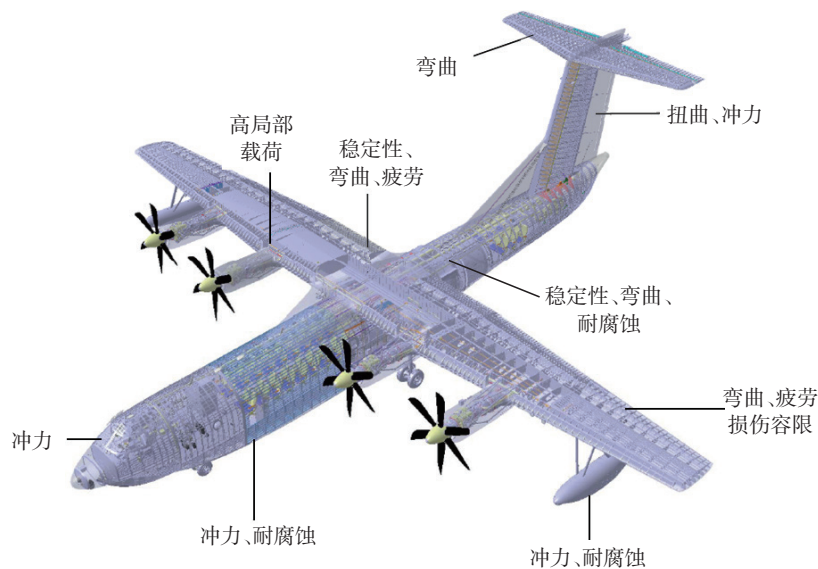


图3 典型结构部位选材的主要考虑因素

Fig.3 Main considerations for material selection of typical structural parts

表1 水陆两栖飞机材料选用依据

Table 1 Basis for selection of materials for amphibious aircraft

结构部位	选材考虑因素
机身蒙皮	疲劳
船体蒙皮	静强度、疲劳和腐蚀
机身上壁板	静强度
机翼下壁板	损伤容限性能
尾翼	静强度
浮筒	耐腐蚀
普通框	疲劳
加强框	静强度、疲劳
机身长桁	静强度
机翼上壁板	静强度
机身短桁	静强度

表2 表面防护体系优选及验证系列试验

Table 2 Surface protection system optimization and verification series of tests

试验项目名称	试验目的	试验结论
典型结构防护体系优选试验	筛选获得水陆两栖飞机典型结构适用的防护体系	铝合金体系:(1)外部:铬酸阳极化+P20-X底漆+ECL面漆;(2)内部:铬酸阳极化+P4-X底漆;耐磨部位:铬酸阳极化+P4-X底漆+XT3耐磨涂料;结构钢:(1)外部:镀镉+P20-X底漆+ECL面漆;(2)内部:镀镉+P4-X
防护涂层加速腐蚀试验	典型结构防护涂层在模拟水陆两栖飞机服役环境下的有效性	P20-X底漆+ECL面漆涂层防护体系综合性能最好,TB-X底漆+TS-X面漆涂层体系次之,试验结果表明:P20-X底漆+ECL面漆涂层防护体系能够满足水陆两栖飞机在海洋环境下使用要求
金属材料加速腐蚀试验	典型结构金属材料在模拟水陆两栖飞机服役环境下的有效性	2024铝合金腐蚀形态以点蚀为主,30CrMnSiA结构钢表现为全面腐蚀特征;在模拟水陆两栖飞机使用环境下,两种金属裸材必须采用适当的防护涂层才能保护其不被腐蚀
防护涂层自然环境暴露试验	典型结构防护涂层在海洋环境下的有效性	海南万宁自然暴晒3年后,P20-X+ECL与TB-X+TS-X涂层体系防护性能基本相当,满足首翻6年设计要求(TB-X+TS-X涂层体系在其他类似使用环境的机型上有效期为6年)
金属材料自然环境暴露试验	典型结构金属材料在海洋环境下的有效性	2024铝合金腐蚀形态以点蚀为主,局部有晶间腐蚀特征,暴露3年最大腐蚀深度达到85μm,失重法得到的平均腐蚀速率为3.0μm/年;30CrMnSiA结构钢表现为全面腐蚀特征,暴露3年最大腐蚀深度为630μm,由失重法得到的平均腐蚀速率为102μm/年
典型结构和连接件防护体系有效期试验	评估飞机结构设计状态的腐蚀防护与控制品质,确认飞机防护体系在预期使用环境下的有效期	有涂层典型结构和连接件除部分紧固件头部、根部与对接板缝隙处出现涂层开裂或剥落现象外,均未发生基材腐蚀状况,涂层防护体系满足水陆两栖飞机使用环境下有效期的要求

新工艺时,应考虑控制在总研制经费允许的范围内。因此,本次研究主要针对国内已经实现工程化应用的表面防护技术,同时兼顾国内外研究较为成熟,在国内工程化时间较短的新型表面防护技术。

在型号研制前期,结合水陆两栖飞机使用环境和防护体系失效特点^[2-3],参照防护体系失效的同类试验方法^[4-6],开展了结构防护体系优选试验、目标防护体系和金属基材实验室加速腐蚀和自然环境暴露试验、典型结构和连接件防护体系有效期试验,最终获得了满足水陆两栖飞机设计要求的典型结构防护体系,表面防护体系优选及验证系列试验和结论如表2所示。

1 表面处理

根据试验结果和国外民机应用情况,从材料特性、结构特点和使用环境选用分析,确定了零/部件和非铝合金紧固件表面处理要求^[7],如表3和表4所示。

表3 零部件表面处理要求

Table 3 Parts/components surface treatment requirements

基材	结构特点	表面处理
铝合金	一般结构	铬酸阳极化
	管件	阿洛丁处理
	磨损表面	硬质阳极化
结构钢	$\sigma_b \leq 1240\text{MPa}$	镀镉
	$\sigma_b > 1240\text{MPa}$	高强度钢镀镉
	一般磨损或轴承表面	镀铬
	使用温度在150~230℃的结构件	—
不锈钢	一般	钝化
	轻度磨损表面	镀镉
	重度磨损表面	镀铬
复合材料	火焰喷涂铝	阿洛丁1200S化学氧化
	外表面	XC1填孔腻子+XW5整平剂
钛合金	与铝合金接触	钝化
	防止微振腐蚀和咬合	钝化
铜合金	与异种金属接触	镀镉
	受摩擦零件	镀镍+镀硬铬抛光
	装饰防护零件	镀镍+镀铬

表4 非铝合金紧固件表面处理要求

Table 4 Non-aluminum alloy fastener surface treatment requirements

结构螺栓	螺杆材料	螺杆涂层	螺母	垫圈	组合材料
受拉	INCO718	紧固件专用铝涂层	A-286 镀镉	A-286 镀镉	铝合金和钢
	A-286	镀镉或紧固件专用铝涂层	A-286 镀镉	A-286 镀镉	铝合金和钢
	钛	紧固件专用铝涂层	A-286 镀镉	A-286 镀镉	铝合金和钢
受剪	INCO718	紧固件专用铝涂层	A-286 镀镉	铝合金阳极化或耐蚀钢镀镉	铝合金和钢
	A-286	镀镉或紧固件专用铝涂层	A-286 镀镉	铝合金阳极化或耐蚀钢镀镉	铝合金和钢
高锁和锁紧螺栓 - 受拉	钛	紧固件专用铝涂层	对高锁或锁紧螺栓按规定用耐蚀钢凸边螺母	A-286 或 303 耐蚀钢镀镉	铝合金和钢
高锁和锁紧螺栓 - 受剪	钛	紧固件专用铝涂层	高锁或锁紧螺栓按规定用铝合金阳极化凸边螺母	铝合金阳极化或耐蚀钢镀镉	铝合金和钢

表5 零/部件表面涂层防护体系

Table 5 Parts/components surface coating protection system

基材	结构特点	飞机上的位置	防护涂层
铝合金	一般结构零件	内部	P4-X 底漆
		外部	P20-X 底漆 + ECL 面漆
	有相对运动接触的部位	—	P4-X 底漆 + XT-3 耐磨漆
	整体油箱	—	X4-1 整体油箱防腐涂料
结构钢	一般结构	内部 外部	P4-X 底漆 P20-X 底漆 + ECL 面漆
	有相对运动接触的部位	—	P4-X 底漆 + XT-3 耐磨漆
	使用温度在 150 ~ 230℃ 的结构件	—	1 层 825-X 耐热聚氨酯涂料
复合材料	火焰喷涂铝	外表面	P20-X 底漆 + ECL 面漆
	要求导电	外表面	528X 防静电涂层 + 512X 复合材料底漆 + ECL 面漆
	不要求导电	外表面	512X 复合材料底漆 + ECL 面漆
	全部	内表面	512X 复合材料底漆

2 涂层防护体系

结合表面防护体系优选及验证系列试验结果和各涂层体系在外国民机应用情况,按基材类型、结构特点和在飞机上所处位置选用涂层防护体系,形成了零/部件表面涂层防护体系^[7],如表5所示。

全机共选用8套防护涂层体系,结构表面涂层体系如图4所示。

结构排水技术

根据水陆两栖飞机构型,参考国外先进成熟机型结构排水系统设计

标准及案例,制订水陆两栖飞机通风、防/排水设计方案。确定了排水系统总体设计思路,提出了机身、机翼、尾翼、浮筒和短舱等具体部位排水设计方案,具体排水技术方案体现在水陆两栖飞机设计和制造过程中。排水系统设计要求为:

(1) 尽量避免水平结构表面,避免电解液积聚;(2) 隔框在纵向连续构件(长桁等)穿过位置处设置纵向排水通道,确保水能够连续纵向流动;纵向连续构件(长桁等)在隔框连接处设置环向排水通道,确保水能

够环向连续流动,水最终通过位于机体最低部位的排水通道或排水孔排出;(3) 机体敞开式排水口直径不小于9.65mm,利用结构间隙排水,排水通道的截面积至少应为70mm²,且该截面上最小边尺寸应不小于6.35mm;(4) 机翼的排水孔处加装防水帽,优点一是飞机飞行时,防止水直接溅进去,二是防水帽处产生负压,可以抽出积水。

1 机身排水

机身排水的总体思路如下:(1) 机身分为机头、中机身、中后机身和

后机身 4 大区域进行排水；(2) 机身环向和纵向设置连续排水通道；(3) 通舱地板以下各水密舱排水系统独立；(4) 各水密舱船底最低点设置放水阀。

通舱地板以下各水密舱排水系统独立，将水集中在船底最低点、1 长桁与龙骨梁之间，在此处船底蒙皮上安装放水阀，共安装放水阀 11 个。中机身船底排水通路如图 5 所示。

2 机翼排水

机翼在中央翼盒段油箱区和外翼盒段燃油区通过油箱放沉淀阀门将水排出机外。前缘和襟翼采用排水孔进行排水，后缘全展长均有铰链口盖，通风排水良好，共有排水孔 170 个，中央翼盒段整体油箱区排水通路如图 6 所示。

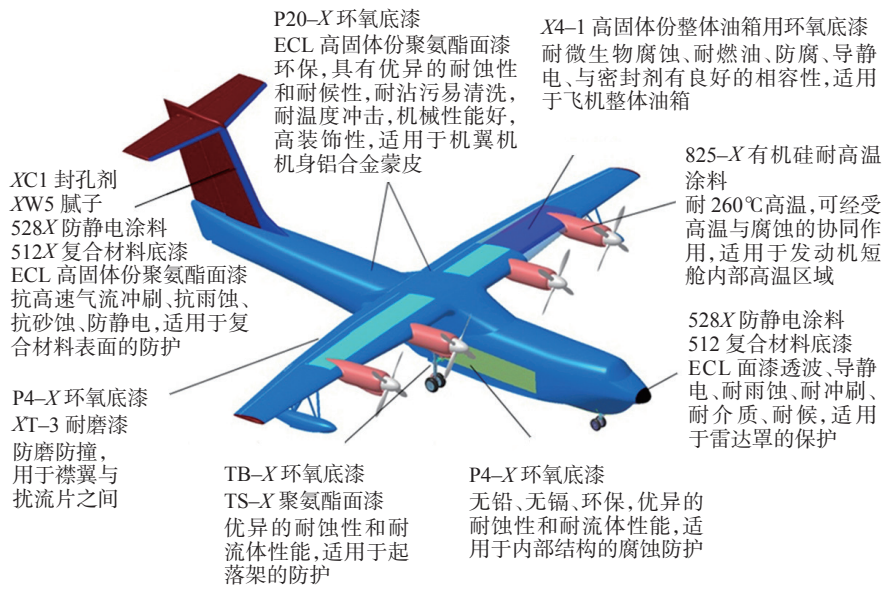


图4 结构表面涂层防护体系示意

Fig.4 Structural surface coating protection system

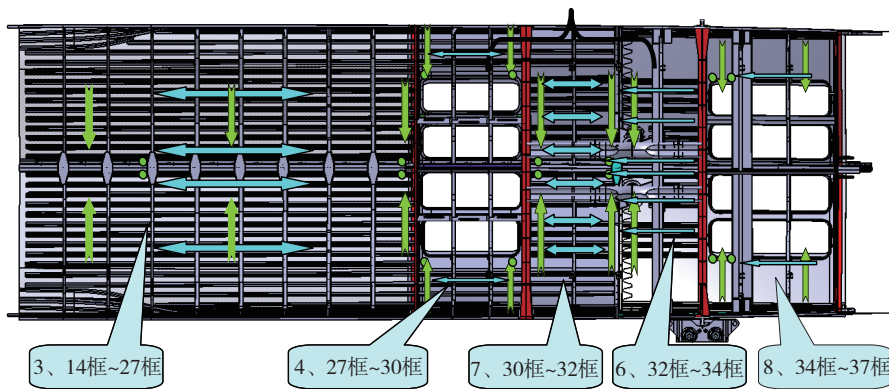


图5 中机身船底排水通路

Fig.5 Middle fuselage bottom drainage channel

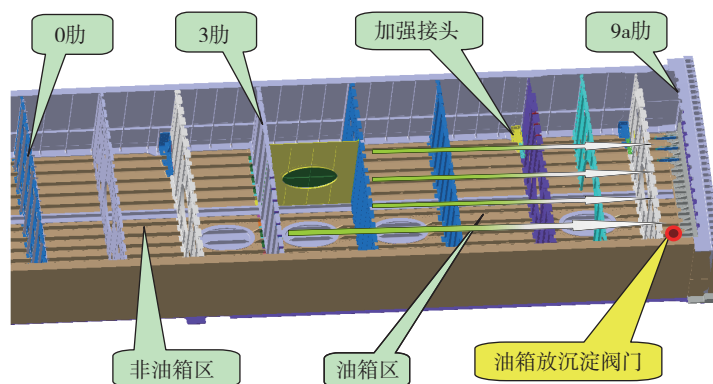


图6 中央翼盒段整体油箱区排水通路

Fig.6 Integral fuel tank area drainage channel of central wing box section

3 尾翼排水

水平尾翼从根部到梢部沿长桁设置有排水通路,根部、梢部下翼面开有排水孔,水沿排水通路流至排水孔排出机体。垂直尾翼在结构内部从高到低都有排水通路,结构低处开足够的排水孔,水沿排水通路流至机身上表面由整流条上的排水孔排出机体。尾翼共设置 44 个排水孔,垂尾区域还可以通过前缘、盒段和后缘下端肋开孔或间隙排水。水平安定面排水通路如图 7 所示,垂直安定面盒段和后缘排水通路如图 8 所示。

4 浮筒排水

浮筒有 3 个水密舱,最低点为 6 框和 11 框位置,6 框前设置 2 个放水阀,11 框前后设置 4 个放水阀,浮筒内部积水通过隔框上的长桁缺口汇集到 6 框和 11 框框缘前后,再通过放水阀排出筒体。浮筒排水通路设计如图 9 所示,浮筒放水阀的安装位置如图 10 所示。

5 短舱排水

短舱排水思路如下:(1)通过框和长桁的安装间隙、长桁缺口形成排水通路;(2)前环通过下盖维护口盖缝隙,将水排出机体;(3)中段通过下盖前端最低点和后端最低点的排水孔,将水排出机体;(4)后段通过排气管等安装孔,将水排出机体。短舱侧盖排水如图 11 所示,短舱中段下盖排水如图 12 所示。

防腐蚀密封技术

防腐蚀密封主要通过结构在结构之间接合面或 / 和接合面周缘,或者紧固件表面涂上合适密封胶,消除结构与结构之间,或者紧固件与结构安装孔之间缝隙,达到防止电解液积聚、预防和控制缝隙腐蚀目的。

防腐蚀密封是飞机结构腐蚀防护与控制的重要组成部分,防腐蚀密封技术直接影响飞机抗腐蚀能力^[8-10]。据统计,水上飞机投入运营后,80% 以上结构腐蚀与密封有关。

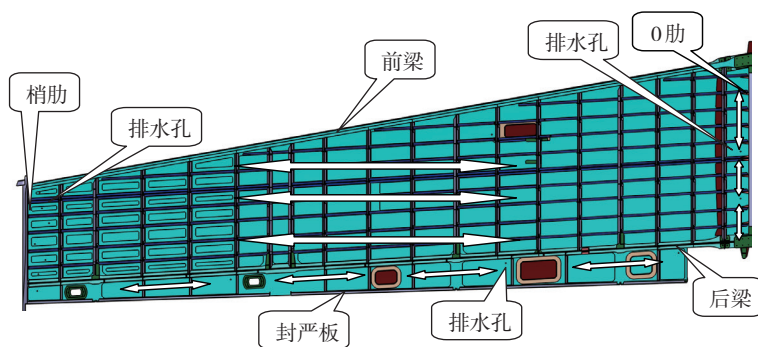


图7 水平安定面排水通路

Fig.7 Horizontal stabilizer drainage channel

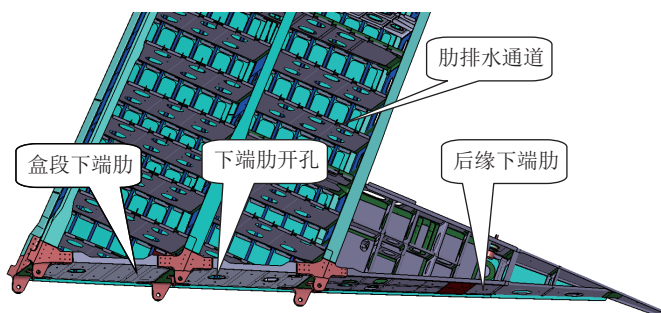


图8 垂直安定面盒段和后缘排水通路

Fig.8 Vertical stabilizer nacelle section and trailing edge drainage channel

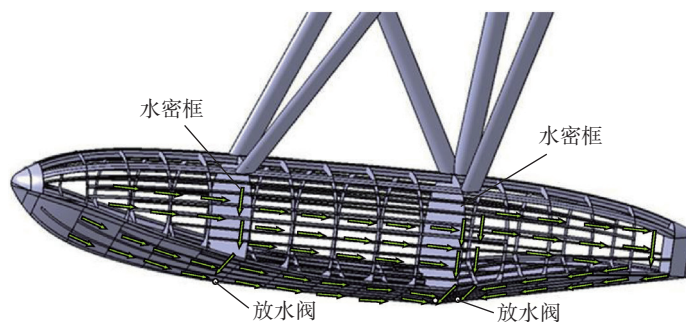


图9 浮筒排水通路

Fig.9 Pontoon drainage channel

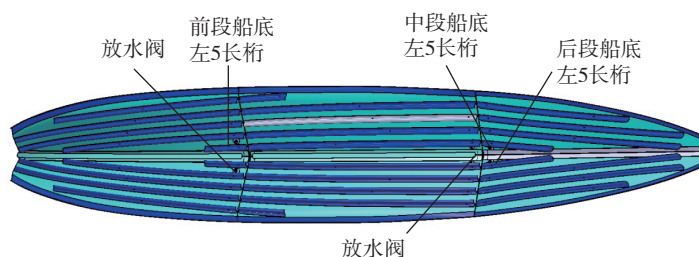


图10 浮筒放水阀的安装位置

Fig.10 Installation position of pontoon waterproof valve

水轰-5飞机同样存在密封失效导致的严重腐蚀问题,修理工时、航材等成本非常高,该机型船底区域存在较为严重的渗水问题,每在海面起降一次,船底均会渗进约10cm海水。服役期间,为了减轻海水对船底区域结构的腐蚀,每次在海面起降后,用户均要出动大量人力、耗时半天、耗费至少4t的淡水对船底区域进行冲洗

和排水,维护成本很高。国内传统的航空密封剂用于海洋环境下使用飞机时,存在密封失效严重问题^[9-12],如水上飞机船底密封失效漏水如图13所示,海洋环境下使用的飞机如舰载机的连接密封胶开裂如图14所示。

结合项目团队已有的水上飞机腐蚀综合治理成果,吸收国外民航先

进密封工程应用经验,按结构分区、防护功能和使用环境选用综合性能更为优异的进口密封剂,提升飞机结构典型连接(铆接、螺接以及贴合面)的密封能力,在一定程度上改善水上飞机船底大应变结构的防水密封问题,水陆两栖飞机结构密封分区如图15所示。

整机密封形式主要包括贴合面



图11 短舱侧盖排水通路

Fig.11 Drainage channel for side cover of nacelle



图13 水上飞机机身船底漏水

Fig.13 Seaplane fuselage bottom leaking

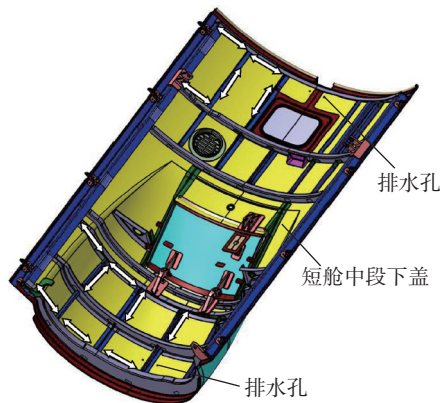


图12 短舱中段下盖排水通路

Fig.12 Drainage channel of lower cover in middle section of nacelle



图14 舰载机连接密封失效腐蚀

Fig.14 Corrosion of connection seal failure of carrier aircraft

- 防腐水密区
- 防腐密封区
- 高温密封区
- 燃油密封区

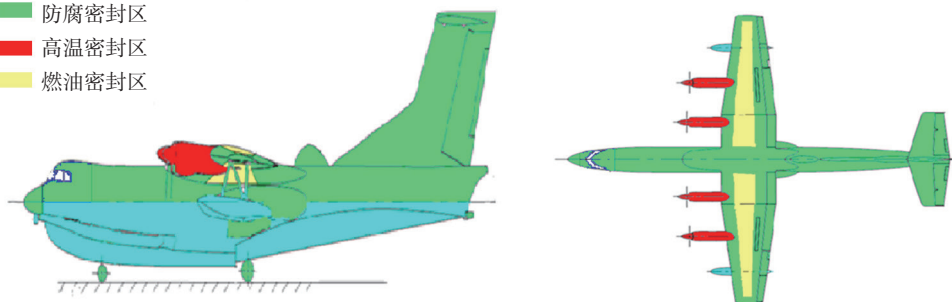


图15 水陆两栖飞机结构密封分区

Fig.15 Amphibious aircraft structure sealing zone

密封、填角密封、缝隙密封、紧固件湿装配和紧固件封包、铝合金结构相邻复合材料密封以及衬套/轴承密封衬套/轴承密封等。密封总原则为：全机具体的密封形式跟所处上下机身区域有关,上下机身的分界面为通舱地板以上一个桁条,所有舱门、浮筒(含撑杆)和分界面桁条属于下机身区域。防腐通用密封原则为：(1)燃油区和下机身包含了以上所有的密封形式；(2)上机身普通贴合面边缘不需要进行填角密封,其余密封形式同下机身；(3)全机所有永久性连接的贴合面都进行贴合面密封；(4)燃油区/下机身所有贴合面边缘、需进行贴合面密封但无法进行密封的贴合面边缘、需导电基座周围进行

填角密封；(5)所有紧固件湿装配；(6)部分紧固件封包^[13],紧固件封包的一般原则如下：(1)燃油区所有紧固件两端封包；(2)下机身连接蒙皮的所有铝合金紧固件铆头和水箱区域紧固件两端封包；(3)全机所有非铝合金紧固件(发动机短舱区域钛合金紧固件除外注)两端封包；(4)需进行贴合面密封但无法进行密封的贴合面区域紧固件两端；(5)蒙皮外侧的所有紧固件端头不封包；(6)部件装配后形成的狭小空间,由于空间限制无法进行单个紧固件头部封包时可采用整体刷涂的形式进行密封(注：因发动机短舱区域为钛合金-铝合金夹层结构,钛合金紧固件表面有铝涂层且已经进行了防腐蚀湿装

配,阻断了异种金属间的直接接触；钛合金紧固件本身耐腐蚀性强,故无需进行防腐蚀增强措施-封包来保护；此外,该区域紧固件上封包的密封胶在飞机飞行过程中受到振动及载荷作用可能存在剥落的风险,剥落的胶帽可能被吸入发动机,引起发动机故障,因此该区域钛合金紧固件两端不封包)。

不同区域密封目的和形式如表6所示。密封部位分为机身密封、机翼密封、油箱密封、尾翼密封、浮筒密封和短舱及发动机支架密封。

以上防腐蚀密封技术已通过了船底水密试验和油箱油密试验验证,表明该密封设计和制造工艺技术满足防腐蚀密封要求,实现了预期的防

表6 不同密封分区的目的和形式
Table 6 Purposes and forms of different sealing zones

密封分区	密封目的	密封形式
防腐密封区	消除结构与结构之间,或者紧固件与安装孔之间缝隙,达到防止电解液积聚、预防和控制腐蚀目的	贴合面密封、缝隙密封、注射密封、紧固件湿安装、紧固件封包、衬套/轴承密封
燃油密封区	在飞机使用寿命内,在各种温度、压力和设计载荷条件下,能够有效防止燃油泄漏	贴合面密封、填角密封、缝隙密封、注射密封、紧固件湿安装、紧固件封包、衬套/轴承密封
防腐水密区	防止水和其他液体侵入,同时起到保持飞机空气动力表面光滑、减小飞行阻力的作用	贴合面密封、填角密封、缝隙密封、注射密封、紧固件湿安装、紧固件封包、衬套/轴承密封
高温密封区	为高温区域工作部件提供保护作用	贴合面密封、填角密封、缝隙密封、紧固件湿安装、紧固件封包(钛合金紧固件端头除外)
电气密封区	为电器部件提供保护作用	贴合面密封、填角密封、缝隙密封

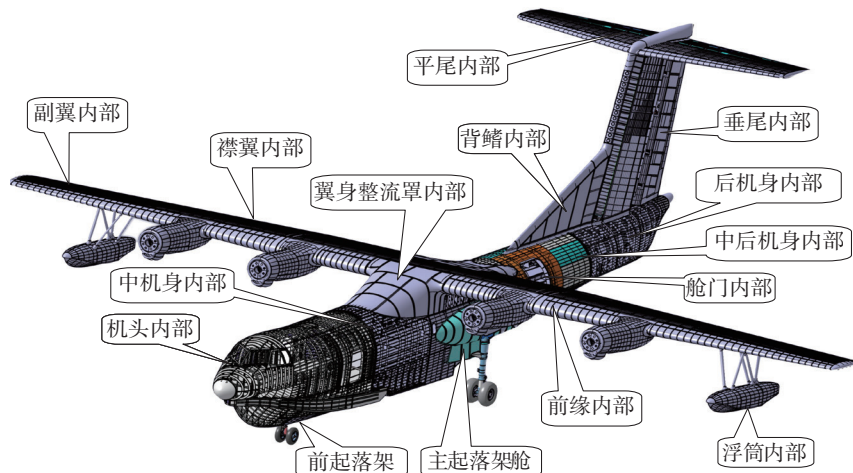


图16 缓蚀剂整机喷涂部位
Fig.16 Corrosion inhibitor spraying parts

腐蚀密封研制目标。

缓蚀剂应用技术

缓蚀剂为多种腐蚀抑制剂复合溶解于低表面张力、挥发性溶剂后形成的不含硅有机物。喷涂于结构表面后,缓蚀剂将置换出结构表面以及缝隙中积聚的水分。缓蚀剂中溶剂挥发后,能够在结构表面形成一层腊状保护膜,阻止电解液与结构直接接触,从而达到预防腐蚀或者减缓腐蚀速度的作用。

缓蚀剂喷涂后具有一定耐久期限,老化后会失去腐蚀预防和控制作用。因此,飞机投入使用后,需要定期检查并视情采用溶剂清除后重新喷涂。大量使用经验证实:飞机制造阶段以及使用/维护阶段,在结构表面喷涂合适种类的缓蚀剂,是一种成本较低且有效的腐蚀预防和控制方法。

缓蚀剂主要用于结构搭接有缝

隙部位、排水通道及可能积水部位。根据水陆两栖飞机构型,参考国外先进成熟机型结构缓蚀剂使用标准,确定了水陆两栖飞机结构缓蚀剂应用方案。缓蚀剂整机喷涂部位如图16所示,缓蚀剂详情如表7所示,缓蚀剂喷涂时机及部位如表8所示。

结论

水陆两栖飞机腐蚀防护与控制技术是在吸取原型机水轰-5综合治理经验,借鉴国外先进民机抗腐蚀设计技术基础上,通过合理选材、表面防护、防腐密封和缓蚀剂选用等技术的综合运用,以各类优选和验证试验作为技术支撑,开展系统、全寿命周期腐蚀防护与控制研究工作。表面防护体系优选及系列验证试验结果表明优选的表面防护体系具有良好的抗腐蚀性能,满足水陆两栖飞机的表面防护体系6年有效期的设计要求。机体结构的防水密封设计

是实现水陆两栖飞机腐蚀防护的根本保证,该防腐密封方法顺利通过了船底水密和油箱密封试验验证,表明其密封性能满足水陆两栖飞机的密封防护设计要求。综上所述腐蚀防护技术的工程应用实现了水陆两栖飞机腐蚀防护与控制品质的提升,最大限度地预防和延缓腐蚀发生,保证该机型安全。

参考文献

[1] MOORE D. Protective finishing systems for navy aircraft[J]. Advanced Materials & Processes, 1999(4):31.

[2] 李金桂. 腐蚀控制系统工程学概论[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.

LI Jingui. An introduction to system engineering science for corrosion control[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009.

[3] 陈群志, 程宗辉, 席慧智, 等. 飞机铝合金结构连接部位的腐蚀行为[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2007, 27(6): 334-337.

CHEN Qunzhi, CHENG Zonghui, XI Huizhi, et al. Corrosion behavior on joint section of aircraft aluminium alloy structure[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2007, 27(6): 334-337.

[4] 刘文斑, 李玉海, 陈群志, 等. 飞机结构腐蚀部位涂层加速试验环境谱研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2002, 28(1): 109-112.

LIU Wenting, LI Yuhai, CHEN Qunzhi, et al. Accelerated corrosion environmental spectrums for testing surface coatings of critical areas of flight aircraft structures[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 28(1): 109-112.

[5] 李星, 周人歌, 陈津虎, 等. 钢和硬铝的加速腐蚀试验研究[J]. 装备环境工程, 2013, 10(6): 5-8, 18.

LI Xing, ZHOU Renge, CHEN Jinhu, et al. Study on accelerated corrosion testing of steel and duralumin[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(6): 5-8, 18.

[6] 王艳艳, 舒畅, 李超. 自然环境谱转化为加速试验环境谱的方法[J]. 装备环境工程, 2014, 11(1): 34-38.

WANG Yanyan, SHU Chang, LI Chao.

表7 缓蚀剂详情

Table 7 Details of corrosion inhibitor

牌号	名称	厚度/ μm	材料技术条件
TFHS-10、corrosion X AV8	软膜水置换型缓蚀剂	—	MIL-PRF-81309 II型
TFHS-15、Cor-Ban 35	硬膜水置换型缓蚀剂	15~35	MIL-DTL-85054
AV100D、Ardrox3321	重型软膜缓蚀剂	38~150	MIL-PRF-16173 1级

表8 缓蚀剂喷涂时机及部位

Table 8 Corrosion inhibitor spraying timing and parts

喷涂时机	喷涂部位	备注
组件装配后, 部件装配前; 密封剂表干后; 涂层喷涂 8h 后	机翼、垂尾和平尾的前梁腹板前 机翼、垂尾和平尾的后梁腹板后 机翼、垂尾和平尾的后缘后隔间 机翼、垂尾和平尾的前缘内表面 机翼和平尾的翼尖内表面 外翼肋工艺分离端面 浮筒内部 各操纵面内部	均为部件装配后不易喷涂部位
部件装配后, 整机装配前; 密封剂表干, 涂层喷涂 8h 后	机身蒙皮内表面及其框、梁、长桁等内部结构 机身内通舱地板及地板梁 前左、前右舱门内表面 通舱后左、后右舱门内表面 应急出口舱门内表面 机身外部整流罩内表面及整流罩包围区域(仅金属) 前起落架舱内部 主起落架舱内部(非金属结构除外)	组件状态已喷涂缓蚀剂部位除外

Method for conversion of natural environmental spectra to accelerated test environmental spectra[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(1): 34-38.

[7] 甘志宏. 大型灭火/水上救援水陆两栖飞机表面防护技术条件, JT D0080T001C1[R]. 荆门: 中国特种飞行器研究所, 2018.

GAN Zhihong. Technical conditions for surface protection of large firefighting/water rescuing amphibious aircraft, JT D0080T001C1[R]. Jingmen: China Special Vehicle Research Institute, 2018.

[8] 陈群志, 王逾涯, 崔常京, 等. 老龄飞机结构的腐蚀问题与对策[J]. 装备环境工程, 2014, 11(6): 1-9.

CHEN Qunzhi, WANG Yuya, CUI Changjing, et al. Corrosion problems and countermeasures of the aging aircraft[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014,

11(6): 1-9.

[9] 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 Chunhui, LAN Qicheng, HE Weiping, et al. Failure analysis of typical adapting piece anticorrosion sealant in accelerated environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(3): 47-50.

[10] 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, 123.

SUN Zhihua, TANG Zhihui, LI Bin. Comprehensive corrosion control of naval aircraft[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(6): 35-39, 123.

[11] 牛春匀. 实用飞机结构工程设计[M]. 北京: 航空工业出版社, 2008.

NIU Chunyun. Practical aircraft structure

engineering design[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2008.

[12] 顾诵芬, 解思适. 飞机总体设计[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001.

GU Songfen, XIE Sishi. Aircraft conceptual design[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2001.

[13] 邢新侠. 大型灭火/水上救援水陆两栖飞机防腐密封技术条件, JT D0080T002C1[R]. 荆门: 中国特种飞行器研究所, 2018.

XING Xinxia. Technical conditions for anti-corrosion sealing of large firefighting/water rescuing amphibious aircraft, JT D0080T002C1[R]. Jingmen: China Special Vehicle Research Institute, 2018.

通讯作者: 李超, E-mail: lichao303@163.com。

Application Research of Corrosion Prevention and Control Technology in Development of Amphibious Aircraft

LI Chao, FENG Wanxi

(Manufacturing Department, AVIC General Huanan Aircraft Industry Co., Ltd., Zhuhai 519040, China)

[ABSTRACT] In order to meet the technical requirements of amphibious aircraft flight safety, total life of the fuselage structure and the interval between repairs, for the harsh operating environment of the amphibious aircraft and the characteristics of the failure of the protection system of the typical structural parts of the aircraft, refer to similar domestic and foreign protection technology methods, according to corrosion Pre-research results of protection and control, comprehensive governance of the SH-5 Maritime Bomber and domestic and foreign civil aircraft engineering application experience, comprehensive consideration of specific engineering applications, through materials selection, surface protection, anti-corrosion sealing, ventilation and drainage, corrosion inhibitor selection and other technologies application research, we carry out the application research on corrosion protection and control technology of amphibious aircraft according to the corrosion protection thought of the whole life cycle. Up to now, the surface protection and sealing of the base structure are normal and effective. The results of the selection and verification of the protection system and the water-tight and oil-tight tests show that the application of this protection technology has achieved the anti-corrosion development goal of the first renovation of 6 years.

Keywords: Corrosion prevention and control; Surface protection; Sealing; Drainage; Corrosion inhibitor; Amphibious aircraft

(责编 古索)