民用飞机防护体系加速试验谱研究

贺崇武，马双双，刘辉
（中航工业第一飞机设计研究院，西安 710089）

摘要：指出了民用飞机日历寿命的首翻期主要由飞机防护体系使用期限决定，分析了民用飞机防护体系失效机制和民用飞机防护体系腐蚀加速试验谱需要考虑的因素，提出了民用飞机防护体系腐蚀加速试验谱的基本构成，并给出了我国沿海湿热地区加速试验谱的具体条件和时间。

关键词：腐蚀；飞机防护体系；加速试验谱；涂层老化
中图分类号：TG174.45；V216.6　　**文献标识码：**A
文章编号：1672－9242(2013)01－0041－04

Study on Accelerated Test Spectrum for Civil Airplane Protection System

HE Chong-wu, *MA Shuang-shuang*, *LIU Hui*
(The First Aircraft Institute of AVIC, Xi′ an 710089, China)

Abstract: First repair life of civil airplane was influenced by the service life of airplane protection systems. On the basis of analyzing the failure mechanism and the influencing factors for accelerated test of civil airplane protection systems, the basic composition of accelerated test spectrum was established, and accelerated test times and conditions for damp and hot foreland region were given.

Key words: corrosion; airplane protection system; accelerated test spectrum; weathering of coating

现代飞机设计寿命都比较长，一般不低于20 a。随着飞机使用时间的不断增长，由于腐蚀造成的事故已大量暴露出来，使飞机使用年限问题越来越突出。飞机防护体系设计好坏直接决定了飞机使用年限，因此飞机防护体系的首次使用期限决定了飞机日历寿命的首翻期，防护体系的再次使用期限决定了飞机日历寿命的维修间隔。首翻期和维修间隔的确定还应考虑飞机飞行小时和飞行起落等因素，但飞机防护体系的使用期限应占主导作用。

完全按飞机实际使用环境进行防护体系试验是不可能的，这主要是由于研究周期和经费不可接受。在工程应用中，只能采用实验室加速腐蚀试验方法，使飞机结构模拟试验件在加速谱作用下用较短的时间达到飞机使用环境长期作用下相当的腐蚀损伤。要将错综复杂的大气环境浓缩成便于工程应用的环境谱，就需要分析影响飞机防护体系失效的因素、形式，使加速腐蚀试验产生的腐蚀损伤形式、腐蚀损伤特征和腐蚀产物成分与飞机实际使用情况

收稿日期：2012－07－15
作者简介：贺崇武(1970—)，男，陕西澄城人，硕士，高级工程师，主要研究方向为飞机结构强度试验。

尽量一致。

1　飞机防护体系失效分析

1.1　飞机防护体系使用特点

飞机通常是在海拔 8000 m 以上高空以 900 km/h 的速度飞行，地面温度变化范围在 –40 ~ 40 ℃，而在飞行高度上的平均温度可达 –58 ℃，因此飞机在起飞、着陆过程中，大约 10 min 内要经历 100 ℃左右的温度变化，这就要求飞机的防护体系具有较强的耐低温性能。

飞机在飞行中，气密舱内外部会产生较大的压差变化，导致涂层与母体基质界面产生张力。此外，飞机飞行中机翼因升力作用发生变形，高速流动和变化无常的气流也会对涂层产生影响，这些条件都要求飞机防护体系具有很强的柔韧性。

由于飞机在飞行中将承受 –50 ℃以下的低温，会在飞机内形成较多的冷凝水，因此飞机防护体系要承受冷凝水作用。同时飞机涂层还要接触防冻液、润滑油和液压油等介质，这些都会影响飞机防护体系的使用性能。此外，飞机在高空飞行中，受到的紫外线辐射具有更宽的波长范围和更强的照射强度。

1.2　飞机防护体系失效形式

飞机结构中常采用的材料为铝合金和高强度钢，防护体系主要包括阳极化或镀镉表面处理、底漆和面漆，紧固件采用湿装配。如果采用合适的防护体系，并有严格的腐蚀预防和控制措施，一般的防护体系能维持 10 a 左右[2—3]。美国在研制 F–15 飞机时就明确提出，飞机应使用 10 a 而无需因腐蚀损伤进厂维修，波音公司则将民用飞机设计目标定为 20 a 使用中无重要腐蚀损伤。

飞机的防护体系失效是一个缓慢的过程，在飞机使用过程中由于受到紫外线照射、湿热环境、低温交变应力、空气污染物、盐雾等因素综合作用，老化过程中会发生一系列变化，如图 1 所示。这些变化最终导致飞机涂层脱落、防护功能丧失。

飞机防护体系主要是通过屏障作用，将金属与外部介质隔离而对基体金属进行保护，因此防护涂层的稳定性对保护性能起着很大的作用。涂层的失效是从如下几个方面开始的。

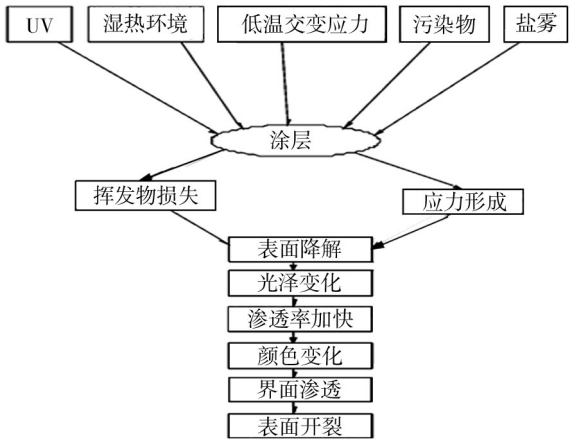


图 1　飞机防护涂层失效过程

Fig. 1　Failure process of airplane protection coating

1）紫外线、氧、热等因素作用。飞机结构的面漆主要功能是提高飞机耐大气老化性能，提供合适、漂亮的外观，达到满意的装饰效果。面漆老化失效机理与其分子结构以及引起老化的环境因素密切相关。涂层吸收紫外线后，聚合物中的分子键发生断裂，最终导致涂层物理性能降低，引起涂层颜色变化。热降解会引起涂层分子键破坏，孔隙增大，抗渗透性下降。一般来说，光降解和热降解将同时进行，使涂层老化机理更加复杂。

2）水、氧、Cl^-和 SO_4^{2-}等腐蚀离子会在涂层中渗透。当涂层同腐蚀介质接触后，腐蚀介质中的水、氧气和腐蚀离子会先后通过涂层中的宏观缺陷和微观缺陷渗透到涂层/金属基体界面，形成非连续或连续的水相。由于界面处水分子的介入，导致涂层附着力持续降低，引起涂层防护性能下降。

3）涂层下金属电化学反应引起涂膜破坏，水溶液渗透到金属界面后，金属因电化学作用形成局部阴极区和阳极区。在阴极区由于氧去极化作用，局部阴极区域溶液呈微碱性，引起涂层破坏、起泡；在局部阳极区，发生金属阳极溶解反应，形成腐蚀产物，由于腐蚀产物的体积远远大于被溶解金属的体积，因而涂层鼓起成“泡”，“泡”胀破后，形成所谓的“透锈”缺陷。

4）飞机在飞行中承受 –50 ℃以下的低温，低温环境下防腐涂层会变脆。飞机的主要承力结构在飞行中受到气动和惯性载荷作用，随着飞行速度和高

度变化、气流强度变化,飞机主承力结构受到的外载也在不断变化。在低温交变应力作用下,涂层可能发生龟裂,导致防护体系失效。

2　防护体系加速试验谱构成

通过分析飞机防护体系失效形式和失效机理,可知影响飞机涂层失效因素有紫外线照射、湿热环境作用、低温交变应力作用、大气中Cl^-和SO_4^{2-}腐蚀离子作用。参照美国空军制定并用于F-18飞机结构涂层的加速试验谱,同时结合民用飞机的特点进行适当修改。

与军用飞机相比,民用飞机结构使用特点表现为飞行时间与地面停放时间相比,民用飞机空中飞行时间可占到40%～70%;与军用飞机高速、机动作战要求不同,民用飞机为经济性、舒适性良好的亚音速飞行状态。由于通常认为3000 m以上的高空空气稀薄,且气温较低,因此可以不考虑空气中腐蚀介质的影响,而紫外线辐射强度会比地面加强。与军用飞机防护涂层加速谱相比,民用飞机防护涂层加速试验谱中紫外线照射试验应加强,盐雾试验应减弱,同时去掉军用飞机涂层加速试验中的热冲击试验。民用飞机防护体系加速试验谱可按图2进行,图2中一个周期相当于飞机使用1 a遭受的腐蚀损伤。

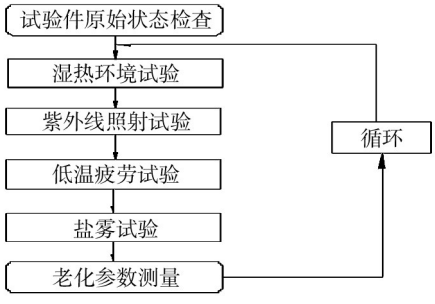


图2　飞机防护体系加速试验谱

Fig. 2　Accelerated test spectrum of airplane protection system

加速试验谱中各环境作用条件和作用时间的确定,应首先考虑飞机腐蚀关键部位结构特点和局部腐蚀环境特点。民用飞机腐蚀关键部位可分为外露腐蚀关键部位、内部腐蚀关键部位和特定腐蚀关键部位(厨房、厕所、货舱地板等);其次考虑飞机所属地气候环境影响,根据一些研究资料,我国飞机使用环境可划分为干冷区、内陆温和区、内陆湿热区、沿海温和区和沿海湿热区。

3　加速试验谱编制

3.1　湿热环境试验

湿热环境试验主要取决于气候条件,试验温度定为(43 ± 2) ℃,相对湿度为95% ～ 100%。暴露时间随飞机使用环境区域不同而不同,最严酷的沿海湿热地区取7 d,内陆湿热地区、沿海温和地区、内陆温和地区、干冷地区作用时间依次减少。

3.2　紫外线照射试验

紫外线照射主要模拟飞机在停放和飞行中日光对防护涂层的老化损伤,紫外线照射强度取决于飞机停放地区日照情况及腐蚀关键部位的具体位置。飞机涂层老化过程中,光降解和热降解是同时进行的,紫外线照射试验中要合理确定试验温度。根据民用飞机腐蚀关键部位实际使用情况和一些研究资料,取试验温度为(55 ± 3) ℃。在沿海湿热地区,民用飞机腐蚀关键部位紫外线年照射强度取60 MJ/m^2,其他飞机使用环境区域可根据具体情况进行调整。

3.3　低温疲劳试验

低温疲劳试验主要模拟飞机在高空飞行中,承受低温环境和交变应力对飞机涂层的损伤,试验温度取-(55 ± 3) ℃。试验载荷为等幅应力谱,应力水平由每次飞行中最大和最小应力构成,载荷循环次数为飞机1 a飞行各应力谱当量折算于等幅试验应力水平的总循环次数。各飞机使用环境区域低温疲劳试验作用条件均相同。

3.4　盐雾试验

盐雾试验温度为-(35 ± 2) ℃,沉降率为1～2 mL/80 cm^2。考虑飞机使用地区空气污染(主要为SO_2),盐雾试验又分为中性试验和酸性试验。中性盐雾试验采用蒸馏水和化学纯NaCl配置的w(NaCl)=5% ± 0.1%溶液,酸性盐雾试验采用NaCl溶液并加入稀硫酸,使溶液pH=3.5～4.5。我国沿海湿热地区

的试验采用中性盐雾作用4 d,酸性盐雾作用3 d,内陆地区盐雾作用时间可适当减少。

3.5 老化参数测量

腐蚀加速试验进行中,应对试验件防护涂层老化参数进行测量,主要测量涂层失光、变色、粉化、起泡、开裂、剥落、基体腐蚀等老化情况。在试验初中期可以定量测量试验件涂层光泽度变化情况,试验中后期定量测量试验件涂层的色差变化和粉化情况,试验后期定性测量涂层起泡、开裂、剥落等老化现象。当试验件出现基体腐蚀(钢结构出现较多红锈,铝合金结构出现较多鼓包,复合材料结构出现外露等)情况,试验件防护涂层基本失效,即达到飞机防护体系的使用期限。

试验件老化参数测量,一方面将记录试验件涂层老化情况,对比涂层的优劣;另一方面,涂层老化参数的变化情况将作为评判加速试验谱当量关系的重要依据。根据相同或相似飞机实际使用中防护体系老化参数随使用年限变化的情况,对比加速试验中防护涂层老化参数随试验周期的变化,对加速试验谱的当量关系进行调整。

4 结论

1) 民用飞机防护体系的使用期限决定了飞机日历寿命的首翻期。

2) 影响民用飞机防护体系的因素有紫外线照射、湿热环境、低温交变应力、空气污染物和盐雾等,涂层失效经历光降解和热降解老化、水\氧和离子(Cl^-,SO_4^{2-})渗透、涂层下金属电化学反应3个阶段。

3) 民用飞机防护体系腐蚀加速试验谱主要包括湿热环境试验、紫外线照射试验、低温疲劳试验、盐雾试验。

参考文献:

[1] 马艳秋. 材料自然老化手册[M]. 北京:中国石油出版社,2004.
[2] 曹楚南. 中国材料自然环境腐蚀[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
[3] 刘文斑. 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.
[4] 张栋. 确定飞机日历寿命的当量环境谱研究[J]. 航空学报,2000,21(2):128—133.
[5] 宋恩鹏. 飞机内部腐蚀关键部位加速试验环境谱研究[J]. 航空学报,2006,27(4):646—649.

(上接第7页)

接收机预期使用情况、剔除产品早期故障的目标。在完善卫星导航接收机环境试验评定方法、提高设备可靠性、形成战斗力等方面,具有十分重要和深远的意义。

参考文献:

[1] 朱喜,苟艳妮. 某型机载电子设备环境应力筛选[J]. 可靠性与环境试验技术及评价,2009,27(4):15—18.
[2] GJB 150.3—86,军用设备高温工作试验方法[S].
[3] GJB 367.2—87,军用通信设备通用技术条件环境试验方法[S].
[4] 白康明,林震. 机载电子设备环境应力筛选[J]. 航空制造技术,2008,26(2):42—45.
[5] 李廷永,唐翔宇. 高温箱内空气循环对自冷设备高低温环境试验影响与对策[J]. 电子质量,2009(5):65—67.
[6] 宁培一. 手机安全测试中的温升要求及试验简介[J]. 中国无线电,2010(5):78.
[7] 李根成. 环境应力筛选与应力激发试验[J]. 装备环境工程,2005,2(4):23—27.