环境因素对长航时无人机机体结构复合材料的影响

骆晨[1]，刘明[1]，张艺莹[2]，孙志华[1]，汤智慧[1]，陆峰[1]
（1.中国航发北京航空材料研究院 航空材料先进腐蚀与防护航空科技重点实验室，北京 100095；
2.中国民航大学 天津市民用航空器适航与维修重点实验室，天津 300300）

摘要：从环境因素对复合材料作用和大展弦比结构影响等方面分析了长航时无人机机体结构复合材料在服役环境中的损伤。结合目前国内外研究现状，扼要叙述了环境因素对长航时无人机机体结构复合材料的影响研究领域当前的主要需求，提出了针对未来研究工作的若干建议。包括应以长航时无人机机体结构典型碳纤维增强树脂基复合材料和涂层体系为主要研究对象，开展跟随无人机的暴露试验和实验室模拟加速试验，研究复合材料在环境和载荷耦合作用下的力学性能变化，确定机体结构典型复合材料的损伤规律等。

关键词：复合材料；损伤；环境因素；载荷；涂层
DOI：10.7643/ issn.1672-9242.2017.11.007
中图分类号：TJ04；TG142.71　　**文献标识码：**A
文章编号：1672-9242(2017)11-0033-04

Effects of Environmental Factors on Composite Materials in Airframe Structures of Long Endurance Unmanned Aerial Vehicle

LUO Chen[1], *LIU Ming*[1], *ZHANG Yi-ying*[2], *SUN Zhi-hua*[1], *TANG Zhi-hui*[1], *LU Feng*[1]
(1.Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Advanced Corrosion and Protection for Aviation Materials, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 2.Tianjin Key Laboratory for Civil Aircraft Airworthiness and Maintenance, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

ABSTRACT: The damage of composite materials in airframe structures of long endurance unmanned aerial vehicle under service condition was discussed from effects of environmental factors on composite materials, influences of high aspect ratio structure, etc. Based on research status at home and abroad, the main demand in researching influences of environmental factors on composite materials in the airframe structures of long endurance unmanned aerial vehicle were summarized. Suggestions for future research works were put forward, including: select the carbon fiber reinforced resin matrix composite materials and coatings system in the airframe structures of long endurance unmanned aerial vehicle as research objects, carry out exposure testing along with the unmanned aerial vehicle and laboratory simulation accelerated testing, study the change of mechanical properties of the composite materials under the co-effect of environment and load, and identify the damage rules of the typical composite materials in the airframe structures.

KEY WORDS: composite materials; damage; environmental factors; load; coatings

收稿日期：2017-08-30；**修订日期：**2017-10-16
基金项目：国家自然科学基金资助项目（51201157）；国防科技工业技术基础科研项目（JSHS2015205C002）
作者简介：骆晨（1984—），男，北京人，博士，高级工程师，主要研究方向为环境试验与观测、铝合金腐蚀与防护等。

自从20世纪60年代美国在越南战场上大量使用无人侦察机以来，无人机的发展受到了各个国家的普遍关注。1982 年 6 月，在著名的贝卡谷地战役中，以色列用自制的“侦察兵”、“猛犬”等无人机，收集了叙利亚的火力配置和战场情况，取得了突出的战果，引起了各国的震惊。在20世纪90年代的海湾战争中，多国部队使用多种无人机成功地执行了侦察、战场损伤评估、火炮校正和人员搜救等任务。据统计，在沙漠风暴行动中，美军仅“先锋号”无人机就出动 30 多架次，飞行 1011 h[1]。可以说，不接触的精确攻击在作战过程中已经成为现实，无人机已经成为现代战争中各军兵种不可缺少的武器装备。

长航时无人机是指续航时间为十几小时、几十小时乃至几天的无人驾驶空中飞行器。它可以完成巡逻、监视、情报侦察、电子对抗、新武器鉴定、对地攻击乃至空中打击等多种形式任务。由于这种无人机的飞行时间特别长，也常被称为“大气层人造卫星”。长航时无人机一般可分为两种，即中空和高空长航时无人机。中空长航时无人机的飞行时间多在 12 h 以上，其中飞行时间在 10~30 h 范围的占 93%左右，30~50 h 范围的约占 7%，比如典型的中空长航时无人机 RQ-1L“捕食者”的最大续航时间就在 40 h 左右。高空长航时无人机的飞行时间多在 24 h 以上，其中飞行时间在 12~20 h 范围的约占 6%左右，20~80 h 范围的约占 62%，120 h 以上的占 31%左右。从当前长航时无人机的发展情况可以看出，高空长航时无人机是主要发展方向，且飞行高度和续航力将得到不断提高，续航时间由几天增加到几个月，甚至 1 年，日历寿命将达到 30 年，飞行总小时数达到 8000 h。

1 损伤分析

长航时无人机在机体结构设计中最大的特点是采用了大展弦比复合材料结构机翼。除了环境因素对复合材料本身的作用，大展弦比结构也对长航时无人机机体结构复合材料损伤的发生和发展带来了影响。

1.1 环境因素对复合材料的作用

为了满足长时间飞行的要求，长航时无人机需要质量轻的机体结构。与传统金属材料相比，复合材料具有比强度和比刚度高、抗疲劳性能好的特点，应用于飞机机体结构当中可以实现结构减轻 25%~30%[2]。同时，复合材料本身具有可设计性，在不改变结构质量的情况下，可根据飞机的强度、刚度要求进行设计。因此，复合材料大量用于长航时无人机机体结构，尤其是机翼和尾翼等部件，但复合材料的应用也存在着一些问题和不足。

1）复合材料的基体和增强体均具有吸湿性，能吸收环境中的水分发生膨胀[3]，致使机翼质量增加，在环境干燥时又释放水分达到与环境湿度的平衡。这种湿度的周期变化使复合材料的最高使用温度和结构压缩性能严重降低。

2）长航时无人机在执行任务过程中反复经历昼夜更替，机翼表面白天受到太阳辐射的作用升温，夜晚降温。树脂基体和碳纤维增强体的热膨胀系数不同，周期的温度变化将减小基体和增强体之间的界面结合力，对复合材料的完整性产生不利影响。

3）大气温度的垂直分布为由地表附近向上递减，直至高度 14 km 的对流层顶，再向上则又递增。长航时无人机的主要工作高度为 9~17 km，这使其长期处于低温环境中。树脂基体在长时间的低温环境中脆性升高，韧性减弱。

4）从地面到 25 km 的长航时无人机飞行高度层中，臭氧层对紫外辐射有不完全的吸收，吸收率随高度的升高而减小。高度越高，透过臭氧层的紫外辐射越向短波长、高能量的 UV-C 波段移动，即从能量分布来讲，高能量紫外辐射所占比例越大。长时间太阳辐射造成树脂基体的分解，使复合材料在寿命期内性能退化甚至失效。

另外，长航时无人机机体结构复合材料表面涂覆了防雷击喷铝条（包括封闭工艺）、底漆有机涂层、抗雨蚀涂层等多种涂层。这种多组元体系在长时间低温、强紫外辐照以及高空-地面温度交变的条件下容易出现界面结合强度降低的现象，从而产生龟裂、起泡等缺陷。缺陷进一步扩展则可能引起复合材料表面损伤或者导致涂层剥落，使复合材料失去保护直接暴露于环境中。

因此，在长航时无人机服役过程中，湿度、温度、紫外辐照等环境因素的综合作用使机体结构复合材料产生损伤，导致结构尺寸改变和力学性能降低，甚至诱发飞行器事故。

1.2 大展弦比结构的影响

除了大量采用碳纤维增强树脂基复合材料外，为提高飞行性能，长航时无人机在布局上普遍选用大展弦比机翼（通常展弦比大于 5）来增加飞机的升阻比（如图 1 所示），增大航程和延长续航时间。例如，美国的“全球鹰”和“暗星”长航时无人机的展弦比分别达到了 25 和 14.83（改进型“全球鹰”RQ-4B 飞机机翼翼展长达 39.9 m，长于波音 737 飞机的机翼[4]）。这种大展弦比机翼在受到气动载荷时会产生很大的上翘和扭转变形，机翼根部弯矩大[5]，上壁板容易发生受压屈曲。柔性机翼的这种静气动变形还会与湿度、温度、紫外辐照等环境因素产生耦合作用，诱发复合材料损伤、失效，影响长航时无人机的飞行安全。

a RQ-4A 无人机

b RQ-4A 无人机机翼

图 1　美国 RQ-4A“全球鹰”无人机及其机翼[4]

2　国外研究现状与发展趋势

早在 2005 年美国防部就发布了《2005—2030 年无人机系统线路图》[6]，并每两年发布一次，列出以后 25 年内开发无人机系统的技术目标，对未来无人机采用的新技术、可能实现的能力等进行规划。其中明确强调“优先发展联合无人作战系统”，即由空军和海军两个无人作战飞机计划合并产生，以后无人机将朝着适用于多兵种复杂环境作战需求的方向发展，这也就对无人机机体结构复合材料适应环境的能力提出了更高要求。

ACG、Hexcel、Cytec 等公司先后研制出适用于各种飞行状态的复合材料预浸料。对于飞行马赫数不高的无人机，耐高温要求相对较低，一般应在 80~100 ℃之间，可以使用中温固化环氧预浸料，如 ACG 公司的 MTM28、MTM49，Hexcel 公司的 F155、913、916。另外还有针对低成本的热压罐外固化预浸料，如 Zephyr 太阳能无人驾驶飞行器的机翼和机身采用 ACG 的 MTM45-1 增韧环氧基碳纤维预浸料。这种预浸料不需要使用热压罐，可以在低于 80 ℃的温度下真空袋固化，并通过 180 ℃的后处理工艺实现全部性能。关于环境因素对复合材料的作用，国外针对复合材料在各种服役条件中的性能数据和损伤规律已经进行了大量的积累和研究，并形成了相应的复合材料力学性能数据库。在实验室内研究了湿度、温度、化学介质、紫外辐射等环境因素对复合材料力学性能的影响，制定了一系列实验室试验评价方法，为复合材料的应用提供了重要的技术基础。

3　国内研究现状及目前存在的问题

国内北京航空材料研究院研制的 3231、3234 等为中温（120~130 ℃）固化的改性环氧树脂基体，具有良好的流变性、自粘性、悬垂性和在室温下较长的暴露期。另外，LT-01、LT-03 等高温环氧树脂预浸料体系分别配合 T300 和 T700 纤维已用于无人机的研制。总体来说，我国军用无人机研制开发起步较晚，相关的复合材料应用研究基础较薄弱。关于环境因素对复合材料的影响研究主要有以下几方面：探讨了碳纤维环氧复合材料与航空铝合金、镁合金、钛合金和钢在腐蚀性环境中的电偶腐蚀行为和机理，建立了碳纤维环氧复合材料与金属电偶腐蚀的防护和控制方法[7-14]；开展了典型复合材料在自然环境中的户外暴露，积累了复合材料在自然环境作用下的力学性能变化规律[15]；研究了复合材料在湿热环境以及液压油、润滑油、煤油、清洗剂等化学介质中的力学性能和化学成份变化，建立了合理快速的实验室加速老化方法[3,16-17]；研究了复合材料在自然环境中冲击损伤阻抗的劣化规律，以及受到预冲击损伤的复合材料在自然环境中损伤容限的变化规律。

具体在长航时无人机机体结构复合材料在服役环境中的损伤研究方面，尚存在以下不足。

1）尚未开展针对长航时无人机服役条件下复合材料损伤规律的研究。例如，在材料研制和选用过程中，开展了国军标规定的－55~150 ℃范围内的力学性能试验，即从标准试验的角度出发研究了复合材料的损伤问题，而用于制造机翼的复合材料长时间处于高空低温环境中，材料在经历长时间低温和温度反复变化后的性能试验尚未开展。

2）重视复合材料、涂层本身性能的研发，而忽略了材料之间的组合对材料性能发挥的影响。例如复合材料表面涂覆防雷击喷铝条（包括封闭工艺）+有机涂层，在长时间低温、强紫外辐照以及高空-地面温度交变的条件下，材料之间膨胀系数的差异是否会在材料界面诱发缺陷从而引起复合材料表面损伤尚不得知。

3）偏重于考察单项环境因素对复合材料的老化作用，较少开展多项环境因素和载荷因素耦合作用对复合材料影响的研究。

4　结语

探讨了长航时无人机机体结构复合材料在服役

环境中的损伤，以及相关研究方面存在的问题。机体结构面临飞行使用环境和地面停放服役环境的影响，即湿度、温度、紫外辐照等环境因素综合作用使机体结构复合材料产生损伤，导致结构尺寸改变和力学性能降低。建议未来以长航时无人机机体结构典型碳纤维增强树脂基复合材料和涂层体系为主要研究对象，开展跟随无人机的暴露试验和实验室模拟加速试验，研究复合材料在环境和载荷耦合作用下的力学性能变化，确定机体结构典型复合材料的损伤规律，并以此研究成果作为长航时无人机机体结构合理选材和及时维护的依据和指导，避免设计失误。

参考文献：

[1] 李怡勇, 沈怀荣, 高飞. 发展高空长航时无人机初探[J]. 飞航导弹, 2005(8): 16-20.

[2] 石庆华, 曹正华. 无人机复合材料设计/制造关键技术[J]. 航空制造技术, 2010(24): 40-43.

[3] 张晓云, 曹东, 陆峰, 等. T700/5244 复合材料在湿热环境和化学介质中的老化行为[J]. 材料工程, 2016, 44(4): 82-88.

[4] 程文礼, 邱启艳, 赵彬. 无人机结构复合材料应用进展[J]. 航空制造技术, 2012(18): 88-91.

[5] 李爱军, 沈毅, 章卫国. 发展中的高空长航时无人机[J]. 航空科学技术, 2001(2): 34-36.

[6] 裴迎军. 美军无人机现状、发展趋势及我军应对对策[C]// 2006 中国无人机大会论文集. 北京: 中国航空学会, 2006: 43-47.

[7] 陆峰, 钟群鹏, 曹春晓. 大气环境条件下复合材料与金属电偶腐蚀及控制方法研究[J]. 材料保护, 2002, 35(12): 19-22.

[8] 陆峰, 张晓云, 汤智慧, 等. 复合材料对 LY12CZ 铝合金 C-环应力腐蚀性能的影响[J]. 材料工程, 2003(7): 3-6.

[9] 陆峰, 孙志华, 钟群鹏, 等. 碳纤维环氧复合材料对铝合金应力腐蚀性能的影响[J]. 航空材料学报, 2003, 23(1): 44-48.

[10] 陆峰, 钟群鹏, 曹春晓. 碳纤维环氧复合材料与金属电偶腐蚀的研究进展[J]. 材料工程, 2003(4): 39-43.

[11] 陆峰, 张晓云, 汤智慧, 等. 炭纤维环氧复合材料腐蚀行为的研究[J]. 材料工程, 2004(4): 16-19.

[12] 陆峰, 汤智慧, 张晓云. 先进复合材料的腐蚀及与金属偶接的相容性原则[J]. 装备环境工程, 2004, 1(4): 26-29.

[13] 陆峰, 张晓云, 汤智慧, 等. 碳纤维复合材料与铝合金电偶腐蚀行为研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2005, 25(1): 39-43.

[14] 张丹峰, 戚佳睿, 李艳丽, 等. 2B06 及 7B04 腐蚀损伤规律研究[J]. 环境技术, 2015, 33(2): 23-24.

[15] 刘明, 孙志华, 张晓云, 等. 复合材料自然环境老化试验方法[C]// 第十八届玻璃钢/复合材料学术年会论文集. 北京: 中国硅酸盐学会, 2010: 82-85.

[16] 刘建华, 曹东, 张晓云, 等. 树脂基复合材料 T300/5405 的吸湿性能及湿热环境对力学性能的影响[J]. 航空材料学报, 2010, 30(4): 75-80.

[17] 曹东, 张晓云, 陆峰, 等. 先进复合材料 T300/5405 综合环境实验谱的研究[J]. 材料工程, 2014(7): 73-78.