



# 无人机复合材料 设计 / 制造关键技术

Key Technology of Composites Design and Manufacturing for UAV

北京航空制造工程研究所 石庆华 曹正华



石庆华

博士,高级工程师,毕业于北京航空航天大学飞行器设计专业,至今工作于北京航空制造工程研究所。目前主要从事树脂基复合材料新结构制造和研究开发工作,曾参与国防 973 基础项目和多项重点型号的技术攻关工作。发表文章 15 篇,获得部级科技进步一等奖 1 次。

将复合材料直接应用于无人机结构上对减轻空机身重量、增加有效载荷、提高安全性和隐身性具有重要的作用。纵观国外无人机(包括中、高空无人侦察机、无人作战飞机等),无一例外地大量使用了复合材料结构,有些甚至是全复合材料结构,因此以复合材料为核心的无人机结构设计 / 制造技术是影响无人机发展的关键技术之一。

高空长航时无人机平台是我国急待发展的重大军事装备项目。与金属材料相比,树脂基复合材料具有结构重量轻、复杂或大型结构易于成型、设计空间大、比强度和比刚度高、热膨胀系数小等诸多优点。将复合材料直接应用于无人机结构上对减轻空机身重量、增加有效载荷、提高安全性和隐身性具有重要的作用。纵观国外无人机(包括中、高空无人侦察机、无人作战飞机等),无一例外地大量使用了复合材料结构,有些甚至是全复合材料结构,因此以复合材

料为核心的无人机结构设计 / 制造技术是影响无人机发展的关键技术之一。

## 国内外无人机 发展状况

无人机的发展有着较长的历史,世界上第一架无人机是英国于 1917 年研制成功的。据不完全统计,目前世界上 30 余个国家和地区已研制出了 50 多种无人机<sup>[1]</sup>,无人机型号超过 300 余种,有 55 个国家装备了无人机,但发展最快、水平最高的主要

是美国、以色列和俄罗斯。

美军拥有的近 20 种型号约 250 架无人机。机型主要包括陆军的“猎犬(Hunter)”、“指针(Pointer)”和“影子 200(Shadow200)”无人机,海军陆战队的“龙眼(Dragon Eye)”和“先锋(Pioneer)”无人机,空军的“全球鹰(Global Hawk)”和“捕食者(Predator)”无人侦察机以及 X-45、X-47 新型无人攻击机。另外,还包括其他几种小型的无人机系统,用于支援特种作战需求。

我国研制无人机已有 40 多年的历史,先后研制成功长空一号无人靶机系列、长虹高空高速无人侦察机、T-6 通用型无人机、Z-5 系列无人侦察机、BZK-002 型无人侦察机、ASN 系列无人机等。新近又开发了“翔龙”、“翼龙”无人侦察机、WZ-2000 无人侦察机和“暗箭”等型号无人机。研究的机构主要是大学、研究所和一些企业,包括北京航空航天大学、南京航空航天大学、西北工业大学、成都飞机设计研究所、成都飞机工业集团、贵航集团和株洲无人机公司。近年来,随着国家的重视,国内掀起了研制无人机的高潮。

## 复合材料在无人机上的应用

### 1 复合材料在无人机上应用的优点

与有人飞机相比,无人飞机(UAV)在机体结构设计中既不需要考虑机动飞行过程中人的生理承受能力限制<sup>[2-3]</sup>,也不需要因为特别强调人的生存性而对隐身及抗弹伤能力的结构和材料作特殊考虑。不过由于无人机机载设备技术先进,要求高,因此也要求无人机有相当好的机体结构性能,这使无人飞机在结构选材上具有一些有别于有人飞机的新特点。无人机遂行任务的特殊性,也使其成为采用新型结构材料的极好的平台。

和传统金属材料相比,复合材料

具有比强度和比刚度高、热膨胀系数小、抗疲劳能力和抗振能力强的特点,将它应用于无人机结构中可以减少 25%~30%。据统计,目前世界上各种先进无人机的复合材料用量一般占机体结构总重的 60%~80%,复合材料的总用量可达 90% 以上。在无人机上大量采用复合材料的益处是多方面的。

首先,复合材料本身具有可设计性,在不改变结构重量的情况下,可根据飞机的强度刚度要求进行优化设计;在设计制造技术上满足了大多数无人机在高度翼身融合结构所需的大面积整体成形这一特点。

其次,聚合物基复合材料具有特殊的电磁性能,改性后有希望满足无人机结构/功能一体的高隐身技术要求。复合材料的耐腐蚀性能,可满足无人机恶劣环境下长储存寿命的特殊要求,降低使用维护的寿命周期成本。

再次,复合材料易植入芯片或金导体形成智能材料、结构。

目前,复合材料在无人机领域已成为主要结构材料,如碳纤维复合材料、玻璃纤维复合材料、蜂窝夹层复合材料等。通常,无人机除机身的龙骨、梁和隔框、起落架等结构件采用铝合金外,机翼、尾翼及各种天线罩、护板、蒙皮等结构件均大量使用复合材料。另外,在中小型无人机上,木

质材料、轻型塑料、塑料薄膜等非金属材料也得到大量使用。复合材料的应用对无人飞机结构轻质化、小型化和高性能化已经起到了至关重要的作用。

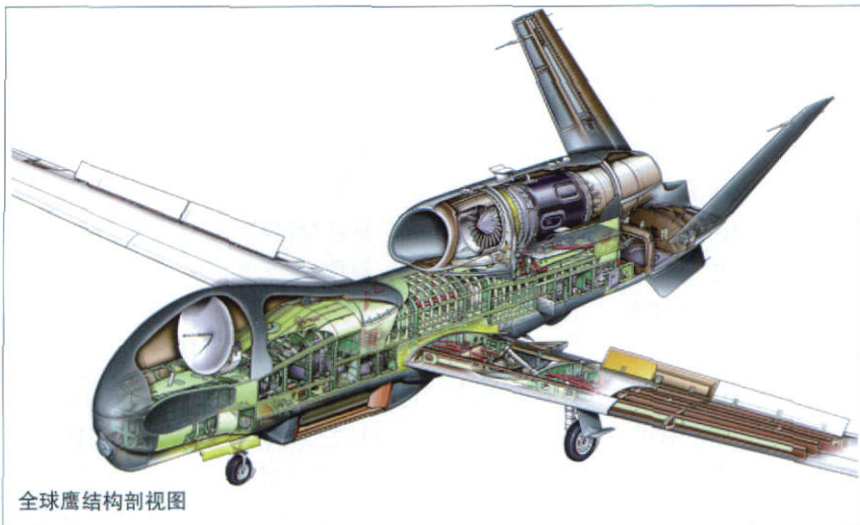
### 2 复合材料在高空长航时无人机上应用

“全球鹰”作为世界上最为著名的高空长航时无人侦察机<sup>[4]</sup>,是由美国诺斯罗普·格鲁门公司为美空军研制的,由沃特(Vought)飞机工业公司生产。其采用大展弦比下单翼,细长机身,V形尾翼,前三点起落架布局,机翼 1/4 弦长处后掠  $5^{\circ}54'$ ,V形尾翼(上反角  $50^{\circ}$ )。复合材料机翼长达 35m,复合材料占结构重量的 65%。沃特(Vought)飞机工业公司生产改进型“全球鹰”RQ-4B 飞机机翼时,使用了商用复合材料和环氧材料。新机翼更增至 39.9m,重约 1814kg。“全球鹰”的活动半径为 5500km,航程 26000km,续航时间达到 42h,实用升限 19.8km,整机起飞重量 11640kg,燃油重量 6727kg,超过总重量的一半,具有从美国本土起飞对全球任何地点进行战略侦察和战术侦察的能力,是目前世界上最先进的高空长航时无人侦察机,它代表了目前高空长航时无人机发展的水平和趋势。

中国“翔龙”无人机 2006 年珠海航展上首次亮相。由成都飞机工



“全球鹰”的复合材料天线罩



全球鹰结构剖视图

业公司制造,初期采用金属机翼,翼展 25m,机身长度 14.3m,巡航速度 750km/h,最大任务载荷 650kg,最大续航时间 9.3h。

可以看出:“全球鹰”无人机的航程是“翔龙”的 3 倍,翼展较“翔龙”多 10m,任务载荷多 250kg。比较国内、外高空长航时无人机各项性能指标,研究发现:影响我国无人机性能的关键是设计制造并使用大展弦比复合材料柔性机翼。根据使用环境(通常高空)和性能要求(通常续航时间大于 24h 和一定的任务载荷),高空长航时无人机需要携带尽量多的燃油(可以提高航程)和使用大展弦比柔性机翼(可以提高升力)。利用树脂基复合材料密度小、比强度、比刚度大和可剪裁的优点,可以设计出大展弦比柔性机翼;利用复合材料整体化设计/制造技术,可以在机翼上设置整体油箱,提高无人机的续航时间和航程。由此可见,无人机大展弦比复合材料柔性机翼整体化设计/制造技术是提高我国高空长航时无人机各种性能,特别是高空、长航时性能的关键技术之一。

### 3 复合材料在攻击无人机上应用

美国已经开始以 X-45A、X-47A 的概念验证基础上发展空/海军通用的无人战斗机。为了尽可能地降低结构重量,无人战斗机结构的一个

显著特点就是大量应用复合材料,且远远超过有人战斗机的应用水平。

波音公司 X-45A 翼展 10.3m,弦长 8m,空重 3640kg,搭载有效载荷的能力为 680kg。复合材料占 X-45A 结构重量的 45%。其机身由高速切削的铝合金龙骨、梁及隔框覆以复合材料蒙皮构成。将美国先进复合材料集团开发的 LTM45EL 长寿命机织碳/环氧低温固化预浸带采用铺层方式制造蒙皮、进气道及舱门,工装由 Janicki 工业公司提供。低温固化预浸料的固化应用了该公司的两个船形模具。该机身上部蒙皮约 9m × 3.7m,被铺成一个整体件,而下部蒙皮则被加工成两个 4.5m × 3.7m 的部分。喷管部分的上、下蒙皮将分别采用 Cytec 公司的 BMI-5250.4 碳纤维/双马树脂制造。它的固化温度范围处于 177℃ ~ 204℃,使用温度在 59℃ ~ 204℃ 之间。依据美国国防部合同,波音获准放弃 X-45B 的开发,将该项目的有效载荷、航程及目标并入目前正在开发的 J-UCAS 计



X-45A 无人机

划中的 X-45C, X-45C 弦长 11m,翼展 14.6m,飞行重量达 15900kg。

## 无人机用复合材料设计/制造关键技术

### 1 无人机用复合材料设计标准制定<sup>[5]</sup>

无人机不需要考虑人的生理承受能力,为充分发挥复合材料的性能优势,可以设计比有人机更低的安全系数,为了达到更高的灵活机动性能,无人机可以设计较大的过载荷系数,达到 15~20g;同样因为不需要考虑人员因素,无人机可以有更大的设计空间,采用更为先进的气动构型,因此要研究制订一些新的设计规范和计算准则,以指导无人机复合材料结构的设计、计算、试验和验收鉴定等。

### 2 复合材料机翼气动、结构设计难点

以高空长航时无人机为背景,国内已经开展了大展弦比柔性复合材料机翼的相关研究,但这些研究对柔性复合材料机翼还缺乏足够的认识,没能有效揭开结构、强度、气动、控制之间强烈的耦合关系,更谈不上有效利用大展弦比复合材料机翼的柔性来提高飞机的性能。



X-45A 的铝合金龙骨和框架

高空、超高空长航时无人侦察机工作在 20~30km 的高度上,空气稀薄,空气密度小于海平面空气密度的 8.4%,因此研究这种低雷诺数气动特性和升力之间的关系,是提高机翼升力的途径之一。

大展弦比复合材料柔性机翼,在飞行载荷作用下,当有一个外部激励时,必将产生一个非线性的结构变

形,同时结构的非线性变形又对气动产生影响,形成结构和气动力的耦合作用,这种耦合影响容易导致高空长航时无人机气动发散,无法收敛导致机翼失效。因此,采用大展弦比机翼的高空无人机必须解决这种柔性机翼的飞行控制问题。

大展弦比复合材料柔性机翼为轻结构,要满足结构具有最小重量和具最大的效率要求,往往要依靠综合结构优化设计技术。由于大展弦比复合材料柔性机翼设计的复杂性,这种综合优化设计需要在多个层次上进行优化设计,例如拓扑形状优化、尺寸优化,而且,这种优化是考虑复杂的气动弹性问题的有多种目标、多种约束性质、多种多级设计变量的综合优化设计技术。

### 3 大型复合材料复杂结构整体化制造变形

复合材料制造的一个突出的问题是不能类似于金属构件那样得到精确的几何或构型尺寸,特别是对于大型整体化复杂复合材料结构,往往可能因为一个较小的局部结构制造变形,最终会造成大型整体化复杂结构产生很大的变形,不能用于部件的装配。典型的大型复合材料复杂结构有高空长航时无人机大展弦比柔性复合材料机翼、无人攻击机翼身融

合体大型复合材料整体构件等。在研究这些结构制造过程中,关注温度分布不均、压力分布不均匀、结构非对称等因素对变形的影响并确定影响变形的关键因素、提出变形控制方法和提供对变形进行补偿的各种措施,以便合理而有效地解决大型复杂结构制造变形问题。

### 4 隐身复合材料结构设计 / 制造技术

隐身是现代战机要求的一项高科技尖端技术,无人机由于经常出现在敌方的防空和雷达监测的空域中,对隐身提出了更高的要求。现代隐身技术主要有材料隐身、涂层隐身、等离子体隐身、结构细节设计隐身等手段。无人机结构多为复合材料夹层结构,在结构细节设计隐身的基础上,作者认为可以优先开展复合材料泡沫或蜂窝夹层结构隐身设计和制造技术研究,在细节设计和结构设计、制造层次上解决无人机复合材料隐身技术。

### 5 RTM 和 RFI<sup>[6]</sup> 成型复合材料构件力学性能评估技术

低成本、高效费比是无人机的显著特点。采用整体化成型技术对于减少复合材料部件结构数量、降低使用和维护费用、节约成本、提高效率具有重要的作用。近年来,工程上,

已经能够用 RTM 和 RFI 成型工艺方法制造复合材料构件,但是国内尚没有将这种成型工艺方法制造复合材料构件批量应用到具体型号上。究其原因,作者认为是对 RTM 和 RFI 成型复合材料结构件(如编织复合材料构件)设计、力学性能、构型和力学性能之间的关系尚未认识清楚。国内尽管部分对 RTM 和 RFI 成型复合材料构件力学性能进行了研究,但这种研究是不系统和不完整的。因此进一步深入研究评估 RTM 和 RFI 成型复合材料结构件力学性能是实现低成本、高效费比无人机结构平台的设计 / 制造的有力保证。

另外,还有低成本制造技术(低成本材料、自动化制造、结构连接技术等)、快速复合材料无损检测技术、智能材料设计 / 制造技术等。

## 结束语

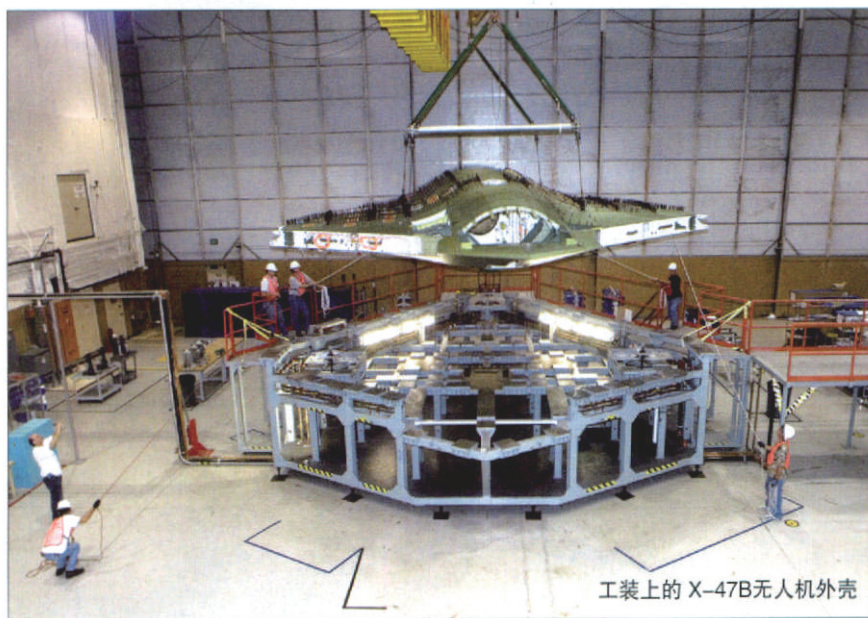
先进树脂基复合材料在国外无人机上得到了广泛的应用,为复合材料的发展迎来了崭新的发展机遇。国内先进树脂基复合材料在无人机上的应用才刚刚开始,积极开展复合材料在无人机上各种关键技术的研究和应用,必将推动无人机各项性能指标迈上一个新台阶。

## 参考文献

- [1] 《世界无人机大全》编写组. 世界无人机大全. 北京: 航空工业出版社, 2004.
- [2] 李爱军, 沈毅, 章卫国. 发展中高空长航时无人机. 航空科学技术, 2001 (2): 34-36.
- [3] 邱玉鑫, 程娅红, 胥家常. 浅析高空长航时无人机的气动研究问题. 流体力学试验与测量, 2004, 18 (3): 1-3.
- [4] Unmanned aerial vehicles spur composite use. Reinforced plastics, 2004.
- [5] 陈绍杰. 复合材料与无人机. 航空制造技术, 2003 (12): 31-33.
- [6] 胡泽. 无人机结构用复合材料及制造技术综述. 中国无人机大会论文集, 2006, 北京.

(责编 侧卫)

2010 年第 24 期 · 航空制造技术 43



工装上的 X-47B 无人机外壳