

# 无人机结构复合材料应用进展

## Application Progress of Composites for UAV

中航工业北京航空制造工程研究所 程文礼 邱启艳  
沈阳飞机工业(集团)有限公司 赵彬



程文礼

工程师,2007年毕业于北京航空航天大学材料科学与工程学院,获工学硕士学位。现就职于中航工业北京航空制造工程研究所,从事飞机复合材料制造与研究工作。

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以及可设计性强、易于整体成型等特点,将其应用于无人机结构可以减重 20%~30%<sup>[1]</sup>。国外无人机 UAV (Unmanned Aerial Vehicles),包括无人作战飞机UCAV (Uninhabited Combat Aerial Vehicles)均无一例外地大量采用复合材料。如“捕食者”除机身大梁外全机由复合材料制成;“暗星”全机采用复合材料外加吸波涂层,满足其高隐身性能的要求;X-47B无人作战飞机

先进树脂基复合材料在国外无人机上得到了广泛应用,国内先进树脂基复合材料在大型无人机上的应用才刚刚开始,与国外先进技术相比还存在不小差距,为满足未来无人机的高空、长航时、功能性、经济性等各种高性能需求,国内应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。

90%机体表面由碳纤维复合材料覆盖;X-37无人空天飞机机体结构采用双马来酰亚胺预浸料制造。此外如以色列的“先锋”和“搜索者”、美国的“鹰眼”、英国的“不死鸟”和南非的“秃鹫”等许多著名的无人机均为全复合材料飞机,且多数以碳纤维复合材料为主并混杂玻纤和芳纶等复合材料<sup>[2]</sup>。

### 几种典型无人机复合材料应用

#### 1 高空长航时无人机复合材料应用

高空长航时无人机的典型代表是诺斯罗普·格鲁曼公司为美国空军研制的RQ-4“全球鹰”,这也是美国空军乃至全世界最先进的无人机之一。除机身主结构为铝合金外,其余均为复合材料制成,机翼、尾翼、发动机短舱、后机身采用碳纤维复合材料制造,雷达罩、整流罩采用玻璃纤维复合材料制造,复合材料的用量约为结构总重的65%(图1)。其中

复合材料机翼翼展长达35.4m,长于波音737的机翼。为满足弯曲刚度的要求,诺斯罗普·格鲁曼公司选用4梁式承扭盒结构,4根“工”形梁由Cytex公司提供的高模碳纤维织物/环氧预浸料制造。蒙皮为复合材料层压板结构,自身可以承载弯曲载荷,由单向带预浸料制造;翼展方向铺层占50%,其余铺层占50%,用于提供扭转刚度;翼内则为整体油箱,前后缘均为蜂窝夹层结构,采用Hexcel公司提供的Nomex蜂窝芯制造。所有机翼复合材料在铝模具上铺叠,121℃热压罐固化成型,梁和蒙皮分别固化后采用Hysol室温胶粘剂进行二次胶接,减少了紧固件用量并防止渗透,整个机翼分成3段,彼此之间采用机械连接<sup>[3]</sup>。

改进型“全球鹰”RQ-4B机翼增至39.9m,重约1814kg,是Vought达拉斯工厂交付的最长机翼(图2),其结构形式与RQ-4基本相同,但组

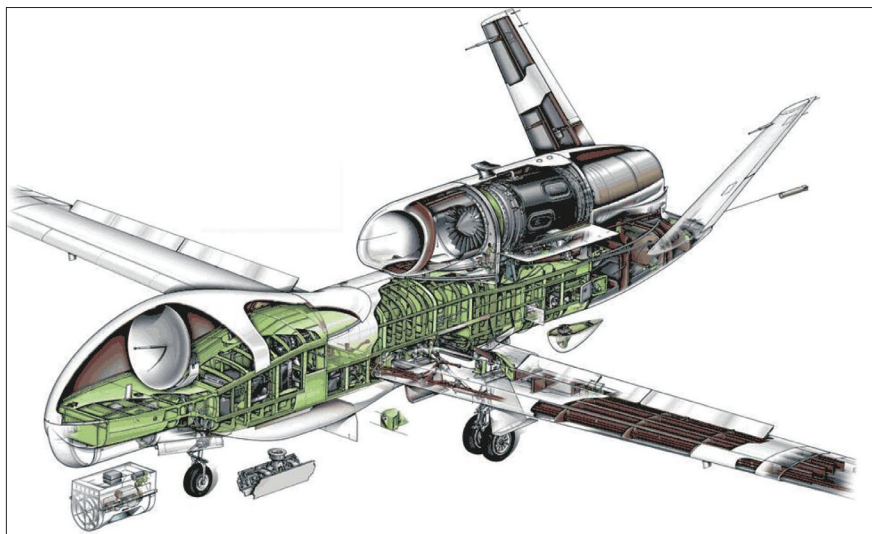


图1 RQ-4 “全球鹰”结构示意图<sup>[3]</sup>



(a) 机翼



(b) 翼尖

图2 RQ-4B “全球鹰”复合材料机翼及翼尖结构

合方式不同,并在一些区域增加了铺层以提高结构强度和刚度。整个机翼分为4段,两个大的翼盒在机身中心对接,两端各一个翼尖组合件(RQ-4机翼为3部分组成:一个15m长横跨机身的翼盒,两个10m长的外翼和翼尖组合件),两个复合材料结构在机身中线对接可以提高气动效率<sup>[3]</sup>。另外,在翼尖部分的制造采用了Radius Engineering公司开发的SQRTM(Same Qualified Resin Transfer Molding)技术。新设计的翼尖包含3个主要部分:一个承扭盒,一个内翼肋(用于连接翼尖和主

翼),还有一个翼尖帽型件(Tip-cap Closeout)。每个承扭盒均包含6根层压复合材料桁条,机翼前后缘和外翼肋组成一个整体结构。而原始的设计是每个承扭盒由两根蜂窝夹层结构桁条和多根翼肋组成,制造成本增加。利用SQRTM技术仅用3个模具就能完成左、右翼尖所有零部件的制备。其中,左承扭盒通过第1个模具制备,右承扭盒通过第2个模具制备,它们包括左、右内侧翼肋,左、右翼边帽型件以及帽型件底部用于覆盖检查孔的盖板。所有部件均采

用Cytec碳纤维/7714A环氧预浸料制造,碳纤维可以是M46J,AS-4或东丽T650织物。首先将零件和模具组合在一起,利用气动压力机提供的0.8MPa压力将预浸料压实,然后当固化温度达到121℃时,再通过RTM5000流控注射系统向模腔内注入少量的树脂产生0.6MPa的压力。用这种技术制造的复合材料纤维体积分数可达58%,孔隙率小于0.5%,所以通过SQRTM技术制造的翼尖能满足或超过诺斯罗普·格鲁曼公司的对“全球鹰”机翼性能的要求,其重量还比原来降低了5%。在早期的设计中,仅翼尖部分(位于机翼前端约3.3m的位置)就包含了12~14个热压罐成型的零件,利用SQRTM技术做到了简化制件结构,集成零部件和不使用热压罐,此技术帮助制造商大大降低了制备成本<sup>[4-5]</sup>。

## 2 中空长航时无人机复合材料应用

美国通用原子公司制造的“捕食者”MQ-1无人机的指挥官及合成部队指挥官进行决策提供情报支持的中空长航时无人侦察机。全机除主梁外,几乎全部采用复合材料,包括碳纤维、玻璃纤维、芳纶纤维复合材料以及蜂窝、泡沫、木块等夹层结构,用量约为结构总重的92%(图3)。机身大量采用碳纤维织物/Nomex蜂窝夹层结构加筋壁

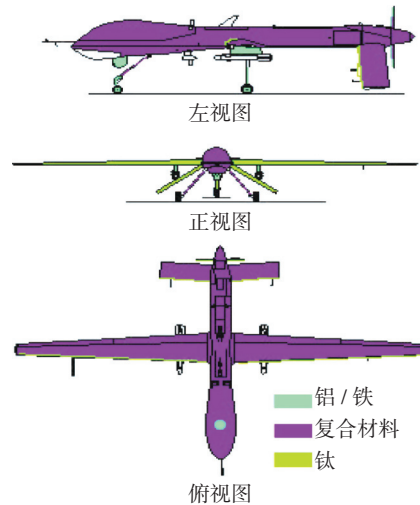


图3 “捕食者”MQ-1材料分布示意图

板,内部关键位置有碳纤维梁肋结构以保证足够的刚度,主要机体部分采用碳纤维/环氧预浸料手工铺叠/热压罐工艺制造,玻璃纤维复合材料用于雷达罩的制造,预浸料由数控裁床裁切,蜂窝芯型面由五轴数控切割机床加工。生产过程中借助激光投影设备以确保零件重复、精确生产,固化的复合材料层板采用机器人水切割技术切边。主梁以及尾翼梁、起落架支柱采用碳纤维织物闭模成型,并使用密封气囊确保足够的密实压力<sup>[6]</sup>。

改进的“捕食者”B即MQ-9是“捕食者”的加大型,又名“狩猎者”,2003年10月初首飞。主要机体采用碳纤维单向带预浸料及织物预浸料与Nomex蜂窝夹层结构制造。在机翼盒型梁顶端上采用了SPECIALTY MATERIALS公司生产的Hy-Bor<sup>®</sup> 碳纤维/碳纤维/环氧预浸料(Hy-Bor<sup>®</sup> (B4-MR-40/NCT301))。Hy-Bor<sup>®</sup> 预浸料是一种碳纤维和碳纤维组成的混杂预浸料,比单一的增强材料具有更高的弯曲和压缩性能,可以提高开孔强度,在考虑压缩应力的设计中还可以减少碳纤维的数量达到减重的效果,其特性可以根据碳纤维与碳纤维的比例进行剪裁设计。标准的Hy-Bor<sup>®</sup> 预浸料是采用三菱丽阳的MR-40石墨纤维和直径为0.1mm的碳纤维以及121~149℃固化的NCT301环氧树脂制成的。Hy-Bor<sup>®</sup> 预浸料还可以与其他任何商业化的石墨预浸料结合使用。

### 3 无人攻击战斗机复合材料应用

2011年2月首飞的X-47B(图4)是诺斯罗普·格鲁曼公司开发的一种低可探测的舰载无人空战系统(J-UCAS)。该无人机是世界上首架陆基和航空母舰都能使用的无人驾驶侦察攻击机,

可实现超音速飞行。全机80%的结构由GKN航宇公司设计制造,其中机身骨架结构采用钛合金和铝合金制造,机身蒙皮、机背口盖和活动舱门等采用复合材料结构,90%机体表面由碳纤维复合材料制造,外翼由铝合金部件和碳纤维/环氧复合材料蒙皮组成(采用碳纤维复合材料比铝合金减重20%~30%),每个机翼均装有副翼,并拥有高度集成的电子和液压管路。机翼设计还包括折叠功能,这样可以使飞机在航母上占有更小的空间<sup>[7]</sup>。

### 4 无人空天飞机复合材料应用

X-37 (Approach and Landing Test Vehicle, ALTV)太空无人飞机是波音公司制造的一种无人驾驶空天飞机,于2006年进行了无动力投放自由滑翔飞行试验,机体结构几乎全部采用复合材料制造,主要采用Cytec公司IM7/5250-4双马来酰亚胺预浸料体系和NASA兰利研究中心研发的IM7/PETI-5(苯炔基封端的聚酰亚胺)体系<sup>[8]</sup>,IM7/5250-4双马来酰亚胺预浸料固化温度为177~204℃,使用温度在59~204℃之间,而IM7/PETI-5聚酰亚胺体系工作温度可达232~260℃,高于目前的双马来酰亚胺体系,比一般的铝结构耐温高37.7℃,而且耐热性也超过了15000h,这种高温树脂体系的应用可以减少飞行器热保护层的用量以

减轻飞行器重量,机身是通过胶接技术制造的整体结构,大大降低了飞行器的重量(图5)。改进后的X-37B (Orbital Test Vehicle, OTV)在控制舵面上改用了耐高温的C/SiC复合材料,其他机体结构仍采用高温树脂基复合材料<sup>[9]</sup>。

## 无人机复合材料的发展现状

### 1 材料体系的发展现状

国外的ACG、Hexcel、Cytec等公司先后研制出适用于各种飞行状态的无人机复合材料预浸料,目前对于飞行马赫数不高的无人机,耐温要求相对较低,一般应在80~100℃之间,可以使用中温环氧预浸料,如ACG公司的MTM28、MTM49,Hexcel公司的F155、913、916和北京航空材料研究院的3231、3234等均为中温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<sup>[10]</sup>。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结构采用ACG的MTM<sup>®</sup>45-1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,并在180℃的后处理工艺实现其全部性能。而对于飞行速度较大的超音速无人机及无人空天飞机,则需要使用高温预浸料体系,如

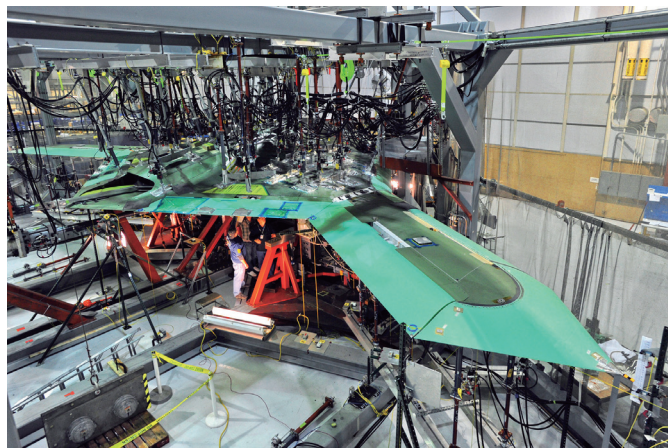


图4 X-47B机身结构验证测试

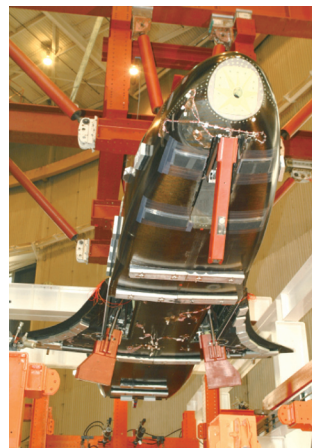


图5 准备试验的X-37 (ALTV)

X-37 机体采用的 Cytec IM7/5250-4<sup>[8]</sup>。国内北京航空材料研究院研制的 LT-01 及 LT-03 环氧树脂体系分别配合 T300 及 T700 纤维已用于无人机的研制。除纤维增强树脂复合材料外,无人机的舵面甚至机体还使用蜂窝、胶膜、泡沫塑料和泡沫胶等材料,对这些材料的选择也应符合设计和工艺要求。蜂窝的种类较多,但目前使用较多的是已商品化的 Nomex 蜂窝。泡沫夹层结构具有水密、漂浮性能和整体填充机翼、尾翼内部结构容腔的工艺特性,其作为芯材在无人机机体结构中的应用也较为常见。

## 2 大展弦比复合材料机翼设计技术

大展弦比机翼有两个显著特点:其一是根部的弯矩较大,上壁板的受压稳定性难以满足;其二是机翼扭转刚度差,翼尖的扭转变形大,容易发生副翼反效和颤振。因此要满足一定刚度要求的大展弦比复合材料机翼设计是机翼结构设计的难点之一。通常翼面结构较容易满足气动弹性对弯曲刚度的要求,但要满足扭转刚度和弯曲与扭转刚度比却比较困难。复合材料机翼设计其结构刚度和结构弹性分布可以通过不同的铺层角度和不同的层数设计来实现,如“全球鹰”RQ-4B 的改进型机翼;另外, NASA 研制的 Helios 太阳能无人机,翼展 75m,全翼分成 6 段,每段节点还装载有发电机载荷,是复合材料机翼设计中的成功典范之一。该机主要结构采用碳纤维增强环氧树脂复合材料制造,利用复合材料的非对称和非均衡铺层产生的耦合效应,把复合材料结构刚度和结构弹性设计完美结合起来。国内也开展了大展弦比柔性复合材料机翼的相关研究,如文献 [11] 提出一种适用于大展弦比机翼的新型混合式结构,即采用翼梁和夹层板的混合式结构,混合式结构充分利用梁式结构和夹层结构特点,可适当调配其刚度比,从而得到减轻重量的效果<sup>[11-12]</sup>。

## 3 复合材料整体化制造技术

复合材料整体结构是通过特定的设计和制造方法使结构在复合材料本身的最终成型过程中结为一体,复合材料热压罐成型整体制造工艺包括共固化、共胶接和二次胶接。目前无人机复合材料的制造,特别是UCAV 多半采用高度翼身融合的飞翼式总体布局,需要结构上的大面积整体成型,复合材料在设计和制造技术上恰恰具有便于大面积整体成型的特点。采用复合材料整体成型技术所使用的模具较复杂,只要模具能制造出来,其他问题便可迎刃而解。一般而言,整体成型中用到的模具较复杂,成本较高,因此要注意分体模和整体模及模具定位组合的合理设计,还要注意低成本模具材料和制造技术的应用<sup>[13]</sup>。然而,复合材料结构的整体化程度需要适度,否则容易增加制造过程中的质量风险,造成后期维修的困难,反而不利于成本的降低。除整体复合材料壁板成型外,无人机还大量采用夹层结构,包括泡沫和蜂窝夹层结构,特别是小型无人机。蜂窝夹层结构制造方法有共固化和二次胶接,共固化工艺中,树脂流动性太好会造成流胶过多导致面板贫胶,成型压力过大则容易造成上面板凹陷,蜂窝失稳,滑移;压力较小容易造成面板缺陷及弱胶接。为了有效控制成型质量,须根据结构及材料体系来合理制定工艺。二次胶接中骨架零件的配合间隙,集中载荷,不同材料胶接过程产生的热应力以及楔形件的蜂窝滑移等问题均需要考虑。国内对复合材料整体制造技术已经展开研究,一些技术已用于航空零件生产,蜂窝夹层结构的二次胶接技术研究比较成熟,但共固化及其相应的预浸料技术还处于研究阶段。

## 4 复合材料低成本制造技术

低成本、高消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、提高效率具有重要作用。但高成本高能耗的热压罐又大大提高了复合材料的成本,目前业界主要从两个方向寻求解决办法:一是开发热压罐外(Out of Autoclave)固化预浸料体系,二是开发低成本液体成型技术,如 RTM、RFI、VARI 等,国外这些技术已经发展得比较成熟。目前国内复合材料构件仍以热压罐成型为主,一些研究单位也开发了低压固化材料体系及液体成型树脂体系,目前还处于研究阶段。国内也已经能够用 RTM、RFI、VARI 成型工艺方法制造复合材料构件,但对预制体结构与性能的关系研究还不够完整,因为树脂体系的要求较高,所以目前国内航空级树脂体系相对较少。采用的固化方法如电子束固化、超声波固化、X 射线固化也将成为低成本制造的方法。低成本的另一途径是研究发展复合材料自动化制造技术,如自动铺带技术(ATL)、自动纤维铺放技术(AFP)、纤维缠绕和拉挤技术,检测上采用 C 扫描等快速无损检测方法可以大大更加生产效率,降低劳动力成本,也减小了人为因素的影响,提高产品质量的一致性。

## 结束语

先进树脂基复合材料在国外无人机上得到了广泛应用,国内先进树脂基复合材料在大型无人机上的应用才刚刚开始,与国外先进技术相比还存在不小差距,为满足未来无人机的高空、长航时、功能性、经济性等各种高性能需求,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,包括原材料的开发、结构设计、整体成型、低成本制造等技术,将促进我国无人机行业的快速发展。

本文共有参考文献 13 篇,因篇幅有限,未能一一列出,如有需要,请向本刊编辑部索取。(责编 深蓝)