

# 复合材料在国外海军航空器上的应用发展进程

## Application Development of Composites in Foreign Naval Aircraft

驻沈阳地区航空军代表室 郭 健

海军航空器飞机结构的复合材料化已成必然的趋势,各类飞机结构的主体材料必将是复合材料而非金属已是不争的事实,这一趋势将从根本上改变飞机结构设计和制造上的传统,也将改变航空工业产业链的重组进程,能否适应这一重大变革,势必影响和决定一个国家航空制造业的成败兴衰

复合材料自问世以来就一直在航空工业中发挥着重要作用,具有比强度高、比模量高、力学性能可设计性强以及耐腐蚀性能好等一系列优点,是轻质高效结构设计最理想的材料。国外对复合材料在海军航空器上的应用非常重视。装备于海军的军用航空器用于在海洋上空执行战斗和保障任务,其要求是:适应海洋环境,抗腐蚀能力强;导航设备与火控系统先进,具有全天候作战能力。复合材料在国外海军航空器上应用具有如下突出的优点:优良的力学性能;优异的抗疲劳和耐腐蚀性(可耐酸、碱、海水侵蚀);可实现20%~30%的结构减重;优良的声、磁、电性能(透波、透声性好,无磁性,介电性能优良);其结构有利于整体设计和制造,可在提高飞机结构效率和可靠性的同时,采用低成本整体制造工艺降低制造成本<sup>[1]</sup>。近20年来,复合材料原材料和成型技术得到飞

速发展,特别是复合材料在几大主要机型(如F-35,F-18)中的应用成功,更加增强了复合材料在海军航空器中的应用前景。

### 复合材料在国外海军航空器上的应用进程

自20世纪60年代初以来国外开始在军用飞机上研究使用复合材料,经过多年的努力,复合材料对海军军用飞机的轻型化和提高机动性能起到了关键作用。表1为国外海军航空器上复合材料应用的具体情况<sup>[2]</sup>。

由表1可以看出,随着海军军用飞机先进性的提高,复合材料的用量也在增加,这充分说明复合材料的用量已成为衡量军用飞机先进性的重要标志。

在海军航空器上,玻璃纤维复合材料主要应用在有特殊电性能要求的功能结构件中,如机头罩、天线罩

和雷达罩等。在美国海军中扮演着极其重要角色的E-2“鹰眼”系列舰载预警机自20世纪60年代初问世以来便在雷达罩上使用玻璃纤维复合材料,进入21世纪后,为了满足美国海军网络中心站的迫切需要,美国开始着手发展更加先进的“鹰眼”舰载预警机,命名为E-2D预警机,如图1所示,其特点是选用玻璃纤维复合材料制造新型八桨叶NP2000螺旋桨,取代了E-2C上的钢制材料四叶螺旋桨。新型螺旋桨不仅振动更小、噪声更低,而且减少了零件数目,降低了维修费用,可以在机翼上直接更换单个桨叶,利用维修设备在飞机上就可以平衡螺旋桨。

碳纤维具有优良的比强度、比刚度等力学性能,70年代碳纤维复合材料首先应用在军用飞机一些受力较小的结构件上,如舱门、口盖、整流罩、副翼等,之后逐渐过度到垂尾、平尾等受力较大的尾翼部件上,今天已

表1 国外海军航空器上复合材料应用的具体情况

机种	首飞年份	复合材料用量 /%	应用部位
F-14	1970	5	水平安定面
F/A-18	1976	13	机翼、尾翼等
AV-8B	1982	26	机翼、前机身、尾翼等
F/A-18E/F	1998	22	机翼、尾翼、进气道等
“阵风”	1991	24	机翼、尾翼、鸭翼等
“台风”	1994	40	机翼、机身、尾翼蒙皮等
F-35	2000	35	机翼、机身、尾翼、进气道等

应用到机身、机翼等主要受力件中。1970年,美国海军首先将硼复合材料应用在F-14的水平安定面上,用以实现能够在航母上起降,短距离起飞及着舰等迫切目的,该机种是美国第三代战机里第一个装备海军使用,也是战后第三代战斗机最早服役的机型,令美国海军获得了极大的领先优势,此后各国军机尾翼一级部件均为复合材料,此时复合材料约占结构总重量的5%。1974年,美国海军提出轻量、低价和可担任多重任务的战斗机VFAX研究计划。1976年美国海军率先研制了F-18的复合材料机翼,并于80年代初进入服役,把复合材料用量提高到了13%左右,国外将其称为复合材料发展史上一个里程碑事件,此后世界上各国新研制的军机机翼以下的部件几乎无一例外

均是复合材料<sup>[3]</sup>。F-18的改进机型E/R型机体结构使用复合材料的比例已经增加至22%,包括中机身与后机身、主翼前缘、后缘襟翼与进气道。在80年代,美国麦道飞机公司又将碳纤维复合材料应用在“AV-8B”飞机的机翼、前机身和尾翼上,该飞机是美国海军陆战队的垂直/短距起落攻击机,全机所用碳纤维的重量约占飞机结构总重量的26%,使整机减重9%,有效载荷比AV-8A飞机增加了1倍。图2为AV-8B机体制造材料图标。

“AV-8B”飞机机体大量使用复合材料,此后机身上便开始应用复合材料,如F35B/C、“台风”等。F-35B是短距离起降/垂直起降机种,用于装备海军陆战队,F-35C是舰载机型,是美国海军第一代隐身舰载战

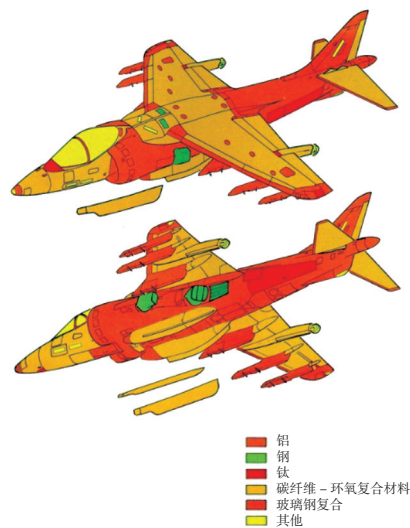


图2 AV-8B机体制造材料图标

机。F35超过35%机身结构件和机体表面都使用碳纤维复合材料,其采用了整体式的复合材料结构,通过法兰盘直接“贴身”地焊在机身两侧,没有一个紧固件,不仅大大地减轻了结构重量,也大大减少了零件数量。

法国阵风战斗机是达索公司为法国空海军研制的超音速战斗机,2002年在法国海军部队服役。“阵风”战斗机机身结构大量采用复合材料常规半硬壳式结构,机身的50%采用碳纤维复合材料。复合材料的广泛应用有利于飞机减重和防腐,这也使“阵风”具有7000h的全寿命飞行,换种说法就是“阵风”在30年内都具有可靠的性能。欧洲的“台风”是公认的三代半战斗机,采用了40%的复合材料。目前海军的“台风”战机正在研制中,“台风”战斗机表面的70%都是碳纤维复合材料,只有15%是金属材料。

复合材料在直升机上的应用超过在固定翼机上的应用,目前可达50%~80%的水平。如美国垂直起落倾斜发动机后又可高速巡航的V-22,共用复合材料3t,占结构总质量的50%;欧洲最新研制的虎式(Tiger)直升机复合材料用量达80%。

无人机上复合材料的应用超过



图1 E-2D舰载预警机

有人机,一般在 50%~80% 之间。重量轻、小型化、长航时、高隐蔽和高安全型等特性是无人机区别于有人机的显著特点和技术发展方向,在材料方面复合材料的耐腐蚀性能可满足无人机在恶劣环境下长储存寿命的特殊要求。目前美国已经在 X-45A、X-47A 的概念验证基础上发展海军通用的无人战斗机,并将其列为未来 25 年优先发展的项目。X-47A 是一架高度翼身融合的无尾飞翼布局飞机,整个机体除一些接头采用铝合金外几乎全部采用了复合材料,堪称全复合材料飞机。图 3 为 X-47 无人战斗机作战想象图及工装上的外壳。由于无人机的生产批量大,复合材料的用量大,故有人估计至 2020 年其复合材料的耗量将可与有人机相匹

敌,形成未来复合材料应用的大户。

图 4 为复合材料在国外海军航空器上的用量情况,可以看出,各类飞机上的复合材料,由小到大,由少到多,由弱到强,由结构到功能,其用量越来越多。飞机结构正在一步一步地走向复合材料化。

### 相关材料与制造技术的发展趋势

复合材料在国外海军航空器上的应用朝着高性能、低成本以及先进的自动化技术方向发展,先进复合材料指的是采用高性能增强材料增强的环氧、双马等树脂基复合材料。

增强材料主要有玻璃纤维、碳纤维、碳纤维、芳纶纤维等。20 世纪 50 年代末美国首先成功研究高强度玻

璃纤维,并在 1960 年成功研制的 E-2 预警机的垂直翼面和雷达天线罩上使用了玻璃纤维增强复合材料。从此,对于具有高强度、高模量、耐候性能好、介电性能好等要求的雷达天线罩材料均选用有较低的介电常数和正切损耗的玻璃纤维。碳纤维具有高强度、高模量等优点,美国 60 年代就开始研究应用硼/环氧复合材料用作飞机蒙皮、操作面等,最终成功用于 F-14 的水平安定面上,后来由于碳纤维造价太贵,难操作,仅在金属基复合材料上进行研究,用作飞机修理补片材料,70 年代逐渐地被碳纤维所取代。碳纤维比重低,与其他高性能纤维相比具有高的比强度和比模量,且具有优异的耐腐蚀性能及优良的力学性能, F-18 战斗机的机



图3 X-47无人战斗机及工装上的外壳

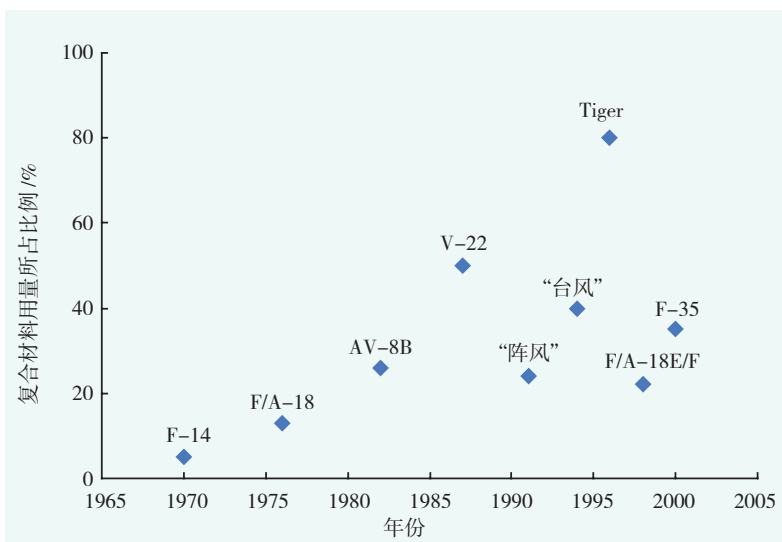


图4 复合材料在海军航空器上的用量情况

翼成功使用碳纤维,使其成为纤维增强材料中发展最迅速,应用范围最广的先进复合材料。芳纶纤维是一种有机纤维,目前也用于天线罩的制造,但芳纶纤维的压缩强度差,抗扭转不强,且易吸潮,限制了其使用范围。

树脂方面环氧树脂占统治地位,第一代 176℃固化的脆性环氧仍然是今天次承力和中等承力结构复合材料的主要树脂;价格较高的第二代 176℃固化的增韧环氧树脂复合材料主要用于冲击后压缩强度和湿热压缩强度要求较高的承力结构。双马来酰亚胺树脂(BMI)的研究起

步稍晚,但发展和应用速度很快,它的使用温度一般为 150~250℃,多用于先进飞机机身和机翼重要复合材料结构。美国空军用 F-22 在选材上就突出强调高性能,树脂以 5250-4 双马树脂为主,大约占了 70% 以上的份额,余下的为环氧 997-3 树脂。高性能必然导致高成本。到 F-35 时,用材思想发生了转变,由突出强调高性能到突出强调低成本,故 F-35 复合材料树脂 90% 以上为环氧树脂,仅 10% 左右用了双马树脂。至于 F/A-18E/F 则全部用了环氧树脂,毕竟双马树脂从材料到制造成本均较环氧树脂高得多<sup>[4]</sup>。

目前,制造先进复合材料结构的主要方法是预浸料——热压罐成形工艺,鉴于此法存在一些限制,不少飞机公司和研究机构都在发展能显著提高生产效益、缩短固化和装配时间的制造技术,如采用缝合预成形或三维编织预形增强体的树脂转移成形法(RTM)、自动铺带技术和电子束固化等。

RTM 是一种新型的闭模成型技术,近年来国外有较好较快的发展。该技术可不用热压罐和预浸料,成型速度快、能耗低,可降低成本<sup>[5-6]</sup>。F-35 襟翼整流罩是至今为止使用低成本制造技术完成的最大尺寸的航空复合材料零件。F-35 的垂尾和平尾原来采用铝合金蜂窝芯/复合材料蒙皮结构,为进一步减轻结构重量,成功的用 RTM 技术验证了全复合材料结构的垂尾,使零件数从原来 13 个减少至 1 个,紧固件取消了 1000 个,实现了大型复杂复合材料结构件制造技术的突破。

自动铺放技术是近 30 年来发展和广泛应用的自动化制造技术,能够显著降低具有复杂形状复合材料构件的制造成本,解决了复合材料零件的尺寸较大时,人工铺层难度大、产品质量难以保证的问题<sup>[7]</sup>。F-35 战斗机进气道、中机身翼身融合体蒙皮,全球鹰

RQ-4B 大展弦比机翼均采用自动铺带工艺成型。图 5 为 F-35 正在等待安

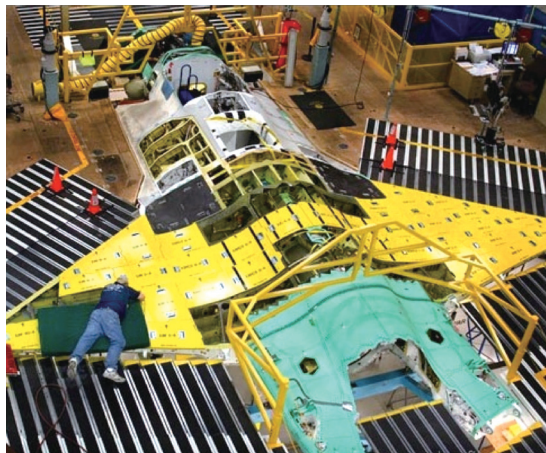


图5 F-35正在等待安装的碳纤维增强机身蒙皮

装的碳纤维增强机身蒙皮。

## 建议

海军航空器飞机结构的复合材料化已成必然的趋势,各类飞机结构的主体材料必将是复合材料而非金属已是不争的事实,这一趋势将从根本上改变飞机结构设计和制造上的传统,也将改变航空工业产业链的重组进程,能否适应这一重大变革,势必影响和决定一个国家航空制造业的成败兴衰,对此如果没有清醒的认识,落后将是长期的、不可避免的,为此提出如下的相关发展建议:

(1) 先进复合材料是一种被 40 年来应用的历史证明了的性能优异的新材料,世界上已达成“复合材料是航空工业结构的未来”这一共识。对此要在思想和理念上有充分的认识,跟上世界航空工业已存在并将进一步发展的飞机结构复合材料化的大趋势,有关部门应在该领域进行战略上的发展研究,要加大投资力度,加快设备改造力度,从而加速航空复合材料产业的发展。

(2) 重视预研,加强基础研究,密切结合工程实际。需要逐步攻克设计、材料和制造诸领域的关键技术问题,彻底改变复合材料应用效益不

足,较普遍存在的“不好用,不敢用,不爱用”,实质是“不会用”的现象,使预研为应用提供强有力的必要的技术支撑。

(3) 在复合材料领域,严重缺乏有经验的专业技术人员,特别是缺乏掌握现代复合材料技术的设计人才和工程制造人才,即人才现状远不能满足发展的需求。国际上认为培养一个成熟的复合材料设计师至少需要 10 年。故应加大人才培养力度和培训力度,各飞机公司及设计院对此也要给以足够的重视。

(4) 注意加强国际的合作和交流。当前复合材料的技术发展存在着国际化的趋势,强调“采用世界上最新的技术,生产最优秀的产品”,成果共享,风险共担。在发展复合材料技术时,也应充分注意,对内整合,对外合作,融入世界的复合材料技术圈,合作共赢,跟上世界复合材料技术发展和前进的步伐。

## 参考文献

- [1] 益小苏,张明. 先进航空树脂基复合材料研究与应用进展. 工程塑料应用,2009,37(10):72-76.
- [2] 陈绍杰. 先进复合材料的近期发展趋势. 材料工程,2004(9):9-13.
- [3] 陈绍杰. 复合材料技术发展及其对我国航空工业的挑战. 高科技纤维与应用,2010,35(1):1-7.
- [4] 杨乃宾. 复合材料与 90 年代战斗机. 航空制造工程,1995(9):3-5.
- [5] 梁志勇,段跃新,张佐光,等. 面向 21 世纪的美国复合材料产业及先进复合材料技术 // 毛天祥. 复合材料的现状与发展——第十一届全国复合材料学术会议论文集. 合肥:中国科学技术出版社,2000.
- [6] 杜善义. 先进复合材料与航空航天. 复合材料学报,2007,24(1):1-12.
- [7] 肖军,李勇,李建龙. 自动铺放技术在大型飞机复合材料结构件制造中的应用. 航空制造技术,2008(1):50-53.

(责编 良辰)