

文章编号:1673-9981(2011)04-0243-06

# 战机用先进树脂基复合材料的应用现状

黄晓艳<sup>1</sup>, 刘波<sup>2</sup>

1. 镇江船艇学院, 江苏 镇江 212003; 2. 镇江高等专科学校, 江苏 镇江 212003

**摘要:**先进树脂基复合材料对于军用飞机屏蔽或衰减雷达波与红外特征,提高战机的生存和空防能力,具有至关重要的作用,在实现战机轻量化、快速反应、精确打击等方面起着巨大的作用,其用量已成为战机先进性的一个重要标志。本文简要阐述了先进树脂基复合材料在战机上的应用、发展现状及发展趋势,分析了我国先进树脂基复合材料的研究应用现状和发展前景。

**关键词:**战机;先进树脂基复合材料;碳纤维

**中图分类号:** V258

**文献标识码:** A

先进树脂基复合材料具有高比强度、高比模量、耐腐蚀、抗疲劳性能好、性能可设计性强、便于整体成型及制备的灵活性和易加工性等特点,自20世纪60年代问世以来,一直受到航空界的关注与重视,其在战机上的应用从最初的非承力构件发展到次承力和主承力构件,从单一的结构件发展到结构/吸波、结构/透波、结构/防弹等多功能一体化结构。先进树脂基复合材料对于军用飞机屏蔽或衰减雷达波与红外特征,提高自身生存和空防能力,具有至关重要的作用,在实现战机轻量化、快速反应、精确打击等方面起着巨大作用,其用量已成为战机先进性的一个重要标志。

## 1 先进树脂基复合材料在战机上的应用

### 1.1 在美战机上的应用

美国在复合材料方面具有强大的、全面的研究和生产基地,综合实力最强,是世界上战机用先进树脂材料最大的生产国和消费国。在战机用先进树脂基复合材料方面,其规模和技术都走在世界前列。美国部分战机上复合材料的应用情况列于表1<sup>[1]</sup>。造价超过20亿美元的B-2“幽灵”重型隐形轰炸机,于1978年开始研制,1993年12月交付使用,它的整个

机身除主梁和发动机机舱采用了钛复合材料外,其它部分均由不易反射雷达波的碳纤维和石墨等非金属复合材料构成,机翼蒙皮是六角形蜂窝状夹芯碳/环氧吸波结构材料,该材料的面板为非圆Kevlar49增韧环氧,夹芯为表面经过特殊处理的六角蜂窝状Nomex,底板为非圆石墨增韧环氧<sup>[2]</sup>。

第四代战斗机F-22“猛禽”,仅就复合材料的用量来讲并不是很高,只占结构质量的24%,但与以往的机型相比,它的复合材料的应用水平提高了一个级别。F-22上的复合材料不只用于蒙皮,而且还应用于机翼梁和垂尾梁。F-22上大约有一半的复合材料是Fiberite 977-3增韧环氧复合材料,另一半是双马来酰亚胺(BMI)树脂复合材料。F-22上的材料分布如图1所示。F-22的性能先进,价格昂贵,F-35联合攻击战斗机是F-22的一种补充<sup>[3]</sup>。为了保证飞机的隐身能力和对结构重量的严格限制,F-35大量地采用了先进树脂基复合材料。蒙皮采用了使用温度为177℃的石墨/环氧树脂基复合材料,机翼和尾翼上的高温部位采用了使用温度为220℃的碳/增韧双马树脂基复合材料。先进的结构设计和大量地应用复合材料,使F-35可采用尺寸更大的整体部件来代替由各个零件组装而成的部件,从而获得更高的可靠性和易维护。

收稿日期:2011-01-11

作者简介:黄晓艳(1974-),女,江西樟树人,副教授,硕士。

表 1 美国部分战机所用复合材料的情况

Table 1 Application status of composite in partial battleplanes of USA

机种	F-15A	F-16A	F/A-18E/F	AV-8B	F-22	F-35	V-22	RAH-66
复合材料用量	2%	2%	22%	26%	24%	35%	45%	51%

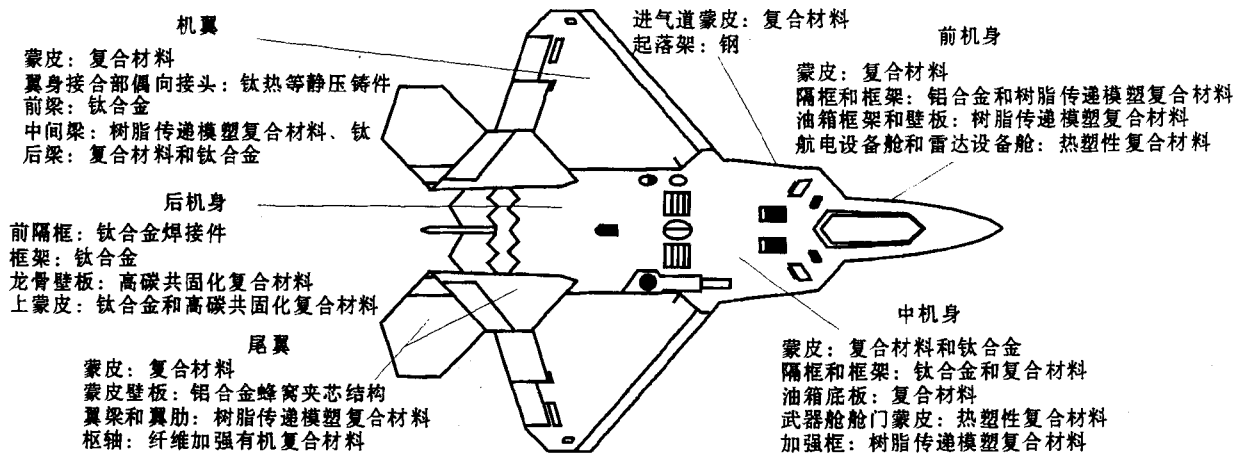


图 1 F-22 战机的材料分布图

Fig. 1 Material distribution scheme of F-22

在直升机上采用复合材料不仅可减重,而且对于改善直升机的抗坠毁性能意义重大.美国的H360,S-75,BK-117和V-22等直升机均大量采用了复合材料<sup>[4]</sup>.V-22“鱼鹰”直升机是世界上第一架机体几乎全部采用复合材料构件的直升机,它所使用的复合材料有3000多千克,约占结构总重的

45%,机身和机翼的大部分结构及发动机悬挂接头和叶片紧固装置均采用了复合材料.RAH-66“科曼奇”轻型侦察攻击直升机,具有隐身能力,为减小机身对雷达的反射截面积,RAH-66广泛采用复合材料,所用复合材料占总结构重量的51%.表2列出了复合材料在RAH-66上所用的部位.

表 2 复合材料在 RAH-66 上的应用部位

Table 2 Application locations of composite in RAH-66

机体结构	旋翼系统	传动系统
蒙皮、舱门、桁条、隔框、中央龙骨盒梁结构、炮塔整流罩、涵道尾桨护罩、垂直尾翼、水平安定面	挠性梁、桨叶、扭力管、扭力臂、旋转倾斜盘、套管轴、旋翼整流罩	传动轴、主减速器箱

1.2 在其他国家战机上的应用

针对20世纪80年代初美国的ATF先进战术战斗机的研制计划,前苏联也拟定出关于研制第五代(相当于西方第四代)歼击机的秘密决定.苏霍伊和米高扬设计局相继制造出了S-37“金雕”(后改称苏-47)和M-1.44技术验证机<sup>[6]</sup>.S-37广泛采用了先进材料,尤其是其前掠机翼几乎全部采用复合材料制作,通过合理的纤维铺层克服了前掠翼的“气动弹性发散”问题,这是S-37引人注目的主要原因

之一.M-1.44采用三角翼、双垂尾的鸭式气动布局和可调S型进气道.机体的前翼、部分蒙皮和武器舱门等处大量采用了复合材料,先进复合材料占结构重量的30%.2010年1月29日,“未来战术航空综合系统”(俄语缩写PAK FA)项目的原型机T-50实现了首飞.复合材料约占T-50整机重量的25%,约占机体表面部分重量的70%.与苏-27相比,T-50机体零件的数量减少了四分之三.

为满足战机对高机动性、超音速巡航及隐身的

要求,各国都不同程度地在战机上应用了先进树脂基复合材料.表3为部分国家的战机上应用复合

材料的情况<sup>[7-8]</sup>.

表3 各国战机复合材料的用量及应用部位

Table 3 Application locations and consumption of composite in battleplanes of other countries

国家	机种	复合材料用量/%	应用部位
法国	Rafael	30	垂尾、机翼、机身结构的50%、起落架舱门及发动机舱门
瑞典	JAS-39	30	机翼、垂尾、前翼、进气道、起落架舱门等
英、意、德、西	EF2000	40	机翼、前中身、垂尾、前翼
印度	LCA	45	机翼上、下部蒙皮、翼梁、翼肋、升降副翼、安定面、方向舵减速板、起落架舱门、机身蒙皮
日本	F-2	18	主翼翼肋、襟副翼外皮、固定后缘蒙皮、机身中段前部外壳、水平尾翼蒙皮、垂直尾翼、尾舵、起落架舱门

### 1.3 在国内战机上的应用

与国外先进战机相比,国产战机的复合材料的用量较少,国内战机上复合材料的应用情况列于表4.由表4可见,在直升机领域复合材料的使用比例较大.直-九直升机中复合材料的使用率约为23%.

歼8、强5战机的垂直尾翼壁板及垂直尾翼使用了碳纤维树脂基复合材料.全天候战斗机歼10的前翼整体采用了复合材料<sup>[14]</sup>.高级教练机L-15“猎鹰”06的机头罩和方向舵大部件都是由国产高性能碳纤维复合材料制造的.

表4 国内战机上复合材料应用的具体情况

Table 4 Concrete application status of composite in domestic battleplane

机型	复合材料用量/%	应用部位
歼击机	6~9	机翼、平尾、垂尾、前机身、鸭翼、襟副翼、腹鳍
直升机	25~33	主要包括旋翼系统和机身结构

## 2 先进树脂基复合材料的发展现状

### 2.1 树脂基体

为提高先进树脂基复合材料的使用性能,在环氧(EP)基的基础上,研究人员开发出了双马来亚胺(BMI)基和耐高温聚酰亚胺(PI)基等复合材料.

环氧树脂的综合性能优异,工艺性好,价格较低,是碳纤维复合材料中应用最普遍的树脂基体,其缺点是韧性不足,耐疲劳性和耐湿热性差,预浸料储存期短等.

双马来亚胺具有优异的耐热性、电绝缘性、透波性、阻燃性和耐候性以及良好的力学性能和尺寸

稳定性.其成型工艺类似于环氧树脂,原材料来源广泛、成本低廉.它的缺点是熔点高、溶解性差、成型温度高及固化物脆性大等.通过改性可获得韧性和耐湿性优于耐热环氧树脂;工艺性优于聚酰亚胺树脂并接近环氧树脂的双马来亚胺基,满足高速飞机主受力结构用复合材料的需要.

热固性聚酰亚胺是高温型复合材料树脂基体,在很宽的温度和频率范围内仍能保持较高的介电性能.其缺点是固化困难,固化时常需高温高压和复杂的升温程序,由于反应生成的水或溶剂的存在导致孔隙率较高,材料易吸潮,使电性能降低.

图2为各类树脂基复合材料的韧性及具体的应用情况<sup>[7]</sup>.

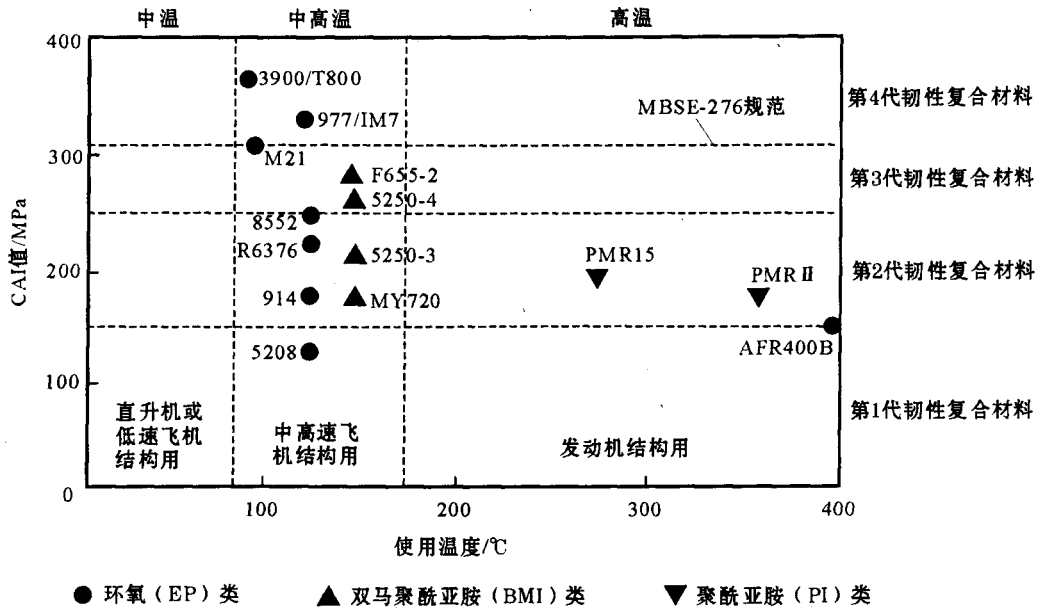


图2 树脂基复合材料的韧性及其应用

Fig.2 Ductility and application of polymer matrix composites

2.2 增强材料

先进树脂基复合材料常用的增强纤维包括碳纤维和其他高性能有机纤维。目前应用得最多和最重要的是碳纤维。对碳纤维的研究目标主要是提高强度和模量及降低生产成本。碳纤维可由聚丙烯腈(PAN)纤维、沥青纤维及粘胶纤维经碳化制得，这

三种碳纤维的主要性能列于表5<sup>[9]</sup>。聚丙烯腈(PAN)纤维的产量占碳纤维总产量的90%左右<sup>[10]</sup>。日本的东丽公司生产的碳纤维是国际公认的代表性产品，它的产品有T系列(碳化产品)和M系列(石墨化产品)，其性能列于表6<sup>[11]</sup>。

表5 不同原料制备的碳纤维的主要性能

Table 5 Main properties of carbon fiber made from different raw materials

纤维类别	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	抗拉强度/MPa	抗拉模量/GPa	延伸率/%
PAN基碳纤维	1.76~1.94	>3500	>230	0.6~1.2
沥青基碳纤维	1.7	1600	379	1.0
粘胶基碳纤维	2.0	2100~2800	414~552	0.7

表6 东丽公司生产的碳纤维的主要性能

Table 6 Main properties of carbon fiber made by Toray Group

项目	T300	T800	T1000	M40	M46	M50	M40J	M46J	M50J	M60J	M65J
拉伸强度/MPa	3530	5590	7060	2740	2550	2450	4410	4210	3920	3920	3600
拉伸模量/GPa	230	294	294	392	451	490	377	436	475	588	640
断裂伸长/%	1.5	1.9	2.4	0.6	0.6	0.5	1.2	1.0	0.8	0.7	0.6
密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.76	1.81	1.82	1.81	1.88	1.91	1.77	1.84	1.88	1.94	1.98

## 2.3 成型工艺

先进树脂基复合材料的成型成本占材料生产总成本的60%~70%,因而为实现复合材料结构件的低成本化而又不牺牲其力学性能优势,各国都采取了相应的措施和策略.美国对复合材料低成本化技术的研究开始得最早,制定了多项低成本复合材料结构开发计划,如低成本复合材料设计和制造(DMLCC)、先进复合材料技术(ACT)、低成本复合材料工艺(LCCP)等<sup>[12]</sup>.其他国家也纷纷制订低成本复合材料发展研究计划,研发出降低复合材料成本的织物预成型技术、液体成型技术、自动铺带技术、自动铺丝技术、电子束固化等.

目前,低成本成型技术的主流是液体模塑性成型技术,主要是树脂传递模塑(Resin Transfer Moulding, RTM)成型技术. RTM是先将纤维预成型体放在闭合的模腔中,再用专用的设备将液态树脂注入到模腔中,在流动充模时完成树脂/纤维的浸润并固化成制件.目前已有多种形式的RTM,如真空辅助RTM(VARTM)、压缩RTM(CRTM)、树脂渗透模塑(SCRIMP)、真空渗透(VIP)、结构反应注射模塑(SRIM)、真空辅助树脂注射(VARI)等十多种方法<sup>[13]</sup>. RTM的优点是可经济地生产形状复杂的复合材料制件,制件尺寸精确、重复性好,减少装配工作量. F-22是首例大量利用RTM复合材料件的飞机,它有400多个部件使用了RTM,如前机身的部分隔框和构架、燃油箱骨架和箱壁;中机身的武器舱门帽形加强筋、机翼中间梁、尾翼的梁和肋等. F-22双垂尾的每一垂尾有10个复合材料工型梁,每侧有15个RTM复合材料肋机翼的正弦形波梁,采用RTM法使成本减少了20%,装配时机翼中所需的加强件减少了一半.

## 3 先进树脂基复合材料的发展趋势

### 3.1 提高复合材料的性能

研发高耐热和耐湿热的树脂基体,在可成型大型复杂构件的前提下,进一步提高基体的湿态耐热性.在开发高性能增强纤维,如纳米材料的同时,通过基体增韧来提高复合材料的抗冲击韧性.

环氧树脂基复合材料改性的主要目标是提高其韧性并保持其体系优良的综合性能.双马树脂基复合材料的发展趋势是提高韧性和湿热性能、改善

工艺性等,扩大其应用范围.

我国的复合材料拥有原材料方面的优势,在航空领域的应用已有一定的基础.在树脂基复合材料的树脂和纤维这两大原料中,树脂的开发我国与国外的差距不大,但碳纤维的研发与国外的差距较大.为缩小与国外先进水平的差距,近年来,我国碳纤维复合材料的生产企业立足于原料、技术及设备的国产化,努力提高碳纤维领域的自主创新和技术集成能力、打破国外对高性能碳纤维的垄断.

### 3.2 低成本开发复合材料的技术

降低成本是复合材料发展的一个重要方向.降低复合材料成本的途径有:(1)低成本制备技术,如采用廉价原材料,低成本大丝束碳纤维的开发和应用,采用低温固化高温使用的树脂体系等;(2)低成本成型工艺,包括由RTM, VRTM, SRTM及FRI等若干技术所构成的液体模塑成型工艺,拓宽原有的低成本复合材料成型工艺如纤维缠绕、拉挤等的应用范围,采用新型固化方式如电子束固化、微波固化等快速固化方式;(3)低成本无损检测技术;(4)低成本后加工工艺;(5)一体化设计和成型工艺技术.

目前,国外已提出“面向制造设计”的概念,即在飞机设计的初期就充分考虑工艺的便利性,从设计的源头为降低复合材料的成本提供可能.随着复合材料的生产和成型工艺的成熟应用,与传统的飞机结构材料相比,复合材料不仅在性能和减重效益上,而且在使用成本上均具有竞争优势.

### 3.3 结构/功能一体化

复合材料的制备正向着技术综合化、功能多样化和结构智能化的方向发展,它的研究和应用往往涉及设计、材料、制造、测试、使用和维护等专业技术领域.为将复合材料的潜力充分发挥出来,可重点开展以下两方面的研发工作:一方面围绕开发复合材料新结构和提高设计许用值来提高减重率;另一方面通过充分利用复合材料的特点,实现结构/功能一体化,如隐身功能、自适应功能和自诊断功能等.

## 4 结 语

先进树脂基复合材料具有比传统结构材料优越得多的力学性能,还兼有耐腐蚀、振动阻尼、成型

方便和吸收电磁波等特点,在国防高新技术和武器装备的发展中占有极为重要的地位.随着先进树脂基体材料和增强材料性能的进一步提高,复合材料工艺的不断改进及其成本的不断降低,先进树脂基复合材料在战机上的应用将越来越广泛.

#### 参考文献:

- [1] 郝建伟. 先进树脂基复合材料的技术现状及发展方向[J]. 第十三届国际复合材料学术会议专辑, 2001(3): 24-25.
- [2] 翟青霞, 黄英, 苗璐, 等. 树脂基复合吸波材料在航空、航天中的应用[J]. 玻璃钢/复合材料, 2009(6): 75.
- [3] 朱传志, 张鹏. 未来空战先锋—F35 联合作战飞机[J]. 国防科技, 2005(7): 14-17.
- [4] 陈祥宝. 先进树脂基复合材料的发展和应用[J]. 航空材料学报, 2003, 23(增刊): 198.
- [5] 钱锟. 俄罗斯第五代战斗机 PAK FA 项目评述[J]. 航空科学技术, 2007(4): 7-11.
- [6] 温杰. 俄罗斯 T-50 原型机总体设计浅析[J]. 航空科学技术, 2010(2): 4-6.
- [7] 贺福, 李润民. 碳纤维在国防军工领域中的应用(2)[J]. 高科技纤维与应用, 2007, 32(1): 12.
- [8] 益小苏, 张明, 安学锋, 等. 先进航空树脂基复合材料研究与应用进展[J]. 工程塑料应用, 2009, 37(10): 72-73.
- [9] 黎小平, 张小平, 王红伟. 碳纤维的发展及其应用现状[J]. 高科技纤维与应用, 2005, 30(5): 24-30.
- [10] 唐见茂. 碳纤维树脂基复合材料发展现状及前景展望[J]. 航天器环境工程, 2010, 27(3): 273.
- [11] 姜润喜. 碳纤维的发展现状[J]. 合成技术及应用, 2010, 25(1): 28.
- [12] 刘代军, 陈亚莉. 先进树脂基复合材料在航空工业中的应用[J]. 材料工程, 2008(增刊1): 195.
- [13] 陈祥宝, 张宝艳, 邢丽英. 先进树脂基复合材料技术发展及应用现状[J]. 中国材料进展, 2009, 28(6): 5.
- [14] 马援. 技术创新与管理创新的典范——访歼 10 飞机研制工程现场副总指挥晏翔[J]. 国际航空, 2007(3): 10-11.

## Application of advanced resin matrix composites in battleplane

HUANG Xiaoyan<sup>1</sup>, LIU Bo<sup>2</sup>

1. Zhenjiang Watercraft College, Zhenjiang 212003, China; 2. Zhenjiang College, Zhenjiang 212003, China

**Abstract:** Advanced resin matrix composites are vital for increasing battleplane's survivability and air defense by shielding or decaying radar waves and its infra-ray characteristic. They also play an important role in realizing battleplane's lightweight, quick-reaction and accurate attack. Consumption of advanced resin matrix composites is an important mark of the advanced battleplane. In this paper, the application, the present status and trend of advanced resin matrix composites in battleplanes are summarized, and their application and prospects in China are analyzed.

**Key words:** battleplane; advanced resin matrix composites; carbon fiber