

海军重点建设教材

复合材料 胶接修理

赵培仲 苏洪波 戴京涛◎编

ADHESIVELY BONDED
COMPOSITE REPAIR



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

复合材料胶接修理

赵培仲 苏洪波 戴京涛 编



電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书围绕复合材料修理技术方法、工艺流程展开,重点突出实践操作和技能实训。本书编写采用项目任务的方式进行,项目一和项目二主要是复合材料基础知识,包括复合材料的基本概念、组成、性能特点、应用等。项目三主要是湿铺法制备复合材料层压板的工艺方法和相关专业知识。项目四是复合材料层压板的性能测试方法及机械加工方法等专业知 识。项目五是复合材料层压板的胶接修理工艺方法,以及与此相关的必要的专业知识,包括复合材料结构损伤的主要类型、无损检测方法和一般的修理设计等。项目六主要介绍复合材料胶接修理金属损伤结构的工艺方法和相关的专业知识。项目七和项目八是蜂窝夹芯结构的制备和损伤修理工艺方法,以及蜂窝夹芯结构的特点、损伤类型和修理设计等必要的专业知识。项目九是关于复合材料结构老化的试验方法,通过试验了解湿热等环境因素对复合材料力学性能的影响。

本书可以作为结构修理专业学生的教材,也可以作为从事复合材料结构修理工作的专业技术人员 的参考资料。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

复合材料胶接修理/赵培仲等编. —北京:电子工业出版社,2018.12

ISBN 978-7-121-35232-4

I. ①复… II. ①赵… III. ①复合材料—胶接—维修 IV. ①TB33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 232391 号

策划编辑:张正梅

责任编辑:刘小琳

印 刷:三河市鑫金马印装有限公司

装 订:三河市鑫金马印装有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:720×1000 1/16 印张:7.5 字数:150 千字

版 次:2018 年 12 月第 1 版

印 次:2018 年 12 月第 1 次印刷

定 价:69.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888,88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式:(010)88254528。

前 言

先进树脂基复合材料具有比强度、比模量高，抗疲劳、耐腐蚀性能优异及可设计性强等突出特点，在航空航天领域得到了越来越广泛的应用。目前，树脂基复合材料在飞机结构中的应用已经从次承力构件拓展到机身等主承力构件，其用量呈现明显的上升趋势。随着树脂基复合材料应用领域和应用范围的不断拓展，复合材料结构的损伤问题越来越多，而且在复合材料及其结构的制造过程中也会出现一些缺陷。这些结构损伤或缺陷都需要采用适当的技术和工艺进行修理，因此复合材料结构的修理也逐渐成为必须面对的课题。和传统金属等均质的各向同性材料不同，复合材料具有各向异性的特点，其修理技术工艺也因此而不同。在实施修理的时候，必须考虑原有复合材料结构的纤维铺层设计、树脂基体类型、固化工艺等因素。目前，国内复合材料结构损伤修理还处在跟踪研究阶段，缺乏成熟的标准规范，本教材是在参考国内外文献的基础上，针对初学者和从事具体修理操作的人员编写的。学员通过本教材的学习能够掌握基本的修理技术方法和工艺。

复合材料结构损伤修理的方式主要包括机械连接和胶接两种。虽然机械连接使用起来相对方便快捷，但是，紧固件孔会造成对结构的二次损伤，补强板和原结构还可能会因为热性能不匹配，在加热固化时产生热应力等问题。本教材主要介绍胶接修理技术和工艺。由于复合材料胶接修理不仅能够很好地修复金属损伤结构，而且在恢复结构强度的同时还能够提高耐腐蚀和抗疲劳性能。因此，本教材中专门介绍了金属损伤结构的复合材料胶接修理技术和工艺。

本书是按照理实一体化教学模式改革要求，突出岗位需求和能力本位而编写的教材。本教材着眼于学员任职岗位需求，以项目实践任务为牵引，强调理实一体化，突出学员主体地位，让学员更好地学会专业知识、增长专业技能、提升任职能力。因此，在内容编排上采用项目任务的方式，每个项目任务都是从项目任务的描述和布置开始，在明确项目任务的同时，引导学员开展任务分析，让学员发现现有知识的欠缺和技能的不足，激发其学习的欲望，真正的学习也因此而逐渐展开。在这个过程中，学员的主体作用得到很好的发挥，课堂教学不再是老师自导自演、学员仅仅是观众，而是老师指导、老师和学员共同参与的过程，很好地实现了“做中学”，达到教与学相长。本教材可以和《学员项目实施报告》配套

使用，这样可以更好地突出学员的主体地位，发挥其主观能动性。本教材部分内容还可用于“航空材料学及热处理”“飞机结构修复工程”“结构损伤修理技术”等课程的相关教学。

本教材由赵培仲统稿。项目一、项目八、项目九由苏洪波编写，项目二、项目三由戴京涛编写，项目四~项目七、附录由赵培仲编写。

由于编者学识水平和能力所限，教材中难免会存在错误和不当之处，敬请各位专家和读者提出宝贵的意见。

编者

2018年7月

实验室安全注意事项

1. 认真学习领会操作要领，不得蛮干，不得随意操作。
2. 实验室水、电、气源的使用必须严格按照操作规程执行。
3. 不得随意动与实验无关的设备仪器。
4. 实验室的化学试剂的使用必须在老师指导下操作。
5. 实验操作过程中注意做好个人防护。
6. 实验室内禁止吸烟、进食。
7. 注意保持实验室的整洁卫生，不得随意丢弃实验中的废物和废液。
8. 实验结束，认真检查水、电、气源是否关闭。
9. 严格遵守保密制度。

目 录

项目一	认识复合材料	1
项目二	环氧树脂的固化	11
项目三	湿铺法制备复合材料层压板	22
项目四	复合材料层压板拉伸试验	33
项目五	复合材料损伤结构的胶接修理	47
项目六	金属损伤结构的复合材料胶接修理	68
项目七	蜂窝夹芯结构的制备	76
项目八	蜂窝夹芯结构的损伤修理	85
项目九	复合材料加速老化试验	103
附录 A	复合材料机械加工的工具和基本参数	109
附录 B	复合材料原材料相关数据	110
参考文献		112

项目一 认识复合材料

一、项目任务

(一) 学习目标

- (1) 知道复合材料的组成, 熟悉复合材料的性能特点。
- (2) 熟悉飞机上复合材料的应用情况。

(二) 任务实施

(1) 实地观察飞机结构中哪些部位采用了复合材料构件, 了解构件的结构形式, 并分析讨论该构件的作用及特点。熟悉复合材料结构在飞机上的应用情况及其作用, 思考为什么使用复合材料, 并推测哪些结构还能使用复合材料。

(2) 组织学员研讨分析复合材料的基本组成及其概念, 分析其性能特点。

(3) 讨论树脂基复合材料与金属材料性能的差异及加工制备这两种结构时的区别。

(4) 熟悉实验室基本情况及相关仪器设备的操作方法。

二、专业知识

(一) 复合材料的定义、命名及分类

1. 复合材料的定义

复合材料是由两种或两种以上物理和化学性质不同的物质组合而成的一种多相固体材料。复合材料的组分材料虽然保持其相对独立性, 但复合材料的性能却不是组分材料性能的简单加和, 而是有重要的改进。在复合材料中, 通常有一相为连续相, 称为基体; 另一相为分散相, 称为增强相(增强体)。分散相是以独立的形态分布在连续相中的, 两相之间存在相界面。分散相可以是增强纤维, 也可以是颗粒状或弥散的填料。

从上述的定义中可以看出, 复合材料可以是一个连续物理相与一个分散相的复合, 也可以是两个或者多个连续相与一个或多个分散相在连续相中的复合。复合后的产物为固体时才称为复合材料, 若复合产物为液体或气体时, 就不能称为复合材料。复合材料既可以保持原材料的某些特点, 又能发挥组合后的新特征, 它可以根据需要进行设计, 从而最合理地达到所要求的性能。

2. 复合材料的命名

复合材料在世界各国还没有统一的名称和命名方法，通用的方法是根据增强体和基体的名称命名，一般有以下三种情况：

(1) 强调基体时，以基体材料的名称为主。如树脂基复合材料、金属基复合材料、陶瓷基复合材料等。

(2) 强调增强体时，以增强体材料的名称为主。如玻璃纤维增强复合材料、碳纤维增强复合材料、陶瓷颗粒增强复合材料。

(3) 基体材料名称与增强体材料名称并用。这种命名方法常用来表示某一种具体的复合材料，习惯上将增强体材料的名称放在前面，基体材料的名称放在后面，如“玻璃纤维增强环氧树脂复合材料”，或简称为“玻璃纤维环氧树脂复合材料或玻璃纤维环氧”，而我国则常将这类复合材料通称为“玻璃钢”。

国外还常用英文编号来表示，如 MMC (Metal Matrix Composite) 表示金属基复合材料，FRP (Fiber Reinforced Plastics) 表示纤维增强塑料，而玻璃纤维环氧则表示为“GF/Epoxy”或“G/Ep (G-Ep)”。

3. 复合材料的分类

随着材料品种不断增加，人们为了更好地研究和材料，需要对材料进行分类。材料的分类方法较多，按材料的化学性质分类，有金属材料、非金属材料之分；按物理性质分类，有绝缘材料、磁性材料、透光材料、半导体材料、导电材料等；按用途分类，有航空材料、电工材料、建筑材料、包装材料等。

复合材料的分类方法也很多，常见的有以下几种。

1) 按基体材料类型分类

(1) 树脂基复合材料。以有机聚合物（主要为热固性树脂、热塑性树脂及橡胶）为基体制成的复合材料。

(2) 金属基复合材料。以金属为基体制成的复合材料，如铝基复合材料、铁基复合材料等。

(3) 无机非金属基复合材料。以陶瓷材料（也包括玻璃和水泥）为基体制成的复合材料。

2) 按增强材料种类分类

(1) 玻璃纤维复合材料。

(2) 碳纤维复合材料。

(3) 有机纤维（芳香族聚酰胺纤维、芳香族聚酯纤维、高强度聚烯烃纤维等）复合材料。

(4) 金属纤维（如钨丝、不锈钢丝等）复合材料。

(5) 陶瓷纤维（如氧化铝纤维、碳化硅纤维、硼纤维等）复合材料。

此外，如果用两种或两种以上的纤维增强同一基体制成的复合材料称为“混杂复合材料”。

混杂复合材料可以看成是两种或多种单一纤维复合材料的相互复合，即复合材料的“复合材料”。

3) 按增强材料形态分类

(1) 连续纤维复合材料。作为分散相的纤维，每根纤维的两个端点都位于复合材料的边界处。

(2) 短纤维复合材料。短纤维无规则地分散在基体材料制成的复合材料中。

(3) 粒状填料复合材料。微小颗粒状增强材料分散在基体材料制成的复合材料中。

(4) 编织复合材料。以平面二维或立体三维纤维编织物为增强材料与基体复合而成的复合材料。

4) 按用途分类

复合材料按用途可分为结构复合材料和功能复合材料。目前结构复合材料占绝大多数，而功能复合材料有广阔的发展前途。21 世纪将会出现结构复合材料与功能复合材料并重的局面，而且功能复合材料会具有更多的竞争优势。

结构复合材料主要用于承力和次承力结构，要求它质量小、强度和刚度高，且能耐受一定温度，在某种情况下还要求其有膨胀系数小、绝热性能好或耐介质腐蚀等其他性能。

功能复合材料指具有除力学性能以外其他物理性能 of 的复合材料，即具有各种电学性能、磁学性能、光学性能、声学性能、摩擦性能、阻尼性能及化学分离性能等的复合材料。

(二) 复合材料的性能特点

1. 复合材料的基本性能

复合材料是由多相材料复合而成的，其共同的特点是：

(1) 可综合发挥各种组成材料的优点，使一种材料具有多种性能，具有天然材料所没有的性能。如玻璃纤维增强环氧基复合材料，既具有类似钢材的强度，又具有塑料的介电性能和耐腐蚀性能。

(2) 可按对材料性能的需要进行材料的设计和制造。例如，可以根据不同方向上对材料刚度和强度的特殊要求，设计复合材料及结构。

(3) 可制成所需形状的产品，可避免金属产品的铸模、切削、磨光等工序。

性能的可设计性是复合材料的最大特点。影响复合材料性能的因素很多，主要取决于增强材料的性能、含量及分布状况，基体材料的性能、含量，以及它们之间的界面结合的情况，同时还受制备工艺和结构设计的影响。

2. 树脂基复合材料的主要性能特点

树脂基复合材料与金属材料比较，显示出较大的优越性，主要体现在以下方面：

(1) 比强度、比模量大。比强度和比模量是度量材料承载能力的一个指标，比强度越高，同一零件的自重越小；比模量越高，零件的刚性越大。玻璃纤维复合材料有较高的比强度和比模量，碳纤维、硼纤维、有机纤维增强的树脂基复合材料的比强度、比模量见表 1-1，由此可见，它们的比强度相当于铝合金的 3~5 倍，比模量相当于金属的 4 倍。

(2) 耐疲劳性能好。疲劳破坏是材料在交变载荷作用下，由于裂纹的形成和扩展而形成的低应力破坏。树脂基复合材料纤维与基体的界面能阻止裂纹的扩展。因此其疲劳破坏总是从纤维的薄弱环节开始，逐渐扩展到结合面上，破坏前有明显的预兆。大多数金属材料的疲劳强度极限是其抗拉强度的 20%~50%，而碳纤维/聚酯复合材料的疲劳极限可为其抗拉强度的 70%~80%。

(3) 减振性好。结构的自振频率除与结构本身形状有关外，还与材料的比模量的平方根成正比。高的自振频率避免了工作状态下共振而引起的早期破坏。复合材料比模量高，故具有高的自振频率。同时，复合材料中纤维和界面具有吸振能力，使材料的振动阻尼很高。根据对形状和尺寸相同的梁进行的试验可知，轻金属合金梁需 9s 才能停止振动，碳纤维复合材料只需 2.5s 就静止了。

表 1-1 典型工程材料的性能

材料	密度 $\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	抗拉强度 σ/GPa	弹性模量 E/GPa	比强度 σ/ρ $/(\text{MJ}/\text{kg})$	比模量 E/ρ $/(\text{MJ}/\text{kg})$
钢	7.8	1.03	210	0.13	27
铝合金	2.8	0.47	75	0.17	26
钛合金	4.5	0.96	114	0.21	25
玻璃纤维复合材料	2.0	1.06	40	0.53	20
玻璃纤维Ⅱ/环氧复合材料	1.45	1.50	140	1.03	97
玻璃纤维Ⅰ/环氧复合材料	1.6	1.07	240	0.67	150
有机纤维/环氧复合材料	1.4	1.4	80	1.0	57
硼纤维/环氧复合材料	2.1	1.38	210	0.66	100
硼纤维/铝复合材料	2.65	1.0	200	0.38	57

(4) 过载时安全性好。纤维复合材料中有大量独立的纤维，当构件过载而有少数纤维断裂时，载荷会迅速重新分配到未破坏的纤维上，使整个构件免于在极短时间内有整体破坏的危险。

(5) 减摩、耐磨、自润滑性好。在热塑件塑料中掺入少量短纤维，可大大提

高它的耐磨性，其增加的倍数为聚氯乙烯本身的 3.8 倍；聚酰胺本身的 1.2 倍；聚丙烯本身的 2.5 倍。碳纤维增强塑料还可降低塑料的摩擦系数，提高它的 pV 值。由于碳纤维增强塑料还具有良好的自润滑性能，因此可以用于制造无油润滑活塞环、轴承和齿轮。

(6) 绝缘性好。玻璃纤维增强塑料是一种优良的电气绝缘材料，用于制造仪表、电机与电器中的绝缘零部件，这种材料还不受电磁作用，不反射无线电波。微波透过性能良好，还具有耐烧蚀性和耐辐照性，可用于制造飞机、导弹和地面雷达罩。

(7) 有很好的加工工艺性。复合材料可采用手糊成型、模压成型、缠绕成型、注射成型和拉挤成型等各种成型方法制成各种形状的产品。

(8) 热膨胀系数小。在冷热交变时，尺寸稳定性好。

复合材料也存在许多缺点和问题，主要体现在以下几个方面：

(1) 耐湿热性较差。复合材料吸湿状态下的高温性能，尤其是树脂基体控制的压缩性能和剪切性能下降明显。湿热环境下，树脂基体会吸收少量的水分，从而引起结构尺寸变化。大多数树脂基复合材料最高工作温度为 230°C 以下。例如，广泛使用的环氧树脂基复合材料，在干态工作温度大约为 180°C ，但在湿态环境下，工作温度降至 120°C 。目前，湿/热环境下复合材料的压缩性能已成为筛选树脂基体的重要依据之一。因此，开发湿热稳定性高的树脂基体一直是树脂基复合材料研究的重点之一。

(2) 材料性能的分散较大。这与复合材料原材料的选择，制造过程中所发生的一系列复杂的化学反应和物理变化及文明生产、厂房环境等有关。实际上，复合材料制造的全过程都必须严格控制和检验，以保证制品质量的稳定性。

(3) 价格较高。与其他工程材料相比，复合材料存在价格较高的问题，这阻碍了它的应用，尤其是在民品中不能大量应用。其成本几乎是钢和铝的 5~20 倍，如玻璃纤维 20~2000 元/kg，碳纤维 80~700 元/kg，环氧树脂 30 元/kg，钢 4~20 元/kg，铝 10~20 元/kg。

(三) 复合材料和金属材料的比较

金属是各向同性材料，在各个方向上有着相同的结构性能。复合材料是各向异性材料，其单层轴向具有很高的强度和刚度，而在与之垂直的方向上性能较低。根据载荷和功能设计的交叉铺层层压板能使复合材料达到甚至超过金属的性能。当然，复合材料也可以铺成准各向同性的层压板。复合材料与金属的差别在于：

(1) 各个方向的性能不一致。

(2) 通过设计可以使其强度和刚度满足载荷要求。

(3) 拥有不同的材料强度差异。

(4) 厚度方向的强度低。

(5) 复合材料通常铺设成二维形式，而金属材料可制成坯料、棒料、锻件和铸件等。

(6) 对环境温度和湿度的敏感性较高。

(7) 抗疲劳损伤能力强。

(8) 损伤扩展表现为分层，而非穿透裂纹。

复合材料相对于金属的优点：

(1) 质量小。

(2) 耐腐蚀。

(3) 抗疲劳损伤能力强。

(4) 机械加工量少。

(5) 锥形截面与复杂外形易于实现。

(6) 可以根据强度/刚度的需要布置纤维方向。

(7) 采用共固化可以减少装配件和紧固件的数量。

(8) 吸收雷达微波（具有隐身性能）。

(9) 热膨胀几乎为零，减少在外层空间使用中出现的热问题。

复合材料相对于金属的缺点：

(1) 材料昂贵。

(2) 缺乏确定的设计许用值。

(3) 与金属材料接合容易造成电偶腐蚀问题，特别是在使用碳或石墨纤维时必须采取隔离措施）。

(4) 在极限温度与潮湿条件下，结构的性能会降低。

(5) 能量吸收能力差，易发生冲击损伤。

(6) 需要进行雷电防护。

(7) 检验方法既复杂又昂贵。

(8) 对于胶接，检测比较困难。

(9) 对于缺陷的准确定位比较困难。

(四) 树脂基复合材料的原材料

1. 增强纤维

碳纤维，由于其性能好、纤维种类多、成本适中等因素，在飞机结构上应用最广。拉伸强度在 3500~5500MPa，可作为承力构件的复合材料。

玻璃纤维，由于模量低，仅用于次要结构（整流罩、舱内装饰），但是其电性能和透波性适宜制作雷达罩等。

芳纶纤维，性能虽然尚佳，但是在湿热环境下性能明显下降，一般不用作飞

机主承力结构，多与碳纤维混杂使用。

硼纤维，因为纤维直径太粗又刚硬，成型加工性能不好，价格又十分昂贵，因此，其应用十分有限。

增强纤维的基本形式有纤维丝束、编织布和针织布。

纤维丝束是增强纤维的最基本形式。纤维丝束一般以预浸渍树脂基体并按照平行排列的纤维丝束条带，即单向带，供工艺成型结构使用。为了改善单向带工艺性能，通常将纤维丝束用少量维持纤维丝束经向排列的非承载作用的纬向纤维织成一种特殊的单向织物，又称无纬布或无纺布。无纬布浸渍树脂后也称为单向带，其纤维增强效果与纤维丝束基本相同，但其铺覆工艺大大改善。

2. 树脂基体

1) 热固性树脂基体

环氧树脂，是最早应用于飞机结构复合材料的树脂基体，而且至今在飞机结构用复合材料中占据主导地位。

酚醛树脂，是最早的人工合成树脂，酚醛树脂大量用于粉状压塑料、短纤维增强塑料。

双马来酰亚胺树脂，和环氧树脂相比，其优异性能主要表现为使用温度高（ $150\sim 230^{\circ}\text{C}$ ）、耐湿热。

聚酰亚胺树脂，有热塑性和热固性两种，均可作为复合材料基体。目前已正式付之应用的、耐高温性最好的是热固性聚酰亚胺基体复合材料。

2) 热塑性树脂

热塑性树脂即通称的塑料，该种树脂在加热到一定温度时可以软化甚至流动，从而在压力和模具的作用下成型，并在冷却后硬化固定。这类树脂一般软化点较低，容易变形，但可再加工使用。可以作复合材料的热塑性树脂品种很多，包括各种通用塑料（如聚丙烯、聚氯乙烯等），工程塑料（如尼龙、聚碳酸酯等）及特种耐高温的树脂（如聚醚醚酮、聚醚砜和杂环类树脂）。

（五）复合材料在飞机结构中的应用

将先进复合材料用于航空航天结构上可相应减重 $20\%\sim 30\%$ ，这是其他先进技术很难达到的效果。美国 NASA 的 Langley 研究中心在航空航天用先进复合材料发展报告中指出，气动设计与优化技术减重 4.6% ，复合材料机翼机身和气动剪裁技术减重 24.3% ，发动机系统和热结构设计减重 13.1% ，先进导航与飞行控制系统减重 9% ，说明了先进复合材料的减重应用最明显。

1. 在飞机结构中的应用

从国外情况看，各种先进的飞机都与复合材料的应用密不可分，国外军用飞机机体结构的复合材料用量见表 1-2。复合材料在飞机上的用量和应用部位已成为

衡量飞机结构先进性的重要指标。复合材料在飞机结构中的应用发展大体上分为三个阶段。

第一阶段基本在 20 世纪 60—70 年代，复合材料高的比强度和比模量的突出优点和飞机结构减重的迫切需求相契合，制造商开始将复合材料应用于非承力结构，如舱门、前缘、口盖、整流罩、扰流板等尺寸较小、受力较小的部件。

第二阶段基本在 20 世纪 70—80 年代，随着原材料性能和制备工艺的不断提高，复合材料逐渐应用到飞机的次承力结构，包括副襟翼、升降舵、方向舵、垂尾、平尾、鸭翼等受力较大、尺寸较大的部件。20 世纪 70 年代，美国 F-14 战斗机把碳纤维增强复合材料成功地应用在平尾上，这是复合材料史上的一个里程碑事件。波音 B777 将复合材料应用于垂尾、平尾等多处部件，共用复合材料 9.9t，占结构总重的 11%。

第三阶段基本上起始于 20 世纪 80 年代，随着高性能碳纤维的开发和复合材料整体成型工艺的逐渐成熟，复合材料开始应用于飞机的机翼、机身等受力大、尺寸大的主承力结构中。美国麦道飞机公司于 1976 年率先研制 F-18 的复合材料机翼，并于 1982 年开始服役。由于在机翼中的应用，复合材料在飞机结构中的占比提高到了 13%。之后，复合材料在 AV-8B 的机翼和前机身上的应用，将复合材料占飞机结构总重的百分比提高到了 26%。

表 1-2 国外军用飞机机体结构的复合材料用量

机种	研制时间	复合材料/%	应用部位	钛合金/%
JAS-39	1982—1988 年	32	机翼、垂尾、前翼、舱门等	—
Rafale “阵风”	1986—1991 年	24	垂尾、机翼	—
EF-2000 “台风”	1988—1994 年	40	机翼、前中机身垂尾、前翼	12
F-22 “猛禽”	1988—1996 年	25	机翼、前中机身蒙皮、垂尾、平尾及大轴	36
F/A-18E/F	1990—1998 年	22	垂尾、平尾、减速板、机翼蒙皮和前缘	23
S-37	约 1997 年	21	—	—
Mig1.44	约 2001 年	30	机身、机翼、鸭翼	30
B-2	约 1989 年	37	机翼前缘、中央翼的 40%、外翼中部和侧后部	23
V-22	约 1989 年	42	机身、机翼、尾翼、旋转机构	—
RAH66 “科曼奇”	约 1995 年	41		13
F-35	约 2000 年	35	机翼、机身、垂尾、平尾、进气道	

近年来，国内飞机上也较多地使用了先进复合材料（ACM）。例如，由国内多家科研单位共同研制的飞机垂尾壁板，比原铝合金结构轻 21kg，减质量 30%。国内研制并生产的 QY8911/HT3 双马来酰亚胺单向碳纤维预浸料及其 ACM，已用于飞机前机身段、垂直尾翼安定面、机翼外翼、阻力板、整流壁板等构件。由北

京航空材料研究院研制的 PEEK/AS4C 热塑性树脂单向碳纤维预浸料及其 ACM, 具有优异的抗断裂韧性、耐水性、抗老化性、阻燃性和抗疲劳性能, 适合制造飞机主承力构件, 可在 120℃ 下长期工作, 已用于飞机起落架舱护板前蒙皮。歼-10 飞机在鸭翼、垂尾、襟副翼、腹鳍等结构中采用了复合材料。“猎鹰” L15 高教机在机头罩、方向舵和垂尾等部位采用了复合材料。

随着大飞机项目的启动, 国内复合材料在航空工业中的应用水平日益提升。我国已经能够制造大型客机中央翼、襟翼及运动机构部段, 这是 C919 大型客机七大部段中难度最大、工作量最大的两个部分。这两个部段尺寸大、结构复杂、外形公差要求高, 尤其是国内民机最长尺寸、长达 15m 的襟翼缘条加工, 技术难度非常大。制造公司突破了复合材料大型成型模具设计制造技术、复合材料构件预装配变形控制技术等多项技术难关, 整个研制过程全部采用先进的三维数字化设计、传递与制造, 中央翼部段除 1 号肋是金属件外, 其他全部采用了先进的中模高强碳纤维/增韧环氧树脂复合材料制造。

随着无人机技术的发展及其应用的不断拓展(无人机具有低成本、轻结构、大过载、高机动、高隐身、长航程等特点), 复合材料在无人机上的应用更加凸显。美国波音公司的 X-45 系列飞机的复合材料用量达到 90% 以上。诺斯罗普·格鲁曼的 X-47 基本上为全复合材料飞机。“全球鹰”高空长航时无人侦察机复合材料用量达到 65%, 其机翼、尾翼、后机身、大型雷达罩等均由复合材料制成, 全复合材料机翼长达 35m。在 2011 年中国国际通用航空大会上, “天弩”“风刃”等无人机采用了全机结构碳纤维增强复合材料。V750 无人直升机、小型通用航空双座飞机, 也都大范围采用了碳纤维复合材料。

复合材料在飞机结构上应用呈以下发展趋势: ①复合材料在飞机上的用量日益增多; ②应用部位由次承力结构向主承力结构过渡; ③复合材料在复杂曲面构件上的应用越来越多; ④构件向整体成型、共固化方向发展。

2. 在航空发动机上的应用

树脂基先进复合材料优异的比强度和比模量性能对于高推比的航空发动机的减重、提高推进效率、降低噪声和排放及降低成本等都具有重要的意义。树脂基先进复合材料一般应用在航空发动机的冷端部件上, 其使用温度通常在 150~200℃ 以下, 主要包括低温低压的涡扇发动机压气机叶片、导向叶片及其框架组件、涡扇发动机的鼻椎、整流罩等。

美国通用电气飞机发动机事业集团公司(GE-AEBG)和普拉特·惠特尼公司(简称“普惠”), 都在用先进复合材料取代金属制造飞机发动机零部件, 包括发动机舱系统的许多部位推力反向器、风扇罩、风扇出风道导流片等都用先进复合材料制造。

美国聚合物公司的碳纤维环氧树脂预浸料(E707A)叠铺而成的发动机进口气罩的外壳,它具有耐 177℃ 高温的热氧化稳定性,壳表面光滑似镜面,有利于形成层流。又如,FW4000 型发动机有 80 个 149℃ 的高温空气喷口导流片,也是碳纤维环氧预浸料制造的。

据波音公司估算,喷气客机质量每减轻 1kg,飞机在整个使用期限内可节省 2200 美元。

3. 在机用雷达天线罩上的应用

机用雷达天线罩是一种罩在雷达天线外的壳形结构,要求透微波性能良好,能承受空气动力载荷作用且保持规定的气动外形,便于拆装维护,能在严酷的飞行条件下正常工作,可抵抗恶劣环境引起的侵蚀。先进复合材料具有优良的透雷达波性能、力学性能和简便的成型工艺,是理想的雷达罩材料。目前制作雷达罩材料采用较多的是玻璃纤维/环氧树脂复合材料。

思考题

1. 你所在单位飞机结构中哪些结构采用了复合材料?
2. 推测飞机上哪些结构可以采用复合材料,为什么?
3. 设计试验,验证纤维增强树脂基复合材料和飞机常用铝合金材料之间的力学性能差异。