

高等教育“十三五”规划教材·无人机应用技术

无人机复合材料结构设计与制造技术

符长青 符晓勤 曹兵◎编著



西北工业大学出版社

无人机复合材料结构设计与 制造技术

符长青 符晓勤 曹兵 编著

000025001
西北工业大学出版社

西安

【内容简介】 本书系统而全面地介绍了无人机复合材料结构设计与制造的主要内容和知识体系。全书共8章,主要内容包括无人机结构材料概述、复合材料的组分、无人机复合材料结构设计、无人机复合材料基础构件设计、无人机复合材料机身结构设计、固定翼无人机复合材料机翼和尾翼设计、旋翼无人机复合材料旋翼系统设计和无人机复合材料结构制造。每章后均附有习题。

本书既适合作为高等学校无人机、航空工程、复合材料、计算机(人工智能)及其相近专业的教材,也可作为从事无人机科研、生产和培训机构工作人员,以及广大航模爱好者的学习和培训教材;对于希望全面了解无人机复合材料结构设计与制造知识的读者也是一本有益的参考读物。

图书在版编目(CIP)数据

无人机复合材料结构设计与制造技术/符长青,符晓勤,曹兵编著. —西安:西北工业大学出版社, 2019.3

ISBN 978-7-5612-6462-1

I. ①无… II. ①符… ②符… ③曹… III. ①无人驾驶飞机-复合材料-结构设计 ②无人驾驶飞机-复合材料-制造 IV. ①V279

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 038352 号

WURENJI FUHE CAILIAO JIEGOU SHEJI YU ZHIZAO JISHU

无人机复合材料结构设计与制造技术

责任编辑:何格夫 朱晓娟	策划编辑:杨 军
责任校对:孙 倩	装帧设计:
出版发行:西北工业大学出版社	
通信地址:西安市友谊西路 127 号	邮编:710072
电 话:(029)88491757, 88493844	
网 址:www.nwpup.com	
印 刷 者:兴平市博闻印务有限公司	
开 本:787 mm×1 092 mm	1/16
印 张:17.5	
字 数:460 千字	
版 次:2019 年 3 月第 1 版 2019 年 5 月第 1 次印刷	
定 价:56.00 元	

如有印装问题请与出版社联系调换

前 言

由于无人机机上“无人”，其结构尺寸相对较小，经济性好，使用方便，可以进入危险恶劣的环境而不怕“牺牲”地工作，因此，无人机不但在军用方面被广泛应用，在民用方面的应用也越来越受到关注和重视。不论是军用还是民用无人机，减轻结构质量、缩小结构体积一直是现代无人机设计与制造追求的目标。只有严格控制结构质量系数，才能腾出质量空间让给燃油、有效载荷、补偿隐身带来的增重，满足轻结构、长航时、高隐身和高机动等技术要求。为了减轻无人机结构质量，除了采用合理的结构形式以外，最有效的方法是选用强度高、刚度大、质量轻、耐高温、抗低温、疲劳/断裂特性好、具有良好的加工性能，以及价格相对较低廉的新型高性能结构材料。

众所周知，航空飞行器的发展历程，是以材料性能的进步和提高为主要标志的，“一代材料，一代飞行器”是航空工业发展的生动写照。航空结构材料在很大程度上对航空飞行器的发展和创新起到了决定性作用。在物理学和化学领域中，人们常把材料按物理化学属性分为金属材料、无机非金属材料、复合材料等，因此航空结构材料通常也可分为金属材料、无机非金属材料 and 复合材料等。从1903年莱特(Wright)兄弟创造的固定机翼飞机滑跑起飞成功，到今天的100多年的时间里，航空结构材料至今已经历了三个大的发展阶段，即木布时代、金属时代和复合材料时代，目前已进入第三阶段——复合材料时代。

无人机结构设计中大量采用复合材料是结构减重的主要技术措施，如使用碳纤维复合材料、玻璃纤维复合材料、蜂窝夹层复合材料等。通常无人机除个别结构件(如起落架)采用金属材料外，机翼(或旋翼)、尾翼(或尾桨)、机身及各种天线罩、护板、蒙皮等结构件均大量使用复合材料。复合材料在无人机结构上的广泛应用对无人机结构轻质化、小型化和高性能化已经起到了至关重要的作用。

纵观世界各国的无人机，无一例外地大量使用了轻质、比强度高、比模量高、抗疲劳能力强、抗震能力强的结构复合材料。复合材料具有很强的可设计性，既可以设计出轻质、高性能、高气动弹性的结构，又可以很容易地在其表面喷涂隐身涂层，还可以添加不同的增强相从而降低高速下复合材料的损伤容限。此外，还可以在复合材料机体结构中埋入芯片或传感器，形成智能材料，对结构进行实时监测。无人机复合材料结构主要包括层合板结构、夹层结构、加筋

板和格栅结构等。由于其具有很强的可设计性,在结构整体设计中可以大大减少无人机零部件的数量,采用复合材料整体化结构与制造技术已成为无人机发展趋势。

本书取材新颖、叙述方法深入浅出,注重无人机复合材料结构与制造的基础知识。但书中并不包括对烦琐数学公式的推导,而侧重讲述无人机复合材料结构与制造的相关技术,内容丰富、概念清楚易懂。

在本书编写过程中参阅了相关文献资料,在此,谨向其作者表示感谢。

由于水平与精力所限,书中难免有不妥之处,敬请各位同行、专家和读者批评指正。

编著者

2018年10月

目 录

第 1 章 无人机结构材料概述	1
1.1 无人机结构设计相关的基础知识	1
1.2 航空结构材料的发展历程	4
1.3 无人机对高性能结构材料需求的意义	9
1.4 复合材料的基本概念	13
1.5 智能复合材料与隐身结构设计	21
习题 1	27
第 2 章 复合材料的组分	28
2.1 碳纤维	28
2.2 玻璃纤维	35
2.3 硼纤维与芳纶纤维	39
2.4 填充材料	41
2.5 复合材料树脂基体	43
习题 2	54
第 3 章 无人机复合材料结构设计	55
3.1 无人机结构设计的基本概念	55
3.2 无人机复合材料结构设计的基本概念	60
3.3 无人机复合材料结构设计的特点、过程和方法	64
3.4 无人机复合材料结构的设计要求	72
3.5 无人机复合材料结构的材料设计	79
习题 3	85
第 4 章 无人机复合材料基础构件设计	86
4.1 复合材料层合板设计	86
4.2 复合材料加筋板设计	94
4.3 复合材料夹层结构设计	96
4.4 复合材料格栅结构设计	105

4.5 复合材料结构连接设计	108
习题 4	116
第 5 章 无人机复合材料机身结构设计	117
5.1 无人机机身结构的基础知识	117
5.2 无人机机身典型结构和传力分析	124
5.3 无人机复合材料机身结构的整体化设计	131
5.4 无人机复合材料机身结构的设计要点	139
习题 5	149
第 6 章 固定翼无人机复合材料机翼和尾翼设计	150
6.1 固定翼无人机机翼结构的基础知识	150
6.2 复合材料机翼结构设计与制造工艺	155
6.3 复合材料翼面结构综合优化设计	161
6.4 复合材料机翼典型结构件设计	167
6.5 固定翼无人机复合材料尾翼结构设计	172
习题 6	181
第 7 章 旋翼无人机复合材料旋翼系统设计	182
7.1 旋翼无人机旋翼系统的基本概念	182
7.2 复合材料旋翼桨叶结构设计	192
7.3 复合材料旋翼桨毂结构设计	203
7.4 复合材料尾桨结构设计	210
7.5 多旋翼无人机复合材料螺旋桨结构设计	212
习题 7	215
第 8 章 无人机复合材料结构制造	216
8.1 无人机复合材料结构制造的基本概念	216
8.2 复合材料手糊成型工艺	224
8.3 复合材料热压罐成型工艺	231
8.4 复合材料缠绕成型工艺	235
8.5 复合材料模压成型工艺	239
8.6 复合材料拉挤成型工艺	242
8.7 复合材料液体成型工艺	247
8.8 热塑性树脂基复合材料的成型工艺	256
8.9 复合材料低成本制造技术和机械加工	263
8.10 复合材料无损检测技术	268
习题 8	272
参考文献	273

第1章 无人机结构材料概述

本章主要内容包括以下方面：

- (1) 无人机结构设计相关的基础知识。
- (2) 航空结构材料的发展历程。
- (3) 无人机对高性能结构材料需求的意义。
- (4) 复合材料的基本概念。
- (5) 智能复合材料与隐身结构设计。

1.1 无人机结构设计相关的基础知识

本章首先介绍无人机结构设计相关的基础知识,包括基本概念和基本知识(如无人机及其结构的定义、无人机总体结构的类型等),它们属于无人机结构设计入门的知识;其次深入介绍和讨论无人机结构设计和制造的主要内容。

1.1.1 无人机及其结构的定义

1. 无人机的定义

(1) 航空飞行器的类型。

航空飞行器是指飞行动力依靠空气,只能在大气层内飞行的飞行器,如孔明灯、风筝、热气球、地效船、飞机、直升机和无人机等。航空飞行器根据其自身质量的比重(单位体积的质量)是否重于空气(大气)的比重,又分为以下两种:

1) 无动力航空飞行器。一种自身质量的比重比空气的比重轻,如孔明灯、热气球等,或是靠风的推力升扬于空中,如风筝等,其特点都是不需要安装动力装置就能飞上天空,统称为无动力航空飞行器。

2) 动力航空飞行器。自身质量的比重比空气的比重大,需要依靠动力装置提供飞行动力才能升空的航空飞行器,称为动力航空飞行器,包括固定翼飞机(简称“飞机”)和旋翼飞行器(简称“直升机”)等。其中飞机可分为有人驾驶飞机(简称“有人飞机”)和无人驾驶飞机(简称“固定翼无人机”)两类;直升机也可分为有人驾驶直升机(简称“有人直升机”)和无人驾驶直升机(简称“旋翼无人机”)两类。固定翼无人机和旋翼无人机统称为无人机。

(2) 无人机的定义。

无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)就是无人驾驶飞行器(简称“无人飞行器”)。它是指机上不搭载操作人员(飞行员)的一种动力航空飞行器,采用空气动力为飞行器提供所需的升力,能够携带有效载荷进行全自动飞行或无线引导飞行;既能一次性使用,也能进行回收

或自动着陆,以便进行多次重复使用。它在无人机系统中全称为“无人机飞行平台”,简称“无人机”,是无人机系统中最基本、最重要部分。无人机的主要功能是承载各种仪器设备及任务载荷飞行到指定空域展开工作或进行战斗。

2. 无人机结构的定义

所谓“结构”指的是受力系统,是能承受和传递载荷,并能保持足够强度和刚度的零部件的总称。无人机结构是能够承受和传递载荷的受力系统,外载荷在结构中以内力的形式传递,并最终实现相互平衡。它是构成无人机系统的基础,主要功能是承受和传递作用在它上面的各种载荷,维持一定的外部 and 内部形状,以满足无人机空气动力学、动力装置安装、结构静强度和疲劳强度、结构动力学、气动弹性力学、任务装载、飞行控制、生产工艺、使用维护和安全等各方面的要求。

无人机结构设计应保证结构在承受各种规定的载荷状态下具有足够的强度和刚度,不产生不能容许的残余变形,以及避免出现不能容许的气动弹性问题与振动问题,还应当具有足够的使用寿命等。但并不是要求强度和刚度愈大愈好,增大强度和刚度往往总是伴随着增加结构质量,从而影响无人机的飞行性能和有效载重,因此在满足一定的强度和刚度要求的前提下尽可能减轻结构质量。

1.1.2 无人机总体结构的类型

无人机按照其产生升力结构部件的不同,可分为固定翼无人机和旋翼无人机两大类。

1. 固定翼无人机的总体结构

固定翼无人机的总体外形和基本结构与有人驾驶航空飞行器中的固定翼飞机(简称“飞机”)相同。固定翼无人机总体结构主要由机翼、机身、尾翼、起落装置和动力装置(发动机)五个主要部分组成,如图 1-1 所示。机翼是固定翼无人机必不可少的关键部件,因为固定翼无人机必须依靠机翼产生向上的升力,克服重力,才能实现升空飞行。机翼的功用除了产生升力以外,同时也起到一定的稳定和操控作用。

固定翼无人机具有续航时间长、飞行速度快、飞行效率高和载荷大等优点,缺点是起飞降落时机场需要有长距离跑道,以及不能进行空中悬停等。

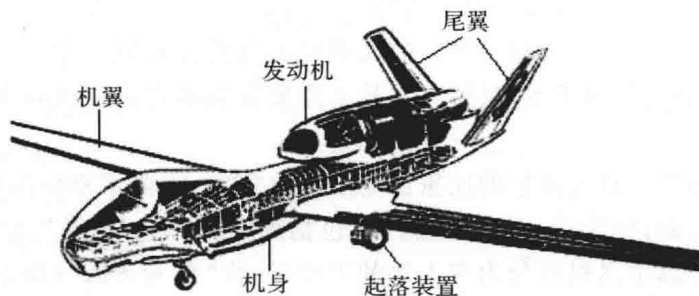


图 1-1 固定翼无人机(全球鹰)总体结构示意图

2. 旋翼无人机的总体结构

旋翼无人机的总体外形和基本结构与有人驾驶航空飞行器中的旋翼飞行器(简称“直升机”)相同。旋翼无人机是指具有一个或多个由发动机驱动的旋转机翼(旋翼)的无人航空飞行器。

旋翼无人机总体结构的基本组成部分与有人直升机大致相同,其中单旋翼带尾桨无人机由旋翼系统、机体结构(机身)、涵道尾桨、起落装置和动力装置等主要部分组成,如图1-2所示。它与固定翼无人机在结构外形和飞行原理上的差别,使得它具有固定翼无人机所不具备的飞行特点:垂直升降,空中悬停,小速度前飞、后飞、侧飞,原地回转和树梢高度飞行等。其缺点是速度低、耗油量较高和航程较短等。

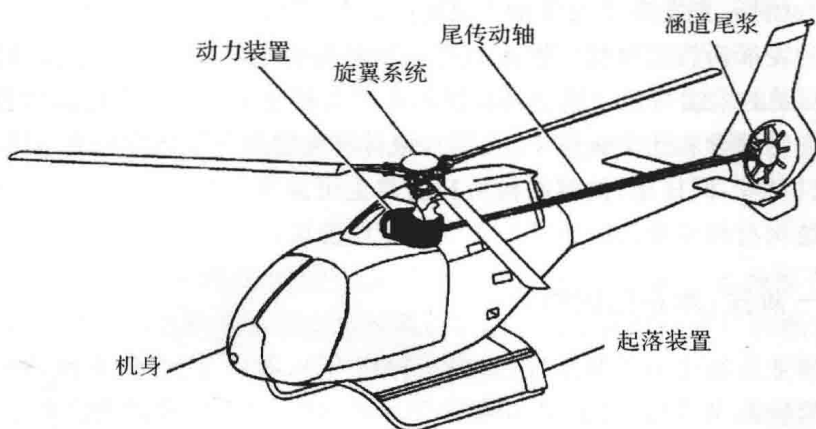


图 1-2 单旋翼带尾桨无人机结构示意图

旋翼是旋翼无人机的关键部件,旋翼绕主轴旋转时,每片桨叶与固定翼无人机的一个机翼类同。沿半径方向每段桨叶上产生的空气动力在桨轴方向上的所有分量的合成力,即为桨叶的总升力,所有桨叶的总升力合成构成旋翼总拉力,起到克服重力的作用。旋翼无人机旋翼由发动机驱动在空气中旋转,给周围空气以扭矩,因而空气必定以大小相等、方向相反的扭矩作用于旋翼,继而传递到机体上。如果不采取补偿措施,这个反作用扭矩将使机体发生逆向旋转。旋翼产生反扭矩的原理就好比人们用桨划船一样,如图1-3所示。

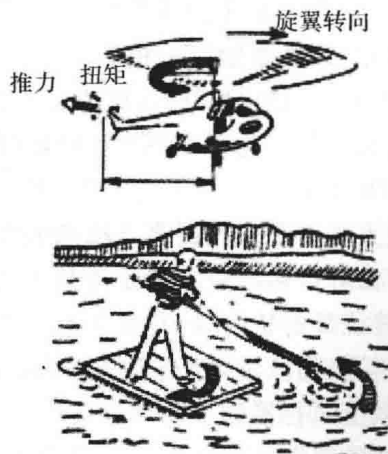


图 1-3 旋翼产生反扭矩的原理示意图

为了消除这个反扭矩作用以保持旋翼无人机机体的航向,可以采用不同的方式,因此出现了不同总体结构布局的旋翼无人机,包括单旋翼带尾桨式、双旋翼共轴式、双旋翼纵列式、双旋翼横列式布局、多旋翼式以及其他形式(如复合式、组合式、倾转旋翼式、涵道式等)。

1.2 航空结构材料的发展历程

材料是航空飞行器赖以存在和发展的物质基础,航空结构材料是泛指用于制造航空飞行器的材料。在人类航空发展史上,航空结构材料与航空飞行器两者是在相互推动下不断发展的,其中航空结构材料一直发挥着先导和基础作用。

航空飞行器的发展历程是以材料性能的进步和提高为主要标志的,“一代材料,一代飞行器”是航空工业发展的生动写照。航空结构材料在很大程度上对航空飞行器的发展和创新起着决定性作用。在物理学和化学领域中,人们常把材料按物理化学属性分为金属材料、无机非金属材料 and 复合材料等,同样地,航空结构材料通常也可分为金属材料、无机非金属材料 and 复合材料等。航空结构材料至今已经历了三个大的发展阶段,目前已进入第三阶段。

1.2.1 第一阶段:木布结构时代

在人类航空事业发展史的早期阶段(1903—1918年),即从1903年莱特(Wright)兄弟创造的固定翼飞机滑跑起飞成功,到1918年的十多年的时间,飞机结构较为简单,主要用到的材料有木材、蒙布、金属丝和钢索等。这期间所有的飞机都是用木三夹板、木条等来做飞机大梁和飞机骨架,采用亚麻布做机翼的翼面,这一阶段被称为航空结构材料的木布结构时代,其代表作即世界上第一架飞机——莱特兄弟的“飞行者”号,该飞机为木制骨架、布蒙皮双翼机。

1.2.2 第二阶段:金属时代

从1919年世界上第一架金属飞机F-13旅客机诞生之日起,直到2004年,在长达85年的时间,用于飞机制造的航空结构材料都是采用金属,或以金属为主,辅助以其他材料(如复合材料),因此这一阶段称为航空结构材料的金属时代。金属时代以金属材料制造的飞机为主,一般把金属用量达到整机结构材料总重的51%以上的飞机称为“金属飞机”;把金属用量达到整机结构材料总重的91%以上的飞机称为“全金属飞机”。俗话说“坚强如钢”,在人们的头脑中采用金属材料就意味着强度高、刚度硬、寿命长、稳定性好,这样的飞机才是品质优良的飞机。

通常航空结构材料金属时代又可细分为下面三个子时期(阶段)。

1. 铝、钢时期(从1920年到1949年)

飞机结构采用木质材料的缺点主要是很难提高飞机的强度、载重能力和飞行性能,而且木质材料具有吸湿性强、易燃、易腐蚀等许多缺点。为了取代木质材料,在航空结构材料发展的第二阶段,人们成功地研制出性能优异的铝合金,它是在铝中加入铜、锌、镁、锂、硅等元素形成的合金,具有较高的强度、刚度和较轻的质量,以及工艺性能优良、成型方便、成本低等其他合金所不能比拟的优点,成为许多航空飞行器的主要结构材料。

除了铝合金,这一阶段最重要的航空结构材料还包括合金钢。合金钢是在普通碳素钢基础上添加适量的一种或多种元素而构成的铁碳合金。根据添加元素的不同,采取适当的加工工艺,可获得高强度、高韧性、耐磨、耐腐蚀、耐低温、耐高温、无磁性等特殊性能。由于合金钢具有较高的强度,性能稳定,工艺简单,成本低廉,是制造承受大载荷的接头、起落架和主梁等构件最合适的材料之一。材料应用技术水平的提高也在推动起落架寿命的进一步延长和适应性的扩大。如空客A380大飞机起落架采用了超大型整体锻件锻造技术、新型气氛保护热处

理技术和高速火焰喷涂技术,使得起落架寿命满足设计要求。由此可知,新材料和制造技术的进步确保了飞机的更新换代。

(1) 铝合金材料的出现。

1906年德国工程师 Wilm(威尔姆)在一次实验中,发现含有一定成分其他金属的铝合金其硬度和强度均有所增加,这就是世界上第一种铝合金。后来由杜拉金属公司制造成功,故被称为杜拉铝。杜拉铝属于可热处理强化铝合金,具有较高的力学性能,比镁铝合金更轻、更薄,硬度是铝镁合金的两倍。1919年德国容克斯公司设计制造出世界上第一架全金属飞机 F-13 旅客机,机翼用 9 根杜拉铝管作翼梁以承担弯矩,用波纹铝板作蒙皮以承担扭矩。该机于 1919 年 6 月 15 日首次试飞成功,这在国际民航史上占有重要地位。到 20 世纪 30 年代,金属(主要是铝合金和钢)才逐渐成为普通的常用的飞机结构材料。

(2) 铝合金的发展。

变形铝合金采用熔融法制备,再经受金属塑性变形加工,可制成各种形态的铝合金,适宜于用作飞机结构材料;铸造铝合金可用金属铸造成型工艺直接获得零件的铝合金,适宜于作航空发动机结构材料。

1) 20 世纪 20 年代,美国在铝合金中增加了硅的含量,研制出 2014 铝合金,进一步提高了铝合金的抗拉强度。

2) 20 世纪 30 年代,美国在铝合金中又增加了镁的含量,并稍稍增加了铜的含量,研制出性能更好的 2024 铝合金(超杜拉铝合金),进一步提高了塑性。至今它都是飞机结构的主要材料。

3) 1937 年日本五十岚勇研制成功超强铝合金 ESD(超高级杜拉铝),应用于日本的零式战斗机。这种铝合金比钢还硬。有了这种金属零式战斗机设计时就采用了很细的飞机框架,并且敢在上面钻减重孔,此外铆钉尺寸也非常小,在能保证战机结构强度的情况下大大减轻了飞机质量。不久,美国获得了零式飞机的合金样本,研制出了 7075 铝合金,并将其用于 B-29 轰炸机。

4) 1943 年美国埃肯公司研制成功新合金 75S,加入了铬,使得合金的抗腐蚀性得到改善,从 20 世纪 40 年代开始,合金 75S 广泛用于飞机结构材料,是航空结构材料上一次重大突破。

5) 1954 年美国埃肯公司研发出 2219 铝合金,用作在 260~316℃下工作的部件。

6) 1969 年,随着高速飞机出现,美国凯瑟公司为了提高材料的疲劳、断裂性能,研制出 7049 及 7050 铝合金,应用到美国 F-111, F-5, B-52 和 DC-10 等军用和民用飞机上。

7) 近年来,面对航空碳纤维(Carbon Fiber, CF)复合材料的崛起与竞争,人们成功研发出了铝锂合金材料,其气动性更好、防腐能力更强、质量更轻,并且其制造、运行、维修成本更低。在新型航空飞行器设计制造中,采用铝锂合金材料可使原铝合金零部件的质量减轻 14%~30%。铝锂合金材料已成为包括新一代航空飞行器在内的关键性结构材料。铝锂合金材料被运用在先进的特大型民用飞机上,例如空客 A380 选用铝锂合金材料制造地板梁、机身蒙皮和地板结构等,其用量达总结构质量的 23%。

2. 铝、钢、钛时期(从 1950 年到 1969 年)

在飞机速度不断提高的过程中,遇到的第一个关口是“声障”。飞机在突破“声障”以后,随着速度的提高,又会遇到一个新关口——“热障”,热障的出现使飞机结构材料面临新课题。实验表明,当飞机以 $Ma=2.0$ 的速度在同温层飞行时,机头温度可达 120℃;当飞行速度提高到

$Ma=3.0$ 时,机头温度可达 370°C 。此时,作为飞机主要结构材料的铝合金,材料性能急剧下降,无法在高温环境下长期工作,从而造成飞机结构破坏,危及飞行安全。

由于铝合金所能承受的温度载荷有限,从20世纪50年代开始,航空结构材料进入了包含铝、钢、钛合金时期。钛合金具有比强度高、耐腐蚀性好和耐高温等一系列优点,能够进行各种方式的零件成型、焊接和机械加工,因而在先进飞机及发动机上获得了广泛应用。钛合金在飞机结构上的应用始于1949年,钛合金首次用在F-86战斗机后机身隔热板、导风罩和机尾罩上,约占全机结构质量的1%。钛合金用量占飞机结构的质量分数曾经成为衡量飞机用材先进程度的重要标志之一,例如SR-71“黑鸟”是美国空军曾经使用的一款长航程、超声速战略侦察机,于1964年12月22日首飞,1966年1月服役,1998年退役。因其93%的机体结构采用了钛合金,号称全钛飞机,所以“黑鸟”顺利地越过了“热障”,创造了3.3倍声速的世界纪录。

当然在这一时期,除了高超声速飞机要比较大量地使用钛合金以外,其他非高超声速飞机主要还是使用铝合金和合金钢材料,但钛合金所占的比例有所增加,或者是有相当明显的增加,也有的飞机钛合金的用量相当于或超过铝合金材料用量。

3. 过渡时期(从1970年到2004年)

在人类航空事业发展史上,减重是航空飞行器发展所一直追求的主要目标。虽然金属材料的性能有很大提高,但是单单依靠提高金属材料性能来进一步降低飞机结构质量系数(即飞机结构质量与飞机起飞质量的比值)已达到了限度。为此,航空结构材料和结构设计师们不得不寻求新的途径,世界上各主要航空大国都对航空飞行器结构设计所用的高性能材料的研发工作给予高度重视,投入了大量的研发资金,并取得了非常突出的进展和成绩。

材料科学的发展造就了高强度、高模量、低密度的碳纤维,从而掀开了先进复合材料时代的序幕。日本于1959年首先发明了聚丙烯腈(PAN)基碳纤维,并于20世纪60年代初将其投入工业化生产,70年代中期以碳纤维为增强相的先进复合材料诞生。所谓复合材料就是运用技术方法将不同性质的材料分化后组合而成的新材料,它需要满足以下条件:

1)必须是人工合成的材料和根据需要设计的新材料才能是复合材料。

2)复合材料必须是两种以上的性质不同材料相组成,并且各组成部分之间没有明确的界限存在。复合材料不仅可以取不同材料的优点,还能使不同材料间的性质更加接近互补。

从20世纪70年代到21世纪初,高比强度、高比刚度且能按控制结构变形要求来设计的纤维增强树脂基复合材料,为航空高性能结构材料的发展打开了一扇充满希望的大门。由于人们最初对复合材料结构的对环境敏感性和损伤破坏机理不是很清楚,复合材料只用在固定翼飞机的舱门、整流罩、尾部安定面等非主要受力结构上,逐步扩展应用到机翼、旋翼和机身等主承力结构上。

这一时期,航空结构材料虽然仍以铝、钢、钛金属材料为主,但复合材料在飞机结构上的应用已经受到越来越受到世界各国的重视,并逐步普及开来。以美国军用有人驾驶军用飞机的发展过程为例,从第三代战斗机(如F-15, F-16和F-18等)到第四代战斗机(如F-22)的材料需求,以进一步减重、提高飞机推重比和机动性,以及忍耐飞行中带来的热负荷和具有隐身功能为目标,逐步减少传统金属加工的比例,优先发展复合材料制造,使复合材料的质量分数增至40%(如F-22)以上。F-22战斗机,绰号“猛禽”,是美国一型单座双发高隐身性第五代战斗机,是世界上第一种进入服役的第五代战斗机。F-22战斗机结构设计中大量采用复合材料,复合材料用量占全机总质量40%,应用整体化技术使金属零部件用量减少了95%,各

种紧固件用量减少了 96%，而复合材料结构件本身也从 600 个零部件减少到 200 个，复合材料的用量也减少了 66%。其隐身性能、灵敏性、精确度和态势感知能力结合，组合其空对空和空对地作战能力，使得它成为当今世界综合性能最佳的战斗机。

由美国贝尔公司和波音公司联合设计制造的一款倾转旋翼直升机 V-22 鱼鹰直升机，整机结构有超过 51% 为复合材料制造，包括旋翼系统、机身、机翼和尾翼等，成为世界上第一款复合材料军用飞机。它兼具直升机和固定翼螺旋桨飞机的优点，从垂直起飞到水平飞行的转换是自动完成的，如图 1-4 所示。执行飞行任务时有超过 70% 时间以固定翼飞机模式飞行，最大速度可达 650km/h，最大悬停质量可达 21 800kg，最大航程可达 3 890km，如果进行空中加油，该机具有从美国本土直飞欧洲的能力，而常规直升机的航程很少超过 1 000km，最大速度通常也小于 300km/h。

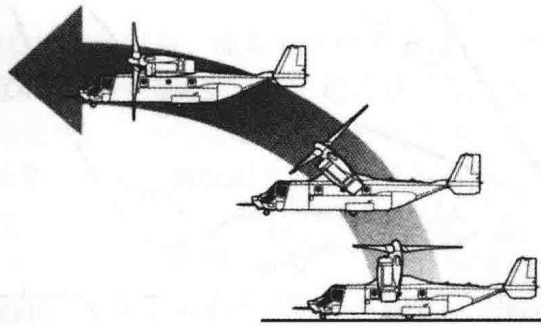


图 1-4 V-22 从垂直起飞到水平飞行的转换示意图

表 1-1 列出了美国主要有人驾驶军用飞机结构设计所采用的四种材料比例的变化情况。

表 1-1 美国主要军用飞机结构设计所用四种材料比例的变化 单位：%

机种	设计年代	复合材料	钛合金	铝合金	钢
F-14	1969 年	1	24	39	17
F-16	1976 年	2	3	64	3
F-18	1978 年	10	13	49	17
AV-8B	1982 年	26	9	49	15
B-2	1988 年	28	26	19	6
F-22	1989 年	40	37	11	5
V-22	1989 年	51	26	12	4

从表 1-1 可以看出，美国主要军用飞机结构材料使用的复合材料数量，从 20 世纪 70 年代的微不足道，发展到 51% 只用了 20 年的时间。这 20 年的时间可以视为航空结构材料从“金属材料”向“复合材料”方向转变的过渡时代。

航空飞行器复合材料技术是随着航空结构材料科学的发展而逐步发展起来的，不仅是军用飞机，各国民用飞机也都在朝着大量使用复合材料的方向发展，如图 1-5 所示。从图 1-5 可以看出，20 世纪 60 年代中期，随着碳纤维的诞生，以碳纤维为主要增强材料的先进复合材料也随之问世，70 年代中开始应用于航空飞行器结构上，并以其高比强度、高比刚度、可设计

性强、疲劳性能好、耐腐蚀、多功能兼容性、材料与构件制造的同步性和便于大面积整体成型等特点,在航空领域的应用日益广泛,是继铝、钢、钛之后已迅速发展成最重要的航空飞行器结构材料。新一代大型民用飞机(如波音 787 和 A350)复合材料的质量分数超过 51%以上,成为名副其实的复合材料大型民用飞机。

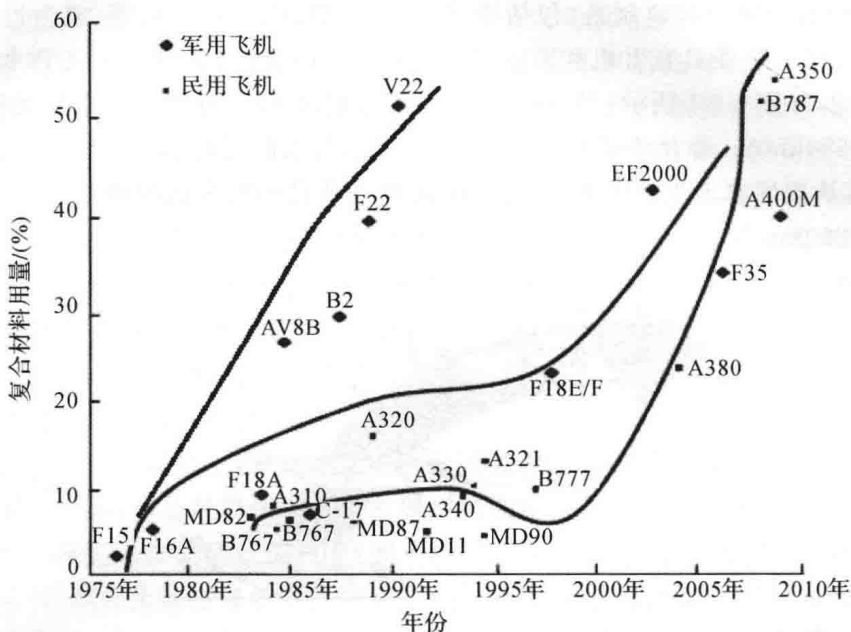


图 1-5 典型军用和民用飞机复合材料用量发展趋势图

1.2.3 第三阶段:复合材料时代

前面已经定义了航空结构材料的“金属时代”是指航空飞行器结构所使用的材料以金属(铝、钢、钛等)为主的时间段,同样道理,如果新研制的航空飞行器结构所使用的航空结构材料以复合材料为主,即新研制的绝大多数飞行器结构的复合材料用量达到或超过结构总质量的 51%,而金属材料及其他一些材料(如木材和化工材料等)只起到辅助材料的作用(质量分数低于 49%),那就可以称该时间段为航空结构材料的“复合材料时代”。现代高性能复合材料与金属(铝、钢)相比,意味着结构强度更高、刚度更大、质量更轻、耐高温、抗低温、疲劳/断裂特性好、具有良好的加工性能,以及价格相对较低廉等。

如果航空飞行器结构所使用的复合材料的质量达到或超过全机结构总质量的 51%,则可定义该飞行器为复合材料飞行器;如果复合材料的质量达到或超过结构总质量的 91%,则可定义该飞行器为全复合材料飞行器。2005 年 10 月美国贝奇飞机制造公司制造出世界上第一架全复合材料密封固定翼飞机,复合材料的质量达到全机结构质量 98%。它是一架载客用的民用飞机,载客 10 人,由 2 600 个部件组成,部件数量要比全金属同类型飞机少了 30%,部件数量少也会降低发生事故的概率。它使用了耐热性能好的碳纤维层,中间夹有环氧化物、石墨和环氧物的保护层包裹着一种蜂窝状材料。这种复合结构要比全金属结构普遍使用的铝、钢和钛的金属材料轻一半,强度和耐热性几乎相同,具有结构载重效率高、质量轻、安全性好、航速快等优点。

虽然从21世纪初(2001年)开始的头五年,世界上新设计研制的航空飞行器型号,大多数的复合材料的质量都已经超过结构总质量的51%以上,即达到了以“复合材料为主,金属材料为辅”的标准,但人们还是认为,2005年诞生的第一架全复合材料飞机是航空结构材料发展史上发生的一件具有历史意义的重大事件,它标志着航空结构材料的发展已从全金属时代进入到了复合材料时代,因此人们把2005年作为航空结构材料的“复合材料时代”元年。航空飞行器从金属时代迈向复合材料时代是航空结构材料发展的必然结果。

发展航空高性能结构材料,尤其是先进复合材料已成为世界上各主要航空大国的战略任务。例如,美国政府的“高技术发展战略”计划,以及美国政府的“关键技术报告”和美国国防部投资计划中都把航空高性能结构材料列为最优先发展项目。此外,西欧、日本、俄罗斯等国家也不甘落后,竞相大力发展航空飞行器所需的高性能结构复合材料,争取技术优势,以提高航空飞行器的战术性能。

复合材料属于新型高性能结构材料。随着复合材料先进技术的成熟,其性能最优和低成本成为可能,这大大推动了复合材料在航空产品上的广泛应用。现在,复合材料以质量轻、比强度高、耐磨损等优势已经成为航空飞行器结构材料的首选,即成为新一代航空飞行器的主体结构材料,其使用量比例也成为衡量一种机型先进性的指标。航空飞行器结构从全金属时代进入了复合材料时代,航空金属材料将成为飞机的“补充”结构材料,而不再作为飞机“常规”结构材料而存在。

航空用的复合材料种类不少,其中的绝对主力就是树脂基碳纤维复合材料。这是因为碳纤维是目前已知的比强度、比刚度最好的材料,它比铝合金还要轻,比合金钢还要硬,其密度是钢的 $1/4$,比强度是钢的10倍,而且化学组成非常稳定,还具有高抗腐蚀性,非常适用于航空飞行器结构。

1.3 无人机对高性能结构材料需求的意义

高性能结构材料是指那些具有高强度、高韧性、耐高温、耐磨损、抗腐蚀等特殊性能的材料,其中主要是指复合材料。复合材料是由基体材料(包括树脂、金属和陶瓷等)和增强剂(有纤维状的、晶须状的和颗粒状的等)复合而成的。复合材料的力学性能和功能,可以根据实际需要,通过适当选材和优化设计来获得。复合材料是目前国际上竞争最激烈的高技术新材料领域之一。

1.3.1 无人机对高性能结构材料的需求和实例

1. 无人机对高性能结构材料的需求

无人机机上“无人”,结构尺寸相对较小,经济性好,使用方便,可以进入危险、恶劣的环境而不怕“牺牲”地工作,因此,无人机不但在民用上被广泛应用,在军事方面的应用也越来越受到关注和重视。随着无人机技术的进步和应用领域的延伸,未来战争必然向“信息化、无人化、智能化”发展,随之而来的是,无人机系统在先进战斗力生成和体系作战中将发挥持续而强劲的作用。

无人机包括无人作战机,无人侦察机和各种小型、微型、超微型无人机。军用无人机具有的低成本、轻结构、高机动、大过载、高隐身和长航程的技术特点,决定了其对减重的迫切需求,因此复合材料的使用比例都很大,这鲜明地体现了飞机结构复合材料化的趋势。

与此同时,对无人机结构设计的要求也就越来越高,其中包括无人机结构设计对减重有特殊的需求。减轻结构质量、缩小结构体积一直是无人机设计追求的目标。只有严格控制结构质量系数,才能腾出质量空间让给燃油、有效载荷、补偿隐身带来的增重,满足轻结构、长航时、高隐身、高机动等技术要求。为了减轻无人机结构质量,除了采用合理的结构形式以外,最有效的方法之一是选用强度高、刚度大、质量轻、耐高温、抗低温、疲劳/断裂特性好、具有良好的加工性能,以及价格相对较低廉的新型高性能结构材料。

无人机结构设计中大量采用复合材料结构是机体结构减重的主要技术措施,复合材料在无人机领域已成为主要结构材料,如使用碳纤维复合材料、玻璃纤维复合材料和蜂窝夹层复合材料等。通常,无人机除个别结构件(如起落架)采用合金钢外,机翼、旋翼、尾翼、尾桨及各种天线罩、护板、蒙皮等结构件均大量使用复合材料。复合材料在无人机结构上的广泛应用对无人机结构轻质化、小型化和高性能化已经起到了至关重要的作用。

目前,在各种无人机上大量使用高性能材料已是不争的事实,这为复合材料技术的发展和应用提供了大好机遇。

2. 现代无人机结构大量使用复合材料

现在,随着人工智能技术的高速发展,无人机的发展进入了一个崭新的时代。性能各异、技术先进、用途广泛的各种新型无人机不断涌现。随着自主化与自动化的融合,无人机系统可以组成群(一个操作手指挥多架次多任务无人机开展行动),实现集中、不间断和规模化的攻击。无人机的发展经历了爆炸性增长过程,促使航空新型高性能结构材料的发展方向、重点领域和技术正在出现新的大规模突破。

综观世界各国的现代无人机,无一例外地大量使用了复合材料。复合材料具有很强的可设计性,既可以设计出轻质、高性能、高气动弹性的结构,又可以很容易地在其表面喷涂隐身涂层,还可以添加不同的增强相降低高速下复合材料的损伤容限。此外,还可以在复合材料机体结构中埋入芯片或传感器,形成智能材料,实现对结构实时监测。无人机复合材料结构主要包括层合板结构、夹层结构、加筋板和格栅结构等,由于其具有很强的可设计性,在结构部件的整体设计中可以大大减少无人机零部件数量,采用复合材料整体化结构设计与制造技术已成为无人机发展趋势。

3. 无人机结构大量使用复合材料的实例

(1)“捕食者”无人机。

“捕食者”无人机是美国通用原子航空系统公司研制的“中海拔、长航时”大型无人机,是目前世界上装备数量和累计飞行时数最多的察打一体无人机之一。

“捕食者”无人机除机身大梁外全机由复合材料制成(复合材料结构质量占85%),如图1-6所示。机长8m,机体高度2.1m,机翼翼展17m,空重512kg,最大起飞质量1020kg,发动机采用一台86kW的涡轮增压活塞式四缸发动机。其飞行速度220km/h,升限7620m,最大活动半径3700km,续航时间40h。

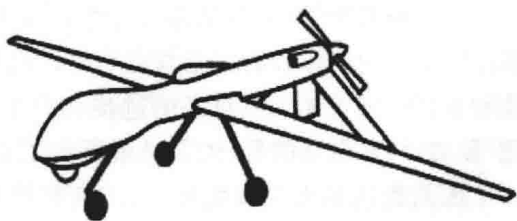


图1-6 “捕食者”无人机示意图