



工业和信息化部“十二五”规划教材

先进复合材料学

李贺军 齐乐华 张守阳◎主编



西北工业大学出版社



工业和信息化部“十二五”规划教材

XIANJIN FUHE CAILIAOXUE

先进复合材料学

李贺军 齐乐华 张守阳 主编

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书系统阐述了先进复合材料的发展历史、性能特点、制备工艺、应用领域及发展现状。全书包括绪论和 10 章内容,涵盖了复合材料基本理论、增强增韧机理、增强体的发展、复合材料分类、复合材料微观结构及界面理论、复合材料发展趋势等方面的内容。尤其是重点叙述了新型陶瓷基、碳基、纳米及功能复合材料等的发展现状,其中对增强增韧机理和新型制备工艺开发的思路做了重点论述。

本书可作为高等院校材料科学与工程专业高年级学生及研究生的教材,也可供从事复合材料研究与应用的人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

先进复合材料学/李贺军,齐乐华,张守阳主编. —西安:西北工业大学出版社,2016.12
ISBN 978-7-5612-5183-6

I. ①先… II. ①李…②齐…③张… III. ①复合材料—高等学校—教材 IV. ①TB33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 022036 号

策划编辑:杨 军

责任编辑:胡莉巾

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)88493844 88491757

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:25.25

字 数:616 千字

版 次:2016 年 12 月第 1 版

2016 年 12 月第 1 次印刷

定 价:58.00 元

前 言

与均质材料相比,先进复合材料具有许多优异的性能,如密度低、比强度和比模量高、材料结构和性能可设计等,在航空、航天、军事、能源、交通、建筑、冶金、化工等领域已成为不可替代的关键性材料。尤其是在我国大型运输机、新型航天器、高速铁路等领域,复合材料均发挥着关键作用。先进复合材料学也成为了材料科学中的一个重要分支,得到了广泛的研究。

先进复合材料主要包括树脂基、金属基、陶瓷基和碳基复合材料,其应用领域涉及国民经济的各个方面。随着相关工业技术及材料学科自身的发展,涌现出了越来越多的复合材料品种,如纳米复合材料、功能复合材料、仿生复合材料等。先进复合材料的发展越来越呈现出多样化和交叉学科的特色。在材料体系方面,众多新型材料的问世,为复合材料提供了品种更为丰富的增强体和基体构成成分。如碳纳米管和石墨烯被发现后不久,就被作为增强体引入复合材料中,由此也使复合材料的纳米尺度增强成为可能,进而提出了微纳多尺度增强的相关理论和技术,进一步拓展了材料“复合”的概念,使得复合化和多重界面设计成为材料设计及改性的重要途径。本书中对多尺度增强有专门论述,可为材料设计提供参考。在材料制备技术方面,复合材料的制备技术大多源于传统的均质材料的制备工艺,但是也形成了一些独具特色的制备工艺,如树脂基复合材料的预浸料成型工艺、陶瓷基和碳基复合材料的化学气相渗积(CVI)工艺等,这也丰富了材料制备技术体系。尤其是几种 CVI 工艺的发展历程,在材料制备工艺的发展中具有极强的代表性。本书也从工艺参数变化和分布的角度对此进行了方法论上的总结,梳理了该工艺的发展变革思路,为从事材料制备技术开发的研究者提供参考。

本书在对几种重要复合材料的发展、制备技术、性能及应用相关知识进行系统介绍的基础上,引出近年来复合材料领域的一些主要发展热点,如复合材料增韧、界面改性、纳米复合材料、功能复合材料等,在讲解基础知识的同时注重对知识的归纳和提炼。

全书包括绪论和 10 章内容。其中,绪论、第 1 章、第 2 章、第 3 章、第 10 章由李贺军和张守阳编写,第 4 章由卢锦花编写,第 5 章由齐乐华和周计明编写,第 6 章由张雨雷编写,第 7 章由付前刚和李伟编写,第 8 章由宋强编写,第 9 章由张磊

磊编写。本书由李贺军、齐乐华和张守阳任主编。

乔生儒教授和陈强教授在百忙之中审阅了书稿,提出了宝贵的修改意见。在此对他们表示真诚的感谢!

由于知识水平所限,书中难免出现错误和不当之处,敬请读者批评指正。

编 者

2016 年 8 月

目 录

第 0 章 绪论	1
0.1 复合材料的发展历史	1
0.2 复合材料的应用现状	3
参考文献	20
第 1 章 先进复合材料概述	22
1.1 先进复合材料的概念	22
1.2 先进复合材料的分类	23
1.3 复合材料的研究方法	28
1.4 复合材料的性能特点	40
参考文献	44
第 2 章 复合材料的力学性能及损伤机理	45
2.1 力学分析模型的建立依据	45
2.2 复合材料力学基础知识	46
2.3 复合材料的增强原理	51
2.4 复合材料的力学性能特点	59
参考文献	67
第 3 章 复合材料增强体	68
3.1 颗粒增强体应用简介	68
3.2 碳纤维的制备工艺、结构及性能特点	70
3.3 硼纤维的制备工艺、结构及性能特点	83
3.4 碳化硅纤维的制备工艺、结构及性能特点	88
3.5 芳酰胺纤维的制备工艺、结构及性能特点	95
3.6 玻璃纤维的性能及其制备工艺	100
参考文献	104
第 4 章 聚合物基复合材料	106
4.1 概述	106
4.2 热塑性树脂基复合材料	106
4.3 热固性树脂基复合材料	119
4.4 热固性树脂基复合材料的制备工艺	140

4.5 树脂基复合材料的韧化	149
参考文献	160
第 5 章 金属基复合材料	162
5.1 金属基复合材料的发展历史	162
5.2 金属基复合材料的制备工艺	163
5.3 金属基复合材料的热处理	184
5.4 金属基复合材料的成型加工	185
5.5 常用金属基复合材料	188
5.6 金属基复合材料发展趋势	196
参考文献	197
第 6 章 陶瓷基复合材料	202
6.1 陶瓷基复合材料的发展历史	202
6.2 陶瓷基复合材料的成型工艺	203
6.3 陶瓷基复合材料的界面	213
6.4 陶瓷基复合材料的性能特点	214
6.5 陶瓷基复合材料的增强增韧机理	218
6.6 陶瓷基复合材料的应用	232
参考文献	234
第 7 章 C/C 复合材料	238
7.1 C/C 复合材料的发展历程	238
7.2 C/C 复合材料的成型工艺	238
7.3 C/C 复合材料的组织结构	257
7.4 C/C 复合材料的性能特点	261
7.5 C/C 复合材料的氧化及防氧化方法	267
7.6 C/C 复合材料的应用	282
参考文献	286
第 8 章 纳米复合材料	294
8.1 纳米复合材料简介	294
8.2 聚合物基纳米复合材料	295
8.3 陶瓷基纳米复合材料	305
8.4 金属基纳米复合材料	311
8.5 碳纤维-CNTs 多尺度增强技术	319
8.6 纳米复合材料的应用前景	327
参考文献	329

第 9 章 功能复合材料.....	334
9.1 聚合物基导电复合材料	334
9.2 吸波复合材料	339
9.3 功能梯度复合材料	341
9.4 生物复合材料	348
参考文献.....	355
第 10 章 复合材料的界面	360
10.1 界面的概念、分类及界面结合	360
10.2 界面结构.....	367
10.3 细观力学实验方法.....	372
10.4 界面改性技术.....	381
参考文献.....	394

第 0 章 绪 论

材料与能源是人类社会发展的物质基础和推动力,也是社会生产力进步的主要标志。其中,材料作为人类从事劳动生产的基本物质基础,是人类生存及发展的基本前提。自原始社会开始,人类社会生产力的每一次飞跃性进步都与新材料的使用密切相关,以至于现代历史学以石器、青铜器、铁器等材料的使用作为划分社会文明阶段的标志。在材料推动人类文明进步的同时,人类文明的发展与进步也对材料提出了越来越高的要求,尤其是在 20 世纪之后,随着社会生产力水平的快速提高和科学技术的进步,对材料的要求也越来越向高性能及功能化发展。这种社会需求反过来又推动着材料的发展与进步,产生了越来越多的新型先进材料,围绕新材料的研究与开发也成为各发达国家重点发展的领域。

人类从使用材料、创造材料,到材料科学的建立,对材料的认识方法也在同步演化和飞跃。最初,人类直接从自然界获取原始材料,如木材、石材、动物骨骼等制造工具。随着人类使用材料的经验积累及认识水平的提高,逐渐过渡到使用自然界原料创造新的材料。同时,人类对材料的认识与创造水平也随之而不断发展和进步。材料学研究的理论体系经历了不同阶段的发展——从古希腊时代哲学家们提出的一元素、三元素、五元素论到现代物理学和化学理论体系的建立,在这个过程中,材料的演变与发展推动着人类基本物质观的进化,从而推动了整个自然科学的产生与发展,最终促成了近代科学体系的建立。反过来,科学认识论的进步也直接推动了材料的发展与多样化。以自然科学理论体系为基本认识论,在材料进步需求的推动下,材料逐渐演化为一门专门的学科而存在,成为自然科学体系中的一个重要的独立分支。

与材料科学的整体发展类似,人类使用复合材料的历史远远早于复合材料学科的发展历史。将复合材料作为一个单独的材料种类进行研究,还仅仅有百余年的历史,但是复合材料已经成为现代材料学科的重要研究领域,在其发展过程中为推动社会进步和创造物质财富提供了丰富的材料资源,同时在理论上也为材料学科的发展奉献了一些独具特色的研究方法及理论模型,极大地丰富了材料科学的方法论和理论体系。当今的人类社会,在航空、航天、兵器、汽车、船舶、化工、医疗、农业、包括家庭用品等方面都已经离不开复合材料制品,而材料学科的许多理论也在复合材料的发展过程中得到了丰富与补充,促使人们对于涉及材料工艺、结构和性能等方面的现象有了更加深入和全面的理解。

0.1 复合材料的发展历史

复合材料是一类在宏观尺度上由两种或者多种不同的材料构成的具有明显界面的非均相材料,按照其性能特点可以分为各向异性和各向同性复合材料,自然界存在的天然各向异性复合材料中比较典型的例子有木材、竹子、椰子壳、贝壳、人类和动物的肌肉、指甲等等。这些材料都是由纤维和黏结纤维的基体组成的,其主要性能特点是材料的强度、模量等性能与受力方向密切相关,沿纤维方向的强度及模量一般高于其他方向上的强度及模量,称之为宏观各向异

性复合材料。除了各向异性复合材料之外,自然界中也存在天然的各向同性复合材料,例如砂岩。砂岩中也包括两种以上的物质,一种为颗粒,另一种为基体。它虽然也包含了增强体与基体两种物质,但是其宏观力学性能却是各向同性的。

人类最初使用天然复合材料,主要包括木材、竹子等,而利用自然资源制造复合材料的历史则可以追溯到 6 000 年前的古代,人们使用稻草增强黏土来建设房屋以及各种建筑,甚至是城墙等防御工事。在西安半坡遗址发现的 7 000 多年前新石器时代建筑中,已经使用草混合泥制作墙壁和坯砖。3 000 年前的商代,中国人已经使用丝或者麻涂覆生漆干燥后形成整体漆器。公元前 200 年左右,罗马的 Pantheon 神庙就是用混凝土建造的,古罗马人发现火山灰具有活性,遇水凝结成坚硬的材料,在公元前 3 世纪就使用火山灰与砂石相混合制成混凝土。公元前 403—221 年的战国时期,中国人使用草拌黄泥浆筑墙。公元 5 世纪的南北朝时期,中国人已经广泛使用石灰、黏土和细砂组成的“三合土”作为建筑材料。古代蒙古人用的弓,其中承受拉应力的部件使用了木材与牛腱相黏合的结构。人们发现,与随机分布的增强体相比(见图 0-1(a)),增强体沿某一方向择优取向后(见图 0-1(b)),在该方向可获得更高的强度。这些发现都表明,人类在遥远的古代就已经懂得使用多种原料复合的方法。

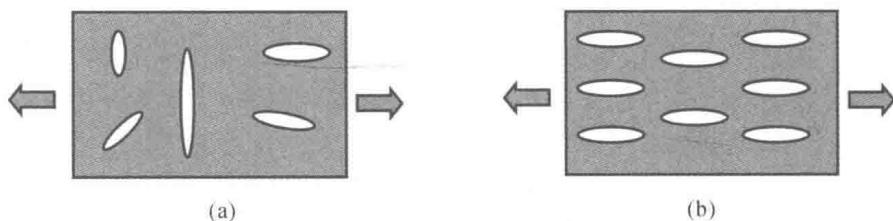


图 0-1 材料中的缺陷分布对力学性能的影响

(a) 增强体随机分布,强度低; (b) 增强体取向,强度较高

具有现代科学意义的先进复合材料多数是指使用合成材料制备出的复合材料,最早出现于 1907 年,Rebatsha 将石棉增强的酚醛树脂作为酸溶液的容器。1909 年发展出用酚醛树脂预聚物混合木粉、纸、布等热压成型的电木生产技术。从 19 世纪开始到 20 世纪初,随着煤炭及石油化工行业的发展,人类合成出酚醛树脂、三聚氰胺甲醛树脂、尿素树脂等热固性树脂。后来又合成了环氧树脂、不饱和聚酯树脂,使得作为复合材料基体使用的树脂品种多样化,低成本化。在增强材料发展方面,工业用玻璃纤维最初诞生于 1893 年,由 Ribi 生产。1938 年,美国 OCF 公司开始生产用作复合材料增强体的玻璃纤维。20 世纪 40 年代,美国人用玻璃纤维增强的酚醛树脂来代替金属制造飞机金属零件的模具。用玻璃纤维和室温固化型不饱和聚酯树脂来手糊成型飞机排气管。在航空领域开始了玻璃纤维增强树脂(GFRP)的大量应用。GFRP 可以成型为任意形状,且具有足够的刚性和强度,可以承受飞机高速飞行中产生的空气阻力,此外,耐腐蚀性好,即使在海上飞行,也不易被腐蚀。20 世纪 40 年代,美国和英国共同开发了先进的飞机雷达罩。在造船领域,由于 GFRP 具有良好的电气绝缘性而被美国海军用作舰艇的电气部分,而小型船只则全部用 GFRP 制成。

20 世纪 50 年代,GFRP 技术从美国向世界推广。日本从 1952 年进口玻璃纤维和不饱和聚酯树脂,开始生产少量的钓鱼竿、小型摩托车的外壳、安全帽、建筑用的 GFRP 波型瓦,后来随着合成树脂工业的发展,在汽车、电子器件、农渔业产品、建筑材料、日用品等方面,广泛使用了玻璃纤维增强的聚乙烯、聚丙烯、聚苯乙烯、ABS、聚氯乙烯、聚酰胺、PET、聚碳酸酯等复合

材料。到了 21 世纪,全世界的 GFRP 复合材料的年产量约 5.5×10^6 t。

随着复合材料的广泛应用,在开发新型基体材料的同时,人类也开展了新型增强体材料的研发。20 世纪 60 年代开发了高模量、高强度的硼纤维(Tekisake 公司)、碳纤维(UCC、考托儿、罗尔斯路伊、摩尔加奈伊、东丽、东邦等公司),70 年代开发出芳香族聚酰胺纤维(杜邦),这些高性能纤维增强的复合材料最初主要用于航空领域,后来逐渐扩展到体育用品(网球拍、高尔夫杆、钓鱼竿、比赛用汽车、比赛用快艇等)、道路、桥梁、风力发电、石油开采、造船等领域。纵观人类使用材料的历史,最初使用的材料以天然的石器、稻草、黏土、木材、金等为主;随着技术的发展,逐渐开始出现经过简单成型加工的铜器、砖、陶等材料;随后,出现了铁器、简单的植物或动物胶、早期的水泥、玻璃等材料;到了近代,随着科学技术的迅速发展,材料品种得以快速丰富,开始出现了各种钢材、橡胶、人工合成的聚合物、波特兰水泥等与现代科学发展有着密切关联的材料;20 世纪以后,人工合成材料的发展更加迅速,诸如各种合金、合成树脂、金属陶瓷、热解陶瓷、复合材料得到了越来越广泛的应用。

20 世纪 60—80 年代,出现了硼纤维、碳纤维和芳纶纤维增强树脂,以及各种金属基、陶瓷基和碳基等复合材料,这是先进复合材料的开发时期。20 世纪 80 年代以后,复合材料不仅应用于航空航天领域,而且在各类工业领域中都得到了广泛应用,性能不断改善,新的功能性复合材料不断出现,这一时期是先进复合材料得到充分发展的时期。除了用作结构材料的复合材料之外,还出现了许多具有独特光、电、磁性能的功能性复合材料。

本书所提及的复合材料一般是指 20 世纪以后出现的,单独作为一种材料而进行研究的现代复合材料,也称之为先进复合材料。主要包括各种增强体增强的树脂、金属、陶瓷、水泥、碳材料等类型的复合材料。

0.2 复合材料的应用现状

经过了 100 多年的发展,复合材料的应用领域已经从最初的军事和化工领域扩展到了社会生产的各个角落,在当今社会中,各行各业都能见到复合材料的身影。生活中最为常见的有各种密度板家具、复合木地板、天线、玻璃钢广告牌、汽车保险杠、健身器材、复合材料钓鱼竿、复合材料自行车架等;而在工业领域,复合材料的应用遍及各个行业,如航天器、飞机、轮船、汽车、化工行业的各种容器、管道等。随着技术的进步和众多产品的更新换代,复合材料的用量有逐渐扩大的趋势。

1. 航空复合材料的应用现状

在航空工业中,复合材料具有比强度高、比模量高、力学性能可设计性强等一系列优点,是轻质高效结构设计最理想的材料。用复合材料设计的航空结构可实现 20%~30% 的结构减重,减轻的质量可以使战斗机获得更高的速度和更大的作战半径,提高其作战能力;复合材料优异的抗疲劳和耐腐蚀性,可提高飞机结构的使用寿命,降低飞机结构的全寿命成本;复合材料结构有利于整体设计和制造,在提高飞机结构效率和可靠性的同时,降低制造成本。可见复合材料的应用和发展是大幅提高飞机安全性、经济性等市场竞争指标的重要保证,复合材料的用量已成为衡量飞机先进性和市场竞争力的重要标志之一。

20 世纪 60 年代,人们用硼纤维嵌入一种环氧树脂中,得到了硼/环氧树脂复合材料。最

初,复合材料主要用于航空领域中的次承力结构;随着技术的进步,复合材料逐渐被用于制造承受大载荷的主承力结构,如飞机的机翼、机身和尾翼等部件;目前人们正将复合材料用于亚声速、先进战斗机和未来超声速/高超声速飞行器中。进入 21 世纪以来,复合材料技术在军用和民用飞行器上的应用不断增加,据统计,2003—2008 年的 5 年期间,航空航天领域碳纤维(CF)复合材料用量的增长达到 123%,平均每年增长约 25%。例如美国第 4 代战斗机 F-22 的复合材料用量达到 24%,F-35 达到 35%,欧洲 EF-2000 的复合材料用量高达 40%,RAH-66 攻击直升机复合材料用量为 51%。在民用航空方面,空中客车公司研制的 A380 复合材料用量达结构质量的 25%,单机用量约 60.5 t;美国波音 787 复合材料用量达到结构质量的 50%,单机用量为 25 t。由此可以看出先进 CF 复合材料已经成为先进航空武器装备的主体材料。

军机和民机复合材料的应用均可以分为 3 个阶段,其时间段上虽有小的出入,但基本上都经历了从次承力构件—尾翼级主承力构件—机翼—机身主承力构件的发展过程,目前已成为飞机结构的主要材料(见表 0-1 和表 0-2)。

表 0-1 国外军用飞机上复合材料应用具体情况

机 种	国 别	用 量	应用部位	首飞时间
Rafale	法国	30%	垂尾、机翼、机身结构的 50%	1986 年
JAS-39	瑞典	30%	机翼、垂尾、前翼、舱门等	1988 年
V22	美国	45%	机翼、机身、发动机悬挂接头、叶片紧固装置等	1989 年
F-22	美国	25%	机翼、前中机身、垂尾、平尾及大轴	1990 年
EF-2000	英、德、意、西	40%	机翼、前中机身、垂尾、前翼	1994 年
RAH-66	美国	51%	机身蒙皮、舱门、中央龙骨大梁、整流罩、旋翼等	1995 年
Cy-39	俄罗斯		机翼、进气道、机身、保形外挂架等	1997 年
F-35	美国	35%	机翼、机身、垂尾、平尾、进气道	2000 年

表 0-2 部分民用客机的复合材料使用情况列表

机 型	最大起飞质量/t	结构质量/t	复合材料用量/t
Ty204(150~186 座)	93.5	29.4	3.2
Il96(187~250 座)	230	65	4.02
B757(200 座)	115		1.4
B767(200~300 座)	187		1.5
B777(350 座以上)	230		9.9
B787(200~300 座)	247	115	
A300(251~350 座)	165	51	6.2
A310(187~250 座)	150	44.7	6.2
A320(150~186 座)	72	20.8	4.5
A340(251~350 座)	235	76	11
A380(550~990 座)	560	275	60.5

飞机和航天飞机是典型的对质量敏感的结构,表 0-3 给出了飞机质量减轻后带来的价值,在这些结构中使用复合材料能够获得很高的经济效益。而且有些先进复合材料品种本身拥有可与铝合金及钢相媲美的力学性能,表 0-4 给出了几种不同复合材料与常规金属材料的性能对比,设计人员可以根据复合材料构件在服役环境下的受力状况,采取合理的纤维排列和分布设计,在适当的方向布置纤维来承受预计的载荷,甚至可以在局部区域采取精细的设计。美国 Grumman 公司的实验战斗机 X-29A 成功使用复合材料实现前掠翼技术,前掠翼技术早在 20 世纪初就已出现,直到 20 世纪 70 年代,高强度复合材料的出现才奠定了前掠翼的实际应用基础。X-29A 中使用复合材料制成的前掠翼可在飞行中克服扭曲变形,其强度也满足使用要求,若使用金属材料则无法达到前掠翼飞机气动特性的要求。

表 0-3 飞行器结构减重带来的经济效益

飞行器种类	减重价值
小型民用飞机	\$ 50/lb
直升机	\$ 300/lb
先进战斗机	\$ 400/lb
商用运输机	\$ 800/lb
超声速和高超声速运输机	\$ 3 000/lb
轨道卫星	\$ 6 000/lb
同步卫星	\$ 20 000/lb
航天飞机	\$ 30 000/lb

注:1lb(磅)=0.453 592 4kg。

表 0-4 复合材料与常见金属材料性能的对比

材 料	石墨/环氧(单向)		Kevlar/环氧 (编织布)	玻璃/环氧 (编织布)	硼/环氧	铝	铍	钛
	高强度	高模量						
$\frac{\text{比强度}}{10^6 \text{ in}}$	5.4	2.1	1	0.7	3.3	0.7	1.1	0.8
$\frac{\text{比刚度}}{10^6 \text{ in}}$	400	700	80	45	457	100	700	100
$\frac{\text{密度}}{\text{lb} \cdot \text{in}^{-3}}$	0.056	0.063	0.05	0.065	0.07	0.10	0.07	0.16

注:1 in(英寸)=2.54 cm。

复合材料在战斗机中的应用经过了一个曲折发展的历程,预计未来的发展状况将会发生改变。20 世纪 60 年代先进复合材料的发展,使飞机结构减重获得巨大突破。随着热固性树脂及热塑性树脂等高性能复合材料的应用,这种趋势将会继续发展。当然,使用复合材料带来的最大缺点是材料成本的上升,一般复合材料的价格高于金属材料,不仅如此,因为对新材料结构的分析、检测、取证及试验验证等的费用较高,所以复合材料结构的设计费用也很高。通过提高设计和工艺水平可以降低复合材料结构的制造、检测与维护成本,从而弥补其原材料成本相对较高的缺点。随着性能的提升和成本的降低,轻质的纤维增强复合材料在运输机中的应用越来越广泛,运输机制造商不断扩大应用范围,从开始的非关键部位(雷达罩、整流罩、舱门等),到后来的较关键的次承力结构(如飞行控制面和尾翼主结构)。因为其优异的性能及减重效果,现在的复合材料已经应用于机翼和机身等主承力结构。20 世纪 80 年代后,公务机和

通用飞机全部或大部分结构采用复合材料已经成为发展趋势。

民用航空要求高效率、经济性、舒适性、便利性以及环保性能。怎样才能达到这个目标呢？答案是大量采用先进复合材料。从民用飞机发展来看，美国波音公司第一代民用客机 B707 上复合材料的用量为零。20 世纪六七十年代先进复合材料在民用飞机上的用量只有 1%~3%，像 DC-9, DC-10, MD80 和 L1011 等客机上先进复合材料的用量还只有 1%左右，B747 飞机的先进复合材料的用量当时比较高，也只有 2%~3%。20 世纪 80 年代民用飞机先进复合材料的用量有所提高，波音公司 B757 先进复合材料的用量为 3%~4%，B767 则达到 4%~5%。欧洲空中客车公司的先进复合材料的用量比美国波音公司高，如 A300~600 达 5%~6%，A310 接近 10%，而 A320 则大于 10%。到 20 世纪 90 年代空中客车公司的 A321, A330 和 A340 的先进复合材料的用量都增长到 13%~15%，A322 则达到 15%~16%，而波音公司的 B777 为 10%~11%。这表明在 20 世纪八九十年代，先进复合材料在民用客机上的应用欧洲空中客车公司领先于美国波音公司。21 世纪以来，美国波音公司大力开展扩大先进复合材料在民用飞机上应用的研究，取得很大成绩，具体反映在最新一代的民用客机 B787 上。B787 用的材料见表 0-5，铝合金用量约占 20%，而先进复合材料的用量高达 50%。同期欧洲空中客车公司大型客机 A380 上先进复合材料的用量在 25%左右。

表 0-5 波音 B787 飞机的材料使用简况

复合材料 $w/(%)$	铝合金 $w/(%)$	钛合金 $w/(%)$	钢 $w/(%)$	其他 $w/(%)$
50	20	15	10	5

注： w 代表质量分数，下同。

空中客车公司研制发展两个新机种 A380 和 A400M，前者是民用客机，后者是运输机。A380 是当今世界上最大型客机，可载客 555 人，飞行距离 15 000 km，无间断直接在欧洲和亚洲之间飞行。A380 客机大量采用纤维增强复合材料，碳纤维复合材料构件包括襟翼、副翼、梁、后隔板、舱壁、地板梁、前缘、中央机翼盒、机身段、垂直稳定翼等。A400M 是新型运输机，为了大幅度增加其运载量而大量采用复合材料。A400M 采用复合材料的比例约占结构质量的 35%~40%，碳纤维复合材料构件包括稳定翼、机动翼、主翼盒等，这是首次在这么大的翼盒上采用复合材料。波音公司 B787、空中客车公司 A380 和 A400M 三个机种的复合材料的需求量约为 3 000 t/a。随这些飞机产量的提高，碳纤维复合材料的需求量将不断增长。

2. 航天及军用复合材料的应用现状

航天技术对结构材料不仅提出减重要求，还要求结构材料具有高比模量和高比强度，最好还兼具有一些特殊的功能，如隔热、隔热、耐高温及耐湿热等特性，复合材料具有上述优点及性能和功能的可设计性，被大量地应用于航天工业上，而军用复合材料(尤其是战术武器用复合材料)则还要求具有较低的制备成本。

(1)在防热方面的应用。导弹、卫星及其他航天器再入大气层的防热，是航天技术必须解决的关键问题之一。由于经过高空飞行以超高速进入稠密的大气层时，飞行器周围空气受到强烈压缩，使空气温度和压力急剧升高，再入体严重的气动力和气动热作用，如不采取有效防热措施，将像流星一样被烧毁。早在 20 世纪 50 年代，美国就采用石棉酚醛作为烧蚀防热材料，如“丘比特”中程导弹，苏联的“东方号”飞船也用该种材料。此后广泛地使用玻璃/酚醛、高硅氧/酚醛，如美国的“MK-11A”弹头和“水星号”飞船，苏联的“联盟号”飞船，法国第一代

导弹的弹头等。后来采用了碳基(碳/酚醛和碳/碳复合材料),如美国的“MK-12A”弹头和法国的第二代导弹弹头已应用。在战术武器用复合材料方面,国内外均将高强度玻纤增强树脂基复合材料用于多管远程火箭弹和空空导弹的结构材料和耐烧蚀-隔热材料,大大减轻了武器质量,提高了战术性能,另外,一些新型的超远程火箭弹甚至使用了低成本碳/碳复合材料作为喷管材料。

(2)在卫星和宇航器上的应用。卫星结构的轻型化对卫星功能及运载火箭的要求至关重要,所以对卫星结构的质量要求很严。国际通讯卫星 VA 中心推力筒用碳纤维复合材料取代铝后减质量 23 kg(约占 30%),可使有效载荷舱增加 450 条电话线路,仅此一项盈利就接近卫星的发射费用。美、欧卫星结构质量不到总质量的 10%,其原因就是广泛使用了复合材料。目前卫星的微波通讯系统、能源系统(太阳能电池基板、框架)各种支撑结构件等已基本上做到复合材料化。在法国电信一号通信卫星本体结构中,带有 4 条环形加强筋的中心承力筒是由碳纤维增强树脂(CFRP)复合材料制成的,它通过螺栓连接在由 CFRP 制成的仪器平台上。卫星的蒙皮由 T300 CFRP 制成。由于 CFRP 的比模量高,在日本 JERS-1 地球资源卫星壳体内部的 $\phi 500$ mm 的推力筒、仪器支架、8 根支撑杆和分隔环都使用了 M40JB CFRP,此外,卫星的外壳、一些仪器的安装板均采用了碳纤维/环氧蜂窝夹层结构。我国在“风云二号气象卫星”及“神舟”系列飞船上均采用了碳/环氧树脂做主承力构件,大大减轻了整星的质量,降低了发射成本。

由于 CFRP 具有质量轻、比强度高、比刚度大以及线膨胀系数小的特点,因此,大型太阳能电池阵通常采用 CFRP。由德国 MBB 公司研制出并已应用于轨道试验卫星的一种刚性太阳能电池阵是由 CFRP 面板、薄壁方形梁和铝蜂窝胶结而成的,面积为 11.4 m^2 。应用在国际通信卫星 V 号上的太阳能电池帆板的面积为 18.12 m^2 ,也采用了 CFRP,每个帆板的长为 7 m,宽为 1.7 m。德国 MBB 公司研制的另外一种太阳能电池阵是半刚性的,其上面的方管形桁架采用了 CFRP。

卫星上安装的大型抛物面天线等强方向天线要求在温度急剧变化的空间环境中仍然能够保持稳定的外形,这就需要采用线膨胀系数极小的材料,即材料要具有较好的热稳定性。由于 CFRP 的可设计性,可以通过选择碳纤维的单层铺设角、铺层比和铺层顺序来获得抛物面天线所要求的刚度、强度以及极小的线膨胀系数。大型抛物面天线一般采用高强度和高刚度的 CFRP 蜂窝夹层结构,能承受主动段的静、动力载荷,以及良好的微波反射。国外在卫星结构中较早应用 CFRP 的是应用技术卫星(ATS-F)上的天线支撑桁架。为了使天线支撑桁架具有较高的结构刚度和较低的线膨胀系数,采用了 8 根 CFRP 制成的 $\phi 66.3 \text{ mm}$,长度为 4.4 m 的圆柱形支撑杆组成桁架结构。用 CFRP 制成的桁架在满足使用要求的前提下,比相同结构的铝合金桁架质量减轻约 50%。国外用 CFRP 制成卫星天线的具体情况见表 0-6。

美国 NASA 的哈勃空间望远镜中有一台叫作 FOC(FAINT OBJECT CAMERA)的相机。这是一台包括滤光镜、折叠镜、光屏以及检测器等多个通道的复杂光学系统的微弱目标相机。这些光学元件都安装在由高模量碳纤维/环氧复合材料制成的光学平台上。这个光学平台的纵向线膨胀系数为 $0 \pm 0.2 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,横向线膨胀系数为 $-0.3 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,在复杂的空间环境条件下都具有非常好的尺寸稳定性。哈勃空间望远镜的主支撑结构采用了 CFRP 制成的精密桁架结构。采用桁架设计是为了使主镜和次镜能够达到间隔漂移 $3 \text{ }\mu\text{m}$,偏心 $10 \text{ }\mu\text{m}$,倾斜 $2''$ 的对准精度。

在“国际紫外线探测卫星”上,为了保证卫星的探测效果,经过详细的计算,要求卫星本体的轴向膨胀量小于 $2\text{ }\mu\text{m}$ 。常用的一些金属材料不能达到这个指标要求,因此,通过铺层设计采用了16根由碳纤维/环氧复合材料制成的桁架结构来支撑光学元件,不受空间温度变化的影响。

表 0-6 国外部分卫星天线应用 CFRP 的情况

卫星名称	天线反射器内容	所用主要材料
美国国防气象卫星	精密天线反射器	Gy-70 石墨/环氧
ERS-1 卫星	大型可展开式天线	碳纤维/环氧
RCA 通信卫星	整体式单壳反射器	碳纤维/环氧、Kevlar/环氧面板,蜂窝夹层结构
国际通信卫星 V 号	喇叭天线、抛物面天线、太阳能电池阵基板	碳纤维/环氧面板蜂窝夹层结构
美国应用技术卫星	F 型和 G 型反射器桁架结构	Gy-70 石墨/环氧
德国 TV-SAT 直播卫星	高精度天线塔	碳纤维/环氧
欧洲海事通信卫星	抛物面天线	碳纤维/环氧面板蜂窝夹层结构
法国电信 1 号通信卫星	抛物面天线及支架	碳纤维/环氧面板蜂窝夹层结构
日本 ETS-6 地球同步轨道卫星	舱体、半刚性轻型太阳能帆板、天线塔	碳纤维/环氧面板蜂窝夹层结构
日本 JERS-1 地球资源卫星	反射器桁架结构	碳纤维/环氧面板蜂窝夹层结构

欧洲空间局(ESA)新一代重力探测卫星(GOCE 卫星)中的高精度重力梯度仪要求具有较高的位置精度,要求其用于测量重力加速度的“加速度计对”固定在低热膨胀系数的支板上,因而采用了具有低膨胀系数的碳/碳(C/C)复合材料盖板与蜂窝夹层结构(见图 0-2)。

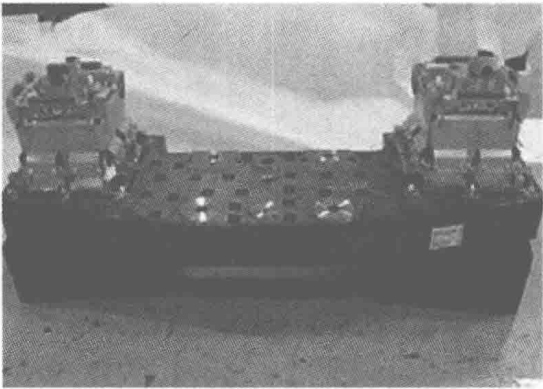


图 0-2 GOCE 卫星重力梯度仪中的加速度计对安装在超稳定 C/C 复合材料支撑结构上

在我国自行研制的卫星结构中,大量采用 CFRP 结构。因为卫星结构纯属有效载荷,减重的经济效益很大,又因其空间环境恶劣,要求卫星结构的尺寸和性能稳定、变形一致,所以在卫星的主体骨架结构、外壳结构、太阳能电池板组件、桁架结构、天线结构、仪器安装板和支架结构等都在不断扩大使用 CFRP。CFRP 在国内卫星的应用情况见表 0-7。

(3)运载火箭及固体火箭发动机。国外在 20 世纪 50 年代末就开始采用纤维缠绕成型的玻璃钢壳体取代钢壳,如美国的潜地导弹“北极星 A-3”的一、二级结构质量,分别比“A-1”的钢质发动机壳体减轻了 $50\%\sim 60\%$ 。后来“三叉戟 I”,MX 的三级发动机壳体全部采用芳纶/环氧树脂,质量又比玻璃钢的同尺寸壳体减轻 50% 。目前碳纤维复合材料发动机壳体以

其优异的特性得到了较好的应用与发展,其先后成功地用于飞马座,德尔塔 II-7925 运载火箭,三叉戟 II (D5)、侏儒导弹等型号。

表 0-7 国内卫星应用 CFRP 的结构件

结构件名称	最大件尺寸/mm	产品结构要素
波纹承力筒	高:1 983;锥段大端内径:1 162	碳纤维波纹筒、对接框、环框、纵桁组成
夹层结构板	1 668×158;1 250×1 985	碳纤维面板、铝蜂窝芯子
太阳能电池阵基板	1 755×2 581	碳纤维网格面板、铝蜂窝芯子
连接架	2 581×750,2 581×810	碳纤维方管、钛合金接头
支架	950×2 030	碳纤维型材、铝合金接头
消旋支架	高:580;大端外径:887	8 根碳纤维管(长 652)、铝合金接头
电池梁	“工”字形,750×54×44	碳纤维和钛合金混杂结构
喇叭天线	高约 280,大端直径约 250	CFRP 本体,镀铜、金等
支撑筒	高约 300,大端直径约 140	CFRP、双锥两端法兰

我国复合材料固体火箭发动机壳体研究制造技术起步较晚,与国外存在一定差距,但经过近 40 年的发展,从无到有取得了很大进步。玻璃纤维/环氧、芳纶/环氧复合材料固体火箭发动机壳体已经成功地应用到航天运载上。

我国已经在多种型号的大型运载火箭,特别是上面级结构中广泛采用 CFRP,有效地减轻了上面级结构质量,对提高运载火箭发射有效载荷的能力具有十分明显的效果。CFRP 在大型运载火箭的应用大致经历了由 20 世纪 70 年代的简单零部件,次承力件转化到 20 世纪 80 年代以来大型部段复杂结构,主承力结构件。CFRP 在运载火箭中的具体应用实例见表 0-8。

表 0-8 国内运载火箭应用 CFRP 的结构件

名 称	结构要素	应 用
卫星接口支架	碳纤维蒙皮、桁条、对接框、弹簧支架、开口加强的卫星支架	CZ-2E 火箭
	碳纤维蒙皮、铝蜂窝芯子夹层结构卫星支架 (1 700 mm×1 200 mm×700 mm)	CZ-3 火箭
加筋壳	碳纤维蒙皮、桁条、环框、对接框、开口加强的加筋结构	火箭结构
梁	碳纤维“工”形截面整体成型	火箭结构
	碳纤维“□”形截面整体成型	仪器舱结构
“K”形梁	碳纤维工字形截面梁、构成组合梁,形成外圆直径 3 000 mm	仪器舱结构
环向加强框	碳纤维帽形加强框,各类直径均可实现	箭体加筋壳结构
碳纤维筒	质量:约 1 000 kg	被采用
整流罩	碳纤维蒙皮、铝蜂窝芯子构成的夹层结构。	CZ-3 火箭
	直径达到 4.2 m,长达 11 m	CZ-2E 火箭等
有效载荷支架	碳纤维蒙皮、铝蜂窝芯子夹层结构,上端 φ2 700 mm,下端 φ3 240 mm,高 550 mm	CZ-2C/FP 支承有效载荷
“井”字梁	由 4 根变截面“工”字形梁整体成型而成,形成 外圆 φ2 700 mm	CZ-2C/FP 分配