



国防科工委“十五”规划教材.材料科学与工程

复合材料力学

矫桂琼 贾普荣 编著

西北工业大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

内容简介

本书以介绍目前航空航天器结构中使用最多的连续纤维增强复合材料层合板的刚度和强度的分析方法为主要内容。另外,还介绍了二维和三维编织复合材料的刚度分析方法、复合材料的工程弹性常数和强度的细观预测方法,以及复合材料层合板的层间应力形成的原因和相应的计算方法。全书内容既有比较完整的理论基础,又力求叙述简捷、内容紧凑实用,突出工程应用,注意体现复合材料力学研究的新理论和新成果。书中配有例题和适当数量的习题,有助于学生自学。例题的数据均采用典型国产复合材料的性能数据。

本书既可作为国防高等院校有关专业的教材,也能适用于从事复合材料结构设计、力学性能研究以及复合材料开发和应用的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

复合材料力学/矫桂琼,贾普荣编著. —西安:西北工业大学出版社,2008.3

国防科工委“十五”规划教材. 材料科学与工程

ISBN 978-7-5612-2332-1

I. 复… II. ①矫…②贾… III. 复合材料力学—高等学校—教材 IV. TB330.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 008140 号

复合材料力学

矫桂琼 贾普荣 编著

责任编辑 王夏林

责任校对 张蕊

西北工业大学出版社出版发行

西安市友谊西路 127 号(710072)

市场部电话:029-88493844 88491757

<http://www.nwpup.com>

陕西向阳印务有限公司印制 各地书店经销

开本:787 mm×960 mm 1/16

印张:11.25 字数:226 千字

2008 年 3 月第 1 版 2008 年 3 月第 1 次印刷

印数:1~3 000 册

ISBN 978-7-5612-2332-1 定价:17.00 元

国防科工委“十五”规划教材编委会

(按姓氏笔画排序)

主 任：张华祝

副主任：王泽山 陈懋章 屠森林

编 委：王 祁 王文生 王泽山 田 蔚 史仪凯

乔少杰 仲顺安 张华祝 张近乐 张耀春

杨志宏 肖锦清 苏秀华 辛玖林 陈光禔

陈国平 陈懋章 庞思勤 武博祯 金鸿章

贺安之 夏人伟 徐德民 聂 宏 贾宝山

郭黎利 屠森林 崔锐捷 黄文良 葛小春



前言

先进复合材料具有轻质、高强度、优越的抗疲劳和耐环境的性能,在航空、航天、造船等部门得到了越来越广泛的应用。复合材料是一种多向材料,它具有非均匀性和各向异性,其强度和刚度分析的理论与方法不同于金属。随着对复合材料力学特性的深入研究,已经形成了复合材料力学学科,复合材料力学课程已成为飞行器、发动机、舰船设计以及力学、材料专业本科生和研究生的必修课或选修课。为了满足国防高校本科生及研究生的复合材料力学课程教学的需要,根据近年来复合材料力学的发展特点和专业教学的实际需要,作者结合多年来从事复合材料力学课程教学以及科研的体会编写了本书。

连续纤维增强复合材料层合板和层合结构是目前航空航天器结构中使用最多的复合材料,因此本书以连续纤维增强复合材料层合板的刚度和强度分析为主要内容。全书内容共分9章。第1章是复合材料概论。第2章介绍了一般三维各向异性材料以及正交各向异性材料的应力-应变关系。第3章以复合材料单层材料主方向的应力-应变关系为基础,介绍了复合材料单层非材料主方向弹性特性的分析方法。第4章基于经典层合板理论导出多向层合板的内力-应变关系,重点介绍了对称层合板的面内刚度和面外刚度,以及一些特殊层合板的刚度分析方法。第5章主要介绍单层的基本强度、失效判据以及层合板的强度计算方法。湿热效应是树脂基复合材料层合板特有的性能。第6章介绍了湿热条件下复合材料的本构关系的建立和残余应力、残余应变的计算方法。第7章简要介绍了基于层合板理论的二维和三维编织复合材料刚度分析的单胞模型方法。连续纤维增强复合材料的力学性能与基体和纤维的性能相关,为了认识这一关系,必须采用细观力学的分析方法。第8章介绍了复合材料的工程弹性常数和强度的细观预测方法。层间分层是复合材料层合板特有的损伤,造成分层的原因主要是层间应力过高。第9章介绍了复合



材料层合板的层间应力形成的原因和相应的计算方法。

本书第 1 章至第 7 章由矫桂琼编写,第 8 章和第 9 章由贾普荣编写。王波以及高峰、常岩军、杜凯、聂荣华等参与了有关的辅助工作,在此一并表示感谢。

全书内容既有比较完整的理论基础,又力求叙述简捷、内容紧凑实用,突出工程应用,注意体现复合材料力学研究的新理论和新成果,例题的数据均采用国产典型复合材料的性能数据。书中配有适当数量的习题,有助于学生自学。本书既可作为国防高等院校有关专业的教材,也可供从事复合材料结构设计、力学性能研究以及复合材料开发和应用的工程技术人员参考。

限于作者水平,书中难免出现错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

作 者

2007 年 8 月于西北工业大学



总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就;研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了一席之地。党的十一届三中全会以来,伴随着改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济做出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新



世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,产生和传播国防科技新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,积极探索,锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影响。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版 200 种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的 100 多位专家、学者,对经各单位精选的近 550 种教材和专著进行了严格的评审,评选出近 200 种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与工程、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,进入 21 世纪,我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提



升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝

目 录

第 1 章 复合材料概论.....	1
1.1 复合材料的发展与应用	1
1.2 复合材料的分类与特性	6
1.3 连续纤维增强树脂基复合材料的制造工艺.....	12
1.4 连续纤维增强复合材料的力学特性.....	14
习题	18
第 2 章 各向异性材料的应力-应变关系.....	19
2.1 三维各向异性材料的应力-应变关系	19
2.2 正交各向异性材料的工程弹性常数.....	26
习题	33
第 3 章 复合材料单层的弹性特性	35
3.1 复合材料单层材料主方向的弹性特性.....	35
3.2 复合材料单层非材料主方向的弹性特性.....	39
3.3 复合材料单层非材料主方向的工程弹性常数.....	45
习题	51
第 4 章 复合材料层合板的弹性特性	53
4.1 层合板的标记.....	53
4.2 经典层合板理论和一般层合板的刚度.....	54
4.3 对称层合板的弹性特性.....	62
4.4 特殊非对称层合板的弹性性能.....	70
4.5 层合板的非中面刚度系数.....	74
4.6 层合板的工程弹性常数.....	77



4.7 层合板的单层应力和应变分析	81
习题	86
第5章 复合材料层合板的强度	88
5.1 复合材料单层的基本强度	88
5.2 复合材料层合板的强度	100
习题	106
第6章 复合材料层合板的湿热效应	107
6.1 湿热对单层力学性能的影响	107
6.2 单层的湿热变形	109
6.3 层合板的湿热本构关系	111
6.4 层合板的湿热膨胀系数	114
6.5 层合板的残余应变和残余应力	115
6.6 层合板的湿热翘曲	116
习题	119
第7章 织物增强复合材料的弹性特性	120
7.1 二维织物增强复合材料的弹性特性	120
7.2 三维织物增强复合材料的弹性特性	125
习题	130
第8章 复合材料细观力学	131
8.1 细观力学的基本假设	131
8.2 材料主方向工程弹性常数的细观预测	132
8.3 工程弹性常数的极限分析	138
8.4 哈尔平-蔡方程	142
8.5 复合材料基本强度的细观预测	143
习题	152



第 9 章 层间应力.....	153
9.1 层间应力的定性分析	153
9.2 单向拉伸下对称层合板的弹性力学基本方程	155
9.3 斜交对称层合板层间应力的近似解法	158
9.4 斜交对称和正交层合板层间应力的完全解	161
习题.....	165
参考文献.....	166

第 1 章 复合材料概论

复合材料在材料的组成和结构、物理化学特性以及制造工艺等方面,与金属、工程塑料等传统材料相比有显著的区别,其力学性能也自然独具特色。为了便于更好地认识和掌握复合材料力学的特点和处理问题的方法,作为本书的引言,本章主要介绍复合材料的发展和应用背景、复合材料的分类和特性、连续纤维增强树脂基复合材料的制造工艺和力学特性。

1.1 复合材料的发展与应用

复合材料是由界面分明、物理化学性能不同的组分材料构成的性能优越的多相材料。人类很早就懂得使用材料的复合原理制成新的材料。中国古代人用黏土加稻草制作成的泥砖和泥墙,古埃及人将木板作不同方向排列制成用于造船的多层板,可以说是最原始的复合材料。到了近代,复合材料已经深入到人类生活的许多方面,例如胶合板就是充分利用了木质纤维的方向性叠层制成的一种复合材料,不但具有高于木材的强度和刚度,而且具有受热和受湿后变形小的特点,成为早期飞机的蒙皮材料。又如建筑中广泛使用的钢筋混凝土,实际上也是一种复合材料,它具有水泥、砂石和钢筋所没有的优越的综合性能。但是,真正被称为复合材料的还是 20 世纪 40 年代出现的玻璃纤维增强树脂,这种材料密度低,强度高,所以也被称为玻璃钢。玻璃钢是现代复合材料的代表,在航空上最早被应用于飞机雷达罩,现在已推广应用于军事、民用的各领域。在军事上,玻璃钢使用于直升机旋翼、扫雷艇舰体、火箭发射管、枪托等。在民用方面被用于建筑材料、高压气瓶、管道、冷风机叶片、安全帽以及撑杆跳用的撑杆等。随着 60 年代新一代高强度高模量纤维——硼纤维、碳纤维与高强有机纤维——的问世,复合材料进入了一个新的时代。由硼纤维、碳纤维和高强有机纤维作增强物的树脂基体复合材料,以及后来出现的耐高温的金属基、陶瓷基和碳-碳复合材料被统称为先进复合材料。虽然它只有 30 多年的历史,但却取得了惊人的发展。

先进复合材料的主要应用对象是航空航天器结构。航空航天器结构对重量的要求可谓是“两两计较”,减轻结构重量对提高飞机和火箭的性能是至关重要的。先进复合材料正是具备了低密度高强度的优势,被越来越大量地应用于飞机、运载火箭、航天器和卫星等结构上。目前,在航空航天器结构上用量最大的先进复合材料是碳纤维增强树脂复合材料。该材料的密度约为 1.6 g/cm^3 ,仅为铝合金的 60%。另外,这种材料具有整体成形的优点,可以大量节省连接结构件时使用的铆钉、螺栓等紧固件。用它代替铝合金,一般可以使飞机结构的质量减少 20% ~ 25%。以美国 AV—8B 鹞式垂直起降战斗机为例(见图 1.1),该机的尾翼、机翼、前机身均使用



复合材料,复合材料用量占飞机结构质量的 26%,使整体质量减少 9%,有效载荷和作战半径比改进前的 AV—8A 型飞机增加了 1 倍。另外,有人作过估计,大型商用运输机结构的质量减少 1 kg,每年可以节约燃油 2.9 t。波音—767 大型运输机采用复合材料的质量减少 450 kg,其经济效益是可想而知的。因此,有人把复合材料技术称为发明喷气发动机以来航空工业最大的技术革命。先进复合材料在飞机结构上的应用经历了由小到大,由次要结构到主要结构的发展过程。20 世纪 70 年代,美国军用飞机上的复合材料主要用于尾翼、舵面以及起落架舱门等次承力结构,使用量不到飞机结构质量的 10%。但是,到了 90 年代,先进战斗机 F—22 的机翼、机身、尾翼以及部分梁、框均使用了复合材料,用量达到 26%。B—2 轰炸机以及英德意西四国联合研制的欧洲战斗机 EF—2000 上复合材料的用量则达到了 30%。先进复合材料在商用运输机上的应用受到成本的制约,用量一直偏低,70 年代波音公司和空中客车公司生产的大型商用运输机的复合材料用量不到 1%,但是 90 年代后由于复合材料低成本技术的发展和主结构关键问题的突破,大型商用运输机的复合材料用量迅速增加。1995 年投入运营的波音 B—777 飞机的垂直和水平尾翼、副翼、襟翼、客舱地板梁等均使用复合材料,用量达 12%。90 年代的空

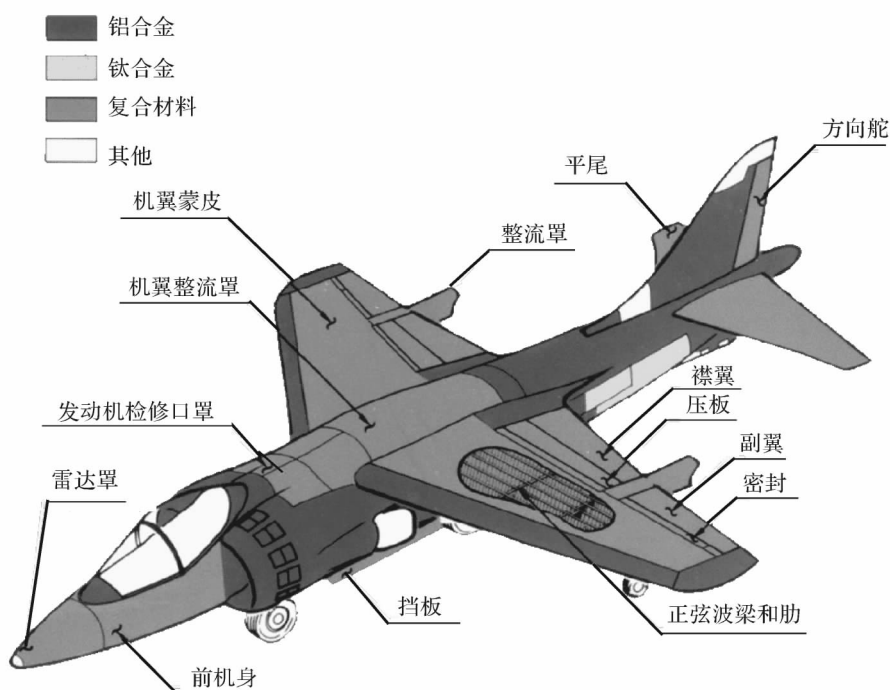


图 1.1 AV—8B 鹞式垂直起降战斗机



中客车 A—320 飞机则达到了 16%。2006 年试飞的空中客车 A—380 飞机复合材料用量达到 25%，除了用于尾翼和操纵面结构外，中央翼盒也采用了复合材料，如图 1.2 所示。21 世纪初美国波音公司在参与并完成了“先进复合材料技术”计划和“先进亚声速技术”计划，基本解决了大型商用运输机的复合材料机翼和机身的关键技术后，向前跨了一大步，2007 年试飞的波音 B—787 飞机复合材料用量高达 50%，该飞机的机翼和机身结构均采用了复合材料，是目前复合材料用量最大的大型商用运输机。可以预计，民用飞机大量使用复合材料的时代即将到来。图 1.3 和图 1.4 是国外军用飞机和商用运输机结构复合材料用量情况。与固定翼飞机相比，直升机上复合材料的使用面更广，发展更快，如图 1.5 所示。70 年代用量还只有 10% 左右，目前已经出现了全复合材料机体结构的直升机。如 RAH—66 科曼奇直升机、V—22 倾转旋翼机机体结构复合材料用量均超过了 40%，最新的 NH—90 欧洲“虎”式武装直升机上复合材料用量达到了 80%，是目前复合材料用量最大的军用直升机。

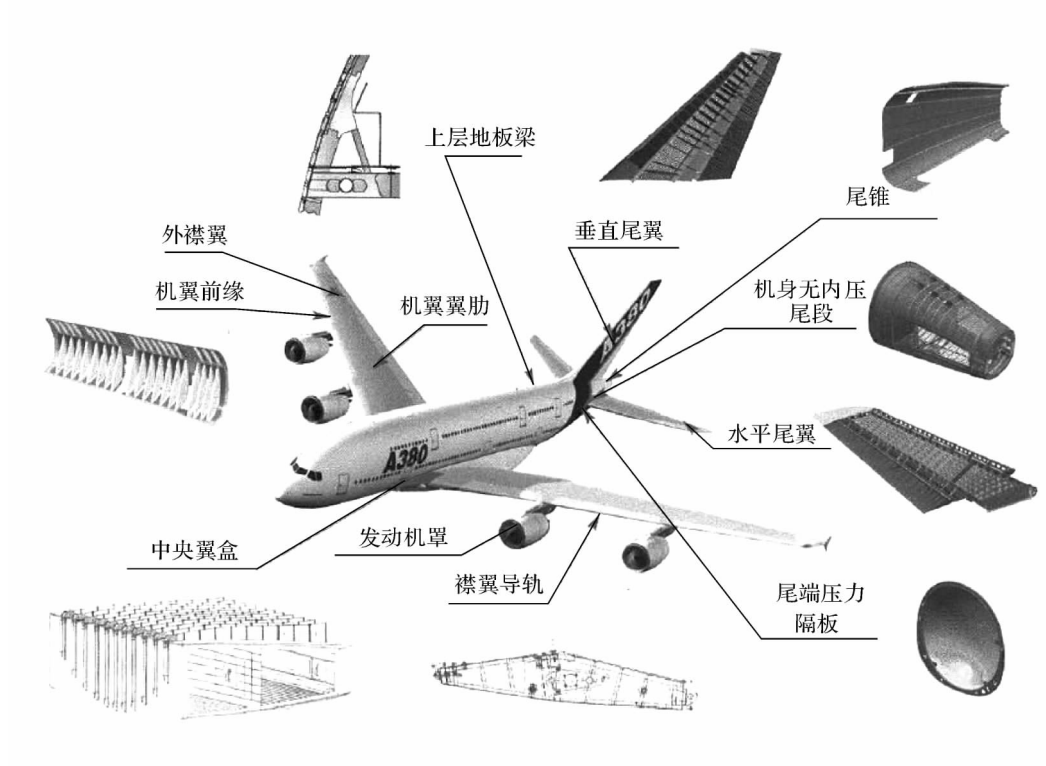


图 1.2 A—380 飞机复合材料构件

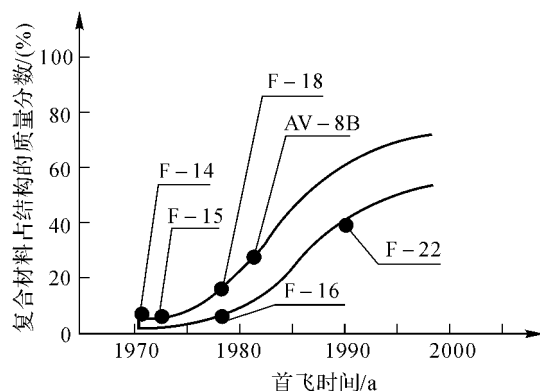


图 1.3 国外军用飞机结构复合材料用量情况

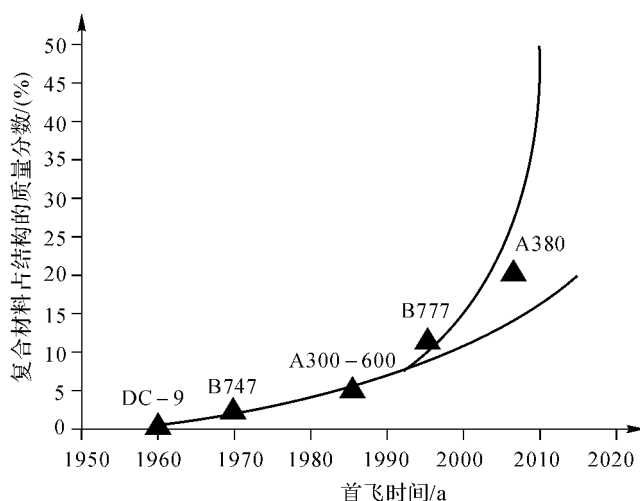


图 1.4 国外商用飞机结构复合材料用量情况

与航空工业同步,先进复合材料在航天器结构上的应用也非常广泛。运载火箭的箭体、固体火箭发动机壳体、卫星和空间站的大型太阳能电池阵基板、卫星展开式天线结构等都大量使用碳纤维增强树脂复合材料,取得了明显的减质量效果和优越的结构性能,如我国某航天器结构用的复合材料承压压力容器,直径达 2 m,与相同刚度和强度的铝合金结构相比,质量减少 30%。

先进复合材料在航空航天应用领域的另一个方面是发动机。推力与自身重力之比——推重比——是航空发动机的重要技术指标,推重比越高航空发动机性能越好,国外先进战斗机



如 F—22 和 EF—2000 飞机发动机的推重比已达到 10, 美国计划用于下一代高性能联合战斗机的发动机的推重比将进一步提高到 15 ~ 20。这时传统的高温合金材料已无能为力, 必须要采用耐高温和轻质的纤维增强陶瓷复合材料和碳—碳复合材料。陶瓷基复合材料的密度仅为高温合金材料的 $1/3 \sim 1/4$, 最高使用温度为 $1\,650^{\circ}\text{C}$ 。陶瓷基复合材料成为新一代航空发动机的首选高强热结构材料。另外, 陶瓷基复合材料还以其优越的耐高温和轻质的特性, 被用于空天飞行器的热防护系统和热结构材料, 如日本的空天飞机 HOPE—X 的隔热瓦就采用了碳化硅陶瓷复合材料。美国正在研制的空天飞行器 X—37 的襟副翼和方向升降舵均采用了连续纤维增强碳化硅陶瓷复合材料(见图 1.6), 这类结构在不采取防热措施条件下, 仍然可以承受巨大的飞行载荷和重返大气层时产生的高温。

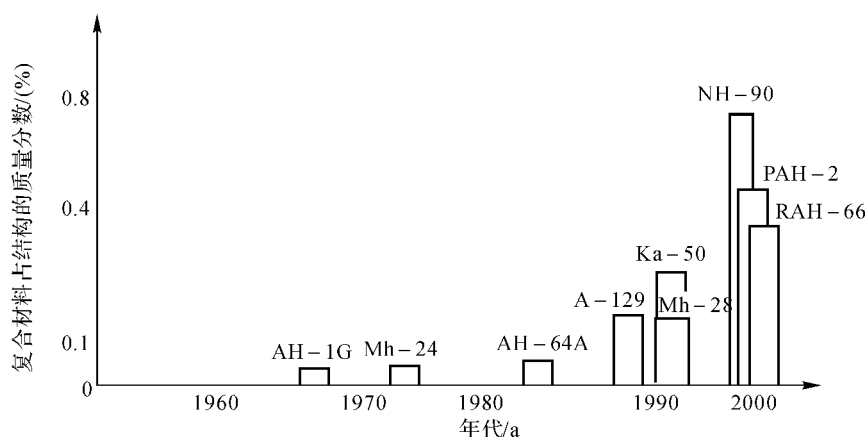


图 1.5 国外直升机结构复合材料用量情况



图 1.6 X—37 陶瓷基复合材料的襟副翼和方向升降舵



先进复合材料在航空航天领域的广泛应用,促进了它在民用领域内的发展。碳纤维复合材料制造的体育运动器材如复合材料自行车、网球拍、高尔夫球杆、划桨以及钓鱼杆等已经屡见不鲜,这些高性能轻质体育运动器材的应用,为运动员提高运动成绩立下了汗马功劳。随着低成本技术的发展,先进复合材料在军事和民用领域的应用将会更加广泛。

1.2 复合材料的分类与特性

工程结构中实用的复合材料可以大致分为细观复合和宏观复合两大类。细观复合是指一种或几种制成细微形状的材料均匀分散于另一种连续材料中,前者称为分散相,后者称为连续相,通常复合材料也主要是指这一类。宏观复合主要是指两层以上不同材料叠合,也称层合,这种层合复合材料的组合可以是几种单成分材料,也可以是上述细观复合材料。从某种意义上讲,这种层合复合材料实际上是一种复合结构,如铝合金薄板和碳纤维或玻璃纤维复合材料薄片的层合等。

对于细观复合材料,连续相材料又称“基体相材料”,简称基体,它的主要作用是黏结保护分散相材料和传递应力。分散相材料又称“增强材料”,它的主要作用是抵抗变形和破坏。细观复合材料的分类有按连续相的性质和按分散相的形状、性质分类的两种方法,宏观复合材料主要按结构形式分类。

一、按连续相分类

1. 非金属基复合材料

用做复合材料基体的非金属主要是树脂(高分子聚合物)、陶瓷和碳,相应的复合材料称为树脂基、陶瓷基和碳基复合材料。

(1) 树脂基复合材料。树脂基复合材料其基体树脂是一种高分子聚合物,也称聚合物基复合材料,基体树脂主要有两大类:热固性树脂和热塑性树脂。

1) 热固性树脂。这类树脂是通过加热和加压引起某种特定的化学反应,使低分子聚合成高分子链,链与链之间又通过化学键交联形成相对分子质量无限大的三维空间网,这个过程称为“固化”。固化后的高聚物相当刚硬,加热不会软化。这种树脂聚合固化的过程是不可逆的,具有热固性。典型的热固性复合材料基体树脂有聚脂(PE)、环氧树脂(Epoxy)、酚醛和双马来酞亚胺(BMI)和聚酰亚胺(PMI)等。

聚脂的优点是具有高的力学性能、良好的耐酸腐蚀性和电绝缘性,工艺简单,成本低,一般用做玻璃纤维增强复合材料的基体材料。

环氧树脂的种类很多。它们具有高的力学性能,耐高温,抗碱性腐蚀能力强,但抗酸腐蚀能力较弱,工艺性好。环氧树脂是碳纤维和硼纤维增强复合材料的主要基体材料,环氧树脂作为基体的复合材料是目前航空航天器结构中应用最多的复合材料。