

第 1 章 复合材料简介

由两种或两种以上的组分材料组成的材料，各组分材料基本上仍保持其原来各自的物理和化学性质,彼此间有明显的界面的材料称为复合材料。

按这样定义，人类利用复合材料已有几千年的历史了，如人们用草增强泥来盖房子等。近代复合材料是以玻璃钢为代表的，即以玻璃纤维增强树脂用作结构材料，并于 20 世纪 40 年代用于美国“蚊式”等飞机机体结构的制造上。但因玻璃钢自身固有的弱点，不能用于主承力结构，直到 60 年代出现了所谓的先进复合材料后，其研究和应用才有了划时代的发展。

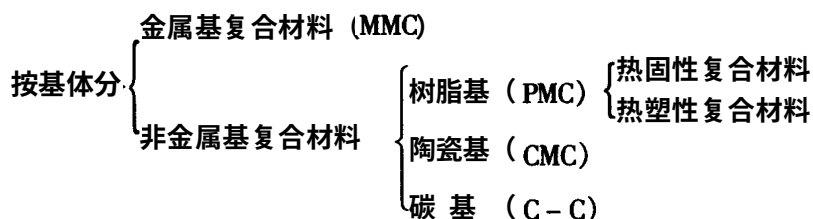
可用于主承力结构和次承力结构、刚度和强度性能相当于或超过铝合金的复合材料称为先进复合材料。目前主要指有较高强度和模量的硼纤维、碳纤维和芳纶（Kevlar, 凯芙拉）等增强的复合材料，其中应用最广的则是碳纤维复合材料。

聚丙烯腈基（PAN 基）碳纤维自 1959 年问世，60 年代初进入工业化生产，60 年代中期碳纤维复合材料问世，70 年代初期即已开始用于飞机结构上。将先进复合材料用于飞机结构上可相应减重 20% ~ 30% ，这是其他先进技术难于或无法达到的效果。因此，其在航空航天领域应用日益广泛，占了其初期用量的 70% ~ 80% 以上，在铝、钢、钛之后，已迅速发展成四大航空航天结构材料之一。当然，随着技术的进步，材料价格的降低，先进复合材料日益向民用领域扩展，目前民用已成为主流，航空航天的应用已只占 20% 左右的份额了。

1.1 复合材料及其应用

1.1.1 复合材料的分类

一般讲复合材料由增强材料和基体材料组成。基体材料有金属和非金属之分，于是形成了金属基和非金属基两大类复合材料。非金属基体又包括了树脂、陶瓷、碳等，分别形成了树脂基、陶瓷基、碳 - 碳（C - C）等几大类复合材料。



增强材料可有碳纤维（包括石墨纤维）、硼纤维、芳纶、玻璃纤维、超高强聚乙烯纤维等，形成的复合材料分别叫做碳纤维复合材料、硼纤维复合材料、芳纶复合材料和玻璃钢等。

按增强纤维分 { 碳纤维复合材料 (CFRP)
芳纶复合材料 (KFRP)
硼纤维复合材料 (BFRP)
玻璃钢 (GFRP)
其他：包括混杂复合材料等

目前发展较成熟，航空航天上应用较多的主要是树脂基碳纤维复合材料和芳纶复合材料，当然还有玻璃钢等。一般讲，树脂基复合材料耐温不超过 400°C ，硼纤维复合材料由于价格昂贵，加工困难，目前应用已不多。

金属基、陶瓷基、碳-碳复合材料均属高温复合材料，金属基的可耐温 600°C ，陶瓷基的可耐温 1000°C 以上。当要求更高温度时只有碳-碳复合材料了，可耐温达 2000°C 。不同的复合材料有其各自的发展程度和应用领域及范围。

1.1.2 复合材料的特点

先进复合材料的几个主要特点如下

(1) 比强度、比刚度高

比强度和比刚度是材料最重要的性能指标之一。比强度、比刚度高才能减重，而减重正是复合材料最重要的优点。

(2) 可设计性强

复合材料是各向异性的，可根据使用要求和受力情况进行材料的设计和剪裁，为设计师提供了更多的自由度，以便提高结构效率。

(3) 良好的抗疲劳性能

复合材料抗拉疲劳性能好，纤维形成多传路结构，裂纹不易扩展，如发生疲劳破坏多有先兆，不像金属那样来得突然。

(4) 抗腐蚀性能好

复合材料在苛刻环境条件下也不会腐蚀，这条优点显得越来越重要，使其可以广泛用在沿海或海上的军、民用工程中。

(5) 便于大面积整体成形

复合材料有多种成形工艺，便于制成大型整体零件和表面复杂的零件，从而可以大幅度减少零件数量和连接件数量，既可减重又可降低装配和制造成本。

(6) 良好的尺寸稳定性

碳纤维的热胀系数几乎为零或是负的，可设计出零膨胀的结构，在温度剧烈变化的条件下可保持良好的结构形状和尺寸稳定性。

(7) 层间强度低

复合材料的层间强度低，易产生分层破坏，降低其承载能力。目前采用缝纫或编织复合材料，此缺点或可克服。

(8) 冲击韧性差

碳纤维复合材料比较脆，抗冲击载荷能力差，甚至低能量的冲击也会产生内部损伤，这也是其缺点之一。

1.1.3 复合材料的航空航天应用

复合材料在航空航天领域有广泛的应用，目前在机体结构、导弹、火箭和人造卫星上有日益增加的趋势。这些复合材料结构即是本指南所要进行修理的主要对象，故应对其应用情况有一个概括的了解。

1.1.3.1 复合材料在航空领域的应用

复合材料在航空领域的应用可分为军用飞机（军机）、民用飞机（民机）、直升机和轻型飞机等几个方面，应用早且量多的当然是以军机为主。

先进复合材料在军机上的应用 20 多年来走过了一条由小到大、由弱到强、由少到多、由结构到功能的发展道路。应用大致分为 3 个阶段，第一阶段用于受力不大的舱门、口盖、整流罩及襟副翼、升降舵和方向舵等操纵面上；第二阶段用在受力较大的垂尾、平尾一级部件上，20 世纪 70 年代初 F-14 战斗机复合材料平尾的出现是个重要的标志；第三阶段是用在机翼、机身等主要受力结构上。

70 年代中期以后进入服役的战斗机，尾翼一级的部件已基本上都由复合材料制成。如众所周知的 F-14、F-15、F-16、F-18、“幻影”2000 和“幻影”4000 等。1976 年美国麦道飞机公司率先将复合材料用在生产型飞机 F-18 的机翼上，并于 1982 年进入服役。由于在机翼上应用了复合材料，将其在结构中所占的百分比提高到了 13%。该公司又将复合材料用在英国“鹞”飞机的美国改型 AV-8B 的机翼和前机身上，复合材料占该机结构总重的 26%，使复合材料在飞机上的应用跨入了第三个阶段。目前，世界各国在研制中的性能先进战斗机机翼一级的部件已几乎无一例外地都是复合材料的了。近期的应用情况详见表 1-1，总的应用情况详见图 1-1，其他详细情况可见图 1-2~图 1-4。

表 1-1 军机上复合材料的应用近况

机 种	国 别	用 量	具体应用部位	首 飞
“阵风” (Rafale)	法国	25%	机翼、垂尾、机身结构的 50%	1986 年 7 月
JAS39	瑞典	30%	机翼、前翼、垂尾、所有的舱门	1988 年 12 月
B-2	美国	50%	中央翼（身）的 40%，外翼中部和侧后部，机翼前缘	1989 年 7 月
F-22	美国	25%	前中机身蒙皮、部分框、机翼蒙皮和部分梁、垂尾蒙皮、平尾蒙皮和大轴	1990 年 6 月
“台风” (EF 2000)	英、德、意、西四国联合	50%	前中机身、机翼、垂尾、前翼，机体表面的 82% 为复合材料	1994 年 3 月

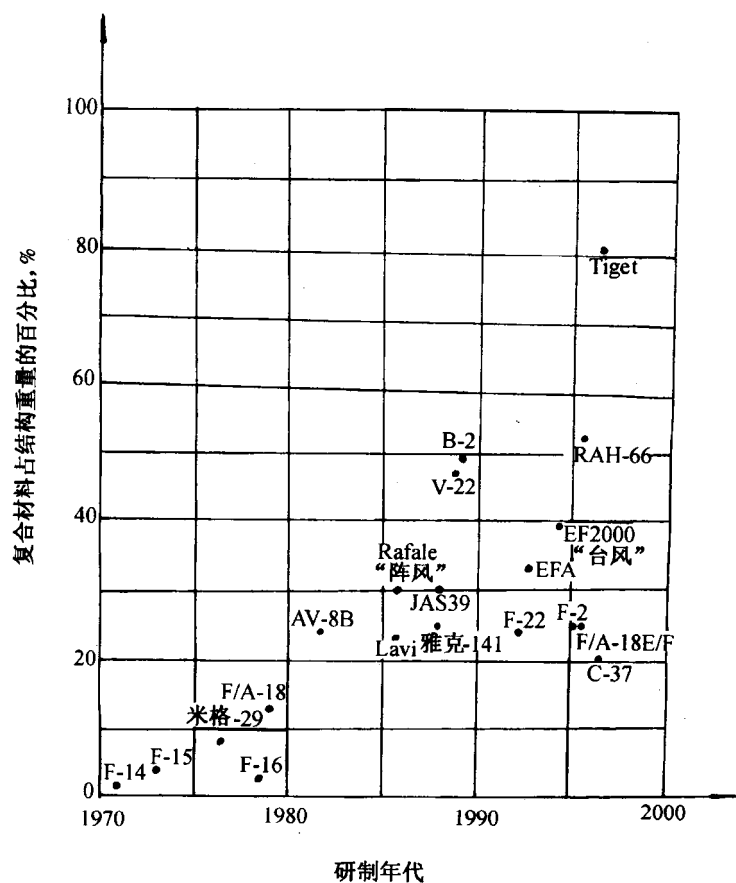


图 1-1 军机复合材料的应用情况

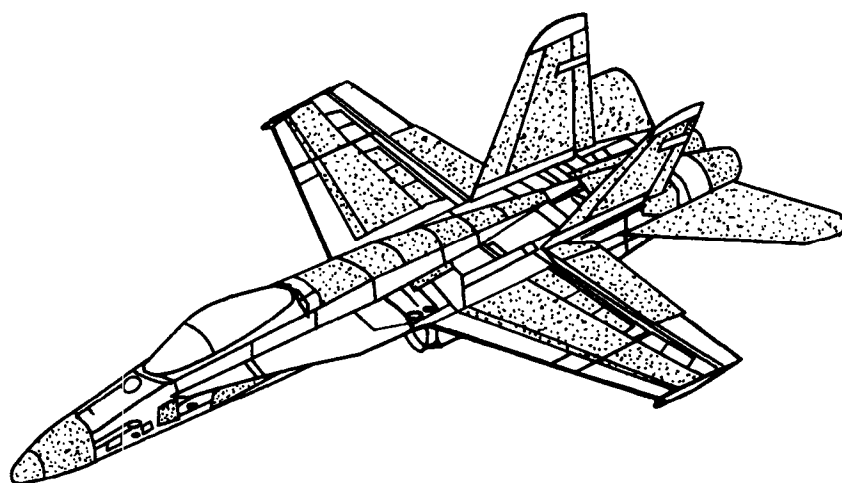


图 1-2 F-18 复合材料的应用

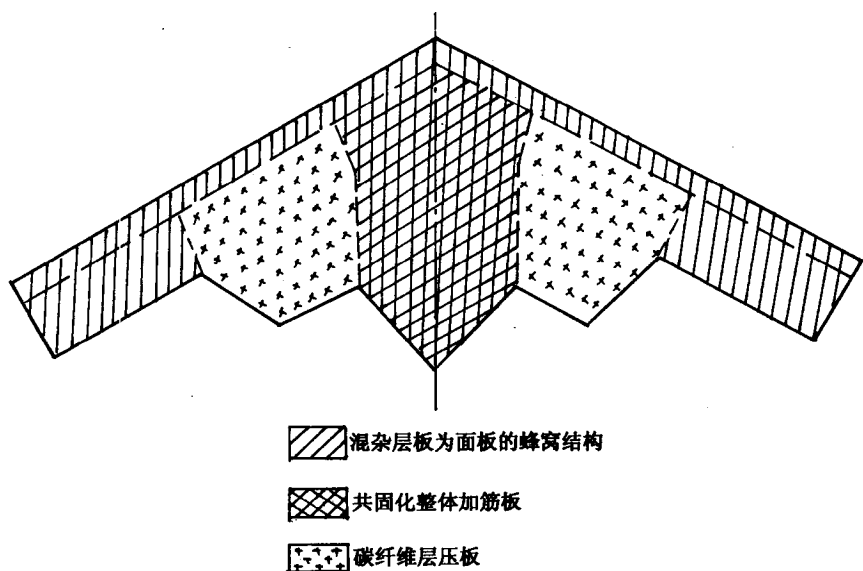


图 1-3 B-2 复合材料的应用



图 1-4 AV-8B 复合材料机翼

大型民机更强调安全性和经济性，复合材料用量的百分比低于军机，但用量也是日渐增加。如波音 757 用量 1429kg, 波音 767 用量 1524kg, 具体情况见表 1-2。

表 1-2 波音 757 和波音 767 上复合材料的使用情况

机 种	应 用 部 位	重量 (kg)	减重 (kg)
波音 757	内、外侧襟翼，副翼，扰流板，发动机整流罩，前、主起落架舱门，方向舵，升降舵	1429	517
波音 767	内、外侧襟翼，副翼，扰流板，发动机整流罩，前、主起落架舱门，升降舵	1524	567

美国各大飞机公司还分别研制了波音 737 平尾、DC-10 垂尾、L-1011 垂尾三个尾翼级部件。最新研制的波音 777 复合材料用量则已增加到 9900 kg，占结构总重的 11%，见图 1-

5。欧洲的空中客车系列飞机用量多者可达结构总重的 15% 左右，如 A340 用了 11000kg 之多，占结构总重的 13%。法、意联合研制的 ATR-72，由于采用了复合材料机翼，其用量高达 20%。近期美国 NASA 分别与几大飞机公司合作，拟研制干线飞机的复合材料机身和机翼，进一步扩大用量。国内进口的大型干线客机上都有复合材料部件，其修理需求日益增加。图 1-6 和图 1-7 为国外民用飞机装配复合材料部件的情况。

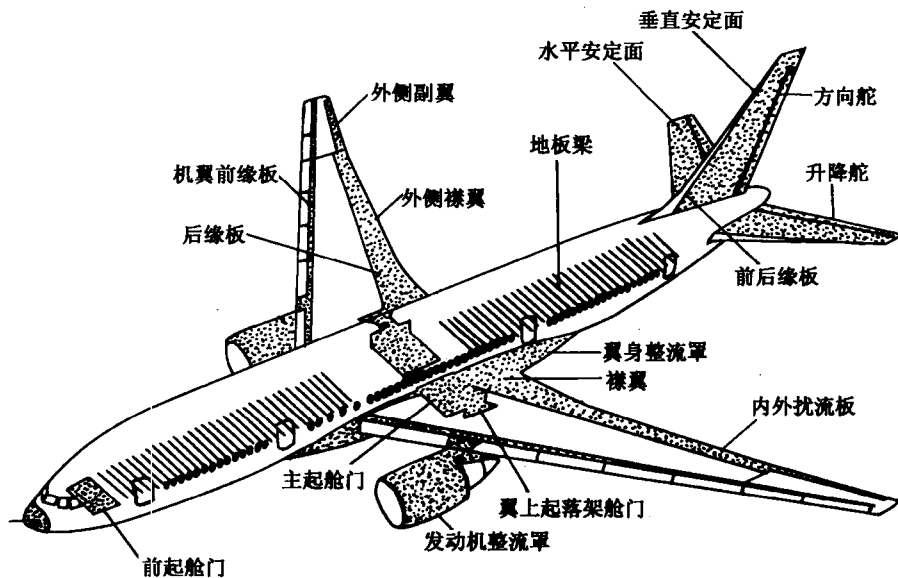


图 1-5 波音 777 上的复合材料结构

在近代直升机上复合材料的用量较一般军、民机还要多。在美国对直升机有一个 ACAP 计划（先进复合材料应用计划），在此计划下 H360、S-75、BK-117 等直升机和 V-22 倾转旋翼机均大量采用了复合材料。如垂直起落倾转旋翼后又能高速巡航的 V-22 用复合材料近 3000kg，占结构总重的 45% 左右，其中包括了机身机翼的大部分结构以及发动机悬挂接头和叶片紧固装置。美国最新研制的轻型侦察攻击直升机 RAH-66，具有隐身能力，复合材料用量约 50%，机身龙骨大梁长 7.62m，铺层最多处达 1000 层。欧洲法、德合作研制的“虎”（Tiger）式武装直升机，复合材料用量高达 80%。

轻型飞机领域更是和复合材料密切相关。自 20 世纪 80 年代后世界上出现了很多全复合材料飞机。美国比奇飞机公司的“星舟 1 号”（Starship 1）是第一个获得 FAA 型号合格证的全复合材料飞机，见图 1-9，它是一种客货两用轻型飞机。“旅游者”号（Voyager）几乎全由碳纤维复合材料制成，大大减轻了机体的结构重量，可以装载大量燃油而号称飞行油箱。该机于 1986 年 12 月创下空中不加油、中途不着陆、连续 9 天环球飞行 40390km 的世界纪录，举世轰动，为先进复合材料的应用带来了成功与骄傲。中国台湾纬华直升机公司研制的超轻型直升机、双座的空机重量仅 180kg，机体结构基本全是碳及混杂复合材料。目前世界上的各种轻型飞机多由复合材料制成，不过多用的是玻璃钢结构。本指南所提供的修理方法对该类飞机亦是适用的。

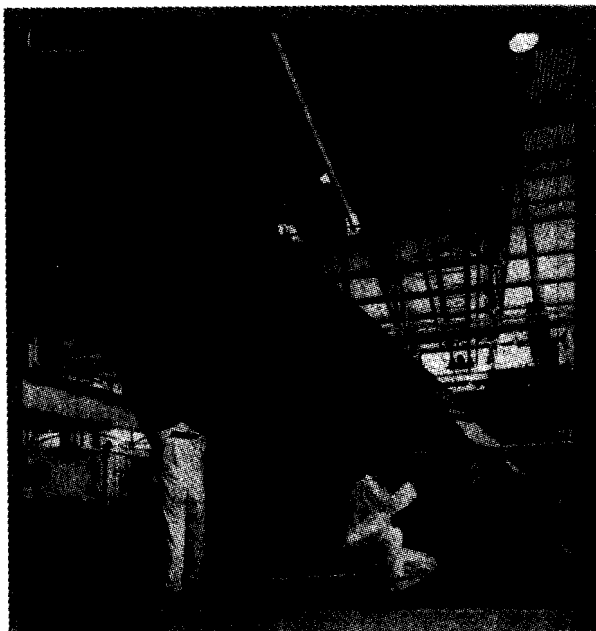


图 1-6 A320 的复合材料垂尾



图 1-7 波音 777 的复合材料方向舵

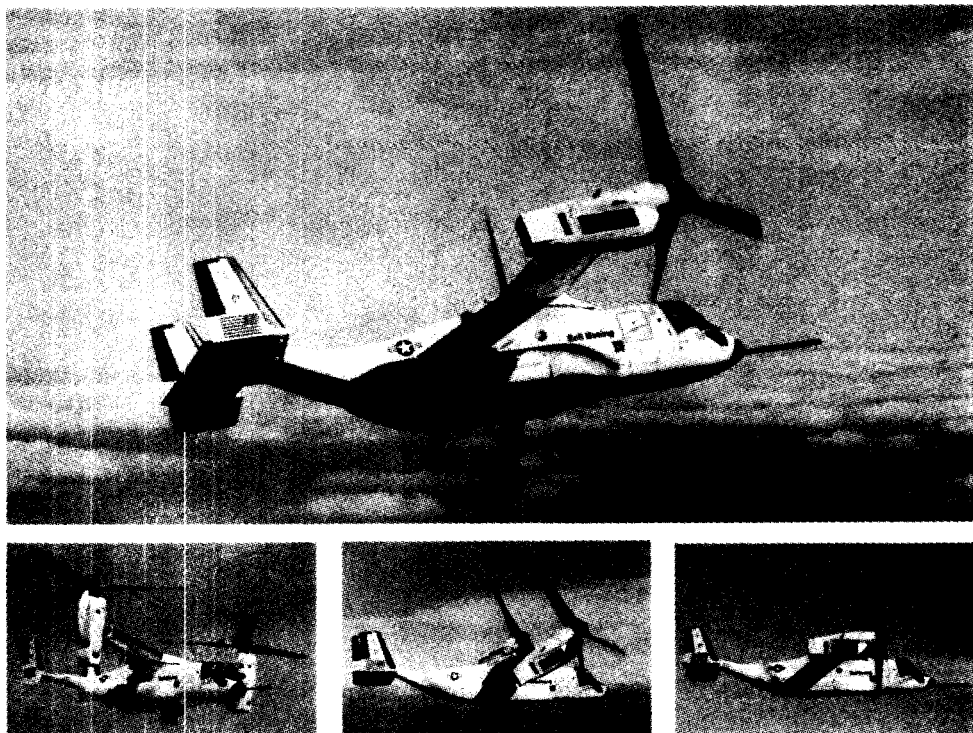


图 1-8 V-22倾转旋翼机



图 1-9 “星舟 1号”全复合材料飞机



图 1-10 公务机的复合材料机身

1.1.3.2 复合材料在航天等领域的应用

以美国为代表的西方，在先进复合材料问世后即已将其大量用于导弹、火箭、航天飞机和卫星等结构上。

在战略导弹和运载火箭上应用先进复合材料的构件主要有弹头鼻锥、壳体、弹体舱段、舱体、级间段等。弹头重量每减轻 1kg，可以增加射程 20km。用于战略导弹机动发射的发射筒可以说是目前最大的先进复合材料构件，如 MX 导弹的发射筒长 14.94m，内径 249cm，重达 7246kg。固体火箭发动机上先进复合材料所占比重更大，甚至有全复合材料固体火箭发动机之说，应用情况可见表 1-3。在巡航导弹上先进复合材料可用在弹翼、尾翼等部件上，据说采用复合材料的翼面可较铝合金翼面减重 40%。表 1-4 给出“战斧”式巡航导弹用复合材料的情况。此外，如航天飞机的大型舱门、翼面前缘，人造卫星的太阳能电池板和各种支架等也都大量使用了先进复合材料。表 1-5 给出了一个国内卫星应用复合材料的情况。图 1-11 则给出了一个战略导弹应用复合材料的示意图。

以国防工业系统而言，先进复合材料在舰船、电子、兵工武器等系统均有大量的应用，原则上讲，所有进入工程应用的复合材料结构均有修理的需求。

表 1-3 固体火箭发动机壳体用先进复合材料

型 号	发动机尺寸 (m×m)	壳体用先进复合材料
海神 (C-3)	一级	玻璃纤维/环氧
	二级	玻璃纤维/环氧
“三叉戟” 1 (C-4)	一级	K-49/环氧
	二级	K-49/环氧
	三级	K-49/环氧

续表 1-3

型 号		发动机尺寸 (mm)	壳体用先进复合材料
“三叉戟” 2 (C-5)	一级	$\phi 1.88 \times 4.50$	1M-7/HBRF-55A
	二级	$\phi 1.88 \times 3.50$	1M-7/HBRF-55A
	三级	$\phi 1.88 \times 2.45$	K-49/环氧
MX	一级	$\phi 2.34 \times 8.44$	K-49/环氧
	二级	$\phi 2.34 \times 5.60$	K-49/环氧
	三级	$\phi 2.34 \times 2.33$	K-49/环氧
侏儒	一级	$\phi 1.168 \times 5.45$	1M-7/HBRF-55A
	二级	$\phi 1.168 \times 3.00$	1M-7/HBRF-55A
	三级	$\phi 1.168 \times 2.03$	1M-7/HBRF-55A

表 1-4 “战斧”式巡航导弹用先进复合材料

部 件	复 合 材 料
头锥	Kevlar/聚酰亚胺
雷达天线罩	玻璃纤维/环氧
进气道	玻璃纤维/环氧
进气道整流罩	石墨纤维/聚酰亚胺
尾翼	玻璃纤维/环氧 Kevlar/环氧
尾锥	E 玻璃粗纱/环氧
发射容器	短碳纤维/环氧

表 1-5 国内卫星应用的复合材料结构件

卫星 序号	结构件名称	外形尺寸 (mm)	材料及结构件组成
1	(1) 喇叭天线 (2) 椭圆抛物面天线反 射器 (3) 消旋支架 (4) 支撑筒	高约 280, 大端直径约 250 长轴 1200, 短轴 700, 最大旋转半 径 1300 高约 580 高约 300, 大端直径约 140	主体材料碳/环氧, 镀铜、金等碳/ 环氧面板铝蜂窝夹层结构 由碳/环氧圆管与铝合金接头组成 由碳/环氧锥壳和金属端框组成
2	电池梁	“工”字形, 长 750, 高 54, 宽 44	由碳/环氧和钛箔组成混杂结构
3	(1) 波纹承力筒 (2) 夹层结构板 (3) 太阳能电池基板 (4) 连接架	高 1983, 锥段大端内径 1166 最大件 1668×2158 1720×2220 750×2220	由碳/环氧波纹筒、端框、隔框、纵 桁和若干角撑件组成 由碳/环氧(或铝合金)面板与铝蜂 窝芯复合 由碳/环氧网格面板和铝蜂窝芯复合 由碳/环氧方管与钛合金接头组成

续表 1-5

卫星序号	结构件名称	外形尺寸 (mm)	材料及结构件组成
4	(1) 加筋壳	高 1300, 内径 1187.6	由 1.7mm 厚碳/环氧壳体、碳/环氧隔框和桁条、铝合金端框组成
	(2) 夹层结构板	最大件: 1250 × 1985	同卫星序号 3 之 (2)
	(3) 太阳能电池基板	1755 × 2581	同卫星序号 3 之 (3)
	(4) 连接架	750 × 2581	同卫星序号 3 之 (4)
5	(1) 加筋壳	高 1620, 内径 1187.6	同卫星序号 4 之 (1), 但碳/环氧壳体壁厚 3.2mm
	(2) 夹层结构板	1250 × 1985	同卫星序号 4 之 (2)
	(3) 太阳能电池基板	1755 × 2581	同卫星序号 3 之 (3)
	(4) 连接架	810 × 2581	同卫星序号 3 之 (4)
	(5) 支撑结构	950 × 2030	碳/环氧型材与钛合金接头组成

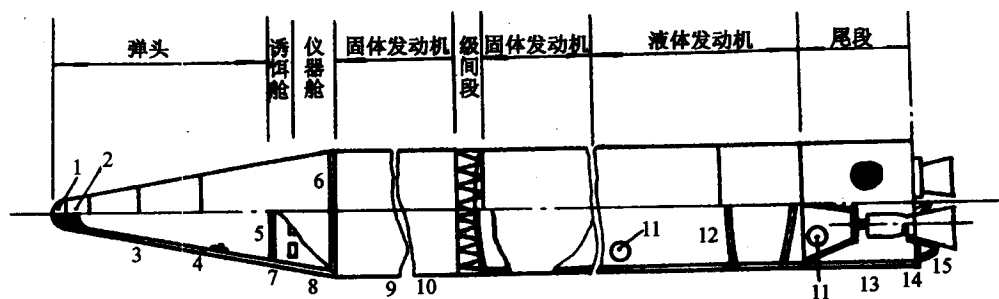


图 1-11 战略导弹应用复合材料的示意图

- 1—鼻锥；2—弹头上壳体；3—弹头下壳体；4—天线窗；5—底遮板；
 6—再入诱饵；7—诱饵舱；8—仪器舱；9—固体发动机壳体；
 10—级间段；11—高压气瓶；12—共底；13—尾段壳体；
 14—发动机底部防热板；15—柔性防热裙

1.1.4 复合材料的民用发展

复合材料的应用传统上分为航空航天、体育及休闲用品和工业应用三大领域，后两部分即所谓的民用部分。目前民用领域占了先进复合材料 70% ~ 80% 的市场份额，而且还有继续扩大的趋势。

体育及休闲用品一直是碳纤维复合材料应用的一个重要领域，而且是一个开发较早的领域，其中高尔夫球杆、网球拍和钓鱼杆是其三大支柱产品，几乎占了该类产品的 80% 以上。其他则包括自行车、船舶、赛车、弓箭、滑雪杆、滑雪板以至乐器等，如图 1-12 和图 1-13 所示。

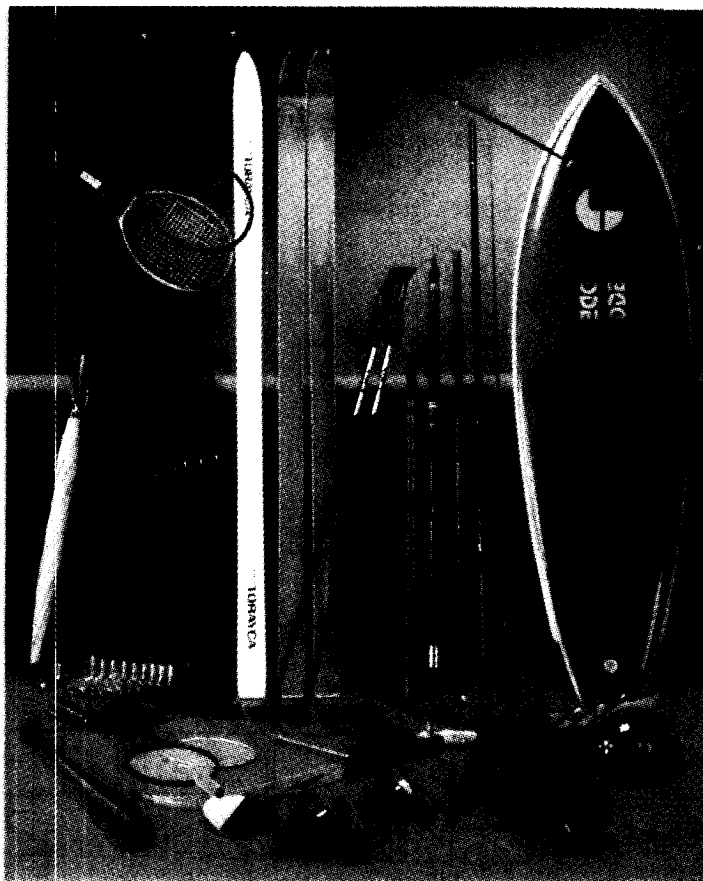


图 1-12 琳琅满目的复合材料体育用品

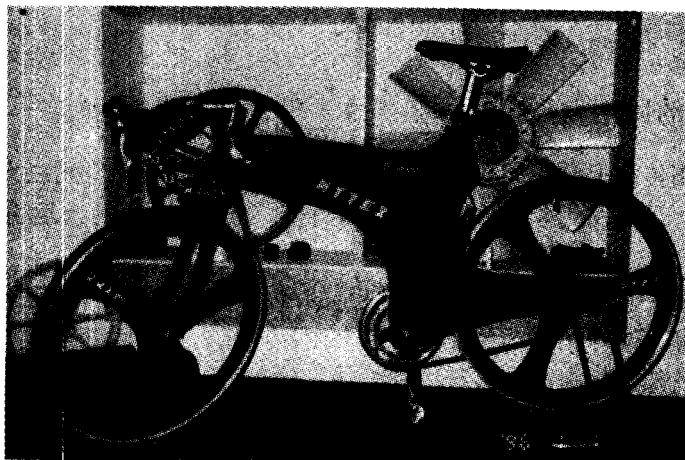


图 1-13 复合材料自行车

工业领域是目前先进复合材料应用最大，也是发展最快的一个重要的领域，该领域包括基础设施（建筑业）；沿海油气田的管道系统、护栏扶手、通道、竖井、钻杆等；汽车的车体结构、电动汽车、压缩天然气瓶等；防弹产品的防弹服、头盔、装甲和防弹车等；其他则还有工业机械应用，高速列车、集装箱、风力发电桨叶，电子领域的线路板、反射天线、发热体材料，以及生物工程等。

仅以基础设施领域的应用（见图 1-14）目前即形成了碳纤维复合材料的最大潜在市场。所谓基础设施包括桥梁、房屋建筑、混凝土工程、地铁、涵洞等建筑设施。先进复合材料以梁、索、柱、杆、筋、桁架、构架、层压板，包缠料等多种形式用于该领域。用复合材料修理、加固和更新基础设施技术目前已形成了巨大的市场，为全球所接受。该技术实质上是复合材料胶接修理技术在基础设施领域的扩展与延长。

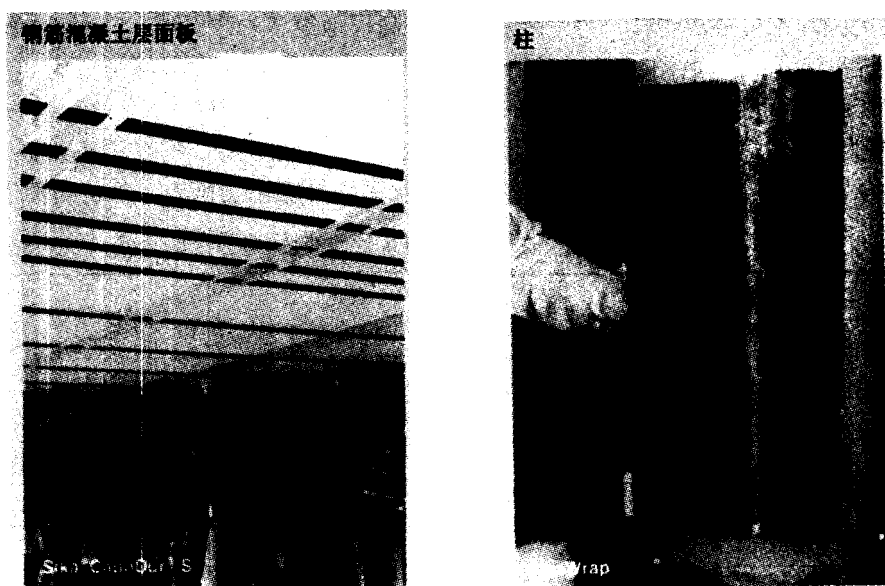


图 1-14 复合材料用于基础设施的修复、更新和加固

原则上讲所有的民用复合材料结构和设施也都存在生产制造和使用过程中缺陷和损伤的问题，也都有修理的需求。本指南所提供的修理方法原则上也适用于这些民用复合材料结构和设施的修理。广义上讲，复合材料修理已形成了一种产业，有着广阔的发展应用前景。

1.2 材料简介

欲进行复合材料结构的修理，必须对复合材料的用材体系有一个初步的认识和概括的了解。复合材料涉及到的材料体系主要包括增强纤维、树脂基体、预浸料、胶粘剂和辅助材料等，下面分别予以简述。

1.2.1 增强纤维

在复合材料中增强纤维植于基体中，起主要的承载作用。增强纤维可有多种，如玻璃纤维、碳纤维、芳纶、硼纤维、碳化硅纤维、超高强聚乙烯纤维等。本指南修理中最常用的是碳纤维，其他如玻璃纤维、芳纶、硼纤维等也会用到。

1.2.1.1 碳纤维

碳纤维可由聚丙烯腈纤维、粘胶丝以及沥青等原料烧制而成，结构用复合材料多由聚丙烯腈基碳纤维制成。烧制有两个主要过程，一是预氧化，二是碳化。一般预氧化在 200 ~ 300°C 下进行，碳化则要在 1200 ~ 2000°C 下进行，还要有惰性气体保护。若在更高的温度 2000 ~ 3000°C 条件下进行则称石墨化，得到的是石墨纤维（Graphite），但美国人有时用 Graphite 一词一般指碳纤维，并非石墨纤维。

从性能上碳纤维可分成中模高强、高模型和超高模型等各种碳纤维，几种常用碳纤维的力学性能可详见表 1-6，由图 1-15 看则更直观。目前世界上又将碳纤维分为航空航天级（Aerospace - Grade）和商用级（Comercial - Grade）两大类，前者多为小丝束（Small Tow, ST），后者多为大丝束（Large Tow, LT）。何谓大丝束，何谓小丝束，分法并不统一，一般讲 24K 以上可为大丝束，24K 以下可算作小丝束，大丝束碳纤维性能稍差，但价格便宜较多。

表 1-6 几种常用碳纤维性能简表

纤维牌号	拉伸强度 (MPa)	拉伸模量 (GPa)	断裂伸长 (%)	密度 (g/cm ³)	生产厂家
T300	3530	230	1.5	1.76	TORAYCA (东丽)
T400H	4410	250	1.8	1.80	TORAYCA (东丽)
T700S	4900	230	2.1	1.80	TORAYCA (东丽)
T800H	5490	294	1.9	1.81	TORAYCA (东丽)
T1000G	6370	294	2.1	1.80	TORAYCA (东丽)
T1000	7060	294	2.4	1.82	TORAYCA (东丽)
M35J	4700	343	1.4	1.75	TORAYCA (东丽)
M40J	4410	377	1.2	1.77	TORAYCA (东丽)
M46J	4210	436	1.0	1.84	TORAYCA (东丽)
M50J	3920	475	0.8	1.88	TORAYCA (东丽)
M55J	3920	540	0.7	1.93	TORAYCA (东丽)
M60J	3920	588	0.7	1.94	TORAYCA (东丽)
M30	3920	294	1.3	1.70	TORAYCA (东丽)
M40	2740	392	0.7	1.81	TORAYCA (东丽)
M46	2550	451	0.6	1.88	TORAYCA (东丽)
M50	2450	490	0.5	1.91	TORAYCA (东丽)
AS1	2760	207		1.8	Hercules (大力士)
AS2	2760	228	1.3	1.8	Hercules (大力士)
AS4	4002	214	1.6	1.8	Hercules (大力士)

续表 1-6

纤维牌号	拉伸强度 (MPa)	拉伸模量 (GPa)	断裂伸长 (%)	密度 (g/cm ³)	生产厂家
AS6	2071	235	1.65	1.8	Hercules (大力士)
IM6	5140	276	1.73	1.7	Hercules (大力士)
IM7	5347	276	1.8	1.8	Hercules (大力士)
IM8	5313	304	1.61	1.8	Hercules (大力士)
IM9	6343	290	1.0	1.79	Hercules (大力士)

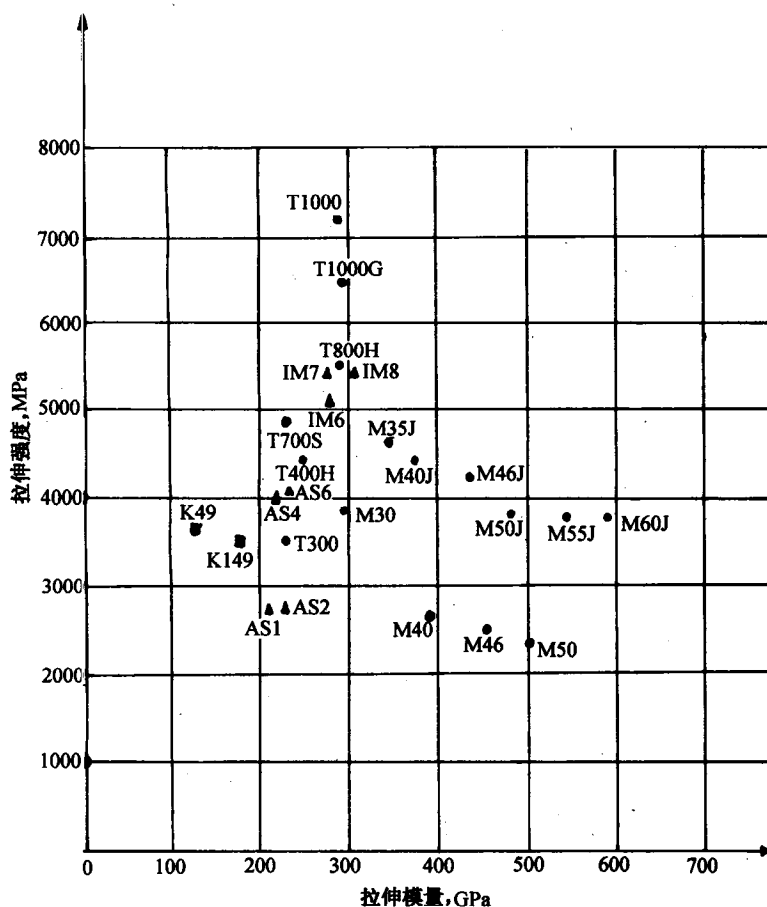


图 1-15 几种典型碳纤维力学性能图

1.2.1.2 玻璃纤维

玻璃纤维（简称玻纤）也分为许多种，如 S 玻纤、E 玻纤，C、D、M、L 等玻纤。结构上常用的为 S 玻纤、E 玻纤则用于有电磁特性要求处，如雷达天线罩等。高强玻纤性能见表 1-7，其中高强 2# 和高强 4# 为我国南京玻璃纤维研究院的产品。

表 1-7 高强玻璃纤维的性能

性能	高强 2*	高强 4*	美国 S994	法国 R	日本 T	俄罗斯 BMTIC
新生态单丝强度(MPa)	4020	4600	4580 ~ 4890	4400	4650	4500 ~ 5000
拉伸弹性模量(MPa)	82900	86400	84700 ~ 86900	83800	84300	95000
密度(g/cm ³)	2.54	2.53	2.49	2.55	2.49	2.56
断裂伸长率(%)		5.3	5.4		5.5	

由表 1-7 可见玻纤的拉伸强度和断裂伸长均较高,但模量相对较低,所以玻璃钢难于用到受力较大的结构上,修理中使用玻纤时亦须注意到此点。

1.2.1.3 芳纶

芳纶是一种聚芳酰胺纤维,它首先由美国杜邦(Dupont)化学公司开发并生产,前苏联亦独立研发成功,性能亦不差。杜邦的注册商标为 Kevlar(芳纶),主要牌号有 Kevlar-49、Kevlar-149 等用于航空航天工业,其性能见表 1-8。Kevlar-149 较 Kevlar-49 提高了模量,改进了吸湿性能。Kevlar-29、Kevlar-129 主要用于防弹产品。

表 1-8 杜邦公司的 Kevlar 性能

品种	拉伸强度 (MPa)	拉伸模量 (GPa)	断裂伸长 (%)	吸湿率 (%)
Kevlar-29	2970	36.7	3.6	4.6 1.1
Kevlar-129	3430	52.8	3.3	
Kevlar-49	3620	125	2.5	
Kevlar-149	3433	165	1.8	

1.2.1.4 硼纤维

硼纤维是硼在钨丝或碳丝上通过化学气相沉积而制成,具有较高的强度和模量,性能见表 1-9。硼纤维价格较高,硼复合材料加工较困难,所以目前应用不多。但用复合材料修理金属飞机结构时,国际上多用硼/环氧复合材料。

表 1-9 硼纤维的基本性能

芯材品种	直径 (mm)	密度 (g/cm ³)	拉伸强度 (MPa)	拉伸模量 (GPa)
硼/钨芯	100	2.59	3445	400
	140	2.46	3583	
	200	2.40		
硼/碳芯	100	2.22		358
	107	2.23		400
	140	2.27		

各种纤维综合性能比较见表 1-10,供修理使用中选择。

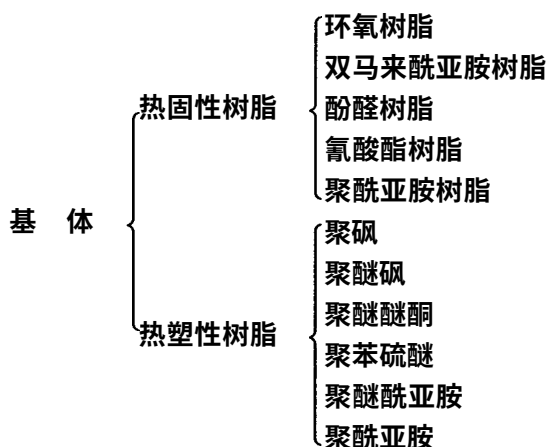
表 1-10 各种纤维综合性能比较

纤维	成本	密度	刚度	强度	韧性	耐热	抗冲击
E 玻纤	低	高	差	中	良	良	良
S 玻纤	低	中	中	良	良	优	良
芳纶	中	低	良	良	优	差	优
碳纤维	高	低	优	优	差	良	差
硼纤维	高	高	优	优	良	优	良

1.2.2 树脂基体

在复合材料中基体将纤维敛集粘附在一起，支撑增强纤维的受力并起一定的保护作用。复合材料的韧性和环境耐受能力主要取决于树脂，如耐温和吸湿性能等。

一般讲树脂分成两大类，热固性树脂和热塑性树脂，前者形成热固性复合材料，后者形成热塑性复合材料。航空航天用复合材料目前以热固性的居多。热塑性复合材料有更好的耐温性能和韧性，便于整体成形和再加工，但成形温度高，生产成本低，发展应用受到一定限制。



1.2.2.1 热固性树脂

(1) 环氧树脂 环氧树脂广泛用于复合材料，品种有双酚 A 环氧、酚醛环氧以及多官能团环氧等。其进一步发展方向应是提高韧性和耐温性能。

(2) 双马来酰亚胺树脂 简称双马树脂，有较好的耐热性能和韧性，多用于航空航天产品的主承力结构，如国外的 NARMCO5250 系列产品。

(3) 聚酰亚胺树脂 聚酰亚胺树脂具有更好的耐热性能和抗氧化性，耐温可达 350°C 左右，常用作发动机等部位的耐热复合材料构件，如国外的主要品种 PMR-15 和 LARC-160 等。

1.2.2.2 热塑性树脂

表 1-11 给出了主要热塑性树脂的品种和性能，其中 PEEK（聚醚醚酮）是最常用的，APC-1 和 APC-2 即为英国 ICI 公司的著名产品。