

第 1 章

复合材料概论

1.1 复合材料及其种类

1.1.1 基本概念

复合材料是由两种或多种不同性质的材料用物理和化学方法在宏观尺度上组成的具有新性能的材料。一般复合材料的性能优于其组分材料的性能,并且有些性能是原来组分材料所没有的,复合材料改善了组分材料的刚度、强度、热学等性能。

人类使用复合材料的历史已经很久了。中国古代使用的土坯砖是由粘土和稻草(或麦秆)两种材料组成的,稻草起增强粘土的作用。古代的宝剑是用复合浇铸技术得到的包层金属复合材料,它具有锋利、韧性好、耐腐蚀的优点。现在的胶合板、钢筋混凝土、夹布橡胶轮胎、玻璃钢等都属于复合材料。

复合材料从应用的性质可分为功能复合材料和结构复合材料两大类。功能复合材料主要具有特殊的功能。例如:导电复合材料,它是用聚合物与各种导电物质通过分散、层压或形成表面导电膜等方法构成的复合材料;烧蚀材料,它由各种无机纤维增强树脂或非金属基体构成,可用于高速飞行器头部热防护;摩阻复合材料,它是用石棉等纤维和树脂或非金属制成的有高摩擦系数的复合材料,应用于航空器、汽车等运转部件的制动、控速等机构。

我们主要研究结构复合材料,它由基体材料和增强材料两种组分组成。基体采用各种树脂或金属、非金属材料;增强材料采用各种纤维或颗粒等材料。其中增强材料在复合材料中起主要作用,提供刚度和强度,基本控制其性能。基体材料起配合作用,它支持和固定纤维材料,传递纤维间的载荷,保护纤维,防止磨损或腐蚀,改善复合材料的某些性能。复合材料的力学性能比一般金属材料复杂得多,主要有不均匀、不连续、各向异性等,因此逐步发展成为复合材料特有的力学理论,称为复合材料力学,它是固体力学学科中的一个新分支。

1.1.2 复合材料的种类

根据复合材料中增强材料的几何形状,复合材料可分为三大类:

(1) 颗粒复合材料,由颗粒增强材料和基体组成。

(2) 纤维增强复合材料,由纤维和基体组成。

(3) 层合复合材料,由多种片状材料层合而组成。

我们主要研究纤维增强复合材料,对其他两种作简单介绍。

1. 颗粒复合材料

它由悬浮在一种基体材料的一种或多种颗粒材料组成。颗粒可以是金属,也可以是非金属。

(1) 非金属颗粒在非金属基体中的复合材料。最普通的例子是混凝土,它由砂、石、水泥和水粘合在一起经化学反应而变成坚固的结构材料,如加入钢筋又做成钢筋混凝土。还有用云母粉悬浮在玻璃或塑料中形成的复合材料。

(2) 金属颗粒在非金属基体中的复合材料。例如,固体火箭推进剂是由铝粉和高氯酸盐氧化剂无机微粒放在如聚氨酯的有机粘结剂中组成的,微粒约占 75%^①,粘结剂约占 25%。为了能有稳定的燃烧反应,复合材料必须均匀和不裂。火箭推力与燃烧表面积成比例,为增加表面积,固体推进剂制成星形或轮形内孔,并研究其内应力。

(3) 非金属在金属基体中的复合材料。氧化物和碳化物微粒悬浮在金属基体中得到金属陶瓷,用于耐腐蚀的工具制造和高温应用:碳化钨在钴基体中的金属陶瓷用于高硬度零件制造,如拉丝模具;碳化铬在钴基体中的金属陶瓷有很高的耐磨性和耐腐蚀性,适用于制造阀门。

2. 层合复合材料

它至少由两层不同材料复合而成,其增强性能有强度、刚度、耐磨损、耐腐蚀等。层合复合材料有以下几种。

(1) 双金属片。它由两种不同热膨胀系数的金属片层合而成,当温度变化时,双金属片产生弯曲变形,可用于温度测量和控制。

(2) 涂覆金属。将一种金属涂覆在另一种金属上,得到优良的性能。例如用 10% 的铜涂覆铝丝作为铜丝的替代物,铝丝价廉而质轻,但难于连接,导热性较差;铜丝价贵而较重,但导热性好,易于连接。涂铜铝丝比纯铜丝价廉而性能好。

(3) 夹层玻璃。这是为了用一种材料保护另一种材料。普通玻璃透光性好但易脆裂,聚乙烯醇缩丁醛塑料韧性好但易被划损,夹层玻璃是两层玻璃夹包一层聚乙烯醇缩丁醛塑料,具有良好的性能。

3. 纤维增强复合材料

各种长纤维比块状的同样材料强度高得多。例如,普通平板玻璃在几十兆帕的应力下

^① 75%表示质量分数,余同,不一一注明。

就会破裂,而商用玻璃纤维的强度可达 $3000\sim 5000\text{MPa}$,实验室研制的玻璃纤维强度已接近 7000MPa ,这是因为纤维与块状玻璃的结构不同,纤维内部缺陷和位错比块状材料少得多。

纤维增强复合材料按纤维种类分为玻璃纤维(其增强复合材料俗称玻璃钢)、硼纤维、碳纤维、碳化硅纤维、氧化铝纤维和芳纶纤维等。

纤维增强复合材料按基体材料可分为各种树脂基体、各种金属基体、陶瓷基体和碳(石墨)基体几种,这些将在第 9 章介绍。

纤维增强复合材料按纤维形状、尺寸可分为连续纤维、短纤维、纤维布增强复合材料等。

4. 以上两种或三种混合的增强复合材料

例如,两种或更多种纤维增强一种基体的复合材料。玻璃纤维与碳纤维增强树脂称为混杂纤维复合材料,这已在很多工程中得到广泛应用,关于混杂复合材料也将在第 9 章介绍。

1.1.3 几种常用纤维

1. 玻璃纤维

它是最早使用的一种增强材料,在飞行器结构中常用 E 型玻璃和 S 型玻璃两个品种。玻璃纤维的直径为 $5\sim 20\mu\text{m}$,它强度高、延伸率较大,可制成织物;但弹性模量较低,约为 $7\times 10^4\text{MPa}$,与铝接近。一般硅酸盐玻璃纤维可用到 450°C ,石英和高硅氧玻璃纤维可耐 1000°C 以上高温。玻璃纤维的线膨胀系数约为 $4.8\times 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$ 。玻璃纤维由拉丝炉拉出单丝,集束成原丝,经纺丝加工成无捻纱、各种纤维布、带、绳等。

2. 硼纤维

它是由硼蒸气在钨丝上沉积而制成的纤维(属复相材料,钨丝为芯,表面为硼)。由于钨丝直径较大,硼纤维不能作成织物,成本较高。20 世纪 60 年代初硼纤维由美国研制成功并应用于某些飞行器。

3. 碳纤维

它是用各种有机纤维经加热碳化制成。主要以聚丙烯腈(PAN)纤维或沥青为原料,纤维经加热氧化、碳化、石墨化处理而制成。碳纤维可分为高强度、高模量、极高模量等几种,后两种需经 $2500\sim 3000^\circ\text{C}$ 石墨化处理,又称为石墨纤维。由于碳纤维制造工艺较简单,价格比硼纤维便宜得多,因此成为最重要的先进纤维材料。其密度比玻璃纤维小,模量比玻璃纤维高好几倍。因此碳纤维增强复合材料已应用于宇航、航空等工业部门。碳纤维的应力-应变关系为一直线,纤维断裂前是弹性体,高模量碳纤维的最大延伸率为 0.35% ,高强度碳纤维的延伸率可达 1.5% 。碳纤维的直径一般为 $6\sim 10\mu\text{m}$ 。碳纤维的热膨胀系数与其他纤维不同,具有各向异性,沿纤维方向 $\alpha_1 = -0.7\times 10^{-6}\sim 0.9\times 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$,而垂直于纤维方向 $\alpha_2 = 22\times 10^{-6}\sim 32\times 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$ 。

4. 芳纶纤维

它是新的有机纤维,属聚芳酰胺,国外牌号为 Kevlar。有三种产品:K-29 用于绳索电缆;K-49 用于复合材料制造;K-149 强度更高,可用于航天容器等。芳纶纤维性能优良,单丝强度可达 3850MPa,比玻璃纤维约高 45%;弹性模量介于玻璃纤维和硼纤维之间,为碳纤维的一半;热膨胀系数纤维方向 $\alpha_1 = -2 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, 横向 $\alpha_2 = 5 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, 与碳纤维接近。

芳纶纤维的制造工艺与碳纤维和玻璃纤维都不同,它采用液晶纺丝工艺。液晶在宏观上属液体,微观上有晶体性质。芳纶纤维的聚对苯撑对苯二甲酰胺(PPTA)在溶液中呈一定取向状态,为一维有序紧密排列,它在外界剪切力作用下,易沿力方向取向而成纤维。纺丝采用干喷湿纺工艺:采用高浓度、高温 PPTA 液晶溶液在较高喷丝速度下喷丝,喷丝进入低温凝固液浴,经纺丝管形成丝束,绕到绕丝辊上,经洗涤,在张力下于热辊上干燥,最后在惰性气体中高温处理得芳纶纤维。

5. 碳化硅纤维及氧化铝纤维

它们属于陶瓷纤维。碳化硅纤维有两种形式,一种是采用与硼纤维相似的工艺,在钨丝上沉积碳化硅(SiC)形成复相纤维;另一种是 20 世纪 70 年代日本研制的连续碳化硅纤维,它用二甲基二氯硅烷经聚合纺丝成有机硅纤维,再高温处理转化成单相碳化硅纤维。碳化硅纤维具有抗氧化、耐腐蚀和耐高温等优点,它与金属相容性好,可制成金属基复合材料,用它增强的陶瓷基复合材料制成的发动机,工作温度可达 1200℃ 以上。

氧化铝纤维的制法有多种,其一是采用三乙基铝、三丙基铝、三丁基铝等原料制造聚铝氧烷,加入添加剂调成粘液喷丝,形成 $\phi 100\mu\text{m}$ 的纤维,再经 1200℃ 加热制成氧化铝纤维。

各种主要纤维材料的基本性能列在表 1-1 中,某些性能数据供参考,表中还列出钢、铝、钛等金属丝的性能供对比用。

表 1-1 各种主要纤维材料与金属丝基本性能

材 料		直径 / μm	熔点 / $^{\circ}\text{C}$	相对 密度 γ	拉伸强度 $\sigma_b/10\text{MPa}$	模量 E / 10^5MPa	热膨胀系数 α / $10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$	伸长率 $\delta/\%$	比强度 (σ_b/γ) / 10MPa	比模量 (E/γ) / 10^5MPa
玻璃 纤维	E	10	700	2.55	350	0.74	5	4.8	137	0.29
	S	10	840	2.49	490	0.84	2.9	5.7	197	0.34
硼纤维		100	2300	2.65	350	4.1	4.5	0.5~0.8	132	1.55
		140		2.49	364	4.1			146	1.65
碳 纤 维	普通	6	3650	1.75	250~300	2.25~2.28	-0.6	1.5~2.4	143~171	1.29~1.30
	高强			1.75	350~700				200~400	
	高模			1.75	240~350	3.5~5.8		0.5~0.7	137~200	2.0~2.34
	极高模			1.75	75~250	4.60~6.70			43~143	2.63~3.83
芳纶 纤维	K-49Ⅲ	10		1.47	283	1.34	-3.6	2.5	193	0.91
	K-49Ⅳ	10			304	0.85		4.0	207	0.58
碳化硅 纤维	复相	100	2690	3.28	254	4.3	3.8		77.4	1.31
	单相	8~12		2.8	250~450	1.8~3.0			89~161	0.64~1.1

续表

材 料	直径 / μm	熔点 / $^{\circ}\text{C}$	相对 密度 γ	拉伸强度 $\sigma_b/10\text{MPa}$	模量 E / 10^5MPa	热膨胀系数 α / $10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$	伸长率 $\delta/\%$	比强度 (σ_b/γ) / 10MPa	比模量 (E/γ) / 10^5MPa
氧化铝纤维	100	2080	3.7	138~172	3.79			37~46	1.02
钢丝		1350	7.8	42	2.1	11~17		5.4	0.27
铝丝		660	2.7	63	0.74	22		23	0.27
钛丝			4.7	196	1.17	9		41.7	0.25

1.1.4 几种常用基体

1. 树脂基体

它分为热固性树脂和热塑性树脂两大类。热固性树脂常用的有环氧、酚醛和不饱和聚酯树脂等,它们最早应用于复合材料。环氧树脂应用最广泛,其主要优点是粘结力强,与增强纤维表面浸润性好,固化收缩小,有较高耐热性,固化成型方便。酚醛树脂耐高温性好,吸水性小,电绝缘性好,价格低廉。聚酯树脂工艺性好,可室温固化,价格低廉,但固化时收缩大,耐热性低。它们固化后都不能软化。

热塑性树脂有聚乙烯、聚苯乙烯、聚酰胺(又称尼龙)、聚碳酸酯、聚丙烯树脂等,它们加热到转变温度时会重新软化,易于制成模压复合材料。

几种常用树脂的性能列于表 1-2 中,供参考和比较。

表 1-2 几种树脂的性能

序号	名 称	相对密度 γ	拉伸强度 σ_b/MPa	伸长率 $\delta/\%$	模量 E / 10^3MPa	抗压强度 / MPa	抗弯强度 / MPa
1	环氧	1.1~1.3	60~95	5	3~4	90~110	100
2	酚醛	1.3	42~64	1.5~2.0	3.2	88~110	78~120
3	聚酯	1.1~1.4	42~71	5	2.1~4.5	92~190	60~120
4	聚酰胺 PA	1.1	70	60	2.8	90	100
5	聚乙烯		23	60	8.4	20~25	25~29
6	聚丙烯 PP	0.9	35~40	200	1.4	56	42~56
7	聚苯乙烯 PS		59	2.0	2.8	98	77
8	聚碳酸酯 PC	1.2	63	60~100	2.2	77	100

2. 金属基体

它主要用于耐高温或其他特殊需要的场合,具有耐 300℃ 以上高温、表面抗侵蚀、导电导热、不透气等优点。基体材料有铝、铝合金、镍、钛合金、镁、铜等,目前应用较多的是铝,一般有碳纤维铝基、氧化铝晶须镍基、硼纤维铝基、碳化硅纤维钛基等复合材料。几种纤维增强金属基复合材料的性能列于表 1-3 中。

表 1-3 几种纤维增强金属基复合材料性能

序号	纤维名称	金属基体	抗拉强度 /MPa	拉伸模量 /10 ³ MPa	线膨胀系数 /10 ⁻⁶ ℃ ⁻¹	其 他
1	石墨	纯铝基	680 650	178 147		纤维体积含量 c _f = 32 % c _f = 35 %
2	石墨	铝镁基	680	195		c _f = 31 %
3	石墨	铜镍基	560(400℃)			c _f = 30 % ~ 50 %
4	石墨	镍基	800 ~ 830	240 ~ 310		c _f = 50 %
5	α-Al ₂ O ₃ 晶须	镍基	48 ~ 38			c _f = 20 % ~ 21 %
6	涂 SiC 硼纤维	钛合金 (温度 70℃)	965	286	1.39	纤维方向 0°
			965	254		15°
			689	215		45°
			455	206	1.75	90°
7	SiC	钛合金	979	250	泊松比 ν ₁₂ 0.28	方向 0°
			930	240	0.28	15°
			779	220	0.35	30°
			738	210	0.35	45°
			656	190	0.25	90°
8	碳纤维 T300	201 铝合金	1050	148		c _f = 40 %
9	硼纤维(W)	6061 铝合金	1400	239		c _f = 50 %
10	SiC(W)	6061 铝合金	1510	232		c _f = 50 %

几种纤维(或晶须)增强陶瓷复合材料的力学性能列于表 1-4。

表 1-4 几种纤维(晶须)增强陶瓷复合材料的力学性能

序号	纤维(晶须)	基 体	弯曲强度 /MPa	断裂韧性 /(MPa · m ^{1/2})	其 他
1	碳纤维	全云母微 晶玻璃	480	1.1	CPMC c _f = 5.56 %
2	SiC 晶须	Si ₃ N ₄	770	5.14	c _f = 0
			855	8.79	10 %
			890	7.84	20 %
			621	6.23	30 %
3	SiC 晶须	TZP 多晶四方相 氧化锆	1060	10.4	c _f = 0
			800	11.7	10 %
			780	12.6	15 %
			640	13.1	20 %
			560	13.8	25 %
4	SiC 纤维	SiC	320		相对密度 2.4
			300		2.3

3. 陶瓷基体

它耐高温、化学稳定性好,具有高模量和高抗压强度,但有脆性,耐冲击性差,为此用纤维增强制成复合材料,可改善抗冲击性并已试用于发动机部分零件。纤维增强陶瓷基复合材料,例如,单向碳纤维增强无定形二氧化硅复合材料,碳纤维含量 50%,室温弯曲模量为 1.55×10^5 MPa,800℃时为 1.05×10^5 MPa。还有多向碳纤维增强无定形石英复合材料,耐高温,可供远程火箭头锥作烧蚀材料。此外还有石墨纤维增强硅酸盐复合材料、碳纤维增强碳化硅或氮化硅复合材料、碳化硅纤维增强氮化硅复合材料、碳化硅晶须增强含有 Y_2C_3 (碳化钇)的多晶四方相氧化锆复合材料(SiC 晶须/Y-TZP)和 SiC/SiC 复合材料。

4. 碳素基体

它主要用于碳纤维增强碳基体复合材料,这种材料又称碳/碳复合材料。以纤维和基体的不同分为三种:碳纤维增强碳,石墨纤维增强碳,石墨纤维增强石墨。碳/碳复合材料 C-CA 和 C-CE 采用碳布叠层化学气相沉积、石墨化处理制成,其中 CA 和 CE 是碳纤维分别用聚丙烯腈基氧化法和催化法生产的,国产 C/C 复合材料的力学性能见表 1-5。化学蒸气沉积法是用碳氢化合物气体,如甲烷、乙炔等在 1000~1100℃进行分解,在三维碳纤维织物、碳毡或碳纤维缠绕件的结构空隙中进行沉积,碳细粉渗透到整个结构,形成致密的碳/碳复合材料。

表 1-5 两种国产碳/碳复合材料的性能

材料	抗拉 强度/ MPa	抗压 强度/ MPa	抗拉 模量/ GPa	拉伸断 裂应变 /%	抗弯 强度/ MPa	抗弯 模量/ GPa	剪切 强度/ MPa	冲击 韧性/ (J/cm ²)	相对 密度 γ	线膨胀 系数/ 10 ⁻⁶ ℃ ⁻¹
C-CA	149	138	52.4	0.40	107	39	7.88	2.12	1.67	0.36~0.37
C-CE	122	97	45.3	0.35	69.7	31.8	5.27	1.80	1.57	0.18~0.20

1.2 复合材料的构造及制法

1.2.1 复合材料的基本构造形式

如前所述,我们只讨论纤维增强复合材料,它一般可分为以下几种构造形式:

1. 单层复合材料(又称单层板)

如图 1-1 所示,单层复合材料中纤维按一个方向整齐排列或由双向交织纤维平面排列(有时是曲面,例如在壳体中),其中纤维方向称为纵向,用“1”表示,垂直于纤维方向(有时有交织纤维,含量较少或一样多)称为横向,用“2”表示,沿单层材料厚度方向用“3”表示,1,2,3 轴称为材料主轴。单层复合材料是不均匀材料,虽然纤维和基体分别都可能是各向同性材料,但由于纤维排列有方向性,或交织纤维在两个方向含量不同,因此单层材料一般是各向异性的。

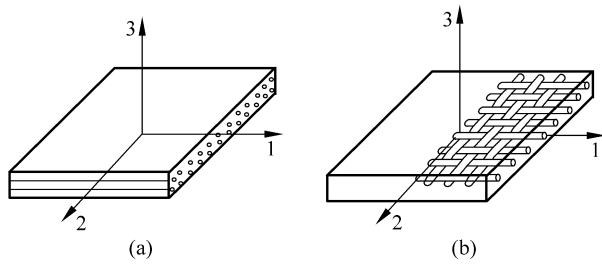


图 1-1 单层复合材料构造形式
(a) 单向纤维；(b) 交织纤维

单层板中纤维起增强和主要承载作用,基体起支撑纤维、保护纤维,并在纤维间起分配和传递载荷作用,载荷传递的机理是在基体中产生剪应力,通常把单层材料的应力-应变关系看作是线弹性的。

2. 叠层复合材料(又称层合板)

叠层材料由上述单层板按照规定的纤维方向和次序,铺放成叠层形式,进行粘合,经加热固化处理而成。层合板由多层单层板构成,各层单层板的纤维方向一般不同。每层的纤维方向与叠层材料总坐标轴 x - y 方向不一定相同,我们用 θ 角(1 轴与 x 轴夹角,由 x 轴逆时针方向到 1 轴的夹角为正)表示,如图 1-2 所示。如四层单层材料组成的层合板,为了表明铺设方式可用下列顺序表示法,图 1-2 中的层合板可表示如下:

$$\alpha/0^\circ/90^\circ/-\alpha$$

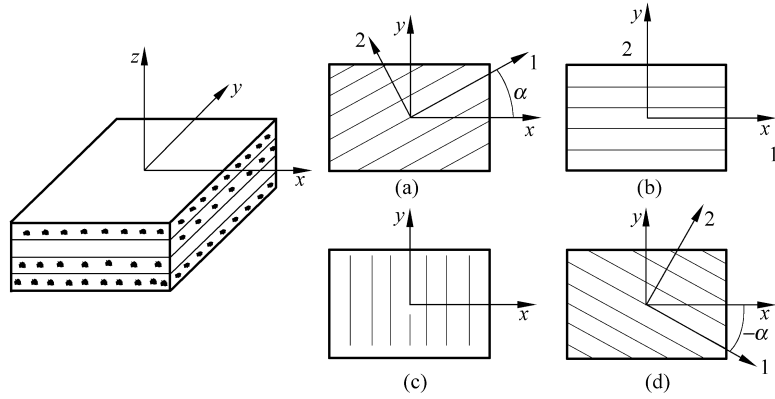


图 1-2 叠层材料构造形式举例
(a) $\theta=\alpha$; (b) $\theta=0^\circ$; (c) $\theta=90^\circ$; (d) $\theta=-\alpha$

其他层合板铺层表示举例如下:

$60^\circ/-60^\circ/0^\circ/0^\circ/-60^\circ/60^\circ$, 可表示为 $(\pm 60^\circ/0^\circ)_s$, 这里 s 表示对称,“ $\pm$ ”号表示两层正负角交错。

$45^\circ/90^\circ/0^\circ/0^\circ/90^\circ/45^\circ$ 还可表示为 $(45^\circ/90^\circ/0^\circ)_s$, s 表示铺层上下对称。

层合板也是各向异性的不均匀材料,但比单层板复杂得多,因此对它进行力学分析计算将大大复杂化。叠层材料可以根据结构元件的受载要求,设计各单层材料的铺设方向和顺序。

3. 短纤维复合材料

以上两种构造形式一般是连续纤维增强的复合材料,但是由于工程的需要以及为了提高生产效率,又有短纤维复合材料的构造形式。这里又分为两种,如图 1-3 所示:①随机取向的短切纤维复合材料,由基体与短纤维搅拌均匀模压而成的单层复合材料;②单向短纤维复合材料,复合材料中短切纤维呈单向整齐排列,它具有正交各向异性。

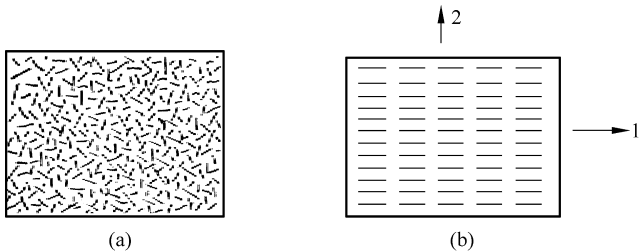


图 1-3 短纤维复合材料两种构造形式
(a) 随机取向; (b) 单向排列

1.2.2 复合材料的制造方法

这里介绍几种典型复合材料的制造方法。

1. 用手糊成型方法制造玻璃纤维增强环氧树脂复合材料

早期采用手糊成型一步法制造玻璃纤维树脂复合材料,其流程如图 1-4 所示,其工艺示意图见图 1-5 所示。将纤维或织物置于模具中,再将配制好的树脂胶液手糊或喷刷到纤维织物上,用室温固化或加压固化成型,这种方法工艺简便、所需设备简单,但胶液中挥发物不易除去,在制品中形成孔洞,不易控制树脂含量,分布不均匀,制品质量较差。

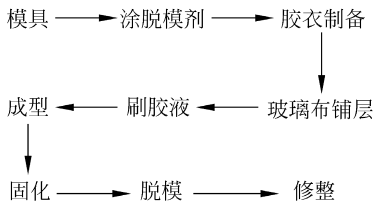


图 1-4 手糊成型工艺流程图

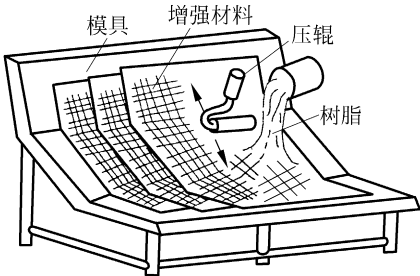


图 1-5 手糊成型工艺的示意图

2. 用两步法压力成型方法制造碳纤维树脂基复合材料

其制造方法流程如图 1-6 所示,先将单层连续碳纤维浸渍树脂胶液经一定烘干处理,使浸渍物成干态或略带粘性的预浸料片,这单层预浸料制造示意图如图 1-7 所示。然后将预浸料多层铺设(按设计要求),放入热压罐中加热、加压成型,制成高性能的复合材料,这样制成的复合材料尺寸稳定,性能优异。

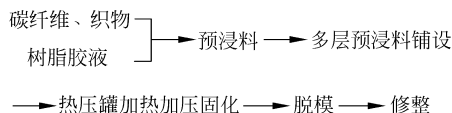


图 1-6 压力成型制法流程图

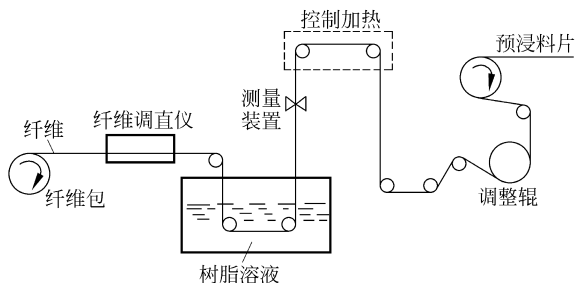


图 1-7 单层预浸料制造示意图

3. 缠绕成型制造连续玻璃(或碳)纤维树脂基复合材料

图 1-8 为湿法缠绕成型制造原理图,把连续纤维浸渍树脂后,在一定张力作用下按一定规则缠绕到芯模上,然后加热或常温固化成型可制成各种尺寸(直径几十 mm~nm)复合材料回转体制品。由于缠绕时树脂物理化学状态不同,生产上分干法、湿法和半干法三种缠绕成型,最普通的是湿法缠绕;缠绕成型基本材料有纤维、树脂、芯模和内衬;缠绕线型有环向、纵向和螺旋缠绕三种。缠绕角在接近 0° 和 90° 之间变化,内衬是在缠绕前加在芯模外部缠绕固化后粘附于制品内表面的一层材料,其主要作用是防止高压气体泄漏,满足制品各种性能要求,内衬一般为铝或塑料等。纤维从纤维架上引出并集束后进入胶液槽浸渍树脂,经刮胶器挤出多余树脂,再由小车上绕纤维头铺放在旋转的芯模上,在缠绕过程中纤维按照一定路径满足一定缠绕线型。

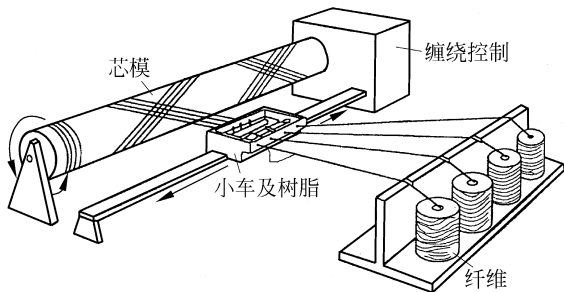


图 1-8 湿法缠绕的工艺原理图

缠绕成型具有纤维铺设的高准确性和重复性,制成各种尺寸回转体,具有纤维含量高、原料消耗少的优点,常用纤维包括玻璃纤维、碳纤维和芳纶纤维,常用树脂有环氧树脂和聚酯树脂。缠绕成型应用范围广泛,在宇航和兵器领域中用于制造火箭发动机壳体、雷达罩、导弹、鱼雷,直升飞机部件,石油、化工领域中各种储罐,压力容器、管道等。

4. 纤维预制体的制造

纤维预制体有多种基本结构:直线型、平面型、立体型。直线型有非连续型、连续型;平面型有机织、针织、编织三种;立体型有机织、针织、编织、非织造多种。直线型中非连续的纤维预制体主要以短纤维、晶须组成的各种毡为主,它所构成的复合材料有各向同性特点,力

学性能较低。直线型中连续纤维或纤维束沿同一方向排列成预制体,有明显各向异性。平面型预制体是由纤维布叠加而成的层合复合材料,在平面内各向异性,但各层间剪切强度较低、立体型三维空间结构,纤维束分布于三维,所得复合材料具有十分优异的力学性能。图 1-9 中表示三种纤维编织结构。

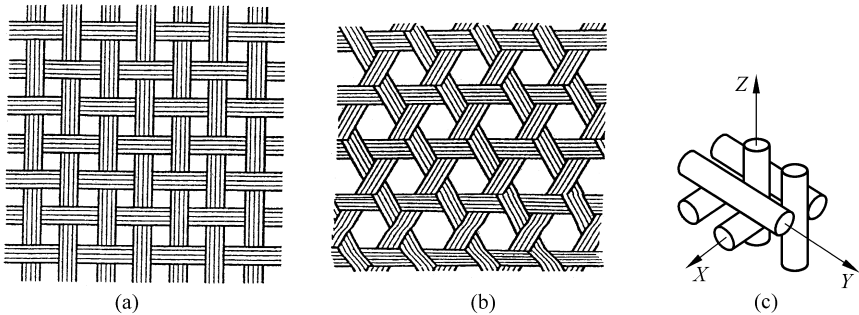


图 1-9 三种纤维编织结构示意图

(a) 二维机编织物结构; (b) 三轴机编织物结构; (c) 简单矩形 XYZ 单元

将纤维预制体放入模具,将树脂注射到闭合模具中浸润纤维预制体材料并固化的方法,是近年来发展迅速、适宜多品种、高质量先进复合材料制品成型方法。图 1-10 表示树脂传递模型制造(resin transfer molding,RTM)复合材料制造原理示意图,这种方法具有原材料利用率高,制品尺寸精确、孔隙率低,制品设计自由度大、制造周期短,成型过程在密闭条件下进行、减少有害挥发物排放等优点。复合材料制造方法还有等离子喷镀、粉末冶金等多种,在 1.6 节中还有一些介绍。

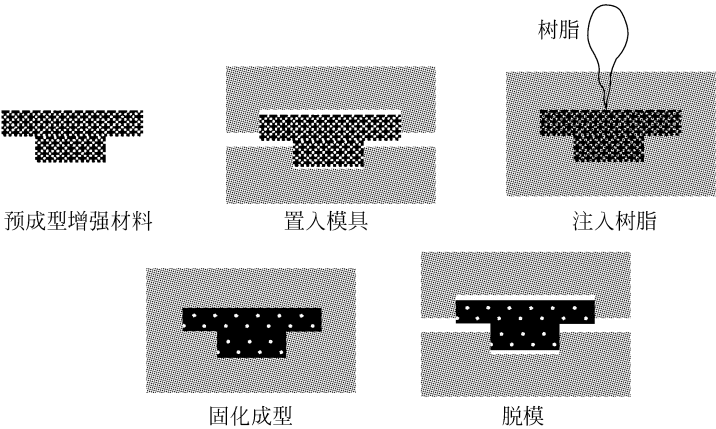


图 1-10 RTM 工艺基本原理示意图

1.3 复合材料的力学分析方法

对于复合材料的力学分析和研究大致可分为材料力学和结构力学两大部分,习惯上把复合材料的材料力学部分称为复合材料力学,而把复合材料结构(如板、壳结构)的力学部分

称为复合材料结构力学,有时这两部分广义上也统称为复合材料力学。复合材料的材料力学部分按采用力学模型的精细程度可分为宏观力学和细观力学两部分,下面分别说明这三种力学分析方法的基本特点。

1.3.1 细观力学

它从细观角度分析组分材料之间的相互作用来研究复合材料的物理力学性能。它以纤维和基体作为基本单元,把纤维和基体分别看成是各向同性的均匀材料(有的纤维属横观各向同性材料),根据材料纤维的几何形状和布置形式、纤维和基体的力学性能、纤维和基体之间的相互作用(有时应考虑纤维和基体之间界面的作用)等条件来分析复合材料的宏观物理力学性能。这种分析方法比较精细但相当复杂,目前还只能分析单层材料在简单应力状态下的一些基本力学性质,例如材料主轴方向的弹性常数以及强度。此外,由于实际复合材料纤维形状、尺寸不完全规则和排列不完全均匀,制造工艺上的差异和材料内部存在空隙、缺陷等,细观力学分析方法还不能完全考虑材料的实际状况,需进一步深入研究(详见第 3 篇)。以细观力学方法分析复合材料性质,在复合材料力学的学科范围内是不可缺少的重要组成部分,它对研究材料破坏机理,提高复合材料性能,进行复合材料和结构设计将起很大作用。

1.3.2 宏观力学

它从材料是均匀的假定出发,只从复合材料的平均表现性能检验组分材料的作用来研究复合材料的宏观力学性能。它把单层复合材料看成均匀的各向异性材料,不考虑纤维和基体的具体区别,用其平均力学性能表示单层材料的刚度、强度特性,可以较容易地分析单层和叠层材料的各种力学性质,所得结果较符合实际。

宏观力学的基础是预知单层材料的宏观力学性能,如弹性常数、强度等,这些数据来自实验测定或细观力学分析。由于实验测定方法较简便可靠,工程应用往往采用它。在复合材料力学学科范围内宏观力学占很大比重(详见第 2 篇)。

1.3.3 复合材料结构力学

它从更粗略的角度来分析复合材料结构的力学性能,把叠层材料作为分析问题的起点,叠层复合材料的力学性能可由上述宏观力学方法求出,或者可用实验方法直接求出。它借助现有均匀各向同性材料结构力学的分析方法,对各种形状的结构元件如板、壳等进行力学分析,其中有层合板和壳结构的弯曲、屈曲与振动问题以及疲劳、断裂、损伤、开孔强度等问题。

总之,复合材料的力学理论作为固体力学的一个新的学科分支是近几十年来发展形成的,它涉及根据复合材料的制造工艺、性能测试和结构设计等进行力学分析。随着新复合材料的不断开发和广泛应用,复合材料力学理论也将不断发展。

1.4 复合材料的力学性能

1.4.1 纤维增强复合材料的主要力学性能

复合材料与常规的金属材料相比具有优良的力学性能,不同的纤维和基体材料组成的复合材料性能也很不相同。表 1-6 中列出几种目前较成熟的复合材料的主要力学性能,为了对比,表中还列出几种常用金属材料的性能数据。

作为主要力学性能比较,常常采用比强度(σ_b/γ)和比模量(E/γ)值(σ_b 为纵向拉伸强度, E 为纵向拉伸模量, γ 为相对密度),它们表示在重量相当情形下材料的承载能力和刚度,其值愈大,表示性能愈好。但是这两个值是根据材料受单向拉伸时的强度和伸长确定的,实际上结构受载条件和破坏方式是多种多样的,这时的力学性能不能完全用比强度和比模量值来衡量,因此这两个值只是粗略的定性性能指标。

玻璃纤维增强复合材料的特点是比强度高、耐腐蚀、电绝缘、易制造、成本低,很早就开始应用,现在其应用还很广泛,缺点是比模量较低。

碳纤维复合材料有很高的比强度和比模量,耐高温、耐疲劳、热稳定性好,但成本较高,现已逐步扩大应用,已成为主要的先进复合材料。

芳纶纤维增强复合材料是一种新的复合材料,它有一定的比强度和比模量,成本比玻璃钢高,但比碳纤维复合材料低,正发展成较广泛应用的材料。

表 1-6 几种复合材料的力学性能

材 料	相对密度 γ	纵向拉伸强度 $\sigma_b/10\text{MPa}$	纵向拉伸模量 $E/10^5\text{MPa}$	比强度(σ_b/γ) /10MPa	比模量(E/γ) /10 ⁵ MPa
玻璃/环氧	1.80	137	0.45	76.1	0.25
高强碳/环氧	1.50	133	1.55	88.7	1.03
高模碳/环氧	1.69	63.6	3.02	37.6	1.79
硼/环氧	1.97	152	2.15	77.1	1.09
Kevlar49/环氧	1.38	131	0.78	94.9	0.57
碳/石墨	2.20	73.8	1.37	33.5	0.62
碳/铝	2.34	80	1.20	34.2	0.51
碳/镁	1.83	51	3.01	27.9	1.64
硼/铝	2.64	152	2.34	57.6	0.89
铝合金	2.71	29.6	0.70	10.9	0.26
镁合金	1.77	27.6	0.46	15.5	0.26
钛合金	4.43	10.6	1.13	23.9	0.26
钢(高强)	7.83	134	2.05	17.1	0.26

现在已制成各种混杂纤维增强复合材料,它具有比单一纤维复合材料更好的力学性能,并已在各种工程中广泛应用(详见第 9 章)。

1.4.2 复合材料的优点

(1) 比强度高。尤其是高强度碳纤维、芳纶纤维复合材料。

(2) 比模量高。除玻璃纤维环氧复合材料外其余复合材料的比模量比金属高很多,特别是高模量碳纤维复合材料最为突出。

(3) 材料具有可设计性。这是复合材料与金属材料很大的不同点,复合材料的性能除了取决于纤维和基体材料本身的性能外,还取决于纤维的含量和铺设方式。因此我们可以根据载荷条件和结构构件形状,将复合材料内纤维设计成适当含量并合理铺设,以使用最少材料满足设计要求,最有效地发挥材料的作用。

(4) 制造工艺简单,成本较低。复合材料构件一般不需要很多复杂的机械加工设备,生产工序较少,它可以制造形状复杂的薄壁结构,消耗材料和工时较少。

(5) 某些复合材料热稳定好。如碳纤维和芳纶纤维具有负的热膨胀系数,因此,当与具有正膨胀系数的基体材料适当组合时,可制成热膨胀系数极小的复合材料,当环境温度变化时结构只有极小的热应力和热变形。

(6) 高温性能好。通常铝合金可用于 $200\sim 250^{\circ}\text{C}$, 温度更高时其弹性模量和强度将降低很多。而碳纤维增强铝复合材料能在 400°C 下长期工作,力学性能稳定;碳纤维增强陶瓷复合材料能在 $1200\sim 1400^{\circ}\text{C}$ 下工作;碳/碳复合材料能承受近 3000°C 的高温。

此外,各种复合材料还具有各种不同的优良性能,例如抗疲劳性、抗冲击性、透电磁波性、减振阻尼性和耐腐蚀性等。

1.4.3 复合材料的缺点

(1) 材料各向异性严重。表 1-6 中所列性能都是沿纤维方向的,而垂直于纤维方向的性能主要取决于基体材料的性能和基体与纤维间的结合能力。一般垂直于纤维方向的力学性能较低,特别是层间剪切强度很低。

(2) 材料性能分散度较大,质量控制和检测比较困难,但随着加工工艺改进和检测技术的发展,材料质量可提高。性能分散性也会减小。

(3) 材料成本较高。目前硼纤维复合材料最贵,碳纤维复合材料比金属成本较高,玻璃纤维复合材料成本较低。

(4) 有些复合材料韧性较差,机械连接较困难。

以上缺点除各向异性是固有的外,有些可以设法改进,提高性能,降低成本。总之,复合材料的优点远多于缺点,因此具有广泛的使用领域和巨大的发展前景。

1.5 复合材料的各种应用

20 世纪 40 年代初,由于航空工业和其他工业的需要,在设计制造高性能复合材料方面有很大的进展。玻璃钢最早于 1942 年在美国生产和应用于军用飞机雷达天线罩,它必须承

受飞行时的空气动力载荷,耐气候变化,在使用温度范围内制品尺寸稳定,同时特别要求能透过雷达波。铝材可满足强度要求,但不能透过雷达波,陶瓷材料则相反,而玻璃纤维复合材料两方面都能满足要求,因此在飞机制造方面得到应用。后来又逐步应用于其他方面,由于玻璃钢弹性模量不够高,不能满足飞行器刚度的高要求,20 世纪 60 年代美、英等国先后研制成硼纤维、碳纤维、石墨纤维、芳纶纤维等增强的先进复合材料,并很快在航空、航天领域得到应用。

我国从 20 世纪 50 年代以来发展了复合材料工业并开展各种应用,下面分几个方面介绍复合材料在国内外的应用情况。

1.5.1 航空航天工程中的应用

1. 航空工程

国内外已应用于飞机机身、机翼、驾驶舱、螺旋桨、雷达罩、机翼表面整流装置、直升机旋翼桨叶等。其中除单一复合材料外,还大量应用混杂复合材料,例如碳纤维和玻璃纤维混杂复合材料、碳纤维和芳纶纤维混杂复合材料等。

表 1-7 中列举出了各种复合材料在航空工程中应用的例子。另外,1981 年美国 Leav Fan 飞机公司制成全复合材料飞机,空载重量 1816kg,航速 640km/h,飞行高度 12000m,高空飞行 3680km,所用燃料降低 80%。1986 年 Burt Rutan 公司 Voyager 全复合材料飞机,经受多次暴风雷雨,实现不着陆环球飞行。近年来应用复合材料的飞机例子有:

表 1-7 航空工程中应用复合材料的例子

序号	材 料	应 用 场 合	应 用 效 果
1	碳纤维树脂基	L-1011 空中客车上发动机 RB-211 风扇叶片,直升机压气机叶片	代替钛合金,减振性好
2	硼纤维/铝	TF-30 发动机叶片(第一、三级)	
3	碳化硅改性硼纤维/铝	发动机转子	降低重量和旋转时的离心力
4	玻璃钢	美 X-19,H-43,CH-47A 直升机螺旋桨 德 B-105,苏 M-4 直升机旋翼(长 10m)	旋翼长 10m
5	非金属蜂窝夹层	波音 727 B-52,B-57 轰炸机 } 雷达罩 F-4H 战斗机 }	减重 34%
6	CF/GF 复合材料,中间硼纤维增强蜂窝结构	机翼(F-14)整流装置 军用飞机机翼、机身	减重 25%,节约 40%费用
7	混杂复合材料	美 YOH-60A } 直升机 德 BO-117 } 旋翼桨叶 法海豚 } 延安-2 号 }	减重 40%,使用寿命高达上万小时
8	硼/环氧	F-111 飞机、机身、水平尾翼 F-14 机水平安定面	

续表

序号	材 料	应 用 场 合	应 用 效 果
9	石墨/环氧	YF-16 机水平、垂直安定面 F-18、波 AV-8B	
10	石墨纤维复合材料	喷气发动机 固体火箭喷管	推力-重量比由 5 : 1 增大到 40 : 1
11	CF/KF 混杂 复合材料	B757, B767 前后翼身整流罩、主起落架舱门等	

(1) 波音 787 大型客机中采用先进复合材料占总重量 50% 以上, 如图 1-11 所示。

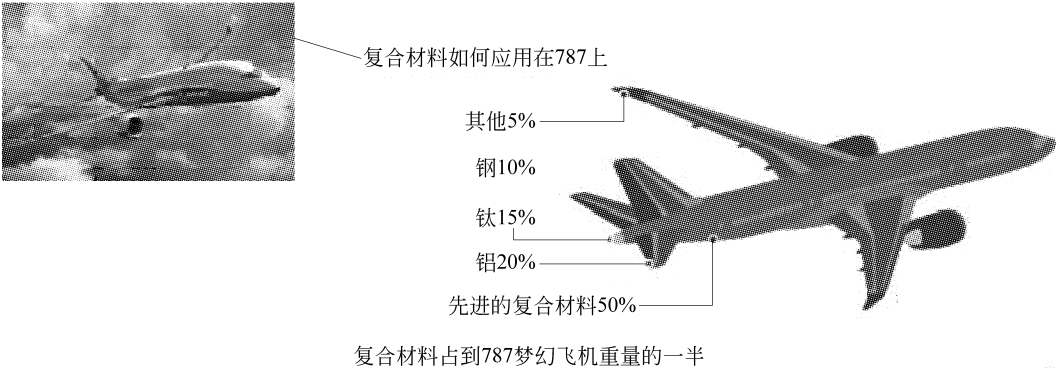


图 1-11 波音 787 大型客机中所用各种材料占总重量的比例

(2) 空客 A380 大型客机中各部件采用先进复合材料占总重量 52% 以上, 如图 1-12 所示。

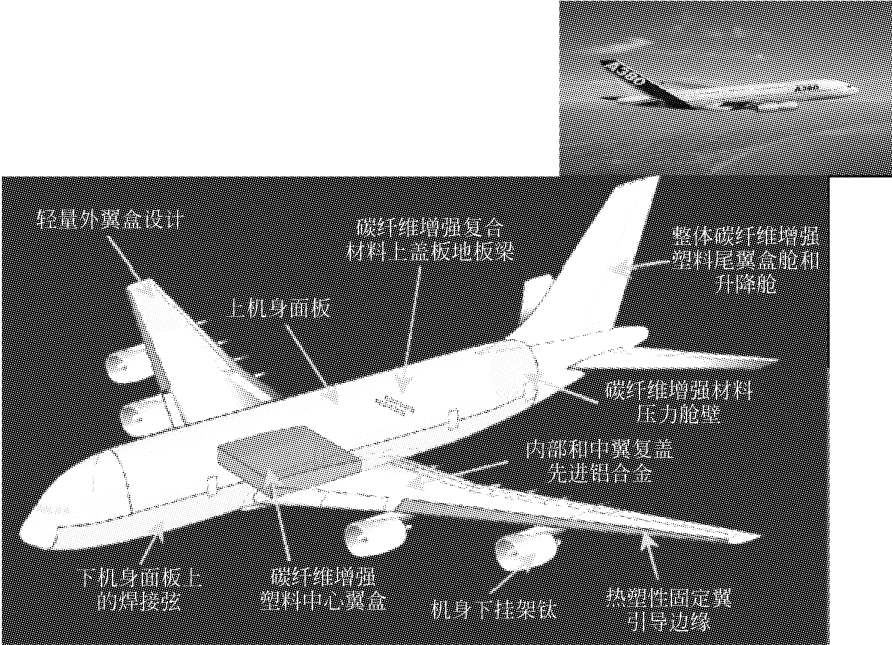


图 1-12 空客 A380 大型客机中各部件采用先进复合材料的情况

(3) 空客 A330 客机上大量采用碳纤维、玻璃纤维、混杂复合材料,如图 1-13 所示。

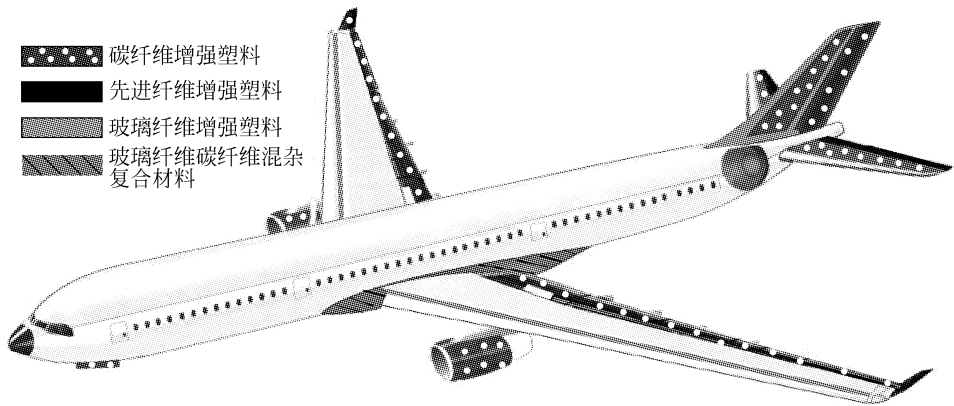


图 1-13 空客 A330 客机上采用先进复合材料的情况

(4) 美国环球“空中霸王”Ⅲ C-17 新型运输机中采用碳/环氧,Aramid 混杂复合材料等如图 1-14 所示。

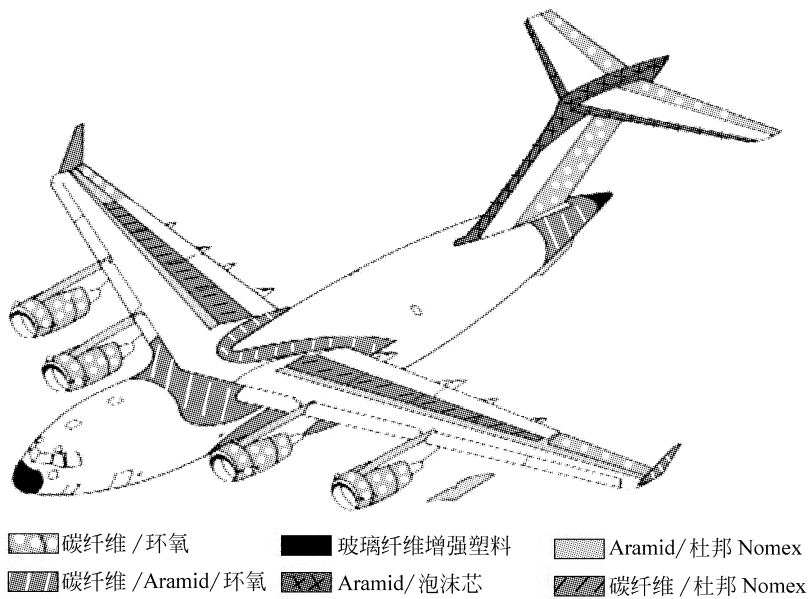


图 1-14 环球“空中霸王”Ⅲ C-17 运输机中复合材料分布图

(5) F-22 战斗机中采用先进复合材料占总重量 24%,钛合金占 39%,如图 1-15 所示,图中还有 F-15、F/A-18E/F 战斗机用材料百分比。

(6) F-18 战斗机。图 1-16 所示为飞机不同部位应用石墨/环氧复合材料的情况,其中有水平、垂直安定面,内机翼蒙皮,外机翼蒙皮,舵,固定机翼后缘,火炮承载门等。

(7) 波音 AV-8B Harrier 战斗机。图 1-17 表示飞机上石墨/环氧复合材料使用的部位情况(阴影表示)。机翼在最厚部分有 160~180 层石墨/环氧复合材料,整个结构中使用了 590kg 石墨/环氧复合材料。

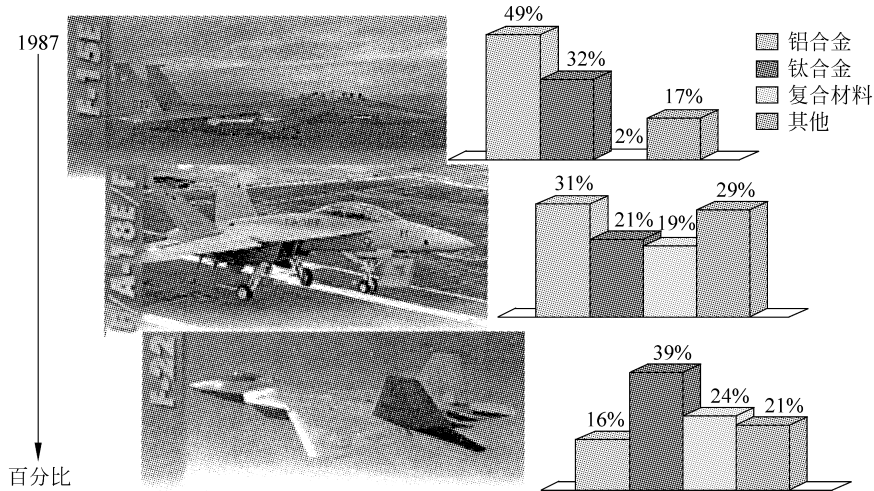


图 1-15 F-22、F/A-18E/F 和 F-15 战斗机用各种材料百分比

先进复合材料

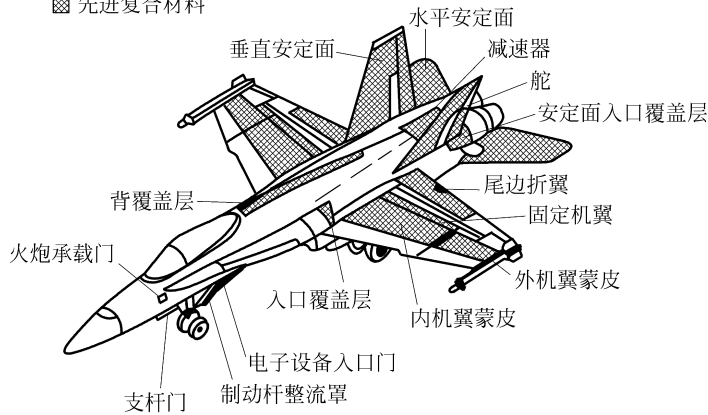


图 1-16 F-18 C/D 复合材料使用情况

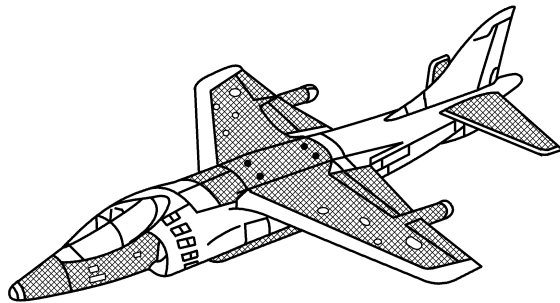


图 1-17 AV-8B Harrier 战斗机复合材料应用情况

(8) 波音 777 大型双发动机宽体客机。图 1-18 表示飞机不同部位应用石墨纤维复合材料和混杂复合材料的情况，其中有安定面、发动机整流罩、机翼前缘板、舵、机翼机身整流罩、

主起落架门、机翼起落架门、头部雷达罩等。每架飞机使用大约 8400kg 复合材料,占总结构重量的 10%。最显著的是用碳纤维增韧环氧基体的大尾翼,节约重量 15%~20%。

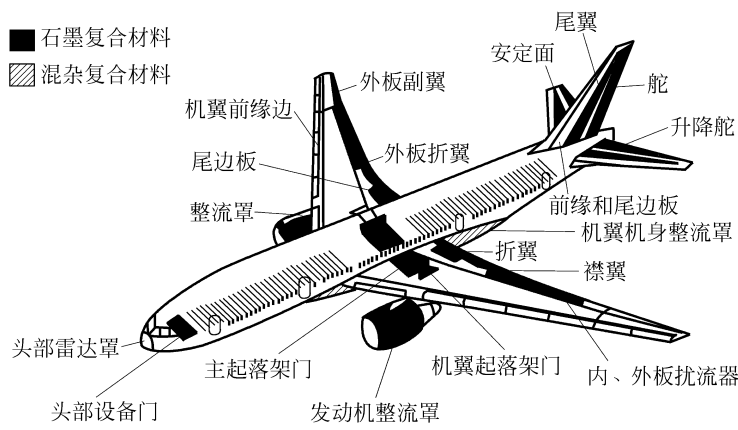


图 1-18 波音(Boeing)777 客机复合材料应用情况

(9) UH-60A 黑隼直升机。图 1-19 表示该直升机外观及复合材料应用情况,它使用 Kevlar 芳纶纤维复合材料约 583m²、玻璃纤维复合材料 1048m²,以及一定量的石墨和硼纤维复合材料,总计复合材料用量占总结构材料的 17%。

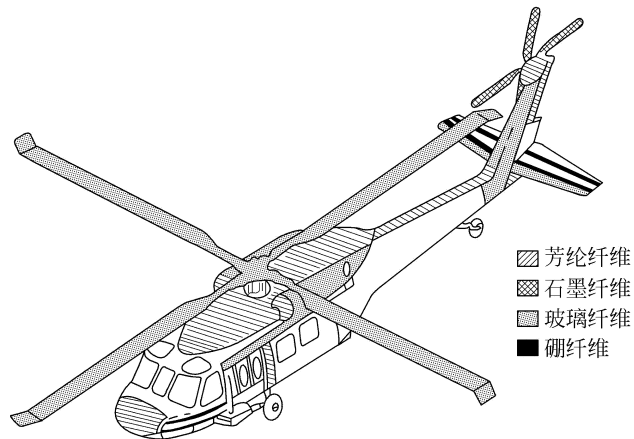


图 1-19 UH-60A 黑隼直升机复合材料应用情况

2. 航天工程

要将航天飞行器送入地球轨道,必须超越第一宇宙速度——7.91km/s。按牛顿第二定律,物体得到的加速度与所受的力成正比,与其质量成反比,即既要增加火箭发动机的推力又要减轻飞行器结构的重量,而减重必须用先进复合材料。

国外航天工程中应用复合材料的一些例子见表 1-8 所列。图 1-20 表示航天飞机中使用各种复合材料的情况,其中中间机身桁架构件用硼/铝复合材料,硼/环氧增强钛合金用于桁架构件,石墨/环氧用于仪表舱门,头部玻璃纤维缠绕压力容器等。

表 1-8 国外航天工程中应用复合材料的例子

序号	材 料	应 用 场 合	应 用 效 果
1	纤维复合材料	美先锋号飞船第二级发动机壳体	
2	酚醛石棉内衬玻璃布/酚醛蜂窝夹层外壁	美“大力神”、“北极星”、“阿特拉斯”火箭发动机 苏“萨龙”、“索弗林”导弹	重量减轻 45%，射程由 1600km 增加到 4000km
3	金属蜂窝增强陶瓷	“宇宙神”、“大力神”、I 型弹头	
4	蜂窝夹层： 铝面板玻璃布蜂窝夹芯 铝面板酚醛玻璃布蜂窝夹芯	阿波罗宇宙飞船火箭 S-IV 级前后隔舱 S-II 和 IV 级液氢液氧储箱共底	直径 10m 全长 110m 直径分别是 10m 和 6m，椭球形底
5	石墨/环氧层压板面板 Nomex 夹芯蜂窝	哥伦比亚航天飞机机身舱门	宽 4.57m×长 18.29m
6	石墨/铝复合材料	外壳构架、太阳能电池帆板、天线	

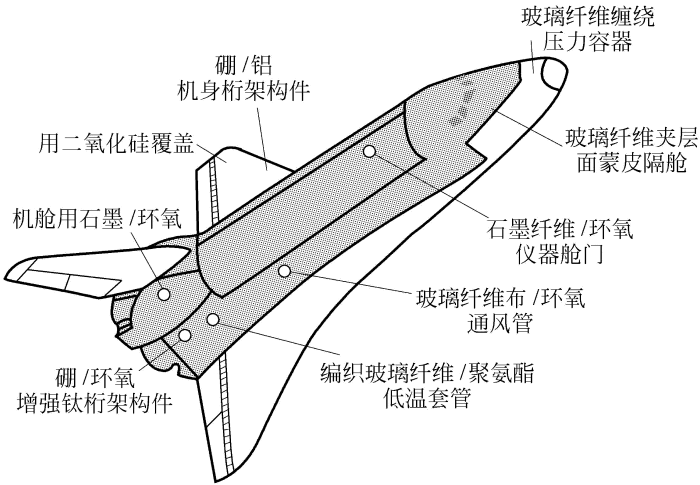


图 1-20 航天飞机应用复合材料情况

我国航天工业中也应用了先进复合材料，全面解决了战略导弹的热防护问题。例如，战略导弹端头用耐热复合材料已经历玻璃纤维复合材料、高硅氧纤维、陶瓷基复合材料到三向碳/碳复合材料并进入第五代新耐热复合材料时期。图 1-21 为先进复合材料在战略导弹中应用的示意图。结构复合材料正应用于大型承力构件，例如 CZ-2E 用整流罩前后柱段为铝蜂窝结构，卫星接口支架是碳/环氧复合材料等。近年来混杂复合材料已应用于航天工程，例如固体火箭发动机壳体用石墨-芳纶(CF/KF)混杂复合材料；在人造卫星中已应用于卫星天线、摄像机支架、蒙皮。碳/玻璃纤维混杂复合材料用于卫星遥控协调电机壳体。碳纤维/玻璃纤维/酚醛复合材料用于战略导弹头锥。

表 1-9 中列出了我国航天飞行器用部分结构复合材料的构件。