

复 合 材 料

赵渠森 编 译

国防工业出版社

内 容 简 介

复合材料是一种新型的材料，它具有许多新的特点。新型复合材料在宇航、航空、原子能、化工、机械等领域已获得越来越广泛的应用。

本书着重介绍复合材料这种非均质的各向异性材料的力学分析、强度计算和设计方法，也介绍了一些有关复合材料的基本原理、界面状态、成型工艺和试验方法等方面的问题。

本书可供从事纤维复合材料的研究工作者以及有关专业的设计人员、技术人员，高等院校师生参考。

复 合 材 料

赵渠森 编译

*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第074号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168¹/₃₂ 印张24³/₄ 637千字

1979年9月第一版 1979年9月第一次印刷 印数：00,001—14,000册

统一书号：15034·1811 定价：3.05元

目 录

符号表	1
简述	6
第一章 复合理论	13
1.1 力学性能的复合法则	13
1.1.1 增强原理——粒子增强和纤维增强	13
1.1.2 弹性模量	15
1.1.3 强度	21
1.2 其它物性复合	38
1.2.1 概述	38
1.2.2 电、磁、热性能的复合法则	39
1.2.3 矫顽力的复合法则	44
1.2.4 热膨胀系数复合法则	44
1.2.5 光学性质的复合法则	45
1.2.6 组合复合的复合效应	50
第二章 复合材料的力学	54
2.1 概述	54
2.2 各向异性的弹性	56
2.2.1 各向异性体的弹性特性（虎克定律）	56
2.2.2 粒子分散增强材料的弹性特性	67
2.2.3 单向纤维增强材料的弹性特性	68
2.2.4 层压板的弹性特性	77
2.2.5 层间剪切	100
2.2.6 夹层材料的弹性特性	113
2.3 屈服-破坏理论	120
2.3.1 概述	120
2.3.2 粒子分散增强材料的强度理论	121
2.3.3 纤维强度的统计理论	131
2.3.4 塑性，屈服条件	137
2.3.5 单向增强材料的破坏理论	151
2.3.6 层压材料的屈服-破坏理论	156
2.3.7 压缩破坏	171

2.3.8 弯曲破坏	178
2.3.9 层间剪切破坏	181
2.3.10 断裂韧性	191
2.3.11 其它的问题	200
2.4 依存时间特性和粘弹性理论	204
2.4.1 概述	204
2.4.2 温度与高分子的粘弹性	205
2.4.3 蠕变	207
2.4.4 高速变形现象	227
2.4.5 振动时的响应	247
第三章 复合材料的结构力学	258
3.1 概述	258
3.1.1 用作结构材料的复合材料	258
3.1.2 结构元件	258
3.1.3 应力分析理论	259
3.2 结构元件的应力分析	260
3.2.1 正交各向异性弹性理论的基本方程	260
3.2.2 简单一维元件	270
3.2.3 平板的面内问题	274
3.2.4 平板的弯曲挠度	281
3.2.5 薄膜在均布载荷作用下的挠度	282
3.2.6 平板的应力集中	289
3.2.7 圆筒壳	309
3.3 层压结构的应力分析	313
3.3.1 层压板	314
3.3.2 夹层板	321
3.3.3 层压壳	330
3.3.4 网格理论	345
3.3.5 纤维缠绕结构分析	359
3.4 屈曲强度	381
3.4.1 柱	381
3.4.2 板	387
3.4.3 圆筒壳	396
3.4.4 夹层结构	413
3.4.5 薄膜结构	420
3.5 连接	427

3.5.2	胶接连接	433
3.5.3	管材的连接	448
3.5.4	夹层板的连接	454
3.5.5	压力容器的连接	454
第四章 设计		461
4.1	概述	461
4.2	设计条件	463
4.2.1	结构所要求的条件	463
4.2.2	性能与结构重量	464
4.2.3	结构重量与载荷: 静载荷和动载荷	465
4.2.4	环境条件	465
4.2.5	可靠性、安全性、经济性	468
4.3	材料设计	470
4.3.1	按刚度要求进行材料设计	470
4.3.2	按强度要求进行材料设计	482
4.3.3	结构设计中复合材料的适用性及与其它材料的匹配问题	486
4.3.4	材料规范与材料设计	487
4.4	结构设计	487
4.4.1	强度规范	487
4.4.2	使用载荷、设计载荷和安全系数	488
4.4.3	材料选择方法	489
4.4.4	结构形式和它的选择	490
4.4.5	结构制造方法的探讨	495
4.4.6	结构的疲劳、蠕变与寿命	495
4.4.7	联结方法和连接接头设计	500
4.5	最佳设计	506
4.5.1	结构重量与最佳化	507
4.6	可靠性	512
4.6.1	概述	512
4.6.2	材料的可靠性	515
4.6.3	结构的可靠性	519
4.7	安全设计	524
4.7.1	概述	524
4.7.2	安全条件	526
4.7.3	破损安全设计	527
4.7.4	安全寿命设计	530

第五章 试验方法	533
5.1 概述	533
5.2 误差和它的处理方法	535
5.2.1 概述	535
5.2.2 平均值、方差、标准误差	535
5.2.3 可靠性界限	540
5.3 增强材料	543
5.3.1 单纤维和晶须	544
5.3.2 纤维束	552
5.3.3 玻璃布和带	556
5.4 橡胶型复合材料	557
5.4.1 概述	557
5.4.2 纤维增强橡胶的试验方法	557
5.5 塑料型复合材料	573
5.5.1 概述	573
5.5.2 纤维增强塑料的试验方法	574
5.5.3 纤维缠绕材料的试验方法	586
5.6 金属和陶瓷型复合材料	591
5.6.1 概述	591
5.6.2 金属	592
5.6.3 陶瓷	606
5.7 结构试验方法	607
5.7.1 板件	608
5.7.2 管子	616
5.7.3 纤维缠绕耐压结构	627
5.7.4 船舶	637
5.7.5 飞机	643
5.7.6 轮胎	648
5.8 无损检验	654
5.8.1 概述	654
5.8.2 放射线检查法	658
5.8.3 热线探伤试验	659
5.8.4 微波探伤试验	663
5.8.5 超声波探伤试验	666
5.8.6 振动法	670
5.8.7 其它检查法	674

5.9 光弹性试验法	676
5.9.1 微观光弹性	676
5.9.2 均质正交各向异性光弹性	683
5.9.3 皮层法	683
第六章 界面和复合材料成型工艺	685
6.1 界面的物理化学特性	686
6.1.1 表面的几何形状、分布状况、纹理结构	686
6.1.2 表面结构与表面活性	688
6.1.3 表面结构与润湿	697
6.2 界面结合强度和复合材料强度	703
6.2.1 结合强度	703
6.2.2 界面结合强度对复合系统强度的影响	705
6.3 几种复合材料的结合状态	707
6.3.1 纤维增强塑料	707
6.3.2 纤维增强金属	719
6.4 成型工艺	725
6.4.1 树脂型复合材料	725
6.4.2 金属基复合材料	739
6.4.3 蜂窝夹芯材料	756
6.4.4 纤维增强陶瓷	761
6.4.5 纤维复合材料的平衡结构	763
6.4.6 碳纤维玻璃纤维双增强剂复合材料	770
附录	780
附录一 板材迭层方向表示法	780
附录二 几种材料的性能比较	781
附录三 增强纤维的力学性能	782
附录四 热固性树脂的力学性能	783
附录五 碳纤维-树脂复合材料性能(例)	784

符 号 表

- A : 面积、系数值;
 A_{ij} : 层压材料的面内刚度矩阵元素;
 a : 长度、半径、系数值;
 a_{ij} 、 a_{ij}^* : 有关层压材料刚度的矩阵元素;
 a_T : 时间因数、移动系数;
 B : 宽度、系数值、磁通密度、弯矩;
 B_{ij} : 层压材料的耦合矩阵元素;
 B_r : 残余磁通密度;
 B_s : 饱和磁通密度;
 b : 宽度、半径、长度;
 b_{ij} 、 b_{ij}^* : 有关层压材料刚度的矩阵元素;
 b_m : 有效宽度;
 C : 系数值、相邻系数、成本;
 C_a : 精确度指数;
 C_{ij} : 柔度矩阵元素;
 C_p : 工程能力指数;
 c : 比热、系数值、复合材料 (下标);
 c_{ij} 、 c_{ij}^* : 有关层压材料刚度的矩阵元素;
 D : 弯曲刚度、直径、系数值;
 D_{ij} : 层压材料的弯曲扭转刚度矩阵元素;
 d : 直径、距离、系数值;
 d_{ij} 、 d_{ij}^* : 有关层压材料刚度的矩阵元素;
 d_p : 粒子直径;
 d_f : 纤维直径;
 E : 弹性模数、系数值;
 E_{ij} : 弹性模数的矩阵元素;
 E_c : 复合材料的平均弹性模数;

- E_f : 纤维的弹性模数;
 E_m : 基体的弹性模数;
 E_p : 用作增强用的粒子的弹性模数;
 E_L 、 E_T : 分别为沿纤维方向和垂直于纤维方向的弹性模数;
 E_x 、 E_y : 分别为 X 方向和 Y 方向的弹性模数;
 $E(\cdot)$: 期待值;
 EI : 弯曲刚度;
 e : 应变、自然对数的底、系数值;
 F : 应力函数、强度、剪切力、面积、增强效率、累积分布函数、纤维;
 F_L 、 F_T : L 及 T 方向的拉伸强度;
 F_{LT} : 基体与纤维之间的剪切强度;
 f : 振动数、安全系数、纤维 (下标)、拉伸强度、函数;
 G : 剪切弹性模数;
 G_c : 复合材料 (或芯材) 的剪切弹性模数;
 G_{xy} 、 G_{LT} : 分别为 xy 及 LT 平面内的剪切弹性模数;
 GJ : 扭转刚度;
 g : 重力加速度、系数值;
 H : 高度、水平载荷、水平方向 (下标)、应变灵敏度、几何尺寸、系数值;
 H_{ij} : 弯曲刚度的柔度矩阵元素;
 h : 厚度;
 h_f : 粗纱层厚度;
 h_m : 基层厚度;
 I : 断面的惯性矩、系数值;
 I_x 、 I_y : 分别为绕 x 及 y 轴的断面惯性矩;
 I_{xy} : 关于 x 、 y 轴的断面 (几何) 惯性矩;
 I_p : 断面的极惯性矩;
 i : 整数、断面半径、虚数单位;
 J : 扭转系数、系数值;
 j : 整数;
 K : 体积弹性模数、系数值;
 k : 整数、弹簧常数、波耳兹曼常数、导电率、屈曲系数、系数值;

k_b : 整体导电率;

L : 跨距、长度、运算符、纤维方向 (下标);

L_f : 纤维长度;

$\mathcal{L}$: 拉普拉斯变换的运算符;

l : 长度、方向余弦;

l_{cr} : 临界纤维长度;

M : 力矩、质量;

M_x 、 M_y 、 M_z : (单位宽度上的) 弯矩和扭矩;

M_t : 扭矩;

m : 质量、基体 (下标)、方向余弦、整数;

N : 薄膜力、轴向力、旋转数;

N_x 、 N_y 、 N_{xy} : 薄膜力分量;

n : 折射系数、负荷倍数、方向余弦、次数、整数;

P : 轴向力、塑料;

P_{cr} : 压缩屈曲载荷;

P_o 、 P_r : 弯曲和剪切破坏载荷;

P_m : 最大拉伸载荷;

p : 压力、螺距、概率、系数值;

Q : 剪力、热容量、玻璃纤维体积分数之半 $\left(\frac{1}{2}\right)$;

q : 均布载荷、层间剪应力、热入射率;

R : 半径、反力、扭转刚度、可靠度、电阻;

r : 半径、曲率半径、极坐标矢径、可靠度、裂纹的表面自由能、系数值;

S : 面积、剪力、安全系数;

S_F : 寿命安全系数;

s : 曲线坐标、长度;

T : 扭矩、张力、绝对温度、垂直于纤维方向 (下标)、时间、动能;

t : 厚度、时间、张力;

t_c : 芯材的厚度;

t_f : 面板的厚度、纤维断裂时间;

U : 应变能;

u : 位移、系数值;

V : 垂直力、体积、体积分数、垂直方向 (下标)、势能、速度;

V_{cr} : 临界速度;

V_f : 纤维体积分数;

V_d 、 V_p : 粒子体积分数;

V_v : 孔隙体积分数;

v : 位移、速度、孔隙率;

v_f : 最终速度;

W : 载荷、重量、重量分数、功、宽度;

W_f : 纤维重量分数;

w : 位移、挠度、均布载荷、系数值;

X : 体积力 (x 方向)、坐标、变量;

x : 坐标;

Y : 体积力 (y 方向)、坐标、屈服 (下标);

y : 坐标;

Z : 体积力 (z 方向)、坐标、断面系数、变量;

z : 坐标;

α : 角度、线膨胀系数、应力灵敏度、曲线坐标、系数值;

β : 角度、切线角变化、曲线坐标、系数值;

Γ : 横向剪切刚度、系数值;

γ : 角度、剪切应变、比重、系数值;

γ_{xy} 、 γ_{xz} 、 γ_{yz} : 剪应变分量;

Δ : 拉普拉斯算子;

δ : 位移量、变分记号;

δ_{if} : 克罗内克 δ ;

ε : 垂直应变;

ε_x 、 ε_y 、 ε_z : 垂直应变分量;

ζ : 坐标、系数值;

η : 粘度系数、坐标、系数值;

Θ : 旋转角、应力函数;

θ : 角度、扭率、温度;

κ : 曲率、系数值;

κ_x 、 κ_y 、 κ_{xy} : 曲率、扭率;

λ : 波长、系数值;

λ_p : 粒子间距离;

μ : 泊松比、平均值、系数值;

μ_x 、 μ_y : 弯曲泊松比;

ν : 泊松比、系数值;

ν_x 、 ν_y 、 ν_L 、 ν_T : 于 x 、 y 、 L 、 T 方向的面内泊松比;

ξ : 坐标、系数值;

ρ : 密度、曲率半径、无量纲矢径、电阻率;

σ : 正应力、标准误差、系数值;

σ_x 、 σ_y 、 σ_z 、 σ_L 、 σ_T : 分别为 x 、 y 、 z 、 L 、 T 方向上的正应力;

σ_B 、 σ_f : 拉伸强度、挤压强度;

σ_e : 疲劳强度;

σ_E : 欧拉屈曲应力;

σ_f : 纤维应力;

σ_m : 基体的正应力;

σ_Y : 屈服应力;

σ_{cr} : 屈曲应力;

σ_{fU} : 纤维的平均拉伸强度;

τ : 剪应力;

τ_{xy} 、 τ_{xz} 、 τ_{yz} : 剪应力分量;

τ_Y : 屈服剪切应力;

τ_m : 基体的胶接强度;

τ_{mY} : 界面胶接屈服应力;

Φ : 切线角、函数值;

ϕ : 角度、切线角、应力函数;

χ : 角度、应力函数;

Ψ : 函数;

ψ : 角度、应力函数;

ω : 角度、角频率、角速度。

简 述

两种或两种以上不同化学性质的或不同组织相的物体，以微观或宏观的形式组合而成的材料，均可称为复合材料。它在我国的社会主义建设事业和日常生活中是屡见不鲜的，掺麦杆的泥墙、钢筋混凝土、金属陶瓷、橡皮轮胎乃至树木、竹材、动物躯体都泛属复合材料范畴。不过，在工程上主要是指一种材料以人工均匀地分散在另一种材料中，以克服单一材料的某些弱点，发挥综合性能而言。一般来说是由较强的、脆性的、高模量的增强剂和较弱的、韧性的、低模量的基体组成。它的主要代表是玻璃纤维增强的树脂即玻璃钢。二十世纪六十年代高模量高强度的碳纤维、硼纤维问世后，除了增强树脂外，还出现了增强金属、橡胶、硅酸盐材料等新品种，给纤维复合材料开辟了新的领域。

高强度高模量的碳纤维和硼纤维都属于无机纤维。碳纤维的成份极大部分是碳，所以又称为纤维状碳。它是以有机纤维（例如聚丙烯腈、粘胶、沥青、聚乙烯醇、尼龙、木质素等）经过一定的热处理，驱除有机纤维中大部分的非碳元素而制成。热处理过程大体上要经历低温（ $200\sim 300^{\circ}\text{C}$ ）弱键断裂和主键架桥，中温（ $400\sim 500^{\circ}\text{C}$ ）芳香环缩合和高温（ 800°C 以上）结晶化几个阶段，从而把无规有机结构转变成晶体排列较规整的无机型碳纤维。碳纤维的分类常常是以最终碳化温度而定的。碳化温度在 $900\sim 1000^{\circ}\text{C}$ 的被称为普通型，即 A 型纤维。这类纤维的拉伸强度居中，弹性模数较低，而断裂伸长最大，成本亦较低；碳化温度在 $1200\sim 1400^{\circ}\text{C}$ 的被称为 II 型即高强度型纤维，拉伸强度最大，弹性模数和断裂伸长居中，因此综合性能较好；碳化温度在 2500°C 以上，已达到石墨化温度，因而此类 I 型即高模量型又被叫做石

墨纤维，其弹性模数最高而拉伸强度和断裂伸长均较低。

硼纤维是通过把硼蒸发在一根根的钨丝（正在研究用碳丝作载体）上制成的，是一种气相反应，氢气将三氯化硼或三溴化硼还原，使钨丝芯上生长出硼。由于硼纤维中有一根芯体，所以纤维直径在 100 微米左右，约为碳纤维直径的几倍乃至十几倍。

纤维状硼的机械性能，特别是压缩强度和热膨胀系数比碳纤维更适合作结构材料，但是用气相沉积法就不能象碳纤维那样进行批生产，且成本也高于碳纤维。

高模量有机纤维中，PRD-49 是比较成功的一种，它有类似于碳纤维的高度取向的梯形环结构，而获得高的弹性模数。这种纤维的断裂伸长大，因此与碳纤维混合使用，可提高构件抗冲击性能。

上述这些纤维，同玻璃纤维一样，可以与树脂复合，并能沿用玻璃钢的一套成型工艺。碳、硼纤维还可以与金属复合，制成金属基复合材料。

目前，人们对新型复合材料的认识还不是很充分，根据现在的了解，复合材料有下列特点：

1. 比强度和比模量高

强度除以比重、模量除以比重之值，是度量材料承载能力的一个指标。从表 1 所列出的数据可以看出，复合材料的比强度、比模量是出众的。

对于非常注重重量的空间结构而言，兼有高的比强度和高的比模量的材料是十分理想的，从而有可能改善结构的气动弹性性能和增长使用寿命。

2. 抗疲劳性能好

疲劳破坏是材料在交变载荷作用下，由于裂缝的形成和扩展而形成的低应力破坏。金属材料的疲劳破坏是由里向外突然发展的，事前没有任何预兆；而纤维复合材料中纤维与基体的界面能阻止裂纹扩展，因此其疲劳破坏总是从纤维的薄弱环节开始，逐

表1 常用材料和纤维复合材料的比强度比模量

材料名称	比重 (克/厘米 ³)	拉伸强度 ($\times 10^4$ 公斤/ 厘米 ²)	弹性模量 ($\times 10^6$ 公斤/ 厘米 ²)	比强度 ($\times 10^8$ 厘米)	比模量 ($\times 10^9$ 厘米)
钢	7.8	1.03	2.1	0.13	0.27
铝	2.8	0.47	0.75	0.17	0.26
钛	4.5	0.96	1.14	0.21	0.25
玻璃钢	2.0	1.06	0.4	0.53	0.21
碳纤维Ⅱ/环氧	1.45	1.5	1.4	1.03	0.21
碳纤维-I/环氧	1.6	1.07	2.4	0.67	1.5
有机纤维 PRD/ 环氧	1.4	1.4	0.8	1.0	0.57
硼纤维/环氧	2.1	1.38	2.1	0.66	1.0
硼纤维/铝	2.65	1.0	2.0	0.38	0.75

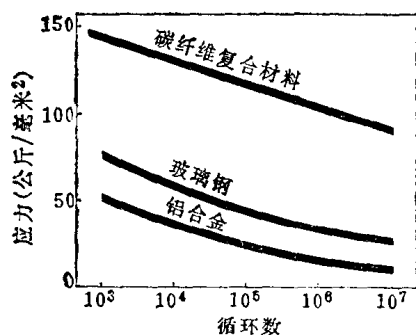


图1 三种材料的疲劳强度

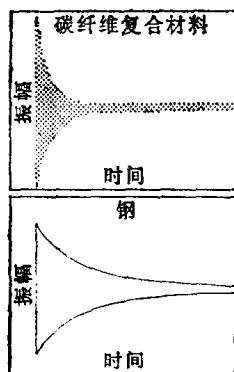


图2 两种材料的振动衰减特性

渐扩展到结合面上,破坏前有明显的预兆。大多数金属材料的疲劳极限是其拉伸强度的40~50%,而碳纤维聚脂树脂复合材料则达70~80%(见图1)。此外,纤维复合材料的抗声振疲劳也是很好的。

3. 减振性能好

结构的自振频率除与结构本身形状有关外,还与材料的比模量的平方根成正比。高的自振频率避免了工作状态下共振而引起

的早期破损。同时,复合材料中的纤维与基体界面具有吸振能力,因此其振动阻尼很高。根据对相同形状和尺寸的梁进行的试验可知,轻金属合金梁需9秒钟才能停止的振动,碳纤维复合材料只需2.5秒钟就静止了。图2是很好的说明。

4. 高温性能好

一般铝合金在400℃时,其弹性模量大幅度下降并接近于零,强度也显著下降,而用碳或硼纤维增强的铝合金,在这个温度下其强度和模量基本不变,从而提高了金属的高温性能(见图3)。同样,碳纤维增强的镍基合金比未增强的镍比重小,高温性能好。若干纤维的高温强度特性见图4。

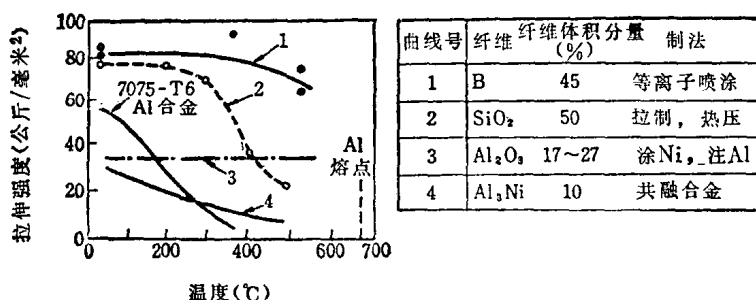


图3 纤维增强后的铝的高温强度

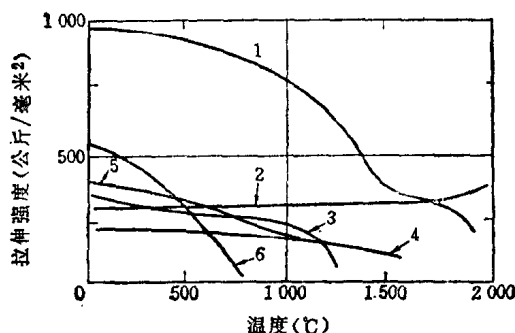


图4 若干纤维的高温强度

1. Al₂O₃晶须; 2. 碳纤维; 3. 钨纤维; 4. SiC纤维;
5. 硼纤维; 6. S-玻璃纤维。

玻璃钢的导热系数只有金属的 1% 到 0.1%，因此它的瞬时耐超高温性能相当好，可适于做耐烧蚀材料。

5. 破损安全性好

纤维复合材料基体中有大量独立的纤维，每平方厘米上的纤维数少至几千根，多至几万根。从力学观点上看，是典型的静不定体系。当这类材料的构件超载并有少量纤维断裂时，其载荷会迅速重新分配在未破坏的纤维上，这样在短期内不致于使整个构件丧失承载能力。

6. 成型工艺好

复合材料构件制造工艺简单，适合整体成型。能用模具制造的复合材料构件，可采用一次成型，从而减少了零部件、紧固件和接头的数目，并可节省原材料和工时。例如验证试验用的 F-16 的复合材料前机身段，由于采用了碳纤维复合材料，零件数从金属的 968 个减少到 642 个，使新的结构比原结构轻 53 公斤。

根据目前的技术水平，纤维复合材料也存在一些问题。如断裂伸长较小，抗冲击性差，横向强度和层间剪切强度较低以及树脂的吸湿性对结构性能的影响等。此外，构件制造过程中手工劳动多、质量不稳定，成本也高。这些问题在一定程度上阻碍了复合材料进一步的推广，有待今后研究解决。这方面的问题，大体有如下几个方面：

1) 改善复合材料的冲击韧性，现行的措施大致是减少纤维内部孔隙和夹杂以提高纤维的断裂伸长；采用适当的纤维表面处理方法，权衡层间剪切强度和冲击强度；采用混合不同伸长率的纤维或增加纤维直径；涂覆构件表面保护层等。

2) 改善基体树脂的性能。现用基体材料主要是沿用玻璃钢，常用的是环氧树脂。这种树脂性脆、耐温性差、与增强剂纤维的线膨胀系数相差较大以及对纤维的润湿性不够好等，因此需研究新的树脂系统。目前相继出现的新型树脂有：改进聚合法的聚酰亚胺和改性环氧。