

复合材料

结构设计

王耀先
编著

FUHE
CAILIAO
JIEGOU
SHEJI



化学工业出版社
材料科学与工程出版中心

北京)

复合材料结构设计

王耀先 编著

化学工业出版社
材料科学与工程出版中心
·北京·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

复合材料结构设计/王耀先编著. —北京: 化学工业出版社, 2001.9
ISBN 7-5025-3389-3

I. 复… II. 王… III. 复合材料-产品-结构设计 IV. TB33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 045967 号

复合材料结构设计

王耀先 编著

责任编辑: 王苏平

责任校对: 蒋宇

封面设计: 于兵

*

化学工业出版社 出版发行
材料科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64918013

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市燕山印刷厂印刷

北京市燕山印刷厂装订

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 18 字数 435 千字

2001 年 9 月第 1 版 2001 年 9 月北京第 1 次印刷

印数: 1—5000

ISBN 7-5025-3389-3/TQ·1401

定价: 38.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

复合材料是非均质的各向异性材料,具有比强度高、比模量高、耐化学腐蚀、电性能好、成型工艺性优越、可设计性好等一系列优点。近40年来,复合材料在航空、航天、建筑、化工、汽车和造船等部门的应用日益广泛,研究工作十分活跃。不少专家认为,当前人类已从合成材料时代进入复合材料时代,这种提法是有一定科学依据的。因为想要合成一种新材料使之满足各种高要求的综合技术指标非常困难,同时即使研制出来某种满意的材料,从实验室到工业生产的周期也很长。但如果把现有的材料通过科学合理的设计复合起来则容易满足要求。因此,世界各主要工业国家都对复合材料的研究与设计十分重视。大力研制、开发和应用各类复合材料是当今高新科技发展中的一个重要方向。随着复合材料的迅速发展和广泛应用,许多原来学习和从事金属材料结构设计的人员需要了解复合材料结构设计知识,许多复合材料工厂和企事业单位的工程技术人员也迫切需要学习这方面的知识,而材料工程方面新技术人才的培养更需要掌握这方面的知识。

在1991年《复合材料结构设计》一书出版10周年之后,新编《复合材料结构设计》一书在跨入新世纪之际又与读者见面了。这次编写中广泛听取了各有关方面的意见,参阅了大量的国内外有关文献资料,吸收了其他教材的优点,并结合作者多年教学、科研和设计的实践经验,对全书的结构安排作了较大调整,在内容方面根据近年来复合材料结构设计的发展以及专业教学的实际需要进行编纂,力求推陈出新。本书第1,5,6,8,9,10,11章内容为这次新编写的,第2,3,4,7章也进行了较大幅度的增删。全书共11章,第1章是绪论,第2~4章是复合材料力学基础,第5~11章为复合材料结构设计内容。全书虽没分上、下篇,但两部分既相互关联,又可以分别使用,各章具有相对独立性,便于读者根据需要取舍,适合于宽口径、少学时的教学需要。本书除可作为高等院校材料类专业或相关专业的教材外,也可供复合材料行业从事研究、设计、生产和应用开发部门工作的工程技术人员参考。本书的基本特点如下:

(1) 内容由浅入深、循序渐进、条理清楚、系统性较强,易学易懂。在叙述时从材料力学基础知识出发,开拓复合材料力学的基本概念;用各向同性材料结构的分析与设计方法来开拓复合材料结构的分析与设计。

(2) 本书重点介绍结构设计思想、步骤和方法,强调理论联系生产实际,从工程设计角度出发,较详细地介绍了几个典型复合材料产品的设计,并配以若干例题,使本书具有较强的实用性。

(3) 阐明成熟的基本概念和基本原理,同时点出最新成就和发展方向,做到既有比较完整的理论基础,又力求叙述简洁、内容紧凑实用。书中还较详细地介绍了复合材料细观力学内容,这有助于研究了解复合材料结构与性能的关系,也是材料设计和结构设计的基础。

限于作者水平,书中错误和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

王耀先

2001年3月于华东理工大学

主要符号说明

A	面积、常数、距离
$[A]$	层合板的面内刚度矩阵
A_{ij}	层合板的面内刚度系数
a	长度、厚度
$[a]$	对称层合板的面内柔度矩阵
a_{ij}	对称层合板的面内柔度系数、强度比值参数
B	宽度、距离、系数
$[B]$	层合板的耦合刚度矩阵
B_{ij}	层合板的耦合刚度系数
b	宽度
C	参数、系数、蜂窝芯子的厚度
c	复合材料吸湿含量、接触系数、比值、系数
c_f, c_m	纤维、基体的吸湿含量
D	抗弯刚度、直径、极限内力、系数
$[D]$	层合板的弯曲刚度矩阵
D_{ij}	层合板的弯曲刚度系数
d	距离、直径
$[d]$	对称层合板的弯曲柔度矩阵
d_{ij}	对称层合板的弯曲柔度系数
E	弹性模量、第二类椭圆积分
E_1, E_2	单层板的纵向、横向弹性模量
E_L, E_T	双向单层板的经向、纬向弹性模量
E_c	复合材料的弹性模量
e	单层的湿热膨胀应变、端距
F	应力空间中的强度参数、第一类椭圆积分、应力函数、外力、支座反力、极限强度、系数、面积
f	挠度、函数、系数、频率
f_L, f_T	经向、纬向纤维量与总纤维量之比
G	剪切弹性模量、应变空间中的强度参数、风量
G_{12}	单层板的面内剪切弹性模量
G_{xy}	层合板的剪切弹性模量
G_{LT}	双向单层板的经纬向剪切弹性模量
G_c	复合材料的剪切弹性模量
g_k	重量风速

H, h	厚度、距离、高度
h_0	单层厚度、距离
I	惯性矩
i	压杆截面的最小惯性半径、焓
J	惯性矩
K	应力比、系数
k	铺层序号、曲率
k_x, k_y, k_{xy}	层合板的曲率和扭率
L	长度、比值
l	长度
M	质量、弯矩、力矩
M_x, M_y, M_{xy}	层合板的弯矩和扭矩
m	质量、铺层角的余弦函数、单层组数
m_{of}, m_{om}	纤维质量、基体质量
m_f, m_m	纤维和基体的质量含量
N	内力、功率、冷却数
N_x, N_y, N_{xy}	层合板的面内力
N_{FPF}^*	层合板的最先一层失效强度
N_{max}^*	层合板的极限强度
n	铺层角的正弦函数、单层数、安全系数、转速、常数
P	外力
p	压力、分布力、参数
Q	剪力、流量
$[Q]$	单层板的正轴模量矩阵
Q_{ij}	单层板的正轴模量分量
$[\bar{Q}]$	单层板的偏轴模量矩阵
$[\bar{Q}]_{ij}$	单层板的偏轴模量分量
q	均布载荷集度、参数、淋水密度
R	强度比、半径
R_ϕ, R_θ	回转曲面的主曲率半径
r	半径
S	面内剪切强度、面积
$[S]$	单层的正轴柔量矩阵
$[\bar{S}]$	单层的偏轴柔量矩阵
S_{ij}	单层的正轴柔量分量
\bar{S}_{ij}	单层的偏轴柔量分量
T	温度、周向压缩力、纤维张力
$[T_\sigma]$	应力转换矩阵

$[T_\sigma]^{-1}$	应力负转换矩阵
$[T_\epsilon]$	应变转换矩阵
$[T_\epsilon]^{-1}$	应变负转换矩阵
T_g	玻璃化转变温度
t	厚度
U_{iQ}	正轴模量的线性组合 ($i=1, 2, 3, 4, 5$)
U_{iS}	正轴柔量的线性组合 ($i=1, 2, 3, 4, 5$)
u, v, w	坐标轴 x, y, z 方向的位移
u_a	许用单位载荷
V	体积、几何因子、速度
V_f, V_m, V_v	纤维、基体、空隙体积含量
V_r, V_c, V_p	增强层、芯材、颗粒的体积含量
W	重力、截面模量
W_c, W_L	静土压、动土压
X_t, X_c	单层板的纵向拉伸、压缩强度
X_{pt}	颗粒增强复合材料的拉伸强度
x, y, z	直角坐标
Y_t, Y_c	单层板的横向拉伸、压缩强度
α	坐标转换角、缠绕角、热膨胀系数
$[\alpha]$	层合板的面内柔度矩阵
α_{ij}	层合板的面内柔度系数
α_1, α_2	复合材料纵向、横向热膨胀系数
α_f, α_m	纤维、基体的热膨胀系数
β	角度、缠绕角、系数
$[\beta]$	层合板的耦合柔度矩阵
β_{ij}	层合板的耦合柔度系数
β_1, β_2	复合材料纵向、横向湿膨胀系数
β_f, β_m	纤维、基体的湿膨胀系数
γ	剪应变、容重、角度
Δ	变形量、增量
δ	挠度
$[\delta]$	层合板的弯曲柔度矩阵
δ_{ij}	层合板的弯曲柔度系数
ϵ	线(正)应变
$\epsilon_1, \epsilon_2, \gamma_{12}$	材料主方向(正轴向)的3个应变分量
$\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}$	单层偏轴应变的3个分量
$\epsilon_x^0, \epsilon_y^0, \gamma_{xy}^0$	层合板中面应变的3个分量
η	耦合系数、应力分配参数、内力比

θ	铺层角、角度、周向坐标、干球温度
θ_0	相位角
λ	比值、拉格朗日乘子、压杆柔度、厚度比、气水比
ν	泊松比
ν_c	复合材料的泊松比
ν_1, ν_2	纵向泊松比和横向泊松比
ξ	无量纲化坐标、纤维增强作用系数、函数
ρ	密度、曲率半径
ρ_f, ρ_m	纤维和基体密度
σ	正应力
$[\sigma]$	许用正应力
$\sigma_1, \sigma_2, \tau_{12}$	单层正轴应力的 3 个分量
$\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$	单层偏轴应力的 3 个分量
σ_w	轴向弯曲应力
σ_s	单轴拉伸的屈服应力
σ_b	短纤维复合材料的强度
$[\sigma_{br}]$	层合板的许用挤压应力
σ_d	挤压设计应力
σ_{xt}	层合板拉伸强度
τ	剪应力、湿球温度
$[\tau]$	许用剪应力
ϕ	角度、相对湿度、函数
ψ	角度
ω	角度
μ	长度系数
上角标符号	
*	正则化
'	新轴
°	面内
+	正转换
-	负转换
T	矩阵转置
下角标符号	
x, y, z	分别为坐标轴 x, y, z 方向
$1, 2, \dots, i$	分别为 1, 2, \dots , i 方向或个数
cr	临界值
max	最大
min	最小
t	拉伸

c	压缩
s	面内剪切, 对称
m	基体
f	纤维
p	颗粒
L	纵向, 经向
T	横向, 纬向
顶标符号	
-	偏轴, 平均

ISBN 7-5025-3389-3



9 787502 533892 >

ISBN 7-5025-3389-3/TQ · 1401 定价：38.00元



目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 复合材料的命名及分类	1
1.2 复合材料的构造及特点	3
1.3 复合材料的优点和缺点	5
1.3.1 复合材料的优点	5
1.3.2 复合材料的缺点	6
1.4 复合材料的应用和发展	7
第 2 章 单层板的刚度和强度	10
2.1 单层板的正轴刚度	10
2.2 单层板的偏轴刚度	17
2.2.1 应力转换和应变转换	17
2.2.2 单层板的偏轴模量	19
2.2.3 单层板的偏轴柔量	23
2.2.4 单层板的偏轴工程弹性常数	25
2.3 单层板的强度	31
2.3.1 单层板的基本强度	31
2.3.2 最大应力准则和最大应变准则	32
2.3.3 蔡-希尔 (Tsai-Hill) 强度准则和霍夫曼 (Hoffman) 准则	33
2.3.4 蔡-吴 (Tsai-Wu) 张量准则	34
2.3.5 单层板强度的计算方法	37
习题	41
第 3 章 单层板的细观力学	43
3.1 引言	43
3.2 复合材料的密度和组分材料的含量	44
3.3 单向连续纤维增强复合材料弹性常数的预测	45
3.3.1 串联模型的弹性常数	46
3.3.2 并联模型的弹性常数	48
3.3.3 植村-山胁的经验公式	49
3.3.4 组合模型的弹性常数	49
3.3.5 蔡-韩 (Tsai-Hahn) 的修正公式	52
3.3.6 哈尔平-蔡 (Halpin-Tsai) 的半经验公式	53
3.4 单向连续纤维增强复合材料单层基本强度的预测	54
3.4.1 纵向拉伸强度 X_t	55
3.4.2 纵向压缩强度 X_c	56
3.5 正交织物复合材料弹性常数和强度的预测	57

3.5.1	正交织物复合材料的弹性常数	58
3.5.2	正交织物复合材料的强度	59
3.6	短纤维增强复合材料的细观力学分析	59
3.6.1	应力传递理论	60
3.6.2	单向短纤维复合材料的弹性模量和强度	62
3.6.3	平面随机取向短纤维增强复合材料的弹性模量和强度	63
3.6.4	空间随机取向短纤维增强复合材料的弹性模量和强度	64
3.6.5	短切纤维毡增强复合材料的弹性常数和强度的预测	64
3.7	颗粒增强复合材料的弹性模量和强度	64
3.8	湿、热膨胀系数的细观力学分析	65
3.8.1	纵向热膨胀系数 α_1	65
3.8.2	横向热膨胀系数 α_2	66
3.8.3	纵向湿膨胀系数 β_1	66
3.8.4	横向湿膨胀系数 β_2	67
	习题	68
第4章	层合板的刚度与强度	69
4.1	引言	69
4.2	对称层合板的面内刚度	71
4.2.1	面内力-面内应变的关系	72
4.2.2	对称层合板的面内工程弹性常数	73
4.2.3	面内刚度系数的计算	74
4.2.4	几种典型对称层合板的面内刚度	76
4.3	一般层合板的刚度	83
4.3.1	一般层合板的内力-应变关系(经典层合板理论)	83
4.3.2	对称层合板的弯曲刚度系数计算	90
4.3.3	一般层合板的刚度系数计算	92
4.3.4	几种典型层合板的刚度	94
4.3.5	平行移轴定理	100
4.4	层合板的强度	101
4.4.1	层合板各单层的应力计算及强度校核	101
4.4.2	层合板的强度	104
4.5	湿热效应	107
4.5.1	单层板的湿热变形	108
4.5.2	考虑湿热应变的单层板应力与应变关系	108
4.5.3	考虑湿热应变的层合板内力与应变关系	109
4.5.4	层合板的湿热应变	109
4.5.5	层合板的残余应变和残余应力	110
4.5.6	考虑残余应力的层合板强度计算	110
	习题	111
第5章	复合材料连接设计	112

5.1	机械连接设计	112
5.1.1	机械连接的破坏形式	112
5.1.2	机械连接设计的一般要求	113
5.1.3	机械连接强度校核	116
5.1.4	机械连接设计和强度校核举例	117
5.2	胶接连接设计	119
5.2.1	胶接接头基本破坏形式	119
5.2.2	胶接连接设计的一般要求	120
5.2.3	搭接接头的极限承载力分析	122
第6章	复合材料结构设计基础	126
6.1	复合材料结构设计过程	126
6.2	材料设计	127
6.2.1	原材料的性能及其选择	127
6.2.2	复合材料成型工艺选择	144
6.2.3	复合材料的力学性能	145
6.2.4	层合板设计	145
6.3	结构设计	154
6.3.1	结构设计的一般原则	154
6.3.2	结构设计应考虑的工艺性要求	155
6.3.3	许用值与安全系数	156
6.3.4	典型结构件设计	159
6.3.5	复合材料结构形式的分类及其选择	165
第7章	复合材料贮罐设计	168
7.1	引言	168
7.1.1	复合材料贮罐的特点	168
7.1.2	复合材料贮罐的制造工艺方法	168
7.1.3	复合材料在贮罐中的应用形式	169
7.2	层合结构设计	169
7.2.1	贮罐罐壁的层合结构	170
7.2.2	层合结构设计	170
7.2.3	层合结构的厚度计算	174
7.3	卧式贮罐设计	175
7.3.1	鞍座设计	175
7.3.2	卧式贮罐受力分析	177
7.3.3	贮罐筒体强度设计与校核	181
7.3.4	封头设计	184
7.3.5	设计实例	186
7.4	立式贮罐设计	189
7.4.1	立式贮罐内力分析	189
7.4.2	立式贮罐的罐顶和罐底	190

7.4.3	立式贮罐支座	191
7.5	拼装式复合材料贮罐	193
7.6	贮罐的零部件设计	194
7.6.1	贮罐的开孔与补强	194
7.6.2	进出口管和人孔	197
7.7	复合材料贮罐的制造	198
7.7.1	原材料的选择	199
7.7.2	贮罐的制造	199
第 8 章	纤维缠绕内压力容器设计	202
8.1	概述	202
8.2	网络理论	203
8.3	纤维缠绕内压力容器筒身段的网络理论	203
8.3.1	单螺旋缠绕筒身段	203
8.3.2	双螺旋缠绕筒身段	205
8.4	纤维缠绕内压力容器封头段的网络理论	206
8.4.1	封头段的基本方程	206
8.4.2	等应力封头	208
8.4.3	平面缠绕封头	211
8.4.4	封头形式的选择及封头补强	212
8.5	纤维缠绕内压力容器设计实例	213
第 9 章	复合材料管道设计	217
9.1	概述	217
9.2	地上压力管道设计	220
9.2.1	管道壁厚的计算	220
9.2.2	管道跨度计算	221
9.3	地下埋设管道设计	222
9.3.1	地下管载荷计算	222
9.3.2	地下玻璃钢管的压力校核	223
9.3.3	地下玻璃钢管的弯曲强度和刚度校核	225
9.3.4	组合载荷	228
9.3.5	地下玻璃钢管的稳定性校核	229
9.3.6	地下玻璃钢管的轴向应力	229
9.3.7	设计计算实例	230
9.4	玻璃钢管的制造	233
9.5	复合材料管道连接	234
第 10 章	复合材料叶片设计	238
10.1	复合材料叶片的应用及特点	238
10.2	复合材料叶片的结构设计	239
10.2.1	复合材料叶片的外形	239
10.2.2	叶片纵剖面的结构形式	239

10.2.3	叶片横剖面的结构形式	239
10.2.4	铺层设计	240
10.2.5	叶根设计	242
10.3	复合材料叶片的强度和刚度计算	243
10.3.1	叶片的强度计算	243
10.3.2	叶片的刚度计算	245
10.4	复合材料叶片的工艺设计	245
10.4.1	原材料的选择	245
10.4.2	叶片成型模具	246
10.4.3	叶片成型工艺	246
10.5	复合材料叶片的试验工作	247
第 11 章	冷却塔设计	248
11.1	概述	248
11.2	冷却塔构造设计	251
11.2.1	空气分配装置	251
11.2.2	淋水填料	251
11.2.3	布水系统	252
11.2.4	收水器	252
11.2.5	通风设备	253
11.2.6	塔体	253
11.3	冷却塔热力计算	254
11.4	玻璃钢冷却塔塔体结构设计	256
11.4.1	上塔体薄膜应力的计算	256
11.4.2	下塔体计算	258
11.4.3	安全系数	259
11.5	玻璃钢冷却塔塔体成型工艺设计	260
11.5.1	模具制作	260
11.5.2	冷却塔塔体手糊成型工艺	262
附录 A	有关复合材料国家标准目录汇编	263
附录 B	玻璃钢管道、贮罐及容器常用标准目录汇编	266
	标准代号说明	268
	基本参考文献	269

第 1 章 绪 论

材料、能源、信息是当代科学技术的三大支柱。材料科学是当今世界的带头学科之一。复合材料是材料领域之中的后起之秀，它的出现带来了材料领域的重大变革，从而形成了金属材料、无机材料、高分子材料和复合材料多角共存的格局。

复合材料是指由两种或两种以上不同性能、不同形态的组分材料通过复合工艺组合而成的一类有用的多相材料。从复合材料的组成与结构分析，其中有一相是连续的称为基体相，另一相是分散的、被基体包容的称为增强相。增强相与基体相之间有一个交界面称为复合材料界面。通过在微观结构层次上的深入研究，发现复合材料界面附近的增强相和基体相由于在复合时复杂的物理和化学的原因，变得具有既不同于基体相又不同于增强相组分本体的复杂结构，同时发现这一结构和形态会对复合材料的宏观性能产生影响，所以界面附近这一个结构与性能发生变化的微区也可作为复合材料的一相，称为界面相。因此确切地说，复合材料是由基体相、增强相和界面相三者组成的。

对复合材料给出的比较全面完整的定义如下：复合材料是由有机高分子、无机非金属或金属等几类不同材料通过复合工艺组合而成的新型材料，它既能保留原组分材料的主要特色，又通过复合效应获得原组分所不具备的性能；可以通过材料设计使各组分的性能互相补充并彼此关联，从而获得新的优越性能，故与一般材料的简单混合有本质的区别。

博采众长的复合材料代表了材料的发展方向。不少专家认为，当前人类已从合成材料时代进入复合材料时代，这种提法是有一定的科学根据的。因为想要合成一种新材料使之满足各种高要求的综合指标是非常困难的。同时即使研制出来某一种满意的材料，则从实验室到生产的周期也非常长。但是如果把现有的材料复合起来则有可能容易达到要求。另外，复合材料是各向异性材料，对于结构使用而言，完全可按实际受力的情况来设计增强纤维的排布方式，从而节约了材料，这是一般各向同性材料所不能达到的。并且复合材料的性能非常优越。基于以上情况，复合材料得到世界发达国家的重视，都把复合材料选定为优先发展的新材料领域之一，足以说明复合材料的重要性。

1.1 复合材料的命名及分类

根据复合材料的定义，其命名以“相”为基础，即将增强相（或分散相）材料放在前，基体相（或连续相）材料放在后，最后缀以“复合材料”。如由碳纤维和环氧树脂构成的复合材料称为“碳纤维环氧复合材料”。通常为了书写简便，在增强相材料与基体相材料之间划一半字线（或斜线），再加“复合材料”。如上面的碳纤维环氧复合材料可写作“碳纤维-环氧复合材料”，更简化一点可写成“碳-环氧”或“碳/环氧”。

按照不同的标准和要求，复合材料通常有以下几种分类法。

(1) 按使用性能不同，复合材料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除力学性能以外的特殊功能，例如摩阻复合材料，隐身吸波复合材料，多功能（如耐热、透波、承载）复合材料，高性能耐热复合材料，阻尼复合材料，压电复合材料，磁性复合材料，导电复合材料，生物功能复合材料等。

利用复合材料的各种良好力学性能用于制造结构的材料，称为结构复合材料，它主要由基体材料和增强材料两种组分组成。其中增强材料主要提供复合材料的刚度和强度，基本控制其力学性能；基体材料固定和保护增强纤维，传递纤维间载荷，并可改善复合材料的某些性能。本书主要介绍结构复合材料。

(2) 按基体材料类型可分为树脂基复合材料，金属基复合材料，无机非金属基复合材料，见图 1-1 所示。

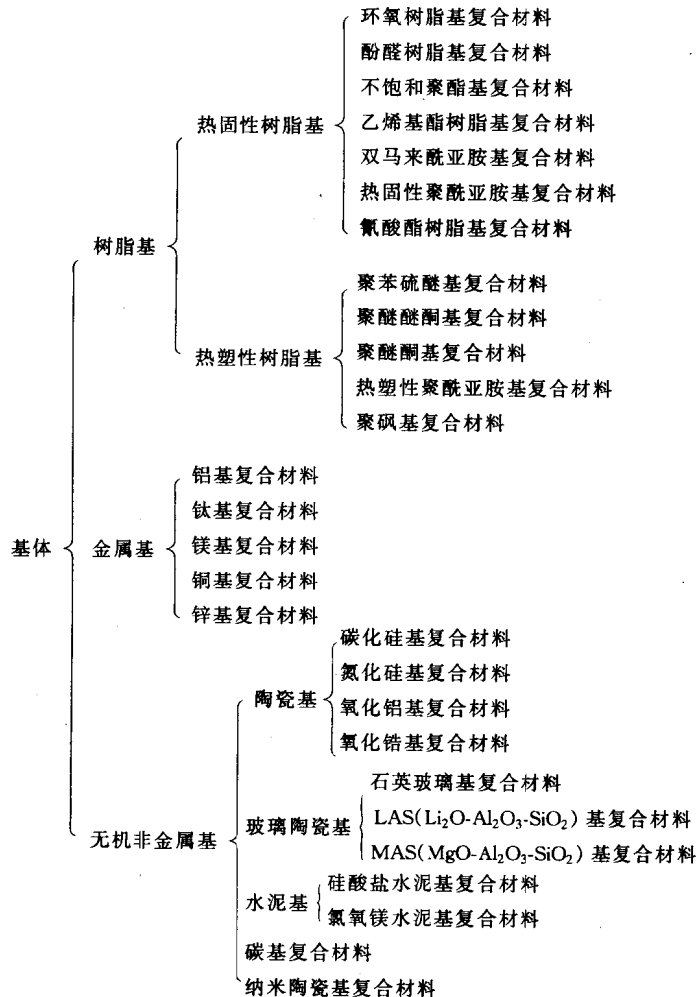


图 1-1 按基体材料分类的复合材料

(3) 按分散相的形态可分为连续纤维增强复合材料，纤维织物增强复合材料，片状材料增强复合材料，短纤维或晶须增强复合材料，颗粒增强复合材料。

(4) 按增强纤维类型可分为碳纤维复合材料，玻璃纤维复合材料，芳纶纤维复合材料，超高分子量聚乙烯纤维复合材料，硼纤维复合材料，陶瓷纤维复合材料等。

本书研究的主要对象为连续纤维增强复合材料构成的结构，基体为树脂，这类复合材料简称为纤维增强塑料 (FRP)。本书中所提及的复合材料，如未另加注明，均指这类纤维增强塑料，且为层合结构。