

“十二五”上海重点图书

● 编著 王耀先

复合材料力学 与结构设计

Mechanics and Structural
Design of Composite Materials



华东理工大学出版社
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

“十二五”上海重点图书

复合材料力学与结构设计

王耀先 编著

 华东理工大学出版社
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

·上海·

图书在版编目(CIP)数据

复合材料力学与结构设计 / 王耀先编著. —上海:华东理工大学出版社,2012.9
ISBN 978-7-5628-3362-8

I. ①复… II. ①王… III. ①复合材料力学-高等学校-教材 ②复合材料-结构设计-高等学校-教材 IV. ①TB33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 191850 号

“十二五”上海重点图书

复合材料力学与结构设计

编 著 / 王耀先

责任编辑 / 马夫娇

责任校对 / 金慧娟

封面设计 / 裘幼华

出版发行 / 华东理工大学出版社有限公司

地 址:上海市梅陇路 130 号,200237

电 话:(021)64250306(营销部)

(021)64251137(编辑室)

传 真:(021)64252707

网 址:press.ecust.edu.cn

印 刷 / 常熟新骅印刷有限公司

开 本 / 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 / 24

字 数 / 594 千字

版 次 / 2012 年 9 月第 1 版

印 次 / 2012 年 9 月第 1 次

书 号 / ISBN 978-7-5628-3362-8

定 价 / 58.00 元

联系我们:电子邮箱 press@ecust.edu.cn

官方微博 e.weibo.com/ecustpress

前 言

新材料产业是重要的战略性新兴产业。复合化是当代新材料发展的一个重要方向。现在想要合成一种新材料使之完全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，则从实验室到工业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比较容易达到要求。复合材料性能优越、可设计性好，可按实际受力情况进行铺层设计，既节约了材料，又易于满足某些需求的综合指标，这是一般各向同性材料所不能达到的，所以得到迅速发展和广泛应用。复合材料受到世界各国的高度重视，被选定为优先发展的新材料之一。

本教材是在参考 1991 年华东化工学院出版社《复合材料结构设计》和 2001 年化学工业出版社《复合材料结构设计》的基础上，根据这些年来复合材料结构设计的发展以及专业教学的实际需要，同时参阅了大量的国内外有关文献资料和最新科研成果，并结合作者长期从事教学、科研和设计的实践经验新编了本书。全书共 4 篇 11 章，第 1 篇为复合材料导论，第 2 篇为复合材料力学，第 3 篇为复合材料结构设计基础，第 4 篇为复合材料典型产品设计。各章节具有相对独立性，便于各院校根据具体情况取舍，适用于宽口径的教学需要。本书注重实用性、先进性、科学性，有利于推进素质教育，培养学生创新意识及自学能力，可作为高等院校材料类专业或相关专业的教材，也可供复合材料行业的工程技术人员参考。该书的基本特点如下。

(1) 注重创新能力的训练和培养，重点阐明经典的基本原理、设计思想以及分析问题与解决问题的方法。使教材在奠定基础、注重经典、把握方法的同时加大开放性、探索性和拓展性的功能。

(2) 注重科学性和先进性。在保持核心内容与关键方法的同时，书中编纂了比较成熟且能反映本课程发展前沿的内容，介绍了国内外最新科研成就和发展方向，还融入了编者的理论研究成果和设计经验，各章均有其独特之处并能自成体系，做到既有比较完整的理论基础，又力求内容稳定、简洁实用。

(3) 强调理论联系实际和工程设计能力的训练，重视实践能力的培养。在介绍结构设计理论时，从工程设计角度出发，按照最新的先进标准，较详细地介绍了几类典型复合材料产品的设计和制造；同时还编写了较多的例题、习题、思考题和图表，便于阅读和练习。

(4) 内容由浅入深、循序渐进、思路清晰，系统性较强，易于自学。在叙述时从学生已掌握的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各向异性复合材料结构的分析与设计；力求力学、设计、材料及其制备的紧密结合。

本书的编写得到了华东理工大学优秀教材出版基金的资助，得到材料科学与工程学院领导的关心。最后，要感谢华东理工大学出版社的辛勤工作，使得新教材以更优秀的面目问世。

由于作者水平有限，书中疏漏和不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

王耀先

2012 年 3 月于华东理工大学

主要符号说明

A	横截面面积、积分常数、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, E_f, E_m	复合材料、纤维、基体的弹性模量
E_x, E_y	x, y 方向上的弹性模量
e	单层的湿热膨胀应变、端距
F	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_i, F_{ij}	应力空间中的强度参数
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、风量
G_{12}	单层板的面内剪切弹性模量
G_i, G_{ij}	应变空间中的强度参数
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、熔
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_c, M_f, M_m	复合材料质量、纤维质量、基体质量
m	铺层角的余弦函数、单层组数
m_c, m_f, m_m	复合材料、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_{FFR}^*	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	功率
p	压力、分布力、外力、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
$[Q]$	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、湿度、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_{Ω}	正轴模量的线性组合 ($i=1,2,3,4,5$)
U_S	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_c	复合材料体积、芯材的体积含量
V_f, V_m, V_v	纤维、基体、空隙体积
V_r, V_p	增强层、颗粒的体积含量
u_c, u_f, u_m, u_v	复合材料、纤维、基体、空隙体积含量
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



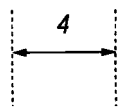
$\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}$	单层偏轴应变的 3 个分量
$\epsilon_x^0, \epsilon_y^0, \gamma_{xy}^0$	层合板中面应变的 3 个分量
η	耦合系数、应力分配参数、内力比
θ	铺层角、角度、周向坐标、干球温度
θ_0	相位角
λ	比值、拉格朗日乘子、压杆柔度、厚度比、气水比
ν	泊松比
ν_c	复合材料的泊松比
ν_1, ν_2	纵向泊松比和横向泊松比
ξ	无量纲化坐标、纤维增强作用系数、函数
ρ	密度、曲率半径
ρ_f, ρ_m	纤维和基体密度
σ	正应力
$[\sigma]$	许用正应力
$\sigma_1, \sigma_2, \tau_{12}$	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

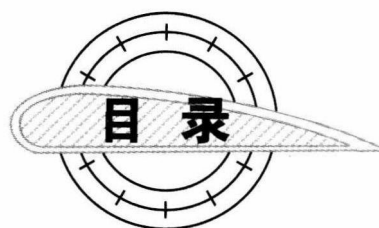
顶标符号

—	偏轴, 平均
---	--------

内容简介

全书共四篇 11 章,从复合材料导论、复合材料力学、复合材料结构设计基础以及复合材料典型产品设计等四个方面系统介绍了复合材料力学与结构设计。主要包括:复合材料的构造、特性、应用及发展;单层板的宏观力学分析,层合板的宏观力学分析,单层板的细观力学分析;复合材料连接分析与设计,复合材料结构设计基础;纤维缠绕压力容器设计,复合材料贮罐设计,复合材料管道设计,复合材料叶片设计和复合材料冷却塔设计等。

本书既可作为高等院校材料专业及相关专业的教材,又可供复合材料行业从事研究、设计、生产与应用部门的工程技术人员参考。



第 1 篇 复合材料导论

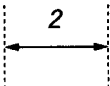
第 1 章 复合材料的构造、特性、应用及发展	3
1.1 引言	3
1.2 复合材料的分类	4
1.3 复合材料的构造与特性	6
1.4 复合材料的优点和缺点	8
1.4.1 复合材料的优点	8
1.4.2 复合材料的缺点	10
1.5 复合材料的应用	11
1.6 复合材料的发展	16
思考题与习题	20

第 2 篇 复合材料力学

第 2 章 单层板的宏观力学分析	25
2.1 单层板的正轴刚度	25
2.2 单层板的偏轴刚度	34
2.2.1 应力转换和应变转换	34
2.2.2 单层板的偏轴模量	38
2.2.3 单层板的偏轴柔量	42
2.2.4 单层板的偏轴工程弹性常数	44
2.3 单层板的强度	50
2.3.1 正交各向异性单层板的基本强度	50
2.3.2 最大应力强度准则和最大应变强度准则	51
2.3.3 蔡-希尔(Tsai-Hill)强度准则	53
2.3.4 霍夫曼(Hoffman)强度准则	53
2.3.5 蔡-吴(Tsai-Wu)张量准则	53
2.3.6 单层板强度的计算方法	57
2.4 单层板的三维应力-应变关系	62



2.4.1	各向异性线弹性材料的应力-应变关系	62
2.4.2	单对称材料的应力-应变关系	63
2.4.3	正交各向异性单层的应力-应变关系	63
2.4.4	横观各向同性单层的应力-应变关系	64
2.4.5	正交各向异性单层的三维工程弹性常数	65
2.4.6	与平面应力状态的关系	66
	思考题与习题	67
第3章	层合板的宏观力学分析	69
3.1	引言	69
3.2	对称层合板的面内刚度	72
3.2.1	面内力-面内应变的关系	72
3.2.2	对称层合板的面内工程弹性常数	74
3.2.3	面内刚度系数的计算	75
3.2.4	几种典型对称层合板的面内刚度	76
3.3	一般层合板的刚度	84
3.3.1	经典层合板理论	84
3.3.2	对称层合板的弯曲刚度系数计算	91
3.3.3	一般层合板的刚度系数计算	94
3.3.4	几种典型层合板的刚度	96
3.3.5	平行移轴定理	102
3.4	层合板的强度	103
3.4.1	层合板各单层的应力计算与强度校核	103
3.4.2	层合板的强度	106
3.5	层合板的湿热效应	109
3.5.1	单层板的湿热变形	109
3.5.2	考虑湿热应变的单层板应力与应变关系	110
3.5.3	考虑湿热应变的层合板内力与应变关系	111
3.5.4	层合板的湿热应变	111
3.5.5	层合板的残余应变和残余应力	112
3.5.6	考虑残余应力的层合板强度计算	113
	思考题与习题	113
第4章	单层板的细观力学分析	115
4.1	引言	115
4.2	复合材料的密度和组分材料的含量	116
4.3	单向连续纤维增强复合材料弹性常数的预测	118
4.3.1	串联模型的弹性常数	118
4.3.2	并联模型的弹性常数	121





4.3.3	植村-山胁的经验公式	122
4.3.4	组合模型的弹性常数	123
4.3.5	哈尔平-蔡(Halpin-Tsai)方程	126
4.3.6	蔡-韩(Tsai-Hahn)的修正公式	127
4.4	单向连续纤维增强复合材料基本强度的预测	129
4.4.1	纵向拉伸强度 X_L	129
4.4.2	纵向压缩强度 X_C	131
4.5	正交织物复合材料弹性常数和基本强度的预测	133
4.5.1	正交织物复合材料的弹性常数	134
4.5.2	正交织物复合材料的基本强度	135
4.6	短纤维增强复合材料的细观力学分析	135
4.6.1	应力传递理论	136
4.6.2	单向短纤维增强复合材料的弹性常数和强度	139
4.6.3	平面随机取向短纤维增强复合材料的弹性常数和强度	140
4.6.4	空间随机取向短纤维增强复合材料的弹性常数和强度	140
4.6.5	短切纤维毡增强复合材料的弹性常数和强度	140
4.7	颗粒增强复合材料的弹性常数和强度	141
4.8	湿热膨胀系数的细观力学分析	141
4.8.1	纵向热膨胀系数 α_1	141
4.8.2	横向热膨胀系数 α_2	143
4.8.3	纵向湿膨胀系数 β_1	144
4.8.4	横向湿膨胀系数 β_2	145
	思考题与习题	145

第3篇 复合材料结构设计基础

第5章	复合材料连接分析与设计	149
5.1	复合材料连接特点	149
5.2	胶接连接设计	150
5.2.1	胶接连接的破坏形式	150
5.2.2	胶接连接设计基础	151
5.2.3	搭接接头的极限承载力分析	153
5.3	机械连接设计	157
5.3.1	机械连接的破坏形式	157
5.3.2	机械连接设计基础	158
5.3.3	机械连接强度校核	162
5.3.4	机械连接设计和强度校核举例	163
	思考题与习题	166

第 6 章 复合材料结构设计基础	167
6.1 复合材料结构设计过程	167
6.2 原材料的性能及其选择	169
6.2.1 选材的基本原则	169
6.2.2 增强材料的种类	170
6.2.3 增强材料的选择	185
6.2.4 树脂基体	186
6.2.5 耐腐蚀复合材料的树脂基体	190
6.2.6 树脂基体的选择	194
6.3 复合材料成型工艺选择	197
6.4 复合材料层合板的力学性能	200
6.5 层合板设计	200
6.5.1 层合板设计的一般原则	201
6.5.2 等代设计法	204
6.5.3 准网络设计法	204
6.5.4 层合板排序设计法	206
6.5.5 毯式曲线设计法	207
6.5.6 层合板优化设计法	209
6.6 结构设计	211
6.6.1 结构设计的一般原则	211
6.6.2 结构设计应考虑的工艺性要求	212
6.6.3 许用值的确定	212
6.6.4 安全系数的确定	214
6.7 典型结构件设计	216
6.7.1 承拉杆件	216
6.7.2 承压杆件	216
6.7.3 承扭杆件	218
6.7.4 承弯杆件	218
6.7.5 板状构件	222
6.7.6 壳状构件	223
6.8 复合材料结构形式的分类及其选择	223
思考题与习题	225

第 4 篇 复合材料典型产品设计

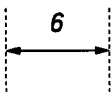
第 7 章 纤维缠绕压力容器设计	229
7.1 引言	229
7.2 网络理论	230
7.3 纤维缠绕内压力容器筒身段的网络理论	231



7.3.1	单螺旋缠绕筒身段	231
7.3.2	双螺旋缠绕筒身段	233
7.4	纤维缠绕内压力容器封头段的网络理论	235
7.4.1	封头段的基本方程	235
7.4.2	等应力封头	238
7.4.3	平面缠绕封头	240
7.4.4	封头形式的选择与封头补强	242
7.5	纤维缠绕内压力容器设计实例	244
	思考题与习题	247
第8章	复合材料贮罐设计	249
8.1	引言	249
8.2	层合结构设计	251
8.2.1	贮罐罐壁的层合结构	251
8.2.2	单位载荷设计法	252
8.2.3	强度设计与铺层设计同时进行法	255
8.2.4	层合结构的厚度计算	256
8.3	卧式复合材料贮罐的结构设计与计算	257
8.3.1	鞍座设计	257
8.3.2	卧式贮罐受力分析	259
8.3.3	贮罐筒体强度设计与校核	263
8.3.4	封头设计	266
8.3.5	设计实例	269
8.4	立式复合材料贮罐的结构设计与计算	272
8.4.1	立式贮罐内力分析	272
8.4.2	立式贮罐的顶盖和罐底设计	273
8.4.3	立式贮罐支座设计	274
8.5	拼装式复合材料贮罐	276
8.6	复合材料贮罐的零部件设计	278
8.6.1	贮罐的开孔与补强	278
8.6.2	贮罐进出口管和人孔	278
8.7	复合材料贮罐的制造	280
8.7.1	原材料的选择	281
8.7.2	贮罐的制造	282
	思考题与习题	284
第9章	复合材料管道设计	285
9.1	引言	285
9.2	架空管的设计	287



9.2.1	管道壁厚的计算	287
9.2.2	管道跨度计算	288
9.3	地下埋设管的设计	290
9.3.1	地下管载荷计算	290
9.3.2	地下复合材料管的压力校核	292
9.3.3	地下复合材料管的弯曲强度和刚度校核	293
9.3.4	组合载荷	296
9.3.5	地下复合材料管的稳定性校核	297
9.3.6	地下复合材料管的轴向应力	298
9.3.7	设计计算实例	298
9.4	复合材料管的制造	301
9.4.1	不同制管工艺的比较	301
9.4.2	缠绕工艺制造定长管	303
9.5	复合材料管道连接	305
	思考题与习题	308
第 10 章	复合材料叶片设计	309
10.1	引言	309
10.2	复合材料叶片结构设计	311
10.2.1	叶片的气动设计	311
10.2.2	叶片纵剖面的结构形式	312
10.2.3	叶片横剖面的结构形式	312
10.2.4	铺层设计	313
10.2.5	叶根设计	316
10.3	复合材料叶片的强度、刚度和频率计算	317
10.3.1	叶片的强度计算	318
10.3.2	叶片的刚度计算	321
10.3.3	叶片的频率计算	321
10.4	复合材料叶片的工艺设计	322
10.4.1	原材料的选择	322
10.4.2	叶片成型模具	324
10.4.3	叶片成型工艺	325
10.5	复合材料叶片的试验工作	329
	思考题与习题	330
第 11 章	复合材料冷却塔设计	331
11.1	引言	331
11.2	冷却塔构造设计	335
11.2.1	空气分配装置	335





11.2.2	淋水填料	335
11.2.3	布水系统	336
11.2.4	收水器	337
11.2.5	风机	337
11.2.6	减速机	338
11.2.7	塔体	338
11.2.8	降低噪声	339
11.3	冷却塔热力计算	340
11.4	玻璃钢冷却塔塔体结构设计	343
11.4.1	上塔体薄膜应力的计算	343
11.4.2	下塔体计算	345
11.4.3	安全系数	346
11.5	玻璃钢冷却塔塔体成型工艺设计	346
11.5.1	模具制作	346
11.5.2	冷却塔塔体手糊成型工艺	348
11.6	冷却塔的选型与使用	349
	思考题与习题	350
附录 A	复合材料国家标准目录汇编	351
附录 B	复合材料管道、贮罐及容器常用标准目录汇编	355
	参考文献	359