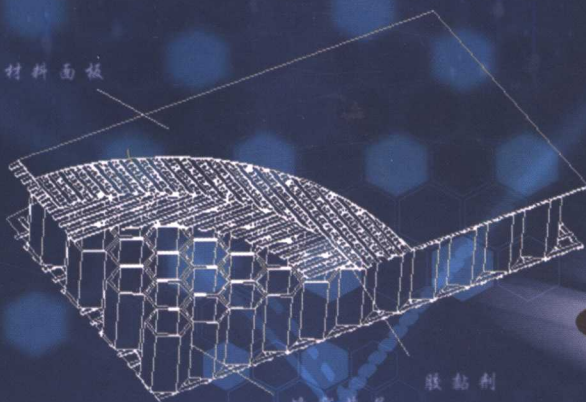


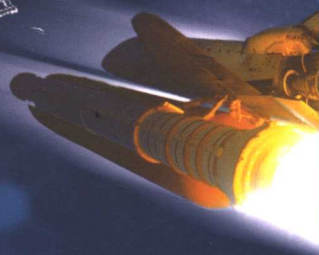


复合材料面板



胶黏剂

蜂窝芯子



国家“十一五”出版规划重点图书
空间飞行器设计专业系列教材
航天一线专家学术专著

复合材料的力学分析

MECHANICAL ANALYSIS FOR COMPOSITE MATERIALS



陈烈民 杨宝宁 编著

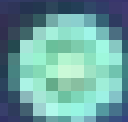


中国科学技术出版社



【力学】力学分析

MECHANICAL ANALYSIS OF MECHANISMS



第1版 1994年 1994
ISBN 7-111-01111-1

- 国家“十一五”出版规划重点图书
- 空间飞行器设计专业系列教材
- 航天一线专家学术专著

复合材料的力学分析

MECHANICAL ANALYSIS FOR
COMPOSITE MATERIALS

陈烈民 杨宝宁 编著

中国科学技术出版社

·北 京·

图书在版编目(CIP)数据

复合材料的力学分析/陈烈民,杨宝宁编著,—北京:中国科学技术出版社,2006.9

(空间飞行器设计专业系列教材)

ISBN 7-5046-4387-4

I. 复... II. ①陈...②杨... III. 复合材料力学-高等学校-教材 IV. TB330.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 063124 号

自 2006 年 4 月起本社图书封面均贴有防伪标志,未贴防伪标志的为盗版图书。

中国科学技术出版社出版

北京市海淀区中关村南大街 16 号 邮政编码:100081

电话:010-62103208 传真:010-62183872

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

科学普及出版社发行部发行

北京国防印刷厂印刷

*

开本:787 毫米×960 毫米 1/16 印张:22.25 字数:500 千字

2006 年 9 月第 1 版 2006 年 9 月第 1 次印刷

印数:1—1500 册 定价:42.00 元

(凡购买本社的图书,如有缺页、倒页、
脱页者,本社发行部负责调换)

内 容 提 要

本书较全面阐明了复合材料及其结构的力学分析,重点阐明其概念、原理和基本分析方法,为从事相关专业的研究生和研究人员提供理论基础和分析方法。

第1章为绪论,简单说明复合材料的概念、性能特征、工程应用及其力学分析要点。

第2章到第5章为复合材料力学的理论分析,除了对复合材料的微观力学分析作一般性的介绍外,重点讨论了具有实用意义的复合材料的宏观力学性能分析,包括弹性特性、热弹性特性和强度特性的分析。另外,第6章专门介绍了复合材料力学分析软件的应用。

第7章到第9章为复合材料结构力学的理论分析,包括复合材料板、壳和薄壁杆件等结构件力学分析的基本理论和方法。其中除了一般的复合材料板、壳理论外,还包括了以复合材料作面板的夹层板的理论分析内容。第10章专门说明了复合材料结构力学的数值分析方法。

作者简介

陈烈民 1936年生,研究员,先后毕业于上海交通大学机械系和清华大学附设工程力学研究生班。1958年起先后从事机械设计、力学研究、航天器结构试验、航天器结构设计和分析以及航天器机构设计等工作。

杨宝宁 1975年生,工程师,1999年西北工业大学工程力学系硕士研究生毕业,主要从事航天器结构设计和分析工作。

责任编辑 崔 玲

封面设计 莱 瑞

责任校对 刘红岩

责任印制 王 沛

总 序

我国航天技术走过了 40 多年的光荣历程,正面临着 21 世纪更加蓬勃发展的形势,需要人才,需要知识。

空间飞行器即航天器,包括卫星、飞船、空间站、深空探测器等等。空间飞行器设计专业是航天技术领域的一门主要学科,它所涵盖的知识面很宽,涉及光、机、电、热和系统工程等,是一门多学科交叉综合和工程性很强的新型学科。

本丛书是根据空间飞行器设计专业培养研究生的课程教学需求,同时考虑到空间技术领域的在职中、高级技术人员研究生水平进修的需要而编写的。因此,本丛书全面讲授空间飞行器设计专业领域的基础理论和系统的专门知识,在内容上具有足够的纵深度和宽广度、前沿性和前瞻性。

本丛书的作者都是从事了几十年航天工程的高级设计师和研究员,他们把自己丰富的知识和经验很好地融入到这套丛书中,理论与实践密切结合,使本丛书具有很高的学术水平和工程实用价值。

本丛书将陆续出版。它的出版是非常值得祝贺的,相信它不仅是一套不错的研究生教材,能够为培养高级航天技术人才服务;同时又是一套优秀的学术专著,将对我国航天科学与技术的发展做出贡献。

阎桂荣

2001 年 9 月

前 言

复合材料具有许多优异性能,尤其是非常适合在航天器结构上使用。随着航天器设计要求的不断提高,以及复合材料及其工艺技术的发展和成熟,目前复合材料已逐步成为航天器结构的主要材料,如航天器的主承载结构、太阳能电池阵结构、天线结构及其他有关部件均广泛采用了复合材料。

与常规的金属材料相比,复合材料最大的特点是它的力学性能不仅“复杂”而且“多变”。因此,为了正确设计、制造和使用复合材料,充分了解和掌握复合材料的特殊力学性能和分析方法,已成为对从事航天器结构设计人员和有关专业人员的首要要求。

对于复合材料的力学分析,目前可以分成三个层次来进行:以纤维和基体材料为基础来分析单层复合材料力学性能的微观力学;以单层复合材料为基础来分析叠层复合材料力学性能的宏观力学;以及以叠层复合材料为基础来分析复合材料结构力学性能的结构力学。前两个层次的分析一般合称为“复合材料力学”,第三层次的分析一般称为“复合材料结构力学”。本书包括了上述三个层次分析的基本内容,即复合材料力学和复合材料结构力学的基本内容。

作者曾编写了《复合材料力学和复合材料结构力学》(中国科学技术出版社,2001年10月出版),作为中国空间技术研究院飞行器设计专业研究生的教材。经过几年的教学实践,取得了一定经验,但也发现一些不足。本书是在原教材的基础上改编而成,对原教材进行了较全面的修改和补充:

增加了复合材料力学分析软件和复合材料结构力学数值分析方法的介绍;补充了相关的复合材料性能、工程应用和力学知识;删去了与本书主题关系不大的复合材料结构优化设计部分;完善了有关理论和公式的解释和推导。

本书的编写目的主要是作为中国空间技术研究院飞行器设计专业研究生的教材,但对于从事航天器和其他各类飞行器结构设计和研究的工作人员,以及从事与复合材料有关的其他人员,均有一定参考价值。

作 者

2006年7月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 复合材料的基本概念	1
1.1.1 复合材料的组成	1
1.1.2 复合材料的构造	2
1.2 复合材料的性能	2
1.2.1 增强材料和基体材料的性能	3
1.2.2 单向复合材料的性能	5
1.3 复合材料在航天器上的应用	6
1.3.1 对航天器结构材料的要求	6
1.3.2 复合材料性能的优越性	8
1.3.3 航天器结构中的应用实例	9
1.4 复合材料的力学分析	12
1.4.1 复合材料的力学分析模型	12
1.4.2 复合材料的力学分析方法	15
1.4.3 复合材料力学分析的意义	17
1.5 复合材料力学分析的预备知识	18
1.5.1 固体力学的简单介绍	18
1.5.2 弹性力学的简单说明	20
参考文献	24
第 2 章 单向复合材料性能的微观力学分析和试验确定	26
2.1 单向复合材料的弹性系数分析	26
2.1.1 体积平均应力和体积平均应变的意义	26
2.1.2 单向复合材料弹性系数的基本概念和一般分析方法	30
2.1.3 简单的材料力学计算方法	32
2.1.4 改进的材料力学计算方法	39
2.1.5 弹性力学的解析方法	42
2.1.6 弹性力学能量原理的分析方法	48
2.1.7 半经验公式	50

2.2 单向复合材料的热膨胀系数分析	52
2.2.1 单向复合材料热膨胀系数的基本概念和一般分析方法	52
2.2.2 简单的材料力学计算方法	54
2.2.3 改进的材料力学计算方法	56
2.2.4 弹性力学的解析方法	57
2.3 单向复合材料的强度分析	59
2.3.1 单向复合材料强度的基本概念和一般分析方法	59
2.3.2 纵向拉伸强度的分析	61
2.3.3 纵向压缩强度的分析	62
2.3.4 横向强度和剪切强度的分析	66
2.4 单向复合材料性能的试验测定	68
2.4.1 拉伸试验	68
2.4.2 压缩试验	70
2.4.3 剪切试验	71
2.4.4 弯曲试验	74
2.4.5 热膨胀试验	75
参考文献	76
第3章 复合材料弹性特性的宏观力学分析	78
3.1 各向异性材料的弹性特性	78
3.1.1 一般各向异性材料的弹性系数	78
3.1.2 几种特殊情形下的材料弹性系数	80
3.2 单层复合材料的弹性特性	88
3.2.1 材料主轴方向的弹性特性	88
3.2.2 材料偏轴方向的弹性特性	91
3.3 叠层复合材料的弹性特性	98
3.3.1 叠层复合材料的一般弹性特性	98
3.3.2 几种常用叠层复合材料的弹性特性	104
参考文献	109
第4章 复合材料热弹性特性的宏观力学分析	110
4.1 单层复合材料的热膨胀系数	110
4.1.1 材料主轴方向的热膨胀系数	110
4.1.2 材料偏轴方向的热膨胀系数	111
4.2 叠层复合材料的热弹性特性	112

4.2.1	温度内力和温度内力矩	112
4.2.2	叠层材料的热弹性特性	113
4.3	叠层复合材料的热膨胀系数	114
4.3.1	叠层复合材料中面的热膨胀系数	114
4.3.2	叠层复合材料厚度方向的热膨胀系数	116
4.4	叠层复合材料的“零热膨胀系数”设计	117
4.4.1	全方向“零热膨胀系数”的设计	117
4.4.2	单方向“零热膨胀系数”的设计	119
4.5	叠层复合材料的残余应力分析	120
4.5.1	微观残余应力的分析	121
4.5.2	宏观残余应力的分析	122
	参考文献	123
第 5 章	复合材料强度特性的宏观力学分析	125
5.1	单层复合材料的宏观强度准则	125
5.1.1	宏观强度准则的基本概念	125
5.1.2	几种常见的宏观强度准则	127
5.2	叠层复合材料的强度分析	134
5.2.1	叠层复合材料强度的基本概念	134
5.2.2	叠层复合材料首层破坏强度的确定	136
5.2.3	叠层复合材料末层破坏强度的确定	138
5.3	叠层复合材料的层间应力和层间强度	148
5.3.1	叠层复合材料的层间应力分析	148
5.3.2	叠层复合材料的层间强度	150
	参考文献	152
第 6 章	复合材料力学分析软件的应用	155
6.1	复合材料力学分析软件	155
6.1.1	应用复合材料分析软件的优点	155
6.1.2	ESAComp 软件简介	156
6.2	弹性特性和热膨胀系数的分析	158
6.2.1	弹性特性和热膨胀系数的微观力学分析	158
6.2.2	弹性特性的宏观力学分析	161
6.2.3	热膨胀系数的宏观力学分析	166
6.3	强度特性的分析	168

6.3.1 叠层复合材料强度校核	168
6.3.2 叠层复合材料强度的确定	170
6.3.3 叠层复合材料的层间强度分析	172
参考文献	174
第7章 复合材料叠层板的分析	175
7.1 对称叠层板经典理论的分析	176
7.1.1 基本方程和边界条件的建立	176
7.1.2 叠层板挠度的求解	183
7.1.3 叠层板临界载荷的求解	188
7.1.4 叠层板固有频率的求解	190
7.2 不对称叠层板经典理论的分析	192
7.2.1 基本方程和边界条件的建立	192
7.2.2 叠层板挠度的求解	199
7.2.3 叠层板临界载荷的求解	203
7.2.4 叠层板固有频率的求解	205
7.3 叠层板剪切理论的分析	206
7.3.1 基本方程和边界条件的建立	206
7.3.2 叠层板剪切理论的解析解	212
7.3.3 叠层板剪切修正系数的确定	214
7.4 以复合材料作面板的夹层板理论的分析	217
7.4.1 假设面板为薄膜理论的分析	218
7.4.2 考虑面板弯曲和耦合刚度理论的分析	223
7.4.3 考虑芯子横向拉压刚度理论的分析	233
参考文献	238
第8章 复合材料叠层壳的分析	241
8.1 任意形状叠层壳经典理论的分析	241
8.1.1 任意形状叠层壳的一般经典理论	241
8.1.2 任意形状叠层壳的近似经典理论	247
8.2 圆柱叠层壳经典理论的分析	255
8.2.1 圆柱叠层壳经典理论的基本方程和边界条件	255
8.2.2 圆柱叠层壳经典理论的求解	257
8.3 圆柱叠层壳剪切理论的分析	260
8.3.1 圆柱叠层壳剪切理论的基本方程和求解	260

8.3.2 考虑横向法应变的圆柱叠层壳剪切理论·····	263
8.4 纤维缠绕内压容器的强度分析·····	267
8.4.1 等强度设计条件的分析·····	267
8.4.2 等强度设计条件的应用·····	270
参考文献·····	273
第9章 复合材料薄壁杆件的分析 ·····	276
9.1 复合材料薄壁杆件分析的理论基础·····	276
9.1.1 复合材料薄壁杆件分析的依据·····	276
9.1.2 复合材料柱形薄壳理论的基本关系式·····	277
9.1.3 从复合材料壳体理论简化到复合材料薄壁杆件理论·····	280
9.2 复合材料薄壁杆件的自由扭转分析·····	284
9.2.1 薄壁杆件的扭矩·····	284
9.2.2 复合材料开口薄壁杆件的自由扭转分析·····	285
9.2.3 复合材料闭口薄壁杆件的自由扭转分析·····	287
9.3 开口截面复合材料薄壁杆件的一般分析·····	290
9.3.1 基本假设·····	290
9.3.2 广义内力、广义应变和广义截面刚度系数·····	291
9.3.3 基本方程和边界条件·····	295
9.4 闭口截面复合材料薄壁杆件的一般分析·····	300
9.4.1 基本假设·····	300
9.4.2 广义内力、广义应变和广义截面刚度系数·····	301
9.4.3 基本方程和边界条件·····	304
9.5 剪切修正系数和截面坐标参数的确定·····	307
9.5.1 剪切修正系数的确定·····	307
9.5.2 截面坐标参数的确定·····	310
参考文献·····	314
第10章 复合材料结构力学的数值分析方法 ·····	316
10.1 有限元法简介·····	316
10.1.1 有限元法的基本概念·····	316
10.1.2 有限元法的分析过程·····	317
10.1.3 复合材料有限元单元的表达格式·····	319
10.2 数值分析方法的应用·····	325
10.2.1 数值分析方法的重要意义·····	325

6 复合材料的力学分析

10.2.2	数值分析模型的建立·····	326
10.3	复合材料结构的数值分析算例·····	329
10.3.1	叠层板算例·····	330
10.3.2	夹层板算例·····	333
10.3.3	叠层圆柱壳算例·····	335
10.3.4	实际工程结构算例·····	338
	参考文献·····	342

第1章 绪 论

1.1 复合材料的基本概念

1.1.1 复合材料的组成

广义地说,复合材料是指由两种或两种以上单一材料用物理或化学的方法、经人工复合成的一种多相固体材料。复合材料保留组分材料的主要优点,克服或减少组分材料的缺点,还可以产生组分材料所没有的一些优异性能。因此,它们作为一类新型材料,已得到了广泛的应用和发展。

作为工程应用的复合材料,主要由两种组分材料构成:一种是增强材料,一种是基体材料。增强材料决定了复合材料的基本性能;基体材料起着支承增强材料、保持材料形状、传递增强材料之间载荷等作用。

在航天领域(包括各类航天器和火箭、导弹)应用的工程复合材料,根据其应用特点可以分成两类:

(1) 结构复合材料。它是航天领域中首先应用的复合材料。其作用是作为各种航天器和火箭导弹的结构材料,用于承受和传递载荷,保证结构所需的强度和刚度,以及安装和保护航天器和火箭导弹上的各种设备。

(2) 功能复合材料。它是目前日益得到重视和发展的新型复合材料。其作用是完成航天器和火箭导弹的一种或几种特殊功能,例如,防热、透波、隐身(吸波)、抗辐射、耐磨、阻尼、导热等。目前应用最广泛的是各种防热复合材料。应该说明的是,随着复合材料的发展,往往一种复合材料同时起着结构和功能的作用,因此结构复合材料和功能复合材料的界线目前已不很明显。

结构复合材料是目前应用最广泛和最成熟的复合材料,其中所采用的增强材料主要是纤维材料;所采用的基体材料主要是塑料或金属。这类复合材料也可以称为纤维增强复合材料(fiber reinforced composite materials)。

为了合理设计、制造和使用纤维增强复合材料,需要充分了解纤维增强复合材料的性能,特别是力学性能,本书内容就是说明纤维增强复合材料及其结构件的力学特性和分析方法。为了叙述方便,以下一般把纤维增强复合材料简称为“复合材料”。

1.1.2 复合材料的构造

如上所述,复合材料由纤维材料和基体材料复合而成,因此,与各向同性的均匀材料相比,实际的复合材料具有比较复杂的构造。

(1) 纤维材料和基体材料。一般说,基体材料(塑料或金属)是各向同性材料,但纤维材料可以是各向同性材料(如玻璃纤维),也可以是各向异性材料(如碳纤维),即沿着纤维长度方向的材料性能与垂直纤维截面内的材料性能可以有很大的差异。

(2) 单层复合材料。首先,由相同方向排列的纤维材料与基体材料组成单向复合材料,如果单向复合材料的厚度很薄,称为单层复合材料。在实用上,有时也可以把纤维编织成某种方式的布,然后再与基体材料复合;或者把复合材料带排列成某种铺层方式的空心网格,这类复合材料也可以看作是一种特殊形式的单层复合材料。在用树脂作为基体的复合材料中,单层材料在制造中往往称为预浸料(pre-preg, pre-impregnated);在用金属作为基体的复合材料中,有时可以把单层材料称为预成形料(preform)。

(3) 叠层复合材料。一般说,单层复合材料不直接应用于复合材料产品,而只是复合材料的一个基本“部件”,或者说仅是复合材料的一种半成品。实际使用的复合材料是把一层以上的单层材料相互叠合,各层的纤维方向各不相同,由此所形成的复合材料称为叠层材料*。而且,即使把每个单层复合材料看作是均匀材料,由于各层纤维方向的不同排列,它在宏观上仍是一种不均匀材料。因此,叠层材料是一种构造更复杂的各向异性材料。

1.2 复合材料的性能

复合材料及其结构的力学分析是工程性很强的工作,其分析的正确性和适用性只有通过工程实际的检验才有真正的价值。所以,在学习和进行复合材料及其结构的力学分析时,必须结合复合材料的材料性能、制造工艺、结构设计、试验技术和产品使用条件,才能对复合材料及其结构的力学分析原理和方法有比较正确和深入的认识,并使分析工作能在实际工作中发挥最大的作用。为此,本节和下一节对复合材料的性能及其实际工程应用作一些简单的说明。

应该指出,由于复合材料的性能处于不断改进和发展之中,以及复合材料性

* 叠层(laminate)材料一般也称为层合材料,本书为了便于与“单层”材料进行对比,因此采用“叠层”材料的名称。