

复合材料力学

复 合 材 料 力 学

〔美〕 R. M. 琼斯 著

朱 颐 龄 等 译校

上 海 科 学 技 术 出 版 社

内 容 简 介

本书通过宏观力学、微观力学和经典层合理论,系统地阐明了复合材料力学。全书内容分为六章,包括:复合材料的分类及其应用;简单层板的宏观力学和微观力学性能;层合板的宏观力学性能与弯曲、屈曲和振动;以及复合材料的疲劳、断裂力学和横向剪切影响等。书末附有矩阵和张量、简单变量函数的极值和典型应力-应变曲线,并附有不少习题和参考文献。

本书系美国复合材料力学研究生用的一学期教材,可供从事复合材料工作的科技工作者和理工科大学有关专业的师生参考。

复 合 材 料 力 学

〔美〕 R. M. 琼斯 著

朱 颐 龄 等 译校

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路 450 号)

新华书店上海发行所发行 上海商务印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 13 字数 306,000

1981年6月第1版 1981年6月第1次印刷

印数 1—6,500

统一书号: 15119·2123 定价: (科四) 1.25 元

译 者 前 言

复合材料在工程上的应用很广泛,如按原子或分子的层次来分类,几乎所有的材料都可认为是复合材料。现在一般地是将由两种或两种以上的宏观材料所组成的新材料定义为复合材料。例如钢筋混凝土、多层木板等是复合材料,各种各样的纤维增强塑料如玻璃钢等则是很有发展前途的复合材料。

由于纤维增强复合材料具有很高的比强度和比刚度等优点,因而在飞机,宇宙飞船,船舶,建筑,车辆,化工设备等方面的应用愈来愈广泛。

为了适应广大科技工作者从事复合材料研制工作的需要,我们翻译了美国1975年出版的 Robert. M. 琼斯 (Jones) 教授的著作《Mechanics of Composite Materials》一书,以供参考。该书系美国大学研究生用的一学期教材。全书共分六章,较为全面系统地叙述了复合材料力学的基本理论和计算方法。

复合材料力学是一个新课题,国内尚无统一的译名,不少专业名词是译校者根据实际工作中的习惯用法拟定的,不妥之处一定很多,加之水平有限,译文难免存在很多缺点和错误,恳请广大读者批评指正。

参加本书译校工作的主要有:朱颐龄、陈名甫、沈燮昌、陈云程、薛元德、曹学诗、张汝光、殷其佩、桂玉弟和刘献甫等。

序

对于需要强度-重量比与刚度-重量比高的结构,应用复合材料是理想的。飞机和宇宙飞船是重量要求严格的典型结构物,在这类结构中应用复合材料是有效的。当充分利用复合材料的优点时,飞机和宇宙飞船的设计方式将与目前大不相同。

复合材料的研究包含许多课题,诸如制造方法,各向异性弹性力学,各向异性材料的强度和微观力学等。事实上,没有一个人能够完全通晓所有这些领域。任何一个业务工作者都只能把他的注意力放在分析和设计,微观力学和宏观力学等中的一两个领域。

本书的目的是将复合材料力学性能的基本概念介绍给学生。实际上,只是提供一个概貌,给出复合材料的基本知识,将层合纤维增强复合材料力学展开为一个连续的例子。作为一个学期的研究生课程,而略去了许多重要的题目。然而,包含的内容是为进一步研究和开展打下稳固的基础,因此仔细地选择了内容并保证了连续性和平衡性。此外,选择的这些题材显示了理论与实验之间的紧密联系,所以导出的理论可以信赖。

通过微观力学与宏观力学的观点,对层合理论和平板弯曲、屈曲与振动等章节的叙述,使这些概念的物理意义更为清楚。第一章简要介绍了复合材料及其在现行结构中应用潜力。第二章用工程材料常数表达简单层板的应力-应变关系,对强度理论与实验结果作了比较。第三章用材料力学和弹性力学方法介绍微观力学,对估算的模量和实验的结果作了比较。第四章借助于新的层合板分类方法,介绍了层合理论,并对层合板刚度的估算值与实验结果作了比较,讨论了层合板的强度、层间应力以及设计。第五章研究了各种层合特征的简支板的弯曲、屈曲、振动,表明在有实际意义的问题中耦合刚度的影响。第六章叙述如疲劳、断裂力学与横向剪切影响等课题。附录提供了矩阵与张量,简单变量函数的极大值与极小值,以及典型的应力-应变曲线。

本书主要是按大学毕业生水平写的教科书,但是作为复合材料自学的指南也很合适。所介绍的理论是简要的,阐明了基本概念。重点放在分析与实验结果的比较上。精确度可能差一些,但对教育目的则是合适的。列出了许多参考文献,以便深入研究。读者的基础应读过高等材料力学课程或者有介绍三维应力-应变关系与板理论的单独课程。此外,各向异性弹性力学知识虽然不是基本的,但也是需要的。

许多人对本书的写作提供了慷慨支持。我要特别感谢空军材料实验室的 Stephen. W. 蔡 (Tsai) 博士,感谢他在过去十年所作的榜样和过去几年的指导。我深切的感谢史蒂夫 (Steve) 以及特拉华大学的 R. Byron 派普斯 (Pipes) 博士和普拉特 (Pratt) 与惠特尼 (Whitney) 飞机厂的 Thomas. 克鲁斯 (Cruse) 博士,他们审阅了手稿并提出了许多有益的意见。还有许多其他工作者为本书提供了素材。对 Fort. 沃思 (Worth), 得克萨斯 (Texas) 的通用动力公司的 Marvin·豪厄思 (Howeth) 提供许多照片, LTV 航空公司的 John·皮姆 (Pimm) 提供 4.7 节中的照片,空军材料实验室的 Nicholas·帕格诺 (Pagano) 博士提供许多插图,特拉华大学的 R. Byron·派普斯 (Pipes) 博士提供 4.6 节中的许多照片和插图以及宾

夕法尼亚 (Pennsylvania) 州布卢贝尔 (Blue Bell) 的材料科学公司的 B. Walter. 罗森 (Rosen) 博士提供 3.5 节中的照片表示谢意。我也不会忘记康涅狄格 (Connecticut) 州韦斯特波特 (Westport) 的技术出版公司允许翻印过去几年中在各种技术书籍和《Journal of Composite Materials》上登载过的许多插图。我十分感谢空军科学研究部 (空间科学管理局) 和海军研究部 (结构力学计划) 对我在第五、六章中讨论的层合板与壳体研究方面的支持。我还感谢南方梅索狄斯特 (Southern Methodist) 大学理工学院几个班级和宾夕法尼亚 (Pennsylvania) 州沃明斯特 (Warminster) 的海军航空发展中心在将讲课笔记发展成为本书时的热心和帮助。最后, 我必须单独感谢 Harold S. 摩根 (Morgan) 的许多帮助和 Marty 孔克勒 (Kunkle) 的手稿打字工作 (虽然有一些是我自己打字的)。

Robert. M. 琼斯 (Jones)

符 号 表

α	角, 热膨胀系数
β	角
γ	剪应变
γ_f, γ_m	纤维剪应变和基体剪应变
Δ	变形量, 总剪切变形
Δ_f, Δ_m	纤维总剪切变形和基体总剪切变形
δ	纤维间距
ϵ	应变
$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$	材料主方向上的应变
$\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$	x, y, z 方向上的应变
η	相互影响系数
θ	角, 层合角
K_x, K_y, K_{xy}	层合板的曲率和扭曲率
ν	泊松比
ν_f, ν_m	纤维泊松比和基体泊松比
ξ	纤维几何形状参数
ρ	单位体积内的重量
σ	正应力
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	与材料主方向平行的正应力
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	与 x, y, z 平行的正应力
$\sigma_{\text{极限}}$	极限应力
τ	剪应力
$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$	x, y, z 坐标轴中的剪应力
Φ	转角
ω	振动频率
A	横截面面积, 拉伸刚度, 振幅
a	裂纹长度
a, b, c, d, e	距离
B	耦合刚度, 振幅
C	刚度矩阵, 接触系数
D	弯曲刚度
E	弹性模量
E_1, E_2, E_3	材料主方向上的弹性模量
E_d	弥散材料的弹性模量
E_x, E_y, E_z	x, y, z 方向上的弹性模量
e	伸长量
F	刚度比
G	剪切弹性模量
G_{12}, G_{23}, G_{31}	在 1-2, 2-3 和 3-1 平面内的剪切弹性模量
h	板厚度
K	挠度系数
k	应力强度因子, 纤维不同线系数

- L ——纤维长度, 距离
 M ——弯矩, 正交铺设比
 M_x, M_y ——垂直于 x 轴和 y 轴截面的单位长度上的弯矩
 M_{xy}, M_{yx} ——垂直于 x 轴和 y 轴截面的单位长度上的扭矩
 N ——法向力, 层数
 N_x, N_y ——垂直于 x 轴和 y 轴截面的单位长度上的法向力
 N_{xy}, N_{yx} ——垂直于 x 轴和 y 轴截面的单位长度上平行于 y 轴和 x 轴的剪力
 P ——压力和屈曲载荷
 $P_{\text{极限}}$ ——压缩极限载荷
 p ——外载荷, 分布载荷
 Q ——二维刚度
 $[\bar{Q}]$ ——转换二维刚度
 $[R]$ ——路透矩阵
 r ——半径
 r_i, r_f, r_m ——纤维内半径, 纤维半径和基体半径
 S ——柔度矩阵, 剪切强度, 表面能
 T ——绝对温度
 ΔT ——温差
 t ——厚度
 U ——应变能, 位移
 U_f, U_m ——纤维应变能和基体应变能
 $U_1 \rightarrow U_7$ ——二维刚度不变量
 u —— x 方向上的位移
 V ——体积含量, 位移, 总势能
 V_d ——弥散材料相对体积含量
 V_f, V_m ——纤维相对体积含量和基体相对体积含量
 v —— y 方向上的位移
 W ——单位体积功, 挠度
 w —— z 方向上的位移
 x, y, z ——直角坐标
 X ——简单层板的纵向强度
 X_o, X_t ——简单层板的纵向压缩和拉伸强度
 Y ——简单层板的平面内横向强度
 Y_o, Y_t ——简单层板的平面内横向压缩和拉伸强度
 Z ——简单层板的厚度方向横向强度
 G ——应变能释放率

目 录

第一章 复合材料介绍	1	2.9 正交各向异性简单层板的二向强度理论	43
1.1 引言	1	2.9.1 最大应力理论	44
1.2 复合材料的分类与特性	1	2.9.2 最大应变理论	45
1.2.1 纤维复合材料	1	2.9.3 蔡-希尔 (Tsai-Hill) 理论	47
1.2.2 层合复合材料	3	2.9.4 蔡-胡 (Tsai-Wu) 张量理论	49
1.2.3 颗粒复合材料	5	习题	51
1.2.4 小结	6	参考文献	51
1.3 复合材料的力学性能	6	第三章 简单层板的微观力学性能	53
1.4 层合纤维增强复合材料的基本术语	8	3.1 引言	53
1.4.1 简单层板	8	3.2 刚度的材料力学分析方法	55
1.4.2 层合板	9	3.2.1 E_1 的确定	56
1.5 层合纤维增强复合材料的制造	10	3.2.2 E_2 的确定	57
1.5.1 组分材料的初始形式	10	3.2.3 ν_{12} 的确定	58
1.5.2 制造方法	10	3.2.4 G_{12} 的确定	59
1.5.3 质量控制	12	3.2.5 小结	60
1.6 纤维增强复合材料的当前和未来的优点	12	习题	60
1.6.1 强度和刚度方面的优点	13	3.3 刚度的弹性力学分析方法	61
1.6.2 价格上的优点	14	3.3.1 引言	61
1.6.3 复合材料当前和未来的用途	14	3.3.2 弹性力学的极值法	61
参考文献	17	3.3.3 精确解	66
第二章 简单层板的宏观力学性能	18	3.3.4 接触时的弹性力学解	67
2.1 引言	18	3.3.5 哈尔平-蔡 (Halpin-Tsai) 方程	70
2.2 各向异性材料的应力-应变关系	18	3.3.6 小结	73
2.3 正交各向异性材料的工程常数	22	习题	73
2.4 弹性常数的限制	24	3.4 刚度分析方法的比较	74
2.4.1 各向同性材料	24	3.4.1 颗粒复合材料	74
2.4.2 正交各向异性材料	25	3.4.2 纤维增强复合材料	74
习题	27	3.4.3 小结	76
2.5 正交各向异性材料平面应力问题的应力-应变关系	27	3.5 强度的材料力学分析方法	77
2.6 简单层板在任意方向上的应力-应变关系	29	3.5.1 引言	77
习题	34	3.5.2 沿纤维方向的拉伸强度	77
2.7 正交各向异性简单层板的不变量性质	35	3.5.3 沿纤维方向的压缩强度	80
习题	36	习题	86
2.8 正交各向异性简单层板的强度	37	3.6 微观力学的小结	86
2.8.1 强度概念	37	参考文献	86
2.8.2 强度和刚度的实验确定	39	第四章 层合板的宏观力学性能	89
2.8.3 力学特性的小结	43	4.1 引言	89
		4.2 经典层合理论	89
		4.2.1 单层的应力-应变性能	89
		4.2.2 层合板的应变和应力变化	90

4.2.3 层合板的合力和合力矩	92	的挠度	147
习题	94	5.3.1 特殊正交各向异性层合板	147
4.3 层合板刚度的特殊情况	94	5.3.2 对称角铺设层合板	148
4.3.1 单层结构	94	5.3.3 反对称正交铺设层合板	151
4.3.2 对称层合板	96	5.3.4 反对称角铺设层合板	152
4.3.3 反对称层合板	100	5.4 在平面载荷作用下简支层合平板的屈	
4.3.4 不对称层合板	102	曲	153
4.3.5 小结	103	5.4.1 特殊正交各向异性层合板	153
习题	103	5.4.2 对称角铺设层合板	154
4.4 层合板刚度的理论和实验比较	104	5.4.3 反对称正交铺设层合板	155
4.4.1 刚度方程的逆阵	104	5.4.4 反对称角铺设层合板	157
4.4.2 正交铺设层合板刚度	105	5.5 简支层合平板的振动	159
4.4.3 正交铺设层合板的理论和实验刚度	107	5.5.1 特殊正交各向异性层合板	159
4.4.4 角铺设层合板刚度	109	5.5.2 对称角铺设层合板	160
4.4.5 角铺设层合板的理论和实验刚度	111	5.5.3 反对称正交铺设层合板	161
4.4.6 小结	112	5.5.4 反对称角铺设层合板	162
习题	112	5.6 刚度影响的小结	164
4.5 层合板强度	112	习题	166
4.5.1 引言	112	参考文献	166
4.5.2 层合板强度分析的程序	113	第六章 总论与其它课题	168
4.5.3 层合板的强度准则	115	6.1 第一章到第五章的复习	168
4.5.4 热应力和力学应力分析	116	6.2 疲劳	168
4.5.5 正交铺设层合板的强度	118	6.3 层合板上开孔	169
4.5.6 角铺设层合板的强度	122	6.4 断裂力学	170
4.5.7 小结	124	6.4.1 断裂力学的基本原理	171
习题	125	6.4.2 断裂力学在复合材料中的应用	173
4.6 层间应力	125	6.5 横向剪切影响	174
4.6.1 经典层合理论	126	6.5.1 柱形弯曲的精确解	174
4.6.2 弹性方程式	127	6.5.2 横向剪切影响的近似处理	176
4.6.3 弹性力学解结果	128	6.6 环境影响	180
4.6.4 层间应力的实验证实	129	6.7 壳体	181
4.6.5 层间应力的含义	131	6.8 其它一些课题	181
习题	132	参考文献	182
4.7 层合板设计	133	附录 A 矩阵和张量	184
4.7.1 层合板刚度不变量概念	133	A.1 矩阵代数	184
4.7.2 层合板刚度不变量的特殊结果	135	A.1.1 矩阵定义	184
4.7.3 层合板刚度不变量在设计中的应用	137	A.1.2 矩阵运算	185
4.7.4 层合板连接接点	138	A.2 张量	187
习题	140	A.2.1 坐标转换	187
参考文献	141	A.2.2 各阶张量的定义	187
第五章 层合平板的弯曲、屈曲与振动	142	A.2.3 简写符号	188
5.1 引言	142	A.2.4 张量转换的矩阵形式	189
5.2 层合平板的弯曲、屈曲与振动的基本方		参考文献	189
程	143	附录 B 简单变量函数的极大值和极小值	190
5.2.1 基本限制与假设	143	参考文献	192
5.2.2 层合平板的平衡方程	144	附录 C 典型的应力-应变曲线	192
5.2.3 层合平板的屈曲方程	145	参考文献	192
5.2.4 层合平板的振动方程	146	参考书目	196
5.2.5 求解方法	147		
5.3 在横向分布载荷作用下简支层合平板			

第一章 复合材料介绍

1.1 引言

复合材料中的“复合”这个词表示由两种或多种材料在宏观尺度上组合成的一种有用的材料。不同的材料能够在微观尺度上组合起来,例如合金,其最终材料在宏观上是均质的。复合材料的优点是:具有其各种组分的最好特性,并且有些特性往往是组分所没有的。组成的复合材料,能改善的性能有:

- | | |
|-------|-----------|
| •强度 | •疲劳寿命 |
| •刚度 | •与温度有关的性能 |
| •耐腐蚀性 | •绝热性 |
| •耐磨性 | •导热性 |
| •吸引性 | •隔音性 |
| •重量 | |

当然,上述这些性能不可能同时都改善,通常也没有必要这样做。

复合材料有长久的使用历史。它的起源还不清楚,但所有有记载的历史都述及了复合材料的一些形式。例如,犹太人用稻秆加强泥砖;古埃及人用了多层木板,那时他们已知道木材重新排列,可达到很高的强度和抵抗热膨胀以及由潮湿引起的膨胀;中世纪的剑和盔甲是用不同材料层合构成的。最近,对于像飞机和宇宙飞船等重量要求严格的应用上,具有高的强度-重量比的纤维增强树脂复合材料就显得重要了。

1.2 节介绍复合材料的分类和特性。1.3 节叙述复合材料的力学性能。1.4 节叙述本书范围内的层合纤维增强复合材料,定义基本术语。1.5 节简要叙述层合纤维增强复合材料的制造过程。1.6 节讨论层合纤维增强复合材料的当前优点和未来的优点。

1.2 复合材料的分类与特性

复合材料的类型有三种:

1. 纤维复合材料,由纤维和基体组成
2. 层合复合材料,由多种材料层合组成
3. 颗粒复合材料,由颗粒和基体组成

1.2.1 纤维复合材料

各种形状的长纤维比块状的同一材料更为刚强。例如,普通平板玻璃在每平方英寸几千磅的应力下破裂了,而现行的商用玻璃纤维的强度已达 400,000~700,000 磅/英寸²,实验室研究的已接近 1,000,000 磅/英寸²。显然,在评价其强度时,纤维的几何形状是重要的,在结构应用中必须考虑。更确切地说,纤维有与块状形式不同的特性是由于纤维是一种更加完整的结构,晶体在纤维中是沿着纤维轴定位的。此外,纤维的内部缺陷比块状材料少,例如,在材料中存在位错,而纤维的位错比块状少。

纤维的特性

纤维在几何上的特征, 不在于它有很大的长度-直径比, 而在于它有近于晶体大小的直径。表 1-1 列出了几种纤维材料的强度与模量。为了比较起见, 也列出了普通材料。表中列出每种材料的密度, 是因为强度-密度比(比强度)与刚度-密度比(比刚度)通常是纤维的有效性指标, 特别是在像飞机和宇宙飞船等重量要求严格的应用上。表 1-1 的条目是按 S/ρ 与 E/ρ 的平均值自小到大排列的。

表 1-1 纤维与线的性能

纤维 或 线	密度 ρ 磅/英寸 ³ (10^9 牛顿/米 ³)	拉伸强度 S 10 ⁸ 磅/英寸 ² (10^9 牛顿/米 ²)	S/ρ 10 ⁵ 英寸 (10 ³ 米)	拉伸模量 E 10 ⁶ 磅/英寸 ² (10^9 牛顿/米 ²)	E/ρ 10 ⁷ 英寸 (10 ⁶ 米)
铝	0.097(26.3)	90(0.62)	9(24)	10.6(73)	11(2.8)
钛	0.170(46.1)	280(1.9)	16(41)	16.7(115)	10(2.5)
钢	0.282(76.6)	600(4.1)	21(54)	30(207)	11(2.7)
E-玻璃	0.092(25.0)	500(3.4)	54(136)	10.5(72)	11(2.9)
S-玻璃	0.090(24.4)	700(4.8)	78(197)	12.5(86)	14(3.5)
碳	0.051(13.8)	250(1.7)	49(123)	27(190)	53(14)
铍	0.067(18.2)	250(1.7)	37(93)	44(300)	66(16)
硼	0.093(25.2)	500(3.4)	54(137)	60(400)	65(16)
石墨	0.051(13.8)	250(1.7)	49(123)	37(250)	72(18)

注: 根据 Dietz[参考文献 1-1]改编。

晶须的特性

晶须有像纤维一样接近晶体大小的直径, 虽然其长度-直径比可以以百计, 但一般是很短的和须状的。因此, 晶须是一种更能表明结晶与块状材料性能不同的明显的例子, 晶须比纤维更为完整而又有更高的性能。晶须是在很小尺度上结晶获得的, 且有近于完整的晶体线状排列。像铁这种具有结晶结构的材料, 其理论强度为 2, 900, 000 磅/英寸², 但是, 结构钢(主要是铁)的强度只有 75, 000 磅/英寸²到 100, 000 磅/英寸²。这个差别是由于钢的结晶结构中有缺陷。这些缺陷被称为位错, 这在塑性材料中是很容易发生的。位错的运动改变了晶体间的关系, 从而也改变了材料的强度与刚度。对于近于完整的晶须只有少量的位错。因而铁的晶须比块状钢有显著高的强度。一组有代表性的晶须性能列于表 1-2。

表 1-2 晶须的性能

晶须	密度 ρ 磅/英寸 ³ (10^9 牛顿/米 ³)	理论强度 S_T 10 ⁸ 磅/英寸 ² (10^9 牛顿/米 ²)	试验强度 S_R 10 ⁶ 磅/英寸 ² (10^9 牛顿/米 ²)	S_R/ρ 10 ⁵ 英寸 (10 ³ 米)	拉伸模量 E 10 ⁶ 磅/英寸 ² (10^9 牛顿/米 ²)	E/ρ 10 ⁷ 英寸 (10 ⁶ 米)
铜	0.322(87.4)	1.8(12)	0.43(3.0)	13(34)	18(124)	5.6(1.4)
镍	0.324(87.9)	3.1(21)	0.56(3.9)	17(44)	31(215)	9.6(2.4)
铁	0.283(76.8)	2.9(20)	1.9(13)	67(170)	29(200)	10.2(2.6)
B ₄ C	0.091(24.7)	6.5(45)	0.97(6.7)	106(270)	65(450)	71(18)
SiC	0.115(31.2)	12(83)	1.6(11)	139(350)	122(840)	106(27)
Al ₂ O ₃	0.143(38.8)	6(41)	2.8(19)	196(490)	60(410)	42(11)
C	0.060(16.3)	14.2(98)	3(21)	500(1300)	142(980)	237(60)

注: 根据 Sutton, Rosen 与 Flom[参考文献 1-2]改编。

可以用几种机理生成晶须, 这些机理通常有液相、气相和在材料中的固体扩散。最普通和有希望的方法之一是在金属基体中直接形成晶须。取两种金属的混合物, 例如图 1-1 中的 A 与 B , 在高温时为液体。有一种称为共熔物的组成, 这是混合物瞬时凝结成的两种固相 α 与 A_3B 的结合物。 α 相是 B 在 A 中的固溶体, 且有 $x\%$ 的 B 。由于 A_3B 中有 25% 的 B , 很明显, α 中的 B 比共熔物中少, 即在复合物中有些区域的 B 较少, 而其它区域的 B 较多。在共熔物中, 假如以特定形式凝固, 材料的两个区域的物理结构在 A_3B 基体中是近乎完整的 α 纤维排列。例如, 在图 1-2 中 A 与 B 的混合物处于一个容器中, 并有一个热源沿容器上升。热源经过后出现固体化, 生成垂直于固态-液态界面的纤维。因此, 图 1-2 中的纤维是垂直的。如果混合物是在共熔物的任一边, 则除 α 纤维外, 还生成称为树枝状晶体的其它生成物, 得到的结构是既不完整又是较弱的。因此使用两种材料的共熔物只限于这两种材料的固定组分。共熔物的例子有铝-镍化铝 ($Al-Al_3Ni$)、铜-铬 ($Cu-Cr$) 与钽-碳化钽 ($Ta-Ta_2C$)。

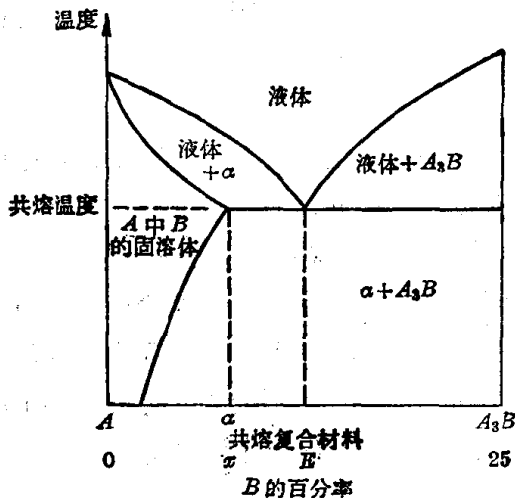
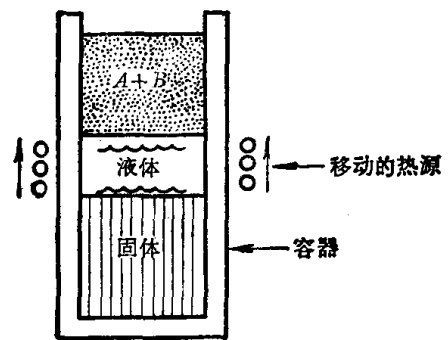
图 1-1 金属 A 与金属 B 混合物的相图

图 1-2 共熔复合物的定向固体化

基体的特性

纤维和晶须一般是粘结在一起成为能够承载的结构元件。粘结材料通常称为基体。基体的作用是多方面的, 有支持作用、保护作用及应力传递作用等。一般说来, 与纤维或晶须相比, 基体的比重、刚度和强度很低。然而, 当纤维或晶须与基体相结合时, 就能有很高的强度与刚度以及仍然低的比重。

一种典型的有机环氧树脂基体材料如 Narmco2387 [参考文献 1-3], 比重为 0.044 磅/英寸³ (11.9×10^3 牛顿/米³), 压缩强度为 23,000 磅/英寸² (0.158×10^9 牛顿/米²), 压缩模量为 560,000 磅/英寸² (3.86×10^9 牛顿/米²), 拉伸强度为 4,200 磅/英寸² (0.029×10^9 牛顿/米²) 以及拉伸模量为 490,000 磅/英寸² (3.38×10^9 牛顿/米²)。诸如铝这样的金属基体有一般块体的性能。

1.2.2 层合复合材料

层合复合材料至少是由两层不同材料胶合而成的。使用层合是为了将组分层的最好方面组合起来以得到更为有用的材料。用层合法增强的性能有强度、刚度、轻质、耐腐蚀、耐磨损、美观或吸引力、绝热性与隔音性等。下列各节叙述双金属、涂覆金属、夹层玻璃、塑料基层合物以及层合纤维复合材料。

双金属

双金属是两种有显著不同热膨胀系数的金属的层合物。在温度变化时,双金属产生一个预定的翘曲或变形量,因而用作温度测量装置是很合适的。例如:可以用两种金属胶合的悬臂条制成简易的恒温器,如图1-3所示。热膨胀系数为 α_A 的金属A胶合到热膨胀系数小于 α_A 且为 α_B 的金属B上。当升高的温度超过胶合的温度时,金属A膨胀得比金属B

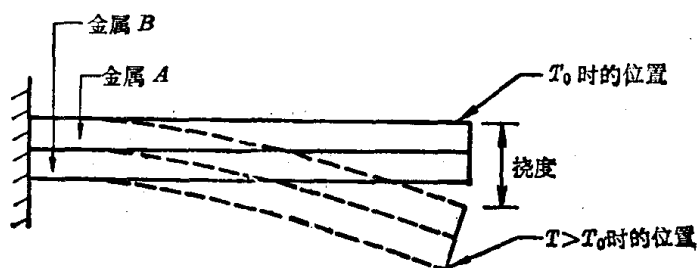


图1-3 悬臂的双金属条(恒温器)

大,因此悬臂条向下弯曲;假如温度从基准温度下降,金属A就比金属B收缩得多,于是悬臂条向上弯曲,这是一个弯曲与伸长耦合的简单例子。很明显,一个单一的均质金属受到均匀的温度,只能是伸长。然而,胶合的两种不同金属受到均匀的温度,正像刚才

叙述的那样,就产生弯曲和伸长。当多种材料层合时,如第四章中所述,弯曲与拉伸的共同作用是一个典型的结果。

涂覆金属

将一种金属涂覆到另一种金属上,就能得到两种金属的最好性能。例如,高强度的铝合金不能抵抗腐蚀,而纯铝和有些铝合金的耐腐蚀性很好。因此,用耐腐蚀的铝合金来涂覆高强度铝合金是一种具有超过其组分的独特的并有引人注目的优点的复合材料。

最近,市场上出现了用约10%铜涂覆铝丝作为铜丝代替物。铝丝价廉而轻质,但有过热问题并难于连接;铜丝价贵而较重,但能保持冷却并易于连接。涂铜铝丝与铜丝相比是轻质,能连接,保持冷却,而且便宜,它的废品价值比铜还低。涂铜铝丝的直径为 $3/16$ 英寸,可以拉细到直径为0.005英寸而仍不影响涂铜的百分比。拉丝时脱粘的缺点也已经基本上克服。

夹层玻璃

用一层材料来保护另一层的概念,可以用同样方法扩展到安全玻璃上。普通窗玻璃在极端的气候下能长久地保持透光,但玻璃非常脆而危险,它会破碎成许多锋利的碎片;另一方面,一种聚乙烯醇缩丁醛塑料的韧性非常好(变形到高应变而不破坏),但又非常柔性和易被划损。安全玻璃是将一层聚乙烯醇缩丁醛夹在两层玻璃之间,复合物中的玻璃保护了塑料不被划损且使其具有刚度,塑料则使复合物有韧性。这样,玻璃和塑料按其不同作用互相保护,从而得到性能比其组分大为改善的复合材料。

塑料基层合物

许多材料可用各种塑料来浸渍,随后按照多种用途进行处理。通用产品胶木是在许多层浸渍了酚醛树脂的重磅牛皮纸上铺上塑料浸渍的装饰层,再铺上一层塑料浸渍的赛璐珞毡,加热加压将各层胶合在一起的层合物。胶木的一种变种是将一层铝箔放在装饰层和牛皮纸层之间,以使其迅速散热,就像散去放在厨房柜台上的燃着烟头的热。

用硅酮来浸渍玻璃织物或石棉织物的层合物,可得到有显著高温性能的复合物。用各种树脂来层合玻璃织物或尼龙织物能够得到一种抗冲击和抗穿透的复合物,这种复合物特别适用于作轻质的人用盔甲。

层合纤维复合物

层合纤维复合物是包含纤维复合与层合工艺的混合型复合物，一个更通俗的名称是层合纤维增强复合材料。这里，纤维增强材料层一般是由不同方向的纤维层组成的，以在不同方向上得到不同的强度与刚度。于是，层合纤维增强复合材料的强度与刚度就能按照结构元件特定的设计要求来布置。层合纤维增强复合材料的例子有北极星导弹壳体、玻璃纤维船壳、飞机机翼与机身、网球拍、高尔夫球棒等。

1.2.3 颗粒复合材料

颗粒复合材料是由悬浮在一种材料基体内的另一种或多种材料的颗粒所组成的。颗粒像基体一样可以是金属的，也可以是非金属的。

非金属在非金属基体中的复合材料

非金属颗粒系统在非金属基体中的最普通的例子是混凝土。混凝土是砂和石子用水泥与水粘合在一起经化学反应而变硬的。混凝土的强度通常归诸于石子，其强度达到岩石强度的增长速率则随着放慢或加速化学反应的水泥型号的改变而变化。钢筋混凝土可以看作是纤维复合材料或颗粒复合材料。

非金属材料薄片如云母或玻璃当其依次悬浮在玻璃或塑料中时，能够形成一种有效的复合材料。薄片主要是一种具有二向几何形状的材料，相应地也具有二向的强度与刚度，与纤维复合材料只有单向性不同。通常，薄片是叠成相互平行的，比纤维叠层有较高的密度。因此，只需用较少的基体材料来胶合薄片。许多薄片叠起来使得片状复合材料比同样组分的普通复合材料更不易渗透液体。云母夹在玻璃中的复合材料由于它有良好的绝缘性和加工性而在电气应用方面被大量采用。玻璃片夹在塑性树脂基材料中，也有与玻璃纤维复合材料相似的潜力。虽然，由于有较高的叠合密度，玻璃片状复合材料可以达到比玻璃纤维复合材料更高的刚度和强度，但是表面缺陷使玻璃片状复合材料的强度低于玻璃纤维复合材料目前能达到的水平。

金属在非金属基体中的复合材料

火箭推进剂是由像铝粉与高氯酸盐氧化剂那样的无机微粒放在像聚胺酯或聚硫橡胶那样的柔性有机粘结剂中组成的。推进剂的微粒组分多到 75%，而粘结剂只有 25%。为了能够有稳定的燃烧反应，复合材料必须均匀和不开裂，否则，将发生不稳定燃烧，导致爆炸而对火箭的轨道有不利的影响。火箭的推力与燃烧表面积成比例，为此，固体推进剂铸造成如图 1.4 中的星形孔以代替圆形孔。出现了许多与火箭发动机机壳上的固体推进剂支承以及由不同的颗粒和粘结剂刚度而产生的内应力有关的应力-分析问题。内应力能通过燃烧横截面最佳形状的设想来降低，这是采用非圆形孔的又一个原因。

悬浮状金属薄片是普通的，例如铝涂料实际上是铝薄片悬浮在涂料上。在涂覆时，薄片平行于表面排列而得到了非常好的覆盖层。同样，可以应用银薄片得到良好的导电性能。

冷焊料是金属粉末悬浮在热固性树脂中的一种复合材料，既坚硬又导热和导电。铜粒放在环氧树脂中的复合材料可大大增加传导性。目前正在研制许多在塑料中放置金属添加剂的复合材料，以提高导热性，降低热膨胀系数和减少磨损。

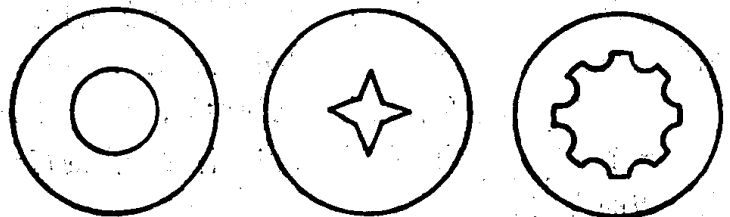


图 1-4 固体火箭推进剂的形状

金属在金属基体中的复合材料

和合金不一样,金属微粒在金属基体中是不溶解的。铅微粒通常用在铜合金和钢中,以改善加工性能(切屑是薄片状的而不是碎屑状的)。此外,铅是铜合金轴承的天然润滑剂。

许多金属在室温下是脆的,因此,必须在加热时进行加工。然而,将钨、铬、钼等金属的微粒悬浮在延性基体中,能得到延性的复合材料,但具有脆性组分的高温性能。悬浮脆性微粒的实用方法是液态烧结,即围绕脆性微粒包着渗透基体材料。在液态烧结过程中脆性微粒变得光滑,因而更有延性。

非金属在金属基体中的复合材料

像陶瓷一类的非金属微粒能悬浮在金属基体中,所得的复合材料称为金属陶瓷。普通的金属陶瓷是氧化物基和碳化物基复合材料。

氧化物基金属陶瓷既可以是氧化物微粒悬浮在金属基体中,也可以是金属微粒悬浮在氧化物基体中。这种金属陶瓷用于有耐腐蚀要求的工具制造以及高温应用上。

碳化物基金属陶瓷有钨、铬、钛的碳化物微粒。碳化钨在钴基体中的金属陶瓷用在需要很高硬度的机器零件上,如金属拉丝模具、阀门等。碳化铬在钴基体中的金属陶瓷有很高的耐腐蚀性和耐磨性,还具有接近于钢的热膨胀系数,所以很适用于制造阀门。碳化钛在镍基体中或在钴基体中的金属陶瓷常用在汽轮机部件等的高温应用上。金属陶瓷还用作核反应堆燃料元素和控制杆。氧化铀微粒在不锈钢中用于燃料元素,碳化硼在不锈钢中用于控制杆。

弥散硬化的合金与金属陶瓷的不同在于颗粒更小和占总体积的百分比更少(通常约为总体积的3%)。但是,弥散的颗粒却控制着复合材料的强度。颗粒是机械地弥散的,它与沉淀硬化的合金不同。通常,颗粒是金属氧化物或金属化合物的混合物(所以有时属于颗粒复合材料的另一种分类)。复合材料在弥散后进行冷作,可提高强度并固定位错。

1.2.4 小结

许多多相复合材料比刚才讨论的纤维、层合或颗粒复合材料有更多的特性。例如钢筋混凝土既是颗粒的(包括水泥浆粘结料中的骨料)又是纤维的(钢筋)。层合纤维增强复合材料既是层合的又是纤维的复合材料。所以,任何一种分类方案都是任意的和不完整的。不过,这个分类系统可给读者了解复合材料的广泛可能性。

1.3 复合材料的力学性能

复合材料有许多不同于常规工程材料的特性。有些特性仅是常规性能的修正;另一些则完全是新的,需要新的分析和实验方法。最普通的工程材料是均质的和各向同性的:

一个均质物体在各处有相同的性能,即性能不是物体位置的函数。

一个各向同性物体的性能,在物体内一点的每一个方向上都是相同的,即性能不是物体内一点的方向的函数。

同温度有关的各向同性的物体,当施加一个温度梯度时,虽不是均质的,但仍是各向同性的。

与此相反,复合材料常常既是非均质的(或异质的)又是非各向同性的(正交各向异性,或各向异性的):

一个非均质体在物体各点有不同的性能,即性能是物体位置的函数。

一个正交各向异性体在物体中一点的三个相互垂直方向上有不同的材料性能。此外，还有三个相互垂直的材料对称面。所以性能是物体中一点的方向的函数。

一个各向异性体在物体中一点的所有方向上有不同的材料性能，它没有材料性能的对称平面，性能是物体内一点的方向的函数。

一些复合材料有非常简单的非均质性。例如夹层安全玻璃有三层，每层都是均质和各向同性的，因此，它的非均质性是垂直于玻璃平面方向的阶梯形函数。有些颗粒复合材料也是非均质的，但是各向同性的，虽然有些是各向异性的。其它的复合材料则更为复杂。

因为复合材料特有的不均匀性，从微观力学和宏观力学两种观点来进行研究是方便的：微观力学是从微观角度检验组分材料之间的相互影响来研究复合材料的性能。

宏观力学是从假定材料是均质的和只从复合材料的平均表现性质检测组分材料的作用来研究复合材料的性能。

在本书中，首先把注意力集中在宏观力学上，因为它是最容易评述设计分析中的两个或更多的重要课题。其次，对微观力学也将进行研究，以便得到对复合材料组分如何配比和排列以适应特定的强度和刚度的评价。

使用宏观力学和微观力学这两个概念，能够在少用材料的情况下设计复合材料来满足特定的结构要求。复合材料的可设计性是它超过常规材料的最显著优点之一。设计的复合材料可以只在给定方向上有所需的强度和刚度。而各向同性材料则在不是最大需要的其它方向上也具有过剩的强度和刚度。

复合材料固有的各向异性(最常用的是正交各向异性)，其力学性能特点与常规的各向同性材料完全不同。在正应力和剪应力作用下的各向同性、正交各向异性及各向异性材料的性质如图 1.5 所示。

对于各向同性材料，正应力在应力作用方向产生伸长，在垂直方向产生收缩。剪应力只产生剪切变形。

对于正交各向异性材料，像各向同性材料一样，在材料主方向(沿着材料三个正交的对称平面的交线之一)的正应力在应力作用方向产生伸长，在垂直于应力的方向产生收缩。然而，由于两个材料主方向的性质不同，其收缩比受到同样载荷且在载荷方向有同一弹性模量的各向同性材料的大些或小些。剪应力产生剪切变形，但变形量与各种弹性模量和泊松比无关，即正交各向异性材料的剪切模量与各向同性材料不同，是独立于其它材料性质的。

对于各向异性材料，正应力的作用不仅导致应力方向的伸长和垂直于应力方向的收缩，还导致剪切变形。反之，剪应力除了产生剪切变形外，还产生伸长和收缩。两种载荷形式和

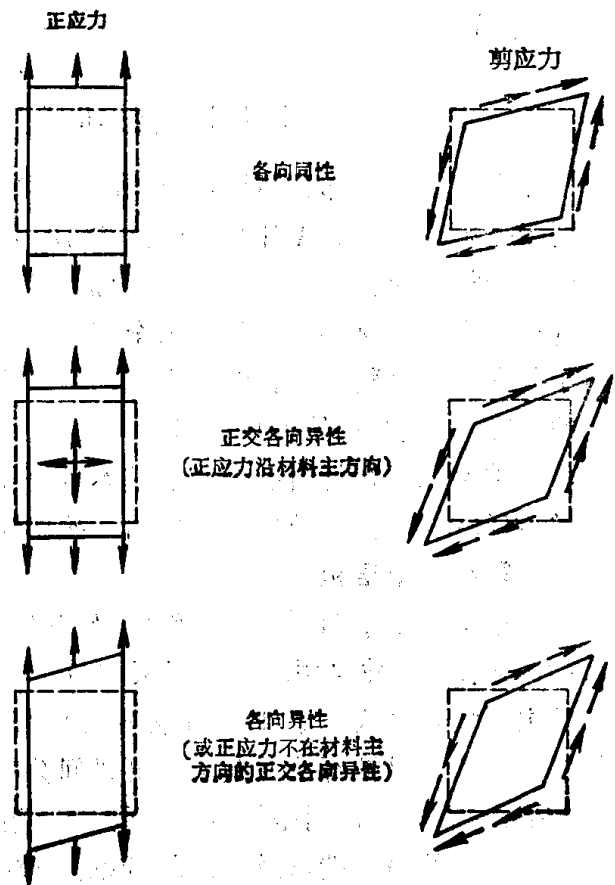


图 1-5 各向异性材料的力学性质