

先进复合材料
力学性能与实验技术

赠阅

光明日报出版社

内容简介

《先进复合材料力学性能与实验技术》是先进复合材料设计、应用、质量控制等方面的基础读物。书中扼要介绍了复合材料力学、静态性能、疲劳损伤及其试验技术；同时还选编了有关标准试验方法。

本书供从事复合材料工作的科学研究人员与工程技术人员参考，也可作为大专院校有关专业的参考书。

先进复合材料

力学性能与实验技术

王山根 潘源民 编著
邵毓俊 张登高

光明日报出版社出版

(北京永安路106号)

光明日报出版社软件出版部编辑

(北海亭山路1297号)

北京大郊亭印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/32 印张: 10 字数: 225千字

1987年11月第一版 1987年11月第一次印刷

印数: 1-3000 定价: 2.50元

统一书号: 13263.196



编 者 的 话

近20年来,复合材料科学技术发展很快,为适应我国复合材料发展形势需要,我们编写了本书。期望对设计、工艺、使用、科研、教学等部门从事复合材料工作的同志有所裨益。

参加本书编写的同志有:王山根(第一、三、四章);潘泽民(第二章);邵毓俊(第五、六章);张登高(标准试验方法编译);

本书的编写得到航空工业部科学技术局、北京航空材料研究所等单位的支持;航空工业部科技局王惠杰同志为组织该书编写付出了辛勤劳动;本书在出版过程中还得到机械工业出版社严蕊琪同志、中国机械报社位中秋、刘志刚、毕远策同志和中国科技导报社刘先曙等有关同志的热情帮助,在此表示衷心感谢。

由于我们水平有限,错误和不足之处在所难免,请读者批评指正。

编 者

一九八六十二月于北京

目 录

第一章 绪言

- 1 - 1 先进复合材料的优点及其应用..... (1)
- 1 - 2 纤维增强复合材料的试验目的..... (2)
- 1 - 3 纤维增强树脂基复合材料的重要性能
及其试验方法..... (3)

第二章 复合材料力学

- 2 - 1 单层的力学特性..... (7)
- 2 - 2 应力及应变转换公式—平面应力状态..... (12)
- 2 - 3 单层的应力—应变关系..... (15)
- 2 - 4 层板的力学特性..... (24)
- 2 - 5 复合材料层板的强度..... (38)
- 2 - 6 层板开孔引起的弹性应力集中..... (50)
- 2 - 7 带切口的复合材料层板强度..... (54)
- 2 - 8 复合材料的层间应力..... (61)

第三章 复合材料在环境条件下的力学性能

- 3 - 1 在不同温湿度条件下单向复合材料的
力学性能..... (74)

3 - 2	在湿热条件下对称层压板的刚度.....	(84)
3 - 3	在湿热条件下对称层压板的强度.....	(88)

第四章 复合材料基本力学性能与试验

4 - 1	单向复合材料力学行为.....	(93)
4 - 2	纤维复合材料的工程常数.....	(106)
4 - 3	纤维复合材料的质重.....	(113)
4 - 4	纤维复合材料试验的共性问题.....	(117)
4 - 5	纤维复合材料拉伸性能试验.....	(119)
4 - 6	纤维复合材料压缩性能试验.....	(127)
4 - 7	纤维复合材料平面剪切性能试验.....	(135)
4 - 8	纤维复合材料弯曲强度与模量测试方法.....	(143)

第五章 复合材料的疲劳性能试验

5 - 1	复合材料的疲劳性能.....	(147)
5 - 2	复合材料的S—N曲线.....	(151)
5 - 3	影响复合材料疲劳行为的因素.....	(161)

第六章 复合材料的损伤

6 - 1	复合材料的损伤类型及其检测.....	(177)
6 - 2	复合材料的内部损伤及其扩展.....	(185)
6 - 3	复合材料的撞击损伤.....	(207)
6 - 4	复合材料的疲劳寿命预测.....	(212)

附录(一) 纤维增强塑料力学性能标准试验方法

- 一、纤维增强塑料性能试验方法总则
(GB1446-83) (219)
- 二、定向纤维增强塑料拉伸性能试验方法
(GB3354-82) (223)
- 三、单向纤维增强塑料平板压缩性能试验方法
(GB3856-83) (228)
- 四、纤维增强塑料纵横剪切试验方法
(GB3355-82) (234)
- 五、单向纤维增强塑料弯曲性能试验方法
(GB3356-82) (239)
- 六、单向纤维增强塑料层间剪切强度试验方法
(GB3357-82) (243)

附录(二) 美国标准试验方法

- 一、纤维—树脂复合材料拉伸性能标准试验方法
(ASTM D3039-76) (247)
- 二、单向或正交铺层纤维—树脂复合材料压缩性能
标准试验方法 (ASTM D3410-75) (258)
- 三、单向增强塑料平面剪切应力—应变特性曲线标准
实验操作规程 (ASTM D3518-76) (272)
- 四、复合材料层压板平面剪切性能试验标准指南
(ASTM D4255-83) (281)
- 五、用短梁法对平行纤维增强复合材料表观层间剪切强
度标准试验方法 (ASTM D2344-84) (303)

第一章 绪 言

1-1 先进复合材料的优点及其应用

1-1.1 比强度和比刚度大

复合材料的密度约为 $1.6\text{g}/\text{cm}^3$ ，比强度约为铝合金的三倍，比刚度约为铝合金的四倍。一般来讲，它像镁那样的轻，像钛那样的硬。这对于重量以克计算的航空产品具有特别重要的意义。

1-1.2 容易成型

纤维复合材料可在压力温度不高的情况下热压成型、甚至可以一次成型形状较复杂的零件。

1-1.3 具有良好的疲劳和断裂特性

由于纤维复合材料具备上述的优点，从而在航空、机械工业部门获得广泛应用。就飞机的使用情况而言，由制作口盖、舱门、座舱地板、舱面等发展到承力较大的结构件，如水平安定面，垂直尾翼等，进而发展到主承力结构件上，如机翼、机身等。

在飞机上应用的复合材料有：1. 纤维增强的树脂基复合材料，其中有热固性高温树脂，还有最近发展的热塑性高温树脂基复合材料。2. 金属基复合材料；3. 陶瓷基复合材料；4. 碳-碳复合材料等。

本书试验方法所涉及的纤维复合材料，是指碳纤维增强的复合材料、kevlar复合材料、混杂复合材料、玻璃纤维增强的复合材料。

1-2 纤维增强复合材料的试验目的

1. 原材料质量检验；
2. 材料评定；
3. 工艺控制；
4. 建立工程设计参数；
5. 产品试验。

复合材料生产过程的质量控制可以分为 1. 原材料，即纤维、树脂的质量检验；半成品，即预浸料的质量检验；2. 生产过程的质量控制；3. 成品质量试验。

为了保证原材料的质量和工艺质量的稳定性，不但要按材料验收规范，在生产前对它进行物理—机械性能试验，而且尽可能对其化学组成进行分析，以便制出符合要求的产品。

生产工艺包括预浸料制造工艺、复合材料构件成型、固化和装配、加工。复合材料产品的性能随着这些参数的改变而强烈变化。故对每道工序制订详细的操作规程，并进行严格检查是十分重要的。

成品检验仅是最后一道关口。通常是用无损检验方法，如超声C—扫描，X软射线、声发射法。

为了设计产品，设计者必须获得一定的性能数据，尤其是产品在工作环境与载荷条件下的物理、力学性能参数。

标准试验方法对于选材、工艺研究、设计数据的提供、及其质量控制都是十分必要的，而且也是十分有益的。

1-3 纤维增强树脂基复合材料的重要性能及其试验方法

本节所列的性能不仅限于力学性能，而且包括热和其它方面的性能。另外，所列出的不仅针对复合材料层压板，而是从原材料开始的基本性能。本书重点是论述力学性能，而其它的性能，因为它们在保证复合材料质量和应用可靠性的重要因素，使读者有个全面了解，所以一併列出，但并不作进一步讨论。

1-3.1 原材料，主要是树脂基体和纤维

1. 树脂基体

- 粘度 (ASTM D2393-68)
- 凝胶时间 贮存期与工作寿命表征
(ASTM D2471-71) (峰值放热温度)
(ASTMD3532-76) (碳纤维/环氧预浸料)
- 环氧预浸料挥发分含量
- 环氧预浸料树脂流动量 (ASTM D3531-76)
- 密度
- 树脂基体的力学性能 (ASTMD882-73)
(ASTMD638-72)

2. 纤维

- 拉伸强度 (ASTMD3379-75)
(GB3362-82)
- 初始模量
- 断裂伸长

- 断裂功
- 剪切模量
- 纤维密度
- 纤维直径（或当量直径）
- 纤维根数

1-3.2 纤维复合材料的重要性能

1. 力学性能

- 定向纤维增强塑料拉伸性能

ASTMD3039-76; GB3354-82

测定纵向拉伸强度，模量和泊松比；横向拉伸强度与模量。

- 定向纤维复合材料压缩性能。

ASTMD3410-75 GB3358-82

测定纵向压缩强度与模量；横向压缩强度与模量。

- 单向纤维复合材料平面剪切性能。

ASTMD2518-76 GB3355-82

测定剪切强度与剪切模量

- 单向纤维增强塑料弯曲性能

ASTMD790-71, GB3356-82

- 单向纤维增强塑料层间剪切强度

ASTMD2344-76, GB3357-82

- 冲击强度

- 纤维复合材料的挤压强度

- 纤维复合材料的蠕变性能

- 单向纤维复合材料拉—拉疲劳

ASTMD3479-76

- 单向纤维复合材料拉—压疲劳
- 复合材料层压板剪切强度与剪切模量
ASTMD4255-83

2. 热性能

- 0° 方向复合材料热膨胀系数 α_L
 90° 方向复合材料热膨胀系数 α_T
- 0° 方向复合材料湿膨胀系数 β_L
 90° 方向复合材料湿膨胀系数 β_T
- 比热
- 热传导
- 玻璃化转变温度 T_g
- 热变形温度
- 脆性温度

3. 物理性能

- 复合材料密度
- 纤维含量
AFML-TR-67-243, GB3366-82
- 孔隙率
ASTMD2734, GB3365-82
- 纤维方向测定

4. 湿热影响及其化学稳定性

第二章 复合材料力学

主要符号及意义:

E ——杨氏模量

ν ——泊松比

G ——剪切模量

T ——温度

C ——湿度

α ——热胀系数

β ——湿胀系数

σ ——正应力分量

τ ——剪应力分量

ϵ ——正应变分量

γ ——剪应变分量

S_{ij} ——单层板的主柔量常数

Q_{ij} ——单层板的主刚度常数

$\bar{S}_{ij}$ ——单层板的非主柔量常数

$\bar{Q}_{ij}$ ——单层板的非主刚度常数

u, v, w ——沿XYZ坐标轴的位移

N ——层板剖面内单位长度上的合力

M ——层板剖面内单位长度上的合力矩

h ——层板厚或叠层梁的高

θ ——主坐标系对任意坐标系的转角

A_{ij} ——层板的拉伸刚度系数

B_{ij} ——层板的耦合刚度系数

D_{ij} ——层板的弯曲刚度系数

下标 1 —表示平行纤维方向

下标 2 —表示垂直纤维方向

下标 f —表示纤维 (fiber)

下标 m —表示基料 (matrix)

复合材料层板的工程计算方法可以在众多的资料中找到。而我们编写本章的目的是为了方便读者能迅速地找到所需要的计算公式。因此本章将有关讨论单层板、层板、开孔、断裂、层间应力等问题的结论全部集中编写在一起。为减少篇幅，内容上尽可能避免冗长的公式推导，直接给出计算公式。由于层板是由各种单层板铺设起来的，单层板的特性自然决定了层板的特性。所以，我们由最基本的单层板开始讨论。

2-1 单层的力学特性

研究复合材料层板的力学特性是从研究单层复合材料的力学特性开始的。单层复合材料通常由纤维和基料组成。前者起增强作用，后者起填充作用。因此，构成单层复合材料的以上两种组分材料的本身特性，纤维的不同排列方式以及纤维和基料各占的体积百分比无疑地决定了单层复合材料的特性。本节单层复合材料的杨氏模量、泊松比、剪切模量、膨胀应变的计算公式，是充分考虑了上述组分材料的各种特性得出的近似算法。这些公式通常称为单层力学特性的微观力学表达式。

2-1.1 复合材料的弹性对称性

一个单向复合材料弹性常数的数目是和纤维排列方式有关的。这些排列方式见图 2-1 所示。图 2-1 a 中的矩形排列方式需要有九个弹性常数来描述其特性：三个杨氏模量 E_1 、 E_2 、 E_3 ；三个剪切模量 G_{12} 、 G_{13} 、 G_{23} ；三个主泊松比 ν_{12} 、 ν_{13} 、 ν_{23} ；三个次泊松比 ν_{21} 、 ν_{31} 、 ν_{32} 不是独立的常数。

图 2-1 b 中的正方形排列，根据对称性容易得到：

$$E_3 = E_2, \quad G_{13} = G_{12}, \quad \nu_{13} = \nu_{12}$$

所以独立常数减少到六个。

图 2-1 c 中的六边形排列， x_2x_3 平面是各向同性平面，下述经典的各向同性关系式成立：

$$G_{23} = \frac{E_3}{2(1 + \nu_{23})}$$

这样的材料称作横向各向同性材料，独立常数减少到五个。在制造中玻璃纤维和碳纤维容易形成六边形排列，因而具有五个独立弹性常数。

2-1.2 杨氏模量

单层板中平行于纤维方向的杨氏模量 E_1 ，可按组分材料的简单混合法则来计算：

$$E_1 = E_{1f}V_f + E_{1m}(1 - V_f) \quad (2.1)$$

式中， E_{1f} 和 E_{1m} 分别表示纤维纵向杨氏模量和基料纵向杨氏模量， V_f 表示纤维的体积百分比（ $V_f = \text{纤维体积} / \text{单层板体积}$ ）， $(1 - V_f)$ 则为基料的体积百分比。

单层板中垂直于纤维方向的杨氏模量 E_2 ，可由下面式子计算：

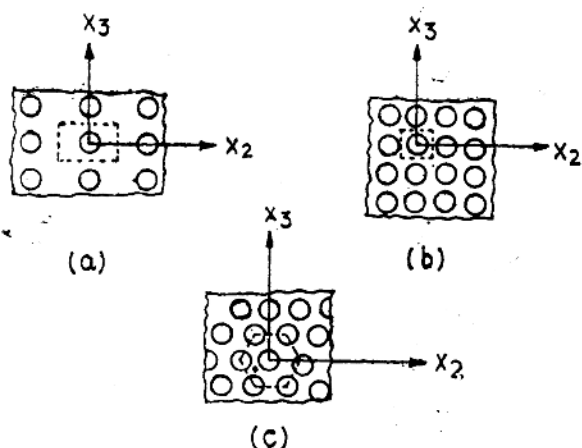


图 2-1 单向纤维排列几何形状：(a) 矩形排列、(b) 正方形排列、(c) 六边形排列

$$E_2 = \frac{E_{2m} (1 + \xi \eta_2 V_f)}{(1 - \eta_2 V_f)} \quad (2.2)$$

式中，

$$\eta_2 = \frac{(E_{2f}/E_{2m} - 1)}{(E_{2f}/E_{2m} + \xi)} \quad (2.3)$$

且 E_{2f} 和 E_{2m} 分别是纤维的横向杨氏模量和基料的横向杨氏模量， ξ 是纤维几何排列系数。具体说：

$\xi = 2$ 表示正方形排列

$\xi = 1$ 表示六边形排列

2-1.3 泊松比

单向复合材料的主泊松比 ν_{12} 可由简单的混合法则计算：

$$\nu_{12} = \nu_{12f} V_f + \nu_{12m} (1 - V_f) \quad (2.4)$$

式中 ν_{12f} 和 ν_{12m} 分别是纤维和基料的主泊松比。

次泊松比 ν_{21} 不是一个独立的弹性常数，它能由下面式子确定：

$$\nu_{21} = \nu_{12} \frac{E_2}{E_1} \quad (2.5)$$

对于横向各向同性单向复合材料，横向泊松比 ν_{23} 可由下面式子确定：

$$\nu_{23} = \frac{2E_1 K_2 - E_1 E_2 - 4\nu_{12}^2 K_2 E_2}{2E_1 K_2} \quad (2.6)$$

式中 K_2 是平面应变体积模量。对于连续纤维增强的单向复合材料， K_2 可由下面式子计算：

$$K_2 = \frac{(K_{2f} + G_{23m}) K_{2m} + (K_{2f} - K_{2m}) G_{23m} V_f}{(K_{2f} + G_{23m}) - (K_{2f} - K_{2m}) V_f} \quad (2.7)$$

式中 K_{2f} 和 K_{2m} 分别是纤维和基料的平面应变体积模量。

2-1.4 剪切模量

对于单向复合材料的面内剪切模量 G_{12} 由下面式子计算：

$$G_{12} = \frac{G_{12m} [G_{12f} (1 + V_f) + G_{12m} (1 - V_f)]}{G_{12f} (1 - V_f) + G_{12m} (1 + V_f)} \quad (2.8)$$

式中 G_{12f} 和 G_{12m} 分别是纤维和基料的面内剪切模量。

对于横向各向同性材料，将方程 (2.1)、(2.2)、(2.3)、(2.6)、(2.7) 和下式一起计算横向剪切模量 G_{23} ：

$$G_{23} = \frac{E_3}{2(1 + \nu_{23})}$$

2-1.5 膨胀应变

金属材料随着温度升高,其体积会发生膨胀。以聚合物为基料的复合材料,其体积也受温度影响,而且当基料从潮湿环境中吸收水分后,会引起材料体积变化。两者对于复合材料是同样重要的。在复合材料的分析中,通常使用广义膨胀应变 ϵ_i^E 的概念。具体表示为:

$$\epsilon_i^E = \alpha_i \Delta T + \beta_i \Delta C \quad (i=1,2,6) \quad (2.9)$$

式中 α_i 和 β_i 分别是热胀系数和湿胀系数。温度用 T 表示,而湿度用 C 表示。符号 Δ 表示增量。

对于各向同性组分, Schapery已经推导出热胀系数的近似微观力学表达式。对于连续纤维排列复合材料的纵向系数 α_1 由下面式子给出:

$$\alpha_1 = \frac{\overline{E\alpha}}{\overline{E}} \quad (2.10)$$

式中带横线的符号表示体积平均混合法则关系式。即

$$\overline{E\alpha} = E_f \alpha_f V_f + E_m \alpha_m (1 - V_f) \quad (2.11)$$

$$\overline{E} = E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad (2.12)$$

以 α_f 和 α_m 分别表示纤维和基料的热胀系数。

单向复合材料,具有各向同性组分,其横向热胀系数 α_2 可由下面式子计算:

$$\alpha_2 = \alpha_f V_f (1 + \alpha_f) + \alpha_m (1 - V_f) (1 + \nu_m) - [\nu_f V_f + \nu_m (1 - V_f)] \frac{\overline{E\alpha}}{\overline{E}} \quad (2.13)$$

在湿胀情况下,推导系数 β_1 和 β_2 的分析过程是完全类同