

空间结构用
复合材料设计手册

[荷] 欧洲航天局



航空航天部飞机强度研究所
航空航天部第四研究院

V258
951

教师阅览室

72644

空间结构用

复合材料设计手册

欧洲航天局 编

丁惠梁 沈真 樊发芬 译
谢鸣九 童贤鑫 李新祥
林德春 审核



90078853

航空航天部飞机强度研究所
航空航天部第四研究院

1992

内 容 简 介

本手册是复合材料空间结构设计和分析方面的工具书。全书共九章，包括用户指南、材料性能和应用、层合板计算方法、一般设计考虑、载荷传递与接头设计、结构设计、完整性控制、验证指南和制造等，书中还给出了大量数据、曲线、表格及计算公式，其中多数经验公式及系数，为其他文献所未见。

本手册主要供空间结构设计人员从事复合材料结构设计使用，也可供其他部门从事复合材料结构设计的人员以及从事复合材料研究、生产和使用部门的工程技术人员和高等院校相应专业的师生参考。

European Space Research and Technology Centre
COMPOSITES DESIGN HANDBOOK
FOR SPACE STRUCTURE APPLICATION

ESA Publications Division, 1988

空间结构用 复合材料设计手册

欧洲航天局 编

丁惠梁 沈 真 樊发芬 译
谢鸣九 童贤鑫 李新祥

林德春 审核

责任编辑：童安齐 杨家福

北京怀柔县黄坎印刷厂印刷

1992年10月第 一 版 开本：787×1092 1/16
1992年10月第一次印刷 印张：23 1/2
印数：1—1000 字数：550 000

20.5

译者前言

复合材料的优异性能可以满足航天结构对高强度-重量比和高刚度-重量比的要求,使用这种材料可得到尺寸稳定的结构. 但只有充分认识影响复合材料应用的各种因素,了解它与金属结构在设计上的差异才能发挥其效益. 与金属材料结构相比,要将复合材料用于结构需做更多的研究. 这是因为:(1) 真实构件的材料性能是设计过程的结果,无法预先知道;(2) 在设计过程中必须考虑各向异性材料的细观力学、弹性力学、强度和稳定性问题;(3) 湿度和温度的联合作用、制造过程及制造缺陷的影响等,以及空间环境中真空、温度急剧改变和强辐射条件对质量保证和试验提出了特别的要求.

由于在设计先进复合材料结构时必须考虑上述各种因素的影响,以及要求改善空间结构性能的呼声日益增高,欧洲航天局(ESA)编纂了本书,其目的是使目前对复合材料的认识和信息协调一致和标准化. 本手册可作为空间结构用复合材料的设计指南.

近年来,由于复合材料的应用日益广泛,已出版了大量有关复合材料本身及其制造、分析和应用方面的书籍,但直接针对复合材料空间结构设计方面的著作还未见到. 考虑到从事复合材料空间结构设计、制造、分析、验证、试验及使用维护方面工程技术人员的需要,我们翻译了这一手册. 相信它的出版将会为进一步提高复合材料在空间结构中的应用水平做出贡献.

本书的翻译工作由航空航天部的飞机强度研究所和第四研究院共同完成. 参加翻译工作的有丁惠梁(第一、二章)、沈真(第四、七、八、九章)、樊发芬(第三章)、谢鸣九(第五章)、童贤鑫和李新祥(第六章).

本书译稿由丁惠梁和沈真校订,林德春审核,许道一协助对译稿进行了整理,在此一并致以谢意.

目 录

第一章	用户指南	1
1.1	绪论	1
1.2	复合材料术语	2
第二章	材料性能及应用	22
2.1	概述	22
2.2	层合板设计用的基本材料数据	26
2.3	典型层合板力学性能指南	56
2.4	复合材料特有性能简介	80
2.5	非标准复合材料	96
2.6	适用的试验方法与标准	96
2.7	制造因素对复合材料性能的影响	99
第三章	层合板的计算方法	103
3.1	应力-应变关系	103
3.2	强度估算和失效准则	122
3.3	热应力与位移	140
3.4	湿度对热膨胀系数、应力和变形的影响	147
3.5	应力集中的影响	152
3.6	典型的动力特性	168
第四章	一般设计考虑	177
4.1	正确的纤维复合材料设计方法	177
4.2	固化应力	186
4.3	制造缺陷和损伤容限	188
4.4	环境考虑	193
第五章	载荷传递和接头设计	195
5.1	胶接接头	195
5.2	机械紧固接头	227
5.3	镶嵌件	242
5.4	载荷传递元件	253
第六章	结构设计	261
6.1	压杆设计	261
6.2	夹层结构设计	268
6.3	加筋和非加筋薄壁结构设计	301
6.4	尺寸稳定结构设计	319
6.5	纤维缠绕压力容器设计	324
第七章	完整性控制	337
7.1	完整性控制的目的	337
7.2	筛选与关键性有关的复合材料结构	338

7.3	复合材料构件中的缺陷	340
7.4	分析时对缺陷的理想化	343
第八章	验证指南	344
8.1	目的	344
8.2	原材料的采购标准	344
8.3	确定设计许用值的原理	349
第九章	制造技术	353
9.1	制造技术	353
9.2	机械加工技术	360
9.3	经济性考虑	366

第一章 用户指南

1.1 绪 论

1. 编写空间结构复合材料设计手册的必要性

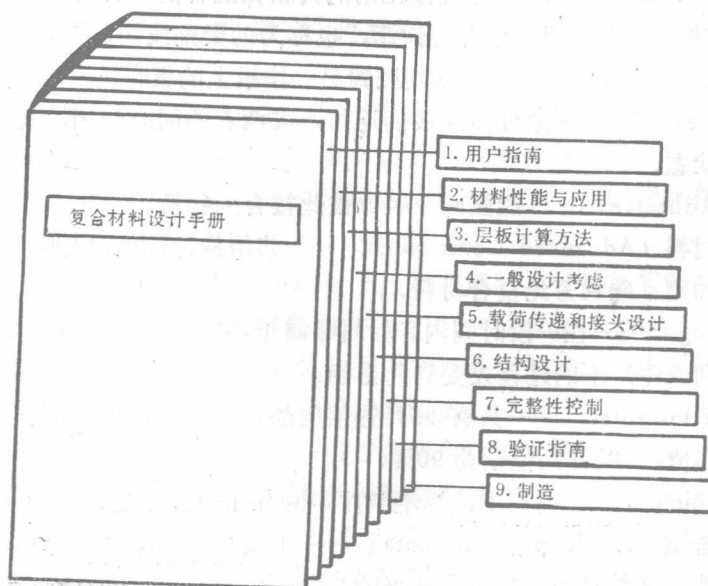
复合材料为设计者在改善空间结构的性能方面，提供了广泛的可能性，以满足日益增长的需求。复合材料的特征是高强度-重量比，高刚度-重量比以及能以制造出尺寸稳定结构的热特性。只有充分了解影响高性能复合材料应用的所有因素，充分重视其与金属结构在设计上之差异，才可能利用上述优点。

与金属设计不同的是，将复合材料用于结构工程需要做更多的研究工作。其原因在于：实际构件的材料性能本身就是设计过程的结果。在这过程中必须考虑到很多不同课题，它们包括细观力学、弹性理论、考虑一些特殊的条件（例如湿度与温度影响）下的强度与稳定性、制造方法及其形成的缺陷等。这些课题的特征是材料的各向异性性质。此外，还必须考虑宇宙空间的特殊环境，亦即真空、温度的剧烈变化和辐射。显然，有大量因素影响先进复合材料结构的设计。

为满足改善航天结构性能的日益增长的需要，应使所有可能获得的信息协调化、标准化，因此，欧洲航天局（ESA）为空间结构中的复合材料应用编写了这本专门的手册。本手册的编写工作始于1984年5日，由MBB/ERNO公司承办。

2. 本手册的结构

本手册的内容分为九章，如下图所示：



3. 资料来源与其可靠性

编入此手册的大量资料均取自于 MBB/ERNO 公司之外的各种不同的来源。其来源为一般出版物及供货商提供的材料数据。在可能的情况下，通过对照一个以上的出处以核实这些资料的可靠性。

(注：这些资料与数据决不是无差错的或可以担保无误的。)

除编入外来数据外，对某些专门课题还利用了 ESTEC 的研究和由手册编者积累的经验。

还有些工作并未编入手册内容，包括材料与结构的试验以及分析工具的发展。

1.2 复合材料术语

1. 引言

为保证准确无误地使用有关复合材料的术语，下面将提供有关术语的解释。术语及其缩写按英文字母顺序列出，它们主要选自参考文献[1]，[2]，部分选自参考文献[3]。

2. 参考文献

- [1] L. M. Schwartz, "Composite Material Handbook", McGraw-Hill, 1984.
- [2] S.W. Tsai, "Composites Design—1985", Think Composites, USA, 1985.
- [3] G.Lubin, "Handbook of Composites", Van Nostrand Reinhold Company, 1982.

3. 复合材料的术语解释

A

促进剂 (Accelerator) ——与有催化剂的树脂相混合的一种材料，用以加速催化剂与树脂间的化学反应，用于聚合物树脂，也称为助聚剂或固化剂。

胶接件 (Adherend) ——用胶粘剂胶到另一块板上的板。

胶接 (Adhesion) ——通过力或胶的连接，或两者的同时作用，使两个表面在界面处牢固结合的状态。

胶粘剂 (Adhesive) ——能使两个表面彼此接合的物质。

先进复合材料 (Advanced Composites) ——其结构特性能够与铝匹敌或优于铝的复合材料，例如硼、碳及芳纶复合材料。

老化 (Aging) ——在一段时间内，材料曝露于环境条件（高温、紫外线辐射、湿度或其他的不利条件）下的过程或受到的影响。

许用值 (Allowables) ——具有 95% 置信度的设计用性能值。‘A’许用值，是具有 99% 母体的最小值；‘B’许用值则为 90%。

环境 (Ambient) ——指周围的环境条件，例如压力或温度。

角铺设层合板 (Angle-ply Laminate) ——正负角度配置铺层数相同的层合板，由于具有正交异性，这种双向层合板是简单的。

各向异性 (Anisotropic) ——材料的力学和/或物理性能,其随相对于材料固有自然参照轴的取向改变而变化。

反对称 (Antisymmetry) ——特殊的中面对称情况,其偏轴分量的符号相反,例如,非对称的角铺层。

A阶段 (A Stage) ——某些热固性树脂(特别是酚醛)聚合反应的早期阶段,在该阶段加入增强剂之后,材料仍可溶于某些液体之中,且是可熔的。有时称之为甲阶段[参见B阶段(B-Stage),C阶段(C-Stage)]。

热压罐 (Autoclave) ——一种密闭容器,用以进行加压或加热条件下的化学反应或其他的操作。

热压罐模压 (Autoclave Molding) ——铺层之后,把整个组合件放到热压罐中,压力加到7—14bar大气压,温度为180°C;增大压力可提高增强剂的含量,并改善排气情况。

轴向缠绕 (Axial Winding) ——在纤维缠绕增强塑料中,纤维与旋转轴相平行的缠绕方式。

轴对称 (Axisymmetry) ——相对于某个轴的对称性;在层状材料的情况下,它在垂直于此轴的平面内是各向同性的,称这种材料为横向各向同性的。

B

均衡设计 (Balanced Design) ——纤维缠绕增强塑料的一种缠绕形式,它使所有纤维中的应力均等。

均衡层合板 (Balanced Laminate) ——板中的正角铺层有相等层数的负角铺层来平衡。角铺设层合板中仅有一对相匹配的角度,而均衡层合板则可能有很多对相匹配的角度,并含有0°和90°的铺层。均衡层合板的内面特性是正交异性的,但其弯曲特性则是各向异性的。

批料 (Batch) ——指在标准的控制条件下,经一个连续的运行过程生产出的一批材料(例如预浸料、纤维或树脂)。同一个批料将遵照一种固定的制造过程,并具有相同的性能(在预定的允差内)。

双轴载荷 (Biaxial Load) ——指(1)在层合板平面内至少有两个不同方向受力的受载情况;(2)压力容器受有内压作用并且端部无约束的受载情况。

双轴缠绕 (Biaxial Winding) ——纤维缠绕的一种类型,其螺旋带按顺序一根根靠着排列,不出现纤维的交叉叠压。

双向层合板 (Bidirectional Laminate) ——增强塑料层合板,其纤维在层合板平面内有各种取向,例如正交层合板[还可参见单向层合板(Unidirectional Laminate)]。

吸胶布 (Bleeder Cloth) ——紧邻复合材料构件放置的非结构成分的玻璃纤维布,用于吸收固化时多余的树脂,在构件固化后将其除去。

胶接接头 (Bonded Joint) ——用一层胶将两个胶接件粘接到一起。搭接接头的胶涂在搭接段处;斜接接头的胶位于相匹配的斜削段部位;台阶接头的胶则在台阶处。

胶接强度 (Bond Strength) ——粘接表面间的胶接强度,是将一层材料从其所粘物体上分开时所需应力的一种度量[参见剥离强度(Peel Strength)]。

B 阶段 (B-Stage) —— 某些热固性树脂反应的一个中间阶段；在此阶段，当它与某些液体相接触时会溶胀，加热时它会软化，但不会完全溶解或熔化。有时称之为半溶乙阶段。未固化的预浸料或预混料中的树脂通常就处于这一阶段[参见A 阶段(A-Stage)及C 阶段(C-Stage)]。

屈曲 (Buckling) —— 结构构件如板因过度受压或受剪而产生的不稳定横向位移。在轴向压缩时复合材料中的纤维也可能出现微屈曲。

纤维束 (Bundle) —— 很多平行长丝形成的束，通常不含有机基体。

纤维束强度 (Bundle Strength) —— 对带有或不带有有机基体的平行长丝组成的纤维束试验得出的强度。通常采用纤维束试验而不采用很难进行的单根纤维试验。

爆破强度 (Burst Strength) —— 使给定厚度的容器爆破所需的液压值；通常在试验纤维缠绕的复合材料结构时使用。

C

毯式曲线 (Carpet Plot) —— 一种设计曲线，给出单向刚度或强度随 0° ， 90° ， 45° 层取任意搭配比例而变化的函数关系。

壳体 (Case) —— 或弹体，指存储压力介质所需的全套结构。它包括压力容器、连接结构与主结构相连的结合面法兰盘。

催化劑 (Catalyst) —— 一种能改变化学反应速度而自身组成不发生永久变化的物质；添加少量（与主要反应物相比）催化剂后，能显著加速化合物的固化。

碳纤维复合材料 (CFRP) —— CFRP 表示碳纤维增强复合材料。本手册中字母 G 表示玻璃纤维 (Glass)，而在美国出版的有关手册中则用 G 表示石墨纤维 (Graphite)。

缠绕循环 (Circuit) —— 在纤维缠绕中指 (1) 缠绕机的纤维供料机构的一圈完整绕程 (循环)；(2) 缠绕带从任一点出发沿缠绕轨迹到达 (过该点并与轴线垂直的平面上) 另一个点的一圈完整绕程。

环向缠绕 [Circumferential (CIRC) Winding] —— 指纤维缠绕增强塑料中纤维基本上与轴线相垂直的绕法。

布 (Cloth) —— 由纤维或细纱加工而成的产品，其纤维或细纱具有足够的机械强度，使织物在加工处理时保持完整[参见织物 (Fabric)]。

共固化 (Cocure) —— 指同时把一个复合材料层合板固化并与其他材料或零件 (如蜂窝芯或加筋条) 胶接。

热膨胀系数 (Coefficient of Thermal Expansion, CTE) —— 因单位温度增高导致单位长度上的长度改变量。

相容性 (Compatibility) —— 能使两种或多种物质彼此组合构成一种均匀复合物，并使之具有有用的塑料特性。

柔度 (Compliance) —— 材料柔性 (与材料刚度相反) 的度量。它是弹性模量的倒数，或者是刚度矩阵之逆阵。

复合材料 (Composite 或 Composite Material) —— 由两种或两种以上组分制成的材料；本手册仅指纤维增强材料，例如编织或非编织形式的单向或多向纤维复合材料。

组分材料 (Constituent Materials) —— 构成复合材料的各种材料，例如石墨 (纤维)

与环氧是石墨/环氧复合材料的组分材料。

连续纤维有捻纱 (Continuous-Filament Yarn) —— 将两股或多股连续纤维加捻形成的单根连续丝束。

芯子 (Core) —— 夹层板芯部所用的轻质材料；把金属或复合材料面板胶接到芯子上就形成夹层板。

支数 (Count) —— 单位长度上经向和纬向纱的根数；例如按英制单位某织物的计数为 24×26 ，这意味着每英寸织物在经向有 24 支纱而纬向为 26 支纱。

耦合 (Coupling) —— 次效应与主效应之间的联系，泊松耦合将横向收缩与纵向拉伸相关联。对复合材料而言，各向异性层合板使剪切分量与法向分量相关联；非对称层合板使弯曲与拉伸相关联。这些耦合是复合材料所特有的，并提供了实现超常规功能的机会。

裂纹 (Crack) —— 模压材料中出现的真实分裂，可从零件的相对两表面看到，并且穿透整个厚度，亦即断裂 (Fracture)。

银纹 (Crazing) —— 细小的裂纹，它们可能在塑性材料的表面或在表面之下扩展成网络状。

蠕变 (Creep) —— 塑料在载荷作用下经历一段时间周期后产生的尺寸变化，其中不包括初始的瞬时弹性变形；在室温的情况下就称为冷流变 (Cold Flow)。

临界应变 (Critical Strain) —— 屈服点处的应变。

正交层合板 (Cross-Ply Laminate) —— 仅含有 0° 与 90° 层的特殊层合板。这种双向层合板是正交异性的，其泊松比几乎为零。另一种简单双向层合板是角铺设层合板，它们由一对均衡配置的偏轴层组成。

C 阶段 (C-Stage) —— 某些热固性树脂反应的最后阶段，此时的材料相对来说是不溶、不熔的；有时称之为不溶丙阶段。充分固化的热固性模压制品中的树脂就处于此阶段 [参见 A 阶段 (A-Stage) 及 B 阶段 (B-Stage)]。

固化 (Cure) —— 通过化学反应改变树脂的特性，这种反应可能是缩聚或加聚，通常通过加热或加催化剂的作用 (或二者均用) 在加压或不加压的条件下完成。

固化应力 (Cure Stress) —— 在复合材料结构固化周期中产生的残余内应力。

固化剂 (Curing Agent) —— 即硬化剂，加到树脂中使之聚合的催化剂或活性剂。

固化温度 (Curing Temperature) —— 铸塑、模压或挤压的产品，用树脂浸渍的增强材料或胶粘剂在固化时所需的温度。

固化时间 (Curing Time) —— 对零件加热或/和加压以使树脂固化的时间；指模具的可移动部分停止相对运动到卸压之间的时间间隔 [组合制件在不继续加热或加压后仍可能固化 [参见后期固化 (Post Cure)]]。

曲率 (Curvature) —— 对板件弯曲与扭转程度的几何量度。

CVCMM —— 收集的挥发物冷凝材料 (Collected Volatile Condensate Material)。

循环 (Cycle) —— 在加工工艺或工艺的部分过程中，重复的一系列完整操作。在模压时，循环时间 (也称周期) 是从一个循环的某点起到下一循环的同一点止所经历的时间。

D

损伤 (Damage) —— 一般术语，用以描述复合材料结构中所包含的固有裂痕 (缺

陷), 如裂纹、空穴、分层, 或外来的损伤 (如因工具掉落或其他外来物造成的冲击损伤)。

损伤关键部件 (Damage Critical Parts) —— 某些结构部件或元件, 如它们因裂纹/损伤的出现或扩展而遭到破坏, 结构就无法正常工作或出现对人员的灾难性伤害。

损伤容限 (Damage Tolerance) —— 具有裂纹、缺陷或其他损伤的结构, 在规定的未修使用期内, 承受规定载荷的能力。

损伤容限控制 (Damage Tolerance Control) —— 应用设计技术、材料与加工控制、制造技术与质量保证措施, 防止制造、试验及使用寿命期内因缺陷/损伤的出现或扩展而造成结构的提前破坏。

机械阻尼 [Damping (Mechanical)] —— 机械阻尼给出材料变形中以热量的形式耗散的能量值。理想的弹性材料无机械阻尼。

脱粘 (Debond) —— 由于玷污、制造中胶接不当以及会导致损伤的层间应力, 在层合板的各层内和层间或胶接接头内出现的分裂区域 [参见分层 (Delamination)]。

压实 (Debulk) —— 通过加压以减少厚度。通过排除层间截留的空气、蒸气及挥发性物质, 达到压实的目的。

挠度 (Deflection) —— 结构 (如梁) 的位移。

变形 (Deformation) —— 因外加应力、温度变化及吸湿造成的物体尺寸与形状的变化。尺寸变形用正应变分量来度量; 形状变形则用剪切分量来度量。

退化 (Degradation) —— 因老化、腐蚀及重复应力或持久应力 (疲劳或应力断裂) 造成的性能下降。

分层 (Delamination) —— 复合材料结构中, 材料层与层之间出现的分离。脱粘的过程主要是不利的层间应力造成的。然而, 可以用环绕增强的办法有效地防止边缘分层。

登尼尔 (Denier) —— 对细纱或长丝的支数测定体系。纱的纤度, 在数值上等于其 30 000ft (9 144m) 长度以克计量的重量值 (用于连续长丝)。登尼尔值越低, 纱就越细。

设计 (Design) —— 对给定的经受一组或多组应力作用的层合板, 选择最优的层数和纤维取向。

尺寸稳定性 (Dimensional Stability) —— 因温度变化或吸湿出现的变形为零或几乎为零。是石墨/环氧及芳纶/环氧复合材料所独有的特性, 应用于空间结构的高精度构件, 例如天线或望远镜。

位移 (Displacement) —— 物体表面或其内部某点移动量的量度。

封头 (Dome) —— 在纤维缠绕的圆柱形容器中, 构成此容器整体端头的部分。

叠缠部位 (Doubler) —— 为增强或修复的局部加强。

拔模斜度 (Draft) —— 模具垂直面的锥度或斜度, 以便模压件出模。

斜度角 (Draft Angle) —— 某点表面的切线与开模方向间的角度。

包模, 覆盖性 (Drape) —— 编织的或非编织的复合材料在复杂曲面上贴合的能力。

干铺层 (Dry Lay-Up) —— 将预浸过的增强材料 (部分固化的树脂) 铺贴到阴模或阳模上而制造层合板结构的方法, 一般再用压力袋模压或热压罐模压 [参见预浸料 (Prepreg)]。

停放时间 (Dwell Time) —— 层合板固化过程中加压前在高温下保持的时间。

动态模量 (Dynamic Modulus) —— 在振动条件下应力与应变的比值 (由自由振动或强迫振动试验得到的数据算出, 分剪切、压缩和拉伸模量)。

E

E 玻璃 (E glass) —— 一种硼硅酸盐玻璃。这类材料大部分用来制造玻璃纤维以增强塑料; 由于其高电阻, 适于制造电器用层合板。

弹性关系 (Elastic Relation) —— 完全可逆的单值应力/应变关系。加载与卸载过程遵循相同的路径, 不存在迟滞或残余应变。尽管可能有非线性的弹性关系, 但对复合材料而言, 这关系基本上是线性的。

伸长 (Elongation) —— 因受拉伸产生的变形, 即材料受拉时长度增量的分数 (当按原标距长度的百分数表示时, 称为延伸率)。

丝束 (End) —— 由一定数量长丝组合在一起构成的一股粗纱 (这股长丝在加捻以前为丝束或原丝, 加捻以后为有捻纱); 单根经纱、线、纤维或粗纱。

工程常数 (Engineering Constants) —— 由单向复合材料或层合板复合材料的单轴拉伸 (或压缩) 及纯剪切试验直接测得。典型的常数为有效弹性模量、泊松比及剪切模量。每个常数均标以字符或数字下标指明该性能所对应的方向。

环境条件 (Environmental Conditions) —— 占控制地位的温度与湿度条件。

环氧塑料 (Epoxy Plastics) —— 将环氧化物或环氧乙烷与其他材料, 如胺、乙醇、苯酚、羧基酸、酸酐和不饱和化合物等, 聚合后制成的热固性树脂。

赤道线 (Equator) —— 纤维缠绕中, 压力容器的圆筒部分与端部封头的交界线。

膨胀系数 (Expansion Coefficient) —— 对复合材料因温度变化及吸湿所产生膨胀的度量。

F

织物 (Fabric) —— 将纱、纤维或长丝交错排列而构成的平面编织材料 [参见编织、布 (Weave, Cloth)]。

制造 (Fabricating, Fabrication) —— 通过开孔、切割、钻孔、攻丝等操作, 将模制的构件、杆、管、板、挤压件等做成塑料制品的加工过程。制造包括用机械装置、胶粘剂、热封或其他方法, 把塑料零件相互紧固或与其他零件紧固在一起。

破损-安全 (Fail-Safe) —— 一种设计原则; 按此原则, 要求把结构设计得具有足够的剩余强度或抗损伤能力, 使之在含损伤的情况下承受限定的载荷。

失效准则 (Failure Criterion) —— 对复合材料在复杂应力或应变条件下破坏所作的经验描述。最常用的准则是最大应力、最大应变及二次准则。

失效包络线 (Failure Envelope) —— 由失效准则所确定的复合应力状态或应变状态的极限区限。

疲劳 (Fatigue) —— 重复施加应力后材料的力学性能丧失或蜕变 (疲劳试验给出材料抗裂纹扩展能力的信息; 因许多次循环载荷的作用, 裂纹会导致最后破坏)。

疲劳寿命 (Fatigue Life) —— 在给定的一组脉动载荷条件下, 导致试样破坏所需的变形循环数。

疲劳极限 (Fatigue Limit) —— 特定的应力值，当低于此值，对材料施加无限次循环应力也不会出现破坏。

疲劳强度 (Fatigue Strength) —— (1) 在出现破坏前材料能承受给定的循环次数的最大循环应力值；(2) 经受疲劳后的剩余强度。

纤维 (Fibre) —— 沿一个方向轧延或成形的单根长丝，用作为编织或非编织复合材料的主要组分。最常用的纤维为玻璃、硼、石墨与芳纶 (Kevlar) 纤维。

纤维复合材料 (Fibre-Composite Material) —— 由两个或多个分散物理相构成的材料，其中的纤维相分散在连续的基体相中。纤维相可以是宏观、细观或亚细观的，但它必须保持其物理可辨性，可以从基体中完整取出。

纤维含量 (Fibre Content) —— 纤维在复合材料中的体积百分数，目前常用的大多数复合材料的纤维含量在 45% 到 70% 之间。也可按重量或质量百分比来计算纤维含量。

纤维直径 (Fibre Diameter) —— 单根长丝直径的量度。

纤维/基体界面 (Fibre/Matrix Interface) —— 分隔纤维相和基体相的区域；这个界面在化学、物理和力学上均不同于纤维相和基体相。在大多数复合材料中，由于纤维、基体间的扩散及化学反应，这界面具有有限的厚度（数毫微米到数千毫微米）。因此，更适当的说法是把此界面称为“中间相”或“界面区”。当对纤维加以涂层或有几个化学相具有确定的微观可辨厚度时，界面区可以由几个界面构成。

纤维取向 (Fibre Orientation) —— 在非编织层合板或毡片层合板（其中的大部分纤维位于相同方向）中的纤维排列方向，该方向上有较高的强度。

纤维线型 (Fibre Pattern) —— (1) 在层合板及模压件表面的可见纤维；(2) 玻璃布中线的尺寸及织法。

Fick 方程 (Fick's Equation) —— 水分迁移的扩散方程，它与傅里叶 (Fourier) 热传导的方程相似。

长丝 (Filament) —— 具有极高比刚度与比强度的连续纤维，它是先进复合材料的主要组分。

纤维缠绕 (Filament Winding) —— 按预定线型将纤维缠绕于芯模上的自动过程。树脂的浸渍可在缠绕之前或缠绕过程中进行，分别称为预浸缠绕或湿缠绕。随后在复合材料固化后拆去芯模。在制造压力容器、管子、驱动轴或任何轴对称装置时，纤维缠绕是非常适宜的。

纬线 (Fill, Filler) —— 在织物中与经线成直角取向的纱（见纬纱）。

胶膜 (Film Adhesive) —— 一种合成的树脂粘合剂（通常为热固性的），用薄的干树脂膜形式提供，带有或不带有衬纸。

表面处理 (Finish) —— 用以处置纤维以改善纤维与基体间界面用的材料与工艺过程。

第一层破坏 (First-Ply-Failure) —— 在多向层合板中首先破坏的层或层组。与这种破坏对应的载荷可能是使用极限载荷。

接头 (Fitting) —— 接头 [或“凸台” (Bosses)] 用于引入或导出所存储的介质，并在极孔处封闭住容器。它们通常也是制造容器时所用芯模的必须部分。

缺陷 (Flaw) —— 复合材料结构中的局部不连续，例如划伤、缺口、裂纹、空隙、

分层或脱粘。

临界缺陷 (Critical Flaw) —— 具有某个尺寸大小与形状的缺陷，在特定工作载荷与环境下它会出现不稳定扩展。

初始缺陷 (Initial Flaw) —— 施加工作载荷或曝置于环境前就存在于复合材料结构中的缺陷。

弯曲模量 (Flexural Modulus) —— 在弹性范围内，受弯试样最外层纤维处所受应力与相应应变之比。

弯曲强度 (Flexural Strength) —— (1) 材料对弯曲应力破坏的抵抗能力；(2) 弯曲时的材料强度，用受弯试样最外层纤维在破坏瞬间的拉伸应力表示；(3) 在弯曲破坏前对最大载荷的单位抗力。

流动 (Flow) —— 树脂在压力下的运动，使模具的各部分得以充填；流动或蠕变是材料（通常在高温下）在持续载荷作用下产生的逐渐而持续的变形。

阳模 (Force) —— (1) 模具中的阳模部分，它插入模腔并对树脂加压使之流动（也叫做冲头）；(2) 压模的任一部分（上模及下模）。

傅里叶方程 (Fourier Equation) —— 通常是与物体热传导有关的扩散方程，Fick 方程为一特例，用于水分的迁移与累积。

断裂 (Fracture) —— 层合板不完全分裂时的表面破裂。

自由膨胀 (Free Expansion) —— 没有外部应力时的热膨胀或湿膨胀。

G

凝胶时间 (Gelation Time) —— 对热固性树脂，指从胶液体系中加入催化剂到形成凝胶的时间间隔。

胶衣 (Gel Coat) —— 在铺贴铺层之前涂到模具表面并使其胶凝的树脂。胶衣最后会变成层合板整体的一部分，通常用于改善表面外观质量等。

凝胶点 (Gel Point) —— 液体开始呈现出假弹性的阶段，并能从粘度/时间曲线的转折点上明显看出，也称为凝胶时间。

广义胡克定律 (Generalized Hook's Law) —— 各向异性材料最普遍的线弹性应力/应变关系，可由其导出具有各种对称性的材料性质。

短程线 (Geodesic) —— 表面上两点间的最短距离。

短程等张力线 (Geodesic Isotensoid) —— 任何给定长丝在其绕径的所有点上均具有等应力。

短程等张力轮廓线 (Geodesic-Isotensoid Contour) —— 纤维缠绕增强塑料压力容器中的一种封头轮廓，在此轮廓内纤维按短程线铺设，这样在压力载荷作用下纤维沿全长受均匀拉伸。

短程椭圆线 (Geodesic Ovaloid) —— 一种端封头的轮廓线，纤维在绕转面上形成短程线。纤维所作用的力与任意点上环向应力和子午线应力成比例。

玻璃钢 (GFRP) —— 玻璃纤维增强塑料，用碳纤维增强的塑料记为 CFRP。

玻璃长丝 (Glass Filament) —— 将熔融玻璃通过白金坩锅牵拔而得，是复合材料中使用最广泛的长丝。可制成单向层合板、织物、毡及片状模塑料一类的短纤维复合材料。

玻璃化转变温度 (Glass Temperature, Glass Transition Temperature) ——有机树脂的刚度与强度出现急剧下降时之温度, 是树脂材料使用的最高温度。

石墨长丝 (Graphite Filament) ——由聚丙烯腈 (Poly-Acrylic-Nitrile, PAN) 长丝经过高温曝露和机械拉伸而得。也可用其他材料和加工方法, 但不常用。

H

手工铺贴 (Handy Lay-Up) ——用手工将增强材料层或树脂预浸增强层在模具上逐层铺设到位的过程。

硬化剂 (Hardner) ——(1) 添加到塑料复合物中, 用以促进或控制固化反应, 并参与此反应的物质或混合物; (2) 用于控制固化薄膜硬度的一种添加物 [参见催化剂 (Catalyst)]。

非均匀性 (Heterogeneity) ——在细观量级上, 是指组分材料的局部变化; 在宏观量级上, 是指层与层之间材料或取向的变化。

HM ——高模量 (碳纤维)。

均质性 (Homogeneity) ——物体内部材料的均匀性。在复合材料力学中, 细观与宏观的均匀性是以将真实的不均匀性通过平均处理达到的。

蜂窝 (Honeycomb) ——用树脂预浸的片材 (纸、玻璃织物等) 或金属薄片做成的具有六角形格子的制品, 用作夹层结构的芯材。

周向应力 (Hoop Stress) ——受有内压或外压时, 圆筒形状材料中出现的环向应力。

HT ——高强度 (碳纤维)。

混杂复合材料 (Hybrid) ——具有两种以上组分的复合材料, 例如碳/玻璃/环氧混杂复合材料。层内混杂复合材料具有由碳和玻璃长丝制成的混杂层。层间混杂复合材料则由两种或多种不同的材料铺层构成的层合板。

吸湿 (Hygroscopic) ——从空气中吸收水分。

湿热效应 (Hygrothermal Effect) ——因吸湿和温度变化产生的性能改变。

I

IM ——中等模量 (碳纤维)。

浸渍 (Impregnate) ——增强塑料中, 使增强材料浸透树脂。

初始模量 (Initial Modulus) ——参见模量 (Modulus of Elasticity)。

镶嵌件 (Insert) ——模塑制件的一个组成部分, 由金属或其他材料制成; 它们可以在模压时置入就位, 也可在压制件完工后压入。

交互作用 (Interaction) ——与耦合 (Coupling) 同。例如纵向拉伸强度会因有横向应力而受影响。纵向屈曲应力与横向应力或剪应力间也有相似的交互作用。就规律而言, 复合材料的交互作用效应要大于常规的各向同性材料。因此, 必须同时考虑预期会出现的所有应力。

界面 (Interface) ——各组分材料之间的边界区或过渡区 (例如纤维/基体界面), 或层合板中各层之间的边界。细观界面 (即纤维/基体界面) 处的脱粘可能导致纤维的断裂或基体的开裂。宏观界面 (即层间界面) 处的脱粘可能导致分层。

层间剪切强度 (Interlaminar Shear Strength) ——层合板材料中层与层之间具有的剪切强度。

层间应力 (Interlaminar Stress) ——复合材料层合板结构中,两个或多个相邻层之间的应力。在板的厚度方向上有三个相应的应力分量;其余三个为板的面内分量。只有当板厚大于板长或板宽的10%时,层间应力才是不可忽视的。同时,在集中载荷作用的区域和材料或几何尺寸有急剧变化处,这种应力也是重要的,因为三维应力分析和失效准则尚未被人们透彻了解,不容易确定这些应力的影响。

层内应力 (Interlaminar Stresses) ——在一个单层平面内的应力。

不变量 (Invariant) ——对所有坐标轴取向均取常值的量。应力、应变、刚度及柔度的分量均有其线性不变量和二次不变量。对复合材料,它们代表了多向层合板的刚度和强度与方向无关的特性和对应的边界值。

各向同性 (Isotropy) ——与方向无关的性能。

J

接头 (Joint) ——用胶层将两个被粘物体固定在一起的部位,是胶接结构的总的接触区域。

对接接头 (Butt Joint) ——两个被粘物粘结的端面与其他面呈直角的接头。

嵌接接头 (Scarf Joint) ——把两个被粘物体切去相似的斜角块,再将被切割部分配合一致粘结起来的接头。

搭接接头 (Lap Joint) ——把一个被粘物体的一部分放到另一被粘物体上,把重叠部分粘结到一起形成的接头。

连接结构 (Joint Structure) ——压力容器必须与周围的主要结构相连接,这任务由连接结构来实现。圆筒连接结构(或“环裙”)用于将等张力容器连接到它们的筒身区域上。用托架(Brackets)在极点处连接球状容器。这些连接结构的设计应考虑所有的受载情况。

K

Kevlar 纤维 (Kevlar Fibre) ——杜邦(Du Pont)公司一种芳纶纤维的商品名。

KFRP ——Kevlar 纤维增强的塑料。

L

单层 (Lamina) ——参见铺层(Ply)。

层合板 (Laminate) ——由一种或多种复合材料的单向层或多向层构成的板。

层合板族 (Laminated Family) ——具有相同层数和铺层角的各种层合板。

层合板理论 (Laminated-Plate Theory) ——分析与设计复合材料层合板时最通用的方法。每个层或层组被当作准均质材料;假定应变沿厚度方向线性分布。也叫做叠层理论(Lamination Theory)。

重叠 (Lap) ——纤维缠绕时,相继两圈间的重搭部分,这样做通常为的是减小间隙。

单层 (Layer) ——参见铺层(ply)。