

复合材料结构设计手册

中国航空研究院 编著

航空工业出版社

内 容 提 要

本手册是在总结复合材料在航空工业中技术进展的基础上,由30多位航空领域的复合材料专家共同编写完成的复合材料结构设计和分析用工具书。全书共分为19章和4个附录,基本上覆盖了复合材料结构设计的所有领域,它们分别是设计要求和原则,同时还概述了结构选材、设计时的工艺性考虑与设计许用值的确定原则和方法;材料和工艺部分给出了设计师应当掌握的材料与工艺基本知识;第4章至第6章给出了复合材料结构的三种基本要素,即层压结构、夹层结构和连接区的设计方法;第7章至第10章给出了飞机结构主要部件,即机翼、机身、尾翼和操纵面的结构设计方法,以及直升机结构(包括动部件和机身部件)的设计;第11章至第16章给出了不同结构完整性要求内容,即稳定性、耐久性与损伤容限和动力特性的设计与分析方法、电性能的设计方法,以及环境影响与防护和结构试验的有关内容;第17章至第19章分别给出了结构修理、纺织复合材料结构设计基础和创新结构设计技术。4个附录分别给出了国内外常用复合材料体系设计用材料性能、已有的复合材料标准目录、民用飞机复合材料部件适航审定程序的特殊要求,摘录了国外有关手册给出的设计经验。

本手册主要供飞机设计人员从事复合材料结构设计使用,也可供航空航天和其他部门从事复合材料结构设计及从事复合材料研究、生产和使用部门的工程技术人员与高等院校的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

复合材料结构设计手册/沈真主编:中国航空研究院
编著. —北京:航空工业出版社,2001.11
ISBN 7-80134-939-3

I. 复… II. ①沈…②中… III. 非金属复合材料
—飞机构件—结构设计—技术手册 IV. V222—62

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第075013号

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里14号 100029)

北京云浩印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

2001年11月第1版

2001年11月第1次印刷

开本:787×1092 1/16 印张:44 字数:1063千字

印数:1—1000

定价:150.00元

序

为了提高航空器的性能和竞争力，必须设法减轻结构的固有重量，并提高结构的可靠性、维修性、生存力和使用寿命，还必须降低结构的全寿命成本。航空先进技术的发展已经证明复合材料的应用是实现上述要求的最好途径之一。我国自 20 世纪 70 年代开始先进复合材料的发展研究，80 年代起复合材料的研究和应用列入航空研究和发展规划。在国家有关部门的大力支持下，我们取得了一系列可喜的基础预研成果，在工程应用方面充分表现了复合材料在航空器发展中的重要作用。

“六五”、“七五”航空复合材料技术的预研，使复合材料在航空结构中的应用，从次结构过渡到了主结构，并开始进入主承力结构的发展研究，与此同时形成了初步的航空复合材料结构设计、分析和验证技术。由中国航空研究院组织编写、并于 1990 年出版发行的《复合材料设计手册》就是它的归纳总结。该手册对于指导复合材料结构设计，推动复合材料研究应用的发展，曾起到过十分重要的作用。

“八五”、“九五”航空复合材料技术进一步的预研和应用，使复合材料在航空结构中的应用不仅实现了从主结构向主承力结构应用的过渡，还实现了由等代设计向高效结构新机设计的过渡，同时还形成了较为完整、成熟且满足结构完整性要求的航空复合材料结构设计、分析和验证技术。现在“飞机复合材料结构强度技术研究”课题组组织编写了新的《复合材料结构设计手册》，将这些研究和应用成果进行归纳总结，更为注重工程实用，它对于促进复合材料在结构上的扩大应用，提高航空结构的性能，并推动在此基础上新技术的完善和发展必将会发挥重要的作用。

希望本手册的出版和应用有利于新一代设计人员的成长，有利于加快缩短与国外先进水平的差距，有利于航空工业和其他行业的自主跨越式发展。

正值航空工业创建 50 周年纪念之际，向为《复合材料结构设计手册》编写、出版给予大力支持并作出贡献的专家、各单位领导和有关人员表示衷心感谢！

中国航空研究院院长



2001 年 4 月

编 审 委 员 会

主 任：朱梅庄

副 主 任：沈 真 章怡宁 黎观生 龚鑫茂 马祖康

主 编：沈 真

副 主 编：章怡宁 黎观生 龚鑫茂 李 野

主 审：马祖康

副 主 审：杨乃宾 陈业标 王全荣 矫桂琼

常 务 编 委：王全荣 马祖康 沈 真 杨乃宾 李 野

陈业标 金赛君 赵渠森 贺 高 胡红东

倪先平 章怡宁 龚鑫茂 谢鸣九 矫桂琼

黄承恭 黎观生

责任编辑：李铁柏 刘 峰

封面设计：刘鹏飞 薛景川

审 订：周士林

各 章 编 写 人 员

前 言	编 写：沈 真				
	校 对：矫桂琼				
符号表	编 写：沈 真				
	校 对：矫桂琼				
术 语	编 写：沈 真				
	校 对：矫桂琼				
第 1 章	编 写：沈 真	杨乃宾			
	校 对：章怡宁	黎观生	龚鑫茂		
第 2 章	编 写：沈 真	王全荣			
	校 对：章怡宁	黎观生	龚鑫茂		
第 3 章	编 写：贺 高	赵渠森			
	校 对：杨乃宾				
第 4 章	编 写：梁惠钧	白佐周			
	校 对： 龚鑫茂				
第 5 章	编 写：陈业标				
	校 对：张玉安				
第 6 章	编 写：谢鸣九				
	校 对：陈业标				
第 7 章	编 写：周之鹏				
	校 对：章怡宁				
第 8 章	编 写：杨乃宾				
	校 对：章怡宁				
第 9 章	编 写：李志刚	金赛君	梁惠钧	初中旭	
	校 对：黎观生				
第10章	编 写：黄承恭	郭俊贤	邱光荣	荚淑萍	胡启元
	樊光华	吴建华	傅 彪	丁惠萍	
	校 对：吴启荣				
第11章	编 写：童贤鑫	李新祥			
	校 对：汪 海				
第12章	编 写：沈 真	陈普会	柴亚南	张开达	
	校 对：矫桂琼				

第13章	编写:	何连珠	张 鹏			
	校对:	张 鹏	何连珠			
第14章	编写:	周之鹏				
	校对:	杨 旭				
第15章	编写:	李 野	周之鹏			
	校对:	王全荣				
第16章	编写:	沈 真	李 野	李令芳	许秋莲	仝永喆
	校对:	周辰福				
第17章	编写:	张阿盈				
	校对:	周辰福				
第18章	编写:	杨胜春	张庆茂	张阿盈		
	校对:	张庆茂				
第19章	编写:	马祖康	羊 姝			
	校对:	沈 真				
附录A	编写:	沈 真	周辰福	贺 高		
	校对:	周辰福	沈 真			
附录B	编写:	杨乃宾				
	校对:	沈 真				
附录C	编写:	马 健	沈 真			
	校对:	沈 真	马 健			
附录D	翻译:	沈 真	杨胜春			
	校对:	谢鸣九	沈 真			

前 言

先进复合材料以其优异的性能，现已广泛应用于航空、航天器和各种武器装备，对促进结构的轻量化、小型化和高性能化起了至关重要的作用，先进树脂基复合材料在结构上的用量已成为飞机结构先进性的重要标志之一。

为了总结我国航空复合材料技术应用成果和经验，原航空航天工业部科学技术研究院曾于1990年组织出版了《复合材料设计手册》，该手册在20世纪90年代我国复合材料结构的发展中起到了积极推动的作用。随着复合材料在飞机结构应用的不断扩大和“八五”、“九五”预研工作的进展，航空复合材料在材料、成形工艺、结构设计、分析和验证技术等方面取得了显著的进步，研制成功了Y7垂尾、多墙式复合材料垂尾、全高度蜂窝鸭翼、带整体油箱机翼等一系列复合材料主结构，并参与了MPC75复合材料垂尾等国际合作项目，积累了丰富的实践经验和大量设计数据：例如发展了固定翼飞机机翼、鸭翼、垂尾及直升机旋翼、机身的结构设计分析和验证技术；编制了复合材料结构专用设计分析软件；开发了为满足新型飞机复合材料结构的低成本高损伤容限要求所需的新的设计和分析技术。

为了总结近十年来复合材料在航空工业中的技术进展，在中国航空研究院领导支持下，飞机复合材料结构强度技术研究课题组组织编写了这本《复合材料结构设计手册》，它是由长期从事飞机复合材料结构设计和研究工作的30多名专家，花费了两年时间完成的。谨以此作为迎接新世纪和献给我国航空工业创建50周年的礼物。

《复合材料结构设计手册》将与《复合材料连接手册》、《复合材料飞机结构耐久性/损伤容限设计指南》、《复合材料结构修理指南》、《复合材料稳定性分析指南》一起，构成复合材料结构设计的系列用书，以促进复合材料在结构上的扩大应用，为我国航空事业飞跃发展作出应有的贡献。

《复合材料结构设计手册》编委会

2001年3月

主要符号说明

A	面积, 波幅
$[A]$	层压板的面内刚度矩阵
a	长度, 裂纹长度, 椭圆的长半径
$[a]$	对称层压板的面内柔度矩阵
$[B]$	层压板的耦合刚度矩阵
b	宽度, 椭圆的短半径
C	蜂窝芯子的厚度
$[C]$	单向层压板中三维应力的模量矩阵
c	吸湿量, 比容量
D	直径
$[D]$	层压板的弯曲刚度矩阵
d	直径, 距离
$[d]$	对称层压板的弯曲柔度矩阵
E	弹性模量, 第二类椭圆积分
e	端距, 湿热膨胀应变
F	外力, 应力空间中的强度参数, 第一类椭圆积分
f	挠度, 频率
G	剪切弹性模量, 应变空间中的强度参数
H	距离, 厚度
h	厚度, 距离
I	惯性矩, 一阶不变量
$[J]$	坐标转换矩阵
K	应力集中系数, 屈曲载荷系数
k	曲率, 扭率
L	长度, 半波长
M	质量, 力矩
m	质量, 铺层组数, 铺层角的余弦函数, 纵向半波数
N	内力, 疲劳破坏时的循环数
n	铺层数, 节点数, 铺层角的正弦函数, 横向半波数
P	外力
p	压力
Q	剪力
$[Q]$	单向层压板主平面应力状态下的模量矩阵
q	剪流
R	半径, 强度比
r	半径, 子层压板的重复数
S	剪切强度, 静矩

[S] 单向层压板三维或平面应力状态下的柔量矩阵

T 温度

T_g 玻璃化转变温度

t 厚度, 时间

U 线性组合, 应变能

u, v, w x, y, z 方向的位移

V 体积

W 宽度, 间距, 重量 (质量)

X 纵向强度

Y 横向强度

α 角度, 坐标转换角, 热膨胀系数

[α] 层压板的面内柔度矩阵

β 角度, 湿膨胀系数

[β] 层压板的耦合柔度矩阵

γ 角度, 剪应变

Δ 位移

δ 位移, 挠度

[δ] 层压板的弯曲柔度矩阵

ϵ 正应变, 线应变

η 应力分配参数, 有效宽度修正系数

θ 铺层角

λ 波长, 椭圆形状比, 导热系数

ν 泊松比

ρ 密度, 曲率半径, 电阻率

σ 正应力

σ_b 拉伸强度

[σ] 许用正应力

τ 剪应力

τ_b 剪切强度

[τ] 许用剪应力

ϕ 角度

Φ 角度

Ω 面积

上角标符号

* 正则化

, 新轴, 导数

。 子层压板, 面内, 基本状态

+ 顶面, 正转换

— 底面，负转换
T 矩阵转置
m 机械
n 非机械
r 残余
f 弯曲
i 层间

下角标符号

x, y, z 分别为 x, y, z 方向
 $1, 2, \dots, i$ 分别为 $1, 2, \dots, i$ 方向
L 纵向
T 横向
cr 临界值
max 最大
min 最小
t 拉伸
c 压缩
s 对称，面内剪切
m 基体
f 纤维，面板
0 单层

顶标符号

— 偏轴，矢量，等效

术 语

复合材料 (Composites; Composite Materials) —— 由两种或两种以上材料独立物理相通过复合工艺组合而成的新型材料, 其中, 连续相称为基体, 分散相称为增强体。它既能保留原组成材料的主要特色, 并通过复合效应获得原组分所不具备的性能。可以通过材料设计使各组分的性能互相补充并彼此联系, 从而获得新的优越性能。

先进复合材料 (Advanced Composites) —— 主要指结构性能相当或优于铝合金的复合材料, 如用高性能增强体如碳纤维、芳纶等与高聚物构成的复合材料, 还包括金属基、陶瓷基和碳(石墨)基以及功能复合材料。

碳纤维复合材料 (CFRP) —— 以碳或石墨纤维为增强体的树脂基复合材料。

芳纶复合材料 (AFRP) —— 以芳纶纤维为增强体的树脂基复合材料。

玻璃纤维复合材料 (GFRP) —— 以玻璃纤维为增强体的树脂基复合材料。

混杂复合材料 (Hybrid Composites) —— 由两种或两种以上纤维增强体与同一种基体组成的复合材料。

热固性树脂 (Thermosetting Resin) —— 一类有机材料, 通过分子间的交联可变为固体, 如环氧树脂、双马来酰亚胺等, 这是复合材料中最常用的一类基体材料。

热固性复合材料 (Thermosetting Composites) —— 以热固性塑料为基体的复合材料。

热塑性树脂 (Thermoplastics Resin) —— 一类具有线型或分枝型结构的高聚物基体材料, 其特点是遇热软化或熔融而处于可塑性状态, 冷却后又变成坚硬固体, 而且这一过程可反复进行, 如聚醚醚酮 (PEEK) 树脂。它的一个独特性能是可以产生很大的应变。但另一方面, 它在加工中所需的温度和压力要高于热固性树脂。

热塑性复合材料 (Thermoplastic Composites) —— 以热塑性塑料为基体的复合材料。

工程常数 (Engineering Constants) —— 对单向及多向层压板进行单轴拉、压及纯剪试验直接测得的常数, 包括拉、压、剪切弹性模量和泊松比等。

正交各向异性 (Orthotropy) —— 材料具有 3 个互相垂直的弹性对称平面的特性。这些平面的垂直方向称为材料的主方向。

横向各向同性 (Transverse Isotropy) —— 具有正交各向异性特性的材料, 若有一个各向同性的平面时, 称其具有横向各向同性。例如单向复合材料即具有此种特性。

正轴 (On-Axis) —— 与材料主方向重合的参考坐标轴。

偏轴 (Off-Axis) —— 与材料主方向不重合, 有一个偏转角 θ 的参考坐标轴。

耦合 (Coupling) —— 一种外力引起与其有对应的基本变形的效应称为耦合。

宏观力学 (Macromechanics) —— 在复合材料力学中采用层压板理论进行分析的力学。此时在每一铺层内纤维和基体作为一个整体而不再加以区分。

微观力学 (Micromechanics) —— 在复合材料力学中要分别考虑纤维和基体的性能以及界面的情况, 研究它们相互关系并进行分析的力学。

失效准则 (Failure Criterion) —— 复杂应力—应变状态下, 材料失效的判据。

失效包线 (Failure Envelope) —— 复杂应力—应变状态下, 由失效准则确定的各极限值形成的包络线。

层间应力 (Interlaminar Stresses) —— 除层压板的三个面内应力分量外, 指与厚度方向有关的 3 个应力分量, 即 σ_z , τ_{zx} , τ_{zy} 。

层间剪切 (Interlaminar Shear) —— 指层间应力分量中的两个剪切分量, 即 τ_{zx} , τ_{zy} , 也称横向剪切。复合材料层间剪切强度较低, 是它的一个弱点。

复合应力 (Combined Stresses) —— 由两种或两种以上的基本应力组合成的复杂应力状态。

铺层角 (Ply Orientation Angle) —— 每一铺层的纤维方向与制件的参考坐标 X 轴之间的夹角, 由 X 轴到纤维方向逆时针旋转为正。

铺层组 (Ply Group) —— 一组具有相同铺层角的连续铺层。

铺层顺序 (Ply Stacking Sequence) —— 铺贴中具有各种不同铺层角的铺层的排列次序。

对称层压板 (Symmetric Laminate) —— 全部铺层及其各种特性和参数相对于板的几何中面对称的层压板。

均衡层压板 (Balanced Laminate) —— 层压板中以主参考轴测量的 $+\theta$ 与 $-\theta$ 的铺层数量相等并且铺层对称的层压板。

均衡对称层压板 (Balanced Symmetric Laminate) —— 既均衡又对称的层压板。

正交层压板 (Cross-Ply Laminate) —— 只含有 0° 和 90° 铺层的双向层压板。

斜交层压板 (Angle-Ply Laminate) —— 只含有 $+\theta$ 和 $-\theta$ 铺层的双向层压板。

准各向同性板 (Quasi-Isotropy Laminate) —— 面内各个方向的弹性常数相同的对称层压板。

子层压板 (Sub-Laminate) —— 在层压板内一个可多次重复的多向铺层组合。

长丝 (Filament) —— 有一定连续长度的纤维。

纤维束 (Tow, Yarn) —— 多根纤维组成的丝束, 一个纤维束可含有 1 000, 3 000, 6 000 或 12 000 根等不同数量的单丝。

预浸料 (Prepreg) —— 将树脂基体浸涂到纤维或织物上, 通过一定的处理后贮存备用的中间材料。

单向带 (Tape) —— 相互平行的连续纤维或单向织物经浸渍树脂胶液, 再经晾置或烘干后形成的预浸料。

铺层 (Lamina; Ply) —— 层压复合材料中的一层单向带或织物, 在计算时还包括连续铺设在同一方向的单向层组, 是层压复合材料的最基本单元。

层压板 (Laminate) —— 由两层或多层同种或不同种材料层合压制而成的复合材料板材。

玻璃化转变温度 (Glass Transition Temperature) —— 聚合物在一定升温速率下达到一定温度值时, 模量—温度曲线出现拐点, 在此拐点温度附近, 表征聚合物的物理参数出现不连续的变化, 此种现象称为玻璃化转变, 所对应的温度称玻璃化转变温度 (T_g)。

树脂含量 (Resin Content) —— 复合材料中树脂体积或质量所占的百分比。

纤维含量 (Fiber Content) —— 复合材料中纤维体积或质量所占的百分比。

贮存期 (Shelf Life) —— 在规定的条件下, 材料仍能满足规范要求而不失效的最长存放时间。

使用期 (Operate Life) —— 在正常施工条件下, 材料仍能满足规范要求而不失效的最长操作

时间。

尺寸稳定性 (Dimensional Stability) —— 复合材料制件在温度和湿度等环境条件变化的情况下仍能保持原有形状和尺寸的特性。

织物 (Fabric) —— 以纱线、长丝等为材料，运用各种织造及其他方法制成的平状物。如机织物、针织物、编织物、无纺织物等。

预成形件 (Preform) —— 在放置于模具内并注入树脂之前，包含有不同结构细节并形成预期形状的纤维增强织物。

经纱 (Warp) —— 织物中与织边平行的纱，或机织物上沿长度方向排列的纱。

纬纱 (Fill) —— 织物中与经纱或长度方向成 90° 的纱。

机织物 (Weaving Fabric) —— 以 2 组纱 (线) 即经纱 (线) 和纬纱 (线) 纵横交织而成的织物。

平纹机织物 (Plain Weave) —— 一根经纱上下交替地穿过每一根纬纱的最简单的机织物。

无纬布 (Uniweave) —— 由经向的承载碳纤维和少量 (5%) 纬向玻璃 (或聚酯) 纤维组成的平纹机织物。

针织物 (Knitting Fabric) —— 用针织机将纱线弯曲成线圈，纵串横联而成的织物。按线圈的连接特征，可分为纬编针织物和经编针织物两大类。

编织物 (Braiding Fabric) —— 纱线或长丝相互交叉成“人”字形 (或 ∞ 形) 编成的织物。

缝合 (Stitch) —— 缝合是在纤维预成形件上采用缝纫的方法在厚度方向上增加增强纤维材料。

单胞 (Unit Cell) —— 单胞定义为重复纤维织构的单元，也可认为是材料的基本构成单元。纺织复合材料可以看成是单胞不加任何旋转或映射的平移拷贝。

旦 (Denier) —— 每 9 000m 长纱线的重量，以 g/m 表示。

固化 (Cure) —— 通过热、光、辐射或化学添加剂等的作用，使热固性树脂经不可逆的化学反应完成交联的过程。

共固化 (Cocure) —— 指不同的复合材料制件在一次固化中同时完成固化和胶接过程的工艺方法。

二次胶接 (Secondary Bonding) —— 指已固化了的不同复合材料制件通过胶粘剂再次进行胶接固化的过程。

RFI (Resin Film Infusion) —— 树脂膜熔浸或树脂膜渗透成形工艺。

RTM (Resin Transfer Molding) —— 树脂转移模塑或树脂传递模塑成形工艺。

长丝缠绕 (Filament Winding) —— 在控制张力和预定线型的条件下，将连续的纤维束 (或单向带) 浸胶后以一定的形式缠绕到芯模或模具上用以成形复合材料制件的一种方法。

B 阶段 (B-Stage) —— 热固性树脂未固化与完全固化的一个中间阶段，或称预固化阶段。

固化收缩 (Shrinkage) —— 固化成形期间或固化成形后制件的尺寸收缩。

残余应力 (Residual Stress) —— 在复合材料中一般指复合材料制件内部由于固化后的降温和吸湿等引起的应力。

铺贴 (Layup) —— 制造复合材料制件过程中用手工或机械按一定方向和顺序逐层铺放预浸料的过程。

模具 (Mold, Tooling) —— 一种保证制件成形的工具。

随炉件 (Processing Control Coupon) —— 与制件的材料工艺过程相同,并在同炉固化成形的一种层压板。将其切成试样后可测试某些基本性能,鉴定制件质量,以便对工艺过程进行监控。

脱胶 (Debond) —— 由各种因素引起的层内、层间或胶接接头胶层产生分离的现象。

空隙 (Void) —— 固化过程中,复合材料内所截留的空气或气体。

分层 (Delamination) —— 由层间应力或制造缺陷等引起的复合材料铺层之间的脱胶。

孔隙率 (Porosity) —— 复合材料中空隙体积所占复合材料总体积的百分比。

夹杂 (Inclusion) —— 制造过程中无意间带进制件中的杂质,如颗粒、芯片、薄膜等。

偏差 (Discrepancy) —— 允许的制造异常,可通过有计划的检测方法检出。它们可能因加工、制造或装配等原因而产生。

架桥 (Bridging) —— 一个或多个铺层在跨越圆角或台阶等处时与其他铺层之间未完全接触的情况。

缺陷 (Flaw; Defect) —— 复合材料制件在铺贴、成形和固化过程中产生的空隙、夹杂、分层等制造异常。

损伤 (Damage) —— 由于加工、制造、装配、搬运或使用引起的结构异常,通常由机械加工、安装紧固件或与外部物体撞击造成。

贫树脂区 (Resin-Starved Area) —— 复合材料制件中局部树脂较制件平均树脂含量低出较多的区域。

富树脂区 (Resin-Rich Area) —— 复合材料制件中局部树脂较制件平均树脂含量高出较多的区域。

龟裂 (Crazing) —— 在复合材料基体内或组分材料的界面处出现的细微裂纹。

冲击损伤 (Impact Damage) —— 由于外部物体冲击引起的结构异常。

吸湿量 (Moisture Content) —— 复合材料暴露于大气环境中,或在其他环境条件下吸进水分的度量,用百分数表示。

环境 (Environment) —— 在使用中能遇到,且会影响结构的外部条件。这些条件可能单独出现,也可能联合存在。它们包括温度、湿度、紫外线辐射和燃油、冲击等,但不包括机械加载。

退化 (Degradation) —— 由于制造异常、重复载荷或因环境条件引起的材料性能(如强度、模量、膨胀系数)下降。

湿热效应 (Hygrothermal Effect) —— 由吸湿和温度变化引起复合材料构件结构尺寸和材料性能改变的现象。

老化 (Aging) —— 材料在环境条件下随时间推移而产生的各种不可逆的化学变化和物理变化,从而引起材料性能逐渐变坏,最后丧失使用价值,这种现象称为老化。一般指自然环境条件下老化。

试样 (Coupon) —— 用于评定铺层和层压板性能,以及一般结构特征时所使用的的小试验件,如通常使用的层压板条和胶接或机械连接的板条接头。

元件 (Element) —— 复杂构件的典型承力单元,如蒙皮、桁条、剪切板、夹层板和各种连

接形式的小接头。

细节件 (Detail) —— 特殊设计的复杂连接、机械接头、桁条端部、较大的检查口等较复杂构件的薄弱部件。

组合件 (Subcomponent) —— 能提供一段完整结构全部特征的较大的三维结构，如盒段、框段、机翼壁板、机身壁板、翼肋、舱段、框等。

部件 (Component) —— 机翼、机身、垂尾、水平安定面等飞机结构的主要部分，可以作为完整的机体结构进行试验，以验证结构完整性。

飞机结构 (Aircraft Structure) —— 飞机的机身、机翼、尾翼、起落架、操纵系统的机械元件和结构元件、操纵面、雷达罩、发动机架、发动机短舱、外挂挂架、结构运动机构以及其他承力结构。

A 基准值 (A-Basis Value) —— 力学性能的一个限定值，在 95% 的置信度下，99% 的性能数值群的最小值。

B 基准值 (B-Basis Value) —— 力学性能的一个限定值，在 95% 的置信度下，90% 的性能数值群的最小值。

典型值 (Typical Value) —— 从至少 5 个试样做出的有效试验结果中得出的算术平均值。此值与统计保证无关。

许用值 (Allowables) —— 在一定的载荷与环境条件下，由试样、元件或细节件等试验数据，经统计分析后确定的性能表征值。

使用载荷 (Limit Load) —— 正常使用中可能出现的最大载荷。在该载荷作用下，结构不应产生妨碍飞机正常运动的有害变形，卸载后不遗留有害的残余变形。

设计载荷 (Ultimate Load) —— 使用载荷与不确定系数的乘积，是结构能承受的最大载荷。预计在大于（或等于）该载荷作用下，飞机结构将破坏或丧失承载能力。用于设计飞机结构、强度校核计算和进行极限载荷（或破坏）试验。

安全系数 (Factor of Safety) —— 设计载荷与使用载荷的比值。

设计许用值 (Design Allowables) —— 为保证整个结构的完整性具有高置信度，在许用值的基础上，由设计师规定的设计（或使用）载荷下的限制值。

飞机结构完整性 (Aircraft Structural Integrity) —— 与飞机安全性、经济性和功能有关的机体结构强度、刚度、耐久性（或疲劳寿命）及损伤容限等飞机所要求的结构特性总称。

耐久性 (Durability) —— 机体结构在规定的时间内，抵抗疲劳开裂、腐蚀、热退化、剥离、分层、磨损和外来物冲击损伤的能力。

使用寿命 (Service Life) —— 具有高可靠度的飞机可使用寿命，并以飞行小时数、飞行次数、日历年限等表示。使用寿命分为设计使用寿命和服役使用寿命，设计使用寿命是用户预期的飞机使用寿命，用于整个飞机设计预研阶段。服役使用寿命是根据飞行实测载荷/环境谱修正耐久性分析和试验结果评估的飞机的实际可使用寿命。使用寿命的评估应考虑试验结果的分散性和分析计算的不确定性。

经济寿命 (Economic Life) —— 按耐久性试验大纲所得试验结果进行数据整理和评估而得到的寿命。当机体结构大范围出现损伤时，若不修理则影响飞机的使用功能和战备状态，修理又不经济时，则认为机体结构达到了耐久性使用寿命。机体结构达到耐久性使用寿命

的特征是损伤部位数量或修理费用迅速增长。目前也有人称之为**耐久性使用寿命** (Durability Service Life)。

损伤容限 (Damage Tolerance) —— 机体结构在给定的不做修理的使用期内, 抵抗因结构存在缺陷、裂纹或其他损伤而引起破坏的能力。

飞行安全结构 (Safety of Flight Structure) —— 其破坏会直接导致飞机失事, 或破坏持续未被查出而会造成飞机失事的结构。

缓慢裂纹扩展结构 (Slow Crack Growth Structure) —— 缓慢裂纹扩展结构包含了下列设计概念, 即不允许缺陷达到失稳快速增长所规定的临界尺寸, 并在可检查度确定的使用期内, 用裂纹缓慢扩展保证安全。在不修使用期内, 带有亚临界损伤的结构强度和安全性, 不应下降到规定水平以下。虽然复合材料结构中一般不出现裂纹, 但作为一种结构分类它仍适用于复合材料结构。由于复合材料结构有着优异的疲劳性能, 冲击损伤的扩展特点以及设计水平所限, 往往采用**损伤无扩展** (Damage No-Growth) 概念, 并把复合材料结构也归入缓慢裂纹扩展结构。

初始质量 (Initial Quality) —— 初始质量是对于基本材料或结构制造过程中产生的裂纹, 缺陷或其他偏差而言的飞机结构状态的质量。

结构可靠性 (Structural Reliability) —— 结构在战术(技术)要求所规定的使用条件和工作环境下以及在规定的使用寿命内, 能承受载荷、环境并正常工作的能力。这种能力可以用一种概率来度量, 称为可靠度。

可靠性 (Reliability) —— 结构或产品能按预定要求正常工作的概率值。

参 考 文 献

- [1] 陈绍杰主编. 复合材料设计手册. 北京: 航空工业出版社, 1990.
- [2] 沈真主编. 复合材料飞机结构耐久性/损伤容限设计指南. 北京: 航空工业出版社, 1995.
- [3] 师昌绪主编. 材料大辞典. 北京: 化学工业出版社, 1994.
- [4] 欧洲航天局编. 空间结构用复合材料设计手册. 1988.
- [5] FAA AC 20-107A 复合材料飞机结构. 1984.
- [6] MIL-HDBK-17B 聚合物基复合材料. 1988.
- [6] HB 7491-97 军用飞机复合材料结构强度验证要求. 1997.
- [7] 张明轩编. 英汉复合材料工程词典. 北京: 航空工业出版社, 1994.
- [8] Dow M B., Dexter H B. Development of Stitched, Braided and Woven Composite Structures in the ACT Program and at Langley Research Center (1985 to 1997). Summary and Bibliography. NASA 97 TP-206234, 1997.
- [9] GB/T 3961-93 纤维增强塑料术语, 1993.

目 录

第 1 章 总 论

1.1 概述	(1)
1.2 复合材料的发展及其在飞机结构中的应用	(1)
1.2.1 复合材料的发展概况	(1)
1.2.2 复合材料在飞机结构中的应用	(2)
1.2.3 低成本复合材料技术进展	(3)
1.3 复合材料结构的特点	(4)
1.3.1 结构性能特点	(4)
1.3.2 制造工艺特点	(6)
1.4 复合材料飞机结构设计用规范概述	(7)
1.5 复合材料飞机结构与验证方法概述	(8)
1.5.1 设计方法概述	(8)
1.5.2 积木式设计验证试验方法概述	(8)
1.5.3 并行工程的设计方法	(9)
1.6 《复合材料结构设计手册》内容简述	(11)
参考文献	(12)

第 2 章 结构设计要求和原则

2.1 结构设计要求	(13)
2.1.1 一般要求	(13)
2.1.2 静强度设计要求	(13)
2.1.3 刚度设计要求	(14)
2.1.4 耐久性设计要求	(14)
2.1.5 损伤容限设计要求	(15)
2.1.6 动力学设计要求	(17)
2.1.7 维修性设计要求	(18)
2.2 结构分析要求	(18)
2.2.1 一般要求	(18)
2.2.2 静强度与刚度分析	(18)
2.2.3 气动弹性剪裁设计	(18)
2.2.4 耐久性与损伤容限分析	(19)
2.2.5 动力分析	(19)
2.2.6 计算机软件	(19)