

先进复合材料设计手册



航空工业部科学技术情报研究所

1984

先进复合材料设计手册

1984

前 言

本手册的内容涉及到复合材料应用的各个方面，如材料选择、受力分析、结构设计、制造方法、表面防护和无损检验等。文中列有数据、图表、示例和简明的计算公式，使用方便，可供复合材料结构设计、力学性能、材料工艺等各个方面的科技人员参考。

本手册译自《波音先进复合材料设计手册》，译者于冀来和朱和清，张明轩和周贵珍参加技术校对，由夏志刚审稿，崔连信负责审校，并由毛镇夷校订。

1984年10月

目 录

1.0 导言	(1)
1.1 目的	(1)
1.2 范围	(1)
1.3 复合材料基础知识	(1)
2.0 复合材料术语	(2)
2.1 术语定义	(2)
2.2 符号	(6)
2.3 设计分析和铺贴工序中用的铺层取向代码	(9)
3.0 设计中要考虑的因素	(11)
3.1 材料选择	(12)
3.1.1 石墨/环氧树脂	(12)
3.1.2 混杂纤维复合材料	(15)
3.1.3 粘接剂材料	(15)
3.1.4 蜂窝材料	(16)
3.2 加工方法	(17)
3.2.1 工艺说明	(17)
3.2.2 装配方法	(20)
3.2.3 加工范围	(21)
3.2.4 工艺过程中的检验	(26)
3.3 结构设计要素	(27)
3.3.1 强度和刚度	(27)
3.3.2 耐久性和损伤容限	(34)
3.3.3 接头	(36)
3.4 环境影响和防护	(41)
3.4.1 环境影响	(41)
3.4.2 防护整饰和涂层	(44)
3.5 蜂窝夹层结构	(45)
4.0 材料和性能	(50)
4.1 材料	(50)
4.2 物理性能	(52)
4.3 机械性能	(53)
4.3.1 弹性模量、剪切模量和强度许用值	(54)
4.3.2 双轴向应力状态强度	(64)
4.3.3 接头和开孔因素	(66)
4.3.4 平板屈曲和复合材料型材局部失稳许用值	(69)

4.3.5	泊松比	(74)
4.3.6	蜂窝夹层结构的屈曲许用值	(74)
5.0	设计分析	(82)
5.1	基本加载条件	(83)
5.2	构件尺寸确定示例	(84)
5.2.1	拉伸	(84)
5.2.2	应变的计算	(86)
5.2.3	结构单元件	(89)
5.2.4	刚度匹配	(92)
5.2.5	蜂窝夹层结构	(95)
5.2.6	压缩	(97)
5.2.7	温度效应	(100)
5.2.8	机械连接接头	(101)
5.2.9	开孔	(104)
5.3	计算机程序	(106)
6.0	图纸内容	(108)
6.1	复合材料组合件标识	(109)
6.1.1	组合件名称	(109)
6.1.2	铺层编号	(109)
6.1.3	复合材料组合件和元件的短划线编号	(109)
6.2	铺层表、铺层引注定义草图	(110)
6.2.1	铺层表的填写	(110)
6.2.2	铺层表的位置	(111)
6.2.3	铺层引注定义图	(111)
6.3	材料表	(111)
6.3.1	一般注释	(111)
6.4	绘图方法	(112)
6.4.1	铺层取向	(113)
6.4.2	铺层叠层件截面示意图	(113)
6.4.3	“贴模”面的表示方法	(113)
6.4.4	公差要求严格的尺寸	(113)
6.4.5	平面图	(113)
6.5	示意图实例	(113)
7.0	参考资料	(116)
附录	(117)
A.	设计应用	(117)
B.	制造方法	(123)
C.	质量保证	(130)
D.	电磁效应	(136)

1.0 导言

本手册所含资料的版权归波音公司所有。它是在设计人员急需这种资料，而正式手册又没有出版这段时间内，作为过渡性文件而出版的。

1.1 目的

《先进复合材料设计手册》旨在向波音公司结构设计师提供必需的数据和方法，以利于他们设计出可靠而有效的先进复合材料结构。这些资料对于现代的和新的飞机型号都适用。

1.2 范围

本手册经批准，作为波音民用飞机公司内部使用的先进复合材料结构的原始资料。其中包括设计依据、结构容限、分析方法和标准的图纸引注。它主要是面向具有应用传统材料经验的设计师、结构工程师和材料工程师。设计人员在开发新的复合材料领域、试验分析方法和加工技术方面，仍需要发挥他们的创造性和智慧，以便设计出成本低、效率高、寿命长的破损安全结构。

“先进复合材料”一词意指由各种类型的纤维和树脂体系所组成的复合材料。而本手册目前所涉及的只有BMS8-212和BAC 5562规定的350°F固化的中强度石墨/环氧。关于石墨/环氧与其他纤维组合而成的混杂复合材料的资料，可查阅《芳纶纤维混杂复合材料设计手册》（本手册的补充资料）。

本手册打算定期进行补充和修改，直到原始的经验资料能够作为可靠的数据纳入波音设计手册为止。

在本手册中，许用极限应变大约取为30%~40%的概率断裂应变。极限应变若大于此限，则必须经补充试验以及有关微裂纹、冲击破坏、疲劳、裂纹扩展和环境效应等的补充数据证明可行时方可采用。

本手册内所涉及的制作方法和规定，只局限于波音公司内部。转包商制作规定的种种考虑因素应与波音公司相应机构的要求相协调。

1.3 复合材料基础知识

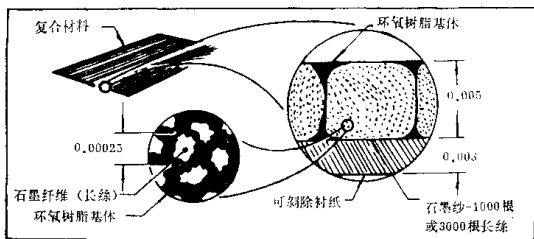
先进复合材料是由树脂基体和含在其中的高强度纤维构成的。本手册中的复合材料是指中强度石墨纤维与环氧树脂基体所组成的复合材料。

石墨/环氧复合材料对于飞机设计来说，具有大幅度减轻飞机重量的潜力。这种材料无论是承受拉伸载荷，还是承受压缩载荷，都具有很高的强度重量比，所承受的载荷比铝合金高30%左右。这样，如果用石墨/环氧复合材料结构来代替铝结构，一般情况下可减轻重量20%或更多。重量轻是石墨/环氧材料的最大优点，是考虑采用这种材料的重要因素之一。

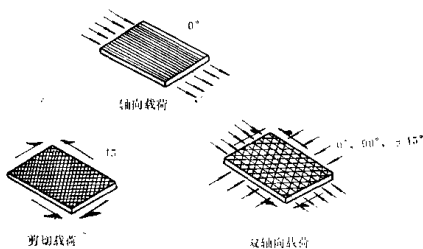
先进复合材料的一个缺点是原材料的成本比较高。因此，设计人员必须仔细地估价制造工艺，并寻求降低构件制作、检验和修理成本的途径。

金属与复合材料之间的差别

与金属材料相比，先进复合材料具有方向性，而金属材料通常是各向同性的。载荷趋向



于顺应纤维方向，而不与纤维横交。因此，设计人员必须设计出铺层纤维方向的布置方案，以便使结构能够有效地承受外载荷。



复合材料要求确定铺层纤维方向的布置方案

优化的复合材料设计不同于传统的金属材料。不应把先进复合材料作为金属材料的替用材料来处理，而必须针对结构的需要，进行专门的剪裁。

2.0 复合材料术语

先进复合材料是一种新出现的技术，对于老的飞机设计人员来说，有些术语可能不太熟悉。本节将对本手册中采用的术语、符号和铺层方向代码加以定义。

2.1 术语定义

A 基准 (A-BASIS) —— “A” 机械性能值是一个极限值，该值的选取条件是在95%置信度下至少有99%数值群的性能值高于它。

先进复合材料 (ADVANCED COMPOSITES) —— 就本手册所涉及的内容而言，先进复合材料的定义应为：通过在基本上均质的基体中埋置高强度、高模量纤维而制成的复合材

料。参见“纤维复合材料”。

滞弹性 (ANELASTICITY) —— 为某些特定材料所显示的一种特性，此种材料的应变为时间和应力二者的函数。这样，如不涉及永久变形的话，在载荷方向和非载荷方向上应力和应变之间达到平衡状态需要一定的时间。

各向异性 (ANISOTROPIC) —— 即非各向同性；材料所具有的机械和物理性能随其相应的固有自然基准轴的方向而改变。

热压罐 (AUTOCLAVE) —— 是一种密闭的容器，用来在加热或不加热的情况下对容器内的物体造成气体压力。

B基准 (B-BASIS) —— “B”机械性能值是一个极限值，该值的选取条件是在95%置信度下至少有90%数值群的性能值高于它。

B阶段 (亦称乙阶树脂—B-STAGE) —— 是热固性树脂完全未固化与完全固化之间的一个中间固化阶段。石墨/环氧预浸料是以B阶段状态提供的，其固化程度随材料供货方的不同而异。预浸料的停放时间不同，B阶段的固化程度也会发生变化（提高）。

均衡层板 (BALANCED LAMINATE) —— 同“对称层板”。

吸胶布 (BLEEDER CLOTH) —— 是在复合材料工件制造过程中使用的一种非结构材料，可使固化过程中多余的气体和树脂逸出。吸胶布在固化完成以后要去掉，不作为复合材料成品构件的一部分。

透气材料 (BREATHER) —— 是一种像玻璃纤维织物一类的疏松织物。盖在工件上面作为连续的真空通路，但不与树脂相接触。

架桥 (BRIDGING) —— 一层或多层铺层（带材或织物）在跨越圆角、台阶或芯子的削边处未完全接触的一种状态。

均压板 (CAUL PLATES) —— 为一平滑的金属板。该板无表面缺陷，其尺寸和形状与复合材料铺层相同。此板在固化过程中通过与铺层紧密接触以传递法向压力，并使层板成品获得平滑的表面。

共固化 (COCURING) —— 在同一个固化周期内，在复合材料层板固化的同时将其胶接在其他制备好的构件表面上。这种作业称之为共固化。

复合材料 (COMPOSITE MATERIAL) —— 复合材料可看成是不同成份或不同形式的材料的组合。各个组成成份在复合材料中仍保持其原有本性。也就是说，虽然它们共同发挥作用，但它们既不互溶，又不互熔。在一般情况下，复合材料的各种成份可以通过物理方式加以鉴别。

连续长纤维纱 (CONTINUOUS FILAMENT YARN) —— 为一连续的长丝束，一般含有两股以上的连续长丝。

芯子压坏 (CORE CRUSH) —— 芯子倒塌、扭曲或压缩。

芯子凹陷 (CORE DEPRESSION) —— 芯子中的局部凹槽或凿痕。

芯子分离 (CORE SEPARATION) —— 芯子节点胶接处局部或全部开裂。

芯子拼接 (CORE SPLICING) —— 通过胶接或搭接方法将各段芯子连接到一起的作业。

龟裂 (CRAZING) —— 基料中出现的大量细微裂纹。

交叉铺层层板 (CROSSPLY) —— 纤维不是同一轴向的长纤维层板的总称。

固化 (CURE) ——树脂在加热和加压的受控条件下化学反应结果而产生的永久性性能变化。这一过程是不可逆的。

分层 (DELAMINATION) ——层板中各铺层之间分离或夹层结构中的芯子与面板分离。

织物 (FABRIC) ——由纱、纤维或长丝编织而成的材料，通常为平纹。非编织物有时也包括在这一类。

纤维 (FIBER) ——均质的单根材料，基本上是一维的。由于它具有很高的轴向强度和模量，在先进复合材料中用作主承载成份。

纤维含量 (FIBER CONTENT) ——复合材料中所包含的纤维数量。纤维含量通常以固化后的复合材料体积或重量的百分数来表示。

纤维方向 (FIBER DIRECTION) ——纤维的纵轴与规定的基准轴的相对方向。

长纤维 (亦称长丝) (FILAMENT) ——以无限长为特征的纤维。因此，除了在几何不连续处以外，在一构件中通常没有长纤维的端头。长纤维束 (纱) 用于长纤维缠绕工艺。

长丝复合材料 (FILAMENTARY COMPOSITES) ——先进复合材料的一种。其中增强纤维为连续的长丝。

长丝缠绕 (亦称纤维缠绕—FILAMENT WINDING) ——一种自动化工艺方法，即将连续的长纤维 (或单向带) 用树脂处理，并按一定的式样缠绕在一个可卸的芯轴上。

纬线 (FILL) ——织物中与经线相垂直的纱线。

填料 (FILLER) ——加到基料中用以改变其物理、机械、热或电性能的一切辅助材料。有时专指颗粒性填充物而言。

填充层 (FILLER PLY) ——通常为在夹层侧面填加的局部填充层。该层并不延伸到蜂窝表面的任何部位。

表面处理剂 (FINISH) ——为了提高复合材料中纤维表面与树脂基体之间的粘接性能而涂到纤维上的一种处理层。

玻璃 (GLASS) ——于本手册中，凡提到玻璃，均指用作长纤维、织物、纱线、毡和短纤维等的纤维状玻璃。

玻璃布 (GLASS CLOTH) ——一般的玻璃纤维织物 (另参见稀纱布)。

手工铺贴 (HAND LAYUP) ——用手工把各单层铺到模具上来制作复合材料的一种工艺程序。

混杂纤维复合材料 (HYBRID) ——由两种或两种以上复合材料体系组合在一起的复合材料层板。如石墨/环氧同玻璃/环氧组成的复合材料层板制品。

夹杂物 (INCLUSIONS) ——铺贴时无意中夹带的形状大小不等的外来杂质，如颗粒、碎片、薄膜等。

层间的 (INTERLAMINAR) ——是说明性的术语，用以说明两个或多个相邻铺层之间存在的或出现的实体 (如空穴)、现象 (如破裂) 或势场 (如剪应力)。

层间剪切 (INTERLAMINAR SHEAR) ——存在于层板两铺层之间的、使铺层沿界面相对位移的剪力。

各向同性 (ISOTROPIC) ——各个方向上的性能相同。各向同性材料所测得的性能值与测试轴无关。

层板 (LAMINATE) ——将两层或多层 (层片) 材料粘合到一起所构成的产品。

层板取向 (LAMINATE ORIENTATION) —— 复合材料交叉铺层层板的结构形态, 包括铺层交叉角, 每种角度铺层的层数, 以及每一单层准确铺贴的顺序。

铺贴 (LAYUP) —— 是指复合材料逐层铺放的一种制造工艺。

芯轴 (MANDREL) —— 在以铺贴方式或长纤维缠绕方式制作工件过程中作为基准用的一种成形装备或阳模。

基体 (MATRIX) —— 是一种将复合材料中的纤维或长纤维粘结在一起的匀质材料。

微裂纹 (MICROCRACKING) —— 基体中出现的显微裂纹 (龟裂)。

针孔 (PIN HOLES) —— 穿透固化工件表面的小孔。

铺层 (PLY) —— 单层的单向带或织物。

铺层皱折 (PLY WRINKLE) —— 是一种铺层缺陷。在一层或多层铺层上形成的永久性隆起、凹陷或折痕。

空隙率 (POROSITY) —— 实心材料中夹杂空气、气体或空腔的一种表示方法。通常以单位数量材料的总空洞体积与总体积 (实心 + 空洞) 的百分比来表示。

预浸料 (PREPREG或PREIMPREGNATED) —— 毡片、织物或非编织材料与树脂的组合物, 业已处理到B阶段, 随时可以进行固化。

树脂 (RESIN) —— 将纤维粘结到一起的环氧基体。

树脂含量 (RESIN CONTENT) —— 复合材料中所包含的基体数量, 既可用重量百分比表示, 亦可用体积百分比表示。

富树脂区 (RESIN RICHNESS) —— 树脂过多的部位, 通常出现在圆角、台阶和芯子削边处。

贫树脂区 (RESIN STARVED) —— 树脂不足的部位, 通常表现为孔穴过多和/或纤维松散。

夹层结构 (SANDWICH CONSTRUCTION) —— 是一种多层结构壁板, 其最简单的形式是在两块相当薄的且互相平行的结构板材中间胶接一块比较厚的轻质芯子。

稀纱布 (SCRIM) 亦称玻璃布、载体 (GLASS CLOTH, CARRIR) —— 是一种由连续纤维织成的、起补强作用的网状纱布, 用以加工成单向带或其他B阶段材料, 旨在便于操作。

二次胶接 (SECONDARY BONDING) —— 用胶接方法把两个或多个已固化的复合材料工件连接到一起。在胶接过程中, 发生的唯一的化学 (或热) 反应是粘接剂自身的固化。

对称层板 (SYMMETRICAL LAMINATE) —— 为复合材料的一种。在此层板中, 铺层方向对称于中间平面。

单向带 (TAPE) —— 石墨长纤维在树脂基体中以单一方向排列而成的材料。

丝束 (TOW) —— 同纱 (YARN)。

真空袋压实 (VACUUM BAGGING) —— 是一种工艺方法。将铺层与盖在其上四周密封的软质薄膜之间的空气抽真空, 以所产生的压力使铺层压实。

空隙 (VOID) —— 组合件中空的未被材料填满的部位。空隙的形成与架桥和贫树脂区有关。

经线 (WARP) —— 织物的纵向纱 (见纬线); 为一组长而接近于平行的纤维束。

X轴 (X-AXIS) —— 在复合材料层板中, 层板平面内的一条基准轴, 它用来标识铺层

角度的0°基准。

XY平面 (XY PLANE) ——在复合材料层板中，与层板平面平行的基准面。

Y轴 (Y AXIS) ——在复合材料层板中，层板平面内与X轴相垂直的轴线。

纱 (YARN) ——适于纺织或用其他编织法制成织物的成股纤维或长丝的统称。

Z轴 (Z AXIS) ——在复合材料层板中，与层板平面相垂直的基准轴线。

2.2 符号

本节列出了通用的复合材料符号，并作了简要说明。

各向异性复合材料系统的发展，增加了特定参数用简单符号加以标识的困难。所示的因数都必须加上某些限定性的术语。例如，除了正常的标记（座标方向、应力、温度）以外，还必须加上成份标志、铺层数，以及其他参量。

未列入本表的符号将在其出现的正文或图中加以说明。

- a — 长度尺寸（英寸），尤指长方形壁板的长度
- A — 面积（英寸²）
- A_i — 换算面积（英寸²）
- b — (1) 宽度尺寸（英寸）
(2) 凸缘尺寸（英寸）
- C — (1) 蜂窝夹芯厚度（英寸）
(2) 由中性轴至最外层纤维的距离（英寸）
(3) 压缩
- Ⓚ — 中心线
- d — 夹层结构壁板两面板形心之间的厚度（英寸）
- D — 紧固件或孔的直径（英寸）
- e — 紧固件边距（英寸）
- E — 拉伸或压缩弹性模量（磅/英寸²）
- E_i — 一铺层中“i”单元件的弹性模量（磅/英寸²）
- E₀ — 一铺层中基准单元件的弹性模量（磅/英寸²）
- f — 实际或计算应力（磅/英寸²）
- F — (1) 许用应力（磅/英寸²）
(2) 华氏温度
- f_A — 点A开口边缘的实际应力或计算应力（磅/英寸²）
- F_A — 点A开口边缘的许用应力（磅/英寸²）
- f_B — 点B开口边缘的实际应力或计算应力（磅/英寸²）
- F_B — 点B开口边缘的许用应力（磅/英寸²）
- f_{b.c.u} — 实际或计算的最大挤压应力（磅/英寸²）
- F_{b.c.u} — 许用最大挤压应力（磅/英寸²）
- f_{c.c} — 实际或计算的折损应力（磅/英寸²）
- F_{c.c} — 许用折损应力（磅/英寸²）
- f_{c.c.k} — 实际或计算的平板屈曲（折损）应力（磅/英寸²）

- $F_{c,c r,x}$ — 许用平板临界屈曲 (折损) 应力 (磅/英寸²)
 $f_{c,l}$ — 实际或计算的极限压缩应力 (磅/英寸²)
 $F_{c,l}$ — 许用极限压缩应力 (磅/英寸²)
 $f_{c,max}$ — 开孔壁板的实际或计算的最大净面积压缩应力 (磅/英寸²)
 $F_{c,max}$ — 开孔壁板的许用最大净面积压缩应力 (磅/英寸²)
 $f_{c,r,c}$ — 实际或计算的临界压缩屈曲应力 (磅/英寸²)
 $F_{c,r,c}$ — 许用临界压缩屈曲应力 (磅/英寸²)
 $f_{c,r,s}$ — 实际或计算的临界剪切屈曲应力 (磅/英寸²)
 $F_{c,r,s}$ — 许用临界剪切屈曲应力 (磅/英寸²)
 $f_{c,u}$ — 实际或计算的最大压缩应力 (磅/英寸²)
 $F_{c,u}$ — 许用最大压缩应力 (磅/英寸²)
 $f_{g,area}$ — 实际或计算的总面积应力 (磅/英寸²)
 $F_{g,area}$ — 许用总面积应力 (磅/英寸²)
 $F_{L,x}$ — 轴向极限应力 (磅/英寸²)
 $F_{L,y}$ — 横向极限应力 (磅/英寸²)
 $f_{s,l,xy}$ — 实际或计算的极限剪应力 (磅/英寸²)
 $F_{s,l,xy}$ — 许用极限剪应力 (磅/英寸²)
 $f_{s,u,xy}$ — 实际或计算的最大剪应力 (磅/英寸²)
 $F_{s,u,xy}$ — 许用最大剪应力 (磅/英寸²)
 $f_{t,l}$ — 实际或计算的极限拉伸应力 (磅/英寸²)
 $F_{t,l}$ — 许用极限拉伸应力 (磅/英寸²)
 $f_{t,max}$ — 实际或计算的最大净拉伸应力 (磅/英寸²)
 $F_{t,max}$ — 许用最大净拉伸应力 (磅/英寸²)
 $f_{t,u}$ — 实际或计算的最大拉伸应力 (磅/英寸²)
 $F_{t,u}$ — 许用最大拉伸应力 (磅/英寸²)
 G — 刚性 (剪切) 模量 (磅/英寸²)
 G_{xy} — 层板在XY基准平面中的剪切模量 (磅/英寸²)
 G_L — 夹芯在LT平面中的刚性模量 (磅/英寸²)
 G_w — 夹芯在WT平面中的刚性模量 (磅/英寸²)
 h — 高度尺寸 (英寸), 尤指梁的横剖面高度, 有时也用来表示厚度
 H/C — 蜂窝
 I — 惯性矩 (英寸⁴)
 $K_{c,r,c}$ — 固支板的剪切屈曲系数 (磅/英寸²)
 $K_{c,r,s}$ — 筒支板的剪切屈曲系数 (磅/英寸²)
 ksi — 千磅/英寸²
 K_t — 应力集中系数 (不连续处的最大应力与总应力之比)
 $K_{t,A}$ — A点的应力集中系数
 $K_{t,B}$ — B点的应力集中系数
 L — 长度 (英寸)

M	— 力矩 (英寸-磅)
MS	— 安全裕度
msi	— 百万磅/英寸 ²
n	— 开孔处的应力集中系数
N	— 力 (磅/英寸)
P	— (1) 施加载荷或许用载荷 (磅) (2) 铺层
P _{b,u}	— 许用最大挤压应力 (磅/紧固件)
P _{ca}	— 许用最大平面压缩载荷 (磅)
P _{cr}	— (许用) 临界圆柱屈曲载荷 (磅)
P _L	— 极限载荷 (磅)
P _{st}	— 净面积拉伸载荷 (磅/紧固件)
P _n	— 法向压力 (磅/英寸 ²)
psi	— 磅/英寸 ²
P _s	— 剪切载荷 (磅)
P _{su}	— 紧固件的许用剪切强度 (磅/紧固件)
P _{tl}	— 极限拉伸载荷 (磅)
P _{tu}	— 最大拉伸载荷 (磅)
P _u	— 最大载荷 (磅)
P _x	— X方向上的载荷 (磅)
P _y	— Y方向上的载荷 (磅)
R	— (1) 半径 (英寸) (2) 交变载荷中最小载荷与最大载荷的代数比
S	— 紧固件的间距 (英寸)
t	— 厚度 (英寸)
t ₁	— 夹层结构壁板的面板厚度 (英寸)
T	— 温度 (度)
W	— 板件宽度 (英寸)
X	— 基准轴, 与0°纤维平行, 通常在主载荷方向上
Y	— 基准轴, 与0°纤维垂直, 通常垂直于主载荷
\bar{Y}	— 由形心至X轴的距离
α	— (1) 热膨胀系数 (2) 平面屈曲参数
α_x	— 层板沿X轴方向的热膨胀系数 (英寸/英寸/°F)
α_y	— 层板沿Y轴方向的热膨胀系数 (英寸/英寸/°F)
Δ	— 差 (用作数量符号的前标)
ϵ	— 应变 (英寸/英寸)
μ_{xy}	— 泊松比; 由X方向载荷引起的Y方向应变与X方向应变之比
μ_{yx}	— 泊松比; 由Y方向载荷引起的X方向应变与Y方向应变之比

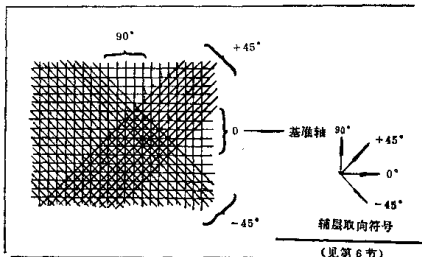
- ρ — 回转半径
 Σ — 总和
 Ψ — 平面屈曲参数

2.3 设计分析和铺贴工序中用的铺层取向代码

A. 采用先进复合材料结构的最大优点之一是，它能根据载荷的要求来布置纤维材料的方向。这就要求设计人员除了给出材料之外，还要示出结构的构成：

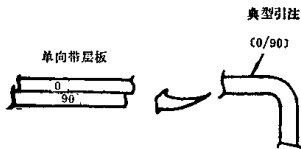
- 纤维方向（术语“铺层取向”）
- 铺层的铺贴顺序

在不涉及实际构件制作的情况下，研究或布置铺层时，铺层的纤维方向和铺层的铺贴顺序均可采用“简化”代码：



• 每一铺层均用一代表纤维方向的数字示出，即用纤维与基准轴所夹的角度来表示。无论是织物的 0° 纤维，还是单向带的 0° 纤维，一般均要与最大轴向载荷同方向。

- B.** 铺层按顺序列出，并用括号括起来，由代码的箭头所指的一侧开始(0/90/±45)
C. 取向角度不同的相邻铺层，用一斜线隔开（见右下图）

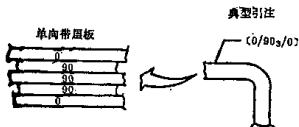


D. 织物铺层和单向带铺层的引注用括号来加以区分。

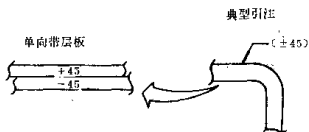
示例： $(\pm 45) / (0, 90)$ 用于织物铺层的代码

$(0 / (\pm 45) / 90)$ 用于单向带和织物混合铺层的代码

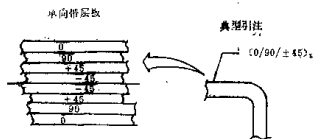
E. 同一取向角度的相邻铺层数，用一下脚数码示出。



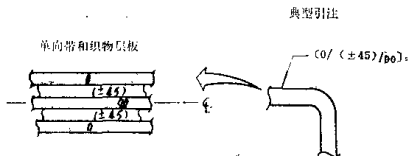
F. 仅适用于单向带：当采用 \pm 号时，表示两个相邻的铺层，其中上面的符号代表二者中的第一个。



G. 铺层数为偶数的对称层板，铺层从材料的一个表面到中心点（对称平面）为止依次列出。括号后面的脚注“S”表示仅示出代码所示的一半铺层，而另一半与所示部分呈镜面对称。

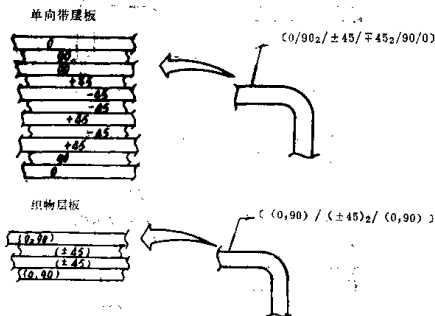


H. 铺层数为奇数的对称层板，以跨越中心线的正中的一层铺层作为中点来表示铺层顺序。同时，以该层作为“镜面”，其余的代码与所示部分呈镜面对称。

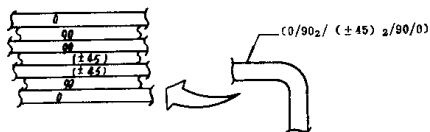


I. 在各个工业企业和空军文件中，已采用“T”来表示所示的总层数。这一规定在波音公司不推荐采用。

J. 典型的引注示例



单向带和织物层板



3.0 设计中要考虑的因素

复合材料结构设计与传统金属结构设计之间的主要差别在于，设计人员要对材料进行“剪裁”，以适应结构要求。其他的差别包括细节设计所需的独特的生产方法，以及专门的环境防护要求。

本节讨论的是石墨/环氧设计的主要部分，其内容分为以下几类：

- 材料选择—3.1节
- 制造方法—3.2节
- 结构要素—3.3节
- 环境影响与防护—3.4节
- 蜂窝夹层结构—3.5节

下表（图3.0-1）是一份“设计师查对一览表”，它有助于设计师掌握复合材料设计所需要的各项内容。

设计要素查对一览表

	图号
（一）材料选择	
石墨/环氧—吸胶与不吸胶	3.1.1-1
石墨/环氧—单向带与织物	3.1.1-2
石墨/环氧—单向带等级	3.1.1-3
石墨/环氧—织物类型	3.1.1-4
混杂材料—冲击损伤	3.1.3-1
粘 接 剂	3.1.3-1
蜂 窝 芯 子	3.1.4-1
（二）加工方法	
固化与装配	3.2.2-1
半径	3.2.3-1
形状	3.2.3-2
公差	3.2.3-3
铺层布置	3.2.3-4
气动流线性	3.2.3-5
制孔	3.2.3-6

拉出成形	3.2.3-7(缺)
(三) 结构要素	
铺层取向	3.3.1-2
铺层布置	3.3.1-3
稳定性	3.3.1-8
铺层的阶差和垫片	3.3.1-9
最低标准	3.3.1-10
许用值	4.3.1-1
	至4.3.6-12
损伤容限—外来物损伤	3.3.2-1
机械连接接头—选择	3.3.3-1(缺)
机械连接接头—破坏模式	3.3.3-2
机械连接接头—零件	3.3.3-3
机械连接接头—结构形式	3.3.3-4
机械连接接头—紧固件选择	3.3.3-5
胶接头—破坏模式	3.3.3-6
(四) 环境影响与防护	
环境影响—腐蚀	3.4.1-1
环境影响—电磁	3.4.1-2
环境影响—浸蚀	3.4.1-3
环境影响—温度	3.4.1-5
防护整饰和涂层	3.4.2-1
(五) 蜂窝夹层结构	
破坏模式	3.5-2
边缘带与连接件	3.5-4
芯子零件	3.5-5
面板	3.5-6
粘接剂的选择	3.1.3-1
芯子的选择	3.1.4-1

3.1 材料选择

本节提供了关于石墨/环氧或石墨/环氧混杂材料、粘接剂、以及夹层结构用蜂窝芯子等的选材资料。

3.1.1 石墨/环氧材料

用在160°F以下的正常工作温度的飞机部位时，石墨/环氧具有很高的强度和刚度。使用温度允许提高到350°F，但要特别当心。

由于石墨/环氧的密度比较低，所以能减轻重量，这是石墨/环氧的最大优点，也是考虑选用它的关键因素之一。当采用石墨/环氧结构来代替铝结构时，重量通常可减轻20%或20%以上。