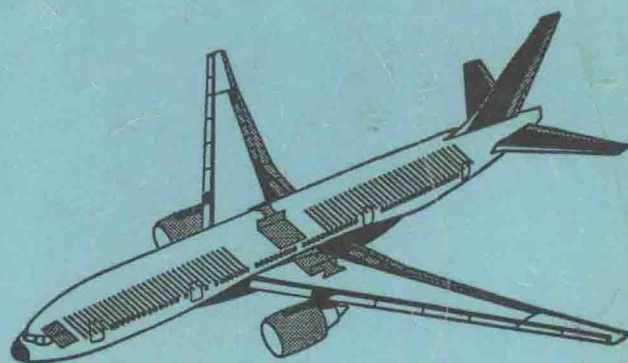


波 音 飞 机

复合材料结构修理教程

主 编 乔 新

副主编 翟长泰 黄传奇 钟诚



中国民航出版社

波音飞机复合材料结构修理教程

主 编	乔 新				
副主编	翟长泰	黄传奇	钟 诚		
主 审	林国梁	申太然			
副主审	章怡宁	韩振山	陈绍杰	沈玉国	
编 委	靳春梅	孔海霞	盛振娟	张志航	
	钱国娣	刘延杰			

中国民航出版社

图书在版编目(CIP)数据

波音飞机复合材料结构修理教程/乔新编著·北京:
中国民航出版社,1996.11
ISBN 7-80110-114-6

I. 波… II. 乔… III. 旅客机,波音—飞机构件,复合材料—维修—教材 IV. V267
中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 14365 号

波音飞机复合材料结构修理教程

主 编 乔 新
副主编 翟长泰 黄传奇 钟 诚
主 审 林国梁 申太然
副主审 章怡宁 韩振山 陈绍杰
沈玉国

*

中国民航出版社出版发行
(北京市朝阳区光熙门北里甲 31 号楼)
— 邮政编码 100028 —

南京航空航天大学印刷厂印装

开本:787×1092 1/16 印张:16.5 字数:391 千字
1996 年 11 月第 1 版 1996 年 11 月第 1 次印刷 印数:1—1000 册

ISBN 7-80110-114-6/V·056 定价:40.00 元

前 言

复合材料由于其比强度比模量高、抗疲劳性能好等优点,正逐步取代一些金属部件,在飞机上大量被采用,特别是我国引进的一些先进民用飞机,如波音、空中客车、麦道、福克等,都采用了大量的复合材料结构,因此,复合材料结构损伤的维修工作便日益显得重要。由于复合材料与传统金属材料的不同,其材料的性能、管理、使用等都有其独特性,不为广大维修人员所熟悉,因此开展这方面的培训工作便显得非常重要,否则航空公司由于不具备这方面的维修手段而引起的停飞损失将是巨大的。

鉴于以上情况,美国西杰公司、南京航空航天大学、GAMECO 培训部、南方航空(集团)公司机务处,中国航空工业总公司第 601 研究所等联合编写了这本教程,其中部分内容参考了波音公司的复合材料培训内容。本教程还配有四个小时的录像带,系统介绍复合材料结构制造及修理的各个步骤。

本教程可作为大专院校学生学习飞机复合材料结构修理技术的教材,也可作为工程技术人员的培训资料。本书编者特别提醒读者注意以下信息:

本书仅可作为学习复合材料结构修理技术的参考书籍。对于维修飞机时的实际操作步骤,应按结构修理手册进行。遇有本书内容与结构修理手册冲突的地方,以结构修理手册为准。

下列人员参加了此书的编写校对工作:

徐建新 宋云雪 姚雪波 谢宗蕻

沈玉国 熊 伟 欧阳晖 张云阁

郑立春 于志伟 吴 冰 胡海峰

本书虽经编写审核人员反复校对,但可能仍有不当之处,欢迎读者提出宝贵意见。

编 者

1996 年 6 月

目 录

第一章 先进复合材料简介	1
1.1 课程的目的	1
1.2 先进复合材料介绍	2
1.3 现代复合材料发展历史	2
1.4 历史发展的总结	2
1.5 复合材料飞机结构	4
习题	8
第二章 先进复合材料	9
2.1 先进复合材料	9
2.2 复合材料的一般描述	9
2.3 纤维制造	12
2.4 纤维布的织造图案	12
2.5 预浸单向带的制造	14
2.6 预浸织布的制造	16
2.7 基体	18
2.8 环氧树脂体系	18
2.9 纤维增强材料	21
2.10 粘接剂	22
2.11 蜂窝制造	23
2.12 编织预制件	25
2.13 长丝缠绕	25
2.14 蜂窝芯格的形状	28
2.15 脱模剂/脱模织物	28
2.16 吸胶和透气材料	28
2.17 可剥层脱模剂	29
习题	32
第三章 安全	33
3.1 安全指导通则	33
3.2 皮肤防护	35
3.3 眼睛与面部防护	36

3.4	呼吸器官防护	37
3.5	工作环境	38
3.6	维修设备——铺设区	38
	习题	40
第四章	材料管理	41
4.1	存贮期	41
4.2	外露时间	41
4.3	预配材料	41
4.4	封装包裹和预装袋	42
4.5	筒装配料/筒装树脂	43
4.6	配方	44
4.7	调制	44
4.8	废弃物	45
	习题	46
第五章	飞机复合材料结构设计	47
5.1	材料特性——密度	47
5.2	失效特性	48
5.3	材料特性——强度	48
5.4	抗疲劳特性	48
5.5	蜂窝夹芯结构的性能	48
5.6	复合材料的连接	51
5.7	紧固件	54
5.8	纤维方向的要求	54
5.9	铺层方向的符号	54
5.10	纤维方向对强度和刚度的影响	54
5.11	铺层的原则	58
5.12	拉、压载荷	60
5.13	设计状况 I (参见图 5-14)	60
5.14	设计状况 II (参见图 5-15)	60
5.15	蜂窝夹层结构的设计	64
5.16	复合材料树脂的固化体系	65
5.17	特殊设计注意事项	65
5.18	电化腐蚀	65
5.19	腐蚀控制	69
5.20	雷击区域	70
5.21	雷电的防护	70
5.22	在波音 737-300 和 737-500 上先进复合材料的应用	72

5.23	波音 757 中先进复合材料的应用	72
5.24	波音 767 中先进复合材料的应用	72
5.25	A310 和 A300—600 (A300—600 后出厂)	79
5.26	空中客车公司与波音公司在复合材料结构应用上的比较	81
	习题	84
第六章	加工	85
6.1	概述	85
6.2	夹芯层合板的切割	85
6.3	边缘去毛刺	88
6.4	手工打磨	88
6.5	机械打磨	88
6.6	孔边去毛刺	88
6.7	在复合材料上钻孔	88
6.8	埋头孔	90
6.9	进刀速度	91
6.10	孔锯	92
6.11	抛光	93
6.12	用带锯切割芯材	93
6.13	蜂窝的加工	94
6.14	典型的边缘倒角	94
6.15	蜂窝芯子的罐封	95
	习题	100
第七章	零件制造	101
7.1	模具	101
7.2	模具贴面的铺层	101
7.3	铺设蜂窝芯体	101
7.4	铺贴内表面面板	101
7.5	TEDLAR(聚氟乙烯)的应用	106
7.6	真空袋加压	106
7.7	用真空袋进行零件加压	106
7.8	热压罐固化	109
7.9	固化过程	109
7.10	加压措施	109
7.11	真空压力	112
7.12	真空袋的类型	113
7.13	真空封装过程	115
7.14	典型的制造过程	115

7.15	真空检查	117
7.16	微声泄漏探测仪	118
✓7.17	先进复合材料的加热固化	118
✓7.18	固化方法	119
	习题	122
第八章	修理的过程	123
8.1	修理的类型	123
8.2	修理设计中需要考虑的因素	124
8.3	表面准备	124
8.4	涂层的清除	125
8.5	芯体准备	126
8.6	制备蜂窝填补塞	129
8.7	修理顺序流程图	130
8.8	修理方法	132
8.9	工程图数据	132
8.10	损伤区	132
8.11	修理区域的标志	138
8.12	清除受损蒙皮	139
8.13	TEDLAR 的清除	139
8.14	损坏芯子的清除	142
8.15	损伤表面的预处理	142
8.16	锥面打磨 I	144
8.17	锥面打磨 II	144
8.18	蜂窝芯子的更换	144
8.19	铺层的更换	149
8.20	固化前的准备工作	149
8.21	重新涂漆	152
8.22	维修装置——冷藏箱	152
8.23	维修装置——烘箱、热压罐和电热毯	157
8.24	维修装置——真空装置	157
8.25	修理装置——模具	157
8.26	修理设备——工具	160
8.27	修理材料——预浸料	161
8.28	修理材料——预固化补片	161
8.29	修理材料——湿补	161
8.30	修理材料——胶膜	161
8.31	修理材料——蜂窝芯	161
8.32	修理材料——处理与保管	164

8.33	修理设备——喷漆	164
8.34	先进复合材料的 350°F(177°C)的固化修理	168
8.35	铝箔的维修	170
8.36	350°F 固化修理——固化过程	170
8.37	先进复合材料的 250°F 固化修补	173
8.38	先进复合材料的室温固化修理	177
8.39	螺接修理法(金属补片修补)	183
8.40	200°F 到 230°F 固化的湿法铺层修补	184
	习题	189
第九章 典型结构修理		191
9.1	装饰层修理(参见图 9-1)	191
9.2	分层	192
9.3	铺层损坏	194
9.4	边缘损坏(参见图 9-8)	196
9.5	钻孔损坏(参见图 9-9)	197
9.6	轻微的夹芯破坏(参见图 9-10)	198
9.7	表层与夹芯脱胶(参见图 9-11)	199
9.8	主要蒙皮与夹芯破坏(参见图 9-15)	200
9.9	夹芯与上下两个表层均遭损坏(参见图 9-23)	203
9.10	雷达罩的修理(参见图 9-27)	205
	习题	210
第十章 检测		211
10.1	损伤的评估	211
10.2	损伤的类型	211
10.3	复合材料的维护检查	215
10.4	可视损伤	216
10.5	目视检测的工具	216
10.6	X 光	216
10.7	热谱图	225
10.8	超声波脉冲/反射检测	225
10.9	穿越超声波检测法(TTU)	225
10.10	超声波	225
10.11	介电固化监视仪	225
	习题	229
作业 1 用预浸料进行热补修理		230
作业 2 用玻璃纤维与树脂进行湿法修理		235

附录 A	复合材料术语表	238
附录 B	单位换算表	243
附录 C	先进复合材料结构的质量保证	245
附录 D	先进复合材料的电磁效应	251

第一章 先进复合材料简介

1.1 课程的目的

复合材料在飞机上的用量愈来愈多,范围愈来愈广,以空中客车 A340 为例,用量占结构重量的 8%,B-777 占 11%。复合材料结构的比重轻,强度大,刚度大,其维护修理技术亟待专业维修人员中普及和提高。

本课程的目的为飞机复合材料结构修理人员教学使用,同样,对工程师和管理人员也能使他们很好地了解复合材料结构修理的过程。课程包括基础部分和修理的实操。经验靠学员在复合材料结构各个领域的学习和修理实践积累丰富(见图 1-1)。

本教程配有四小时左右的录像,用以配合教学和示范操作,需要时可与作者联系。

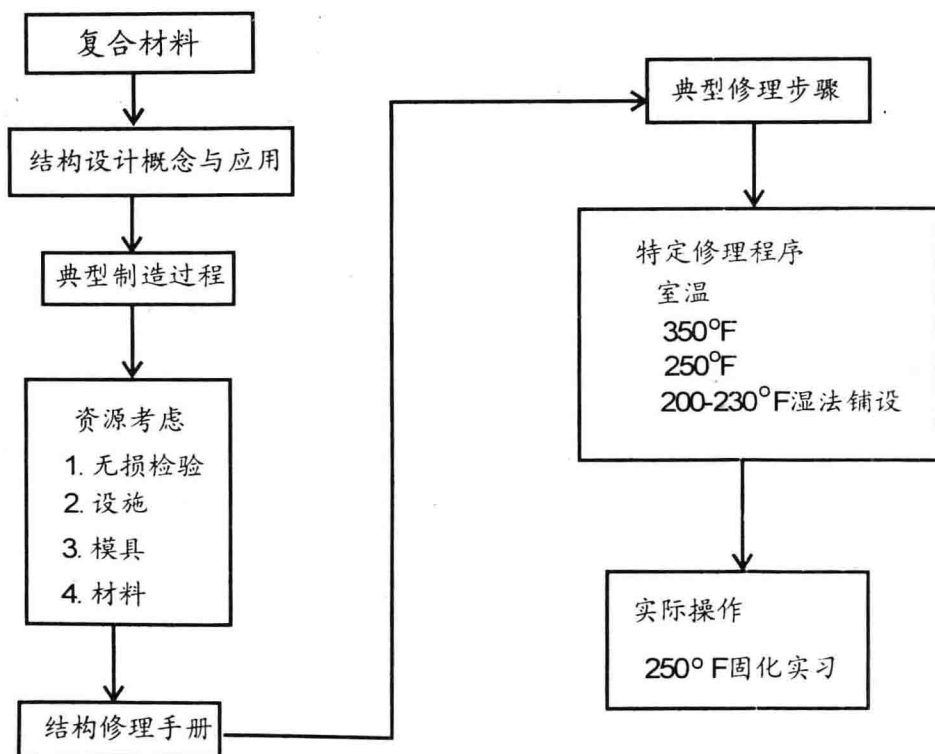


图 1-1 课程内容图解

1.2 先进复合材料介绍

飞机设计传统方法是选择材料和设计结构分别进行。然而今天的复合材料结构,使设计过程发生了根本的变化,即结构与材料同时设计。

由两种或两种以上的材料组合而成的材料称之为复合材料。复合材料的范围包括玻璃纤维增强复合材料、碳纤维/环氧树脂复合材料、碳/碳复合材料、金属基、陶瓷基复合材料,某些复合材料的详细组分仍是国家或商业机密。现在芳纶和碳/环氧树脂复合材料已进入民品市场。例如汽车,甚至于体育用品中。

本书中所涉及的复合材料是基于用一种或数种纤维排列镶嵌在某些形式的聚合物树脂(基体)中。选择高性能的增强材料和树脂基体对于复合材料的性能非常重要。复合材料组分的排列形式对零件的最终特性十分重要。

除了飞机零件在使用过程中可能有许多形式的损伤以外,制造复合材料零件的过程也会使它产生缺陷。怎样维护修理复合材料结构是本教程的主题。

1.3 现代复合材料发展历史

航空用复合材料的发展可以追溯到二十世纪四十年代用层合板制造机体的 Spitfire 和 Mosquito 战斗机。在二十世纪五十年代初,用聚酯树脂玻璃纤维湿法铺设去制造各种形式的娱乐用船得到了快速的发展。玻璃纤维制品的高强度重量比,耐久性特点引起了商业飞机设计者的注意,这导致了环氧树脂和各种形式的高强纤维,以及用于制造现代飞机部件的预浸料的快速发展。

1.4 历史发展的总结

- | | |
|--------|---|
| 1940 | * 用层合板和玻璃纤维制成机体的蚊式 Mosquito 和喷火式 Spitfire 战斗机 |
| 1950 | * 造船业发展了湿法铺设技术 |
| 1964 | * 初步评价硼/环氧树脂和石墨纤维 |
| 1965 | * 硼纤维开始工业应用,用于 F-111 水平安定面 |
| | * 对强度和刚度的初步微观力学分析 |
| 1967 | * 分析技术的改进与提高 |
| | * 手工铺设技术用于第一代结构部件 |
| | * 发展了用于 Windecker Eagle 飞机的玻璃纤维/环氧树脂机翼。该机是第一架获得适航证的玻璃/环氧树脂结构的飞机 |
| | * 商用碳纤维开始出现 |
| 1968 | * 第一代单向带铺设机开始发展 |
| | * 为 C5-A 发展了硼/环氧树脂(前缘缝翼板) |
| | * 将已发展的复合材料和测试数据进行了归纳总结 |
| 七十年代初期 | * 发展了挤拉技术与挤拉设备 |

- * 石墨/环氧树脂用于 F-5 水平安定面,前缘和后缘襟翼、刹车襟翼与中机身
- * 集中对疲劳、断裂力学、孔的影响、环境及老化的研究
- * 发展了用于 F-15 的硼和石墨/环氧树脂复合材料机翼
- * 发展了对复合材料部件和零件的共固化技术
- * 发展了石墨/环氧树脂复合材料,用于 YF-16, YF-17, B-1 的水平与垂直安定面,前缘和后缘襟翼和弹舱门
- * 发展了改进的单向带铺设机
- * 逐层铺敷的铺设技术得到普遍采纳

七十年代中期 * 石墨纤维织布得到商业应用

- * 制造技术的提高——高速切割,自动的无损检测和铺层的树脂传送技术,复杂形状的共固化和膨胀橡胶成型法
- * 试验技术集中发展:关于损伤容限、缺陷效应、长期环境效应、防雷击、航空电子/电学界面,冲击损伤和大的损伤修理的试验——重点是应用的方面
- * 发展了具有较低价格的第三代石墨/环氧树脂,提高了操作性和抗环境等特点
- * 继续发展石墨/环氧(Gr/Ep)飞机部件,用于从 F-14 到 DC-10, 737, L-1011, 727, 747, Gossamer Condor 和 AV-8B

八十年代初期 * 修理技术的发展,Heatcon 复合材料系统公司出售了第一个程序化的热补仪器给波音公司

- * Lear Fan 和 Gossamer Albatross 放飞,767 和 757 大量用复合材料设计非结构主承力件
- * 继续发展更能防潮湿的环氧树脂和提高防雷击能力。就像早期热塑性材料的发展一样

八十年代后期 * Beechcraft Starship——全石墨复合材料商业飞机

- * Dornier Starship——全复合材料水上飞机
- * V-22 全复合材料垂直起降飞机
- * B-2, F-19——复合材料隐身飞机

复合材料和金属不同,它们是由组分和形状不同的材料组成。在复合材料里,各组分保持了它们的特点,尽管它们共同起作用,但并不溶解或互相完全搀合。相对于单独的组分来说,复合材料的性能是卓越的,可能在某些方面是独有的。例如钢筋混凝土结构,两个组分各自保持了原有的特点,钢材承受拉力,混凝土承受压力。在飞机工程中,复合材料结构指的是织物与树脂的组合,其中织物嵌在树脂中,并保持它的特点,织物的纤维承受拉力,基体对织物提供支持和传递压力。

先进复合材料由高强度纤维嵌在环氧树脂基体中,这些复合材料能使飞机结构减重的主要原因是因为它们有高的比强度和比刚度。当用石墨/环氧树脂复合材料结构替换铝合金结构时,能减轻 20% 甚至更多的重量。减重是复合材料最大的优点,也是决定选择它的关键因素。能通过设计纤维方向和铺层数量来有效地承受使用载荷是减重的主要原因。

其他的优于传统材料的特点包括:耐腐蚀、高抗疲劳性、能改变设计来适应载荷和减少部件中零件的数量。

缺点包括:昂贵的材料价格,在制造和修理过程中的高强度劳动,层间强度较低,机械性能受温度和湿度影响,难于检查,石墨/环氧能导致铝的腐蚀和需要长时间的固化处理(见图 1-2)。

1.5 复合材料飞机结构

(一) 早期飞机结构

早期飞机是复合材料的,由木骨架,张线和蒙布组成。焊接钢架在二十年代初逐步取代了木材。在二十世纪三十年代初期,轻的铝制硬壳式结构开始用于承载结构,到五十年代转变成全金属飞机的过程已经完成(见图 1-3)。

(二) 今天的飞机结构

随着玻璃纤维和现代的 Kevlar 及石墨纤维的发展,复合材料结构的应用又开始复兴。

在早期的波音 707 飞机中使用玻璃纤维增强的复合材料部件如翼尖、雷达罩和尾锥,标志着在飞机设计中又回到了使用复合材料结构的时期。这些部件的使用导致了复合材料从那时起在每个新的型号上的使用量不断增加。

在过去的几年中,对复合材料更加深入的了解使得应用范围发生了变化,复合材料被用于机翼,地板梁等。显然,了解复合材料结构及其修理技术对本专业及有关的工作人员来说是十分重要的(见图 1-4)。

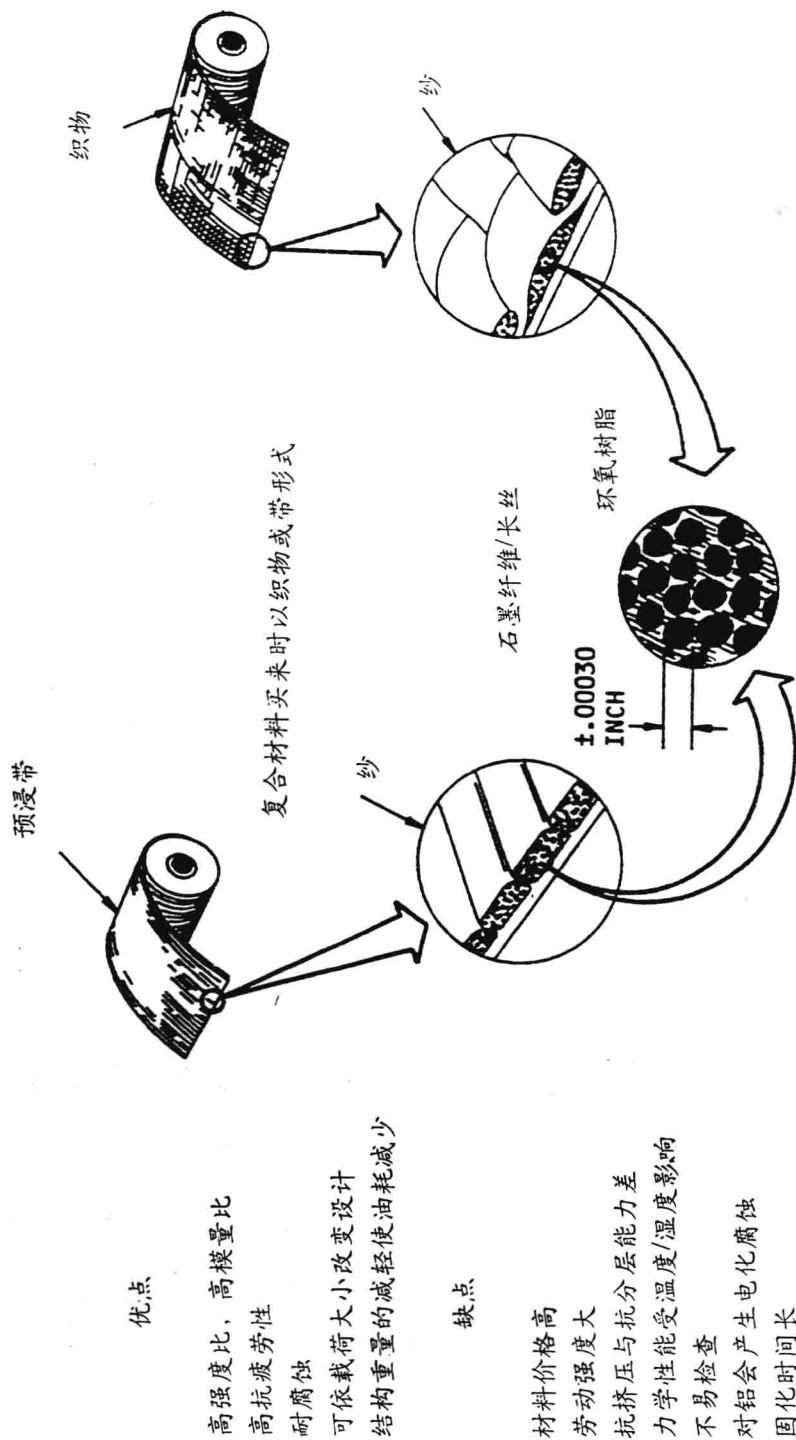


图 1-2 复合材料优缺点

早期的飞机

- *木质骨架/张线系紧/布蒙皮
- *焊接骨架, 20 年代
- *铝合金硬壳式, 30 年代
- *变成全金属结构, 50 年代

波音 MB3A 飞机
下翼上表面, 1918

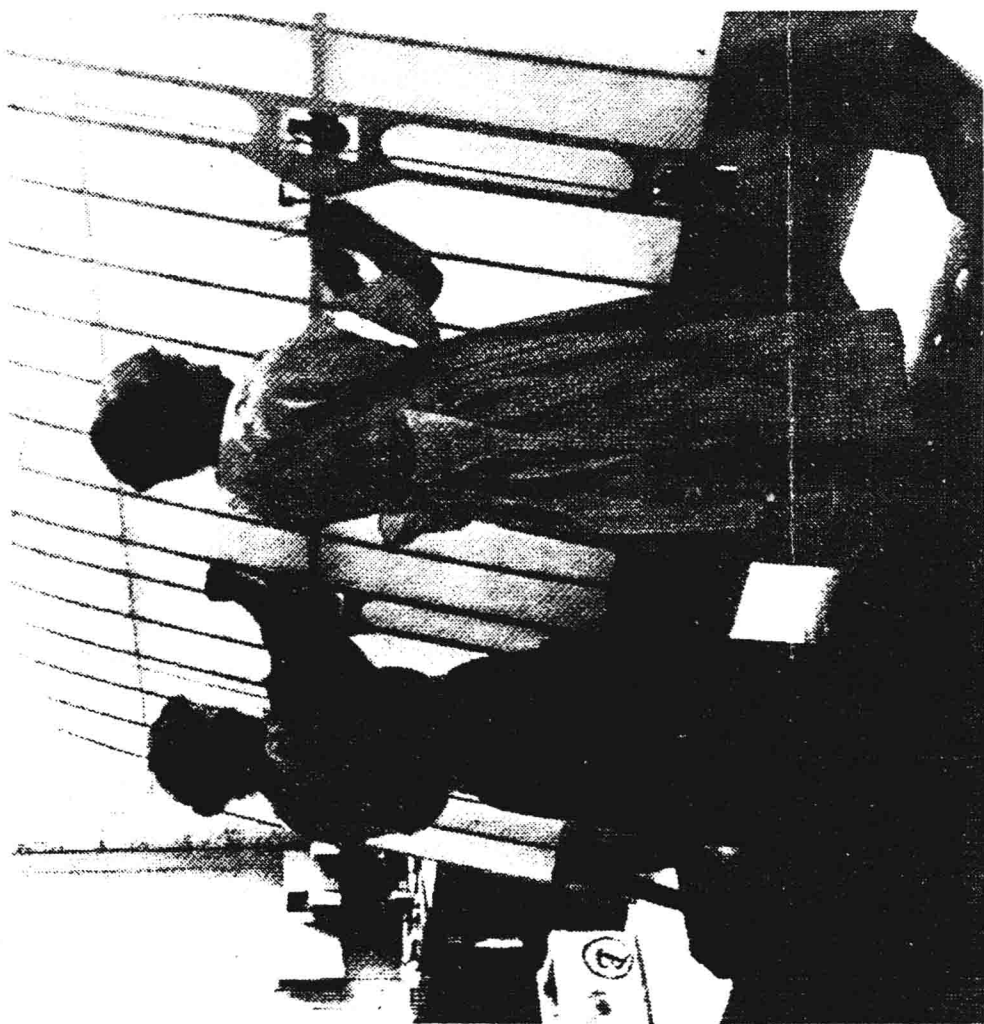


图 1-3 早期的飞机结构

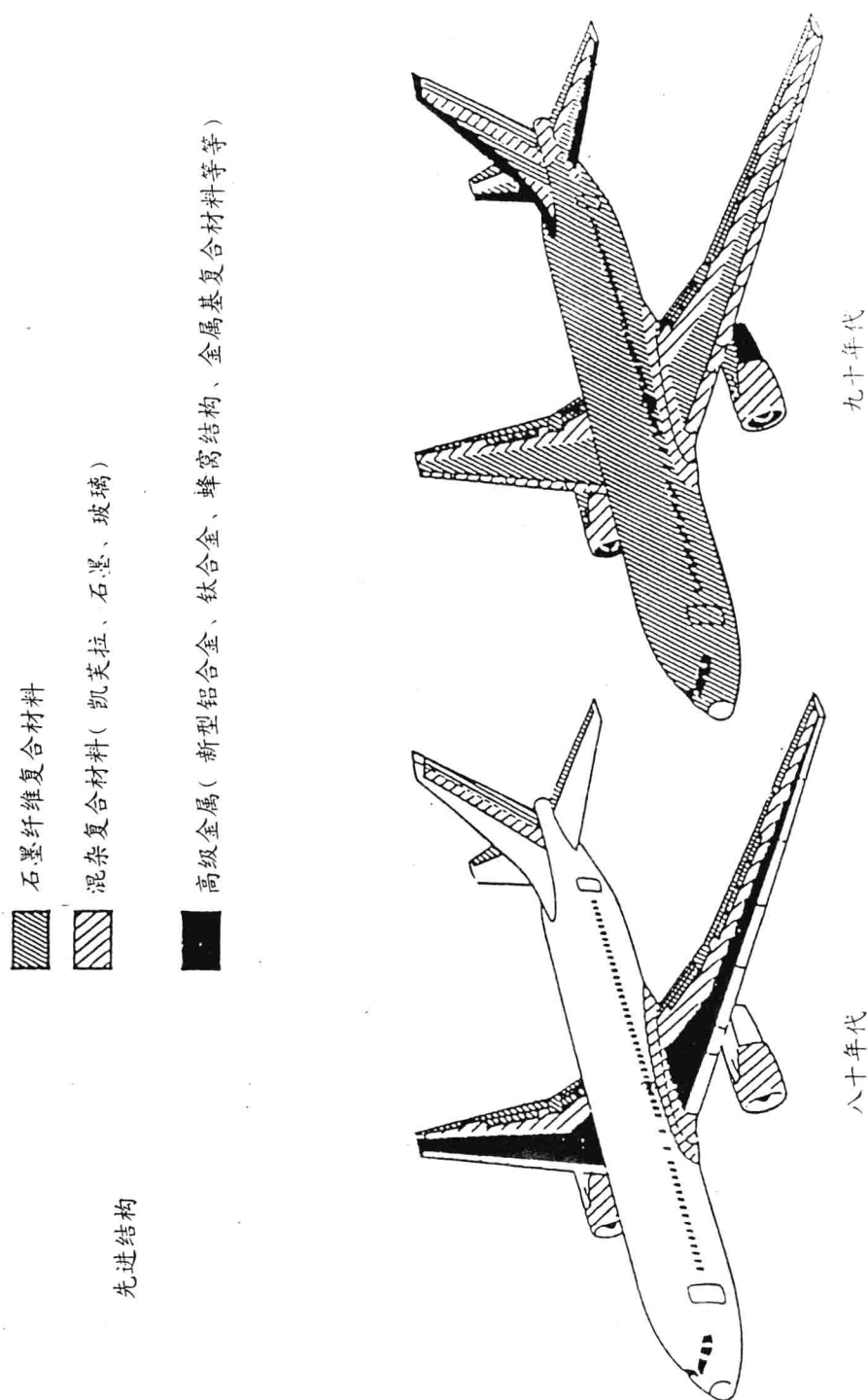


图 1-4 今天的先进复合材料结构