

聚合物基复合材料

主讲教师：董智贤

手机：13316124531

邮箱：zxdong@gdut.edu.cn

办公地点：工学三号馆 720

一、课程地位、作用和任务

★**课程地位：**《聚合物基复合材料》是高分子材料与工程专业本科生的选修课程。

★**课程作用：**掌握有关聚合物基复合材料的基本知识和基本理论，了解学科发展动态，为学习其他相关专业课程、进行实验研究和从事教学、科研工作打下基础。

★课程任务

- ★**了解**有关聚合物基复合材料的基本知识和基本理论；
- ★**掌握**聚合物基复合材料的常用增强材料；
- ★**掌握**聚合物基复合材料的基体树脂；
- ★**掌握**聚合物基复合材料的成型工艺

二、教学内容与课时分配

教学内容（总学时：24）

- | | |
|---------------|-------|
| 1 概论 | (2学时) |
| 2 增强材料 | (6学时) |
| 3 聚合物基复合材料界面 | (2学时) |
| 4 树脂基体 | (6学时) |
| 5 聚合物基复合材料的成型 | (4学时) |
| 6 课堂讨论 | (2学时) |
| ★ 随堂考试 | (2学时) |

使用教材：

陈宇飞 等编著，《聚合物基复合材料》，化学工业出版社。

三、参考教材

- [1] 宋焕成、赵时熙 编著, 《聚合物基复合材料》, 国防工业出版社, 1996.
- [2] 伍必兴、栗成金 编著, 《聚合物基复合材料》, 北京航空航天大学出版社, 2000.
- [3] 黄丽主编, 《聚合物基复合材料》, 中国轻工业出版社, 2001.
- [4] 王汝敏、郑水蓉、郑亚萍编著, 《聚合物基复合材料及工艺》, 科学出版社, 2004.
- [5] 顾书英、仁杰编著, 《聚合物基复合材料》, 化学工业出版社, 2007.
- [6] 倪礼忠, 陈麒 编著, 《聚合物基复合材料》, 华东理工大学出版社

其它教学资料

学术期刊：

《复合材料学报》、《玻璃钢/复合材料》

专业网站：

中国复合材料网 (www.ourfrp.com)

中国玻璃纤维复合材料信息网
(www.cnbxfc.net)

第1章 概论

本章教学目的：

1. 了解复合材料的定义、命名及分类、成型方法
2. 了解复合材料的特性、应用
3. 了解复合材料的进展

本章重点难点：

聚合物基复合材料的基本概念、应用及进展

本章课时安排： 2学时



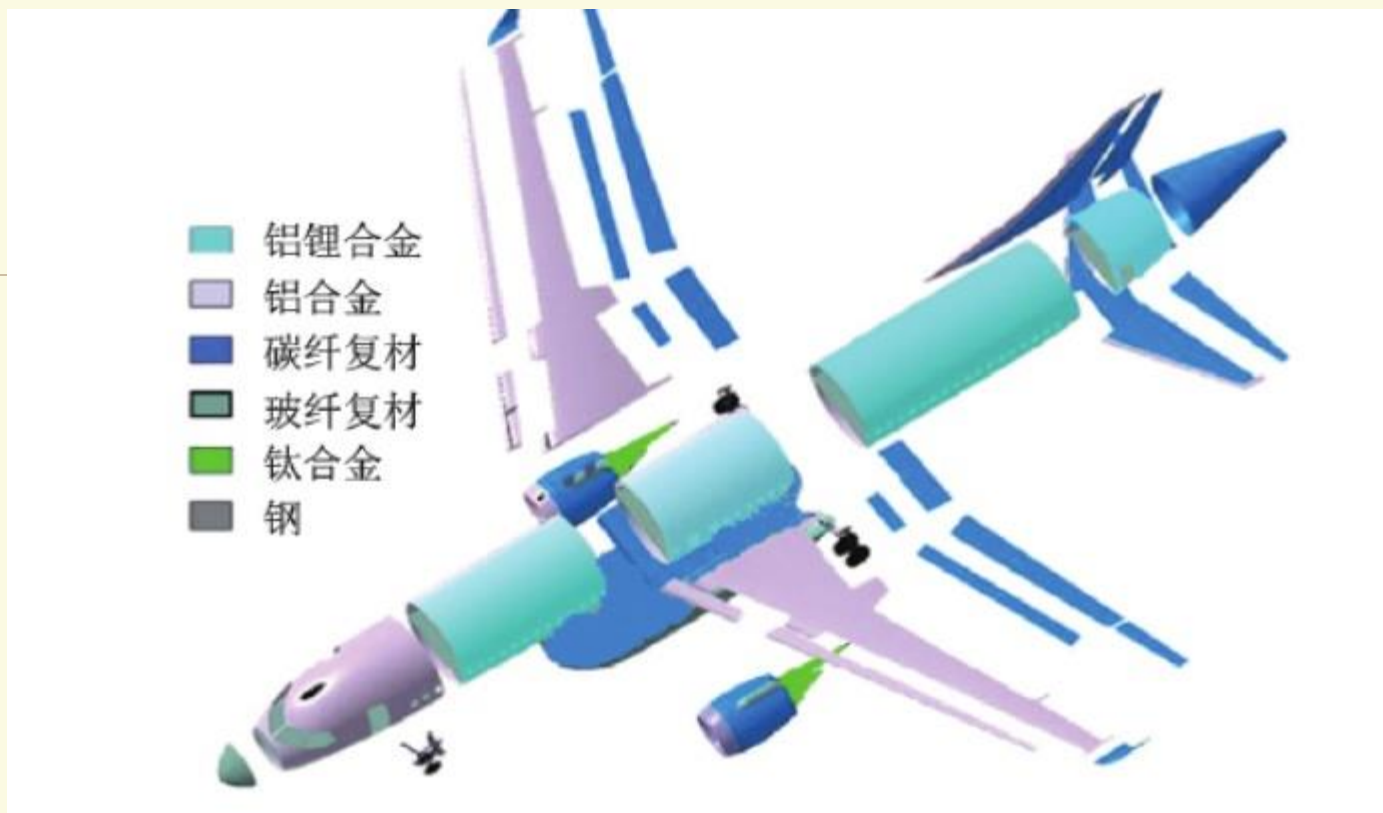
2017年5月5日，首架国产大飞机C919在上海成功首飞。

C919是中国自行研制、具有自主知识产权的大型喷气式民用飞机，采用单通道窄体布局，座级158至168座，航程4075至5555公里。与空客320、波音737机型同级别。



2022年8月1日，
中国商飞晒出贺
图官宣
国产大飞机C919
完成取证试飞！



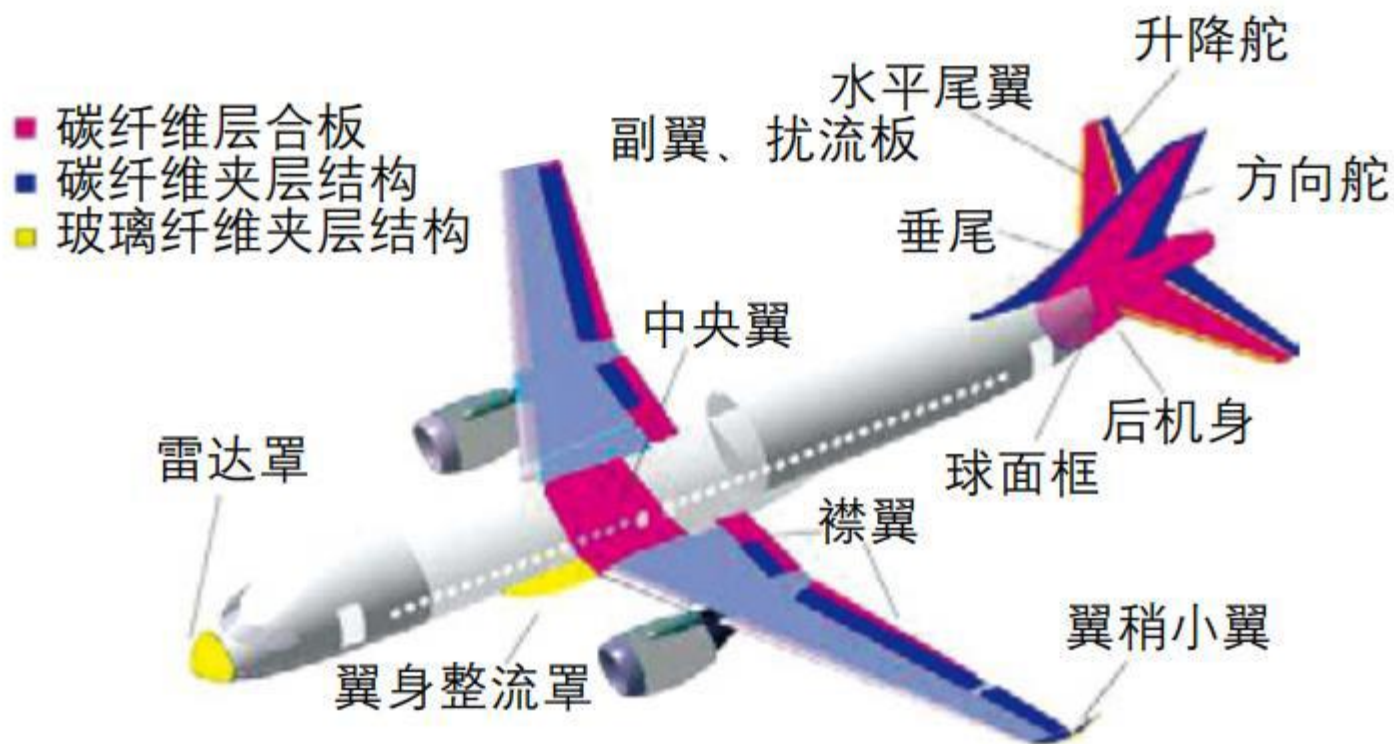


C919大范围采用了铝锂合金材料，以第三代铝锂合金、复合材料为代表的先进材料总用量占飞机结构重量的**26.2%**，还大胆尝试了钛合金**3D**打印等“绿色”加工方法。由于大规模采用先进材料，**C919整体减重7%左右**。

C919采用的复合材料，在新机型中的用量明显增多。



C919被认为“在我国材料领域具有里程碑式的意义”。



碳纤维复合材料

C919大型客机是国内首个使用**T800级高强碳纤维复合材料**的民机型号。**C919**上受力较大的部件，如后机身和平垂尾等都使用了这种材料。

C919的发动机为**LEAP-X1C**发动机，采用了**18**片赛峰公司研制的碳纤维复合材料风扇叶片以及美国通用电气公司研制的陶瓷基复合材料涡轮部件。

玻璃纤维复合材料

C919的雷达罩和一些受力较小的部件，如襟翼等都使用了玻璃纤维复合材料。

因为玻璃纤维复合材料成本比碳纤维复合材料低，在受力较小的部件上应用，既可以达到设计要求，又可以降低制造成本。

芳纶蜂窝材料

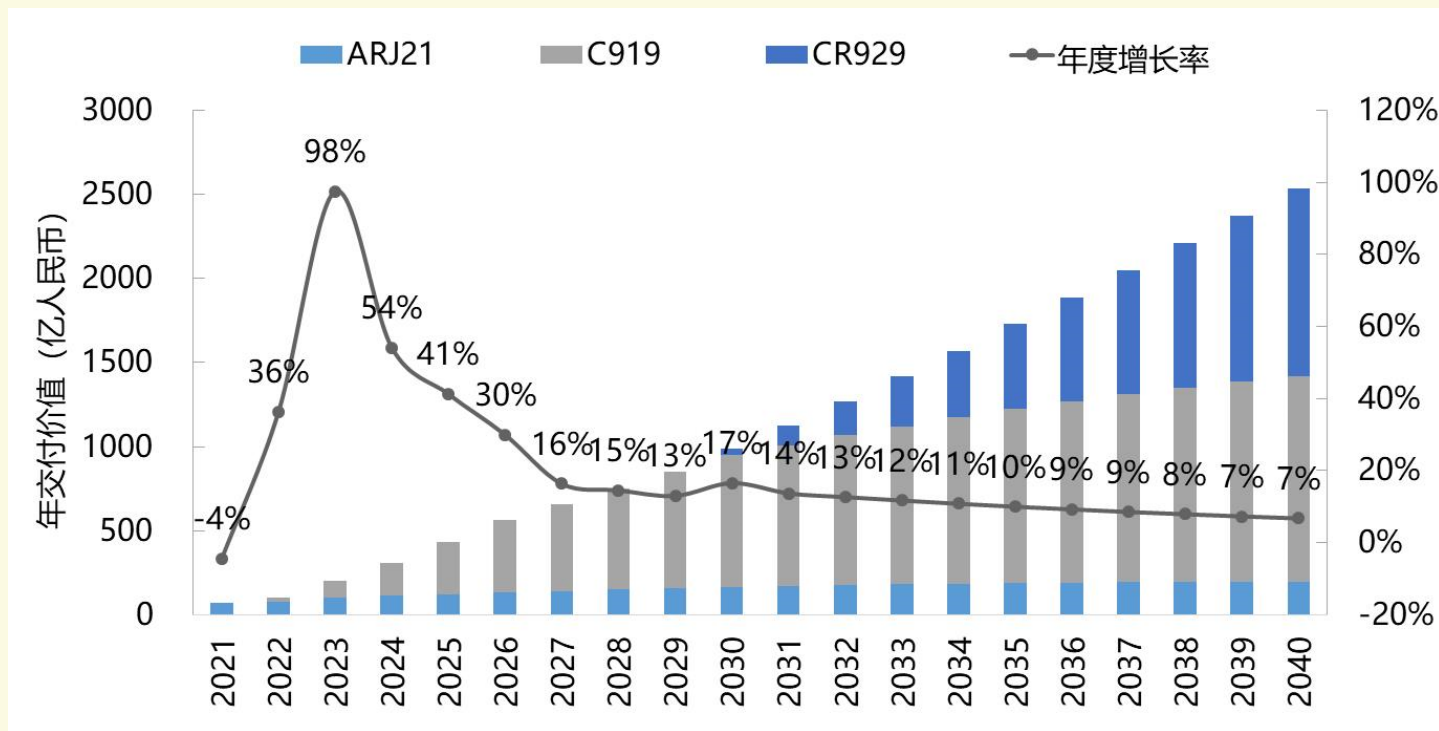
C919大型客机舱门和客货舱地板使用了芳纶蜂窝材料，这是一种采用酚醛树脂浸渍的芳纶纸制成的轻质高强非金属仿生芯材制品，具有高韧性、良好的抗疲劳性能和防火性能，是一种比较理想的民机复合材料。

芳砜纶纤维

C919机舱内部将首次启用芳砜纶纤维制作椅罩、门帘，使飞机**减重30公斤**以上，每架飞机能够节省超万元成本。

此外，国产大飞机**C919**在机翼前后缘、活动翼面、翼梢小翼、翼身整流罩、后机身、尾翼等主承力和次承力结构上使用了复合材料，**占全机结构总重的比例达11.5%**。

根据中国商飞公司预测，2040年中国将成全球最大单一航空市场，C919实现年产100架以上，国产民机市场规模爬升到**千亿以上**。



C919飞机应用复合材料相关上市公司有：中航高科、中复神鹰、光威复材、中简科技、恒神股份、楚江新材。

1.1 复合材料的定义和分类

1.1.1 复合材料的定义

1.1.2 复合材料的结构

1.1.3 复合材料的分类

1.1.1 复合材料的定义要点

复合材料包含两种或两种以上物理上不同并可能用机械方法分离的材料。一般其中一种为连续相，另一种为功能增强相。

几种材料通过某种方法混合在一起获得复合性能。

复合材料的总体性能优于各单独组分材料，并在某些方面可能具有独特性能。

- ◇ 复合材料的性能取决于组分材料的**种类、性能、含量和分布**，还取决于复合材料的**复合工艺和界面的结合程度**。
- ◇ 选择复合材料的组分和工艺的过程就是复合材料设计的内容之一。

1.1.2 复合材料的结构

- ◆ 复合材料的**组分材料**包括**增强体** (Reinforcement) 和**基体** (matrix),
- ◆ 增强体和基体称为复合材料的**增强相**和**基体相**。
- ◆ **界面**(interface) 被视作复合材料中的第三个 “相” 。

1.1.3 复合材料的分类

1.1.3.1 按增强体分类

1.1.3.2 按基体分类

1.1.3.3 按应用分类

1.1.3.4 更高级复合材料

1.1.3.1 按增强体分类

复合材料

纤维复合材料(fiber composite materials):

{ 连续纤维 (continuous fiber)复合材料

{ 非连续纤维复合材料

{ 晶须(whisker)

{ 短切纤维(short fiber)

织物(fabrics) 增强复合材料

颗粒(particle)增强复合材料

片状物 (platelet)增强复合材料

1.1.3.2 按基体分类

复合材料

聚合物基复合材料(Polymer Matrix Composites, 简记为PMC)

热塑性PMC

热固性PMC

金属基复合材料 (Metal Matrix Composites, 简记为MMC)

铝、镁及其合金基MMC

钛、高温合金基MMC

金属间化合物基MMC

陶瓷基复合材料 (Ceramics Matrix Composites, 简记为CMC)

碳及碳化物基CMC

非碳基CMC

水泥基CMC

热固性树脂（常用）

Phenolics (PH)

酚醛树脂

Epoxies (EP)

环氧树脂

Bismaleimides (BMI)

双马来酰亚胺

Cyanate esters (CE)

氰酸酯

Polyimides (PI)

聚酰亚胺

热塑性树脂（常用）

Polycarbonates (PC)

聚碳酸酯

Polyamides (PA-6, PA-12)

聚酰胺 (PA-6 PA-12)

Polyphenylene Sulfide (PPS)

聚苯硫醚

Polyetherimide (PEI)

聚醚酰亚胺

Polyetheretherketone (PEEK)

聚醚醚酮

Polyetherketoneketone (PEKK)

聚醚酮酮

1.1.3.3 按应用分类

- ◆ **结构复合材料** (structural composite)

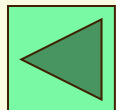
结构复合材料主要作为承力结构使用的复合材料。

- ◆ **功能复合材料** (functional composite)

功能复合材料具有某种特殊物理或化学特性。如声、光、电、磁、热、耐腐蚀、零膨胀、阻尼、摩擦或换能等。

1.1.3.4 更高级复合材料

- ◇ 仿生(biomimetic)复合材料
- ◇ 功能梯度(functionally gradient)复合材料
- ◇ 机敏(smart)复合材料
- ◇ 智能(intelligent)复合材料
- ◇ 原位(in-situ)复合材料
- ◇ 分子(molecular)复合材料
- ◇ 多功能 (multifunctional)复合材料
- ◇ 混杂 (hybrid) 复合材料



1.3 聚合物基复合材料的特性

- (1) 高比强、高比模量。**
- (2) 可设计性好。**
- (3) 电性能好。**
- (4) 耐腐蚀性能好。**
- (5) 热性能良好**
- (6) 工艺性能优良。**
- (7) 聚合物基复合材料弹性模量较低。**
- (8) 聚合物基复合材料长期耐热性不好。**

◆复合材料的可设计性是指：

通过**选材**（选择增强体和基体）和**铺层设计**
[即根据受力要求和刚度（变形）要求，来确定增强体在复合材料中的理想配置与铺叠次序]，使制造出的复合材料构件满足各种不同的性能（如方向性，包括等强度、等刚度等及特殊功能，包括热、电、声、光）要求。

◆复合材料的性能设计具有比传统材料的设计**更高级、更广泛、更自由**的特点。

1.4 复合材料的应用

新材料的研究与应用一直是当代高技术的主要内容之一，材料科学是当代整个科学技术的前沿，材料的复合化是研制新材料的重要手段。

复合材料的三大应用领域：

航空航天领域：约占18%；

体育休闲用品：约占37%；

各类工业应用：约占45%。

将先进复合材料（ACM）用于航空航天结构上可减重20%以上，这是其它先进技术无法达到的效果。

复合材料是继铝、钢、钛之后，迅速发展成为四大航空航天结构材料之一。

1.4.1 先进复合材料在军机上的应用

飞机设计及其性能的不断提高一直与采用性能优异的新材料**尤其是ACM**密切相关。

ACM：先进复合材料。

ACM 中大量应用的是碳纤维复合材料 (CFRP)：高比强、高比模。

先进复合材料在飞机结构上的应用大致分为三个阶段。

1、第一阶段

用于舱门、口盖、整流罩以及襟、副翼、方向舵等操纵面上。受力较小、规模较小，于60年代末 ~ 70年代初完成。

2、第二阶段

用于垂尾、平尾等受力较大、规模较大的尾翼一级部件，自70年代初始，至今仍在延续，现军机尾翼一级部件已均为复合材料。

其中F-14的硼/环氧复合材料平尾于1971年前后研制成功，是复合材料发展史上一个重要里程碑，此后则有F-15、F-16、F-18、B1-B、幻影2000和幻影4000等，此时复合材料用量一般不超过结构总重的5%。

3、第三阶段

代表了近况，用于**机翼、机身等主要受力结构上**、
受力很大、规模很大。

其中美国麦道飞机公司于1976年率先研制F-18的复合材料机翼，并于1982年进入服役，把复合材料用量提高到了**13%**，此后该公司又将复合材料用于AV-8B的机翼和前机身上，其用量为**26%**，使复合材料在飞机上的应用跨入了第3个阶段，自80年代初至今。

目前军机上复合材料用量占结构总重的**20~50%**左右不等。



Lockheed Martin's Raptor 4011, the last of five Dedicated Initial Operational Test & Evaluation (DIOT&E) jets the US Air Force need to determine the warfighting capabilities of the F/A-22. (Picture courtesy of John Rossino, Lockheed Martin.)



F/A-22“猛禽” 的复合材料应用：

目前世界上唯一的4代战机（隐身、超音速巡航、推力矢量）， F/A-22大量应用了复合材料，复合材料约占其结构总重的23 ~ 25%左右。

主要应用部位：机翼（蒙皮和部分梁）、垂尾、平尾及平尾大轴、前、中机身蒙皮等。

双马树脂体系：17.2%；环氧树脂体系：6.6%；

热塑性复合材料：0.4%；

首飞时间：1997年；交付使用：2003年1月；单价：1.2亿美元（不含研制成本）。



F-35 “闪电II” 复合材料应用：

F-35是美国研制的轻型、低成本、多用途、隐身战斗机（绰号:Lightning II），是世界上最大的单发单座舰载战斗机和世界上唯一一种已服役的舰载第五代战斗机，复合材料用量约为30 ~ 35%。

要应用部位：机翼、机身、垂尾、平尾、进气道等。

用材体系：30%的碳/环氧、2%的碳/双马、2%玻纤/双马。大量用环氧树脂体系，强调低成本。

研制费用达到绝对空前的2000亿美元，洛克希德.马丁公司主持，8国参与，素有“世界战斗机”之称。





美国B-2隐形轰炸机表面为具有良好吸波性能的碳纤维复合材料

B-2轰炸机复合材料应用：

复合材料约占其结构总重的**50%**左右。

洛斯罗普公司研制，1989年首飞，能执行核轰炸和常规轰炸双重任务，单价高达22.2亿美元，是世界上迄今为止最昂贵的飞机。

机身采用翼身融合、无尾翼的飞翼构形，机翼前缘交接于机头处，机翼后缘呈锯齿形。

机身机翼大量采用石墨/碳纤维复合材料，表面有吸波涂层，发动机喷口置于机翼上方，独特的外形设计和选材，能有效躲避雷达的探测，达到良好的隐身效果。

最高时速0.85马赫，升限19000m，最大航程11000km。接到指令后能在几小时内攻击世界上任何地区的目标。

1.4.2 先进复合材料在民机上的应用

民机既强调安全性、经济性，但也强调性能，继军机之后亦早于70年代初就开始了应用先进复合材料的进程。

1、大型民机

大型民机又称商用干线客机，在先进复合材料问世之初的70年代就开始了其研究应用，以美国而言大致可分为四个阶段：

第一阶段：**受力很小的构件**，如前缘、口盖、整流罩、扰流板等，该阶段约70年代中期结束。

第二阶段：受力较小的部件，如升降舵、方向舵、襟副翼等。

1975年NASA开始执行ACEE计划（飞机节能计划）：**减重、节油、增加商载**。该阶段约于80年代初结束。

第三阶段：受力较大的部件，如平尾、垂尾。仍在ACEE计划下执行，该阶段约于85年前后完成。

第四阶段：在生产型飞机上正式设计应用，如B757, B767, B737, B747。B777：共用复合材料9.9吨，占结构总重的**11%**。波音的“音速巡航者”（Sonic Cruiser）拟用复合材料60%，2008年投入使用。后该项目取消，转为B7E7。

A380超大型客机上复合材料的应用

该机共用各种复合材料**25%左右**，开创了大型民机上大规模使用复合材料的先河。

主要应用部位：中央翼、外翼、垂尾、平尾、机身地板梁和后承压框等。机身上壁板则大量应用了超混杂复合材料Glare层板，机翼前缘还用了热塑性复合材料。

A380是第一个将复合材料用于中央翼盒的大型民机，该翼盒 $8 \times 7 \times 2.4\text{m}$ ，重8.8吨，**用复合材料5.3吨，减重1.5吨。**

1999年开始研发，预算耗资88亿英镑，后来追加到120亿英镑，单价2.95亿美元；投入服务后，打破了B747统领35年的历史，改写了人类航空史，并成为世界上载客量最大的的民用飞机，续航能力14800km。

新结构材料技术在A380上的应用分布

GLARE复合材料构成示意图



客舱上地板梁
采用CFRP复合材料



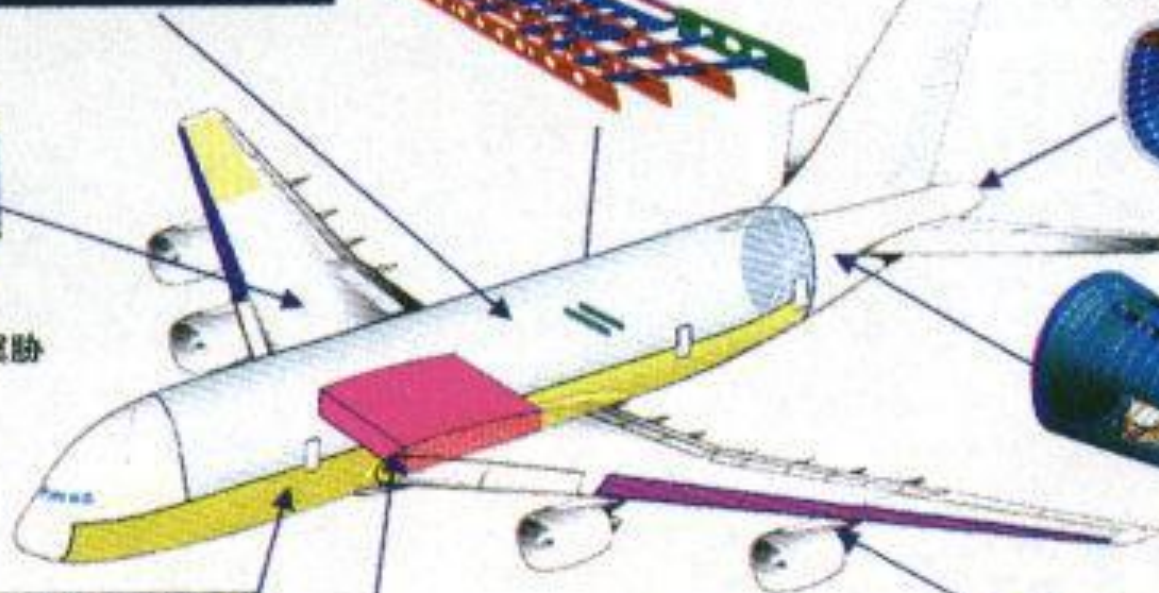
机身尾段(19.1段)
采用CFRP复合材料



机身尾段
(19段)采用
CFRP复合材料



CFRP制成的翼肋



采用激光焊的整体结构



中央翼盒
采用CFRP复合材料

采用了更多的钛
合金及新的钛合
金加工技术
(电子束焊)



B787“梦想”飞机上复合材料的应用：

主要应用部位：全机主要结构均将用复合材料制成，包括机翼、机身、垂尾、平尾、地板梁及部分舱门、整流罩等，复合材料占全机结构重量**50%以上**，这是世界上第一个采用复合材料机翼和机身的大型商用客机，其应用远远超过B777和A380，为世界之最，载客量：289人；巡航速度：0.85马赫；最大航程：15700km。



波音787直径5.8米整体成型CFRP框段

1.4.3 体育休闲用品应用

这是一个开发较早，有稳定需求的应用领域。

1. **高尔夫球拍**：4000万只/年，约占总数的80%以上。

2. 其他各种球拍（**网球拍、羽毛球拍等**）：

500 ~ 600万只/年，几乎独占市场。

3. **钓鱼杆**：1200万只/年，约占总数的50%以上。

4. **自行车**：12万辆/年。

5. 其他：赛艇、赛车、弓箭、滑雪板、杆等等。

前4项约占碳纤维耗量的85%左右，其他只占15%左右。





台湾的复合材料产业：

台湾素有“复合材料体育用品王国”之称，当局一直把复合材料产业作为24项支柱产业之一予以支持发展。规模大、产品新、市场观念强、重开发、注意成果转化形成生产力，经费充足、人才档次高，原材料可部分解决、产品大部分外销，向大陆转移已成定局。

台湾碳纤维约有3000吨/年的产能。

1.4.4 工业应用

这是一个覆盖甚广，内容甚多，也是一个发展最快，前景最好的应用领域。

1、基础设施领域（混凝土结构加固补强）

基础设施（Infrastructure）系指建筑领域的房屋、桥梁、隧道、涵洞、地铁及其相关的混凝土工程，其修复、更新、加固已构成复合材料目前极重要的应用领域。

结构应用：承拉索、护栏、扶手、梁、柱、杆、板、桩、桁架、构架、格栅、筋条（代钢筋）。

修复、加固、更新：层压板、包缠料（片材）。

使用Sika®CarboDur® 复合材料进行结构加固

该加固体系能满足

结构要求

- ▲ 静荷
- ▲ 动荷
- ▲ 裂缝控制
- ▲ 安全
- ▲ 耐久性

当施加工作荷载时，该板按比例与侧墙共同承担拉力。原有结构混凝土受压区必须有未使用的承载储备，粘贴层应使该应力峰变得平缓，因此平整度越好，传递荷载的粘贴面之比例越大。

Sika®CarboDur®板

优点

- ▲ 性能可靠
- ▲ 尺寸可制—优化设计
- ▲ 模量可高
- ▲ 根据需求工厂预制
- ▲ 用加热法可低温施工
- ▲ 高温下正常工作
- ▲ 可预加应力
- ▲ 超高强

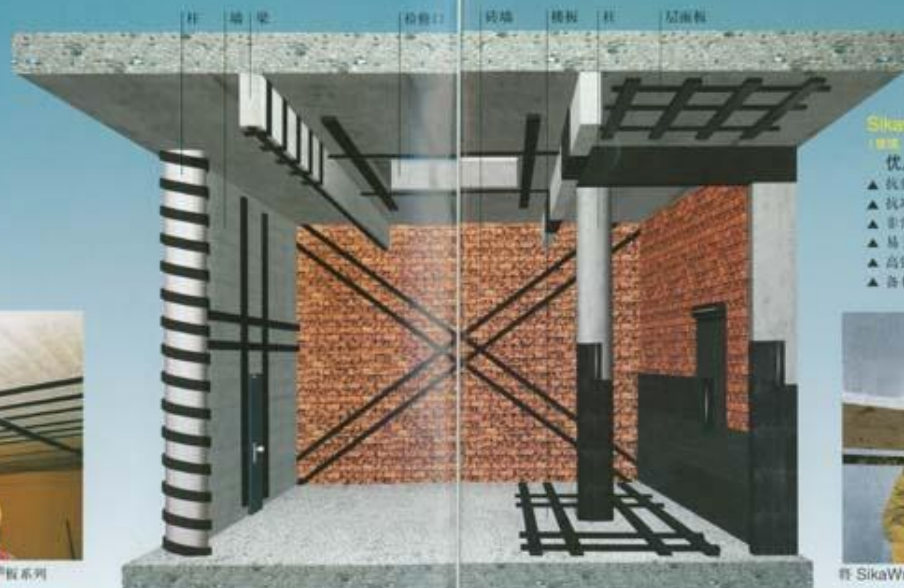


加固钢筋混凝土楼板使用Sika®CarboDur®板系列
(Sikadur-30粘剂及Sika®CarboDur®板)

环境影响下要求

- ▲ 温度
- ▲ 潮湿
- ▲ 盐
- ▲ 冻融
- ▲ 腐蚀
- ▲ 紫外线辐射

抗腐蚀是长期使用中的重要因素，Sika®CarboDur®板对结构粘剂产生的污染有强的化学抵抗力，尤其是绝无腐蚀的危险。



Sikawrap®织物

(纤维、布、混合布) 漆 / 干膜用

优点

- ▲ 快速加固
- ▲ 抗冲击及爆炸
- ▲ 非常牢固可用于各种细部
- ▲ 易于做成圆形和方形截面
- ▲ 高强
- ▲ 含有碳纤维、玻璃布、混合布



将Sikawrap®织物系列用于桥柱抗冲击



关于复合材料筋：

混凝土工程的寿命危机：钢筋锈蚀→沿筋开裂→混凝土工程提前破坏，产生耐久性危机→重建与维修的费用不胜负担。

复合材料筋：不锈不蚀；质量轻、易于运输、施工；有特殊的电磁性能，满足特殊应用，特别是沿海应用。

缺点：成本高、不易现场弯制。

材料体系：**玻纤、碳纤、芳纶、玄武岩纤维（Basalt）等，基体多用聚乙烯醇缩甲醛，环氧树脂亦可。**

中国的混凝土工程世界第一，水泥产量占世界的1/3，投资基础设施→拉动内需。

2、沿海油气田

由于复合材料高耐腐蚀性的特点，在该领域有广泛的应用前景。

On-shore：管道系统、油罐、油箱。

Off-shore：管道系统、围栏、扶手、通道、竖井、抽油杆等。

Down-hole（井底，井下）：管道系统及其衬里。

3、汽车领域

复合材料用于汽车领域多数代替钢材，可**减重40%以上**→节省燃油→降低使用成本。

但复合材料成本较高→进展一直不如人意→碳纤维须降至 \$ 11/kg以下才会有大的变化。

近年来随大丝束纤维、RTM工艺等低成本技术的发展，情况大有变化，应用日益增多。

车体结构，赛车、环保型的电动汽车（车体、储能飞轮必用），汽车必将成为复合材料潜在的应用大户！

◆碳纤维复合材料在汽车制造中实际应用



宝马M3碳纤维车顶

车重降低5KG,市场售价110.5万, 普通钢制车顶售价110万

雷克萨斯FLA优质跑车
60%车身采用碳纤维复合材料

不仅加强车身坚固性
较铝制车身减重
100KG



4、以风力发电为主的能源领域

风力是节能环保的可再生能源→风力发电是世界能源增长最快的领域：每年以25%的速率递增。

在风力发电设备中，最核心的部分是**叶片**。目前大型风力发电机的叶片基本上由复合材料制成，并向大型化、低成本、高性能、轻量化、多翼型方向发展。

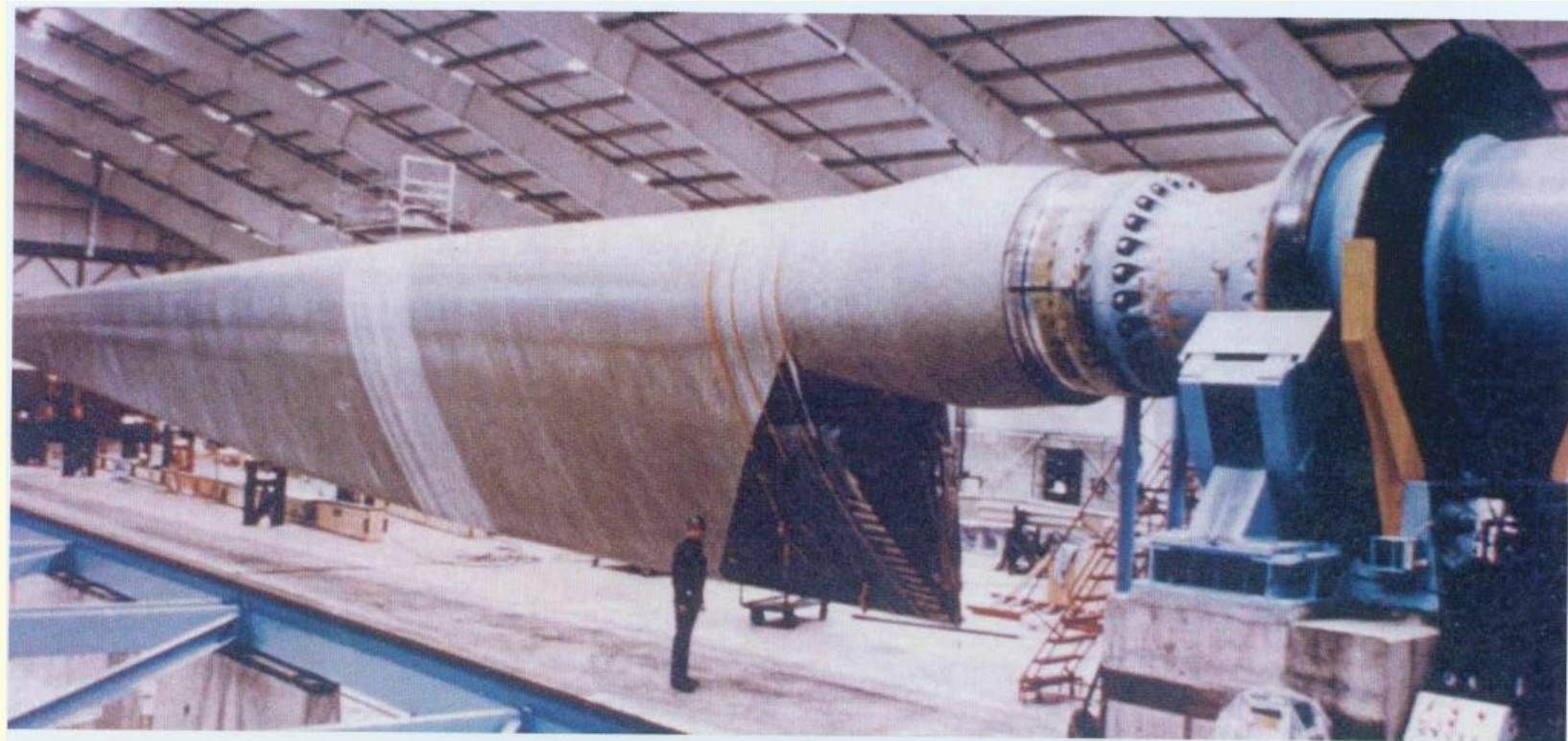
趋势：单机容量越来越大→叶片越来越长、自重越来越大→刚度、强度要求越来越高→**由玻纤转向碳纤**。

目前最高可达4~5MW，塔高70m，叶片长达50m。

德国领先，其次是美国，亚洲是印度、日本等。

应用：叶片、机舱罩、导流罩、塔架等。







5、防弹产品领域

现代的防弹产品多由复合材料制成，可用到
**芳纶（kevlar）、超高分子量聚乙烯纤维（
UHMWPE）等。**

防弹板：飞机、武装直升机、坦克

**防弹头盔：金属→非金属（陶瓷）→复合材料
→混杂复合材料**

防弹服：武警、特种部队需求增加。

防弹车：防弹运钞车、轿车，或整车或局部。

6、其他工业领域

复合材料几乎是个无所不为的材料，在其他工业领域亦有广泛应用。

电子领域：抛物面天线、印刷电路板、电器设备壳架；

海上应用：游艇、赛艇、滑水板等；

生物工程：人工关节、骨骼、人工脏器等，CT床板；

发热体：电暖气、发热墙体；

其他：高速列车、机械设备、齿轮、轴承、飞轮、集装箱、乐器等。



运载火箭整流罩、广播卫星抛物面天线

快艇、游艇

