

# 先进复合材料在飞机结构上的应用与发展

张佐光<sup>1</sup> 李 敏<sup>1</sup> 陈绍杰<sup>2</sup>

(1 北京航空航天大学 2 沈阳飞机设计研究所)

**摘 要** 首先阐述了飞机结构用复合材料的重要性与必然性,较全面介绍了先进树脂基复合材料在飞机上应用及其发展历程,指出了复合材料发展亟待解决的重要问题,展望了复合材料的发展未来。大量事实表明:先进复合材料用于飞机结构可同获减重/功能双重显著效益,先进复合材料在飞机结构上用量已成为衡量飞机先进性的一个重要标志,先进复合材料用于飞机结构仍有很大的发展潜能,树脂基复合材料用于飞机结构老化已不成问题,复合材料更大发展时期已经到来。

**关键词** 复合材料; 飞机结构; 结构设计; 制造工艺; 树脂基体

## 1 飞机结构用复合材料的必然性

“轻质化、长寿命、高可靠、高效能、高隐身、低成本”是新一代飞机的发展目标,先进复合材料用作飞机结构则是实现这一目标的重要途径。这是因为先进复合材料具有质轻、高强、可设计、抗疲劳、易于实现结构/功能一体化等优点,因此,继铝、钛、钢之后迅速发展成为四大飞机结构材料之一,如图 1 所示。复合材料用量已是飞机先进性的一个重要标志,如先进的 F-22、F-35、B-2 等军机其复合材料用量均达到 25% 以上,民机也是如此,新研制的 A380 复合材料用量达 25%,而 B787 高达 50%。

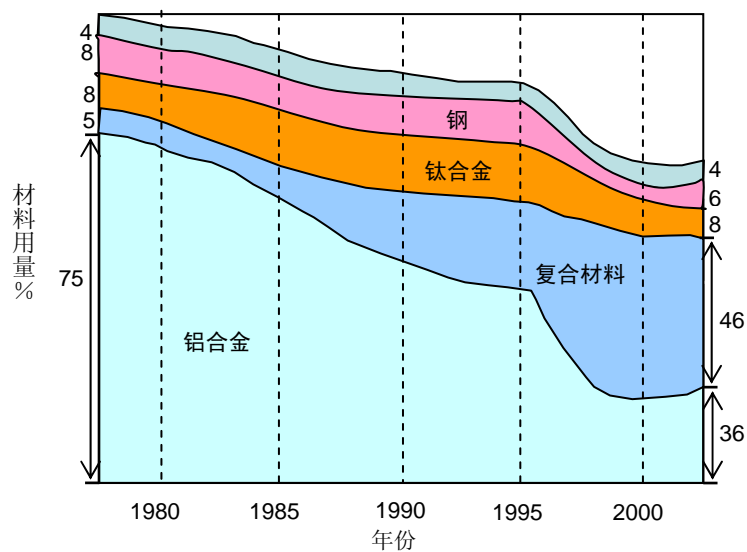


图 1 飞行器用四大结构材料

复合材料在飞机结构上的应用首先带来的是显著的减重效益，复合材料尤其是碳纤维复合材料其密度仅为  $1.6\text{g/cm}^3$  左右，如等量代替铝合金，理论上可有 42% 的减重效果，对于为减轻 1 克重量而奋斗的飞机结构设计而言，这是目前其他任何先进手段所无法达到的效果，也是先进复合材料在飞机结构上大量应用的根本所在。重量的减轻意味着战斗能力的提升、航程增加或者运输能力提高，如美国旅游者（Voyager）号飞机，90% 以上为碳纤维复合材料，飞机结构重量只有 453kg，可连续环球飞行 9 天，飞行距离达 40252km。飞机结构每减少 1kg 重量，对于小型民机、直升机、战斗机和运输机，其结构受益分别可达 50、100、450 和 900 美元，飞机结构应用复合材料所带来的效益显而易见。

近年来随着复合材料技术的深入研究和应用实践的积累，人们清楚地认识到：复合材料在飞机结构上应用效益绝不仅仅是减重，而且给设计带来创新舞台，通过合理设计，还可提供诸如抗疲劳、抗振、耐腐蚀、耐久性和吸透波等其它传统材料无法实现的优异功能特性，可极大地提高其使用效能，降低维护成本，增加未来发展的潜力和空间。尤其与铝合金等传统材料相比，可明显减少使用维护要求，降低寿命周期成本，特别是当飞机进入老龄化阶段后效果更明显，据说 B787 较之 B767 机体维修成本会降低 30%，这在很大程度上应归功于复合材料的大量应用。同时，大部分复合材料飞机构件可以整体成型，大幅度减少零件数目，减少紧固件数目，减轻结构质量，降低连接和装配成本，从而有效地降低了总成本，如 F/A-18E/F 零件数减少 42%，减重 158kg。复合材料整体成型技术还可消除缝隙、台阶和紧固件，无疑对提高军机的隐身性能也具有非常重要的贡献。

## 2 飞机结构用复合材料的发展历程

先进复合材料于上世纪 60 年代中期一问世，即首先用于飞行器结构上。30 多年来先进复合材料在飞机结构上应用走过了一条由小到大、由次到主、由局部到整体、由结构到功能、由军机应用扩展到民机应用的发展道路。

纵观国外军机结构用复合材料所走过的道路，大致可分为三个阶段：

第一阶段复合材料主要用于受力较小或非承力件，如舱门、口盖、整流罩以及襟副翼、方向舵等，大约于上世纪 70 年代初完成。

第二阶段复合材料主要用于垂尾、平尾等尾翼一级的次承力部件，以 F-14 硼/环氧复合材料平尾于 1971 年研制成功作为标志，基本于上世纪 80 年代初完成。此后 F-15、F-16、F-18、幻影 2000 和幻影 4000 等均采用了复合材料尾翼，此时复合材料用量大约只占全机结构重量的 5%。

第三阶段复合材料开始应用于机翼、机身等主要的承力结构，受力很大，规模也很大。主要以 1976 年美国原麦道公司研制成功 FA-18 复合材料机翼作为里程碑，此时复合材料用量已提高到了 13%，军机结构的复合材料化进程进一步得到推进。此后世界各国所研制的军机机翼一级的部件几乎无一例外地都采用了复合材料，其复合材料用量不断增加，如美国的 AV-8B、B-2、F/A-22、F/A-18E/F、F-35、法国的“阵风”（Rafale）、瑞典的 JAS-39、欧洲英、德、意、西四国联合研制的“台风”（EF2000）、俄罗斯的 C-37 等，具体如表 1 所示。

应该指出继机翼、机身采用复合材料之后，飞机的最后一个重要部件——起落架也开始了应用复合材料，向着全机结构的复合材料化又迈进了一步。复合材料用在起落架上不是代钢而不是代铝，可有更大的减重空间，一般可达 40% 左右。

表 1 几种军机复合材料应用情况

| 机种           | 国别     | 用量 (%) | 应用部位             | 首飞年份 |
|--------------|--------|--------|------------------|------|
| 阵风 (Rafale)  | 法国     | 30     | 垂尾、机翼、机身结构的 50%  | 1986 |
| JAS-39       | 瑞典     | 30     | 机翼、垂尾、前翼、舱门等     | 1988 |
| F-22         | 美国     | 25     | 机翼、前中机身、垂尾、平尾及大轴 | 1990 |
| 台风 (EF-2000) | 英德意西四国 | 40     | 机翼、前中机身、垂尾、前翼    | 1994 |
| F-35         | 美国     | 35     | 机翼、机身、垂尾、平尾、进气道  | 2000 |

目前世界军机上复合材料用量约占全机重量的 20%~50%。如果达到 50%，则全机的主要结构几乎都由复合材料制成，复合材料成为飞机结构的基本材料。如 B-2 其复合材料用量高达 50%，全机结构几乎均为复合材料，如图 2 所示。

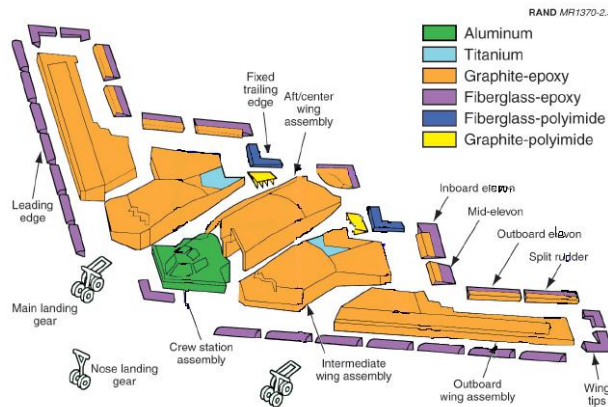


图 2 B-2 飞机上的复合材料结构

我国于上世纪 70 年代已开展军机用先进复合材料的研究。“六五”期间作为预研项目研制了两个机型的复合材料垂尾，1985 年开始研制某型机带整体油箱的复合材料机翼，90 年代初研制了某型机复合材料垂尾和前机身，此后多种机型均正式采用了复合材料，其复合材料用量接近 10%。

继军机之后，国外大型民机也大量采用复合材料，以波音飞机为例，其进程大致走过了四个阶段：第一阶段：采用复合材料制造受力很小的前缘、口盖、整流罩、扰流板等构件，该阶段于上世纪 70 年代中期实现。第二阶段：制造升降舵、方向舵、襟副翼等受力较小的部件，该阶段约于 80 年代中期结束。第三阶段：制造垂尾、平尾受力较大的部件，突破了尾翼级部件在大型客机上的试用，随后 B777 设计应用了复合材料垂尾、平尾，共用复合材料 9.9 吨，占结构总重的 11%。第四阶段：在飞机最主要受力部件机翼、机身上正式使用复合材料，如波音公司正在研制的 B787“梦想”飞机，其复合材料用量达 50%，见图 3。

空客也于 70 年代中期开始了先进复合材料在其 A300 系列飞机上的应用研究，经过 7 年时间于 1985 年完成了 A320 全复合材料垂尾的研制，此后 A300 系列飞机的尾翼一级的部件均采用复合材料，将复合材料的用量迅速推进到了 15% 左右。已于 2005 年初下线并首飞的 A380 超大型客机，其复合材料用量达 25%，主要应用部位包括中央翼、外翼、垂尾、平尾、机身地板梁和后承压框等，开创了先进复合材料在大型客机上大规模应用的先河，如图 4 所示。

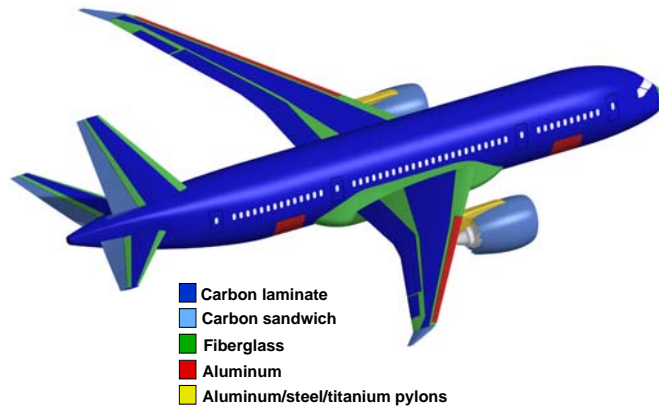


图3 B787 飞机上的复合材料结构

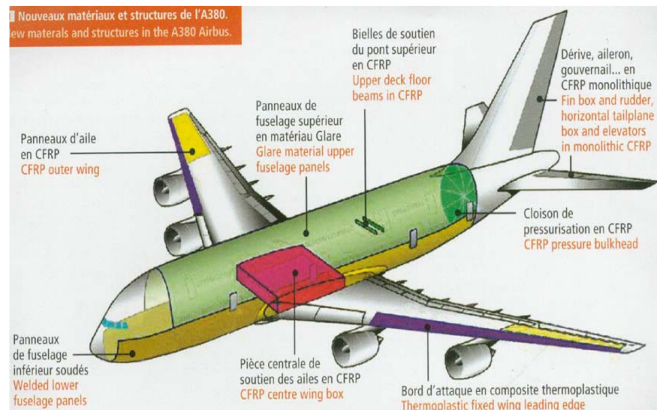


图4 A380 飞机上的复合材料结构

与此同时，直升机和无人机结构用复合材料发展更快，如美国的武装直升机科曼奇 RAH66，共用复合材料 50%。欧洲最新研制的虎式（Tiger）武装直升机，复合材料用量高达 80%。X-45C 无人机复合材料用量达 90% 以上，甚至出现了全复合材料无人机，如“太阳神”（Helios）号。

综上所述，随着飞机结构复合材料用量的不断增加，飞机的先进性不断提高，因此复合材料用量已成为目前衡量飞机先进性的一个重要标志。见图 5 与图 6。

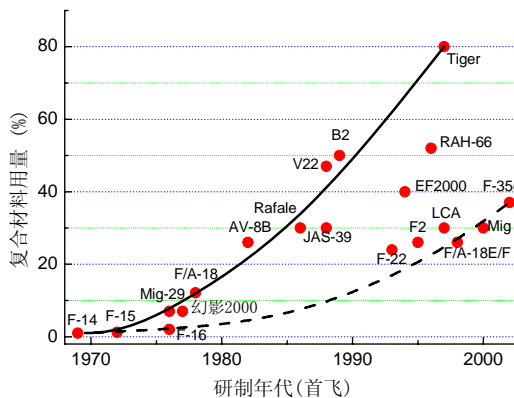


图5 国外军机结构用复合材料进程

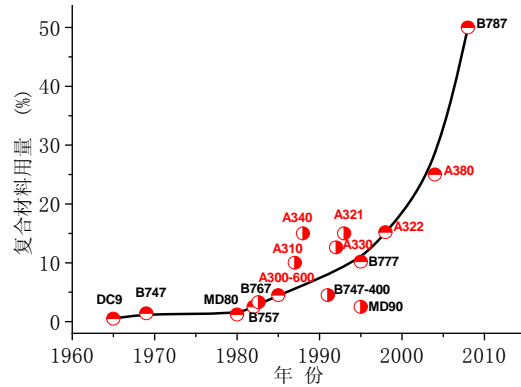


图6 大型民航机结构用复合材料进程

### 3 重视预先研究

分析国外飞机发展的历程不难发现，复合材料在飞机结构上的应用是一个循序渐进、逐步深化的过程，并且这个过程每前进一步都与预先系统全面的基础研究和应用技术研究密切相关。例如，自上世纪 70 年代以来，以美国为代表的发达国家为推进复合材料在飞机结构中的大量应用，连续提出了多个重大计划。1976 年 NASA 首先执行了 ACEE (Advanced Composite Energy Efficiency)，即飞机先进复合材料节能计划，该计划历时 10 年，主要推动以平尾与垂尾为核心用复合材料进行研究，实现结构减重、节省燃油、增加客机的商载。1988 年执行了著名的 ACT (Advanced Composite Technology)，即先进复合材料技术计划，主要目的是开发大型飞机机身、机翼主承力结构用的复合材料技术，改进结构性能，降低成本，提高损伤容限能力，实现“强度、刚度、损伤容限三者的统一”，研究范围包括热固性和热塑性复合材料，纺织复合材料，成型工艺涉及热压、RTM 等多种技术。这些计划都是以减重而驱动，实践结果形成了一个广泛而有深刻的现象：成本下不来，用量上不去。鉴于此美国又推出了 CAI (Composites Affordability Initiative) 计划，即低成本复合材料计划，DMLCC (Design & Manufacturing of Low Cost Composites) “低成本复合材料设计与制造”计划和 LCCP “低成本复合材料工艺”计划等，这些计划的核心是研究复合材料的低成本技术。CAI 计划 (1996~2007) 是由美国国防部联合 NASA、FAA 和工业界共同发起并制定的，该计划目标是降低复合材料成本 50%，其核心要实现一个设计/制造示范性的创新转变，最终降低复合材料结构单位质量的成本。DMLCC 计划是由美国空军资助，Boeing、MDC、GE 及 Bell 等公司共同承担，于 1997 年启动，主要针对批量生产 F22 军机的低成本制造技术进行研究，其目标是比原来复合材料结构成本减少 50%。LCCP 计划的目标则是试验机的低成本工艺技术，主要研究复合材料缠绕成形和特殊模具技术等。欧洲多国联合发起的 TANGO (Technology Application to the Near-Term Goals and Objectives) 计划和“SWK”的计划，实质上也是欧洲的低成本复合材料计划。其中 TANGO 计划为期 4 年，该计划以 A380 作为应用背景，目标减重 20%，降低成本 20%。共选用中央翼、外翼、两个机身段 4 个大的验证平台，规模均较大，各平台采用不同的技术途径验证，通过竞争达到高质量、低成本，集中用在 A380 的研制上。“SWK”的计划是欧洲近期发起执行的，该计划目标减重 30%，降低成本 40%，主要为发展大型飞机复合材料机身服务，并为此进行技术上的革新，革新设计概念和制造方法。

此外还有美国的 ATCAS (Advanced Technology Composite Aircraft Structure)，即先进复合材料飞机结构计划，AFS (Advanced Fuselage Structure) 先进机身结构计划等。主要研究飞机主翼/机身技术，目标减重 20%，降低成本 30%；欧洲的 FUBACOMP 即全尺寸筒体复合材料机身计划，ALCAS (Advanced Low Cost Airframe Structures) 先进的低成本机体结构计划，绿色航空旅行计划 (Air Travel—Greener by Design)，以及 EDAVCOS (Efficient Design and Verification of Composite Structures) 复合材料结构有效设计与验证计划等。

### 4 复合材料具有优异的使用性

人们以前一直担心树脂基复合材料结构的使用寿命问题，30 多年来的应用发展历史证明了先进复合材料具有优异的使用性能，使用寿命不成问题，这也是目前飞机结构复合材料用量大幅提高的基础和前提。自 20 世纪 70 年代先进复合材料进入飞机结构以来，各种飞机从未因大量使用复合材料引发飞行事故，这无疑为复合材料的应用增加了信心和安全置信

度。最早的装机件历经 30 余年的使用，已到设计的使用寿命，最近的检测结果表明，空中使用和地面验证情况相符，疲劳和使用环境未造成剩余强度下降，仍可承受既定的设计载荷，绝大多数制件至今仍处于良好状态。曾以为树脂基复合材料的老化可能是影响使用的严重问题，国外的大量使用经验证明，老化不成问题，性能衰退未超过使用要求。同时使用经验还表明，复合材料随飞机结构成功地经受了疲劳与温度、吸湿及腐蚀等环境的考验，有些问题并不像当初预计的那样严重。

实践还使人们认识到复合材料越是用于主结构问题越少，使用性能可能更好。如复合材料薄板，特别是薄的蜂窝结构面板常出现冲击损伤容限等问题，但主结构板厚增加，如 A380 中央翼盒处板厚可达 45mm，损伤阻抗能力提高，损伤容限已不成问题。当板厚超过 8mm 损伤容限问题会急剧下降，厚板的吸湿、温度传导等问题均会下降，机体结构内部的框、梁、肋用复合材料冲击、吸湿、耐高温等敏感问题也会相应下降，因此材料许用值和结构设计值可适当放宽。国内 20 余年的飞机结构用复合材料结果也表明复合材料确是一种使用性能优异的新材料。

## 5 飞机结构用复合材料的发展

### 5.1 飞机用复合材料发展潜力

复合材料在四大机种上的大量应用，已形成目前世界航空领域再度起飞的发展新态势，事实雄辩地证明复合材料是实现飞机现代化的必由之路，飞机结构复合材料化也是大势所趋。未来飞机特别是军机为了进一步达到结构减重与降低综合成本，复合材料将不断取代其他材料，用量继续增长。美国一报告中指出：到 2020 年，只有复合材料才有潜力使飞机获得 20%~25% 的性能提升，复合材料将成为飞机的基本材料，用量将达到 65%。图 7 示出复合材料相对铝合金的成本与重量关系，图 8 为飞机用材料比例。

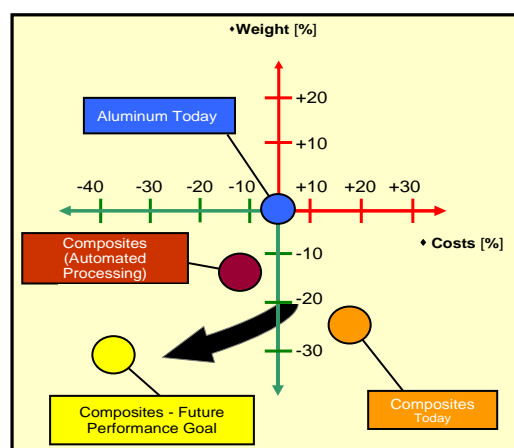


图 7 复合材料相对铝合金的成本与重量关系

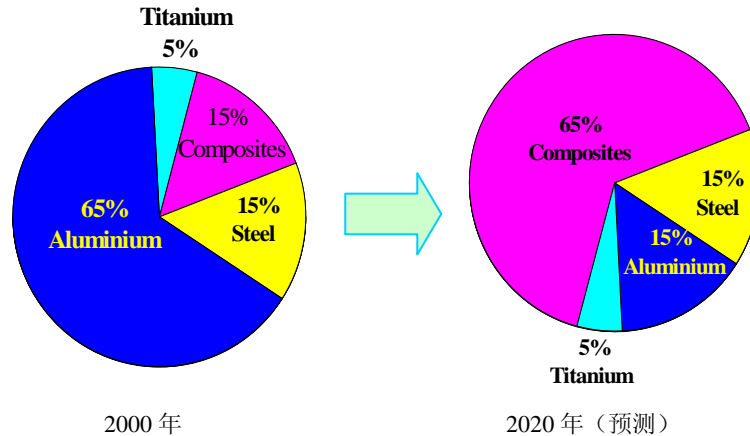


图 8 飞机用材料比例

## 5.2 飞机结构用复合材料亟待研究的问题

我国飞机结构要大量应用复合材料，提升我国飞机结构复合材料应用水平，还必须解决设计、材料、制造、评价中的一些重要理论与技术问题，设计是先导，材料是基础，制造是关键，评价是保障。

### (1) 设计理念与设计方法

国外在设计上突破了追求高性能的传统思想，转向寻求成本/性能/重量综合平衡的设计新理念。在飞机复合材料结构的设计、分析和试验验证中美国和欧洲均普遍采用了“积木式方法”(BBA-Building Block Approach)。该方法实质上是一个分析和试验验证的程序，整个过程实验分为五级：试样级、元件级、次部件级、部件级、全尺寸级。在分析/验证的过程中采用逐步增加试件的复杂程度，逐步增大试件尺寸和规模的作法进行分析和试验验证，保证工程项目的研发质量和成功。目前，有减少元件级和次部件级实验量的倾向，更多依靠计算机模拟。我国在设计理论与方法方面还比较落后，虽也在逐步采用“积木式”设计方法，但其材料许用值和设计值的确定缺乏科学方法，富裕度过大，导致复合材料的应用优势不明显，因此必须加强结构强度基础、前沿技术及结构强度规范的研究，加强材料许用值和设计值科学确定方法的研究，建立共享的复合材料飞机结构强度数据库，不断探索复合材料飞机结构新技术。

### (2) 材料研究与开发

#### 1) 碳纤维

多年来在碳纤维技术方面我国未能突破其关键技术，研究进展缓慢，与国外的差距越来越大，产量远远不能满足国内的需求，导致至今碳纤维 95% 以上依赖进口，并深陷受制于人的局面。特别是随着 A380、B787 等几大机种上复合材料用量的剧增，碳纤维严重短缺，引发危机，对我国飞机结构用先进复合材料的发展影响甚大。

碳纤维生产技术难度很大，特别是原丝技术难度大，没有好的原丝就碳化不出优质的碳纤维，成为我国碳纤维产业的瓶颈。近几年，国家有关部门对国产碳纤维的发展也很重视，有多个计划给予支持，有些企业自行投资也在研发碳纤维，并取得良好的前期效果。因此，可望在十一五、十二五期间我国碳纤维有新的较大发展，这对促进我国飞机结构大量用复合具有深远的意义。

#### 2) 新型树脂体系

先进复合材料用树脂体系仍然需要足够的重视，我国目前性能优异、工艺性优良的真正能够用于飞机结构复合材料树脂体系还不多，有待于新品种的开发，特别是相匹配的固化剂

体系研制，如低温固化中温使用、中温固化高温使用的树脂体系等。

### (3) 复合工艺与制造成本

先进的制备技术不仅可以保证复合材料结构质量，而且还可以降低复合材料成本。由于复合材料成本的 80% 左右主要来源于制造工艺，因此加强工艺理论与制造方法的研究是至关重要的。首先要重视复合材料制造过程物理化学行为和复合工艺计算机模拟技术研究，优化热压罐成型技术，提高成品率；开发自动铺带 (ATL)、铺层展开和纤维自动铺放 (AFP) 等自动化制造技术，提高制件质量与工艺效率；不断完善共固化/共胶接和 RTM 树脂传递模塑等大面积整体成型技术，减少零件安装降低成本；发展电子束固化、缠绕等罐外成型技术，减少能耗降低成本。

### (4) 使用性能与演变规律

使用性能是材料的四大要素之一。由于飞机结构服役的长期性，服役环境的复杂性与复合材料结构的多重性和组分材料的多元性，研究飞机结构用复合材料在服役条件下使用性能的演变规律极为重要。在此方面我国虽然也开展了一些复合材料老化机理和疲劳特性等研究工作，但缺乏深入系统的研究，难以为飞机结构设计提供科学的理论依据。因此必须加强服役环境条件下复合材料性能演变、损伤演化、失效机制和耐久性理论分析与实验研究，建立计算机模拟与实验评价体系，以实现复合材料结构使用性能可靠性预测与评价。

### (5) 维修方法与评价技术

随着飞机结构用复合材料的大量增加，构件的维修越来越重要。因此飞机用复合材料结构修补的合理设计、相配的优质用材、简便的施工方法、修后的性能评价等都需要系统研究。

### (6) 计算分析与模拟优化

计算机在复合材料结构研制中的应用，是提高复合材料研究水平和研究效率的重要途径。除了结构设计与力学分析外，还需要特别重视计算机在材料研制与材料选配、制造仿真与工艺优化及服役环境模拟与性能演化评价中的应用技术研究。

## 5.3 飞机结构用复合材料发展趋势

飞机结构用复合材料的发展趋势概括起来可归纳为以下几个方向：

(1) 高性能化。高性能化趋势从材料角度主要体现在三个方面，一是提高力学性能，二是提高耐热性能，三是提高耐服役环境性能。

(2) 多功能化。同一结构实现多种功能是复合材料的优势之一，如承力/吸波，承力/吸波/减振、降噪一体化是飞机结构用复合材料的一个重要发展方向。要实现多功能化，设计是首位，材料是根本，工艺是保证。

(3) 智能化。智能化对提高结构效率和可靠性具有重要作用，是飞机结构设计越来越重视的方向。开发飞机结构用复合材料自感知、自诊断、自适应智能化技术，可以实现复合材料飞机结构噪声抑制、振动控制、主动变形、健康监测。

(4) 低成本化。这是一个永恒的主题。成本过高仍是制约飞机结构大量应用复合材料的主要障碍，因此低成本化仍为复合材料发展中急需解决的关键技术。低成本化重点考虑制造技术低成本化、设计方法低成本化、全寿命低成本化。

(5) 制造过程数字化。有利于减少试验量，缩短研制周期，降低废品率及提高生产效率。应发展复合材料制造过程模拟与工艺参数优化技术，实现复合材料制造过程数字化与飞机结构设计数字化趋向相适应。

(6) 设计制造一体化。在设计阶段就考虑制造与装配中的问题，可加快产品研制进度，提高质量，有效降低成本。采用全新的设计理念和手段，将设计和制造融为一体，是复合材料发展的又一个重要趋势。

## 参考文献 (略)