

# 大型飞机与复合材料

Large Aircraft and Composite

沈阳飞机设计研究所 陈绍杰



陈绍杰

毕业于哈尔滨工业大学航空工程系飞机设计专业, 现任沈阳飞机设计研究所研究员, 中国复合材料学会常务理事, 国际 SAMPE 学会会员, 北京航空航天大学、西北工业大学、大连理工大学、东北大学的兼职教授。40 多年来先后参加过歼八等多个型号的研制工作, 主持并参加过多个复合材料系统工程及前沿课题的发展研究工作, 主编了我国第一本《复合材料设计手册》。获国家科技进步奖二等奖 1 项、国家光华基金奖 1 项、部级一等科技进步奖 2 项、二等科技进步奖 6 项、三等科技进步奖 3 项、部级型号及预研二等功 2 次、三等功 1 次, 1993 年始享受政府特殊津贴。

复合材料技术是大型飞机研制的关键技术之一, 只有充分重视, 合理规划, 尽早启动预研, 突破其相关

飞机结构的复合材料化已成必然的发展趋势, 大型飞机结构的主体材料必将是复合材料而非金属已是不争的事实。这一趋势将从根本上改变飞机结构设计和制造上的传统, 也将改变航空工业供应链的重组进程, 能否适应这一重大变革, 势必影响和决定一个国家航空制造业的成败兴衰。

的关键技术, 才能形成对大型飞机研制的有力支撑。

研制大型飞机已被列入我国中长期科技发展规划。2007 年 2 月 26 日, 在温总理主持召开的国务院常务会议上, 原则批准了大型飞机研制重大科技专项的正式立项, 并已于 2008 年 5 月 11 日在沪正式组建“中国商用飞机有限责任公司”具体管理运作此事, 这引起了国内外高度的关注。让中国的大飞机翱翔蓝天, 既是国家的意志, 也是全国人民的意志, 更是几代航空人多年企盼的梦想。

2007 年 7 月 8 日美国波音飞机公司的 B787 正式下线, 其焦点、亮点和难点主要就是复合材料技术及其应用。飞机性能的不断提高一直与采用性能优异的新材料密切相关, 可以说是“一代飞机, 一代材料”。研制我国的大型飞机, 复合材料无疑将是其关键技术之一, 因而形成了当前人们议论和研发的热点。

## 大型飞机上复合材料的应用

大型客机目前突出强调安全性、经济性、舒适性和环保性, 这些性能上的高要求决定了其对复合材料需求的迫切性和必然性。先进复合材料诞生于 20 世纪 60 年代末, 大型客机早于 20 世纪的 70 年代初就开始了先进复合材料应用的历史进程。

### 1 历史与沿革

就美国而言, 复合材料的应用大致分为 4 个阶段, 首先应用于受力很小的构件, 如前缘、口盖、整流罩、扰流板等; 第二阶段用于受力较小的部件, 如升降舵、方向舵、襟副翼等, 已有了一定的规模; 第三阶段用于受力较大的部件, 如水平尾翼、垂直尾翼、发房等部件, 规模已较大, 如在 B777 上用于平尾、垂尾、机身地板梁等处, 共用复合材料 9.9t, 占结构总重的 11%; 第四阶段, 即现阶段, 用于机翼、机身等主承力结构, 规模已很

大。

民机不同于军机,军机的复合材料应用上完尾翼马上上机翼、机身,而民机是相隔了20年后才出现大型飞机的复合材料机翼和机身。这段时间一是在发展相关技术,二是在努力降低成本,使之能与对应的金属结构竞争,条件具备了才由第三阶段迈入第四阶段的应用。从中明显可见应用是由小到大、由少到多、由弱到强,循序渐进,一步一步走过来的,强调“step by step”。

再看欧洲的情况。欧洲空中客车工业集团,亦于20世纪70年代中期开始了复合材料应用的进程,走过的路和美国相似,先上舵面,再上尾翼,1978年始研制A320的复合材料垂尾,至1985年完成,实现减重20%。此后A320、A330、A340等机种上均大量使用了复合材料,把复合材料的用量推广到15%左右,此时情况比美国尚有所超出。

多年来波音和空客在民机市场上竞争激烈,技术上先进复合材料的应用则是其主要的对峙内容之一,他们要竞争复合材料技术的“霸主”地位。

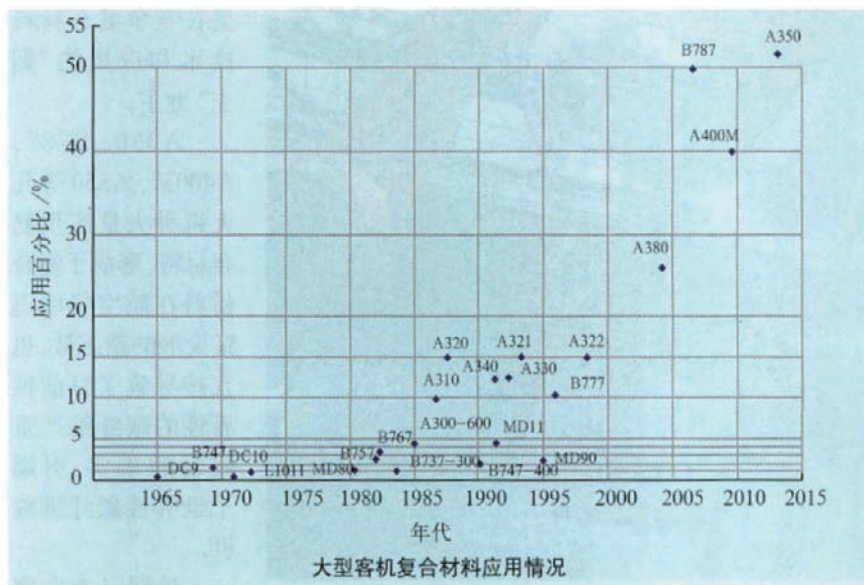
## 2 A380上复合材料的应用

空客集团已研制成超大型客机A380,虽推迟进度近2年,但目前已首飞并正式交付航线使用。该机复合材料占25%,主要应用部件包括中央翼、外翼、垂尾、平尾、机身地板梁和后承压框等,仅中央翼盒就用复合材料5.3t,实现减重1.5t,板厚可达45mm,对接主交点处厚达160mm,受载很大。其水平尾翼的大小超过A320的机翼,半展长19m,内装燃油,号称世界上正在飞行的最大复合材料整体油箱。其机身后承压框6.2m×5.5m,上有泡沫塑料充填的加筋,用RFI(树脂膜熔塑)技术成形,号称世界上最大的RFI整体成形构件。机身I型地板梁,跨度近6m,两端固支,受载很大,由日本

的JAMCO公司采用创新的拉挤技术制造,拉进去的是预浸料而不是纤维。

A380上机身还大量应用了Glare层板,共用27块达470多 $m^2$ ,约占结构总重的3%~4%,与相应的铝合金板比实现减重25%~30%,疲劳寿命提高10~15倍,长达14m的垂尾前缘也拟采用此层板。Glare是玻纤增强铝合金层板,国内称作超混杂复合材料,由荷兰Delft大学最先研究开发,已有20多年的历史,较之以前应用的ARALL层板,芳纶增强铝合金层板有更好的四周疲劳性能,且成本较低,只是比重稍大一些。

A380是第一个将复合材料用于



受载很大的中央翼盒的大型民机,开创了大型民机上大规模应用复合材料的先河。

## 3 B787上复合材料的应用

美国波音飞机公司正在研制B787“梦想”飞机,并已于2007年7月8日成功下线,即将首飞并交付航线使用。该机要大幅度减轻结构重量,提高燃油效率20%,所以大量采用了复合材料。

B787共用复合材料占50%左右,考虑到复合材料密度仅为 $1.6g/cm^3$ ,故全机主要结构均将采用复合

材料制成,从外表面看,除机翼、尾翼前缘(防鸟撞)、发动机挂架(防高温)外几乎看不到金属。主要应用部位包括机翼、机身、垂尾、平尾、发房、地板梁、部分舱门、整流罩等,甚至还包括了起落架后撑杆、发动机机匣、叶片等部位。应该特别指出这是世界上第一个采用复合材料机翼和机身的大型客机,其应用水平远远超过B777和A380,为世界之最,世界公认这是复合材料发展史上一个重要的里程碑。

B787的主要用材体系为T800S/3900-2,纤维为日本东丽公司生产,树脂为改性的韧性环氧,177℃固化,已基本在B777上完成使用和验证。B787上的新技术还包

括TiGr层板,即碳纤维增强钛板,由IM6/PEEK与钛箔相间制成,又是一种新的超混杂复合材料,同样具有优异的抗疲劳性能,同时耐高温;结构健康监控技术,以光纤系统为传感器,连续探测损伤,监视结构完整性,而且在线监控,预报早期的结构修理、维护要求。波音认为复合材料除减重外,还可提供更好的耐久性、耐腐蚀性,可降低使用维护要求和成本,较B767降低成本30%,未来发展的潜力和空间大大增加。

波音强调指出,在人类有动力飞

行进入第二个百年之后,波音如此的选材决定将使其在先进材料技术领域占领世界的制高点,声言要领跑飞机设计技术,称“复合材料为航空航天未来”。我们已经知道,复合材料在军机、直升机、无人机包括无人作战飞机上的用量早已达到或超过了50%,如今大型客机上的用量也超过了50%,这给业已存在的飞机结构复合材料化趋势又涂上了浓墨重彩的一笔。



#### 4 A400M 和 A350 上复合材料的应用

A400M 是欧洲空客集团正在研发的一架大型军用运输机,为大量减重以增加有效载荷已决定大量应用复合材料,复合材料约占其结构总重的40%左右,主要应用部位包括机翼、垂尾、平尾、部分机身和32个螺旋桨桨叶,仅桨叶就用复合材料2t多。机翼主承力盒已于2006年底前装配下线,23m×4m,重达3t,为空客迄今为止最大的复合材料制件,该机预定今年首飞,2009年交付使用。

空客不久前宣布了新型超宽体客机 A350XWB 计划,该机因面临 B787 的严重竞争,结构选材方案先后经6次修改,主要是复合材料用量和机身复合材料的应用问题,最后决定复合材料用量达到52%,甚至超过了 B787 50%的水平,并表示要重新评价复合材料机身的价值。机身共分5段,中间3段为金属骨架、复合材料蒙皮,每段各四大块层压板,这不同于波音完整的筒段。

欧洲宣称 A400M 和 A350 均采用欧洲最新的复合材料技术,以迎接美国 B787 复合材料技术的挑战,欧美在竞争复合材料技术和应用的“霸主”地主。

A380、B787、A400M、A350 等几大机种大量应用复合材料,形成了复合材料在航空领域迅猛发展的新态势,也直接导致了目前世界性的碳纤维严重短缺的事实,引爆了世界性碳纤维危机。

长期以来空客和波音在复合材料的应用上,特别是机身应用的问题上,双方持有不同观点,并存在较严重的分歧与争论。空客认为波音在 B787 上如此应用复合材料是在冒很大的风险,特别机身“会导致非优化的设计方案”,损伤容限也成为问题,会影响安全,此外成本、修理等也成问题。波音回之以技术上不成问题,安全上更不会有问题,只承认成本上会高一些。争论以后空客还是走到波音的路上来了,只有一点不同的是在 A350 上采用了复合材料机身,但不是筒段机身而是

板段机身。实质上这与空客在理念和自动化制造技术上落后于美国有关。

那么波音是否存在风险呢?实质上波音是存在风险的,如果 B787 上的复合材料技术失败,则会导致波音与空客总体竞争上的失败。机遇与挑战同在,效益与风险并存。目前 B787 已正式宣布推迟进度一年,说明风险与技术上的问题均是客观存在的。

#### 复合材料应用的技术基础

先进复合材料在大型客机上如此大踏步前进的应用态势是我们始料不及的,应用的情况固然重要,但笔者认为认真分析其应用的技术基础尤为必要,这有助于我们从中发现问题,看到差距,认清方向,为我们大型飞机的研制提供参考和借鉴。

##### 1 先进复合材料是性能优异的新材料

先进复合材料的发展应用已有30多年的历史,30多年来其在各种民机上的应用日益增多,但从未因此引发飞行事故,这无疑增加了应用复合材料的信心和安全置信度,这是前提基础。早期的装机件历经30年左右的飞行使用,已到了使用寿命,美国人作了认真的检查,甚至分解检查,结论是制件均处于良好状态,长期的疲劳和使用环境未造成剩余强度的下降,制件仍能承受设计载荷。如波音 B727 的5个复合材料方向舵已累计飞行189000个起落、331000飞行小时; B737 的108个扰流板已累计飞行3781000个起落、2888000飞行小时;1个 B737 的复合材料平尾已飞行了19295个起落、17302飞行小时,经分解检查仅有一点钉孔电化腐蚀,状态良好。树脂基复合材料是一种非金属材料,当年曾认为老化会是其严重问题之一,30多年过去了,证明老化也不成问题。是铁一般的事实雄辩地证明了复合材料是一

种性能优异的新材料。

国内最早装机使用的歼八复合材料垂尾在苛刻的飞行条件下飞行使用近 20 年,地面检查亦无问题。我们自行研制的歼八-2 带整体油箱的复合材料机翼自 1995 年装机飞行 13 年来亦毫无问题。教-8 复合材料垂尾已装机 300 多架份,使用情况均良好。国内仅有的一点使用经验也表明复合材料是一个性能优异的新材料。

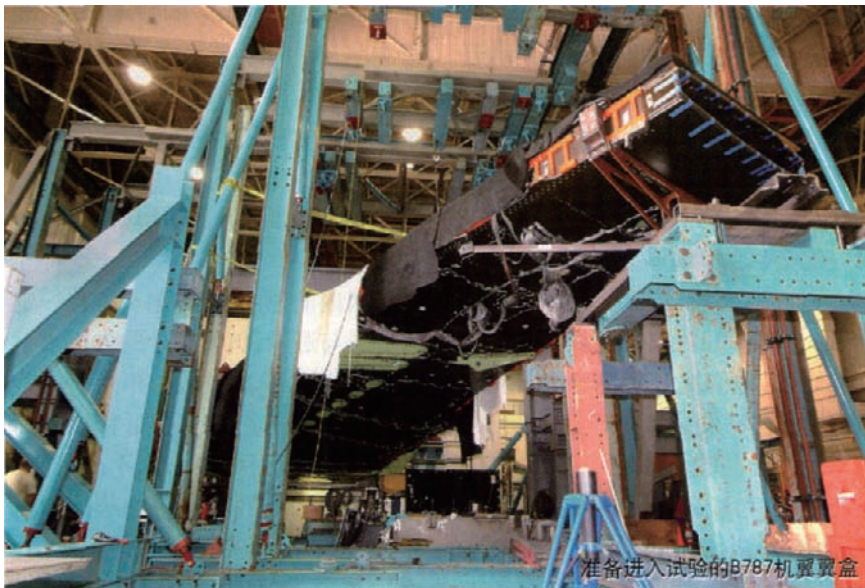
## 2 各种预研计划认真执行的结果

美国为推进复合材料在大型客机上的应用,多年来曾先后制定过多个发展预研计划,并认真执行,取得了积极的成果,从而为今天 B787 等机种大量应用复合材料奠定了坚实的技术基础。

NASA 于 1976 ~ 1985 年执行的 ACEE (Aircraft Energy Efficiency) 计划,即飞机节能计划,以复合材料应用为主要内容,实现结构减重、节省燃油、增加商载。该计划执行的结果实现了舵面一级的应用,突破 B737 等尾翼一级部件的应用。接着 NASA 又于 1988 ~ 1998 年执行了著名的 ACT (Advanced Composite Technology) 计划,即先进复合材料技术计划,该计划则主要为大型飞机上复合材料机翼和机身的研制做准备,目的在于改进结构性能,研制“强度、刚度、损伤容限”三者统一的主承力结构,降低复合材料成本,使之可与对应的铝合金结构竞争。

欧洲则有著名的 TANGO (Technology Application to the Near-Term Goals and Objectives) 计划,为期 4 年,由欧洲 12 国共 34 个部门联合发起,目标要减重 20%、降低成本 20%,为此共选用 4 个大的验证平台,包括中央翼、外翼和 2 个机身段,各平台规模均较大,采用不同的技术途径设计、制造和验证,通过竞争达到高质量、低成本。其成果

已用到 A380 及其他机种上。接着欧洲又提出新的 SWK 计划,主要为发展大型民机复合材料机身服务,目标要减重 30%,降低成本 40%,为此要革新设计理念、制造方法。



预研是应用的基础,没有预研就没有应用的发展。纵观国外的经验和做法,他们是一个计划接一个计划地执行,有计划、务实而有成效的预研工作卓有成效地支持和推动了应用的进展。

## 3 低成本复合材料技术是重要的前提

复合材料在飞机结构上扩大应用的主要障碍是成本较高,特别是制造成本较高。有鉴于此,以美国为首的西方发达国家纷纷制订了低成本复合材料计划,复合材料的低成本化已形成了当今世界上复合材料技术发展研究的核心问题。美国国防部联合 NASA、FAA 和工业界共同发起并制订了 CAI (Composite Affordability Initiative) 计划,即低成本复合材料计划。该计划自 1996 ~ 2007 年共分 4 个阶段执行,已于 2007 年结束,正在作总结,认为取得了巨大的成功。CAI 的目标是要降低成本 50%,其核心是要共同努力创造一个设计 / 制造上示范性的转变,最终降低复合材料单位质量的成本

数。

低成本复合材料技术包括了低成本的设计技术、低成本的制造技术和低成本的材料技术,核心是低成本的制造技术。为此美国早于上世纪

70 年代中期即着手发展了以自动铺放技术,包括自动铺带技术(ATL)和自动纤维铺放技术(AFP)为核心的自动化制造技术。同时大力发展了以共固化 / 共胶接为核心的大面积整体成形技术,这使得 B787 实现了复合材料与金属零件数比为 1:19 的可喜成果。

## 4 复合材料技术的进步是坚实的保障

先进复合材料历经 30 多年的研究、发展和应用已取得了长足的进步,从设计、材料、制造到试验验证逐步走向了规范化、标准化和成熟化,即复合材料技术上的进步,形成了如 B787 上大规模应用复合材料的坚实保障。

设计上重点发展了优化、革新的设计技术,以 DFM (Design for Manufacture) 技术,即设计制造一体化,为核心的数字化和自动化技术,采用全新的理念和手段将设计和制造进一步融为一体,从而加快了产品研发、提高质量、降低成本的步伐。材料上发展了多种稳定的高性能材

料体系,提高了材料的许用值和结构的设计值,并且许多已在前行機種上完成验证和使用,如 B787 的用材体系多在 B777 完成验证, A380 用材体系多在 A340-500/600 上完成验证,新机大量应用时材料体系几乎是现成的,并不要做太多的工作。制造上则大力发展了革新的制造工艺和技术,实现了高度的自动化和整体化成形,发展了各种 RTM 成型工艺,大幅度地降低了制造成本,使之能与对应的金属结构竞争。

还应特别指出西方发达国家在重视硬件的同时也极为注意软件技术的研发,他们提出要有组织地统一制订规范“开发编制全行业的标准,改进最终产品的一致性”。其目的在于将复合材料的设计和鉴定文件化、规范化,形成统一的指南,以减少风险、降低成本。美国 FAA 咨询文件 AC20-107A “复合材料飞机结构”的贯彻执行、美国军用复合材料手册 MIL-HDBK-17 的不断修订和再版以及各大飞机公司自用复合材料设计手册的不断编写和更新均是这方

面的研究发展也有了一定的规模和水平,取得了相当的进步和成果:国内目前已形成了一支从设计、材料到制造配套的研发队伍,各大主机厂均已建起了较完善的复合材料生产手段和车间,完成了相应的技术改造,各研究院所和相关高校均具备了一定的研究力量并培养了大量的专业人才。复合材料在各种军、民机型号上已获得正式的应用,并有一批软、硬件成果问世,这一切均应给予充分肯定。

国内的复合材料技术虽有一定的发展与进步,但与国外的先进水平相比尚存在许多问题和相当大的差距。以飞机结构用复合材料技术而言,我们的应用规模与水平、设计的理念、方法和手段、材料的基础和配套、制造的工艺和设备均严重落后,落后是全方位的,差距甚至有越来越大的趋势。其中应用的落后是根本的落后,带有标志性的落后,如我国军用战斗机上复合材料最大的用量尚不足 10%,世界上军机的机翼自上世纪 80 年代后就早已复合材料化

是思想认识和理念上落后,没有充分看到和认识到世界上现已存在的飞机结构复合材料化的大趋势,远落后于世界前进的步伐。其次是国内在该技术领域缺乏战略上、总体上的规划与研究,规划落后、投资严重不足,明显地缺乏长远发展与竞争的意识。机制与体制上也有问题,缺乏相对统一的组织与领导、合作与协调,存在多方领导、多方投入且投入又严重不足的问题,研究力量分散,项目低水平重复,设计与制造分离,研究与生产混淆。基础研究薄弱,预研不踏实,技术上落后,导致许多基础理论和工程实践的关键问题未获或未很好解决,应用效益不足,麻烦不少,普遍存在“不敢用,不好用,不爱用”的现象,实质是“不会用”,说明预研远没给应用提供必要的技术基础。

### 相关的发展建议

飞机结构的复合材料化已成必然的发展趋势,大型飞机结构的主体材料必将是复合材料而非金属已是不争的事实。这一趋势将从根本上改变飞机结构设计和制造上的传统,也将改变航空工业供应链的重组进程,能否适应这一重大变革,势必影响和决定一个国家航空制造业的成败兴衰。

现在我们面临的事实是,我国要研制大型飞机,为确保其先进性和未来的市场,要大量应用复合材料。另一方面我们于该技术领域又实在是落后得太多,缺乏必要的技术储备与支撑,需要和可能之间构成了一对尖锐的矛盾。如何面对,值得我们认真地思考与论证。下面提出笔者的相关建议:

(1) 合理地确定目标,并以此为依据做好科学的规划,积极开展预先研究。所谓“目标”,主要指应用目标,究竟是多大的用量。提法可有 3 个:用到尾翼一级,类似 B777 的用法,用到结构重量的 15% 以下;用到



面精彩的实例。

### 我们的问题与差距

国内复合材料的研究和发展起步并不晚,也于上世纪 70 年代初就开始了这一历史的进程。30 多年来

了,我国至今尚无批生产的复合材料机翼问世;最新研制的 ARJ21 支线客机复合材料用量不足 2%,微乎其微。我们应该清醒地看到我国复合材料应用落后的严重现实。

落后的原因是多方面的。首先

机翼一级部件,则可用到 25% 左右;和 B787 一样,用到机身、机翼等主结构,用量也达到 50% 左右。建议我们低者用到尾翼级部件,高者用到机翼一级部件,取用量为 25% 左右。至于复合材料机身,根据我们的技术基础,恐怕一时上不去,徐容后议。

系,早定“材料规范”和“工艺规范”,以便开展工作,积累经验和数据。应该指出碳纤维产生危机后世界上各大生产厂家均在急速扩产,大约 2 年后即可达到新的供需平衡。军机不能再用国外的纤维了,民机则可酌情选用,但要签好长期稳定的供货合

制订;

- 以设计手册为核心的设计、分析等软件的研发和编写;
- 以自动铺放技术为核心的自动化制造技术;
- 大面积整体成型的设计、制造及相关材料技术;
- 广义的 RTM 制造成型技术;
- 厚板固化成型优化工艺技术;大型加筋板壳的固化变形控制技术;
- 复合材料结构修理技术;
- 大型制件快速自动无损检测技术;
- 座舱内装饰用相关复合材料技术;
- 适航审定和取证的相关程序和实施。



根据经充分论证确定的合理目标,有针对性的规划预研课题,尽快启动预研工作,争取用有限的时间,突破必要的关键技术,形成强有力的技术支撑。

(2) 注意突破关键技术。所谓关键技术指缺了它不行的技术,对大型飞机而言关键的复合材料技术应包括以下诸点:

革新的设计技术和理念;以 DFM 技术为核心的数字化设计技术,并注意材料许用值和结构设计值的合理确定;损伤容限和修理等问题的合理解决;工程计算分析方法的研发和相关设计软件,如规范手册等的编写和制订。

发展并确定先进的材料体系,关键是碳纤维的问题,用国产的还是进口的? 哪个档次哪个品种的? 其次是高韧性环氧树脂的研究与开发和较大丝束纤维的应用。早定材料体

同。

大力发展革新的低成本制造技术,重点应有 ATL 和 AFP 技术及其设备;大件整体成型技术和无损检测技术,厚板固化技术;广义的低成本的各种 RTM 成形技术。

适航取证的审定技术,包括“积木式”方法和 AC20-107A 等文件的贯彻执行等问题,同时一开始就要注意和重视文件标准和规范的制订与执行的问题。

把上述要点具体化为应立即开展预研的关键题目可大致开列如下:

- 材料体系的合理选择和评定;
- 材料许用值、结构设计值的合理确定;
- 以设计制造一体化 (DFM) 技术为核心的软件研发;
- 损伤容限原则的确定、验证和设计实施;
- 构件缺陷、损伤标准的研究和

(3) 人才的培养和准备。国内的复合材料领域严重缺乏成熟的结构设计人才和有经验的制造工艺人才,这与大型飞机的技术需求极不适应,必须引起充分重视。国际上讲培养一个成熟的复合材料设计师至少需要 10 年。对人才的问题我们要采取切实的措施予以培养提高,以人为本、事在人为。对此各相关高校负有义不容辞的责任和义务。

(4) 积极进行对内整合,对外合作。国内复合材料技术已有近 40 年的发展历程,也有了一定的规模和基础。发展大型飞机的复合材料技术应在此基础上充分注意整合国内现有的技术力量和人力资源,并注意发挥业已存在并将要兴起的民用复合材料产业的技术和力量。

复合材料的技术发展呈现国际化趋势,如 B787 的复合材料制件 65% 以上外包, A350 也计划 50% 以上外包。我们在发展大型飞机的复合材料技术以至其结构制造时,也应以开放的思维充分注意国际合作、国际交流,充分吸收国际上的先进技术、经验和教训,努力做到成果共享、风险共担。 (责编 依然)