

复合材料技术在当代飞机结构上的应用

Application of Composite Technology in Modern Aircraft Structure

第一飞机设计研究院 冯 军

至今复合材料和铝、钢、钛一起,已发展成为四大航空结构材料。现代先进民机机体结构复合材料用量越来越大。经过几个阶段的发展,已实现了从非承力、次承力构件,到尾翼主承力、再到机翼与机身主承力构件应用。

以碳纤维为增强体的先进复合材料在 20 世纪 60 年代中期间世,70 年代初即开始应用于飞机结构。先进复合材料的应用对飞机结构轻量化、模块化起着至关重要的作用。随着复合材料设计和制造技术的不断发展和成熟,先进复合材料在军、民用飞机上的用量也在不断扩大。复合材料用量的剧增,带动了复合材料产业的专业化和规模化发展,使先进复合材料正在逐步成为一种成熟、稳定的航空材料。目前,复合材料和铝、钢、钛一起,已发展成为四大航空结构材料。

现代先进民机机体结构复合材料用量越来越大。经过几个阶段的发展,已实现了从非承力、次承力构件,到尾翼主承力、再到机翼与机身主承力构件应用。这是飞机性能的要求,也是商业成功和市场竞争的需要。

国外复合材料技术水平和 发展趋势

复合材料由于其高比强度、比刚度等优异特性,越来越广泛应用于飞机结构。目前国内外新研制的飞机不但在水平安定面、副翼、垂尾等结构采用了复合材料,而且机身、机翼翼盒等主结构也采用复合材料,使得结构一体化程度高,系统安装较为简单、减少零部件数,缩短总装时间。复合材料非比寻常的物理特性和可设计性,以及近年来生产成本的降低,加速了飞行器结构选材从金属材料向复合材料转变的进程。复合材料的应用具有可使飞机结构减重 10%~40%、结构设计成本降低 15%~30% 的优势。面对较高的燃油价格和越来越严格的污染物排放标准,复合材料能使飞机减重的优点显得尤为重要。

代表当今世界大型民用飞机先进水平的两大生产商:波音公司和空客集团,从 20 世纪 80 年代起就开始将先进复合材料用于大型飞机的结构。随着经验的积累和先进复合材料所带来的效益增加,结构应用不断扩大。波音公司在前期的波音 737、波音 757 和波音 767 几个机型中,先进复合材料的应用仅涉及了起落架舱门、整流罩、升降轮、方向舵、襟翼和副翼等次承力结构。到了 90 年代中期,在波音 777 研制中将先进复合材料扩大应用到了垂直安定面和水平尾安定面等主结构。空客公司于 70 年代中期首次将先进复合材料应用于 A300 飞机的垂尾,1987 年在 A320 飞机上将先进复合材料应用扩大到了水平尾翼,随后的 A321、A319、A330 和 A340 基本保持了相同的应用水平,对于将先进复合材料应用于主机翼结构仍有保留。

进入 21 世纪后,波音和空客两大公司为争夺新一代大型民用飞机市场,展开了一场先进复合材料应用之争。波音公司在其新研制的波音 787“梦幻”飞机上先进复合材料的用量达到机体重量的 50%,虽然空客公司在先进复合材料应用上采取了一种循序渐近的方式,逐步扩大应用范围,以减低技术风险,在 A380 新一代大型客机上,先进复合材料用量也扩大到了 23%。

残酷的市场竞争使这两大生产商均将先进复合材料的用量视为实现飞机机体减重及降低运营成本的有效途径,从而使先进复合材料在民用飞机上的应用急剧升温。虽然空客与波音两大公司在先进复合材料用量的认知上有所差异,但空客公司由于受到波音公司复合材料高用量的威胁,在计划中的 A350 飞机上将复合材料的用量提高到了 52%,以形成与波音 787 飞机的竞争。A350 飞机将在中央翼盒、外翼盒、垂尾、平尾、机身壁板、机身后承压隔框、龙骨梁等结构上大量采用碳纤维复合材料(Carbon Fiber-Reinforced Polymer, CFRP)。

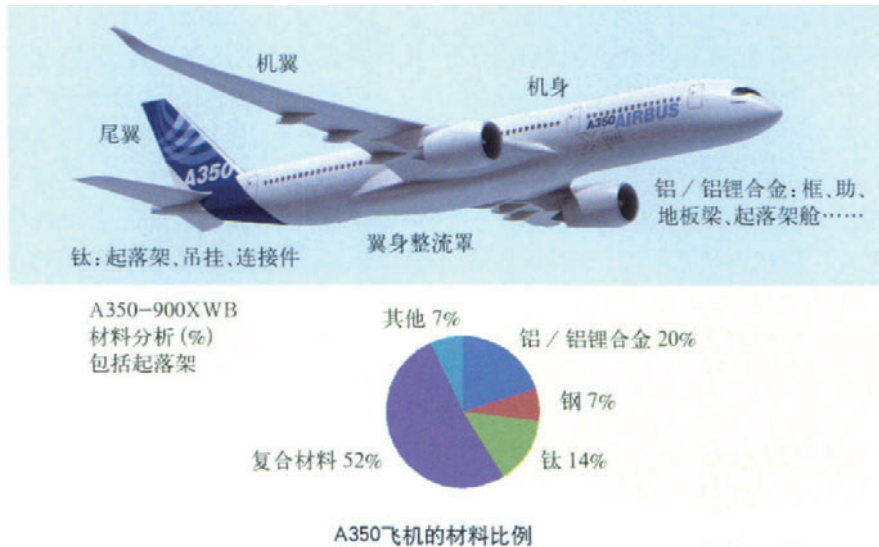
这些情况说明了机体结构中先进复合材料的用量是衡量飞机先进性的重要标志之一,尤其是在机翼主结构中应用先进复合材料,能充分体现出飞机结构技术的先进性。先进复合材料已逐步成为民用飞机主要结构材料。

近 40 年的研究结果和使用经验表明:复合材料具有优异的性能,在疲劳和恶劣的使用环境下不会造成剩余强度的降低,这些结论和经验增强了各大公司使用复合材料结构的信心。复合材料技术的进一步发展,特别是低成本制造技术的发展,为复合材料在民机上的广泛应用提供了良好的技术平台,现在和将来的民机结构,大量使用复合材料已经成为可能。

复合材料结构设计技术的发展过程

国外民机复合材料结构技术的发展经历了从次承力构件——尾翼级主承力构件——机翼主承力构件的过程,具有典型性。以美国为例,它的发展过程可以归纳为 6 个阶段:

第 1 阶段,20 世纪 70 年代初在受力很小的构件如前缘、整流罩和口盖上;



第 2 阶段,1976 年开始选择了相应的受力不大的部件进行预研,波音 727 升降舵、DC-10 上的方向舵;

第 3 阶段,1985 年开始仍然是在 NASA 的 ACEE 计划下,各大飞机公司开始研制受力较大的尾翼级部件;

第 4 阶段,20 世纪 80 年代初开始 在生产型飞机上正式设计应用复合材料方向舵、升降舵;

第 5 阶段,20 世纪 90 年代初在 B777 尾翼盒段上使用复合材料;

第 6 阶段,现今在波音 787 飞机机翼机身主承力结构上使用复合材料。

复合材料在民用飞机上应用量的急剧增长主要应归功于其技术的发展和成熟。20 世纪 80 年代后期以来,美国和欧洲针对低成本、轻重量复合材料结构技术

经过了 TANGO (Technology Application to the Near-Term Goals and Objectives) 计划、ALCAS (Advanced Low Cost Aircraft Structure) 计划、ACT (Advanced Composite Technology) 计划、AST 计划等一系列的专项计划研究,取得了显著的成果。例如美国实施的 ACT 计划,研究低成本制造工艺技术的应用,目前已开发了 RTM (树脂转移膜塑成

形)、RFI (树脂膜渗透成形)、VARI (真空辅助成形工艺)、纤维铺放/缠绕、拉挤成型、自动铺放和采用大丝束纤维等低成本制造技术。其中 RTM 技术已在 F-22 飞机上大量应用(400 多个零件采用 RTM 工艺制造)。由于 VARI 技术在降低复合材料制造成本及大型构件整体成型方面的优势,近年来受到广泛重视。美国洛克希德·马丁公司与美国海军 IPT 公司合作,采用 VARI 工艺制造 P-3 的复合材料下翼面整流壁板。洛克希德·马丁公司已经着手进行 VARI 工艺在 S-3、C-5、C-130 等机型上的试验及验证工作,加速低成本复合材料在飞机结构上的应用。

这些成果逐渐应用于正在研制的民机结构设计上,促使复合材料在民机主结构中的应用出现突破性进展。

欧美等国通过系列计划的持续

性长期研究,对复合材料结构有了更深入的理解,取得了丰富的经验。这些计划通过选取基准平台,按照“积木块”式的试验验证方法,从试件、元件、典型结构件、构件/子结构,一直到全尺寸结构(综合验证)进行严格的考核。经过这一过程,不仅建立了材料的基本性能数据库和结构设计许用值,而且结构设计思想得到了评估,结构制造技术得到了考核,大大加快了新材料、新的结构设计和制造技术应用于实际工程的进程。如美国在20世纪90年代初期的ACT计划后继续开展了AST计划(ACT的后续计划,20世纪90年代中)。尤其是在AST计划实施中,NASA与波音公司联合开展了先进低成本复合材料机翼技术研究,以机翼翼盒为研究对象,通过设计,制造和试验等一系列研究,验证了低成本复合材料翼翼盒的制造技术。

国内复合材料结构技术的现状与差距

我国飞机结构上对复合材料的应用追随着国际上先进国家的脚步,发展的历程基本相同。军民飞机的各类舵面上选择复合材料结构已经很普遍。在运-7系列支线飞机的腹鳍、方向舵等次结构上应用了先进复合材料。对尾翼级结构也是在80年代末就开始应用研究,到了90年代中期设计、研制成功了运-7复合材料垂尾,并取得了适航证。

我国通过多年的预研和大量的研制实践,以低成本复合材料应用为目标的技术研究已经取得了可喜的成果,初步形成先进低成本复合材料制造能力。如Z向缝纫和三维编织增强复合材料结构制造技术;低成本RTM、VARTM、RFI、VARFI成形技术。这些低成本制造技术有的已用于产品,有的做了大量工艺、性能试验件,验证了工艺的可行性。舵面等次承力结构的低成本VARI工

艺复合材料结构与金属结构相比,减重25%,降低制造成本17%。同时在“十一五”期间,完成了民机全尺寸复合材料尾翼设计、制造与试验。使国内复合材料结构设计技术在损伤容限设计与验证、无损检测、加筋整体化结构制造/工艺、复合材料结构适航验证等方面上了一个台阶。目前,我国已经开始进行复合材料机翼主结构技术的研究工作。由于机翼结构外形复杂,连接关系多,结构复杂,尺寸大,加工制造难度大。同时机翼需要考虑发动机吊挂接头、起落架支撑结构等集中载荷的影响等等。这些特殊要求,给设计和制造带来难度。就目前的技术状态看,已经可以制造出15m长左右的复合材料机翼翼壁板,同时也研制出厚度在40mm以上的大型复合材料承载接头。

虽然国内在复合材料的设计制造方面取得很大进步,但是与国际先进水平比较,尤其是在复合材料主承力结构设计制造技术方面还是存在相当大的差距。复合材料在飞机结构上的应用情况大致可以分为3个阶段:第1阶段是应用于受载不大的简单零件部件,如各类口盖、舵面、阻力板、起落架舱门等;第2阶段是应用于承力较大的尾翼等次级主承力结构,如垂直安定面、水平安定面、全动平尾、鸭翼等;第3阶段是应用于主承力结构,如机翼翼盒段、机身等。3个阶段所涉及的复合材料制造技术是3个不同的层次,在载荷水平上是完全不同的,对构件制造技术的要求也不同,构件的尺寸和结构的复杂程度也有大幅度的提高。

国内目前的技术水平处于第2阶段的水平。对大型复合材料整体壁板的设计制造技术,由于尺寸及载荷增大使得在复合材料结构形式的选择与优化、设计许用值的确定、分离面的设计、机械连接、制造精度及工艺稳定性、试验研证方法等方面都需要进行进一步的深入研究。在制

造与工艺技术方面,国内航空复合材料结构生产厂家除了采用预浸料/热压罐成型工艺生产复合材料构件,也开始采用各种低成本制造技术生产不同的复合材料构件,也配备了一定的无损检测设备,普遍采用激光定位、自动铺带机、预浸料切割机、预制体编织机等复合材料制造设备,初步满足现阶段航空复合材料构件生产的需求。但对于大型飞机复合材料构件的制造仍然是生疏的,特别是大型整体成形技术和手段仍然是关键瓶颈,从模具、材料、检验等材料体系与标准规范方面,国内现在还没有国产的通过适航认证的适应下一代先进民机复合材料的碳纤维,即使是芳纶纤维、玻璃纤维(布)也未经过适航认证过程。目前适合于先进民机复合材料构件用的环氧树脂体系有一定的基础,但数据都不完善,尚未获得适航认证。

结束语

纵观国外复合材料技术的发展,几乎都采用了先预研,再在型号中应用的方法。20世纪80年代后期以来,美国和欧洲就复合材料结构技术开展了多个专项计划研究,已经取得了显著的成果,正是由于这些成果的取得,复合材料在民机结构中的应用才能出现突破性的进展。

随着国内先进复合材料在军民飞机上的应用不断扩大以及设计和制造技术的积累,一些代表复合材料发展趋势的低成本复合材料结构技术也有所进展。对飞机复合材料结构的应用研究也在持续开展。在碳纤维制造、复合材料结构制造设备、复合材料主结构设计技术、大型无损检测技术方面已经有了长足的进展。可以预期,这些持续不断的各类复合材料研究项目的成果必定会在将来国内新的飞机项目中得到大量的应用,从而增强我国在世界航空工业的竞争力。(责编 侧卫)