



美国先进复合材料货运飞机 研究进展

Research Progress of American Advanced Composites Cargo Aircraft

中国航空工业发展研究中心 刘代军 陈亚莉



刘代军

助理研究员,毕业于西北工业大学,现就职于中国航空工业发展研究中心航空技术所。主要从事航空材料、技术成熟度等方面的情报研究工作。

美国空军研究实验室(Air Force Research Laboratory, AFRL)和洛克希德·马丁公司的“臭鼬”工厂(Skunk Works)于2009年6月2日一起成功完成了先进复合材料货运飞机

ACCA 项目的实施将显著提高空军实验室和工业部门在快速验证未来高投入航空关键技术方面的能力,加快对未来航空武器装备的研制生产能力,降低技术风险并节约研制生产和使用成本。同时,像其他美国绝大多数X型验证机一样,在ACCA项目中被验证的材料技术和制造方法将很快用于其他军用飞机,包括长航程攻击飞机和无人机系统。从中也可以看出,OOA材料和制备工艺将成为未来航空航天领域复合材料的主要方向之一。

(Advanced Composites Cargo Aircraft, ACCA)的首次验证飞行。此次成功首飞标志着ACCA项目第二阶段的结束,是ACCA研制过程中的一个重要里程碑,也标志着该项目的研制进入了一个新阶段。

ACCA 项目背景

无论C-130还是C-17都比较

适合在后方安全度较高的机场进行战略投放与补给,但面对类似阿富汗等的战场,以美国现有的投送力量,大型战略运输机补给不能直达前线,而卸载后的陆路运输过程往往风险大、速度慢。为此,近几十年来,美国国防部实施了一系列战区战术航空运输工具研制计划。其中,美国空军正在重新探索用“先进联合航

空作战系统”(Advanced Joint Air Combat System, AJACS)中的短距起降飞机取代C-130军用运输机(包括C-130特种作战飞机)。

先进复合材料货运飞机项目是“先进联合空战系统”的组成部分之一。按照AJACS的设想,2020年,美国将拥有一种“小型的,具有966km飞行半径,可在不大于914m的未修整简易跑道起降,并能应对15.2m障碍物,能投送6804kg(项目要求飞机能携带2个陆军标准437L货盘和20名全副武装的士兵或一辆武装悍马)有效战斗载荷(1932km航程),巡航速度为740km/h的战术飞机”,这就是ACCA的由来。

但是ACCA项目的目的不是运输机本身,其主要目的是验证用非热压罐(OOA)复合材料制备的新型飞机机体构件,把ACCA打造成为OOA复合材料的空中试验测试平台。空军实验室的项目负责人表示,选用运输机平台来验证的主要原因是货运任务代表了结构部件的大部分应力环境,从而能够很好地验证这种新型复合材料大型结构的各种使用情况,确保在未来运输机上的成功应用。

作为美国空军实验室最新的X型验证机,ACCA的主要目的是验证先进复合材料结构在短距起落(STOL)货运飞机上的应用效果,从而改进结构设计和制造技术来降低未来军用运输机的结构重量和成本。

ACCA 项目进展

ACCA项目开始时要求在18个月内设计和制造先进复合材料运输机验证机,并进行首飞。

第一阶段为方案设计阶段。该阶段为期5个月,从2007年5月~10月。在参加竞争的方案中选择了洛克希德·马丁公司和极光公司(Aurora Flight Systems)作为研

制试验样机的备选公司,并与二者签订了总额分别为4900万美元和4600万美元的合同,双方分别在多尼尔328Jet和安-72的基础上进行了改进设计。由于整个项目研制时间短,研制经费有限,在对比了2家的设计方案后,美国空军实验室在2007年10月宣布洛克希德·马丁公司胜出,将继续承担ACCA项目的第二阶段任务。

第二阶段为ACCA验证机的制造阶段。由于AFRL希望验证机能在12个月内实现首飞,洛克希德·马丁公司选择使用先进复合材料结构来取代多尼尔328Jet的中后机身和垂直尾翼。但是由于在大型复合材料整体部件制造方面存在很大挑战,使得首飞时间推迟到了2009年6月。ACCA的成功首飞,标志着洛克希德·马丁公司圆满完成第二阶段研制生产任务,为非热压罐低温固化复合材料大型整体部件在未来大型战术机动运输机上的广泛应用开辟了道路。

第三阶段为ACCA验证机的飞

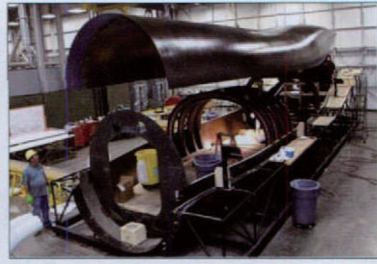


行测试阶段。洛克希德·马丁公司计划在6月2日ACCA验证机实现首飞之后,开始对先进复合材料货运机进行飞行包线扩展工作。按计划,飞行包线将在未来的4~5个月内扩展到7620km和马赫数0.6。在所有的飞行中,ACCA验证机采用各种应力测量仪器来测量结构件的性能,以便检验采用非热压罐低温固化的大型复合材料整体部件是否满足未来运输机的性能需要。一旦第三阶段的测试工作能够很好地证明采用该复合材料和制备工艺能够满足战术运输机的各项性能指标,就将对未来飞机结构产生重大影响。整个第三阶段的飞行测试工作将在2010年中期结束。

ACCA 验证机的设计和制造

ACCA是在多尼尔328Jet的基础上改进的。多尼尔328Jet本身具





ACCA复合材料整体结构

备 13608kg 载荷能力,航程 1448km,适航能力经过多年验证,属于成熟机型。在适当改进机体,牺牲部分载荷的情况下,该机即能够达到载荷 6804kg、航程 1932km 或者飞行半径 966km 的目标,但它还达不到在 914m 以下未修整软土跑道起降的要求。因此,“臭鼬”工厂为了减重和加强机体寿命,提出了使用“全复合材料硬壳技术”,这是飞机制造技术的一个大胆的尝试。

ACCA 验证机以整体模成型的方

可以在其他不变的情况下,机体减轻近 2268kg 的重量,再加上 328Jet 本身载荷余出 1361kg,总共可减轻 3629kg 之多,基本能够满足 AJACS 提出的要求。

与传统的制造方法相比,使用模成型的先进复合材料大型整体结构件后可使 ACCA 零件数量从 3000 个减少到大约 300 个,紧固件数量从 17000 个减少到 3000 个,大大减少了工装时间和成本。

跟铝合金结构通过机械紧固在

式制造飞机,整个飞机机体的复合材料比例高达 65%,整机减重甚至可达 25% 以上。这意味着该机

一起不同,改进后的机身是在低温下粘接在一起的。这个长 17m、宽 3m 的单个机身筒体仅仅只由 4 个结构件组成。

跟其他用于飞机结构的大型复合材料构件不同,以前的大部件(如波音 787 的大型复合材料构件)都采用昂贵的大型热压罐技术。但是洛克希德·马丁公司利用在美国国防部复合材料经济可承受性倡议(CAI)项目中开发的技术,已从以前的项目中得到有关在低温下固化复合材料构件的大量经验,包括采用复合材料中机身的“暗星”(BlackStar)无人机和最近的“臭猫”(Polecat)无尾无人机,其翼展达到 27.4m,而 ACCA 从登机门到后机身部分的复合材料构件长 16.8m,直径 2.7m。因此,用于 ACCA 机的复合材料都是在低温烘箱中固化的,而不是热压罐制造的。

表1 复合材料集团公司提供的MTM45-1/AS4复合材料机械性能

性能	测试方法	单位	-54℃干燥	室温干燥	93℃干燥	93℃潮湿	121℃潮湿
0°, 拉伸强度	ASTM D3039	MPa	895.7	903.8		843.7	844.7
0°, 拉伸模量	ASTM D3039	GPa	65.8	63.5		64.4	75.8
90°, 拉伸强度	ASTM D3039	MPa	845.5	858.2	822.2		748.2
90°, 拉伸模量	ASTM D3039	GPa	62.9	60.9	59.3		61.5
0°, 压缩强度	ASTM D6641	MPa	687.0	643.7		448.1	350.7
0°, 压缩模量	ASTM D6641	GPa	58.2	58.3		69.6	
90°, 压缩强度	ASTM D6641	MPa	644.2	593.8		383.5	322.1
90°, 压缩模量	ASTM D6641	GPa	53.6	54.5		60.1	
层内剪切强度	ASTM D3518	MPa	91.4	68.6		38.0	30.9
层内剪切模量	ASTM D3518	GPa	4.3	3.7		2.6	2.2
层间剪切强度	ASTM D2344	MPa	80.4	71.8	59.5	43.4	34.2
开孔拉伸强度(层板)	ASTM D5766	MPa	342.0	355.5		371.8	349.5
开孔压缩强度(层板)	ASTM D6468	MPa		277.8		219.3	194.2
闭孔拉伸强度(层板)	ASTM D6742	MPa	352.4	379.5			
闭孔压缩强度(层板)	ASTM D6742	MPa		446.5			446.5
冲击后压缩强度(6.7J/mm)	SACMA SRM2R-94	MPa		224.8			

注:增强体为 3k 碳纤维平纹织布,121℃真空袋固化,177℃后固化。

复合材料树脂 是 ACCA 项目的关键

对 ACCA 项目来说最重要的一点是用于机体制造的非热压罐复合材料树脂基体,即 MTM45-1 环氧树脂。跟其他复合材料树脂不同的是,MTM45-1 不需要在热压罐中进行高温固化。这一特点使该树脂成为航空制造领域中的一种突破性技术。十几年前,一些小部件已经开始采用非热压罐固化成型,但是大部件(如波音 787 的全复合材料机身筒体)仍然必须在热压罐提供的高温高压环境下固化成型才能满足结构强度的需要。

所有的复合材料构件都必须进行冲击后压缩强度(CAI)验证,冲击后压缩强度至少为 276MPa。用于波音 787 复合材料机身筒体的东丽 3900-2 树脂就是在高温热压罐中固化成型后才能满足冲击后压缩强度要求。但是,热压罐工艺费用非常高。首先,购买大型热压罐需要大笔资金;其次,在采用热压罐工艺过程中需要消耗大量电能和惰性加压气体(氮气)等,也使得成本增加。

目前,一些小部件利用现有树脂已经开始由非热压罐工艺制备。其采用的真空辅助树脂传递模塑(VARTM)工艺就是一层一层地把树脂注入一个已经抽成真空的密封模具里。大气压力就把树脂层压在一起粘接成一个整体部件。由于固化压力减少,完成的复合材料构件强度就没有热压罐成型的高。所以仅仅用于小部件的制备或者用于非商业飞机结构件的生产。

因此,更有效的解决方法就是开发一种更先进的树脂。该树脂能够使非热压罐固化的复合材料构件强度跟热压罐固化的构件差不多,但是其需要的热能却只有后者的 1/2。新型树脂能够使飞机结构件在一个特



殊烘箱中进行固化,其温度范围为 65.5 ~ 82.2℃。这样可以使低温烘箱直接进入产品生产线,从而避免了从热压罐中把构件搬运到下一步组装引起的生产中断。

MTM45-1 就是这样一种非热压罐复合材料树脂。该树脂具有足够的强度,能够安全应用于验证机项目。在 ACCA 项目选用该树脂之前,MTM45-1 树脂已经在“白骑士”2 (White Knight) 和 P175 “臭猫”(Polecat) 无人机上得到了成功应用。

但是,一些数据表明,MTM45-1 要比目前用于商业飞机的先进复合材料性能低,MTM45-1/AS4 复合材料的性能见表 1。尽管 MTM45-1 将继续在试验和技术开发项目中得到应用,但是,相对于商业飞机来说,它的抗损伤容限性能还是稍微低了一些。波音 787 结构的冲击后压缩强度水平为 310MPa 左右(3900/T800 复合材料),而 MTM45-1 的 CAI 只有 230MPa 左右。

因此,只有研发出一种能够产生和波音 787 所用复合材料强度相同水平的新树脂时,00A 复合材料才能被广泛应用于各种商业飞机,否则 00A 结构将只局限于 ACCA 和“臭

猫”无人机等项目水平。从目前的情况来看,要使 00A 结构强度达到商业飞机的要求还需要一段时间,加上民用飞机制造商本来在采用新技术上都偏于保守,所以 00A 复合材料结构在商业飞机上的应用可能会更晚一些。

但是,这些都不会影响 MTM45-1 在 ACCA 项目中的重要性。作为一个验证机,需要它来收集 00A 复合材料在使用中的大量性能数据,为 00A 复合材料的大量应用做好充分的准备。

结束语

ACCA 项目的实施将显著提高空军实验室和工业部门在快速验证未来高投入航空关键技术方面的能力,加快对未来航空武器装备的研制生产能力,降低技术风险并节约研制生产和使用成本。同时,像其他美国绝大多数 X 型验证机一样,在 ACCA 项目中被验证的材料技术和制造方法将很快用于其他军用飞机,包括长航程攻击飞机和无人机系统。从中也可以看出,00A 材料和制备工艺将成为未来航空航天领域复合材料的主要方向之一。

(责编 玉龙)