

航空 复合材料技术 成果文集

航空航天 科学技术研究院 编
工业部

航空工业出版社

V257-53
03

32897202

航空复合材料技术 成果文集

航空航天科学技术研究院 编
工业部



航空工业出版社

1993



C0341462

(京)新登字 161 号

航空复合材料技术
成果文集

航空航天科学技术研究院 编
工业部

主 编 张 耀

副主编 理有余 张登高

责任编辑：黄铁林

封面设计：霍振源

航空工业出版社出版发行

(北京市安外小关东里 14 号)

— 邮政编码：100029 —

北京信息工程学院印刷厂印刷

1993 年 5 月第 1 版 1993 年 5 月第 1 次印刷
开本：787×1092 1/16 印张：31.75
印数：1—100 插页：1 字数：925 千字

统一书号：17448·18

定价：79.00 元

编者的话

“七五”计划期间,航空复合材料领域的预先研究与技术攻关取得了丰硕成果,在继承与发展以往科研成就的基础上,成功地研制了多种航空飞行器的复合材料重要部件,在复合材料的结构设计、强度计算与试验评估、材料、制造技术、质量控制与无损检测以及性能测试技术等方面均有建树,取得了很好的社会效益与经济效益,并为“八五”的预研和型号应用创造了良好的技术条件与物质条件。

航空复合材料技术已进入了一个新的发展阶段。

为了较全面地反映从事航空复合材料工作的研究所、高等院校与航空工厂的科技工作者和教师在“七五”期间所取得的上述成果,我院组织了技术成果文集的征文工作。在不到一年的时间里,共收到稿件 234 篇,为提高工效和节约开支,特就近邀请在北京的部分复合材料专家进行审稿,根据航空航天部科学技术研究院复[1991]151号文的要求,从来稿中审定 166 篇(含摘要文章)汇编出版了这部《航空复合材料技术成果文集》,其内容涉及“七五”计划内的系统工程项目、设计与强度、材料与制造技术、性能测试与型号应用等各个方面。本文集对今后继续开展复合材料的应用研究将发挥应有的作用。

本文集由张耀同志任主编,理有亲、张登高同志任副主编,宋焕成、刘方龙、张志民、杨乃宾、张凤翻、王山根、杨国章、刘善国、张钟林以及我院复合材料处理有亲、张登高、王慧杰、胡宏东等同志参加了审稿或校对工作,航空工业出版社张铁钧、黄苏桥等同志在编辑出版过程中也付出了辛勤的劳动,在此一并致谢。我们还要向“七五”期间对航空复合材料技术的发展努力工作和积极投稿的同志表示谢意,并预祝他们在今后的工作中取得更好的成绩。

编者

1993年5月

于北京,航空航天工业部科学技术研究院

目 录

加速我国航空复合材料技术的发展(代序) 张耀 理有亲

一、复合材料机身系统工程

带夹层结构的复合材料机身技术研究	11
复合材料前机身段结构设计	24
前机身夹层结构分析与优化设计研究	28
复合材料夹层结构优化设计研究	35
复合材料蜂窝夹层结构参数优化设计	45
复合材料机身夹层结构的分析与试验研究	49
复合材料夹层结构有限元稳定性分析	50
复合材料夹层结构前机身段有限元分析与试验验证	58
复合材料夹层结构连接形式设计	64
复合材料结构连接件及试验分析	71
混杂复合材料设计方法研究	78
复合材料层压、夹层和加筋圆柱曲板的稳定和振动研究.....	90
复合材料结构撞击损伤研究.....	106
复合材料结构电性能设计研究.....	120
带夹层结构复合材料前机身段模拟件研究.....	128
蜂窝夹层结构共固化成形工艺.....	135
复合材料前机身下壁成形方法与模具研究.....	141
计算机辅助设计在带夹层结构复合材料前机身段研制中的应用.....	146

二、复合材料机翼系统工程

复合材料机翼设计若干问题研究.....	149
复合材料机翼整体油箱设计研究.....	156
复合材料油箱防静电设计技术研究.....	161
复合材料机翼整体油箱密封技术试验研究.....	166
复合材料飞机结构的雷击防护.....	170
复合材料机翼结构铺层设计分析.....	175
复合材料机翼层压板的铺层应力分析.....	176
复合材料机翼的动强度分析.....	182
复合材料结构动力特性分析及翼面颤振分析 DASC程序介绍	191
复合材料盒段颤振特性试验研究.....	192
复合材料翼面变铺层参数颤振特性研究.....	196
复合材料机翼外挂副油箱颤振特性分析.....	197
复合材料机翼大开口强度分析与研究.....	209

复合材料加筋层压板稳定性分析	212
复合材料对称层合板螺栓连接接头承载能力预测	217
复合材料结构验证试验中考虑环境影响的实施方案	225
用一个复合材料机翼试件完成静、动、耐、损验证试验的可行性	225
复合材料外翼 1:2 模拟件研制	226

三、设计与强度

民机复合材料部件的强度设计	237
复合材料翼面的气动弹性剪裁	241
复合材料机翼的数值优化结构剪裁	241
复合材料机翼在气动弹性约束下的优化设计研究	242
复合材料翼面结构满足颤振速度约束优化设计	248
复合材料翼面结构的自振和颤振分析及优化设计	248
复合材料翼面结构带位移约束的优化设计	249
用序列二次规划作复合材料结构的优化设计	249
复合材料加筋壁板的优化设计	250
复合材料桨叶剖面特性计算	258
复合材料旋翼桨叶的结构优化与振动控制	277
复合材料叠层板弯曲有限元分析中的一种应力杂交元	277
层压板在压剪载荷下屈曲分析的三角有限差分法	278
复合材料强度特性的统计分析与设计许用值的确定	278
统一型三次强度准则及其耦合项系数的确定	279
预示复合材料螺栓接头强度的经验方法	280
复合材料连接区的局部软化技术研究	288
复合材料层合板多向层间的 I 型分层断裂韧性研究	293
冲击损伤容限许用值(方案论证阶段)确定方法和冲击损伤破坏曲线	294
复合材料层板结构在冲击载荷作用下非线性动力分析	299
碳纤维增强复合材料冲击断裂分析	300
复合材料强度和疲劳性能的误差限度与最少试样个数	301
含软化带复合材料板在剪切和拉伸载荷下的损伤扩展和剩余强度	301
复合材料湿热效应综合研究	302
复合材料稳态及瞬态湿度场及应力场分析	309
复合材料结构耐久性问题	309
复合材料疲劳损伤模型评述	310
复合材料结构系统的可靠性分析方法	310
复合材料层压板满足可靠性约束的铺层优化设计	311
复合材料叠层板可靠度的计算方法	311
采用多级优化技术进行复合材料结构可靠性优化设计	312
复合材料层板的综合可靠性安全系数	312
有限宽层合板边界效应影响拉伸强度的修正方法	313

含孔层合板考虑边界效应的拉伸强度分析	313
碳纤维增强塑料层合板斜交层间的剪切强度	314

四、材料与工艺

QY8911 双马来酰亚胺树脂及其应用	317
改性双马来酰亚胺树脂及复合材料的研究	326
LWR-1 中温固化环氧树脂体系研究	336
LWF 中温固化胶粘剂研制	343
LWP 中温发泡胶研制	348
HD03 基体及其进展	354
TG-XDA 基体树脂的合成及固化特性	360
双酚 A 甲醛多环氧树脂的合成	360
Y-2 中温固化环氧树脂基体及其复合材料的性能研究	361
热固性树脂的刚性增韧	362
AG80 树脂体系贮存挥发稳定性数学模式	363
AG80 四官能度环氧树脂质量控制研究	363
树脂的热熔预浸性研究	364
蜂窝夹层结构用玻璃织物预浸料的树脂体系研究	369
聚合物基复合材料预浸类型及预浸机	373
国产 PEEK 树脂作为复合材料基体的工艺性能	377
以国产 PEEK 为基体的复合材料成型工艺研究	378
碳—玻璃层间混杂层合板试验研究	387
碳/碳复合材料的氧化与防氧化问题研究	387
混杂纤维复合材料吸湿行为研究	388
混杂纤维复合材料吸波特性初探	397
脉冲雷达罩用人工介质材料的研究	398
不对称低回波多层结构研究	403
复合材料固化应力模型	410
共固化整体多轴结构制造技术	411
高强低密度玻璃空心微球与先进复合材料结构共固化技术研究	415
计算机辅助直流电阻分析仪监控复合材料的固化过程	421
NRH 型芳纶纸蜂窝芯材的研制应用	422
复合材料常见缺陷的计算机定性定量无损检测	427
摄像定标装置的研究及其在手动 C 扫描成像技术中的应用	435
手动 C 扫描探头超声定标装置的研究	435
ZJJ-1 智能胶接检测仪的研制	436

五、性能测试与分析

环氧树脂基体固化动力学的红外光谱法研究	443
高压液相色谱法和凝胶渗透色谱法在复合材料质量控制中的应用	443

用高压液相色谱法—凝胶渗透色谱法研究四官能团环氧树脂	444
用高压液相色谱法和凝胶渗透色谱法研究预浸料化学组成	445
复合材料固化工艺的动态力学分析法研究	451
复合材料动态粘弹特性研究	454
界面层对复合材料动态力学性能的影响	454
复合材料基体用热塑性树脂 PEK-C 流变性能研究	455
用扭辫分析技术研究 PMR 聚酰亚胺的工艺与耐热性	461
QY8911/T300 碳纤维预浸料存放环境和存放期的热行为及微观结构研究	462
制备芳纶预浸料的质量控制	465
用混合加载测定复合材料压缩性能的新方法	469
一种新型面内剪切的实验测定方法	480
浸胶丝束拉伸强度统计分布特性研究	480
固化条件和测试温度对石墨/双马来酰亚胺力学性能的影响	481
碳/环氧复合材料多向层间拉伸强度的研究	481
$\pi/4$ 层板平面剪切特性的测试	482
复合材料力学性能的统计分析方法	482
复合材料数据处理及设计许用值的确定	483
混杂纤维复合材料的剪切特性	489
多向层合板分层破坏断口的扫描电镜(SEM)分析	489
芳纶/环氧多向层合板剪切断口的 SEM 研究	490
复合材料断口形貌与性能	490
基体对复合材料性能及破坏特征的影响	491
玻璃纤维复合材料冲击特性研究	491
混杂纤维复合材料的冲击特性	492
湿热环境对单向复合材料层板断裂韧性及 I 型疲劳裂纹扩展速率的影响	492
碳纤维树脂基复合材料轴向载荷疲劳性能测试技术研究	493
复合材料无缺口试样拉-压疲劳性能研究	494
碳纤维/环氧复合材料在拉-压载荷疲劳下的损伤特性	494
复合材料连接件谱载疲劳试验研究	495
碳纤维电聚合表面处理	495
碳纤维复合材料与金属偶合电化学腐蚀防护的试验研究	496
低反射防雷击分流条综合分析	497
ARALL 层板的纤维含量对力学性能的影响	502

六、型号应用

复合材料垂直安定面的研制	511
复合材料垂直安定面设计研究	516
复合材料垂真安定面与整流罩强度计算及静力试验分析	525
复合材料方向舵设计研究	526
复合材料垂尾气动剪裁位移约束优化设计	531

复合材料垂尾常温和高温下的静气动弹性计算和分析·····	531
复合材料垂尾颤振特性分析·····	532
复合材料方向舵典型盒段声振疲劳试验研究·····	532
复合材料垂直安定面制造工艺研究·····	533
复合材料方向舵共固化成形工艺研究·····	539
复合材料垂直安定面装配技术·····	547
复合材料方向舵、垂尾超声检测方法和应用研究·····	552
复合材料腹鳍的结构设计·····	561
碳/环氧复合材料腹鳍制造工艺研究·····	566
复合材料腹鳍、平尾翼尖的无损检测·····	572

加速我国航空复合材料技术的发展

(代序)

张耀 理有亲

《航空复合材料技术成果文集》已付梓出版了。这是从事航空复合材料工作的科技工作者、高等学校的教师主要在“七五”期间辛勤劳动的结晶,也是我国航空复合材料技术的发展方兴未艾、蒸蒸日上的佐证。

航空工业是先进复合材料的大用户。复合材料技术的发展和在航空上的应用,大大改善了飞机综合性能;航空工业对复合材料的需求与应用,又推动着复合材料技术的发展。当今,先进的军用、民用飞机和直升机不用复合材料是不可想象的;振兴航空如不抓住时机,大力发展复合材料技术也是难以成功的。

现就加速我国航空复合材料技术的发展谈一些意见。

一、复合材料技术是一项战略性关键技术

先进复合材料已被列为国家中、长期重点发展项目,并被列为我国国防科学技术发展为数不多的关键技术之一。这是具有远见卓识的决策。

先进复合材料作为一种比较理想的结构材料和功能材料,具有许多独特的优点和重要的实用价值,因而在世界范围内迅猛发展起来。几十年的应用与发展历程证明:复合材料是发展国防科学技术和提供现代精良武器的关键技术手段之一,是实现先进产品设计的重要物质基础。

前不久,美国国家工程研究院组织专家评出的近 25 年来世界十大技术成就中,先进复合材料就是其中的一大成就。80 年代末,美国国防部在强调发展 21 项关键技术以确保国防优势和技术领先地位时,将复合材料列为优先发展项目;在 1991 财年又被列为最优先的“A”类关键技术;1992 年 7 月美国国防部在公布“国防科学与技术战略”的同时,公布了新的关键技术计划。新计划的内容虽在以前计划的基础上调整成 11 个关键技术领域,但“复合材料”仍为其中“材料与工艺”项 5 个技术子领域的重要研究内容。美国政府于 1991 年 3 月 20 日还正式公布了国家关键技术报告,确定了 6 大关键技术领域与 22 项国家关键技术,作为美国跨世纪的一项战略任务,复合材料再次被列为关键技术之一,并认为,这些关键技术“对繁荣国民经济和确保国家安全关系重大”,“抓住机会大力开发这些关键技术,并迅速转化为巨大的经济效益和军事实力,就可能在高技术竞争中立于不败之地”。

实际上,已经有人作了分析,认为就复合材料技术应用研究的总体水平来看,西欧许多方面已领先美国。西欧在军用飞机和民用飞机这些综合反映科技水平与工业水平的产品上,复合材料技术应用水平是很高的。即使如此,为了使纤维增强复合材料高技术应用更上一层楼并发挥更大的经济效益,德国研究技术部还在大力开展工作,要在 7 个城市建立纤维复合材料演示中心。而日本也在

继续重视复合材料这一高技术的基础研究与开发。虽然日本的碳纤维无论在品种方面,还是产量与质量方面均已名列世界首位,但日本政府仍将复合材料作为跨世纪新技术、新材料开发的4大重要领域之一。

由此可见,复合材料是一项战略性的关键技术。在一定程度上,可以说,复合材料的研究水平与应用程度是一个国家科技发展水平的代表。

二、复合材料在航空工业发展中具有突出地位

先进复合材料在航空航天、兵器、电子、舰艇、核工业以及民用工业等领域都具有广泛的应用前景,而先进复合材料技术的实际应用,在航空工业中则占有突出的重要地位。这是因为,复合材料诸多优异性能,比如强度高、比刚度大、优良的抗疲劳与冲击性能,以及独特的材料可设计性等,正是飞机结构盼望的理想性能。众所周知,高性能的军用航空器要求结构重量轻,从而可以减少油耗,延长留空时间,飞得更高更快或具有更好的机动性;也可以安装更多的电子设备和航空武器,提高飞机的综合性能。资料表明,减轻结构重量可大大节约飞机的使用成本,取得明显的经济效益,据国外有关资料报告,如先进战斗机每减重1kg,就可节约1760美元。由此可见,西方在20年左右的时间内,军用飞机广泛使用复合材料并非偶然。他们在很短的时间内就实现了从非受力件和次受力件到主受力件应用的过渡,无论是用量还是技术覆盖面都有了长足的发展。值得一提的是,隐身技术的发展与应用,进一步扩大了对复合材料技术的需求。在继民用飞机中出现全复合材料飞机(如 Lear Fan 2100, Starship 和 Voyager)之后又出现了全复合材料的隐身轰炸机 B2。此外,也只有用了复合材料,才使前掠翼得以在 X-29 上实现。附表 1 列出了西方军用飞机一些主要机型使用复合材料的概况。

附表 1 西方主要军机使用复合材料情况

序号	机型	使用部位	材料与结构特点
1	F-4	方向舵	硼/环氧蒙皮+全高度铝蜂窝芯
2	F-14	水平尾翼安定面、整流罩	硼/环氧蒙皮+全高度铝蜂窝芯
3	UTTAS(S-70)(直升机)	机身加强梁	硼/环氧
4	CH-47(直升机)	旋翼桨叶	硼/环氧
5	CH-54(直升机)	尾翼蒙皮、机身长桁	硼/环氧
6	F-15	减速板、舱内地板、垂直安定面、方向舵、水平安定面蒙皮	硼/环氧
7	F-111	机翼支承加强板、水平安定面	硼/环氧蒙皮+全高度铝蜂窝芯
8	幻影 2000	方向舵	硼/石墨—环氧
9	F-16	垂直安定面翼盒、垂尾前缘、方向舵、平尾	石墨/环氧蒙皮+全高度铝蜂窝芯 平尾为石墨/环氧蒙皮+全高度波 纹板铝构架
10	A-7	外翼	硼/石墨—环氧
11	C-130	机翼翼盒	硼/石墨—环氧

续表 1

序号	机型	使用部位	材料与结构特点
12	C-5A	机翼前缘缝翼	硼/环氧
13	B-1	垂直安定面、水平安定面、机翼前缘缝翼、襟翼、武器舱门、后设各舱门	硼/石墨-环氧面板+全高反铝蜂窝芯武器舱门下面板为芳纶/酚醛
14	F-18	垂尾、平尾、减速板、机翼蒙皮、前缘	石墨/环氧 用量为 12.1% 结构总重
15	AV-8B(美英垂直起落战斗机)	机翼翼盒蒙皮+基础结构、前机身、水平尾翼、整流罩、副翼、襟翼、发动机舱门	石墨/环氧, 26.3% 结构总重, 机翼蒙皮长达 8.53m
16	X-29A(验证机)	前掠翼蒙皮、鸭翼	石墨/环氧, 50% 结构总重, 蒙皮厚度达 20mm
17	“鱼鹰”(U-22)(垂直/短距起落)	机翼整体壁板、梁、肋、前后缘; 机身、气翼及正弦波梁	石墨/环氧, 机身占 50% 结构重量
18	A-6	机翼	石墨/环氧
19	“阿尔发喷气”(Alpha Jet)	安定面翼盒	石墨/环氧
20	“美洲虎”(Jaguar)	发动机舱门、机翼翼盒(蒙皮及槽形前后梁、正弦波中间梁)	石墨/环氧
21	“狂风”(Tornado)	升降副翼(差动平尾)	石墨/环氧蒙皮+全高反铝蜂窝芯
22	EAP(英实验飞机计划)	机翼, 前机身, 鸭翼, 垂尾	石墨/环氧
23	“狮”(Lavi)(以美战斗机)	机翼蒙皮、垂尾、前置翼面、操纵面、各种门、壁板、机身	石墨/环氧
24	“阵风”(Rafale)(法)	机翼、机身、鸭翼、操纵面、起落架、舱门	机身占 50% 结构重量
25	JAS39(Gripen)(瑞典)	机翼, 垂尾, 鸭翼、进气道、起落架、舱门	石墨/环氧, >30% 结构重量
26	FFP(德 MBB 战斗机机身计划)	机身	两半机身共固化
27	ATF(YF-22, YF-23)	机翼, 机身	>40% 结构重量
28	B-2		全复合材料结构、具有隐身功能
29	F-117A		>50% 结构总重, 具有隐身功能多棱截面碳纤维, 三向异形整体编织结构

三、我国航空复合材料技术的进展

我国航空复合材料技术的发展,是在上级领导机关的关怀与领导下,紧密结合需求,在自力更生基础上,从无到有,从小到大发展起来的。到现在已拥有相当规模的研究队伍和初步配套的科研、生产条件。在过去的十几年里,我们在有计划地组织复合材料预研和型号攻关的同时,加强应用研究,逐渐从非承力构件发展到次承力构件,以致主承力结构的研制。

复合材料在我国一些飞机上应用的主要部件,如附表2所列。

复合材料技术,是结构与材料工艺融为一体的系统工程,研制中需要整套综合技术。两个五年计划以来,尤其“七五”期间重点安排了由需求牵引的预研和技术攻关,全面带动了复合材料结构设计、强度分析与试验、树脂体系与预浸料研制、工装模具的设计制造、零部件制造与装配、结构试验和无损检测技术等应用基础研究与应用研究。具体的进展主要有:

1. 复合材料结构设计已由在老机上等效替换金属件的等代设计,过渡到多种新结构的综合优化设计。如翼面采用考虑气动弹性剪裁的优化设计,机身采用考虑大面积夹层结构和混杂纤维效应的综合设计,同时对耐久性和损伤容限设计也开展了研究,并向工程应用过渡,大量计算机软件编制和应用,保证了良好的减重效果,如强五垂尾和机身段减重都在30%以上。

2. 研制成功了多种中温和高温固化树脂体系,其工艺性好,储存期长,耐高温和韧性较满意,已在型号和研制项目中应用,见附表3。

附表2 我国一些飞机上使用复合材料情况

序号	机型	使用部位	材料与结构特点
1	××	进气道外侧壁板、启动箱口盖、氧气瓶口盖	碳/环氧
2	××	整流罩	碳/环氧
3	歼八	主起落架支柱护板、雷达天线罩、垂直安定面壁板、前缘蒙皮	碳/环氧
4	××	减速板、翼鳍、背鳍、雷达罩	碳/环氧
5	歼七Ⅱ	机头罩、上轮口盖	碳/环氧,口盖为碳纤维面板+空心玻璃珠芯筋条,一次共固化复杂型面,筋条为kevlar/环氧
6	××	垂直安定面、方向舵、整流包皮	碳/环氧 碳/双马
7	××	垂直安定面、前机身、翼部舱门	碳/环氧,机身蒙皮+全高度 Nomex 蜂窝芯,一次共固化成型
8	教八	垂直安定面、方向舵	蒙皮、梁、桁条整体一次共固化,方向舵蒙皮+全高度 Nomex 蜂窝芯

续表 2

序号	机型	使用部位	材料与结构特点
9	直九	旋翼桨叶、机身、尾翼	多品种、多系列预浸料,国产化率~80%
10	×××	机翼翼盒、外翼	碳/双马芳整体密封油箱,在研制中
11	××	垂尾、鸭翼等 8 类 16 件	碳/双马,在研制中,鸭翼管型梁、芳 Nomex 蜂窝芯舵面,桁条 n 无结构
12	×××	垂直安定面,前机身	碳/双马,主要移植 No3、7 预研成果,拟批生产,研制中

附表 3

航空用树脂体系研究一览表

序号	名称	类型	固化温度	使用情况
1	648 酚醛环氧,三氟化硼单乙胺 4211	环氧	150℃	垂尾,背鳍,腹鳍
2	四官能环氧 DDS 5222	环氧	180℃	机翼、前翼试验件
3	环氧树脂固化剂 N3231	环氧	125℃	直九国产化
4	改性双马来酰亚胺树脂 QY8911	聚酰亚胺	177℃~200℃	垂尾三角区壁板,多堵结构件与蜂窝结构件,机翼,弹头头锥、导弹翼面
5	双酚 A 型环氧 DDS HY-1, LWR-1	环氧	130±5℃	前机身、垂尾
6	环氧树脂 DDS HD03, HD01	环氧	160℃~170℃	整流罩,下阻尼板及垂尾前缘
7	四官能环氧 DDS 阻燃剂 5223	环氧	180℃	直九国产化
8	环氧树脂固化剂 N, 阻燃剂	环氧	125℃	直九国产化
9	改性双马来酰亚胺树脂 5405(仿 NARMCO 5243C)	聚酰亚胺	180℃~200℃	机翼
10	双马来酰亚胺树脂 (仿 Narmco 5150)	聚酰亚胺	180℃~220℃	预研

序号	名称	类型	固化温度	使用情况
11	聚苯硫醚热塑性树脂	热塑		预研
12	热塑预浸用中温固化环氧树脂基体	环氧	125℃	预研

3. 掌握了一整套一次共固化和软模成型技术,在复合材料结构件制造工艺上前进了一大步。如实现 K-8 教练机多墙式全复合材料垂尾全盒段的一次共固化。

4. 复合材料性能与测试方法较好地解决了复合材料的高低温力学性能测试准则、平板轴向载荷疲劳性能测试技术、薄板压缩试验技术、动态力学性能温度与频率图谱解析技术及应用,湿热膨胀系数高精度测试技术等。建立了 20 多项标准试验方法,获得了大量有价值的数,分别列为国标、军标和航标。其中一些性能数据已在几种型号的复合材料构件研制中应用。

5. 无损检测技术,包括 C 扫描、激光全息、声发射、软 X 射线、涡流检测等全面展开,特别是 C 扫描检测设备已在生产中获得了实际应用。

6. 编写了我国第一部“复合材料设计手册”,这是我院组织的复合材料技术在设计软件方面的一项基本建设。发行后为全国许多单位采用,取得明显效益。

“七五”对复合材料前机身进行的预研工作,解决了夹层结构、混杂纤维和共固化技术在机身上的应用问题,并由于大幅度减重和减少零件数,为解决飞机电子设备增多、机头偏重这一普遍性问题,提供了有效的减重途径,使我国航空复合材料技术上了一个新台阶,实现了从次承力构件向主承力构件的过渡。

值得一提的是,复合材料前机身段与被替代的原金属前机身段相比,取得了毋庸置疑的效果,与结构大小相似的美、英合作的 AV-8B 垂直起落战斗机前机身段相比,收益,如附表 4 所示。

附表 4 前机身段比值

机型	结构材料	重量(kg)		零件		紧固件	
		称重	减重率(%)	数量	减少率(%)	数量	减少率(%)
强 5 机	复合材料结构	76.0	31.5	35	61.5	1109	61.3
	金属结构	110.9		91		2865	
AV-8B	复合材料结构	78.5	24.5	88	62.87	2450	61.96
	金属结构	104.0		237		6440	

四、发展我国航空复合材料的基本思路

发展我国航空复合材料技术的总原则,一是要紧密结合我国国情,坚持需求牵引、技术发展推动和有限目标,突出重点的方针。二是要坚持按复合材料自身发展的科学规律办事。特别是复合材料性能可设计,材料与制件同时形成,从而对各有关专业学科、技术门类有计划、有目标地进行综合配套研究。三是借鉴国外发展这项技术的经验教训,争取少走弯路。据此,我们对航空复合材料预研的基本思路是:

1. 对航空结构复合材料与功能复合材料,以发展结构复合材料为主,兼顾功能复合材料。
2. 对树脂基复合材料与金属基、陶瓷基、碳/碳等复合材料,以发展树脂基复合材料为主,跟踪其他复合材料。
3. 对热固性与热塑性树脂基复合材料,当前,以发展热固性树脂基碳纤维复合材料为主,同时跟踪热塑性树脂基复合材料。
4. 根据飞机特别强调安全性和使用寿命的特点,航空复合材料的发展必须切实坚持预研先行,一步一个脚印地为型号提供技术储备。一切通过验证,为型号提供确实可靠的技术,实现从预研到型号的顺利衔接。
5. 坚持有目标、分层次发展航空结构应用技术,从现役型号上的部件等代,过渡到新机部件的优化综合;从单一结构形式发展到多种结构形式的组合;从非承力构件,次承力构件,再上机身和机翼类主承力构件。
6. 注意预研技术在选定的成熟机型上装机试飞验证,目的在于突破通用技术,使多种型号受益。扩大应用,减少风险。
7. 在预研阶段,对大型课题组织系统工程,明确各自职责,发挥各家特长,建立强有力的行政与技术指挥系统,集中力量突破航空部件的应用技术关键。
8. 不仅要重视应用研究,也要重视基础研究和应用基础研究,使之配套发展,形成整体水平的提高。

我们认为,这些思路基本符合国际上复合材料技术发展的总趋势,也适应我国航空应用前景。“六五”、“七五”、“八五”期间我们的预研也正是根据上述思想安排的,实践证明行之有效,从而取得了较好的成绩和经验,当然也还有不少教训值得总结。

五、发展我国航空复合材料的几点感受与思考

1. 国外十分重视先进复合材料的研究,不但把复合材料列为战略性的关键技术,同时在航空复合材料应用研究方面还有专门的研究计划与经费支持。比如,80年代有复合材料大型飞机机翼结构(CLAWS)计划,先进设计的复合材料飞机(ADCA)计划等。根据CLAWS计划,由几家飞机制造公司共同研制的美国空军B-1B飞机的下机翼蒙皮,其大型复合材料构件尺寸达 $14.94 \times 2.44\text{m}$,需要的石墨/环氧预浸带竟长达2.9万m。根据ADCA计划,复合材料将占飞机结构重量的68.5%,并使整个结构重量减轻35%。

根据发展需要和我国的实际情况,复合材料已被列为重点预研项目。但由于复合材料的应用特点,材料与制件一体化设计同时形成,需要设计、材料、工装、成型、试验、试飞、维护、修补等整套技术。如能建立相对独立的航空结构发展计划,从预研与型号两方面出资,组成统一的系统工程,连贯安排,将能取得更大的技术效益和经济效益,缩短从预研到型号的过渡历程。

2. 发展航空复合材料的决策中,投资强度是十分突出的问题。没有相当雄厚的经费投入,加速航空复合材料发展几乎是不可能的。从下列数字可见一斑:

1991~1992财年,美国国防部用于关键技术复合材料的科研总经费为9.15亿美元,约合人民币50亿元,在21项关键技术中投资强度占第4位。

美国航空航天局(NASA)为实现“先进复合材料计划”,投资约1.4亿美元,约合人民币7.5亿元。

美国格鲁门飞机公司为提高飞机战术技术性能,增强竞争力,制定发展复合材料现代化计划,投资3亿美元,约合人民币16亿元。

复合材料在我国的技术基础还很薄弱,要获得可靠的数据与资料,需要足够的实践,应保证基本的研究条件和试验手段,完成必要的试验和有足够的试件数量。这些都要有足够经费支持。我国复合材料技术综合水平较之西方差距仍然很大,如不加强经费投入并辅之以其他相应措施,必然使已经存在的差距进一步拉大。

3. 复合材料技术是一门实践性极强的技术,通过探索和试验,才能实际揭示复合材料的各种影响因素和规律,形成新颖的设计方案、制造方法,为工程应用提供可靠的依据和资料。复合材料的试验应该包括元件试验,构件和数模件的试验,也应该包括必要的装机验证试验。我国航空工业尚无专门的验证机制度,就更应重视验证工作。通过在现役飞机上对复合材料构件装机验证,可以取得实际飞行条件下的第一手数据和资料。这是缩比件代替不了的。

我们相信,在上级主管部门的正确领导下,总结经验,统一认识,抱着强烈的责任感和国际科技竞争意识,一定能把我国复合材料技术的发展计划搞好。让我们急起直追,加速我国航空复合材料技术的发展,迎接 21 世纪高技术的挑战。

1993 年 5 月于北京
航空航天部科学技术研究院