

无人机全复合材料主起落架支柱的研制

Development of Main Landing Gear Strut Made of Complete Composites for Unmanned Aircraft

中航工业贵州云马飞机制造厂 罗俊 关永安



罗俊

材料工程 / 工商管理双学士, 1987年毕业于西北工业大学材料系高分子材料专业。现任贵州云马飞机制造厂冶金试验部部长、研究员, 一直从事航空非金属、复合材料技术研究工作。

无人机由于具有使用成本低, 可以完成有人飞机所不能完成的一些特殊任务, 甚至在执行任务时许多方面比有人机具有更多的优点, 因此世界各国均投入大量的经费进行研制工作。

我国各种无人机的研制起步较晚, 与世界先进国家相比有很大的差距, 先进复合材料的应用就更少。

某集团研制的“某系列无人机”,

对作为主承力构件使用的全复合材料起落架支柱, 其最关键的指标——综合力学性能, 主要是由增强材料也就是纤维及其组合形式来决定的, 因此, 增强材料的选择、组合、制造就成为我们工艺实验的一个非常重要的环节。

类似主起落架支柱这样的全复合材料受力构件产品, 国内没有企业研制生产, 只能由国外进口, 不仅价格贵, 而且手续繁琐。同时, 由于该产品可以军民两用, 所以一旦出现局势紧张或局部战争时, 进口来源都将受到禁运的威胁,

由于该系列飞机已经批量生产, 但起落架一直依赖进口, 严重限制了飞机的生产和使用维护。为此, 在多方面支持下, 我们进行了《某系列无人机复合材料起落架》课题研究。

分析研究

该课题研究的关键点包括以下5点:

- (1) 从制件的结构和承力状况分析, 采用何种成型工艺制造;
- (2) 如何达到高的抗弯强度;
- (3) 何种成型方法可以满足高的抗弯强度和高的纤维含量;
- (4) 采用何种树脂体系;

(5) 采用何种增强纤维并进行预制体成型。

通过对进口件的外观、内部结构微观检查、力学性能测试及材质鉴定, 来分析判断进口件的成型工艺方法。运用复合材料的理论知识, 结合国内设备能力现状, 研究确定自制件的成型工艺。对基体材料即树脂的选用, 根据进口件的红外和差热分析, 可以判明进口件的基体材料体系。对作为主承力构件使用的全复合材料起落架支柱, 其最关键的指标——综合力学性能, 主要是由增强材料也就是纤维及其组合形式来决定的, 因此, 增强材料的选择、组合、制造就成为工艺试验的一个非常重要的环节。

通过对进口件的静强度试验和样件理化性能检测结果显示, 纤维含量已经达到70%。综观复合材料真空袋压、模压、树脂移动模塑(RTM)、拉挤、缠绕等各种成型法,

70%的纤维含量,都是一个很高的指标,因此,提高纤维含量是必须要攻克的关键。

基于此,课题组进行了相当长时间的基础工艺试验和新材料新工艺探索实践。

1 进口起落架样件微观、材质分析

(1) 样件试样烧蚀处理。

为了分析样件的增强材料和铺层结构,我们对样件试样进行了烧蚀处理,以便准确确定样件的纤维品种及铺层结构。

通过烧蚀试样分析,进口起落架的中间层也就是主受力层为单向高强度无碱玻璃纤维丝束,外层承担主起支柱横向载荷和剪应力的是10层

无碱高强度玻璃纤维布,最外层(即第一层)与第五层为 $\delta 0.1$ 细玻璃纤维平纹布,第二层~第四层、第六层

弹性变形,无变形残留。

3 进口件成型工艺分析

目前,业界常用的复合材料成型

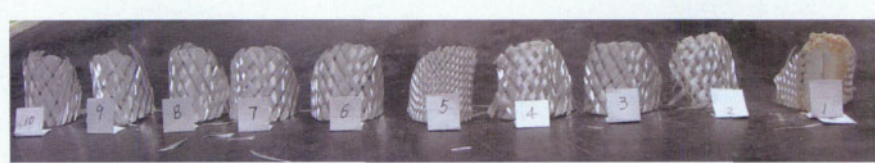


图3 进口起落架外面玻璃纤维织物包裹层烧蚀后剥开的各层形貌

~第十层均为 $\delta 0.8$ 无碱玻璃纤维平纹布(见图1、图2、图3)。

(2) 样件基体材料分析。

对样件基体材料进行红外、差热分析结果显示,进口件基体树脂玻璃化转变温度为 65°C 左右,应是双酚A型环氧类树脂加脂肪胺固化。

(3) 样件纤维含量分析。

采用烧失法测定出进口件纤维含量为70.9%,密度为 $1824\text{kg}/\text{m}^3$ 。

2 进口样件力学性能分析

为了解进口起落架的力学性能指标,为研制起落架提供依据和方向,我们在适当部位截取标准试片测试了进口件主要的材料力学性能。

根据设计要求,我们测试了进口件的宏观力学(静强度)指标: $P_y \cdot m$ 、 $P_z \cdot m$ 等方向按设计载荷和加载间隔的压力/变形数据及曲线。静强度测试结果显示,进口件的应力-应变曲线曲率平稳流线,表明该受力构件的制造质量良好,材料内部组织均匀,树脂对增强材料浸渍完全,气孔、缺胶、杂质等缺陷较少,样件在设计强度范围内为完全

工艺有:真空袋压、手糊成型、RTM、缠绕、拉挤、喷射、模压等。

通过对进口件剖面微观检查发现,样件内部几乎没有气孔、干斑等缺陷,基体材料对增强材料浸渍完全,内部组织均匀。结合其纤维含量、密度、力学性能、构件外形以及纤维组合形式等分析,进口件是采用树脂移动模塑(RTM)成型。

自制件研制

1 成型工艺方案

根据对进口起落架的分析研究,结合国内工艺材料体系和工厂具备的设备条件,我们决定采用树脂移动模塑成型(RTM)方法。

在RTM成型法中,较高的纤维含量,会导致树脂的充模、排气过程困难,较高的纤维含量和不当的纤维组合缝制工艺,都容易导致注射过程中树脂的紊流,从而产生气孔、缺胶、干痂等缺陷而报废。要提高纤维含量,除了选择合理的注射工艺参数外,对纤维的前处理是非常重要的一个环节,为了提高纤维含量,必须降低纤维的润湿角以提高浸润性能。为此,对纤维进行偶联处理是十分必要的,或直接购买偶联处理的纤维制品。

鉴于RTM成型工艺存在充模过程易产生气泡、干斑的缺陷,我们经过工艺分析,最后确定国产复合材料起落架的成型工艺选用现在国际上比较先进的“真空辅助RTM成型工艺”进行国产复合材料起落架的研制工作,并在研制中成功运用了“压缩式RTM技术”和“纤维预张紧”等



图1 进口起落架中部主受力部分烧蚀后形貌



图2 进口起落架中间部分烧蚀后形貌

技术,成功解决了充模、气孔、缺胶等缺陷,同时,“压缩式RTM技术”技术还最大限度地提高了构件纤维含量和综合力学性能。

“压缩式RTM技术”是在型腔未压缩、体积较大的状态下完成树脂注射和纤维浸润,此时模具型腔中的纤维含量相对较低,容易实现树脂注射、纤维完全浸润和排气,待模具型腔完成树脂注射、纤维浸润以及排气后,在保压情况下将模具型腔压缩到预定的体积、排挤出型腔中的部分树脂,从而使模具型腔中的纤维达到较高的体积含量,也就相应地提高了所成型零件的纤维含量。该技术能够显著提高成型零件的纤维含量,从而可以大大提高成型零件的力学性能。

“纤维预张紧”技术是在模具设计上实现,模具内设有相应的夹持和张紧机构,能够最大限度地使纤维预制件的纤维束按照要求的方向施加预应力并均匀排布,使得制件内纤维能够协同受力,提高构件设计方向上的力学性能,类似建筑行业的预应力梁原理。RTM技术成型工艺流程图见图4。

(1) 基体材料。

参照对进口件的差热分析,结合RTM技术特点和构件几何形态,为保证树脂最佳充模参数、固化及后固化性能,采用的基体材料为中低粘度、中等韧性、高强度的室温注射、中温固化的树脂类,因此,选择了3种进口树脂(高强不饱和树脂、注射型低黏度环氧树脂、低粘度环氧改性乙烯基树脂)用于试验。

(2) 增强材料及铺层结构。

根据进口复合材料起落架样品的剖析试验结果与起落架在使用中的具体受力分析,在预制件的铺层设计中,选用高强度无碱单向玻璃纤维织物作为中间部分主要受力方向(起落架长度方向)的主承载体,选用无碱玻璃方格布作为外部包裹增强材料,即起落架横向方向主承载体。按样板将无碱玻璃纤维织物/布裁减、叠

层后包裹并进行三维缝合。各层织物材料的规格和层数参照设计强度要求并按制件最终力学性能测试结果进行反馈修正。主要材料参见表1。

(3) 成型设备及工艺。

根据讨论确定的工艺总方案,采用真空辅助RTM技术原理进行样件试制,模具采用压缩式RTM专利技术,自制了一套带压缩腔和纤维张紧机构的RTM注射成型模具。

为了考察和对比进口件、试验件X、Y、Z等方向的载荷-变形力学性能指标,按照设计试验任务书和构件图纸,针对性地设计制造了一套在普通液压材料试验机上使用的专用试验夹具。在多树脂、纤维以及配比体

系情况下,采用正交试验方法,先后制造完成了26件试验件,据以摸索出优化的基体-纤维-配比方案,最终完成合格成品的研制。

2 工艺试验

(1) 引发剂MEPK加入量对树脂凝胶时间的影响。

由图5可以看出,MEPK加入量对树脂的凝胶时间影响较大,树脂的凝胶时间随MEPK加入量的增加而缩短。根据实际情况,MEPK的用量选在(0.5~0.8ml)/100g范围内。

(2) 纤维含量对复合材料起落架的力学性能影响。

由图6可以看出,起落架Y方向、Z方向的变形量随纤维含量增加,呈

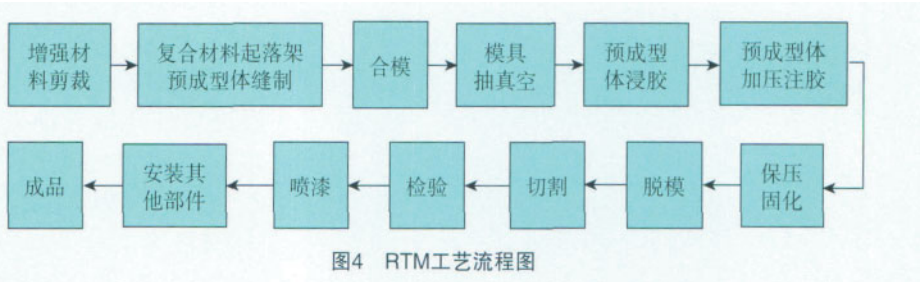


图4 RTM工艺流程图

表1 试验原料

材料名称	牌号	规格/mm	生产单位
单向玻璃纤维织物	—	—	法国
无碱玻璃布	EWR200-90	0.2	常州天马集团有限公司
无碱玻璃布	EW100A	0.1	上海耀华无碱纤维有限公司
无碱玻璃布	无碱布-290	0.29	沈阳玻璃厂
闭模成型树脂	EPOVIA®LSP-8020B	—	克雷威力利产品
乙稀基树脂	EPOVIA®RF-1001	—	克雷威力利产品

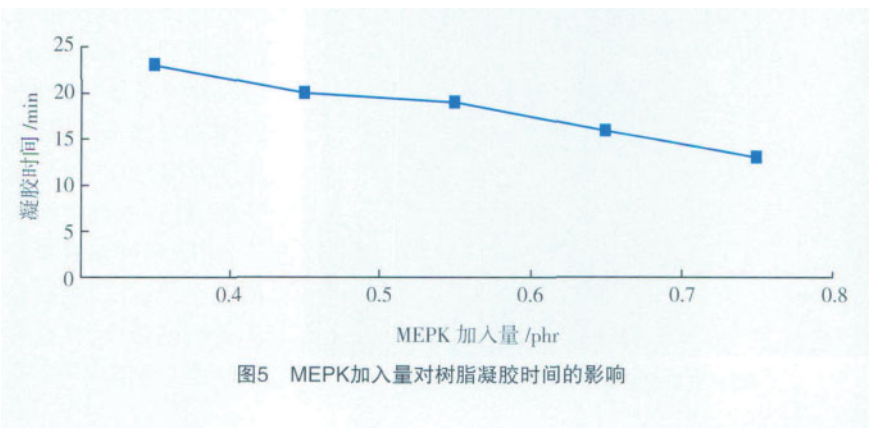


图5 MEPK加入量对树脂凝胶时间的影响

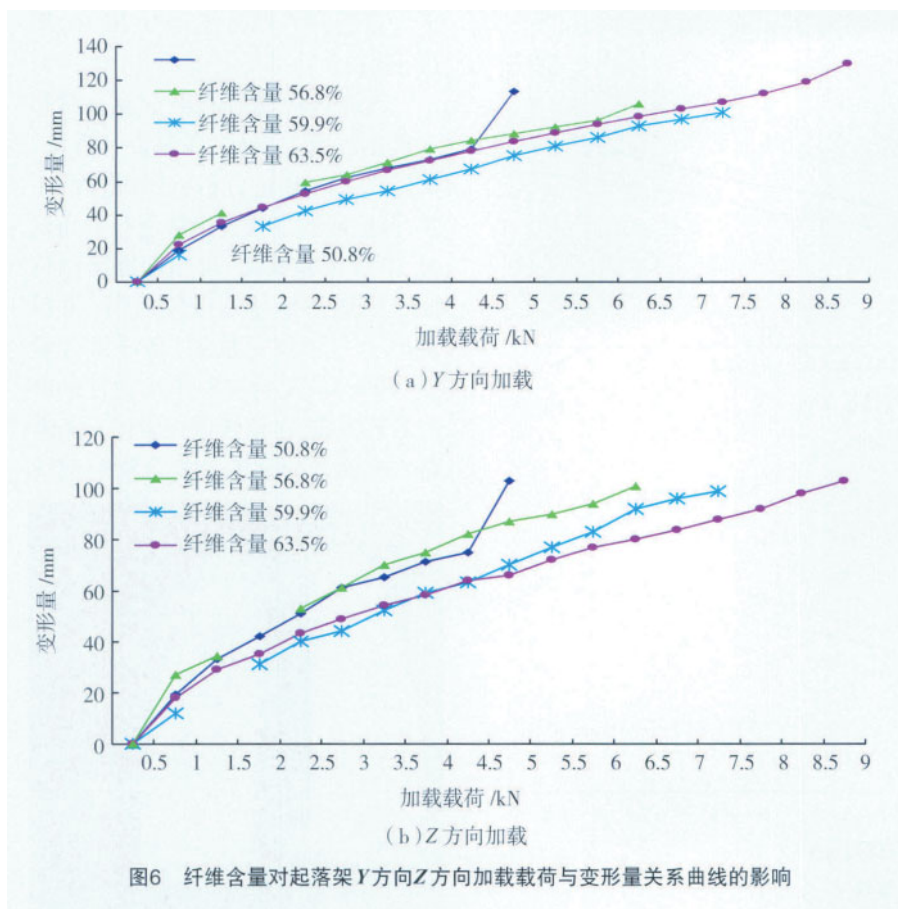


图6 纤维含量对起落架Y方向Z方向加载载荷与变形量关系曲线的影响

下降趋势。纤维含量达到63.5%时,国产复合材料起落架已经达到较好的强度状态,没有出现失稳现象,没有残余变形。

通过多次试验发现,当纤维含量达到63%以上时,制件力学性能、残余变形、内部缺陷等指标已经很理想,虽然我们还制作了纤维含量大于70%的零件,力学性能仍然在上升,但内部缺陷也呈上升趋势,成型工艺性下降,故只选取63.5%的纤维含量作为测试样件。

(3) 不同牌号树脂对复合材料起落架的力学性能影响。

由图7可以看出,起落架Y方向、Z方向的变形量随树脂牌号不同而出现不同的变形量曲线。其中以EPOVIA®RF-1001树脂为最佳。

(4) 自制件/进口件的力学性能(静力)对比。

从图8中可以看出,自制件和进口件的载荷-变形曲线拟合程度非

常好,且均无残余变形,说明自制件在静载荷情况下的力学性能指标已经达到进口件水平。进口与国产起落架在Y方向、Z方向的变形量差别不大,EPOVIA®RF-1001树脂制备的起落架比EPOVIA®LSP-8020B树脂制备的起落架变形量小,与进口起落架的变形量相近。

(5) 自制件与进口件的力学性能(落振)试验。

为了验证自制件的动态力学性能,进行了模拟飞机起、降过程的落振试验。经对比,进口件和自制件的动载荷、变形量、变形曲线以及残余变形量都非常相似,见表2。

结束语

先后成型了26件套主起支柱,对其中的7件作了动/静强度试验,与进口件比较,承载强度达到进口件指标,载荷-变形曲线与进口件的拟合理想;对其中2件进行试片剖切,进行了含胶量、抗拉、弯曲等测试,自

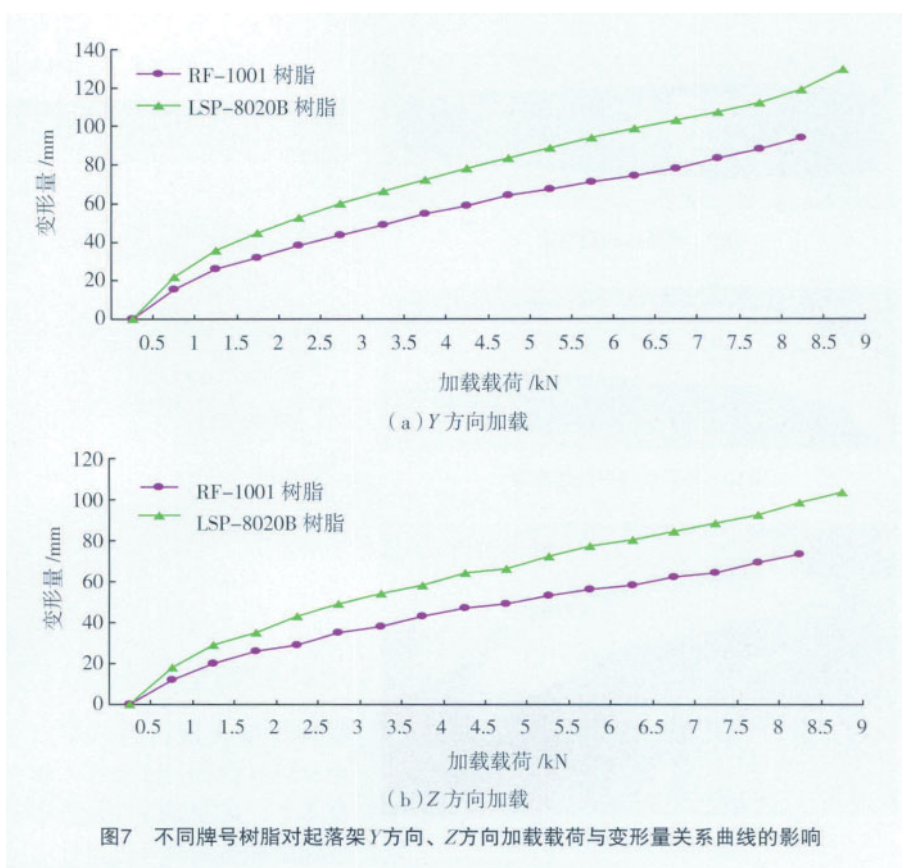
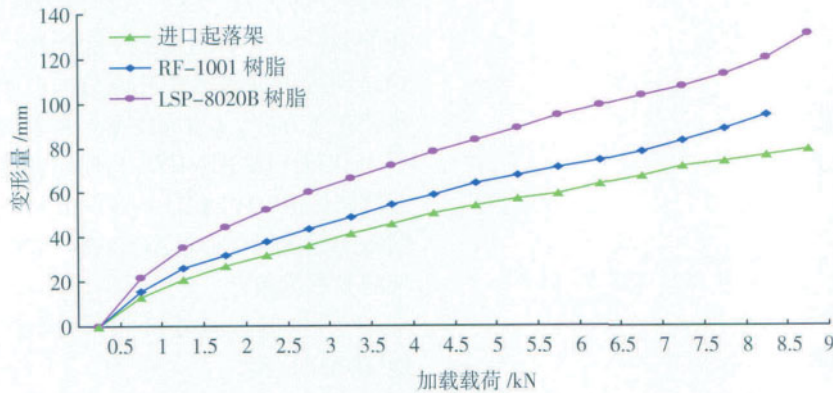
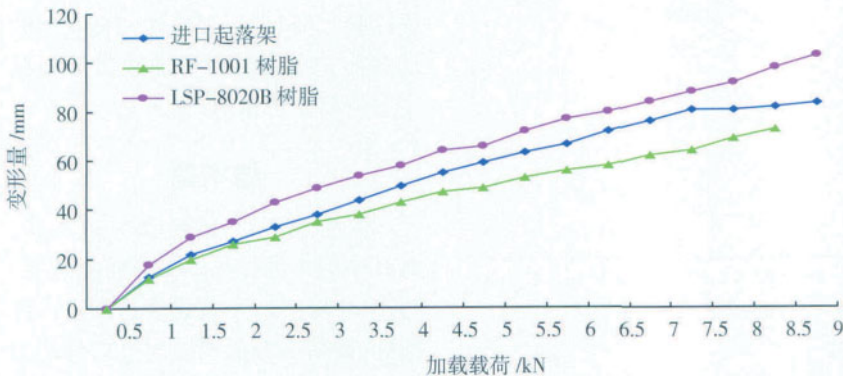


图7 不同牌号树脂对起落架Y方向、Z方向加载载荷与变形量关系曲线的影响



(a) Y方向加载



(b) Z方向加载

图8 进口与国产起落架 Y方向、Z方向加载载荷与变形量关系曲线

平。自制样件照片见图 9、图 10、图 11、图 12。

该课题成功研制出全复合材料飞机主起落架支柱，课题设计方案、实施工艺和理论分析、计算合理、正确，课题研制件与进口件进行静力试验、落震试验对比，得出课题研制件综合性能指标与进口件相当；并摸索出了一套较完整的、高纤维含量 ($\geq 70\%$) 的复合材料主受力件的制造工艺方法，在该领域探索出一条新路。本课题研制的全复合材料起落

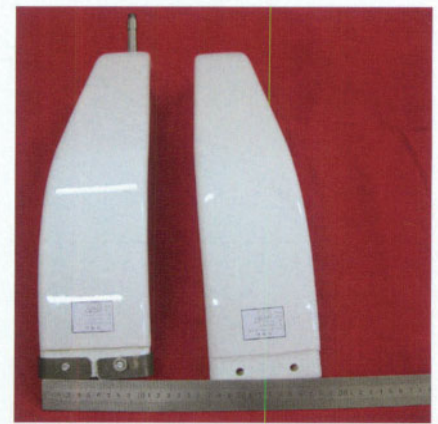


图12 起落架装配前后的对比照片2



图9 修整前的起落架



图10 修正喷漆后的起落架



图11 起落架装配前后的对比照片1

表2 自制件与进口件的落震试验结果比较

科目	某定型 (进口件)		课题带转 (自制件)	
	水平着落	机尾下沉着陆	水平着陆	机尾下沉着陆
系统功量/kJ	0.559	0.516	0.557	0.523
系统效率	0.454	0.196	0.346	0.270
吊篮最大位移/mm	121.551	159.900	171.002	186.172
缓冲器功量/kJ	0.178	0.233	0.165	0.320
缓冲器效率	0.616	0.258	0.382	0.465
缓冲器最大行程/mm	28.495	60.170	45.920	64.914
最大垂直载荷/N	12196.0	16423.5	10012.0	11582.5
带转速度/ $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	102	85	102	85
投放高度/mm	258	258	258	258
投放时间	20070902		20070911	

制件纤维含量达到 70% 以上，已经达到了 RTM 技术较高水平。自制样件综合力学性能指标达到国外进口件水

架支柱，动 / 静强度指标合格，制造技术先进，工艺设计合理，成本优势明显，可以替代进口件装机使用。

(责编 小城)