

单臂梁复合材料全高度双曲面蜂窝夹层结构水平尾翼的研制

邹国发 万建平 王再玉 龙国荣

(洪都航空工业集团,南昌 330024)

文 摘 主要描述了单臂梁复合材料全高度双曲面蜂窝夹层结构水平尾翼的研制情况。根据飞机水平尾翼的结构特点和选材以及特殊力学性能的要求,提出了可靠的工艺方法,进行了大量的工艺试验。通过对水平尾翼的研制分析,可知采用预吸胶技术和预压实技术对厚零件的成功制造起到了关键作用;采用共固化技术保证了高强钢转轴和复合材料梁连接;采用回弹角模具设计,可以解决“工”字型零件的回弹变形问题;高强钢的表面采用喷砂处理技术以及平尾采用的预装配校验技术,有效地保证了平尾的胶接质量。

关键词 水平尾翼,复合材料,蜂窝,夹层结构,工艺

Development of Horizontal Stabilizer of Composite Hyperboloid

Zou Guofa Wan Jianping Wang Zaiyu Long Guorong

(Hongdu Aviation Industry Group, Nanchang 330024)

Abstract Development of horizontal stabilizer of composite hyperboloid honeycomb sandwich in full height is described in this article. Based on the stabilizer's features, material selection and special mechanical properties requirements, a reliable technological process is raised, and lots of process tests are conducted. By analysis on the development of the stabilizer, it is concluded that fore absorption of glue and fore compaction play key role in successful making of thick parts, reasonable con-cure technique ensures link between rotating shaft of high tensile steel and composite beam, design of spring back angle mould resolves spring back deformation in "I"-shaped part and sand blasting on the high tensile steel surface and pre-assembly adjustment on horizontal stabilizer guarantee gluing quality of the horizontal stabilizer.

Key words Horizontal stabilizer, Composite, Honeycomb, Sandwich, Process

1 概述

国外航空复合材料已经得到了迅猛发展,A380、B-7E7、F22、F35 复合材料占结构质量的 24%、50%、25%、30%~35%。虽然我国先进复合材料的开发研究起步较晚,但经过近 30 年的研究与应用,已经奠定了相当的发展基础,有的已在某部件上批量生产,为其他型号的应用发展提供了经验。特别是近年来紧密结合航空、航天发展的需要,开展了多项复合材料典型结构件的研制和攻关,取得了相应的研究成果,并逐渐在航空产品上由次承力结构件向主承力结构件上扩大应用,如某型飞机复合材料全动水平尾翼部件研制成功,取得了复合材料主承力结构件研制的

新成果。

2 结构特点及选材

2.1 结构特点

水平尾翼采用全动转轴式薄翼面结构,内部无装载,翼面为双曲面全高度蜂窝夹层结构。

平尾复合材料蒙皮采用变厚度结构设计,在转轴梁处最厚,并逐渐向翼尖、前缘和后缘处变薄。转轴和“工”字梁是平尾的主要构件。它既有精确的尺寸要求,又有高的胶接强度要求^[1~2]。

2.2 选材

根据设计需要,除了转轴为 30CMnSi2A 高强钢,其他均为非金属材料。其中上、下壁板、梁、肋均

收稿日期:2006-03-17;修回日期:2006-08-31

作者简介:邹国发,1977年出生,工程师,主要从事树脂基复合材料成型技术的研究

为环氧树脂基碳纤维复合材料,前、后尾缘条以及垫块均为玻璃钢材料,夹芯为 NOMEX 纸蜂窝,胶黏剂材料均为环氧类型的胶膜材料。具体见表 1。

表 1 水平尾翼用的主要材料

Tab 1 Main materials used for horizontal stabilizer

材料名称	材料牌号
碳纤维	T300B
玻璃纤维	EW210A
金属材料	30CMnSNi2A
高温环氧树脂	NY9200G
环氧树脂	EP01441 - 310
夹芯材料	NH - 1 - 1.8 - 48
发泡胶	SY - PI
胶膜	SY - 14A

3 工艺

3.1 热压罐成型工艺

水平尾翼采用“工”字单臂梁全高度双曲率 NOMEX 蜂窝夹层结构,在成型工艺上有较大的难度。为了保证各组件之间的协调和制件的外形精度,采用二次胶接以及共固化的热压罐成型工艺,并根据组件的铺层多少及制件的厚度要求采用预压实、预吸胶和预固化以及校验膜技术等。

3.2 框架式模具结构

成型模具的要求有足够的刚性,以保证模具型面基准不变;具有较小的比热容量,以有效地利用热能和传热;质量轻,便于搬运;价格低,便于降低制造成本;维护简便,有较长的使用寿命等。基于这些要求模具采用经工程验证的框架式结构。

3.3 共固化胶接技术

共固化胶接技术是采用热压罐加压技术与局部采用橡胶软模压力传递技术相结合的方式共固化胶接成型。

3.4 “工”字型零件回弹量控制技术

复合材料在固化成型过程中,各种应力会造成的复合材料变形,一部分是热弹性变形,而一部分是非热弹性变形。热弹性变形是发生在从固化温度到室温的降温过程中,和复合材料的线胀系数有关。而非热弹性变形则是发生在固化等温过程中,它和固化等温过程中的应力变化有关,属于不可恢复的变形。

热弹性变形可以根据工件初始几何形状(拐角大小)、线胀系数以及温度的改变大小来确定。

即:

$$= \left[\frac{(\alpha - \alpha_r) \cdot T}{1 + \alpha_r \cdot T} + \frac{\alpha}{1 + \alpha_r} \right]$$

式中, α 和 α_r 分别为面内和沿厚度方向的线胀系数, θ 、 θ_r 和 T 分别为回弹角、工件拐角和温差,

和 α_r 分别为成型过程中沿面内和厚度方向的收缩大小。从分析中可以得出,变形包含三部分:各向异性、材料梯度分布和应力梯度分布,即:

$$= \left[\left(\frac{d}{dT} \right)_{\text{各向异性}} + \left(\frac{d}{dT} \right)_{\text{材料梯度分布}} \right] \cdot T + \left[\left(\frac{d}{dT} \right)_{\text{各向异性}} + \left(\frac{d}{dT} \right)_{\text{材料梯度分布}} + \left(\frac{d}{dT} \right)_{\text{应力梯度分布}} \right]$$

式中, T 为工件成型温度。

上式中,前一部分属于热弹性变形,随温度改变而改变,后一部分属于非热弹性变形,属于永久变形范畴^[3-5]。

4 结果与分析

4.1 元件力学性能

根据所选定的高强钢,表面处理方法试验结果见表 2,试验标准为 GB7124—86。

表 2 不同表面改性方法对高强钢搭接剪切强度的影响¹⁾

Tab 2 Effect of high tensile steel surface treatment on shear strength of lap joint

改性方法	剪切强度 /MPa	破坏形式
化学氧化	31.0	内聚破坏
喷砂	44.9	内聚破坏
磷酸阳极化	21.2	混合破坏
镀锡钛	28.6	内聚破坏

注:1)胶黏剂为 SY - 14A。

从表 2 中可以看出,转轴表面采用喷砂改性方法力学性能最佳,胶接强度达到了 44.9 MPa,大大超过了设计要求,并且胶接界面破坏形式正常,因此金属转轴胶接表面最后采用喷砂处理方法。

4.2 “工”字型零件变形试验

不同铺层和厚度的“工”字型零件计算、试验和分析的结果见表 3,根据表 3 的结果分析和实践经验认为“工”字型零件回弹角应控制在 1°~2°;在模具设计时对“工”字型零件的模具考虑了此值,效果良好。

由表 3 可以看出, [0°]s 和 [0°/30°/0°/30°]s 铺层的热弹性变形明显较小,因为它们在面内的 90° 方向上的线胀系数较大并和厚度方向上的线胀系数比较接近。这使得其呈现各向同性的特性。面内和厚度方向上的线膨胀性能均受铺层方向的影响。除了热弹性变形以外,非热弹性变形也有非常重要的影响,从 0.04°~1.12°。对于大部分铺层方式的结构来说,非热弹性变形占总的变形量的 65%左右。对于 [0°]s 和 [0°/30°/0°/30°]s 铺层结构来说,非热弹性变形量则要占到绝大多数。

表 3 “ 字型零件铺层和厚度对回弹量影响

Tab 3 Effect of -shaped part lay-up and thickness on resilience

铺层方式	拐角 / (°)	半径 /mm	厚度 /mm	总的回弹角 / (°)	热弹性变形 / (°)			非热弹性变形 / (°)		
					试验	预测	差异	试验	预测	差异
[0°] _s	90	6	1	0.74	0.11	0.00	0.11	0.64	0.00	0.64
[90°] _s	90	6	1	1.35	0.44	0.46	-0.02	0.91	0.27	0.64
[(90°/0°) ₂] _s	90	6	1	1.62	0.50	0.60	-0.10	1.12	0.35	0.77
[(-45°/45°) ₂] _s	90	6	1	1.39	0.43	0.60	-0.17	0.96	0.35	0.61
[90°/-45°/45°/0°] _s	90	6	1	1.39	0.41	0.60	-0.19	0.98	0.35	0.63
[0°/30°/0°/-30°] _s	90	6	1	0.79	0.11	0.25	-0.14	0.68	0.15	0.53
[(90°/-45°/45°/0°) ₂] _s	90	6	2	1.35	0.61	0.60	0.01	0.74	0.35	0.39
[(90°/-45°/45°/0°) ₂] _s	90	12	2	0.81	0.60	0.60	0.00	0.22	0.35	-0.13
[(90°/-45°/45°/0°) ₂] _s	90	24	2	0.68	0.64	0.60	0.04	0.04	0.35	-0.31
[(45°/90°/-45°/0°) ₃] _s	60	6	3	1.71	0.70	0.60	0.10	1.02	0.35	0.67
[(45°/90°/-45°/0°) ₃] _s	90	6	3	2.01	0.90	0.81	0.09	1.12	0.47	0.65
[(45°/90°/-45°/0°) ₃] _s	135	6	3	0.37	0.28	0.24	0.04	0.11	0.14	-0.03

4.3 外形与质量

理论质量与实际质量比较见表 4,外形测量数据见表 5。

由表 4 看出,水平尾翼复合材料的理论总质量与实际总质量的误差为 4.2%,大大低于设计要求 10% 的误差;水平尾翼的理论总质量与实际总质量的误差为 2.5%。

表 4 复合材料水平尾翼各部件质量

Tab 4 Weight of subassemblies of composite horizontal stabilizer

部件	实际质量	理论质量
金属	16.21	16.10
复合材料	28.84	30.09
总重	45.05	46.19

表 5 水平尾翼外形检测数据

Tab 5 Tolerance of horizontal stabilizer configuration

测试点	A		B		C		D	
	上翼面	下翼面	上翼面	下翼面	上翼面	下翼面	上翼面	下翼面
1	+0.15	+0.23	+0.16	+0.22	+0.23	+0.10	+0.29	+0.12
2	+0.22	+0.25	+0.29	+0.14	+0.20	+0.11	+0.26	+0.18
3	+0.24	+0.26	+0.13	+0.20	+0.21	+0.13	+0.25	+0.11
4	+0.21	+0.29	+0.30	+0.23	+0.31	+0.21	+0.27	+0.22
5	+0.30	+0.21	+0.28	+0.22	+0.23	+0.20	+0.32	+0.25

从表 5 中可以看出,0 <外形误差 < 0.3 mm,基本满足设计要求的 -0.6 mm <外形误差 < +0.4 mm,均满足设计要求。

4.4 无损检测

各部件和整个平尾经过超声波检测和 X 光检测,均满足设计要求。蜂窝夹层结构的胶接质量和层压板的制造质量均较好,无分层、脱粘、疏松、夹杂等缺陷。

4.5 静力试验

复合材料平尾经静力试验,在 135%设计载荷的加载条件下平尾正常破坏,标志着水平尾翼研制的圆满成功。

破坏形式为蜂窝夹层内部破坏,说明二次胶接质量良好,没有产生脱粘破坏;且破坏起始点在抽钉连接处和受力最大的部位开始破坏,属于正常破坏。

5 结论

(1)采用的热压罐成型工艺完全可行,预吸胶和预压实技术对厚零件的成功制造起到关键作用。

(2)采用合理的共固化技术成功将高强钢转轴

和复合材料梁连接,变形符合设计要求。

(3)使用框架式模具结构,针对“ 字型零件模具拐角处考虑 1°~2° 回弹角设计,其零件变形角度控制在技术要求范围以内,满足了水平尾翼的装配技术要求。

(4)高强钢的表面采用喷砂处理和平尾的预装配校验技术,保证了平尾的胶接质量。

参考文献

- 1 中国航空研究院编著. 复合材料结构设计手册. 北京:航空工业出版社, 2001
- 2 赵渠森主编. 先进复合材料手册. 北京:机械工业出版社, 2002
- 3 寇哲君,龙国荣等. 复合材料 U 型层合结构固化变形研究. 北京:航空制造技术, 2004
- 4 戴棣,乔新. 粘弹性基体复合材料层合板的固化残余应力和曲率变化. 复合材料学报, 2000; 17(3): 38~41
- 5 戴棣,乔新,刘善国. 单曲面复合材料层合构件的固化变形计算. 纤维复合材料, 1999; (5): 50~56

(编辑 任涛)