

# 复合材料产品结构、质量及成形工艺验证方法的探讨

## Verifying Methods of Composites Products Structure, Quality, and Molding Process

许漂 段淑银 温菡 李萌 / 昌河飞机工业集团有限责任公司

**摘要:**通过分析当前复合材料产品结构及质量稳定性验证方法的不足,提出了共固化、二次胶接复合材料制件的破坏性结构验证方法,对于考核验证复合材料产品结构、质量及成形工艺的稳定性和可靠性具有重要参考价值。

**关键词:** 复合材料; 产品结构验证; 质量考核

**Keywords:** composites; products structure verifying; quality assessing

### 0 引言

近年来,复合材料产品在航空领域的应用范围不断扩大,因民用航空器对安全性的要求很高,故复合材料产品质量的提高和控制也变得尤为重要。因此,对复合材料产品结构的完整性和产品质量进行综合考核验证,对于直升机复合材料的发展具有重要意义。特别是有必要对直升机中的一些关键的、复杂的结构进行结构验证,同时对其成形工艺的有效性进行考核验证。

我国直升机的研制及制造相比于国外起步较晚,在产品的结构验证方面缺少相关经验。当前,国内普遍应用的产品质量控制方法主要有超声波检测、尺寸检查等无损检测、阶段产品的随炉件考核和力学试验。但其两者都有一些不足,仅依靠无损检测不能预测产品结构的力学性能;而对于随炉件的考核方法,因随炉件在固化设备中的位置、铺层结构、成形工

装均与正式产品结构存在差异,用随炉件代表真实产品时缺乏一定的严谨性,以随炉件的力学试验结果考核产品结构形式的稳定性是不充分的。

本文在复合材料制件传统的质量检测方法基础上,提出了复合材料产品(包括共固化和二次胶接制件)的破坏性结构验证方法,对成形工艺和产品质量的稳定性进行综合评估和验证,对于更好地发挥材料性能、提高和保证复合材料产品的质量具有重要的意义和推广应用价值。

### 1 共固化制件的破坏性结构验证方法

美国FAA要求飞机结构中的关键复合材料部件必须进行破坏性试验,破坏性试验在产品上取样并实施试验,对产品质量和制造工艺进行考核和监控,依据部件的复杂程度和已有经验决定破坏性试验的频率。破坏性试验也适用于无损检测不能充分检测

的区域、对产品的结构形式或制造工艺的工作经验水平比较低的情况。该方法对国内机型复合材料零件的质量控制和产品结构验证具有较好的借鉴意义。

破坏性试验可通过以下几种方式实施。

- a. 固化后层压板的物理性能测试;
- b. 可通过显微照相等方式对关键区域、细节区域进行检验;
- c. 铺层数量、顺序和铺层位置的复核;
- d. 按部件的关键失效模式进行力学试验。

对高聚物而言,玻璃化温度是高聚物从玻璃态转变为高弹态的温度。玻璃化转变温度( $T_g$ )对于表征材料的耐热性能具有重要意义,是复合材料成形质量控制及工艺稳定性考核的一项重要手段。在玻璃化转变温度附近,热固性树脂的许多物理特性,如比热容、热膨胀系数、力学模量等都发生显著变化,所以可用多种热分析

技术测量玻璃化转变温度。

### 1) 试验方法的选择

差示扫描量热法(DSC)和动态热机械分析(DMA)是 $T_g$ 测试常用的两种方法。DSC是根据热效应,如比热容的变化进行测量;DMA则是用于测定材料与温度和频率有关的弹性行为,通过弹性模量等的变化进行检测。两种分析方法在测定 $T_g$ 时有不同的灵敏度。因发生玻璃化转变时比热容变化不及力学模量变化明显,因此DMA用于检测 $T_g$ 比DSC要灵敏1000倍。在某些时候,玻璃态和橡胶态的热容差别不大,或在基线不平的情况下,DSC曲线的台阶变化不明显, $T_g$ 便不能通过DSC检测出来(见表1)。

### 2) 复合材料固化参数对 $T_g$ 的影响

试验表明,玻璃转变温度与固化参数有直接关系,通过对 $T_g$ 测试结果的分析,继而对固化参数进行调整,就可以有效控制复合材料的固化质量。

图1和图2分别为某型机一复合材料零件在 $177 \pm 5^\circ\text{C}$ 下固化150min与固化

表1 DSC与DMA在测定玻璃化转变时的灵敏度

检测技术	物理性能	玻璃化转变时的变化
DSC	比热容	5%~30%
DMA	力学模量	1~3个数量级

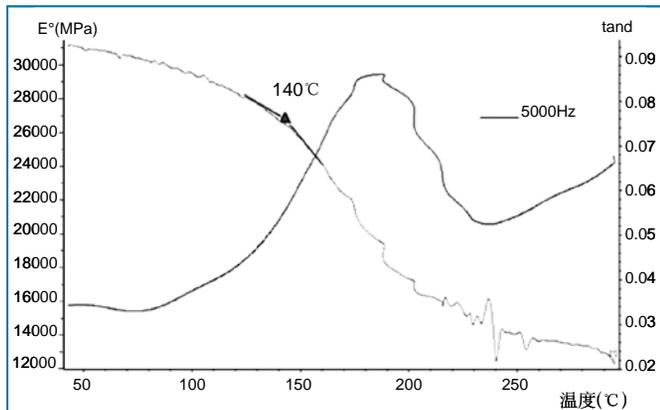


图1 在 $177 \pm 5^\circ\text{C}$ 下固化150min的 $T_g$

210min的 $T_g$ 测试结果比较,贮能模量变化台阶处的切线交点即为 $T_g$ 。一般情况下,要求复合材料固化后的 $T_g$ 要比固化温度高约 $10^\circ\text{C}$ 。由此可判断,固化时间150min条件下的 $T_g$ 不能满足要求,而需将固化时间延长至210min,方可保证制件成形固化质量。因此,该分析方法可有效地对复合材料成形工艺及制件质量的稳定性作出判断,具有很好的推广应用价值。

### 1.2 固化后制件的纤维体积分量的测量

对于固化后的层压板制件,纤维体积含量( $V_f$ )对其力学性能有重要的影响。因此,固化后制件的纤维体积含量及孔隙率的检测和控制尤为重要。

纤维体积分量的测量方法有GB3365以及ASTM D3171。相比于GB3365,ASTM D3171中的检测方法更为方便易行,该标准中的检测方法是采用物理或化学的方法将树脂基体去除,通过检测剩余增强体含量计算纤维的体积含量和气孔率。ASTM D3171中主要有树脂灼烧以及酸洗的方法去除树脂。经前期试验发现,高温下树脂灼烧的方法会造成纤维含量的损失,损失重量百分比约为2%,造成 $V_f$ 检测结果的误差;而酸洗的方法,特别是采用硝酸溶解树脂,则能精确地测算 $V_f$ (%)和Void(%),与国外相关检测

结果一致。其计算公式如下:

纤维体积含量:

$$V_f(\%) = (M_f/M_i) \times 100 \times \rho_c / \rho_f;$$

树脂体积含量:

$$V_r(\%) = (M_i - M_f) / M_i \times 100 \times \rho_c / \rho_r;$$

气孔体积百分比:

$$V_v(\%) = 100 - (V_f + V_r)$$

其中, $M_f$ 为纤维重量; $M_i$ 为试样初始重量; $\rho_c$ 为固化后试样密度; $\rho_f$ 为纤维密度; $\rho_r$ 为树脂密度

固化后层板的纤维体积含量主要取决于预浸料的树脂含量以及固化工艺过程和参数。因此, $V_f$ (%)的控制方法需着手于预浸料树脂含量以及固化时的升温速率、加压力、成形压力等工艺参数的控制和调整,也可采用吸胶的工艺方法提高固化后的 $V_f$ (%),最终得到满足性能要求的复合材料产品。

### 1.3 产品结构检查

#### 1) 关键细节区域的显微照相

产品进行破坏性试验时,切割分解后的试片除进行目视检查外,对成形及质量控制的关键细节区域进行微观结构检查也是一项重要的检查内容。例如,对复合材料制件成形时容易架桥的拐角区域、蜂窝结构向层压板结构过渡的区域等内部结构的缺陷(孔洞、分层等)检查,能够较为直观地将产品结构内部的缺陷反映出来。图3为某型直升

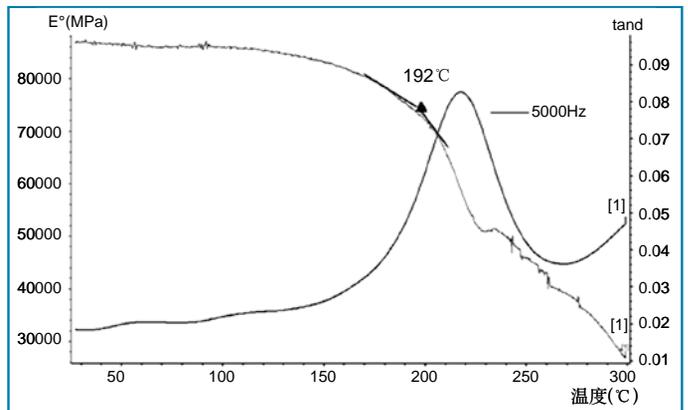


图2 在 $177 \pm 5^\circ\text{C}$ 下固化210min的 $T_g$

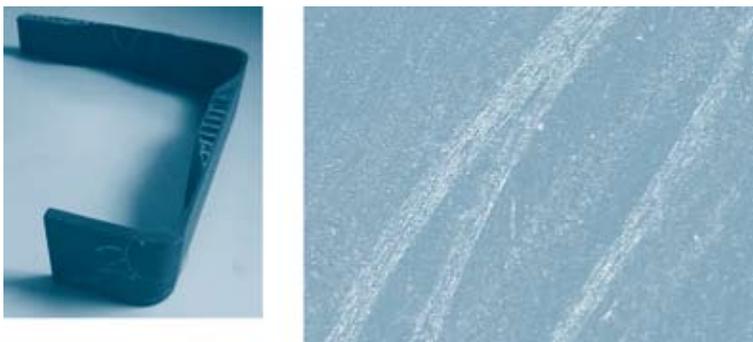


图3 关键结构区域显微照片示例

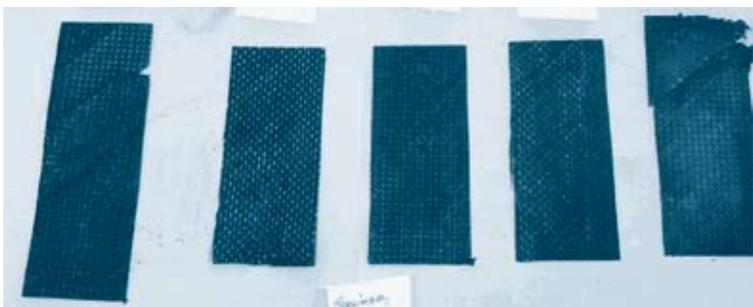


图4 铺层核查示意图

表2 力学试验项目表

类别	测试项目	测试标准	试样尺寸	测试数量
蜂窝夹层结构	平面拉伸强度	ASTM C 297	50 mm × 50 mm	3~6
	纵向弯曲强度	ASTM C 393	200mm × 75mm	3~6
层压结构	弯曲强度	ASTM D 790	76.2 mm × 12.7 mm	3~6
	层间剪切强度	ASTM D 2344	25.4mm × 6.35 mm	5~6

表3 考核方式分析比较

考核方式	结构形式的验证	工艺参数的考核验证	工艺、质量的稳定性验证
现有外形尺寸、无损检测及随炉件考核的方式	随炉试验件的有限性,不能验证真实产品的结构形式是否满足设计要求	无法判断复合材料的最优工艺性能达到与否,工艺参数的正确性难以保证	在验证工艺、质量的稳定性方面存在不足
产品周期性破坏试验考核的方式	通过产品试样的力学测试,可对产品结构的有效性作出明确判断	能够保证工艺参数的正确性,可使材料发挥其最佳工艺性能	通过一定频率的周期性考核的方式,可有效保证产品质量及工艺的稳定性

机承扭盒零件分解后一拐角区域的显微照片,可以看出,该区域未发现分层/孔洞及脱粘现象,层压质量良好。

#### 2) 铺层核查

为检查实际零件产品的铺层位置及铺层数、铺层方向是否符合

图纸和相关工艺文件要求,可以通过对固化后零件的指定区域进行铺层核查的方式。具体操作方法是:将指定区域的层合板试样在马弗炉中烘烤,温度控制在能使树脂燃烧的温度(如450℃)时,对燃烧后的碳布铺层逐层剥

离和核查。图4所示为某型直升机承扭盒零件固化后某区域灼烧并剥离后的铺层情况。

#### 1.4 力学性能测试

按照零部件的关键失效模式进行力学项目试验也是对产品结构稳定性和产品质量验证的一项有力措施。根据复合材料蜂窝夹层结构、层压结构的不同结构形式及受力、失效模式,确定相应的试验项目。常用的结构验证试验项目及推荐的测试标准见表2,测试需用的试样在复合材料产品上制取。

## 2 二次胶接结构的验证方法

### 2.1 板板胶接首件产品的破坏分解试验

为考核验证胶接结构的完整性,首件产品的破坏分解试验可以作为一项重要的验证手段。分解后的试段除了进行断面胶接质量的目视检查外,还可通过采取对产品剥离破坏的方式,分析判断胶接贴合面积,对胶接结构的有效性以及工装的适用性进行鉴定。西科斯基公司规定了符合要求的胶接效果为:对于非夹层结构,在胶接面区域的边缘3mm胶接范围以内,胶接面完全贴合的面积不少于95%;剩余内部胶接面完全贴合的面积应不少于80%。夹层结构的理想胶接贴合面积应为100%。

除了通过胶接表面贴合面积判断胶接效果外,波音的工艺文件还明确了采取检验膜试验结合产品破坏性试验的方法,通过核查检验膜的表面状态,结合对应产品结构区域的剥离分解试验,检查胶接区域的胶接质量,有效地促进和保证胶接结构的完整性。

### 2.2 预固化蜂窝夹层结构力学性能试验

对于预固化蜂窝夹层结构制件,除了进行破坏剥离试验验证胶接效果外,辅之以结构力学性能考核的方法,则更能对胶接结构的稳定性作出可靠性判断。参考国外相关文件规定,一般采取实施的力学试验项目为平面拉伸强度(ASTM C 297)、横向/纵向弯曲剪切强度(ASTM C 393)。

## 3 分析比较

相比于传统的无损检测、随炉件验证考核等质量控制方法,周期性破坏性试验的考核方式对

# 直升机旋翼双线摆式吸振器的关键技术

## Helicopter Rotor Bifilar Vibration Absorber Technology

赵军 黄文俊 黄珺 / 中航工业直升机所

**导读:**对直升机的振动水平控制方法进行了综述,着重讨论了旋翼双线摆式动力吸振器的应用情况。对双线摆式吸振器的基本原理进行了介绍,并对设计中的几个关键问题进行了分析。阐述了该类吸振器在直升机型号设计中的应用潜力和待解决的关键问题。

**关键词:** 直升机; 旋翼; 双线摆式吸振器

**Keywords:** helicopter; rotor; bifilar vibration absorber

### 0 引言

由于旋翼的周期性振动载荷,加上尾桨和其他一些高速旋转的动部件工作时产生的振动载荷,导致的振动问题给直升机的使用带来严重后果:降低机体与构件的疲劳寿命,有60%的破损全部或局部来自振动和冲击;影响机上系统与设备的功能和可靠性,增加维护费用;影响驾驶员和乘员的舒适性与任务工作效能;限制直升机前飞速度与机动性能。减振技术一直是直升机型号发展中要解决的一个重要问题,也是伴随直升机诞生而来的一个技术难点,直升机设计阶段必须尽最大努力控制和降低振动水平。

目前,直升机上广泛采用的是被动的吸振或隔振方式。被动式减振的主要优点是对原结构、产品不做任何修改,可以作为选装件。被动式动力吸振器包括旋翼动力吸振器和机身常规动力吸振器。过去人们曾尝试在机身多个位置分散布置吸振器,但后来证明这种方法不够有效。因为随着直升机越来越大,动力越来越来高,需要大量的吸振器,带来结构上的复杂化和质量上的增加,而且结构上改变带来的频率改变很难预测。旋翼动力吸振器作为一种较新颖的被动减振装置,对全机重心位置影响小,结构紧凑,易维护而且能有效地减小由旋翼产生的交变力与力矩引起的

机体振动等特点。采用旋翼动力吸振器后,可以考虑移除部分机身吸振器,能达到更好的减振效果。若旋翼动力吸振器的附加质量小于移除的部分机身吸振器质量,则直升机总体质量是降低的。

采用旋翼动力吸振器是降低直升机振动水平的有效途径。研究有效的减振措施与手段非常必要,对延长直升机使用寿命、提高军用直升机的战斗力和民用直升机的舒适性、安全性具有重要的意义与作用。

### 1 旋翼双线摆式吸振器技术特点和应用

旋翼动力吸振器主要包括桨根单

于验证产品结构形式是否满足设计要求、验证成形工艺参数的正确性以及考核成形工艺、质量的稳定性具有重要现实意义。具体分析比较见表3。

### 4 结论

产品周期性破坏试验的考核方式可对产品结构形式是否满足设计要求作出明确判断,且可保证成形工艺参数的正确性,发挥材料最佳工艺性能。应用周期性的产品破坏性试验,

能够真实的反映和判断产品的质量及工艺稳定性。

因此,直升机结构中复杂、关键的复合材料零部件,其结构、工艺的稳定性及成形质量的考核可在传统的无损检测、随炉件验证基础上,应用周期破坏性试验的方法,采取产品试样物理性能、力学性能检测、显微结构检查、胶接分解试验等方式,对产品结构、质量、成形工艺的稳定性和可靠性作出综合性判断,对于提高和

控制复合材料产品质量有重要意义。

AST

### 参考文献

[1] Riesen R. 热固性树脂[M]. 路立明,译.上海:东华大学出版社,2009.

### 作者简介

许谦,工程师,主要从事树脂基复合材料成形与制造研究工作。