

# 某大型复合材料结构胶接面次生缺陷解决过程分析

## Resolution of Secondary Defects in Adhesive Bonding Lay of Large Composites Structures

中航复合材料有限责任公司 万喜伟 王海青 徐洪波  
海军驻沈阳地区航空军事代表室 王 衡

**[摘要]** 热固性树脂基复合材料结构在热压罐成型过程中,经历高温加压固化成型及冷却,发生复杂的化学反应,且由于模具的约束作用加大了零件的固化变形,对零件精度和装配都会产生极为不利的影响,甚至产生次生缺陷。本文结合某大型复合材料机翼壁板生产过程质量统计数据,着重分析了壁板胶接面次生缺陷的解决过程。

**关键词:** 复合材料 残余应力 固化变形 次生缺陷

**[ABSTRACT]** During the autoclave molding processing, thermoset resin matrix composite materials structures experiences high-temperature, compression molding and cooling, and occurs a complex chemical reaction. Due to the constraint of the mold curing deformation, which have an extremely negative effect on part accuracy and assembly will even lead to secondary defects. With the statistical data of quality of wing panel production process of the large composite, this article analysis focused on the solving process of the secondary defects of the siding adhesive bonding lay.

**Keywords:** Composites Remnants stress Mold curing deformation Secondary defects

复合材料结构在经历高温固化成型及冷却过程后,由于材料的热胀冷缩效应,以及复合材料与成型所用模具材料的热膨胀系数上的显著差异,其在室温下的自由状态与预期的理想状态之间会产生一定程度的不一致,通常将这种不一致称为构件的固化变形<sup>[1]</sup>。复合材料结构的固化变形对零件外形精度和构件制件的连接匹配会产生极为不利的影响,严重的会产生次生缺陷,对飞机的安全性造成非常大的隐患。

### 1 壁板胶接面次生缺陷的分析

某壁板成型过程是先固化蒙皮,再胶接共固化长桁。工程化生产以来,经历多年的摸索,生产工艺与产品质量都很稳定。但在生产的某一个时期突然出现大

规模的脱粘缺陷,缺陷位置相似,均在长桁端头,针对这一情况我们对产品生产的整个过程进行跟踪,分析出缺陷产生的原因有两方面:外部原因和内部原因。

#### 1.1 外部原因

图1为壁板存储方式及壁板的位置,存放在内部的1#~6#壁板之前无损检测完好,无缺陷,存放时间较长,后经无损检测均有不同数量和程度的次生缺陷;7#~9#壁板为新入库壁板,无损检测无缺陷,经过复查也无次生缺陷。此前壁板库存较少,最多有2~3块叠放在托架上。

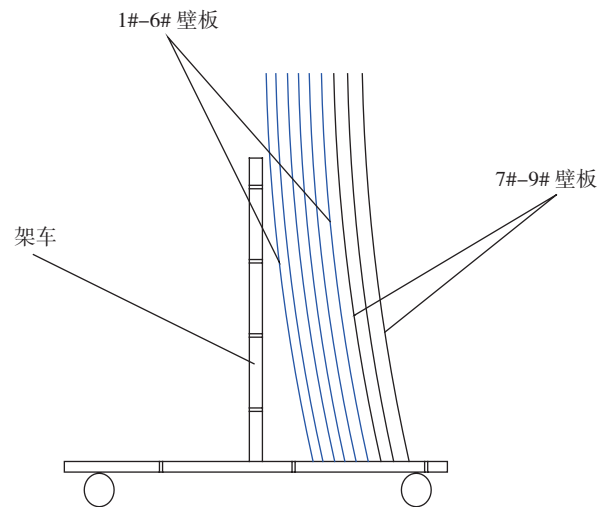


图1 壁板存放架车示意图  
Fig.1 Composites wing shelf

由上述判断,壁板胶接面的次生脱粘缺陷形成的外部原因,应是由于壁板存放方式不当,外力传递引起壁板形变,胶接面剥离形成脱粘缺陷。

通过分析影响壁板胶接面质量的外部因素,我们制定了改进方案及保护措施。

(1)改造转运架车:增大架车尺寸及架车上的支撑数量,保证壁板水平放置。

(2)控制零件存放方式:制造专用存放托架,将壁板水平放置。

(3)规范搬运操作:尽量减少零件翻转,必须翻转

时,严禁在蒙皮边角处施力。

改进后,壁板在某肋轴线两侧胶接面的次生缺陷明显减少,也不再集中产生,起到了明显效果。但是,壁板胶接面次生脱粘缺陷并没有完全解决,部分壁板还是有1~2个次生脱粘缺陷。

## 1.2 内部原因

预浸料在固化过程中由于材料的热胀冷缩效应、基体树脂的化学反应放热效应、树脂的化学收缩以及复合材料与成型所用模具材料在热膨胀系数上的显著差异等原因,在室温下的形状与预期的理想形状之间产生一定程度的不一致,通常将这种不一致状态称之为构件的固化变形。

因为复合材料构件的变形受铺层、结构、模具、成型过程、环境、温度等诸多因素影响,因此复材构件的变形分析非常复杂,通过对比分析带有次生缺陷壁板的成型过程,筛选去除成型过程中相同的条件和影响因素,将分析的重点放在复材与成型模具在材料上的差异以及模具表面情况的研究,即复材制件与模具之间脱模介质的研究。

变形因素示意函数为:

$$\delta = f(k, a, s, m, E, \theta, T, M, \dots),$$

式中,  $\delta$  代表固化变形,  $f$  表示某种特定的函数关系; 括号内符号为各影响因素,  $k$  为摩擦变形,  $a$  为脱模介质,  $s$  为尺寸大小,  $m$  为材料性能,  $E$  为结构,  $\theta$  为复材铺层结构,  $T$  为温场,  $M$  为模具特性等。

壁板整体化胶接结构是长桁对蒙皮刚性的加强和约束。次生脱粘缺陷集中发生在壁板的某肋轴线两侧,从壁板的实际结构来看,壁板的长桁胶接面在某肋轴线部分是断开的,分为某肋前和某肋后两部分,因此,壁板某肋处的强度约束弱于壁板其他位置的约束,某肋相邻两侧的长桁胶接面是应力集中区域。

### 1.2.1 蒙皮零件成型过程变形分析和模型

壁板整体化结构成型是先在金属模具上固化成型蒙皮,然后在成型后的蒙皮上胶接共固化长桁,采用的是真空袋热压罐成型法,所以固化变形最主要的成因之一就是成型工艺的热历程。

蒙皮固化成型的历程是,真空状态下在热压罐里加压 0.7MPa,升温至 185℃,保温 2h;再升温至 195℃,保温 4h 后降温。

复合材料蒙皮制件和金属模具都经历了一个热胀冷缩的过程。在升温过程中,金属模具(A3钢)和制件都会因为受热膨胀,因为材料的差异,金属模具的膨胀系数大于复材制件的膨胀系数,模具的膨胀量大于复材制件的膨胀量。

$$\Delta L = L \times \alpha (T - t),$$

式中,  $\Delta L$  表示膨胀量,  $L$  表示在温度  $t$  下的长度,  $t$  表示初始温度,  $T$  表示高点温度。

表1 复材层压板线膨胀系数

性能	层压板	典型值				
		温度 /℃	20~70	20~90	20~110	20~130
线膨胀系数 $\alpha / 10^{-6}$ $\cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	[0] <sub>16</sub>	0.28	0.27	0.25	0.25	0.19
	[90] <sub>16</sub>	29.9	31.3	32.6	36.4	40.3
	[±45] <sub>8</sub>	9.54	9.81	10.05	10.56	11.0

碳钢在 20~200℃ 的线膨胀系数  $\alpha$  范围为  $(12.1\sim 13.5) \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ,复材层压板线膨胀系数见表 1。

从蒙皮的固化工艺过程分析,制件自重及在外加气压为 0.7MPa 和真空压力为 -0.1MPa 的情况下,制件紧贴模具表面上(制件与模具表面近似接触),由于材料热胀冷缩,模具与制件之间产生摩擦力,因为金属模具的热胀冷缩变形量远大于复材制件,因此,成型过程中在摩擦力的作用下,模具影响制件的固化变形,尤其是制件与模具的接触面区域影响最大。

在升温过程中,金属模具膨胀变形大于复材制件的膨胀变形,起拉伸复材制件作用;在降温过程中,金属模具收缩变形大于复材制件的收缩变形,起收缩复材制件作用<sup>[2]</sup>。

如图 2 所示,在升温过程中,复材制件结构厚,结构内部的温度和固化度与表面相差较大,复材制件除了自身的热膨胀外,还受到模具膨胀变形拉伸复材制件形成的变形,即复材制件的膨胀变形是两种变形的叠加。

复材制件固化后,在降温过程中,制件本身收缩量已经不会太大,但还是受到模具收缩变形带给制件的摩擦,如图 3 所示。

复材制件在经历热胀冷缩的历程中,模具、蒙皮制件之间互相制约,如图 4 所示,固化后蒙皮内部积聚了

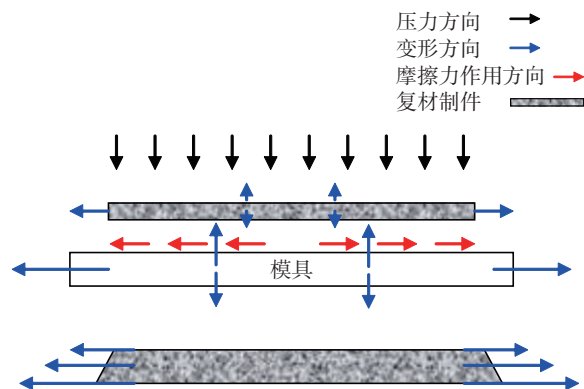


图2 膨胀变形示意图

Fig.2 Expanding distortion

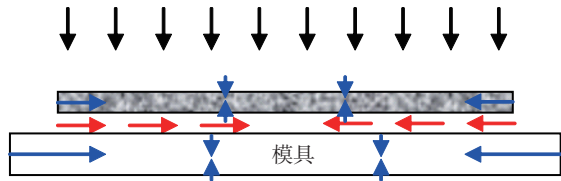


图3 收缩变形示意图  
Fig.3 Sketch map of shrinking distortion



图4 固化后蒙皮变形示意图  
Fig.4 Curing deformation of the skin

复杂的残余应力和变形,出罐脱模后蒙皮零件的型面与理想状态存有差异。具体表现为:蒙皮零件周边贴模间隙几乎为0,蒙皮中间部分贴模间隙约为0~1mm。

### 1.2.2 壁板胶接成型过程变形分析和模型

壁板胶接固化成型的历程为:真空状态下在热压罐里加压0.6MPa,升温至185℃,保温2.5h后降温。

壁板胶接成型经历的热历程与蒙皮零件的热历程相近,其工艺组合在热胀冷缩过程中的变形分析与蒙皮零件的固化变形一致。此处复合材料长桁制件在热历程分析中只考虑长度方向,横向和垂直方向不作分析。壁板自重及在外加压力下,壁板紧贴在模具表面上(制件与模具表面近似接触),蒙皮制件已经固化成型,升温过程中,金属模具膨胀变形,在摩擦力的作用下拉伸蒙皮制件,降温过程中,金属模具收缩变形,收缩蒙皮制件。

壁板胶接面摩擦力远小于金属模具与蒙皮制件的摩擦力,且蒙皮制件尺寸大于长桁制件尺寸,因此在热胀冷缩过程中,蒙皮制件自身的变形量大于长桁制件的变形量: $\Delta L_{蒙皮} > \Delta L_{长桁}$ 。

复合材料胶接制件在经历热胀冷缩历程中,模具、蒙皮、长桁制件之间互相制约,固化后内部积聚了复杂的残余应力和变形,出罐脱模后壁板零件的型面与理想状态存有差异,如图5所示。表现为,壁板零件周边贴模间隙几乎为0,壁板中部某肋和纵轴线交叉中心贴模间隙约为0~2mm。

通过分析壁板的两个成型过程,我们发现大型复合材料壁板胶接固化成型后会有个较明显的固化变形,并且这个变形会随着时间的推移呈增大趋势,如图6所示。因材料、结构、铺层等差异,模具和蒙皮、长桁的变形量不一致,壁板成型后内部积聚复杂应力,应力首先从壁板的长桁端头位置释放。因为复合材料壁板尺寸大,壁板结构在某肋轴线处长桁一齐断开,壁板在内应力和外力作用下导致长桁端头胶接面剥离形成次生脱

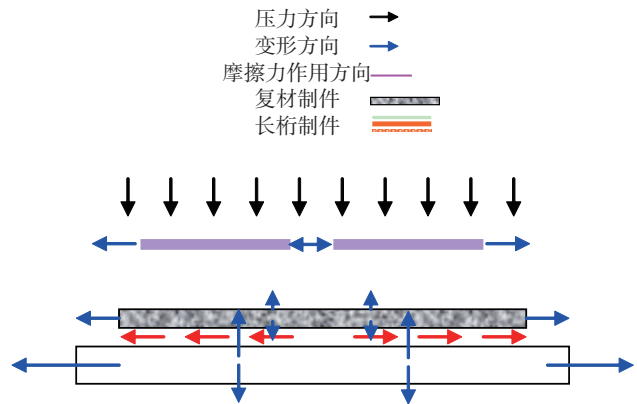


图5 胶接工艺组合膨胀变形示意图  
Fig.5 Expanding distortion of the adhesive bonding structure

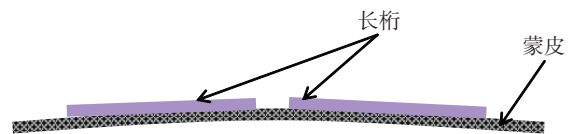


图6 固化后壁板胶接件变形趋向示意图  
Fig.6 Curing deformation of the adhesive structure

粘缺陷。

### 1.2.3 模具表面状态模型分析

影响复合材料构件固化残余应力和变形的因素很多,摩擦力和摩擦变形仅是诸多影响因素之一。固化工艺过程中由于热压罐内气体压力的作用使复合材料构件紧贴在模具表面上,模具表面情况及脱模介质将会直接影响到模具与复合材料之间的相互作用程度。使用两种脱模材料对模具表面进行不同处理,脱模材料a和脱模材料b都会影响构件固化变形。而对两种处理方法的影响效果还没有一致公认的结果,本文仅是对该型复合材料壁板胶接构件的影响进行分析。

在现有条件下,分析两种脱模介质的状态模型,可以有助于选取适当的脱模材料,改善模具表面状态,降低摩擦力、减小摩擦变形对复合材料构件固化变形的部分影响。

图7为在同一模具表面条件下,脱模材料a和脱模材料b的过程模型。图7(a)中,脱模介质很薄,可以将其与模具表面视为一体,复材制件直接与模具表面接触;图7(b)中的脱模介质表面摩擦系数极低,贴在金属模具表面,相当于形成一个光滑平整的模面,下表面是胶黏,材料本身具有延展性。因此,与材料a相比,材料b一定程度上起到了降低复材制件与金属模具表面摩擦变形的作用。

在试用了脱模介质b后,该复合材料壁板在某肋处

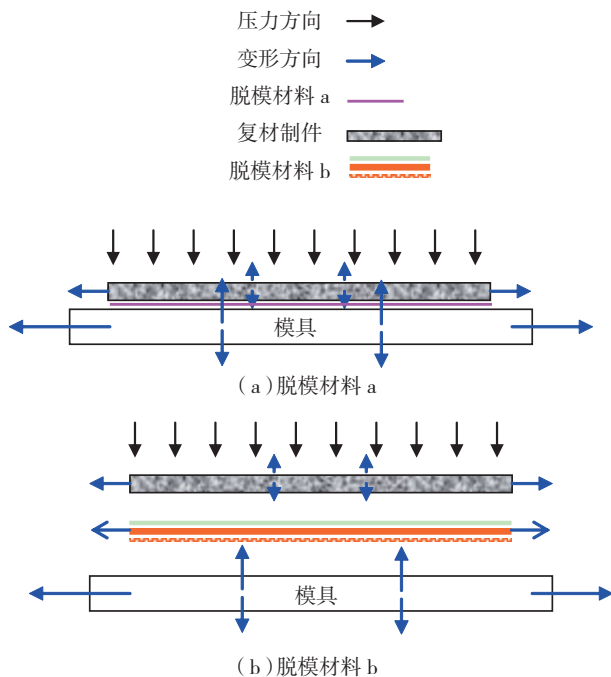


图7 不同脱模介质示意图

Fig.7 Compare of different molting medium

次生缺陷再无发生,脱模介质的选择对抑制次生缺陷的产生起到了关键的作用。

## 2 结论

通过控制壁板的存储、转运、翻转方式,以及更改了脱模介质(将脱模介质 a 更换为脱模介质 b),杜绝了胶接面次生缺陷的产生。后续生产的复合材料壁板未发现胶接面次生缺陷,提高了生产效率和产品合格率,缩短了生产周期,保证了产品的交付进度。同时提出以下建议:

(1)大型复合材料构件高温下成型,要根据其结构特点和模具状况等多方面因素考虑,合理选择脱模介质;

(2)对于大型复合材料构件的转运和存放,需要匹配满足构件刚度和提供足够保护措施的工装器械;

(3)将影响大型复合材料构件的缺陷因素和成型经验,及时与我所相关技术人员分享和交流,并选择性的反馈给复材构件设计科研院所。

## 参考文献

- [1] 寇哲君,戴棣,曹正华. 复合材料结构固化变形预测. 材料工程,2007(21): 225-228.
- [2] 岳广全,张博明,杜善义,等. 模具对热固性树脂基复合材料固化变形的影响. 玻璃钢/复合材料,2010(5): 62-65.

(责编 深蓝)

(上接第 95 页)

通过选择合适的刀具及材料,制定合理的切削要素和切削用量,开展 Invar 钢焊件粗加工、半精加工以及精加工等研究。

## 3.3 Invar 钢热处理工艺

Invar 钢材料在机加工前,必须进行退火处理以调整材料内部结构。同时,机加工会给材料施加内应力,这些内应力通常是不均匀分布的。为了获取稳定、准确的尺寸,必须进行去应力退火,因此需要在不同阶段对 Invar 钢进行相应的热处理,如 Invar 钢材料在大面积成型或焊接后进行完全退火(推荐 1h850℃空冷或炉冷);在粗精加工之间或者小的焊接修补后进行去应力退火(推荐 2h315℃空冷或炉冷)<sup>[2]</sup>,具体的热处理温度需根据结构尺寸进行具体分析。

## 4 结束语

对于复合材料 Invar 钢模具制造工艺——焊接、机加、热处理等工艺分析,总结如下:

(1)由于 Invar 钢的热膨胀系数与复合材料相近,采用 Invar 钢作为复合材料制件的成型模具可很好地解决复合材料零件在高温真空成型后回复到常温自然条件过程中产生不可控制的变形问题;

(2)对于大型复合材料 Invar 钢模具,由于原材料加工最大尺寸以及成型设备加工能力限制,势必采用焊接工艺将不同的板料进行连接,因此 Invar 钢的焊接工艺研究显得极为重要。Invar 钢焊接一般选用气体保护焊工艺进行焊接,焊接过程中建议采用小电流方式进行焊接;

(3)对于 Invar 钢的机械加工工艺,建议 Invar 钢加工过程中选择大前角、大后角、大螺旋角刀具。因 Invar 钢材料与一般的碳钢相比硬度要高,故机械加工过程中采用相对碳钢高的转速,低的切削进给量进行加工。

## 参考文献

- [1] 刘君伍,黄建云. 新型复合材料夹层结构及接头在机身结构中的应用前景. 复合材料制造,2008(25):129-130.
- [2] ArcelorMitta 公司. INVAR<sup>®</sup> 钢模具用于复合材料零件生产,2009.
- [3] 杨博,李宏,曹正华. 殷钢在复合材料成形模具中的应用. 玻璃钢和复合材料,2010(6): 68-69.
- [4] 刘招娣. 大型薄壁 Invar 钢复合材料模具制造技术. 电加工与模具,2009(1): 47-50.
- [5] 何晓蓉,高建军. 精密殷钢模具加工工艺. 辽宁: 模具工业,2002(5): 56-58.
- [6] 《焊接工艺操作技巧丛书》编委会. 氩弧焊工艺与操作技巧. 辽宁: 辽宁科学技术出版社,2010: 193-197.

(责编 亿霖)