

共固化成型蜂窝夹层结构缺陷分析及工艺改进

Study on Process Improvement and Production Defects of Co-Cured Sandwich Composite Structure

中航复合材料有限责任公司 毕红艳 段友社
中航工业北京航空制造工程研究所 谢凯文

[摘要] 通过采用不同的共固化胶接成型工艺成形蜂窝夹层结构,并利用超声及金相方法对不同工艺的蜂窝夹层结构蒙皮缺陷进行分析,分析了不同工艺的内部质量及缺陷产生的原因,最终提出有效的工艺改进方法。

关键词: 复合材料 蜂窝夹芯结构 共固化成型 内部缺陷

[ABSTRACT] The honeycomb sandwich parts by different co-cure process are introduced in this paper. The test for the inner defects using ultrasonic pulsed reflection and metallographic examination is described in detail. The inside quality and inner defects of different co-cure process are judged and analyzed. This paper aims at offering the proper technology to solve the problems in key points of the co-cure technique and machining process.

Keywords: Composites Honeycomb sandwich structure Co-cure process Inner defects

目前蜂窝夹芯^[1]复合材料的成型工艺较为普遍的主要有胶接成型^[2]和共固化成型^[3-4]2种。胶接成型是先固化上下蒙皮,再用胶黏剂将上下蒙皮和蜂窝芯胶接成为一体。共固化和胶接不同之处在于上下蒙皮铺叠完成后不进行固化,而是组合成夹芯结构后同时固化。相对于胶接成型,共固化成型工艺步骤简单,工序少,生产效率高,生产成本低。

复合材料蜂窝夹层结构共固化成型工艺采用高性能的碳纤维预浸料作为蒙皮与 Nomex 蜂窝芯组成夹层结构,蒙皮与蜂窝芯在热压罐中一次共固化成型。共固化成型工艺制造成本低,适合制造型面复杂的结构,现在这种成型工艺越来越受到重视。固化成型后的蜂窝夹层结构不能直接观测其内部质量,而在一次共固化成型制造过程中蒙皮还易产生各种内部质量缺陷^[5],这些缺陷将直接影响结构件的工作性能,危及整体结构的安全,因此分析缺陷的类型及造成缺陷原因是十分重要的。根据造成缺陷的原因,对工艺进行改进。

1 材料及设备

CF3031/BA9916-II 织物预浸料: 含胶量为 $38 \pm 3\%$, 单层厚度为 $0.23 \pm 0.02\text{mm}$, 树脂体系为高温固化环氧树脂, 中航工业复合材料有限责任公司; CCF300/BA9916-II 预浸料: 含胶量为 $34 \pm 2\%$, 单层厚度为 $0.125 \pm 0.01\text{mm}$, 树脂体系为高温固化环氧树脂, 中航工业复合材料有限责任公司; Nomex 蜂窝: 规格 NRH-2-48, 高度 10mm, 平压强度 $\geq 1.48\text{MPa}$, 纵向剪切 $\geq 0.89\text{MPa}$, 剪切模量 37.8 MPa, 横向剪切 $\geq 0.53\text{MPa}$, 剪切模量 22.8 MPa; 中航工业复合材料有限责任公司; J116A 胶膜: 厚度 0.35~0.40mm, 面密度 $(420 \pm 30)\text{g/m}^2$,

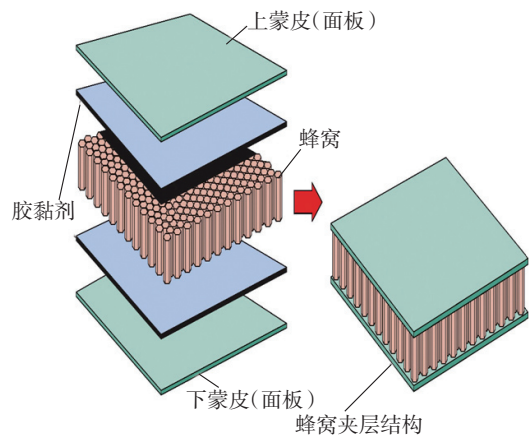


图1 蜂窝夹层结构示意图

Fig.1 Honeycomb sandwich structure

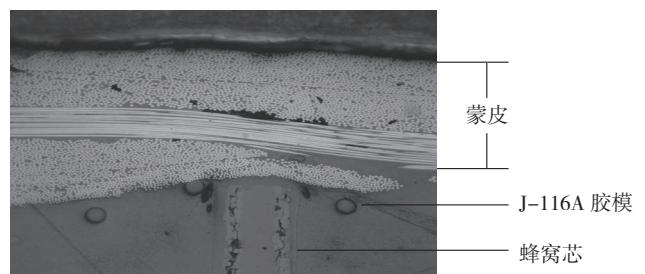


图2 共固化蜂窝夹层结构金相图

Fig.2 Metallographic atlas of honeycomb sandwich structure

针织尼龙纱网载体膜状,常温(23℃)板-板剥离强度 $\geq 7.5\text{KN/m}$,剪切强度 $\geq 35\text{MPa}$,黑龙江石化所。

热压罐:型号 XLG-1*2.3,最大压力为 1.0 MPa,北京燕山石油化工有限公司机械厂;烘箱:型号 GW-16m³,无锡市南亚试验设备有限公司;复合材料超声检测仪:型号 S316013。

2 样件制作

蜂窝夹层零件如图 1 所示,主要有下蒙皮、胶黏剂(胶膜)^[6]、蜂窝芯、胶黏剂、上蒙皮组成。

上下蒙皮的铺层为 $[\pm 45/0/\pm 45]$,其中 $[\pm 45]$ 为 CF3031/BA9916-II 织物预浸料,[0]为 CCF300/BA9916-II 预浸料。

零件按图 1 所示的结构形式进行蒙皮铺叠,铺放胶膜、蜂窝芯组合,然后在热压罐中固化,固化工艺为:温度 $180\pm 5^\circ\text{C}$ 、时间 2~3.5h、固化压力为 0.3~0.5MPa,升温速率 $\leq 2^\circ/\text{min}$ 。

3 共固化蜂窝夹层结构主要的缺陷

与胶接成型夹层结构相似,碳纤维复合材料共固化蜂窝夹层结构常见的缺陷有:

(1) 复合材料蒙皮的缺陷,例如孔隙、夹杂、分层等(如图 3(a)所示);

(2) 复合材料蒙皮和蜂窝的粘结缺陷,主要是脱粘;

(3) 蜂窝芯的损坏。与胶接成型不同的缺陷主要是蒙皮的缺陷,包括蒙皮表面贫胶(如图 3(b)所示)、内部孔隙密集(如图 3(c)所示)等。图 2 是共固化蜂窝夹层结构金相图,图 3 是蒙皮上典型的缺陷金相图。

共固化蜂窝夹层结构的缺陷可采用超声^[7-9]、射线、声阻、红外等方法进行检测。蒙皮的内部质量可使用超声反射法、红外检测进行评估,胶接面质量可采用超声穿透法、声阻、红外其进行检测,蜂窝芯内部质量可采用射线进行评估。

4 缺陷产生原因分析及解决的措施

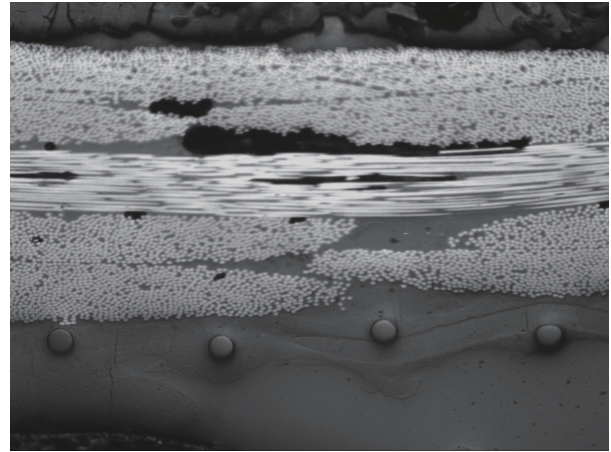
4.1 预浸料对共固化夹芯结构质量影响

相对于胶接成型蜂窝夹芯结构,共固化成型夹芯结构对预浸料的含胶量、树脂流动性^[10-12]等要求更为严格,采用和胶接成型同样的预浸料进行夹芯共固化试验,结果是上下面板出现大量树脂不能完全填充的空腔,树脂未能完全包覆纤维,如图 4 和图 5 所示。

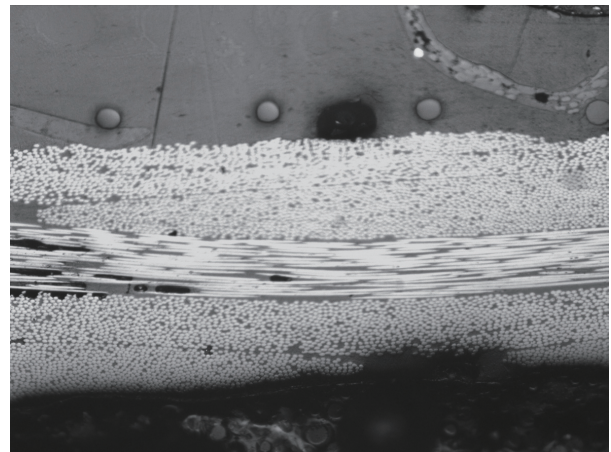
CF3031/BA9916-II 织物预浸料标准含胶量为 $38\%\pm 2\%$,在预浸料生产过程中,不可避免出现 36%左右的低含胶量预浸料,低的树脂含量和较高的树脂粘度,影响共固化成型工艺面板的成型质量。根据试

验结果,对预浸料含胶量进行精确控制,使其控制在 39%~40% 之间,并降低树脂粘度,试验结果夹芯上下面板未现空腔等缺陷,见图 6 所示。

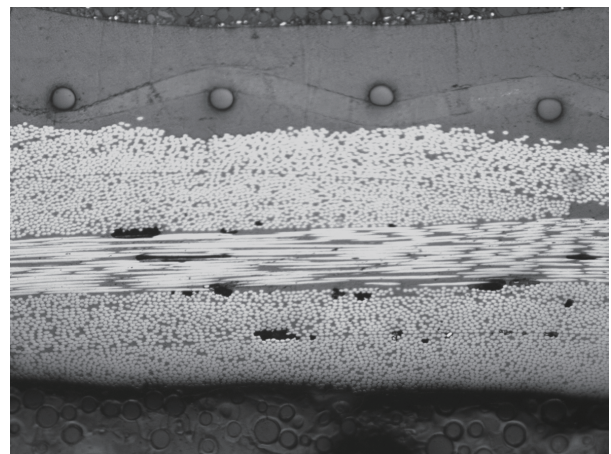
4.2 上下蒙皮内部质量的控制措施



(a) 分层



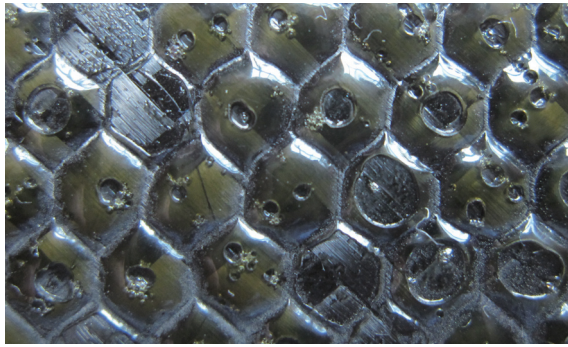
(b) 表面贫胶



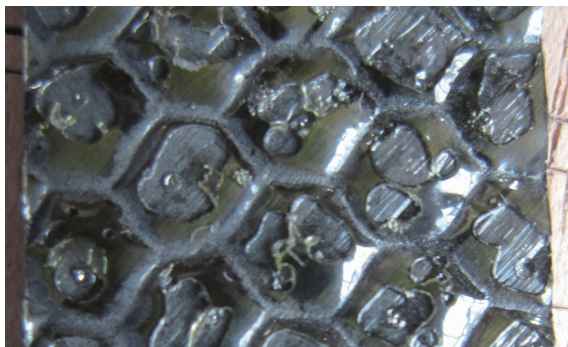
(c) 孔隙密集

图3 主要内部缺陷金相图

Fig.3 Metallographic atlas of main defects



(a)上面板



(b)下面板

图4 低含量高粘度预浸料成型夹芯上下面板

Fig.4 Face quality of both top and bottom sandwich panels with low resin content high viscosity prepreg

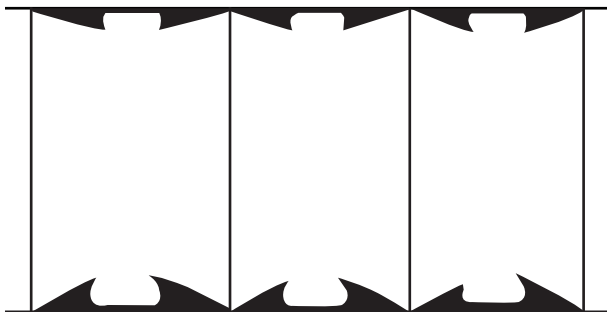


图5 上下面板空腔示意图

Fig.5 Sketch of cavum on both top and bottom panels

采用共固化成型蜂窝夹层结构,蒙皮的内部质量相对难以控制。在共固化成型过程中,高压会导致蜂窝压塌及变形,因此无法使用高压,同时,蜂窝芯的结构导致加压过程中蒙皮压力不均匀及加压困难,上述原因导致共固化胶接过程中蒙皮中的气不易排出淤在蒙皮中,从而形成孔洞、孔隙密集或分层等缺陷。成形过程中加压是通过软膜面加压,对于贴硬膜面蒙皮,由于中间通过蜂窝芯传导压力,其相对贴软膜面蒙皮加压困难,更容易出现内部缺陷,通过超声反射法检测及金相也证实贴硬膜面蒙皮内部有大量孔洞。图7(a)是蒙皮未经预先处理的共固化胶接蒙皮金相结果,从图中可知,其内部

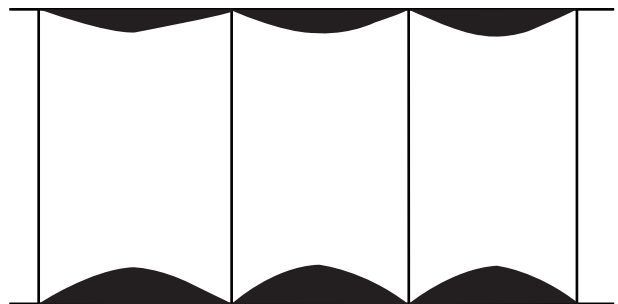


图6 改进后的夹芯面板及示意图

Fig.6 Sandwich panels with improved prepreg

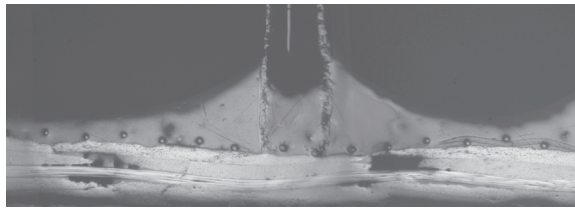
有大量孔洞。因此,针对解决蒙皮内部气体无法排除造成孔隙密集等缺陷问题,提出对上下蒙皮进行预先处理。预先处理措施为在上下蒙皮铺叠过程中抽真空将内部气体排除,在必要时可施加压力和一定的温度预先对上下蒙皮进行处理,预先处理后上下蒙皮质量得到很好的改善。图7(b)是通过预先处理蒙皮金相结果,从图中可知,其内部质量改善明显改善。

4.3 蜂窝芯的缺陷及质量控制

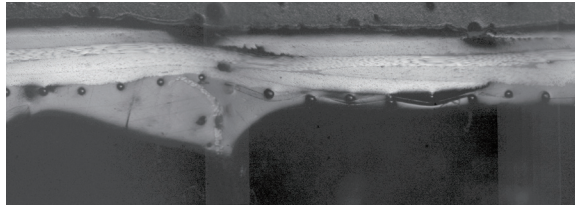
本实验采用的 Nomex 蜂窝是规格为 NRH-2-48,高度为 20 mm 的蜂窝芯,由于蜂窝密度较低,高度较高,蜂窝芯材在受压时易失稳因此在固化时蜂窝芯的抗压能力较弱。蜂窝夹芯复合材料固化时主要的形变方式是蜂窝芯受热受压引起的收缩变形,可能导致胶接过程中蜂窝芯局部位置滑移,产生形变。因此,有必要对工艺进行改进,避免形变的发生。蜂窝在收到压力和热的影响下,会产生收缩变化^[13]。

对蜂窝芯进行了收缩率试验,结果见表 1。

从表 1 中可以看到温度和压力对蜂窝压缩率的影响非常大,随着温度和压力的升高压缩量越来越大。蜂窝芯所采用的树脂体系是酚醛树脂,蜂窝芯材固化过程中固化程度不高或者在空气中吸湿都有可能对蜂窝性能有所下降,将蜂窝进行一次热处理后再进行收缩率试验,发现收缩变形有所缓解,收缩率降低了 40% 左右。为了加强蜂窝芯的抗形变能力,在做试验前对蜂窝芯进

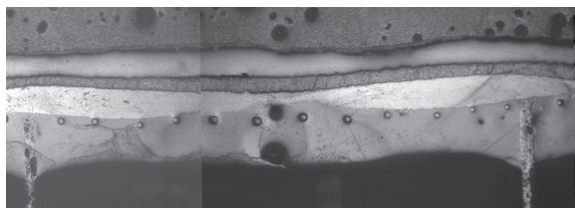


硬膜面

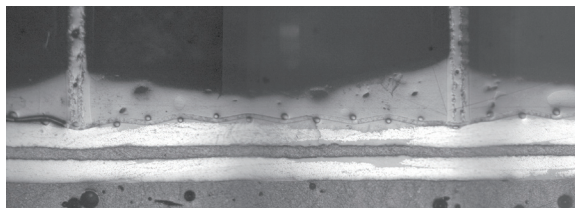


软膜面

(a) 预先未处理的蒙皮金相照片



软膜面



硬膜面

(b) 预先处理后的蒙皮金相照片

图7 蒙皮金相照片

Fig.7 Metallographic atlas of both top and bottom panels

表1 蜂窝芯收缩率试验

序号	温度 /℃	压力 /MPa	压缩量 /%
1	常温	0.6	0.25
2	180	0.6	3.95
3	180	0.5	2.88
4	180	0.45	2.8
5	180	0.3	1.9
6	180	0.2	1.5
7	180	0	0.43

表2 不同的容重对蜂窝压缩量的影响

序号	容重 / (g·cm ⁻³)	压缩量 /%
1	48	2.88
2	52	2.8
3	62	1.8
4	68	1.7
5	82	0.98

行高温处理,提高蜂窝芯树脂的固化程度并对蜂窝芯进行除湿,增加承压能力,从而减少了蜂窝芯胶接过程中的收缩变形。

对不同容重的蜂窝也作了压缩量测试,温度为180℃,压力为0.5MPa,得到的蜂窝的压缩量如表2所示。在实际的操作过程中,可以根据不同的设计和工艺选择不同容重的蜂窝。

5 结束语

本文针对共固化成型蜂窝夹层结构缺陷的产生进行了分析,并通过一系列的工艺试验,研究出缺陷产生的原因及控制方法:(1)选用的预浸料要具有较高的含胶量和较低的树脂粘度,保证比较好的流动性;(2)在共固化成型前对共固化成型蒙皮进行预处理,得到比较好的内部质量;(3)选用容重比较高的蜂窝芯和较低的成型压力,能够得到质量比较好的蜂窝芯。

参 考 文 献

- [1] 张广平. 复合材料夹心板及其应用. 纤维复合材料, 2000(2): 26-29.
- [2] 邹国发, 万建平, 王再玉, 等. 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. 宇航材料工艺, 2007, 3:32-34.
- [3] 原崇新, 李敏, 顾轶卓, 等. 蜂窝夹层结构真空袋共固化工艺过程实验研究. 复合材料学报, 2008, 25(2):57-62.
- [4] 毕红艳, 段友社, 陈永清, 等. 复合材料蜂窝夹层结构的共固化成型工艺研究. 第17届全国复合材料学术会议论文, 2012:670-674.
- [5] 章令辉. 蜂窝夹层结构常见制造缺陷分析. 航天返回与遥感, 2006, 27(1):57-61.
- [6] 梁滨. 蜂窝夹层结构面板胶粘剂的研究. 中国胶粘剂, 2000(5):11-13.
- [7] 唐桂云, 王云飞, 王宝瑞. 碳纤维复合材料蜂窝夹层结构的无损检测方法研究. 纤维复合材料, 2011(3):30-32.
- [8] 冯占英, 周正干. 蜂窝结构的超声和声无损检测技术. 无损探伤, 2007, 31(6):1-4.
- [9] 唐桂云, 王云飞, 吴东辉, 等. 先进复合材料的无损检测. 纤维复合材料, 2006, 23(1):33-36.
- [10] 赵卫娟, 张佐光, 王景明. 树脂流动对气泡运动特性的影响. 复合材料学报, 2006, 23(2):25-29.
- [11] Grove S M, Popham E, Miles M E. An investigation of the skin/core bond in honeycomb sandwich structures using statistical experimentation techniques. Composites Part A, 2006, 37(5):804-812.
- [12] Vadakke V, Carlsson L A. Experimental investigation of compression failure of sandwich specimens with face/core debond. Composites Part B, 2004, 35(6/8):583-590.
- [13] 程鹏飞, 石少卿, 郭剑峰. 垂直压力作用下蜂窝夹层结构承载力的研究. 四川建筑, 2007, 27(5):140-142.

(责编 杰一)