

蜂窝夹层结构复合材料胶接共固化 工艺技术研究

Study On Co-Bonding Process of Honeycomb Sandwich Composite Structure

中航复合材料有限责任公司 梁春生 邱启艳 陈静
中国人民解放军驻沈飞公司军事代表室 陈海峰

[摘要] 针对蜂窝夹层结构的胶接共固化工艺,以 T300/BA9913 复合材料为面板,以 Nomex 蜂窝芯为夹层材料,采用热压罐法研究了不同规格的蜂窝夹芯对外观和面板内部缺陷的影响,有利于扩大采用胶接共固化工艺的蜂窝夹层结构复合材料壁板在航空产品中的应用。

关键词: 蜂窝夹层结构 复合材料 胶接共固化

[ABSTRACT] By using T300/BA9913 composites as panel and Nomex honeycomb as core, the effects of different specifications of honeycomb on the appearance and panel quality in the honeycomb sandwich structure are investigated with the auto clave co-bonding process. It helps expand the application of honeycomb composite structure panel with the co-bonding process in aerial products.

Keywords: Honeycomb sandwich structure Composites Co-bonding

蜂窝夹层结构复合材料是目前所知的最节省材料、具有最大的强度重量比的一种结构性材料。与实心材料相比,蜂窝夹层结构复合材料使用的有效材料仅为被替代材料的 1%~5%,它显然是一种用料省、耗能小的极具潜力的轻质材料。蜂窝结构板材具有许多优越的性能^[1]:从力学角度分析,封闭的六角等边蜂窝结构相比其他结构,能以最少的材料获得最大的受力。蜂窝夹层结构板承受垂直于板面的载荷时,它的弯曲刚度与同材料、同厚度的实心板相差无几,甚至更高,但其重量却减轻 70%~90%。在诸多的应用中,蜂窝复合板材几乎可以完全替代各类实心板材的使用,能降低原材料的使用量,达到高效、节能的目的。以梁板构件为例,用单一的玻璃钢材料制造梁板,满足强度要求时,挠度往往很大;如果按允许挠度进行设计,则强度又大大超过要求,造成浪费。只有采用夹层结构形式进行设计,才能合理地解决这一矛盾,这也是夹层结构得以发展的主要原因。

蜂窝夹层结构通常是由比较薄的面板与比较厚的芯子胶接而成^[2]。一般面板采用强度和刚度比较高的

材料,芯子采用密度比较小的材料,如蜂窝芯、泡沫芯、波纹板芯等。夹层结构具有重量轻、弯曲刚度及强度大、抗失稳能力强、耐疲劳、吸音、隔热等优点,因此在飞行器结构上得到了广泛应用。对结构高度大的翼面结构,如蒙皮壁板(尤其是上翼面壁板),采用蜂窝夹层结构取代加筋板,能明显减轻重量;对于结构高度小的翼面结构,如操纵面,采用全高度夹层结构代替梁肋式结构,能带来明显的减重效果。以复合材料层合板为面板的夹层结构,由于材料的相容性,目前普遍采用 Nomex 蜂窝芯子。

胶粘剂将面板和芯子胶接成整体,传递面板和芯子之间的载荷;芯子支持面板承受垂直于面板的压缩应力,并能防止面板发展轴压引起的屈曲,此时芯子承受压缩和剪切载荷。

蜂窝夹层结构的主要特点如下:

- (1) 具有大的弯曲刚度 / 重量比, 弯曲强度 / 重量比;
- (2) 具有良好的吸声、隔声、隔热性能;
- (3) 具有大的屈曲临界载荷;
- (4) 对湿热环境敏感, 设计时要防潮密封;
- (5) 面板对低能冲击敏感;
- (6) 修补困难。

蜂窝夹层结构具有比强度和比刚度高的优点,可以充分发挥材料的抗弯强度和抗弯刚度(如表 1),比传统结构减重 10%~33%。

蜂窝夹层复合材料的成型方式主要有 3 种,如表 2

表1 蜂窝夹层结构比强度及比刚度的效能

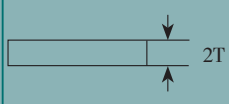
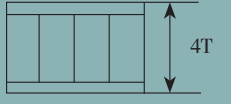
项目		
相对弯曲刚度	1	37
相对挠度	1	0.027
相对弯曲强度	1	7
密度 /psf	0.91	0.994

表2 常用蜂窝夹层结构复合材料成型方式比较

成型方法	工艺程序	特点	适用范围
共固化 (一次成型)	上下蒙皮、蜂窝芯和胶膜按顺序组合在一起,蒙皮的固化和面板与蜂窝芯的胶接固化一次成型	芯子与面板粘接强度高; 制造周期短,制造成本低; 受蜂窝芯抗压强度限制,成型的蒙皮力学性能偏低; 单个零件超差将引起整体零件报废; 胶接定位难度大	平板及型面简单的制件
分步固化 (二次成型)	上下蒙皮预先固化成型,再与蜂窝芯、胶膜、发泡胶等材料组合胶接固化	预先固化了的蒙皮无蜂窝压痕,表面质量好; 制造周期较长,制造成本较高; 蒙皮内部质量好,不会因蒙皮内部质量影响最终制件的性能; 蜂窝芯材、梁肋与蒙皮胶接面需精确配合,控制难度较大	上下蒙皮质量要求高,固化工艺与最终胶接工艺相差较大的制件
分步固化 (三次成型)	一面蒙皮先固化成型,其上铺贴胶膜和蜂窝芯后胶接成型,再与另一蒙皮组合后,进行第三次固化成型	每次成型后可进行质量检查,有问题可及时处理; 固化次数过多,制造周期长,制造成本高	形状复杂的制件

表3 NRH-3-32 (0.05) 和NRH-2-48 (0.05) 的力学性能对比

规格代号	平面压缩性能			纵向剪切性能			横向剪切性能		
	强度 /MPa		模量 /MPa	强度 /MPa		模量 /MPa	强度 /MPa		模量 /MPa
	平均	最小	平均	平均	最小	平均	平均	最小	平均
NRH-2-48(0.05)	1.63	1.48	133.7	1.16	0.89	47.2	0.67	0.53	28.5
NRH-3-32(0.05)	0.85	0.57	77.6	0.74	0.51	34.7	0.40	0.27	17.2

所示^[3]。

1 蜂窝夹层试验件

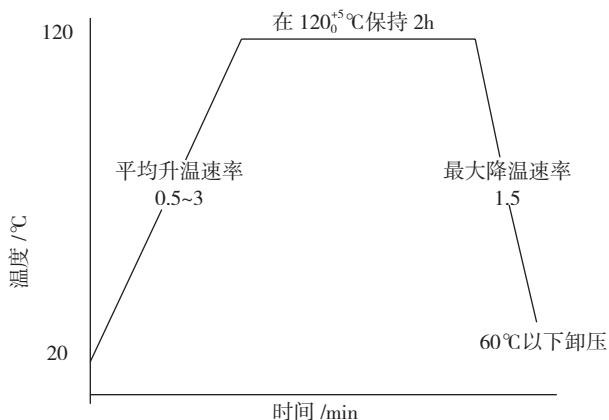
依据任务需求, T300/BA9913 预浸料用热溶法(干法)制备,将蜂窝芯机加至试验件所需尺寸,复合材料蜂窝夹芯试验件的工艺采用胶接共固化成形工艺。

工艺试验件面板厚度为 0.875mm,按照任务需求的铺层顺序依次铺叠而成。

2 主要原材料

2.1 T300/BA9913 预浸料

BA9913 树脂系 120℃ 中温固化预浸料环氧树脂体



注:真空袋的真空度不低于 0.097MPa;热压罐加压 ≥ 0.6 MPa。

图1 层合板典型固化工艺规范示意图

Fig.1 Schematic diagram of process specification of typical cured laminates

系,采用零吸胶、直接加压升温固化工艺,具有较长的室温贮存时间(2个月以上),其性能水平与国外同类树脂 Hexply913 相当。

将叠层块由室温加压 ≥ 0.6 MPa 后,升温至 120^{±5}℃,保温 2h,最后保压降温至 60℃ 以下卸压,具体见图 1。

2.2 J 系列中温固化胶膜

J 系列中温固化结构胶膜是改性环氧树脂结构胶膜,可用于复合材料面板-面板、面板-蜂窝芯结构的粘接。此胶膜可在 -55℃ ~120℃ 环境使用。

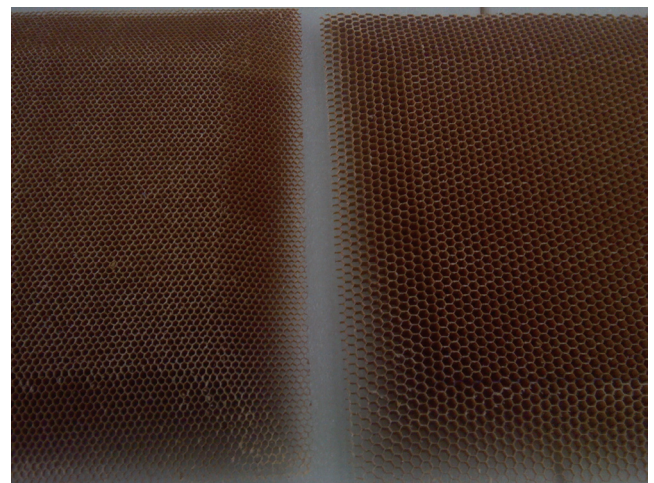


图2 NRH-2-48(0.05) (左) 和NRH-3-32(0.05) (右) 蜂窝芯
Fig.2 Honeycomb cores of NRH-2-48 (0.05) (left) and NRH-3-32 (0.05) (right)

其典型固化工艺为：由室温加压 0.25~0.35MPa 后，升温至 120^{±5}℃，保温 60~90min，最后保压降温至 60℃ 以下卸压，升温速度为 1~3℃ /min。

2.3 蜂窝芯材

NRH 型芳纶纸蜂窝芯材规格代号的定义为芯材代号 - 芯材孔格边长 - 芯材密度 (纸材厚度)，例如 NRH-3-32(0.05) 代表孔格边长 3mm、纸材厚度 0.05mm、密度 32kg/m³ 的 Nomex 芳纶纸蜂窝芯。

试验件选用的 NRH-2-48 (0.05) 和 NRH-3-32 (0.05) 两种规格蜂窝芯的性能数据详见表 3，图 2 为其外观对比。

3 研制过程

3.1 固化工艺的确定

因受蜂窝芯材的影响，碳纤维预浸料与 NRH 系列蜂窝构成的夹层结构复合材料的胶接共固化成型压力区间较小(一般为 0.1~0.3MPa)，同时温度和碳纤维预浸



图3 工艺摸索样件及截面细节
Fig.3 Process test sample and its section detail

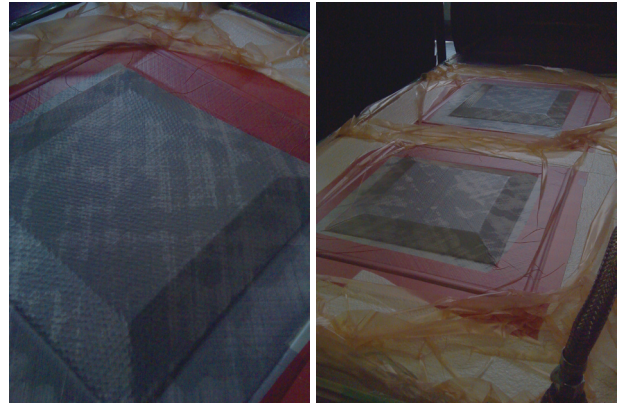
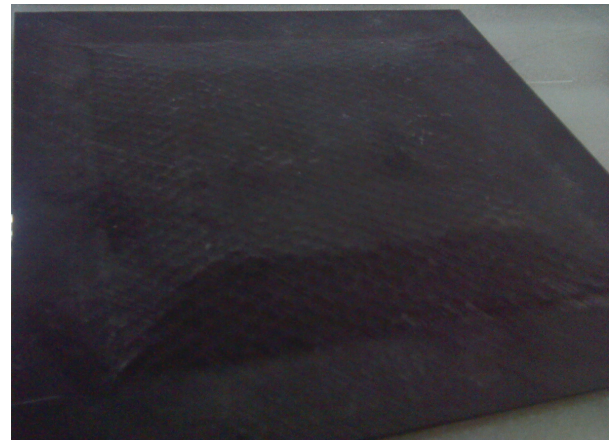
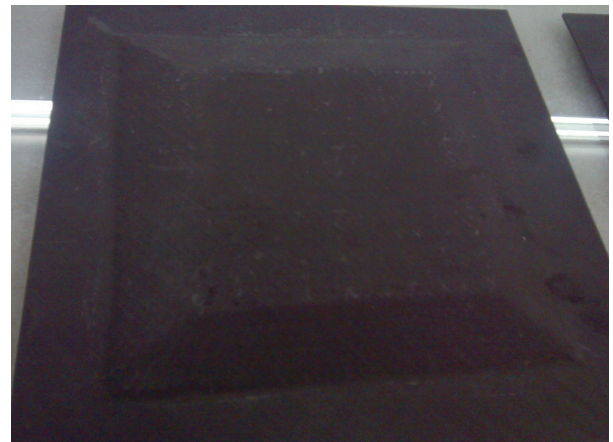


图4 封装进罐
Fig.4 Packing into the autoclave



(a) 试验件 A



(b) 试验件 B

图5 两种规格的试验件非贴模面表面质量对比
Fig.5 Non stick surface quality contrast of two specifications

表4 试验件种类、数量及尺寸

试验种类	长 × 宽 (mm × mm)	试验件类别	试验件编号	试验环境	数量(件)	合计数量(件)
蜂窝夹芯工艺试验件	200 × 200	试验件 A	1GY-32-7-1~1GY-32-7-3	常温干态	3	6
		试验件 B	1GY-48-7-1~1GY-48-7-3	常温干态	3	

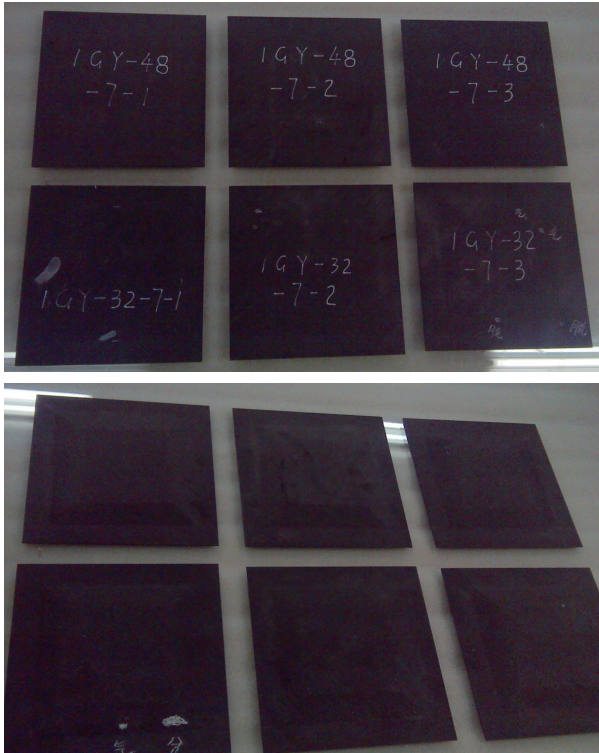


图6 试验件的贴模面(左)与非贴模面(右)
Fig.6 Stick surface (left) and non stick surface (right)

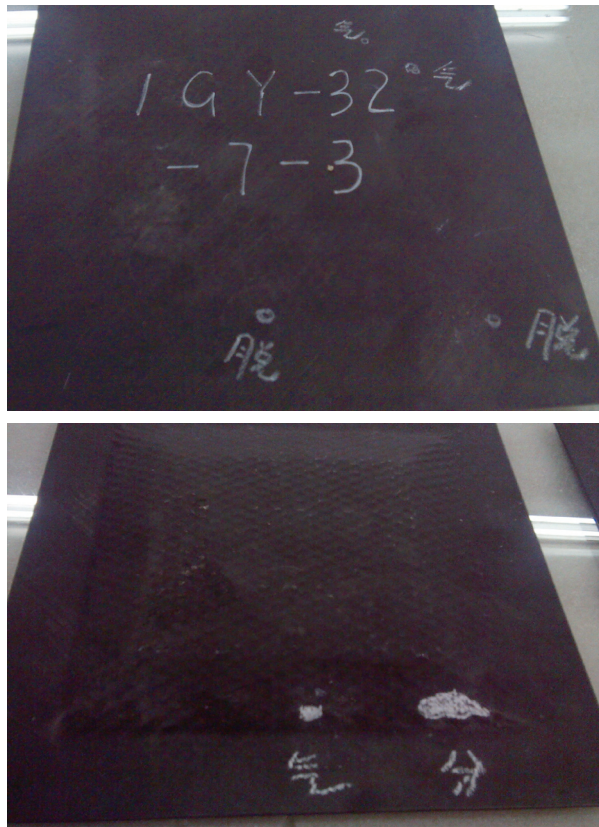


图7 试验件A上 $\phi 3$ 或 $\phi 5$ 的气孔和脱粘缺陷罐
Fig.7 $\phi 3$ or $\phi 5$ stomatal and debonding defects of text sample A

料种类也有一定的影响。通过前期工艺摸索,试制了不同规格的工艺摸索样件(见图3),以确定具体的工艺参数。

从样件切开的截面观察,两种规格的蜂窝芯均未出现失稳,与复合材料面板的结合清晰紧密,蜂窝夹层边角区域密实圆滑,超声未检测出缺陷。

3.2 试验件研制

表4中的6件夹层试验件均为一炉产品(见图4),成型工艺与工艺摸索样件一致。两种规格的试验件表面质量均合格,且与试验件A相比,试验件B的非贴模面表面质量较好,见图5。

经超声检测仪FCC-B-1检测及X光探伤,两种试验件的内部质量基本合格,但试验件A的气孔和脱粘缺陷多于试验件B,以 $\phi 3$ 或 $\phi 5$ 的缺陷为主;同时,蜂窝芯的加工质量对非贴模面成型质量的影响较大,棱线过渡处因配合不佳的原因易出现分层缺陷,见图6、7;夹层区域外形轮廓维持较好,均未见蜂窝芯塌陷、收缩和滑移。

4 结论

(1) T300/BA9913预浸料与NRH-3-32(0.05)和NRH-2-48(0.05)蜂窝芯构成的夹层结构复合材料可采用胶接共固化工艺研制出质量合格的零件。两种规格试验件的夹层区域外形轮廓控制较好,均未见蜂窝芯塌陷、收缩和滑移,能够满足设计要求。

(2) 两种规格试验件表面质量均合格,目视未见明显的面板凹陷,且选用NRH-2-48(0.05)蜂窝芯作为夹层的试验件B非贴模面表面质量优于试验件A。

(3) 两种规格试验件内部质量均合格,但选用NRH-3-32(0.05)蜂窝芯作为夹层的试验件A出现复材面板气孔和胶接面脱粘的缺陷几率较大,以 $\phi 3$ 或 $\phi 5$ 的缺陷为主,相比之下,NRH-2-48(0.05)蜂窝芯更适用于采用胶接共固化工艺的蜂窝夹层结构复合材料壁板。

(4) 蜂窝芯的加工质量对零件非贴模面成型质量的影响较大,棱线过渡处因配合不佳的原因易出现分层缺陷。

参考文献

[1] 赵景丽. 蜂窝夹层结构复合材料的性能研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2002.
[2] 负钦东. 复合材料在飞机上的应用与修理. 民航科技, 2009,3:114-116.
[3] 何文治, 马业广, 吴复兴, 等. 航空制造工程手册. 北京: 航空工业出版社, 1996.

(责编 谷雨)