

Nomex 蜂窝夹层复合材料力学性能研究

贺靖¹, 杨晓琳¹, 朱秀迪¹, 孙超明^{1,2}

(1. 北京玻璃钢院复合材料有限公司, 北京 102101; 2. 特种纤维复合材料国家重点实验室, 北京 102101)

摘要: 为了研究蜂窝夹层复合材料的力学性能, 本文使用三种牌号单向预浸布、不同面密度胶膜以及一种 Nomex 蜂窝芯材通过热压一体成型工艺制备蜂窝夹层复合材料。研究了蜂窝夹层板的滚筒剥离、长梁弯曲、板剪切(三点弯曲)以及嵌件剪切性能的影响因素。研究结果表明使用相同 Nomex 蜂窝芯材时: 胶膜面密度对蜂窝夹层板的滚筒剥离性能影响显著; 蜂窝夹层板的长梁弯曲性能和 450 N 载荷下的挠度主要受预浸布影响; 预浸布和胶膜对蜂窝夹层板的板剪切性能影响较小; 蜂窝夹层板的嵌件剪切性能和胶膜面密度无明显关系, 受预浸布影响较大。

关键词: Nomex 蜂窝; 力学性能; 胶膜面密度; 复合材料; 热压成型

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-8000(2020)09-0079-06

1 前言

夹层复合材料具有比刚度高、重量轻以及可设计性强等优点, 被广泛应用于航空航天领域。随着轻质夹芯结构的发展, 以蜂窝芯为夹层的蜂窝夹层复合材料在航天领域的主、次承力结构件上发挥了重要作用。蜂窝夹层复合材料是由上、下两张高强度的刚性面板以及蜂窝芯组成的, 蜂窝芯拥有的独特孔格结构赋予了蜂窝夹层复合材料抗疲劳、隔音、降噪、隔热等功能^[1-4]。

近年来, 随着蜂窝夹层复合材料的应用与发展, 国内学者对蜂窝夹层板进行了大量研究。毕红艳^[5]研究了共固化和二次胶接成型对蜂窝板面板性能及胶接质量的影响; 梁春生等^[6]研究了蜂窝夹层复合材料的共固化工艺对蜂窝夹层结构力学性能的影响。李清河等^[7]研究了成型压力对蜂窝板压缩、剪切性能的影响; 原崇新等^[8]研究了加压时机、加压大小及升温速率等因素对蜂窝板面板质量、胶接强度及侧压强度的影响; 王伟等^[9]研究了胶膜面密度、成型压力对蜂窝板性能的影响。然而, 很少有人从原材料方面对蜂窝夹层板性能进行研究。

本文主要研究胶膜面密度对蜂窝夹层板滚筒剥离性能的影响, 蜂窝夹层板的长梁弯曲强度和 450 N 载荷时挠度的相关性, 预浸布和胶膜对蜂窝夹层板的板剪切强度的影响, 蜂窝夹层板嵌件剪切强度和胶膜面密度的关系等。

2 实验

2.1 实验原料

表 1 为本文所用原材料。

表 1 原材料
Table 1 Raw material

材 料	相关参数	生产厂家
E-200	纤维面密度为 200 g/m ² 树脂含量为 32% 增韧环氧	自 制
S-245	纤维面密度为 245 g/m ² 树脂含量为 32% 常规环氧	自 制
S-235	纤维面密度为 235 g/m ² 树脂含量为 32% 自粘型增韧环氧	自 制
NH-3.2-80-9.6	密度为 80 kg/m ³	特一新材料
J-69C 胶膜	150 g/m ² 、200 g/m ² 、 300 g/m ²	黑龙江石油化工研究院

2.2 试样制备

采用热压共固化成型工艺, 上、下面板分别使用两层预浸布铺叠, 面板铺层方式为 0°/90°对称铺层, 内层纤维方向平行于蜂窝芯 L 向, 上、下面板与蜂窝芯之间铺覆胶膜; 成型后夹层板厚度为 10 mm±0.2 mm。

2.3 测试与表征

预浸布树脂特性: 采用耐驰差示扫描量热仪测试树脂的非等温 DSC 固化特性曲线(称取 5 mg 树脂, 测试温度范围为 50 °C~300 °C, 升温速率为 10 K/min);

采用 HAAKE MARS 40 Rheometer 转矩流变仪测试树脂的流变性能(称取 1 g 树脂,测试温度范围为 50 °C ~ 150 °C,升温速率为 2 K/min)。

力学性能:使用万能试验机 Instron 2340,按照 ASTM D 1781、ASTM C 393 以及 BMS4-17 8.7 分别测试夹层板的滚筒剥离、长梁弯曲、板剪切以及嵌件剪切性能,表 2 所示为测试样品尺寸及测试标准。

表 2 测试内容

Table 2 Test items

测试性能	样品尺寸/mm	测试标准
滚筒剥离性能	(305±2)×(76±0.5)	ASTM D 1781
长梁弯曲(挠度)性能	(610±2)×(76±0.5)	ASTM C 393
板剪切性能	(178±1)×(76±0.5)	ASTM C 393
嵌件剪切性能	(254±2)×(76±0.5)	BMS4-17

形貌观察:使用 Zeiss Stemi 2000-C 光学显微镜观察样品形貌。

3 结果与讨论

3.1 胶膜和预浸布树脂分析

图 1 为预浸布树脂和胶膜的非等温 DSC 测试曲线,表 3 列出了树脂和胶膜的初始反应温度和固化峰温度。从表 3 中数据可以看出:预浸布 S-245 和 S-235 的树脂与胶膜的初始反应温度和固化峰值温度接近;E-200 的树脂初始反应温度为 153.6 °C,固化峰值温度为 186.1 °C。为了进一步了解预浸布树脂和胶膜的特性,分别对其进行了流变测试。图 2 至图 5 为预浸布的树脂和胶膜的流变曲线。从图中可以看到胶膜和预浸布 E-200、S-245、S-235 树脂的表观凝胶点(G' 和 G'' 交点)^[10]分别为 140 °C、171 °C、138 °C 以及 147 °C。

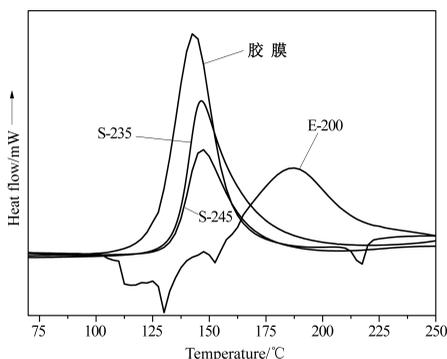


图 1 三种预浸布树脂和胶膜的非等温 DSC 固化曲线

Fig. 1 The non-isothermal DSC curing curve of three resin of prepreg and adhesive film

表 3 预浸布树脂及胶膜 DSC 测试数据

Table 3 Test data of resin of prepreg and adhesive film

样品名称	初始反应温度/°C	固化峰温度/°C
胶膜	125.9	143.2
E-200	153.6	179.1
S-245	133.3	147.5
S-235	135.2	146.8

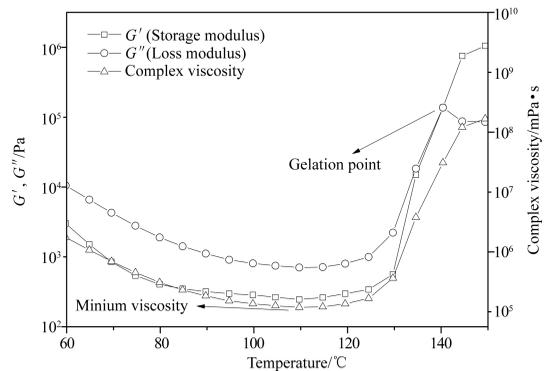


图 2 胶膜流变曲线

Fig. 2 Rheological curve of adhesive film

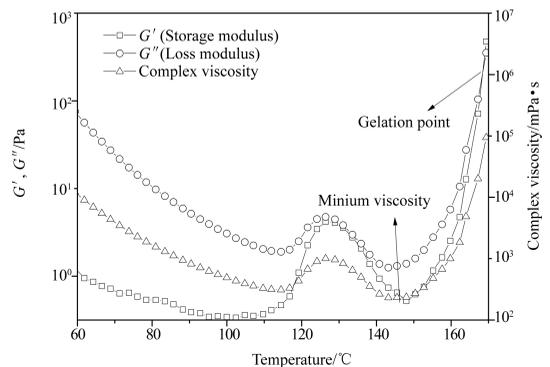


图 3 E-200 预浸布环氧流变曲线

Fig. 3 Rheological curve of epoxy resin of E-200 prepreg

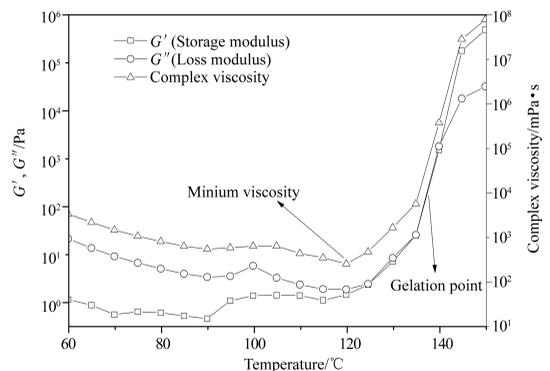


图 4 S-245 预浸布环氧流变曲线

Fig. 4 Rheological curve of epoxy resin of S-245 prepreg

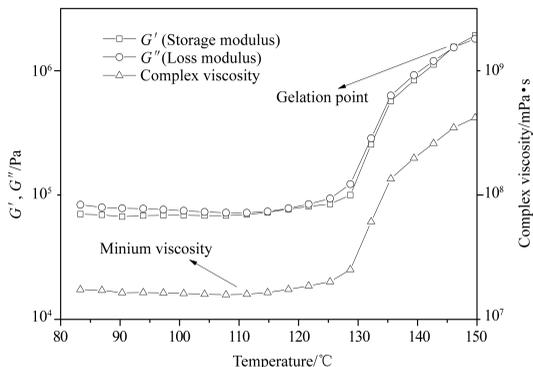


图5 S-235预浸布环氧流变曲线

Fig. 5 Rheological curve of epoxy resin of S-235 prepreg

为实现蜂窝板面板和胶膜充分固化, E-200-32、S-235-32以及E-200-32三种预浸布的蜂窝夹层板固化制度分别为: 150 °C-2 h-0.4 MPa、120 °C-1.5 h-0.4 MPa、120 °C-1.5 h-0.4 MPa。下文用 HS_{E-200} 、 HS_{S-245} 和 HS_{S-235} 代表三种预浸布制备的蜂窝夹层板。

3.2 蜂窝夹层复合材料性能研究

3.2.1 蜂窝板滚筒剥离性能测试

图6为不同面密度胶膜、不同规格预浸布制备的蜂窝夹层板的滚筒剥离性能(测试方向为纤维内层方向)。由图6可知,在使用相同预浸布的情况下,蜂窝夹层板的滚筒剥离性能随着胶膜面密度的增加而增加。

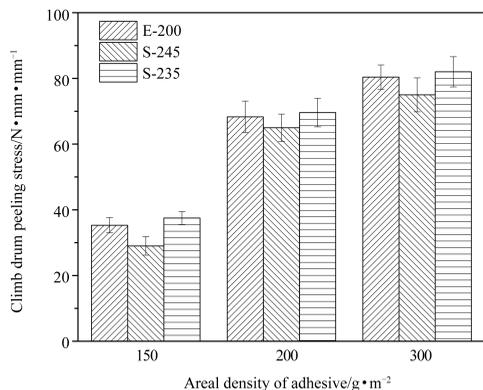


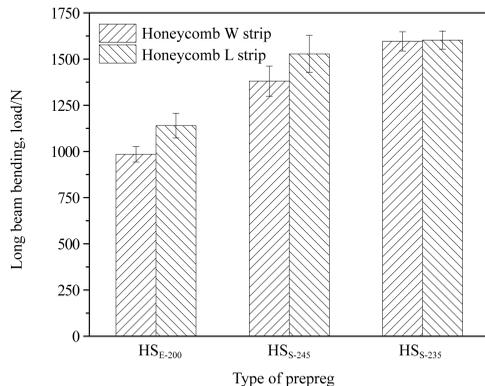
图6 蜂窝夹层板的滚筒剥离性能

Fig. 6 The climb drum peeling performance of honeycomb sandwich panel

3.2.2 蜂窝板长梁弯曲以及挠度测试

图7为三种预浸布分别与面密度为200 g/m²的胶膜制备的蜂窝夹层板的长梁弯曲性能。从图中可以看出,在胶膜面密度相同的情况下,蜂窝板样品的

L向载荷均高于W向载荷,三种蜂窝板的长梁弯曲载荷大小为 $HS_{E-200} < HS_{S-245} < HS_{S-235}$ 。蜂窝板 HS_{E-200} 的长梁弯曲性能最差,这是因为预浸布E-200的纤维为E玻璃纤维(E玻纤的强度、模量以及断裂延伸率均低于S玻纤的^[11]);通过对比 HS_{S-245} 和 HS_{S-235} 的长梁弯曲性能发现,面密度较低的预浸布S-235所制样品具有更佳的长梁弯曲性能,预浸布树脂体系(见表1)是性能产生差异的主要原因。

图7 三种预浸布和面密度为200 g/m²的胶膜制备的蜂窝夹层板的长梁弯曲性能Fig. 7 Long beam bending performance of honeycomb sandwich panels made from three types of prepreg and adhesive film with surface density of 200 g/m²

对蜂窝夹层板的挠度进行测试(挠度为蜂窝板长梁弯曲样品在450 N时的变形量)。图8为蜂窝夹层板的挠度测试,测试结果显示胶膜面密度对蜂窝夹层板的挠度影响较小;蜂窝夹层板L向的挠度几乎都低于W向挠度,这是由于本文所用蜂窝芯L向的剪切模量为70.0 MPa,W向的剪切模量为38.4 MPa;在使用相同面密度胶膜时,蜂窝板挠度大小顺序为 $HS_{S-245} < HS_{S-235} < HS_{E-200}$ (蜂窝夹层板L向和W向挠度均有此规律)。由图7可知,三种蜂窝板长梁弯曲强度大小顺序为 $HS_{E-200} < HS_{S-245} < HS_{S-235}$,说明蜂窝板长梁弯曲的载荷和其挠度没有明显的相关性。蜂窝板 HS_{S-245} 有着较低挠度,这是由于S-245预浸布的树脂为普通环氧树脂,相比于增韧环氧树脂有着更高的模量^[12],所制备的面板模量较高;S-235和E-200两种预浸布的树脂均为增韧环氧树脂,导致蜂窝板面板弯曲模量较低,因此蜂窝板 HS_{E-200} 和 HS_{S-235} 的抗弯曲能力差,制备的样品挠度较高。

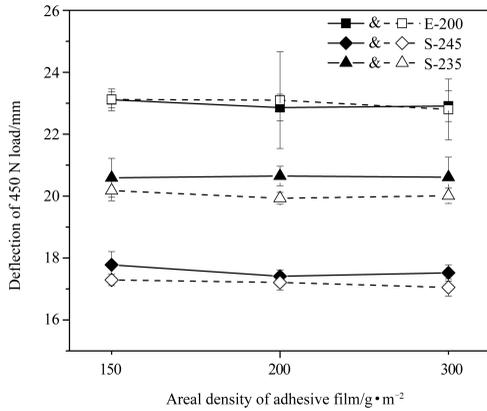


图 8 蜂窝夹层板挠度测试

(实线为蜂窝板 W 向挠度,虚线为 L 向挠度)

Fig. 8 Deflection test of honeycomb sandwich panel

(Solid line is W deflection of honeycomb panel, dotted line is L deflection)

图 9 为蜂窝板 HS_{E-200} 的长梁弯曲性能。从图中可以看出随着胶膜面密度的增加,夹层板长梁弯曲性能逐渐增加,且试样 L 向的性能均高于 W 向。蜂窝面板的铺层方式为 $0^\circ/90^\circ$ 对称铺层,结合前文分析可知,蜂窝板的长梁弯曲性能是由面板和蜂窝芯共同决定的。从图中还可以看出随着胶膜面密度的增加,夹层板 HS_{E-200} 的 L 向和 W 向的长梁弯曲性能差值逐渐减小。由图 6 可知胶膜面密度越大,夹层板滚筒剥离性能越好,这意味着面板和蜂窝芯的结合强度越高,蜂窝芯两个方向的性能差异对长梁弯曲性能的影响越小。为了印证此规律,使用不同面密度胶膜制备了蜂窝板 HS_{S-245} 并测试其长梁弯曲性能(见图 10),发现其规律与蜂窝板 HS_{E-200} 规律相同。

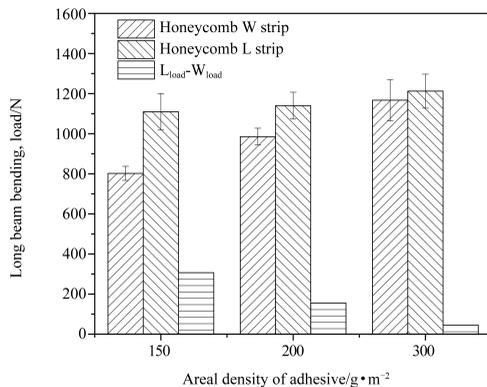


图 9 使用 E-200 预浸布制备蜂窝夹层板长梁弯曲性能

Fig. 9 The long beam bending properties of honeycomb sandwich panel were prepared using E-200-prepreg

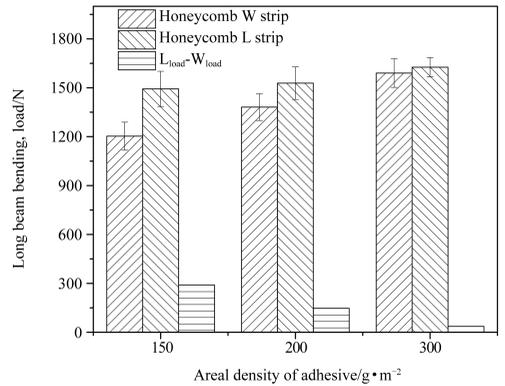


图 10 S-245 预浸布制备的蜂窝层板长梁弯曲性能
Fig. 10 The long beam bending properties of honeycomb sandwich panel made of S-245 prepreg

3.2.3 蜂窝板板剪切(三点弯曲)测试

图 11 为三种预浸布和不同面密度胶膜制备的蜂窝夹层板的板剪切性能,从图中数据可以看出 HS_{E-200} 、 HS_{S-245} 、 HS_{S-235} 三种类型蜂窝板的板剪切性能差异很小。这说明预浸布种类和胶膜面密度对蜂窝夹层板的板剪切性能影响较小。

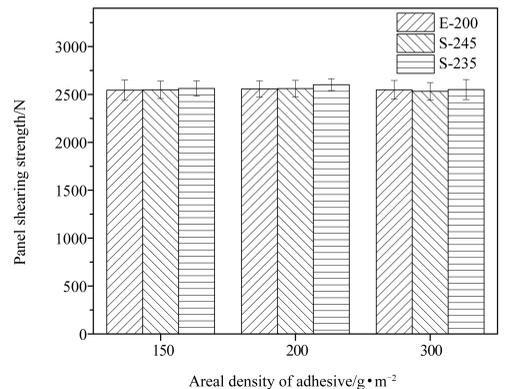


图 11 蜂窝夹层板板剪切性能
Fig. 11 The panel shearing properties of honeycomb sandwich panels

3.2.4 蜂窝板嵌件剪切测试

图 12 为嵌件剪切样品及其测试示意图,取样时沿蜂窝芯 L 向。嵌件剪切样品的受力方式为:作用力平行于蜂窝板 L 向,蜂窝芯材的侧向拉伸性能相比于面板可以忽略,测试的载荷反映的几乎是蜂窝夹层板面板的强度。图 13 为蜂窝板 HS_{E-200} 、 HS_{S-245} 以及 HS_{S-235} 的嵌件剪切性能。从图中可以看出,在相同固化压力的作用下,嵌件剪切性能排序为 $HS_{E200} < HS_{S245} < HS_{S235}$,和上文所述蜂窝夹层板的长梁弯曲载荷顺序相同,因此可知蜂窝夹层板的长梁弯曲和嵌件剪切性能有一定的相关性。由图 13 还可以看出,三种预浸布所制备蜂窝板的嵌件剪切性能随着固化压力的增大逐渐增加,固化压力对蜂窝夹层板的力

学性能影响显著^[9],随着压力的增大,蜂窝夹层板的嵌件剪切性能增强,这是因为成型压力增大可提高面板质量,降低面板孔隙率^[13,14]。图14为不同固化压力下 HSE-200 蜂窝板的面板照片。由图可知,随着压力的增大,面板空隙减少,面板质量明显提升^[15,16]。

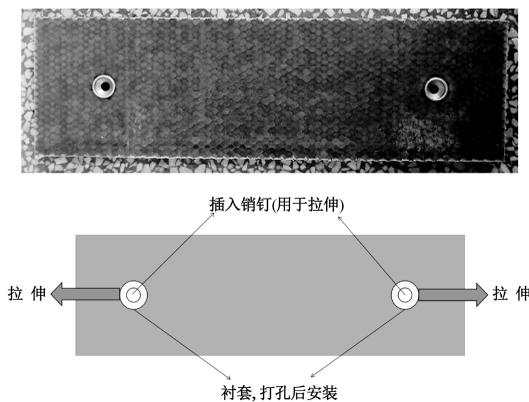


图12 嵌件剪切样品及测试示意图

Fig. 12 Sample of insert shearing and its test schematic diagram

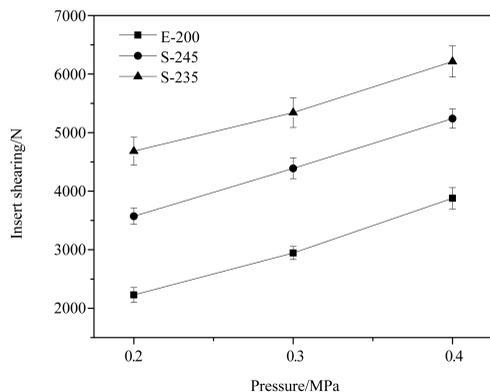


图13 蜂窝夹层板的嵌件剪切性能

Fig. 13 The insert shearing properties of honeycomb sandwich panel

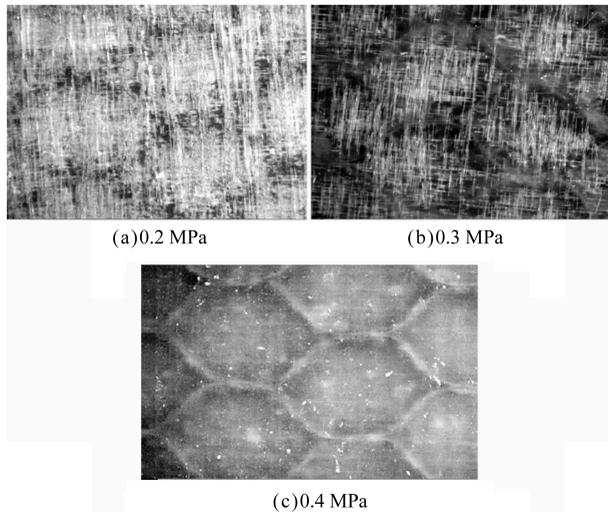


图14 蜂窝板 HSE-200 在不同压力下的蒙皮外观

Fig. 14 The skin appearance of HSE-200 at different pressures

图15为相同固化压力下的蜂窝板的嵌件剪切性能。从图中可以看出,不同面密度胶膜对蜂窝板的嵌件剪切性能影响较小,说明嵌件剪切性能主要受面板性能的影响。

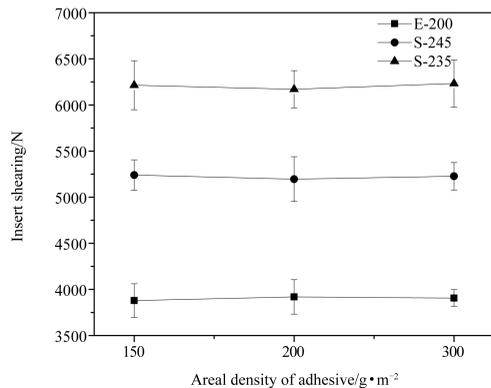


图15 蜂窝夹层板的嵌件剪切性能

Fig. 15 The insert shearing properties of honeycomb sandwich panel

4 结论

本文使用同一种蜂窝芯材、三种牌号单向预浸布以及三种面密度胶膜制备了多种蜂窝夹层板,通过研究得出以下结论:

- (1) 蜂窝板的滚筒剥离性能随着胶膜面密度的增加而增加;
- (2) 蜂窝板的长梁弯曲性能和材料相关:蜂窝板的L向长梁弯曲性能优于W向的;胶膜面密度增加,长梁弯曲性能增加且W向和L向的性能差异减小;蜂窝板的长梁弯曲强度和挠度无明显相关性;
- (3) 蜂窝夹层板的板剪切性能受预浸布和胶膜面密度的影响较小;
- (4) 蜂窝夹层板的嵌件剪切强度随着固化压力的增大而增大;嵌件剪切强度受预浸布影响较大;胶膜面密度对蜂窝夹层板的嵌件剪切性能影响较小。

参考文献

- [1] 郑义珠, 顾轶卓, 孙志杰, 等. Nomex 蜂窝夹层结构真空袋共固化过程蜂窝变形[J]. 复合材料学报, 2009, 26(4): 29-35.
- [2] 罗玉清, 宋欢, 陆志远, 等. 芳纶蜂窝复合材料的制备及性能研究[J]. 高科技纤维与应用, 2018, 43(4): 7-13.
- [3] 孙华凯, 王显峰, 齐俊伟, 等. Nomex 蜂窝夹层复合材料的自动铺丝成型工艺研究[J]. 航空制造技术, 2018, 61(10): 94-99.
- [4] 于国财. 多功能复合材料蜂窝结构的导热及力学性能[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [5] 毕红艳. 蜂窝夹层结构成型工艺对其力学性能影响[J]. 黑龙江

- 科技信息, 2016(21): 66-67.
- [6] 梁春生, 邱启艳, 陈静, 等. 蜂窝夹层结构复合材料胶接共固化工艺技术研究[J]. 航空制造技术, 2014, 459(15): 86-89.
- [7] 李河清, 赵景丽, 张元明, 等. 固化压力对夹层结构力学性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2002, 30(6): 16-18.
- [8] 原崇新, 张佐光. 蜂窝夹层结构胶接质量与面板质量工艺因素分析[C]//中国力学学会. 第十五届全国复合材料学术会议论文集(上册). 中国力学学会, 2009: 521-525.
- [9] 王伟, 左小彪, 冯志海, 等. 一种玻纤/环氧-Nomex 蜂窝夹层复合材料制备工艺与性能研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2015(10): 42-47.
- [10] 杨晓强, 赵玉宇, 吴健伟, 等. 中温固化阻燃结构胶膜流变特性与蜂窝粘接性能[J]. 化学与粘合, 2012, 34(5): 17-21.
- [11] 汪泽霖. 玻璃钢原材料手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2015.
- [12] 刘乐诗, 张锋锋, 戚裕, 等. 高强高韧环氧树脂的制备与性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2019, 35(9): 35-39.
- [13] 张广成, 赵景利. 蜂窝夹层结构复合材料的力学性能研究[J]. 机械科学与技术, 2003, 22(2): 280-282.
- [14] 陈蔚, 成理, 叶宏军, 等. Nomex 蜂窝夹层复合材料的成型工艺研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2017(7): 70-73.
- [15] 张冬梅, 叶金蕊, 刘奎, 等. 孔隙微观特征影响 CFRP 力学性能的细观综述[J]. 复合材料学报, 2013, 30(s1): 118-123.
- [16] 李波, 万小朋, 赵美英. 孔隙率对复合材料单向板横向力学性能的影响[J]. 玻璃钢/复合材料, 2017(6): 33-38.

STUDY ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF NOMEX-HONEYCOMB SANDWICH COMPOSITES

HE Jing¹, YANG Xiao-lin¹, ZHU Xiu-di¹, SUN Chao-ming^{1, 2}

(1. Beijing Composite Materials Co., Ltd., Beijing 102101, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Fiber Composites, Beijing 102101, China)

Abstract: Honeycomb sandwich composites were prepared by using three brands of unidirectional prepreg, one type of multi-surface density adhesive film and a type of Nomex honeycomb core, through a hot-pressing process. The paper studies the effect of the surface density of adhesive film on climb drum peeling of honeycomb sandwich panel, and the factors which affect the long beam bending, panel shearing (three-point bending) and insert shearing. When using the same Nomex honeycomb core material, the results are as follows. The surface density of the adhesive film has obvious influence on the climb drum peeling performance of the honeycomb sandwich panel. The long beam bending load of the honeycomb sandwich panel is mainly affected by the performance of the prepreg. The deflection under 450 N load is controlled by the modulus of prepreg after curing. The effect of prepreg and adhesive film on the performance of panel shearing of sandwich panel is small. The performance of insert shearing has nothing to do with the surface density of the adhesive film.

Key words: Nomex honeycomb; mechanical properties; surface density of adhesive film; composites; hot-pressing molding