

PMI 泡沫夹层结构性能研究

赵锐霞 尹亮 潘玲英 梅立 孙宏杰

(航天材料及工艺研究所,北京 100076)

文 摘 对聚甲基丙烯酸酯亚胺(PMI)泡沫碳环氧复合材料夹层结构进行了平拉、平压、侧压、弯曲、剪切等性能试验,并对试样破坏模式进行了分析。结果表明:泡沫夹层结构平拉、平压、剪切性能取决于芯材的性能,表现为芯材的破坏,弯剪试样更能表征泡沫的剪切性能,泡沫夹层结构具有优越的侧压和弯曲性能,碳面板(1.05 mm)/泡沫(30 mm)夹层结构侧压强度为26.5 MPa、模量为5.88 GPa,弯曲刚度为3.05 kN·m²、模量为97.5 GPa。

关键词 PMI 泡沫,夹层结构,性能

Properties of PMI Foam Sandwich Structure

Zhao Ruixia Yin Liang Pan Lingying Mei Li Sun Hongjie

(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

Abstract The flatwise tension, flatwise compression, edgewise compression, flexure and shear properties of polymethacrylimide (PMI) foam/carbon-fiber epoxy resin composites sandwich structures have been tested. And the failure modes of mechanical testing specimens have also been analysed. Results showed that the flatwise tension, flatwise compression and shear properties mainly depended on the properties of PMI foam core. The flexure testing specimens could better reflect the shear properties of foam. In addition, the foam sandwich structures had excellent edgewise compression and flexure properties. The edgewise compression strength and modulus of carbon-fiber epoxy panel (1.05 mm)/foam (30 mm) sandwich structure are respectively 26.5 MPa and 5.88 GPa. The flexure stiffness and modulus of foam sandwich structure are respectively 3.05 kN·m² and 97.5 GPa.

Key words PMI foam, Sandwich structure, Property

0 引言

聚甲基丙烯酸酯亚胺(PMI)泡沫是一种闭孔刚性发泡材料,具有良好的抗疲劳性能和防火性能,燃烧时不释放有害物质,在加工过程中具有较好的抗压缩蠕变性能^[1]。新型高性能泡沫夹层结构以其更高的结构效率在运载火箭、航空、风力发电机叶片、体育运动器材、医用设备配件、船舶制造、列车机车、雷达天线罩等领域大量应用^[2]。

新型泡沫夹层结构在国内应用处于起步阶段。本文采用面板与芯材胶接同时完成的共固化和胶接分步实施的多次固化两种成型工艺制作泡沫夹层结构复合材料^[3],分析了不同成型工艺对泡沫夹层结构性能的影响,对泡沫夹层结构性能进行了研究,并对试样破坏模式进行分析,为PMI泡沫夹层结构设

计提供数据支持。

1 实验

1.1 材料

JT300/602、T700/605 干法预浸料及 T300/601 湿法预浸料,自制;UT500/5228 干法预浸料,北京航空材料研究院生产;ROHACELL® 110WF PMI 泡沫,德固赛生产;J-47A 和 SJ-2A 胶膜,黑龙江省石油化学研究院生产。

1.2 试样制备

泡沫夹层结构碳/环氧面板状态见表1。泡沫夹层结构试样中PMI泡沫芯材厚度均为30 mm,先将面板按设计要求进行铺层,然后通过界面胶与泡沫复合后,进热压罐加热加压固化。平拉试样、平面剪切试样需夹层试样与加载片粘接后进烘箱进行固化。

收稿日期:2011-11-22;修回日期:2012-06-05

作者简介:赵锐霞,1971年出生,高级工程师,主要从事树脂基复合材料方面的研究工作。E-mail:htyzyrx@sina.com

表1 泡沫夹层结构碳/环氧面板状态

Tab.1 C/EP facing state of PMI foam sandwich structure

| 面板材料 | 面板厚度/mm | 铺层 |
|--------------------------------------|---------|------------------------------------------------------------------|
| 1 [#] (JT300/602) | 1.05 | [0/90/0/90] _s |
| 2 [#] (T700/605) | 1.50 | [±45/0/90/0] _s |
| 3 [#] (UT500/5228+T300/601) | 1.55 | [C _布 /0 ₂ /C _布 /0] _s |
| 4 [#] (MT300/603) | 1.20 | [C _布 /0 ₂ /C _布] _s |

1.3 性能测试

泡沫夹层结构平拉、平压、弯曲、剪切、侧压性能分别按 GB/T1452—2005、GB/T1453—2005、GB/T1456—2005、QJ1125—87、GB/T1454—2005 进行测试,平拉、平压、弯曲、剪切采用长春科新试验仪器研究所 WD4050 电子万能试验机进行测试,侧压性能采用美国 MTS Sintech65/G 试验机进行测试。

2 结果与讨论

2.1 泡沫夹层结构成型工艺

为了解成型工艺对泡沫夹层结构性能的影响,对采用共固化、单侧面板分步固化(单面固)、两侧面板分步固化(双面固)三种工艺分别成型的泡沫夹层结构进行力学性能对比试验,由于平压、剪切性能主要取决于泡沫芯材的性能,泡沫夹层结构性能主要以侧压性能和弯曲性能来表征,夹层结构的弯曲性能极其重要,直接呈现夹层结构高比强度高比刚度优点,本文选择弯曲性能进行平行对比试验,三种不同成型工艺的结果见表2。可以看出,共固化成型的泡沫夹层结构弯曲性能略优于其他两种工艺。

表2 不同成型工艺泡沫夹层结构性能

Tab.2 Mechanical properties of PMI foam sandwich structure with different processing methods

| 固化工艺 | 弯曲刚度/ kN·m ² | 弯曲强度/ MPa | 弯曲模量/ GPa |
|------|----------------------------|--------------|--------------|
| 双面固 | 2.74 | 215 | 89.0 |
| 单面固 | 2.56 | 349 | 82.4 |
| 共固化 | 3.05 | 396 | 97.5 |

为验证面板成型压力对性能影响,分别采用 0.3 和 0.6 MPa 成型压力进行试验,其压缩和弯曲性能对比试验结果见表3。可以看出,对于较薄的面板,不同成型压力时的性能基本处于同一水平。泡沫夹层结构采用共固化成型工艺的性能略高的原因不在于面板因固化压力不同而带来的差异。

宇航材料工艺 <http://www.yhelgy.com> 2012 年 第5期

表3 不同成型压力对面板性能影响

Tab.3 Mechanical properties of C/EP facing with different processing pressures

| 成型压力/ MPa | 压缩强度/ MPa | 压缩模量/ GPa | 弯曲强度/ MPa | 弯曲模量/ GPa |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 0.3 | 714 | 78.2 | 1100 | 65.9 |
| 0.6 | 759 | 78.5 | 1130 | 65.1 |

共固化成型泡沫夹层结构性能优的主要原因在于面板与 PMI 泡沫芯的粘结效果不同所致。热压罐固化过程中,树脂受到的压力很重要,树脂压力是树脂和气相材料从一处到另一处移动的驱动力,有助于防止空隙的形成^[3],泡沫芯子是影响树脂压力的因素之一,PMI 泡沫为 100% 闭孔材料,由于板材的切割,泡沫表层会有切开的开孔,微观照片见图 1^[4],对共固化面板,外力施加于模具或面板的装袋面,会形成树脂压力,此时树脂会进入泡沫表面的孔隙中,在树脂含量足够情况下,当泡沫表面孔隙填满后,在外界持续压力作用下,面板受压不变,保证了面板粘接质量,同时也保证了面板与泡沫界面的粘接质量。而预固化面板与泡沫芯材粘接时,一方面受面板与泡沫表面平整度影响,另一方面界面采用的胶膜流动充盈泡沫表面孔隙的内在质量直接影响面板与泡沫界面间的粘接质量,这种不同成型工艺带来的面板与泡沫界面间粘接质量的不同,直接导致泡沫夹层结构性能的差异。

泡沫夹层结构共固化的主要优点是胶接界面之间的良好贴合与表面清洁。

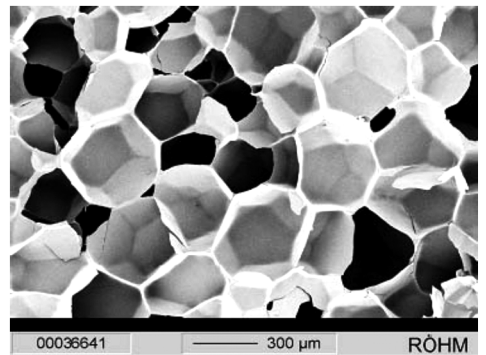


图1 PMI 泡沫结构的显微照片

Fig.1 SEM micrograph of PMI foam

2.2 泡沫夹层结构平拉强度

碳环氧泡沫夹层结构平拉强度 2[#]为 2.27 MPa、3[#]为 1.84 MPa,破坏模式见图2。

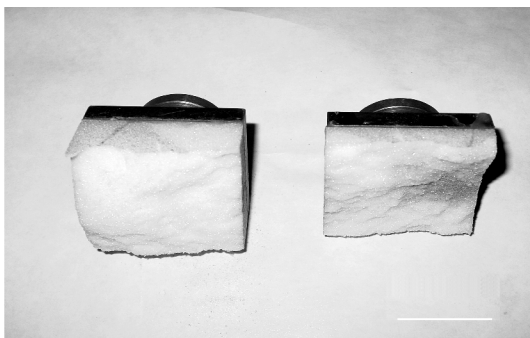


图2 平拉试样破坏模式

Fig.2 Failure mode for flatwise tension sample

从图2可以看出,泡沫夹层结构平拉试样破坏模式为泡沫本体破坏,说明面板与芯子的平拉强度大于泡沫本体,夹层结构界面胶接强度较好。

2.3 泡沫夹层结构平压性能

碳环氧泡沫夹层结构平压强度、模量及破坏模式见表4、图3。

表4 平压性能测试结果

Tab.4 Flatwise compression property of sandwich structure

| 面板材料 | 平压强度 | 平压模量 |
|------|------|------|
| 1# | 3.63 | 158 |
| 2# | 3.55 | 142 |
| 3# | 3.71 | 145 |



图3 平压试样破坏模式

Fig.3 Failure mode for the flatwise compression sample

从图3可以看出,泡沫夹层结构平压破坏主要为芯材的破坏,这主要与泡沫本体结构形式有关,当试样承受到一定载荷后,发生局部失稳,造成破坏。

试验中采用的 PMI 泡沫压缩强度为 3.67 MPa,压缩模量为 170 MPa,结果表明,不同面板泡沫夹层结构平压性能基本相当,且与泡沫芯材的平压性能处于同一水平,泡沫夹层结构平压性能主要取决于泡沫芯材性能。

2.4 泡沫夹层结构侧压性能

碳环氧泡沫夹层结构侧压性能及破坏模式见表5、图4。

表5 侧压性能测试结果

Tab.5 Edgewise compression property of sandwich structure

| 面板材料 | 侧压强度/MPa | 侧压模量/GPa |
|------|----------|----------|
| 1# | 26.5 | 5.88 |
| 2# | 47.3 | 6.84 |
| 3# | 68.7 | 12.7 |

泡沫夹层结构侧压强度破坏模式主要表现为两侧碳环氧面板失稳破坏,泡沫芯材剪切破坏,直接反映出碳环氧面板与泡沫之间界面粘接质量的好坏。可以看出,不同材料、不同铺层的面板其泡沫夹层结构侧压性能差异较大,面板性能对泡沫夹层结构侧压性能起决定性作用。

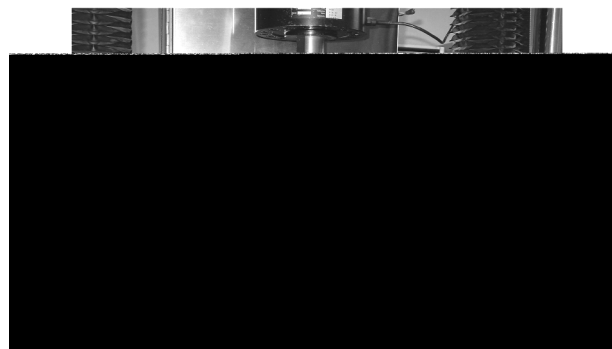


图4 侧压试样破坏模式

Fig.4 Failure mode for edgewise compression sample

2.5 泡沫夹层结构弯曲性能

在测试夹层结构弯曲性能时,首先应考虑梁的受力性质和约束情况,如采用悬臂梁、三点弯曲、四点弯曲、集中力还是分布力等。最好与使用条件一致^[5]。

三点弯曲法测试弯曲性能见表6,其弯曲试样破坏模式见图5。

表6 弯曲性能测试结果

Tab.6 Flexure property of PMI foam sandwich structure

| 面板 | 面板厚度/ mm | 弯曲刚度/ kN·m ² | 弯曲强度/ MPa | 弯曲模量/ GPa |
|----|-------------|----------------------------|--------------|--------------|
| 1# | 1.05 | 3.05 | 396 | 97.5 |
| 2# | 1.50 | 3.34 | 319 | 107 |
| 3# | 1.55 | 3.98 | 399 | 154 |



图5 弯曲试样破坏模式

Fig. 5 Failure mode for flexure sample

泡沫夹层结构弯曲试样破坏模式一般分为泡沫芯材剪切破坏和面板屈曲破坏等模式,本文中试样破坏模式主要表现为泡沫受弯剪破坏,是一种理想的破坏模式。面板的性能对泡沫夹层结构弯曲性能起主要作用。

2.6 泡沫夹层结构剪切性能

泡沫芯材在结构中主要承担剪应力,芯材应具有

足够的剪切强度,否则会导致芯材与面板脱离,结构失效。两种试样剪切性能及破坏模式见表7、图5、图6。

可以看出,两种测试结果相差较大,弯曲剪切测试结果明显偏高,主要是由于压剪试样制作中泡沫与加载板的界面粘接质量、试样两侧加载板的平行度等因素都可能导致试样受压时泡沫芯材受剪不均衡,从而导致试样破坏不理想,测试结果偏低。从图5、图6也可以看出,弯剪试样的破坏模式更能表征泡沫的剪切性能。

剪切性能测试时,尽量选用能真实表征泡沫芯材受剪破坏的有效检测方法。试验中采用的PMI泡沫芯材剪切强度为2.25 MPa,剪切模量为75.8 MPa,从结果看,弯剪强度测试结果与泡沫芯材剪切强度测试结果相当,而双压剪强度测试结果明显偏低,从两种方法试样的破坏模式看,弯剪试样破坏模式为泡沫受弯剪破坏,较为理想。

表7 泡沫夹层结构剪切性能测试结果

Tab.7 Shear properties of PMI foam sandwich structure

| 面板材料 | 弯曲剪切 | | | 双压剪 | | 备注 |
|------|---------|----------|----------|----------|----------|----|
| | 剪切刚度/kN | 剪切强度/MPa | 剪切模量/MPa | 剪切强度/MPa | 剪切模量/MPa | |
| 3# | 132 | - | 73.1 | 0.506 | 50.6 | 横向 |
| 4# | 128 | 2.18 | 69.0 | 0.618 | 54.9 | 纵向 |
| | 118 | 2.10 | 66.7 | - | - | 横向 |

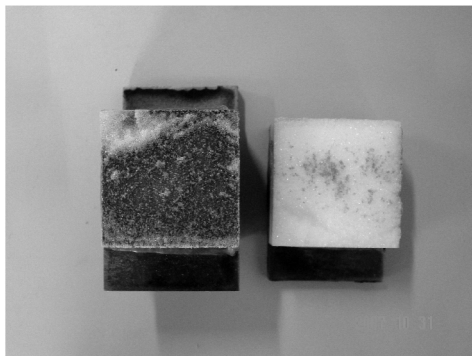


图6 双压剪破坏模式

Fig. 6 Failure mode for compression-shear sample

3 结论

(1) PMI泡沫夹层结构共固化和分步固化两种成型工艺中,共固化成型工艺成型的泡沫夹层结构弯曲性能略优,主要是良好的胶接界面质量。

(2) PMI泡沫碳环氧夹层结构平拉、平压、剪切性能取决于芯材的性能,表现为芯材的破坏,弯剪试样

更能表征泡沫的剪切性能,侧压和弯曲性能取决于面板,侧压为面板失稳破坏,弯曲为泡沫受弯剪破坏,破坏模式较为理想。

(3) PMI泡沫碳环氧夹层结构具有优越的侧压和弯曲性能,是一种性能优异的新型复合夹芯材料。

参考文献

- [1] 孙春方,李文晓,薛元德,等. 高速列车用PMI泡沫力学性能研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2006(4):13-15
- [2] 赵锐霞,尹亮,潘玲英. PMI泡沫夹层结构在航天航空工业的应用[J]. 宇航材料工艺, 2011, 41(2):13-16
- [3] 聚合物基复合材料的使用、设计和分析[M]. 美国军用手册 MIL-HDBK-17F 复合材料手册 第三卷, 2002:80-83
- [4] 胡培. ROHACELL 技术手册[M]. 德国赛(中国)投资有限公司上海分公司, 2005:21-22
- [5] 孙春方,薛元德,胡培. 复合材料泡沫夹层结构力学性能与试验方法[J]. 玻璃钢/复合材料, 2005(2):3-6

(编辑 吴坚)