

C_f /PI 蜂窝夹层结构性能

赵伟栋¹ 潘玲英¹ 蒋文革¹ 王会平²

(1 航天材料及工艺研究所,北京 100076)

(2 中国运载火箭技术研究院总体设计部,北京 100076)

文 摘 为了提高蜂窝夹层结构的耐热性和高温力学性能,采用石英灯和力学性能测试的方法进行了相关性能测试。弯曲性能测试结果表明,UT500/KH370 蜂窝夹层面板的弯曲强度 400℃ 保持率为 58%,弯曲模量保持率为 85%,层间剪切强度保持率为 57%;石英灯静态隔热试验结果表明,冷壁热流为 300 kW/m² 的条件下,高度为 29 mm 的蜂窝夹层板的背温为 320℃;冷壁热流为 168 kW/m² 的条件下,背温为 296℃。

关键词 聚酰亚胺,蜂窝夹层结构,复合材料,防热,隔热

Properties of C_f /PI Honeycomb Sandwich Composites

Zhao Weidong¹ Pan Lingying¹ Jiang Wenge¹ Wang Huiping²

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

(2 Systems Engineering Division CALT, Beijing 100076)

Abstract In order to enhance the heat resistant and mechanical properties of honeycomb sandwich at high temperature, the test of mechanical properties and heat insulation properties with static quartz lamp are carried out. The result shows that the retaining rate of flexural strength, moduli and interlaminar of panel are 58%, 85% and 57%, respectively. After the sample heated by static quartz lamp, with 300 kW/m² and 168 kW/m² heat flux for 180 s, the back temperature of honeycomb structural composites are 320℃ and 296℃, respectively.

Key words Polyimide, Honeycomb sandwich structure, Composite, Thermal protection, Heat insulation

0 引言

蜂窝夹层结构不但具有质轻、高强度等优点,而且通过控制成型工艺可得到光滑平整的外型,具有优良的气动性能,同时其力学性能、电性能和隔热性能可设计,广泛应用于航空航天领域。常用的蜂窝芯有铝蜂窝、Nomex 蜂窝和玻璃钢蜂窝,面板有铝合金、碳/环氧复合材料、玻璃钢等。但上述蜂窝夹层结构的使用温度通常不超过 200℃。PI 具有优异的耐热性和力学性能,但其蜂窝夹层结构在国内研究较少,航天材料及工艺研究所近年来开展了这方面的探索研究。20 世纪 80 年代以来,国内外在乙炔基和苯乙炔基封端的 PI 树脂方面开展了较系统的研究^[1-3],该类树脂具有以下特点:(1)较之降冰片烯封端的 PI 交联温度提高,一般在 330℃ 以上,这一特性拓宽了复合材料的加工窗口;(2)在交联过程中没有小分子放出;(3)固化后的树脂具有优异的韧性和良好的热

氧化稳定性。此外,研究结果显示异构联苯四酸二酐(a-BPDA)的使用,使 PI 具有更低的熔体黏度和更高的 T_g ,由此成为目前研究的热点之一^[4-7]。但是采用该类树脂制备蜂窝夹层结构的研究还未见报道。本文采用苯乙炔基封端的新型 PI 制备蜂窝夹层结构板,并研究了其成型工艺及性能。

1 实验

1.1 材料

PI 树脂 KH370,胶黏剂 KHPIA-S,中国科学院化学研究所;UT500-12K 碳纤维,日本东邦公司;蜂窝芯,EW-200 无碱平纹玻璃布,蜂窝规格 0.2 mm×5 mm,自制。

1.2 性能测试

TGA 和 DMA 采用 Perkin-Elmer7 系列热分析仪测定,氮气流速 20 mL/min;TGA 升温速率为 10℃/min,DMA 的测试频率为 1 Hz,升温速率为 5℃/min。

收稿日期:2010-11-30

作者简介:赵伟栋,1968 年出生,高级工程师,主要从事耐热结构复合材料技术研究。E-mail:zhaowd67@sina.com

弯曲性能测试采用电子万能试验机 MTS RF/100,按照 GB/T 3356—1999 进行;短梁剪切性能按照 JC/T 773—1996 进行;蜂窝夹层板的平拉强度测试按 GB/T1452—2005 进行;平压性能测试按 GB/T1453—2005 进行;弯曲性能测试按照 GB/T1456—2005 进行。

静态隔热性能试验:采用石英灯加热静态烧蚀隔热性能试验,在前表面温度约为 800℃,稳定段热流密度为 180 kW/m²,总加热时间为 180 s 以及前表面温度约为 1 000℃,稳定段热流密度为 300 kW/m²,总加热时间为 180 s 两个条件下考核材料的隔热性能。

1.3 预浸料与复合材料面板的制备

UT500/KH370 单向带预浸料采用湿法缠绕工艺制得。预浸料的含胶量为 (50±5)%,纤维面密度为 165±2% g/m²,单层厚为 0.15 mm,为了保持较好的黏性和铺覆性,挥发份质量分数控制在 (10±2)%。

复合材料面板采用模压成型工艺制备。将组装好的毛坯料放入高温压机,按照程序升温并加压,保温保压完成复合材料的固化成型。固化温度 370℃,固化压力 1.5~2.0 MPa。面板铺层为 [±45/0/90/0/90/0]_{2S}。

1.4 蜂窝芯的制备

蜂窝芯的制备工艺流程:芯条裁切→浸胶→拉伸→预固化→固化→打磨→下料。

将蜂窝芯裁切为一定高度的芯条,然后将芯条拉伸成蜂窝状,浸入盛有 KH370 胶液的浸胶槽,浸渍时间为 5~30 min,室温晾置后置于烘箱升温至 150~200℃ 预固化成型,然后升温至 350~400℃ 固化。固化后的蜂窝芯经打磨,并按要求的尺寸下料备用。

1.5 面板与蜂窝芯的胶接

面板为 C_f/PI,蜂窝芯为玻璃布/PI。蜂窝夹层结构采用二次固化工艺,分别固化成型面板和蜂窝芯,然后将面板和蜂窝打磨,清洗、晾干,涂抹耐高温胶黏剂或粘附耐高温胶膜,然后将面板和蜂窝贴合,送入热压机,加热、加压,完成蜂窝夹层结构复合材料板材

的成型。制作的复合材料夹层板芯高 25 mm,面板厚 2 mm,密度 110 kg/m³,夹层结构密度 0.27 g/cm³。

2 结果与分析

2.1 复合材料面板的力学性能

制备的 C_f/PI 面板的力学性能见表 1。可看出,UT500/KH370 复合材料 400℃ 层间剪切强度保持率为 57%,400℃ 弯曲强度保持率为 58%,弯曲模量保持率为 85%。可见其高温力学性能优异。

表 1 C_f/PI 面板力学性能

Tab.1 Mechanical properties of C_f/PI

temperature /°C	flexural strength /MPa	flexural modulus /GPa	interlaminare shear strength/MPa
RT	762	47	30
370	566	46	21
400	445	40	17

2.2 C_f/PI 蜂窝夹层板力学性能

表 2 为 C_f/PI 蜂窝夹层板力学性能。由表 2 可见,相比酚醛玻璃钢夹层板 PI 蜂窝夹层板性能较低。原因可能是粘接用的板芯胶不同,酚醛玻璃钢蜂窝夹层板的板芯胶为环氧类胶黏剂,虽然其耐温等级只有 160℃,但是其室温粘接性能优异,因此蜂窝夹层板的平拉强度和压剪性能均表现出了较高的数据。然而蜂窝夹层板所用的板芯胶为耐 320℃ PI 胶黏剂,挥发份较多,高温熔体黏度很高,流动摩擦阻力很大,粘接困难,易造成胶接缺陷,影响粘接效果。另外,PI 蜂窝夹层板的平压强度和压剪强度也较低。虽然两种夹层板选用的芯条同为玻璃布材质,但是节点胶均为耐中温的 X98-11(缩醛烘干胶)。PI 玻璃钢蜂窝芯子的固化温度为 370℃ 以上,固化阶段蜂窝节点胶发生分解炭化,破坏了蜂窝的节点性能。因此,PI 蜂窝夹层板的平压强度和压剪强较低。总体上看 UT500/KH370 复合材料夹层结构板材表现出了较好的力学性能。

表 2 UT500/KH370 蜂窝夹层板力学性能

Tab.2 Mechanical properties of UT500/KH370

material	flatwise compressive strength/MPa	flatwise tensile strength/MPa	panel shear modulus/MPa	flexural stiffness /kN·m ²	flexure core shear modulus/MPa	flexure core shear strength/MPa
EW-100glass wave/phenolics facing	4.42	2.81	107	334	115	2.07
EW-200/Ph honeycore						
carbon/polyimide facing	2.45	1.84	110	1000	98	1.16
EW-200/PI honeycore						

2.3 PI 复合材料蜂窝夹层板的隔热性能

在 168 h、300 kW/m² 热流条件下,所有试样均有

燃烧明火现象,玻璃钢板的火焰较大并伴有很大的噼啪响声,其残样发生严重的分层和整体变形的现象。而碳纤维增强 PI 复合材料层合板燃烧时几乎无响声且火焰较小。试验后没有观察到明显的层间开裂和变形现象。

2.3.1 热流密度为 168 kW/m^2 隔热试验

对 6 mm 厚酚醛树脂玻璃钢层压板、2 mm 厚 UT500/KH370 层压板和 PI 复合材料蜂窝夹层板进行了石英灯隔热试验。

从图 1 可知,不同材料的前表面温度相差较大,这与不同材料的热分解反应和热导率、比热容、传热方式等综合因素有关。反应热高,热导率大、比热容大的表面温度就低。加热 3 min 后,6 mm 玻璃钢的前表面温度约为 878°C ,蜂窝夹层板的前表面温度约为 814°C 。玻璃钢的热导率为 $0.4 \sim 0.6 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,碳纤维增强复合材料的热导率为 $0.8 \sim 1.0 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。两者的比热容相差不多,均为 $0.9 \sim 1.3 \text{ J}/(\text{g}\cdot\text{K})$,因此稳定段玻璃钢呈现出了较高的前表面温度,碳面板的 PI 夹层板呈现出了较低的前表面温度。另外,在初期非稳定段,玻璃钢的前表面温度低于碳面板蜂窝夹层板。这可能是因为酚醛树脂的最大热分解温度较低约为 500°C ,而 PI 的最大热分解温度约为 700°C 。酚醛树脂在较早的时候就已经发生剧烈的热分解和燃烧,带走了大量的热量,降低了前表面温度,曲线上呈现了一定规律性。

6 mm 玻璃钢的背温约 227°C 与蜂窝夹层板的背温约 296°C 。这一结果除了与试样的材质有关外,还与试样在加热过程中的结构变化有关。图 2 中的 (c)、(d) 分别是玻璃钢板和 PI 复合材料夹层板实验结束后的实物照片。

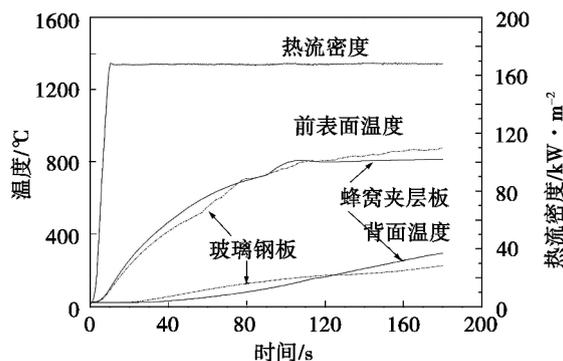
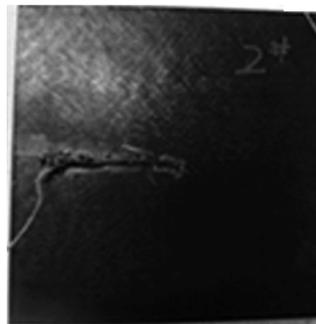


图 1 热流密度为 168 kW/m^2 试样板热流曲线

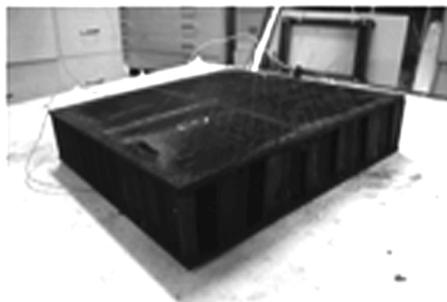
Fig. 1 Curves of 168 kW/m^2 heat flux

对比实验前后试样的照片,可以看出碳夹层板未发生结构变形,而玻璃钢板发生了严重层间开裂和变形,且背面表层颜色变深,说明背面表层也发生了树脂材料工艺 <http://www.yhelgy.com> 2011 年 第 4 期

脂分解。层间开裂造成了层间填充了多层空气层,多层铺层之间可能有反射作用,降低了整体结构的热导率,这对玻璃钢背温的降低有利。PI 复合材料夹层板由于有中间蜂窝在夹层板的厚度方向上是联通的,因此其背温比玻璃钢板高约 70°C 。



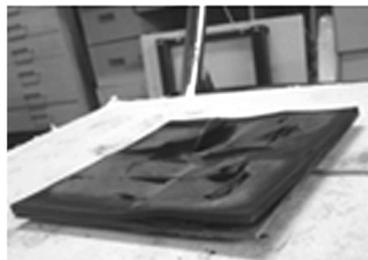
(a) honeycomb sandwich composites before test



(b) honeycomb sandwich composites after test



(c) 6 mm glass fiber reinforced phenolics before test



(d) 6 mm glass fiber reinforced phenolics after test

图 2 热流密度为 168 kW/m^2 石英灯隔热试验

Fig. 2 Test of heat insulation heating with static quartz lamp at 168 kW/m^2 heat flux for 180 s

2.3.2 热流密度为 300 kW/m²隔热试验

试样为 3 种:2 mm 厚碳板、6 mm 厚酚醛玻璃钢板和 PI 蜂窝夹层板加热。从图 3 可知,由于热流密度增加较大,相比 168 kW/m²的试验,试样的温度上升更快。同样也出现了不同材料前表面温度相差较大的现象,但是幅度在增加。3 min 后,2 mm 碳板的前表面温度约为 985℃,6 mm 玻璃钢板的前表面温度约为 1 033℃,蜂窝夹层板的前表面温度约为 954℃。稳定段玻璃钢板呈现出了较高的前表面温度,碳板和碳面板的 PI 夹层板呈现出了较低的前表面温度。另外,在初期非稳定段,由于发生了剧烈的热分解和燃烧现象,前表面温度变化失去了规律性。

2 mm 碳板的背温最高约为 398℃,6 mm 玻璃钢板的背温约 324℃与蜂窝夹层板的背温 320℃相当。这一结果与热流密度为 168 kW/m²的情形类似。图 4 中的(d)、(e)、(f)分别是碳板、玻璃钢板和夹层板实验结束后的实物照片。对比实验前后试样的照片,可以看出 2 mm 碳板和碳面板夹层板几乎没有发生结构变形,而玻璃钢板发生了严重层间开裂和变形,并且背面表层变黑,说明背面表层也发生了树脂分解炭化。同样层间开裂使玻璃钢板层间填充了多层空气层,降低了背温,但是由于温度梯度大,热导率增加,传热速率加快,三者的背温有接近的趋势,蜂窝夹层板的隔热效果与玻璃钢相近。

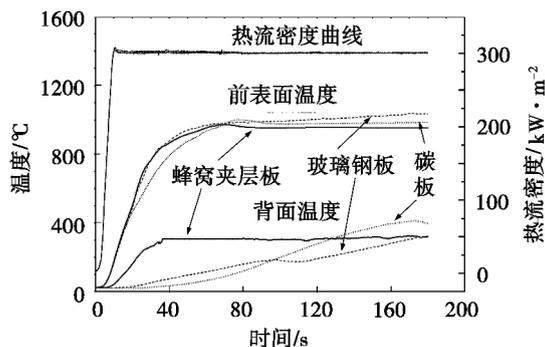
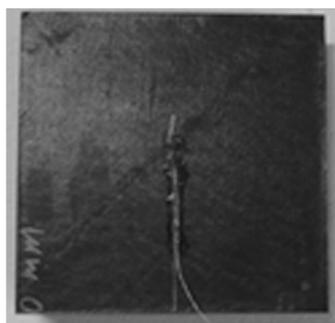


图 3 热流密度为 300 kW/m²试样的热流曲线

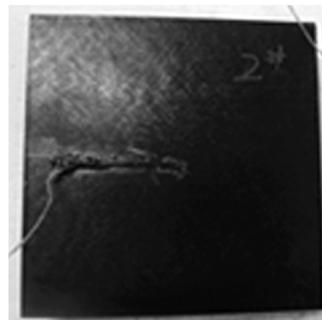
Fig. 3 Curves of 300 kW/m² heat flux



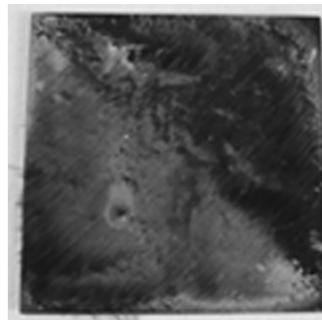
(a) 2 mm carbon panel before test



(b) 6 mm glass fiber reinforced phenolics before test



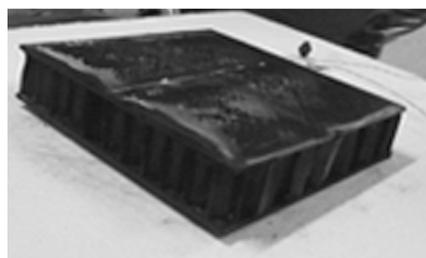
(c) honeycomb sandwich composites before test



(d) 2 mm carbon panel after test



(e) 6 mm glass fiber reinforced phenolics after test



(f) honeycomb sandwich composites after test

图 4 热流密度为 300 kW/m²石英灯隔热试验

Fig. 4 Test of heat insulation heating with static quartz lamp at 300 kW/m² heat flux for 180 s

(下转第 71 页)