

国产高模量碳纤维制备蜂窝夹层结构件的性能评价

李莺歌 张玉生 宫 頔 陈维强 黎 昱 张建峰

(北京卫星制造厂, 北京 100094)



摘要: 采用国产 BHM3 和进口 M40、M40J 高模量碳纤维分别与环氧 4211 和改性氰酸酯 BS-4 树脂制备复合材料层合板, 再与铝蜂窝芯组合制成蜂窝夹层结构件。对比检测两类结构件的平面拉伸和弯曲性能, 以及其内置金属接头的承载能力, 并通过碳纤维表观形貌和碳纤维增强树脂基复合材料的界面性能对测试结果进行分析验证。结果表明, 与同种树脂基体复合, 国产 BHM3 碳纤维制备蜂窝夹层结构件的性能已显著优于进口 M40 碳纤维, 部分性能已接近或优于进口 M40J 碳纤维; 相比较于环氧 4211 树脂基体, 改性氰酸酯 BS-4 树脂更有利于提高国产 BHM3 碳纤维复合材料的力学性能。

关键词: 高模量碳纤维; 复合材料; 蜂窝夹层结构; 力学性能

Performance Evaluation of Honeycomb Sandwich Structural Parts Manufactured by Domestic High-modulus Carbon Fiber

Li Yingge Zhang Yusheng Gong Xu Chen Weiqiang Li Yu Zhang Jianfeng

(Beijing Spacecrafts, Beijing 100190)

Abstract: This paper focused on the performance evaluation of honeycomb sandwich structure samples, which were manufactured by carbon fiber reinforced composite laminates and aluminum honeycomb core. The different laminates were prepared by the high modulus carbon fiber of BHM3, M40 and M40J and the resin of 4211 (epoxy resin) and BS-4 (cyanate ester resin). The plane stretching and bending properties of the honeycomb sandwich structural parts using the different matrix resins as well as the maximal failed load of the embedded metal tooling into the structure were compared. Furthermore, the carbon fiber morphology and interfacial properties of the studied composite materials were investigated to explain the research results. The results show that the properties of the honeycomb structural parts using BHM3 carbon fiber are obviously prior of that using M40 carbon fiber and are basically close to that using M40J carbon fiber when the matrix is identical. Additionally, the properties of the honeycomb structural parts using BS-4 resin are higher than that using 4211 resin when the reinforced fiber is same.

Key words: high-modulus carbon fiber; composite; honeycomb sandwich structure; mechanical properties

1 引言

蜂窝夹层结构件由于质量轻、比强度和比刚度高等显著优点, 已在航空航天领域得到广泛应用^[1]。近年来, 随着深空探测、通信、导航等领域的快速发展, 航天器结构的减重和热稳定性等需求更为迫切。高模

量碳纤维增强树脂基复合材料由于具有比强度和比模量高、热膨胀系数低、结构尺寸稳定、抗疲劳和振动阻尼性能良好等突出优点, 成为航天领域不可替代的战略材料^[2, 3], 已大量应用于航天器蜂窝夹层结构蒙皮的制造。针对进口碳纤维供应紧张, 严重制约国内航空航天等特殊领域的发展, 国内已自主研发成功

作者简介: 李莺歌 (1978-), 高级工程师, 材料工程专业; 研究方向: 星船复合材料成形工艺技术。

收稿日期: 2015-04-16

国产 BHM3 高模量碳纤维,其力学性能和工艺性能已基本稳定,急需开展国产高模量碳纤维制备典型航天器结构件的性能评价,以进一步推进其工程化应用。本文对比验证了国产 BHM3 碳纤维制备蜂窝夹层结构件的相关性能,可作为结构设计的基础依据。

2 实验

2.1 实验方法

利用万能试验机测试蜂窝夹层结构件的力学性能。采用扫描电子显微镜 (SEM) 表征碳纤维表面及其复合材料拉伸断口的物理形貌。采用界面强度微脱粘测试方法,即在显微镜下,选定碳纤维增强树脂基复合材料中的单根纤维,然后利用金刚石探针对其端部施加轴向载荷,使得纤维在一定范围内与周围树脂基体脱粘(脱粘部分的纤维周边呈黑色),记录发生脱粘时的压力和纤维脱粘的百分比,从而反映出树脂与纤维界面的粘接性能。

2.2 试样尺寸及构型

板面 M5 金属接头承载试样是在平面尺寸为 $150\text{mm} \times 150\text{mm}$ 的蜂窝夹层结构内,居中胶接一件 M5 金属接头,通过螺孔对试样施加拉伸载荷,见图 1。

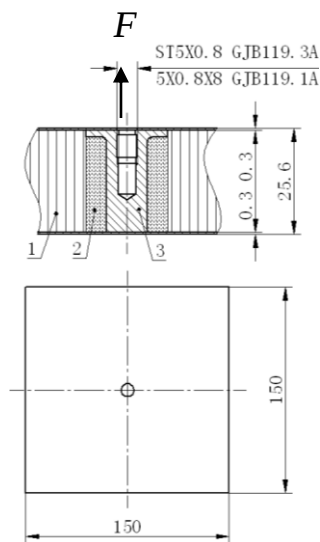


图 1 板面 M5 金属接头承载试样

1—铝蜂窝结构板 2—胶粘剂 3—金属埋件

侧向 M5 金属接头承载试样是在平面尺寸为 $100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 的蜂窝夹层结构内,对称胶接两件 M5 侧向金属接头,通过螺孔对试样施加拉伸载荷,见图 2。

平面拉伸试样尺寸为 $60\text{mm} \times 60\text{mm} \times 21\text{mm}$ 。弯曲试样尺寸为 $600\text{mm} \times 55\text{mm} \times 21\text{mm}$,蜂窝 L 方向为长度方向。

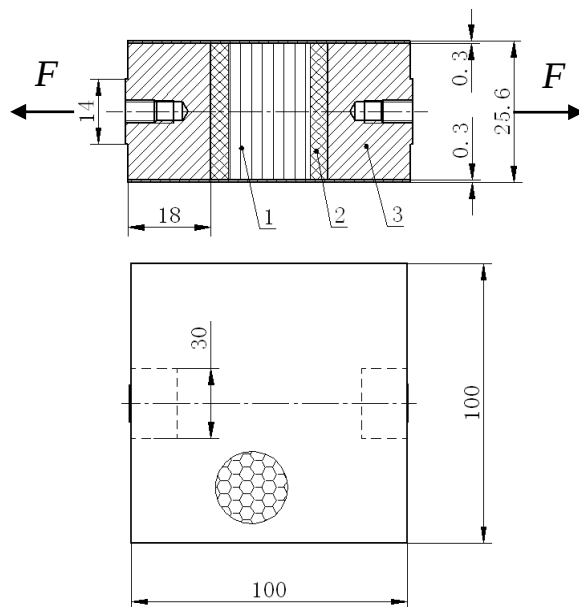


图 2 侧向 M5 金属接头承载试样

1—铝蜂窝结构板 2—胶粘剂 3—金属埋件

2.3 试样材料

进口高模量碳纤维 M40,其拉伸强度为 2740MPa ,拉伸模量为 392GPa ,延伸率为 0.7% ,密度为 1.81g/cm^3 。进口高模量碳纤维 M40J,其拉伸强度为 4410MPa ,拉伸模量为 377GPa ,延伸率为 1.2% ,密度为 1.77g/cm^3 。国产高模量碳纤维, BHM3-3K 型,其复丝力学性能与进口 M40 相当^[4]。

改性氰酸酯 BS-4 为淡黄色粘稠状液体,由氰酸酯树脂和环氧树脂按一定比例配制而成,由北京卫星制造厂复材产品事业部研制^[4]。环氧 4211 是由酚醛环氧树脂与三氟化硼单乙胺络合物组成,其配比为 $100:3$ (质量比)^[5]。

金属接头:直径 22mm 和 35mm 的 2A12-T4 (GB/T3191—1998) 铝合金。铝蜂窝芯:格孔规格 $0.03\text{mm}/5\text{mm}$ 的 LF2-Y (HB5443—90) 有孔蜂窝,平面拉伸和弯曲试样芯高 20.4mm ,金属接头承载试样芯高 25mm 。J-47 系列 (Q/HSY003) 胶粘剂:底胶 J-47B;胶膜 J-47C,厚度 0.15mm ;发泡胶 J-47D,厚度 1mm 。

2.4 试样制备工艺

a. 预浸料:采用热熔法排布机制备 0.08mm 厚的 M40/4211、M40J/4211、BHM3/4211 和 BHM3/BS-4

预浸料，含胶量控制在（36±2）%，挥发分≤0.5%。

b. 复合材料蒙皮：将预浸料按预定尺寸裁剪，按纤维取向[0/+45/-45/90]次序叠合，经真空袋—热压罐法固化成形。4211 树脂固化温度为 165℃，时间 2h，压力 0.4MPa，BS-4 树脂固化温度为 180℃，时间 2h，压力 0.9MPa，并在固化全过程保持-0.1MPa 的真空压。

c. 金属接头：按航天器蜂窝夹层结构常用 M5 接头 P-YM/ZL-5×250 和 M5 侧向接头 P-YM/CL-5×250 加工。

d. 表面处理：金属接头采用胶接磷酸阳极氧化法清洗，蜂窝芯端面采用有机溶剂清洗，复合材料蒙皮采用细砂纸打磨胶接面表层树脂后再用有机溶剂清洗。

e. 夹层结构胶接工艺：按（80±20）g/m² 用量，在蒙皮和接头的胶接面均匀涂底胶，然后铺放胶膜，并通过发泡胶将埋件与周围蜂窝芯进行胶接。

f. 夹层结构固化工艺：采用真空袋—热压罐法固化，固化温度 130℃，时间 2h，压力 0.12MPa^[6]。

2.5 性能测试

2.5.1 测试设备和夹具

测试设备为美国 Instron 公司 Instron5982 型万能材料试验机。其中，板面 M5 金属接头的承载测试需要专用夹具，其底板上设计螺纹接口，可通过紧固螺杆与试验机固定；上压板中心设计 Φ60mm 的加载口，试样加载螺杆可通过加载口与试验机连接，对试样施加拉脱力；调平块用以控制试样与底板和上压板的平行度^[7]。侧向 M5 金属接头可在螺孔内对称安装紧固螺杆和加载螺杆，通过试验机施加纵向拉伸载荷。

表 2 蜂窝夹层结构弯曲性能

项目	BHM3/BS-4 蒙皮		BHM3/4211 蒙皮		M40/4211 蒙皮		M40J/4211 蒙皮	
	D/N mm ²	C/kN	D/N mm ²	C/kN	D/N mm ²	C/kN	D/N mm ²	C/kN
最小值	3.78E+08	114	3.56E+08	105	3.40E+08	55	3.67E+08	110
最大值	4.08E+08	133	3.90E+08	118	3.62E+08	60	3.95E+08	135
平均值	3.89E+08	120	3.71E+08	109	3.52E+08	58	3.77E+08	125

注：D 为蜂窝夹层结构的弯曲刚度，C 为剪切刚度。

表 3 金属接头承载性能

项目	BHM3/BS-4 蒙皮		BHM3/4211 蒙皮		M40/4211 蒙皮		M40J/4211 蒙皮	
	ZL-5	CL-5	ZL-5	CL-5	ZL-5	CL-5	ZL-5	CL-5
最小值	2545	7836	2011	7705	2037	6202	2430	6155
最大值	3193	9536	2597	8010	2247	6843	4272	7260
平均值	2913	8658	2239	7755	2118	6528	2948	6697

2.5.2 测试标准及装夹加载方式

平面拉伸性能测试按 GJB130.4—1986 执行。弯曲性能测试按 GJB130.9—1986 执行，测试跨距为 300mm。

金属接头承载性能测试过程应确保试验机对中，要求试样的紧固螺杆、加载螺杆与接头的螺孔端面垂直，且螺杆轴心与螺孔孔心位于同一轴线。测试时先预加载 0.1kN，再以 5mm/min 的速度逐级加载直至试样破坏。

3 结果与讨论

3.1 测试结果

采用不同复合材料制备蒙皮的蜂窝夹层结构，其平面拉伸性能测试结果见表 1，弯曲性能测试结果见表 2，金属接头承载性能见表 3。

表 1 蜂窝夹层结构平面拉伸强度

项目	BHM3/BS-4 蒙皮	M40J/4211 蒙皮
最小值/MPa	2.28	2.34
最大值/MPa	2.61	2.67
平均值/MPa	2.43	2.49

测试结果表明，对于同种树脂基体，国产 BHM3 碳纤维制备蜂窝夹层结构件的性能已显著优于进口 M40 碳纤维，部分性能如蜂窝夹层结构弯曲刚度、剪切刚度和侧向 M5 金属接头承载能力已接近或优于进口 M40J 碳纤维。

同时，实验还发现，国产 BHM3 碳纤维与改性氰酸酯 BS-4 树脂复合制备蜂窝夹层结构蒙皮，其结构件性能更加优异，已与进口 M40J/4211 复合材料蒙皮结构件相当，明显优于 BHM3/4211 复合材料。

3.2 结果分析

3.2.1 碳纤维表面形貌的影响分析

采用扫描电子显微镜（SEM）对 M40、M40J 和 BHM3 碳纤维的表面进行微观观察，其形貌见图 3。

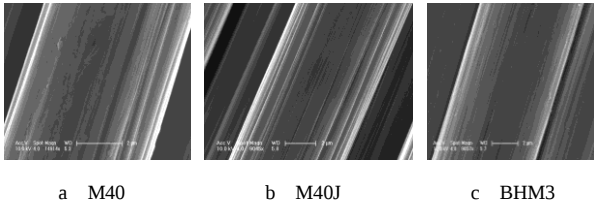


图 3 碳纤维扫描电子显微镜照片

从图 3 可以看出，几种碳纤维表面均有明显的沟槽状起伏。沟槽的方向沿纤维轴向，在可见的范围内是连续的，没有明显的断裂或改变。通过与原丝的对比，认为这种形貌是两方面因素的综合结果：纤维在制备过程中的拉伸，以及在高温炭化过程中的熔化结晶、出气和冷却。这种连续的沟槽状起伏会增加碳纤维的表面积，并且在一定程度上可以形成“锚固”效应，从而可提高碳纤维与树脂之间的界面强度，进一步促进纤维与树脂的连接。对比三种碳纤维，可以看出进口碳纤维 M40J 的纤维取向更规整，其表面沟槽深度和密度更大，国产 BHM3 略优于进口 M40。因此，三种碳纤维树脂基复合材料的力学性能表现为 M40J 最优，BHM3 略优于进口 M40，与其制备蜂窝夹层结构件的力学性能测试结果吻合。

3.2.2 复合材料界面性能的影响分析

碳纤维增强树脂基复合材料的性能不仅取决于增强体和基体的自身性能，而且增强体和基体的界面粘接性能对其也有显著影响。良好的界面结合有利于载荷的有效传递，可提高复合材料的力学性能^[8]。为了解国产 BHM3、进口 M40 碳纤维与 4211 和 BS-4 树脂基体的界面结合情况，对其界面性能（微脱粘）进行测试，结果见表 4。

表 4 复合材料界面性能

项目	M40/4211	M40/BS-4	BHM3/4211	BHM3/BS-4
脱粘力值/cN	3.7	5.9	3.5	5.2

表 4 数据表明，对于同种树脂基体，BHM3 碳纤维与树脂的界面脱粘力值与 M40 碳纤维相当。对于同种碳纤维，与改性氰酸酯 BS-4 的界面粘接性能明显优于环氧 4211。分析认为 BS-4 树脂由环氧改性氰酸酯获得，由于环氧树脂的加入，使氰酸酯树脂在保

持其良好的力学性能、介电性能的同时脆性获得改善，韧性得到提高，树脂与碳纤维的界面结合力也会得到一定程度的提高。因此，改性氰酸酯 BS-4 与碳纤维复合材料的力学性能较 4211 树脂有显著提高，其复合材料制成的结构件性能也相对较高。

图 4 为 M40/4211 和 BHM3/4211 复合材料单向层合板拉伸破坏的断口形貌，图中深色圆孔为纤维单丝从树脂中拔出留下的空洞。由此可知，M40 和 BHM3 碳纤维对 4211 树脂都存在不同程度的拔出现象，局部纤维与树脂的界面结合不理想。这说明碳纤维表面与树脂基体间存在不匹配现象，可能是缺少具有相容性的分子和官能团，也可能是碳纤维表面的沟槽形貌不理想，没有实现“锚固”效应。仔细观察可以发现，M40 碳纤维与树脂的脱离现象更加严重，而 BHM3 碳纤维情况相对较好，脱离现象较少，因此 BHM3/4211 复合材料结构件的力学性能优于 M40/4211。

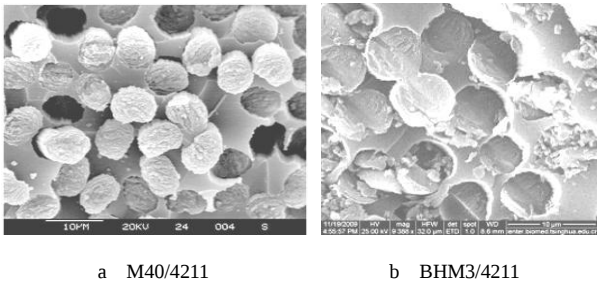


图 4 碳纤维/树脂拉伸破坏的断口 SEM 照片

4 结束语

通过实验研究，得出以下结论：

- a. 与同种树脂基体复合，国产 BHM3 碳纤维制备蜂窝夹层结构件的性能已显著优于进口 M40 碳纤维，部分性能已接近或优于进口 M40J 碳纤维。
- b. 相比较于环氧 4211 树脂基体，改性氰酸酯 BS-4 树脂更有利于提高国产 BHM3 碳纤维复合材料的力学性能，其结构件性能已与进口 M40J/4211 相当。
- c. 国产 BHM3 碳纤维表面沟槽形貌与进口碳纤维相似，沟槽深度和密度略优于进口 M40 碳纤维，但距 M40J 碳纤维还有一定差距。
- d. 对于同种树脂基体，国产 BHM3 碳纤维与树脂的界面脱粘力值与进口 M40 碳纤维相当；对于同种碳纤维，与改性氰酸酯 BS-4 的界面粘接性能明显优于环氧 4211。

（下转第 15 页）