

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.07.009

五边形柔性芳纶纸蜂窝的制备及性能

赵聪, 刘文品, 蒋明燕, 杨进军, 尹龙

(中航复合材料有限责任公司, 北京 101300)

摘要: 为满足大曲率部件对蜂窝材料柔性的要求, 丰富国产芳纶纸蜂窝的种类, 进一步拓展国内外蜂窝市场, 在传统正六边形芳纶纸蜂窝制造工艺的基础上, 优化工艺技术, 研制了一种孔格为五边形结构的新型柔性芳纶纸蜂窝 ACCH-2I-2.75-48D (孔格边长为 2.75 mm, 密度为 48 kg/m³)。测试了三种国产芳纶纸制备的柔性蜂窝的物理性能、力学性能、泊松比及阻燃性能, 参照了欧洲复材(EC)相同规格的柔性芳纶纸蜂窝力学性能指标值, 且与现有相同规格的正六边形芳纶纸蜂窝(ACCH-2I-2.75-48)和过拉伸芳纶纸蜂窝[ACCH-2I-2.75-48 (OX)]的力学性能指标进行了对比。测试结果表明, 五边形柔性蜂窝孔格规整, 外观无缺陷, 物理性能稳定, 平面压缩强度、剪切强度和剪切模量达到了 EC 柔性蜂窝的指标值要求, 力学性能达到批次间稳定, 蜂窝在纵向和横向均具有良好的柔性且阻燃性能优异。结果证明, 五边形柔性芳纶纸蜂窝的制造工艺已完备, 研制的五边形柔性蜂窝具有优异和稳定的综合性能, 满足作为夹层结构材料芯材的基本要求。

关键词: 芳纶纸蜂窝; 复合材料; 柔性; 力学性能; 泊松比

中图分类号: V262.415 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)07-0057-07

Preparation and properties of pentagonal flexible aramid paper honeycomb

ZHAO Cong, LIU Wenpin, JIANG Mingyan, YANG Jinjun, YIN Long

(AVIC Composite Corporation Ltd., Beijing 101300, China)

Abstract : In order to meet the requirements of large curvature parts for the flexibility of honeycomb materials, enrich the types of domestic aramid paper honeycomb, and further expand the honeycomb global markets, a new flexible aramid paper honeycomb ACCH-2I-2.75-48D with a pentagonal structure (the cell size is 2.75 mm, density is 48 kg/m³) was developed on the basis of the traditional hexagonal aramid paper honeycomb manufacturing process. The physical properties, mechanical properties, Poisson's ratio and flame retardant properties of three kinds of flexible honeycombs prepared from domestic aramid paper were tested. The mechanical properties of pentagonal flexible aramid paper honeycomb were compared with the requirements of the flexible aramid paper honeycomb of european composites (EC), the hexagonal aramid paper honeycomb (ACCH-2I-2.75-48) and over-expanded aramid paper honeycomb [ACCH-2I-2.75-48 (OX)] of the same specification. The results show that the pentagonal flexible honeycomb has excellent properties, which has regular cell size, the stable physical properties and no visible defects. The compressive strength, shear strength and shear modulus can meet the requirements of EC flexible honeycomb, and the mechanical properties are stable between batches. The honeycomb also has good flexibility in both longitudinal and transverse and excellent flame retardant properties. The results show that the manufacturing process of pentagonal flexible aramid paper honeycomb is relatively complete, the pentagonal flexible honeycomb has excellent and stable comprehensive properties, which meets the basic requirements as the core material of sandwich structure material.

Keywords : aramid paper honeycomb ; composite ; flexible ; mechanical property ; Poisson's ratio

蜂窝芯材是一种超轻材料, 具有优异的力学性能, 这主要源于其特殊的孔格结构。填充蜂窝孔格

内部空间的互连网络结构, 使得蜂窝材料有着较高的孔隙率和更低的密度, 从而具有较高的强度^[1-2]。

通信作者: 赵聪, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为芳纶纸蜂窝的研制及性能

收稿日期: 2024-05-23

引用格式: 赵聪, 刘文品, 蒋明燕, 等. 五边形柔性芳纶纸蜂窝的制备及性能[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(7): 57-63.

ZHAO Cong, LIU Wenpin, JIANG Mingyan, et al. Preparation and properties of pentagonal flexible aramid paper honeycomb[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(7): 57-63.

蜂窝材料还具有刚度大、弯曲和压缩强度大等优点,在航空航天、轨道交通、船舶、卫星和医疗器械等领域得到了广泛应用^[3-7]。蜂窝芯材可分为铝蜂窝、芳纶纸蜂窝以及玻璃布蜂窝等,芳纶纸蜂窝因其局部失稳问题较小、质轻、没有电化学腐蚀且满足烟雾毒性(FST)要求,所以应用更为广泛^[8-10]。

在航空领域,随着复合材料应用范围的扩大,某些部件在型面设计上更加复杂化,对蜂窝材料的要求更加多样化。芳纶纸蜂窝常用于飞机内饰、地板、机身侧壁板机翼前缘等部件^[11-14]。传统的正六边形蜂窝及过拉伸蜂窝只能成型平面或曲率小的柱面蜂窝制品,用于成型大曲率蜂窝制品时,普通六边形及过拉伸蜂窝夹层结构,难以抵抗生产和使用中的面内大变形和面外高承载的要求,易出现马鞍型形变,如飞机雷达罩^[15]、柔性机翼^[16]等,其变形能力无法满足成型和使用要求,容易产生节点开裂等问题,且有时需要进行分切和拼接,这不仅增加了工艺难度,对蜂窝制品的质量和性能稳定性也造成影响,工艺性和使用性难以满足使用需求。柔性蜂窝改变传统的蜂窝格型,蜂窝具有极其优异的各方向柔软性,能够减少蜂窝材料的刚性,赋予蜂窝易于变形的特性,使其在加工过程中不会产生结构破坏,同时还具有与传统蜂窝相当的物理及力学性能,可以满足众多复杂曲率制件的设计要求,解决复合材料面内变形与面外承载之间的矛盾,在复合材料结构设计和应用中具有更多的优势^[17-19]。

中航复合材料有限责任公司基于国内外芳纶纸蜂窝的市场需求和自身发展的需要,以国产芳纶纸为原材料,开展了五边形柔性芳纶纸蜂窝的研制。对柔性蜂窝的密度、孔格、水迁移等物理性能,平面压缩强度、剪切强度及模量等力学性能、泊松比以及阻燃性能等进行测试,并与欧洲复材(EC) 3D柔性蜂窝以及正六边形(ACCH-2I-2.75-48)和过拉伸芳纶纸蜂窝[ACCH-2I-2.75-48 (OX)]的力学性能指标值进行比较。笔者研制的五边形柔性芳纶纸蜂窝为解决现有技术的蜂窝结构不能满足较大曲率部件成型的问题提供一种途径,对丰富蜂窝产品以及满足我国新机型所需更高性能的蜂窝芯材起到积极的作用。

1 实验部分

1.1 主要原材料

蜂窝基材 A 型芳纶纸:株洲时代华先材料科技

有限公司;

蜂窝基材 X 型芳纶纸:超美斯新材料股份有限公司;

蜂窝基材 Y 型芳纶纸:烟台民士达特种纸业股份有限公司;

蜂窝芯条黏结:J 型节点胶,黑龙江石油化工研究院;

蜂窝增强材料:P 型浸渍树脂,南通住友电木有限公司。

1.2 主要仪器及设备

电子天平:JJ2000B,常熟市双杰测试仪器厂;

高温烘箱:H888,北京众磊创新科技有限公司;

万能力学试验机:Instron 5982,美国英斯特朗公司;

垂直燃烧箱:CZF-3,南京江宁分析仪器有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):Qtattoo S,赛默飞世尔科技(中国)有限公司。

1.3 柔性蜂窝制备及试样制作

五边形柔性芳纶纸蜂窝的制备工艺路线见图 1。研制出五边形柔性芳纶纸蜂窝孔格呈“人”字形结构,孔格单元由一条自由边和一条柔性边组成,如图 2 所示。采用 A 型、X 型以及 Y 型三种国产芳纶纸,按照涂胶、叠合、压制、拉伸、定型、浸胶、烘干、固化、片切等工序,制备了孔格边长为 2.75 mm、蜂窝密度为 48 kg/m³ 的五边形柔性芳纶纸蜂窝,芳纶纸蜂窝牌号为 ACCH-2I-2.75-48D,其孔格规整均匀,无外来杂质、无明显树脂堆积和缺树脂现象。

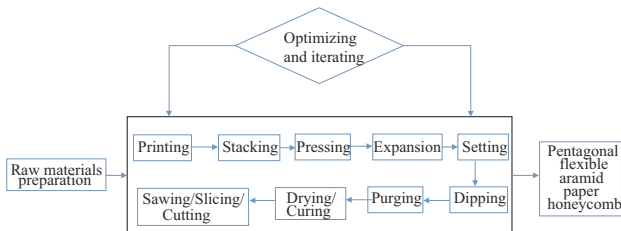


图 1 五边形柔性芳纶纸蜂窝制备工艺路线

Fig. 1 Process route of pentagonal flexible honeycomb

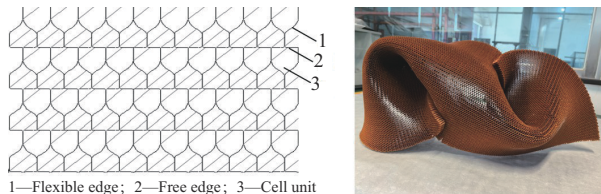


图 2 五边形柔性芳纶纸蜂窝

Fig. 2 Pentagonal flexible honeycomb

采用A型、X型以及Y型三种芳纶纸制备的五边形柔性芳纶纸蜂窝分别命名为FH1, FH2, FH3, 柔性蜂窝经切片后, 按照物理、力学、泊松比和阻燃的测试标准进行试验样品的制备和测试。

1.4 性能测试与表征

1.4.1 五边形柔性芳纶纸蜂窝的物理性能测试

(1)水迁移:按照ASTM F1645-2022对五边形柔性芳纶纸蜂窝进行水迁移测试,设备为酸式滴定管。

(2)尺寸稳定性:按照Q/ZHFC 8573-2019对五边形柔性芳纶纸蜂窝进行尺寸稳定性测试,测试设备为高温烘箱和钢卷尺。测试方法为:裁切纵向(L 向)尺寸不小于457 mm,横向(W 向)尺寸不小于914 mm,厚度为 (12.7 ± 0.15) mm的试样;将试样水平放置,在蜂窝芯材 W 或 L 方向至少距边缘50 mm的范围内,垂直于 L 或 W 向等间距用黑色油性笔(加热后不褪色)和钢板尺画3条测量线;测量并记录测量线的尺寸(L_0);然后将试样水平放在预热至 $(177\pm 5)^\circ\text{C}$ 的烘箱中,保温90~100 min后,将试样从烘箱中取出并冷却至 $(23\pm 3)^\circ\text{C}$;重复测量并记录试样原测量线的尺寸(L_1),按公式 $R = (L_1 - L_0)/L_0 \times 100\%$ 计算尺寸变化率。

(3)密度:按照ASTM C271M-2016规定对五边形柔性芳纶纸蜂窝进行密度测试,测试设备为电子天平和数显卡尺。

1.4.2 五边形柔性芳纶纸蜂窝的泊松比测试方法

测试按照ASTM D6790M-2022规定进行,测试设备为专用工装及游标卡尺。

1.4.3 五边形柔性芳纶纸蜂窝的力学性能测试

(1)平面压缩强度:测试按照ASTM C365M-2022规定进行,测试设备为万能力学试验机。

(2)剪切强度及模量:测试按照ASTM C273M-2020规定进行,测试设备为万能力学试验机。

1.4.4 五边形柔性芳纶纸蜂窝的阻燃性能测试

按照CCAR-25-R4-2011规定,对五边形柔性芳纶纸蜂窝的阻燃性能进行测试,测试设备为垂直燃烧箱。

1.4.5 五边形柔性芳纶纸蜂窝的形貌测试

通过SEM测试观察五边形柔性芳纶纸蜂窝平面压缩强度、剪切强度测试后表面及断面形貌,垂直燃烧测试后的残炭形貌,测试前用真空镀膜仪对充分干燥后的样品进行喷金处理,扫描电压为10

kV。

2 结果与讨论

A型、X型以及Y型三种芳纶纸制备的五边形柔性芳纶纸蜂窝,即FH1, FH2, FH3,测试了蜂窝的物理、泊松比、力学和阻燃性能,每种规格蜂窝各测试三批次,并将三批次平均值列入图表中。

2.1 五边形柔性芳纶纸蜂窝的物理性能

2.1.1 密度

在研制五边形柔性芳纶纸蜂窝时,考虑到蜂窝格型的改变,对浸胶工艺进行了工艺探索和优化,五边形柔性芳纶纸蜂窝的物理性能见表1。对三种国产芳纶纸制备的柔性蜂窝进行密度测试,从表1的密度数据可以看出,五边形柔性芳纶纸蜂窝的密度集中在 $47.6\sim 49.7\text{ kg/m}^3$ 之间,满足Q/ZHFC 8573-2019标准中“蜂窝芯材的密度偏差为 $\pm 10\%$ ($43.2\sim 52.8\text{ kg/m}^3$)”的指标要求,证明五边形柔性芳纶纸蜂窝的浸胶过程稳定,浸胶工艺优化效果和过程控制较为良好。

表1 五边形柔性芳纶纸蜂窝的物理性能

Honeycomb type	Density/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Water migration/cell	Core dimensions/%	
			L -direction	W -direction
FH1	47.6	0	-0.414	-0.399
FH2	49.7	1	-0.157	-0.231
FH3	48.5	1	-0.173	-0.189
Requirements	43.2~52.8	≤ 6	-1.5~1.5	

2.1.2 水迁移

芳纶纸蜂窝的水迁移性能受到原材料芳纶纸的吸水性、节点胶接的能力以及制样时面板胶接和高度的多重影响,反映出蒸馏水在蜂窝孔格间迁移的速率。五边形柔性芳纶纸蜂窝的水迁移测试结果见表1,柔性蜂窝的水迁移孔格数量均为0个或1个,符合Q/ZHFC 8573-2019标准中“蜂窝芯材的水迁移应限制在6个相邻的孔格之内”的要求,性能合格。反映出柔性蜂窝研制过程中,叠合工艺和蜂窝孔格格型的改变不影响蜂窝边的胶接性能,满足作为夹芯材料的使用要求。

2.1.3 尺寸稳定性

五边形柔性芳纶纸蜂窝的尺寸稳定性测试结果见表1,柔性芳纶纸蜂窝试样经过升温、在 $(177\pm 5)^\circ\text{C}$ 保温100 min和降温至室温的整个过程, L 向和 W 向的尺寸变形量均在 $-0.5\%\sim 0.5\%$ 以内,满足Q/ZHFC 8573-2019标准中“蜂窝芯材的 W 向和 L 向

方向尺寸稳定性偏差为 $\pm 1.5\%$ ”的指标值要求,具有较小的形变量。

2.2 五边形柔性芳纶纸蜂窝的泊松比

泊松比是指材料由单轴向应力引起应变时,其横向应变与轴向应变的比值。对于蜂窝材料,在受力时孔格在 L 向和 W 向均会发生变形,且蜂窝材料不满足均质和各向同性的条件,因此需分别考虑 L 向和 W 向的泊松比。对五边形柔性芳纶纸蜂窝、六边形蜂窝(2.75-48)及过拉伸蜂窝[2.75-48 (OX)]进行泊松比测试,从图3可以观察到三种蜂窝的泊松比对比情况,其变化呈一定规律:五边形柔性蜂窝、正六边形蜂窝和过拉伸蜂窝的 L 向泊松比均大于 W 向泊松比;柔性蜂窝的 L 向泊松比均小于正六边形和过拉伸蜂窝, W 向泊松比与过拉伸蜂窝相当;具有良好的 W 向变形能力的过拉伸蜂窝,其 W 向泊松比远小于 L 向;对于 L 向和 W 向变形能力相差不大的正六边形蜂窝,其 L 向和 W 向泊松比测试值较为相近。蜂窝泊松比测试结果表明了三类蜂窝芯材实际的变形能力,可知五边形柔性蜂窝在 L 向和 W 向均具有良好的变形能力,这一性能使得面对曲率较为复杂的零件加工需求时,五边形柔性蜂窝具有比正六边形和过拉伸蜂窝更好的各向加工和变形能力,且结构不易破坏。

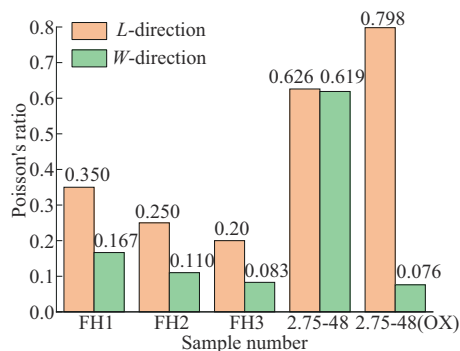


图3 不同蜂窝类型的泊松比

Fig. 3 Poisson's ratio of different honeycomb types

2.3 五边形柔性芳纶纸蜂窝的力学性能

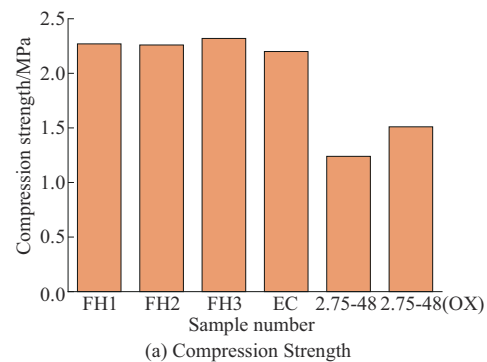
对制备的ACCH-2I-2.75-48D五边形柔性芳纶纸蜂窝进行了力学性能测试,并与欧洲复材(EC)相同规格的柔性蜂窝、现有相同规格的正六边形和过拉伸蜂窝力学性能比较。力学试验的项目为常温平面压缩强度、剪切强度及模量测试。力学性能数据见表2和图4。

由表2和图4可知,三种国产间位芳纶纸制备

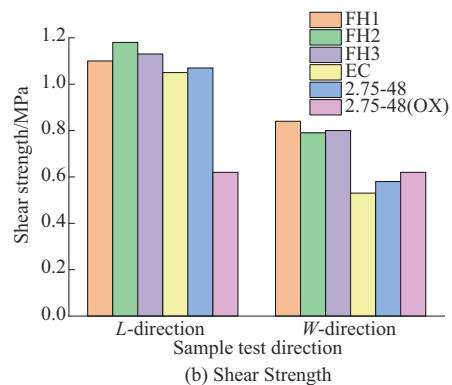
表2 不同蜂窝类型的力学性能对比

Tab. 2 Comparison of mechanical properties of different honeycomb types

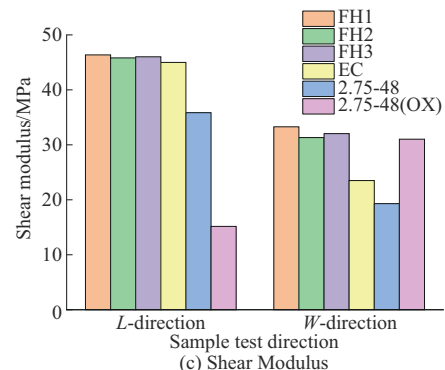
Honeycomb type	Compression strength/MPa	Shear strength/MPa		Shear modulus/MPa	
		L -direction	W -direction	L -direction	W -direction
FH1	2.27	1.10	0.84	46.36	33.28
FH2	2.26	1.18	0.79	45.83	31.32
FH3	2.32	1.13	0.80	46.03	32.04
EC	2.2	1.05	0.53	45	23.5
2.75-48	1.24	1.07	0.58	35.86	19.31
2.75-48 (OX)	1.51	0.62	0.62	15.17	31.03



(a) Compression Strength



(b) Shear Strength



(c) Shear Modulus

图4 不同蜂窝类型的力学性能

Fig. 4 Mechanical properties of different honeycomb types

的五边形柔性芳纶纸蜂窝,其常温非稳态平压和剪切性能均能够达到欧洲复材(EC)柔性蜂窝的指标

值,同时可看出,五边形柔性蜂窝的力学性能不低于同孔格尺寸和密度的正六边形和过拉伸蜂窝,表现出了较好的力学性能。蜂窝材料由于其特殊的结构, W 方向在承受拉剪力时,只有平行于力的方向的孔格壁承受剪力载荷作用,而 L 方向受力时,所有孔格壁均会承受应力,因此从剪切模量的测试数据可以看出,五边形蜂窝的 L 向剪切模量比 W 向剪切模量高40%左右,其在 L 向和 W 向都表现出了较好的抗剪切变形的能力。

对经平面压缩测试和剪切性能测试的试样破坏处形貌进行分析。图5为平面压缩性能测试后的试样图片,由图5可以看出,五边形柔性芳纶纸蜂窝经平面压缩性能测试后,芯材受力面外观无破损,反映此工艺制备的五边形柔性芳纶纸蜂窝厚度均匀性较好;蜂窝芯的侧面仅有裂纹产生,而没有断裂现象出现或被压溃,破坏模式为均匀破坏。通过SEM对平压测试产生裂纹处形貌进行观察,可以看出五边形芳纶纸蜂窝经平面压缩测试后,仅为表面浸渍树脂层断裂,而被浸渍树脂包裹着的蜂窝基体芳纶纸并没有断裂,表现出良好的压缩强度和能

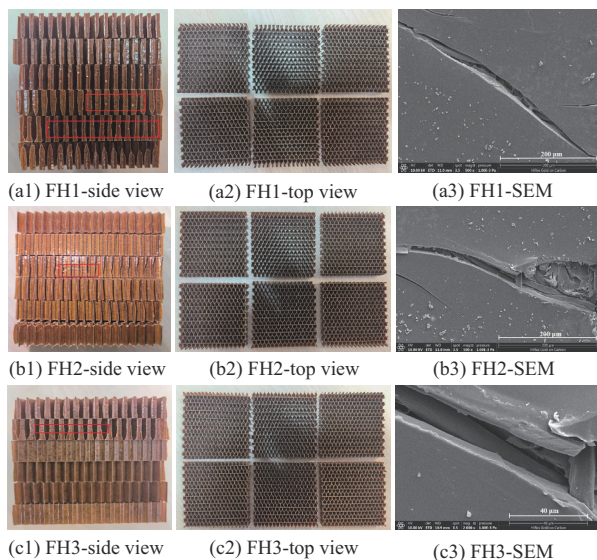


图5 五边形柔性蜂窝平面压缩测试后的数码照片和SEM图片
Fig. 5 Digital image and SEM image after flatwise compressive properties test of pentagonal flexible honeycomb

五边形柔性芳纶纸蜂窝经平拉剪切测试后,蜂窝侧面产生少量裂纹及少量芯格壁断裂,破坏模式为蜂窝芯破坏,对蜂窝侧面芯格壁断裂处进行断面形貌分析,如图6和图7所示。从图6和图7可以看出,芳纶纸纤维的空隙填充了浸渍树脂,两者紧密

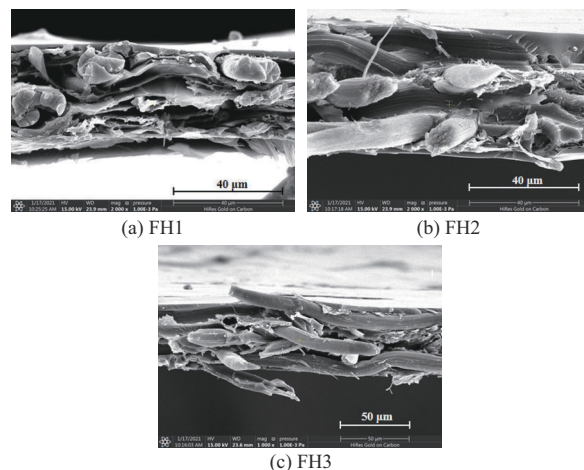


图6 五边形柔性蜂窝 L 向剪切测试后的SEM图片
Fig. 6 SEM image after L -direction shear properties test of pentagonal flexible honeycomb

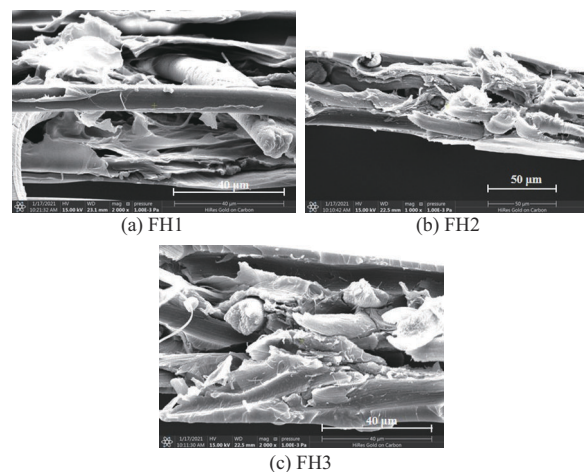


图7 五边形柔性蜂窝 W 向剪切测试后的SEM图片
Fig. 7 SEM image after W -direction shear properties test of pentagonal flexible honeycomb

结合,形成较好的界面强度,在受到剪切力时,芳纶纤维不能直接从结合基体中拔出,需经纤维与纤维之间的界面结合和纤维与浸渍树脂之间的界面受力发生破坏后,纤维才能发生断裂或从基体中拔出,因此剪切断裂面的微观形貌表现为纤维的不平整断裂。

同时,三种国产芳纶纸制备的柔性芳纶纸蜂窝,其平面压缩强度及剪切强度的批次间离散均低于10%(表3),剪切模量的批次间离散低于12%,批次间力学性能稳定,证明五边形柔性芳纶纸蜂窝的制备工艺已较成熟,力学性能能够满足其作为夹芯材料的要求。

2.4 五边形柔性芳纶纸蜂窝的阻燃性能

阻燃性能是蜂窝芯材的一项重要特性,受到材

表3 五边形柔性蜂窝力学性能批次间离散系数
Tab. 3 CV value of machanical properties for all batches for pentagonal flexible honeycomb

Honeycomb type	Compression strength	Shear strength		Shear modulus	
		<i>L</i> -direction	<i>W</i> -direction	<i>L</i> -direction	<i>W</i> -direction
FH1	2.83	3.15	4.16	1.42	3.91
FH2	2.70	3.43	3.85	1.25	0.52
FH3	7.99	2.85	8.69	2.19	10.46

料芳纶纸、浸渍树脂以及树脂在芳纶纸表面的包裹效果的影响。蜂窝原材料芳纶纸耐高温,在燃烧时能够形成致密炭层,浸渍树脂具有高度交联和芳香环结构,在燃烧受热时能够吸收大量热,且高温热解的残炭率较高,有助于提高炭层的热稳定性和蜂窝材料的抑烟性能,抑制熔滴的产生,增加火灾的安全性^[20]。

五边形柔性芳纶纸蜂窝的60 s垂直燃烧测试结果见表4。从表4可以看出,三种芳纶纸制备的柔性蜂窝的自熄时间均为0 s,均无滴落物产生,其中最大燃烧长度为54.27 mm,均满足CCAR-25-R4-2011规定的要求,展现出优异的阻燃性能,满足其作为飞机内饰或结构件使用的需求。对经垂直燃烧测试后的蜂窝微观形貌进行分析,如图8所示。由图8可以发现,蜂窝经燃烧测试后,表面形成连续性和致密性较好的炭层结构,炭层表面有连续凸起的鼓包,并且观察不到任何孔洞。蜂窝在燃烧时形成了高质量的炭层,能够承受燃烧时产生的气体和烟雾向外界挥发时的作用力,气体不能冲破炭层表面,因此出现鼓包;结构稳定的炭层还能够有效抑制裂纹的产生和生长,阻止燃烧过程中蜂窝内部的热量与产生的可燃性气体外溢,外界的氧气也无法进入蜂窝内部,阻止蜂窝内部的持续燃烧,同时能够抑制熔滴产生,在凝固相发挥较好的阻燃作用。

表4 五边形柔性蜂窝的阻燃性能

Tab. 4 Flame retardant properties of pentagonal flexible honeycomb

Honeycomb type	60 s Vertical burn test		
	Self-extinguishing time/s	Maximum drip extinguishing time/s	Maximum burn length/mm
FH1	0	0	54.27
FH2	0	0	53.50
FH3	0	0	55.57
Requirements	≤5	≤1	≤75

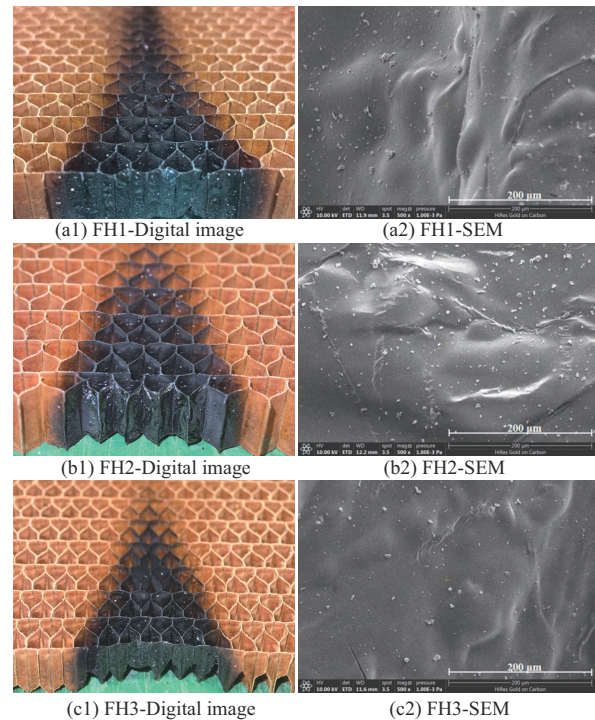


图8 五边形柔性芳纶纸蜂窝60 s垂直燃烧测试后的数码照片和SEM图片

Fig. 8 Digital image and SEM image after 60 s vertical burn test of the pentagonal flexible honeycomb

3 结论

采用三种国产芳纶纸研制了一种五边形柔性芳纶纸蜂窝,蜂窝孔格呈“人”字型结构,孔格单元由一条自由边和一条柔性边组成,并测试了柔性芳纶纸蜂窝物理、泊松比、力学和阻燃性能,形成结论如下。

(1)五边形柔性芳纶纸蜂窝的物理和阻燃性能均满足指标值要求,泊松比测试结果表明五边形柔性芳纶纸蜂窝具有良好的*L*向和*W*向变形的能力。

(2)五边形柔性芳纶纸蜂窝的常温平压和剪切性能均达到EC相同规格柔性蜂窝的指标值,且不低于同规格的正六边形(2.75-48)及过拉伸[2.75-48(OX)]蜂窝,具有良好的力学性能。

五边形柔性芳纶纸蜂窝已具备较为完整的制造工艺,可为大曲率结构件上选材提供参考,但其在不同环境性能条件下的力学性能以及工艺适应性评价等,将在后续的工作中继续开展和完善。

参考文献

- [1] HE M, HU W. A study on composite honeycomb sandwich panel structure[J]. Materials & Design, 2008, 29(3):709-713.
- [2] QI C, JIANG F, YANG S. Advanced honeycomb designs for improving mechanical properties: A review[J]. Composites Part B:

- Engineering, 2021, 227. DOI:10.1016/j.compositesb.2021.109393.
- [3] ZHOU X, SHI S, LIU Z, et al. In-plane compression property of S-shaped reinforced honeycomb cores[J]. Materials & Design, 2023, 235. DOI:10.1016/j.matdes.2023.112442.
- [4] 刘文品, 杨进军, 马建忠. 低密度芳纶纸蜂窝制备及力学性能[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(8):96-100.
- LIU Wenpin, YANG Jinjun, MA Jianzhong. Preparation and mechanical properties of low density aramid paper honeycomb[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(8):96-100.
- [5] ZHANG Y, YAN L, ZHANG W, et al. Metallic tube-reinforced aluminum honeycombs: Compressive and bending performances[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 171:192-203.
- [6] AHMAD S, ZHANG J, FENG P, et al. Processing technologies for Nomex honeycomb composites (NHCs): A critical review[J]. Composite Structures, 2020, 250. DOI: 10.1016/j.comstruct.2020.112545.
- [7] 陆志远, 罗玉清, 王萌, 等. 高密度蜂窝制备技术研究及其应用[J]. 高科技纤维与应用, 2022, 47(2):11-16.
- LU Zhiyuan, LUO Yuqing, WANG Meng, et al. Research and application of preparation techniques of high density honeycomb[J]. Hi-Tech Fiber and Application, 2022, 47(2):11-16.
- [8] 林晓凤, 王雪明, 严谨, 等. 芳纶纸抗张性能的测试影响因素[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(3):101-106.
- LIN Xiaofeng, WANG Xueming, YAN Jin, et al. Influencing factors of tensile properties of domestic aramid paper[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(3):101-106.
- [9] 王燕, 程文礼, 王绍凯. 复合材料蜂窝夹层结构在民用飞机上的应用综述[J]. 纤维复合材料, 2021, 38(2):73-77.
- WANG Yan, CHENG Wenli, WANG Shaokai. Review of the application of composite honeycomb sandwich structure on civil aircraft[J]. Fiber Composites, 2021, 38(2):73-77.
- [10] 姜力文, 马建忠, 杨进军, 等. 胶膜与芳纶纸蜂窝自动化叠合工艺适应性研究[J]. 高科技纤维与应用, 2023, 48(4):67-71.
- JIANG Liwen, MA Jianzhong, YANG Jinjun, et al. Study on adaptability of honeycomb automatic stacking process between adhesive film and aramid paper[J]. Hi-Tech Fiber and Application, 2023, 48(4):67-71.
- [11] 程文礼, 王燕, 于洪斌, 等. 民用飞机货舱地板夹层结构基本力学性能研究[J]. 高科技纤维与应用, 2022, 47(3):35-40.
- CHENG Wenli, WANG Yan, YU Hongbin, et al. Basic mechanical properties of honeycomb sandwich structure for cargo floor in commercial aircraft[J]. Hi-Tech Fiber and Application, 2022, 47(3):35-40.
- [12] 陈静, 邱启艳. 蜂窝夹层结构在飞机上的应用及发展[J]. 新材料产业, 2018(7):63-67.
- CHEN Jing, QIU Qiyang. Application and development of honeycomb sandwich structure in aircraft[J]. Advanced Materials Industry, 2018(7):63-67.
- [13] GIGLIO M, MANES A, GILIOLI A. Investigations on sandwich core properties through an experimental-numerical approach[J]. Composites Part B: Engineering, 2012, 43(2):361-374.
- [14] ARACHCHIGE B, GHASEMNEJAD H, YASAEI M. Effect of bird-strike on sandwich composite aircraft wing leading edge[J]. Advances in Engineering Software, 2020, 148. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2020.102839.
- [15] WANG P Y, WANG F S, DONG Y P, et al. Stability design of honeycomb sandwich radome with asymmetric shape[J]. Materials & Design, 2011, 32(3):1 636-1 645.
- [16] 颜芳芳, 徐晓东. 负泊松比柔性蜂窝结构在变体机翼中的应用[J]. 中国机械工程, 2012, 23(5):542-546.
- YAN Fangfang, XU Xiaodong. Negative Poisson's ratio honeycomb structure and its applications in structure design of morphing aircraft[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(5): 542-546.
- [17] 张平, 周丽, 邱涛. 一种新的柔性蜂窝结构及其在变体飞机中的应用[J]. 航空学报, 2011, 32(1):156-163.
- ZHANG Ping, ZHOU Li, QIU Tao. A new flexible honeycomb structure and its application in structure design of morphing aircraft[J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2011, 32(1): 156-163.
- [18] LIU W, ZHANG Y, GUO Z, et al. Analyzing in-plane mechanics of a novel honeycomb structure with zero Poisson's ratio[J]. Thin-Walled Structures, 2023, 192. DOI:10.1016/j.tws.2023.111134.
- [19] QIU K, WANG Z, ZHANG W. The effective elastic properties of flexible hexagonal honeycomb cores with consideration for geometric nonlinearity[J]. Aerospace Science and Technology, 2016, 58:258-266.
- [20] 伍毅, 陈莹隆. 民机内饰典型材料燃烧特性研究综述[J]. 中国民航飞行学院学报, 2023, 34(4):17-20.
- WU Yi, CHEN Yinglong. Literature review of combustion characteristics of civil aircraft Interior typical materials[J]. Journal of Civil Aviation Flight University of China, 2023, 34(4):17-20.