

高密度芳纶纸蜂窝的力学性能及应用前景分析

刘 杰 罗玉清*

(中航复合材料有限责任公司,北京 101300)

摘 要 高密度芳纶纸蜂窝在飞机客舱及货舱地板上应用广泛,对其制作工艺和力学性能的研究具有重要意义。将树脂微观形貌与蜂窝宏观性能结合,研究了 3 种高密度蜂窝力学性能存在差异的原因,对比分析了芳纶纸蜂窝、聚甲基丙烯酸酯(PMI)泡沫和铝蜂窝作为复合材料夹层结构用芯材的优缺点。结果表明:高密度芳纶纸蜂窝的力学性能和节点胶柱面积均随着密度的增大而增大,其力学性能优于 PMI 泡沫,耐腐蚀性能和抗屈曲性能优于铝蜂窝,但高密度芳纶纸蜂窝工艺控制困难,在制备过程中易出现树脂分布不均匀的现象。

关键词 高密度芳纶纸蜂窝,蜂窝,力学性能,微观形貌

Study on mechanical property and application of high-density aramid paper honeycomb

Liu Jie Luo Yuqing

(AVIC Composite Corporation Ltd., Beijing 101300)

Abstract High-density aramid paper honeycomb is widely used in the aircraft cabin and cargo floor. The study on production process and mechanical properties has important significance. The micro-morphologies and mechanical properties of resin were performed to study the reasons for the mechanical properties difference for three specifications of high-density honeycombs. The advantages and disadvantages of aramid paper honeycomb, PMI foam and aluminum honeycomb as the core material of sandwich structure were compared. The results showed that both the mechanical properties and node resin form area of honeycomb were increased as the density increased. The mechanical properties of honeycomb were better than of PMI foam, Resistance to corrosion and local buckling of honeycomb were better than aluminum honeycomb. However, the problem was hard to control the process and easy to appear the phenomenon of uneven distribution of resin during manufacture.

Key words high-density aramid paper honeycomb, honeycomb, mechanical property, microstructure

蜂窝芯材是一种形状与蜜蜂巢穴极其相似的复合材料,因具有轻质高强高模、阻燃、耐高温和低介电损耗等一系列优良性能,在航空航天领域得到了大量的应用。目前,航空飞行器常用的夹层结构芯材主要有蜂窝芯材和泡沫芯材两种,与相同密度的泡沫芯材相比,芳纶纸蜂窝芯材具有更高的强度和模量,耐温等级也较高^[1]。国内外对芳纶纸蜂窝的研制与生产已有多年历史,对芳纶纸及其蜂窝的制作工艺、力学性能和功能性进行了大量研究^[2-4]。近些年,国内对间位芳纶纸的浆粕和纤维进行了较为深入的研究,并成功研制出与杜邦纸性能相当的国产芳纶纸及国产芳纶纸蜂窝^[5-8],所研制的芳纶纸蜂

窝密度一般低于 80kg/m^3 ,对于 80kg/m^3 以上的高密度蜂窝,由于蜂窝密度较高,工艺控制及后续加工均存在较大困难,国内未见相关的研究报道,但随着国内大飞机项目的开展,其对高密度芳纶纸蜂窝具有较大的需求,亟需国内研究人员对高密度芳纶纸蜂窝制备技术展开研究。

本研究通过对蜂窝浸胶过程中提升速度、浸胶次数等关键工艺的研究,制备了 3 种规格高密度芳纶纸蜂窝,随后对其压缩和剪切性能进行测试,并将力学性能测试结果和蜂窝浸渍树脂微观形貌相结合,探讨了高密度芳纶纸蜂窝制备工艺上的难点,最后将高密度蜂窝芯材与铝蜂窝芯材和聚甲基丙烯酸

作者简介:刘杰(1985-),男,硕士工程师,主要研究方向为芳纶纸蜂窝芯材。

联系人:罗玉清(1973-),女,硕士,高级工程师,主要研究方向为芳纶纸蜂窝芯材。

亚胺(PMI)泡沫芯材进行了对比分析。

1 实验部分

1.1 原材料

芳纶纸(T412-3mil 型),美国杜邦公司;醇溶性酚醛烘干清漆(F01-36HK 型),重庆三峡油漆股份有限公司;节点胶,黑龙江石油化学研究院。

1.2 实验方法

高密度芳纶纸蜂窝的树脂含量大,在制备过程中需要反复多次浸胶,同时还需要将浸渍树脂的密度、浸胶提升速度进行调整,才能控制蜂窝块的密度,保证蜂窝的性能。通过对高密度蜂窝浸胶提升速度与单位体积上胶量及蜂窝浸胶次数的研究,制备出 3 种规格的高密度芳纶纸蜂窝,分别记做 NH-1-1.83-80、NH-1-1.83-144 和 NH-1-1.83-192。其中,1.83 为蜂窝的孔格边长(mm),80、144 和 192 为蜂窝的公称密度(kg/m^3)。

提升速度与上胶量关系如图 1 所示。由图可知,蜂窝浸胶过程中提升速度与单位体积上胶量在一定范围内存在近似线性的关系,根据此关系和双倍浸胶原则(双倍浸胶原则是:浸胶次数为 2N 次, $N \geq 1$),确定了 3 种规格高密度蜂窝的提升速度范围和浸胶次数两项关键参数,结果见表 1。根据表 1 中工艺制备的高密度芳纶纸蜂窝密度符合公称密度 $\pm 10\%$ 的要求。

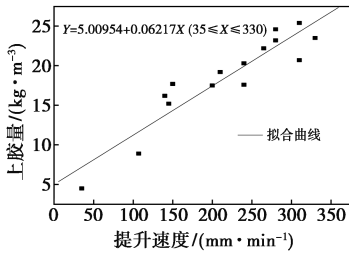


图 1 提升速度与单位体积上胶量关系图

表 1 高密度芳纶纸蜂窝浸胶工艺

试样	NH-1-1.83-80	NH-1-1.83-144	NH-1-1.83-192
提升速度/ ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	100~150	200~330	210~330
浸渍时间/min	2	4	4~6

1.3 性能测试

按照 ASTM C365 和 ASTM C273 标准,采用电子万能试验机(Inspekt 100N 型)对蜂窝进行稳定型压缩强度和 L 向、W 向剪切强度测试;采用金相显微镜(Olympus GX51 型)对高密度蜂窝的截面进

行观察,测量蜂窝孔壁的厚度。

2 结果与讨论

2.1 试样性能分析

2.1.1 稳定型压缩强度分析

3 种规格蜂窝的稳定型强度测试结果如图 2 所示。由图可知,3 种规格蜂窝的压缩强度随着密度的增加而增大,其中 NH-1-1.83-80 的稳定型压缩强度均值为 5.1MPa, NH-1-1.83-144 的均值为 14.3MPa, NH-1-1.83-192 的均值为 24.5MPa。

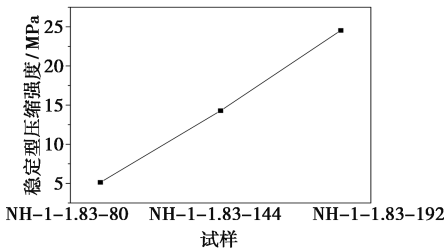


图 2 密度对试样稳定型压缩强度的影响

2.1.2 剪切强度及模量分析

3 种规格蜂窝的剪切强度及模量测试结果如图 3 所示。由图可知,3 种规格蜂窝的剪切强度及模量均随着密度的增加而增大。蜂窝的 L 向剪切强度由 2.7MPa 增加到 4.1MPa, W 向剪切强度由 1.4MPa 增加到 3.6MPa; L 向剪切模量由 78.7MPa 增加到 161.7MPa, W 向剪切模量由 38.6MPa 增加到 135.9MPa。

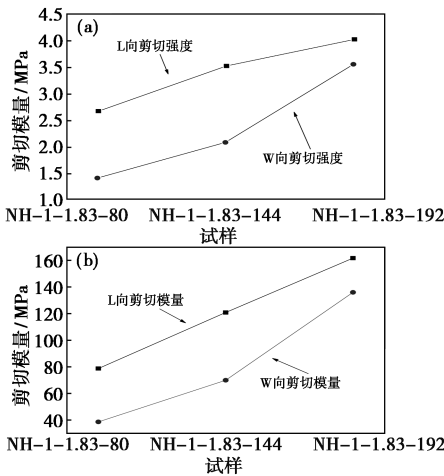


图 3 密度对试样剪切强度(a)和剪切模量(b)的影响

2.1.3 芳纶纸蜂窝截面金相显微镜分析

为了观察浸渍树脂与芳纶纸结合后的形貌,将 3 种规格蜂窝制备成金相试样,在金相显微镜下对其截面进行了微观观察,结果见图 4。图中白色发亮的框架为芳纶纸,其表面附着黑色物体为固化

后的酚醛树脂。由图可见,由于间位芳纶纸表面结构紧密,酚醛树脂固化后主要附着在芳纶纸表面,很难进入纸张内部,固化后的酚醛树脂与芳纶纸之间存在明显的界面,蜂窝密度越高,树脂在芳纶纸表面分布的均匀性越差。NH-1-1.83-80 中大部分酚醛树脂均分布于芳纶纸表面,仅有小部分树脂分布于蜂窝的节点开叉位置和岔口背面,开叉位置的胶柱近似三角形,高度约为 0.18mm,岔口背面树脂的最大厚度约为 0.05mm;NH-1-1.83-144 中酚醛树脂形貌与 NH-1-1.83-80 类似,但明显可见节点位置的树脂增多,开叉位置的三角形胶柱高度约为 0.31mm,节点位置的树脂将节点完全覆盖,表面的树脂厚度不均(0.06~0.16mm 不等);NH-1-1.83-192 中酚醛树脂形貌同样呈现出树脂将节点完全覆盖的现象,且开叉位置的树脂进一步增多(高度接近 0.7mm)。对比 3 种规格蜂窝截面的树脂分布情况可知,虽然蜂窝整体的密度均匀性符合要求,但随着蜂窝密度的增加,蜂窝孔格壁上树脂分布的均匀性逐渐下降。

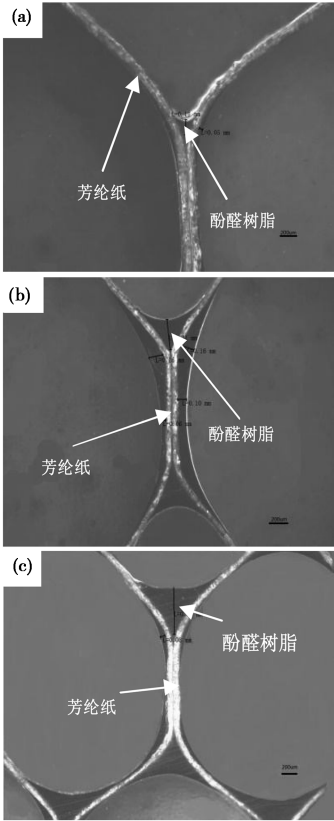


图 4 试样的截面形貌图

[(a)NH-1-1.83-80;(b)NH-1-1.83-144;(c)NH-1-1.83-192]

2.2 芳纶纸蜂窝力学性能差异原因分析

芳纶纸蜂窝的压缩强度主要受到蜂窝孔格边

长、蜂窝壁厚度以及蜂窝芯材料的性能影响,三者之间的理论关系见公式(1)^[9]。由于 3 种规格蜂窝孔格边长相同,所用的芳纶纸和浸渍树脂均为同一牌号,可认为蜂窝的壁弹性模量 E_c 、极限强度 σ_c 和蜂窝的孔格边长 a 相等,由理论关系可知,蜂窝压缩强度仅与壁厚 δ_c 的平方成正比。结合 3 种规格蜂窝的截面形貌可知,随着蜂窝密度的增加,蜂窝节点位置的树脂量逐渐增大,蜂窝壁的平均厚度增大,在宏观上表现为蜂窝的压缩强度随着蜂窝密度的增加而增加。同理,可由理论关系式(2)^[9]和关系式(3)^[9]得出:3 种规格蜂窝的蜂窝壁材料弹性模量 E_c 、极限强度 σ_c 和剪切模量 G_c 保持不变,随着蜂窝密度的增加,蜂窝的平均壁厚增大,在宏观上表现为蜂窝的剪切强度和模量增大。高密度芳纶纸蜂窝的压缩性能和剪切性能结果与理论关系相符。

$$\sigma_{cr} = \frac{4}{\sqrt{3}} \left(\frac{\delta_c}{a} \right)^2 k \sqrt{E_c \sigma_c} \tag{1}$$

$$\tau_{cxz}' = 5.1 \left(\frac{\delta_c}{a} \right)^2 E_c \quad \tau_{cyz}' = 2.9 \left(\frac{\delta_c}{a} \right)^2 E_c \tag{2}$$

$$G_{cxz} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\delta_c}{a} G_c \quad G_{cyz} = \frac{\sqrt{3}}{3} \frac{\delta_c}{a} G_c \tag{3}$$

式中, σ_{cr} 为蜂窝的平压强度,MPa; a 为孔格边长,mm; δ_c 为蜂窝的壁厚,mm; E_c 和 σ_c 分别为蜂窝壁材料的弹性模量和极限强度,MPa; τ_{cxz}' 为蜂窝 L 向的剪切强度,MPa; τ_{cyz}' 为蜂窝 W 向的剪切强度,MPa; G_c 为蜂窝壁材料的剪切模量,MPa; G_{cxz} 为蜂窝 L 向的剪切模量,MPa; G_{cyz} 为蜂窝 W 向的剪切模量,MPa。

高密度蜂窝主要用于大型客机及大型运输机的客舱和货舱地板,这些部位由于经常受到较大的压缩和冲击载荷,对地板材料的强度及抗冲击性能要求较高,航空及铁路上所用的地板材料主要有铝蜂窝夹层结构、芳纶纸蜂窝夹层结构以及泡沫夹层结构。根据国外某型客舱及货舱地板的性能要求(表 2),所研制的高密度芳纶纸蜂窝满足其指标值要求。现在,PMI 泡沫在航空领域的应用也不断扩大^[10-11],将所研制的芳纶纸蜂窝与 PMI 泡沫对比后发现,PMI 泡沫和芳纶纸蜂窝压缩强度接近时,所研制蜂窝的密度仅为 PMI 泡沫的 1/2^[12](表 3),力学性能明显优于 PMI 泡沫。可见,在相同的设计要求下,芳纶纸蜂窝可有效降低结构的质量;对比相同密度的铝蜂窝,芳纶纸蜂窝的压缩强度与耐久铝蜂窝的强度相当,剪切强度低于耐久铝蜂窝^[13],但从芳纶纸蜂窝的截面微观形貌可以看出,随着蜂窝密度的增加,蜂窝节点部位的酚醛树脂增加明显,蜂窝

壁的厚度也慢慢增加,这些胶柱的形成并增大可提高芳纶纸蜂窝的压缩强度,同时这些胶柱增加了蜂窝的壁厚,使蜂窝壁与面板胶接后具有更大的接触面积。以 NH-1-1.83-144 为例,其在节点位置的最小壁厚约为 0.3mm,高于同密度铝蜂窝的壁厚(单层壁厚为 0.1mm,节点位置壁厚约为 0.2mm),更厚的蜂窝壁及芳纶纸蜂窝本身的自回弹性,使芳纶纸蜂窝在受冲击力时不易出现局部屈曲现象,且芳纶纸蜂窝也不会与碳纤维、玻璃纤维等非金属面板发生电化学腐蚀(铝蜂窝易发生电化学腐蚀)。虽然芳纶纸蜂窝具有以上优势,但芳纶纸蜂窝也有易吸水、不适合在潮湿环境中使用和价格较高等缺点,且随着芳纶纸蜂窝密度的增加,其工艺控制难度增加,本实验所研究的 3 种规格蜂窝就出现了节点位置树脂多,自由边位置树脂少的不均匀现象,这些不均匀可能会使蜂窝在受力过程中出现局部失稳。所以,还需进一步研究高密度蜂窝的浸胶工艺,使酚醛树脂在蜂窝的六边形孔壁上分布的更加合理,提高高密度蜂窝的整体性能。

表 2 国外地板用蜂窝性能指标

样品	稳定型压	L 向剪切		W 向剪切	
	缩强度/ MPa	强度/ MPa	模量/ MPa	强度/ MPa	模量/ MPa
	(测试值/ 指标值)	(测试值/ 指标值)	(测试值/ 指标值)	(测试值/ 指标值)	(测试值/ 指标值)
NH-1-1.83-80	5.13/	2.68/	78.7/	1.41/	38.6/
	4.55	2.07	65.5	1.07	34.5
NH-1-1.83-144	14.17/	3.53/	120.8/	2.08/	69.9/
	12.07	3.28	117.2	1.79	62.7
NH-1-1.83-192	24.45/	4.03/	161.7/	3.55/	135.9/
	—	—	—	—	—

表 3 PMI 泡沫与蜂窝性能对比^[12]

高密度 PMI 泡沫		芳纶纸蜂窝芯材	
密度/ (kg·m ⁻³)	稳定型压缩 强度/MPa	密度/ (kg·m ⁻³)	稳定型压缩 强度/MPa
164	4.35	80	5.13
211	7.10	—	—
270	11.63	144	14.29
341	18.51	—	—
410	26.96	192	24.45

3 结论

制备了高密度芳纶纸蜂窝芯材,通过力学性能和截面微观观察发现蜂窝的力学性能和节点胶柱面积均随着密度的增大而增大,其力学性能优于 PMI 泡沫,耐腐蚀性能和抗屈曲性能优于铝蜂窝。但高密度芳纶纸蜂窝也存在一些缺点,如工艺控制困难,在制备过程中易出现树脂分布不均匀的现象。今后应当进一步研究上胶量、提升速度等关键工艺参数对高密度蜂窝密度均匀性的影响,提高高密度蜂窝的性能稳定性,为其在大型客机及运输机客舱和货舱地板上的广泛应用提供技术储备。

参考文献

[1] 陈祥宝.聚合物基复合材料手册[M].北京:化学工业出版社,2004,516-525.

[2] Grediac M.A finite element study of the transverse shear in honeycomb cores[J]. International Journal of Solids and Structures,1993,30(13):1777-1788.

[3] Foo C C,Chai G B,Seah L K.Mechanical prooerties of nomex material and nomex honeycomb structure[J]. Composite Structures,2007,80(4):588-594.

[4] Petras A,Sutcliffe M P F.Indentation failure analysis of sand-wich beams[J].Composite Structure,2000,50(3):311-318.

[5] 王厚林,王宜,姚运振,等.芳纶纸结构性能与其对蜂窝力学性能的影响[J].功能材料,2013,44(15):2184-2187.

[6] 郝巍,罗玉清.国产对位芳纶纸蜂窝性能的研究[J].高科技纤维与应用,2009,34(6):21-25.

[7] 唐爱民,贾超锋,王鑫.热压工艺对对位芳纶纸强度性能的影响[J].造纸科学与技术,2010,29(6):61-64.

[8] 周志伟,王志华,赵隆茂,等.航空用芳纶纸蜂窝各向异性行为研究[J].实验力学,2012,27(4):440-447.

[9] 王兴业,杨孚标,曾竟成,等.夹层结构复合材料设计原理及其应用[M].北京:化学工业出版社,2007,102-117.

[10] 胡培,陈秀华.PMI 泡沫夹芯结构在 A380 后压力框上的应用[J].航空制造技术,2009(15):46-49.

[11] 窦润龙.复合材料泡沫夹层结构在民机中的应用[J].民用飞机设计与研究,2004(3):42-45.

[12] 张乐,张广成,米星宇,等.高密度 PMI 泡沫塑料的制备、结构与性能研究[J].宇航材料工艺,2012(6):60-64.

[13] 中华人民共和国航空航天工业部航空工业标准.HB 5443—90.夹层结构用耐久铝蜂窝芯材规范[S].北京:航空航天工业部,1990:1-16.