

# 酚醛树脂分布对芳纶纸蜂窝力学性能的影响

刘 杰 罗玉清 纪双英 王 萌

(中航复合材料有限责任公司,北京 101300)

**文 摘** 采用两种浸胶工艺制作树脂分布不同的3种规格蜂窝芳纶纸蜂窝,对蜂窝进行力学性能测试和蜂窝孔壁树脂分布微观观察,研究了酚醛树脂分布、蜂窝孔壁厚度对芳纶纸蜂窝力学性能的影响。结果表明:酚醛树脂充分流淌后会使蜂窝的压缩强度提高8%~40%,剪切强度下降9%~21%;树脂在蜂窝节点端部形成胶柱是蜂窝压缩性能提高的主要原因,但胶柱的形成会使蜂窝孔壁的平均厚度下降,导致蜂窝的剪切性能下降。

**关键词** 树脂分布,微观形貌,芳纶纸蜂窝,力学性能

中图分类号:V214

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2016.02.006

## Effect of Phenolic Resin Distribution on Mechanical Properties of Nomex Honeycomb

LIU Jie LUO Yuqing JI Shuangying WANG Meng

(AVIC Composite Corporation LTD, Beijing 101300)

**Abstract** The study on the influencing factors of its mechanical properties is important for the improvement of its mechanical properties. Three types of nomex honeycomb with different resin distribution were made through two different gumming processes. Then mechanical properties testing on the honeycomb and micro observation on phenolic resin distribution at honeycomb hole wall were performed to study the effect of resin distribution and wall thickness of honeycomb holes on their mechanical properties. The results show that sufficient flow of the resin may increase the compressive strength of the honeycomb by 8% to 40%, decrease the shear strength by 9% to 21%. The resin forms gum pillars at the end of the honeycomb nodes, which is the main cause for the increase of the compressive strength. The forming of gum pillars results in the decrease of the average thickness of honeycomb hole walls and thus leads to the decline of the shear strength.

**Key words** Resin distribution, Microstructure, Nomex honeycomb, Mechanical property

### 0 引言

蜂窝夹层结构因比强度高,比刚度大,隔热、透波及优异的介电性能,在航空航天等军事领域得到了非常广泛的应用,比如机翼、机身、尾翼、雷达罩等部位。蜂窝夹层结构主要由蒙皮、胶膜和蜂窝芯材组成,结构的整体性能主要由芯材的性能决定,若蜂窝芯材的强度不足,则极易发生整个夹层结构的塌陷<sup>[1-2]</sup>。因此,国外对芳纶纸蜂窝芯材的性能展开了较为深入的研究,并建立了蜂窝性能数学模型<sup>[3-6]</sup>。国内对芳纶纸蜂窝的研究也有近30年的历史,从最初的制作工

艺摸索,到如今对工艺的不断改进<sup>[7-9]</sup>,使国产芳纶纸蜂窝的力学性能已经与国外Hexcel公司、欧洲复材等先进复合材料制造商的性能基本相当<sup>[10]</sup>。近几年国内主要对蜂窝芯材力学性能、蜂窝夹层结构制作工艺、蜂窝制件整体性能以及蜂窝夹层结构的功能性进行了研究,具体研究方向包括蜂窝夹层结构面板的铺层设计和固化工艺、蜂窝制件成型工艺、蜂窝夹层结构的吸/透波功能<sup>[11-15]</sup>等。虽然国内外对蜂窝夹层结构的研究已涉及多个方向,但未从微观的角度将浸渍树脂的分布与蜂窝制作工艺、力学性能联系起

收稿日期:2015-08-06

作者简介:刘杰,1985年出生,工程师,硕士,研究方向为芳纶纸蜂窝芯材。E-mail: liu\_jie621@126.com

来进行研究。

本文采用2种工艺制作了3种规格芳纶纸蜂窝,对蜂窝的压缩性能和剪切性能、蜂窝截面进行微观观察和酚醛树脂的截面面积测量,将不同工艺下所制作蜂窝表面的树脂分布情况与力学性能相结合,分析了蜂窝表面酚醛树脂分布存在差异的原因,及不同的树脂分布对蜂窝性能的影响。

## 1 实验

### 1.1 材料及制备工艺

实验用芳纶纸蜂窝的增强材料为杜邦 T412 芳纶纸,树脂基体为酚醛树脂。分别在两种浸胶工艺下制作了3种规格蜂窝,其中工艺1让浸渍树脂充分流淌后再进行固化,工艺2在浸胶后立即让溶剂挥发,浸渍树脂流淌不充分。3种蜂窝的规格及其含义见表1。

表1 芳纶纸蜂窝规格及含义

Tab.1 Specifications of nomex honeycomb

蜂窝规格	孔格尺寸/mm	密度 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
ACCH-1-1.83-48	1.83	48
ACCH-1-2.75-48	2.75	48
ACCH-1-2.75-56	2.75	56

### 1.2 方法

采用 Inspekt 100N 电子万能实验机对蜂窝进行非稳定型压缩强度, L 向、W 向剪切强度实验,分别按照 ASTM C365 和 ASTM C273 进行;采用 Olympus GX51 金相显微镜对蜂窝截面的树脂分布情况进行观察,测量蜂窝节点端部的胶柱面积和蜂窝孔壁的厚度。

## 2 实验结果

### 2.1 压缩强度

3种规格蜂窝的压缩强度实验结果见图1。

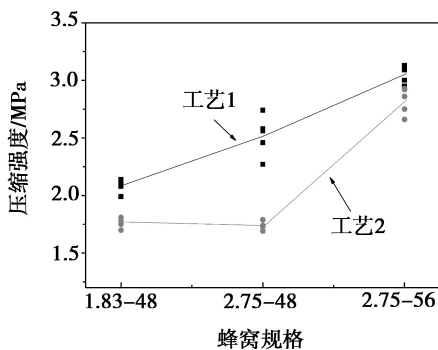


图1 压缩强度对比图

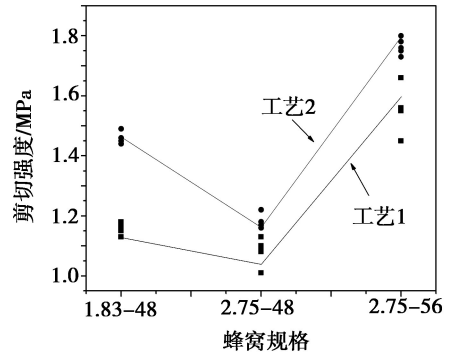
Fig.1 Compressive strength comparison of bare honeycomb

从图1可以看出,对于同种规格蜂窝,工艺1所  
宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2016年 第2期

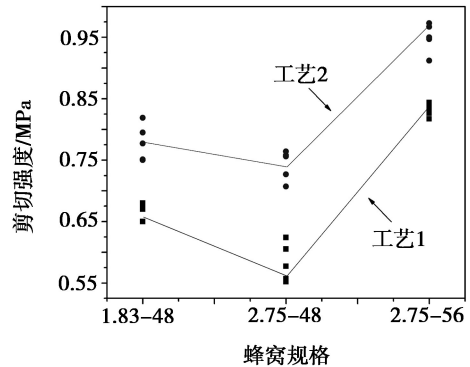
制作蜂窝压缩强度的平均值分别高于工艺2蜂窝18%、40%和8%;随着树脂含量的增加,工艺1所制作蜂窝的压缩性能逐渐增加,而工艺2所制作蜂窝的压缩性能则先小幅降低后迅速增加。

### 2.2 剪切强度及模量

3种规格蜂窝的剪切强度实验结果见图2。



(a) L向



(b) W向

图2 L向和W向剪切强度对比图

Fig.2 Comparison of shear strength L direction and W direction

由图2可知工艺1制作蜂窝的L向剪切强度比工艺2分别低20%、9%和10%,W向剪切强度分别低14%、21%和12%。在密度相同的情况下,工艺1制作蜂窝孔格尺寸的增加会使蜂窝的L剪切强度降低约7%,W向剪切强度降低约13%;工艺2制作蜂窝的孔格尺寸增加会使蜂窝的L剪切强度降低约18%,W向剪切强度降低约5%(对比1.83-48和2.75-48),但随着蜂窝密度的上升,其剪切强度逐渐上升。

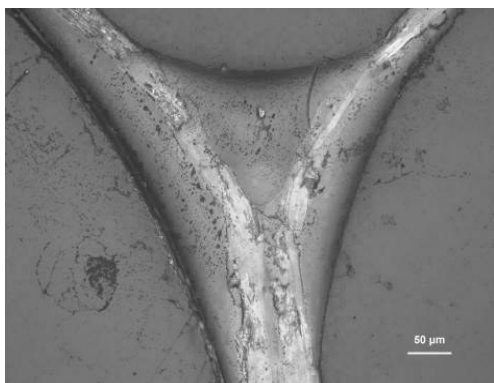
### 2.3 芳纶纸蜂窝截面观察

为了观察2种工艺条件下浸渍树脂在芳纶纸表面的分布情况,研究不同工艺条件下所制作的蜂窝性能存在差异的原因,将芳纶纸蜂窝制备成金相试样,用金相显微镜对其截面进行了微观观察,其微观形貌

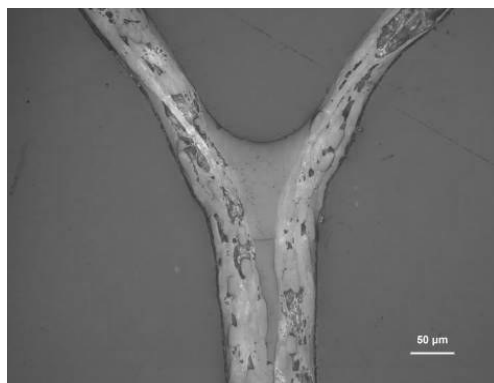
见图3~图5。

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。可以看出,浸渍树脂充分流淌后(工艺1),树脂主要集中在蜂窝节点端部,形成近似三角形和半月形胶柱,而树脂未充分流淌(工艺2)所制作蜂窝表面的树脂分布相对均匀,节点两端的胶柱较小,两种工艺下蜂窝胶柱的大小均随着

蜂窝含胶量的增加逐渐增大。节点位置胶柱的截面面积和蜂窝自由边厚度测量结果见表2。由表2可知,相同工艺蜂窝的胶柱截面面积和蜂窝壁厚随着含胶量的增加而增加,而蜂窝规格相同时,蜂窝节点端部的胶柱截面面积大小为工艺1>工艺2,蜂窝孔壁厚度为工艺1<工艺2。



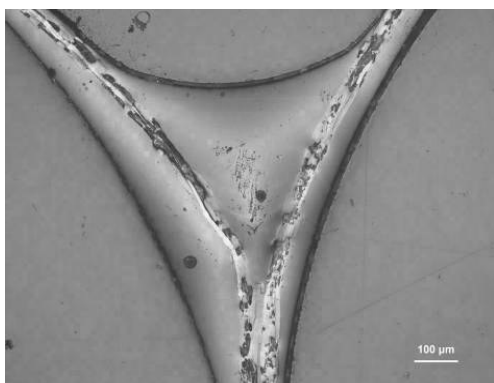
(a) 工艺1



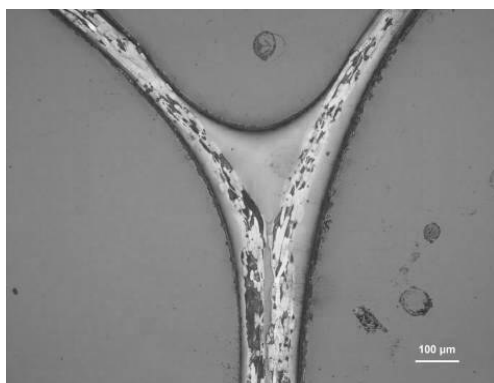
(b) 工艺2

图3 ACCH-1-1.83-48 规格蜂窝树脂分布情况

Fig.3 Resin distribution of honeycomb ACCH-1-1.83-48



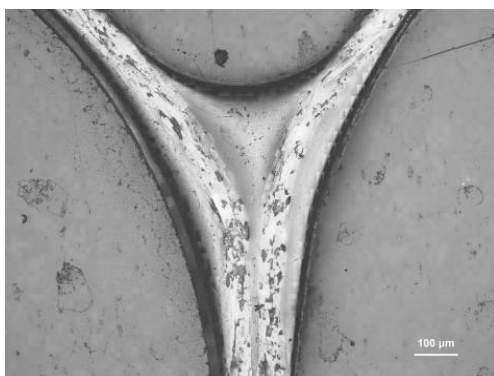
(a) 工艺1



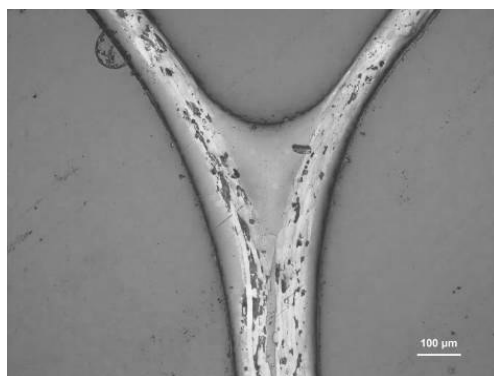
(b) 工艺2

图4 ACCH-1-2.75-48 规格蜂窝树脂分布情况

Fig.4 Resin distribution of honeycomb ACCH-1-2.75-48



(a) 工艺1



(b) 工艺2

图5 ACCH-1-2.75-56 规格蜂窝树脂分布情况

Fig.5 Resin distribution of honeycomb ACCH-1-2.75-56

表 2 胶柱截面面积及蜂窝壁厚测量结果

Tab. 2 Measurement results of cross-sectional area and honeycomb wall thickness

工艺	蜂窝规格	芳纶纸理论厚度/ $\mu\text{m}$	树脂含量/%	胶柱截面面积/ $\mu\text{m}^2$	自由边厚度/ $\mu\text{m}$
工艺 1	ACCH-1-1.83-48	50	38	50500.9	42.0
	ACCH-1-2.75-48	50	55	184315.6	84.8
	ACCH-1-2.75-56	80	42	138770.0	91.8
工艺 2	ACCH-1-1.83-48	50	38	7383.9	47.8
	ACCH-1-2.75-48	50	55	40215.4	99.4
	ACCH-1-2.75-56	80	42	83554.9	106.6

### 3 分析与讨论

#### 3.1 压缩性能结果分析

两种工艺下蜂窝压缩强度存在差异的主要原因可能是浸渍树脂经充分流淌后(工艺 1),树脂主要集中在蜂窝节点的两端,固化后在节点处形成 1 个三角形和 2 个半月形胶柱,胶柱依附于孔壁并贯穿整个蜂窝的高度方向,与芳纶纸形成一个整体共同承载,胶柱的形成影响了蜂窝的性能,进一步对压缩失效过程进行观察发现:压缩过程中随着压缩载荷的不断升高,蜂窝首先发生自由边的屈曲,随后发生蜂窝节点的屈曲,在达到蜂窝的极限载荷后,蜂窝发生整体失稳失效。由压缩失效过程可以判断,蜂窝节点在压缩过程中起着更为关键的作用,浸渍树脂在节点端部堆积后形成胶柱,可增大节点与压盘的接触面积,从而提高蜂窝的压缩强度。

从压缩性能变化趋势上来看,蜂窝在孔格尺寸增大时性能的变化趋势存在不同:蜂窝的孔格尺寸由 1.83 mm 增大至 2.75 mm,工艺 1 所制作蜂窝的压缩强度呈上升趋势,而工艺 2 所制作蜂窝的压缩强度却在孔格尺寸增加为 2.75 mm 后出现小幅下降。结合蜂窝压缩强度与孔格边长、蜂窝壁厚以及芯子材料性能之间的理论关系<sup>[9]</sup>(式 1),在蜂窝壁弹性模量  $E_c$  和极限强度  $\sigma_c$  的乘积不变的情况下,蜂窝的压缩强度与壁厚  $\delta_c$  的平方成正比,与孔格边长  $a$  的平方成反比。因孔格边长的增加量远大于  $\delta_c$  的增加量,理论上蜂窝的压缩性能应该下降,但工艺 1 所制作蜂窝的性能却呈现上升趋势,结合胶柱截面面积测量结果发现,工艺 1 所制作蜂窝在孔格尺寸由 1.83 mm 增大至 2.75 mm 时,节点位置的胶柱横截面积增加了 1 33 814.7  $\mu\text{m}^2$ ,而工艺 2 所制作蜂窝的面积仅增加 32 831.5  $\mu\text{m}^2$ ,胶柱面积的增加可能会使蜂窝  $E_c$  和  $\sigma_c$  的乘积增加,工艺 1 所制作蜂窝节点位置的面

积增加量约为工艺 2 的 4 倍,使蜂窝  $E_c$  和  $\sigma_c$  的乘积增加明显,使得该工艺所制作蜂窝的压缩强度在孔格变大时反而上升,而工艺 1 节点位置胶柱增加量较少, $E_c$  和  $\sigma_c$  的乘积基本不变,蜂窝孔格增大后压缩强度变化趋势与理论公式相符。

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

式中, $\sigma_{cr}$  表示蜂窝的平压强度。

#### 3.2 剪切性能结果分析

蜂窝在发生剪切失稳时其剪切强度理论公式分别为<sup>[9]</sup>:

$$\begin{aligned} \tau'_{cxz} &= 2.9 \left( \frac{\delta_c}{a} \right)^2 E_c \\ \tau'_{cyz} &= 5.1 \left( \frac{\delta_c}{a} \right)^2 E_c \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $\tau'_{cxz}$  表示蜂窝  $L$  向的剪切强度, $\tau'_{cyz}$  表示蜂窝  $W$  向的剪切强度。

两种工艺所制作蜂窝的剪切失效模式均为剪切失稳失效,且工艺 1 所制作蜂窝的剪切性能低于工艺 2。根据式 2,当芳纶纸和浸渍树脂一定时,蜂窝的剪切强度主要受到  $\delta_c$ 、 $a$  和  $E_c$  的影响。造成两种工艺下蜂窝剪切性能存在差异的原因可能是:浸渍树脂集中在节点端部后(工艺 1),蜂窝六边形孔壁上的树脂分布不均匀,除节点端部外,蜂窝壁其他位置的树脂减少,壁厚低于工艺 2 所制作蜂窝,在孔格边长相同的情况下,工艺 1 所制作蜂窝的  $\delta_c$  和  $E_c$  均低于工艺 2 所制作蜂窝,最终导致其剪切强度低于工艺 2 所制作蜂窝;当蜂窝的壁厚和孔格尺寸均发生变化时,蜂窝孔格从 1.83 mm 增大到 2.75 mm,蜂窝的孔格边长增加为原边长的 1.5 倍,造成蜂窝的有效承载面积大大降低,虽然蜂窝壁厚也增加,但  $a$  的变化对蜂窝性能的影响更加明显,造成 ACCH-1-2.75-48 规格

蜂窝的剪切强度出现较大幅度的降低,但随着蜂窝密度的增加,蜂窝壁厚进一步增大,在孔格不变的情况下,蜂窝的剪切强度逐渐升高。

从不同工艺所制作蜂窝的力学性能实验和截面微观形貌观察发现,芳纶纸蜂窝的主要原材料芳纶纸、浸渍树脂和芯条胶确定后,蜂窝的力学性能不仅受到密度和孔格尺寸的影响<sup>[16]</sup>,浸渍树脂在蜂窝孔壁上的不同分布,也会对蜂窝的力学性能产生影响。

#### 4 结论

(1) 酚醛树脂的分布不同会对蜂窝的力学性能产生影响,树脂经充分流淌后会使蜂窝的压缩强度提高8%~40%,但会使剪切强度下降9%~21%。

(2) 树脂在蜂窝节点端部形成胶柱是造成蜂窝压缩性能提高的主要原因,但胶柱的形成会使蜂窝孔壁的平均厚度下降,导致蜂窝的剪切性能下降。

#### 参考文献

[1] 中国航空工业集团公司复合材料技术中心. 航空复合材料技术[M]. 北京:航空工业出版社,2013:62-68.

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

[3] 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.

[4] FOO C C, CHAI G B, SEAH L K. Mechanical properties of nomex material and nomex honeycomb structure[J]. Composite Structures,2007,80(4):588-594.

[5] ZHANG J, ASHBY M F. The out of plane property of honeycombs[J]. International Journal of Mechanical Sciences,

1992,34(6):475-489.

[6] LEE H S, HONG SH, LEE J R, et al. Mechanical behavior and failure process during compressive and shear deformation of honeycomb composite at elevated temperatures [J]. Journal of Materials Science,2002,37(6):1265-1272.

[7] 郝巍,罗玉清,王萌. 国产对位芳纶纸蜂窝与NH-1蜂窝性能的对比研究[J]. 高科技纤维与应用,2011,36(4):17-20.

[8] 王厚林,王宜,姚运振,等. 芳纶纸结构性能及其对蜂窝力学性能的影响[J]. 功能材料,2013,44(15):2184-2192.

[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.

[10] Hexcel Composites. HexWeb™ Honeycomb Attributes and Properties[S].

[11] 赵景丽. 蜂窝夹层结构复合材料的性能研究[D]. 西北工业大学,2002.

[12] 原崇新,李敏,顾轶卓,等. 蜂窝夹层结构真空袋共固化工艺过程实验研究[J]. 复合材料学报,2008,25(2):57-62.

[13] 梁海州,张元龙. 复合材料蜂窝夹层结构翼梁优化设计[J]. 机械制造研究,2009,38(3):3-5.

[14] 赵宏杰,嵇培军,胡本慧,等. 蜂窝夹层复合材料的吸波性能[J]. 宇航材料工艺,2010,40(2):72-76.

[15] 邢丽英,刘俊能. 蜂窝夹层结构吸波材料研究[J]. 材料工程,1992(6):15-18.

[16] TOM BITZER. Honeycomb Technology [M]. Chapman & Hall, 1997.