

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.08.020

# 低密度芳纶纸蜂窝制备及力学性能

刘文品, 杨进军, 马建忠

(中航复合材料有限责任公司, 北京 101300)

**摘要:** 采用国产 X612N-1.5 mil 规格的芳纶纸制造了低密度 ( $29, 22.4 \text{ kg/m}^3$ ) 蜂窝芯材, 研究了国产 X612N 型芳纶纸的定量与白蜂窝 (未浸渍) 密度的关系, 蜂窝压缩强度与酚醛树脂增量的关系, 浸胶次数对蜂窝密度均匀性及压缩强度的影响, 且测试低密度蜂窝在三种条件下 ( $25, 135, 70^\circ\text{C}$  及湿度 70%) 的力学性能。结果表明: 白蜂窝密度与芳纶纸定量成正比关系, 比列系数为 1.14 (孔格边长: 1.83 mm) 和 0.68 (孔格边长: 2.75 mm); 压缩强度与酚醛树脂增量成正比关系, 比列系数为 0.082。浸胶 2 次有利于控制密度的均匀性和压缩强度, 浸胶 1 次的蜂窝密度离散系数 (CV) 为 7%, 浸胶 2 次的蜂窝密度 CV 为 2.4%, 压缩强度可提高 38.3%~26.5%。经过湿热老化环境处理 30 天后, 蜂窝的非稳态压缩强度、 $L$  及  $W$  向剪切强度和模量降低幅度小于 10%, 高温 ( $135^\circ\text{C}$ ) 条件下, 两种规格芳纶纸蜂窝的非稳态压缩强度的降低较大, 降低幅度为 21%~28%,  $L$  和  $W$  向剪切强度和弹性模量降低幅度为 4%~20%。

**关键词:** 蜂窝; 芳纶纸; 浸胶; 密度; 力学性能

**中图分类号:** TQ323.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2019)08-0096-05

## Preparation and Mechanical Properties of Low Density Aramid Paper Honeycomb

Liu Wenpin, Yang Jinjun, Ma Jianzhong

(AVIC Composite Corporation Ltd, Beijing 101300, China)

**Abstract:** The domestic X612N-1.5 mil aramid paper was used to prepare the low density ( $29 \text{ kg/m}^3, 22.4 \text{ kg/m}^3$ ) honeycomb core materials. The relationship between the basis weight of domestic X612N aramid paper and the density of white honeycomb (un-dipped), the relationship between honeycomb compression strength and phenolic resin increment, and the effect of dipping times on core density uniformity and compressive strength were studied and low density honeycomb's mechanical properties under three conditions ( $25^\circ\text{C}, 135^\circ\text{C}, 70^\circ\text{C}$  and 70%) were tested. The results show that the density of white honeycomb is proportional to the basis weight of aramid paper, the ratio coefficient is 1.14 (cell side length: 1.83 mm) and 0.68 (cell side length: 2.75 mm). The compressive strength is proportional to the increment of phenolic resin, the ratio coefficient is 0.082. Dipping two times could control the uniformity of density. The coefficient of variation (CV) of core dipping one time is 7%, the CV of core the dipping twotimes is 2.4%, and the compressive strength can be increased from 38.3% to 26.5%. After 30 days of treatment in a damp heat aging environment, the unsteady compressive strength,  $L$  and  $W$  shear strength and modulus of the honeycomb decreased by less than 10%. Under high temperature ( $135^\circ\text{C}$ ), the aramid paper honeycombs of two specifications were unstable. The compression strength of the state is greatly reduced, the reduction range is 21% to 28%, and the shear strength and modulus of the  $L$  and  $W$  are reduced by 4% to 20%.

**Keywords:** honeycomb; aramid paper; dipping; density; mechanical property

芳纶纸蜂窝夹层结构复合材料是航空、航天、交通运输等领域重要的减重材料, 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, 芳纶纸蜂窝作为一种复合材料夹芯材料被大量应用到飞机客舱地板、内装饰部件以及部分次承受力构件中<sup>[1-6]</sup>。

芳纶纸蜂窝制造流程包括: 原材料准备、涂胶、热压、切边、拉伸、定型、浸胶、烘干、固化及片切。芳纶纸是制作芳纶纸蜂窝的关键原材料, 是由芳纶短切纤维和芳纶浆粕通过造纸湿法成形技术制造, 纸张的结构和性能对蜂窝的性能有着重要的影响<sup>[7-9]</sup>。浸胶工艺对蜂窝的密度分布及力学性能有重要的影

**通讯作者:** 刘文品, 工程师, 主要从事芳纶纸蜂窝的研制 E-mail: liuwenpin5@163.com

**收稿日期:** 2019-06-03

**引用格式:** 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.

响<sup>[10-12]</sup>。采用国产 X612N 型芳纶纸,制备两种规格低密度 (29, 22.4 kg/m<sup>3</sup>) 芳纶纸蜂窝,测试在不同条件下两种规格蜂窝的力学性能。为了进一步完善低密度蜂窝制造工艺,笔者研究了芳纶纸定量与白蜂窝密度的关系公式,压缩强度与酚醛树脂增量的关系,分析了浸胶次数对蜂窝密度均匀性及压缩强度的影响。

## 1 试验部分

### 1.1 主要原材料

国产芳纶纸: X612N-1.5mil, 超美斯新材料股份有限公司;

芯条胶: J80B, 黑龙江省科学院石油化学研究院;

酚醛树脂: PR43204, 南通住友电木有限公司。

### 1.2 主要设备及仪器

万能力学试验机: CMT 5205 型, 美国美斯特公司;

环境模拟箱: MKF240 型, 德国 Binder 公司;

定量取样器: ZY-DL100 型, 山东中仪仪器有限公司;

电子天平: JJ2000B 型, 常熟市双杰测试仪器厂。

### 1.3 蜂窝试样的制作

采用 X612N-1.5 mil 规格芳纶纸, 按图 1 工艺路线制作 ACCH-2I-1 / 8-1.8 (孔格边长 1.83 mm, 密度 29 kg/m<sup>3</sup>) 和 ACCH-2I-3 / 16-1.4 (边长 2.75 mm, 密度 22.4 kg/m<sup>3</sup>) 规格的正六边形芳纶纸蜂窝, 蜂窝片切后, 按照测试标准进行制作试验样品, 测试了蜂窝的主要力学性能, 包括常温、高温和湿热压缩强度, 常温、高温和湿热剪切强度及弹性模量。蜂窝产品包含的专业术语代号如图 2 所示。

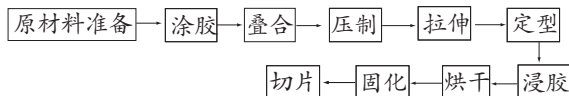
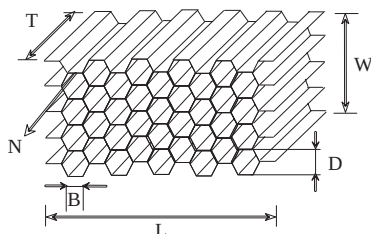


图1 芳纶纸蜂窝制造工艺流程



L—纵向; W—横向; T—高度;  
N—节点; B—孔格边长; D—内切圆直径

图2 芳纶纸蜂窝示意图

### 1.4 性能测试

(1) 采用测试仪器定量取样器和电子天平, 按 GB/T 451.2-2002 进行芳纶纸定量的测定。

(2) 采用万能力学试验机, 按照 ASTM C365 / C365M-2005 进行稳态及非稳态平面压缩强度的测定, 样品尺寸: L 方向为 (76.2 ± 1.27) mm, W 方向为 (76.2 ± 1.27) mm, T 方向为 (12.7 ± 0.15) mm, 测试温度为 25, 135℃。

(3) 采用万能力学试验机, 按照 ASTM C273 / C273M-2007a 测定剪切强度及弹性模量, 样品尺寸: (50.8 ± 1.27) mm × (152.4 ± 1.27) mm × (12.7 ± 0.15) mm (T 方向)。测试温度为 25, 135℃。

(4) 湿热老化: 测试样品制备按照 ASTM C365 / C365M-2005 和 ASTM C273 / C273M-2007 的规定进行, 湿热环境的处理按照 ASTM C272-2001 的规定进行, 在湿度为 70% 和温度 70℃ 的条件下处理 30 天, 湿热处理设备为 MKF240 型环境模拟箱。

## 2 结果与讨论

### 2.1 低密度芳纶纸蜂窝的力学性能

(1) 按照工艺流程图 1 加工三批次 ACCH-2I-1 / 8-1.8 规格芳纶纸蜂窝, 测试常温 (25℃)、高温 (135℃)、湿热老化处理 (70℃, 湿度 70%) 条件下的非稳态平面压缩、L 及 W 向剪切强度及弹性模量, 计算均值, 其性能测试结果如图 3 所示。对比图 3 中蜂窝芯材的压缩强度、剪切强度和模量可知, 在 70℃, 70% 环境处理 30 天后, 蜂窝芯的非稳态平面

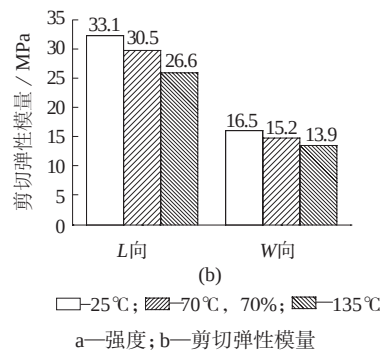
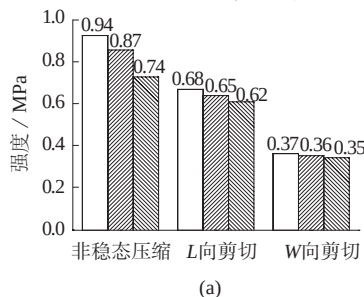


图3 ACCH-2I-1 / 8-1.8 规格芳纶纸蜂窝力学性能

压缩强度、 $L$ 和 $W$ 向强剪切强度及弹性模量低于25℃的强度,非稳态平面压缩强度降低约7.2%, $L$ 向剪切强度和弹性模量分别降低约4.4%,7.8%, $W$ 向剪切强度和弹性模量分别降低约2.7%,7.9%。在高温(135℃)测试条件下,蜂窝芯的非稳态平面压缩强度、 $L$ 和 $W$ 强剪切强度及弹性模量低于25℃的强度和弹性模量,非稳态平面压缩强度降低约21.3%, $L$ 向剪切强度和弹性模量分别降低约8.8%,19.6%, $W$ 向剪切强度和弹性模量分别降低约5.4%,15.7%。湿热环境处理,主要是考察蜂窝再湿热老化环境下,芳纶纸蜂窝是否能保持可使用的力学性能,在高温135℃下材料内部结构发生一定程度的破坏,表现为力学性能有所下降,但能够满足高温下使用的要求。

(2) 按照工艺流程图1加工三批次ACCH-2I-3/8-1.4规格芳纶纸蜂窝,测试常温(25℃)、高温(135℃)、湿热老化处理(70℃,湿度70%)条件下的非稳态平面压缩、 $L$ 及 $W$ 向剪切强度及弹性模量计算均值,其性能测试结果如图4所示。

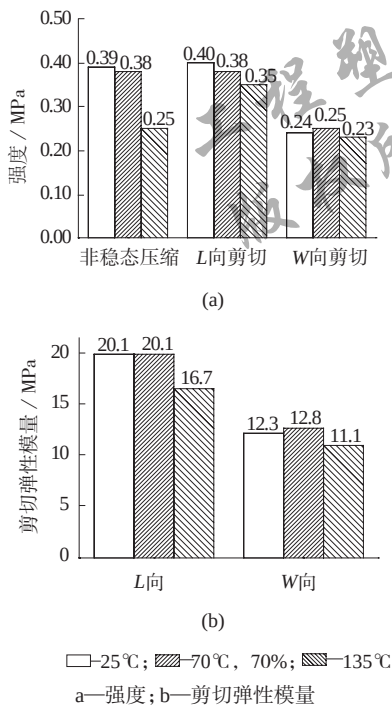


图4 ACCH-2I-3/16-1.4规格芳纶纸蜂窝力学性能

对比图4中蜂窝芯材的压缩强度、剪切强度和模量可知,在70℃,湿度70%环境处理30天后,蜂窝芯的非稳态平面压缩强度、 $L$ 向强剪切强度低于25℃的压缩强度和剪切强度,非稳态平面压缩强度降低约2.6%, $L$ 向剪切强度降低约5%, $W$ 向剪切强度高于25℃的强度,高约4.2%, $L$ 向剪切弹性模

量与25℃的模量相当, $W$ 向剪切弹性模量比25℃的模量高约4.1%。在高温(135℃)测试条件下,蜂窝芯的非稳态平面压缩强度、 $L$ 和 $W$ 强剪切强度及弹性模量低于25℃的强度和模量,非稳态平面压缩强度降低约28.2%, $L$ 向剪切强度和弹性模量分别降低约12.5%,16.9%, $W$ 向剪切强度和弹性模量分别降低约4.2%,9.8%。

通过分析图3和图4的数据,比对不同测试条件下的测试数据可知,经过湿热老化环境处理30天后,ACCH-2I-1/8-1.8规格蜂窝的非稳态压缩强度、 $L$ 及 $W$ 向剪切强度和弹性模量降低幅度小于10%,ACCH-2I-3/16-1.4规格蜂窝具有良好的抗老化性能,非稳态压缩强度、 $L$ 向剪切强度降低幅度小于5%。高温(135℃)条件下,两种规格芳纶纸蜂窝的非稳态压缩强度的降低较大,降低幅度为21%~28%, $L$ 和 $W$ 向剪切强度和模量降低幅度4%~20%。

## 2.2 白蜂窝密度与芳纶纸定量的关系

芳纶纸作为基材,其各项性能均对蜂窝的性能有影响,低密度芳纶纸蜂窝因密度低,为了满足蜂窝的各项力学性能指标要求,对浸渍树脂的增量有一定的要求,芳纶纸蜂窝密度主要是有白蜂窝(未浸渍的蜂窝)密度和单位体积树脂增量叠加而成。白蜂窝密度( $\rho_{\text{白蜂窝}}$ )与芳纶纸的定量(BW)及蜂窝的孔格边长有关。笔者采用4批次厚度1.5 mil的芳纶纸,并测试芳纶纸的定量,通过涂胶、热压、拉伸、及定型制备正六边白蜂窝,测试白蜂窝密度,测试结果见表2。

表2 白蜂窝密度与芳纶纸定量

| 序号 | 定量 /<br>(g · cm <sup>-2</sup> ) | 白蜂窝密度* /<br>(kg · m <sup>-3</sup> ) | 白蜂窝密度** /<br>(kg · m <sup>-3</sup> ) |
|----|---------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| 1  | 29                              | 24.5                                | 17.6                                 |
| 2  | 28.4                            | 23.1                                | 16.8                                 |
| 3  | 26.8                            | 22.4                                | 15.8                                 |
| 4  | 26                              | 20.5                                | 15.5                                 |

注:\*表示孔格边长:1.83mm;\*\*表示孔格边长:2.75mm。

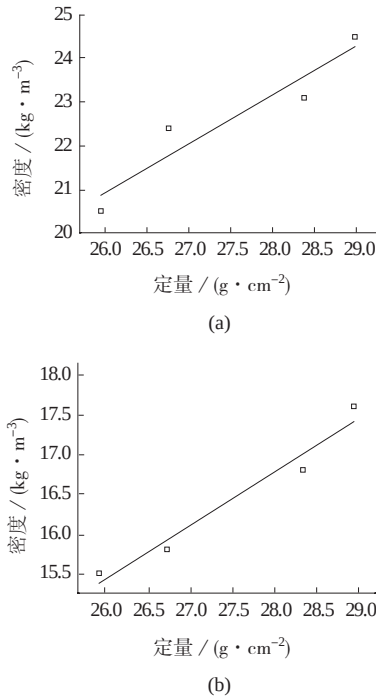
由表3可以看出,在孔格边长一定的条件下,白蜂窝密度随着芳纶纸定量的增加而增加。对测试的数据进行线性拟合,拟合结果如图5所示。

经线性拟合得出白蜂窝密度与定量关系如下:

$$\text{孔格边长 } 1.83 \text{ mm} : \rho_{\text{白蜂窝}} = \text{BW} \times 1.14 - 8.7 \quad (1)$$

$$\text{孔格边长 } 2.75 \text{ mm} : \rho_{\text{白蜂窝}} = \text{BW} \times 0.68 - 2.25 \quad (2)$$

式中: $\rho_{\text{白蜂窝}}$ 为白蜂窝的密度,BW为芳纶纸的定量,得出的经验公式表征了白蜂窝密度与芳纶纸定量的关系。



孔格边长: a—1.83 mm; b—2.75 mm

图5 白蜂窝密度与芳纶纸定量的关系

与 Tom Bitzer 的理论计算公式<sup>[13]</sup>存在差异的原因包括两个方面:一是理论计算是基于一个蜂窝孔格,二是忽略了蜂窝在加工过程中其它影响因素。而在实际生产过程,芳纶纸正在涂胶过程中有节点胶涂覆,在拉伸定型过程中,芳纶纸由于张力均匀性而受热时孔格变形不均一,而芳纶纸蜂窝体积受到蜂窝孔格规整性的影响。

### 2.3 压缩强度与酚醛树脂增量的关系

浸胶前的纸蜂窝虽然具有较好的隔热性能,但是强度较低,易吸湿,其抗冲击性较差。故纸蜂窝一般通过浸渍树脂来提高力学性能和阻燃性能,改善吸湿性能,以满足各种使用要求<sup>[14]</sup>。

采用规格相同的芳纶纸,定量为  $26.8 \text{ g/cm}^2$ ,按照图1的蜂窝制造工艺流程,制造孔格边长为  $1.83 \text{ mm}$  的芳纶纸蜂窝,测试其白蜂窝的密度,和浸胶-固化后密度,按 ASTM C365/C365M 测试各个密度的蜂窝的压缩强度,按照  $\Delta\rho = \rho_{\text{蜂窝}} - \rho_{\text{白蜂窝}}$  计算酚醛树脂的增量,酚醛树脂增量和压缩强度的测试结果如图6所示。由图6可以看出,随着酚醛树脂增量增加,压缩强度增加,且在密度增量为  $(5 \sim 15) \text{ kg/m}^3$ ,酚醛树脂增量与压缩强度具有一定的线性关系,通过线性拟合得到:

$$F = \Delta\rho \times 0.082 + 0.015 \quad (3)$$

将  $\Delta\rho = \rho_{\text{蜂窝}} - \rho_{\text{白蜂窝}}$  和式(1)代入式(3),得到:

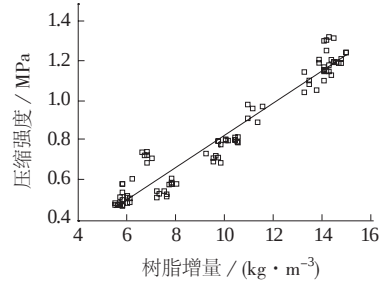


图6 压缩强度与酚醛树脂增量的关系

$$F = 0.082 \times \rho_{\text{蜂窝}} - 0.09348 \times BW + 0.7284 \quad (4)$$

式中:  $F$  为压缩强度,  $\rho_{\text{蜂窝}}$  为蜂窝密度,  $BW$  为芳纶纸定量。

根据此经验公式(4),将蜂窝产品的压缩强度、蜂窝的密度及芳纶纸的定量关系结合在一起,可根据蜂窝的密度及压缩强度,推算出所需芳纶纸的定量,或者已知芳纶纸的规格,推算出达到目标压缩强度,所需的树脂增量。

### 2.4 浸胶工艺对蜂窝性能的影响

笔者研究浸胶工艺对蜂窝密度和压缩强度的影响,采用 ACCH-2I-1/8-1.8 规格芳纶纸蜂窝分别进行一次浸胶和两次浸胶达到目标密度  $29 \text{ kg/m}^3$ ,按照高度方向经过片切蜂窝,得出高度( $T$ )方向的密度分布图,如图7所示。

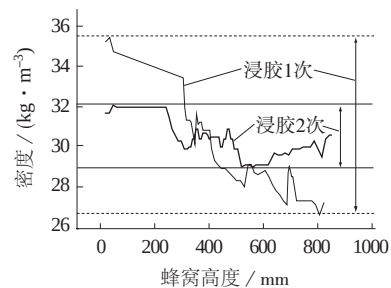


图7 不同浸胶次数下蜂窝密度与高度的关系

由图7可知,浸胶1次的蜂窝密度比浸胶2次蜂窝密度分散大,浸胶1次蜂窝片切后密度范围为:  $26.8 \sim 35.6 \text{ g/m}^3$ ,离散系数  $CV$  为  $7\%$ ,浸胶2次蜂窝片切后密度范围为:  $29.1 \sim 32.2 \text{ kg/m}^3$ ,离散系数  $CV$  为  $2.4\%$ ,对于高度  $914 \text{ mm}$  的蜂窝块,2次浸胶有利于控制密度的均匀性。图8为不同浸胶次数下蜂窝的非稳态和稳态压缩强度。由图8可知,非稳态压缩强度低于稳态压缩强度,浸胶2次的蜂窝的非稳态压缩强度和稳态压缩强度比浸胶1次蜂窝的高,非稳态压缩强度提高  $38.3\%$ ,稳态压缩强度提高  $26.5\%$ 。浸胶2次提高了密度均匀性,促使酚醛树脂在蜂窝表面分布更均匀,增强了蜂窝的压缩强度。

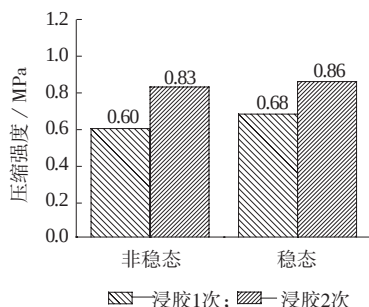


图8 不同浸胶次数下蜂窝的稳态和非稳态压缩强度

### 3 结论

(1) 白蜂窝密度与芳纶纸定量的关系: 孔格边长为 1.83 mm 时,  $\rho_{\text{白蜂窝}} = BW \times 1.14 - 8.7$ ; 孔格边长为 2.75 mm 时,  $\rho_{\text{白蜂窝}} = BW \times 0.68 - 2.25$ 。压缩强度与酚醛树脂增量的关系:  $F = \Delta \rho \times 0.082 + 0.015$ 。

(2) 浸胶 2 次的蜂窝密度比浸胶 1 次蜂窝密度离散小, 浸胶 1 次的离散系数 CV 为 7%, 浸胶两次的离散系数 CV 为 2.4%, 2 次浸胶有利于控制密度的均匀性。浸胶 2 次的蜂窝的压缩强度比浸胶 1 次蜂窝的高 38.3%~26.5%。

(3) 经过湿热老化环境处理 30 天后, ACCH-2I-1 / 8-1.8 规格蜂窝的非稳态压缩强度、L 及 W 向剪切强度和模量降低幅度小于 10%, ACCH-2I-3 / 16-1.4 规格蜂窝具有良好的抗老化性能, 非稳态压缩强度、L 向剪切强度降低幅度小于 5%。高温 (135℃) 条件下, 两种规格芳纶纸蜂窝的非稳态压缩强度的降低较大, 降低幅度为 21%~28%, L 和 W 向剪切强度和模量降低幅度 4%~20%。

### 参考文献

- [1] 穆举杰, 刘玉. 国产芳纶纸蜂窝在雷达罩上的应用 [J]. 现代雷达, 2014, 36(9):58-60.  
Mu Jujie, Liu Yu. Applications of domestic aramid paper honeycomb in radome [J]. Modern Radar, 2014, 36(9):58-60.
- [2] Johanna Sjölund. A new approach for determining the hidden material parameters of a honeycomb [J]. Journal of Materials Science, 2014, 49(14):4998-5005.
- [3] 贾金荣, 汤海涛, 陈磊, 等. 芳纶制品在轨道交通领域的应用概况 [J]. 电力机车与城轨车辆, 2015, 38(S1):62-65.  
Jia Jinrong, Tang Haitao, Chen Lei, et al. Application progress of aramid materials in rail transit [J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2015, 38(S1):62-65.
- [4] 杨乃宾, 章怡宁. 复合材料飞机结构设计 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2002.  
Yang Naibin, Zhang Yining. Composite materials for aircraft structural design [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2002.
- [5] Meo M, Morris A J, Vignjevic R, et al. Numerical simulations of low-velocity impact on an aircraft sandwich panel [J]. Composite Structures, 2003, 62(3 / 4):353-360.
- [6] 张广成, 赵景利. 蜂窝夹层结构复合材料的力学性能研究 [J]. 机械科学与技术, 2003, 22(2):280-282.  
Zhang Guangcheng, Zhao Jingli. Study on mechanical properties of honeycomb sandwich structure composite [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2003, 22(2):280-282.
- [7] 黄钧铭, 孙茂健, 朱敏英, 等. 蜂窝结构材料用国产芳纶纸性能分析 [J]. 高科技纤维与应用, 2008, 33(6):33-38.  
Huang Junming, Sun Maojian, Zhu Mingyong, et al. Performance analysis of the domestic meta-aramid paper (PMIA) used for honeycomb structure material [J]. Hi-Tech Fiber and Application, 2008, 33(6):33-38.
- [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):2184-2187.  
Wang Houlin, Wang Yi, Yao Yunzhen, et al. Aramid paper's structure and performance and their effect on the mechanical properties of aramid paper honeycomb [J]. Journal of Functional Materials, 2013, 44(15):2184-2187.
- [9] 罗玉清, 王萌, 郝巍, 等. 芳纶纸基结构性能对蜂窝性能影响关系的研究 [J]. 高科技纤维与应用, 2018(5):42-47.  
Luo Yuqing, Wang Meng, Hao Wei, et al. Study on relationships between properties of aramid paper and properties of honeycomb [J]. Hi-Tech Fiber and Application, 2018(5):42-47.
- [10] 杨进军, 马建忠, 刘文品. 大尺寸 ACCH 芳纶纸蜂窝浸胶工艺研究 [J]. 航空制造技术, 2015, 58(14):68-70.  
Yang Jinjun, Ma Jianzhong, Liu Wenpin. Study on dipping process of large size ACCH aramid paper honeycomb [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(14):68-70.
- [11] 刘杰, 罗玉清, 纪双英, 等. 酚醛树脂分布对芳纶纸蜂窝力学性能的影响 [J]. 宇航材料工艺, 2016, 46(2):26-30.  
Liu Jie, Luo Yuqing, Ji Shuangying, et al. Effect of phenolic resin distribution on mechanical properties of nomex honeycomb [J]. Aerospace Materials & Technology, 2016, 46(2):26-30.
- [12] 杨进军, 刘文品, 马建忠. 蜂窝浸胶-烘干-固化质量模型研究 [J]. 航空制造技术, 2015(7):91-98.  
Yang Jinjun, Liu Wenpin, Ma Jianzhong. Study on mass model of honeycomb's dipping-drying-curing [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(7):91-98.
- [13] Tom Bitzer. Honeycomb technology: Materials, design, manufacturing, applications and testing [M]. Springer, 1997.
- [14] 杨进军, 刘文品, 马建忠. 蜂窝用酚醛树脂固化反应动力学研究 [J]. 航空制造技术, 2015(14):105-108.  
Yang Jinjun, Liu Wenpin, Ma Jianzhong. Study on curing reaction kinetics of honeycomb-phenolic resin [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(14):105-108.