

# 芳纶纸蜂窝外观缺陷分析

刘 杰 郝 巍

(中航复合材料有限责任公司,北京 101300)

**文 摘** 对芳纶纸蜂窝的制备工艺流程进行了简单的介绍,结合其制备工艺,对蜂窝双层壁、嵌套孔格、S型孔格和人字形孔格等常见外观缺陷产生的原因进行了分析,并结合蜂窝制备过程提出了减少蜂窝缺陷的具体措施。建议研究人员评估芳纶纸蜂窝外观缺陷对其性能的影响,确定缺陷的可接受范围。

**关键词** 芳纶纸蜂窝,外观缺陷,制备工艺

中图分类号:TB3

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2018.03.019

## Analysis on Appearance Defect of Aramid Paper Honeycomb

LIU Jie HAO Wei

(AVIC Composite Corporation LTD, Beijing 101300)

**Abstract** In this paper, aramid paper honeycomb preparation process is briefly introduced. Combining with aramid paper honeycomb preparation process, the causes of common appearance defects such as Doublewall thickness, Nested cells, S-sells and Herringbone patterns are analyzed, and some concrete measures to reduce honeycomb defects were proposed. It is recommended that researchers evaluate the effect of aramid paper honeycomb appearance defects on their performance and determine the acceptable range of defects.

**Key words** Aramid paper honeycomb, Appearance defect, Preparation process

### 0 引言

复合材料夹层结构是一种优异的结构形式,具有比强度高、比刚度、质轻和性能可设计等优点,同时还具有隔声、隔热、保温和透波等功能。在航空航天领域,夹层结构主要用于飞行器的次承力结构件,如机身整流罩、雷达罩、起落架舱门、口盖等部位。近几年,随着复合材料制造技术的不断发展,夹层结构的应用已逐步扩大到汽车、建筑、船舶、轨道交通、风力发电叶片等领域,在这些领域得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>。

芳纶纸蜂窝芯材作为复合材料夹层结构用芯材之一,因其突出的力学性能稳定性、耐腐蚀性、阻燃性、耐环境性和透波性,在航空航天领域的应用最为广泛<sup>[2]</sup>。国外对芳纶纸蜂窝的研究工作开展较早,已研制出六边形、矩形、菱形等多种规格蜂窝<sup>[3]</sup>,结合有限元对蜂窝及其夹层结构的压缩、剪切和冲击等性能开展了大量研究<sup>[4-6]</sup>;国内研究人员在芳纶纸蜂窝国产化的过程中研究了国产芳纶纸蜂窝的制备工

艺和力学性能<sup>[7-9]</sup>,并将芳纶纸性能与蜂窝性能结合后发现,影响芳纶纸蜂窝模量最重要的纸张性能是浸渍树脂后纸张模量与厚度的乘积<sup>[10]</sup>,还有部分研究人员以芳纶纸蜂窝为基础,开展了蜂窝结构的吸声、降噪和吸波等功能性研究<sup>[11-12]</sup>,对于芳纶纸蜂窝制作过程中常见的缺陷,仅美国 Hexcel 公司、北京航空材料研究院和中航复合材料有限责任公司等部分企业标准中对芳纶纸蜂窝缺陷的定义、缺陷的示意图进行了简单的描述,而针对这些缺陷产生的原因未见相关报道。本文总结了芳纶纸蜂窝芯材制备过程中常见的外观缺陷,结合蜂窝的制备工艺,对这些缺陷产生的可能原因及造成的影响进行了分析,并提出具体的解决措施。

### 1 芳纶纸蜂窝生产工艺流程

芳纶纸蜂窝主要由芳纶纸、芯条胶和浸渍树脂制作而成,根据芳纶纸原料的不同,芳纶纸蜂窝可分为对位芳纶蜂窝和间位芳纶纸蜂窝,因对位芳纶纸的主

要原材料对位芳纶的分子结构中酰胺基团位于苯环对位(1,4位),分子链的刚性更大,使对位芳纶纸蜂窝较间位芳纶纸及蜂窝具有更优异的力学性能;按孔格形状的不同,又可将芳纶纸蜂窝分为正六边形、过拉伸、单曲柔性、双曲柔性、增强正六边形等。由于正六边形蜂窝易于自动化生产、节省材料、强度较高,过拉伸型蜂窝有利于L向单曲面成型,这两种类型的蜂窝在国内市场的应用最为广泛。芳纶纸蜂窝的生产工序较多,主要分为涂胶、叠合、压制、拉伸、定型、浸胶、固化和片切8道工序(图1),每道工序出现工艺问题均有可能对后一工序造成影响,导致蜂窝产生缺陷。

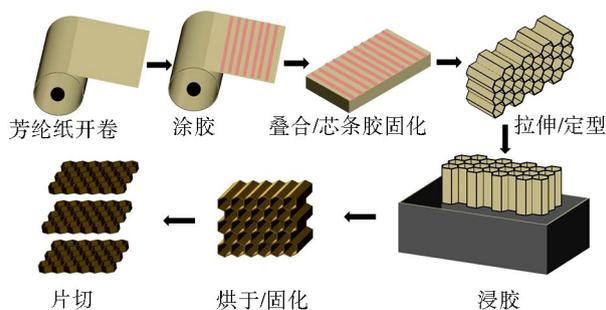


图1 芳纶纸蜂窝生产流程

Fig.1 Aramid paper honeycomb production process

## 2 芳纶纸蜂窝常见缺陷及形成原因

### 2.1 涂胶压制

芳纶纸蜂窝通常采用凹印涂胶的方式将芯条胶间隔涂印在芳纶纸上,涂胶后将一定长度的芳纶纸交错叠合,叠合完成后在热压机或热压罐中加热加压固化,制成蜂窝叠板。涂胶压制工序中,可能造成的缺陷有蜂窝局部拉丝、双层壁、嵌套孔格、节点宽/窄等缺陷,部分缺陷示意图见图2。

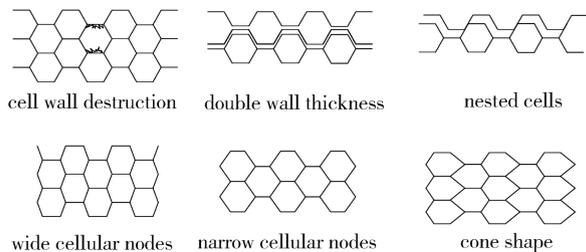


图2 涂胶压制工序部分缺陷示意图

Fig.2 Defective diagram of part of coating adhesive and pressing

造成这些外观缺陷的可能原因有以下3点:

(1) 芯条胶胶液中存在杂质、较大的橡胶颗粒,胶液黏度过大或者涂胶速度过快时,可能造成涂胶过程中芯条胶出现拉丝现象,丝状芯条胶固化后会导致拉伸过程中蜂窝出现局部无法拉伸、未浸胶蜂窝壁表面破坏等缺陷;

(2) 操作人员或者自动叠合机在进行叠合过程中未进行交错叠合或者交错叠合位置不正确,会导致叠板在拉伸后出现双层壁缺陷、嵌套孔格缺陷和锥型孔格缺陷;

(3) 涂胶辊印胶槽的宽度和深度偏大,芯条胶固化压力过大时,会造成蜂窝节点宽;涂胶辊印胶槽的宽度和深度偏小,芯条胶固化压力过小时,会造成蜂窝节点窄,还可能造成节点强度不足。

### 2.2 拉伸定型

拉伸定型工序中,将蜂窝叠板安装在拉伸机上后,以一定速度对蜂窝叠板进行拉伸,当孔格尺寸达到工艺要求后,将拉伸后蜂窝固定在工装上,随后在高温烘箱中将拉伸后蜂窝加热至材料的玻璃化温度,对蜂窝进行定型处理,制成未浸胶蜂窝块。拉伸定型过程中,可能出现S型孔格、蜂窝局部开裂、人字形孔格等缺陷,部分缺陷示意图见图3。

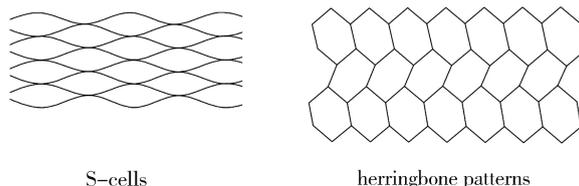


图3 拉伸定型工序部分缺陷示意图

Fig.3 Defective diagram of part of drawing and setting

造成这些蜂窝外观缺陷的可能原因有以下3点:

(1) 蜂窝未拉伸到规定的尺寸时会出现S型孔格缺陷,而拉伸速度过快或者节点强度不足时,易造成蜂窝局部开裂;

(2) 蜂窝拉伸过程中蜂窝局部的展开速度不一致,出现一部分展开,而另一部分未展开的现象,在展开和未展开的交界处,易出现人字形孔格缺陷,而造成蜂窝展开速度不一致的原因可能是拉伸速度过快或者蜂窝局部的粘连;

(3) 蜂窝在定型过程中受热不均匀也会造成蜂窝局部开裂。

### 2.3 浸胶固化

在浸胶固化工序中,首先将未浸胶蜂窝块浸泡至树脂溶液中,将蜂窝以一定速度提升出树脂溶液,反复多次直至蜂窝达到要求的密度后,在高温烘箱中加热固化,制成蜂窝块。浸胶固化过程中,可能出现蜂窝孔格堵胶、蜂窝孔格气泡、蜂窝局部缺胶、蜂窝外观色差等缺陷,部分缺陷示意图见图4。造成这些蜂窝外观缺陷的可能原因有以下5点:

(1) 拉伸时因蜂窝叠板局部有芯条胶拉丝、芳纶纸透胶等工艺缺陷,会造成蜂窝孔格无法拉开或拉伸

后出现蜂窝壁破坏,破坏部位的芳纶纤维凸起后阻挡树脂的流动,造成蜂窝孔格堵胶;

(2)蜂窝在拉伸过程中出现表面划伤且划伤在浸胶前未去除,会造成浸胶后在划伤处堵胶;

(3)对于局部蜂窝孔格未拉开或者堵胶的蜂窝,在蜂窝孔格堵胶的背面则易出现蜂窝局部缺胶的现象;

(4)蜂窝孔格出现气泡缺陷的原因可能是白蜂窝壁破坏部位纤维凸起较少,未引起蜂窝堵胶缺陷,但树脂在流过凸起的纤维时,会与蜂窝壁形成一个空腔,蜂窝在固化后形成蜂窝孔格气泡缺陷;也可能是蜂窝固化前溶剂含量较大,在高温下溶剂挥发过快,导致蜂窝孔壁出现气泡缺陷;还有可能是浸渍树脂(通常为酚醛树脂)在固化过程中小分子释放,造成蜂窝孔壁出现气泡缺陷;

(5)蜂窝外观色差的主要原因是蜂窝溶剂挥发不均匀或者烘干固化时风速不均匀。

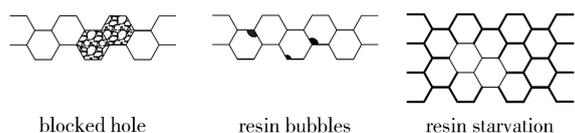


图4 浸胶固化工序部分缺陷示意图

Fig.4 Defective diagram of the part of the dipping and curing

## 2.4 片切

片切工序根据客户需求将固化后蜂窝块片切为不同的高度,在片切过程中可能出现蜂窝表面起毛、蜂窝高度公差过大、节点开胶等缺陷,片切节点开胶缺陷示意图见图5。造成这些蜂窝缺陷的可能原因有以下2点:

(1)片切机带锯锯齿过大,片切速度过快会造成芳纶纤维从蜂窝孔壁中拔出,引起蜂窝的表面起毛,而带锯选择不当、进刀速度和带锯线速度设定不当会造成蜂窝高度公差过大;

(2)蜂窝局部的节点开胶缺陷一般出现在低高度的蜂窝中,主要是由于操作工人在转运蜂窝产品过程中操作不当造成。

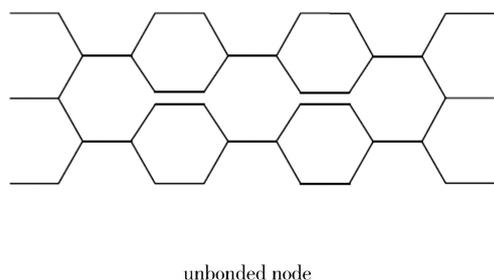


图5 片切工序节点开胶缺陷示意图

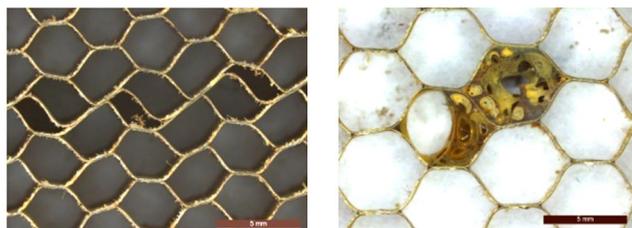
Fig.5 Defective diagram of the part of the slicing

## 3 减少蜂窝外观缺陷的措施

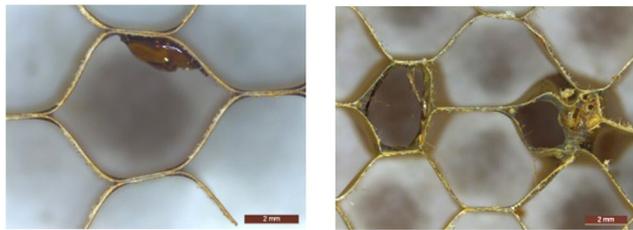
芳纶纸蜂窝制作的每道工序均有可能使产品出现缺陷,而涂胶压制工序是各工序中保证蜂窝质量最为关键的一道工序,在该工序中出现芯条胶拉丝、透胶,叠合位置不正确,芯条胶含胶量不足、压制压力不适宜等问题均会对芳纶纸蜂窝的后续制作造成影响。针对涂胶压制工序的缺陷,可通过对涂胶机局部隔离后加装空调、除湿设备对环境温湿度进行控制,降低拉丝现象;通过自动化叠合设备提高叠合精度,减少双层壁缺陷、嵌套孔格缺陷和锥型孔格缺陷,通过加装胶液过滤设备,减少胶液中的杂质,提高涂胶质量;优化涂胶辊印胶槽的尺寸,综合考虑含胶量和压制挤宽宽度,可保证蜂窝的节点宽度。

涂胶质量的保证可减少蜂窝在拉伸过程中出现人字形孔格缺陷的出现,若拉伸过程中发现蜂窝局部出现了人字形孔格缺陷,应当降低拉伸速度,同时通过热水对局部进行加热,减少或者去除人字形孔格缺陷;蜂窝在定型过程中出现的局部开裂现象除增加节点强度外,还需要对烘房热风的均匀性进行控制,使蜂窝均匀受热,减少受热不均产生的内应力,从而导致蜂窝局部开裂。

同样,蜂窝的涂胶质量得以保证后,可减少蜂窝在固化后出现蜂窝孔格堵胶、蜂窝孔格气泡和局部缺胶等缺陷,若在浸胶后(树脂未固化)发现蜂窝孔格已经出现堵胶现象,可采取物理的方法去除蜂窝堵胶;因溶剂挥发不充分而导致的蜂窝孔格气泡,可通过延长蜂窝晾置时间来减少缺陷,而因酚醛树脂反应时小分子释放而产生的气泡缺陷,可通过增加固化台阶、减少每次浸胶的上胶量等措施来减少缺陷的产生;在蜂窝净化和烘干固化时对风速进行有效控制,使溶剂均匀挥发,整块蜂窝上的树脂固化速度保持基本一致,可有效减少蜂窝外观颜色不均匀的缺陷产生。最后,在片切加工时选择适合的片切带锯,调整进刀速度和线速度在合理范围内,可解决蜂窝表面纤维毛较多的问题。芳纶纸蜂窝部分外观缺陷形貌见图6。



(a) 嵌套孔格 (b) 蜂窝孔格堵胶



(c) 蜂窝孔格气泡 (d) 孔格粘连

图6 部分外观缺陷形貌

Fig.6 Macroscopic morphology of appearance defects

#### 4 结论与建议

随着芳纶纸蜂窝国产化研制工作的开展,国内现已实现芳纶纸及芳纶纸蜂窝的国产化,国产芳纶纸蜂窝的性能已达到 Hexcel 公司、欧洲复合材料公司等国外先进芳纶纸蜂窝制造商的性能指标要求,但受国产芳纶纸和芯条胶工艺性的影响,国产芳纶纸蜂窝在制作过程中易出现透胶、节点胶拉丝等工艺问题,针对这些工艺问题,研究人员提出了部分解决办法,但还未完全解决这些工艺问题。建议在今后的研究工作中重点关注芳纶纸蜂窝制备过程中的各种缺陷,找出缺陷产生的根本原因,进一步提高国产芳纶纸蜂窝的质量,并评估这些外观缺陷对蜂窝性能的影响程度,确定这些缺陷的可接受范围。

#### 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,2013:62-66.  
 [2] 沃丁柱. 复合材料大全[M].北京:化学工业出版社,2000.

[3] HEXCEL Composites. HexWeb Honeycomb Attributes and Properties[S].

[4] LEE H S, HONG S H, 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: 1265 - 1272.

[5] KIM D S, LEE J R. Compressive Mechanical properties of the nomex/thermoset honeycomb cores[J]. Polymers for Advanced Technologies, 1996, 8: 1 - 7.

[6] CASTAÑE B, AMINANDA Y, BARRAU J J, et al. Discrete modeling of the crushing of nomex honeycomb core and application to impact and post-impact behavior of sandwich structures[M]. Dynamic Failure of Composite and Sandwich Structures, 2013: 427-489.

[7] 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.

[8] 郝巍, 罗玉清. 国产间位芳纶纸蜂窝与 NH-1 蜂窝性能的对比研究[J]. 高科技纤维与应用, 2011, 36(4): 21-24.

[9] 马科峰, 刘杰, 王萌, 等. 三种间位芳纶纸蜂窝力学性能及断口形貌分析[J]. 工程塑料应用, 2017, 44(2): 32-36.

[10] 王厚林, 王宜, 姚运振, 等. 芳纶纸蜂窝力学性能与纸张性能相关性的研究[J]. 功能材料, 2013, 44(3): 349-352.

[11] 杨军伟, 蔡俊, 邵骢. 微穿孔板-蜂窝夹芯复合结构的隔声性能[J]. 噪声与振动控制, 2013, 33(4): 122-125.

[12] 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.