

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.08.012

植物纤维纸蜂窝芯材的制备及性能

李瑞敏,刘杰,罗玉清,余金光,郝巍

(中航复合材料有限责任公司,北京 101300)

摘要:分别采用“两步法”和“三步法”两种不同工艺方法制备植物纤维纸蜂窝芯材,通过测试压缩性能、剪切性能研究两种工艺方法所制得芯材的力学性能;测试水迁移和垂直燃烧研究芯材的物理阻燃性能;比较芯材的力学性能和物理性能,选出两种方法中效果较好的工艺方法。结果表明,三步法工艺中芯材的压缩强度比两步法增加了52%; L 向剪切强度增加了47.6%, W 向剪切强度增加了72%。水迁移测试中两步法水迁移孔格数平均值为5,三步法平均值为0,垂直燃烧测试中两步法平均烧焦长度为41.8 mm,比“三步法”烧焦长度长12.8 mm。通过扫描电子显微镜测试分析了三步法力学性能较好的原因。综合比较芯材的力学性能和物理性能,三步法工艺好。

关键词:植物纤维纸蜂窝芯材;两步法工艺;三步法工艺;力学性能;物理性能

中图分类号: TQ327.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2017)08-0055-05

Preparation and Properties of Plant Fiber Honeycomb Core

Li Ruimin, Liu Jie, Luo Yuqing, Yu Jinguang, Hao Wei

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

Abstract : The “two-step method” and “three-step method” were used to prepare the plant fiber honeycomb core material. The mechanical properties were studied by compressive property and shear test. The physical and properties were studied by water migration test and vertical combustion test. By comparing the mechanical and physical properties with the two methods, the better one was choosed. The experimental results show that the compressive strength in the “three-step” process is increased by 52% compared with that of the “two step method”, the L shear strength is increased by 47.6%, and the W shear strength is increased by 72%. Water migration test show that the number of water transferred honeycomb core cells is 0 by “three-step” method, while “two-step method” is 5. The average burning length of the “two-step method” in the vertical combustion test is 41.8 mm, which is 12.8 mm longer than “three-step method”. SEM explains the reason of “three-step” has better mechanical properties. The experimental results show that the three-step process method is the better one.

Keywords : plant fiber honeycomb core ; two-step process method ; three-step process method ; mechanical property ; physical property

夹层结构复合材料是一种典型的高比强度、高比刚度的结构复合材料,它将面板的高强度和高模量与夹芯材料的轻质和高刚度有机结合起来,在航空航天、轨道交通等领域得到了广泛的应用。蜂窝夹芯材料作为夹层复合材料芯材的一种,因形同天然蜂窝而得名,它是从增强材料成型,再经过浸胶固化后制得^[1-6]。

蜂窝芯材包括布蜂窝、金属蜂窝、纸蜂窝等,其中芳纶纸蜂窝芯材具有轻质、高强度、高模量、阻燃、耐高温、低介电损耗等一系列优良性能,已成为飞机复合材料蜂窝夹层结构的首选芯材,主要应用于飞机机体次承力和舱内结构等部件,在减轻飞机结构质量、改善相关零部件的加工性能方面起到较重要的作用^[7-11]。芳纶纤维纸主要由间位纤维和对位纤

维制备而成,主要存在原材料和制造成本较高的问题,因此很难大规模应用在成本较为敏感的轨道交通、汽车工业等领域,而恰恰是交通运输工业对低成本、高性能的蜂窝芯材有着强烈的需求。金属蜂窝芯材是由金属板拉伸制备而成,铝蜂窝的原材料价格相对 Nomex 纸低,制备工艺相对简单,所以蜂窝芯材价格较低,但是由于金属铝密度较高,主要用于对质量要求不高的建筑领域,同时这些蜂窝芯材也存在对不可再生资源的依赖性,在使用或废弃过程中存在对环境的破坏性,不利于环保,因此开发绿色环保型蜂窝芯材意义重大^[12-16]。

联系人:李瑞敏,硕士,工程师,主要从事芳纶纸蜂窝的研制

收稿日期:2017-06-06

目前,低碳和环保型材料已经成为当前国际社会研究热点,欧美等发达国家和地区,鼓励和支持“环境友好”材料的开发,目的是减少污染、保护环境。而生物质的植物纤维来源于自然界,是可再生资源,且可自然降解,充分利用植物纤维对环境保护和减少人们对非可再生资源的依赖就有非常重要的意义。

笔者采用植物纤维纸为原材料,采用两种工艺方法制作了同种规格植物纤维纸蜂窝芯材,对植物蜂窝芯材的压缩性能和剪切性能、水迁移性能及燃烧性能进行测试分析,将两种工艺条件下所制作植物纤维蜂窝芯材性能进行综合比较,从而选择出两者之间最优的植物纤维蜂窝芯材的制备工艺。

1 实验部分

1.1 主要原材料

植物纤维纸:中航复合材料有限责任公司定制;

芯条胶:黑龙江省科学院石油化学研究院;

酚醛清漆:重庆三峡油漆股份有限公司;

磷氮类阻燃剂:常州市纽雷阻燃剂厂。

1.2 主要设备及仪器

涂胶机、拉伸机、浸胶机:中航复合材料有限责任公司;

电子拉力试验机:5582型,美国 INSTRON 公司;

电子引伸计:JD1488型,美国 INSTRON 公司;

垂直燃烧仪:CZF-3型,江苏省江宁县分析仪器厂;

扫描电子显微镜(SEM):JSM-6360LV型,美国 JEOL 公司。

1.3 试样制备

采用两步法和三步法两种工艺制作规格为 1.83-48 (1.83 指蜂窝孔格边长,48 指蜂窝密度) 植物纤维纸蜂窝芯材,两步法工艺中直接将白蜂窝浸入阻燃剂溶液中,烘干过后进行浸胶固化。三步法工艺中首先对定型后的白蜂窝进行浸胶处理,其次进行浸泡阻燃剂,最后再进行一次浸胶处理。制备工艺流程如图 1 和图 2 所示。

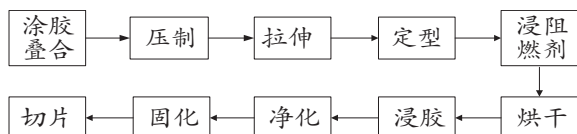


图1 两步法工艺流程图

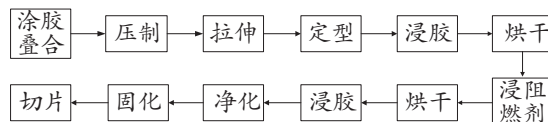


图2 三步法工艺流程图

将不同工艺条件下所制备的蜂窝芯材进行综合比较,从而确定两者中植物纤维纸蜂窝芯材的较佳的制备工艺。

1.4 性能测试

稳定性压缩强度:按照 ASTM C365-2016 测试,试样尺寸为 75 mm × 75 mm × 12.7 mm,试验机加载速率为 0.5 mm/min,试验过程中连续加载直至蜂窝发生破坏,实验结果取 5 个试样测试结果的平均值。植物纤维纸蜂窝芯材压缩性能测试装置如图 3 所示。

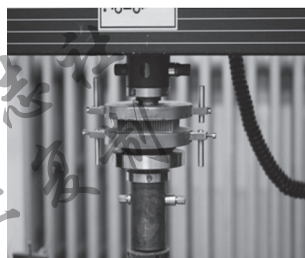


图3 植物纤维蜂窝芯材压缩性能测试装置

剪切强度及模量:按照 ASTM C273-2000 进行试验,试验尺寸为 50 mm × 150 mm × 12.7 mm,将试样装在试验机上时保证载荷作用线接近试样的对角线,试验机加载速率为 0.5 mm/min,试验过程中均匀加载直至蜂窝发生破坏。实验结果取 5 个试样测试结果的平均值。植物纤维纸蜂窝芯材剪切性能测试装置如图 4 所示。

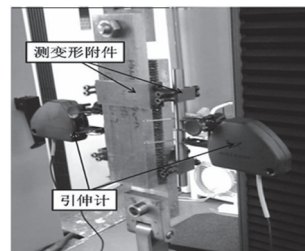


图4 植物纤维蜂窝芯材剪切性能测试

芯子水迁移:按照 ASTM F1645-2000,试样尺寸为 75 mm × 75 mm × 12.7 mm,蜂窝通过防水胶粘剂与有机玻璃板粘接,室温固化 24 h。固化后在有机玻璃面板钻孔,要求孔的尺寸略小于一个蜂窝孔格,在钻孔时不能损坏蜂窝壁,在已打好孔的有机玻璃面板上粘接固定滴定管,将滴定管通过软管与量管连接。实验结果取 5 个试样测试结果的平均值。图 5 为植物纤维纸蜂窝芯材水迁移测试装置图。



图5 植物纤维纸蜂窝芯材水迁移试验装置

燃烧性能:按照 BSS 7230 中 F1 方法进行试验,试样尺寸为 $76\text{ mm} \times 305\text{ mm} \times 12.7\text{ mm}$,观察并记录点火 60 s 后每个试样的焰燃时间、烧焦长度,是否有滴落物及滴落物自熄时间和其它试验现象。实验结果取 5 个试样测试结果的平均值。图 6 为植物纤维纸蜂窝芯垂直燃烧试验装置。

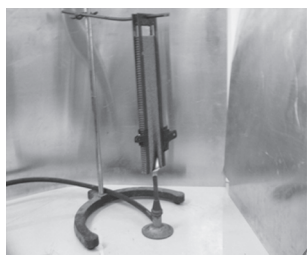


图6 植物纤维纸蜂窝芯垂直燃烧试验装置

SEM 分析:用 SEM 观察两步法和三步法工艺制备出的植物纤维纸蜂窝芯材断面形貌。

2 结果与讨论

2.1 植物纤维纸蜂窝芯力学性能

分别进行了植物纤维纸蜂窝芯材的压缩性能及 L 向及 W 向剪切强度及模量测试。对于植物纤维纸蜂窝芯材, W 向为蜂窝孔格展开的方向, L 向为垂直于蜂窝孔格展开的方向, T 为蜂窝芯材的高度。正六边形植物纤维纸蜂窝芯材如图 7 所示。

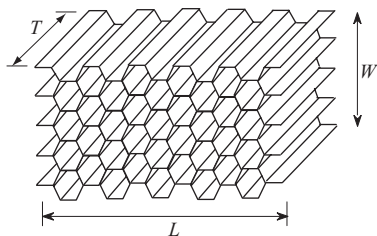


图7 植物纤维纸蜂窝芯材正六边形几何尺寸

图 8 为两步法和三步法植物纤维纸蜂窝芯材压缩强度和剪切强度的对比。从图 8 可以看出,两步法工艺所制得的蜂窝稳定性压缩强度为 1.17 MPa,三步法为 1.78 MPa,三步法比两步法工艺增加 0.610 MPa,较两步法增加了 52%;两步法制得的蜂窝的 L 向剪切强度为 0.786 MPa,三步法为

1.16 MPa,三步法比两步法增加 0.374 MPa,较两步法工艺增加了 47.6%,三步法工艺制作蜂窝的 W 向剪切强度为 0.750 MPa,两步法为 0.435 MPa,三步法比两步法工艺增加 0.315 MPa,较两步法工艺增加了 72%。

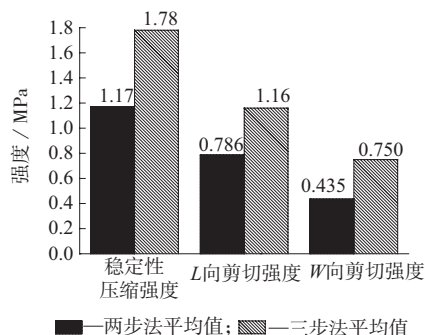


图8 两步法和三步法植物纤维纸蜂窝芯材压缩强度、剪切强度对比

如图 7 中 T 为蜂窝芯材两端面之间的距离,植物纤维纸蜂窝芯材剪切试验使蜂窝孔格在垂直于其轴线方向发生破坏,主要的破坏形式为蜂窝孔壁在与孔格轴向成 45° 角方向上的坍塌。当夹层结构承受横向剪切时,剪切应力主要由蜂窝芯承受,即由孔壁承受。由于孔壁较薄,故先产生单孔壁剪切失稳,剪切变形增大进而出现非线性应力—应变曲线,当达到材料的剪切强度时,夹层结构失去承载能力而破坏^[17]。同时,当夹层结构承受横向剪切时,蜂窝芯发生剪切变形,剪切弹性模量对于夹层结构的稳定性也有较大影响^[18]。植物纤维纸作为蜂窝芯材的骨架材料,构成了蜂窝的孔壁,对植物纤维纸蜂窝的剪切性能起着重要的作用。

图 9 为两步法和三步法植物纤维纸蜂窝芯材 L 向剪切弹性模量和 W 向剪切弹性模量的对比图。

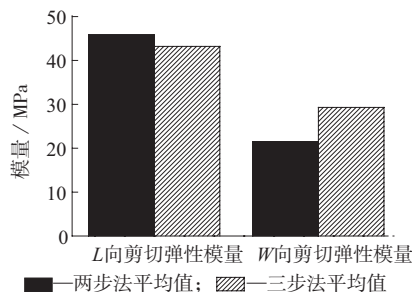


图9 两步法和三步法植物纤维纸蜂窝芯剪切模量对比图

从图 9 可以看到,两步法蜂窝芯材 L 向剪切模量为 45.8 MPa,三步法为 43.2 MPa,三步法比两步法工艺减小 2.6 MPa,较两步法工艺降低了 5.6%。但三步法工艺制作蜂窝的 W 向剪切弹性模量为 29.3 MPa,两步法为 21.5 MPa,三步法比两步法工艺 W 向剪切弹性模量增大 7.8 MPa,三步法工艺制

作的蜂窝 W 向剪切弹性模量增加了 36%。

2.2 植物纤维纸蜂窝芯水迁移性能

蜂窝芯的水迁移性与其纸的吸水性、蜂窝胶结边的粘结质量和隔板与蜂窝的高度公差有密切关系。所用的植物纤维纸是由间位芳纶纤维、聚酯纤维和木纤维制备而成的。首先,芳纶纤维结构单元中含有酰胺基团,同时木质纤维表面含有大量的羟基基团,这些基团具有很强的极性,导致材料极易吸水。植物纤维蜂窝芯材虽然经过浸胶、固化和切片成型后,已固化的酚醛树脂将植物纤维纸表面包覆,但在蜂窝的上下切口端面有裸露的材料,因此植物纤维芯材仍具有吸水性;其次,若植物纤维纸蜂窝胶结边粘结质量差,纸与纸之间存在缝隙,水易迁移至相邻蜂格。

表 1 为两步法工艺植物纤维纸蜂窝芯水迁移测试结果。表 2 为三步法工艺植物纤维纸蜂窝芯水迁移测试结果。从实验结果对比看,两种工艺方法中,平均值都达到了指标要求,但三步法工艺的抗水迁移性能更佳,分析其原因,三步法中纸芯材内外表面都有酚醛树脂包裹,导致水不易浸入,并从芯材内部穿透。而两步法阻燃剂直接与纤维纸接触,且有相当一部分会裸露在外,更容易吸水,所以三步法所得植物纤维纸蜂窝芯材耐水性能较两步法好。

表 1 两步法工艺芯材水迁移测试结果

试样编号	水迁移孔格数 / 个
1 [#]	8
2 [#]	4
3 [#]	4
4 [#]	3
5 [#]	4
平均值	5
指标值	≤ 6

表 2 三步法工艺芯材水迁移测试结果

试样编号	水迁移孔格数 / 个
6 [#]	0
7 [#]	0
8 [#]	0
9 [#]	0
10 [#]	0
平均值	0
指标值	≤ 6

2.3 植物纤维纸蜂窝芯阻燃性能

传统的间位芳纶纸本身具有阻燃的特性,制得的蜂窝芯材阻燃性能良好,但是主要成分为纤维素的植物纤维纸不耐燃,所以制得的蜂窝芯材达不到阻燃要求,因此要对白蜂窝芯材进行阻燃处理。

表 3 为两步法工艺植物纤维纸蜂窝芯材垂直

燃烧测试结果。表 4 为三步法工艺植物纤维纸蜂窝芯材垂直燃烧测试结果。从实验结果可以看出,不管是三步法还是两步法都能通过垂直燃烧测试,测试过程中样品自熄时间都为 0,并且没有滴落物产生,但是两步法工艺中试样的平均烧焦长度为 41.8 mm,比三步法的烧焦平均长度长出 12.8 mm。分析三步法阻燃效果优于两步法的原因,两步法中,阻燃剂直接附着在植物纤维纸(白蜂窝)表面,这样阻燃剂会使植物纤维纸变得易脆断,同时植物纤维纸会被水溶液浸透析出,导致阻燃剂直接裸露在外面而脱落,进而导致阻燃剂失效。而采用“浸胶-浸阻燃剂-浸胶”三步法制作植物纤维纸蜂窝芯,阻燃剂被里外两层酚醛树脂包裹,既不会直接接触植物纤维纸,又不会直接裸露在外。阻燃剂能够与酚醛树脂完美结合,发挥阻燃作用,从而使得三步法工艺所得芯材阻燃效果更优。

表 3 两步法工艺植物纤维纸蜂窝芯材垂直燃烧结果

试样编号	自熄时间 / s	滴落物	烧焦长度 / mm
1 [#]	0	无	45
2 [#]	0	无	40
3 [#]	0	无	40
4 [#]	0	无	43
5 [#]	0	无	41
平均值	0	-	41.8

表 4 三步法工艺植物纤维纸蜂窝芯材垂直燃烧结果

试样编号	自熄时间 / s	滴落物	烧焦长度 / mm
6 [#]	0	无	26
7 [#]	0	无	30
8 [#]	0	无	28
9 [#]	0	无	30
10 [#]	0	无	33
平均值	0	-	29

2.4 两步法和三步法制备植物纤维纸蜂窝 SEM

为了研究阻燃剂在植物纤维纸蜂窝的分布状态,选取经过阻燃处理的两步法和三步法工艺制备的蜂窝,分别对其淬断面进行观察,其 SEM 照片如图 10 和图 11 所示。两步法制备的植物纤维蜂窝芯,有很多阻燃剂直接聚集在蜂窝芯材表面,同时在阻燃剂与植物纤维基体之上有很多明显的界面或者小空隙分布于断面上,这是由于阻燃剂与植物纤维基体之间的表面性质或者极性的差异,造成了阻燃剂与植物纤维基体的界面相容性差。在图 11 中,“三步法”制备的植物纤维蜂窝芯,尽管植物纤维基体材料的横断面也凹凸不平,但是阻燃剂并没有与基体材料直接接触,在酚醛树脂中分布较好,阻燃剂和植物纤维基体材料之间没有明显的不相

容的界面和孔洞分布,说明阻燃剂对植物纤维纸基体材料力学性能影响较小。通过上述分析也解释了“三步法”工艺制备的植物纤维蜂窝力学性能优于“两步法”的原因。

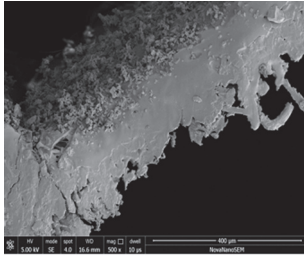


图 10 两步法制备植物纤维纸蜂窝芯断面 SEM 照片

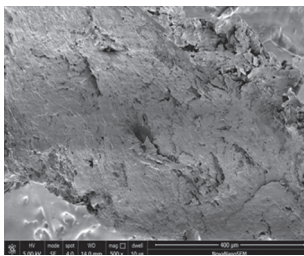


图 11 三步法制备植物纤维纸蜂窝芯断面 SEM 照片

3 结论

(1) 三步法制备的植物纤维蜂窝压缩性能、剪切强度都优于“两步法”,其中三步法压缩强度增加了 52%, L 向剪切强度增加了 47.6%, W 向剪切强度增加了 72%。

(2) “两步法”和“三步法”都能通过指标值,但是“两步法”制备的植物蜂窝更容易发生水迁移现象。

(3) “两步法”和“三步法”制备的植物纤维蜂窝在点火 60 s 后能够通过阻燃测试要求,但是“两步法”烧焦长度更长,比三步法的烧焦长度长出 12.8 mm。

(4) 发现三步法制备的植物纤维纸蜂窝中,阻燃剂没有和植物纤维纸基体相接触,且与酚醛树脂相容性良好,解释了“三步法”力学性能优于“两步法”的原因。

(5) 三步法制备工艺优于两步法制备工艺。

参考文献

- [1] 马科峰,刘杰,王萌. 三种间位芳纶纸蜂窝力学性能及断面形貌分析[J]. 工程塑料应用,2017,45(2):32-36.
Ma Kefeng, Liu Jie, Wang Meng. Mechanical properties and fracture morphology analysis of three kinds of meta-aramid paper honeycomb[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(2):32-36.
- [2] Sun Gaohui, Wang Wenpeng, Wang Leichao, et al. Effects of aramid honeycomb core on the flame retardance and mechanical property for isocyanate-based polyimide foams[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2017, 134(28):DOI:10.1002/app.45157.
- [3] 罗玉清,郝巍. 民用芳纶纸蜂窝性能的研究[J]. 高科技纤维与应用,2009,34(1):34-37.
Luo Yuqing, Hao Wei. Study on properties of T722 nomex honeycomb[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2009, 34(1):34-37.
- [4] Shi Guangyu, Tong Pin. Equivalent transverse shear stiffness of honeycomb cores[J]. International Journal of Solids & Structures, 1995, 32(10):1 383-1 393.
- [5] 江明,王志新,邓钧波. 间位与对位芳纶沉析纤维及其纸基绝缘材料的结构特性对比研究[J]. 绝缘材料,2017,50(1):17-22.
Jiang Ming, Wang Zhixin, Deng Junbo. Structures and properties comparison of meta-aramid and para-aramid fibrid and their paper-baseds[J]. Insulation Material, 2017, 50(1):17-22.
- [6] 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.
- [7] Tian Jianzhong, Wang Jianhe. Nomex paper t-411 impregnated with adhesive varnish and its application[J]. Proceedings of the International Symposium on Electrical Insulating Materials, 1998, 9:337-339.
- [8] 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.
Hao Wei, Luo Yuqing. Study on the properties of China's paramid paper honeycomb[J]. Hi-tech Fiber & Application, 2009, 34(6):21-25.
- [9] 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,2015,484(1):88-92.
Yang Jinjun, Ma Jianzhong, Liu Wenpin. Study on dipping process of large size ACCH aramid paper honeycomb[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 484(1):88-92.
- [10] Chen D H, Masuda K. Estimation of stress concentration due to defects in a honeycomb core[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2017, 172:61-72.
- [11] 王厚林,王宜,姚运振. 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):2 184-2 187.
Wang Houlin, Wang Yi, Yao Yunzhen. 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):2 184-2 187.
- [12] 郝巍,马科峰,罗玉清. 芳纶纸蜂窝及其夹层结构的研究进展[J]. 材料开发与应用,2011,26(6):81-85.

- Shi Wenku, Qian Kun, Ke Jun, et al. Prediction and analysis for the modal of a composite leaf spring in a light bus[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(24):139–144.
- [4] Sureshk S M, Tamtelselvam P, Kuma R R, et al. Design, fabrication and analysis of a hybrid fiber composite monoleaf spring using carbon and E-glass fibers for automotive suspension applications[J]. Mechanics of Composite Materials, 2014, 50(1):115–122.
- [5] 赵燕, 蔡艳涛, 王声涛, 等. 复合材料汽车板簧的优化设计[J]. 汽车工程师, 2014(11):28–32.
- Zhao Yan, Cai Yantao, Wang Shengtao, et al. Optimization design of automotive composite material leaf spring[J]. Auto Engineer, 2014(11):28–32.
- [6] 管鸣, 任勇生, 孙祥正. 基于 ANSYS 的形状记忆合金复合材料板簧的模态分析[J]. 山东科技大学学报, 2012, 31(6):106–112.
- Guan Ming, Ren Yongsheng, Sun Xiangzheng. Modal analysis of composite leaf spring with SMA based on ansys[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology, 2012, 31(6):106–112.
- [7] 任坤, 蔡金刚, 武海鹏. 汽车用前置复合材料板簧的研究[J]. 纤维复合材料, 2015, 31(4):31–33.
- Ren Kun, Cai Jingang, Wu Haipeng. Research on composite front leaf spring for automobiles[J]. Fiber Composites, 2015, 31(4):31–33.
- [8] 胡显奇. 我国连续玄武岩纤维的进展及发展建议[J]. 高科技纤维与应用, 2008(6):12–18.
- Hu Xianqi. The overview of the present development of basalt fiber in China[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2008(6):12–18.
- [9] 刘志杰, 闫超, 罗辑, 等. 复合材料多隔板框架结构的 RTM 工艺成型[J]. 玻璃钢 / 复合材料, 2015(1):82–87.
- Liu Zhijie, Yan Chao, Luo Ji, et al. A resin transfer molded(RTM) processing methods to produce typical[J]. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2015(1):82–87.
- [10] 何先成, 刘刚, 包建文. 预浸料在 RTM 工艺中的应用研究[J]. 玻璃钢 / 复合材料, 2015(4):71–75.
- He Xiancheng, Liu Gang, Bao Jianwen. Application of prepreg in RTM process[J]. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2015(4):71–75.
- [11] 陈蓉, 吴安如, 孙振起, 等. 基于 RTM 工艺成型复合材料风机叶片的质量控制研究进展[J]. 湖南工程学院学报, 2016, 26(3):28–75.
- Chen Rong, Wu Anru, Sun Zhenqi, et al. Research process of quality control on composite wind turbine blade based on RTM proces[J]. Journal of Hunan Institute of Engineering, 2016, 26(3):28–75.
- [12] 李伟东, 刘刚, 安学锋, 等. Z 向流动 RTM 工艺树脂的流动浸润行为[J]. 复合材料学报, 2013, 30(6):82–88.
- Li Weidong, Liu Gang, An Xuefeng, et al. Investigation of resin flowing and in filtration behavior during Z direction flowing RTM proces[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013, 30(6):82–88.
- [13] 高磊, 胡国辉, 徐楠, 等. 玄武岩纤维工程性质研究进展[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(2):1 749–1 754.
- Gao Lei, Hu Guohui, Xu Nan, et al. Advances in research on engineering properties of basalt fiber[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(2):1 749–1 754.
- [14] 赵洪斌, 陈宏章, 刘忠珊. 纤维复合材料单片板簧的研制[J]. 纤维复合材料, 2000(9):29–31.
- Zhao Hongbin, Chen Hongzhang, Liu Zhongshan. Development of fiber composite single leaf spring[J]. Fiber Composites, 2000(9):29–31.
- [15] 陈展, 杨波. RTM 工艺干斑缺陷形成分析及其两相流仿真预测研究[J]. 橡塑技术与装备 (塑料), 2016, 42(20):65–68.
- Chen Zhan, Yang Bo. RTM process dry spot defect analysis and two phase flow simulation prediction research[J]. China Rubber / Plastics Technology And Equipment (Plastics), 2016, 42(20):65–68.

(上接第 59 页)

- Hao Wei, Ma Kefeng, Luo Yuqing. Research progress of aramid paper honeycomb and sandwich structure[J]. Development and Application of Materials, 2011, 26(6):81–85.
- [13] Aminanda Y, Castanié B, Barrau J J, et al. Experimental analysis and modeling of the crushing of honeycomb cores[J]. Applied Composite Materials, 2005, 12(3):213–227.
- [14] 刘文品, 杨进军, 马建忠. YT822A 型芳纶纸蜂窝性能研究[J]. 高科技纤维与应用, 2015, 40(1):58–61.
- Liu Wenpin, Yang Jinjun, Ma Jianzhong. Study on the properties of YT822A aramid paper honeycomb[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2015, 40(1):58–61.
- [15] Hayes M W, Degrange J E, Rice C V, et al. Honeycomb cores for aerospace applications:US, 10/236,361[P]. 2002-09-06.
- [16] Yam L H, Yan Y J, Jiang J S. Vibration-based damage detection for composite structures using wavelet transform and neural network identification[J]. Composite Structures, 2003, 60:403–412.
- [17] Kelsey S, Gellatly R A, Clark B W. The shear modulus of foil honeycomb cores: A theoretical and experimental investigation on cores used in sandwich construction[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 1958, 30(10):294–302.
- [18] Grediac M. A finite element study of the transverse shear in honeycomb cores[J]. International journal of solids and structures, 1993, 30(13):1 777–1 788.