

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.07.006

开槽芳纶纸蜂窝芯与有孔芳纶纸蜂窝芯的对比分析

马科峰,王清明,申学明,郝巍

(中航复合材料有限责任公司,北京 101300)

摘要:通过压缩性能和剪切性能实验,对同一密度的传统芳纶纸蜂窝芯、开槽芳纶纸蜂窝芯以及有孔芳纶纸蜂窝芯的主要力学性能进行了对比分析。实验表明,同一密度的传统蜂窝芯的压缩性能和剪切性能优于两种特殊蜂窝芯,但两种特殊蜂窝芯的主要力学性能能够达到传统芳纶纸蜂窝芯标准中出厂检验指标值的77%以上,能够满足多数特殊结构的使用要求。对两种特殊芳纶纸蜂窝芯的制造工艺和实际应用进行了对比分析,指出了各自的优势和劣势。两种特殊蜂窝芯的 W 向剪切模量均高于指标值。开槽蜂窝芯较有孔蜂窝芯制造工艺简单、制造周期短、制造成本低,但有孔蜂窝芯制造精度更高、应用范围更加广泛。

关键词:开槽芳纶纸蜂窝;有孔芳纶纸蜂窝;力学性能;制造工艺;实际应用

中图分类号:TH117.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3539(2017)07-0029-05

Contrastive Analysis of Slotting Aramid Paper Honeycomb Core and Perforated Aramid Paper Honeycomb Core

Ma Kefeng, Wang Qingming, Shen Xueming, Hao Wei

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

Abstract : Through the compression and shear performance test, the main mechanical properties of the traditional aramid paper honeycomb core, the slotting aramid paper honeycomb core and the perforated aramid paper honeycomb core at the same level of density were compared. The results show that density of the same level of traditional honeycomb core is better than that of compression and shear properties of two kinds of special honeycomb core. However, the main mechanical properties of the two kinds of special honeycomb core can achieve factory inspection parameter values of common traditional aramid paper honeycomb core standards by more than 77%, that can meet the using demand of the most special structure. The manufacturing technology and practical application of the two kinds of special aramid honeycomb core were compared, their advantages and disadvantages were pointed out. W shear modulus of the two kinds of special honeycomb cores is higher than the index value. The slotting aramid paper honeycomb core has the advantages of simple manufacturing process, short manufacturing cycle and low manufacturing cost, but the perforated aramid paper honeycomb core has higher manufacturing precision and wider application range

Keywords : slotting aramid paper honeycomb ; perforated aramid paper honeycomb ; mechanical property ; manufacturing technology ; practical application

夹层结构复合材料由于其高比强度、高比刚度以及突出的稳定性和可设计性而广泛地应用于航空航天等领域产品结构件的制造上^[1-3]。近些年来,芳纶纸蜂窝作为最常用的夹芯材料,其制造工艺已经十分成熟,国内的间位芳纶纸蜂窝的制造工艺和产品性能均已达到了国际领先水平,并且产品已出口国外航空企业^[4-6]。

但是,传统的芳纶纸蜂窝芯夹层结构在制备过程中孔格内会留有气体,当使用传统蜂窝芯与复合材料面板粘接制造夹层结构时,孔格内外会形成气压差^[7]。一方面,某些需要进入太空工作的制件,由于太空中空气稀薄,气压差的存在容易造成蜂窝孔格内部受力而破损;另一方面,气压差的存在会影

响到蜂窝芯与面板之间的粘接强度,不利于所制蜂窝板的牢固、稳定以及强度性能。另外,某些有特殊用途的零部件也需要蜂窝孔格内外相通的特殊芯材来制造夹层结构,以改善蜂窝芯内、外部气体的流动性。例如,长期应用并暴露在户外的飞机消声衬等夹层结构,由于面板上排布许多通孔,日常停放和工作时会有雨水进入到夹层结构当中,这就需要进入蜂窝孔格内部的雨水顺利的排除,此时这种夹芯材料内外相通的特殊结构可解决此类问题。

基于此,中航复合材料有限责任公司先后研制

联系人:马科峰,工程师,主要从事芳纶纸蜂窝和PMI泡沫塑料研究

收稿日期:2017-05-02

并生产出两种特殊结构的芳纶纸蜂窝芯材:开槽芳纶纸蜂窝芯(开槽蜂窝芯可制造单面开槽和双面开槽,文中只讨论目前应用最为广泛的单面开槽蜂窝芯)和有孔芳纶纸蜂窝芯。笔者分别选取了中航复合材料公司制造的同一密度级别(48 kg/m^3)的上述两种特殊芳纶纸蜂窝芯材与传统芳纶纸蜂窝芯材,从力学性能、制造工艺和实际应用等方面进行了对比分析研究。

1 实验部分

1.1 主要原材料

芳纶纸蜂窝[杜邦 T412-2 mil (0.05 mm) 芳纶纸]:ACCH-4-3-48/有孔,记为 1#,中航复合材料有限责任公司;

芳纶纸蜂窝[杜邦 T412-2 mil (0.05 mm) 芳纶纸]:NH-1-2.75-48/开槽,记为 2#,中航复合材料有限责任公司;

芳纶纸蜂窝[杜邦 T412-2 mil (0.05 mm) 芳纶纸]:NH-1-2.75-48,记为 3#,中航复合材料有限责任公司;

环氧结构胶膜:SY-14A,北京航空材料研究院。

1.2 主要设备及仪器

电子拉力试验机:5582 型,INSTRON 公司;

电子引伸计:JD1488 型,INSTRON 公司。

1.3 性能测试

按照实验标准要求,将三种芳纶纸蜂窝分别制成 $80\text{ mm} \times 80\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ (用于压缩性能测试)和 $150\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ (用于剪切性能测试)尺寸的试样,用环氧结构胶膜将切好的蜂窝试样和与其大小一致的铝制薄板(用于稳定型压缩强度测试)/铝块(用于剪切性能测试)粘结后加压,并在 $(175 \pm 5)^\circ\text{C}$ 条件下固化制得力学性能测试试样。测试前,试样在室温环境条件下保持 24 h 以上。

在电子拉力试验机上,采用专用压缩/剪切夹具放置试样并加载试验力,分别测得三种芳纶纸蜂窝的非稳定型压缩强度、稳定型压缩强度(测试标准 GB/T 1453-2005)、 L/W 向剪切强度及模量(测试标准 GB/T 1455-2005),测试条件为 $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、相对湿度 45%~55%。

2 结果与讨论

2.1 三种芳纶纸蜂窝力学性能对比分析

(1) 压缩强度。

在室温条件下对三种牌号规格芳纶纸蜂窝各

进行了三个批次非稳定型压缩强度试验和稳定型压缩强度试验,试验结果分别如图 1a、图 1b 所示。图 1a 中指标值来自北京航空材料研究院 Q/6S 1948-2005 标准,图 1b 中指标值来自美国波音公司 BMS 8-124 AB 标准,指标值均为供应商所提供产品出厂检验应满足的压缩强度最小平均值,上述两标准为目前国内外最常用的传统芳纶纸蜂窝芯材标准。有孔蜂窝非稳定型压缩性能试样和开槽蜂窝稳定型压缩性能试样分别如图 2a、图 2b 所示。

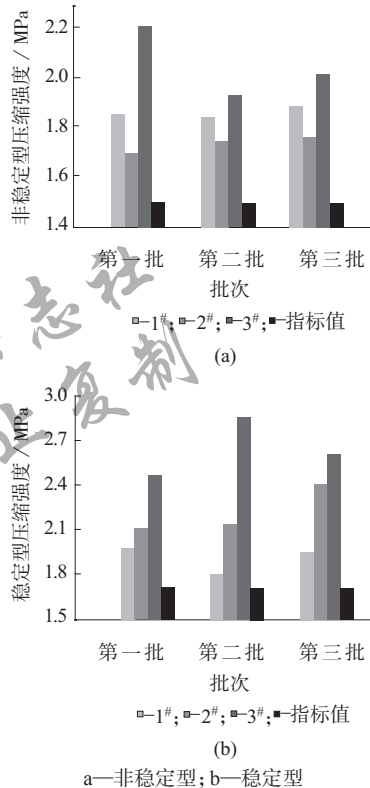


图 1 三种蜂窝压缩强度试验结果

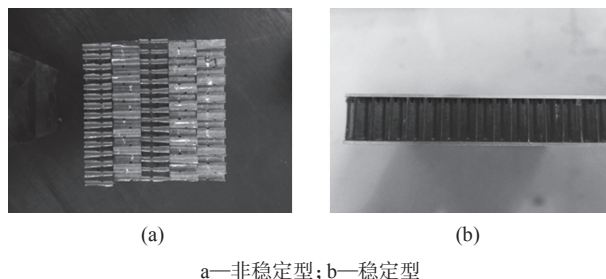


图 2 有孔蜂窝非稳定型及开槽蜂窝稳定型压缩性能试样

由图 1a 可以看出,传统蜂窝芯的非稳定型压缩强度最高,开槽蜂窝芯的非稳定型压缩强度低于有孔蜂窝芯,但三种蜂窝芯的该项性能均高于 Q/6S 1948-2005 标准的指标值,说明三种蜂窝芯的非稳定型压缩强度均能够满足传统蜂窝芯该项性能的使用要求。开槽蜂窝芯的该项性能最低,是由于在压缩强度测试过程中开槽端面与试验机夹头接触面积

减小,易形成端面失稳并造成应力集中,从而造成开槽蜂窝芯的性能偏低。而有孔蜂窝芯的孔壁通孔是均匀地分布在芯材的中间部位,虽然压缩强度较传统蜂窝芯有所下降,但不至于形成类似开槽蜂窝芯进行压缩强度测试时的应力集中,故其非稳定压缩强度在三者中居中。由图 1b 可以看出,传统蜂窝芯稳定型压缩强度仍然最佳,但两种特殊蜂窝芯的稳定型压缩强度排序与非稳定型压缩强度相反。这是由于稳定型压缩试样在制作时,芯材上下粘贴了铝制面板,并且芯材与面板之间的树脂固化时会有少量树脂沿孔壁流动至孔格内并在蜂窝芯与面板连接处形成胶瘤,胶瘤将开槽位置填充,使蜂窝不易在开槽位置端面失稳,进而在进行压缩强度测试时,端面失稳对开槽蜂窝芯的影响大大降低。由此推断,在面板材料和制造工艺相同时,单面开槽蜂窝夹层结构压缩性能会优于同一密度级别有孔蜂窝夹层结构。

(2) 剪切强度及其弹性模量。

在室温条件下对三种牌号规格芳纶纸蜂窝各进行了三个批次 L 向、 W 向剪切强度及其弹性模量实验,剪切强度实验结果分别如图 3a、图 3b 所示,剪切模量实验结果分别如图 4a、图 4b 所示。图 3 ~ 图 4 中所有指标值均来自美国波音公司 BMS 8-124 AB 标准中规定供应商所提供产品出厂检验应满足的剪切性能最小平均值。

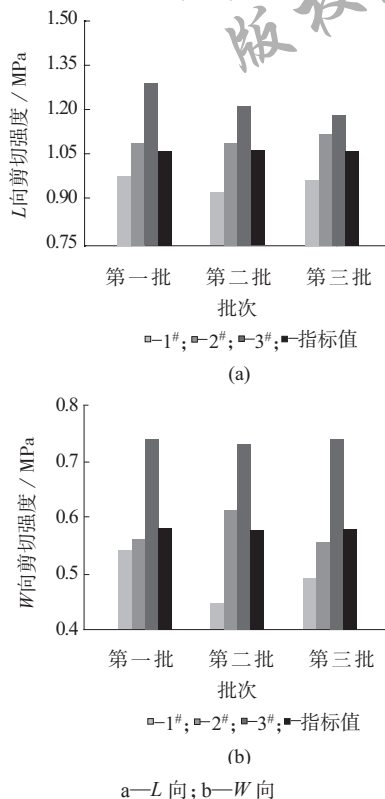


图 3 三种蜂窝 L 向及 W 向剪切强度

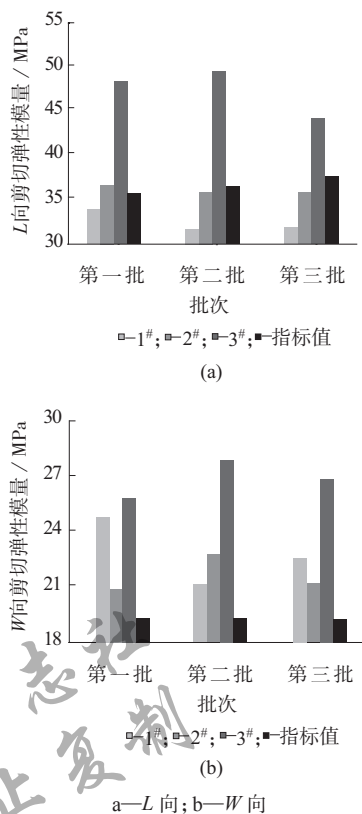


图 4 三种蜂窝 L 向及 W 向剪切弹性模量

两种特殊蜂窝芯剪切性能试样分别如图 5a、图 5b 所示。

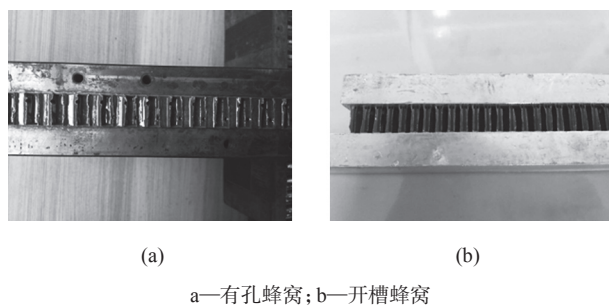


图 5 有孔蜂窝及开槽蜂窝剪切性能试样

由图 3a、图 4a 可以看出,三种蜂窝芯材 L 向剪切性能排序与稳定性压缩强度排序一致,传统蜂窝芯 L 向剪切性能最优,开槽蜂窝芯次之,有孔蜂窝芯相对最低。这同样是由于在剪切性能测试试样的制作过程中,树脂的流动和剪板对蜂窝芯的固定对开槽蜂窝的端面失稳在一定程度上起到了补充作用,故其剪切性能略优于有孔蜂窝芯。传统蜂窝芯与开槽蜂窝芯的 L 向剪切强度及其弹性模量均高于 BMS 8-124 标准中对于蜂窝芯 L 向剪切性能要求的指标值,说明传统与开槽两种蜂窝芯的 L 项剪切性能基本能够达到传统蜂窝芯该项性能的使用要求。有孔蜂窝芯的 L 向剪切性能略低于标准中的

指标值要求,但差距不大,第一批和第三批能够达到指标值的90%以上,第二批能够达到指标值的85%以上。

由图3b、图4b可以看出,三种蜂窝芯 W 向剪切强度由大到小依次仍为传统蜂窝芯、开槽蜂窝芯、有孔蜂窝芯。但 W 向剪切弹性模量测试结果中,第一批次和第三批次有孔蜂窝芯模量高于开槽蜂窝芯,只有第二批次开槽蜂窝芯模量高于有孔蜂窝芯,这是由于开槽蜂窝芯的开槽位置位于蜂窝孔格的自由边上,孔格胶接边并未开槽,故进行剪切性能试验时,开槽对 W 向剪切形变影响较大,从而影响了 W 向剪切弹性模量,导致部分批次开槽蜂窝芯 W 向剪切弹性模量低于有孔蜂窝芯。传统蜂窝芯和第二批次开槽蜂窝芯 W 向剪切强度高于指标值,第一批次、第三批次开槽蜂窝芯 W 向剪切强度低于指标值,但能够达到指标值的95%以上,有孔蜂窝芯 W 向剪切强度整体低于指标值,测试结果最低的第二批次约为指标值的77%。在 W 向剪切弹性模量方面,三种蜂窝芯的测试结果均高于指标值。

整体来看,传统蜂窝芯和开槽蜂窝芯能够基本达到BMS 8-124标准中对于蜂窝芯 W 向剪切性能要求,有孔蜂窝芯的剪切性能若需达到传统蜂窝芯标准中的要求,仍有很大提升空间。

2.2 两种特殊芳纶纸蜂窝制造工艺对比分析

开槽芳纶纸蜂窝芯和有孔芳纶纸蜂窝芯都是在制造传统芳纶纸蜂窝芯的工艺基础上,根据所需特殊蜂窝芯的厚度要求,先将涂叠并固化好的芳纶纸叠板加工成固定厚度的芳纶纸叠条,然后对芳纶纸叠条进行一系列物理机械操作,形成开槽/有孔叠条,再经过拉伸、浸胶、固化等步骤制备而成。

对于现阶段两种特殊蜂窝芯的制作工艺,开槽蜂窝芯更多采用人工开槽,其操作成本相对较低,工作周期较短并且易于掌控和调整,但同时也由于人工操作而带来了芯子槽形的宽度、深度、槽间距等工艺参数的精度把握上难度较大的问题。槽宽、槽深、槽间距不仅影响到开槽蜂窝芯夹层结构的压缩性能和剪切性能,同时也是影响夹层结构缓冲性能的重要因素^[8]。因此,机械化和自动化处理芳纶纸叠条的开槽工艺,或者通过切削刀组对传统蜂窝芯直接开槽是今后其发展的重要方向之一^[9]。

有孔蜂窝芯是按照工艺要求,使用自动化机械设备在固定厚度的芳纶纸叠条的特定位置进行打孔操作,其操作成本较之开槽蜂窝芯大幅提高,

而且由于该步骤准备和操作周期较长,工作效率相对较低。而且由于受打孔设备的限制,厚度较大的芳纶纸叠板打孔难度增加,有孔蜂窝芯现阶段仍无法像开槽蜂窝芯一样制造出全尺寸蜂窝芯(2500 mm×1200 mm)。目前,3 mil (0.076 mm) 厚度芳纶纸、3 mm 孔格的蜂窝芯 W 方向最大可做约1500 mm,2 mil (0.05 mm) 厚度芳纶纸、3 mm 孔格的蜂窝芯 W 方向最大可做约2000 mm,今后为制造大幅宽有孔蜂窝芯,芳纶纸叠条双面打孔是其中的重要发展方向。同时,由于打孔步骤是自动化机械操作,打孔位置、孔径、孔间距等工艺参数的精度较开槽蜂窝芯更加易于掌握,这些参数的精度的提高将有利于芯子各项机械性能的提高。

另外,在芯子浸胶过程中,由于开槽的位置位于芯子的端部而打孔的位置位于芯子的中部,故较之开槽蜂窝芯,有孔蜂窝芯需要更加精细化的浸胶操作以保证所开通孔不被浸渍树脂堵塞。

2.3 两种特殊蜂窝芯材的实际应用

两种特殊蜂窝芯的出现,最主要的推动因素是一些需要蜂窝芯内、外部气体保持流通或者需要向芯子孔格内部充入某些特殊气体的零部件的使用。但是,由于两者的通气机构的位置的不同,其使用范围有所不同。

大厚度夹层结构中使用的蜂窝芯主要是有孔蜂窝芯,这是由于开槽蜂窝芯开槽位置位于芯材端部,大厚度蜂窝芯往往需要数控铣切加工,在铣切加工过程中,位于端面的开槽容易被加工掉从而无法实现其开槽的目的和意义。通孔位于芯材中部的有孔蜂窝芯则避免了此问题,故使用特殊蜂窝芯厚度较大时多选用有孔蜂窝芯。

成型有一定曲率的预成型蜂窝芯时,抽真空的工艺操作易使得位于端面的开槽产生应力集中并发生端面失稳现象,从而将压塌蜂窝芯的开槽,不利于蜂窝孔格内外部气体流通,失去了开槽的意义。同样的,有孔蜂窝芯的通孔由于位于芯材中部,预成型过程对通孔不产生影响,较好地保证了使用时孔格内外气体流动保持畅通。

制作蜂窝夹层结构,上下面板、胶膜与蜂窝芯的配合需要按照不同的使用需求制定不同制作工艺和选用不同的材料^[10]。若选用的胶膜厚度较大、流动性较好,成型夹层结构时树脂容易爬上蜂窝孔格,树脂固化后位于端面的开槽容易被部分甚至完全堵塞,故此时不宜选用开槽蜂窝芯,而应选用通孔位于

芯材中部、不受树脂流动影响的有孔蜂窝芯。

由于芳纶纸在分子结构方面本身存在易吸水的酰胺基结构^[11],不能长期用于芯材直接暴露在室外结构中,故开槽铝蜂窝芯材多用于此类结构中,如笔者述及的飞机消声声衬等夹层结构等。中航复合材料有限责任公司研制开发并投入使用的开槽铝蜂窝芯材如图6所示。

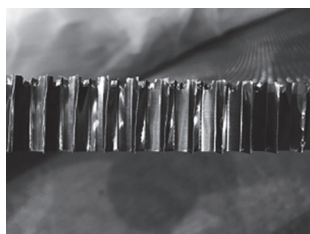


图6 开槽铝蜂窝芯

3 结论

(1) 传统芳纶纸蜂窝芯的压缩和剪切性能优于开槽芳纶纸蜂窝芯和有孔芳纶纸蜂窝芯。

(2) 压缩性能方面,开槽蜂窝芯的非稳定型压缩强度低于有孔蜂窝芯,开槽蜂窝芯的稳定型压缩强度优于有孔蜂窝芯,两种特殊蜂窝芯的非稳定型/稳定型压缩强度均高于常用蜂窝芯材标准中出厂检测指标值。

(3) 剪切性能方面,开槽蜂窝芯的 L 向剪切强度及其弹性模量优于有孔蜂窝芯,并且高于美国波音公司标准中出厂检测指标值,有孔蜂窝芯 L 向剪切强度及其弹性模量能够达到指标值的85%以上;开槽蜂窝芯的 W 向剪切强度优于有孔蜂窝芯,两种特殊蜂窝芯的 W 向剪切强度能够达到指标值得77%以上;两种特殊蜂窝芯的 W 向剪切弹性模量互有高低,均高于指标值。

(4) 开槽蜂窝芯较有孔蜂窝芯制造工艺简单、制造周期短、成本低,但有孔蜂窝芯制造精度更高、应用范围更加广泛。

参考文献

- [1] 张广成,何祯,刘良威,等. 夹层结构复合材料低速冲击试验与分析[J]. 复合材料学报,2012,29(4):170-177.
Zhang Guangcheng, He Zhen, Liu Liangwei, et al. Low-velocity impact experiment and analysis of sandwich structure composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2012, 29(4):170-177.
- [2] 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.
AVIC technology center. Aeronautical composite technology[M]. Aviation Industry Press, 2013:62-66.
- [3] 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.
- [4] 马科峰,郝巍,罗玉清. 国内外间位芳纶纸蜂窝性能对比研究[J]. 材料开发与应用,2013,28(3):62-68.
Ma Kefeng, Hao Wei, Luo Yuqing. Properties of meta-aramid paper honeycomb at home and abroad[J]. Development and Application of Materials, 2013, 28(3):62-68.
- [5] 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 properties of China' P-aramid paper honeycomb[J]. Hi-Tech Fiber and Application, 2009, 34(6):21-25.
- [6] 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 and Application, 2015, 40(1):58-61.
- [7] 穆举杰,刘玉. 一种打孔纸蜂窝芯: 中国, 203077702 U[P]. 2013-07-24.
Mu Jujie, Liu Yu. A perforated paper honeycomb core: CN, 203077702 U[P]. 2013-07-24.
- [8] 言利容,谢勇,赵德坚,等. 芯子开槽工艺对蜂窝纸板缓冲性能的影响[J]. 湖南工业大学学报,2011,25(5):14-17.
Yan Lirong, Xie Yong, Zhao Dejian, et al. The Influence of slotting craft of honeycomb core on cushioning properties of honeycomb paperboard[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2011, 25(5):14-17.
- [9] 应海全. 一种连续蜂窝纸芯开槽机构: 中国, 202862269U[P]. 2013-04-10.
Ying Haiquan. A continuous honeycomb paperboard core slot mechanism: CN, 202862269U[P]. 2013-04-10.
- [10] 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.
- [11] 王汝敏,郑水蓉,郑亚萍. 聚合物基复合材料及工艺[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
Wang Rumin, Zheng Shuirong, Zheng Yaping. Polymer based composite materials and processes[M]. Beijing: Science Press, 2004.