

Nomex 蜂窝夹层结构面内剪切性能试验研究

王 伟 纪高宁 朱晓光 左小彪 孙福瑞

(航天材料及工艺研究所,先进功能复合材料技术重点实验室,北京 100076)

文 摘 采用改进设计的像框试验对 Nomex 蜂窝夹层结构的面内剪切性能进行了表征测试与研究。试验结果表明,在像框的持续性剪切载荷作用下,夹层结构首先发生了板-芯界面脱粘,继而蒙皮在竖直方向上形成了巨大的鼓包和皱褶。随着剪切载荷的增加,夹层结构最终发生了横向的断裂。多次试验结果所得的低于3%的离散率也预示出面内剪切像框试验的有效性和准确性。此外,试样和夹具之间的固定程度是影响面内剪切像框试验的关键因素。仅采用螺钉进行固定的试样测试时,螺钉受拉力的移动直接导致了夹层结构边缘破坏,然而样件本身所受像框的面内剪切载荷有限,试验无效。

关键词 面内剪切,像框试验,Nomex 蜂窝夹层结构,复合材料,脱粘

中图分类号:TB302.3,TB332

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2016.05.015

Experimental Study on In-Plane Panel Shear of Nomex Honeycomb Cored Sandwich Structure

WANG Wei JI Gaoning ZHU Xiaoguang ZUO Xiaobiao SUN Furui

(Science and Technology on Advanced Functional Composites Laboratory, Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

Abstract The modified picture-frame experiment was applied to test and study the in-plane panel shear of Nomex honeycomb cored sandwich structure. The results show that under by the continuous shear loads from the picture frames, skin-core debonding of the sandwich structure occurred firstly and the skin materials formed to the big bubbles and wrinkles in the vertical direction, i. e., the direction of tensile travel. With the increase of shear loads, the sandwich structure finally fractured in the transverse direction. The dispersion ratio of lower 3% gained from several experiment results indicates the effectiveness and accuracy. In addition, the fixedness between specimen and fixtures is the key factor for picture-frame experiment of in-plane panel shear. For the screw-fixed test specimen, the motion of screws driven by tensile loads induced the failure of the edges of sandwich structure. However, the specimen gained in-plane panel shear loads from picture frames were very limited indicating invalid experiment.

Key words In-plane panel shear, Picture-frame experiment, Nomex honeycomb cored sandwich, Composite, Debonding

0 引言

对于客舱及货舱地板等为代表的飞机舱内承载型夹层结构部件来说,根据其实际工况所需研究的全面力学性能不仅涉及板-芯间粘接强度和弯曲、压缩、冲击等传统力学性能,还包括模拟材料部件在使用过程中可能出现的因面内方向上拉伸或压缩载荷作用所导致的预埋件与灌胶剪切失效以及板材整体

面内剪切失效等行为。例如,波音公司的相关材料标准如 BMS4-17、BMS4-23 等就对机舱内部复合材料地板的嵌件剪切强度和面内剪切强度有着明确的性能指标要求。但是,目前国内外已有夹层结构面内剪切性能及其测试方法的公开专利、学术文章以及相关报道均无法查询到,仅在国外 M. C. Gill 公司的相关产品性能数据介绍中有所表述夹层结构面内剪切的

收稿日期:2015-12-09

作者简介:王伟,1981年出生,博士,高级工程师,主要从事树脂基功能复合材料研究。E-mail:wangyiwei1981@hotmail.com

力学行为、失效形式等性能特征对于其实际应用尤为重要。不同于夹层结构层间剪切性能是主要通过拉伸或压缩剪切^[1-2]测试得出夹层材料所受剪切载荷情况,夹层结构面内剪切性能的测试更为复杂,需要通过试样施加外力而使表面蒙皮连同胶黏剂粘接层和芯材同时受到纯剪切载荷的作用。因此,如何设计一种可行的试验方法以及合理的试验装置是关键。本文针对夹层结构面内剪切性能测试的难点,以传统像框试验方法作为基础,重新改进设计了一套适合于夹层结构的像框试验夹具,改善了试验方法。通过对整个像框试样进行拉伸试验,分别测试了夹层结构试样和相应的校准试样的面内剪切性能,并对试验中的力学行为特征、试样失效形式以及可能的影响因素进行了分析。

1 试验

1.1 相框试验

相框试验起初被设计用来研究复合材料在层间剪切作用下的流变行为^[3-4],后来随着不断改进而逐步用于纤维织物的面内剪切性能表征^[5-8]。织物相框通常是由四根刚性杆在正方形的织物表面进行固定并相互连接构成一个四个边框杆可自由转动的正方形框,在对角线方向施加相反的力并以恒定的速度向相反的方向运动时,织物在四个边框均匀的拉伸载荷作用下发生纯面内剪切性变形^[6]。本文在上述织物相框的基础上针对夹层结构的特点进一步进行了改进。分别在试样的上、下表面各安装一组相框夹具,通过胶黏剂粘接和螺钉紧固两种方式共同作用使试样和相框连接成为牢固的刚性体结构,以保证测试过程中试样在面内产生纯剪切,从而避免相框夹具与试样产生滑移所导致的试样垂直于夹具方向上(即夹层结构蒙皮的经、纬方向)的拉伸或压缩的发生。此外,在试样与相框粘接时采用了加强片,起到了对试样表面的保护作用。

1.2 夹层结构试样制备

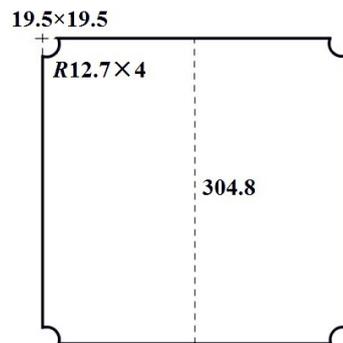
原材料:蒙皮用 YZM-3B 无碱玻璃布增强中温固化环氧预浸料,自制;芯材用 NH(SF)-1-1.83-144 规格的 Nomex 蜂窝,北京航空材料研究院;150 g/m²面重规格的结构胶膜由黑龙江石油化学研究院提供。

制备方法:在蜂窝芯上下表面各依次铺 1 层胶膜和 2 层预浸料,成型后夹层结构厚度为 9.9 ~ 10.4 mm,密度低于 3.8 kg/m³。成型采用热压机共固化工艺,压力 0.1 MPa,其他具体固化工艺制度参见文献^[9]。

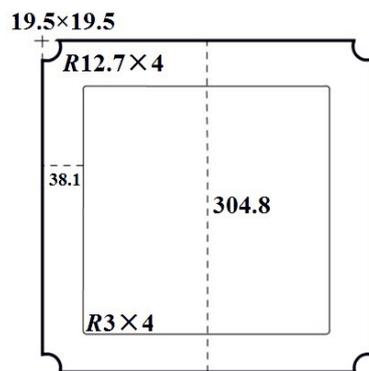
1.3 面内剪切试样制备

将制备好的夹层结构试样依照 BMS4-17 要求进行加工,具体尺寸如图 1 所示,其中测试试样如[图 1

(a)]加工不少于 4 件,校准试样如[图 1(b)]加工 2 件。



(a) 测试试样



(b) 校准试样

图 1 面内剪切试样示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of in-plane panel shear specimens

采用胶黏剂均匀涂覆到玻璃钢加强片上制作成双面胶带,然后将上述加工好的试样与相框夹具通过双面胶带进行粘接和固化,最后按照夹具上的螺孔对试样进行打孔并采用相应的螺栓和螺母拧紧。安装好的相框试验件示意图如图 2 所示。

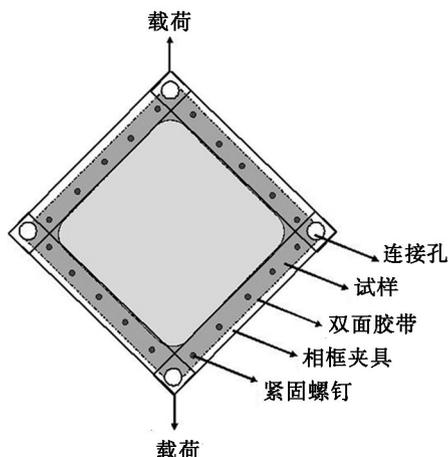


图 2 安装好的相框试验件示意图

Fig. 2 Schematic diagram of as-prepared picture-frame experimental specimen

1.4 测试与表征

将制备好的试验组合件通过连接孔以对角线方向安装在电子拉力试验机上,其型号为 MTS SinTech 65/G。相框夹具的下端固定,上端随试验机进行拉伸。设定拉伸速率为 25.4 mm/min,开启试验机进行测试,记录载荷—位移曲线(L-D)。

2 结果与讨论

2.1 面内剪切性能相框试验分析

图 3 是 Nomex 蜂窝夹层结构面内剪切性能相框试验的典型 L-D 曲线。可以看出,所得的测试试样曲线①的特征变化趋势较为复杂,结合相应的试样外观形貌变化情况如图 4 所示,分阶段对其进行了分析。在初始阶段均匀拉伸载荷的作用下,相框夹具对夹层结构所产生的面内方向剪切力较小,试样作为整体刚性体结构发生弹性形变,剪切载荷呈线性增加,其外观无明显变化如[图 4(a)]所示。随着试验的进行,试样面内所受的剪切载荷逐渐增大,夹层结构中刚性相对较高的蒙皮连同胶层材料开始出现永久性的塑性形变,剪切载荷呈非线性增加,如曲线①中 T 点后部分所示。当相框夹具对试样面内产生的剪

切载荷足够大时,直接导致蒙皮与蜂窝的粘接胶层先发生界面脱粘破坏,并在剪切载荷的持续作用下形成了鼓泡、皱褶等缺陷[图 4(b)]。从图 3 也可以看出,载荷在达到了其第一个最大值即 p_{max} 后由于脱粘的发生紧接着发生了一段急速降低。曲线①中 p_{max} 载荷处相应的横梁位移值 s 可近似于试样相应的形变量。

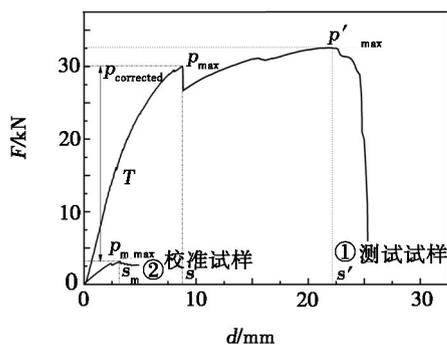
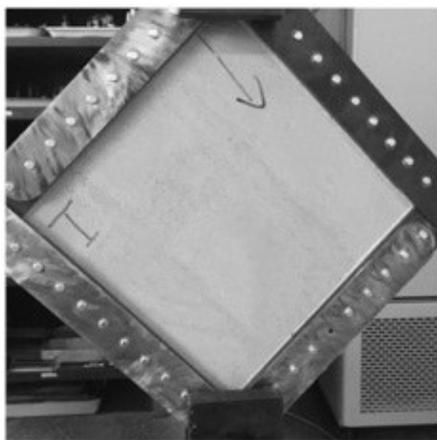
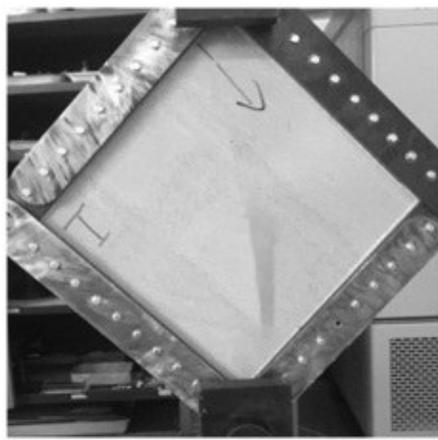


图 3 夹层结构面内剪切 L-D 典型曲线

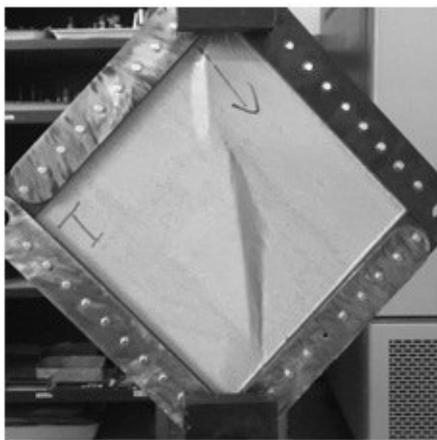
Fig. 3 Typical load-displacement curves of in-plane panel shear of sandwich structures.



(a) 初始阶段



(b) 脱粘



(c) 脱粘后的剪切变形



(d) 剪切破坏

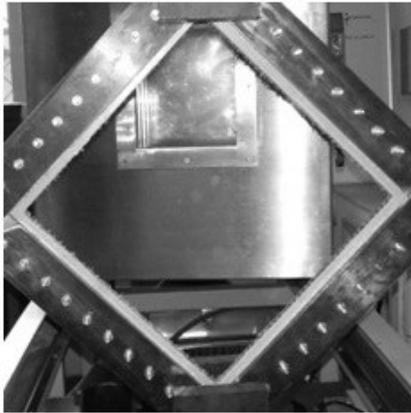
图 4 测试试样面内剪切相框试验

Fig. 4 Picture-frame experiment of in-plane panel shear of test specimen

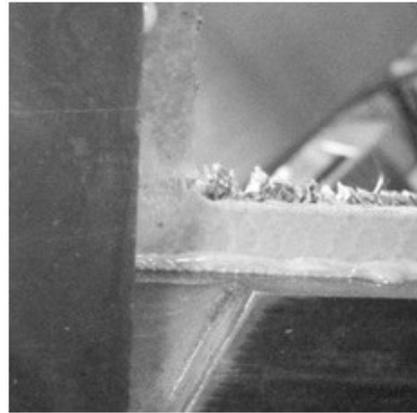
蒙皮脱粘区域主要集中在试样竖直对角范围内即位移方向的中间带。继续对相框试验件进行拉伸,蒙皮脱粘部位随着位移行程的增加发生更大的变形如[图 4(c)]。由于蒙皮未与蜂窝发生全面脱粘,并且试样整体未发生截面方向的损伤,因此,夹层结构还在受到来自相框持续增加的面内方向的剪切载荷,直到试样水平方向上出现损伤,具体表现为蒙皮与蜂窝一同发生断裂[图 4(d)]。此时,载荷在曲线①上达到了第二个最大值即 p'_{\max} ,相应的横梁位移值 s' 则是试样相应的形变量。 p'_{\max} 也就是此试样所测得的名义上的面内剪切极限载荷,并且 p'_{\max} 明显高于 p_{\max} 。但是对于具有承力结构特点的夹层结构来说,在其实际使用过程中是绝对不允许界面脱粘情况发生的。因此,在本文中 Nomex 蜂窝夹层结构板-芯界面粘接不够强的情况下, p_{\max} 可以被认为是夹层结

构试样在相框试验中发生面内剪切破坏的载荷。

需要说明的是,在进行上述试验时,试样中所受到纯面内剪切作用的部分是去掉相框所覆盖的方框后所剩下的中心部位,如图 2 中浅灰色的正方形部分。因此,还需要对相框所覆盖部分的方框形试样即校准试样进行相框试验,从而对曲线①所得到的数据进行校准。图 3 中曲线②其特征形状与曲线①相似,也整体呈现出线性-非线性的变化,但是其相应的外观形貌变化相对较为简单如图 5 所示。由于试验中相框对校准试样的剪切载荷主要集中于拐角处,当载荷增加到足够大时,试样拐角处发生整体性断裂损伤,此时曲线②中所测得载荷达到其最大值 $p_{m\max}$,相应的横梁位移 s_m 为校准试样相应的形变量。之后,校准试样所受来自相框面内方向的剪切载荷逐渐减弱。



(a) 初始阶段



(b) 剪切破坏

图 5 校准试样面内剪切相框试验

Fig. 5 Picture-frame experiment of in-plane panel shear of modified test specimen

图 3 中 L-D 曲线①和②中测试试样和校准试样的 p_{\max} 和 $p_{m\max}$ 间差值就是所测试的 Nomex 蜂窝夹层结构实际承受相框面内剪切的极限载荷 $p_{\text{corrected}}$,其面内剪切强度 q 可以进一步由 BMS4-17 中公式(1)计算得出:

$$q = \frac{p_{\text{corrected}}}{l} = \frac{p_{\max} - p_{m\max}}{l} \quad (1)$$

式中, l 是测试试样中所受纯面内剪切载荷作用下的长度,即去掉校准试样外框后所留下的方形试样的对角线长度,本文中 $l \approx 323.4 \text{ mm}$ 。而 s 与 s_m 之间的差值可近似认为是该 Nomex 蜂窝夹层结构在发生面内剪切破坏时的实际形变量。

2.2 相框试验测试准确性分析

图 6 是按照 BMS4-17 要求完成测试的一组 Nomex 蜂窝夹层结构面内剪切相框试验的 L-D 曲线。

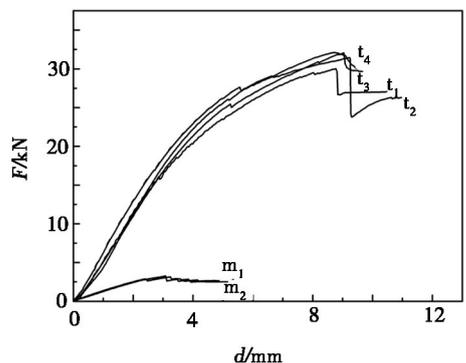


图 6 Nomex 蜂窝夹层结构面内剪切 L-D 曲线

Fig. 6 Load-displacement curves of in-plane panel shear of Nomex honeycomb cored sandwich structures

对于测试试样来说,仅完成了面内剪切载荷导致界面脱粘的阶段,反映在 L-D 曲线上即是达到 p_{\max} 点后终止。可以看出,四个测试试样和两个校准试样的 L-D 曲线趋势特征较为一致,相关曲线间的差距很小。从表 1 中所测得的 p_{\max} 和 $p_{m\max}$ 以及相应的 s 和

s_m 数值来看,结果也较为稳定。其中,四个测试试样 p_{max} 和 s 的平均值为 31.414 4 kN 和 8.938 mm,相应的离散值分别仅为 3.1% 和 2.8% 左右,表明了所述相框试验的测试稳定性。进一步将计算得出的 p_{max} 平均值与校准试样 p_{mmax} 的平均值(3.194 6 kN)一起代入公式(1)计算得出所测试的 Nomex 蜂窝夹层结构的面内剪切强度 q 为 87.2 N/mm,单位换算后结果为 8.89 kg/mm。上述结果显著高于 BMS4-17 相应指标值 6.43 kg/mm 的要求,表明制备的 Nomex 蜂窝夹层结构所具有的力学性能优越性的同时,也再次验证了相框试验的有效性。

表 1 Nomex 蜂窝夹层结构面内剪切相框试验结果

Tab.1 Picture-frame experimental results of in-plane panel shear of Nomex honeycomb cored sandwich structures

测试试样	p_{max}/kN	s/mm	校准试样	p_{mmax}/kN	s_m/mm
t_1	30.0245	8.773	m_1	3.1437	3.247
t_2	31.4435	9.242	m_2	3.2455	3.082
t_3	32.0725	9.038			
t_4	32.1171	8.698			

需要特别注意的是,上述试验结果的准确性是与相框试验样件在试验过程中的有效性密切相关的。由于在试样与相框夹具间采用了加强片双面胶带进行粘接以及螺钉紧固两种方法共同固定,近似于一体。得益于强力粘接的作用,避免了在强力载荷作用下紧固螺钉对试样的剪切破坏所导致的夹具与试样间的滑移,从而影响了最终测试结果的有效性和准确性。因此,作为对比进一步对未采用加强片双面胶带进行粘接仅进行螺钉固定的试样件进行了相框试验,所测得的 L-D 曲线如图 7 所示。可以看出,在载荷达到最高点之前的趋势特征同图 3 曲线①略有不同,

载荷随位移均呈非线性增长,其最大值 p''_{max} 仅为 25 kN 左右,大幅低于表 1 中所测结果,而最大位移 s'' 为 34.749 mm 大幅高于表 1 中数据。在 p''_{max} 点之后,与图 3 曲线①不同的是,此时曲线立即降低到底处,表明试样已经处于卸载状态,夹层结构发生贯穿性断裂破坏。

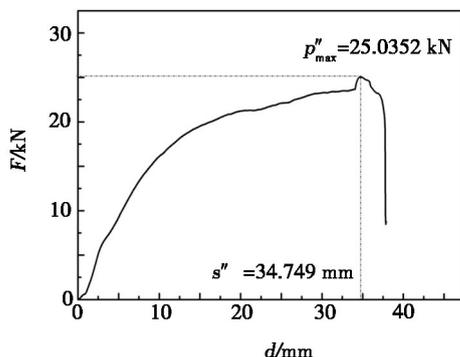
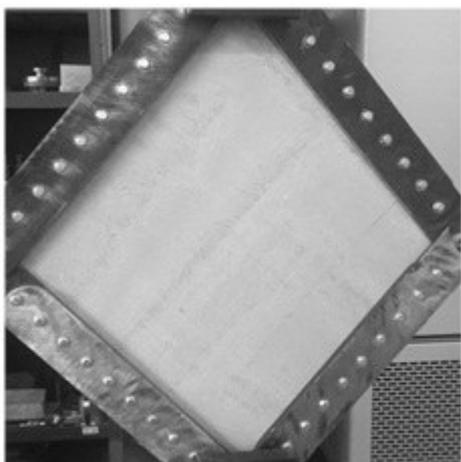


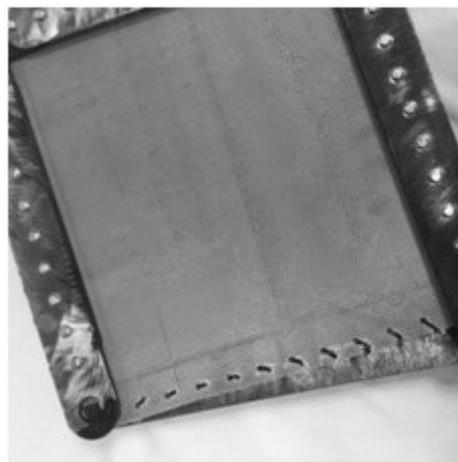
图 7 螺钉固定的测试试样的面内剪切 L-D 曲线

Fig.7 Load-displacement curve of test specimen fixed with screws

图 8 是完成测试后试样件的外观照片。从[图 8 (a)]可以看出,试验结束后虽然相框夹具已经呈菱形,但是试样表面并没有明显的损伤特征,仅发生了一定量的形变。而从图 8(b)可以清楚的发现,所有的螺孔均有所扩大,部分螺孔已经完全损坏,这是由于螺钉在受力后对其附近材料产生了较强的剪切破坏从而发生了移动,并最终导致了试样边缘破坏。因此,图 7 中的曲线特征主要反映了螺钉对夹层结构试样的剪切载荷作用,较低的极限载荷值则是由螺钉与夹层结构试样拉脱造成的,而相框对试样在面内方向所产生的实际有效剪切载荷较弱,无法损伤到试样的材料内部。与此同时,所测得的位移量也只是反映出了电子拉力试验机的横梁位移,并不是试样实际的形变量。



(a) 试验结束时



(b) 相框夹具拆除后

图 8 螺钉固定的测试试样相框试验后的照片

Fig.8 Photos of test specimen fixed with screws after picture-frame experiment

3 结论

(1)改进设计了适合于夹层结构面内剪切性能测试用的相框夹具,并对其中的试验过程和所得结果进行了分析;Nomex 蜂窝夹层结构在相框的持续性剪切载荷作用下,经过线性-非线性变形后载荷达到 p_{\max} 时先发生了板-芯界面脱粘,并在脱粘部位形成了鼓包和皱褶,随着剪切载荷的继续增大直到 p'_{\max} 时,夹层结构最终发生了横向的断裂破坏,试验结束;虽然 $p'_{\max} > p_{\max}$,但 p_{\max} 是实际的面内剪切破坏载荷,并且该夹层结构所受到的纯面内剪切作用下的极限载荷应为 p_{\max} 去掉相框所覆盖的方框部位的破坏载荷 $p_{m \max}$ 后的校准数值 $p_{\text{corrected}}$;

(2)研究了夹层结构试样与相框夹具的固定形式对试验的影响,结果表明,试样和夹具之间的固定程度是面内剪切相框试验的关键,采用加强片双面胶粘接和螺钉共同固定的试样其多次相框试验所得结果的离散值低于 3%,预示出了试验的有效性和准确性;而仅采用螺钉进行固定的试样测试时螺钉受拉力的移动直接导致了夹层结构边缘破坏,然而样件本身所受相框的面内剪切载荷有限,试验无效。

参考文献

[1] 党旭丹,张红松,王新莉,等. X-core 夹层结构的力学性能试验研究[J]. 材料导报,2011(10):54-58.

[2] 蔡婧. 复合材料夹层板层间剪切强度的试验研究[J]. 科技信息,2013,22:380-381.

[3] Mc GUINNESS G B, Brádaigh C M. Development of rheological models for forming flows and picture-frame shear testing of fabric reinforced thermoplastic sheets [J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 1997, 73:1-28.

[4] Mc GUINNESS G B, Brádaigh C M. Characterization of thermoplastics composite melts in rhombus-shear: the picture frame experiment [J]. Composites Part A: 1998, 19A:115-132.

[5] 张一帆,陈利,孙绯,等. 预定型机织物剪切变形实验研究[J]. 复合材料学报,2009,26(3):29-33.

[6] LAUNAY J, HIVET G, DUONG A V, et al. Experimental analysis of in plane shear behavior of woven composite reinforcements [J]. Composites Science and Technology, 2008, 68:506-515.

[7] CAO J, AKKERMAN R, BOISSE P, et al. Characterization of mechanical behavior of woven fabrics: Experimental methods and benchmark results [J]. Composites Part A, 2008, 39:1037-1053.

[8] 张一帆,陈利,李金超,等. 机织结构预定型体本构关系和剪切性能[J]. 宇航材料工艺,2010,40(4):16-22.

[9] 王伟,左小彪,冯志海,等. 一种玻纤/环氧-Nomex 蜂窝夹层复合材料制备工艺与性能研究[J]. 玻璃钢/复合材料,2015(10):42-47.

欢迎订阅 2017 年《宇航材料工艺》

《宇航材料工艺》(双月刊)创刊于 1971 年,是经国家科委和国家新闻出版署批准出版的国家级技术类期刊,中国科技论文统计用刊,中国中文核心期刊,已被国际宇航文摘《IAA》、美国化学文摘《CA》、金属文摘《METADDEX》、《中国期刊网》、万方数据资源系统(ChinaInfo)数字化期刊群、《中国学术期刊(光盘版)》、《中国学术期刊综合评价数据库》、《中国科学引文数据库》等多种文摘和数据库收录。2002 年在第二届国家期刊奖评比活动中,《宇航材料工艺》获百种重点期刊奖。

《宇航材料工艺》主要报道我国材料及工艺的科技进展、科研成果和工程实践,内容丰富,信息量大。除大量刊登学术类技术论文、研究报告、综述和专论外,还刊登新材料、新工艺、新产品及技术改造、技术革新、生产经验、国外科技、科技见闻、成果简介及会议信息等。

刊号 ISSN1007-2330
CN11-1824/V

双月刊,每期 20 元,全年 6 期,共 120 元/年

国外订价:120 美元/年

帐户名称:航天材料及工艺研究所 请注明:订阅《宇航材料工艺》

开户银行:北京市工商银行东高地支行

帐号:0200006509008800374

邮汇:北京 9200 信箱 73 分箱《宇航材料工艺》编辑部。 邮编:100076

联系电话:(010)68383269 E-mail:rtao703@163.com

未收到订单的读者可信汇或直接邮汇至编辑部,并将订户信息发至邮箱。订户信息需注明:单位名称(开发票)、经办人及电话、订阅份数及汇款金额、汇款方式及日期、邮寄地址及邮编。