

复合材料蜂窝夹层结构在飞机中的应用

柳敏静, 武湛君

大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116024

摘要 蜂窝夹层壁板是飞机结构中理想的、结构效率最高的结构形式之一。简述了蜂窝夹层结构的典型蜂窝几何形状和面板、蜂窝芯材种类及相应性能, 介绍了国外主要机型蜂窝夹层结构的使用状况和中国飞机结构上蜂窝夹层结构的应用情况, 讨论了部分蜂窝夹层结构的设计方法。

关键词 复合材料; 蜂窝夹层; 飞机; 结构设计

飞机结构设计的基本原则是在满足强度要求的情况下使结构尽可能轻^[1-3], 这一要求必然导致需利用稳定的薄蒙皮承受拉伸载荷和压缩载荷, 以及剪切、扭转、弯曲载荷的耦合作用。传统的飞机结构设计中使用了纵向加强件和增稳桁条、翼肋和隔框等结构加强蒙皮, 这样不可避免会带来结构增重问题。提高结构比刚度的有效结构形式之一是夹层结构^[4,5], 复合材料夹层结构具有重量轻、强度刚度好、耐热、吸声隔音、抗冲击、耐疲劳等特点, 已被广泛应用于航空航天、汽车、通信、轨道车辆、造船、医用器械、体育器材和土木工程中。

本文简述蜂窝夹层结构的典型蜂窝几何形状和面板、蜂窝芯材种类及其性能, 介绍国外主要机型蜂窝夹层结构的使用状况和国内飞机结构上蜂窝夹层结构的应用情况, 针对蜂窝夹层结构在应用中的一些细节讨论了相关设计方法。

1 复合材料蜂窝夹层结构

复合材料夹层结构由 2 个薄面板及其中间的夹芯层构成, 芯层与面板一般用胶粘结在一起, 也可用熔焊、焊接连接成整体, 如图 1^[6]所示。

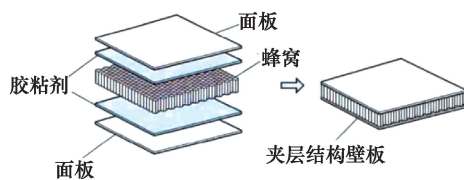


图 1 典型的复合材料夹层结构

Fig. 1 Composite sandwich structures

夹层结构传递载荷方式类似于工字梁, 上下面板主要承受由弯矩引起的面内拉压应力和面内剪应力, 芯材主要承受由横向力产生的剪应力, 如图 2^[6]所示, 上下面板间的距离使截面惯性矩增大, 提高了结构的弯曲刚度以及材料的有效利用率和结构效率。

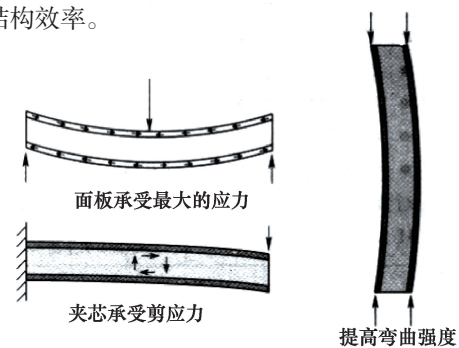


图 2 夹层结构的结构效率

Fig. 2 Structural efficiency of sandwich structures

复合材料蜂窝夹层结构的强度与蜂窝几何形状和蜂窝芯层材料有关。根据蜂窝几何形状不同, 蜂窝芯层分为标准六边形芯、矩形过膨胀芯、增强波纹芯、方格芯、特殊夹芯等^[5-7], 如图 3^[6]所示, 其中增强正六边形强度最高, 正六边形蜂窝次之, 由于正六边形蜂窝制造简单, 用料省, 强度也较高, 故应用最广。

复合材料夹层结构的面板材料有铝合金、钛合金、不锈钢、玻璃钢等复合材料, 目前航空结构上采用的大多为碳纤维单向带或织物增强复合材料。芯材有金属或非金属蜂窝、泡沫塑料等。金属蜂窝芯层主要是铝蜂窝, 非金属蜂窝芯层主要有诺梅克斯(NOMEX)纸蜂窝、玻璃布蜂窝和碳纤维蜂窝等, 其中铝蜂窝或 NOMEX 纸蜂窝具有压缩模量高和质量轻

收稿日期: 2015-11-30; 修回日期: 2015-12-10

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2014CB046506); 国家自然科学基金项目(51105056); 中央高校基本科研业务费项目(DUT15QY16)

作者简介: 柳敏静, 副教授, 研究方向为飞行器复合材料结构连接技术、飞行器透波构件制造中的反求技术等, 电子邮箱: liumj@dut.edu.cn

引用格式: 柳敏静, 武湛君. 复合材料蜂窝夹层结构在飞机中的应用[J]. 科技导报, 2016, 34(8): 21-25; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.08.003

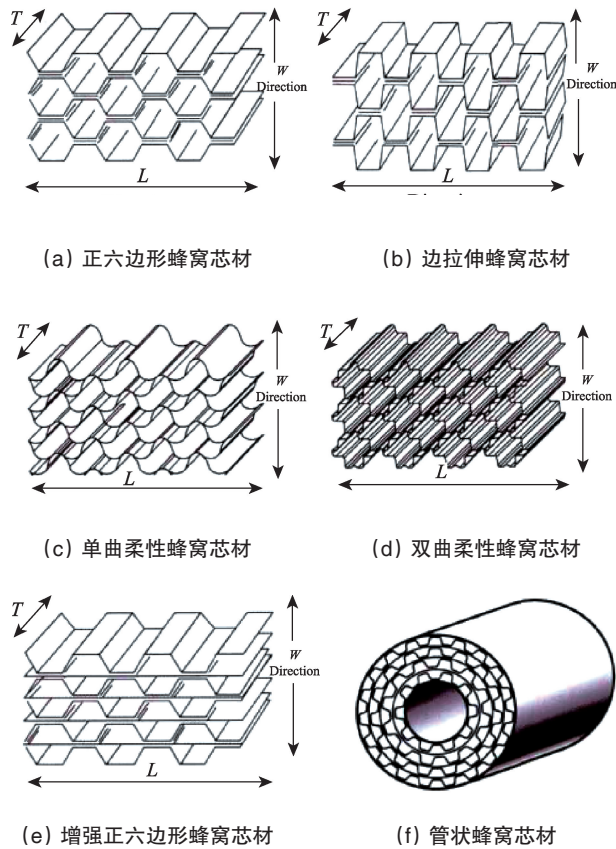


图3 典型蜂窝几何形状

Fig. 3 Geometry of typical honeycomb

的优点,成为飞机结构上广泛使用的夹芯材料。

铝蜂窝是一种比强度和比刚度较高的结构材料,同时价格也较便宜。铝蜂窝夹芯材料在一定质量条件下可以做得很薄,但可能会因此导致蜂窝表面、尤其是蜂窝孔隙较大的位置发生局部失稳。铝蜂窝夹层结构一般应用在剪切载荷较大的部位,其面板通常采用金属板材。因为铝蜂窝和碳纤维面板一同使用时,铝蜂窝与复合材料面板胶接时难以配合,且2种材料的热膨胀系数差别较大导致的固化变形也较为明显,而且如果2种材料之间的电绝缘处理不当就容易发生电化腐蚀^[8-10]。

NOMEX纸蜂窝强度比铝蜂窝略低,但它有良好的韧性和抗损伤能力,质量较轻,有足够高的压缩强度、剪切强度和良好的疲劳强度,具有各向异性特点,有大的弯曲刚度/质量比及弯曲强度/质量比;吸声、隔声、隔热性能好,与复合材料黏接和组装时容易协调且没有腐蚀问题,还能够满足FST(烟雾毒性)等要求,同时NOMEX蜂窝与铝蜂窝相比局部失稳的问题要小得多。NOMEX纸蜂窝夹芯通常与碳/玻璃纤维预浸料一起使用,应用经验丰富、成本适中,所以在航空制造上应用广泛,由于NOMEX纸蜂窝芯材制造曲板较困难,蜂窝与型面贴合较难、需铣切加工,蜂窝较软、不易装夹,加工困难^[8,11]。

2 蜂窝夹层结构在飞机上的应用

2.1 蜂窝夹层结构应用形式

目前,航空用蜂窝夹层结构主要有2类,如图4^[8]所示。第一类为蜂窝夹层壁板结构,主要用于机身和机翼结构。其特点是上、下面板较薄,一般不超过1 mm,整个蜂窝夹层板厚度一般不超过30 mm,结构内部有梁/墙作为支撑,与机体的连接主要通过金属预埋件或梁/墙上的接头。第二类为全高度夹层结构,主要用于方向舵、升降副翼和襟翼等。其特点是梁、肋等零件固化后通过铆钉连接在一起,梁、肋零件与蜂窝芯材之间一般采用发泡胶填充,整个零件与机体的连接主要依靠复合材料或金属梁上的接头^[5,6,12]。

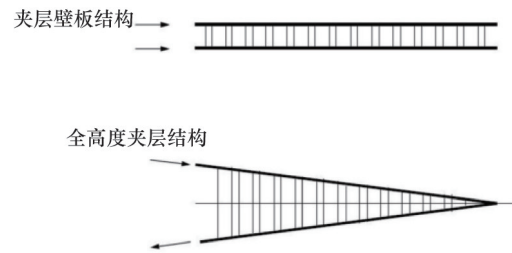


图4 蜂窝夹层结构的应用形式

Fig. 4 Applied form of honeycomb sandwich structure

2.2 国外飞机上的应用

近年来,随着蜂窝夹层成型工艺和机械加工水平的提高,蜂窝芯材的复合材料夹层结构在机翼前缘方向舵,后缘壁板、尾翼壁板、全高度舵面、起落架舱门等各种舱门、翼身和翼尖整流罩、机身地板等部件上应用日益增加,表1所示为国外主要机型及其蜂窝夹层结构的使用情况^[2,3,5,6]。

表1 国外主要机型及其蜂窝夹层结构

Table 1 Main types of foreign countries and their honeycomb sandwich structures

机型	应用部位	蜂窝材料
F-14		
F-15	机翼前缘、襟翼、副翼、垂尾、平尾	铝蜂窝
F-16		
F/A-18E/F	方向舵、平尾	KEVLAR
F-35	襟翼、副翼、平尾前缘、垂尾前缘、方向舵	NOMEX
A320	方向舵、襟翼导轨整流罩、腹部整流罩等	NOMEX
A340		
A380	襟翼、副翼、机翼滑轨整流罩、地板及内饰等	NOMEX
B767	升降舵、方向舵、发动机整流罩、机翼翼尖等	NOMEX
B787		
Starship		
MQ-1	机翼、机身	NOMEX
RQ-4	鼻锥整流罩、机翼前、后缘	NOMEX
ARH-70	桨叶、前机身	NOMEX

图5^[5]为B767方向舵,基本的设计是双梁式多翼肋翼盒,应用了蒙皮面板、翼梁和蜂窝夹层翼肋。图6^[5]为B767外侧副翼,是全高度蜂窝夹层结构,最大尺寸达15 cm,这种结构使外副翼刚度好、重量轻。图7^[5]为A320复合材料襟翼,其前缘为蜂窝夹层壁板结构,后缘为蜂窝夹层全高度结构形式。

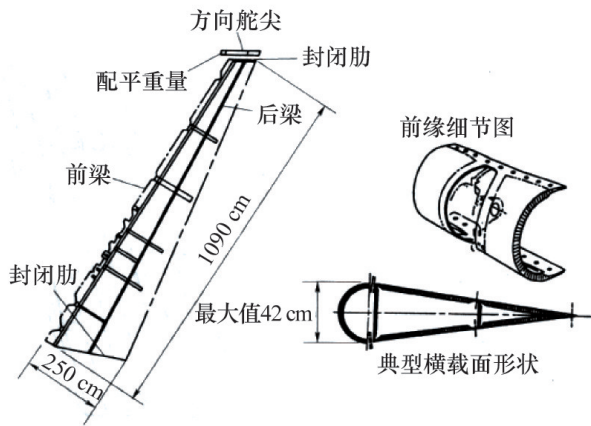


图5 B767复合材料垂尾方向舵(Boeing公司供图)
Fig. 5 Composite vertical tail rudder of B767

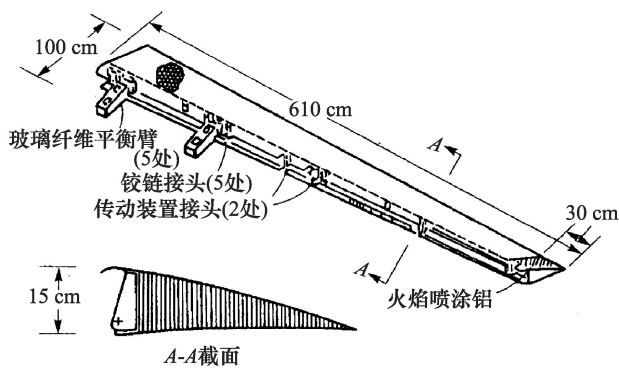


图6 B767复合材料外侧副翼
Fig. 6 Composite outboard-aileron of B767

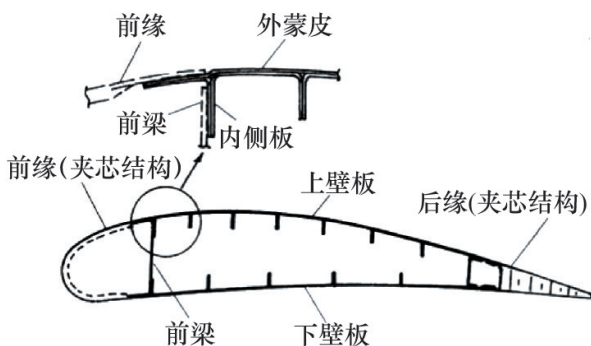


图7 A320复合材料襟翼
Fig. 7 Composite flap of A320

2.3 国内飞机上的应用

复合材料蜂窝夹层结构在我国航空航天领域也得到了越来越多的应用,如图8^[8]所示为国内某型教练机的全动平尾,它采用单臂梁全高度双曲面NOMEX纸蜂窝复合材料夹层结构。全高度双曲面NOMEX纸蜂窝型面复杂、下陷多,胶接面积大、胶接面之间的贴合度影响到胶接质量。如前所述,采用普通的方法进行加工无法满足要求,需要精确的蜂窝加工技术,在五坐标数控铣床上进行数控加工,力求胶接面的配合满足胶接工艺要求。

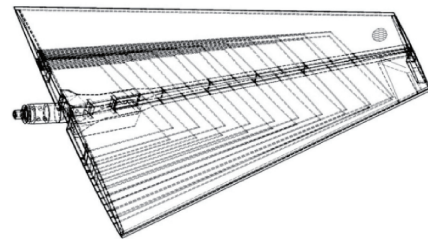


图8 某教练机全动平尾
Fig. 8 Composite all-flying tailplane of training plane

该平尾采用二次胶接成型工艺:上、下蒙皮等各零件单独固化,金属转轴与复合材料梁共固化成型,然后采用二次胶接技术将转轴梁、蜂窝、根肋、端肋、前缘条、后缘条等结构进行发泡预胶接,再将上、下蒙皮与其进行二次胶接成型。

3 蜂窝夹层结构的设计

蜂窝夹层结构是飞机结构中理想的、结构效率最高的结构形式之一,目前在航空航天领域获得了广泛的应用,重视蜂窝夹层结构的设计工作可以更有效地发挥结构的优势,以下仅讨论几种设计情况。

为提高蜂窝夹层结构强度,可以采用如下措施^[5,13,14],如提高面板和夹芯之间的剪切和拉伸强度;将密度非常小的泡沫填充到蜂窝夹芯内,不但可以更好地承受和传递一定的载荷,还可以降低热导率;用特殊的树脂蘸湿夹芯两边,然后扑在一个加热模板上烘干等,如图9^[5]所示。

再如,机身舷窗周围的蜂窝夹层壁板,现在多采用典型的纤维环绕进行加强,这样可以减小开口处的应力集中,舷窗壁板用RTM成形的J形框进行固定,如图10^[5]所示。

关于连接,图11^[5]所示的复合材料机翼根部与机身的连接采用了复合材料制成的预固化的双十字形接头,蜂窝夹层壁板通过二次胶结连接到双十字形接头上,这样可以仅使用很少的几个紧固件为胶结面提供压力,保证了连接强度^[5,15]。图12^[5]所示为星舟飞机复合材料机翼上翼梁和机翼蒙皮的连接,翼梁通过角箍和H形卡箍连接在机翼蒙皮上,这样的卡箍具有连续纤维通过交叉处提供连续传力路线的作用。角箍和H形卡箍与前述双十字形接头一样由织物制成,H形卡箍采用Rohacell泡沫作为填充芯材,在使用过程中可以提高剪切强度。

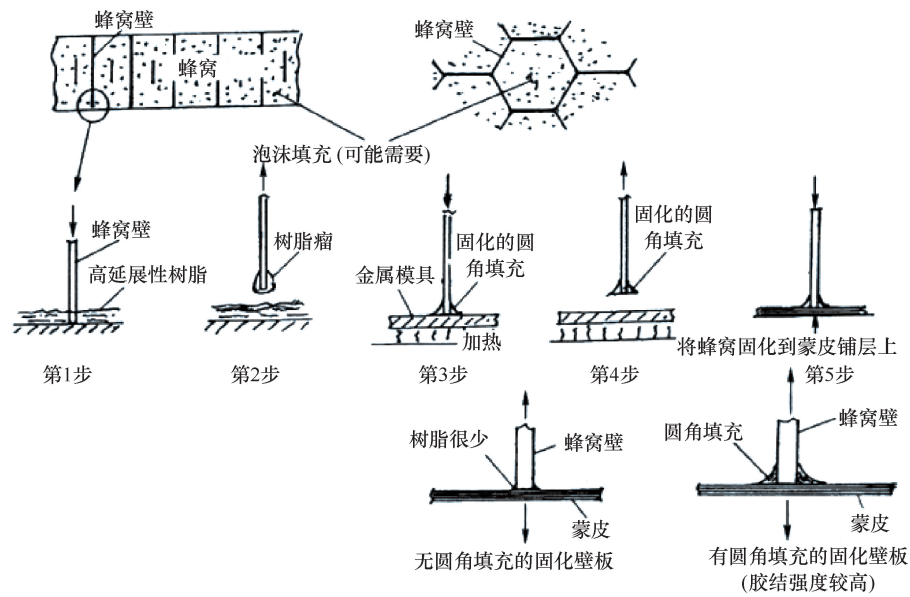


图9 提高蜂窝夹层壁板强度的工艺

Fig. 9 Process for improving the strength of honeycomb sandwich structure

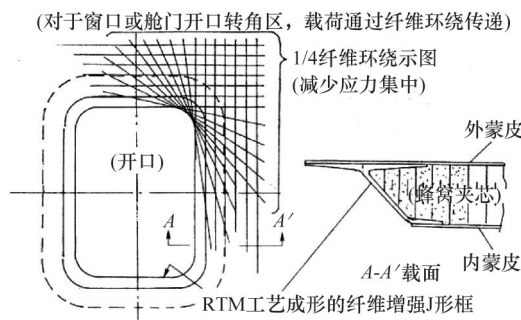
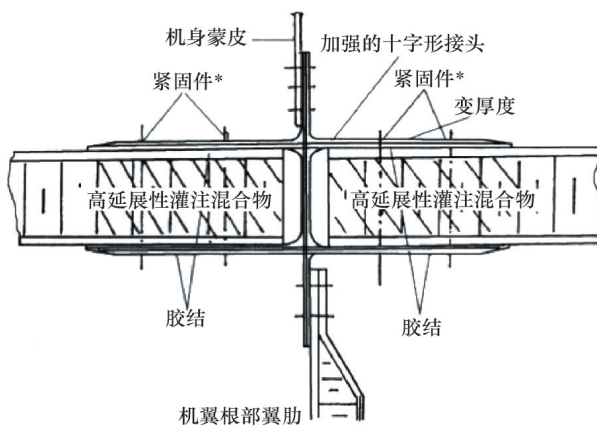


图10 机身舷窗开口转角处

Fig. 10 Porthole corner of aircraft



*只需用很少几个紧固件为胶结面提供压力

图11 复合材料机翼根部接头

Fig. 11 Joint of wing and fuselage

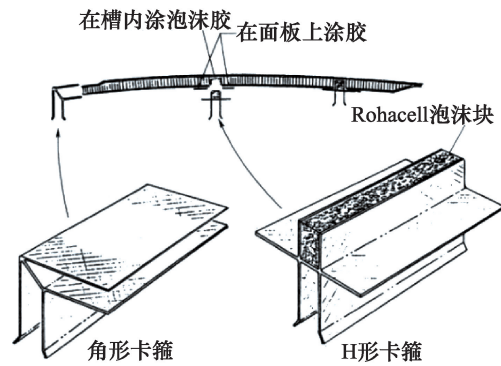


图12 翼梁和蒙皮的连接

Fig. 12 Joint of spars and skin

4 结论

复合材料蜂窝夹层结构是飞机结构中理想的、结构效率最高的结构形式之一,目前在航空航天领域获得了广泛的应用,但仍有许多技术问题有待解决。中国航空用蜂窝夹层结构在设计上仍较多地采用传统的方法与经验,制造工艺方面比较落后,需要在设计、材料、制造工艺及成本与维修等方面开展全面深入的研究。

参考文献 (References)

- [1] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报, 2007, 24(1): 1-12.
Du Shanyi. Advanced composite materials and aerospace engineering [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(1): 1-12.
- [2] 杜善义, 关志东. 我国大型客机先进复合材料技术应对策略思考[J]. 复合材料学报, 2008, 25(1): 1-10.

- Du Shanyi, Guan Zhidong. Strategic considerations for development of advanced composite technology for large commercial aircraft in China [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2008, 25(1): 1-10.
- [3] 杨乃宾, 梁伟. 大飞机复合材料结构设计导论[M]. 北京: 航空工业出版社, 2009: 1-6.
- Yang Naibing, Liang Wei. Introduction to composite structural design for large aircraft[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2009: 1-6.
- [4] 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.
- [5] 牛春匀. 实用飞机复合结构设计与制造[M]. 程小全, 张纪奎, 译. 北京: 航空工业出版社, 2010: 90-99, 456-486, 532-537.
- Niu C Y. Composite airframe structures[M]. Cheng Xiaoquan, Zhang Jikui, trans. Beijing: Aviation Industry Press, 2010:90-99, 456-486, 532-537.
- [6] 程文礼, 袁超, 邱启艳, 等. 航空用蜂窝夹层结构及制造工艺[J]. *航空制造技术*, 2015(7): 94-98.
- Cheng Wenli, Yuan Chao, Qiu Qiyan, et al. Honeycomb sandwich structure and manufacturing process in aviation industry[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2015(7): 94-98.
- [7] 范秋习. 蜂窝夹层复合材料[J]. *北京轻工业学报*, 1998, 16(2): 77-81.
- Fan Qiuxi. Honeycomb sandwich composite[J]. *Journal of Beijing Institute of Light Industry*, 1998, 16(2): 77-81.
- [8] 陈龙辉, 付杰斌, 王强, 等. 复合材料夹层结构在航空领域的应用[J]. *教练机*, 2014(2): 44-48.
- Chen Longhui, Fu Jiebin, Wang Qiang, et al. Application of composite sandwich structure on aviation[J]. *Trainer*, 2014(2): 44-48.
- [9] Fam A, Sharaf T. Flexural performance of sandwich panels comprising polyurethane core and GFRP skins and ribs of various configurations[J]. *Composite Structures*, 2010, 92(12): 2927-2935.
- [10] 王闯, 刘荣强, 邓宗全, 等. 铝蜂窝结构的冲击动力学性能的试验及数值研究[J]. *振动与冲击*, 2008, 27(11): 56-61.
- Wang Chuang, Liu Rongqiang, Deng Zongquan, et al. Experimental and numerical studies on aluminum honeycomb structure with various cell specifications under impact loading[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2008, 27(11): 56-61.
- [11] 杜正兴, 薛应举, 刘洪权. 复合材料蜂窝夹层结构的总体稳定性研究[J]. *强度与环境*, 2014, 41(4): 27-32.
- Du Zhengxing, Xue Yingju, Liu Hongquan. General stability research of honeycomb sandwich structure[J]. *Structure & Environment Engineering*, 2014, 41(4): 27-32.
- [12] 罗云烽, 彭公秋, 曹正华, 等. 航空用热压罐外固化预浸料复合材料的应用[J]. *航空制造技术*, 2012(18): 26-31.
- Luo Yunfeng, Peng Gongqiu, Cao Zhenghua, et al. Application of composites manufactured with out-of-autoclave prepreg for aviation industry[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2012(18): 26-31.
- [13] Davalos J F, Qiao P Z, Ramayanam V, et al. Torsion of honeycomb FRP sandwich beams with a sinusoidal core configuration[J]. *Composite Structures*, 2009, 88(1): 97-111.
- [14] 章令晖, 韩宇, 沃西源, 等. 蜂窝夹层结构常见制造缺陷分析[J]. *航天返回与遥感*, 2006, 27(1): 57-61.
- Zhang Linghui, Han Yu, Wo Xiyuan, et al. Analysis on process defects of honeycomb sandwich[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2006, 27(1): 57-61.
- [15] Gandy H T N. Adhesive less honeycomb sandwich structure with carbon graphite prepeg for primary structural application: A comparative study to the use of adhesive film[D]. Kansas: Wichita State University, 2012.

Application of composite honeycomb sandwich structure in aircraft

LIU Minjing, WU Zhanjun

State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China

Abstract Honeycomb sandwich panel structure is one of the most efficient structures in aircraft. Several types of honeycomb sandwich panels, honeycomb core material and the typical cellular geometry are introduced, as well as corresponding performances. The application situations of honeycomb sandwich structures in both major foreign and domestic aircraft are described. Finally, some design ideas and concepts are discussed.

Keywords composite; honeycomb sandwich; aircraft; structure design

(责任编辑 刘志远)