

# 蜂窝夹层结构及其埋件的力学性能研究

李莺歌 关鑫 陈维强 彭志刚 朱大雷

(北京卫星制造厂,北京 100094)

**文 摘** 对蜂窝夹层结构及其侧向和板内 M5 埋件力学性能进行了研究,分析了蒙皮厚度、胶黏剂面密度和胶接强度对力学性能的影响。结果表明,适当增加蒙皮厚度,有利于提高蜂窝夹层结构及其埋件的力学性能;在同等胶接强度下,胶黏剂面密度对力学性能的影响可以忽略,可选用面密度较低的胶黏剂来降低结构质量;埋件系统承受面内剪切载荷的能力明显优于其承受垂直于蒙皮的面外拉拔载荷能力;承受面内剪切载荷时,埋件系统的失效模式以埋件区域蒙皮局部破坏为主;承受面外拉拔载荷时,埋件周围蜂窝芯先失稳破坏,并最终导致埋件带动蒙皮变形、局部发生破坏。所得结果可为结构设计优化提供参考。

**关键词** 蜂窝夹层结构,埋件,力学性能

中图分类号:TB330.1V19

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2018.04.007

## Mechanical Performances of Honeycomb Sandwich Structure and Inserts

LI Yingge GUAN Xin CHEN Weiqiang PENG Zhigang ZHU Dalei

(Beijing Spacecrafts, Beijing 100094)

**Abstract** The mechanical performances of honeycomb sandwich structure and M5 inserts were tested. Results were discussed and the effects of panel thickness, areal density of adhesive and bonding strength on the mechanical performances were analyzed. It was found that properly increasing the panel thickness was effective to improve the mechanical performances of honeycomb sandwich structure and inserts. On conditions of the same bonding strength, mechanical performance was not affected by areal density of adhesive, therefore adhesive with lower areal density should be chosen to reduce weight. The in-plane shear carrying load capacity of inserts was better than the normal pull-out load carrying capacity. While under in-plane shear load, the failure mode of inserts was panel failure. While under normal pull-out load, the failure mode of inserts was honeycomb instability failure which finally caused panel deformed and destroyed at last. The conclusions can be used in product design.

**Key words** Honeycomb sandwich structure, Inserts, Mechanical performance

### 0 引言

蜂窝夹层结构具有比强度高、比刚度大,可设计性强等优点,现已成为航天器的基本结构部件<sup>[1-3]</sup>,主要用于提供支撑、承受和传递载荷、保持结构刚度等方面<sup>[4]</sup>。其中,埋件是蜂窝夹层结构与其他结构连接,以及蜂窝夹层结构上仪器设备安装时的主要受力部件<sup>[5]</sup>。研究蜂窝夹层结构及其埋件的力学性能对优化航天器结构设计、平衡结构强度与结构质量意义重大。本文简述蜂窝夹层结构及其埋件的力学性能测试条件和结果,分析蒙皮厚度、胶黏剂面密度和胶接强度对力学性能的影响。

### 1 实验

#### 1.1 试件

##### 1.1.1 尺寸及构型

(1)胶黏剂试件包括剪切试件和 90°板-蜂窝剥离试件。其中,剪切试件的尺寸及构型按 GB7124—1986 规定,90°板-蜂窝剥离试件按 GJB130.8—1986 规定。

(2)蜂窝夹层结构平面拉伸试件尺寸为 60 mm×60 mm×21 mm,平面剪切试件尺寸为 150 mm×50 mm×21 mm,弯曲试件尺寸为 600 mm×55 mm×21 mm,蜂窝 L 方向为长度方向。

收稿日期:2017-10-12

第一作者简介:李莺歌,1978 年出生,研究员,主要从事飞船复合材料成形工艺工作。Email:yingge1978@sina.com

(3) 蜂窝夹层结构埋件静力试件尺寸及构型见图 1, 试件高度为 21 mm, 蜂窝 L 方向为长度方向, 具

体的埋件尺寸及构型见图 2。

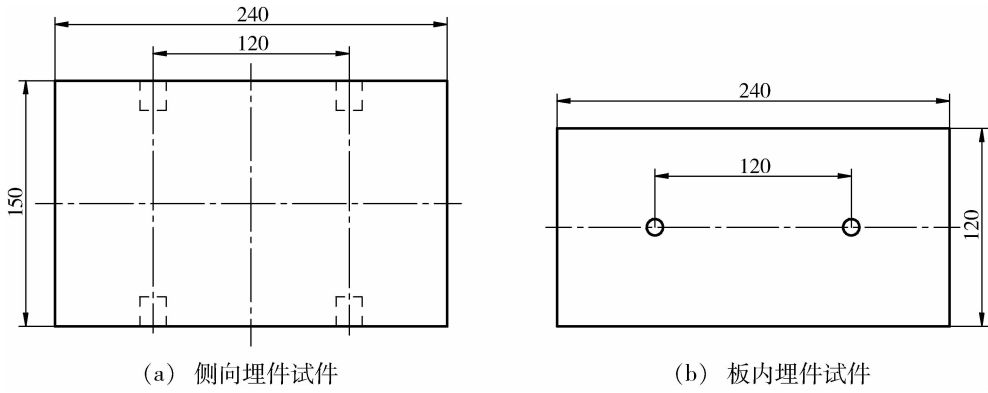


图 1 金属埋件静力试件示意图  
Fig.1 Metal insert pull-out sample

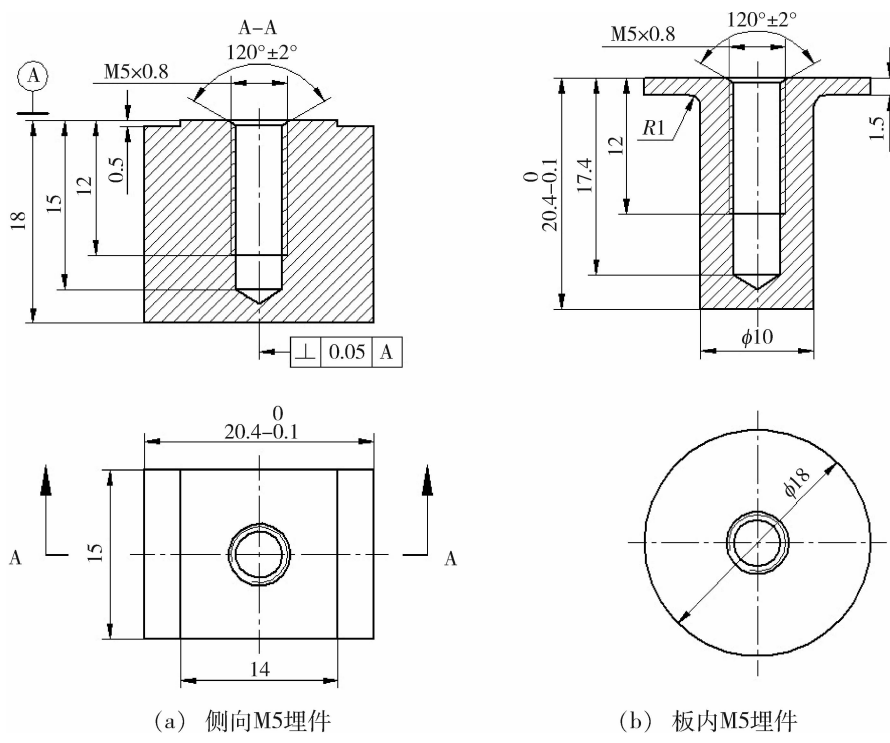


图 2 金属埋件结构示意图  
Fig.2 Schema of different metal inserts

### 1.1.2 材料

(1) 蒙皮, 国产碳纤维/改性氰酸酯树脂 BHM3-3K/BS-4 复合材料层合板<sup>[6]</sup>, 厚度 0.32、0.24 mm。其中, 试件 a 选用 0.32 mm, 试件 b、c 选用 0.24 mm。

(2) 埋件, 3# 高强铝棒 AAHS-3-T6 (Z/HNZJ 001-2007), 直径 22、28 mm。

(3) 蜂窝, 有孔铝蜂窝芯材 LF2-Y (HB5443-90), 铝箔厚度 0.03 mm, 格孔边长 5 mm, 芯高 20.4、20.5 mm。其中, 试件 a 选用 20.4 mm, 试件 b、c 选用 20.5 mm。

(4) 胶黏剂, 试件 a、b 选用 J-312 系列 (Q/HSY202-2012), 包括底胶 J-312B, 胶膜 J-312C, 面密度约为 (130~140) g/m<sup>2</sup>; 试件 c 选用 J-47 系列 (Q/HSY003-2012), 包括底胶 J-47B, 胶膜 J-47C, 面密度约为 (200~210) g/m<sup>2</sup>; 发泡胶均选用 J-47D, 厚度 1 mm。

### 1.1.3 制备工艺

(1) 预浸料, 利用热熔法获取 BHM3-3K/BS-4 预浸无纬布, 厚度 0.06、0.08 mm, 控制含胶量约为 38wt%, 挥发分 ≤ 1.0%。

(2) 蒙皮,将预浸料按纤维方向 $[0^\circ/+45^\circ/-45^\circ/90^\circ]$ 次序叠合后经真空袋—热压罐法固化成形。固化工艺为 $0.9\text{ MPa}$ , $180^\circ\text{C}$ , $2\text{ h}$ ,并于全过程保持 $0.1\text{ MPa}$ 的真空压。其中,纤维 $0^\circ$ 方向为长度方向, $90^\circ$ 层为蒙皮与蜂窝的胶接面。

(3) 埋件,按图2采用数控机床加工。

(4) 表面处理,埋件采取磷酸阳极氧化处理,蜂窝芯材胶接面利用乙酸乙酯清洗,蒙皮胶接面打磨树脂层后用乙酸乙酯清洗。

(5) 剪切试件胶接工艺,按 $(80\pm 20)\text{ g/m}^2$ 的涂胶量在两个剪切试片的胶接面上均匀涂刷底胶,烘干后将胶膜铺放在任意一个试片的胶接面上,然后将两个试片进行胶接。

(6) 蜂窝夹层结构胶接工艺,按 $(80\pm 20)\text{ g/m}^2$ 的涂胶量将底胶均匀地涂于蒙皮胶接面,以及埋件上下端面,烘干后在蒙皮胶接面铺放胶膜,在埋件周围包裹发泡胶,利用胶黏剂将各类零件组合为一体。

(7) 试件固化工艺,利用真空袋—热压罐法固化,固化工艺为 $0.12\text{ MPa}$ , $130^\circ\text{C}$ , $2\text{ h}$ <sup>[7]</sup>。

## 1.2 测试

### 1.2.1 测试设备和标准

采用 Instron5982 型材料力学试验机按 GB7124—1986 测试胶黏剂剪切性能,按 GJB130.8—1986 测试胶黏剂 $90^\circ$ 板—蜂窝剥离性能;按 GJB130.4—1986 测试蜂窝夹层结构平面拉伸性能;按 GJB130.6—1986 测试蜂窝夹层结构平面剪切性能;按 GJB130.9—1986 测试蜂窝夹层结构弯曲性能,测试跨距为 $300\text{ mm}$ 。

### 1.2.2 夹具及加载方式

胶黏剂和蜂窝夹层结构性能测试依据测试标准全部选用标准夹具。

埋件性能测试夹具包括两类,分别用于埋件的面外拉拔和面内剪切性能测试。其中,面外拉拔测试夹具由底板、调平块、压板、固定螺杆、施力螺杆和组合螺栓组成。底板通过固定螺杆固定在试验机上;压板中心有加载口,直径 $\varphi 100\text{ mm}$ ,施力螺杆穿过加载口,通过试验机对试件施加拉脱力<sup>[8]</sup>;测试时,利用调平块将试件水平固定在底板与压板之间,再用组合螺栓装夹。面内剪切测试夹具由加载板和紧固螺钉组成,紧固螺钉通过埋件螺孔,将加载板与蜂窝夹层结构板固定,试验机通过加载板对埋件施加剪切载荷。侧向埋件垂直于边缘进行剪切时可在螺孔内对称安装固定螺杆和施力螺杆,通过试验机施加纵向拉伸载荷。

埋件力学性能检测的加载方式(图3)为施加面外拉拔力和面内剪切力,用以考核埋件承受拉拔和剪切载荷的能力,每种加载方式的描述见表1。测试过程应使固定螺杆、施力螺杆位于同一轴线并垂直于埋件的螺孔端面,然后再对埋件施加纵向拉伸载荷,预加载 $100\text{ N}$ ,再按 $5\text{ mm/min}$ 的速度加载至试件破坏。

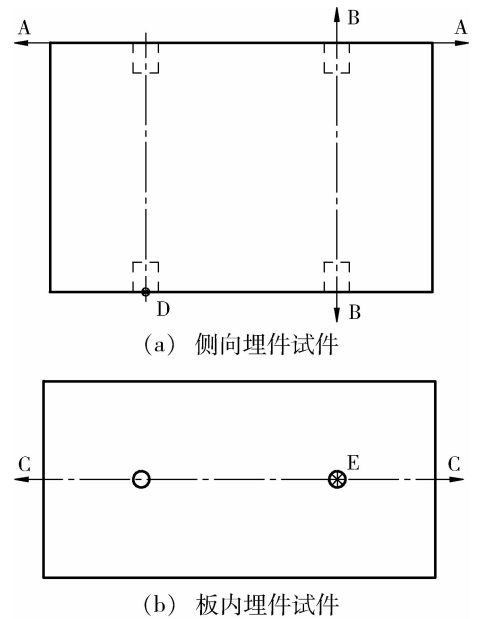


图3 埋件静力试件加载方式示意图

Fig.3 Schematic of different metal insert pull-out sample

表1 加载方式的描述

Tab.1 Description of loading modes

加载方式代号	埋件特点	加载方式描述
A-A	边缘侧向埋件	沿边缘方向面内剪切
B-B	边缘侧向埋件	垂直于边缘方向面内剪切
C-C	内部板内埋件	平行于蒙皮方向面内剪切
D	边缘侧向埋件	垂直于蒙皮方向面外拉拔
E	内部板内埋件	垂直于蒙皮方向面外拉拔

## 2 结果与讨论

### 2.1 胶黏剂的胶接性能

蜂窝夹层结构中蒙皮与蜂窝之间胶黏剂的剪切强度、 $90^\circ$ 板—蜂窝剥离强度是衡量胶黏剂胶接性能优劣的主要指标。实验考察了J-312系列和J-47系列胶黏剂的胶接性能。实测结果见表2,相比J-47系列,J-312系列胶黏剂的比强度更高,其面密度虽然降低了约 $70\text{ g/m}^2$ ,但其胶接强度与J-47系列相当,甚至更优。因此,在同等胶接强度下,选择J-312系列胶黏剂可有效降低结构质量。

表 2 胶黏剂性能指标

Tab.2 Performance index of different adhesive

胶黏剂牌号	面密度/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$	剪切强度指标值/MPa		剪切强度实测值/MPa		剥离强度/ $\text{N} \cdot \text{cm}^{-1}$	
		室温	100℃	室温	100℃	室温指标值	室温实测值
J-47 系列	200~210	26	13	33.7	17.2	30	32.2
J-312 系列	130~140	35	18	38.6	20.9	30	32.9

## 2.2 蜂窝夹层结构的力学性能

蜂窝夹层结构的蒙皮主要承担结构中的弯曲应力以及面内拉、压和剪切应力;蜂窝芯材在夹层结构中起连接和支撑蒙皮的作用,主要承担横向剪切应力;蒙皮与蜂窝之间的胶黏剂将蒙皮和蜂窝芯材束缚成整体,主要提供界面强度与刚度。为分析蒙皮厚度、胶黏剂面密度和胶接性能对蜂窝夹层结构的力学性能影响,采用本文 1.1 节相应条件分别制成试件 a、b、c,其力学性能测试结果见表 3。

实验结果表明,蜂窝夹层结构试件 b、c 的力学性能基本相当,这是由于试件 b、c 除蒙皮与蜂窝之间的胶黏剂不同外,其他技术状态完全一致,而两种胶黏

剂虽然牌号和面密度不同,但其胶接强度基本相当,因此不影响试件的力学性能。由此可知,在同等胶接强度下,可采用面密度较低的胶黏剂以降低结构质量。

同时,实验发现试件 a 的力学性能明显优于试件 b 和 c,分析各类试件的技术状态可知,这是由于试件 a 的蒙皮厚度为 0.32 mm,而试件 b 和 c 的蒙皮厚度为 0.24 mm,对于蜂窝夹层结构而言,在保证蒙皮与蜂窝胶接强度的前提下,蒙皮厚度越大,其强度越大,相应的抵抗弯曲应力、面内拉、压和剪切应力的能力也越大,因此,蒙皮较厚的试件,其平面拉伸、平面剪切和弯曲性能也越高。

表 3 蜂窝夹层结构的力学性能

Tab.3 Mechanical properties of honeycomb sandwich structure with different adhesive

试件	平面拉伸强度/MPa	平面剪切强度/MPa	平面剪切模量/GPa	弯曲刚度/ $\text{MN} \cdot \text{mm}^2$	剪切刚度/kN
a	2.43	0.64	174	429	127
b	1.95	0.36	89.2	289	94.1
c	1.72	0.37	89.7	290	92.8

## 2.3 侧向 M5 埋件的力学性能

在等厚度 21 mm 的蜂窝夹层结构内埋置尺寸构型完全一致的侧向 M5 埋件,对应不同的蒙皮和胶黏剂,埋件在各个加载方式下的承载力见表 4。

表 4 侧向 M5 埋件的力学性能

Tab.4 Pull-out strength of lateral M5 insert sample

试件	抗拉载荷/kN		
	A-A	B-B	D
a	4.82	10.77	1.10
b	4.63	10.15	1.04
c	4.39	10.02	0.92

测试结果表明,蜂窝夹层结构中侧向 M5 埋件的承载力表现为试件 a 最优,试件 b 略优于试件 c。而且,同种试件中侧向埋件在不同加载方式下的承载力差异也较大,其中垂直于边缘方向的面内剪切载荷承载力最大,沿边缘方向的面内剪切载荷次之,垂直于蒙皮方向的面外拉拔载荷最低。分析认为:侧向埋件位于蜂窝夹层结构边缘,在垂直于蒙皮的面外拉拔载

荷作用下,埋件系统需要同时承受拉拔、剪切和剥离等多种形式的载荷,但由于埋件位于结构边缘,所受载荷无法有效、均匀地传递给周围的蜂窝夹层结构,所以埋件区域的蜂窝芯材和蒙皮会很快受到破坏而导致承载失效,埋件承载力较低。但侧向埋件承受面内剪切载荷时,所受载荷会通过埋件与蒙皮之间的胶黏剂直接传递给上下蒙皮,并最终在埋件区域的蒙皮破坏导致承载失效。实验发现,埋件承受垂直于边缘方向的面内剪切载荷时,埋件端面的受力均匀、单一,而埋件承受沿边缘方向的面内剪切载荷时,由于埋件系统需要同时承受剪切和扭转等多种载荷,埋件端面不同部位的受力各不相同,在相同载荷下扭矩较大部位的蒙皮会首先发生破坏导致承载失效,因此,侧向埋件承受垂直于边缘方向的面内剪切能力明显高于其承受沿边缘方向的面内剪切载荷能力。

## 2.4 板内 M5 埋件的力学性能

在等厚度 21 mm 的蜂窝夹层结构内埋置尺寸构型完全一致的板内 M5 埋件,对应的不同蒙皮和胶黏剂,埋件在各个加载方式下的承载力见表 5。

测试结果表明,试件 a 中的板内 M5 埋件承载能力最优,试件 b,c 中的板内 M5 埋件承载能力基本相当。分析认为:在蜂窝夹层结构中,板内埋件受到的面内剪切载荷会通过埋件上下端面与蒙皮之间的胶黏剂直接传递给上下蒙皮,由于三种试件所用胶黏剂的胶接强度基本一致,但试件 a 的蒙皮略厚,试件 b,c 的蒙皮厚度一致,且相对较薄,因此试件 a 的埋件承载力较大,试件 b,c 的埋件承载力较小,且数据基本相当。另一方面,板内埋件受到的面外拉拔载荷会经过埋件周围的胶黏剂以剪切力形式传递给周围的蜂窝芯材和蒙皮,由于蜂窝芯材的剪切强度远低于胶黏剂的剪切强度,因此在垂直于蒙皮的面外拉拔载荷作用下,蜂窝芯材在未达到屈服强度极限时,就发生了皱褶现象,随着载荷加大,蜂窝芯材的受力情况便由起初的受剪切力变为了沿蜂窝芯材对角线的拉力,直至埋件周围的蜂窝芯材被撕裂破坏,埋件带动蒙皮沿法向移动,最终导致埋件区域蒙皮断裂分层,埋件系统承载失效<sup>[9-10]</sup>。综合以上分析,蜂窝夹层结构板内埋件承受垂直于蒙皮的面外拉拔载荷能力较面内剪切载荷能力低,且蒙皮厚度越大,埋件承载力越大。

表 5 板内 M5 埋件的力学性能

Tab.5 Pull-out strength of plate M5 insert sample

试件	抗拉载荷/kN	
	C-C	E
a	6.52	2.45
b	6.29	2.19
c	6.28	1.98

### 3 结论

(1) 在保证蒙皮与蜂窝胶接强度的前提下,适当增加蒙皮厚度,有利于提高蜂窝夹层结构及其埋件的力学性能。

(2) 在同等胶接强度下,蒙皮与蜂窝之间的胶黏剂面密度对蜂窝夹层结构及其埋件力学性能的影响

可以忽略,可以选用面密度较低的胶黏剂来降低结构质量。

(3) 蜂窝夹层结构内埋件承受面内剪切载荷的能力明显优于其承受垂直于蒙皮的面外拉拔载荷能力。

(4) 蜂窝夹层结构内埋件所受面内剪切载荷会通过胶黏剂直接传递给埋件区域的上下蒙皮,埋件系统的失效模式以蒙皮局部破坏为主。

(5) 蜂窝夹层结构内埋件所受垂直于蒙皮的面外拉拔载荷会通过胶黏剂以剪切力的形式传递给周围蜂窝芯材和上下蒙皮,失效模式为埋件周围蜂窝芯材先失稳破坏,并最终导致埋件带动蒙皮变形、局部发生破坏。

### 参考文献

- [1] 张纪奎, 酆正能, 寇长河. 大展弦比复合材料机翼结构设计研究[J]. 航空学报, 2005, 26(4): 450-453.
- [2] 张广平. 复合材料夹心板及应用[J]. 纤维复合材料, 2000, 6(2): 25.
- [3] 沃西源, 夏英伟, 涂彬, 等. 蜂窝夹层结构复合材料特性及破坏模式分析[J]. 航天返回与遥感, 2005, 26(4): 46.
- [4] 李莺歌, 宫项, 黎昱, 等. 蜂窝夹层结构埋件拉脱力的影响因素[J]. 宇航材料工艺, 2011, 41(3): 38.
- [5] 法洋洋, 陈秀华. 蜂窝夹层结构拉脱破坏的有限元分析[J]. 机械工程材料, 2012, 36(10): 86.
- [6] 陈维强, 照臻璐, 等. 国产高模量碳纤维/改性氰酸酯复合材料性能研究[C]. 第十八届全国复合材料学术会议论文集, 2014 下册: 299.
- [7] 李莺歌, 黎昱, 等. 蜂窝夹层结构埋件区域的损伤分析和修补[C]. 第十八届全国复合材料学术会议论文集, 2014, 下册: 244.
- [8] 李莺歌, 宫项, 黎昱, 等. 蜂窝夹层结构埋件拉脱力的影响因素[J]. 宇航材料工艺, 2011, 41(3): 39.
- [9] 冯纪生. 蜂窝夹层板后埋件的连接设计[J]. 航天器工程, 1998, 7(2): 44-51.
- [10] 侯向阳. 蜂窝夹层结构埋件拉脱破坏机理研究[C]. 中国宇航学会飞行器总体专业委员会论文集, 2005: 690-695.