

# 芯子宽厚比对铝蜂窝夹层结构平压强度的影响

章妮 卢克非 崔文龙

(航天材料及工艺研究所,北京 100076)

**文 摘** 用正六边形代替实际蜂芯,推导了夹层结构的平压强度与芯子宽厚比的关系,并对八种规格的芯子平压强度进行统计,统计结果虽然与推导的结果有偏差,但规律却是一致的,即蜂窝夹层结构的平压强度随着芯子宽厚比  $d/t_s$  增大呈负指数减小。

**关键词** 铝蜂窝,夹层结构,宽厚比,平压强度

中图分类号:V45

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2016.02.008

## Effect of Ratio of Width to Thickness of Aluminum Honeycomb Sandwich Structure of Flatwise Compression Stress

ZHANG Ni LU Kefei CUI Wenlong

(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

**Abstract** Using the hexagon instead of the actual honeycomb core, the flat compression strength of sandwich structure and its relationship with the width to thickness ratio was deduced. Eight kinds of specifications of core flat compressive strength were evaluated. Statistical results revealed that although there are deviations from the deduced results, the law is consistent, namely honeycomb sandwich structure of flat compression strength decreases exponentially with the increase of core width to thickness ratio  $d/t_s$ .

**Key words** Aluminum honeycomb, Sandwich structure, Ratio of width to thickness, Flatwise compression stress

### 0 引言

夹层结构在复合材料领域是一种常见的结构,通常由蒙皮和芯体组成,具有比强度高、比模量高,密度低和透波性好等特点。在航空、航天、船舶、建筑、桥梁等领域广泛应用,尤其在航空和航天领域应用最为广泛,如大型运载火箭整流罩、仪器舱、卫星支架、贮箱共底,卫星的电气结构板、天线反射器、太阳能电池阵基板,载人返回舱侧壁、防热大底以及天线罩等<sup>[1]</sup>。

夹层结构芯子包括泡沫、蜂窝和软木等轻型材料。由于夹层结构的组成复杂,蒙皮材料的强度和模量高于芯材,为反映夹层结构的真实性能,其试验方法较为复杂<sup>[2]</sup>,而平压试验方法是其中较为简单的方法。夹层结构或芯子的平压强度是通过在垂直于芯材平面(即厚度方向)施加压缩载荷,直至材料发生破坏或屈服,计算单位面积上的压缩载荷<sup>[3]</sup>(图1),可见,对于夹层结构,芯子是主要的承力部位,芯子的平压强度决定了夹层结构的平压强度。芯子的

平压强度与芯子材料类型、形状规格和芯子密度等都有密切关系<sup>[4]</sup>。

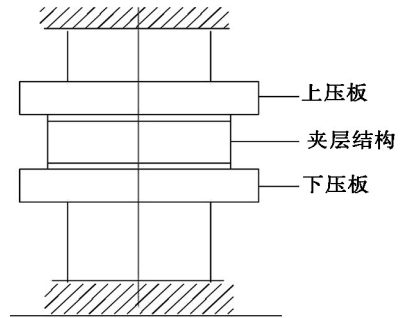


图1 平压强度测试示意图

Fig.1 Schematic diagram of flatwise compression strength test

对蜂窝等格子芯材,承受载荷的是蜂窝芯壁,蜂窝芯壁由单层壁和双层壁构成,这种构成及芯子边长与蜂壁厚度的比(宽厚比),构成了蜂窝芯子的基本结构特征。本文对八种芯子规格的蜂窝芯子测试数

据进行统计分析,找出了芯子规格(主要是芯子厚度和芯子边长)对平压强度的影响及关系。

### 1 统计样品与结果

统计样品为铝蜂窝芯子,牌号为 LF2Y,芯子规格见表 1,试验在 WD4050 国产电子万能试验机上按 GB/T 1453—2005 进行,压缩速度为 2 mm/min。

图 2 是不同规格的铝蜂窝芯子的 5 批次试样平压强度试验统计结果。图中误差棒较长,可以看出同规格铝蜂窝芯子的平压强度批次间的分散较大,这主要是由于制作工艺和铝箔的批次间厚度差异造成的。

根据 GB/T 1453 附录,  $\sigma_s = \frac{P}{(2n_1d+n_2 \cdot c) \cdot t_s}$  式中,  $\sigma_s$  为蜂壁压缩强度,  $p$  为破坏载荷,  $n_1$  为试样中双层蜂壁数,  $n_2$  为试样中单层蜂壁数,  $d$  为蜂格双层蜂壁边长,  $c$  为蜂格单层蜂壁边长,  $t_s$  为单层蜂壁厚

度<sup>[3]</sup>。假设蜂窝为正六边形,单层蜂壁边长与双层蜂壁边长相等,则计算出蜂壁压缩强度如表 1 所示。

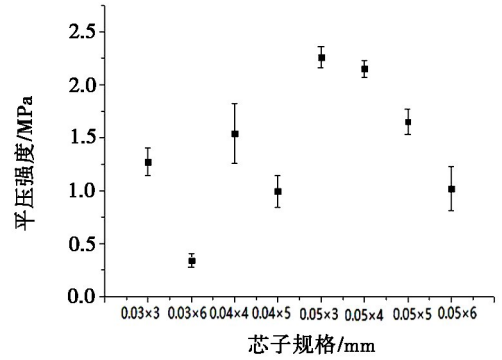


图 2 不同规格铝蜂窝芯的平压强度

Fig. 2 Aluminum honeycomb flatwise compression strength with different specification

表 1 不同规格铝蜂窝芯的蜂壁强度

Tab. 1 Aluminum honeycomb wall compression strength with different specification

芯子规格/mm	平压强度/MPa	单层蜂壁数	双层蜂壁数	蜂壁强度/MPa
0.03×3	1.27	462	231	55.0
0.03×6	0.342	115	58	29.6
0.04×4	1.54	260	130	66.7
0.04×5	0.994	166	83	53.8
0.05×3	2.26	462	231	58.7
0.05×4	2.15	260	130	74.5
0.05×5	1.65	166	83	71.4
0.05×6	1.02	115	58	53.0

### 2 平压强度与芯子规格的关系

图 3 为蜂窝芯子的代表单元,可以看出,芯子平面面积和蜂壁截面积比为:  $\frac{d \times l \sin \theta}{(d+l) \times t_s}$ , 式中,  $t_s$  为蜂壁厚度。

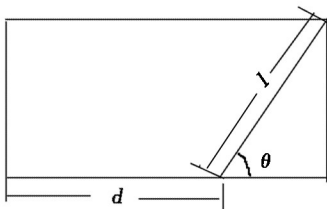


图 3 蜂窝芯子代表单元(俯视图)

Fig. 3 Typical honeycomb core unit (top view)

要达到平衡,夹层结构平压应力与芯子平面面积的乘积和蜂壁应力与蜂壁截面积的乘积相等,即是:

$$\sigma(d \times l \sin \theta) = \sigma_s(d+l) \times t_s \quad (1)$$

式中,  $\sigma$  和  $\sigma_s$  分别为夹层结构平压应力(即平压强度)和蜂壁应力。假设蜂窝芯格为正六边形,则有  $l = d$ ,  $\theta = 60^\circ$ , 式(1)可写成

$$\sigma = 2.31(t_s/d)\sigma_s \quad (2)$$

可见,平压强度不仅与芯子宽厚比有关,还与蜂壁强度有关,文献[5]给出在一个方向受压的四边简支平板,当板的未受压边长与受压边长  $d$  之比大于等于 1 时,失稳临界应力

$$\sigma_{cr} = 3.3 \frac{E}{1-\nu^2} (t_s/d)^2 \quad (3)$$

式中,  $E$  为材料弹性模量,  $\nu$  为泊松比。

由于双层壁厚是单层壁厚的两倍,从式(4)中可以看出双层壁的失稳强度为单层壁的 4 倍,所以蜂窝的破坏,必然是从芯子单层蜂壁的失稳开始,继而双层壁达到最大承载能力,最终发生整体破坏<sup>[5]</sup>。

将式(3)代入式(2),则平压强度与宽厚比的关系可写成

$$\sigma = k(t_s/d)^3 \quad (4)$$

式中,  $k = 7.62 \frac{E}{1-\nu^2}$  为材料常数,可见,平压强度最终是与芯子宽厚比成固定比例的,对于铝蜂窝芯,铝合

金弹性模量为 70 GPa,金属泊松比为 0.33,则式(4)可写成  $\sigma = 598\ 821 (t_s/d)^3$ 。根据这个公式,平压强度是一个只与宽厚比有关的常数,也就是说相同的宽厚比所测得的平压强度相同。

图 4 是统计和计算结果与宽厚比的关系曲线。

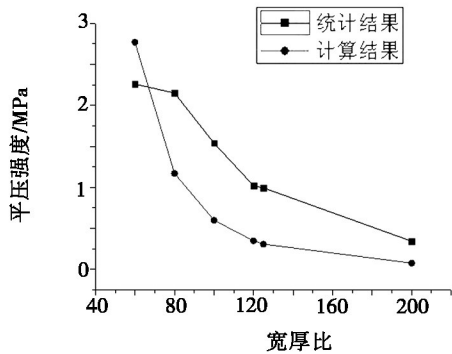


图 4 芯子宽厚比与理论和实际平压强度的关系

Fig. 4 Relationship of the ratio of core width and thickness with the theoretical level compressive strength and the actual level compressive strength

可以看出,统计结果与计算结果相差比较大,这是因为夹层结构的平压强度本身具有一定的离散性,有时还比较显著(图 2)。而且在上面的推导中,直接用理想的正六边形代替蜂窝芯子也使得统计结果与计算结果相差加大。但得出的结论趋势与实际状态

(上接第 21 页)

图 6 可以看到,经过高温烧结后涂层由白色变为黄褐色。EDS 分析显示,防潮涂层高温烧结前后,涂层中主要含有 Si、O,还有少量 C。C 来自全氢硅氮烷中的有机固化剂,这与其红外光谱结果是一致的。以氧化硅为主要成分的防潮涂层与石英织物基材成分一致,因而其无线电波透过能力与石英织物基材相近。

### 3 结论

以全氢硅氮烷树脂为成膜物,添加少量纳米  $\text{SiO}_2$ ,在石英织物表面制备出了高温下与石英织物组分相近且防潮性能优良的陶瓷前驱体基防潮涂层。该防潮涂层在温度  $40^\circ\text{C}$ 、湿度 95% 环境下放置 24 h,可将石英织物的吸潮率从 11.71% 降到 0.31%,且涂层主要组分与石英织物基材组分一致,因而其无线电波透过能力与石英织物基材相近。

#### 参考文献

[1] 李俊生,张长瑞,王思青,等.  $\text{SiO}_2/(\text{Si}_3\text{N}_4+\text{BN})$  透波

应该是吻合的,即蜂窝夹层结构的平压强度随着芯子宽厚比  $d/t_s$  增大呈负指数减小。

### 3 结论

夹层结构的平压强度即是芯子的平压强度,是一个与芯子宽厚比成固定比例的数值,对于铝蜂窝夹层结构,其平压强度约为  $598\ 821 (t_s/d)^3$ ,但实际测试中,蜂窝芯格的边长和厚度都很难精确测出,且在实际产品应用中,蜂窝芯格的变长和厚度本身也不是很均匀,或者说它们本身是离散性较大的参数,因此实际测得的数据和理论推导的数偏离较大,但是趋势与推导的趋势是一致的,即蜂窝夹层结构的平压强度随着芯子宽厚比  $d/t_s$  增大呈负指数减小。

#### 参考文献

[1] 中国航天材料体系 [M]. 北京:国防工业出版社, 2005  
 [2] 张子龙,航空非金属材料性能测试技术(5)复合材料 [M]. 北京:化学工业出版社,2014.  
 [3] GB/ T 1453-2005. 夹层结构或芯子平压试验方法  
 [4] 周祝林,王亚熊. 夹层结构或芯子平压试验方法(国标 GB/T1453)试验验证研究分析[J], 玻璃钢, 2004(1): 5 ~ 13  
 [5] 张汝光. 玻璃钢蜂窝夹层结构的平压破坏形式和强度预测[J]. 玻璃钢,1999(2): 1 ~ 7

材料表面涂层的防潮性能和透波性能研究[J]. 涂料工业, 2007, 37(1): 5-10.

[2] 刘坤,曹峰,张长瑞,等. 石英/氮化物复合材料防潮涂层的制备及性能研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2010(5): 47 -49.

[3] 崔唐茵,刘瑞祥,崔文亮,等. 石英陶瓷天线罩表面封孔防潮涂层的研究[J]. 陶瓷, 2010(8): 32-34.

[4] 魏美玲,赵小玻,程之强,等. 陶瓷天线罩防潮保护涂层的研究[J]. 硅酸盐通报, 2006, 25(5): 56-59.

[5] 李俊生,张长瑞,王思青,等. 涂层对  $\text{SiO}_2/(\text{Si}_3\text{N}_4+\text{BN})$  透波材料力学、介电性能影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(suppl. 2): 671-673.

[6] WEI Qihong, WANG Chonghai, LI Ling, et al. Study on damp-proof and enhanced coating on porous silicon nitride surface by sealing [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41(S3): 278-281.

[7] 王树彬,李世杰,张跃. 多孔氮化硅表面封孔增强涂层研究[J]. 无机材料学报, 2008, 23(4): 769-773.