

卫星结构用 PVC 泡沫芯与铝蜂窝芯夹层板的比较

马立 朱大雷

(北京卫星制造厂, 北京 100190)



摘要: 以卫星隔板为例, 从原材料、工艺方法、力学性能、重量、生产周期及制造成本等方面比较了 PVC 泡沫芯夹层板和传统的铝蜂窝芯夹层板, 总结出 PVC 泡沫芯夹层板的优势与劣势。最后, 展望了 PVC 泡沫夹层结构在航天领域的应用前景。

关键词: PVC 泡沫芯; 铝蜂窝芯; 夹层板; 力学性能

Comparison between PVC Foam Core and Aluminum Core Sandwich Panel in Satellite Structure

Ma Li Zhu Dalei

(Beijing Spacecrafts CAST, Beijing 100094)

Abstract: Taking a shear web of satellite for example, comparison between PVC foam core and aluminum core sandwich panel has been conducted in the aspects of material, process, mechanical properties, mass, production cycle, and cost. The benefits and disadvantages of PVC foam core sandwich panel are summarized. Finally, application prospect of PVC foam core sandwich panel in space is presented.

Key words: PVC foam core; aluminum core; sandwich panel; mechanical properties

1 引言

PVC 泡沫生产工艺是上世纪 30 年代后期由德国人林德曼发明的, 最早应用于制造保温隔热车厢。目前, 世界上生产 PVC 泡沫的两个主要厂家是戴博 (DIAB) 公司和爱瑞柯斯 (Airex) 公司。PVC 泡沫具有高韧性, 良好的抗冲击性^[1]、能量吸收和耐疲劳性能, 低吸湿, 耐化学腐蚀, 隔热、隔音效果好。另外, 由于 PVC 泡沫夹层材料比强度、比刚度高, 且性价比高, 已应用于船舶^[2]、航空、建筑、汽车、火车、轻工等领域。

虽然, PVC 泡沫问世时间不短了, 但在我国航天领域才刚刚开始尝试应用。目前, 我国航天器多采用铝蜂窝芯夹层板作为主承力或次承力结构, 对于有电性能要求的结构, 则采用 Nomex 蜂窝芯。为了探索一种可替代铝蜂窝的芯材, 2011 年, 在某型号电性星上尝试采用 PVC 泡沫芯夹层板作为卫星结构的隔板,

经试验证实, PVC 泡沫芯夹层板可以作为次承力结构使用。

本文从原材料、工艺方法、力学性能、重量、生产周期及制造成本等方面, 将 PVC 泡沫芯夹层板和传统的铝蜂窝芯夹层板作了比较研究。

2 原材料

本研究采用的 PVC 泡沫为戴博 (DIAB) 公司生产的 Divinycell HP60 泡沫, 与之对比的是规格为 0.03/5 的铝蜂窝芯 (此规格是卫星结构最常用的), 符合 HB 5443—90 的 I 类标准。两种芯材的主要性能指标见表 1。

PVC 泡沫为各向同性材料, 即在各个方向上性能一样; 而铝蜂窝是各向异性材料, 纵向性能远高于横向性能, 这是因为纵向是铝箔的方向, 而横向是铝箔之间通过胶粘剂粘接在一起的。因此, 通常将铝蜂窝

作者简介: 马立 (1973-), 研究员, 复合材料专业; 研究方向: 航天器复合材料结构。

收稿日期: 2012-11-15

芯的纵向作为结构的主承力方向。

表 1 PVC 泡沫与铝蜂窝的性能

	密度/kg m ⁻³	压缩强度/MPa	剪切模量/MPa	剪切强度/MPa	
				纵向	横向
PVC 泡沫	65	0.95	20	0.85	
铝蜂窝	27	0.45	57	0.44	0.24

3 工艺方法

一般来说, PVC 泡沫芯夹层板的面板可以采用铝合金, 也可以采用复合材料, 如: 玻璃钢、碳纤维复合材料^{[1] [2]}等。本文讨论的卫星隔板的外形尺寸为 1325mm×562mm×21mm, 面板材料为 2A12T4 铝合金, 厚度 0.5mm, 芯材为 HP 60 PVC 泡沫, 高度 20mm; 与之作对比研究的是外形尺寸相同的另一块卫星隔板, 其面板材料、厚度相同, 芯材是高度相同的规格为 0.03/5 的铝蜂窝。

两种芯材的夹层板成型工艺方法相同, 均为胶接工艺, 即面板与芯材之间通过胶粘剂在一定的温度、压力作用下粘接在一起。

表 2 列出了两种芯材夹层板制造过程的异同。对于铝面板的加工和表面处理方法, 二者相同; 芯材加工方面, PVC 泡沫芯要简便得多, 只需用普通的壁纸刀切割即可, 而铝蜂窝芯的加工则需要先利用铣床将铝蜂窝叠层块切割成 20mm 高的铝蜂窝叠层条, 然后在专用拉伸机上拉伸、定型; 芯材的表面处理方法也不同, PVC 泡沫芯只需用真空吸附的方法去除表面的碎屑, 而铝蜂窝芯则需要用溶剂清洗, 以去除表面油污和其它多余物; 使用的胶粘剂相同, 可以是胶膜, 也可以将液态的胶粘剂涂刷在铝面板的胶接面上; 固化方法的差异, PVC 泡沫芯的夹层板, 固化压力只需 1bar 的真空负压, 而铝蜂窝芯的夹层板在固化过程中既需要抽真空又需要施加外压, 压力为 1.2bar。

表 2 两种芯材夹层板制造过程比较

制造过程	PVC 泡沫芯夹层板	铝蜂窝芯夹层板
铝面板加工	铣加工或激光切割	铣加工或激光切割
铝面板表面处理	磷酸阳极氧化	磷酸阳极氧化
芯材加工	壁纸刀切割	铣切、拉伸
芯材表面处理	真空吸附	溶剂清洗
胶粘剂	贴胶膜或涂刷液态胶粘剂	贴胶膜或涂刷液态胶粘剂
固化方法	真空袋法	热压罐法

4 力学性能

在制造两种芯材的卫星隔板时, 同步加工随炉试件, 包括: 90°剥离试件和弯曲试件, 两种随炉试件

的数量均为 6 件。参照国军标 GJB 130.8 测试了夹层板的 90°剥离强度; 参照国军标 GJB 130.9, 采用三点弯曲法测试了夹层板的弯曲刚度、剪切刚度, 试验数据对比见表 3。

表 3 力学性能比较

	90°剥离强度		弯曲刚度		剪切刚度	
	平均值/N cm ⁻¹	离散系数/%	平均值/N mm ²	离散系数/%	平均值/kN	离散系数/%
PVC 泡沫芯夹层板	14.6	5.8	4.84E+08	4.5	26	3.2
铝蜂窝芯夹层板	13.9	4.9	4.95E+08 (纵向)	3.7	62 (纵向)	4.1

由表 3 的数据可以看出, PVC 泡沫芯夹层板与铝蜂窝芯夹层板相比, 90°剥离强度和弯曲刚度相当, 但剪切刚度要低得多。

的弹性模量决定的, 而剪切刚度主要是由芯材的剪切模量贡献的。

从夹层板的弯曲刚度、剪切刚度的理论公式^[3~5] (1) 和 (2) 可以得知: 弯曲刚度主要是由面板材料

$$D_f = \frac{E_f h_f (h_c + h_f)^2}{2(1 - \mu_f^2)} L \quad (1)$$

$$C_c = G_{xz}^c (2h_f + h_c)L \quad (2)$$

式中： D_f ——弯曲刚度； h_f ——面板厚度； h_c ——夹芯厚度； L ——板宽； E_f ——面板材料的弹性模量； μ_f ——面板材料的泊松比； C_c ——剪切刚度； G_{xz}^c ——芯材的剪切模量。

由表 1 中的数据可知，PVC 泡沫的剪切模量为 20MPa，而铝蜂窝的剪切模量为 57MPa，正是由于芯材剪切模量的差异导致了两种夹层板剪切刚度的不同。

5 重量

该卫星隔板的金属埋件采用后埋的方式埋置。所谓后埋是指在面板与芯材胶接成夹层板后，再将金属埋件通过胶粘剂置入夹层板中的工艺方法。表 4 列出了两种芯材夹层板后埋前、后的重量，其金属埋件种类、数量相同，均为 65 件。

表 4 夹层板重量比较

	后埋前的重量/kg	后埋后的重量/kg
PVC 泡沫芯夹层板	2.966	3.240
铝蜂窝芯夹层板	2.945	3.626

由表 4 的数据得知，后埋前，两种夹层板的重量相当，埋置了 65 件金属埋件后，PVC 泡沫芯夹层板的重量比铝蜂窝芯夹层板的重量轻 10.6%。造成重量差异的原因经分析认为，埋置金属埋件前，需在夹层板相应位置处开口，包括在铝面板表面开口，并去除该位置的铝蜂窝芯，由于铝蜂窝壁的铝箔很薄，在去除过程中很容易造成蜂窝壁破损，在灌注胶粘剂时，液态的胶粘剂就会流淌到周围破损的铝蜂窝芯格内，这样就势必造成后埋时胶粘剂用量偏多，一般每个金属埋件处胶粘剂的用量为 15~20g；而 PVC 泡沫芯夹层板没有这种现象，因为 PVC 泡沫是刚性泡沫，在铝面板开口处的泡沫芯去除面积等于铝面板的开口面积，因此胶粘剂的灌注量会比铝蜂窝芯的要少，一般每个金属埋件处胶粘剂的用量仅为 5~8g。当金属埋件数量越多，PVC 泡沫芯夹层板相对于铝蜂窝芯夹层板的减重效果越显著。

6 生产周期与制造成本

由表 2 得知，PVC 泡沫芯夹层板与铝蜂窝芯夹层

板的制造过程存在以下不同：

a. 芯材加工方法：PVC 泡沫可采购到合适高度的芯材，而铝蜂窝采购的是铝蜂窝叠层板，需要先铣切出所需高度的蜂窝叠层条，然后再借助拉伸机将其拉开，使蜂格成为正六边形；

b. 芯材表面处理：PVC 泡沫芯在胶接前的表面处理采用真空吸附的方法即可，而铝蜂窝芯为了清除表面加工过程中造成的污染，需要工人涂刷溶剂清洗，晾干后才能使用。两种方法比较，PVC 泡沫芯的表面处理方法简单、快捷、环保，且不会对工人的健康带来损害；

c. 固化方法：PVC 泡沫芯夹层板只需在烘箱中利用真空负压即可实现加压固化，而铝蜂窝芯夹层板需要使用热压罐加压固化。

以上制造过程的不同造成两种芯材夹层板的生产周期和制造成本的差异。由于铝蜂窝芯加工和表面处理的时间比 PVC 泡沫芯的要长，使得铝蜂窝芯夹层板的生产周期要长 30%。

铝蜂窝芯比 PVC 泡沫芯的材料成本高 35%~80%；工序多造成加工费用高；热压罐的使用费是烘箱使用费的 5 倍，合算下来，同种规格的铝蜂窝芯夹层板的制造成本是 PVC 泡沫芯夹层板的 2~3 倍。

7 结束语

7.1 PVC 泡沫芯夹层板的优势与劣势

2011 年 PVC 泡沫芯夹层板首次应用于卫星结构，但目前还没有普及。与铝蜂窝芯夹层板相比，PVC 泡沫芯夹层板的优势在于：各向同性；重量轻；工艺简单、生产周期短；制造成本低。

由于泡沫芯的剪切模量低于铝蜂窝芯的剪切模量，所以，与同种规格的铝蜂窝芯夹层板相比，PVC 泡沫芯夹层板的剪切刚度偏低，不适于主承力结构，可用于次承力结构。

7.2 PVC 泡沫芯结构的应用前景

除了以上优势外，PVC 泡沫芯还有铝蜂窝芯所不具备的两个方面性能和用途：利用热变形能力，可制造曲面结构；利用热导率低、隔热性好的优点，可制造隔热结构。

PVC 泡沫可通过热成型工艺在二维或三维方向上做变形。变形后的曲面，可以是可展开面，也可以是不可展开面。PVC 泡沫的热导率只有 0.029W/m K，

(下转第 6 页)

