

# 航空航天夹层结构抗冲击性能的研究现状\*

## Research Review on Anti-Impact Property of Sandwich Structures in Aerospace

北京工业大学机电学院 林晓虎 杨庆生

**[摘要]** 随着航空航天科技的迅猛发展,人们对高性能工程材料的设计与制备提出了更高的要求,夹层结构因其具有良好的抗冲击性能,得到了广泛的应用。简要介绍了目前航空航天上主要应用的几种夹层结构的抗冲击性能的研究现状,分析比较几种夹层结构的抗冲击性能,为航空航天夹层结构抗冲击性能的设计和研发提供参考。

**关键词:** 夹层结构 抗冲击性能 泡沫 蜂窝 点阵

**[ABSTRACT]** With rapid development of aerospace technology, the sandwich structures with excellent performance have been widely applied. The anti-impact property of three types of sandwich structures applied in aerospace are briefly introduced. Then the anti-impact property of different sandwich structures are analyzed. The design and research of anti-impact behavior of the sandwich structures in aerospace is provided for reference.

**Keywords:** Sandwich structure Anti-impact property Foam Honeycomb Lattice

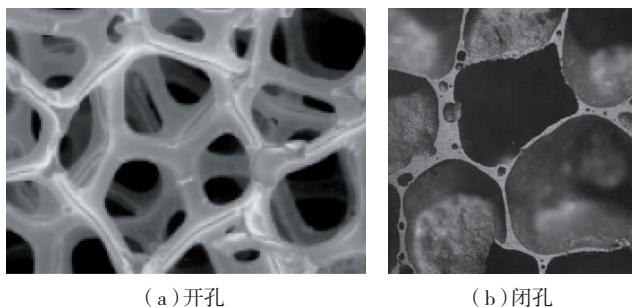
典型的夹层结构由上下2块刚度大、强度高、厚度薄的面板和密度较低的夹芯层组成。在横向载荷作用下,其面板主要承受载荷的弯曲和拉伸,芯层承受载荷的剪切作用,芯材的力学作用机理是连接面层使之成为整体构件,让薄而强的面层在承担较高拉压应力的同时不发生屈曲,并将剪切力从面层传向内层。这种承载形式的分工很好地提高了结构自身的承载效率,相对于等质量的实体板,夹层结构具有较高的比刚度和比强度。

目前,航空航天上主要应用的夹层结构有:泡沫夹层结构、蜂窝夹层结构、点阵夹层结构等。其中蜂窝夹层结构和泡沫夹层结构已经应用于航空航天,而点阵夹层结构被认为是最有前景的新型先进轻质超强韧结构,正逐步得到应用。

## 1 航空航天夹层结构的类型

### 1.1 泡沫夹层结构

泡沫材料是一种结构内部含有大量孔隙的、功能与结构一体化的新型材料。从结构上可分为通孔和闭孔泡沫2种<sup>[1-2]</sup>,如图1所示。前者含有大量独立存在的气孔,而后者则是连续贯通的三维多孔结构。



(a) 开孔

(b) 闭孔

图1 开孔和闭孔泡沫材料

Fig.1 Open-cell foam materials and closed-cell foam materials

泡沫材料的制备方法主要为发泡法、烧结法、铸造法和沉积法等<sup>[1]</sup>。

泡沫夹层结构已广泛应用于航空航天器部件,如:飞机起落架舱门、雷达罩、地板、发动机短舱、控制面板等<sup>[3]</sup>;空客已将 Alcan 公司出产 AirexR80 泡沫夹层结构用于民用航空器; AirexR82 泡沫因其具有优秀的动力、静力性能,使用温度范围大,耐水性好等特点,被空客用于 A330 飞机和 A340 飞机的各种内部部件<sup>[4]</sup>。

### 1.2 蜂窝夹层结构

蜂窝夹层结构分为金属蜂窝夹层结构和非金属蜂窝夹层结构。金属蜂窝通常用铝合金箔制造,常用的厚度是 0.03~0.05mm<sup>[1]</sup>。非金属蜂窝常用的材料有纸、玻璃布、塑料和陶瓷等。

在航空方面,美国波音公司将铝蜂窝夹层结构用于 F-15 战斗机的前缘、后缘、副翼及襟翼;欧洲直升机工业公司用夹层结构制造 EH101 直升机旋翼;国产直九直升机 Nomex 蜂窝夹层结构的用量也占到了整机覆盖面积的 80%;波音 747 客机机身圆柱壳结构主要采用 Nomex 材料蜂窝夹层结构形式<sup>[5]</sup>;波音 757/767 的外部

\* 国家自然科学基金项目(10872011,11172012);北京市自然科学基金项目(3092006);教育部博士点基金(201011103110005)资助。

结构有 46% 采用蜂窝夹层结构形式<sup>[5]</sup>。

在航天方面<sup>[6]</sup>,1969年,美国阿波罗号宇宙飞船的太空舱采用了面板为钢质材料、芯层为铝蜂窝的夹层结构,这种金属材料的夹层结构既满足了太空舱重量轻的条件,又能保证在发射和着陆时结构的强度要求;美国的“哥伦比亚”号航天飞机的中部机身舱门采用了石墨/环氧蒙皮和 Nomex 蜂窝夹层结构;国际通信卫星 5 的中心推力筒壳体使用了碳纤维/环氧蒙皮和铝蜂窝的夹层结构;我国“风云三号”卫星推进舱和服务舱的承力筒采用了碳纤维复合材料蒙皮和蜂窝组成的夹层结构等。

### 1.3 点阵夹层结构

哈佛大学的 Evans 教授、剑桥大学的 Ashby 教授、麻省理工的 Gibson 教授等人最先提出了点阵夹层结构的概念,也称为“类桁架结构”,是一种具有新型高效结构构型的材料,具有质量轻、承载能力高、密度低、抗剪强度高特点,在航空航天领域具有良好的应用前景。

点阵夹层结构是指点阵材料与上下面板结合而成的夹层结构,其可以分为两大类<sup>[7]</sup>:二维点阵夹层结构即格栅夹层结构和三维点阵夹层结构。

格栅夹层结构<sup>[7]</sup>按芯层单元形状可以分为如下类型:六边形胞元、四边形胞元、米字型胞元、Kagome 胞元、三角形胞元和金刚石形胞元格栅夹层结构。

三维点阵夹层结构按照芯层材料的几何构型可分为四面体结构、金字塔结构、3 维(3D)-Kagome 结构<sup>[8]</sup>以及编织物结构等拓扑结构。

点阵夹层结构芯层的制备方法主要有<sup>[7]</sup>:熔模铸造、冲孔网冲压-钎焊法、钢板网折叠-钎焊法、三维编织法等,国外报道的采用折叠铝板网制备金字塔点阵和 X 型芯体的技术,由于其兼具较低的成本以及可以规模化大面积生产的技术特点得到大规模的应用。

## 2 夹层结构的抗冲击性能研究

夹层结构在航天航空飞行器结构被广泛应用,在服役过程中不可避免受到外来飞行物的冲击,使结构发生严重变形,甚至被侵彻与贯穿而失效,因此对夹层结构冲击性能的研究越来越重要<sup>[9]</sup>。

尽管夹层结构的试验研究<sup>[10-11]</sup>可以提供一些信息,但是由于冲击现象涉及到很多参数,试验研究费时,且成本较高,更主要的是有许多信息是无法采用试验方法测得。为了减少研究成本和时间,有必要使用数值模拟方法研究夹层结构的抗冲击性能。Xue 等<sup>[12]</sup>借助有限元数值仿真初步分析了四棱锥芯层夹层结构的抗冲击特性,并指出与等质量的实体板相比,夹层结构具有更好的抗冲击性能。

### 2.1 泡沫夹层结构的抗冲击性能

泡沫夹层结构因其面板较薄,主要为泡沫芯体,这种结构密度小、重量轻,具有良好的抗冲击性能、优越的吸能减振特性,但其抗弯曲、抗拉伸、抗剪切性能差,不适用于承载构件<sup>[13]</sup>。

泡沫材料具有良好的压缩性<sup>[14]</sup>,在航天器的回收系统等领域有广泛的应用,其结构尤以泡沫填充圆柱管结构居多。Meo 等人<sup>[15]</sup>利用 LS-DYNA3D 分析了夹芯板结构的抗冲击性能(图 2、图 3)<sup>[15]</sup>,其面板使用了 Chang-Chang 失效准则来预测损伤。桂良进等<sup>[16]</sup>研究表明:在泡沫实体材料与管壁材料屈服极限相等时,泡沫材料的相对密度对比吸能有显著的影响;当圆管几何参数  $r/t$  一定时,泡沫材料的相对密度对比吸能有着显著的影响,相对密度并非越大越好,而是取某个值时比吸能最大;同时,提高泡沫实体材料与管壁材料屈服极限之比,可有效提高比吸能之比。

通过模拟结果表明<sup>[17]</sup>,给夹层结构增加面板厚度,芯层厚度或芯层密度均能有效改善其吸能效果。因此,在工程防护结构中,适当提高芯层厚度、芯层密度和面板厚度可以更好地改善泡沫夹层板的抗侵彻性能。

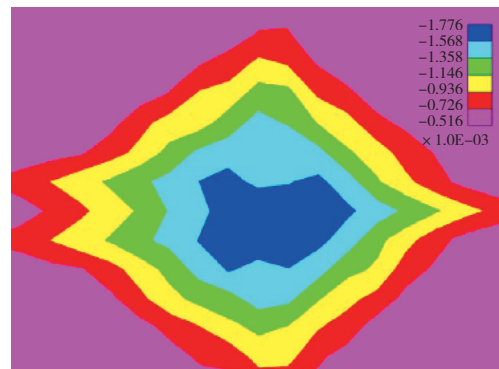


图2 泡沫夹层板厚度方向位移

Fig.2 Foam sandwich panels through thickness displacement

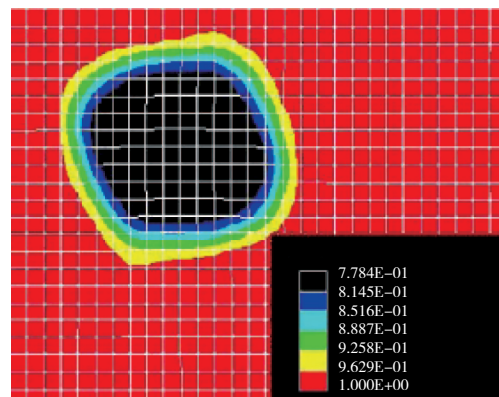


图3 泡沫夹层板破坏区域(0-破坏,1-未破坏)

Fig.3 Damage area of foam sandwich panels (0-failed, 1-unfailed)

## 2.2 蜂窝夹层结构的抗冲击性能

在航空航天飞行器承载构件和能量吸收构件中,蜂窝的通透方向垂直于夹层板板面,从而使得全部蜂窝材料都用到增强芯层的抗剪切能力上,大大增强了夹层结构的承载能力和抗冲击能力。

Ruan 等<sup>[18]</sup>采用 ABAQUS 程序研究了规则蜂窝结构的面内动态冲击问题,模拟结果发现,改变孔壁厚度和冲击速度,结构会出现“X”和“V”形的变形。分析还发现结构的平台应力与相对密度之间满足立方的关系;当冲击速度很大时,甚至平台应力与相对密度间满足平方的关系。Tan 等<sup>[19]</sup>在有关泡沫铝动态压缩强度特性的研究中采用有限单元法和简单的二维 voronoi 蜂窝材料模型相结合的方法图解了为什么伴随多孔固体的“冲击”压缩有较多的能量消耗的问题。Zheng 等<sup>[20]</sup>研究了泡孔形状的不规则性和冲击速度对变形模态和平台应力的影响。研究结果显示,增加泡孔的不规则程度将导致平台应力的增加,从而可改善其能量吸收能力。Li 等<sup>[21]</sup>研究的重点是规则六边形蜂窝材料及采用随机扰乱规则六边形蜂窝材料的方法形成的随机结构(胞孔形状的非规则排列和孔壁厚度的非均匀性)的动力特性(平台应力、应变能密度和初始应变等)。其思想是将采用随机扰乱规则六边形蜂窝形成的模型作为规则六边形蜂窝材料的不完整性模型。发现在较低的冲击速度下,平台应力和密实化应变能随着模型不规则度的增加反而减小。然而,Zheng<sup>[20]</sup>和 Li<sup>[21]</sup>得出了不一致的结论,有必要对蜂窝材料的动态特性进行系统深入的研究。Xue 和 Hutchinson<sup>[22]</sup>研究单轴冲击载荷下方形蜂窝夹层板的力学响应,并讨论了连续性模型的应用。Zhang 和 Cheng<sup>[23]</sup>数值模拟了有限个数蜂窝轴向冲击下能量吸收效果,并讨论了该理论模型拓延到无限多个蜂窝的可行性。

与实体材料不同,蜂窝材料内部微结构的存在,使得其性能不仅取决于基体材料的特性,而且在很大程度上依赖于微胞元的几何拓扑结构。尤其在冲击载荷的作用下,载荷的高频成分将控制结构的动态响应,胞元的空间拓扑结构对材料局部动态应力演变的影响变得越来显著。

蜂窝夹芯层胞元的形状对蜂窝材料的冲击动力学性能有很大的影响<sup>[24]</sup>:如三角形和四边形胞元蜂窝材料在不同冲击速度下的平台应力(图4)和单位质量吸收的能量(图5)。

由图可以看出<sup>[24]</sup>三角形蜂窝材料的平台应力值大于正方形蜂窝材料的相应值,在压缩相同位移的情况下,单位质量三角形胞元比四边形吸量能力大。同时,胞元形状的不同改变了蜂窝材料中应力波的局部传播

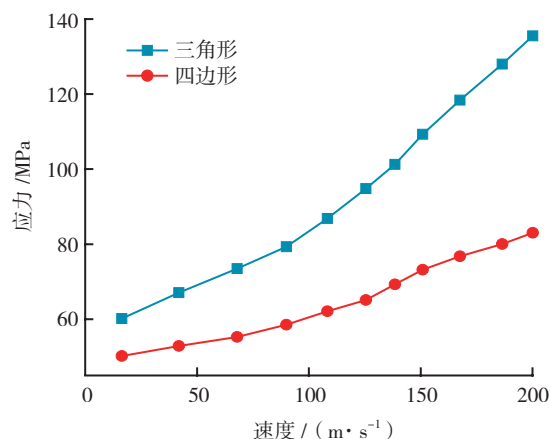


图4 不同速度下三角形和四边形胞元平台应力的比较  
Fig.4 Plateau stress comparison of triangle and quadrilateral cell at different speeds

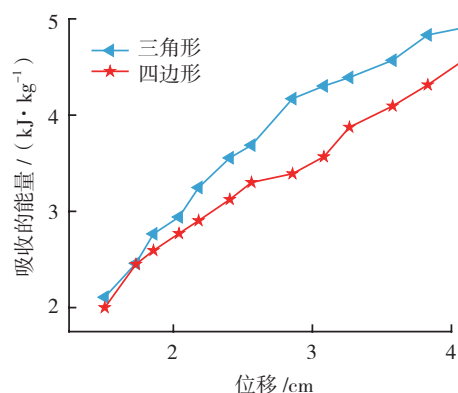


图5 单位质量三角形和四边形胞元吸收的能量对比  
Fig.5 Energy absorption ability comparison of triangle and quadrilateral cell per unit mass

特性,使材料局部的动态变形模式发生变化,进而对整体结构的动力学响应有很大的影响。

因此,不同的夹芯层胞元形状对蜂窝夹芯层结构吸能效果有很大不同,可通过设计夹芯层胞元的形状来满足不同抗冲击性设计的要求。

## 2.3 点阵夹层结构的抗冲击性能

如图6所示的3种点阵夹层结构可有效用于装载及承载夹层板中芯材结构的开孔桁架点阵结构。研究表明<sup>[25]</sup>,在高强度载荷作用下,这些结构具有明显减弱脉冲传播及峰值压力传播的作用。

Wallach 等<sup>[26]</sup>采用试验手段和有限元分析相结合,

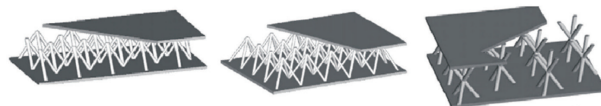


图6 典型的点阵夹层结构<sup>[8]</sup>  
Fig.6 Typical lattice sandwich structures

研究了表征金字塔型点阵夹芯板的强度和刚度。有研究者<sup>[27-28]</sup>从试验方面初步研究了多种复合超轻结构三明治板受圆球形弹丸作用时的抗侵彻性能,指出:加入陶瓷及环氧树脂的多材料复合三明治结构,具有优良的抗侵彻性能。

金字塔结构<sup>[29-31]</sup>由于其结构的特殊性可实现对弹丸的偏航作用,此因素对提高整体三明治板的抗侵彻性能有着重要作用。

通过分析,我们发现对于空心金字塔结构夹芯板受弹丸侵彻作用过程中,弹丸在与上下面板作用时速度下降最为明显(图7),其中下面板吸收能量最大,可见整个结构主要以材料的塑性变形能吸收弹丸动能,位于中间的金字塔点阵结构由于质量轻、体积小、杆系结构等原因,产生塑性变形能最小,而弹丸接触上面板时弹头形态完整、速度高,故作用时间短,所以产生变形能也较小;弹丸到达下面板时,由于之前作用,弹丸产生销蚀和墩粗现象,速度也明显下降,故与下面板作用时间最长,下面板变形最大,吸收能量也最多。

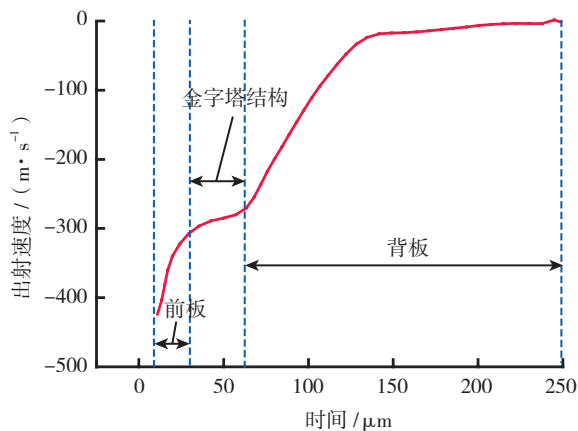


图7 空心金字塔结构受弹丸侵彻作用下速度衰减图<sup>[29]</sup>

Fig.7 Velocity decay of hollow pyramid structure under projectile penetration

### 3 夹层结构的抗冲击性能比较

不同夹层结构在抗冲击性能、减重效果、加工难易程度、力学性能可设计性等方面有很大不同。一般来说,夹层结构抗冲击性能优越于单面板结构<sup>[32]</sup>,另外,夹层结构中不同形状的夹芯层胞元对夹芯层结构吸能效果有很大影响,可通过设计夹芯层胞元的形状来满足不同抗冲击性设计的要求。

从抗冲击性能上来说:(1)在单位体积或单位质量吸收冲击能量较低时,采用蜂窝夹层结构具有优势<sup>[28]</sup>;点阵夹层结构更适合于要求单位体积或单位质量吸收冲击能量较高的工况;(2)在同等重量下点阵材料比无序微结构金属泡沫具有更好的抗冲击性能;(3)点阵夹

层结构与蜂窝夹层结构的结构承载效率相当<sup>[31]</sup>。

从减重效果上来说,虽然点阵夹层结构本身减重效果与蜂窝和泡沫夹层结构相当,但它可以在不破坏整体结构的完整性和承载能力下,为航空航天辅助设备提供一定的安装空间,且其本身的结构决定了有良好的散热性能。

从可加工性上来说,点阵材料芯层的加工逐步实现自动化后,蜂窝夹层结构相比其他2种夹层结构加工相对复杂。

夹层结构因其良好的抗冲击性能在航空航天上得到了广泛的应用,但夹层结构局部变形和局部稳定性等问题需要做进一步的探讨。

### 4 结束语

目前,夹层结构的抗冲击性能研究多以金属材料为研究对象,而复合材料在减轻重量、耐腐蚀以及提高抗冲击性能方面具有很好的潜能。但复合材料在受到冲击力作用时,往往首先发生层间破坏,结构中的极小分层就可能引起局部失稳<sup>[33]</sup>。

在航空航天夹层结构中,当冲击速度小于500m/s,使用金属点阵结构作为防护结构具有更大的优势;但空间撞击的速度一般高于1000m/s,在这种情况下,使用碳纤维点阵夹芯结构作为外侧的防护结构更为合理,待冲击速度降到较低的范围后,再使用金属点阵夹芯结构进行防护便能够达到更好的防护效果<sup>[34]</sup>。

因此,应根据航空航天工程实际需求,综合考虑夹层结构在结构承载效率、可加工性、减重、抗冲击性能等影响因素来设计制备需要的结构。

### 参考文献

- [1] 杨亚政,杨嘉陵,曾涛,等. 轻质多孔材料研究进展. 力学季刊,2007,28(4):503-516.
- [2] Evans A G, Hutchinson J W, Fleck N A, et al. The topological design of multifunctional cellular metals. Materials Science,2001,46(3-4):309-327.
- [3] 胡培. 飞机夹层结构的设计和泡沫芯材的选择. 航空制造技术,2010(17):94-96.
- [4] 李涛,陈蔚,成理,等. 泡沫夹层结构复合泡材料的应用与发展. 科技创新导报,2009(14):3-5.
- [5] Bitzer TN. Recent honeycomb core developments in sandwich constructions 4//Proceeding of 4th International Conference Sandwich Constructions.1998: 555-563.
- [6] 刘均. 方形蜂窝夹层结构振动与冲击响应分析[D]. 武汉:华中科技大学,2009.

本文共有参考文献34篇,因篇幅有限,未能全部列出,如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 夏宛)