纤维增强复合材料蜂窝结构的研究进展

韦兴宇^{1,2}, 熊健^{1,2*}, 王杰³, 徐武⁴

1. 哈尔滨工业大学复合材料与结构研究所, 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨工业大学特种环境复合材料技术国家级重点实验室, 哈尔滨 150080;

3. 上海飞机设计研究所, 上海 201210;

4. 上海交通大学航空航天学院, 上海 200240

* E-mail: jx@hit.edu.cn

doi: 10.1360/SST-2020-0208

在夹芯结构中, 轻质多孔材料可以让面板远离中性层, 从而使夹芯结构获得最大的抗弯能力. 蜂窝结构作为一种主要的轻质多孔材料, 由于其可靠的力学性能和极佳的可设计性而被广泛地用于航空航天、车辆、船舶、建筑和机械工程等诸多领域. 采用纤维增强复合材料是开发具有优异力学性能的超轻蜂窝结构的有效方法. 近些年来, 使用这种轻质高强的纤维增强复合材料蜂窝来代替传统的铝蜂窝和芳纶纸蜂窝受到了许多学者的关注. 相较于金属、聚合物和芳纶纸等材料而言, 纤维增强复合材料具有高比强度、高比刚度、优异的抗疲劳性、抗腐蚀性以及耐高温等多种优势. 使用纤维增强复合材料蜂窝结构作为夹芯芯子在高超声速飞行器、远程火箭、远航货轮和防护系统等领域具备极大的应用潜力.

制备工艺是促进纤维增强复合材料蜂窝结构工程应用的关键因素, 目前主要有5种制备工艺: 热压成型工艺、真空辅助树脂传递成型工艺^[1]、嵌锁工艺、3D打印工艺和裁折法制备工艺^[2]. 热压成型工艺可以使蜂窝结构获得较好的成型质量; 真空辅助树脂传递成型工艺可以减少气泡对复合材料成型质量的影响^[1]; 嵌锁工艺可以简化复合材料结构的制备难度; 3D打印工艺可以通过混杂短纤维或采用连续长纤维对任意设计的结构进行打印; 裁折法制备工艺可以对复合材料

蜂窝结构进行连续化、工业化地制备^[2], 如图1(a)所示. 复合材料蜂窝芯子通过与面板相黏接可以得到全复合材料蜂窝夹芯结构, 如图1(b)所示.

科研工作者通过理论模型、仿真分析和实验验证等手段对多种构型的全复合材料蜂窝夹芯结构的面外压缩、面内压缩、面内剪切、弯曲、冲击和振动的力学性能进行了全面的研究. 研究发现复合材料蜂窝结构具有高比强度、高比刚度和优异的能量吸收性能, 但是复合材料纤维方向对其面外压缩性能及面内剪切性能有极大的影响. 通过绘制失效机制图获得了全复合材料蜂窝夹芯结构在不同载荷下的失效模式^[3], 如图1(c)所示. 在面外压缩载荷下, 蜂窝会发生压缩屈曲以及压缩破坏失效; 在面内剪切载荷下, 蜂窝会发生剪切屈曲和剪切破坏失效; 在侧压载荷下, 夹芯结构会发生面板弯曲、面板格间屈曲、面板压溃以及芯子宏观剪切屈曲失效; 在三点弯曲载荷下, 夹芯结构会发生芯子剪切屈曲、芯子剪切破坏、面芯脱黏、面板格间屈曲以及面板破坏失效. 通过对不同构型及工艺的全复合材料蜂窝夹芯结构力学性能及失效机制的汇总研究发现, 全复合材料蜂窝夹芯结构是一种适用于工程应用的理想选择.

此外, 由于复合材料具有可设计性强的优点^[4], 复合材料蜂窝结构还具备极大的多功能设计空间. 针对不同的工程背景和应用目标, 学者基于复合材料蜂窝

全文英文见: Wei X Y, Xiong J, Wang J, et al. New advances in fiber-reinforced composite honeycomb materials. Sci China Tech Sci, 2020, 63: 1348–1370, <https://doi.org/10.1007/s11431-020-1650-9>

图 1 (网络版彩图) (a) 裁折法制备工艺示意图^[2]; (b) 全复合材料蜂窝夹芯板; (c) 全复合材料蜂窝夹芯梁在三点弯曲载荷下的三维失效机制图^[3]

Figure 1 (Color online) (a) Schematic of fabricating process of the tailoring-folding method [2]; (b) fiber-reinforced sandwich panel with hexagonal honeycomb core; (c) the three-dimensional failure mechanism map for fiber-reinforced honeycomb sandwich beams under three-point-bending [3].

夹芯结构分别对导热性能、热膨胀性能、吸波性能和吸声性能进行了设计, 使得复合材料蜂窝结构不但具备良好的力学性能, 而且兼具多功能化的潜力。这就使得复合材料蜂窝结构存在广泛的应用空间。目前, 复合材料蜂窝结构在桥梁、航天部件、吸波装置以及

卫星结构中都有应用^[5]。但是依然有许多问题限制着复合材料蜂窝结构的发展。其中, 低价可控的制备工艺、有效的无损检测手段、针对任意曲面结构的设计方法、使用寿命分析手段以及回收方法等是其未来主要的发展方向。

参考文献

- Vitale J P, Francucci G, Xiong J, et al. Failure mode maps of natural and synthetic fiber reinforced composite sandwich panels. *Compos Part A-Appl Sci Manuf*, 2017, 94: 217–225
- Wei X, Li D, Xiong J. Fabrication and mechanical behaviors of an all-composite sandwich structure with a hexagon honeycomb core based on the tailoring-folding approach. *Compos Sci Tech*, 2019, 184: 107878
- Wei X, Wu Q, Gao Y, et al. Bending characteristics of all-composite hexagon honeycomb sandwich beams: Experimental tests and a three-dimensional failure mechanism map. *Mech Mater*, 2020, 148: 103401
- Yang W D, Li Y. Sound absorption performance of natural fibers and their composites. *Sci China Tech Sci*, 2012, 55: 2278–2283
- Sun F, Lai C, Fan H. Failure mode maps for composite anisogrid lattice sandwich cylinders under fundamental loads. *Compos Sci Tech*, 2017, 152: 149–158