碳纤维八面体骨架增强泡沫复合结构的制备及力学性能分析

徐香新

(东北大学理学院, 沈阳 110819)

摘要: 设计了一种不需加装面板的碳纤维八面体骨架增强泡沫复合结构,介绍了碳纤维八面体骨架增强泡沫复合结构的制作工艺。分别从实验测试以及理论分析两个方面,获得了碳纤维八面体骨架增强泡沫复合结构的抗压强度及压缩模量等力学性能。研究结果表明:受边界效应影响,碳纤维八面体骨架增强泡沫复合结构的抗压强度及压缩模量明显降低,实测抗压强度介于理论最大值与最小值,压缩模量甚至低于最小值。对比其他类型的碳纤维-泡沫复合结构,碳纤维八面体骨架增强泡沫复合结构在抗压强度与压缩模量上具有一定优势。碳纤维八面体骨架增强泡沫复合结构具有近乎各向同性的力学性能,密度低于水,耐腐蚀性高,在航海领域的应用前景广泛。

关键词: 碳纤维; 人工合成泡沫; 八面体骨架; 复合材料; 力学性能

中图分类号: TB332 **文献标识码**: A **文章编号**: 2096-8000(2020)06-0062-06

随着国防科学、航空航天、军舰船舶等领域的蓬勃发展,复合材料凭借其轻质、高强、抗疲劳等优点,成为了新一代材料的主体[1,13]。点阵夹芯结构作为一种具有高强度、高模量的轻质结构被广泛应用于航空航天等领域[2,3]。当下常见的点阵夹芯结构主要包括 3 种[4-6]:四面体点阵夹芯结构、金字塔点阵夹芯结构以及 Kagome 点阵夹芯结构。八面体点阵夹芯结构目前研究较少,而且传统的夹芯结构,芯材与面板之间的连接性能薄弱,加载过程中连接点会出现应力集中的现象[7]。针对这一情况,本文设计了一种无面板的八面体点阵夹芯复合结构。本复合结构以人工合成超轻泡沫为基体,在泡沫内部用碳纤维搭建八面体拓扑构型骨架,形成碳纤维八面体骨架增强泡沫复合结构。本文重点描述了碳纤维八面体骨架增强泡沫复合结构的制备工艺,并分别从实验测试与理论分析两个方面对比了其抗压强度、弹性模量等力学性能。

1 碳纤维八面体骨架增强泡沫复合结构的设计、制作与分析

1.1 设计方案

碳纤维八面体骨架增强泡沫复合结构示意图如图 1 所示。本复合结构需要分层组装,装配过程需要如下 3 个步骤:

(1)使用人工合成泡沫形成空间支撑物,作为骨架的附着体。泡沫需要在特定的位置通过机械加工(车床、钻床)的方式开孔、挖槽,形成型模。

(2)堆叠模具层,将碳纤维束植入加工好的型模中,形成八面体拓扑结构。

(3)使用 VARTM(真空辅助树脂传递模塑)工艺将环氧树脂填充到整个复合结构中。

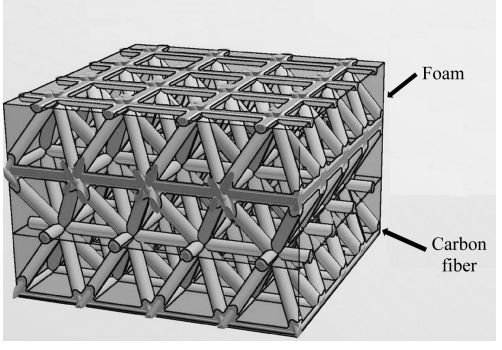


图 1 碳纤维八面体骨架增强泡沫复合结构示意图

Fig. 1 Diagram of carbon fiber skeleton reinforced hybrid composite

1.2 人工合成泡沫制备及力学性能

为了避免树脂渗入泡沫,只能选取闭孔泡沫作为八面体增强复合结构的基体。本文使用掺加空心玻璃微球的 SC1 环氧树脂人工合成泡沫。该合成泡沫是通过混合 IM30K 级空心玻璃微球(秦皇岛玻璃微珠有限公司)与高强度环氧树脂 SC1(廊坊化工有限责任公司)得到的。IM-30K 级玻璃球由钠钙硼硅酸盐玻璃制成,具有抗压强度高、密度低等优点,其平均粒径为 18 μm,真实密度为 600 kg/m^3,抗碎强

收稿日期: 2019-09-18

基金项目: 中央高校基本科研业务费资助项目 (02060032119012)

作者简介: 徐香新 (1990-), 男, 硕士, 实验师, 主要从事复合材料性能及力学行为方面的研究。

度为 195 MPa。所制备的合成泡沫中玻璃空心微球的体积分数在 21%~65%之间变动。

制作 SC1 树脂合成泡沫时,首先根据体积分数,将空心玻璃微球和环氧树脂倒入方形铝制模具中,再通过机械搅拌将树脂和微球完全混合,直至形成一种粘性的白色糊状物。接下来将混合物在室温下固化 24 h,然后再放置在 71 ℃下的烘干箱中烘干 4 h。固化完成后,将混合泡沫从模具中取出,用切割机将其加工成规则形状,用于准静态压缩实验。

将泡沫试样在 23 ℃室温下,以 2×10^{-4} s^{-1}的应变速率进行压缩实验。图 2 分别给出了 21%vol、39%vol、60%vol、65%vol 微球合成泡沫的应力-应变曲线。从应力-应变曲线可以看出,随着玻璃微球体积分数的增加,泡沫的韧性逐渐降低。

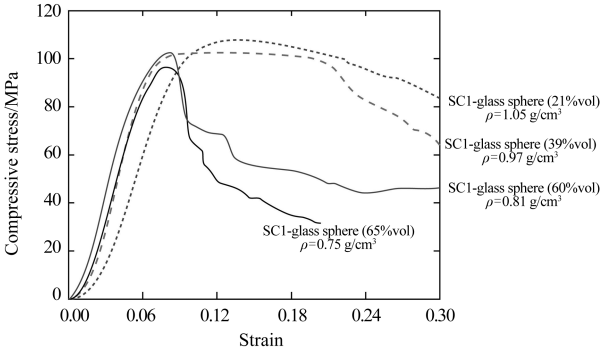


图 2　21%vol、39%vol、60%vol、65%vol 微球合成泡沫的应力-应变曲线

Fig. 2　Compressive stress-strain curves for syntactic foams with microsphere volume fractions of 21%vol, 39%vol, 60%vol and 65%vol respectively

有效减重是轻质结构未来的发展方向[14],而密度低于水的结构将会得到工程领域更高的关注[15],特别是在航海领域的潜在应用,因为密度小于水的材料或结构更加便于工程设计(不需要考虑后续的打孔等工艺使得材料悬浮于水面之上),且高分子材料又有极好的耐海水腐蚀性。鉴于上述原因,本文仅讨论 65vol%微球合成泡沫作为基体的碳纤维八面体骨架增强泡沫复合结构性能,该成分的八面体骨架增强复合结构的密度小于水。表 1 给出了 65%vol 微球合成泡沫的力学性能。

表 1　65%vol 微球合成泡沫的力学性能

Table 1　Mechanical properties of 65%vol microsphere syntactic foam

参　数	密度/kg·m^{-3}	抗压强度/MPa	压缩弹性模量/GPa
实验结果	750	97	1.62

1.3　八面体骨架结构制备

搭建八面体骨架首先需要制备泡沫型模,将制备好的合成泡沫(见 1.2)通过机械切割、钻孔加工后,制成外型尺寸为 40 mm×40 mm×4 mm 的型模。鉴于玻璃空心球的外径大约为 18 μm,而机械加工出的样品模块尺寸为 40 mm×40 mm×4 mm,通孔直径为 2 mm,这些尺寸为玻璃微球直径的 100 倍~200 倍,因此机械加工对于所制备的合成泡沫的闭孔率影响微乎其微(所破坏的玻璃微球仅存在于产品表面),而且对后续的 VARTM 工艺和压缩性能的影响可忽略不计。

加工完成后,堆叠五层合成泡沫型模,每层型模均已开孔,五层型模的内部通孔形成八面体拓扑构型的通道。使用机械针将碳纤维丝束穿入并充填到上述八面体构型的通道中。每个通道中需要四束 12k(每束 12000 根)IM7 碳纤维。不同方向的碳纤维丝束在利用机械针引入模型孔隙后利用卡钳进行了拉直及固定,而随后其他方向的碳纤维丝束在穿过结点并穿出模型孔洞后也进行了拉直操作,从而保证碳纤维丝束的平直。结点处不同方向的碳纤维丝束相互穿插,从而形成理想节点结构[11]。

完成上述操作之后,修剪型模外部多余的碳纤维,完成样品制备。

1.4　VARTM 工艺树脂注入

将 SC1 环氧树脂注入制备好的样品中(见 1.3),填充样品内部间隙。SC1 树脂的粘度较低,流动性好,可以很好地渗透到样品内部。灌注的过程如图 3 所示。灌注和固化过程在真空皿中进行,随后将样品放入 71 ℃烘干箱后,烘干 4 h,进一步固化,用于提高 SC1 树脂的强度。完成灌注和固化后,脱模、修剪试样,碳纤维八面体骨架增强泡沫复合结构制作完成。图 4 给出了制备完成后碳纤维八面体骨架增强泡沫复合结构的试样图。

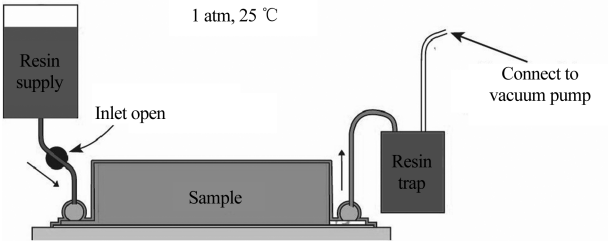


图 3　碳纤维八面体骨架增强泡沫复合结构渗透过程

Fig. 3　The infiltration setup for carbon fiber skeleton reinforced hybrid composite

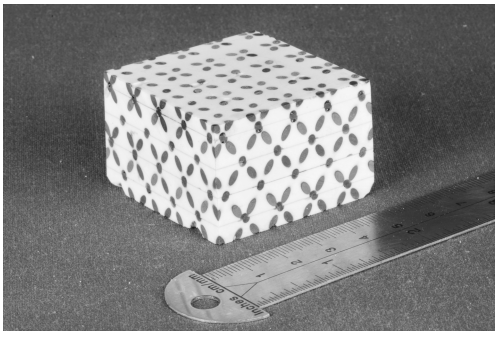


图 4 碳纤维八面体骨架增强泡沫复合结构试样图

Fig. 4 Photo of carbon fiber skeleton reinforced hybrid composite

1.5 碳纤维八面体骨架增强泡沫复合结构密度

碳纤维八面体骨架增强泡沫复合结构单胞如图 5 所示,单胞内碳纤维杆的直径 d 为 2 mm,长度 l 为 10 mm(节点之间间距相同),碳纤维杆的倾斜角 ω 为 45°。用碳纤维杆所占体积除以单胞体积,可以得到骨架的相对密度 $\bar{\rho}$:

$$\bar{\rho}=6\sqrt{2}\pi\left(\frac{r}{l}\right)^2 \tag{1}$$

其中:r 为碳纤维杆的半径;因此单胞的相对密度 $\bar{\rho}$ 为 26.4%。将骨架单元的密度与周围泡沫材料的密度相结合,可以得到碳纤维八面体骨架增强泡沫复合结构的总密度 ρ。假设单胞内没有被杆件占据的空间均被泡沫占据,总密度可以写为:

$$\rho=(\bar{\rho}\rho_t)+(1-\bar{\rho})\rho_f \tag{2}$$

其中:ρ_t 为碳纤维杆的密度,密度为 1450 kg/m^3;ρ_f 为泡沫的密度。

值得一提的是通过公式(2)计算的碳纤维八面体骨架增强泡沫复合结构的密度为 934 kg/m^3,实测密度为 932 kg/m^3,两者之间高度吻合。

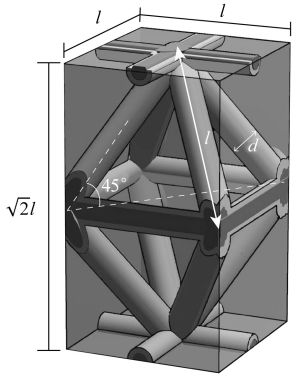


图 5 碳纤维八面体骨架增强泡沫复合结构单胞

Fig. 5 Unit cell of carbon fiber skeleton reinforced hybrid composite

2 实验分析与讨论

2.1 碳纤维压缩实验性能分析

为了随后分析碳纤维八面体骨架增强泡沫复合结构的力学性能,需要先分析碳纤维骨架的力学性能。为此制备了碳纤维压缩试样,进行压缩实验。将包含 4 束(12k)IM7 碳纤维束放入直径为 2 mm 的玻璃管中,并在玻璃管中注入 SC1 环氧树脂。当树脂固化后,用机械方式去除玻璃管。将固化后的圆柱形的碳纤维 SC1 树脂基复合材料样品切割成长度为 20 mm 的试样。为防止试样在压缩过程中发生尾端开裂,把切割好的试样封装在铝合金端帽里,并在两端涂上环氧树脂以固定。此时试样的碳纤维体积比为 41%,该体积比与碳纤维八面体骨架相同。然后以 2×10^{-4} s^{-1}的应变速率进行压缩实验,测得实验结果如表 2 所示。

表 2 碳纤维树脂基复合材料力学性能

Table 2 Mechanical properties of carbon fiber composites

参 数	密度/kg·m^{-3}	抗压强度/MPa	压缩弹性模量/GPa
实验结果	1450	470±35	85±4

2.2 碳纤维八面体骨架增强泡沫复合结构压缩实验

根据 ASTM-C365 标准试验方法[9],使用 300 kN 万能试验机(深圳万测 ETM305D)对碳纤维八面体骨架增强泡沫复合结构试样进行准静态压缩实验,碳纤维八面体骨架增强泡沫复合结构在长宽方向有 4 个单胞,高度方向有 1.5 个单胞。在 23 ℃室温下,以名义应变速率 2×10^{-4} s^{-1}进行压缩实验。在应力-应变曲线的名义弹性区内卸载,测量试样的弹性模量。图 6 中实线为碳纤维八面体骨架增强泡沫复合结构应力-应变曲线,虚线为去掉八面体骨架的镂空合成泡沫应力-应变曲线。镂空的合成泡沫应力-应变曲线相比完整的合成泡沫应力-应变曲线(见图 2)缩小了 26.4%(见 1.5)。二者的应力-应变曲线初始阶段均为线弹性,到达峰值后发生屈服,随后强度下降,出现应力平台。表 3 列出了压缩实验的实验结果。

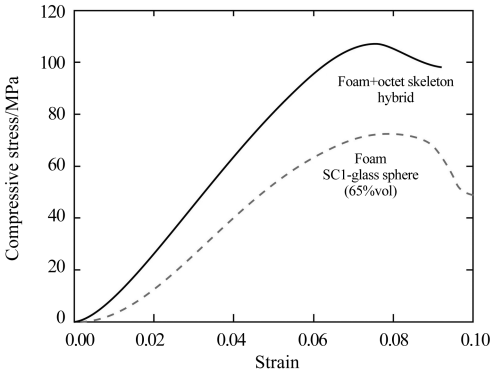


图 6　碳纤维八面体骨架增强泡沫复合结构与去掉八面体骨架的镂空合成泡沫的应力-应变曲线

Fig. 6　Compressive stress-strain responses of carbon fiber skeleton reinforced hybrid composite and the structure without carbon fiber skeleton

表 3　碳纤维八面体骨架增强泡沫复合结构力学性能

Table 3　Mechanical properties of carbon fiber skeleton reinforced hybrid composite

参　数	密度/kg·m^{-3}	抗压强度/MPa	压缩弹性模量/MPa
实验结果	932	104	1670

3　边界效应

此外,在进行碳纤维八面体骨架增强泡沫复合结构压缩实验时,发现试样边界处的骨架不与压板接触,这部分试样没有任何承载,实验过程中存在显著的边界效应。这种边界效应同样发现于菱形结构[10],文献[10]详细地描述了 Knockdown 效应对压缩模量及压缩强度的影响。根据该文献,骨架的强度和弹模与试样的长高比以及杆件倾斜角有关,Knockdown 因子 K 可以表示为:

$$K=1-\left(\frac{1}{A}\tan\omega\right) \tag{3}$$

其中:A 为长高比;ω 为纤维杆倾斜角。在估算骨架的强度和弹模时,Knockdown 因子可以用来估算二者的下限值。对于本文所描述的八面体骨架增强复合结构,将骨架中斜零杆的数目除以斜纤维杆件的总数即可得到 Knockdown 因子 K。假设节点不受力,则 192 个碳纤维斜杆中除去边缘斜杆,仅有 84 个为受力斜杆,$K\approx0.56$,说明在八面体骨架增强复合试样中 Knockdown 效应显著。

研究表明八面体骨架在进行压缩实验时,骨架的弹性模量取决于骨架材料的模量 E_s 以及骨架的相对密度 $\bar{\rho}$[11]。骨架弹性模量的上限值可表示为:

$$E_U=\frac{1}{9}\bar{\rho}E_S \tag{4}$$

对于碳纤维八面体骨架增强泡沫复合结构的弹性模量 E_{core},不仅要考虑骨架的弹性模量,还需考虑泡沫的弹性模量,根据混合物弹性模量计算准则,E_{core} 可以表示为下面的公式:

$$E_{coreU}=(1-\bar{\rho})\,E_{foam}+E_U \tag{5}$$

其中 E_{foam} 为泡沫的弹性模量。结合 Knockdown 因子 K,可以得到更接近真实值的八面体骨架增强复合结构的弹性模量,计算公式如下所示:

$$E_{coreL}=(1-\bar{\rho})\,E_{foam}+KE_U \tag{6}$$

图 7(a)给出了碳纤维八面体骨架增强泡沫复合结构弹性模量的实验值与预估值的对比数据,由于试样切割不够平整、内部不够均匀等因素,造成实验值低于理论最小值,但同时也说明受边界效应的影响,碳纤维八面体骨架增强泡沫复合结构的压缩模量明显降低。

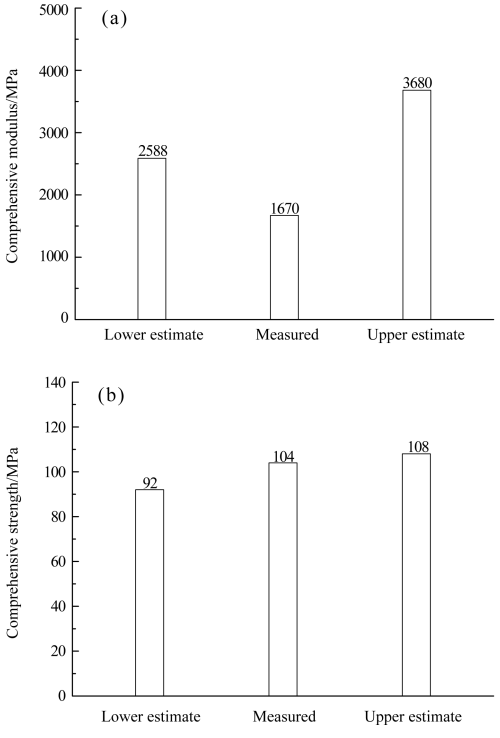


图 7　(a)测试模量与预估模量对比图

(b)测试强度与预估强度对比图

Fig. 7　(a) Comparison of measured modulus and estimate modulus

(b) Comparison of measured strength and estimate strength

当八面体骨架结构受压时,若杆件足够细长,骨架会因杆件的弹性屈曲而坍塌,相反骨架则会因杆

件的塑性微屈曲而坍塌,根据本实验中八面体骨架的几何尺寸(d=2 mm,l=10 mm),试样不会发生弹性屈曲。根据 Deshpande 等[11]的研究,本实验的试样骨架的抗压强度与母材的抗压强度有关,计算公式如下所示:

$$\sigma_{\text{lattice}} = 0.085\sigma_{\text{p}} \tag{7}$$

其中 σ_{p} 为母材的抗压强度,即上文中测试的碳纤维的微屈曲强度。根据混合物弹性模量计算准则,八面体骨架增强复合结构的抗压强度 σ_{coreU} 的上限表达式为:

$$\sigma_{\text{coreU}} = (1-\bar{\rho})\,\sigma_{\text{foam}} + \sigma_{\text{lattice}} \tag{8}$$

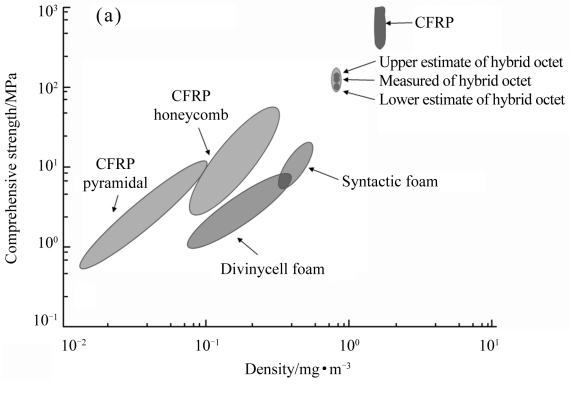
其中 σ_{foam} 为泡沫的抗压强度。同样,通过结合 Knock-down 因子 K,可以得到抗压强度 σ_{coreL} 的下限表达式:

$$\sigma_{\text{coreL}} = (1-\bar{\rho})\,\sigma_{\text{foam}} + K\sigma_{\text{lattice}} \tag{9}$$

图 7(b)给出了碳纤维八面体骨架增强泡沫复合结构抗压强度的测量值以及预估值。可以看出,碳纤维八面体骨架增强泡沫复合结构的实测抗压强度介于两个预估值之间,再次证明边界效应对小长高比试件的影响。

本文只测试了一个方向(z 方向)的力学性能;由于八面体骨架结构的力学性能近乎各向同性[11],其具有立方对称性,从而只有 3 个独立的刚度/柔度张量变量(C_{11}、C_{12}、C_{44}或 S_{11}、S_{12}、S_{44}),因此 3 个方向的弹性模量相同,即 $1/S_{11} = 1/S_{22} = 1/S_{33}$,从而对于足够大尺寸的样品(边界效应微小),其余两个方向的力学性能和 z 方向(本文所测试的方向)一致。

图 8 给出了八面体骨架增强复合结构抗压强度和弹性模量的 Ashby 材料性能图(对比数据出自文献[12]),可以看出八面体骨架增强复合结构的性能相比其他类型的碳纤维-泡沫复合结构在抗压强度与压缩模量上具有一定优势,八面体骨架增强复合结构拥有很广泛的应用前景。



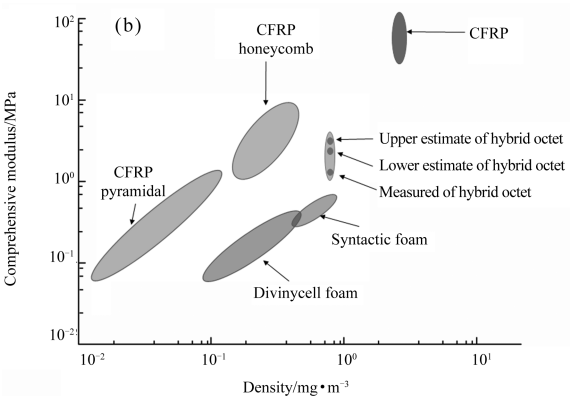


图 8 (a)八面体骨架增强复合结构与其他碳纤维复合材料结构抗压强度对比图与(b)八面体骨架增强复合结构与其他碳纤维复合材料结构压缩模量对比图

Fig. 8 Showing the comparison of (a) compressive strength and (b) compressive modulus of the hybrid octet lattice and other CFRP structures

4 小 结

(1)本文提出了一种不需加装面板的碳纤维八面体骨架增强泡沫复合结构的设计方案,并依此制作了碳纤维八面体骨架增强泡沫复合结构试样;

(2)对碳纤维八面体骨架增强复合结构分别进行了压缩测试,并获得了相应的抗压强度与弹性模量。其中碳纤维八面体骨架增强泡沫复合结构的抗压强度为 104 MPa,弹性模量为 1670 MPa。实验过程中存在显著的边界效应。将碳纤维八面体骨架增强泡沫复合结构的实验值与预估值相比对,比对结果显示,边界效应明显降低了八面体骨架增强复合结构的抗压强度与弹性模量;在日后应用过程中,可以增加长宽方向单胞的数目,减弱边界效应影响;

(3)碳纤维八面体骨架增强泡沫复合结构的优点在于其具有近乎各向同性的力学性能,密度低于水,且材料耐腐蚀性高,相比其他复合结构颇具竞争力,在航海领域的应用前景广泛。但是该结构的力学性能只有在产品尺寸足够大时才能充分表现出来。

参考文献

[1] 赓祥, 蔡殉. 材料科学基础[M]. 上海: 交通大学出版社, 2003.

[2] Deshpande V S, Fleck N A. Collapse of truss core sandwich beams in 3-point bending[J]. International Journal of Solids and Structures, 2001, 38: 6275-6305.

[3] Evans A G, Hutchinson J W, Fleck N A, et al. The topological design of multifunctional cellular metals[J]. Progress in Materials Science, 2001, 46(3): 309-327.

[4] Deshapande V S, Ashby M F, Fleck N A. Form topology bending

versus stretching dominated architectures [J]. Acta Materialia, 2001, 49(10): 1035-1040.
[5] 张卫红, 吴琼, 高彤. 周期性金属桁架夹芯板的力学性能研究进展[J]. 昆明理工大学学报: 理工版, 2005, 30(6): 24-28.
[6] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报, 2007, 24(1): 1-12.
[7] 钱海峰, 张振华, 牟金磊, 等. 金字塔点阵夹芯板单元结构准静态压缩性能研究[J]. 中国舰船研究, 2013(5): 46-51.
[8] ASTM. Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials: ASTM D3039/D3039M-14[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2014.
[9] ASTM. Standard test method for flatwise compressive properties of sandwich cores: ASTM C365/C365M-16[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2016.
[10] Queheillalt D T, Wadley H N G. Cellular metal lattices with hollow trusses[J]. Acta Materialia, 2005, 53(2): 303-313.
[11] Deshapande V S, Fleck N A, Ashby M F. Effective properties of the octet-truss lattice material[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2001, 49(8): 1747-1769.
[12] George T, Deshpande V S, Sharp K. Hybrid core carbon fiber composite sandwich panels: fabrication and mechanical response[J]. Composite structures, 2014, 108: 696-710.
[13] 沈观林, 胡更开, 刘彬. 复合材力力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
[14] 肖冰, 康凤, 胡传凯, 等. 国外轻质结构材料在国防工业中的应用[J]. 兵器材料科学与工程, 2011, 34(1): 94-97.
[15] 钦伦洋. 基于拓扑优化的船舶结构轻量化研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2016.

PREPARATION AND MECHANICAL PROPERTIES ANALYSIS OF CARBON FIBER SKELETON REINFORCED HYBRID COMPOSITE

XU Xiang-xin

(Department of Science, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: A kind of carbon fiber reinforced foam without panels for the hybrid octet lattice was designed and the fabrication technology of the hybrid octet lattice was introduced. The compressive strength and compressive modulus of carbon fiber skeleton reinforced hybrid composite were obtained from experimental test and theoretical analysis. The results show that the compressive strength and modulus of carbon fiber skeleton reinforced hybrid composite decrease significantly by boundary effect. The measured compressive strength is between the theoretical maximum and minimum, and the compressive modulus is even lower than the minimum. Compared with other types of carbon fiber-foam composite structures, carbon fiber skeleton reinforced hybrid composite have certain advantages in compressive strength and compressive modulus. Carbon fiber skeleton reinforced hybrid composite has the following advantages including nearly isotropic mechanical properties, and lower density than water and corrosion resistance. It has wide application prospects in the field of navigation.

Key words: carbon fiber; syntactic foam; octet lattice; composite material; mechanical properties