

# 三维整体中空复合材料的力学性能研究进展\*

郭章新<sup>1,2,3</sup>, 李忠贵<sup>1,2</sup>, 崔俊杰<sup>1,4</sup>, 朱明<sup>1,3</sup>, 贺奇<sup>1,3</sup>, 李永存<sup>1,4</sup>, 栾云博<sup>1,3</sup>

(1. 太原理工大学机械与运载工程学院应用力学研究所, 太原 030024;

2. 西安交通大学航天航空学院机械结构强度与振动国家重点实验室, 西安 710049;

3. 太原理工大学材料强度与结构冲击山西省重点实验室, 太原 030024;

4. 太原理工大学力学国家级实验教学示范中心, 太原 030024)

[摘要] 三维整体中空复合材料是一种新型的夹芯结构材料,是将芯材和上下面板交织连接在一起,芯材和面板构成一个整体。三维整体中空复合材料的面板与芯材为一体结构且一次固化成型,因此具有优异的抗分层、抗冲击、高损伤容限等性能。研究三维整体中空复合材料的力学性能对其结构设计与应用具有重要的指导意义。详细介绍了三维整体中空复合材料的平压性能、侧压性能、剪切性能、弯曲性能等力学性能的研究进展,提出目前研究存在的问题,以期以后的发展提供研究方向。

关键词: 三维整体中空复合材料; 平压性能; 侧压性能; 剪切性能; 弯曲性能; 冲击性能

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.04.022



郭章新

博士,副教授,主要从事复合材料及其结构的力学性能研究。发表论文20余篇,授权发明专利1项。

三维整体中空复合材料是由地经纱、纬纱以及连接并贯穿上下面板的绒经纱组成的一种新型夹芯复合材料,国外称为三明治结构(Sandwich structure)<sup>[1-2]</sup>,见图1<sup>[3]</sup>,其面板间的微孔可以作为聚物流体的通道,聚物流体“浸润”纤维束时可以瞬间吸收树脂。绒经纱和树脂可以自动成型,并可以设计其高度,固化成型为整体中空复合材料。三维整体中空复合材料为一体结构,并且芯材与上下面板之间一次固化成型,与传统的夹层复合材料相比,具有制造成本低、不易分层、耐冲击等优点<sup>[4]</sup>。三维整体中空复合材料因具有高的比强度、比刚度,特别是整体性、抗分层、抗冲击以及可设计性等优点,在航空航天、军工、船舶、

体育用品、交通和建筑等领域得到了广泛的应用<sup>[5-8]</sup>。研究三维整体中空复合材料的力学性能对其结构设计与应用具有重要指导意义。

祝成炎等<sup>[9]</sup>设计了多种经向截面为六边形的三维整体中空机织复合材料,并在改造的普通织机上织造成功。对比分析了试样的结构特点,研究了三维正交夹芯机织物孔形尺寸的影响因素,为三维整体中空机织复合材料的结构设计提供了参考。Mountasir等<sup>[10]</sup>阐述了大型三维(3D)热塑性复合材料作为编织间隔织物的开发和成功实施,以及三维多层织物连续制造的横向和纵向集成加强筋的中空复合材料的结构设计,如图2和图3所示<sup>[10]</sup>。研究表明,与具有纱线卷曲的机织织物相比,由

\* 基金项目: 国家自然科学基金(11602160, 11402160, 21501129); 山西省高等学校创新项目(2017117); 西安交通大学机械结构强度与振动国家重点实验室开放课题(SV2017-KF-01); 山西省“1331工程”重点创新团队项目。

三维多层机织织物制成的中空复合材料的力学性能明显提高。

本文主要从试验和有限元模拟两方面介绍了三维整体中空复合材料的平压性能、侧压性能、剪切性能、弯曲性能以及冲击性能等力学性能研究进展。

### 中空复合材料的平压性能

Drechsler 等<sup>[11]</sup>首次研制出了三维整体中空复合材料,对比了泡沫夹芯结构、蜂窝夹芯结构和三维整体中空复合材料的压缩性能。与泡沫夹芯结构和蜂窝夹芯结构相比,三维整体中空复合材料抗压性能有明显的提高。在此基础上, Vuure 等<sup>[12]</sup>进一步研究了这3种结构的压缩性能和剪切性能。结果表明,三维中空复合材料的压缩性能和剪切性能明显优于两种传统夹芯结构。

周正亮等<sup>[13]</sup>研究了不同厚度及不同铺层顺序的三维整体中空夹层复合材料的压缩强度,并且分析了树脂含量和织物厚度匹配对中空复合材料压缩强度的影响。结果表明,三维整体中空复合材料的压缩强度随着树脂含量的增加而显著提高,三维整体中空复合材料总厚度保持不变时,将厚度较大的中空织物置于下层的复合材料的压缩强度明显高于将其置于上层的复合材料的压缩强度。Zhao 等<sup>[14]</sup>对不同芯材高度的三维整体中空复合材料进行了压缩试验(图4)。结果表明,三维整体中空复合材料的芯材高度是影响失效机理的一个重要因素,不同芯材高度的三

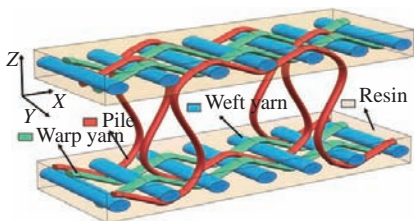


图1 三维整体中空复合材料结构示意图

Fig.1 Three-dimensional integrated hollow composites structure diagram

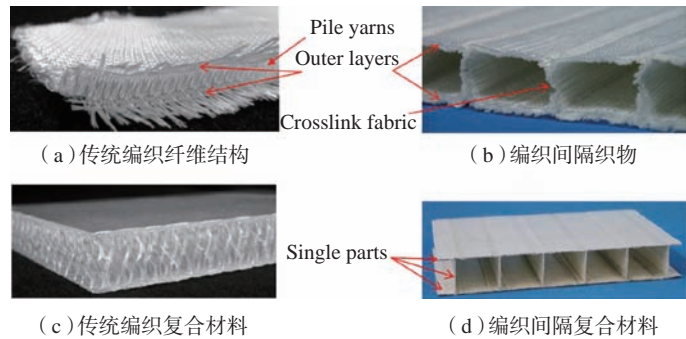


图2 编织间隔织物

Fig.2 Woven spacer fabrics

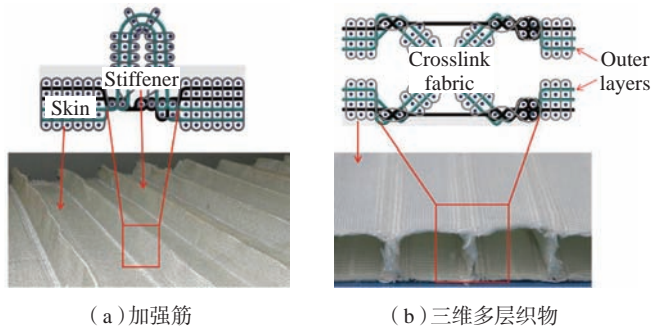


图3 间隔织物结构设计

Fig.3 Structural design of developed spacer fabrics

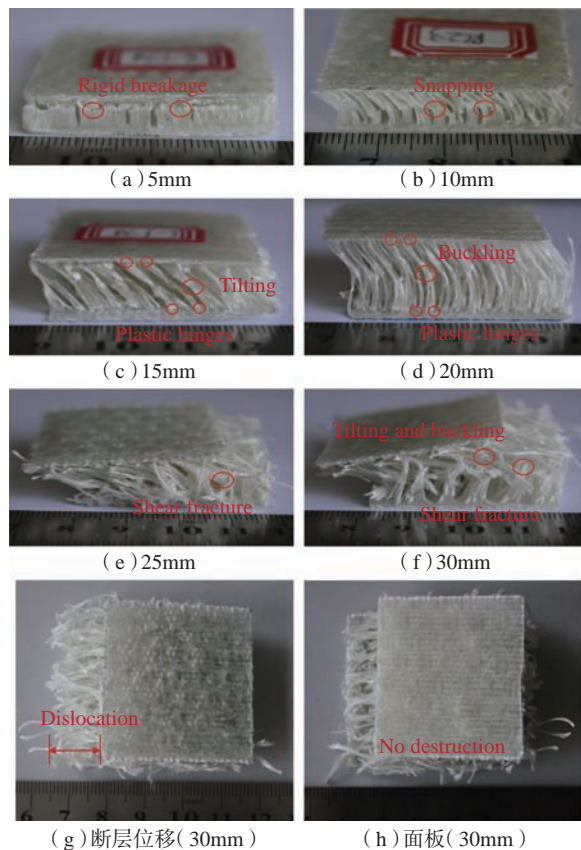


图4 平压复合材料的断裂照片

Fig.4 Fracture photographs of composites under flat compression

维整体中空复合材料的压缩破坏模式不同,其破坏照片如图4所示<sup>[14]</sup>。

曹海建<sup>[15]</sup>研究了三维整体中空复合材料在平压作用下的力学性能,分析了芯材密度和高度等对三维整体中空复合材料力学性能的影响。研究了不同芯材高度的三维整体中空复合材料在不同冲击能量下的低速冲击特性,进一步分析了低速冲击后中空复合材料的剩余强度。利用有限元软件 ANSYS,建立了芯材为“X”型的三维中空复合材料结构的有限元模型<sup>[16-18]</sup>,如图5所示<sup>[18]</sup>。基于有限元模型,得到了三维中空复合材料经纱系统和树脂等组分的应力和应变云图如图6所示<sup>[18]</sup>。研究了芯材高度、芯材密度和材料特性等对复合材料压缩性能的影响。结果表明,三维中空复合材料在受压状态下,芯材与上下面板相接处应力最大,最容易发生压缩破坏。三维中空复合材料的压缩性能随着芯材高度的增加而降低,随着材料弹性模量的增加而提高。

由此可知,相较于传统的夹芯材料,三维整体中空复合材料具有优异的抗压性能和抗剪切性能,且其压缩强度与树脂含量、芯材高度有关。对于不同的芯材高度,破坏形式不同,随着芯材高度的增加,三维整体中空复合材料的压缩性能降低。

### 中空复合材料的侧压性能

薄晓莉<sup>[19]</sup>等对中空复合材料进行了平压、侧压、四点弯曲、三点弯曲、双面剪切和低速冲击等试验。

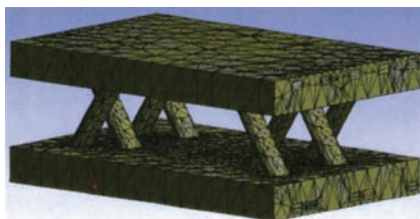


图5 三维中空复合材料微观模型

Fig.5 Micro-structural model of 3D composites

Velecela等<sup>[20]</sup>和Li等<sup>[21]</sup>研究了侧压下中空复合材料的失效模式,并进行了有限元模拟计算。周红涛<sup>[22]</sup>设计了三维整体中空复合材料试件,研究了面板结构对三维整体中空复合材料侧压性能的影响。结果表明,面板为平纹组织的三维整体中空复合材料的侧压性能优于面板为经重平组织的侧压性能。

钟崇岩等<sup>[23]</sup>选取不同面板组织的三维整体中空复合材料进行了侧压试验,对不同芯材结构的三维整体中空复合材料进行了平压试验,并采用 Origin 对其压缩性能进行了研究。研究结果表明:面板组织为平纹的三维整体中空复合材料的压缩性能比经重平结构复合材料的压缩性能好;芯材结构为“细长 X 型”整体中空复合材料的压缩性能比“扁平 X 型”结构复合材料的压缩性能好。

陈红霞等<sup>[24]</sup>制备了芯材高度分别为 2mm、4mm、6mm、8mm,芯材间距分别为 4mm、6mm、8mm 的三维整体中空复合材料,并对其进行了平压和侧压试验。结果显示,三维整体中空复合材料的侧压强度随着芯材高度和芯材密度的增加而增大,且纬向的侧压强度高于经向的侧压强度。

廖春晓等<sup>[25]</sup>采用增强体嵌入的方式对叠经多层间隔结构整体中空机织复合材料的强度进行改进,增加了中空复合材料强度的可设计性。王婷婷<sup>[26]</sup>对整体中空双夹层复合材料的侧压性能进行了有限元模拟计算,其径向侧压和纬向侧压的应力云图分别如图7和图8所示<sup>[26]</sup>。结果表明,复合材料在经向侧压作用下,芯材的树脂部分基本上不承受载荷作用,地经纱承担了大部分的压缩载荷,并且该部分纱线应力分布比较复

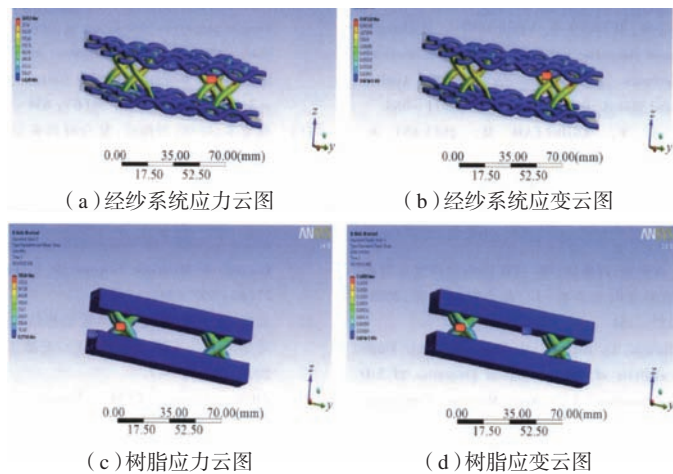


图6 三维中空复合材料经纱和树脂的应力、应变云图

Fig.6 Stress and strain cloud pictures of warp yarn and resin on three-dimensional hollow sandwich composites

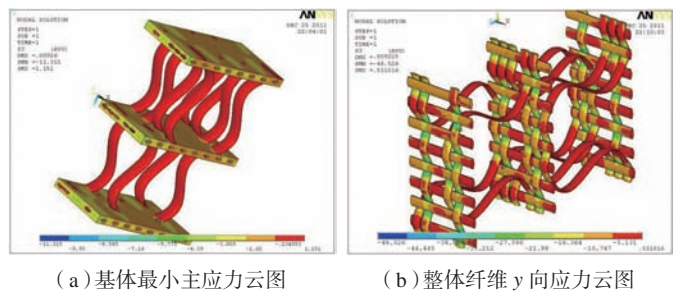


图7 经向侧压应力云图

Fig.7 Lateral compressive stress of warp

杂,在与纬纱交织处出现了应力集中的现象。复合材料在纬向侧压作用下,芯材的基体部分同样是基本不承受荷载,纬纱承担了大部分的压缩载荷,应力最大值在上层面板纬纱与绒经交织处。

对于三维中空复合材料的侧压性能,面板为平纹组织的侧压性能优于面板为经重平组织的侧压性能;对于不同的芯材,芯材结构为“细长X型”整体中空复合材料的压缩性能比“扁平X型”结构复合材料的压缩性能好,且侧压强度随着芯材高度和芯材密度的增加而增大。

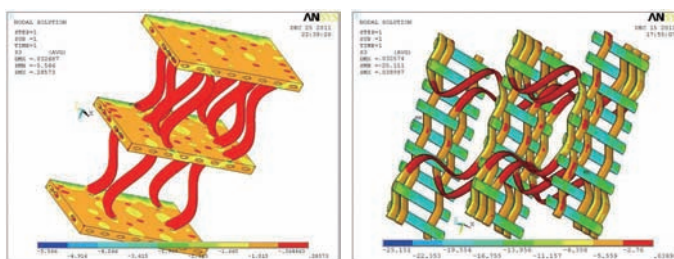
### 中空复合材料的剪切性能

匡宁等<sup>[27-28]</sup>研究了三维整体中空复合材料的复合成型工艺,并制作了三维整体中空复合材料的试件,然后对复合材料的经、纬向进行了双层剪切试验,获得了该复合材料的主要力学性能参数,并与类似的蜂窝等夹层复合材料的力学性能进行了对比。与匡宁等<sup>[27-28]</sup>相比,钟志珊<sup>[29]</sup>对三维整体中空复合材料进行了双剪切试验,研究表明:三维整体中空复合材料比相同规格的蜂窝夹层复合材料经向的剪切强度大约高20%,纬向的剪切强度大约高30%,并指出纬向的剪切性能比经向的剪切性能优越,经向的剪切强度约为纬向剪切强度的60%。曹海建等<sup>[30]</sup>研究了三维整体中空复合材料的剪切力学性能。结果表明,三维整体中空复合材料的剪切破坏为“先剪后拉”破坏模式,随着芯材高度的增加,中空复合材料的剪切强度降低。不同于以上的研究,庄桂增等<sup>[31]</sup>研究了三维间隔连体织物泡沫夹层结构的剪切性能,并与传统泡沫夹层结构复合材料的力学性能进行了对比分析,同时进一步考察了芯柱高度、泡沫密度对复合材料剪切性能的影响。结果表明,随着芯柱高度增加,三维间隔连体织物泡沫夹层结构复合材料的剪切强度减

小。袁铁军等<sup>[32]</sup>设计和制备了能够保证大高度芯柱直立性的面板增强中空复合材料的芯模及试件,测试了中空复合材料试件的平压强度、剪切强度和弯曲强度等力学性能。

李鸿顺等<sup>[33]</sup>对三维整体中空复合材料的剪切性能进行了有限元模拟计算,结果指出,芯材两个面板受到剪切作用而发生倾斜,并且出现了变形,应力集中发生在面板和芯材的结合处。相较于李鸿顺等<sup>[33]</sup>

的有限元模型,匡宁等<sup>[34]</sup>将整体中空复合材料的芯材简化为双菱形,建立了中空复合材料的有限元模型,预测了复合材料的剪切刚度、强度以及各组分材料的应力分布和破坏模式。并且用双层剪切试验测定了三维整体中空复合材料的剪切性能,得到了剪切工况下的芯材变形过程(图9<sup>[34]</sup>),也得到了经向和纬向剪切工况下复合材料试件的破坏模式(图10<sup>[34]</sup>)。



(a) 结构基体应力云图

(b) 纤维x向应力云图

图8 纬向侧压应力云图

Fig.8 Lateral compressive stress of weft

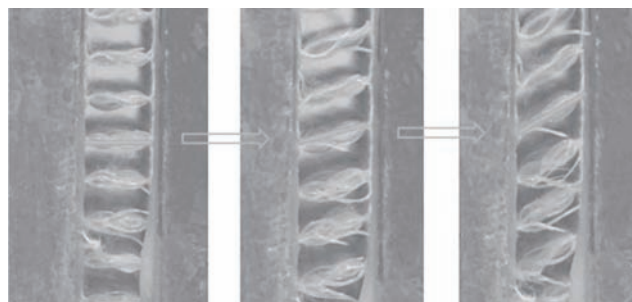
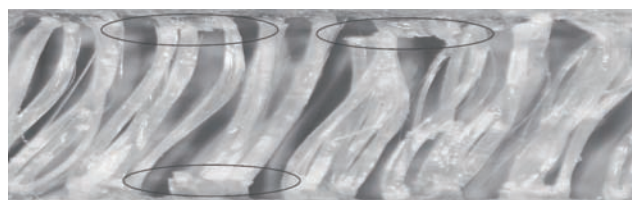


图9 芯材剪切变形过程

Fig.9 Core shear deformation process



(a) 经向剪切工况下试件的破坏模式



(b) 纬向剪切工况下试件的破坏模式

图10 剪切工况下中空复合材料的破坏模式

Fig.10 Failure modes of hollow composites under shear condition

### 中空复合材料的弯曲性能

张守玉等<sup>[35]</sup>研究了树脂含量及分布对三维整体中空复合材料弯曲性能的影响,得到了不同树脂含量的三维整体中空复合材料正反方向弯曲的破坏形式,如图 11 所示<sup>[35]</sup>。结果表明,随着树脂含量增加,三维中空复合材料的弯曲性能明显提高,并且反向弯曲强度提高的幅度更大。与传统的三维整体中空复合材料不同, Hassanzadeh 等<sup>[36-37]</sup>对芯材为“U”字形和“V”字形的三维整体中空复合材料进行了三点弯曲试验和有限元分析,如图 12 所示<sup>[36-37]</sup>,分析了不同厚度、不同形状中空复合材料的弯曲性能。Corigliano 等<sup>[38]</sup>研究了填充聚氨酯泡沫的中空复合材料的力学性能,并进行了三点弯曲和四点弯曲试验以及有限元模拟计算,结果表明,填充后复合材料的刚度和强度性能大幅度提高。此外, Judawisastra 等<sup>[39]</sup>研究了填充聚亚安酯泡沫的中空复合材料的弯曲疲劳性能,并对比分析了静态三点弯曲和疲劳性能,探讨了中空复合材料性能退化的规律。

Li 等<sup>[40]</sup>研究了高度分别是 3mm、6mm 和 10mm 3 种情况下中空复合材料在室温(20℃)和液氮温度(-196℃)下的弯曲性能,试验装置如图 13 所示<sup>[40]</sup>。结果表明,中空复合材料在液氮温度下的弯曲性能比室温下的弯曲性能有显著提高,并且芯材高度对液氮温度和室温下的弯曲性能影响都很大。同时,三维整体中空复合材料的失效破坏模式与芯材高度和温度有关。在室温下,观察到了不同芯材高度复合材料的 3 种典型失效模式。在液氮温度下,复合材料显示出逐渐失效的过程,该过程从压缩面的外层延伸到芯层。此外,脆性破坏特征变得更加明显,界面黏附能力显著提高。紧接着, Li 等<sup>[41]</sup>通过三维整体中空复合材料的

三点弯曲试验,研究了面板厚度对复合材料弯曲性能及失效机理的影响。结果表明,面板厚度是影响中空复合材料弯曲性能的一个重要因素,具有厚面板的复合材料的抗弯曲性能显著提高。

蒋家松<sup>[42]</sup>对表层加厚叠经织物和多层间隔叠经织物复合材料进行

了四点弯曲性能测试,结果表明,随着材料表层的加厚和材料间隔层数的增加,材料的杨氏模量和最大抗弯载荷显著增加。刘畅等<sup>[43]</sup>提出了预测整体中空复合材料经向弯曲刚度的理论方法,建立了复合材料宏观弯曲刚度和面板弯曲刚度的关系式,预测了复合材料的经向弯曲刚度,并对

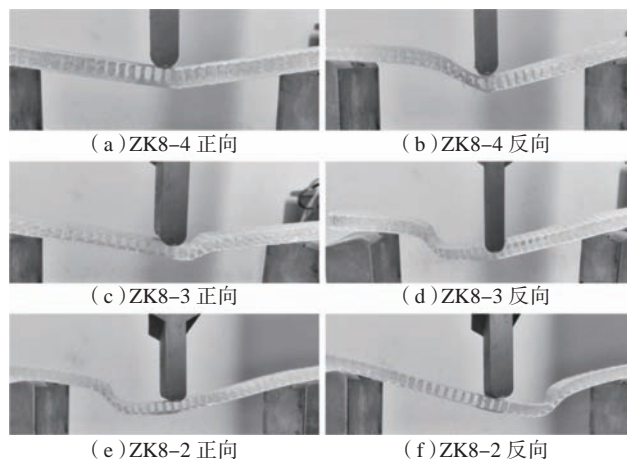


图 11 三维中空复合材料弯曲破坏形式

Fig.11 Flexural failure form of 3D sandwich woven composites

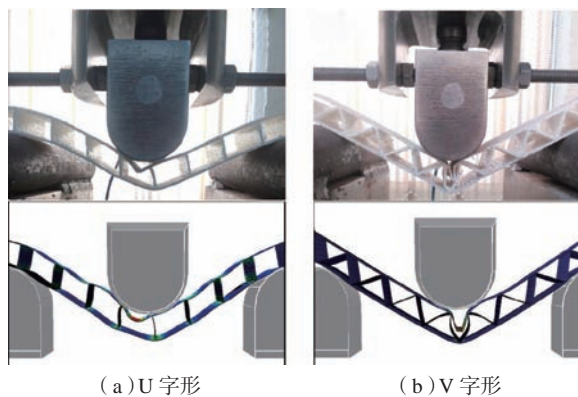


图 12 试验和模拟下的复合材料变形

Fig.12 Deformed composite samples in both experimental and simulated conditions

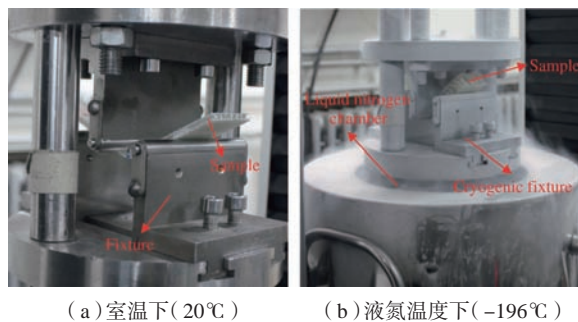


图 13 三点弯曲试验装置

Fig.13 Experimental devices for three-bending testing

中空复合材料进行了四点弯曲试验。刘静<sup>[44]</sup>对三维整体中空复合材料进行了四点弯曲试验(图14<sup>[44]</sup>),得到了三维中空复合材料的弯曲刚度和面板强度,指出整体中空复合材料的纬向弯曲性能比经向弯曲性能优越。

### 中空复合材料的冲击性能

三维中空复合材料与传统蜂窝、泡沫等夹芯复合材料相比,具有结构不易分层、抗冲击性能好等优点<sup>[45-48]</sup>。与大多数纤维增强复合材料一样,三维整体中空复合材料对冲击载荷,特别是低速冲击载荷比较敏感<sup>[49-50]</sup>。Kang等<sup>[51]</sup>研究了多层经编织复合材料和机织复合材料层合板的冲击能量吸收及冲击损伤容限性能。结果表明,多层经编织复合材料具有较小的分层面积,并具有比层合板更高的分层能量和抗冲击性能。Vaidya等<sup>[52]</sup>研究了不同厚度的中空复合材料低速冲击性能。结果表明,中空复合材料比传统夹芯结构复合材料具有更好的抗冲击性能,并且冲击损伤具有明显的局部性。Vaidya等<sup>[53]</sup>将聚氨酯泡沫填充在三维机织中空复合材料中,并对其进行了低速冲击试验,然后与未填充聚氨酯泡沫的三维机织中空复合材料进行对比。结果表明,填充聚氨酯泡沫后三维机织中空复合材料的抗冲击性能显著提高。

张福乐等<sup>[54]</sup>研究了材料厚度、基体含量和冲击能量等对中空复合材料冲击防护性能的影响。曹海建等<sup>[55-56]</sup>对厚度分别为5mm、6mm和7mm的中空复合材料进行了不同能量下的低速冲击试验,其损伤破坏形貌如图15和图16所示<sup>[54]</sup>。并且将7mm厚的中空复合材料进行了含铝蒙皮前后低速冲击对比试验。结果表明,不同能量对三维中空复合材料的损伤破坏程度差别很大。厚度为5mm的三维中空复合材料,当冲击能量从1J逐渐增大到10J时,中

空复合材料由无损伤状态变为目视可检损伤状态,最后处于穿透损伤状态。含铝蒙皮的三维中空复合材料的抗冲击性能明显增强,复合材料的最大冲击载荷和初始损伤能量大幅度提高。曹海建等<sup>[57]</sup>研究了低速冲击后三维中空复合材料的剩余压缩强度,并对压缩破坏损伤进行了研究,分析了复合材料的压缩破坏机理。

Li等<sup>[58-59]</sup>对具有6种类型芯材高度的三维整体中空复合材料在室温和液氮温度(-196℃)下进行了夏比冲击试验,通过复合材料的宏观断裂形态(图17和图18<sup>[58-59]</sup>)和SEM照片分析了复合材料的变形和破坏

机理。结果表明,随着芯材高度的增加,室温和液氮温度下的冲击能量增加,同时,液氮温度下的冲击性能比室温下的冲击性能提高更显著。此外,在室温下,面板的穿透断裂,基体开裂(Matrix cracking)、纤维断裂(Fiber fracture)、纤维与基体间界面脱胶开裂(Interfacial debonding)是主要的损伤和破坏模式。然而,在液氮温度下,基体破碎主导着失效,纤维断裂较少,脆性断裂变得更加明显。随着芯材高度的增加,复合材料的失效强度在室温和液氮温度下显著降低。

### 结论

本文主要从试验和有限元两方

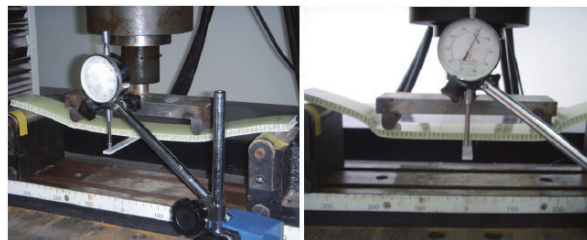


图14 四点弯曲试验装置及破坏形式

Fig.14 Fixture and form of destruction for four-bending testing

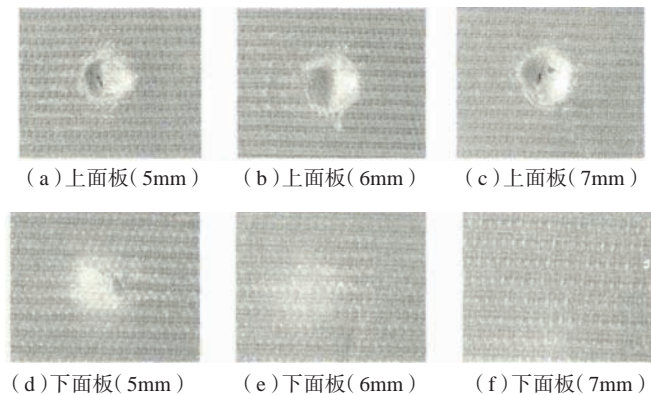


图15 三维整体中空复合材料在低速冲击时上下面板的破坏

Fig.15 Failure of upper and lower panels of three-dimensional integrated hollow composite material suffering low-velocity impact loads

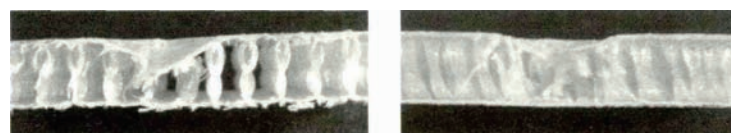


图16 三维整体中空复合材料在低速冲击下经、纬向截面破坏形式

Fig.16 Warp and weft section damage picture of three-dimension integrated hollow sandwich composites suffering low-velocity impact loads

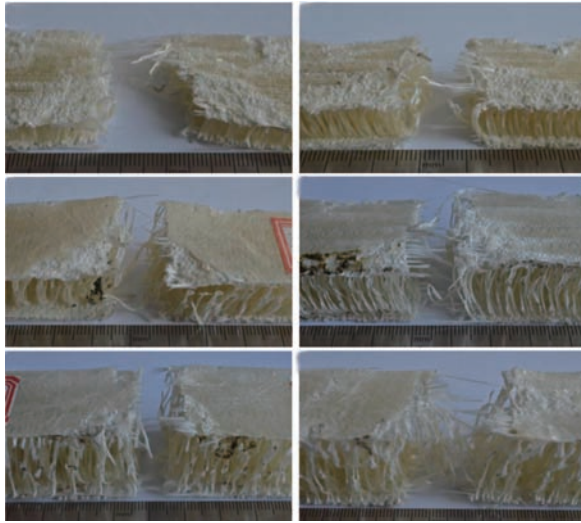


图17 中空复合材料在室温下的冲击破坏照片

Fig.17 Impact fracture photographs of composites at room temperature

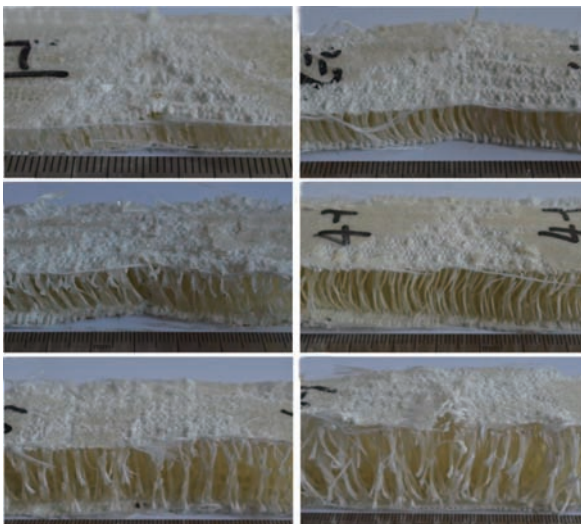


图18 中空复合材料在液氮温度下的冲击破坏照片

Fig.18 Impact fracture photographs of composites at liquid nitrogen temperature

面介绍了三维整体中空复合材料的平压性能、侧压性能、剪切性能、弯曲性能以及冲击性能等力学性能研究进展。研究人员通过设计芯材高度、芯材密度、芯材形状、面板厚度、树脂含量和织物厚度匹配等参数,分析了三维整体中空复合材料在平压、侧压、剪切、弯曲和冲击等载荷作用下的损伤破坏模式。但对三维整体中空复合材料失效破坏机理的研究工作比较欠缺,许多结构失效机理还不明确,需要进一步完善和扩展。三维整体中空复合材料对极端条件下(主要包括低温与高温等环境)力学性

能和时间因素影响的研究工作比较欠缺。除此之外,本文主要是针对其静态力学特性,对于复杂和动态载荷考虑不全面。研究人员主要是对三维整体中空复合材料在低速冲击载荷下的损伤破坏进行了研究,对高速冲击及爆炸载荷作用下的力学行为研究较少。因此,对于三维整体中空复合材料的研究范围还需扩大,深度还需加强。

三维整体中空复合材料因具有高的比强度、比刚度,特别是整体性、抗分层、抗冲击以及可设计性等优点,并且与传统的夹芯材料相比,具

有优异的力学性能,因此其将会广泛应用在航空航天、军工、船舶、体育用品、交通和建筑等领域,并成为应用前景最广泛的材料之一。

### 参考文献

[1] YU K J, CAO H J, QIAN K, et al. Manufacturing and flat-wise compression performance of modified 3D integrated sandwich fabric composites[J]. *Fibers & Textiles in Eastern Europe*, 2014, 105(3): 98-102.

[2] VAN VUURE A W, PFLUG J, IVENS J A, et al. Modelling the core properties of composite panels based on woven sandwich-fabric preforms[J]. *Composites Science and Technology*, 2000, 60(8): 1263-1276.

[3] 朱波. 整体中空夹层复合材料低速冲击性能及剩余强度研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.

ZHU Bo. Investigation and numerical evaluation on low-velocity impact and strength after-impact of hollow integrated sandwich composites[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.

[4] 许建伟, 李春林, 高凌, 等. 三维织物复合材料天线罩的应用研究[J]. *电子机械工程*, 2018, 34(2): 36-39.

XU Jianwei, LI Chunlin, GAO Ling, et al. Study on application of 3D fabric composite radome[J]. *Electro-Mechanical Engineering*, 2018, 34(2): 36-39.

[5] HOSUR M V, ABDULLAH S, JEELANI S. Manufacturing and low velocity impact characterization of foam filled 3D integrated core sandwich composites with hybrid face sheets[J]. *Composite Structures*, 2005, 69(2): 167-181.

[6] 张超, 许希武, 许晓静. 三维多向编织复合材料宏观力学性能有限元分析研究进展[J]. *复合材料学报*, 2015, 32(5): 1241-1251.

ZHANG Chao, XU Xiwu, XU Xiaojing. Research progress in finite element analysis on macro-meso mechanical properties of 3D multi-directional braided composites[J]. *Acta Materialiae Compositae Sinica*, 2015, 32(5): 1241-1251.

[7] 匡宁, 周光明, 张立泉, 等. 整体夹芯中空复合材料的开发与应用[J]. *玻璃纤维*,

2007(5): 15–20.

KUANG Ning, ZHOU Guangming, ZHANG Liquan, et al. Development and application of integrated hollow core sandwich composite[J]. *Fiber Glass*, 2007(5): 15–20.

[8] 周红涛. 整体中空夹层复合材料低速冲击性能的研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2009.

ZHOU Hongtao. Research the low-velocity impact performance of hollow integrated core sandwich composites[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2009.

[9] 祝成炎, 谭冬宜, 田伟, 等. 三维正交整体夹芯机织物的结构设计及织造 [J]. *纺织学报*, 2006, 27(12): 9–13.

ZHU Chengyan, TAN Dongyi, TIAN Wei, et al. Structural design and weaving methods of 3D orthogonal integrated cellular woven fabrics[J]. *Journal of Textile Research*, 2006, 27(12): 9–13.

[10] MOUNTASIR A, HOFFMANN G, CHERIF C, et al. Competitive manufacturing of 3D thermoplastic composite panels based on multi-layered woven structures for lightweight engineering[J]. *Composite Structures*, 2015, 133: 415–424.

[11] DRECHSLER K, BRANDT J, ARENDTS F J. Integrally woven sandwich-structures[C]//Proceedings of ECCM3 Third European Conference on Composite Materials. Bordeaux, 1989.

[12] VAN VUURE A W, IVENS J A, VERPOEST I. Mechanical properties of composite panels based on woven sandwich-fabric preforms[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2000, 31(7): 671–680.

[13] 周正亮, 张守玉, 陈同海, 等. 铺层结构对三维中空夹层复合材料压缩性能的影响 [J]. *工程塑料应用*, 2017, 45(6): 56–60.

ZHOU Zhengliang, ZHANG Shouyu, CHEN Tonghai, et al. Influence of layer structure on compressive strength of 3D hollow sandwich woven composite[J]. *Engineering Plastics Application*, 2017, 45(6): 56–60.

[14] ZHAO C Q, LI D S, GE T Q, et al. Experimental study on the compression properties and failure mechanism of 3D integrated woven spacer composites[J].

*Materials and Design*, 2014, 56: 50–59.

[15] 曹海建. 三维机织整体中空复合材料的结构及性能研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2010.

CAO Haijian. Structures and properties of three-dimension woven integrated sandwich composites[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2010.

[16] 曹海建, 钱坤, 魏取福, 等. 三维整体中空复合材料压缩性能的有限元分析 [J]. *复合材料学报*, 2011, 28(1): 230–234.

CAO Haijian, QIAN Kun, WEI Qufu, et al. Finite element analysis of the compressive properties of 3D integrated sandwich composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2011, 28(1): 230–234.

[17] 冯古雨, 钱坤, 曹海建, 等. 中空复合材料压缩性能及有限元分析 [J]. *宇航材料工艺*, 2017(3): 29–32.

FENG Guyu, QIAN Kun, CAO Haijian, et al. Compression property testing and FEM analysis of hollow composite[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2017(3): 29–32.

[18] 曹海建, 冯古雨, 俞科静, 等. 碳纤维/环氧树脂基中空夹芯复合材料压缩性能的有限元法研究 [J]. *纺织学报*, 2015, 36(9): 50–54.

CAO Haijian, FENG Guyu, YU Kejing, et al. Compressive properties of carbon fiber/epoxy resin hollow sandwich composites based on finite element software[J]. *Journal of Textile Research*, 2015, 36(9): 50–54.

[19] 薄晓莉. 整体中空夹层复合材料力学性能的数值分析与实验研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.

BO Xiaoli. Experimental and numerical evaluation on mechanical property of hollow integrated sandwich composites[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009.

[20] VELECELA O, SOUTIS C. Prediction of crushing morphology of GRP composite sandwich panels under edgewise compression[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2007, 38(7/8): 914–923.

[21] LI M, WANG S K, ZHANG Z G, et al. Effect of structure on the mechanical behaviors of three-dimensional spacer fabric composites[J]. *Applied Composite Materials*, 2009, 16(1): 1–14.

[22] 周红涛. 整体中空夹层复合材料侧压性能的研究 [J]. *山东纺织科技*, 2011(1): 54–56.

ZHOU Hongtao. Study on the performance of leather woven base cloth[J]. *Shandong Textile Science & Technology*, 2011(1): 54–56.

[23] 钟崇岩, 曹海建, 李娟. 组织结构对三维整体中空复合材料压缩性能的影响 [J]. *材料导报*, 2012, 26(20): 279–281.

ZHONG Chongyan, CAO Haijian, LI Juan. Influence of organization structures on compressive property of 3-D integrated sandwich composites[J]. *Materials Review*, 2012, 26(20): 279–281.

[24] 陈红霞, 曹海建. 芯材结构对三维中空夹芯复合材料压缩性能的影响 [J]. *机械工程材料*, 2016, 40(3): 82–106.

CHEN Hongxia, CAO Haijian. Influence of pile structure on compressive properties of three dimension hollow sandwich composite[J]. *Material of Mechanical Engineering*, 2016, 40(3): 82–106.

[25] 廖春晓, 蒋家松, 周罗庆. 嵌入式增强多层整体机织中空复合材料及其抗压性能的研究 [J]. *材料导报*, 2012, 26(19): 405–409.

LIAO Chunxiao, JIANG Jiasong, ZHOU Luoqing. Design and compressive performance study of multi-layer overlapping warp embedded enhancing integrated woven composite[J]. *Materials Review*, 2012, 26(19): 405–409.

[26] 王婷婷. 整体中空双夹层复合材料力学性能研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.

WANG Tingting. Investigation of mechanical properties or 3D two-layer hollow integrated sandwich composites[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.

[27] 匡宁, 周光明, 张立泉, 等. 三维中空复合材料力学性能研究 [J]. *材料工程*, 2007(S1): 117–120.

KUANG Ning, ZHOU Guangming, ZHANG Liquan, et al. Investigation on mechanical properties of 3-D sandwich woven composites[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2007(S1): 117–120.

[28] 匡宁, 张建钟, 杨朝坤, 等. 整体夹芯中空复合材料的研究 [J]. *航空制造技术*,

2007, 50(S1): 53–56.

KUANG Ning, ZHANG Jianzhong, YANG Chaokun, et al. Investigation on the hollow integrated sandwich composites[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2007, 50(S1): 53–56.

[29] 钟志珊. 整体中空夹层复合材料力学性能研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.

ZHONG Zhishan. Investigation on mechanical property of hollow integrated sandwich composites[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007.

[30] 曹海建, 钱坤, 盛东晓, 等. 芯材高度对整体中空复合材料力学性能的影响 [J]. *上海纺织科技*, 2010, 38(9): 54–57.

CAO Haijian, QIAN Kun, SHENG Dongxiao, et al. Influence of core height on the mechanical properties of 3D integrated hollow composites[J]. *Shanghai Textile Science & Technology*, 2010, 38(9): 54–57.

[31] 庄桂增, 孙志杰, 王绍凯, 等. 三维间隔连体织物泡沫夹层结构复合材料的基本力学特性 [J]. *复合材料学报*, 2009, 26(5): 27–32.

ZHUANG Guizeng, SUN Zhijie, WANG Shaokai, et al. Experimental study on the basic mechanical characteristics of foam filled 3-D spacer fabric composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2009, 26(5): 27–32.

[32] 袁铁军, 周来水, 郑伟峰, 等. 面板增强中空复合材料构件微波成形工艺 [J]. *中国机械工程*, 2016, 27(4): 544–548.

YUAN Tiejun, ZHOU Laishui, ZHENG Weifeng, et al. Microwave molding process for facesheet-reinforced spacer fabric composite component[J]. *Chinese Mechanical Engineering*, 2016, 27(4): 544–548.

[33] 李鸿顺, 曹海建, 钱坤, 等. 整体中空复合材料有限元模型的建立 [J]. *材料导报*, 2010, 24(16): 265–267.

LI Hongshun, CAO Haijian, QIAN Kun, et al. The finite element model of integrated hollow core sandwich composites[J]. *Materials Review*, 2010, 24(16): 265–267.

[34] 匡宁, 刘畅, 周光明. 整体中空夹层复合材料剪切性能研究 [J]. *南京理工大学学报*, 2017, 41(5): 653–665.

KUANG Ning, LIU Chang, ZHOU

Guangming. Study on shear performance of hollow integrated sandwich composite[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2017, 41(5): 653–665.

[35] 张守玉, 周正亮, 耿杰, 等. 树脂含量及分布对三维中空复合材料性能的影响 [J]. *材料导报*, 2016, 30(27): 376–378.

ZHANG Shouyu, ZHOU Zhengliang, GENG Jie, et al. Influence of resin content and distribution on the property of 3D sandwich woven composite[J]. *Materials Review*, 2016, 30(27): 376–378.

[36] HASSANZADEH S, HASANI H, ZARREBINI M. Thermoset composites reinforced by innovative 3D spacer weft-knitted fabrics with different cross-section profiles: Materials and manufacturing process[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2016, 91: 65–76.

[37] HASSANZADEH S, HASANI H, ZARREBINI M. Mechanical characterization of innovative 3D multi-cell thermoset composites produced with weft-knitted spacer fabrics[J]. *Composite Structures*, 2018, 184: 935–949.

[38] CORIGLIANO A, RIZZI E, PAPA E. Experimental characterization and numerical simulations of a syntactic-foam/glass-fibre composite sandwich[J]. *Composites Science and Technology*, 2000, 60(11): 2169–2180.

[39] JUDAWISASTRA H, IVENS J, VERPOEST I. The fatigue behavior and damage development of 3D woven sandwich composites[J]. *Composite Structures*, 1998, 43(1): 35–45.

[40] LI D S, ZHAO C Q, JIANG L, et al. Experimental study on the bending properties and failure mechanism of 3D integrated woven spacer composites at room and cryogenic temperature[J]. *Composite Structures*, 2014, 111: 56–65.

[41] LI D S, ZHAO C Q, JIANG L, et al. Fabrication, properties and failure of 3D integrated woven spacer composites with thickened face sheets[J]. *Materials Letters*, 2015, 148: 103–105.

[42] 蒋家松. 叠经中空结构机织复合材料的结构设计及力学性能研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2012.

JIANG Jiasong. Development and

mechanical behavior of a overlapping warp 3D woven composite[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2012.

[43] 刘畅, 周光明, 王狄辉, 等. 整体中空夹层复合材料经向弯曲刚度的预测 [J]. *南京航空航天大学学报*, 2016, 48(4): 558–562.

LIU Chang, ZHOU Guangming, WANG Dihui, et al. Prediction of warp hollow integrated bending modulus for sandwich composites[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics*, 2016, 48(4): 558–562.

[44] 刘静. 整体中空层连复合材料结构与性能的研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2008.

LIU Jing. Study of hollow integrated sandwich composites structure and property[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2008.

[45] NI C Y, LI Y C, XIN F X, et al. Ballistic resistance of hybrid-cored sandwich plates: Numerical and experiment assessment[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2013, 46: 69–79.

[46] FAN H L, ZHAO L, CHEN H L, et al. Dynamic compression failure mechanisms and dynamic effects of integrated woven sandwich composites[J]. *Journal of Composite Material*, 2014, 48(4): 427–437.

[47] WANG B, WU L Z, MA L, et al. Low-velocity impact characteristics and residual tensile strength of carbon fiber composite lattice core sandwich structures[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2011, 42(4): 891–897.

[48] 刘杨, 曾卓, 陆晓峰, 等. 空爆载荷下点阵夹层结构式舱壁安装方式研究 [J]. *南京工业大学学报(自然科学版)*, 2017, 39(4): 79–85.

LIU Yang, ZENG Zhuo, LU Xiaofeng, et al. Installation research of lattice sandwich structure bulkheads under blast loading[J]. *Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition)*, 2017, 39(4): 79–85.

[49] SHYR T W, PAN Y H. Low velocity impact responses of hollow core sandwich laminate and interplay hybrid laminate[J]. *Composite Structures*, 2004, 64(2): 189–198.

[50] 马丕波, 蒋高明, 高哲, 等. 纺织结构复合材料冲击拉伸研究进展 [J]. *力学进展*, 2013, 43(3): 329–357.

MA Pibo, JIANG Gaoming, GAO Zhe, et al. Advances in impact tensile properties of 3-D textile structural composites[J]. *Advances in Mechanics*, 2013, 43(3): 329-357.

[51] KANG T J, KIM C. Energy-absorption mechanisms in Kevlar multiaxial warp-knit fabric composites under impact loading[J]. *Composites Science and Technology*, 2000, 60(5): 773-784.

[52] VAIDYA U K, HOSUR M V, EARL D, et al. Impact response of integrated hollow core sandwich composite panels[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2000, 31(8): 761-772.

[53] VAIDYA A S, VAIDYA U K, UDDIN N. Impact response of three-dimensional multifunctional sandwich composite[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2008, 472(1/2): 52-58.

[54] 张福乐, 林蓝天, 薛亚静, 等. 整体中空夹层复合材料冲击防护性能研究[J].

上海纺织科技, 2015, 43(8): 14-17.

ZHANG Fule, LIN Lantian, XUE Yajing, et al. Study on the impact protection performance of integrated hollow core sandwich composite[J]. *Shanghai Textile Science & Technology*, 2015, 43(8): 14-17.

[55] 曹海建, 钱坤, 魏取福, 等. 三维整体中空复合材料低速冲击性能[J]. *纺织学报*, 2009, 30(10): 70-74.

CAO Haijian, QIAN Kun, WEI Qufu, et al. Low-velocity impact property of 3-D integrated hollow sandwich composites[J]. *Journal of Textile Research*, 2009, 30(10): 70-74.

[56] 曹海建, 陈红霞, 钱洪浩. 芯材高度对三维中空夹层复合材料低速冲击性能的影响[J]. *宇航材料工艺*, 2014(6): 71-75.

CAO Haijian, CHEN Hongxia, QIAN Honghao. Influence of pile height on low-velocity impact properties of three dimension hollow sandwich composites[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2014(6): 71-75.

[57] 曹海建, 钱坤, 魏取福, 等. 低速冲击后三维中空夹层复合材料的压缩损伤容限[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2010(5): 11-15.

CAO Haijian, QIAN Kun, WEI Qufu, et al. Compressive damage tolerance of 3-D hollow sandwich composites after low-velocity impact[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2010(5): 11-15.

[58] LI D S, ZHAO C Q, JIANG N, et al. Experimental Study on the Charpy impact failure of 3D integrated woven spacer composite at room and liquid nitrogen temperature[J]. *Fibers and Polymers*, 2015, 16(4): 875-882.

[59] LI D S, JIANG N, JIANG L, et al. Static and dynamic mechanical behavior of 3D integrated woven spacer composites with thickened face sheets[J]. *Fibers and Polymers*, 2016, 17(3): 460-468.

通讯作者: 郭章新, E-mail: woxintanran215@163.com.

## Research Progress on Mechanical Properties of Three-Dimension Integrated Hollow Sandwich Composites

GUO Zhangxin<sup>1,2,3</sup>, LI Zhonggui<sup>1,2</sup>, CUI Junjie<sup>1,4</sup>, ZHU Ming<sup>1,3</sup>, HE Qi<sup>1,3</sup>, LI Yongcun<sup>1,4</sup>, LUAN Yunbo<sup>1,3</sup>

(1. Institute of Applied Mechanics, College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, School of Aerospace Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

3. Shanxi Key Laboratory of Material Strength & Structural Impact, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

4. National Demonstration Center for Experimental Mechanics Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**[ABSTRACT]** The three-dimension integrated hollow sandwich composites is a novel sandwich structure material, which is obtained by interweaving the core material and the upper and lower panels together, and the core material and the panel become a unitary structure. The panel of the three-dimension integrated hollow sandwich composites is integrated with the core material and is formed by one-time curing, so that it has excellent properties such as resistance to delamination, impact resistance, and high damage tolerance. Studying the mechanical properties of three-dimension integrated hollow sandwich composites has important guiding significance for its structural design and application. In this paper, the research progress of mechanical properties of three-dimension integrated hollow sandwich composites in terms of flatwise compression, side compressive, shear, bending and impact properties were introduced in detail, and the existing problems are pointed out, to provide direction for future research.

**Keywords:** Three-dimension integrated hollow sandwich composites; Flatwise compressive property; Side compressive property; Shear property; Flexural property; Impact property

(责编 李丹)