

DOI: 10.11883/bzycj-2021-0347

中低速压缩加载下不同截面构型复合材料薄壁结构吸能特性及失效分析*

张欣玥, 惠旭龙, 葛宇静, 舒 挽, 白春玉, 刘小川

(中国飞机强度研究所结构冲击动力学航空科技重点实验室, 陕西 西安 710065)

摘要: 为研究开剖面复合材料薄壁吸能结构的吸能特性, 基于高速液压伺服试验系统, 开展了开剖面复合材料薄壁结构轴向压缩试验, 分析了截面构型、截面长宽比、触发模式及加载速度对其吸能特性的影响, 揭示了其在压溃过程中的失效及吸能机理。研究表明, 复合材料薄壁结构压溃过程中主要通过材料弯曲、分层、剪切破坏以及压溃区之间的摩擦吸能。截面构型对其吸能特性影响显著, 其中, 帽形及 Ω 形试件的平均压溃载荷较C形试件分别高出14.1%和14.6%, 比吸能较C形试件分别高出14.3%和14.8%; 截面长宽比对复合材料薄壁结构吸能特性的影响不如截面构型明显; 触发模式主要影响吸能结构的初始压溃阶段, 在降低峰值载荷方面, C形试件采用45°倒角触发效果更好, 帽形试件采用15°尖顶触发效果更好; 当加载速度从0.01 m/s提高到1 m/s时, C形、帽形及 Ω 形试件的平均压溃载荷分别下降了6.1%、10.9%和6.1%, 比吸能分别下降了6.2%、11.0%和6.2%。

关键词: 复合材料薄壁结构; 吸能; 截面构型; 截面长宽比; 触发模式; 加载速度

中图分类号: O347 国标学科代码: 13015 文献标志码: A

Energy absorption characteristics and failure analysis of composite thin-walled structures with different cross-sectional configurations under medium- and low-speed compression loading

ZHANG Xinyue, HUI Xulong, GE Yujing, SHU Wan, BAI Chunyu, LIU Xiaochuan

(Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Structures Impact Dynamics,

Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, Shaanxi, China)

Abstract: In order to study the energy absorption characteristics of open-section thin-walled composite structures, axial compression tests were carried out by using a high-speed hydraulic servo test system. The loading speed was set to 0.01, 0.1 and 1 m/s. A high-speed camera was used to record the deformation and failure of the test specimens. The effects of cross-section shape, section aspect ratio, trigger mechanism, and loading speed on the energy absorption characteristics of the composite structures are analyzed. The failure and energy absorption mechanism of the structure in the crushing process is revealed. The results show that the energy absorption is mainly attributed to material bending, delamination, shear failure and friction between crushing zones during the crushing process. The cross-section shape has a significant influence on its energy absorption capacity. The average crushing loads of the hat shaped and Ω -shaped specimens are 14.1% and 14.6% higher than that of the C-channel specimens, and their specific energy absorption (SEA) are 14.3% and 14.8% higher than that of C-channel specimens, respectively. The stress concentration of C-channel specimens leads to insufficient material damage, responsible to their lower energy absorption capacity. On the other hand, the section aspect ratio has less effect on the energy absorption capacity of composite thin-walled structures. The trigger mechanism mainly affects the initial crushing stage of the structures. For the C-channel specimens, 45° chamfer trigger is more effective in reducing the initial peak load; while for the

* 收稿日期: 2021-08-17; 修回日期: 2022-01-24

基金项目: 民机专项科研(MJ-2017-F-15)

第一作者: 张欣玥(1994—), 女, 硕士, 工程师, nwpuzhangxinyue@163.com

通信作者: 刘小川(1983—), 男, 博士, 研究员, asri02@163.com

hat shaped test piece, the 15° steeple trigger is better. When the loading speed was increased from 0.01 m/s to 1 m/s, the average crushing load of the C channel, hat shaped and Ω -shaped specimens were reduced by 6.1%, 10.9% and 6.1%, respectively; while the SAE were reduced by 6.2%, 11.0% and 6.2% respectively. The increase of loading speed leads to more debris flying out, which reduces the loading area and material utilization of the structure, and it reduces the friction energy absorption of the collapse zone, too.

Keywords: composite thin-walled structure; energy absorption; cross-section shape; section aspect ratio; trigger mechanism; loading speed

飞机结构耐撞性是飞机安全性设计的一个重要方面^[1-4]。飞机在坠撞过程中, 货舱下部支撑结构可以吸收碰撞时的大部分冲击能量, 降低传递到乘员的过载, 从而有效保护乘员安全^[3-8]。先进复合材料在飞机结构中的大量应用给吸能结构与评估提出了较大挑战^[6-11]。近年来, 学者们对圆管^[12-20]、方管^[7, 9, 21-23]等吸能结构进行了较系统的研究。对于航空结构而言, 开剖面的吸能结构因具有质量更轻、安装及检修难度小等优点, 被广泛用作飞机货舱下部的主要支撑结构^[23], 因此也引起了学者们的广泛关注^[10, 19, 24-32]。

Deepak^[20]比较了准静态压缩下 C 形、帽形及 L 形结构的压溃吸能特性, 同时比较了倒角触发与尖顶触发两种触发模式对以上 3 种结构吸能特性的影响, 然而, 在动态加载条件下, 截面构型及触发模式对吸能结构的影响规律并不清楚。Riccio 等^[27]通过试验与数值模拟方法研究了复合材料 C 形货舱立柱结构在准静态压缩与动态载荷下的材料层内损伤和层间分层损伤机制, 动态试验在落塔系统上进行, 冲击质量为 26 和 77 kg, 初始冲击速度分别为 1.8 和 3.9 m/s, 结果表明, 在动态加载条件下, C 形复合材料薄壁结构会产生更多的层间分层。Jackson 等^[29]对比了 Ω 形吸能结构在准静态及动态加载下的压溃吸能特性, 动态试验在高速液压伺服试验机上进行, 加载速度为 8.5 m/s, 结果表明, 与准静态情况相比, 动态加载下, Ω 形吸能结构的吸能效果有所降低; 同时比较了不同铺层设计对结构吸能特性的影响。汪洋等^[31]对比了触发模式、高度、截面面积不同的 C 形结构在准静态加载及动态加载下的压溃吸能特性, 其中动态压溃试验在双立柱导轨式落震台上进行, 试验中通过落体自由下落冲击试件, 冲击质量 216 kg, 初始冲击速度为 6.1 m/s。Waimer 等^[33]对一种新型飞机货舱地板下部复材薄壁吸能结构进行了大量动态压缩实验测试, 加载速度为 6.7 和 10.0 m/s, 同时考虑了冲击角为 10° 的偏轴加载的情况, 通过对材料失效模式、力-位移曲线以及吸能指标进行比较, 得到了铺层角度和结构尺寸、速度及加载角度等参数对该结构吸能特性的影响。Kakogiannis 等^[13]通过试验与数值模拟方法比较了复合材料薄壁吸能元件在动态轴向载荷作用和脉冲轴向载荷作用下的响应, 研究发现, 在脉冲载荷作用下试件比吸能增加, 两种载荷模式导致材料中的主裂纹扩展模式有所不同。

由于开剖面复合材料薄壁结构的吸能特性受多种因素影响, 因此较多学者通过建立薄壁结构动态压溃加载的渐进失效有限元模型来进一步分析复合材料薄壁吸能结构动态压溃过程中材料的损伤机理^[7-11, 25-27, 34-36], 并给出了铺层角度^[7, 10]、触发模式^[7, 16]和加载角度^[34-35]等对结构吸能特性的影响规律。模型中考虑了复合材料层内及分层损伤, 但并未考虑材料的应变率效应。

综上所述, 现有文献对复合材料薄壁吸能结构在准静态下及 1.8~10.0 m/s 高速加载下的压溃吸能特性研究较多, 而对复合材料薄壁吸能结构在 0.01~1 m/s 的中低速加载范围内的吸能特性研究较少。该加载速度范围对应材料处于中低应变率范围, 大量研究表明复合材料在该应变率范围的应变率敏感性将有所不同, 同时考虑到开剖面复合材料薄壁结构的截面构型、截面长宽比、触发方式及加载速度均会对其吸能特性产生影响, 进而影响机身下部结构的能量吸收及乘客的安全。因此有必要对该加载速度范围内复合材料薄壁结构的吸能特性进行试验研究, 分析不同因素对结构吸能特性的影响规律, 揭示其失效机理, 为飞机下部结构抗坠撞设计提供参考。

本文中, 基于高速液压伺服试验系统, 开展开剖面复合材料薄壁结构的轴向压缩试验研究, 分析截面构型、截面长宽比、触发模式及加载速度对结构吸能特性的影响, 通过对比结构在压缩过程中的初始峰值载荷、平均压溃载荷、比吸能及失效模式, 分析不同因素对结构动态吸能特性的影响规律及影响机理, 以为飞机货舱下部复合材料吸能结构设计提供理论支持。

1 试件与试验方法

1.1 复合材料薄壁吸能试件

试件由 CCF300/8552A 高温固化环氧碳纤维预浸料经过热压成型工艺层合而成, 碳纤维体积分数为 $67\% \pm 2\%$, 预浸料单层 0° 拉伸强度为 1.5 GPa, 材料密度为 1.6 g/cm^3 , 试件铺层角度为 $[45^\circ/0^\circ/90^\circ/-45^\circ/45^\circ/0^\circ/90^\circ/-45^\circ]_s$, 其中: 下标 s 指对称铺层, 轴向压缩方向为纤维 0° 方向, 试件厚度为 2 mm。

为了研究复合材料薄壁结构的截面构型、截面长宽比及触发方式对其吸能特性的影响, 本文中考虑了 C 形、帽形及 Ω 形 3 种截面构型, 3 种长宽比(长宽比为 1.65、1.06 和 2.31 的 C 形吸能元件, 记为 C1、C2 及 C3 型)(见 图 1), 45° 倒角触发及 15° 尖顶触发 2 种触发方式(见 图 2)。试件横截面尺寸如 图 1 所示, 通过合理设计, 保证每种试件均具有相同的横截面积。为满足试件能够稳定固定于试验机上, 试件设计了如 图 2 所示的底座, 底座由金属外壳及树脂浇筑部分组成, 底座尺寸为 $80 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$, 高度为 20 mm, 复合材料元件有 20 mm 的部分插入树脂浇筑的底座中, 试件高度(带底座)为 100 mm。

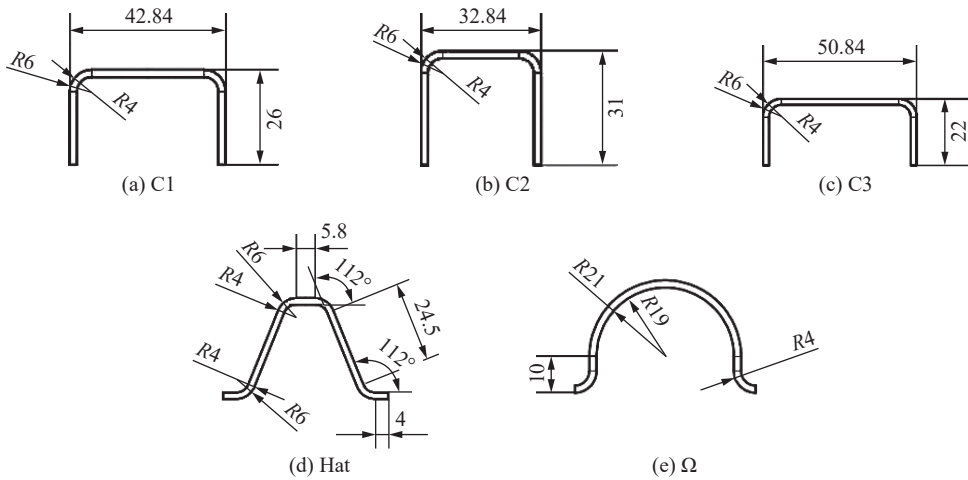


图 1 试件横截面尺寸(单位: mm)

Fig. 1 Cross-sectional dimensions of specimens (unit: mm)

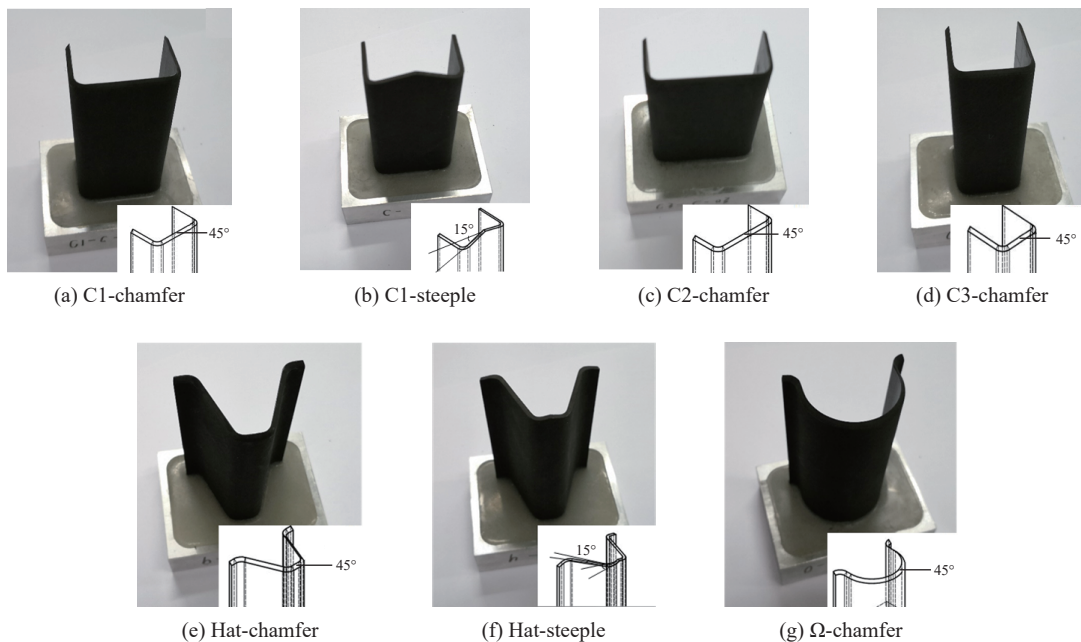


图 2 试件照片

Fig. 2 Photos of the specimens

1.2 试验设备及试验方法

轴向压缩试验采用 Instron VHS 160/100-20 高速液压伺服试验机进行, 如图 3 所示。该试验机由液压系统、水冷系统、机架和控制系统 4 部分组成, 通过液压作动缸与气体蓄能器组合提供加载能量, 实现恒速动态加载。试验机最大加载速度为 20 m/s, 最大冲击动载荷为 100 kN。



图 3 高速液压伺服试验机

Fig. 3 High speed hydraulic servo testing machine

试验载荷及位移分别由试验机上的力传感器及位移传感器测得。在加载过程中, 采用高速摄像机 (Photron SA-X) 记录试件的变形及破坏情况。加载速度分别为 0.01、0.1、1 m/s, 最大压缩进程为 54 mm。试验设备及试件夹持方式如图 4 所示, 试件通过前后两个固定块及螺栓固定在试验机底座上, 支持装置通过螺栓固定于试验机台面, 支持装置可以避免试验机压头在加载过程中发生失稳。试验矩阵如表 1 所示, 每个工况重复 3 次试验以保证可重复性。

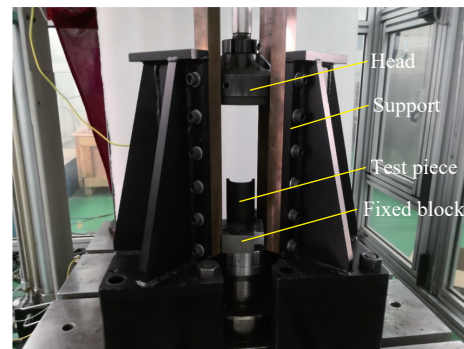


图 4 试件夹持方式

Fig. 4 Clamping method of the specimens

表 1 复合材料薄壁吸能结构压溃试验

Table 1 Composite thin-walled structures compression test matrix

试件构型	触发方式	加载速度/(m·s ⁻¹)	压缩行程内质量/g	试验组数
C1型	倒角触发	1	14.680	3
帽形	倒角触发	1	14.678	3
Ω形	倒角触发	1	14.677	3
C2型	倒角触发	1	14.680	3
C3型	倒角触发	1	14.680	3
C1型	尖顶触发	1	13.507	3
帽形	尖顶触发	1	14.029	3
C1型	倒角触发	0.01	14.680	3
C1型	倒角触发	0.1	14.680	3
帽形	倒角触发	0.01	14.678	3
帽形	倒角触发	0.1	14.678	3
Ω形	倒角触发	0.01	14.677	3
Ω形	倒角触发	0.1	14.677	3

1.3 吸能特性评价指标

图 5 为复合材料吸能结构渐进压溃的典型载荷-位移曲线, 加载曲线可以分为两个典型阶段: 初始压溃阶段(阶段 I), 载荷-位移曲线呈近似线性上升趋势, 到达载荷峰值后, 出现一定程度下降; 稳定压溃阶段(阶段 II), 载荷-位移曲线维持在一定载荷水平并上下波动。通常采用以下 4 个指标评价吸能结构的吸能特性。

(1) 初始峰值载荷 (F_p) 为结构在压溃瞬间测出的最大载荷值, 其数值应控制在一定范围内, 以避免对乘员产生较大过载。

(2) 平均压溃载荷 (F_{avg}) 为整个压溃过程的载荷平均值:

$$F_{avg} = \frac{\int F dl}{l} \quad (1)$$

式中: F 为压溃载荷, l 为压溃位移。

(3) 压溃载荷效率 (crushing load efficiency, η_{CLE}) 为平均压溃载荷与初始峰值载荷的比值:

$$\eta_{CLE} = \frac{F_{avg}}{F_p} \quad (2)$$

(4) 比吸能 (specific energy absorption, e_{SEA}) 为单位压溃质量的复合材料所吸收的能量, 是衡量结构吸能特性最重要的参数:

$$e_{SEA} = \frac{\int F dl}{m} \quad (3)$$

式中: m 为压溃位移内的试件质量。本文中取压头刚接触试件顶部即位移零点为吸能起始点, 取 54 mm 加载行程内的吸能指标进行比较。

2 结果与讨论

2.1 截面构型的影响

为研究截面构型对复合材料薄壁结构吸能特性的影响, 选取 C1 型、帽形及 Ω 形 3 种构型, 触发模式均为 45° 倒角触发, 加载速度为 1 m/s。由 3 种截面构型试件压溃过程中的典型载荷-位移曲线如图 6 所示。可知, 试件均为渐进压溃式破坏, 其中, 相较于帽形及 Ω 形试件, C1 型试件载荷到达峰值后下降更加明显, 且进入稳定压溃阶段的载荷较其他两种构型低。在相同触发模式及加载速度下, 帽形及 Ω 形试件的初始峰值载荷、平均压溃载荷及比吸能较接近。帽形及 Ω 形试件的平均压溃载荷较 C1 型试件分别高出 14.1% 和 14.6%, 比吸能较 C1 型试件分别高

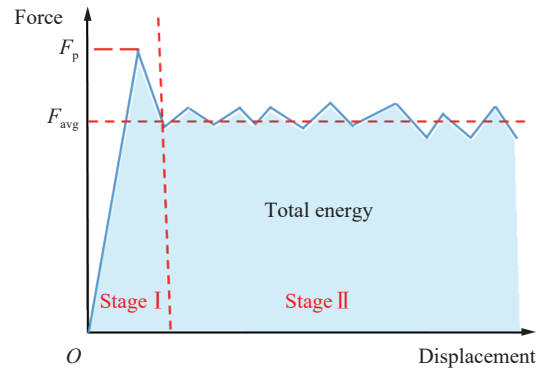


图 5 典型复合材料吸能试件渐进压溃载荷-位移曲线

Fig. 5 Typical progressive crushing load-displacement curve of composite energy-absorbing specimens

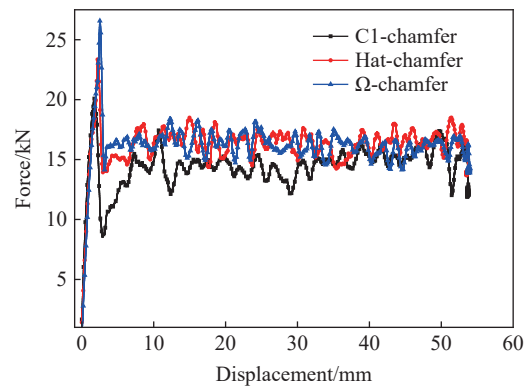


图 6 不同截面构型试件压溃过程中的典型载荷-位移曲线

Fig. 6 Typical force-displacement curves of the specimens with different cross-section shapes

出 14.3% 和 14.8%, 如图 7 所示。其中, 帽形及 Ω 形试件的初始峰值载荷相对较高, 主要原因是受截面构型和触发模式的共同影响。

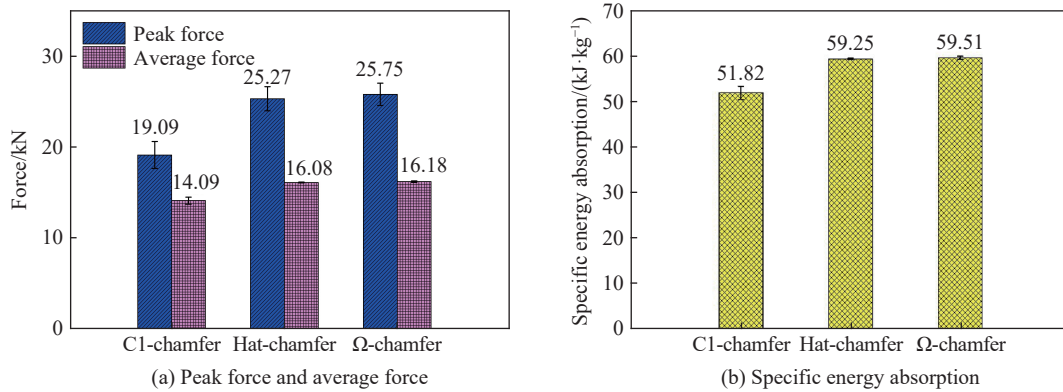


图 7 不同截面构型试件吸能特性对比

Fig. 7 Comparison of energy-absorption characteristics of the specimens with different cross-section shapes

试验机压头接触试件后, 试件顶部材料发生弯曲, 层间开裂使得内层碳纤维布向内弯曲, 外层碳纤维布向外弯曲, 与此同时, 在压头作用下, 试件产生大量较短的层内裂纹, 最后在层内裂纹根部发生剪切失效, 形成大量碎片并脱落, 如图 8 所示。在试件压溃过程中, 主要通过材料的弯曲、分层、剪切破坏, 以及压溃区之间的摩擦、压溃区与压头之间的摩擦吸能。

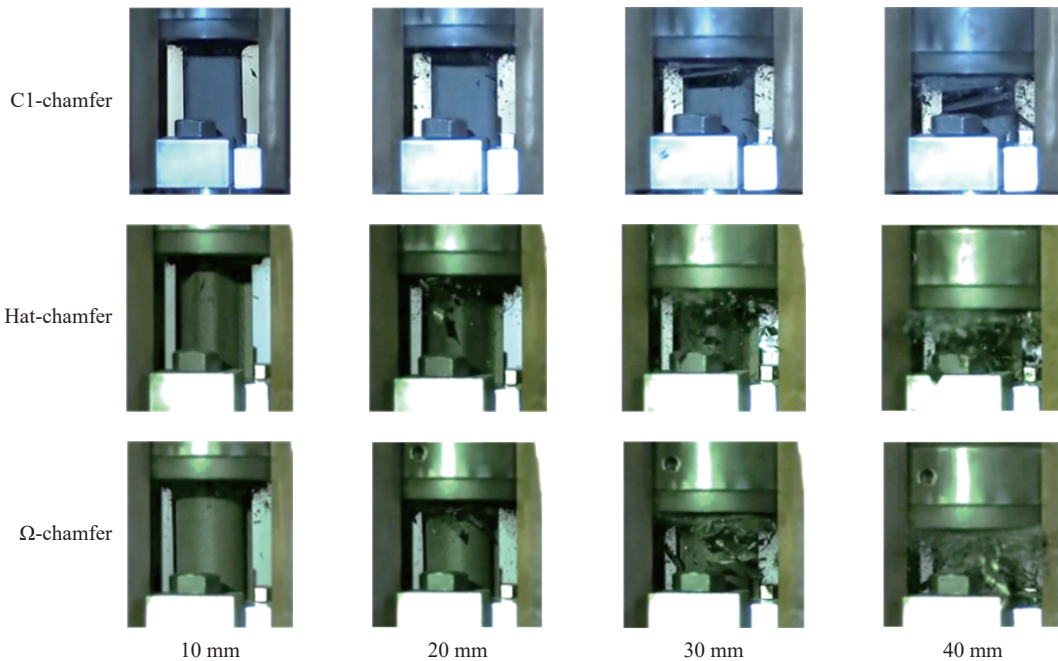


图 8 不同截面构型试件加载过程中的破坏情况(加载速度 1 m/s)

Fig. 8 Failure modes of the specimens with different cross-section shapes during loading (loading speed: 1 m/s)

由回收后的试件(见 图 9)可以看出, C1 型试件残留的碎片尺寸最大, 帽形次之, Ω 形最小。C1 型及帽形试件部分外层碳纤维布在拐角处由于应力集中, 形成了较长的轴向撕裂区域, C1 型试件部分内层碳纤维布向内发生弯曲折叠, 同时保留了部分较完整的碳纤维布。残留的碎片尺寸大、较完整的碳纤维布多表明试件在压溃过程中破坏不充分, 不利于结构承载与能量吸收。因此 C1 型试件平均压溃载荷及比吸能较低。Ω 形试件在压溃过程中不存在应力集中现象, 材料破坏充分, 平均压溃载荷及比吸能较高。

帽形试件由于拐角过渡较平缓, 应力集中有所缓解, 材料的破坏较充分, 因此其平均压溃载荷及比吸能与 Ω 形试件相当。

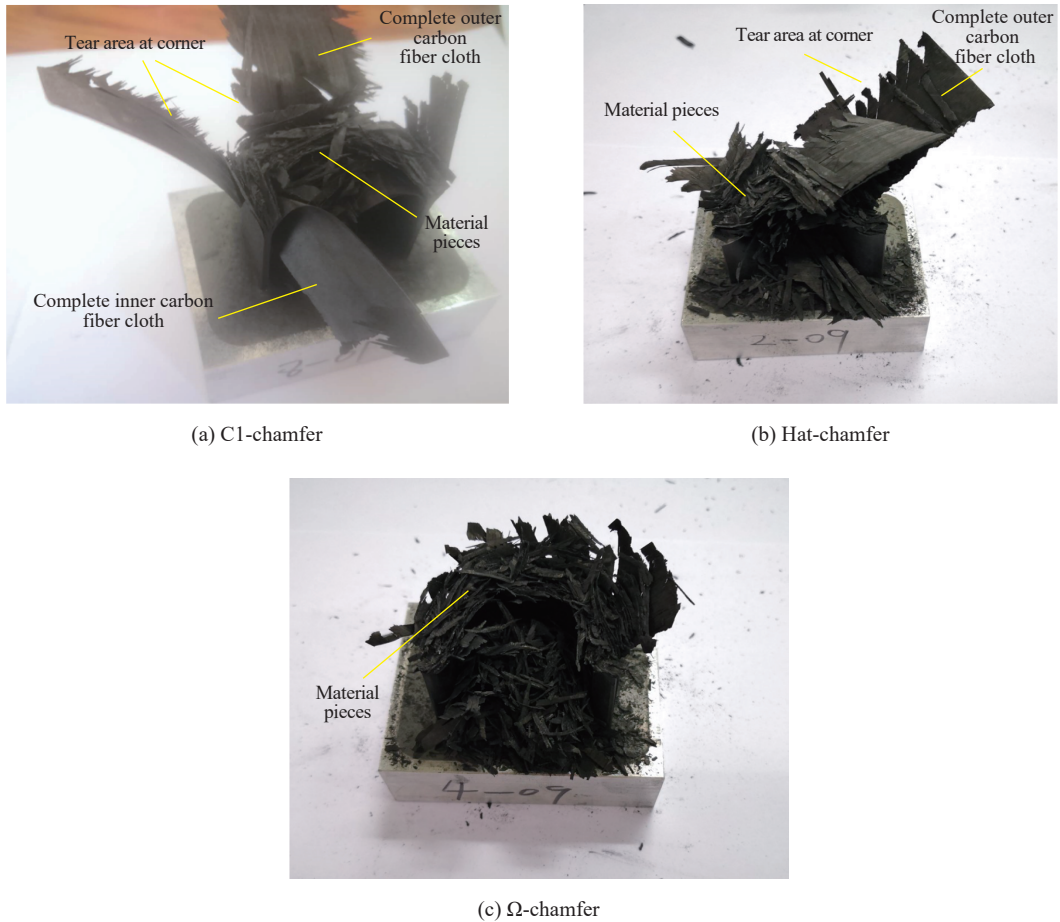


图 9 加载速度为 1 m/s 时不同截面构型试件的破坏形貌

Fig. 9 Failure morphology of the specimens with different cross-section configurations under loading speed of 1 m/s

2.2 截面长宽比的影响

为研究截面长宽比对复合材料薄壁结构吸能特性的影响, 选取 C1 型、C2 型及 C3 型试件, 触发模式均为 45°倒角触发, 加载速度 1 m/s。图 10 为 3 种长宽比试件加载过程中的典型载荷-位移曲线, 图 11 为不同长宽比试件吸能特性对比。由图 10~11 可以看出, 3 种长宽比试件的载荷-位移曲线较接近, 其中, C1 型试件平均压溃载荷较 C2 型和 C3 型试件分别高出 6.4% 和 5.1%, 比吸能较 C2 型和 C3 型试件分别高出 6.4% 和 5.0%。

3 种长宽比试件的破坏模式较相似, 在拐角处均存在碳纤维布的轴向撕裂, 残留的材料碎片宽度均与试件的厚度相当 (如图 9(a)、图 12 所示), 因此吸能特性较接近。但压溃过程中形成碎片的长度与试件的尺寸相关, 这也是 3 种长宽比试件吸能特性存在一定差异的原因。

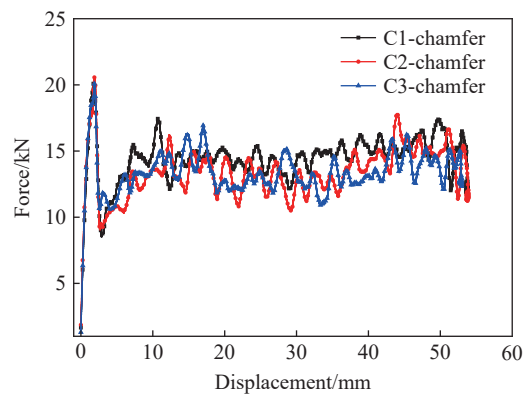


图 10 不同截面长宽比试件压溃过程中的典型载荷-位移曲线
Fig. 10 Typical force-displacement curves of the specimens with different section aspect ratios

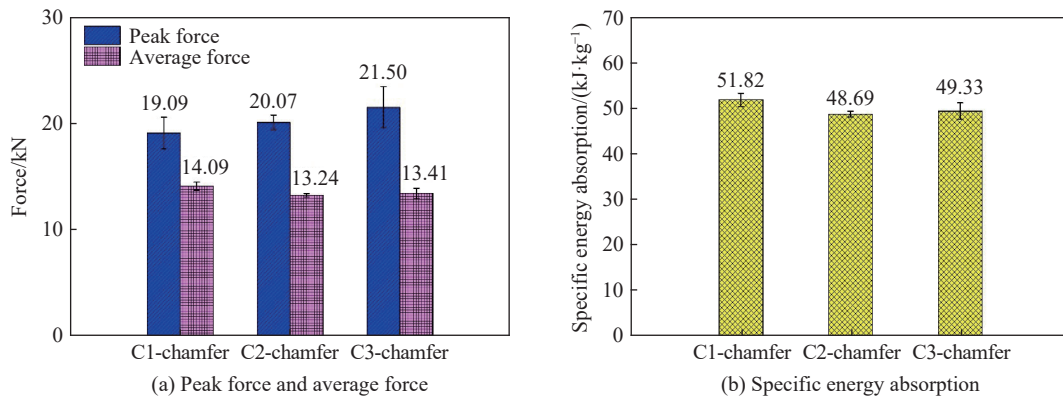


图 11 不同长宽比试件吸能特性对比

Fig. 11 Comparison of energy-absorption characteristics of the specimens with different section aspect ratios

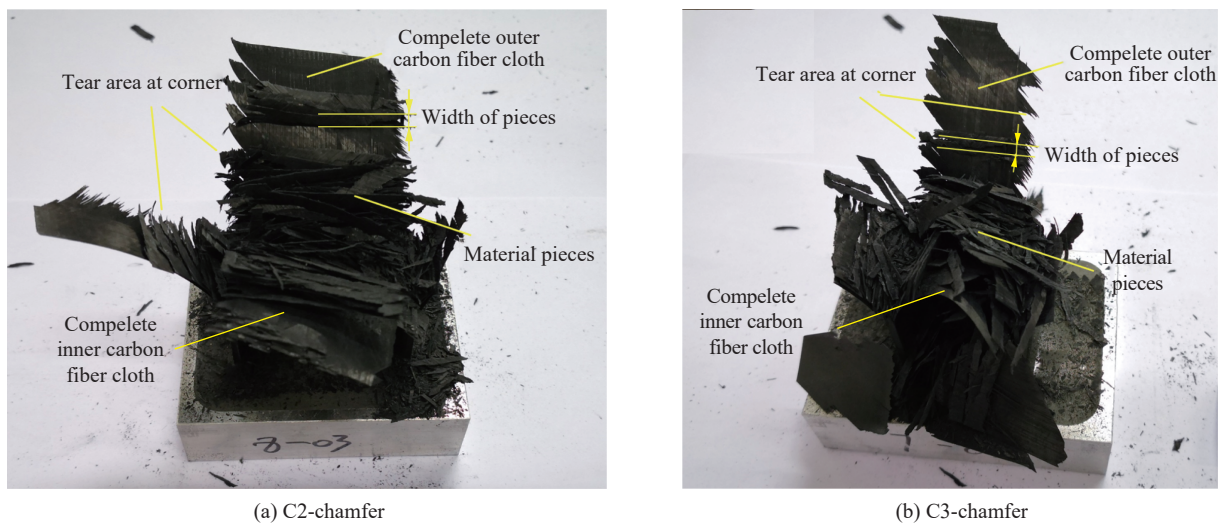


图 12 不同截面构型试件破坏形貌

Fig. 12 Failure morphology of the specimens with different cross-section shapes

2.3 触发模式的影响

为研究触发模式对复合材料薄壁结构吸能特性的影响,选取 45°倒角触发及 15°尖顶触发的 C1 型及帽形试件,加载速度为 1 m/s。图 13 为不同触发模式的 C1 型和帽形试件在压溃过程中的典型载荷-位移曲线,图 14 为不同触发模式试件吸能特性对比。可以看出,在压溃初始阶段,采用 15°尖顶触发时,载荷-位移曲线到达载荷峰值的时间显著增加,但稳定压溃阶段,两种触发模式的载荷-位移曲线差别较小。对于 C1 型试件,采用 45°倒角触发在降低峰值载荷方面效果更好。而采用 15°尖顶触发时,其载荷-位移曲线在压头向下加载到约 4 mm 即压头下降到拐角处时,出现一个小平台段,之后载荷继续上升,且曲线斜率增大,这是由于该触发方式在试件拐角以上区域削弱过多,而拐角以下削弱程度不够,未充分诱导结构的渐进破坏,试验构型与触发方式匹配较差。对于帽形试件,采用 15°尖顶触发可消除初始载荷尖峰,并且压溃载荷效率可以达到 89.50%,说明该帽形试件与响应的顶部触发方式匹配较好。试件尖顶压溃过程中,形成的碎片更小,如图 15 所示,表明试件顶部破坏更加充分。

由此也可知,在 2.1 节中,帽形及 Ω 形试件的初始峰值载荷相对较高,主要原因是不同截面构型复合材料薄壁结构最优的触发方式有所不同,45°倒角触发方式对帽形及 Ω 形试件的削弱程度不够,并非最优的触发模式,在未来工作中,将对倒角及尖顶的角度进行进一步优化,从而有效降低不同构型复合材料薄壁结构的峰值载荷。

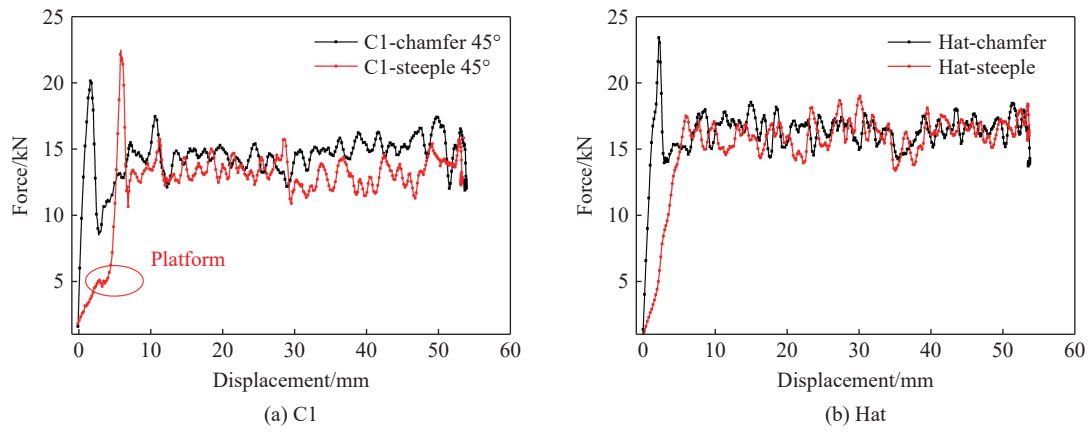


图 13 不同触发模式试件典型载荷-位移曲线

Fig. 13 Typical force-displacement curves of the specimens with different trigger methods

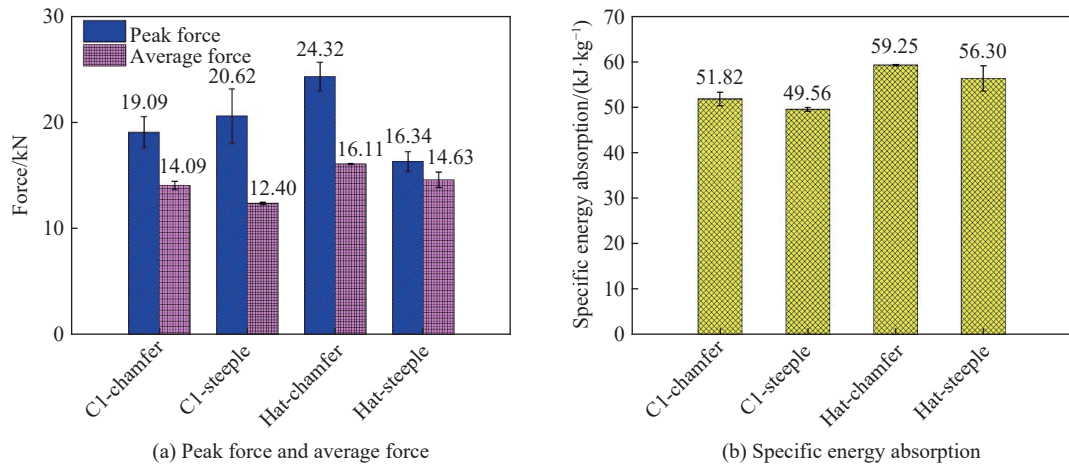


图 14 不同触发模式试件吸能特性对比

Fig. 14 Comparison of energy-absorption characteristics of the specimens with different trigger methods

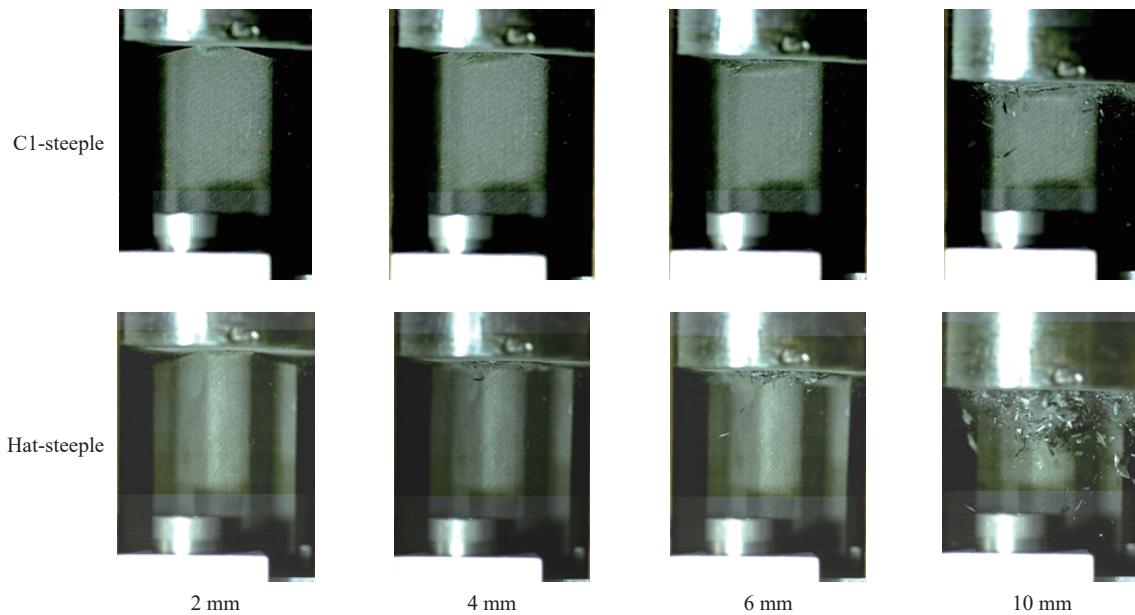


图 15 尖顶触发试件加载过程中破坏情况

Fig. 15 Failure modes of the specimens with steep trigger method

2.4 加载速度的影响

为研究加载速度的影响, 对比了 0.01、0.1 和 1 m/s 加载速度下, C1 型、帽形及 Ω 形试件的吸能特性。图 16~17 为 3 种构型试件在不同加载速度下的典型载荷-位移曲线和吸能特性对比。由图 17 可知, 当加载速度提高时, 3 种构型试件的初始峰值载荷、平均压溃载荷及比吸能均有一定程度的下降。当加载速度从 0.01 m/s 提高到 1 m/s 时, C1 型、帽形及 Ω 形试件的平均压溃载荷分别下降 6.1%、10.9% 和 6.1%, 比吸能分别下降 6.2%、11.0% 和 6.2%。3 种构型试件比吸能随加载速度变化情况如图 18 所示, 由图 18 可知, 随着加载速度的提高, 相较于 C1 型和 Ω 形试件, 帽形试件的比吸能下降更加明显。

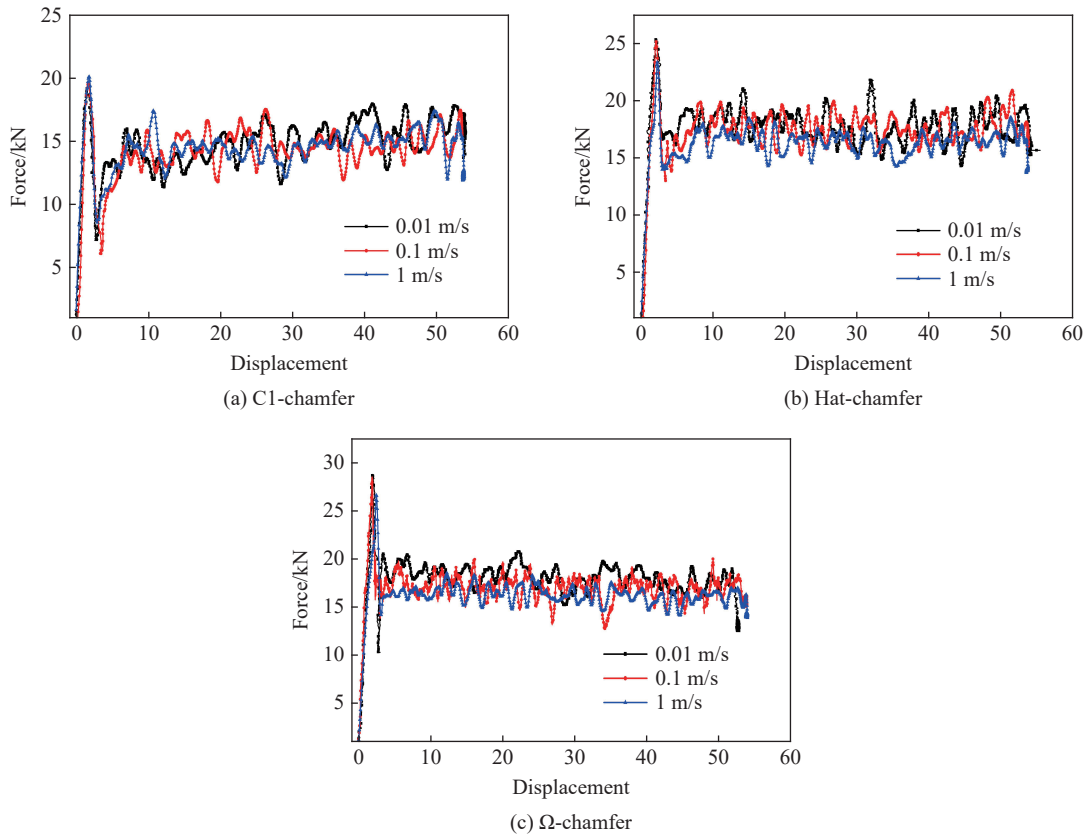


图 16 不同加载速度下的典型载荷-位移曲线

Fig. 16 Typical force-displacement curves of the specimens with different loading speeds

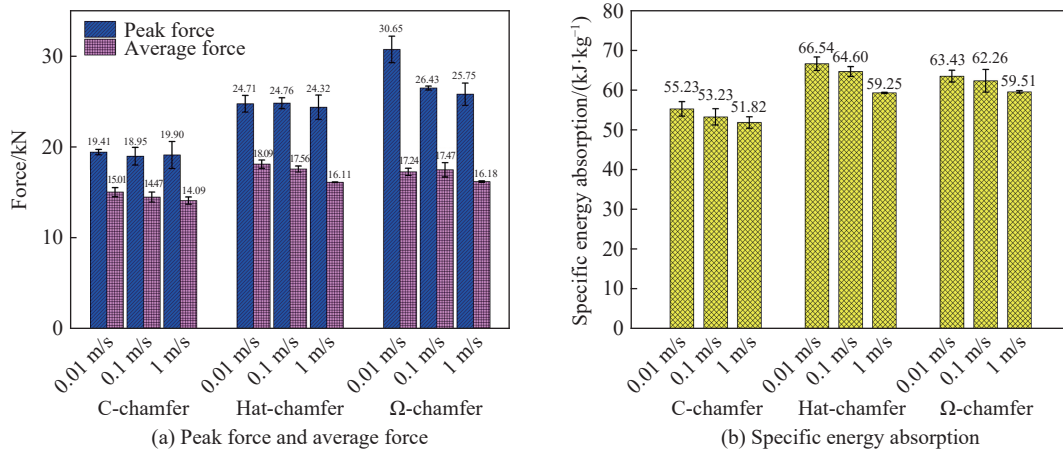


图 17 不同加载速度的试件吸能特性对比

Fig. 17 Comparison of energy-absorption characteristics of the specimens with different loading speeds

对比图 19(加载速度 0.01 m/s)和图 6(加载速度 1 m/s)试件在压溃过程的破坏情况可以看出,当加载速度为 0.01 m/s 时,试件在压溃过程中飞出的材料碎片较少,材料破坏充分。由试件破坏端口形貌可知,压溃端部保留了更多的材料碎片,并且层束更加杂乱、扭曲(见图 20),表明压溃区域经历了与压头充分摩擦与压实的过程,在一定程度增大了结构承载面积。而当加载速度为 1 m/s 时,试件在压溃过程中有大量的材料碎片飞出,从而降低了结构承载面积及材料利用率,减少了压头与压溃区之间、层束与碎片之间的摩擦吸能作用,因此试件的初始峰值载荷、平均压溃载荷及比吸能下降。

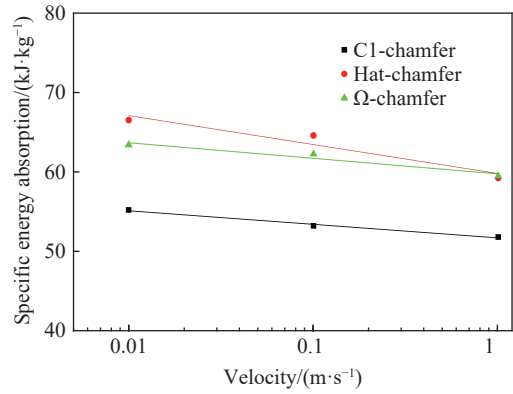


图 18 不同构型试件比吸能随加载速度变化情况

Fig. 18 Variation of specific energy absorption of the specimens of different section shapes with loading speed

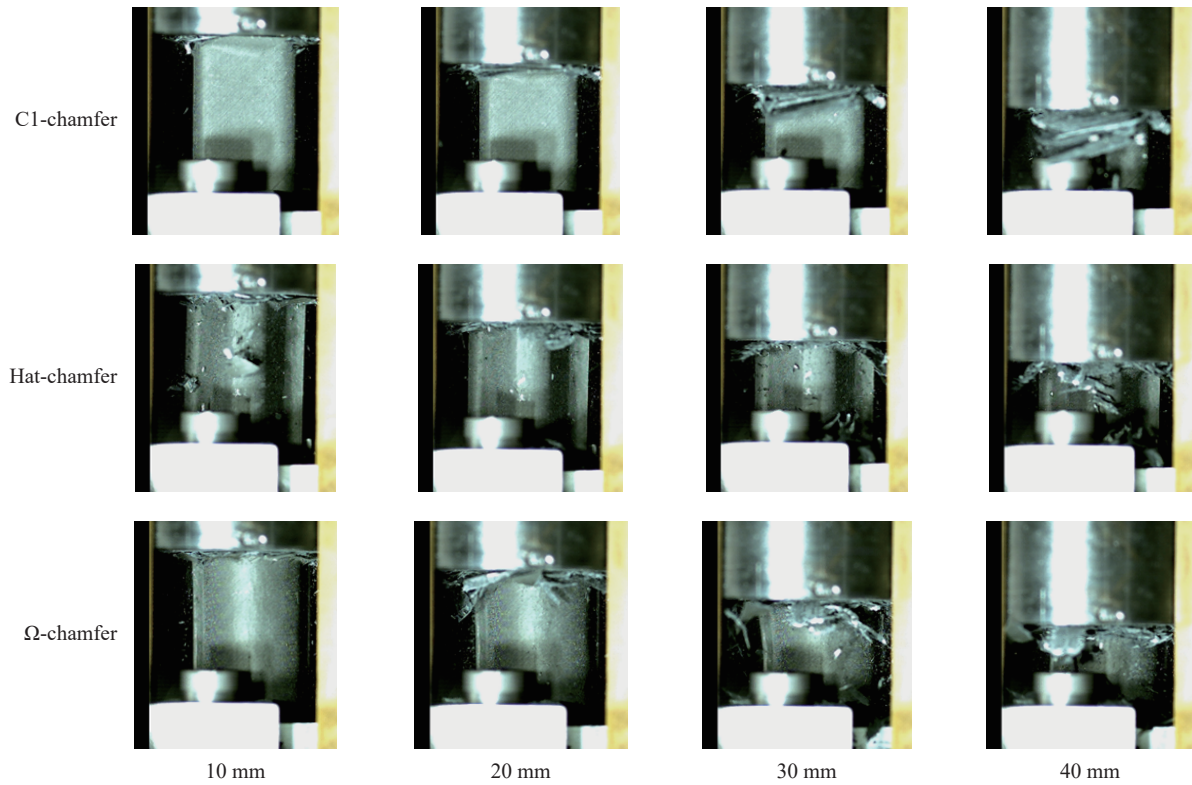


图 19 不同截面构型试件加载过程中破坏情况(加载速度 0.01 m/s)

Fig. 19 Failure modes of the specimens of different cross-section shapes during loading (loading speed: 0.01 m/s)

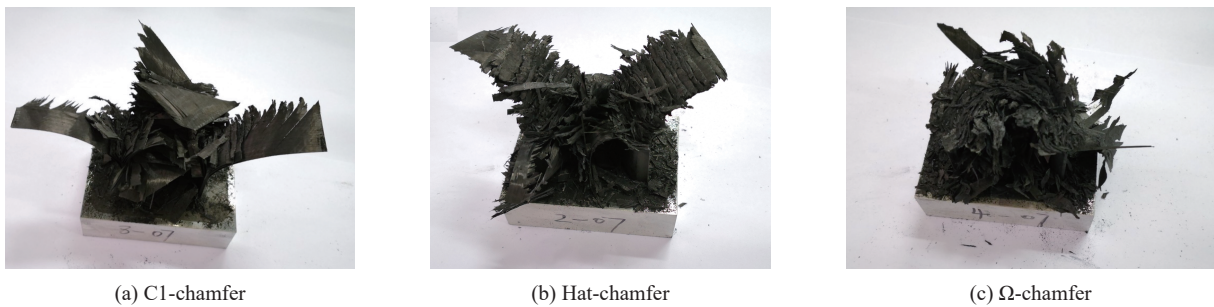


图 20 加载速度为 0.01 m/s 时不同截面构型试件破坏形貌

Fig. 20 Morphology of the specimens of different section shapes under loading speed of 0.01 m/s

3 结 论

基于高速液压伺服试验系统,开展了开剖面复合材料薄壁吸能结构的轴向压缩试验,分析了截面构型、截面长宽比、触发模式及加载速度对其吸能特性的影响,得到如下主要结论。

(1) 对于不同构型的 CCF300/8552A 复合材料薄壁吸能结构,在不同加载速度下均表现为破碎型失效模式。结构压溃过程中主要通过材料弯曲、分层、剪切破坏以及压溃区之间的摩擦吸能。其中摩擦吸能在结构压溃吸能过程中起着重要作用。

(2) 截面构型对复合材料薄壁结构的吸能特性影响显著,由于应力集中引起的材料破坏不充分是 C1 型试件吸能效果较帽形及 Ω 形差的主要原因。采用过渡光滑的截面构型可降低应力集中效应,从而提高结构的吸能效果。

(3) 截面长宽比对复合材料薄壁结构吸能特性有一定影响,但影响不如截面构型的影响显著,试件压溃后形成碎片的长度与试件的尺寸相关,这也是 3 种截面长宽比试件吸能特性存在差异的主要原因。

(4) 触发模式的不同主要影响复合材料薄壁结构的初始压溃阶段,对稳定压溃阶段影响较小。对于 C 形试件采用 45° 倒角触发效果更好,但触发角度仍有再优化的空间;对于帽形试件, 15° 尖顶触发为最优的触发方式。

(5) 随着加载速度的提高,复合材料薄壁结构的平均压溃载荷及比吸能减小。这是由于加载速度的提高会导致更多的材料碎片飞出,从而降低了结构承载面积及材料利用率,同时减少了压溃区的摩擦吸能。

参考文献:

- [1] REN Y R, JIANG H Y, JI W Y, et al. Improvement of progressive damage model to predicting crashworthy composite corrugated plate [J]. *Applied Composite Materials*, 2017, 25(1): 45–66. DOI: 10.1007/s10443-017-9610-z.
- [2] 刘小川,周苏枫,马君峰,等. 民机客舱下部吸能结构分析与试验相关性研究 [J]. *航空学报*, 2012, 33(12): 2202–2210.
LIU X C, ZHOU S F, MA J F, et al. Correlation study of crash analysis and test of civil airplane sub-cabin energy absorption structure [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2012, 33(12): 2202–2210.
- [3] 冯振宇,解江,李恒晖,等. 大飞机货舱地板下部结构有限元建模与适坠性分析 [J]. *航空学报*, 2019, 40(2): 522394. DOI: 10.7527/S1000-6893.2018.22394.
FENG Z Y, XIE J, LI H H, et al. Finite element modeling and crashworthiness analysis of large aeroplane sub-cargo structure [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2019, 40(2): 522394. DOI: 10.7527/S1000-6893.2018.22394.
- [4] 冯振宇,程坤,赵一帆,等. 运输类飞机典型货舱地板下部结构冲击吸能特性 [J]. *航空学报*, 2019, 40(9): 222907. DOI: 10.7527/S1000-6893.2019.222907.
FENG Z Y, CHENG K, ZHAO Y F, et al. Energy-absorbing characteristics of a typical sub-cargo fuselage section of a transport category aircraft [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2019, 40(9): 222907. DOI: 10.7527/S1000-6893.2019.222907.
- [5] 李松晏,郑志军,虞吉林. 高速列车吸能结构设计和耐撞性分析 [J]. *爆炸与冲击*, 2015, 35: 164–170. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)02-0164-07.
LI S Y, ZHENG Z J, YU J L. Energy-absorbing structure design and crashworthiness analysis of high-speed trains [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2015, 35: 164–170. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)02-0164-07.
- [6] SUBBARAMAIAH R, PRUSTY B G, PEARCE G M K, et al. Crashworthy response of fibre metal laminate top hat structures [J]. *Composite Structures*, 2017, 160: 773–781. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.10.112.
- [7] JIANG H Y, REN Y R, GAO B H, et al. Design of novel plug-type triggers for composite square tubes: enhancement of energy-absorption capacity and inducing failure mechanisms [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2017, 131: 113–136. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2017.06.050.
- [8] REN Y R, ZHANG H Y, XIANG J W. A novel aircraft energy absorption strut system with corrugated composite plate to improve crashworthiness [J]. *International Journal of Crashworthiness*, 2018, 23(1): 1–10. DOI: 10.1080/13588265.2017.1301082.
- [9] 冯振宇,周坤,裴惠,等. 复合材料薄壁方管准静态轴向压缩失效机理及吸能特性 [J]. *高分子材料科学与工程*, 2019,

- 35(8): 94–104. DOI: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2019.0220.
- FENG Z Y, ZHOU K, PEI H, et al. Failure mechanism and energy-absorption characteristics of composite thin-walled square tube under quasi-static axial compression load [J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2019, 35(8): 94–104. DOI: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2019.0220.
- [10] 解江, 马聪瑶, 霍雨佳, 等. 纤维铺层角度对复合材料薄壁圆管轴向压溃吸能特性影响研究 [J]. *振动与冲击*, 2018, 37(20): 205–211. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.20.031.
- XIE J, MA C Y, HUO Y J, et al. Effect of ply orientations on energy-absorbing characteristics of composite thin-walled circular tubes under axial compression [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(20): 205–211. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.20.031.
- [11] JIANG H Y, REN Y R, GAO B H. Research on the progressive damage model and trigger geometry of composite waved beam to improve crashworthiness [J]. *Thin-Walled Structures*, 2017, 119: 531–543. DOI: 10.1016/j.tws.2017.07.004.
- [12] KIM J S, YOON H J, SHIN K B. A study on crushing behaviors of composite circular tubes with different reinforcing fibers [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, 38(4): 198–207. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2010.11.007.
- [13] KAKOGIANNIS D, YUEN S C K, PALANIVELU S, et al. Response of pultruded composite tubes subjected to dynamic and impulsive axial loading [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2013, 55: 537–547. DOI: 10.1016/j.compositesb.2013.07.022.
- [14] 黄建城, 王鑫伟, 卞航. SMA 薄弱环节对复合材料圆管耐撞性影响的试验研究 [J]. *工程力学*, 2011, 28(10): 222–227.
- HUANG J C, WANG X W, BIAN H. Effect of SMA trigger on the crashworthiness of composite tubes [J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28(10): 222–227.
- [15] 王振, 宋凯, 朱国华, 等. 单向碳纤维复合材料锥管轴向吸能特性研究 [J]. *振动与冲击*, 2018, 37(7): 172–178.
- WANG Z, SONG K, ZHU G H, et al. Axial energy absorption characteristics of unidirectional carbon-fiber composite cone tubes [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(7): 172–178.
- [16] 邓亚斌, 任毅如, 蒋宏勇. 复合材料吸能圆管在半圆凹槽触发机制下的斜向压溃失效行为 [J]. *复合材料学报*, 2022, 39(4): 1796–1804.
- DENG Y B, REN Y R, JIANG H Y. Oblique crushing failure behaviors of composite energy-absorbing circular tube under the semi-circular cavity triggering mechanism [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(4): 1796–1804.
- [17] 谭丽辉, 徐涛, 崔晓梅, 等. 带有圆弧形凹槽金属薄壁圆管抗撞性优化设计 [J]. *爆炸与冲击*, 2014, 34(5): 547–553. DOI: 10.11883/1001-1455(2014)05-0547-07.
- TAN L H, XU T, CUI X M, et al. Design optimization for crashworthiness of metal thin-walled cylinders with circular arc indentations [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2014, 34(5): 547–553. DOI: 10.11883/1001-1455(2014)05-0547-07.
- [18] 殷之平, 李玉龙, 黄其青. 含诱导缺陷薄壁圆管耐撞性优化设计 [J]. *爆炸与冲击*, 2011, 31(4): 418–422. DOI: 10.11883/1001-1455(2011)04-0418-05.
- YIN Z P, LI Y L, HUANG Q Q. Optimal crashworthiness design of thin-walled circular tubes with triggering holes [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2011, 31(4): 418–422. DOI: 10.11883/1001-1455(2011)04-0418-05.
- [19] 黄建城. 含薄弱环节复合材料圆管轴向吸能特性研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011: 46–96.
- HUANG J C. On the axial energy absorption behaviour of composite tubes with crush triggers [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011: 46–96.
- [20] DEEPAK S. Crashworthy design and analysis of aircraft structures [D]. Philadelphia: Drexel University, 2013: 87–227.
- [21] 蒋宏勇. 复合材料薄壁结构的损伤耦合破坏模型及其吸能机理的研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2017: 33–36.
- JIANG H Y. Research on the damage coupling destruction model and energy-absorbing mechanism of composite thin-walled structure [D]. Changsha: Hunan University, 2017: 33–36.
- [22] ZHAO X, ZHU G H, ZHOU C Y, et al. Crashworthiness analysis and design of composite tapered tubes under multiple load cases [J]. *Composite Structures*, 2019, 222: 110920. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.110920.
- [23] 郝文乾, 卢进帅, 黄睿, 等. 轴向冲击载荷下薄壁折纹管的屈曲模态与吸能 [J]. *爆炸与冲击*, 2015, 35(3): 380–385. DOI: 10.11883/1001-1455-(2015)03-0380-06.
- HAO W Q, LU J S, HUANG R, et al. Buckling and energy absorption properties of thin-walled corrugated tubes under axial impacting [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2015, 35(3): 380–385. DOI: 10.11883/1001-1455-(2015)03-0380-06.
- [24] 解江, 张雪晗, 宋山山, 等. CFRP 薄壁 C 型柱轴向压缩破坏机制及吸能特性 [J]. *复合材料学报*, 2018, 35(12): 3261–3270. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20180319.002.

- XIE J, ZHANG X H, SONG S S, et al. Failure mechanism and energy-absorbing characteristics of CFRP thin-walled C-channels subject to axial compression [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2018, 35(12): 3261–3270. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20180319.002.
- [25] JIANG H Y, REN Y R. Crashworthiness and failure analysis of steeple-triggered hat-shaped composite structure under the axial and oblique crushing load [J]. *Composite Structures*, 2019, 229: 111375. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111375.
- [26] JOOSTEN M W, DUTTON S, KELLY D, et al. Experimental and numerical investigation of the crushing response of an open section composite energy absorbing element [J]. *Composite Structures*, 2011, 93(2): 682–689. DOI: 10.1016/j.compstruct.2010.08.011.
- [27] RICCIO A, RAIMONDO A, CAPRIO F D, et al. Experimental and numerical investigation on the crashworthiness of a composite fuselage sub-floor support system [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 150: 93–103. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.05.044.
- [28] RICCIO A, SAPUTO S, SELLITTO A, et al. On the crashworthiness behaviour of a composite fuselage sub-floor component [J]. *Composite Structures*, 2020, 234: 111662. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111662.
- [29] JACKSON A, DUTTON S, GUNNION A J, et al. Investigation into laminate design of open carbon-fibre/epoxy sections by quasi-static and dynamic crushing [J]. *Composite Structures*, 2011, 93(10): 2646–2654. DOI: 10.1016/j.compstruct.2011.04.032.
- [30] 解江, 宋山山, 宋东方, 等. 复合材料 C 型柱轴压失效分析的层合壳建模方法 [J]. *航空学报*, 2019, 40(2): 522395. DOI: 10.7527/S1000-6893.2018.22395.
- XIE J, SONG S S, SONG D F, et al. Stacked shell modeling method for failure analysis of composite C-channel subject to axial compression [J]. *Acta aeronautica et Astronautica Sinica*, 2019, 40(2): 522395. DOI: 10.7527/S1000-6893.2018.22395.
- [31] 汪洋, 吴志斌, 刘富. 复合材料货舱地板立柱压溃响应试验 [J]. *复合材料学报*, 2020, 37(9): 2200–2206. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20200111.001.
- WANG Y, WU Z B, LIU F. Crush experiment of composite cargo floor stanchions [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(9): 2200–2206. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20200111.001.
- [32] FERABOLI P. Development of a corrugated test specimen for composite materials energy absorption [J]. *Journal of Composite Materials*, 2008, 42(3): 229–56. DOI: 10.1177/0021998307086202.
- [33] WAIMER M, KOHLGRÜBER D, HACHENBERG D, et al. Experimental study of CFRP components subjected to dynamic crash loads [J]. *Composite Structures*, 2013, 105: 288–299. DOI: 10.1016/j.compstruct.2013.05.030.
- [34] PATEL S, VUSA V R, SOARES C G. Crashworthiness analysis of polymer composites under axial and oblique impact loading [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019, 156(1): 221–234. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2019.03.038.
- [35] WAIMER M, SIEMANN M H, FESER T. Simulation of CFRP components subjected to dynamic crash loads [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 101(1): 115–131. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2016.11.011.
- [36] 蒋宏勇, 任毅如, 袁秀良, 等. 基于非线性渐进损伤模型的复合材料波纹梁耐撞性能研究 [J]. *航空学报*, 2017, 38(6): 220717. DOI: 10.7527/S1000-6893.2016.220717.
- JIANG H Y, REN Y R, YUAN X L, et al. Crashworthiness of composite corrugated beam based on nonlinear progressive damage model [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2017, 38(6): 220717. DOI: 10.7527/S1000-6893.2016.220717.

(责任编辑 曾月蓉)