

DOI:10.16356/j.1005-2615.2023.01.006

## 复合材料波纹腹板梁坠撞试验与数值模拟

李 姣<sup>1</sup>, 于 健<sup>2</sup>, 李宇翔<sup>1</sup>

(1. 航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610091; 2. 南京航空航天大学通用航空与飞行学院, 南京 211106)

**摘要:** 为了探究复合材料波纹腹板梁在坠撞过程中的吸能性能, 对复合材料波纹腹板梁试验件进行了动态冲击压溃试验研究, 得到了试验件的损伤破坏形貌以及载荷和能量的历程曲线。基于 ABAQUS/Explicit 平台二次开发得到了模拟复合材料波纹腹板梁冲击压溃过程的仿真分析模型, 模型采用了改进的 Hashin 损伤判定准则和 Choi-Chang 准则综合判断单元失效, 并结合 Cohesive 界面单元, 可较为真实地反映所研究复合材料层合结构的各向异性和渐进损伤特性。通过数值模拟得到了能量评估参数比吸能 (Specific energy absorption, SEA) 和平均压溃载荷, 与试验结果进行了对比分析。基于仿真分析模型, 本文进一步研究了不同波数的复合材料波纹腹板梁的吸能能力。数值模拟结果表明: 波纹腹板梁在冲击载荷作用下发生了渐进压溃失效; 平均压溃载荷的相对误差较小, 验证了模型的有效性; 在腹板单波长度不变的情况下, 波纹腹板梁的长度对抗冲击吸能的影响较大。当波纹腹板梁长度较小时, 结构容易失稳, 无法有效地吸收能量。

**关键词:** 波纹腹板梁; 层合板; 坠撞试验; 冲击压溃; 有限元法

**中图分类号:** TB332; O347.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2023)01-0051-07

## Drop Tests and Numerical Simulation of Composite Beams with Corrugated Web

LI Jiao<sup>1</sup>, YU Jian<sup>2</sup>, LI Yuxiang<sup>1</sup>

(1. AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610091, China; 2. College of General Aviation and Flight, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106, China)

**Abstract:** To investigate the ability of energy absorption of composite beams with corrugated web in the crash process, the drop tests of composite beams with corrugated web are carried out, and the morphology of fracture, load and energy history curves are obtained. Based on the ABAQUS/Explicit platform, a simulation analysis model is developed to simulate the impact collapse process of composite beams with corrugated web by secondary development. The improved Hashin criterion and Choi-Chang criterion are used with Cohesive interface element. The anisotropy and progressive damage of composite laminates are implemented. Specific energy absorption (SEA) and average loads are obtained by numerical simulation, which is verified by experimental results. Based on this model, further studies on the energy absorption of composite beams with corrugated web are analyzed with different wavenumbers. The progressive damage of corrugated web beams under impact loads are simulated by the developed FE model. The relative errors of average crushing load are small, which verifies the validity of the FE model. When the wave length of web is defined, the length of corrugated web beams has influence on energy absorption under impact. The shorter beam with corrugated web is instability and ineffective in energy absorption.

**基金项目:** 江苏省自然科学基金青年基金(BK20220871); 天目湖校区人才启动基金。

**收稿日期:** 2022-10-10; **修订日期:** 2022-11-20

**通信作者:** 于健, 男, 工学博士, 讲师, E-mail: jian.yu@nuaa.edu.cn。

**引用格式:** 李姣, 于健, 李宇翔. 复合材料波纹腹板梁坠撞试验与数值模拟[J]. 南京航空航天大学学报, 2023, 55(1): 51-57. LI Jiao, YU Jian, LI Yuxiang. Drop tests and numerical simulation of composite beams with corrugated web[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55(1): 51-57.

**Key words:** beams with corrugated web; laminates; drop test; impact crushing; finite element method (FEM)

复合材料具有结构可设计性,与组分材料相比,有更高的比强度和比模量(刚度),更广泛的使用温度范围,优良的化学稳定性(陶瓷基复合材料以及树脂基复合材料具有良好的耐腐蚀性),良好的抗疲劳、冲击和蠕变性能以及较高的断裂韧性等。在航空航天领域,复合材料结构已成为直升机抗坠毁结构首选的吸能材料,被广泛运用于机身底部的地板结构中,如图1所示。

复合材料波纹腹板梁作为飞行器吸能结构的重要组成元件,研究其在冲击压溃过程中的平均载荷和比吸能(Specific energy absorption, SEA)等吸能参数,对提高飞行器的抗坠毁能力具有重要指导意义。目前,国内外研究人员对复合材料吸能结构的研究多集中于准静态加载的条件下<sup>[1]</sup>,缺少瞬态冲击下的研究。同时由于复合材料结构冲击试验的周期长、难度大、成本高等,可通过数值方法来模拟复合材料波纹腹板梁的轴向冲击压溃过程。

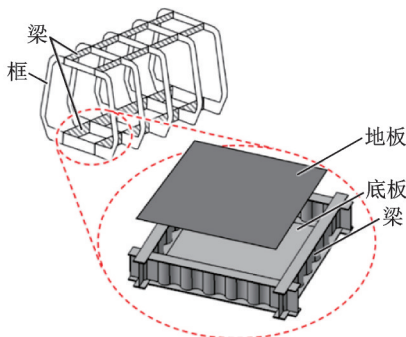


图1 波纹腹板梁吸能结构

Fig.1 Corrugated web beam in energy absorption structure

国内外研究人员提出了多种数值模拟方法对复合材料吸能结构耐撞性能进行研究。苏璇<sup>[2]</sup>采用参数等效的方法,将复合材料层合板等效为弹塑性材料,运用MSC.Dytran软件模拟了波纹腹板梁在冲击载荷下的动态响应,数值结果与试验结果具有较好的一致性。但该方法忽略了复合材料的各向异性和细观破坏形式,因而无法准确地表征复合材料结构在冲击载荷下的损伤失效形式。Sokolinsky等<sup>[3]</sup>运用连续介质损伤力学,基于ABAQUS/Explicit对波纹腹板梁的准静态轴向压缩进行了模拟,并讨论了复合材料的4种失效模式,但其采用的是最大应力失效准则,未考虑剪切破坏对纤维和基体的影响。

还有研究表明,复合材料抗坠毁结构中不同形式的薄弱环节对构件的吸能水平有较大影响,对薄弱环节进行优化设计可改进结构的吸能形式,提高

耐撞性能<sup>[4-5]</sup>。本文设计了铺层形式为 $[(\pm 45)_3/(0, 90)/(\pm 45)_3]$ 的复合材料波纹腹板梁,并设计实施了坠撞试验。基于复合材料层合板的常见失效模式以及渐进损伤演化规律,并结合改进的Hashin损伤判定准则,提出了针对复合材料波纹腹板梁耐撞性仿真分析方法。以ABAQUS/Explicit为平台开发了适用于复合材料波纹腹板梁渐进损伤分析流程,对其耐撞性能进行了数值仿真研究。并与试验结果对比分析,验证了数值模拟方法的准确性。最后,研究了不同长度的波纹腹板梁元件的吸能能力,获得了耐撞性能与梁结构参数之间的关系。

## 1 复合材料波纹腹板梁吸能结构

本文所研究的波纹腹板梁结构形式如图2所示,波纹形腹板的圆弧半径 $R=25\text{ mm}$ ,铺层总厚度是 $1.6\text{ mm}$ ,定义薄弱环节的端部诱导角半径为 $r$ ,波纹腹板梁的高度 $H=400\text{ mm}$ 。

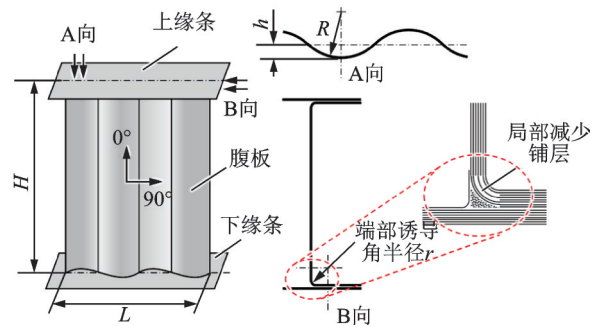


图2 复合材料波纹腹板梁示意图

Fig.2 Schematic diagram of composite beam with corrugated web

波纹腹板梁的铺层形式为 $[(\pm 45)_3/(0, 90)/(\pm 45)_3]$ ,铺层所用的碳纤维单向材料属性由表1所给出。复合后所制成的层合板的层间强度以及能量释放率见表2。

铺层形式的波纹腹板梁中,预置的薄弱环节有效地降低冲击峰值载荷,明确了破坏起始位置(薄

表1 碳纤维单向材料性能参数

Table 1 Mechanical parameters of CFRP

密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	拉伸模量/GPa			剪切模量/GPa		
	$E_{11}$	$E_{22}$	$E_{33}$	$G_{12}$	$G_{13}$	$G_{23}$
2.53	120	9.5	9.5	5	5	3.2
	强度/MPa				泊松比	
$X_t$	$Y_t$	$X_c$	$Y_c$	S	$\nu_{12}$	$\nu_{23}$
1 000	40	700	180	70	0.31	0.52

表 2 碳纤维层合板层间参数

**Table 2 Interlaminar parameters of CFRL**

N/MPa	S/MPa	T/MPa
21	28	28
$G_{Ic}/(J \cdot m^{-2})$	$G_{IIc}/(J \cdot m^{-2})$	$G_{IIIc}/(J \cdot m^{-2})$
306	632	632

弱环节处),并能参与引导波纹腹板梁的压溃过程<sup>[6-8]</sup>。如图 2 所示,本文所研究的波纹腹板梁采用了参考文献[8-9]中的端部诱导角半径  $r=2.5\text{ mm}$  的薄弱环节。

在数值研究中所建立的结构等效模型中,对波纹腹板梁的薄弱环节也进行了等效处理。将厚度为  $1.6\text{ mm}$  的薄弱环节(圆弧区),简化为自腹板下端竖直向上高度为  $15\text{ mm}$  的等效薄弱区域,并对该区域的材料刚度进行折减等效。假设薄弱环节处的等效材料与旁边的复合材料层板具有相同的轴向压缩刚度,当施加一定的轴向压缩载荷,圆弧形薄弱环节与等效薄弱环节的压缩变形量相同,由此可求得长  $15\text{ mm}$  的等效薄弱环节的厚度值。图 2 中给出了等效薄弱环节的设计图。

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{12P(r - r\sin\theta)^2}{ELt^3} r d\theta = \frac{Ph_e}{ELt_e} \quad (1)$$

式中: $L$ 代表波纹腹板梁宽度, $t_e$ 为等效薄弱环节的厚度, $h_e$ 为数值模型中等效薄弱环节的高度, $r$ 代表实际圆弧形薄弱环节的半径。已知所研究的圆弧形薄弱环节  $r=2.5\text{ mm}$ ,则通过式(1)可得  $t_e=0.92\text{ mm}$ 。

采用数值方法对波纹腹板梁的抗冲击性能进行仿真分析时,对模型底端高度为  $15\text{ mm}$  的区域进行等效处理。在厚度不变的情况下,对材料刚度进行折减,折减因子为  $D_e = t_e/t = 0.575$ 。

## 2 波纹腹板梁耐撞性试验

波纹腹板梁的坠撞过程可被视为结构的轴向冲击压溃,试验件采用碳纤维单向布铺设复合而成,试验件尺寸与铺层形式同前节,坠撞试验选用了三波波纹腹板梁试验件(图 3),其长度  $L=120\text{ mm} \times 3=360\text{ mm}$ 。同时,为提高波纹腹板梁



图 3 三波波纹腹板梁试验件照片

Fig.3 Photo of specimen of beam with three-wave corrugated web

在轴向压溃试验中的稳定性,在腹板两侧最外层各铺设一层玻璃纤维双向布。

复合材料波纹腹板梁坠撞试验中,试验件投放高度为  $2.12\text{ m}$ ,投放质量为  $108\text{ kg}$ 。试验开始后,记录试验件在坠撞过程中的载荷时间历程;用高速摄像机对试验过程进行摄像记录,位移(即试件压缩量)、碰撞后峰值速度及加速度时间历程均通过对高速摄像数据处理后得到。

基于坠撞试验数据,并通过观察波纹腹板梁的破坏现象与失效模式,分别得到峰值载荷、平均载荷、吸收能量等数据。图 4 和图 5 分别给出了试验中呈现三波波纹腹板梁稳定压溃过程的载荷-时间曲线和能量-时间曲线。三波波纹腹板梁试验件的主要坠撞试验结果和吸能参数如表 3 所示。

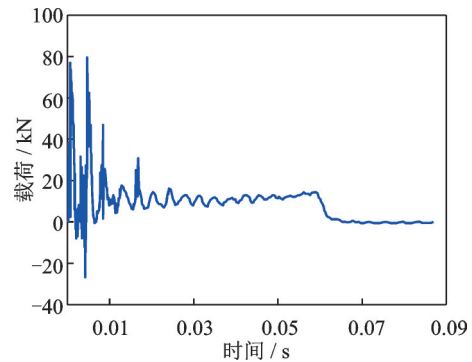


图 4 轴向冲击载荷-时间曲线

Fig.4 Axial impact load-time curve

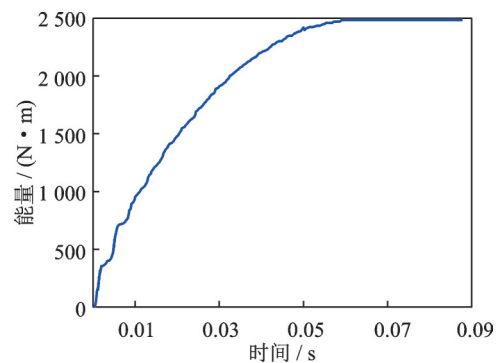


图 5 吸收能量-时间曲线

Fig.5 Energy absorption-time curve

表 3 复合材料波纹腹板梁坠撞试验结果

Table 3 Results of drop tests of composite beams with corrugated web

试验件编号	3A-1	3A-2	3A-3	3A-4
峰值载荷/kN	82.66	94.02	48.29	55.82
平均载荷/kN	13.54	12.84	16.96	16.28
峰值加速度/g	13.80	15.85	18.64	16.39
峰值速度/( $m \cdot s^{-1}$ )	6.42	6.41	6.44	6.45
压缩量 $L$ /mm	180.65	189.19	126.85	130.22
总功量 $Mg$ /kJ	2.45	2.46	2.39	2.40
吸收功量/kJ	2.45	2.43	2.15	2.12

坠撞试验结果表明,复合材料波纹腹板梁的压溃破坏过程主要分为两个阶段:初始局部破坏阶段和稳定压溃破坏阶段。波纹腹板梁的抗失稳能力较高,破坏过程稳定,有较高的吸能性能。本试验有效地模拟了坠撞冲击压溃过程,对于该型复合材料层合结构具有代表意义。

### 3 复合材料波纹腹板梁有限元仿真分析

#### 3.1 模型基本理论

层合板可视为是由多个单层板构成,把多层复合材料单层板转化为具有相同截面面积的单层板,其强度也是通过单层板的强度来预测。复合材料拥有多种失效准则,在有限元数值计算过程中,单层板达到了失效条件,材料即发生失效。通常在宏观上可以认为复合材料层合板是正交各向异性材料。

单层板在材料主方向的应力-应变关系为

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

本文通过 Hashin 准则来判断单层板的失效,采用 Choi-Chang 准则<sup>[10]</sup>判断分层。

基体拉伸损伤判定

$$\left(\frac{\sigma_y + \sigma_z}{Y_t}\right)^2 + \frac{\tau_{yz} - \sigma_y \sigma_z}{S^2} + \left(\frac{\tau_{xy}}{S}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{xz}}{S}\right)^2 \geq 1 \quad (3)$$

式中: $\sigma_y$ 和 $\sigma_z$ 代表2、3方向的应力; $S$ 则表示基体剪切强度; $Y_t$ 代表基体拉伸强度; $\tau_{xy}$ 和 $\tau_{xz}$ 代表剪切应力。

基体压缩损伤判定

$$\left(\frac{\sigma_y + \sigma_z}{2S}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_y + \sigma_z}{Y_c}\right) \left[ \left(\frac{Y_c}{2S}\right)^2 - 1 \right] + \frac{1}{S^2} (\tau_{yz}^2 - \sigma_y \sigma_z) + \left(\frac{\tau_{xy}}{S}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{xz}}{S}\right)^2 \geq 1 \quad (4)$$

式中 $Y_c$ 代表压缩强度。

纤维拉伸损伤判定

$$\left(\frac{\sigma_x}{X_t}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{xy}}{S}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{xz}}{S}\right)^2 \geq 1 \quad (5)$$

式中: $X_t$ 代表纤维纵向的拉伸强度; $\sigma_x$ 代表纤维纵向的应力; $\tau_{xy}$ 和 $\tau_{xz}$ 代表剪切应力。

纤维压缩损伤判定

$$\left(\frac{\sigma_x}{X_c}\right)^2 \geq 1 \quad (6)$$

式中: $X_c$ 代表纤维压缩强度; $\sigma_x$ 代表纤维纵向的应力。

分层判定标准如下

$$D_a \left[ K \left( \frac{\sigma_{xz}^n}{S} \right)^2 + K \left( \frac{\sigma_{yz}^n}{S} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_y^{n+1}}{Y} \right)^2 \right] \geq 1 \quad (7)$$

式中: $\sigma_{xz}^n$ 、 $\sigma_{yz}^n$ 为上铺层的横向剪应力; $\sigma_y^{n+1}$ 代表下铺层的横向正应力。式中的参数 $K$ 随铺层厚度方向的拉和压而不同,具体如下

$$K = \begin{cases} \left( 1 + \frac{\sigma_z^n + \sigma_z^{n+1}}{2Y_t} \right)^\beta & \sigma_z \geq 0 \\ \left( 1 + \frac{\sigma_z^n + \sigma_z^{n+1}}{2Y_c} \right)^\beta & \sigma_z < 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\beta$ 代表界面性能参数,其值等于2; $\sigma_z^n$ 、 $\sigma_z^{n+1}$ 分别表示上、下铺层沿厚度方向上的正应力。

本文除了采用 Choi-Chang 准则模拟单层板内部的分层损伤,还引入了 Cohesive 单元,模拟单层板之间的分层损伤。Cohesive 单元分层破坏判定公式为

$$\left(\frac{\tau_3}{N}\right)^2 + \left(\frac{\tau_2}{S}\right)^2 + \left(\frac{\tau_1}{T}\right)^2 = 1 \quad (9)$$

式中: $N$ 、 $S$ 、 $T$ 分别表示模式 I、II、III 的层间强度; $\tau_3$ 、 $\tau_2$ 、 $\tau_1$ 表示层间应力。当式(9)成立时,Cohesive 单元发生破坏,并进行刚度退化。

当复合材料内部有损伤萌生并扩展,为达到模拟材料损伤的目的,需要对模型的刚度进行折减。Camanho 等<sup>[11]</sup>提出了一种三维刚度退化模型,能够较为准确地模拟材料损伤破坏的过程,计算精度和效率较高。本文基于试验研究结果及所选用材料的力学特性,在上述退化模型的基础上进行了适用性调整。由于 Hashin 准则是以纤维的拉伸强度为主导,故损伤演化过程中所对应的模型退化程度较高。保持基体的刚度折减系数不变,将纤维的刚度折减系数设置为0.01。另外,考虑到当分层破坏发生时,会导致结构的稳定性降低,轴向承压能力严重下降,其破坏后的刚度系数也折减至0.01。本文有限元模型所使用的刚度折减方案具体如表4所示。

表4 碳纤维层合板刚度折减系数

失效模式	刚度折减系数					
	$E_{xx}$	$E_{yy}$	$E_{zz}$	$G_{xy}$	$G_{xz}$	$G_{yz}$
基体拉裂	—	0.2	—	0.2	—	0.2
基体压裂	0.4	—	—	0.4	0.4	—
纤维拉裂	0.01	—	—	0.01	0.01	—
纤维压断	0.01	—	—	0.01	0.01	—
分层失效	—	—	0.01	—	0.01	0.01

#### 3.2 有限元模型

本文所研究的波纹腹板梁是由16层单向复合材料铺成,单层厚度仅有0.1 mm,为保证数值计算仿真

过程中的单元质量,同时提高计算效率、降低计算成本,对波纹腹板梁有限元模型进行了简化处理。基于层合板理论,将4层单向复合材料合并等效为一个实体层,厚度方向共4层实体单元,每层单元厚度为0.4 mm。在每两层实体单元之间布置一层 Cohesive 单元,共计7层,有限元模型如图6所示。

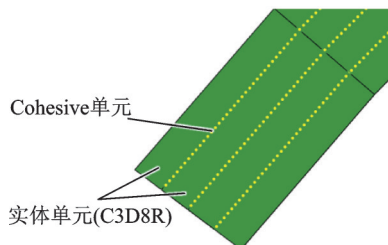


图6 模型厚度方向单元类型示意图

Fig.6 Element types along thickness direction of FE model

由于在实际压溃过程中波纹腹板梁上、下缘条的吸能能力几乎可忽略不计,所以在仿真模型中去掉了上、下缘条。将试验平台简化为两个刚性平板,定义上平台质量为108 kg。

经过等效处理和单元离散后,波纹腹板梁数值仿真模型共130 928个单元,其中实体单元74 816个,Cohesive单元56 112个。模型如图7所示。波纹腹板梁与刚性平台之间定义接触对,接触类型为面面接触,整体模型采用自接触算法,并设置摩擦系数为0.1。

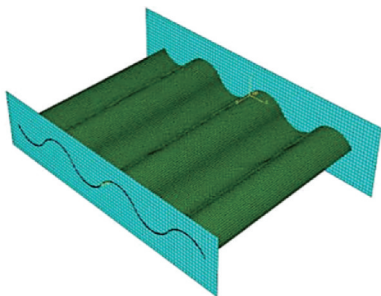
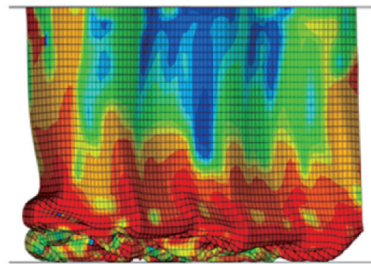


图7 三波波纹腹板梁有限元模型

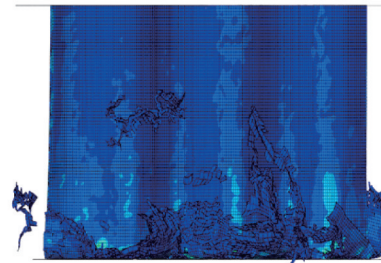
Fig.7 FE model of a composite beam with three-wave corrugated web

### 3.3 计算结果及分析

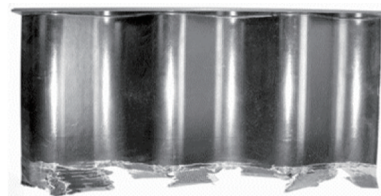
图8为波纹腹板梁有限元仿真结果以及试验件破坏后的照片。其中,图8(a)中波纹腹板梁模型采用了等效的弹塑性本构,与所提出的层合板本构进行对比分析。压溃发生时,在模型底端薄弱环节处首先出现应力集中区域,随后高应力区出现局部屈曲并向上延伸。整个压溃过程稳定进行。图8(b)所示的波纹腹板梁模型采用了层合板本构。在压溃过程中,梁腹板底端屈曲,导致局部应变集中,随后该区域内部分 Cohesive 单元失效,结构出现分层损伤。损伤发生后,模型载荷重新分布,导致腹板



(a) Stress nephogram of a three-wave corrugated web simulated by the elastic-plastic constitutive model when collapsed



(b) Stress nephogram of a three-wave corrugated web simulated by the constitutive model of laminates when collapsed



(c) Photo of a three-wave corrugated web when collapsed

图8 复合材料波纹腹板梁有限元模型计算结果及试验后试验件照片

Fig.8 Numerical results of FE model of composite corrugated web beam and a photo of a specimen after test

实体单元失效。从图中可以看出,压溃时有少量碎片飞出。该模型的压溃过程基本稳定。图8(c)是单波波纹腹板梁试验件压溃后的照片,其压溃过程比较稳定,从圆弧形薄弱环节处开始向上不断破坏。

数值仿真计算结果显示(表5),波纹腹板梁模型的峰值载荷要高于试验所得的峰值载荷,同时平均压溃载荷也高于试验所得,可能是因为:

(1)通过降低刚度和强度所得到的等效薄弱环节,无法完全反映圆弧形薄弱环节实际的破坏与吸能过程。

(2)模型中选用的刚度折减系数也是在基于先前折减方法的基础上确定的,不一定能完全反应真实情况。

(3)不论是波纹腹板梁与刚性板之间的接触,还是波纹腹板梁自身接触的定义,都进行了理想化假设。另外,模型只定义了摩擦因数一个参量来引入摩擦导致的能量耗散,与实际接触形式相比较为简单。

(4)模型中所采用的Cohesive单元本构需要进一步修正,层间断裂韧性会影响结构的初始损伤状态。

表5 波纹腹板梁计算结果与部分试验结果的比较

Table 5 Comparison between numerical results and partial test results of corrugated web beam

仿真结果/kN		试验结果/kN	
峰值载荷	平均载荷	峰值载荷	平均载荷
86.0	20.9	84.0	18.6

### 3.4 复合材料波纹腹板梁吸能力分析

SEA<sup>[7-12]</sup>是评价复合材料结构吸能性能的一个重要指标,即结构能量评估参数比吸能。而在实际应用中,波纹腹板梁很少以波数较少(单波或两波)的结构形式存在,而多是以三波、四波甚至更多波数的形式出现在抗坠撞的结构中(如直升机的波纹腹板梁盒段)。所以,研究不同的铺层形式、截面形状、长度方向及宽度方向尺寸等因素,对波纹腹板梁吸能性能的影响有着至关重要的意义。基于上节所提出的有限元仿真分析方法,以ABAQUS/Explicit为平台分别建立了单波、两波、三波、四波以及五波的波纹腹板梁模型,并在轴向冲击载荷作用下对其压溃过程进行了计算分析。以讨论不同的波数对结构吸能性能的影响。

5种波数波纹腹板梁的复合材料本构模型在受到冲击载荷时的应力云图由图9所给出。其中,

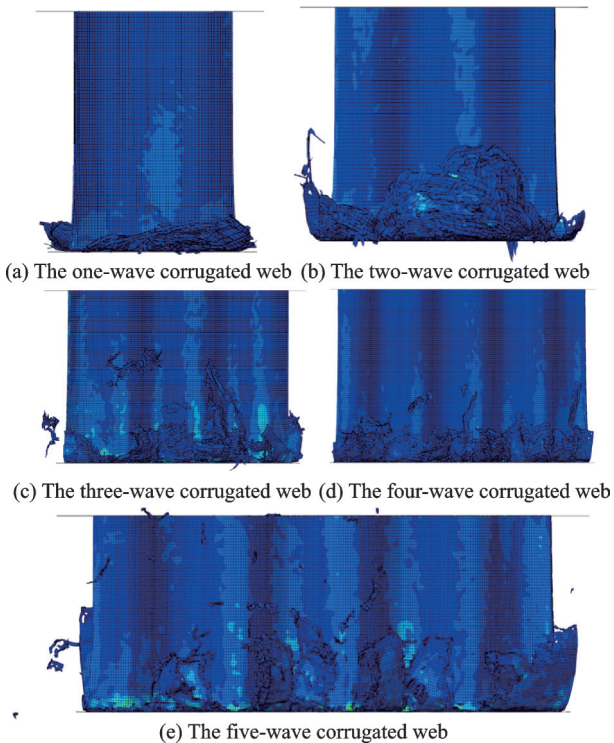


图9 不同波数的波纹腹板梁有限元模型压溃应力云图  
Fig.9 Stress nephogram of FE models of corrugated web beams with different wavenumbers when collapsed

图9(a)是单波波纹腹板梁的压溃图,在压溃过程中,波纹腹板梁底部发生应力集中,发生屈曲,随后发生分层,单元删除。压缩至一定位移后波纹腹板梁发生扭转。两波波纹腹板梁峰值载荷出现在结构发生更大位移后。三波、四波及五波的压溃过程与单波和两波波纹腹板梁相似,但在压溃过程中载荷较快进入稳定状态,由此可以推断其模型的横向位移较小,模型稳定性更高。

5种不同波数的波纹腹板梁有限元仿真计算所得的位移载荷曲线如图10所示,从中可以看出:

(1)5个模型受冲击后载荷瞬间达到峰值,薄弱环节首先被压溃,随后载荷大幅下降,并逐渐趋于稳定,可视为收敛于固定值,该值与材料的断裂韧性有关。在当结构进入压溃过程,载荷-位移曲线趋于稳定,每种结构的SEA略有差异,平均压溃载荷基本稳定在10~12 kN之间。

(2)当结构位移行进至15 mm左右时,曲线会出现较小峰值,可能是由于等效薄弱环节与腹板之间的刚度不连续导致的。

(3)与其他波数模型相比,单波波纹腹板梁长度过短,其结构稳定性较差,当压溃到一定位移后(18 mm),承载能力发生明显下降,且压溃过程中载荷波动较为剧烈。两波波纹腹板梁峰值载荷出现得略晚(21 mm),但整个压溃过程载荷维持在一定范围,没有明显降低。

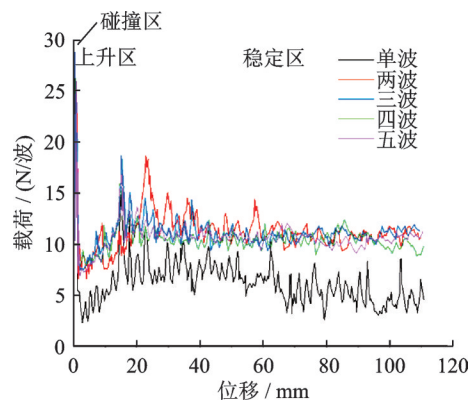


图10 不同波数的波纹腹板梁模型的载荷-位移曲线  
Fig.10 Load-displacement curves of corrugated web beams with different wavenumbers

由此可知,当波纹腹板梁长度较短时,会导致结构的局部屈曲,从而改变腹板上的载荷分布状态,使得结构在压溃吸能过程中出现横向位移,进而影响其抗冲击性能,结构的SEA低于平均水平。因此,一般避免选用单波或两波的波纹腹板梁,而多选用三波、四波甚至更多波数的波纹腹板梁应用于抗坠撞的结构中。

## 4 结 论

(1)对复合材料波纹腹板梁进行了坠撞试验研究,得到了试验件的损伤破坏形貌,以及载荷和能量的历程曲线。结果表明,复合材料波纹腹板梁的压溃破坏过程主要分为两个阶段:初始局部破坏阶段和稳定压溃破坏阶段,波纹腹板梁断口形成于初始局部破坏阶段,并且其形貌主要依赖于薄弱环节的设置。

(2)基于 ABAQUS/Explicit 平台二次开发得到了模拟复合材料波纹腹板梁受冲击压溃过程的仿真分析模型,采用改进的 Hashin 损伤判定准则和 Choi-Chang 准则综合判断单元失效,并结合 Cohesive 界面单元,可较为真实地反映所研究复合材料层合结构的各向异性和渐进损伤特性。

(3)建立了不同波数的复合材料波纹腹板梁的有限元模型。由数值计算结果可以得出,当腹板单波长保持不变时,腹板的波数(波纹腹板梁的长度)对抗冲击吸能的影响较大。当波纹腹板梁长度较大时( $L \gg H$ ),结构才能够稳定有效地吸收能量。因此,在抗坠撞结构设计时,应综合考虑波纹腹板梁的结构参数。

### 参考文献:

- [1] 龚俊杰,王鑫伟. 复合材料波纹梁吸能能力的数值模拟[J]. 航空学报, 2005, 26(3): 298-302.  
GONG Junjie, WANG Xinwei. Numerical simulations of energy absorption capability of composite components[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2005, 26(3): 298-302.
- [2] 苏璇. 复合材料波纹梁吸能特性分析及优化设计[D]. 天津: 中国民航大学, 2020.  
SU Xuan. Energy absorption characteristics and optimization design of composite semi-circular corrugated beam[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2020.
- [3] SOKOLINSKY V S, INDERMUEHLE K C, HURTADO J A. Numerical simulation of the crushing process of a corrugated composite plate[J]. Composites Part A, 2011, 42(9): 1119-1126.
- [4] HAMZA S S, AL EMRAN I, YUHAZRI M Y, et al. Hybridization effect on crashworthiness parameters of natural composite[J]. Frontiers in Materials, 2021. DOI:10.3389/fmats.2021.619245.
- [5] 黄建城,王鑫伟. 薄弱环节对复合材料吸能元件轴向压溃性能的影响综述[J]. 船舶力学, 2011, 15(8): 930-939.  
HUANG Jiancheng, WANG Xinwei. Overview on effect of trigger geometry on the axial crushing behavior of composite components for energy absorption[J]. Journal of Ship Mechanics, 2011, 15(8): 930-939.
- [6] MCGREGOR C J, VAZIRI R, POURSAARTIP A, et al. Simulation of progressive damage development in braided composite tubes under axial compression [J]. Composites Part A: Applied Science & Manufacturing, 2007, 38(11): 2247-2259.
- [7] MA J, YAN Y. Quasi-static and dynamic experiment investigations on the crashworthiness response of composite tubes[J]. Polymer Composites, 2013, 34(7): 1099-1109.
- [8] 龚俊杰. 复合材料结构耐撞性及可控薄弱环节研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.  
GONG Junjie. On the crashworthiness of composite structures and controllable trigger mechanism[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007.
- [9] 陶然. 复合材料波纹梁耐撞性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.  
TAO Ran. Crashworthiness analysis of composite waved beams[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.
- [10] CHANG F K, CHANG K Y. A progressive damage model for laminated composites containing stress concentration[J]. Journal of Composite Materials, 1987, 19(9): 834-855.
- [11] CAMANHO P P, MATTHEWS F L. A progressive damage model for mechanically fastened joints in composite laminates[J]. Journal of Composite Materials, 1999, 33: 2248-2280.
- [12] MCGREGOR C, VAZIRI R, POURSAARTIP A. Simulation of progressive damage development in braided composite tubes undergoing axial crushing[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2007, 38(11): 2247-2259.

(编辑:胥橙庭)