

## 带加固连接的复合材料梯形梁结构吸能特性研究\*

陈艳芬, 冯振宇, 赵彦强, 解江

(中国民航大学天津市民用航空器适航与维修重点实验室, 天津 300300)

**[摘要]** 通过对梯形梁的连接部分加固,能够改善梯形梁准静态压溃时的失效模式并提高其吸能能力。分别用单层壳和叠壳有限元模型的建模方法,研究无加固连接的复合材料梯形梁在轴向准静态压溃下的吸能特性。在叠壳有限元模型建模可行且仿真结果准确,同时单层壳有限元模型达到了叠壳模型的预测精度,在此基础上,用单层壳有限元模型的建模方法研究带圆柱形和圆锥形两种加固连接的梯形梁在轴向准静态压溃下的吸能特性,并对比这两种加固连接的梯形梁的载荷位移曲线和比吸能大小,得出带圆锥形加固连接的梯形梁的峰值载荷最低同时比吸能最大。

**关键词:** 复合材料; 梯形梁; 加固连接; 数值模拟

### Energy Absorption Research on Composites Trapezoid Beam Structure With Reinforced Connection

CHEN Yanfen, FENG Zhenyu, ZHAO Yanqiang, XIE Jiang

(Tianjin Key Laboratory, Civil Aircraft Airworthiness and Maintenance, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

**[ABSTRACT]** The failure mode and specific energy absorption of composites trapezoidal beams can be improved by reinforcing intersection. Energy absorbing characteristics of composites trapezoidal beams without reinforced intersection under quasi-static axial crushing is analyzed by single shell and stacked shell model with explicit finite element code PAM-CRASH. When stacked-shell model is workable and the simulation result is correct, at the same time the simulation accuracy of single shell model is achieved as stacked-shell model, energy absorption characteristics of cylindrical and conical reinforced intersection are studied by single shell finite element model. The load-displacement curve and specific energy absorption of trapezoidal corrugated beams are compared, the final results showed that the peak load of trapezoidal beams with conical reinforced intersection is the minimum and specific energy absorption is the maximum.

**Keywords:** Composites; Trapezoidal corrugated beams; Reinforced intersection; Numerical simulation

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2016.04.081

结构适坠性是民机安全性的一个重要关注点,是民机初始设计阶段的重要指标。民机的适坠性是指飞机在发生意外坠撞或其他应急事件时,能够使乘员和机组人员得到最大限度地保护,尽可能减少人员伤亡,并且能够成功撤离飞机的能力。适坠性设计的两个主要目标是限制传递给乘员的冲击力以及保持机身结构的完整性,从而确保乘员的最小安全空间。梁盒段结构是民机机身下腹部的一种典型缓冲吸能结构。梁盒段结构的合理优化能够改善其坠撞吸能能力,从而提升飞机的

适坠性,降低飞机坠撞时传递到乘员身上的冲击载荷。

梁的连接形式对于梁盒段的吸能特性具有重要影响<sup>[1-7]</sup>。刘瑞同<sup>[8-10]</sup>等人对波纹梁、“十”字型、“T”字型、“L”字型连接结构和蜂窝结构进行了压溃试验研究,试验结果表明除“L”字型连接结构外,其余4种结构压溃过程都比较稳定,有较好的吸能能力。南京航空航天大学龚俊杰<sup>[11]</sup>等对复合材料波纹梁盒段耐撞性进行了数值模拟,将计算结果与 MCCARTHY<sup>[12]</sup>的试验结果进行对比,可以发现两者比较吻合。JOOSTE<sup>[13]</sup>等针对波纹梁盒段结构设计了棱柱形和圆锥形两种加固连接形式,即在波纹梁盒段十字交叉部分分别采用棱柱形和圆锥

\* 基金项目: 中央高校基本科研业务费中国民航大学专项项目(ZXH2012B004)。

形进行加固。

本文借鉴 KINDERVATER 等<sup>[7]</sup>对梁盒段的优化形式,采用 PAM-CARSH 非线性有限元软件,对盒段梁连接结构进行建模仿真,研究了梯形梁连接部分加固形式对结构吸能特性的影响。

## 1 有限元模型

### 1.1 材料模型

本文选用 PAM-CRASH 软件中 130 号材料模型进行复合材料建模,此材料模型专门用于层合型单向铺制的纤维—基体材料建模,能够考虑 3 种不同模式的复合材料分层损伤: I 型损伤时拉伸失效,类似于“剥离”; II 型损伤则是由剪切力引起的,通常被称做“滑动剪切”失效模式; III 型被称做“撕裂或剪切”失效模式。

### 1.2 层间胶粘单元模型

PAM-CRASH 软件采用脱开断裂模型控制分层的产生和扩展。本文中使用的 PAM-CRASH 中 303 号胶粘单元来模拟复合材料层间连接。该胶粘单元的损伤模型能够很好地模拟层间的分层失效。

对于 I 型拉伸失效,在弹性变形范围内,应力、位移将满足以下关系:

$$\sigma_{33} = k_3(1 - d_3)\delta_3, \quad (1)$$

对于  $\delta_{30} \leq \delta_3 \leq \delta_{3m}$ ,

$$d_3 = c_3 \left(1 - \frac{\delta_{30}}{\delta_3}\right), \quad (2)$$

式中,  $k_3$  代表界面的弹性拉伸刚度,  $d_3$  代表失效参数,  $\delta_{ij}$  代表应变,  $c_3$  用于控制柔度曲线的梯度。I 型破坏断裂能量释放率  $G_{IC}$  等于应力—位移曲线下部面积,可以通过界面处拉伸应力  $\sigma_{33}$  和应变  $\delta_3$  进行计算:

$$G_{IC} = \int_0^{\delta_{3m}} \sigma_{33} d\delta_3, \quad (3)$$

破坏断裂能量释放率  $G_{IIC}$  与 I 型破坏的相似,断裂能量释放率通过位移  $\delta_{30}$  和  $\delta_{3m}$  定义。事实上,结构的破坏过程通常是两种破坏模式的混合形式 PAM-CRASH 中的 303 号 SLINK-ELINK-TIED 界面胶粘模型便通过下列公式将 I 型破坏和 II 型破坏混合组成“剪切型破坏”。

$$\left(\frac{G_I}{G_{IC}}\right)^n + \left(\frac{G_{II}}{G_{IIC}}\right)^n = e_d \leq 1.0, \quad (4)$$

其中,  $G_I$  和  $G_{II}$  分别是 I 型和 II 型破坏的断裂能量释放率,  $n$  是结合试验得到的常量,通常介于 1.0 与 2.0 之间,界面处的应力逐渐降低直至当  $e_d$  超过 1.0 时发生失效。

## 2 无加固连接的梯形波纹梁数值模拟

### 2.1 带连接的梯形波纹梁结构形式

本文研究的是波纹梁盒段结构 1/4 模型,并考虑十字连接结构以及两种不同加固形式的十字连接结构,分别是圆柱形和圆锥形加固,其俯视图如图 1 所示。

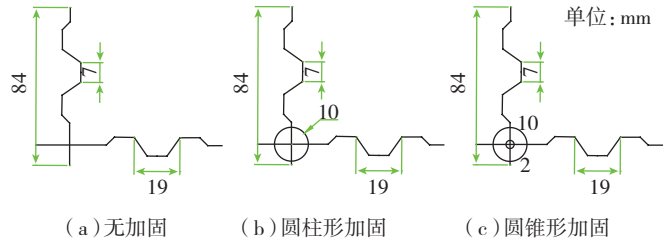


图1 3种带连接结构的梯形波纹梁

Fig.1 Three trapezoidal corrugated beams with intersection structure

### 2.2 材料及单元属性

文中结构材料为 T300/5288 复合材料,其力学性能参数如表 1 所示,复合材料铺层形式为  $[0/90]_{3s}$ ,共 12 层,单层厚度 0.15mm。通过自定义积分点的方法逐渐减小壳单元厚度来模拟一端的 45° 倒角薄弱环节,本文选用  $2.0 \times 2.0$ mm 的 Belytschko-Tsay 壳单元对几何模型进行有限元离散,胶粘单元参数设置如表 2 所示。模型中复合材料梁各层之间设置 36 号自接触算法,梯形波纹梁与刚性墙之间设置 33 号面接触算法,来模拟各部分间的真实接触。

表1 单向板力学性能参数

参数	参数名称	参数值
$\rho$	单层板密度	1.52 g/cm <sup>3</sup>
$E_1$	纤维方向模量	145 GPa
$E_2$	垂直纤维方向模量	9 GPa
$G_{12}$	1、2 平面剪切模量	3 GPa
$G_{23}$	2、3 平面剪切模量	3 GPa
$\nu_{12}$	1、2 平面泊松比	0.317
$Y_c$	临界剪切损伤极限	0.04
$Y_0$	初始剪切损伤极限	0.01
$E_{c1}$	纤维方向压缩模量	117 GPa
GAMMA	压缩模量修正系数	0.15
$R_0$	初始屈服应力	0.025GPa
$Y_{t2}$	基体横向拉伸强度	0.06GPa
$Y_{c2}$	基体横向压缩强度	0.2GPa
$S$	基体剪切强度	0.07GPa
EPSI11+	纤维拉伸失效强度	0.6 GPa
EPSI11-	纤维压缩失效强度	0.5GPa

### 2.3 仿真初始条件

约束梯形梁最底端单元的所有自由度,顶端为自由

端,刚性墙以 2.49m/s 的速度对结构进行轴向压溃,其属性如表 3 所示。

表2 303胶粘单元参数

参数	参数名称	参数值
$h_{cont}$	动能计算距离	0.3
$E_0$	模量	4
$G_0$	剪切模量	2.5
$SIG_{prtg}$	持续分层的正应力	0.098
$GAMA_{prtg}$	持续分层的剪应力	0.094
$G_{it}$	I 型断裂能	0.00047
$G_{it'}$	II 型断裂能	0.002
$SIG_{strt}$	初始分层的正应力	0.1
$GAMA_{strt}$	初始分层的剪应力	0.1

表3 刚体属性

边长 /mm	厚度 /mm	质量 /kg	$I_x$	$I_y$	$I_z$	弹性模量 / MPa	泊松比
80	10	120	10	10	10	210	0.3

注:  $I_x$ 、 $I_y$ 、 $I_z$  分别表示刚体  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三轴的转动惯量。

## 2.4 叠壳和单层壳有限元模型建模方法

已有相关研究表明,在 PAM-CRASH 中采用多层壳单元建模可以较为准确地模拟复合材料结构的轴向压溃特性<sup>[13]</sup>,但多层建模方法计算效率较低,影响了其在复杂结构坠撞仿真中的应用。本文首先分别采用 12 层叠壳和单层壳单元建立无加固连接的梯形梁有限元模型。

对叠壳和单层壳有限元模型进行准静态压溃,叠壳和单层壳有限元模型均呈现稳定渐进压溃。表 4 为叠壳和单层壳有限元模型仿真结果数据。从中可以看出,虽然单层壳仿真的峰值载荷较大,但两种方法得到的比吸能结果较为相近,而从计算成本上考虑,单层壳复合材料模型都占有极大优势如表 5 所示。

综上所述,虽然单层壳仿真的准确性相较于叠壳模型有所降低,也不能模拟复合材料的层间失效模式,但其建模简单、计算成本低、效率高且计算准确性能够达

表4 单层壳与叠壳有限元仿真结果对比

模型	载荷峰值 /kN	单位距离吸能 / ( $J \cdot cm^{-1}$ )
叠壳	52	266.70
单层壳	58	266.67

表5 单层壳与叠壳有限元仿真计算成本对比

结构建模方式	前处理件 /kB	结果文件 /kB	计算时间 / s	壳单元数量 / 个	节点数量 / 个
单层壳	567	17240	82	4516	4704
叠壳	6373	7552208	16300	52036	54311

到仿真要求,因此在下面研究中采用单层壳有限元模型对带圆柱形和圆锥形加固连接的梯形波纹梁进行仿真分析。

## 3 两种加固连接的梯形波纹梁数值模拟

### 3.1 两种加固连接的梯形波纹梁的仿真结果

用单层壳单元对带圆柱形和圆锥形加固连接的梁结构进行建模,加固部分与两侧的梯形梁采用胶粘连接,胶粘属性如表 3 所示。两种加固连接形式的梯形波纹梁的失效形式均为稳定渐进压溃,较之于无加固梯形波纹梁的破坏失效,其更能保持结构的完整性,压溃过程更加稳定。从表 6 中可以看出,带圆柱形加固连接的梯形梁结构响应曲线的峰值载荷高于带圆锥形加固连接的梯形梁结构的峰值载荷,而平均压溃载荷则低于后者。这说明带圆锥形加固连接的梯形梁结构吸能能力优于带圆柱形加固连接的梯形梁结构。

### 3.2 两种加固连接的梯形波纹梁吸能特性分析

圆柱形和圆锥形加固连接及无加固连接的梯形梁结构在匀速压溃工况下的主要仿真结果对比,如表 6 所示。

表6 两种加固连接和无加固连接仿真结果对比

不同加固连接形状	峰值载荷 /kN	稳态压溃载荷 /kN	单位质量吸能 / ( $J \cdot g^{-1}$ )
无加固	58	33	60.3
圆柱形	65	30	62.3
圆锥形	57	32	66.2

由表 6 可知,带圆柱形加固连接的梯形梁峰值载荷比无加固连接的梯形梁峰值载荷大 12.1%,而带圆锥形加固连接的梯形梁比无加固连接的梯形梁小 1.7%,说明加固连接对梯形梁的峰值载荷有影响,其中圆锥形加固连接对梁结构的响应载荷峰值影响不大。虽然带圆柱形加固连接和带圆锥形加固连接的梯形梁的稳态压溃载荷比无加固连接的梯形梁分别小 9.1% 和 6.1%,但是带加固连接的梯形梁比吸能值要高于无加固连接的梯形梁,也就是说对梯形波纹梁的连接进行加固能够提高其吸能能力,而带圆锥形加固连接的梯形梁比吸能值比带圆柱形加固连接的梯形梁高 6.3%,同时其响应峰值载荷比带圆柱形加固连接的梯形梁低 12.3%,因此圆锥形加固连接为梯形梁结构较好的加固连接形式。

## 4 结论

本文用单层壳和叠壳有限元模型的建模方法对无加固连接的梯形波纹梁进行数值仿真,对比单层壳和叠壳有限元建模方法的优劣,最终采用单层壳有限元模型

对带圆柱形和圆锥形两种加固连接的梯形梁结构吸能特性进行仿真分析。研究表明:

(1) 虽然单层壳建模方法不能准确模拟复合材料结构层间失效模式,但其建模简单、计算效率高,能够较为准确地预测复合材料梁结构的压溃吸能值,可以替代多层壳建模方法进行大规模仿真计算。

(2) 对梯形梁结构连接部分进行加固之后,结构压溃破坏比无加固连接更加稳定,比吸能值比无加固连接有所提高。圆锥形加固连接的梯形梁的吸能特性优于圆柱形加固连接的梯形梁结构。

### 参考文献

[1] 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.

[2] FERABOLI, P. Development of a corrugated test specimen for composite materials energy absorption [J]. *Journal of Composite Materials*, 2008, 42(3): 229-256.

[3] FARLEY G L, JONES R M. Prediction of the energy-absorption capability of composite tubes [J]. *Journal of Composite Materials*, 1992, 26(3): 389-404.

[4] 倪先平,王永亮,荚淑萍,等.直升机机身下部复合材料典型结构耐坠特性研究 [J]. *复合材料学报*, 2003(8):51-57.

NI Xianping, WANG Yongliang, JIA Shuping, et al. Helicopter lower fuselage composite structure typically fall resistant properties [J]. *Composites Material*, 2003 (8): 51-57.

[5] 刘瑞同,王鑫伟,荚淑萍.碳纤维-环氧树脂波纹梁吸能能力的试验研究 [J]. *航空学报*, 2001, 22(1): 59-61.

LIU Ruitong, WANG Xinwei, JIA Shuping. Carbon fiber - experimental epoxy corrugated beam energy absorption capability [J]. *Journal of Aeronautics*, 2001, 22 (1): 59-61.

[6] 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*, 2008, 26(3): 298-302.

GONG Junjie, WANG Xinwei. Simulation of composite materials corrugated beam energy absorption capability [J]. *Journal of Aeronautics*, 2008, 26 (3): 298-302.

[7] KINDERVATER C M, KOHLGRÜBER D, LÜTZENBURGER M. Crash simulation methodologies for aircraft structures used within european crashworthiness research [C]. FAA International aircraft fire and cabin safety research Conference, Atlantic City, New Jersey, November 16-20, 1998.

[8] 刘瑞同,王鑫伟.轴向载荷下复合材料元件吸能能力的试验研究 [J]. *南京航空航天大学学报*, 2002, 34 (5): 418-422.

LIU Ruitong, WANG Xinwei. Experimental study of composite components under axial load capacity of energy absorption [J]. *Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2002, 34 (5): 418-422.

[9] 刘瑞同,王鑫伟,荚淑萍,等.碳纤维-环氧树脂波纹梁吸能能力的试验研究 [J]. *航空学报*, 2002, 23 (1):60-61.

LIU Ruitong, WANG Xinwei, JIA Shuping, et al. Experimental study of carbon fiber-epoxy corrugated beam energy absorption capability [J]. *Journal of Aeronautics*, 2002, 23 (1): 60-61.

[10] 刘瑞同.复合材料结构的耐撞性能研究 [D]. 南京:南京航空航天大学, 2002.

LIU Ruitong. Crashworthiness research of composite structures [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2002.

[11] 龚俊杰,王鑫伟.复合材料波纹梁盒段耐撞性的数值模拟 [J]. *应用力学学报*, 2007, 24 (1):165-168.

GONG Junjie, WANG Xinwei. Composite corrugated box girder segment crashworthiness simulation [J]. *Journal of Applied Mechanics* 2007, 24 (1):165-168.

[12] MCCARTHY M A, WIGGENRAAD J F M. Numerical investigation of a crash test of a composite helicopter subfloor structure [J]. *Composite Structures*, 2001(93):345-359.

[13] JOOSTEN M W, DUTTON S. Experimental and numerical investigation of the crushing response of an open section composite energy absorbing element [J]. *Composite Structures*, 2011(93): 682 - 689.

(责编 古京)

(上接第80页)

A: Physical, 2004, 113(2):166-173.

[7] ANTONUCCI V, CUSANO A, GIORDANO M, et al. Cure-induced residual strain build-up in a thermoset resin [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2006, 37(4):592-601.

[8] 廖延彪,黎敏,张敏,等.光纤传感技术与应用 [M]. 北京:清华大学出版社, 2009.

LIAO Yanbiao, LI Min, ZHANG Min, et al. Optical fiber sensing techniques and applications [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.

[9] 赵勇. 光纤光栅及其传感技术 [M]. 北京:国防工业出版社, 2006.

ZHAO Yong. Optical fiber gratings and sensing technology [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2006.

[10] 张自嘉. 光纤光栅理论基础与传感技术 [M]. 北京:科学出版社, 2009.

ZHANG Zijia. Optical fiber gratings theoretical basis and sensing technology [M]. Beijing: Science Press, 2009.

[11] DUNPHY J R, MELTZ G, LAMM F P, et al. Multifunction, distributed optical fiber sensor for composite cure and response monitoring [C]. San Jose-DL Tentative. International Society for Optics and Photonics. 1990:116-118.

[12] 万里冰,武湛君,张博明,等. 光纤布拉格光栅监测复合材料固化 [J]. *复合材料学报*, 2004, 21(3):1-5.

WAN Libing, WU Zhanjun, ZHANG Boming, et al. Cure monitoring of composites using fiber Bragg grating sensors [J]. *Acta Materiae compositae Sinica*, 2004, 21(3):1-5.

[13] 武湛君,张博明,万里冰. 单根光纤光栅监测复合材料固化工艺过程多目标参量技术的研究 [J]. *复合材料学报*, 2004, 21(6):82-86.

WU Zhanjun, ZHANG Boming, WAN Libing. Multi-parameters monitoring for fiber reinforced plastics with a single fiber Bragg gratings [J]. *Acta Materiae compositae Sinica*, 2004, 21(6):82-86.

[14] 李雪芹,周玉敬,张子龙,等. 光纤布拉格光栅传感器监测环氧树脂固化收缩研究 [J]. *材料工程*, 2012(8):73-77.

LI Xueqin, ZHOU Yujing, ZHANG Zilong, et al. Curing shrinkage monitoring in epoxy resin by fiber bragg grating sensors [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2012(8):73-77.

[15] KOSAKA T, OSAKA K, NAKAKITA S, et al. Fiber optic strain monitoring of textile GFRP during RTM molding and fatigue tests by using embedded FBG sensors [J]. *SPIE*, 2003:50-56.

(责编 古京)