

文章编号:1674-8190(2019)06-767-13

复合材料冲击损伤数值仿真模型评估

张嘉睿¹, 吴富强², 姚卫星^{1,2}

(1. 南京航空航天大学 机械结构力学及控制国家重点实验室, 南京 210016)

(2. 南京航空航天大学 飞行器先进设计技术国防重点学科实验室, 南京 210016)

摘要: 纤维增强树脂基复合材料(FRP)已被广泛应用于航空航天等先进结构, 研究 FRP 的低速冲击损伤问题具有重要的工程应用价值。对低速冲击下复合材料结构损伤的数值仿真模型进行分类和评估, 低速冲击模型由冲击过程模型和材料损伤演化模型两类子模型组合而成, 列出每类模型的关键要素及其处理方法, 对常用的组合进行整理与评述, 并列出现频率较高的六种仿真模型; 完成六种模型的两个算例的数值评估。结果表明: 对于正交层合板算例六个模型均可较准确地预测损伤形状和面积; 对于角铺设层合板算例, 采用 Puck 准则、考虑剪切非线性、基于能量释放率的模型得到的分层损伤形貌更接近于试验结果。

关键词: 复合材料; 低速冲击; 数值仿真; 失效准则

中图分类号: V258

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2019.06.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Assessment of Numerical Simulation Models for Impact Damage of Composite Materials

Zhang Jiarui¹, Wu Fuqiang², Yao Weixing^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

(2. Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense-advanced Design Technology of Flight Vehicle, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Fiber reinforced resin matrix composites(FRP) have been widely used in aerospace and other advanced structures. The study of low-speed impact damage of FRP is of important engineering application value. The numerical simulation models of composite structural damage under low velocity impact are classified and evaluated. The low-velocity impact model is composed of two kinds of sub-models: the impact process model and the material damage evolution model. The key elements of each type of model and their processing methods are listed. The commonly used combinations are collected and reviewed, and six simulation models appeared constantly in the literatures are listed. The numerical evaluation of two examples with the listed six models is completed. Results show that for orthogonal laminated plates, the damage shapes and areas given by the six models can be predicted accurately, but for the angle-ply laminated plate, the delamination damage morphology achieved by the model of Puck criterion, considering shear nonlinearity and based energy release rate is closer to the experimental results.

Key words: composites; low-velocity impact; numerical simulation; failure criterion

收稿日期:2018-12-18; 修回日期:2019-03-15

基金项目:江苏高校优势学科建设工程基金资助项目

通信作者:姚卫星, wxyao@nuaa.edu.cn

引用格式:张嘉睿, 吴富强, 姚卫星. 复合材料冲击损伤数值仿真模型评估[J]. 航空工程进展, 2019, 10(6): 767-779.

Zhang Jiarui, Wu Fuqiang, Yao Weixing. Assessment of numerical simulation models for impact damage of composite materials [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(6): 767-779. (in Chinese)

0 引言

纤维增强树脂基复合材料(FRP)已被广泛应用于航空航天等先进结构。FRP 抗冲击能力较弱而易产生冲击损伤,对结构的承载能力和使用安全造成了严重威胁。因此,FRP 低速冲击损伤问题受到了工程界和学术界的广泛关注。

目前,研究 FRP 低速冲击问题主要有实物试验和数值仿真两种方法。贾建东^[1]从试验角度对冲击损伤进行了总结,综述了 FRP 层合板的损伤形式、损伤检测等方面的研究进展;张银芬等^[2]从数值仿真角度对破坏准则、冲击损伤产生和扩展进行了综述;张颖军等^[3]从试验和数值方法角度对 FRP 层合板冲击损伤的表征进行了综述;崔海坡等^[4]对 FRP 数值模拟模型进行了分类和介绍。

由于数值模型的复杂性,前人对于数值模型的分类方法有很多种,但都不尽完备。本文认为一个 FRP 低速冲击数值模型应包括两部分:第一部分描述了冲击物和被冲击 FRP 结构之间的相互作用及其响应,第二部分描述了 FRP 结构内部损伤变化。本文将按此分类,通过两个算例对相关模型进行评估。

1 冲击过程模型分类

FRP 层合板与冲击物接触时,涉及冲击物、接触过程、被冲击物等问题的描述,因此冲击模型可以按不同角度分类。按外载荷的处理方式,可分为准静态模型和动态模型;按载荷—位移关系,可分为线性模型和非线性模型;按分析模型中是否利用了试验数据,可分为经验、半经验和全数值模型;按模型的维数可分为二维模型和三维模型。

本文认为数值模型是物理模型的映射,数值模型应该在物理机制上再现冲击损伤试验。从冲击过程看,冲击损伤数值模型应包含冲击载荷、冲击物模型、接触过程描述、控制方程求解等要素,每个

要素都可以有不同的处理方法,如表 1 所示。

表 1 冲击过程模型分类

Table 1 Classification of impact process models

| 冲击载荷 | 冲击物模型 | 接触过程描述 | 控制方程求解 |
|----------------|-----------|--------|--------|
| 冲击能 (质量+速度) | 刚性 | 点集中力 | 准静态 |
| 位移 | 柔性 | 接触定律 | 动态 |
| 集中力 | 不考虑(用力代替) | 接触界面算法 | — |

从理论上讲,上述四个要素的任意组合都可构成一个 FRP 结构冲击损伤数值仿真模型,即可能有 54 类模型。但常见的数值模型主要有以下四种,如表 2 所示。

表 2 冲击过程典型模型

Table 2 Typical models of impact process

| 作者 | 年份 | 相近文献 | 模型内涵 |
|-------------------------------|------|---------|------------------|
| C. T. Sun 等 ^[5] | 1995 | [6-8] | 集中力+不考虑+接触定律+准静态 |
| F. Collombet 等 ^[9] | 1996 | [10-17] | 冲击能+刚性+接触界面算法+动态 |
| M. Wisheart 等 ^[18] | 1998 | [19-23] | 集中力+不考虑+点集中力+准静态 |
| 刘洪权等 ^[24] | 2016 | [25] | 位移+刚性+接触界面算法+准静态 |

从表 2 可以看出:冲击物目前鲜有采用柔性体模型的,主要原因是计算成本太高;准静态求解也主要是为了节省计算时间;这样处理对仿真精度有一定的影响。

近几年随着计算机运算能力的提高,动态有限元算法越来越多地被人们所采用,冲击物柔性体模型也开始有所尝试。

2 冲击载荷下材料损伤演化模型

冲击载荷下 FRP 结构状态变化的数值模型主要包括初始损伤场、材料本构、就位特征、破坏准则、损伤演化、网格效应六个要素,如表 3 所示。

表 3 材料损伤演化数值模型要素和取值

Table 3 Elements and values of numerical model for damage evolution of materials

| 初始损伤场 | 材料本构 | 破坏准则 | 损伤演化 | 就位特征 | 网格效应 |
|-------|-------|-------------|---------|----------|------|
| 不考虑 | 线性 | Puck | 瞬间卸载模型 | 不考虑 | 依赖 |
| 考虑 | 剪切非线性 | Hashin | 逐渐卸载模型 | 邻层约束 | 不依赖 |
| — | — | Chang-Chang | 承载力不变模型 | 层内单元尺寸效应 | — |

上述六个要素的每个都可以有多种处理方法,不同组合可以构成数百类模型,对它们一一进行评估的工作量十分巨大。下面对这六个要素略作介绍,并指出目前较主流的组合方法。

(1) 初始损伤

FRP 组分材料本身就具有一定的分散性和不确定性。同时,在 FRP 结构的加工成型制造过程中,会出现气泡、夹杂、基体富聚、孔隙、基体和纤维界面粘接不匀称、纤维局部弯曲等工艺缺陷。因此 FRP 结构一定存在初始的物理损伤,目前的数值模型中均未直接考虑初始损伤问题,一般将其均匀化到宏观力学性能中,也有少量采用随机变量等不确定性方法来描述这种初始损伤。

(2) 材料本构

大量研究表明单层 FRP 的纵向与横向应力—应变呈现近线性关系,而剪切应力—应变呈现明显的非线性特征,因此考虑 FRP 的非线性本构关系是有必要的。目前处理 FRP 剪切非线性行为的模型主要有单系数模型和三系数模型。H. T. Hahn 等^[26]单系数模型为

$$\epsilon_{ij} = G_{ij}^{-1} \sigma_{ij} + \beta \sigma_{ij}^3 \quad (i \neq j) \quad (1)$$

式中: σ_{ij} 和 ϵ_{ij} 分别为剪应力和剪应变, $ij = 13, 23; \beta$ 为材料剪切非线性系数; G_{ij} 为起始剪切模量。

文献^[27]对式(1)进行了稳定性分析,并引入折减系数 d_{non} 对剪切应力应变进行线性化处理

$$\begin{cases} \sigma_{ij} = (1 - d_{non}) G_{ij} \epsilon_{ij} \\ d_{non} = \frac{\beta G_{ij} \sigma_{ij}^2}{1 + 3\beta G_{ij} \sigma_{ij}^2} \end{cases} \quad (2)$$

在纤维间损伤出现前,用折减系数 d_{non} 对剪切割线模量在起始剪切模量基础上进行折减。损伤出现后,剪切模量退化在采用 d_{non} 退化后的剪切模量上进行。

D. Feng 等^[28]和段永照等^[29]采用三系数剪切非线性模型:

$$\tau_{ij} = c_1 \gamma_{ij}^3 - \text{sign}(\gamma_{ij}) c_2 \gamma_{ij}^2 + c_3 \gamma_{ij} \quad (3)$$

式中: $c_i (i = 1, 2, 3)$ 为待定系数,在此阶段为了表征由基体微损伤引起的非线性,引入损伤变量 d_{ij} , 定义 $d_{ij} = \alpha \gamma_{ij}$, 其中 α 为材料常数,表征剪切刚度随剪切应变的增加而减小;总的剪切应变 γ_{ij} 为弹性应变 γ_{ij}^e 和不可逆损伤应变 γ_{ij}^d 的和。

在卸载时有 $\tau_{ij} = G_0 (1 - d_{ij}) (\gamma_{ij} - \gamma_{ij}^d)$, 其中 G_0 取三次曲线在原点处的切线斜率,如图 1 所示。

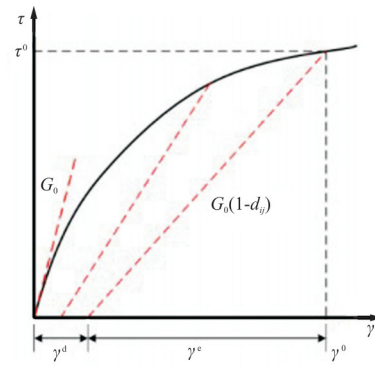


图 1 三系数剪切非线性模型

Fig. 1 Three-coefficient shear nonlinear model

在有限元中用来描述分层的主要方法有两种,一种是基于断裂力学的直接分析方法,该方法认为能量释放率分量组合大于或等于临界能量释放率时发生分层,虽然该方法能够预测分层的起始情况,但是对于分层的扩展需要通过网格重构才能实现。另一种方法是粘聚区模型(CZM),该方法不仅能够预测新裂纹的萌生,同时还可以避免在裂纹扩展过程中的网格重构,是目前使用较多的一种分层模拟方法。

粘聚区模型的本构关系不考虑轴向耦合效应,层间本构关系为

$$\begin{bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & 0 & 0 \\ 0 & K_{ss} & 0 \\ 0 & 0 & K_{tt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: K_{nn} 、 K_{ss} 和 K_{tt} 为界面元在三个方向上的刚度; δ_n 、 δ_s 和 δ_t 为界面元在三个方向上的相对位移; t_n 、 t_s 和 t_t 分别为界面元法向应力及两个方向上的剪应力。

(3) 就位特征

对 FRP 就位效应的研究主要集中在就位层厚度效应和邻近层约束效应两个方面,处理就位效应目前有三种方法:能量准则法,经验公式法和统计分析方法。F. K. Chang 等^[30]提出经验公式确定各子层的横向就位拉伸强度 $Y_{T,is}$ 和面内就位剪切强度 $S_{12,is}$,

$$\begin{cases} Y_{T,is} = Y_T \left\{ 1 + \frac{A}{M^B} \min [\sin(\Delta\theta_a), \sin(\Delta\theta_b)] \right\} \\ S_{12,is} = S_{12} \left\{ 1 + \frac{C}{M^D} \min [\sin(\Delta\theta_a), \sin(\Delta\theta_b)] \right\} \end{cases} \quad (5)$$

式中: Y_T 和 S_{12} 分别为单层板的横向拉伸强度与面内剪切强度; M 为子层的铺层数; $\Delta\theta_a$ 和 $\Delta\theta_b$ 分别为子层与上下层的夹角; A 、 B 、 C 和 D 为材料的常数。

S. T. Pinho 等^[31] 提出了薄板就位强度计算公式:

$$\begin{cases} Y_{T, is} = \sqrt{\frac{8G_{IC}(L)}{\pi t \Lambda_{22}^0}} \\ S_{12, is} = \sqrt{\frac{1 + \beta \frac{48G_{SHc}(L)}{\pi t} (G_{12})^2 - 1}{3\beta G_{12}}} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \text{纤维拉伸} (\sigma_1 \geq 0) & \text{FFT} = \left(\frac{\sigma_1}{X_T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2}{S_{12}^2}\right) \\ \text{纤维压缩} (\sigma_1 < 0) & \text{FFC} = \left(\frac{\sigma_1}{X_C}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2}{S_{12}^2}\right) \\ \text{基体拉伸} (\sigma_2 \geq 0) & \text{MFT} = \left(\frac{\sigma_1}{Y_T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S_{23}}\right)^2 \\ \text{基体压缩} (\sigma_2 < 0) & \text{MFC} = \frac{1}{4} \left(\frac{-\sigma_2}{S_{12}}\right)^2 + \frac{Y_C^2 \sigma_2}{4S_{12}^2 Y_C} - \frac{\sigma_2}{Y_C} + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 \end{cases} \quad (7)$$

Hashin 准则为

$$\begin{cases} \text{纤维拉伸} (\sigma_1 \geq 0) & \text{FFT} = \left(\frac{\sigma_1}{X_T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2}{S_{12}^2}\right) \\ \text{纤维压缩} (\sigma_1 < 0) & \text{FFC} = \left(\frac{\sigma_1}{X_C}\right)^2 \\ \text{基体拉伸} (\sigma_2 + \sigma_3 \geq 0) & \text{MFT} = \left(\frac{\sigma_2 + \sigma_3}{Y_T}\right)^2 + \frac{\tau_{23}^2 - \sigma_2 \sigma_3}{S_{23}^2} + \frac{\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2}{S_{12}^2} \\ \text{基体压缩} (\sigma_2 + \sigma_3 < 0) & \text{MFC} = \left[\left(\frac{Y_C}{2S_{23}}\right)^2 - 1\right] \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{Y_C} + \left(\frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2S_{23}}\right)^2 + \frac{\tau_{23}^2 - \sigma_2 \sigma_3}{S_{23}^2} + \frac{\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2}{S_{12}^2} \end{cases} \quad (8)$$

A. Puck 等通过大量破坏试验发现: 对于 FRP 存在一个平行于纤维方向的潜在断裂面, 如图 2 所示, 断裂面是特定应力状态下最容易发生失效的作

式中: $\Lambda_{22}^0 = 2 \left(\frac{1}{E_2} - \frac{\nu_{21}^2}{E_1} \right)$; t 为层合板各子层的厚度; G_{IC} 和 G_{SHc} 分别为 I 型和 II 型断裂能量释放率; β 为剪切非线性系数, 通过试验数据拟合。

(4) 破坏准则

在层内破坏准则方面已有诸多研究人员进行了深入研究, 其中 Chang-Chang 准则^[32], Hashin 准则^[33] 和 Puck 准则^[34] 受到广泛的认可并被采用在各种有限元模型中, 来进行 FRP 单层板损伤起始的判断。

Chang-Chang 准则为

用面, 当危险应力系数 f_E 大于 1 时, 纤维间失效发生。

$$\begin{cases} f_{E, \text{IFFT}}(\theta) = \sqrt{\left\{ \left[\left(\frac{1}{R_{\perp}^T} - \frac{p_{\perp\Psi}^T}{R_{\perp\Psi}^A} \right) \sigma_n(\theta) \right]^2 + \left(\frac{\tau_{n1}(\theta)}{R_{\perp//}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{nt}(\theta)}{R_{\perp\perp}^A} \right)^2 \right\}} + \frac{p_{\perp\Psi}^T}{R_{\perp\Psi}^A} \sigma_n(\theta) \quad (\sigma_n \geq 0) \\ f_{E, \text{IFFT}}(\theta) = \sqrt{\left(\frac{\tau_{n1}(\theta)}{R_{\perp//}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{nt}(\theta)}{R_{\perp\perp}^A} \right)^2 + \left(\frac{p_{\perp\Psi}^C}{R_{\perp\Psi}^A} \sigma_n(\theta) \right)^2} + \frac{p_{\perp\Psi}^C}{R_{\perp\Psi}^A} \sigma_n(\theta) \quad (\sigma_n < 0) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\hat{\sigma}_n(\theta)$ 、 $\hat{\sigma}_{nt}(\theta)$ 、 $\hat{\sigma}_{n1}(\theta)$ 为“潜在”IFF 断裂面上的有效应力; $\frac{p_{\perp\Psi}^{\text{T(C)}}}{R_{\perp\Psi}^A} = \frac{p_{\perp\perp}^{\text{T(C)}}}{R_{\perp\perp}^A} \cos^2 \Psi + \frac{p_{\perp//}^{\text{T(C)}}}{R_{\perp//}} \sin^2 \Psi$, $R_{\perp\perp}^A$

$= \frac{R_{\perp}^C}{2(1+p_{\perp\perp}^C)}$, $\sin^2 \Psi = \frac{\sigma_{n1}^2}{\sigma_{n1}^2 + \sigma_{nt}^2}$, $\cos^2 \Psi = \frac{\sigma_{nt}^2}{\sigma_{n1}^2 + \sigma_{nt}^2}$; R_{\perp}^T 、 R_{\perp}^C 、 $R_{\perp//}$ 分别为单元横向拉伸强度、横向压缩强度、纵横剪切强度, 即 $R_{\perp}^T = Y_T$ 、 $R_{\perp}^C = Y_C$ 、 $R_{\perp//} =$

S_{12} ; $p_{\perp\perp}^T$ 、 $p_{\perp\perp}^C$ 为横向斜率参数; $p_{\perp\parallel}^T$ 、 $p_{\perp\parallel}^C$ 为纵向斜率参数; $p_{\perp\perp}^T$ 、 $p_{\perp\parallel}^T$ 表征法向拉伸对 IFF 损伤的促进效应; $p_{\perp\perp}^C$ 、 $p_{\perp\parallel}^C$ 表征法向压缩对 IFF 损伤的抑制效应; T、C 分别对应 IFF 作用面上法向载荷的拉伸和压缩两种状态。

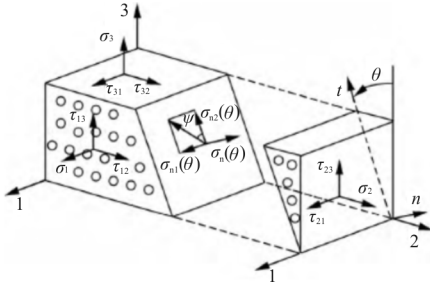


图 2 子层应力状态与断裂面

Fig. 2 Sublayer stress state and fracture surface

在层间起始损伤判定准则方面,常见的准则为 ABAQUS 自带的基于应力的二次准则:

$$\left(\frac{\langle t_n \rangle}{N}\right)^2 + \left(\frac{t_s}{S}\right)^2 + \left(\frac{t_t}{S}\right)^2 = 1 \quad (10)$$

式中: N 和 S 分别为层间界面的拉伸与剪切强度; t_n 、 t_s 和 t_t 分别为粘结元法向应力与两个方向上的剪应力。

(5) 损伤演化

FRP 单层损伤演化可分为瞬间卸载模型、逐渐卸载模型和承载力不变模型,如图 3 所示。目前大多采用基于系数折减的瞬间卸载模型与基于能量释放率的逐渐卸载模型。

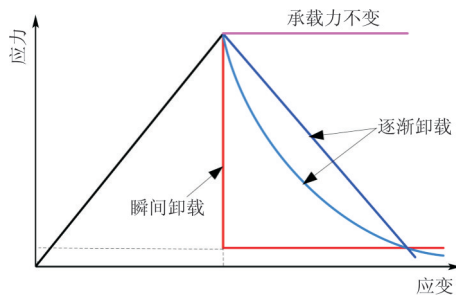


图 3 FRP 损伤演化模型

Fig. 3 FRP damage evolution model

层间损伤演化方式目前大多采用混合模式的 B-K 能量释放率来预测分层发生后的扩展,当材料的释放率满足损伤扩展准则时材料完全失效。

$$G_C = G_{Ic} + (G_{IIc} - G_{Ic}) \left(\frac{G_{IIc} + G_{IIIc}}{G_{Ic} + G_{IIc} + G_{IIIc}} \right)^\eta \quad (11)$$

式中: G_{Ic} 、 G_{IIc} 、 G_{IIIc} 为 I、II、III 型临界能量释放率; η 为 B-K 准则系数。

(6) 网格效应

在仿真模型中,损伤的最小尺度是有限元的单元。通过引入单元的特征长度和修改单元失效应变,可以降低有限元分析过程中能量释放率对网格的依赖性,从而削弱数值计算结果对网格尺度的依赖^[35]。若在单轴加载下的材料满足线性软化行为,则修改后的单元材料失效应变不再维持不变,因为

$$\epsilon_i^f = \frac{2G_C}{R_i \cdot l^*} = \frac{2g_C}{R_i} \quad (12)$$

式中: G_C 为临界能量释放率; g_C 为单元体在单位特征长度内的临界应变能密度; R_i 为损伤起始时的最大应力; l^* 为单元特征长度。

在 ABAQUS 中,实体单元的特征长度与该体单元的体积相关,即 $l^* = \sqrt[3]{V}$,但是该方法只是对长宽比不同的实体单元的一个整体近似,对于长宽高尺寸差别较大的单元消除网格依赖性效果有限。段永照等^[29]采用了一种新的单元特征长度来消除网格依赖性的影响,其表达式为

$$l^* = \begin{cases} l_y \cos \theta_{fp} & (|\theta_{fp}| < \theta) \\ l_z \sin |\theta_{fp}| & (|\theta_{fp}| \geq \theta) \end{cases} \quad (13)$$

式中: l_y 、 l_z 为单元在整体坐标系中沿坐标轴 y 、 z 方向的尺寸。

特征单元尺寸如图 4 所示,常见的数值模型搭配如表 4 所示。

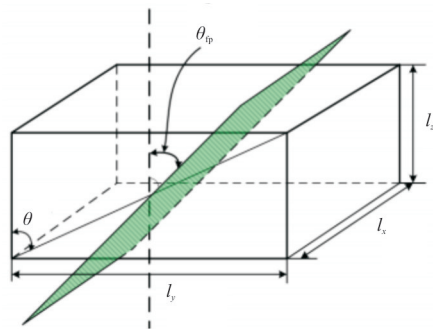


图 4 特征单元尺寸

Fig. 4 Characteristic unit size

表 4 材料损伤演化典型模型

Table 4 Typical models for damage evolution of materials

| 作者 | 年份 | 相近文献 | 模型内涵 |
|---------------------------------|------|--------------------|--------------------------|
| P. P. Camanho 等 ^[36] | 1999 | [21][37-54] | Hashin 准则+瞬间卸载+线性本构 |
| J. P. Hou 等 ^[55] | 2001 | [56-67] | Chang-Chang 准则+瞬间卸载+线性本构 |
| A. Faggiani 等 ^[14] | 2010 | [15-17][28][68-72] | Pcuk 准则+逐渐卸载+非线性本构+网格效应 |

3 评 估

由于目前冲击模型的种类很多,仅对典型的冲击模型进行分析评估。本文将整个冲击模型分为冲击物和被冲击 FRP 结构之间相互作用及其响应,以及 FRP 结构内部损伤变化。对两个部分分别选取典型的方法开展分析与评估。

3.1 模型宏观评价

冲击过程模型中 Collombet 模型被广泛认可,刘洪权模型比较新,这两个模型的主要区别为冲击载荷的施加方式不同且控制方程的解法不同。考虑到冲击载荷还有一种集中力施加方式,本文增加

一种组合方式:将刘洪权模型的位移施加方式改为最大接触力施加方式。在数值分析中,采用 ABAQUS 中的冲击接触来描述冲头与 FRP 层合板的动态冲击接触。

在 FRP 材料损伤演化模型中,Camanho 模型和 Faggiani 模型^[14]被认可程度较高。段永照等^[29]在 Faggiani 模型基础上采用三系数非线性本构进行了完善。本文选用 Camanho 和段永照这两个模型,并同时考虑网格效应和就位效应,具体模型形式和参数详见文献[36]和文献[29]。

将冲击过程模型与材料损伤演化模型组合,构成六种模型,如表 5 所示。

表 5 评估采用模型

Table 5 Assessment adoption model

| 模型 | 冲击过程模型 | 材料损伤演化模型 |
|-----|---------------------|-------------------------------|
| I | 冲击能+刚性+接触界面算法+动态 | Hashin 准则+瞬间卸载+线性本构+就位效应 |
| II | 位移+刚性+接触界面算法+准静态 | Hashin 准则+瞬间卸载+线性本构+就位效应 |
| III | 最大接触力+刚性+接触界面算法+准静态 | Hashin 准则+瞬间卸载+线性本构+就位效应 |
| IV | 冲击能+刚性+接触界面算法+动态 | Puck 准则+逐渐卸载+三系数非线性+就位效应+网格效应 |
| V | 位移+刚性+接触界面算法+准静态 | Puck 准则+逐渐卸载+三系数非线性+就位效应+网格效应 |
| VI | 最大接触力+刚性+接触界面算法+准静态 | Puck 准则+逐渐卸载+三系数非线性+就位效应+网格效应 |

3.2 评估算例一:正交铺设层合板

3.2.1 原始数据

本算例以 H. Y. Choi 等^[6]的试验为原始数据。材料为 T300/976,层合板铺层为 $[45_4/-45_4]_s$,材料属性如表 6 所示^[6]。试验件的有效冲击尺寸为 100 mm×76 mm×2.3 mm。冲击能量为 2.78 J,冲击后分层损伤如图 5 所示^[6]。

表 6 T300/976 材料属性

Table 6 Material properties of T300/976

| 参 数 | 数 值 | 参 数 | 数 值 |
|-------------------------------|-------|---|-----------|
| E_1 /GPa | 156 | Y_C /MPa | 252 |
| E_2 /GPa | 9.09 | Z_T /MPa | 45 |
| E_3 /GPa | 9.09 | Z_C /MPa | 252 |
| $\nu_{12} = \nu_{13}$ | 0.224 | c_1 | 1 750 824 |
| ν_{23} | 0.400 | c_2 | -172 358 |
| ρ /(kg·m ⁻³) | 1 540 | c_3 | 6 523 |
| X_T /MPa | 1 520 | G_{22}^I /(J·g·m ⁻²) | 230 |
| X_C /MPa | 1 590 | $(G_{12}^c = G_{23}^c)$ /(J·g·m ⁻²) | 760 |
| Y_T /MPa | 45 | α | 10 |

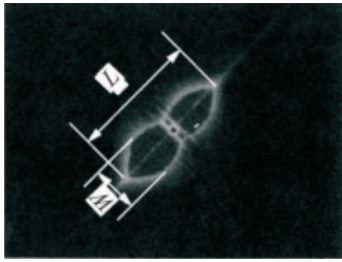


图 5 分层损伤结果

Fig. 5 Delamination damage results

3.2.2 模型与结果

整个模型分为冲头与 FRP 层合板两部分。冲头部分将钢质冲头简化为解析刚体,半径为 6.35 mm,质量为 0.16 kg。FRP 层合板部分,按照试验条件对层合板两端进行固支约束,单层板采用 8 节点减缩积分实体单元(C3D8R)进行模拟,厚度方向上将每四个子层离散为一个单元,在不同角度铺层之间插入零厚度界面元来模拟层间分层,损伤演化采用 B-K 准则,有限元图如图 6 所示,层间界面元参数如表 7 所示^[73]。模型分层结果如图 7 所示,分层面积具体尺寸如表 8 所示。

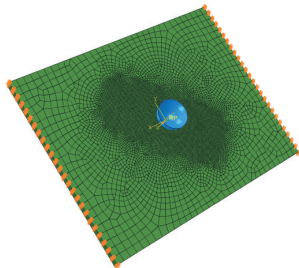


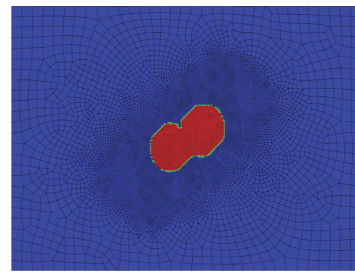
图 6 算例一有限元模型

Fig. 6 Finite element model of case 1

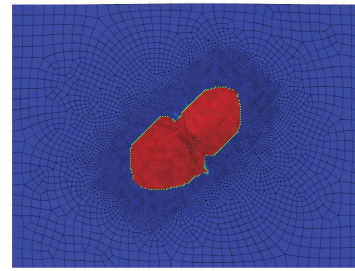
表 7 层间界面元参数(算例一)

Table 7 Interlayer interface element parameters(case 1)

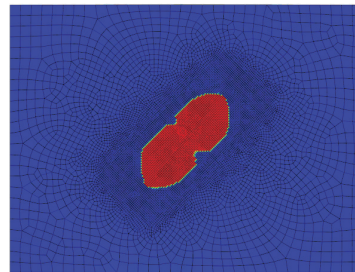
| 参 数 | 数 值 | 参 数 | 数 值 |
|---------------------------------------|-----|---------------------------------------|------|
| $G_{Ic}/(J \cdot m^{-2})$ | 230 | $K_{nn}/(GPa \cdot mm^{-1})$ | 156 |
| $(G_{IIc}=G_{IIIc})/(J \cdot m^{-2})$ | 450 | $(K_{ss}=K_{tt})/(GPa \cdot mm^{-1})$ | 70 |
| N/MPa | 45 | η | 1.45 |
| $(S=T)/MPa$ | 115 | | |



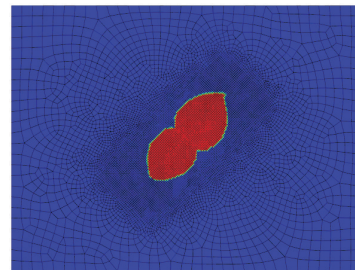
(b) 模型 II



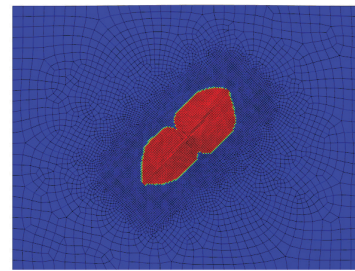
(c) 模型 III



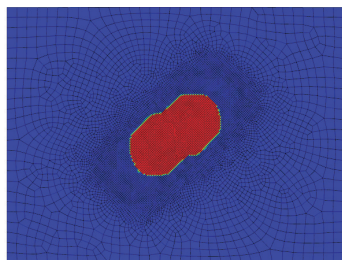
(d) 模型 IV



(e) 模型 V



(f) 模型 VI



(a) 模型 I

图 7 各模型仿真结果(算例一)

Fig. 7 Simulation results of each model(case 1)

表 8 分层损伤特征尺寸
Table 8 Layered damage characteristic size

| 方式 | 长度/mm | | 宽度/mm | | 面积/mm ² | | 计算时间/min |
|--------|-------|-------|-------|-------|--------------------|-------|----------|
| | 数值 | 误差/% | 数值 | 误差/% | 数值 | 误差/% | |
| 模型 I | 30.5 | -12.1 | 16.5 | +1.9 | 437.0 | +3.3 | 230 |
| 模型 II | 25.0 | -27.9 | 15.0 | -7.4 | 284.0 | -32.8 | 227 |
| 模型 III | 38.5 | +10.9 | 18.0 | +11.1 | 518.0 | +22.5 | 210 |
| 模型 IV | 35.2 | +1.4 | 16.5 | +1.9 | 383.0 | -9.5 | 357 |
| 模型 V | 32.5 | -6.3 | 15.0 | -7.4 | 360.2 | -14.8 | 335 |
| 模型 VI | 36.0 | +3.7 | 16.5 | +1.9 | 447.6 | +5.8 | 324 |
| 试验 | 34.7 | - | 16.2 | - | 423.0 | - | - |

3.2.3 讨 论

从图 5 和图 7 可以看出,各仿真模型得到的分层形状都接近花生状,损伤形状的长轴与该界面下方铺层方向一致,这与试验观测到的现象符合;Puck 准则材料损伤演化模型得到的分层形状较 Hashin 准则的材料损伤演化模型更接近于试验,这是因为 Puck 准则材料损伤演化模型考虑了剪切非线性的影响,但是从计算效率方面,由于 Puck 准则需要寻找隐藏断裂面,在计算时间上明显高于 Hashin 准则材料损伤演化模型,Hashin 材料损伤演化模型更适用于工程实践;两种材料损伤演化模型均可以较准确的预测冲击后的分层面积。

在冲击过程模型方面,采用位移输入的冲击过程模型得到的分层面积与试验相比存在损伤面积偏小的情况,这是由于位移输入忽略了冲头的惯性效应以及冲头回弹的影响,导致损伤面积偏小。采用最大接触力作为输入时,未考虑在冲击过程中冲击力随时间的变化,得到的分层面积与试验值相比偏大。

3.3 评估算例二:角铺设层合板

3.3.1 原始数据

以 D. Feng 等^[28]的试验为原始数据。材料为 HS300/ET223,层合板铺层为 $[0_3/45_4/-45_4]_s$,材料属性如表 9 所示^[28]。试验件的有效冲击尺寸为 $65\text{ mm}\times 87.5\text{ mm}\times 3.2\text{ mm}$ 。冲击能量为 4 J,冲击后分层损伤如图 8 所示^[28]。

表 9 HS300/ET223 材料属性

Table 9 Material properties of HS300/ET223

| 参 数 | 数 值 | 参 数 | 数 值 |
|--------------------------------------|-------|---|---------|
| E_1/GPa | 122 | Y_C/MPa | 140 |
| E_2/GPa | 6.2 | Z_T/MPa | 29 |
| E_3/GPa | 6.2 | Z_C/MPa | 140 |
| $\nu_{12}=\nu_{13}$ | 0.35 | c_1 | 835 749 |
| ν_{23} | 0.5 | c_2 | -98 043 |
| $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ | 1 600 | c_3 | 4 185.3 |
| X_T/MPa | 1 850 | $G_{22}^1/(\text{J}\cdot\text{g}\cdot\text{m}^{-2})$ | 520 |
| X_C/MPa | 1 470 | $(G_{12}^1=G_{23}^1)/(\text{J}\cdot\text{g}\cdot\text{m}^{-2})$ | 1 610 |
| Y_T/MPa | 29 | α | 18.33 |

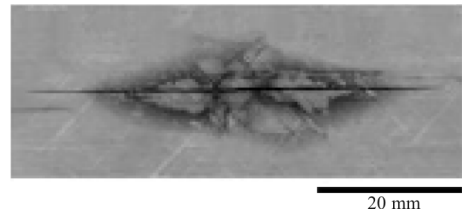


图 8 试验结果(算例一)

Fig. 8 The test result(case 1)

3.3.2 模型与结果

整个模型分为冲头与 FRP 层合板两部分。冲头部分将钢质冲头简化为解析刚体,直径为 12.5 mm,质量为 2.34 kg。FRP 层合板部分,按照试验条件对矩形开口筒支夹具固支,单层板采用 8 节点减缩积分实体单元(C3D8R)进行模拟,厚度方向上将每一个子层离散为一个单元,在不同角度铺层之间插入零厚度界面元来模拟层间分层,损伤演化采用 B-K 准则,有限元图如图 9 所示,层间界面元参数如表 10 所示^[28]。模型分层结果如图 10 所示,分层面积具体尺寸如表 11 所示。

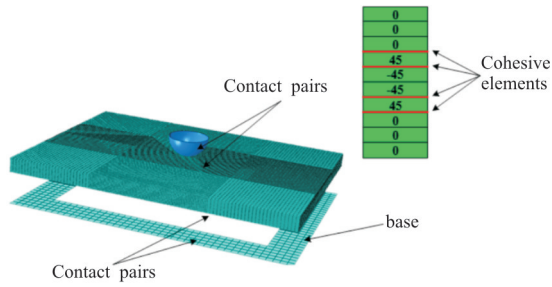


图 9 算例二有限元模型

Fig. 9 Finite element model of case 2

表 10 层间界面元参数(算例二)

Table 10 Interlayer interface element parameters(case 2)

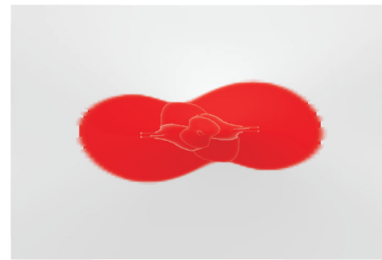
| 参 数 | 数 值 | 参 数 | 数 值 |
|---------------------------------------|-----|---------------------------------------|------|
| $G_{Ic}/(J \cdot m^{-2})$ | 520 | $K_{nn}/(GPa \cdot mm^{-1})$ | 120 |
| $(G_{IIc}=G_{IIIc})/(J \cdot m^{-2})$ | 920 | $(K_{ss}=K_{tt})/(GPa \cdot mm^{-1})$ | 43 |
| N/MPa | 30 | η | 1.45 |
| $(S=T)/MPa$ | 40 | | |



(a) 模型 I



(b) 模型 II



(c) 模型 III



(d) 模型 IV



(e) 模型 V



(f) 模型 VI

图 10 各模型仿真结果(算例二)

Fig. 10 The test result(case 2)

表 11 特征尺寸

Table 11 Characteristic size

| 方 式 | 长度/mm | | 宽度/mm | | 面积/mm ² | | 计算时间/min |
|--------|-------|-------|-------|-------|--------------------|-------|----------|
| | 数值 | 误差/% | 数值 | 误差/% | 数值 | 误差/% | |
| 模型 I | 54.5 | +50.5 | 15.8 | +6.0 | 786 | +56.6 | 285 |
| 模型 II | 57.6 | +59.1 | 14.46 | -2.9 | 875 | +74.3 | 160 |
| 模型 III | 56.7 | +56.6 | 15.8 | +6.0 | 958 | +90.8 | 210 |
| 模型 IV | 51 | +40.8 | 16 | +7.3 | 539 | +7.4 | 884 |
| 模型 V | 47.5 | +31.2 | 15.7 | +5.4 | 478 | -4.7 | 824 |
| 模型 VI | 52.8 | +45.8 | 16.96 | +13.8 | 641 | +27.7 | 820 |
| 试验 | 36.2 | - | 14.9 | - | 502 | - | - |

3.3.3 讨论

从图 8 和图 10 可以看出:各仿真模型得到的分层形状都接近花生状,损伤形状的长轴与该界面下方铺层方向一致,这与试验观测到的现象符合;但是 Hashin 准则得到的分层面积较 Puck 准则明显偏大,对于角铺设层合板,考虑剪切非线性的 Puck 准则更为合适;计算效率方面,由于 Puck 准则需要寻找隐藏断裂面,在计算时间上明显高于 Hashin 准则材料损伤演化模型。

4 结论

(1) 将低速冲击模型分为两大部分:冲击过程模型及材料损伤演化模型,并对两部分关键要素的处理方法及各要素的常用搭配进行整理与评述。

(2) 选取了六种模型进行了数值评估,评估结果表明:对于正交层合板各模型均可较准确地预测损伤形状和面积;对于角铺设层合板,没有考虑剪切非线性的 Hashin 模型得到的损伤面积偏大,而采用 Puck 准则、考虑剪切非线性、基于能量释放率的材料损伤演化模型得到的分层损伤形貌更接近于试验结果。

参考文献

- [1] 贾建东. 复合材料层合结构冲击损伤研究进展[J]. 应用数学和力学, 2014, 35(s1): 141-145.
Jia Jiandong. Research progress on impact damage of composite laminated structures[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2014, 35(s1): 141-145. (in Chinese)
- [2] 张银芬, 穆建春. 复合材料层合结构冲击损伤研究进展(I)[J]. 太原理工大学学报, 1999, 30(6): 563-566.
Zhang Yifen, Mu Jianchun. Research of impact damage of composite laminated structures(I)[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 1999, 30(6): 563-566. (in Chinese)
- [3] 张颖军, 梅志远, 朱锡. FRP 层合板低速冲击损伤特性研究现状与展望[J]. 玻璃钢/复合材料, 2011(1): 52-58.
Zhang Yingjun, Mei Zhiyuan, Zhu Xi. Current status and prospects of study on low velocity impact damaged characterization of fiber-reinforced composite laminates[J]. Glass Steel/Composite Material, 2011(1): 52-58. (in Chinese)
- [4] 崔海坡, 温卫东, 崔海涛. 复合材料层合板冲击损伤及残余强度研究进展[J]. 材料科学与工程学报, 2005, 23(3): 466-472.
Cui Haipo, Wen Weidong, Cui Haitao. Advances of study on low velocity impact damaged and residual strength of composite laminates[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2005, 23(3): 466-472. (in Chinese)
- [5] Sun C T, Jin C J. Quasi-static modeling of delamination crack propagation in laminates subjected to low-velocity impact[J]. Composite Science Technology, 1995, 54: 185-191.
- [6] Choi H Y, Chang F K. A model for predicting damage in graphite/epoxy laminated composites resulting from low-velocity point impact[J]. Journal of Composite Materials, 1992, 26: 2134-2169.
- [7] Davies G A O, Hitchings D, Wang J. Prediction of threshold impact energy for onset of delamination in quasi-isotropic carbon/epoxy composite laminates under low-velocity impact[J]. Composites Science & Technology, 2000, 60(1): 1-7.
- [8] 彭文杰, 陈建桥, 魏俊红, 等. 考虑逐步失效的层合板低速冲击损伤研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(4): 129-132.
Peng Wenjie, Chen Jianqiao, Wei Junhong, et al. Numerical simulation of delamination in laminates with sequential failure low-velocity impact considering[J]. Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2010, 38(4): 129-132. (in Chinese)
- [9] Collombet F, Bonini J, Lataillade J L. A three-dimensional modeling of low velocity impact damage in composite laminates[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1996, 39: 1491-1516.
- [10] Johnson A F, Pickett A K. Impact and crash modelling of composite structures: a challenge for damage mechanics [EB/OL]. (1999-03-15) [2018-12-18]. http://xueshu.baidu.com/usercenter/paper/show?paperid=6482bdc1bd036caa4709782ecc1cfb07&site=xueshu_se.
- [11] Johnson A F, Pickett A K, Rozycki P. Computational methods for predicting impact damage in composite structures[J]. Composites Science and Technology, 2001, 61(15): 2183-2192.
- [12] Hou J P, Petrinic N, Ruiz C. Prediction of impact damage in composite plate[J]. Composites Science and Technology, 2000, 60(2): 273-281.
- [13] 张彦, 来新民, 朱平, 等. 复合材料铺层板低速冲击作用下损伤的有限元分析[J]. 上海交通大学学报, 2006, 40(8): 1348-1353.
Zhang Yan, Lai Xinmin, Zhu Ping, et al. The finite element analysis of low-velocity impact damage in composite laminated plates[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2006, 40(8): 1348-1353. (in Chinese)
- [14] Faggiani A, Falzon B G. Predicting low-velocity impact damage on a stiffened composite panel[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2010, 41(6): 737-749.
- [15] Shi Y, Sait T, Soutis C. Modelling damage evolution in composite laminates subjected to low velocity impact[J]. Composite Structures, 2012, 94(9): 2902-2913.
- [16] Li N, Chen P H, Ye Q. A damage mechanics model for low-velocity impact damage analysis of composite laminates[J]. Aeronautical Journal-New Series, 2017, 121: 1-18.
- [17] 拓宏亮, 马晓平, 卢智先. 基于连续介质损伤力学的复合材料层合板低速冲击损伤模型[J]. 复合材料学报, 2018, 35(7): 1878-1888.

- Tuo Hongliang, Ma Xiaoping, Lu Zhixian. A model for low velocity impact damage analysis of composite laminates based on continuum damage mechanics[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2018, 35(7): 1878-1888. (in Chinese)
- [18] Wisheart M, Richardson M. The finite element analysis of impact induced delamination in composite materials using a novel interface element[J]. *Composites Part A*, 1998, 29(3): 301-313.
- [19] De Moura M, Marques A T. Prediction of low velocity impact damage in carbon-epoxy laminates [J]. *Composites Part A*, 2002, 33(3): 361-368.
- [20] 关志东, 郭渊. 含缺陷的复合材料层合板低速冲击过程的有限元模拟[J]. *复合材料学报*, 2006, 23(2): 180-184.
Guan Zhidong, Guo Yuan. Computer simulation of low-velocity impact process of the composite laminate with defect [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2006, 23(2): 180-184. (in Chinese)
- [21] 张海波. 新 3D 界面元在复合材料层合板分层损伤数值模拟中的应用[D]. 天津: 天津大学, 2009.
Zhang Haibo. Application of new 3D interface element in the numerical simulation of delamination damage of composite laminates [D]. Tianjin: Tianjin University, 2009. (in Chinese)
- [22] 王敬意. 基于逐渐损伤模型的层合板脱层数值模拟[D]. 天津: 天津大学, 2010.
Wang Jingyi. Delamination simulation of laminated plates based on a progressive damage model [D]. Tianjin: Tianjin University, 2010. (in Chinese)
- [23] 郝扣安, 王振清, 周利民. 不同铺层厚度复合材料的低速冲击特性与损伤模式研究[J]. *应用数学和力学*, 2013, 34(7): 661-671.
Hao Kouan, Wang Zhenqing, Zhou Limin. Impact behaviors and damage modes of composites under low-velocity impact with different layup thicknesses [J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2013, 34(7): 661-671. (in Chinese)
- [24] 刘洪权, 谭申刚, 薛应举. 基于内聚单元的复合材料层合板低速冲击损伤的数值模拟[J]. *机械科学与技术*, 2016, 35(9): 1455-1460.
Liu Hongquan, Tan Shengang, Xue Yingju. Numerical simulation of low-velocity impact damage in laminated composites by using cohesive element [J]. *Mechanical Science and Technology*, 2016, 35(9): 1455-1460. (in Chinese)
- [25] 方际澄, 于哲峰. 含分层损伤复合材料层压板低速冲击模型刚度计算方法 [J]. *复合材料学报*, 2018, 35(10): 2768-2776.
Fang Jicheng, Yu Zhefeng. On the stiffness of composite laminate with delaminations for analytical model of low velocity impact [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2018, 35(10): 2768-2776. (in Chinese)
- [26] Hahn H T, Tsai S W. Nonlinear elastic behavior of unidirectional composite laminates [J]. *Journal of Composite Materials*, 1973, 7(1): 102-118.
- [27] ABAQUS Inc., Ltd. ABAQUS user's manual. Version V6.10[M]. Rhode Island: ABAQUS Inc., Ltd., 2010.
- [28] Feng D, Aymerich F. Finite element modelling of damage induced by low-velocity impact on composite laminates [J]. *Composite Structure*, 2014, 108: 161-171.
- [29] 段永照, 姚卫星, 陈方. 面向纤维增强复合材料低速冲击损伤的非线性混合模型 [J]. *南京航空航天大学学报*, 2018, 50(1): 16-23.
Duan Yongzhao, Yao Weixing, Cheng Fang. A nonlinear mixed-mod model oriented low velocity impact damage of FRP [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2018, 50(1): 16-23. (in Chinese)
- [30] Chang F K, Chang K Y. A progressive damage model for laminated composites containing stress concentrations [J]. *Journal of Composite Materials*, 1987, 21: 834-855.
- [31] Pinho S T, Nancy J H, Tonny T, et al. Failure models and criteria for FRP under in-plane or three-dimensional stress states including shear non-linearity [R]. USA: NASA Technical Memorandum, 2005.
- [32] Chang K Y, Chang F K. Damage tolerance of laminated composites containing an open hole and subjected to tensile loadings [J]. *Journal of Composite Materials*, 1991, 25: 274-301.
- [33] Hashin Z. Failure criteria for unidirectional fiber composites [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1980, 47: 329-334.
- [34] Puck A, Schürmann H. Failure analysis of FRP laminates by means of physically based phenomenological models [J]. *Composites Science and Technology*, 1998, 58(7): 1045-1067.
- [35] Falzon B G, Apruzzese P. Numerical analysis of intralaminar failure mechanisms in composite structures Part II: applications [J]. *Composite Structures*, 2011, 93(2): 1047-1053.
- [36] 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.
- [37] Batra R C, Gopinath G, Zheng J Q. Damage and failure in low energy impact of fiber-reinforced polymeric composite laminates [J]. *Composite Structure*, 2012, 94: 540-547.
- [38] Tang Z, Hang C, Suo T, et al. Numerical and experimental investigation on hail impact on composite panels [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 105(7): 102-108.
- [39] 吴振, 陈健. 基于 Hashin 准则的复合材料层合结构低速冲击研究 [J]. *沈阳航空航天大学学报*, 2017, 34(5): 12-20.
Wu Zhen, Chen Jian. Low-velocity impact damage of composite structure based on Hashin criteria [J]. *Journal of Shenyang Aerospace University*, 2017, 34(5): 12-20. (in Chinese)
- [40] 徐瑞童, 左洪福, 陆晓华, 等. 含低速冲击损伤复合材料层合板剩余压缩强度预测 [J]. *兵器装备工程学报*, 2017, 38(8): 170-174.
Xu Yutong, Zuo Hongfu, Lu Xiaohua, et al. Residual compressive strength prediction of low-speed impact damaged composited laminates [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2017, 38(8): 170-174. (in Chinese)
- [41] 王念, 王志瑾. 复合材料层合板低速冲击损伤研究 [J]. 飞

- 机设计, 2015, 35(2): 5-10,14.
- Wang Nian, Wang Zhijin. Research on low velocity impact damage of composites laminates[J]. Aircraft Design, 2015, 35(2): 5-10,14. (in Chinese)
- [42] 刘万雷, 常新龙, 张晓军, 等. 基于改进 Hashin 准则的复合材料低速冲击损伤研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(12): 209-214.
- Liu Wanlei, Chang Xinlong, Zhang Xiaojun, et al. Low-velocity impact analysis of composite plates based on modified Hashin criterion [J]. Journal of Vibratuion and Shock, 2016, 35(12): 209-214. (in Chinese)
- [43] 郭孝欢, 孙法亮, 范洪波. 复合材料层压板结构低速冲击损伤仿真的分析[J]. 机电产品开发与创新, 2015, 28(5): 91-93.
- Guo Xiaohuan, Sun Faliang, Fan Hongbo. Simulation and analysis for composite laminates subjected to low velocity impact[J]. Development and Innovation of Machinery and Electircal Products, 2015, 28(5): 91-93. (in Chinese)
- [44] 于飞, 陈向明, 张阿盈, 等. 一种改进的内聚力损伤模型在复合材料层合板低速冲击损伤模拟中的应用[J]. 复合材料学报, 2015, 32(6): 1745-1753.
- Yu Fei, Chen Xiangming, Zhang Aying, et al. Application of modified cohesive zone damage model in damage simulation of composite laminates subject to low-velocity impact [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(6): 1745-1753. (in Chinese)
- [45] 谭建设, 张晓晶, 张俊琪, 等. 复合材料层合板低速冲击的接触力和能量响应仿真[J]. 复合材料学报, 2014, 31(4): 970-980.
- Tan Jianshe, Zhang Xiaojing, Zhang Junqi , et al. Simulation of impact force and energy response of composite laminate subjected to low velocity impact [J]. Acta Materiae compositae sinica, 2014, 31(4): 970-980. (in Chinese)
- [46] 万铖, 金平, 谭晓明, 等. 基于 ABAQUS 的复合材料低速冲击损伤分析[J]. 装备环境工程, 2014, 11(5): 38-42.
- Wan Cheng, Jin Ping, Tan Xiaoming, et al. Analysis for damage of composites under low-velocity impact based on abaqus[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(5): 38-42. (in Chinese)
- [47] 朱东俊, 张玮, 葛亮, 等. 复合材料层合板低速冲击损伤特性影响因素[J]. 舰船科学技术, 2014, 36(11): 57-65.
- Zhu Dongjun, Zhang Wei, Ge Liang, et al. Studies of several influence factors of low-velocity impact damaged characterization on composite laminates [J]. Ship Science and Technology, 2014, 36(11): 57-65. (in Chinese)
- [48] 王一飞, 张晓晶, 汪海. 复合材料层压板低速冲击响应与损伤参数关系研究[J]. 固体力学学报, 2013, 34(1): 63-72.
- Wang Yifei, Zhang Xiaojing, Wang Hai. Low-velocity impact response of composite laminate and its relationship with damage parameters[J]. Chinese Journal of Soild Mechanics, 2013, 34(1): 63-72. (in Chinese)
- [49] 闫蕊, 徐继, 马春浩. 基于应变损伤模型的复合材料层合板低速冲击数值模拟[J]. 机械科学与技术, 2013, 32(2): 235-239.
- Yan Rui, Xu Fei, Ma Chunhao. Simulating low-velocity impact for composite laminates based on strain damage model[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2013, 32(2): 235-239. (in Chinese)
- [50] 伊鹏跃, 于哲峰, 汪海. 复合材料层压板低速冲击刚度退化仿真方案研究[J]. 力学季刊, 2012, 33(3): 469-475.
- Yin Pengyue, Yu Zhefeng, Wang Hai. Stiffness degradation methodology for low-velocity impact simulation in composite laminate[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2012, 33(3): 469-475. (in Chinese)
- [51] 刘德博, 关志东, 陈建华, 等. 复合材料低速冲击损伤分析方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2012, 38(3): 422-426.
- Liu Debo, Guan Zhidong, Chen Jianhua, et al. Composite damage analysis subjected to low-velocity impact[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2012, 38(3): 422-426. (in Chinese)
- [52] 屈天骄, 郑锡涛, 范献银, 等. 复合材料层合板低速冲击损伤影响因素分析[J]. 航空材料学报, 2011, 31(6): 81-86.
- Qu Tianjiao, Zheng Xitao, Fan Xianyin, et al. Analysis of influencing factors on low-speed impact damage of composite laminates[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2011, 31(6): 81-86. (in Chinese)
- [53] 张丽, 李亚智, 张金奎. 复合材料层合板在低速冲击作用下的损伤分析[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(5): 1170-1174.
- Zhang Li, Li Yazhi, Zhang Jinkui. Low-velocity impact damage analysis in composite laminates[J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(5): 1170-1174. (in Chinese)
- [54] 贾建东, 丁运亮, 胡伯仁. 复合材料层合板低速冲击后压缩破坏的数值模拟[J]. 机械科学与技术, 2010, 29(10): 1320-1324.
- Jia Jiandong, Ding Yunliang, Hu Boren. Numerical simulation of compressive failure of composite laminates after low velocity impact [J]. Mechanical Science and Technology, 2010, 29(10): 1320-1324. (in Chinese)
- [55] Hou J P, Petrinic N, Ruiz C. A delamination criterion for laminated composites under low-velocity impact[J]. Composites Science and Technology, 2001, 61(14): 2069-2074.
- [56] 徐颖, 温卫东, 崔海坡. 低速冲击下的层合板逐渐损伤扩展模拟[C]//第十六届玻璃钢/复合材料学术年会. 黄山: 中国硅酸盐学会, 2005.
- Xu Ying, Wen Weidong, Cui Haipo. Cumulative damage simulation of low velocity impact on laminatied composites [C]. The 16th Fiber Reinforced Plastics/Composites. Huangshan: The Chinese Ceramic Society, 2005. (in Chinese)
- [57] 徐颖, 温卫东, 崔海坡. 复合材料层合板低速冲击逐渐累积损伤预测方法[J]. 材料科学与工程学报, 2006, 24(1): 77-81.
- Xu Ying, Wen Weidong, Cui Haipo. A cumulative damage prediction method of low-velocity impacts on laminated composites[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2006, 24(1): 77-81. (in Chinese)

- [58] 崔海坡, 温卫东, 崔海涛. 层合复合材料板的低速冲击损伤及剩余压缩强度研究[J]. 机械科学与技术, 2006, 25(9): 1013-1017.
Cui Haipo, Wen Weidong, Cui Haitao. Research on low velocity impact damage and residual compressive strength of laminated composites[J]. Mechanical Science and Technology, 2006, 25(9): 1013-1017. (in Chinese)
- [59] 温卫东, 徐颖, 崔海坡. 低速冲击下复合材料层合板损伤分析[J]. 材料工程, 2007(7): 6-11.
Weng Weidong, Xu Ying, Cui Haipo. Damage analysis of laminated composites under low velocity impact loading[J]. Material Engineering, 2007(7): 6-11. (in Chinese)
- [60] 程起有, 童小燕, 姚磊江, 等. 复合材料层合板低速冲击响应的有限元分析[J]. 飞机设计, 2008(1): 33-36.
Cheng Qiyou, Tong Xiaoyan, Yao Leijiang, et al. Finite element analysis on response of composite laminated plated under low-velocity impact[J]. Aircraft Design, 2008(1): 33-36. (in Chinese)
- [61] 张小娟, 张博平. 复合材料层合板低速冲击损伤方法研究[J]. 航空计算技术, 2010, 40(3): 68-70, 74.
Zhang Xiaojuan, Zhang Boping. Damage analysis of composite laminate under low-velocity[J]. Aeronautical Computing Technique, 2010, 40(3): 68-70, 74. (in Chinese)
- [62] 庄苗, 宋恒旭, 彭涛, 等. 复合材料低速冲击损伤研究及等效模型的应用[J]. 工程力学, 2012, 29(s2): 15-22.
Zhuang Zhuo, Song Hengxu, Peng Tao, et al. Damage of composite under low-velocity impact and application of mechanical equivalent model [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(s2): 15-22. (in Chinese)
- [63] 姚振华, 李亚智, 刘向东, 等. 复合材料层合板低速冲击后剩余压缩强度研究[J]. 西北工业大学学报, 2012, 30(4): 518-523.
Yao Zhenhua, Li Yazhi, Liu Xiangdong, et al. Effectively calculating residual compressive strength of composite laminate after impact[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2012, 30(4): 518-523. (in Chinese)
- [64] 张鹏飞. 低速冲击下复合材料层合板损伤的有限元模拟[J]. 江苏航空, 2012(s1): 137-140.
Zhang Pengfei. Finite element simulation of damage of composite laminates under low velocity impact[J]. Jiangsu Aviation, 2012(s1): 137-140. (in Chinese)
- [65] 陈亚军, 于哲峰, 汪海. 复合材料层压板低速冲击响应比例效应数值模拟研究[J]. 固体力学学报, 2012, 33(6): 574-582.
Chen Yajun, Yun Zhefeng, Wang Hai. Numerical modeling of scale effects on the responses of laminated composite plate under low velocity impact[J]. Acta Mechanica Sinica, 2012, 33(6): 574-582. (in Chinese)
- [66] 刘银伟, 周晚林, 张思远. 复合材料低速冲击损伤的数值模拟研究[J]. 固体力学学报, 2014, 35(s1): 1-5.
Liu Yinwei, Zhou Wanlin, Zhang Siyuan. Study on low-velocity impact damage simulation of composite laminates[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2014, 35(s1): 1-5. (in Chinese)
- [67] 何林锋, 金海波. 复合材料低速冲击损伤有限元模拟[J]. 江苏航空, 2015(1): 26-28.
He Linfeng, Jin Haibo. Finite element simulation of low-velocity impact damage of composite materials[J]. Jiangsu Aviation, 2015(1): 26-28. (in Chinese)
- [68] Donadon M V, Iannucci L, Falzon B G, et al. A progressive failure model for composite laminates subjected to low velocity impact damage[J]. Computite Structure, 2008, 86(11/12): 1232-1252.
- [69] Raimondo L, Iannucci L, Robinson P. A progressive failure model for mesh-size-independent FE analysis of composite laminates subject to low-velocity impact damage[J]. Composites Science and Technology, 2012, 72(5): 624-632.
- [70] 范磊, 李念, 陈普会. 复合材料加筋结构边缘冲击响应的有限元分析[J]. 江苏航空, 2018(1): 20-25.
Fan Lei, Li Nian, Chen Puhui. Finite element analysis of impact response of composite stiffened edge structure[J]. Jiangsu Aviation, 2018(1): 20-25. (in Chinese)
- [71] 刘向民, 姚卫星, 陈方. 复合材料层合板结构冲击损伤数值模拟的损伤力学模型[J]. 航空学报, 2016, 37(10): 3054-3063.
Liu Xiangmin, Yao Weixing, Chen Fang. Damage mechanics model for simulating impact response of composite laminated structures[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(10): 3054-3063. (in Chinese)
- [72] 李念, 陈普会. 复合材料层合板低速冲击损伤分析的连续介质损伤力学模型[J]. 力学学报, 2015, 47(3): 458-470.
Li Nian, Chen Puhui. Continuum damage mechanics model for low-velocity impact damage analysis of composite laminates[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2015, 47(3): 458-470. (in Chinese)
- [73] 吴义韬, 姚卫星, 吴富强, 等. 基于应变能耗散的复合材料层合板面内缺口强度分析 CDM 模型[J]. 复合材料学报, 2014, 31(4): 1013-1021.
Wu Yitao, Yao Weixing, Wu Fuqiang, et al. CDM model for analyzing intralaminar strength of notched composite laminates based on the dissipation of strain energy[J]. Acta Materiae compositae sinica, 2014, 31(4): 1013-1021. (in Chinese)

作者简介:

张嘉睿(1994—),男,硕士研究生。主要研究方向:复合材料结构设计。

吴富强(1979—),男,博士,副教授。主要研究方向:复合材料结构设计。

姚卫星(1957—),男,博士,教授,博导。主要研究方向:复合材料结构设计,飞行器结构疲劳、断裂、优化设计。

(编辑:马文静)