

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2017.04.006

基于 ABAQUS 的 CCF300 碳纤维层合板 低速冲击破坏数值模拟

熊明洋, 向 忠, 胡旭东, 陆海亮

(浙江理工大学 机械与自动控制学院, 浙江 杭州 310018)

摘 要:为了更有效预测国产碳纤维增强材料在冲击载荷下的损伤情况,以国产碳纤维(CCF300)/环氧树脂(5228)复合材料层合板为对象,利用专业有限元仿真软件 ABAQUS 进行冲击破坏性能数值模拟研究。采用复合材料渐进损伤法,建立 CCF300 碳纤维层合板在低速冲击载荷下的损伤和变形三维有限元模型。通过三维实体单元模拟层合板,利用内聚力接触模拟单层板间的接触,从而模拟层合板层内和层间的不同失效模式。使用 FORTRAN 语言编写 ABAQUS 材料用户子程序 VUMAT 实现模拟,程序中包含本构方程的求解、损伤准则对单元失效的判定和损伤单元参数退化 3 部分,材料的单元失效是通过引入状态损伤变量来判断。仿真模型可通过调用子程序来模拟复合材料的纤维拉伸、压缩失效、基体开裂、挤压失效 4 种层内损伤,同时 ABAQUS 本身可以模拟材料分层损伤。通过仿真得到了材料的最大冲击破坏载荷和损伤模式的效果图。

关 键 词:复合材料;低速冲击;有限元分析;渐进损伤;ABAQUS 有限元仿真软件

中图分类号:TB332 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2895(2017)04-0027-06

Numerical Simulation of Low Velocity Impact Failure of CCF300 Carbon Fiber Laminate Based on ABAQUS

XIONG Mingyang, XIANG Zhong, HU Xudong, LU Hailiang

(School of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to more effectively study and predict the damage of domestic carbon fiber reinforced materials under impact load, this paper took the domestic carbon fiber (CCF300) / epoxy resin (5228) composite laminates as the object, the professional finite element simulation software ABAQUS was used for impact damage simulation. Based on the analysis of progressive damage, a three-dimensional finite element model of damage and deformation for composite laminates under low velocity impact was established. Being applied to three dimensional solid elements and cohesive elements, the model could simulate the different failure modes of intralaminar and interlaminar damage for composite laminates. The numerical analysis was mainly carried out by using the user subroutine (VUMAT) of finite element software ABAQUS which included three parts: the solution of constitutive equation, the damage criterion to the failure of the element and material degradation of damage element. In the process of the simulation model could call the subroutine to simulate fiber tensile failure, fiber compress failure, matrix crushing and matrix cracking and the ABAQUS could simulate the delamination damage by itself. Finally, the maximum impact strength and damage pattern of the material were obtained by simulation.

Keywords: composite materials; low velocity impact; Finite Element analysis; progressive damage; ABAQUS

近几十年来,复合材料以其比强度高和比模量大、制造等多领域得到广泛的应用^[1]。但是,复合材料服役期间,必然会遭受到各种外来作用力的损伤,其中冲

收稿日期:2016-12-24;修回日期:2017-02-08

基金项目:国家自然科学基金项目(51605443)。

第一作者简介:熊明洋(1992),男,安徽广德人,工程硕士,主要从事复合材料基础性能研究。E-mail:604635357@qq.com

击损伤对复合材料结构是不可避免的。对于碳纤维增强复合材料来说,材料对于外界冲击的抵抗能力较弱,在遭受冲击破坏后,一些材料性能会剧烈下降,大大缩短了材料的服役寿命。所以,为了更最大限度地发挥复合材料的性能,需要对其结构极限承载能力进行预测和研究,同时为了更好地研究复合材料层合板在冲击载荷下的破坏过程,国内外学者在这一方面也做了许多研究。

Long 等^[2]通过低速冲击试验和仿真来预测分层损伤,由于该模型主要考虑分层损伤,所以采用了壳单元来模拟单层板,采用 ABAQUS 内置的二维的 Hashin 损伤准则,不能很好地描述材料的真实损伤情况;Tita 等^[3]也通过实验和数值模拟对薄复合材料板的低速冲击失效进行分析,考虑冲击过程中纤维断裂、分层、基体开裂等失效模式,在 ABAQUS 中采用 Hill 模型 UMAT 材料子程序进行仿真;Ahmad 等^[4]通过实验研究了湿度对单向层合板的抗低速冲击性能的影响,结果表明水分吸收会增强材料基体的塑性,降低材料的抗冲击性能,减小分层临界值和初始能量;毛春见等^[5]研究低速冲击损伤的对象是缝合复合材料层合板,通过对缝合复合材料层板在横向低速冲击载荷作用下分析模型的建立,探讨了影响缝合层板冲击响应和损伤的几大因素;谭建设等^[6]通过有限元仿真,采用多种混合损伤准则,研究复合材料层合板低速冲击的接触力和能量响应,并通过实验进行验证。

课题组采用渐进损伤分析^[7](progressive damage analysis, PDA)来模拟纤维增强材料从初始损伤至最终结构完全失效的整个过程,通过 ABAQUS 有限元软件的材料子程序 VUMAT 建立渐进损伤模型,首先建立冲击三维有限元模型,以便可以考虑层间应力;然后通过 VUMAT 子程序编入层合板应力分析、损伤准则和材料退化方式来进行模型的损伤分析。应力分析主要是正交各向异性材料的本构方程求解,损伤准则采用三维 Hashin 准则,可以较好预测各种破坏模式,材料参数退化是利用损伤状态变量因子,然后对损伤材料点的刚度矩阵进行退化,最后得到层合板的不同损伤模式和破坏载-时间的曲线图。

1 VUMAT 程序理论部分

1.1 冲击渐进损伤分析

课题组利用复合材料渐进损伤分析方法^[8],对冲击破坏模型进行分析。渐进损伤分析方法主要有3部分,包括本构方程求解、材料损伤准则和材料性能退化,这3部分内容都是通过 FORTRAN 语言编写子程

序 VUMAT 完成的,以下3节分别进行介绍。

1.2 本构方程求解

单层纤维增强复合材料为正交各向异性,对于三维的线弹性体,未损伤材料的应力-应变关系可以用下式表示:

$$\{\sigma\} = [C] \{\varepsilon\}。$$

也可以表示为:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{12} \end{Bmatrix}。$$

式中:1 代表纤维方向,2 为横向方向,3 代表板的厚度方向; σ_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) 表示应力, C_{ij} ($i, j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$) 表示刚度矩阵 $[C]$ 中的刚度系数, ε_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) 表示应变。其中未损伤刚度矩阵 $[C]$ 内部系数可表示为:

$$\begin{aligned} C_{11} &= E_{11}(1 - \mu_{23}\mu_{32})\Delta; & C_{22} &= E_{22}(1 - \mu_{13}\mu_{31})\Delta; \\ C_{33} &= E_{33}(1 - \mu_{21}\mu_{12})\Delta; & C_{12} &= E_{11}(\mu_{21} + \mu_{31}\mu_{23})\Delta; \\ C_{23} &= E_{22}(\mu_{32} + \mu_{12}\mu_{31})\Delta; & C_{13} &= E_{11}(\mu_{31} + \mu_{21}\mu_{32})\Delta; \\ C_{44} &= G_{12}; & C_{55} &= G_{13}; & C_{66} &= G_{23}。 \end{aligned}$$

式中 $\Delta = \frac{1}{1 - \mu_{12}\mu_{21} - \mu_{23}\mu_{32} - \mu_{31}\mu_{13} - 2\mu_{21}\mu_{32}\mu_{13}}$ 。

μ 和 E 代表材料的泊松比和弹性模量, G 为剪切模量, 1, 2 和 3 代表材料的主方向。

1.3 损伤准则

在本文中,主要考虑层合板低速冲击下的5种损伤模式,即:纤维断裂、纤维压缩、基体开裂、基体挤压和分层损伤。本文中采用三维 Hashin 准则^[9]作为损伤判据,模拟前4种失效模式,因为三维的 Hashin 准则形式比较简单,而且如 ABAQUS 等仿真软件自带的也是二维 Hashin 准则。其三维具体失效准则如下所示:

1) 纤维断裂失效 ($\sigma_{11} \geq 0$)

$$F_{ft} = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_t} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}} \right)^2 \geq 1;$$

2) 纤维压缩失效 ($\sigma_{11} < 0$)

$$F_{fc} = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_c} \right)^2 \geq 1;$$

3) 基体开裂失效 ($\sigma_{22} + \sigma_{33} \geq 0$)

$$F_{mt} = \left(\frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{Y_t} \right)^2 + \frac{(\tau_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33})}{S_{23}^2} + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}} \right)^2 +$$

$$\left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}}\right)^2 \geq 1;$$

4) 基体挤压失效 ($\sigma_{22} + \sigma_{33} < 0$)

$$F_{mc} = \frac{1}{Y_c} \left(\left(\frac{Y_c}{2S_{12}} \right)^2 - 1 \right) (\sigma_{22} + \sigma_{33}) + \left(\frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{2S_{12}} \right)^2 + \frac{(\tau_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33})}{S_{23}^2} + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}} \right)^2 \geq 1。$$

式中: F_{ft} , F_{fc} 为纤维破坏时的失效指数; F_{mt} , F_{mc} 为基体破坏时的失效指数; 1 代表纤维方向, 2 为横向方向, 3 代表板的厚度方向; σ_{11} , σ_{22} , σ_{33} 为材料 1, 2, 3 方向的正应力分量; τ_{12} , τ_{13} , τ_{23} 为材料 1-2, 1-3, 2-3 方向的剪应力分量; X_t 为纤维纵向拉伸强度, X_c 为纤维纵向压缩强度, Y_t 为横向拉伸强度, Y_c 为横向压缩强度; S_{12} , S_{13} , S_{23} 代表各方向的剪切强度。

分层损伤主要是利用内聚力 (Cohesive) 单元^[10]模拟层与层之间的粘接区域, 内聚力单元可以有效地模拟和预测分层损伤的产生、损伤扩展直至最后分层的发生。在 ABAQUS 中主要有 2 种表示方式: 一种是插入一层没有厚度的薄壳单元模拟界面层, 另一种是在层与层之间定义内聚力接触。本研究采用内聚力接触模拟层和层之间的粘接, 在后处理中用分层损伤状态变量 D 区分材料是否出现分层损伤。

1.4 材料性能退化方案

当复合材料遭到冲击破坏, 材料退化开始, 此时采用基于连续损伤力学内部损伤状态变量对损伤材料属性进行退化, 也就是在材料的刚度矩阵中引入损伤变量^[11-13], 损伤材料的应力应变关系如下:

$$\{\sigma\} = [Q] \{\varepsilon\}。$$

式中 $[Q]$ 表示材料的损伤刚度矩阵, 其表达式为

$$[Q] = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & Q_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{13} & Q_{23} & Q_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix}。$$

根据 Farooq^[14] 以及郭卫^[15] 提出的理论, 如果材料的积分点满足失效准则时, 材料的刚度和应力参数就开始发生退化, 从而引发应力更新。通过引入损伤状态变量 d 来预测材料的损伤模式, 变量 d 的定义域为 $[0, 1]$, 当 $d=0$ 时, 表示没有发生损伤, 当 $d=1$ 时, 表示材料完全破坏失效了。文中用 d_f 表示纤维损伤, d_m 表示基体损伤, d_f 与 d_m 表达式如下:

$d_f = 1 - (1 - d_{ft})(1 - d_{fc})$; $d_m = 1 - (1 - d_{mt})(1 - d_{mc})$ 。式中: d_{ft} 和 d_{mt} 表示在拉伸作用下纤维断裂和基体开裂, d_{fc} 和 d_{mc} 表示在压缩作用下纤维断裂和基体挤压, 而 d_{ft} , d_{mt} , d_{fc} 和 d_{mc} 的表达式, 可以由以下方程得到:

$$d_{ft} = 1 - \frac{1}{F_{ft}} e^{-X_t \varepsilon_{1t}^f L^c (F_{ft} - 1) / G_{ft}};$$

$$d_{fc} = 1 - \frac{1}{F_{fc}} e^{-X_c \varepsilon_{1c}^f L^c (F_{fc} - 1) / G_{fc}};$$

$$d_{mt} = 1 - \frac{1}{F_{mt}} e^{-Y_t \varepsilon_{2t}^f L^c (F_{mt} - 1) / G_{mt}};$$

$$d_{mc} = 1 - \frac{1}{F_{mc}} e^{-Y_c \varepsilon_{2c}^f L^c (F_{mc} - 1) / G_{mc}}。$$

式中: G_{fc} , G_{ft} , G_{mc} , G_{mt} 为材料临界断裂能; ε_{1t}^f , ε_{1c}^f , ε_{2t}^f , ε_{2c}^f 为达到抗拉 (或压) 强度时的应变; L^c 是单元的特征长度。

当满足失效准则, 可以通过未损伤刚度矩阵 $[C]$ 得到损伤刚度矩阵 $[Q]$, 具体可根据以下方程计算:

$$Q_{11} = C_{11}(1 - d_f); \quad Q_{22} = C_{22}(1 - d_f)(1 - d_m);$$

$$Q_{33} = C_{33}(1 - d_f)(1 - d_m); \quad Q_{23} = C_{23}(1 - d_f)(1 - d_m);$$

$$Q_{13} = C_{13}(1 - d_f)(1 - d_m); \quad Q_{12} = C_{12}(1 - d_f)(1 - d_m);$$

$$Q_{44} = C_{44}(1 - d_f)(1 - s_{mt}d_{mt})(1 - s_{mc}d_{mc});$$

$$Q_{55} = C_{55}(1 - d_f)(1 - s_{mt}d_{mt})(1 - s_{mc}d_{mc});$$

$$Q_{66} = C_{66}(1 - d_f)(1 - s_{mt}d_{mt})(1 - s_{mc}d_{mc})。$$

式中: Q_{ij} ($i, j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$) 表示损伤刚度矩阵 $[Q]$ 中的刚度系数, s_{mt} 和 s_{mc} 表示在拉伸和压缩作用下基体的剪切刚度损伤因子, 数值大小根据经验公式取值。

2 数值仿真部分

2.1 模型参数

仿真中采用的模型尺寸为 100 mm × 100 mm, 厚度为 1.6 mm, 对称铺层方式采用常见的对称铺层: $(-45/0/45/90/90/45/0/-45)_s$, 层合板铺层方式如图 1 所示, 每层厚度为 0.1 mm。复合材料的基本力学性能如表 1, 界面性能参数如表 2 所示。其中: E_{11} , E_{22} , E_{33} 分别为 11, 22, 33 方向的弹性模量; G_{12} , G_{13} , G_{23} 分别为 12, 13, 23 方向的剪切模量; μ_{12} , μ_{13} , μ_{23} 为泊松比; S_{12} 为剪切强度; K_n , K_s , K_t 分别为层间界面元厚度方向 n 和垂直于厚度方向的 2 个剪切方向 s, t 的模量; T_n , T_s , T_t 分别是界面元 3 个方向的拉伸强度; G_n , G_s , G_t 分别是界面元 3 个方向的断裂能。

2.2 有限元模型建立

本文中通过 ABAQUS /Explicit 有限元软件进行碳纤维复合材料层合板在冲击作用下的动态响应分析, 本算例的冲击损伤三维模型如图 2 所示。半球体

表1 单层板基本力学性能

Table 1 Basic mechanical properties of composite materials

弹性模量/GPa			剪切模量/GPa			纵向拉伸 强度/MPa	纵向压缩 强度/MPa	横向拉伸 强度/MPa	横向压缩 强度/MPa	剪切强 度/MPa	泊松比		
E_{11}	E_{22}	E_{33}	G_{12}	G_{13}	G_{23}	X_t	X_c	Y_t	Y_c	S_{12}	μ_{12}	μ_{13}	μ_{23}
125.0	8.7	8.7	3.36	3.36	3.15	2 500	1 631	50	230	100	0.31	0.31	0.45

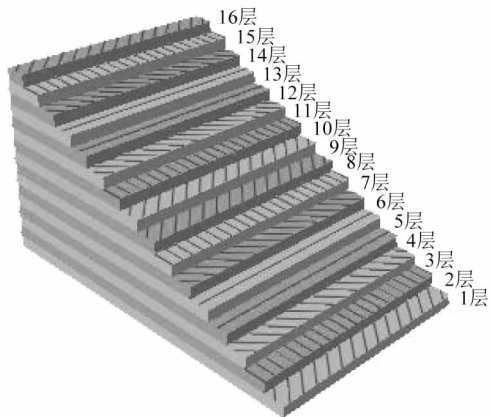


图1 层合板铺层方式

Figure 1 Ply laminate

表2 单层板层间性能参数

Table 2 Interface performance parameters of laminate

各方向模量/MPa			拉伸强度/MPa			断裂能/(N · mm ⁻¹)		
K_n	K_s	K_t	T_n	T_s	T_k	G_n	G_s	G_t
700	700	700	4	9	9	0.421	0.731	0.731

冲头直径为 10 mm, 质量为 0.5 kg, 采用刚体单元, 开始给冲头一个 12 J 的冲击能量, 单层板选择 C3D8R 单元, 层间选用内聚力 (Cohesive) 接触, 参数在软件接触模块输入, 相当于连接单层板层与层之间的“胶水”, 层合板的四周固定, 冲击部位位于板的中心。

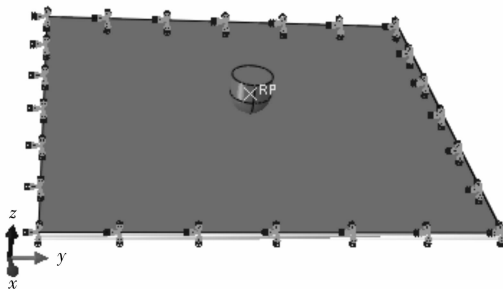


图2 冲击损伤三维模型

Figure 2 Three dimensional model of impact damage

2.3 VUMAT 子程序

ABAQUS 中自带 Hashin 损伤准则, 只适用于平面应力单元, 为了考虑层间应力, 利用 FORTRAN 语言编

写 VUMAT 子程序, 将 Hashin 准则扩展到三维模型; 在 VUMAT 子程序中编入材料的正交各向异性本构方程, 三维 Hashin 损伤准则和退化方式, 通过不断地迭代计算, 直到材料达到破坏准则为止。

2.4 仿真结果讨论

通过 Abaqus/Explicit 求解器结合自编的 VUMAT 实现了对上述算例冲击损伤的数值模拟, 得到冲击载荷-时间曲线, 如图 3 所示, 各类损伤的情况如图 4 和图 5 所示。下面对结果进行讨论, 并对模型的预测效果进行分析。

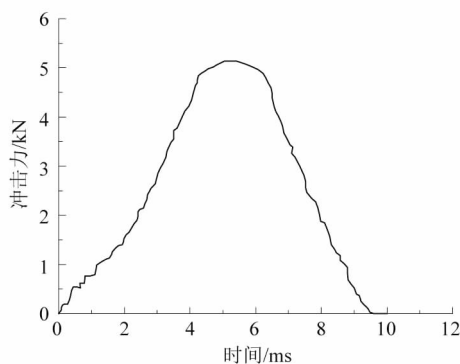


图3 冲击载荷-时间曲线

Figure 3 Impact load-time curve

1) 图 3 给出了仿真的力-时间历程曲线图, 文中冲击力是指冲头和层合板在接触过程中的反作用力, 开始阶段冲头和层合板相互接触, 接触力迅速增加, 并且曲线存在一定的振荡, 因为层合板在遭受冲击时也会出现变形。当层合板的变形达到最大时, 也是冲击力达到最大值, 为 $F_N = 5000$ N, 之后接触力会慢慢减小, 最后变为零。通过查阅文献[16], 得出曲线符合层合板的冲击载荷变化规律, 验证了 VUMAT 子程序和模型的正确性。在 ABAQUS 中为了减小曲线的振荡, 可以创建平滑幅值曲线, 还有减小质量缩放。

2) 在 VUMAT 子程序中, 通过定义状态损伤变量 S_{DV} 来表示纤维和基体的损伤, 当 $S_{DV} = 0$ 时, 材料未损伤, 当 $S_{DV} = 1$, 材料完全破坏。对于分层损伤利用 ABAQUS 接触模块进行模拟, 同样依靠分层损伤状态变量 D 进行区分, 当 $D = 0$ 时, 层合板没有分层损伤,

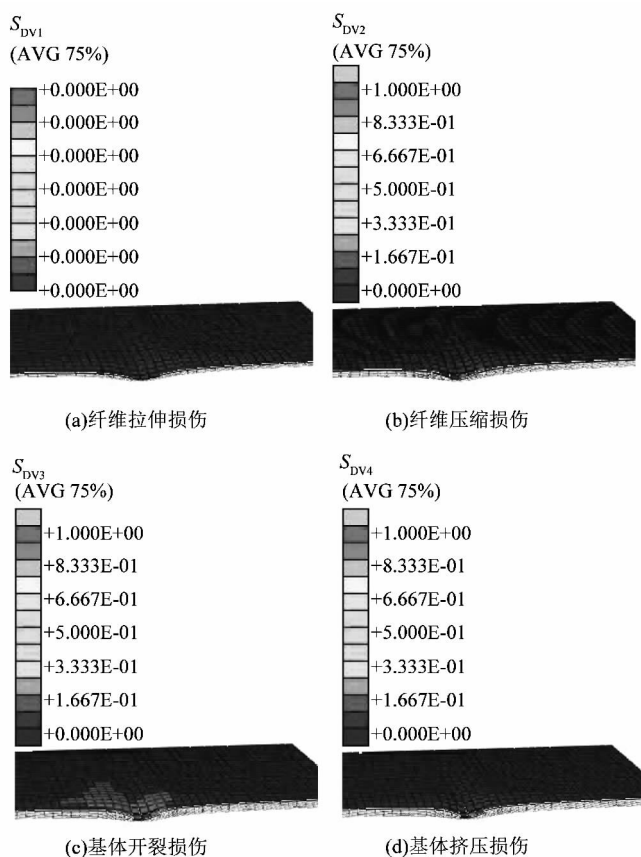


图4 层合板基体损伤和纤维损伤

Figure 4 Laminate matrix damage and fiber damage

$D = 1$ 时,材料完全分层。在 ABAQUS 后处理中,通过对应数值范围,可以看出损伤和未损伤区域,数值为 1 的区域代表完全损伤,这种方法可以对不可见损伤进行直观的分析。如图 4 中的 (a) ~ (b) 分别表示同一时刻最上面一层基体损伤和纤维损伤,图 5 表示分层损伤,其中图 4 与图 5 都是取模型的一半进行观察。

在图 4 中, (a) 图表示纤维拉伸损伤, S_{DV1} 表示纤维拉伸损伤状态变量,可以看出 $S_{DV1} = 0$,在低速冲击中,没有发生纤维拉伸损伤; (b) 图表示纤维压缩损伤, S_{DV2} 表示纤维压缩损伤状态变量,可以看出在低速冲击中,存在纤维压缩损伤,因为在冲击过程中,厚度方向的载荷会对纤维进行压缩破坏,会出现少量纤维破坏的现象; (c) 图表示基体开裂失效, S_{DV3} 表示基体开裂损伤状态变量,从图中可以看出在冲击过程中主要发生的就是基体开裂破坏,在厚度方向,基体承受最多冲击载荷,失效最为严重; (d) 图表示基体挤压失效, S_{DV4} 表示基体挤压损伤状态变量,可以看出只有少量区域发生挤压失效。

在图 5 中, C_{SDMC} (即损伤因子 D) 代表分层损伤,通过图 (a) ~ (c) 可以看出层合板在冲击过程中分层损伤严重,对比 3 张图,发现 (b) 图中 90° 与 90° 层间的完全分层破坏区域最小,说明了在相邻铺层中,铺层角度相同时层与层之间的粘接能力越强。

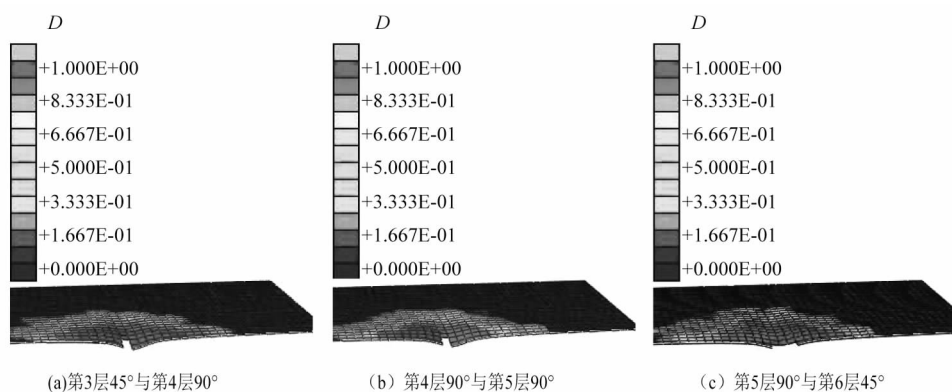


图5 分层损伤

Figure 5 Delamination damage

3 结语

课题组通过 Fortran 语言编写 ABAQUS 用户子程序,基于渐进损伤力学,研究国产碳纤维 (CCF300)/环氧树脂 (5228) 复合材料层合板在冲击载荷下面内和层间的损伤情况,可以得到以下结论:

1) 数值仿真中通过编入 VUMAT 子程序,可以将 Hashin 准则应用于三维实体单元,利用程序定义损伤

变量,可以有效模拟和在后处理中观察层合板在冲击过程中的多种损伤模式,三维模型考虑了层合板的层间应力,选用内聚力接触模拟层间应力,可以更好模拟分层损伤;

2) 在低速冲击过程中层合板内部主要损伤形式是分层损伤和基体损伤,冲击破坏过程中也会有少部分地方发生层内纤维压缩断裂。在冲击过程中,与冲

头的接触区域,厚度方向受到较大载荷,主要是基体承受冲击力;随着基体损伤,开始出现分层,通过比较发现,相邻铺层如果角度一样,发生分层的区域比铺层角度不同的区域要小;

3) 层合板低速冲击过程中,材料的内部损伤有时无法用眼睛观察,可以借助有限元软件进行损伤分析,各种破坏模式并非单一出现,而是相互交织出现,都可以通过后处理观察得到。

参考文献:

- [1] 王耀先. 复合材料力学与结构设计[M]. 上海:华东理工大学出版社,2014:3-20.
- [2] LONG Shuchang, YAO Xiaohu, ZHANG Xiaoqing. Delamination prediction in composite laminates under low-velocity[J]. Composite structures,2015,132:290-298.
- [3] TITA V, DE CARVALHO J, VANDEPITTE D. Failure analysis of low velocity impact on thin composite laminates: Experimental and numerical approaches[J]. Composite structures,2008,83(4):413-428.
- [4] AHMAD F, HONG J W, CHOI H S, et al. Hygro effects on the low-velocity impact behavior of unidirectional CFRP composite plates for aircraft applications[J]. Composite structures,2016,135:276-285.
- [5] 毛春见, 许希武, 田静, 等. 缝合复合材料层板低速冲击损伤研究[J]. 固体力学学报,2011,32(1):1-14.
- [6] 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.
- [7] MCCARTHY C T, MECARTHY M A, LAWLOR V P. Progressive damage analysis of multi-bolt composite joints with variable bolt-hole

clearances[J]. Composites part B:engineering,2005,36(4):290-305.

- [8] LAPCZYK I, HURTADO J A. Progressive damage modeling in fiber-reinforced materials [J]. Composites part A: applied science and manufacturing,2007,38(11):2333-2341.
- [9] HASHIN Z. Failure criteria for unidirectional fiber composites[J]. Journal of applied mechanics,1980,47(2):329-335.
- [10] ALFANO G. On the influence of the shape of the interface law on the application of cohesive-zone models [J]. Composites science and technology,2006,66(6):723-730.
- [11] MAIMI P, CAMANHO P P, MAYUGO J A, et al. A continuum damage model for composite laminates: part I constitutive model [J]. Mechanics of materials,2007,39(10):897-908.
- [12] MAIMI P, CAMANHO P P, MAYUGO J, et al. A continuum damage model for composite laminates: part II computational implementation and validation[J]. Mechanics of materials,2007,39(10):909-919.
- [13] 王跃全, 童明波, 朱书华. 三维复合材料层合板渐进损伤非线性分析模型[J]. 复合材料学报,2009,26(5):159-166.
- [14] FAROOQ U, MYLER P. Finite element simulation of carbon fibre-reinforced composite laminates subjected to low velocity impact using damage induced static load-deflection methodology [J]. Thin-walled structures,2015,97:63-73.
- [15] 郭卫. 三维渐进损伤的复合材料层合板低速冲击模型[J]. 哈尔滨商业大学学报,2014,30(4):455-461.
- [16] KIM Eun-Ho, RIM Mi-Sun, LEE In, et al. Composite damage model based on continuum damage mechanics and low velocity impact analysis of composite plates[J]. Composite structures,2013,95:123-134.

(上接第26页)

5 结论

1) 采用非线性有限元分析法并基于2倍弹性斜率法,确定了矩形结构极限载荷,依据正交试验设计,选取了对结构影响较大的3个因素分析,结果表明加强筋厚度对极限载荷影响最大,其次是加强筋高度,最后是筒体(腔体)厚度。

2) 体积试验分析表明,加强筋厚度对体积影响最大,其次是腔体的厚度,最后是加强筋高度,结构优化时应当尽量避免增厚加强筋来提高极限载荷。综合考虑极限载荷与体积试验后,最优方案为 $\delta(1)\delta_1(1)H_1(3)$,此时矩形容器所能承受的极限载荷为0.273 MPa,大于该结构的筒体和夹套的设计压力0.180 MPa和0.250 MPa,达到了标准规定的强度要求。

3) 在结构满足极限承载能力与疲劳强度前提下,优化后结构的质量减少43.5%,优化效果明显,由此可以看出采用极限载荷分析方法对结构进行优化设计更加充分挖掘了结构的承载能力,给今后此类基于极限载荷的优化设计方法提供了参考。

参考文献:

- [1] 王家海, 李红梅, 施玉安. 基于ANSYS的矩形截面压力容器的参数化分析[J]. 制造业自动化,2011,33(9):138-140.
- [2] 桑芝富, 郑津洋, 董其伍. 过程设备设计[M]. 3版. 北京:化学工业出版社,2010.
- [3] 沈望. ASME压力容器分析设计[M]. 上海:华东理工大学出版社,2014.
- [4] 中国石油化工总公司. 钢制压力容器:分析设计标准:JB 4732—1995[S]. 北京:新华出版社,2007.
- [5] 陆明万, 寿比南, 杨国义. 压力容器分析设计的塑性分析方法[J]. 压力容器,2011,28(1):33-39.
- [6] 李建国. 压力容器分析设计的应力分类法于塑性分析法[J]. 化工设备与管道,2005,42(5):5-9.
- [7] 万先平, 蒋诚航, 金志江, 等. 内压作用下椭圆管道应力及极限载荷数值分析[J]. 化工机械,2010,37(3):331-334.
- [8] 沈望. 极限载荷分析法在压力容器分析设计中的应用[J]. 石油化工设备,2011,44(4):35-38.
- [9] 谭开忍, 肖熙. 含有腐蚀缺陷海底管道极限载荷分析[J]. 海洋工程,2006(3):63-67.
- [10] 刘彩霞. 焊制三通管件塑性极限载荷的有限元分析[D]. 北京:北京化工大学,2003:25-34.
- [11] 刘瑞江, 张业旺, 闻崇炜, 等. 正交试验设计和分析方法研究[J]. 实验技术与管理,2010,27(9):52-55.