

文章编号: 1001-4888(2010)03-0234-05

基于凹坑深度的复合材料低速冲击损伤分析^{*}

张小娟, 张博平, 张金奎, 汪蓝明

(西北工业大学 航空学院, 西安 710072)

摘要: 对复合材料层合板进行了低速冲击实验,建立了冲击凹坑深度与冲击能量的关系。依据凹坑深度反推冲击能量,并用能量确定冲锤质量和冲击速度,从而可对层合板进行动态数值模拟。冲击凹坑深度与冲击能量的关系表明,凹坑深度的变化是与冲击能量的变化过程相适应的,在此基础上对损伤的分布形式及大小做了详细的分析。采用 ANSYS 有限元程序对复合材料层合板横向低速冲击进行模拟,采用瞬态分析方法研究层合板的冲击与损伤过程。对冲击后的试验件进行了 C 扫描损失检测。计算和试验结果表明,此方法是可行的,特别适合于层合板冲击后的损伤评估。

关键词: 复合材料; 低速冲击; 凹坑深度; 冲击能量; 损伤

中图分类号: TB330

文献标识码: A

0 引言

由于复合材料的比强度、比刚度高及可设计性等特点,在航空航天以及许多民用结构中的用量越来越大。然而,低层间强度和脆性性能是制约复合材料应用的一大瓶颈,数焦耳的低能量冲击可导致复合材料的严重分层,使压缩强度大幅度下降。研究表明,由高强度纤维和改性环氧树脂组成的复合材料,仅 5J 的冲击能量就能使复合材料的压缩强度降低到初始值的 32% 左右^[1]。因此,研究低能量冲击问题是复合材料飞机结构损伤容限设计的一个重要课题,一直受到极大的关注。

对于复合材料低速冲击问题,很多学者做了大量的研究工作,对于复合材料层合板在低速冲击下损伤问题的研究,M. V. Donadon 等^[2]建立了三维加载的损伤模型,预测了层合板的损伤; G. M. Bostaph 等^[3]在层合板的低速冲击分层问题研究中估算了其分层扩展,并对其损伤进行了数值模拟; H. T. Wu 等^[4]在层合板冲击问题的研究中建立了冲击模型,模拟了局部分层形状; M. F. S. F. de Moura 等^[5]对碳环氧层合板低速冲击损伤进行了分析,采用特殊壳单元研究了层间剪切应力分布。Scott R. Finn 等^[6]研究了层合板在静态或冲击载荷下的分层问题,建立了分层损伤模型和接触力模型,对层合板的分层损伤进行了数值和试验研究。

复合材料低速冲击是一个随机的、不可预见事件,在工程应用中是不可跟踪和检测的。层压板受冲击后常常会产生分层损伤、纤维脱粘甚至背面纤维断裂,与此同时,也会在表面留下凹坑,凹坑深度反映了冲击载荷和冲击损伤的大小,这为层合板的损伤和冲击载荷研究提供了依据。

本文通过低速冲击的凹坑深度,采用数值方法模拟复合材料冲击过程和冲击损伤,并与试验结果进行比较。

^{*} 收稿日期: 2009-10-12; 修订日期: 2009-12-21

通讯作者: 张博平(1958—),男,副教授,硕士。主要从事复合材料及结构应力分析、疲劳断裂和实验力学研究。E-mail: zhangbp@nwpu.edu.cn

1 低速冲击试验

材料为 T300/5222, 铺层为 $[45/0/-45/90]_{4s}$, 试件尺寸为 150×100 层压板, 单层厚度为 0.125mm, 材料性能见表 1。

表 1 T300/5222 单层板性能(GPa)
Tab. 1 T300/5222 ply properties (GPa)

E_{1t}	E_{1c}	E_{2t}	E_{2c}	G_{12}	G_{31}	G_{23}	V_{12}	V_{31}	V_{23}	X_t	X_c	Y_t	Y_c	S_{12}	S_{31}	S_{23}
135	134	9.4	10.8	5	5	5	0.28	0.28	0.28	1.49	1.21	0.0407	0.197	0.092	0.092	0.1

试验采用 ASTM D 7136 试验标准, 为自由落体冲击模式, 在冲锤导管出口处有冲头速度测量系统, 根据冲锤质量便可计算冲击能量, 如图 1 所示。落锤冲头直径为 12.7mm, 冲击后用千分尺测量凹坑深度。

根据试验结果, 可得到冲击能量与冲击坑深度关系如图 2 所示。



图 1 冲击试验装置
Fig. 1 Impact test device

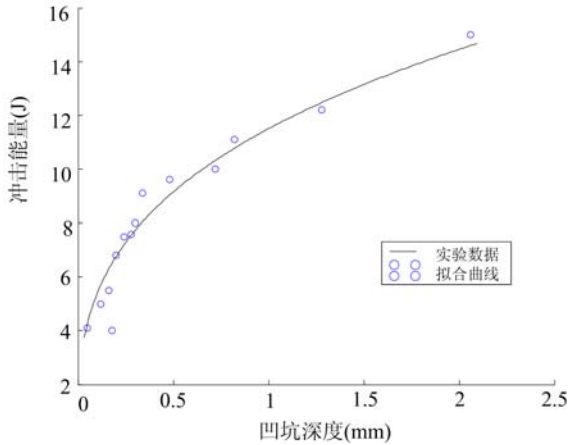


图 2 冲击能量与凹坑深度关系
Fig. 2 The relationship between impact energy and dent depth

经过对试验数据分析和数据拟合, 冲击能量与凹坑深度满足曲线方程:

$$E = k\delta^{1/3} \tag{1}$$

其中,

$$k = \frac{1}{2} \sqrt{R} \left(\frac{1 - \nu_s^2}{E_s} + \frac{1}{E_z} \right)^{-1}$$

为接触系数^[7], 与冲击物和被冲击物的材料特性有关。式中 ν_s 、 E_s 分别为冲头的泊松比和弹性模量 (MPa); E_z 为层压板最外层在厚度方向上的弹性模量 (MPa), 在缺乏试验数据时可以用单向板的横向弹性模量 E_y 来代替; R 为冲头的曲率半径 (mm); δ 为层压板的凹坑深度 (mm); E 是与之对应的冲击能量 (J)。

2 损伤数值计算

由试验结果建立了能量与凹坑深度关系, 根据被冲击物的凹坑深度, 即可确定冲击能量, 由此可对冲击过程进行数值仿真。

2.1 失效判据

复合材料层压板冲击损伤形式一般有基体开裂、分层和纤维断裂等。本文采用以下失效判据^[8]研究单层板的失效模式。

纤维断裂

$$\left[\frac{\sigma_x}{X_T}\right]^2 + \frac{\sigma_{xy}^2 + \sigma_{xz}^2}{S_{xy}^2} \geq 1 \quad (2)$$

基体开裂 ($\sigma_y \geq 0$)

$$\left[\frac{\sigma_y}{Y_T}\right]^2 + \left[\frac{\sigma_{xy}}{S_{xy}}\right]^2 + \left[\frac{\sigma_{yz}}{S_{myz}}\right]^2 \geq 1 \quad (3)$$

基体挤压失效 ($\sigma_y < 0$)

$$\frac{1}{4}\left[\frac{\sigma_y}{S_{xy}}\right]^2 + \frac{Y_c \sigma_y}{4S_{xy}^2} - \frac{\sigma_y}{Y_c} + \left[\frac{\sigma_{xy}}{S_{xy}}\right]^2 \geq 1 \quad (4)$$

分层失效

$$\left[\frac{\sigma_z}{Z_T}\right]^2 + \left[\frac{\sigma_{yz}}{S_{lyz}}\right]^2 + \left[\frac{\sigma_{xz}}{S_{xz}}\right]^2 \geq 1 \quad (5)$$

式中, X_T 、 Y_T 、 Z_T 分别为单层板沿 x 、 y 、 z 方向的抗拉强度; Y_c 为单层板沿 y 方向的抗压强度; S_{xy} 、 S_{xz} 为单层板的剪切强度; S_{myz} 为横向与厚度方向基体开裂的剪切强度; S_{lyz} 为横向与厚度方向分层的剪切强度; σ_x 、 σ_y 、 σ_z 、 σ_{xy} 、 σ_{yz} 、 σ_{xz} 为各单元与材料主方向相对应的应力分量。

2.2 刚度退化

复合材料破坏是逐层逐单元发生的, 单层发生破坏后, 其刚度将发生退化, 应力在各单元中的分布也随之改变。因此, 用有限元方法模拟冲击过程, 必须对失效层刚度进行退化处理, 本文采用以下刚度退化方法^[9]。

发生纤维断裂时, 则纤维方向的模量为:

$$E_{xx} = 0.07 E_{xx}$$

发生基体开裂时, 则横向模量为:

$$E_{yy} = 0.2 E_{yy}, \quad G_{xy} = 0.2 G_{xy}, \quad G_{yz} = 0.2 G_{yz}$$

发生基体挤压失效时,

$$E_{yy} = 0.4 E_{yy}, \quad G_{xy} = 0.4 G_{xy}, \quad G_{yz} = 0.4 G_{yz}$$

当出现分层时,

$$E_{zz} = G_{yz} = G_{xz} = \nu_{yz} = \nu_{xz} = 0$$

式中, G 是剪切模量; ν 是泊松比; E 为弹性模量; 下标 x 、 y 、 z 分别表示单层板的纤维方向和两个横向方向。

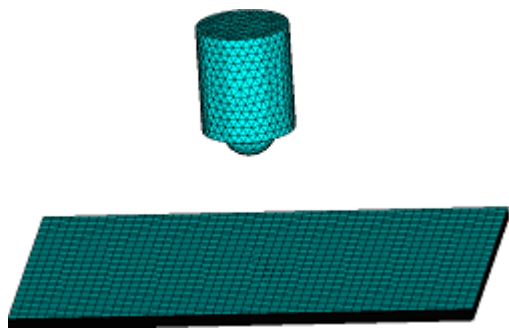


图 3 有限元冲击模型

Fig. 3 Finite element impact model

2.3 数值计算

在复合材料低速冲击中, 确定冲击载荷是数值计算的最大难点。准静态数值计算一般用试验过程测试的载荷—时间曲线或位移—时间曲线分段加载, 以模拟冲击过程, 显然, 计算必须依赖于试验。本文建立了凹坑深度与冲击能量关系式(1), 只要获得冲击后层合板上的凹坑深度, 由(1)式即可计算冲击能量的大小, 从而可依据能量动态地模拟冲击过程。

本文采用 ANSYS 软件, 建立了三维有限元分析模型, 对四边简支的层合板低速冲击过程进行了数值仿真。根据冲击能量确定从 1m~1.2m 处自由下落时冲锤的质量范围, 然后再计算具体高度。

对冲击凹坑深度为 1.1mm 的层合板损伤进行了计算, 由(1)式可得冲击能量为 14J, 取冲锤质量为 1.3kg, 则高度为 1.1m, 以 4.64m/s 的速度冲击层合板, 数值计算模型如图 3 所示。

图 4 是层合板冲击后的表面变形(凹坑)图。图 5(a)是冲击后层合板的三维损伤图, 其中水平面上两个坐标方向代表单元数, 竖直方向坐标表示铺层数目, 图 5(b)是损伤平面图。从图中可以看出, 层合板受冲击后, 冲击点处的损伤沿厚度方向上相对较小, 而板背面损伤较大, 在平面区域内形成两头小、中

间大,类似于橄榄球形状,这与实际损伤的超声波 C 扫描无损检测结果非常一致,如图 6 所示。

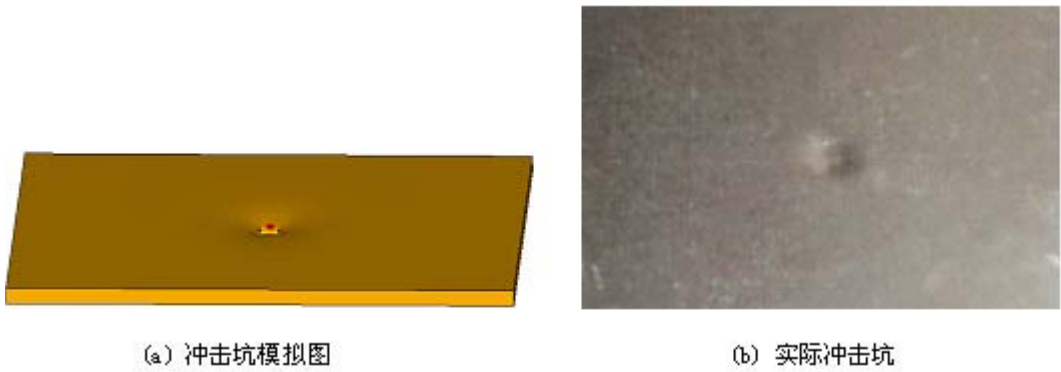


图 4 冲击后的凹坑图

Fig. 4 The dent depth of laminate after impact

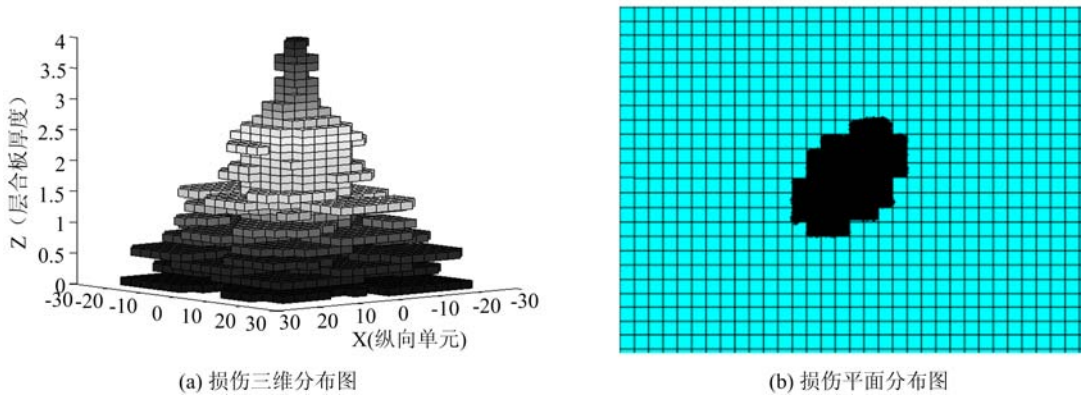


图 5 损伤分布图

Fig. 5 Damage distribution

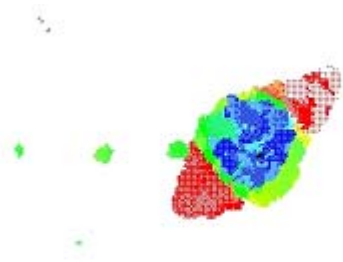


图 6 层合板冲击后的损伤检测图

Fig. 6 The damage of laminate after impact

3 结论

研究了复合材料层合板受低速冲击后的凹坑深度,建立了凹坑与冲击能量的关系,以凹坑深度确定冲锤的质量和冲击速度,并动态的对冲击过程进行数值仿真。结果表明,把凹坑深度转换为冲击能量作为加载条件,研究复合材料冲击后的冲击过程再现及损伤估计是可行的。此外,对比实验结果与仿真结果,凹坑误差在 1% 以内,损伤面积误差为 18%。所以不管冲击后在层合板上留下凹坑还是损伤,计算结果与实际检测结果比较吻合,此方法非常适合工程中的冲击损伤评估。

参考文献:

- [1] 张博平, 李亚智. 低速冲击下复合材料层合板的三维损伤[J]. 机械强度, 2007, 29(5): 840—842 (ZHANG Boping, LI Yazhi. 3-dimension damage in composite plates subject to low velocity impact [J]. Mechanical Strength, 2007, 29(5): 840—842(in Chinese))
- [2] Donadon M V, Iannucci L, Falzon B G, et al. A progressive failure model for composite laminates subjected to low velocity impact damage [J]. Composite Structures, 2008, 1232—1252.
- [3] Bostaph G M, Elber W. A fracture mechanics analysis for delamination growth during impact on composite plates. In 1983 Advances in Aerospace Structures, Materials, and Dynamics [M]. American Society of Mechanical Engineers, New York, 1983: 133—138.
- [4] Wu H T, Springer G S. Impact induced stresses, strains, and delaminations in composite plates [J]. Journal of Composite Materials, 1988, 22: 533—560.
- [5] M F S F de Moura, Marques A T. Prediction of low velocity impact damage in carbon-epoxy laminates [J]. Composites: Part A, 2002, 33: 361—368.
- [6] Scott R Finn, George S Springer. Delaminations in composite plates under transverse static or impact loads—A model [J]. Composite Structure, 1993, 23: 177—190.
- [7] Yang S H. Indentation law for composite laminate [M]. Composite materials, testing and design. ASTM, STP787, 1983: 425—449.
- [8] 罗靓, 张佐光, 李敏 等. 复合材料层合板准静态压痕实验研究 [J]. 复合材料学报, 2007, 24(3): 154—159 (LU Liang, ZHANG Zuoguang, LI Ming, et al. Experimental study on quasi-static indentation damage resistance of composite laminates [J]. Material Composite, 2007, 24(3): 154—159(in Chinese))
- [9] Hou J P, Petrinic N, Ruiz C, Hallett S R. Prediction of impact damage in composite plates [J]. Composites Science and Technology, 2006, 60: 273—281.

Damage Analysis for Composite Materials Subjected to Low-Speed Impact Based on Pit-Depth Analysis

ZHANG Xiao-juan, ZHANG Bo-ping, WANG Lan-ming, ZHANG Jin-kui

(School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Low-speed impact experiment for composite laminated plate was carried out, and the relationship between dent depth and impact energy was established. The damage energy was calculated reversely from the dent depth, and the hammer's mass and impact speed were determined by impact energy, therefore, the dynamical numerical simulation for laminates could be carried out. Relation between the dent depth and the impact energy indicates that the variation of pit depth is consistent with the energy, and detailed analysis of damage distribution and size was conducted. The process of transverse low-speed impact of composite laminated plate was simulated by using finite element soft package ANSYS and method of transient analysis. C-scan was used to measure and to record the internal and external damages of laminated plate. Calculated and experimental results show that this method is feasible, especially is fit for the damage evaluation of composite laminated materials subjected to impact.

Keywords: composite; slow-velocity; pit depth; impact energy; damage