第 14 卷 第 3 期 复 合 材 料 学 报 Vol. 14 No. 3
1997 年 8 月 ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA August 1997

层合复合材料冲击损伤破坏过程研究(I)
——数值分析

江大志 沈 为* 彭立华* 王兴业 黄玉盈*
(国防科技大学材料工程与应用化学系, 长沙 410073) (* 华中理工大学, 武汉 430074)

摘 要 基于连续损伤力学, 对弹丸冲击复合材料多层板靶的变形–损伤过程给出了必要的基本方程, 进行了三维有限元分析。将靶板处理为具有材料各向异性和结构非均匀性; 冲击引起的微损伤是各向异性的, 造成材料的非线性; 冲击造成的局部大变形, 构成几何非线性。宏观损伤(包括层内基体开裂、纤维断裂和层间分层) 在有限元分析中用节点分裂法处理。钢质弹丸假设是线弹性的, 不考虑它在冲击过程中的损伤。计算结果表明, 采用本文中提出的方法, 能较好地模拟复合材料层合板受弹丸冲击时的损伤、变形过程。

关键词 层合复合材料, 冲击, 连续损伤力学, 数值分析
中图分类号 TB33, O316

目前, 先进的复合材料和复合材料结构的应用越来越多, 而复合材料及其损伤的各向异性和非均匀性以及冲击波与损伤的相互作用, 使复合材料结构的冲击响应变得很复杂。解决这个实际问题和企图在理论研究上有重要突破, 在很大程度上依赖于实验研究和计算机模型。

在我们研究弹–靶冲击问题中, 要考虑以下重要因素:

(1) 弹靶冲击问题作为三维动态接触问题;

(2) 靶结构具有材料各向异性和结构非均匀性;

(3) 冲击引起的微缺陷群(损伤) 是各向异性的, 造成材料非线性;

(4) 冲击造成局部大变形, 因而整个过程有几何非线性;

(5) 冲击波要造成宏观缺陷(包括层内基体断裂、纤维断裂和层间分层) 的产生与扩展。

根据上述情况, 此项研究用连续损伤本构方程处理单元材料的非线性; 用三维动态有限元分析程序模拟弹靶冲击全过程; 用 U. L. (Updated Lagragian) 描述以考虑结构的几何非线性; 用结点分裂法描述宏观断裂过程。同时, 本文中给出了初速为49.16m/s 的钢弹对8层玻璃纤维/环氧复合材料层合板靶的正冲击全过程的三维计算机模拟实例。

1 基本方程

1.1 几何方程

采用弹性大变形增量问题的 U. L. 方法, 表示格林应变增量的几何方程为

$$d\epsilon_{ij} = (1/2)(du_{i,j} + du_{j,i} + du_{m,i}du_{m,j}) \tag{1}$$

本文于 1996 年 10 月 7 日收到修改稿, 1996 年 6 月 5 日收到初稿。国家自然科学基金资助项目

式中: ϵ 是格林应变张量; $\boldsymbol{u}$ 是位移矢量。根据非线性有限元法, 单元的应变增量 $\mathrm{d}\epsilon$ 与单元各节点的位移矢量增量 $\mathrm{d}\boldsymbol{u}^{\mathrm{e}}$ 有以下关系(用 Voigt 符号):

$$\mathrm{d}\epsilon_i = B_{ij}\mathrm{d}u_j^{\mathrm{e}} \qquad (i = 1, 2, \cdots\cdots, 6; \quad j = 1, 2, \cdots\cdots, n) \tag{2}$$

式中, n 为单元的节点数, $\boldsymbol{B}$ 是几何矩阵, 且 $\boldsymbol{B} = \boldsymbol{B}_{\mathrm{l}} + \boldsymbol{B}_{\mathrm{n}}$, 即几何矩阵由其线性部分 $\boldsymbol{B}_{\mathrm{l}}$ 和非线性部分 $\boldsymbol{B}_{\mathrm{n}}$ 组成。

1.2　本构方程

取考虑损伤的增量型应力–应变关系

$$\mathrm{d}\sigma_{ij} = C_{ijmn}\mathrm{d}\epsilon_{mn} \tag{3}$$

式中, σ 是柯西应力张量; $\boldsymbol{C}$ 是4阶切线模量。

对于大变形问题, 第二类克希荷夫应力增量 $\mathrm{d}s$ 与柯西应力增量 $\mathrm{d}\sigma$ 有以下关系:

$$\mathrm{d}S_{ij} = \frac{\rho^t}{\rho^{t+\mathrm{d}t}}\beta_{im}\beta_{jn}\mathrm{d}\sigma_{mn} \tag{4}$$

式中: $\boldsymbol{S}$ 是第二类克希荷夫应力张量, ρ^t 和 $\rho^{t+\mathrm{d}t}$ 分别表示在 t 和 $t + \mathrm{d}t$ 时刻单元的材料密度, β 是变换矩阵, 表示为

$$\beta_{ij} = (\delta_{ij} - \mathrm{d}u_{i,j})^{-1} \tag{5}$$

这里 δ 是 Kronecker 张量。

将(3)代入式(4), 得到考虑损伤的大变形条件下的本构关系

$$\mathrm{d}S_{ij} = C^*_{ijmn}\mathrm{d}\epsilon_{mn} \tag{6}$$

式中 $\boldsymbol{C}^*$ 是大变形下的动态模量张量

$$C^*_{ijmn} = \frac{\rho^t}{\rho^{t+\mathrm{d}t}}\beta_{ik}\beta_{jl}C_{klmn} \tag{7}$$

1.3　动力方程

材料单元在 $t + \mathrm{d}t$ 时刻的虚功方程为

$$\int_t S_{ij}^{t+\mathrm{d}t}\delta\epsilon_{ij}^{t+\mathrm{d}t}\mathrm{d}V = F_k^t\delta(\boldsymbol{u}_k^{\mathrm{e}})^{t+\mathrm{d}t} - \int_t \rho^{t+\mathrm{d}t}\boldsymbol{u}^{t+\mathrm{d}t}\delta\boldsymbol{u}^{t+\mathrm{d}t}\mathrm{d}V$$

$$(\text{对 } i, j, k \text{ 求和}) \tag{8}$$

式中: $\delta\epsilon^{t+\mathrm{d}t}$, $\delta\boldsymbol{u}^{t+\mathrm{d}t}$ 分别为表示 $t + \mathrm{d}t$ 时刻的应变变分和位移变分, 而 $\delta(\boldsymbol{u}^{\mathrm{e}})^{t+\mathrm{d}t}$ 为 $t + \mathrm{d}t$ 时刻节点的位移变分。$\boldsymbol{F}^t$ 为 t 时刻节点力矢量, V^t 为时刻 t 的单元体积, $\boldsymbol{u}^{t+\mathrm{d}t}$ 为 $t + \mathrm{d}t$ 时刻的加速度矢量。因而上式的含义是: 单元应变能的变分等于节点力的虚功和单元惯性力虚功之和。

采用 Voigt 符号, 则由式(8)可以导出动力平衡方程

$$\int_t \widetilde{B}_{ik}(\sigma_i^t + \mathrm{d}S_i)\mathrm{d}V + \int_t \rho^{t+\mathrm{d}t}N_{ij}N_{ik}((u^{\mathrm{e}})_j^t + \mathrm{d}u_j^{\mathrm{e}})\mathrm{d}V - F_k^t = 0 \tag{9}$$

式中: $\boldsymbol{N}$ 为形函数, $\widetilde{\boldsymbol{B}}$ 为非线性几何矩阵。将本构关系式(6)代入上式($\boldsymbol{C}^*$ 用缩减符号表示)有

$$\int_t \widetilde{B}_{ik}\sigma_i^t\mathrm{d}V + K_{km}\mathrm{d}u_m^{\mathrm{e}} + M_{kj}((u^{\mathrm{e}})_j^t + \mathrm{d}u_j^{\mathrm{e}}) - F_k^t = 0 \tag{10}$$

式中: K_{km} 为单元刚度矩阵, M_{kj} 为单元质量矩阵。此两矩阵的表达式分别为

$$K_{km} = \int_t C_{ij}^t B_{jk}\widetilde{B}_{jm}\mathrm{d}V \tag{11}$$

和

$$M_{kj} = \int_t \rho^{t+\mathrm{d}t}N_{ij}N_{ik}\mathrm{d}V \tag{12}$$

采用集中质量矩阵, 即 $M_{kj} = M\delta_{kj}$, 可得到求加速度增量的显式

$$\mathrm{d}u_k^{\mathrm{e}} = -\frac{1}{M}\int_t(\sigma_i^t + \mathrm{d}S_i)\widetilde{B}_{ik}\mathrm{d}V \tag{13}$$

这里的 $\mathrm{d}S$ 可由位移增量借助本构关系得到, 并可在单元一级积分。

2 损伤及损伤本构方程

为了确定方程(7)中的切线模量 $\boldsymbol{C}$, 需要建立损伤参量方程和损伤本构方程。

2.1 损伤参量方程

对于所研究的弹脆性损伤问题, 在小变形条件下, 应力张量 σ 与应变张量 ϵ 的关系为

$$\sigma_{ij} = \frac{\partial \varphi}{\partial \epsilon_{ij}} \tag{14}$$

式中: Helmholts 自由能函数 φ 是应变张量 ϵ 和损伤张量(内变量)的函数, 可取为(单位体积)

$$\varphi = (1/2)\tilde{E}_{ijmn}\epsilon_{ij}\epsilon_{mn} \tag{15}$$

式中: $\tilde{\boldsymbol{E}}$ 称为有效模量张量(与损伤有关)。

在引用弹性能等效性假设以后, 有效模量张量 $\tilde{E}$ 可表示为[1]

$$\tilde{E}_{ijmn} = N_{klij}N_{opmn}E_{klop} \tag{16}$$

式中: $\boldsymbol{N}$ 是4阶算子, 称为损伤影响张量。它是由真实应变张量 ϵ 对有效应变张量 $\tilde{\epsilon}$ 的一个变换

$$\tilde{\epsilon}_{ij} = N_{ijmn}\epsilon_{mn} \tag{17}$$

由于损伤影响张量 $\boldsymbol{N}$ 的分量太多, 不便应用, 为使问题简化, 可用 Kachanov 型的2阶连续性张量 ψ 构造4阶的损伤影响张量 $\boldsymbol{N}$, 形式如下:

$$N_{ijmn} = (1/2)(\psi_{im}\delta_{nj} + \psi_{nj}\delta_{im}) \tag{18}$$

其中: 连续性张量 ψ 是损伤张量 $\boldsymbol{D}$ 的相补参量, 可以表示为

$$D_{ij} = \delta_{ij} - \psi_{ij} \tag{19}$$

式中: δ 是 Kronecker 张量。

若设连续性张量 ψ 是表征各向异性损伤的内变量, 则根据热力学的正则关系, 内变量 ψ 的对偶广义力 $\boldsymbol{R}$ 也是2阶张量, 称为损伤扩展力或损伤能密度耗散率[2], 定义为

$$R_{ij} = \partial\varphi/\partial\psi_{ij} \tag{20}$$

实验证实, 表征损伤的连续性与应变状态有关, 可设连续性随时间的变化率 ψ 与应变率 ϵ 有下列变换关系:

$$\psi_{ij} = -\lambda_{ijmn}\epsilon_{mn} \tag{21}$$

称 λ 为损伤演变系数。一般情况下, λ 是4阶的, 具体的构造应由材料的损伤实验决定。

2.2 增量型损伤本构关系

取 $\varphi = \varphi(\epsilon, \psi)$, 即自由能函数是 ϵ 与 ψ 的函数, 将式(14)对时间求导, 有

$$\sigma_{ij} = \frac{\partial^2\varphi}{\partial\epsilon_{ij}\partial\epsilon_{mn}}\epsilon_{mn} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial\epsilon_{ij}\partial\psi_{mn}}\psi_{mn} \tag{22}$$

考虑到

$$\tilde{E}_{ijmn} = \frac{\partial^2\varphi}{\partial\epsilon_{ij}\partial\epsilon_{mn}} \tag{23}$$

及式(20)得到

$$\sigma_{ij} = \tilde{E}_{ijmn}\epsilon_{mn} + \frac{\partial R_{ij}}{\partial\epsilon_{mn}}\psi_{mn} \tag{24}$$

并令

$$K_{ijmn} = \frac{\partial R_{ij}}{\partial\epsilon_{mn}} \tag{25}$$

将损伤演变方程式(21)代入式(22), 最后得到增量型损伤本构关系

$$\sigma_{ij} = C_{ijmn}\epsilon_{mn} \tag{26}$$

式中, 动态切线模量张量为

$$C_{ijmn} = \tilde{E}_{ijmn} + K_{ijkl}\lambda_{klmn} \tag{27}$$

增量型损伤本构关系式(26)正是决定所研究冲击下大变形复合材料靶的动态模量 $\boldsymbol{C}^*$ 所需要的(见式(7))。

3 三维数值模拟

基于上面对冲击下考虑损伤的动态大变形问题的理论分析, 用三维有限元分析对8层玻璃纤维/ 环氧复合材料$[0/90]_{2S}$层合板受钢弹正冲击时的变形–损伤过程进行计算机模拟。图1是弹靶构形的示意图。其中: $a = b = 126\text{mm}$, $h = 2.0\text{mm}$ 。

弹体形状为带球头的圆柱体, 尺寸为 $\Phi 14.5\text{mm} \times 20\text{mm}$ 。弹体性能参数为: $E = 210.0\text{GPa}$, $\nu = 0.25$, $\rho = 7800\text{kg/m}^3$; 靶板单层的初始(无损) 性能参数为: $E_1 = 145\text{GPa}$, $E_2 = 10.16\text{GPa}$, $\nu_{23} = 0.3$, $\nu_{12} = \nu_{13} = 0.1$, $G = 5.87\text{GPa}$, $\rho = 1800\text{kg/m}^3$ 。

在有限元分析中, 弹体采用六面体八节点等参元, 总共68个单元, 100个节点。靶板采用五面体三角棱形单元, 每层划分为512个单元。整个靶共有4096个单元, 2601个节点。这种靶单元划分适用于对0°、90°和±45°四个方向的层内基体开裂和纤维断裂进行节点分裂处理。

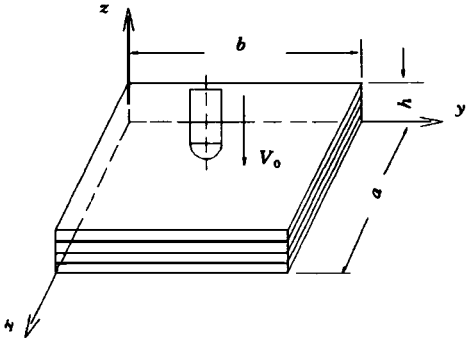

图1　弹靶构形示意图

所研究的复合靶板在出现分层前平行于 xy 面共有9个面, 包括上下表面和7个界面。靶的边界条件为四侧边固定; 初始时上下表面为自由表面, 靶处于静止。弹以初速为 V_0 对靶上表面中心作正冲击。

冲击接触后, 接触力使弹速度逐步降低, 最后使弹发生反弹; 靶同时发生变形–损伤; 冲击造成的三维应变波由接触区同时沿厚度(z 方向) 和面内(xy 方向) 传播。由于复合材料在面内的正交异性和厚度方向的非均匀性以及损伤的各向异性和非均匀性, 靶内发生的应变波也是非线性的和非均匀的, 显示了复杂的情形, 对此问题作理论分析是很困难的。用本文中给出的冲击下三维计算机模拟, 给出了大量的应变场变化和损伤场变化的数据与信息。图2是冲击过程中靶板横截面(xz 平面) 的变形图, 图3是第七界面层(xy 平面) 内的等损伤演变图。顺便指出, 本文中所用损伤变量 $\boldsymbol{D}_{ij}$ 是2阶张量, 用以表示各向异性损伤, 其主值为 $\boldsymbol{D}_{\mathrm{I}}$, $\boldsymbol{D}_{\mathrm{II}}$ 和 $\boldsymbol{D}_{\mathrm{III}}$ 。由图3可见, 等损伤主值线沿材料主轴方向取向, 这一结果与正交层合板受横向冲击后的损伤形貌实验结果[3]基本一致。

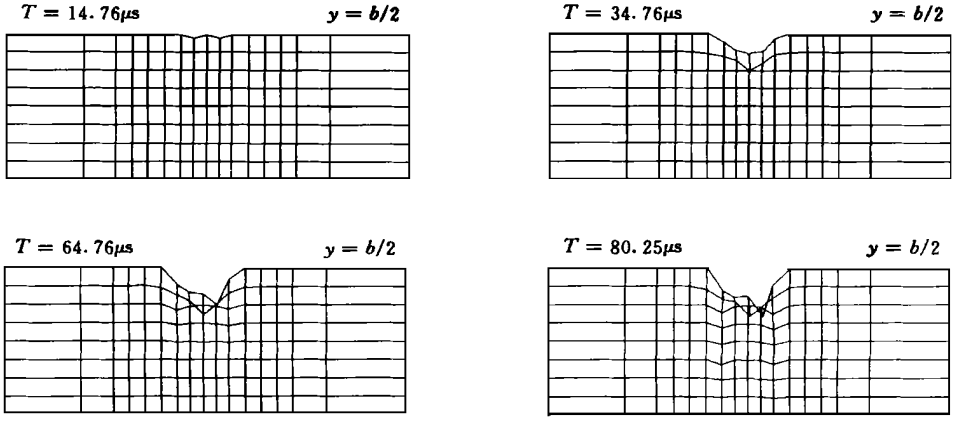

图2　冲击过程中靶板横截面(xz 平面) 的变形图

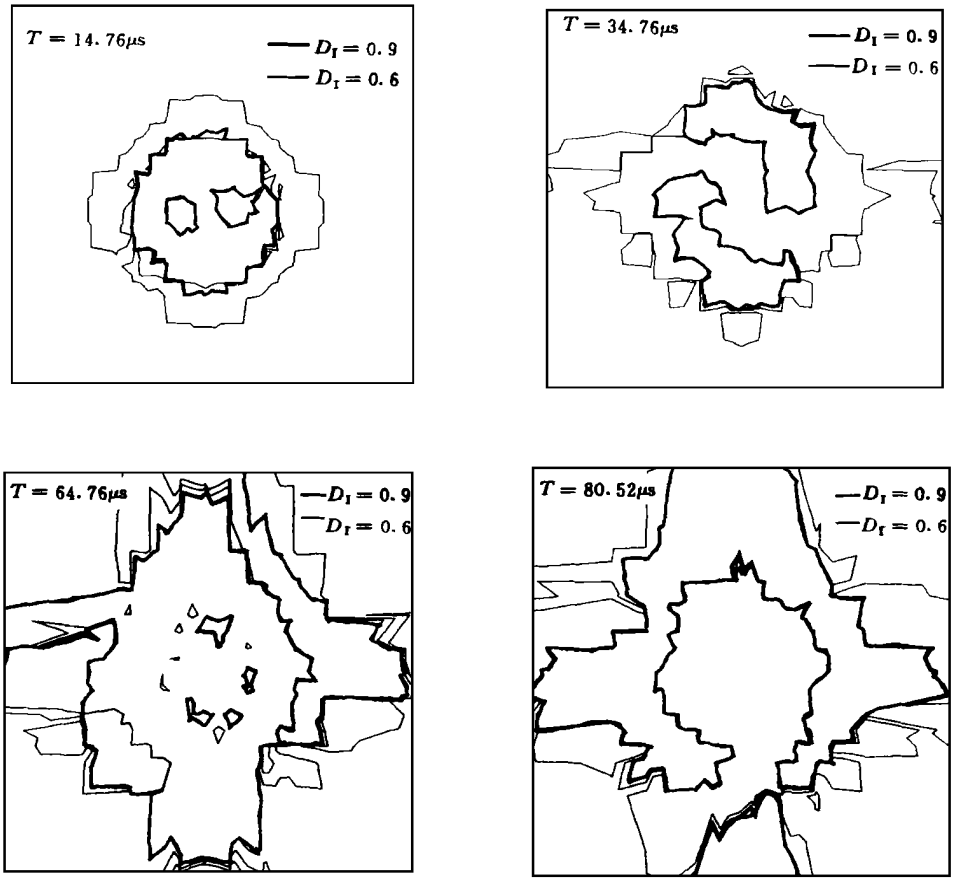

图3 第七界面层(xy 平面)内的等损伤演变图

4 结 论

本文中对复合材料层合板受弹丸冲击后的损伤-破坏过程提出了一套完整的数值分析方法,其中考虑了材料的各向异性和结构的非均匀性,以及材料的非线性和几何大变形。计算结果表明,采用本文的方法,可以有效地计算层合复合材料受横向冲击时的变形历史和损伤演变。

参 考 文 献

1 沈 为. 弹脆性材料的损伤本构关系及应用. 力学学报, 1990, 23(3): 374

2 沈 为. 损伤力学. 武汉: 华中理工大学出版社, 1995. 61

3 Hull D, Shi Y B. Damage mechanism characterization in composite damage tolerance investigation. Comp Struc, 1993, 23: 99

4 Shen W, Peng L H, Yang F, *et al*. Generalized elastic damage theory and its application to composite plate. Engng Frac Mech, 1987, 28: 403

5 Shen W, Wu C. Computer simulation for damage-failure process of composite plate under high-speed impact. Engng Frac Mech, 1992, 42: 159

DAMAGE AND FRACTURE PROCESS OF COMPOSITE LAMINATES IMPACTED BY PROJECTILE(I) ——NUMERICAL ANALYSIS

Jiang Dazhi　Shen Wei*　Peng Lihua*　Wang Xingye　Huang Yuying*
(National University of Defense Technology, Changsha 410073)
(* Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract　Based on continuum damage mechanics, the deformation and damage process of composite laminates impacted by projectile were studied theoretically. The basic equations for this simulation were then derived. The composites are of anisotropy and nonhomogeneity, the micro-damage induced by impact is anisotropic and results in nonlinearity of materials, and the local large-deformations of target construct geometrical nonlinearity. The macro-damages which include cracking of matrix, fibers fracture within lamina and interface debonded as well are treated by the nodal division for finite element analysis. The projectile made of steel is assumed to be linear elastic and its damage in the impact process is not taken into account. The theory used in this paper can simulate the process of damage and deformation of composite laminates impacted by projectile.

Key words　composite laminates, continuum damage mechanics, impact, numerical analysis

---

(上接第136页)

文编审委员会(PEC)审查接受后, 发出正式录用通知。本次会议还将评选优秀论文, 颁发证书及奖品。征文具体要求如下:

1) 内容新颖, 主题明确, 反映近期研究成果;

2) 凡在其他会议或国内外期刊上已经录用或发表的论文不再受理;

3) 文责自负, 内容不得涉及保密问题, 须提交所在单位的保密审查证明;

4) 论文限5000字以内;

5) 稿件一式三份(至少含一份原件);

6) 不退稿件, 请作者自留底稿;

7) 接受论文截止日期为: 1998年2月28日(以邮戳为准)。

出版社将在作者提供的论文原稿基础上, 采用激光照排方式印刷论文集。为保证论文集的出版质量, 现将论文稿的格式及版面要求如下:

1) 正文撰写形式符合国标 GB7713-87, 文末附相应的英文题目和英文摘要, 详见《作者须知》及《打字实样》;

2) 论文稿须用 A4(297×210)纸激光打印, 版芯为214×145(mm),

3) 论文稿限5页, 每增加一页, 增收版面费100元;

4) 提供录入论文的软磁盘, 用 WORD6.0录入, 其它字处理软件录入者, 按每1000字20元收取录入、排版、激光打印费;

5) 同意转让论文版权(仅限本届会议论文集);

6) 每篇论文版面费400元, 汇款方式见第二轮通知。

(下转第106页)