

# 陶瓷/复合材料航空装甲撞击响应的数值仿真

龚尧南 钱纯 张佐光

(北京航空航天大学固体力学所, 北京, 100083)

## NUMERICAL SIMULATION OF IMPACT RESPONSE OF ADVANCED COMPOSED CERAMIC/ COMPOSITE AERO ARMOUR

Gong Yaonan, Qian Chun, Zhang Zuoguang

(Research Institute of Solid Mechanics, Beijing University of

Aeronautics and Astronautics, Beijing, 100083)

**摘要** 用求解接触撞击问题的方法对陶瓷/复合材料装甲的撞击响应和失效机理进行数值仿真。着重讨论了接触撞击界面的搜索与确定、接触撞击力的计算、以及失效准则及其处理技巧等3个问题。计算结果与试验结果进行了比较,符合良好。

**关键词** 接触载荷, 数据仿真, 复合材料

**中图分类号** V257, V254. 2, O242. 1

**Abstract** The impact response and failure mechanism of the composed ceramic/composite armour are simulated numerically by use of the solution method to contact-impact problems. Emphasis is put on the searching and determination of the contact-impact interface between the projectile and armour, the algorithm for the contact-impact force calculation, the establishment of failure criterion and its implementation strategy. The computational results are compared and agreed well with those data resulted from test.

**Key words** contactload, data simulation, composites

由陶瓷和复合材料(或铝合金)组成的新型装甲正在逐渐替代常规的钢或钛合金装甲。这种新型装甲不仅制造方便、重量轻,而且防弹性能好,可保护飞机和飞行员避免地面轻武器所造成的伤害。相对来说,在同等防弹性能的前提下,它比钢制装甲还要便宜。现在,这种新型装甲已经受到国际军工企业的重视。

衡量装甲抗弹能力的唯一判据是 $V_{50}$ ,它的定义是击穿装甲的概率为50%时的弹头出膛速度<sup>[1]</sup>。设计装甲的目的,是要使装甲的 $V_{50}$ 能达到预定设计值。 $V_{50}$ 的值取决于许多因素。就陶瓷/复合材料装甲而言,它取决于陶瓷材料的机械性能、靶板厚度、复合材料背板的纤维面密度 $AD_f$ 、弹头直径以及弹头的冲击角等因素。新型装甲的设计就是要合理选择各有关参数,使能以较轻的重量获得较高的 $V_{50}$ 。过去,国内外在设计装甲时,多依靠试验,或依靠在试验基础上建立起来的近似估算公式<sup>[2-6]</sup>。试验虽能获得较精确的结果,但在时间、人力和物力上都是不经济的,而近似估算公式的适用范围较小,特别

是对于用新材料制造的新型装甲更是如此。本项研究采用数值仿真的方法,对弹头冲击靶板后的靶板响应、失效机理和各种参数的影响等进行预测,为新型装甲的设计与分析提供更经济、高效的方法,从而使新型装甲的设计建立在更加合理可靠的基础上。

装甲受冲击后的响应分析属于高速撞击动力学的范畴,是一类 / 接触- 撞击0 问题。在接触撞击问题的分析中,除不可避免地涉及问题的几何非线性和物理非线性、动力响应过程的数学表述、相应的(空间和时间的)离散化格式等普遍性问题外,还必须研究 4 个特殊的问题,即在每一个时间积分步上: 1° 确定接触撞击界面的位置; 2° 根据接触撞击条件(在接触撞击界面处,物体与物体之间无侵入对方表面的现象即零侵入条件)确定撞击力; 3° 根据接触界面相互滑移的趋向确定摩擦力; 4° 根据所建立的失效准则,判断何时在何处失效,并依此更新计算模型。在本文中,限于篇幅不可能讨论问题的每一个方面(虽然在后面的算例中涉及到所有带普遍性的和特殊性的问题),而只着重讨论上面提出的 1°、2° 和 4° 这 3 个特殊问题。

## 1 方 法

### 1. 1 接触撞击界面的确定

在确定接触撞击的界面时,问题的困难方面并不在于理论,而是要找到一个可靠而高效的接触搜索算法。接触搜索算法由两部分组成。第一部分是对原来未接触的点、线、面进行搜索,判断它们在当前时间步是否进入接触,这种算法称做接触前搜索。第二部分则是对已经处于接触状态的点、线、面进行搜索,判断它们在当前时间步是否保持原有接触状态不变;或者虽仍处于接触状态,但与之接触的点、线、面有了改变;或者已脱离接触;这种搜索算法称为接触后算法。

令  $\underline{x}^i = [x_1^i, x_2^i, x_3^i]$  是某一接触区上结点  $i$  的位置矢量。于是,接触区的范围可定义为

$$T = \left\{ \underline{x} \mid x_j^{\min} \leq x_j \leq x_j^{\max}, j = 1, 3 \right\} \quad (1)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} X_j^{\min} &= x_j^{\min} - E_{ep} \\ X_j^{\max} &= x_j^{\max} + E_{ep} \\ X_j^{\min} &= \min(x_j^1, x_j^2, x_j^3, x_j^4) \\ X_j^{\max} &= \max(x_j^1, x_j^2, x_j^3, x_j^4) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$E_{ep}$  是为了使接触点的搜索更加有效可靠,因此把接触区的范围定义得稍宽而规定的扩展量。由 (1) 式可见,接触范围  $T$  是一个点集,处于该范围中的任何一点都可能成为接触点。在接触前搜索中,要用所有事先定义的接触区对在上一时间步未处于接触状态的对应结点进行测试;而在接触后搜索中,为了避免盲目搜索,要用一组有选择的接触区(原来与给定接触点处于接触状态的点、边、面的四周邻近区域)对已处于接触状态的结点进行

测试, 找出给定接触结点的新的接触位置。

## 1.2 接触撞击力的确定

在找到当前时间步的接触偶之后, 就要计算它们之间的接触力。本文采用罚参数法进行接触力的计算。设有两个单连物体, 每个物体的边界 FS 由 3 部分组成, 即

$$\bar{F}^i = \bar{D}^i \cup \bar{G}^i \cup \bar{C}^i, i = 1, 2 \quad (3)$$

式中, 上标  $i$  表示第  $i$  个物体, 下标  $D$ 、 $F$ 、 $C$  分别表示指定位移、指定边界力和接触部分的边界。

令一对候选接触点之间的法向间隙为  $g_n(\cdot)$ , 这是两个物体之间的相对间隙, 它既可以在物体 1 上定义, 也可以在物体 2 上定义。这里, 选择在  $\bar{C}^2$  上定义。如果下述条件中的任一个得到满足, 即认为发生接触

$$g_n(s) = 0, \quad s \in \bar{C}^2 \quad (4)$$

或

$$\bar{H}^1 \cap \bar{X}^2 \neq \emptyset \quad (5)$$

式中  $s$  为在  $\bar{C}^2$  上定义的线坐标;  $\emptyset$  表示零空间。此外, 在撞击过程中, 零侵彻条件

$$V^1 \cap V^2 = \emptyset \quad (6)$$

应始终得到满足;  $V^1$  和  $V^2$  分别指物体 1 和物体 2 的体积。接触点上的接触力  $f_n$  应是非正的, 否则为零。设时间积分的步长为  $\Delta t$ , 则在  $t + \Delta t$  时刻一对接触点之间的间隙为

$$g_n^{t+\Delta t}(s) = g_n^t(s) - (\underline{u}^2 - \underline{u}^1) \cdot \underline{n}$$

$\underline{n}$  为接触点处的法向矢量,  $\underline{n} = \underline{n}^2$ 。且

$$f_n^{t+\Delta t}(s) = f_n^t(s) \quad (8)$$

在 (7) 式中,  $(\underline{u}^2 - \underline{u}^1) \cdot \underline{n}$  是间隙 (或侵彻量) 从时刻  $t$  到  $t + \Delta t$  的增量。在罚参数法中, 接触力的大小与侵彻量有关, 可表示为

$$f_n^{t+\Delta t} = A (g_n^{t+\Delta t}) \quad (9)$$

式中  $A$  为罚参数, 它的值应事先选定。

用有限元对位移  $\underline{u}$  和接触力  $f_n$  进行离散, 有

$$f_n(s) = N_f f_n \quad (10)$$

$$g_n^{t+\Delta t}(s) = g_n^t(s) - (\underline{u}^2 - \underline{u}^1) \cdot \underline{n} = g_n^t(s) - N_u \underline{u} \quad (11)$$

或者

$$D(\underline{u}^2 - \underline{u}^1) \cdot \underline{n} = N_u \cdot D \underline{u} \quad (12)$$

在从时刻  $t$  到  $t + \Delta t$  的过程中, 接触力在间隙增量上所作的虚功为

$$\delta R_c^{t+\Delta t} = \int_C (f_n^{t+\Delta t}(s)) D[(\underline{u}^2 - \underline{u}^1) \cdot \underline{n}] (\Delta t ds) \quad (13)$$

考虑到 (9) 式, 上式又可写成

$$\delta R_c^{t+\Delta t} = \underline{D}^T \underline{Q} N_u^T [A (g_n(s) - N_u \underline{u})] (\Delta t ds) = \underline{D}^T (\underline{G} - \underline{A} \underline{u}) \quad (14)$$

式中

$$\underline{G} = \underline{Q}_c \underline{N}_u^T \underline{A}^t \underline{g}_n(s) (\underline{t} ds) \quad (15)$$

$$\underline{A} = \underline{Q}_c \underline{N}_u^T \underline{A} \underline{N}_u (\underline{t} ds)$$

根据零侵彻条件,  $\underline{t}^{+v} \underline{r}_c$  应等于零, 即

$$\underline{D}_u^T (\underline{G} - \underline{A} \underline{u}) = 0$$

于是,

$$\underline{t}^{+v} \underline{R}_c = \underline{G} - \underline{A} \underline{u} \quad (16)$$

也就是罚参数法中接触力对载荷矢量的贡献。

### 1.3 破坏准则

为了对装甲受弹击后的响应、失效机理以及抗弹能力作出准确的描述和可靠的预测, 合理地建立破坏准则是十分必要的。可以采用多种不同的技术措施, 通过图象显示和数据输出在数值仿真中准确而形象地描述装甲受弹击后的响应和失效过程。根据试验中出现的破损现象, 采用了 2 种处理方式。

陶瓷是一种坚质脆性材料, 它的弹性模量比钢高 5 倍以上, 但极限应变却不足钢的 1/10。试验表明, 陶瓷靶板受弹击后, 靶板破碎为大小不一的碎片, 在着弹点处则形成破碎的锥体, 锥体的直径在弹入口处与弹的直径一致, 出口处则大于弹的直径。在此锥体内, 陶瓷破碎成粉末状。显然, 在这样的部位, 材料已失去抵抗拉伸和剪切的能力, 而只承受压缩。因此, 在计算中认为, 如果某一单元材料的受力使应变达到极限值, 则计算模型中该单元立即由固体元改变为不可压、但可任意剪切和拉伸变形的流体元。我们称这种模拟失效的技巧为改变单元材料模式法。

第二种技巧为 / 连接- 断开 0 结点法。令在建立有限元模型时, 每个单元都有它自己独有的结点, 每个结点都不与其它单元共享。但是, 几个结点可以共享同一个位置向量  $\underline{x}$ 。于是, 为了连接单元, 可以把具有相同位置矢量的结点 / 捆绑 0 在一起。如果该结点处的应变已达到极限值, 就把这些捆绑在一起的结点松开。这样, 就可以在分析中模拟靶板的碎裂。下一节的算例表明, 这 2 种处理方法都取得了良好的效果。

## 2 算 例

作为对上面提出的接触撞击算法的考核, 本文计算了陶瓷/复合材料的组合装甲在弹击条件下的响应和失效过程。因为高速撞击的响应范围很小 (计算也证明了这一点), 所以在分析时只取出着弹点邻近的部分区域。计算中, 陶瓷靶板和复合材料背板的厚度, 以及弹体直径和它对靶板的撞击速度均与试件的相同, 这是为了便于将计算结果与试验结果相比较。首先, 用 / 连接- 断开 0 的处理方法进行数值仿真, 但不加背板, 以测试单独陶瓷靶板的抗弹能力。控制方程的时间积分步长是随单元尺寸的变化而改变的。在本例情况

下, 时间步长的平均值约为  $0.1L_s$ 。取这样小的时间步长, 是为了把应力波的效应考虑进去。图 1 给出了某些时刻的响应。撞击后  $4.08L_s$  时, 靶板部分开裂; 由图 1 可以看出撞击后  $12.017L_s$  时靶板开裂的情况。到  $28.01L_s$  时, 子弹完全穿透装甲。为了较仔细地观察靶板受撞击后时的失效历程, 图 2 表示了弹体撞击陶瓷靶板时的侵彻过程, 全部采用 8 结点三维元, 并采用了改变单元材料模式的方法。受撞后  $6L_s$  时, 靶板已经破裂。图 2 表示了撞击后  $12.026L_s$  和  $28.013L_s$  后的靶板受损情况 (图中单元形状明显畸变时, 表示材料已成粉末状碎粒, 单元的材料模式已由固体改变为流体)。

受撞  $28L_s$  后, 子弹完全穿透靶板, 结论与采用 / 连接- 断开 0 处理方法时的一致。最后, 对陶瓷 / 复合材料组合装甲的抗弹能力和失效模式进行数值仿真, 如图 3 所示。装甲受撞  $16L_s$  后, 陶瓷破裂, 复合材料背板开始脱层; 到  $28L_s$  时, 靶板碎裂, 复合材料脱层, 撞击过程到此终结。仿真结果与同样条件下的试验结果相符良好。

### 3 结 论

由以上讨论和计算结果, 可以得到下列结论:

- (1) 接触- 撞击问题是高度非线性的, 且同时涉及几何非线性与物理非线性。
- (2) 所采用的处理接触撞击界面和接触撞击力的理论和方法是十分有效的。从图 1~ 图 3 的各帧图中可以看出, 在弹体与靶板的接触界面之间始终未发生侵彻现象。
- (3) 对失效历程进行数值仿真时, 采用的 2 种处理失效的措施是成功的。
- (4) 用数值仿真来预测装甲受撞后的失效历程是经济而有效的。它可以在短时间内对不同材料、不同组合方式、不同几何尺寸、以及不同撞击速度下的装甲抗弹能力进行分

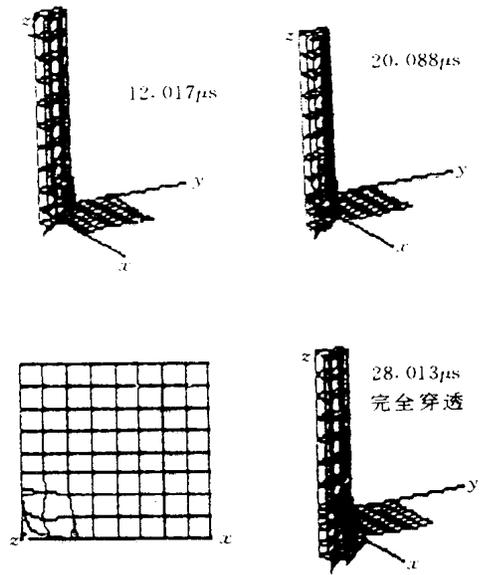


图 1 三维元 (弹体) / 壳元 (靶板) 模型撞击响应的数值仿真, 仅显示 1/4 模型

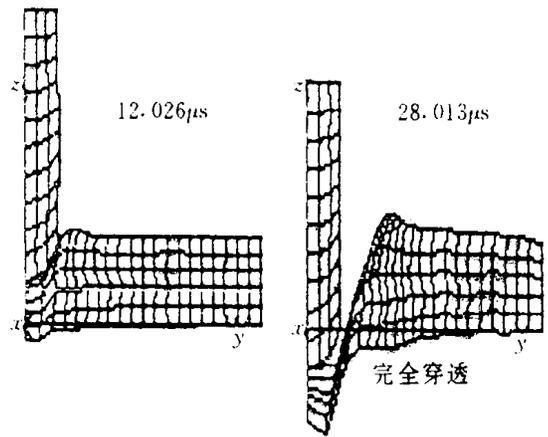


图 2 弹体撞击陶瓷靶板时的侵彻过程

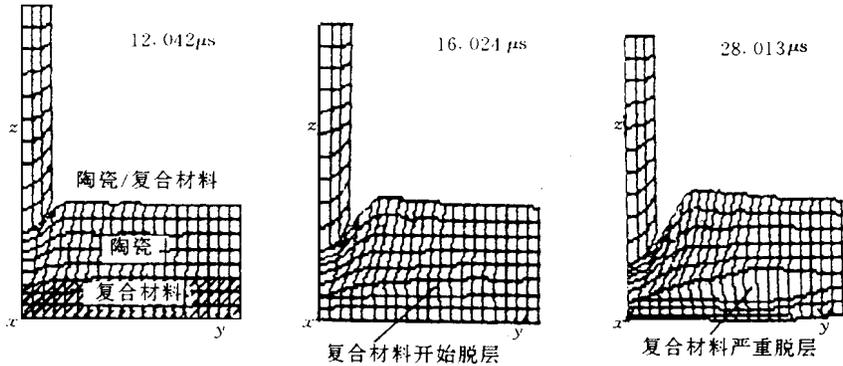


图3 弹体撞击陶瓷/复合材料靶板时的破裂过程

析比较, 从而十分经济地帮助设计人员对设计方案进行优化。

(5) 本文所采用的方法不仅适用于弹体对装甲撞击响应的分析, 而且适用于诸如金属薄板冲压成形、飞机和汽车等的适撞性 (crashworthiness) 设计、齿轮和轴承等接触撞击问题的数值仿真。

在本文的准备、研究和计算过程中, 宋焕成教授热诚地提供了必需的材料数据和试验结果, 作者谨致以衷心的感谢。

### 参 考 文 献

- 1 Avery J G. Design manual for impact damage tolerant aircraft structure. AGARDograph No. 238, Oct. 1981
- 2 钱伟长. 穿甲力学. 北京: 国防工业出版社, 1983
- 3 Hetherington J G, Rajagopalan B P. An investigation into the energy absorbed during ballistic perforation of composite armours, Int. J Impact Engng. 1990; 11 (1): 33- 40
- 4 Florence A L. Interaction of projectiles and composite armour. Part 0. AD 698543
- 5 Figucia F. Mechanism of improved ballistic fabric performance. ADA117104
- 6 Zhong ZH, Nilsson L. A single- surface contact- impact treatment based on the hierarchy territory and the defence node algorithms. Sweden: Linköping University, 1992