

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.12.013

纤维增强复合材料分层损伤失效模拟计算方法

王荣惠, 徐井利, 张海云, 刘岩, 高莹莹, 郭建芬, 张建芹, 孙魁远, 梁国伟

(山东非金属材料研究所, 济南 250031)

摘要: 针对纤维增强复合材料最典型的分层损伤破坏模式, 研究了现阶段冲击动力学仿真计算中常用的复合材料本构模型及失效准则, 分析了内聚力单元模型算法与固连失效接触模型算法各自的原理及特点。内聚力单元算法应用了损伤力学和断裂力学, 不需要假设初始损伤位置。而固连接触算法将接触面上的从节点集与目标接触面中的表面粘接在一起, 当达到失效条件后, 从节点集与目标接触面中的表面发生滑动或者分离。针对两种纤维增强复合材料靶板的抗侵彻性能进行仿真计算, 通过仿真计算与靶试验验证得出, 内聚力单元算法及固连接触算法均能较好地模拟纤维增强复合材料的分层损伤破坏模式, 揭示了纤维增强复合材料抗侵彻过程中的防护机理, 为新型复合防护结构及装备的研制与设计提供重要参考。

关键词: 纤维增强复合材料; 本构模型; 内聚力单元算法; 固连接触算法

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)12-0074-06

Delamination Damage Algorithm of Fiber Reinforced Composites

Wang Ronghui, Xu Jingli, Zhang Haiyun, Liu Yan, Gao Yingying, Guo Jianfen, Zhang Jianqin, Sun Kuiyuan, Liang Guowei

(Shandong Institute of Non-metallic Materials, Jinan 250031, China)

Abstract : Aiming at the typical delamination damage mode of fiber-reinforced composites, the constitutive model and failure criterion of composites that commonly used in dynamic simulation were studied, and the principles and characteristics of cohesive element and tiebreak contact algorithm were analyzed. The cohesive element algorithm use damage mechanics and fracture mechanics, and did not need to assume the initial damage location. The tiebreak contact algorithm would bond the slave node set with the surface in the target. When the failure condition was reached, the slave node set would slide or separate from the target surface. Then the simulation calculation of two fiber-reinforced composite targets anti penetration is take as an example. The accuracy of the cohesive element and the tiebreak contact algorithm are verified respectively, and the protection mechanism of fiber-reinforced composites in the process of anti penetration is revealed, which provides an important reference for the development and design of new composite protection structures and equipment.

Keywords : fiber-reinforced composite ; constitutive model ; cohesive element ; tiebreak contact

纤维增强复合材料除具有比强度高、比模量高、可设计性强等特点外, 与常规金属材料相比还具有防崩落、耐腐蚀及抗破片等突出优点, 因此纤维增强复合材料在装甲内衬、单兵防弹衣、防弹头盔等装甲防护领域具有广泛应用^[1]。在战场环境下, 纤维增强复合材料面临各种动能弹侵彻、爆轰波冲击等极端载荷作用, 因此研究纤维增强复合材料的动态响应特性具有重要价值^[2-4]。试验法能够直接获得较真实的复合材料动态响应结果, 但受周

期长、成本高、可获得数据少等制约, 试验研究通常只作为验证手段, 且试验研究需要基于实物样件, 不适用于在研方案进行评估^[5]。随着数值仿真技术及软件功能的不断更新完善和使用经验的积累, 数值仿真的精度和效率不断提升, 由于具有重复性好、工况可按需设定、费效比低等优势, 可有效弥补实验研究的不足, 数值仿真已逐渐成为纤维增强复合材料产品及部件防护性能研究最重要的途径之一^[6]。

通信作者: 王荣惠, 副研究员, 主要从事复合材料及装备动力学仿真

收稿日期: 2022-11-16

引用格式: 王荣惠, 徐井利, 张海云, 等. 纤维增强复合材料分层损伤失效模拟计算方法[J]. 工程塑料应用, 2022, 50(12): 74-79.

Wang Ronghui, Xu Jingli, Zhang Haiyun, et al. Delamination damage algorithm of fiber reinforced composites[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(12): 74-79.

大量研究表明,分层损伤失效是纤维增强复合材料最典型的破坏模式,针对复合材料分层损伤失效模式,笔者研究了仿真计算中常用的复合材料本构模型及失效准则,分析了内聚力单元算法与固连接触算法的原理及特点,并以常用纤维增强复合材料靶板的抗侵彻性能仿真为例,分别验证了内聚力单元与固连接触两种算法的准确性,揭示了纤维增强复合材料抗侵彻过程中的防护机理,为新型复合防护结构及装备的研制与设计提供重要参考。

1 本构模型研究

纤维增强复合材料属于层合结构,其作为正交各向异性材料,可简化为二维广义平面问题^[7-9]。在平面应力状态下,正交各向异性单层板在材料主方向上的应力-应变关系列于公式(1)。

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} \end{bmatrix} \quad (1)$$

设 Q_{ij} 为简化的刚度矩阵,在与材料主方向构成任一角度 O_{xyz} 坐标系中应力-应变列于公式(2)。

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{16} \\ Q_{12} & Q_{22} & Q_{26} \\ Q_{16} & Q_{26} & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (2)$$

复合材料作为典型的各向异性材料,其应用最广泛的本构模型是正交各向异性本构模型,在进行复合材料损伤失效的仿真模拟过程中,破坏准则需结合具体的材料、服役工况及失效模式进行选择^[10]。Chang-Chang 于 1987 年提出的复合材料渐进失效模型^[11],主要通过纵向拉伸强度 S_1 、横向拉伸强度 S_2 、剪切强度 S_{12} 、横向压缩强度 C_2 、非线性剪切应力参数 α 等 5 个参数进行描述。在平面应力中,应力和应变关系如公式(3):

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{1}{E_1} (\sigma_1 - v_1 \sigma_2) \\ \varepsilon_2 &= \frac{1}{E_2} (\sigma_2 - v_2 \sigma_1) \\ 2\varepsilon_{12} &= \frac{1}{G_{12}} \tau_{12} + \alpha \tau_{12}^3 \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_{12}$ ——纵向、横向、面内剪切应变;

$\sigma_1, \sigma_2, \tau_{12}$ ——纵向、横向、面内剪切应力;

E_1, E_2, G_{12} ——纵向、横向、面内剪切模量;

v_1, v_2 ——纵向和横向的泊松比。

另外有纤维-基体剪切公式,即剪切应力与剪切强度的比率($\bar{\tau}$)列于公式(4):

$$\bar{\tau} = \frac{\frac{\tau_{12}^2}{2G_{12}} + \frac{3}{4}\alpha\tau_{12}^4}{\frac{S_{12}^2}{2G_{12}} + \frac{3}{4}\alpha S_{12}^4} \quad (4)$$

在经典商用冲击动力学软件 LS-DYNA 中, Chang-Chang 复合材料本构内嵌三个失效准则,分别如下所示:

基体开裂失效:

$$F_{\text{matrix}} = \left(\frac{\sigma_2}{S_2} \right)^2 + \bar{\tau} \quad (5)$$

当 $F_{\text{matrix}} > 1$ 时,基体开裂失效,材料常数 E_2, G_{12}, v_1, v_2 退化为 0。

复合材料压缩失效:

$$F_{\text{comp}} = \left(\frac{\sigma_2}{S_2} \right)^2 + \left[\left(\frac{C_2}{2S_{12}} \right) - 1 \right] \frac{\sigma_2}{C_2} + \bar{\tau} \quad (6)$$

当 $F_{\text{comp}} > 1$ 时,压缩失效,材料常数 E_2, v_1, v_2 退化为 0。

最终纤维断裂失效:

$$F_{\text{fiber}} = \left(\frac{\sigma_1}{S_1} \right)^2 + \bar{\tau} \quad (7)$$

当 $F_{\text{fiber}} > 1$ 时,纤维断裂失效,材料常数 $E_1, E_2, G_{12}, v_1, v_2$ 退化为 0。

2 复合材料分层损伤失效算法

纤维增强树脂基复合材料层间性能较弱,尤其在受到冲击载荷作用时,复合材料层压板中靠近冲击面的部分发生剪切冲塞,而靠近背面的部分则发生大面积隆起变形,复合材料内部出现最典型的分层损伤失效^[12]。随着有限元技术的发展,复合材料分层损伤失效的破坏模式可被模拟得非常准确并接近现实,常用的分层损伤失效算法有两种,分别是内聚力单元算法和固连接触算法,下面分别介绍两种算法的原理及特点。

2.1 内聚力单元模型算法

内聚力单元模型算法是一种用来分析复合材料层合结构层间损伤破坏的仿真计算方法,该方法根据复合材料的真实力学性能,用一种假想的粘结层(内聚力单元),将传统连续介质力学单元的应力-应变关系转换为应力-位移关系,采用双线性牵引-分离响应的本构关系来模拟分层损伤的萌生和扩展过程^[13],如图 1 所示。

由于粘结层(内聚力单元)不代表实际的层间

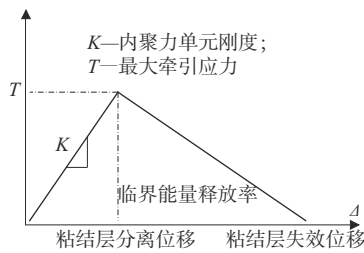


图1 内聚力单元的本构关系示意图

基体,因而不能采用实际基体刚度进行定义^[14]。内聚力单元的刚度本质上是罚刚度,一般需设定一个比相邻子层刚度大得多的数值,但又不能过大,避免出现有限元计算不收敛的问题。内聚力单元刚度 K 计算公式如公式(8):

$$K = \frac{\alpha E_3}{t} \quad (8)$$

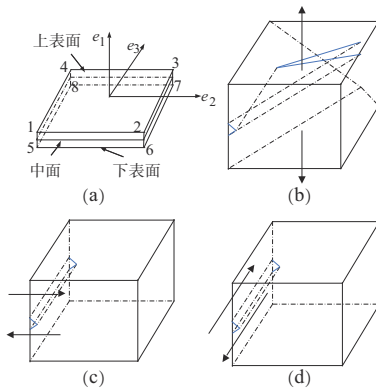
式中: E_3 ——相邻层的弹性模量;

t ——相邻层的厚度;

α ——系数,默认值50,一般可以设 $K_{11}=K_{22}=$

K_{33} 。

根据内聚力单元的本构模型,当内聚力单元所受到的牵引应力达到最大时,初始分层损伤开始发生,当单元的能量释放率达到临界时,达到内聚力单元的完全失效的阈值,裂纹开始在复合材料层间扩展,层合板宏观结构上的分层现象出现。图2为内聚力单元及其三种开裂模式示意图。图中所示局部坐标系 e_1 为内聚力单元的厚度方向,沿 e_1 方向的界面力 p_1 与“张开型”开裂模式相关; e_2, e_3 为内聚力单元面内的两个相互垂直方向,沿 e_2 方向的界面力 p_2 与“滑开型”开裂模式相关;沿 e_3 方向的界面力 p_3 与“撕开型”开裂模式相关^[15]。



a—内聚力单元示意图; b—开裂模式I“张开型”;
c—开裂模式II“滑开型”; d—开裂模式III“撕开型”

图2 内聚力单元及其三种开裂模式示意图

内聚力单元的建立是基于粘接域理论,结合不同材料在粘结面处的开裂过程,该模型将层间裂纹

处的界面力 p_i 与界面上下表面间的相对位移 δ_i 之间用下式描述为:

$$p_i = k_i(\delta_i) \quad (i = 1, 2, 3) \quad (9)$$

式中: p_i ——三个方向的界面力;

δ_i ——三个方向的界面相对位移。

一般用下式来判定界面处损伤的产生:

$$f_i(p_i, S_i) - 1 = 0 \quad (10)$$

式(10)中, $S_i(i=1,2,3)$ 为界面强度,判定准则:

$$f_i(p_i, S_i) = \left(\frac{\max(p_1, 0)}{S_1} \right)^2 + \left(\frac{p_2}{S_2} \right)^2 + \left(\frac{p_3}{S_3} \right)^2 \quad (11)$$

在外载荷作用下,复合材料内部损伤持续发展,界面处将产生宏观裂纹,为研究复合材料内部裂纹的扩展状况,可采用断裂力学中应变释放率准则来分析:

$$f_g(G_i) - 1 = 0 \quad (12)$$

式中, $G_i(i=1,2,3)$ ——界面上由于出现初始损伤而耗散的能量率,根据线性断裂力学理论将其描述如公式(13):

$$G_i = \int p_i d\delta_i - \frac{1}{2} p_i \delta_i \quad (13)$$

一般采用如公式(14)的线性耦合或二次耦合准则作为裂纹扩展判据:

$$f_g = \frac{G_I}{G_{Ic}} + \frac{G_{II}}{G_{IIc}} + \frac{G_{III}}{G_{IIIc}} \quad (14)$$

或

$$f_g = \left(\frac{G_I}{G_{Ic}} \right)^2 + \left(\frac{G_{II}}{G_{IIc}} \right)^2 + \left(\frac{G_{III}}{G_{IIIc}} \right)^2 \quad (15)$$

式(14)和(15)中, $G_{ic}(i = \text{I, II, III})$ 分别对应界面处的失效模式为I, II, III型裂纹时的临界断裂能释放率。该模型融合了损伤力学和断裂力学的理论,无需假设复合材料内部的初始损伤位置,可准确描述复合材料内部的界面分层损伤从产生到扩展的整个过程。

2.2 固连失效接触算法

为模拟复合材料层间的失效破坏,可在复合材料上下两层之间定义固连失效接触,该算法主要是将接触面从节点集与目标接触面中的表面粘接到一起,在接触准则失效之前上下两面会被绑定在一起,此时上下两面相当于绑定接触,达到失效准则之后则允许上下两个接触面之间发生相对滑动或分离,此时绑定接触退化为自动面-面接触。一般通过设定法向失效力和剪切失效力模拟复合材料层间达到一定失效条件后的分层损伤现象。其

中带有 OFFSET 的接触类型是以罚函数算法为主,未带有 OFFSET 的接触类型主要采用动态约束算法^[16]。

在商用冲击动力学软件 LS-DYNA 中,固连失效接触模型的参数较多,其中起主要作用的是软件设定的法向应力失效参数(NFLS)和软件设定的剪切失效应力失效参数(SFLS)两个参数。在不同接触类型中 NFLS 和 SFLS [软件设定的法向力失效参数(NFLF)和软件设定的剪切力失效参数(SFLF)]这两个参数含义不同,下面介绍 NFLS 和 SFLS (NFLF 和 SFLF)两组参数在仿真计算模型中的设置和使用条件。

当层合结构的复合材料各层材料之间设置固连失效接触时,一般要对从接触面设置为节点集,而对主接触面不做要求,材料的破坏方式一般为复合型破坏,因此设置法向失效应力和剪切失效应力作为失效阈值,其失效准则描述为:

$$\left(\frac{|\sigma_n|}{NFLS}\right)^2 + \left(\frac{|\sigma_s|}{SFLS}\right)^2 \geq 1 \quad (16)$$

式中: σ_n ——法向失效应力;

σ_s ——剪切失效应力。

在该接触模型中,如果从接触面的 DA1, DA2 参数和 NFLS, SFLS 参数同时定义,则其优先顺序是:DA1>NFLS; DA2>SFLS。

当仿真过程中选用点面固连失效接触模型时,需对主接触面设定节点集,对从接触面进行 segment 设置,与面面固连失效接触不同的是,点面模型中的两个参数含义为法向失效力和剪切失效力。点面固连失效接触模型的失效准则定义如公式(17)所示:

$$\left(\frac{|f_n|}{NFLF}\right)^{NEN} + \left(\frac{|f_s|}{SFLF}\right)^{MES} \geq 1 \quad (17)$$

式中: f_n ——法向失效力;

NEN——法向力指数;

f_s ——剪切失效力;

MES——剪切力指数。

3 复合材料靶板抗侵彻性能仿真

3.1 内聚力单元算法

为验证内聚力单元算法,建立了包含超高分子量聚乙烯纤维增强复合材料靶板、球形模拟弹的有限元模型,聚乙烯纤维复合材料靶板及模拟弹有限元模型如图3所示。

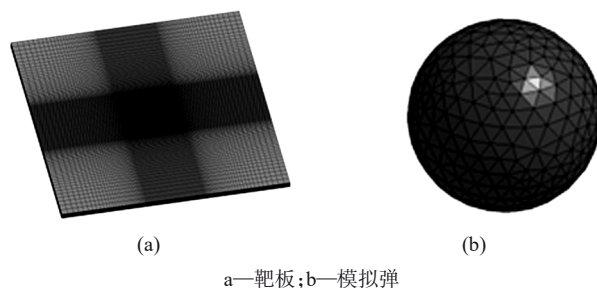


图3 聚乙烯纤维复合材料靶板及模拟弹有限元模型

复合材料靶板每层之间采用内聚力单元法建模,靶板具体尺寸为 400 mm×400 mm×10 mm, 4.5 g 球形模拟弹直径为 10.3 mm, 铺敷方式为正交铺层,靶板周边固定约束。

图4为球形模拟弹侵彻聚乙烯(PE)纤维复合材料靶板的过程,图5为PE纤维复合材料靶板抗侵彻过程中的应变分布。由图4、图5可看出,在弹体以较高速度着靶后,产生沿面内方向扩散的应力波和垂直于靶板方向扩散的应力波,同时PE纤维复合材料靶板被冲击挤压,靠近冲击面的部分发生剪切冲塞,并有开坑现象,当应力波在靶板背面反射形成拉伸应力波后,靶板背部开始拉伸变形,靶板背面的复合材料隆起变形,此时在整个层合板的内部出现典型层间损伤破坏。随着弹体的进一步侵彻作用,复合材料靶板背部拉伸破坏,弹体穿透靶板。

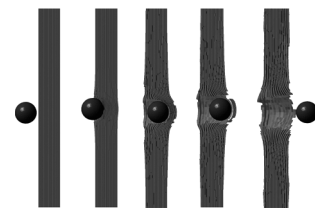


图4 球形模拟弹侵彻聚乙烯复合材料靶板过程

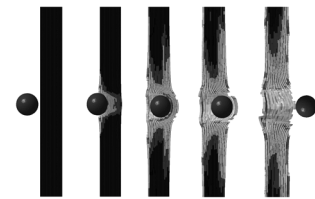


图5 聚乙烯纤维复合材料靶板抗侵彻过程中的应变分布

为了验证仿真计算方法的有效性,进行了3组打靶试验,模拟弹入射速度分别为 793, 788 m/s 和 762 m/s, 并将仿真计算所得临界穿透速度(V_{50})结果与试验 V_{50} 结果进行了对比。表1为计算结果和试验结果的统计。

经过上述仿真计算结果与试验结果的对比发现,仿真所得与试验所得的残余速度误差范围在 6.3%~7.8%,验证了内聚力单元算法可以较好地模

表1 仿真计算所得 V_{50} 结果与试验 V_{50} 结果统计

序号	仿真计算结果			试验结果			等效 V_{50} 误差/%
	初速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	残余速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	等效 V_{50} /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	初速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	残余速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	等效 V_{50} /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	
1	793	608	509	793	577	543	6.3
2	788	600	511	788	560	554	7.8
3	762	570	506	762	531	547	7.5

拟分层损伤的产生及扩展的整个动态过程,也验证了该模型的合理性和可行性。

3.2 固连接触算法

为验证固连接触算法,建立柱形模拟弹侵彻PBO纤维增强环氧树脂基复合材料靶板的有限元模型,复合材料靶板尺寸为100 mm×100 mm×15 mm,柱形模拟弹的尺寸为 $\varnothing 10\text{ mm}\times 20\text{ mm}$,设置靶板四周施加非反射边界条件,并设置固定约束,复合材料靶板抗侵彻有限元网格模型如图6所示。

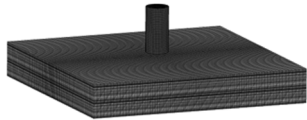


图6 复合材料靶板抗侵彻有限元网格模型

图7为PBO复合材料靶板抗柱形模拟弹侵彻过程,图8为PBO复合材料靶板的塑性损伤过程。

根据图7、图8可以看出,弹体着靶后迅速对PBO靶板产生明显的挤压及冲塞作用,PBO复合材料靶板被冲击挤压并呈现出剪切破坏,随着弹体的侵彻作用PBO复合材料靶板的侵蚀破坏不断加深,靶板内部形成一个与弹体直径相当的冲塞块,靶板背面的背凸鼓包非常明显,此时靶板背面的复合材料主要呈拉伸破坏,整个PBO靶板的内部出现典型层间损伤破坏。在弹体的进一步侵彻作用下,复合材料靶板被贯穿,层间的损伤及破坏更加明显,在

PBO复合材料靶板背面,层合板的分层、剥离范围远超弹体直径大小。

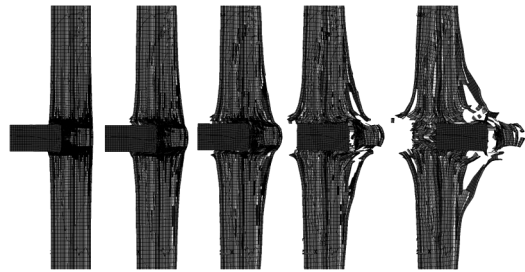


图7 柱形模拟弹侵彻PBO靶板过程

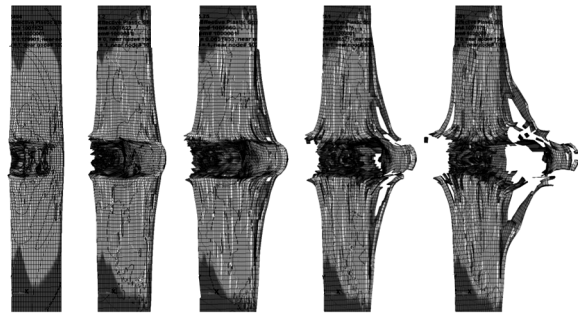


图8 PBO复合材料靶板抗弹侵彻的塑性损伤过程

为验证仿真计算方法的有效性,进行了三组打靶试验,并将仿真计算结果与试验结果进行了对比。表2为柱形弹侵彻PBO靶板的仿真计算 V_{50} 结果和试验 V_{50} 结果的统计。

表2 柱形弹侵彻PBO靶板的仿真计算 V_{50} 结果与试验 V_{50} 结果的统计

序号	仿真计算结果			试验结果			等效 V_{50} 误差/%
	初速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	残余速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	等效 V_{50} /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	初速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	残余速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	等效 V_{50} /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	
1	900	804	404	911	795.9	443	8.8
2	1 200	1 055	571	1 195.3	1 072.4	528	8.1
3	1 500	1 324	704	1 498.5	1 339.9	671	4.9

经过上述仿真计算结果与试验结果的对比发现,仿真所得与试验所得的残余速度误差范围在4.9%~8.8%,验证了固连失效接触算法可以较好的模拟分层损伤的产生及扩展的整个动态过程,也验证了该模型的合理性和可行性。

4 结论

针对纤维增强复合材料最典型的分层损伤破

坏模式,研究了现阶段动力学仿真计算中常用的复合材料本构模型及失效准则,分析了内聚力单元算法与固连接触算法各自的原理及特点,并以两种纤维增强复合材料靶板的抗侵彻性能仿真计算为例,分别验证了内聚力单元算法与固连接触算法的准确性,揭示了纤维增强复合材料抗侵彻过程中的防护机理,得出结论如下。

(1)通过仿真计算与靶试验证得出,内聚力单元算法及固连接触算法均能较好地模拟纤维增强复合材料的分层损伤破坏模式。内聚力单元算法采用双线性牵引-分离响应的本构关系来模拟分层损伤的萌生和扩展过程,应用了损伤力学和断裂力学,不需要假设初始损伤位置。而固连接触算法将接触面上的从节点集与目标接触面中的表面粘接在一起,在未达到失效条件前,从节点集与目标接触面中的表面固连在一起,当达到失效条件后,从节点集与目标接触面中的表面发生滑动或者分离,在固连接触中起作用的是 *NFLS* 和 *SFLS* 两个主要参数。

(2)通过仿真模拟研究两种纤维增强复合材料靶板的抗侵彻过程,揭示了纤维增强复合材料抗侵彻过程中的防护机理。弹体以较高速度着靶后,产生沿面内方向扩散的应力波和垂直于靶板方向扩散的应力波,同时纤维增强复合材料靶板被冲击挤压,靠近冲击面的部分发生剪切冲塞,并呈现出开坑现象,当应力波在靶板背面反射形成拉伸应力波后,靶板背部开始拉伸变形,靶板背面的复合材料发生隆起变形,此时在整个层合板的内部出现典型层间损伤破坏。随着弹体的进一步侵彻作用,复合材料靶板背部拉伸破坏,弹体穿透靶板。

参考文献

- [1] 谢文波,张伟,姜雄文. 钢球斜侵彻碳纤维复合材料板的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(3): 647-653.
Xie Wenbo, Zhang Wei, Jiang Xiongwen. Oblique penetration on CFRPs by steel sphere[J]. Explosive and Shock Waves, 2018, 38(3): 647-653.
- [2] 秦建兵,韩志军,刘云雁,等. 复合材料层合板侵彻行为的研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(24): 122-126.
Qin Jianbing, Han Zhijun, Liu Yunyan, et al. Penetration behavior of composite laminated plates[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(24): 122-126.
- [3] 彭刚,王绪财,刘原栋,等. 复合材料层板的抗贯穿机理与模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 2012, 32(4): 337-345.
Peng Gang, Wang Xucai, Liu Yuandong, et al. Research on anti-perforating mechanism and simulation of composite laminates[J]. Explosive and Shock Waves, 2012, 32(4): 337-345.
- [4] Tsai S W, Wu E M. A general theory of strength for anisotropic materials[J]. Journal of Composite Materials, 1971, 5 (1): 58-80.
- [5] Puck A, Kopp J, Knops M. Guidelines for the determination of the parameters in Puck's action plane strength criterion[J]. Composites Science & Technology, 2002, 62 (3): 371-378.
- [6] 李硕,王志军,田非,等. 芳纶复合材料抗破片模拟弹丸侵彻的一种工程分析方法[J]. 弹箭与制导学报, 2014, 34(5): 98-101.
Li Shuo, Wang Zhijun, Tian Fei, et al. Engineering analysis on aramid composite penetration performance by fragment simulating projectile[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2014, 34(5): 98-101.
- [7] Wang B, Chou S M. The behaviour of laminated composite plates as armour[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 68(3): 279-287.
- [8] Messier D R, Patel P J. High modulus glass fibers[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 1995, 182(3): 271-277.
- [9] Gao Hua, Xiong Chao, Yin Junhui. Dynamic response and anti penetration performance of multi layered heterogeneous[J]. Composite Structure Acta Materialae Compositae Sinica, 2019, 36: 1 284-1 294.
- [10] Deng Yunfei, Yuan Jiajin, Xu Jianxin. Penetration characteristics of woven composite laminates impacted by hemispherical [J]. Nosed Projectiles At Different Angles Acta Materialae Compositae Sinica, 2018, 35: 843-849.
- [11] Chang F K, Chang K Y. Post-Failure analysis of bolted composite joints in tension or shear-out mode failure[J]. Composite Materials, 1987, 21: 809-833.
- [12] Cui Weicheng. Computational simulation of progressive failure in composite structures[J]. Acta Metallurgica Sinica (English letters), 1996, 13: 102-111.
- [13] Chang F K, Chang K Y. A progressive damage model for laminated composites containing stress concentration[J]. Composite Materials, 1987, 21: 834-855.
- [14] Gower H L, Cronin D S, Plumtree A. Ballistic impact response of laminated composite panels[J]. International Journal of Impact Engineering, 2008, 35(9): 1 000-1 008.
- [15] Wambua P, Vangrimde B, Lomov S, et al. The response of natural fibre composites to ballistic impact by fragment simulating projectiles[J]. Composite Structures, 2007, 77(2): 232-340.
- [16] Shokrieh M M, Javadpour G H. Penetration analysis of a projectile in ceramic composite armor[J]. Composite Structures, 2008, 82(2): 269-276.