

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.06.028

# 复合材料曲板高速弹丸冲击损伤数值模拟

邓同强<sup>a</sup>, 曾建飞<sup>b</sup>

(江西师范高等专科学校 a. 航空工程学院; b. 物联网学院, 江西 鹰潭 335001)

**摘要:**基于复合材料层板三维连续损伤本构理论,引入 cohesive 界面单元来模拟层间分层,结合三维 Hashin 失效准则编写 Vumat 子程序,开展复合材料曲板高速冲击参数化研究。结果表明:弹丸高速冲击下,基体拉伸损伤面积沿着厚度方向是先减小后增加;当冲击速度大于 115 m/s 时,随着冲击速度的增加,剩余速度近似线性增长,基体拉伸损伤先增大后减小最后趋于平稳;入射角度增大时,弹丸的剩余速度逐渐减小,穿过曲板后弹丸姿态发生逆时针偏转,入射角度越大,偏转越明显,曲板呈现前凹孔后鼓包的形态。

**关键词:**复合材料曲板;高速冲击;基体损伤;剩余速度

**中图分类号:**TB332      **文献标志码:**A      **文章编号:**1671-5276(2025)06-0150-07

## Numerical Simulation of Damage in Composite Curved Plate under High-speed Projectile Impact

DENG Tongqiang<sup>a</sup>, ZENG Jianfei<sup>b</sup>

(a. College of Aeronautical Engineering; b. College of Internet of Things, Jiangxi Teachers College, Yingtan 335001, China)

**Abstract:** Cohesive interface elements are introduced to simulate inter-layer delamination according to the 3D continuous damage constitutive theory of composite laminates. Combined with the 3D Hashin failure criterion, a Vumat subroutine is written to conduct parameterized research on high-speed impact of composite curved plates. The results show that under high-speed impact of the projectile, the tensile damage area of the matrix decreases first and then increases along the thickness direction. When the impact velocity is greater than 115 m/s, with the increase of impact velocity, the remaining velocity approximately increases linearly, and the tensile damage of the matrix first increases, then decreases, and finally stabilizes. As the incident angle increases, the residual velocity of the projectile gradually decreases, and after passing through the curved plate, the projectile's attitude undergoes counterclockwise deviation. The larger the incident angle, the more obvious the deviation, and the curved plate presents a front concave hole and rear bulging shape.

**Keywords:** composite curved plate; high-speed impact; matrix damage; residual velocity

## 0 引言

复合材料具有质量轻和比强度高的特性,在航空航天、船舶、汽车等领域得到较广泛的应用,尤其是航空领域。随着复合材料加工技术的进步研究<sup>[1]</sup>,复合材料结构的占比越来越大,比如空客 A380 客机和波音 787 客机中,复合材料用料均超过了 50%,这大幅度减轻了飞机的结构质量,提高了燃油效率。飞机在飞行过程中难免会受到外来物的冲击,造成结构损伤<sup>[2-3]</sup>。因此,有必要开展复合材料高速冲击的损伤研究。

近年来,针对复合材料高速弹丸冲击,国内外学者做了大量研究。HAZELL 等<sup>[4-5]</sup>研究了高速钢球对复合材料层合板在正冲击和斜冲击下的损

伤情况,发现正冲击时,随冲击能量的增加,薄靶板稳定分层,厚板渐进分层。LIN 等<sup>[6]</sup>在对复合材料夹层结构在高速冲击下的损伤分析中发现分层和脱胶影响材料的抗高速冲击性。TANABE 等<sup>[7]</sup>通过高速冲击试验对比证明不同纤维和基体组成的复合材料抵抗高速冲击损伤的能力有较大差异。LÓPEZ-PUENTE 等<sup>[8]</sup>利用 Chang-Chang 损伤准则建立复合材料高速冲击有限元模型,与试验结果对比发现弹道极限随着冲击倾角的增加而增加。APPLEBY-THOMAS 等<sup>[9]</sup>通过试验模拟飞机受到高速冰雹的冲击,研究了复合材料板的损伤情况和结构剩余强度。PERNAS-SÁNCHEZ 等<sup>[10]</sup>通过垂直弹丸冲击试验,对试验数据分析得到计算损伤面积的经验公式。STEPHEN、NAYAK

**基金项目:**江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ2209507)

**第一作者简介:**邓同强(1992—),男,江西赣州人,讲师,硕士,研究方向为复合材料结构损伤分析,tqiangdeng@163.com。

等<sup>[11-12]</sup>对碳/玻璃混杂纤维层合板进行高速冲击,试验结果表明混杂纤维层合板吸收能量大于单材料层合板。国内学者也积极开展相关研究。马凯等<sup>[13]</sup>利用三维 Hashin 失效准则建立复合材料板高速倾斜冲击有限元模型,研究弹丸角度对冲击损伤的影响。邓云飞等<sup>[14]</sup>通过弹靶撞击试验分析了冲击角度对弹道极限、失效模式和能量吸收率的影响。古兴瑾等<sup>[15]</sup>用 Abaqus 软件模拟复合材料板高速冲击,分析了层合板的破坏过程和损伤特性。黄峰等<sup>[16]</sup>利用有限元方法建立三维冲击失效模型,通过与试验结果对比发现三维 Hashin 损伤判据与界面单元混合建模方法的有效性。刘鹏等<sup>[17]</sup>通过试验研究高速弹丸冲击复合材料不同位置的损伤情况。顾善群等<sup>[18]</sup>通过试验研究复合材料的高速冲击性能,结果表明冲击速度较低时,层合板冲击背面容易出现分层损伤,冲击速度较高时,层合板出现圆形贯穿孔。

上述学者研究主要集中于高速冲击下复合材料平板的损伤分析,但对高速冲击下复合材料曲

板的弹道损伤特性研究较少。

本文采用界面单元与实体单元混合建模的方法,利用三维 Hashin 失效准则建立复合材料曲板高速冲击损伤有限元模型,通过数值模拟分析复合材料曲板高速冲击损伤情况,并探讨冲击速度和曲板角度对冲击损伤的影响。

## 1 复合材料层板三维连续损伤本构模型

本文以正交纤维层合材料为研究对象,由广义 Hooke 定律可知,正交各项异性材料本构关系可表示为

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{S} \boldsymbol{\sigma} \quad (1)$$

式中: $\boldsymbol{\varepsilon}$  为应变张量; $\boldsymbol{\sigma}$  为应力张量; $\boldsymbol{S}$  为柔度矩阵。材料冲击受损后,其损伤情况可以在柔度矩阵中引入损伤变量  $d$ ,于是受损材料的本构关系变为

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{S}_d \boldsymbol{\sigma} \quad (2)$$

对于单层复合材料 2 方向、3 方向具有相同的力学性能,即  $\nu_{12} = \nu_{21}$ ,  $\nu_{13} = \nu_{31}$ ,  $\nu_{23} = \nu_{32}$ ,则有效柔度矩阵  $\boldsymbol{S}_d$  为

$$\boldsymbol{S}_d = \begin{bmatrix} \frac{1}{(1-d_1)E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{13}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_2} & \frac{1}{(1-d_2)E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_3} & -\frac{\nu_{23}}{E_3} & \frac{1}{(1-d_3)E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{(1-d_4)G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{(1-d_5)G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{(1-d_6)G_{12}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

若用  $\boldsymbol{C}_d$  表示损伤后有效刚度矩阵,由上式可得冲击损伤材料本构形式为

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{S}_d^{-1} \boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{C}_d \boldsymbol{\varepsilon} \quad (4)$$

## 2 模型损伤判据

本文采用三维 Hashin 准则为模型损伤判据。

纤维拉伸失效:

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_T}\right)^2 + \alpha \left(\frac{\tau_{12}}{S_L}\right)^2 \geq 1, \quad \sigma_{11} \geq 0 \quad (5)$$

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_C}\right)^2 \geq 1, \quad \sigma_{11} < 0 \quad (6)$$

纤维压缩失效:

$$\left(\frac{\sigma_{22}}{Y_T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_L}\right)^2 \geq 1, \quad \sigma_{22} \geq 0 \quad (7)$$

基体拉伸失效:

$$\left(\frac{\sigma_{22}}{2S_T}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y_C}{2S_T}\right)^2 - 1\right] \frac{\sigma_{22}}{Y_C} + \left(\frac{\tau_{12}}{S_L}\right)^2 \geq 1, \quad \sigma_{22} < 0 \quad (8)$$

基体压缩失效:

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_C}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_L}\right)^2 \geq 1 \quad (9)$$

式中: $X_T$  为轴向拉伸强度; $X_C$  为轴向压缩强度;

$Y_T$  为横向拉伸强度;  $Y_C$  为横向压缩强度;  $S_L$  为轴向剪切强度;  $S_T$  为横向剪切强度;  $\alpha$  为修正系数;  $\sigma_{11}$  为轴向主应力;  $\sigma_{22}$  为横向主应力;  $\tau_{12}$  为剪切应力。

对于层间失效则通过在两单层板之间引入 cohesive 单元来模拟胶层,胶层的拉伸方向与纤维的铺层厚度方向一致,利用 cohesive 单元分析损伤起始和损伤演化两个阶段来模拟胶层的开裂,其中,损伤起始采用二次正应力准则 Quads 为判据。

$$e = \sqrt{\left\{ \left( \frac{t_n}{N} \right)^2 + \left( \frac{t_s}{S} \right)^2 + \left( \frac{t_t}{S} \right)^2 \right\}} \quad (10)$$

式中:  $t_s$  为面内第一个剪切方向(s)的牵引应力分量(剪切应力);  $t_n$  为材料在法向(n)的强度(拉伸或压缩);  $t_t$  为面内第二个剪切方向(t)的牵引应力分量(剪切应力),与 s 方向正交。

当  $e > 1$  时,材料开始失效,损伤演化采用 B-K 断裂准则进行有限元计算。

$$G^C = G_n^C + (G_s^C - G_n^C) \left( \frac{G_s + G_t}{G_s + G_n} \right)^\eta \quad (11)$$

式中:  $G_n^C$ 、 $G_s^C$ 、 $G_t$  分别为材料 3 个方向的临界断裂应变能;  $\eta$  为材料修正系数。

### 3 有限元模型

基于 Abaqus 软件平台编写 VUMAT 子程序,嵌入材料损伤本构和失效判据,利用子程序接口实现与 Abaqus/Explicit 的数据交换,建立复合材

料曲板高速冲击有限元模型,VUMAT 子程序调用流程如图 1 所示。

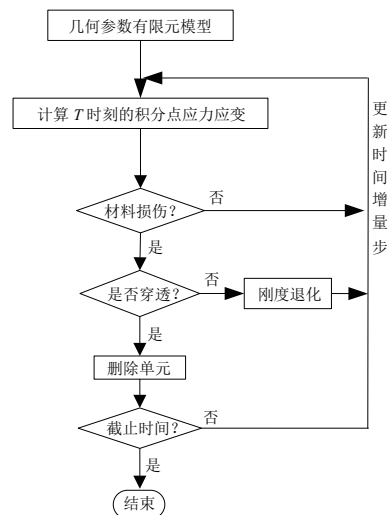


图 1 VUMAT 子程序调用流程图

## 4 数值分析与讨论

### 4.1 算例验证

为了验证本文建模方法的正确性,选用文献[19]中的试验数据进行验证,冲击模型以 T-300 复合材料层合板为研究对象,模型纤维交叉铺放,尺寸为 150 mm×150 mm×2 mm,材料参数如表 1 所示。冲击物为 34.5 g 的圆锥形弹体,弹体形状和尺寸参考文献[19],冲击结果如表 2 所示。从表 2 可知,本文计算结果与文献试验数据基本一致,相对误差小于 8%,说明本文建模方法的合理性。

表 1 材料性能

| 复合材料单层材料参数               |                                                              | 数值    | 黏性层材料参数                  |                       | 数值    |
|--------------------------|--------------------------------------------------------------|-------|--------------------------|-----------------------|-------|
| 模量/GPa                   | $E_1 = 129, E_2 = E_3 = 8.89, G_1 = G_2 = G_3 = 2.51$        |       | 弹性模量 E/GPa               |                       | 4.6   |
| 泊松比                      | $\nu_{12} = \nu_{13} = \nu_{23} = 0.33$                      |       | 切变模量 G/GPa               |                       | 1.3   |
| 强度/MPa                   | $X_T = 719, X_C = 700, Y_T = 719, Y_C = 700, S_L = S_T = 77$ |       | 强度/MPa                   | $X_T = 183, S_T = 80$ |       |
| 密度/(kg·m <sup>-3</sup> ) |                                                              | 1 578 | 密度/(kg·m <sup>-3</sup> ) |                       | 1 440 |

### 4.2 复合材料曲板高速冲击分析

基于上述建模方法建立复合材料曲板高速冲击模型,材料参数如表 2 所示。铺层角度为  $[0/90/45/-45/0]_s$ ,单层厚度为 0.2 mm,胶层厚度为 0.01 mm,模型由中间的曲板和两端相切的平板构成,板宽  $H = 100$  mm,两端平板长度与中间曲板端面曲边弧长相等为  $L$ ,取  $L = 50$  mm,保持  $L$  不变,

曲率半径  $R$  与角度  $\alpha$  的对应关系如表 3 所示。当  $\alpha = 180^\circ$  时,模型变为平板。冲击物为圆锥形弹丸,弹体形状和尺寸如图 2 所示。在有限元模型中设为离散刚体,复合材料曲板边界条件为约束四边位移,单层板采用 C3D8R 实体单元,层间胶层采用 COH3D8 界面单元模拟分层,弹体与复合材料曲板的接触方式为罚函数法,复合材料曲板高速冲击有限元模型如图 3 所示。

表2 弹体冲击靶板结果

| 初始速度<br>$V_i/(m/s)$ | 剩余速度 $V_r/(m/s)$ |        | 误差值/% |
|---------------------|------------------|--------|-------|
|                     | 本文结果             | 文献试验   |       |
| 41.91               | 0                | 0      | 0     |
| 52.36               | 17.36            | 16.12  | 7.69  |
| 59.56               | 42.22            | 39.71  | 6.32  |
| 61.76               | 45.49            | 46.32  | -1.79 |
| 68.38               | 53.02            | 52.94  | 0.15  |
| 94.85               | 84.94            | 86.03  | -1.27 |
| 116.91              | 109.06           | 108.09 | 0.90  |

表3 模型几何特征

| $\alpha/(^\circ)$ | 30 | 60 | 90 | 120 | 150 | 180 |
|-------------------|----|----|----|-----|-----|-----|
| $R/mm$            | 19 | 24 | 32 | 48  | 96  | —   |

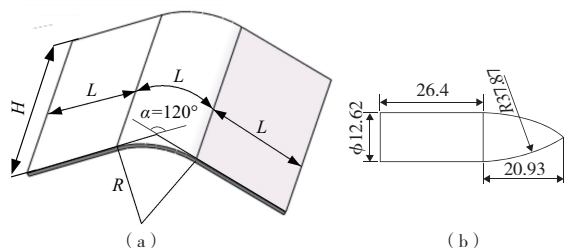


图2 曲板和弹体几何尺寸

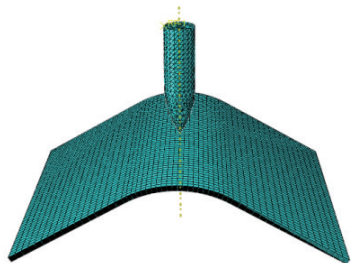


图3 复合材料曲板高速冲击有限元模型

图4为圆锥弹丸在95 m/s的速度冲击下复合材料曲板横向截面图,曲板内外两侧均有一定的隆起,内侧复合材料有明显撕裂,并且内侧胶层开裂逐渐向两端平板扩展,说明曲板在冲击的过程中发生了层内损伤和分层损伤,并且内侧材料分层损伤更大。

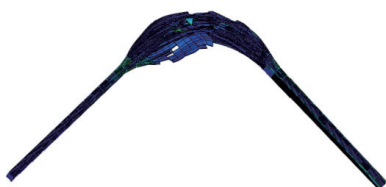


图4 复合材料曲板横向截面破坏

图5为圆锥弹丸在95 m/s的速度冲击下复合材料曲板各层的损伤面积,材料发生的主要破坏形式为纤维拉伸断裂和基体拉伸裂纹,基体拉伸损伤面积沿着厚度方向是先减小后增加,内侧纤维发生纤维断裂的面积更大。图6为模型各层基体拉伸裂纹的分布情况,可以看到裂纹在曲面部分均匀分布并且有向两端平板扩展的趋势。

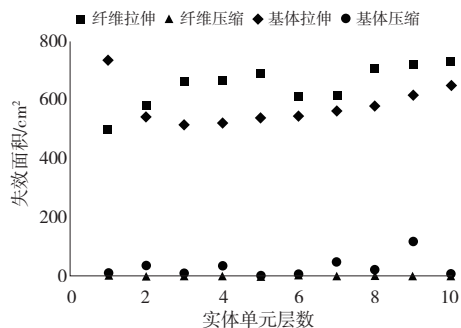


图5 复合材料曲板各层损伤面积

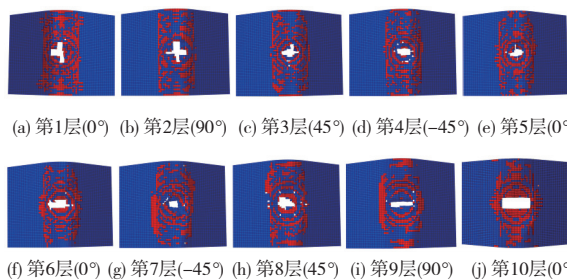


图6 复合材料曲板各层基体拉伸裂纹

图7为圆锥弹丸在95 m/s的速度冲击下复合材料曲板的层间损伤情况,分层损伤集中在中间曲面上,损伤形状接近方形向外扩展,并且中间深颜色区域发生严重的刚度退化。

### 4.3 影响因素分析

#### 1) 冲击速度的影响

模型铺层角度为 $[0/90/45/-45/0]_s$ ,单层厚度为0.2 mm,胶层厚度为0.01 mm,板宽100 mm,两端平板夹角为 $\alpha = 120^\circ$ ,冲击初速度在60~200 m/s范围内模拟高速冲击,结果如图8所示。由图8看出,圆锥弹丸穿透曲板最小速度为71.61 m/s,随着冲击速度的增加,弹丸穿透曲板后剩余速度也增加,当冲击速度大于115 m/s时,剩余速度近似线性增长。图9给出复合材料曲板第6层、第7层、第8层基体拉伸损伤面积。由图9可知,随着冲击速度的增加,基体拉伸损伤先增大后减小最好趋于平稳,冲击速度为105 m/s时,基体拉伸损伤达到最大。图10为第6层基体拉伸损

伤分布情况,基体损伤主要集中在中间环形区域,并向四周扩展的趋势。图 11 为第 5 层与第 6 层之间分层损伤特征云图,分层损伤面积随着冲击速度的增加呈现先增大后减小的趋势,在 105 m/s 的冲击速度下,分层损伤达到最大。

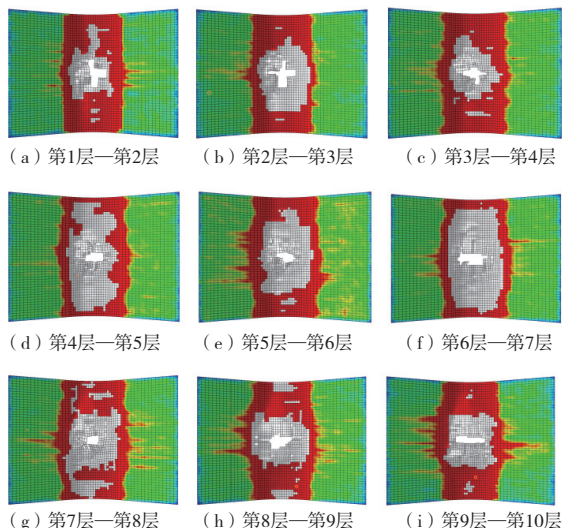


图 7 复合材料曲板的层间损伤情况

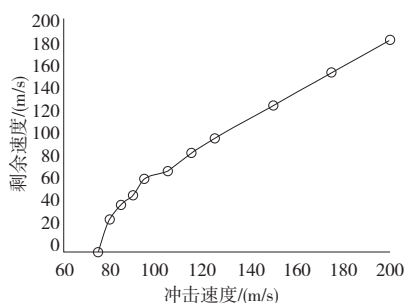


图 8 复合材料曲板高速冲击后剩余速度曲线

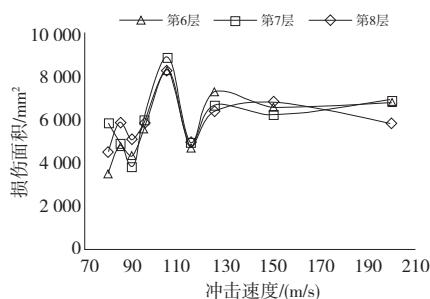


图 9 复合材料曲板第 6 层、第 7 层、第 8 层基体拉伸损伤面积

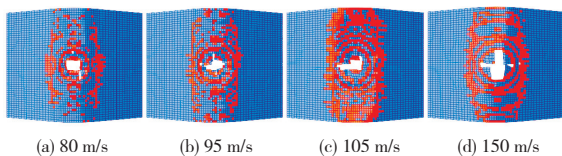


图 10 第 6 层基体拉伸损伤分布

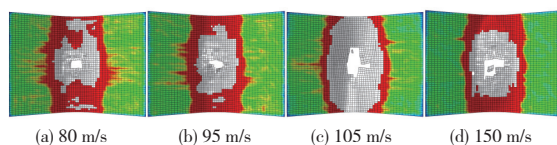


图 11 第 5 层—第 6 层之间分层损伤特征云图

## 2) 平板夹角 $\alpha$ 的影响

模型铺层角度为  $[0/90/45/-45/0]_s$ , 单层厚度为 0.2 mm, 胶层厚度为 0.01 mm, 板宽 100 mm, 模型由中间的曲板和两端相切的平板构成, 两端平板长度与中间曲板端面曲边弧长相等为  $L$ , 两平板所成的角度为  $\alpha$ , 保持各段长度不变, 随着曲率半径改变, 角度  $\alpha$  也发生变化。分析夹角  $\alpha$  分别取  $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $120^\circ$ 、 $150^\circ$ 、 $180^\circ$ , 冲击速度 60~150 m/s 时, 复合材料曲板的损伤情况。

图 12 为不同角度的复合材料曲板高速冲击后子弹剩余速度情况。由图 12 可知, 在相同的冲击速度下, 相比其他夹角的复合材料曲板, 两平板所成的角度为  $180^\circ$  的剩余速度最大, 说明复合材料平板的吸收冲击能量的能力较差, 圆锥弹丸容易穿透层板。当曲板角度  $\alpha \leq 90^\circ$  时, 复合材料曲板冲击剩余速度较小, 吸收冲击能量的能力较好。

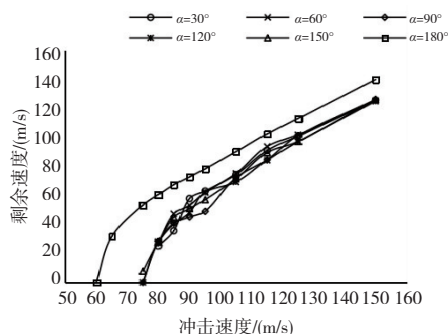


图 12 不同角度的复合材料曲板高速冲击后子弹剩余速度

图 13 为 95 m/s 的冲击第 6 层基体拉伸损伤分布情况。基体拉伸损伤集中在中间区域, 平板 ( $\alpha = 180^\circ$ ) 的基体损伤较小, 平板的吸能较差, 这与图 12 结论一致。当  $\alpha < 180^\circ$  时, 随着  $\alpha$  的增大, 有向两端逐渐扩展。图 14 为 95 m/s 的冲击第 6 层与第 7 层之间分层损伤特征云图, 随着  $\alpha$  的增大, 分层损伤区域增大, 其他层间损伤类似。

## 3) 弹丸入射角的影响

模型铺层为  $[0/90/45/-45/0]_s$ , 单层厚度为 0.2 mm, 胶层厚度为 0.01 mm, 板宽 100 mm, 两平板所成的角度为  $\alpha = 120^\circ$ , 弹丸初速度为 200 m/s, 入射角为弹丸与曲面法线的夹角, 大小为  $\beta$ 。

如图 15 所示,取  $\beta=0^\circ\sim 45^\circ$  时,研究入射角对剩余速度和冲击损伤的影响。

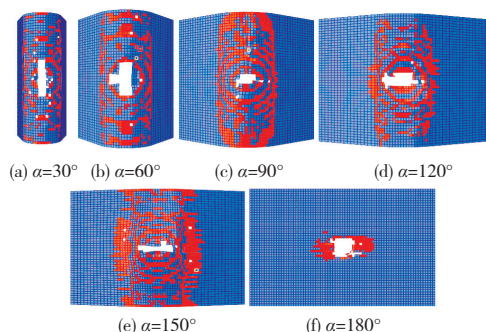


图 13 不同角度的复合材料曲板高速冲击后第 6 层基体拉伸损伤

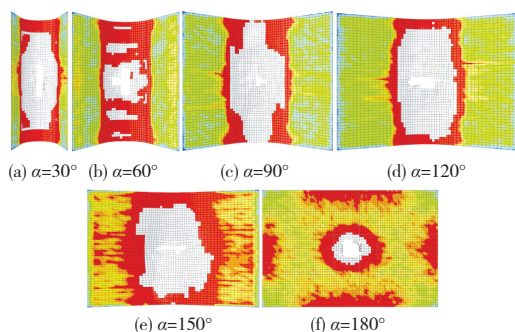


图 14 不同角度的复合材料曲板高速冲击后第 6 层—第 7 层之间分层损伤特征云图

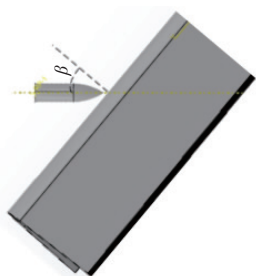


图 15 复合材料曲板高速冲击有限元模型

图 16 为 200 m/s 冲击复合材料曲板的过程变化图。随入射角度的增大,弹丸的剩余速度逐渐减小,入射角度为  $45^\circ$  时,弹丸剩余速度最小,曲板吸能值达到最大;当入射角度  $\beta>10^\circ$  时,弹丸穿过曲板后发生逆时针偏转,入射角度越大,偏转越明显。对比图 16 中曲板冲击后的损伤形貌,曲板前面铺层先接触到弹丸,受到剪切力的作用,形成一个凹孔,曲板背面受拉,加剧层间损伤,形成一个鼓包;随着冲击入射角度的增大,弹体表面与曲板切面的夹角减小,冲击接触面增大,基体损伤

面积增大,入射角  $\beta=45^\circ$  时,损伤面积达到最大。

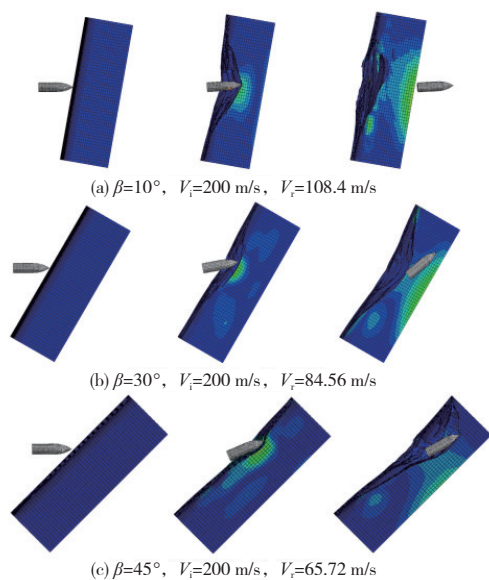


图 16 弹丸冲击复合材料曲板的过程图

## 5 结语

1) 复合材料曲板高速冲击的主要破坏形式为纤维拉伸断裂和基体拉伸裂纹,基体拉伸损伤面积沿着厚度方向是先减小后增加,内侧纤维发生纤维断裂的面积更大。分层损伤集中在中间曲面上,损伤形状接近方形向外扩展。

2) 随着冲击速度的增加,弹丸穿透曲板后剩余速度也增加,当冲击速度大于 115 m/s 时,剩余速度近似线性增长,基体拉伸损伤先增大后减小最后趋于平稳,冲击速度为 105 m/s 时,基体拉伸损伤达到最大。

3) 在相同的冲击速度下,相比其他夹角的复合材料曲板,两平板所成的角度  $\alpha=180^\circ$  的剩余速度最大,当曲板角度  $\alpha\leq 90^\circ$  时,复合材料曲板冲击剩余速度较小,吸收冲击能量的能力较好。

4) 随入射角度的增大,弹丸的剩余速度逐渐减小,穿过曲板后弹丸姿态发生逆时针偏转,入射角度越大,偏转越明显,曲板呈现前凹孔后鼓包的形态,且入射角  $\beta=45^\circ$  时,损伤面积达到最大。

## 参考文献:

- [1] 贾振元,付饶,王福吉. 碳纤维复合材料构件加工技术进展[J]. 机械工程学报,2023,59(19):348-374.
- [2] 张彦. 纤维增强复合材料层合结构冲击损伤预测研究[D]. 上海:上海交通大学,2007.
- [3] 于连超. 航空复合材料构件鸟撞击响应数值分析及应用研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2008.

- [4] HAZELL P J, KISTER G, STENNETT C, et al. Normal and oblique penetration of woven CFRP laminates by a high velocity steel sphere [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2008, 39 (5): 866-874.
- [5] HAZELL P J, COWIE A, KISTER G, et al. Penetration of a woven CFRP laminate by a high velocity steel sphere impacting at velocities of up to 1 875 m/s [J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(9): 1136-1142.
- [6] LIN C F, FATT M S H. Perforation of sandwich panels with honeycomb cores by hemispherical nose projectiles [J]. Journal of Sandwich Structures & Materials, 2005, 7(2): 133-172.
- [7] TANABE Y, AOKI M, FUJII K, et al. Fracture behavior of CFRPs impacted by relatively high-velocity steel sphere [J]. International Journal of Impact Engineering, 2003, 28(6): 627-642.
- [8] LÓPEZ - PUENTE J, ZAERA R, NAVARRO C. Experimental and numerical analysis of normal and oblique ballistic impacts on thin carbon/epoxy woven laminates [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2008, 39(2): 374-387.
- [9] APPLEBY-THOMAS G J, HAZELL P J, DAHINI G. On the response of two commercially - important CFRP structures to multiple ice impacts [J]. Composite Structures, 2011, 93(10): 2619-2627.
- [10] PERNAS-SÁNCHEZ J, ARTERO-GUERRERO J A, VARAS D, et al. Experimental analysis of normal and oblique high velocity impacts on carbon/epoxy tape laminates [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2014, 60: 24-31.
- [11] STEPHEN C, SHIVAMURTHY B, MOURAD A I, et al. Experimental and finite element study on high-velocity impact resistance and energy absorption of hybrid and non-hybrid fabric reinforced polymer composites [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 18: 5406-5418.
- [12] NAYAK S, SAHOO B P, NAYAK R K, et al. Improvement of low - velocity impact and tribo - mechanical properties of unsymmetrical hybrid composites through addition of nanoclay [J]. Bulletin of Materials Science, 2024, 47(4): 237.
- [13] 马凯, 许希武, 古兴瑾. 纤维增强复合材料层板高速倾斜冲击损伤数值模拟 [J]. 复合材料学报, 2013, 30(3): 211-219.
- [14] 邓云飞, 袁家俊, 徐建新. 半球形头弹不同角度冲击下编织复合材料板的侵彻特性 [J]. 复合材料学报, 2018, 35(4): 843-849.
- [15] 古兴瑾, 许希武. 纤维增强复合材料层板高速冲击损伤数值模拟 [J]. 复合材料学报, 2012, 29(1): 150-161.
- [16] 黄峰, 黄涛, 王海雷, 等. 复合材料结构侧向高速弹丸冲击研究 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21(4): 1300-1304.
- [17] 刘鹏, 宣善勇, 周光明, 等. 碳纤维复合材料层合板高速冲击损伤研究 [J]. 航空维修与工程, 2024(12): 27-33.
- [18] 顾善群, 刘燕峰, 李军, 等. 碳纤维/环氧树脂复合材料高速冲击性能 [J]. 材料工程, 2019, 47(8): 110-117.
- [19] 邓云飞, 袁家俊, 徐建新. 刚性卵形头弹撞击角度对编织复合材料层合板侵彻特性的影响 [J]. 复合材料学报, 2018, 35(8): 2039-2045.

---

 收稿日期: 2023 - 10 - 17

(上接第 140 页)

- [16] 许谨辉, 王文善, 王爽, 等. 基于 DYCS-YOLOv8n 的井下无人驾驶电机车多目标检测 [J]. 工矿自动化, 2025, 51(4): 86-92, 130.
- [17] 郭纪良, 刘莉, 何建. 基于改进 YOLOv8 的无人机航拍火灾检测算法 [J]. 林业工程学报, 2025, 10(2): 111-122.
- [18] 陈君, 赵小会, 王博士, 等. 基于 YOLOv7 的垃圾检测方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(12): 1-8.
- [19] 陈学深, 梁俊, 汤存耀, 等. 基于改进 YOLOv7 模型的水田复杂环境稻株识别 [J]. 农机化研究, 2025, 47(7): 9-17.
- [20] 饶兴昌, 郑盈盈, 陆万浩, 等. 基于改进 YOLOv7 红外海上船舶检测算法 [J]. 电光与控制, 2025, 32(4): 23-30.
- [21] 杨达伟, 杨明圣, 付博. 改进 YOLOv7 的电力设备红外图像多目标检测 [J]. 红外技术, 2025, 47(3): 326-334.

---

 收稿日期: 2024 - 07 - 08