

DOI: 10.11883/bzycj-2019-0019

破片冲击作用下舰船复合材料结构损伤的近场动力学模拟*

杨娜娜, 赵天佑, 陈志鹏, 武国勋, 姚熊亮

(哈尔滨工程大学船舶工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 基于近场动力学方法, 综合分析了破片的速度、层合板的铺层方式、加筋板的筋条尺寸和破片相对筋条的冲击位置对结构损伤模式和破片剩余速度的影响。结果显示: 高速破片冲击作用下, 层合板会发生侵彻和穿透现象, 层合板的损伤模式以基体损伤为主, 且随着破片冲击速度的增大, 板上下表面的损伤区域呈现出一种先增大后减小的趋势; 高速破片冲击作用下, 层合板的损伤扩展方向和纤维铺设方向有关, 对于纤维铺层方向相同的层合板, 其上下表面的损伤扩展方向一般与纤维方向相同; 加筋板通过增加少量质量可以获得比层合板更好的抗破片冲击性能, 且加筋板的筋条尺寸和破片相对筋条的冲击位置对加筋板的损伤具有明显影响。

关键词: 复合材料; 高速破片; 近场动力学; 冲击损伤

中图分类号: O383; O341; O342

国标学科代码: 13015; 13035

文献标志码: A

Peridynamic simulation of damage of ship composite structure under fragments impact

YANG Nana, ZHAO Tianyou, CHEN Zhipeng, WU Guoxun, YAO Xiongliang

(School of Ship Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, Heilongjiang, China)

Abstract: Based on the method of near-field dynamics, the effects of fragment velocity, ply mode of laminated plate, rib size of stiffened plate and impact position of fragment relative to rib on the damage mode and residual velocity of fragment are analyzed. The results show that: under the impact of high-speed fragments, the laminate will be penetrated and penetrated. The damage mode of the laminate is mainly matrix damage. With the increase of the impact speed of fragments, the damage area of the upper and lower surfaces of the laminate presents a trend of increasing first and then decreasing. Under the impact of high-speed fragments, the damage expansion direction of the laminate is related to the direction of fiber laying. For the laminates with the same fiber ply direction, the damage propagation direction of the upper and lower surfaces is generally the same as that of the fiber; the stiffened plate can obtain better fragment impact resistance than the laminated plate by increasing a small amount of mass, and the size of the stiffened plate and the impact position of the fragments relative to the stiffeners have a significant impact on the damage of the stiffened plate.

Keywords: composite materials; high-speed fragments; peridynamics; impact damage

鱼雷和导弹等反舰武器爆炸产生的小型不规则破片, 对舰船结构构成了严重威胁。为了抵抗破片对船体结构的破坏, 现代大型舰船通常在舷侧及特殊舱室位置布置防护板。用于舰船抗破片冲击的传统钢质材料, 由于过重, 已不能满足当前作战环境下的要求。而复合材料由于比强度和比刚度高, 耐高温和良好的可设计性等优点成为了舰船防护结构材料的不二选择^[1]。但复合材料由于各向异性的特点,

* 收稿日期: 2019-01-08; 修回日期: 2019-06-10

基金项目: 国家自然科学基金(51879048, 51809054)

第一作者: 杨娜娜(1980—), 女, 博士, 副教授, 博士生导师, yangnana@hrbeu.edu.cn

通信作者: 陈志鹏(1994—), 男, 博士研究生, chenzipeng2012@163.com

其损伤形式更为复杂,一般包括基体开裂、纤维断裂、层间分层和界面脱粘等^[2]。传统有限元方法在求解结构损伤、裂纹扩展、分层断裂和穿透等不连续问题时,位移场的偏微分方程在不连续位置存在奇异性,即便借助动网格或自适应网格技术,也不能模拟裂纹产生和扩展的过程。为此 Dolbow 等^[3]提出了扩展有限元和不连续有限元方法来处理不连续性问题,在有限元函数中引入了反映不连续现象的附加函数来描述不连续力学问题,但该方法在解决复杂损伤问题方面仍然存在很大困难。为了应对材料的复杂损伤和断裂等不连续问题, Silling^[4]在2000年提出了一种基于非局部作用的粒子理论——近场动力学(PD)。PD方法将求解域分离为有限数量的材料点来描述系统的状态,以某一材料点一定范围内与其他材料点之间的相互作用来描述粒子之间的非局部作用,进而利用求解空间积分平衡方程来描述材料点的力学行为。PD方法对材料损伤本构关系的定义较为简单,通过求解运动方程就能描述结构变形、损伤、裂纹扩展和破坏的整个过程,并且允许裂纹沿任意路径扩展,能够对结构复杂的损伤和裂纹扩展进行准确的捕捉和描述。同时该方法的本构模型中包含了损伤的定义,具有无须引入其他失效判据即可从物理层面揭示结构损伤断裂等演化过程的优点。

本文基于“键”基复合材料近场动力学冲击模型,采用“键”基复合材料层合板和加筋板的冲击损伤计算程序,综合考虑破片的速度和几何形状、层合板的铺层方式、加筋板的筋条尺寸以及破片相对于筋条的冲击位置的影响,分析高速破片冲击下的用于舰船防护的复合材料层合板和加筋板结构的损伤形式,以及破片贯穿结构后的剩余速度情况。

1 近场动力学(PD)理论

近场动力学(Peridynamics, PD)^[4]结合了分子动力学、无网格方法和有限元方法的优点,区别于传统局部模型的位移偏微分方程求解模式,采用基于非局部思想的直接积分形式的运动方程,避免了基于连续性假设建模和求解空间微分方程的传统宏观方法在不连续问题时的奇异性,所以特别适用于模拟材料的损伤和断裂过程。

由动量守恒和力守恒关系,经典连续介质力学中某一材料点 r 处存在以下平衡方程:

$$\rho(\mathbf{x})\ddot{\mathbf{u}}(\mathbf{r},t) = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{b}(\mathbf{r},t) \quad (1)$$

式中: $\rho(\mathbf{r})$, $\mathbf{b}(\mathbf{r},t)$, $\boldsymbol{\sigma}$ 和 $\ddot{\mathbf{u}}(\mathbf{r},t)$ 分别为材料在点 \mathbf{x} 处密度、体积力、应力和加速度。对于不连续结构处,例如裂纹处,应力的空间偏导数并不存在。Silling^[4]将其中的求导项变换为积分项,这使平衡方程同样适用于不连续结构,此时平衡方程为:

$$\rho(\mathbf{x})\ddot{\mathbf{u}}(\mathbf{r},t) = \int_{H_r} \mathbf{f}(\mathbf{u}(\mathbf{r}',t) - \mathbf{u}(\mathbf{r},t), \mathbf{r}' - \mathbf{r}) dV_{r'} + \mathbf{b}(\mathbf{r},t) \quad (2)$$

式中: H_r 称为近场域,半径为 δ , V_r 代表材料点 r' 的体积,矢量函数 $\mathbf{f}(\mathbf{u}(\mathbf{r}',t) - \mathbf{u}(\mathbf{r},t), \mathbf{r}' - \mathbf{r})$ 为近场力表达式,该函数与两物质点之间的初始相对位置矢量 $\mathbf{r}' - \mathbf{r}$ 及相对位移矢量 $\mathbf{u}(\mathbf{r}',t) - \mathbf{u}(\mathbf{r},t)$ 相关,可表示为图1。

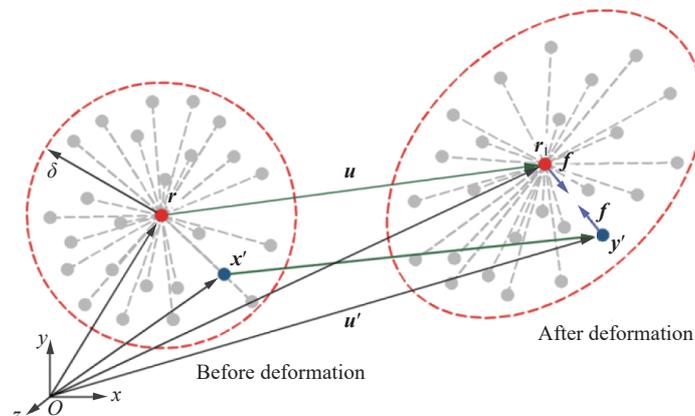


图1 变形前后物质点间对点力函数

Fig. 1 Pairwise response function before and after deformation

在外部载荷的作用下,任意物质点 \mathbf{x} 与近场域以内的其他物质点之间存在力的相互作用,物质点 \mathbf{x} 与 \mathbf{x}' 间的伸长率可以表示为:

$$s = \frac{|\mathbf{r}'_1 - \mathbf{r}_1| - |\mathbf{r}' - \mathbf{r}|}{|\mathbf{r}' - \mathbf{r}|} \quad (3)$$

式中: \mathbf{r}_1 、 \mathbf{r}'_1 为物质点 \mathbf{r} 、 \mathbf{r}' 变形后的坐标。

在力函数中引入标量函数 μ 来描述材料的损伤破坏,即认为物质点之间键的伸长率超过预先设定的临界伸长率 s_0 时,将发生不可逆转的断裂,键断裂后将不再承受力的作用。假定对点力函数与键伸长率成正比,因此对点力函数可写为:

$$\mathbf{f}(\mathbf{u}' - \mathbf{u}, \mathbf{r}' - \mathbf{r}) = \mu(t, \boldsymbol{\xi}) c s \frac{\mathbf{r}'_1 - \mathbf{r}_1}{|\mathbf{r}'_1 - \mathbf{r}_1|} \quad (4)$$

式中: $\boldsymbol{\xi}$ 为材料点初始相对位置矢量; c 为与材料力学性能相关的参数,对于三维各向同性材料,根据能量相等可得到材料参数的表达式 $c = 18\kappa/(\pi\delta^4)$, 其中 κ 为材料体积模量; $\mu(t, \boldsymbol{\xi})$ 为与时间 t 和初始相对位置矢量 $\boldsymbol{\xi}$ 相关的标量函数,表达式为

$$\mu(t, \boldsymbol{\xi}) = \begin{cases} 1 & s(t', \boldsymbol{\xi}) < s_0, 0 \leq t' \leq t \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

根据文献 [5], 键的临界伸长率 s_0 用材料的断裂能 G_0 来表示:

$$s_0 = \sqrt{\frac{10G_0}{\pi c \delta^5}} = \sqrt{\frac{5G_0}{9\kappa\delta}} \quad (6)$$

近场域内键不断断裂并积累,将会导致宏观上的损伤,因此引入描述任意物质点 \mathbf{r} 近场域内损伤程度的标量函数:

$$\varphi(\mathbf{r}, t) = 1 - \int_{H_r} \mu(t, \boldsymbol{\xi}) dV_r \bigg/ \int_{H_r} dV_r \quad (7)$$

该标量函数描述了物质点局部损伤的程度,取值范围在 $0 \sim 1$ 之间, 0 表示近场域内未发生损伤, 1 表示中心物质点与近场域内的所有其他物质点之间的键全部发生断裂。

2 复合材料 PD 理论

对于纤维增强复合材料,在 PD 理论中也必须考虑到其方向相关性。如图 2 所示, j 代表在材料点 i 的近场内与 x 轴成 θ 角的纤维方向上相互作用的材料点。相似的, j' 代表在材料点 i 近场内的所有材料点,包括纤维方向和垂直于纤维方向。用 ϕ 来表示材料点 i 近场内相关的材料点与 x_1 轴所成的角度, H 表示半径为 δ 、厚度为 h 的近场域积分区域。

在简单剪切、轴向拉伸等载荷作用下,根据 PD 理论得到的应变能密度 W^{PD} 与通过经典力学理论得到的应变能密度 W^{CM} 应当相等,从而可以求得层内纤维键常数 c_f 和基体键常数 c_m 分别为:

$$c_f = \frac{2E_1(E_1 - E_2)}{\left(E_1 - \frac{1}{9}E_2\right) \left(\sum_{j=1}^J \xi_{ji} V_j\right)} \quad (8)$$

$$c_m = \frac{8E_1 E_2}{\left(E_1 - \frac{1}{9}E_2\right) \pi e \delta^3} \quad (9)$$

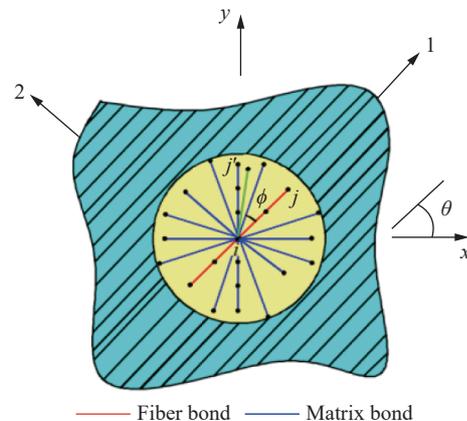


图 2 单层板的纤维键与基体键示意图
Fig. 2 PD bonds of fiber and matrix in a lamina

式中: J 为近场域内包含的纤维键的数量; E_1 、 E_2 分别为复合材料在纤维和垂直纤维方向上的弹性模量, e 代表复合材料层的厚度。

层间键常数 c_N 和剪切键常数 c_S 也可以使用工程材料参数来表示, 即:

$$c_N = \frac{E_m}{e\bar{V}} \tag{10}$$

$$c_S = \frac{2G_m}{\pi t} \frac{1}{\left[\delta^2 + e^2 \ln\left(\frac{e^2}{\delta^2 + e^2}\right) \right]} \tag{11}$$

式中: E_m 为基体的弹性模量, G_m 为基体的剪切模量, \bar{V} 代表层间材料点的体积。

本文采用胡祎乐等^[6]提出的弹性模量方法求解面内键的临界伸长参数。该方法认为模型在拉伸载荷作用下, “键” 伸长率达到临界伸长率时, “键” 就会立刻破坏, 从而完全失去承载力; 而受到压缩力时, 纤维键也会立刻破坏, 完全失去承载力, 基体键虽然也会发生一定破坏, 但是仍能承受屈服时一半的载荷大小。图 3 给出了键力 f 随伸长率 s 的变化。图中, s_{ft} 和 s_{fc} 分别为纤维键在拉伸和压缩情况下的临界伸长率; s_{mt} 和 s_{mc} 分别为基体键在拉伸和压缩情况下的临界伸长率; X_t 、 X_c 、 Y_t 、 Y_c 分别为复合材料在纤维和垂直于纤维方向上的拉伸及压缩强度。对于纤维键, 有 $s_{ft} = X_t/E_1 (s \geq 0)$, $s_{fc} = X_c/E_1 (s < 0)$; 对于基体键, 有 $s_{mt} = Y_t/E_2 (s \geq 0)$, $s_{mc} = Y_c/E_2 (s < 0)$ 。

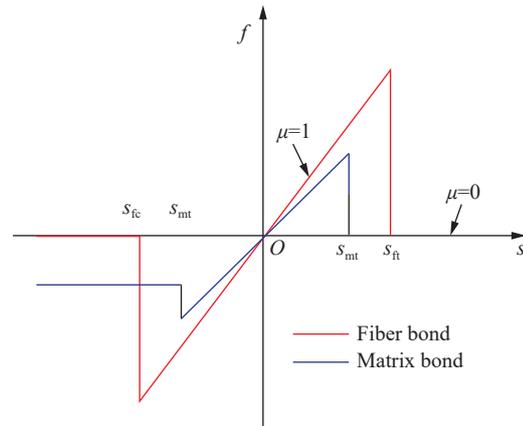


图 3 键力 f 随伸长率 s 的变化

Fig. 3 Relationship of elongation with bond force f

层间键的临界参数 s_N 通常均采用以下方法计算: 材料的 I 型张开型断裂的临界能量即为第 k 层的材料点 r 和第 $(k+1)$ 层材料点 r' 之间层间键破坏所需要的能量, 该临界能量的释放率 G_I 可以表示为

$$G_I = e \left(\frac{c_N s_N^2 e}{2} \right) \bar{V} \tag{12}$$

结合式 (10), 可以得到层间键对应的临界伸长率的表达式

$$s_N = \sqrt{\frac{2G_I}{eE_m}} \tag{13}$$

不同于层间键, 位于第 k 层的材料点 r 处近场域内剪切键数目较多, 并且剪切键的破坏宏观上表现为 II 型滑移型断裂模式, 因此所有剪切键破坏需要克服 II 型断裂模式的临界能量释放率 G_{II} , 故

$$G_{II} = e \int_H \frac{c_S \phi_C^2}{2} dH \tag{14}$$

式中: ϕ_C 即为剪切键的临界参数, 亦称为临界剪切角。将积分区域进行分解可以得到

$$G_{II} = e \left[e \frac{c_S \phi_C^2}{2} \int_0^\delta l dl \left(\int_0^{2\pi} d\phi \right) \right] \tag{15}$$

式中: l 为极坐标系下的径向坐标。

由积分结果可以得到:

$$\phi_C = \sqrt{\frac{G_{II}}{eG_m}} \tag{16}$$

II 型断裂模式的临界能量释放率 G_{II} 往往取决于环氧树脂后固化温度, 因此通常认为 G_{II} 数值上等于 $3G_I/4$, 此时 $\phi_C = s_N$ 。

3 复合材料层合板破片冲击模拟

针对层合板在高速破片冲击作用下的损伤模式及裂纹扩展过程进行数值模拟, 研究了高速破片的速度变化及板的铺层方式等因素。

3.1 破片冲击速度的影响

本节对 0.5~2 km 间不同速度的下的高速球形刚性破片对于层合板靶体的穿透问题进行了数值模拟。如图 4 所示, 冲击板的几何尺寸为 300 mm×300 mm×300 mm, 边界条件为四面固支, 球形破片半径 $r=8$ mm, 密度为 7 850 kg/m³。层合板的材料基本参数如表 1 所示^[7], 层合板采用的铺层方式为 [45/0/-45/0/90]_{2S}, 单层厚度为 1 mm, 其中: “[]” 内的数字表示铺层方向的排列顺序, 这里的排列即以 45°、0°、-45°、0°、90° 的纤维方向逐层铺放, 下标 2 表示按此顺序再重复铺放一次 (即共 2 次), 下标 S 表示再在此基础上按之前顺序的倒序重复铺放。在 PD 模型中沿板的长度和宽度方向均设置 300 个材料点, 粒子间距 $\Delta r = 1$ mm, 材料点体积 $\Delta V = 1.0 \times 10^{-3}$ mm³, 近场半径 $\delta = 3.015\Delta x$, 取时间步 $\Delta t = 0.02$ μ s, 满足稳定性要求。

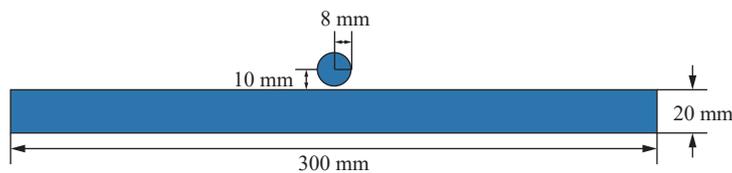


图 4 破片及板几何形状示意图

Fig. 4 The geometric dimensions of the fragment and the plate

表 1 CCF300/10128H 材料属性

Table 1 Thematerial properties of CCF300/10128H

E_1 /GPa	E_2 /GPa	E_3 /GPa	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}	G_{12} /GPa	G_{13} /GPa	G_{23} /GPa
125	7.6	7.6	0.34	0.34	0.46	4.32	4.32	3.23
X_t /MPa	X_c /MPa	Y_t /MPa	Y_c /MPa	S_{12}	S_{23}	ρ /(kg·m ⁻³)		
2 200	1 100	50	200	60	60	1 678		

注: E_3 为沿复合材料层合板堆叠方向的弹性模量, ν_{12} 、 ν_{13} 、 ν_{23} 分别为对应 E_1 、 E_2 、 E_3 方向上的泊松比, G_{12} 、 G_{13} 、 G_{23} 为对应 E_1 、 E_2 、 E_3 方向上的剪切模量, S_{12} 、 S_{23} 分别为面内和层间的剪切强度, ρ 为复合材料板密度。

从结果看出, 高速破片冲击作用下层合板的损伤形式以基体损伤为主, 图 5 和图 6 分别给出层合板上、下表面在速度为 0.5、1、1.5、2 km/s 破片冲击下的损伤模式。复合材料层合板在受到高速破片冲击时会发生侵彻和穿透现象。整体而言, 层合板上下表面均在冲击中心位置的损伤程度最大, 损伤由中心位置向周边逐渐扩展。对比不同速度下的损伤结果可以看出: 当破片速度在 1 km/s 以下时, 上表面损伤主要沿 45° 方向扩展, 下表面损伤主要沿 -45° 方向扩展; 当破片速度大于 1 km/s 后, 上表面损伤主要沿 -45° 方向扩展, 下表面损伤要沿 $\pm 45^\circ$ 方向交叉扩展。总体而言, 随着破片速度的增加, 层合板上下表面的裂纹长度均逐渐减小, 损伤逐渐向冲击点位置集中, 损伤扩展不再具有明显单一的方向性, 而是沿着多方向多分叉扩展。而且随着破片速度增加, 层合板的上表面和下表面的损坏呈现先增加然后减小的趋势。

不同初始速度的球形破片的速度衰减情况如图 7 所示, 可以看出破片冲击层合板的过程大致可以分为 3 个阶段: (1) 破片与层合板接触前; (2) 破片进入层合板; (3) 破片贯穿层合板。以速度 2 km/s 的冲击过程为例, 破片在 $t_1 = 1.0$ μ s 时开始与层合板发生接触, 在 $t_2 = 16$ μ s 时完全贯穿层合板, $t_1 \sim t_2$ 时间段破片进入并侵彻层合板, 该阶段破片速度呈近似线性降低直至破片完全贯穿层合板, 在 t_2 时刻之后, 破片

完全贯穿层合板, 速度趋于稳定。破片的剩余速度情况如表 2 所示, 破片初始速度越大, 破片穿透层合板所损失的速度值就越大, 层合板对破片的能量耗散也就越大。结合图 8 的曲线可以看出, 随着破片初始速度的增加, 层合板能量耗散曲线的斜率值逐渐增加, 表面能量损耗的梯度也随着破片初始速度的增加而增加。

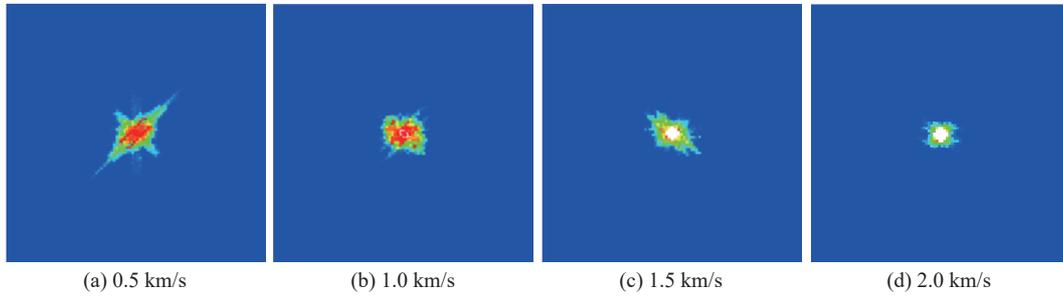


图 5 速度不同的破片对应的层合板的上表面基体损伤情况图

Fig. 5 Damage of the upper surface of the laminate corresponding to the fragments with different velocities

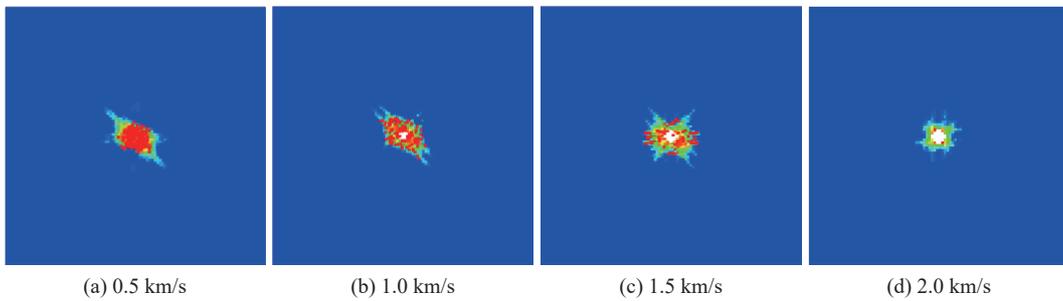


图 6 速度不同的破片对应的层合板的下表面基体损伤情况图

Fig. 6 Damage of the lower surface of the laminate corresponding to the fragments with different velocities

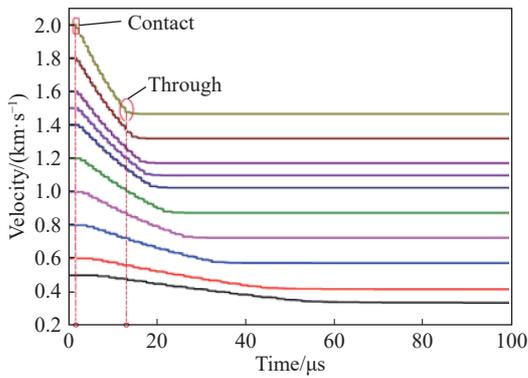


图 7 破片的速度衰减

Fig. 7 Attenuation of fragments' velocity

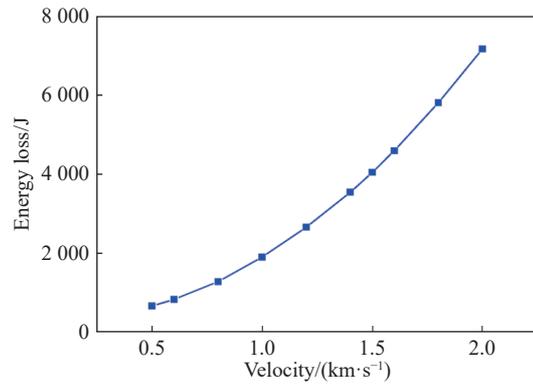


图 8 层合板能量耗散示意图

Fig. 8 Energy dissipation of laminates

表 2 初始速度不同的破片剩余速度大小

Table 2 Residual velocities of fragments with different initial velocities

编号	初始速度/(km·s ⁻¹)	剩余速度/(km·s ⁻¹)	损失速度/(km·s ⁻¹)	耗散能量/J
1	0.5	0.336	0.164	673.1
2	1.0	0.724	0.276	1 906.8
3	1.5	1.098	0.402	4 040.1
4	2.0	1.465	0.535	7 144.9

3.2 铺层方式的影响

不同的铺设角度和铺层顺序对复合材料层合板的刚度具有显著的影响, 进而会影响层合板在冲击作用下的损伤破坏模式。本节对球状破片冲击作用下的 7 种不同铺层形式的层合板响应情况进行了模拟。破片速度为 $v = 0.8 \text{ km/s}$, 层合板以及球形破片的几何尺寸和材料参数与 3.1 节中相同。

由图 9~图 10 可以看出, 在破片冲击作用下各铺层角度相同的层合板, 其损伤扩展的方向具有明显的单一的方向性, 其中 $[0]_{20}$ 和 $[90]_{20}$ 铺层的层合板的上下表面的损伤分别沿着 0° 和 90° 方向扩展, $[45]_{20}$ 铺层的层合板的上表面的损伤沿 45° 方向扩展, 下表面沿 -45° 方向扩展, $[-45]_{20}$ 铺层的上下表面的损伤扩展方向与 $[45]_{20}$ 相反。各层铺设角度相同的层合板的损伤区域均关于纤维方向和垂直于纤维方向的中心轴

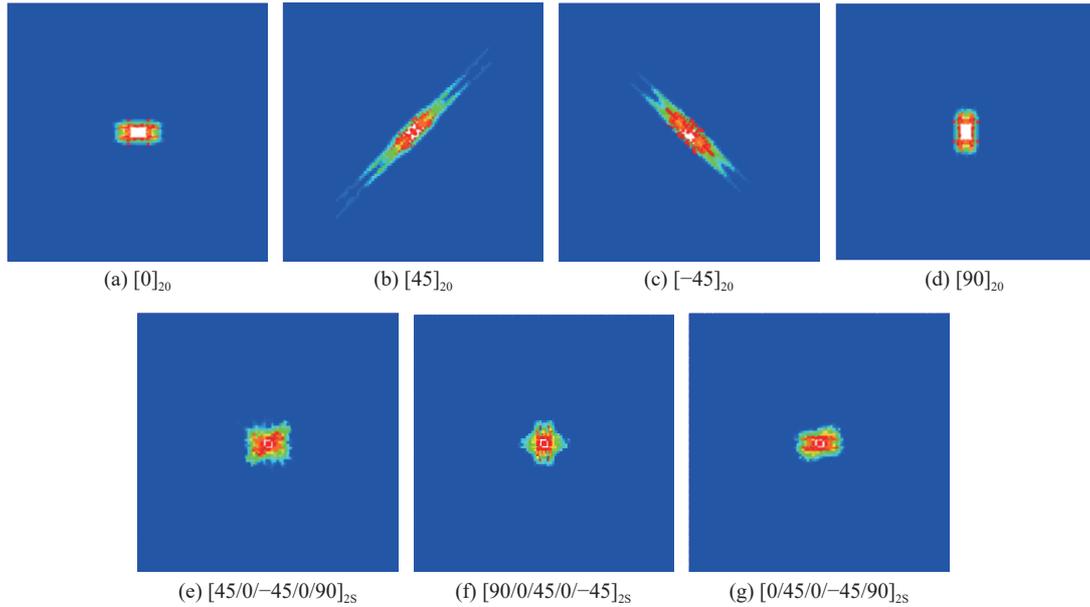


图 9 不同铺层的层合板的上表面基体损伤

Fig. 9 Damage of the upper surface of laminates with different laminates

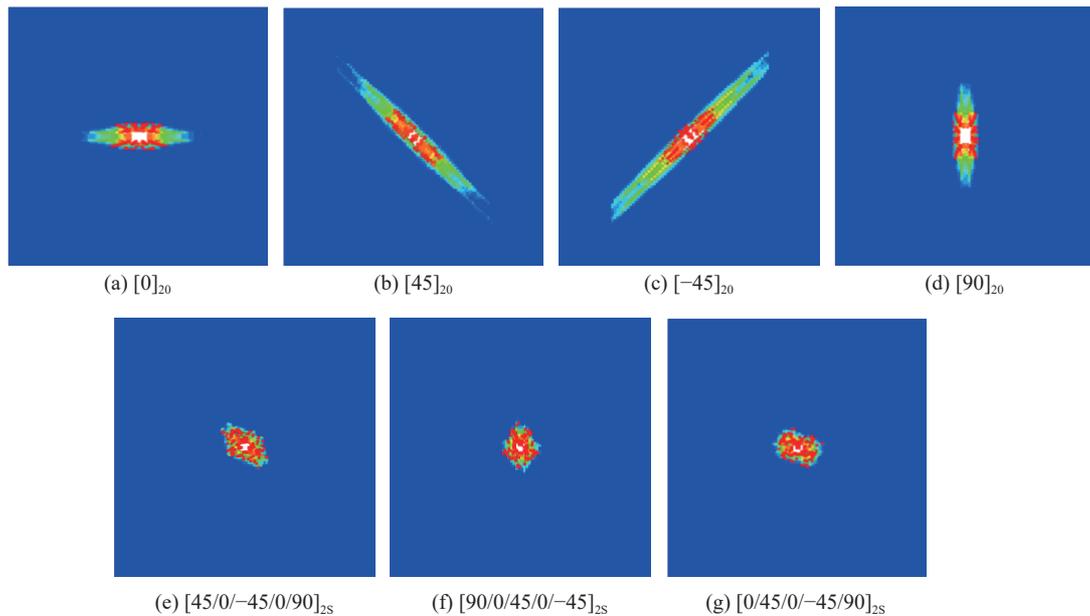


图 10 不同铺层的层合板的下表面基体损伤

Fig. 10 Damage of the lower surface of laminates with different laminates

严格对称。对比发现,相比于铺设角度相同的层合板,铺设角度不同时层合板的损伤区域的大小及损伤程度存在明显的差异, $[45]_{20}$ 和 $[-45]_{20}$ 的损伤区域的大小及损伤程度明显大于 $[0]_{20}$ 和 $[90]_{20}$ 铺层,说明了层合板单层纤维的铺设方向对其冲击损伤具有明显的影响,一般来说, 0° 和 90° 方向的纤维铺设方式的抗冲击性能优于 $\pm 45^\circ$ 方向的铺设方式。

对比三种铺设顺序不同的层合板,其损伤扩展的方向不再具有明显的单一的方向性,损伤较为均匀地向四周扩展。对比发现,铺设角度不同的层合板的整体损伤区域的大小和损伤程度无明显差异,说明改变层合板各层纤维的铺设角度的组合顺序,对于其结构的抗冲击性能的影响不大。此外,铺设角度不同的层合板的损伤情况一般小于单向铺层的层合板,即多向铺层的层合板的防护性能更优。

图 11 给出了不同铺层的层合板对应的破片冲击的速度衰减情况, A~G 分别对应 $[0]_{20}$ 、 $[90]_{20}$ 、 $[45]_{20}$ 、 $[-45]_{20}$ 、 $[45/0/-45/0/90]_{2S}$ 、 $[90/0/45/0/-45]_{2S}$ 和 $[0/45/0/-45/90]_{2S}$ 等 7 种铺层的结果。表 3 为破片最终的剩余速度大小,从速度衰减曲线和最终剩余速度的大小可以发现,7 种类型层合板的对应的破片速度衰减趋势基本一致,剩余速度的差异也较小。

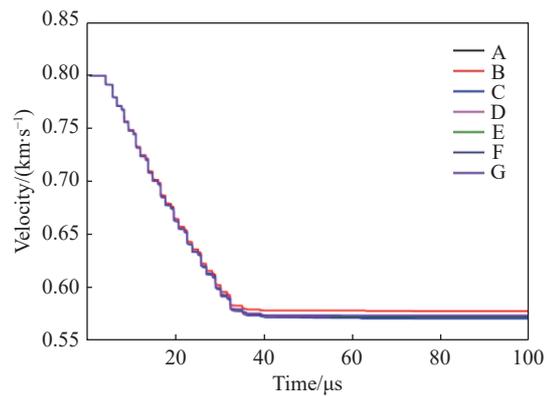


图 11 不同铺层层合板对应的破片速度衰减示意图

Fig. 11 Velocity attenuation of fragments with different layup configuration

表 3 不同铺层的层合板对应的破片的剩余速度

Table 3 Residual velocity of fragments with different layup configuration

铺层	$[0]_{20}$	$[45]_{20}$	$[-45]_{20}$	$[90]_{20}$	$[45/0/-45/0/90]_{2S}$	$[90/0/45/0/-45]_{2S}$	$[0/45/0/-45/90]_{2S}$
剩余速度/(m·s ⁻¹)	574.69	578.06	577.93	574.76	573.01	573.69	573.84

4 复合材料加筋板的破片冲击模拟

加筋板由层合板(蒙皮)和加筋桁条组成,加筋板结构通常以增加少量的质量为代价,获得比层合板结构更为优良的力学特性。本节采用 PD 方法对加筋板在高速破片冲击作用下的损伤模式及裂纹扩展过程进行数值模拟,分析加强筋的尺寸及冲击破片相对于筋的位置等因素对损伤破坏模式以及破片剩余速度的影响。

4.1 加强筋的尺寸的影响

本节选取单向加筋板进行模拟计算,板的尺寸为 $300\text{ mm} \times 300\text{ mm}$,筋条为“I”型,尺寸选取 Type A: $25\text{ mm} \times 12.5\text{ mm}$ ($a:b = 1:0.5$); Type B: $20\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ ($a:b = 1:0.75$); Type C: $17.5\text{ mm} \times 17.5\text{ mm}$ ($a:b = 1:1$); Type D: $15\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ ($a:b = 1:1.33$); Type E: $12.5\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ ($a:b = 1:2$); 其中 a 和 b 分别表示筋条的宽度和高度。单层板厚度均为 1 mm ,铺层顺序为 $[0/90/0/90/0]_{2S}$,共 20 层,材料参数与 3.1 节中相同,铺设方式如图 12 所示。冲击破片选取半径 $r = 8\text{ mm}$ 的球状破片,冲击位置为加筋板正中央。数值模型中板长度和宽度方向均设置 300 个材料点,粒子间距 $\Delta x = 1\text{ mm}$,材料点体积 $\Delta V = 1 \times 10^{-3}\text{ mm}^3$,近场半径 $\delta = 3.015\Delta x$,时间步 $\Delta t = 0.02\text{ }\mu\text{s}$ 。

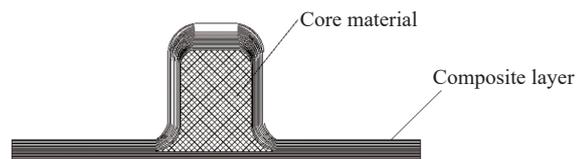


图 12 加筋板侧视图

Fig. 12 Side view of stiffened plate

图 13~图 15 给出了不同加筋板的基体损

伤情况,从图中可以看出, Type A 板和 Type B 板的上下表面的损伤形式类似,其上表面损伤区域近似为水平方向较宽,垂直方向较窄的“十字架”形,下表面损伤区域近似为水平的中部被筋条隔断的“梭”形,其中 Type B 板的损伤面积略大于 Type A 板; Type C~E 板的损伤形式类似,上表面损伤区域近似为“井”字形,下表面损伤区域近似上下等长的中部被筋条隔断的“二”字形,其中 Type C 板的损伤面积最大, Type E 板的损伤面积最小。从上述分析可以看出,当筋条的宽度大于高度,即 $(a : b < 1)$ 时与筋条的高度大于宽度,即 $(a : b \geq 1)$ 时加筋板的冲击损伤形式存在明显的差异,但总体而言,当筋条的横截面积一定时,加筋板的冲击损伤程度随着加筋板筋条的高度的增加而减小。

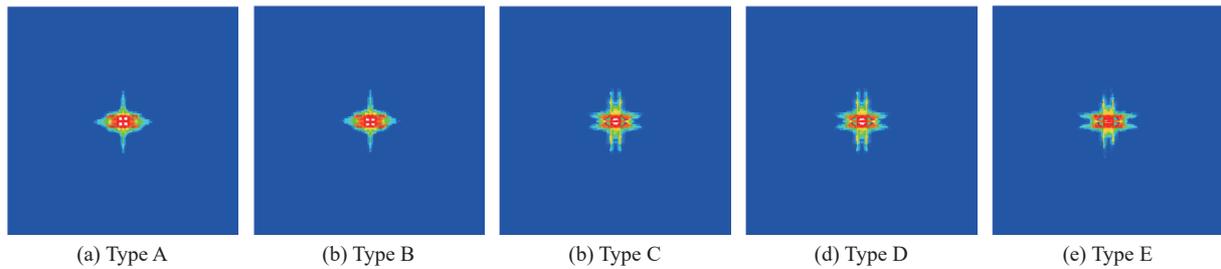


图 13 不同筋条尺寸的加筋板的上表面基体损伤图

Fig. 13 Damage of the upper surface of stiffened laminates with different stiffener sizes

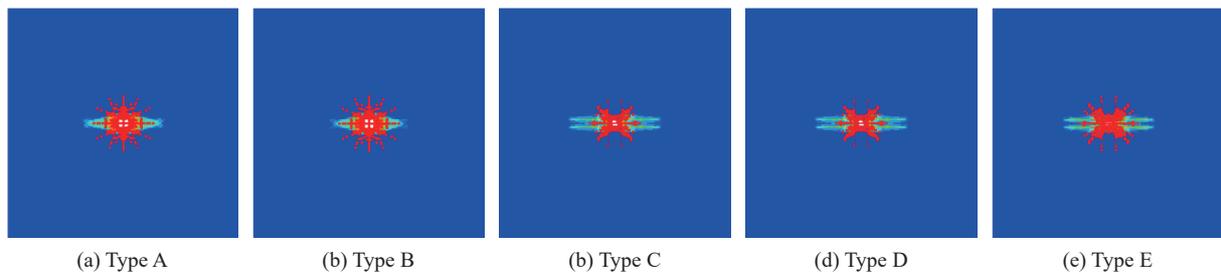


图 14 不同筋条尺寸的加筋板下表面基体损伤模式

Fig. 14 Damage of the lower surface of stiffened laminates with different stiffener sizes

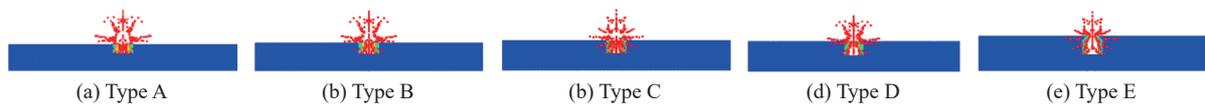


图 15 不同筋条尺寸的加筋板的基体损伤侧视图

Fig. 15 Side view of matrix damage of stiffened laminates with different stiffener sizes

对比同一加筋板上下表面的损伤情况,板上表面的损伤均沿 0° 和 90° 两个方向扩展,而板的下表面由于筋条的存在,损伤始终只沿 0° 方向扩展,即筋条的存在对于其布置方向的损伤扩展具有明显的限制作用。此外加筋板的筋条在破片冲击下会发生断裂,损伤由破口向两端都有一定的扩展。

图 16 给出了不同加筋板的破片速度衰减情况。从图中可以看出,加筋板的速度衰减率相同,但其各自的剩余速度却有明显的差异。一般而言,筋条宽高比值越小,即筋条高度越大,加筋板对破片能量的耗散效果越好,也就是说在不考

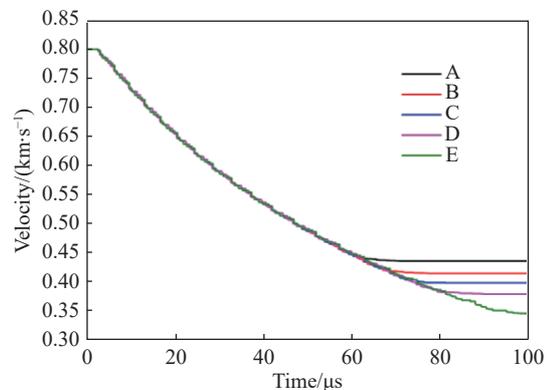


图 16 不同加筋板的破片速度衰减

Fig. 16 Velocity attenuation of fragments with different stiffeners

考虑加筋板质量增加时, 宽高比值越小其防护效果一般越好。

4.2 破片冲击位置的影响

本节针对破片相对筋条的相对位置的影响进行研究。选取研究对象为具有两根筋条的加筋板, 筋条尺寸为 12.5 mm×25 mm(宽×高), 选取三处具有代表性的位置进行探讨: a. 加筋板的中心位置, 点 A; b. 筋条侧边位置, 点 B; c. 筋条中心位置, 点 C(见图 17)。加筋板的材料属性、铺层顺序、PD 模型参数以及冲击破片的相关参数均与 3.1 节中相同。

如图 18 和图 19 所示, 破片冲击位置不同时, 加筋板破坏模式基本一致: 其中加筋板冲击点位置的损伤破坏程度最大, 上表面损伤区域呈现为沿着 0°和 90°方向扩展的“井”字形, 下表面损伤为沿 0°方向扩展的“二”字形, 损伤区域以破口为中心的水平和垂直轴有一定的对称性。观察冲击位置在 A 处的下表面的模拟结果可以发现, 当损伤扩展到了筋条所在位置时, 损伤的扩展趋势将受到限制。冲击点在 C 处时, 加筋板上破口的面积最小, A 和 B 处的破口面积近似。总体而言, 当破片的冲击位置越靠近筋条时, 加筋板的损伤区域的大小及损伤的程度越小, 冲击点在筋条位置时, 加筋板的损伤区域的大小及损伤的程度最小。

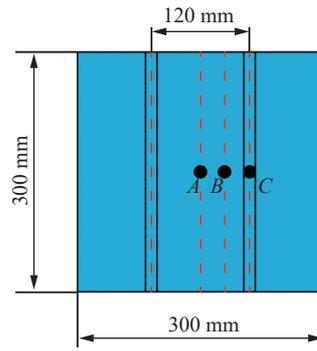


图 17 破片冲击位置分布图
Fig. 17 Different impact positions of fragments

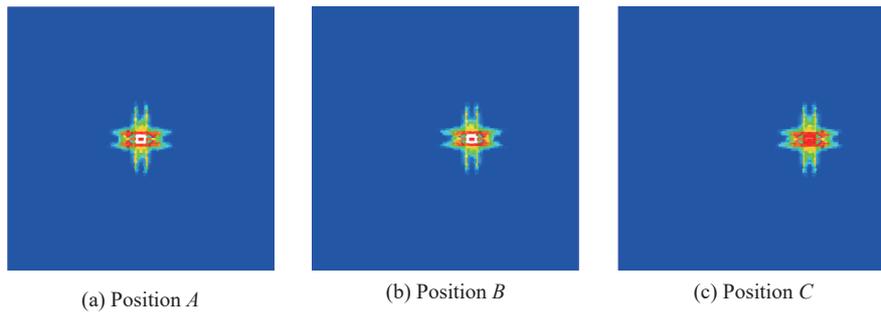


图 18 破片冲击位置不同时加筋板的上表面基体损伤情况图
Fig. 18 Damage of the upper surface of the stiffened laminates with different impact positions

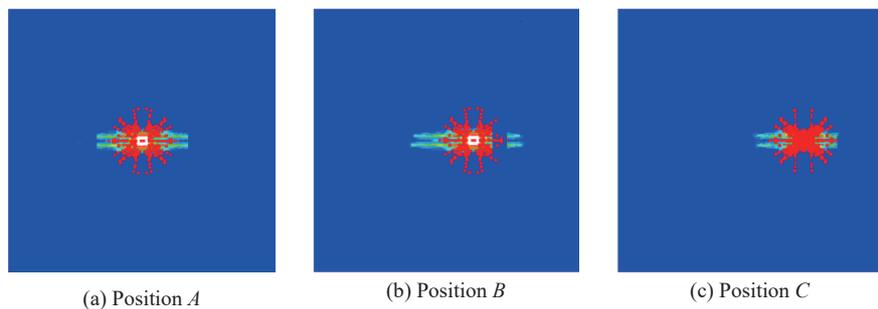


图 19 破片冲击位置不同时加筋板的下表面基体损伤情况图
Fig. 19 Damage of the lower surface of the stiffened laminates with different impact positions

5 结论

本文采用近场动力学方法模拟分析了高速破片冲击作用下的复合材料结构的损伤模式和规律。对于层合板考虑了破片的冲击速度和层合板的铺层方式对结构的损伤和剩余速度的影响; 对于加筋板结

构则考虑了筋条的几何尺寸和破片冲击点相对筋条的位置的影响, 得出如下结论:

(1) 高速破片冲击作用下, 层合板会发生侵彻和穿透现象, 层合板的损伤模式以基体损伤为主, 且随着破片冲击速度的增大, 板的上下表面的损伤区域呈现出一种先增大后减小的趋势; 在破片冲击速度较低时, 板上表面的损伤区域大于下表面, 并且在峰值点之后发生穿透效应。

(2) 高速破片冲击作用下, 层合板的损伤扩展的方向和纤维铺设方向有关, 对于纤维铺层方向相同的层合板而言, 其上下表面的损伤扩展方向一般与纤维方向相同; 而纤维铺层方向不同的层合板的损伤一般均匀地向四周扩展, 不具有明显单一的方向性, 其损伤程度一般小于纤维铺层方向相同的层合板。

(3) 加筋板通过增加少量质量可以获得比层合板更好的抗破片冲击性能, 且加筋板的筋条的尺寸和破片相对筋条的冲击位置对于加筋板的损伤具有明显的影响, 通常而言, 筋条的宽高比越小, 破片冲击点距离筋条的距离越近, 加筋板的损伤程度及面积越小。

参考文献:

- [1] 王晓强, 魏忠仁, 宫平, 等. 抗弹复合材料在舰船防护上的应用研究 [J]. *工程塑料应用*, 2014, 42(11): 143–146. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3539.2014.11.69.
WANG X Q, GUO Z R, GONG P, et al. Application research of bulletproof composites in warship protection [J]. *Engineering Plastics Application*, 2014, 42(11): 143–146. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3539.2014.11.69.
- [2] 杨光松. 损伤力学与复合材料损伤 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
- [3] DOLBOW J, BELYTCHKO T. Numerical integration of the Galerkin weak form in meshfree methods [J]. *Computational Mechanics*, 1999, 23(3): 219–230. DOI: 10.1007/s004660050403.
- [4] SILLING S A. Reformulation of elasticity theory for discontinuities and long-range forces [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2000, 48(1): 175–209. DOI: 10.1016/S0022-5096(99)00029-0.
- [5] SILLING SA, ASKARI E. A meshfree method based on the peridynamic model of solid mechanics [J]. *Computers and Structures*, 2005, 83(17): 1526–1535. DOI: 10.1016/j.compstruc.2004.11.026.
- [6] 胡祎乐, 余音, 汪海. 基于近场动力学的复合材料层压板建模和渐进损伤分析 [C] // 全国复合材料学术会议, 2012.
- [7] 万钺, 金平, 谭晓明, 等. 基于 ABAQUS 的复合材料低速冲击损伤分析 [J]. *装备环境工程*, 2014, 11(5): 38–42. DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2014.05.008.
WAN C, JIN P, TAN XM, et al. Analysis for the damage of composites under low-velocity impact based on ABAQUS [J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2014, 11(5): 38–42. DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2014.05.008.

(责任编辑 王小飞)