

DOI: 10.11883/bzycj-2021-0081

破片群作用下复合材料层合板 近场动力学损伤模拟*

陈志鹏, 马福临, 杨娜娜, 姚熊亮, 鞠金龙
(哈尔滨工程大学船舶工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 采用一种新兴的无网格法——近场动力学理论, 模拟复合材料结构在破片群载荷作用下的损伤情况。根据复合材料结构受到载荷的特性, 总结破片群冲击作用下复合材料结构损伤特性, 分析其破坏过程, 研究破片群增强效应, 并对破片速度、破片数量、破片群间距对侵彻能力增强效应的影响进行分析。结果表明: 层合板结构在高速破片群侵彻作用下损伤模式多样, 与破片数量、速度、间距相关; 破片数量的增加, 对破片群侵彻能力增强效应明显; 破片间距与破片群侵彻能力增强效应负相关, 破片间距减小, 破片群损伤效应提高; 破片速度直接决定穿透时间, 破片速度的提高使得穿透时间缩短, 应力波的叠加效应不足以影响破片群的侵彻能力。

关键词: 复合材料; 近场动力学; 破片群; 破片数量; 破片群间距

中图分类号: O382 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

Peridynamic damage simulation of composite structures subjected to fragment clusters

CHEN Zhipeng, MA Fulin, YANG Nana, YAO Xiongliang, JU Jinlong
(School of Ship Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, Heilongjiang, China)

Abstract: In recent years, as a hot area of computational mechanics, peridynamic has attracted the attention of researchers. The peridynamic theory attempts to unify the mathematical models of continuum, cracks, and particles into one framework, which is essentially a mechanical model independent of the scope of continuum mechanics. The governing equation of peridynamic adopts the spatial integral form, and the continuity of the field function is no longer required. Compared with the traditional methods based on continuum mechanics, this method has a great advantage in dealing with discontinuity problems, such as crack propagation and other fracture problems. In this paper, the peridynamic method was used to study the damage characteristics of composite structures under the impact of a fragment group and to analyze the enhancement effect on the penetration ability during the destruction process. Through a self-programmed peridynamic model, the penetration process of a fragment group into a composite laminate was simulated to explore the influence of the fragment velocity, fragment number and fragment spacing on the penetration ability enhancement. The results show that the damage modes of the laminate structure under the action of high-velocity fragment group penetration are diverse and related to the number, velocity and spacing of the fragments. The increase in the fragment number has a significant effect on the penetration ability of the fragments. The fragment spacing is negatively correlated with the enhancement effect. When the fragment spacing decreases, the damage effect increases. The fragment velocity directly determines the penetration time, and the increase in the fragment velocity decreases the penetration time. The superimposition effect of the stress waves is not enough to affect the penetration ability of the fragment group.

* 收稿日期: 2021-03-05; 修回日期: 2021-10-28

基金项目: 国家自然科学基金(51879048, 51809054)

第一作者: 陈志鹏(1994—), 男, 博士研究生, chenzhipng2012@163.com

通信作者: 杨娜娜(1980—), 女, 博士, 教授, yangnana@hrbeu.edu.cn

Keywords: composites; peridynamics; fragment clusters; fragment number; fragment spacing

反舰导弹的战斗部在爆炸后形成空爆冲击波以及破片群, 舰船上层建筑防护结构不仅会受到大量破片群以及冲击波的耦合伤害, 也会出现破片群单独侵彻作用一定时间之后冲击波再开始作用^[1]。破片群密集侵彻结构的破坏机理复杂多样, 而纤维增强复合材料因自身力学性能复杂, 其破坏机理的分析较金属靶板的破坏机理分析更困难^[2]。由于复合材料比强度与比模量较高, 应力波在复合材料结构中的传播速度高于在金属结构中的传播速度, 将更快地产生应力波叠加效应, 从而产生更广泛的破坏范围^[3]。在应力波的叠加效应下, 靶板的被撞击区域内能量密度与能量持续时间大幅增加, 导致靶板在破片侵彻过程的抵抗能力大幅下降, 破片的侵彻与穿透能力大幅提高, 产生侵彻能力增强效应^[4]。

目前开展的实验主要集中于单个破片的侵彻作用, 对多破片的实验研究较少。主要是因为开展复合材料破片侵彻的实验研究比较困难, 尤其是多破片的侵彻实验, 难点在于无法精确控制破片弹道轨迹和冲击速度。本文中, 将从数值研究角度对复合材料破片群侵彻作用进行定量研究。针对脆性材料毁伤问题, 包括裂纹扩张、分层损伤和高速侵彻等不连续问题时, 采用有限元方法等传统方法仍具有局限性, 为此, Silling^[5]于 2000 年提出了近场动力学理论(peridynamic, PD), 作为一种基于非局部作用的新兴粒子法, 近 20 年受到了广泛关注, 尤其是在解决结构不连续性问题上有更好的应用前景。

本文中, 基于键的复合材料近场动力学冲击模型, 对破片群侵彻作用下纤维增强复合材料结构的损伤进行研究, 分析复合材料结构破坏过程及损伤特性, 探讨破片群的增强效应, 并对破片速度、破片数量和破片群间距对侵彻能力增强效应的影响进行总结。

1 PD 基本理论

在近场动力学方法中, 物质点 x_i 的作用范围由近场半径 δ 定义, 称为近场范围。近场范围内的所有物质点称为物质点 x_i 的近场域 H_x , 在近场域范围 δ 之外的粒子认为不与物质点 x_i 产生相互作用力。物质点 x_i 在其近场域内物质点 x_j 的互相作用下产生变形, 物质点 x_i 与 x_j 分别产生位移 u_i 和 u_j , 因此, 物质点 x_i 与 x_j 之间的伸长率可以定义为:

$$s_{ij} = \frac{|x_i + u_i - x_j - u_j| - |x_i - x_j|}{|x_i - x_j|} \quad (1)$$

Silling^[5]最早提出将物质点之间作用力以特殊的力矢量作为力密度函数的方法, 以键表示这种成对相互作用的力矢量 f 。为简化表示, 将物质点的位移向量与相对位置向量分别表示为 $\eta = u(x', t) - u(x, t)$ 和 $\xi = x' - x$, 则 $\eta + \xi$ 为变形后的两相对作用点的相对位置向量, 得到的运动方程:

$$\rho(x)\ddot{u}(x, t) = \int_H f(u' - u, x' - x, t) dH + b(x, t) \quad (2)$$

式中: $f(u' - u, x' - x, t)$ 为力密度矢量, 它定义为物质点 x' 施加在物质点 x 上的单位体积平方的力矢; $b(x, t)$ 为体密度矢量。

最初的 PD 基于键模型以微弹性材料为例建立, 这种键可以类比为一种机械弹簧, 具有与之相似的性质:

- (1) 物质点相互作用近场力 f 与物质点之间键的伸长率 s 呈相关性, 定义作用力 f 的绝对值与伸长率 s 的比值为弹簧参数 c 。
- (2) 当键的伸长率超过临界值 s_0 时, 认为键已经断裂, 即物质点之间的作用力消失且不可恢复。
- (3) 键在受压的情况下不会断裂, 伸长率超过临界值后仍具有一定承载能力。

因此, 由以上的假设可以将 PD 物质点本构力函数写为:

$$f(\eta, \xi) = (c_1 s - c_2 T) \frac{\eta + \xi}{|\eta + \xi|} \quad (3)$$

式中: T 为成对作用物质点相对于环境温度的变化率平均值, 伸长率 s 定义按照式 (1) 中的形式。对于各向同性材料而言, 式 (3) 中的参数 c_1 与 c_2 可以通过计算各向同性材料均匀膨胀下的理论均质物体能量密度确定, 物体同时也受到温度变化的影响。将 PD 和传统连续介质力学的能量密度等同 $c_1=c=\frac{18K}{\pi\delta^4}$, $c_2=c\alpha$, 可以推导出 c_1 与 c_2 的值, 式中 K 为体积模量, α 为材料的热膨胀系数。

近场动力学中物质点的局部损伤定义为其近场域内失效的相互作用点数量与初始总数的加权比例, 局部损伤的表达式可以写为:

$$D(\mathbf{x}, t) = 1 - \frac{\int_H \mu(t, \xi) dV'}{\int_H dV'} \quad (4)$$

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

式 (4) 中局部损伤 D 的变化范围为 $0 \sim 1$: 损伤值 $D=1$, 代表物质点与其近场域内所有点的相互作用力全部终止, 该物质点完全破坏失效; 而损伤值 $D=0$ 则表示该物质点近场域内的相互作用力保持完好。物质点的局部损伤可表征物体内部可能产生的裂纹形式, 物体中一系列微小裂纹随着外力作用而连接在一起, 最终形成了宏观上的裂纹。

2 复合材料层合板损伤模式与破坏过程

2.1 破片群侵彻模型

层合板模型几何尺寸为 $200 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 16 \text{ mm}$, 采用的铺层为 $[45^\circ/0^\circ/-45^\circ/90^\circ]_{2s}$, 每一层厚度为 1 mm , 边界条件为四周固支, 具体材料参数如表 1 所示。本文中, 采用自行开发的近场动力学程序对复合材料层合板进行建模, 模型的离散物质点的宽度 $\Delta x=1 \text{ mm}$, 长度方向上设置 200 个物质点, 宽度方向上设置 100 个物质点, 厚度方向设置 16 个物质点, 可得物质点体积 $V=1.0 \text{ mm}^3$; 近场半径 $\delta=3.015\Delta x$, 时间步大小取为 $\Delta t=2 \times 10^{-8} \text{ s}$, 其中近场半径和时间步长已通过验算满足模型计算稳定性要求。

表 1 层合板材料性能参数
Table 1 Material properties of the laminate

参数	含义	数值	单位
E_1	x 方向弹性模量	125	GPa
E_2	y 方向弹性模量	7.6	GPa
E_3	z 方向弹性模量	7.6	GPa
ν_{12}	面内泊松比	0.344	
ν_{13}	面外泊松比	0.344	
ν_{23}	面外泊松比	0.46	
G_{12}	xy 平面剪切模量	4.32	GPa
G_{13}	xz 平面剪切模量	4.32	GPa
G_{23}	yz 平面剪切模量	3.23	GPa
ρ	密度	1678	kg/m^3
X_t	纵向拉伸强度	2200	MPa
X_c	纵向压缩强度	1100	MPa
Y_t	横向拉伸强度	50	MPa
Y_c	横向压缩强度	200	MPa

基于上述模型, 本文中研究破片数量、破片间距和破片速度对于板的损伤模式的影响效应^[6]。设定破片间距 $S=1\sim 2\text{ mm}$, 破片速度 $v=200\sim 1\ 500\text{ m/s}$, 破片的数量 $N=2\sim 9$, 以研究破片数量在侵彻作用中的影响效应, 破片的分布形式如图 1~2 所示。本文中采用球形破片, 破片定义为刚性体, 半径为 8 mm , 密度为 $7\ 850\text{ kg/m}^3$ 。

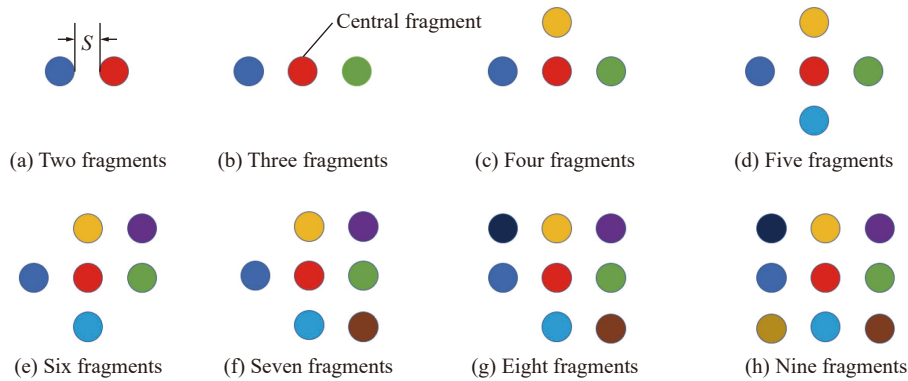


图 1 不同数量破片群排列示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the arrangement of fragment groups with different numbers

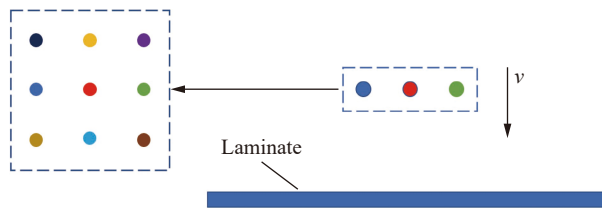


图 2 破片群冲击工况示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the impact condition of the fragment group

2.2 损伤模式

根据近场动力学理论对于物质点损伤 D 的定义, 物质点的损伤情况可以由一个取值 $[0,1]$ 的区间表示, $D=0$ 表示物质点未损伤, $D=1$ 表示物质点与其近场域内的物质点对点力全部消失。为在后处理中可以直观表达模型的损伤情况, 用色条表示材料在该损伤模式下的损伤情况, 如图 3 所示。



图 3 模型损伤程度

Fig. 3 Damage degree of the model

破片群的侵彻破坏模式与破片间距、速度以及破片数量有关^[7]。由表 2 可知, 当破片群间距较小 ($S=1\text{ mm}$) 和破片速度较低 ($v=300\text{ m/s}$) 时, 破片群侵彻较慢, 板在初期形成鼓包变形, 随后逐渐在迎弹面形成大变形和基体损伤, 背弹面为纤维拉伸破坏。当速度较高时 ($v=800\text{ m/s}$), 破坏模式为集团冲塞纤维层拉伸破坏, 迎弹面沿面内纤维方向发生基体损伤与剪切损伤, 在一定范围内产生变形, 背弹面主要损伤表现为剪切损伤, 损伤范围相对迎弹面更广。当破片速度达到高速时 ($v=1\ 200\text{ m/s}$), 破坏模式依然表现为集团冲塞破坏, 迎弹面及背弹面的主要损伤为剪切破坏, 且背弹面的损伤范围较迎弹面大。

由表 3 可知, 在破片间距较大的条件下 ($S=10\text{ mm}$), 当破片速度较低 ($v=300\text{ m/s}$) 时, 由于间距较大, 层合板未出现集团冲塞破坏, 但在破片冲击位置之间出现了裂纹的连接产生附加效应, 在迎弹面出现大

范围剪切破坏, 损伤范围沿水平以及纤维方向, 背弹面的剪切损伤范围相对较小。当破片速度较高 ($v=800\text{ m/s}$) 时, 损伤模式接近于独立穿孔的损伤模式, 迎弹面冲击位置范围内产生损伤并在相互之间产生部分断裂情况, 背弹面由于破片的高剩余速度产生大面积的拉伸断裂破坏。随着破片速度的提高, 达到高速 ($v=1\ 200\text{ m/s}$) 时, 层合板的损伤模式主要是迎弹面的剪切穿孔, 以及在冲击位置附近的部分基体损伤, 由于穿透速度过快, 损伤范围较小, 背弹面产生纤维拉伸破坏。

表 2 破片间距 $S=1\text{ mm}$ 时, 在破片群侵彻下层合板的损伤模式

Table 2 Damage modes of the laminate subjected to fragment group penetration when the fragment spacing $S=1\text{ mm}$

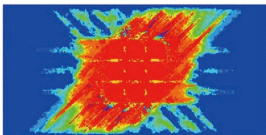
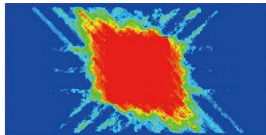
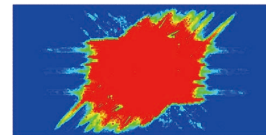
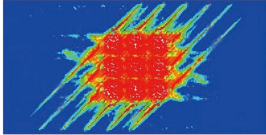
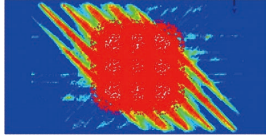
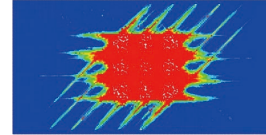
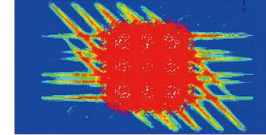
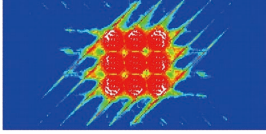
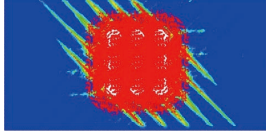
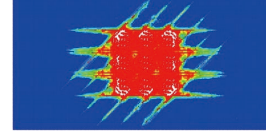
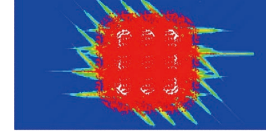
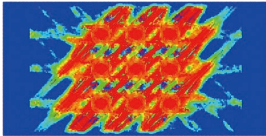
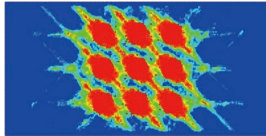
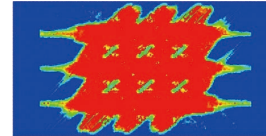
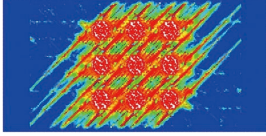
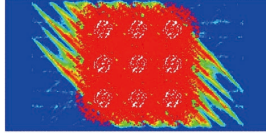
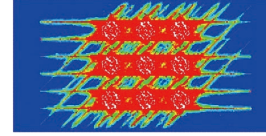
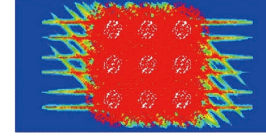
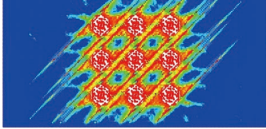
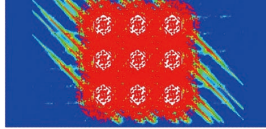
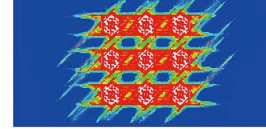
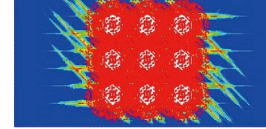
$v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	基体损伤		剪切损伤	
	迎弹面	背弹面	迎弹面	背弹面
	300			
800				
1 200				

表 3 破片间距 $S=10\text{ mm}$ 时, 在破片群侵彻下层合板的损伤模式

Table 3 Damage modes of the laminate subjected to fragment group penetration when the fragment spacing $S=10\text{ mm}$

$v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	基体损伤		剪切损伤	
	迎弹面	背弹面	迎弹面	背弹面
	300			
800				
1 200				

由以上分析可知, 单破片与破片群侵彻的复合材料层合板, 其破坏模式有较大区别: 单破片侵彻下, 层合板的损伤模式以冲击部位的穿孔破坏以及小范围的剪切与基体损伤为主, 而破片群侵彻下层合板的破坏模式主要是集团冲塞破坏、独立穿孔、大面积剪切拉伸断裂和基体损伤等。破坏程度与破片数量、间距和速度有关, 其中破片间距主要影响集团冲塞破口损伤, 随着间距的增大, 逐渐转变为独立穿

孔-附加效应。破片速度主要影响层合板中损伤的范围比例,随着速度的提高,层合板上下表面的损伤范围逐渐减小,层间损伤程度逐渐增大。

2.3 破片群侵彻过程

图 4 为破片间距 $S=1\text{ mm}$ 、破片速度 $v=800\text{ m/s}$ 的侵彻工况下,为了便于观察,以层合板的半剖模型表示层合板破坏的具体过程。由图 4 可知,当 $t=4\text{ }\mu\text{s}$ 时,破片群开始侵彻层合板,破片撞击后层合板将产生层间的压缩波以及面内应力波,压缩波在冲击位置的厚度方向产生局部压缩变形直至破坏失效,而应力波开始逐渐在各破片着弹点之间产生剪切破坏,其宏观表征体现为各破片着弹点附近形成浅坑状凹陷;当 $t=8\text{ }\mu\text{s}$ 时,破片群之间开始产生剪切的延伸连接损伤,随着时间的延长逐渐扩大。由于间距较小,多个破片的动能会汇聚叠加,冲击位置能量密度增加形成大量集团剪切破口。当 $t=18\text{ }\mu\text{s}$ 时,随着破片群侵彻过程中速度的不断衰减,每一层单层板的剪切破坏逐渐转变为拉伸破坏,集团剪切破口进一步形成; $t=38\text{ }\mu\text{s}$ 时,集团冲塞破口形成,破片群与冲塞块依靠惯性继续飞出。

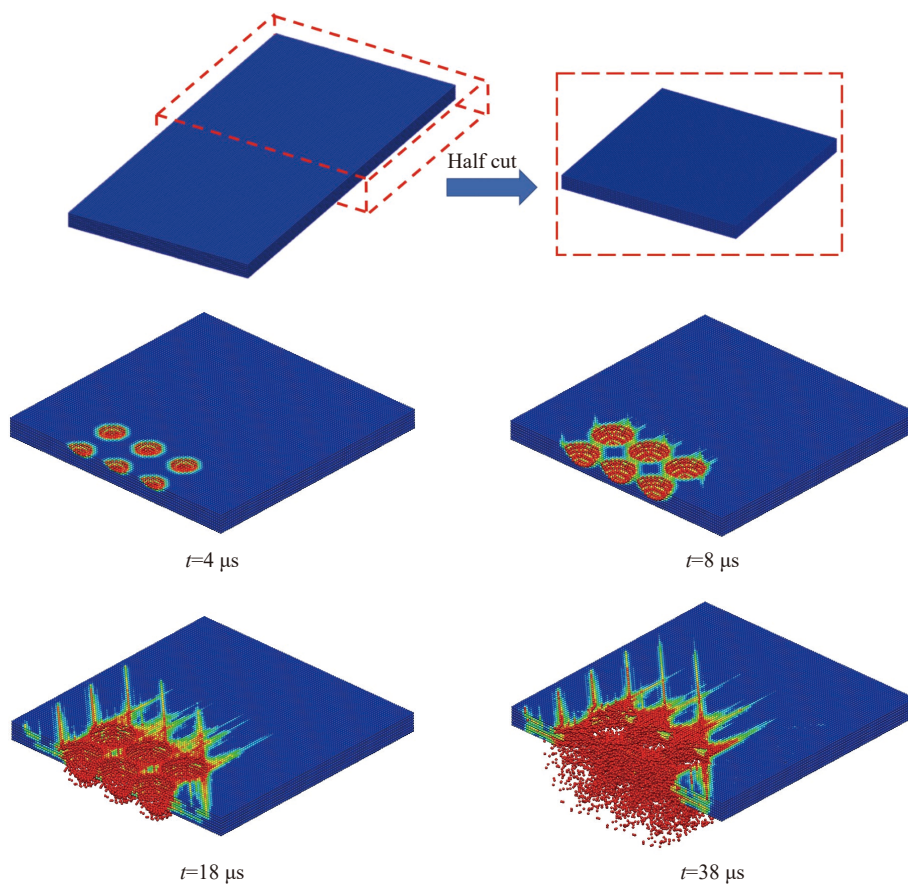
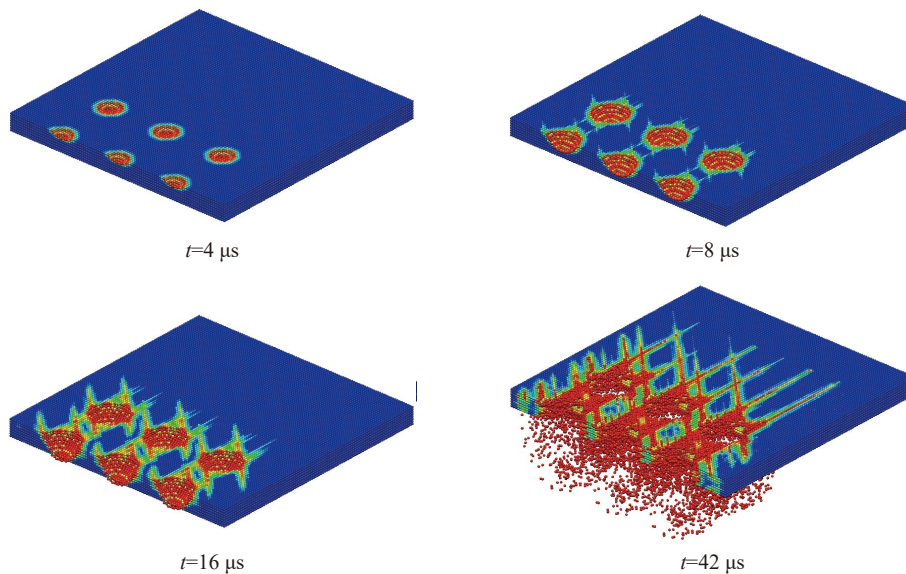


图 4 破片群侵彻下层合板的破坏过程($S=1\text{ mm}$, $v=800\text{ m/s}$)

Fig. 4 Failure process of the laminate subjected to fragment group penetration ($S=1\text{ mm}$, $v=800\text{ m/s}$)

图 5 为破片群 $S=10\text{ mm}$ 、 $v=800\text{ m/s}$ 的侵彻工况下,以板的半剖模型表示层合板破坏的具体过程。由图 5 可知,当 $t=4\text{ }\mu\text{s}$ 时,破片群开始侵彻层合板,冲击位置由于破片的高速冲击作用产生局部压缩变形,板发生剪切破坏,开始形成弹坑。当 $t=8\text{ }\mu\text{s}$ 时,破片群继续侵彻作用,由于间距较大,冲击位置之间传播的应力波更加均匀分散,破坏较小,迎弹面主要在冲击位置产生独立剪切穿孔。同时,压缩波传播到背弹面产生拉伸破坏。当 $t=16\text{ }\mu\text{s}$ 时,破片群冲击位置之间逐渐有一定损伤出现,体现为破片冲击的附加效应。当 $t=42\text{ }\mu\text{s}$ 时,背弹面进一步拉伸,产生剪切破口,破片群穿透。

图 5 破片群侵彻下层合板的破坏过程($S=10\text{ mm}$, $v=800\text{ m/s}$)Fig. 5 Failure process of the laminate subjected to fragment group penetration ($S=10\text{ mm}$, $v=800\text{ m/s}$)

3 破片群侵彻下复合材料层合板损伤关键因素的影响

层合板在破片群侵彻过程中, 多个破片分别在冲击位置造成损伤变形, 并在板内产生应力波, 当破片穿透层合板的时间 $t > S/C$, 其中 C 为应力波传播速度, 使冲击位置的能量密度与能量持续时间大大增加, 提高破片的侵彻能力, 即应力波的相互叠加会对破片的侵彻产生增强效应^[8-11]。当破片穿透层合板的时间 $t < S/C$, 破片穿透层合板的时间内, 应力波未开始相互叠加, 此时不会产生破片群的侵彻增强效应, 侵彻能力接近于单破片侵彻能力。由此可知, 破片间距 S 和破片速度 v 是破片群侵彻能力的主要影响因素, 前者影响应力波的叠加发生时间, 后者影响破片穿透的过程, 两者共同决定了破片群的侵彻能力。此外, 破片的数量也是影响破片群侵彻能力的重要因素, 当破片数量过少, 叠加效应不足以产生明显影响。

采用控制单一变量方法, 开展层合板破片群侵彻关键因素的影响规律研究。为将破片群侵彻能力量化分析, 采用破片群穿透后剩余速度最大的破片表征该工况下破片群的侵彻能力。而根据图 3 中破片群的排列方式以及应力波叠加原理, 中心破片将会受到主要的加强作用, 其侵彻能力的增强效应最大, 所以可以直接采用中心破片的侵彻状态表征相应工况下破片群的侵彻能力。

3.1 破片群数量的影响

保持破片群速度 $v=800\text{ m/s}$ 和破片间距 $S=1\text{ mm}$ 不变, 仅改变破片数量获得不同工况下破片群侵彻的剩余速度, 如图 6 所示。单破片侵彻时, 破片剩余速度为 472 m/s 。破片数量为 2 枚时, 两破片的应力波叠加效应开始产生一定影响, 但由于破片数量较少, 剩余速度为 541 m/s 。随着破片数量的增加, 应力波的叠加效应对于中心破片的影响不断增强, 破片剩余速度逐渐增高。

当破片数量增加至 5 枚以上时, 速度增高幅度相对较小, 当破片数量到达 9 枚时, 破片数量对于破片群侵彻能力的影响已经微乎其微。

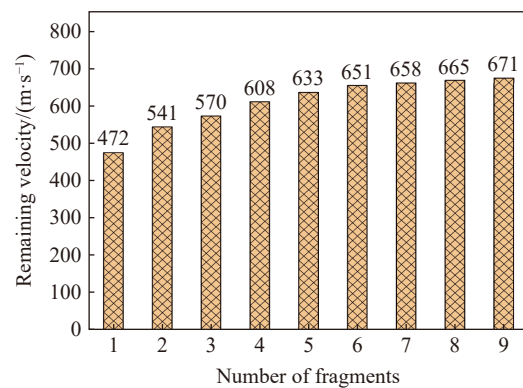


图 6 破片数量对破片群侵彻能力的影响

Fig. 6 Influence of the fragment number on the penetration ability of the fragment group

3.2 破片间距的影响

根据 3.1 节的分析结果, 固定破片数量 $N=9$ 以及破片速度 $v=800$ m/s, 研究破片间距对破片群侵彻能力的影响。图 7 为不同破片间距下破片群侵彻剩余速度与单破片侵彻剩余速度对比。当 $S=0$ mm 时(设置的极端工况, 每个破片都紧密地, 无间隔地聚集在一起), 破片群侵彻剩余速度比单破片侵彻剩余速度高 50.4%, 随着破片间距的增大, 破片群剩余速度不断降低。当 $S=15$ mm 时, 破片群与单破片侵彻剩余速度基本相等, 可以认为破片群效应已退化为独立破片侵彻。这种破片群效应出现的主要原因在于, 应力波的叠加所需时间随着破片冲击位置之间距离的增大而不断增长, 直至出现破片已经开始穿透层合板而应力波叠加效应仍未作用, 导致破片间距对破片群效应的不断减弱直至退化消失。

图 8 为破片速度 $v=800$ m/s 和破片间距 $S=5$ mm 的破片群侵彻下, 层合板的损伤过程。由图 8 可知, 当 $t=4$ μ s 时, 破片群开始侵彻层合板, 冲击位置开始具有法向速度并产生弹坑; 当 $t=12$ μ s 时, 随着应力波的传播, 迎弹面冲击位置之间开始产生变形损伤, 背弹面开始产生局部断裂; 当 $t=38$ μ s 时, 由于层间损伤导致背弹面纤维层的拉伸损伤断裂, 破口形成, 损伤失效材料与破片一起飞出。

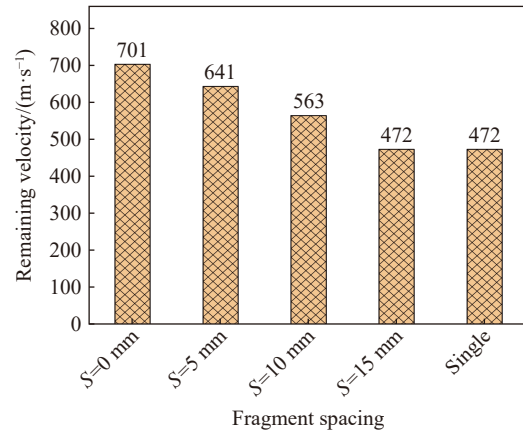


图 7 破片间距对破片群侵彻能力的影响

Fig. 7 Influence of the fragment spacing on the penetration ability of the fragment group

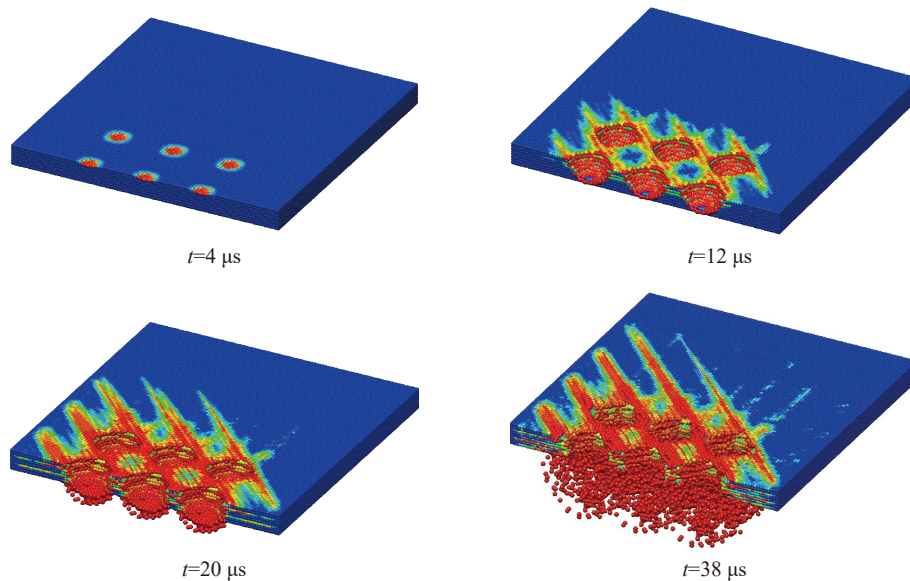


图 8 破片群侵彻下层合板的破坏过程($S=5$ mm, $v=800$ m/s)

Fig. 8 Failure process of the laminate subjected to fragment group penetration ($S=5$ mm, $v=800$ m/s)

图 9 为破片速度 $v=800$ m/s 和破片间距 $S=20$ mm 的破片群侵彻下, 层合板的损伤过程。由图 9 可知, 当 $t=4$ μ s 时, 破片群着靶, 层合板冲击位置获得法向速度产生弹坑, 应力波开始向四周传播; 当 $t=12$ μ s 时, 由于破片间距较大, 应力波叠加效应已经可以忽略, 破片在背弹面形成局部变形拉伸; 当 $t=42$ μ s 时, 破片完全穿透层合板, 在背弹面形成大范围剪切拉伸损伤, 非冲击区域也产生一定的剪切拉伸损伤。

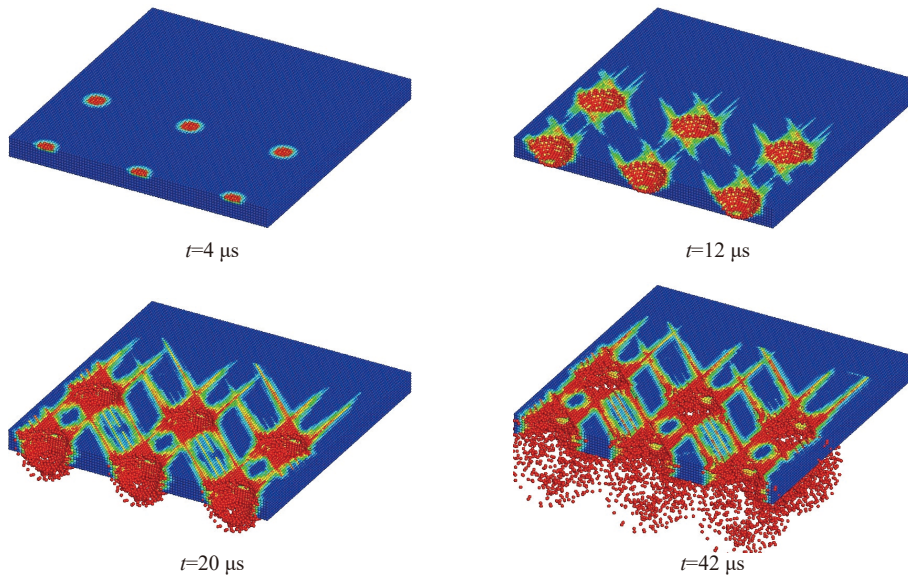


图 9 破片群侵彻下层合板的破坏过程($S=20\text{ mm}$, $v=800\text{ m/s}$)

Fig. 9 Failure process of the laminate subjected to fragment group penetration ($S=20\text{ mm}$, $v=800\text{ m/s}$)

综上所述,破片间距较小时应力波叠加效应明显,应力波在破片冲击位置以外造成损伤,尤其是层间损伤情况,使得连接处产生拉伸断裂破坏进而失去抗冲击能力。当破片间距较大时,应力波叠加效应影响较小,非冲击区域的位移较小,不足以让背弹面提前产生局部拉伸破坏,背弹面仍具有一定的抗冲击能力,类似于单破片侵彻情况。

3.3 破片冲击速度的影响

固定影响因素破片间距 $S=3\text{ mm}$ 和破片数量 $N=9$, 研究破片速度 $v=300, 800, 1200, 1500\text{ m/s}$ 等 4 种工况下破片速度与破片群效应的关系。图 10 为该破片群与相同速度单破片工况下剩余速度对比情况。由图 10 可知,当 $v=300\text{ m/s}$ 时,破片群剩余速度是单破片的 1.78 倍。随着破片速度的升高,破片群与单破片的剩余速度差距不断减小,即群效应不断减弱。当 $v=1200\text{ m/s}$ 时,破片群的侵彻增强效应退化消失为单破片侵彻情况。这是由于在破片间距不变条件下,穿透时间随着破片速度升高而缩短,应力波叠加效应影响时间缩短,即 $t < S/C$, 因此破片群侵彻能力增强效应随破片速度的升高而不断退化直至消失。

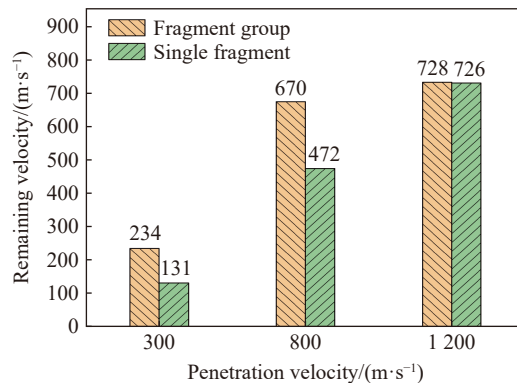


图 10 不同初始速度下破片群与单破片侵彻能力对比

Fig. 10 Comparison of penetration ability between fragment group and single fragment at different initial velocities

图 11 为在破片间距 $S=3\text{ mm}$ 、破片速度 $v=1200\text{ m/s}$ 以及破片数量 $N=9$ 枚的破片群对层合板的侵彻过程。由图 11 可知,当 $t=4\text{ μs}$ 时,破片开始侵彻层合板;当 $t=8\text{ μs}$ 时,面内应力波使冲击位置之间的部分

产生较大的变形, 层间产生剪切破坏; 当 $t=12 \mu\text{s}$ 时, 冲击位置之间产生大量剪切损伤, 背弹面受到层间压缩波的作用产生剪切损伤, 破片最下端已到达层合板底部位置; 当 $t=22 \mu\text{s}$ 时, 破片完全穿透层合板。由于破片的高速侵彻, 应力波叠加效应不足以影响破片群侵彻能力, 损伤模式已退化为单破片模式。

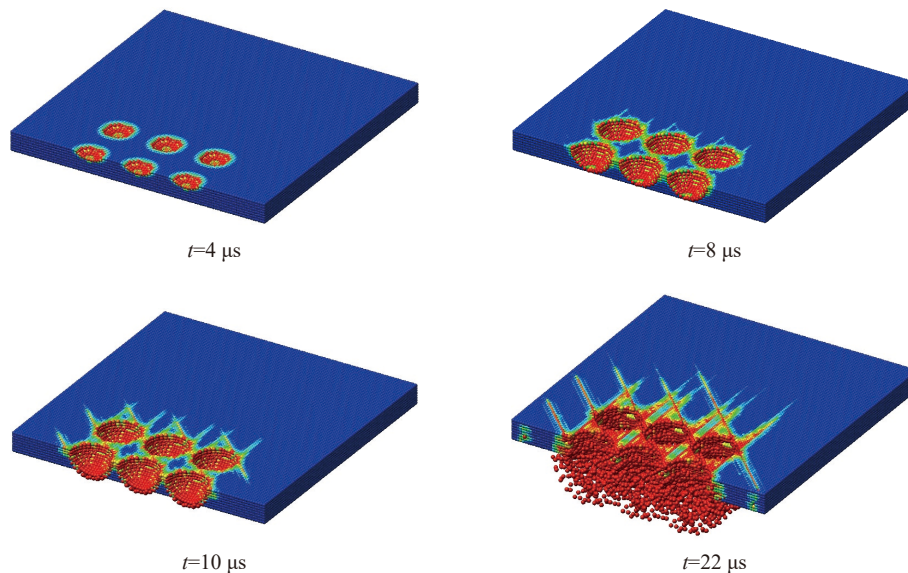


图 11 破片群侵彻下层合板的破坏过程 ($S=3 \text{ mm}$, $v=1\ 200 \text{ m/s}$)

Fig. 11 Failure process of the laminate subjected to fragment group penetration ($S=3 \text{ mm}$, $v=1\ 200 \text{ m/s}$)

综上所述, 由于破片速度直接决定了穿透时间, 对于破片群侵彻增强效应影响巨大。在相同破片间距工况下, 随着破片冲击速度的提高, 破片穿透时间缩短, 从而应力波叠加效应对破片群侵彻作用有限, 导致破片群增强效应退化至消失。

4 结 论

利用破片冲击近场动力学模型, 开展破片群对纤维增强复合材料层合板侵彻的损伤研究, 分析其破坏过程, 得到的主要结论如下。

(1) 破片群侵彻损伤模式多样, 包括集团冲塞、独立穿孔、大范围剪切拉伸破坏等, 损伤模式与破片数量、破片速度和破片间距相关。

(2) 在一定的破片间距与速度下, 破片数量的增加对破片群侵彻能力的增强效应明显, 5 枚以下数量的破片侵彻能力增强效应明显。

(3) 破片间距与破片群侵彻能力增强效应负相关, 随着破片间距的减小, 破片群增强效应提高。破片间距较小时, 应力波传播所需时间减少, 冲击动能迅速叠加造成层合板快速失去抗冲击能力。

(4) 破片速度直接决定了破片穿透时间, 在固定间距与数量的情况下, 破片速度的提高使得破片更快穿透层合板, 应力波叠加效应作用时间不足以影响破片群侵彻能力。

参考文献:

- [1] RIEDEL W, NAHME H, WHITE D M, et al. Hypervelocity impact damage prediction in composites: Part II: experimental investigations and simulations [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, 33(1): 670–680. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2006.09.052.
- [2] 王晓强, 朱锡, 梅志远, 等. 超高分子量聚乙烯纤维增强层合板抗弹性能实验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2009, 29(1): 29–34. DOI: 10.11883/1001-1455(2009)01-0029-06.

WANG X Q, ZHU X, MEI Z Y, et al. Ballistic performances of ultra-high molecular weight polyethylene fiber-reinforced

- thick laminated plates [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2009, 29(1): 29–34. DOI: 10.11883/1001-1455(2009)01-0029-06.
- [3] 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): 232–240. DOI: 10.1016/j.compstruct.2005.07.006.
- [4] 李典, 侯海量, 朱锡, 等. 破片群侵彻纤维增强层合板破坏机理及穿甲能力等效方法 [J]. *兵工学报*, 2018, 39(4): 707–716. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2018.04.010.
- LI D, HOU H L, ZHU X, et al. Study of the failure mechanism of fiber reinforced composite laminates subjected to fragment cluster penetration and the equivalent method for armor piercing ability of fragment cluster [J]. *Acta Armamentarii*, 2018, 39(4): 707–716. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2018.04.010.
- [5] 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.
- [6] 李典, 侯海量, 戴文喜, 等. 爆炸冲击波和破片联合作用下玻璃纤维夹芯复合结构毁伤特性实验研究 [J]. *兵工学报*, 2017, 38(5): 877–885. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2017.05.006.
- LI D, HOU H L, DAI W X, et al. Experimental investigation on damage of glassfiber sandwich structure under explosion and fragment loadings [J]. *Acta Armamentarii*, 2017, 38(5): 877–885. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2017.05.006.
- [7] 姜翠香. 裂纹损伤舰船结构的断裂及止裂研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2004: 1–3.
- JIANG C X. Research on fracture and crack arrest in ship structure [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2004: 1–3.
- [8] 姚熊亮. 舰船结构振动冲击与噪声 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 144–146.
- [9] 赵国志. 穿甲工程力学 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 1992: 52–53.
- [10] 侯海量, 朱锡, 谷美邦, 等. 破片模拟弹侵彻钢板的有限元分析 [J]. *海军工程大学学报*, 2006, 18(3): 78–83; 88. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3486.2006.03.019.
- HOU H L, ZHU X, GU M B, et al. Investigation on penetration of steel plate by fragment simulated projectile using finite element method [J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2006, 18(3): 78–83; 88. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3486.2006.03.019.
- [11] 侯海量, 朱锡, 李伟, 等. 低速大质量球头弹冲击下薄板穿甲破坏机理数值分析 [J]. *振动与冲击*, 2008, 27(1): 40–45. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2008.01.004.
- HOU H L, ZHU X, LI W, et al. Numerical analysis of perforation mechanism for a thin plate subjected to impact by hemispherical-nosed projectiles with low velocity [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2008, 27(1): 40–45. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2008.01.004.

(责任编辑 张凌云)