

冲击波和高速破片联合作用下固支方板毁伤效应数值模拟*

李茂,朱锡,侯海量,李典,陈长海,郑红伟,徐伟
(海军工程大学舰船工程系,湖北武汉 430033)

摘要:为探讨固支方形钢板结构在空爆冲击波和高速破片联合作用下的动态响应过程及变形破坏模式,利用有限元分析软件 ANSYS/LS-DYNA,开展了空爆冲击波和高速破片对固支方板的联合作用数值模拟计算,阐述了固支方板在联合载荷作用下动态响应过程的2个阶段,以及在不同爆距下的变形破坏模式和特点。结果表明,随着爆距增加,在破片密集作用区内,钢板的破坏模式存在从集团冲塞破口到部分穿孔边界撕裂联通,再到无穿孔边界撕裂现象的转换。

关键词:空爆冲击波;高速破片群;联合作用;动态响应;数值模拟

中图分类号:U661.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2017)06-064-07

Numerical simulation of the damage effects of clamped square plate subjected to the impact of blast wave and fragments

LI Mao, ZHU Xi, HOU Hailiang, LI Dian, CHEN Changhai, ZHENG Hongwei, XU Wei

(Department of Naval Architecture Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: The main objective of this study was to explore the dynamic response and damage pattern of a clamped square steel plate under the synergy effect of blast and fragments loading. A numerical-simulation tool was used to further study the combined blast and fragments loading effects on a clamped square steel plate. Through finite element program ANSYS/LS-DYNA, simulations of the response behavior and damage pattern of the plate subjected to the combined blast and fragments loading were conducted. Large punched hole caused by the dense fragment cluster will form in the intensively impacted area under proper launch distance. As launch distance increases, large deformation is the main failure modes of the plate, combined with numbers of perforation holes but no large punched hole.

Key words: blast wave; high-speed fragment cluster; combined impact; dynamic response; numerical simulation

研究表明^[1-2],爆炸冲击波与高速破片对结构的联合毁伤作用,与二者单独作用有显著差异,在一定条件下具有叠加增强效应。瑞典科学家 Nyström^[3]、Leppänen^[4]对混凝土结构在不同载荷作用下的破坏效应开展了试验研究及数值模拟,指出联合载荷作用下结构的整体破坏程度大于单一载荷对结构产生的破坏程度之和。何翔^[5]开展了防护门在空气冲击波和破片联合作用下的破坏试验研究,认为防护门的破坏效应是破片和冲击波复合作用的结果。李伟等^[6]采用模拟半穿甲导弹战斗部进行了舰船舱室模型舱内爆炸实验,研究了舱室板架结构的破坏模式,发现高速破片密集作用区各弹孔间的边界会被冲击波撕裂而相互连通,形成长且大的破口。Kong^[7]采用同样方法研究了舰船多层多舱防护结构的毁伤问题,并开展了数值分析。张成亮^[8]开展了爆炸冲击

波载荷和联合载荷分别作用下钢-玻璃钢-钢的破坏效应试验,结果表明,两种载荷形式下结构的变形破坏模式有较大差异。侯海量^[9]针对芯层材料不同的4种典型夹芯式复合抗爆舱壁结构,并开展了结构在联合载荷作用下的破坏效应试验,指出在冲击波和高速破片联合作用过程中,两种载荷存在耦合作用,并提出了耦合作用时间区间、空间区间的概念。此外,Qian^[10-12]研究了破片群侵彻钢靶板结构的叠加破坏效应和累积破坏效应发现,当破片群速度、着靶分布密度、着靶时间差达到一定数值时,结构将产生集团冲塞破口。

国内外研究人员对爆炸冲击波和高速破片联合毁伤效应的研究^[1-17],取得了一些有价值的成果,但是结构在联合载荷作用下的毁伤问题相当

* 收稿日期:2016-07-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51409253, 51679246, 51479204)

作者简介:李茂(1991—),男,安徽安庆人,博士研究生,E-mail:limao19910224@163.com;

侯海量(通信作者),男,高级工程师,博士,硕士生导师,E-mail:houl1104@163.com

复杂,且他们的试验过程不够精细,或者仅对试验结果或数值仿真结果进行定性分析,研究人员对这2种载荷的联合作用机理及联合载荷作用形式的认识尚不清晰,尚未形成可靠和完善的分析计算方法。

1 有限元模型

采用非线性动力有限元分析程序,对固支方形钢板在联合载荷作用下的变形破坏进行数值模拟研究。数值模型由炸药、空气、破片、钢板四部分组成,均采用8节点的Solid164三维实体单元模拟,其中炸药和空气材料采用Euler网格建模,单元使用多物质ALE(arbitrary Lagrange-Euler)算法,破片和钢板采用Lagrange网格建模,破片、钢板与空气材料间采用耦合算法,以允许破片、钢板和空气材料通过Euler-Lagrange罚函数耦合算法将结构与流体耦合。靶板四边固支,对空气设定透射边界。

图1为数值计算模型示意图,图2所示为预制破片布置方式。钢板平面尺寸为 500×500 mm,厚度为4 mm;TNT药柱直径为50 mm,装药长度为130 mm;爆距为148 mm(炸药底部中心距钢板迎爆面中心距离),采用点起爆方式,起爆点位于药柱顶面中心;单个破片平面尺寸为 5×5 mm,厚度为2 mm,破片无间隙,密集布置于药柱底部,破片总数为89;为减小空气域边界对数值计算结果的影响,将炸药、钢板、破片完全置于空气域中,更具体的模型尺寸和试验设置可参考文献[17]。网格划分后,单元总数约为62万。

炸药采用HIGH_EXPLOSIVE_BURN本构模型,对爆轰产物的膨胀采用JWL(Johes-Wilkins-Lee)状态方程描述:

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega e_0}{V} \quad (1)$$

式中: P 为爆轰压力; A, B 为常数,分别取 $A = 374$ GPa, $B = 3.23$ GPa; R_1, R_2, ω 为实验拟合参数,分别取 $R_1 = 4.15, R_2 = 0.95, \omega = 0.30$; V 为相对体积; e_0 为单位体积内能;取炸药密度 $\rho_e = 1630$ kg/m³,爆速 $D = 6930$ m/s,压力 $P_{CJ} = 27$ GPa。程序采用beta + programmed burn技术模拟炸药的爆轰过程,每个炸药单元的点火时间由该单元形心至起爆点的距离和爆速确定。

空气采用NULL材料模型及LINEAR_POLYNOMIAL状态方程描述。线性多项式状态方程为:

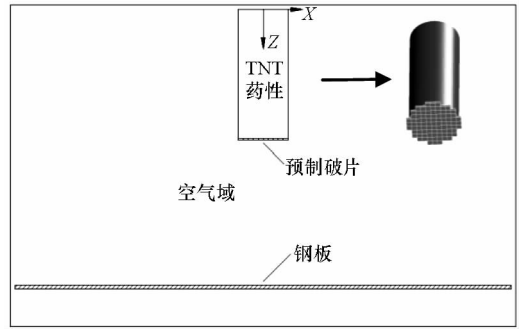


图1 模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the model

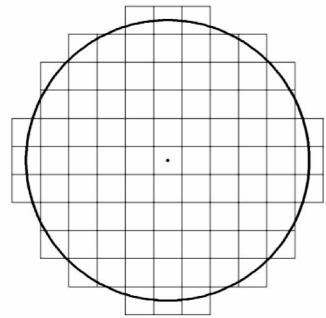


图2 预制破片布置图

Fig. 2 Placement of fragments

$$P = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) e_0 \quad (2)$$

式中: e_0 为单位体积内能,取 $e_0 = 2.53 \times 10^5$ J/m³; $\mu = 1/V - 1$,其中 V 为相对体积,取初始相对体积 $V_0 = 1.0$; $C_0 \sim C_6$ 为多项式方程系数,当线性多项式状态方程用于理想气体模型时, $C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = C_6 = 0, C_4 = C_5 = \gamma - 1, \gamma = C_p / C_v, \gamma$ 为气体的热容比,取 $\gamma = 1.4$;空气密度取为 1.225 kg/m³。

破片采用双线性弹塑性本构模型Plastic_Kinematic,其应变率效应由Cowper-Symonds模型描述:

$$\sigma_d = \left(\sigma_0 + \beta \frac{E E_{\tan}}{E - E_{\tan}} \varepsilon_p \right) \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C} \right)^{1/n} \right] \quad (3)$$

式中: σ_d 为动态屈服强度; σ_0 为静态屈服强度; E 为弹性模量; E_{\tan} 为切线模量; ε_p 为有效塑性应变; $\dot{\varepsilon}$ 为等效塑性应变率; C, n 为应变率参数,对于低碳钢,通常取 $C = 40.4$ s⁻¹, $n = 5; \beta = 1$ 为等向强化模型, $\beta = 0$ 为随动强化模型。材料失效模型采用最大等效塑性应变失效准则。

钢板材料采用J-C(Johnson-Cook)本构模型,该模型考虑了应变强化、应变率强化、温升软化效应,能反映材料在高应变率以及高温情况下材料性质的变化,其具体形式为:

$$\sigma = (a + b\bar{\varepsilon}_p^{n_0}) \left[1 + c \ln \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^m \right] \quad (4)$$

式中: a 、 b 、 n_0 、 c 、 m 为材料参数, a 为静态屈服强度, 取 $a = 235$ MPa, b 、 n_0 通过拟合等效应力应变曲线数据获得, 取 $b = 300$ MPa, $n_0 = 0.26$; $\dot{\varepsilon}$ 为有效塑性应变率; $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考塑性应变率, 一般取 $\dot{\varepsilon}_0 = 1 \text{ s}^{-1}$; c 为应变率系数, 取 $c = 0.014$; m 为热软化指数, 取 $m = 1.03$; T_m 为材料的熔点, 取 $T_m = 1793 \text{ K}$; T_0 为参考温度(取室温), 取 $T_0 = 300 \text{ K}$ 。

J-C 材料模型的累积损伤失效模型考虑了应力三轴度、应变率和温度效应, 由式(5)定义单元损伤:

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p}{\varepsilon_f} \quad (5)$$

式中: D 为损伤参数, 在 $0 \sim 1$ 之间变化, 初始时 $D = 0$, 当 $D = 1.0$ 时材料失效; $\Delta \varepsilon_p$ 为一个时间步的塑性应变增量; ε_f 为当前时间步的应力状态、应变率和温度下的破坏应变, 其具体表达式为:

$$\varepsilon_f = \left[D_1 + D_2 \exp \left(D_3 \frac{p}{\sigma_{\text{eff}}} \right) \right] \left[1 + D_4 \ln \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right] \cdot \left[1 + D_5 \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right) \right] \quad (6)$$

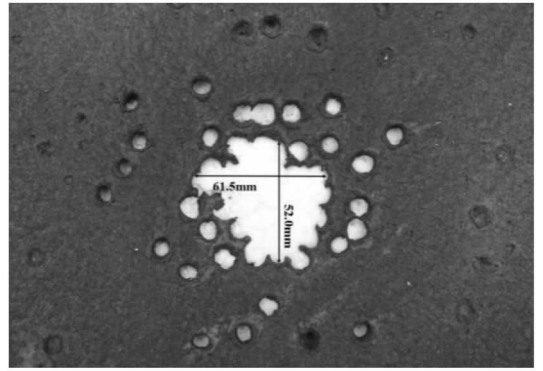
式中: $D_1 \sim D_5$ 为材料参数, 取 $D_1 = 0.4$; σ_{eff} 为 Mises 等效应力; p 为压力。

2 数值计算结果与分析

文献[17]已对数值仿真的有效性进行了验证, 从中可以看出, 模型的建立和材料参数的选取都较为合理, 本文采用与文献[17]完全相同的几何模型、材料模型及网格划分方法, 在此不予赘述。图3所示为钢板破坏形貌试验结果与仿真结果对比。对于同一个模型, 若钢板与空气材料间不定义耦合, 即仅考虑冲击波和爆轰产物对预制破片的驱动作用, 而不考虑冲击波载荷对钢板的冲击作用, 则可进行破片群单一载荷作用下结构的毁伤效应数值模拟分析。

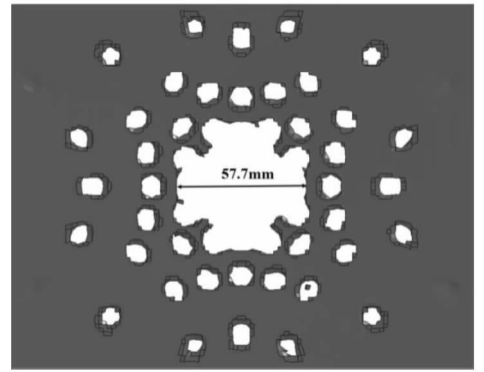
2.1 固支方板在联合作用下的变形破坏过程分析

取钢板中心区域共 21 个破片的着靶区域作为研究对象, 称为破片密集作用区。根据文献[17], 冲击波载荷在 $t \geq 74 \mu\text{s}$ (从炸药引爆时刻开始计时, 下同)、破片群在 $t = 77.5 \mu\text{s} \sim 210 \mu\text{s}$ 作用于钢板, 密集作用区内, 破片群着靶时间为 $t = 77.5 \mu\text{s} \sim 82.0 \mu\text{s}$; 对于每个破片着靶位置, 均为冲击波先于破片作用于结构, 随后破片陆



(a) 实验结果^[8]

(a) Experimental image^[8]



(b) 数值仿真结果

(b) Numerical simulation image

图3 实验结果与模型仿真结果

Fig. 3 Experimental and numerical results of deformation and damage of the steel plate

续作用于结构, 二者对结构的作用时间及二者到达结构的时间差均远小于钢板结构的响应周期, 两种载荷具有一定的耦合效应; 装药驱动预制破片飞散时, 将一部分能量转化为了破片的冲击动能, 致使冲击波作用于钢板结构的冲击动能减小; 破片总动能为 62.5 kJ, 大于爆轰产物及冲击波传递给钢板结构的动能。

图4所示为钢板中线上方三个点处的超压-时间历程曲线(三个点距钢板中心的水平距离分别为 3.15 cm、5.675 cm 和 9.0 cm); 图5所示为图4所述三个点处的比冲量-时间历程曲线。其中, s 为钢板中线上的点距钢板中心的水平距离, 单位为 cm。图6所示为钢板在联合载荷作用下的变形破坏过程。由图可知, 固支方板的动态响应可分为 2 个阶段。阶段 1 中, 钢板受到密集破片群和强大冲击波的共同作用, 钢板主要发生穿甲破口破坏, 密集作用区内, 间距较小的穿孔的连线在剪切应力作用下断裂而相互联通; 钢板中间区域受到的破片群及冲击波载荷强度远大于外围区域, 使得钢板材料获得较大 Z 向速度的同时,

在面内具有较大的速度梯度,但结构未发生大的整体挠曲变形;该阶段以结构开始受到载荷作用作为起始标志。阶段 2 中,破片群对钢板的冲击作用结束,且冲击波已显著衰减(超压 ΔP_m 小于 1.0 MPa,如图 4 所示),穿孔连线在拉剪应力的作用下进一步撕裂,产生塞块,钢板中间形成大破口;钢板变形能的增加主要依靠惯性效应;该阶段以无破片群冲击以及冲击波超压数值较小为显著特征。图中, s 为钢板中线上的点距钢板中心的水平距离,单位:cm。

2.2 固支方板在不同爆距下的变形破坏分析

爆距的改变,实际发生改变的是冲击波及破片群的载荷特性,而这将导致结构产生不同的动态响应。在本节的数值计算中,仅改变爆距,其他条件不变,以探讨固支方板在不同爆距下的变形破坏特点。爆距工况如表 1 所示。

图 7 所示为不同爆距下模型的变形破坏结果 ($t = 1200 \mu s$)。由图可知,在 Case 1 中,钢板中心区域产生一个集团冲塞大破口,破口直径约

54.5 mm,在破口以外区域,为局部破片穿孔和撞击凹坑,未形成撕裂联通的破口。在 Case 2 中,钢板中心处冲塞破口直径约 57.7 mm,略小于 Case 2;总体来看,Case 1 和 Case 2 的变形破坏模式非常相似。随着爆距增加,破片着靶间距增大,破片着靶密度减小。在 Case 3 中,钢板中心区域部分破片穿孔间的边界呈现撕裂联通现象,但与 Case 1 和 Case 2 不同,处于形成集团冲塞破口的临界状态;由图 8 可知,在破片群单一载荷作用下,同样存在部分破片穿孔间边界撕裂联通的现象,表现出明显的累积破坏现象;对比图 7(c) 和图 8 可知,在冲击波的撕裂作用下,钢板中心区域产生了更为严重的破坏。而在 Case 4 中,仅个别破片穿孔间的边界断裂,未因冲击波的冲击而产生大量撕裂现象(可能是因为钢板厚度较大、破片着靶间距较大),钢板中心处未产生大的破口。4 个工况中,钢板均产生整体挠曲变形,最大挠度均出现在钢板中心区域,挠度值分别为 24.5 mm、22.9 mm、24.8 mm 和 25.4 mm。

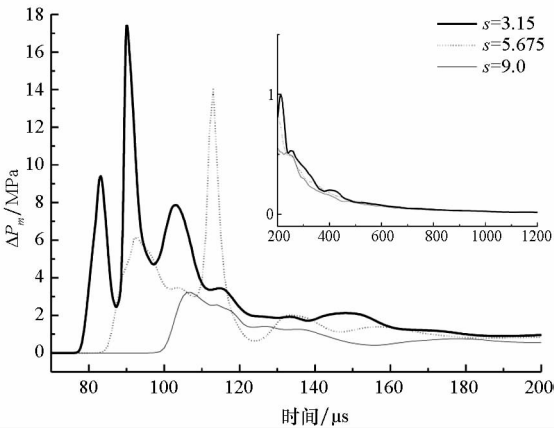


图 4 钢板中线上方三点超压 - 时间历程曲线
Fig. 4 Over pressure versus time curve of three positions over center-line of plate

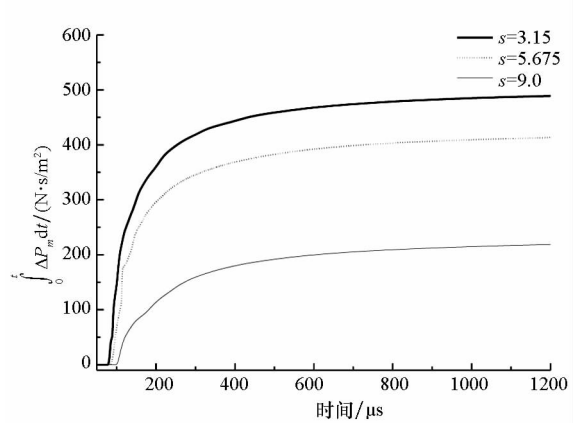


图 5 钢板中线上方三点比冲量 - 时间历程曲线
Fig. 5 Blast impulse density versus time curve of three positions over center-line of plate

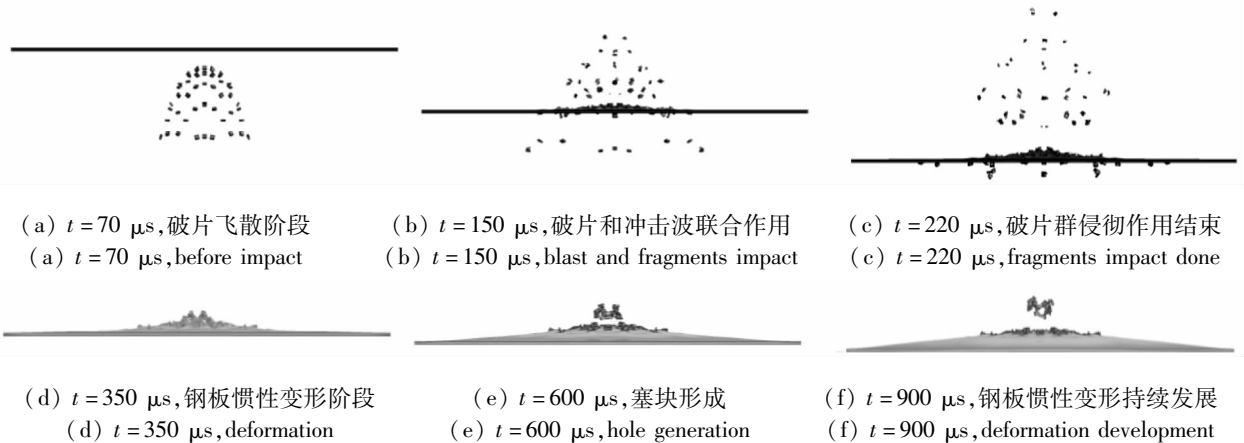


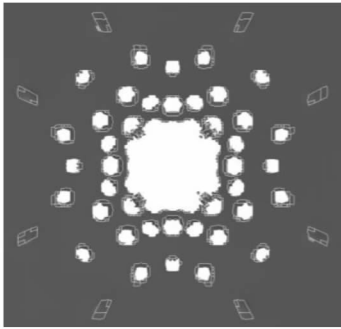
图 6 钢板结构变形破坏过程图

Fig. 6 Deformation and damage process of steel plate

表 1 不同爆距下破片密集作用区载荷特性

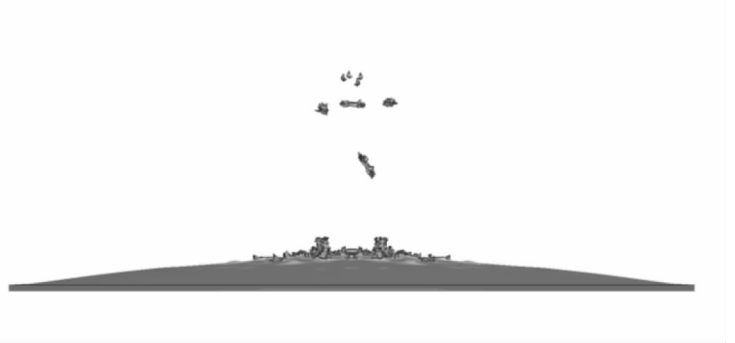
Tab. 1 Loading properties of fragment cluster in intensively impacted area in different cases

Case	爆距/ m	TNT 药量/ kg	密集作用区 半径/ mm	破片群平均 着靶密度/ (pieces / m ²)	破片群平均 能量密度/ (kJ/m ²)	破片群平均 比冲量/ (N · s/m ²)	密集作用区边缘处 比冲量/(N · s/m ²)
1	0.130	0.4	28.2	8400	10100	8150	0 μs ~ 200 μs; 532.5 200 μs ~ 1200 μs; 96.6
2	0.148	0.4	29.9	7500	9000	7250	0 μs ~ 200 μs; 360.4 200 μs ~ 1200 μs; 128.5
3	0.168	0.4	32.2	6500	7800	6260	0 μs ~ 200 μs; 448.2 200 μs ~ 1200 μs; 159.9
4	0.188	0.4	34.9	5500	6600	5300	0 μs ~ 200 μs; 444.4 200 μs ~ 1200 μs; 209.4



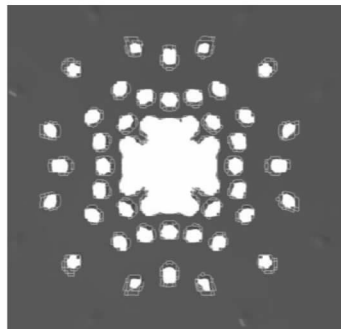
(a) Case 1 俯视图

(a) Front view of damaged plate in case 1



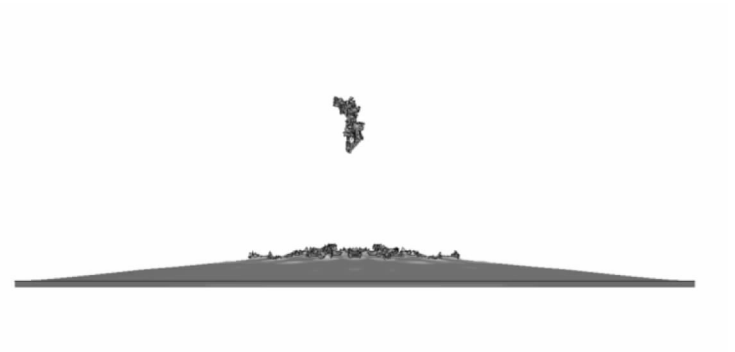
(b) Case 1 侧视图

(b) Side view of damaged plate in case 1



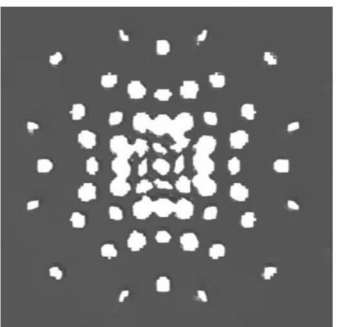
(c) Case 2 俯视图

(c) Front view of damaged plate in case 2



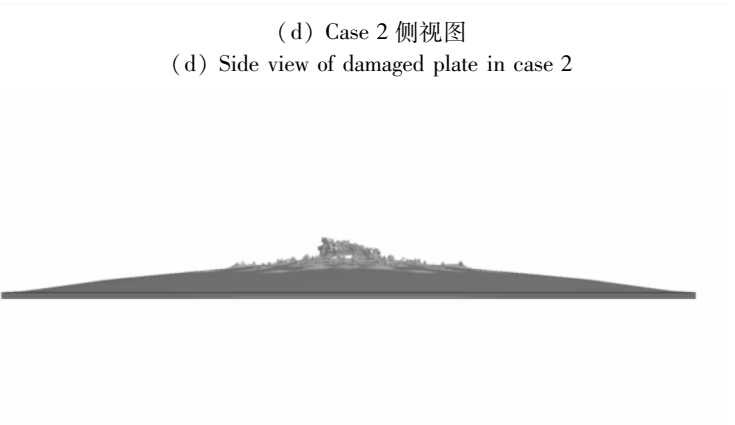
(d) Case 2 侧视图

(d) Side view of damaged plate in case 2



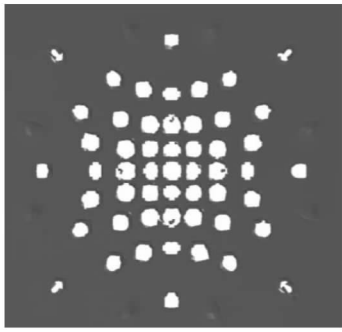
(e) Case 3 俯视图

(e) Front view of damaged plate in case 3



(f) Case 3 侧视图

(f) Side view of damaged plate in case 3



(g) Case 4 俯视图

(g) Front view of damaged plate in case 4

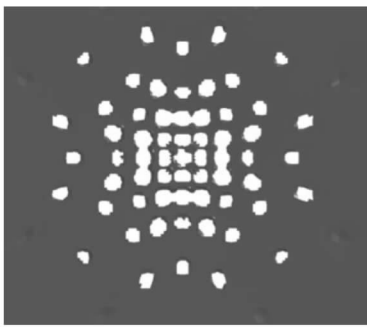


(h) Case 4 侧视图

(h) Side view of damaged plate in case 4

图 7 不同爆距下模型的变形破坏仿真结果

Fig.7 Numerical simulation images of damaged steel plate with different launched distance



(a) 俯视图

(a) Front view of damaged plate



(b) 侧视图

(b) Side view of damaged plate

图 8 Case 3 破片群单一载荷作用下模型的变形破坏仿真结果

Fig.8 Numerical simulation images of damaged steel plate under fragments loading in case 3

比较不同工况下该区域内破片群及冲击波载荷特性,计算结果如表 1 所示。为便于分析,忽略破片旋转及着靶姿态对侵彻过程的影响。破片密集作用区边缘处的冲击波比冲量值远小于密集作用区形成冲塞破口时,冲击波“泄漏”,导致作用于结构内的破片群。比较各工况下模型的变形破坏结果可知,在破片着靶密度超过一定数值时,钢板便会产生集团冲塞破口。

图 9 所示为钢板剩余材料的变形吸能时程曲线。从图 9 中可以看出,在 4 个工况中,2 个阶段的分界均约出现在 $t = 200 \mu\text{s}$; $t = 1200 \mu\text{s}$ 时,钢板剩余材料的变形吸能量最大相差 15.3% (Case 2 和 Case 4 比较)。从破片群载荷来看,一方面,中间破片最早作用于靶板,使靶板穿孔周围的材料获得一定速度,这相对减少了随后到达的外围破片冲击靶板时的速度损失,随着爆距增加,在破片密集作用区,破片着靶间距增大,破片着靶密度显著减小,着靶时间差增大,使得破片速度损失增大^[17],因而破片群整体传递给靶板的冲量增大,最终转变成靶板材料内能;另一方面,在数值仿真中,靶板穿孔边界的撕裂是以单元删除来实现的,

而这将消耗部分能量。从冲击波载荷来看,在阶段 1 中,密集作用区边缘处的冲击波载荷强度主要受爆距和破片群扰动的共同影响;而当密集作用区形成冲塞破口时,冲击波“泄漏”,导致作用于结构的比冲量减小^[18],如表 1 所示。

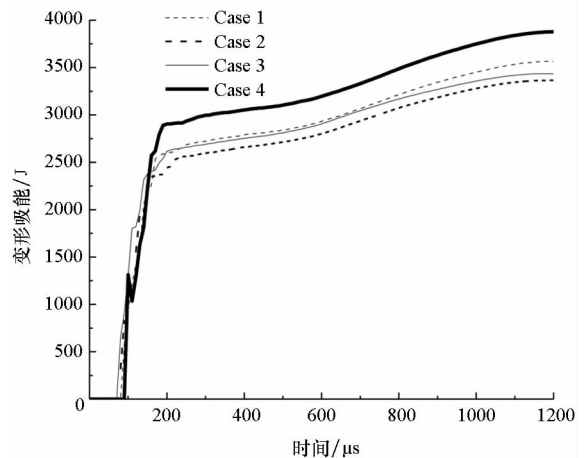


图 9 不同工况下钢板结构变形吸能时程曲线

Fig.9 Energy-absorbed versus time of steel plates

实际上,武器战斗部产生的破片载荷很大程

度地依赖于破片的着靶分布,而目标结构上破片密集作用区是很小的区域,因而累积破坏区域也很小。因此,可将破片群冲击下目标结构的累积破坏效应问题限定在某一特定区域。

3 结论

本文得到了如下主要结论:

1) 在联合作用下,固支方板的动态响应可分为 2 个阶段;在阶段 1 中,钢板主要产生穿甲破口破坏,且钢板材料产生较大的速度,但未发生较大的整体挠曲变形;在阶段 2 中,破片群对钢板的冲击作用结束,且冲击波作用已显著衰减,钢板变形的增加主要依靠惯性作用;

2) 在破片密集作用区内,破片群载荷强度远大于冲击波,当着靶密度超过一定数值时,钢板便会形成集团冲塞破口,产生明显的累积破坏;

3) 随着爆距增大,破片密集作用区内钢板的破坏模式存在从集团冲塞破口到部分穿孔边界撕裂联通的转换。当爆距增大到一定数值时,钢板以挠曲大变形为主要破坏模式,将不再产生冲塞破口,穿孔边界也不会因应力集中和冲击波的冲击而撕裂;破片群载荷以叠加破坏效应为主,冲击波载荷只是增加了结构的整体挠曲程度,不会产生更严重的破坏。

参考文献 (References)

[1] Girhammar U A. Brief review of combined blast and fragment loading effects; Report C7; 90 [R]. Eskilstuna, Sweden; Sweden National Fortifications Administration, 1990.

[2] Nixon J D, Vargas M M, Marchand K A. The synergistic effects of combined blast and fragment loadings [R]. San Antonio, USA: Southwest Research Institute, 1992.

[3] Nyström U, Gylltoft K. Numerical studies of the combined effects of blast and fragment loading [J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(8): 995 - 1005.

[4] Leppänen J. Experiments and numerical analyses of blast and fragment impacts on concrete [J]. International Journal of Impact Engineering, 2005, 31(7): 843 - 860.

[5] 何翔, 庞伟宾, 曲建波, 等. 防护门在空气冲击波和破片作用下的破坏 [J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(5): 475 - 479. HE Xiang, PANG Weibin, QU Jianbo, et al. Protective door damaged by air shock wave and fragment arisen from explosion in prototype tunnel [J]. Explosion and Shock Waves, 2004, 24(5): 475 - 479. (in Chinese)

[6] 李伟, 朱锡, 梅志远, 等. 战斗部舱内爆炸对舱室结构毁伤的实验研究 [J]. 舰船科学技术, 2009, 31(3): 34 - 37. LI Wei, ZHU Xi, MEI Zhiyuan, et al. Experimental studies on damage effect of missile warhead on cabin's structure under internal explosion [J]. Ship Science and Technology, 2009, 31(3): 34 - 37. (in Chinese)

[7] Kong X S, Wu W G, Li J, et al. Experimental and numerical

investigation on a multi-layer protective structure under the synergistic effect of blast and fragment loadings [J]. International Journal of Impact Engineering, 2014, 65(3): 146 - 162.

[8] 张成亮. 爆炸冲击波和高速破片联合作用效应及防护机理研究 [D]. 武汉: 海军工程大学, 2013. ZHANG Chengliang. Study on failure effective and mechanisms of armor structure subjected to blast waves and fragments [D]. Wuhan: Naval University of Engineering, 2013. (in Chinese)

[9] 侯海量, 张成亮, 李茂, 等. 冲击波和高速破片联合作用下夹芯复合舱壁结构毁伤特性实验研究 [J]. 爆炸与冲击, 2015, 35(1): 116 - 123. HOU Hailiang, ZHANG Chengliang, LI Mao, et al. Damage characteristics of sandwich bulkhead under the impact of shock and high-velocity fragments [J]. Explosion and Shock Waves, 2015, 35(1): 116 - 123. (in Chinese)

[10] Qian L X, Qu M, Jiang D, et al. Dense fragment generator [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2002, 27(5): 267 - 278.

[11] Qian L X, Qu M, Feng G. Study on terminal effects of dense fragment cluster impact on armor plate. Part I: analytical model [J]. International Journal of Impact Engineering, 2005, 31(6): 755 - 767.

[12] Qian L X, Qu M. Study on terminal effects of dense fragment cluster impact on armor plate. Part II: numerical simulations [J]. International Journal of Impact Engineering, 2005, 31(6): 769 - 780.

[13] 金乾坤. 破片和冲击波毁伤圆柱靶的数值模拟 [J]. 兵工学报, 2006, 27(2): 215 - 218. JIN Qiankun. Simulation of cylindrical shell damage by fragments and shock waves [J]. Acta Armamentarii, 2006, 27(2): 215 - 218. (in Chinese)

[14] 段新峰, 程远胜, 张攀, 等. 冲击波和破片联合作用下 I 型夹层板毁伤仿真 [J]. 中国舰船研究, 2015, 10(6): 45 - 59. DUAN Xinfeng, CHENG Yuansheng, ZHANG Pan, et al. Numerical analysis of the damage on I-core sandwich panels subjected to combined blast and fragment loading [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2015, 10(6): 45 - 59. (in Chinese)

[15] Hatch-Aguilar T, Najjar F, Szymanski E. Computation hydrocode study of target damage due to fragment-blast impact [C] // Proceedings of 26th International Symposium of Ballistics, 2011.

[16] 陈长海, 朱锡, 侯海量, 等. 近距空爆载荷作用下固支方板的变形及破坏模式 [J]. 爆炸与冲击, 2012, 32(4): 368 - 375. CHEN Changhai, ZHU Xi, HOU Hailiang, et al. Deformation and failure modes of clamped square plates under close-range air blastloads [J]. Explosion and Shock Waves, 2012, 32(4): 368 - 375. (in Chinese)

[17] 李茂, 朱锡, 侯海量, 等. 冲击波和高速破片对固支方板的联合作用数值模拟 [J]. 中国舰船研究, 2015, 10(6): 60 - 67. LI Mao, ZHU Xi, HOU Hailiang, et al. Numerical simulation of steel plates subjected to the impact of both impact waves and fragments [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2015, 10(6): 60 - 67. (in Chinese)

[18] Kambouchev N, Noels L, Radovitzky R. Numerical simulation of the fluid-structure interaction between air blast waves and free-standing plates [J]. Computers & Structures, 2007, 85(11/12/13/14): 923 - 931.