

柱状装药预制破片缩比战斗部爆炸冲击波和破片的作用时序

夏冰寒 王金相 周楠 陈兴旺 卢孚嘉

Blast Wave and Time Sequence of Prefabricated Fragments for Scaled Warhead with Cylindrical Charge

XIA Binghan, WANG Jinxiang, ZHOU Nan, CHEN Xingwang, LU Fujia

引用本文:

夏冰寒, 王金相, 周楠, 等. 柱状装药预制破片缩比战斗部爆炸冲击波和破片的作用时序[J]. 高压物理学报, 2020, 34(1):015101. DOI: 10.11858/gywlxb.20190780

XIA Binghan, WANG Jinxiang, ZHOU Nan, et al. Blast Wave and Time Sequence of Prefabricated Fragments for Scaled Warhead with Cylindrical Charge[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2020, 34(1):015101. DOI: 10.11858/gywlxb.20190780

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11858/gywlxb.20190780

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

破片式战斗部空中爆炸下冲击波与破片的耦合作用

Coupling Action Spans for Air-Blast Waves and Fragments by Fragmentation Warheads Exploding in Air 高压物理学报. 2018, 32(1): 015104 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20170849

破片式战斗部破片与冲击波相遇位置研究

Meeting Location of Fragment and Shock Wave from Blast Fragmentation Warhead 高压物理学报. 2018, 32(6): 065101 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20180591

聚焦式战斗部破片轴向飞散控制技术

Axial Dispersion Control of Focusing Fragment Warhead 高压物理学报. 2018, 32(1): 015103 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20170512

非金属壳体低附带战斗部实验与破片飞散分析

Experimentation and Fragment Flight Analysis of Low-Collateral-Damage Warhead with Nonmetal Shell 高压物理学报. 2018, 32(4): 045103 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20170573

预制破片与轻质壳体阻抗匹配对破片初速及完整性的影响

Influence of Impedance Matching between Prefabricated Fragments and Light Shell on Initial Velocity and Completeness of Fragments

高压物理学报. 2018, 32(4): 045104 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20170602

扇形复合装药驱动破片定向飞散的数值模拟

Numerical Simulation of Directed Scattering of Fragments Driven by Sector-Shaped Double-Layer Charge 高压物理学报. 2017, 31(5): 557 https://doi.org/10.11858/gywlxb.2017.05.008 DOI: 10.11858/gywlxb.20190780

柱状装药预制破片缩比战斗部爆炸 冲击波和破片的作用时序

夏冰寒¹,王金相¹,周 楠²,陈兴旺¹,卢孚嘉³ (1.南京理工大学瞬态物理国家重点实验室,江苏南京 210094; 2.南京森林警察学院,江苏南京 210023; 3.北京北方车辆集团有限公司,北京 100072)

摘要:针对柱状装药的周向预制破片战斗部,结合无量纲分析方法和爆炸驱动理论,确定了 影响破片和冲击波相遇位置的关键参数,给出了由缩比战斗部推广预测原型战斗部爆炸产生的 破片冲击波作用时序的方法。采用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件进行数值模拟,对比验证了 理论分析和数值试验结果,分析了战斗部缩比比例对冲击波和破片作用时序的影响。结果表 明:缩比模型与原型战斗部爆炸产生的破片和冲击波的相遇位置之比和相遇时间之比主要取决 于两模型的质量比,在不考虑破片速度衰减时,两模型中载荷相遇位置之比和相遇时间之比等 于其质量比的 0.33 次方。受破片速度衰减影响,该方法仅适用于质量缩比不小于 0.2 的模型。

关键词:柱状装药战斗部;预制破片战斗部;缩比;冲击波;破片;作用时序

中图分类号: E932.4; O382.1 文献标识码: A

带壳装药战斗部爆炸时,产生空气冲击波的同时,还伴随着大量的高速弹片,共同对目标产生破坏 作用。在早期研究该类战斗部的毁伤效果时,通常在远距离处只考虑破片的作用,而在近距离处将其 解耦成近场冲击波的作用和高速破片群的作用^[1-2]。近年来,国内外学者开始对破片和冲击波的联合毁 伤效应展开了研究。Nyström等^[3]研究了爆炸产生的冲击波和破片对混凝土的毁伤效果,分别对破片、 冲击波的单独作用和联合作用展开分析,得到了联合作用毁伤效果大于两者单独作用毁伤效果的结 论。Leppänen^[4]利用试验和数值模拟方法研究了破片和冲击波对混凝土的联合毁伤作用,分析了破片 密度、炸药量和起爆方式对毁伤的影响,得出的结论为破片和冲击波联合作用下的毁伤大于两种毁伤 元单独作用时的毁伤。国内学者张成亮等^[5]、李茂等^[6]、侯海量等^[7] 开展了预制破片战斗部对一些组合 防护结构的毁伤特性研究,分析了高速破片和爆炸冲击波对不同结构破坏模式的影响,结果表明,高速 破片和冲击波的联合作用会加剧目标结构的破坏。

由于冲击波与破片的运动规律大不相同,因此在不同的距离下战斗部爆炸产生的破片和冲击波作 用在目标上的先后顺序也不同。确定冲击波与破片同时到达的距离,是研究两种毁伤效应耦合的重要 基础。对于破片冲击波的作用时序问题,国内外学者均有研究,Nyström等^[3]模拟了炸弹爆炸后破片和 冲击波的相遇位置,从而对破片和冲击波的协同作用进行研究。Lloyd^[8]分析了导弹战斗部爆炸后不同 时间破片相对于冲击波的位置。梁为民等^[9]在模拟爆腔内完成了模拟弹对目标靶板的爆炸破坏效应 试验,研究了战斗部在结构内爆炸条件下破片和冲击波的运动演化过程,分析了不同比例距离和装药

^{*} 收稿日期: 2019-05-17;修回日期: 2019-05-28

基金项目:国家自然科学基金(11672138,11602113);江苏省自然科学基金(BK20161055)

作者简介: 夏冰寒 (1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事毁伤与防护理论与技术研究. E-mail: 117121011409@njust.edu.cn

通信作者: 王金相(1978-), 男, 博士, 研究员, 主要从事爆炸与冲击动力学研究. E-mail: wjx@njust.edu.cn

系数下,破片与冲击波的运动规律。安振涛等^[10] 对破片和冲击波的运动时序问题进行了理论分析,得 出了冲击波和破片同时到达目标的距离,该距离大小与破片形状和单个破片质量关系不大。在对冲击 波和破片的作用时序问题研究中,通常采用理论计算、数值仿真和试验等方式开展^[9-13]。考虑到对于 某些较大型战斗部,在仿真计算时会出现网格过多、计算时间过长的问题,实验研究时对实验场地要求 很高,且操作困难,耗资较大,因此有必要进行缩比模型的相似律研究。目前相关的研究报道较少,且 主要针对冲击波和目标结构的缩比,对于缩比战斗部爆炸产生的破片和冲击波的运动规律,尤其是两 者作用时序的规律研究还不够充分。

针对柱状装药预制破片缩比战斗部爆炸产生的破片和冲击波的传播过程与作用时序展开探究,考虑到实验难度较大,各项测量难以实施,故采用量纲分析方法,结合爆炸驱动理论与现有经验公式, 对影响破片和冲击波作用时序的因素及其缩比后的相似准则进行分析,确定影响破片和冲击波相遇位 置的关键参数,并结合数值模拟结果验证并分析战斗部缩比比例对破片和冲击波作用时序的影响。

1 理论分析

1.1 量纲分析

建立如图 1 所示的柱状装药预制破片战斗部 模型,模型由炸药和破片 2 部分组成。炸药采用 柱状 TNT 炸药,轴向密集排布 540 枚扇形破片,破 片材料均为 45 钢,战斗部整体模型如图 1(a) 所 示,其截面如图 1(b) 所示,其中 r、h、d 分别为装 药半径、装药高度和破片厚度。由于炸药爆炸所 产生的能量中破片的变形能约占总能量的 1%^[10], 因此破片的变形、破坏和质量损失忽略不计,只 考虑破片的动能、爆炸产物的动能和内能。决定 破片和冲击波相遇位置的控制参数主要来自 3 个



Fig. 1 Schematic diagram of the warhead model

方面:破片的质量 m_{p} ,炸药的质量 m_{e} 、装药密度 ρ_{e} 、单位质量炸药释放的化学能 E_{e} 、爆炸产物的膨胀指数 γ_{e} ,空气的初始压力 p_{a} 、初始密度 ρ_{a} 、绝热指数 γ_{a} 。以上物理量的单位与量纲如表 1 所示。

Object	Parameters	Symbol	Unit	Dimension
Fragment	Mass	$m_{ m f}$	kg	М
	Mass	m _e kg		М
Employing	Density	$ ho_{ m e}$	$kg \cdot m^{-3}$	ML^{-3}
Explosive	Chemical energy released per unit mass of explosive	E_{e}	$m^2 \cdot s^{-2}$	$L^{2}T^{-2}$
	Expansion index	$\gamma_{ m e}$	1	SI
	Initial pressure	p_{a}	$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}$	$ML^{-1}T^{-2}$
Air	Initial density	$ ho_{\mathrm{a}}$	$kg \cdot m^{-3}$	ML^{-3}
	Adiabatic index	γ_{a}	1	SI

表 1 破片和冲击波相遇距离问题中相关物理量及其单位和量纲 Table 1 Parameters and their units and dimensions related to the location of the two encounters

若以 R 表示破片和冲击波的相遇距离, 那么存在函数关系式

$$R = f(m_{\rm f}; m_{\rm e}, \rho_{\rm e}, E_{\rm e}, \gamma_{\rm e}; p_{\rm a}, \rho_{\rm a}, \gamma_{\rm a})$$

(1)

上述物理量以L、M、T为基本量纲,可取 m_{e} 、 ρ_{e} 、 E_{e} 为基本量,则式(1)可化为下面的无量纲关系

$$\frac{R}{\rho_{\rm e}^{-1/3}m_{\rm e}^{-1/3}} = f\left(\frac{m_{\rm f}}{m}; 1, 1, 1, \gamma_{\rm e}; \frac{p_{\rm a}}{\rho_{\rm e}E_{\rm e}}, \frac{\rho_{\rm a}}{\rho_{\rm e}}, \gamma_{\rm a}\right)$$
(2)

若采用同种炸药在空气中做缩比模型实验,那么有6个有关的控制参数与原模型相同,即

$$(\rho_{\rm e}, E_{\rm e}, \gamma_{\rm e}; p_{\rm a}, \rho_{\rm a}, \gamma_{\rm a}) = {\rm const}$$
(3)

则无量纲函数关系式可简化为

$$R = m_{\rm e}^{1/3} f\left(\frac{m_{\rm f}}{m}\right) \tag{4}$$

式(4)即为基于量纲分析得到的相遇距离的定性关系式,可知破片和冲击波的相遇距离取决于炸药总质量以及破片和炸药的质量比。

1.2 破片和冲击波相遇位置和相似准则

在 1.1 节中使用量纲分析法得到的破片和冲击波相遇位置的定性关系式还不足以明确两载荷相遇 位置和相关参数的具体关系,本节将结合爆炸驱动理论和相关经验公式对其具体形式进行推导。

对破片,依据Gurney公式^[9]可知最大破片速度

$$v_0 = G \sqrt{\alpha/(1+0.5\alpha)} \tag{5}$$

式中: G 为炸药的格林参数; α 为战斗部破片总质量与装药量之比, 对于同一战斗部的不同缩比模型, 模型中的 α 应为常数。故不同模型中的破片速度应相等。

考虑到破片的速度衰减,破片飞行时间 t_f 与距离 R 的关系为^[10]

$$t_{\rm f} = 250 \frac{m_{\rm f}^{1/3}}{v_0} \left[\exp\left(\frac{0.004R}{m_{\rm f}^{1/3}}\right) - 1 \right]$$
(6)

对冲击波,由于破片的存在会在一定程度上削减冲击波的强度,依据能量法可以得到削减后的等效 TNT 当量 m_{be}与装药时的 TNT 药量 m 的关系^[10]

$$m_{\rm be} = \frac{0.347 + 0.653\beta}{2 - \beta} m_{\rm e} \tag{7}$$

式中: β 为战斗部的装填系数, $\beta = m_e/(m_e + m_f)$ 。式(7)可改写为

$$m_{\rm be} = \mu m_{\rm e} \tag{8}$$

对于指定的战斗部,由于各缩比模型的α相等,故μ为常数。

冲击波波阵面传播到距离 R 处的时刻 ts 可由经验公式¹⁹ 改进得到

$$t_{\rm s} = 4.56 \times 10^{-4} R^{1.76} m_{\rm be}^{-0.25} \tag{9}$$

要求得破片和冲击波同时到达的距离 R, 令 $t_f = t_s$, 可得

$$250 \frac{m_{\rm f}^{1/3}}{\nu_0} \left[\exp\left(\frac{0.004R}{m_{\rm f}^{1/3}}\right) - 1 \right] = 4.56 \times 10^{-4} R^{1.76} m_{\rm be}^{-0.25}$$
(10)

通过式(10)直接求出 R 与 m 的关系较为困难,由于近场环境下破片速度衰减较小,因此若不考虑 破片速度衰减,式(10)可改写为

$$R/v_0 = 4.56 \times 10^{-4} R^{1.76} m_{\rm be}^{-0.25} \tag{11}$$

如前所述, v₀为常数,则式(11)可改写为

$$R = \gamma m_{\rm be}^{0.33} \tag{12}$$

忽略破片速度衰减,视破片为匀速运动,可以得到破片和冲击波的相遇时间 t

$$t = R/v_0 = \gamma m_{\rm be}^{0.33}/v_0 \tag{13}$$

前面已指出,同一原型战斗部的不同缩比模型中 ν₀、μ均为常数,而 γ 为 ν₀ 的函数,故 γ 也为常数。 那么由式 (12)、式 (13) 可知,破片和冲击波的相遇距离和时间与等效 TNT 当量的 0.33 次方成正比。由 此可推断出质量为 m 的缩比模型中破片冲击波相遇时间 t₁ 和距离 R₁ 与质量 M 的原模型中破片冲击波 相遇时间 t₂ 和位置 R₂ 的关系为

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{R_1}{R_2} = \frac{m_{\rm be}^{0.33}}{M_{\rm be}^{0.33}} = \left(\frac{m}{M}\right)^{0.33} \tag{14}$$

2 有限元仿真

2.1 缩比模型

为研究不同缩比尺寸下的工况,针对图 1 所示的战斗部,保持战斗部各部分尺寸(r、h、d)比例不 变,对整体战斗部模型进行缩比。结合前文可知,破片和冲击波的相遇距离主要取决于炸药与破片的 质量,故按照 0.8:1、0.4:1、0.3:1、0.2:1、0.1:1的总质量比设计包括原模型在内共 6 个模型,具体 尺寸列于表 2。

	Table 2 Scaled warhead size										
Model	<i>r</i> /cm	<i>h</i> /cm	<i>d</i> /cm	$m_{\rm e}/{ m g}$	$m_{\rm f}/{ m g}$	Mass shrinkage ratio	Dimension shrinkage ratio				
1	1.966	5.023	0.126	100	62.92	0.1	0.464				
2	2.476	6.328	0.159	200	125.83	0.2	0.585				
3	2.835	7.244	0.181	300	188.75	0.3	0.669				
4	3.120	7.972	0.200	400	251.67	0.4	0.737				
5	3.931	10.046	0.252	800	503.34	0.8	0.928				
6	4.237	10.822	0.271	1 000	629.15	1.0	1.000				

表 2 缩比战斗部尺寸 Table 2 Scaled warhead size

2.2 有限元模型

采用 ANSYS/LS-DYNA 非线性动力有限元分 析程序,考虑到整体结构的对称性,建立不同缩比 质量下的战斗部的 1/8 模型,如图 2 所示。

数值模型由炸药、空气和破片3部分组成, 均采用8节点Solid164三维实体单元建模,其中 炸药、空气单元使用多物质ALE算法,破片采用 Lagrange网格建模,破片与炸药和空气材料间采 用流固耦合算法。在对称面上设立对称边界,对 空气边界设定透射边界。模型采用 cm-g-μs 单位 制。起爆方式为中心线起爆。



炸药采用 HIGH_EXPLOSIVE_BURN 本构模型, 对爆轰产物的膨胀采用 JWL 状态方程描述

$$p = A\left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right) e^{-R_1 V} + B\left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V}$$
(15)

式中:p为爆轰压力,A、B、 R_1 、 R_2 、 ω 为试验确定的参数,e为指定函数,V为相对体积,E为初始内能。 计算中所采用的炸药参数见表 3^[11]。其中, ρ 为装药密度,D为爆轰速度, p_{CI} 为爆轰波阵面的压力。

表 3 TNT 炸药材料参数及 JWL 状态方程参数

Table 3	Parameters	of TNT	material	and JWL	equation	of state
I able 5	1 al ameter 5	UL LIVE	mattiai	and o tt L	equation	of state

<i>p</i> /(kg⋅m ⁻³)	$D/(\mathbf{m}\cdot\mathbf{s}^{-1})$	$p_{\rm CJ}$ /GPa	$E/(GJ \cdot m^{-3})$	A_1 /GPa	B_1 /GPa	R_1	R_2	ω	V
1 640	6 930	19.4	6.2	309	3.09	4.485	0.79	0.30	1

空气采用 NULL 材料模型及 LINEAR POLY NOMIAL 状态方程描述

$$p = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) E$$
(16)

式中: $\mu = \rho/\rho_0 - 1$, C_0 、 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 、 C_6 为试验定义的常数, E为单位体积的能量。空气材料参数 见表 4^[11]。

表 4 空气材料参数及状态方程参数

Table 4 Equation of state parameters of air

$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	E/MPa	C ₀ /MPa	C_1	C_2	<i>C</i> ₃	C_4	<i>C</i> ₅	C_6
1.25	0.25	-0.1	0	0	0	0	0.4	0

破片采用 MAT PLASTIC KINEMATIC 的钢材料模型,其应变率由 Cowper-Symonds 模型描述

$$\sigma_{\rm d} = \left(\sigma_0 + \frac{EE_{\rm h}}{E - E_{\rm h}}\right) \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{D}\right)^{1/n}\right] \tag{17}$$

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, 取 E = 210 GPa; E_h 为硬化模量, 取 E_h =

319 MPa; ε_p 为有效塑性应变; $\dot{\varepsilon}$ 为等效塑性应变 率; D、n 为常数, 对于低碳钢, 通常取 n = 5, D =400 s⁻¹。材料失效模型采用最大等效塑性应变失 效准则。破片材料参数见表 5^[12], 其中 ν 为泊松比。

 -12	5	吸户材料参数及状态力性参数
表	5	破片材料参数及状态方程参数

-	-	5	
$ ho/(\mathrm{kg}\cdot\mathrm{m}^{-3})$	ν	<i>σ</i> ∕MPa	Ė
7.83	0.3	1 075	0.9

3 结果及分析

3.1 破片和冲击波的传播过程

从各工况的数值仿真结果中可以发现,各个模型中破片和冲击波的传播规律大致相同,图 3、 图 4 给出了模型 2 中各阶段的破片和冲击波传播过程,主要分为 4 个阶段:第1阶段(Ⅰ)中破片领先于 正后方的冲击波,此时冲击波在驱动破片加速的同时绕流过破片;第2阶段(Ⅱ)破片速度趋于平稳,冲 击波汇集在破片前方,速度由快至慢衰减;第3阶段(Ⅲ)破片追赶上冲击波;第4阶段(Ⅳ)破片赶超冲 击波后领先于冲击波。





Fig. 4 Propagation of blast wave and fragments as a function of time in air in Model 2

3.2 破片和冲击波的相遇位置

表 6 给出了各个模型中破片和冲击波的相遇时间、相遇距离与(*m*/*M*)^{0.33}的关系。由表 6 结果可知,随着模型的减小,破片和冲击波的相遇距离也会随之缩减,这是因为破片的速度保持不变,冲击波速度

变小,导致破片追赶上冲击波的时间和距离也随之缩短。对比各结果中的相遇时间缩比、相遇距离缩 比与(m/M)^{0.33}的关系,可以看到,质量缩比在1.0~0.2范围内时,理论与仿真结果符合较好,但误差会随 着缩比模型的缩小而增大。这主要是由于在有限元计算中采用的ALE算法考虑了实际的破片和空气 的相互作用,而随着模型的缩小,破片迎风面积与质量之比却在增大,因此破片速度衰减带来的影响也 越来越大。结合以上数据,可以认为该方法适用于战斗部质量缩比不小于0.2的模型。

Model	Mass reduction	$(m)^{0.33}$	Meeting time			Meeting distance		
Widder	ratio	$\left(\frac{\overline{M}}{M}\right)$	Value/µs	Reduction	Deviation/%	Value/cm	Reduction	Deviation/%
1	0.1	0.464	140	0.403	13.1	27	0.397	14.4
2	0.2	0.585	188	0.531	9.2	36	0.529	9.5
3	0.3	0.669	229	0.642	4.0	45	0.651	2.7
4	0.4	0.737	270	0.763	3.5	52	0.764	3.6
5	0.8	0.929	334	0.941	1.3	64	0.945	1.7
6	1.0	1.000	355	1.000		68	1.000	

表 6 理论结果与仿真结果对比 Table 6 Comparison of theoretical and simulation results

4 结 论

缩比模型与原型战斗部爆炸产生的破片和冲击波的相遇位置之比和相遇时间之比取决于两模型 的质量比,在不考虑破片速度衰减时,两模型中的相遇位置之比和相遇时间之比等于其质量比的 0.33次方。通过有限元仿真验证了理论的有效性,同时由于破片速度衰减的影响,该方法适用于质量 缩比不小于 0.2 的模型。

参考文献:

- HU W, CHEN Z. Model-based simulation of the synergistic effects of blast and fragmentation on a concrete wall using the MPM [J]. International Journal of Impact Engineering, 2006, 32(12): 2066–2096.
- [2] LEPPÄNEN J. Concrete subjected to projectile and fragment impacts: modelling of crack softening and strain rate dependency in tension [J]. International Journal of Impact Engineering, 2006, 32(11): 1828–1841.
- [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] 张成亮,朱锡,侯海量,等.爆炸冲击波与高速破片对夹层结构的联合毁伤效应试验研究 [J]. 振动与冲击, 2014, 33(15): 184-188.

ZHANG C L, ZHU X, HOU H L, et al. Tests for combined damage effect of blast waves and high-velocity fragments on composite sandwich plates [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(15): 184–188.

- [6] 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 M, ZHU X, HOU H L, 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.
- [7] 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的毁伤特性 [J]. 爆炸与冲击, 2015, 35(1): 116-123.

HOU H L, ZHANG C L, LI M, 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.

[8] LLOYD R. Conventional warhead systems physics and engineering design [M]. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1998.

- [9] 梁为民, 张晓忠, 梁仕发, 等. 结构内爆炸破片与冲击波运动规律试验研究 [J]. 兵工学报, 2009(Suppl 2): 223–227. LIANG W M, ZHANG X Z, LIANG S F, et al. Experimental research on motion law of fragment and shock wave under the condition of internal explosion [J]. Acta Armamentarii, 2009(Suppl 2): 223–227.
- [10] 安振涛, 王超, 甄建伟, 等. 常规弹药爆炸破片和冲击波作用规律理论研究 [J]. 爆破, 2012, 29(1): 15–18.
 AN Z T, WANG C, ZHEN J W, et al. Theoretical research on action law of fragment and shock wave of traditional ammunition explosion [J]. Blasting, 2012, 29(1): 15–18.
- [11] 郑红伟,陈长海,侯海量,等.破片尺寸对空爆冲击波及破片传播过程的影响仿真分析 [J]. 中国舰船研究, 2017, 12(6): 73-80.

ZHENG H W, CHEN C H, HOU H L, et al. Simulation analysis of effects of single fragment size on air-blast wave and fragment propagation [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2017, 12(6): 73–80.

- [12] 史志鑫, 尹建平, 王志军. 预制破片的形状对破片飞散性能影响的数值模拟研究 [J]. 兵器装备工程学报, 2017(12): 31–35. SHI Z X, YIN J P, WANG Z J. Numerical simulation of the influence of prefabricated fragments shape on fragment scattering performance [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2017(12): 31–35.
- [13] 曾首义, 蒋志刚, 陈斌, 等. 冲击波与破片共同作用探讨 [C]//中国土木工程学会防护工程分会理事会暨学术会议, 2006: 263-267.

ZENG S Y, JIANG Z G, CHEN B, et al. Discussion on the interaction between shock wave and fragmentation [C]//China Civil Engineering Society Protection Engineering Branch Council and Academic Conference, 2006: 263–267.

Blast Wave and Time Sequence of Prefabricated Fragments for Scaled Warhead with Cylindrical Charge

XIA Binghan¹, WANG Jinxiang¹, ZHOU Nan², CHEN Xingwang¹, LU Fujia³

 National Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China;
 Nanjing Forestpolice College, Nanjing 210023, Jiangsu, China;
 Beijing North Vehicle Group Corporation, Beijing 100072, China)

Abstract: In order to explore the influence of the scale effects on the timing of fragmentation and shock wave, the key parameters affecting the location of fragmentation and shock wave are determined by the dimensionless analysis and explosion theory for the prefabricated fragment warhead. This paper proposes a method to predict the timing relationship of the prototype warhead fragmentation and blast wave by the scale ratio warhead, and establishes the model of the warhead under different scale ratios. The numerical simulation is carried out with ANSYS/LS-DYNA finite element software. Based on the theoretical and numerical results, we analyze the scale effects of the warhead on the timing of shock waves and fragmentation. The results show that the ratio of the encounter position of fragments and shock waves produced by the scaled model and the prototype model depends on the mass ratio of the two models. Without considering the velocity attenuation of fragments, the ratio of the encounter position in two models is equal to the 0.33 power of the mass ratio. Due to the effects of fragmentation velocity attenuation, the method is applicable to models with a mass reduction ratio of not less than 0.2.

Keywords: columnar charge warhead; prefabricated fragment warhead; scale ratio; shock waves; fragment; action time sequence