

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2020.02.007

# 杀爆战斗部相关作用场的毁伤效能研究<sup>\*</sup>

杨 帅<sup>①</sup> 赵太勇<sup>①</sup> 张晓东<sup>②</sup> 成乐乐<sup>③</sup> 李 帅<sup>④</sup> 孟凡高<sup>④</sup> 江 帅<sup>⑤</sup>

①中北大学地下目标毁伤技术国防重点实验室(山西太原,030051)

②西北机电工程研究所(陕西咸阳,712000)

③新方舟安防科技有限责任公司(四川成都,610041)

④山东北方滨海机器有限公司(山东淄博,255200)

⑤中国人民解放军 94195 部队(甘肃定西,730500)

[摘 要] 破片和冲击波作为杀爆战斗部的两种主要毁伤元素,对目标的毁伤形式不尽相同。以杀爆弹为研究对象,在不同工况下,通过 LS-DYNA 动力学软件,对杀爆相关作用场的毁伤效能进行研究,并将其毁伤效能与单独冲击波作用进行对比,得到了如下结论:杀爆相关作用场的毁伤效能较单独冲击波作用有较大提升;TNT 当量的增加对杀爆相关作用有较大的增益;杀爆战斗部相关作用场的毁伤效能随着预开孔间距的增大而减小。

[关键词] 杀爆相关作用;冲击波作用;毁伤效能;LS-DYNA

[分类号] TJ012.4

## Damage Effectiveness of the Related Fields of Explosive Warhead

YANG Shuai<sup>①</sup>, ZHAO Taiyong<sup>①</sup>, ZHANG Xiaodong<sup>②</sup>, CHENG Lele<sup>③</sup>, LI Shuai<sup>④</sup>, MENG Fan'gao<sup>④</sup>, JIANG Shuai<sup>⑤</sup>

①National Defense Key Laboratory of Underground Target Damage Technology, North University of China  
(Shanxi Taiyuan, 030051)

②Northwest Institute of Mechanical and Electrical Engineering (Shaanxi Xianyang, 712000)

③New Ark Security Technology Co., Ltd. (Sichuan Chengdu, 610041)

④Shandong North Binhai Machinery Co., Ltd. (Shandong Zibo, 255200)

⑤People's Liberation Army 94195 (Gansu Dingxi, 730500)

[ABSTRACT] Being the two main elements to the blasting warhead, fragments and shock waves generate damage to the targets in different ways. Blasting bomb was defined as the research object. Its damage efficiency of the blast-related field was studied by LS-DYNA dynamics software under different working conditions and was compared with the single shock wave effect. It was found that damage effect of the killing and explosion-related action field greatly improves compared with the single shock wave effect. Increase of TNT equivalent has a greater gain on the effect of killing explosion-related effect. Damage efficiency of the relevant action field of the killing warhead decreases with the increase of the pre-opening interval.

[KEYWORDS] blast-related effects; shock wave effect; damage efficiency; LS-DYNA

## 引言

杀爆弹在各国军队内使用广泛。在 20 世纪初,中东地区发生的数场战役中,杀爆弹均发挥了至关重要的作用<sup>[1-2]</sup>。学者们也对杀爆弹的毁伤效能进行了大量的研究和积累。张成亮等<sup>[3-7]</sup>为探讨爆炸冲击波和高速破片协同作用的毁伤机理,做了大量

的试验,结果显示,在爆炸冲击波和高速破片协同作用下,目标的毁伤程度远大于冲击波或破片的单独作用;郑红伟等<sup>[8]</sup>进行了端部贴有预制破片的柱状 TNT 模型的仿真模拟,探讨了冲击波与高速破片的传播规律以及速度和能量衰减机制,研究结果表明,预制破片群会阻碍破片正后方冲击波的传播,较大程度地降低冲击波的强度和传播速度;陈长海等<sup>[9]</sup>对破片和冲击波的联合作用区间进行深入研究,得

<sup>\*</sup> 收稿日期:2019-08-29

第一作者:杨帅(1994 - ),男,硕士,研究方向为战斗部高效毁伤。E-mail:1043414401@qq.com

到冲击波与破片先后作用临界爆距的理论计算模型;曹兵等<sup>[10]</sup>建立了巡航导弹发动机舱模拟等效靶,并进行了冲击毁伤实验,研究了发动机在破片和冲击波耦合作用下的毁伤模式;张媛等<sup>[11-12]</sup>根据强度等效,建立了直升机等效模型及毁伤元参数的毁伤计算模型,并通过仿真得出了直升机在两种毁伤元联合作用下的结构动态响应,分析了战斗部炸药装药质量、炸点位置及破片穿孔密度等因素对直升机目标的毁伤影响。

就国内外研究而言,对杀爆弹在超近程范围内,冲击波和破片的相关毁伤效应的研究报道较少,对相关毁伤的形式、规律、机理还有待深入研究。本文中,将结合 LS-DYNA 仿真软件,对杀爆相关作用场进行研究,并对其毁伤效能进行对比分析。研究结论能够为杀爆战斗部的设计和威力评估提供关键的技术支持。

# 1 杀爆相关作用场及产生条件

## 1.1 杀爆相关作用场的基本概念

杀爆战斗部对目标作用时,当弹目距离大于某一值时,破片先与目标接触,大量破片会在目标处进行侵彻,并形成孔带、孔链,使得目标局部的易损特性发生突变。在此情况下,冲击波再次对目标进行作用,此时,破片作用导致目标的穿孔或结构强度降低,当冲击波作用在目标的孔带、孔链附近时,更易出现应力集中,使得目标的变形程度进一步加大。

在上述情况下,破片与冲击波对目标的毁伤作用就不仅是两者的叠加,此毁伤效应也被称之为杀爆相关毁伤效应,发生相关毁伤效应的破片和冲击波共同产生的作用场称之为杀爆相关作用场。

## 1.2 杀爆相关毁伤效应的产生条件

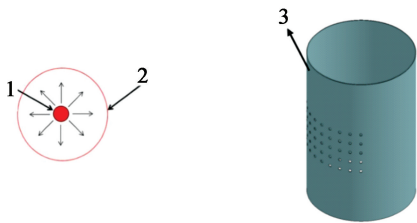
随着弹目距离增大,冲击波和破片的能量已经不足以对目标造成有效的毁伤作用,此时,也就不存在相关毁伤效应。因此,出现杀爆相关毁伤效应的区域也有特定的要求。相关毁伤效应的强弱受该范围内的破片密集度影响,只有破片在目标处形成的穿孔达到一定的密度时,目标的结构强度和易损特性才会发生改变,后续的冲击波对目标的毁伤效应也随之会被放大。

综上所述,杀爆相关毁伤效应产生的条件为:高密集度的破片先于冲击波对目标进行毁伤,形成大量穿孔,导致目标的结构强度和易损特性发生改变;与此同时,在该范围内的破片和冲击波均具备毁伤能力,此时便会出现杀爆相关毁伤效应。

# 2 数值模拟的计算模型

## 2.1 仿真模型的建立

对杀爆相关作用进行研究时,以巡航导弹为目标。针对美国的 BGM-109 战斧巡航导弹,对其导引头、制导舱、战斗部舱以及发动舱等零部件处的材料、结构进行分析研究,确定采用预开孔的圆柱薄壳等效模型。此外,考虑到杀爆弹破片群对目标作用的过程中,不可能进行无死角冲击侵彻,故圆柱薄壳上的预开孔区域并未完全周向覆盖,仅仅占据了周向约 120°的范围,如图 1 所示。图 1 中,圆柱薄壳的高度为 600 mm,预开孔范围的高度为 200 mm,上、下侧未开孔区域的高度均为 200 mm,模型的直径为 400 mm。



1 - 炸药;2 - 入射冲击波;3 - 预开孔圆柱壳靶。

图 1 杀爆相关作用的仿真模型

Fig. 1 Simulation model of blast-related effects

利用 True Grid 前处理软件建立等效计算模型。图 1 为杀爆相关作用的计算模型,左侧为炸药。在实际的仿真计算过程中,设置炸药的相关参数,并通过改变炸药质心位置坐标,来控制球形 TNT 炸药到圆柱薄壳的距离。

## 2.2 计算模型算法的选择

在研究杀爆相关作用场时,使用 \* Load\_Blast\_Enhanced 关键字进行数值模拟,见图 2。将预开孔圆柱薄壳上所有的 Segment 设置为段,同时对目标模型添加边界约束条件,引导爆炸冲击波对其作用,

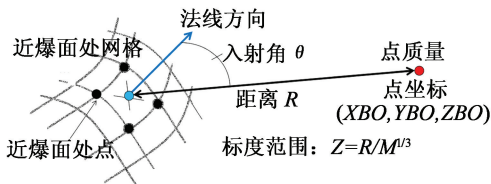


图 2 \* Load\_Blast\_Enhanced 关键字的爆炸压力计算模型

Fig. 2 Calculation model of explosion pressure for the keyword \* Load\_Blast\_Enhanced

采用忽略空气域的关键字来模拟炸药在空气中的爆炸,可以在保证计算精度的同时,极大地缩减仿真时间。该关键字根据实验数据库,计算得到迎载面上的爆炸压力,并将爆炸压力转换为施加到有限元网格节点的力。

2.3 计算模型材料的选择

在使用 \* Load\_Blast\_Enhanced 关键字模拟炸药的爆轰时,炸药默认为 TNT,所以本文仿真中的炸药均采用 TNT 进行计算,其他炸药利用计算公式进行相应的等效。仿真中所涉及的目标材料为 45<sup>#</sup> 钢,采用的单位制为 cm-g-ms-Mpa,具体的材料参数见表 1。表 1 中, $E$  为材料的弹性模量, GPa;  $V$  为材料泊松比;  $Y$  为材料的屈服应力, Pa;  $H$  为材料的切线模量, GPa;  $\beta$  为材料的硬化系数;  $\delta$  为材料的失效应变。

3 数值模拟与结果分析

3.1 杀爆相关作用的数值模拟

当爆炸冲击波作用于预开孔的圆柱薄壳时,冲击波首先对模型的迎载面进行作用,而后冲击载荷向背载面传播。

图 3 为 1.33 kg TNT 在 0.5 m 炸距时,预开孔圆柱薄壳在不同时刻的应力云图。 $t$  为 150  $\mu\text{s}$  时,冲击波作用在圆柱薄壳上,随后应力波开始传播;当  $t$  为 400  $\mu\text{s}$  时,圆柱薄壳迎载面出现轻微的凹陷,并有扩大变形的趋势;当  $t$  为 1 000  $\mu\text{s}$  时,圆柱薄壳迎载面处变形最大,且有继续向背载面运动的趋势,此时迎载面两侧壳体向中线聚拢;当  $t$  为 5 000  $\mu\text{s}$  时,迎载面左、右两侧的壳体已经在中间聚拢,圆柱薄壳产生整体的凹陷翻折变形。

3.2 杀爆相关作用毁伤效应的仿真对比

3.2.1 不同炸距下预开孔对圆柱薄壳变形的影响

为了研究预开孔对圆柱薄壳变形的影响以及杀爆相关作用的毁伤特征,将预开孔圆柱薄壳与未开孔圆柱薄壳的仿真模拟结果进行对比,结构如图 4 所示。

图 4 中,当炸距相同时,毁伤元作用时间是相同的。将不同模式的毁伤结果进行对比分析可知:当炸距从 0.5 m 增加到 2.0 m 时,杀爆相关作用对目标的毁伤程度要远大于冲击波单独作用时的毁伤程度。冲击波单独作用时,在炸距  $R \geq 1.0$  m 的情况下,圆柱薄壳仅出现平头变形和轻微的椭圆式变形;而杀爆相关作用下,出现此种变形时,炸距  $R \geq 1.4$

表 1 材料参数  
Tab. 1 Material parameters

材料	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$E/\text{GPa}$	$V$	$Y/\text{Pa}$	$H/\text{GPa}$	$\beta$	$\delta$
45 <sup>#</sup> 钢	7.89	2.06	0.3	0.004	0.05	1.00	1.00

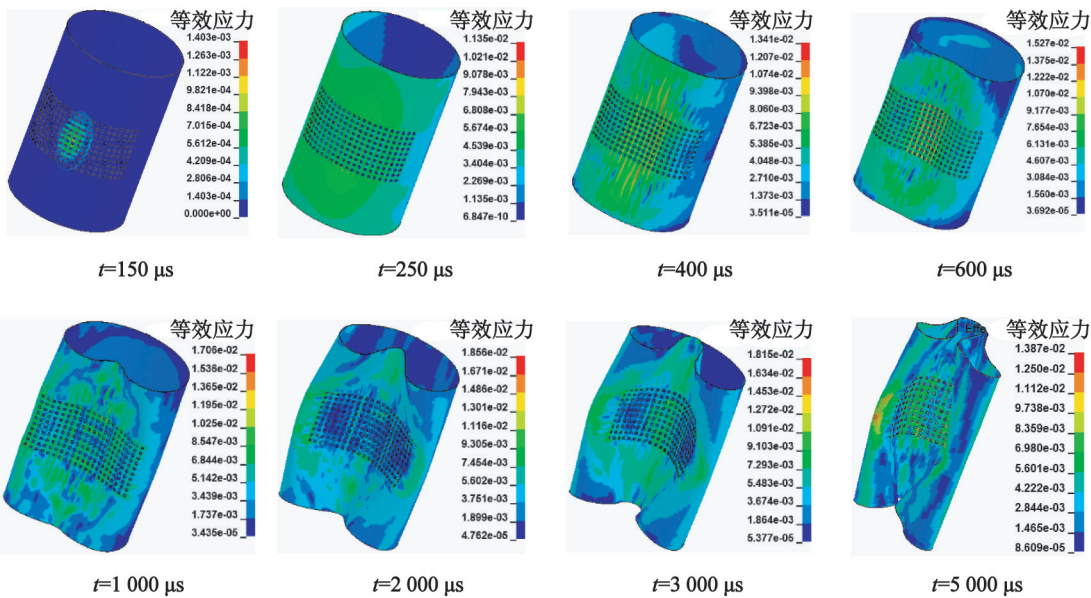


图 3 圆柱薄壳不同时刻的应力云图

Fig. 3 Stress nephogram of a cylindrical thin shell at various times



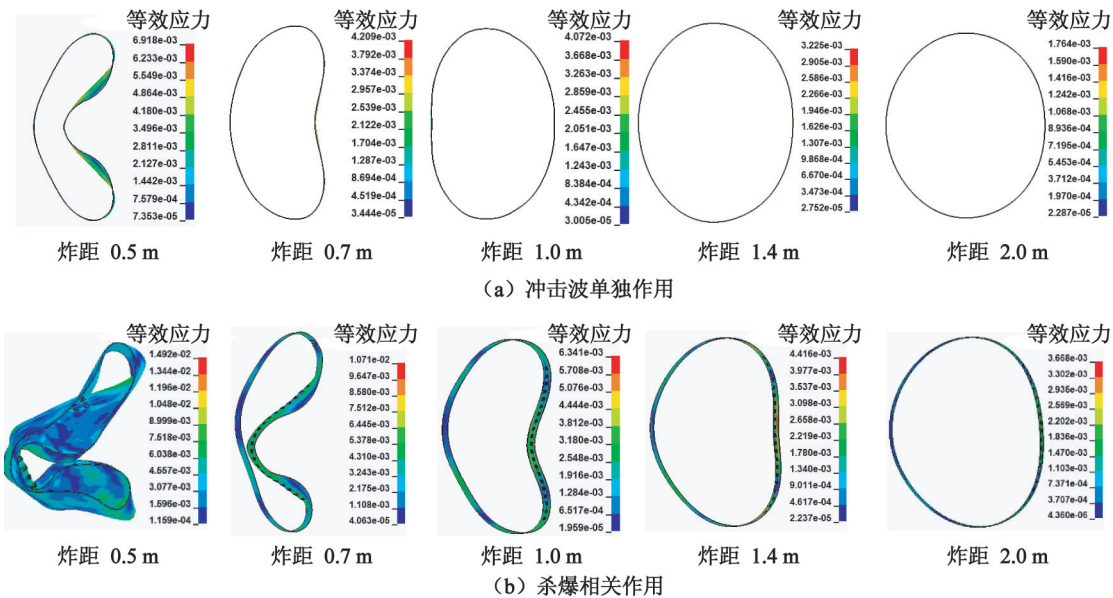


图 4 不同毁伤模式时圆柱薄壳的应力云图

Fig. 4 Stress nephogram of a cylindrical thin shell at different damage modes

表 2 不同毁伤模式时圆柱薄壳的变形量

毁伤模式	等效靶	炸距 $R/\text{m}$				
		0.5	0.7	1.0	1.4	2.0
冲击波单独作用	变形量 $W/\text{mm}$	322.0	178.0	95.0	52.0	29.0
杀爆相关作用	变形量 $W_k/\text{mm}$	400.0	376.0	181.2	87.2	44.7

m;当  $0.5\text{ m}\leq R<1.0\text{ m}$  时,冲击波单独作用下圆柱薄壳产生凹陷变形,而杀爆相关作用时圆柱薄壳的变形程度较大;当炸距为  $0.5\text{ m}$  和  $0.7\text{ m}$  时,圆柱薄壳完全变形。总体来看,当炸距相同时,杀爆相关作用下目标的变形等级比冲击波单独作用时的高。对图 4 中圆柱薄壳变形程度进行量化,所得结论如表 2 和图 5 所示。其中,相对变形量  $\varnothing_k$  为变形量  $W_k$  与原模型直径的比值。

由图5可知,在不同炸距下,杀爆相关作用对目

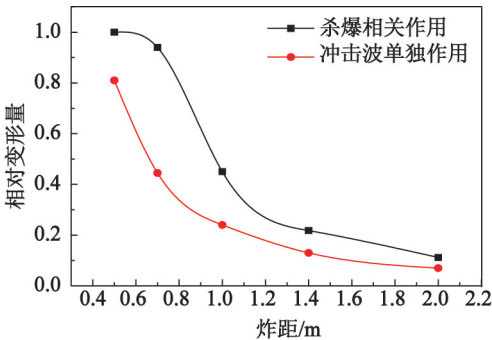


图 5 炸距  $R$  和相对变形量  $\varnothing_k$  的关系曲线

Fig. 5 Relationship between explosion distance  $R$  and deformation amount  $\varnothing_k$

标的毁伤效果要大于冲击波的单独作用;随着炸距的不断增大,两种毁伤模式下相对变形量的差值逐渐减小;当炸距增加到  $2.0\text{ m}$  时,相对变形量的差值已经减小到 4%;对最大相对变形量进行比较,并将  $\delta_x$  定义为毁伤效能相关系数,则有

$$\delta_x(h,d)=\delta_x(20,10)=\frac{[\varnothing]_x}{[\varnothing]}=\frac{0.454R^2}{0.251R^2}=1.81。$$

(1)

式(1)表明,在相同炸距下,杀爆相关作用下的目标相对变形量是单独冲击波作用下的 1.81 倍,即杀爆相关作用对目标的毁伤产生了放大效应。

3.2.2 TNT 质量对杀爆相关毁伤效能的影响

为了研究 TNT 质量对杀爆相关毁伤效能的影响,将炸距设置为  $0.7\text{ m}$ ,以不同质量的 TNT 对  $1.5\text{ mm}$  厚的 45# 钢进行毁伤作用。将杀爆相关作用及冲击波单独作用两种工况进行对比分析。图 6 为 TNT 质量与相对变形量的关系曲线。

图6中,在不同毁伤模式下,对应的关系曲线均表现为线性正相关,可见TNT质量对毁伤模式的影响规律是一致的,也说明了在近炸条件时,冲击波对目标的变形起主导作用。两种毁伤模式下,目标的

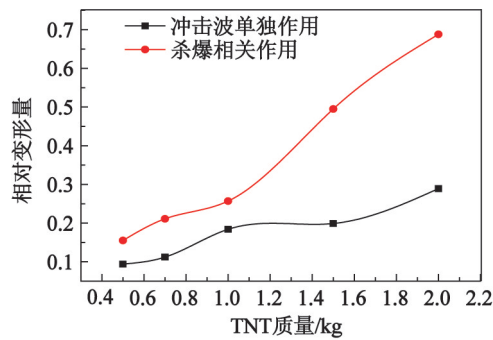


图 6 TNT 质量与相对变形量的关系

Fig. 6 Relationship between TNT mass and relative deformation

相对变形量与 TNT 质量有关, TNT 质量为 0.5 kg 时, 两种毁伤模式间的差距小于 5%; 当 TNT 质量增加到 2.0 kg 时, 两种毁伤模式间的差距约为 36%。说明 TNT 质量的增加能增强杀爆相关作用的毁伤效果。

3.2.3 开孔间距对杀爆相关毁伤效应的影响

为了研究开孔间距对杀爆相关毁伤效应的影响, 仿真模拟选取的目标靶为 10 mm 开孔、间距不等的 5 种圆柱薄壳靶(间距分别为 20、40、60、80、100 mm), 在不同炸距下, 对各工况进行仿真模拟计算, 结论如图 7、图 8 所示。

由图 7 可知, 当目标靶预开孔间距为 20 mm 时, 在杀爆相关作用下, 目标靶出现上下侧撕裂式的解体毁伤, 且撕裂范围贯穿整个预开孔区域; 当预开孔间距为 40 mm 时, 目标靶仅在下侧靠近中间的孔带处出现裂纹, 有撕裂解体毁伤的趋势。

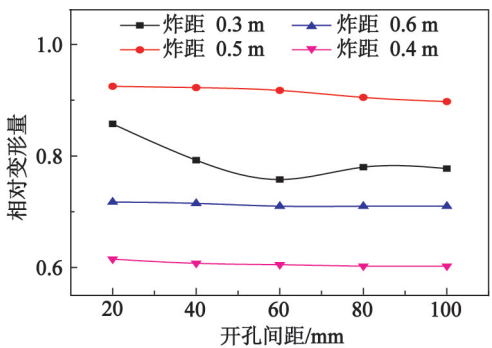


图 8 预开孔圆柱薄壳在不同炸距时的相对变形量曲线

Fig. 8 Relative deformation of pre-opened cylindrical shells at different explosion distances

如图 8 所示, 在不同炸距下, 由目标靶的相对变形量曲线图可知, 壳体相对变形量随着开孔间距的增加而呈现下降趋势; 且随着炸距的增加, 相对变形量先减小、后增加而后再减小; 当炸距在 0.5 m 处时, 相对变形量达到峰值, 此时毁伤能力较高; 而后随着炸距的不断增大, 破片和冲击波的耦合毁伤作用对圆柱薄壳预开孔间距的敏感程度逐渐降低。

4 结论

为研究杀爆相关作用场的毁伤规律, 结合数值模拟软件, 研究了影响杀爆弹相关毁伤作用的重要参数, 并与冲击波单独作用时的毁伤效果进行了对比分析, 得到如下结论:

1) 杀爆相关作用的毁伤效果较单一冲击波而

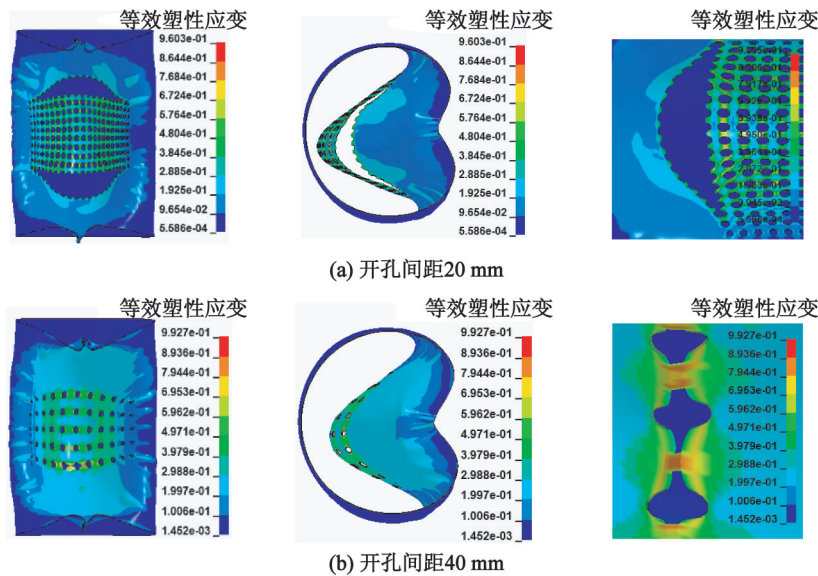


图 7 开孔间距为 20、40 mm 时圆柱薄壳的等效塑性应变云图

Fig. 7 Effective plastic strain nephogram of a cylindrical shell with a pre-opening interval of 20 mm or 40 mm

言有较大的提升,在近距离处尤为明显;

2)随着 TNT 质量的增加,两种作用方式的毁伤效能都有所提升,但杀爆相关作用的增益较大;

3)毁伤效能与预开孔间距大致呈现负相关趋势,且随着炸距的增加,耦合毁伤作用对预开孔间距的敏感程度逐渐降低。

## 参 考 文 献

- [1] 冯顺山,蒋浩征. 爆炸冲击波与杀伤破片对飞机目标相关毁伤效应的研究[J]. 北京工业学院学报, 1986(1):119-131.  
FENG S S, JIANG H Z. An investigation on fragment-last interrelated damage effect on aircraft targets[J]. Journal of Beijing University of Technology, 1986(1):119-131.
- [2] 尹建平,王志军. 弹药学[M]. 2 版. 北京:北京理工大学出版社, 2012:313-325.  
YIN J P, WANG Z J. Ammunition theory[M]. 2nd Ed. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2012:313-325.
- [3] 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.
- [4] 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 X F, CHENG Y S, ZHANG P, 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.
- [5] 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.
- [6] 李营,吴卫国,朱海清,等. 爆炸冲击波与破片对 RC 桥的耦合毁伤研究[J]. 爆破, 2016, 33(2):142-148.  
LI Y, WU W G, ZHU H Q, et al. Damage characteristics of RC bridge under combined effects of blast shock wave and fragments loading [J]. Blasting, 2016, 33(2): 142-148.
- [7] 李茂,朱锡,侯海量,等. 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[J]. 国防科技大学学报, 2017, 39(6):64-70.  
LI M, ZHU X, HOU H L, et al. Numerical simulation of the damage effects of clamped square plate subjected to the impact of blast wave and fragments [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2017, 39(6): 64-70.
- [8] 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):74-80.  
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):74-80.
- [9] 陈长海,侯海量,李万,等. 破片式战斗部空中爆炸下冲击波与破片先后作用的临界爆距研究[J]. 海军工程大学学报, 2018, 30(2):18-23.  
CHEN C H, HOU H L, LI W, et al. Critical stand-off distances of action order for air-blast waves and fragments by fragmentation warheads exploding in air [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2018, 30(2):18-23.
- [10] 曹兵,何勇,李向东. 破片与冲击波耦合作用下巡航导弹发动机毁伤试验研究[J]. 火工品, 2009(5):8-12.  
CAO B, HE Y, LI X D. Experimental investigation on damage to engine of cruise missile by fragments and shock waves[J]. Initiative & Pyrotechnics, 2009(5): 8-12.
- [11] 张媛. 杀爆战斗部对武装直升机的毁伤研究:破片先于冲击波作用于目标[D]. 南京:南京理工大学, 2013.
- [12] 张媛,胡传辉,刘刚,等. 冲击波和破片对直升机旋翼的联合毁伤研究[J]. 弹箭与制导学报, 2013, 33(4):109-112.  
ZHANG Y, HU C H, LIU G, et al. The study on the combined damage of blast and fragments on helicopter rotor [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2013, 33(4):109-112.