

文章编号: 1674-8190(2024)05-086-11

典型壁板结构爆炸冲击实验与仿真研究

周佳煜^{1,2}, 王彬文^{1,2}, 张宇^{1,2}, 郭玉佩^{1,2}, 李达诚^{1,2}, 白春玉^{1,2}

(1. 中国飞机强度研究所 强度与结构完整性全国重点实验室, 西安 710065)

(2. 中国飞机强度研究所 结构冲击动力学航空科技重点实验室, 西安 710065)

摘要: 空空导弹战斗部爆炸产生的爆炸冲击波毁伤源对飞机蒙皮结构的损伤效果受多种因素影响, 作用机理较为复杂, 因此冲击波对飞机蒙皮结构的毁伤评估需要大量的实验和计算样本支撑。本文设计并进行铝合金加筋平板静爆实验, 分析固支加筋平板在冲击波加载下的动态响应和变形规律; 采用有限元分析软件 LS-DYNA 对爆炸冲击下的结构响应进行仿真分析, 通过对比仿真结果与实验结果对数值仿真模型的准确性进行验证。结果表明: 孔洞面积占该形式加筋平板面积大于 1% 时, 靶板更容易发生以固支边界撕裂为主要形式的拉伸失效, 增大孔径或增加孔的数量都有提高孔间贯穿损伤的风险; 同爆距下爆炸物与目标迎爆面的夹角越大, 靶板的变形程度越严重, 夹角从 30° 增大至 60° 时目标挠度可增加 30% 以上。

关键词: 爆炸冲击波; 壁板结构; 动态响应; 数值模拟; 实验研究

中图分类号: V214.4

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2024.05.08

Experimental and simulation study on explosion impact of a typical wall panel structure

ZHOU Jiayu^{1,2}, WANG Binwen^{1,2}, ZHANG Yu^{1,2}, GUO Yupei^{1,2}, LI Dacheng^{1,2}, BAI Chunyu^{1,2}

(1. National Key Laboratory of Strength and Structural Integrity, Aircraft Strength

Research Institute of China, Xi'an 710065, China)

(2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Structural Impact Dynamics,

Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China)

Abstract: The damage effect of the explosion shock wave generated by the explosion of the air to air missile warhead on the aircraft skin structure is influenced by various factors, and the function mechanism is relatively complex, so that a large number of experimental and computational samples are required to evaluate the damage of shock waves to aircraft skin structures accurately. The static explosion experiments of aluminum alloy reinforced plates with fixed supports are performed, and their dynamic response and deformation patterns under shock wave loading are analyzed. The finite element analysis software LS-DYNA is used to simulate the structural response under explosive impact, and the simulation model is validated by comparing with the experimental results. The results show that the target plate is prone to tensile failure with tearing at the fixed boundary when the hole area ratio of the reinforced plate exceeds 1%, and increasing the hole diameter or the number of holes enhances the risk of perforation damage between holes. The target deformation increases with the incident angle of explosion, and the target deflection can increase by more than 30% when the angle increases from 30° to 60° at a constant explosion distance.

Key words: explosion shock wave; wall panel structure; dynamic response; numerical simulation; experimental study

收稿日期: 2023-11-13; 修回日期: 2024-03-12

通信作者: 王彬文(1974-), 男, 博士, 研究员。E-mail: asriwbw@vip.163.com

引用格式: 周佳煜, 王彬文, 张宇, 等. 典型壁板结构爆炸冲击实验与仿真研究[J]. 航空工程进展, 2024, 15(5): 86-96.

ZHOU Jiayu, WANG Binwen, ZHANG Yu, et al. Experimental and simulation study on explosion impact of a typical wall panel structure[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2024, 15(5): 86-96. (in Chinese)

0 引言

军用飞机作为战场上的高价值、高威胁目标,是敌方的首选打击对象,然而现有的飞机结构完整性大纲并不能完全满足作战背景下的需要^[1]。在现代战争中,飞机主要面临各式导弹的威胁,导弹战斗部爆炸会产生高速破片和爆炸冲击波两种毁伤源。其中冲击波毁伤源具有初始能量高、速度衰减快的特点,受爆炸距离、目标受载面积等因素影响,相同质量的爆炸源在不同作用条件下毁伤目标可能表现出不同的破坏形式,因此有必要对毁伤目标在爆炸冲击载荷作用下的响应展开研究。

目前针对爆炸冲击毁伤的研究方法包括炸药静爆实验和计算机仿真分析,其研究内容主要集中在冲击波引起的大变形毁伤、冲击波对结构部件的毁伤特征、冲击波毁伤作用规律等方面。在研究冲击波引起的大变形毁伤方面,彭兵等^[2]对某型防护结构进行了仿真分析和实爆实验,得出了结构大变形的损伤形态;刘粟涛等^[3]用实验和仿真方法得到了高强钢板在爆炸冲击时的结构响应为中心凸起,四周向下翘曲。在研究冲击波对结构部件的毁伤特征方面,成乐乐等^[4]采用实验和数值模拟方法研究了爆炸作用下舱室结构的载荷传递行为和损伤特性,总结了冲击波作用下舱室结构的凹陷塑性变形、沿板格撕裂、花瓣形破口等多种损伤模式;张宇等^[5]基于有限元方法分析了典型飞机机翼爆炸冲击毁伤的变形模式,指出机翼内部桁架结构可以抑制蒙皮变形,但随着蒙皮进一步变形会在长桁/翼肋交界处产生迅速扩展的撕裂裂纹。在研究冲击波作用规律方面,黄涛等^[6]进行了双舱结构模型战斗部内爆实验,发现冲击波能量会随结构强弱发生流向改变,整体能量更易向结构薄弱处倾泻。还有一些研究者通过对典型结构件的研究获取部件或系统在爆炸冲击波毁伤下的作用规律。姚武文等^[7]以起爆点到蒙皮垂直距离和炸药装药质量为主要计算参数,推导了一种计算蒙皮崩落尺寸的公式;张媛等^[8]研究了固定装药量时爆炸炸点位置对直升机旋翼的毁伤情况,得到了旋翼临界毁伤曲线;董秋阳^[9]提出一种超压作用的简化方法,并通过该方法研究得出同等装

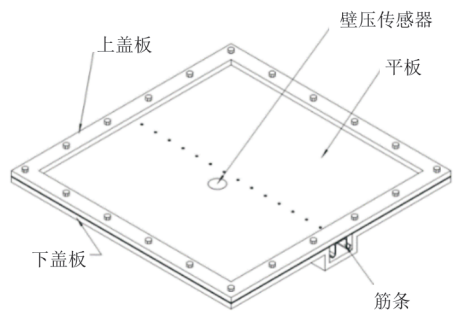
药量下爆炸距离对机翼损伤结果影响显著的结论;程帅等^[10]通过实验与有限元仿真的方法研究了某型加筋结构在爆炸冲击下的变形分布规律和塑性毁伤特性,推算出飞机表面结构塑性变形阈值;韩璐等^[11]建立了一种考虑冲击波超压作用的飞机毁伤计算模型,能够推算战斗部威力场对几何舱段的毁伤;陈新祥^[12]研究了铝板在爆炸冲击载荷作用下的变形,获得了不同冲击波强度下机翼等效靶的破坏规律。

总体来说,冲击波对目标的毁伤是一种复杂的行为,不同的炸药当量、爆炸距离、目标结构形式,甚至爆炸时目标与炸药的相对位置都会影响爆炸毁伤的严重程度,因此需要大量的实验和计算样本支撑,目前采用航空铝合金材料的爆炸冲击研究通常结构简单,工况数不够丰富。本文采用静爆实验和有限元仿真结合的研究方法,基于实验结果和经验证的仿真模型研究典型加筋壁板结构在爆炸冲击载荷下的变形特征,分析预制孔损伤和炸药安放位置等因素对壁板结构动态响应的影响规律,以期研究爆炸冲击波的破坏作用和壁板结构的防护提供参考。

1 铝合金加筋壁板静爆实验

1.1 实验设计

本文设计的加筋壁板结构如图1(a)所示,壁板由方形平板和U型筋条组成,二者之间通过14颗直径为4 mm的铆钉铆接,铆接位置和铆钉间距如图1(b)所示。平板与筋条均为1.6 mm厚的2024航空铝合金材料,平板尺寸为480 mm×480 mm,筋条与平板直接接触宽度23 mm,如图1(c)所示。



(a) 正等轴测图

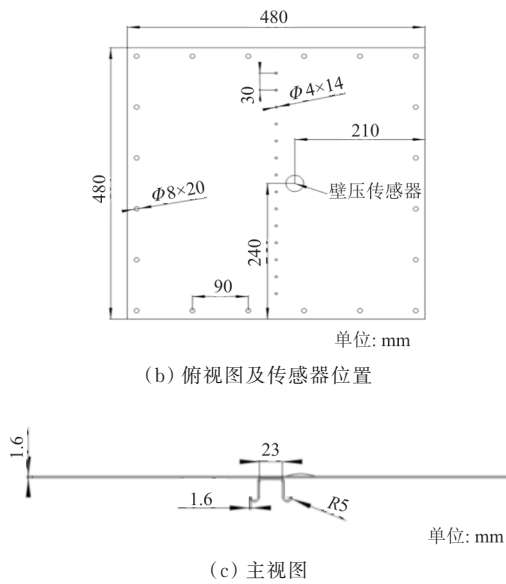
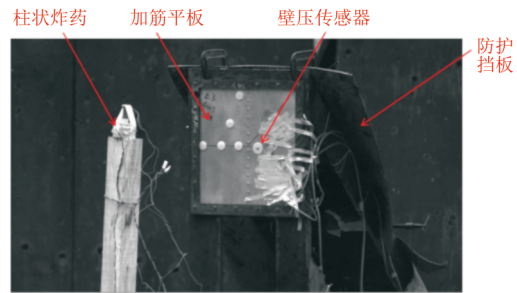


图1 加筋平板试件与传感器位置布置
Fig. 1 Layout of wall panel structures specimens and sensors location

使用厚度 10 mm、宽度 30 mm 的钢制盖板与底板夹持靶板,四周通过 20 只 M8 螺栓贯穿靶板、前后盖板和靶架,完成对靶板的固支,在爆炸后固支边界不发生松动、摇晃,保证靶板不脱离边界约束。

静爆实验主要围绕定额装药量 0.4 kg TNT 炸药爆炸时,位于 0.8、1.0 和 1.2 m 爆距下的加筋壁板的损伤特性展开。实验中通过采集到的壁面反射压力表冲击波作用强度,而靶板的损毁程度则通过实验后对靶板进行 3D 扫描出的轮廓线来表示。实验方法如图 2 所示,采用炸药实爆的方式产生冲击波载荷。将质量 0.4 kg、径高比 1:1 的炸药药柱放置在木制支座一端,采用上端面中心点瞬时起爆的引爆方式。加筋平板试验件竖立放置,药柱所在位置与平板中心点同高,将药柱与平板的水平距离视为爆炸距离。侯海量等^[13]的研究表明,加载冲击波毁伤源时,加筋板主要的损伤表现为塑性变形凹坑和中心点大挠度变形,中心点挠度能够直观反映出冲击波作用效果。本文实验除了中心挠度外,还关注靶面反射壁压等能够反映载荷特征参数,为避免安装传感器给筋条造成损伤,在靶板中心区域不与筋条重合的位置设置最大量程为 34.5 MPa 的压力传感器一台,覆盖实验最近爆距工况的壁面反射压峰值范围。为避免冲击波对靶板后的人员设备造成伤害,在工装

后夹持防护挡板一片。



(a) 实验布置

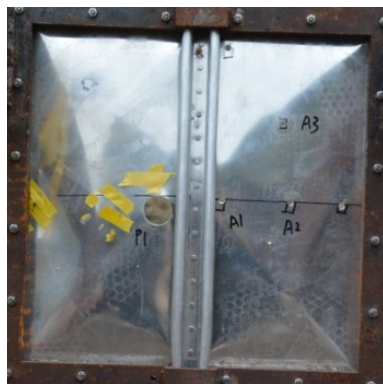


(b) 典型实验结果

图2 实验现场布置及典型实验
Fig. 2 Experimental site layout and typical result

1.2 实验结果分析

静爆实验的典型结果如图 3 所示,靶板中心区域出现呈现漏斗状大挠度变形,在 1.2 m 的爆炸距离下,爆炸距离约是炸药特征尺寸的 18 倍,0.4 kg TNT 造成的变形挠度仍可达 18.8 mm,为板厚的 10 倍以上。背部加强筋弯曲未发生断裂,无铆钉崩落。实验中出现的靶板变形模式其中一种是塑性变形叠加中心大挠度凹坑,靶板出现的塑性铰如图 3(a) 所示。当装药量一定并减小爆炸距离时,靶板挠度值快速增长,如图 4 所示。在装药质量 0.4 kg 时,1.0 m 爆距处靶板中心区域挠度 28.6 mm,相比 1.2 m 处增加了 52.1%;0.8 m 爆距处靶板挠度为 46.9 mm,相比 1.0 m 处再增加了 64.0%。可见靶板的挠度并非是随爆距减小而线性增长的,这与冲击波初始强度高但衰减快的特性相符。在较大装药量或爆炸距离较近的情况下,平板被工装夹住的部分会向中心区域轻微移动。爆距 0.8 m 时,进一步加大炸药质量至 0.6 kg,会出现平板边缘开裂变形,如图 3(b) 所示。



(a) 塑性变形



(b) 边界开裂

图 3 实验中两种主要的变形失效模式
Fig. 3 Two main deformation failure modes in the experiment

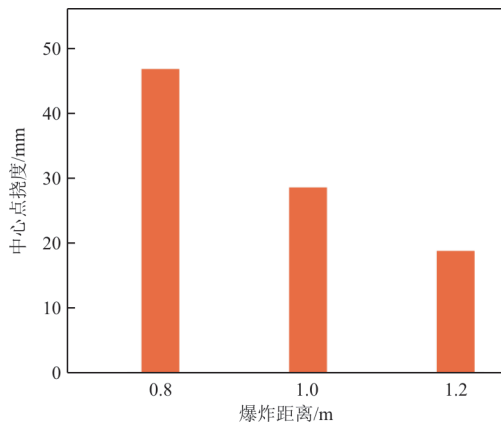


图 4 0.4 kg 炸药不同爆炸距离靶板挠度
Fig. 4 Comparison of deflection at different explosion distances for 0.4 kg explosives

2 数值计算分析

2.1 数值仿真模型

为了更加详细地分析加筋平板在爆炸载荷下的动态响应规律,参照实验利用 LS-DYNA 软件

建立有限元分析模型,使用任意欧拉-拉格朗日方法(ALE)实现爆炸冲击仿真。由于靶板的厚度远小于其面板尺寸,故采用四边形壳单元模拟,网格尺寸为 2 mm。实验中不存在铆钉崩落的情况,故采用不设置失效参数的 spotweld 单元实现平板和筋条的连接。空气域和炸药采用多物质网格,实现物质在分界面上的交换。在流固耦合计算中,网格尺寸对计算结果会产生较大影响,划分网格时依据靶板网格尺寸的 2、3 倍和炸药半径的 1/7、1/3 分别建立单一网格尺寸为 4、5、6 和 10 mm 的流体域。计算结果表明,空气网格 10 mm 时,会引发网格尺寸不匹配引起的计算错误;网格尺寸为 5 和 6 mm 时计算靶板挠度结果相近,但 6 mm 网格计算时靶板的震荡时间更久;加密网格至 4 mm,挠度值与实验结果误差增长至 20% 以上,且计算时长增长 17.3%。综合考虑计算成本和计算精度,空气域采用尺寸为 5 mm 的六面体网格。靶板与炸药和空气的耦合采用 *CONSTRAIN_LAGRANGE_IN_SOILD 实现。为模拟无限空气域,将空气域外侧设置为透射边界条件,计算模型如图 5 所示。空气使用 *MAT_NULL 材料和 *EOS_LINEAR_POLYNOMIAL 状态方程描述^[14],炸药采用 *MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 材料和 *EOS_JWL 状态方程描述^[15],铝合金靶板使用 *MAT_JHONSON_COOK 材料描述^[16]。空气、炸药、铝合金材料参数如表 1~表 3 所示。

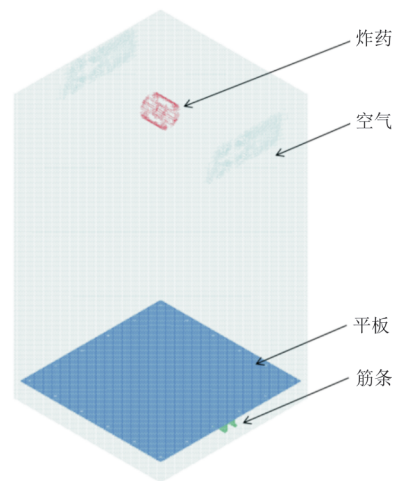


图 5 爆炸仿真模型
Fig. 5 Simulation model of explosion experiment

表 1 空气材料参数
Table 1 Material parameters of air

参数	数值	参数	数值
$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1.30	C_4	0.4
P_c/Pa	-1.0×10^{-10}	C_5	0.4
$\mu/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2})$	2.0×10^5	E/Pa	2.5×10^5

表 2 炸药材料参数
Table 2 Material parameters of explosive

参数	数值	参数	数值
$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1 658	B/GPa	3.734 71
$D_{CJ}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	6 930	R_1	4.15
P_{CJ}/GPa	21	R_2	0.9
E_0/GPa	6.0	ω	0.35
A/GPa	373.77		

表 3 铝合金材料参数
Table 3 Material parameters of aluminum alloy

参数	数值	参数	数值
$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2 780	C	0.008 3
ν	0.33	m	1.7
E/GPa	73.083	$C_p/[(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1})\cdot\text{K}^{-1}]$	875
T_r/K	300	D_1	0.13
T_m/K	775	D_2	0.13
A/MPa	369	D_3	-1.5
B/MPa	684	D_4	0.011
n	0.73	D_5	0

2.2 实验与仿真的对比分析

Nurick 等^[17]的研究表明,在爆炸载荷下固支平板存在三种失效模式:塑性大变形(模式 I)、拉伸失效(模式 II)、剪切失效(模式 III),这三种失效模式同样适用于固支加筋平板。试验中爆炸当量 0.4 kg TNT 炸药,爆炸距离 0.8 和 1.0 m 的两种工况变形特征明显且固支边界牢固。在对应的仿真分析中可清楚地看到在爆炸冲击波的作用下,传递给加强筋的动反力使加强筋迅速进入机构状态,造成加强筋和面板作为整体一起运动。随着压力载荷的衰减,面板在筋条反作用力下逐渐停止塑性变形,但筋条仍在惯性和面板传递的作用力下继续塑性变形,直至加筋板的动能全部转化为变形能,进入弹性振动阶段。在此种变形响应

下的加筋壁板处于典型的塑性凹坑叠加加大变形失效模式,如图 6 所示。对图 3(b)所示的边界变形失效工况进行仿真,出现固支约束处撕裂的拉伸失效模式(如图 7 所示),符合固支方板失效模式规律。模式 III 的剪切失效是在超强冲击载荷作用下发生的,工程上一般少见,在本文的实验和仿真中不作考虑。

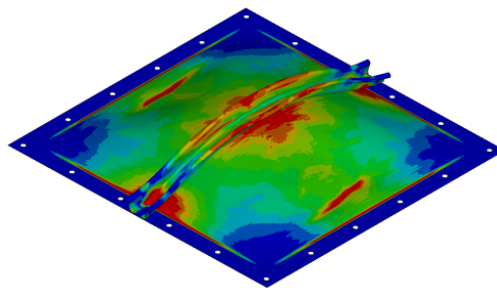


图 6 0.4 kg 炸药 0.8 m 爆炸距离无孔靶板的变形失效模式

Fig. 6 Deformation failure mode of a 0.4 kg explosive an explosion distance of 0.8 m from a perforated target plate

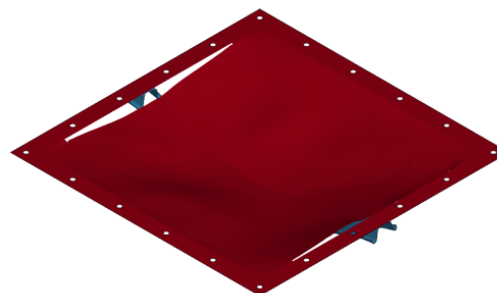


图 7 0.6 kg 炸药 0.8 m 爆炸距离无孔靶板的变形失效模式

Fig. 7 Deformation failure mode of a perforated target plate at an explosion distance of 0.8 m with 0.6 kg explosive

在仿真计算中,设定炸药在 $t=0$ ms 时引爆,如图 8 所示,在 1.2 m 爆炸距离时,第一周期峰值约出现在 $t=1.29$ ms,处于位移曲线的第一个周期;第一振动周期过后,位移曲线在平衡位置小幅振动,中心点残余挠度约 20.4 mm,与实验测得的挠度 18.8 mm 相比偏大 8.0%。在 1.0 m 爆炸距离时,靶板中心处最大挠度值约出现在 $t=1.1$ ms,残余挠度 30.8 mm,与该工况实验中测得的中心处挠度 28.6 mm 相比偏大 7.7%,较仿真中 1.2 m 工况增长 52.9%。在 0.8 m 爆炸距离时,第一周期峰值约出现于 $t=0.85$ ms,中心点残余挠度约为

51.2 mm,与实验测得的挠度 46.9 mm 相比偏大 8.4%,较仿真中 1.0 m 工况增长 64.1%。每个爆距的仿真结果均比同工况实验结果偏大约 8%。三种工况的误差均在合理范围内,这种误差主要是仿真中不涉及各种能量耗散造成的,以 1.2 m 工况为例,靶板处于峰值挠度时,动能与内能之和约为 1.35 kJ,第一振荡周期过后总能量稳定处于 1.31 kJ,仅衰减了 1.5%,仿真中不考虑爆炸冲击波作用于工装支架的能量和靶板变形时与夹具间的摩擦。降低爆距时各仿真工况挠度的增长率与实验结果也近似相同,仿真模型的一致性较为可靠。随着爆距变远,冲击波衰减更多,不仅靶板下凹速率变慢,峰值挠度出现的时间依次推迟,而且挠度到达峰值后的震荡回弹周期也 longer。

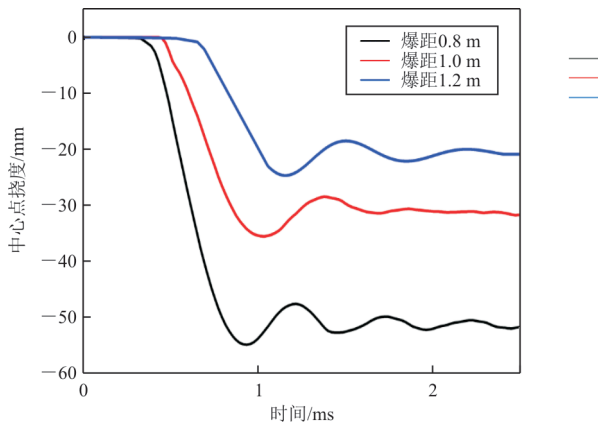


图 8 靶板中心点挠度变化

Fig. 8 Deflection change at the center of the target plate

对实验后的靶板进行 3D 扫描得到靶板的中心截面线,与仿真结果的对比图如图 9 所示。

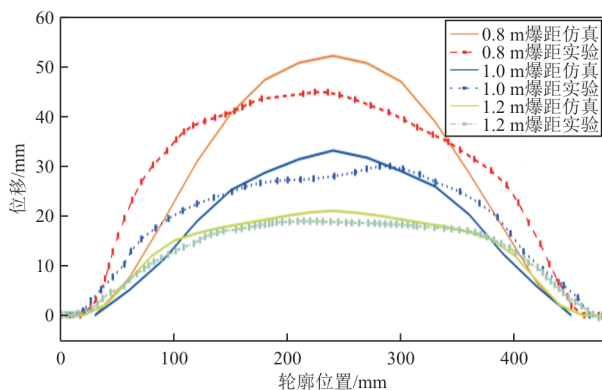
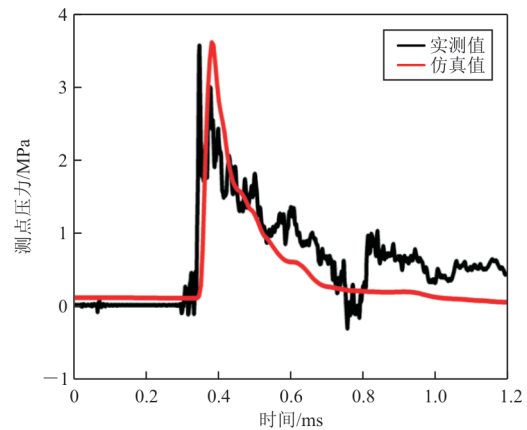


图 9 0.4 kg 炸药在不同爆炸距离下靶板中心截面线实验与仿真对比

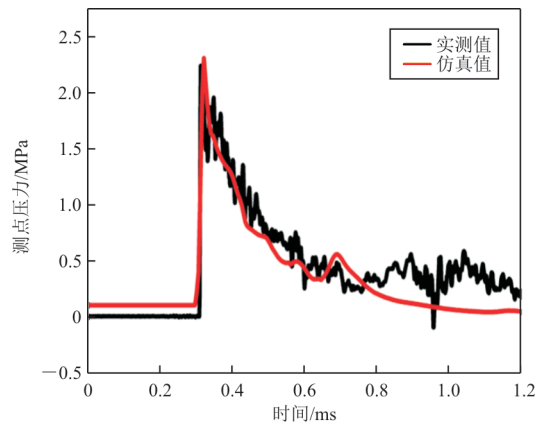
Fig. 9 Experimental and simulation comparison of 0.4 kg explosives at different explosion distances on the central cross section line of the target plate

仿真工况均为理想条件,得到的结果均为完全对称,但实验中只能尽力减小各种因素引起误差的影响,因此两者存在一定差异。对于爆距相对较远的 1.0、1.2 m 工况,实验和仿真的轮廓较为接近。0.8 m 工况时,实验得到的轮廓相比仿真更低矮,但靶板两侧变形大于仿真结果,且凹坑具有一侧陡峭而另一侧平缓的不对称特征,这可能是由于摆放炸药时位置未与靶板中心轴线完全对齐,在该爆距下冲击波超压峰值强于其他工况,放大了初始误差造成的结果误差。

对于 0.8 和 1.0 m 这两种工况的壁压传感器原始数据和仿真分析得到的压力载荷时间历程曲线对比如图 10 所示。



(a) 0.4 kg 炸药 0.8 m 爆炸距离



(b) 0.4 kg 炸药 1.0 m 爆炸距离

图 10 两工况测点壁压时程曲线

Fig. 10 Time history curve of wall pressure at two working conditions measurement points

从图 10 可以看出:0.8 m 爆距下压力载荷峰值实测为 3.56 MPa,仿真压力载荷峰值 3.61 MPa; 1.0 m 爆距下压力载荷峰值实测为 2.24 MPa,仿

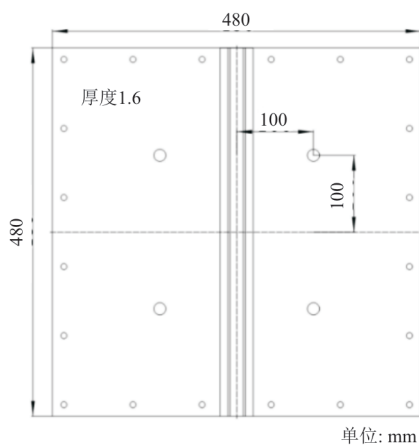
真压力载荷峰值 2.31 MPa。尽管 1.2 m 工况中未能采集到有效反射压数据,但 0.8 和 1.0 m 仿真工况得到的冲击波的反射压时间历程曲线与实验测得峰值的误差均小于 5%,具有较高的一致性,证明仿真模型是可靠的。

3 预制损伤和爆炸方位对靶板失效的影响分析

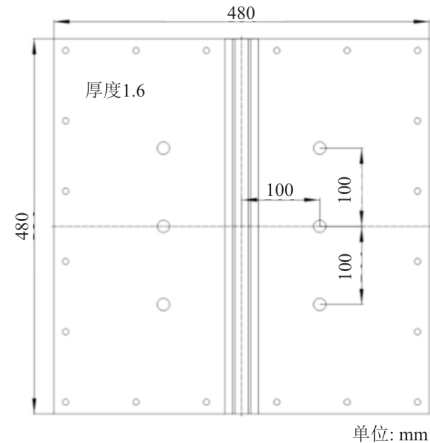
杀爆战斗部毁伤目标时产生的破片、冲击波两种毁伤源作用于目标一般存在时间先后顺序,破片先穿孔目标,冲击波再作用是一种典型的作用工况^[18]。破片造成的穿孔损伤对目标结构的承力性能造成负面影响,有可能导致在冲击波作用下产生更严重的破坏。而破片在目标上通常不会造成像冲击波一样的大挠度损伤,因此在研究穿孔造成的结构承力性能降级规律时,可以使用预制损伤来代替破片穿孔损伤,有利于降低研究的复杂性。另外,实际作战时冲击波并不总是正入射的,斜入射条件下的结果可能与正入射存在差异,因此有必要对预制孔靶板在斜入射爆炸冲击波作用下的毁伤变形开展研究。基于第 2 节所使用的仿真方法,研究预制孔和改变入射角对靶板变形带来的影响。

3.1 预制孔的影响

为研究预制孔对靶板抗冲击能力的影响,本文设计的两种开孔方式(4 个孔,6 个孔)的靶板如图 11 所示。



(a) 4 孔靶开孔位置



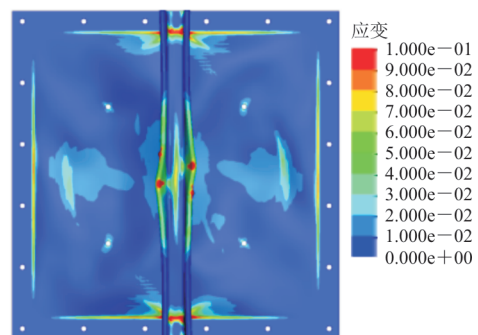
(b) 6 孔靶开孔位置

图 11 预制孔靶板形式

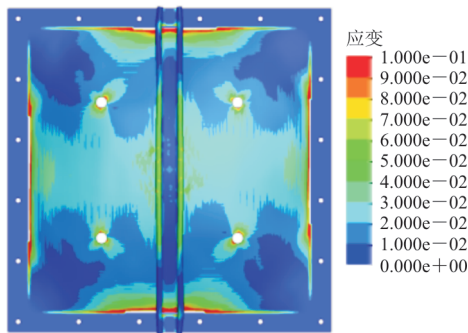
Fig. 11 Forms of prefabricated hole plates

图 11 中开孔方式分别为 4、6 个孔,开孔直径分别有 8、10 和 16 mm 三种类型。仿真时炸药量均设置为 0.4 kg,爆炸距离 1 m,共计 6 项工况,分析相同爆炸工况下靶板中心挠度值变化与靶板损伤变形情况。从图 11 可以看出:存在 4 个直径 8 mm 预制孔的靶板在受到冲击波后的中心点峰值挠度为 24.1 mm,与无预制孔板的中心点峰值挠度相比降低了 22.8%。

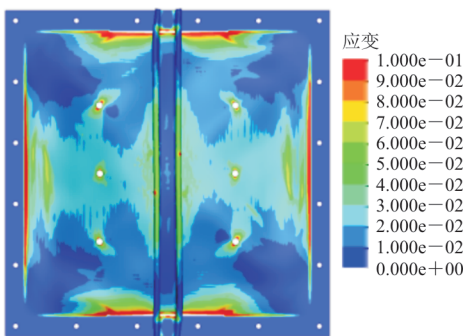
多孔靶板板面应变结果如图 12(a)所示,靶板上塑性应变较小但筋条变形严重,这和无孔靶板的变形特征较为相似。当预置孔直径增大到 10 与 16 mm 时,靶板边缘约束的位置因无法承受载荷而撕裂,如图 12(b)所示,靶板出现以拉伸失效为主要表现形式的第二类失效(模式 II)。当预制孔数增加至 6 个,三种开孔直径下靶板均发生拉伸失效如图 12(c)、图 12(d)所示,同时孔径越大开孔处应变越大。



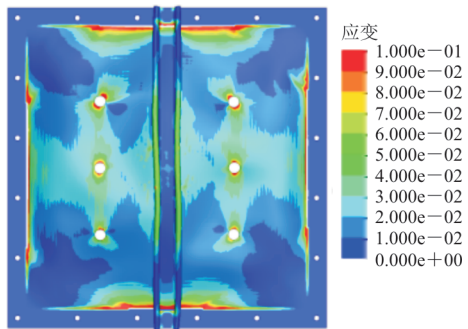
(a) 4 孔 $d=8$ mm



(b) 4 孔 $d=16$ mm



(c) 6 孔 $d=10$ mm



(d) 6 孔 $d=16$ mm

图 12 多孔靶板板面应变

Fig. 12 Surface strain of target plates with holes

从图 12 可以看出:除靶板四周固支处和开孔处应变较大外,相邻较近的两个孔之间也存在连通的应变值较高的区域;当开孔数量增加和增大孔径时孔间应变均增大,有向各孔之间形成贯穿撕裂损伤的演化趋势。为验证这一趋势,在图 11 所示靶板开孔方式的基础上,于相邻两个孔的中点位置设置额外预制孔,并增大孔径至 20 mm,在相同爆炸工况下确认发生了固支端和沿预制孔的撕裂损伤,如图 13 所示。

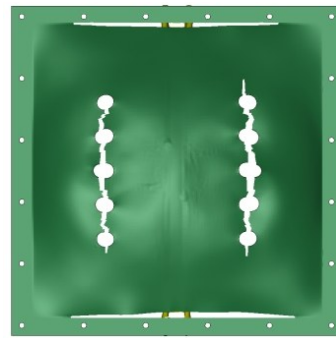


图 13 10 孔靶板在冲击波作用下的变形失效模式

Fig. 13 Deformation failure mode of a 10 holes target plate under shock wave

至此关于预制孔对此类加筋板在冲击波载荷作用下的变形影响规律可以得到初步的认识:当加筋板出现以塑性大变形为主的第一类失效时(模式 I),特定尺寸的预制孔会降低变形的严重程度,但预制孔占板面面积较大时,会降低靶板的刚度,更容易造成拉伸失效。

3.2 爆炸方位的影响

空气冲击波与刚性壁面以某角度入射时,将会发生斜反射。通过改变炸药与靶板中心区域的相对位置,研究冲击波入射角度给靶板变形带来的影响。

炸药和靶板的放置位置关系如图 14 所示。

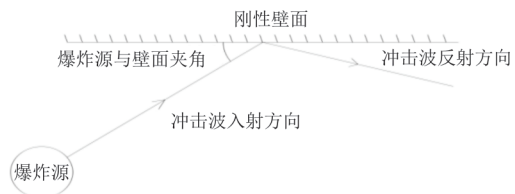


图 14 爆炸载荷加载示意图

Fig. 14 Schematic diagram of explosive load loading

面板上有 4 个直径为 16 mm 预制孔的靶板,在炸药与靶板夹角为 60° 时的位移分布云图如图 15 所示,色卡每提升一阶表示挠度增长 1 mm。冲击波与靶板的作用图形如图 16 所示,可以看出:当炸药偏置于靶板一侧时,先接触冲击波的一侧先发生变形。靶板中线初始时在筋条的支撑作用下变形程度较小,因此在 0.6 ms 的位移分布图上可见左右两侧板面下凹且凹陷深度存在显著差别。当与冲击波后接触的一侧靶板产生较大程度变形

时,筋条已进入机构状态和靶板一起运动,而先发生变形的一侧板面轻微回弹,出现 1.2 ms 时所表现的一侧大面积变形,另一侧变形位移分布呈梯度排列的情况。

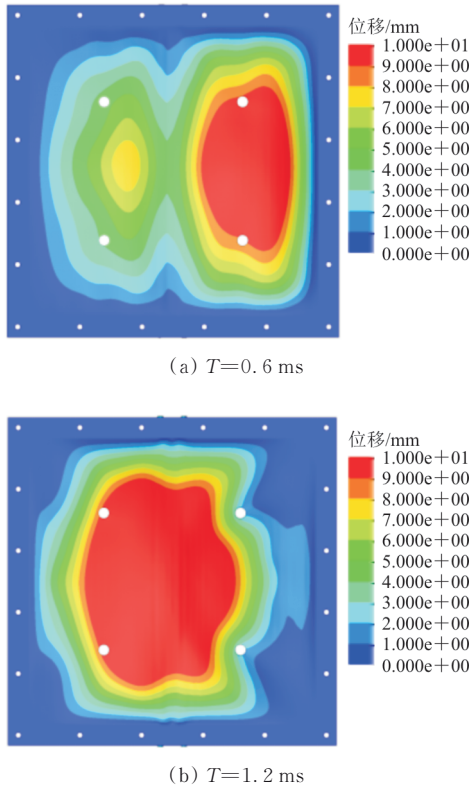


图 15 四个直径 16 mm 预制孔靶板爆炸夹角 60° 位移分布云图
 Fig. 15 Displacement distribution nephogram of four 16 mm diameter prefabricated hole target plates with an explosion angle of 60°

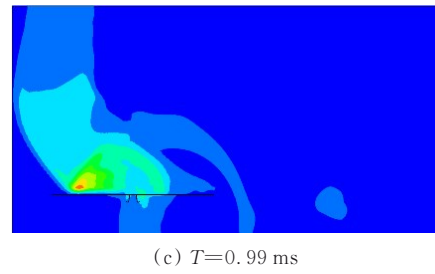
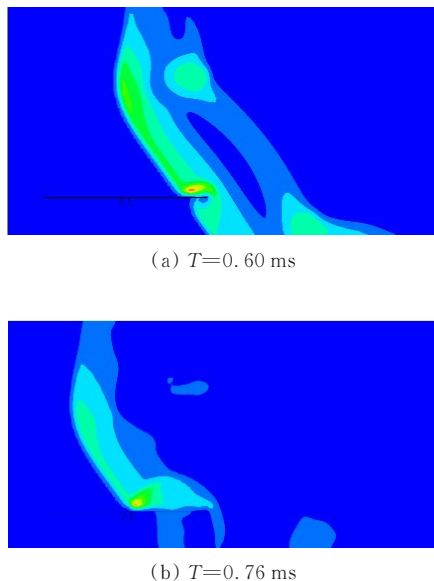


图 16 炸药与无孔靶板壁面存在夹角时冲击波的传播特征

Fig. 16 Propagation characteristics of shock waves when there is an angle between explosives and the wall

与冲击波正入射不同,斜入射时板面变形后的最大挠度所在位置偏向波阵面与板面后接触的一侧,爆炸源与壁面夹角越小,最大挠度点偏移得越严重。所有工况中向一侧偏移最大的是含 4 个直径 16 mm 预制孔靶板、爆炸夹角 30°、爆心距离 0.8 m 冲击的工况,水平偏移量 36 mm,占一侧靶板承载长度的 17.1%。偏移量最小的为爆炸夹角 60°、在 1 m 远处对无孔靶板的冲击,水平偏移仅 6 mm。

当平板的塑性变形基本结束时,筋条因惯性和平板反力的作用下继续塑性变形,这和正入射冲击波时筋条的响应规律一致。预制孔靶板 60° 夹角爆炸背爆面应力云图如图 17 所示,由于筋条两侧的板面变形存在差异,筋条的变形明显向一侧扭曲。整个靶板上的残余应力主要集中于筋条中部、筋条两端、平板固支处及预制孔处,最大超过 400 MPa。

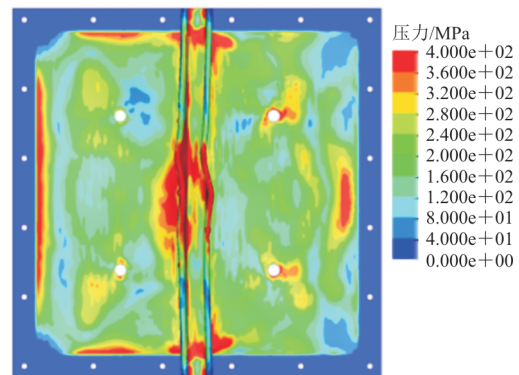


图 17 预制孔靶板 60° 夹角爆炸背爆面应力云图
 Fig. 17 Von mises stress nephogram of prefabricated hole plate with an angle of 60° explosion on back surface

各工况的靶板变形情况统计如表 4 所示,对比如图 18 所示。对于任何一种靶板形式来说,爆炸

距离仍是决定变形挠度的最主要因素,爆炸距离越近,则变形相对越严重,但存在爆炸角度时靶板的毁伤程度与冲击波正入射的毁伤显著不同。30°夹角时,0.8 m爆距下靶板挠度减小了69.7%,1 m爆距下减小了78.9%,60°夹角时这两种爆距下靶板挠度分别减小51.4%和66.6%,显然存在爆炸角度会极大地降低靶板挠度,爆炸角度越小挠度减小量越多。由第2节中的中心点挠度分析可知,无孔靶板在0.8和1 m两种爆距下中心点挠度差为39.1%,而爆炸夹角30°时两种爆距下无孔靶板挠度差为30.3%,60°时挠度差则为31.3%,相比冲击波正入射时均有所减小。

表4 变形结果
Table 4 Deformation results

编号	是否有孔	爆炸距离/mm	爆炸角度/(°)	挠度/mm
1	无预制孔	800	30	15.5
2			60	24.9
3		1 000	30	10.8
4			60	17.1
5	4个d=8 mm 预制孔	800	30	15.9
6			60	21.6
7		1 000	30	11.2
8			60	17.2
9	4个d=16 mm 预制孔	800	30	15.4
10			60	23.4
11		1 000	30	11.1
12			60	17.0

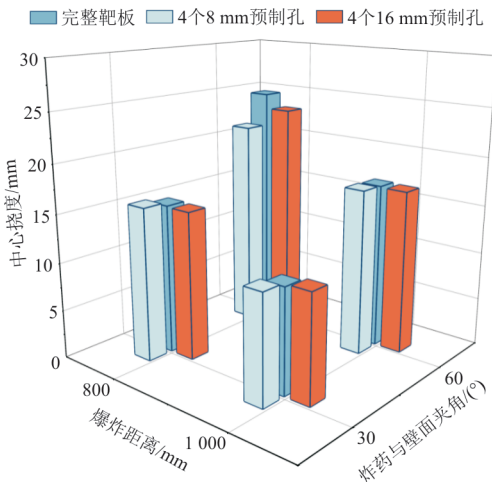


图18 三种形式靶板的变形结果对比
Fig. 18 Comparison of deformation results of three types of plates

对比相同爆距、相同角度下三种形式靶板的挠度,仅有爆炸夹角60°、爆炸距离0.8 m时三种靶板的挠度出现明显差异,含4个d=8 mm 预制孔的靶板变形程度最小,比无预制孔板挠度小13.3%;含4个d=16 mm 预制孔的靶板变形程度也小于无预制孔板。在不发生拉伸变形时,含孔靶板变形程度小于无孔靶板这一现象与正入射工况下表现吻合。对于其他工况,特别是爆炸距离1 m时,相同爆炸角度下三种靶板的变形程度均不存在明显差异,说明在爆炸距离较远时,靶板上存在预制孔与否已不是影响靶板变形的主要因素。

4 结 论

1) 实验中塑性大变形和拉伸失效两种失效模式的分界与边界固支条件高度相关,当固支条件越接近理想情况,越不容易出现因边缘脱落导致的误判。

2) 孔洞损伤的面积占靶板面积小于0.25%时,孔洞对靶板在正入射冲击波作用下的损伤模式影响不大;当孔洞的面积占比达到1%以上时,在正入射冲击波的作用下,孔洞之间容易形成应变值较高的连通区域,从而更容易导致贯穿撕裂的损伤模式。

3) 相同距离下同质量炸药正对目标爆炸造成的毁伤程度大于存在夹角的爆炸,爆炸物与目标迎爆面所在平面的夹角越小则目标的变形程度越弱,爆炸夹角从60°降至30°时挠度值可降低30%以上。

4) 在爆炸距离较远时(爆距大于12倍爆炸物特征尺寸),爆炸距离和爆炸夹角是影响靶板毁伤程度的主要因素,是否存在预制孔损伤对靶板变形模式和变形程度基本没有影响。

参 考 文 献

[1] 何宇廷,张腾,缙百勇. 基于作战完整性的军用飞机结构强度发展思考[J]. 航空工程进展, 2023, 14(5): 1-7.
HE Yuting, ZHANG Teng, GOU Baiyong. Opinions on the development of military aircraft structural strength based on aircraft structural operational integrity [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(5): 1-7. (in Chinese)

[2] 彭兵,王显会,王磊,等. 某轻型车辆底部结构爆炸仿真与试验研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(12): 173-178.
PENG Bing, WANG Xianhui, WANG Lei, et al. Simula-

- tion and experimental study on explosion of a light vehicle bottom structure[J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(12): 173-178. (in Chinese)
- [3] 刘粟涛, 周云波, 张明, 等. 爆炸冲击波与破片作用下车辆底部结构动响应数值仿真[J]. *兵器装备工程学报*, 2022, 43(5): 56-62.
- LIU Sutaο, ZHOU Yunbo, ZHANG Ming, et al. Numerical simulation of dynamic response of vehicle bottom structure under action of explosion shock wave and fragments[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2022, 43(5): 56-62. (in Chinese)
- [4] 成乐乐, 黄风雷, 武海军, 等. 水下爆炸作用下多舱室结构的动力响应及损伤特性[J]. *兵工学报*, 2023, 44(12): 3562-3579.
- CHENG Lele, HUANG Fenglei, WU Haijun, et al. Research on dynamic response and damage characteristics of multi-cabin structure under the impact of underwater explosion[J]. *Acta Armamentarii*, 2023, 44(12): 3562-3579. (in Chinese)
- [5] 张宇, 王彬文, 白春玉. 典型飞机机翼结构爆炸冲击毁伤数值分析研究[J]. *机械科学与技术*, 2022, 41(9): 1468-1474.
- ZHANG Yu, WANG Binwen, BAI Chunyu. Numerical analysis of typical aircraft wing structure damaged by explosion impact[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2022, 41(9): 1468-1474. (in Chinese)
- [6] 黄涛, 陈威, 彭帅, 等. 典型舱室在战斗部内爆下的载荷及毁伤特性试验研究[J]. *中国舰船研究*, 2023, 18(6): 167-176.
- HUANG Tao, CHEN Wei, PENG Shuai, et al. Testing investigation on load and damage characteristic of typical cabins under warhead internal blast[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2023, 18(6): 167-176. (in Chinese)
- [7] 姚武文, 周平, 侯日立. 爆炸冲击波引起的飞机蒙皮崩落损伤研究[J]. *机电产品开发与创新*, 2011, 24(3): 26-28.
- YAO Wuwen, ZHOU Ping, HOU Rili. Study on avalanche damage of airplane skin by blast shockwave[J]. *Development & Innovation of Machinery & Electrical Products*, 2011, 24(3): 26-28. (in Chinese)
- [8] 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 Yuan, HU Chuanhui, LIU Gang, 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. (in Chinese)
- [9] 董秋阳. 机翼蒙皮在破片和冲击波作用下的损伤研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- DONG Qiuyang. Damage research of wing skins under projectile and shock wave[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013. (in Chinese)
- [10] 程帅, 刘文祥, 童念雪, 等. 爆炸载荷下飞机典型加筋结构毁伤特性[J]. *爆炸与冲击*, 2021, 41(1): 88-95.
- CHENG Shuai, LIU Wenxiang, TONG Nianxue, et al. Damage mechanism of typical stiffened aircraft structures under explosive loading[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(1): 88-95. (in Chinese)
- [11] 韩璐, 韩庆. 飞机在模拟混合破片威力场打击下的易损性计算[J]. *航空工程进展*, 2014, 5(4): 445-462.
- HAN Lu, HAN Qing. Calculation on the vulnerability of aircraft from a simulation mixed fragment warhead[J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2014, 5(4): 455-462. (in Chinese)
- [12] 陈新祥. 典型战斗部对飞机目标毁伤评估研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- CHEN Xinxiang. Damage assessment of typical warhead to aircraft[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [13] 侯海量, 朱锡, 古美邦. 爆炸载荷作用下加筋板的失效模式分析及结构优化设计[J]. *爆炸与冲击*, 2007, 27(1): 26-33.
- HOU Hailiang, ZHU Xi, GU Meibang. Study on failure mode of stiffened plate and optimized design of structure subjected to blast load[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2007, 27(1): 26-33. (in Chinese)
- [14] FRANK M, MIKE H. Soil modeling for mine blast simulation[C]// 13th International LS-DYNA Conference. Dearborn: IEEE, 2014: 1-9.
- [15] BIBIANA L, DANIEL A, GERALD N, et al. Craters produced by underground explosions[J]. *Computers & Structures*, 2009, 87(21/22): 1366-1373.
- [16] BUYUK M, KURTARAN H, MARZOUGUI D, et al. Automated design of threats and shields under hypervelocity impacts by using successive optimization methodology[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35: 1449-1458.
- [17] NURICK G N, SHAVE G C. Deformation and tearing of thin square plates subjected to impulsive loads[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1996, 18(1): 99-116.
- [18] 侯俊亮, 蒋建伟, 门建兵, 等. 预制孔靶板在爆炸冲击波载荷作用下的动态响应[J]. *爆炸与冲击*, 2013, 33(6): 662-666.
- HOU Junliang, JIANG Jianwei, MEN Jianbing, et al. Dynamic response of thin plate with holes under blast loading[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2013, 33(6): 662-666. (in Chinese)

(编辑:丛艳娟)