

V形铝合金靶板双射弹高速冲击损伤特性



张宇*,白春玉,郭军,舒挽

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, 陕西 西安 710065

摘要:为研究V形铝合金靶板抗双射弹高速冲击损伤特性,基于二级空气炮系统开展射弹高速冲击试验,研究靶板变形及射弹剩余速度等变化规律,并基于经验证的有限元模型,研究两枚射弹角度、间距等对靶板损伤失效的影响。研究结果表明,V形靶板在射弹高速冲击下发生局部剪切冲塞破坏,且后侧壁板的损伤面积较大;射弹角度和射弹间距对靶板损伤失效面积影响较小,但射弹角度和间距越小,靶板的塑性变形区域越大;同时射弹间距对射弹速度变化几乎没有影响,但射弹角度越小,剩余速度越小。

关键词:冲击动力学; 高速冲击; 试验方法; 数值模拟; ABAQUS

中图分类号:O381

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2020.09.012

飞机在执行作战任务过程中,常常会受到武器系统的威胁,进行高生存力设计对于降低造价高昂的飞机系统的损耗、维持战斗力起着非常重要的作用。飞机作战生存力主要由敏感性和易损性两部分组成,敏感性指的是飞机在特定条件下躲避敌方探测和定位的能力,易损性指的是飞机抵抗敌方特定打击方式的能力。易损性涉及飞机面临的终端威胁(如能够对飞机造成损伤的发射平台、枪炮、导弹及其终端产物等),侧重于研究飞机被终端武器命中之后的杀伤特性^[1]。在飞机易损性研究中,操纵面作为控制系统的执行部件,是较为易损的关键部件之一。

Beissel^[1-2]、Evans^[3]、Williamson^[4]等利用数值模拟方法进行了射弹高速冲击的形状效应研究,得到不同形状射弹的弹道极限速度曲线。Staley^[5]等利用数值仿真手段,分析了射弹打击飞机结构前后速度与质量变化,并通过试验进行了验证。Balos^[6]等采用抗弹撞击试验方法,以匀质靶板为研究对象,分析了射弹-靶板夹角与靶板损伤程度的关系,得出射弹与靶板法线夹角越大,损伤程度越低的结论。展全伟^[7]等利用战伤模拟试验与数值仿真结合方法构建了

不同速度射弹对飞机结构毁伤模拟试验装置,讨论了射弹速度与结构应变、变形直径、目标靶结构之间的关系,分析了操纵面的损伤特性。惠旭龙^[8]等利用试验和数值模拟方法研究了平板的弹道特性及弹头形状、撞击角度及靶板后的影响。

针对以上研究现状,可看到针对操纵面的高速冲击易损特性已经开展了相应的研究,并获得了一定的结论。但目前的研究主要集中于单射弹冲击和平板/曲板结构。本文将飞机操纵面结构简化为V形靶板,通过试验研究双射弹高速冲击下的损伤特性,并基于经验证的有限元模型,研究射弹间距及射弹速度对V形靶板的损伤特性。

1 高速冲击试验方法^[9]

1.1 试验件设计

操纵面包括升降舵(全动平尾)、副翼、方向舵等主操纵面以及前缘缝翼、襟翼、扰流板等辅助操纵面,是控制飞机升降、滚转等的结构。本文参考F-35飞机的副翼操纵面结

收稿日期: 2020-01-19; 退修日期: 2020-06-10; 录用日期: 2020-07-15

基金项目: 航空科学基金(20174123008); 机械结构强度与振动国家重点实验室开发课题(SV2019-KF-23)

*通信作者: Tel.: 029-88268287 E-mail: 305869212@qq.com

引用格式: Zhang Yu, Bai Chunyu, Guo Jun, et al. High-speed impact damage characteristics of V aluminum target[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(09): 72-78. 张宇, 白春玉, 郭军, 等. V形铝合金靶板双射弹高速冲击损伤特性[J]. 航空科学技术, 2020, 31(09): 72-78.

构,如图1所示。从图1可以看出,其外表面类似于V形,同时考虑到副翼的外表面形状决定其操纵效率,因此本文只考虑其外表面结构,将其简化为V形靶板。试验件设计如图2所示,高440mm,长800mm,同时作为方法研究,考虑试验方便,采用5mm厚的2024-T4铝合金材料。其中在两块平板之间设计肋板结构,用于模拟操纵面内部加强结构,保证V形靶板整体刚度。

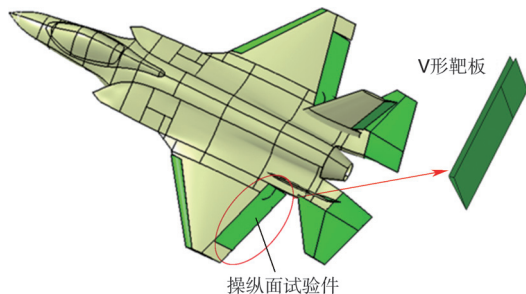


图1 F-35飞机模型
Fig.1 Model of F-35

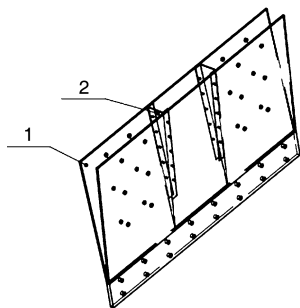


图2 试验件模型
Fig.2 Test piece model

1.2 试验设备

试验中所使用的二级空气炮系统主要由气源系统、炮尾部件、活塞、一级炮管、支撑体、一二级炮管转接体、二级炮管、弹托收集器和靶室等组成,如图3所示。该空气炮可将50g射弹加速到400~2000m/s。

对于二级空气炮系统,其利用重活塞压缩气体至高温高压状态(高压气体对被压缩气体做功,重活塞相当于能量转换器),当被压缩气体压力至膜片临界破膜压力时,膜片破裂,高温高压气体推动弹托射弹加速运动。为了提高被压缩气体的做功能力,通常采用分子量小的气体,如氢气或氦气等。综合考虑本文中试验速度需求和试验成本,采用空气作为压缩气体。

二级空气炮系统所使用的射弹如图4所示。射弹直径12.7mm,射弹圆柱段长度75mm,前端为半球头,质量78g,

材料为30CrMnSi。试验中,弹托与炮管直径相同,保证射弹轨迹与炮管方向平行;在炮管终端,弹托与撞击块撞击,实现射弹与弹托分离,从而保证射弹的初始轨迹姿态。

试验设备还包括高速摄像机测量系统,其具体参数见表1(表中,1ft≈0.3048m)。



图3 高速气炮系统
Fig.3 High-speed gas gun system



图4 射弹形状
Fig.4 Projectile shape

表1 试验设备

Table 1 Experiment equipment

名称	数量	主要技术指标
高速气炮系统	一套	气炮系统,速度范围400~2200m/s
高速摄像机	两台	一台FASTCAM SA1.1,最大分辨率1024×1024,满幅拍摄速率5400ft/s 一台FASTCAM SA1.X,最大分辨率1024×1024,满幅拍摄速率12500ft/s
数据采集系统	一套	动态采样率不小于100kHz/s,精度1%
照相机	一组	1300万像素

1.3 试验测量方法

本试验中,一台高速摄像机测量射弹的初速度和剩余速度,另外一台高速摄像机用于观察射弹与试验件表面之间的相互作用。其空间布置如图5所示。

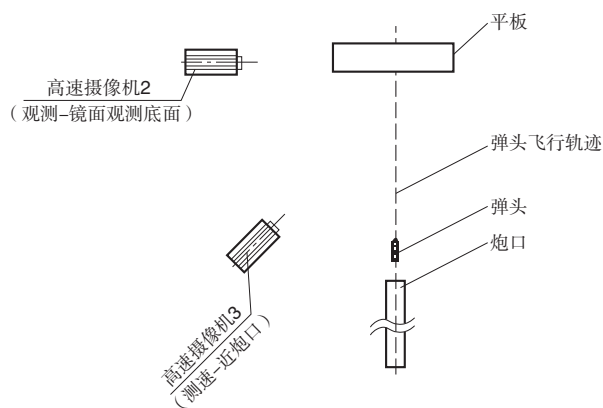


图5 摄像机空间位置

Fig.5 Camera space location

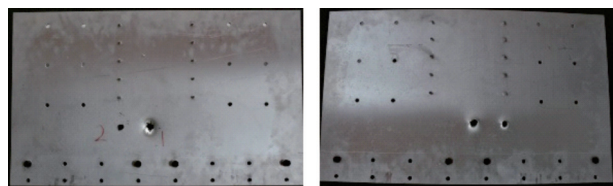
为保证高速摄像机2测速的准确性,试验前对其进行标距处理,保证测量结果的准确性。

本次试验对同一试验件进行不同位置两次冲击,获得多弹丸高速冲击下的损伤规律。

2 试验结果分析

2.1 试验件损伤变形

射弹高速冲击下,试验件整体损伤变形如图6所示。从图6可以看出,在射弹高速冲击下,试验件仅在冲击点附件产生损伤和塑性变形;其中在试验件上产生局部剪切冲塞破坏,几乎没有产生撕裂裂纹;且试验件损伤区域近乎为圆形,与射弹投影形状完全一致;对比V形靶板前壁板和后壁板,可看到在后壁板塑性变形面积比前壁板更大。



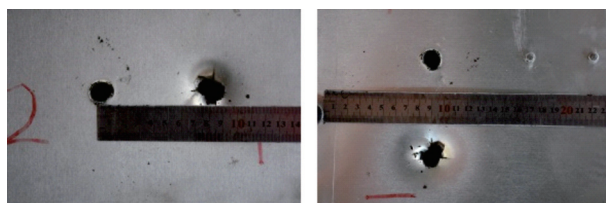
(a) 前侧

(b) 后侧

图6 试验后损伤变形

Fig.6 Damage and deformation

图7和图8分别为射弹高速冲击下,在前壁板和后壁板上形成的损伤区域沿横向和纵向的尺寸大小(见表2)。可以看到射弹在试验件上留下的孔洞尺寸略大于射弹直径(12.7mm),且形成的孔洞外形近乎为圆形;其中在后侧壁板形成的损伤面积略大于前侧壁板的损伤面积,说明射弹在侵彻穿透前侧壁板过程中,射弹姿态产生变化,同时考虑局部剪切冲塞在前侧壁板产生的碎片的共同作用,导致后

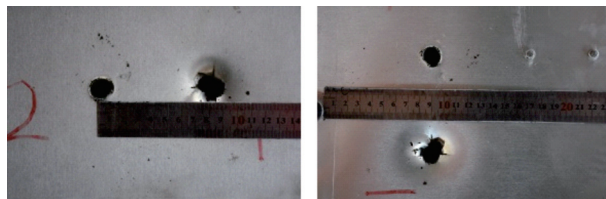


(a) 横向

(b) 纵向

图7 前侧壁板损伤

Fig.7 Front side panel damage



(a) 横向

(b) 纵向

图8 后侧壁板损伤

Fig.8 Rear side panel damage

表2 损伤大小

Table 2 Damage size

射弹编号	前侧损伤/mm		后侧损伤/mm	
	横向	纵向	横向	纵向
1	15.3	15.2	16.5	15.7
2	14.8	14.6	15.9	15.3

侧壁板的损伤面积增大。

2.2 射弹速度变化

表3给出了两发试验及一发补充试验中射弹的初始速度、剩余速度及其动能损失。从表3中可以看到,随着射弹速度的增加,动能损失逐渐增大。这是因为在弹靶侵彻过程中,弹动能的损失主要是因为弹靶之间的侵彻阻力(主要)和摩擦力(次要),其中侵彻阻力与速度的平方正相关。因此,随着射弹速度的增加,侵彻阻力增大,做的功越多,射弹的动能损失更多。

表3 动能损失

Table 3 Kinetic energy loss

编号	初始速度/(m/s)	剩余速度/(m/s)	动能损失/J
1	781.6	753.9	1659
2	905.7	872.9	2275
3(补)	451.6	427.7	821

3 有限元分析及验证

基于Johnson-Cook本构模型和失效模型,采用有限元分析软件ABAQUS模拟射弹高速冲击V形靶板过程,获得

冲击过程中射弹速度、动能衰减变化及V形靶板损伤方式。

3.1 有限元模型

G. Tiwari 等^[10]在2014年通过对弹丸高速撞击铝合金平板试验和数值仿真结果分析,发现单层板的弹道极限速度随边界紧固度的增加而减小。因此为保证仿真结果和试验结果的可对比性,应充分考虑边界条件(试验夹具)的影响。

建立的有限元模型如图9所示。V形靶板和射弹均采用六面体单元,同时为了提高计算效率和精度,将V形靶板撞击区域网格细化,经网格敏感性分析确定撞击区域单元尺寸为0.8mm,并光滑过渡到模型非撞击区,沿V形靶板厚度方向共划分5层单元,最终划分为1209040个单元,射弹划分为1492个单元。

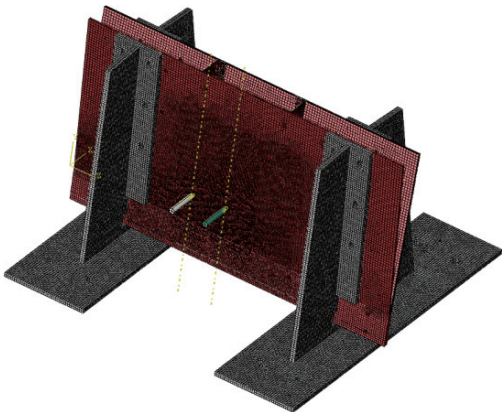


图9 有限元模型

Fig.9 Finite element model

通过 Interaction–Create Constraint–Tie 设置试验夹具与试验件之间的接触,考虑实际冲击过程中传递路径,其中试验夹具为主面,试验件为从面。边界/载荷设置与试验工况保持一致,通过固定试验夹具保证边界的设置,通过给射弹赋初始速度场来设置速度。射弹、试验夹具及V形靶板材料参数见表4和表5。

表4 射弹及夹具材料参数

Table 4 Material parameters of the projectile and the fixture

材料	$\rho/(\text{kg/m}^3)$	E/GPa	ν
钢	7800	210	0.3

3.2 模型验证

图10给出有限元计算结果应力云图。可看到,仿真得到的损伤区域也是圆形,与试验结果一致。表6给出了射弹速

表5 V形靶板材料参数

Table 5 Material parameters of "V" target plate

$\rho/(\text{kg/m}^3)$	E/GPa	ν	T_{melt}/K	A/MPa
2700	71.1	0.3	775	293
B/MPa	n	C	m	D_1
737	0.58	0.004	1	0.25

度变化、仿真损伤区域大小及其与试验结果的误差。从表6可以看到,两者之间的误差小于5%,且数值计算结果对射弹剩余速度和前侧壁板损伤拟合程度更好。证明所建有限元模型的有效性及其计算结果的可靠性,可进一步开展相关分析。



图10 仿真计算结果

Fig.10 Simulation results

表6 数值分析结果

Table 6 Numerical analysis results

射弹编号	前侧损伤/mm		后侧损伤/mm		剩余速度/(m/s)	
	仿真	误差	仿真	误差	仿真	误差
1	14.8	3.0%	16.8	4.3%	751.3	0.3%
2	14.5	1.4%	16.3	4.5%	869.8	0.4%

4 V形靶板损伤多影响因素研究

基于真实场景,在单弹丸研究中,常常开展射弹角度、速度以及射弹形状等因素的研究。对于双弹入射,在其基础上,射弹角度和空间间距则是考虑的重点。因此考虑射弹间距和射弹角度的变化,研究其对V形靶板损伤射弹高速冲击损伤的影响^[11-12]。

4.1 射弹角度

试验中射弹垂直入射,基于试验结果分别设置射弹入射角度为90°、80°和60°,研究射弹角度对两枚射弹同时冲击V形靶板的影响。数值仿真计算结果如图11所示。

从图 11 可以看到,三种入射角度下,射弹在靶板上形成的孔洞大小基本一致,说明靶板发生局部剪切冲塞破坏的面积与射弹入射角度无关;垂直入射(入射角度 90°)时,在靶板冲击点上下两侧应力变化趋势一致;斜入射时,在靶板冲击点一侧应力较为集中,另外一侧应力较小。因此,斜入射对结构的抗冲击性能要求更高,应充分考虑斜入射的影响。

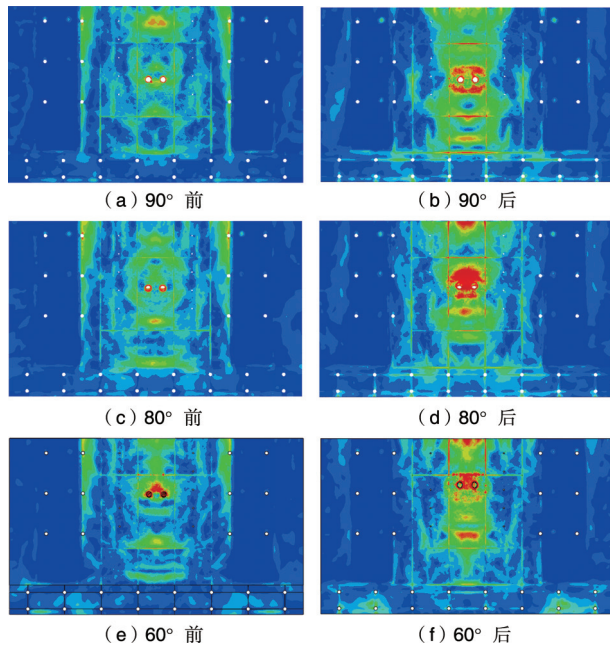


图 11 应力云图

Fig.11 Stress cloud map

图 12 给出了不同入射角度下两枚射弹的速度变化。从图 12 可以看出,同一入射角度下,两枚射弹的速度变化规律基本一致;不同入射角度下,射弹速度分别发生两次明显衰减,分别对应射弹侵彻前侧壁板和后侧壁板;且射弹剩余速度随着入射角度的减小而降低,这是因为说明入射角度越小,冲击过程中射弹侵彻靶板厚度越大,靶板吸收能量越多。

4.2 射弹间距

试验中射弹空间间距约 8cm,基于试验结果分别设置射弹轴心间距为 20mm、40mm 和 60mm,研究射弹间距对两枚射弹同时冲击 V 形靶板的影响。数值仿真计算结果如图 13 所示。

图 13 分别给出了不同射弹间距下,射弹冲击过程中靶板后侧壁板的应力云图和位移云图(云图中标度已统一)。从图 13 可以看出,三种射弹间距下,射弹在靶板上形成的

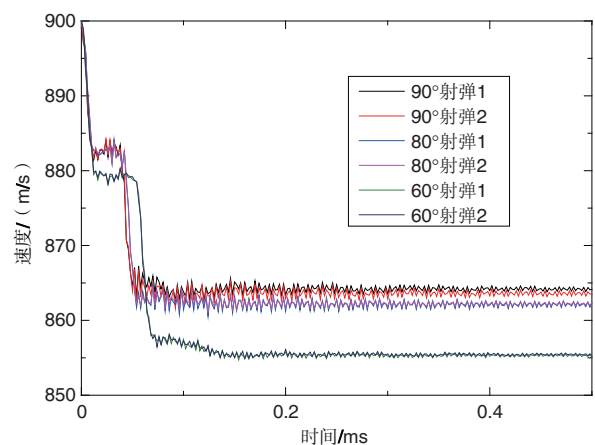


图 12 速度变化

Fig.12 Velocity change

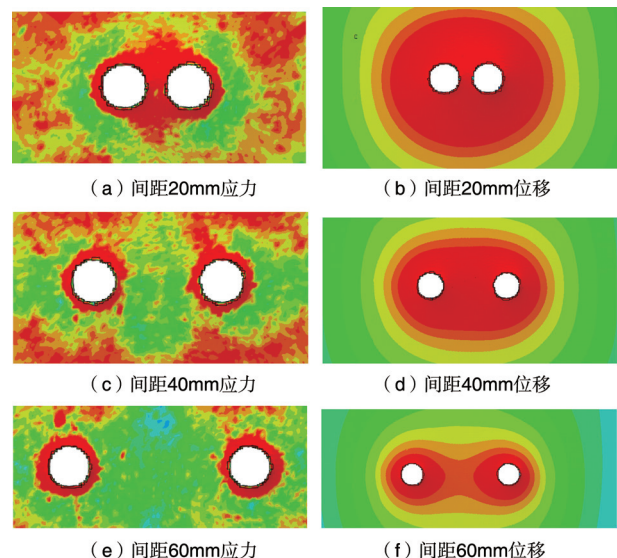


图 13 应力/位移云图

Fig.13 Stress/displacement cloud map

孔洞大小基本一致,说明靶板发生局部剪切冲塞破坏的面积与射弹间距无关;但随着射弹间距减小,两个弹孔之间区域的应力增大,变形程度(位移)逐渐增大,最大位移分别为 3.77mm、4.24mm 和 5.81mm。说明射弹距离越近,对靶板的损伤失效影响程度越大。

图 14 给出了不同射弹间距下两枚射弹的速度变化。从图 14 可以看出,射弹间距对射弹速度变化几乎没有影响,说明两枚射弹之间的相互作用只影响靶板的变形程度,对射弹的速度变化几乎没有影响。

5 结束语

本文基于二级空气炮系统开展 V 形靶板射弹高速冲击

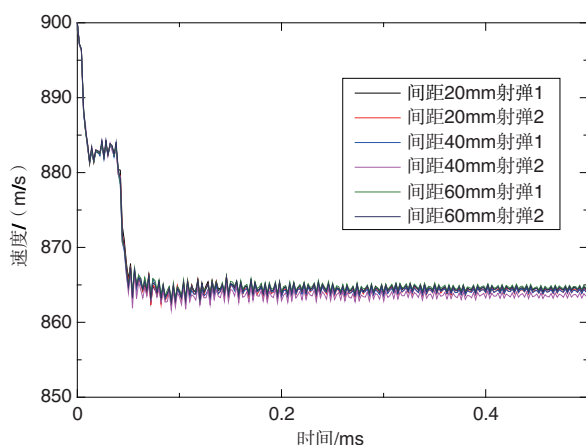


图14 速度变化
Fig.14 Velocity change

试验,研究了靶板变形及射弹剩余速度等变化规律,结合经试验验证的有限元模型,开展两枚射弹同时冲击V形靶板数值分析工作,并研究了射弹角度、间距等对靶板损伤失效的影响,可以得到以下结论:

(1)本文采用的二级炮试验方法可有效开展靶板弹道高速冲击试验,发现V形靶板在射弹高速冲击下发生局部剪切冲塞破坏,且后侧壁板的损伤面积较大,但两枚射弹之间几乎没有影响。

(2)基于经试验验证的数值分析模型,发现射弹角度和射弹间距对靶板损伤失效面积影响较小;但射弹斜入射、小间距入射下,靶板的塑性变形区域越大,位移越大;同时射弹间距对射弹速度几乎没有影响,射弹角度越小,剩余速度越小。

(3)针对V形靶板抗射弹高速冲击损伤特性,还需进一步结合试验与数值分析方法开展相关研究。

AST

参考文献

- [1] 裴扬,宋笔锋,石帅.飞机作战生存力分析方法研究进展与挑战[J].航空学报,2016,37(1):216-234.
Pei Yang, Song Bifeng, Shi Shuai. Analysis method of aircraft combat survivability: progress and challenge[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(1): 216-234. (in Chinese)
- [2] Beissel S R, Gerlach C A, Johnson G R. A quantitative analysis of computed hypervelocity debris clouds[J]. International Journal of Impact Engineering, 2008, 35(12):1410-1418.
- [3] Evans S, Williamsen J. Orbital debris shape and orientation effects on impact damage to shuttle[C]// AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2013.
- [4] Williamsen J E, Schonberg W P, Evans H, et al. A comparison of NASA, DoD, and hydrocode ballistic limit predictions for spherical and non-spherical shapes versus dual- and single-wall targets, and their effects on orbital debris penetration risk[J]. International Journal of Impact Engineering, 2008, 35(12): 1870-1877.
- [5] Staley T D, Baker J R. Finite element simulation of ballistic impact in survivability studies[M]. Palm Springs, 2004.
- [6] Balos S, Grabulov V, Sidjanin L, et al. Geometry, mechanical properties and mounting of perforated plates for ballistic application[J]. Materials & Design, 2010, 31(6):2916-2924.
- [7] 展全伟.飞机典型结构件的模拟战伤试验及数值模拟[D].西安:西北工业大学,2005.
Zhan Quanwei. Simulated battle damage test and numerical simulation of typical structural parts of aircraft[D]. Xi'an: Northwest Polytechnic University, 2005. (in Chinese)
- [8] 惠旭龙,刘小川,王计真,等.TC4钛合金平板高速撞击损伤及弹道极限特性[J].科学技术与工程,2017,17(11):1-8.
Hui Xulong, Liu Xiaochuan, Wang Jizhen, et al. High velocity impact failure and ballistic performance of TC4 plate [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(11): 1-8. (in Chinese)
- [9] 郭军,张宇,舒挽.油箱水锤效应试验方法研究[J].航空科学技术,2019,30(3):63-70.
Guo Jun, Zhang Yu, Shu Wan. Experimental study on hydrodynamic ram phenomenon of fuel tank[J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(3):63-70. (in Chinese)
- [10] Tiwari. G, Iqbal M A, Gupta P K, et al. The ballistic resistance of thin aluminum plates with varying degrees of fixity along the circumference[J]. International Journal of Impacting Engineering, 2014, 74: 46-56.
- [11] 刘小川,王彬文,白春玉,等.航空结构冲击动力学技术的发展与展望[J].航空科学技术,2020,31(3):1-14.
Liu Xiaochuan, Wang Binwen, Bai Chunyu, et al. Progress and prospect of aviation structure impact dynamics[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(3):1-14. (in Chinese)
- [12] 刘牧东.金属薄板材料冲击性能研究进展[J].航空科学技术,

2019,30(2):1-6.

Liu Mudong. Research progress on impact property of sheet metal materials[J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(2):1-6. (in Chinese) (责任编辑 陈东晓)

作者简介

张宇(1994-)男,硕士,助理工程师。主要研究方向:冲击动力学。

Tel: 029-88268287

E-mail: 305869212@qq.com

白春玉(1986-)男,硕士,高级工程师。主要研究方向:飞

机结构强度。

Tel: 029-88268287

E-mail: asri02@163.com

郭军(1973-)男,学士,高级工程师。主要研究方向:飞机结构强度。

Tel: 029-88268287

E-mail: guojun623@126.com

舒挽(1985-)男,硕士,工程师。主要研究方向:飞机结构强度试验。

Tel: 029-88268287

E-mail: swyx5@163.com

High-speed Impact Damage Characteristics of V Aluminum Target

Zhang Yu*, Bai Chunyu, Guo Jun, Shu Wan

Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Structures Impact Dynamics, Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China

Abstract: In order to study the characteristics of V-shaped aluminum alloy target plate against high-speed impact damage of double projectiles, the experiment is carried out based on the secondary air gun system. The variation laws of target plate deformation and residual velocity of projectiles are studied. Based on the verified finite element model, the effects of angle and spacing of two projectiles on the damage and failure of target plate are studied. The results show that the V shaped target plate is damaged by local shear plug under the high-speed impact of projectile, and the damage area of the rear side wall plate is larger. The impact of the projectile angle and distance on the damage area of the target plate is smaller. However, the smaller the projectile angle and distance are, the larger the plastic deformation area of the target plate is. At the same time, the projectile distance has little impact on the change of projectile speed, Whereas the residual velocity of projectile decreases with the decrease of angle.

Key Words: impact dynamics; high-speed impact; experiment method; numerical simulation; ABAQUS

Received: 2020-01-19; Revised: 2020-06-10; Accepted: 2020-07-15

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China(20174123008); Key Laboratory State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures(SV2019-KF-23)

*Corresponding author.Tel. : 029-88268287 E-mail: 305869212@qq.com