

航空发动机双层结构金属机匣的弹道试验

张帆¹, 曹振忠¹, 苗艳², 丛佩红², 柏松汉², 章定国¹

(1. 南京理工大学理学院, 南京 210094;

2. 中国航空发动机集团有限公司沈阳发动机研究所, 沈阳 110015)

摘 要: 为研究航空发动机双层结构金属机匣在受叶片冲击时的包容性问题, 利用滑膛炮试验系统对双层钛合金带不同间隙叠层靶板进行打靶弹道试验。通过 28 次有效的弹道试验发现: 对比内层(迎弹面)、外层靶板厚度相同带间隙组合的试验结果, 间隙越大靶板抗侵彻能力越差; 对比不带间隙组合试验结果, 内层较薄组合的抗侵彻能力强于内、外层厚度相同组合。采用商业有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 对打靶试验进行了数值仿真, 有限元仿真与试验结果吻合较好, 并发现内层较薄组合的抗侵彻能力强于内层较厚组合, 且两者均强于内、外层厚度相同组合; 各个组合在没有间隙的情况下, 弹道极限随叶片攻角增加而增加, 但是速度曲线突增的攻角有所不同。无量纲靶厚决定了叶片冲击双层靶板的破坏模式。

关 键 词: 双层结构钛合金叠层靶板; 弹道试验; 间隙; ANSYS/LS-DYNA 有限元数值仿真; 侵彻; 弹道极限; 无量纲靶厚

中图分类号: V232.6

文献标志码: A

Ballistic test of double-layer metal casing of aero-engines

ZHANG Fan¹, CAO Zhenzhong¹, MIAO Yan², CONG Peihong²,

BAI Songhan², ZHANG Dingguo¹

(1. School of Science,

Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Shenyang Engine Research Institute,

Aero Engine Corporation of China, Shenyang 110015, China)

Abstract: In order to study the containment of double-layer metal-structured casing of aero-engines under blade's impact, the ballistic test of double-layer titanium alloy laminated target plates with different clearances was carried out by using a sliding-bore gun test system. The process of blade penetration into target plate was recorded by high-speed camera system, and the damaged targets were recovered. The penetration resistance and failure modes of different laminated target plates were studied. Through 28 effective ballistic tests, it was found that: compared with the test results of the combination with the same thickness of the inner (attack surface) and outer target plate, the larger gap indicated the worse anti-penetration ability of the target plate; compared with the test results of the combination without the gap, the anti-penetration ability of

收稿日期: 2021-03-15

基金项目: 国家自然科学基金(11772158); 中央高校基本科研业务费专项(30917011103)

作者简介: 张帆(1990—), 男, 博士生, 主要从事航空发动机机匣包容性问题的研究。

通信作者: 章定国(1967—), 男, 教授、博士生导师, 博士, 主要研究领域为多体系统动力学与控制。

E-mail: zhangdg419@mail.njust.edu.cn

引用格式: 张帆, 曹振忠, 苗艳, 等. 航空发动机双层结构金属机匣的弹道试验[J]. 航空动力学报, 2022, 37(6): 1248-1259. ZHANG Fan, CAO Zhenzhong, MIAO Yan, et al. Ballistic test of double-layer metal casing of aero-engines[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(6): 1248-1259.

the combination with the thinner inner target plate was better than that of the combination with the same thickness of the inner and outer target plates. The ballistic test was simulated numerically by commercial finite element software ANSYS/LS-DYNA. The finite element simulation results were in good agreement with the test results. It was found that the anti-penetration ability of the combination with thinner inner target was stronger than that of the combination with thicker inner target, and both of them were stronger than that of the combination with the same thickness of inner and outer targets; in the case of no clearance, the ballistic limit increased with the increase of blade angle of attack, but the angle of attack of the sudden increase of velocity curve was different. The dimensionless target thickness determined the failure mode of the blade impacting the double-layer targets.

Key words: double-layer TC4 laminated target plates; ballistic test; gaps; ANSYS/LS-DYNA numerical simulation; penetration; ballistic limit; dimensionless target thickness

航空发动机作为飞机的心脏在航空飞行的安全上起至关重要的作用。随着现代高新技术的不断涌现,航空燃气涡轮发动机一直向高压比、高涡轮进口温度、高推重比、低油耗和高可靠性发展,导致发动机的工作环境越来越恶劣^[1]。受外物撞击、高周疲劳、过热、叶片脱落和材料缺陷等影响,工作在极端载荷和恶劣环境下的高速旋转部件被破坏并且释放高速高能的碎片,当碎片贯穿发动机机匣,击中飞机的机舱、油箱、液压管路和电器控制线路等,很可能导致飞机失事,给飞机以及乘客带来巨大的危害,是航空发动机安全领域一个亟待解决的问题。若航空发动机机匣能成功阻止碎片的贯穿,那么航空发动机机匣对失效的碎片具有包容性,则能减少此类事故的发生。航空发动机机匣的包容性问题具有重要的理论研究和工程应用价值^[2]。

航空大国对发动机机匣的包容问题都较为重视^[3],我国航空发动机的研究正蒸蒸日上,已经有了很多关于机匣包容性的研究。张晓峰、范志强、何庆、宣海军、段玥晨和刘璐璐等^[4-9]多位学者和团队针对航空发动机包容性的问题做出了突出的贡献。诸位学者成功地设计并进行了机匣打靶试验和包容性试验,研究了机匣/叶片的变形和失效,分析了损伤过程,给出了诸多关于机匣包容性问题的指导建议。同时还进行了有限元的数值仿真建模,基于与试验吻合较好的结论,进一步深入探寻了失效机理,给出了宝贵的有限元仿真建模和材料参数。基于试验和仿真,现有的包容准则——临界速度法和破坏势能法已被验证,并且也给出了适合多种情况的新的包容准则,更加

吻合试验和仿真结果。

通常,航空发动机机匣包容性研究的第一步是进行打靶弹道试验,即利用空气炮或者滑膛炮等装置发射高速弹体冲击靶体。弹道试验的研究最早可以追溯到拿破仑时代,Poncelet综合了当时的弹道试验结果,提出了著名的邦锡莱公式,并沿用五十年之久^[10]。第二次世界大战加速了终点弹道学的发展,并逐渐发展出了很多有关弹道研究的学科分支。弹道极限速度(简称弹道极限,ballistic limit velocity)是衡量弹/靶板系统的重要参数,定义为弹体刚好贯穿靶体的最小速度,用符号 v_{bl} 表示;从能量角度可以看作靶体能刚好吸收弹体的最大动能;在打靶试验数据中多用 v_{50} 表示。在某些研究中也把 v_{50} 认为是弹道极限, v_{50} 介于不发生穿透的最高撞击速度和发生贯穿的最低撞击速度 v_{bl} 之间^[11]。目前已经有大量的科研人员对单层或者多层的金属靶板抗圆柱形弹丸的冲击问题进行了研究。值得注意的是,对于双层金属靶板的弹道试验研究,尖头弹和钝头弹有着显著不同的试验结果。Deng、Dey、Woodward、Borvik和Ben-Dor等^[12-17]学者针对弹体冲击多层钢或铝合金的金属靶板进行了弹道试验研究。研究发现对于尖头弹体冲击单层和多层靶板,分层会导致弹道极限降低,增加靶板之间的间隙同样会降低弹道极限,但结论并不是完全适用,会有部分个例;对于平头弹体来说,结论则相反。国内学者也针对发动机机匣进行了很多弹道试验,杨双林^[18]针对双层钢1Cr11Ni2W2MOV材料靶板抗叶片冲击开展了试验和数值仿真,发现双层靶板好于单层,靶板之间存在间隙好于无间隙。对于

上述弹道试验存在不同的结论,可能与失效模式有关,例如形成花瓣、冲塞等原因,亦可能与靶板的厚度和材料有关系。

目前国内外较多采用空气炮试验系统进行打靶试验。受空气炮限制,只能对尺寸较小、质量较低的叶片加载较小的速度冲击模拟机匣的靶板,并且受冲击的靶板厚度相对于真实机匣厚度较薄^[19]。空气炮打靶试验动能较小,各个部件与真实发动机尺寸差距较大。本文在国内首次采用100 mm口径滑膛炮对质量为400 g叶片加载300 m/s以上的初速度冲击总厚度为10 mm Ti-6Al-4V(TC4)钛合金金属叠层靶板,符合高速高能失效叶片冲击真实厚度发动机机匣的试验设计,总共进行了28次叶片冲击双层无间隙以及双层带间隙金属叠层靶板的弹道试验。即便是相对较为经济的打靶试验,过多次的试验验证不仅增加了试验费用,还延长了试验周期,因此采用了大型商业有限元软件ANSYS/LS-DYNA进行数值仿真与打靶试验相结合的分析方法。通过试验结果与数值仿真结果相对比,验证数值仿真结果的正确性。

1 双层金属靶板弹道试验

试验设备主要包括100 mm口径滑膛炮、高速摄像机系统和靶架等。图1为打靶试验主要设备的布局图。

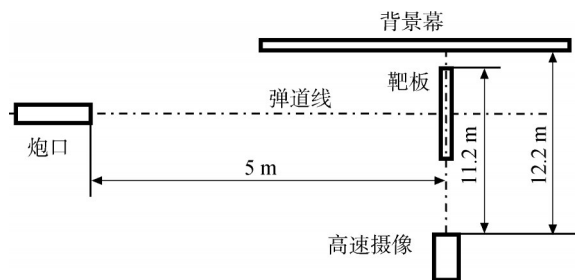


图1 弹道试验设备的布局
Fig.1 Equipment layout for ballistic tests

弹道试验叠层靶板总厚度为10 mm,模拟双层不带间隙机匣内层靶板厚度5 mm,外层靶板厚度5 mm叠层靶板组合记为5S+0A+5S^[17],其中前者5S代表内层靶板,即为迎弹面;0A代表间隙为0 mm;后者5S代表外层靶板,模拟机匣外层。

试验目的:利用所提供的钛合金靶板进行打靶试验设计,开展双层金属机匣模拟件打靶试验。利用高速摄像记录叶片冲击靶板过程,记录试验

数据,对回收靶体进行分析,研究不同组合叠层靶板抗侵彻性能和失效模式。通过大型商业有限元软件ANSYS/LS-DYNA对打靶试验进行数值仿真。靶板组合形式分为:5S+0A+5S、5S+2A+5S、5S+5A+5S、5S+8A+5S、5S+10A+5S、5S+15A+5S、2S+0A+8S、8S+0A+2S。叶片尺寸为200 mm×90 mm×5 mm;5 mm厚靶板尺寸为472 mm×350 mm;2 mm厚靶板尺寸为500 mm×500 mm;8 mm厚靶板尺寸为540 mm×540 mm。叶片以及靶板材料均为TC4。

图2示意了双层金属靶板打靶试验研究的流程图。首先需要对弹道试验进行初步的设计,包括弹体、滑膛炮高压室以及靶架和靶板装夹的设计。由于人力、物力有限,若想得到较好的试验效果,需要对叶片加载接近弹道极限的初始速度,撞击速度过高或者过低都不理想。本文利用ANSYS/LS-DYNA进行有限元建模仿真,计算得到设计模型的弹道极限。获得弹道极限的过程:建立模型、设置参数、选取弹体的初始速度;若仿真结束时,叶片没能贯穿靶体,则需要选取较大的初始速度;若仿真结束时,叶片贯穿靶板但是叶片剩余速度不为零,则需要选取较小的初始速度;若仿真结束时,叶片贯穿靶板时剩余速度刚好为零,那么此时的初始速度便是弹/靶板系统的弹道极限。

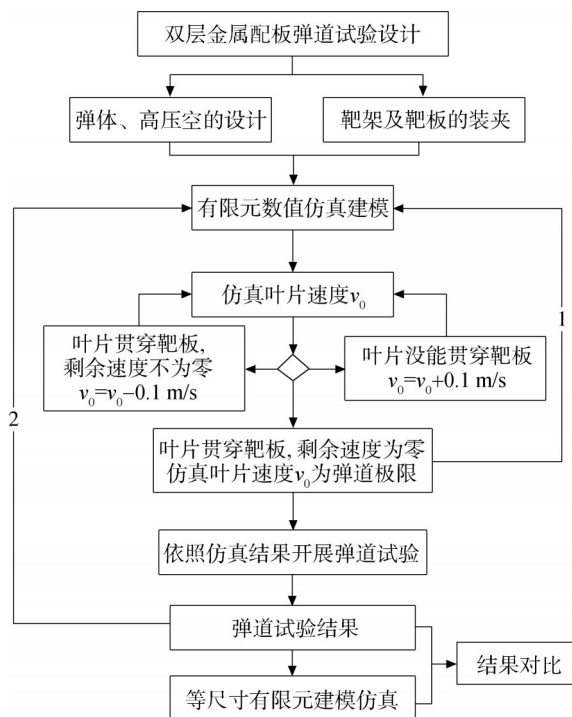


图2 双层金属靶板弹道试验研究流程图
Fig.2 Flow chart for ballistic tests study of double-layer metal targets

此时可以进行其他组合建模仿真,通过循环1得到所有组合的弹道极限。紧接着,结合数值仿真结果开展叶片冲击双层金属靶板的弹道试验,通过得到的弹道试验结果,需要通过循环2不断的调整上述的有限元数值仿真建模,使得仿真更加准确,从而令弹道试验更加接近预期效果。当所有弹道试验得到结果,需要再次进行与试验相同情况且等尺寸的仿真建模,对比试验与仿真结果,以便验证数值仿真的准确性,使数值仿真更具有指导意义。数值仿真的准确有助于帮助理解叶片形弹体侵入双/多层金属靶板的过程和失效机理,为接下来的理论分析提供依据。

1.1 弹体和靶架的设计

相对于传统空气炮的限制,滑膛炮打靶试验发射弹丸的质量和速度较大,本文弹道试验的冲击动能在 15 000 J 以上,对靶架的强度设计要求较为严格。不同于传统弹道试验的圆柱形弹体,叶片形弹体需要进行精心设计才能被火炮正常发射,图 3 示意了滑膛炮高压室与发射的弹体。发射原理:点燃高压室中火药,产生的高压燃气推动弹体使其发射出炮口,飞行中铝卡瓣分离,叶片以一定速度冲击叠层靶体。



图 3 滑膛炮高压室和弹体

Fig.3 Bombard high-pressure chamber and projectile

图 4 中靶架的设计满足装夹以及固定叠层靶板的要求。40 mm 厚铸铁为后板,将其固支在架体上,用 20 mm 厚铸铁压住叠层靶板,四周用 M16 螺栓固定,试验时靶架底部用楔形块和重物压紧固定。图 4(a)、图 4(b)为带间隙双层 5 mm

装夹示意图,取图 4(a)、图 4(b)坐标系 xyz ,以便在数值仿真中还原试验建模,其中角度 α 为叶片横滚角,攻角 β 为叶片俯仰角。

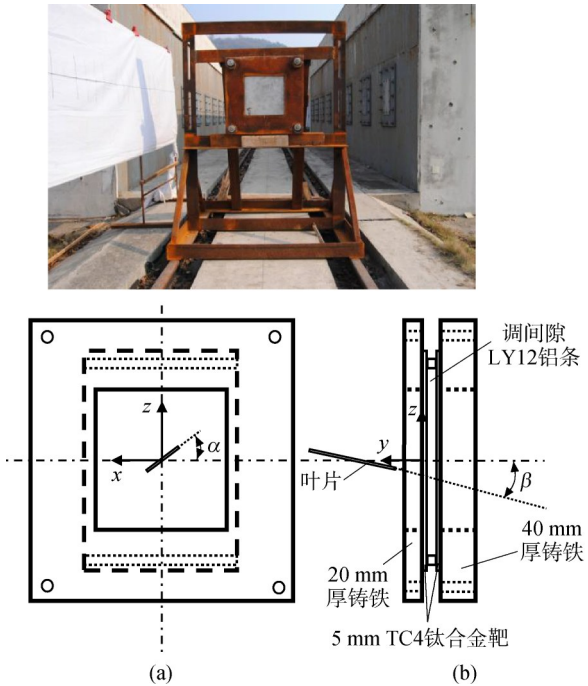


图 4 5S+5S 靶架的设计

Fig.4 Design of the target holder for 5S+5S

图 5 为 2 mm 和 8 mm 叠层靶板装夹示意图。靶架露出靶板部分是边长为 300 mm 的正方形。与钢和铝合金等其他材料不同,钛合金的强度和抗侵彻能力更强,很难被切割和打孔,只能通过加强固定才能尽量保持被冲击时不移动。

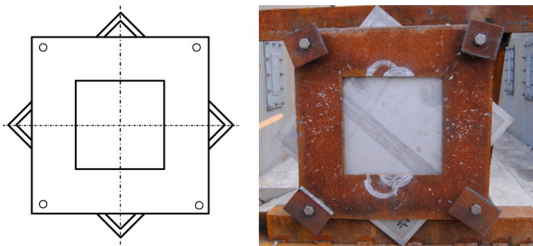


图 5 2S+8S 靶架的设计

Fig.5 Design of the target holder for 2S+8S

1.2 试验方法

叶片冲击靶板可产生三种不同的情况:①叶片完全贯穿靶体并以非零剩余速度飞出;②叶片部分穿透靶体,要么嵌入入靶体,要么反弹跳飞;③叶片完全贯穿靶体剩余速度为零,此时叶片初始速度为弹道极限。

弹道极限是反映靶体抗侵彻能力的主要指

标,即靶体的弹道极限越高对应的航空发动机机匣包容能力越强。弹道极限与靶体的破坏模式密切相关,而靶体的破坏模式与弹/靶的形状、几何尺寸、材料性能、边界条件和弹体头部形状、冲击方式等因素有关^[20],撞击过程存在非常复杂的力学问题。

著名的 Recht-Ipson(R-I)公式^[21]被广泛地应用于弹道试验,可以写成如下形式:

$$v_r = a(v_0^p - v_{bl}^p)^{1/p} \quad (1)$$

式中 v_0 为弹体初始撞击速度; v_r 为弹体贯穿靶板后的剩余速度; v_{bl} 为弹道极限速度; a 、 p 为待定常数。R-I公式需要试验测得的弹体初始速度-剩余速度数据并描点,利用最小二乘法结合上述公式曲线拟合得到。靶板组合固定的情况下,靶体的弹道极限 v_{bl} 固定,根据式(1)当初始速度 v_0 越大,剩余速度 v_r 越接近 v_0 。试验中加载叶片的初始速度过大或者过小对达到试验效果均不利,最好的加载速度应该在叠层靶板的弹道极限值左右。

目前还没有关于双层金属机匣包容准则的提

出,利用大型商业有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 对设计的打靶试验进行等尺寸的数值仿真建模,仿真结果用于预测各个试验组合的弹道极限,以便于试验加载弹体的初始速度。

数值仿真中叶片以及靶板的材料均为 TC4,为了节省求解时间,选用 *MAT_Simplified Johnson-Cook^[22-23] 作为材料模型,选用 3DSolid164 单元进行网格划分,加密叶片侵入靶板的区域,固支靶板的边界条件,控制沙漏和控制接触条件等。以上建模过程均遵循侵彻问题的数值仿真建模方法^[24]。表 1 给出了数值仿真预估各个叠层靶板组合的弹道极限。5S+5S 带间隙组合靶板对间隙最为敏感,弹道极限随两板间隙增大而减小;预测在双层靶板之间没有间隙时,2S+8S 组合靶板抗侵彻能力最强。

通过改变火药的用量来达到控制弹体飞出炮口的初始速度。由于存在卡瓣分离等不确定因素,并不能精准地控制叶片冲击靶板时的俯仰角 β ,所以只能力争垂直入射。

表 1 弹道试验数值仿真预估结果

Table 1 Prediction results of numerical simulation of ballistic tests

靶板组合	$v_{bl}/(\text{m/s})$	靶板组合	$v_{bl}/(\text{m/s})$	靶板组合	$v_{bl}/(\text{m/s})$
5S+0A+5S	263.2	2S+0A+8S	272.1	8S+0A+2S	264.9
5S+2A+5S	251.9	2S+2A+8S	257.7	8S+2A+2S	265.9
5S+5A+5S	242.3	2S+5A+8S	262.6	8S+5A+2S	263.8
5S+8AD	224.3	2S+8A+8S	258.8	8S+8A+2S	259.7
5S+10A+5S	218.8	2S+10A+8S	263.3	8S+10A+2S	256.8
5S+15A+5S	207.7				

1.3 打靶弹道试验结果

图 6 示意了弹体冲击 5S+10A+5S 组合叠层靶板的高速录像,追踪弹体侵彻靶体全过程。TC4 叶片在侵彻过程中发生弹性、塑性变形,并伴有大量火花。贯穿后可以清晰看到叶片弹性抖动,有的叶片保持完整,有的断为两截;反弹跳飞的叶片有的保持完整,有的断为两截或三截。铝



(a) 弹体冲击靶体的初始形态



(b) 600 μs 时叶片侵彻靶体



(c) 8 200 μs 时叶片贯穿靶体并飞出一段距离

图 6 弹体冲击靶体高速录像

Fig.6 High speed recording of projectile impact target

卡瓣被拦截反弹。叶片侵彻靶板过程中铝托撞击叶片尾端并被截成两半。

表 2 所示为通过弹道试验获得的叶片初始速度 v_0 、贯穿靶板后的剩余速度 v_t 以及叶片的姿态角。其中俯仰角 β 正方向为对图 4(b) 中 x 坐标轴使用右手准则,即表中正数代表叶片姿态下倾,反之代表叶片姿态上仰;横滚角 α 正方向为对图 4(a) 中 y 坐标轴使用右手准则;对图 4(b) 中 z 坐标轴使用右手准则为叶片偏航角 γ 的正方向。通过高速录像可以观测到叶片初始冲击靶板姿态,偏航角 γ 在冲击全程可以很好地保持为 0° 。其中俯仰角 β 和偏航角 γ 对叠层靶板的抗侵彻能力影响最大,若存在偏航角 γ ,会使得叶片尖端角侵彻叠层靶板,进而叠层靶板的抗侵彻能力会明显下降。

表 2 弹道试验结果

Table 2 Results of ballistic tests

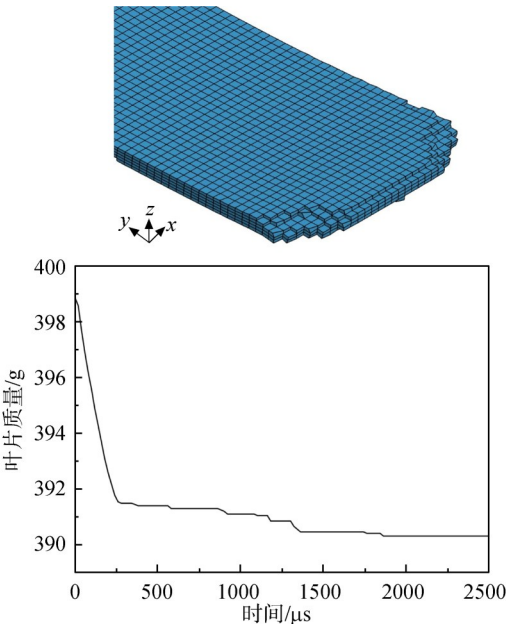
试验编号	靶板组合	试验结果	$v_0/(\text{m/s})$	$v_t/(\text{m/s})$	$\beta/(^{\circ})$	$\alpha/(^{\circ})$
#23	2S+0A+8S	贯穿	297.43	113.07	0	0
#24	2S+0A+8S	贯穿	294.66	133.32	0	110.00
#30	2S+0A+8S	跳飞	259.30		-9.71	0
#25	8S+0A+2S	跳飞	280.95		9.96	5.00
#26	8S+0A+2S	贯穿,接近 v_{bl}	307.28	42.40	4.70	20.00
#31	8S+0A+2S	跳飞	290.52		8.02	11.50
#27	5S+0A+5S	贯穿	274.28	111.56	0.77	-12.00
#42	5S+0A+5S	跳飞	269.82		10.44	0
#43	5S+0A+5S	贯穿,接近 v_{bl}	273.13	45.64	0	-24.00
#7	5S+2A+5S	跳飞	256.61		25.91	2.65
#8	5S+2A+5S	跳飞	280.28		-20.11	0
#11	5S+2A+5S	跳飞	256.00	-17.29	5.80	-12.00
#40	5S+2A+5S	贯穿	270.63	181.25	0	-2.00
#10	5S+5A+5S	贯穿	302.93	235.50	-4.57	-7.30
#12	5S+5A+5S	贯穿	286.79	201.61	9.06	-4.00
#13	5S+5A+5S	跳飞	272.59	-4.69	13.43	0
#14	5S+5A+5S	贯穿	259.52	118.86	7.13	0
#44	5S+5A+5S	贯穿	238.83	159.87	0	-13.00
#15	5S+8A+5S	贯穿	255.42	197.49	-4.70	10.00
#16	5S+8A+5S	v_{bl}	233.67	2.50	-6.25	-19.00
#41	5S+8A+5S	贯穿	246.59	117.86	4.94	0
#17	5S+10A+5S	贯穿	225.67	99.20	-1.59	-2.00
#18	5S+10A+5S	贯穿	212.08	76.24	0	-4.90
#21	5S+10A+5S	贯穿	207.41	92.65	0	0
#22	5S+10A+5S	贯穿	230.97	77.65	2.97	18.50
#19	5S+15A+5S	贯穿	208.52	116.55	0	-7.50
#20	5S+15A+5S	跳飞	196.18	-14.75	-10.38	17.50
#32	5S+15A+5S	嵌埋, v_{50}	210.00		3.72	16.50

2 打靶试验数值仿真

2.1 数值仿真建模

离散单元的网格依照侵彻区域加密、网格为规则六面体等原则进行划分。由于模型复杂,单元较多,畸形的网格会导致仿真结果的不准确、计算停滞、负体积以及降低计算效率等情形,使得计算时间多出1.5~3倍。

数值仿真建模的铸铁、铝 LY12 和双层 TC4 叠层靶板的材料选用 98 号材料 *MAT_SIMPLIFIED_JOHNSON_COOK 模型。回收弹道试验后的叶片(质量损耗在 0~20 g 左右),与仿真结果作比较,发现数值仿真叶片选用 15 号材料 *MAT_JOHNSON_COOK 模型^[8]更符合弹道试验叶片的质量损耗如图 7,材料参数参考表 3。15 号材料比 98 号材料涉及更多的参量,其状态方程



(a) 数值仿真叶片质量损失情况



(b) 试验叶片质量损失情况

图 7 试验#14 叶片质量损耗情况与仿真对比
Fig.7 Quality loss of test #14 blade compared with the simulation

表 3 *MAT_JOHNSON_COOK 模型材料参数^[8]
Table 3 *MAT_JOHNSON_COOK model material parameters^[8]

参数	数值
材料密度 $\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	4.43
弹性模量 E/MPa	113 000
泊松比 ν	0.33
材料熔点 T_m/K	1 878
试验室温 T_r/K	293
材料比定压热容 $c_p/(\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K}))$	0.2
应变率因子 ϵ_0/s^{-1}	1
A/MPa	1 098
B/MPa	1 092
n	0.93
c	0.014
m	1.1
D_1	-0.09
D_2	0.27
D_3	0.48
D_4	0.014
D_5	3.87

为 GRUNEISEN,此模型可以描述 TC4 材料的应变硬化、应变率和温度软化效应,以及在不同应力三轴度、应变率和温度情况下的抗破坏能力。不同于 98 号材料,15 号材料 Von Mises 流变应力表述为

$$\sigma_y = (A + B\bar{\epsilon}_{ep}^n)(1 + c \ln \dot{\epsilon}^*)(1 - T^{*m}) \quad (2)$$

式中 A 、 B 、 C 、 n 、 m 为输入材料参数,需要通过试验来拟合获得; $\bar{\epsilon}_{ep}$ 为等效塑性应变; $\dot{\epsilon}^*$ 为无量纲化等效塑性应变率; T^* 为无量纲化温度;破坏应变可写作

$$\epsilon_f = (D_1 + D_2 e^{D_3 \sigma^*})(1 + D_4 \ln \dot{\epsilon}^*)(1 + D_5 T^*) \quad (3)$$

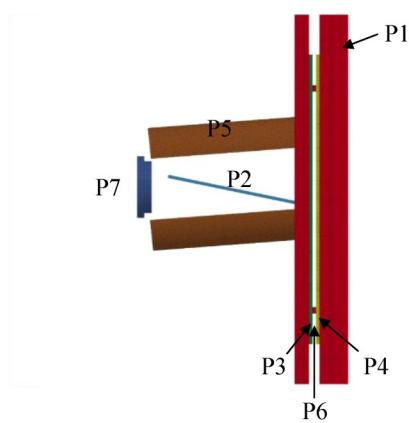
式中 D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 、 D_5 为输入参数需要通过试验来拟合获得。在不同的温度、应变率等情况下 15 号材料的各个拟合值相差较大,且计算效率远小于 98 号材料,故靶板材料选择 98 号材料。

图 6 所示试验中叶片侵彻靶板的过程大约为 5 000 μs ,那么数值仿真选取总时间为 5 000 μs 。在部分弹道试验中,铝 LY12 卡瓣和铝 LY12 底托与叶片以同样的速度一同撞击在试验靶板上,其动能不可忽略。图 8 以试验#13 为例,示意建模情况^[25],图 8(b)中建模 Part 1(简称为 P1,以下各个

Part简称为P)部分为铸铁靶架,固支靶架的边界条件,P2为叶片,P3为内层靶板,P4为外层靶板,P5为铝瓣,P6为调整间隙的铝条,P7为铝托。每个不同编号的试验对应不同的仿真建模。



(a) 试验#13



(b) 有限元数值仿真模型

图8 试验#13数值仿真建模

Fig.8 Numerical simulation model of test #13

冲击过程中各部件变形较大,尤其是叶片可能发生自接触,为了描述系统内各部件的变形特点和相互作用,对各部件采用自动面面接触算法

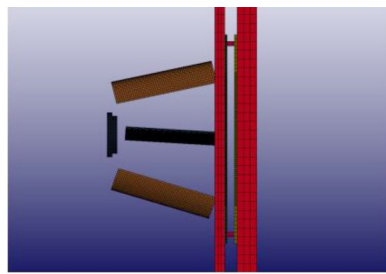
(CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE)来模拟它们之间的相互作用,防止不同部件之间相互重叠穿透。对于自由叶片与机匣之间的接触则采用侵蚀接触算法(CONTACT_ERODING_SURFACE_TO_SURFACE)。虽然在高速冲击理论分析冲击中经常假设忽略摩擦力作用,对于模拟真实试验的有限元仿真有必要考虑摩擦力的影响。摩擦力需要设置于接触算法内,动摩擦因数选取0.1,静摩擦因数选取0.15。

弹道冲击仿真中,碰撞速度快、单元密集,可能会出现单元畸形或者负体积情况,质量、长度和时间单位通常选用g、cm、 μ s。为了降低上述情况的发生而导致的计算错误,需要添加沙漏控制,若没有特殊情况,沙漏控制保持LS-DYNA默认即可。同样,接触控制*CONTROL_CONTACT的设置在没有特殊的需求时保持默认。值得一提的是计算过程中零散的碎片会被删除,从而质量减少导致结果误差。考虑到侵彻过程中的冲塞问题,需要设置ENMASS参数为2,代表保留实体单元和壳单元零散碎片并继续参加侵彻过程。

2.2 数值仿真结果

表2中试验#32结果为叶片嵌埋,叠层靶板组合为5S+15A+5S。高速摄影计算的弹体着靶初始速度为210.00 m/s, α 角度为 16.5° , β 角度为 3.72° 。

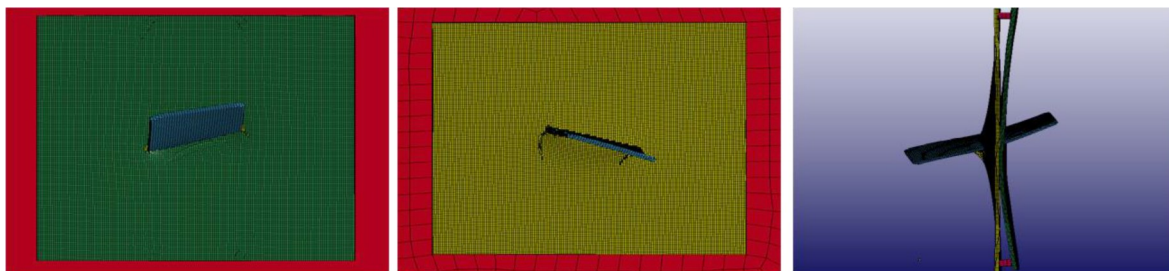
叶片形弹丸与靶板撞击瞬间,产生较为明亮的火花,火光穿过靶板,碎片被靶板挡住,试验叶片嵌入靶板,认为叶片撞击初始速度为 v_{50} 。图9



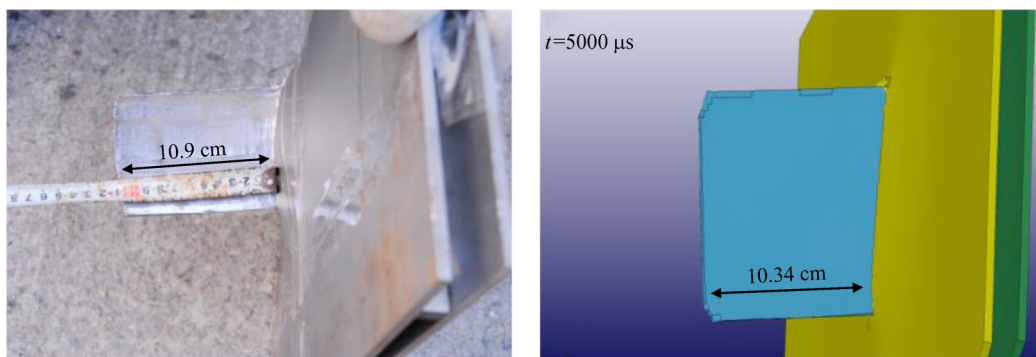
试验#32的有限元数值仿真建模



(a) 试验#32靶板损伤和叶片的嵌入情况



(b) 试验#32对应的数值仿真靶板损伤和叶片的嵌入情况



(c) 试验#32叶片嵌入长度与数值仿真对比情况

图9 试验#32数值仿真结果与试验对比

Fig.9 Test #32 numerical simulation results are compared with the test results

对比了试验#32与其仿真结果,仿真叶片嵌入长度(10.34 cm)与试验叶片嵌入长度(10.9 cm)结果吻合较好,从损伤情况和嵌入状态来看仿真与试验结果吻合较好。通过LS-DYNA的后处理可以输出叶片飞行方向速度-时间曲线图10,可以看出有限元数值仿真叶片在没有贯穿靶板时最终速度为0 m/s,叶片嵌入入双层金属靶板之中,数值仿真结果与试验结果相吻合。

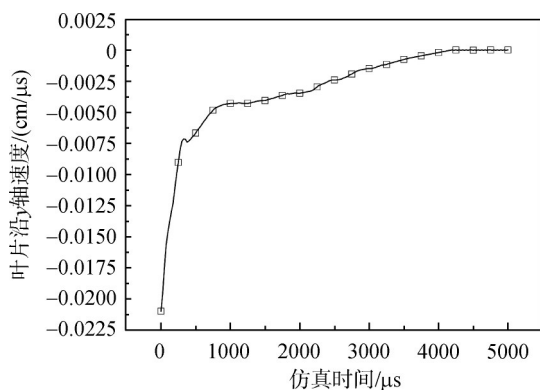


图10 试验#32叶片沿y轴速度-时间曲线

Fig.10 Blade of test #32 along y axis velocity-time curve

3 试验和数值仿真结果讨论

图11为5S+5S带间隙组合靶板试验情况与

数值仿真预测曲线对比图(数仿真结果见表1),图中空心矩形点为仿真预测弹道极限,曲线为拟合的预测曲线,实心圆点为叶片贯穿叠层靶板试验情况;实心三角形为叶片未击穿试验情况;数据点编号对应试验编号及其叶片攻角 β 。其中编号#16和#32带有一定的小角度,试验速度约为弹道极限;试验#43、#40、#18、#21和#19叶片姿态垂直撞击且均穿透靶板。其中编号#18和#21在预测线下方,即初始速度略低于预测弹道极限值,除这两组试验外,其余均符合仿真预测结果。由此可见,试验前进行数值仿真对打靶试验具有很高

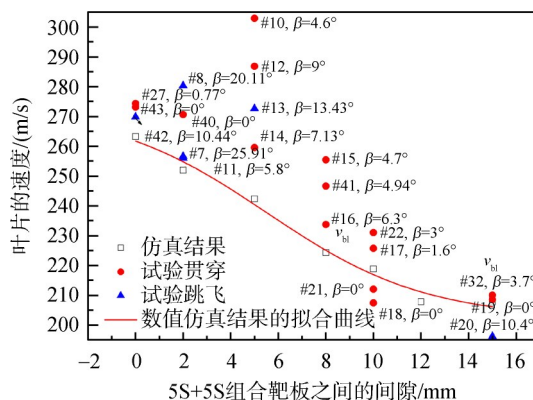


图11 5S+5S组合试验与仿真预测吻合

Fig.11 Test results of 5S+5S combination agree well with the simulation results

的参考价值。

叶片存在俯仰角 β 时对靶板组合弹道极限影响较大。表 4 和图 12 给出数值仿真建模无间隙叠层靶板组合的弹道极限,图 12 中空心点为仿真预测弹道极限,曲线为拟合预测曲线,实心点代表试验结果,其后面编号为对应的试验编号。编号 #23、#24、#43 和 #27 试验结果均为击穿且俯仰角较小,编号 #26、#27 和 #43 试验结果接近弹道极限且在预测曲线上,编号 #31、#25、#30 和 #42 试验均未击穿靶板。各个组合在没有间隙的情况下,弹道极限随叶片攻角增加而增加,三种组合曲线均存在拐点。其中 2S+8S 与 8S+2S 组合情况对攻角较为敏感,攻角小于 6° 时 2S+8S 组合抗侵略能力较强;攻角大于 6° 时 8S+2S 组合抗侵略能

力较强。

图 12 的预测曲线可以看出,叶片俯仰角 β 在 $4^{\circ}\sim 8^{\circ}$ 时,靶板的弹道极限突升。原因是随着俯仰角的增加,叶片从直接贯穿靶板到卷曲挤出靶板。叶片卷曲被靶板挡住,叶片的动能一部分会转变为叶片的变形能,同时靶板的撕裂、大变形将会耗散更多的能量。当叶片初始动能不足以贯穿或者卷曲挤出靶板时,叶片会被弹开即发生如表 2 中叶片跳飞的情况。图 13(a)和图 13(b)(图 13(b)为剖面图)中显示了 2S+0A+8S 靶板组合情况下叶片在俯仰角 β 为 4° 贯穿和 10° 卷曲的损伤情况。图 13(c)为弹道试验后叶片的损伤情况,弹道试验与数值仿真的叶片损伤情况吻合,可以解释曲线中弹道极限突升的情况。5S+5S 以及

表 4 叶片在不同 β 角度下冲击带有 0 mm 间隙叠层靶板的弹道极限

$\beta/(^{\circ})$	$v_{bl}/(\text{m/s})$		
	5S+5S	2S+8S	8S+2S
0	263.2	272.1	264.9
2	265	276	273
4	267	297	284
6	269	354	352
8	322	362	373
10	343	375	384
12	382	384	392

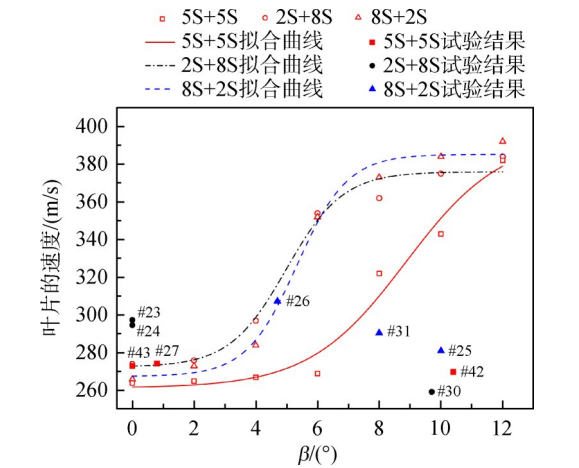
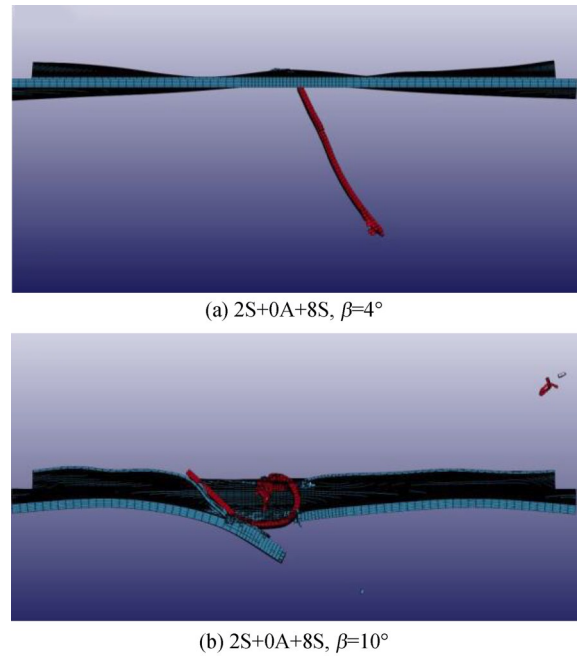


图 12 0 mm 间隙下试验与仿真预测结果吻合
Fig.12 Test results agree well with the simulation results under 0 mm gap



(c) 试验叶片损伤情况
图 13 试验叶片损伤情况与数值仿真相比较
Fig.13 Damage of testing blade compared with the numerical simulation

8S+2S组合曲线的突升原因与图13所示相同。

图12中可以看出叶片在攻角为 $0^\circ\sim 4^\circ$ 时,弹道极限相差1~10 m/s,即说明在此攻角范围内,攻角对弹道极限的影响不大。根据试验表2数据以及图11可知:

1) 对比5S+0A+5S试验#43与5S+2A+5S试验#40的结果,在叶片初始撞击速度基本相同、姿态均为垂直侵彻靶体的情况下,前者叶片贯穿靶板后速度45.60 m/s低于后者叶片贯穿靶板后速度181.30 m/s,可见5S+0A+5S组合靶体抗侵彻能力大于5S+2A+5S组合靶体。

2) 对比5S+2A+5S试验#11与5S+5A+5S试验#14的结果,在叶片初始撞击速度基本相同,且前者俯仰角较小的情况下,5S+2A+5S试验叶片没有贯穿靶板,而5S+5A+5S试验叶片贯穿且剩余速度为118.90 m/s,可见5S+2A+5S组合靶体抗侵彻能力大于5S+5A+5S组合靶体。

3) 对比5S+5A+5S试验#12、#13与#14的结果,叶片俯仰角在 $9^\circ\sim 13.4^\circ$ 之间靶板抗侵彻能力变化明显,出现类似图12中所示的俯仰角在某个区间内靶板抗侵彻能力突升的情形。

4) 对比5S+5A+5S试验#14与5S+8A+5S试验#15的结果,在初始撞击速度和俯仰角均接近的情况下,叶片贯穿5S+5A+5S组合靶板后的剩余速度118.9 m/s低于5S+8A+5S组合的叶片剩余速度197.5 m/s,可见5S+5A+5S组合靶体抗侵彻能力大于5S+8A+5S组合靶体。

5) 对比5S+8A+5S试验#16与5S+10A+5S试验#22的结果,可见5S+8A+5S组合靶体抗侵彻能力大于5S+10A+5S组合靶体。

6) 对比5S+10A+5S试验#19与5S+15A+5S试验#18的结果,在叶片初始撞击速度基本相同、姿态均为垂直侵彻靶体的情况下,前者叶片贯穿靶板以后的剩余速度76.2 m/s,后者叶片贯穿靶板后的剩余速度116.60 m/s,可见5S+10A+5S组合靶体抗侵彻能力大于5S+15A+5S组合靶体。

7) 对比2S+0A+8S试验#23与5S+0A+5A试验#27的结果,在叶片贯穿叠层靶板的剩余速度基本相同、姿态均为垂直侵彻靶体的情况下,前者叶片初始速度297.40 m/s,大于后者叶片初始速度274.30 m/s,可见2S+0A+8S组合抗侵彻能力大于5S+0A+5S组合。

综上所述,5S+5S带间隙靶板组合间隙越大,靶板抗侵彻能力越小,这与数值仿真结果吻合。由于2S+0A+8S组合打靶试验叶片攻角较小,而8S+0A+2S组合打靶试验叶片攻角较大,没有对照试验可以证明抗侵彻能力较强的是哪一组,但是弹道试验证明了数值仿真曲线图11和图12的正确性,从而可以推断出2S+0A+8S组合抗侵彻能力大于8S+0A+2S组合,8S+0A+2S组合抗侵彻能力大于5S+0A+5S组合抗侵彻能力。

从弹道试验和数值仿真结果来看,数值仿真内外靶板损伤情况、裂纹扩展情况以及叶片损伤、速度变化情况均与试验结果吻合,可见数值仿真结果具有一定的正确性和可靠性。

文献[18]认为分层和增加靶板之间的间隙均能提高组合靶板的弹道极限,这与本文的弹道试验和仿真结论有所不同。对比弹道试验可见,文献[18]中的靶板厚度和弹体厚度之比即无量纲靶厚为0.75,本文无量纲靶厚为2。通常无量纲靶厚决定了圆柱形弹丸冲击多层靶板的破坏模式,可见对于叶片形弹丸也有类似的结论,本文弹道试验的无量纲靶厚较大,试验结果接近尖头弹的弹道试验结论,即分层和增加靶板之间的间隙会降低组合靶板的弹道极限;相反,文献[18]中的弹道试验无量纲靶厚较小,试验结果接近平头弹的弹道试验结论。

4 结 论

1) 设计并开展了火炮加载高质量、高动能叶片形弹丸冲击双层钛合金带间隙叠层靶板的弹道试验。通过对靶架、叶片形弹丸的设计以及利用有限元仿真得到的加载弹体速度等方法,进而得到了较为良好的试验效果。通过试验可知:双层5S+5S带间隙叠层靶体的抗侵彻能力随着间隙的增大而降低;随着叶片攻角加大,在一定范围内,叠层靶体的抗侵彻能力会有所突升;在间隙为0 mm的时候,2S+8S叠层靶体组合的弹道极限高于8S+2S叠层靶体组合,8S+2S叠层靶体组合的弹道极限高于5S+5S叠层靶体组合。

2) 利用大型仿真软件ANSYS/LS-DYNA进行等尺寸试验数值仿真。通过仿真看出,2S+8S与8S+2S组合情况对叶片攻角较为敏感,攻角小于 6° 时2S+8S组合抗侵彻能力较强,攻角大于 6° 时8S+2S组合抗侵彻能力较强。仿真结果

显示靶体损伤情况、叶片速度变化和叶片形变与损伤情况等均与试验情况吻合较好。可以看出数值仿真具有较高的准确性,可以用于弹道试验和深入探求更多潜在的规律。

3) 无量纲靶厚决定了叶片形弹丸冲击双层靶板的破坏模式,无量纲靶厚越大,弹道试验结果越接近尖头弹的弹道试验结论;反之,无量纲靶厚越小,弹道试验结果越接近平头弹的弹道试验结论。

参考文献:

- [1] 何庆. 航空发动机机匣包容性机理及数值仿真方法研究[D]. 杭州:浙江大学, 2012.
HE Qing. Research on the mechanism and simulation methodology development for aeroengine casing/blade containment[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. (in Chinese)
- [2] 陈光. 航空发动机结构设计分析[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2006.
- [3] 陈光涛. 几种典型机匣结构的包容性研究[D]. 杭州:浙江大学, 2014.
CHEN Guangtao. Research on the containment of several kinds of typical casing structures[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese)
- [4] 张晓峰. 航空发动机机匣包容性的试验研究与仿真计算[D]. 杭州:浙江大学, 2005.
ZHANG Xiaofeng. Experiments and simulation of the blade containment in the aeroengines[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005. (in Chinese)
- [5] 范志强. 航空发动机机匣包容性理论和试验研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2006.
FAN Zhiqiang. Theory and experimental study on aeroengine casing containment[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006. (in Chinese)
- [6] HE Q, XIE Z, XUAN H, et al. Ballistic testing and theoretical analysis for perforation mechanism of the fan casing and fragmentation of the released blade[J]. International Journal of Impact Engineering, 2016, 91:80-93.
- [7] 宣海军, 陆晓, 洪伟荣, 等. 航空发动机机匣包容性研究综述[J]. 航空动力学报, 2010, 25(8):1860-1870.
XUAN Haijun, LU Xiao, HONG Weirong, et al. Review of aero-engine case containment research[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(8):1860-1870. (in Chinese)
- [8] 段玥晨, 章定国, 陈思佳, 等. 航空发动机机匣包容性打靶试验与仿真研究[J]. 计算机仿真, 2014, 31(4):106-109.
DUAN Yuechen, ZHANG Dingguo, CHEN Sijia, et al. Simulation and experimental study on aeroengine casing containment[J]. Computer Simulation, 2014, 31(4):106-109. (in Chinese)
- [9] 刘璐璐. 二维三轴编织带缠绕碳纤维复合材料机匣包容性研究[D]. 杭州:浙江大学, 2014.
LIU Lulu. Research on the containment of 2D carbon fiber triaxial braided tape wound composite casing[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese)
- [10] 钱伟长. 穿甲力学[M]. 北京:国防工业出版社, 1984.
- [11] ROSENBERG Z, DEKEL E. Terminal ballistics[M]. Berlin: Springer International Publishing, 2012.
- [12] DENG Y, ZHANG W, CAO Z. Experimental investigation on the ballistic resistance of monolithic and multi-layered plates against ogival-nosed rigid projectiles impact[J]. Materials & Design, 2013, 44:228-239.
- [13] DENG Y, ZHANG W, CAO Z. Experimental investigation on the ballistic resistance of monolithic and multi-layered plates against hemispherical-nosed projectiles impact[J]. Materials & Design, 2012, 41:266-281.
- [14] DEY S, BØRVIK T, TENG X, et al. On the ballistic resistance of double-layered steel plates: an experimental and numerical investigation[J]. International Journal of Solids and Structures, 2007, 44(20):6701-6723.
- [15] WOODWARD R L, CIMPOERU S J. A study of the perforation of aluminium laminate targets[J]. International Journal of Impact Engineering, 1998, 21(3):117-131.
- [16] BØRVIK T, FORRESTAL M J, HOPPERSTAD O S, et al. Perforation of AA5083-H116 aluminium plates with conical-nose steel projectiles-calculations[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(3):426-437.
- [17] BEN-DOR G, DUBINSKY A, ELPERIN T. On the ballistic resistance of multi-layered targets with air gaps[J]. International Journal of Solids & Structures, 1998, 35(23):3097-3103.
- [18] 杨双林. 双层金属机匣模拟包容性试验及数值分析[D]. 南京:南京航空航天大学, 2010.
YANG Shuanglin. Simulated containment test and numerical simulation of double-layered metal casing[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese)
- [19] 李建华, 刘杰. WJ9 发动机涡轮转子叶片包容性研究[C]//中国航空学会(直升机)第三届动力与传动学术讨论会论文集. 北京:中国航空学会, 2000, 76-81.
- [20] GUPTA N K, IQBAL M A, SEKHON G S. Effect of projectile nose shape, impact velocity and target thickness on the deformation behavior of layered plates[J]. International journal of impact engineering, 2008, 35(1):37-60.
- [21] RECHT R F, IPSON T W. Ballistic perforation dynamics[J]. Journal of Applied Mechanics, 1963, 30(3):384-390.
- [22] HALLQUIST J O. LS-DYNA theory manual[M]. Livermore, US: Livermore Software Technology Corporation, 2006.
- [23] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA Keyword User's Manual (Version 970)[M]. Livermore, US: Livermore Software Technology Corporation, 2003.
- [24] 时党勇, 李裕春, 张胜民. 基于 ANSYS/LS-DYNA 8.1 进行显式动力分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2005.
- [25] MOHAMMAD R, TOHID M M, HASH EM B, et al. Dynamic plastic response of double-layered circular metallic plates due to localized impulsive loading[J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers, 2019, 233(7):1449-1471. (in Chinese)

(编辑:张雪)