

文章编号:1000-6893(2008)04-1049-06

微爆索线型切割某战斗机舱盖的研究

李志强¹, 赵隆茂¹, 刘晓明², 赵勇刚¹

(1. 太原理工大学 应用力学研究所, 山西 太原 030024)

(2. 成都飞机集团有限公司, 四川 成都 610092)

Study on the Linear Shape Cutting Canopy of a Warcraft with Miniature Detonating Cord

Li Zhiqiang¹, Zhao Longmao¹, Liu Xiaoming², Zhao Yonggang¹

(1. Institute of Applied Mechanics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

(2. Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co. Ltd., Chengdu 610092, China)

摘要: 为了缩短弹射座椅穿盖时间, 确保飞行员安全逃生, 提出了微爆索(MDC)爆炸切割技术在航空弹射救生系统中应用。首先对由黑索今(RDX)、奥克托金(HMX)、六硝基芪(HNSII)3种不同类型炸药, 铅、铝两种包覆材料制作的半圆形微爆索线型切割平板航空有机玻璃(PMMA)元件进行了实验研究, 观察了有机玻璃的层裂现象, 确定了最佳的微爆索炸药类型、包覆材料和装药量。然后利用实验确定的微爆索方案, 采用三维动态非线性显式有限元程序 LS-DYNA3D, 对沿舱盖中央铺设的微爆索切割真实全尺寸飞机舱盖透明件进行了计算机模拟。在有限元分析中, 选择 ALE 算法模拟高能炸药起爆后表现出来的流体特性, 定义自动面对面接触类型实现炸药与 PMMA 流固耦合作用, 使用连续损伤动力学材料模型模拟有机玻璃在爆炸冲击波作用下的损伤行为, 并伴随有层裂现象。数值模拟得到了一定的装药量对应的舱盖切割深度, 与实验实测得到的结果吻合得较好。因此, 平板有机玻璃元件实验可用来指导舱盖透明件实验。

关键词: 微爆索; 切割; 有机玻璃; 弹射救生系统; 层裂; 计算机模拟

中图分类号: V254.1 **文献标识码:** A

Abstract: To shorten the time of ejection seat through the canopy, and to ensure pilot to safely escape and survive, the application of cutting technique with miniature detonating cord (MDC) in aviation ejection escape system is proposed. Firstly, experimental study on the cutting aeronautical polymethyl methacrylate (PMMA) plate with a serial of semi-circle MDC, which are made of royal demolition explosive (RDX), high melting explosive (HMX), Hexanitrostilbene II (HNSII) and two different metal materials (Pb and Al), is performed. Spalling phenomenon in the PMMA due to MDC cutting is observed. The best explosive type, covered material and charge quantity suitable for MDC are determined. Subsequently, According to experimental result from PMMA component test, the process of cutting the real full-size warcraft canopy is simulated using three-dimension dynamic nonlinear explicit code LS-DYNA3D, herein MDC is installed along the center of canopy. In FEA, ALE algorithm is used to model the flow properties of explosive after detonation. Automatic surface to surface contact type is selected to implement fluid structure interaction between explosive and PMMA. Damage behaviors of PMMA subjected to detonation shock are represented by using continuum damage dynamic constitutive model accompanying with the spalling property. Lastly, cutting depths corresponding to given charge quantities are obtained by numerical simulation, which well agree with the experimental results. As a consequence, experiment on the PMMA plate is able to guide canopy test.

Key words: miniature detonating cord; cutting; PMMA; ejection escape system; spalling; computer simulation

飞机弹射救生系统主要由弹射座椅和清除弹射通道系统两部分组成^[1]。在座椅弹射之前一定要为座椅清除弹射通道, 清除弹射通道系统作为弹射救生的重要子系统是救生能否成功的关键,

随着飞机整体性能的不断提高, 清除弹射通道的方式也在不断地改进和完善^[2]。

传统的抛盖救生系统, 首先启动弹射手柄, 飞机联动装置将活动舱盖抛离弹射区, 然后座椅才开始运动。这一过程需要一定的时间。特别在零-零(即飞机高度和速度均为零时)弹射状态, 一般需要 0.3~0.4 s。飞机设计师为避免弹射座椅

收稿日期:2007-06-19; 修订日期:2007-11-02

基金项目:国家自然科学基金(10672112)

通讯作者:赵隆茂 zhaolm@tyut.edu.cn

与舱盖在空中相撞,往往采用延时机构使座椅延时 0.3~0.4 s 才开始运动。对低空复杂姿态下的飞机来说,时间的损失可能导致弹射救生失败。

因此,目前先进的战斗机已普遍放弃了抛盖弹射救生系统,采用穿盖弹射技术,即无延时弹射救生系统作为主要弹射救生方式,缩短了从启动弹射到座椅开始运动的时间。穿盖弹射救生技术大致可分为两类:第1类是使用破盖枪,在弹射座椅接触舱盖透明件前,破盖枪工作,使舱盖透明件产生破裂和初始裂纹,然后依靠座椅的穿盖器破裂舱盖透明件,达到清除弹射通道障碍的目的。该技术主要适用于第2代战斗机的非定向航空有机玻璃舱盖。第2类是采用微爆索穿盖弹射救生系统在弹射座椅接触舱盖透明件前^[3],微爆索破裂系统工作,当舱盖透明件产生破裂和初始裂纹后,依靠座椅的穿盖器来完成弹射通道障碍的清除。该项技术主要适用于第3代战斗机的定向航空有机玻璃舱盖。“枭龙”采用了大量现代先进的航空技术,微爆索穿盖弹射救生系统就是其一。

本文针对预破碎舱盖弹射救生方式,主要介绍了采用实验方法来确定用于精确可控切割航空平板定向有机玻璃的微爆索类型和装药量范围^[4]。为了减少透明件昂贵的实验费用,先依据板材实验结果,采用有限元方法来模拟微爆索切割舱盖透明件的过程。验证了板材实验结果可直接指导系统实验。

1 微爆索层裂切割航空有机玻璃(PMMA)原理

利用微爆索爆炸切割 PMMA,要求切割形成的侵彻部分应尽量在附着微爆索的反面,这样可保证切割效果并避免因切割产生的碎片对飞行员造成伤害。PMMA 是一种高分子材料,其强度远比金属材料、岩石等低,经定向处理后,具有层裂的特性。对于微爆索-PMMA 系统,微爆索起爆后,爆轰波由高阻抗介质(炸药)向低阻抗介质(PMMA)传播,界面上的反射波(传向炸药)为稀疏波,透射波(传向 PMMA)为短历时、高强度冲击波,当其到达 PMMA 自由表面反射后形成拉应力,与入射压缩波相向而行,在 PMMA 内某一层面产生应力波的叠加,引起强烈的拉伸应力。当某截面处 PMMA 的拉应力大于动态拉伸强度时,材料发生断裂,由此在背面产生层裂^[5]。层裂发生的位置又成为新的自由面,如此反复,就可以达到在附着微爆索的背面产生层裂深度精确可控的切割效果,如图 1 所示。

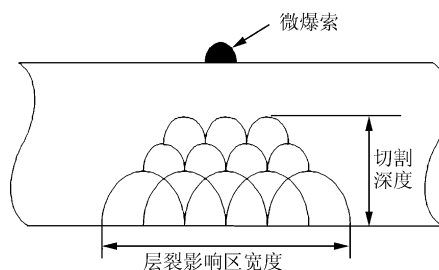


图1 微爆索层裂切割 PMMA 示意图

Fig.1 Schematic sketch of cutting PMMA with miniature detonating cord (MDC)

2 板材切割实验研究

2.1 微爆索的相关参数

为了确定影响切割效果的微爆索的几何外形、药型罩材质、炸药类型和装药量等参数,设计了一系列半圆柱形微爆索如图 2 所示。

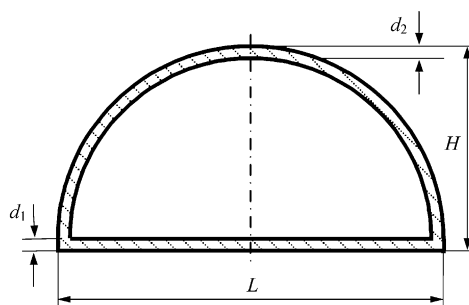


图2 金属药型罩的几何外形及尺寸

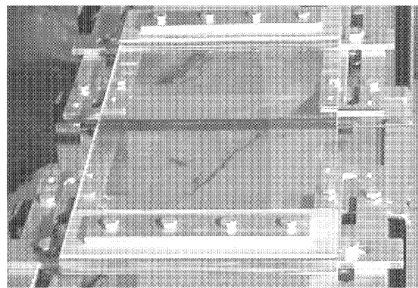
Fig.2 Geometry shape and size of metal cover

微爆索由金属药型罩和炸药组成。由于微爆索被使用在航空救生系统中,因此药型罩的材料要求塑性好,在爆炸切割过程中不气化,不易形成污染。一般可取材料有紫铜、黄铜、软铁、铅、铝、银、镉等。本文选用了铅和铝两种材料。加工后测得, $L=1.87\sim 1.96$ mm,切割深度 $H=0.87\sim 1.09$ mm, $d_1=0.12\sim 0.26$ mm, $d_2=0.16\sim 0.26$ mm,并发现 4 个参数的上限值或下限值往往存在于同一种药型罩中。在一般的爆炸切割中,为了提高切割效果,炸药切割力愈大愈好。切割 PMMA 这种高分子材料并不需要太大的切割力,且为了易于控制切割深度,分别选择了六硝基芪(HNSII)、奥克托金(HMX)、黑索今(RDX)3 种钝化炸药。由理论和经验公式估算,对每种炸药给出多种填充线密度(线密度范围 0.60~1.51 g/m)。对于 HNSII 型炸药共填充了 9 种规格。采用铅外壳的为 5 种规格,炸药的线密度分别为

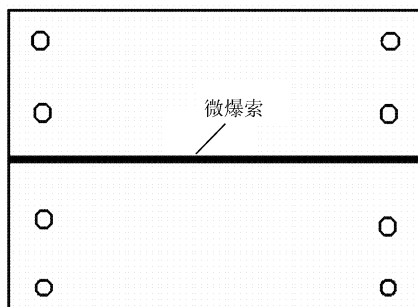
0.68, 0.83, 1.07, 1.22, 1.41 g/m。采用铝外壳的为4种规格,炸药的线密度分别为1.01, 1.23, 1.39, 1.51 g/m。HMX型炸药3种规格,均为铝外壳,炸药的线密度分别为0.83, 1.02, 1.39 g/m。RDX型炸药也共填装了3种规格,均为铝外壳,炸药的线密度分别为0.80, 1.03, 1.26 g/m。另外,采用电离导通式电探针方法对上述各种类型炸药的爆速也进行了测量,对于后面数值模拟要用到的铝外壳 HNSII 微爆索,其爆速随线密度增大而增大,大小在 6 500~7 100 m/s 之间。

2.2 实验

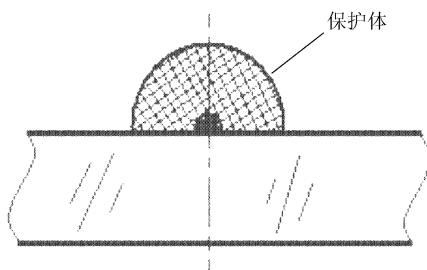
试件选择3#定向PMMA,尺寸为140 mm×180 mm×7 mm。实验装置如图3所示。



(a) 实验装置



(b) 微爆索的位置



(c) 实验装置切面局部放大图

图3 实验装置

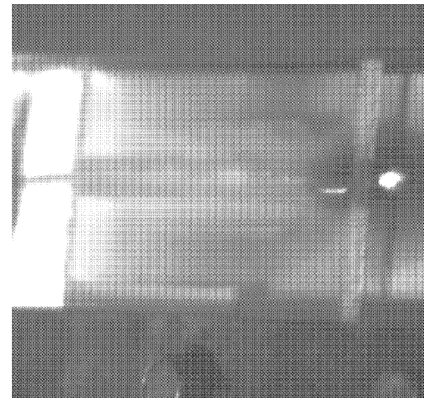
Fig.3 Experimental apparatus

微爆索保护体采用XM-23密封胶材料形成制成。采用XM-23胶粘剂将微爆索、微爆索保护体和透明件粘接成一体,并进行硫化。微爆索放

置于板中央对称位置。采用M14螺栓挤压压紧边缘方式来固定玻璃板试件。对3种炸药、2种外壳、不同的线密度从小到大逐次进行实验,共完成45次实验,相同的实验重复3次。采用电雷管引爆微爆索端部。

2.3 实验结果

实验中采用高速摄像机对起爆过程进行记录。图4为高速摄像图,图5为实验后试件照片,从图中可以明显地看到层裂现象。



(a) 起爆



(b) 开裂

图4 切割过程

Fig.4 Process of cutting

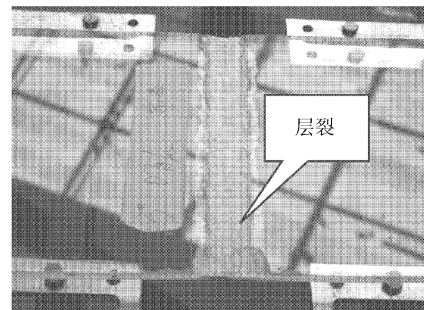


图5 实验后试件照片

Fig.5 Image of specimen after experiment

衡量切割效果好坏的主要指标为PMMA板切割深度。在实验中,采用游标卡尺来测量PM-

MA板切割深度。对于相同的重复实验,取平均值作为最后切割深度。试件被彻底穿透时,切割深度记为7mm。为了确定不同的金属外壳的微爆索对切割效果的影响,分别对具有铅外壳、铝外壳不同装药量的 HNSII 微爆索进行了切割实验,其实验结果见图6。

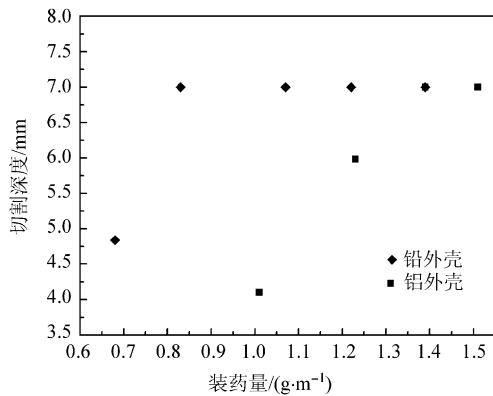


图6 不同的金属外壳切割深度与装药量之间的关系

Fig. 6 Relationships between cutting depth and charge quantity for different types of metal shell

由图6可以看出,对于同一种炸药,铅外壳微爆索比铝外壳微爆索切割深度要大。因此在其他参数相同的情况下,采用铅外壳的微爆索比采用铝外壳的微爆索切割有机玻璃的效果好。因此选择铅作为较佳的外型罩材料。为了确定不同炸药类型对微爆索切割PMMA板效果的影响,对3种不同类型炸药的铅外壳微爆索进行了切割实验,结果示于图7。由图7可以看出,3种类型的炸药相比,HNSII炸药切割深度最大,所以其具有较大的切割能力。尽管设计的微爆索的装药线密度在0.60~1.51 g/m之间,但当装药线密度超过0.83 g/m,PMMA板彻底破坏,试件被切割

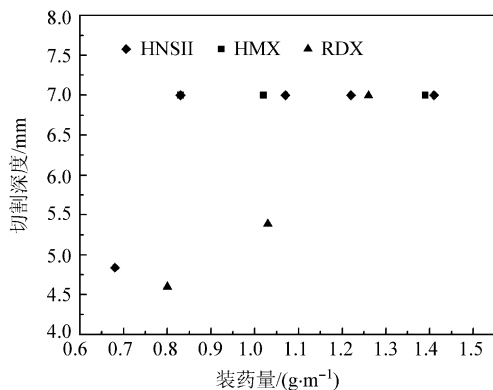


图7 不同的炸药类型,切割深度与装药量之间的关系

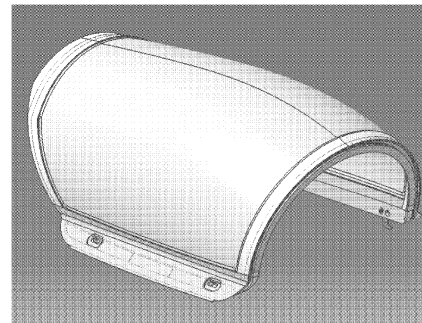
Fig. 7 Relationships between cutting depth and charge quantity for different types of explosive

为两半。显然,原设计装药量过大,最佳的装药线密度应在0.6~0.9 g/m范围之内。

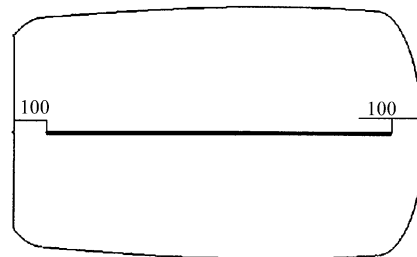
通过实验研究,再考虑到HNSII具有热感度低的特性,确定了铅外壳微爆索与PMMA相匹配,同时也确定了最佳的装药量范围在0.6~0.9 g/m。

3 数值模拟

为了验证板材的实验可否用来直接指导真实透明件现场实验,对沿某机型舱盖中央布置的微爆索断裂系统切割过程进行了模拟,如图8所示。数值模拟采用实验确定的微爆索类型和装药量范围。



(a) 舱盖的几何外形



(b) 微爆索在舱盖上的布局示意图

图8 某机型微爆索断裂系统

Fig. 8 MDC fracture system of a certain aircraft

3.1 有限元模型

对舱盖、炸药和铅外壳划分网格,有限元模型由3个部分组成,见图9。舱盖选择拉格朗日实体全积分单元。为了模拟层裂现象,单元尺寸尽可能地小,厚度方向尺寸为0.46 mm。水平方向的单元尺寸由微爆索作用区域到远离区域逐渐增大。炸药选择ALE实体单元,大小均匀,尺寸为0.25 mm。铅外壳被模拟为默认的壳单元类型。整个模型的单元和节点总数分别为120 000和125 000。定义自动面对面接触类型来模拟炸药和舱盖之间的流固耦合作用。采用固定支撑边界来模拟边缘压紧。

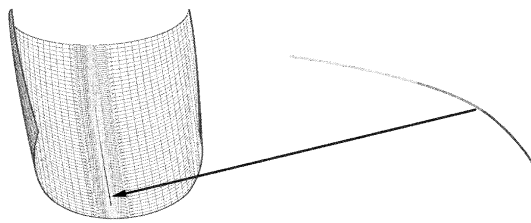


图 9 微爆索的有限元模型
Fig. 9 Finite element model of MDC

3.2 材料模型

舱盖采用 LS-DYNA 中的 105 #材料(*MAT_DAMAGE_2),这是一个考虑黏性效应的弹塑性和连续损伤力学相结合的本构模型^[6]。利用等效应力-等效塑性应变曲线来反映弹黏塑性模型。对于连续损伤力学模型,损伤应力为

$$\tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{1-D} \quad (1)$$

式中: D 为损伤变量; σ 为名义应力。损伤演化过程为

$$\dot{D} = \begin{cases} 0 & r \leq r_D \\ \frac{Y}{S(1-D)} \dot{r} & r > r_D, \sigma_1 > 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: r_D 为损伤阈值; S 为应变能释放率,正的材料常数; σ_1 为最大主应力; Y 为应变能密度。对于舱盖, $\rho=1.19 \text{ g/cm}^3$, $E=3.6 \text{ GPa}$, $\nu=0.4$, $\sigma_s=76 \text{ MPa}$ 。

炸药采用 LS-DYNA 提供的高能炸药材料模型(MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN)和 JWL 状态方程,式(3)定义爆炸压力为相对体积 V 与初始内能 E 的函数,

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (3)$$

式中: E_0 为初始内能, $E_0=0.1$; V_0 为初始相对体积, $V_0=1.0$; ω, A, B, R_1, R_2 为用户输入参数,对于不同的炸药,Dobratz 给出相应参数,本文采用 $\omega=0.35$, $A=5.409$, $B=0.094$, $R_1=4.6$, $R_2=1.35$ 。

对于炸药,需输入爆轰速度、质量密度和相应的 PCJ 压力。铅外壳采用带破坏的塑性强化模型(MAT_PLASTIC_KINEMATIC)。

3.3 模拟结果

在计算分析中,单位采用 $\mu\text{s}, \text{cm}, \text{g}$,这主要是因为爆轰过程所需时间极短而决定的。图 10 为爆轰结束后,舱盖层裂部分的外貌。从图中可以看

出,切割区域发生在舱盖中央附近区域,且具有一定的切割深度,并且也能够看到在舱盖的外面发生了层裂现象。为了清楚地看到舱盖切割深度的变化情况,图 11(a)~(c)分别给出了铅壳装药量为 0.6,0.8,0.9 g/m 微爆索完全起爆后,座舱盖上与炸药布置方向垂直断面 A-A 的切割变形图。

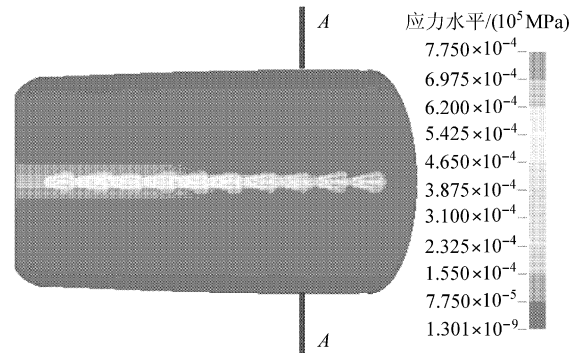
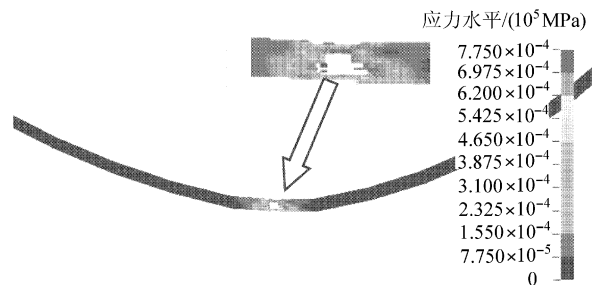
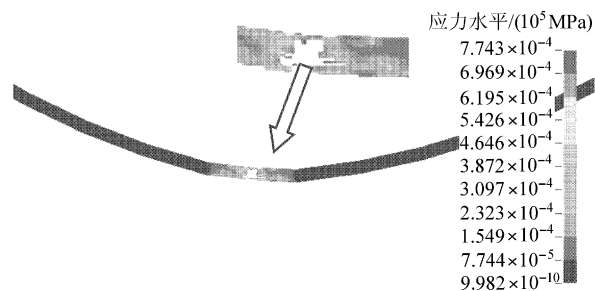


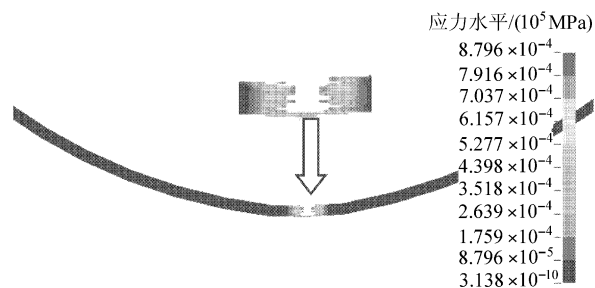
图 10 舱盖的切割过程
Fig. 10 Cutting process of canopy



(a) 装药量为 0.6 g/m



(b) 装药量为 0.8 g/m



(c) 装药量为 0.9 g/m

图 11 不同装药下舱盖的切割深度

Fig. 11 Cutting depths of canopy for different charge quantities

计算图 11 沿厚度方向破坏单元的数量,可以得到装药量为 0.6, 0.8, 0.9 g/m, 舱盖的切割深度分别为 5.0, 6.8, 7.0 mm(完全被切开), 与平板元件实验结果基本吻合。为了与铝壳的切割效果对比, 对同样装药量的铝壳也采用上述模型进行了计算, 得到了舱盖的切割深度分别为 3.4, 4.1, 4.8 mm。均低于铅壳的切割深度, 这主要是由于外壳破坏后, 铅携带的单位体积动能大于铝携带的单位体积动能, 具有较大的切割力。因此, 相同的装药量, 铅壳比铝壳的切割能力强。而且在一定的装药量范围内, 随着装药量的增加, 舱盖的切割深度也在增加。

4 结 论

通过一系列微爆索切割 PMMA 的大量实验, 得到了药型罩材料、炸药类型和装药量等参数对切割效果的影响。由于实验难度大, 实验数据具有一定的离散性, 但结果也可表明, 铅质药型罩较铝质药型罩切割效果好, HNSII 炸药较其他两种炸药切割能力强, 又考虑 HNSII 具有热感度低的特性, 因此选择铅质药型罩的 HNSII 微爆索作为最佳的微爆索类型。同时, 确定了最佳的装药量范围在 0.6~0.9 g/m 之间。为了将此实验结果应用到真实件实验上, 采用有限元方法首先对舱盖透明件切割过程进行了数值模拟, 模拟结果与实验结果吻合得较好, 验证了数值分析的正确性。同时也得到了在一定范围内, 切割深度随装药量的增加而增加。而且相同的装药量, 铅壳要比铝壳的切割能力强。下一步将进行大量的数值模拟和少数的舱盖透明件实验, 并考虑微爆索不同的布局方式对切割效果的影响。进一步确定装药量与切割深度的关系, 为航空弹射救生系统的设计提供更可靠的科学依据。

参 考 文 献

- [1] 韩梦珍. 国外航空救生技术现状及展望[J]. 航空科学技术, 2003(2):22-25.
Han Mengzhen. Present status and prospects for foreign aviation life-support technology[J]. Aeronautical Science and Technology, 2003(2):22-25. (in Chinese)
- [2] 方芷. 预测弹射座椅成功穿盖的方法[J]. 国际航空, 1994(2):61-62.
Fang Zhi. Methods for predication successful ejection seat canopy penetration[J]. International Aviation, 1994(2):61-62. (in Chinese)
- [3] 王伟. 研究飞机穿盖弹射的有效途径[J]. 飞机设计, 1985(3):28-32.
Wang Wei. The effective approach of study on penetration ejection[J]. Aircraft Design, 1985(3):28-32. (in Chinese)
- [4] 袁宝慧, 胡凯, 肖川, 等. 聚酯类工程塑料的爆炸精确切割[J]. 火炸药学报, 2003, 26(3):70-72.
Yuan Baohui, Hu Kai, Xiao Chuan, et al. Explosive cutting of PMMA [J]. Explosives & Propellants, 2003, 26(3):70-72. (in Chinese)
- [5] 周睿, 冯顺山, 吴成. 条形装药接触爆炸对金属靶板作用的效应[J]. 北京理工大学学报, 2001, 21(4):405-409.
Zhou Rui, Feng Shunshan, Wu Cheng. A study on the rupturing effects upon a metal plate under the contact explosion of linear explosive[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2001, 21(4):405-409. (in Chinese)
- [6] Berstad T, Hopperstad O S, Lademo O G, et al. Computational model of ductile damage and fracture in shell analysis [C]//Proceedings of the Second European LS-DYNA Conference. 1999:37-44.

作者简介:

李志强(1973—) 男, 博士研究生, 讲师。主要研究方向: 冲击动力学与力学行为的计算机仿真。发表论文 10 篇。

Tel: 0351-6010560

E-mail: zqli-tyut@163.com

赵隆茂(1943—) 男, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 冲击动力学、计算固体力学和生物力学。发表学术论文 60 余篇, 多次获得省自然科学和科技进步一等奖, 主持多项省基金项目和国家自然科学基金项目。

Tel: 0351-6018226

E-mail: zhaolm@tyut.edu.cn

(责任编辑: 蔡斐)