文章编号：1000-5773(2010)01-0043-06

有机玻璃的几何形状对爆炸切割影响的研究*

王志华[1,2]，李志强[2]，任会兰[1]，赵隆茂[2]

（1. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室，北京 100081；
2. 太原理工大学应用力学与生物医学工程研究所，山西太原 030024）

摘要：为了改善现有的航空弹射救生系统，提高飞行员安全逃生的成功率，提出了微爆索切割技术在航空穿盖弹射救生系统中的应用。采用非线性动力显式程序 LS-DYNA3D，对有机玻璃平板元件、航空舱盖的微爆索切割过程进行了数值计算分析，得到了不同装药量下有机玻璃平板元件、航空舱盖的切割深度，对比了有机玻璃的几何形状对微爆索切割深度的影响。模拟结果表明：有机玻璃平板切割实验对航空舱盖切割实验具有一定的指导意义，研究结果也可为微爆索线性切割航空舱盖的实验设计提供依据。

关键词：微爆索切割；层裂；有机玻璃；有限元分析
中图分类号：O383；O347.3 **文献标识码**：A

1 引 言

爆炸切割在常规机械手段（如锯切、磨削、车削、气割等）无法实施的特殊复杂行业有重要的应用背景，如高空运行火箭的星箭分离、水下的石油井架、海底沉船打捞、核设施的拆除等[1]。常见的有聚能切割和层裂切割。聚能切割利用金属药型罩在炸药作用下产生的高速片状射流切割目标物，在这方面已有大量的研究成果[2-4]。但在一些特殊服役环境中，要求对非金属材料的切割深度精确可控[5-7]。如战斗机在紧急情况下，飞行员启动弹射装置脱离飞机前，必须先用微爆索爆炸切割驾驶舱，以削弱其强度，要求切割形成的破坏部分应尽量在放置微爆索的背面，这样既可保证切割效果，又能避免因切割产生的碎片而对飞行员造成伤害，因此层裂切割在这些领域有重要的应用前景。

目前，利用层裂切割原理对微爆索线性切割航空有机玻璃（PMMA）的研究甚少[8]。为了完善现有的航空弹射救生系统，本工作利用微爆索线性切割技术，对有机玻璃平板元件、航空舱盖的切割过程进行了数值计算分析，对比了有机玻璃的几何形状对微爆索切割深度的影响，验证了有机玻璃平板切割实验对航空舱盖切割实验具有一定的指导意义，研究结果也可为微爆索线性切割航空舱盖的实验设计提供依据。

2 微爆索层裂切割有机玻璃（PMMA）原理

微爆索主要由金属药型罩和炸药组成，如图 1 所示，考虑到在航空救生系统应用中的安全要求，药型罩材料需有较好的韧性，且在爆炸切割过程中不汽化，不易形成污染。对比几种不同材质的药型罩爆炸切割的实验结果后，选择铅作为药型罩材料，加工后测得：$L=1.87\sim1.96$ mm，$H=0.87\sim1.09$ mm，$d_1=0.16\sim0.26$ mm，$d_2=0.16\sim0.30$ mm，其几何形状如图 2 所示。

* **收稿日期**：2009-05-20；**修回日期**：2009-08-26
基金项目：国家自然科学基金（90716005，10802055）
作者简介：王志华（1977—），男，博士，副教授，主要从事材料和结构的动力学行为研究. E-mail：wangzh623@yahoo.com.cn
通讯作者：任会兰（1973—），女，博士，副教授。主要从事材料的动力学响应、本构模型和破坏特性的研究. E-mail：huilanren@bit.edu.cn

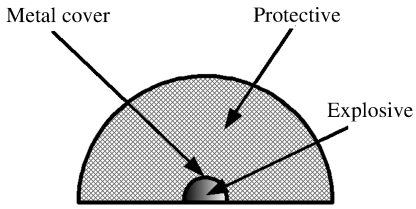


图 1 微爆索示意图

Fig. 1 Sketch of miniature detonation cord

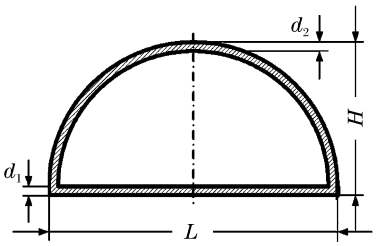


图 2 药型罩的几何形状

Fig. 2 Geometric shape of shaped charge

利用微爆索爆炸切割航空用有机玻璃(PMMA),要求切割后的破坏部分应在放置微爆索的背面,这样既可保证切割效果,又可避免因切割产生碎片而对飞行员造成伤害。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 自由表面后反射形成拉应力,与入射压缩波相向而行,在 PMMA 内某一层产生应力波的叠加,引起较大的拉伸应力。当某截面处 PMMA 的拉应力大于其动态拉伸强度时,材料会发生断裂,从而在其背面产生层裂[4]。层裂发生的位置又成为新的自由面,入射冲击波再次被反射成为拉伸波,当拉伸应力仍然大于材料动态拉伸强度时,材料会再次发生层裂。如此反复,直到拉伸应力小于材料动态拉伸强度,如图 3 所示。从而,可通过控制微爆索的炸药当量来产生所需求的层裂深度。

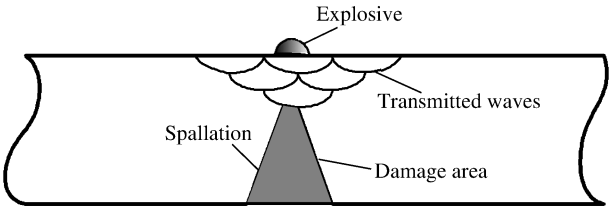


图 3 PMMA 层裂示意图

Fig. 3 Sketch of PMMA spallation

3 数值模拟

3.1 有限元模型

对 PMMA 平板、航空舱盖以及炸药和铅外壳划分网格,如图 4～图 5 所示。PMMA 平板、航空舱盖的厚度均为 7 mm,其它两个方向的尺寸均大于厚度方向两个量级,以消除波传播的影响。有机玻璃选择拉格朗日实体全积分单元。为了模拟层裂现象,单元尺寸应尽可能小,其厚度方向的尺寸为 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 0.35 mm。铅外壳选择默认的壳单元。采用参数分配法,定义滑移接触来模拟炸药和 PMMA 之间的流固耦合作用,其余选择自动面对面接触。边界处采用固定约束来模拟边缘压紧。

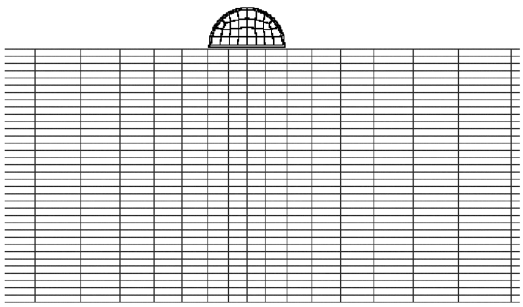


图 4 平板有机玻璃的有限元模型

Fig. 4 Finite element model of PMMA panel

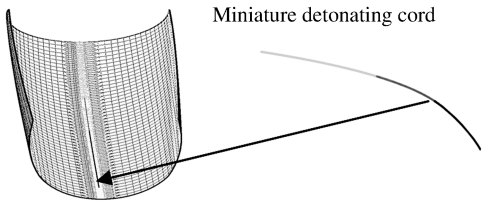


图 5 航空舱盖的有限元模型

Fig. 5 Finite element model of canopy

3.2　材料模型

PMMA 平板和舱盖选用 LS-DYNA 中的 105 号材料(＊MAT_DAMAGE_2)本构模型,该模型使粘性效应的弹塑性与连续损伤力学相结合[7],利用等效应力-等效塑性应变曲线来反映弹粘塑性特性。对于连续损伤力学模型,损伤应力 $\tilde{\sigma}$ 定义为

$$\tilde{\sigma}=\sigma/(1-D) \tag{1}$$

式中:D 是损伤变量,σ 是名义应力。损伤演化过程为

$$\dot{D}=\begin{cases}0 & r\leqslant r_D\\ Y\dot{r}/(S(1-D) & r>r_D \text{ 且 } \sigma_1>0\end{cases} \tag{2}$$

式中:r_D 是损伤阈值;S 是应变能释放率,为正的材料常数;σ_1 是最大主应力。Y 是应变能密度,定义为

$$Y=\frac{1}{2}\boldsymbol{e}_e:\boldsymbol{C}:\boldsymbol{e}_e=\frac{\sigma_{vm}^2R_\nu}{2E(1-D)^2} \tag{3}$$

式中:σ_{vm}为 von Mises 等效应力,$\sigma_{vm}=(\frac{3}{2}S_{ij}S_{ij})^{1/2}$,偏应力张量 $S_{ij}=\sigma_{ij}-\frac{1}{3}\delta_{ij}\sigma_{mm}$,而 R_ν 为

$$R_\nu=\frac{2}{3}(1+\nu)+3(1-2\nu)(\sigma_H/\sigma_{vm})^2 \tag{4}$$

当材料的 D 值达到给定的极限损伤值 D_c 时,材料发生破坏。有机玻璃的相关参数为 $\rho=1.19\ \mathrm{g/cm^3}$,$E=3.6\ \mathrm{GPa}$,$\nu=0.4$,$\sigma_s=76\ \mathrm{MPa}$。

炸药采用 LS-DYNA 提供的高能炸药材料模型(MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN)和 JWL 状态方程进行描述,其爆炸压力与相对体积 V 和初始内能 E 的关系为

$$p=A\Big(1-\frac{\omega}{R_1V}\Big)\mathrm{e}^{-R_1V}+B\Big(1-\frac{\omega}{R_2V}\Big)\mathrm{e}^{-R_2V}+\frac{\omega E}{V} \tag{5}$$

式中:ω、A、B、R_1 和 R_2 是输入参数,文献[9]给出了不同类型炸药的相应参数,对于本工作应用的六硝基芪炸药,其参数为 $A=5.409$,$B=0.094$,$R_1=4.6$,$R_2=1.35$,$\omega=0.35$,$E=0.1$,$V=1.0$。此外,模型还需输入炸药的爆轰速度、质量密度和 p_{CJ}压力。铅外壳采用带破坏的弹塑性强化模型(MAT_PLASTIC_KINEMATIC)进行描述。

3.3　模拟结果及分析

考虑到爆轰过程所需时间极短,在计算分析中单位采用 μs、cm、g 量级,由于在模拟爆炸切割真实航空舱盖的过程中,微爆索长度较大,炸药起爆后因其膨胀而产生较大变形,导致计算时间步长在不断变小,甚至无法继续计算。因而在对其模拟分析中采用多点起爆方式。

图 6 给出了药量为 0.8 g/m 微爆索切割 PMMA 平板的历程,从图中可以看出,微爆索起爆后,炸药因膨胀而发生较大的变形,当 $t=25\ \mu\mathrm{s}$ 时,冲击波已经传播到了有机玻璃的另一端。

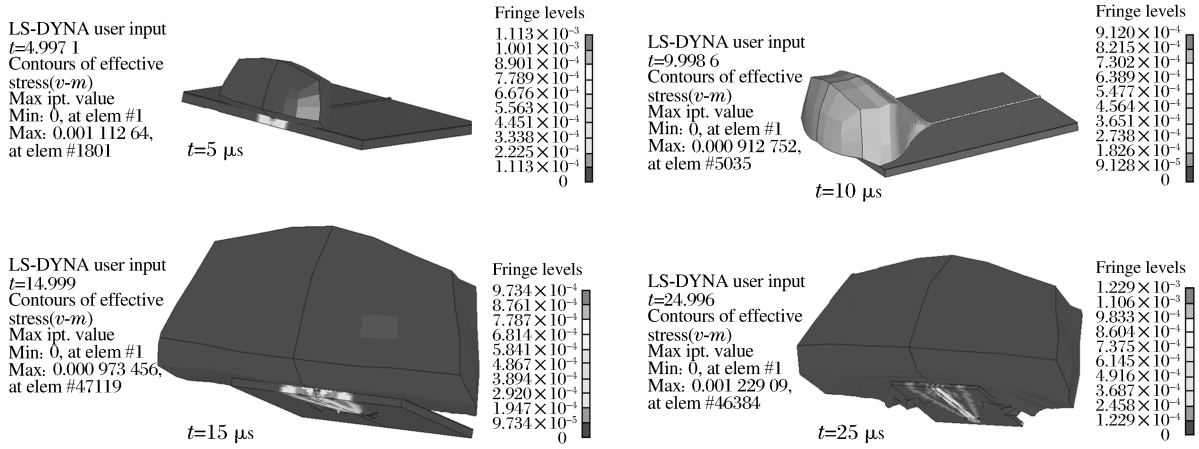


图 6　爆炸切割 PMMA 板的过程

Fig. 6　The process of explosion cutting PMMA panel

图 7 给出了微爆索药量为 0.8 g/m 时，不同时刻 PMMA 板的层裂过程，当微爆索在爆炸时形成的冲击波传播到有机玻璃自由表面时，压缩波在自由表面反射后形成拉伸波，当其强度达到或超过有机玻璃的破坏强度时可引起层裂，形成新的自由表面，波在其中连续反射，从而形成多次层裂。从图中可以清晰地看到有机玻璃板的层裂现象，其正面基本保持完整，存在较小的凹坑。

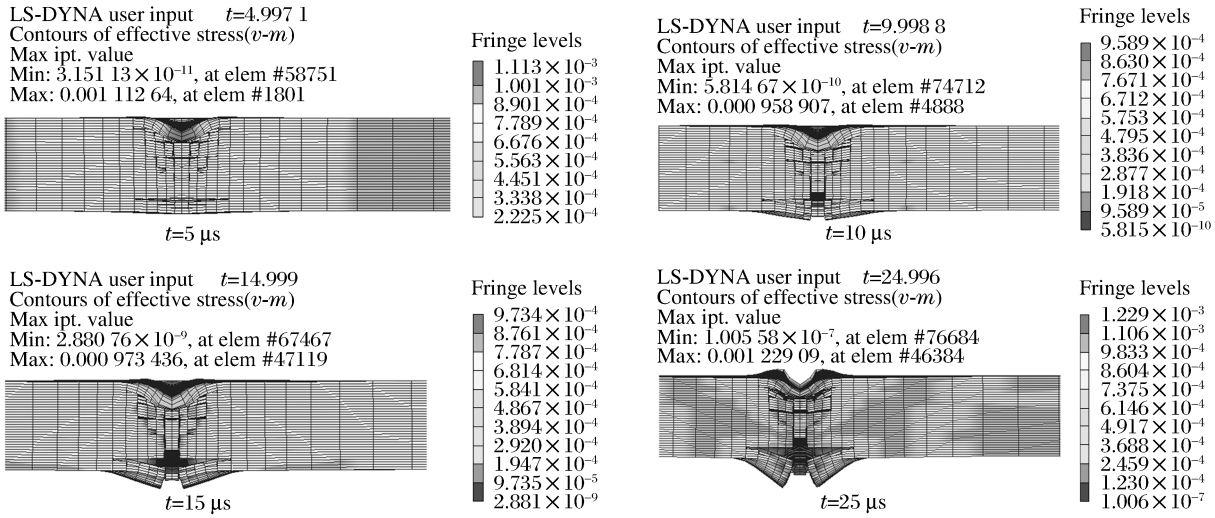


图 7 不同时刻 PMMA 板的层裂过程

Fig. 7 Spallation process of PMMA panel

图 8 给出了有机玻璃平板与炸药长度方向垂直的截面的切割程度，其装药量分别为 0.6 g/m、0.8 g/m和 0.9 g/m。通过计算平板厚度方向破坏的单元数量，可以得到其切割深度分别为 6 mm、6.5 mm 和 6.8 mm。

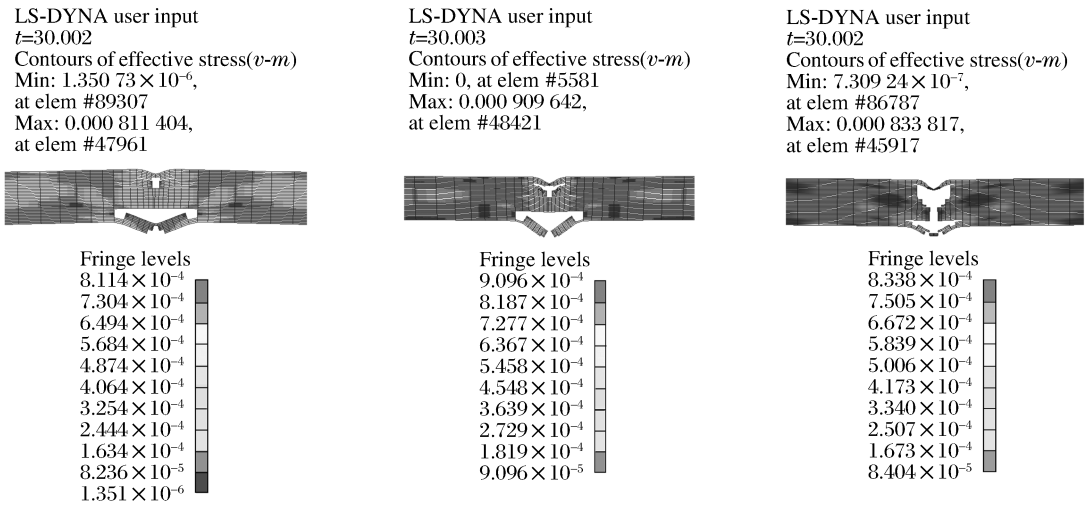


图 8 不同药量下 PMMA 板的切割程度

Fig. 8 Cutting extent of PMMA for different charges

图 9 给出了药量为 0.8 g/m 的微爆索切割真实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,具有一定的切割深度,并且也能够看到在舱盖的外表面发生了层裂现象。当装药量分别为 0.6 g/m、0.8 g/m 和 0.9 g/m 时,座舱盖与炸药布置长度方向垂直的截面的切割变形图如图 10 所示,通过计算舱盖厚度方向破坏单元的数量可知,其切割深度分别为 6.1 mm、6.65 mm 和 6.9 mm。与有机玻璃平板结果对比可知,在研究的装药量范围内,几何形状对微爆索切割深度的影响较小,可以利用微爆索切割平板有机玻璃的实验来替代真实舱盖的相关实验,从而可为这类工程问题节省大量经费。此外,本研究也可为微爆索切割飞机舱盖的实验设计提供一定的依据。

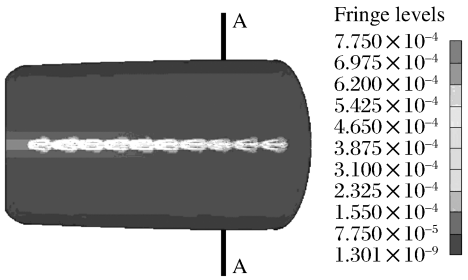
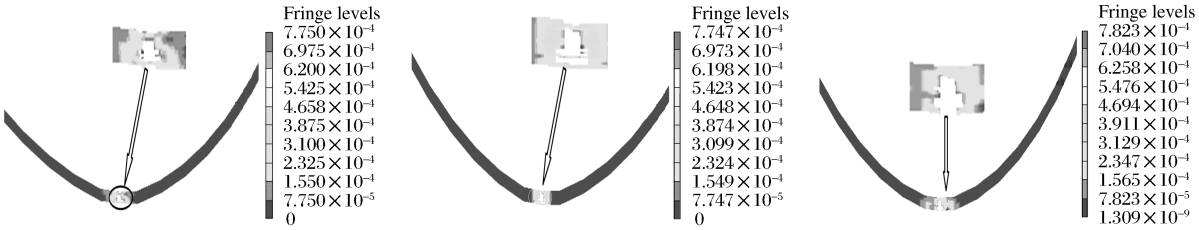


图 9　舱盖的层裂效果

Fig. 9　Spallation of canopy



(a) ρ=0.6 g/m　　(b) ρ=0.8 g/m　　ρ=0.9 g/m

图 10　不同装药下舱盖的切割深度

Fig. 10　Cutting extent of canopy for different charges

4　结　论

通过对六硝基芪微爆索切割有机玻璃平板、飞机舱盖的数值模拟研究,发现有机玻璃的几何形状对微爆索的切割深度影响较小,从而证实了平板切割实验对飞机舱盖破裂实验具有重要的指导意义。此外,本研究也可为不同药量下微爆索切割飞机舱盖的实验设计提供一定的依据。

References:

[1] Yang W B, Xi J Y, Sun M, et al. The Application of Explosive Technique in the Engineering of Demolishing Ship [J]. Ship Engineering, 1997, 6: 31-33. (in Chinese)
杨文彬,奚进一,孙　明,等. 爆炸切割技术在拆船工程中的应用 [J]. 船舶工程, 1997, 6: 31-33.

[2] Zhou R, Feng S S, Wu C. 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)
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.

[3] Ning J G, Wang C, Ma T B. Numerical Analysis of the Shaped Charge Jet with Large Cone Angle [J]. Int J Nonlinear Sci Numer Simulat, 2006, 7(1): 71-78.

[4] Ma T B, Wang C, Ning J G. Numerical Study of the Shaped Charges [J]. Int J Modern Phys B, 2008, 22: 5749-5754.

[5] Han M Z. Present Status and Prospects for Foreign Aviation Life-Support Technology [J]. Aeronatutical Science and Technology, 2003, (2): 22-25. (in Chinese)

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.

[6] Fang Z. Methods for Predication Successful Ejection Seat Canopy Penertration [J]. International Aviation,1994,2:61-62. (in Chinese)
方 芷. 预测弹射座椅成功穿盖的方法 [J]. 国际航空,1994,2:61-62.

[7] Wang W. The Effective Approach of Study on Penetration Ejection [J]. Aircraft Design,1985,(3):28-32. (in Chinese)
王 伟. 研究飞机穿盖弹射的有效途径 [J]. 飞机设计,1985,(3):28-32.

[8] Li Z Q,Liu X M,Zhao Y G,et al. Experimental Study and Finite Element Analysis of Linear Cutting Aerial PMMA Using Micro Detonation Cord [J]. Explosive and Shock Waves,2007,27(5):385-389. (in Chinese)
李志强,刘晓明,赵勇刚,等. 微爆索线性切割航空有机玻璃的实验研究和有限元分析 [J]. 爆炸与冲击,2007,27(5):385-389.

[9] Berstad T, Hopperstad O S, Lademo O G, et al. Computational Model of Ductile Damage and Fracture in Shell Analysis [A]//Second European LS-DYNA Conference [C]. Gothenburg, Sweden, 1999.

Finite Element Analysis on the Influence of PMMA Geometry on Explosion Cutting

WANG Zhi-Hua[1,2], LI Zhi-Qiang[2], REN Hui-Lan[1], ZHAO Long-Mao[2]

(1. *State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*;
2. *Institute of Applied Mechanics and Biomedical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan* 030024, *China*)

Abstract: In order to improve the present aviation ejection lifesaving system and enhance success possibility of safe escape, the application of Miniature Detonating Cord (MDC) on the aviation ejection-escape-system is proposed. The explosion cutting process of plexiglass (PMMA) plate and Canopy by MDC are simulated employing nonlinear dynamic explicit program LS-DYNA3D. The variation of cutting depth with charge quantities is obtained, which agrees well with the experimental result. Simulation result shows that the geometry of PMMA has slight influence on the cutting effect. This study may provide the powerful foundation for the design of the aviation ejection lifesaving system.

Key words: micro detonation cord(MDC) cutting; spallation; plexiglass ; Numerical simulation