

6-4-2020

## Numerical Simulation of Aluminum Foam Cushion Performance Analysis on Set-forward Overload of Fuze

Kuahai Yu

*1. Department of Engineering Mechanics, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China; ;*

Xuhui Zhang

*1. Department of Engineering Mechanics, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China; ;*

Hongyu Xu

*1. Department of Engineering Mechanics, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China; ;*

Li Rong

*2. Xi'an Institute of Electromechanical Information Technology, Xi'an 710065, China;*

*See next page for additional authors*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Numerical Simulation of Aluminum Foam Cushion Performance Analysis on Set-forward Overload of Fuze

## Abstract

**Abstract:** *Buffering protect of fuze under high-speed impact was realized using aluminum foam gasket with special pore structure, and numerical simulation method to achieve the buffer validity analysis.* Numerical model of three-layered concrete target projectile penetration was established, and the numerical model was validated to be accurate by comparing the fuze acceleration curves of simulation and experiment results. Numerical simulations were completed to predict the cushioning effect for different foamed aluminum structures. *The result reveals that foamed aluminum cushioning can reduce the load of the fuze, and the foam's void ratio and thickness will significantly affect the cushioning performance, and exists a best design value to achieve the highest efficiency. Furthermore, the foamed aluminum sandwich structure has a better cushioning performance than monolayer foam, their special structure can effectively weaken or avoid the problem which single-layer aluminum foam may easily lose protect function due to compaction.* The research results can provide design reference for fuze especially buffer structure.

## Keywords

numerical simulation, penetration, cushioning, foamed aluminum

## Authors

Kuahai Yu, Xuhui Zhang, Hongyu Xu, Li Rong, and Xingguo Kang

## Recommended Citation

Yu Kuahai, Zhang Xuhui, Xu Hongyu, Li Rong, Kang Xingguo. Numerical Simulation of Aluminum Foam Cushion Performance Analysis on Set-forward Overload of Fuze[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(6): 1311-1316.

## 基于数值仿真的引信前冲过载泡沫铝缓冲性能分析

虞跨海<sup>1</sup>, 张旭辉<sup>1</sup>, 徐红玉<sup>1</sup>, 李蓉<sup>2</sup>, 康兴国<sup>2</sup>

(1. 河南科技大学工程力学系, 河南 洛阳 471023; 2. 西安机电信息研究所, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 采用特定孔隙结构泡沫铝垫片以冲击隔离方式实现引信在前冲过载下的缓冲保护, 基于数值仿真方法开展了缓冲有效性分析。建立某型火箭弹侵彻三层混凝土靶标数值仿真模型, 通过引信过载仿真曲线与试验结果对比较核数值模型, 数值方法分析了不同泡沫铝类型和缓冲结构对引信过载的弱化作用。结果表明: 泡沫铝可有效降低引信过载, 孔隙率和厚度存在最佳设计值使其缓冲效率达到最高; 泡沫铝夹层结构对引信保护效果更佳, 其结构特性可有效减弱或避免高过载下单层泡沫铝易被压实失去保护作用的问题。研究成果为引信结构尤其缓冲结构的设计提供参考。

**关键词:** 数值仿真; 侵彻; 缓冲; 泡沫铝

中图分类号: TJ43+1.5; TJ714; TH12 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2017) 06-1311-06

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201706021

### Numerical Simulation of Aluminum Foam Cushion Performance Analysis on Set-forward Overload of Fuze

Yu Kuahai<sup>1</sup>, Zhang Xuhui<sup>1</sup>, Xu Hongyu<sup>1</sup>, Li Rong<sup>2</sup>, Kang Xingguo<sup>2</sup>

(1. Department of Engineering Mechanics, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China;

2. Xi'an Institute of Electromechanical Information Technology, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** Buffering protect of fuze under high-speed impact was realized using aluminum foam gasket with special pore structure, and numerical simulation method to achieve the buffer validity analysis. Numerical model of three-layered concrete target projectile penetration was established, and the numerical model was validated to be accurate by comparing the fuze acceleration curves of simulation and experiment results. Numerical simulations were completed to predict the cushioning effect for different foamed aluminum structures. The result reveals that foamed aluminum cushioning can reduce the load of the fuze, and the foam's void ratio and thickness will significantly affect the cushioning performance, and exits a best design value to achieve the highest efficiency. Furthermore, the foamed aluminum sandwich structure has a better cushioning performance than monolayer foam, their special structure can effectively weaken or avoid the problem which single-layer aluminum foam may easily lose protect function due to compaction. The research results can provide design reference for fuze especially buffer structure.

**Keywords:** numerical simulation; penetration; cushioning; foamed aluminum

## 引言

重要军事目标通常深藏地下通过多层防护躲

避常规武器的打击, 深侵彻火箭弹是实现地下工事有效打击的主要武器装备, 不仅要求其具有高侵彻能力和破坏性, 更要有高可靠性和精确性, 要求智能引信系统准确计算侵彻层数或侵彻深度后实施爆炸。随着侵深要求和弹体初速度的提高, 引信系统承受的冲击过载不断增大。由于电子元器件抗过载能力的限制, 现有引信结构已无法对引信硬件实施有效保护。如某型火箭弹试验中发现, 侵彻多层



收稿日期: 2015-07-20 修回日期: 2015-12-08;  
基金项目: 国家自然科学基金(51105132, U1604135),  
河南科技大学研究生创新基金(CXJJ-ZR11);  
作者简介: 虞跨海(通讯作者 1982-), 男, 浙江义乌,  
博士, 副教授, 研究方向为计算力学、缓冲材料等。

<http://www.china-simulation.com>

• 1311 •

混凝土靶板时由于冲击载荷过大导致引信硬件破坏,使得火箭弹未能按照预期实施爆炸。所以,研究高速侵彻火箭弹动力学建模与缓冲技术对提高火箭弹侵彻性能和可靠性具有重要意义。

高速侵彻实验成本昂贵,特别是侵彻过程非线性、弹靶个体特征多样性等因素限制了经验法、理论分析法的应用,随着侵彻理论和计算技术的发展,数值算法逐步成为研究高速侵彻的重要手段。Forrestal 等<sup>[1-2]</sup>通过理论计算和实验测试研究了弹头形状等因素对侵彻性能的影响,得到了不同弹头形状对侵彻过载特性和侵彻深度的影响; Sambasivan 等<sup>[3]</sup>研究了弹体侵彻数值计算方法和模型对计算精度的影响;此外,在弹体及靶板材料本构模型方面的大量研究也为更好预测弹体侵彻动力学特性奠定了基础<sup>[4-6]</sup>。但由于火箭弹外形、内部结构、引信系统和侵彻目标的个体多样性,使得火箭弹侵彻数值仿真需要根据个体特性展开建模和计算技术研究。侵彻速度和强度的不断增长引发了芯片、加速度计失效等的系列问题<sup>[7-8]</sup>。近年逐步开展了泡沫铝缓冲机理<sup>[9]</sup>、垫片缓冲机制<sup>[10]</sup>的研究,但多是针对单层目标开展,多层目标的缓冲问题更加复杂,其缓冲作用尚未形成完善的设计理论体系。

本文在某型火箭弹侵彻多层目标数值仿真建模、计算和过载特征曲线试验验证的基础上,研究了泡沫铝材料对引信过载的缓冲作用。

## 1 泡沫铝缓冲分析

缓冲效率是判断材料缓冲性能的一项重要指标,缓冲效率高意味着相同的条件下用较少的缓冲材料达到相同或者较好的缓冲效果。具有孔隙结构特征的泡沫铝是用于缓冲的理想材料,研究人员前期对泡沫铝静动态本构模型<sup>[9]</sup>、失效模式<sup>[10]</sup>等已开展了大量研究。图 1 所示不同孔隙率泡沫铝能量吸收曲线,泡沫铝进入塑性平台阶段后,孔洞出现变形和坍塌,在较低应力水平下经历了较大的塑性变形,吸收大量的能量,降低引信承受的冲击载荷。传统情况下采用前置泡沫铝垫片的策略对引信结构实施有效防护。

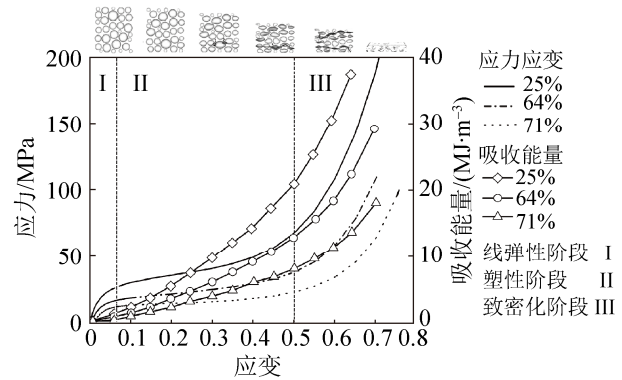


图 1 不同孔隙率泡沫铝本构关系及吸能曲线  
Fig. 1 Constitutive relation and energy absorption of Aluminum foam with different porosity

然而侵彻多层目标工况下,泡沫铝承受多峰冲击载荷,多次冲击使得泡沫铝材料达到致密化阶段,内部空隙结构被破坏,发生较大塑性变形,缓冲效率逐渐较低,当泡沫铝被完全压实时,材料不再具有缓冲吸能作用,此时引信与弹体结构间可能出现空隙,造成内部空间结构不稳定。

缓冲结构的设计在实现对引信结构有效保护条件下应具有一定刚度,产生塑性变形较小。为使引信在侵彻多层目标时具有较高的稳定性,基于应力波在不同密度界面传播的反射和透射特性提出由钢板+泡沫铝结构组成的泡沫铝复合夹层结构。泡沫铝夹层结构及应力波传递如图 2 所示。结构总厚 4.0 mm,钢板与泡沫铝粘结,其中钢板厚度 0.2 mm,泡沫铝 1.7 mm,应力波透过钢板后经过泡沫铝再到钢板。

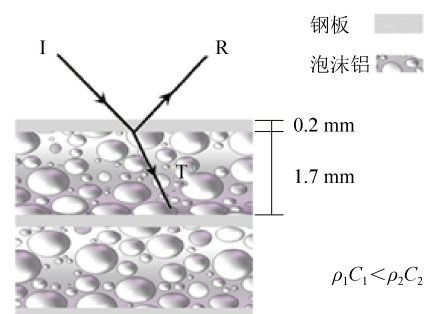


图 2 泡沫铝夹层结构  
Fig. 2 Aluminum foam sandwich structure

由于两种材料波阻抗不同,对强间断波阵面由动量守恒条件得

$$[\sigma] = -\rho_0 C [\nu] \quad (1)$$

入射波阵面上的应力为  $\sigma_i$ , 钢板与泡沫铝分界面上的反射波  $\sigma_r$ 、透射波  $\sigma_t$  分别为

$$\sigma_i = \rho_1 C_1 \nu_i \quad \sigma_r = -\rho_1 C_1 \nu_r \quad \sigma_t = \rho_2 C_2 \nu_t \quad (2)$$

式中:  $\rho$  为材料密度;  $C = \sqrt{d\sigma/\rho d\varepsilon}$  为波阵面传播的物质波速;  $\rho C$  为材料的波阻抗。由钢板与泡沫铝界面两侧经反射、透射后的质点速度、应力相等

$$\sigma_i + \sigma_r = \sigma_t \quad \nu_i + \nu_r = \nu_t \quad (3)$$

令  $n = \frac{\rho_1 C_1}{\rho_2 C_2}$  整理可得

$$\sigma_r = \frac{1-n}{1+n} \sigma_i \quad \sigma_t = \frac{2}{1+n} \sigma_i \quad (4)$$

钢板的波阻抗大于泡沫铝的波阻抗, 即  $n > 1$ , 应力波由钢板入射泡沫铝时, 由(4)式知透射波  $\sigma_t$  小于入射波  $\sigma_i$ , 且  $n$  越大  $\sigma_t$  越小。应力波由泡沫铝传入钢板时, 有  $n < 1$ , 此时透射波大于入射波, 应力波虽有所增强但相对于初始入射波已大幅度削弱。多层结构可以使泡沫铝承受的过载被削弱, 泡沫铝能充分发挥低应力平台的吸能作用。

## 2 侵彻试验与数值模型

### 2.1 数值模型

图 3 为试验弹及有限元模型, 弹长 88 cm, 弹径 20 cm, 弹头型线采用两段圆弧曲线组成。弹体材料模型采用考虑大变形、高应变率的 JC 模型, 混凝土采用经典 HJC 模型, 弹体及靶板参数如表 1 所示<sup>[4-5]</sup>。

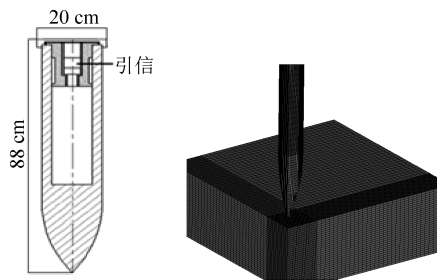


图 3 试验弹及有限元模型  
Fig. 3 Test projectile and finite element model

弹体内部构件采用固连失效接触方式, 构件间接触面粘结, 发生失效后则允许两表面相对滑动或分离, 即应力波在弹体内部传播时, 构件结合面会因法向应力和剪切应力发生破坏, 其失效表达式:

$$\left(\frac{|f_n|}{f_{n,f}}\right)^2 + \left(\frac{|f_s|}{f_{s,f}}\right)^2 \geq 1 \quad (5)$$

式中:  $f_{n,f}$  和  $f_{s,f}$  为法向失效应力和剪切失效应力。

表 1 材料模型参数  
Tab. 1 Parameters of model material

材料	钨合金	高强钢	铝合金	混凝土
$P$ (g/cm <sup>3</sup> )	17.60	7.83	2.77	2.50
$E$ (GPa)	611	200	67	-
$Y_0$ (GPa)	1.51	1.50	0.324	0.79
$B$ (GPa)	0.177	0.569	0.114	1.600
$N$	0.12	0.22	0.42	0.61
$C$	0.016	0.003	0.220	0.007
$m$	1.00	1.17	1.34	-
$T_m$ (K)	1777	1723	925	-

建立火箭弹弹体及混凝土几何模型, 弹体由钨合金和高强度钢组成, 引信封装及连接结构为铝合金。计算采用 1/4 几何模型, 弹靶网格基于映射网格方法生成六面体单元, 侵彻区域模型网格控制在 0.1 mm 以内, 非侵彻区域网格尺寸为 0.5 mm, 其中侵彻区域尺寸约为 2.5 倍弹径, 网格总数约 300 万。对称面上施加对称边界约束, 靶板边界施加无反射边界条件, 弹体与靶板间设置侵蚀接触。

### 2.2 侵彻试验

试验设置侵彻目标为三层混凝土靶板, 其厚度分别为 30 cm、18 cm 和 18 cm, 靶板混凝土强度 48 MPa, 截面配筋率 > 0.3%, 靶间距 300 cm。引信搭载的试验平台为  $\phi 20$  cm 高速火箭弹, 试验采用次口径发射技术将某型火箭弹加载至 800 m/s, 以垂直入射混凝土目标靶板方式实施侵彻, 引信内部数据记录仪获得侵彻过载特性。

### 2.3 结果讨论

#### 2.3.1 数值计算结果

图 4 所示侵彻过程第一层靶标破坏情况, 图 4(a) 为侵彻初始阶段, 靶体形成漏斗状开坑; 图 4(b) 弹体进入稳定侵彻阶段, 靶体形成柱形孔通道, 靶体背面出现层裂现象, 并不断扩展; 图 4(c)、(d) 表示弹头已完全贯穿靶体, 靶体背面产生崩落现象。侵彻过程正背面均出现碎块飞溅现象, 弹坑呈漏斗状。



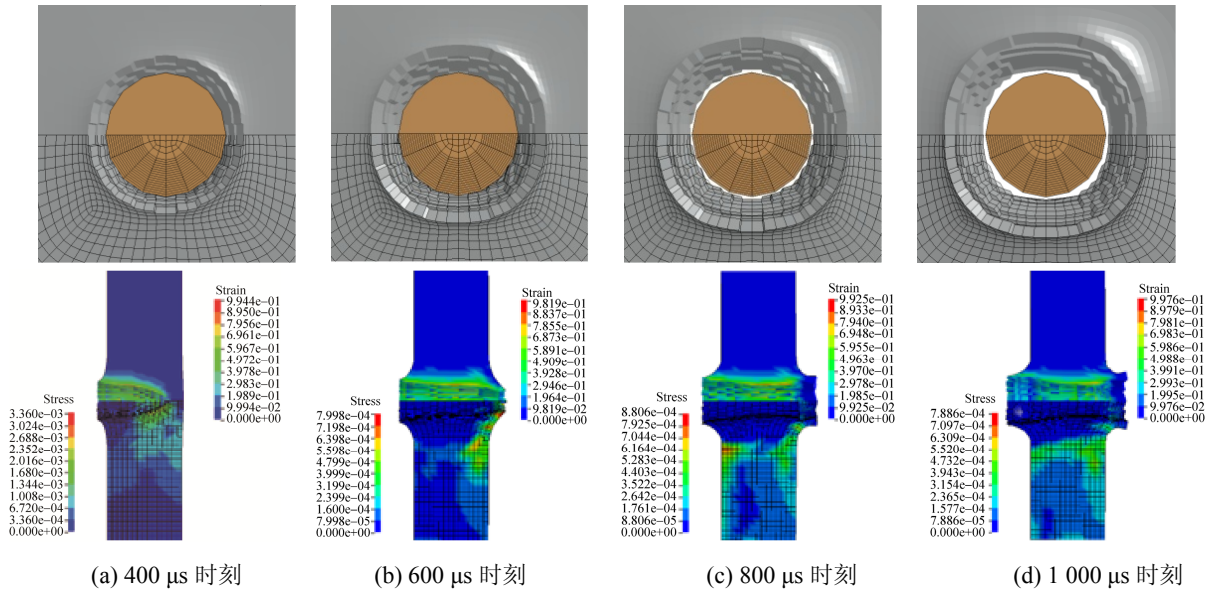


图 4 第一层靶标侵彻过程(单位: g/cm/μs)  
Fig. 4 Penetration process of first layer target(unit: g/cm/μs)

### 2.3.2 试验、数值仿真结果对比

图 5(a)为火箭弹侵彻试验过载曲线, 试验中引信最大过载峰值高达 108 000 g, 远超其主要电子元器件的抗过载设计容限, 必将导致引信系统失效。

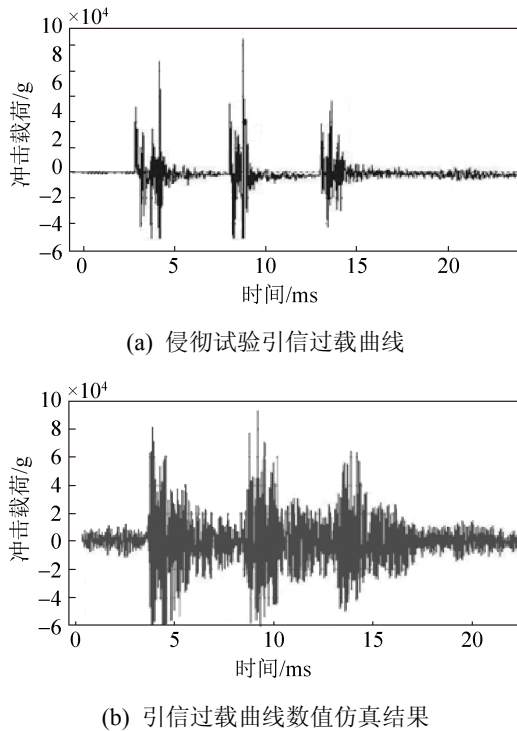


图 5 试验及数值仿真曲线  
Fig. 5 Test and numerical simulation curve

图 5(b)所示为侵彻过载数值仿真结果, 仿真过载曲线与试验过载曲线中过载峰值最大相差 9%, 脉宽最大相差 7%, 过载峰值出现时间最大相差 4%, 仿真数据与试验数据相差均小于 10%; 仿真曲线侵彻过载曲线包络清晰, 基本没有发生相互粘连的现象, 两组曲线除层间过载在数值上存在一定差别外, 过载特征基本一致。其原因在于: 试验曲线过载信号经过一定的滤波处理, 而且火箭弹在侵彻过程中应力波会在引信与弹体内部各界面处发生反射和透射等现象, 使得火箭弹在层间侵彻飞行过程中, 仍然表现出一定的过载波动, 引信应力幅值出现增强或减弱。从过载峰值和持续时间两个主要特征判定, 本文所建立的数值模型是准确的, 能够用于描述与预测该火箭弹侵彻过程中引信的过载特性。

## 3 泡沫铝缓冲计算

### 3.1 单层泡沫铝仿真计算

对孔隙率为 52%和 71%厚度分别为 4 mm、6 mm、8 mm 和 10 mm 的泡沫铝垫片缓冲性能开展了数值计算, 垫片安装于引信结构前端。图 6 所示为不同厚度垫片侵彻第一层靶板时的引信过载峰值曲线, 峰值随泡沫铝厚度的增加逐渐减小,

厚度大于 6 mm 前, 过载峰值下降效果随厚度增加作用显著, 具有较高的缓冲效率, 但厚度大于 6 mm 后, 过载峰值的这种弱化效果随着泡沫铝厚度增加逐渐减弱。两条过载峰值曲线对比表明, 孔隙率对缓冲作用有一定影响, 相同厚度下大孔隙率材料缓冲作用较弱, 随着泡沫铝垫片厚度的增加, 缓冲效果之间的差异减小。

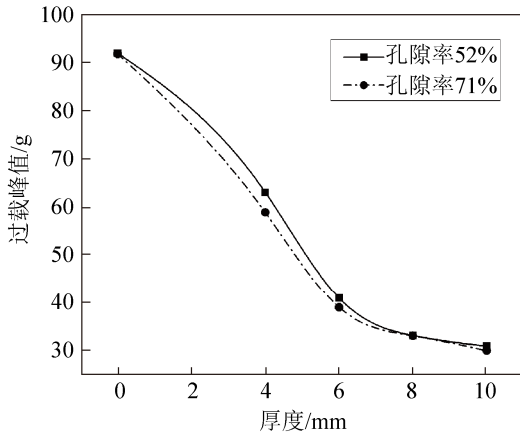
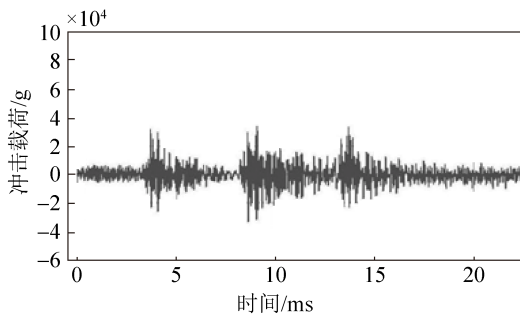
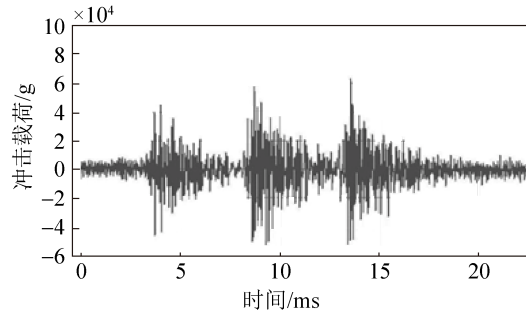


图 6 不同垫片下引信过载峰值曲线  
Fig. 6 Fuze peak overload under different gasket

图 7 所示分别为 4 mm 孔隙率 52% 和 8 mm 孔隙率 71% 泡沫铝垫片时侵彻过程引信过载曲线, 前者过载曲线峰值逐层增大, 侵彻至第三层靶板时过载最大为 62 000 g, 与未加缓冲材料时的过载相当, 这是由于泡沫材料随着侵彻过程的进行被逐步压实, 缓冲作用逐层减弱, 表明在当前侵彻速度下泡沫铝缓冲材料未能完全实现整个侵彻过程的有效防护; 后者最大过载出现在侵彻第二层靶板时, 但各层靶板侵彻峰值过载基本相同, 表明该泡沫铝结构对引信的保护作用贯穿于侵彻的整个过程。



(a) 4 mm 孔隙率 52%



(b) 8 mm 孔隙率 71%

图 7 泡沫铝缓冲过载曲线

Fig. 7 Aluminum foam buffer overload curve

### 3.2 泡沫铝夹层结构仿真计算

相同侵彻条件下, 计算得到 4 mm 泡沫铝夹层结构缓冲时的引信过载曲线, 如图 8 所示。过载幅值相对于试验载荷下降明显, 最大过载在 60 000 g 以下, 侵彻第二层靶板时过载峰值较高, 但未出现幅值逐层升高的现象。表明多层泡沫铝结构综合了钢和泡沫铝的特点, 提高结构整体刚度保证高缓冲效率的同时降低了应力波对泡沫铝的破坏程度, 相对于单层结构, 多层泡沫铝结构的设计能够在较小厚度下达到有效的缓冲效果, 能有效降低或避免单层泡沫铝被压实现象, 这种多层泡沫铝结构比单层泡沫铝更适用于高速侵彻引信的保护。

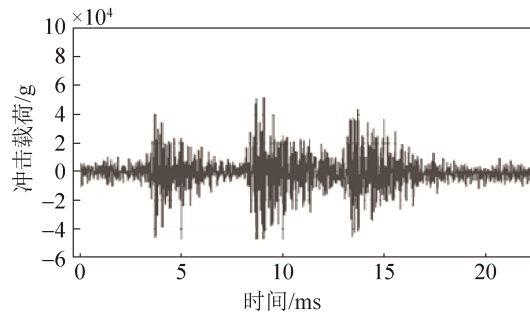


图 8 泡沫铝夹层缓冲后引信过载曲线

Fig. 8 Fuze overload under aluminum foam sandwich buffer

## 4 结论

本文建立了某型火箭弹侵彻多层防御结构数值计算模型, 预测了火箭弹高速侵彻多层靶板引信过载特性, 研究了不同泡沫铝结构对引信的缓冲作用效果, 得到以下结论。

(1) 数值计算结果与实验结果基本吻合, 表明本文所建立的数值模型能够较准确地预测高速侵彻多层目标引信的过载特性。

(2) 泡沫铝前置可以有效降低引信在侵彻过程中承受的过载, 不同孔隙率泡沫铝对引信的缓冲作用有一定差别, 但随着泡沫铝垫片厚度的增加孔隙率对缓冲作用的影响减小; 泡沫铝缓冲性能随厚度增加呈非线性变化, 可能出现孔隙结构被压实现象, 但当垫片厚度加至某一数值后, 继续增加厚度对泡沫铝缓冲作用提高不再显著。

(3) 安装泡沫铝材料前, 可将其进行预压, 使其直接进入塑性平台阶段, 提高材料缓冲效率并充分利用弹体内部有限的空间。

(4) 泡沫铝复合夹层结构可有效降低泡沫铝被冲击荷载压实的程度, 充分发挥泡沫铝缓冲吸能作用的同时具有更小的塑形变形, 更适合侵彻多层目标工况。

### 参考文献:

- [1] Frew D J, Forrestal M J, Cargile J D. The effect of concrete target diameter on projectile deceleration and penetration depth [J]. *International Journal of Impact Engineering* (S0734-743X), 2006, 32(10): 1584-1594.
- [2] Forrestal M J, Warren T L, Randles P W. *Deceleration Displacement Response for Projectiles That Penetrate Concrete Targets* [M]// *Dynamic Behavior of Materials*, Volume 1. Germany: Springer International Publishing, 2014: 251-275.
- [3] Sambasivan S, Kapahi A, Udaykumar H S. Simulation of high speed impact, penetration and fragmentation problems on locally refined Cartesian grids [J]. *Journal of Computational Physics* (S0021-9991), 2013, 235(2): 334-370.
- [4] 郑浩, 何勇, 郭磊, 等. 卵形弹丸高速正侵彻混凝土靶板的数值仿真 [J]. *系统仿真学报*, 2013, 25(7): 1508-1512. (Zheng Hao, He Yong, Guo Lei, et al. Numerical Simulations of Normal Penetration of Concrete Target with Ogive-nose Steel Projectile by High-speed [J]. *Journal of System Simulation* (S1004-731X), 2013, 25(7): 1508-1512.)
- [5] 郭锦炎, 阮文俊, 王浩, 等. 助推钻地弹对混凝土目标侵彻效应的数值模拟 [J]. *系统仿真学报*, 2012, 24(2): 305-309. (Guo Jinyan, Ruan Wenjun, Wang Hao, et al. Numerical Analysis of Earth Penetrating Weapon with Boosting Penetration Effect into Concrete Targets [J]. *Journal of System Simulation* (S1004-731X), 2012, 24(2): 305-309.)
- [6] 张旭辉, 虞跨海, 徐红玉, 等. 基于优化最佳逼近的火箭弹高速侵彻等效缩比方法 [J]. *弹箭与制导学报*, 2016, 36(2): 41-44. (Zhang Xuhui, Yu Kuahai, Xu Hongyu, et al. Equivalent Scaling Method of High-speed Rocket Projectile Penetration Based on Optimization of Optimal Approximation [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2016, 36(2): 41-44.)
- [7] 鲍爱达, 陈员娥, 李长龙, 等. 弹载加速度记录仪在冲击环境下的失效研究 [J]. *振动与冲击*, 2013, 32(13): 182-186. (Bao Aida, Chen Yuane, Li Changlong, et al. Failure study on a missile accelerometer recorder under shock environment [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 32(13): 182-186.)
- [8] 张旭辉, 虞跨海, 徐红玉, 等. 高g冲击载荷下多层陶瓷电容结构失效分析 [J]. *电子元件与材料*, 2016, 35(6): 28-31. (Zhang Xuhui, Yu Kuahai, Xu Hongyu, et al. Failure analysis on multi-layer ceramic capacitor with high g value impact [J]. *Electronic Components and Materials*, 2016, 35(6): 28-31.)
- [9] 杨永顺, 杨哲, 虞跨海, 等. 闭孔泡沫铝缓冲性能及其变形失效机理研究 [J]. *功能材料*, 2014(8): 87-91. (Yang Yongshun, Yang Zhe, Yu Kuahai, et al. Study on the cushioning property and deformation failure mechanism of close-cell aluminum foam [J]. *Journal of Functional Materials*, 2014(8): 87-91.)
- [10] 徐蓬朝, 黄惠东, 张龙山, 等. 垫片提高抗冲击能力的应力波衰减机理 [J]. *探测与控制学报*, 2012, 34(2): 1-6. (Xu Pengzhao, Huang Huidong, Zhang Longshan, et al. Stress Wave Reflecting Attenuation to Improve Anti-shock Capacity by Gasket [J]. *Journal of Detection & Control*, 2012, 34(2): 1-6.)