

文章编号: 1673-3193(2024)04-0496-07

高过载信号的脉宽对泡沫铝缓冲效率的影响

王海宾, 范锦彪, 王燕

(中北大学 电气与控制工程学院, 山西 太原 030051)

摘要: 弹载仪器在冲击载荷作用下的缓冲保护研究备受关注, 本文针对实弹测试中高过载信号的脉宽对泡沫铝缓冲材料的缓冲效率影响问题, 提出了一种基于空气炮试验的缓冲效率研究方法。将缓冲测试装置的缓冲模型简化为单自由度缓冲模型, 分析并建立了泡沫铝在高过载信号缓冲压缩下的应力-应变曲线。研究发现, 高过载信号的脉宽通过影响高密度泡沫铝的应变率而去影响塑性平台区应力和缓冲效率, 而低密度泡沫铝的缓冲效率基本不受脉宽变化的影响。研究结果表明: 高过载信号的幅值约20 000g时, 脉宽下降111 μ s, 1.55 g/cm³泡沫铝塑性平台区应力增大约15 MPa, 缓冲效率下降约5.97%; 0.5 g/cm³泡沫铝在高过载信号的幅值相同, 脉宽下降126 μ s, 塑性平台区应力和缓冲效率基本不变。

关键词: 泡沫铝; 缓冲效率; 空气炮; 高过载; 弹载仪器

中图分类号: TB122

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1673-3193.2024.04.011

引用格式: 王海宾, 范锦彪, 王燕. 高过载信号的脉宽对泡沫铝缓冲效率的影响[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2024, 45(4): 496-502.

WANG Haibin, FAN Jinbiao, WANG Yan. Influence of pulse width of high overload signal on buffering efficiency of foam aluminum[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2024, 45(4): 496-502.

Influence of Pulse Width of High Overload Signal on Buffering Efficiency of Foam Aluminum

WANG Haibin, FAN Jinbiao, WANG Yan

(School of Electrical and Control Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Research on the buffering protection of missile borne instruments under impact loads has received much attention. Aiming at the problem that the pulse width of high overload signal affects the cushioning efficiency of the cushioning material foam aluminum in live ammunition test, a research method of cushioning efficiency based on air gun test was proposed. The buffer model of the buffer test device was simplified to a single degree of freedom buffer model, and the stress-strain curve of foam aluminum under the high overload signal buffer compression was analyzed and established. It is found that the pulse width of the high overload signal affects the stress and buffer efficiency of the plastic platform area by affecting the strain rate of the high-density foam aluminum, while the buffer efficiency of low-density foam aluminum is basically not affected by the change of pulse width. The research results show that when the amplitude of high overload signal is about 20 000g, the pulse width decreases by 111 μ s, the stress in 1.55 g/cm³ foam aluminum plastic platform area increases by about 15 MPa, and the buffer effi-

收稿日期: 2023-11-29

作者简介: 王海宾(1996—), 男, 硕士生, 主要从事动态测试方面的研究。

通信作者: 范锦彪(1974—), 男, 教授, 博士, 主要从事冲击过载测试与校准技术方面的研究。E-mail: fjb@nuc.edu.cn。

ciency decreases by about 5.97%; The amplitude of 0.5 g/cm³ foam aluminum at high overload signal is the same, the pulse width decreases by 126 μs, and the stress and buffer efficiency in plastic platform area remain basically unchanged.

Key words: foam aluminum; buffer efficiency; air cannon; high overload; missile borne instruments

0 引言

在高过载的冲击侵彻试验中,弹载电路要承受很高的过载,根据靶板的不同,过载可达到几万g,甚至更高。因此,必须通过缓冲降低弹载电路所承受的高过载,以提高弹载仪器的存活性^[1-2]。泡沫铝作为弹载仪器的缓冲材料已经应用到实际的工程中,学者们已经对弹载仪器上的缓冲保护进行了大量的研究。徐鹏等^[3-4]利用泡沫铝对弹载记录仪进行缓冲防护,并在实弹侵彻混凝土试验和空气炮上检验了泡沫铝缓冲保护的可行性。范志强等^[5]基于数值模拟、试验和理论分析,研究了三次高g值脉冲和恒速冲击加载下复合泡沫填充壳对弹载记录仪的缓冲防护。Luo等^[6]设计了一个缓冲隔离器,研究了泡沫铝填充波纹管(AFFT)结构和环氧树脂组合的缓冲性能。张锦明等^[7]提出一种新的缓冲材料设计思路,通过将孔介质与弹性聚合物混炼加工,形成弹性聚合物纤维空间骨架包络多孔介质颗粒的新型结构。虞跨海等^[8]用仿真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。姜星辰等^[9]分析了高过载环境下不同泡沫铝垫片厚度对内部电路板缓冲防护的影响。

关于弹载仪器的缓冲结构设计、泡沫铝填充壳、泡沫铝和聚合物材料组合等的缓冲研究已有很多,但是,过载信号的脉宽对弹载仪器的泡沫铝缓冲材料的缓冲效率影响问题还不清楚。因此,本文针对高过载的脉宽对泡沫铝的缓冲效率影响问题展开研究,提出一种基于空气炮试验的泡沫铝缓冲研究方法,根据设计的缓冲测试装置结合单自由度缓冲模型,分析了在约20 000g高过载下脉宽对泡沫铝的应力-应变曲线和缓冲效率的影响。

1 缓冲模型分析

弹载仪器中缓冲材料对电路的缓冲物理模型与空气炮试验中的缓冲测试装置的缓冲模型相同。因此,可通过空气炮试验中的缓冲测试装置

对高过载下缓冲材料的缓冲性能进行研究,研究结果对实弹测试中弹载电路的缓冲设计具有一定的指导意义。利用缓冲测试装置缓冲模型简化的单自由度隔振系统结构研究泡沫铝在高过载工况下的响应。基于弹性元件、粘弹性阻尼及其它阻尼的单自由度隔振系统结构可简化为基础激励的力学模型^[10],如图1所示。

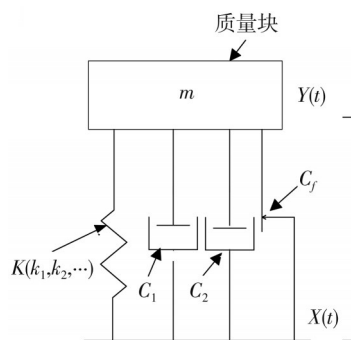


图1 基础激励力学模型

Fig. 1 Basic excitation mechanics model

基础激励时的数学模型如式(1)所示,缓冲材的变形量如式(2)所示。

$$mz''(t) + c_1 z'(t) |z'(t)| + c_2 z'(t) + c_f \times Sgnz'(t) + k_1 z(t) + k_2 z^3(t) = mx''(t), \quad (1)$$

$$z(t) = x(t) - y(t), \quad (2)$$

式中: z(t)为质量块的相对位移,即缓冲材料的变形量; y(t)为质量块的响应位移; x(t)为基础激励; c₁为平方阻尼系数; c₂为粘性阻尼系数; c_f为库仑阻尼系数; k₁, k₂为刚度系数。

质量块所受弹性力、黏弹性阻尼力和其它阻尼力是质量块相对位移的函数,可设

$$c_1 z'(t) |z'(t)| + c_2 z'(t) + c_f \times Sgnz'(t) + k_1 z(t) + k_2 z^3(t) = F[z(t)].$$

在不考虑缓冲材料的质量时, F[z(t)]就是缓冲材料变形所受到的力,对质量块 m 进行受力分析可得

$$F[z(t)] = mY''(t). \quad (3)$$

设缓冲材料的应力为 σ(t), 其应变为 ε(t)。泡沫铝与传感器模块的接触面积为 S, 泡沫铝高为 L, 则

$$\sigma(t) = \frac{mY''(t)}{S}, \quad (4)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{z(t)}{L} = \frac{x(t) - Y(t)}{L}. \quad (5)$$

由式(4)和式(5)可知,根据过载 $x''(t)$ 和 $Y''(t)$ 即可求出同一时刻缓冲材料的应力 $\sigma(t)$ 和应变 $\varepsilon(t)$ 。

泡沫铝的过载缓冲效果的一个重要指标就是缓冲效率 η_a ^[11],其表达式为

$$\eta_a = \frac{a_n - a_m}{a_n} \times 100\%, \quad (6)$$

式中: a_n 为基础激励过载 $x''(t)$ 的最大值; a_m 为质量块响应过载 $y''(t)$ 的最大值。

泡沫铝的平均应变率为

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{\varepsilon(t)}{t}. \quad (7)$$

泡沫铝试件压缩时有3个阶段,即弹性区、塑性平台区、致密区^[12]。理想的泡沫铝试件是在塑性平台区就将高过载的峰值脉冲能量吸收。所谓的平台区并不很平缓,并且泡沫铝的孔隙率越小,屈服段上升斜率越明显。由式(4)可知,缓冲过程中,泡沫铝的应力由质量块所受到的响应过载和泡沫铝与传感器模块的接触面积决定。缓冲效率由基础激励过载和响应过载的峰值决定。由式(6)可知,当基础激励过载的峰值 a_n 不变而过载信号的脉宽发生变化,泡沫铝试件缓冲效率也发生变化时,则一定是过载信号的脉宽变化影响了泡沫铝的响应过载即塑性平台区应力。

2 空气炮缓冲测试试验及数据分析

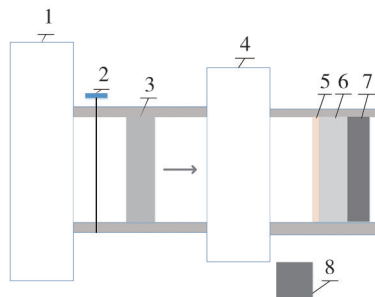
空气炮^[13]作为一种高压气体推动装置可产生数百微秒脉宽,峰值达 10^5g 的过载。因为空气炮具有重复性好,安全性高、操作维护较方便的优点,被国内外许多研究机构所采用^[14-15]。

2.1 空气炮缓冲测试试验

空气炮为一级气体炮^[16],通过压缩气体使弹丸产生较大的动能,弹丸碰撞缓冲测试装置后产生高 g 值过载以测试缓冲材料的缓冲性能,其结构简图如图2所示。

空气炮的工作原理:高压室产生压缩气体,打开气压阀门产生压差,推动弹丸快速运动,碰撞到缓冲测试结构后产生高 g 值过载,由多普勒激光测速装置测得碰撞时的速度。改变撞击面毛

毡垫厚度和材料特性,可以产生不同峰值和脉宽的过载信号。



1—高压室;2—气压阀门;3—弹丸;4—消声装置;5—毛毡垫;
6—缓冲测试装置;7—液压缓冲装置;8—多普勒激光测速装置

图2 空气炮结构简图

Fig. 2 Structure diagram of air cannon

为了方便研究实弹测试中电路的缓冲效率问题并节约研究成本,基于空气炮试验设计了专门的缓冲测试装置。弹载仪器中缓冲材料对电路的缓冲物理模型与空气炮试验中的缓冲测试装置的缓冲模型相同,其结构简图如图3和图4所示。

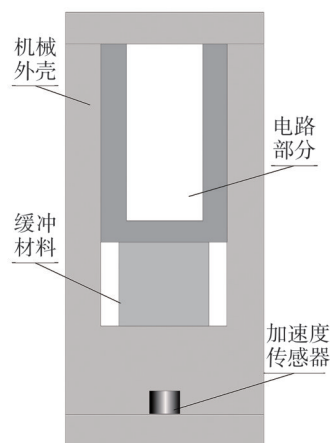
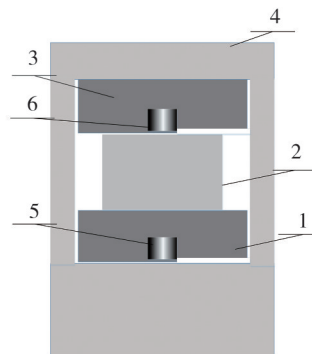


图3 弹载仪器结构简图

Fig. 3 Structural diagram of missile borne instruments



1—传感器1模块;2—泡沫铝;3—传感器2模块;4—外壳;
5—加速度传感器1;6—加速传感器2

图4 缓冲测试装置结构简图

Fig. 4 Structural diagram of buffer testing device

缓冲测试装置中,传感器 1 模块用于测量基础激励过载即装置的壳体过载,重 307.2 g;传感器 2 模块用于测量响应过载即泡沫铝缓冲后传感器 2 模块的过载,重 459.2 g;外壳重 1 819.3 g。传感器 1 和 2 的安装方式相同,传感器 1 通过螺纹固定到传感器 1 模块上,如图 5 所示。传感器通过外接导线与示波器连接,碰撞前弹丸和测试装置的状态图如图 6 所示。



图 5 传感器安装图

Fig. 5 Sensor installation diagram



图 6 碰撞前弹丸和测试装置状态图

Fig. 6 Status diagram of projectile and testing device before collision

泡沫铝试件有 1.55 g/cm³和 0.5 g/cm³两种,1.55 g/cm³泡沫铝孔隙直径大小为 0.5~1 mm,0.5 g/cm³泡沫铝孔隙直径大小为 2~4 mm。泡沫铝试件如图 7 和图 8 所示。空气炮控制室控制高压室推动弹运动,对两种密度试件进行测试。调节高压室气压和毛毡垫厚度,得到同幅值不同脉宽的基础激励过载。



图 7 1.55 g/cm³泡沫铝

Fig. 7 1.55 g/cm³ foam aluminum



图 8 0.5 g/cm³泡沫铝

Fig. 8 0.5 g/cm³ foam aluminum

2.2 试验数据的处理和分析

2.2.1 试验数据的处理

试验前后的参数如表 1 所示。

表 1 试验前后的参数

Tab. 1 Parameters before and after the experiment

实验次序	试件密度/(g·cm ⁻³)	弹速/(m·s ⁻¹)	毛毡厚度/mm	试验前试件的直径/mm	试验后试件变形处的直径/mm	试验前试件的厚度/mm	试验后试件的厚度/mm	轴向压缩/mm
1	1.55	41.60	30	29.76	34.62	29.32	22.20	7.12
2	1.55	36.32	10	30.12	32.62	28.66	23.52	5.14
3	0.5	40.24	30	29.72	32.26	36.22	17.32	18.90
4	0.5	36.00	10	29.76	32.16	35.56	16.88	18.68

第 1 次测试的原始激励和响应过载曲线如图 9 所示。在测试过程中,加速度传感器对于碰撞时的响应不仅仅包含实际的过载,此外还有传感器安装到装置内的结构响应^[17]。针对传感器安

装结构响应的问题,采取了侵彻过载处理原则^[18]。对实测的碰撞过载信号进行快速傅里叶变换(FFT),激励过载、响应过载频谱图如图 10 和图 11 所示。频谱分析后,激励过载信号的第 1 个

频谱波峰值为 5.7 kHz, 响应过载信号的第 1 个频谱波峰值为 5.7 kHz, 激励过载和响应过载的滤波频率为 5.5 kHz。

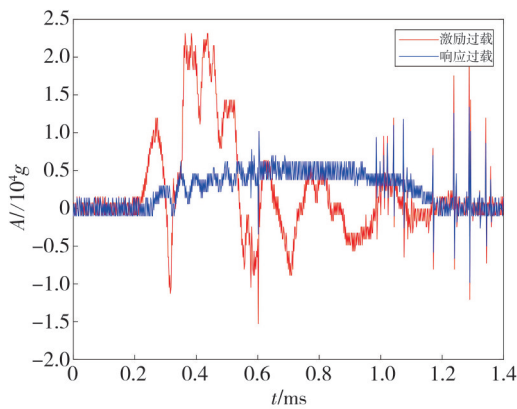


图 9 原始过载曲线
Fig. 9 Original overload curve

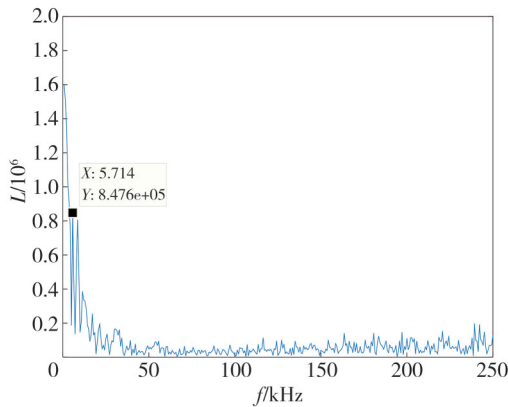


图 10 激励过载频谱图
Fig. 10 Excitation overload spectrum diagram

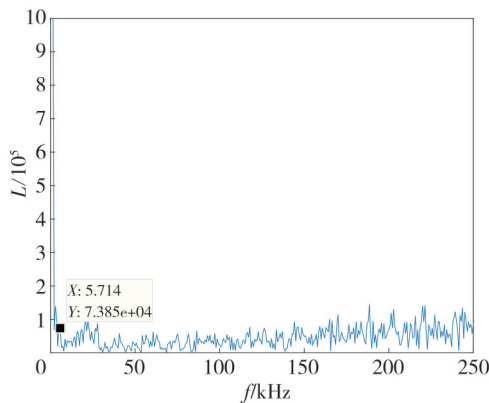


图 11 响应过载频谱图
Fig. 11 Response overload spectrum diagram

激励过载信号滤波前后的积分速度分别为 33.71 m/s 和 33.68 m/s, 响应过载信号滤波前后的积分速度分别为 34.65 m/s 和 34.61 m/s, 滤波后激励过载信号和响应过载信号的能量基本不变。对实测的碰撞过载信号处理后得到其对应的

刚体过载, 过载曲线如图 12 所示。原始的过载曲线与处理后得到的刚体过载信号峰值和持续时间基本一致。滤波前的激励过载峰值为 21 540g, 脉宽为 438 μ s, 滤波后的激励过载峰值为 19 720g, 脉宽为 442 μ s。滤波前的响应过载的峰值为 6 800g, 脉宽为 1 030 μ s, 滤波后的响应过载为 6 042g, 脉宽为 1 038 μ s。按照同样的方法处理余下的数据, 4 次试验的数据如表 2 所示。

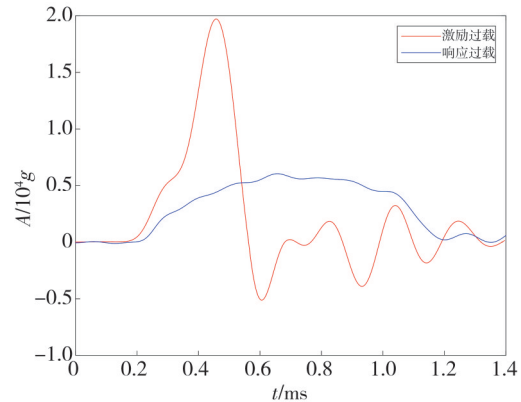


图 12 滤波后的过载曲线
Fig. 12 Overload curve after filtering

表 2 空气炮缓冲测试数据
Tab. 2 Air cannon buffering test data

试验 次序	基础激励过载		响应过载		轴向压缩/ mm
	峰值/g	脉宽/ μ s	峰值/g	脉宽/ μ s	
1	19 720	442	6 042	1 038	7.24
2	19 350	331	7 084	634	5.38
3	21 360	336	3 860	1 330	18.32
4	20 690	210	3 814	1 120	18.04

2.2.2 试验数据的分析

对 4 次试验的过载数据进行二次积分, 然后通过式(2)处理得到泡沫铝试件的轴向压缩量分别为 7.24, 5.38, 18.32 和 18.04 mm, 而实际测量的轴向压缩量分别为 7.12, 5.14, 18.90 和 18.68 mm, 相对误差分别为 1.69%, 4.67%, 3.07% 和 3.43%, 过载数据处理计算出的轴向压缩量和实际测量的相对误差都小于 5%, 证明了过载数据的可靠性。

由式(4)分析可知, 缓冲过程中, 泡沫铝的应力由质量块所受到的响应过载和泡沫铝与传感器模块的接触面积决定, 应变由相对位移决定。为了减小由于缓冲材料和接触面积的变化而造成的计算应力误差, 面积取缓冲前后泡沫铝与传感器模块接触面积的均值。基于空气炮缓冲测试试验测得的基础激励过载、响应过载经过式(4)和

式(5)来消除中间变量 t ,可得泡沫铝试件的应力-应变曲线,如图13所示。由图13可知 1.55 g/cm^3 泡沫铝在过载峰值约 $20\ 000\text{g}$ 时,第1次测试的塑性平台区应力约为 25 MPa ,第2次测试约 40 MPa 。而 0.5 g/cm^3 泡沫铝在第3次和第4次测试时的塑性平台区应力约为 10 MPa 。

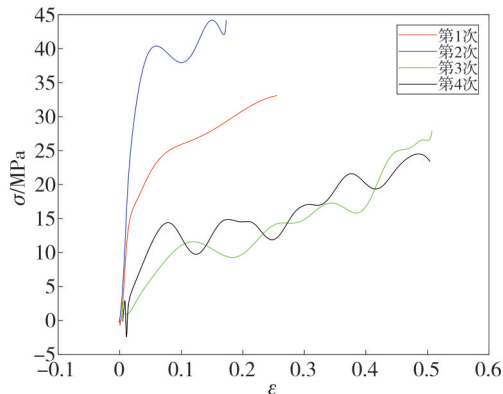


图13 应力-应变曲线

Fig. 13 Stress-strain curve

由表2的数据结合式(8)可知, 1.55 g/cm^3 泡沫铝两次实验的缓冲效率分别为 69.36% 和 63.39% , 0.5 g/cm^3 泡沫铝两次实验的缓冲效率分别为 81.93% 和 81.57% 。 1.55 g/cm^3 泡沫铝在过载约 $20\ 000\text{g}$,脉宽差 $111\ \mu\text{s}$ 时,缓冲效率下降 5.97% 。 0.5 g/cm^3 泡沫铝在过载约 $20\ 000\text{g}$,脉宽差 $126\ \mu\text{s}$ 时,缓冲效率下降 0.36% 。

由此可知,过载峰值一定时, 1.55 g/cm^3 泡沫铝的缓冲效率受过载信号的脉宽变化影响较大,脉宽减小,塑性平台区应力增大,致使缓冲效率降低; 0.5 g/cm^3 泡沫铝的塑性平台区应力和缓冲效率基本不受过载脉宽的影响。

泡沫铝对传感器2模块的缓冲时间是传感器2模块测试的响应过载的脉宽,所以缓冲时间为 $1\ 038, 634, 1\ 330$ 和 $1\ 120\ \mu\text{s}$,根据式(7)和泡沫铝的实际轴向压缩量求得应变率分别为 $233.95, 282.88, 392.33$ 和 469.03 s^{-1} 。 1.55 g/cm^3 泡沫铝的应变率增加 48.93 s^{-1} 时,其塑性平台区应力增加约 15 MPa 。 0.5 g/cm^3 泡沫铝的应变率增加 76.70 s^{-1} ,其塑性平台区应力基本不变。这与文献[19]中高密度泡沫铝表现出较强的应变率敏感性的结论一致。综上可知,过载脉宽的减小致使泡沫铝的应变率增大,从而致使高密度泡沫铝的塑性平台区应力增大,进而使得缓冲效率降低,而低密度泡沫铝的塑性平台区应力不受其应变率

的影响。

3 结 论

本文基于空气炮实验,通过调节弹丸和测试装置之间的毛毡厚度以及弹丸的速度研究了过载脉宽对缓冲材料-泡沫铝缓冲效率的影响,主要结论如下:

1) 由空气炮缓冲试验结合单自由度缓冲模型得到了密度为 1.55 g/cm^3 和 0.5 g/cm^3 的泡沫铝在过载约 $20\ 000\text{g}$ 时,不同脉宽下的应力-应变曲线,为高过载下电路缓冲设计提供了数据基础和理论支持。

2) 过载约 $20\ 000\text{g}$,泡沫铝试件在塑性平台区阶段缓冲时,脉宽下降 $111\ \mu\text{s}$, 1.55 g/cm^3 泡沫铝塑性平台区应力增大约 15 MPa ,缓冲效率下降 5.97% ,而 0.5 g/cm^3 泡沫铝的塑性平台区应力和缓冲效率基本不受影响。

3) 过载信号的脉宽减小致使泡沫铝的应变率增大,导致高密度泡沫铝的塑性平台区应力增大,从而使得缓冲效率降低。

参考文献:

- [1] 陈宏亮, 马少杰, 张锦明. 弹载高冲击三维加速度存储测试仪[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(2): 41-45.
CHEN Hongliang, MA Shaojie, ZHANG Jingming. High impact three-dimensional acceleration storage tester [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2018, 39(2): 41-45. (in Chinese)
- [2] 朱仕永, 祖静, 范锦彪. 基于CPLD的弹载加速度存储测试仪[J]. 探测与控制学报, 2009, 31(3): 43-45.
ZHU Shiyong, ZU Jing, FAN Jinbiao. Missile-borne storage measurement and test instrument of acceleration Based on CPLD [J]. Journal of Detection & Control, 2009, 31(3): 43-45. (in Chinese)
- [3] 徐鹏, 范锦彪, 祖静. 高 g 值冲击下存储测试电路模块缓冲保护研究[J]. 实验力学, 2005, 20(4): 610-614.
XU Peng, FAN Jinbiao, ZU Jing. The buffer of on-board test circuit module in high g shock [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2005, 20(4): 610-614. (in Chinese)
- [4] 徐鹏, 范锦彪, 祖静. 高 g 值加速度冲击试验技术研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(4): 241-243.
XU Peng, FAN Jinbiao, ZU Jing. Acceleration shock

- test technology with higher values of G [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2011, 30(4): 241-243. (in Chinese)
- [5] 范志强, 张冰冰, 苗雨中, 等. 复合泡沫填充壳三次高 g 值冲击防护设计研究[J]. *振动与冲击*, 2022, 41(22): 275-283.
- FAN Zhiqiang, ZHANG Bingbing, MIAO Yuzhong, et al. Design of syntactic foam filled shell protection subjected to triple high g shocks[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(22): 275-283. (in Chinese)
- [6] LUO H T, LI Y X. Design and experimental research on buffer protection of high- g penetrator for deep space exploration[J]. *Acta Astronautica*, 2021 189: 63-78.
- [7] 张锦明, 张合. 多孔弹性复合材料研制及其吸能缓冲特性[J]. *兵工学报*, 2022, 43(1): 159-168.
- ZHANG Jinming, ZHANG He. Preparation of elastic porous composite material and its energy-absorption characteristics[J]. *Acta armamentarii*, 2022, 43(1): 159-168. (in Chinese)
- [8] 虞跨海, 张旭辉, 徐红玉, 等. 基于数值仿真的引信前冲过载泡沫铝缓冲性能分析[J]. *系统仿真学报*, 2017, 29(6): 1311-1316.
- YU Kuahai, ZHANG Xuhui, XU Hongyu, et al. Numerical simulation of aluminum foam cushion performance analysis on set-forward overload of fuze[J]. *Journal of System Simulation*, 2017, 29(6): 1311-1316. (in Chinese)
- [9] 姜星辰, 程翔, 张锦明. 泡沫铝垫片厚度在侵彻过程中缓冲性能研究[J]. *兵器装备工程学报*, 2018, 39(11): 81-84.
- JIANG Xingchen, CHEN Xiang, Zhang Jinming. Research on buffer performance of aluminum foam during penetration[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2018, 39(11): 81-84. (in Chinese)
- [10] 杨平. 非线性抗振动冲击防护动力学和动态设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [11] 哈里斯 C. M., 克瑞德 C. E.. 冲击和振动手册[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- [12] 曾斐, 潘艺, 胡时胜. 泡沫铝缓冲吸能评估及其特性[J]. *爆炸与冲击*, 2002, 22(4): 358-362.
- ZENG Fei, PAN Yi, Hu Shisheng. Evaluation of cushioning properties and energy-absorption capability of foam aluminium[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2002, 22(4): 358-362. (in Chinese)
- [13] 刘石豪, 张振海, 牛兰杰, 等. 高能量冲击加载试验装置研究进展[J]. *探测与控制学报*, 2023, 45(4): 14-28.
- LIU Shihao, ZHANG Zhenhai, NIU Lanjie, et al. A Review on high-energy impact loading test device research[J]. *Journal of Detection & Control*, 2023, 45(4): 14-28. (in Chinese)
- [14] 林俊德. 侵彻武器及气体炮试验[J]. *中国工程科学*, 2003, 5(11): 25-33.
- LIN Junde. Test of penetrating weapons and gas cannons[J]. *Chinese Engineering Science*, 2003, 5(11): 25-33. (in Chinese)
- [15] 翁雪涛, 黄映云, 朱石坚. 利用气体炮技术测定隔振器冲击特性[J]. *振动与冲击*, 2005, 24(1): 103-105.
- WENG Xuetao, HUANG Yingyun, ZHU Shijian. Measuring vibration isolator's shock characteristics by air gun[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2005, 24(1): 103-105. (in Chinese)
- [16] 熊镐, 王惠源, 王玲儒. 一级气体炮内弹道方程修正及仿真验证[J]. *火炮发射与控制学报*, 2019, 40(4): 20-25.
- XIONG Hao, WANG Huiyuan, WANG Lingru. Correction and simulation verification of interior ballistic equation of first stage gas gun[J]. *Journal of Gun Launch & Control*, 2019, 40(4): 20-25. (in Chinese)
- [17] 徐鹏, 范锦彪, 祖静. 高速动能弹侵彻硬目标加速度测试技术研究[J]. *振动与冲击*, 2007, 26(11): 118-122.
- XU Peng, FAN Jinbiao, ZU Jing. Study on acceleration test technique of high velocity kinetic energy projectile penetrating into hard target[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2007, 26(11): 118-122. (in Chinese)
- [18] 范锦彪, 祖静, 徐鹏, 等. 弹丸侵彻混凝土目标减加速度信号的处理原则[J]. *探测与控制学报*, 2012, 34(4): 1-5.
- FAN Jinbiao, ZU Jing, XU Peng, et al. Impact deceleration signal processing for concrete target penetration[J]. *Journal of Detection & Control*, 2012, 34(4): 1-5. (in Chinese)
- [19] 张健, 赵桂平, 卢天健. 闭孔泡沫铝应变率效应的试验和有限元分析[J]. *西安交通大学学报*, 2010, 44(5): 97-101.
- ZHANG Jian, ZHAO Guiping, LU Tianjian. Experimental and numerical study on strain rate effects of closed-celled aluminum foams[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2010, 44(5): 97-101. (in Chinese)