

文章编号: 1001-1455(2013)05-0479-08

# 高 $g$ 值加速度发生器中的波形整形技术\*

周广宇<sup>1,2</sup>, 胡时胜<sup>2</sup>

(1. 山东水利职业学院, 山东 日照 276826;

2. 中国科学技术大学中国科学院材料力学行为和 Design 重点实验室, 安徽 合肥 230026)

**摘要:** 以 Hopkinson 压杆实验装置作为火工品抗过载实验中的高  $g$  值加速度发生器, 通过数值模拟分析了子弹(形状)、波形整形器(材料、直径、厚度)对加载脉冲的影响规律, 并获得了所需的加速度脉冲, 实现了有效控制 and 改善火工品冲击实验中的加载环境。研究结果可为检验火工品在冲击环境下或经冲击后性能可靠度的实验设计、测试等提供依据。

**关键词:** 固体力学; 波形整形技术; Hopkinson 压杆; 高  $g$  值加速度发生器

**中图分类号:** O347.4

**国标学科代码:** 1301515

**文献标志码:** A

现代高科技战争弹药技术的发展, 对火工品的安全性提出了更高的要求, 而耐过载实验成为检验火工品在冲击环境下或经冲击后使用安全性的重要手段, 构成其加载环境的主要因素<sup>[1]</sup>包括冲击的时间历程(冲击波形)、冲击脉冲的峰值加速度和冲击脉冲的持续时间(脉冲宽度)。目前, Hopkinson 压杆技术<sup>[2]</sup>已被广泛用来评估火工品的抗过载能力、标定高  $g$  值加速度传感器<sup>[3-5]</sup>。T. C. Togami 等<sup>[4-5]</sup>用改进后的 Hopkinson 压杆装置得到加速度脉冲的峰值  $200\,000g$  ( $g=9.81\text{ m/s}^2$ ), 并对比了不同子弹速度下的加速度曲线。R. D. Sill<sup>[6]</sup>、T. C. Togami 等<sup>[4]</sup>、李玉龙等<sup>[7]</sup>及盛党红等<sup>[8]</sup>采用 Hopkinson 压杆技术标定了高  $g$  值加速度传感器。沈瑞琪等<sup>[9]</sup>则将 Hopkinson 压杆技术应用于火工品安全性的评估。虽然采用 Hopkinson 压杆技术可以得到高于  $200\,000g$  的冲击加速度峰值, 但没有考虑波形弥散、加速度脉宽对火工品抗过载性能的影响, 且加速度脉宽也只在  $10\sim 25\ \mu\text{s}$  之间。邓强等<sup>[10]</sup>将 Hopkinson 压杆中的波形整形技术应用到火工品安全性检测中, 试图得到不同的冲击脉冲。进一步表明火工品的破坏临界加速度值随着加速度脉宽的增大而减小, 研究火工品的抗过载性能时, 外界环境的冲击加速度值和加速度脉宽同时影响着火工品的安全性能。因此, 研究波形整形技术对加速度值和加速度脉宽的影响规律, 来实现更高的加速度值和更长的加速度脉宽, 是火工品安全测试中面临的问题, 更是迫切需要解决的问题。本文中, 基于 Hopkinson 压杆(HPB)中的波形整形技术, 针对高  $g$  值加速度发生器火工品安全性检测的要求, 通过数值模拟, 系统研究子弹及波形整形器等对加载脉冲的影响。

## 1 实验装置

本文中, 采用的实验装置实际为一套 Hopkinson 压杆装置, 如图 1 所示。

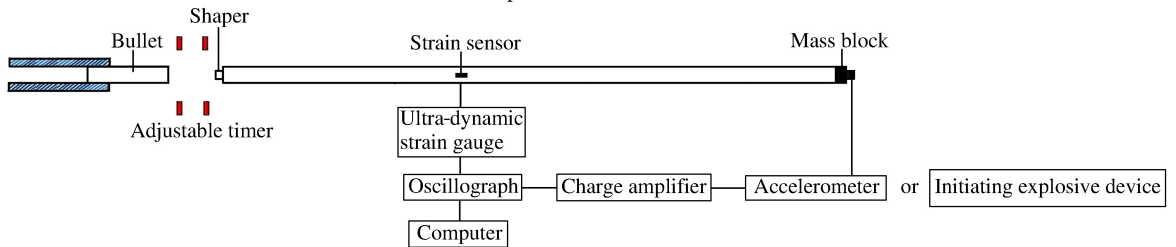


图 1 高  $g$  值冲击加速度发生器实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of high- $g$ -value impact acceleration generator

\* 收稿日期: 2012-05-08; 修回日期: 2012-12-17

作者简介: 周广宇(1979—), 男, 硕士, 讲师。

高压气枪发射的子弹以一定的速度撞击 Hopkinson 压杆,在该压杆中产生弹性应力波。此应力波沿压杆并通过杆端传递到试件上,对试件进行高速加载。由于 Hopkinson 压杆长径比大,可将杆中的应力波看作一维应力波。根据一维应力波理论及牛顿第二定律,得到压杆端面试件的加速度<sup>[11]</sup>。

## 2 数值模拟

### 2.1 几何模型

为了系统研究子弹、波形整形器等相关因素对火工品冲击实验中冲击脉冲的影响规律,本文中采用 ABAQUS/Explicit 有限元软件<sup>[12]</sup>对高  $g$  值冲击加速度发生器实验装置产生高  $g$  值加速度冲击脉冲的工作过程进行了数值模拟。

因为整个实验装置以及载荷等都关于杆的中心线轴对称,所以可以使用轴对称单元进行二维分析。如图 2 所示,单元类型均设为 CAX4R 轴对称单元,子弹与整形器、整形器与入射杆之间采用面-面的有限滑动接触,接触属性设定为无摩擦硬接触。为避免单元形状发生畸变、计算无法收敛并控制脉冲波形质量,对整形器采用 ALE 自适应网格。

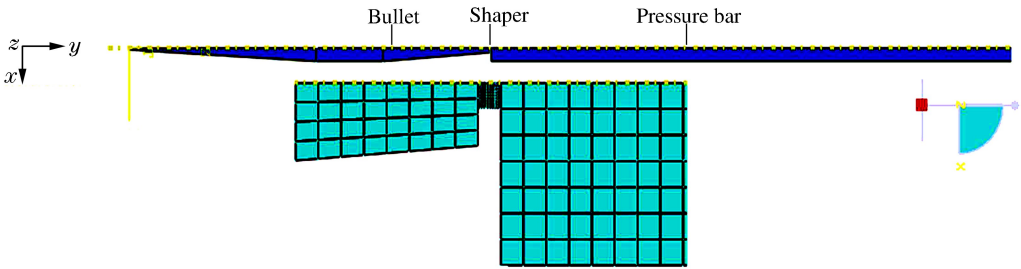


图 2 高  $g$  值冲击加速度发生器有限元模型

Fig. 2 The finite element model for high- $g$ -value impact acceleration generator

### 2.2 材料模型

子弹、压杆在工作过程中均处于弹性状态且使用相同材料,材料本构关系选择为各向同性弹性材料模型,材料模型参数为:弹性模量  $E=210$  GPa,密度  $\rho=7.8$  t/m<sup>3</sup>,泊松比  $\mu=0.3$ 。软铝<sup>[13]</sup>、紫铜<sup>[14]</sup>、LY12 铝<sup>[14]</sup>及 45 钢<sup>[15]</sup>为波形整形器选用材料,采用 Johnson-Cook (J-C)本构模型。

## 3 结果与分析

### 3.1 子弹对加速度脉冲的影响

#### 3.1.1 梭形子弹与圆柱形子弹

基于  $\varnothing 14.5$  mm 的 HPB 装置,将子弹设计为如图 3 所示的梭形子弹,由削去顶端的圆锥体与圆柱体组合而成,其中  $D_1=5.0$  mm,  $D_2=14.5$  mm,  $D_3=2.0$  mm,  $L_1=64$  mm,  $L_2=40$  mm,  $L_3=112$  mm。

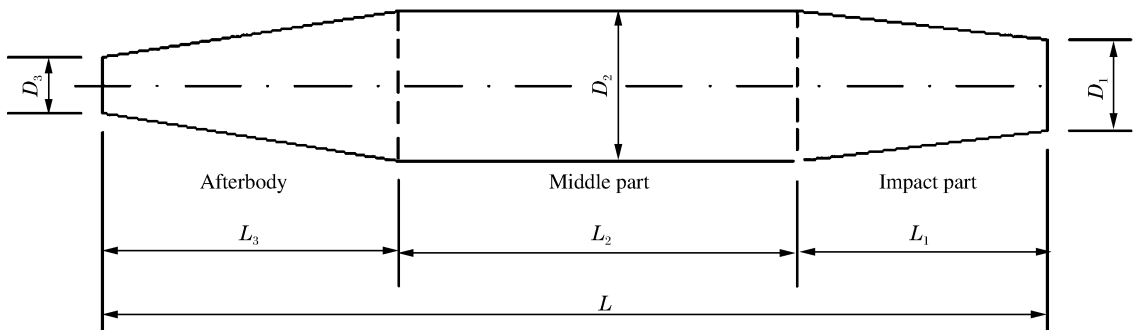


图 3 梭形子弹平面图

Fig. 3 Plan of spindle-shaped bullet

该梭形子弹以  $v=15\text{ m/s}$  的速度撞击压杆,得到的加载波(应变波) $\epsilon$  波形及加速度  $a$  脉冲如图 4 所示。

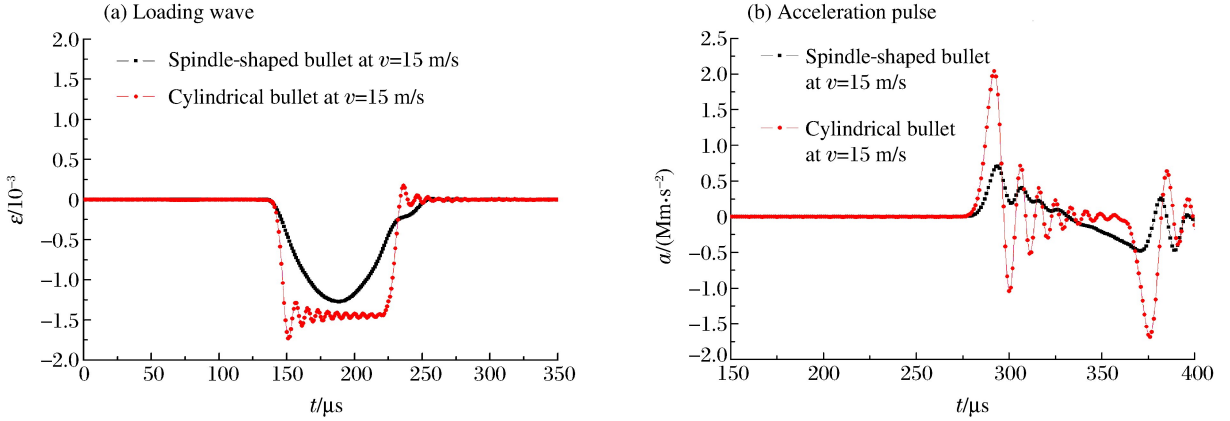


图 4 用梭形子弹和圆柱形子弹得到的加载波波形和加速度脉冲

Fig. 4 Loading wave shapes and acceleration pulses obtained by spindle-shaped and cylindrical bullets

从图 4 可知:采用梭形子弹能够明显改善加载波波形上升沿,上升时间比采用圆柱形子弹时长得更多,峰值平台变窄甚至不出现,形状也由矩形波变成近似半正弦波,所测波形基本上消除了由弥散而带来的波形振荡;另外,虽然加速度脉冲的脉宽增加了,但加速度脉冲的峰值降低了很多。

### 3.1.2 梭形子弹撞击端面积的影响

改变梭形子弹撞击端的端面直径  $D_1$ ,用撞击端面直径不同的梭形子弹以  $v=15\text{ m/s}$  的速度分别直接撞击压杆,得到的加载波波形及加速度脉冲如图 5 所示。

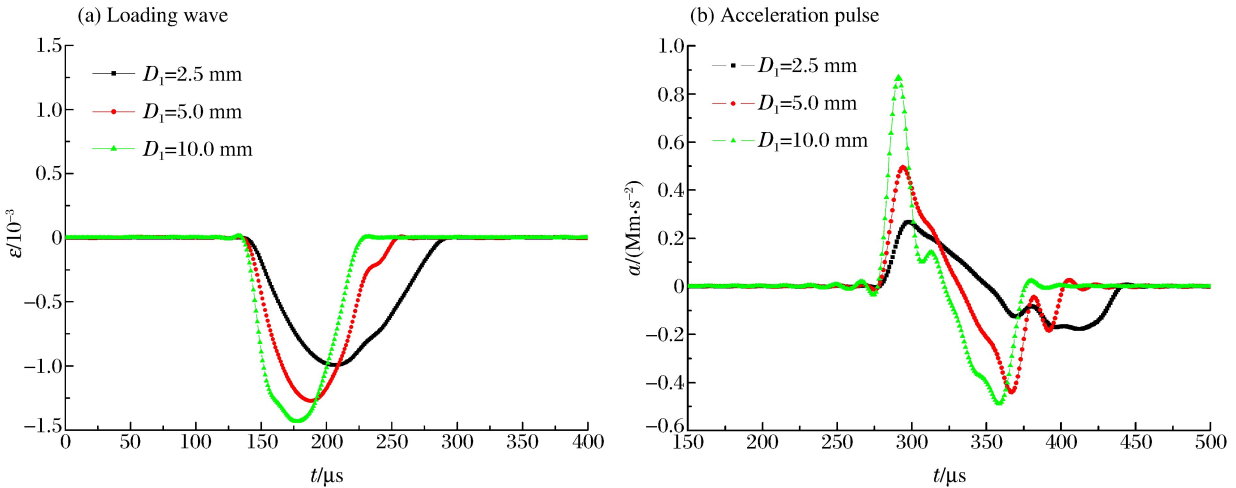


图 5 用撞击端面直径不同的梭形子弹得到的加载波波形和加速度脉冲

Fig. 5 Loading wave shapes and acceleration pulses obtained by spindle-shaped bullets with different-diameter impact ends

从图 5 可知:随着梭形子弹撞击端面面积的增加,加载波波形被逐渐压扁,即峰值加大,宽度减小,上升沿变得陡峭;另一方面,加速度脉冲的脉宽减小,峰值提高。

### 3.1.3 梭形子弹撞击端锥度的影响

改变梭形子弹端部的长度  $L_1$ ,获得不同撞击端锥度。用撞击端锥度不同的梭形子弹以  $v=15\text{ m/s}$  的速度分别直接撞击压杆,得到的加载波波形及加速度脉冲如图 6 所示。

从图 6 可知:随着梭形子弹撞击端部锥体锥度的增加,加载波的上升沿略微变陡,应变幅值稍微提高;另一方面,对应的加速度峰值也有提升,而加速度脉宽也略微变窄。

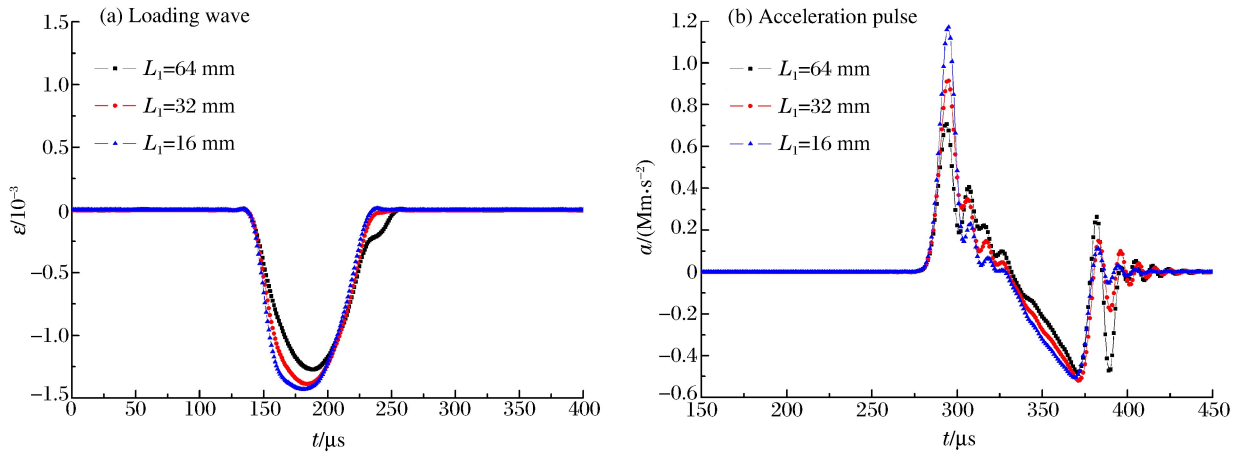


图6 用撞击端锥度不同的梭形子弹得到的加载波波形和加速度脉冲

Fig. 6 Loading wave shapes and acceleration pulses obtained by spindle-shaped bullets with different-cone-angle impact ends

### 3.1.4 梭形子弹尾部的影响

分别改变梭形子弹的尾部直径  $D_3$  和尾部长度  $L_3$ , 用不同尾部直径和不同尾部长度的梭形子弹以  $v = 15$  m/s 的速度分别直接撞击入射杆, 得到的加载波波形及加速度脉冲分别如图7、8所示。

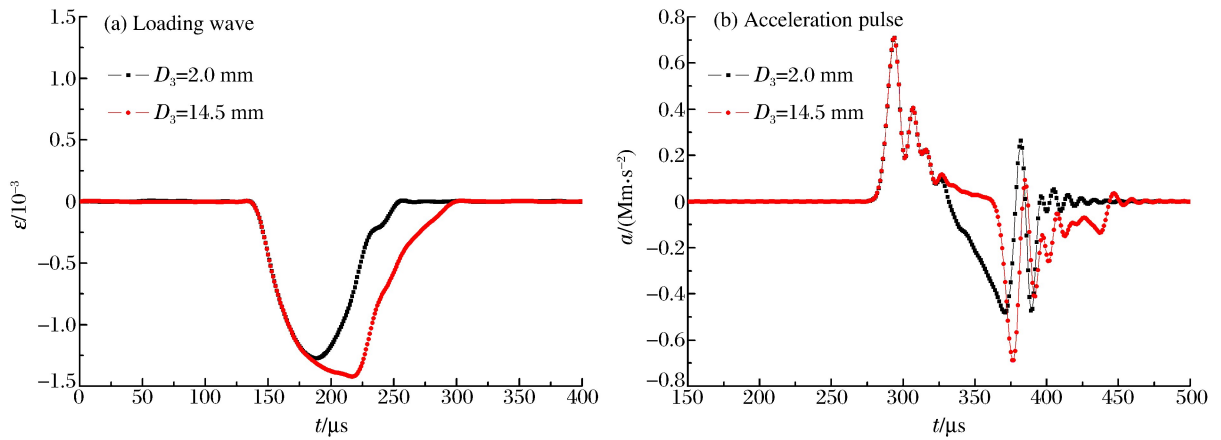


图7 用尾部直径不同的梭形子弹得到的加载波波形和加速度脉冲

Fig. 7 Loading wave shapes and acceleration pulses obtained by spindle-shaped bullets with different-diameter afterbodies

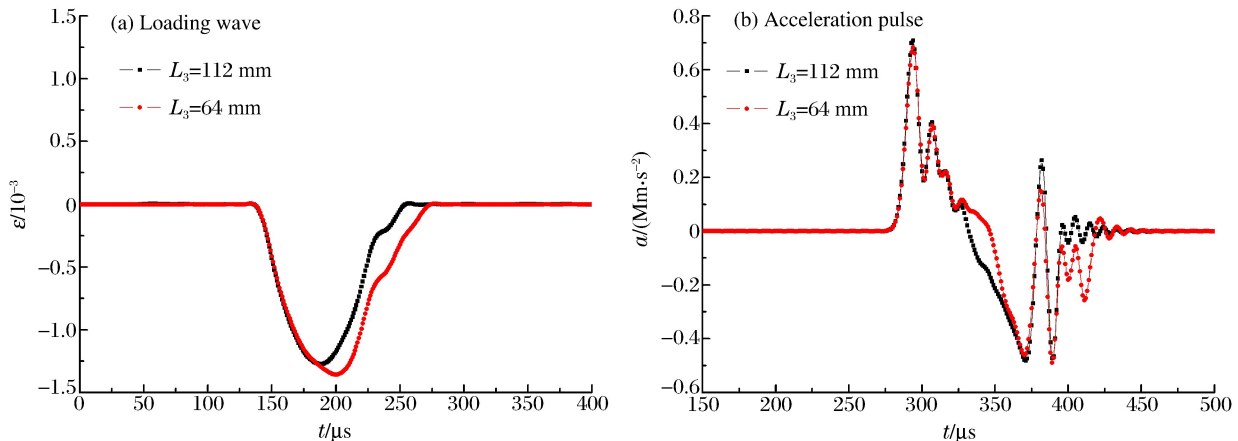


图8 用尾部长度不同的梭形子弹得到的加载波波形和加速度脉冲

Fig. 8 Loading wave shapes and acceleration pulses obtained by spindle-shaped bullets with different-length afterbodies

从图 7~8 可知:改变梭形子弹的尾部直径或尾部长度,得到的加速度脉冲峰值及波形基本一致,只是脉宽稍长。由此说明,梭形子弹尾部几何参数相对于撞击端而言对加速度脉冲的影响很小。

### 3.1.5 子弹弹长的影响

改变梭形子弹中间段的长度  $L_2$ ,用中间段长度不同的梭形子弹以  $v=15\text{ m/s}$  的速度分别直接撞击压杆,得到的加载波波形及加速度脉冲如图 9 所示。

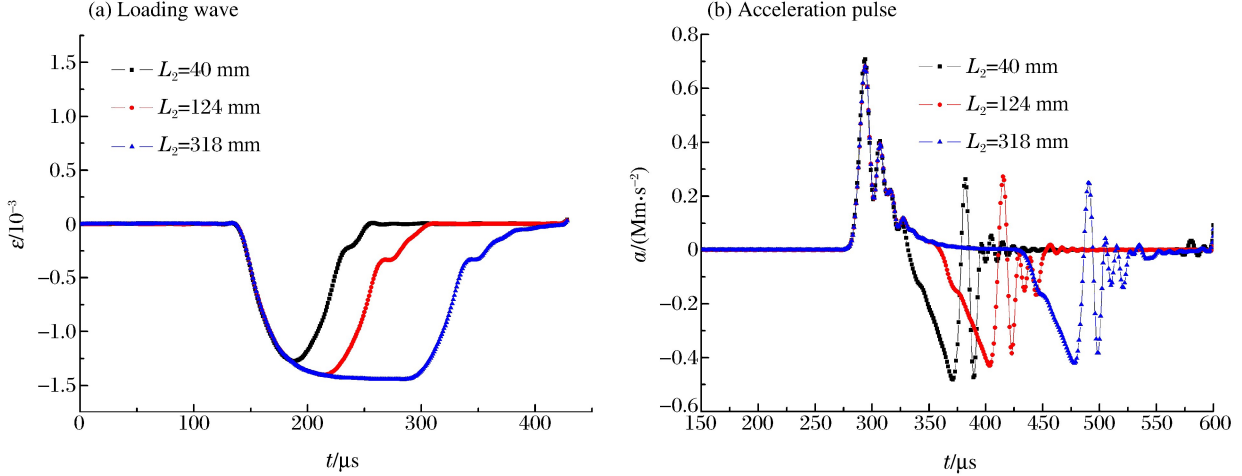


图 9 用中间段长度不同的梭形子弹得到的加载波波形和加速度脉冲

Fig. 9 Loading wave shapes and acceleration pulses obtained by spindle-shaped bullets with different-length middle parts

从图 9 可知:用不同弹长的子弹所得到的波形上升沿走势基本一致,脉冲宽度随着子弹长度的增大而增加。由此说明,子弹长度对加速度峰值的影响很小,仅对加速度脉冲的脉宽有一定影响,随子弹长度的增大而略有增加。

## 3.2 波形整形器对加速度脉冲的影响

### 3.2.1 整形器材料的影响

在保持弹形不变(图 3 所示)的情况下,在压杆前端面(撞击端)加设一个金属垫块作为整形器。在梭形子弹以相同的速度撞击下,得到的加载波波形及加速度脉冲如图 10 所示。

从图 10 可知:加入整形器后,加载波上升沿均明显被拉宽、峰值减小,其对应的加速度脉冲峰值下降、脉宽增加;整形器材料越软,加载波形的上升沿越宽,而加速度脉冲峰值越低,脉宽越大。

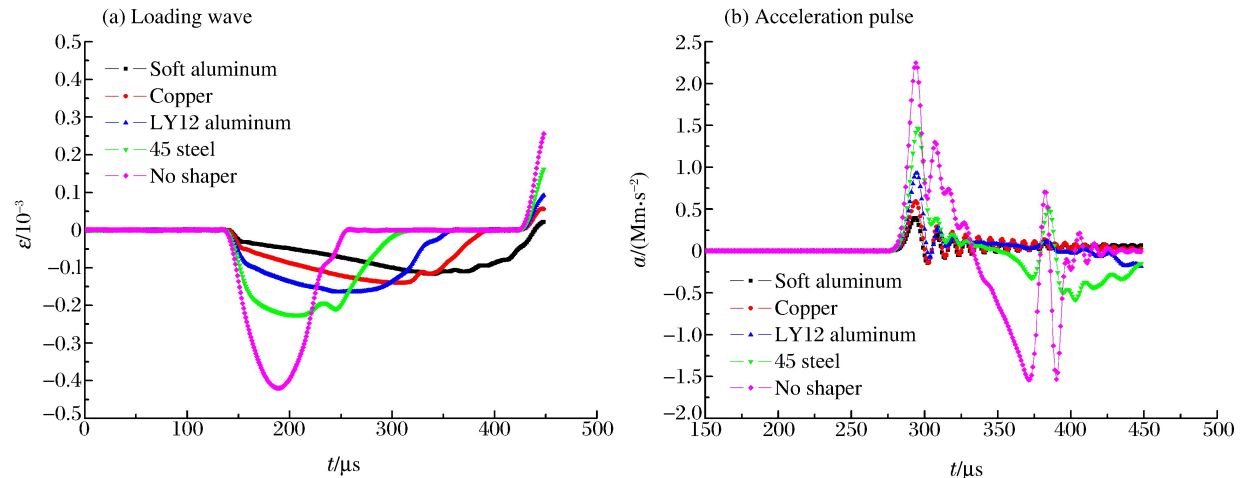


图 10 不同材料的整形器对应的加载波波形和加速度脉冲

Fig. 10 Loading wave shapes and acceleration pulses corresponding to the shapers of different materials

### 3.2.2 整形器尺寸的影响

以圆柱形紫铜作为整形器,分别考虑整形器的直径  $d$  和厚度  $l$  对加载波波形及加速度脉冲的影响,如图 11~12 所示。

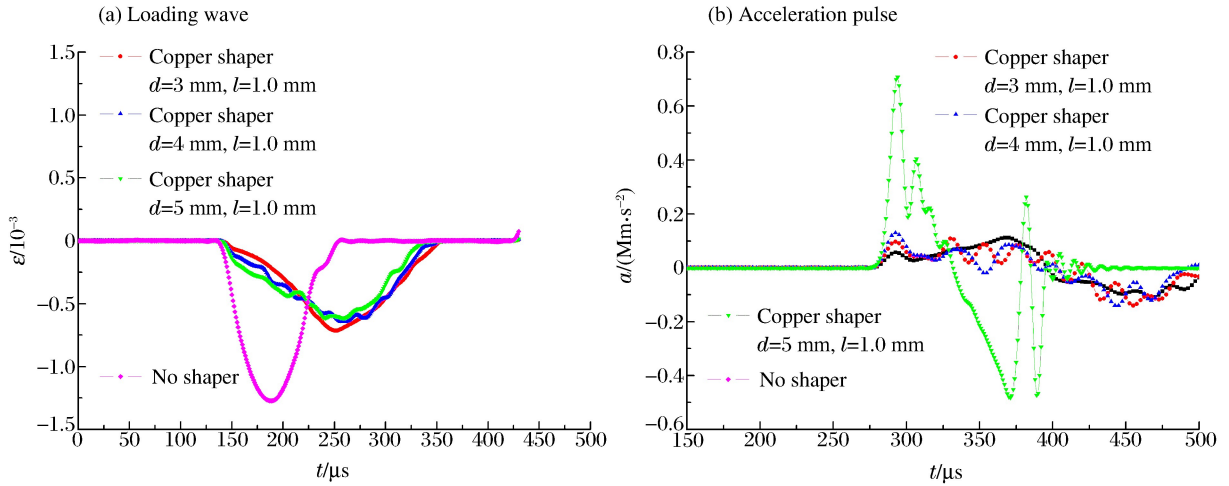


图 11 不同直径的整形器对应的加载波波形和加速度脉冲

Fig. 11 Loading wave shapes and acceleration pulses corresponding to the shapers of different diameters

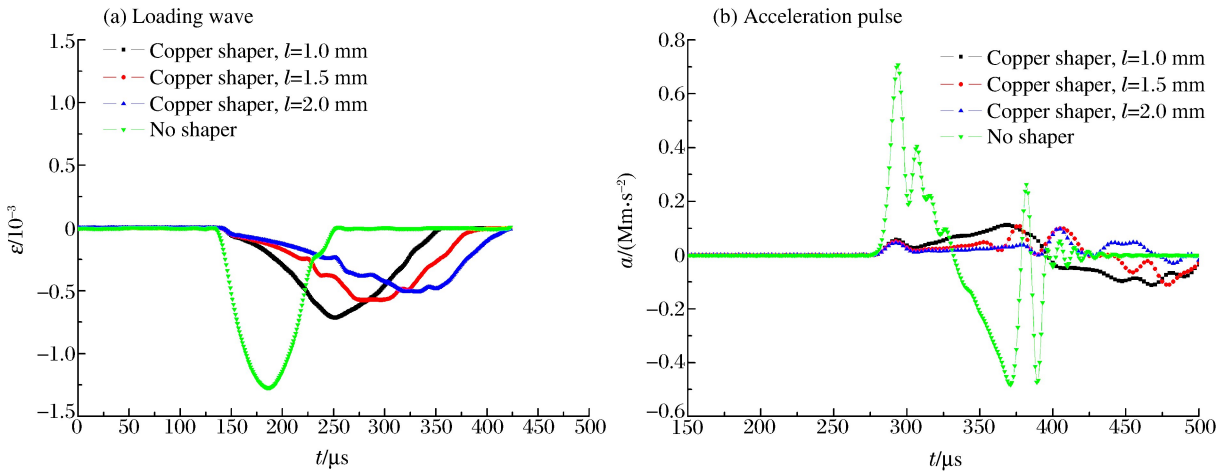


图 12 不同厚度的整形器对应的加载波波形和加速度脉冲

Fig. 12 Loading wave shapes and acceleration pulses corresponding to the shapers of different thicknesses

从图 11~12 可知:随着紫铜垫块直径的增加,加载波上升时间减小,而加速度脉冲的峰值增大;随着紫铜垫块厚度的增加,加载波上升时间增大,而加速度脉冲的峰值减小。

## 4 火工品冲击实验加载环境的数值模拟

实验表明:火工品的破坏临界加速度值随着加速度脉宽的增大而减小<sup>[16]</sup>,从而证明研究火工品的抗过载性能时,必须考虑加速度脉宽的影响,外界环境的冲击加速度峰值和加速度脉宽同时影响火工品的安全性能。

为此,在上述分析的基础上,设计合理的子弹形状,选择适当的整形器,并将两者相关因素有效地组合在一起,计算得到的加载波波形及加速度脉冲如图 13 所示。数值模拟中,子弹形状为梭形,改变子弹长度和子弹的撞击速度;整形器材料为 45 钢,直径均为 6 mm,改变整形器的厚度。

由图 13 可知:通过控制子弹和整形器的相关因素,加载波上升沿被拉宽,其形状近似为半正弦波,加速度脉冲脉宽约为 100 μs,同时得到 100 000g 的加速度峰值。

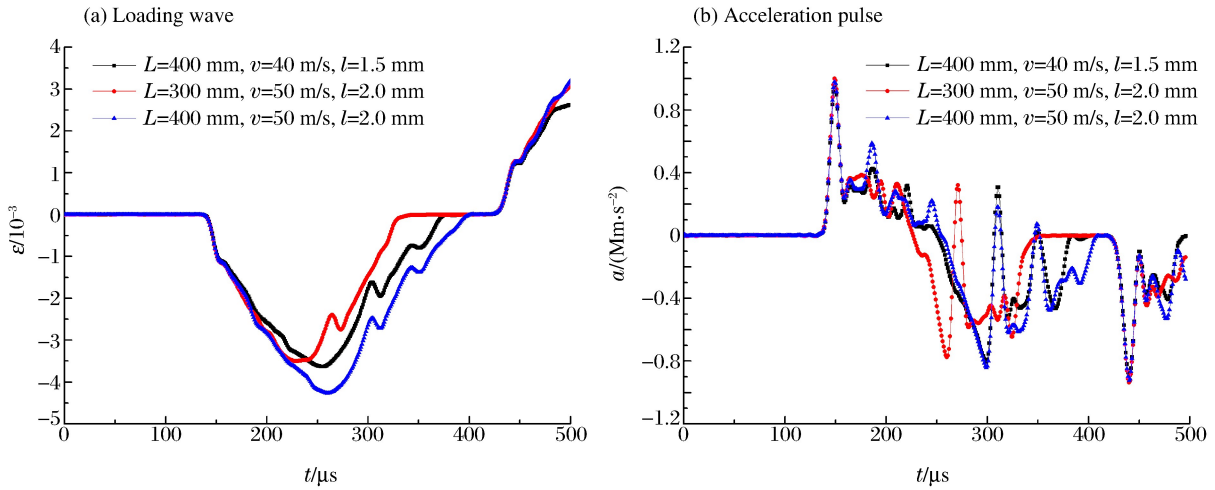


图 13 不同组合对应的加载波波形和加速度脉冲

Fig. 13 Loading wave shapes and acceleration pulses corresponding to different combinations

### 5 结 论

(1) 在一定的撞击速度范围内, 梭形子弹所产生的波形近似于半正弦波, 子弹撞击端几何参数对加载波波形的影响远大于子弹尾部。加载波上升时间与子弹弹长有关, 并随弹长增加而增加。

(2) 改变波形整形器的材料、直径和厚度等任何一个条件, 都会获得不同的入射波波形和加速度脉冲, 并根据模拟结果总结出其各自的影响规律。

(3) 通过有效控制子弹和波形整形器等相关因素, 可以获得所需的加速度脉冲, 为检验火工品在冲击环境下或经冲击后性能可靠度的实验设计、测试等提供依据。

### 参考文献:

[1] 柳继昌, 席兰霞. 火工品冲击试验[J]. 火工品, 1994(4): 32-37.  
Liu Ji-chang, Xi Lan-xia. Shock test for initiating explosive device[J]. Initiators and Pyrotechnics, 1994(4): 32-37.

[2] 胡时胜. 霍普金森压杆技术[J]. 兵器材料科学与工程, 1991(11): 40-47.  
Hu Shi-sheng. Hopkinson pressure bar technology[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 1991(11): 40-47.

[3] Bateman V I, Brown F A, Davie N T. Use of a beryllium Hopkinson bar to characterize a piezoresistive accelerometer in shock environments[J]. Journal of the Institute of Environmental Sciences, 1996, 39(6): 33-39.

[4] Togami T C, Baker W E, Forrestal M J. A split Hopkinson bar technique to evaluate the performance of accelerometers[J]. Journal of Applied Mechanics, 1996, 63(2): 353-356.

[5] Togami T C, Brown F A, Forrestal M J, et al. Performance evaluation of accelerometers to 200 000g[J]. Journal of Applied Mechanics, 1998, 65(1): 266-268.

[6] Sill R D. Testing techniques involved with the development of high shock acceleration sensors[R]. ADP002693, 1983.

[7] 李玉龙, 郭伟国, 贾德新, 等. 高  $g$  值加速度传感器校准系统的研究[J]. 爆炸与冲击, 1997, 17(1): 90-96.  
Li Yu-long, Guo Wei-guo, Jia De-xin, et al. An equipment for calibrating high shock acceleration sensors[J]. Explosion and Shock Waves, 1997, 17(1): 90-96.

[8] 盛党红. 高  $a$  值加速度传感器标定方法的理论探讨与分析[J]. 无损检测, 1999, 21(12): 544-545.  
Sheng Dang-hong. Theoretical study and analysis on the method for calibrating high a value accelerometers[J]. Nondestructive Testing, 1999, 21(12): 544-545.

- [9] 张学舜,沈瑞琪. 火工品动态着靶模拟仿真技术研究[J]. 火工品, 2003(4):1-4.  
Zhang Xue-shun, Shen Rui-qi. Study on dynamic touch-target analog simulation technique for initiating explosive devices[J]. Initiators and Pyrotechnics, 2003(4):1-4.
- [10] 邓强,吴艳霞,沈瑞琪,等. 波形整形器在火工品高过载试验中的应用[J]. 火工品, 2005(5):12-15.  
Deng Qiang, Wu Yan-xia, Shen Rui-qi, et al. Application of pulse shaper in over-loading test for initiator[J]. Initiators and Pyrotechnics, 2005(5):12-15.
- [11] Forrestal M J, Togami T C, Baker W E, et al. Performance evaluation of accelerometers used for penetration experiments[J]. Experimental Mechanics, 2003,43(1):90-96.
- [12] 庄茁. ABAQUS 非线性有限元分析与应用[M]. 3 版. 北京:清华大学出版社, 2005:49-57.
- [13] 卢剑锋. 冲击载荷作用下材料和结构力学行为有限元模拟[D]. 北京:清华大学, 2003:51-56.
- [14] Johnson G R, Cook W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures[C]// Proceedings of the Seventh International Symposium on Ballistics. Netherlands: Hague, 1983:541-547.
- [15] 陈刚,陈忠富,陶俊林,等. 45 钢动态塑性本构参量与验证[J]. 爆炸与冲击, 2005,25(5):451-456.  
Chen Gang, Chen Zhong-fu, Tao Jun-lin, et al. Investigation and validation on plastic constitutive parameters of 45 steel[J]. Explosion and Shock Waves, 2005,25(5):451-456.
- [16] 邓琼,李玉龙,索涛,等. 火工品高过载动态力学性能测试方法研究[J]. 火工品, 2007(1):28-31.  
Deng Qiong, Li Yu-long, Suo Tao, et al. Test method on dynamic mechanical behavior of initiating explosive device under high acceleration[J]. Initiators and Pyrotechnics, 2007(1):28-31.

## Pulse-shaping techniques of high- $g$ -value acceleration generators<sup>\*</sup>

Zhou Guang-yu<sup>1,2</sup>, Hu Shi-sheng<sup>2</sup>

(1. Shandong Water Polytechnic, Rizhao 276826, Shandong, China;

2. CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China)

**Abstract:** A Hopkinson pressure bar device was utilized in high overloading tests for initiators as a high- $g$ -value acceleration generator. And a finite element model was created to simulate the operation process of producing acceleration pulses. The effects of the bullets and the pulse shapers on the loading pulses were investigated by considering the shapes of the bullets as well as the materials, diameters and thicknesses of the pulse shapers, respectively. To realize the purpose of effectively controlling and improving the loading environment in impact tests for initiators, the required acceleration pulses were obtained. So the investigated results can provide a basis for experimental designations and tests to check the reliability of initiators in impact environments.

**Key words:** solid mechanics; pulse shaping technique; Hopkinson pressure bar; high- $g$ -value acceleration generator

\* Received 8 May 2012; Revised 17 December 2012

Corresponding author: Hu Shi-sheng, sshu@ustc.edu.cn