

文章编号: 1003-1480 (2003) 04-0001-04

火工品动态着靶模拟仿真技术研究

张学舜, 沈瑞琪

(南京理工大学化工学院, 江苏 南京, 210094)

摘 要: 本文采用分离式 Hopkinson 压杆 (SHPB) 技术和装置对火工品动态着靶进行模拟试验, 建立了考核和评估火工品动态性能, 包括安全性和可靠性的方法。并运用 LS-DYNA 进行了计算机模拟仿真, 计算与实测结果吻合。

关键词: 火工品; 动态; 模拟仿真; 试验方法; Hopkinson 压杆

中图分类号: TJ450-6 文献标识码: A

Study on Dynamic Touch-target Analog Simulation Technique for Initiating Explosive Devices

ZHANG Xue-shun, SHEN Rui-qi

(Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094)

Abstract: In this paper, dynamic touch-target analog experimental for initiating explosive devices is studied and the methods of test and evaluation of dynamic performance (security and reliability) are established based on Split Hopkinson Press Bar (SHPB) technology and device. The computer analog simulation is applied based on LS-DYNA finite element program. The result of experiment and computation is anastomotic.

Key words: Initiating explosive device; Dynamic; Analog simulation; Test method; Hopkinson press bar

随着现代战争弹药技术的发展, 对火工品动态安全性、可靠性的要求愈来愈高, 火工品能否满足高过载动态要求, 直接影响弹药使用安全性、作用可靠性和作用效能。因此动态安全性和可靠性考核包含火工品自身的惯性的加载和火工品受其他组件挤压导致的结构失稳两方面。

目前, 国内火工品生产验收中采用马歇特锤击试验机检测火工品过载加速度, 最大 30 000g ($1g=9.81m/s^2$), 而对火工品结构失稳无法考核。目前只有通过实弹射击的综合效应的方法考核火工品的安全性、可靠性, 但试验成本高、风险大、试验数量少, 不能对火工品动态提出量化战技指标要求, 在定型后的生产验收中火工品不再进行动态

考核, 因而无法从根本上保证使用中火工品动态安全性和作用可靠性。火工品的这种考核和检测状况已经成为制约新型弹药研制的技术瓶颈。

本文拟采用的分离式霍布金森压杆 (Split Hopkinson Pressure Bar) 简称“SHPB”技术和装置^[1], 是研究和测量固体材料在高应变率 $10^2\sim 10^4 s^{-1}$ 范围内的力学性能的一项成熟实验技术, 能够形成高加速度环境, 可以对高 g 的加速度传感器进行标定^[2]。它具有技术成熟、结构简单、使用方便、数据处理容易等优点, 已获得广泛应用。研究表明, 火工品动态着靶时应变率应在 $10^2\sim 10^4 s^{-1}$ 范围内, 而这一范围正好是 Hopkinson 压杆装置可以实现的应变率范围。因此, 采用 SHPB 实验技术对火工品

收稿日期: 2003-09-01

作者简介: 张学舜 (1963-), 男, 在读博士, 从事火工品动态模拟仿真研究工作。

动态着靶进行试验模拟仿真，显示火工品及其系统受力状态和运动状态，定量提供火工品动态抗过载的模拟数值，具有较强的适用性。

1 SHPB 应力波加载试验

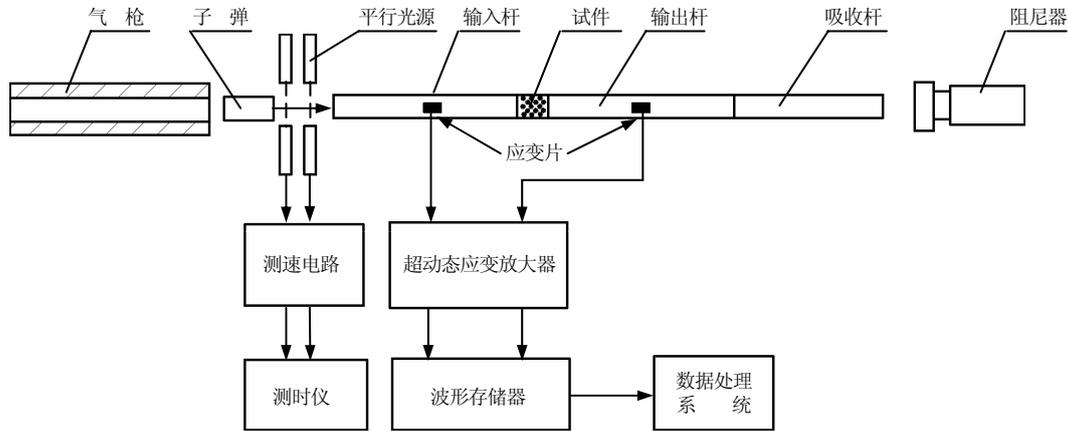


图1 分离式 Hopkinson 应力波加载试验装置原理图

通过高压气枪发射的子弹以一定的速度撞击输入杆，在输入杆中产生入射弹性应力波。此应力波沿输入杆传递到试件上，对试件进行高速加载，试件产生弹塑性变形，并且在输出杆中形成透射弹性波和在输入杆中形成一个反射弹性波。沿输出杆传递的透射波冲量由吸收杆吸收并被带走，再由阻尼器吸收。

根据一维应力波理论及均匀假定：

$$\varepsilon_i + \varepsilon_r = \varepsilon_t \quad (1)$$

$$\varepsilon(t) = -\frac{2C}{l_0} \varepsilon_r \quad (2)$$

$$\varepsilon(t) = -\frac{2C}{l_0} \int_0^t \varepsilon_r dt \quad (3)$$

$$\sigma(t) = \frac{A}{A_0} E \varepsilon_t \quad (4)$$

式中：应力、应变均以压为正， E 、 C 和 A 分别为 Hopkinson 压杆的弹性模量、波速和横截面积， A_0 、 l_0 分别为试件的初始横截面积和初始长度， ε_i 、 ε_r 、 ε_t 分别为入射波、反射波和透射波应变。

由于试件夹在输入杆和输出杆之间，其左右端面的速度 v_1 、 v_2 即为两杆接触端面的质点速度，

$$v_1 = c(\varepsilon_i - \varepsilon_r) \quad (5)$$

$$v_2 = c\varepsilon_t = c(\varepsilon_i + \varepsilon_r) \quad (6)$$

则试件获得平均速度 v 和加速度 a 值：

$$v = \frac{1}{2}(v_1 + v_2) = c\varepsilon_i \quad (7)$$

$$a = c \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (8)$$

$$\text{其中 } c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (9)$$

式中： ε 、 c 、 E 、 ρ 分别是压杆的入射波应变、波速、弹性模量、密度； v 、 a 分别是试件平均速度和加速度。

根据输入杆和输出杆所记录的入射波 $\varepsilon_i(t)$ 、反射波 $\varepsilon_r(t)$ 和透射波 $\varepsilon_t(t)$ 应力或应变值的任意两个，利用一维应力波理论可确定试件的动态力学状态和加载状态。

1.2 试验仪器、设备、装置和试件

(1) 仪器。超动态应变仪，通频带的上限频带 $f_{\text{上}}$ 为 1MHz；测速光电靶，光栅宽度 1.0mm，间距 50mm，测时仪精度为微秒级；信号记录仪，为多通道高速数据采集和分析系统，同时测试时间信号和应变信号，并通过相应分析软件处理记录的信号。

(2) 设备。采用气瓶贮存的高压气体作为发射子弹的动力源，通过与 $\Phi 14.5\text{mm}$ 滑膛枪管连接

的高压室和相应的充气、泄放和控制机构控制子弹的速度在3%的误差范围内。

(3) 装置的指标。Hopkinson 杆材料: LY12 铝杆、合金钢 65Si2MnWA 钢杆; 直径: 14.5mm; 长度: 800mm; 子弹长度: 300mm; 许用撞击速度 v_0 : 20m/s (LY12 铝杆), 50m/s (合金钢钢杆); 电阻应变片: 电阻值 $(120.4 \pm 0.1)\Omega$, 灵敏系数 2.21 ± 0.01 。

(4) 试件。试验采用的试件——火工品组件结构如图 2 所示。火工品座、底片材料 LY12 铝, 直径为 $\Phi 13\text{mm}$, 内径和高度与火工品外径和高度相等。底片厚度为 5.6mm, 火工品自由放入火工品座孔中, 火工品座与底片、底片与压杆之间用凡士林粘接, 轴心对齐。

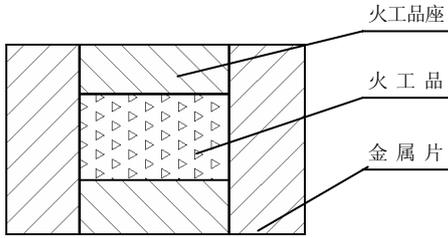


图 2 试件——火工品组件示意图

2 试验结果分析与评定

2.1 试验结果

分离式 Hopkinson 杆为钢杆, 子弹 (300mm) 速度为 14.7m/s。试件为火工品组件—— $\Phi 13\text{mm} \times 5.6\text{mm}$ (铝托+空心 $\Phi 3.84\text{mm}$ 铝火工品座+雷管+铝托)。实测的波形曲线如图 3 所示。按 (2)、(3)、(4) 和 (8) 公式处理得到的试件应力与应变关系、应力与时间关系、应变与时间关系、应变率与时间关系及平均加速度与时间关系分别见图 4~8。反映了试件在冲击下的受力状态和运动状态。

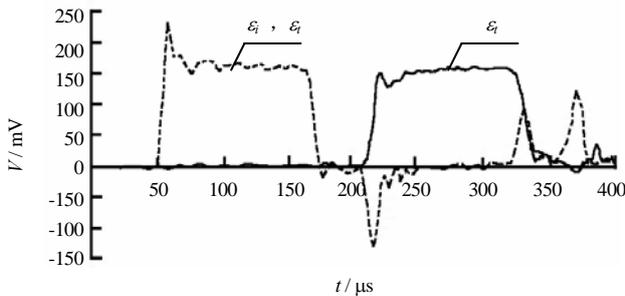


图 3 实测波形

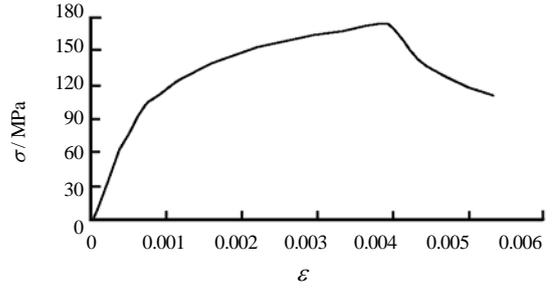


图 4 应力与应变关系

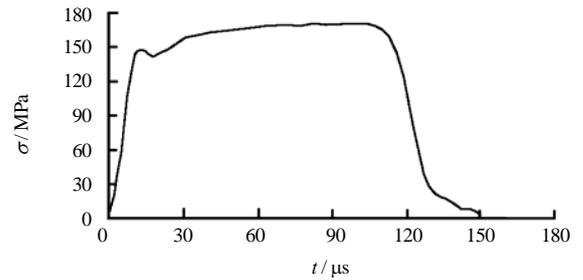


图 5 应力与时间关系

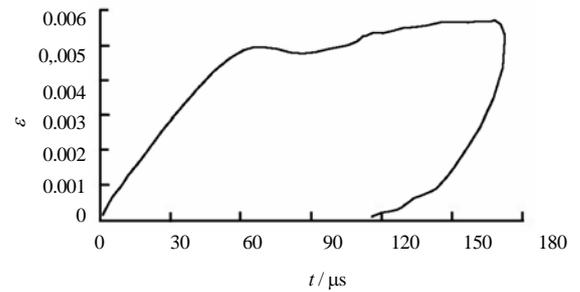


图 6 应变与时间关系

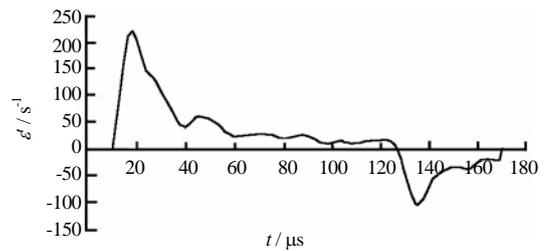


图 7 应变率与时间关系

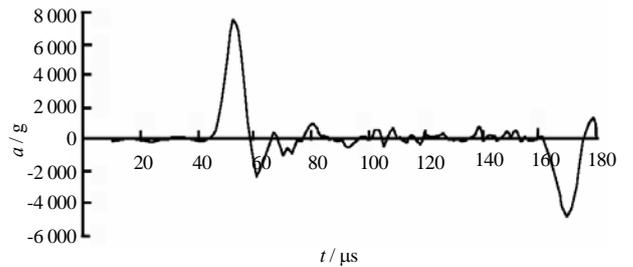


图 8 试件平均加速度与时间关系

按照以上方法, 重复试验可获得在不同子弹速

度冲击下，各物理参量之间的关系及与子弹冲击速度的关系。研究表明，试件最大应力值、过载系数与子弹速度成线性关系。

2.2 结果评定

火工品动态安全性评定：在规定的过载条件下，火工品不应该爆炸或燃烧，否则认为火工品承受动态加载的动态安全性没有达到要求。

火工品动态可靠性评定：在规定的过载条件下，火工品不应该爆炸或燃烧，且从加载试验后的火工品组件中退出的火工品按有关标准或规范测试作用可靠性指标符合要求，否则认为火工品承受动态加载的动态可靠性没有达到要求。

应用该技术和方法，考核和评价了3种制式引

信用针刺雷管的动态安全性和可靠性。

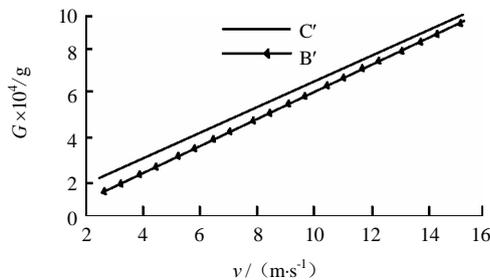
3 数值计算及与试验结果对比

采用大型有限元通用分析软件 ANSYS/LS-DYNA 模拟火工品组件在霍普金森压杆中的动态响应。在保证计算结果精度的前提下，为节省数值计算工作量，将试验中的炮膛、支架及吸收杆忽略，且把火工品组件简化为整体。材料的动态力学性能参数来自于 SHPB 应力波加载实测数据。不同速度下火工品组件加载系数仿真结果与试验结果对比如表 1 所示。

表 1 分离式霍普金森（铝杆）数值计算与试验火工品组件加载系数对比

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
子弹冲击速度 / (m·s ⁻¹)	4.87	5.64	6.03	10.87	11.28	12.20	12.38	12.95	13.16	14.34	15.03	16.17	17.06
仿真加载系数 / 10 ⁴ g	2.5	2.7	3.6	5.8	6.3	6.5	6.6	7.2	7.3	7.2	7.4	9.1	9.7
试验加载系数 / 10 ⁴ g	-	1.2	1.5	4.6	4.9	5.2	5.5	5.2	5.5	6.4	6.4	7.4	7.8

经线性拟和加载系数随速度变化关系如图 9 所示，加载系数——速度曲线仿真与试验结果线性一致。



注：B'表示试验加载系数——速度曲线

C'表示仿真加载系数——速度曲线

图 9 经线性拟和的分离式试验与仿真加载系数——子弹速度曲线

4 结论

在国内首次建立了以 SHPB 为基础的火工品高过载试验方法和火工品过载安全性和可靠性考核和评估方法，不仅能够考核和评价火工品自身的惯性加载，也能够考核和评估火工品与火工品及其组件的结构失稳的安全性和可靠性，结合试验方法考

核了 3 种制式引信用雷管的动态安全性、结构失稳安全性和可靠性。

在国内首次通过计算机模拟仿真的方法对复杂组件中火工品的过载能力进行计算和评估，计算与试验结果吻合。该方法为火工品的动态性能指标的提出和考核提供了依据和试验保障。

参考文献：

- [1] 王礼立, 余同希, 李永池. 冲击动力学进展 [M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 1992.
- [2] Vesta I. Bateman, Fred A. Brown, Neil T. Davie. Use of a Beryllium Hopkinson Bar to characterize a piezoresistive accelerometer in shock environments [J]. Journal of the Institute of Environmental Sciences, 1996.
- [3] 王礼立. 应力波基础 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
- [4] 胡时胜. 霍普金森压杆技术 [J]. 兵器材料科学与工程, 1991, 11, (122): 40~47.
- [5] 胡时胜, 王礼立. 一种用于材料高应变率试验的装置 [J]. 振动与冲击, 1986, (1) (总第 17 期): 40~47.