

文章编号: 1006-9941(2015)02-0178-06

# 基于空气炮和分离式霍普金森压杆的火工品高加速度力学过载模拟试验等效方法研究

张蕊<sup>1</sup>,付东晓<sup>1</sup>,都振华<sup>1</sup>,童书辉<sup>2</sup>,杜军<sup>2</sup>,任斌<sup>2</sup>,李芳<sup>1</sup>,刘虎<sup>1</sup>

(1. 陕西应用物理化学研究所, 陕西 西安 710061; 2. 海军装备部, 北京 100841)

**摘要:** 针对分离式霍普金森压杆(SHPB)试验无法用加速度描述其对火工品的影响问题,利用空气炮和SHPB试验后所得的半导体桥火工品轴向应变、作用时间和芯片发火能量等结果,将空气炮试验的加速度等效至SHPB试验的子弹速度上,获得了SHPB试验的子弹速度与加速度的等效方程。建立了基于SHPB试验的火工品高加速度力学过载模拟试验方法。

**关键词:** 火工品; 力学过载; 试验方法; 霍普金森压杆(SHPB)

**中图分类号:** TJ55; O34

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.02.014

## 1 引言

火工品是武器装备的重要组成部分,广泛应用于武器弹药系统。由于火工品使用的火工药剂是最敏感的化学能源,其机械敏感性高,在撞击、摩擦、过载等作用下可能导致火工品提前发火或失效,从而导致整个武器系统的意外作用或失效。尤其是在侵彻弹药中,装载火工品的弹药可能未侵彻至需要的深度时,火工品由于承受的过载太高而提前发火,或火工品的换能部件在侵彻过程中失效,导致弹药无法达到作战目的。因此,对火工品进行过载试验,测试火工品的抗过载能力,研究侵彻过载过程中火工品的性能变化规律具有重要意义。

现有技术中对火工品进行过载试验可以采用实弹射击试验、马歇特锤击试验、自由式霍普金森压杆(Free Hopkinson Pressure Bar, FHPB)试验、空气炮等试验方法。其中,实弹射击是评价过载安全性和可靠性的有效方法,但试验成本高,不适合用作产品的常规过载能力评估和验收。而马歇特锤击试验最大可以进行过载加速度为 $3 \times 10^4 \text{ g}$ 的试验<sup>[1]</sup>,FHPB试验最大可以进行加载时间 $100 \mu\text{s}$ ,过载加速度为 $10 \times 10^4 \text{ g}$ 的试验<sup>[2]</sup>,空气炮试验最大可以进行加载时间 $100 \mu\text{s}$ ,过

载加速度为 $15 \times 10^4 \text{ g}$ 的试验<sup>[3]</sup>,现有技术中,没有能够对火工品更大过载加速度进行试验的常规过载能力评估试验方法。

分离式霍普金森压杆(Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB)通常用作测量材料的动态力学性能的主要手段之一<sup>[4]</sup>,张学舜等<sup>[5]</sup>应用SHPB装置评估火工品动态结构失稳安全性和可靠性,提出了SHPB不同子弹速度下,火工品动态安全性所受过载系数和应力波强度下的临界值。因此SHPB作用在火工品上是由过载系数和应力波强度2个变量描述的,不能用单一的加速度来描述SHPB试验后的火工品状态。阻碍了SHPB在火工品力学过载试验上的应用。

本研究利用半导体桥(SCB)火工品在空气炮试验和SHPB两种力学过载试验后宏观性能的变化规律,例如轴向应变、作用时间和发火能量的规律变化特性,建立了基于空气炮和SHPB的高加速度过载模拟试验方法和等效关系,利用该方法和等效关系可以利用SHPB试验获得等效加速度下火工品的抗过载能力及其性能变化情况。

## 2 试验

### 2.1 试验样品

试验样品为半导体桥火工品,其尺寸为 $\Phi 7 \text{ mm} \times 9.7 \text{ mm}$ 。半导体桥芯片尺寸为 $1.6 \text{ mm} \times 1.3 \text{ mm} \times 0.45 \text{ mm}$ ,其芯片电阻 $0.9 \sim 1.15 \Omega$ ,桥区厚度 $2 \mu\text{m}$ 。图1为半导体桥火工品样品。

收稿日期: 2013-10-31; 修回日期: 2014-04-01

作者简介: 张蕊(1968-),女,研究员,主要从事火工品安全性可靠性技术研究。e-mail: zhurui2@sohu.com

通信联系人: 付东晓(1981-),男,工程师,主要从事火工品安全性可靠性技术研究。e-mail: coolfdx@163.com

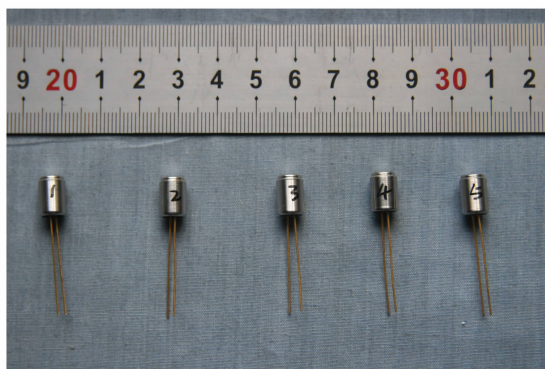


图1 半导体桥火工品样品

Fig.1 Sample of semiconductor bridge(SCB) pyrotechnics

## 2.2 试验方法

### (1) 空气炮试验

空气炮试验是基于空气炮原理的动态过载力学环境模拟试验方法,此试验方法的原理为空气炮发射装载被测火工品样品的子弹、子弹与炮口前方的靶板碰撞形成冲击力学环境,火工品受到冲击力学环境的影响发生相应的变形或位移,通过分析火工品试验后的样品损伤程度、输入输出性能的变化和失效/发火事件数,分析火工品样品耐受冲击过载的能力、评估火工品样品的力学过载安全性和可靠性,检验火工品的过载加速度指标。本试验采用铜柱测压法作为子弹与靶板碰撞试验的过载加速度测试方法。碰撞试验中,铜柱在撞击杆作用下发生塑性变形,根据铜柱压后高查找压力表可得到撞击压力,根据撞击杆质量、测试得到的撞击压力并基于牛顿第二定律,进而求得试件的过载加速度。空气炮子弹内火工品样品的装配方式如图2所示。

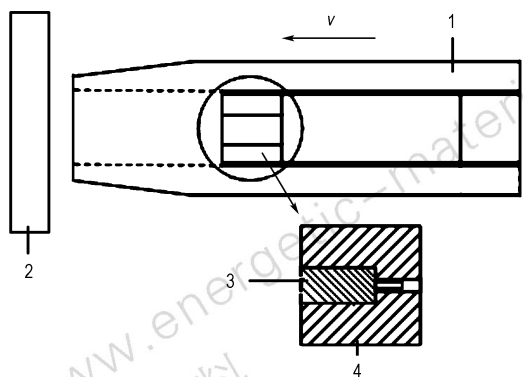


图2 空气炮试验中子弹与半导体桥火工品装配示意图

1—子弹, 2—靶板, 3—半导体桥火工品, 4—正轴向加载

Fig.2 Assembly schematic of bullets and SCB pyrotechnics in air cannon test

1—bullets, 2—target plate, 3—SCB pyrotechnics, 4—positive axis direction of the load

### (2) SHPB 试验

SHPB 试验是采用 Hopkinson 压杆形成的应力波对火工品试样进行应力波加载,形成力学过载环境<sup>[6-8]</sup>,火工品受到应力波作用发生相应损伤。火工品试样放置在 SHPB 的输入杆与输出杆之间,火工品脚线部分插入垫块,垫块的材料与输入杆输出杆材料相同,装配方式如图3所示。

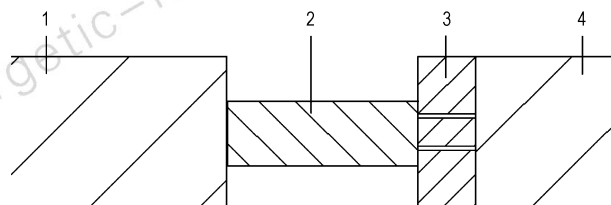


图3 SHPB 与半导体桥火工品装配方式示意图

1—输入杆, 2—半导体桥火工品, 3—垫块, 4—输出杆

Fig.3 Assembly schematic of SHPB and SCB pyrotechnics

1—input bar, 2—SCB pyrotechnics, 3—pad, 4—output bar

### (3) 火工品轴向应变

采用游标卡尺对试验前的火工品长度进行轴向长度测量,测量值为  $L_1$ ,试验后轴向长度为  $L_2$ ,火工品轴向应变为  $100 \times (L_1 - L_2) / L_1 (\%)$ 。

### (4) 作用时间

将火工品从输入端接受规定的外部能量刺激到燃烧或爆炸所用的时间定义为火工品的作用时间。对半导体桥火工品样品用  $(27 \pm 1) \text{ V}$ 、 $(28 \pm 2.8) \mu\text{F}$  充电电容器放电一次,并用 GJB5309. 21-2004 规定的方法测量半导体桥火工品的作用时间,单位为  $\mu\text{s}$ 。

### (5) 芯片发火能量

半导体桥芯片爆发过程中所消耗的电能。用示波器对发火过程中的动态发火电压和动态发火电流进行测量,将测得的电压和电流时间相乘可得功率 ( $P$ ) 的时间曲线,通过积分即可得输入半导体桥芯片上的电能 ( $E$ ),单位为  $\text{mJ}$ 。

## 2.3 试验结果及分析

对空气炮试验后的火工品样品进行轴向应变、作用时间和芯片发火能量进行测试,结果见表1。根据表1中的数据对其进行拟合,结果如图4a,图5a,图6a所示。

对 SHPB 试验后的火工品样品进行轴向应变、作用时间和芯片发火能量进行测试,测试结果见表2。根据表2中的数据对其进行拟合,拟合结果见图4b,图5b,图6b所示。

表 1 空气炮过载后 SCB 火工品的试验结果

Table 1 Results of SCB pyrotechnics after overload by air cannon

acceleration / $\times 10^4$ g	strain / %	time to reaction / $\mu$ s	chip firing energy / mJ
4.55	1.21	13.21	1.116
5.88	1.11	12.74	1.091
7.21	2.21	12.34	1.083
9.87	2.72	11.58	1.008
10.54	4.05	11.47	1.007
12.53	4.42	10.83	0.992
14.19	5.06	10.44	0.962

表 2 分离式 Hopkinson 压杆过载后 SCB 火工品的试验结果

Table 2 Results of SCB pyrotechnics after overload by SHPB

bullet speed / $m \cdot s^{-1}$	strain / %	time to reaction / $\mu$ s	chip firing energy / mJ
2.5	1.84	12.60	1.084
5.0	6.12	10.74	0.944
7.5	7.96	8.70	0.910
9.8	10.11	8.54	0.913
11.5	11.57	8.66	0.939

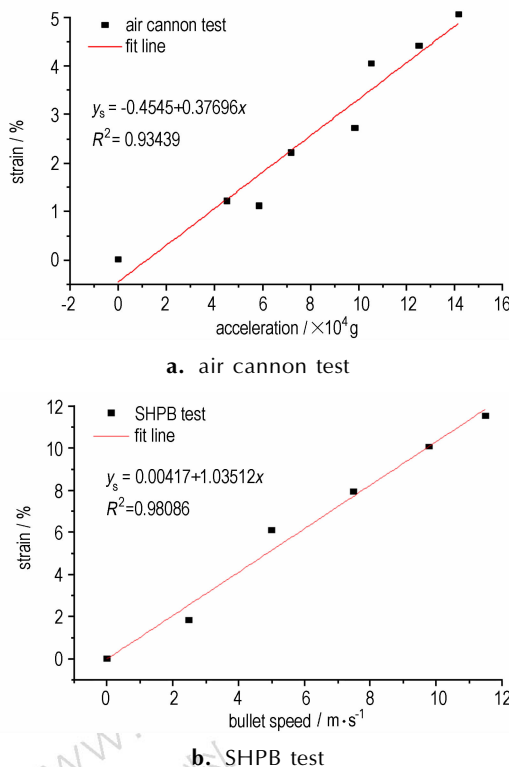


图 4 两种试验的应变拟合曲线

Fig. 4 Fitting curves of Strain obtained by two tests

(1) 轴向应变变化情况

典型半导体桥火工品头部采用收口设计, 在空气炮的试验夹具中头部收口处会发生轴向压缩, 空气炮

试验与 SHPB 试验后的现象是一致的。同时 2 种试验 SCB 火工品的轴向应变变化规律如图 4 所示。随着过载加速度或子弹速度的增加, 轴向应变呈线性增大, 线性拟合公式如图 4 中所示。

(2) 作用时间及发火能量的变化情况

在 2 种过载试验中, SCB 火工品中的药柱被压缩, 使药柱的密度变大, 同时药柱与换能元的接触更为紧密, 此时半导体桥火工品性能变化服从装药密度变化规律, 即随着密度的增加作用时间逐渐减少, 发火能量逐渐降低, 当装药密度达到一定值后, 由于半导体桥芯片的发火机理由等离子体起爆转换为热机理起爆, 从而导致作用时间变长, 发火能量变大。所以当半导体桥火工品轴向应变达到一定量值后, 其性能变化主要受应变的影响。作用时间和发火能量变化规律及拟合曲线方程如图 5 和图 6 所示。由图 5a 和图 6a 中可见空气炮试验中 SCB 火工品的作用时间和发火能量呈现降低趋势, 与上述规律不相符, 这是因为空气炮试验的最大过载加速度还未达到 SCB 火工品作用时间及发火能量发生转变的临界过载加速度。而图 5b 和图 6b 中, 由于其应变达到了较高的值 (10.11% 及以上), 作用时间和发火能量达到了临界变化最小值后, 开始有变大的趋势。

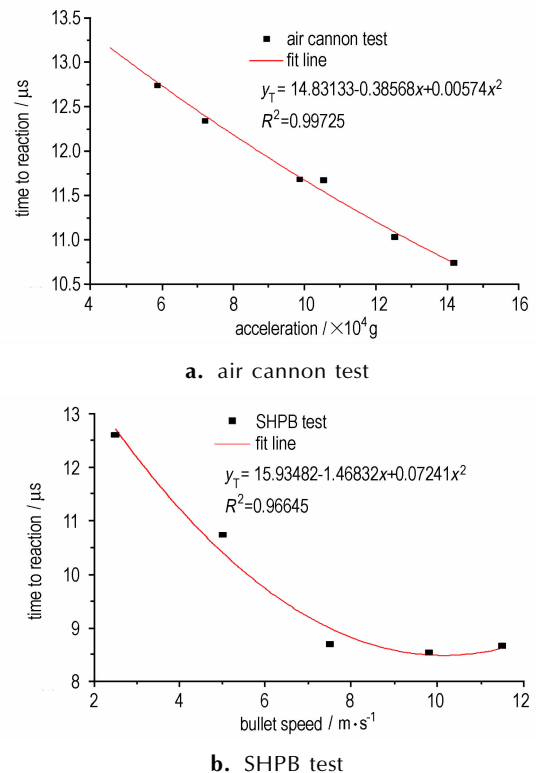
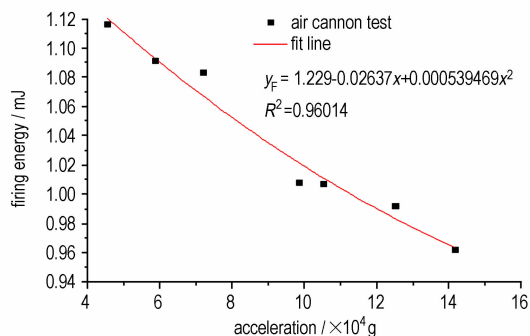
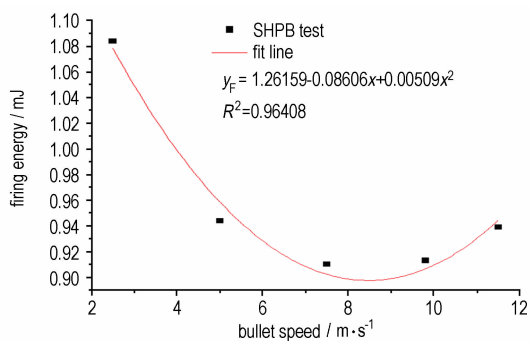


图 5 两种试验的作用时间拟合曲线

Fig. 5 Fitting curves of time-to-reaction obtained by two tests



a. air cannon test



b. SHPB test

图6 两种试验的发射能量拟合曲线

Fig.6 Fitting curves of chip firing energy obtained by two tests

### 2.4 空气炮试验和 SHPB 试验的等效

空气炮试验和 SHPB 试验对火工品的影响通常表现为火工品的轴向压缩、作用时间和发射能量等参数发生变化。空气炮试验可以通过弹载加速度传感器或计算的方法直接获得加速度。而 SHPB 试验中,除了加速度对火工品发生作用外,还有应力波也对对火工品同样产生影响,因此,SHPB 试验中无法单纯的用加速度来描述。本研究利用空气炮试验和 SHPB 试验中火工品对应性能的变化,将 SHPB 试验中的子弹速度等效为空气炮试验中的加速度,从而得到空气炮不能达到加速度下的火工品的抗力学性能。

#### (1) 加速度-轴向应变的等效

空气炮加速度-应变拟合线性方程如图 4a 所示,由图 4a 中公式可得:

$$x = (y_s + 0.4545) / 0.37696 \quad (1)$$

式中,  $x$  为加速度,  $g$ ;  $y_s$  为轴向应变, %。

将 SHPB 试验后的 SCB 火工品的轴向应变数据(表 2),代入方程(1)可得等效加速度。图 7 给出了 SCB 火工品轴向应变与 SHPB 试验等效加速度的拟合曲线。

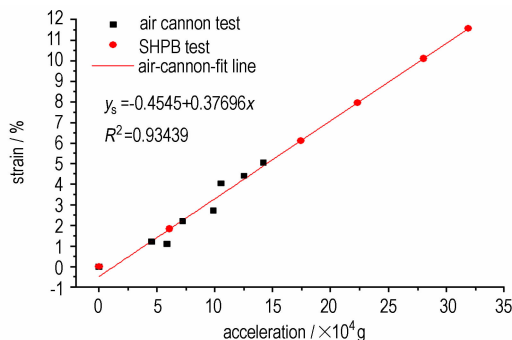


图7 加速度-应变曲线等效结果

Fig.7 Equivalent results by acceleration-strain fitting lines

#### (2) 加速度-作用时间等效

空气炮加速度-作用时间拟合非线性方程如图 5a 所示,由图 5a 公式可得:

$$x = 0.5 \times (-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}) / a \quad (2)$$

式中,  $x$  为加速度  $g$ , 式(2)中取图 5a 公式中参数,即  $a = 0.00574$ ,  $b = -0.38568$ ,  $c = 14.83133 - d$ ,  $d$  为 SHPB 试验得到的作用时间,  $\mu s$ (表 2)。图 8 给出了 SCB 火工品作用时间与 SHPB 试验等效加速度的拟合曲线。

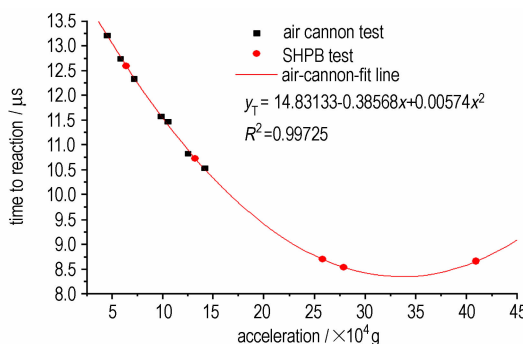


图8 加速度-作用时间曲线等效结果

Fig.8 Equivalent results by acceleration-time to reaction fitting lines

#### (3) 加速度-芯片发射能量等效

空气炮加速度-芯片发射能量拟合非线性方程如图 6a 所示,由图 6a 公式可得:

$$x = 0.5 \times (-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}) / a \quad (3)$$

式中,  $x$  为加速度,  $g$ , 其中  $a = 0.000539469$ ,  $b = -0.02637$ ,  $c = 1.229 - d$ ,  $d$  为 SHPB 试验得到的芯片发射能量,  $mJ$ (表 2)。图 9 给出了 SCB 火工品发射能量与 SHPB 试验等效加速度的拟合曲线。图 8 和图 9 中的拟合结果表明,当过载加速度达到  $24 \times 10^4 g$  以上时,SCB 火工品的作用时间和发射能量才出现拐点,这



也是在空气炮试验中图 5a 和图 6a 中的规律未呈现抛物线规律的原因。

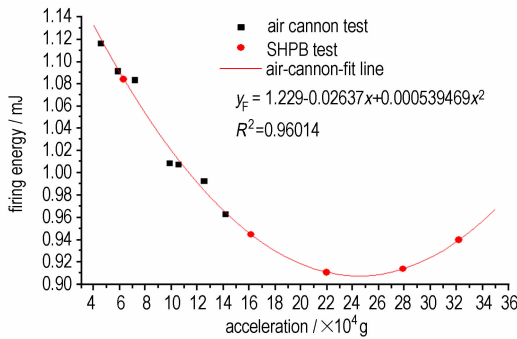


图 9 加速度-发火能量曲线等效结果  
Fig.9 Equivalent results by acceleration- firing energy fitting lines

(4) 等效数据综合分析

利用 SHPB 试验中 SCB 火工品的轴向应变、作用时间和发火能量等试验数据, 分别代入公式(1)、公式(2)和公式(3), 获得的 SHPB 试验不同子弹初始速度对应的等效的加速度见表 3。

表 3 三种参数的等效结果

Table 3 Equivalent results of three kinds of parameters

bullet speed / m · s <sup>-1</sup>	acceleration-strain acceleration / ×10 <sup>4</sup> g	acceleration-time to reaction acceleration / ×10 <sup>4</sup> g	acceleration-firing energy acceleration / ×10 <sup>4</sup> g
2.5	6.087	6.394	6.314
5.0	17.441	13.219	16.131
7.5	22.322	25.817	21.986
9.8	28.026	27.884	27.845
11.5	31.899	40.960	32.173

根据表 3 的结果, 对不同子弹速度下的 3 组等效加速度进行拟合, 拟合结果见图 10。子弹速度-加速度的等效线性方程为:

$$x = -0.58302 + 3.06007v \quad v > 0 \quad (4)$$

式中,  $v$  为子弹速度,  $m \cdot s^{-1}$ ;  $x$  为加速度,  $g$ 。

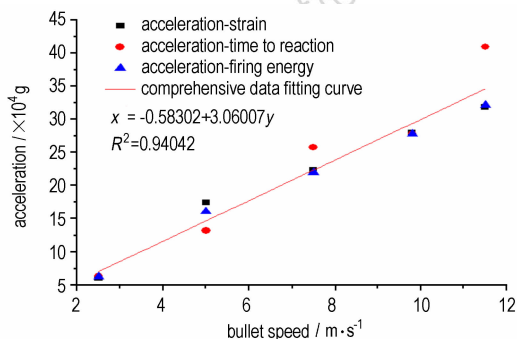


图 10 三种参数的等效结果拟合曲线  
Fig.10 Equivalent fitting curve of three kinds of parameters

由上获得了等效加速度与 SHPB 试验中子弹速度的关系。至此, 利用获得拟合方程(4)即可得到 SHPB 试验不同子弹速度下半导体桥火工品所受到的等效加速度值。

### 3 基于空气炮和 SHPB 试验的火工品高加速度力学过载模拟试验方法的步骤

归纳上述试验, 采用以下步骤即可进行空气炮和 SHPB 试验高  $g$  值加速度等效模拟试验:

步骤 1: 对待测试的火工品进行不同加速度(不少于 5 个)下的空气炮模拟试验。

步骤 2: 对待测试的火工品进行不同子弹初速(不少于 5 个)的 SHPB 试验。

步骤 3: 对空气炮和 SHPB 试验后的火工品进行结构或性能特征参量测试(如, 轴向应变、作用时间或发火能量等)。

步骤 4: 对空气炮模拟试验得出的过载加速度与火工品结构或性能特征参量的对应关系进行曲线拟合, 得到过载加速度-特征参量拟合方程。

步骤 5: 将通过 SHPB 试验得到的特征参量代入过载加速度-特征参量拟合方程, 得到基于特征参量的过载加速度与 SHPB 子弹速度的对应关系。

步骤 6: 对基于各种(一般选择两种及以上)的特征参量过载加速度与 SHPB 子弹速度的对应关系共同进行曲线拟合, 得到 SHPB 子弹速度-过载加速度拟合方程。

步骤 7: 将使用 SHPB 试验得出的子弹速度代入子弹速度-过载加速度拟合方程, 得到等效的过载加速度。

### 4 结论

采用空气炮试验中 SCB 火工品的三种性能参数随过载加速度变化的拟合关系(应变随着加速度变化呈现线性关系, 作用时间和发火能量随着加速度变化呈现抛物线关系), 将 SHPB 试验的结果代入拟合关系式中, 获得过载加速度和 SHPB 试验的初始子弹速度的关系(见表 3 所示), 并综合拟合出等效加速度和子弹初速的表达式( $x = -0.58302 + 3.06007v, v > 0$ ), 初步实现了利用等效加速度描述 SHPB 试验中加速度与应力波对火工品的综合作用, 是利用 SHPB 试验研究加速度对火工品抗力学过载性能的一种有效尝试。

参考文献:

[1] 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&Pyrothchnics*, 2003(4): 1-4.
- [2] Danny R Hayles. DTRA counter WMD technologies fuzing & instrumentation technology overview [C]//54th Annual NDIA Fuze Conference, 2010.
- [3] John T Geaney. Fuze technology integration (FTI) improved 30mm[C]//53rd Annual Fuze Conference, Lake Buena Vista, FL, USA, 19-21 May, 2009.
- [4] 冯明德, 彭艳菊, 刘永强, 等. SHPB 实验技术研究. 地球物理学进展[J]. 2006, 21(1): 273-278.
- FENG Ming-de, PENG Yan-ju, LIY Yong-qiang, et al. Study on SHPB techniqu[J]. *Progress in Geophysic*. 2006, 21(1): 273-278.
- [5] 张学舜, 沈瑞琪, 季正峰. 应用 SHPB 装置评估火工品动态结构失稳安全性和可靠性的研究[C]//第三届全国爆炸力学实验技术学术会议论文集, 中国黄山. 2004: 61-67.
- ZHANG Xue-shun, SHEN Rui-qi, Ji Zheng-feng. Study on evaluating methods of security and reliability of initiators induced by dynamic structure displacement with SHPB apparatus[C]//Proceeding of the 3<sup>th</sup> National Conference on Experimental Techniques in Mechanics of Explosion, 2004: 61-67.
- [6] 邓琼, 叶婷, 苗应刚. 基于 Hopkinson 压杆实验技术研究火工品及含能材料的抗高过载能力[J]. 火炸药学报, 2009, 32(6): 66-70.
- DENG Qiong, YE Ting, MIAO Ying-gang. Study on overloading-resistibility of initiator and energetic materials based on the technique of Hopkinson pressure bar[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2009, 32(6): 66-70.
- [7] 刘虎, 张蕊, 付东晓, 等. 半导体桥火工品力学过载下的结构失效研究[J]. 火工品, 2012(1): 30-33.
- LIU Hu, ZHANG Rui, FU Dong-xiao, et al. Study on structure failure of SCB initiator under high overload[J]. *Initiators & Pyrothchnics*, 2012(1): 30-33.
- [8] 张周梅, 王培勇, 申依林, 等. 基于过载冲击下的针刺延期火工品性能. 含能材料[J]. 2013, 21(5): 660-663.
- ZHANG Zhou-mei, WANG Pei-yong, SHEN Yi-lin, et al. Performance of stab delay initiating device under overload shock[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2013, 21(5): 660-663.

## Equivalent Overload Simulation Test Method of High Acceleration Mechanics for Pyrotechnics Based on Air Cannon and Split Hopkinson Pressure Bar

ZHANG Rui<sup>1</sup>, FU Dong-xiao<sup>1</sup>, DU Zhen-hua<sup>1</sup>, TONG Shu-hui<sup>2</sup>, DU Jun<sup>2</sup>, REN Bin<sup>2</sup>, LI Fang<sup>1</sup>, LIU Hu<sup>1</sup>

(1. Shaanxi Applied Physics-Chemistry Research Institute, Xi'an 710061, China; 2. Equipment Department of PLA Navy, Beijing 100841, China)

**Abstract:** Since the split Hopkinson pressure bar (SHPB) test can not describe the effect problem on pyrotechnics using acceleration, an equivalent equation of bullet speed and acceleration of SHPB test was obtained using results of SCB pyrotechnics from by air cannon and SHPB tests, such as axial strain, time to reaction, chip firing energy etc and taking that the acceleration of air cannon test is equivalent to the bullet speed of the SHPB test. An overload acceleration mechanics simulation test method of pyrotechnics for SHPB test is established finally.

**Key words:** pyrotechnics; mechanical overload; test method; Hopkinson pressure bar (SHPB)

**CLC number:** TJ55; O34

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.02.014