

文章编号: 1006-9941(2012)04-0432-05

## 三种起爆药抗高加速度过载能力及受力模型

李钊鑫, 盛涤伦, 朱雅红, 杨斌, 陈利魁, 蒲彦利, 李俊

(陕西应用物理化学研究所, 陕西 西安 710061)

**摘要:** 采用霍普金森杆装置研究了叠氮化铅(LA)、斯蒂芬酸铅(LTNR)、高氯酸·四氨·双(5-硝基四唑)合钴(Ⅲ)(BNCP)三种起爆药抗高加速度过载的能力,提出了50 MPa压制起爆药柱加速度过载下的受力模型。研究表明,LA、BNCP、LTNR药柱抗加速度过载的临界值分别为5000, 5000, 10000 g,起爆药药柱先经过短历时的弹性变形后发生脆性断裂,整体具有弹脆性的特征。

**关键词:** 军事化学与烟火技术; 起爆药; 高加速度过载; 分离式霍普金森压杆; 受力模型

中图分类号: TJ55; TQ560

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2012.04.011

### 1 引言

弹药发射和侵彻过程中需经过数万到十几万重力加速度( $g$ )的加速度过载作用,这对引信中火工药剂的影响不可忽视,因而需开展火工品药剂动态载荷下的性能研究。对含能材料动态载荷下的性能,多集中研究炸药(尤其PBX炸药)及其替代物的动态拉伸及压缩行为、本构关系、损伤行为等<sup>[1-4]</sup>。这类炸药添加了黏结剂、增塑剂等辅助材料,具有良好的粘弹性特征、物理安定性、易成型等便于研究。关于火工药剂,学者曾对部分延期药、烟火药进行过高加速度过载下安全性、失效机理和抗过载能力的探索研究<sup>[5-7]</sup>,这也是基于了研究安全方便的特点。起爆药敏感性高、且成型后的力学性能差,国内刚研究了叠氮化铅高过载下的响应特性<sup>[8]</sup>,国外相关研究报道也较少。起爆药能否经受住高加速度过载的力学冲击、装药的受力状态会发生怎样的变化,是提高过载环境下火工品安全可靠性的问题,本研究从本征抗过载能力和受力历程两方面对此进行了讨论。

### 2 实验部分

#### 2.1 实验装置

马歇特锤击、落锤撞击等加速度模拟试验只能反映加载峰值,无法测控加载历程及受力状态,而霍普金

森杆可实现高 $g$ 值-宽时间范围的加速度环境,且连续可调。因此,本研究采用分离式霍普金森杆(SHPB)模拟高加速度过载环境,子弹、输入杆、输出杆为LY-12铝材、直径 $\Phi 12.0$  mm、长度分别为400, 1500, 1000 mm;采用组合整形器将入射脉冲延长到150  $\mu s$ 以上。

#### 2.2 实验样品

羧甲基纤维叠氮化铅(CMC-LA)、三硝基间苯二酚铅(LTNR)、高氯酸·四氨·双(5-硝基四唑)合钴(Ⅲ)BNCP,装药压力50 MPa,试样尺寸 $\Phi 6$  mm  $\times$  1.2 mm,见图1。

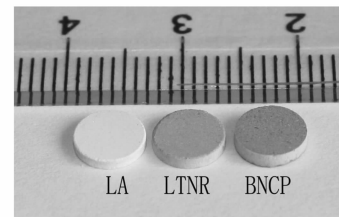


图1 三种起爆药的实验样品

Fig.1 Sample of three primary explosives

#### 2.3 实验方法

起爆药试样置于SHPB输入杆与输出杆之间,接触面润滑。以不同气压驱动子弹撞入射杆,并进行数次平行实验。三种起爆药在SHPB装置0.04~0.07 MPa加载气压下的实验结果见表1。

由表1看出,起爆药在某加载气压以下不爆炸,超过某一加载强度后(称为“最高加载气压”)则全部发生爆炸,在这之间则为爆与不爆的交叉状态。本研究

收稿日期: 2011-08-08; 修回日期: 2012-01-15

作者简介: 李钊鑫(1984-),男,助理工程师,主要从事火工药剂过  
载性能研究。e-mail: afulov@163.com

从安全性角度选取略低于该“最高加载气压”的值作为起爆药的临界加载气压。因此, SHPB 装置条件下 LA、BNCP、LTNR 的临界加载气压分别为 0.55, 0.045, 0.065 MPa, 这将于下文继续讨论。

表 1 三种起爆药 SHPB 加载下的响应状态

Table 1 Response of primary after SHPB loading

sample	loading pressure /MPa	explosion times	non-explosion times	total
LA	0.040	0	2	2
	0.045	0	3	3
	0.050	3	1	4
	0.055	1	2	3
	0.060	3	0	3
BNCP	0.040	0	2	2
	0.045	1	3	4
	0.050	3	0	3
	0.060	2	0	2
LTNR	0.050	0	2	2
	0.060	0	2	2
	0.070	3	0	3

### 3 结果与讨论

#### 3.1 有效加载时间的判定

图 2 为起爆药发生爆炸时入射波与透射波的相对位置, 由图 2 可以发现, 透射波上爆炸峰的位置要比入射波上升沿顶点的位置提前, 说明在入射波结束加载之前试样就已经发生了不可逆的变化, 这表明入射波并不是全部有效地作用在试样上。因此必须判定入射波对起爆药的有效加载时间。

本研究中入射波为近似三角形, 理论上可视其上升沿为直线型。在此条件下, 若透射波某一阶段也具有了近似的线性趋势, 则表示两导波杆已经接触, 试样在两杆间消失、加载过程结束。据此分析, 坐标原点与透射波快速上升段起点(切点)间的时间段内试样受到了有效加载, 将这一时间反推到入射波上则为入射波对试样的有效加载时间, 这也能判定入射波对未爆炸试样的有效加载时间。图 3 所示即为 SHPB 条件下 BNCP 在临界加载气压 0.045 MPa 下未爆炸试样的有效加载时间。由图 3 可以判定, SHPB 临界加载条件下 BNCP 起爆药的有效加载时间为 114 μs。同理, 根据采集到的波形, LA、LTNR 在各自临界加载气压(0.55, 0.065 MPa)下有效加载时间分别为 89, 76 μs。

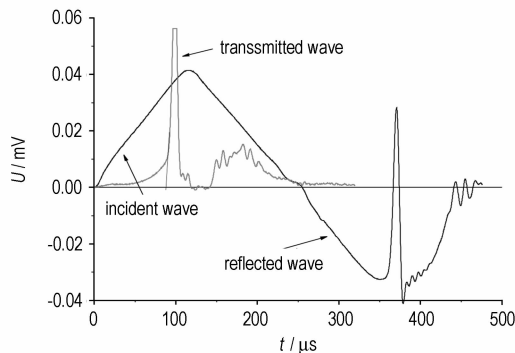


图 2 BNCP 爆炸峰与入射波的相对位置

Fig. 2 Relative position of explosion peak and incident wave of BNCP

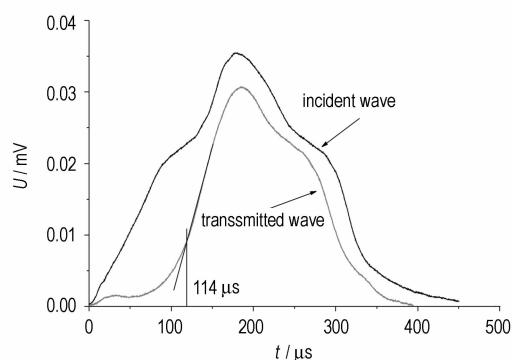


图 3 BNCP 试样的有效加载时间

Fig. 3 Virtual loading time of BNCP at 0.045 MPa

#### 3.2 起爆药本征抗过载能力

SHPB 的应变波(ε)与加速度(a)关系如下<sup>[5]</sup>:

$$a = c \frac{d\varepsilon_i}{dt} \quad (1)$$

式中, ε<sub>i</sub> 为入射应变波, c 为杆中应力波波速, t 为时间。

根据式(1), 结合实际加载条件下试样的有效加载时间, 三种起爆药各自临界加载气压下对应的加速度曲线如图 4~图 6 所示, "1"、"0" 表示爆和不爆炸。

图 4~图 6 分别显示了 LA、BNCP、LTNR 抗加速度过载的临界值。结合前面确定的三种起爆药在各自 SHPB 临界载荷条件下的有效加载时间(分别为 89, 114, 76 μs), 可以得出三种起爆药在各自有效加载时间内的本征抗过载能力。从图 4 看出, LA 在临界加载条件下的有效加载时间为 89 μs, 该时间内使 LA 爆炸和不爆炸的加速度平均值都在 5000 g 附近。同理, 由图 5 和图 6 可得出, BNCP 在临界加载条件下的有效加载时间为 114 μs, 其临界加速度均值为 4000 g; LTNR 在临界加载条件下的有效加载时间为 76 μs, 其临界加速度均值为 10000 g。

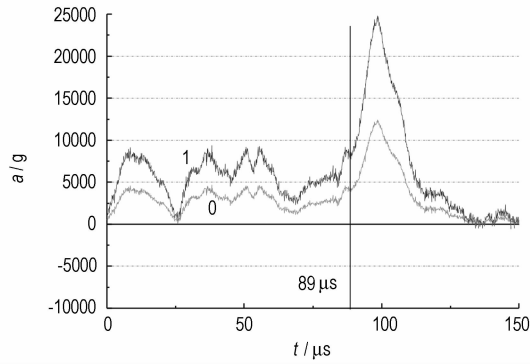


图4 LA 临界加速度曲线

Fig. 4 Critical acceleration curve of LA

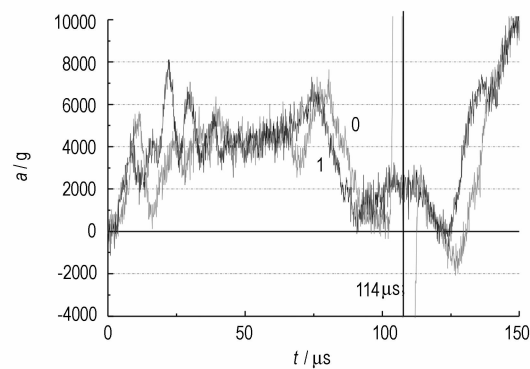


图5 BNCP 临界加速度曲线

Fig. 5 Critical acceleration curve of BNCP

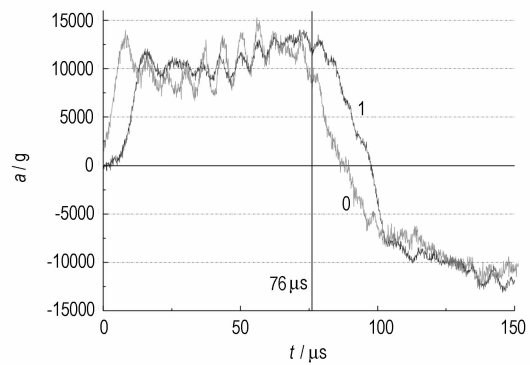


图6 LTNR 临界加速度曲线

Fig. 6 Critical acceleration curve of LTNR

### 3.3 起爆药加速度过载下的受力历程

SHPB 加载中的典型波形及应力均匀性随时间的变化如图 7、图 8 所示。

研究认为,当试样两端面应力差与两端面的平均应力之比  $\delta(t) \leq 5\%$  时可认为试样测试过程中达到了应力均匀要求<sup>[9]</sup>。图 8 表明,加载  $5 \mu\text{s}$  以后  $\delta(t) \leq 5\%$ , 试样中的应力分布趋于均匀。

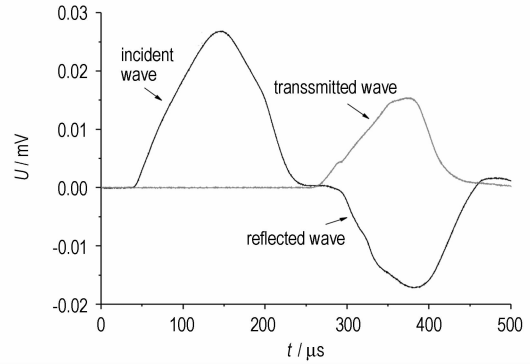


图7 SHPB 实验中的三种典型波形

Fig. 7 Three waves obtained by SHPB

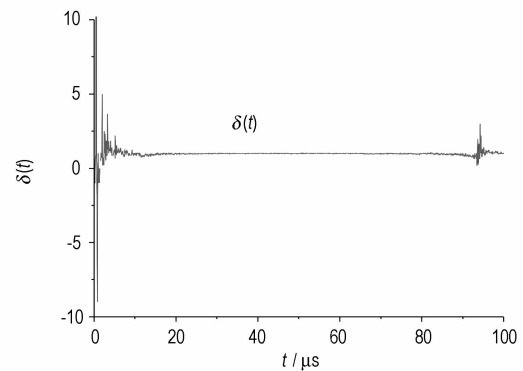


图8 试样的应力均匀性

Fig. 8 Stress uniformity of sample

由一波法和三波法<sup>[10]</sup> 计算试样应力的公式为:

$$\sigma = E \frac{A}{A_s} \varepsilon_t = E \frac{A}{A_s} \frac{\varepsilon_i + \varepsilon_r + \varepsilon_t}{2} \quad (2)$$

式中,  $E$ 、 $A$  是压杆弹性模量和截面积, 取  $E = 70 \text{ GPa}$  (铝杆),  $A_s$  试样截面积。  $\varepsilon_i$ 、 $\varepsilon_r$ 、 $\varepsilon_t$  分别是入射、反射和透射应变。

为便于比较,取相同加载条件下 LA、BNCP、LTNR 未爆试样的入射波、透射波和反射波,计算得到三种起爆药试样内部应力的变化曲线如图 9 所示。

由图 9(a) 看出,  $0 \sim 26 \mu\text{s}$  LA 内部应力成线性上升到  $200 \text{ MPa}$ ,  $26 \sim 60 \mu\text{s}$  应力略微下降后缓慢升高。图 9(b) BNCP 在  $16 \mu\text{s}$  内应力线性增加到  $150 \text{ MPa}$ , 随后下降到了  $100 \text{ MPa}$  并持续到  $80 \mu\text{s}$ 。图 9(c) LTNR 在  $17 \mu\text{s}$  内应力最高达到  $250 \text{ MPa}$ , 之后下降到  $200 \text{ MPa}$  左右并持续到约  $100 \mu\text{s}$ 。

特别说明的是,图 9 中三条计算曲线后半部分的应力虽然还处于上升过程中,但这只是入射波上升沿的后半部分进入到透射杆中造成了叠加的现象,此时已经超出了有效加载时间而与试样的实际受力无关。

从上述分析可以发现,起爆药加速度过载下的受力历程具有共同特点:(1)开始阶段起爆药试样内部应力呈线性上升,表现出弹性特征,LA、BNCP、LTNR弹性阶段可承受的应力分别为200,150,250 MPa;(2)弹性阶段后试样应力略有降低并维持一段时间。起爆药药柱先经过一个短时的弹性阶段,然后在较长时间内维持应力平稳,药柱发生变形破坏。由此看出,SHPB加载下起爆药药柱的受力呈现出阶段性,这将在下文进一步分析讨论。

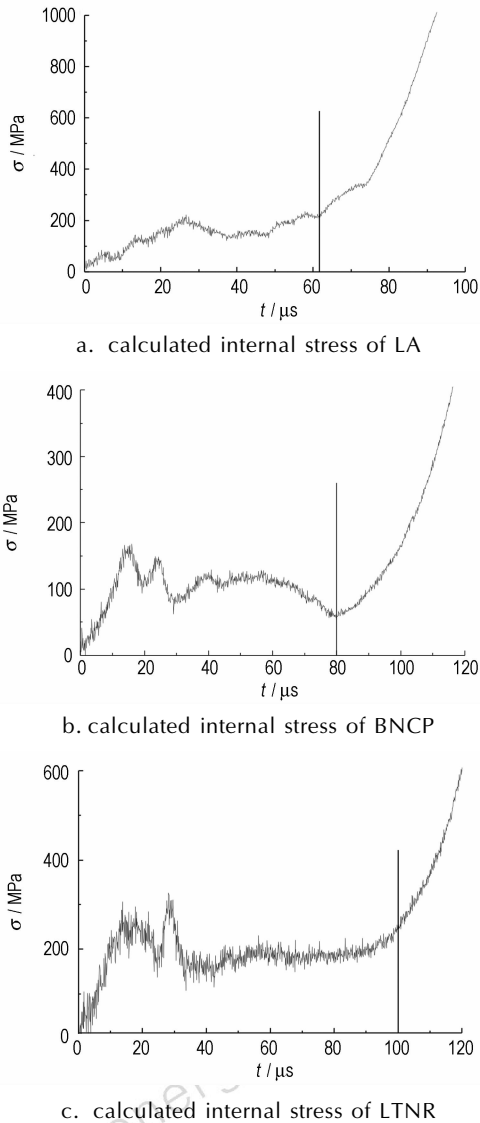


图9 三种起爆药试样的内部应力曲线  
Fig.9 internal stress curve of three primary explosives

#### 4 起爆药药柱受力模型分析

文献[4]推导了SHPB中入射应力波( $\sigma_I$ )与透射应力波( $\sigma_T$ )的关系:

$$\sigma_T = \frac{4A_g A_s \rho_g \rho_s C_g C_s}{(A_g \rho_g C_g + A_s \rho_s C_s)^2} \sigma_I \quad (3)$$

式中, $A_g$ 、 $A_s$ 、 $\rho_g$ 、 $\rho_s$ 、 $C_g$ 、 $C_s$ 分别是金属杆和试样的截面积、密度、弹性波速。

导波杆参数为常数,若试样是弹性体且不考虑变形则式(3)中系数也是常数,即透射波与入射波具有线性关系。根据式(2),透射波可以反映出试样应力的变化,以LA为例对SHPB加载下起爆药的受力模型进行分析,见图10。

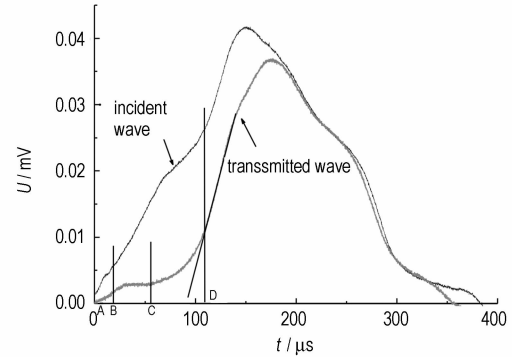


图10 LA试样SHPB加载下的典型波形  
Fig.10 Typical wave of un-exploded LA after SHPB loading

图10中透射波形的变化也具有阶段性。AB段直线上升,结合式(3)可知此时试样应力随入射应力的升高而升高,此阶段试样的力学响应表现出弹性特征。

BC阶段基本平行与时间轴,表示试样应力大致相等。由于入射应力升高,要保持应力相等则必须是试样与压杆的接触面积在增大<sup>[4]</sup>,BC段试样受压缩而边缘膨胀,产生结构变形及破坏,式(3)不再适用。当含能材料的粘结剂含量降低时,高应变率下材料的脆性就更大<sup>[11]</sup>,起爆药不含粘结剂,其破坏过程也具有脆性断裂的特性。

CD段透射波快速上升,因为试样被压缩截面积增大、且试样破碎并开始飞散,所以透射信号增强。CD段以后超出了有效加载时间,入射波对试样的受力分析就失去了意义。

因此,起爆药药柱加速度过载下的受力经历了三个阶段:(1)开始阶段试样内部应力随外部加载线性增加,其力学响应表现出弹性特征,这种弹性特征源于起爆药压装后具有一定的力学强度。(2)随后施加到试样上的应力超过了自身强度,试样发生破裂,被压缩而面积增大,但此时试样内部应力大致不变。(3)加载持续时间60~80  $\mu s$ 后达到了起爆药的受力极限,药剂出现脆性断裂。

起爆药药柱受力模型的三个阶段为: 初始阶段表现出弹性, 其应力随外部加载应力而升高; 超出弹性范围后被压缩变形产生破坏, 但应力大小基本不变; 最后药柱脆性断裂并可能发生爆炸。从开始受力到变形破坏, 起爆药经历了应力增长、应力恒定两个过程, 显示出弹性-脆性特征。分析表明, 实验计算和理论结果一致, 结论可靠。

## 5 结 论

利用霍普金森杆装置对三种典型起爆药进行了高加速度过载研究, 结果表明: SHPB 加载下入射波宽度大于起爆药的实际受加载时间, 判定有效加载时间是进一步研究的前提。LA、BNCP、LTNR 在各自有效加载时间内的抗加速度过载能力分别为 5000, 5000, 10000 g。起爆药药柱的受力模型是: 经过一个短时弹性阶段后, 在较长时间内维持应力平稳同时伴随着变形破坏; LA、BNCP、LTNR 在弹性阶段的最高应力分别为 200, 150, 250 MPa; 弹性阶段后试样应力略微降低并维持一段时间, 整体表现出弹性-脆性特征。

### 参考文献:

- [1] 李明, 张珏, 李敬明, 等. 高聚物粘炸药压缩破坏的细观力学实验研究[J]. 含能材料, 2005, 13(2): 79-83.  
LI Ming, ZHANG Jue, LI Jing-ming, et al. Experimental investigation to the damage localization of PBX mechanical failure at mesoscale[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2005, 13(2): 79-83.
- [2] 张鹏, 赵峰, 白树林. PBX 代用材料动态力学行为和微观结构的实验研究[J]. 高压物理学报, 2007, 21(2): 20-28.  
ZHANG Peng, ZHAO Feng, BA Shu-lin. Experimental study on the microstructures and dynamic behavior of a PBX substitute material[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2007, 21(2): 20-28.
- [3] 周栋, 黄风雷, 姚惠生. PBX 炸药粘弹性损伤本构关系研究[J]. 北京理工大学学报, 2007, 27(11): 945-947.

- ZHOU Dong, HUANG Feng-lei, YAO Hui-sheng. Study on the visco-elastic constitutive model of PBX[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2007, 27(11): 945-947.
- [4] 蓝林钢, 温茂萍, 李明, 等. 被动围压下 PBX 的冲击动力学性能[J]. 火炸药学报, 2011(4): 41-44.  
LAN Lin-gang, WEN Mao-ping, LI Ming, et al. Impact mechanical properties of PBX in passive confined pressure[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2011(4): 41-44.
- [5] 吴艳霞, 沈瑞琪, 叶迎华, 等. 高加速度过载对硼系延期药延期性能的影响[J]. 火工品, 2005(3): 14-17.  
WU Yan-xia, SHEN Rui-qi, YE Ying-hua, et al. Effect of high acceleration load on delay performance of boron type delay charge[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2005(3): 14-17.
- [6] 蔡吉生, 沈瑞琪, 叶迎华, 等. 高加速度过载下延期元件的失效机理研究[J]. 火工品, 2006(5): 8-11.  
CAI Ji-sheng, SHEN Rui-qi, YE Ying-hua, et al. Failure mechanism of delay element loaded with high acceleration[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2006(5): 8-11.
- [7] 霸书红, 焦清介, 任慧. 强闪光烟火药过载能力的实验研究[J]. 含能材料, 2007, 15(2): 162-164.  
BA Shu-hong, JIAO Qing-jie, REN Hui. Experimental study on over-loading of strong flash pyrotechnic composite[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2007, 15(2): 162-164.
- [8] 李钊鑫, 盛涤纶, 杨斌, 等. 叠氮化铅动态载荷下的响应特性研究[J]. 火工品, 2011(1): 26-30.  
LI Zhao-xin, SHENG Di-lun, YANG Bin, et al. The mechanical responses of lead azide under dynamic loading[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2011(1): 26-30.
- [9] 丰平, 张庆明, 陈利, 等. SHPB 测试中斜坡加载对应力均匀性和恒应变率的影响分析[J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(5): 513-516.  
FENG Ping, ZHANG Qing-ming, CHEN Li, et al. Influence of incident pulse of slope on stress uniformity and constant strain rate in SHPB test[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2010, 30(5): 513-516.
- [10] 宋力, 胡时胜. SHPB 数据处理中的二波法与三波法[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(4): 368-373.  
SONG Li, HU Shi-sheng. Two-wave and three-wave method in SHPB data processing[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005, 25(4): 368-373.
- [11] Murri W J, Curran D R, Seaman L. Fracture model for high energy propellant[J]. *Shock Waves in Condensed Matters*, 1981: 460.

## Anti-overload Capability and Mechanical Failure Model of Three Primary Explosives by SHPB

LI Zhao-xin, SHENG Di-lun, ZHU Ya-hong, YANG Bin, CHEN Li-kui, PU Yan-li, LI Jun

(Shaanxi Applied Physics-Chemistry Research Institute, Xi'an 710061, China)

**Abstract:** Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) was used to investigate the intrinsic anti-acceleration capability and mechanical model of Lead Azide (LA), Lead Styphnate (LTNR), Tetraammine bis (5-nitrotetrazolato) Cobalt (III) Perchlorate (BNCP). Results show that, the intrinsic anti-overload capabilities of LA, BNCP and LTNR are 5000 g, 5000 g, 10000 g respectively. Primary explosive charge suffered a short elasticity deformation, and then the brittle fracture occurred.

**Key words:** military chemistry and pyrotechnics; primary explosive; high acceleration over loading; split Hopkinson pressure bar; mechanical model

CLC number: TJ55; TQ560

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2012.04.011