

文章编号: 1006-9941(2012)01-0062-05

## 基于 Hopkinson 杆技术分析典型传爆药的动态力学性能

张子敏, 许碧英, 贾建新, 吕永柱, 李公法

(西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 采用分离式 Hopkinson 压杆技术作为动态加载手段, 对压装型 JH-14C、JHB-1C 传爆药及浇注型 PBXN-110 传爆药进行了冲击加载作用, 利用高速摄影及扫描电子显微技术进行了传爆药的宏观破坏过程及状态观察, 分析了试样的微观损伤模式, 并得到了三种典型传爆药高应变率动态响应下的应力-应变关系曲线, 表明, 压装传爆药和浇注传爆药的动态力学性能存在明显不同。所得结果可作为过载载荷环境下侵彻战斗部设计中比较选择传爆装药的参考依据。

**关键词:** 爆炸力学; 传爆药; 动态力学性能; 应力-应变曲线; 抗过载

**中图分类号:** TJ55; O389

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2012.01.015

### 1 引言

传爆装药作为武器弹药传爆序列的最后一级, 是弹药系统不可缺少的组成部分。因此, 传爆药的性能起着至关重要的作用, 是决定弹药和战斗部整体效能发挥的核心环节之一。随着侵彻武器的迅速发展, 对弹药系统的抗过载性能提出了越来越高的要求, 不同传爆药在冲击载荷作用环境中所表现的力学性能也因此逐渐成为影响武器弹药正常作用的关键之一。韩宝成等<sup>[1]</sup>采用侧向钢凹法考察传爆药柱的起爆效果, 王作山等<sup>[2]</sup>对约束条件下传爆药的输出压力进行了研究, 曹雄等<sup>[3]</sup>为了适应钝感弹药对传爆序列提出的新要求, 根据炸药冲击起爆理论研究了凹球形和半球形两种新结构传爆药柱, 总之, 传爆药的研究重点仍是如何提高其起爆能力并保证安全, 而传爆药在冲击载荷作用下的动态响应规律则尚未见文献报道。

本研究以 JH-14C、JHB-1C 两种压装传爆药及 PBXN-110 浇注传爆药为对象, 参照卢芳云<sup>[4-5]</sup>、王娜<sup>[6]</sup>、邓琼<sup>[7]</sup>、陈鹏万<sup>[8]</sup>等关于 Hopkinson 杆技术及含能材料损伤理论研究的实验方法, 利用分离式 Hopkinson 杆、高速摄影、扫描电子显微等技术综合分析比较了三种典型传爆药在过载冲击环境中的动态力学性能, 为侵彻弹药装药中传爆药的设计选用提供了参考及理论依据。

收稿日期: 2010-11-08; 修回日期: 2011-05-11

作者简介: 张子敏(1981-), 女, 工程师, 主要从事战斗部设计研究。  
e-mail: zhangzimin1981@163.com

### 2 实验部分

#### 2.1 实验装置

本实验使用的动态冲击实验装置为分离式 Hopkinson 压杆装置, 如图 1 所示。实验装置分为机械系统及测试系统两部分, 其中机械系统由用于发射撞击杆(子弹)的高压气枪及控制系统、撞击杆、入射杆和透射杆、试样、接收应力波能量的吸收杆、缓冲器装置平台等主要部件构成; 测试系统由贴在入射杆和透射杆中部的应变片、超动态应变仪、数据采集和分析系统, 以及计算和分析软件等主要硬件和软件构成。

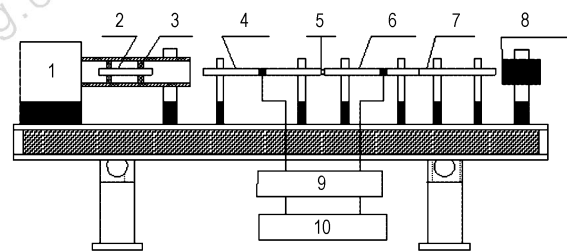


图 1 分离式 Hopkinson 杆实验装置示意图

1—气室, 2—子弹, 3—弹托, 4—入射杆, 5—试样, 6—透射杆, 7—吸收杆, 8—能量吸收块, 9—超动态应变仪, 10—信号采集系统

Fig. 1 Schematic of split Hopkinson pressure bars

1—air chamber, 2—bullet, 3—sabot, 4—incident bar, 5—sample, 6—transmission bar, 7—absorption bar, 8—energy absorption block, 9—super dynamic strain instrument, 10—signal acquisition system

## 2.2 试样的制备及装配

本研究选用由西安近代化学研究所研制并生产的 JH-14C<sup>[9]</sup>、JHB-1C 两种压装型传爆药及依照美国海军配方仿制而成的 PBXN-110 浇注型传爆药为对象进行实验。JH-14C 是一种混合炸药,由 RDX、氟橡胶、石墨组成,呈黑色颗粒状,该药为压装成型,具有优良的传爆性能;JHB-1C 是以 TATB 为基的钝感传爆药,也属于压装型 PBX 类炸药,是国内研制成型的钝感传爆药,外观为黄色颗粒;PBXN-110 传爆药是美国海军研制的一种浇注型传爆药,已被批准用于海军战斗部,主要由 88% HMX 和 12% 粘结剂组成,具有优良的不敏感性能。

试验所用试样材料为低阻抗材料,Hopkinson 杆试验中,实现试样的应力平衡是试验成败的关键。应力平衡决定于应力波在试样中来回传播一次所用的时间,鉴于此,经过反复的试验及对试验结果的分析,将三种传爆药试样制成尺寸为  $\phi 8 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$  的圆柱形薄药片以期实现早期的应力平衡。如图 2 所示。每发实验开始前试样在 Hopkinson 杆上的初始状态如图 3 所示。



a. JH-14C samples



b. JHB-1C samples



c. PBXN-110 samples

图 2 三种传爆药试样

Fig. 2 Test samples of three booster explosives



图 3 冲击前试样在 Hopkinson 杆上的初始状态

Fig. 3 Initial state of sample on the bar before impact

在入射杆上与子弹碰撞端粘贴尺寸为  $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}$  的合金铜片作为波形整形器,用以过滤加载波中由于直接碰撞引起的高频分量,减少波形在大距离传播中的弥散,消除由于高频波的弥散失真引起的实验误差,而且可以使加载波变宽,上升沿变缓,从而实现常应变率加载<sup>[10]</sup>,并通过调节子弹的长度及速度实现对试样的高应变率加载。图 4 是 JH-14C 传爆药试样的 SHPB 实验典型原始波形,图中通道 1 记录入射波和反射波,通道 2 记录透射波,图中材料弱点对应的反射波为一平台,表明在材料破坏之前,已达到应力平衡。

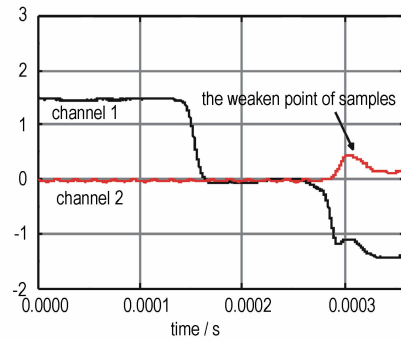


图 4 JH-14C SHPB 原始实验波形

Fig. 4 Original SHPB test curves of JH-14C

## 2.3 实验过程

实验利用 THANTOM V7 高速摄影仪观察记录试样在 Hopkinson 杆上的动态冲击过程,具体如图 5 所示。

由图 5 可以观察到冲击后试样状态表现出明显不同,在压杆分离瞬间两种压装传爆药试样(JH-14C, JHB-1C)粉碎飞散,而浇注型传爆药(PBXN-110)冲击后还存在较完整的药片。

## 3 结果与讨论

### 3.1 三种传爆药的宏观破坏状态

实验对三种传爆药在应变率  $1000 \sim 4000 \text{ s}^{-1}$  范围进行了动态冲击加载,收集应变率在  $4000 \text{ s}^{-1}$  左右的冲击后传爆药试样,如图 6 所示。

由图 6 可见,JH-14C 冲击后破坏为块状(图 6a),JHB-1C 破坏后碎裂程度最为严重(图 6b),基本上为粉末状,PBXN-110 受到冲击加载后基本呈饼状(图 6c)。

### 3.2 三种传爆药的微观损伤模式

利用 JSM5800 扫描电子显微镜(SEM)对不同应变率冲击前后三种传爆药试样进行显微观察比较,图 7 为  $4000 \text{ s}^{-1}$  左右应变率冲击作用前后三种传爆药试

样的微观形貌。

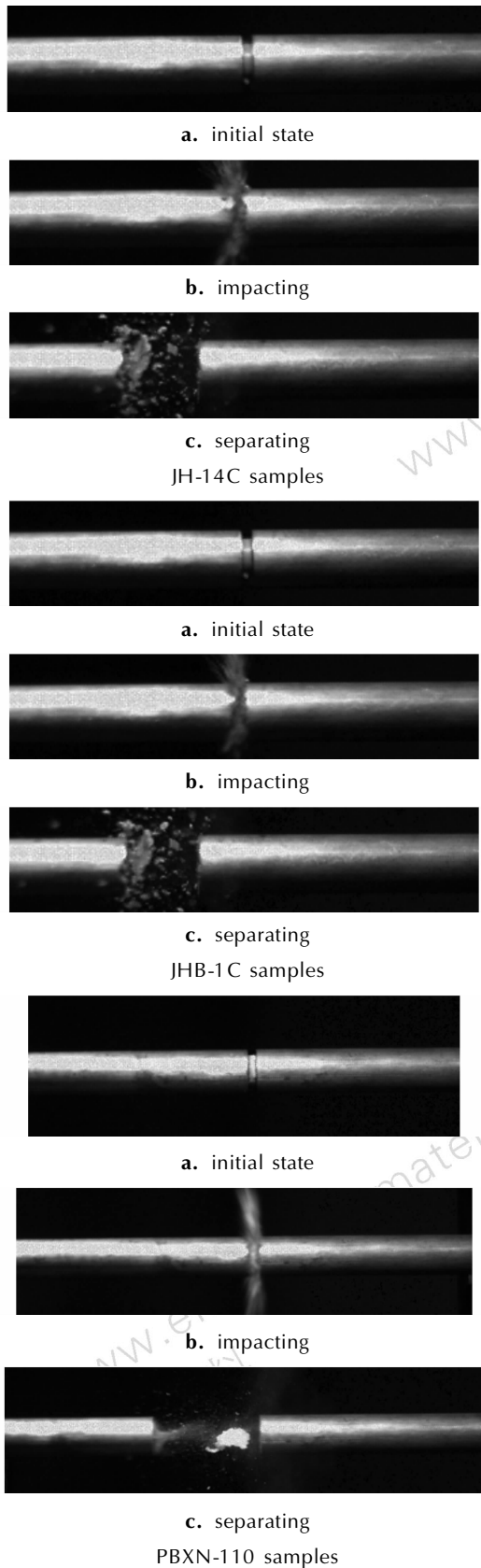


图5 三种传爆药的动态冲击过程  
Fig.5 Dynamic impacting process of three booster explosives

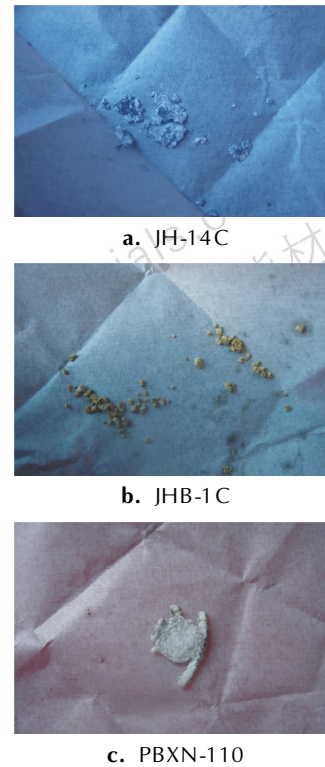


图6 动态冲击实验后三种传爆药破坏状态  
Fig.6 Test samples of three booster explosives after impact

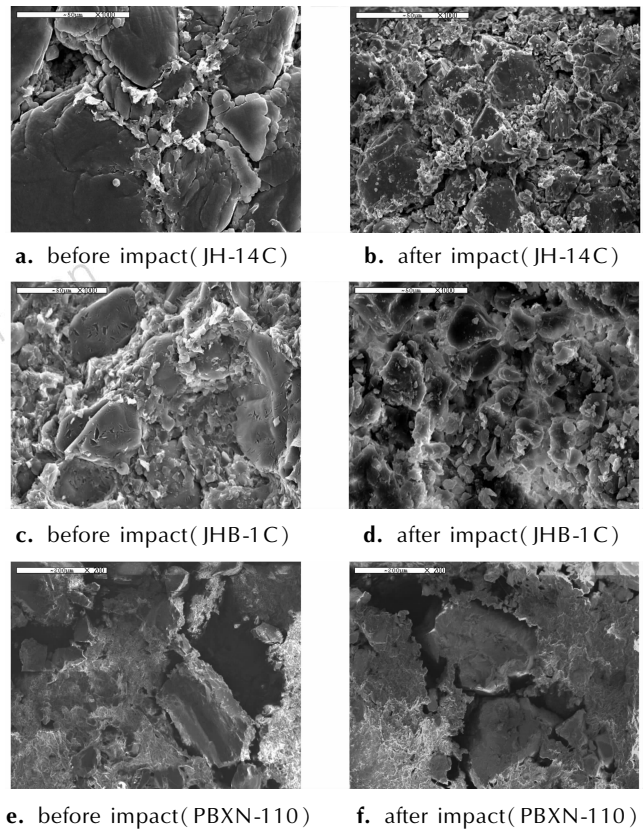


图7 三种传爆药的微观形貌  
Fig.7 SEM photos for three booster explosives before and after impact

由图 7 可见,各传爆药冲击前试样颗粒相对都较完整,而冲击后颗粒都产生了不同程度的断裂以及颗粒与粘结剂脱粘而形成的沿晶断裂。

进一步进行比较,冲击前 JH-14C(图 7a)及 JHB-1C(图 7c)两种压装传爆药由于压装成型,颗粒之间已存在挤压形成的损伤,同时,有些颗粒上已明显有了初始微裂纹,这些微裂纹的存在势必增加该药发生爆炸的几率,而 PBXN-110(图 7e)传爆药的颗粒相对比较完整,主炸药紧密的嵌入高分子粘结剂内,不存在初始微裂纹;冲击过后,两种压装传爆药首先表现出沿初始微裂纹产生的颗粒断裂,以及随后大量颗粒的细化碎裂,并伴有颗粒与粘结剂之间的脱粘分离以及剪切断裂,PBXN-110 传爆药颗粒破碎的形状主要表现为小块颗粒和表面“削平”的棱形颗粒,主炸药颗粒与高分子粘结剂间出现间隙,即一定的颗粒与粘结剂的脱粘。从图上可以明显看出冲击过后,JHB-1C(图 7d)传爆药的破坏程度较 JH-14C(图 7b)稍为严重。而两种压装(JH-14C 和 JHB-1C)传爆药的破坏程度均比浇注型传爆药大。

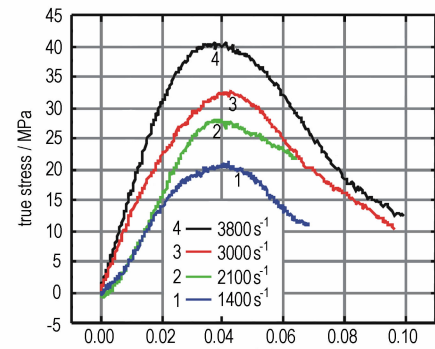
### 3.3 三种传爆药的应力-应变曲线

图 8 选取了三种传爆药在  $1000\text{ s}^{-1}$ 、 $2000\text{ s}^{-1}$ 、 $3000\text{ s}^{-1}$ 、 $4000\text{ s}^{-1}$  四种应变率范围冲击作用后得到的应力-应变曲线,三组曲线存在明显不同,逐一分析得到以下结论。

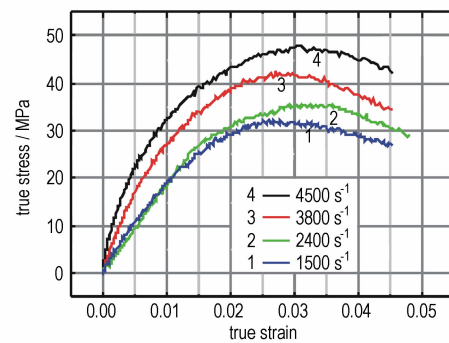
由图 8a 可见,JH-14C 传爆药的失效力随着应变率的增加而增加,变化趋势为  $20\text{ MPa} \rightarrow 28\text{ MPa} \rightarrow 32\text{ MPa} \rightarrow 40\text{ MPa}$ ,呈现出明显的应变率效应,但失效应变却一直较稳定,基本上保持在 0.04 左右。由图 8b 可见,JHB-1C 传爆药的失效力也随着应变率的增加而增加,变化趋势为  $31\text{ MPa} \rightarrow 35\text{ MPa} \rightarrow 41\text{ MPa} \rightarrow 47\text{ MPa}$ ,表现出较明显的应变率效应,失效应变同样没有呈现出明显的变化趋势,基本稳定在 0.03 左右。比较两种压装传爆药的应力-应变曲线,均具有明显的非线性弹性变形阶段、线弹性变形阶段和变形强化阶段,表现出一定的脆性,与 JH-14C 传爆药相比,JHB-1C 传爆药的失效力较大,失效应变较小,虽然差别不大,但从一定程度上说明 JH-14C 传爆药比 JHB-1C 传爆药更脆。

PBXN-110 作为浇注型传爆药,其应力-应变曲线和前两两者存在明显的差异,曲线只包括线弹性阶段和强化阶段,根据试样变形过程中体积不变的假设计算出该试样的真实应变约为 0.40,由图 8c 可见,真实应变范围内,没有明显的应力失效点,最大的应力值小于  $9\text{ MPa}$ ,应变率效应微弱,PBXN-110 传爆药呈现典型

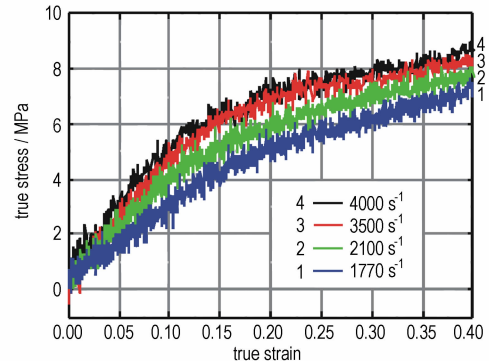
的粘弹性。



a. JH-14C



b. JHB-1C



c. PBXN-110

图 8 三种传爆药的应力-应变曲线

Fig. 8 Stress-strain curves of three booster explosives

## 4 结论

(1) 三种传爆药的宏观破坏状态存在差异,JHB-1C破坏最为严重,呈粉末状;JH-14C碎裂为块状;PBXN-110经压缩成饼状,且三者的破坏程度均随应变率的增加有所增加。

(2) JH-14C及JHB-1C作为压装传爆药,炸药颗粒存在初始微裂纹,在外界作用刺激下容易发生意外爆炸,且冲击载荷作用后首先发生穿晶断裂,当应变率

增加到  $3000 \text{ s}^{-1}$  以上时, 出现以颗粒之间界面粘结剂的断裂为主的沿晶断裂, 并伴随有剪切断裂的发生; PBXN-110 中炸药颗粒紧密嵌入粘结剂分子内, 冲击载荷作用后主要表现为炸药颗粒的表面“削平”, 粘结剂与颗粒的分离在应变率超过  $4000 \text{ s}^{-1}$  时开始出现。

(3) JH-14C 及 JHB-1C 传爆药的应力-应变曲线具有明显的应变率效应, 随着应变率的加大, 失效力逐渐增加, 但失效应变基本上保持在恒定值; 与 JH-14C 传爆药相比, JHB-1C 传爆药的失效力较大, 但失效应变较小, 总体表现为 JH-14C 的脆性大于 JHB-1C; PBXN-110 传爆药的应力-应变曲线的应变率效应微弱, 真实应变范围内没有明显的应力失效点, 表现出典型的粘弹性。

#### 参考文献:

- [1] 韩宝成, 苟瑞君. 传爆药起爆效果的影响因素研究[J]. 火工品, 1997(4): 9-12.  
HAN Bao-cheng, GOU Rui-jun. Study on the influence factors of detonation initiation effect of booster[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 1997(4): 9-12.
- [2] 王作山, 刘玉存, 张景林, 等. 约束条件对传爆药输出压力的影响[J]. 火炸药学报, 2003, 26(2): 10-12.  
WANG Zuo-shan, LIU Yu-cun, ZHANG Jing-lin, et al. Effect of restraint conditions on shock pressure of booster[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2003, 26(2): 10-12.
- [3] 曹雄, 胡双启, 张建忠. 装药结构对传爆药柱起爆能力的影响研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2005(增刊): 200-204.  
CAO Xiong, HU Shuang-qi, ZHANG Jian-zhong. Study on the effect of charge structure of booster pellet had on its initiation capacity

- [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2005(Supplement): 200-204.
- [4] 卢芳云, 吴会民, 王晓燕, 等. 两种炸药材料本构行为的应变率效应分析[J]. 含能材料, 2004(增刊): 280-285.  
LU Fang-yun, WU Hui-min, WANG Xiao-yan, et al. Analysis of strain-rate effects on constitutive behaviors of two explosives[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2004(Supplement): 280-285.
- [5] 王晓燕, 卢芳云, 林玉亮. SHPB 实验中端面摩擦效应研究[J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(2): 134-139.  
WANG Xiao-yan, LU Fang-yun, LIN Yu-liang. Study on interfacial friction effect in the SHPB tests[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2006, 26(2): 134-139.
- [6] 王娜. 冲击波加载过程中火工品的受力分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2004.  
WANG Na. Mechanical analysis of initiator in loading of shock wave[D]. Nanjing: Nanjing Institute of Technology, 2004.
- [7] 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 bars[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2009, 32(6): 66-70.
- [8] 陈鹏万, 黄风雷. 含能材料损伤理论及应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006.
- [9] 张子敏, 许碧英, 仲凯, 等. 冲击载荷下 JH-14C 传爆药的动态响应实验研究[J]. 火炸药学报, 2010, 33(1): 57-59.  
ZHANG Zi-min, XU Bi-ying, ZHONG Kai, et al. Experimental study on the dynamic response of booster explosive JH-14C under impact load[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2010, 33(1): 57-59.
- [10] 郭伟国, 李玉龙, 索涛. 应力波基础简明教材[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2007.

## Analysis on Dynamic Properties of Typical Boosters Based on Hopkinson Bars

ZHANG Zi-min, XU Bi-ying, JIA Jian-xin, Lü Yong-zhu, LI Gong-fa

(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** The dynamic properties of two types of pressed booster explosives (JH-14C, JHB-1C) and one cast booster explosive PBXN-110 were investigated using Split-Hopkinson Pressure Bars (SHPB). The macro and micro failure modes of the recovery specimen were analyzed by high-speed photography and scanning electron microscope (SEM), the corresponding stress-strain curves of three distinct explosives under high strain-rate dynamic response were obtained. Results show that the dynamic mechanical properties of pressed and cast booster explosives are distinctly different and also can be used as reference and guidance for comparison and choice of booster explosives in penetrate warhead designed for over-loading environment.

**Key words:** explosion mechanics; booster explosive; dynamic mechanic performance; stress-strain curve; over-loading

**CLC number:** Tj55; O389

**Document code:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2012.01.015