

DOI: 10.11883/1001-1455(2015)01-0140-05

# 几种典型起爆药的混凝土侵彻过载<sup>\*</sup>

盛涤伦, 杨 斌, 李钊鑫, 陈利魁, 李 俊, 朱雅红

(陕西应用物理化学研究所, 陕西 西安 710061)

**摘要:** 为考核战斗部引信用火工品中起爆药的抗过载性能及适应性, 通过火炮实弹射击的混凝土靶侵彻过载模拟实验, 分析了典型起爆药在模拟弹中真实的力学环境、失效特性及承载能力。测试与计算结果表明: 实验弹丸过载  $8.7 \times 10^4 g$ 、脉宽持续时间约 2 ms、最大速度 708 m/s、侵彻深度 0.57 m、起爆药惯性载荷最大瞬态作用力为 85.34 N、冲量 70.17 mN·s、最大瞬态作用能为 0.466 8 J、总能量 18.656 1 J。在此力学环境下, 由于起爆药质量较小, 实际承受加速度引起的作用力较小, 与静态撞击感度测试作用势能数量级相当, 起爆药在实验弹中未发现损伤。

**关键词:** 爆炸力学; 损伤与失效特性; 侵彻过载; 起爆药

**中图分类号:** O389

**国标学科代码:** 13035

**文献标志码:** A

现代战争要求常规钻地弹具有较大的侵彻深度, 要求战斗部引信和装药的安定性必须满足高过载要求, 其中引信中火工品的过载特性最重要<sup>[1-3]</sup>。而火工品能否承受高过载首先是建立在对侵彻过程中火工品中起爆药过载特性的准确认识基础上。

目前, 我国侵彻弹药与国外比较穿透深度浅, 毁伤效果弱, 着靶时偶尔会发生表面爆炸与提前爆炸或哑弹的现象。其重要原因之一是火工品及药剂抗过载能力弱, 具体现象有: 火工品中药剂与换能元及药剂层面之间界面分离、敏感药剂惯性冲击下意外起爆与点火, 装药密度发生变化, 装药药柱松散开裂变型等等。存在的本质问题是火工药剂力学环境下损伤特性与响应机理没有得到解决, 导致抗过载火工品用药剂的设计缺乏理论依据。

文献[4-7]报道了混凝土靶中样品侵彻与贯穿的过载估算方法以及起爆药化学结构与感度的关系, 对起爆药抗力学过载性能的研究报道很少, 文献[8-10]报道了延期元件和几种典型起爆药的抗过载特性、能力及受力模型。本文中几种典型起爆药着靶侵彻过载实验研究, 分析混凝土着靶的力学环境数据, 考核与验证几种常用起爆药在混凝土高过载着靶侵彻实验中抵御高过载的能力, 为抗力学冲击环境下火工药剂的设计与研制提供基础支撑。

## 1 火炮实弹射击的混凝土靶侵彻过载实验

改进的大口径 57 炮发射实验弹, 炮口与靶板距离约 10 m。混凝土靶标尺寸为  $\varnothing 2\ 000\ \text{mm} \times 1\ 000\ \text{mm}$ , 混凝土靶板抗压强度为 40 MPa, 实验弹理论初速为 650 m/s。弹载存储记录器安装在实验弹上, 当实验弹着靶时实时记录弹丸着靶过程的侵彻过载, 并能良好回收。弹丸参数为  $\varnothing 62\ \text{mm} \times 218\ \text{mm}$ , 质量 3.2 kg, 材料为 35CrMn5。

起爆药验证样品: 按照典型军用雷管的尺寸与质量, 设计管壳为  $\varnothing 5.08\ \text{mm} \times 7.50\ \text{mm}$ , 内径 4.65 mm, 装药量 100 mg, 装药条件见表 1。表中 BNCP 表示高氯酸·四氨·双(5-硝基四唑)合钴(III), LA 表示叠氮化铅, LTNR 表示斯蒂芬酸铅,  $p$  为压药压力。

6 个实验样品安装在 1 个测试弹上, 包括弹载记录器, 弹载记录器装有加速度传感器, 如图 1 所示。

\* 收稿日期: 2013-06-03; 修回日期: 2013-09-22

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(预 2010939)

第一作者: 盛涤伦(1956—), 男, 硕士, 研究员, shdl1998@sina.com。

测试弹回收良好,测试数据有效。加速度传感器测试得到实验件承受的最大过载峰值为  $8.7 \times 10^4 g$ ,脉宽持续时间约 2 ms,如图 2 所示。

表 1 火炮过载实验起爆药样品装药条件

Table 1 Charging conditions of primary explosives in artillery

样品	起爆药	$p/MPa$
7	BNCP	100
9	LA	100
15	LA	50
17	LTNR	50
19	BNCP	50



图 1 火炮过载实验样品与工装

Fig. 1 Overloading experiment samples and device of primary explosives in artillery

(a) Bullet Intruding photograph after shooting



(b) Over loading curve of acceleration- time

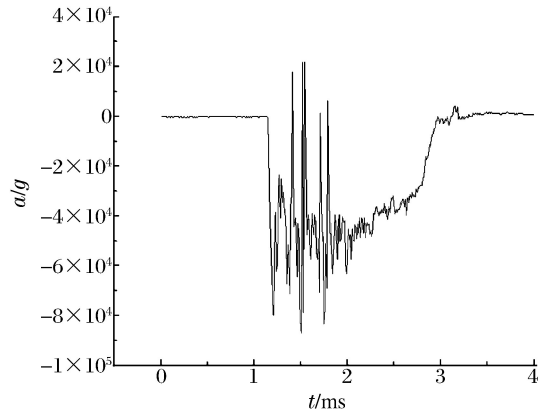


图 2 火炮混凝土过载实验侵入图片及记录曲线

Fig. 2 Intruding photograph and recording curve of overloading experiment

## 2 测试结果分析与讨论

从测试弹上取出起爆药样品,进行损伤程度与功能失效的鉴定检查与测试,如图 3~4 所示。

从 X 光照片和 CT 照片可以看出,过载前后起爆药壳体及药柱尺寸没有发生变形。从视频显微系统的形貌观察,起爆药微观结构没有发生变化,如图 5 所示。

通过数据处理,可以获得整个实验弹的着靶速度-时间曲线和位移-时间曲线,如图 6 所示。从速度图上可以读出着靶的最大速度为 708 m/s,从位移图可以看出炮弹侵入深度为 0.57 m。

根据  $F=ma$ 、 $I=Fs$ 、 $E=FD$ ,可以获得加载在起爆药上的实际惯性瞬态作用力  $F$ 、冲量  $I$ 、能量  $E$ ,如图 7 所示。从图 7 可知:起爆药的惯性载荷最大瞬态作用力为 85.34 N,平均作用力为 32.73 N,冲量  $I=70.17 \text{ mN} \cdot \text{s}$ ,最大惯性载荷瞬态作用能  $E=0.4668 \text{ J}$ ,着靶时程内平均作用能  $E_{\text{平}}=0.1330 \text{ J}$ ,累计总能量  $E_{\text{总}}=18.6561 \text{ J}$ 。

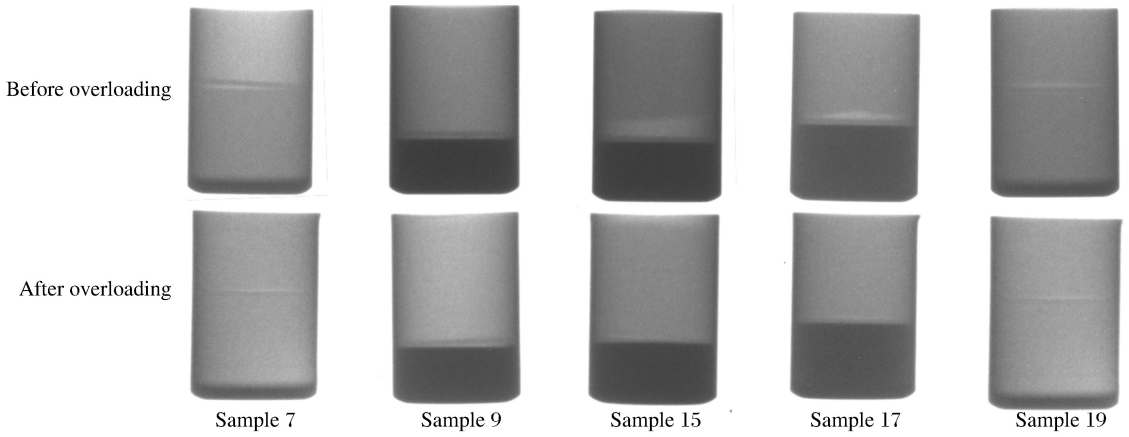


图 3 火炮过载起爆药 X 光照片

Fig. 3 X-ray photographs of primary explosives before and after overloading experiment

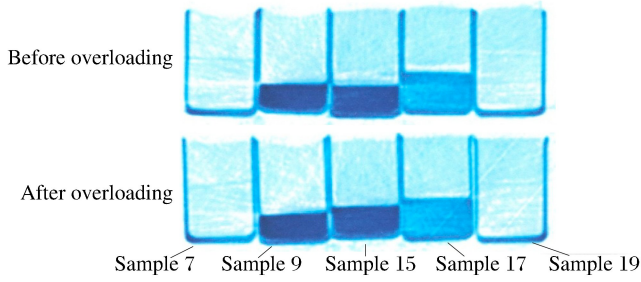


图 4 火炮过载起爆药 CT 图像

Fig. 4 CT photographs of primary explosives before and after overloading experiment

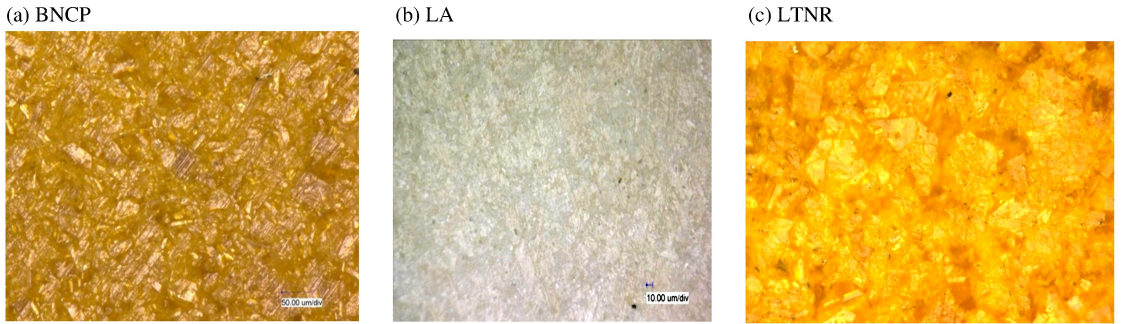


图 5 起爆药动态过载后的微观形貌

Fig. 5 Microscopical photographs of primary explosives after overloading experiment

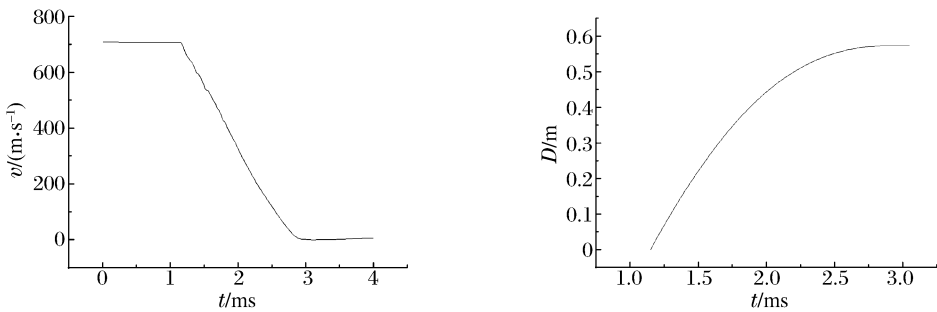


图 6 火炮混凝土过载实验分析曲线

Fig. 6 Experiment analytic curve of overloading experiment

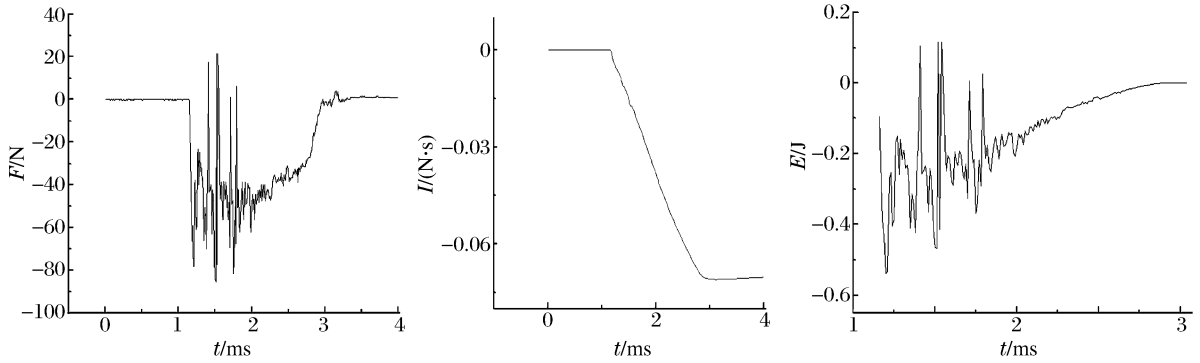


图 7 起爆药的力学参数分析图

Fig. 7 Mechanical parameters analytic curve of the primary explosives

高过载主要分为惯性载荷、冲击载荷以及交变载荷。实验中测试工装件和实验弹体给予起爆药以强大的约束保护，几乎没有受到冲击与挤压。如果仅考虑起爆药的惯性载荷，则起爆药在最大瞬态作用力 85.34 N、冲量 70.17 mN·s；最大瞬态作用能 0.466 8 J、累计总能量 18.656 1 J 下未受到损伤。

对比静态环境下火工药剂的力学性能，撞击感度是主要临界特征参数值之一。撞击感度的落锤质量、重力加速度与高度的乘积是样品接受的最大能量临界值。表 2 是起爆药与对比典型炸药撞击感度的力学性能参数值，表中  $H_{50}$  表示 50% 落高， $m$  为落锤质量， $E$  为作用势能。

表 2 起爆药的撞击感度的力学性能参数

Table 2 Mechanical performance parameters of impact sensitivity of primary explosives at static state

试样	$H_{50}$ /cm	$m$ /kg	$E$ /J
BNCP	10.6	0.8	0.831 0
LA	27.4	0.4	1.074 1
LTNR	8.2	0.8	0.642 3
PETN	12.0	2.5	2.940 0
RDX	24.0	2.5	5.880 0

对比着靶侵彻实验，起爆药承受的最大瞬态作用能与静态撞击感度在同一数量级，并小于撞击感度的作用势能，而实际着靶时程内累计的总能量比作用势能高一个数量级，在这种条件下起爆药没有发现损伤和失效。

### 3 结 论

对侵彻弹引信火工品中典型起爆药装药进行了混凝土着靶侵彻过载实验，对弹丸的过载过程力学环境进行了实验测试和数据分析，结果表明：实验弹丸最大过载峰值为  $8.7 \times 10^4 g$ ，脉宽持续时间约 2 ms，最大速度为 708 m/s，侵彻深度为 0.57 m。

通过计算获得：起爆药惯性载荷最大瞬态作用力为 85.34 N，平均作用力为 32.73 N，冲量  $I = 70.17 \text{ mN} \cdot \text{s}$ ，最大瞬态作用能  $E = 0.466 8 \text{ J}$ ，着靶时程内平均作用能  $E_{\text{平}} = 0.133 0 \text{ J}$ ，累计总能量  $E_{\text{总}} = 18.656 1 \text{ J}$ 。在此力学环境下，由于起爆药质量较小，实际承受加速度引起的质点作用力较小，与静态撞击感度测试的作用势能数量级相当，因此起爆药在实验弹中未发现损伤。

### 参考文献：

[1] 杨英, 葛涛, 李杰. 锥形弹体侵彻过载分析[J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2006, 7(4): 356-359.  
 Yang Ying, Ge Tao, Li Jie. Deceleration-time of penetration of cone-shaped projectile[J]. Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2006, 7(4): 356-359.

- [2] 周宁,任辉启,沈兆武,等. 侵彻钢筋混凝土过程中弹丸过载特性的实验研究[J]. 实验力学, 2006, 21(5): 572-578.  
Zhou Ning, Ren Hui-qi, Shen Zhao-wu, et al. Experimental study on overload characteristics of projectile penetrating reinforced concrete[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2006, 21(5): 572-578.
- [3] 高金霞,赵卫刚,郑腾. 侵彻战斗部装药抗过载技术研究[J]. 火工品, 2008(4): 4-7.  
Gao Jin-xia, Zhao Wei-gang, Zheng Teng. Study on the anti-overloading technique for penetrating warhead charge [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2008(4): 4-7.
- [4] Frew D J, Hanchck S J, Green M L, et al. Penetration of concrete targets with ogive-nose steel rods[J]. International Journal of Impact Engineering, 1998, 21(6): 489-497.
- [5] Forrestal M J, Frew D J, Hickerson J P, et al. Penetration of concrete targets with deceleration-time measurements [J]. International Journal of Impact Engineering, 2003, 28(6): 479-497.
- [6] Frew D J, Forrestal M J, Cargile J D. The effect of concrete target diameter on projectile deceleration and penetration depth[J]. International Journal of Impact Engineering, 2006, 32(10): 1584-1594.
- [7] Cartwright M, Wilkinson J. Correlation of structure and sensitivity in inorganic azides[C]// New Trends in Research of Energetic Material. Czech: Pardubice, 2008: 99-112
- [8] 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): 8-10.  
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): 8-10.
- [9] 李钊鑫,盛涤伦,朱雅红,等. 三种起爆药抗高加速度过载能力及受力模型研究[J]. 含能材料, 2012, 20(4): 423-436.  
Li Zhao-xin, Sheng Di-lun, Zhu Ya-hong, et al. Studies on the anti-overload capability and mechanical failure model of three primary explosives by SHPB[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2012, 20(4): 423-436.
- [10] 李钊鑫,盛涤伦,杨斌,等. 叠氮化铅动态过载下的响应特性研究[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.

## Penetration overloading to concrete target for several typical primary explosives

Sheng Di-lun, Yang Bing, Li Zhao-xin,  
Cheng Li-kui, Li Jun, Zhu Ya-hong

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

**Abstract:** In order to examine the overloading resistance performance and adaptability of primary explosive in detonator used for fuse, several typical primary explosives' mechanical conditions, failure character and overloading resistance capability in the simulating bomb was analyzed by the penetration experiment on concrete target. Results from test and calculation showed: The overloading value of tested bullet is  $8.7 \times 10^4 g$ , time is 2 ms, the maximal velocity is 708 m/s, penetrating depth is 0.57 m; The maximal transient acting force of primary explosives in inertial load is 85.34 N; Impulse is 70.17 mN · s; The maximal transient action energy is 0.466 8 J; The total energy is 18.656 1 J. Under this mechanical condition, the actual acting force aroused for acceleration is less due to primary explosive' less mass, and it is comparative to impact sensitivity potential energy at static state of primary explosive. No damage and failure of the primary explosive were found in the tested bullet.

**Key words:** mechanics of explosion; damage and failure character; penetration overloading; primary explosives