

文章编号: 1006-9941(2010)06-0702-04

# 抗过载炸药装药侵彻安全性试验研究

李媛媛, 高立龙, 李巍, 席鹏

(西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 针对炸药装药侵彻安全性问题, 从主炸药粒度、颗粒级配和装药工艺出发, 研制了一种可以满足抗高过载性能的不敏感炸药。感度测试表明, 在满足浇注工艺要求的前提下, 采用较细粒度的 HMX, 经过颗粒级配和钝感处理, 大大降低了炸药的机械感度; 采用特殊的装药工艺, 严格控制了炸药装药质量, 提高了装填密度达  $1.80 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。采用试验弹, 通过 100 mm 滑膛炮和钢筋混凝土靶, 对所研制的新型抗过载炸药进行了侵彻安全性试验。侵彻过程中弹体保持完好, 内部装药未燃未爆。

**关键词:** 爆炸力学; PBX 炸药; 高速侵彻; 装药安全性; 钢筋混凝土

**中图分类号:** TJ55; O389

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.06.021

## 1 引言

近年来, 对攻击机场跑道、地面加固目标、地下设施等硬目标的高速侵彻战斗部的要求日益提高。攻击地下目标使用的炸药必须满足能量和感度的要求<sup>[1]</sup>。自 20 世纪 80 年代初发展不敏感弹药(IM)以来, 不敏感炸药技术研究受到世界各国的高度重视, 并推出了许多新的不敏感高能炸药配方, 有些配方已经应用于地下目标毁伤战斗部中, 如美国增强型 BLU-113/B 侵彻弹战斗部等<sup>[2]</sup>。高能和不敏感抗过载炸药技术的发展方向, 推广使用 HMX 基高能不敏感混合炸药是主要趋势之一。HMX 是当前应用能量水平较高、综合性能较好的单质炸药, 多年来国外一直在进行含 HMX 的高能炸药的研究, 目前已有一些配方已用于钻地武器中, 如美国的 PBXIH-135、德国的 KS33 炸药等<sup>[3]</sup>。

陈文等人<sup>[4]</sup>针对高速钻地弹侵彻过程的装药损伤所引起的炸药不安全问题, 采用回收侵彻试验弹内装药样品的方法, 较真实地反映侵彻过程装药的损伤特性<sup>[4]</sup>。

本研究从降低炸药装药机械感度、提高装药质量出发,<sup>[1]</sup>通过主炸药 HMX 粒度级配、添加金属可燃剂和采用新型装药工艺等手段, 研制出一种新型浇注 PBX 炸药配方, 并将其装填到试验弹体中, 通过 100 mm 滑膛炮和钢筋混凝土靶进行了炸药装药侵彻安全性试验。

收稿日期: 2010-07-02; 修回日期: 2010-08-05

作者简介: 李媛媛(1981-), 女, 助工, 硕士, 研究方向为混合炸药配方及工艺研究。e-mail: liyuan204@126.com

## 2 装药设计和弹体结构

### 2.1 炸药装药配方设计

从 20 世纪 80 年代起, 以美国为首的西方国家对各种侵彻弹药基本上都采用浇注 PBX 炸药来替代早期广泛使用的 TNT 或 H<sub>6</sub>、Tritonal 炸药。浇注 PBX 炸药主要有以下优点<sup>[5]</sup>: (1) 提高弹药威力。以美国应用在侵彻战斗部上的典型抗过载配方 PBXN-109、AFX-757 炸药为例, 其爆炸威力和毁伤效果均比 TNT 基混合炸药有很大增加; (2) 提高弹药装药的安全性和环境适应性。绝大部分浇注 PBX 炸药都具有钝感炸药的特性, 其安全性较好, 加之不含 TNT, 长贮寿命可达 20 a 以上, 具有勤务处理简单且成本低廉、装备使用环境不受限制等优点; (3) 浇注 PBX 炸药类似弹塑性体, 它可以吸收过载应力。抗过载能力较高, 优于其它品种的混合炸药。因此, 抗过载弹药采用浇注 PBX 炸药是现代武器装备发展的主要方向之一<sup>[6]</sup>。

抗过载类型炸药要求炸药侵彻过程中不能发生燃爆。对炸药装药来说, 抗高过载能力是配方设计时必须重点研究的内容。因此, 抗过载炸药装药应具备以下特点: ① 较低感度: 包括应力波作用下的感度、高速撞击下的感度和大尺寸装药变形错位时的感度; ② 适宜的高速冲击动力学性能: 炸药装药的内应力小, 不易破裂, 在冲击载荷下不易产生损伤; ③ 优良的装药质量: 装药相对密度高, 密度均匀性好; 装药内部没有气泡或裂纹等疵病; 炸药与壳体间没有间隙。

RDX 系列炸药和 HMX 系列炸药都有较高的爆热、

爆速和较好的化学稳定性,是目前混合炸药中应用较多的主装药。但比较而言,HMX 的爆速、爆压更高,冲击波感度更低、热安定性更好。对抗高过载炸药性能特点进行分析,从提高内部爆炸毁伤威力的角度考虑,选择金属化炸药。金属粉选用铝粉,它具有氧化热较高、价格低廉、来源广泛等优点,又具有较强的“后燃效应”。

综合以上因素,本课题组开展了以 HMX 为主炸药的低敏感性浇注 PBX 炸药配方研究。分别将不同粒度的 HMX 进行级配,并采用一定配比的高分子粘结剂进行钝感处理。颗粒级配主要是提高配方中的固含量,改善炸药的流动性。在满足浇注工艺要求的前提下,选用机械感度和摩擦感度最低、装填密度较高和流动性能良好的炸药配方。经过实验筛选,最终配方选择为 HMX(中、细颗粒级配)/Al/复合粘结剂。

## 2.2 炸药装药工艺设计

侵彻过程中高过载冲击载荷条件下,炸药装药中空气隙或气泡的绝热压缩是导致炸药装药发生点火的一个重要因素。因此,提高炸药的装药质量对抗过载类炸药侵彻安全性至关重要。经过多次试验和改进,采用了新型装药工艺,主要为以下三步:将炸药各组分真空混合;将混合好的药料采用两级真空-振动浇注;将浇注后的试验弹体内装药进行控温固化。该工艺方法中的关键步骤两级真空-振动浇注是将药料置于抽真空减压条件下的工装设备中,然后浇注入弹体中,经振动装置使炸药流平。将浇注好的物料再放入水浴烘箱,控温固化。在浇注过程中,抽真空可使药料内部的空气移至表面而逸出,减少气泡,提高装药的密实性,从而使装药质量的一致性较好。该浇注装药工艺可使装药密度达到理论密度的 95% 以上,实际炸药装药密度达  $1.80 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,装药内部无明显疵病。

## 2.3 试验弹体结构

混凝土高速侵彻终点效应物理规律表明,弹体弹身结构影响弹体侵彻能力和侵彻稳定性,进而影响弹体在高速过载条件下内部装药应力的载荷<sup>[7]</sup>。因此,本试验中,弹体选择为圆锥形结构,如图 1 所示。弹体的圆锥形结构设计,增大了弹体与混凝土的接触面积,可以保证在整个稳定侵彻时间内与侵彻混凝土弹洞的接触,产生一个回复力矩以克服不稳定侧向载荷,而这种侧向载荷产生于头部区域和弹体的重心,保持了弹道的稳定<sup>[3]</sup>,使炸药的侧向载荷降低,进而降低炸药意外点火的可能性。

## 3 试验部分

### 3.1 感度实验

对所采用的炸药配方进行感度实验。撞击感度采用经过标定的 WL-1 型卡斯特落锤撞击感度仪,根据 GJB772A-97 标准中 601.2 试验方法,测定炸药装药的特性落高( $H_{50}$ ),落锤质量为 10 kg,并测量炸药在 25 发实验量情况下撞击发生爆炸的百分数,即撞击感度爆炸百分数;摩擦感度试验参照 GJB772A-97 标准中 601.1 方法进行,仪器采用 WM-1 型摩擦感度仪。实验结果见表 1。为了比较,表 1 中同时给出了未经钝感处理的纯 HMX 感度<sup>[8]</sup>。从表 1 可以看出,钝感处理的炸药装药感度明显低于纯 HMX,可以大大提高弹体装药在高速撞击下的安全性能。



图 1 试验前弹体

Fig. 1 Projectile before test

表 1 炸药机械感度

Table 1 Impact and friction sensitivities of charge

sample	impac sensitivity		friction sensitivity/%
	$H_{50}$ /cm	explosion probability/%	
charge	85.1	4	0
HMX	26	100	92 ~ 100

### 3.2 侵彻安全性性试验

通过 100 mm 滑膛炮,共进行了 3 发试验弹侵彻钢筋混凝土靶试验。靶标为  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$  正方体钢筋混凝土,过载强度 35 MPa。试验中测量了碰撞着靶速度和侵彻深度,结果见表 2。其中开坑范围和开坑深度分别指靶体迎弹面形成的弹坑大小和弹坑深度,侵彻深度指弹体贯穿钢筋混凝土靶的深度。

表 2 侵彻试验测试结果

Table 2 Results of overloading test

No.	loading velocity / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	crater area / $\text{mm} \times \text{mm}$	crater depth /mm	penetration depth/m	results
1	813	1280 × 1230	300	1.6	test projectiles is in good condition and the charge is unreactive
2	832	1140 × 800	200	1.96	
3	868	1220 × 800	140	2.00	

典型的试验靶体正面破坏情况如图 2。由图 2 中靶体的破坏现象可以看出,靶体迎弹面有范围较大的冲击漏斗坑,裂缝贯穿整个靶体。试验回收弹体形貌如图 3 所示。试验回收弹体的结构没有发生明显的弯曲,弹丸形状保持完好,内部装填炸药不燃不爆。



图 2 试验靶体正面破坏情况

Fig. 2 Crack characteristic of concrete target



图 3 试验回收弹体形貌

Fig. 3 Recovered test projectile

## 4 结果讨论

### 4.1 装药感度分析

文献[9-10]的结果表明,随 HMX 粒度的减小,特性落高值增加,即撞击感度降低。

本实验炸药装药配方采用了细颗粒的 HMX,颗粒间作用力较小,单个空穴的体积较小,材料导热性能较好,不易形成热点;炸药装药中 HMX 颗粒较细,比表面积较大,颗粒具有的表面能也高,因此小颗粒多以团聚体形式存在,外力作用时,颗粒团聚体的破散将消耗一部分能量,使炸药的撞击力度减小<sup>[10]</sup>。在高速过载条件下,炸药之间、炸药与杂质之间、炸药与接触面之间激烈摩擦,一方面炸药颗粒较小时,晶粒中的缺陷比晶粒大时少,需要的起爆能量大;另一方面炸药采用复合粘结剂进行钝感处理,粘结剂均匀包覆在炸药颗粒之间,减少了颗粒与颗粒的相互摩擦。因此撞击感度和摩擦感度较低,降低了炸药的感度,提高了过载条件下的安全性。

### 4.2 装药质量分析

大量实验和研究成果表明,影响炸药抗过载性能的主要原因之一是装药质量<sup>[11]</sup>。装药中的底隙、气泡、缩孔和裂纹等装药缺陷在很大程度上减低了弹体的侵彻能力。

图 4 为其中一发试验前后弹体内部炸药装药的工业 CT 扫描照片。图中白色外圈为弹体内壁惰性涂层和炸药装药的分界线。由图 4a 可见,炸药装药基本没有明显的瑕疵,说明采用新型装药工艺,使炸药装药质量良好,降低了弹体在高度侵彻过载中,在强烈挤压和压缩波的作用下,炸药由于气孔、裂纹等装药缺陷造成意外点火的可能性<sup>[12]</sup>。从图 4b 可见,内部装药试验前后基本没有变化。这主要是因为采用新型配方和装药工艺的炸药装药具有较强的可塑性,使得炸药在发射、飞行及着靶等过程中主装药能够克服很大的剪切力,使得整弹可以承受较大的过载,弹体安全性可以得到保证。

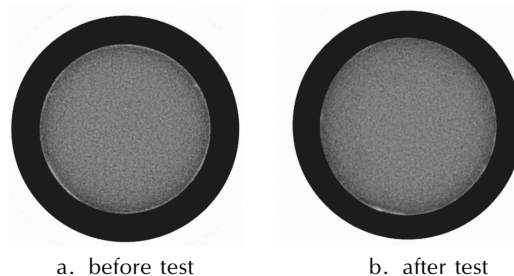


图 4 试验前后弹体装药工业 CT 扫描照片

Fig. 4 CT photos of projectile before and after test

### 4.3 炸药微观形貌分析

图 5 为侵彻试验前后弹体内炸药的电镜图片,可见经过钢筋混凝土靶板侵彻试验后弹体内炸药装药 HMX 颗粒无明显晶粒扭曲、碎裂等微观破坏情况,降低了炸药在承受高速过载时由于炸药损伤形成“热点”的可能性,提高了弹体侵彻安全性。而文献[13]结果表明,传统的 TNT 炸药装药可塑性较差,在高度撞击下易产生绝热剪切,造成晶粒扭曲。因此,以细颗粒 HMX 为主炸药配制抗高过载不敏感炸药更为可行。

## 5 结论

(1) 从主炸药粒度选择、颗粒级配和装药工艺出发,研制了一种新型抗过载 PBX 炸药,其主要组成为 HMX(中、细颗粒级配)/Al/复合粘合剂。

(2) 采用的特殊装药工艺可以提高炸药的装填密度达  $1.80 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,较好地控制装药质量,其内部无明显疵病。

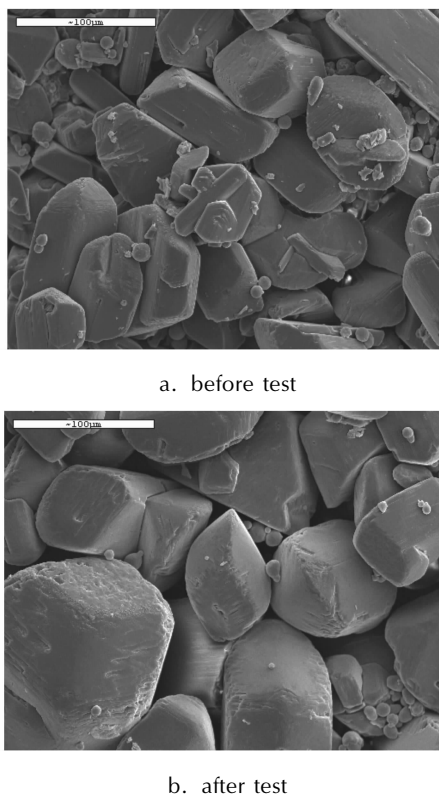


图5 炸药装药扫描电镜照片

Fig. 5 SEM images of explosive charge

(3) 通过试验弹体进行了侵彻安全性试验,炸药装药通过 2 m 厚、强度为 35 MPa 钢筋混凝土靶板后未燃未爆,安全性能良好。证明了该炸药是一种抗高过载性能良好的不敏感炸药,可以推广应用到抗高过载类型战斗部弹体装药中。

## 参考文献:

- [1] CHEN X W, FAN S C, LI Q M. Oblique and normal penetration/perforation of concrete target by rigid projectiles[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2004, 30(6): 617-637.
- [2] Peter Gerber. Characterization of insensitive octogen[C]//38<sup>th</sup> International Annual Conference of ICT. Karlsruhe, Germany, 2007.

- [3] JASSM to fly with new explosive formulation [OL]. AFRT: AFDT/PA98-422. <http://www.fas.org/msn/dod-101/sys/smart/docs/afx757.htm>, 2004.
- [4] 陈文,张庆明,胡晓东,等. 侵彻过程冲击载荷对装药损伤实验研究[J]. 含能材料, 2009, 17(3): 321-324.  
CHEN Wen, ZHANG Qing-ming, HU Xiao-dong, et al. Experimental study on damage to in the process explosive charge by impact load of penetration [J]. *Chinese Journal of Energetic Material*, 2009, (17)3: 321-324.
- [5] 郑腾. 动能侵彻子弹装药工艺的研究[C]//弹药战斗部学术交流论文集. 北京:中国兵工学会, 2005: 532-534.
- [6] 王昕. 美国不敏感混合炸药的发展现状[J]. 火炸药学报, 2007, 30(2): 78-80.  
WANG Xin. Current situation of study on insensitive composite explosives in USA[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2007, 30(2): 78-80.
- [7] 武海军,黄风雷,王一楠. 高速弹体非正侵彻混凝土试验研究[C]//第八届全国爆炸力学学术会议论文集. 江西·吉安, 2007: 488-494.
- [8] 孙业斌,惠君明,曹欣茂. 军用混合炸药[M]. 北京:兵器工业出版社, 1995: 48-49.
- [9] 陈天石,张玉若,张英浩. HMX 粒度对其机械感度的影响研究[J]. 四川兵工学报, 2006, (5): 27-28.  
CHEN Tian-shi, ZHANG Yu-ruo, ZHANG Ying-hao. Effect of particle size of RDX on mechanical sensitivity[J]. *Sichuan Ordnance Journal*, 2006, (5): 27-28.
- [10] 刘玉存,王建华,安崇伟. RDX 粒度对机械感度的影响[J]. 火炸药学报, 2004, 27(2): 7-9.  
LIU Yu-cun, WANG Jian-hua, AN Chong-wei. Effect of particle size of RDX on mechanical sensitivity[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2004, 27(2): 7-9.
- [11] 常双君. 炸药装药质量对发射安全性的影响[J]. 中国安全科学学报, 2004, 14(11): 76-78.  
CHANG Shuang-jun. Effect of charging quality on launching safety[J]. *China Safety Science Journal*, 2004, 14(11): 76-78.
- [12] Dr W Arnold. What influence the shock sensitivity of high explosive? [C]//2006 Insensitive Munitions & Energetic Materials Technology Symposium. Bristol (UK), 2006: 24-28.
- [13] 韩小平,张元冲,沈亚鹏. 快速加载下 TNT 材料中绝热剪切带的微观研究[J]. 实验力学, 1995, 10(2): 125-130.  
HANG Xiao-ping, ZHANG Yuan-chong, SHEN Ya-peng. Microscopic study of adiabatic shear bands of TNT materials under fast loading[J]. *Journal of Experimental mechanics*, 1995, 10(2): 125-130.

## Experiment Research on Security of Insensitive Explosive Charge During Penetration

LI Yuan-yuan, GAO Li-long, LI Wei, XI Peng

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

**Abstract:** In order to solve the problems such as the explosive charge safety during penetration, an insensitive explosive charge is designed started with choosing explosive size, size distribution and charging processes to endure high overloading. The impact and friction sensitivities were tested. Results show that after size distribution and deterred, the thinner of the HMX, is the lower of sensitivity will be. The density of charge is improved to  $1.8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  by special technique which controlles explosive charge quality. The experiment research on safety of explosive charge was carried out with test projectiles penetrating reinforced concrete. It indicates that test projectiles are in good condition and the charge is unreactive during penetration.

**Key words:** mechanics of explosion; PBX explosive; high overloading; charge safety; reinforced concrete

**CLC number:** TJ55; O389

**Document code:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.06.021