

文章编号: 1006-9941(2011)06-0705-04

## 压制密度及密度均匀性对装药撞击安全性的影响

王淑萍, 王晓峰, 金大勇

(西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 为了研究装药密度对撞击安全性的影响, 针对 A-IX-II 炸药、B 炸药、HMX 基含铝炸药压制了不同密度的药柱。用 A-IX-II 炸药压制了径向呈一定密度分布的药柱, 利用 400 kg 落锤进行了撞击加载试验。结果显示, 随着密度的增大, A-IX-II 炸药、B 炸药、HMX 基含铝炸药的起爆阈值增加。对于 A-IX-II 炸药, 当装药密度达到  $1.680 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  以上时, 起爆阈值没有明显差别。三种炸药的起爆阈值相差不大。当 A-IX-II 炸药密度分布不均匀时, 其起爆阈值有所下降, 低于密度相对均匀的药柱。表明装药密度及密度均匀性是影响撞击安全性的两个主要因素。

**关键词:** 物理化学; 高能炸药; 装药密度; 撞击实验; 安全性

**中图分类号:** TJ55; O64

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.06.023

### 1 引言

国内外炸药装药的抗过载安全性研究结果表明<sup>[1]</sup>, 装药中存在底隙、缩孔、气泡等疵病是导致装药在意外刺激下出现安全事故及在发射过程中发生早炸的主要原因, 揭示了炸药装药抗过载安全性与装药质量有密切关系。而炸药装药质量一般通过装药密度、密度均匀性及是否存在疵病来表征。以往的研究主要集中在含装药缺陷(底隙、气泡、裂纹等疵病)和无缺陷条件下对装药的抗过载安全性的影响, 对炸药品种和装药工艺的影响也进行了一些研究, 并根据试验研究结果对装药发射安全性进行了评估, 旨在研究炮弹发射时装药的抗过载安全性<sup>[2-4]</sup>, 而对压装炸药密度及其均匀性对装药抗过载安全性的影响研究未见报道。对于弹药压装装药工艺, 装药密度及其均匀性是压装药柱的主要特征<sup>[5]</sup>, 本研究主要针对 RDX 基含铝炸药(A-IX-II)、B 炸药及 HMX 基含铝炸药, 压制了不同密度及一定密度分布的药柱, 进行了撞击加载实验, 测量装药的起爆阈值, 研究密度对装药撞击安全性的影响, 为弹药压装装药工艺研究及使用安全性提供参考。

收稿日期: 2011-09-22; 修回日期: 2011-10-15

作者简介: 王淑萍(1964-), 女, 高级工程师, 从事炸药装药技术研究。  
e-mail: wangsp204@sohu.com

### 2 实验

#### 2.1 实验装置和条件

实验采用大型撞击加载模拟装置进行<sup>[4]</sup>, 该装置主要由不同重量(200 kg、400 kg 和 1200 kg)的加载落锤、模拟实验样弹、安全防护系统、数据采集系统等组成, 加载落高在 4 m 范围内可连续调节, 实验药量  $\leq 300 \text{ g}$  (TNT 当量), 装药加载应力最高可达 1 GPa (主要决定于样弹的强度), 达到应力峰值的加载时间  $\leq 5 \text{ ms}$ 。为了模拟弹药装药发射时药柱所受加载情况, 通过加载应力及应力率计算, 采用 400 kg 落锤进行加载试验能够满足要求, 试验装置示意图见图 1。

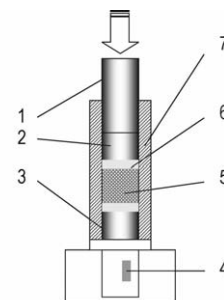


图 1 实验装置示意图

1, 2, 3—活塞, 4—数据采集, 5—炸药药柱, 6—密封垫, 7—模拟弹

Fig. 1 Sketch map of experimental device

1, 2, 3—piston, 4—data acquisition, 5—charge, 6—hermetic pad, 7—simulated shell case

应力测量采用应变式传感器,测试记录系统采用 TDS544A 瞬态存储示波器,最大采样速率为  $1 \text{ GS} \cdot \text{s}^{-1}$ , 4 通道,可实现数字存储和转换。为满足炸药装药加载应力信号采集要求,结合实验弹对传感器进行了专门设计和安装。

模拟实验弹结构根据药柱尺寸及可承受加载应力为  $1 \text{ GPa}$  的强度要求设计加工。

## 2.2 实验样品

实验药柱尺寸为  $\Phi 40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ ,为了满足炸药样品装配的密封要求,选择了弹性模量与药柱接近的聚乙烯塑料作为密封材料,尺寸为  $\Phi 40 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ ,装配在药柱上下两端。采用模压方法,针对 A-IX-II 炸药,压制了  $1.534 \sim 1.771 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  范围内五组不同密度; B 炸药压制了  $1.503 \sim 1.664 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  范围内四组密度的药柱; HMX 基含铝炸药压制了  $1.873$  和  $1.922 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  两种密度的药柱。利用小冲头、大套筒,采用多次压制方式,压制了若干发 A-IX-II 药柱,径向密度呈中间高而周边低分布的不均匀药柱,平均密度为  $1.688 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,径向密度分布约为  $1.658 \sim 1.718 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

密度均匀的药柱是指药柱整体密度分布比较均匀,通过测量药柱重量和尺寸,计算得到药柱密度值。密度不均匀是指采用小冲头和大套筒压制的药柱,由于冲头与套筒间隙处的药柱密实度主要是依靠炸药颗粒挤压而成,因而密度比中芯处低,通过局部切块,采用排水法测量其密度,并通过工业 CT 对药柱的轴向和径向进行了密度均匀性扫描,结果显示轴向扫描线基本为直线,而径向为中芯部高边部较低的曲线,与实测结果趋势一致。

表 1 不同炸药在不同密度下的撞击加载试验结果

Table 1 Experimental results of different kinds of explosive charges with different densities by impact loading test

explosive	density / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	no ignition		ignition		test number
		maximum drop height/mm	maximum stress/MPa	minimum drop height/mm	minimum stress/MPa	
A-IX-II	1.534	1500	954	1400	754	13
	1.629	1600	1020	1600	681	15
	1.680	2100	1050	1900	812	22
	1.734	2250	947	2250	903	9
	1.771	1900	1020	1900	605	15
Comp. B	1.664	2000	1150	2250	804	9
	1.638	1700	947	/	/	1
	1.534	/	/	1800	832	1
	1.503	1600	907	1700	805	8
HMX-based	1.873	1300	833	1400	738	5
aluminized explosive	1.922	1600	858	1500	804	5

对以上样品分别进行装药在约束条件下落锤撞击加载试验。

## 3 结果与讨论

### 3.1 药柱密度对装药撞击安全性的影响

采用升降法进行实验,如发生起爆现象,则降低落锤高度,反之则提升高度。根据现场目测试验弹破裂和烧蚀情况来判断药柱是否发生起爆,如有燃烧发生但仍有残余药粉存在,均视为发生点火(起爆)。不同密度 A-IX-II、B 炸药和 HMX 基含铝炸药装药的试验结果见表 1。图 2 是 A-IX-II 装药未爆和起爆时加载应力曲线,图 3 是不同密度 A-IX-II 炸药的加载曲线,图 4 是 A-IX-II 炸药密度与最大落高的关系。

装药的起爆阈值通过未爆时的最大落高和应力或起爆时最小落高和应力来表征。从撞击起爆炸药的机制来说,药柱点火是由应力和应力持续时间共同作用的结果(见图 2)。研究表明<sup>[6]</sup>,装药所受的应力载荷越大,引起炸药点火的几率越大,而峰值较低的应力作用较长时间也会引起炸药点火。从图 3 的加载波形可以看出,药柱密度较低时,其弹性模量小,强度较低,在这个过程中,药柱首先被压实,导致应力峰值变小,应力上升时间延长,平均应力率降低,然而由于药柱内部孔隙率较大,受加载时产生热点的可能大,因而撞击安全性降低。随着密度的增加,应力上升时间缩短,平均应力率增大,但由于药柱强度提高,造成药柱破碎消耗更多的机械功,使装药起爆阈值增大,提高了装药的撞击安全性。

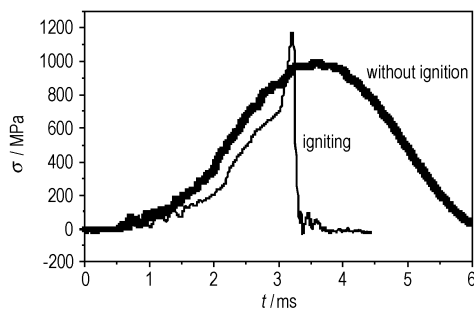


图 2 A-IX-II 装药爆和未爆时的应力曲线

Fig. 2 Stress curves of A-IX-II charge when igniting and not igniting

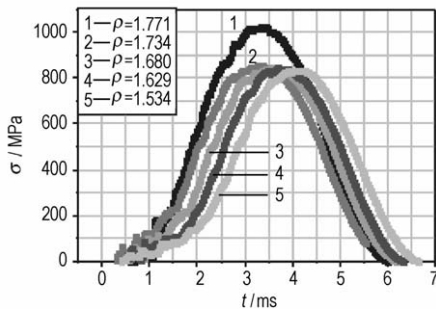


图 3 不同密度 A-IX-II 炸药的应力曲线

Fig. 3 Stress curves of A-IX-II charge with different densities

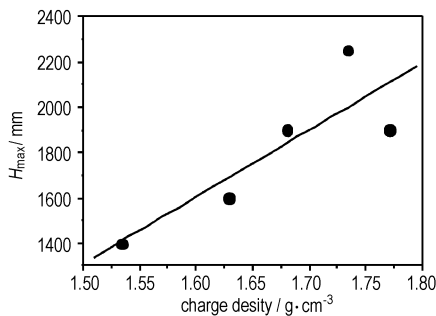


图 4 A-IX-II 炸药密度与最大落高的关系

Fig. 4 Relationship between density of charge A-IX-II and maximum drop height

从表 1 可以看出,随着药柱密度的增加,A-IX-II、B 炸药和 HMX 基含铝炸药的起爆阈值随之增大,当密度为  $1.680 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  以上时,A-IX-II 炸药起爆阈值无明显差别,图 4 中 A-IX-II 炸药未爆时最大落高随着密度的增大而增高,密度较大时,变化趋势不明显。也就是说,

表 2 A-IX-II 炸药密度不均匀时撞击加载试验结果

Table 2 Experimental results of A-IX-II charge with asymmetric density by impact loading test

	drop height /mm	stress /MPa	even stress rate /MPa · ms <sup>-1</sup>	test number	even density /g · cm <sup>-3</sup>	radial density distribution /g · cm <sup>-3</sup>
no ignition	1600 ~ 1800	878 ~ 996	284 ~ 328	13	1.688	1.658 ~ 1.718
ignition	1700 ~ 1900	664 ~ 1160	285 ~ 394	13		

在一定密度范围内,随着药柱密度的增加其撞击安全性增大。这是由于混合炸药从微观上看并不是完全均匀的,其特征是有晶粒或微晶粒大小的不连续性,形成装药空隙。这些空隙受到低速撞击加载作用后,可能产生点火的机理是粘滞流动,快速压缩等,同时炸药颗粒相互挤压、剪切、摩擦,使局部温度上升,达到点火温度后,产生点火、甚至爆炸。装药在约束条件下,随着密度的增加,剪切、摩擦逐渐成为引起装药点火的主要因素<sup>[7-8]</sup>。孔隙率较大(药柱密度较小)的药柱,受到撞击载荷时,在平面间隙的空气与炸药界面处生成的热点较多,容易引起点火;孔隙率较小的药柱时形成的热点较少,其抗撞击安全性相对较高。

当密度增加到一定值后,药柱内部孔隙率降低,引起装药点火的机制发生变化,装药受到撞击载荷后,产生的应力波与炸药内部颗粒的不均匀性的相互作用,使炸药内部某些局部区域的温度可能比整个受载区的温度高得多,成为最易发生反应的热点,热点处炸药发生化学反应并释能,使高温区反应扩展,引发炸药的点火起爆。就炸药装药接近均匀性而言,反应初期的局部热点可能在炸药装药受撞击产生断裂的情况下产生的,这时储藏在炸药中的弹性能转变成断口处的形变功,在断口处表面上由于摩擦(在压缩条件下)产生局部热点,当热点温度达到炸药临界起爆温度时,引发爆炸。

### 3.2 药柱密度均匀性对装药撞击安全性的影响

针对密度分布不均匀的 A-IX-II 药柱,采用升降法进行撞击加载试验,结果见表 2。

从表 1 和表 2 的数据可以看出,在平均密度接近相同( $\rho = 1.680 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )的条件下,A-IX-II 炸药密度相对均匀时,其未爆时最大加载落高为 2100 mm,应力为 1050 MPa,起爆时最小加载落高为 1900 mm,应力为 812 MPa;而密度不均匀(平均密度为  $1.688 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )时,未爆时最大加载落高为 1800 mm,应力为 996 MPa,起爆时最小落高为 1700 mm,应力为 664 MPa,其起爆阈值均低于密度相对均匀的药柱。这是由于密度分布不均匀时,药柱中较大尺寸的孔隙较多,受加载后更容易产生热点,降低了撞击起爆阈值。

从热点起爆机理来看,由于药柱内部颗粒不均匀,分布着任意形状和尺寸的孔隙,当装药受到撞击加载时,炸药颗粒摩擦与热交换,产生热流,气孔内的温度急剧上升,温度上升到一定值,固相内开始产生反应,温度达到与点火温度相当时,可能产生点火反应。因此,药柱局部温度变化与加载系数、药柱局部密度及热传导系数等参数有关,其温度变化规律可由下式表示<sup>[4]</sup>。

$$T(t) = T_0 + \frac{1}{\sqrt{\lambda\rho c}} \int_0^t \frac{q(t-\eta)}{\sqrt{\eta}} d\eta$$

其中,  $T$  为药柱局部温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\lambda$  为导热系数;  $\rho$  为药柱密度,  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ;  $\eta$  为过载系数;  $q$  为热流,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ;  $c$  为固相热容,  $\text{J} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。由上式可以看出,药柱孔隙越大(局部密度越小)的药柱,局部温度上升越快,产生点火的几率越大,对于密度分布不均匀的 A-IX-II 炸药,在药柱周边的局部孔隙较大,密度较低,因此撞击安全性低于相同平均密度的均匀药柱。

从上述试验结果看,不同的压装炸药品种,药柱密度较高时,其撞击安全性相差不大,说明装药质量是影响撞击安全性的关键因素。因此,对于压装装药工艺,提高装药密度及密度均匀性,降低孔隙率是提高装药撞击安全性的有效途径。

## 4 结 论

压制密度对装药的撞击感度有一定影响,在一定范围内,随着药柱密度的增大,其装药的撞击安全性增强;对于压装密度分布不均匀的药柱,装药的撞击安全性有所下降,低于密度相对均匀的药柱。

对于压装装药工艺,装药密度是影响其撞击安全性的主要因素,而装药品种的影响较为其次。因此,在无宏观缺陷的装药条件下,提高炸药装药密度及密度均匀性,可有效提高装药的撞击安全性。

### 参考文献:

- [1] John Sarkenberg. Air compression heating ignition of high explosives in the launch environment. AD-A 164961 [R], 1986: 8-28.
- [2] 章冠人. 凝聚炸药起爆动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1991: 89-127.
- [3] 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.
- [4] 王世英. 铸装 B 炸药落锤撞击起爆研究[D]. 西安: 西安近代化学研究所, 2003.  
WANG Shi-ying. Study on cast Comp. B for drop weight impact initiation[D]. Xi'an: Xi'an Modern Chemistry Research Institute, 2003.
- [5] 王淑萍. 分步压装装药的安全性分析[J]. 火炸药学报, 2006, 29(2): 23-25.  
WANG Shu-ping. The safety analysis of the step-press-loading charges[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2006, 29(2): 23-25.
- [6] 贾宪振, 杨建, 陈松, 等. 带壳 B 炸药在钨珠撞击下冲击起爆的数值模拟[J]. 火炸药学报, 2010, 33(5): 43-47.  
JIA Xian-zhen, YANG Jian, CHEN Song, et al. Numerical simulation on shock initiation of Composition B explosive impacting by tungsten sphere[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2010, 33(5): 43-47.
- [7] Yehuda Parton. A threshold criterion for impact ignition[C] // 12th International Detonation Symposium, 11-16 August, 2002 San Diego, California, P831.
- [8] Chidester S K, Tarver C M. Low amplitude impact testing and analysis of pristine and aged solid explosives[C] // Proceedings of 11th Symposium (International) on Detonation, Colorado, 1998: 93-100.

## Influence of Pressed Explosive Charges Density and its Distribution on Impact Safety

WANG Shu-ping, WANG Xiao-feng, JIN Da-yong

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

**Abstract:** In order to study the influence of pressing density on impact safety, some explosive charges with different densities were pressed utilizing A-IX-II explosive, composition B, and HMX-based aluminized explosive. The charges of A-IX-II explosive with density distribution in some order in the radial direction were pressed. The impact load test was carried out using a 400 kg weight drop. Results show that, with density increasing, the detonation threshold of A-IX-II explosive, composition B and HMX-based aluminiferous explosive increases. When the density of A-IX-II explosive is more than  $1.680 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , its detonation threshold has no obvious change, whereas the detonating thresholds of three kinds of explosive have a little difference. When the density of A-IX-II explosive distributes irregularly, its detonation threshold is decreased a little, lower than that of symmetrical density, indicating that pressing density and its asymmetry of charge are two principal factors affecting impacting safety.

**Key words:** physical chemistry; high explosive; density of charge; impact test; safety

**CLC number:** TJ55; O64

**Document code:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.06.023