

专题——不敏感弹药环境适应性与评估技术

# 冲击损伤对炸药装药冲击起爆特性的影响

金朋刚, 姜夕博, 李鸿斌, 高赞, 王晓峰

(西安近代化学研究所, 西安 710065)

**摘要:** **目的** 研究冲击载荷下炸药内部损伤随时间变化特征对其冲击感度的影响规律。**方法** 针对损伤状态随时间变化的两种典型情况, 采用冲击波模拟加载的方式对炸药装药进行损伤实验。损伤的恢复时间很长时, 在损伤后将试样放置 7 天后, 再研究其损伤状态对其冲击起爆特性的影响; 恢复时间很短时, 通过控制冲击损伤实验和冲击感度实验之间的时间间隔模拟多层靶板撞击的实际情况。选择常用的两种奥克托金基炸药作为研究对象, 通过冲击感度实验确定临界隔板厚度、设计损伤条件, 然后进行两种不同损伤愈合时间后的冲击起爆特性实验, 研究损伤状态对炸药装药冲击起爆特性的影响。**结果** 在文中损伤条件下, 放置 7 天后, 炸药装药的冲击感度均显著下降, 而类似于侵彻多层靶板条件的实验后, 炸药装药的冲击感度显著增加。**结论** 炸药装药损伤状态随时间的变化对炸药装药冲击起爆有完全不同的影响趋势, 在相关的炸药装药安全性设计时, 必须考虑与损伤时间状态相关的冲击起爆特性。

**关键词:** 冲击损伤; 损伤特性; 冲击波起爆

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2019.09.001

**中图分类号:** TJ405 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2019)09-0001-04

## Effects of Shock Insults on Explosive Charges Shock Wave Sensitivity

JIN Peng-gang, JIANG Xi-bo, LI Hong-bin, GAO Zan, WANG Xiao-feng  
(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

**ABSTRACT: Objective** To research the influencing rule of internal explosive damage of shock load on shock wave sensitivity with time. **Methods** For damage status changing over time of two typical cases, the shock wave was used to simulate loading to inspect the damage. When the damage recovery time was very long, the damaged sample was kept for seven days before it was used to research its damage status on the shock wave sensitivity; when the recovery time was very short, the actual situation of impact between several layers of target plates were simulated by controlling the time internal between shock damage test and shock wave sensitivity. In usual, two kinds of HMX based explosives were used to determine the thickness of critical partition and the damage condition of design. Then, the impact wave sensibility was tested with two kinds of recovery duration to study the influences of damage status on impact wave sensibility of explosives. **Results** After being kept for 7 days in the aforementioned damage conditions, the shock wave sensitivity of explosive charging decreased apparently. While the shock wave sensitivity increased significantly after being tested in conditions similar to multi-layer target plate. **Conclusion** The different damage coalescence times have the different variation trend of shock wave sensitivity. The shock wave sensitivity of damaged explosive charge is time dependent.

**KEY WORDS:** shock damage; characteristic of damage; shock wave sensitivity

收稿日期: 2019-03-06; 修订日期: 2019-07-04

基金项目: 总装备部预研基金项目(9140C350504150C35161)

作者简介: 金朋刚(1978—), 男, 副研究员, 从事炸药爆炸及安全特性研究。

通讯作者: 王晓峰(1967—), 男, 博士, 研究员, 博导, 从事炸药及装药技术研究。

一般都认为损伤使炸药装药的感度增加。国内外关于炸药损伤特性的研究已经有较多的报道。Palmer 等<sup>[1-2]</sup>采用力学性能实验机对高聚物粘结炸药进行压缩实验观察了炸药装药可能出现的多种损伤形式,如颗粒断裂、界面脱粘、变形孪晶等,并分析了可能的几种破坏机理。陈鹏万等<sup>[3-4]</sup>利用巴西实验研究了高聚物粘结炸药的破坏机理,实验表明,界面脱粘和粘结剂的成穴失效是该类炸药主要破坏机制。孙培培等<sup>[5]</sup>研究了高氯酸铵(AP)颗粒在机械冲击下的破坏机制,分析认为冲击加载后 AP 首先出现了破裂,且破碎严重程度与粒度尺度成正比。田勇等<sup>[6-8]</sup>研究了热作用后 JOB-9003 炸药的损伤状态,并通过超声检测技术表征了热作用后该类炸药的损伤状态,对实验结果分析后认为,温度差与试样损伤破坏率存在正相关关系。目前,国内在该方面的研究主要集中在准静态和热加载方面<sup>[9-11]</sup>,对损伤状态与性能的相关性研究较少,尤其是动态损伤及损伤愈合特性与安全性之间的相互关系研究更少。实弹侵彻过程中,炸药装药数据难以直接测量,有关侵彻过程中的点火机制的研究主要采用数值模拟的方法<sup>[12-15]</sup>,无损伤相关的研究支撑,无法实现数值模拟的验证。

文中将通过冲击模拟加载的方式研究炸药装药损伤及损伤愈合对炸药冲击起爆特征的影响。这些研究结果将对实际使用中的冲击起爆安全性设计及模拟提供技术支撑。

## 1 实验

### 1.1 样品

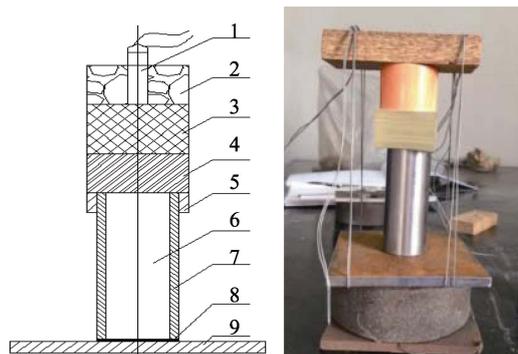
炸药装药试样的制备采用压装和浇注两种工艺。压装工艺制备的样品代号 W,浇注工艺制备样品的代号为 P。压装工艺制备的样品直径为 25 mm,高为 25 mm,浇注工艺直接制成直径为 25 mm、高为 75 mm 的试样。

### 1.2 方法

通过冲击波感度实验得到两种炸药的临界隔板厚度。根据实际过载过程中炸药装药所受冲击压力约 1 GPa 压力计算<sup>[16]</sup>,得到损伤实验中隔板厚度为 60 mm(文中两种炸药的临界起爆压力均高于 1 GPa),在该条件下开展炸药装药损伤实验。在类似于受到冲击后继续储存的情况下,冲击损伤实验后,将试样在真空干燥器中放置 7 天,再开展冲击波感度实验,获得损伤后炸药装药的冲击感度。根据文献<sup>[17]</sup>研究结果,炸药装药在侵彻靶板时,撞击初始阶段在炸药装药内部形成的应力波为类似于冲击波的强间断波。在这种情况的模拟中,采用冲击加载的方式,具体是通过导爆索长度(导爆索的爆轰速度为

8000 m/s)控制损伤加载波脱离试样后(即完成第一次损伤后),使损伤后冲击感度实验中的冲击紧接着作用在试样上,两个冲击波加载至试样上的时间差,可根据典型多层靶侵彻实验的时间差设计。这种设计只是针对侵彻过程中炸药装药轴向冲击应力波作用下的模型模拟,是基于低幅值的冲击波会在炸药装药中形成一定损伤的原理设计的,虽然不能完全代表侵彻过程中装药的安全性,但可以为侵彻研究提供一种操作性较强的思路和方法。

1) 类似于受到冲击后继续储存的的冲击损伤实验:采用隔板实验对炸药样品进行冲击加载,装置如图 1 所示。主发药柱是压制钝化黑索今,密度为  $(1.60 \pm 0.05) \text{ g/cm}^3$ ,直径为 40 mm;隔板为有机玻璃,直径为  $(40 \pm 0.1) \text{ mm}$ ;被试炸药样品装填于尺寸为  $\phi 25 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$  的钢管中;见证板为普通钢板。假设选择的试样质量无差异,通过严格控制冲击损伤试验中冲击波的压力后,可假设相同的冲击压力在炸药试样中形成的损伤程度也相同。



1-8号电雷管 2-雷管座 3-主发药柱 4-有机玻璃隔板 5-支架 6-试样 7-钢管 8-硬纸板垫片 9-见证板

图1 隔板实验装置

2) 冲击波感度影响实验参照 GJB 772A—1997 602.1 执行。

3) 类似于侵彻多层靶板时的模拟实验:浇注炸药粘结剂为韧性较大高分子材料,在受到冲击后,随着时间的推移,会发生损伤的愈合。为了研究这种愈合行为对冲击起爆特性的影响规律,通过导爆索控制损伤实验和损伤后感度实验的时间间隔接近于多层靶板侵彻实验中的时间间隔,从而实现对炸药装药侵彻多层靶板时的损伤状态及冲击感度的模拟。

根据未反应炸药装药中冲击波传播速度准确计算出第一次冲击加载完的时间,从而控制第二次起爆时间,使第一次冲击加载完成后,第二次冲击加载刚好到达已经冲击受损后的炸药装药,从而实现受损后炸药装药接近实际侵彻多层靶板时的实际使用状况。根据典型侵彻实验分析,本次模型实验中的时间尺度控制在  $5 \mu\text{s}$  内的时间间隔。具体的实验原理及照片如图 3 所示。

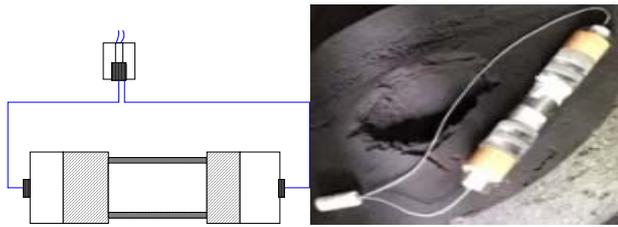


图 3 双隔板实验

## 2 结果

### 2.1 储存条件下的冲击损伤实验

未损伤及损伤后炸药的冲击感度见表 1。损伤后两种样品的隔板厚度没有增加,反而出现了下降,也就是说损伤后样品反而变得更加钝感。这一结论与通常的认识是完全不同的。

表 1 储存条件下的冲击损伤实验结果

Sample	Critical gap thicknesses/mm	
	After damaged	Before damaged
Casting moulding	14	26
Pressed fitting	31	39

### 2.2 侵彻多层靶板时的实验

具体的实验结果见表 2。可以看出,相对于未损伤炸药,无愈合时间的两种样品的冲击感度均有所上升。其中浇注炸药损伤愈合后和损伤愈合前的感度变化显著。

表 2 侵彻多层靶板时的实验结果

Sample	Casting moulding	Pressed fitting
Critical gap thicknesses/mm	33	43

### 2.3 讨论

未损伤、损伤后试样冲击感度数据见表 3 和表 4。可以看出,未损伤时两种炸药的临界隔板值分别是 26 mm 和 39 mm,对应的冲击起爆压力约 6.1 GPa 和 3.2 GPa。放置一段时间后,临界隔板值分别是 14 mm 和 31 mm,对应的临界起爆压力约为 8.1 GPa 和 5.1 GPa。双隔板实验中,炸药的临界隔板值分别是 33 mm 和 43 mm,对应的压力分别约是 4.9 GPa 和 2.7 GPa。

表 3 浇注炸药实验结果

Sample	Critical gap thicknesses/mm	Critical shock wave pressure/GPa
Cards test	26	6.1
Cards test of insult explosive	14	8.1
Double cards test	33	4.9

表 4 压装炸药实验结果

Sample	Critical gap thicknesses/mm	Critical shockwave pressure/GPa
Cards test	39	3.2
Cards test of insult explosive	31	5.1
Double cards test	43	2.7

冲击起爆热点理论认为<sup>[18]</sup>,当冲击波经过炸药后,炸药材料升温,内部形成热点,足够多的热点反应,产生大量热和气体,迅速提高炸药装药自身的反应速率,最终在炸药装药中形成稳定的自持爆轰。损伤后炸药中肯定存在孔洞,孔洞周围含能材料反应产生的气体和热量会向损伤形成的孔洞中传播。假设孔洞尺寸足够大时,可以推测存在初始反应阶段的压力和温度会向孔洞中传播,从而使温度和压力有所降低,可能产生不足以引起其周边的含能材料发生反应的情况。宏观表现为导致临界隔板值降低,也就是临界起爆压力的增加。如果空洞足够小时,上述影响恰恰相反。王洪波等<sup>[19]</sup>研究 PBX 炸药细观空洞与冲击点火特性关系中得到以下结论:当空洞尺寸从 0.015 mm 增加至 0.04 mm 后,损伤炸药的临界起爆压力不再发生变化。该结论可以理解为,当炸药中的空洞尺寸大于 0.04 mm 后,空洞的降压降温效应不再显著。据此推测,在本次实验中,炸药装药形成的空洞尺寸应大于 0.04 mm。因此,结合文中研究结果和王洪波等的结论可以确定,损伤程度与炸药临界起爆压力并不是线性关系,存在一个使炸药冲击感度显著增加的最大尺寸。

另外,模拟多层靶的实验也表明,在损伤后立即进行冲击实验,两种炸药的冲击起爆感度均有增加趋势,但仍在 GPa 级范围内。炸药在侵彻过程中受到的撞击应力约为 1 GPa,即损伤后炸药在侵彻过程中受到的撞击应力也达不到炸药临界起爆压力水平。由此可以推断,这两种炸药在侵彻过程中不会因冲击发生爆炸反应。在实际工程的弹药侵彻实验中,发生点火反应存在其他机制。在这种低强度作用下,炸药装药发生点火反应的机制应属于非冲击点火范畴<sup>[20]</sup>,炸药侵彻安全性设计中应多考虑非冲击点火安全性。

## 3 结论

1) 从文中实验结果可以看出,炸药装药在受到相当的冲击作用后,由于时间间隔的不同,导致炸药的冲击波有显著的差异。分析认为,这主要是因为冲击损伤的程度随时间在发生变化,这种变化是引起文中冲击波感度实验结果差异显著的主要原因。

2) 损伤对炸药冲击感度的影响不是随着损伤程度的增加而增加的,存在一个使炸药冲击感度显著增加的损伤尺寸。

3) 在冲击作用下, 炸药的损伤可能存在愈合现象, 采用与时间不相关的实验方法评估损伤对炸药的冲击波感度的影响是不合理的。

#### 参考文献:

- [1] FIELD J E, PARRY M A, PALMER S J, et al. Deformation and Explosive Properties HMX Powers and Polymer Bonded Explosive[C]// 9<sup>th</sup> Symposium(International) on Detonation. Portland, 1989.
- [2] RAE P J, GOLDREIN H T, PALMER S J, et al. Studies of the Failure Mechanisms of Polymer-bonded Explosive by High Resolution More Interferometry and Environmental Scanning Electron Microscopy[C]// 11<sup>th</sup> Symposium(International) on Detonation. Colorado, 1998.
- [3] 陈鹏万, 丁雁生. 高聚物粘结炸药的力学行为及变形破坏机理[J]. 含能材料, 2000, 8(4): 161-166.
- [4] 周忠彬. 高聚物粘结炸药宏/细观力学行为及变形破坏研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2012.
- [5] 孙培培, 王晓峰, 南海, 等. 落锤冲击加载下炸药基体内不同粒度 AP 颗粒破碎特征[J]. 含能材料, 2015, 23(1): 53-56.
- [6] 田勇, 张伟斌, 温茂萍, 等. JOB-9003 高聚物粘结炸药热冲击损伤破坏相关性研究[J]. 含能材料, 2004, 12(3): 174-177.
- [7] 张伟斌, 田勇, 温茂萍, 等. JOB-9003 炸药热冲击损伤的超声波检测[J]. 含能材料, 2004, 12(2): 85-88.
- [8] 田勇, 张伟斌, 郝莹, 等. 炸药热冲击损伤破坏及超声波特性参量检测[J]. 火炸药学报, 2000, 23(4): 13-15.
- [9] 丁雁生, 潘颖, 蔡瑞娇, 等. PBX 材料的蠕变损伤本构关系[J]. 含能材料, 2000, 8(2): 86-92.
- [10] 李俊玲, 傅华, 谭多望, 等. PBX 炸药的拉伸断裂损伤分析[J]. 爆炸与冲击, 2011, 31(6): 624-630.
- [11] 颜熹琳, 李敬明, 周阳, 等. 高聚物粘结炸药温湿度载荷加速老化实验研究[J]. 含能材料, 2009, 17(4): 412-415.
- [12] 段卓平, 刘益儒, 欧卓成, 等. 多元混合 PBX 炸药孔隙塌缩热点模型[J]. 北京理工大学学报, 2013, 33(8): 771-775.
- [13] 梁增友, 黄风雷, 张震宇. 损伤炸药的冲击起爆数值模拟[J]. 北京理工大学学报, 2006, 26(12): 1047-1051.
- [14] 孙宝平, 段卓平, 万经伦, 等. 基于 Visco-SCRAM 模型的侵入装药点火研究[J]. 爆炸与冲击, 2015, 35(5): 689-695.
- [15] 李媛媛, 王晓峰, 高立龙, 等. 炸药装药侵彻靶板过程的点火机制分析[J]. 四川兵工学报, 2013, 34(12): 24-26.
- [16] MIL-STD-1751A, Safety and Performance Tests for the Qualification of Explosives(Hight Explosives, Propellants, and Pyrotechnics)[S].
- [17] 贾宪振, 李媛媛, 郭洪卫, 等. 弹体侵彻混凝土过程中炸药动态响应数值模拟[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(11): 2528-2531.
- [18] 惠君明, 陈天云. 炸药爆炸理论[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1995.
- [19] 王洪波, 王旗华, 卢永刚, 等. PBX 炸药细观孔洞缺陷对其冲击点火特性的影响[J]. 火炸药学报, 2015, 38(5): 31-36.
- [20] BLAINE W. Asay Shock Wave Science and Technology Reference Library Volume 5 Non-shock Initiation of Explosives[M]. Berlin: Springer Press, 2009.