

文章编号: 1006-9941 (2016) 03-0244-05

# 热冲击对压装含铝炸药性能的影响

王彩玲, 赵省向, 方伟, 李文祥, 姚李娜

(西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 为评价一种黑索今基压装含铝炸药(JHL-X)的环境适应性,利用-55~70℃热冲击试验,研究了JHL-X炸药热冲击前后炸药药柱的内部损伤、安全性能和力学性能。用JHL-X炸药药柱自发火温度和冲击波感度表征了炸药安全性能,用弹性模量、压缩强度和断裂应变表征了力学性能。结果表明,经热冲击后,JHL-X炸药药柱内部主要损伤为空穴和微裂纹。安全性能略有降低,自发火温度从211℃降低至208℃,冲击波感度从51.5 mm增加到53.5 mm。力学性能变化较为显著,弹性模量和压缩强度分别提高了85.3%和37.7%,断裂应变降低29.2%。

**关键词:** 热冲击; 压装含铝炸药; 环境适应性; 内部损伤; 安全性能; 力学性能

**中图分类号:** TJ55; O341

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.03.006

## 1 引言

炸药在贮存、运输和使用过程中不可避免地受热应力作用,产生热损伤,导致武器系统失效。压装含铝炸药是由炸药晶体、铝粉以及少量的钝感粘结剂组成的复合材料,各组分力学性能、热膨胀系数等性能相差较大。由于采用压装装药工艺,压制成型后的炸药装药内部会产生一定的初始损伤,经受不同的环境温度热应力的载荷后,会产生甚至加重热损伤<sup>[1-6]</sup>,使炸药的结构遭到严重破坏,影响炸药的正常使用。炸药热损伤以及损伤对炸药的性能的影响研究已成为近来含能材料的热点。Elban等<sup>[7]</sup>和张伟斌等<sup>[8]</sup>分别研究了低温热应力、高温热应力作用下炸药的微观结构,观察到了炸药微裂纹的萌生和穿晶断裂现象。韦兴文等<sup>[9]</sup>研究了热老化对TATB基高聚物粘结炸药力学性能的影响,杨国满<sup>[10]</sup>等研究了时间、温度对塑料粘结炸药力学性能的影响。这些研究主要集中在低温或者高温热应力对炸药性能影响,而低温交替冲击作用下产生的热应力对炸药的微观结构以及炸药的安全性能和力学性能的变化研究较少,对压装含铝炸药性能的影响研究至今尚未见报道。

为了探讨温度冷热交变作用下的热应力对压装用

含铝炸药使用性能的影响,本研究对黑索今(RDX)基压装含铝炸药(JHL-X)进行了高低温循环冲击试验,通过观察试验前后炸药微观结构,测量自发火温度、力学强度和冲击波感度等参数,研究了热冲击对炸药微观结构损伤以及安全性能和力学性能等的影响。

## 2 实验部分

### 2.1 试验样品

JHL-X炸药是以RDX为主体的压装含铝炸药,钝感黏结剂主要由高分子碳氢型热塑性树脂A和低分子有机混合物B组成。采用60t精密压机将其造型粉压制不同尺寸的试样药柱,其中: $\Phi 40\text{ mm}\times 40\text{ mm}$ 药柱3发用于药柱损伤检测; $\Phi 50\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 药柱16发, $\Phi 50\text{ mm}\times 40\text{ mm}$ 药柱8发,用于冲击波感度测试; $\Phi 20\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ 药柱7发,其中2发打孔,孔径为 $\Phi 3\text{ mm}$ ,孔深约15 mm,用于自发火温度的测试,5发用于力学性能测试。药柱密度范围 $(1.750\pm 0.003)\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

### 2.2 试验方法

#### 2.2.1 热冲击试验方法

本试验参考标准GJB150.5-1986《军用设备环境试验方法温度冲击试验》进行。试验使用SDJ705型高低温湿热交变试验箱,其温湿度调节范围分别为-70~100℃和30%~98%。温湿度偏差分别为 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $\pm 3\%$ ,在湿热模式下其温度均匀度 $\leq 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,波动度为 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。结合GJB1172.2-1991《军用设备气候极值地面气温》,选定的热冲击试验参数如下:

收稿日期: 2015-03-18; 修回日期: 2015-06-16

作者简介: 王彩玲(1971-),女,副研,主要从事炸药配方及工艺研究。  
e-mail: wcl2054@163.com

(1) 一个周期的循环温度顺序为: 20 ~ 70 °C 至 -55 ~ 20 °C (如图 1 所示)。

(2) 试验温度保持时间: 高温 (70 °C)、低温 (-55 °C) 均保持 30 min。

(3) 转换时间: 高温和低温之间的转换时间为 5 min。

(4) 循环程序与周期: 一个周期 1 h, 先高温, 后低温, 依此顺序分别进行 3 个循环。

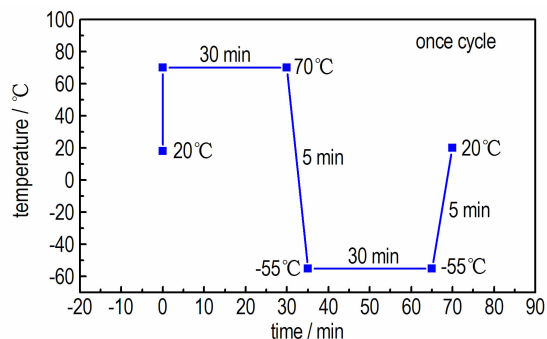


图 1 热冲击试验程序

Fig.1 Test program of the thermal shock

### 2.2.2 药柱内部损伤检测

炸药内部损伤情况采用美国 FEI 公司 QUANTA 600 场发射扫描电镜 (SEM) 观察。

### 2.2.3 自发火温度测试

采用自行设计的一种烤燃实验装置<sup>[11]</sup>。包括加热炉、环形热电极、热电偶、控温仪和计算机。通过控温仪控制加热炉温度, 控温范围为 0 ~ 800 °C, 控温精度为  $\pm 0.5$  °C。加热炉炉壁的环形热电极用于均衡加热炉的温度。实验系统中用 4 个直径为 2 mm 测量热电偶测量温度, 用计算机数据采集系统对实验数据进行记录和处理。实验时, 将试样安装于加热炉中, 样品中心孔内布放一只测温传感器, 再以  $1$  °C · min<sup>-1</sup> 的升

温速率进行加热, 直至样品发生反应。通过实验得到炸药发生爆炸的时间、温度、现象以及炸药内部温度随时间变化的曲线。平行实验至少 2 发, 实验结果为平行实验数据的平均值, 误差  $\leq \pm 2$  °C。

### 2.2.4 冲击波敏感度测试

采用标准隔板试验<sup>[12]</sup>测得炸药 50% 起爆时的隔板厚度, 用以比较试样的相对冲击波敏感度。施主药柱为太安标准药柱, 密度为  $1.57$  g · cm<sup>-3</sup>, 高度为 50 mm, 直径为 50 mm, 衰减隔板为有机玻璃板, 被测炸药由 2 发高度为 50 mm、1 发高度为 40 mm 的药柱组成, 总高度 140 mm。实验按 Bruceton 升降法<sup>[13]</sup>进行, 隔板厚度的升降步长为 0.5 mm; 被测试样末端钢鉴定块上的炸痕深度大于零间隙 (隔板厚度为零) 时平均炸痕深度的 50%, 判定为起爆。由锰铜压力传感器法<sup>[14]</sup>得到标准施主药柱所产生的冲击波在有机隔板中的衰减规律, 根据实验测得的 50% 隔板值, 测得对应的冲击波输出压力 (有机玻璃) 端面输出压力。

### 2.2.5 力学性能测试

抗压强度采用 GJB772A-1997 炸药试验方法方法 416.1 抗压强度压缩法<sup>[15]</sup>。

## 2.3 结果与讨论

### 2.3.1 热冲击对炸药装药的微观损伤

采用扫描电镜研究了 JHL-X 炸药热冲击前后炸药内部的微观形貌, 结果如图 2 所示。由图 2a 可见, 热冲击前, 炸药表面颗粒之间的交界面可分辨 (图中箭头所指的位置), 但并不很明显。热冲击以后, 相同放大倍数情况下, 可清楚地观察到炸药造型粒之间明显的交界面, 还可看到界面之间出现了孔穴和脱粘以及裂痕 (见图 2b)。放大 1000 倍后, 颗粒界面间的裂痕变得更加明显 (见图 2c)。从图 2 中未观察到炸药晶体大面积的断裂。

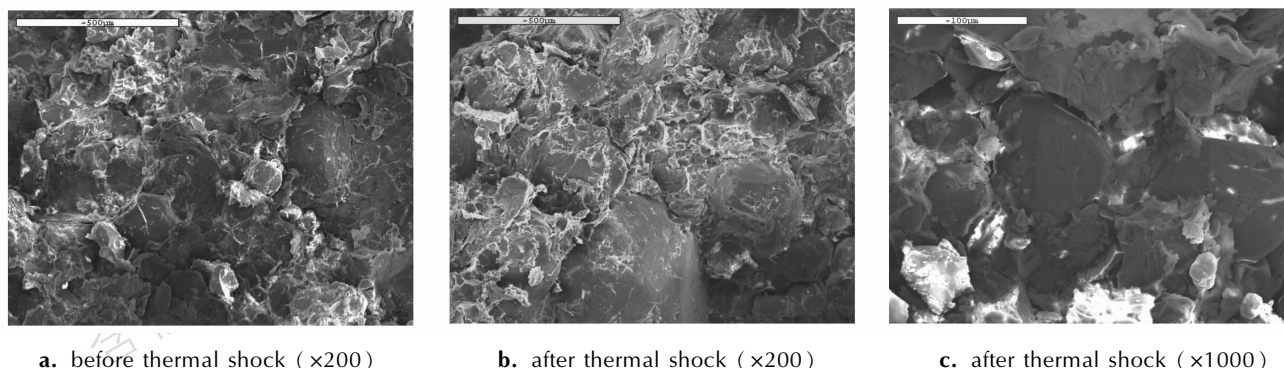


图 2 JHL-X 炸药药柱断面扫描电镜图

Fig.2 SEM images of JHL-X explosive cylinder cutting section before and after thermal shock

由图 2 可以看出,在热冲击作用下,JHL-X 炸药发生界面脱粘和成穴的形成,当成穴和脱粘发展到一定程度后,粘结剂开裂,产生微裂纹。因此,JHL-X 炸药在热冲击作用下的损伤形式主要包括空穴、脱粘和微裂纹。这与陈鹏万等<sup>[1]</sup>的研究结果相同。针对热冲击作用下炸药晶体未发生大面积断裂这一现象,陈鹏万采用 Griffith 断裂理论估算了界面脱粘应力和粘结剂成穴应力,获得了界面脱粘应力和粘结剂成穴应力显著低于炸药晶体的断裂应力的结果,合理地解释了炸药晶体未发生大面积断裂的原因。

需要特别提出的是,本试验未观察到 RDX 炸药晶体的穿晶,这可能与炸药试样的制备,或与包覆 RDX 的钝感粘结剂体系对热应力的释放有关,需要进一步研究。

### 2.3.2 热冲击对炸药安全性的影响

在上述实验方法和实验条件下,测试了热冲击前后 JHL-X 炸药自发火温度和冲击波感度,并进行了对比分析,结果如图 3 和表 1 所示。

由图 3 可以看出,JHL-X 炸药在药柱冲击前自发火温度为 211 °C,热冲击后自发火温度为 208 °C。与热冲击前相比,自发火温度降低了 3 °C。表明 JHL-X 炸药的热安定性在受到热冲击后有一定程度的降低,但不显著。

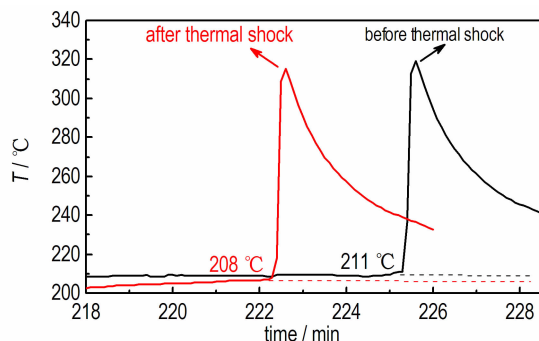


图 3 JHL-X 炸药药柱的温度-时间历程曲线

Fig. 3 Curves of temperature-time course for JHL-X cylinder

表 1 JHL-X 炸药药柱在热冲击前后的冲击波感度

Table 1 Shock wave sensitivity of JHL-X cylinder before and after thermal shock test

| test projects | JHL-X  |       |
|---------------|--------|-------|
|               | before | after |
| $G_{50}$ / mm | 51.5   | 53.5  |
| $p$ / GPa     | 2.00   | 1.85  |

Note:  $G_{50}$  represents the shock sensitivity,  $p$  represents the critical detonation pressure.

由表 1 可以看出,热冲击后 JHL-X 炸药冲击波起

爆临界隔板值为 53.5 mm,较热冲击前提高了 2 mm;临界起爆压力为 1.85 GPa,较热冲击前的临界起爆压力(2.00 GPa)降低了 0.15 GPa。可见热冲击后,炸药冲击波感度有一定的提高,但增幅较小。

理论上讲,炸药内部的晶体缺陷、空穴和裂纹是引起炸药起爆的热点点火源,会对炸药热感度和冲击波感度产生不同程度的影响,其中晶体缺陷是炸药安全性能最薄弱的环节。这是由于热作用下,炸药的热分解首先在晶体缺陷处开始,然后才向晶体表面扩展;冲击波作用下,晶体内部缺陷的尺寸及数量促进了热点群的形成和热点的传播,显著增加炸药爆炸的概率。研究结果也表明,对于不同品质的 RDX/HMX 炸药,晶体缺陷的增加将引起炸药热感度和冲击波感度的显著增加,可使 5 s 延滞期爆点降低 51 ~ 54 °C<sup>[16]</sup>,冲击波感度  $G_{50}$  降低 50%<sup>[17]</sup>。

从图 3 和表 1 可以看出,热损伤对 JHL-X 炸药的热感度和冲击波感度影响较小,说明了热冲击并未使 JHL-X 炸药晶体内部晶体缺陷显著增加。因此,炸药内部空穴、微裂纹等损伤的增加是导致 JHL-X 炸药热感度和冲击波感度升高的主要原因。这与热冲击对炸药装药的微观损伤研究结果一致。

### 2.3.3 热冲击后药柱准静态力学性能研究

采用弹性模量  $E$ 、压缩强度  $\sigma_m$ 、断裂应变  $\varepsilon_m$  描述热冲击后 JHL-X 炸药准静态下的力学性能。弹性模量  $E$  由最大载荷量 5% ~ 20% 对应的应力-应变确定<sup>[18]</sup>,结果见表 2。

表 2 热冲击前后 JHL-X 炸药药柱的力学性能参数

Table 2 Mechanical performances of JHL-X cylinder before and after thermal shock

| sample               | $E$ / MPa | $\sigma_m$ / MPa | $\varepsilon_m$ / % |
|----------------------|-----------|------------------|---------------------|
| before thermal shock | 534.0     | 9.00             | 3.42                |
| after thermal shock  | 990.0     | 12.4             | 2.42                |

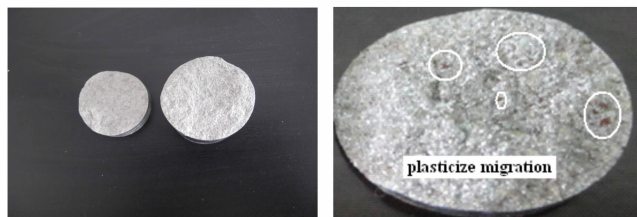
Note:  $E$  is elastic modulus,  $\sigma_m$  is compressive strength,  $\varepsilon_m$  is fracture strain.

由表 2 可知,热冲击对 JHL-X 炸药的力学性能影响显著。经受热冲击后,弹性模量  $E$  和压缩强度  $\sigma_m$  分别提高了 85.3% 和 37.7%,断裂应变  $\varepsilon_m$  降低了 29.2%。结果表明,受高低温度冲击循环后的炸药发生了硬化,脆性提高,弹性模量和压缩强度显著增加。

温度对炸药力学性能的影响主要包括以下两个方面:一是炸药的损伤。经热冲击后的 JHL-X 炸药内部存在许多微裂纹、孔洞等缺陷,在外力作用下,这些缺

陷附近就会产生应力集中现象,成为炸药结构中的薄弱环节,降低了炸药的力学强度和弹性模量;二是炸药组分在低温或高温热应力作用下力学性能的变化。在 JHL-X 组分中,RDX、Al 粉与黏结剂间的弹性模量、压缩强度和应变有数量级的差别,RDX 晶体、Al 粉的弹性模量、压缩强度可以达到吉帕级,而钝感黏结剂是由高分子碳氢型热塑性树脂 A 和低分子有机混合物 B 组成的,黏结剂体系的弹性模量和压缩强度仅在兆帕级<sup>[18]</sup>。RDX 晶体、Al 粉的弹性模量、压缩强度随着温度的变化不大,仍在吉帕级以上,但钝感黏结剂体系的力学性能随温度的变化却很大。因此,与其他组分相比较,钝感黏结剂在热作用下力学性能的优劣是影响炸药力学性能的另一个主要因素。以上两方面因素的共同作用决定了热冲击后炸药的力学性能的变化。从表 2 可以看出,JHL-X 炸药中的钝感黏结剂体系在经受热冲击后力学性能增强作用大于损伤对炸药力学性能的减弱作用。

为了探究热冲击后钝感黏结剂体系力学性能增强作用,分别回收了热冲击前后压缩强度试验的 JHL-X 炸药药柱,观察药柱的断面,热冲击前后力学性能试验的药柱断面形貌如图 4 所示。比较图 4a 和图 4b 可以看出,热冲击前的药柱断裂面较为平整,鲜有凹坑,而经受热冲击后的炸药断裂面多处有较深的凹坑,且凹坑处填充有橙红色物质。分析认为,JHL-X 炸药中的钝感黏结剂体系在受到热冲击时,低分子有机混合物 B 发生相变、溶出,与高分子碳氢型热塑性树脂 A 脱离,失去了增塑作用。同时,树脂 A 受到热冲击后,树脂结晶度增加,造成了分子的紧密堆集,分子间作用力增强,也使树脂 A 强度和硬度增加,弹性下降,表现为破坏应力提高,脆性增加,应变减小。因此,热冲击后的 JHL-X 炸药弹性模量和抗压强度增加,断裂应变降低。



a. before thermal shock test b. after thermal shock test  
图 4 热冲击前后 JHL-X 炸药断面图

Fig. 4 Cutting section of JHL-X cylinder before and after thermal shock

### 3 结 论

(1) 热冲击后 JHL-X 炸药内部产生的孔隙、微裂纹等损伤是炸药自发火温度和冲击波敏感度发生变化的根本原因。

(2) 热冲击后的 JHL-X 炸药自发火温度 208 °C, 较热冲击试前降低了 3 °C, 冲击波敏感度临界起爆压力 1.85 GPa, 较热冲击前试验前低了 0.15 GPa。与热冲击试验前比较,热冲击后 JHL-X 炸药热感度和冲击波敏感度略有升高。

(3) 热冲击对 JHL-X 炸药的力学性能影响显著。经受热冲击后,JHL-X 炸药的弹性模量  $E$  和压缩强度  $\sigma_m$  明显增加,分别提高了 85.3% 和 37.7%,而断裂应变  $\varepsilon_m$  显著降低,减小了 29.2%。

#### 参考文献:

- [1] 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: 77-78.
- [2] Dobmzt B M, Crawford P C. LLNL Explosive handbook properties of chemical explosives and simulates [R]. UCRL\_52997, 1985.
- [3] Sewcn T D, Menikoff R. A molecular dynamics simulation study of elastics of HMX[J]. *Journal of Chemical Physics*, 2003, 19 (14): 7417-7426.
- [4] Li M, Zhang J, Xiong C Y, et al. Damage and fracture prediction of plastic-bonded explosive by digital image correlation processing[J]. *Optical and Laser Engineering*, 2005, 43(8): 856-868.
- [5] Berghout H L, Son S F, Skidmore C B, et al. Combustion of damage PBX9501 explosive [J]. *Thermochimica Acta*, 2002, 384: 261-277.
- [6] Demol G, Lambert P, Trumel H. A study of the microstructure of pressed TATB and its evolution after several kinds of solicitations [C] // Eleventh International Detonation Symposium, 1998: 309-316.
- [7] Elban W L. Production and assessment of damaged high energy propellant samples. NSWC TR 79-259 [R], Naval Surface Weapons Center, 1980.
- [8] 张伟斌,田勇,温茂萍,等. JOB-9003 炸药(激热)及冲击损伤破坏及超声特征[J]. *火炸药学报*, 2001, 24(4): 61-65. ZHANG Wei-bin, TIAN Yong, WEN Mao-ping, et al. Water-bathed thermal shock damage of PBX JOB-9003 and its ultrasonic characteristics [J]. *Chinese Journal of Explosive & Propellants*, 2001, 24(4): 61-65.
- [9] 韦兴文,李敬明,涂小珍,等. 热老化对 TATB 基高聚物粘结炸药力学性能的影响[J]. *含能材料*, 2010, 18(2): 157-161. WEI Xing-wen, LI Jing-ming, TU Xiao-zhen, et al. Effects of thermal ageing on mechanical properties of PBX based on TATB [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2010, 18(12): 157-161.
- [10] 杨国满,胡晓棉. 时间温度效应与塑料粘结炸药的力学性能[J]. *火炸药学报*, 2004, 27(1): 5-9.

- YANG Guo-man, HU Xiao-mian. Time - temperature shift factor and mechanical properties of explosive [J]. *Chinese Journal of Explosive & Propellants*, 2004, 27(1): 5-9.
- [11] 王晓峰, 戴蓉兰, 涂健. 传爆药的烤燃实验[J]. 火工品, 2001(2): 5-7.
- WANG Xiao-feng, DAI Rong-lan, TU Jian. Cookoff tests of booster explosives[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2001(2): 5-7.
- [12] 韩勇, 鲁斌, 蒋志海. JO-9159/ECX 复合装药的冲击波敏感度研究[J]. 含能材料, 2008, 16(2): 157-161.
- HAN Yong, LU Bin, JIANG Zhi-hai. Shock sensitivity of JO-9159/ECX composite charge [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2008, 16(2): 157-161.
- [13] Barry T Neyer. AD-optimality-based sensitivity tests[J]. *Technometrics*, 1994, 36(1): 61-70.
- [14] GJB772A-97, 中华人民共和国军用标准: 炸药试验方法[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 1997.
- [15] 刘玉存, 王作山, 吕春玲, 等. 黑索今粒度及粒度级配对高分子粘结炸药冲击波感度的影响[J]. 兵工学报, 2005, 26(1): 126-128.
- LIU Yu-cun, WANG Zuo-shan, Lü Chun-ling, et al. Influence of particle size and gradation of RDX on the shock sensitivity of a polymer bonded explosive [J]. *Acta Armamentarii*, 2005, 26(1): 126-128.
- [16] 黄亨建, 董海山, 舒远杰, 等. HMX 中晶体缺陷的获得及其对热感度和热稳定性的影响[J]. 含能材料, 2003, 11(3): 123-126.
- HUANG Heng-jian, DONG Hai-shan, SHU Yuan-jie, et al. The preparation of HMX crystals with defects and the influences of crystal defects on thermal sensitivity and stability [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2003, 11(3): 123-126.
- [17] 花成, 黄明, 黄辉, 等. RDX/HMX 炸药晶体内部缺陷表征与冲击波敏感度研究[J]. 含能材料, 2010, 18(2): 152-157.
- HUA Cheng, HUANG Ming, HUANG Hui, et al. Intragranular defects and shock sensitivity of RDX/HMX [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2010, 18(2): 152-157.
- [18] 董海山, 周芬芬. 高能炸药及其相关物性[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 61-63.
- DONG Hai-shan, ZHOU Fen-fen. Performance of High Explosives And Correlates [M]. Beijing: Science Press, 1989: 61-63.

## Effects of Thermal Shock on the Performance of a Pressed Aluminized Explosive

WANG Cai-ling, ZHAO Sheng-xiang, FANG Wei, LI Wen-xiang, YAO Li-na

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

**Abstract:** To evaluate the environmental adaptability of the pressed RDX-based aluminized explosive (JHL-X), the internal damage, safety and mechanical performance of grain before and after thermal shock of JHL-X were studied by -55~70 °C temperature cycle impact test. The safety performance of this explosive was characterized by spontaneous ignition temperature and shock wave sensitivity. The mechanical performance was characterized by elasticity modulus, compression strength and fracture strain. Results show that the main damage of the JHL-X explosive grain interior after the thermal shock is micro-pores and micro-cracks. Its safety property decreases slightly. The spontaneous ignition temperature drops from 211 °C to 208 °C, and the shock wave sensitivity increases from 51.5 mm to 53.5 mm. The elasticity modulus and compression strength increase by 85.3% and 37.7%, respectively, while the fracture strain decreases 29.2%.

**Key words:** thermal shock; pressed aluminized explosive; environmental adaptation; internal damage; safety performance; mechanical performance

**CLC number:** TJ55; O341

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.03.006