

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2019.04.008

# 高低温循环及对称冲击耦合加载下 炸药的安全性研究<sup>\*</sup>

屈可朋 李亮亮 肖 玮  
西安近代化学研究所(陕西西安,710065)

[摘 要] 基于一级轻气炮加载装置,研究了高低温循环及对称冲击耦合加载下某黑索今(RDX)基含 Al 炸药的安全性,计算了缺陷处的内能等参数。结果表明:高低温循环后,炸药试样出现可见的孔隙。对称碰撞加载后,不经高低温循环的试样未发生点火,应力加载峰值为 835 MPa,加载时间为 35  $\mu$ s;而经历高低温循环的试样出现点火,点火前应力为 242 MPa,加载时间 11  $\mu$ s。高低温循环所产生的缺陷是导致炸药点火的重要原因。

[关键词] 炸药;安全性;高低温循环试验;对称碰撞试验

[分类号] V512<sup>+</sup>.2

## Safety of Explosive under High and Low Temperature Cycle and Coupling Loading of Symmetrical Colliding

QU Kepeng, LI Liangliang, XIAO Wei  
Xi'an Modern Chemistry Research Institute (Shaanxi Xi'an, 710065)

[ABSTRACT] Safety of RDX-based aluminized explosive under temperature cycle and coupling loading of symmetrical colliding was evaluated by one-stage light-gas gun experiment, and the parameters such as internal energy were calculated. Results show that it has appeared defects of explosive after temperature cycle experiment. Ignition of this explosive with defects occur under the conditions of symmetrical colliding, the loading stress is 242 MPa, and the loading time is 11  $\mu$ s. While the ignition of explosive without defects will not occur under the same condition, the loading stress is 835 MPa, and the loading time is 35  $\mu$ s. Defects caused by temperature cycle are the main reasons for ignition.

[KEYWORDS] explosive; safety; high and low temperature cycle test; symmetrical colliding test

## 引言

侵彻战斗部在使用过程中承受多种载荷作用,如冲击载荷、剪切载荷、热载荷等。在多种载荷作用下,炸药装药的安全性已成为研究的重点,尤其随着防御工事性能的提高,加载到战斗部的载荷更加苛刻,迫切需要对多种载荷耦合作用下的炸药装药安全性进行研究。目前,炸药在冲击载荷或热载荷作用下的安全性问题已得到较多关注,如田勇等<sup>[1]</sup>研究了炸药在热作用下的损伤问题;梁增友等<sup>[2]</sup>对损伤炸药的冲击起爆进行了数值模拟,建立了基于 KIM 弹黏塑性球壳塌缩热点模型原理的三项式整体

化学反应速率方程模型,该模型与试验结果吻合较好;李德聪等<sup>[3]</sup>基于炸药的热爆炸理论,研究了炸药装药-弹体在侵彻混凝土厚靶过程中的炸药安全性,结果表明,炸药装药与弹壳接触面间的强摩擦形成热点,导致炸药早炸;林聪妹等<sup>[4]</sup>研究了 PBX 炸药的抗热冲击性能;向梅等<sup>[5]</sup>研究了炸药在烤燃环境中的热反应规律;王晨等<sup>[6]</sup>研究了炸药在低强度冲击作用下的反应特性;李银成<sup>[7]</sup>研究了均匀炸药冲击起爆和起爆后的行为。但此类研究仅关注单一载荷作用,对冲击载荷-热载荷耦合作用下的炸药安全性研究较少。

本研究中,拟基于一级轻气炮设备,对高低温循环后的某黑索今(RDX)基含 Al 炸药试样进行对称冲

<sup>\*</sup> 收稿日期:2019-02-26  
基金项目:国家安全重大基础研究项目(号码省略)  
第一作者:屈可朋(1983-),男,副研究员,主要从事弹药动力学响应及安全性研究。E-mail:155301498@qq.com

击,研究炸药在冲击载荷-热载荷耦合作用下的安全性,为冲击载荷-热载荷耦合作用下炸药安全性研究提供技术支撑,为其他炸药在复杂应力作用下的安全性研究提供参考。

## 1 试验

### 1.1 样品及仪器

试样为 RDX 基含 Al 炸药(质量分数):RDX 70%、Al 20%、其他(低分子钝感剂、高能黏合剂) 10%,采用直接压装工艺制成,密度为  $1.80 \text{ g/cm}^3$ ,尺寸  $\varnothing 30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ ,约 38 g。

### 1.2 高低温循环试验

交变湿热试验箱:型号 PCH(r10)-800ITUH,上海晟泰试验设备有限公司,温度范围:  $-70 \sim 150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,温度升降速率不大于  $1 \text{ }^{\circ}\text{C/min}$ ,精度  $\pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,1 个循环 24 h。

依据西安近代化学研究所企业标准 Q/AY250—1996《炸药环境适应性试验:高低温温度循环试验方法》进行高低温循环试验,高低温循环范围:  $-54 \sim 71 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,共进行 7 个循环,循环程序见图 1。

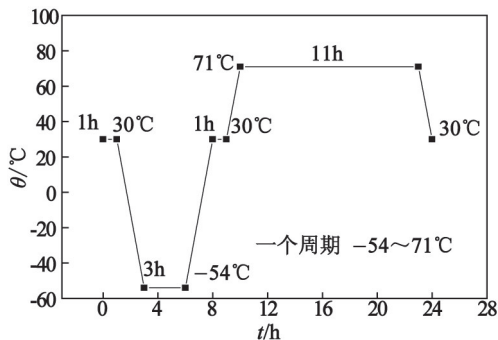


图 1 高低温循环试验一周期程序示意图

Fig. 1 Schematic diagram of one periodic process of high-low temperature cyclic test

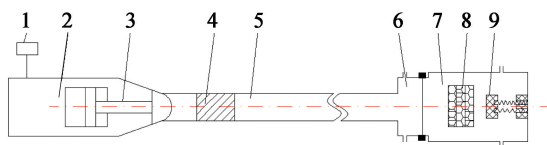
### 1.3 对称碰撞试验

对称碰撞试验在西安近代化学研究所的一级轻气炮上进行加载,气炮直径 130 mm。装置主要包括增压装置、气室、锥阀、弹丸、发射管、测试室、靶室、靶及缓冲器等部分,弹丸速度范围  $300 \sim 600 \text{ m/s}$ ,对称碰撞目标,加载应力可达 1 GPa,加载时间为毫秒量级。此装置中,弹丸(模拟靶体)运动,试验弹(内含炸药)固定,故可以模拟研究侵彻过程中的炸药装药安全性。

比较同种炸药在不同高低温循环条件(本试验中为经高低温循环试验及未经高低温循环试验)下的安全性。常用的方法是固定弹丸的质量、材质及

加载速度。因此,本试验中固定的弹丸参数为:材质,聚乙烯;质量,2.5 kg;加载速度,400 m/s。弹丸与装药处于同一轴线,采用红外水平仪进行确认;高低温循环后试样在  $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$  保温,试验前取出进行装配,试验弹从装配、安装到进行试验,时间可控制在 5 min 内,各组试验进行 3 次,取重复率较高的试验结果作为最终数据。

装置示意图如图 2 所示,试验原理及方法可参照文献[8],冲击速度的确认(采用光电测试仪进行测量)、传感器的标定等方法参考文献[9]。



1 - 增压装置;2 - 气室;3 - 锥阀;4 - 弹丸;  
5 - 发射管;6 - 测试室;7 - 靶室;  
8 - 靶;9 - 缓冲器。

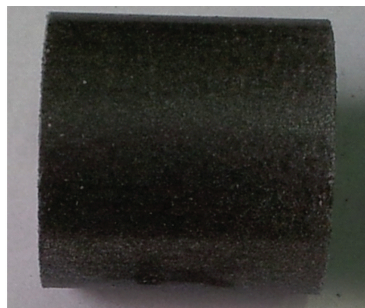
图 2 一级轻气炮试验装置原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of one-stage light-gas gun

## 2 结果与讨论

### 2.1 高低温循环试验

高低温循环试验前、后的试样照片如图 3 所示。从图 3 可以看出,高低温循环前药柱表面表现



(a) 高低温循环前



(b) 高低温循环后

图 3 高低温循环前、后的试样表面

Fig. 3 Surface of sample before or after high-low temperature cycle

上无肉眼可见的裂纹,但高低温循环后的药柱表面存在较多孔隙(凹坑),且分布不均匀。分析原因可能是因为:在高低温循环后试验的低温阶段(−54℃),药柱温度降低,体积缩小,因固体组分(RDX、Al)、低分子钝感剂及黏合剂组分的体积缩小程度不同,药柱会产生各种缺陷,如微孔;高温阶段(71℃),药柱受热膨胀,各组分的热膨胀系数不同,各组分的热膨胀量存在差异;在收缩-膨胀过程中,各固体组分的颗粒位置发生改变,微孔等缺陷的数量及大小可能增加,而液化或软化后的低分子钝感剂通过微孔发生流动迁移,因表面张力的作用而富集于药柱表面处,进而流失,在流失处产生表观上可见的孔隙。这些孔隙中含有空气,在冲击过程中,将影响装药安全性。

2.2 对称碰撞试验

对称碰撞试验在一级轻气炮上进行。对称碰撞试验结果如表1所示。所获得的对称碰撞试验 $\sigma$ - $t$ 曲线见图4。

表1 对称碰撞试验结果

Tab.1 Symmetrical impact experiment test				
状态	$v/$ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$\sigma/$ MPa	$t/$ $\mu\text{s}$	结果
未经高低温循环	400	835	35	未点火
经高低温循环	400	242	11	点火

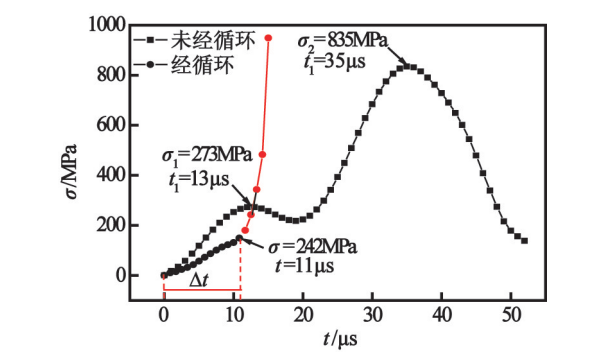


图4 对称碰撞试验曲线

Fig.4 Curves of symmetrical impact experiment

从表1及图4可以看出,未经高低温循环的试样未发生点火,而经高低温循环的试样发生点火。其中,未经高低温循环试样的 $\sigma$ - $t$ 曲线上有两个峰,为方便讨论,分别记为 $\sigma_1$ 和 $\sigma_2$ ,第一个峰值出现在13 s, $\sigma_1$ 为273 MPa,第二个峰值出现在35 s, $\sigma_2$ 为835 MPa。文献[10]认为, $\sigma_1$ 加载载荷对炸药进行快速压缩,产生热点,并引起热点处的温度上升,最终导致热点(细微缺陷或裂纹)处闭合,继续加载产生 $\sigma_2$ 峰;经高低温循环的试样在加载到11 s即发生点火,点火前应力值为242 MPa。同时,从图4可

以看出, $\sigma$ - $t$ 曲线在0~11 s间,即第一个应力峰 $\sigma_1$ 之前,经高低温循环试样的应力低于未经高低温循环试样。分析原因可能为,试样经过冲击被压缩,孔隙周围的炸药坍塌,表现出应力逐渐上升的趋势,又由于经过高低温循环后,试样内部及表面的孔隙中存在空气,即经高低温循环试验后试样内部及表面的孔隙,其体积、数量均大于未经高低温循环的试样,达到相同的应力值,经高低温循环的试样所需的时间长于未经高低温循环的试样,故经高低温循环的试样,其应力值增长低于未经高低温循环的试样。而经高低温循环的试样在对缺陷压缩过程中,缺陷处的气体受到快速压缩,内能增加,温度升高,因缺陷内空气及炸药的导热系数小,炸药热分解所产生的热量无法释放,对压缩后的空气及炸药进行了二次加热,如此反复,热量积累到一定程度,炸药点火。

不同高低温循环条件下,对称碰撞试验后的试验弹状态如图5所示。图5表明,未经高低温循环的试样在对称碰撞时,弹裂后碎片数量少,体积大,试验弹的内壁未见黑色烧蚀痕迹,仅有试样压缩痕迹,现场可见散落的炸药试样,此为炸药未反应的表现,这说明400 m/s的速度是所选炸药进行冲击压缩时的临界速度,提高速度,炸药将发生反应。而经高低温循环的试样在对称碰撞时,残片数量多,体积小,试验弹的内壁可见黑色烧蚀痕迹,此为点火反应的表现。可见,经高低温循环炸药的安全性低于未经高低温循环的炸药。

为定量分析经高低温循环的炸药表面孔隙对炸药点火的影响,将孔隙中的空气假定为理想气体,由



(a) 未经高低温循环,重大开裂



(b) 经高低温循环,点火

图5 试验后试验弹状态

Fig.5 Test projectile after symmetrical impact experiment



热力学<sup>[11]</sup>知识可知,理想气体绝热可逆过程有:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^{1-\gamma} \quad (1)$$

式中:  $T_1$ 、 $T_2$  分别为开始和压缩结束时的温度, K;  $V_1$ 、 $V_2$  分别为开始和压缩结束时体积,  $\text{mm}^3$ ;  $\gamma$  为空气的绝热指数, 近似为常数,  $\gamma = 1.4$ 。

将炸药表面孔隙做球形处理, 采用精度 0.05 mm 的游标卡尺测得孔隙表面的最大直径为 1.70 mm, 则半径  $R_1 = 0.85$  mm, 结合  $T_1 = 298$  K (25 °C)、球体体积计算公式及式(1), 可得缺陷处温度-半径的计算公式:

$$T_2 = 298 \cdot \left( \frac{R_2}{0.855} \right)^{-1.2} \quad (2)$$

郝志坚等<sup>[12]</sup>认为, 热点成长为爆炸时, 热点温度为 300 ~ 600 °C (573 ~ 873 K), 代入式(2), 得到缺陷压缩至半径为 0.353 ~ 0.501 mm 时即可达到热点形成温度, 此时缺陷(孔隙)半径约为初始半径的 41% ~ 59%, 实际加载条件下, 孔隙压缩后的半径远小于此值, 即缺陷处温度将高于 600 °C<sup>[13]</sup>, 此温度也远超过了单质 RDX 的熔点(204 °C)<sup>[14]</sup>。

同时, 若将孔隙中的气体作为理想气体处理, 则内能( $\Delta E$ )由公式计算可得:

$$\Delta E = \frac{m}{M} \cdot \frac{i}{2} R (T_2 - T_1) \quad (3)$$

式中:  $m$  为气体的实际质量, g;  $M$  为气体的摩尔质量, g/mol;  $i$  为气体的自由度, 因空气主要由  $\text{N}_2$  及  $\text{O}_2$  组成, 对于双原子分子,  $i = 5$ ;  $R$  为摩尔气体常数, 定值, 8.314 J/(K/mol);  $T_1$  为孔隙中空气压缩前的温度, K;  $T_2$  为孔隙中空气压缩后的温度, K。其中, 空气密度  $\rho = 1.29$  g/L, 压缩后缺陷半径  $R_2$  取 0.501 mm。

由式(3)可得, 压缩后的缺陷气体内能约为  $4.3 \times 10^{-8}$  J, 若压缩后半径进一步减小, 缺陷处能量将持续增加, 这些能量将会传播给炸药, 使得壁面处点燃、发火、爆炸。因此, 缺陷处空气压缩产生的高温和内能的增加是引起缺陷附近炸药发生点火的重要原因。

### 3 结论

1) 在 2.5 kg 塑料弹、400 m/s 速度冲击条件下, 未经高低温循环的试样可承受的应力峰值为 835 MPa、应力作用时间为 35  $\mu\text{s}$  的冲击载荷, 炸药不发生反应; 而经高低温循环的试样在应力达到 242 MPa、应力作用时间 11  $\mu\text{s}$  时即发生爆炸反应。

2) 经高低温循环的药柱表面出现较多孔隙, 且分布不均匀, 在冲击载荷下, 缺陷处因发生绝热压缩而引发局部内能增加, 温度升高, 导致炸药在低应力下便可发生剧烈反应。

### 参 考 文 献

- [1] 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.  
TIAN Y, ZHANG W B, WEN M P, et al. Research on correlation of thermal shock damage of PBX JOB-9003 [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2004, 12(3): 174-177.
- [2] 梁增友, 黄风雷, 张振宇. 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.  
LIANG Z Y, HUANG F L, ZHANG Z Y. Numerical simulation of damaged explosive in shock detonation[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2006, 26(12): 1047-1051.
- [3] 李德聪, 陈力, 丁雁生. 装药弹体侵彻混凝土厚靶中的炸药摩擦起爆模型[J]. 爆炸与冲击, 2009, 29(1): 13-17.  
LI D C, CHEN L, DING Y S. A model of explosion induced by friction in the process of loaded projectiles penetrating into concrete targets [J]. Explosion and Shock Waves, 2009, 29(1): 13-17.
- [4] 林聪妹, 刘佳辉, 曾贵玉, 等. 苯乙烯共聚物改性 TATB 基 PBX 的抗热冲击性能[J]. 含能材料, 2016, 24(2): 149-154.  
LIN C M, LIU J H, ZENG G Y, et al. Thermal shock resistance of styrene copolymer modified TATB-based polymer bonded explosive [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2016, 24(2): 149-154.
- [5] 向梅, 黄毅民, 饶国宁, 等. 不同升温速率下复合药柱烤燃实验与数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 2013, 33(4): 394-400.  
XIANG M, HUANG Y M, RAO G N, et al. Cook-off test and numerical simulation for composite charge at different heating rates [J]. Explosion and Shock Waves, 2013, 33(4): 394-400.
- [6] 王晨, 陈朗, 何乐, 等. 低强度冲击下炸药点火的数值模拟[J]. 火炸药学报, 2012, 35(2): 44-48.  
WANG C, CHEN L, HE L, et al. Numerical simulation of explosive ignition under low impact loading [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2012, 35(2): 44-48.

(下转第 53 页)

- [illegible]