

文章编号: 1006-9941(2018)02-0156-05

# 热老化对 RDX 基含铝压装炸药装药发射安全性的影响

张林军, 杜姣姣, 栾洁玉, 贾林, 刘文亮, 常海, 王芳芳

(西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 为了探讨热老化对炸药装药过载安全性的影响, 在 71℃ 下对某黑索今(RDX)基含铝压装炸药装药高温加速老化 39 天, 采用落锤加载装置对老化前后装药的发射安全性进行了考核, 并分析了炸药药柱结构、钝感剂和黏结剂含量、RDX 晶体品质对装药发射安全性的影响。结果表明, 在相同落锤加载条件下, 未老化样品比老化后样品发生燃烧爆炸的可能性更大; 老化后炸药药柱结构完整, 药柱中黏结剂软化迁移, 微小孔隙缩小弥合, 药柱表面钝感剂和黏结剂含量由 5.90% 增加到 6.20%; RDX 晶体颗粒的拉曼特征峰半峰宽较老化前减小, 特别是 345 cm<sup>-1</sup> 位置处特征峰半峰宽减少了 42.4%。表明老化过程中炸药药柱中钝感剂和黏结剂的软化迁移、微缺陷修复、表面钝化、RDX 晶体品质的改善等因素是老化装药发射安全性优于未老化装药的主要原因。

**关键词:** RDX 基含铝压装炸药装药; 热老化; 发射安全性; 性能变化

**中图分类号:** TJ55; O64

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2018.02.008

## 1 引言

装填黑索今(RDX)、奥克托今(HMX)为主体的新型高能炸药, 可以大幅提高大口径榴弹的毁伤威力和作战效能, 但由于受发射安全性制约, 高能炸药的应用受到了限制。在贮存和使用过程中, 受各种环境应力作用, 炸药装药自身会以某种形式发生缓慢的物理、化学变化, 这种变化可能导致炸药自身热稳定性变差, 同时也可能使装药的结构产生损伤, 从而影响炸药装药的发射安全性<sup>[1]</sup>。

国内对于发射安全性及长贮老化过程中炸药装药的性能变化研究较多<sup>[2-4]</sup>。王世英等<sup>[5-6]</sup>, 王淑萍等<sup>[7]</sup>对炸药装药的发射安全性开展了一系列研究, 发现装药产生的裂纹、缩孔及底隙等“缺陷”是引起发射安全性变化的主要原因; 高大元等<sup>[8]</sup>研究了加速老化对高聚物粘结炸药(PBX)安全性的影响, 认为高温老化后炸药热安全性和撞击安全性均降低; 张冬梅等<sup>[9]</sup>研究了温度循环老化试验下压装 A-IX-II 装药的失效模式及裂纹机理, 认为 A-IX-II 炸药药柱产生裂纹是主要的失效模式, 钝感剂液化和局部流失是产生裂纹的主要原因; 贾林等<sup>[10]</sup>研究了热老化下石蜡对压装

RDX 基 PBX 炸药性能的影响, 认为热老化并未影响炸药药柱的撞击感度、安定性和结构完整性, 药柱中的石蜡发生软化迁移, 缺陷得到修复, 从而降低了药柱的摩擦感度, 提高了抗压强度; 韦兴文等<sup>[11]</sup>研究了热老化对 TATB 基高聚物粘结炸药力学性能的影响, 认为长期高温贮存后, 炸药晶体与粘合剂仍具有良好的粘合界面, 力学性能指标未发生明显变化。以上研究多集中于炸药药柱老化性能变化规律及老化机理方面, 但对于高温老化过程中装药发射安全性的变化及其影响研究还较少。

基于此, 本研究采用落锤加载装置研究了高温老化前后 RDX 基含铝压装炸药装药的发射安全性, 并从药柱结构、钝感剂含量、炸药晶体品质等方面分析了高温老化对装药发射安全性的影响, 以为该类炸药装药安全应用、贮存、装药工艺改进提供参考。

## 2 实验部分

### 2.1 样品及装置

某 RDX 基的含铝压装炸药, 基本配比 RDX75%、铝粉 20%、钝感剂 5%, 灰色造型粉颗粒, 压制成  $\Phi 40$  mm $\times$ 40 mm 的药柱, 药柱平均密度 1.75 g $\cdot$ cm<sup>-3</sup> 由西安近代化学研究所制备, 经工业 CT 检测, 药柱无裂纹、孔洞等明显结构缺陷。

高温热加速老化试验采用 AHX-863 型安全水浴烘箱, 控温精度  $\pm 0.5$  °C。

收稿日期: 2017-05-25; 修回日期: 2017-09-29

基金项目: 国防重大基础科研项目(00402040502)

作者简介: 张林军(1976-), 男, 副研究员, 主要从事火炸药长贮老化和寿命评估研究, e-mail: zhanglj204@163.com

发射安全性模拟试验采用大型落锤加载装置,锤重 400 kg,落高 0~2500 mm。

结构完整性检测采用俄罗斯莫斯科探伤有限公司的 BT-400 型工业 CT,电压 150 kV,电流 4.5 mA,切片厚度 1.5~2 mm。

炸药药柱断面形貌采用美国 FEI 公司生产的 Quanta600FEG 型场发射扫描电镜,放大倍率 400 万,分辨率 1 nm。

炸药中 RDX 晶体颗粒品质表征采用英国雷尼绍公司生产的 INVIA 显微拉曼光谱仪,空间分辨率 1  $\mu\text{m}$ ,光谱分辨率 1  $\text{cm}^{-1}$ 。

## 2.2 实验过程

### 2.2.1 高温加速老化试验

采用安全水浴烘箱,试验样品在 71  $^{\circ}\text{C}$  下加速老化 39 天,考核老化前后的炸药试样发射安全性。同时分别在 13,21,31,39 天取样,分析炸药药柱断面形貌、抗拉强度、钝感剂含量、炸药晶体品质等变化情况。

### 2.2.2 发射安全性考核试验

采用大型落锤加载装置模拟发射安全性,落锤重 400 kg。将老化后的  $\phi 40\text{ mm}\times 40\text{ mm}$  的炸药药柱装于自行设计的模拟试验弹<sup>[5-6]</sup>中,药柱两端用密封垫密封,模拟试验弹结构如图 1 所示。试验时将装有炸药药柱的模拟试验弹放入具有安全防护的底座中,分别在 2200,2300,2500 mm 高度,使落锤自由落体降落,撞击模拟试验弹,由置于试验弹短击柱和底座间的压力传感器测量装药响应分值压力,同时观测炸药装药是否发生燃烧爆炸,每次试验进行 2 发,峰值压力取平均值。

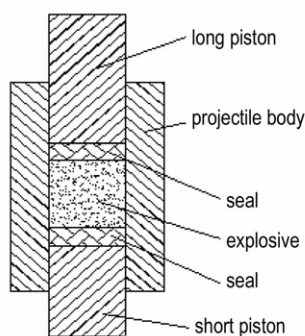


图 1 模拟弹结构示意图

Fig.1 Diagrammatic sketch of simulating projectile structure

### 2.2.3 炸药装药结构形貌分析

采用工业 CT 对老化后的模拟试验弹装药进行轴向扫描,并在距离炸药药柱底部 10,20,30 mm 位置

处进行 3 层 CT 扫描,观测炸药药柱的结构完整性。

将炸药药柱沿径向用铜刀环切后,采用力学三点弯曲装置压断制造断面,利用场发射扫描电镜对断面同一微区进行原位扫描,观测不同老化时间点炸药中固体颗粒与黏结剂间微结构的变化。

### 2.2.4 炸药中 RDX 晶体颗粒品质表征

采用显微拉曼光谱对老化前后炸药中 RDX 晶体品质进行分析。为了降低激光辐照在样品上产生的热效应,保障试验安全性,选取激发波长能量低的 785 nm 激光器,曝光时间选择 1 s,扫描次数 1 次,激光衰减 10%。试验前,先在药柱表面标记好测试区域,老化前后均在该区域内多次测量,数学统计获得实验结果。同时,为避免热效应累积,必须随机采点测试,且两点之间距离应大于 1 mm。

## 3 结果与讨论

### 3.1 炸药装药发射安全性考核

在 71  $^{\circ}\text{C}$  下老化 39 天后,将  $\phi 40\text{ mm}\times 40\text{ mm}$  的炸药药柱装于模拟试验弹中,采用大型落锤加载试验装置进行炸药药柱发射安全性实验室模拟试验,试验结果如表 1 所示。

表 1 炸药药柱的落锤加载试验结果

Table 1 Results of explosive grain by drop hammer loading test

sample	H/mm	$\sigma/\text{MPa}$	result
unaged	2200	825	no-ignition
	2300	874	ignition
	2500	650	ignition
71 $^{\circ}\text{C}$ aged 39 days	2200	769	no-ignition
	2300	887	no-ignition
	2500	960	ignition

Note: H is the height of drop hammer,  $\sigma$  is the peak stress.

由表 1 可以看出,在锤重 400 kg、落高 2200 mm 的加载条件下,71  $^{\circ}\text{C}$  热老化 39 天后样品可承受最大 769 MPa 的峰值压力,老化和未老化样品均未发生爆炸燃烧表现出良好的安定性。当落高增加到 2300 mm 时,未老化的样品在峰值压力达到 874 MPa 时发生了爆炸,而老化后的样品在峰值压力达到 887 MPa 仍未发生爆炸燃烧;当落高增加到 2500 mm 时,未老化和老化后样品均发生了爆炸,但老化后样品加载的峰值压力为 960 MPa,未老化样品加载的峰值压力为 650 MPa,老化样品加载峰值压力比未老化样品大的多。由此可见,在相同落锤加载条件下,未老化

样品比老化后样品发生燃烧爆炸的可能性更大。因此, 71 °C, 39 天的有限热老化在一定程度上改善了该炸药装药的发射安全性。

### 3.2 高温老化对炸药装药发射安全性的影响因素分析

#### 3.2.1 老化过程中炸药药柱结构形貌变化

图 2 为老化后模拟试验淬装药轴向及距炸药药杆底部 10, 20, 30 mm 径向 CT 扫描图。从图 2 可以看出, 炸药药柱内部结构完整, 密度均匀, 未见气孔、裂纹等缺陷。由此可见, 71 °C, 39 天的热加速老化未对炸

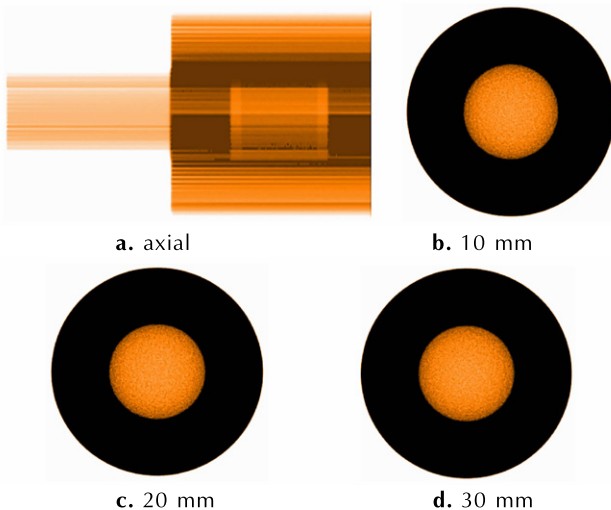


图 2 老化后 RDX 基含铝压装炸药药柱的 CT 扫描图  
Fig.2 CT scan photos of RDX-based aluminized and pressed explosive grain after aging

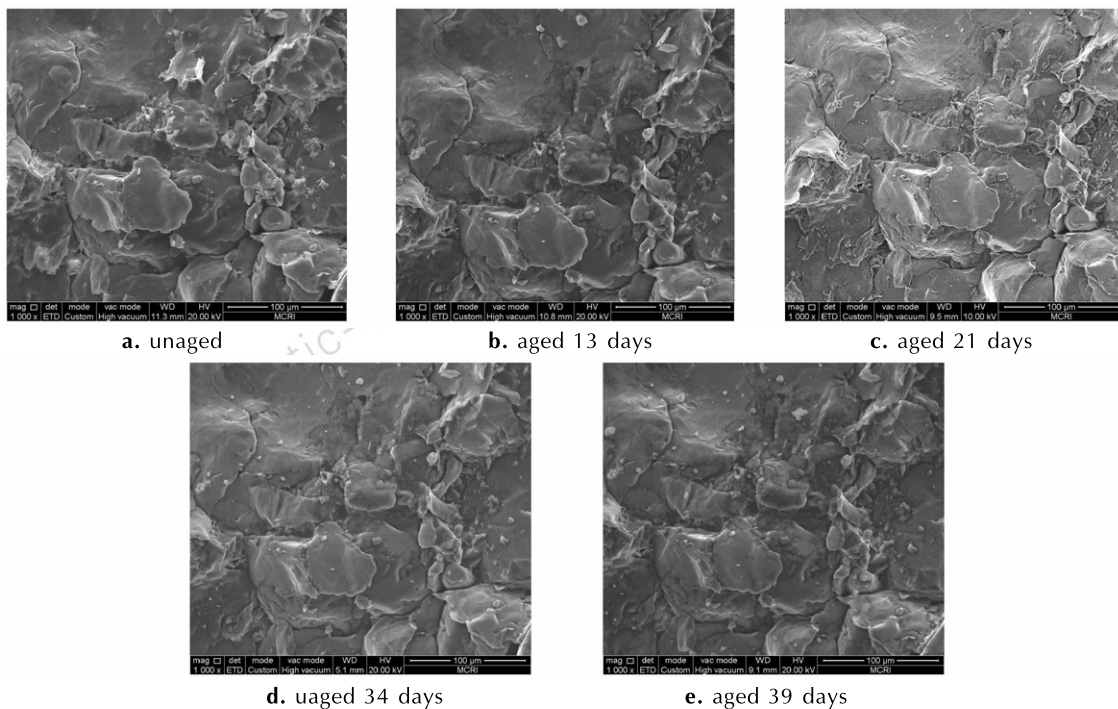


图 3 不同老化时间下 RDX 基含铝压装炸药药柱断面的 SEM 图

Fig.3 SEM images of RDX-based aluminized and pressed explosive grain section at different aging time

药药柱的结构产生损伤。

采用扫描电镜对老化过程中炸药药柱表面微观形貌进行了观测, 图 3 为不同老化时间下炸药药柱断面在 1000 倍放大条件下的扫描电镜结果。由图 3 可以看出, 未老化时, 炸药药柱断面棱角较为分明, 毛刺清晰可见, 表面炸药颗粒间存在着间隙。随着老化时间的推移, 炸药断面逐渐软化, 颗粒间的间隙缩小弥合。老化 39 天时, 炸药药柱断面颗粒边缘变得圆滑, 部分毛刺消失, 表面颗粒间隙变得模糊。由此可见, 热老化过程中, 炸药中的钝感剂和黏结剂软化迁移, 对药柱表面颗粒重新包覆, 同时弥合了表面颗粒间隙, 改善了炸药的微观结构, 这与国内兰琼等<sup>[12]</sup>的研究结论相吻合。兰琼等人研究认为, 高温可以对 PBX 炸药药柱内部分布的低熔点黏结剂软化, 在压力作用下, 带动炸药晶体发生微位移, 填补微小孔隙, 药柱内部裂纹在一定的温度、应力载荷作用下愈合, 改善药柱致密化程度和力学性能。

#### 3.2.2 老化过程中炸药药柱表面钝感剂和黏结剂含量变化

炸药药柱表面钝感剂和黏结剂含量老化前后也存在着差异。经过组分定量分析, 老化前炸药药柱表面钝感剂和黏结剂含量为 5.90%, 老化后为 6.20%, 老化试验后滤纸上有明显的蜡状渗出物, 如图 4 所示。由此可见, 在老化过程中炸药药柱中钝感剂和黏结剂由

于受到热的作用软化,同时向药柱表面迁移渗出,使得药柱表面含量高于药柱内部,则炸药药柱表面更加钝感,在受到过载冲击时,更不易发生燃烧爆炸。

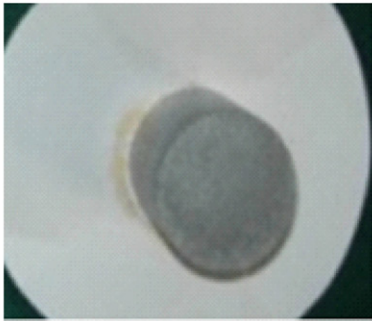


图 4 RDX 基含铝压装炸药药柱老化后的渗出物

Fig.4 Photo of the exudates of RDX-based aluminized and pressed explosive grain after aging

### 3.2.3 老化前后炸药中 RDX 晶体品质变化

拉曼光谱中特征峰半峰宽与试样晶体品质直接相关<sup>[13]</sup>,RDX 晶体中有缺陷存在时,直接导致拉曼特征峰半峰宽展宽,因此,RDX 晶体品质越高,拉曼光谱特征峰半峰宽越小<sup>[14-15]</sup>。晶体缺陷理论认为,晶体中的缺陷可借助点缺陷的运动而实现扩散,在晶体内迁移以至消失。炸药晶体中的缺陷并不是静止不变的,而是随着环境条件的变化产生、发展、运动和交互作用,能够合并消失。常温下,由点缺陷引起的扩散效应可以忽略不计,但在高温老化时,分子热振动的动能显著增大,点缺陷迁移速率随温度上升不断增长,若温度与时间适宜,当扩散达到平衡,这种热老化作用可能会使晶体中的缺陷数量总体减小,在拉曼光谱中即表现为特征峰半峰宽减小,表现为晶体品质提升。

对未老化和老化后炸药药柱同一位置的 RDX 晶体颗粒分别进行显微拉曼光谱测试,测试结果见图 5。由图 5 可见,老化前后药柱中 RDX 晶体颗粒拉曼图谱的峰形具有一致性,分别在 345,605,885,1312  $\text{cm}^{-1}$  四个位置强度较大,可以选择作为该炸药药柱中 RDX 晶体颗粒的特征峰,对四组拉曼光谱特征峰的半峰宽进行统计分析,结果见表 2。由表 2 可知,老化前炸药药柱中 RDX 晶体颗粒的拉曼特征峰半峰宽值为 9.2, 11.5, 8.6, 10.2  $\text{cm}^{-1}$ ,老化后其特征峰值对应变为 5.3, 9.2, 7.8, 9.1  $\text{cm}^{-1}$ ,老化后炸药药柱中 RDX 晶体颗粒的拉曼特征峰半峰宽比老化前明显减小,在 345  $\text{cm}^{-1}$  位置处老化后特征峰半峰宽比老化前减少了 42.4%,因此,老化后炸药药柱中 RDX 晶体的品质得到了提升,可改善炸药的安全性<sup>[16]</sup>。

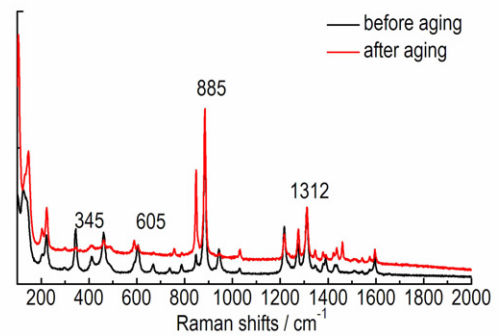


图 5 老化前后炸药药柱中 RDX 晶体显微拉曼光谱图

Fig.5 Micro-Raman spectra of RDX crystal in the explosive grain before and after aging

表 2 炸药药柱老化前后 RDX 晶体的半峰宽

Table 2 Full width at half maxima (FWHM) of the RDX crystal in the explosive grain before and after aging  $\text{cm}^{-1}$

characteristic peak	FWHM	
	before aging	after aging
345	9.2	5.3
605	11.5	9.2
885	8.6	7.8
1312	10.0	9.1

## 4 结 论

(1) 在 71  $^{\circ}\text{C}$ , 39 天热老化过程中炸药药柱中钝感剂和黏结剂的软化迁移,使药柱表面的钝感剂和黏结剂含量由 5.90% 增加到 6.20%,表面钝化;钝感剂和黏结剂在药柱中迁移重新分布,填补了微小孔隙,改善了炸药药柱的微观结构;炸药中 RDX 晶体颗粒的拉曼特征峰半峰宽较老化前减小,品质提升。

(2) 在装药无明显结构缺陷的情况下,有限的热老化对炸药药柱发射安全性具有改善作用,老化后样品比未老化样品发生燃烧爆炸的可能性更小。炸药药柱中钝感剂和黏结剂的软化迁移、微缺陷修复,表面钝化、炸药中 RDX 晶体品质的提升等因素是老化后装药发射安全性优于老化前的主要原因。

### 参考文献:

- [1] 肖玮, 李亮亮, 屈可朋, 等. 某 RDX 基含 Al 炸药发射安全性[J]. 含能材料, 2015, 23(1): 62-66.  
XIAO Wei, LI Liang-liang, QU Ke-peng, et al. Launch safety of RDX-based aluminized explosive[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2015, 23(1): 62-66.
- [2] 尹俊婷, 罗颖格, 陈智群, 等. 一种弹药 PBX 装药的贮存老化机理及安全性[J]. 含能材料, 2015, 23(11): 1051-1054.  
YIN Jun-ting, LUO Ying-ge, CHEN Zhi-qun, et al. Storage aging mechanism and safety of certain ammunition PBX charge[J].

- Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2015, 23(11): 1051-1054.
- [3] 左玉芬, 熊鹰, 房永曦, 等. JOB-9003 炸药热老化寿命预估及结构表征[J]. 化学研究与应用, 2010, 22(2): 152-155.  
ZUO Yu-fen, XIONG Ying, FANG Yong-xi, et al. Thermal ageing life evaluation and structure characterization of JOB-9003 explosive[J]. *Chemical Research and Application*, 2010, 22(2): 152-155.
- [4] 王宝成, 牛国涛, 金大勇. 国内炸药老化及寿命评估的进展和评述[J]. 兵工自动化, 2015, 34(6): 44-47.  
WANG Bao-cheng, NIU Guo-tao, JIN Da-yong. Review and development of internal explosive aging and life assessment[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2015, 34(6): 44-47.
- [5] 王世英, 王淑萍, 胡焕性. 榴弹炸药装药发射早炸的模拟实验系统研究[J]. 兵工学报, 2002, 23(4): 51-54.  
WANG Shi-ying, WANG Shu-ping, HU Huan-xing. A study on a simulation experiment system for projectile's premature explosion upon launching[J]. *Acta Armamentarii*, 2002, 23(4): 51-54.
- [6] 王世英, 李向东. 新型压装含铝炸药应用于大口榴弹发射安全性模拟研究[J]. 计测技术, 2013, 33(Z1): 37-40.  
WANG Shi-ying, LI Xiang-dong. Simulation research on launch safety of large caliber grenade with a new type of pressed aluminized explosive[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2013, 33(Z1): 37-40.
- [7] 王淑萍, 王晓峰, 金大勇. 压制密度及密度均匀性对装药撞击安全性的影响[J]. 含能材料, 2011, 19(6): 705-708.  
WANG Shu-ping, WANG Xiao-feng, JIN Da-yong. Influence of pressed explosive charges density and its distribution on impact safety[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2011, 19(6): 705-708.
- [8] 高大元, 申春迎, 文尚刚, 等. 加速老化对炸药件安全性的影响研究[J]. 含能材料, 2011, 19(6): 673-678.  
GAO Da-yuan, SHEN Chun-ying, WEN Shang-gang, et al. Accelerated aging on effect of safety for explosive parts[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2011, 19(6): 673-678.
- [9] 张冬梅, 韩芳, 贾林, 等. 温度循环载荷作用下压装 A-IX-II 装药的裂纹机理研究[J]. 火炸药学报, 2016, 39(1): 89-94.  
ZHANG Dong-mei, HAN Fang, JIA Lin, et al. Study on crack formation mechanism of pressed charge A-IX-II under temperature cyclic load[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2016, 39(1): 89-94.
- [10] 贾林, 张林军, 张冬梅, 等. 低热应力下石蜡对压装 RDX 基 PBX 炸药性能的影响[J]. 火炸药学报, 2015, 38(5): 74-78.  
JIA Lin, ZHANG Lin-jun, ZHANG Dong-mei, et al. Effect of paraffin on properties of a pressed RDX-based PBX explosive under the low thermal stress[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2015, 38(5): 74-78.
- [11] 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(2): 157-161.
- [12] 兰琼, 戴斌, 杨白凤, 等. 温压时效处理 PBX 内部裂纹愈合现象研究[J]. 含能材料, 2013, 21(2): 205-208.  
LAN Qiong, DAI Bin, YANG Bai-feng, et al. Healing of crack in PBX by thermal pressure aging treatment[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2013, 21(2): 205-208.
- [13] 田国辉, 陈亚杰, 冯清茂. 拉曼光谱的发展及应用[J]. 化学工程师, 2008, 22(1): 34-36.  
TIAN Guo-hui, CHEN Ya-jie, FENG Qing-mao. Development and application of raman technology[J]. *Chemical Engineer*, 2008, 22(1): 34-36.
- [14] 栾洁玉, 陈智群, 张皋, 等. 一种用于单质炸药晶体品质评价的微拉曼光谱测试方法: CN201210310708.8[P], 2015.  
LUAN Jie-yu, CHEN Zhi-qun, ZHANG Gao, et al. A test method of micro-raman spectroscopy for quality evaluation of explosive crystal; CN201210310708.8[P], 2015.
- [15] 栾洁玉, 陈智群, 王明, 等. 显微拉曼光谱评价 HMX 晶体结晶品质[J]. 含能材料, 2014, 22(1): 49-52.  
LUAN Jie-yu, CHEN Zhi-qun, WANG Ming, et al. Quality evaluation of HMX crystals by micro-raman spectroscopy[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2014, 22(1): 49-52.
- [16] LUAN Jie-yu, CHEN Zhi-qun, ZHENG Chao-min, et al. Evaluation of HMX crystal after thermal aggression by micro-raman spectroscopy[C]//45th International Annual Conference of the ICT, 2014.

## Effect of Thermal-aging on Launching Safety of RDX-based Aluminized and Pressed Explosive Charge

ZHANG Lin-jun, DU Jiao-jiao, LUAN Jie-yu, JIA Lin, LIU Wen-liang, CHANG Hai, WANG Fang-fang

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

**Abstract:** To investigate the effect of thermal aging on the overloading safety of explosive charge, the accelerating aging of RDX-based aluminized and pressed explosive charge was performed at high temperature of 71 °C for 39 days. The launching safety of charge before and after aging were checked by drop hammer loading device and the effect of explosive grain structure, deterrent and binder content and quality of RDX crystal on the launching safety of charge was analyzed. Results show that under the same drop hammer loading condition, the probability of occurring combustion and explosion of unaged sample is larger than aged sample, after aging, the structure of explosive grain of aged sample is completer, the binder of explosive grain is softened and migrated, micro pore is reduced and closed, the content of deterrent and binder of explosive grain surface increases from 5.90% to 6.20%. Compared with the RDX crystal particles before aging, the half width of Raman characteristic peak of the RDX crystal particles after aging decreases, especially full width at half maxima for characteristic peak at 345 cm<sup>-1</sup> decreases by 42.2%. Showing that in the aging process, the softening and migration of deterrent and binder in explosive grain, micro defect repair, surface passivation and improvement of quality of RDX crystal etc. factors are the main reasons of launching safety of aged charge is better than that of unaged charge.

**Key words:** RDX-based aluminized and pressed explosive charge; thermal aging; launching safety; performance change

**CLC number:** TJ55; O64

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2018.02.008