

文章编号: 1006-9941(2016)07-0674-04

压装 HMX 基 PBX 老化损伤及力学环境适应性

尹俊婷¹, 袁宝慧¹, 石玮玮², 王建朝², 高玉玲¹

(1. 西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065; 2. 中国人民解放军第 5715 工厂, 河南 洛阳 471000)

摘要: 研究弹药装药的长贮老化损伤及力学环境适应性, 用计算机断层成像(CT 扫描)观察了贮存 4, 8, 12 a 的压制奥克托今(HMX)基高聚物粘结炸药(PBX)装药的宏观结构缺陷。采用扫描电子显微镜(SEM)分析了贮存 4, 12 a 装药的细观损伤。运用冲击、振动实验考核了贮存 12 a 装药的力学环境适应性。结果表明, 长贮后出现 PBX 装药缺陷, 表现为较为平直的沿径向贯穿、沿周向分布较为均匀的裂纹, 裂纹数量随贮存年限增加而增加。装药缺陷的细观损伤模式为界面脱粘及基体开裂。带缺陷 PBX 装药弹药经受一定的冲击及振动载荷后, 虽然增加了两处径向裂纹, 但能够保证安全。

关键词: 高聚物粘结炸药(PBX); 贮存老化; 装药缺陷; 细观损伤; 环境适应性

中图分类号: TJ55

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.07.009

1 引言

弹药具有“长期贮存、一次使用”的特点, 在贮存期内受到热应力和低机械应力等复杂加载环境的长期作用, 装药会发生缓慢的物理及化学变化, 产生老化损伤。高聚物粘结炸药(PBX)广泛应用于高效毁伤武器弹药装药, 研究其长贮性能对于弹药安全与可靠使用至关重要。目前对 PBX 的老化研究大都采用小尺寸试验件, 通过加速老化, 辅以常规拉伸压缩、应力应变等力学实验^[1-6]。长贮装药承受的载荷具有加载缓慢、多应力叠加、作用时间长的特点^[7], 与加速试验载荷作用下的老化机理存在一定差异, 另外尺寸效应对研究结果也会产生一定影响。由于开展弹药装药自然长贮老化研究危险性大, 保密性强, 且需要较长的周期, 相关资料和公开的文献较少。

为了研究弹药装药的长贮老化损伤及力学环境适应性, 本研究针对库房标准条件下自然长贮 4, 8, 12 a 的压制奥克托今(HMX)基 PBX 弹药装药, 运用 CT 扫描观察了贮存 4, 8, 12 a 装药的结构完整性, 采用扫描电子显微镜 SEM 表征了贮存 12 a 装药的细观形貌损伤, 根据机载武器平台典型冲击、振动实验条件, 采用

振动实验台考核了贮存 12 a 的带缺陷弹药装药的力学环境适应性。研究结果可应用于长贮弹药的使用安全性分析及贮存可靠性评估。

2 实验

2.1 试验样品

试验样品为装填压装 HMX 基 PBX 的弹药, PBX 组成为 HMX96%、地蜡 2.0%、三元乙丙共聚物 2%, 装药质量 2.5 kg、外径 170 mm、内径 90 mm。弹药在库房标准条件(温度低于 30 °C, 湿度小于 80%)下分别贮存 4, 8, 12 a。CT 扫描样品为贮存 4, 8, 12 a 的弹药各 2 发, SEM 样品为贮存 4, 12 a 的弹药各 1 发中取出的装药, 力学环境适应性样品为贮存 12 a 的弹药 1 发。

2.2 实验设备及条件

CT 扫描采用俄罗斯莫斯科探伤有限公司 BT-400 型工业 CT 机, 任意方向的裂纹敏感度为 0.05 mm; SEM 采用日本日立 S-2150 型扫描电子显微镜; 力学环境适应性实验采用 SAI 120F-T2000-44/ST 振动实验台系统。

力学环境适应性实验参照 GJB150-86《军用设备环境实验方法》^[8], 根据机载武器平台典型的使用环境要求进行冲击和振动考核。冲击实验的冲击脉冲波形为后峰锯齿波, 瞬时加速度峰值为 7 g, 脉冲持续时间 25 ~ 30 ms, 冲击次数 20 次; Y 轴、Z 轴的随机振动实验每个轴向 2 h, 频率范围为 15 ~ 2000 Hz, 功率谱密度 $W_1 = 0.01 \text{ g}^2/\text{Hz}$, $W_2 = 0.06 \text{ g}^2/\text{Hz}$ 。冲击与振动实验均采用单点控制, 传感器灵敏度 10.156。

收稿日期: 2015-10-20; 修回日期: 2015-12-03

基金项目: 国家重大基础科研专项(004040204)

作者简介: 尹俊婷(1964-), 女, 副研究员, 主要从事弹药设计及寿命评估研究。e-mail: yjt1211@sohu.com

通信联系人: 袁宝慧(1959-), 男, 研究员, 主要从事弹药高效毁伤研究。e-mail: 1371965619@qq.com

3 结果与讨论

3.1 装药结构缺陷

采用数字放射显影(DR)技术对贮存4,8,12 a的弹药各2发进行装药轴向检测,根据轴向DR情况,进行径向CT扫描,观察装药结构老化缺陷。典型CT扫描照片如图1所示。

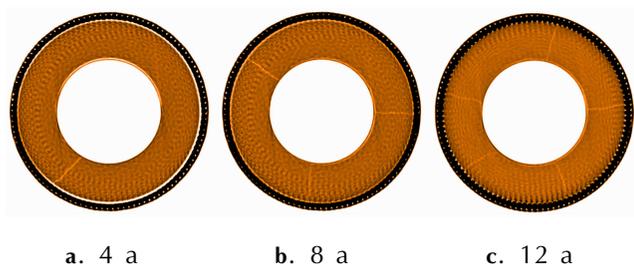


图1 不同贮存年限PBX的CT照片

Fig.1 CT images of PBX stored for different years

CT结果(图1)表明,自然贮存后PBX装药结构出现明显的老化缺陷,表现为沿径向贯通,沿轴向延伸一定长度或贯通的裂纹。裂纹断裂面比较平直,并且沿周向分布较为均匀;贮存4 a的弹药有1条裂纹,贮存8 a的弹药有3条裂纹,贮存12 a的则有5条裂纹,即随贮存年限增加,裂纹数量呈增加的趋势。

3.2 装药细观损伤

为分析弹药装药结构缺陷的细观损伤形貌,进行了不同倍数(200,500,1000倍)SEM分析,结果如图2所示。由于SEM分析用样品是弹药拆分后取出的装药,需损耗弹药且具有危险性,故仅对贮存年限较短的4 a和贮存年限较长的12 a弹药装药各1发进行了SEM分析。

由200倍SEM(图2a、图2d)可见,HMX晶体粒度分布为100~400 μm,结晶致密,晶粒较为完整,晶体形状相对规则,晶粒断面较平整光滑,晶粒与粘结剂之间解理面清晰,断面上有HMX晶粒脱离粘结剂后留下的空隙;由500倍SEM(图2b、图2e)可见,贮存4 a的PBX其HMX晶粒与粘结剂之间界面脱粘形成了裂纹,贮存12 a的PBX出现了明显的界面脱粘及沿晶断裂裂纹,断面上有HMX颗粒从粘结剂中脱离出留下的孔洞;由1000倍SEM(图2c、图2f)可见,贮存4 a PBX粘结剂基体完整,贮存12 a PBX出现了粘结剂基体开裂现象。上述SEM分析结果表明,长贮PBX结构缺陷的细观损伤为HMX晶粒与粘结剂之间界面脱粘及粘结剂基体开裂。

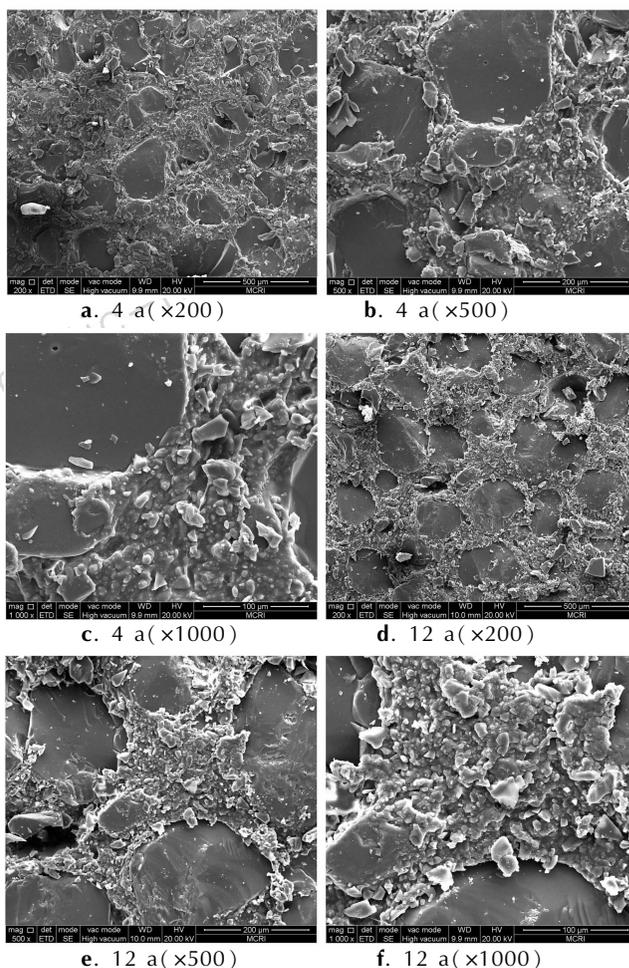


图2 不同贮存年限PBX的SEM照片

Fig.2 SEM images of PBX stored for different years

3.3 老化损伤模式分析

从力学角度表征装药的老化损伤模式,可以明确诱导损伤发生的关键因素,为分析损伤对装药性能的影响提供依据。根据D. W. Nicholson^[9]能量守恒模型,在晶体模量比粘结基体模量大数个量级的情况下,临界脱粘应力可简化为将弹性基体中的刚性球从基体脱离出来所需的外界应力,PBX各组元间的弹性模量存在较大差别,HMX晶体的弹性模量达10 GPa以上,而粘结剂的模量仅为0.01~0.40 GPa^[10-11],故可采用该能量守恒模型计算其临界脱粘应力:

$$\sigma_d^2 = 4E_b \gamma (2+3\varphi) / [3r(1-\varphi)] \quad (1)$$

式中, E_b 为粘结剂的模量弹性模量,取0.40 GPa, γ 为界面粘着力做功,取50 mJ·m⁻², φ 为晶体颗粒体积分数,该PBX的颗粒体积分数为96%,最大颗粒半径 $r \approx 200 \mu\text{m}$ (由图2a,图2d得到),代入公式(1)计算,得到临界脱粘应力 σ_d 为4.03 MPa。

在微观结构中,原子之间的强度取决于它们的化学键,两个原子之间的吸引力在一定范围内随两个原

子之间距离 r 的增加而增加, 但吸引力达到极值后, r 再增加, 作用力反而减弱了, 此时的 σ 为化学键的理论拉伸强度 σ_{\max} , 介质的临界破坏强度可用(2)式^[12]近似计算:

$$\sigma_{\max} \approx 0.1 E_{\alpha} \quad (2)$$

式中, E_{α} 为介质的弹性模量, 根据李明等^[11]针对含 HMX 压装 PBX 测定的弹性模量, 取 $E_b = 6$ GPa, 对粘结剂取 $E_b = 0.40$ GPa。带入(2)式得粘结剂开裂临界应力为 40 MPa, HMX 晶体穿晶断裂临界应力为 600 MPa。

计算结果表明, HMX 晶体界面脱粘临界应力仅为 4.03 MPa, 粘结剂基体开裂临界应力是 HMX 晶体界面脱粘临界应力的 10 倍, 而 HMX 晶体穿晶断裂临界应力达 HMX 晶体界面脱粘临界应力的 150 倍, 所以界面脱粘和粘结剂开裂可在很小应力条件下发生, 是 PBX 长贮老化的损伤模式。

装药在贮存期内受到热应力和低机械应力等复杂加载环境的长期作用及外部环境冷热交替变化的影响, 在装药内部产生较为缓和的低机械应力, 受低应力作用, PBX 首先产生界面脱粘和粘结剂开裂的现象, 随着应力继续作用, 炸药中的微裂纹将经过汇集、贯通等过程形成宏观裂纹, 同时宏观裂纹的端部又因应力集中而出现新的微裂纹, 进而发展成新的宏观裂缝或体现为原有宏观裂缝的延伸。

3.4 力学环境适应性

力学环境适应性关系到武器装备在战场环境下的生存能力和作战效率的发挥, 是装备的重要质量特性之一^[13]。为了考核带损伤装药弹药的力学环境适应性, 为弹药使用、维修和后勤保障提供技术参考, 通过实验设备模拟国内典型机载武器在运输、储存、使用中所经受的载荷条件和接口界面, 对贮存 12 a 的 1 发 PBX 装药弹药进行了冲击实验及振动实验。

完成 +X 轴、-X 轴的轴向冲击实验及 Y、Z 轴向随机振动实验后, 实验弹药未发生爆炸或燃烧现象, 检查弹药外观情况, 可以看出整体结构无松动。通过 CT 扫描进一步观察弹药装药内部结构, 实验前后 CT 照片对比如图 3 所示。

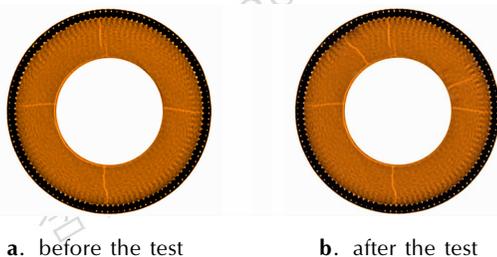


图 3 环境实验前后贮存 12 a 的 PBX 的 CT 照片

Fig. 3 CT images of PBX stored for 12 years before and after the environmental test

由图 3 可见, 冲击实验及振动实验完成后, 装药结构仅增加了 2 条径向裂纹, 且增加的裂纹损伤形态与原裂纹相似, 说明在经受一定的冲击及振动载荷后, 带裂纹 PBX 装药虽然结构缺陷有所增加, 但能够保证安全。

有研究表明, 老化会对装药安全性能产生一定影响^[14-15], 该 PBX 老化后仍能经受一定的冲击及振动载荷并保证安全, 分析其原因是因为 HMX 主体炸药中添加了高聚物三元乙丙共聚物, 该聚合物兼有粘结和钝感两种作用, 与蜡共同作用, 对 HMX 晶粒充分浸润包覆, 形成三维网状嵌段共聚物结构, 网状结构通过形变吸收外界压力, 减轻 HMX 晶粒上的应力集中, 大大改善了装药的安全性能^[16]。而该 PBX 老化现象主要为粘结剂开裂和界面脱粘形成的沿晶断裂裂纹, 老化后炸药晶粒仍然完整, 钝感剂对晶粒的包覆也基本完好, 经受一定的冲击振动载荷时, 网状结构仍可起到吸热、隔热、缓冲与润滑的钝感作用, 炸药晶粒间并未产生较为强烈的相互作用, 使得带裂纹缺陷装药承受一定的冲击、振动载荷时, 能够保持其安全性。该结论对于研究缺陷装药弹药的应用、保障部队装备的可靠性和安全性具有借鉴意义。

4 结论

(1) 在库房标准条件(温度低于 30 °C, 湿度小于 80%)下分别贮存 4、8、12 a 后, 压装 HMX 基 PBX 均出现老化现象。CT 结果表明, 老化产生的结构缺陷为沿径向贯通, 沿轴向延伸一定长度或贯通的裂纹, 裂纹断面比较平直, 沿周向分布较为均匀; 随贮存年限增加, 裂纹数量增加。

(2) SEM 观测到裂纹的细观形貌为 HMX 晶粒与粘结剂之间界面脱粘、沿晶断裂及粘结剂基体开裂。计算得到界面脱粘临界应力为 4.03 MPa, 粘结剂开裂临界应力为 40 MPa, HMX 晶体穿晶断裂临界应力为 600 MPa, 验证了界面脱粘与粘结剂基体开裂是 PBX 长贮老化的主要损伤模式。

(3) 贮存 12 a 后带缺陷 PBX 装药弹药完成冲击实验及振动实验后, 增加了 2 处径向裂纹, 但能够保证安全。实验结果对于研究长贮弹药的应用、保障部队装备的可靠性和安全性具有借鉴意义。

参考文献:

- [1] 贺传兰, 兰林钢, 温茂萍, 等. HTPB 热固 PBX 老化过程中的体积收缩[J]. 火炸药学报, 2014, 37(5): 20-24.

- HE Chuan-lan, LAN Lin-gang, WEN Mao-ping, et al. Volume shrinkage of HTPB thermosetting PBX in the aging process[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2014, 37(5): 20-24.
- [2] 丁黎,郑朝民,梁忆,等. RDX 基压铸 PBX 的老化性能[J]. 含能材料, 2015, 23(2): 156-162.
- DING Li, ZHENG Chao-min, LIANG Yi, et al. Aging properties of casted RDX-based PBX [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2015, 23(2): 156-162.
- [3] 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.
- [4] 温茂萍,周红萍,徐涛,等. 高温老化后 HMX 基 PBX 的压缩与拉伸性能反向变化研究[J]. 含能材料, 2011, 19(4): 420-424.
- WEN Mao-ping, ZHOU Hong-ping, XU Tao, et al. Reverse change of compressive and tensile properties of PBX based on HMX aged at high temperature [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2011, 19(4): 420-424.
- [5] 韦兴文,李敬明,涂小珍,等. 热老化对 TATB 基高聚物粘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.
- [6] 周红萍,何强,李明,等. 低拉伸应力下 PBX 的老化研究[J]. 火炸药学报, 2009, 32(5): 157-161.
- ZHOU Hong-ping, HE Qiang, LI Ming, et al. Experimental study on aging of PBX under low tensile stress[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2009, 32(5): 157-161.
- [7] 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. Study on the storage aging mechanism and safety of certain ammunition PBX charge [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2015, 23(11): 1051-1054.
- [8] 王秀清,刘凤云,陈素女,等. GJB150-86《军用设备环境实验方法》[S]. 北京: 中国科学技术出版社,1986.
- WANG Xiu-qing, LIU Feng-yun, CHEN Su-nü, et al. GJB150-86《Environmental test methods of military equipment》[S]. Beijing: China Science and Technology Press, 1986.
- [9] Nicholson D W. On the detachment of a rigid inclusion from an elastic matrix[J]. *Journal of Dhesion*, 1979, 10(3): 255-260.
- [10] 戴开达,刘龔龙,陈鹏万,等. PBX 炸药有效弹性模量的有限元模拟[J]. 北京理工大学学报, 2012, 32(11): 1154-1158.
- DAI Kai-da, LIU Yan-long, CHEN Peng-wan, et al. Finite element simulation on effective elastic modulus of PBX explosives [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2012, (11): 1154-158.
- [11] 李明,蓝林刚,庞海燕,等. 基于纳米压痕方式测定 PBX 的弹性模量[J]. 含能材料, 2007, 15(2): 101-104.
- LI Ming, LAN Lin-gang, PANG Hai-yan, et al. Measurement of PBX elastic modulus by nano-indentation [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2007, 15(2): 101-104.
- [12] 蔡宣明,张伟,魏刚,等. PBX 模拟材料动态力学响应及细观损伤模式[J]. 含能材料, 2014, 22(5): 658-663.
- CAI Xuan-ming, ZHANG Wei, WEI Gang, et al. Dynamic mechanics response and mesoscopic damage of a PBX simulant [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2014, 22(5): 658-663.
- [13] 鞠成玉,刘宣,高雅娟. 航空装备环境适应性定量化表征方法研究[J]. 航空工程进展, 2014, 5(Suppl): 34-36.
- JU Cheng-yu, LIU Xuan, GAO Ya-juan. Study on quantitative characterization technique of environmental worthiness of aviation equipment[J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2014, 5(Suppl.): 34-36.
- [14] 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.
- [15] 颜熹琳,李敬明,周阳,等. 高聚物粘炸药温湿度载荷加速老化试验研究[J]. 含能材料, 2009, 17(4): 412-414.
- YAN Xi-lin, LI Jing-ming, ZHOU Yang, et al. Temperature-humidity-load accelerating age tests of PBX[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2009, 17(4): 412-414.
- [16] 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: 283-290.
- SUN Ye-bin, HUI Jun-ming, CAO Xin-mao. Military Mixed Explosive[M]. Beijing: Weapon industry Press, 1995: 283-290.

Aging Damage and Mechanical Environment Adaptability of Pressed HMX-Based PBX

YIN Jun-ting¹, YUAN Bao-hui¹, SHI Wei-wei², WANG Jian-chao², GAO Yu-ling¹

(1. Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China; 2. Chinese People's Liberation Army 5715th factory, Luoyang 471000, China)

Abstract: To investigate the long-term storage aging damage and mechanical environment adaptability of ammunition charge, the macroscopic structure defects of the pressed HMX-based polymer bonded explosive (PBX) charge stored for 4, 8 and 12 years were observed by computerized tomography (CT scanning). The micro damage of the charge stored for 4 and 12 years was analyzed by scanning electron microscope (SEM). The mechanical environment adaptability of the charge stored for 12 years was examined by impact and vibration tests. Results indicate that the defects of PBX charge occur after long-term storage. The defects are expressed as relatively straight cracks penetrated along the radial direction and circumferential uniform distribution. The crack number increases with the increase of storage period. The micro damage model of charge defects is the interface debonding and matrix cracking. After certain loading subjected to impact and vibration, the 2 charge cracks are increased, but PBX charge ammunition with defect can ensure to be safe.

Key words: polymer bonded explosive (PBX); storage aging; charge defect; micro damage; mechanical environment adaptability

CLC number: TJ55

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.07.009