

doi: 10.7690/bgzd.2015.06.013

## 国内炸药老化及寿命评估的进展和评述

王宝成<sup>1</sup>, 牛国涛<sup>2</sup>, 金大勇<sup>2</sup>

(1. 海军驻西安导弹设备军事代表室, 西安 710065; 2. 西安近代化学研究所第二事业研究部, 西安 710065)

**摘要:** 为了解决准确评价常规弹药的贮存寿命问题, 分析和总结了国内对炸药寿命的评估方法。对国内目前使用的数理统计法、自然老化与加速老化法、数值计算法这 3 种方法的优缺点进行比较分析, 并对国内外炸药寿命研究方面的进展进行对比, 指出了当前研究的不足及将来炸药寿命评估的难点和发展方向。该分析结果可为评估弹药的寿命提供一定的参考。

**关键词:** 炸药老化; 寿命评估; 自然老化; 加速老化

**中图分类号:** TJ410.6 **文献标志码:** B

## Review and Development of Internal Explosive Aging and Life Assessment

Wang Baocheng<sup>1</sup>, Niu Guotao<sup>2</sup>, Jin Dayong<sup>2</sup>(1. Xi'an Missile Equipment Military Representative Office of Navy, Xi'an 710065, China;  
2. No. 2 Research Department, Xi'an Modern Chemical Research Institute, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** For accurately estimating the storage life of conventional munitions, the methods of the internal explosive aging and life assessment were analyzed and summarized. There were three common methods used for life estimation including mathematical statistics, natural aging and accelerated aging, and numerical calculation at present. The merits and drawbacks of three methods were comparatively investigated in conjunction with the internal and external studies about explosive life, the insufficiency of the state of the art, key point and the direction of development were pointed out based on comparing foreign and domestic explosive life research. The analytical results could provide reference to the explosive life estimation.

**Keywords:** explosive aging; life assessment; natural aging; accelerated aging

## 0 引言

从第二次世界大战结束至今已有 69 a, 虽然出现了一些局部战争, 目前仍是一个和平和发展为主流的时代。出于战备的需要, 世界各国仍在不断研制和装备新式武器, 使得各个军种装备库存量不断增加。早期装备的弹药面临使用寿命到期的问题亟待解决处理。例如 20 世纪 80 年代, 美国国防部对总重量近 380 万吨、价值约 180 亿美元库存的常规弹药进行调查, 结果表明: 在美国本土、太平洋、欧洲、大洋洲等地, 由于自然环境所造成的变质和腐蚀, 仅陆军待维修或销毁的弹药就已经高达 11.1 万吨<sup>[1]</sup>。贮存寿命是常规弹药一个非常关键与重要的技术指标, 对其进行评价是一项非常重要的工作。如果未达到弹药的寿命提前退役会造成经济浪费, 而超期服役则会造成严重的安全隐患。炸药寿命评估只是弹药寿命评估的一部分, 也是重要的一环。其中杨雪梅等<sup>[2]</sup>对国外 PBX 老化动态进行了详尽的报道; 同时国内各个院校、研究所等在炸药老化及寿命的评估方面进行了许多有意义的研究, 基于此,

笔者综合分析各方面的研究进展, 提出自己对炸药寿命评估的一些看法。

## 1 对炸药的寿命评估方法的研究

目前国内对炸药寿命的评估方法主要是数理统计的方法、自然老化和加速老化的方法、数值计算的方法, 下面分别对这 3 种情况进行评述。

## 1.1 数理统计在炸药寿命评估方法上的应用

用数理统计方法预估弹药寿命, 必须与弹药贮存的实际环境情况紧密联系, 并建立正确的数学模型及相应的统计与分析方法。而统计分析则直接依赖于相关数据的获取, 需找出数据与所建立数学模型中参数的关系, 利用这些关系进行数据处理及统计分析。

从贮存的弹体可靠性出发, 一种是建立离散型数学模型<sup>[3]</sup>, 例如 Poisson 过程模型; 另一种利用贮存寿命分布函数经验公式<sup>[4-7]</sup>: 指数分布、威布尔分布(逆威布尔分布)、极小值分布等。以上 2 种方法都需要通过选取一定数量的弹药样品, 设立失效判

收稿日期: 2015-02-28; 修回日期: 2015-03-25

作者简介: 王宝成(1965—), 男, 陕西人, 硕士, 高级工程师, 从事战斗部装药技术研究。

据,统计所测试样品失效情况,利用极大似然估计法求得经验公式参数,便可计算出在一定置信度和可靠度下求得的弹药寿命。

从炸药某种关键组份的含量或失重率出发,设定其小于某值(例如0.1%)时判为失效,建立一种连续的数学模型<sup>[8-9]</sup>,先通过样品选取、测试求解模型中的参数从而确定在某一可靠度和置信度下弹药的贮存寿命。

利用数理统计的方法,若要得到比较可靠的模型参数的值,需要较大的样品量,而且所确定的数学模型能真实反映弹药寿命的规律,此法比较适合小型弹药及自然环境长期贮存弹药的寿命评估,试验成本较高。

## 1.2 自然老化和加速老化在寿命评估上的应用

确定炸药贮存寿命最准确的方法是自然老化,定期检测有关性能指标,直到不能满足要求为止,这种方法周期太长。加速老化试验是强化环境因素作用,在相对较短的时间里获得长期贮存试验结果的一种试验方法,现在成为对炸药寿命评估最为常用的方法之一。根据炸药加速老化分解试验取得的数据为依据,求出炸药化学动力学参数,再估算其实际贮存寿命。炸药的加速老化是在某一设定温度下(45, 55, 65, 75 °C等)、一定湿度下,在恒温恒湿箱中贮存一定时间。对已知的炸药样品进行加速老化,炸药样品会有一些物理和化学方面的变化,影响炸药的力学性能和爆轰性能,为炸药的寿命评估带来帮助。

### 1.2.1 加速老化对炸药表观和微观结构的影响<sup>[10-15]</sup>

加速老化对炸药表观和微观结构的影响根据炸药的种类不同而有一些差异,总体表现在以下几个方面:1) 放出气体。这些气体来源于原材料合成生产过程、混合炸药制造过程中添加的工艺助剂、混合炸药中的组份以及释出物之间相互反应气体,并随着贮存温度的升高,气体浓度也有增大的趋势;2) 体积不可逆增大,药柱变脆和疏松,颜色大都由浅变深;3) 物质迁移。加速老化促进了氨基、硝基等活性官能团向表层迁移,使表面极性发生变化,宏观上表现为晶析现象和一些粘结剂、低熔点物质或是杂质的迁移;4) 炸药晶体颗粒增长,甚至在晶间出现断裂。长大的晶体甚至破坏了网状结构的粘结剂,出现了脱粘现象,但是其分子结构并没有变化,低温老化对炸药组份的分子结构也没有影响。

以上综合作用的结果表现在药柱的重量减小,体积增大,最终导致装药质量的下降。

### 1.2.2 加速老化对炸药力学性能的影响

通过上述加速老化后炸药表观和微观结构的变化对炸药的力学性能产生了影响。FEX-1 挠性炸药老化后失去弹性,更易于扯断从而失效<sup>[16]</sup>;以 F2314 为粘结剂的 PBX 老化后其拉伸强度和拉伸模量都呈现下降趋势<sup>[17]</sup>;然而在 TATB 基 PBX 的热老化中发现其拉伸模量和拉伸强度等力学性能指标并无明显变化,老化前后均具有较好的力学性能,且炸药晶体与粘结剂仍具有良好的粘结界面<sup>[18]</sup>。周红萍等<sup>[19]</sup>分别对 TATB 基和 HMX 基炸药进行了低应力条件下的老化试验,结果表明两者的力学性能也无下降趋势。对于 PBX 炸药,高分子材料的老化性能与炸药的力学性能有很大关系,所以只有掌握了高分子加速老化的一些现象和规律,才能全面反映混合炸药的力学性能。

### 1.2.3 对炸药安全性能和爆轰性能的影响

加速老化后,改性 B 炸药的化学热安定性未发生显著变化;FEX-1 挠性炸药的爆速和临界尺寸变化不大,仍维持在原来水平;RHT-902 炸药有良好的热稳定性。文献报道中,PBX 炸药老化研究较多,说明了 PBX 具有较好的抗老化能力,老化后其相容性、热安定性、机械感度、冲击波感度、抗过载性能及爆轰性能均无明显变化<sup>[16,20-22]</sup>。

然而也有相反的情况发生,例如在 198~220 °C 的环境中 PBX-6 炸药热感度增大,在 65 °C 环境老化 180 天后,烤燃时间缩短,烤燃温度降低,撞击感度提高<sup>[23]</sup>。炸药在 150~200 °C 下会导致许多微相产生,降低热安定性,导致炸药活化能降低<sup>[24]</sup>。在实际贮存 25~30 a 的水雷装药性能测试中发现<sup>[24]</sup>,其机械感度严重的升高,尤其是摩擦感度都达到了 100%,爆发点和真空安定性都有较大的劣化;在爆轰性能测试中,爆热和做功能力也由于炸药中铝粉的氧化而降低,这可能和弹药储存在潮湿的环境中有关。

在炸药老化对安全性能和爆轰性能的研究中,也产生了一些矛盾研究结果。主要是因为炸药所处的环境不同,较高的温度、较长得贮存时间和较高的湿度都易于使装药加速老化,使得延滞期缩短,加速反应期提前,导致炸药的安全性能和爆轰性能发生了质的改变。但是很难判断出延滞期和加速反

应期的临界状态。

#### 1.2.4 老化中寿命的评估

在以测试为前提评估炸药的寿命时,沿用了 2 种方法。一是利用 Berthelot 模型、Arrhenius 模型、时温叠加模型、神经网络模型等<sup>[25-28]</sup>,先设定合理的失效条件,再利用试验中的数据拟合出模型中的参数,即可得到不同贮存温度下的寿命年限;二是对一定年限的炸药的力学性能、安全性能和爆轰性能测试,与选定的临界值比较其是否到寿。前者可以较小的代价就可以预估炸药的寿命,但是受模型的准确性和到寿的判定准则的不确定性,结果误差无法衡量;而后者需要较长时间贮存。

#### 1.3 数值计算在炸药寿命评估中的应用

计算机数值模拟技术是当今科学和工程技术研究非常重要的手段之一,要准确计算炸药经过热分解后的爆轰性能参数,需要弄清炸药在不同升温速率的热分解特性、加速老化机理和效应。可通过不同升温速率下热失重曲线获得其热分解机理函数和动力学方程,对炸药老化进行数值模拟。既可以设定某个分解深度,计算出炸药的寿命;又可以计算某个时间点老化炸药的爆轰性能参数。

通过数值计算 PETN 基和 TATB 基的塑料粘结炸药的密度、爆速和爆压都有不同程度的降低<sup>[29-30]</sup>。数值模拟技术的准确程度依赖于炸药的分解机理函数,然而炸药在不同的情况下分解机理极其复杂,所以计算的结果与实际加速老化得出的结果还有一定的出入,若要真实模拟炸药在贮存过程中的老化过程还有待于炸药分解理论的深入研究。

## 2 国内外研究进展比较

国内外对 PBX 炸药老化及寿命评估研究较多,而对装备较多的熔铸炸药老化研究较少。虽然国内外起点不同,但是对炸药老化的研究方法基本一致,得出的结论也趋于相同,只是国外针对 PBX 炸药重点研究了高分子材料的老化降解;在长期的自然贮存寿命方面开展的研究工作不多;在建立数学模型及预测工作方面远不够系统和成熟,还需获得相关大量的试验数据后,才能投入实际应用。

国内在老化研究过程中发现,炸药在贮存过程中都经历了一个较长的延滞期,在延滞期内虽然炸药的物理化学性能略有变化,但是其不影响炸药的应用性能;从延滞期到加速期也是从量变到质变的过程,其中的临界点的判断依据尚不充分。PBX 炸

药老化过程中表现出相对稳定的状态,需要对粘结剂和增塑剂的老化进一步研究。

## 3 结束语

随着各种计算机技术、检测技术、试验水平的不断提高,对炸药的老化及寿命评估取得了一定的进步,但是现阶段国内对炸药老化及寿命评估的研究还不全面,没有形成系统,所积累的数据有限,导致炸药老化后表现出来得规律还不十分明显。尤其是对炸药寿命到期的判断依据缺乏确实可靠的标准,只能凭借经验合理取值,这就导致通过老化方法得出的炸药寿命具有随机性。正因为上述 3 种寿命评价方法还有很大的不一致性,所以我国的弹药的寿命评估仍以自然环境长期贮存试验检测为主,用装药的安全性能和爆轰性能对炸药做出寿命评估。

另外,通过战斗部装药来评估弹药的寿命是不全面的,还要通过对发射药、推进剂、橡胶圈、引信、制导装置等其他弹药组成部分进行系统的、综合的、抓重点的、抓薄弱环节的评估方法,才能全面反映弹药的寿命。

## 参考文献:

- [1] 罗天元,吴波,但渝霞. 弹药环境适应性设计需要考虑的几个问题[J]. 装备环境工程, 2007, 4(1): 62-66.
- [2] 杨雪海,张启戎,高晓敏. 国外 PBX 老化研究动态[J]. 四川兵工学报, 2008, 29(5): 99-102.
- [3] 郑波,许和贵,姜志保. 一种基于 Poisson 过程的弹药贮存寿命评估方法[J]. 兵工学报, 2005, 26(4): 528-530.
- [4] 祝逢春,王晓鸣,崔大伟,等. 航空弹药失效分布拟合方法比较研究[J]. 火箭与制导学报, 2006, 26(2): 922-925.
- [5] 钟强晖,范志和,徐剑波,等. 舰艇环境下弹药的可靠性分析[J]. 火箭与制导学报, 2007, 27(2): 357-359.
- [6] 李淦,郑波. 基于步进应力加速寿命试验的某新型弹药储存寿命评估[J]. 火箭与制导学报, 2007, 27(2): 307-308.
- [7] 刘金梅,王建萍,张力. 生存分析法在弹药贮存可靠性评估中的应用[J]. 火箭与制导学报, 2004, 24(4): 332-334.
- [8] 石爽,曲仕茹,朱丽娟,等. 基于老化失重率的炸药贮存可靠性研究[J]. 火箭与制导学报, 2011, 31(6): 120-122.
- [9] 郑波,宋新民,姜志保,等. 一种评估库存发射药安全贮存寿命的方法[J]. 火炸药学报, 2005, 28(2): 29-31.
- [10] 余堃,余凤湄,李哲,等. JOB-9003 炸药释出气体研究[J]. 火炸药学报, 2005, 28(3): 66-69.
- [11] 杨秀兰,徐瑞娟,黄黎明,等. 固相微萃取和 GC/MS 分析 JOB 炸药老化释放气氛[J]. 含能材料, 2003, 11(4):

- 215-218.
- [12] 程克梅, 何芳, 夏云霞, 等. 用原子力显微镜观察 HMX 基炸药老化前后的表面形貌变化[J]. 含能材料, 2005, 13(Z1): 30-35.
- [13] 徐涛, 程克梅, 陈曙东, 等. JO-9159 炸药柱在加速老化条件下表面特性的变化[J]. 火炸药学报, 2003, 26(4): 51-54.
- [14] 徐涛, 陈曙东, 王晓川, 等. JOB-9003 炸药中组分迁移及其迁移物的表征[J]. 火炸药学报, 2004, 27(4): 80-83.
- [15] 黄奕刚, 王晓川, 郑敏侠, 等. TATB 基高聚物粘结炸药低温老化后的结构和热性能研究[J]. 含能材料, 2002, 10(2): 81-83.
- [16] 唐桂芳, 王晓峰, 衡淑云, 等. FEX-1 挠性炸药贮存寿命的预估[J]. 火炸药学报, 2003, 26(2): 19-21.
- [17] 李敬明, 郝莹, 舒远杰, 等. F2314 氟树脂在老化过程中的结晶度变化及其对力学性能的影响研究[J]. 含能材料, 2004, 12(Z1): 317-319.
- [18] 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.
- [19] 周红萍, 何强, 李明, 等. 低拉伸应力下 PBX 的老化实验研究[J]. 火炸药学报, 2009, 32(5): 8-10.

\*\*\*\*\*

(上接第 43 页)

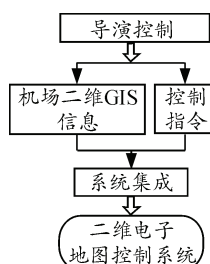


图5 导演控制系统实现流程

## 5 结束语

笔者以提高岗位任职能力为出发点与落脚点, 分析确定航空装备保障指挥综合演练系统建设目标及原则, 构建功能定位准确、组成内容明确, 建设方案具体的航空装备保障指挥综合演练体系, 对培养航空装备保障指挥人员“装备指挥能力”、“装备管理能力”和“领导管理能力”的形成, 实现“保障有力”的要求, 具有一定的指导意义和应用价值。

## 参考文献:

- [1] 海军院校任职教育研究优秀论文集[C]. 北京: 海军司令部, 2006: 12-16.
- [2] 军队院校任职教育研究[M]. 北京: 海潮出版社, 2005: 23-33.

- [20] 刘萍, 许西宁. 聚奥炸药的机械感度研究[J]. 火炸药学报, 2000, 23(4): 16-17.
- [21] 高晓敏, 黄明. I-RDX 及其 PBX 老化研究进展[J]. 含能材料, 2010, 18(2): 236-240.
- [22] 代晓淦, 向永, 申春迎. 用抛射弹撞击法(Steven 试验)研究 PBX-2 炸药加速老化前后反应能力[J]. 含能材料, 2006, 14(6): 453-456.
- [23] 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.
- [24] 陈亚芳, 王保国, 张景林. 某型水雷装药的安全贮存寿命的实验研究[J]. 四川兵工学报, 2009, 30(3): 25-26.
- [25] 左玉芬, 陈捷, 常昆, 等. 改性 RHT-902 炸药热分解反应动力学研究[J]. 含能材料, 2004, 12(Z1): 333-335.
- [26] 孙国祥. 高分子混合炸药[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985: 158-219.
- [27] GJB770A-97 火药试验方法[S].
- [28] 张国辉, 韦兴文, 陈捷, 等. 高聚物粘结炸药老化模型比较分析[J]. 含能材料, 2011, 19(6): 679-683.
- [29] 高大元, 何松伟, 韩勇, 等. GI-920 炸药加速老化模拟[J]. 火炸药学报, 2008, 31(3): 58-60.
- [30] 高大元, 何松伟, 周建华, 等. JB-9014 炸药加速老化模拟研究[J]. 兵工学报, 2009, 30(12): 1607-1610.
- [3] 宋华文, 李福生. 装备保障综合演练[M]. 北京: 解放军出版社, 2003: 5-67.
- [4] 黄海, 曹军海, 单志伟. 基于 MAS 的装备综合保障仿真系统设计[J]. 装甲兵工程学院, 2008(3): 17-21.
- [5] 彭英武, 李庆民, 王睿, 等. 面向任务的装备保障仿真模型体系研究与应用[J]. 海军工程大学学报, 2010(5): 62-68.
- [6] 杨宇航. 仿真技术在部队装备技术保障研究中的应用[J]. 系统工程理论方法应用, 1995(1): 43-49.
- [7] 暴轩, 高会军. 装备保障指挥体系组织结构的评价模型[J]. 兵工自动化, 2009, 28(5): 57-59.
- [8] 卢永吉, 王远达, 侯健, 等. 军用飞机两级维修及其关键设计技术[J]. 航空维修与工程, 2008(5): 52-55.
- [9] 刘俊杰, 冀亚林, 刘滨. 基于 HLA 的战术级装备保障系统仿真[J]. 科学技术与工程, 2006(24): 3965-3970.
- [10] 石磊, 刘佳, 赵晓明, 等. 基于 UML 和 HLA 的装备维修保障仿真系统建模[J]. 兵工自动化, 2007(6): 21-22.
- [11] 刘伟, 贾希胜, 胡起伟, 等. 基于 VR\_Forces 的装备保障仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2010(5): 1292-1300.
- [12] 邵维忠, 杨芙清. 面向对象的系统设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 72-79.
- [13] 张涛, 郭波. 基于增强型扩展的面向对象 Petri 网模型的装备保障能力评估建模[J]. 兵工学报, 2006, 27(2): 273-277.
- [14] 伍尔德里奇. 多 Agent 系统引论[M]. 石纯一, 译. 北京: 电子工业出版社, 2003: 35-38.