导弹战斗部炸药装药的贮存可靠性研究

余文力， 董三强， 朱满林， 王少龙
(第二炮兵工程学院，陕西西安 710025)

摘 要：通过高温加速老化试验和统计分析，研究了某导弹战斗部中炸药装药的贮存寿命分布规律，在此基础上，建立了贮存寿命的可靠性评估模型，并对贮存温度下的平均贮存寿命及贮存寿，r爷置信下限进行了评估。研究得出，该导弹战斗部炸药装药的贮存寿命服从对数正态分布规律；常温25℃条件下贮存时，其平均贮存寿命为67.2 a，置信度为0.8、0.85、0.9、0.95水平下的贮存寿命置信下限分别为29.58、23.06、15.75和7.14 a。研究结果对该导弹战斗部炸药装药的后续贮存方案的制定等具有重要的指导意义和参考价值。

关键词：炸药装药；加速老化试验；贮存寿命；置信下限

中图分类号：TJ410.3+4 **文献标识码**：A **文章编号**：1009-3516(2005)02-0043-03

炸药作为导弹武器系统的能源，具有长期贮存一次使用的特点，其贮存寿命及贮存可靠性是一项重要技术指标，它既关系到现役装备的安全贮存和有效使用，又关系到产品的不合理报废造成的经济损失。因此，炸药装药的贮存可靠性是其导弹武器研制、生产、使用和贮存管理部门共同关注的问题，开展其研究对设计改进、作战决策与延寿等具有重要的意义。本文以高温加速贮存试验为基础，通过统计分析，对某导弹战斗部中使用的一种以RDX为主体的混合炸药装药的贮存可靠性进行了研究。

1 试验及结果

试验采用恒加应力加速贮存的方法，即在高温环境下同时贮存多个炸药装药试样，定期测试试样质量的变化。取72℃、82℃、95℃及105℃ 4个温度点作为加速应力水平，每个加速应力水平下，分别采用6个试样进行试验[1]，在贮存过程中定期监测炸药装药试样的质量变化。以试样的质量累积减量百分数作为失效判据参数。美军标MIL－STD－1751认为[2]，无论任何原因引起的炸药失重达1%时便认为该炸药失效。考虑到该炸药在导弹中作用的重要性和要求的严格性，因此，从安全使用的角度出发，以试样质量减少0.5%为失效临界点，其对应的贮存时间作为炸药装药的贮存寿命 t。试验得到该炸药装药试样在4个不同温度 T 下的贮存寿命，列于表1。

表1 4个温度点下炸药装药试样的贮存寿命

T/℃	t/d					
	试样1	试样2	试样3	试样4	试样5	试样6
72	264.45	304.43	299.36	266.04	299.05	270.47
82	173.41	212.72	197.24	200.26	197.42	189.74
95	41.77	46.23	47.10	47.24	46.63	41.35
105	15.41	17.36	16.38	16.18	16.30	16.22

2 贮存寿命分布模型

2.1 寿命分布模型假设

收稿日期：2004－06－14
作者简介：余文力(1967－)，男，安徽潜山人，副教授，博士，主要从事炸药战斗部工程研究.

对数正态分布是可靠性研究中一种常用的分布类型,它适合于描述受物理化学过程所支配的失效规律。根据炸药分解失效的特点,假设该炸药装药在各温度 T_i 下的贮存寿命 t 均服从对数正态分布,其分布密度函数形式为

$$f_i(t)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i t}\exp\left[-\frac{(\ln t-\mu_i)^2}{2\sigma_i^2}\right] \tag{1}$$

式中, t 为贮存寿命, μ_i 为寿命 t 的对数均值, σ_i 为寿命 t 的对数标准差。

2.2 贮存寿命分布模型检验

如果寿命 t 服从对数正态分布,则随机变量 $X=\ln t$ 服从正态分布。因此,对寿命 t 的对数正态分布检验可转化为对随机变量 $X=\ln t$ 的正态性检验。设 $t_1,t_2,\cdots,t_n$ 是来自于对数正态分布 $LN(\mu,\sigma^2)$ 的一个完全样本,则由变换 $x=\ln t$ 得到 $x_1,x_2,\cdots,x_n$ 是来自正态分布 $N(\mu,\sigma^2)$ 的一个完全样本。建立假设 H_0: 样本 $x_1,x_2,\cdots,x_n$ 来自于正态分布。根据夏皮诺和威尔克检验法[3],检验统计量 W 为

$$W=\frac{\left[\sum_{i=1}^{[n/2]}a_i(x_{n+1-i}-x_i)\right]^2}{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2} \tag{2}$$

式中, $\bar{x}$ 为样本均值, a_i 为 W 统计量的系数。

对给定的显著水平 α ,当统计量 W 与 α 分位数 W_α 之间满足:

$$W>W_\alpha \tag{3}$$

时,接受正态假设 H_0,认为样本 $x_1,x_2,\cdots,x_n$ 是来自正态总体,即认为 $t_1,t_2,\cdots,t_n$ 来自对数正态分布。否则,拒绝正态性假设 H_0。

取显著水平 $\alpha=0.01$,根据试验结果及上述方法,分别对 4 个试验温度下炸药装药试样的寿命对数正态分布假设进行检验,计算结果列于表 2。从表 2 中的计算结果可以看出,对 4 个贮存试验温度下的炸药装药试样,均满足式(3)。因此,认为 4 个贮存试验温度下该炸药装药的贮存寿命均服从对数正态分布。

表 2 寿命分布模型检验统计量计算结果

	72℃	82℃	95℃	105℃
样本容量 n	6	6	6	6
统计量 W	0.798 0	0.932 1	0.753 7	0.897 0
分位数 $W_{\alpha=0.01}$	0.713	0.713	0.713	0.713

2.3 对数标准差相等的检验

2.3.1 寿命分布模型参数估计

对数标准差相等检验是确保贮存寿命分布模型(1) 成立的重要保证。为此首先用各试验温度 T_i 下的完全寿命数据估计相应的分布参数 μ_i 和 σ_i。根据点估计理论,参数 μ_i 和 σ_i 的无偏估计值由下式确定:

$$\hat{\mu}_i=\overline{\ln t_i}=\frac{1}{n_i}\sum_{j=1}^{n}\ln t_{ij} \tag{4}$$

$$\hat{\sigma}_i^2=\frac{1}{n_i-1}\sum_{j=1}^{n_i}(\ln t_{ij}-\overline{\ln t_i})^2,i=1,2,\cdots,k \tag{5}$$

根据表 1 列出的 4 个温度下该炸药装药各试样的贮存寿命试验结果,由式(4)、(5) 计算得到各温度下的分布参数 μ_i 和 σ_i,其结果列于表 3。

表 3 贮存寿命对数正态分布参数估计值

统计量	72℃	82℃	95℃	105℃
$\hat{\mu}_i$	5.647 0	5.271 8	3.806 3	2.791 1
$\hat{\sigma}_i$	0.066 3	0.067 9	0.061 9	0.038 0

2.3.2 对数标准差相等的检验

假定在 4 个试验温度下,诸对数标准差 σ_i 相等,即假设

$$H_1:\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3=\sigma_4 \tag{6}$$

根据巴特利特检验法,该假设的检验统计量为[3]

$$\chi^2=B^2/C \tag{7}$$

式中,

$$B^2=\left[\sum_{i=1}^{k}(n_i-1)\right]\left\{e_n\sum_{i=1}^{k}\left[(n_i-1)\hat{\sigma}_i^2\right]-\ln\left[\sum_{i=1}^{k}(n_i-1)\right]\right\}-\sum_{i=1}^{k}(n_i-1)\ln\hat{\sigma}_i^2 \tag{8}$$

$$C = 1 + \frac{1}{3(k-1)}\left\{\sum_{i=1}^{k}\frac{1}{n_i - 1} - \left[\sum_{i=1}^{k}(n_i - 1)\right]^{-1}\right\} \tag{9}$$

式中，n_i 为试验温度 T_i 下的样本容量，k 为加速试验温度点数，$k = 4$。

在假设 H_1 成立的条件下，统计量 B^2/C 近似服从自由度为 $k-1$ 的 χ^2 分布。对给定的显著性水平 α，当

$$\chi^2 < \chi^2_{\alpha}(k-1) \tag{10}$$

时，接受假设 H_1，否则，拒绝假设 H_1。

采用上述方法计算得到检验统计量 $\chi^2 = 1.7113 < \chi^2_{0.025}(3)$。因此，在显著性水平 $\alpha = 0.025$ 下假设 H_0 成立，即认为 4 个对数标准差相等，其值 σ 可由 $\hat{\sigma}_i(i = 1,2,3,4)$ 的加权平均来估计，即

$$\hat{\sigma} = \sum_{i=1}^{k}(n_i\hat{\sigma}_i)/\sum_{i=1}^{k}n_i \tag{11}$$

3　贮存寿命评估

3.1　贮存寿命评估模型

炸药热分解失效研究得出[4]，在贮存寿命服从对数正态分布的条件下，炸药贮存寿命的对数与贮存温度之间一般呈线性关系。假设该炸药装药的贮存寿命符合下面的线性模型：

$$\ln t = a + bT + \varepsilon \tag{12}$$

式中：a、b 为参数；t 为贮存寿命(d)；T 为绝对温度；ε 为服从正态分布 $N(0,\sigma_1^2)$ 的随机变量。

根据一元线性回归分析理论[5]，对参数 a、b 与 σ^2 进行点估计，得无偏估计值分别为 $\hat{a} = 36.9365$，$\hat{b} = -9.0062\times10^{-2}$，$\hat{\sigma}_1 = 0.1953$。于是，该炸药装药的贮存寿命评估模型为

$$\ln\hat{t} = 36.9365 - 0.090062T \tag{13}$$

用线性回归假设检验理论，对上述寿命评估模型的正确性进行显著性检验。分析得到，在显著水平 $\alpha = 0.01$ 条件下，式(13)所描述的该炸药装药的贮存寿命模型线性回归比较显著，因此，该模型是可信的。

由式(13)得到，$T = 25$℃ 下的 $\hat{\mu} = \ln\hat{t} = 10.098$。于是，常温 25℃ 下该炸药装药的贮存寿命分布密度函数可由式(1)完全确定。图 1 给出了常温 25℃ 下该炸药装药的贮存寿命分布密度曲线。

常温 25℃ 下，该炸药装药的平均贮存寿命为

$$E(t) = \exp(\hat{\mu} + \hat{\sigma}_1^2/2) = 67.2(\mathrm{a})。$$

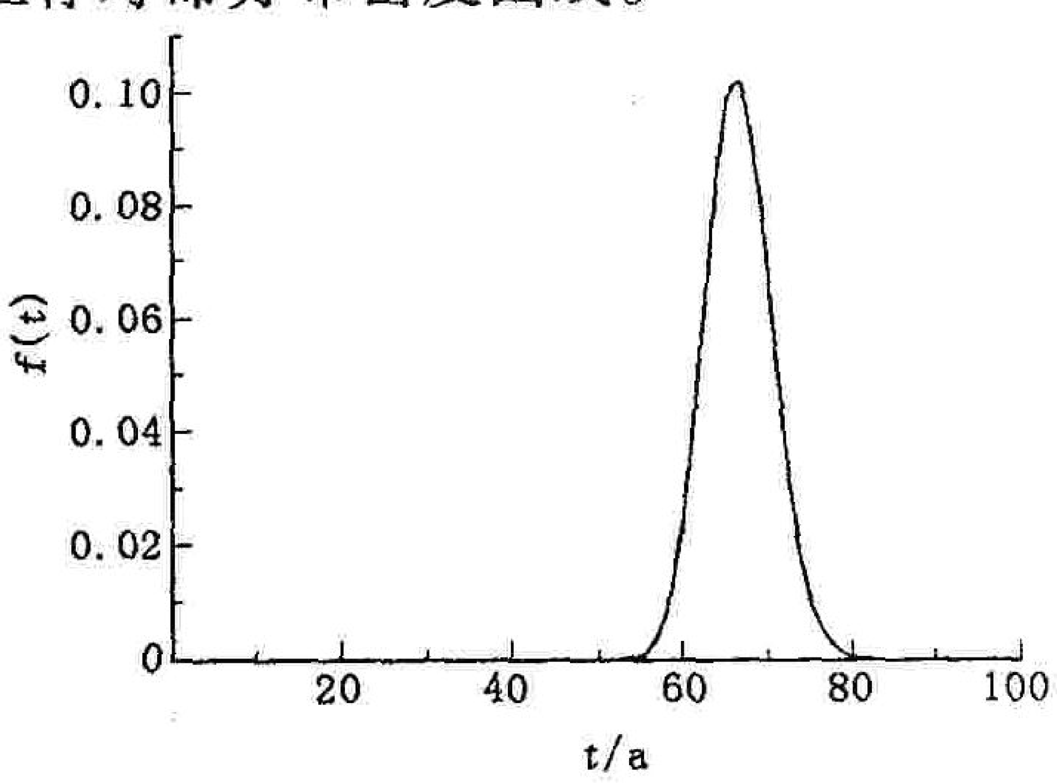

图 1　25℃ 下该炸药的贮存寿命分布密度曲线

3.2　贮存寿命置信下限

为了对常温下的该炸药装药的贮存寿命给出更合理的估计，采用下面的方法对贮存寿命的置信下限进行估计。

设温度为 T_0 时的样品寿命为 t_0，则统计量

$$T = \frac{\ln t_0 - \hat{a} - \hat{b}T_0}{\hat{\sigma}_1^*\sqrt{1 + \frac{1}{k} + \frac{(T_0 - \bar{T})^2}{\sum_{i=1}^{k}(T_i - \bar{T})^2}}} \tag{14}$$

服从自由度为 $k-2$ 的 t 分布。式中，k 为样本容量，$\hat{\sigma}_1^* = \sqrt{k/(k-2)}\,\hat{\sigma}_1$。

根据文献[5]，在给定的置信水平 α 下，对应温度 T_0 的炸药装药的贮存寿命单侧置信下限为

$$t_L = e^{\hat{a} + \hat{b}T_0 - \delta(T)} \tag{15}$$

其中，

$$\delta(T) = t_{\alpha}(k-2)\hat{\sigma}_1^*\sqrt{1 + \frac{1}{k} + \frac{(T_0 - \bar{T})^2}{\sum_{i=1}^{k}(T_i - \bar{T})^2}} \tag{16}$$

由式(16)计算得到，该战斗部炸药装药在 25℃ 贮存条件下，对应不同置信度 $\gamma = 1 - \alpha$ 的贮存寿命下限列于表 4。

表 4　不同置信度 γ 下的贮存寿命下限

γ	0.8	0.85	0.9	0.95
t_L/a	29.58	23.06	15.75	7.14

(下转第 49 页)