

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2016.03.008

# TNT 基炸药储存寿命评估研究<sup>\*</sup>

祝逢春 刘恒春 游培寒 郭广文 赵未平  
95856 部队(江苏南京,210028)

[摘 要] 为解决有效评估炸药储存寿命的难题,提出一套基于炸药加速退化试验失重率阈值的储存寿命评估技术。采用基于伪失效寿命的加速寿命试验数据建模与处理方法,对某 TNT 基炸药加速退化试验数据,使用正态分布和威布尔分布模型,估计了两种模型参数,评定了其储存寿命。研究表明,该评估技术可行,结论可信。

[关键词] 炸药;加速试验;退化;失重率;储存寿命;寿命评估

[分类号] TQ560.7

## 引言

炸药储存寿命是关系装药产品安全储存、可靠使用的重要指标。目前国内外尚无有效的炸药储存寿命评定技术。对于炸药的储存寿命<sup>[1]</sup>,美国主要依靠长期监测,辅以加速储存试验,获取变化规律,建立外推模型进行预报;俄罗斯相关理论与试验结合很好,加速储存试验理论和方法较成熟,能够通过加速储存试验提前较长时间预报;我国主要是采用性能监测、加速储存试验和产品类比等方法进行综合评估。

我国对于火工品加速试验和储存寿命的研究较领先,并形成了标准<sup>[2]</sup>,而对于炸药或炸药装药产品的相关研究尚不多。目前,炸药装药产品设计定型时,储存寿命大多数是靠类比分析评估的。据报导,余文力等利用四温度下定量截尾恒定应力加速试验数据,按对数正态分布寿命模型评定了 RDX 混合炸药储存寿命<sup>[3]</sup>;石爽等人利用三温度恒定应力定时截尾加速试验数据进行过多种炸药储存寿命评估<sup>[4]</sup>,对样品平均失重率退化模型研究较深。

加速退化试验<sup>[5-7]</sup>是在不改变产品失效机理的前提下,通过加大产品的热应力、电应力或机械应力等敏感应力,加快产品的性能退化,利用高应力水平下的性能退化数据,外推正常使用应力下的产品的寿命和可靠性。其关键要识别出能够表征产品功能退化和可靠性下降的性能值,以及引起产品发生性能退化的主要影响因素。

加速退化试验方法主要包括恒定加速退化试验和步进加速退化试验。本文以某 TNT 基炸药为研究对象,采用恒定加速退化试验,以炸药失重率表征

炸药性能,将失重率阈值作为炸药失效依据,提出一套符合统计学原理的基于加速退化试验数据的炸药储存寿命评估技术。

## 1 评估基础

加速性能退化试验评估产品寿命,在电子器件、非金属材料领域比较普遍<sup>[8-9]</sup>,而用于炸药储存寿命评估较为鲜见。进行加速退化试验,特征参数和加速因素的选取是试验成功的关键,特征参数阈值是寿命评估的依据,其科学性、合理性至关重要。

### 1.1 性能退化特征参数的选取

进行加速退化试验,选择的样品性能特征参数,一是必须有准确定义而且能够进行监测,二是随着试验时间增长,有明显的趋势性变化,能客观反映产品状态。对于有机炸药,在一般情况下分子结构保持相对稳定,但在较高温度或特殊情况下会出现挥发、升华或分子链断裂分解成气相产物等现象,使得试样质量发生变化,这种失重现象与炸药性能密切相关。此特性常用于炸药热分解研究,并以此评价炸药热性能。库存炸药随着储存时间增加,受环境温度影响,其成分会分解挥发,质量会发生变化。可见,将炸药失重率作为炸药特征参数符合加速退化研究要求。

### 1.2 特征参数阈值的确定

美国军用标准 ML—STD—1751 规定,无论什么原因引起的炸药失重 1% 均认为该炸药失效。文献[10]的试验研究表明,一般炸药质量分解约 1% ~ 2% 就进入加速分解期,并将失重率达 1% 作为某型固体云爆剂的失效阈值。同样,文献[3]将失重率达 1% 作为 RDX 混合炸药的失效阈值。因此,本文

<sup>\*</sup> 收稿日期:2015-06-23

作者简介:祝逢春(1964 - )男,博士,高工,主要从事弹药储存可靠性研究。E-mail:13382763857@189.cn

也将失重率 1% 作为性能退化参数的阈值。

1.3 加速因素的选取

本研究的炸药处于较密封状态,储存过程中受湿度影响较小,因而进行加速退化试验时,仅进行温度单因素加速试验。

1.4 储存寿命评估方法

利用加速退化试验数据评估储存寿命有两种方法<sup>[11-13]</sup>:一种是基于伪失效寿命的加速退化数据建模分析方法,另一种是基于退化量分布的加速退化

数据建模分析方法。本文采用前一种方法。

2 试验及结果

试验用炸药为某 TNT 基炸药,样品储存 8 a。分别称量 27 份块状装药样品,每份 5 g。3 个老化箱的试验温度分别设定为 59、65、71 ℃;各老化箱放炸药样品 9 份,定期取出样品称其质量(取出称量时应该注意减少时间,控制温度,并保持干燥),直到 90 d 停止试验。试验获得数据如表 1 ~ 表 3 所示。

表 1 59 ℃加速试验时的失重率  
Tab. 1 Weight loss rate in accelerating test at 59 ℃ %

序号	10 d	20 d	30 d	40 d	50 d	60 d	70 d	80 d	90 d
1 <sup>#</sup>	0.007	0.012	0.017	0.023	0.030	0.039	0.046	0.053	0.060
2 <sup>#</sup>	0.005	0.009	0.015	0.021	0.028	0.034	0.042	0.049	0.058
3 <sup>#</sup>	0.005	0.010	0.019	0.026	0.030	0.036	0.041	0.047	0.052
4 <sup>#</sup>	0.007	0.012	0.018	0.027	0.030	0.038	0.044	0.052	0.060
5 <sup>#</sup>	0.004	0.012	0.019	0.023	0.031	0.035	0.042	0.048	0.054
6 <sup>#</sup>	0.006	0.011	0.016	0.020	0.026	0.035	0.043	0.051	0.056
7 <sup>#</sup>	0.006	0.013	0.020	0.025	0.031	0.036	0.043	0.050	0.056
8 <sup>#</sup>	0.007	0.012	0.021	0.026	0.032	0.039	0.047	0.055	0.063
9 <sup>#</sup>	0.005	0.015	0.022	0.028	0.035	0.041	0.048	0.056	0.064

表 2 65 ℃加速试验时的失重率  
Tab. 2 Weight loss rate in accelerating test at 65 ℃ %

序号	10 d	20 d	30 d	40 d	50 d	60 d	70 d	80 d	90 d
1 <sup>#</sup>	0.006	0.015	0.023	0.030	0.038	0.050	0.056	0.063	0.070
2 <sup>#</sup>	0.005	0.014	0.022	0.031	0.041	0.051	0.057	0.065	0.073
3 <sup>#</sup>	0.005	0.013	0.021	0.029	0.036	0.046	0.055	0.064	0.074
4 <sup>#</sup>	0.008	0.012	0.024	0.033	0.041	0.049	0.055	0.068	0.078
5 <sup>#</sup>	0.007	0.017	0.025	0.029	0.039	0.049	0.060	0.071	0.080
6 <sup>#</sup>	0.004	0.020	0.028	0.034	0.040	0.051	0.060	0.069	0.077
7 <sup>#</sup>	0.007	0.013	0.022	0.032	0.041	0.052	0.062	0.073	0.082
8 <sup>#</sup>	0.006	0.014	0.026	0.034	0.045	0.056	0.065	0.074	0.084
9 <sup>#</sup>	0.005	0.010	0.018	0.026	0.046	0.051	0.058	0.068	0.079

表 3 71 ℃加速试验时的失重率  
Tab. 3 Weight loss rate in accelerating test at 71 ℃ %

序号	10 d	20 d	30 d	40 d	50 d	60 d	70 d	80 d	90 d
1 <sup>#</sup>	0.008	0.020	0.032	0.044	0.057	0.070	0.082	0.094	0.107
2 <sup>#</sup>	0.011	0.021	0.035	0.045	0.056	0.067	0.078	0.090	0.102
3 <sup>#</sup>	0.010	0.024	0.031	0.044	0.056	0.069	0.081	0.093	0.104
4 <sup>#</sup>	0.009	0.015	0.030	0.037	0.047	0.059	0.070	0.085	0.096
5 <sup>#</sup>	0.008	0.022	0.034	0.046	0.059	0.068	0.080	0.090	0.100
6 <sup>#</sup>	0.010	0.025	0.036	0.048	0.060	0.072	0.083	0.096	0.109
7 <sup>#</sup>	0.007	0.019	0.031	0.038	0.047	0.056	0.067	0.082	0.095
8 <sup>#</sup>	0.009	0.022	0.031	0.041	0.053	0.064	0.074	0.083	0.092
9 <sup>#</sup>	0.010	0.021	0.032	0.043	0.055	0.065	0.076	0.088	0.098

3 寿命评估

先对各应力下各样品数据作曲线,由退化曲线选择退化轨迹模型,采用最小二乘法估计退化轨迹模型参数,根据各样品退化轨迹模型和退化阈值,计算各应力下各样品伪失效寿命;再对伪失效寿命分布进行检验,确定分布模型,估计模型参数;然后利用加速模型建模分析方法,推导失效寿命参数与应力水平关系,用外推法估计正常应力下炸药储存寿命模型参数,从而由储存寿命分布函数计算出炸药在正常条件下的储存寿命。

3.1 退化轨迹模型的选择与模型参数计算

分别对每一温度下每个样品数据作图,发现装药失重率曲线呈线性上升分布<sup>[1]</sup>。采用最小二乘法求出退化轨迹模型参数。

设模型为:

$y = at + b。$  (1)

式中: $y$  为失重率,%; $t$  为试验时间,d。

退化轨迹如图 1 所示,计算参数如表 4 所示。

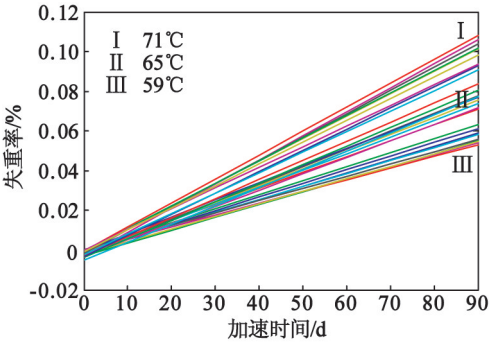


图 1 不同温度下各样本失重退化轨迹  
Fig. 1 Weight loss degradation track of samples at different temperature

3.2 各样本伪失效寿命的外推

由退化轨迹模型和特征参数阈值,分别计算

59、65 ℃ 和 71 ℃ 各样品伪失效寿命。对于新炸药退化阈值(失重率)为 1.0%,而本研究炸药已储存 8 a,按炸药寿命 20 a 的保守估计,可确定退化阈值为 0.6%,将表 4 的参数分别代入式(1),计算伪失效寿命  $t$ ,计算结果见表 5。

表 5 不同温度下各样品的伪失效寿命

Tab. 5 Pseudo-failure life calculation of samples at different temperature d

序号	59 ℃	65 ℃	71 ℃
1 <sup>#</sup>	852.0	626.1	496.9
2 <sup>#</sup>	870.7	644.8	496.9
3 <sup>#</sup>	897.6	660.4	514.4
4 <sup>#</sup>	918.8	678.0	527.1
5 <sup>#</sup>	938.7	696.0	531.4
6 <sup>#</sup>	952.8	699.1	546.1
7 <sup>#</sup>	973.4	714.7	562.9
8 <sup>#</sup>	990.3	725.4	576.2
9 <sup>#</sup>	1 017.8	749.1	582.9

3.3 失效寿命分布检验与参数估计

以图估法<sup>[14]</sup>对伪失效寿命进行威布尔分布和正态分布假设检验。从文献[4]中附表 7.1 查得,9 个样本情况的概率  $F_n(t_i)$  为 0.074 12、0.179 62、0.286 24、0.393 08、0.500 00、0.606 91、0.713 76、0.820 38、0.925 87。以概率为纵坐标,3 个温度的伪失效寿命为横坐标分别作图,如图 2。

对于正态分布模型,采用式(2)和式(3)分别计算 3 个温度下的伪失效寿命均值  $\hat{\mu}$  和标准差  $\hat{\sigma}$ ,计算所得参数如表 6 所示。

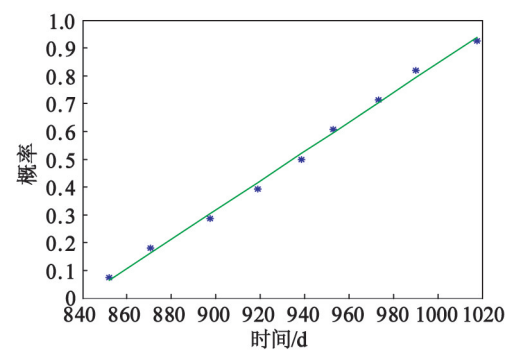
$$\hat{\mu} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i;$$
 (2)

$$\hat{\sigma} = \left[ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (t_i - \hat{\mu})^2 \right]^{\frac{1}{2}}。$$
 (3)

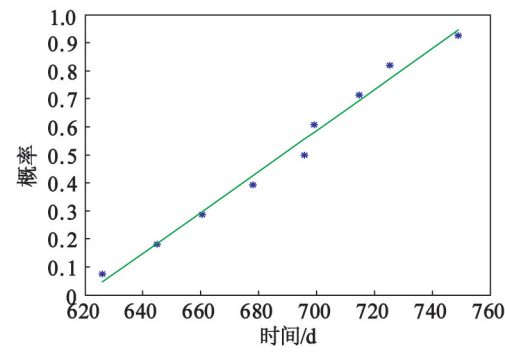
表 4 不同温度时各样本模型参数的计算值

Tab. 4 Assessment parameters of samples at different temperature

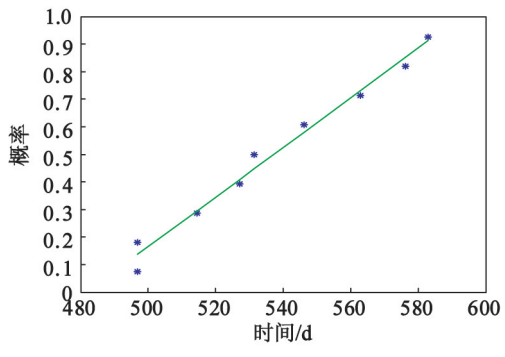
序号	59 ℃		65 ℃		71 ℃	
	$a(\times 10^{-4})$	$b(\times 10^{-4})$	$a(\times 10^{-4})$	$b(\times 10^{-3})$	$a(\times 10^{-3})$	$b(\times 10^{-3})$
1 <sup>#</sup>	6.7	-15.00	8.0	-1.00	1.2	-3.20
2 <sup>#</sup>	6.4	-28.00	8.4	-2.00	1.1	-0.30
3 <sup>#</sup>	5.9	0.71	8.3	-3.10	1.2	-1.40
4 <sup>#</sup>	6.5	-6.20	8.6	-2.00	1.1	-3.50
5 <sup>#</sup>	6.1	-4.90	8.9	-2.30	1.1	-0.60
6 <sup>#</sup>	6.3	-20.00	8.6	-0.50	1.2	-0.50
7 <sup>#</sup>	6.2	2.70	9.4	-3.70	1.0	-2.30
8 <sup>#</sup>	6.9	-8.60	9.6	-2.90	1.0	0.04
9 <sup>#</sup>	7.0	-3.20	9.2	-5.10	1.1	-0.70



(a) 59 °C



(b) 65 °C



(c) 71 °C

图2 失效寿命概率图

Fig. 2 Probability distribution of lifetime

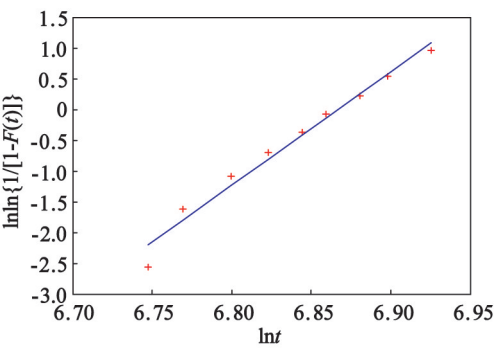
表6 不同温度下的正态分布参数

Tab. 6 Estimated parameters of Gaussian distribution at different temperature

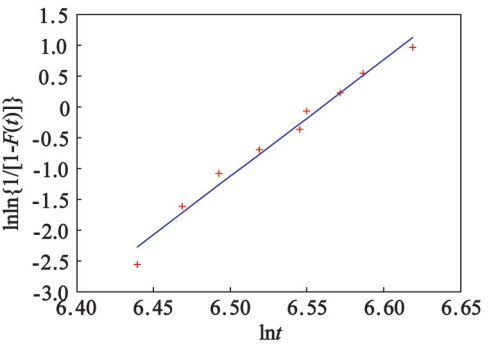
参数	71 °C	65 °C	59 °C
$\hat{\mu}$	537.2	688.2	934.7
$\hat{\sigma}$	32.1	39.7	55.2

对于威布尔分布模型,采用最小二乘法拟合直线,以  $\ln\ln\{1/[1 - F(t)]\}$  为纵坐标,  $\ln t$  为横坐标作图,如图 3,其中  $F(t)$  和  $t$  分别为概率和伪失效寿命。伪失效寿命在概率图上分布均呈直线,说明伪失效寿命服从正态分布和威布尔分布。威布尔分布的形状参数  $\hat{m}_i$  和尺度参数  $\hat{\eta}_i$  计算方法参照式(1),

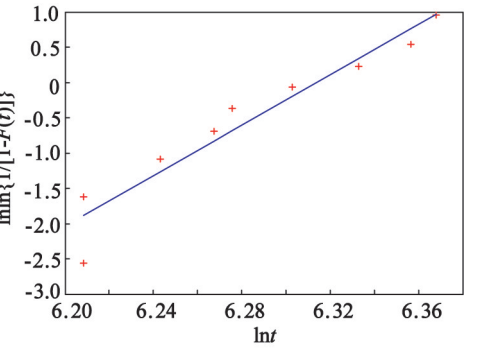
直线斜率  $a$  即为  $\hat{m}_i$ ,  $e^{-b}$  则为  $\hat{\eta}_i$ , 计算结果见表 7。



(a) 59 °C



(b) 65 °C



(b) 71 °C

图3 威布尔分布

Fig. 3 Weibull distribution

表7 不同温度下的威布尔分布参数

Tab. 7 Estimated parameters of Weibull distribution at different temperature

参数	71 °C	65 °C	59 °C
$\hat{m}_i$	17.820	18.950	18.461
$\hat{\eta}_i$	552.2	706.3	959.9

3.4 加速模型的拟合

以  $\ln\hat{\mu}$ 、 $\ln\hat{\sigma}$  为纵坐标,  $1/T$  (其中  $T$  的单位为 K) 为横坐标作图 (如图 4 中的点)。从图 4 中可以看出,  $\ln\hat{\mu}$  和  $\ln\hat{\sigma}$  数据分布呈直线状, 说明符合 Arrhenius 加速模型。用最小二乘法计算模型参数, 并作

图(图 4 中的线)。由图 4 还可知,两条直线斜率接近,即  $\ln\hat{\mu}$  和  $\ln\hat{\sigma}$  比值接近,表明加速试验失效机理一致。

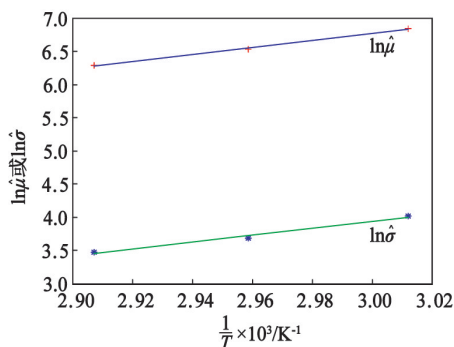


图 4 正态分布参数与温度的关系

Fig. 4 Relationship between parameters of Gaussian distribution and temperature

拟合所得正态分布参数与温度的关系如下:

$$\hat{\mu}(T) = \exp(-9.0523 + 5273.7/T); \quad (4)$$

$$\hat{\sigma}(T) = \exp(-11.5682 + 5166.6/T). \quad (5)$$

从表 7 看,威布尔分布形状参数估计值  $\hat{m}$  很接近,表明加速退化试验过程中失效机理保持不变。

以  $\ln\hat{\eta}$  为纵坐标,  $1/T$  为横坐标作图(如图 5)。从图 5 看,  $\ln\hat{\eta}$  分布呈直线状,表明符合 Arrhenius 加速模型。采用二乘法计算模型参数,并作参数与温度关系图(图 5)。

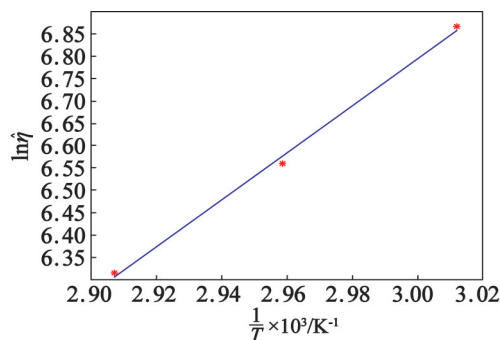


图 5 威布尔分布参数与温度的关系

Fig. 5 Relationship between parameters of Weibull distribution and temperature

拟合所得威布尔参数与温度的关系如下:

$$\ln\hat{\eta} = -8.9981 + 5264.4/T. \quad (6)$$

### 3.5 正常温度下分布参数的外推

对于正态分布,正常温度(293 K)下的均值和标准差分别由式(4)和式(5)计算得:

$$\hat{\mu}_0 = \exp(-9.0523 + 5273.7/293) = 7691.4;$$

$$\hat{\sigma}_0 = \exp(-11.5682 + 5166.6/293) = 430.6.$$

对于威布尔分布,正常温度下的参数  $\hat{m}_0$  由下

式求得:

$$\hat{m}_0 = (n_1 m_1 + n_2 m_2 + n_3 m_3) / (n_1 + n_2 + n_3) = (9 \times 18.461 + 9 \times 18.950 + 9 \times 17.820) / (9 + 9 + 9) = 18.41.$$

参数  $\hat{\eta}_0$  由式(6)计算得:

$$\hat{\eta}_0 = \exp(-8.9981 + 5264.4/293) = 7856.2.$$

### 3.6 估计储存寿命

对于正态分布,由于  $\hat{\mu}_i$  和  $\hat{\sigma}_i$  分别定义为伪失效寿命均值和标准差,可知  $\hat{\mu}_0$  就是正常温度下的中位寿命:  $t_{0.5} = \hat{\mu}_0 = 7691.4 \text{ d} = 21.1 \text{ a}$ 。

$\hat{\sigma}_0$  即为正常温度下寿命标准差:  $\hat{\sigma}_0 = 430.6 \text{ d} = 1.2 \text{ a}$ 。

对于威布尔分布,  $\hat{\eta}_i$  与伪失效寿命对应,故  $\hat{\eta}_0$  为正常温度下的特征寿命:  $\hat{\eta}_0 = 7856.2 \text{ d} = 21.5 \text{ a}$ 。

对于中位寿命:  $t_{0.5} = \hat{\eta}_0 (\ln 2)^{1/\hat{m}_0} = 7701.3 \text{ d} = 21.1 \text{ a}$ 。

采用两种分布计算的中位寿命均为 21.1 a,这里可取整数 21 a 作为炸药的剩余储存寿命。

根据以上样本 21 a 的储存寿命评估结果,加上样本历经 8 a 储存时间,得出该炸药储存寿命为 29 a。

## 4 结论

炸药储存寿命评估的准确性,主要取决于特征参数及其阈值的合理性、试验数据的准确性以及评估技术的科学性。基于失重率阈值的依据是美军标 ML—STD—1751,此依据是否合理或具普适性需要进一步验证。试验数据的准确性要取决于样品状况、试验条件控制、测试仪器精度等多种因素。评估技术中评估方法、加速模型和数据量大小对结果均产生影响。此外,实际获得的试验数据通常会出倒挂现象,这还需要参照相关文献作统计修正。

本文介绍一种炸药储存寿命的评估技术。它不局限于 TNT 基炸药,也适用于其他炸药或产品(如电子器件、非金属材料等)的储存寿命评估。评估过程表明,采用加速退化试验数据,基于失重率阈值,利用统计学方法,可以评估炸药储存寿命。

## 参 考 文 献

- [1] 孟涛,张仕念,易当祥,等. 导弹储存延寿技术概论[M]. 北京:中国宇航出版社,2013.
- [2] 机械电子工业部. 火工品试验方法 71℃ 试验法: GJB736.8—1990[S]. 北京:中国标准出版社,1990. Ministry of Machine-building and Electronics Industry. Initiating explosive device: method of the test at 71℃: GJB736.8—1990[S]. Beijing: China Standard Press, 1990.
- [3] 余文力,董三强,朱满林,等. 导弹战斗部炸药装药的



- 储存可靠性研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2005,6(2):43-45,49.
- YU W L, DONG S Q, ZHU M L, et al. Research on storage reliability of missile warhead explosive charge [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2005,6(2):43-45,49.
- [4] 石爽,曲仕茹,朱丽娟,等. 基于老化失重率的炸药储存可靠性研究[J]. 弹箭与制导学报,2011,31(6):120-122.
- SHI S, QU S R, ZHU L X, et al. The research on explosive storage reliability based on weight loss rate of aging [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2011,31(6):120-122.
- [5] 郑德强,张正平,李海波,等. 加速退化试验技术研究、应用与发展[J]. 装备环境工程,2011,8(2):100-104.
- ZHENG D Q, ZHANG Z P, LI H B, et al. Research, application and development of accelerated degradation test technology [J]. Equipment Environmental Engineering,2011,8(2):100-104.
- [6] 陈好. 电力电子电路参数辨识新方法 with 故障预测算法研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2012.
- CHEN Y. Research on new parameter identification methods and failure prediction algorithms of power electronic circuits[D]. Nanjing:Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2012.
- [7] 沈峥嵘,时钟,游曼. 加速退化试验方案优化问题经验参数估计方法[J]. 环境技术,2014(2):10-14.
- SHEN Z R, SHI Z, YOU M. The rough estimation of the unknown parameters of the problem with designing an accelerated degradation testing[J]. Environmental Technology,2014(2):10-14.
- [8] 李坤兰. 恒温加速退化试验的灰色预测[J]. 装备环境工程, 2011, 8(4):20-24.
- LI K L. Grey prediction of constant temperature accelerated degradation testing [J]. Equipment Environmental Engineering,2011,8(4):20-24.
- [9] 马小兵,王晋忠,赵宇. 基于伪寿命分布的退化数据可靠性评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 2011,33(1):228-232.
- MA X B, WANG J Z, ZHAO Y. Reliability assessment using constant-stress accelerated degradation data based on pseudo life distribution [J]. Systems Engineering and Electronics,2011,33(1):228-232.
- [10] 赵方超,罗天元,李超,等. 某型固体云爆剂加速老化试验与储存寿命预测研究[J]. 装备环境工程,2011,8(6):34-37,39.
- ZHAO F C, LUO T Y, LI C, et al. Study on the accelerated aging test and storage life prediction of SE-FAE [J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(6):34-37,39.
- [11] 陈循,张春华,汪亚顺,等. 加速寿命试验技术与应用[M]. 北京:国防工业出版社,2013.
- CHEN X, ZHANG C H, WANG Y S, et al. Accelerated life testing technology and application [M]. Beijing: National Defense Industry Press,2013.
- [12] 邓爱民,陈循,张春华,等. 基于加速退化数据的可靠性评估[J]. 弹箭与制导学报,2006,26(2):808-812,815.
- DENG A M, CHEN X, ZHANG C H, et al. Reliability assessment based on accelerated degradation data [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2006,26(2):808-812,815.
- [13] 邓爱民,陈循,张春华,等. 基于性能退化数据的可靠性评估[J]. 宇航学报,2006,27(3):546-552.
- DENG A M, CHEN X, ZHANG C H, et al. Reliability assessment based on performance degradation data [J]. Journal of Astronautics,2006,27(3):546-552.
- [14] 潘吉安. 可靠性维修性可用性评估手册[M]. 北京:国防工业出版社,1995.

## Study on Storage Life Assessment of a Composite Explosive Based on TNT

ZHU Fengchun, LIU Hengchun, YOU Peihan, GUO Guangwen, ZHAO Weiping

Unit 95856 (Jiangsu Nanjing, 210028)

[ABSTRACT] To solve the problem of explosive storage life assessment, alifetime assessment technology based on weight loss rate threshold in explosive accelerating degradation test was introduced. According to the accelerating lifetime test modeling based on its Pseudo-failure life, accelerating degradation test data of a kind of TNT explosive were used in Gaussian distribution and Weibull distribution models. Storage life of this explosive was obtained by calculating the parameter distributions in the two models. Research results show that the new assessment method is feasible for storage life assessment of explosive, and the calculation results are reliable.

[KEY WORDS] explosive; accelerating test; degradation; weight loss rate; storage life; lifetime assessment