

基于老化失重率的炸药贮存可靠性研究^{*}

石爽¹, 曲仕茹¹, 朱丽娴², 赵海²

(1 西北工业大学自动化学院, 西安 710072; 2 95856 部队, 南京 210000)

摘要:为获得某种硝酸类混合炸药常温下的贮存寿命, 采用恒加应力加速贮存的方法, 对炸药进行高温加速老化。建立数学模型, 对试验数据进行修正后, 用五种曲线对炸药失重率拟合, 并利用最小二乘法评估拟合效果。根据阿伦尼斯模型, 用一元线性回归的方法得出该混合炸药失重率随时间的变化规律, 再用 F 检验法检验, 线性回归效果显著。试验数据处理结果符合工程实践。

关键词:恒加应力; 曲线拟合; 失重率

中图分类号: TQ560.79 **文献标志码:** A

The Research on Explosive Storage Reliability Based on Weight Loss Rate of Aging

SHI Shuang¹, QU Shiru¹, ZHU Lixian², ZHAO Hai²

(1 School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2 No. 95856 Unit, Nanjing 210000, China)

Abstract: For obtaining the shelf life of composite explosive in ambient temperature, the explosive aging acceleration in high temperature was conducted by the method of constant-stress accelerated life. The experiment data was modified, and five kinds of curve fitting were made for weight loss rate fitting, and the effect was evaluated by the least square method. According to Arrhenius model, the change rule of the explosive's weight loss rate with time was got. According to F-test, the linear regression is OK. The result shows the method is effective.

Keywords: constant-stress; curve fitting; weight loss rate

0 引言

炸弹装药的贮存寿命评估一直是弹药寿命研究领域的重要课题和难题, 尤其新型装药和引进弹药装药的贮存可靠性研究是近期弹药各管理、使用及研究部门关注的重点。美军标 ML-STD-1751^[1] 把无论什么原因引起的炸药失重达 1% 作为炸药拒收的标准。文中以某型弹药硝酸类混合炸药为对象, 进行基于老化失重率的试验和贮存可靠性研究和探索。

1 试验方法、内容及结果

试验采用恒加应力加速贮存的方法^[2], 对某种混合炸药采取 61℃、71℃、81℃ 3 个温度点作为加速应力水平。根据现有样品药量, 61℃ 采用 3 个试样、71℃ 和 81℃ 分别采用 2 个试样进行试验。在试验过程中监测试样的质量变化, 以试样的质量累积减量百分数作为失效判断参数。考虑到试验所用炸药已经

贮存 8 年左右, 炸药已有一定比例的失重, 因此, 以试样质量减少 0.5% 为失效点^[3] 对数据进行处理。该失效点选取是根据业内的一般经验, 从偏保守的安全角度出发做出的选取。试验得到炸药试样在 3 个不同温度下的失重率, 如表 1 所示。

2 建立模型

2.1 基本假设

1) 炸药老化失重率参数是时间的函数。

2) 因为同一种温度 T 下同一种药的试样只有 2~3 个, 因此通过该质量参数很难判断失重率分布情况。根据经验, 假设炸药样本在 t 时刻的失重率测定值 $y(t)$ 服从样本均值为 $\mu_y(t)$ 、样本均方差为 $\sigma_y(t)$ 的正态分布。

2.2 模型建立

2.2.1 数据预处理

因为试验室地处南方, 高温多雨, 炸药存取及称量

* 收稿日期: 2011-02-22

作者简介: 石爽(1978-), 男, 安徽泗县人, 工程师, 博士研究生, 研究方向: 弹药工程, 目标识别。

过程中受环境影响较大,因此,难免出现测量值奇异,须对个别试验数据进行修正,以免影响后续的计算。

拟合曲线如下:

$$y = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_1 x + c \tag{1}$$

采用高阶多项式分别对试样试验数据进行拟合,

表 1 炸药老化失重率数据

老化时间/d	61℃			71℃		81℃	
	样品 1	样品 2	样品 3	样品 1	样品 2	样品 1	样品 2
1	0.0107	0.0112	0.0032	0.0189	0.0062	0.0078	0.0216
5	0.0156	0.0197	0.0167	0.0422	0.0371	0.0245	0.0443
9	0.0253	0.0262	0.0173	0.0477	0.0361	0.0304	0.0473
17	0.0399	0.0365	0.0269	0.0433	0.0351	0.0274	0.0443
24	0.0380	0.0356	0.0243	0.0488	0.0433	0.0215	0.0401
28	0.0487	0.0394	0.0288	0.0577	0.0433	0.0353	0.0484
36	0.0331	0.0300	0.0224	0.0411	0.0320	0.0264	0.0360
39	0.0429	0.0375	0.0295	0.0488	0.0475	0.0362	0.0535
45	0.0555	0.0515	0.0378	0.0610	0.0536	0.0490	0.0659
48	0.0497	0.0422	0.0327	0.0466	0.0464	0.0392	0.0545
51	0.0419	0.0375	0.0288	0.0422	0.0392	0.0333	0.0484
57	0.0458	0.0403	0.0295	0.0588	0.0536	0.0343	0.0484
61	0.0312	0.0300	0.0224	0.0277	0.0330	0.0196	0.0360
66	0.0253	0.0225	0.0147	0.0255	0.0340	0.0206	0.0350
69	0.0224	0.0234	0.0192	0.0399	0.0351	0.0313	0.0504
75	0.0331	0.0319	0.0243	0.0411	0.0475	0.0353	0.0504
78	0.0497	0.0478	0.0359	0.0533	0.0629	0.0480	0.0638
84	0.0341	0.0328	0.0256	0.0388	0.0475	0.0333	0.0515

计算拟合后的函数值和试验值差异 er :

$$er = |(y - y_t) / y_t| \tag{2}$$

其中, y 为 t 时刻的拟合值, y_t 为 t 时刻的试验值。设定阈值 et , 如果 $er > et$, 即此试验值视为奇异值, 并用拟合值将其取代。

2.2.2 失重率参数计算

基于以上假设, 炸药在 t 时刻的失重率服从正态分布 $y(t) \sim N[\mu_y(t), \sigma_y^2(t)]$, 同样临界值也服从正态分布 $y_{er}(t) \sim N[\mu_{er}(t), \sigma_{er}^2(t)]$, 并且 $y(t)$ 和 $y_{er}(t)$ 相互独立。于是对于同一种温 T 下同一时刻 t 的炸药失重率为:

$$\hat{y}_T(t) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{Tj}(t) \tag{3}$$

其中, n 为同一种温度 T 下同一时刻 t 的炸药试样数量。

2.2.3 曲线拟合及拟合度的评估

分别用多项式、指数、对数等 5 种函数对某一种试样的试验值进行拟合, 函数如下:

$$\begin{aligned}
 &y = ax^3 + bx^2 + cx + d \\
 &y = a \ln x + c \\
 &y = ae^{bx} \\
 &y = ax^{0.5} + c \\
 &y = ax + b
 \end{aligned} \tag{4}$$

利用最小二乘法^[4] 的原理对拟合函数的拟合效

果评估, 设评估参数为:

$$k_m = \sum_{j=1}^n (Y_j - y_j)^2 \tag{5}$$

其中: k_m 为第 m 种拟合函数的评估参数; n 为测量值的个数; Y_j 为 t 时刻的拟合值; y_j 为 t 时刻的试验值。每种拟合函数都对应一个 k_m 值, 最小 k_m 所对应的函数即为拟合度最好的函数, 反之, 最大 k_m 所对应的函数即为拟合度最差的函数。

2.2.4 常温下贮存寿命的计算

每种拟合函数都会对应临界失重率 $y_{er}(t_T)$ 下的贮存寿命 t_T , 在不同应力 T 下, 同一种药将出现不同的贮存时间。根据阿伦尼斯模型, 炸药贮存寿命 t 与贮存绝对温度 T 间存在关系:

$$\ln t = A + B/T \tag{6}$$

式中: A 、 B 均为系数。可以看出 $\ln t$ 与 $1/T$ 间是线性关系, 于是用一元线性回归的方法计算常温下炸药的贮存寿命。

回归函数为:

$$\hat{y} = A + Bx \tag{7}$$

A 、 B 的估计值分别为:

$$\begin{cases} \hat{A} = \bar{y} - \hat{B}\bar{x} \\ \hat{B} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})y_i}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \end{cases} \tag{8}$$

计算常温 T_f 下试样的贮存寿命为:

$$t_f = e^{A+B/T_f} \quad (9)$$

最终还要将拟合评估参数 k_m 、贮存寿命 t_f 与工程实际相结合,筛选出合理的贮存寿命 t_f 。

2.2.5 线性回归效果的显著性检验

假设 y 与 x 具有线性关系:

$$y = A + Bx + \epsilon, \epsilon \sim N(0, \sigma^2) \quad (10)$$

当 $B = 0$ 时,就认为 y 与 x 之间不存在线性相关关系,问题转化为在显著性水平 α 下,检验假设: $H_0: B = 0; H_1: B \neq 0$ 是否成立。若拒绝 H_0 ,则认为 y 与 x 之间存在线性关系。

采用 F 检验法

$$S_R = \hat{B}^2 \sum (x_i - \bar{x})^2 \quad (11)$$

$$S_e = \sum (y_i - \hat{A} - \hat{B}x_i)^2 \quad (12)$$

当假设为真时,有:

$$\frac{S_R}{\sigma^2} \sim \chi^2(1), \text{且 } S_e \text{ 与 } S_R \text{ 相互独立} \quad (13)$$

又因为:

$$\frac{S_e}{\sigma^2} \sim \chi^2(n-2) \quad (14)$$

所以,当假设为真时,得:

$$\frac{(n-2)S_R}{S_e} \sim F(1, n-2) \quad (15)$$

当假设为真时, $(n-2)S_R/S_e$ 应该比较小,若 $(n-2)S_R/S_e$ 比较大,就应该拒绝 H_0 。由分位数定义,得:

$$P\left\{\frac{(n-2)S_R}{S_e} \geq F_{1-\alpha}(1, n-2)\right\} = \alpha \quad (16)$$

计算 F 观测值,若 $F \geq F_{1-\alpha}(1, n-2)$,则拒绝 H_0 ,此时 y 与 x 之间存在线性相关关系;

若 $F < F_{1-\alpha}(1, n-2)$,则接受 H_0 ,此时 y 与 x 之间没有线性相关关系。

3 数据处理

3.1 对混合炸药老化数据进行预处理

用 4 阶多项式分别对 7 种试样试验数据进行拟合,经反复调试,设定阈值 et 为 0.4 时对数据进行修复的情况较符合实际情况。以 61℃ 下样品 1 为例,得到新老描点数据如图 1 所示。

3.2 曲线拟合及评估

按照式(4)中的函数,分别对 3 种应力下失重率参数进行拟合,分别计算出用不同函数拟合时不同应力下的贮存时间;按照式(5)计算评估参数 k_m ;再按照 2.2.4 的方法计算用不同拟合函数时的常温下贮存时间,如表 2 所示。

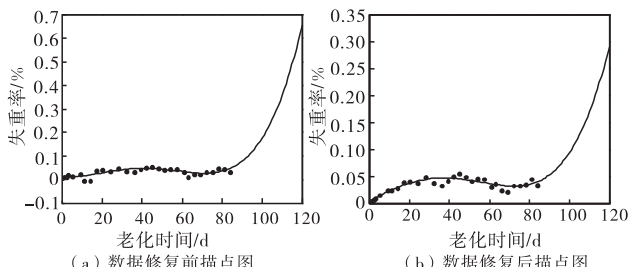


图 1 数据修复前后描点图

综合考虑以下三条原则,选择最理想的拟合函数。三条原则为:一是常温下贮存时间符合实际情况;二是应力水平越高,其应力下的贮存时间越短;三是评估参数越小越好。

可见,拟合函数用 $y = ax + b$ 最为合理,拟合曲线如图 2 所示,图中点状线、间断线和连续线分别为 81℃、71℃ 和 61℃ 的拟合曲线。

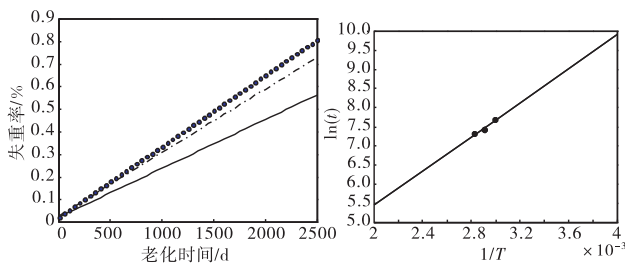


图 2 拟合曲线

图 3 一元线性回归函数

\hat{A} 和 \hat{B} 分别为 0.0010 和 2225.4258,一元线性回归函数的表达式为:

$$\hat{y} = 0.0010 + 2225.4258x$$

如图 3 所示。当常温为 20℃ 时,可算出该药常温下继续贮存寿命为 15 年。

3.3 F 检验法检验

$$S_R = 0.21262$$

$$S_e = 0.0042278$$

$$F = \frac{(n-2)S_R}{S_e} = 50.291$$

α 取 0.1,查表得 $F_{1-\alpha}(1, n-2) = 39.9$

因为 $F = 50.291 > 39.9 = F_{1-\alpha}(1, n-2)$,故拒绝 H_0 ,认为回归效果显著。

4 结论

通过对某种混合型炸药试验数据的处理,得出该炸药失重率的分布规律,计算出 20℃ 下炸药的贮存时间,该时间比较符合工程实践,从而证明了文中所建模型的正确性。研究成果对该类炸药的贮存寿命和可靠性研究工作具有重要的指导作用和参考价值。

(下转封三)

(上接第 I 页)

一种新的混合信号调制识别方法 葛 娟,李一兵,林 云(183)

基于小波域 OBF 分解的磁异常信号检测算法 张 坚,林春生,邓 鹏,等(187)

内装式空射运载火箭与载机分离过程的纵向飞行品质研究 张艳华,张登成,张久星,等(190)

电容式测压器的壳体设计与仿真 刘 飞,徐 鹏,张红艳(193)

基于相关性的微型电子测压器模拟应用环境下的校准方法 袁月华,裴东兴,张 瑜,等(197)

奇偶矢量 RAIM 算法的故障检测研究 彭兴钊,黄国荣,郭 创,等(199)

炸点测试中多源数据融合技术研究 朱望飞,李 锐,张显伟(203)

基于图论的通用测试性推理 王宝龙,黄考利,马立元,等(207)

JYJ-90 型天幕靶的人工光源设计 张 鹏,王召巴,陈友兴,等(211)

基于 LED 的天幕靶标定技术研究 赵 亮,王召巴,陈友兴,等(213)

基于 Vega 的高炮外弹道视景仿真系统设计与实现 孙 鹏,赵捍东,曹红松,等(215)

雷达干扰对防空导弹射击效能的影响分析 周哲帅,方红兵(219)

基于光电的闭环校射技术研究 李 亢,杨绍清,刘松涛,等(223)

一种提高薄板非线性振动响应分析精度的方法 马小飞,韦娟芳(226)

(上接第 122 页)

表 2 拟合函数、评估参数及贮存时间

拟合函数	应力水平	拟合函数表达式	评估参数	贮存时间/d	20℃ 常温下贮存时间/年
多项式	61℃	$y = 0.000000310320452x^3 - 0.000049442492643x^2 + 0.002339189291952x + 0.003479797221441$	0.0006	170.2521	0.5302
	71℃	$y = 0.000000388031451x^3 - 0.000057918948992x^2 + 0.002615658334009x + 0.009755329803341$	0.001	157.4243	
	81℃	$y = 0.000000279548764x^3 - 0.000040271642695x^2 + 0.001877668269119x + 0.010967185621210$	0.0007	166.7124	
对数	61℃	$y = 0.006884726640485\ln x + 0.007164522732432$	0.0012	1.2260×10^{31}	1.3050×10^{37}
	71℃	$y = 0.008082612731033\ln x + 0.012659748181114$	0.0015	1.5337×10^{26}	
	81℃	$y = 0.007801947801833\ln x + 0.009702322709005$	0.0010	1.9605×10^{26}	
$y = a\sqrt{x} + b$	61℃	$y = 0.002847789413809x^{0.5} + 0.012989935654243$	0.0016	2924.5573	257.7834
	71℃	$y = 0.003490341033127x^{0.5} + 0.018628519492938$	0.0019	19020.6339	
	81℃	$y = 0.003634401229795x^{0.5} + 0.013894167962431$	0.0011	17889.4060	
$y = ae^{bx}$	61℃	$y = 0.017466170932228 * \exp(0.010863489721455x)$	389.0619	308.7721	0.9240
	71℃	$y = 0.025376381567805 * \exp(0.009188550745065x)$	326.8170	324.4025	
	81℃	$y = 0.021787856449731 * \exp(0.010441064955546x)$	345.6375	300.0896	
直线	61℃	$y = 0.000216593977379x + 0.020976135619029$	0.0021	2211.6213	15.0018
	71℃	$y = 0.000280397358945x + 0.027805440016132$	0.0025	1684.0193	
	81℃	$y = 0.000314077212742x + 0.022545004420927$	0.0014	1520.1835	

参考文献:

[1] ML-STD-1751. Safety and Performance Tests for Qualification of Explosives[S].

[2] 茆诗松,王玲玲. 加速寿命试验[M]. 北京:科学出版社,2000.

[3] 余文力,董三强,朱满林,等. 导弹战斗部炸药装药的贮存可靠性研究[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2005,6(2):43-49.

[4] 庄楚强,吴亚森. 应用数量统计基础[M]. 广州:华南理工大学出版社,2002.