

# 基于 Arrhenius 模型和 Peck 模型 的分段非线性加速模型

王者蓝<sup>1</sup>, 侯清源<sup>2</sup>, 汤杰<sup>1</sup>, 陈洋<sup>1</sup>, 赵宏杰<sup>1</sup>, 姚军<sup>2\*</sup>

(1. 上海航天精密机械研究所, 上海 201600;

2. 北京航空航天大学 可靠性与系统工程学院, 北京 100083)

**摘要:** **目的** 解决 Arrhenius 模型无法估计湿度应力敏感产品和 Peck 模型试验时间较长的问题。**方法** 考虑温度应力和湿度应力对产品贮存寿命的综合影响, 在产品激活能不变的假设下, 将 Arrhenius 模型对产品激活能的估计和 Peck 模型对湿度应力参数的估计相结合, 建立 Arrhenius&Peck 分段非线性加速寿命估计模型。基于此模型, 在双应力恒加试验条件下, 得到产品的寿命估计方程。**结果** 以弹上电子产品的恒定应力加速贮存试验为例, 进行仿真分析, 得到产品寿命的估计, 并对比产品实际寿命。Arrhenius&Peck 模型的寿命误差和失效率误差均控制在 5% 以内, 准确度高于 Arrhenius 模型和 Peck 模型。**结论** 构建的 Arrhenius&Peck 分段非线性加速寿命模型可以充分利用温度和湿度条件下的试验数据, 对温湿敏感产品的寿命估计有较好的应用效果, 为导弹产品的寿命估计提供一种可选方法。

**关键词:** 加速贮存; Arrhenius 模型; Peck 模型; 恒加试验; 寿命评估; 加速寿命试验

中图分类号: TJ760; TB114.3

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2024)01-0059-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.01.008

## Segmented Nonlinear Acceleration Model Based on Arrhenius and Peck Models

WANG Zhelan<sup>1</sup>, HOU Qingyuan<sup>2</sup>, TANG Jie<sup>1</sup>, CHEN Yang<sup>1</sup>, ZHAO Hongjie<sup>1</sup>, YAO Jun<sup>2\*</sup>

(1. Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute, Shanghai 201600, China;

2. School of Reliability and Systems Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

**ABSTRACT:** The work aims to solve the problem that the Arrhenius model cannot estimate the humidity stress sensitive products and the Peck model has a long test time. Considering the combined effect of temperature stress and humidity stress on the storage life of the product, under the assumption of constant activation energy of the product, the estimation of the activation energy of the product by Arrhenius model and the estimation of the humidity stress parameters by Peck model were combined to establish a Arrhenius&Peck segmented nonlinear accelerated life estimation model. Based on this model, the life estimation equations of the products were obtained under the double-stress constant-addition test conditions. Taking the constant stress accelerated storage test of electronic products on the bomb as an example for simulation and analysis, the estimation of the product

收稿日期: 2023-10-11; 修订日期: 2023-11-03

Received: 2023-10-11; Revised: 2023-11-03

基金项目: 中国航天科技集团公司第八研究院产学研合作基金资助项目

Fund: Industry University Research Cooperation Fund of the Eighth Research Institute of China Aerospace Science and Technology Corporation

引文格式: 王者蓝, 侯清源, 汤杰, 等. 基于 Arrhenius 模型和 Peck 模型的分段非线性加速模型[J]. 装备环境工程, 2024, 21(1): 59-65.

WANG Zhelan, HOU Qingyuan, TANG Jie, et al. Segmented Nonlinear Acceleration Model Based on Arrhenius and Peck Models[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(1): 59-65.

\*通信作者 (Corresponding author)

life was obtained and compared with the actual life of the product, and the life error and failure rate error of the Arrhenius&Peck model were controlled within 5%, which was more accurate than the Arrhenius model and the Peck model. The constructed Arrhenius&Peck segmented nonlinear accelerated life model can make full use of the test data under the temperature and humidity conditions, and has a better application effect on the life estimation of temperature and humidity sensitive products, which provides an optional method for the life estimation of temperature and humidity sensitive products of missiles.

**KEY WORDS:** accelerated storage; Arrhenius model; Peck model; constant-stress accelerated life tests; life prediction; accelerated life test

导弹是典型的“长期贮存，一次使用”产品，随着装备延寿技术的发展，导弹产品的可靠性水平快速提高，如何低成本、高效率地确定导弹的贮存寿命是导弹延寿工程的重点关注问题<sup>[1-2]</sup>。加速寿命试验是进行弹上产品寿命评估的合理有效方法，能够有效缩短试验时间，降低试验成本。进行加速寿命试验要依靠各类加速模型，而加速模型的选择依赖于产品的敏感应力<sup>[3]</sup>。弹上电子产品在贮存阶段的敏感环境应力主要为温度、振动和湿度<sup>[4]</sup>。

目前对于加速贮存试验的研究主要集中在产品寿命估计和试验设计方面。文献[5]利用 Arrhenius 模型对具有高可靠度的加速度开关进行了寿命估计。文献[6]利用逆幂律模型对谐波减速器进行了加速寿命试验，评价结果优于中位数评价方法。文献[7]结合导弹库房贮存寿命指标和贮存环境因素，提出了一种导弹加速贮存验证试验方法。文献[8]提出了一种结合加速试验寿命数据和自然贮存试验数据进行产品贮存寿命估计的方法，提高了试验数据的利用效率。文献[9]利用 Arrhenius 模型对飞行器火工品进行了贮存试验，并提出飞行器火工品的评估方法。

加速寿命试验的研究多集中于单应力试验，缺乏对多应力共同作用和加速模型适应性的考虑。文献[10]考虑了温湿应力影响，利用 PECK 模型对网络控制模块进行了寿命估计，估计效果较好，但对 Peck 模型的适应性没有做出回答。文献[11]针对 Arrhenius 和 Peck 模型无法准确预测 EPD 产品寿命的问题，提出了综合 Arrhenius 模型和 Peck 模型的 LWW 模型，然而其模型仅基于 EPD 产品进行构建，对其他产品的可迁移性考虑不足。文献[12-13]对 Arrhenius 模型在温度较小区间适用的问题，提出了分段非线性 Arrhenius 模型，并对硅橡胶进行了应用，取得较好估计，由于仅考虑了温度应力影响，难以适应于温湿应力敏感产品的寿命估计。

目前对导弹产品加速贮存的研究集中于考虑温度因素，并运用 Arrhenius 模型进行加速贮存试验，较少从湿度条件对产品的加速作用方面进行考虑<sup>[14-16]</sup>。湿度环境对导弹贮存具有明显影响，高湿环境下的水膜、凝露和吸湿等现象会加速产品老化<sup>[17]</sup>，湿度和温度环境对产品的交互作用会使产品寿命快速下降。文献[18]对交变盐雾和湿热试验的腐蚀机理进行了研究，

提出湿热条件会加速盐雾对产品的腐蚀作用。文献[19]研究了沿海地区自然条件对导弹贮存的影响，提出温度、湿度、盐雾和霉菌是导弹产品贮存时面临的关键应力。文献[20]对异种材料的黏接结构进行了多种加速试验，发现高温高湿循环试验带来的结构强度下降最为明显。文献[21-22]对导弹发射箱影响因素进行了分析，发现影响各类电子设备的可靠性和稳定性的最严重因子是高湿度，相对湿度越高，腐蚀速度越快。

部分弹上电子产品有对湿度敏感的特性，在高湿度条件下进行贮存时，产品寿命快速下降。双应力 Peck 模型考虑了湿度作用，可以对温湿应力敏感的产品进行寿命估计<sup>[23]</sup>。受限于一般的加速试验设备在实现温度高于 100 °C 的高温高湿条件存在困难，Peck 模型多在低于 100 °C 的高温高湿的条件下使用，对于高可靠度、长寿命产品存在试验时间过长，成本较高的问题。

本文针对 Arrhenius 模型和 Peck 模型无法准确预测湿度敏感应力产品的贮存寿命的问题，提出一种基于 Arrhenius 和 Peck 模型的分段非线性加速模型，并通过某弹上产品的加速贮存试验仿真结果对 3 类模型效果进行比较。结果表明，基于 Arrhenius 和 Peck 模型的分段非线性加速模型对弹上产品有更准确的贮存寿命评估结果。

## 1 模型简介

### 1.1 双应力下加速模型假设

一般而言，电子产品寿命服从指数分布，依此作出假设 1。

假设 1 在正常应力组合和加速应力组合 $(i, j)$ 下，产品的寿命分布服从指数分布，其分布函数为：

$$F_{ij}(t) = 1 - e^{-t/\theta_{ij}} \quad t \geq 0; i = 0, 1, \dots, l; j = 0, 1, \dots, k \quad (1)$$

式中： $\theta_{ij}$  为应力组合 $(i, j)$ 下产品的平均寿命。失效密度函数为：

$$f_{ij}(t) = \lambda_{ij} e^{-\lambda_{ij} t} \quad t \geq 0; i = 0, 1, \dots, l; j = 0, 1, \dots, k \quad (2)$$

式中： $\lambda_{ij}$  为应力组合 $(i, j)$ 下产品的失效率， $\lambda_{ij} = 1/\theta_{ij}$ 。

假设 2 产品的平均寿命  $\theta_{ij}$  与所用的加速应力组合 $(i, j)$ 之间服从式 (3) 的关系。

$$\ln \theta_{ij} = \beta_0 + \beta_1 \phi_1(S_i) + \beta_2 \phi_2(S_j) \quad (3)$$

假设 3 产品在不同温度条件下的激活能不变。

### 1.2 Arrhenius 和 Peck 模型

Arrhenius 模型<sup>[24]</sup>:

$$\theta = Ae^{E_a/kT} \quad (4)$$

式中:  $\theta$  为产品的特征寿命;  $A$  为常数, 且  $A > 0$ ;  $E_a$  表示激活能;  $k$  为 Boltzmann 常数,  $T$  为热力学温度。Arrhenius 模型是最常用的基于温度应力的寿命推断模型, 对于一般的考虑温度应力的产品寿命估计有较好的效果<sup>[15]</sup>。

Peck 模型<sup>[25]</sup>:

$$\theta = A \cdot H^n \cdot e^{\frac{E_a}{kT}} \quad (5)$$

式中:  $H$  为相对湿度;  $n$  为小于 0 的无单位常数。Peck 模型是稳态条件下考虑温度和湿度的加速模型, 适用于由温度、湿度 2 种应力引起的产品的寿命评估<sup>[25]</sup>。

对于温湿应力敏感的产品, 加速贮存一般在不同温度的高湿环境下进行, 以推断常温常湿下产品的贮存寿命。对于高可靠度长寿命的温湿敏感产品, 85 °C/85% 的试验方法需要较长的时间完成试验, 采用温度应力高于 100 °C 的试验方法时, 高湿条件无法继续维持。因此, 一般的试验方法对于温湿应力敏感产品需要较长的时间进行试验, 试验成本较高。

本文针对以上问题, 认为产品在不同温度条件下的激活能不变, 在高于 100 °C 的高温条件下利用 Arrhenius 模型计算出产品在温度应力下失效的激活能, 在低于 100 °C 的高温高湿条件下利用 Peck 模型计算出湿度应力作用参数, 综合两模型参数得到产品贮存寿命的 Arrhenius&Peck 分段模型, 如式 (6) 所示。

$$\theta = \begin{cases} A_1 \cdot e^{\frac{E_a}{kT}} \cdot H^n & T_0 \leq T \leq T_c \\ A_2 \cdot e^{\frac{E_a}{kT}} & T_c < T \leq T_m \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $T_m$  为产品失效机理发生改变的临界温度;  $T_c$  为湿度条件无法维持的温度临界点;  $A_1$  为  $T \leq T_c$  时, 通过 Peck 模型计算的参数  $A$ ;  $A_2$  为  $T_c < T$  时, 通过 Arrhenius 模型计算的参数  $A$ 。对式 (6) 两侧取对数, 得到对数 Arrhenius&Peck 分段模型:

$$\ln \theta = \begin{cases} a_1 + b_2 \varphi(H) + c \gamma(T) & T_0 \leq T \leq T_c \\ a_2 + b_2 \varphi(H) & T_c < T \leq T_m \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $b_2$ 、 $c$  为待估参数,  $a_1 = \ln A_1$ 、 $a_2 = \ln A_2$ 、 $b_2 = \frac{E_a}{k} > 0$ 、 $c = n < 0$ ;  $\varphi(H) = 1/T$  和  $\gamma(T) = \ln(H)$  为已知函数;  $T_0$  为贮存条件下的温度。由此可以得到 Arrhenius&Peck 分段模型下寿命服从指数分布的产

品的失效率和环境应力的关系:

$$\ln \lambda = \begin{cases} -a_1 - b_2 \varphi(H) - c \gamma(T) & T_0 \leq T \leq T_c \\ -a_2 - b_2 \varphi(H) & T_c < T \leq T_m \end{cases} \quad (8)$$

## 2 温湿应力恒加贮存试验设计

首先确定 2 个加速应力, 分别记为  $S^1$  和  $S^2$ , 存在多个应力水平, 如式 (9) 所示。

$$S_0^1 < S_1^1 < \dots < S_l^1, S_0^2 < S_1^2 < \dots < S_k^2 \quad (9)$$

式中:  $l$  和  $k$  是 2 个加速应力对应的水平数。

$(S_i^1, S_j^2)$  为产品的一个应力组合, 2 段应力水平各设置  $h$  个应力组合。将  $n$  个产品随机分为  $2h$  组, 其中第  $q$  组包含  $n_q$  个产品,  $q=1, 2, \dots, 2h$ , 满足  $\sum_{q=1}^{2h} n_q = n$ 。在应力水平  $(S_i^1, S_j^2)$  下, 对  $n_q$  个产品进行定数截尾寿命试验, 观察到  $r_{ij}$  个产品失效时, 移除剩余产品, 并终止试验, 获得截尾样本数据  $t_{ij1} \leq t_{ij2} \leq \dots \leq t_{ijr_{ij}}$  ( $i=0, 1, \dots, l; j=1, 2, \dots, k$ ), 其中  $r_{ij}$  为应力水平  $(S_i^1, S_j^2)$  下的截尾数。

### 2.1 温湿应力下分段非线性极大似然估计

本文仅考虑高温高湿条件双应力下产品平均寿命的极大似然估计建模。当温度低于  $T_c$  时, 利用 Peck 模型进行估计; 当温度高于  $T_c$  时, 利用 Arrhenius 模型进行估计。利用温度高于  $T_c$  时 Arrhenius 模型得到的产品激活能  $E_a$ , 以及温度小于  $T_c$  时 Peck 模型得到的产品寿命与湿度关系系数, 得到 Arrhenius&Peck 分段模型。

在应力水平  $(S_i^1, S_j^2)$  下, 产品寿命的似然函数为:

$$L_{ij} = (1/\theta_{ij})^{r_{ij}} \exp(-u_{ij}/\theta_{ij}) \quad (10)$$

式中:  $\theta_{ij}$  为应力水平  $(S_i^1, S_j^2)$  下的产品寿命;  $r_{ij}$

为应力水平  $(S_i^1, S_j^2)$  下的截尾数;  $u_{ij}$  如式所示。

$$u_{ij} = \sum_{d=1}^{r_{ij}} t_{ijd} + (n_{ij} - r_{ij}) \times t_{ijr_{ij}} \quad (11)$$

由于各应力水平下的试验是相互独立的, 双应力恒加试验的似然函数为:

$$L = \prod_{d=1}^{2h} L_{ijd} = \prod_{d=1}^{2h} \left( \frac{1}{\theta_{ijd}} \right)^{r_{ij}} \exp \left( -\sum_{d=1}^{2h} \frac{u_{ijd}}{\theta_{ijd}} \right) \quad (12)$$

对式 (10) 取对数, 并代入式 (4) 和式 (5) 得到  $a$ 、 $b$ 、 $c$  的极大似然估计:

$$l = \begin{cases} -\sum_{d=1}^h [r_{ij} (a_1 + b_1 \varphi_{ij} + c \gamma_{ij})] - \sum_{d=1}^h \frac{u_{ijd}}{\exp(a_1 + b_1 \varphi_{ij} + c \gamma_{ij})} & T_0 \leq T \leq T \\ -\sum_{d=1}^h [r_{ij} (a_2 + b_2 \varphi_{ij})] - \sum_{d=1}^h \frac{u_{ijd}}{\exp(a_2 + b_2 \varphi_{ij})} & T_c < T \leq T_m \end{cases} \quad (13)$$

当各应力试验水平截尾数一致时,根据此对数似然方程,分别对参数  $a$ 、 $b$ 、 $c$  求偏导数,建立非线性方程组,如式(14)和式(15)所示。

$$\begin{cases} \frac{\partial l}{\partial a_1} = -hr + \sum_{d=1}^h \frac{u_{ij}}{\exp(a_1 + b_1\varphi_{ij} + c\gamma_{ij})} & T_0 \leq T \leq T \\ \frac{\partial l}{\partial b_1} = -\sum_{d=1}^h r\varphi_{ij} + \sum_{d=1}^h \frac{u_{ij} \cdot \varphi_{ij}}{\exp(a_1 + b_1\varphi_{ij} + c\gamma_{ij})} & T_0 \leq T \leq T \\ \frac{\partial l}{\partial c} = -\sum_{d=1}^h r\gamma_{ij} + \sum_{d=1}^h \frac{u_{ij} \cdot \gamma_{ij}}{\exp(a_1 + b_1\varphi_{ij} + c\gamma_{ij})} & T_0 \leq T \leq T \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial l}{\partial a_2} = -hr + \sum_{d=1}^h \frac{u_{ij}}{\exp(a_2 + b_2\varphi_{ij})} & T_c < T \leq T_m \\ \frac{\partial l}{\partial b_2} = -\sum_{d=1}^h r\varphi_{ij} + \sum_{d=1}^h \frac{u_{ij} \cdot \varphi_{ij}}{\exp(a_2 + b_2\varphi_{ij})} & T_c < T \leq T_m \end{cases} \quad (15)$$

对式(14)和式(15)进行求解,决策变量为参数  $a$ 、 $b$ 、 $c$ ,约束条件为  $b > 0$ ,  $c < 0$ ,需要求解的目标函数为:

$$\min f(a, b, c) = \begin{cases} \left(\frac{\partial l}{\partial a_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial l}{\partial b_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial l}{\partial c}\right)^2 & T_0 \leq T \leq T \\ \left(\frac{\partial l}{\partial a_2}\right)^2 + \frac{\partial l}{\partial b_2} & T_c < T \leq T_m \end{cases} \quad (16)$$

$b_1 > 0, b_2 > 0, c < 0$

## 2.2 正常应力水平下平均寿命 $\theta_0$ 的极大似然估计

对式(16)求解得到待估计参数的估计值为  $(\hat{a}_1, \hat{a}_2, \hat{b}_1, \hat{b}_2, \hat{c})$ ,结合式(7)进而得到正常应力水平下参数  $\theta_0$  的极大似然估计:

$$\ln \theta_0 = \begin{cases} \hat{a}_1 + \hat{b}_2\varphi(H) + \hat{c}\gamma(T) & T_0 \leq T \leq T_c \\ \hat{a}_2 + \hat{b}_2\varphi(H) & T_c < T \leq T_m \end{cases} \quad (17)$$

## 3 仿真算例

### 3.1 导弹典型电子产品恒定应力加速贮存试验

某导弹典型成附件属于湿度敏感类电子产品,已知其寿命分布服从指数分布,根据历史经验和相似产品可知其平均故障时间约为 120 000 h,失效率为  $8.333 \times 10^{-6}$ 。已知此产品在 130 °C 以下时的失效机理保持不变,当温度高于 100 °C 时,湿度条件无法继续维持,选择温度应力和湿度应力作为加速应力。已知此类电子产品的激活能  $E_a$  为 0.4~0.5 eV,进行极大似然估计时,限制寿命估计方程的参数  $b$  的范围为 4 600~5 800。

考察此产品在正常贮存条件下 ( $T=303\text{K}$ ,  $H=50\%$ ) 的寿命<sup>[26]</sup>,采用定数结尾(截尾数为 3)的恒定应力加速寿命试验方法进行贮存寿命评估,未失效样本寿命取全部样本中寿命最大值。共设计 6 个试验应力水平,其中 3 个水平为温度高于 100 °C 的高温试验水平,另外 3 个为温度低于 100 °C 的高温高湿试验水平,每个水平有 4 个样本,各应力水平下样本试验结果如图 1 所示。 $u_{ij}$  为温度  $i$  和湿度  $j$  的应力水平下样本失效时间之和,各应力水平  $u_{ij}$  的计算结果如表 1 所示,其中  $(i, j)$  为温度  $i$  和湿度  $j$  的应力水平。

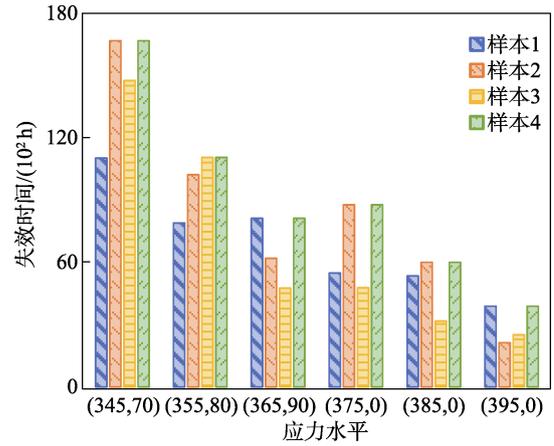


图 1 各应力水平样本试验结果  
Fig.1 Sample test results for each stress level

表 1 各应力水平下的试验结果  
Tab.1 Sample test results for each stress level

应力水平	温度/K	湿度/%	$u_{ij}$
1	345	70	59 074
2	355	80	40 271
3	365	90	27 051
4	375	0	27 153
5	385	0	20 725
6	395	0	12 474

### 3.2 Arrhenius&Peck 模型的贮存寿命评估

结合式(7)和试验数据,对极大似然估计模型进行求解,得到加速模型中的参数估计值为  $\hat{a}_0 = -4.22$ ,  $\hat{a}_2 = -3.99$ ,  $\hat{b}_1 = 4761$ ,  $\hat{b}_2 = 4799$ ,  $\hat{c} = -0.09$ 。将估计得到的  $(\hat{a}_1, \hat{a}_2, \hat{b}_1, \hat{b}_2, \hat{c})$  结果代入式(7),进而得到加速方程:

$$\theta = \begin{cases} \exp(-4.22 + 4799 \times \varphi(H) - 0.09 \times \gamma(T)) & T_0 \leq T \leq T_c \\ \exp(-3.99 + 4799 \times \varphi(H)) & T_c < T \leq T_m \end{cases} \quad (18)$$

根据高温下 Arrhenius 模型计算产品激活能,得  $E_a = 0.413$  eV,未超过产品激活能要求范围,说明  $E_a$  估计结果有效。取正常贮存温度  $T=303\text{K}$ ,  $H=50\%$ ,得到正常贮存条件下产品的平均寿命  $\theta_0 = 117\,926$  h,失效率  $\lambda = 8.479 \times 10^{-6}$ 。

### 3.3 结果分析

对比 Arrhenius 模型、Peck 模型和 Arrhenius&Peck 模型的产品寿命估计的偏差, 计算结果分别为 0.161、-0.133、-0.017。其中, Arrhenius 模型由于未考虑湿度因素的影响, 估计结果明显偏差较大; 相比 Arrhenius 模型, Peck 模型的估计准确度明显提高, 但是仍具有较大偏差; 与上述 2 类方法相比, Arrhenius&Peck 模型估计的准确度较高。

将 3 类模型计算得到的产品寿命与温度的关系绘制成曲线, 结果如图 2 所示, 其中\*标记为产品在贮存条件下的实际寿命。可见, Arrhenius&Peck 模型的寿命估计结果最接近产品实际寿命, 整体结果优于其他 2 类方法。

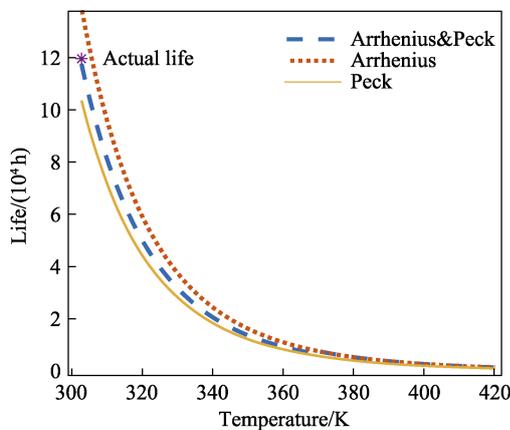


图 2 Arrhenius 模型、Peck 模型和 Arrhenius&Peck 模型下寿命与温度关系

Fig.2 Lifetime versus temperature for Arrhenius model, Peck model, and Arrhenius&Peck model

Arrhenius 模型、Peck 模型和 Arrhenius&Peck 模型在产品失效率的偏差分别为 -0.139、0.154、0.017。可见, Arrhenius&Peck 模型在产品失效率估计方面偏差较小, 对产品失效率的估计结果优于 Arrhenius 模型和 Peck 模型。将 3 类模型计算得到的产品失效率与温度的关系绘制成曲线, 结果如图 3 和图 4 所示,

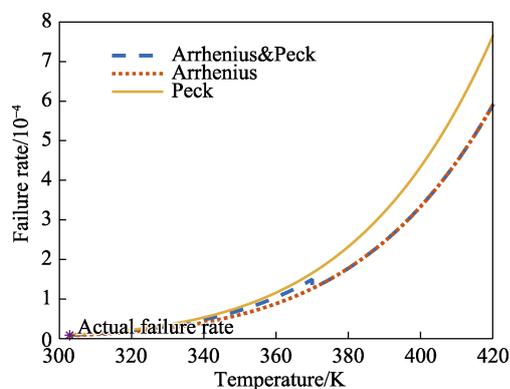


图 3 Arrhenius 模型、Peck 模型和 Arrhenius&Peck 模型下失效率与温度关系

Fig.3 Failure rate versus temperature for Arrhenius model, Peck model and Arrhenius&Peck model

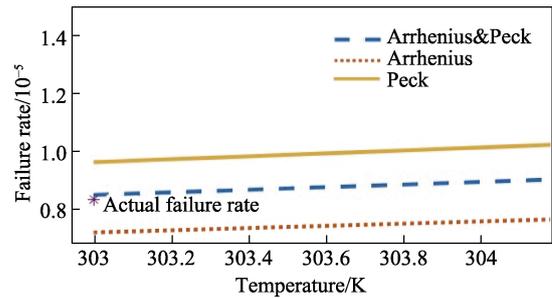


图 4 贮存温度附近三模型下失效率与温度关系  
Fig.4 Failure rate versus temperature for three models near storage temperature

其中\*标记为产品在贮存条件下的实际失效率。可见, Arrhenius&Peck 模型的失效率估计结果优于其他 2 类方法。

## 4 结论

本文针对弹上产品的敏感应力与试验特征, 基于 Arrhenius 和 Peck 模型建立了 Arrhenius&Peck 分段非线性加速模型, 实现了对温湿应力敏感的弹上产品寿命估计, 得出以下结论。

1) 弹上产品的敏感应力为温度和湿度, 在依靠加速寿命试验进行寿命估计时, 应充分考虑湿度应力的作用, 确保加速试验的估计结果可靠。

2) Arrhenius&Peck 模型结合 Arrhenius 模型对产品激活能的估计和 Peck 模型对湿度应力参数的估计, 充分利用高温高湿和过高温条件的试验数据, 对试验设备要求较低。模型对温湿应力敏感产品有较好的估计效果, 相比 Arrhenius 模型和 Peck 模型寿命估计误差更低, 为弹上产品寿命估计提供了一种可行的方法。

### 参考文献:

- [1] 王浩伟, 滕克难, 吕卫民. 导弹贮存延寿试验关键技术及研究进展[J]. 含能材料, 2019, 27(12): 1004-1016.  
WANG H W, TENG K N, LÜ W M. Review on Key Technologies for Missile Storage and Life-Extension Test[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2019, 27(12): 1004-1016.
- [2] HOWARD T W, DAVIS G D. Challenges in Missile Life Cycle System Engineering[M]. MacDill: US Army Missile Command, 1997.
- [3] YANG G B. Optimum Constant-Stress Accelerated Life-Test Plans[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1994, 43(4): 575-581.
- [4] 吴松, 吕晶晶, 李小康. 可靠性加速寿命试验综述[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2021, 39(1): 94-100.  
WU S, LV J J, LI X K. Review of Reliability Accelerated Life Test[J]. Electronic Product Reliability and Environ-

- mental Testing, 2021, 39(1): 94-100.
- [5] 王勇, 夏昌福, 郭茂. 基于加速退化模型的加速度开关贮存寿命评估[J]. 压电与声光, 2023, 45(3): 484-488.  
WANG Y, XIA C F, GUO M. Evaluation of Storage Life of Acceleration Switch Based on Accelerated Degradation Model[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2023, 45(3): 484-488.
- [6] 王巧, 杜雪松, 宋朝省, 等. 谐波减速器加速寿命试验方法研究[J]. 中国机械工程, 2022, 33(19): 2317-2324.  
WANG Q, DU X S, SONG C S, et al. Research on Accelerated Life Test Method of Harmonic Reducers[J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(19): 2317-2324.
- [7] 焦纲领, 朱曦全, 陈津虎. 海军战术导弹贮存试验方法与寿命评估研究[J]. 强度与环境, 2020, 47(5): 42-47.  
JIAO G L, ZHU X Q, CHEN J H. Research on Storage Test Method and Life Evaluation of Naval Tactical Missile[J]. Structure & Environment Engineering, 2020, 47(5): 42-47.
- [8] 赵晓东, 穆希辉. 加速度计贮存试验及寿命评估方法研究[J]. 兵工学报, 2020, 41(6): 1227-1235.  
ZHAO X D, MU X H. Storage Life Evaluation of Accelerometer Based on Accelerator Factor Coefficient of Variation[J]. Acta Armamentarii, 2020, 41(6): 1227-1235.
- [9] 赵长见, 洪东跑, 管飞, 等. 飞行器火工品加速贮存寿命试验与评估方法[J]. 含能材料, 2015, 23(11): 1130-1134.  
ZHAO C J, HONG D P, GUAN F, et al. Accelerated Storage Life Test and Assessment Method for Explosive Initiator Used on Aircraft[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2015, 23(11): 1130-1134.
- [10] YIN C, WANG X, DU S H. Life Analysis and Evaluation of Network Control Module Based on Accelerated Life Test[C]// 2019 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). Hanoi: IEEE, 2019.
- [11] WU M, LUO Y J, WU F F, et al. Lifetime Prediction Model of Electrophoretic Display Based on High Temperature and High Humidity Test[J]. Journal of the Society for Information Display, 2020, 28(9): 731-743.
- [12] 周洁, 姚军, 宋燕. 基于分段非线性 Arrhenius 的贮存寿命评估方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(4): 744-750.  
ZHOU J, YAO J, SONG Y. Storage Life Evaluation Method Based on Segmented Nonlinear Arrhenius Model[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(4): 744-750.
- [13] ZHOU J, YAO J, HU H H, et al. Accelerated Aging Life Evaluation Method of Silicone Rubber Based on Segmented Nonlinear Arrhenius Model[J]. Materials Research Innovations, 2015, 19(S5): 855-860.
- [14] 王文平, 王向晖, 张庆君, 等. 基于 Arrhenius 模型的星载电子产品加速寿命试验技术[J]. 航天器环境工程, 2018, 35(3): 247-251.  
WANG W P, WANG X H, ZHANG Q J, et al. Accelerated Life Test Technology for Satellite Electronic Products Based on Arrhenius Model[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2018, 35(3): 247-251.
- [15] 张鑫, 韩建立, 张崇会, 等. 弹载二次电源加速寿命试验试验谱研究[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(5): 54-59.  
ZHANG X, HAN J L, ZHANG C H, et al. Study on Accelerated Life Test Spectrum of Bomb Secondary Power Supply[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(5): 54-59.
- [16] 张仕念, 颜诗源, 张国彬, 等. 导弹产品基于阿伦尼乌斯方程的环境等效温度计算方法[J]. 装备环境工程, 2018, 15(6): 74-77.  
ZHANG S N, YAN S Y, ZHANG G B, et al. Computing Method of Environment Equivalent Temperature Based on Arrhenius Equation for Missile Products[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(6): 74-77.
- [17] 张仕念, 吴勋, 颜诗源, 等. 贮存使用环境对导弹性能的影响机理[J]. 装备环境工程, 2014, 11(5): 17-22.  
ZHANG S N, WU X, YAN S Y, et al. Influencing Mechanism of Storage /Use Environment on Missile Performance[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(5): 17-22.
- [18] WANG H, YAO J, XU M G. Corrosion Analysis for the Effect on Products in Alternating Salt Fog Test and Damp Heat Test[C]// The Proceedings of 2011 9th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety. Guiyang: IEEE, 2011.
- [19] XU M G, YAO J, WANG H. The Impact Research of the Natural Environmental Conditions on the Storage of the Missile in China's Coastal Areas[C]// 2011 IEEE 18th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. Changchun: IEEE, 2011.
- [20] QIN G F, ZHENG L Y, MI P W, et al. Influence of Single or Multi-Factor Coupling of Temperature, Humidity and Load on the Aging Failure of Adhesively Bonded CFRP/Aluminum Alloy Composite Joints for Automobile Applications[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2023, 123: 103345.
- [21] 吴一乔, 周刚, 韩建立, 等. 综合环境下舰载导弹弹上计算机加速寿命试验研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(8): 27-35.  
WU Y Q, ZHOU G, HAN J L, et al. Accelerated Life Test Research for Shipborne Missile Board Computer under Comprehensive Environmental Conditions[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(8): 27-35.
- [22] 高松, 滕克难, 赵建印, 等. 温湿度因子对舰载导弹发射箱可靠性的影响分析[J]. 舰船电子工程, 2019, 39(1):

- 101-105.  
GAO S, TENG K N, ZHAO J Y, et al. Influence of Temperature and Humidity Factor on the Reliability of Shipborne Missile Launcher[J]. Ship Electronic Engineering, 2019, 39(1): 101-105.
- [23] 张鑫, 韩建立, 王瑶, 等. 弹载电子设备加速贮存试验环境谱设计研究[J]. 舰船电子工程, 2021, 41(1): 117-121.  
ZHANG X, HAN J L, WANG Y, et al. Study on Spectral Design of Accelerated Storage Test Environment for Missile-Borne Electronic Equipment[J]. Ship Electronic Engineering, 2021, 41(1): 117-121.
- [24] 茆诗松, 王玲玲. 加速寿命试验[M]. 北京: 科学出版社, 1997.  
MAO S S, WANG L L. Accelerated Life Test[M]. Beijing: Science Press, 1997.
- [25] PECK D S. Comprehensive Model for Humidity Testing Correlation[C]// 24th International Reliability Physics Symposium. Anaheim: IEEE, 1986.
- [26] GJB 806.8—2009, 地地战略导弹通用规范标志包装贮存转载运输[S].  
GJB 806.8—1990, General Specification for Marking, Packaging, Storage and Transportation of Strategic Ground Missiles[S].