

环境适应性设计与分析

导弹产品基于阿伦尼乌斯方程的
环境等效温度计算方法

张仕念, 颜诗源, 张国彬, 吴勋, 刘春和

(北京市海淀区西北旺镇北清路 109 号 24 分队, 北京 100094)

摘要: **目的** 基于阿伦尼乌斯方程, 讨论弹上产品加速贮存试验计算加速因子过程中的正常应力水平, 即环境等效温度的计算方法。**方法** 根据导弹武器考察周期内的贮存使用环境温度数据, 利用阿伦尼乌斯方程在加速应力水平下对应于贮存使用环境不同温度点的加速贮存试验时间之和, 与在等效温度下的加速贮存试验时间相等建立方程, 得出等效温度的计算公式, 并用数据计算结果进行对比分析。**结果** 理论分析和算例均表明, 环境等效温度不仅与导弹武器在贮存使用过程中的环境温度及其分布有关, 还与试验对象的活化能有关, 对加速贮存试验时间的影响很大。**结论** 在对弹上产品开展加速贮存试验计算加速因子过程中, 应根据导弹武器贮存使用过程中的环境温度剖面和试验对象的活化能计算等效温度, 作为正常应力水平值。

关键词: 导弹; 加速贮存寿命试验; 等效温度; 阿伦尼乌斯方程

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2018.06.014

中图分类号: TJ410.89

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2018)06-0074-04

Computing Method of Environment Equivalent Temperature
Based on Arrhenius Equation for Missile Products

ZHANG Shi-nian, YAN Shi-yuan, ZHANG Guo-bin, WU Xun, LIU-Chun-he
(Division 24, 109 of Beiqinglu road, Town of Xibeiwang, Haidian District, Beijing, 100094)

ABSTRACT: Objective To discuss the method of calculating the nominal stress level, which is also called environmental equivalent temperature, for computing accelerated factor used in the missile products' accelerated storage life tests based on the Arrhenius equation. **Methods** The equivalent temperature equation was derived, based on the hypothesis that the accelerated storage life test time under the equivalent temperature was equal to the sum of the test time under the Arrhenius equation's, where the storage temperature was sourced from the missile weapons' spot observation. The computation result was compared based on these data. **Results** According to the theoretic analysis as well as the calculation example, the environmental equivalent temperature was not only related to the missile weapons' storage temperature and its distribution, but is also influenced by the activation energy of the test object, which had great effect on the accelerated storage life tests. **Conclusion** Both the missile weapons' environment temperature profile in storage or usage and the activation energy of the test object should be taken into account when calculating the nominal stress level for the missile products' accelerated storage life test.

KEY WORDS: missile; accelerated storage life test; equivalent temperature; arrhenius equation

贮存延寿是一项具有持续时间长、经费投入大、综合效益高等特点的重大工程、长效工程。通过贮存

延寿可以实现以较小的代价保持导弹的有效作战规模, 科学合理地确定维修时机和维修内容, 优化贮存使用方法, 提高寿命设计水平。贮存延寿对延长导弹的服役年限、提高导弹的贮存使用性能、减少武器装备购置经费、带动国家工业基础和科技水平的提升等都具有重要的意义^[1-3]。加速贮存试验方法由于具有试验时间短、试验效率高、能够提前评估寿命等优点。随着加速贮存试验技术的发展完善, 用该方法得出寿命结论的准确性正逐步提高, 加速贮存试验方法已成为提前评估弹上产品贮存期的重要手段, 在导弹贮存延寿中得到广泛应用, 受到各方关注。在加速贮存试验实践过程中, 需要按照加速模型计算加速应力水平相对于正常应力水平的加速因子^[4-6], 计算过程中的正常应力水平要求是某一具体的数值, 而正常应力水平是指导弹武器的贮存使用环境条件。

导弹武器通常要经历库房贮存和野外机动、待机、发射等环境条件, 贮存使用环境对导弹性能的影响及影响机理得到深入讨论^[7-11]。由于库房可以采取环境控制措施, 其环境温度波动较小。野外环境受季节影响较大, 但正常的训练通常是有规律可循的, 例如冬训、夏训等。导弹在贮存使用过程中所经历的环境条件往往是在一定范围之内, 而不是某一具体的值, 而且在某一温度点的时间分布也不相同。

获得导弹在贮存和训练使用过程中的温度数据后, 可以采用容差数据处理归纳方法等^[12-15]进行处理, 得到年温度剖面。文中针对导弹武器贮存延寿过程中最常用的阿罗尼兹方程, 根据导弹武器贮存使用的温度剖面, 讨论加速因子计算过程中正常应力水平即等效温度的计算方法。

1 等效温度计算

温度是最常见的加速应力, 针对温度的加速模型中, 应用最广泛的是阿伦尼乌斯 (Svante Arrhenius) 方程^[16]:

$$L = k \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$

式中: L 为寿命特征; k 为常数 (由试验决定); E 为活化能; R 为理想气体常数; T 为绝对温度, K。

设采用温度作为加速应力时, 加速应力水平记为 T , 产品的实际应力水平为 T_0 , 则应力水平 T 相对于 T_0 的加速因子为:

$$a_{T-T_0} = 1 / \exp\left(-\frac{E}{R}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right) \quad (1)$$

设在周期 τ 内实际有 M 个温度点, 分别记为 T_1, T_2, \dots, T_M , 在对应温度点下的时间为 $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_M$,

$\tau = \sum_{i=1}^M \tau_i$, 则加速应力水平 T 相当于实际应力水平

为 T_i 的加速因子为:

$$a_{T-T_i} = 1 / \exp\left(-\frac{E}{R}\left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T}\right)\right)$$

对应于实际应力水平 T_i 下的时间 τ_i , 在加速应力水平 T 下需要的试验时间记为 t_i , 则:

$$t_i = \frac{\tau_i}{a_{T-T_i}} = \tau_i \exp\left(-\frac{E}{R}\left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T}\right)\right)$$

从整个考察周期来看, 在加速应力水平 T 下需要的试验时间记为 t , 则:

$$t = \sum_{i=1}^M t_i = \sum_{i=1}^M \tau_i \exp\left(-\frac{E}{R}\left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T}\right)\right) = \exp\left(\frac{E}{RT}\right) \sum_{i=1}^M \tau_i \exp\left(-\frac{E}{RT_i}\right) \quad (2)$$

另一方面, 设存在某一等效温度点 T_0 , 对应于在 T_0 下的贮存时间为 τ , 在加速应力水平 T 下需要的试验时间记为 t' , 则:

$$t' = \frac{\tau}{a_{T-T_0}} = \tau \exp\left(-\frac{E}{R}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right) = \tau \exp\left(\frac{E}{RT}\right) \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) \quad (3)$$

由于 $t=t'$, 由式 (2) 和式 (3) 可得:

$$\sum_{i=1}^M \tau_i \exp\left(-\frac{E}{RT_i}\right) = \tau \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right)$$

两边取自然对数并整理后得:

$$T_0 = -\frac{E}{R} \left[\ln \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^M \tau_i \exp\left(-\frac{E}{RT_i}\right) \right]^{-1} \quad (4)$$

由式 (4) 可见, 由于 R 是常数, 等效温度 T_0 不仅与温度点 $T_i (i=1, \dots, M)$ 和在某一温度点下的时间 $\tau_i (i=1, \dots, M)$ 有关, 而且还与试验对象的活化能 E 有关。

2 算例

某导弹在贮存使用过程中主要经历洞库贮存、冬训和夏训环境, 根据贮存、训练环境的温度数据, 其温度剖面见表 1。现有 2 种产品 A 和 B, 其中 A 产品的活化能为 9 800 cal/mol, B 产品的活化能为 13 600 cal/mol, 分别计算其等效温度、80 °C 相对于等效温度的加速因子, 以及等效 1 年的加速贮存试验时间。

由表 1 可得, 该导弹经历环境的算术平均温度是 18.87 °C, 区间中值是 21.5 °C, 包络上限是 41 °C。将表 1 中的相关数据带入式 (4), 得到产品 A 和产品 B 的等效温度分别为 19.91 °C 和 20.47 °C。可见, 由于产品 A 和产品 B 的活化能不同, 对于相同的环

境温度数据,计算出的等效温度是不同的,而且也不等于平均温度。

表1 导弹环境温度统计表(365 d)

剖面	实际温度/°C	时间/d
冬训	2	2
	3	6
	4	10
	5	2
库房	16	22
	17	55
	18	80
	19	83
	20	59
	21	18
	22	8
	37	2
夏训	38	5
	39	8
	40	4
	41	1

为了对比选择不同温度作为正常应力水平对加速贮存试验时间的影响,根据式(1)计算相对于80 °C的加速因子,用365除以加速因子得到等效1年的加速贮存试验时间,计算结果见表2。由表2可见,选择不同的正常应力水平对加速因子和加速贮存试验的时间影响较大。寿命要求越长的产品,正常应力水平的数值对加速贮存试验的试验时间的影响越大。

表2 产品A和产品B的加速因子计算结果

产品	温度类型	温度值/°C	加速因子	等效1年的加速贮存试验时间/d
A	当量温度	19.91	17.53	20.82
	平均温度	18.87	18.61	19.61
	区间中值	21.5	16.00	22.81
	包络上限	41	5.66	64.46
B	当量温度	20.47	50.87	7.17
	平均温度	18.87	57.82	6.31
	区间中值	21.5	46.90	7.78
	包络上限	41	11.09	32.91

显然,也可以分别计算80 °C相对于实际温度的加速因子,并根据在各个温度点的时间计算80 °C应力水平下加速贮存试验的时间,再计算等效1年的加速贮存试验时间。例如,直接计算A产品在各个温度点的加速贮存试验时间,结果见表3。将表3中各温度点的加速贮存试验时间相加,就得到等效1年的

加速贮存试验时间为20.82 d,与采用式(4)计算的结果一致。

表3 产品A各温度点的加速试验时间

温度/°C	时间/d	加速因子	加速贮存试验时间/d
2	2	52.41	0.04
3	6	49.12	0.12
4	10	46.05	0.22
5	2	43.20	0.05
16	22	22.00	1.00
17	55	20.75	2.65
18	80	19.57	4.09
19	83	18.47	4.49
20	59	17.43	3.38
21	18	16.47	1.09
22	8	15.56	0.51
37	2	6.93	0.29
38	5	6.59	0.76
39	8	6.26	1.28
40	4	5.95	0.67
41	1	5.66	0.18

3 结语

在导弹贮存延寿过程中,开展加速贮存试验时,有将库房环境的温度包络上限作为正常应力水平,将贮存使用环境的温度区间的中间值作为正常应力水平,将贮存使用环境温度数据的算术平均值作为正常应力水平等各种情况。由于正常应力水平的数值直接影响加速因子和加速贮存试验的时间,对评估结论的影响很大。通过讨论可见,环境等效温度不仅与导弹武器在贮存使用过程中的环境温度及其分布有关,还与试验对象的活化能有关。在对弹上产品开展加速贮存试验过程中,应根据导弹武器贮存使用过程中的环境温度剖面 and 试验对象的活化能计算等效温度,作为计算加速因子的正常应力水平值。

参考文献:

- [1] 张仕念,何敬东,颜诗源,等. 导弹贮存延寿的技术途径及关键技术[J]. 装备环境工程, 2014, 11(4): 37-41.
- [2] 张仕念,孟涛,张国彬,等. 从民兵导弹看性能改进在导弹武器贮存延寿中的作用[J]. 导弹与航天运载技术, 2012(1): 58-61.
- [3] 孟涛,张仕念. 导弹武器装备贮存延寿评述[J]. 科技研究, 2009, 25(1): 10-13.
- [4] NELSON W B. Accelerated Life Testing-step-stress Model Sand Data Analysis[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1980, 29(2): 103-108.
- [5] RIVALINO M J, PEDRO A B, KISHOR S T. Accelerated Degradation tests Applied to Software Aging Experi-

- ments[J]. IEEE Trans on Reliability, 2010, 59(1): 102-114.
- [6] PENG C Y, TSENG S T. Mis-specification Analysis of Linear Degradation Models[J]. IEEE Trans On Reliability, 2009, 58(3): 444-455.
- [7] 吴勋, 周巍. 导弹武器系统开展环境适应性研究的思考[J]. 装备环境工程, 2005, 2(2): 81-85.
- [8] XU Ming-ge, YAO Jun, WANG Huan. The Impact Research of the Natural Environmental Conditions on the Storage of the Missile in China's Coastal Areas[C]// Proceedings of 2011 IEEE the 18th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. 2011.
- [9] 吴勋, 孟涛. 地地导弹环境适应性分析[J]. 装备环境工程, 2006, 3(1): 30-36.
- [10] 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.
- [11] 赵保平, 孙建亮, 庞勇. 航天产品环境适应性问题研究[J]. 装备环境工程, 2011, 8(2): 51-57.
- [12] MIL-STD-810G, Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests [S].
- [13] 张文伟, 李宏民. 自然贮存场自然环境剖面归纳处理[J]. 装备环境工程, 2011, 8(1): 61-65, 81.
- [14] 孙志安. 装备环境应力归纳技术研究[J]. 指挥控制与仿真, 2011, 35(5): 108-113.
- [15] 张仕念, 颜诗源, 徐军, 等. 导弹弹上仪器工作寿命考核方法探讨[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2017, 35(2): 1-4.
- [16] 孟涛, 张仕念, 易当祥, 等. 导弹贮存延寿技术概论[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2013.