# 温度试验加速加载有效性分析

# 王易君,周本权,史平安,杜宏伟

(中国工程物理研究院总体工程研究所,四川 绵阳 621900)

摘要:目的 分析某试件温度试验采用的加速加载方法的有效性和该试验的有效性。方法 应用加速试验理 论,利用 Arrhenius 稳态温度加速模型,识别并分析其加载的加载因子和加载方法是否合理有效,通过活化 能范围判断加速加载的方法和阈值是否合理。通过预期目标结果对比试验实测数据,分析试验是否达到了 预期温度,通过测点温度和温度极限、重要位置的表面温度梯度数据比较,判断试验是否合理有效。结果 当 活化能范围在 0.675~1.3 eV 之间时,采用的加速加载方法是有效的,且温度应力上、下限以及加速因子合 理,实测的测点温度和重要位置的温度梯度同目标结果接近。结论 该试验所采用的加速因子和温度阈值合 理,通过提高温度应力加载,合理有效地降低了试验运行时间,节约了成本。

关键词:温度试验;加速模型;有效性 DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.03.013 中图分类号:TN306 文献标识码:A 文章编号:1672-9242(2019)03-0063-04

## **Effectiveness of Accelerated Test for Temperature Test**

WANG Yi-jun, ZHOU Ben-quan, SHI Ping-an, DU Hong-wei (Institute of Systems Engineering, CAEP, Mianyang 621900, China)

**ABSTRACT: Objective** To analyze the effectiveness of the method of accelerated test and the effectiveness of the test. **Methods** The theory of accelerated test and the Arrhenius model were used to analyze the principle and the method of the temperature test. The reasonability of the acceleration method and limit was judged according to the range of the activation energy. The temperature and temperature gradient of important location were introduced and compared by test results and expected ones to explain the feasibility of the accelerated method and prove the validity of the test. **Results** The method of accelerated test was effective when *Ea* varied from 0.675 eV to 1.3eV, and the upper limit, lower limit and accelerated factor of temperature were appropriate. The temperature measured at the measuring spot and the temperature gradient in important positions were close to the target result. **Conclusion** The *AF* and temperature limit of the accelerated test are proved with good reason. Accelerating the temperature and stress could effectively and reasonably reduce the time and cost of test.

KEY WORDS: temperature test; accelerate model; effectiveness

在某试件温度试验中,产品结构复杂、质量大、 热滞后效应明显,达到温度稳定的时间长。为了节约 成本,同时达到考核产品温度适应性的目的,依据相 关试验标准<sup>[1]</sup>,在该试件温度试验中,试验箱加载了 超出试验条件的温度,以缩短温度应力作用时间。在 GJB 451—90《可靠性维修性术语》<sup>[2]</sup>中,加速试验 (Accelerated Test)是指为缩短试验时间,在不改变 故障模式和失效机理的条件下,用加大应力的方法进

作者简介:王易君(1986-),女,四川人,工程师,主要研究方向为气候环境试验技术。

收稿日期: 2018-09-03; 修订日期: 2018-10-03

基金项目:中国工程物理研究院规划项目基金(TCGH0411)

行的试验。在该温度试验中,试验箱调控温度超出试件的试验条件,相当于开展了一次加速试验。应用加速试验理论分析其采用的加速模型是否有效,讨论该试验的有效性。

# 1 试验概况

试件为含热源的大型复杂结构,质量大、热响应 缓慢,重要部件达到温度稳定的时间非常长,而温度 稳定是保证再现试验条件的重要因素,同时是作为试 验工况结束的主要判据。温度稳定的概念在国内外典 型环境试验标准中定义略有差别,具体指标和操作性 有差异<sup>[3-4]</sup>。结合相应试验标准和试件特点,分别采 用了与理论平衡温度相差不超过 3.5 ℃和关键测点温 度变化之比为 0.95 作为达到温度稳定的判据。

根据试件经历的温度环境剖面,其试验条件如图 la 所示。其中  $t_1$ =48 h,为试件初始平衡条件, $t_1$ - $t_9$  为一个温度循环,共计 3 个温度循环,温度  $T_a$ 、 $T_0$ 、  $T_b$ 已知,平衡时间  $t_3$ - $t_2$ ,  $t_5$ - $t_4$ ,  $t_7$ - $t_6$ ,  $t_9$ - $t_8$ 未知,由试件达到温度稳定的时间长短确定。

整个温度试验中,要求产品在对应的温度条件下 达到稳定后可进行下一步加载,典型的确定温度稳定 的方法有直接测量法、重量法、时间常数法等。其中 直接测量法需要在样品热容量大的部位安装温度传 感器,监测该处的温度是否达到温度稳定<sup>[5]</sup>。也有学 者采用有限元方法计算温度环境试验中产品温度稳 定时间<sup>[6]</sup>。在本次温度试验中,提前采用有限元方法, 通过数值计算确定了试件在各温度阶段下达到温度 稳定的时间。如按照图 1a 的温度条件进行加载时,



整个试验阶段周期过长,成本较高。根据中华人民共和国国家军用标准<sup>[1]</sup>,为缩短达到温度稳定的时间,试验箱调控温度可以超出试件的试验条件,但不能使试件的响应温度超出其温度极限。因此调整试验箱加载后的温度条件如图 1b 所示,其中  $T_{a1}=T_{a}-5$ ,  $T_{01}=T_{01}-5$ ,  $T_{11}=T_{01}+5$ ,  $T_{b1}=T_{b}+5$ 。图 1 的 a、b 图中升降温速率相同。同样的,对于平衡时间  $t_{31}-t_{21}$ ,  $t_{51}-t_{41}$ ,  $t_{71}-t_{61}$ ,  $t_{91}-t_{81}$  也是由产品达到温度稳定确定。

# 2 加速模型及分析方法

## 2.1 加速试验

加速试验是在不改变试件的失效机理前提下,通 过适当提高诱发其失效的应力条件(温度、湿度、压 力等)来加速试件的退化和失效<sup>[7]</sup>,主要分为加速寿 命试验(Accelerated Life Testing, ALT)和加速应力 筛选试验(Accelerated Stress Screening, ASS)。加 速寿命试验在合理工程及统计假设的基础上,利用与 物理失效规律相关的统计模型,对加速条件下获得的 失效数据进行转换,得到试件在正常应力水平下可靠 性的试验方法。可以缩短试验时间,降低试验成本, 进而使长寿命的验证与评价成为可能<sup>[8]</sup>。定性加速试 验是采用高应力主动刺激故障发生,尽快暴露产品的 缺陷,寻求改进的方法。定量的加速寿命试验是通过 试验来确定产品的寿命。对于单温度应力类型的加速 试验,产品活化能对加速试验方案和周期均有影响<sup>[9]</sup>。 俄罗斯和美国的导弹加速贮存试验技术,是根据材料 老化的物理模型建立加速贮存模型,材料老化原理是 材料在加速试验中的老化和自然老化等效[10]。国外弹 药贮存寿命试验分为自然贮存试验和加速寿命试验, 其弹药贮存寿命评价中,采用活化能、凝胶含量法、 傅里叶红外光谱分析等方法[11],分析比较加速试验的 目的和原理。Arrhenius 模型适用于单应力加速试验, Peck 模型适用于温度湿度共同作用的组合应力加速 试验[12]。

#### 2.2 Arrhenius 稳态温度加速模型

针对加速试验模型,当温度是唯一显著载荷时, 多使用 Arrhenius 稳态温度加速模型。由于该温度试 验中仅有温度应力进行加载,因此采用 Arrhenius 稳 态温度加速模型,见式(1)。

$$\frac{\mathrm{d}M}{\mathrm{d}t} = A \exp\left(\frac{-E_a}{kT}\right) \tag{1}$$

式中:M为失效敏感参数;t为试验时间,h;A为常数; $E_a$ 为活化能,与材料有关, eV;k为波尔兹 曼常数,8.617×10<sup>-5</sup> eV/K;T为绝对温度,K。

对式(1)进行积分,得到:

$$M_0 = \int_0^{t_0} A \exp\left(\frac{-E_a}{kT_0}\right) dt = A \exp\left(\frac{-E_a}{kT_0}\right) t_0$$
(2)

$$M = \int_0^t A \exp\left(\frac{-E_a}{kT}\right) dt = A \exp\left(\frac{-E_a}{kT}\right) t$$
(3)

在正常条件和加速条件下,试件的失效判据是一样的,*M*=*M*<sub>0</sub>,进一步得到:

$$t_0 = \frac{\exp\left(\frac{-E_a}{kT}\right)}{\exp\left(\frac{-E_a}{kT_0}\right)}t = \exp\left(\frac{-E_a}{k}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right)t$$
(4)

$$AF = \exp\left(\frac{-E_a}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right)$$
(5)

则  $t=t_0/AF$ , AF 被称为加速因子。

相同试件的同一失效机理对应相同失效活化能, 因此在正常条件下,工作寿命 t<sub>0</sub>和加速条件下的工作 寿命 t<sub>0</sub> 呈 *AF* 的线性关系。通过式(5)可以判断, 在确定了加速温度的前提下,试件的加速因子与活化 能成指数关系,因此活化能 *E*<sub>a</sub> 度量的准确程度是加 速试验的关键。活化能与被测对象相关,通常电子元 器件活化能为 1.6~2.0 eV。活化能是晶体中晶格点阵 上的原子运动到另一点阵或间隙位置时所需的能量, 反映温度应力对产品寿命影响的一种指标。对某一确 定反应,活化能不随温度变化。

## 3 结果及分析

#### 3.1 加载模型有效性分析

从工程实际需求的角度,可靠性试验中的应力应 是产品在实际贮存和使用环境中所承受的应力。该温 度试验稳定环境下的温度应力值为 *T*<sub>a</sub>、*T*<sub>0</sub>、*T*<sub>b</sub>。在采 用加速试验时,将温度范围的上下限进行调整,既要 达到减少时间成本的目的,同时要求产品响应不能超 过其温度响应极限。因此,调整后的温度应力值包括 *T*<sub>a1</sub>、*T*<sub>01</sub>、*T*<sub>0</sub>、*T*<sub>11</sub>、*T*<sub>b1</sub>,在升降温段采用相同的温度 变化速率,并且实现相同的循环次数。

由于该试件结构复杂,涉及多种元件和材料,其 活化能无法确定为某个定值。假设其活化能范围在 0.5~2.0 eV 之间,则在温度和加速温度条件下各段的 加速因子如图 2 所示。

将整个循环周期视为整体,且假设不同温度段的 权重因子相同,求解得到不同活化能条件下平均加速 因子,与两个温度稳定判据下获得的加速因子曲线见 图 3。通过曲线拟合,获得加速试验的加速因子同活 化能的关系为:

AF = 0.2915E<sup>2</sup><sub>a</sub> - 0.1365E<sub>a</sub> + 1.0343, R<sup>2</sup> = 0.9999 (6) 在两种温度稳定判据下,由实际试验时间计算的 加速因子分别为 1.075 和 1.346。利用式(6)得到, 当活化能范围在 0.675~1.3eV 之间时,可以判断所采 用的加速加载方法是合理的,且温度应力上、下限以 及加速因子的选取比较合理。由于活化能范围适当, 加速因子均大于1,因此试验缩短了试验周期、达到 了加速的目的。



#### 3.2 试验有效性分析

试验有效性的判据以实际响应温度不超过温度 极限,实际测试数据的温度梯度与目标温度梯度的相 符性进行判断。在整个加速试验过程中,极限温度同 测点实际测试的温度差值见表 1,整个试件的温度响 应未超过温度极限。

表1 极限温度与测点实测温度差值

测点	$(T_{T} - T_{\min})/^{\circ}\mathbb{C}$	$(T_{\perp}-T_{\max})/^{\circ}C$
$T_1$	1.5	1.9
$T_2$	0.9	1.4
$T_3$	0.5	1.1
$T_4$	0	0.4

注:T<sub>上</sub>一温度上限值,T<sub>下</sub>一温度下限值

目标温度值是以同类试件的温度试验测试结果 为依据,并由有限元方法计算和修正得到全部测点的 温度。比较恒温阶段计算结果同实测数据的差别,得 到关键测点的温度响应参数,见表 2,其中  $T_s$ 为实测 值, $T_c$ 为计算值, $\overline{T_s}$ - $\overline{T_c}$ 为实测值与计算值差值的平 恒温险船温度参数

主う

· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·										
阶段 -	$T_1/^{\circ}\mathbb{C}$		$T_2/^{\circ}\mathrm{C}$		$T_3/^{\circ}\mathbb{C}$		$T_4$ /°C			
	$\overline{T_{ m s}-T_{ m c}}$	σ								
$t_2 - t_3$	0.75	0.55	0.58	0.70	0.57	0.70	0.50	0.77		
$t_4 - t_5$	1.13	0.44	0.90	0.53	0.88	0.53	0.79	0.53		
$t_6 - t_7$	1.08	0.08	0.84	0.16	0.86	0.08	0.76	0.08		
$t_8 - t_9$	1.05	0.13	0.74	0.14	0.70	0.08	0.65	0.08		

均数, σ为标准差。可以看出, 实测温度整体略高于 计算值, 但整体相差在 1.13 ℃以内, *T*<sub>1</sub> 点实测数据 同计算值之差略高于其他各点, 但各点实测数据同计 算值差值的一致性较好。

比较目标结果和实测数据,温度梯度如图 4 所示。其中位置 1( $\Delta T_1$ )处的温度梯度的实测数据为 0.5~0.7 °C,目标温度梯度为 0.69~0.75 °C;位置 2 ( $\Delta T_2$ )处温度梯度的实测数据范围为 0.3~0.4 °C,目标温度梯度为 0.31~0.41 °C;位置 3( $\Delta T_3$ )处温度梯度的实测数据为 0.2~0.8 °C,目标温度梯度为 0.6~1.11 °C。位置 2 处温度梯度的实测结果和目标温度梯度结果基本一致,位置 1、3 的温度梯度的实测数据整体略小于目标温度梯度。从图 4 可以看出,试件各处的温度梯度实测数据和目标温度梯度相差在 1.11 °C以内,整个试验过程中其变化趋势一致。由于目标温度是基于部分温度测点和数值计算获得,因计算模型在模型处理和热物性参数等效时无法完全与实际情况相同,因而实测数据和目标温度的结果偏差 在许可范围内。



图 4 循环阶段中温度梯度的实测值和计算目标值

通过实测数据同目标结果相比较,可以认为该试 验较好地符合了预期的试验结果,本次试验采用的加 速加载方式是合理、有效的。

## 4 结语

文中介绍了某试件温度试验在试验实施过程中

采用调节温度限值进行加速加载的过程,在加速试验 技术基础上,应用单温度应力的 Arrhenius 稳态加速 模型分析了该温度试验进行加速加载的合理性和有 效性。通过对加速因子和活化能的分析,表明该温度 试验所采用温度阈值合理,达到加速试验的目的。同 时对试验后的测试数据和试件的极限温度、预期温度 梯度进行了比较分析,测试结果较好地符合了试验预 期,确定了本次试验的有效性。

#### 参考文献:

- GJB 150.1A—2009, 军用装备实验室环境试验方法 第 1部分:通用要求[S].
- [2] GJB 451—90, 可靠性维修性术语[S].
- [3] 李宝晗, 祝耀昌, 仇振安. 直接测量法确定受试产品温度稳定时间的研究. [J]. 航天器环境工程, 2011, 28(3): 255-263.
- [4] 龚武,孙立军.人工加速环境试验的不确定度评定[J].电子产品可靠性与环境试验,2018,36(3):55-60.
- [5] 林琳, 晏效锋, 张熙川, 等. 电子产品环境应力筛选温 度稳定性测试研究[J]. 装备环境工程, 2010, 7(6): 160-162.
- [6] 罗群生, 史光梅, 陈均, 等. 温度环境试验中试件温度
   温度时间估算方法[J]. 装备环境工程, 2012, 9(6):
   117-122.
- [7] 陈循,张春华.加速试验技术的研究、应用与发展[J]. 机械工程学报,2009,45(8):130-136.
- [8] 杨玉新,程德斌.加速试验工程运用综述[J].电子产品 可靠性与环境试验,2012,30(6):44-47.
- [9] YURKOWSKY W, SCHAFER R E, FINKELSTEIN J M. Accelerated Testing Technology[R]. New York: Rome Air Development Center, 1967.
- [10] 侯希久. 国外导弹贮存可靠性技术概况[J]. 国外质量 与可靠性. 1997(4): 44-46.
- [11] 罗天元,周堃,余淑华,等.国外弹药贮存寿命试验与 评价技术概述[J].装备环境工程,2005,2(4):17-22.
- [12] 杨光,李金国,陈丹明,等.产品加速试验应用原理分析[J].装备环境工程,2006,3(4):55-61.