

## 常用三种加速老化测试模型

在环境模拟试验中，常常会遇到这样一个问题：产品在可控的试验箱环境中测试若干小时相当于产品在实际使用条件下使用多长时间？这是一个亟待解决的问题，因为它的意义不仅仅在于极大地降低了成本，造成不必要的浪费，也让测试变得更具目的性和针对性，有利于测试人员对全局的掌控，合理进行资源配置。在众多的环境模拟试验中，温度、湿度最为常见，同时也是使用频率最高的模拟环境因子。实际环境中温度、湿度也是不可忽略的影响产品使用寿命的因素。所以，迄今将温度、湿度纳入考量范围所推导出的加速模型在所有的老化测试加速模型中占有较大的比重。由于侧重点的不同，推导出的加速模型也不一样。下面，本文将解读三个极具代表性的加速模型。

### 模型一. 只考虑热加速因子的阿伦纽斯模型（Arrhenius Mode）

某一环境下，温度成为影响产品老化及使用寿命的绝对主要因素时，采用单纯考虑热加速因子效应而推导出的阿伦纽斯模型来描述测试，其预估到的结果会更接近真实值，模拟试验的效果会更好。此时，阿伦纽斯模型的表达式为：

$$AF = \exp\left\{\frac{E_a}{k} \cdot \left[\frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_t}\right]\right\}$$

式中：

AF 是加速因子；

E<sub>a</sub> 是析出故障的耗费能量，又称激活能。不同产品的激活能是不一样的。一般来说，激活能的值在 0.3eV~1.2eV 之间； K 是玻尔兹曼常数，其值为 8.617385×10<sup>-5</sup>；

T<sub>u</sub> 是使用条件下(非加速状态下)的温度值。此处的温度值是绝对温度值，以 K(开尔文)作单位；

T<sub>t</sub> 是测试条件下(加速状态下)的温度值。此处的温度值是绝对温度值，以 K(开尔文)作单位。

案例：某一客户需要对产品做 105℃ 的高温测试。据以往的测试经验，此种产品的激活能 E<sub>a</sub> 取 0.68 最佳。对产品的使用寿命要求是 10 年，现可供测试的样品有 5 个。若同时对 5 个样品进行测试，需测试多长时间才能满足客户要求？ 已知的信息有 T<sub>t</sub>、E<sub>a</sub>，使用的温度取 25℃，则先算出加速因子 AF：

$$AF = \exp\left\{\frac{0.68}{8.617385 \times 10^{-5}} \cdot \left[\frac{1}{273+25} - \frac{1}{273+105}\right]\right\}$$

最终：

$$AF \approx 271.9518$$

又知其目标使用寿命：

$$L_{\text{目标}} = 10 \text{ years} = 10 \times 365 \times 24 \text{ h} = 87600 \text{ h}$$

故即可算出：

$$L_{\text{测试}} = L_{\text{目标}} / AF = 87600 / 271.9518 \text{ h} = 322.1159 \text{ h} \approx 323 \text{ h}$$

现在 5 个样品同时进行测试，则测试时长为：

$$L_{\text{最终}} = 323 / 5 \text{ h} = 65 \text{ h}$$

这即是说明，若客户用 5 个产品同时在 105℃ 高温下测试 65h 后产品未发生故障，则说明产品的使用寿命已达到要求。

通过这个案例可以看出，利用阿伦纽斯模型可以提前预估测试的相关信息，指导客户怎样进行测试才既能达到目标值而又最大限度的降低成本。本案例中，若客户急需测试结果，那么可以投入 10 个或者更多的样品来缩短整个测试时长；或者在允许的情况下进一步提高温度，加快完成测试。根据需求灵活的调整测试方案，这才能更完美地达到目标，提高工作效率，省去一些不必要的费用。

模型二. 综合温度及湿度因素的阿伦纽斯模型（Arrhenius Mode With Humidity） 综合温度及湿度因素的阿伦纽斯模型的表达式为：

$$AF = \exp\left\{\frac{E_a}{k} \cdot \left[\frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_t}\right] + (RH_t)^n - (RH_u)^n\right\}$$

式中：

AF 是加速因子;

Ea 是析出故障的耗费能量, 又称激活能。不同产品的激活能是不一样的。一般来说, 激活能的值在 0.3ev~1.2ev 之间; K 是玻尔兹曼常数, 其值为  $8.617385 \times 10^{-5}$ ;

Tu 是使用条件下(非加速条件下)的温度值。此处的温度值是绝对温度值, 以 K(开尔文)作单位;

Tt 是测试条件下(加速条件下)的温度值。此处的温度值是绝对温度值, 以 K(开尔文)作单位;

RHu 是使用条件下(非加速状态下)的相对湿度值; RHt 是测试条件下(加速状态下)的相对湿度值。

模型二可以说是模型一的拓展, 它只是在模型一的基础上简单地添加了湿度这一影响因素。长期以来的测试经验表明, 用模型二来解释某些情况下湿度对加速测试的影响并不准确。所以, 一种更为准确的综合考虑温湿度影响的模型将被提出, 这即是下文将介绍的另外一种模型—Hallberg-Peck 模型。

### 模型三. Hallberg-Peck 模型

Hallberg-Peck 模型综合考虑了温度、湿度影响, 它相比于模型二更能准确的描述在温湿度条件下进行的老化测试, 其表达式为:

$$AF=(RHt/RHu)^3 \cdot \exp\{(Ea/k) \cdot [(1/Tu)-(1/Tt)]\}$$

式中:

AF 是加速因子;

Ea 是析出故障的耗费能量, 又称激活能。不同产品的激活能是不一样的。一般来说, 激活能的值在 0.3ev~1.2ev 之间; K 是玻尔兹曼常数, 其值为  $8.617385 \times 10^{-5}$ ;

Tu 是使用条件下(非加速条件下)的温度值。此处的温度值是绝对温度值, 以 K(开尔文)作单位;

Tt 是测试条件下(加速条件下)的温度值。此处的温度值是绝对温度值, 以 K(开尔文)作单位;

RHu 是使用条件下(非加速状态下)的相对湿度值; RHt 是测试条件下(加速状态下)的相对湿度值。

案例: 某一半导体元件生产厂家, 经过长期研究开发出一款新产品。初步将新产品的 MTBF 定为 20 年。新产品日常的使用环境为 45°C, 25%RH。为了验证其使用寿命是否达到要求, 厂家要把新产品置于 85°C, 85%RH 的高温高湿条件下做加速测试。现客户共有 3 款新产品, 仅 2 款可用于测试, 剩余一款作为其余两款试验后对比之用。厂家现在希望能最快地完成测试, 得到相关结果, 那这一最快时间是多少?

现在, 采用 Hallberg-Peck 模型来解答这一问题。已知:

RHt=85%, RHu=25%, Tt=85°C, Tu=45°C, Ea=1.0(按类似产品的经验值) 则有:

$$AF=(85\%/25\%)^3 \cdot \exp\{[1/(8.617385 \times 10^{-5})] \cdot [1/(273+45)] - [1/(273+85)]\}$$
 最终:

$$AF=2318.42204$$

又知其目标使用寿命:

$$MTBF \text{ 目标}=20\text{years}=20 \times 365 \times 24\text{h}=175200\text{h}$$

故即可算出测试时长:

$$T \text{ 测} = MTBF \text{ 目标}/AF=175200/2318.42204\text{h}=75.5686\text{h} \approx 76\text{h}$$

现在最多只能用 2 个产品同时进行测试, 则测试时长为: T 最终=76/2h=38h

这即是说明, 若客户想得到最快的测试结果需同时用 2 个产品进行 85°C, 85%RH 的高温高湿测试 38h, 若之后产品未发生故障, 则可说明其 MTBF 已达目标。综合以上三个模型可以看出, 他们都有一些共通的参数, 如 Ea、k、Tu、Tt, 其中 k 是一恒量, 其值始终不会变, 变化的是 Ea、Tu、Tt, Tu 和 Tt 是人为设定的, 它的变化有很强的随机性。而 Ea 则不同, 它是析出故障所耗费的能量, 当故障具体到某一种特定类型时, 其值会在很小的范围内产生波动, 几乎可认为不变。以下是一些常见故障的 Ea 值:

氧化膜破坏:	0.3ev
离子性 (SiO <sub>2</sub> 中 Na 离子漂移)	1.0---1.4ev
离子性 (Si-SiO <sub>2</sub> 界面的慢陷阱)	1.0ev
电迁移造成短路或开路	0.6ev
铝腐蚀	0.6---0.9ev
金属间化合物生长	0.5---0.7ev

另外，GR-468 标准中还推荐了一部分  $E_a$  值以供选取。不过，选择  $E_a$  值的最佳方法就是从产品的相关数据库得出。这样得出的值更真实准确，比一些推荐值更具说服力。

通过这三个模型可以看到，在进行以温湿度为主的测试时，需先对产品所处的使用环境有个彻底详尽的了解，然后确定何为主要环境因素，继而确定相应的加速测试模型，在条件允许的情况下以最优的方法来解决，以求达到事半功倍的效果。

现代社会办事讲求的是高效率高质量，谁能在最短的时间内高质量地完成工作，谁必将脱颖而出，成为胜者。同样，运用在测试当中，就是谁能在最短时间保质保量地完成既定测试目标，进而降低生产成本，缩短研制周期，对产品的市场占有率有着积极的促进作用