

恒定温度应力加速实验失效机理一致性快速判别方法

郭春生[†] 万宁 马卫东 张燕峰 熊聪 冯士维

(北京工业大学电子信息与控制工程学院, 北京 100124)

(2011年11月28日收到; 2012年11月8日收到修改稿)

针对加速实验中因失效机理发生改变而导致的无效实验问题, 对失效机理一致性和分别在不同应力下器件的初期退化参数分布的关系进行了研究. 研究证明了判断加速实验失效机理一致的条件: 1) 不同应力下失效分布的形状参数服从一致, 即 $m_i = m, i = 1, 2, 3, \dots$, 2) 尺度参数 η_i 服从 $\eta_i = AF_i \cdot \eta$. 从而提供一种在实验初期即可根据参数退化分布快速判别不同应力下失效机理是否一致的方法, 避免了因失效机理发生改变而造成的无效加速实验. 最后对加速实验初期理论退化数据和多芯片组件厚膜电阻初期退化数据进行了威布尔分布参数估计, 并对其在不同应力下的失效机理一致性进行了判别.

关键词: 失效机理一致性, 恒定温度应力加速实验, 威布尔分布

PACS: 85.40.-e, 06.30.Gv, 02.50.-r

DOI: 10.7498/aps.62.068502

1 引言

加速实验是指在保证失效机理不变的前提下, 提高实验应力水平, 使产品加速失效, 以便在短时间内获得失效数据, 从而评估产品正常应力水平下的可靠性或寿命指标. 然而, 加速条件下, 由于实验应力水平高, 器件潜在的失效机理可能被激发出来, 成为主要失效机理^[1,2], 从而使得加速条件下失效机理发生改变^[3], 导致由加速实验获得的器件寿命不能代表器件的真实寿命^[4]. 且加速实验经常在未确定失效机理和未保证与不同应力条件下具有相同失效机理的情况下进行^[5]. 而现行失效机理判别方法需在失效后进行判别, 并不能避免因失效机理改变造成的无效加速时间.

现行判断失效机理一致性的方法主要归结为: 根据 Nelson^[6] 提出的假设利用图估法判断寿命分布直线是有规律和相互平行的, 即形状参数在不同应力下均相等来判断其失效机理一致^[7]. 由于该方法需要在实验结束后再进行失效机理一致性的判别, 不能避免实验中失效机理改变导致的无效实验. 而且在失效机理发生改变的情形下, 形状参数仍然可能不发生改变, 所以上述方法并不能够准确判断

失效机理一致性.

针对恒定应力加速实验失效机理一致性的快速判别问题, 本文基于统计分布的方法有效利用了加速实验中器件的早期退化数据, 在加速实验初期根据退化时间计算出退化分布的分布参数, 并根据分布参数与失效机理一致性的关系, 对不同实验应力下其失效机理是否一致进行快速判别, 避免了因失效机理改变而造成的无效加速实验, 节省了实验时间.

2 理论

温度能够加快产品内部物理化学反应, 促使产品参数加速退化, 因此在加速寿命实验中常用温度作为加速应力. 产品的参数退化速率与温度的关系常用 Arrhenius 模型表示^[8,9]:

$$\frac{dM}{dt} = A \exp\left(\frac{-E_A}{k_B T}\right), \quad (1)$$

式中 M 为失效敏感参数, t 为实验时间, dM/dt 为参数反应速率, A 为常数, E_A 为激活能, k_B 为玻尔兹曼常数, T 为实验温度.

加速条件下和正常工作条件下, 器件的失效判据是一样的, 即达到失效时器件的损伤累积量是相

[†] 通讯作者. E-mail: guocs@bjut.edu.cn

等的, 所不同的仅仅是加速系数, 即参数的退化速率不同. 因此

$$\Delta M = \Delta M_0, \quad (2)$$

式中 ΔM 为加速条件下的失效敏感参数的退化量, ΔM_0 为正常工作条件下的失效敏感参数的退化量.

根据 Arrhenius 方程:

$$\Delta M = \int_0^t A \exp\left(\frac{-E_A}{k_B T}\right) dt = A \exp\left(\frac{-E_A}{k_B T}\right) t, \quad (3)$$

$$\Delta M_0 = \int_0^{t_0} A \exp\left(\frac{-E_A}{k_B T_0}\right) dt = A \exp\left(\frac{-E_A}{k_B T_0}\right) t_0, \quad (4)$$

将以上两式相比整理可得外推常温下的工作寿命 t_0 :

$$t_0 = \frac{\exp\left(\frac{-E_A}{k_B T}\right)}{\exp\left(\frac{-E_A}{k_B T_0}\right)} t. \quad (5)$$

令

$$\frac{\exp\left(\frac{-E_A}{k_B T}\right)}{\exp\left(\frac{-E_A}{k_B T_0}\right)} = \exp\left(\frac{-E_A}{k_B} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right) = AF,$$

其中 AF 为加速因子. 则 (5) 式可以表示为

$$t = t_0 / AF. \quad (6)$$

同一失效机理对应相同失效激活能^[10], 因此如果在加速应力条件下和正常工作下的激活能 E_A 不发生改变, 常温下的工作寿命 t_0 和加速条件下的寿命 t 呈常数 AF 的线性关系.

在加速实验的参数退化过程中, 取失效敏感参数退化量为 3% 时的退化时间 (低于失效判据, 节省退化所占用的实验时间), 以服从威布尔分布模型为例, 假设 $F_U(t_0)$ 为正常工作水平下退化时间的分布函数, 服从参数为 m, η 的威布尔分布, 其中 $f(S)$ 为该威布尔分布的概率密度函数, 则施加应力后退化时间的分布函数 $F_S(t)$ 有

$$\begin{aligned} F_S(t) &= P(\xi < t) = P\left(\xi < \frac{t_0}{AF}\right) \\ &= \int_0^{\frac{t_0}{AF}} f(S) dS \\ &= \int_0^{\frac{t_0}{AF}} \frac{m}{\eta} \left(\frac{S}{\eta}\right)^{m-1} e^{-\left(\frac{S}{\eta}\right)^m} dS \\ &= 1 - e^{-\left(\frac{t_0}{AF\eta}\right)^m}, \end{aligned} \quad (7)$$

从 (7) 式中可以得出, 施加应力后退化时间仍然服从威布尔分布, 但是其分布参数转变为 $m, AF\eta$. 因

此, 在进行恒定应力加速实验时, 测定各温度应力下失效敏感参数退化量达到 3% 时的退化时间, 并对退化数据的分布函数进行参数估计, 若该温度范围内失效机理未发生改变, 参数估计与分布函数应满足上述条件.

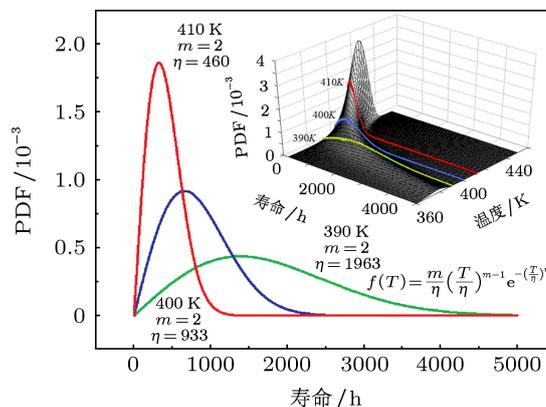


图 1 恒定温度应力下威布尔分布的概率密度曲线

图 1 显示了 390, 400, 410 K 下的概率密度曲线. 插图显示了温度范围从 360 到 440 K 范围内产品失效机理未发生改变时失效敏感参数退化时间的概率密度曲面. 根据获得的参数估计可做出如下判别, 若威布尔分布的参数估计同时满足以下两个关系:

1) 形状参数 m_i 服从 $m_i = m$,

2) 尺度参数 η_i 服从 $\eta_i = AF_i \cdot \eta$,

其中, $AF_i = \exp\left(\frac{-E_A}{k_B T_i}\right) / \exp\left(\frac{-E_A}{k_B T}\right)$, 则可以确定在该温度范围内失效机理没有发生改变, 加速实验是合理的; 反之, 失效机理在加速实验过程中发生改变. 找到形状参数 m 或尺度参数 η 关系发生转变的点, 就可以确定失效机理发生改变的应力点, 不需要继续进行实验. 实验过程不需要等待样品退化至失效, 从而快速获得产品保持失效机理一致的应力范围, 同时避免了因失效机理改变而造成的无效加速实验, 节省了实验时间.

3 模型验证

由于实验总会引入误差, 且在激活能等参数未知的情况下, 必然会对模型的准确性造成影响. 因此, 本文通过赋予威布尔分布参数与激活能等参数获得参数退化量的理论数据, 结合本文提出的失效一致性判别方法对各温度应力下的失效机理一致性进行判别.

实验应力选取四组温度应力, 分别为 390, 400, 410, 420 K, 每组实验样本 10 个, 共 40 个样品. 赋予 300 K 下的理论初值: 激活能 $E_A = 1 \text{ eV}$, 形状参数 $m_0 = 2$, $\eta_0 = 1 \times 10^7$, 390, 400, 410 K 下的理论数据均由此外推得到. 同时在 420 K 下取激活能 0.9 eV 作为理论失效对比数据. 将计算机辅助取得的失效敏感参数退化量达到 3% 时取得的理论退化数据由低到高依次排列如表 1 所示:

表 1 样本退化数据

温度应力/样品编号	390 K	400 K	410 K	420 K
1	754.3 h	358.7 h	176.9 h	5.7 h
2	805.9 h	383.3 h	189 h	6.1 h
3	1334.4 h	634.6 h	313 h	10.1 h
4	1448.4 h	688.9 h	339.7 h	11 h
5	1512.3 h	719.2 h	354.7 h	11.4 h
6	1671.3 h	794.9 h	392 h	12.6 h
7	2454.3 h	1167.2 h	575.6 h	18.6 h
8	2853.2 h	1356.9 h	669.2 h	21.6 h
9	3641.7 h	1731.9 h	854.1 h	27.6 h
10	3962.5 h	1884.5 h	929.3 h	30 h

对该理论退化数据的威布尔分布的形状参数 m , 尺度参数 η 进行参数估计并计算加速因子 AF 如表 2 所示.

表 2 各温度应力下的形状参数 m , 尺度参数 η 和加速因子 AF

温度应力	形状参数 m	尺度参数 η	加速因子 AF (相对 300 K)
390 K	2.06	1701.1	1.9628×10^{-4}
400 K	2.06	808.99	9.3347×10^{-5}
410 K	2.06	398.94	4.6033×10^{-5}
420 K	2.1572	16.1097	1.4852×10^{-6}

由表 2 可知, 390, 400, 410 K 下的形状参数和尺度参数同时满足 $m_{390} = m_{400} = m_{410}$, $\exp\left(\frac{-E_A}{k_B T_{390}}\right) / \exp\left(\frac{-E_A}{k_B T_{400}}\right) / \exp\left(\frac{-E_A}{k_B T_{410}}\right) = \eta_{390} / \eta_{400} / \eta_{410}$. 因此可以判断失效机理在 390 K 至 410 K 的温度范围内没有发生改变. 同时根据 390, 400, 410 K 下的参数估计值可由尺度参数关系式计算出未发生失效的激活能 $E_A = 1.0000 \text{ eV}$. 利用参数估计在 Arrhenius 寿命 - 温度关系图上分别

绘制 390, 400, 410 K 下概率密度曲线如图 2 所示.

但 420 K 下的参数估计不满足判别失效机理一致性的两个条件, 即 $m_i \neq m_{420}$, $\exp\left(\frac{-E_A}{k_B T_i}\right) / \exp\left(\frac{-E_A}{k_B T_{420}}\right) \neq \eta_i / \eta_{420}$, $i = 390, 400, 410 \text{ K}$. 因此判定在该温度应力下失效机理发生改变, 在该温度下进行的加速实验是没有意义的. 根据获得的分布参数估计, 由 (5) 式可以计算 420 K 下的失效激活能 $E_{Afailure}$.

$$\exp\left(\frac{-E_A}{k_B T_i}\right) / \exp\left(\frac{-E_{Afailure}}{k_B T_{420 \text{ K}}}\right) = \eta_i / \eta_{420 \text{ K}}, \quad (8)$$

经计算, 420 K 下的失效激活能 $E_{Afailure} = 0.9081 \text{ eV}$, 激活能较正常水平下降 10%, 失效机理在 420 K 发生改变, 验证了本文提出的失效一致性判别方法的准确性.

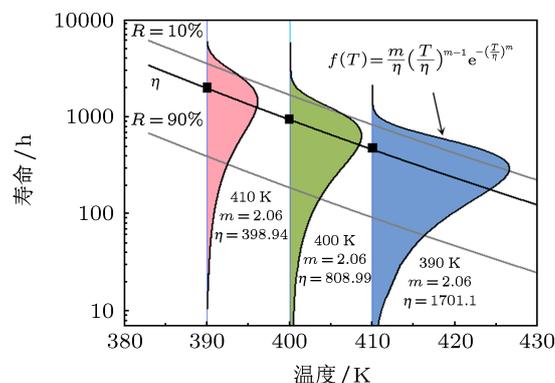


图 2 威布尔分布下的 Arrhenius 寿命 - 温度关系图

通过对 390 K 到 420 K 范围内的理论退化数据进行参数估计, 结合本文提出的失效一致性判别条件, 在失效敏感参数退化 3% 时, 得到失效机理一致性判别结果, 发现在 420 K 下加速实验失效机理发生改变, 避免了由于加速实验过程中因失效机理发生改变而导致的无效实验, 节约了实验时间.

4 实验

实验选取 MCM-C 用的 LTCC 多层陶瓷电路板上的 30 个 10 kΩ 的厚膜电阻作为实验样品, 将样品分为 3 组分别在三个温度点 (200 °C, 230 °C 和 260 °C) 进行加速实验, 按一定时间间隔测试样品电阻大小, 以电阻退化至初始电阻的 90% (即 9 kΩ) 作为失效判据, 同时记录样品失效时间如表 3 所示.

表3 加速条件下的样品失效时间

温度应力样品编号	200 °C	230 °C	260 °C
1	910 h	90 h	34 h
2	950 h	100 h	35 h
3	970 h	100 h	35 h
4	970 h	120 h	35 h
5	980 h	130 h	37 h
6	1070 h	140 h	38 h
7	1090 h	140 h	40 h
8	1270 h	140 h	44 h
9	1290 h	150 h	45 h
10	1330 h	150 h	50 h

首先对每组实验数据进行威布尔分布的拟合优度检验, 设检验统计量:

$$w = \frac{\sum_{i=r_1+1}^{r-1} \frac{l_i}{r-r_1-1}}{\sum_{i=1}^{r_1} \frac{l_i}{r_1}}$$

式中, $r_1 = [r/2]$, 这里 $[\cdot]$ 为取整符号, 所取整数为小于或等于括号内之值的最大整数值.

$$l_i = \frac{x(i+1) - x_i}{\ln \left[\ln \left(\frac{4(n-i+1)+3}{4n+1} \right) \right] / \ln \left(\frac{4(n-i)+3}{4n+1} \right)}$$

式中 x 为失效时间, n 为样品数. 统计量 W 渐进地服从自由度为 $(2(r-r_1-1), 2r_1)$ 的 F 分布. 在显著性水平 α 下, 其检验规则为: $W \geq F_\alpha(2(r-r_1-1), 2r_1)$ 时拒绝原假设, 即认为该批数据不是来自威布尔分布的总体, 反之接受. 对三组温度应力下样品失效时间进行威布尔分布的拟合优度检验, 若服从威布尔分布, 同时对威布尔分布的形状参数 m , 尺度参数 η 进行参数估计, 所得数据如表 4 所示.

根据威布尔分布的参数估计同时满足的两个关系, 对上述三组数据进行失效一致性验证:

1) 形状参数 m 服从 $m_{200} = m_{230} = m_{260}$;

2) 尺度参数 η 服从 $\eta_{200}/\eta_{230}/\eta_{260} = \exp\left(\frac{-E_A}{k_B T_{200}}\right) / \exp\left(\frac{-E_A}{k_B T_{230}}\right) / \exp\left(\frac{-E_A}{k_B T_{260}}\right)$.

因此, 可以在初期退化量达到 90% 时判断上述三组样品在不同温度应力下的失效机理没有发生改变.

表4 加速条件下的样品失效时间服从威布尔分布的拟合优度检验结果

	200 °C	230 °C	260 °C
w	0.0983	1.4833	0.1915
$F_{0.1}(8, 10)$	2.38	2.38	2.38
是否接受服从威布尔分布假设	是	是	是
形状参数 m	7.6	7.6386	7.6158
尺度参数 η	1150.6	134.7093	41.6454

5 结论

针对加速实验中失效机理发生改变而导致的无效实验问题, 本文基于温度应力的 Arrhenius 退化模型, 结合威布尔分布模型, 推导了不同应力水平下, 加速实验失效机理一致性与威布尔分布参数的关系, 从而能够在实验初期根据退化数据的分布参数快速判别不同应力水平下失效机理是否一致, 提供了一种实验初期即可快速判定失效机理的方法.

为验证该方法的准确性, 对 390 K 至 420 K 范围内失效敏感参数退化量达到 3% 时的理论退化数据进行威布尔分布参数估计, 在 420 K 下的形状参数与尺度参数均不符合失效机理一致的关系, 判断其在 420 K 下失效机理发生改变. 最后对 MCM 厚膜电阻进行了加速实验, 对初期退化参数进行计算, 其形状参数与尺度参数同时满足判定失效机理一致的两个关系, 从而在实验初期快速判别该加速实验的失效机理一致.

感谢李志国教授、吕长志研究员对本文工作的指导和帮助.

[1] Xue Z Q, Huang S R, Zhang B P, Chen Z 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5002 (in Chinese) [薛正群, 黄生荣, 张保平, 陈朝 2010 物理学报 **59** 5002]
 [2] Wang X H, Wang J H, Pang L, Yuan T T, Luo W J, Liu X Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 177302 (in Chinese) [王鑫华, 王建辉, 庞磊, 袁婷婷, 罗卫军, 刘新宇 2012 物理学报 **61** 177302]
 [3] Zhang F P, Du J M, Liu Y S, Liu Y, Liu G M, He H L 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 057701 (in Chinese) [张福平, 杜金梅, 刘雨生, 刘艺, 刘高旻,

贺红亮 2011 物理学报 **60** 057701]
 [4] Guo C S, Xie X S, Ma W D, Cheng Y H, Li Z G 2006 *J. Semicond.* **27** 560 (in Chinese) [郭春生, 谢雪松, 马卫东, 程尧海, 李志国 2006 半导体学报 **27** 560]
 [5] Hu J M, Barker D B, Dasgupta A, Arora A K 1992 *Proceedings of the Reliability and Maintainability Symposium Las Vegas, NV Jan. 21-23, 1992* p181

- [6] Nelson W 1972 *IEEE T. Reliab.* **R-21** 2
[7] Gu Y 2004 *Reliability Engineering Mathematics* (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) p207 (in Chinese) [顾瑛 2004 可靠性工程数学 (北京: 电子工业出版社) 第 207 页]
[8] Redhead P A 1962 *Vacuum* **12** 203
[9] Pasco R W, Schwarz J A 1983 *Solid-state Electronics* **26** 445
[10] Guo C S, Wan N, Ma W D, Xiong C, Zhang G C, Feng S W 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 128501 (in Chinese) [郭春生, 万宁, 马卫东, 熊聪, 张光沉, 冯士维 2011 物理学报 **60** 128501]

Rapid identification of the consistency of failure mechanism for constant temperature stress accelerated testing

Guo Chun-Sheng[†] Wan Ning Ma Wei-Dong Zhang Yan-Feng
Xiong Cong Feng Shi-Wei

(College of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

(Received 28 November 2011; revised manuscript received 8 November 2012)

Abstract

For avoiding the invalid acceleration experiments caused by the changes of the failure mechanism, the relationship of the failure mechanism consistency and the parameters of degradation data distribution in the early stage under different accelerated stress levels has been derived. Conditions for judging the failure mechanism consistency are also given as follows: firstly, the shape parameters of failure distribution has a uniform distribution $m_i = m, i = 1, 2, 3, \dots$; secondly, the dimension parameter η_i follows the equation $\eta_i = AF_i \cdot \eta$. A method to rapidly discriminate the consistency of failure mechanism under different experimental stresses in the early stage was obtained, and the invalid acceleration experiments caused by the changes of the failure mechanism could be avoided. Finally, theoretical degenerate data in the early stage of the accelerated test and the initial degenerate data of the MCM thick-film resistor were used for estimating, Weibull distribution parameter, and the consistency of failure mechanism degradation was also judged.

Keywords: failure mechanism consistency, constant temperature stress accelerated test, Weibull distribution

PACS: 85.40.-e, 06.30.Gv, 02.50.-r

DOI: 10.7498/aps.62.068502

[†] Corresponding author. E-mail: guocs@bjut.edu.cn