

电子组件温度循环试验研究

曹耀龙, 黄杰

(中国电子科技集团公司第十三研究所, 石家庄 050051)

摘要: 为了使温度循环试验在有效提高电子组件的可靠性方面得以广泛应用, 基于温度循环试验的机理, 对电子组件温度循环试验的关键参数(温度范围、循环次数、保持时间、温变速率、风速)进行了探讨, 给出了这些参数的工程经验选取值。在此基础上, 借助热分析软件分析了温变速率、保持时间和风速三个参数对试验过程的影响并定性分析了三个参数间的关系。最后, 提出了进行温度循环试验时应注意的问题, 强调科学、正确地执行温度循环试验的重要性。

关键词: 电子组件; 温度循环; 温变速率; 保持时间; 风速

中图分类号: TN406 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-353X(2011)06-0487-05

Research of Temperature Cycle Test for Electronic Assemblies

Cao Yaolong, Huang Jie

(The 13th Research Institute, CETC, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: In order to make the temperature cycle test be widely used in effectively improving the reliability of electronic assemblies, based on the mechanism of temperature cycle test, the critical parameters (temperature range, number of cycles, dwell time, temperature rate of change and airflow velocity) of temperature cycle test for electronic assemblies were discussed. And the engineering experience values of these parameters were given. Based on this, the influences of temperature rate of change, dwell time and airflow velocities on test process were analyzed and a qualitative analysis of the relationship between the three parameters was undertaken by using the thermal analyze program. Finally, some key points that should be noticed were adduced when making the temperature cycle tests. The importance of understanding temperature cycle test scientifically and correctly was emphasized.

Key words: electronic assembly; temperature cycle; temperature rate of change; dwell time; airflow velocity

EEACC: 0170N

0 引言

随着科技的发展, 对电子组件可靠性的要求越来越高, 特别是航空、航天等应用领域。为了满足工程的可靠性要求, 一般情况下, 组件在从生产到交付使用前的这段时间内都要进行一系列的环境试验来验证其可靠性。而在这些环境试验中, 最重要也最有效的试验就是温度循环试验。根据美国环境科学学会 (Institute of Environmental Sciences, IES)

的报告, 在各种常用的环境筛选应力中, 温度循环的筛选效益最高, 可达到 77%。因此, 有效地开展温度循环试验对提高电子组件的可靠性意义重大。

本文借助电子组件, 对如何有效开展温度循环试验进行了相关研究。

1 温度循环试验机理

温度循环试验主要是利用不同材料热膨胀系数

的差异, 加强其因温度快速变化所产生的热应力对试件所造成的劣化影响。当电子组件经受温度循环时, 内部出现交替膨胀和收缩, 使其产生热应力和应变。如果组件内部邻接材料的热膨胀系数不匹配, 这些热应力和应变就会加剧, 在具有潜在缺陷的部位会起到应力提升的作用, 随着温度循环的不断施加, 缺陷长大并最终变为故障 (如开裂) 而被发现, 这称为热疲劳。

对于电子组件而言, 其内部元器件一般采用引

脚插入式 (PTH) 或表面贴装式 (SMT) 焊接。焊点在温度循环作用下, 因为热应力和蠕变的交互作用, 导致焊点产生粗大条状组织和孔洞, 随着循环次数的增加, 条状组织持续扩大且孔洞慢慢结合成为微裂缝, 从而导致焊点失效。这种热疲劳失效属于低周疲劳 (low-cycle fatigue) 失效的一种, 多发生于电子组件的内部焊点结合处。图 1 是组件内部元器件焊接引脚在进行温度循环试验时脱焊的示意图^[1]。

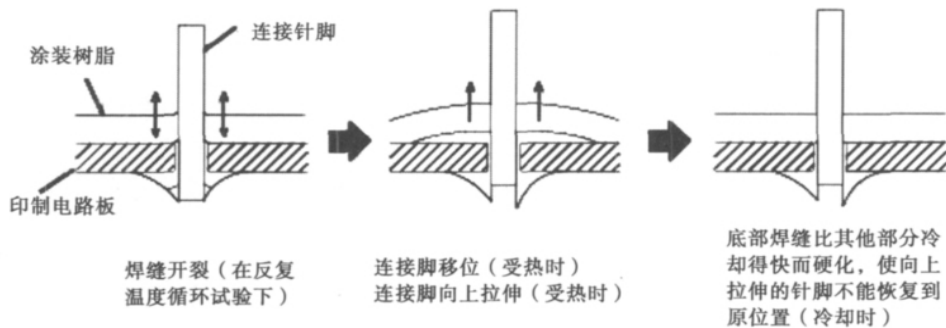


图 1 引脚脱焊机理

Fig. 1 Pin dislocation mechanism

温度循环试验温度的升降一般是在单一温循环箱内以冷热空气循环加热或冷却的方式来达成。试验所用温循环箱效能的优劣对试验结果的准确性有很大影响。温循环箱调节温度的方式是利用温度传感器测得箱内空气或试件的温度, 经过信号转换后再经控制器与设定值比较, 由比较结果决定加热系统或冷却系统是否动作, 从而调节至所需温度。温循环箱内通常有风扇, 以强迫对流方式, 使箱内各点的温度尽可能达到均一。调节的控制方式有两种, 一种是通过试件的温度反馈进行控制, 另一种是通过温循环箱内的空气温度进行控制。对于这两种情况, 试件、箱壁都会与箱内空气交换热量及水汽。其调节情形可归纳为: ①试件、箱壁与箱内空气间只要仍有热量或湿度的交换, 箱内各点的状态将无法达到均一; ②当温循环箱内热量和湿度的交换率一定时, 温循环箱内各点的状态差异将与空气循环速率成反比。

因此, 当温循环箱内各点环境必须维持较小差异时, 应尽可能提供高的空气循环速率, 循环速率越高, 对流系数就越大, 温循环箱内各点的表面温度就

更容易达到均一。

2 温度循环试验关键参数

对于电子产品而言, 周期性温度变化引发的环境应力是由于试件由多种不同材料组成, 其机械性能如杨氏系数、屈服强度、热传导系数、热膨胀系数等存在很大差异, 所以, 当受试件温度产生变化时, 由于所处温度值、相关几何尺寸、材料系数、结构排列等的不同, 其所受到的应力应变值也就不同。典型温度循环试验的剖面图见图 2。

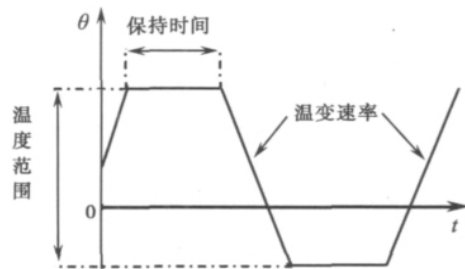


图 2 典型温度循环试验剖面

Fig. 2 Profile of typical temperature cycle test

对温度循环试验而言,影响试验效果的参数主要有:温度范围、循环次数、保持时间、温变速率和风速,下面分别对这几项关键参数进行分析。

2.1 温度范围

温度范围就是高低温极限值的差,原则上越大越好,但要视电子产品的耐热强度而定,可通过传热特性分析,了解在不同温度范围下产品内部温度的分布及变化情况。传热特性分析可以用理论模型进行分析,也可直接用实际条件进行测量,实际工作中,以测量的方法较为方便。测量时需注意产品是不是需加电工作,因为加电工作时,产品温度会有所改变,特别是对于大功率电子产品。当了解了各种温度循环条件下产品内部温度的分布及变化情况,就可选择最大且不损伤正常产品的温度范围。对于组件类产品,温循试验的温度范围一般是在产品工作温度范围的基础上拓宽 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[2],例如,组件的工作温度范围为 $-40\sim+70\text{ }^{\circ}\text{C}$,则该产品的温度循环试验温度范围选择为 $-55\sim+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

从实际工程经验看,电子组件温度循环试验较理想的温度范围是 $-55\sim+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

2.2 循环次数

由于温度交变在试件中引起机械应力,导致随温度交变次数的增加试件内部应力也增加。理论上循环次数越多,加速性越大,但次数太多可能会影响产品的使用寿命,并且会增加成本,所以,一般参考以往的经验或相关的规范,选择一个适当的循环次数,通过试验分析找出最佳的循环次数。

Coffin-Manson 方程建立了热应力引起的低周疲劳 (low-cycle fatigue) 影响模型,其方程为^[3]

$$N_f(\Delta\varepsilon_p)^2 = C_s \quad (1)$$

式中: N_f 为温度循环的次数; $\Delta\varepsilon_p$ 为塑性应变; C_s 为常数。

塑性应变 $\Delta\varepsilon_p$ 与温度循环的温度范围 ΔT 成正比。故式 (1) 可改写为

$$N_f(\Delta T)^2 = C_T \quad (2)$$

式中: ΔT 为温度范围; C_T 为常数。

以加速因子的形式改写式 (2) 为

$$A_{CM} = \frac{N_{fU}}{N_{fA}} = \left(\frac{\Delta T_A}{\Delta T_U}\right)^2 \quad (3)$$

式中: A_{CM} 为循环次数的加速因子; N_{fU} 为至失效为止的循环次数 (使用); N_{fA} 为至失效为止的循环

次数 (加速); ΔT_A 为温度范围 (加速); ΔT_U 为温度范围 (使用)。

从式 (2) 和式 (3) 可以看出,循环次数与温度范围之间存在定量关系。在有些情况下,必须用较少的循环次数来完成试验,这时可以通过拓宽温度范围来实现同样的效果;在另外一些情况下,试验的温度范围不能设置太宽,这时可以通过增加循环次数来达到同样的效果。

从剔除早期失效的角度看,电子组件温度循环试验的循环次数一般在 $5\sim 20$ 次之间选择较为合适。

2.3 保持时间

保持时间取决于试验样品达到周围空气温度时的热平衡时间,应根据试件的热时间常数来选择试件保持所需要的时间。对于较大的产品,内部和表面的热时间常数可能相差很大,应选择最里面或最易损部分的热时间常数来确定。

试验样品的热时间常数取决于周围空气的性质和运动速度。温循箱内试验介质与试件的温度差越小,试验持续的时间越长。试件在某一环境温度下达到温度稳定的时间 (t) 约为热时间常数 τ 的 $3\sim 5$ 倍,一般取 4 倍

$$t = 4\tau \quad (4)$$

热时间常数 τ 为

$$\tau = \frac{mC}{S\lambda} \quad (5)$$

式中: m 为质量,单位 g ; C 为比热,单位 $J/(g\cdot^{\circ}\text{C})$; S 为散热面积,单位 cm^2 ; λ 为散热系数,单位 $W/(\text{cm}^2\cdot^{\circ}\text{C})$ 。

由于散热系数与试件材料、形状、周围介质的性质及运动速度有关,因此通过计算较难确定,一般情况下通过试验来获取。

根据工程经验,对于铝制箱体封装且尺寸小于 $10\text{ cm}\times 10\text{ cm}\times 2\text{ cm}$ 的电子组件,保持时间选择 30 min 即可;对于一些较大的组件产品,保持时间要达到 1 h ,甚至更长,这样才能保证试件温度响应与试验温度之差控制在要求的范围内。

部分军用标准是根据受试样品的重量来确定保持时间,例如 GJB360A 和美军标 MIL-STD-202G,标准中规定的极限保持时间 (t_{dwell}) 与受试样品质量 (m) 之间的关系如表 1 所示。

表 1 质量与时间的关系

Tab. 1 Relationship between molarity and time

m/kg	t_{dwell}/h
$m < 0.028$	0.25
$0.028 \leq m \leq 0.136$	0.5
$0.136 \leq m \leq 1.36$	1
$1.36 \leq m \leq 13.6$	2
$13.6 \leq m \leq 136$	4
$m \geq 136$	8

2.4 温变速率

一般来说, 温变速率越大, 试验效果越好, 但是由于受到温循箱内风速及试件自身热容量的影响, 试件的温度响应与温循箱的热输出并不一致。研究表明^[4], 温度循环的试验强度并不总是随着温变速率的提高而增大, 当温变速率达到某一特定值后, 再增大温变速率对环境应力试验的收效甚微, 此时, 试件对温度变化的响应不敏感, 试件的温度变化明显滞后于试验箱的温度变化。

当温循箱的冷却设备是以空气循环方式冷却时, 其温变速率将被限制在 5 ~ 10 °C/min, 若温循箱的冷却设备是以液氮来冷却时, 其温变速率可达到 25 ~ 40 °C/min。对于组件产品, 国外的经验是在 5 ~ 30 °C/min 间选择温变速率。

2.5 风速

风速与温度循环试验的各参数密切相关, 对于温循箱的升降温曲线有很大的影响, 较高的风速可以达到较高的温变速率, 并且可以使试件温度的均匀度提高。

对于组件产品, 要使受试件的温度紧随温循箱中空气温度的变化, 风速一般不低于 4.57 m/s (15 f/s)。

3 温循试验参数间的影响分析

温变速率 (v_{change})、保持时间 (t_{dwell})、风速 ($v_{airflow}$) 这三个参数密切相关, 对试验效果也相互影响。

通过 CINDA 有限差分热分析软件对典型组件产品的温循试验进行瞬态分析^[5]。试验条件如表 2 所示 (温度范围为 -55 ~ +85 °C), 仿真剖面见图 3 ~ 6, 图中实线表示组件表面的温度响应。

表 2 温循试验输入条件

Tab. 2 Test condition of temperature cycle test

序号	$v_{change} / (°C \cdot min^{-1})$	t_{dwell} / min	$v_{airflow} / (m \cdot s^{-1})$
条件 1	15	5	1.52
条件 2	30	5	1.52
条件 3	30	60	1.52
条件 4	30	30	9.14

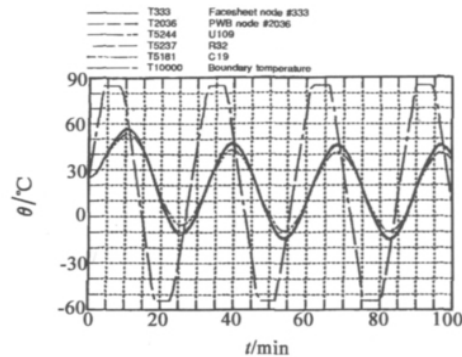


图 3 条件 1 的剖面
Fig. 3 Profile of condition one

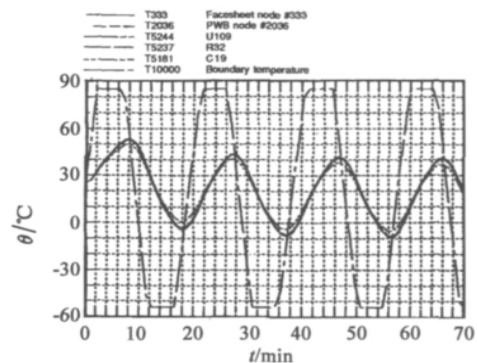


图 4 条件 2 的剖面
Fig. 4 Profile of condition two

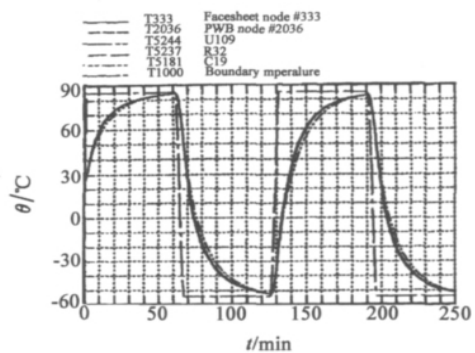


图 5 条件 3 的剖面
Fig. 5 Profile of condition three

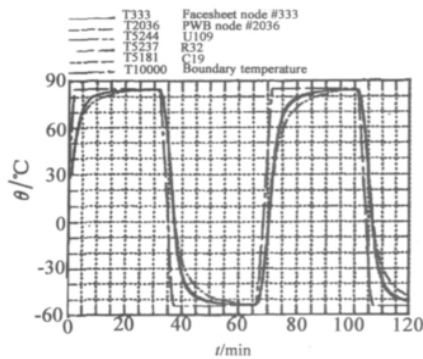


图6 条件4的剖面

Fig. 6 Profile of condition four

从仿真剖面可以看出:

①当采用较低风速和较短保持时间时, 组件的极限温度并未达到试验介质(空气)的极限温度, 而且组件的温变速率也未达到试验介质(空气)的温变速率, 也就是说, 组件的温度响应和试验介质(空气)不一致, 达不到试验的目的。

②当风速较低、保持时间较短时, 单纯提高试验的温变速率, 组件的温度响应仍跟不上试验介质(空气)的变化, 同样无法达到试验的目的。

③显而易见, 提高试验过程中组件极限温度最简单的方式就是延长保持时间, 虽然组件温度的响应比试验介质(空气)慢, 只要保持时间够长, 组件的极限温度总会达到试验介质(空气)的极限温度。

④单纯延长保持时间对提升组件的温变速率效果不明显, 而温循箱内的风速对组件的温变速率有较大影响, 较高的风速可以使组件在更短的时间内达到试验介质(空气)的极限温度, 从而提高了组件的温变速率, 使其与试验介质(空气)的温变速率接近。

综上所述, 在进行温度循环试验时, 应根据组件产品特点, 结合具体试验设备的能力, 综合考虑试验的温变速率、保持时间和风速, 只有这样才能获得满意的试验效果, 达到预期试验目的。

4 温度循环试验应注意的问题

进行温度循环试验时, 除了要考虑上述的几个关键参数外, 还有一些问题需注意, 总结如下:

①温循箱内空间容积与受试件体积的比值应不小于5:1, 使温循箱有足够的热容量。此外, 箱内受试件的摆放位置不能阻碍空气的对流, 以免使得温循箱的效能降低。

②如果从常温先进入高温, 然后从高温转入低温, 按这一做法, 试验结束时产品正处于从低温到常温的过程。此时将样品取出, 由于产品本身的温度一般要低于环境温度, 往往在其内外表面产生凝露, 造成对受试产品的不良影响, 因此一般需放入50℃左右的高温箱中恢复, 从而使试验周期加长。因此, 在进行试验时, 先从低温开始, 这样, 试验结束时, 样品正处于从高温到常温的过程, 从而避免在表面产生凝露。

③温循箱的测试孔应适当地加以密封, 防止外部空气涌入箱内, 造成对受试件的不良影响。

5 结语

电子组件是介于元器件和整机之间的一类产品, 有着非常广泛的应用范围。对于电子组件而言, 温度循环试验是最有效的试验之一, 因此, 正确、有效地开展此项试验意义重大, 值得工程技术人员深入研究和实践。本文正是基于此目的, 对电子组件温度循环试验的关键参数进行了简要探讨, 分析了几个参数间的影响, 提出了几个试验时应注意的问题, 供同行进行深入研究时参考。

参考文献:

- [1] KIN Y, IZUMI J. What is environmental testing [R]. Espec Technology Report, 1997, 3: 1-10.
- [2] PARKER T P, WEBB C W. A study of failure identified during board level environmental stress testing [J]. IEEE Transactions on Components, Hybrids and Manufacturing Technology, 1992, 15(6): 1086-1092.
- [3] NORRIS K C, LANDZBERG A H. Reliability of controlled collapse interconnections [J]. IBM Journal of Research and Development, 1969, 13(3): 266-271.
- [4] 梁雪仪. 温度循环筛选剖面的剪裁方法 [J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2002(5): 35-38.
- [5] KALLIS J M, HAMMOND W K, CURRY E B. Stress screening of electronic modules: investigation of effects of temperature rate of change [C] // Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium. California, USA, 1990: 59-66.

(收稿日期: 2011-01-17)

作者简介:

曹耀龙(1978—), 男, 河北正定人, 工程师, 多年从事电子产品的检验技术研究。

