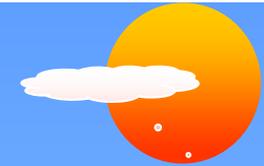


# 第八讲 电子产品可靠性试验

主讲：潘开林 博士



# 内容提要

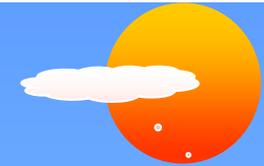
8.1 电子产品可靠性试验基础

8.2 可靠性筛选试验

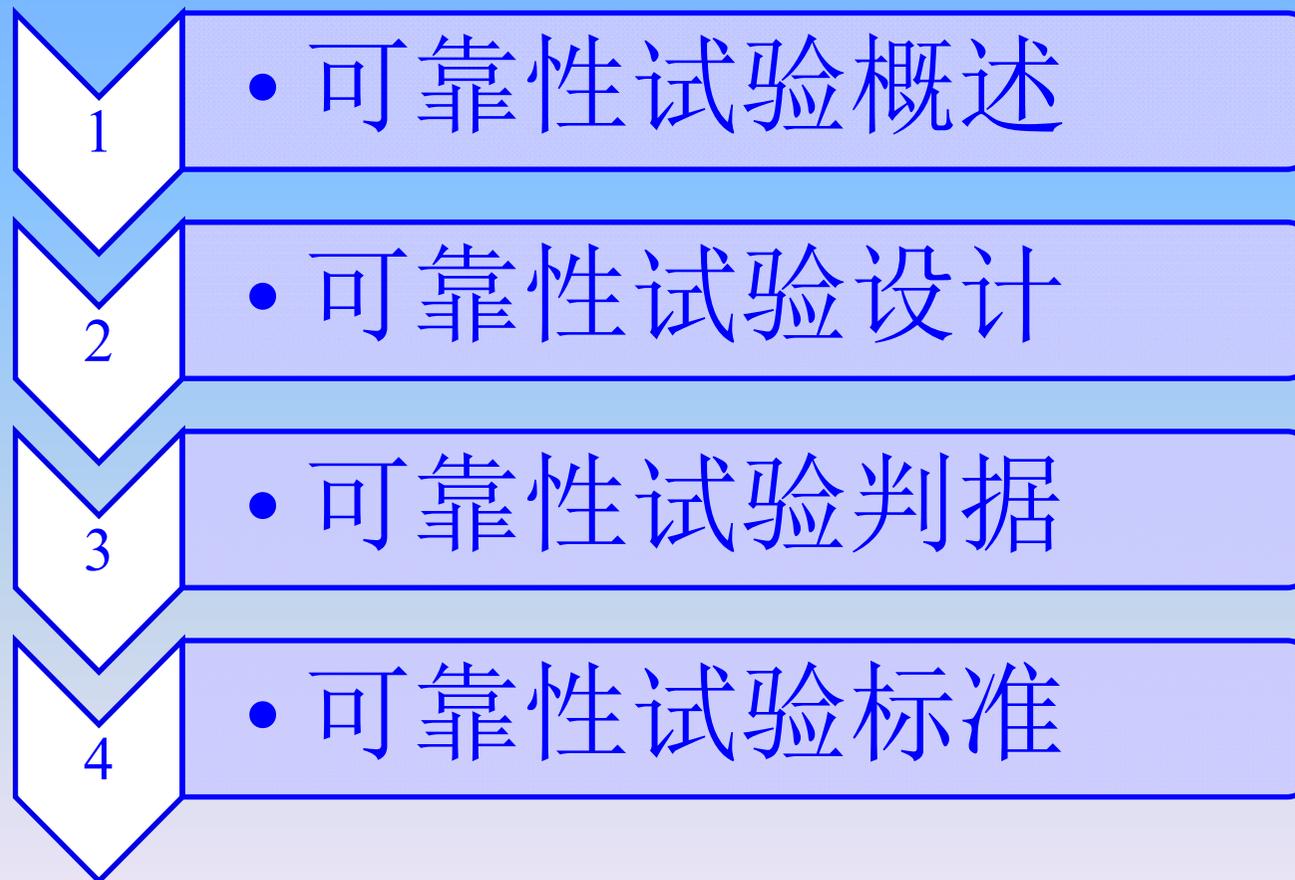
8.3 可靠性寿命试验

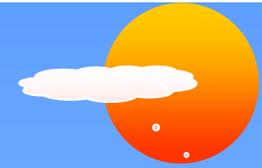
8.4 主要的电子组件可靠性寿命试验

8.5 环境试验



## 8.1 电子产品可靠性试验基础





# 1. 可靠性试验概述

## ➤ 定义

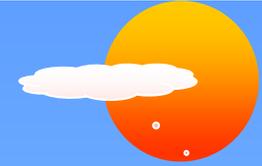
可靠性试验是评价产品可靠性水平的重要手段。目前把了解、评价、考核、分析和提高产品可靠性而进行的试验，统称为可靠性试验。

## ➤ 目的

## ➤ 内容

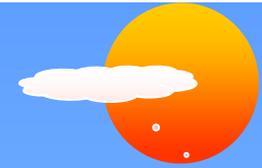
## ➤ 步骤

## ➤ 分类



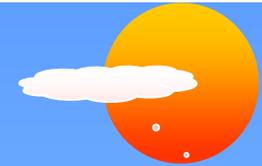
## 可靠性试验目的

- (1) 通过试验来确定电子元器件的可靠性特性值。试验暴露出的在设计、材料、工艺阶段存在的问题和有关数据，对设计者、生产者和使用者都是非常有用的。
- (2) 通过可靠性鉴定试验，可以全面考核电子元器件是否已达到预定的可靠性指标。这是电子元器件新品设计定型必须进行的步骤。
- (3) 通过各种可靠性试验，了解产品在不同的工作、环境条件下的失效规律，摸准失效模式，搞清失效机理，以便采取有效措施，提高产品可靠性。



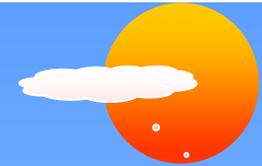
# 可靠性试验内容

阶段	目的	内容	样品
研究开发	掌握可靠性水平的试验	标准试验 加速试验 极限试验 使用试验	扩散评价TEG 组装评价TEG 基本电路TEG 产品
	标准化探讨用的试验	模拟试验 极限试验	TEG 产品
大量生产	可靠性保证试验	形式试验 认定试验 批量保证试验	产品
	筛选试验	加速试验	产品



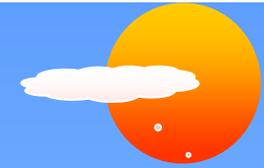
# 可靠性试验步骤

- ◆ 明确试验目的
- ◆ 确定加速试验项目
- ◆ 实验设计与试验样件制作
- ◆ 实验测试
- ◆ 试验结果分析（统计、回归、方差分析）
- ◆ 可靠性分析评价

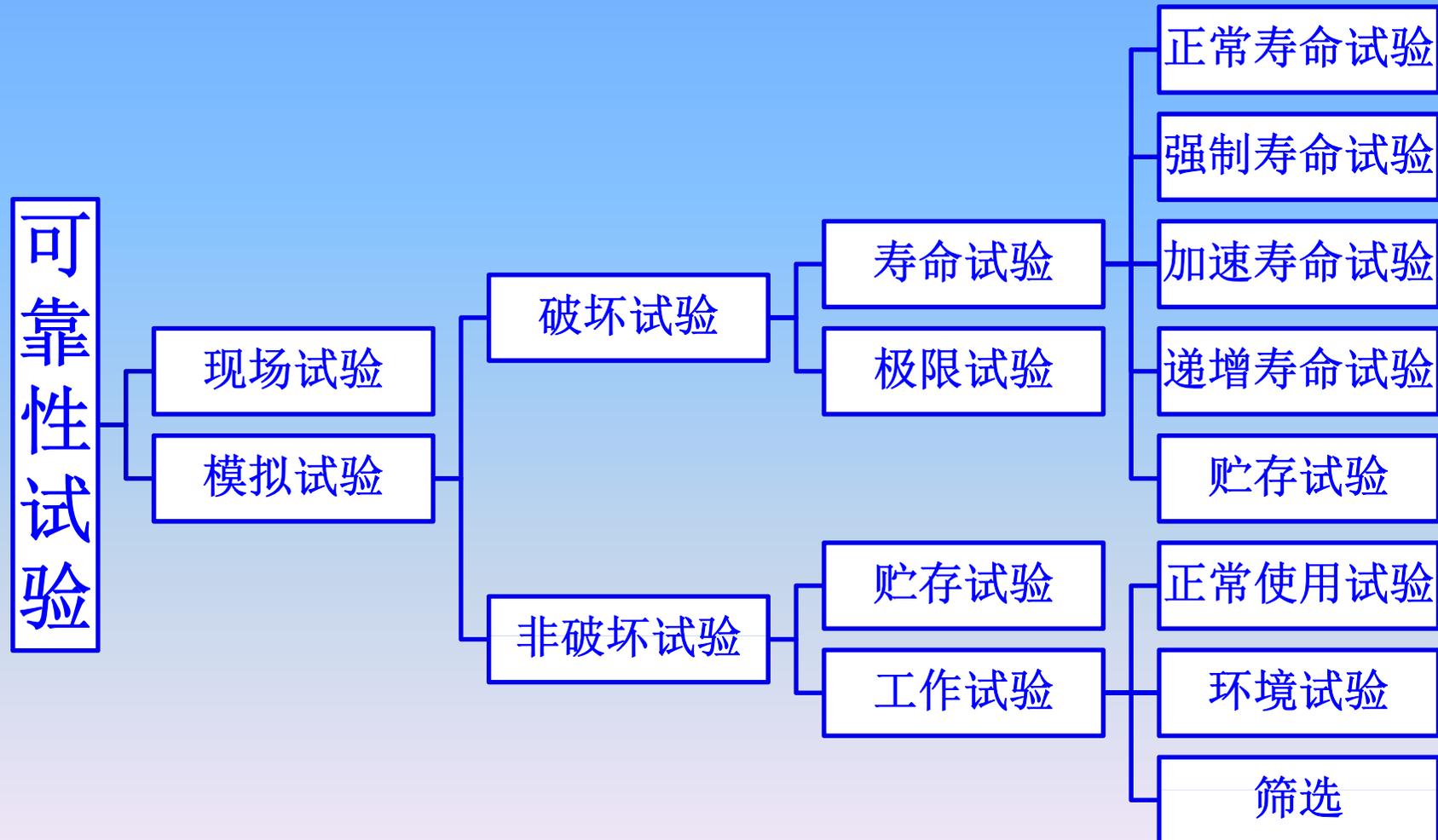


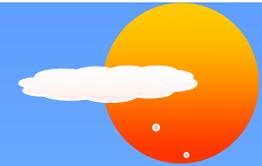
## 可靠性试验的分类

按试验目的来分，可分为统计或验证试验—可靠性鉴定试验、可靠性验收试验；工程试验—环境应力筛选试验、可靠性增长试验。按试验地点来分，可分为现场试验和模拟试验（实验室试验）。按试验项目来分，则可分为环境试验、寿命试验、筛选试验、鉴定试验、验收试验等。



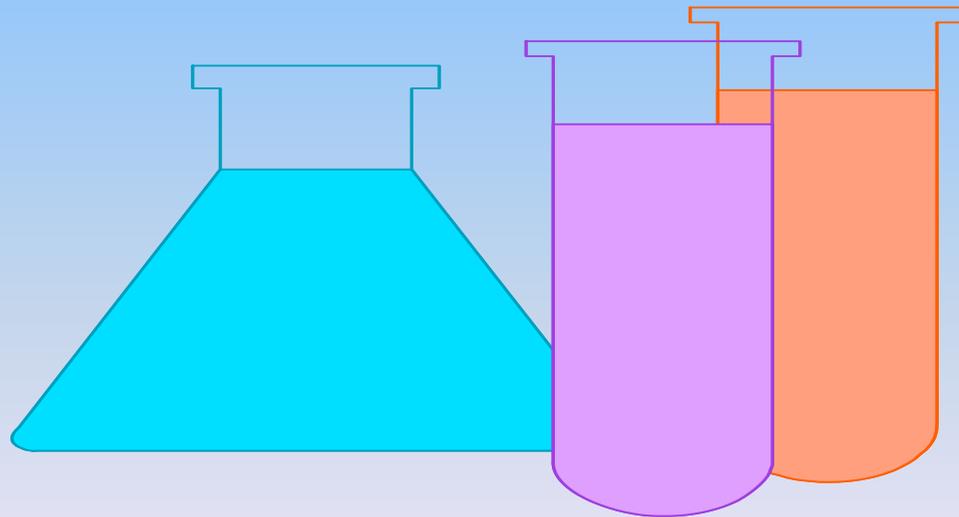
# 可靠性试验的分类

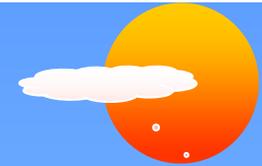




## 2. 可靠性试验设计 (DOE)

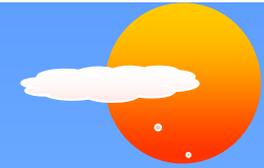
- 试验设计 (DOE) 是一种科学方法；指所有的有控制的输入及有计划的结果分析的试验。
- 试验设计的作用
- 正交实验设计
- 菊花链设计





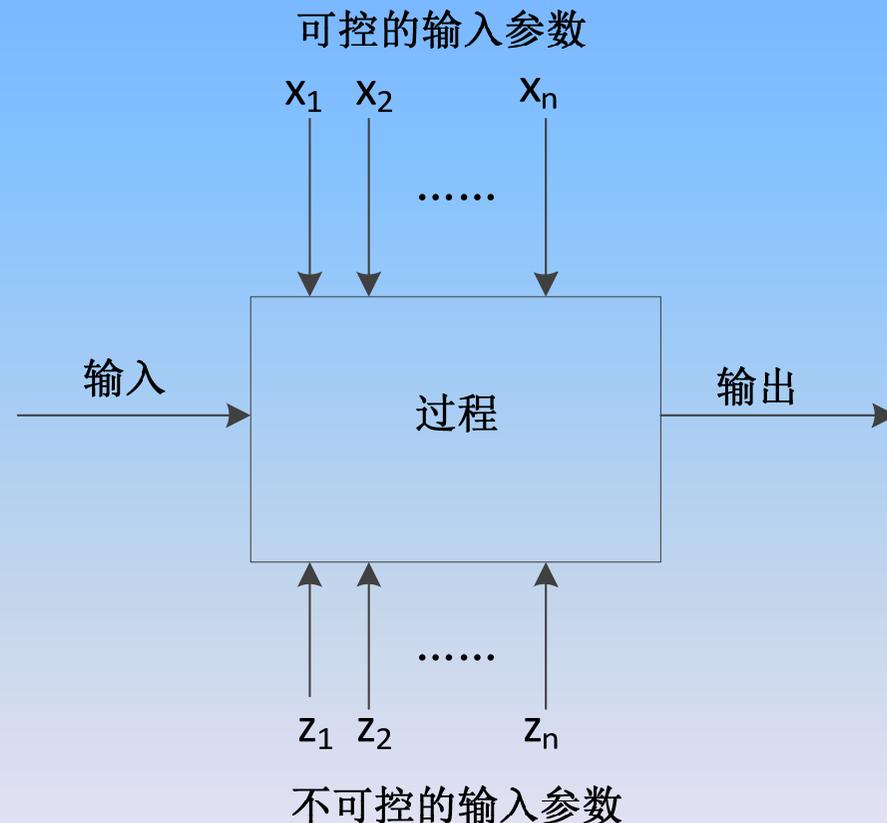
# 试验设计的作用

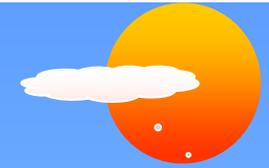
- ① 进行过程变量研究
- ② 变量的优化设置
- ③ 建立可靠的公差
- ④ 发现低成本的解决方案
- ⑤ 减少过程变化
- ⑥ 将过程均值逼近目标值
- ⑦ 缩短制造周期
- ⑧ 消除缺陷
- ⑨ 提升产品可靠性



## 可靠性试验设计在生产制造过程中的位置

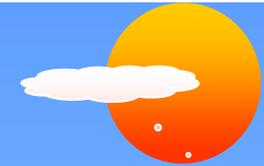
- 试验设计（Design of Experiment）是一系列试验及分析方法集，通过有目的地改变一个系统的输入来观察输出的变化情况。
- 右图为一个系统示意图。图中的系统既可以看作是一个产品开发过程，也可以看作是一个生产过程。





## DOE术语

- **响应(Response)**: 试验输出的结果
- **因子(Factor)**: 试验过程中的不同输入变量 (温度、时间、粘度等)
- **水平(Level)**: 试验中对因子的不同设定值. (温度: **10度**、**20度**、**30度**)
- **干扰(Noise)**: 人不可控制的事物
- **Blocking**: 将干扰最小化的方法
- **主要影响(Main Effect)**: 对单个因子而言, 从一个水平到另一个水平的变化对输出的平均影响
- **Interaction(交互作用)**: 两个因子合起来对总输出的影响将高于两个单独的因子造成的影响
- **重复 (Replication)**: 以随机次序重新做一次试验
- **随机化 (Randomization)**: 以一种无固定模式的次序做试验



# 正交试验

## 为什么要进行正交试验:

- ▶ 在实际生产中，影响试验的因素往往是多方面的，我们要考察各因素对试验影响的情况。在多因素、多水平试验中，如果对每个因素的每个水平都互相搭配进行全面试验，需要做的试验次数就会很多。比如对3因素7水平的试验，如果3因素的各个水平都互相搭配进行全面试验，就要做 $7^3=343$ 次试验，对6因素7水平，进行全面试验要做 $7^6=117649$ 次试验。这显然是不经济的。我们应当在不影响试验效果的前提下，尽可能地减少试验次数。正交设计就是解决这个问题的有效方法。正交设计的主要工具是正交表。

## 正交试验表的结构

要进行试验设计，必须了解试验表的结构，下面以  $L_8(2^7)$  为例介绍试验表的结构

$L_8(2^7)$  正交表

8行表示不同因子水平的组合

1、2表示各因子的两种水平

试验	因素						
	A	B	C	D	E	F	G
1	1	1	1	2	2	1	2
2	2	1	2	2	1	1	1
3	1	2	2	2	2	2	1
4	2	2	1	2	1	2	2
5	1	1	2	1	1	2	2
6	2	1	1	1	2	2	1
7	1	2	1	1	1	1	1
8	2	2	2	1	2	1	2

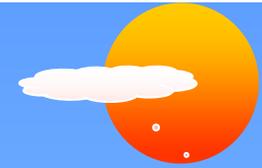
7列表示最多7个因子

每个因子出现机会均等

任意2列间组合数字各出现2次，其搭配是均等的

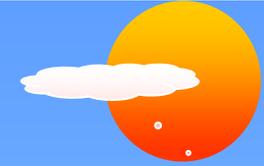
该表为7因素，2水平，运行8次的正交试验表，具有以下特点：

- 1、有8个行，表示8种试验运行的不同因素水平组合。
- 2、有7个列，表示最多可允许有7个因素。
- 3、表中心的“1”、“2”表示各因素的两种水平。
- 4、每个因素的每个水平各出现4次，出现机会完全均等。
- 5、表中任意两列间的组合数字各出现2次，其搭配是均衡的。



# 正交表的两条重要性质:

- 1) 每列中不同数字出现的次数是相等的, 如 $L_9(3^4)$ 中, 每列中不同的数字是1, 2, 3, 它们各出现3次;
- 2) 在任意两列中, 将同一行的两个数字看成一个有序数对, 则每一数对出现的次数是相等的, 如 $L_9(3^4)$ 中有序数对共有9个: (1,1), (1,2), (1,3), (2,1), (2,2), (2,3), (3,1), (3,2), (3,3), 它们各出现一次。  
所以, 用正交表来安排试验时, 各因素的各种水平的搭配是均衡的, 这是正交表的优点。



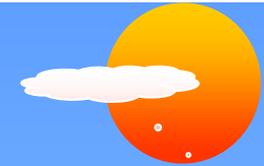
## 实验因素表

为了实验芯片重量、焊盘直径、模板厚度对可靠性的影响，进行如下表的规划。

水平 \ 因素	芯片重量 (g)	焊盘直径 (mm)	钢网厚度 (mm)
1	G1	D1	S1
2	G2	D2	S2
3	G3	D3	

如果各因素在其参数范围内**平均分布**，称为**均匀正交**；否则非均匀正交。

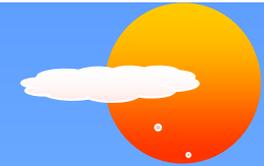
样本数： $G_n \times D_n \times S_n \times N$ （样本数）+ 显微检测数+其它



### 例1: (单指标的分析方法)

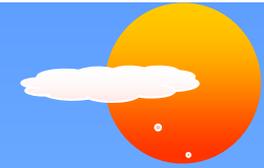
某炼铁厂为提高铁水温度，需要通过试验选择最好的生产方案经初步分析，主要有3个因素影响铁水温度，它们是焦比、风压和底焦高度，每个因素都考虑3个水平，具体情况见表。问对这3个因素的3个水平如何安排，才能获得最高的铁水温度？

因素 水平	焦比A	风压B	底焦高度C
1	1:16	170	1.2
2	1:18	230	1.5
3	1:14	200	1.3



解：如果每个因素的每个水平都互相搭配着进行全面试验，必须做试验 $3^3=27$ 次。现在我们使用 $L_9(3^4)$ 正交表来安排试验。

因素			
编号	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2



我们按选定的9个试验进行试验，并将每次试验测得的铁水温度记录下来：

试验编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
铁水温度(°C)	1365	1395	1385	1390	1395	1380	1390	1390	1410

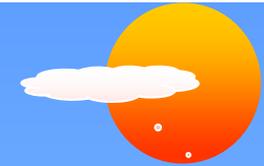
为了便于分析计算，我们把这些温度值和正交表列在一起组成一个新表。另外，由于铁水温度数值较大，我们把每一个铁水温度的值都减去1350，得到9个较小的数，这样使计算简单。

试验编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
铁水温度(°C)	15	45	35	40	45	30	40	40	60



分析表

因素 编号	1 A	2 B	3 C	铁水温度 (°C)	铁水温度值 减去1350
1	1	1	1	1365	15
2	1	2	2	1395	45
3	1	3	3	1385	35
4	2	1	2	1390	40
5	2	2	3	1395	45
6	2	3	1	1380	30
7	3	1	3	1390	40
8	3	2	1	1390	40
9	3	3	2	1410	60
$K_1$	95	95	85		
$K_2$	115	130	145		
$K_3$	140	125	120		
$k_1(=K_1/3)$	31.7	31.7	28.3		
$k_2(=K_2/3)$	38.3	43.3	48.3		
$k_3(=K_3/3)$	46.7	41.7	40.0		
极差	15.0	11.7	20.0		
最优方案	A3	B2	C2		



解释:

$K_1$  这一行的3个数分别是因素A, B, C的第1水平所在的试验中对应的铁水温度之和;

$K_2$  这一行的3个数分别是因素A, B, C的第2水平所在的试验中对应的铁水温度之和;

$K_3$  这一行的3个数分别是因素A, B, C的第3水平所在的试验中对应的铁水温度之和;

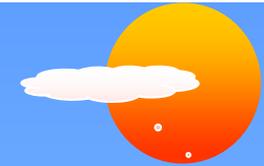
$k_1, k_2, k_3$  这3行的3个数, 分别是 $K_1, K_2, K_3$  这3行中的3个数的平均值;

极差是同一列中,  $k_1, k_2, k_3$  3个数中的最大者减去最小者所得的差。极差越大, 说明这个因素的水平改变时对试验指标的影响越大。

极差最大的那一列, 就是那个因素的水平改变时对试验指标的影响最大, 那个因素就是我们要考虑的主要因素。

通过分析可以得出: 各因素对试验指标(铁水温度)的影响按大小次序应当是C(底焦高度) A(焦比) B(风压); 最好的方案应当是C2A3B2。与此结果比较接近的是第9号试验。

为了最终确定上面找出的试验方案是不是最好的, 可以按这个方案再试验一次, 并同第9号试验相比, 取效果最佳的方案。



## 例2: (多指标的分析方法---- 综合平衡法)

为提高某产品质量，要对生产该产品的原料进行配方试验。要检验3项指标：抗压强度、落下强度和裂纹度，前2个指标越大越好，第3个指标越小越好。根据以往的经验，配方中有3个重要因素：水分、粒度和碱度。它们各有3个水平。试进行试验分析，找出最好的配方方案。

水平 \ 因素	因素		
	A 水分 (%)	B 粒度 (%)	C 碱度
1	8	4	1.1
2	9	6	1.3
3	7	8	1.5

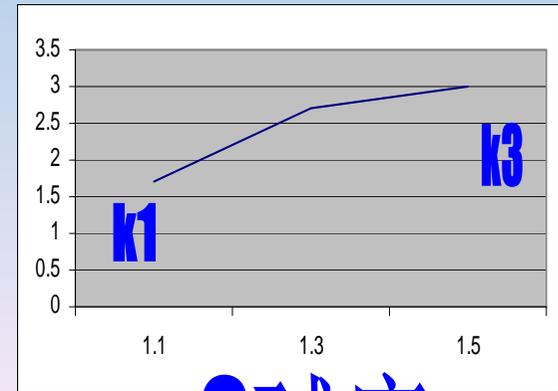
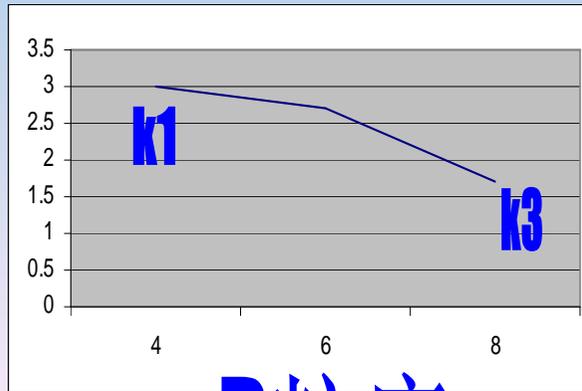
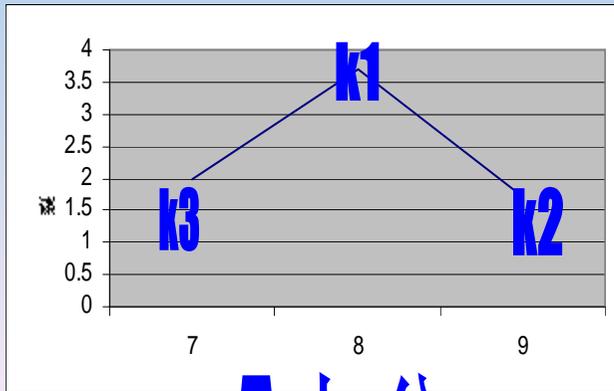
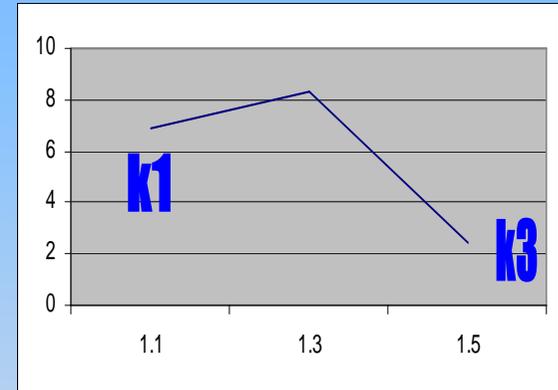
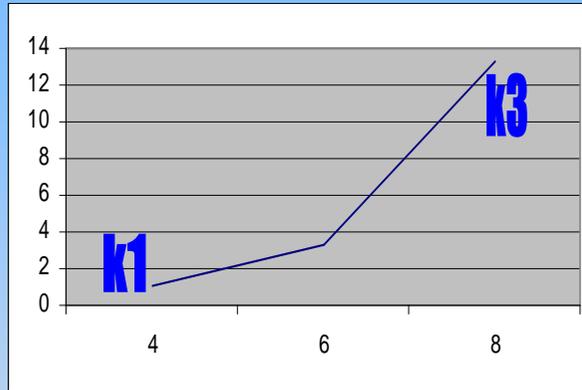
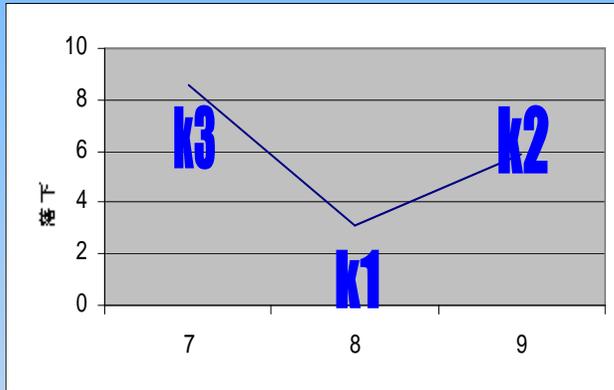
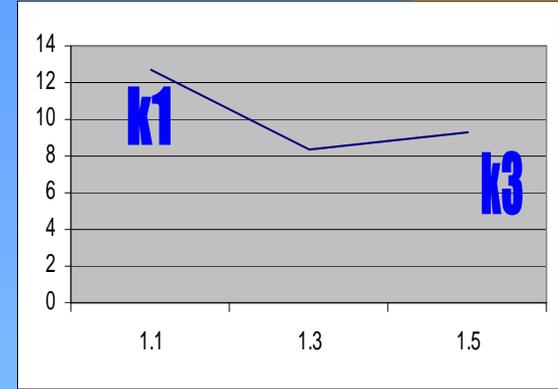
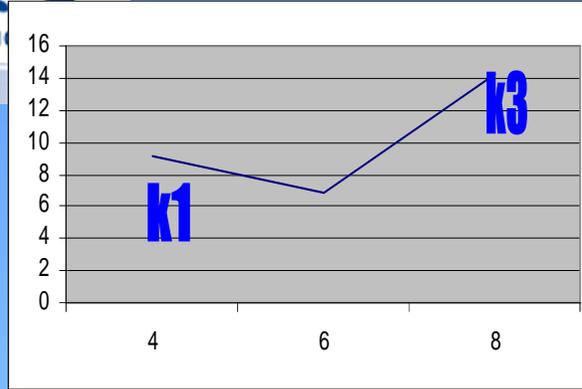
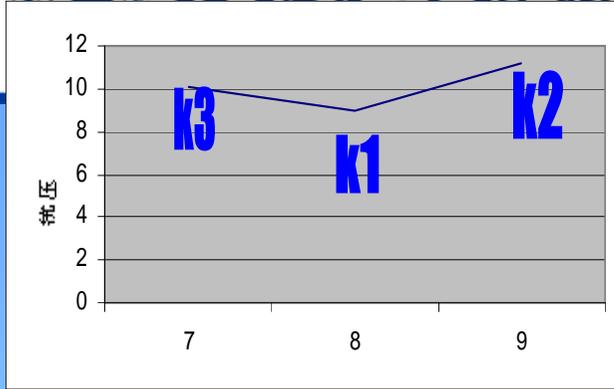


# 选用正交表 $L_9(3^4)$ 来安排试验。

试验号 \ 因素	1	2	3	各指标的试验结果		
	A	B	C	抗压强度	落下强度	裂纹度
1	1	1	1	11.5	1.1	3
2	1	2	2	4.5	3.6	4
3	1	3	3	11.0	4.6	4
4	2	1	2	7.0	1.1	3
5	2	2	3	8.0	1.6	2
6	2	3	1	18.5	15.1	0
7	3	1	3	9.0	1.1	3
8	3	2	1	8.0	4.6	2
9	3	3	2	13.4	20.2	1

因素 试验号		1	2	3	各指标的试验结果		
		A	B	C	抗压强度	落下强度	裂纹度
1		1	1	1	11.5	1.1	3
2		1	2	2	4.5	3.6	4
3		1	3	3	11.0	4.6	4
4		2	1	2	7.0	1.1	3
5		2	2	3	8.0	1.6	2
6		2	3	1	18.5	15.1	0
7		3	1	3	9.0	1.1	3
8		3	2	1	8.0	4.6	2
9		3	3	2	13.4	20.2	1
抗压强度	K <sub>1</sub>	27.0	27.5	38.0			
	K <sub>2</sub>	33.5	20.5	24.9			
	K <sub>3</sub>	30.4	42.9	28.0			
	k <sub>1</sub>	9	9.2	12.7			
	k <sub>2</sub>	11.2	6.8	8.3			
	k <sub>3</sub>	10.1	14.3	9.3			
	极差	2.2	7.5	4.4			
最优方案	A <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	C <sub>1</sub>				
裂纹度	K <sub>1</sub>	11	9	5			
	K <sub>2</sub>	5	8	8			
	K <sub>3</sub>	6	5	9			
	k <sub>1</sub>	3.7	3.0	1.7			
	k <sub>2</sub>	1.7	2.7	2.7			
	k <sub>3</sub>	2.0	1.7	3.0			
	极差	2.0	1.3	1.3			
最优方案	A <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	C <sub>1</sub>				
落下强度	K <sub>1</sub>	9.3	3.3	20.8			
	K <sub>2</sub>	17.8	9.8	24.9			
	K <sub>3</sub>	25.9	39.9	7.3			
	k <sub>1</sub>	3.1	1.1	6.9			
	k <sub>2</sub>	5.9	3.3	8.3			
	k <sub>3</sub>	8.6	13.3	2.4			
	极差	5.5	12.2	5.9			
最优方案	A <sub>3</sub>	B <sub>3</sub>	C <sub>2</sub>				

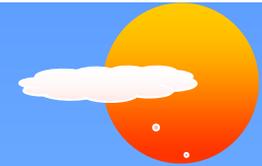




**A**水分

**B**粒度

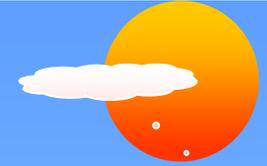
**C**碱度



## 分析:

- 1) 粒度B对抗压强度和落下强度来讲，极差都是最大的，说明它是影响最大的因素，而且以取8为最好；对裂纹度来讲，粒度的极差不是最大，不是影响最大的因素，而且也以取8为最好；
- 2) 碱度C对三个指标的极差都不是最大的，是次要的因素。对抗压强度和裂纹度来讲，碱度取1.1最好；对落下强度，取1.3最好，但取1.1也不是太差，综合考虑碱度取1.1；
- 3) 水分A对裂纹度来讲是最大的因素，以取9为最好；但对抗压强度和落下强度来讲，水分的极差都是最小的，是影响最小的因素。综合考虑水分取9；

最后较好的试验方案是 $B_3C_1A_2$



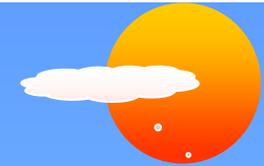
# 菊花链设计

**菊花链**：将一定数量的焊点按一定规律连接起来的“导体电路”，其目的是依据其电阻的变化甚至开路来判断焊点的失效。

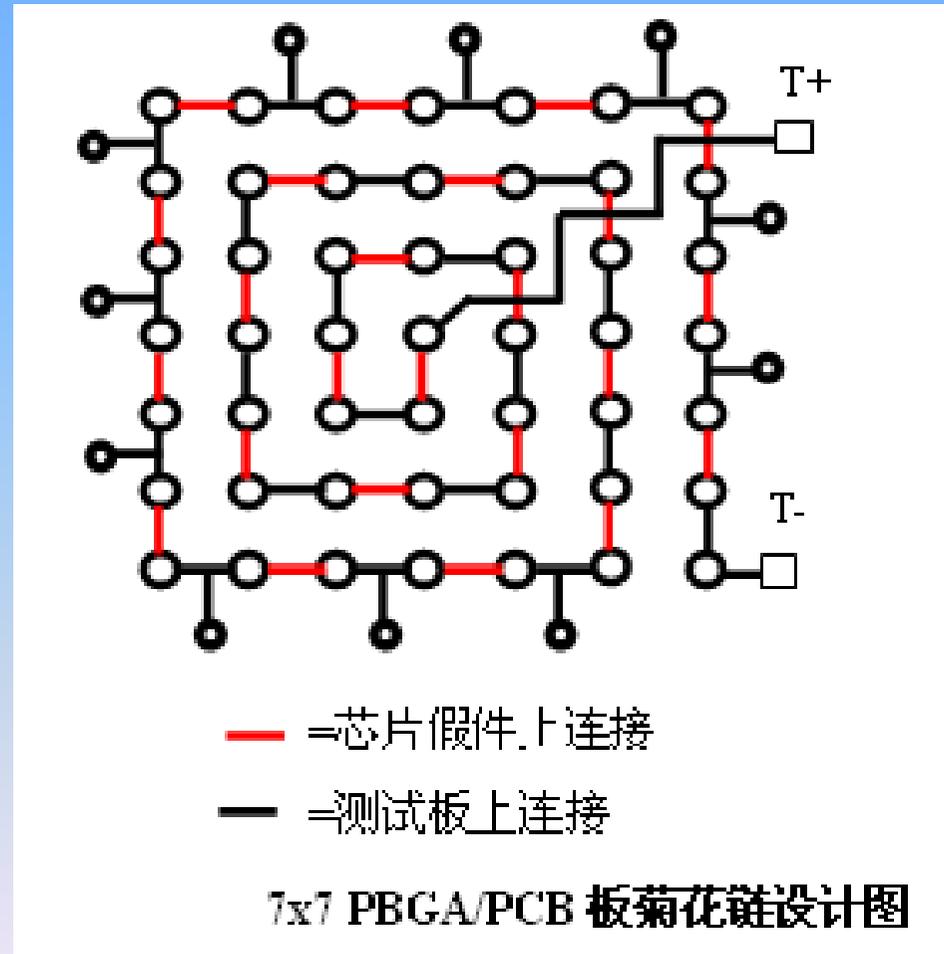
## 设计要求：

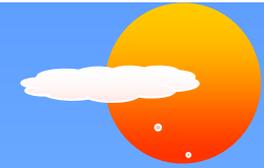
对于一般的器件，可以一个器件就一条菊花链；

对于BGA/CSP器件，一般包括3~5个菊花链，一是最危险的对角线上焊点，二是最外层焊点，三是芯片对应的下方焊点，四是最内层焊点，五是已知的最危险的焊点。

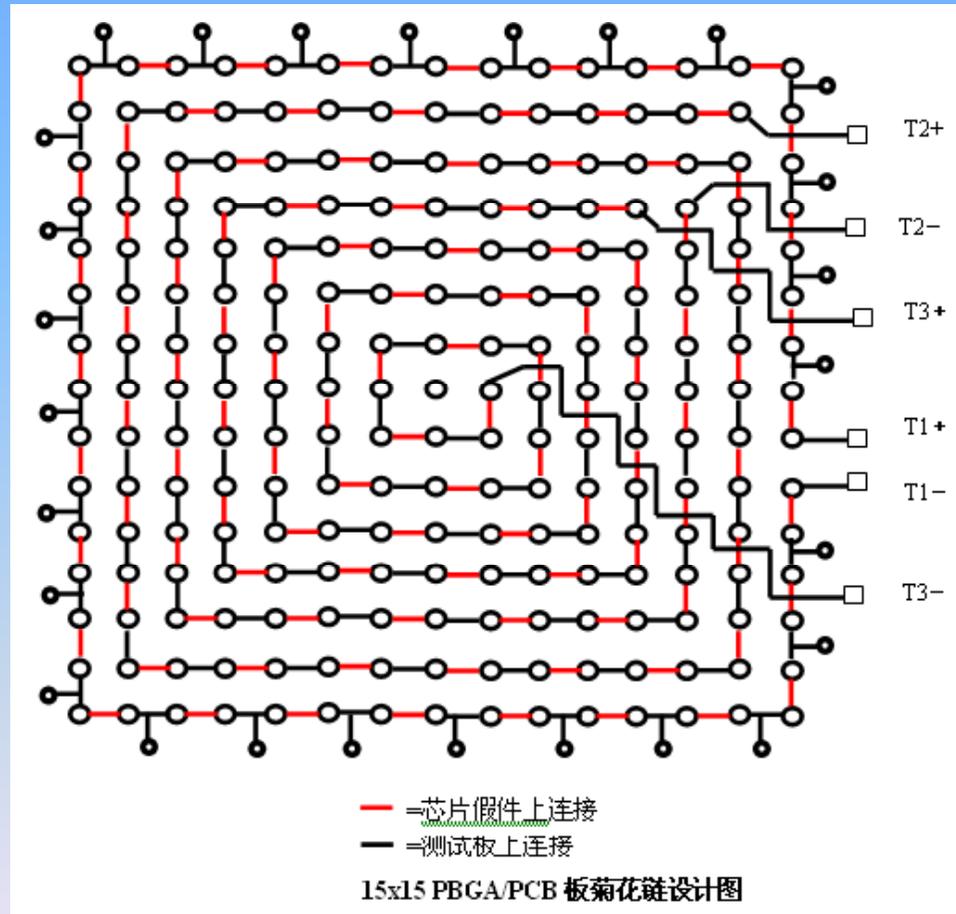


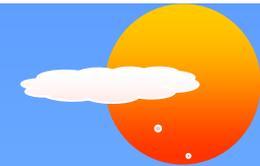
# 菊花链实验设计例1



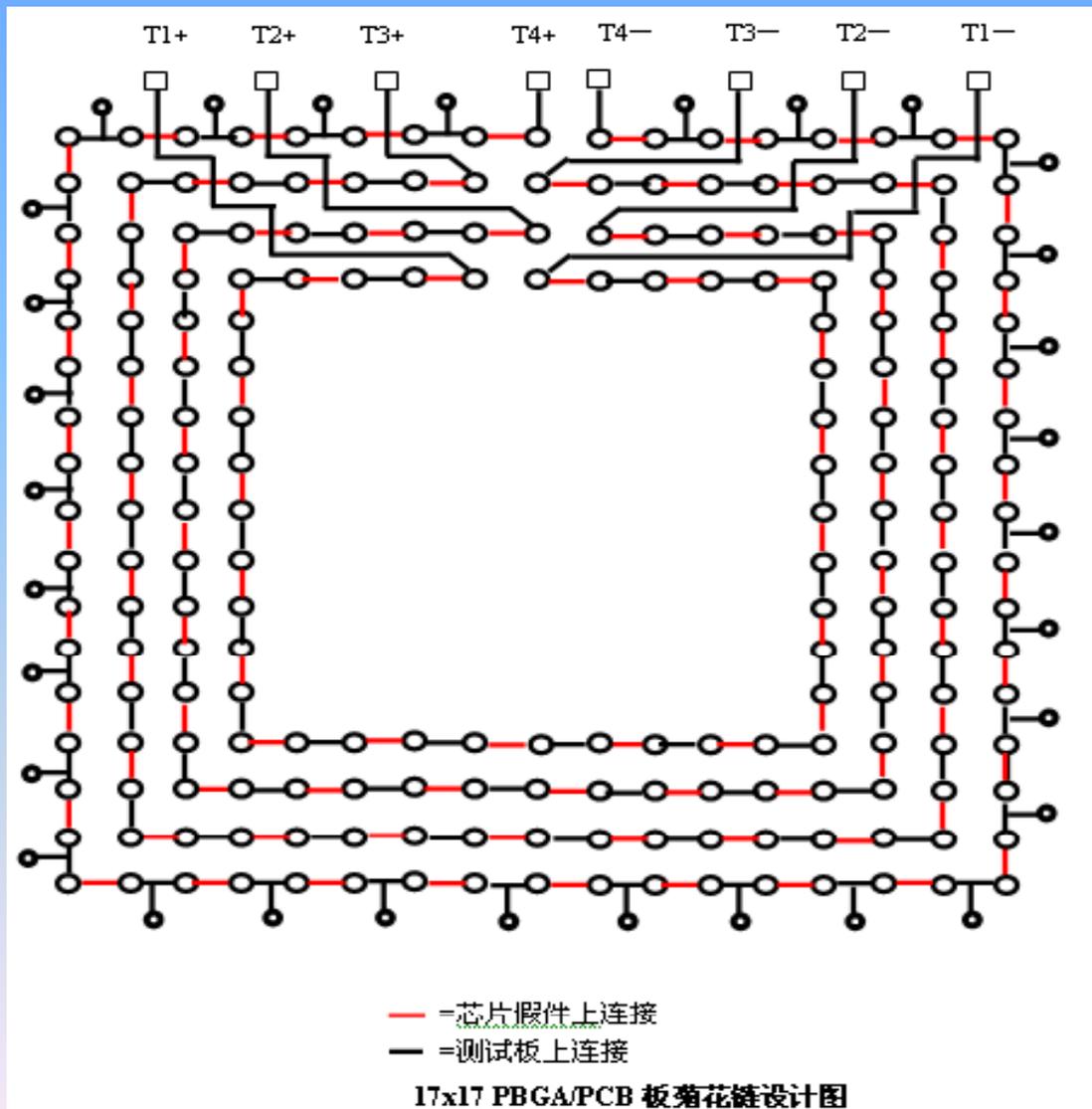


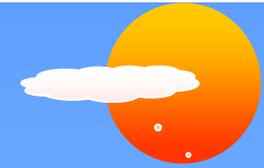
# 菊花链实验设计例2





# 菊花链实验设计例3

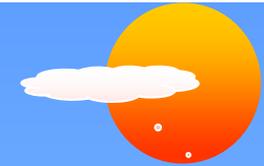




## 3. 可靠性试验判据

在进行可靠性试验前，首先要确定好失效判据。由于失效的判据不同，试验结果也会有不同，为此必需做出合理的失效定义(制定失效判据)。

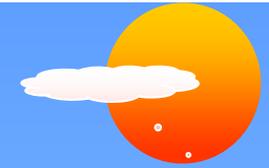
失效一般分有两种，即致命性失效和非致命性失效。致命性失效如断路、短路和严重丧失功能。非致命性失效如漂移失效(漏电流、互连线电阻增加、电源电压下降)。这将取决于退化的程度。退化的程度不同，失效形式也会不同。把参数退化到什么程度判定为失效，即失效判据不同，可靠性试验的评价结果也会有明显的不同。所以，如何确定失效判据应该非常慎重。



## 可靠性试验的抽样检查

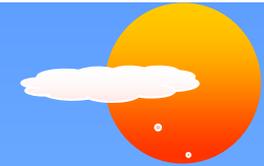
在可靠性试验中，有许多试验是属于破坏性的，而且进行试验需要昂贵的设备，尤其是集成电路规模大，不可能100%进行试验。在这些情况下，势必要采取抽样检查。

抽样检查是指对批量生产的产品从一批产品中随机抽取一部分做样品进行试验，根据试验测试结果来判断整批产品的质量是否合格的一种检查办法。这是一种检验产品质量和可靠性既经济又实用的办法。抽样检查的前提是产品的质量 and 可靠性必须均匀、稳定。只有这样，从整批产品中抽取出来的样品，才能具有一定的代表性。对它检查的结果才能用来评估整批产品的质量与可靠性指标。



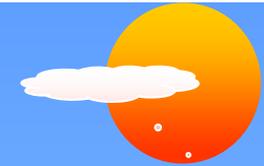
## 4. 主要的可靠性试验方法标准

- **IEC 标准**[International Electrotechnical Commission(国际电工委员会)]  
68 号出版物：基本环境试验法  
147-5 号出版物：半导体器件的机械及耐气候性试验方法
- **MIL 标准**[Military Standard (美国军用标准) ]  
MIL-STD-202：电子、电器元器件试验方法  
MIL-STD-750：分立半导体器件试验方法  
MIL-STD-833：微电子器件试验方法
- **BS 标准**[British Standard (英国标准) ]  
BS-9300：半导体器件的试验方法  
BS-9400：IC 的试验方法



## 4. 主要的可靠性试验方法标准

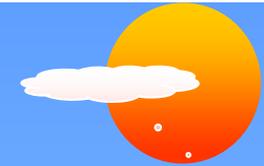
- **JIS 标准**[Japanese Industrial Standard (日本工业标准)]
  - JIS C 7021: 分立半导体器件的环境试验方法和疲劳试验方法
  - JIS C 7022: 半导体集成电路的环境试验方法和疲劳试验方法
- **EIAJ 标准**[Standard Electronic Industries Association of Japan (日本电子机械工业协会标准)]
  - SD-121: 分立半导体器件的环境和疲劳性试验方法
  - IC-121: 集成电路的环境及疲劳性试验方法
- 其它: NASA 标准, CECC 标准, 防卫厅标准, 汽车工业标准等



## 8.2 可靠性筛选试验

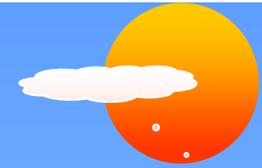
### 筛选的目的

- 电子器件的失效率与时间的关系可用浴盆曲线来表示。曲线分三个阶段即早期失效阶段、偶然失效阶段和耗损失效阶段。**筛选的主要目的在于通过对产品实施100%非破坏性筛选试验，剔除具有潜在缺陷的早期失效产品，以提高批产品的可靠性。**一般在微电路产品上施加一定的电、热应力。施加应力的的大小的确定主要考虑因素是：如何才能有利于将具有潜在缺陷的早期失效产品与合格产品分离开来，即有利于失效产品的劣化，而不会损伤合格产品。



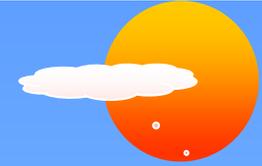
## 可靠性筛选特点

- (1) 通过可靠性筛选，剔除具有潜在缺陷的早期失效产品，一般都是工艺缺陷和工艺过程中产生差错造成的，**所以可靠性筛选有时也叫作工艺筛选**。其实，在产品制造过程中，各个工艺质量的检验、成品和半成品的电参数测试等也都应该算做筛选的过程。
- (2) **可靠性筛选是100%的试验，而不是抽样检验**。所以可靠性筛选必须是非破坏性的试验。经过筛选试验，对批产品不应增加新的失效模式和机理。
- (3) **可靠性筛选本身不能提高产品的固有可靠性**。但是，可靠性筛选可以提高批产品的可靠性。因为把潜在的早期失效产品从整批产品中剔除以后，确保了出厂产品具有原设计要求的较高的可靠性。所以，高可靠电子元器件产品的获得，主要是靠对电子元器件的可靠性设计和严格的工艺控制，而不是靠可靠性筛选。



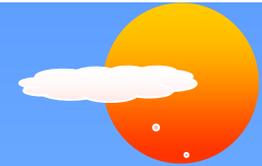
# 筛选方法的评价指标

- ◆ 筛选剔除率=剔除的产品数/受试的产品总数
- ◆ 筛选效率=剔除的次品数/实际的次品数
- ◆ 筛选损耗率=好品损坏数/实际好品数



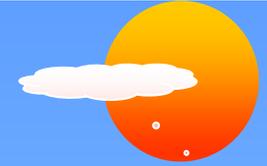
## 筛选方式简介

- 目检或镜检
- x 射线筛选
- 红外筛选
- 功率老化筛选
- 温度循环和热冲击筛选
- 高温贮存筛选
- 高温工作筛选



## 目检或镜检

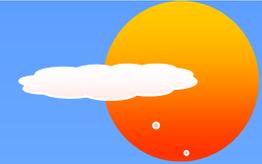
- 目检或者显微镜检查是集成电路制造中一种重要的筛选方法。多年来的经验公认为这种方法是最简便易行而且效率很高的方法之一。对检查芯片表面的各类缺陷（如金属化层缺陷、芯片裂纹、氧化层质量、掩模版质量、扩散缺陷等）以及观察内引线键合、芯片焊接、封装缺陷等都很有效。国外已有采用扫描电镜与计算机联合使用的自动镜检系统。



## X射线筛选与红外筛选

x射线是一种非破坏性筛选，用于检查器件密封后检查管壳内有无多余物、键合和封装工序的潜在缺陷以及芯片上的裂纹等。

红外筛选是通过红外探测技术，检测显示芯片热分布情况，用来观察由于异常扩散、针孔或二氧化硅层台阶处的局部热点、p-n 结不均匀的击穿点、键合处裂纹、金属膜内部的小孔等，以便筛选掉存在严重的体内缺陷、表面缺陷、热缺陷的器件。



## 功率老化筛选

### ➤ 原理

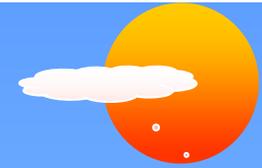
通过对产品施加过电应力，促使早期失效器件存在的潜在缺陷尽快暴露而被剔除。

### ➤ 作用

它能有效地剔除器件生产过程中产生的工艺缺陷、金属化膜过薄及划伤和表面沾污等。

### ➤ 方法

将集成电路产品置于高温条件下，施加最大的电压，以获得足够大的筛选应力，达到剔除早期失效产品的目的。所施加的电应力，可以是直流偏压，也可以是脉冲功率老化。前者多用于小规模数字电路，而后者则用于中、大规模集成电路，使电路内的元器件在老化时能经受工作状态下的最大功耗和应力。



## 温度循环和热冲击筛选

### ➤ 原理

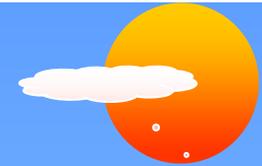
温度循环可以加速因材料之间热不匹配效应所造成的失效。

### ➤ 作用

芯片组装、键合、封装以及在氧化层上的金属化膜等潜在缺陷都可以通过温度循环进行筛选。

### ➤ 方法

温度循环筛选的典型条件是一55-+155℃或-65~+200℃进行3次或5次循环。每循环一次，在最高或最低的温度下各保持三十分钟，转移时间为十五分钟。试验后进行交直流电参数测试。热冲击筛选是判定温度急剧变化的集成电路强度的有效方法。



## 高温贮存筛选

### ➤ 原理

如果在集成电路封装的管壳内含有水汽或各种有害气体，或者芯片表面不清洁，或者在键合处存在各种不同的金属成分等，都会产生化学反应，高温贮存可加速这些反应。

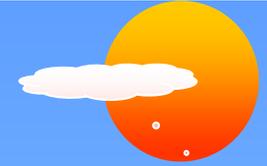
### ➤ 作用

高温可以加速产品内部的化学反应。

### ➤ 特点

由于这种筛选方法操作简便，可批量进行，筛选效果好，投资又小，所以应用较为普遍。

高温贮存温度，对于硅器件而言，金-铝系统的一般选用 $150^{\circ}\text{C}$ ，铝-铝系统选用 $200^{\circ}\text{C}$ ，金-金系统选用 $300^{\circ}\text{C}$ 。贮存时间则一般为24-168 小时。



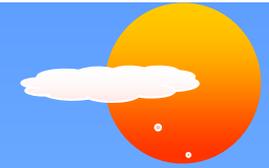
## 高温工作筛选

### ► 常用方法

高温直流静态、高温交流动态和高温反偏。这些方法对于剔除器件表面、体内和金属化系统存在的潜在缺陷引起的失效十分有效。

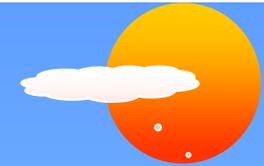
### ► 高温反偏法

该方法是在高温下加反偏工作电压的试验。它是在热电共同作用下进行，与实际工作状态很接近，所以比单纯高温贮存筛选的效果好。



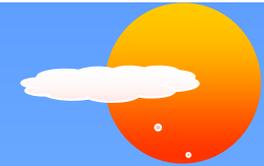
## 失效模式相应的筛选方法

失效模式	筛选方法
表面（污染等）	静态老化
氧化膜缺陷	动态老化、高压、单元应力
输入电路劣化	静态老化
扩散缺陷	动态老化
微小裂纹	温度循环
接触缺陷	动态老化
电迁移	动态老化
腐蚀（塑料）	高温、高湿度、低损耗偏置
腐蚀（密封）	低温、低损耗偏置
热载流子注入	低温工作

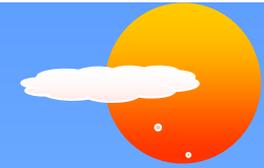


# 筛选方法及其比较

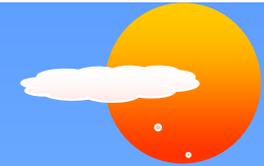
方法		检测对象	效果	费用	应用
热应力	高温贮存	电稳定性 金属化层 硅 腐蚀	好	很便宜	有效的方法，也是稳定的方法，也有时会恢复用其他方法产生的缺陷
	温度循环	封装的密封性 引线焊接 管芯焊接 硅（裂纹） 结热缺陷	好	很便宜	有效的方法，对结异常的筛选有效
	热冲击	封装的密封性 引线焊接 管芯焊接 硅（裂纹） 结热缺陷	好	便宜	效果近似温度循环、应力程度高



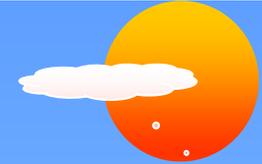
机械应力	恒定加速度	内部引线的形状 引线焊接、管芯焊接 硅（裂纹）	好	中等	对高密度封装有效
	变频振动 （无监控器）	封装 引线焊接、管芯焊接 硅（裂纹）	稍好	高	
	随机振动 （无监控器）	封装 引线焊接、管芯焊接 硅（裂纹）	好	高	航天设备用器件
	变频振动 （有监控器）	异物 内部引线（现状） 内部引线（半断线）	好	很高	对异物的效果取决于异物的类型
	随机振动 （有监控器）	异物 内部引线（现状） 内部引线（半断线）	好	很高	价格最高的方法
	振动噪声	异物	稍好	高	费用效果比小
	冲击	异物、内部引线	稍好	中等	比恒定加速度差



电应力	断续工作	金属化、硅 氧化膜、污染 位错沟道、漂移	好	高	
	交流工作	金属化、硅 污染 位错沟道、漂移	很好	高	
	直流工作	金属化、硅 氧化膜、污染 位错沟道、漂移	好	高	
	高温交流 工作	金属化、硅 氧化膜、污染 位错沟道、漂移	极好	高	由于温度加速失效， 故高温进行效果大
	高温反偏	位错沟道	稍差	高	



其他	细检漏	封装的密封	好	中等	
	粗检漏	封装的密封	好	便宜	
	X射线透视	管芯焊接 引线形状 封装密封 异物 污染	好	中等	对树脂铸型品有效

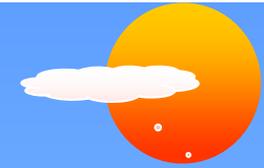


## 8.3 可靠性寿命试验

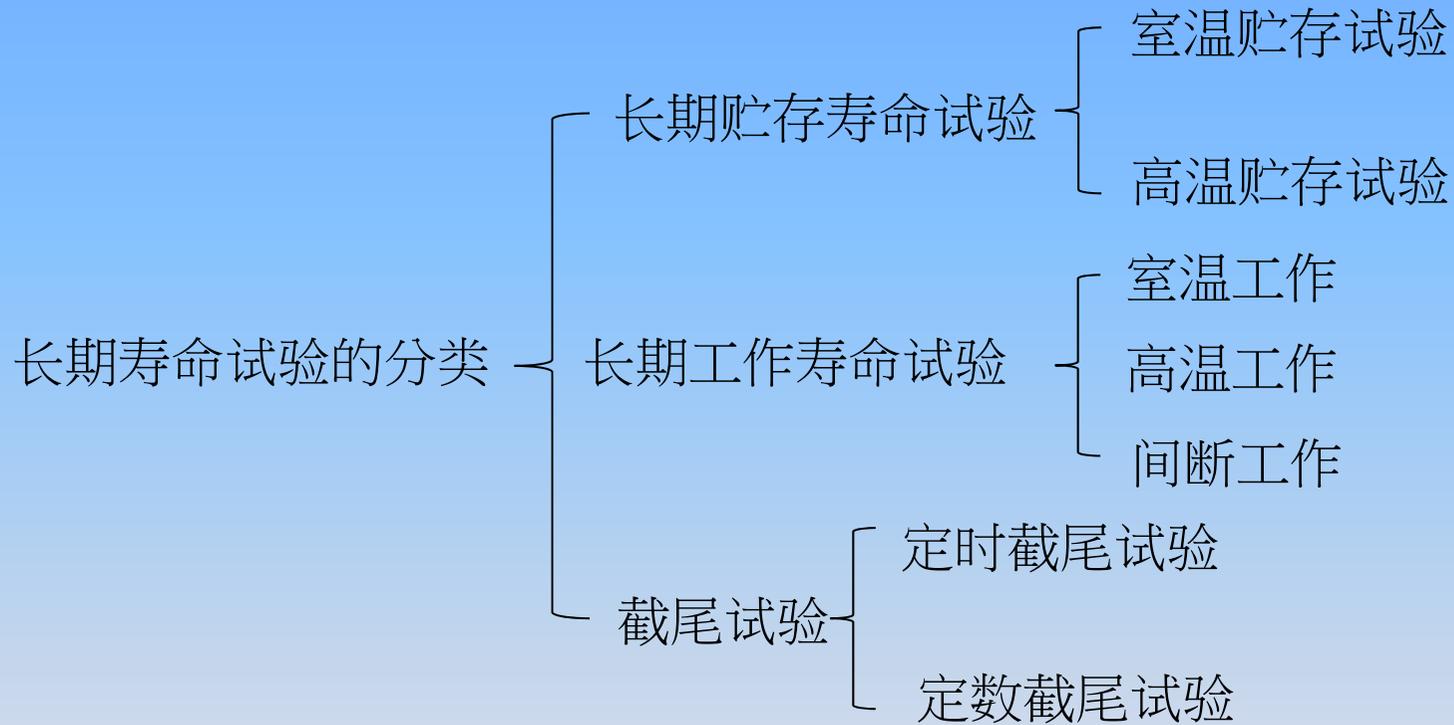
- 1.按国家标准：工作寿命试验和贮存寿命试验；
- 2.按数据处理方式：定时截尾试验和定数截尾试验；

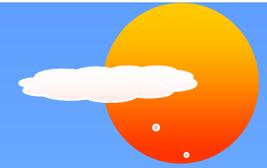
**截尾试验**又可分为有替换（试验过程中，每发生一个失效样品，就换上一个好样品继续试验，使样品数量保持不变）试验和无替换（试验过程中，失效样品取下后不再补充样品，剩下的样品继续试验，直到规定试验截止时间时才停止）试验；

- 3.以施加的应力区分：**长期寿命试验**和**加速寿命试验**。



# 1. 长期寿命试验





# 常用的寿命试验方法

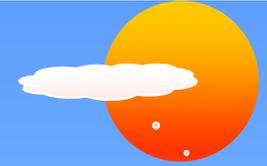
## (一) 长期贮存寿命试验

电子产品在规定的环境条件下，非工作状态的存放试验，称为贮存寿命试验。贮存时间在1000h以上称为长期贮存寿命试验。

长期贮存寿命的目的是了解产品在特定的环境下贮存的可靠性。

## (二) 长期工作寿命试验

电子产品在规定条件下施加规定的应力的试验称为工作寿命试验。试验周期在1000h以上称为长期工作寿命试验。



### (三) 截尾试验

#### (1) 定时截尾

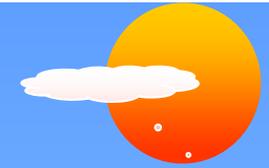
即规定一定的试验时间，就停止试验，然后通过数理统计方法，计算出产品的平均寿命、失效率等有关的可靠性特征量。

定时截尾试验分无替换和有替换两类。

#### (2) 定数截尾

定数截尾试验是在出现规定数量的失效后，就停止试验。

定数截尾试验也分无替换和有替换两类。具体情况要根据不同样品类型、型号选择的抽样方案、试验方法来决定。



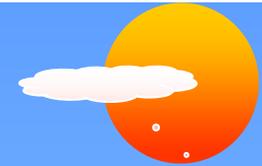
## 测试周期的确定

确定测试周期的原则是：在不过多地增加检查和测试工作量的情况下,能比较清楚地反映（了解）产品地失效分布情况。不要使失效过于集中在一、二个测试周期内。各应力水平组一般要有五个以上地测试点（指能测到失效产品地测试点），每个测试点上的失效数应尽可能大致相同。

## 失效判据

失效判据就是判断产品是否满足技术指标。失效判据可以是产品完全丧失功能，也可以是某些参数退化。

在可靠性寿命试验中只要其中某一项技术指标不符合技术标准和要求，就判失效。

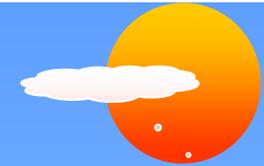


## 2. 加速寿命试验

加速寿命试验是指利用加大应力的方法促使样品在短期内失效，以预测在正常工作条件或贮存条件下的可靠性。**但不改变受试样品的失效分布。**

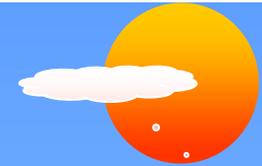
**通过加速寿命试验可达到以下目的：**

- (1) 在较短的时间里，对高可靠器件的可靠性水平进行评估，可用外推法快速预测在规定条件下的失效率；
- (2) 在较短时间内，对器件可靠性设计、工艺改进和可靠性增长的效果进行评价；
- (3) 在较短时间内，加速暴露器件失效模式和机现，从而可正确地制定失效判据和筛选条件。



## 加速寿命试验的种类

- ▶ **恒定应力加速试验**：施加在样品上的应力不变(单一应力或复合应力)，用来了解器件失效时间的分布；
- ▶ **周期应力加速试验**：周期性重复对器件施加应力，用来了解应力对器件失效的影响情况；
- ▶ **序进应力加速试验**：对器件施加的应力随时间连续增加，用来了解影响器件寿命的应力分布情况；
- ▶ **步进应力加速试验**：对器件施加的应力按每隔一定时间的步进方式增加，用来了解在哪一级步进应力下产生失效。
- ▶ **临界试验**：利用上述加速试验方法，可以确定器件的失效界限，所以可以称为临界试验。通过临界试验可以知道临界寿命，还可以了解器件对机械强度、电浪涌等能承受的耐量。



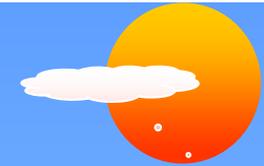
# 加速寿命试验方案的基本想法

## 1 选择加速变量

在选择加速变量时，就要选择那种对主要失效机理起主导作用的应力条件。半导体器件常选择温度作为加速变量。

## 2 确定加速变量的应力水平

## 3 选取试验样品和确定试验样品数



## 加速寿命试验的理论依据

实践证明，当温度升高以后，器件劣化的物理化学反应加快，失效过程加速，而Arrhenius 模型就总结了由温度应力决定的化学反应速度依赖关系的规律性，为加速寿命试验提供了理论依据。

以温度应力为加速变量的加速方程

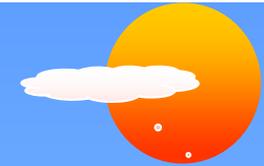
$$\frac{dM}{dt} = Ae^{(-E_a/kT)} \quad (1)$$

由Arrhenius 总结的经验公式为：

式中， $dM/dt$  是化学反应速率， $A$  是常数， $E_a$  是引起失效或退化过程的激活能， $k$  是玻尔兹曼常数， $T$  是绝对温度。

当器件在  $t_0$  时刻处于正常状态数为  $M_0$ ，到  $t_1$  时刻，器件处于失效状态数为  $M_1$ 。如果温度与时间无关，则积分式 (1) 得：

$$M_1 - M_0 = Ae^{(-E_a/kT)}(t_1 - t_0) \quad (2)$$



## 加速寿命试验的理论依据 (续)

令  $\Delta M = M_1 - M_0$ ,  $t = t_1 - t_0$ , 得到:

$$t = \frac{\Delta M}{A} e^{E_a/kT} \quad (3)$$

取对数

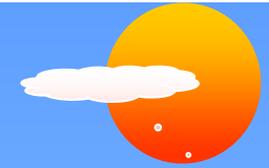
$$\lg t = \lg \frac{\Delta M}{A} + \frac{E_a}{kT} \lg e \quad (4)$$

可写成

$$\lg t = a + b\left(\frac{1}{T}\right) \quad (5)$$

其中

$$\begin{aligned} a &= \lg \frac{\Delta M}{A} \frac{\Delta M}{A} \\ b &= \frac{E_a}{kT} \lg e \end{aligned} \quad (6)$$



## 加速寿命试验的理论依据 (续)

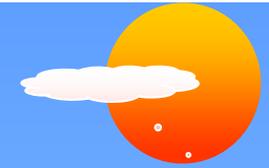
上式就是根据Arrhenius 模型得到的以温度应力为加速度变量的加速方程。用此方程来解释器件的高温贮存寿命试验是非常成功的。式中， $t$  表示器件产品达到某一 $F(t)$ 的时间，它的对数与绝对温度的倒数成线性关系。若用 $t \sim 1/T$  单边对数坐标纸绘图，则可得到一条直线，然后用图估计法或数值法推算出器件在不同温度下的寿命值。

由式 (6) 可计算得到方程的斜率 $b$ 、截距 $a$  和激活能 $E_a$ ，当 $T_1 > T_2$  时

$$b = \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \lg \frac{t_1(F_0)}{t_2(F_0)}$$

$$a = \lg t_2(F_0) - \frac{b}{t_2} \quad (7)$$

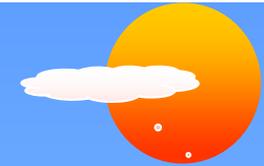
$$E_a = \frac{bk}{\lg e} = 2.3036k$$



## 加速寿命试验的理论依据 (续)

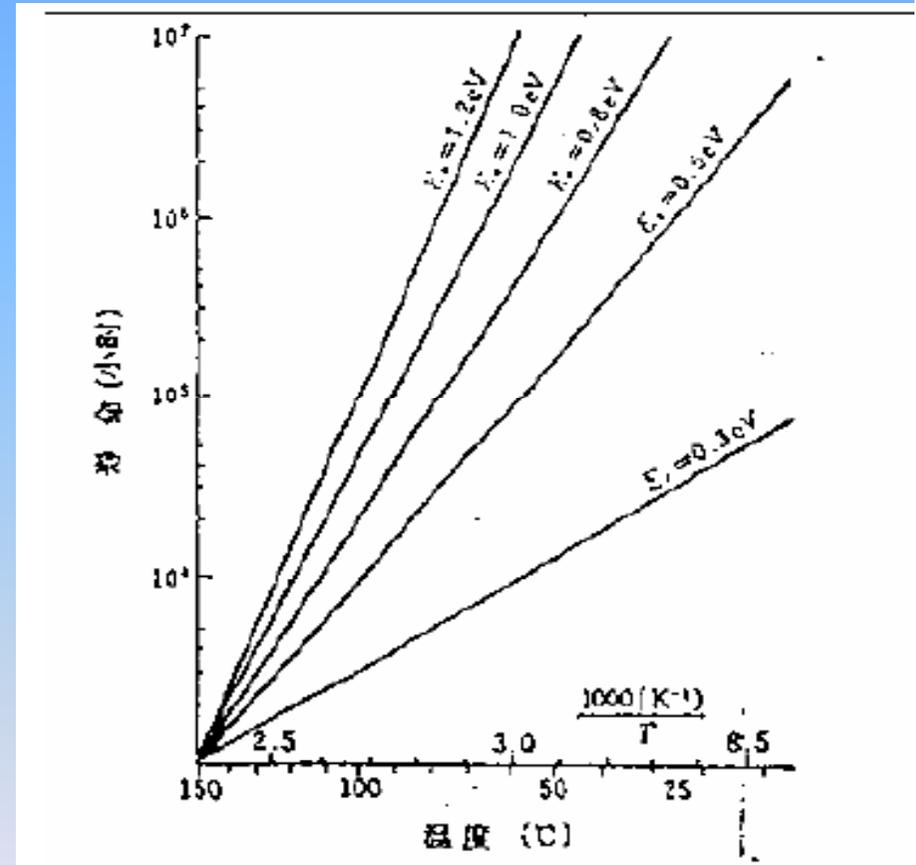
激活能  $E_a$  与方程的斜率  $b$  与器件的失效模式与失效机理有关。根据多年来的实践积累，有关半导体器件与微电路不同失效模式与机理的激活能数据列于下表。

失效模式	失效机理	激活能 (eV)
阈值电压漂移	离子性 (SiO <sub>2</sub> 中的钠离子漂移)	1.0~1.4
阈值电压漂移	离子性 (Si-SiO <sub>2</sub> 界面的低阻挡层)	1.0
漏电流增加	形成反型层 (MOS 器件)	0.8~1.4
漏电流增加	隧道效应 (二极管)	0.5
电流增益下降	因水分加速离子移动	0.8
开路	铝的腐蚀	0.6~0.9
开路	铝的电迁移	0.6

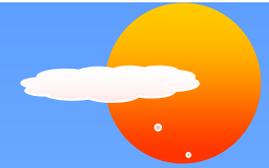


## 加速寿命试验的理论依据 (续)

以激活能 $E_a$  作为参数, 可以绘出不同 $E_a$  时温度与寿命的关系, 如左图所示。可见, 激活能越大, 曲线倾斜越大, 与温度的关系越密切。



不同激活能时温度与寿命的关系

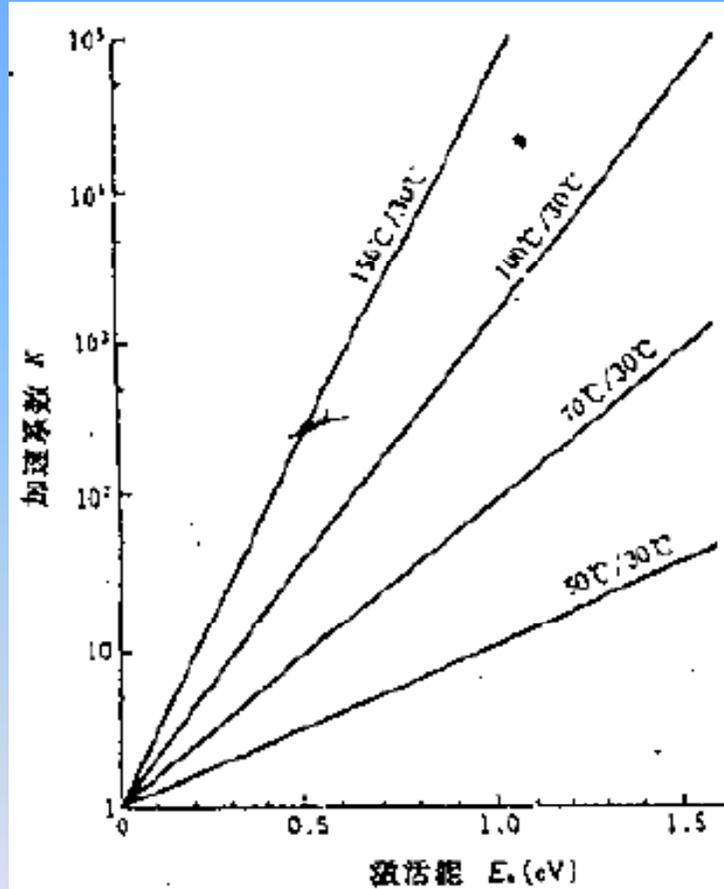


## 加速系数 $\tau$ 的计算方法

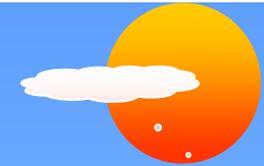
设在基准应力条件下做试验达到累积失效概率 $F_0$ 所需的时间为 $t_0(F_0)$ ，施加某种应力条件下进行加速寿命试验达到相同的累计失效概率所需的时间为 $t_1(F_0)$ ，则两者的比值即为加速系数 $\tau$ 。由基准温度 $T_0$ 升至高温 $T_1$ 条件下的加速系数为

$$\tau = \frac{t_0(F_0)}{t_1(F_0)} = \exp \left[ \frac{E_a}{k} \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_1} \right) \right]$$

由上式可看出，激活能越大，加速系数越大，越容易被加速失效，加速试验的效果越明显。在不同温度应力下，激活能与加速系数的关系，如左图所示。



激活能与加速系数之间的关系

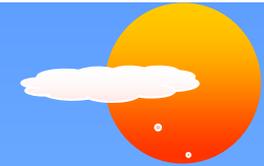


## 以电应力为加速变量的加速方程

器件失效除了与温度应力有关外，与电应力也有密切关系。电应力也会促使器件内部产生离子迁移、质量迁移等，造成短路、击穿断路失效等。器件在电流、电压或功率等电应力作用下，应力越强，失效速率越快，器件寿命越短，爱伦模型总结了器件寿命与电应力之间的逆幂律关系，即

$$t = \frac{1}{kV^c} \quad (8)$$

式中， $t$  是电子元器件的寿命， $k$ 、 $c$  是常数， $V$  是施加在电子元器件上的电应力。这就是以电应力为加速变量的加速方程。



## 以电应力为加速变量的加速方程

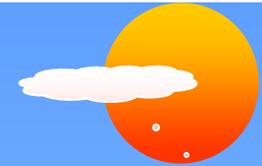
将上式取对数后，可得到 $k$ 、 $c$ 值。当 $V_2 > V_1$ 时，

$$\begin{aligned} \lg t &= -c \lg V - \lg k \\ c &= \frac{\lg t_1(F_0) - \lg t_2(F_0)}{\lg V_2 - \lg V_1} \\ K &= \frac{1}{t_2(F_0) V_2^c} \end{aligned} \quad (9)$$

在确定 $k$ 、 $c$ 之后，可根据上式，利用图估法或数值计算法评估器件在电应力下的寿命或失效率。

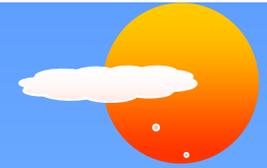
加速系数 $\tau$ 的计算可按下式计算

$$\tau = \frac{t_0(F_0)}{t_1(F_0)} = \left( \frac{V_1}{V_0} \right)^c \quad (10)$$



## 8.4 主要的电子组件可靠性寿命试验

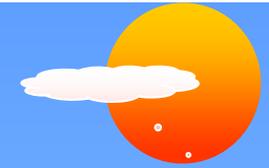
1. 热循环与热冲击
2. BGA焊球剪切试验
3. 跌落试验
4. 机械弯曲、振动试验



# 1. 热循环与热冲击

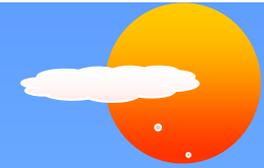
**热循环：**热循环的时间一般比较长。热循环是在高温或低温时由于最大的CTE热不匹配产生微裂纹，但在室温时却无法观测到，因此当在室温时观测到明显的裂纹时实际上其循环数远远大于实际产生微裂纹的循环数。

**热冲击：**是以相当快的时间进行高低温的转换，实验装备一般是采用两个隔离的高低温区相互切换。热冲击实验所用的时间比较短，但是热冲击有可能引入与实际使用环境条件下不一致的失效机理。因此，难以将热冲击实验结果转换为实际使用寿命。

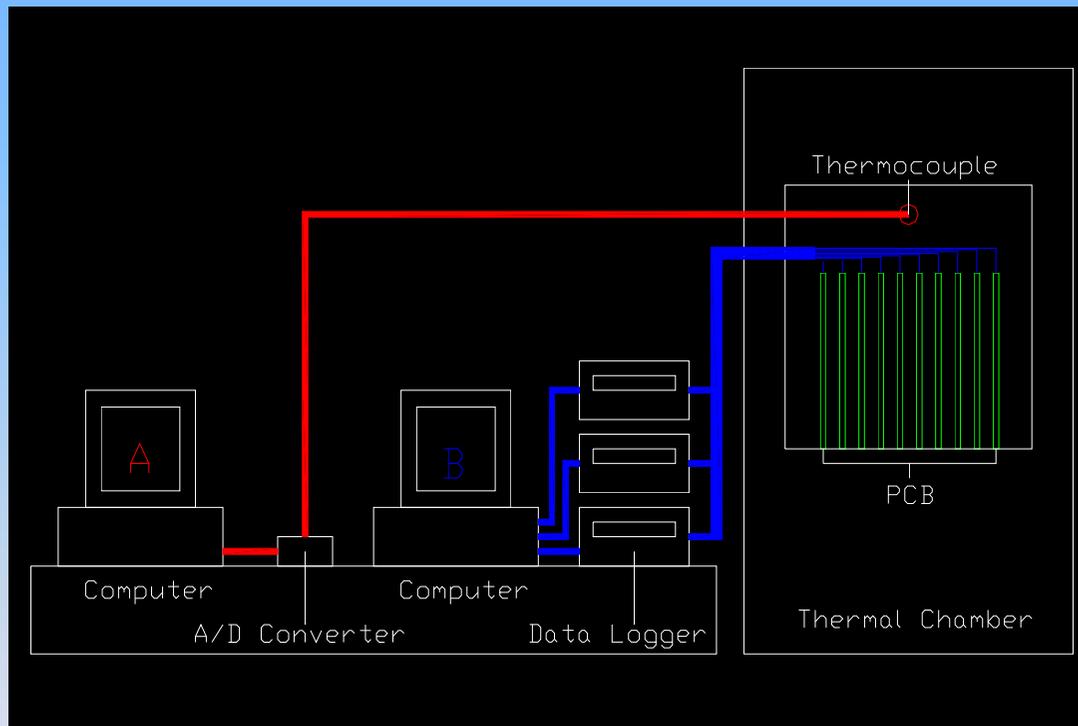


测试条件	规定条件
循环条件 (TC) :	
<b>TC1</b>	0°C~+100°C(优先参考)
<b>TC2</b>	-25°C~+100°C
<b>TC3</b>	-40°C~+125°C
<b>TC4</b>	-55°C~+125°C
<b>TC5</b>	-55°C~+100°C
测试周期:	无论出现那种情况:
热循环所需次数 (NTC)	50% (首选63.2%) 的累积失效; 测试周期 (优先考虑)
<b>NTC-A</b>	200周期
<b>NTC-B</b>	500周期
<b>NTC-C</b>	1000周期 (首选TC2, TC3, TC4)
<b>NTC-D</b>	3000周期
<b>NTC-E</b>	6000周期 (首先TC1)
低温保温时间	10分钟
低温容差 (首选)	+0 °C/-10°C (+0°C/-5°C)
高温保温时间	10分钟
高温容差 (首选)	+10°C/0°C (+5°C/0°C)
温度变化速率	不超过20°C/min

左表为IPC-9701中列出的热循环测试条件与方法。



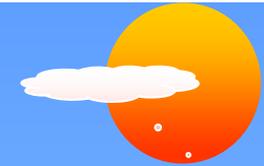
# 热循环测试硬件



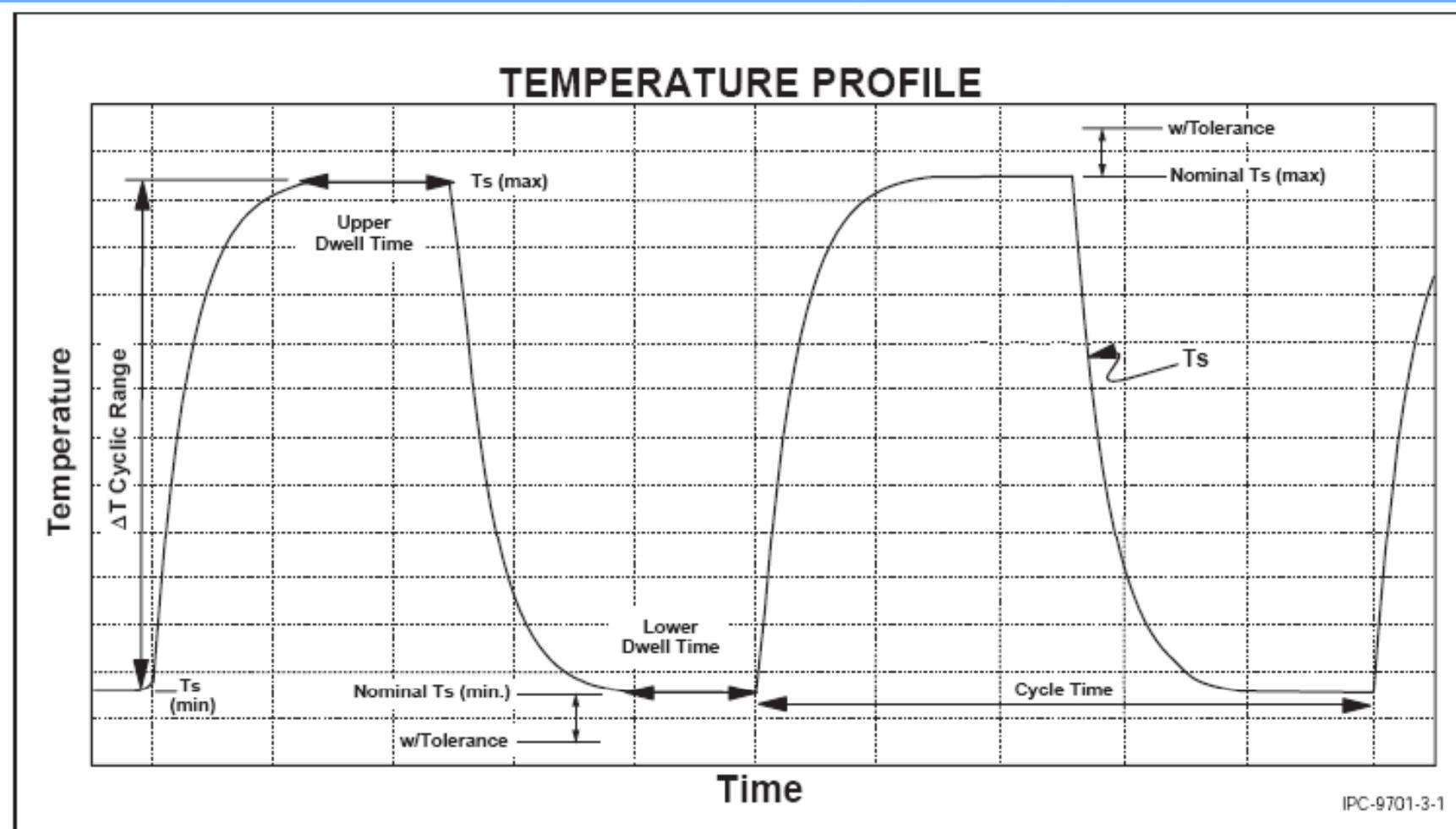
Schematic Diagram of Experimental Setup  
and Measurement System



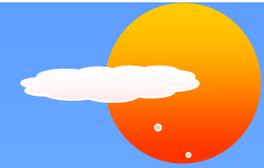
Test Boards in Thermal  
Cycling Chamber



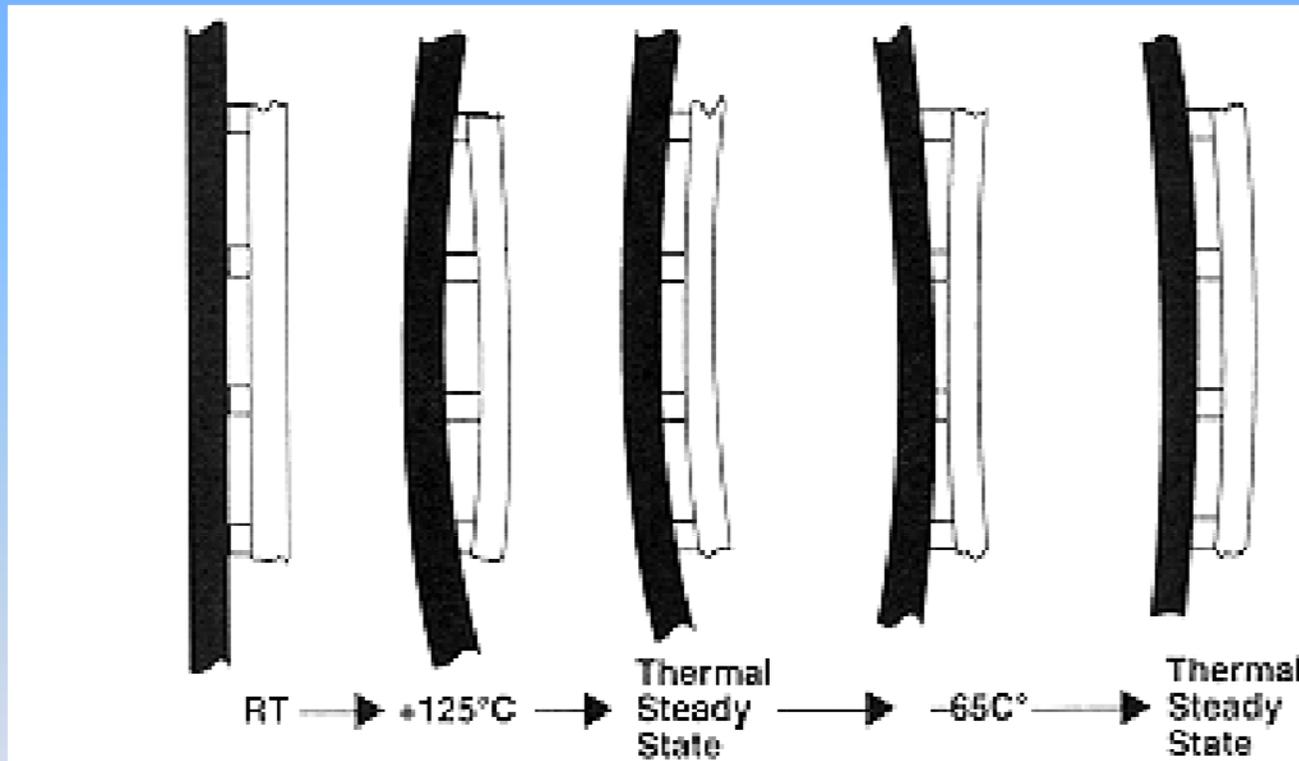
# 热循环加载曲线



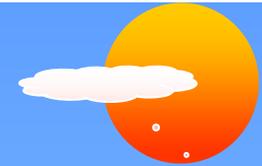
-40  $\leftrightarrow$  125°C, one hour per cycle



# 热循环条件下的BGA封装

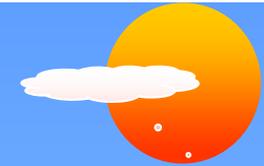


The CTE (coefficient of thermal expansion) of PCB is larger than that of Package

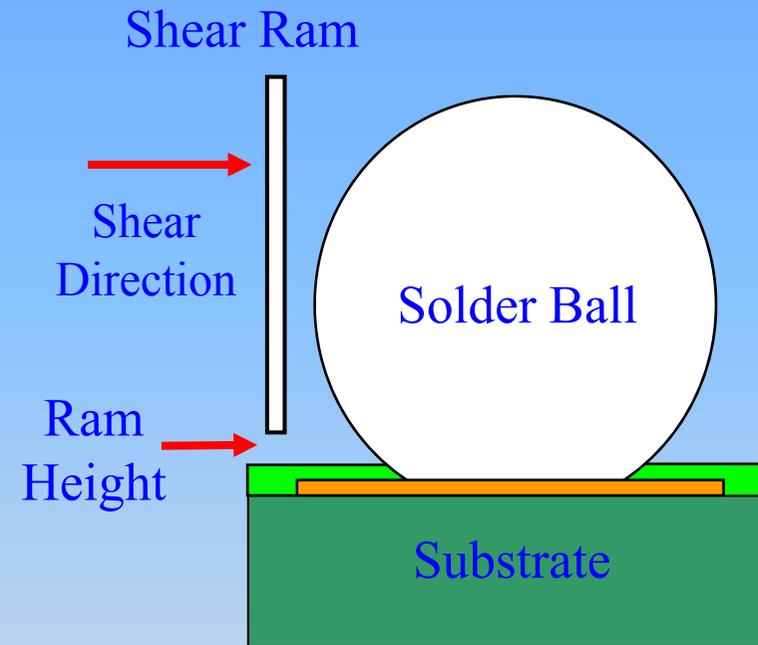
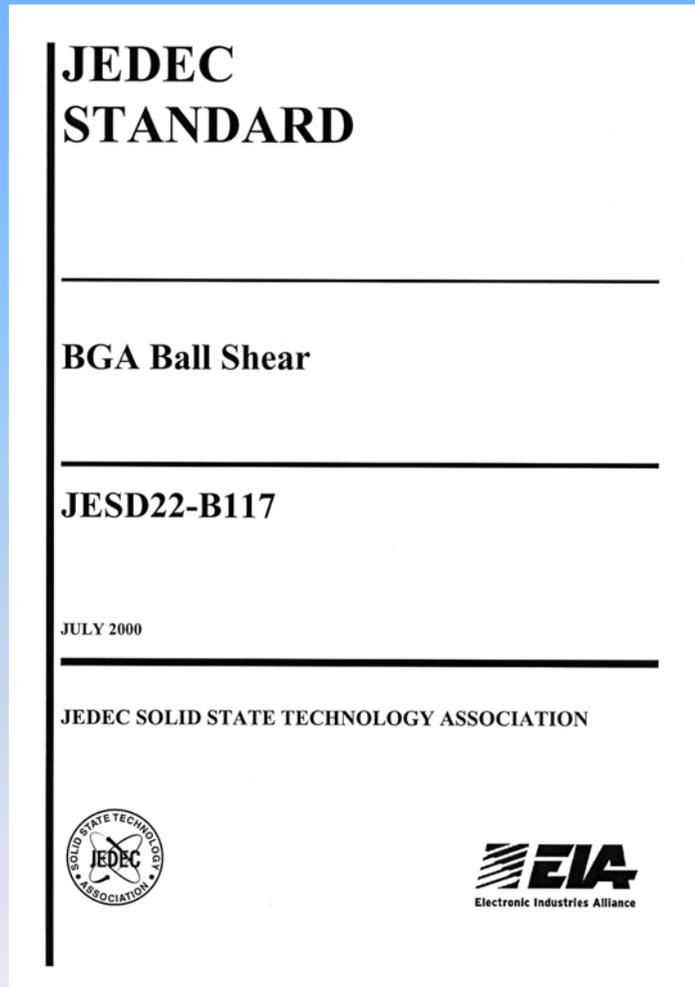


## 热循环的局限性

- 热循环的时间较长；
- 热循环时在高温或低温时由于最大的CTE热不匹配产生微裂纹，但在室温时无法观测到，因此当在室温时观测到明显的裂纹时实际上其循环数远远大于实际产生微裂纹的循环数；
- 对策：实时检测

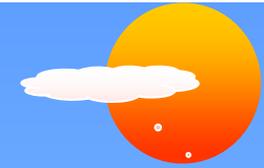


## 2. 焊球剪切试验



Ram Height-----  
> 50 mm (2 mils)  
≤ 25% of Ball Height

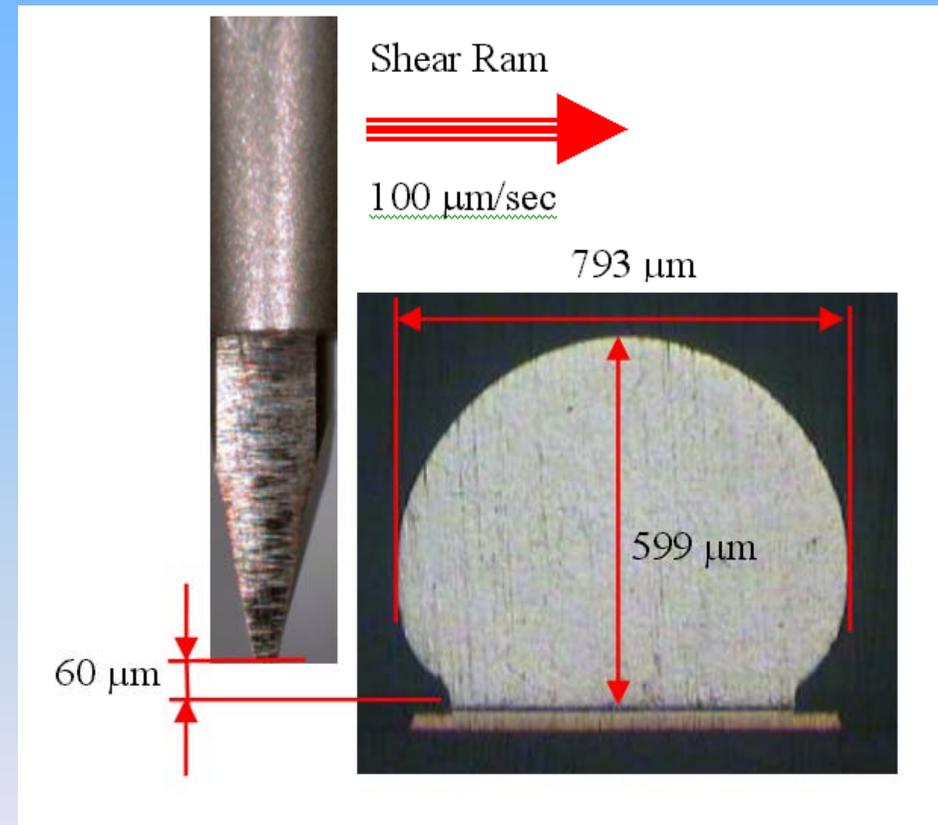
Ram Width-----  
about the ball size

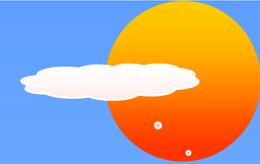


# 剪切测试条件

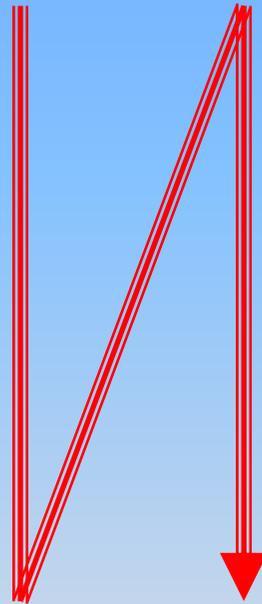
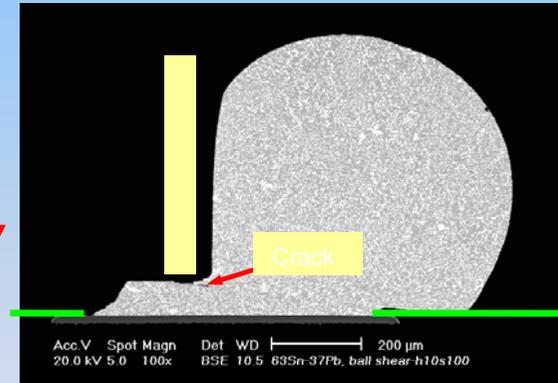
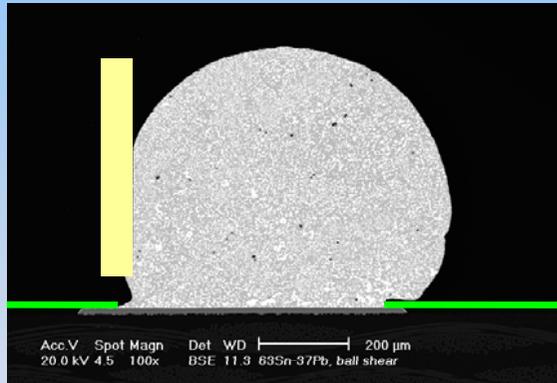
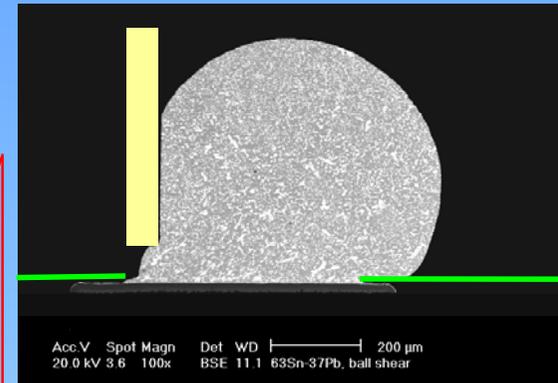
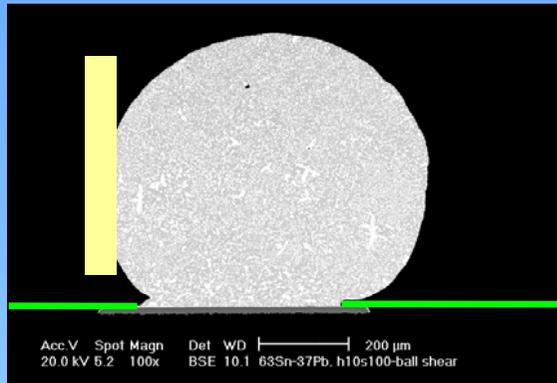


DAGE 4000S

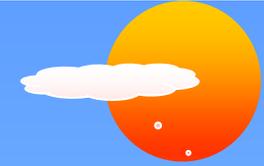




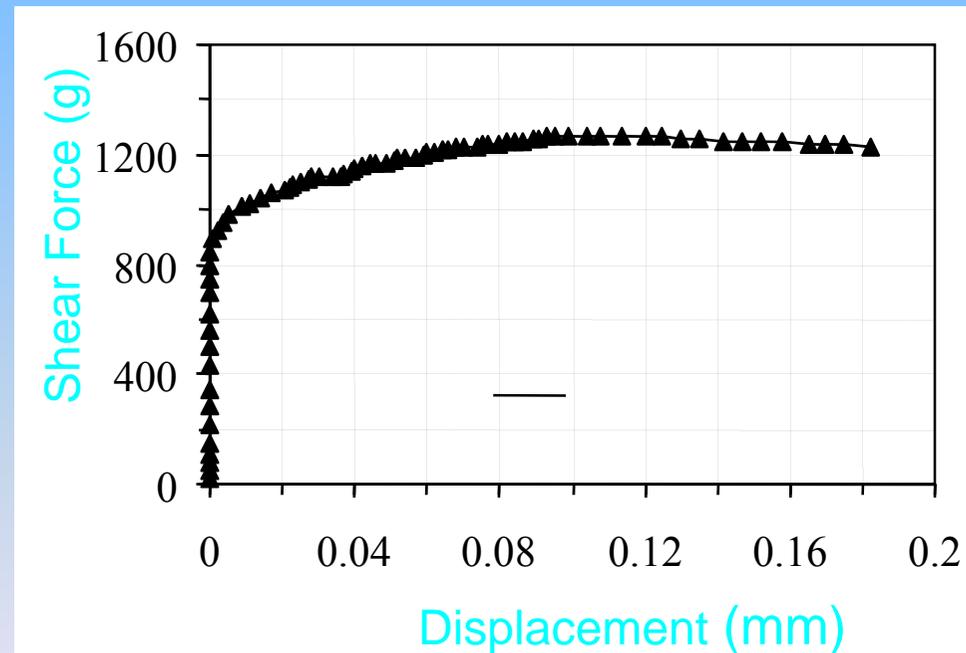
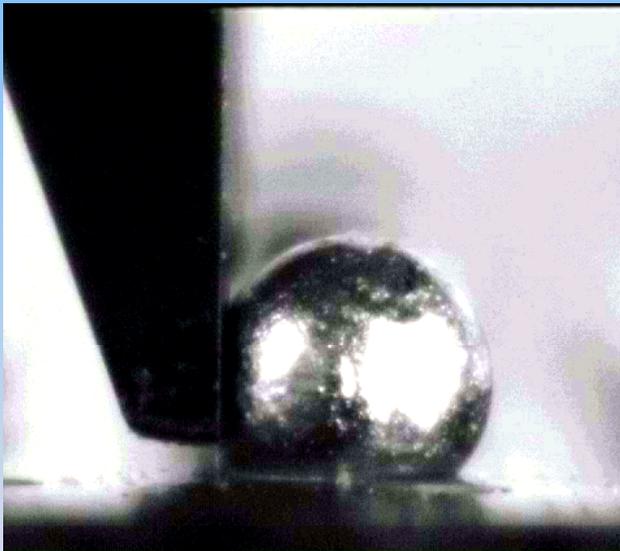
# Progressive Failure Mechanism

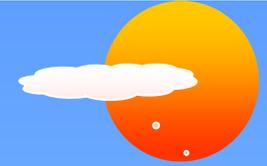


Huang, X., S.W.R. Lee and C.C. Yan (2002), "Experimental Investigation on the Progressive Failure Mechanism of Solder Balls During Ball Shear Test," *Proc. 52nd Electronic Components and Technology Conference*, San Diego, CA, pp. 968-973.



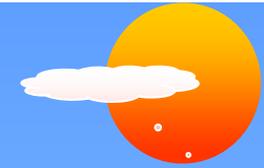
# Solder Ball Shear Process





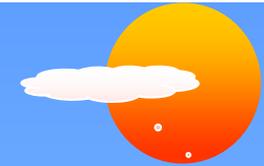
# 跌落试验

随着手持电子产品的迅速普及以及无铅时代的到来，电子产品的跌落可靠性已引起工业界和学术界的广泛关注。跌落试验又名“包装跌落测试机”，为产品包装后在模拟不同的棱、角、面于不同的高度跌落于地面时的情况，从而了解产品受损情况及评估产品包装组件在跌落时所能承受的坠落高度及耐冲击强度。



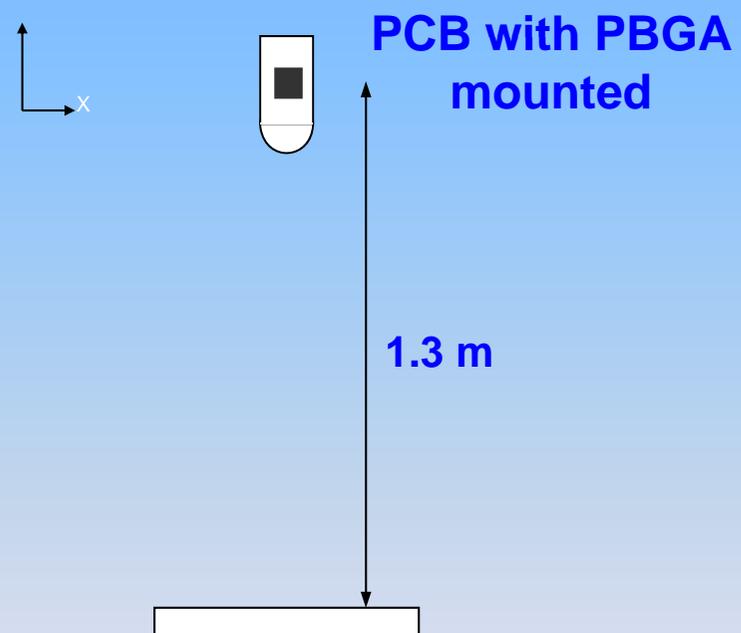
## 跌落试验的操作流程：

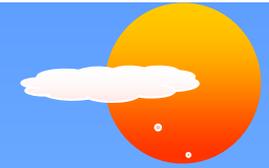
- 1、接线；
- 2、跌落高度调整；
- 3、将被测物体放于工作台面，然后用固定杆加以固定；
- 4、按上升键使被测物体提升至设定高度；
- 5、按跌落键使工作台面瞬间脱离被测物体，被测物体做自由跌落运动；
- 6、按复位键使工作台恢复工作状态；
- 7、若重复试验，则重复上述步骤；
- 8、试验完后：按降低键使工作台面运作至最低位置关闭电源键。



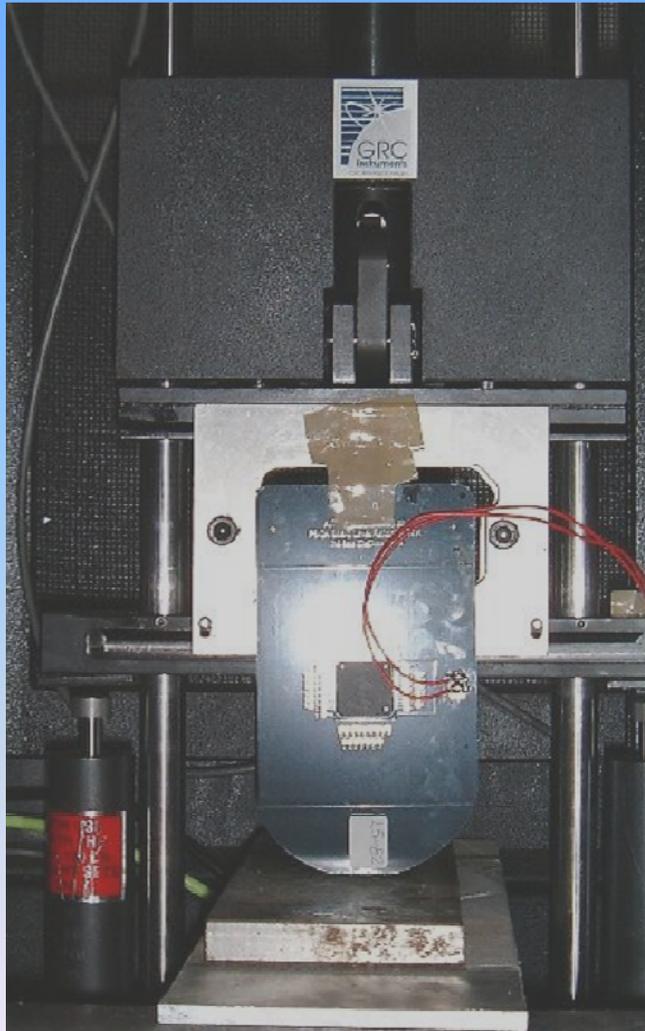
# 跌落试验规范

Loading Condition	Guided Free-fall
Drop Height	1.3 m
Impact Axis	Y-axis
Testing Mode	Tested until failure. Sample classified as pass if no failure within 30 times of impact
Failure Criteria	10 times of initial daisy chain resistance value





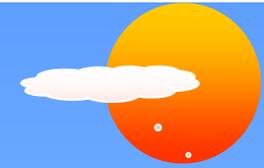
# 跌落试验设备



Test Specimen

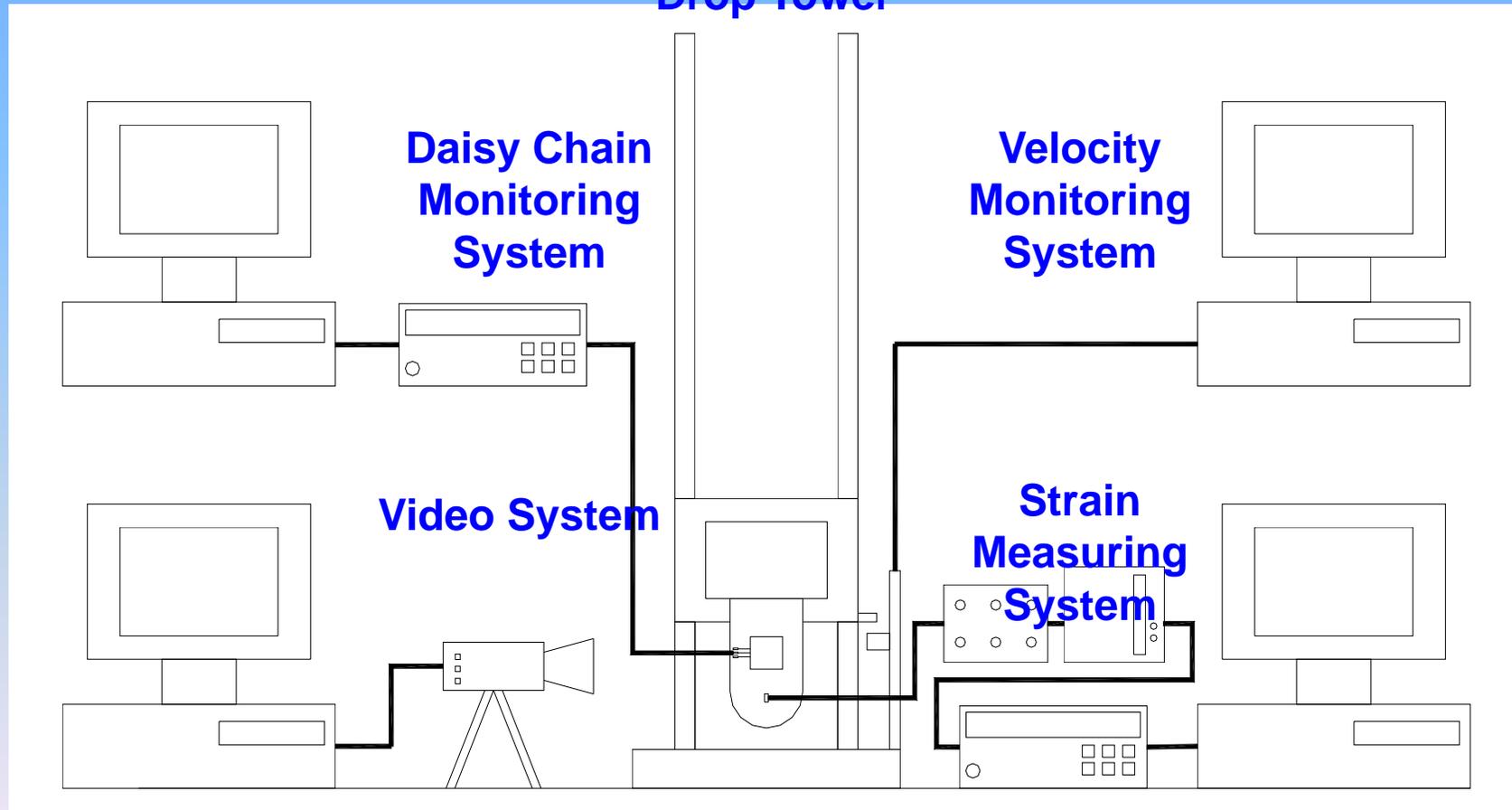


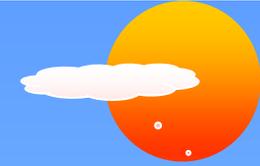
Drop Test Tower



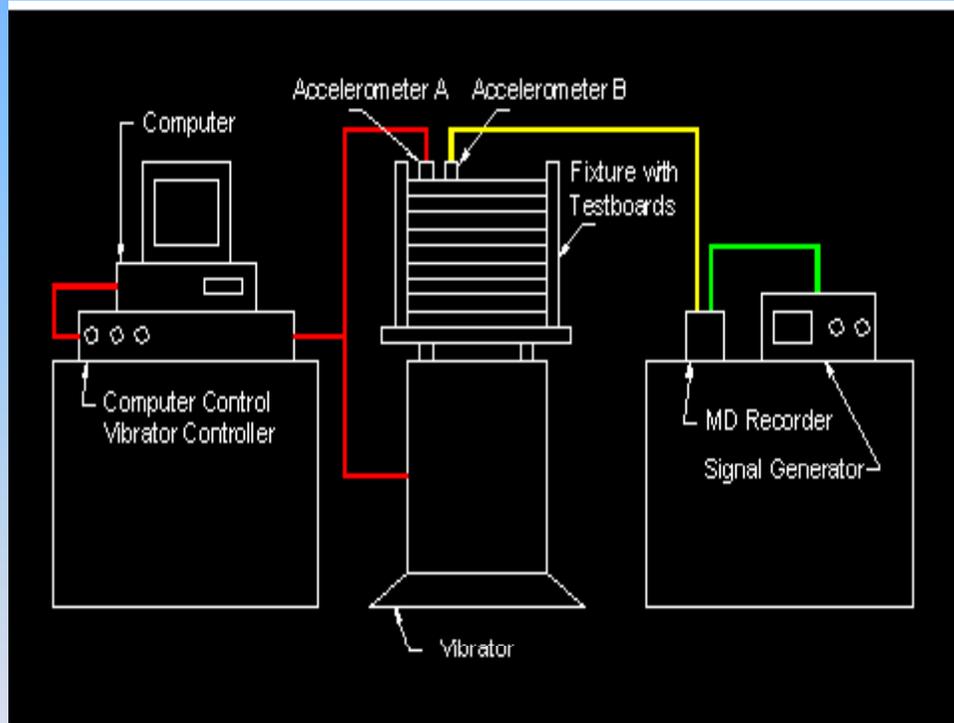
# 试验测量系统

## Drop Tower





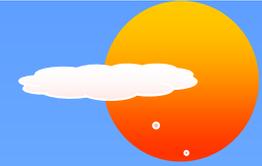
# 机械振动测试



Schematic Diagram of  
Experimental Setup

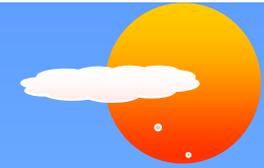


Specimens on the Shaker  
(Vertical Vibration)

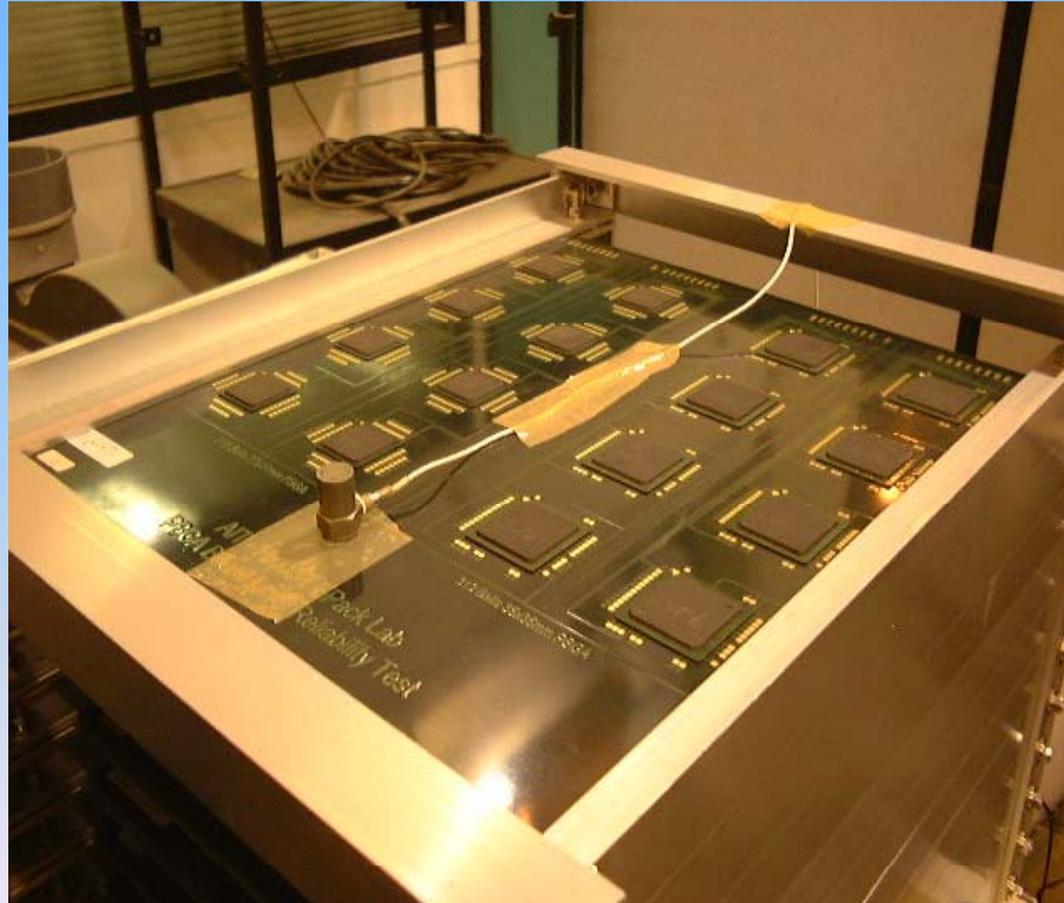


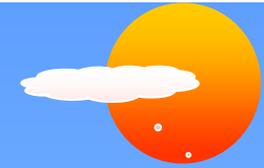
# Vertical Vibration Test



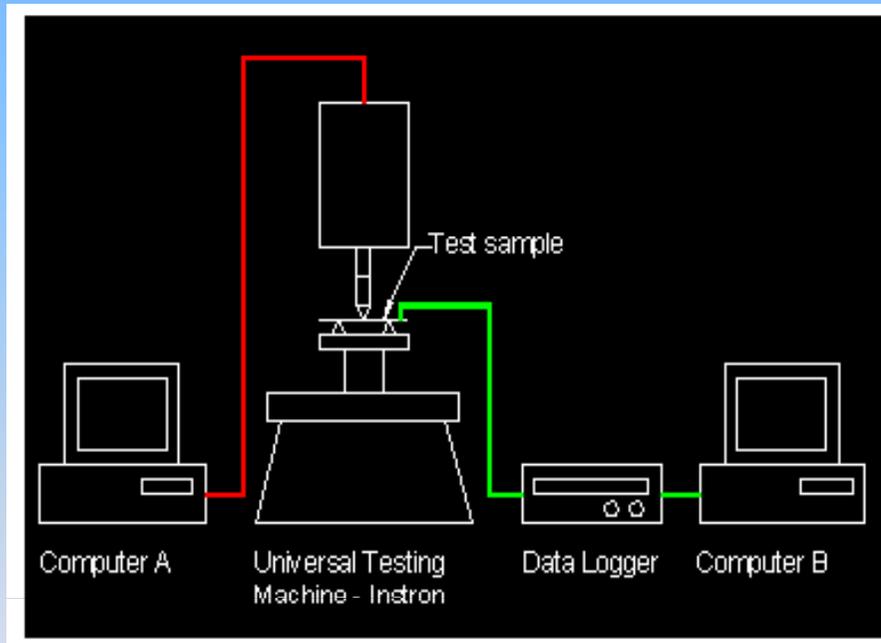


# PCBs in the Fixtures on Top of the Vibration Shocker

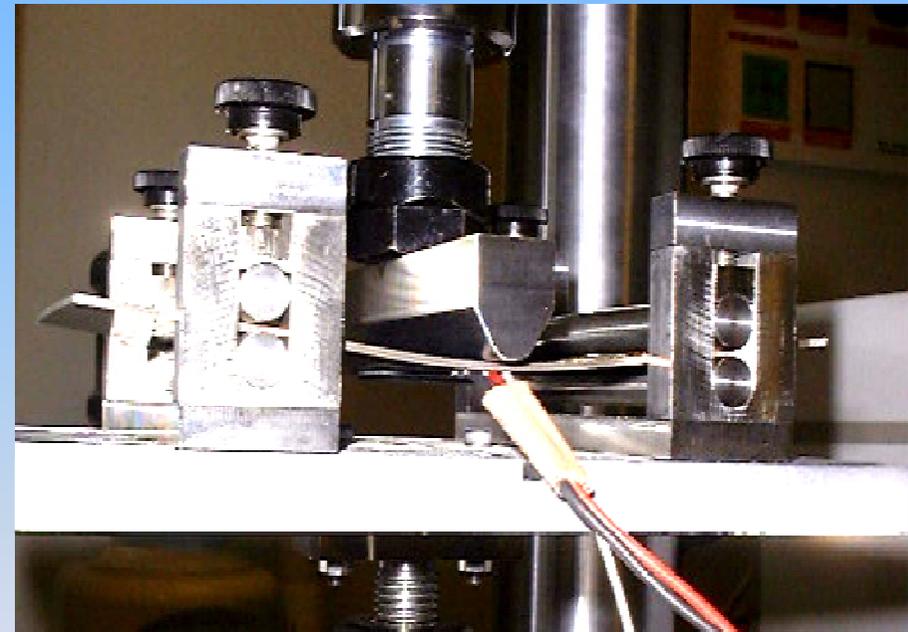




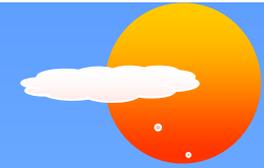
# 三点弯曲测试



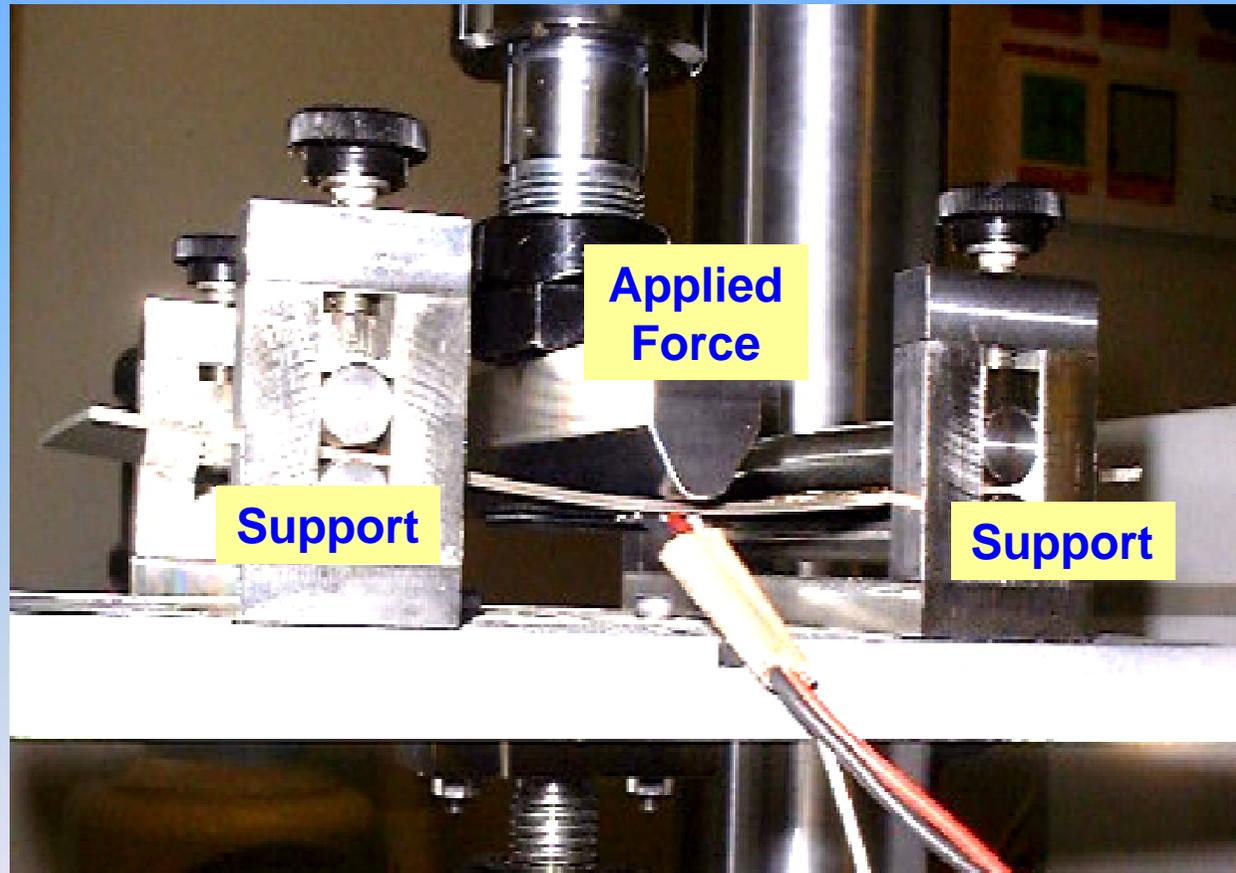
Schematic Diagram of  
Experimental Setup

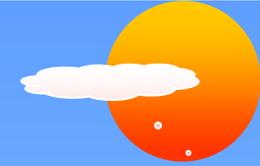


Specimen on the Test Rig

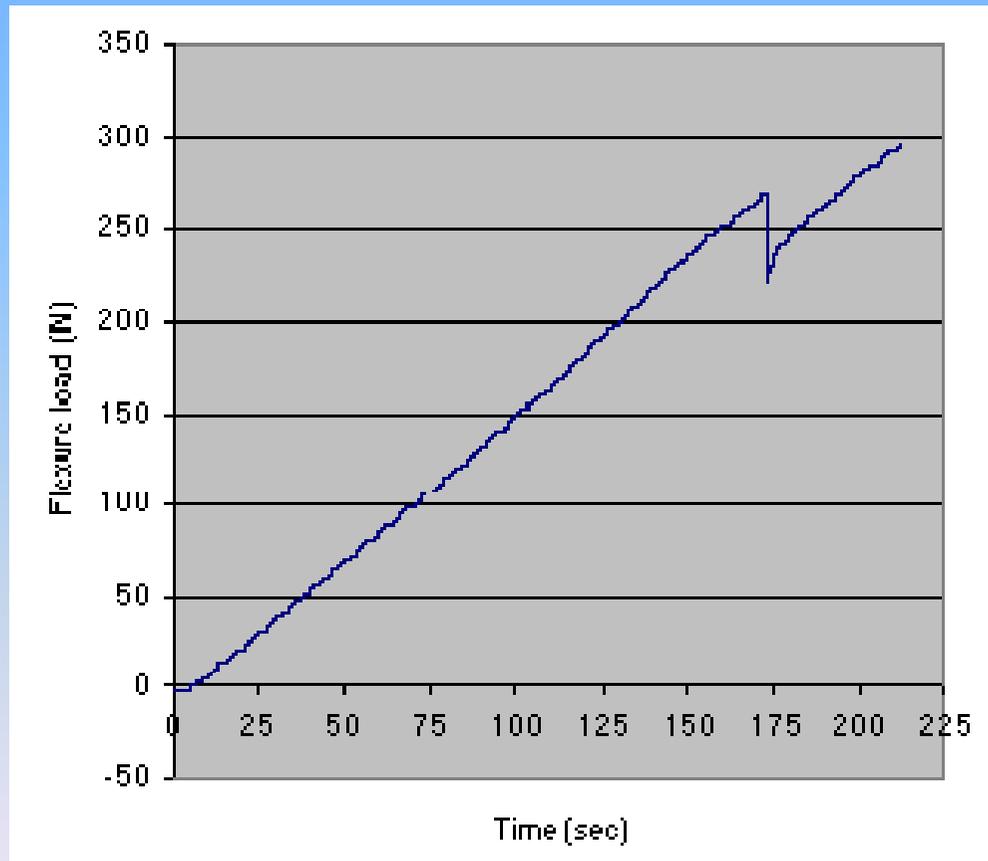


# 3-Point Bending Test





# 3-Point Test Results

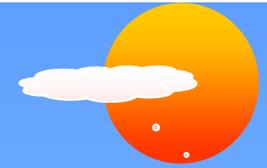


Strain Rate-----

**0.025 mm/sec  
(test until failure)**

Failure Criterion-----

**250  $\Omega$  change in  
electrical resistance**

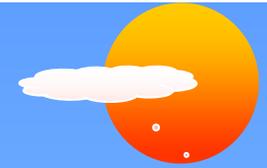


## 8.5 环境试验

环境试验是考核产品在各种环境（振动、冲击、离心、温度、热冲击、热潮等）条件下的适应能力，是评价产品可靠性的重要试验方法之一。

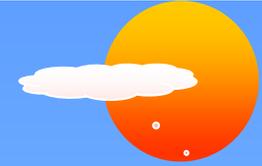
环境试验的试验场地应具有广泛的代表性，能进行尽可能多的试验项目，并且与将来可能的工作环境尽可能地接近。

环境大致可分为4大类：工业环境、自然环境、人为环境以及特殊环境。



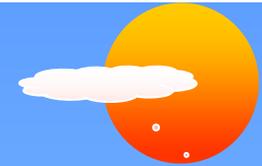
# 环境试验的分类

1. **现场使用试验**：可真实地反映产品在实际使用条件下的可能性；
2. **自然暴露试验**：是把样品长期放置于自然环境条件的一种试验；
3. **人工模拟试验**：在人工控制条件下，在试验室（或试验箱内）进行的试验。



# 环境试验的程序

- 1) 样品选择;
- 2) 环境条件的确定;
- 3) 预处理;
- 4) 初始检测;
- 5) 试验;
- 6) 中间检测;
- 7) 恢复处理;
- 8) 最后检测。



# 环境试验的方法

1. 振动试验;
2. 冲击试验;
3. 离心加速试验;
4. 低温试验;
5. 高温试验;
6. 温度交变试验;
7. 盐雾试验。