

# 几种灌封材料西沙热带海洋大气环境效应研究

刘丽红<sup>1,2</sup>, 胡湘洪<sup>1,2</sup>

(1.工业和信息化部电子第五研究所, 广州 510610;

2.广州市电子信息产品可靠性与环境工程中心重点实验室, 广州 510610)

**摘要:** 目的 研究灌封材料在南海海洋大气中的环境效应。方法 在南海西沙永兴岛开展24个月棚下大气暴露试验, 分析其性能劣化规律, 评价其环境适应性。开展实验室高温及湿热人工模拟试验, 并对比分析自然与人工模拟试验的相互关系。结果 参与试验的16种材料有5种材料环境适应性较好, 10种环境适应性一般。高温试验后参与试验的材料主要性能指标与棚下的相关性均为中等强度相关或之下, 11种材料的介电常数性能、体积电阻性能劣化加速倍数超过2倍以上。湿热试验后有11种材料主要性能指标与棚下的相关性均为中等强度相关或强相关, 10种材料表面电阻性能劣化加速倍数超过3倍以上, 14种材料体积电阻性能劣化加速倍数超过3倍以上。结论 在西沙棚下海洋大气环境中, 该批试验的灌封材料环境适应性一般。湿热试验与西沙棚下大气暴露试验相关性较好, 湿热试验对性能劣化加速性较好。

**关键词:** 灌封材料; 海洋大气暴露试验; 环境适应性

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2017.06.012

**中图分类号:** TJ04

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2017)06-0055-10

## Marine Environmental Effect of a Few Encapsulating Materials in Xisha

LIU Li-hong<sup>1,2</sup>, HU Xiang-hong<sup>1,2</sup>

(1.The Fifth Electronics Research Institute of Ministry of Industry and Information Technology, Guangzhou, 510610, China;

2.Key Laboratory of Electronic Information Product Reliability and Environmental Engineering Center in Guangzhou, 510610, China)

**ABSTRACT: Objective** To study the marine environmental effect of a few encapsulating materials in South China Sea. **Methods** The exposure test of a few encapsulating materials was carried out under shelter on Yongxing Island of Xisha in South China Sea for 24 months. The environmental effect and the environmental adaptability were analyzed. At the same time, the high temperature test and the humidity-heat test were completed. The correlativity between the environmental test and the artificial simulation test was compared and analyzed. **Results** There were 5 kinds of materials with better environmental adaptability and 10 kinds of materials with medium environmental adaptability in the tested 16 materials; the correlation between high temperature test and marine atmosphere expose test was medium or lower than medium, and there were 11 kinds of materials, which acceleration factor of dielectric constant and volume resistance were more than 2 times; there were 11 kinds of materials, which correlation between humidity-heat test and marine atmosphere expose test was medium or higher than medium, and there were 10 kinds of materials, which acceleration factor of surface resistance were more than 3 times, and there were 14 kinds of materials, which acceleration factor of volume resistance were more than 3 times. **Conclusion** The environmental adaptability of the tested encapsulating materials was medium under shelter on Xisha of South China Sea. The correlation between humidity-heat test and marine atmosphere expose test were preferable, and the humidity-heat test has better performance degradation acceleration effect.

**KEY WORDS:** encapsulating materials; marine atmosphere expose test; environmental adaptability

灌封材料有着良好的绝缘、防腐、防潮、固定、隔离等作用,在电子产品上的应用十分广泛,对电子装备的绝缘性、可靠性起着重要的作用<sup>[1-3]</sup>。目前的灌封材料多种多样,主要是各种合成聚合物,如环氧树脂、有机硅、有机硅环氧、聚酰亚胺、液态聚合物、端羟基聚丁二烯、各类聚氨酯等。其中环氧树脂、有机硅及聚氨酯灌封材料由于其各种优良特性而被广泛应用<sup>[4-8]</sup>。我国经过多年的研究,灌封材料性能的提高已取得了长足的进步<sup>[9-12]</sup>,可满足通用电子灌封领域的使用要求。由于自然环境的影响效应,灌封材料的性能会有不同程度的下降,尤其是三防性能。研究灌封材料的环境效应,尤其是恶劣环境的环境效应,提高灌封材料的环境适应性,对提高电子产品高可靠性和环境适应性,减少部件、整机故障,有着十

分重要的现实意义。

目前我国研究灌封材料在南海大气环境下的环境效应较少,文中选用电子装备常用有机硅、环氧树脂及聚氨酯类灌封材料样品,在南海西沙试验站进行海洋大气暴露试验,观察其性能劣化规律,并与实验室常规模拟试验进行对比分析,研究其相互关系。

## 1 实验方法

### 1.1 试样

试验选择不同厂家的环氧树脂、有机硅及聚氨酯灌封材料制作标准平板样品,试样尺寸为 $\phi 100\text{ mm}$ ,厚度约为 $2\text{ mm}$ 。试验样品清单见表1。

表1 试验样品

| 编号 | 种类    | 型号                   | 品牌  | 编号  | 种类    | 型号      | 品牌 |
|----|-------|----------------------|-----|-----|-------|---------|----|
| C1 | 有机硅   | INSULCAST RTVS 8127V | 摩根  | C9  | 环氧树脂类 | HL-1108 | 国产 |
| C2 | 有机硅   | HASUNCAST RTVS 267   | 哈森  | C10 | 环氧树脂类 | HL-1112 | 国产 |
| C3 | 有机硅   | HL-1029              | 国产  | C11 | 聚氨酯类  | PU8505  | 国产 |
| C4 | 有机硅   | HL-1025              | 国产  | C12 | 聚氨酯类  | 8836    | 国产 |
| C5 | 有机硅   | DC160                | 道康宁 | C13 | 聚氨酯类  | 8083    | 国产 |
| C6 | 环氧树脂类 | INSULCAST 116FR      | 摩根  | C14 | 聚氨酯类  | 8802    | 国产 |
| C7 | 环氧树脂类 | HASUNCAST 112FR      | 哈森  | C15 | 聚氨酯类  | TSE399  | 日本 |
| C8 | 环氧树脂类 | HL-1105              | 国产  | C16 | 聚氨酯类  | KE441-T | 日本 |

### 1.2 试验方法

考虑灌封材料多用于内部器件的密封,试验选择南海西沙试验站棚下大气暴露试验、实验室高温模拟试验及实验室湿热模拟试验。在试验过程中进行外观、电性能变化周期检测,观察其性能劣化规律。每种样品采用5块平行样来综合评价,对样品暴露24个月的试验结果进行对比分析。

1) 西沙棚下大气暴露试验条件:样品垂直悬挂,棚下年平均温度为 $27.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,年平均相对湿度为 $79.1\%$ ;总试验时间为24个月。

2) 高温模拟环境试验条件:参考标准 GJB 150 执行,试验温度为 $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,总试验时间为60 d。

3) 湿热模拟环境试验条件:参考标准 GJB 150 中交变湿热程序执行,总试验时间为60 d。

## 2 结果与讨论

### 2.1 西沙海洋大气环境劣化规律

#### 2.1.1 有机硅灌封材料

试验中5种有机硅类试样西沙棚下大气暴露24个月的主要性能指标变化趋势见图1。

由图1可以看出,试验2年后:介电常数呈轻微上升变化;损耗因数呈微弱升高的变化趋势;表面电阻基本未变或微弱下降的变化趋势;体积电阻轻微下降,下降了1个数量级左右;在试验过程中,耐压强度呈不同程度的先上升后下降的变化趋势,试验后基本属于微弱下降的变化趋势;表面邵氏硬度呈微弱到轻微上升变化趋势。

#### 2.1.2 环氧树脂类灌封材料

试验中5种环氧树脂类试样西沙棚下大气暴露2年的主要性能指标变化趋势见图2。

由图2可以看出,试验2年后:介电常数呈不同程度的上升变化趋势;损耗因数呈微弱升高的变化趋势;C6样品表面电阻下降了3个数量级,呈明显下降趋势,C7, C8, C9样品很轻微下降,下降了1个数量级,C10样品基本无变化;体积电阻下降了1个数量级或基本无变化;在试验过程中击穿强度呈先上升后下降的变化趋势,试验前后性能未下降;样品表面邵氏硬度呈很轻微上升的变化趋势。

#### 2.1.3 聚氨酯类材料

试验中6种聚氨酯类试样西沙棚下大气暴露2年的主要性能指标变化趋势见图3。

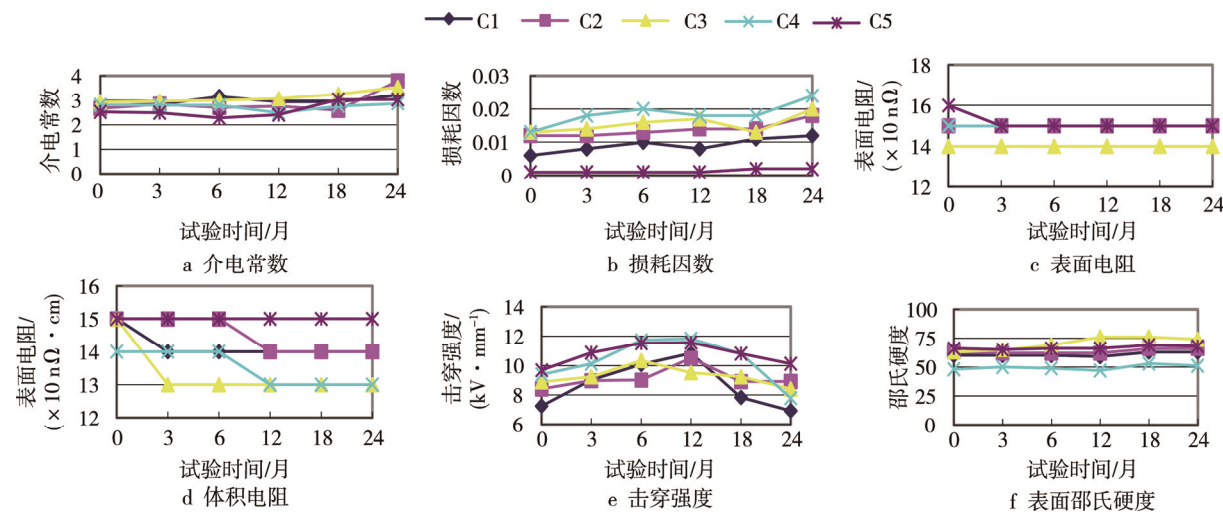


图 1 有机硅试样西沙棚下大气暴露性能劣化趋势

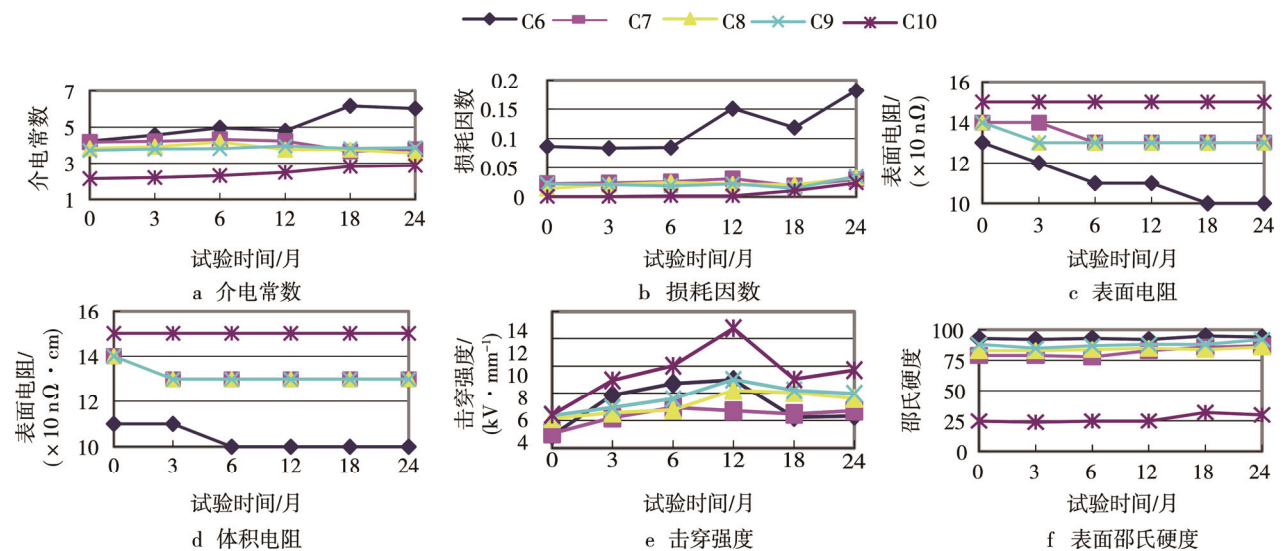


图 2 环氧树脂灌封样品西沙棚下大气暴露性能劣化趋势

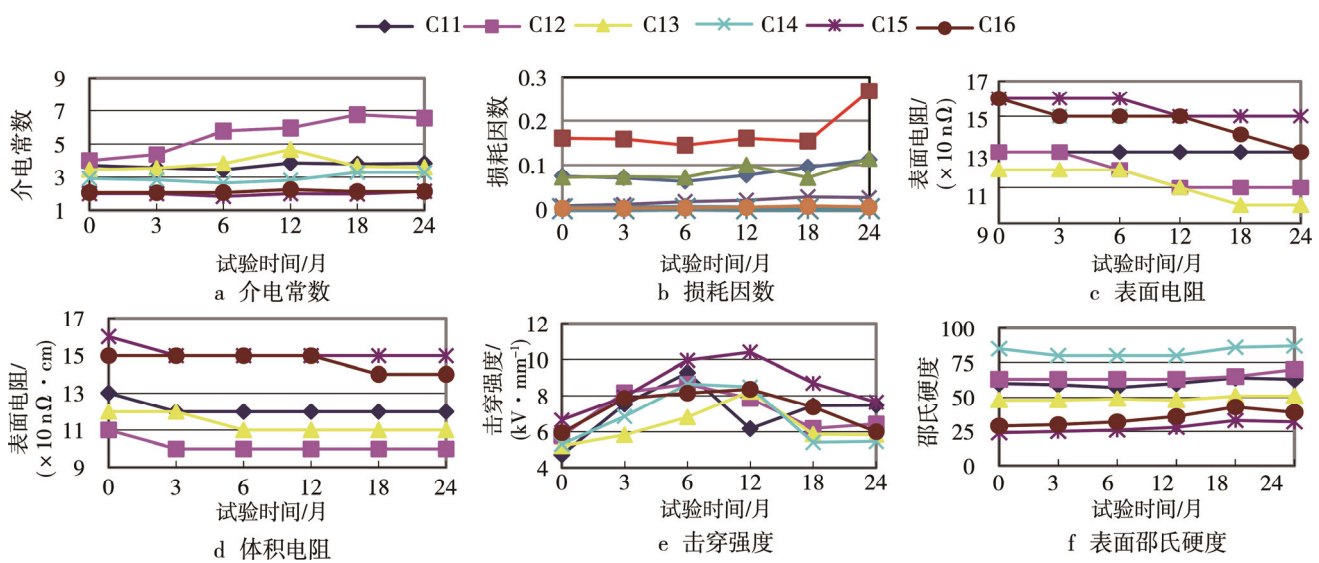


图 3 聚氨酯灌封材料西沙棚下大气暴露性能劣化趋势

由图3可以看出, 试验2年后: 介电常数呈不同变化趋势, 很轻微上升或无变化或明显上升的变化趋势; 损耗因数微弱升高或不变; 表面电阻呈轻微下降的变化趋势, 下降在2个数量级之内; 体积电阻均轻微下降, 下降在1个数量级之内; 击穿强度均呈先上升再下降的变化趋势, 试验前后性能未下降; 邵氏硬度总体呈轻微上升的变化趋势。

## 2.2 实验室模拟环境试验变化规律

### 2.2.1 高温模拟环境试验

#### 2.2.1.1 有机硅灌封材料

实验室高温模拟环境试验中有机硅类试样的主要性能指标变化趋势见图4。

由图4可以看出, 试验60 d后: 介电常数呈基本无变化或轻微上升变化趋势; 损耗因数呈微弱升高的变化趋势; 表面电阻轻微下降, 下降了1个数量级

左右; C4样品体积电阻变化明显, 下降3个数量级, 其他体积电阻轻微下降, 下降了1个数量级左右; 在试验过程中, 耐压强度呈不同程度的先上升后下降的变化趋势, 试验后基本属于微弱下降的变化趋势; 表面邵氏硬度呈微弱变化或基本无变化。

#### 2.2.1.2 环氧树脂类灌封材料

实验室高温模拟环境试验中环氧树脂类试样主要性能指标变化趋势见图5。

由图5可以看出, 试验60 d后: 介电常数呈微弱上升或基本无变化趋势; 损耗因数呈微弱下降或基本无变化; 表面电阻试验前后性能未下降; 体积电阻很轻微下降, 下降了1个数量级; 击穿强度呈先轻微上升后轻微下降的变化趋势, 试验前后性能未下降; 部分样品表面邵氏硬度呈很轻微上升, 部分样品表面邵氏硬度基本无变化。

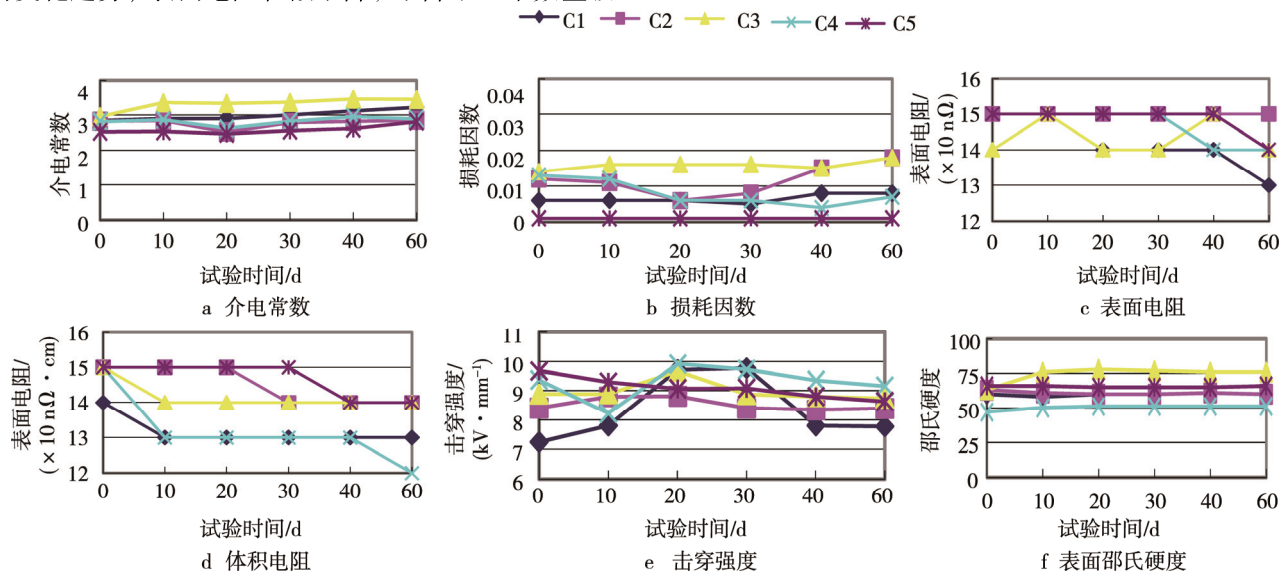


图4 有机硅试样高温试验性能劣化趋势

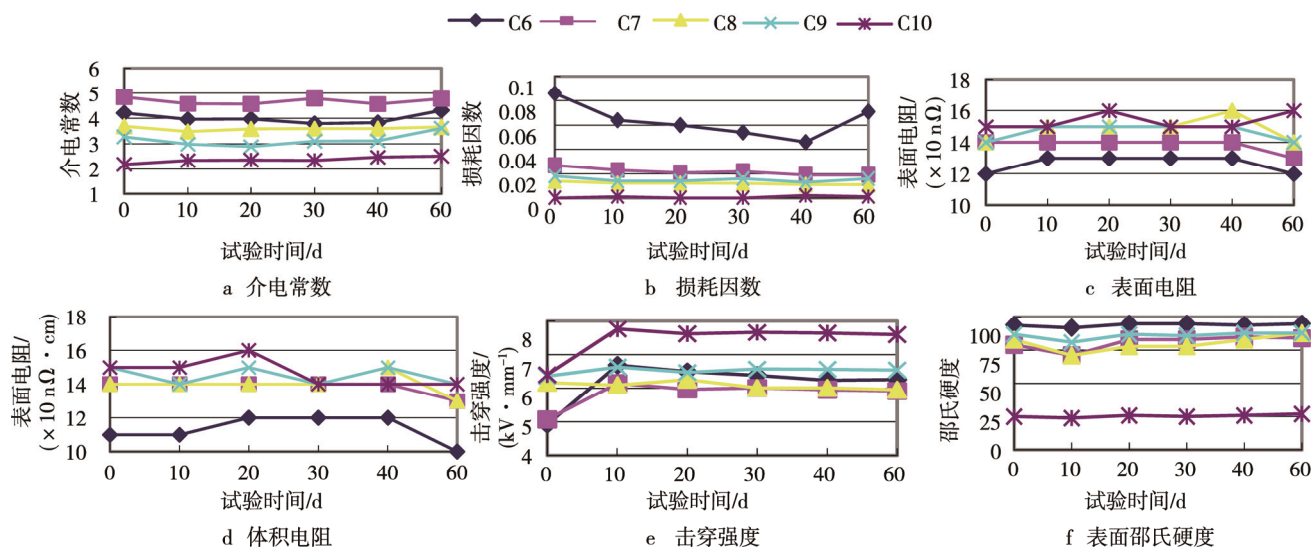


图5 环氧树脂灌封样品高温试验性能劣化趋势

### 2.2.1.3 聚氨酯类材料

实验室高温模拟环境试验中聚氨酯类试样主要性能指标变化趋势见图6。

由图6可以看出, 试验60 d后: 样品介电常数呈轻微或明显上升变化趋势; 损耗因数微弱升高或基本不变; 样品表面电阻性能呈基本未变或很轻微下降的变化趋势, 下降在1个数量级之内; 体积电阻呈很轻微下降, 下降在1个数量级之内; 击穿强度均呈先上升再下降的变化趋势, 试验前后性能未下降; 部分样品邵氏硬度呈轻微上升的变化趋势, 部分样品试验前后基本未变。

## 2.2.2 湿热模拟环境试验

### 2.2.2.1 有机硅灌封材料

实验室湿热模拟环境试验中有机硅类试样主要性能指标变化趋势见图7。

由图7可以看出, 试验60 d后: 介电常数变化微弱或基本无变化; 部分样品损耗因数明显升高, 部

分样品损耗因数微弱升高; 表面电阻、体积电阻轻微下降, 变化在1~2个数量级; 在试验过程中, 耐压强度呈不同程度的先上升后下降的变化趋势, 试验后部分样品性能未下降, 部分样品性能轻微下降; 表面邵氏硬度呈微弱上升变化趋势, 个别明显上升。

### 2.2.2.2 环氧树脂类灌封材料

实验室湿热模拟环境试验中环氧树脂类试样主要性能指标变化趋势见图8。

由图8可以看出, 试验60 d后: 介电常数、损耗因数呈不同程度的上升变化趋势; 样品表面电阻、体积电阻均下降了1~2个数量级, 呈轻微下降趋势; 在试验过程中击穿强度呈先上升后下降的变化趋势, 试验前后性能未下降; 样品表面邵氏硬度呈无变化到明显上升的不同变化趋势。

### 2.2.2.3 聚氨酯类材料

实验室湿热模拟环境试验中聚氨酯类试样主要性能指标变化趋势见图9。

由图9可以看出, 试验60 d后: 介电常数及损

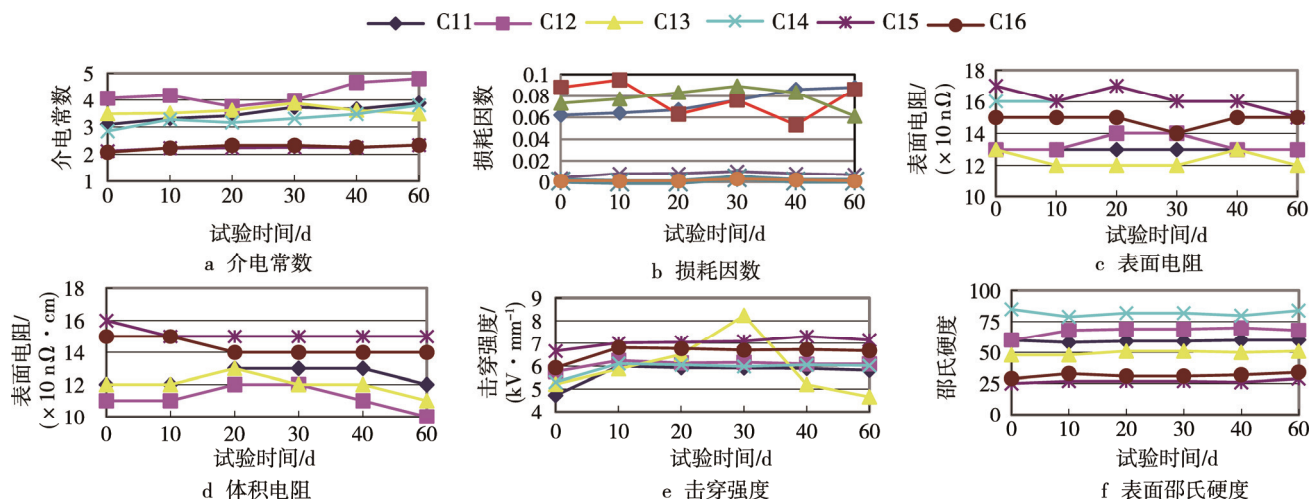


图6 聚氨酯灌封材料高温试验性能劣化趋势

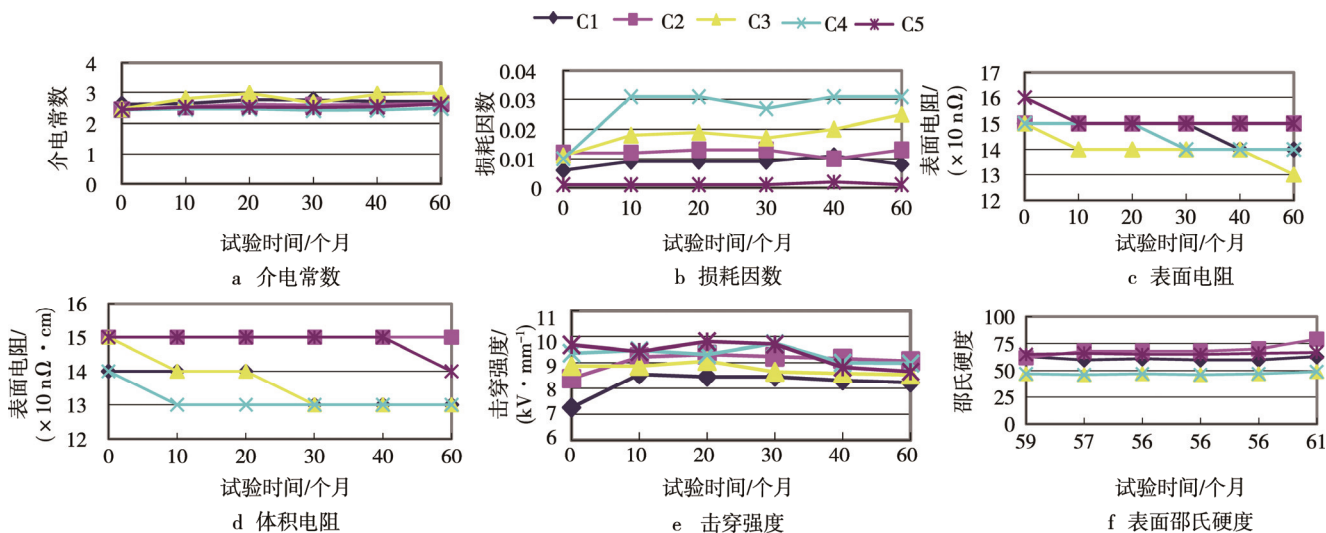


图7 有机硅试样湿热试验性能劣化趋势

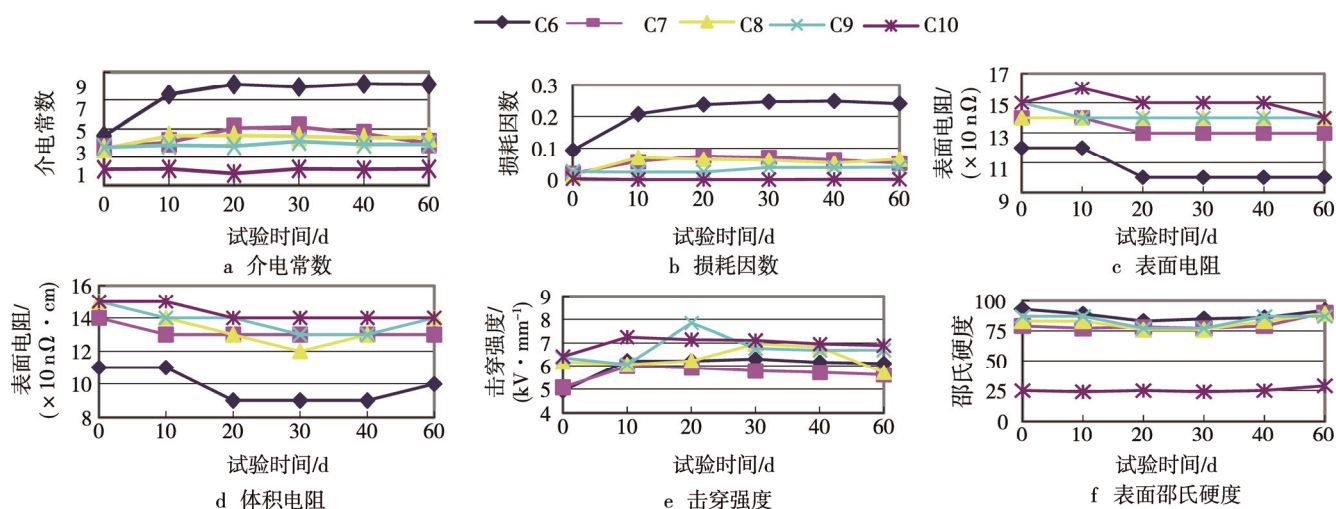


图8 环氧树脂灌封样品湿热试验性能劣化趋势

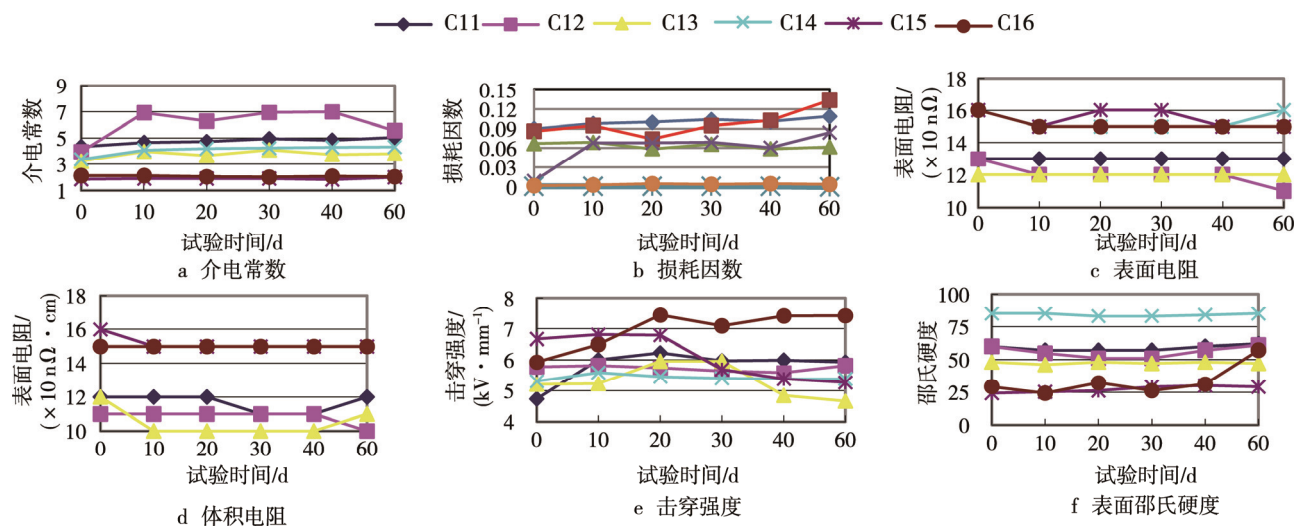


图9 聚氨酯灌封材料湿热试验性能劣化趋势

耗因数呈无变化到明显上升的不同变化趋势;表面电阻及体积电阻呈无变化到很轻微下降的变化趋势,下降在一个数量级之内;击穿强度均呈先上升再下降的变化趋势,试验前后部分样品性能未下降,部分样品性能下降;样品邵氏硬度呈无变化到明显上升的不同变化趋势。

## 2.3 自然与实验室相关性

应用 Spearman 秩相关系数  $R(\rho_2)$  法计算出灌封材料实验室高温模拟试验、湿热模拟试验与西沙大气暴露试验的相关系数见表2。

表2 西沙棚下大气暴露试验与实验室模拟试验相关系数

| 试验类别          | 材料类别 | 介电常数 | 损耗因素 | 表面电阻 | 体积电阻 | 击穿强度 | 表面硬度 |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|
| 西沙棚下/<br>高温试验 | 有机硅  | 0.65 | 0.49 | 0.44 | 0.68 | 0.62 | 0.42 |
|               | 环氧树脂 | 0.23 | 0.27 | 0.17 | 0.35 | 0.35 | 0.54 |
|               | 聚氨酯  | 0.58 | 0.38 | 0.53 | 0.38 | 0.56 | 0.48 |
|               | 平均   | 0.49 | 0.38 | 0.39 | 0.46 | 0.51 | 0.48 |
| 西沙棚下/湿<br>热试验 | 有机硅  | 0.74 | 0.54 | 0.59 | 0.58 | 0.72 | 0.52 |
|               | 环氧树脂 | 0.68 | 0.44 | 0.77 | 0.68 | 0.55 | 0.60 |
|               | 聚氨酯  | 0.55 | 0.54 | 0.71 | 0.80 | 0.48 | 0.68 |
|               | 平均   | 0.65 | 0.51 | 0.69 | 0.69 | 0.58 | 0.60 |

由表 2 中可看出,该次试验灌封材料实验室高温模拟试验、湿热模拟试验与西沙大气暴露试验的相关性如下所述。

1) 高温试验与棚下试验结果的相关性:介电常数性能变化中等强度相关,相关性一般;损耗因数性能变化弱相关,相关性较差;表面电阻性能变化弱相关,相关性较差;体积电阻性能变化中等强度相关,相关性一般;击穿强度性能变化中等强度相关,相关性一般;邵氏硬度性能变化中等强度相关,相关性一般。

2) 湿热试验与棚下试验结果的相关性:介电常

数性能变化强相关,相关性较好;损耗因数性能变化中等强度相关,相关性一般;表面电阻性能变化强相关,相关性较好;体积电阻性能变化强相关,相关性较好;击穿强度性能变化中等强度相关,相关性一般;邵氏硬度性能变化强相关,相关性较好。

2.4 实验室加速倍数

2.4.1 高温试验加速效应

应用 AF 加速倍数计算公式,计算出实验室高温试验与西沙大气暴露试验的加速倍数见表 3。

表 3 灌封材料高温试验相当于西沙大气暴露试验的加速倍数

| 工艺种类 |  | 介电常数变化量 | 高温试验时间/d |  | 西沙棚下大气暴露试验时间/d |  | AF1 |  |
|------|--|---------|----------|--|----------------|--|-----|--|
| C1   |  | 0.4     | 60       |  | 180            |  | 3   |  |
| C3   |  | 0.5     | 60       |  | 660            |  | 11  |  |
| C4   |  | 0.2     | 60       |  | >720           |  | >12 |  |
| C5   |  | 0.2     | 60       |  | 540            |  | 9   |  |
| C9   |  | 0.3     | 60       |  | >720           |  | >12 |  |
| C10  |  | 0.3     | 60       |  | 270            |  | 4.5 |  |
| C11  |  | 0.8     | 60       |  | >720           |  | >12 |  |
| C12  |  | 0.7     | 60       |  | 120            |  | 2   |  |
| C14  |  | 1       | 60       |  | >720           |  | >12 |  |
| C15  |  | 0.2     | 60       |  | >720           |  | >12 |  |
| C16  |  | 0.3     | 60       |  | >720           |  | >12 |  |

| 工艺种类 | 表面电阻<br>变化数量级 | 高温试<br>验时间/d | 西沙棚下大气暴<br>露试验时间/d | AF2  | 体积电阻变化数<br>量级 | 高温试<br>验时间/d | 西沙棚下大气<br>暴露试验时间/d | AF3   |
|------|---------------|--------------|--------------------|------|---------------|--------------|--------------------|-------|
| C1   | 0.3           | 20           | >720               | >36  | 0.6           | 60           | 540                | 9.0   |
| C2   | 0.2           | 10           | 90                 | 9.0  | 0.3           | 30           | 360                | 12.0  |
| C3   | 0.3           | 60           | 90                 | 1.5  | 0.9           | 60           | 90                 | 1.5   |
| C4   | 0.4           | 40           | 540                | 13.5 | 0.7           | 5            | 360                | 72.0  |
| C5   | 0.7           | 50           | 180                | 3.6  | 0.2           | 35           | 540                | 15.4  |
| C6   | 0.4           | 50           | 90                 | 1.8  | 0.4           | 60           | 90                 | 1.5   |
| C7   | 1.1           | 60           | 360                | 6.0  | 0.8           | 60           | 90                 | 1.5   |
| C8   | 0.4           | 60           | <60                | <1   | 0.8           | 60           | 60                 | 1.0   |
| C9   | 1             | >60          | 45                 | <1   | 1.3           | 60           | 85                 | 1.4   |
| C10  | 0             | /            | /                  | /    | 0.4           | 30           | >720               | >24   |
| C11  | 0.1           | >60          | 90                 | <1   | 0.4           | 60           | 150                | 2.5   |
| C12  | 0.3           | 60           | 50                 | <1   | 0.6           | 60           | 180                | 3.0   |
| C13  | 0.6           | 50           | 90                 | 1.6  | 1.1           | 60           | 160                | 2.5   |
| C14  | 0.6           | 60           | 135                | 2.3  | 1             | 60           | 360                | 6.0   |
| C15  | 1             | 50           | 390                | 7.8  | 0.4           | 50           | >720               | >14.4 |
| C16  | 0.2           | 60           | 90                 | 1.5  | 0.4           | 60           | 420                | 7.0   |

| 工艺种类 | 击穿强度<br>变化量/V | 高温试验<br>时间/d | 西沙棚下大气暴<br>露试验时间/d | AF4 | 邵氏硬度<br>变化量 | 高温试<br>验时间/d | 西沙棚下大气<br>暴露试验时间/d | AF5 |
|------|---------------|--------------|--------------------|-----|-------------|--------------|--------------------|-----|
| C3   | 0.5           | 35           | 720                | 21  | 13.0        | 60.0         | 360                | 6   |
| C4   | 1.6           | 40           | 720                | 18  | /           | /            | /                  | /   |
| C7   | /             | /            | /                  | /   | 5.0         | 60.0         | 360                | 6   |
| C8   | 0.2           | 60           | >720               | >12 | /           | /            | /                  | /   |
| C12  | /             | /            | /                  | /   | 8.0         | 60.0         | 720                | 12  |
| C13  | 0.2           | 60           | >720               | >12 | /           | /            | /                  | /   |
| C15  | /             | /            | /                  | /   | 4.0         | 60.0         | 360                | 6   |
| C16  | /             | /            | /                  | /   | 5.0         | 60.0         | 270                | 5   |

注: AF1 为灌封材料介电常数高温试验相对西沙棚下试验的加速倍数; AF2 为灌封材料表面电阻高温试验相对西沙棚下试验的加速倍数; AF3 为灌封材料体积电阻高温试验相对西沙棚下试验的加速倍数; AF4 为灌封材料击穿强度高温试验相对西沙棚下试验的加速倍数; AF5 为灌封材料邵氏硬度高温试验相对西沙棚下试验的加速倍数。

由表3结合试验数据可得出如下结论。

1) 高温试验对灌封材料的介电常数性能老化加速效果较好,进行试验的16种材料中,有11种加速效果明显,加速倍数在2倍以上,有6种材料加速倍数在12倍以上,尤其是聚氨酯灌封材料加速效果明显。

2) 高温试验对灌封材料的表面电阻性能老化加速效果较差,进行试验的16种材料中,只有6种加速效果明显,加速倍数在2倍以上。对于有机硅材料加速效果相对明显,5种材料中有4种材料的加速倍数在3.6倍以上。

3) 高温试验对灌封材料的体积电阻性能老化加速效果较好,进行试验的16种材料中,有11种加速效果明显,加速倍数在2.5倍以上,尤其是有机硅和聚氨酯灌封材料加速效果明显,加速倍数均在1.5以上。对于环氧树脂材料来说,该性能加速效果不明显,参试的5种材料中,只有1种加速效果明显,加速倍数在24倍以上,其他4种几乎没有加速效果。

4) 高温试验对灌封材料的击穿强度性能老化加速效果较差,进行试验的16种材料中,只有4种加速效果明显,加速倍数在12倍以上,其他材料加速效果不明显。

5) 高温试验对灌封材料的邵氏硬度性能老化加速效果较差,进行试验的16种材料中,只有5种加速效果明显,加速倍数在5倍以上,其他材料加速效果不明显。

#### 2.4.2 实验室湿热试验加速效应

应用AF加速倍数计算公式,计算出实验室湿热试验与西沙大气暴露试验的加速倍数见表4。

由表4结合试验数据可得出如下结论。

1) 湿热试验对灌封材料的介电常数性能老化加速效果一般,进行试验的16种材料中,只有7种加速效果明显,加速倍数在3倍以上,尤其聚氨酯灌封材料加速效果明显,参试的6种材料中,有4种材料加速效果较好。

2) 湿热试验对灌封材料的表面电阻性能老化加速效果较好,进行试验的16种材料中,有10种加速效果明显,加速倍数在3倍以上。对于有机硅材料加速效果相对明显,5种材料中只有C2加速倍数小于1倍,其他4种材料加速倍数在3倍以上。

3) 湿热试验对灌封材料的体积电阻性能老化加速效果较好,进行试验的16种材料中,有14种加速效果明显,加速倍数在3倍以上。

4) 湿热试验对灌封材料的击穿强度性能老化加速效果较差,进行试验的16种材料中,只有6种加速效果明显,加速倍数在10.5倍以上,其他材料加

速效果不明显。

5) 湿热试验对灌封材料的邵氏硬度性能老化加速效果较差,进行试验的16种材料中,只有7种加速效果明显,加速倍数在6倍以上,其他材料加速效果不明显,尤其有机硅灌封材料加速效果不明显。

## 2.5 分析

灌封材料属于高分子材料,在自然环境中,易受到热、氧、水、光、微生物、力、化学介质等影响发生老化,从而使其物理性能、电性能等降低,甚至丧失。空气中的氧会引起高分子发生氧化,造成降解或交联反应。光在老化过程中起活化作用,同时也是游离基生成过程中的引发剂,能引起高分子材料的光氧化反应。热会引起热老化,影响化学反应速率,加速破坏作用。湿气附在表面凝结成露后遇到亲水基团或者水溶性物质就会被吸附并渗透到高分子材料内层,破坏结构,降低其电学性能、物理性能和力学性能。在一定的温度、湿度条件下,高分子材料表面沉附的氯离子通过材料的微孔逐步渗透到内部,引起材料的老化。高分子材料表面在一定的温度、湿度和介质条件下会滋长霉菌等微生物,吃掉高分子材料中的某些成分及分解碳氢化合物,从而降低其电学性能、机械强度,甚至破坏其组分、结构,引起老化<sup>[13]</sup>。

1) 在西沙棚下大气暴露试验时,棚下年平均气温27.6℃,棚下年平均相对湿度RH为79.1%,户外年平均太阳辐照量为6760.6 MJ/m<sup>2</sup>,户外月平均氯离子含量为0.152 μg/mL,霉菌种类繁多,为典型热带海洋大气环境。因此西沙环境特有的高温、高湿、高盐雾及霉菌交互作用,是灌封材料性能劣化的主要因素。

2) 高温试验和湿热试验结果表明,高温加速及相关性较湿热试验效果差,这是因为热虽然是促进高聚物发生老化反应的主要因素之一,可使高聚物分子发生链断裂从而产生自由基,形成自由基链式反应,导致聚合物降解和交联,性能劣化。纯粹大气中的热对高分子材料是没有多大破坏作用的,其引起的破坏作用主要是有氧存在下的氧化作用,即“热氧老化”<sup>[13]</sup>。高温下的水汽对高分子材料具有一定的渗透能力,在热的作用下,这种渗透能力更强,能够渗透到材料体系内部并积累起来形成水泡,从而降低分子间相互作用力,导致材料的性能老化<sup>[14]</sup>。因此在该试验中,单一75℃的高温试验对耐高温性能优良的灌封材料样品劣化效果不明显,湿热试验对样品的劣化影响更接近于西沙棚下环境影响,相关性和加速性结果更好。

表 4 灌封材料湿热试验相当于西沙大气暴露试验的加速倍数

| 工艺种类 |  | 介电常数变化量 | 湿热试验时间/d |  | 西沙棚下大气暴露试验时间/d |  | AF1 |  |
|------|--|---------|----------|--|----------------|--|-----|--|
| C3   |  | 0.5     | 60       |  | 660            |  | 11  |  |
| C6   |  | 3.5     | 60       |  | >720           |  | >12 |  |
| C8   |  | 0.8     | 60       |  | >720           |  | >12 |  |
| C11  |  | 7       | 60       |  | >720           |  | >12 |  |
| C12  |  | 1.6     | 60       |  | 180            |  | 3   |  |
| C13  |  | 0.6     | 60       |  | >720           |  | >12 |  |
| C14  |  | 0.9     | 60       |  | >720           |  | >12 |  |

| 工艺种类 | 表面电阻变化数量级 | 湿热试验时间/d | 西沙棚下大气暴露时间/d | AF2   | 表面电阻变化数量级 | 湿热试验时间/d | 西沙棚下大气暴露试验时间/d | AF3  |
|------|-----------|----------|--------------|-------|-----------|----------|----------------|------|
| C1   | 0.1       | 50       | 540          | 10.8  | 0.7       | 60       | 180            | 3.0  |
| C2   | 0.1       | 60       | 45           | <1    | 0.1       | 60       | 210            | 3.5  |
| C3   | 0.6       | 50       | 540          | 10.8  | 1.9       | 50       | 180            | 3.6  |
| C4   | 0.1       | 20       | >720         | >36   | 0.9       | 50       | 540            | 10.8 |
| C5   | 0.7       | 60       | 180          | 3.0   | 0.1       | 50       | 720            | 14.4 |
| C6   | 2.7       | 60       | 180          | 3.0   | 1.3       | 60       | 360            | 6.0  |
| C7   | 0.6       | 60       | 210          | 3.5   | 0.7       | 60       | 65             | 1.0  |
| C8   | 0.3       | 60       | <60          | <1    | 1         | 60       | 180            | 3.0  |
| C10  | 0.3       | 50       | >720         | >14.4 | 0.4       | 10       | >720           | >72  |
| C11  | 0.1       | >60      | 60           | <1    | 0.6       | 60       | 540            | 9.0  |
| C12  | 1.5       | 50       | 180          | 3.6   | 1         | 60       | 600            | 10.0 |
| C13  | 0.6       | 60       | 90           | 1.5   | 1.2       | 60       | 180            | 3.0  |
| C14  | 0.2       | 60       | 60           | 1.0   | 1         | 60       | 360            | 6.0  |
| C15  | 0.9       | 60       | 420          | 7.0   | 1         | 60       | >720           | >12  |
| C16  | 1.1       | 60       | 180          | 3.0   | 0.1       | 60       | 180            | 3.0  |

| 工艺种类 | 击穿强度变化量 | 湿热试验时间/d | 西沙棚下大气暴露试验时间/d | AF4  | 邵氏硬度变化量 | 湿热试验时间/d | 西沙棚下大气暴露试验时间/d | AF5 |
|------|---------|----------|----------------|------|---------|----------|----------------|-----|
| C3   | 0       | 60       | 720            | 12   | 6.0     | 30       | 180            | 6.0 |
| C4   | 0       | 60       | 630            | 10.5 | /       | /        | /              | /   |
| C5   | 1       | 60       | >720           | >12  | /       | /        | /              | /   |
| C7   | /       | /        | /              | /    | 5.0     | 50       | 420            | 8.4 |
| C8   | 1       | 60       | >720           | >12  | 6.0     | 60       | >720           | >12 |
| C10  | /       | /        | /              | /    | 4.0     | 60       | 540            | 9.0 |
| C13  | 1       | 60       | >720           | >12  | 4.0     | 60       | 540            | 9.0 |
| C15  | 1       | 60       | >720           | >12  | 5.0     | 60       | 360            | 6.0 |
| C16  | /       | /        | /              | /    | 9.0     | 50       | 360            | 7.2 |

注：AF1 为灌封材料介电常数湿热试验相对西沙棚下试验的加速倍数；AF2 为灌封材料表面电阻湿热试验相对西沙棚下试验的加速倍数；AF3 为灌封材料体积电阻湿热试验相对西沙棚下试验的加速倍数；AF4 为灌封材料击穿强度湿热试验相对西沙棚下试验的加速倍数；AF5 为灌封材料邵氏硬度湿热试验相对西沙棚下试验的加速倍数。

3 结论

1) 参与试验的 16 种灌封材料中，有 5 种在西沙棚下大气环境中环境适应性较好，10 种环境适应性一般，只有 1 种环境适应性较差，即灌封材料在西沙棚下大气环境中环境适应性一般。

2) 此次进行高温试验的 16 种灌封材料中，几乎有 62.5%以上的材料主要性能指标与西沙棚下大气暴露试验的相关性都为中等强度相关或之下，即高温试验与西沙海洋大气暴露试验结果相关性较差。原因为灌封材料耐高温性能较好，试验温度远低于其老化温度。

3) 此次进行湿热试验的 16 种灌封材料中，至少

有 68.8%以上的材料主要性能指标与西沙棚下大气暴露试验的相关性都为中等强度相关或强相关,即湿热试验与西沙海洋大气暴露试验结果相关性较好,其原因为湿热是灌封材料电性能劣化的重要因素。

4) 高温试验对灌封材料的介电常数性能、体积电阻性能劣化加速效果较好,超过 69%的灌封材料加速倍数超过 2 倍以上。

5) 湿热试验对灌封材料的表面电阻性能老化、体积电阻性能老化加速效果较好,超过 63%材料表面电阻性能老化加速倍数超过 3 倍以上,超过 88%材料体积电阻性能老化加速倍数超过 3 倍以上。

#### 参考文献:

- [1] 罗刚. 电子器件灌封材料的现状及发展趋势[J]. 试验科学与技术, 2010, 8(3): 21—23.
- [2] 曾诚. 电子灌封材料的研究现状及发展趋势[C]// 四川省电子学会生产技术专委会先进制造技术成果交流会议论文集. 成都: 四川省电子学会, 2005.
- [3] 李楠, 苏桂明, 王宇非, 等. 高性能绝缘灌封材料的研制[J]. 电子工艺技术, 2009, 20(5): 287—290.
- [4] NING Y B, LOKE Y, MCKINNON G. Fabrication and Characterization of High g-force, Silicon Piezoresistive Accelerometers[J]. Sensors and Actuators A, 1995, 48: 55—61.
- [5] 乔红云, 寇开昌, 颜录科, 等. 有机硅灌封材料的研究进展[J]. 材料科学与工程学报, 2006, 24(2): 321—324.
- [6] 武应涛. 聚氨酯绝缘灌封材料性能及其应用[J]. 聚氨酯工业, 2004, 19(5): 43—45.
- [7] 白战争, 赵秀丽, 罗雪方, 等. 环氧灌封材料的研究进展[J]. 材料导报, 2009, 23(1): 24—27.
- [8] RIMDUSIT S, ISHIDA H. Development of New Class of Electronic Packaging Materials Based on Ternary Systems of Benzoxazine, Epoxy, and Phenolic Resins[J]. Polymer, 2000, 41(22): 7941.
- [9] 郭艳宏. 电子电器环氧灌封材料的研究现状与发展趋势[J]. 化学工程师, 2002, 93(6): 44—45.
- [10] 王颖, 周春艳. 耐高低温冲击的绝缘灌封材料[J]. 电子工艺技术, 2013, 34(2): 110—113.
- [11] 刘运学, 王晓丹, 范兆荣, 等. 硅微粉填料对环氧灌封材料性能的影响[J]. 天津化工, 2009, 23(4): 30—32.
- [12] 李芝华, 林伟, 谢科予, 等. 玻璃纤维填充聚氨酯改性环氧树脂灌封材料的性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2009, 25(9): 47—49.
- [13] 李晓刚, 高谨, 张三平, 等. 高分子材料自然环境老化规律与机理[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [14] 任圣平, 张立. 高分子材料老化机理初探[J]. 信息记录材料, 2004, 5(4): 57—59.