

自然贮存场自然环境剖面归纳处理

张文伟, 李宏民

(中国航天科工集团第二研究院 201所, 北京 100854)

摘要: 针对某自然贮存场近几年的自然环境因素数据,应用小波分析理论对温度数据的周期分量和随机分量进行了分离。在数据分离的基础上,根据阿仑尼斯方程对年温度数据的周期分量,进行了等效平均,获得以热天、冷天划分的年恒定温度剖面。根据Manson-coffin模型对温度数据的随机分量进行了等效循环处理,最后综合得到贮存场的试验室模拟试验应力剖面。文中所有统计归纳均应用了MIL-STD-810中所建议的容差数据处理归纳方法。

关键词: 温度环境; 试验剖面; 损伤等效; 数据分离。

中图分类号: V216 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2011)01-0061-05

Induction Treatment of Environmental Profile of Natural Storage Station

ZHANG Wen-wei, LI Hong-min

(No. 201 Research Institute, Second academy of CASIC, Beijing 100854, China)

Abstract: The theory of wavelet was used to separate the periodic component and the stochastic component of temperature data from recent years' natural environmental data of a certain natural storage station. Equivalent mean was processed on the periodic component of annual temperature data using Arrhenius equation. The temperature profile was formulated by drawing isothermal curve of hot days and cold days in a year. Equivalent circulation treatment was processed on the stochastic component of annual temperature data using Manson-coffin equation. The stress profile of the natural storage station for laboratory simulation test was formulated from the integration of above. The induction data was carried out in accordance with MIL-STD-810.

Key words: temperature environment; stress profile; damage equivalent; data separation

对于随机振动数据的处理, MIL-STD-810中建议采用容差法进行振动环境数据的处理,然而自然环境因素数据的处理与归纳一直以来没有相应的标准。目前,我国外场自然环境因素数据采集,主要涉

及了温度、相对湿度、气压、太阳辐射、风向风速及天气现象几个方面。在试验室中能够模拟的自然环境因素有温度、湿度、气压、辐射和风速,基本涉及了所采集自然环境数据的几个方面,但主要是温度、相对

收稿日期: 2010-08-10

作者简介: 张文伟(1974—),男,硕士研究生,主要从事环境与可靠性试验技术研究。

湿度和气压三综合的自然环境因素的模拟。对这3个自然环境因素的模拟,仅是温度模拟能够达到很好的控制性,湿度和气压通常都采用恒定应力值施加方式模拟外场的综合环境应力。

外场自然环境因素受到的影响有2个方面:地理(包括生态地理)环境和气候环境。地理与生态地理环境所具有的特点是,通过长期的物理、生物、化学作用形成后,在相当一段时间内其变化甚微,一定程度上可看成一个稳定的系统。采集的自然环境因素数据,是此系统在气候环境激励下的响应。气候环境激励由周期性因素和非周期因素构成,气候因素因时间变化呈现一定的周期性,是太阳系天体运动的结果。每年中相同日期的气候因素具有较大的随机性,是诸多随机因素影响的结果。笔者对自然环境剖面处理,主要是针对温度,相对湿度和气压则仅仅考虑极值环境。

1 分离温度数据的周期量和随机量

温度受一天内昼夜周期变化和一年内季节周期变化的影响,特定地理环境的温度数据中包含了这2个周期变化量。同时,不同年份中对应日期的温度数据,又受到其它诸多因素的影响,体现出一定的随机性。外场采集的某地区温度数据如图1所示。

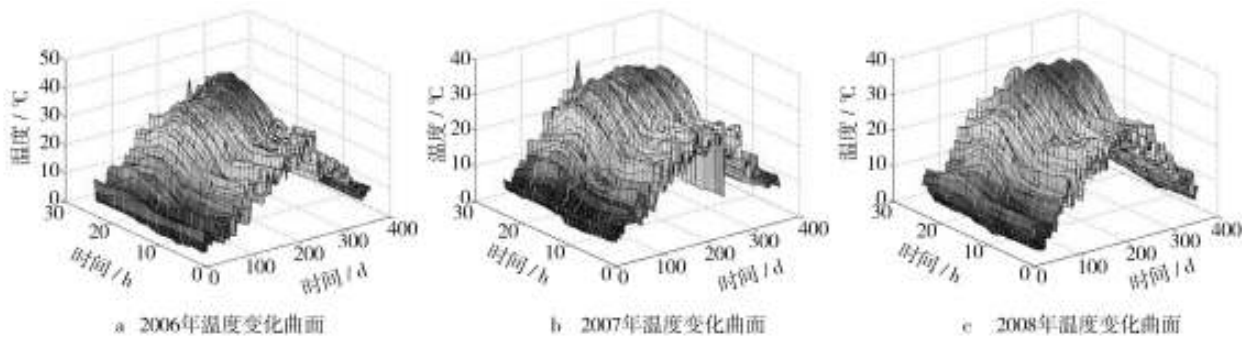


图1 某试验场年温度环境因素变化曲面

Fig. 1 Curved surface of annual temperature of a test station

$$T_i = \frac{1}{5}(2T_{i-1} + T_i + 2T_{i+1}) \quad (3)$$

滑动平均滤波器能够剔除信号中毛刺现象。经过奇异值剔除和平滑滤波处理后年温度自然因素变化曲面如图2所示。

常规的滤波方法或在时域上应用最小二乘法拟合趋势项来进行信号分离与重构,均会使得重组信

从图1可以看出,所采集的数据有一些奇异点。奇异点的产生,第1类来自于数据采集系统的非正常工作,第2类来自于特殊剧烈气候因素。第1类奇异点应剔除。对第2类奇异点,考虑产品在生产过程中经历环境鉴定,同时奇异点的应力历程较短,把奇异点的应力环境归结到极值应力环境范畴。因此,贮存环境应力不考虑奇异点对产品贮存寿命的影响,所以需要数据进行奇异值剔除和平滑滤波处理。奇异值的判别见式(1), $i=1, \dots, 365, j=1, \dots, 24$,分别代表一年中的每天和一天中的每个小时的编号:

$$\left| T_{i,j} - \frac{1}{4}(T_{i-2,j} + T_{i-1,j} + T_{i+1,j} + T_{i+2,j}) \right| \geq 10$$

或: $\left| T_{i,j} - \frac{1}{4}(T_{i,j-2} + T_{i,j-1} + T_{i,j+1} + T_{i,j+2}) \right| \geq 10$ (1)

在判别所采集数据为奇异点后,进行剔除处理,见式(2):

$$T_{i,j} = \frac{1}{4}(T_{i-2,j} + T_{i-1,j} + T_{i+1,j} + T_{i+2,j})$$

或: $T_{i,j} = \frac{1}{4}(T_{i,j-2} + T_{i,j-1} + T_{i,j+1} + T_{i,j+2})$ (2)

在进一步对信号采集过程中,由于仪器和人为原因引入的随机量,一般数字信号处理要求对所采集的信号进行平滑处理,使用滑动平均滤波处理:

号失真较大。采用小波变换进行信号分离和重组,可以达到分离采集数据的周期分量和随机分量这一目的。

对于任一可积平方函数 $\psi(t)$,即 $\psi(t) \in L^2(R)$,若其傅立叶变换满足条件: $C_\psi = \int_R \frac{|\psi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty$,则称为一个基小波。在基波函数上进行伸缩和平移

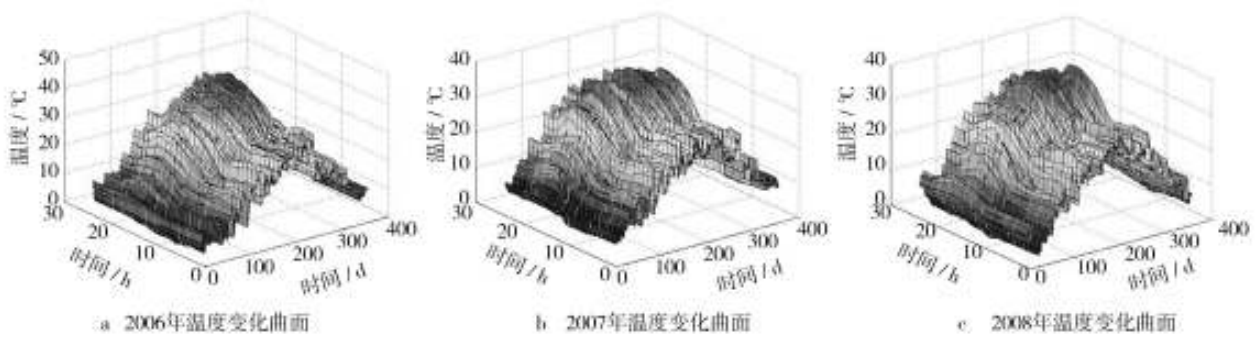


图2 奇异值剔除、平滑滤波后温度环境因素变化曲面

Fig. 2 Curved surface of temperature after singular value elimination and smoothing filtering

得到小波基函数: $\psi_{a,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right)$, $a, \tau \in R$; $a > 0$ 。有了小波基函数后,对于任意 $L^2(R)$ 空间中的函数 $f(t)$ (信号),可定义小波变换和逆变换:

$$\begin{cases} WT_f(a,\tau) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) dt \\ f(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_0^{+\infty} \frac{da}{a^2} \int_{-\infty}^{+\infty} WT_f(a,\tau)\psi_{a,\tau}(t) d\tau \end{cases} \quad (4)$$

式中: $C_\psi = \int_R \frac{|\psi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty$ 。

小波基函数的窗口随尺度因子的不同而伸缩,当

a 增大时,基函数 $\psi_{a,\tau}(t)$ 的时间窗口增大,而其对应的频率窗口相应减小,中心频率变低。当 a 减小小时,基函数 $\psi_{a,\tau}(t)$ 的时间窗口减小,而其频率窗口相应增大,中心频率升高。对于一个固定的 a ,变换就对应一个中心频率滤波器,当取 $\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ 进行离散小波变换和逆变换,即可在时域上对信号进行分层处理。采用 Matlab 小波工具包中的 Daubechies 小波,对年温度数据进行分层和重组处理,低频趋势层为天或年温度周期变化量,所有其它层的重组构成温度随机变化量,处理结果如图3所示。

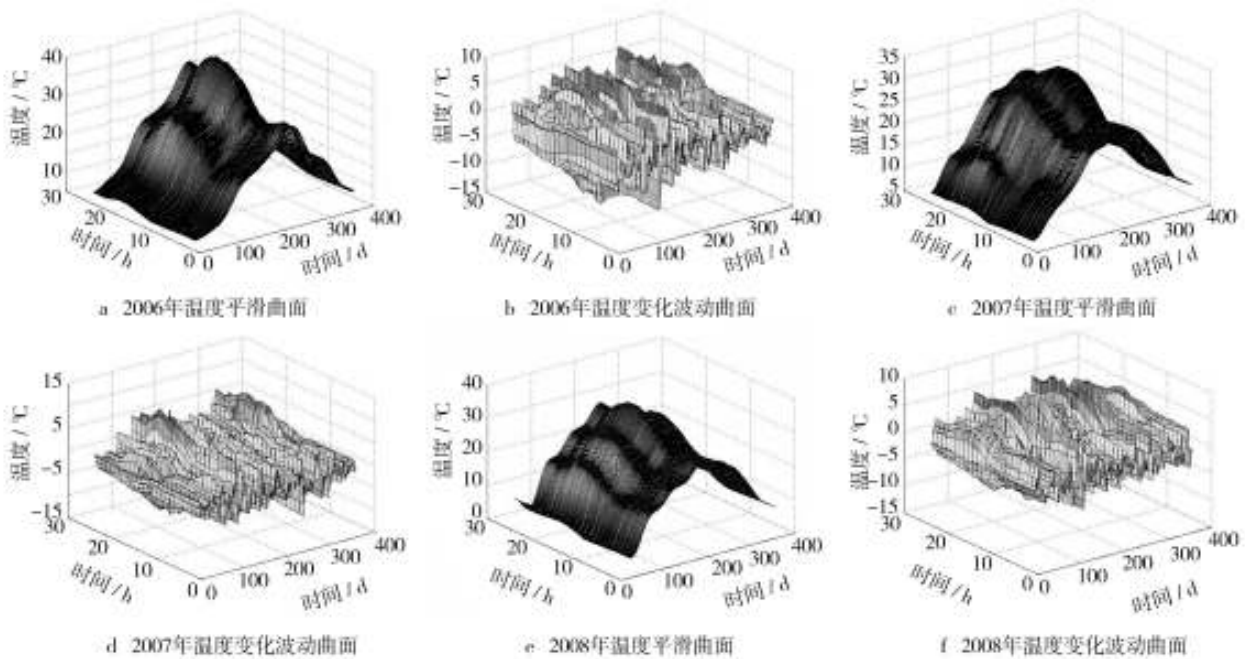


图3 周期量、随机量分离后温度环境因素变化曲面

Fig. 3 Curved surface of temperature after periodic and stochastic component separation

2 温度数据统计分析

归纳温度应力剖面,需进行等效损伤平均,形成试验室可用的温度应力剖面。对于温度的天周期应力剖面 and 年周期应力剖面,根据阿仑尼乌斯方程,认为产品的对数寿命与产品受到的绝对温度应力的倒数成直线关系,即:

$$\ln \theta = a + b/T \tag{5}$$

式中: θ 为产品的寿命特征参数; a, b 为待定常数; T 为产品所受的绝对温度应力。

根据阿仑尼乌斯方程可得:

$$d \ln \theta = -\frac{b}{T^2} dT \tag{6}$$

把绝对温度应力剖面表达为函数 $f(T, t)$ 时,有:

$d \ln \theta = -\frac{b}{T(t)^2} dT(t)$ 。在作用时间 (t_1, t_2) 内应力剖面给产品带来的损伤为:

$$\Delta \ln \theta = \int_{t_1}^{t_2} -b \frac{1}{T(t)^2} dT(t) \tag{7}$$

根据积分中值定理有: $\int_{t_1}^{t_2} -b \frac{1}{T(t)^2} dT(t) = -bT^* \cdot (t_2 - t_1)$, 进而得到损伤等效的均值函数 T^* :

$$T^* = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{T(t)^2} dT(t)}{t_2 - t_1} \tag{8}$$

应用式(8),对所采集数据 1 d 内的温度剖面进行平均,得到年温度变化曲线如图 4 所示:

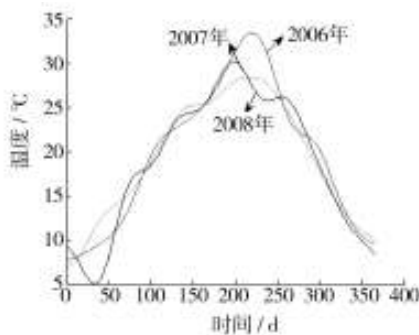


图4 年温度变化曲线

Fig. 4 Changing curve of annual temperature

年温度周期变化,随着年份的不同具有随机性,受到各种气候因素的影响,因而假设采集数据的随机性均服从正态分布。在进行数据统计分析估计

时,希望所得的统计估计量能够较好地包络较多的极值条件(峰值),同时又不希望进行完全的峰值包络,造成统计估计量过大。MIL-STD-810 建议振动数据采用容差估计,所以笔者也引用容差估计方法来估计年温度极值剖面 and 年温度循环的极值应力条件。正态分布数据的容差估计如下。

对于正态分布,随机变量 $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ 。在给定包容概率 β 时,有 $F(X_\beta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{X_\beta} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt = \beta$ 。

当知道标准正态分布的 $P(Z \leq Z_\beta) = \beta$ 分位点 Z_β 时,可得 X 的取值上限为:

$$X_\beta = \mu + Z_\beta \sigma \tag{9}$$

在给定一定置信度 $(1 - \alpha)$ 的情况下,利用统计量 $\frac{\bar{X} - \mu}{S/\sqrt{N}}$ (N 为统计样本量)服从自由度为 $N-1$ 的 $t(N-1)$ 分布,和统计量 $\frac{nS^2}{\sigma^2}$ 服从自由度为 $N-1$ 的 $\chi^2(N-1)$ 分布,可得 μ, σ 的置信上限:

可得 μ, σ 的置信上限:

$$\begin{cases} \mu_{c,u} = \bar{X} - t_{1-\alpha}(N-1) \frac{S}{\sqrt{N}} \\ \sigma_{c,u} = \sqrt{\frac{N-1}{\chi_{1-\alpha}^2(N-1)}} \end{cases} \tag{10}$$

由于 $\mu_{c,u}, \sigma_{c,u}$ 形成了新的正态随机变量 $X_{c,u} = N(\mu_{c,u}, \sigma_{c,u}^2)$, 从而得到在已知子样 $X(i) (i=1, 2, \dots, N)$ 的统计特性 (\bar{X}, S^2) 条件下,正态分布随机变量 $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ 在置信度 $(1 - \alpha)$ 下以概率 β 包含数据得到容差上限估计式为:

$$X_u(N, \alpha, \beta) = \bar{X} + \left(\frac{t_{1-\alpha}(N-1)}{\sqrt{N}} + Z_\beta \sqrt{\frac{N-1}{\chi_{1-\alpha}^2(N-1)}} \right) \tag{11}$$

在数据的正态假设下,利用容差估计,得到置信度为 90%,包容概率为 99% 的年温度变化容差估计曲线(如图 5 所示)。

温度随机变化量的估计,把图 3 中连续 3 a 的温度波动数据以 h 为时间单位展开,同样应用式(11)进行容差估计,得到置信度为 90%、包容概率为 99% 的容差估计。对所有的循环过程都以峰-峰值为 10.5 °C 的温度循环来估计,显然是不合理的,因此需对展开的年温度随机波动曲线进行滤波处理,剔除高频小幅值数据,得到温度循环曲线

如图6所示。

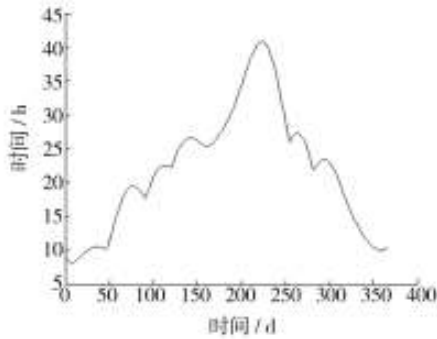


图5 年温度变化容差估计曲线

Fig. 5 Tolerance estimation of annual temperature

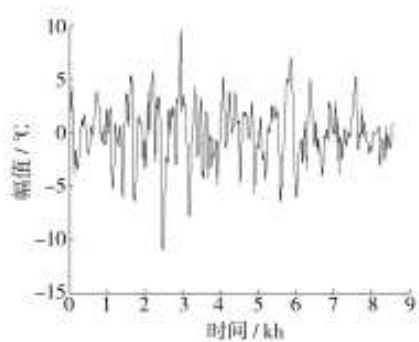


图6 大幅值年温度循环曲线

Fig. 6 Large amplitude annual temperature circulation

应用雨流法进行循环计数统计,得到循环数为43。1 a的温度循环应力剖面归纳如图7所示。

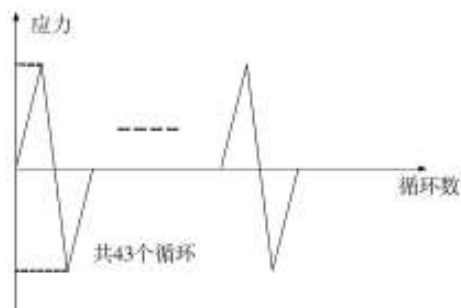


图7 年温度循环应力剖面

Fig. 7 Stress profile of annual temperature circulation

3 等效试验应力剖面处理

应用式(8),把图5的年温度变化容差估计曲线低于日温 20 ℃的气候天等效为冷天,高于日温

20 ℃的气候天等效为热天,得到冷天等效平均温度为12 ℃(历程151 d),热天等效平均温度为28 ℃(历程214 d)。这2个温度即为试验温度剖面的最低温度和最高温度,其差值为试验剖面温度循环幅值。因而,图7的温度循环剖面需要等效为幅值16 ℃(峰-峰)的等效温度循环数。

目前,温度循环应力对产品失效的作用机理研究还处于低周疲劳损伤认识阶段,唯一应用于应力筛选和加速寿命试验的Manson-coffin模型是根据电子器件管脚焊点的疲劳寿命推导出来的。其应用了Basquins公式:

$$AN^b = \tan t \tag{12}$$

式中:A为应力幅值;N为应力循环数;b为常数; $\tan t$ 为与产品有关的常量。

两幅值应力不同的循环应力循环数等效可用式(13)进行等效:

$$N_2 = N_1 \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^{1/b} \tag{13}$$

式中:1/b为常量,在MIL-STD-810D中推荐正弦载荷取值为5,这里把温度循环应力看作正弦载荷。因此,图7的温度循环应力等效为幅值16 ℃(峰-峰)的温度循环时,等效循环数为6。

由于此地区海拔对气压的影响较小,所以自然环境因素应力剖面对气压不作处理,以试验室环境大气压作为试验时的模拟应力。湿度应力根据热天平均湿度应力93%作为试验时热天剖面的试验模拟应力。由于冷天湿度控制较为困难,同时考虑到白昼由于有阳光能量的输入,对环境具有加湿作用,夜晚环境基本上不存在加湿,所以试验时冷天不控制湿度。

经过上面的等效处理,最终的试验应力剖面如图8所示。

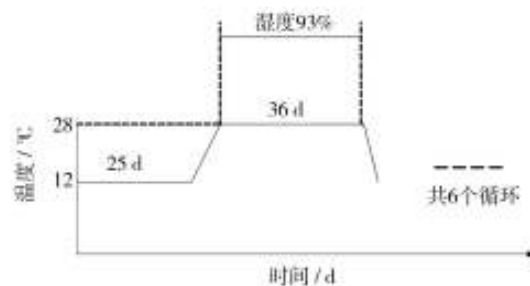


图8 试验室应力剖面

Fig. 8 Stress profile of laboratory test

(下转第81页)

降低。另外,水硅比较小时,聚合度较小,聚合度较小时分子较多,分子量较小的产物闪点低,在蒸馏过程中容易随乙醇蒸出,也会使计算得到的转化率变大。随着水硅比的增大,聚合度较小的部分逐渐减少,计算得到的转化率也逐渐变小。

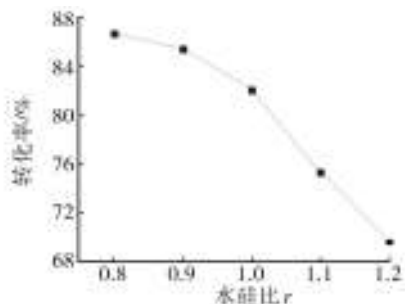


图3 反应转化率随水硅比的变化情况

Fig. 3 Variation of conversion ratios with r

2.6 水硅比对产物稳定性的影响

产物的稳定性通过产物在 50 °C 下的凝胶时间来表征,不同配比下产物的凝胶时间见表 2。

表2 不同水硅比下产物稳定性

Table 2 Stabilities of products under different r

水硅比	0.8	0.9	1	1.1	1.2
产物状态	无色透明	无色透明	无色透明	微黄色透明	微黄色透明
50 °C凝胶时间/d	16	13	13	9	2

(上接第 65 页)

4 结论

笔者对试验室环境剖面等效自然贮存环境剖面的方法进行了研究。通过分析自然贮存外场温度的周期性和随机性,应用容差估计、小波理论及加速模型等,进行了数据分离、归纳和损伤等效的处理。笔者对以往温度环境数据平均处理归纳方法进行改进,特别是利用加速方程进行损伤等效平均,为恒定温度应力剖面归纳处理提供了理论依据。引入小波理论到温度环境数据的处理中,为数据中随机量分离提供了有效的处理方法,在一定理论依据的基础上归纳处理了某自然贮存试验场的自然因素环境数据,获得试验应力剖面。由于在温度循环等效时采

由表 2 可见,当水硅比大于 1 后,产物由无色透明变成微黄色透明状态。由 50 °C 下的凝胶时间看,水硅比大于 1 后,产物聚烷氧基硅氧烷的稳定性逐渐变差,水硅比为 1.2 时 2 d 就凝胶。这主要是由于水硅比较大时,水解产生的硅羟基未缩聚的较多,而产物的储存稳定性与羟基含量有很大的关系,因此水硅比大于 1 的产物的储存稳定性较差。

3 结论

利用正硅酸乙酯的部分水解缩聚反应合成聚乙氧基硅氧烷时,控制水硅比为 1,用盐酸调节水的 pH 至 4 左右,能得到合适且较稳定的产物。

参考文献:

- [1] 韩雁明,朱宝菊. 新型聚甲基甲氧基硅氧烷交联剂对硅橡胶性能的影响[J]. 化工新型材料,2008,36(6):30—31.
- [2] SAWAI Takeshi, KATO Hanako, TANAKA Seiichiro, et al. Polyalkoxysiloxane and Process for its Production:US,625-8969[P]. 2001-10-7.
- [3] 陈同来,陈铮. 催化方式和水硅比对正硅酸乙酯的溶胶凝胶过程的影响[J]. 华东船舶工业学院学报(自然科学版),2003,17(3):62—65.
- [4] 隋学叶,刘世权,程新. 正硅酸乙酯的水解缩聚反应及多孔 SiO₂ 粉体的制备[J]. 中国粉体技术,2006,(3):35—39.
- [5] 曲绪平,王兆伦. 正硅酸乙酯水解-聚合的工艺参数研究及纳米 SiO₂ 的合成[J]. 玻璃与搪瓷,2005,33(3):20—22.

用正弦载荷等效,载荷因子取 5,实际循环等效效果需要通过试验修正。本剖面可为制定试验室试验剖面或加速贮存寿命试验的寿命评估剖面提供参考。

参考文献:

- [1] 徐明. 随机振动环境测量数据归纳的统计容差方法[C]// 2001 年中国航空学会环境工程学术年会. 北京,2001.
- [2] 杨福生. 小波变换的工程分析和应用[M]. 北京:科学出版社,1992.
- [3] 茆诗松,王玲玲. 加速寿命试验[M]. 北京:科学出版社,1995.
- [4] CHAN H A,PAUL J E. Accelerated Stress Testing Handbook—Guide of Achieving Quality Products[M]. IEEE Press, 2001:71—82.
- [5] 李楠,周波. 信号处理中各种频率以及小波此度的关系[J]. 电气电子教学学报,2008,30(6):15.
- [6] 王建平. 基于小波变换的信号去噪处理[J]. 贵州师范大学学报,2007,25(4):89—91.