

装备防护

复杂温度环境下苯基硅橡胶减震垫服役寿命评估技术

赵方超^{1,2*}, 顾晓辉¹, 刘伟², 张洪铭¹, 杨承强¹, 赵阳²

(1.南京理工大学 机械工程学院, 南京 210094; 2.西南技术工程研究所, 重庆 400039)

摘要: **目的** 评估某型苯基硅橡胶减震垫在库房贮存-户外值班交替复杂温度环境下的服役寿命。**方法** 开展苯基硅橡胶减震垫在不同温度下的热空气加速老化试验, 测试压缩刚度性能数据, 计算库房贮存-户外值班环境下多个等效温度反应速率, 评估苯基硅橡胶减震垫服役寿命。**结果** 在置信度为99%时, 苯基硅橡胶减震垫的压缩刚度保持率均随老化时间延长呈修正指数型变化规律, 初期变化速率快, 后期变化速率减缓; 随着温度增加, 交联密度增加, 减震能力降低。**结论** 基于范霍夫近似规则, 计算苯基硅橡胶减震垫在库房贮存-户外值班交替环境下的服役寿命为28年, 为类似产品的使用寿命预测提供方法支撑。

关键词: 苯基硅橡胶; 加速老化试验; 范霍夫近似规则; 等效温度; 服役寿命

中图分类号: TB32 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3563(2024)13-0285-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.13.033

Technology for Service Life Assessment of Phenyl Silicone Rubber Damping Pads in Complex Temperature Environment

ZHAO Fangchao^{1,2*}, GU Xiaohui¹, LIU Wei², ZHANG Hongming¹, YANG Chengqiang¹, ZHAO Yang²

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Southwest Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: The work aims to evaluate the service life of a type of phenyl silicone rubber damping pad under the complex temperature environment of alternating warehouse storage and outdoor service. Thermal air accelerated aging tests of phenyl silicone rubber damping pads were conducted at different temperature to obtain the data of compression stiffness performance and calculate the reaction rate of multiple equivalent temperature in the warehouse storage-outdoor service environment to evaluate the service life of phenyl silicone rubber damping pads. At a confidence level of 99%, the retention rate of compression stiffness of the phenyl silicone rubber damping pads showed a modified exponential variation law with extended aging time, with a fast initial variation rate, and a reduced later variation rate. As the temperature increased, the crosslink density increased, reducing the damping capacity. Based on the Van't Hoff rule, the calculated service life of the phenyl silicone rubber damping pads in the alternating environment of warehouse storage and outdoor service is 28 years, providing methodological support for the service life prediction of similar products.

KEY WORDS: phenyl silicone rubber; accelerated aging test; Van't Hoff rule; equivalent temperature; service life

苯基硅橡胶是一种特殊类型的硅橡胶, 其主链由硅和氧原子组成, 而侧链则通过硅原子连接苯基, 这种结构赋予了苯基硅橡胶许多独特的性能, 包括优良的耐热性、耐低温、耐辐射以及高阻尼等^[1-4]。与传

统的硅橡胶相比, 苯基硅橡胶能在更宽的温度范围内保持稳定的弹性和柔韧性, 这使得它能在极为严苛的环境下工作, 常被应用于制造振动吸收垫、减震垫、隔音垫等, 可有效减弱振动传递, 以减少设备在运行

时产生的噪音和振动,提升使用者的操作舒适度和装备的稳定性^[5-8]。

然而,尽管苯基硅橡胶具有众多优点,其服役过程中的老化失效问题不可忽视。研究表明,苯基硅橡胶在长期使用过程中,易在臭氧、氧、光、热、水分、机械应力等各种因素的作用下老化失效,从而逐渐失去其原有的物理和化学性能,导致减震能力下降,影响整个设备的稳定性和安全性^[9-12]。当前,针对苯基硅橡胶材料的研究主要集中在改善其耐老化性能上,同时探索有效的服役寿命预测^[13-14]。国内外一般利用各种数学模型拟合自然环境试验或加速试验获得的性能退化数据,以此类推某个恒定温度条件下的使用寿命^[15]。王莉娜等^[16]研究了长期服役橡胶密封性能与寿命评估,通过拟合橡胶密封泄漏率与老化时间之间的函数关系,经外推,实现对O形橡胶在常温贮存条件下密封寿命的精确预测。柯玉超等^[17]研究了基于加速老化的橡胶密封件使用寿命评估,利用老化后样品的压缩永久变形数据外推了橡胶密封件在25℃下的贮存寿命。Meng等^[18]研究了基于硬度保持率的船用乙丙橡胶电力电缆寿命评估,虽然文中计算了不同温度下的贮存寿命,但是使用的温度条件仍是恒定温度,不涉及变温区间。对很多产品而言,尤其是那些部署在户外或者面临严苛环境条件的设备来说,实际的服役条件会面临昼夜温差变化以及随季节更替而变化的温度波动,这种温度的周期性变化对材料的性能影响是显著的^[19-21]。因此,针对某些服役过程中面临温度循环变化的产品来说,预测某个恒定温度条件下的服役寿命不符合产品实际使用状态,有必要探索变温区间下的服役寿命预测方法。

本文以某产品用苯基硅橡胶减震垫为研究对象,基于修正指数型加速寿命模型,结合范霍夫近似规则,求取多个等效户外值班或库房贮存温度的上限速率常数,并根据给定的失效临界值,获得各等效户外值班或库房贮存温度之间的加速倍率,并将1年实际户外值班与库房贮存时长等效转化为某个指定等效温度下的贮存时长,再结合该等效温度贮存寿命,求出实际服役寿命。

1 试验

1.1 试验样品与试验设备

主要材料:苯基硅橡胶,来自北京橡胶工业研究院有限公司,按照GB/T 7757—2009《硫化橡胶或热塑性橡胶压缩应力应变性能的测定》标准C法(压缩25%的刚度)规定,将待试验样品加工成直径(29.0±0.5)mm、高度(12.5±0.5)mm的圆柱形试样。样品在5个温度下开展热老化试验,每个温度包括10个取样时间点,每个取样时间点5个平行样,总计250个样品。

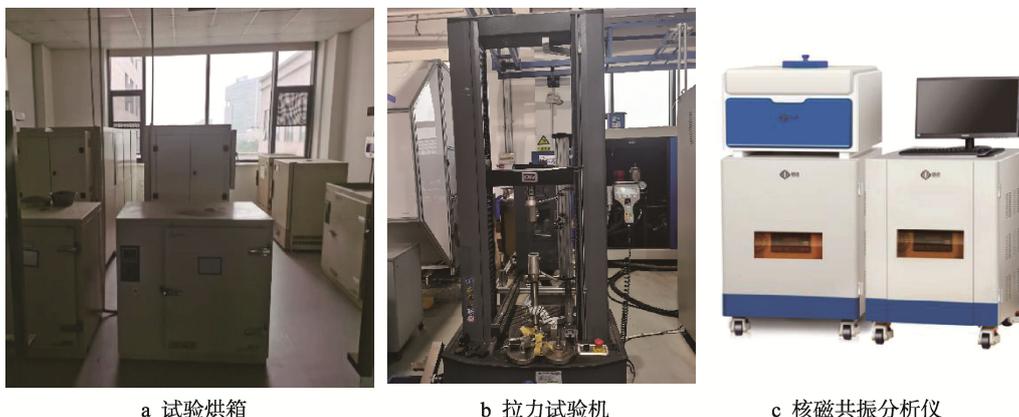
主要仪器:CS101型电热鼓风干燥箱,重庆苏试四达试验设备有限公司,干燥箱温度波动≤±0.5℃,温度均匀度≤±2.5%;2kN高低温电子拉力试验机,美特斯工业系统(中国)有限公司,试验载荷示值误差为±0.5%,位移示值误差为±1.0%;VTMR20-010V-T核磁共振分析仪,上海纽迈电子科技有限公司,频率控制精度为0.1Hz。文中使用到的仪器设备见图1。

1.2 试验方法

将加工好的苯基硅橡胶试样放入5台电热鼓风烘箱,分别设定试验条件为100、110、120、130、140℃,开展热空气加速老化试验,定期取样测试加速试验后样品的压缩刚度和交联密度。

1.3 性能测试

使用拉力试验机测试苯基硅橡胶的压缩刚度,以10mm/min速度压缩试样,直至应变达到30%为止,并从记录的力-变形曲线上读出25%压缩应变下的刚度S₂₅(以N表示),压缩刚度结果取5个试样平均值。利用低场核磁共振分析仪测定苯基硅橡胶的交联密度,测试磁场强度为(0.5±0.08)T,仪器主频率为21.3MHz,探头线圈直径为10mm,样品控温范围为35~130℃,有效样品检测范围为8.5mm(直径)×25mm(高)。



a 试验烘箱

b 拉力试验机

c 核磁共振分析仪

图1 仪器设备

Fig.1 Instruments and equipment

2 结果

2.1 压缩刚度性能演化规律分析

苯基硅橡胶减震垫试样分别在 100、110、120、130、140 °C 5 个温度下的压缩刚度演化规律如图 2 所示。

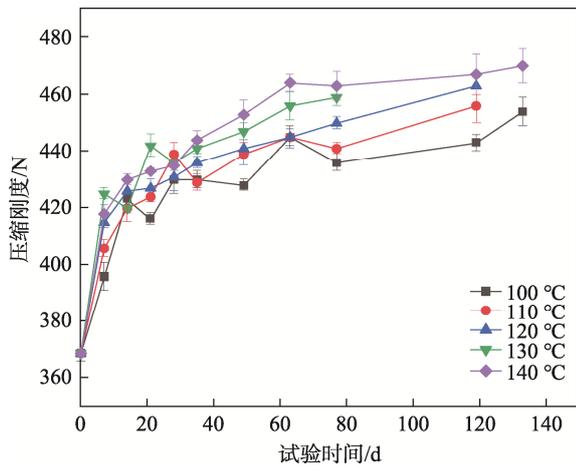


图 2 苯基硅橡胶减震垫压缩刚度演化规律
Fig.2 Degradation law of compression stiffness for phenyl silicone rubber damping pads

从图 2 可知, 随着老化时间延长, 5 个温度条件下的压缩刚度数据均呈上升趋势, 且老化初期增大的绝对值较大, 老化后期增大绝对值降低; 压缩刚度增大绝对值与老化温度高低相关, 温度越高, 压缩刚度增大的绝对值越大。其原因在于苯基硅橡胶属于黏弹性材料, 其力学性能变化规律遵循时温等效原理^[22-23], 升高老化温度、延长老化时间, 压缩刚度变化越明显, 验证利用加大温度应力水平快速获得性能变化规律的可行性。

2.2 交联密度结果分析

利用低场核磁共振仪, 测试多个温度下苯基硅橡胶减震垫的交联密度数据, 见表 1。

表 1 苯基硅橡胶交联密度数据
Tab.1 Crosslink density data of phenyl silicone rubber

时间/d	交联密度 $v_c / (10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{mL}^{-1})$		
	100 °C	120 °C	140 °C
0	2.421	2.421	2.421
28	2.734	2.662	2.835
49	2.815	2.523	2.931
91	2.654	2.916	2.838
119	2.929	2.718	2.826

从表 1 可以看出, 随着老化时间延长, 交联密度

值呈现波动上升趋势, 且随着老化温度增加, 交联密度增大的绝对值越大, 与压缩刚度变化趋势保持一致。苯基硅橡胶的材料特性和结构特点决定了温度对其压缩刚度有着重要影响, 也即是在高温作用下, 苯基硅橡胶材料主要发生氧化交联反应, 交联密度增大, 导致减震垫微观结构中链段运动自由度减小, 阻尼衰减性能减小, 压缩刚度随之增大^[24-25]。

2.3 苯基硅橡胶减震垫贮存寿命等效评估

2.3.1 计算性能演化模型

首先, 按照式 (1) 对测量的压缩刚度数据进行无量纲化处理, 获得压缩刚度保持率 P (见图 3)。

$$P = 1 - \frac{S_t - S_0}{S_0} \quad (1)$$

式中: S_t 为某一老化时刻 t 的 25% 压缩刚度测试值; S_0 为试验前的 25% 压缩刚度值。

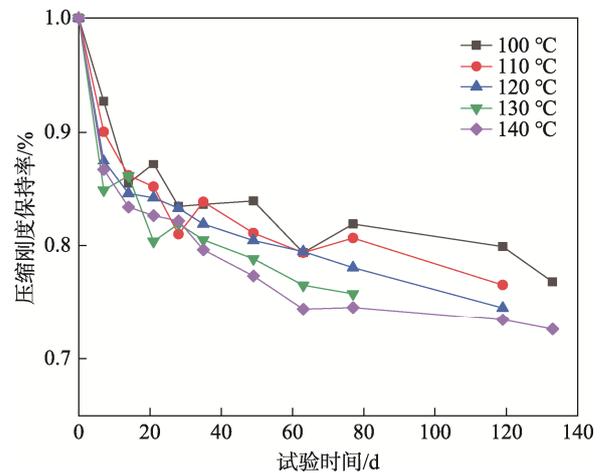


图 3 苯基硅橡胶减震垫压缩刚度保持率变化曲线
Fig.3 Compression stiffness retention rate variation curve of phenyl silicone rubber damping pads

其次, 根据 GJB 92.2—86 的数据处理方法, 设定苯基硅橡胶性能变化指标 P 与试验时间 t 遵循修正指数模型, 见式 (2)。

$$P = A \exp(-Kt^\alpha) \quad (2)$$

式中: P 为压缩刚度保持率; t 为老化时间; α 为常数; K 为性能变化速率常数; A 为常数。

应用逐次逼近法尝试确定参数 α , 逼近准则是 α 精确到小数点后 2 位时, 使 I 最小:

$$I = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (p_{ij} - \hat{p}_{ij})^2 \quad (3)$$

式中: P_{ij} 为第 i 个老化试验温度下, 第 j 个测试点的 25% 压缩刚度保持率; \hat{p}_{ij} 为第 i 个老化试验温度下, 第 j 个测试点的 25% 压缩刚度保持率预测值。

计算结果表明, 参数 α 为 0.20。由此, 对式 (2) 作变换, 通过基于 Visual Studio 编制的热老化寿命评

估软件 (参照 GJB 92.2—86) 获得 $\ln P$ 与 $t^{0.20}$ 的关系 (见图 4), 并计算反应速率常数 K 和相关系数 r , 结果见表 2。

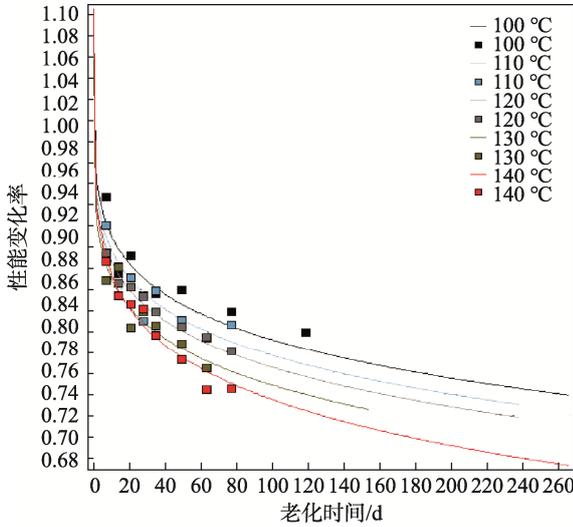


图 4 $\ln P$ 与 $t^{0.20}$ 的关系曲线
Fig.4 Relationship curve between $\ln P$ and $t^{0.20}$

从表 2 可以看出, 在置信度为 99% 时, $r_{\text{计算}}$ 均大于 $r_{\text{表}}$, 说明苯基硅橡胶压缩刚度保持率 P 随试验时间 t 变化规律均符合修正指数模型。

最后, 以 $\ln K$ 对 $1/T$ 作图 (见图 5), 获得反应速率常数 K 和试验温度 T 的相关关系。

根据相关系数检验临界值表 (取自由度 f 为 3), 在置信度为 95% 时, $r_{\text{计算}}$ (0.880 1) 大于 $r_{\text{表}}$ (0.878 0), 说明苯基硅橡胶在置信度为 95% 时, 反应速率常数 K 和试验温度 T 符合 Arrhenius 加速寿命模型:

$$K = \exp(0.1438 - 834.07/T) \quad (4)$$

2.3.2 计算等效温度反应速率 $K_{\text{等效温度}}$

根据范霍夫近似规则, 温度每升高 10 °C, 反应速率增加 2~4 倍, 可近似认为在温度区间内部绝对温差不高于 2 °C 时, 该温度区间的中间温度反应速率可代表整个温度区间的反应速率, 也即是某温度区间上限温度与下限温度变化值小于 5 °C 时, 该温度区间的反应速率可用中间温度反应速率代替。据此, 将户外

值班温度和库房贮存温度以 5 °C 为梯度, 等效转化为各温度区间的中间温度, 经由建立的加速寿命模型, 外推求得一系列不同等效温度的反应速率 $K_{\text{等效温度}}$, 代表该温度区间的反应速率。

因此, 将苯基硅橡胶在某地区服役 1 年的户外值班环境温度 (1~40 °C)、库房贮存环境温度 (6~25 °C) 均以 5 °C 为梯度, 分别划分为 8 个温度等级 (1~5 °C、6~10 °C、11~15 °C、16~20 °C、21~25 °C、26~30 °C、31~35 °C、36~40 °C) 和 4 个温度等级 (6~10 °C、11~15 °C、16~20 °C、21~25 °C), 并将该区间温度的反应速率分别等效转化为户外值班中间温度 3、8、13、18、23、28、33、38 °C 的反应速率, 以及库房贮存中间温度 8、13、18、23 °C 的反应速率。

由此, 将户外值班环境等效温度、库房贮存环境等效温度分别代入式 (4), 求出各等效温度反应速率上限值 K_s (见表 3):

$$K = \exp(0.1438 - 834.07/T) \times \exp(t \times s_y) \quad (5)$$

式中: S_y 为标准离差, $S_y = S \sqrt{1 + \frac{1}{m} + \frac{(x_s - \bar{x})^2}{L_{xx}}}$,

$S = \sqrt{\frac{(1-r^2)L_{yy}}{m-2}}$, $L_{xx} = \sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2$, $L_{yy} = \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2$; t 由 t 分布值 (单侧) 表查出。

根据表 2 可知, A 与老化温度 T 无线性关系, 故各等效温度的 A_s 可取 5 个加速试验温度下 A 的平均值, 即 $A_s = (1.0889 + 1.0796 + 1.0722 + 1.0574 + 1.1056)/5 = 1.0807$

2.3.3 计算等效温度加速倍率与库房贮存/户外值班寿命

根据工程经验, 压缩刚度保持率失效临界值取 0.5, 将各等效温度的 A 、 K_s 代入式 (2), 分别获得等效温度下的库房贮存寿命或户外值班寿命 t_s ; 以户外值班环境等效温度 3 °C 的值班寿命 $t_{3°C}$ 为基准, 对比其余户外值班环境等效温度 8、13、18、23、28、33、38 °C 的值班寿命, 以及库房贮存环境等效温度 8、13、18、23 °C 的贮存寿命, 获得各等效温度寿命相较于 $t_{3°C}$ 的加速倍率, 见表 4。

表 2 苯基硅橡胶性能演化模型及其相关性检验结果

Tab.2 Degradation model of phenyl silicone rubber properties and its correlation test results

温度/°C	性能演化模型	K	A	$r_{\text{计算}}$	$f=n-2$	$r_{\text{表}}$
100	$P = 1.0889 \exp(-0.1268t^{0.2})$	0.1268	1.0889	0.9228	9	0.7348 (置信度 99%)
110	$P = 1.0796 \exp(-0.1309t^{0.2})$	0.1309	1.0796	0.9487	8	0.7646 (置信度 99%)
120	$P = 1.0722 \exp(-0.1342t^{0.2})$	0.1342	1.0722	0.9848	8	0.7646 (置信度 99%)
130	$P = 1.0574 \exp(-0.1376t^{0.2})$	0.1376	1.0574	0.9323	7	0.7977 (置信度 99%)
140	$P = 1.1056 \exp(-0.1627t^{0.2})$	0.1627	1.1056	0.9784	8	0.7646 (置信度 99%)

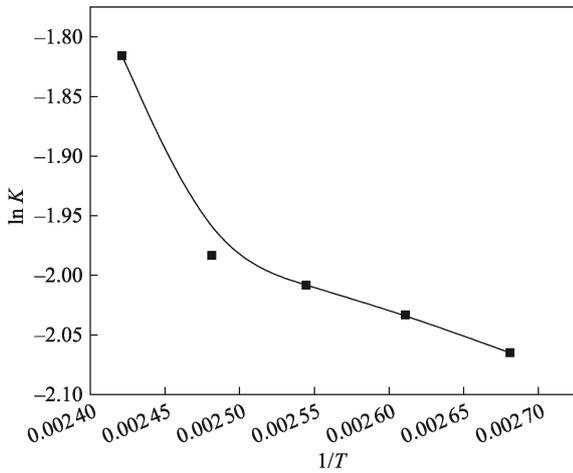


图 5 苯基硅橡胶 $\ln K-1/T$ 关系图
Fig.5 $\ln K-1/T$ relationship diagram of phenyl silicone rubber

表 3 不同等效温度的反应速率上限值 K_s

Tab.3 Maximum reaction rate value K_s at different equivalent temperature

等效温度/ $^{\circ}\text{C}$	K_s
3	0.117 5
8	0.118 8
13	0.120 1
18	0.121 4
23	0.122 7
28	0.123 9
33	0.125 2
38	0.126 4

表 4 不同等效温度相对于 $t_{3^{\circ}\text{C}}$ 的加速倍率

Tab.4 Acceleration multiples relative to $t_{3^{\circ}\text{C}}$ at different equivalent temperature

等效温度/ $^{\circ}\text{C}$	$t_s/\text{年}$	加速倍率 ($t_s/t_{3^{\circ}\text{C}}$)
3	33.27	1
8	31.46	1.057
13	29.79	1.117
18	28.25	1.178
23	26.82	1.24
28	25.49	1.305
33	24.24	1.372
38	23.07	1.442

2.3.4 计算加速老化试验等效时长

根据使用要求, 苯基硅橡胶减震垫在 1 年户外值班与库房贮存期内, 户外值班时间与库房贮存时间占比为 1:1, 且户外值班在 1~10 $^{\circ}\text{C}$ 、11~30 $^{\circ}\text{C}$ 、31~40 $^{\circ}\text{C}$

区间的时间占比为 1:1:1。由于监测环境温度数据有限, 可将库房贮存时间与户外值班时间按以下原则继续划分时间比例。

1) 库房贮存。温度区间 6~25 $^{\circ}\text{C}$ 分为 4 个温度等级 (6~10 $^{\circ}\text{C}$ 、11~15 $^{\circ}\text{C}$ 、16~20 $^{\circ}\text{C}$ 、21~25 $^{\circ}\text{C}$) 的时间比例为 1:1:1:1。

2) 户外值班。温度区间 1~10 $^{\circ}\text{C}$ 分为 2 个温度梯度 (1~5 $^{\circ}\text{C}$ 、6~10 $^{\circ}\text{C}$) 的时间比例为 1:1; 11~30 $^{\circ}\text{C}$ 分为 4 个温度梯度 (11~15 $^{\circ}\text{C}$ 、16~20 $^{\circ}\text{C}$ 、21~25 $^{\circ}\text{C}$ 、26~30 $^{\circ}\text{C}$) 的时间比例为 1:1:1:1; 31~40 $^{\circ}\text{C}$ 分为 2 个温度梯度 (31~35 $^{\circ}\text{C}$ 、36~40 $^{\circ}\text{C}$) 的时间比例为 1:1。

由此, 在 1 年户外值班与库房贮存期内, 1~5 $^{\circ}\text{C}$ (等效 3 $^{\circ}\text{C}$)、6~10 $^{\circ}\text{C}$ (等效 8 $^{\circ}\text{C}$)、11~15 $^{\circ}\text{C}$ (等效 13 $^{\circ}\text{C}$)、16~20 $^{\circ}\text{C}$ (等效 18 $^{\circ}\text{C}$)、21~25 $^{\circ}\text{C}$ (等效 23 $^{\circ}\text{C}$)、26~30 $^{\circ}\text{C}$ (等效 28 $^{\circ}\text{C}$)、31~35 $^{\circ}\text{C}$ (等效 33 $^{\circ}\text{C}$)、36~40 $^{\circ}\text{C}$ (等效 38 $^{\circ}\text{C}$) 的时间占比分别为 1:2.5:2:2:2:0.5:1:1。

结合表 4 给出的各等效温度相较于最低等效温度 (3 $^{\circ}\text{C}$) 的加速倍率, 将 1 年户外值班与库房贮存期转化为 3 $^{\circ}\text{C}$ 条件下的等效时长, 见表 5。

表 5 不同等效贮存温度相对于 $t_{3^{\circ}\text{C}}$ 的等效时长

Tab.5 Equivalent duration relative to $t_{3^{\circ}\text{C}}$ at different equivalent storage temperature

等效温度/ $^{\circ}\text{C}$	1 年贮存期 时间占比/月	等效于 3 $^{\circ}\text{C}$ 贮存时间/月
3	1	1
8	2.5	2.64
13	2	2.23
18	2	2.36
23	2	2.48
28	0.5	0.65
33	1	1.37
38	1	1.44
合计	12	14.2

从表 5 可以看出, 1 年户外值班与库房贮存期相当于 3 $^{\circ}\text{C}$ 等效温度时长为 14.2 月。因此, 计算苯基硅橡胶减震垫户外值班与库房贮存的服役寿命:

$$t_{\text{服役寿命}} = 33.27 \div 14.2 \times 12 = 28.1 \text{年}$$

3 结语

1) 苯基硅橡胶减震垫在温度作用下, 其压缩刚度保持率遵循修正指数模型且符合时温等效原理, 即随着温度增大、试验时间延长, 压缩刚度保持率降低, 且老化前期下降速率较快, 后期下降速率减缓。

2) 在温度作用下, 苯基硅橡胶减震垫主要发生氧化交联反应, 使得微观网构中链段运动自由度减小, 阻尼衰减性能下降, 压缩刚度保持率下降, 回弹性减小, 减震能力降低。

3) 苯基硅橡胶减震垫在户外值班与库房贮存交替环境下使用 1 年相当于 3 °C 等效温度下贮存 14.2 月, 由此获得苯基硅橡胶的户外值班与库房贮存服役寿命为 28 年。本文使用统计数据为加速老化试验数据, 如果有产品实际贮存环境数据, 可提高寿命预测精度。

参考文献:

- [1] 王韵然, 张叶琴, 彭诗元, 等. 苯基聚硅氧烷对加成型自渗油液体硅橡胶性能的影响[J]. 有机硅材料, 2023, 37(6): 24-27.
WANG Y R, ZHANG Y Q, PENG S Y, et al. Effect of Phenyl Polysiloxane on Properties of Additional Cured Oil-Bleeding Liquid Silicone Rubber[J]. Silicone Material, 2023, 37(6): 24-27.
- [2] 黄艳华, 苏正涛, 周传健. 航空用苯基硅橡胶生胶的合成及性能研究[J]. 润滑与密封, 2023, 48(3): 134-140.
HUANG Y H, SU Z T, ZHOU C J. Synthesis and Properties of Phenyl Silicone Rubber for Aviation[J]. Lubrication Engineering, 2023, 48(3): 134-140.
- [3] 李滨, 徐雨, 刘建超. 硅橡胶耐高温改性研究进展[J]. 弹性体, 2023, 33(4): 72-78.
LI B, XU Y, LIU J C. Research Progress of High Temperature Resistant Modification of Silicone Rubber[J]. China Elastomers, 2023, 33(4): 72-78.
- [4] 费楚然, 胡纯, 文艳辉, 等. 苯基硅橡胶高剂量辐射老化性能研究[J]. 合成材料老化与应用, 2023, 52(5): 7-10.
FEI C R, HU C, WEN Y H, et al. Study on High Dose Radiation Aging Performance of Phenyl Silicone Rubber[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2023, 52(5): 7-10.
- [5] YU F M, LU A, LU J L, et al. Effect of Phenyl Content, Sample Thickness and Compression on Damping Performances of Silicone Rubber: A Study by Dynamic Mechanical Analysis and Impact Damping Test[J]. Polymer Testing, 2019, 80: 106101.
- [6] 刘琳, 金磊. 苯基硅橡胶在航空航天领域的应用研究[J]. 橡胶工业, 2020, 67(2): 119-122.
LIU L, JIN L. Study on Aerospace Application of MVPQ[J]. China Rubber Industry, 2020, 67(2): 119-122.
- [7] TANG X D, LUO T G, ZHOU Y J. Studies On the Damping Performance of Heat Curable Phenyl-silicone Rubber[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2008, 24(1): 51-54.
- [8] 涂春潮, 陈子昂, 张雪颂, 等. 惯性导航用氟硅橡胶减振器振动性能研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2023, 46(5): 131-136.
TU C C, CHEN Z A, ZHANG X S, et al. Vibration Performance of Fluoro-Silicone Rubber Vibration Absorber for Inertial Navigation[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2023, 46(5): 131-136.
- [9] 苏正涛, 秦瑞祥, 朱华, 等. 苯基硅橡胶的热空气老化性能研究[J]. 有机硅材料, 2012, 26(4): 248-250.
SU Z T, QIN R X, ZHU H, et al. Thermal Stability of Hot Air Aging of Methylphenylvinyl Silicone Rubber[J]. Silicone Material, 2012, 26(4): 248-250.
- [10] YAN X, GUO J H, JIANG X H. The Microwave-Absorption Properties and Mechanism of Phenyl Silicone Rubber/CIPs/Graphene Composites after Thermal-Aging in an Elevated Temperature[J]. Scientific Reports, 2022, 12: 4385.
- [11] GORUR R S, KARADY G G, JAGOTA A, et al. Aging in Silicone Rubber for Outdoor Insulation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(2): 525-538.
- [12] 王鹏, 刘宛琪, 苏正涛, 等. 热空气老化对苯基硅橡胶阻尼特性的影响[J]. 有机硅材料, 2015, 29(4): 273-277.
WANG P, LIU W Q, SU Z T, et al. Impact of Hot Air Aging on Damping Property of Methylphenylvinyl Silicone Rubber[J]. Silicone Material, 2015, 29(4): 273-277.
- [13] 刘晓敏. 苯基硅橡胶的合成及其环氧化改性研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2018: 7-12.
LIU X M. Study on the Synthesis and Epoxidation Modification of Phenyl Silicone Rubber[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2018: 7-12.
- [14] ZHOU Z, PAN G, ZHANG R, et al. Review of Aging Evaluation Methods for Silicone Rubber Composite Insulators[J]. Polymers, 2023, 15(5): 1141-1141.
- [15] LI G, ZHU D, JIA W, et al. Analysis of the Aging Mechanism and Life Evaluation of Elastomers in Simulated Proton Exchange Membrane Fuel Cell Environments[J]. E-Polymers, 2021, 21(1): 921-929.
- [16] 王莉娜, 史纪军, 李征, 等. 长服役期橡胶密封性能分析与寿命评估[J]. 航天器环境工程, 2022, 39(5): 475-481.
WANG L N, SHI J J, LI Z, et al. Performance Analysis and Lifetime Evaluation of Rubber Seal for Long Term Service[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2022, 39(5): 475-481.

- [17] 柯玉超, 王识君, 吴蕾. 基于加速老化的橡胶密封件使用寿命评估[J]. 液压气动与密封, 2018, 38(12): 79-83.
KE Y C, WANG S J, WU L. The Lifespan Prediction of Rubbers through Temperature Accelerated Aging[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2018, 38(12): 79-83.
- [18] MENG X, WANG Z, LI G. Life Assessment of Marine Ethylene Propylene Rubber Power Cables Based on Hardness Retention Rate[J]. Archives of Electrical Engineering, 2017, 66(3): 475-484.
- [19] CUI T, CHAO Y, ZEE J V. Stress Relaxation Behavior of a Liquid Silicone Rubber Seal Subjected to Temperature Cycling[J]. ECS Meeting Abstracts, 2011, 16(2): 1037.
- [20] 赵敏. 一种基于高苯基硅橡胶的高强宽温高阻尼材料[J]. 橡胶工业, 2013, 60(9): 575.
ZHAO M. A High-strength, Wide Temperature, and High Damping Material Based on High Phenyl Silicone Rubber[J]. China Rubber Industry, 2013, 60(9): 575.
- [21] MISHRA P, PAUL M, VINOD P, et al. Performance Evaluation of Room Temperature Vulcanized Silicone Rubber Nanocomposites Aged in Strong Aqueous Solutions[J]. Polymer engineering and science, 2022(5): 62.
- [22] QIAO L N, NAGELSCHMIDT S, HERBRICH U, et al. Introduction of a Power Law Time-Temperature Equivalent Formulation for the Description of Thermorheologically Simple and Complex Behavior[J]. Materials, 2022, 15(3): 726.
- [23] YOU G, GAO X, DU P, et al. Research and Prediction of Creep Behavior of Triaxial Warp-knitted Composites by Time-temperature Equivalent Principle[J]. Polymer Composites, 2024, 45(2): 1472-1482.
- [24] 刘佩风, 杨学印, 牛建朝, 等. 可靠性试验中橡胶减振器性能变化规律研究[J]. 环境技术, 2018, 36(5): 52-57.
LIU P F, YANG X Y, NIU J C, et al. Research on Changing Laws of Rubber Damper Performance in Reliability Test[J]. Environmental Technology, 2018, 36(5): 52-57.
- [25] YAO H, DONG H, FENG X, et al. Reinforcing Behavior of Reclaimed Rubber Filled Natural Rubber Composites[J]. Polymer International, 2023, 72(9): 841-847.