

某型金属减振器的加速贮存验证试验方法研究

宫晓春¹, 秦玉灵², 赵薇¹, 李昊宇¹

(1. 北京强度环境研究所, 北京 100076; 2. 北京航天长征飞行器研究所, 北京 100076)

摘要: **目的** 研究一种金属减振器的库房贮存寿命的实验室加速贮存试验验证方法。**方法** 首先分析某型金属减振器的性能指标参数和贮存薄弱环节, 然后设计并实施相关的加速贮存试验。通过对试验数据进行回归分析, 获得金属减振器常温下的应力松弛关系式, 进而开展金属减振器的加速贮存验证试验, 验证其贮存后的性能指标参数能否满足要求。**结果** 根据验证试验的数据结果评估得出, 某型金属减振器在常温库房贮存环境至少能达到 15 a 的贮存寿命。**结论** 通过在实验室开展加速贮存试验, 能够在短时间内验证金属减振器的贮存寿命, 为金属减振器寿命评估工作提供了技术支撑。

关键词: 金属减振器; 加速贮存试验; 贮存寿命评估

中图分类号: TJ07

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)04-0082-06

DOI: 10.7643/ issn.1672-9242.2021.04.012

Research on Accelerated Storage Validation Test Method of a Certain Type Metal Damper

GONG Xiao-chun¹, QIN Yu-ling², ZHAO Wei¹, LI Hao-yu¹

(1. Beijing Institute of Structure and Environment Engineering, Beijing 100076, China;

2. Beijing Institute of Space Long March Vehicle, Beijing 100076, China)

ABSTRACT: The accelerated storage validation test method of a certain type metal damper is investigated to dual with the real storage life level. Firstly, the performance parameters and storage weakness of a certain type metal damper are investigated and the accelerated storage test of the metal damper is designed and carried into execution. Secondly, the stress relaxations function of the metal damper in normal temperature is obtained by linearization fitting to the test data. Finally the accelerated storage validation test the metal damper is carried out to work over the performance parameters status after long term storage. The storage life of a certain type metal damper in normal storeroom is at least 17 years according to the evaluation of the test results. The storage life of a certain type metal damper can be validated in little duration by the accelerated storage validation test in laboratory, which is the prominent evolvement to the storage life research and evaluation of the metal damper.

KEY WORDS: metal damper; accelerated storage test; storage life evaluation

金属橡胶减振器具有耐高低温、耐高压、耐剧烈运动等良好的环境适应性, 在军工装备减振隔振领域广泛应用^[1-3]。自 20 世纪 60 年代起, 俄罗斯就研制

出金属橡胶制品以解决航天航空关键仪器设备在高压、高温、高真空、超低温及剧烈振动等环境下的减振防护问题^[4-6]。法国、德国等在航空航天仪器设备

收稿日期: 2020-08-02; 修订日期: 2020-09-09

Received: 2020-08-02; Revised: 2020-09-09

作者简介: 宫晓春 (1981—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为环境可靠性工程技术。

Biography: GONG Xiao-chun (1981—), Male, Ph. D., Senior engineer, Research focus: environmental and reliability engineering technology.

引文格式: 宫晓春, 秦玉灵, 赵薇, 等. 某型金属减振器的加速贮存验证试验方法研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(4): 082-087.

GONG Xiao-chun, QIN Yu-ling, ZHAO Wei, et al. Research on accelerated storage validation test method of a certain type metal damper[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(4): 082-087.

的金属橡胶减振设计方面实现了规范化、系列化和标准化的研究^[7-9]。国内外针对金属减振器的动力学特性,建立了各种参数与非参数模型及建模方法,力图准确描述其非线性刚度与迟滞阻尼的特点^[10-14],Daniele 和 Carnevale 等^[15]在 2005 年基于 Preidach 模型^[16]提出了一种适用更广泛的微分迟滞模型,并进行了详细的理论推演和试验验证^[17]。2010 年 Sunny M R 与 Kapania R K 在经典的 Perisach 模型中加入动态松弛时间,从而建立迟滞系统模型^[18]。哈尔滨工业大学在金属减振器的减振理论分析以及管路支承减振技术、月球着陆器着陆缓冲技术等方面开展了大量研究工作^[19-21]。秦朝红等^[22]对星箭复杂系统的减振要求进行了分析,根据减振性能要求设计了金属减振器,并通过试验验证对其减振性能进行了初步评估。

导弹武器装备具有“长期贮存,一次发射”的特点,金属减振器在导弹中的使用也是长期处于库房贮存状态。经过十几年的贮存后其功能性能指标参数能否满足使用要求也是军方高度关注的问题,而且军方通常要求在金属减振器装弹使用前必须提前给出其贮存寿命,但目前对金属减振器贮存过程中失效机理还没有统一认识,至今还没有通用的加速贮存试验和寿命评估方法。

笔者针对某型导弹用金属减振器的库房贮存寿命开展研究。为了能够在短时间内快速获得金属减振器的贮存寿命,分析了该金属减振器的功能性能参数和贮存薄弱环节,设计了相应的加速贮存试验方案。通过开展多组金属减振器的加速贮存试验和数据回归分析,进而对该型金属减振器的贮存寿命进行评估。

1 某型金属减振器分析

某型金属减振器由两片金属减振垫、一个限位套筒和一个限位垫片组合而成,其整体和各组成部分的外观如图 1 所示。

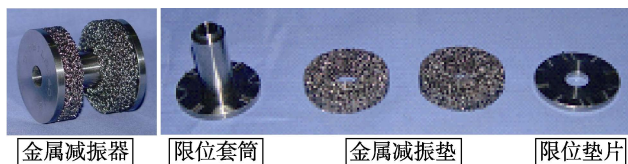


图 1 某型金属减振器外观

Fig.1 The appearance of a certain type metal damper

该型金属减振器 3 个为一组,安装在某型导弹的惯性仪表和复合支座之间,能够有效地减缓惯性仪表承受的振动和冲击应力。金属减振垫、限位套筒和限位垫片的原材料均为 1Cr18Ni9Ti,其为含钛的 18-8 型奥氏体不锈钢。限位套筒和限位垫片由机械加工而成,为金属减振器的结构承力件。金属减振垫为弹性阻尼元件,是金属减振器的核心元件。它由不锈钢丝绕制的弹性元件拉伸成螺旋状态堆放好,然后用冷压

工艺成型。其内部结构是螺旋状金属丝之间的相互嵌合、勾联而形成的类似于橡胶分子结构的网状结构,在受力变形时由不锈钢丝的相对位移而产生的摩擦,使一部分振动能量转变为热能而逸散,具有良好的阻尼效果。

1.1 金属减振器的指标参数分析

以 3 个金属减振器安装于惯性仪表和复合支座之间组成系统质量为 M 的系统,3 个金属减振器组成刚度为 K 、阻尼为 C 的并连体,则该系统对基座单向激励的传递特性可表示为:

$$T = \frac{1 + j2\zeta b}{1 - b^2 + j2\zeta b} \quad (1)$$

$$|T| = \sqrt{\frac{1 + 4\zeta^2 b^2}{(1 - b^2)^2 + 4\zeta^2 b^2}} \quad (2)$$

式中: $b = f/f_n$, 为基座运动频率 f 与系统谐振频率 f_n 之比, $f_n = (K/M)^{0.5}/2\pi$; ζ 为金属减振器的阻尼比, $\zeta = C/(2K^{0.5}M^{0.5})$ 。

若已知基座加速度正弦激励 A_e , 可以计算出减振后的响应加速度 A_r :

$$A_r = |T| A_e \quad (3)$$

若已知基座加速度随机激励功率谱密度 G_e , 可以计算出减振后的响应加速度功率谱密度 G_r :

$$G_r = |T|^2 G_e \quad (4)$$

将 G_e 和 G_r 在振动条件规定的频率范围内积分,便可得到基座加速度激励的总均方根值 E_{rms} 和响应加速度的总均方根值 R_{rms} , 进而计算出减振效率:

$$\eta = \left(1 - \frac{R_{rms}}{E_{rms}}\right) \times 100\% \quad (5)$$

金属减振器性能主要指标包括刚度 K 和阻尼 C , 金属减振器阻尼比 ζ 一般在 0.1~0.2 范围内, 金属减振器刚度由设计参数控制。该型金属减振器的主要功能性能参数的指标要求为: 谐振频率 $65 \text{ Hz} \leq f \leq 75 \text{ Hz}$, 减振效率 $\eta \geq 70\%$, 谐振峰放大倍数 $3 \leq Q \leq 5$;

金属减振器的性能参数测定方法如图 2 所示,选取一组金属减振器安装在模拟惯性仪表和复合支座之间组成一套系统,将该系统通过连接工装安装在振动台上进行随机振动试验,如果测得的谐振频率 f 、减振效率 η 和谐振峰放大倍数 Q 满足其功能性能参数的指标要求,即认为该套金属减振器能够满足使用要求,否则即为失效。

1.2 贮存薄弱环节分析

该型金属减振器在导弹贮存过程中的安装状态如图 3 所示,在长期的库房贮存过程中处于良好的常温常湿的环境,不会产生腐蚀现象。金属减振器的限位套筒和限位垫片材料均为 1Cr18Ni9Ti 的结构件,在贮存过程中承受的预紧力远小于其设计载荷。金属

减振垫为弹性阻尼元件,是金属减振器的核心元件,其安装前后有一定的设计预压量,即安装前自由高度 H 大于安装后的高度 h 。金属减振垫在长期的贮存过程中一直处于压缩状态,其预压力载荷 F 随着时间的推移会逐渐衰减导致其产生应力松弛,金属减振垫的整体刚度随之发生明显变化,致使金属减振器的谐振频率 f 、减振效率 η 和谐振峰放大倍数 Q 等参数超出其指标要求,进而造成金属减振器失效。

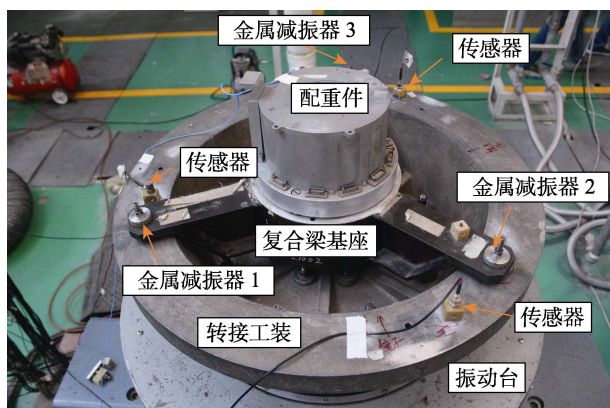


图2 金属减振器的性能参数测定试验

Fig.2 The parameter measuring test of a certain type metal damper

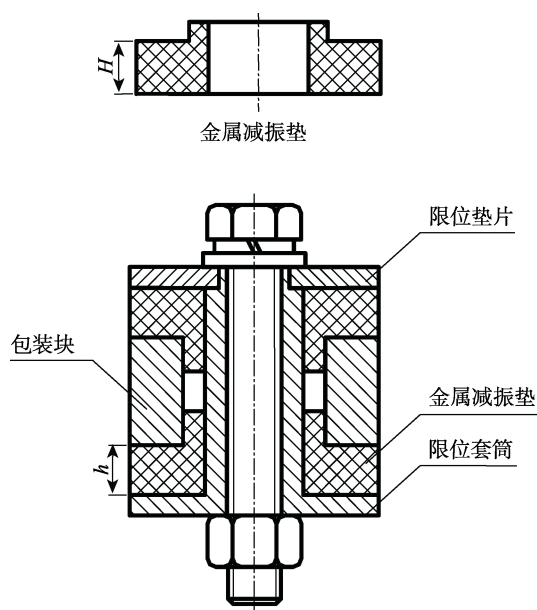


图3 金属减振器的安装状态

Fig.3 The installation status of a certain type metal damper

1.3 应力松弛分析

金属减振器的应力松弛率 v_s 与温度 T 以及位错越过障碍所需的激活能 $Q(\tau^*)$ 之间满足 Arrhenius 公式:

$$v_s = \gamma e^{\frac{-Q(\tau^*)}{kT}} \quad (6)$$

式中: P_0 为初始预应力,假定金属减振器在 t 时刻的应力载荷为 P_t ,记 $\Delta P = P_t - P_0$, v_s 为应力松弛率,

可定义为 $v_s = d(\Delta P/P_0)/d(\ln t)$; $Q(\tau^*)$ 为某一应力作用下,位错突破障碍所需的激活能, eV; γ 为特定常数; T 为热力学温度, K; k 为波尔兹曼常数, $k = 8.6 \times 10^{-5} \text{ eV} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

对式(6)的两边取对数可得:

$$\ln v_s = \ln \gamma - \frac{Q(\tau^*)}{k} \frac{1}{T} \quad (7)$$

因此,在 $\ln v_s \sim 1/T$ 的关系中,松弛率的对数与温度的倒数之间呈线性关系。

金属减振器的应力松弛关系式为:

$$\Delta P/P_0 = A + B \ln t \quad (8)$$

对式(8)两边关于 $\ln t$ 求导可得,式(8)中的 B 即为应力松弛率 $v_s = d(\Delta P/P_0)/d(\ln t)$ 。

在不同的温度 $T_i (i=1, 2, \dots, n)$ 下开展金属减振器的高温应力松弛试验,可以获得其在 T_i 的应力松弛关系式 $\Delta P/P_0|_{T_i} = A_i + B_i \cdot \ln t$ 和相应的应力松弛率 $v_s|_{T_i}$, 根据不同温度下的应力松弛率 $v_s|_{T_i}$ 与温度的倒数 $1/T$ 之间的线性关系 $\ln(v_s|_{T_i}) \sim 1/T$ 进行拟合回归,可建立金属减振器在室温下的应力松弛关系式: $\Delta P/P_0|_{\text{室温}} = A_{\text{室温}} + B_{\text{室温}} \cdot \ln t$ 。

2 试验方案设计

根据金属减振器的贮存薄弱环节和应力松弛分析结果可知,金属减振器的指标参数:谐振频率 f 、减振效率 η 和谐振峰放大倍数 Q 与应力松弛 $\Delta P/P_0$ 密切相关,但从理论上建立金属减振器的谐振频率 f 、减振效率 η 和谐振峰放大倍数 Q 与应力松弛 $\Delta P/P_0$ 的解析关系式非常困难,因此,只能根据金属减振器的在库房贮存 X 年寿命指标要求,由金属减振器在室温下的应力松弛关系式 $\Delta P/P_0|_{\text{室温}} = A_{\text{室温}} + B_{\text{室温}} \cdot \ln t$ 计算得出金属减振器在室温贮存 X 年后的应力松弛 $\Delta P/P_0|_X$,并根据金属减振器在高温 T_i 下的应力松弛关系式 $\Delta P/P_0|_{T_i} = A_i + B_i \cdot \ln t$,得到在高温 T_i 要达到应力松弛 $\Delta P/P_0|_X$ 所需要的试验时间 $t(\Delta P/P_0|_{T_i} = \Delta P/P_0|_X)$,在实验室选取一组金属减振器在高温 T_i 的环境下开展试验时间 $t(\Delta P/P_0|_{T_i} = \Delta P/P_0|_X)$ 的加速贮存试验,试验后将金属减振器安装在模拟惯性仪表和复合支座之间组成一套系统,将该系统通过连接工装安装在振动台上进行振动试验,测得谐振频率 f_{T_i} 、减振效率 η_{T_i} 和谐振峰放大倍数 Q_{T_i} ,如果各项指标均满足合格判据的容差要求,即认为该套金属减振器满足库房贮存 X 年寿命指标要求,否则判定不满足要求。

金属减振器的加速贮存试验的试验系统如图4所示,采用安装方式固定、温度应力加速的方式进行试验,通过加载压杆和固定夹具将金属减振器按照其实际压缩状态安装在带高温试验箱的松弛蠕变试验机中,金属减振器的预应力载荷在高温环境下随时间的推移会逐渐衰减,数据采集仪通过力传感器会实时

测量并记录金属减振器的压力载荷变化趋势。一次试验装载一个金属减振器试样，待该组试样的试验结束之后，更换试样，进行下一组试验，直至所有产品的试验结束。

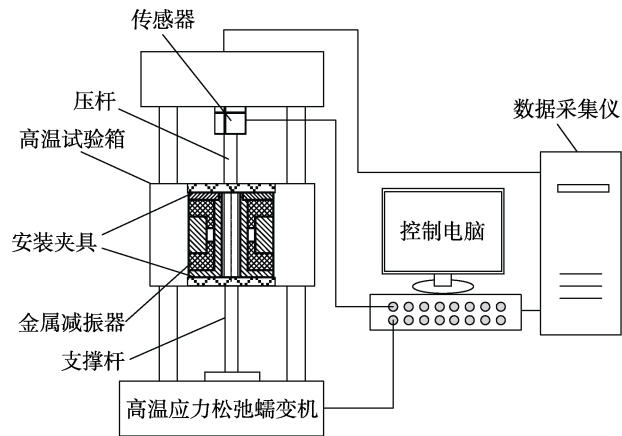


图 4 试验系统示意
Fig.4 Schematic diagram of metal damper experiment system

3 试验实施

3.1 温度极限应力摸底试验

在开展加速贮存试验前，选取 4 组（每组 3 只）金属减振器分别在 160、190、220、250℃下分别进行了 48 h 的温度极限应力摸底试验，试验过程中每组金属减振器的安装状态与在弹上的安装状态完全一致。试验前、后测得的每组金属减振器的谐振频率 f 、减振效率 η 和谐振峰放大倍数 Q 见表 1，各项指标均满足要求，因此，证实该型金属减振器的 1Cr18Ni9Ti 材料在 250℃以下不会发生贮存失效机理的改变。

表 1 温度极限应力摸底试验前后性能参数测定结果对比
Tab.1 Comparison of performance parameters before and after the temperature limit test

温度/℃	共振频率 f/Hz		Q		减振效率 $\eta/\%$	
	试验前	试验后	试验前	试验后	试验前	试验后
160	70	67.5	4.83	4.56	81.2	79.2
190	70	70	4.79	4.67	79.1	78.9
220	70	65	4.85	4.82	80.6	80.2
250	70	67.5	4.76	4.72	81.1	78.8

3.2 加速贮存试验

正式加速贮存试验选取了 15 个金属减振器，分成 I、II、III、IV 和 V 共 5 组（每组 3 件）。将每组金属减振器安装在惯性仪表（模拟件）和基座上，并通过连接工装安装在振动台上进行振动试验，测得的谐振频率 f 、减振效率 η 和谐振峰放大倍数 Q 见表 2

（试验前），均满足指标要求。

表 2 第 I-IV 组金属减振器在试验前后性能参数测定结果对比
Tab.2 Comparison of test results of I – IV group metal dampers before and after the experiment

组别	共振频率 f/Hz		Q		减振效率 $\eta/\%$	
	试验前	试验后	试验前	试验后	试验前	试验后
I	70	65	4.48	4.32	79.3	76.4
II	70	65	4.61	4.45	80.25	78.3
III	70	65	4.89	4.63	78.87	74.8
IV	70	65	4.16	4.02	80.36	78.8

正式试验时，I、II、III、IV 组金属减振器分别在 140、160、180 和 200℃的温度下进行了 48 h 的加速贮存试验，第 V 组金属减振器用于加速贮存验证试验。通过试验获得了金属减振器在不同温度下的应力松弛数据。在加速贮存试验后，再次对 I、II、III、IV 组的金属减振器进行了振动测定，测得的谐振频率 f 、减振效率 η 和谐振峰放大倍数 Q 见表 2（试验后），均满足指标要求。

经过金属减振器在不同温度下的加速贮存试验，测得金属减振器在 140、160、180 和 200℃的预压力载荷 P 与时间 t 的关系（如图 5 所示），其中每条曲线为该温度下的 3 个金属减振器的试验数据的平均值，从试验曲线可以看出，金属减振器的预压力载荷在高温环境下随时间的推移呈现先快速衰减再缓慢衰减的特点，符合金属材料应力松弛的曲线的特点。

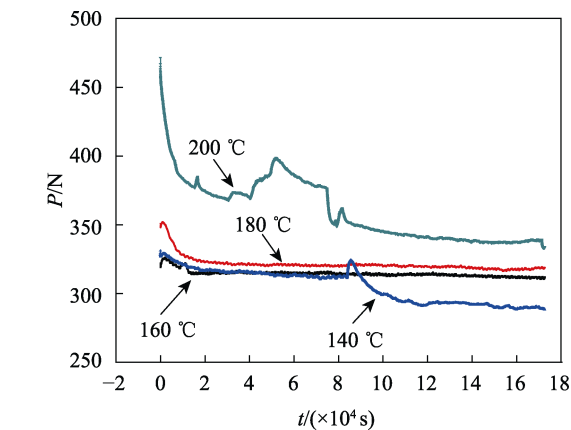


图 5 不同温度下载荷 P -时间 t 的应力松弛曲线
Fig.5 Stress relaxation graph of force P and time t at different temperatures

4 金属减振器加速贮存试验数据分析

将金属减振器在不同温度下的载荷-时间关系曲线进行变换，对载荷进行变换，记 $\Delta P = P_t - P_0$ ，对时间 t 取对数，可建立应力松弛 $\Delta P/P_0$ 与时间的对数 $\ln t$ 关系曲

线(如图6所示)。

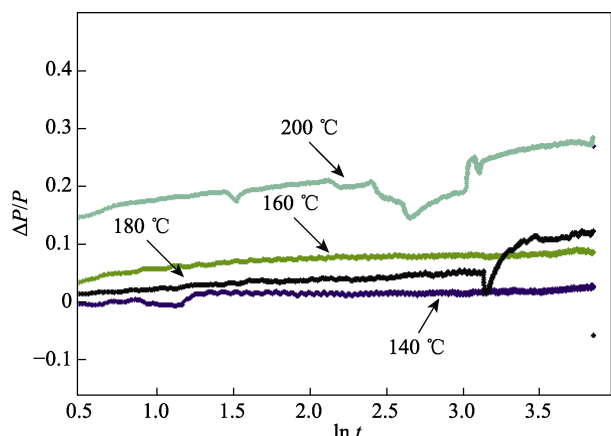


图6 $\Delta P/P_0 - \ln t$ 的关系曲线
Fig.6 Relation curve of $\Delta P/P_0 - \ln t$

根据应力松弛理论,利用 Origin 软件对图6的 $\Delta P/P_0 - \ln t$ 关系曲线进行拟合回归分析,拟合的曲线如图7所示,得到的应力松弛关系式见表3。

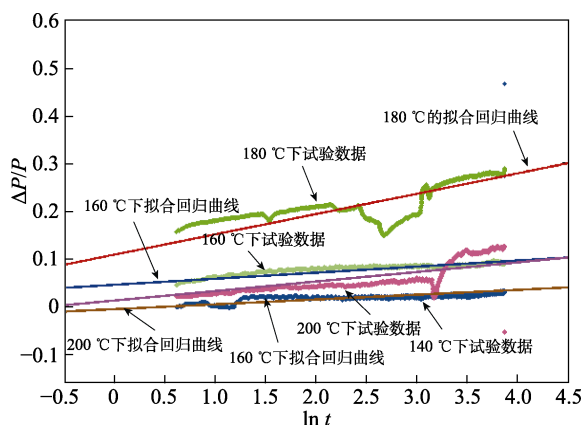


图7 $\Delta P/P_0 - \ln t$ 的拟合回归曲线
Fig.7 Fitted regression curve of $\Delta P/P_0 - \ln t$

表3 不同温度下的拟合回归方程

Tab.3 Fitted regression equations of different temperatures

序号	温度 T/K	拟合回归方程	应力松 弛率 v_s	温度的 倒数 $1/T$
1	413	$\Delta P/P_0 = 8.14 \times 10^{-3} + 1.01 \times 10^{-2} \times \ln t$	1.01×10^{-2}	2.42×10^{-2}
2	433	$\Delta P/P_0 = 4.30 \times 10^{-3} + 1.27 \times 10^{-2} \times \ln t$	1.27×10^{-2}	2.31×10^{-2}
3	453	$\Delta P/P_0 = 1.14 \times 10^{-2} + 2.08 \times 10^{-2} \times \ln t$	2.08×10^{-2}	2.21×10^{-2}
4	473	$\Delta P/P_0 = 1.07 \times 10^{-1} + 4.26 \times 10^{-2} \times \ln t$	4.26×10^{-2}	2.11×10^{-2}

根据不同温度下的应力松弛率 v_s 与温度的倒数 $1/T$ 之间的线性关系进行拟合回归,得到的 $\ln v_s$ 与 $1/T$ 的线性关系式为:

$$\ln v_s = 6.41 - 3698 \times 1/T \quad (10)$$

根据式(10),可得到常温 25 °C 下 $T=298 \text{ K}$ 时的应

力松弛率 $v_s = 2.48 \times 10^{-3}$,进而可得到常温 25 °C 下的应力松弛关系式为:

$$\Delta P/P_0 = 1.06 \times 10^{-2} + 2.48 \times 10^{-3} \times \ln t \quad (11)$$

要验证金属减振器能否满足 15 a 的贮存寿命要求,将 $t=15 \times 365 \times 24 \text{ h}$ 代入(11)式可得到 $\Delta P/P_0 = 3.98 \times 10^{-2}$ 。根据表3可知,金属减振器在高温 160 °C 下的应力松弛关系式为 $\Delta P/P_0 = 8.14 \times 10^{-3} + 1.01 \times 10^{-2} \times \ln t$,因此在金属减振器在 160 °C 下要达到 $\Delta P/P_0 = 3.98 \times 10^{-2}$ 所需要的试验时间 $t=23.7 \text{ h}$ 。

选取第 V 组金属减振器在高温 160 °C 开展加速贮存验证试验,试验时间为 23.7 h。加速贮存试验后,将该组金属减振器安装在惯性仪表(模拟件)和基座上,并通过连接工装安装在振动台上进行振动试验,测得的谐振频率 f 、减振效率 η 和谐振峰放大倍数 Q 见表4,均满足指标要求,因此可证明该批次金属减振器能够满足 15 年的贮存寿命要求。

表4 第 V 组金属减振器在试验前后振动参数测定结果
Tab.4 Comparison of test results of V group metal dampers before and after the experiment

组别	共振频率 f/Hz		Q		减振效率 $\eta/\%$	
	试验前	试验后	试验前	试验后	试验前	试验后
V	70	70	4.920	4.61	77.9	77.2

5 结论

1) 为研究某型金属减振器的库房贮存寿命的实验室加速贮存试验方法,分析了金属减振器的性能指标参数和贮存敏感应力,设计了金属减振器在不同温度下的加速贮存试验方案,选取 3 组金属减振器开展加速贮存试验,通过对试验数据进行拟合回归分析,获得了金属减振器在不同温度下的应力松弛关系式。

2) 对完成加速贮存验证试验的金属减振器进行振动测定,通过试验数据结果评估得出,某型金属减振器在常温库房贮存环境至少能达到 15 a 的贮存寿命。通过在实验室开展加速贮存试验,能够在短时间内验证金属减振器的贮存寿命,为金属减振器寿命评估工作提供了技术支撑。

参考文献:

- [1] 李中郢, 卢正人. 航天器用新型金属橡胶减振器[J]. 上海航天, 2005(5): 58-61.
LI Zhong-ying, LU Zheng-ren. New all-metal damper for spacecraft[J]. Aerospace Shanghai, 2005(5): 58-61.
- [2] 翟庆鹰, 王建军, 邱杰. 金属减振器在海军导弹武器中的应用[J]. 战术导弹技术, 2006(6): 27-31.
ZHAI Qing-ying, WANG Jian-jun, QIU Jie. The application of metal damper to navy missile weapon system[J].

- Tactical missile technology, 2006(6): 27-31.
- [3] 单林庆, 范柱子, 蒋庆华. 金属减振器在稳定平台中的应用与研究[J]. 工业技术, 2012(14): 86-88.
SHAN Lin-qing, FAN Zhu-zi, JIANG Qing-hua. Application and research of the metal damper in inertia platform[J]. Science and technology information, 2012(14): 86-88.
- [4] DEN HARTOG J P. Forced vibration with combined coulomb and viscous friction[J]. Journal of apply mechanical, 1991, 53(9): 107-115.
- [5] ALONSO A, GIMENEZ J G, GOMEZ E, et al. Yaw damper modeling and its influence on railway dynamic stability[J]. International journal of vehicle mechanics and mobility, 2011, 49(8/12): 1367-1387.
- [6] LEVITAN E S. Forced oscillation of a spring-mass- system having combined coulomb and viscous damping[J]. Journal of Acoustical Society of America, 1960, 32(10): 1265-1269.
- [7] JANUSZ G. Study of a magneto rheological fluid damper with multiple annular flow gaps[J]. International journal of vehicle design, 2013, 62(1): 21-41.
- [8] YE H G C K. Forced vibrations of a two-degrees-of-freedom with combined and viscous damping[J]. J Acoustical Society of America, 1966, 39(1): 14-24.
- [9] FERRI C, PIERRE A A, DOWELL E H. Multi-harmonic analysis if dry friction damped system using an incremental harmonic balance method[J]. Journal of application mechanical ASME, 1985, 52(4): 958-964.
- [10] KIM Y, CHOI S, LEE J, et al. Damper modeling for dynamic simulation of a large bus with MR damper[J]. International journal of automotive technology, 2011, 12(4): 521-527.
- [11] KO J M, NI Y Q, TIAN Q L. Hysteretic behavior and empirical modeling of a wire-cable vibration isolator[J]. The international journal of analytical and experimental model analysis, 1992, 7(2): 111-117.
- [12] KRISHNA P B, SUBHASH R, ION S et al. Influence of automotive damper asymmetry on the kinematic and dynamic responses, and optimal damper asymmetric parameters[J]. International journal of vehicle design, 2010, 54(3): 191-216.
- [13] NICHOLAS L W, NORMAN M W, WEI H, et al. Analysis of a magneto rheological damper incorporating temperature dependence[J]. International journal of vehicle design, 2013, 63(2/3): 137-158.
- [14] JANCIRANI J, BALAMURUGAN, ELTANTAWIE M A, et al. Generalized magneto rheological (MR) damper model and its application in semi-active control of vehicle suspension system[J]. International journal of automotive technology, 2014, 15(3): 419-427.
- [15] DANIELE C, SALVATORE N, LUCA Z. A differential hysteresis mode[C]// Proceedings of the 16th IFAC world congress. [s. l.]: Elsevier Science, 2005.
- [16] JORGE G P, JODI V, XAVIER C, et al. Gas damper: Potential vehicle performance studied on a full-car model[J]. International journal of vehicle design, 2014, 64(2/4): 214-239.
- [17] BHASKARARAO A V, JANGID R S. Harmonic response of adjacent structures connected with a friction damper[J]. Journal of sound and vibration, 2016, 292(5): 710725.
- [18] SUNNY M R. KAPANIA R K. Modified dynamic preisach model for hysteresis[J]. AIAA journal, 2010, 48(7): 1523-1530.
- [19] 姜洪源. 金属橡胶构件的性能分析与实验研究[M]. 北京: 中国机械工程出版社, 2000.
JIANG Hong-yuan. Performance analysis and experimental study of metal rubber components[M]. Beijing: China Mechanical Engineering Press, 2000.
- [20] 敖宏瑞, 姜洪源, 闰辉, 等. 基于复刚度模型的金属橡胶隔振系统的研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, (12): 1615-1617.
AO Hong-rui, JIANG Hong-yuan, YAN Hui. Research of a metal rubber isolation system based on complex stiffness[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37 (12): 1615-1619.
- [21] 郝振东. 金属橡胶隔振器随机振动性能分析及试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
HAO Zhen-dong. Analysis and experimental study on random vibration performance of metal rubber vibration isolator[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology. 2009.
- [22] 秦朝红, 陆宏伟, 任方, 等. 金属减振器减振技术在复杂系统中的应用[C]// 第十六届全国模态分析与试验学术会议. 天津: 中国振动工程学会, 2016: 12-14.
QIN Zhao-hong, LU Hong-wei, REN Fang, et al. The application of metal damper in complex system[C]. The 16th national conference on modal analysis and experiment. Tianjin: Chinese Society of Vibration Engineering, 2016: 12-14.