

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.07.014

一种舰用橡胶减振器疲劳寿命预测方法研究*

李东方^{1,2}, 赵应龙^{1,2*}, 肖全山^{1,2}

(1. 海军工程大学 振动与噪声研究所, 湖北 武汉 430033; 2. 船舶振动噪声重点实验室, 湖北 武汉 430033)

摘要:针对橡胶减振器在舰船设备应用中常伴随着不可预见的疲劳失效问题,对舰用 BE-300 型橡胶减振器疲劳寿命预测方法进行了研究。基于连续介质力学理论,通过开展橡胶材料拉伸疲劳试验,建立了减振器橡胶材料的疲劳寿命预测模型;根据减振器橡胶材料的单轴拉伸和单轴压缩试验数据拟合结果,选择 2 阶多项式本构模型进行了橡胶减振器的有限元仿真;根据有限元仿真计算结果提取了橡胶减振器的最大主应力分量,结合橡胶材料疲劳寿命模型预测了橡胶减振器的疲劳寿命。研究结果表明:选取不同的疲劳损伤参量所得到的寿命预测结果并不相同,以等效应变为损伤参量对橡胶减振器寿命进行预测得到的结果与实际情况较为符合,该方法可用于预测舰用橡胶减振器的疲劳寿命。

关键词:橡胶减振器;拉伸疲劳试验;有限元仿真;疲劳寿命预测

中图分类号:TH136;TB534

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2020)07-0811-05

Fatigue life prediction method for shipborne rubber shock absorber

LI Dong-fang^{1,2}, ZHAO Ying-long^{1,2}, XIAO Quan-shan^{1,2}

(1. Institute of Noise & Vibration, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. National Key Laboratory on Ship Vibration & Noise, Wuhan 430033, China)

Abstract: Aiming at the unforeseen fatigue failure problem of rubber shock absorber in ship equipment application, the fatigue life prediction method of marine BE-300 rubber shock absorber was studied. Based on the theory of continuum mechanics, the fatigue life prediction model of damper rubber material was established by tensile fatigue test of rubber material. According to the uniaxial tension and uniaxial compression test data fitting results of the rubber material of the shock absorber, the second-order polynomial constitutive model was selected to simulate the finite element of the rubber shock absorber. According to the finite element simulation results, the maximum principal stress component of the rubber shock absorber was extracted, and the fatigue life prediction of the rubber shock absorber was predicted by the fatigue life prediction model of rubber material. The results indicate that the life prediction results obtained by selecting different fatigue damage parameters are not the same. The results obtained by predicting the life of rubber shock absorber with equal effect into damage parameters are in line with the actual situation. This method can be used to predict the fatigue life of a marine rubber shock absorber.

Key words: rubber shock absorber; tensile fatigue test; finite element simulation; fatigue life prediction

0 引 言

橡胶减振器在服役过程中,由于受橡胶配方、周期性载荷、减振器结构尺寸等因素的影响,橡胶减振器会出现疲劳破坏、刚度失效等现象^[1]。对于舰用橡胶减

振器,不可预料的失效问题将严重影响装备的安全可靠性、设备稳定性,可能造成不可估量的后果。目前主要有两种研究橡胶疲劳寿命的方法^[2]:一种是基于连续介质力学的裂纹萌生法,另一种是基于连续损伤力学的疲劳损伤演化法。

收稿日期:2019-10-16

基金项目:装备预研国防科技重点实验室基金资助项目(614220406030917)

作者简介:李东方(1995-),男,安徽宿松人,硕士,主要从事振动与噪声控制方面的研究。E-mail:15927307661@163.com

通信联系人:赵应龙,男,研究员,博士生导师。E-mail:zhaoyl_hg@163.com

国内外学者已对橡胶疲劳寿命的预测研究做了大量工作。1940 年起, CADWELL、FIELDING J H 和 ROBERTS 等^[3-5]首次建立了基于裂纹萌生法的橡胶疲劳寿命预测方法, 后经 WANG Bo、汪艳萍、WANG Xiao-li 等人^[6-8]的完善, 形成了一套较为完备的橡胶材料疲劳寿命预测体系。对橡胶构件的疲劳寿命预测, 目前研究则相对较少。主要有: KIM D、LI Q 等人^[9-10]以最大主应变和应变张量建立了汽车发动机悬置橡胶的寿命预测模型; 王文涛等人^[11]基于橡胶开裂能密度及裂纹扩展特性计算了汽车用橡胶减振器的疲劳寿命; 王伯平等^[12]基于有限元仿真的方法对橡胶减振元件的疲劳寿命进行了研究。

以上研究大多仅针对于橡胶材料以及汽车用橡胶构件的寿命预测, 舰用橡胶减振器由于其承载要求高, 工作环境复杂, 使用寿命与普通汽车用橡胶减振器存在明显差异。目前对于舰用橡胶减振器的疲劳寿命预测研究, 国内外相关报道较少。

本文将通过开展橡胶材料拉伸疲劳试验, 结合有限元仿真, 建立基于连续介质力学理论的橡胶疲劳寿命预测模型, 并以等效应变作为疲劳损伤参量, 进行舰用橡胶减振器的寿命预测。

1 橡胶材料单轴拉伸疲劳寿命预测模型

橡胶材料疲劳寿命与疲劳损伤参量之间通常满足幂次法则, 即:

$$P = K(N_f)^b \quad (1)$$

式中: P — 疲劳损伤参量; N_f — 橡胶材料寿命; K, b — 与材料有关的常数。

早期研究表明, 损伤参量的选择是研究橡胶材料的疲劳寿命预测的关键问题, 疲劳损伤参量通常与某一点的应力或应变历程有关。

1.1 橡胶材料拉伸疲劳试验

为了研究减振器橡胶材料的拉伸疲劳特性, 参考 GT/T 1688 - 2008 标准, 本文采用哑铃型试片对橡胶拉伸疲劳特性进行研究。

笔者测量橡胶哑铃试片在循环的拉伸作用下, 重复变形直至断裂的循环次数, 橡胶疲劳试片几何形状和尺寸如图 1 所示。

哑铃型试片采用国产疲劳试验机进行试验, 由于橡胶材料疲劳寿命受诸如加工工艺、环境温度等因素的影响, 即使是同一片试片也不能保证每个区域内力学、疲劳等性能完全相同。为了尽量减小疲劳寿命数

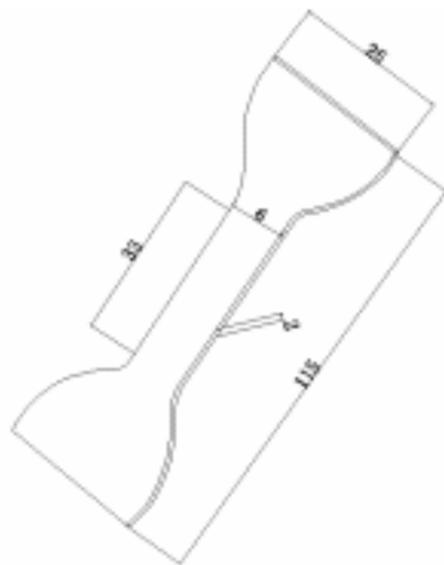


图 1 橡胶疲劳试片几何形状和尺寸

据本身分散性对寿命预测模型的影响, 同一种试验工况下, 需采用多个相同试片同时进行试验。

该试验中, 每一种拉伸载荷工况下, 同时采用 8 个试片进行试验, 将一组试片两端整齐的用纸板粘接成一列, 用记号笔对哑铃橡胶试片的中间狭长段进行标记, 并测量每一片试片的初始厚度, 橡胶拉伸疲劳试验工装如图 2 所示。



图 2 橡胶拉伸疲劳试验工装

橡胶材料具有粘弹性, 在力的作用下, 橡胶材料会发生蠕变, 这种蠕变会使橡胶的疲劳寿命缩短。因而疲劳试验中均采用位移(应变)控制的循环载荷正弦波加载方式, 频率为 5 Hz, 试验所加的位移(应变)循环载荷最小值为零, 试验在常温(23 ℃)通风的环境下进行。

根据前期对应变载荷条件为 0.6 的橡胶哑铃试片摸底试验, 发现橡胶材料的疲劳寿命高达 1.2×10^7 次以上, 试验时间长达 27 d, 如果在应变低于 0.6 条件下设计较多组试验, 试验成本较高。根据 GT/B1688 - 2008 标准要求和摸底试验结果, 共设计开展了 6 组不同拉伸载荷下的疲劳试验, 应变幅值分别为 190%、

165%、140%、115%、90%。记录一组中每一片哑铃试样中间狭长部位断裂时试验循环的次数。需要注意,如果试件在非狭长部位断裂,此样件应该剔除。

1.2 单轴拉伸寿命预测模型

以最大对数应变 $\varepsilon_{L,\max}$ 作为疲劳损伤参量来描述橡胶的疲劳寿命,对数应变定义为^[13]:

$$\varepsilon_L = \int_L \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) = \ln(\lambda) \quad (2)$$

式中: L_0 —橡胶试片初始标记长度; λ —橡胶试片伸长比。

以最大工程应变 $\varepsilon_{E,\max}$ 为疲劳损伤参量来描述橡胶的疲劳寿命,橡胶拉伸试件的工程应变与伸长比之间的关系为:

$$\varepsilon_E = \lambda - 1 \quad (3)$$

根据 ASTM 标准推荐,橡胶材料的疲劳寿命多服从对数正态分布,因此减振器橡胶材料的疲劳寿命是对相同载荷条件下每一片橡胶试片的疲劳寿命取平均得到,平均寿命 N_e 的计算公式为^[14]:

$$\log_{10}(N_e) = \frac{\sum_{i=1}^n \log_{10}(N_i)}{n} \quad (4)$$

式中: n —相同载荷工况的一组中试片的件数,该试验方案中 $n = 8$; N_i —相同工况的一组中第 i 片试件所测得的疲劳寿命。

橡胶试片疲劳试验结果如表 1 所示。

表 1 橡胶试片疲劳试验结果

工况号	伸长率	$\varepsilon_{E,\max}$	$\varepsilon_{L,\max}$	平均寿命
1	1.6	0.6	0.47	> 1 200
2	1.9	0.9	0.64	275.13
3	2.15	1.15	0.77	19.432
4	2.40	1.40	0.88	11.897
5	2.65	1.65	0.98	1.992
6	2.90	1.90	1.07	0.796

相同试验工况的一组试验,平均寿命 N_e 按照式(4)计算得到。笔者利用最小二乘法拟合减振器橡胶材料的单轴疲劳试验数据,建立疲劳寿命预测模型。根据最小二乘法拟合结果,得到疲劳寿命预测模型为:

$$N_f = 1.453 \times 10^6 (\varepsilon_{E,\max})^{-4.696} \quad R^2 = 0.9986 \quad (5)$$

$$N_f = 1.132 \times 10^5 (\varepsilon_{L,\max})^{-6.558} \quad R^2 = 0.9973 \quad (6)$$

式中: R^2 —相关系数,其值越接近于 1,表明拟合效果越好。

由上式可以看出,两种损伤参量的拟合结果均较好,以上述模型进行寿命预测,能达到较好的结果。

2 橡胶减振器疲劳寿命预测

2.1 橡胶材料本构试验与参数拟合

橡胶材料本构关系对于橡胶减振器有限元仿真至

关重要,通常以应变能函数描述,通过对应变能函数的假设,根据微分关系导出本构方程。目前已有大量对橡胶超弹性本构方程的研究,通过从不同出发点来考虑问题,得到了不同的本构模型,如 Mooney-Rivlin 模型、多项式模型、Ogden 模型、Yeoh 模型等。其中多项式模型的应变能函数为:

$$W(I_1, I_2) = \sum_{i,j=0}^N C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J - 1)^{2i} \quad (7)$$

式中: C_{ij} —Rivlin 系数,它们是试验数据的回归系数,没有具体的物理意义,且满足 $C_{00} = 0, i + j \leq N$; I_1, I_2 —第一和第二 Green 应变不变量; J —橡胶变形前后体积比; D_i —决定橡胶材料是否可压缩; N —多项式阶数。

一般将橡胶材料看做不可压缩材料,取 $J = 1$,则有:

$$W(I_1, I_2) = \sum_{i,j=0}^N C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (8)$$

文献[15]中对本文所用的橡胶材料开展了单轴拉伸和单轴压缩试验,且据此拟合得到了最接近试验结果的 2 阶多项式本构模型。

本构模型拟合结果如表 2 所示。

表 2 本构模型拟合结果

材料类别	本构模型	参数	值 / MPa
橡胶件	2 阶多项式	C10	0.278 32
		C01	0.467 64
		C20	-5.142 4E - 02
		C11	0.389 94
		C02	-0.464 08

下面从物理机理上对本文所研究的 BE 型橡胶隔振器采用 2 阶多项式模型的合理性进行分析。

BE 型橡胶减振器为剪切型隔振器,在工作过程中主要承受剪切力。根据文献[16],可以得到以剪应变 γ_{xy} 表示的 2 阶多项式应变能函数为:

$$W = (C_{10} + C_{01}) \gamma_{xy}^2 + (C_{20} + C_{02} + C_{11}) \gamma_{xy}^4 \quad (9)$$

根据式(9)可以得到剪应力 T_{xy} 为:

$$\tau_{xy} = \frac{\partial W}{\partial \gamma_{xy}} = 2D_1 \gamma_{xy} + 4D_2 \gamma_{xy}^3 \quad (10)$$

式中: D_1 —常剪切模量; D_2 —二次剪切模量,且有 $D_1 = C_{10} + C_{01}, D_2 = C_{20} + C_{02} + C_{11}$ 。

由式(10)可以得到 2 次多项式模型剪切模量 G 为:

$$G = \frac{\tau_{xy}}{\gamma_{xy}} = 2D_1 + 4D_2 \gamma_{xy}^2 \quad (11)$$

根据式(11)可以看出 2 次多项式剪切模量是随剪应变的变化而变化的,为非定值剪切模型。橡胶材料受剪切通常呈现先软化后硬化的特点,而二次多项式模型可以较为准确地模拟橡胶材料受剪切后软化阶段

的变化规律。因此在小应变的条件下,二次多项式模型适用于本文所研究的 BE 型橡胶减振器。

由式(8)可以得到 2 阶多项式模型的应变能函数为:

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{02}(I_2 - 3)^2 + C_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) \quad (12)$$

2.2 多轴载荷下等效应力及等效应变计算

减振器橡胶材料寿命预测模型是在单向应力状态下推导出的,对于复杂应力状态下的减振器橡胶材料寿命,简单地利用单向应力寿命预测模型计算将会产生较大误差。为了将单轴应力寿命预测模型应用到复杂应力状态,需要建立复杂应力与单向应力之间的联系,将复杂应力转换为单向应力进行计算。根据 LUO 等研究^[17],橡胶材料的等效应力 σ_f 是关于复杂应力条件下 3 个主应力分量的函数:

$$\sigma_f = \sqrt{\sigma_1^2 + A_1\sigma_2^2 + A_2\sigma_3^2} \quad (13)$$

式中: $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ —主应力分量,其中 $\sigma_1 > 0, \sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$; A_1, A_2 —应力状态参数。

其中:

$$A_1 = \begin{cases} 1 & \sigma_2 > 0 \\ 0 & \sigma_2 \leq 0 \end{cases}, A_2 = \begin{cases} 1 & \sigma_3 > 0 \\ 0 & \sigma_3 \leq 0 \end{cases}$$

参数 A_1, A_2 值与橡胶材料的受力状态有关,在多轴载荷下,利用有限元仿真,计算出可能破坏位置(一般为应力最大单元)的 3 个主应力分量,代入式(13)可得到可能破坏位置的等效应力。

最小二乘法拟合橡胶材料应力应变曲线如图3所示。

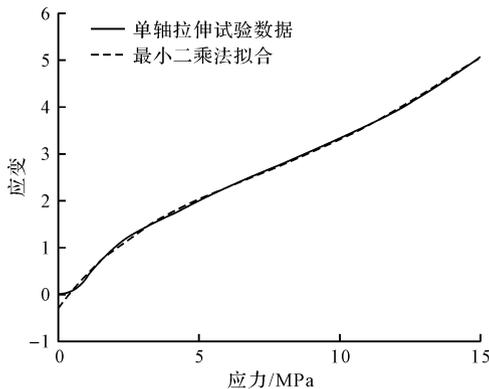


图3 最小二乘法拟合橡胶材料应力应变曲线

则可以得到等效应力 - 等效应变公式为:

$$\begin{aligned} \varepsilon_f &= 1.90088 \times 10^{-5} \sigma_f^5 - 0.84523 \times 10^{-4} \sigma_f^4 + \\ &0.01551 \sigma_f^3 - 0.14088 \sigma_f^2 + 0.88052 \sigma_f - 0.3586 \\ R^2 &= 0.9997 \end{aligned} \quad (14)$$

式中: ε_f —由等效应力计算得到的等效应变。

相关系数 R^2 接近于 1,说明对减振器橡胶材料的拉伸应力 - 应变曲线拟合程度很好,用上式来计算橡

胶材料的等效应变误差较小,可信度较高。

2.3 有限元仿真

BE 型减振器由于具有固有频率低、性能稳定、减振效果优良以及外形尺寸小等优点,是现役各类舰艇上使用效果最好的减振器之一。

本文利用 Pro/E 三维绘图软件建立 BE-300 型橡胶减振器几何模型,将其导入到 ABAQUS 中进行有限元仿真,BE-300 型橡胶减振器有限元模型如图 4 所示。

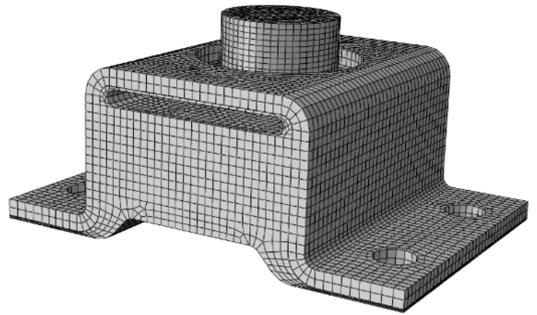


图4 BE-300 型橡胶减振器有限元模型

根据 BE-300 型橡胶减振器的承载特性,规定了该型橡胶减振器的额定工况,即理想工作条件下,橡胶减振器除受到 3 000 N 垂向载荷外,还受到频率为 12 Hz,幅值为 300 N 垂向交变力载荷作用。在定义有限元边界时需与实际工况保持一致。

橡胶件采用 2.1 节所得到的 2 阶多项式超弹性本构模型参数,金属件的弹性模量取 2.1×10^5 MPa,泊松比取 0.3。对橡胶减振器进行模拟仿真,得到最大主对数应变分布云图。

橡胶件的应力云图如图 5 所示。

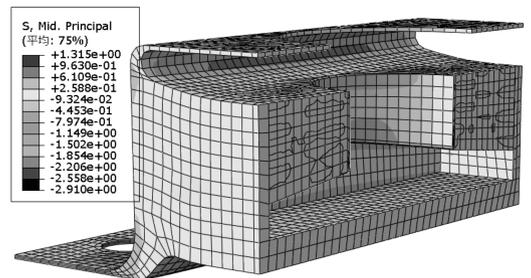


图5 橡胶件的应力云图

图 5 表示在 3 000 N 静载下,橡胶减振器受到 300 N 正弦载荷时在幅值最低点所对应的应力云图。利用 ABAQUS 有限元软件的后处理功能,得到橡胶减振器可能破坏点的最大主应力值分别为 $\sigma_1 = 1.4722$ MPa、 $\sigma_2 = 0.687$ MPa、 $\sigma_3 = 0.008$ MPa。

2.4 橡胶减振器的寿命预测

橡胶减振器的疲劳寿命由危险点的寿命决定,一般而言,橡胶材料最大主应力分量值最大的节点即为

危险点。提取有限元计算结果中危险节点的3个主应力,代入到式(13)中,计算出橡胶材料危险节点的等效应力 σ_f ,再利用橡胶单轴拉伸试验拟合结果得到的应力-应变关系,即式(14),计算出与之相对应的等效应变,最后将等效应变作为损伤参量代入寿命预测模型中,即可计算得到橡胶减振器的疲劳寿命。

等效应变的提取结果如表3所示。

表3 等效应变提取结果

节点	主应力/MPa	等效应力/MPa	等效应变
11 522	$\sigma_1 = 1.472$	1.624 4	0.766 1
	$\sigma_2 = 0.687$		
	$\sigma_3 = 0.008$		

将表3中计算得到的等效应变 ε_f 和相关寿命预测模型参数代入到寿命预测模型中,得到以最大主工程应变 $\varepsilon_{E,max}$ 为损伤参量的疲劳寿命为 5.078×10^6 次,以最大主对数应变 $\varepsilon_{L,max}$ 为损伤参量的疲劳寿命为 4.581×10^6 次,与工程应用中该型减振器的寿命值较为吻合。另外可以看出,选用不同应变量为疲劳损伤参量得到的寿命预测结果并不完全相同。

3 结束语

本文主要基于连续介质力学理论,结合有限元仿真,提出了一种舰用橡胶减振器的疲劳寿命预测方法。该方法选取最大名义应变及最大对数应变为疲劳损伤参量,对舰用BE-300型橡胶减振器的疲劳寿命进行了预测。

结果表明,以等效应变为损伤参量所预测的橡胶减振器疲劳寿命约为500万次,与工程应用中的实际结果相符;另外选用不同损伤参量将得到不同的寿命预测结果,对本文研究的橡胶减振器,以最大主工程应变为损伤参量得到的疲劳寿命略大于以最大主对数应变为损伤参量得到的疲劳寿命。

本文研究工作可为舰用橡胶减振器的寿命评估提供一定的理论参考。

参考文献(References):

[1] FARZAD N. Chapter 6. buckling and stability of elastomeric isolators[M]. New York:John Wiley & Sons, Inc., 2007.
 [2] 王小莉. 防振橡胶材料疲劳寿命研究方法综述[J]. 河北科技大学学报,2016,37(4):329-334.

[3] CADWELL S, MERRILL R, SLOMAN C, et al. Dynamic fatigue life of rubber[J]. **Industrial & Engineering Chemistry Analytical Edition**, 1940, 12(1):19-23.
 [4] FIELDING J H. Flex life and crystallization of synthetic rubber[J]. **Ind Eng Chem**, 1943, 35(12):1259-1261.
 [5] ROBERTS B J, BENZIES J B. Relationship between uniaxial and equibiaxial fatigue in gum and carbon-black-filled vulcanizates[J]. **Plastics and Rubber: Materials and Applications**, 1977, 77(21):1-13.
 [6] WANG B, LU H, KIM G H. A damage model for the fatigue life of elastomeric material[J]. **Mechanics of Materials**, 2002, 8(34):475-483.
 [7] 汪艳萍. 橡胶材料多轴疲劳寿命及微观结构研究[D]. 天津:天津大学化工学院,2007.
 [8] WANG Xiao-Li, LIAO Mei-Ying, XU You, et al. Fatigue crack propagation characteristics of rubbery materials under variable amplitude loading[J]. **Results in Physics**, 2018(10):233-240.
 [9] KIM D, JEE L. Fatigue life estimation of an engine rubber mount[J]. **International Journal of Fatigue**, 2004, 26(5):553-560.
 [10] LI Q, ZHAO J C, ZHAO B. Fatigue life prediction of a rubber mount based on test of material properties and finite element analysis[J]. **Engineering Failure Analysis**, 2009, 16(7):2304-2310.
 [11] 王文涛,肖苏华,黄健龙,等. 单轴拉伸状态下橡胶隔振器的疲劳寿命预测研究[J]. 振动与冲击,2014,33(5):24-30.
 [12] 王伯平,翟敬宇,李雅淑,等. 橡胶减振元件加速寿命试验的仿真研究[J]. 机电工程,2013,30(4):399-402.
 [13] BONET J, WOOD R D. Nonlinear continuum mechanics for Finite Element Analysis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
 [14] WANG X, SHANG GUAN W, LIU T. Experiment of uniaxial tension fatigue and modeling of fatigue life for filled natural rubbers[J]. **Journal of Mechanical Engineering**, 2013, 49(14):65-73.
 [15] 肖全山,赵应龙,金 著. 一种橡胶材料超弹本构等效试验方法[J]. 船海工程,2018,47(4):126-130.
 [16] 刘滢滢,邢誉峰. 超弹性橡胶材料的改进 Rivlin 模型[J]. 固体力学学报,2012,33(4):408-414.
 [17] 丁智平,杨荣华,黄友剑,等. 基于连续损伤模型橡胶弹性减振元件疲劳寿命分析[J]. 机械工程学报,2014,10(50):80-86.

[编辑:方越婷]

本文引用格式:

李东方,赵应龙,肖全山. 一种舰用橡胶减振器疲劳寿命预测方法研究[J]. 机电工程,2020,37(7):811-815.

LI Dong-fang, ZHAO Ying-long, XIAO Quan-shan. Fatigue life prediction method for shipborne rubber shock absorber[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2020, 37(7):811-815.
 《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>