

文章编号:1006-1355(2021)06-0211-04+228

## 考虑应变比影响的车用隔振橡胶 疲劳寿命预测方法

吕向飞<sup>1,2</sup>, 黄 帅<sup>3</sup>

- (1. 重庆电子工程职业学院 智能制造与汽车学院, 重庆 410331;  
2. 重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400044;  
3. 九江职业技术学院 机械工程学院, 江西 九江 332000)

**摘要:**隔振橡胶的工作载荷通常为时变和幅变载荷,为更好预测橡胶疲劳寿命,有必要建立不同应变比作用下橡胶疲劳寿命的高精度预测模型。在不同应变比作用下的橡胶疲劳寿命实测数据的基础上,引入等效应变的概念,将不同应变比作用下的疲劳寿命预测问题转化为运用传统裂纹萌生法可以处理的问题。分别采用指数函数、幂函数、幂指混合函数和二次多项式进行等效应变的计算,以相关系数为拟合优度,对不同模型的建模精度进行评价。结果表明:以幂指混合函数作为等效应变的近似计算模型拟合精度相对最高。进一步的疲劳寿命预测表明,将所提方法应用于不同应变比作用下的隔振橡胶疲劳寿命预测时,所获得的寿命预测值与实测值相比处于2倍分散线以内,说明模型的预测精度符合工程需求。

**关键词:**振动与波;隔振橡胶;疲劳寿命;等效应变;混合模型;裂纹萌生法

中图分类号:U270.1

文献标志码:A

DOI编码:10.3969/j.issn.1006-1355.2021.06.034

## Fatigue Life Prediction Method of Vibration Isolation Rubber for Vehicles Considering the Influence of Strain Ratios

LYU Xiangfei<sup>1,2</sup>, HUANG Shuai<sup>3</sup>

- (1. School of Intelligent Manufacturing and Automobile, Chongqing College of Electronic Engineering, Chongqing 410331, China;  
2. State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China;  
3. School of Mechanical Engineering, Jiujiang Vocational and Technical College, Jiujiang 332000, Jiangxi, China)

**Abstract :** The working load of vibration isolation rubber is usually time-varying and amplitude-varying. In order to better predict the fatigue life of rubber, it is necessary to establish a high-precision fatigue life prediction model for rubbers under different strain ratios. Based on the measurement data of fatigue life of rubbers under different strain ratios, the concept of equivalent strain is introduced to transform the fatigue life prediction problem of different strain ratios into such a problem that can be dealt with by the traditional crack initiation method. The exponential function, power function, power-exponent mixed function and quadratic polynomial models are used respectively to calculate the equivalent strain. Moreover, the correlation coefficient is used as the fitting goodness to evaluate the modeling accuracy of different models. The results show that the fitting accuracy of the power-exponential mixed function is the highest. Finally, the proposed method is applied to the fatigue life prediction of vibration isolation rubber under different strain ratios. Compared with the measured values, the obtained life prediction values are within 2 times of the dispersion lines, indicating that the prediction accuracy of the model meets the engineering requirement.

**Key words :** vibration and wave; vibration isolation rubber; fatigue life; equivalent strain; mixed model; crack initiation method

收稿日期:2021-01-25

基金项目:江西省教育厅科学技术研究资助项目(GJJ171245)

作者简介:吕向飞(1984—),男,河南省南阳市人,博士,研究方向为智能制造、车辆故障诊断技术。

E-mail: xiangfei113072@163.com

橡胶材料是一种力学性能优异而成本相对较低的隔振和密封材料,在机械设备的振动隔离和流体密封等领域应用广泛。橡胶零部件在使用环境中受到各种因素的影响,同时又受限于橡胶材料本身配方和合成工艺等内部因素的影响,造成了橡胶使用

寿命的影响因素十分复杂,难以从理论上提出一套十分完备的方法对橡胶的疲劳寿命进行准确的预测,现有的橡胶疲劳寿命预测方法大多依据试验数据进行拟合,主要可分为裂纹萌生法和裂纹扩展法等<sup>[1]</sup>。

为了解决橡胶疲劳寿命预测的难题,从而为橡胶零部件的耐久可靠性设计提供指导,学者们从不同的角度对橡胶的疲劳寿命进行了研究。文献[2]的研究表明,外界环境因素如温度,橡胶的自身内部因素如配方不同造成的硬度差异等,这些内外耦合因素对橡胶的疲劳寿命具有显著的影响。文献[3]中以隔振橡胶垂向变形量为性能衰退指标,对橡胶进行了高温加速退化试验,并由高温寿命推算出正常使用温度下的寿命。文献[4]中分析了激励频率对橡胶疲劳寿命的影响。文献[5]中同时考虑应变、应变能和应力等参数,提出了一种新型损伤参量用于描述多轴橡胶疲劳寿命。文献[6]中结合实测试验数据和有限元方法,分析了不同损伤参量对橡胶疲劳寿命预测精度的影响。文献[7]中在橡胶高温疲劳试验数据的基础上,以工程应变峰值为损伤参量,建立了橡胶的高温疲劳寿命预测模型。文献[8]中研究了臭氧、紫外线和热老化对隔振橡胶动静特性的影响。文献[9]在步进应力加速试验的基础上,提出了改进的 Arrhenius 模型对橡胶的贮存寿命进行准确的预测。总结上述研究可知,目前对于橡胶疲劳寿命的研究侧重于研究环境因素(温度、紫外线和臭氧等)、载荷频率和不同损伤参量的选取对寿命预测的影响等方面。此外,加速性能衰退方法也逐渐被引入研究中用于提升橡胶寿命评估的效率。

橡胶的寿命与工作载荷息息相关,工作载荷作用于橡胶零部件导致橡胶产生应变,而应变特征(幅值、均值)对橡胶疲劳寿命的影响不容忽视<sup>[10]</sup>。为提高橡胶疲劳寿命预测的准确性,对不同应变影响下的橡胶疲劳寿命进行量化的评估就显得十分必要和迫切。据笔者的文献调研可知,现有研究中,针对应变比对橡胶疲劳寿命的影响进行研究的文献并不多见。因此,基于已有的少量不同应变比作用下的车用隔振橡胶疲劳寿命实测结果的公开数据<sup>[11-14]</sup>,开展不同应变比影响下的橡胶疲劳寿命建模方法研究很有意义,可为进一步提升橡胶零部件的寿命预测准确性提供帮助。

## 1 不同应变比下的橡胶寿命疲劳

为评估不同类型橡胶的疲劳寿命,需在实验室条件下对标准橡胶试样施加给定频率的正弦载荷,并记录试样断裂破坏时的载荷循环次数作为该载荷

下的疲劳寿命。

本文的研究目的是针对不同应变比影响下的橡胶疲劳寿命进行研究。应变比  $R$  指的是所施加的激励载荷引起的橡胶样件的最小应变值和最大应变值的比值,其定义如式(1)所示。

$$R = \frac{\varepsilon_{\min}}{\varepsilon_{\max}} = \frac{\varepsilon_m - \varepsilon_a}{\varepsilon_m + \varepsilon_a} \quad (1)$$

式中:  $\varepsilon_{\min}$  和  $\varepsilon_{\max}$  分别为最小应变和最大应变,  $\varepsilon_m$  为应变均值,  $\varepsilon_a$  为应变幅值。

分别针对不同应变比下的橡胶试样开展疲劳试验,测量其疲劳寿命,表1所示是不同应变比作用下的30组车用隔振橡胶疲劳寿命试验结果<sup>[11-14]</sup>。试验所用试样为哑铃型橡胶试柱,试验载荷为5 Hz的正弦载荷,载荷加载方式为位移控制方式,试验环境温度维持在  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  的范围内,每种工况下的试验样本量为3个,各工况下的实测寿命值为3个样本的平均值<sup>[14]</sup>。

## 2 等效应变的近似模型

当应变比  $R$  等于0时,疲劳试验中所施加的循环载荷为脉动循环载荷。当应变比  $R$  等于-1时,施加的循环载荷为对称循环载荷。采用应变比  $R$  描述载荷的特征时,橡胶的疲劳寿命将随着载荷特征的变化发生改变。因此,应用传统的裂纹萌生法所建立的某一应变比的应变幅值  $\varepsilon_a$  与疲劳寿命  $N_f$  之间的逆幂律关系在另一应变比下不成立。

为推广逆幂律关系的应用范围,针对橡胶寿命最小和损伤风险最大的载荷特征,即应变比  $R=0$  载荷作用下的实测疲劳数据,进行逆幂律拟合,如式(2)所示。

$$\varepsilon_a^{(0)} = k (N_f)^b \quad (2)$$

式中:  $\varepsilon_a^{(0)}$  是特征为  $R=0$  的载荷的应变幅值,  $k$  和  $b$  为模型回归常数。

在建立起应变比为0的样本的回归模型后,根据各不同应变比工况下的实测寿命,就可由式(3)计算出各不同应变比工况下对应的等效应变:

$$\varepsilon_{\text{eq}} = k (N_f)^b \quad (3)$$

在获得等效应变后,进一步分析等效应变与应变比的关系,可建立起等效应变与应变均值、应变幅值之间的数学关系,如式(4)所示。

$$\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_{\text{eq}}} = f\left(\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_a}\right) \quad (4)$$

在得到式(4)中的数学函数  $f(\cdot)$  的准确表达式后,就可以通过等效应变的方法将不同应变比作用下的疲劳寿命预测问题转化为应变比为0时的疲劳寿命预测问题,如式(5)所示。因此,建立等效应变

表1 不同应变比下的橡胶疲劳寿命实测数据<sup>[11-14]</sup>

载荷特征	序号	应变均值	应变幅值	应变比	实测寿命
R=0	1	0.4	0.4	0	84 994
	2	0.38	0.38	0	126 560
	3	0.35	0.34	0.01	146 934
	4	0.3	0.3	0	264 222
	5	0.25	0.24	0.02	485 644
	6	0.23	0.23	0	812 012
	7	0.2	0.2	0	1404 492
	8	0.45	0.36	0.11	126 954
	9	0.35	0.3	0.08	187 636
	10	0.4	0.3	0.14	244 933
R>0	11	0.45	0.3	0.2	417 953
	12	0.45	0.24	0.3	463 240
	13	0.35	0.24	0.19	474 589
	14	0.25	0.18	0.16	916 558
	15	0.3	0.2	0.2	921 771
	16	0.25	0.16	0.22	1 896 574
	17	0.32	0.47	-0.2	148 542
	18	0.17	0.64	-0.59	163 539
	19	0.18	0.57	-0.53	181 609
	20	0.34	0.39	-0.07	204 281
R<0	21	0.19	0.5	-0.45	212 232
	22	0.2	0.43	-0.35	301 805
	23	0.22	0.37	-0.26	336 450
	24	0.25	0.26	-0.03	364 001
	25	0.23	0.32	-0.16	399140
	26	0.07	0.52	-0.77	532 498
	27	0.08	0.45	-0.7	805 766
	28	0.16	0.34	-0.34	958 260
	29	0.12	0.27	-0.4	1 205 349
	30	0.1	0.35	-0.56	1 631 035

的准确数学模型 $f(\cdot)$ 是研究的核心内容。

$$\varepsilon_a / f\left(\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_a}\right) = k(N_f)^b \quad (5)$$

现有文献中,对等效应变采用幂函数、多项式和随机森林等方法进行建模<sup>[11-14]</sup>,未全面对比各不同模型的建模精度,因此本文分别采用指数模型、幂函数模型、幂指混合函数模型和二次多项式模型这4种模型建立等效应变的近似模型,并引入相关系数作为拟合优度指标,对各模型的拟合精度进行系统对比。

式(6)所示是指数形式的等效应变函数。其中 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 和 $\alpha_3$ 为常数。

$$\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_{eq}} = \exp\left(\alpha_1 \frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_a} + \alpha_2\right) + \alpha_3 \quad (6)$$

式(7)所示是幂函数形式的等效应变函数。其中 $\beta_1$ 和 $\beta_2$ 为常数。

$$\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_{eq}} = \beta_1 \left(\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_a}\right)^{\beta_2} \quad (7)$$

式(8)所示是幂指混合函数形式的等效应变函数。其中, $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$ 和 $\gamma_3$ 为常数。

$$\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_{eq}} = \exp\left(\gamma_1 \frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_a} + \left(\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_a}\right)^{\gamma_2}\right) + \gamma_3 \quad (8)$$

式(9)所示是二次多项式函数形式的等效应变函数。其中, $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$ 和 $\varphi_3$ 为常数。

$$\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_{eq}} = \varphi_1 \left(\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_a}\right)^2 + \varphi_2 \frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_a} + \varphi_3 \quad (9)$$

### 3 分析与讨论

根据表1中的数据,由式(2)进行拟合获得逆幂律关系模型中的两个常数,如式(10)所示。

$$\varepsilon_a^{(0)} = 7.7873(N_f)^{-0.2609} \quad (10)$$

由式(10)推算出各不同应变比工况下的等效应变 $\varepsilon_{eq}$ ,分别应用式(6)至式(9)所示的模型建立等效应变 $\varepsilon_{eq}$ 与应变均值 $\varepsilon_m$ 和应变幅值 $\varepsilon_a$ 之间的数学表达式,如式(11)至式(14)所示。

$$\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_{eq}} = \exp\left(-2.2561 \frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_a} + 0.5595\right) + 0.8586 \quad (11)$$

$$\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_{eq}} = 1.0712 \left(\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_a}\right)^{-0.3735} \quad (12)$$

$$\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_{eq}} = \exp\left(-2.8831 \frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_a} + \left(\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_a}\right)^{0.2544}\right) + 0.8829 \quad (13)$$

$$\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_{eq}} = 0.6994 \left(\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_a}\right)^2 - 1.9737 \frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_a} + 2.2943 \quad (14)$$

在获得式(11)至式(14)所示的4种等效应变模型的基础上,分别计算基于这4种模型预测结果与实际计算出的等效应变之间的相关系数,如图1所示。

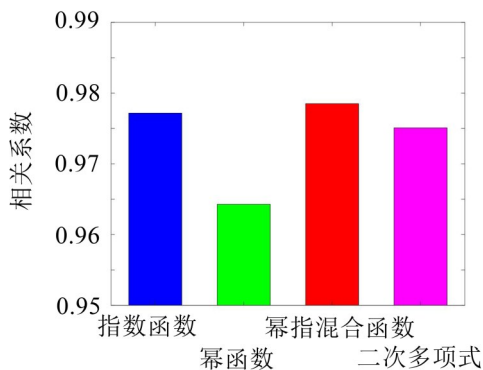


图1 4种等效应变近似模型拟合效果对比

由图1可知,4种模型的拟合优度都较高,相关系数均在0.95以上,而幂指混合函数的拟合优度最高,其相关系数可达0.9785。因此,本文选取幂指混合函数作为不同应变比作用下橡胶疲劳寿命计算的等效应变计算模型。

图2所示是不同应变比条件下等效应变与应变



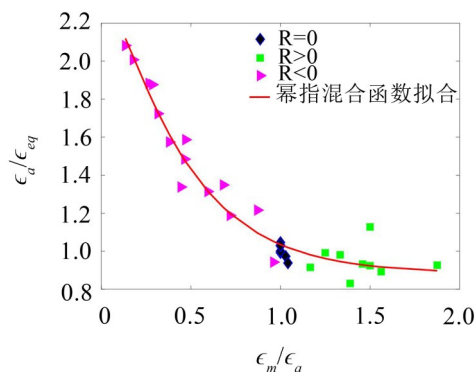


图2 不同应变比条件下的拟合效果对比

幅值、应变均值之间的拟合效果对比图。

由图2可知,幂指函数可以很好拟合等效应变,通过拟合,可以将应变幅值和应变均值之间的分散性进行一定的抑制,使得预测结果更为平滑。

图3所示是由混合幂指函数计算出的等效应变,结合由式(5)获得的不同应变比条件下的橡胶疲劳寿命的预测值与实测橡胶疲劳寿命的对比图。

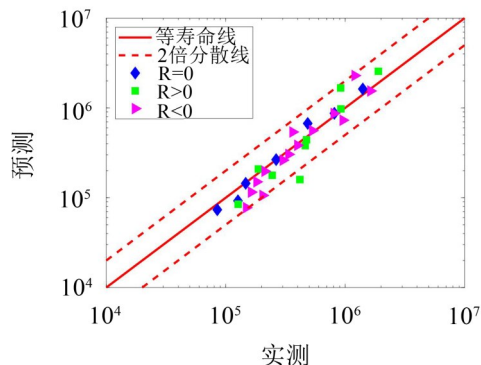


图3 预测结果和实测结果对比

由图3可知,预测值相对实测值很好分布在等寿命线两侧,其最大分散性基本都控制在2倍以内,说明采用本文方法所预测的不同应变比影响下的橡胶疲劳寿命的精度较高,很好满足了工程实际需求。

图4所示是根据幂指混合函数等效应变模型和逆幂律疲劳寿命方法给出的应变均值 \$\epsilon\_m\$、应变幅值 \$\epsilon\_a\$ 和对数疲劳寿命 \$\ln(N\_f)\$ 之间的三维关系图。

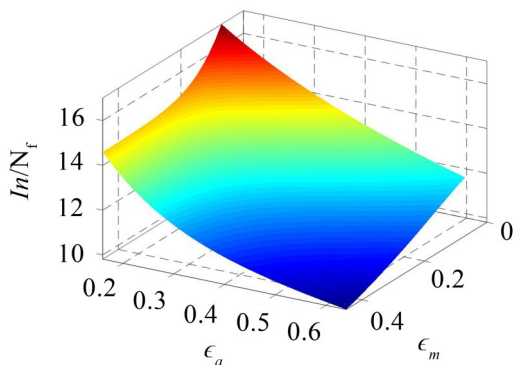


图4 应变幅值、应变均值与寿命预测的关系图

由图4可知,随着应变幅值和应变均值的增加,橡胶的疲劳寿命降低。在应变均值和应变幅值都相对较小时,橡胶的疲劳寿命最大。采用图4所示的三维关系图,可以方便地对任意载荷特征下的橡胶疲劳寿命进行快速而准确的预测。

## 4 结语

在不同应变比影响下的橡胶疲劳寿命实测数据的基础上,基于等效应变的思想,分别采用指数函数、幂函数、幂指混合函数和二次多项式函数对等效应变进行拟合,通过对比不同模型的相关系数,发现幂指混合模型的建模精度相对最高。根据基于幂指混合函数计算出的等效应变对橡胶疲劳寿命进行了准确预测,预测寿命相对实测寿命的分散性基本控制在2倍以内,很好满足了工程实际应用需求。

在进一步的研究中可综合考虑不同温度、不同应变比、变幅载荷和更为复杂的多轴载荷等多因素的耦合作用,对橡胶疲劳寿命预测问题开展更为深入和全面的研究,从而进一步提高橡胶疲劳寿命预测的准确性,有力支撑橡胶可靠耐久设计。

### 参考文献:

- [1] 王昊,危银涛,王静. 橡胶材料疲劳寿命影响因素及研究方法综述[J]. 橡胶工业, 2020, 67(10): 723-735.
- [2] 蔺朝莉,陈志军,杨平. 内外因素作用下隔振橡胶材料本构模型的修正方法[J]. 噪声与振动控制, 2020, 40(2): 66-70.
- [3] 金著,何琳,赵应龙. 寿命周期构型变化类橡胶减振器使用寿命评估[J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(2): 248-253.
- [4] 赵立杰,曲明. 橡胶隔振元件频率疲劳的寿命预测[J]. 噪声与振动控制, 2016, 36(5): 183-186.
- [5] TOBAJAS R, ELDUQUE D, IBARZ E, et al. A new multiparameter model for multiaxial fatigue life prediction of rubber materials[J]. Polymers, 2020, 12(5): 1194.
- [6] 上官文斌,段小成,刘泰凯,等. 不同损伤参量对橡胶隔振器疲劳寿命预测结果影响的研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(2): 116-126.
- [7] 上官文斌,李明敏,段小成. 动力总成橡胶悬置高温疲劳特性的预测与试验研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(15): 66-71.
- [8] 李海涛,潘国培,丁炜,等. 环境因素对船用橡胶隔振器寿命期内静态性能影响研究[J]. 噪声与振动控制, 2020, 40(4): 241-245.
- [9] 刘巧斌,史文库,刘鹤龙,等. 基于步进应力加速老化和改进 Arrhenius 模型的橡胶贮存寿命预测[J]. 国防科技大学学报, 2019, 41(5): 56-61.
- [10] 上官文斌,姚斌辉,李武成,等. 考虑应变均值影响的天然橡胶隔振元件疲劳寿命预测[J]. 振动与冲击, 2013, 32(1): 1-4.

(下转第228页)