

文章编号: 1001-4888(2021)01-0080-11

基于等效阻尼理论的金属橡胶 弹性迟滞力学模型及实验研究^{*}

薛新, 阮仕鑫, 白鸿柏

(福州大学 金属橡胶工程研究中心 机械工程及自动化学院, 福建 福州 350116)

摘要: 针对弹性多孔金属橡胶非线性迟滞特性力学行为, 将迟滞恢复力一位移曲线分解为非线性单值曲线和椭圆, 并将等效阻尼理论用于动态力学性能参数识别, 从而建立了一种新型的适用于黏弹性阻尼材料的宏观唯象力学模型。采用不同相对密度的环形金属橡胶进行动态实验测试, 以验证理论模型的准确性, 结果表明该模型可将具有非线性特性的金属橡胶系统进行降阶处理, 提高金属橡胶力学模型的预测效率, 并能很好地描述金属橡胶的迟滞力学行为。另外, 研究了在不同激励频率条件下金属橡胶的阻尼耗能特性。实验结果表明: 在高频加载的条件下, 黏性阻尼系数对动态加载频率不敏感, 阻尼耗能与加载幅值之间呈线性正相关。基于等效阻尼理论的弹性迟滞力学模型具有一定的普适性, 可进一步推广应用于类似弹性多孔材料的力学性能表征, 为其工程应用提供理论基础。

关键词: 金属橡胶; 弹性迟滞力学模型; 参数识别; 等效阻尼理论; 黏性阻尼系数

中图分类号: O345; V252.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-20-013

0 引言

金属橡胶是一种具有弹性多孔特性的干摩擦阻尼材料, 是将金属丝绕制成类似弹簧形状的螺旋卷, 然后通过缠绕或者编织、冲压成形等工艺制作而成的新型金属基多孔材料^[1-3]。金属橡胶受到外载荷时, 金属丝发生变形、挤压和干摩擦滑动, 从而表现出迟滞阻尼特性。由于制备金属橡胶的原材料是金属丝, 如不锈钢^[4]、NiTi^[5]、形状记忆合金(SMA)^[6,7]和 Mg^[8]等, 所以与传统的橡胶阻尼材料相比, 金属橡胶具有承载能力强、耐高低温、耐疲劳、环境适应性好等优点^[9-13], 因此, 金属橡胶通常作为各种减振装置的阻尼耗能元件^[14-20]。但是由于金属橡胶具有复杂的内部空间线匝勾连结构和明显的非线性特性(刚度非线性和阻尼非线性), 如何建立有效的力学模型成为国内外学者关注的热点问题。

金属橡胶的非线性特性的本质是金属丝排布不规律和金属丝之间存在干摩擦阻尼。因此, 部分学者通过分析金属橡胶细观结构的受力状态, 从而建立金属橡胶的力学模型, 通过这种方法建立的模型称之为细观力学模型。彭威等^[21]、胡嘉麟^[22]基于金属橡胶螺旋卷缠绕的工艺特点提出了弹簧单元模型, 弹簧单元通过层内并联和层间并联的方式形成金属橡胶的空间结构。Li 等^[23]基于金属橡胶的多孔特性建立了多孔材料模型, 将金属橡胶内部的基本单元简化为空心立方体, 在多孔材料理论的基础上, 利用多项式拟合的方式建立金属橡胶的非线性刚度模型。曹凤利等^[24,25]、吴荣平等^[26]基于金属丝的变形特点建立了变长度悬臂曲梁模型, 该模型将金属橡胶内部的基本单元简化为悬臂曲梁, 悬臂曲梁的长度

^{*} 收稿日期: 2020-01-18; 修回日期: 2020-03-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 51705080); 福建省自然科学基金(No. 2018J01764)资助

通信作者: 薛新, 男, 副教授, 主要研究方向: 高性能金属基复合材料力学行为。Email: xin@fzu.edu.cn

在变形过程中会不断变化,并且假设曲梁长度和应变成线性关系。Ma 等^[27]在弹簧单元模型的基础上,考虑了制备工艺参数对弹簧单元空间分布的影响,建立了形状记忆合金金属橡胶(SMA-MR)的本构模型。张谨谨^[28]将金属橡胶内部的基本单元简化为叠层悬臂直梁,通过悬臂直梁之间的摩擦来描述金属橡胶的摩擦耗能特性。文献[27,28]虽然能解释金属橡胶的变刚度和干摩擦阻尼耗能特性,但是也只适用于准静态加载。然而,大量实验结果表明金属橡胶不仅包含与加载幅值有关的干摩擦阻尼,还包含与频率有关的黏性阻尼^[29,30],因此,上述细观力学模型存在一定的局限性。

由于通过分析金属橡胶内部结构受力状态的细观力学方法建立力学模型存在一定的困难,一些学者采用唯象学的方法,通过宏观规律来建立金属橡胶的力学模型。Zhang 等^[31]将迟滞恢复力分解为非线性弹性力、干摩擦阻尼力和黏性阻尼力,建立了双折线迟滞阻尼模型,并且提出了一种基于正交最小二乘法、可调预测误差平方和线性模型有效性检验的参数识别方法。杨坤鹏等^[32]提出了基于遗传算法的参数识别方法。肖坤等^[33]利用非线性最小二乘参数识别算法建立了金属橡胶的非线性泛函本构关系。闫辉等^[34]建立了线弹性黏性阻尼模型,导出了随机激励下系统均方根加速度响应的计算公式。Hou 等^[35]将迟滞恢复力一位移曲线分解为单值非线性曲线、双值非线性闭合曲线和双折线,建立了金属橡胶的动力学模型。通过唯象学方法建立的力学模型虽然可以很好地描述金属橡胶的非线性刚度特性和复杂的阻尼成分,但是模型中的参数没有明确的物理意义,无法从本质上解释金属橡胶的非线性刚度特性和阻尼耗能特性。

本文将结合细观力学和唯象学的方法,建立金属橡胶的弹性迟滞力学模型。将迟滞恢复力一位移曲线分解为一条代表“非线性弹性力”的单值非线性曲线和一条代表“非线性阻尼力”的双值非线性闭合曲线,基于弹簧单元模型,建立金属橡胶的等效刚度模型,通过幂函数多项式拟合的方法建立非线性弹性力模型,最后建立基于等效阻尼理论的非线性阻尼力模型。研究结果对金属橡胶及类似弹性多孔材料的力学性能表征的理论发展和工程应用具有参考意义。

1 迟滞力学模型

金属橡胶在周期性载荷激励下迟滞恢复力一位移曲线如图 1 所示,迟滞恢复力一位移曲线可以分为上、下半支,利用幂函数多项式拟合上半支曲线,则上半支曲线可以表示为

$$F_U = \sum_{i=0}^n a_i K_E X^i \quad (1)$$

由于迟滞恢复力一位移曲线关于位移反对称,因此,下半支曲线可以表示为

$$F_D = \sum_{i=0}^n (-1)^{i+1} a_i K_E X^i \quad (2)$$

式中: F_U, F_D 分别为上半支曲线和下半支曲线的迟滞恢复力; a_i 为幂函数多项式系数; K_E 为金属橡胶的等效刚度; X 为位移。

将式(1)和式(2)的幂函数多项式分解为奇数项和偶数项之和,则

$$F_U = \sum_{i=1}^{\frac{n+1}{2}} a_{2i-1} K_E X^{2i-1} + \sum_{i=0}^{\frac{n-1}{2}} a_{2i} K_E X^{2i} \quad (3)$$

$$F_D = \sum_{i=1}^{\frac{n+1}{2}} a_{2i-1} K_E X^{2i-1} - \sum_{i=0}^{\frac{n-1}{2}} a_{2i} K_E X^{2i} \quad (4)$$

式(3)和式(4)中的 n 为奇数,则迟滞恢复力一位移曲线可以统一表达为

$$F = \sum_{i=1}^{\frac{n+1}{2}} a_{2i-1} K_E X^{2i-1} \pm \sum_{i=0}^{\frac{n-1}{2}} a_{2i} K_E X^{2i} \quad (5)$$

由式(5)可见,迟滞恢复力一位移曲线可以分解为一条单值非线性曲线和一条双值非线性闭合曲线。单值非线性曲线代表不含阻尼的非线性弹性力,双值非线性闭合曲线代表阻尼耗能的非线性阻尼力。因此,金属橡胶的迟滞恢复力 F 可以分解为作为“基架线”的非线性弹性力 F_K 和作为“阻尼环”的

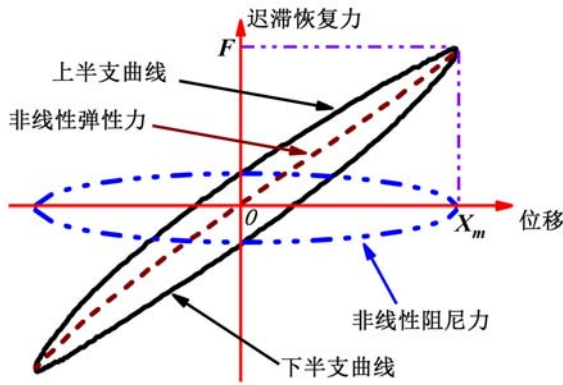


图 1 迟滞恢复力—位移曲线

Fig. 1 Hysteresis restoring force-displacement curves

一位移曲线的表达式为

$$F = \sum_{i=1}^{\frac{n+1}{2}} a_{2i-1} K_E X^{2i-1} \pm b \sqrt{1 - \frac{X^2}{X_m^2}} \quad (8)$$

从式(8)可以看出,椭圆长轴 a 可以表征位移幅值对金属橡胶阻尼耗能的影响,但是金属橡胶除了包含与幅值有关的干摩擦阻尼外,还包含与激励频率有关的黏性阻尼,式(8)中的非线性弹性力(第一项)没有阻尼效应,因此,椭圆短轴 b 为与激励频率有关的参数。本文将椭圆长轴 a 定义为干摩擦阻尼系数,将椭圆短轴 b 定义为黏性阻尼系数,只要识别出金属橡胶的非线性弹性力和黏性阻尼系数的表达式即可建立金属橡胶的弹性迟滞力学模型。

2 参数识别

2.1 非线性弹性力

由于金属橡胶内部复杂的空间网状结构,金属丝之间内部的作用力很难精确描述。本文基于金属橡胶螺旋卷缠绕的特点,将金属橡胶内部结构的基本单元简化为微弹簧单元,微弹簧单元通过层内并联,层间串联的方式组合而形成金属橡胶的空间结构。根据文献[27],微弹簧单元的轴向刚度和径向刚度分别为

$$K_Z = \frac{Ed \cos \tau}{16 n C^3 (1 + \nu \cos^2 \tau)} \quad (9)$$

$$K_R = \frac{Ed \cos \tau}{8 n C^3 \left[\frac{4(2 + \nu) n^2 \pi^2 + \frac{3\nu}{2} \tan^2 \tau + 1}{3} \right]} \quad (10)$$

式中: d 为金属丝的直径; E 和 ν 分别为金属丝的杨氏模量和泊松比; τ 为微弹簧单元的螺旋升角; n 为微弹簧单元的圈数; C 为螺旋卷中径与金属丝直径的比值。

金属橡胶的缠绕毛坯在冲压成型过程中,螺旋卷的螺距会减小并且接近零,因此,微弹簧单元的轴向刚度 K_Z 和径向刚度 K_R 可以简化为

$$K_Z = \frac{Ed}{16 n C^3 (1 + \nu)} \quad (11)$$

$$K_R = \frac{Ed}{8 n C^3} \quad (12)$$

根据力的正交分解原理,微弹簧单元受到的压力 F 可以分解为轴向力和径向力,如图 2 所示。根据力的平衡条件,可以求得

非线性阻尼力 F_C ,其中,双值非线性闭合曲线是一个椭圆,如图 1 所示。因此金属橡胶的迟滞力学模型可以描述为

$$F = F_K + F_C \quad (6)$$

结合式(5)和式(6),迟滞恢复力—位移曲线的表达式为

$$F = \sum_{i=1}^{\frac{n+1}{2}} a_{2i-1} K_E X^{2i-1} \pm b \sqrt{1 - \frac{X^2}{a^2}} \quad (7)$$

式中: a 表示椭圆的长轴; b 表示椭圆的短轴。

由图 1 可以看出,当位移达到最大时,非线性弹性力与迟滞恢复力相等。因此,非线性阻尼力此时必须为零,则椭圆长轴与位移幅值相等。设位移幅值为 X_m ,则迟滞恢复力

$$F_z = \frac{F}{\cos\beta + \mu\sin\beta} \quad (13)$$

式中： μ 为摩擦系数； β 为微弹簧单元中心轴与非成型方向的夹角。

微弹簧单元沿压力方向的变形为

$$\Delta L = \frac{F_z}{K_z} \cos\beta + \frac{F_f}{K_f} \sin\beta \quad (14)$$

微弹簧单元沿压力方向的刚度为

$$K_s = \frac{F}{\Delta L} = \left[\frac{1}{\cos\beta + \mu\sin\beta} \frac{\cos\beta}{K_z} + \frac{\mu}{\cos\beta + \mu\sin\beta} \frac{\sin\beta}{K_R} \right]^{-1} \quad (15)$$

将金属橡胶看成层状结构,假设单位面积有 N 个弹簧单元,单位长度有 M 层,则金属橡胶的等效刚度为

$$K_E = V \frac{N}{M} K_s \quad (16)$$

式中： V 为金属橡胶的体积。根据文献[24, 25],可求得

$$\frac{N}{M} = \left(\frac{4\rho_r}{\pi^2 D d^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (17)$$

式中： ρ_r 表示相对密度,定义为金属橡胶密度和金属丝密度的比值。金属橡胶密度定义为金属橡胶试样的整体质量和外形尺寸确定的体积之间的比值。金属丝密度指的是制备金属橡胶所使用的原材料丝材的密度。

将式(17)代入式(16),可求得金属橡胶的等效刚度

$$K_E = V \left(\frac{4\rho_r}{\pi^2 D d^2} \right)^{\frac{1}{3}} K_s \quad (18)$$

将式(18)代入式(8)的第一项,通过幂函数多项式拟合即可得到非线性弹性力的表达式

$$F_K = \sum_{i=1}^{\frac{n+1}{2}} a_{2i-1} \left(\frac{4\rho_r}{\pi^2 D d^2} \right)^{\frac{1}{3}} V K_s X^{2i-1} \quad (19)$$

2.2 黏性阻尼系数

椭圆面积和迟滞力恢复力—位移曲线的面积均代表了金属橡胶的阻尼耗能,因此,两个面积应该相等。设迟滞力恢复力—位移曲线围成的面积为 ΔW ,则 ΔW 可以表达为

$$\Delta W = \pi a b \quad (20)$$

设对金属橡胶施加一个频率为 f 的位移激励,则任意时刻的位移可以表达为

$$X_1 = X_m \cos(\omega t + \alpha) \quad (21)$$

式中： X_m 为位移幅值； ω 为加载周期； α 为位移的初始相位。

设位移传感器的采样频率为 f_0 ,则一个周期内的采样点数 N 可以表达为

$$N = \frac{f_0}{f} \quad (22)$$

迟滞恢复力—位移曲线上任意一点的位移值可以表达为

$$X_1 = X_m \cos \left(\frac{2\pi i}{N} + \alpha \right), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (23)$$

迟滞恢复力—位移曲线的面积为

$$\Delta W = \oint F dx = -\frac{2\pi X_m}{N} \sum_{i=1}^N F_i \sin \left(\frac{2\pi i}{N} + \alpha \right) \quad (24)$$

由于椭圆长轴 a 与位移幅值相等,即 $a = X_m$,将式(24)代入式(20),可求得黏性阻尼系数 b

$$b = \frac{\Delta W}{\pi X_m} = -\frac{2}{N} \sum_{i=1}^N F_i \sin \left(\frac{2\pi i}{N} + \alpha \right) \quad (25)$$

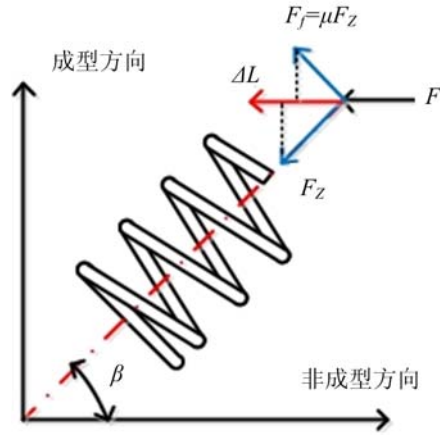


图 2 微弹簧单元受力分析图

Fig. 2 Mechanical analysis of micro-spring element

黏性阻尼系数的取值为式(25)计算值的绝对值。从该式可以看出,黏性阻尼系数不仅与激励频率有关,还与相对密度等基本参数有关。这种利用阻尼相等的参数识别方法称之为等效阻尼法。

3 实验及结果分析

3.1 金属橡胶制备

本文选用 304(06Cr16Ni10)奥氏体不锈钢丝作为原材料制备环形金属橡胶。主要制备工艺可以大致分为以下四步:(1)通过专用的螺旋卷成型设备将直的不锈钢丝绕制成类似弹簧形状的螺旋卷,螺旋卷直径一般控制在金属丝直径的 5~15 倍。(2)通过定螺距拉伸装置将螺旋卷拉伸至合适的螺距,螺距一般与螺旋卷直径大致相等。(3)用专用的毛坯缠绕设备制备金属橡胶缠绕毛坯。(4)将缠绕毛坯装入设计好的冲压模具内进行冲压成型。冲压过程采用多步冲压工艺,冲压至成型压力并且保压 60s 后卸载,重复操作两次,保证金属橡胶的均匀性和尺寸精度。制备的金属橡胶如图 3 所示,金属橡胶的基本参数如表 1 所示。



图 3 金属橡胶试样

Fig. 3 Metal rubber samples

表 1 金属橡胶的基本参数

Tab. 1 Basic parameters of the studied metal rubber			
分组	尺寸/mm	金属丝直径/mm	相对密度
A	23×33×12	0.3	0.316
		0.3	0.348
		0.3	0.379
B	13×23×8	0.15	0.316
		0.15	0.348
		0.15	0.379

3.2 动态实验测试

动态测试系统主要包括激励系统、测量系统、数据采集系统。激励系统由 KEYSIGHT 型信号发生器、E-JZK-100 型电磁激振器、E5874A 型功率放大器组成;测量系统由 ECL-YD-312A 型力传感器和 KD9010 型电涡流位移传感器组成;数据采集系统由 DH5922N 数据采集器和带有数据分析功能的软件组成。动态测试系统的测试原理如图 4 所示,动态测试装置如图 5 所示。此外,金属橡胶缠绕毛坯在冲压成型过程中,由于金属丝在压力的作用下发生变形,导致金属橡胶样件内部的金属丝存在残余应力,内部结构不稳定。因此,金属橡胶在正式加载测试之前,需要进行预加载,使其内部结构稳定,减小实验误差。

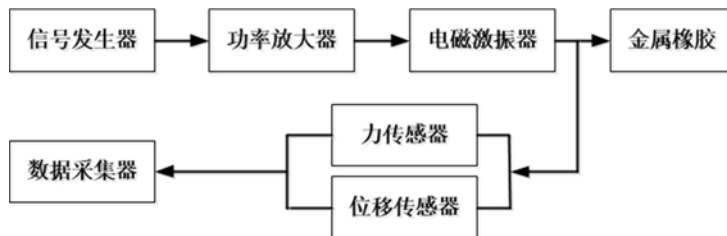


图 4 动态测试系统的测试原理

Fig. 4 Illustration of dynamic test system

3.3 模型验证

对 A 组和 B 组金属橡胶试件进行动态实验测试,加载位移幅值为 0.5mm,激励频率为 6Hz。分别取迟滞恢复力-位移曲线上半支和下半支两条曲线迟滞恢复力的平均值,即可得到非线性弹性力曲线,

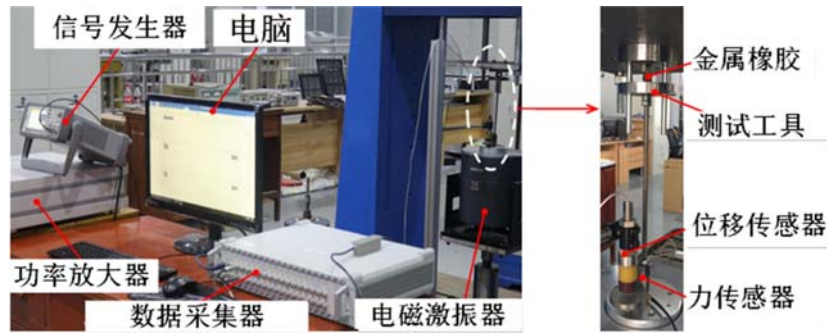


图 5 动态测试装置

Fig. 5 Dynamic test device

利用幂函数多项式拟合可得到非线性弹性力方程,多项式的阶数按照拟合精度取舍。根据式(25)并取其值的绝对值求得椭圆短轴,从而得到代表“非线性阻尼力”的椭圆方程,将多项式方程与椭圆方程相加即可得到金属橡胶迟滞回线的理论曲线。实际曲线和理论曲线如图 6 所示,相对密度对动态平均刚度和阻尼耗能的影响如图 7 所示,金属橡胶的阻尼耗能可以通过式(24)计算,动态平均刚度 $\bar{K}$ 通过下式计算

$$\bar{K} = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{2X_m} \quad (26)$$

式中: $F_{\max}$ 和 $F_{\min}$ 分别表示迟滞恢复力的最大值和最小值; X_m 表示位移幅值。根据式(26)的定义,动态平均刚度本质上表示的是迟滞恢复力的最大值和最小值连线的斜率,则动态平均刚度的变化表现为迟滞恢复力—位移曲线的旋转。

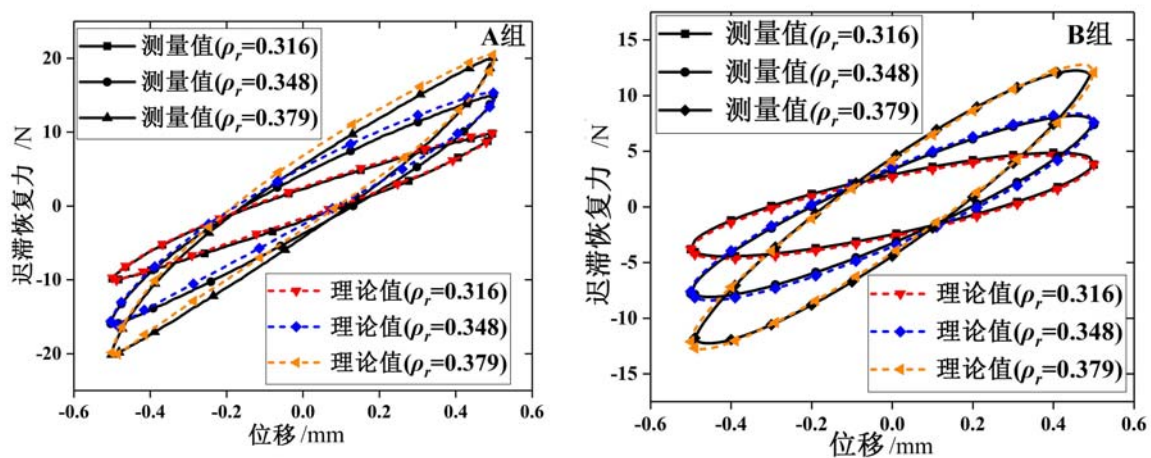


图 6 迟滞恢复力—位移曲线实验和理论结果对比

Fig. 6 Comparison of hysteresis restoring force-displacement curves by experimental and theoretical methods

从图 6 可以看出,理论曲线与实验测得的迟滞恢复力—位移曲线重合度较好,具有较高的精度。从图 6 和图 7 可以看出,对于体积相同的金属橡胶试件,金属橡胶的相对密度增加,则金属橡胶的质量增加,意味着金属橡胶内部的金属丝增加,金属丝之间的干摩擦接触(点接触和线接触)相应地增加,在相同振幅和激励频率的条件下,相对密度大的金属橡胶试件内部有着更多的干摩擦滑动,因此干摩擦阻尼耗能增加。金属橡胶的刚度可以分为弹性刚度和干摩擦刚度,弹性刚度来自于金属螺旋卷的变形,干摩擦刚度来自于金属螺旋卷之间的接触力。由于相对密度的增加导致金属螺旋卷数量和干摩擦接触同时增加,金属橡胶的弹性刚度和干摩擦刚度也相应增加,所以动态平均刚度随着相对密度的增大而增大,迟滞恢复力—位移曲线逆时针旋转(图 6 所示)。

此外,值得注意的是,根据迟滞恢复力—位移曲线的分解原理,迟滞恢复力等于非线性弹性力和非线性阻尼力之和,当加载位移等于零时,非线性阻尼力达到最大值(如图 1 所示),由于金属橡胶此时没

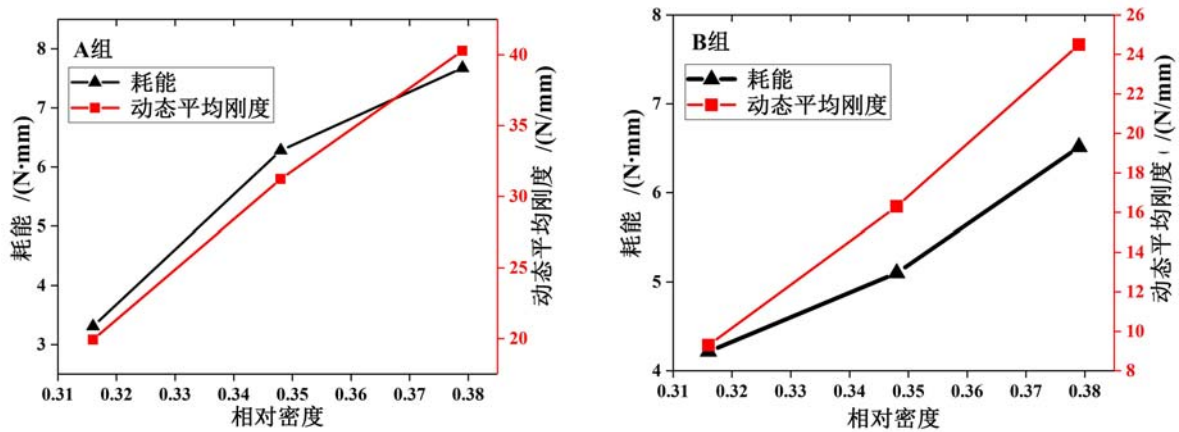


图 7 相对密度对金属橡胶阻尼耗能和动态平均刚度的影响

Fig. 7 Effects of relative density on energy dissipation and dynamic average stiffness of metal rubber

有受载,非线性弹性力接近零,所以非线性阻尼力与迟滞恢复力应该接近相等,此时非线性阻尼力的值即为黏性阻尼系数(椭圆短轴),迟滞恢复力的值即为迟滞恢复力—位移曲线与 Y 轴交点的纵坐标(本文定义为截距,用 Y_i 表示),因此黏性阻尼系数与截距接近相等,如表 2 所示。

表 2 截距与非线性黏性系数的比较

Tab. 2 Comparison of intercept and viscous damping coefficients

相对密度	截距	黏性阻尼系数
0.316	2.24	2.10732
0.348	4.4	3.99904
0.379	5.5	4.8879

椭圆长轴 a 与位移幅值 X_m 相等,椭圆短轴 b 与截距 Y_i 近似相等,将 $a = X_m$, $b = Y_i$ 代入式(20),可以得到金属橡胶阻尼耗能 ΔW 的近似计算公式

$$\Delta W = \pi X_m Y_i \quad (27)$$

式中: X_m 和 Y_i 分别表示位移幅值和截距。

3.4 金属橡胶阻尼耗能特性

金属橡胶的阻尼耗能主要与干摩擦阻尼系数和黏性阻尼系数有关,但是干摩擦阻尼系数只与位移幅值有关,在其他条件相同的情况下,位移幅值越大,金属丝之间的干摩擦滑移距离越大,干摩擦阻尼耗能越大,金属橡胶的耗能也就越大。因此,本文重点研究黏性阻尼系数与金属橡胶阻尼耗能之间的关系。选用 B 组金属橡胶试件进行动态实验测试,位移幅值均为 0.75mm,激励频率对金属橡胶阻尼耗能的影响如图 8 所示。

从图 8 可以看出,对相同密度的金属橡胶试件,激励频率在 2~6Hz 的范围内,阻尼耗能随着激励频率的增加而减小,这是由于在激励频率较低条件下,金属丝的变形恢复速度同步于输入的激励信号,金属丝之间的干摩擦滑移比较充分;随着激励频率的增加,金属丝之间的干摩擦滑移逐渐滞后于输入的激励信号,导致金属丝的上一次变形还没有恢复,就又进入下一次加载,金属丝之间的干摩擦滑移滞后于输入信号,滑移不充分,因此阻尼耗能逐渐减小;当激励频率继续变大到 8Hz 时,金属丝之间的干摩擦滑移已经完全滞后于输入的激励信号,此时金属橡胶的阻尼耗能基本不变。

激励频率对金属橡胶耗能的影响如图 9 所示,结果表明金属橡胶的耗能随着激励频率(2~8Hz)的增加而减小,8~12Hz 出现波动,12~20Hz 基本趋于平缓。因此,可以认为所研究的金属橡胶试样在高频加载下的阻尼耗能对频率不敏感。

黏性阻尼系数作为与频率有关的表征量,其与金属橡胶阻尼耗能的关系应该有相同的变化规律,根据式(25)计算黏性阻尼系数,结果如表 3 所示。

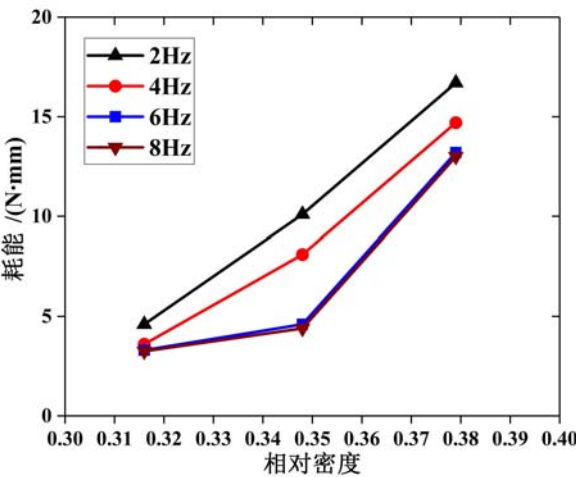


图 8 激励频率对不同相对密度金属橡胶阻尼耗能的影响

Fig. 8 Effects of excitation frequency on energy dissipation of metal rubber under different relative densities

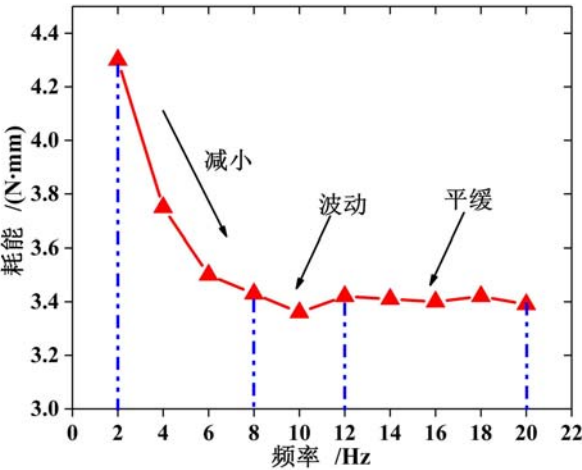


图 9 激励频率对金属橡胶耗能的影响

Fig. 9 Effects of excitation frequency on energy dissipation of metal rubber

表 3 不同频率下不同相对密度的金属橡胶试件的黏性阻尼系数

Tab. 3 Viscous damping coefficients of metal rubber with different relative densities and excitation frequencies

相对密度	2Hz	4 Hz	6 Hz	8 Hz
0.316	1.953	1.529	1.401	1.380
0.348	4.289	3.439	1.953	1.868
0.379	7.091	6.242	5.605	5.520

从表 3 可以看出,在激励频率相同的条件下,黏性阻尼系数随着相对密度的增大而增大,这是由于相对密度影响了金属橡胶的刚度,相对密度越大,刚度越大,式(25)中的 F_i 也就越大,导致黏性阻尼系数变大,金属橡胶的阻尼耗能也随之增大。在相对密度相同的条件下,黏性阻尼系数随着激励频率的增大而减小,8Hz 的黏性阻尼系数比 6Hz 略小,接近相等,其变化规律与图 7 相同。因此,在高频加载的条件下,可以认为黏性阻尼系数对频率不敏感。

结合式(20)可以看出,在高频加载的条件下,黏性阻尼系数对激励频率不敏感(即可近似认为不随着频率的改变而改变),金属橡胶的阻尼耗能与位移幅值是线性正相关关系,所以可以通过等效阻尼理论将金属橡胶材料非线性系统降阶处理,基于等效阻尼理论的参数识别方法简化金属橡胶系统的理论

建模,更适用于工程应用,但是由于影响金属橡胶阻尼耗能的参数较多,还有待进一步研究。

4 结 论

本文将金属橡胶的迟滞恢复力一位移曲线分解为代表“非线性弹性力”的单值非线性曲线和代表“非线性阻尼力”的椭圆,提出了基于等效阻尼理论的参数识别方法,建立了相应的弹性迟滞力学模型,主要结论如下:

(1) 等效阻尼理论是一种有效的参数识别方法,不同相对密度的金属橡胶试件的动态实验测试结果表明,基于该方法建立的迟滞力学模型具有较高的预测精度。

(2) 基于等效阻尼理论的参数识别方法将金属橡胶材料非线性系统降阶处理,为金属橡胶系统的理论建模提供了新的思路。在低频加载的条件下,金属橡胶的阻尼耗能随着黏性阻尼系数增加而增大;在高频加载的条件下,金属橡胶的黏性阻尼系数对动态加载频率不敏感,阻尼耗能与加载幅值之间呈线性正相关的影响规律。

(3) 迟滞恢复力一位移曲线的截距与黏性阻尼系数接近相等,所以金属橡胶的阻尼耗能可以通过近似公式计算,相比之前的计算方法实用性和有效性更强。基于等效阻尼理论的弹性迟滞力学模型可进一步推广应用于类似弹性多孔材料的力学性能表征分析。

参考文献:

- [1] Yang Pei, Bai Hongbai, Xue Xin, et al. Vibration reliability characterization and damping capability of annular periodic metal rubber in the non-molding direction[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 132:622—639
- [2] Ma Yanhong, Zhang Qicheng, Wang Yongfei, et al. Topology and mechanics of metal rubber via X-ray tomography[J]. Materials & Design, 2019, 181:108067.
- [3] Li Sucuo, Mao Chenxi, LI Hui, et al. Mechanical properties and theoretical modeling of self-centering shape memory alloy pseudo-rubber[J]. Smart Materials and Structures, 2011, 20:115008.
- [4] Zhao Zilong, Feng Kai, Zhao Xueyuan, et al. Identification of dynamic characteristics of hybrid bump-metal mesh foil bearings[J]. Journal of Tribology, 2018, 140(5):051702.
- [5] Gadot B, Martinez O R, Roscoat S R D, et al. Entangled single-wire NiTi material: a porous metal with tunable superelastic and shape memory properties[J]. Acta Materialia, 2015, 96:311—323.
- [6] Ma Yanhong, Zhang Qicheng, Zhang Dayi, et al. Size-dependent mechanical behavior and boundary layer effects in entangled metallic material systems[J]. Journal of Materials Science, 2017, 52(7):3741—3756.
- [7] Kwon S C, Jeon S H, Oh H U. Performance investigation of a novel pseudoelastic SMA mesh washer gear wheel with micro-jitter attenuation capability[J]. Smart Materials and Structures, 2016, 25:055004.
- [8] Li Qiuyan, Li Jiao, He Guo. Compressive properties and damping capacities of magnesium reinforced with continuous steel wire[J]. Materials Science & Engineering A, 2017, 680:92—96.
- [9] 卢成壮, 李静媛, 周邦阳, 等. 金属橡胶的刚度特性和阻尼试验研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(8):203—208 (LU Chengzhuang, LI Jingyuan, ZHOU Bangyang, et al. Effect of metallic wire materials characteristics on the fatigue properties of metal rubber[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(8):203—208 (in Chinese))
- [10] 董万元, 杨利, 师永宁. 金属丝网非线性隔振器的动静态特性研究[J]. 实验力学, 2019, 34(5):897—903 (DONG Wanyuan, YANG Li, SHI Yongning. Investigation on dynamic and static vibration characteristics of metal wire mesh nonlinear vibration isolator[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2019, 34(5):897—903 (in Chinese))
- [11] Ma Yanhong, Zhang Qicheng, Zhang Dayi, et al. A novel smart rotor support with shape memory alloy metal rubber for high temperatures and variable amplitude vibrations[J]. Smart Materials and Structures, 2014, 23(12):125016.
- [12] Rodney D, Gadot B, Martinez O R, et al. Rodney reversible dilatancy in entangled single-wire materials[J]. Nature Materials, 2016, 15(1):72—77.
- [13] 邹广平, 刘泽, 唱忠良, 等. 金属丝网橡胶压缩力学性能研究[J]. 实验力学, 2014, 29(6):676—682 (ZOU

- Guangping, LIU Ze, CHANG Zhongliang, et al. On the compression properties of metal wire mesh rubber[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2014, 29(6):676—682 (in Chinese))
- [14] Ma Yanhong, Scrrpa Fabrizio, Zhang Dayi, et al. A nonlinear auxetic structural vibration damper with metal rubber particles[J]. Smart Materials and Structures, 2013, 22:084012.
- [15] Oh H U, Kwon S C, Youn S H. Characteristics of spaceborne cooler passive vibration isolator by using a compressed shape memory alloy mesh washer[J]. Smart Materials and Structures, 2015, 24:015009.
- [16] Feng Kai, Liu Wanhui, Zhang Zhiming, et al. Theoretical model of flexure pivot tilting pad gas bearings with metal mesh dampers in parallel[J]. Tribology International, 2016, 94:26—38.
- [17] 邹广平, 张冰, 唱忠良, 等. 弹簧—金属丝网橡胶组合减振器迟滞力学模型及实验研究[J]. 力学学报, 2018, 50(5):1125—1134 (ZOU Guangping, ZHANG Bin, CHANG Zhongliang, et al. Hysteresis mechanical model and experimental study of spring metal-net rubber combination damper[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2018, 50(5):1125—1134 (in Chinese))
- [18] Ma Yanhong, Zhang Qicheng, Dobah Yousef, et al. Meta-tensegrity: design of a tensegrity prism with metal rubber[J]. Composite Structures, 2018, 206:644—657.
- [19] Ma Yanhong, Zhang Dayi, Dobah Yousef, et al. Tensegrity cell mechanical metamaterial with metal rubber[J]. Applied Physics Letters, 2018, 113:031906.
- [20] Tang N, Rongong J A. Feasibility study on the use of tangled metal wire particles as the adjustable elements in tuned mass dampers[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 457:1—14.
- [21] 彭威, 白鸿柏, 郑坚, 等. 金属橡胶材料基于微弹簧组合变形的细观本构模型[J]. 实验力学, 2005, 20(3):455—462 (PENG Wei, BAI Hongbai, ZHENG Jian, et al. A micromechanics constitutive model of the metal rubber materials based on the radial and axial combined deformation of the microspring[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2005, 20(3):455—462 (in Chinese))
- [22] 胡嘉麟. 复合金属橡胶力学性能的理论及试验研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2019 (HU Jialin. Theoretical and experimental study on mechanical properties of composite metal rubber[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019 (in Chinese))
- [23] Li Yuyan, Huang Xieqing, Mao Weixiong. A theoretical model and experimental investigation of a nonlinear constitutive equation for elastic porous metal rubbers[J]. Mechanics of Composite Materials, 2005, 41:303—312.
- [24] 曹凤利, 白鸿柏, 李冬伟, 等. 金属橡胶非成形方向迟滞特性力学模型研究[J]. 机械工程学报, 2015, 51(2):84—89 (CAO Fengli, BAI Hongbai, LI Dongwei, et al. Research on mechanical model of metal rubber for hysteresis characteristic in the non-forming direction[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 48(24):61—66 (in Chinese))
- [25] Cao Fengli, Bai Bongbai, Li Dongwei, et al. A constitutive model of metal rubber for hysteresis characteristics based on a meso-mechanical method[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2016, 45(1):1—6.
- [26] 吴荣平, 白鸿柏, 路纯红. 金属橡胶压缩性能影响因素及细观模型研究[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(2):66—71 (WU Rongping, BAI Hongbai, LU Chunhong. Influencing factors of compression properties and mesoscopic model of metal rubber[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(2):66—71 (in Chinese))
- [27] Ma Yanhong, Zhang Qicheng, Zhang Dayi, et al. The mechanics of shape memory alloy metal rubber[J]. Acta Materialia, 2015, 96:89—100.
- [28] 张瑾瑾. 金属橡胶减振器动力学特性研究[D]. 太原科技大学, 2010 (ZHANG Jinjin. Study on dynamic characteristics of metal rubber damper[D]. Taiyuan University of Science and Technology, 2010 (in Chinese))
- [29] Zhang Dayi, Scarpa Fabrizio, Ma Yanhong, et al. Dynamic mechanical behavior of nickel-based superalloy metal rubber[J]. Materials & Design, 2014, 56:69—77.
- [30] Chandrasekhar K, Rongong J, Cross E. Mechanical behavior of tangled metal wire devices[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 118:13—29.
- [31] Zhang B, Lang Z Q, Billings S A, et al. System identification methods for metal rubber devices[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 39:207—226.
- [32] 杨坤鹏, 樊文欣, 曹存存, 等. 金属橡胶材料的动态力学建模及参数辨识[J]. 机械科学与技术, 2017, 36(12):1830—1833 (YANG Kunpeng, FAN Wenxin, CAO Cuncun, et al. Dynamic mechanical modeling and parameter

- identification of metal-rubber materials[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2017, 36(12):1830—1833 (in Chinese))
- [33] 肖坤, 白鸿柏, 薛新, 等. 高温管路包覆金属橡胶耗能特性及参数识别[J]. 兵器材料科学与工程, 2019, 42(1): 11—17 (XIAO Kun, BAI Hongbai, XUE Xin, et al. Energy dissipation characteristics and parameter identification of metal rubber coated pipe in high temperature environment[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2019, 42(1):11—17 (in Chinese))
- [34] 闫辉, 姜洪源, 刘文剑, 等. 金属橡胶隔振器随机振动加速度响应分析[J]. 物理学报, 2010, 59(6):4065—4070 (YAN Hui, JIANG Hongyuan, LIU Wenjian, et al. Analysis of acceleration response of metal rubber isolator under random vibration[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(6):4065—4070 (in Chinese))
- [35] Hou Junfang, Bai Hongbai, Li Dongwei. Damping capacity measurements of elastic porous wire-mesh material in wide temperature range[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 206(1-3):412—418.

Elasto-hysteresis model and experimental study of metal rubber based on equivalent damping theory

XUE Xin, RUAN Shixin, BAI Hongbai

(Engineering Research Center for Metal Rubber, School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, Fujian, China)

Abstract: In order to describe the nonlinear hysteretic characteristics of elastic-porous metal rubber, the hysteretic restoring force-displacement curve is divided into a nonlinear single value curve and an ellipse. The corresponding parameter identification approach based on equivalent damping theory is proposed for the macroscopic phenomenal model, which can be used for the mechanical characterization of viscoelastic damping materials. Dynamic experimental tests of annular metal rubber with different relative densities are performed to verify the accuracy of the proposed theoretical model. The results reveal that this model can be used to reduce the nonlinear order of dynamic system and well describe the elasto-hysteresis behavior of metal rubber. In addition, the energy dissipation characteristics of metal rubber under different excitation frequencies are studied experimentally. The results indicate that the viscous damping ability is not susceptible to excitation frequency under the condition of high frequency. The energy dissipation of metal rubber exhibits a linear positive correlation to the loading amplitude. The proposed elasto-hysteresis model based on equivalent damping theory has good suitability and can be expanded for the mechanical characterization of similar elasto-porous materials, providing a theoretical basis for engineering applications.

Keywords: metal rubber; elasto-hysteresis model; parameter identification; equivalent damping theory; viscous damping coefficient