

金属橡胶迟滞特性本构模型研究*

朱彬 马艳红[†] 张大义 洪杰

(北京航空航天大学能源与动力工程学院航推系, 北京 100191)

(2011年9月13日收到; 2011年12月2日收到修改稿)

金属橡胶作为一种新型阻尼材料, 其原材料及加工工艺具有一定特殊性. 基于材料的微观结构特征, 选取了金属丝螺旋卷作为金属橡胶的基本微元体结构, 并以圆柱压缩螺旋弹簧理论为基础, 分别建立了横向和纵向排列微元体结构的刚度. 鉴于库仑摩擦模型, 分别建立三种接触状态螺旋卷接触对的力学模型. 考虑整个加工工艺流程的特点, 分析了不同接触状态数目变化规律, 建立了金属橡胶迟滞特性本构模型. 从理论上解释了金属橡胶迟滞特性的特点, 以及刚度和阻尼非线性的产生机理. 最后, 通过对比不同相对密度金属橡胶试件的理论和试验结果, 验证了理论模型的适用性. 本模型从螺旋卷微元体结构上描述了金属橡胶迟滞特性, 为工程上预测和分析金属橡胶的刚度、阻尼特性和设计金属橡胶产品提供了有效的理论基础.

关键词: 金属橡胶, 金属丝螺旋卷, 迟滞回线, 非线性刚度阻尼

PACS: 81.05.Ni, 07.10.Fq, 46.25.-y, 46.40.Ff

1 引言

振动是伴随着航空、航天及航海等高新技术领域的发展而带来的公害之一, 它严重破坏机器设备运行的稳定性和可靠性, 限制机器性能的提高. 因此, 在设计过程用就应该考虑到振动控制和抑制问题^[1]. 金属橡胶是由金属丝制造的多孔结构材料, 因其具有类似橡胶的弹性而得名. 由于它本质上是一种金属基的多孔阻尼结构材料, 具有金属、橡胶及多孔材料的共同优点: 阻尼性能好、环境适应能力强、易于成型各种形状、重量轻、可调节刚度等, 金属橡胶显著的阻尼性能和在恶劣环境下保持良好性能的优点, 使其在各种工程机械的减振领域中具有非常广泛的应用前景.

金属橡胶是一种非线性阻尼结构材料, 近年来很多学者从宏观上研究其刚度和阻尼特性较多, 并且得到一定的成果^[2-9]. 而从微元体结构上研究和揭示金属橡胶材料非线性刚度和阻尼减振的物理本质, 并给予较准确的描述, 是研究和设计金属橡胶阻尼减振器的重要基础性工作. 目前只有悬臂梁

模型、角锥模型、微元弹簧模型和多孔材料模型等^[10-12]. 但是这些模型和预估方法或物理含义不明确, 或预估参数过多, 需要大量的试验结果, 因此对刚度非线性的变化机理和摩擦耗能的物理过程认识至今还不全面, 还处于逐渐摸索和完善的阶段. 尚缺少一种能清晰描述金属橡胶刚度和阻尼物理本质的模型以及快捷有效的刚度和阻尼预测方法, 因此如何建立一个比较全面的理论模型, 是一个亟待解决的问题.

本文把金属丝螺旋卷作为金属橡胶的基本微元体结构, 通过分析横向和纵向排列微元体的刚度和三种接触状态相邻螺旋卷的力学模型, 并结合不同接触状态数目变化规律, 建立了金属橡胶迟滞特性本构模型, 从理论上解释了刚度和阻尼非线性的产生机理. 通过试件的理论和试验结果对比, 验证了理论模型的适用性.

2 金属橡胶力学特性

金属橡胶试验静态迟滞回线如图 1 所示, 包含

* 国家自然科学基金 (批准号: 51101008, 51105022) 和“凡舟”青年科研基金 (批准号: 20110402) 资助的课题.

[†] E-mail: mayanh2002@gmail.com

加载曲线和卸载曲线. 金属橡胶受载时, 由于内部金属丝螺旋卷表面之间相对滑动而产生的摩擦力, 导致加载曲线和卸载曲线不同. 加载时摩擦力阻碍变形的增加, 因此使金属橡胶实际刚度增大. 卸载时摩擦力将阻碍弹性变形的恢复, 因此使金属橡胶实际刚度减小. 加载和卸载曲线围成的面积即为摩擦力在一个循环内消耗的功. 假如不考虑摩擦力的影响, 金属橡胶加载曲线和卸载曲线将重合为弹性力曲线.

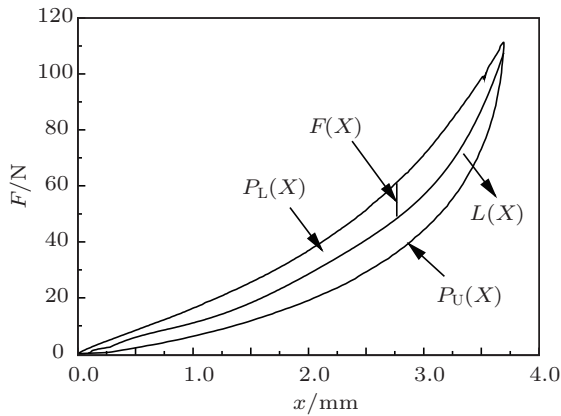


图1 金属橡胶的迟滞回线

因此通过金属橡胶的迟滞回线可以得知以下关系式:

$$P_L(x) = L(x) + F(x), \quad (1)$$

$$P_U(x) = L(x) - F(x), \quad (2)$$

$$K(x) = dL(x)/dx, \quad (3)$$

$$\eta = \frac{\Delta W}{\pi U}, \quad (4)$$

式中, $P_L(x)$ 为加载力 (N); $P_U(x)$ 为卸载力 (N); $L(x)$ 为弹性力 (N); $F(x)$ 为摩擦力 (N); $K(x)$ 为金属橡胶平均刚度 (N/mm); η 为金属橡胶损耗因子; ΔW 为迟滞回线围成的面积, 表示一个循环周期内耗散的能量^[13] (N·m); U 为迟滞回线中线与横轴围成的面积, 表示变形过程中最大弹性势能 (N·m).

根据 (1) 式,(2) 式和 (4) 式, 损耗因子可表达为下式:

$$\eta = \frac{\int_0^A P_L(x) dx - \int_0^A P_U(x) dx}{\pi \left(\int_0^A P_L(x) dx + \int_0^A P_U(x) dx \right) / 2}$$

$$= \frac{\int_0^A F(x) dx}{\pi \int_0^A L(x) dx}. \quad (5)$$

然而, 金属橡胶受载过程中内部螺旋卷杂乱分布, 很难准确确定摩擦力的总影响, 因此有必要从金属橡胶基本结构出发, 使其能在一定尺度和比例上较为准确模拟金属丝元件间的啮合、滑移的相互作用.

3 金属橡胶微元体结构分析

3.1 微元体结构

由金属橡胶的加工工艺可知, 金属橡胶的基础原材料为金属丝螺旋卷. 螺旋卷受力变形时的弹性特征能体现金属橡胶的刚度特性, 与其他螺旋卷接触时的摩擦特性又能体现阻尼特性. 因此金属丝螺旋卷是一种即能够体现金属橡胶基本结构, 又能表征金属橡胶力学特征微元体结构.

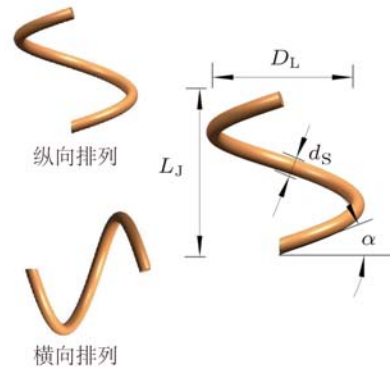
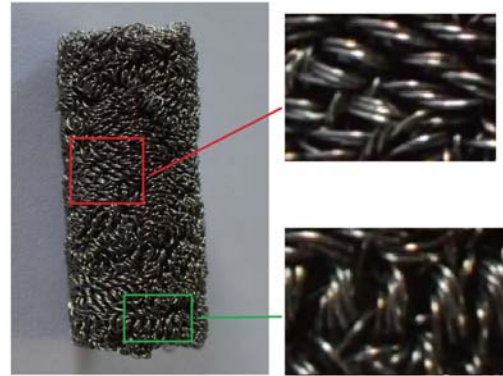


图2 金属丝螺旋卷微元体结构

金属橡胶加工成型后, 金属丝螺旋卷的取向是不规则的. 但由于缠绕和编织等工艺, 使得其内部将有两种最基本的螺旋卷排列形式: 纵向和横向排

列. 纵向螺旋卷排列形式为螺旋卷的轴向方向与载荷方向平行, 横向则为轴向方向与载荷方向垂直, 如图 2.

图 2 中, d_s 为金属丝的丝径 (mm); D_L 为螺旋卷的直径 (mm); L_J 为螺旋卷的螺距 (mm); α 为螺旋卷轴线方向与载荷方向的夹角 (rad).

根据材料力学和圆柱螺旋压缩弹簧的基本理论^[14], 可推导出两种不同排列方式微元体结构的刚度.

纵向排列微元体结构刚度

$$K_V = \frac{Ed_s^4 \pi \cos \alpha}{32D_L^3 (\pi \cos^2 \alpha (1+u) + 2 \sin^2 \alpha)}; \quad (6)$$

横向排列微元体结构刚度

$$K_T = Ed_s^4 / \left(32D_L^3 \cos \alpha \left[1 + (1+u) \operatorname{tg}^2 \alpha + \frac{1}{3} \times \left(\frac{L_J}{D_L} \right)^2 \left(1 + u + \frac{1}{\cos^2 \alpha} + \operatorname{tg}^2 \alpha \right) \right] \right). \quad (7)$$

式中, E 为金属丝材料的弹性模量 (MPa); u 为金属丝材料的泊松比.

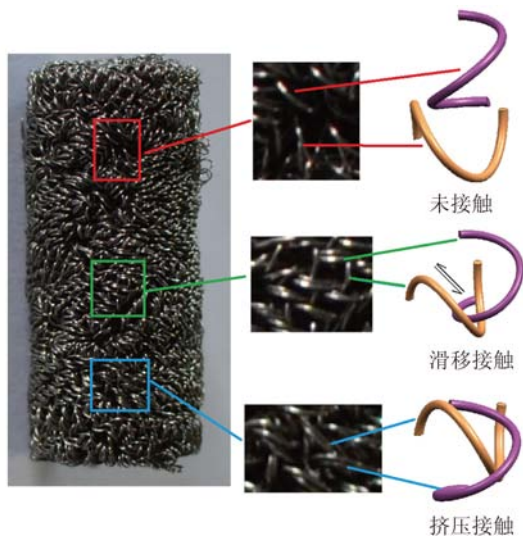


图 3 金属橡胶内部螺旋卷接触状态

3.2 不同接触状态微元体结构受力变形

由金属橡胶材料的内部结构可以看出, 经过拉伸后的一组纵向和横向螺旋卷在成型压力作用下存在三种接触状态: 未接触、滑移接触和挤压接触. 未接触状态是一组螺旋卷之间存在间隙; 滑移接触是接触对之间可发生相对滑移; 挤压接触是接触对之间处于黏滞或挤压状态. 三种状态见图 3.

未接触状态的一组螺旋卷, 上端纵向和下端横向螺旋卷之间有一定的间隙. 受到轴向载荷方向作用力 F_Z 时, 下端横向螺旋卷始终不受力的作用, 因此一组螺旋卷的变形仅为上端的纵向螺旋卷的弹性变形. 加载时受力状态如图 4.

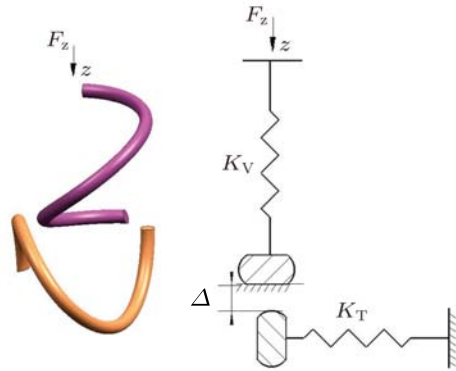


图 4 未接触状态螺旋卷

因此加载过程中根据 (6) 式, 一组螺旋卷等效的总刚度为

$$K'_L = K_V. \quad (8)$$

在卸载过程中, 未接触的螺旋卷对之间同样无作用力, 则卸载时和加载的刚度一致, 即 $K'_U = K'_L$.

随着载荷的增加, 纵向螺旋卷不断沿着载荷方向变形, 当纵向的螺旋卷和横向螺旋卷之间没有间隙时, 两螺旋卷开始接触. 接触点间的切向力也随之增加, 当切向力超过静摩擦力临界值时接触点产生滑动, 螺旋卷转换成滑移接触状态. 此时, 上端纵向螺旋卷沿着下端横向螺旋卷的圆柱面滑移, 相互接触螺旋卷之间在载荷方向的相对作用简化为一个支反力 F_N 和相对滑移产生的摩擦力 F_f , 摩擦力由库仑定律定义 $F_f = \mu F_N$, 力学模型如图 5 所示.

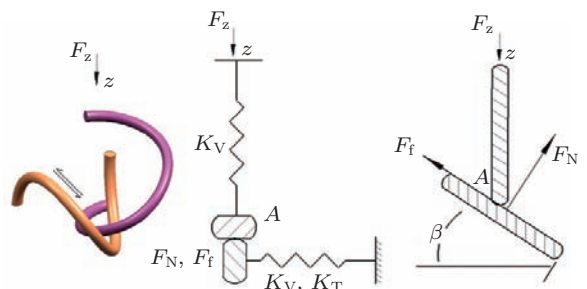


图 5 滑移接触状态螺旋卷

由迟滞回线分析可知加载和卸载两种情况的摩擦力作用效果不同, 受摩擦力的影响, 滑移接触

的螺旋卷在加载和卸载时刚度不同. 根据力学模型和 (6), (7) 式可获得滑移接触状态下一组螺旋卷的加载 K_L'' 和卸载等效刚度 K_U'' 为

$$K_L'' = \frac{K_V K_T}{\left(1 + \frac{\sin a - \mu \cos a}{\cos a + \mu \sin a} \tan a\right) K_V + K_T}, \quad (9)$$

$$K_U'' = \frac{K_V K_T}{\left(1 + \frac{\sin \beta + \mu \cos \beta}{\cos \beta - \mu \sin \beta} \tan \beta\right) K_V + K_T}, \quad (10)$$

式中, μ 为金属丝材料的摩擦系数.

纵向的螺旋卷和横向螺旋卷滑移一段位移后, 两螺旋卷无滑移空间, 接触状态为挤压状态, 两螺旋卷之间状态下的关系如图 6 所示. 此时载荷 F_Z 同时作用于纵向螺旋卷和横向螺旋卷, 相当于两种螺旋卷并联.

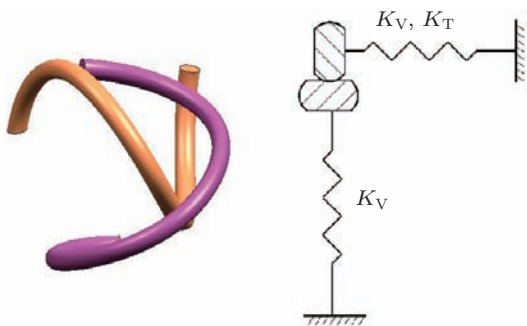


图 6 挤压接触状态螺旋卷

因此根据 (6), (7) 式, 挤压状态时一组螺旋卷加载时等效刚度为

$$K_L''' = K_V + K_T. \quad (11)$$

两挤压状态的螺旋卷, 在加载和卸载时接触状态无变化, 因此 $K_U''' = K_L'''$.

4 金属橡胶力学模型

金属橡胶构件成型后, 基本可以认为是一种较均匀的介质. 金属橡胶可以假设为沿模压成型方向多个层面构成, 每个层面上有 N_A 个微元体, 成型方向上有 N_L 层. 每个层面上各种微元体数目和接触状态相同, 其相互关系为并联; 层与层之间随着变形的改变接触状态不同, 其间相互关系为串联. 则位移为 x 下加载或卸载时总等效刚度为

$$K_{L/U}(x) = B \frac{N_A}{N_L} K_{L/U}^e(x), \quad (12)$$

式中, $K_{L/U}^e(x) = \frac{1}{\frac{n_1(x)}{K_{L/U}' + K_{L/U}'' + K_{L/U}'''} + \frac{n_2(x)}{K_{L/U}'' + K_{L/U}'''} + \frac{n_3(x)}{K_{L/U}'' + K_{L/U}'''}}$ 分别为不同载荷下每层微元体加载或卸载时的等效刚度; $n_i(x) = \frac{N_i}{N_{\max}}$ 为贡献系数 (各接触状态对数目/微元体总数目); B 为修正系数.

根据 (4) 和 (12) 式损耗因子为

$$\eta = \frac{\int_0^A (K_L'' - K_U'') K_L' K_L''' n_2(x) x dx}{\pi \int_0^A (K_L''' K_L'' K_U'' n_1(x) + K_L' K_L'' K_U'' n_3(x) + (K_L'' + K_U'') K_L' K_L''' n_2(x) / 2) x dx}. \quad (13)$$

由 (13) 式可知, 金属橡胶内部的螺旋卷的数目和接触状态决定了构件的刚度和阻尼特性. 由于材料、工艺和结构等参数的不同, 其螺旋卷的总数目及贡献系数都不尽相同. 当金属橡胶构件在振动载荷下工作时, 螺旋卷之间的接触状态也在时时改变, 贡献系数之间相互转换最终表现为金属橡胶的非线性刚度和阻尼特性.

4.1 微元体结构变化规律

层数、对数和贡献系数等参数的确定是金属橡胶力学模型的关键问题之一. 这些参数受金属橡

胶材料参数、工艺参数和结构参数的影响. 接触的形成过程都是开始于最大密度区, 随着载荷的增加而扩展至小密度区, 状态的变化遵守未接触 — 滑移接触 — 挤压接触这一基本规律.

由加工工艺可知, 微元体结构不改变前提下, 金属橡胶具有最小相对密度和最大相对密度 (相对密度 = 金属橡胶密度/金属丝材密度). 最小密度为金属丝拉伸编织工艺后的相对密度, 即毛坯的相对密度, 如图 7 所示, 毛坯以各个接触对之间都按拉伸工艺状态后的螺旋卷均匀的分布. 此时初始状态螺旋卷都为未接触状态, 即此时 $n_1 = 1, n_2 = 0, n_3 = 0$.

根据拉伸后的螺旋卷的结构, 可得金属橡胶最小密度为

$$\bar{\rho}_{\min} = \frac{d_S^2}{D_L^2 \sin \alpha} \quad (14)$$

最大密度为螺旋卷工艺成型的最大相对密度或者考虑弹性范围内, 螺旋卷无弹性变形空间下的相对密度, 如图 8 所示. 即此时 $n_1 = 0, n_2 = 0, n_3 = 1$. 根据大量的成型试验和经验 $\bar{\rho}_{\max}$ 在 0.30—0.40 之间.

一对螺旋卷

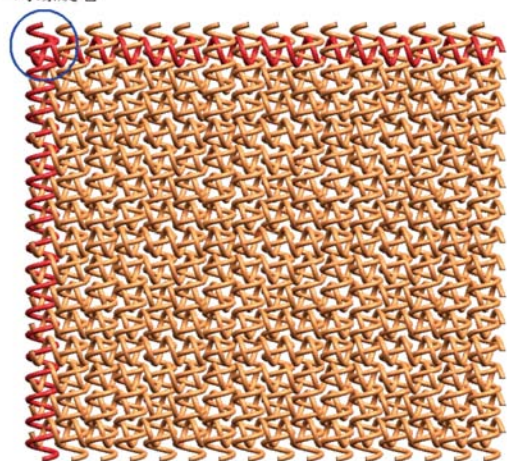


图 7 最小相对密度排列示意图

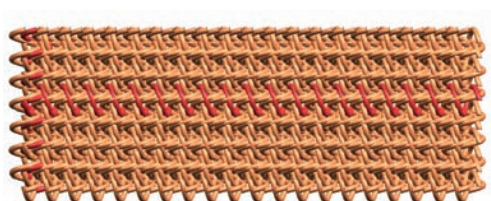


图 8 最大相对密度排列示意图

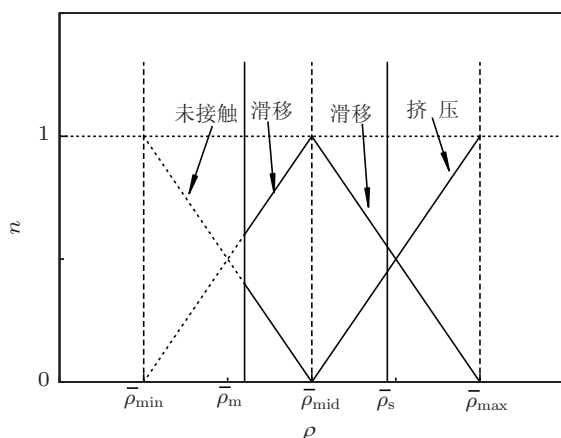


图 9 不同相对密度接触状态贡献系数的变化

金属橡胶构件的成型后相对密度 $\bar{\rho}_m$ 和受载时一定变形后的相对密度 $\bar{\rho}_x$ 总在最小相对密度到

最大相对密度之间变化, 即 $\bar{\rho}_{\min} \leq \bar{\rho}_m, \bar{\rho}_x \leq \bar{\rho}_{\max}$. 贡献系数则在未接触的 $1 \rightarrow n_1 \rightarrow 0$, 滑移接触的 $0 \rightarrow n_2 \rightarrow 0$, 挤压接触的 $0 \rightarrow n_3 \rightarrow 1$ 之间变化. 假设贡献系数的整个变化过程为线性过程, 存在一个中间相对密度 $\bar{\rho}_{\text{mid}} = \frac{\bar{\rho}_{\max} + \bar{\rho}_{\min}}{2}$, 可得贡献系数随着相对密度的变化如图 9 所示.

根据以上假设, 金属橡胶构件以一定的相对密度成型后, 可以确定各接触状态的初始贡献系数. 构件受载变形时, 相对密度也发生变化, 可以确定各接触状态不同变形的贡献系数.

4.2 金属橡胶刚度和阻尼

设计一定相对密度的金属橡胶构件, 可看作在最小相对密度的毛坯基础上, 按照所需的螺旋卷数目在单位面积和长度上均匀的增加, 得到最终设计毛坯的螺旋卷数量和质量.

在最小相对密度时, 金属橡胶构件毛坯内面积 A 上螺旋对的总数为 $N_{A0} = \frac{4A}{\pi D_L^2}$, 长度 L 上总数为 $N_{L0} = \frac{rL}{L_j}$ (r 为毛坯的高度和成型高度的比值).

因此金属橡胶构件相对密度为 $\bar{\rho}_m$ 时, 毛坯的相对密度为 $\bar{\rho}_r = \frac{\bar{\rho}_m}{r}$, 在同样毛坯体积下增加的螺旋卷数目为 $N_M = \frac{\bar{\rho}_m}{r \bar{\rho}_{\min}}$. 则单位面积增加了 $N_M^{2/3}$, 单位长度增加 $N_M^{1/3}$.

即相对密度为 $\bar{\rho}_m$ 时, 金属橡胶构件毛坯每个层面上的微元体数目为

$$N_A^m = \frac{4A}{\pi D_L^2} \left(\frac{\bar{\rho}_m D_L^2 \sin \alpha}{r d_S^2} \right)^{2/3} \quad (15)$$

毛坯厚度方向微元体数目为

$$N_L^m = \frac{rL}{\pi D_L \tan \alpha} \left(\frac{\bar{\rho}_m D_L^2 \sin \alpha}{r d_S^2} \right)^{1/3} \quad (16)$$

根据 (12), (15), (16) 式, 在变形为 x 下, 金属橡胶构件加载和卸载时总等效刚度可表示为下式:

$$K_{L/U}(x) = BmK_{L/U}^e(x), \quad (17)$$

式中, $m = \frac{4A \tan \alpha \sin \alpha^{4/3} \bar{\rho}_m^{4/3} D_L^{5/3}}{L r^{7/3} d_S^{8/3}}$ 为系数.

根据图 9 假设的接触状态贡献系数变化规律, 可得不同相对密度下刚度的表达式.

当 $\bar{\rho}_m < \bar{\rho}_{\text{mid}}$ 时, 根据变形的不同, 可能要经过未接触 — 滑移接触 — 挤压接触两个状态过程, 因此刚度为变形的分段函数.

$$K_{L/U}(x) = \begin{cases} Bm \left[\frac{K'_{L/U} K''_{L/U}}{K''_{L/U} \left(1 - \frac{B_1(L_{\min} - L + x)}{L - x} \right) + K'_{L/U} \frac{B_1(L_{\min} - L + x)}{L - x}} \right], & x < L - L_{\text{mid}}, \\ Bm \left[\frac{K''_{L/U} K'''_{L/U}}{K'''_{L/U} \frac{B_2(L - L_{\max} - x)}{L - x} + K''_{L/U} \left(1 - \frac{B_2(L - L_{\max} - x)}{L - x} \right)} \right], & x \geq L - L_{\text{mid}}, \end{cases} \quad (18)$$

式中, $L_{\min} = \frac{L\bar{\rho}_m}{\bar{\rho}_{\min}}$ 为金属橡胶相对密度达到 $\bar{\rho}_{\min}$ 时的高度 (mm); $L_{\text{mid}} = \frac{L\bar{\rho}_m}{\bar{\rho}_{\text{mid}}}$ 为金属橡胶相对密度达到 $\bar{\rho}_{\text{mid}}$ 时的高度 (mm); $L_{\max} = \frac{L\bar{\rho}_m}{\bar{\rho}_{\max}}$ 为金属橡胶相对密度达到 $\bar{\rho}_{\max}$ 时的高度 (mm); $B_1 = \frac{L_{\text{mid}}}{L_{\min} - L_{\text{mid}}}$, $B_2 = \frac{L_{\text{mid}}}{L_{\text{mid}} - L_{\max}}$ 为系数.

当 $\bar{\rho}_m \geq \bar{\rho}_{\text{mid}}$ 时, 只有滑移接触 — 挤压接触一个状态转换过程, 因此刚度同 (18) 式中 $x \geq L - L_{\text{mid}}$ 情况相同.

当 $\bar{\rho}_m < \bar{\rho}_{\text{mid}}$ 时, 根据损耗因子表达式 (13) 结合上面的刚度表达式 (18) 可到的金属橡胶损耗因子为

$$\eta = \begin{cases} \frac{\int_0^A K'_L (K''_L - K''_U) \frac{B_1(L_{\min} - L + x)}{L - x} x dx}{\pi \int_0^A \left(K''_L K''_U \left(1 - \frac{B_1(L_{\min} - L + x)}{L - x} \right) + K'_L (K''_L + K''_U) \left(\frac{B_1(L_{\min} - L + x)}{2(L - x)} \right) \right) x dx}, & x < L - L_{\text{mid}}, \\ \frac{\Delta W_{\text{mid}} + \int_0^{A - A_{\text{mid}}} K'''_L (K''_L - K''_U) \frac{B_2(L - L_{\max} - x)}{L - x} x dx}{\pi \left[U_{\text{mid}} + \int_0^{A - A_{\text{mid}}} \left(K''_L K''_U \left(1 - \frac{B_2(L - L_{\max} - x)}{L - x} \right) + K'''_L (K''_L + K''_U) \frac{B_2(L - L_{\max} - x)}{2(L - x)} \right) x dx \right]}, & x < L - L_{\text{mid}}, \end{cases} \quad (19)$$

式中

$$\Delta W_{\text{mid}} = \int_0^{A_{\text{mid}}} K'_L (K''_L - K''_U) \times \frac{B_1(L_{\min} - L + x)}{L - x} x dx;$$

$$U_{\text{mid}} = \int_0^{A_{\text{mid}}} K''_L K''_U \left(1 - \frac{B_1(L_{\min} - L + x)}{L - x} \right) + K'_L (K''_L + K''_U) \times \left(\frac{B_1(L_{\min} - L + x)}{2(L - x)} \right) x dx.$$

载荷和变形.



图 10 金属橡胶构件的测试系统和样件

5 理论与试验对比分析影响

金属橡胶的成型方向静态力学特性试验在计算机控制的 WDW3100 电子万能试验机上进行. 试验时, 控制一定的加载速度 (0.25—0.5 mm/s) 和卸载速度 (50—100 N/s), 均匀无冲击, 用 0—1 kN 的力传感器和测量范围 0—10 mm 的电子千分表测量

表 1 试验件各项参数

编号	d_s/mm	D_L/mm	$\bar{\rho}_m$	m/g
1	0.12	1.2	0.10	3.06
2	0.12	1.2	0.15	4.2
3	0.12	1.2	0.20	5.6
4	0.12	1.2	0.25	7.0

影响金属橡胶刚度和阻尼最主要的构件参数为相对密度. 为了验证理论模型的适用性, 试验对比不同相对密度下金属橡胶的迟滞回线. 试验件金属橡胶为圆柱形状, 金属丝材料均为 0Cr18Ni9, 直径 15 mm, 高度 20 mm, 其他各项参数如表 1 所示. 试验机和试验件如图 10 所示.

图 11 所示在不同相对密度下加载曲线理论模型和试验曲线的对比, 对比表明不同相对密度下理论模型与试验都能较好的拟合, 得到金属橡胶迟滞

的特性, 特别是相对密度较大的情况. 需要注意的是不同相对密度所采用的修正系数 B 不同. 分析误差来源: 实际试验过程中, 加载和卸载是一个连续过程, 卸载初始状态有一小段粘滞状态向滑移状态的转换, 即滑移启动区域. 但是当相对密度较小时, 刚度主要来自于未接触和滑移接触状态的螺旋卷变形, 并未考虑滑移启动区域, 因此误差较大. 当相对密度较大时, 已经有部分滑移接触的螺旋卷转换为黏滞状态的螺旋卷, 因此误差较小.

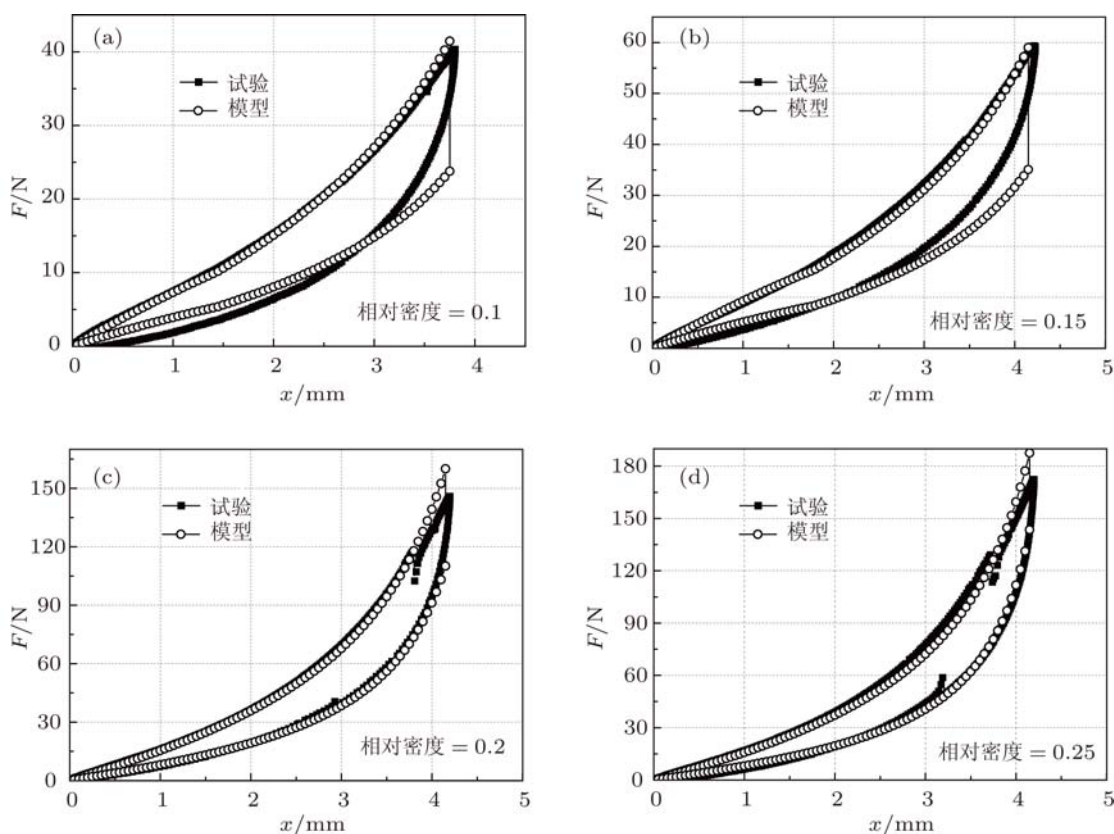


图 11 不同相对密度下迟滞回线 (a) 相对密度 0.1; (b) 相对密度 0.15; (c) 相对密度 0.20; (d) 相对密度 0.25

6 结论

本文建立了金属橡胶的迟滞特性本构模型, 理论上解释了刚度和阻尼产生非线性机理, 得到以下结论:

1. 建立的金属橡胶刚度和阻尼模型充分考虑了金属橡胶构件的基本常用物理参数, 并且能很好的描述金属橡胶刚度和阻尼的机理.

$$K, \eta = f(E_S, d_S, D_S, \bar{\rho}_m, r, A, L, x).$$

2. 螺旋卷之间接触状态“未接触 — 滑移接触 — 挤压接触”的转换是造成金属橡胶刚度和阻尼的非线性主要原因.

3. 滑移接触螺旋卷数目的贡献系数成为衡量阻尼的重要因素.

4. 理论模型都能较好的分析解释试验结果, 能够更好准确的描述金属橡胶构件的力学特性.

- [1] Lin M, Huang Y M 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3277 (in Chinese) [林敏, 黄咏梅 2006 物理学报 **55** 3277]
- [2] Zhong W Z, Ke K J, Zhou Z Y, Xia W, Li Y Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5155 (in Chinese) [钟文镇, 何克晶, 周照耀, 夏伟, 李元元 2009 物理学报 **58** 5155]
- [3] Al K 2002 *Ph. D. Dissertation* (TX: Texas A&M University)
- [4] Ma Y H 2005 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics) (in Chinese) [马艳红 2005 博士学位论文 (北京: 北京航空航天大学)]
- [5] Ma Y H, Hong J, Zhang D Y, Wang H 2007 *Proceedings of ASME TURBO EXPO* Montreal, Canada, May 14–17, 2007 27585
- [6] Ma Y H, Wang H, Li H Y, Hong J 2008 *Proceedings of ASME TURBO EXPO* Berlin, Germany, June 9–13, 2008 50961
- [7] Bugra H, Ertas B, Luo H 2008 *J. Eng. Gas Turbine Power* **138** 032503
- [8] Bugra E, Luo H, Darren H 2009 *Proceedings of the 17th American Institute of Aeronautics and Astronautics* Palm Springs, California, May 4–7, 2009 2521
- [9] Hong J, Zhu B, Ma Y H 2011 *Proceedings of ASME TURBO EXPO* Vancouver, Canada, June 6–10, 2011 45772
- [10] Chegodayev D E (Translated by Li Z Y) (Russia) 2000 *The Designing of Components Made of Metal Rubber* (Beijing: Publishing Company of National Defence Industry) pp99–124 (in Chinese) [契戈达耶夫 D E. 著李中鄂译 2000 金属橡胶构件的设计 (北京: 国防工业出版社) 第 99—124 页]
- [11] Guo B T 2002 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics) (in Chinese) [郭宝亭 2002 博士学位论文 (北京: 北京航空航天大学)]
- [12] Li Y Y 2005 *Ph. D. Dissertation* (Xian: Xian Jiaotong University) (in Chinese) [李宇燕 2005 博士学位论文 (西安: 西安交通大学)]
- [13] Shui J P, Liu Y S, Pei H Y 1998 *Acta Phys. Sin.* **47** 658 (in Chinese) [水嘉鹏, 刘咏松, 裴慧元 1998 物理学报 **47** 658]
- [14] Zhang Y H, Liu H H, Wang D C 2008 *Spring manual* (Beijing: China Machine Press) p280–400 (in Chinese) [张英会, 刘辉航, 王德成 2008 弹簧手册 (北京: 机械工业出版社) 第 280—400 页]

A constitutive model of metal rubber based on hysteresis property*

Zhu Bin Ma Yan-Hong[†] Zhang Da-Yi Hong Jie

(School of Jet Propulsion, Beihang University, Beijing 100191, China)

(Received 13 September 2011; revised manuscript received 2 December 2011)

Abstract

Metal rubber (MR) material is a new-type of damping material. Its raw material and fabrication process have same unique features. Wire helix is considered as the unit cell geometry of MR. Combining cylindrical compression coil spring theory, a mechanical model is established for individual wire helix which is located in the horizontal or longitudinal direction. Three contact statuses are analyzed for the neighboring helices and mechanical models are derived for these cases according to the Kulan model. The arrangement and the spatial distribution of the microelements are assumed to be located evenly and periodically inside the MR. A mathematic model is established to characterize the damping behavior of MR. It came from the unit cell geometry and the fabrication process of MR materials. It is easy to explain the mechanism of hysteresis loop and the nonlinear stiffness and damping characteristic of MR by analyzing contact states and contact number of unit cell wire helices. Finally, a comparison is made between theoretical results and experimental results. This model is valuable for the analysis of the material mechanics and the design of MR. It provides theoretical support for the further engineering application of MR in the field of vibration reduction.

Keywords: metal rubber, wire helix, hysteresis loop, nonlinear stiffness and damping

PACS: 81.05.Ni, 07.10.Fq, 46.25.-y, 46.40.Ff

* Project supported by the National Natural Science Foundation of china (Grant Nos. 51101008, 51105022), and the Fan Zhou Research Fund (Grant No. 20110402).

[†] E-mail: mayanh2002@gmail.com