

文章编号: 1000-8055(2002)04-0416-05

# 金属橡胶减振垫刚度特性及本构关系研究

陈艳秋, 郭宝亭, 朱梓根  
(北京航空航天大学 动力系, 北京 100083)

**摘要:** 金属橡胶是一种新型迟滞非线性弹性材料, 具有优良的减振特性, 尤其适用于航空、航天及其他恶劣条件下工作。本文对金属橡胶材料的刚度特性进行了较详细的实验研究。在大量实验的基础上, 总结影响其性能的因素及其影响规律, 建立了金属橡胶的本构关系模型, 并得到了与实验数据符合较好的结果。

**关键词:** 金属橡胶(MR); 非线性; 刚度; 本构关系

**中图分类号:** V 231. 92

**文献标识码:** A

## The Investigation of the Stiffness Characteristics and the Stress-Strain Relation of Metal Rubber

CHEN Yan-qiu, GUO Bao-ting, ZHU Zi-gen

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Metal rubber is a kind of non-linear and nonelastic material that has excellent damping performance. It can especially be compatibly used in aviation, space flight and atrocious environment. Some experimental studies of stiffness performance of thinner MR material have been carried out in this paper. The factors that affect the performance of MR and their affecting rules have been summed up on the basis of plentiful tests. There is important and practical value for perfecting the MR. The investigation results provided credible evidence for the application and theoretical research of MR damper or material. The strain-stress relation of MR is established and the coefficients of the equation are given based on the test data. The result of the theoretic calculation is consistent with the experimental data.

**Key words:** metal rubber; non-linear; stiffness; strain-stress relation

## 1 引言

金属橡胶是由金属丝经过螺旋成型拉长, 相互缠绕模压而成的, 是一种低密度多孔材料, 因具有类似橡胶的弹性和结构而得名。它的特性主要取决于制作金属橡胶的金属丝材料、成型密度、厚度及安装情况等诸多因素。其阻尼效果主要是由于在受力变形时其内部金属丝的相对位移产生的滑动摩擦而耗散能量。金属橡胶材料的主要优点除了其优越的减振性能外, 还有其对环境的适应

性。金属橡胶在空间或其他高、低温环境下不蒸发、不老化, 耐腐蚀, 且强度高, 易于设计成各种形状并可根据不同的要求选择合理的制作和安装参数。

金属橡胶优良的减振特性和广泛的应用前景使其对其性能的研究显得更加迫切和必要。目前人们对其基本性能、减振特性的研究还很不完善, 特别是薄型金属橡胶材料。我们研制的薄型金属橡胶主要用于航空发动机外部管路, 做卡箍的减振衬垫, 取得了较好的效果<sup>[1]</sup>。但是在应用中, 发现

收稿日期: 2001- 08- 05; 修订日期: 2001- 10- 10

作者简介: 陈艳秋(1972- ), 女, 北京航空航天大学动力系博士生

薄型金属橡胶与其它类型的金属橡胶相比有其自身的特点<sup>[1~3]</sup>, 其工作特性与制作安装参数的关系也更加密切。因此, 要设计出各项性能优良的金属橡胶减振器, 还需要对其进行系统的理论与实验研究。

本文对薄型金属橡胶材料的刚度特性做了详细的实验研究, 对完善金属橡胶材料的性能, 设计不同要求的减振器有重要的实际意义; 并在实验的基础上建立了金属橡胶的一维本构关系。

## 2 刚度曲线

金属橡胶的刚度实验在 CSS-280 疲劳实验机上进行, 缓慢加载 (加载速率  $0.001 \text{ mm/s}$ ), 加载方向为金属橡胶成型受压方向。分别用压力传感器和位移传感器测量静力和变形。实验所用的试件均由直径为  $0.1 \text{ mm}$  金属丝制成, 这些试件长宽尺寸相同, 厚度不同, 密度也不相同。

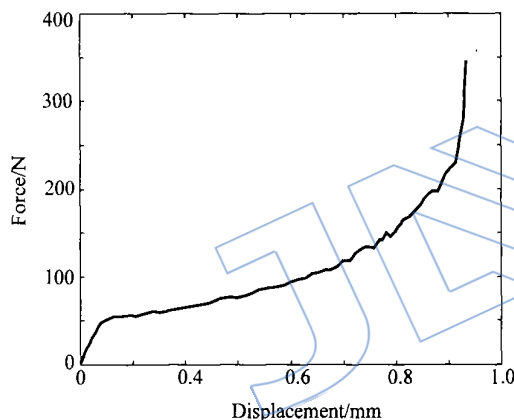


图1 金属橡胶材料的静力——位移曲线

Fig 1 Force vs displacement of metal rubber

图1为一典型的金属橡胶材料的静力——位移曲线。由图1可以观察到, 金属橡胶材料是1种典型的非线性材料, 其线性段较短, 软特性段相对较长。由于用做减振器时在安装或振动力作用下使材料产生一定的变形量, 因而使金属橡胶工作时一般表现出软特性, 但对于振动很小或很大, 也会表现出线性或硬特性。

### 2.1 密度的影响

为考察金属橡胶制作密度的影响, 各个厚度分别制作了密度  $\rho$  为  $1.5, 2.0, 2.5 \text{ g/cm}^3$  的金属橡胶实验件, 材料为冷态不锈钢丝。图2为3种密度的厚度为  $2.2 \text{ mm}$  的金属橡胶试件的载荷——变形曲线。由图2可见, 密度越小, 金属橡胶材料的刚度越小, 其软特性段也越宽。通过其他厚度的试件

的实验, 也能得出相同的规律。

### 2.2 厚度的影响

为了考察试件的制作厚度对其刚度特性的影响, 我们选用3种厚度分别为  $2.2, 3.0, 5.0 \text{ mm}$  材料为冷态不锈钢丝的试件进行比较实验。图3为不同厚度的金属橡胶的静力——位移曲线。

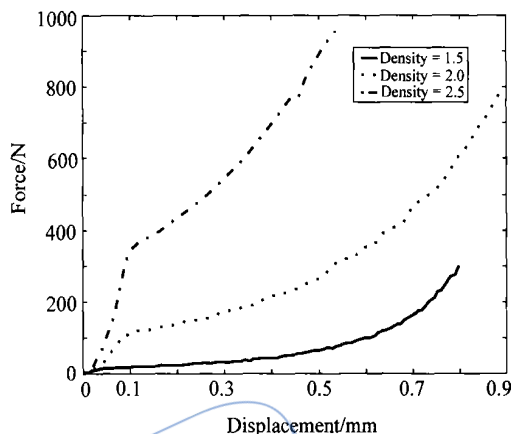


图2不同密度的金属橡胶的静力——位移曲线

Fig 2 Force vs displacement of different density

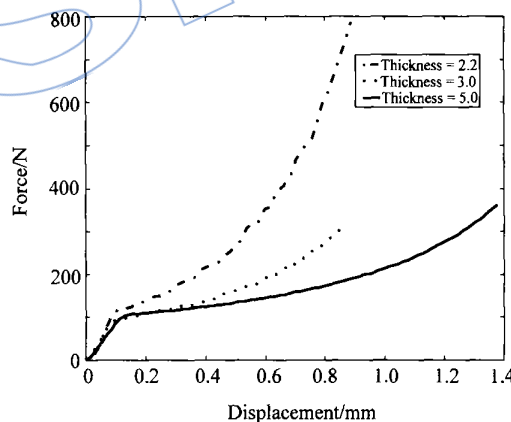


图3 不同厚度的金属橡胶静力——位移曲线

Fig 3 Force vs displacement of different thickness

由图3可以发现, 对密度相同 (图中密度皆为  $2.0 \text{ g/cm}^3$ ) 厚度不同的试件, 其线性段的刚度基本相等, 软特性区域厚度小的金属橡胶试件此段较窄, 在变形量较大时, 厚度小的刚度略微增大。在后来的金属橡胶减振实验中也证实了此点。当然, 其他密度情况下也有相同的规律。图4为图3所用试件的应力——应变曲线, 由图4看到不同厚度的金属橡胶其应力——应变关系却是接近的, 即弹性模量基本相同, 但进入硬特性区差别会增大。

### 2.3 金属丝材的影响

制作金属橡胶可根据实际工作条件的需要选

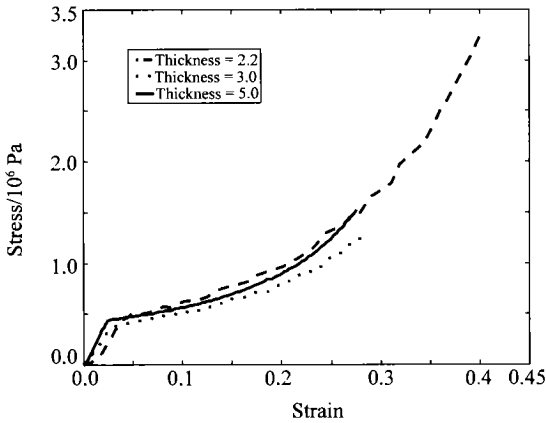


图4 不同厚度的金属橡胶应力—应变曲线

Fig 4 Stress vs strain of different thickness

择不同的金属丝材料。例如: 在高、低温环境中工作可选用高温合金。在一般条件下可选用软态或冷态不锈钢丝。不同丝材制作的金属橡胶其阻尼、刚度或减振特性是不同的, 可根据需要选择。

图5中的两条曲线分别为密度相同、厚度相同而材料不同的金属橡胶的静力—位移曲线。很明显, 软态丝的软特性区域较短。但是, 在要求使用软态不锈钢丝的场所, 根据2-1, 2-2的规律, 可以通过调节其密度、厚度来改变它的刚度及性能。

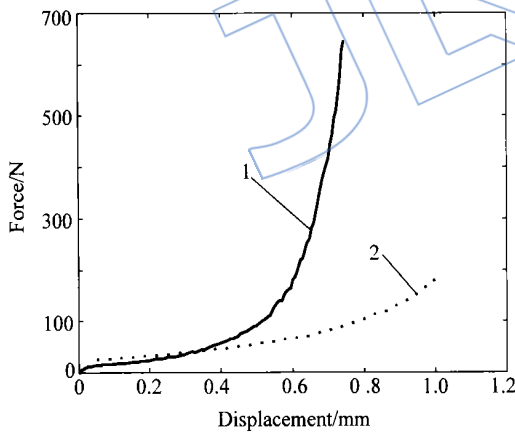


图5 不同丝材制作的金属橡胶静力—位移曲线

Fig 5 Force vs displacement of different material

由上面的静力—位移曲线可以看出, 金属橡胶在相当大的变形阶段, 随变形的不断变化, 对应的力变化很小, 这样的特性是十分有利于减振、防振的。特别是当结构受到意外激励或冲击时, 元件刚度软化, 使结构的自然频率改变, 因而共振难以建立。对一般振动环境下工作的构件或结构, 金属橡胶也表现出较好的阻尼特性。

### 3 金属橡胶的本构关系

#### 3.1 单向受压状态下MR本构模型的建立

本文所研究的金属橡胶本构关系, 主要是指其在成型受压方向受到单向压力时的应力—应变关系。由于金属橡胶由金属丝经过螺旋成型拉长, 相互缠绕模压而成的, 金属丝在其成型受压面上基本为平行分布, 因此根据文献[4]提出的1种小曲梁受力模型, 建立了金属橡胶弹性计算所必须的基本参数的关系式, 以描述金属橡胶的变形性能。如图6所示,  $Z$  向即为受压方向。根据虚功

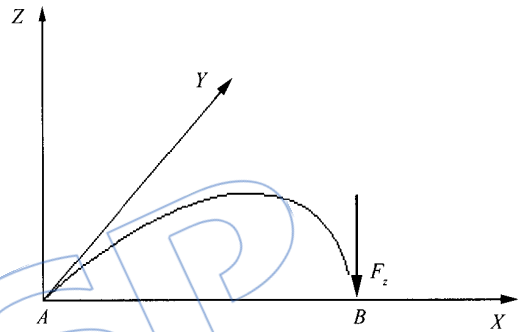


图6 金属橡胶中的小曲梁受力图

Fig 6 Small curving beam model of MR

原理, 弹性体的变形能  $U$  等于外力对它所作的功  $W$ , 即:

$$U = W \quad (1)$$

其中:

$$U = \int_0^L \frac{T^2(s)}{2GI_p} ds + \int_0^L \frac{M^2(s)}{2EI} ds$$

$$W = \frac{1}{2} \cdot F_z \cdot \Delta_z \quad (2)$$

根据小梁模型, 可写出其弯矩、扭矩表达式, 代入(2)式, 再由(1)式可得到力与位移的关系:

$$F_z = \frac{ED^4}{4(4 + 3\mu)D_c^3} \cdot \Delta_z = K_{zi} \cdot \Delta_z \quad (3)$$

其中:  $D$  为金属丝的直径,  $E$  为金属丝的弹性模量,  $D_c$  为螺旋直径,  $\Delta_z$  为  $Z$  向位移。  $K_{zi} = ED^4/[4(4 + 3\mu)D_c^3]$  为微元弹簧在  $Z$  方向的刚度系数。

假设在单位面积上有  $n$  个这样的微元弹簧, 在单位长度上有  $m$  层弹簧, 如图7所示。显然这与金属橡胶的密度有关。在每层上的小弹簧, 其相互关系为并联, 其总的等效刚度为:

$$K_{zj} = \sum_{i=1}^n K_{zi} \quad (4)$$

各层之间的弹簧为串联关系, 则其总的等效刚度为:

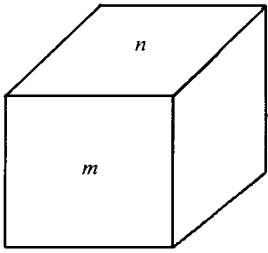


图7 金属橡胶的微元模型

Fig 7 Microelement of MR

$$K'_{zj} = \frac{\prod_{j=1}^m K_{zj}}{\sum_{i=1}^m \prod_{j \neq i}^m K_{zj}} \quad (5)$$

虽然各微元弹簧的形态各不相同,一般刚度系数也不同,但总的来说存在一个统计上的均值。假定以均值作为微元弹簧的刚度系数,则(4)和(5)式变为:

$$K_{zj} = nK_{zi} \\ K'_{zj} = \frac{K_{zj}}{m K_{zj}^{m-1}} = \frac{K_{zi}}{m} = \frac{nK_{zi}}{m} \quad (6)$$

因此,金属橡胶的力与位移的关系为:

$$F_z = K'_{zj} \cdot \Delta_z = \frac{nK_{zi}}{m} \cdot \Delta_z \quad (7)$$

对于单位体积的金属橡胶,式(7)即为金属橡胶的本构关系:

$$\sigma = \frac{nK_{zi}}{m} \cdot \epsilon \quad (8)$$

设金属橡胶的密度为  $\rho_j$ , 金属丝材料的密度为  $\rho$ 。体积为  $V$  内总的弹簧螺旋圈数为:

$$M = n \cdot m = \frac{L}{\pi D_c} = \frac{4\rho V}{\rho \pi^2 D_c^2}$$

则立方体单位体积内的螺旋圈数为:

$$M = (4/\pi^2) \cdot (\bar{\rho}/D_c^2)$$

其中:  $\bar{\rho} = \rho_j/\rho$

单位面积上的螺旋圈数  $n = \sqrt[3]{M^2}$ , 层数  $m = \sqrt[3]{M}$ 。那么:

$$\sigma = \frac{1}{4(4+3\mu)} \sqrt{\frac{4}{\pi^2}} \cdot E \sqrt{\left(\frac{D}{D_c}\right)^{10} \bar{\rho}} \cdot \epsilon \quad (9)$$

由金属橡胶试件实验结果表明其应力——应变(或力——位移)关系随应变(或位移)增大呈非线性特性,如前图所示:应变小时近似线性,较大时呈软特性,应变很大时变为硬特性。金属橡胶中微元弹簧之间相互缠绕接触,当变形小时,变形力不足以克服静摩擦,主要起弹簧的作用,表现出应力——应变关系近似线性。随着位移增加,微元弹

簧之间产生滑移使刚度变小,表现为软特性,当位移(外力)继续增加,由于挤压作用使微元弹簧改变了原有的状态,失去部分弹性,甚至部分微元弹簧压死而失效,此时呈硬特性现象。根据实验和上面的分析,对金属橡胶本构关系式(9)作修正:应力——应变关系是应变的3次曲线,即:

$$\sigma = A E \cdot \sqrt{\left(\frac{D}{D_c}\right)^{10} \bar{\rho}} \cdot \epsilon + B E \cdot \sqrt{\left(\frac{D}{D_c}\right)^{10} \bar{\rho}} \cdot \epsilon^2 + C E \cdot \sqrt{\left(\frac{D}{D_c}\right)^{10} \bar{\rho}} \cdot \epsilon^3 \quad (10)$$

其中  $A, B, C$  为系数,由实验获得。

公式(10)可直接反映制作金属橡胶的材料及其丝径、密度、螺旋直径、金属橡胶密度的影响。

3.2 计算结果与实验结果的比较

用本文所研究不同参数的部分金属橡胶试件的实验数据,例如用密度为  $2.0 \text{ g/cm}^3$  的不同厚度的试件的试验数据,由最小二乘法获得经验常数  $A, B, C$  的值。根据式(10)对其他试验件进行了计算,将得到的计算结果与该试验件的试验数据进行比较,如图8为密度为  $1.5 \text{ g/cm}^3$ , 厚度为  $5.0 \text{ mm}$  的金属橡胶试件的试验值与计算结果的对比。

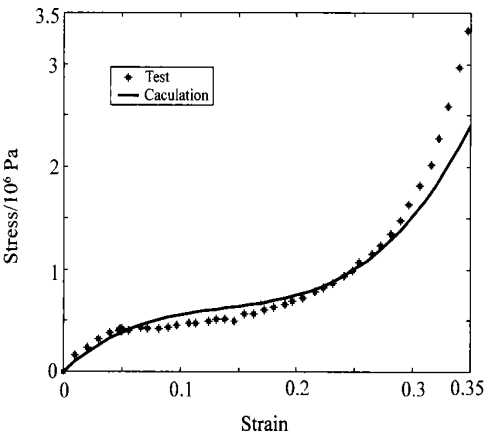


图8 计算结果与实验结果比较

Fig 8 Comparison of calculated result and test data

图8的结果具有代表性,由此图可以看出,所建立的本构关系模型基本可以描述这种单向受压状态下的应力——应变关系。在大多数情况下,三项式能较准确的描述线性段和软特性区,而硬特性区则不一定表达准确,如图8所示。这个问题的主要原因还在于前面2.2提到的在硬特性区,不同参数的试件的应力——应变关系有差别。

实际上,由于金属橡胶一般工作在线性和软特性区域,所以三项式基本能满足要求。

4 结 论

(1) 本文通过理论分析与实验研究总结了薄型金属橡胶材料的刚度特性。通过金属橡胶垫的实验曲线看到, 金属橡胶是一种典型的非线性材料, 其刚度受制作金属橡胶的密度、材料、厚度等多种因素的影响。

(2) 针对薄型金属橡胶材料, 建立了金属橡胶的本构关系, 能较好的描述单向受压状态下金属橡胶的应力——应变关系, 并将理论计算与实验结果进行了比较, 二者符合较好, 为金属橡胶减振垫的设计提供了理论依据。

金属橡胶减振器有着灵活的设计方式, 实际中可根据需要改变其参数、形状, 再加上其对环境

的广泛的适应性, 使其应用前景十分广阔。

参考文献:

[1] 邓剑波 悬臂梁根部金属橡胶减振器阻尼性能的实验研究[J] 航空动力学报, 1998, 13(4): 406- 408

[2] 王新, 朱梓根 环形金属橡胶减振器[J] 航空动力学报, 1997, 12(2): 143- 145

[3] 陈艳秋, 朱梓根, 李琳 金属橡胶用于航空发动机外部管路减振的实验研究[A] 中国航空学会第十届航空发动机结构强度与振动会议论文集[C] 2000: 397- 399

[4] 邓剑波 新型结构阻尼材料金属橡胶性能的理论与应用实验研究[D] 北京: 北京航空航天大学, 1997.

(责任编辑 王震华)

