

金属丝网橡胶的本构关系

邹广平¹, 刘泽¹, 唱忠良¹, 李雨蕾²

(1. 哈尔滨工程大学 航天与建筑工程学院, 哈尔滨 150001;

2. 中国兵器工业集团公司 中国兵器科学研究院 宁波分院, 浙江 宁波 315103)

摘 要: 通过对圆环形金属丝网橡胶成型制造过程的分析,在圆环嵌套模型基础上,结合干摩擦非线性理论和小曲梁模型建立了金属丝网橡胶材料的非线性本构关系,对不同相对密度的金属丝网橡胶试件进行了静态压缩实验,通过实验数据确定了本构关系方程的各项系数并实验结果进行比较.研究表明:建立的本构关系模型可以很好地描述金属丝网橡胶的非线性力学特性,实验结果能够较好地符合理论结果,并且该模型反映了相对密度、网格大小和网格宽度等参数的影响,从而实现了材料结构刚度的预估.

关 键 词: 金属丝网橡胶; 本构关系; 圆环嵌套模型; 非线性力学特性; 静态压缩实验

中图分类号: V252.1

文献标志码: A

Constitutive relation of metal-net rubber

ZOU Guang-ping¹, LIU Ze¹, CHANG Zhong-liang¹, LI Yu-lei²

(1. College of Aerospace and Civil Engineering,

Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. Ningbo Branch of Ordnance Science and Research Academy of China,

China North Industries Group Corporation, Ningbo Zhejiang 315103, China)

Abstract: Through analysis of the manufacturing process of the ring metal-net rubber and on the basis of the ring nesting model, in combination with nonlinear theory of dry friction and small curving beam model, the nonlinear constitutive relation of metal-net rubber was constructed, several metal-net rubber components of different relative density were taken on the compression experiment, and the experimental data were used to determine the coefficients on constitutive relation equation and compared with the experimental results. The results show that the model of the stiffness from nonlinear constitutive relation can correctly describe the nonlinear mechanical properties of metal-net rubber, and the theoretic calculations are consistent with the experimental data. The model can reflect the influences of the relative density, mesh size, mesh width and other such parameters, providing a theoretic basis for better design and application of metal-net rubber.

Key words: metal-net rubber; constitutive relation; ring nesting model; nonlinear mechanical properties; compression experiment

金属丝网橡胶材料是一种具有减振耗能特性的金属材料. 制备工艺是将金属丝按照特定的规则编制成金属丝网,然后通过冲压工艺压制成的

弹性多孔材料. 由于内部的金属丝相互挤压、勾结、摩擦可以消耗大量的能量,从而达到减振吸能的效果. 在国防、宇航、船舶等领域得到广泛应

收稿日期:2014-10-30

基金项目:国家自然科学基金(11372081)

作者简介:邹广平(1963-),男,黑龙江哈尔滨人,教授、博士生导师,博士,主要从事实验力学研究.

用^[1-5].

在加工工艺方面,金属丝网橡胶与传统的金属橡胶有明显的区别.传统加工方法先将金属丝制备成螺线卷,再将螺线卷缠绕制成毛坯冲压成型,过程中存在大量手工加工过程,制备的金属橡胶稳定性较差,而通过实验研究发现,金属丝网橡胶的力学性能更加稳定,省去了许多手工部分,机械化程度很高,特别适合批量生产.

金属丝网橡胶材料自面世以来,国内外许多学者对其本构关系进行了大量的实验及理论研究^[6-13].俄罗斯萨玛拉国立航空航天大学的学者们对金属橡胶材料的刚度特性做了系统的研究,并根据实验结果建立了金属橡胶材料的非线性本构关系式^[14].国内北京航空航天大学的陈艳秋等人以小曲梁模型为基础建立了金属橡胶材料的非线性本构关系^[15].彭威等人^[16]通过弹簧微元模型建立了金属橡胶材料的非线性本构关系方程.曹凤利等人基于变长度曲梁的细观结构和单元接触作用模型,建立了金属橡胶恢复力的迟滞模型^[17].金属丝网橡胶材料与以往金属橡胶材料加工工艺存在巨大差异,制作工艺的差异性造成其理论模型的适用性不同,因此,以往学者提出的金属橡胶材料的非线性本构关系不能适用于金属丝网橡胶材料,并且影响金属丝网橡胶材料力学特性的相关参数也与以往金属橡胶材料不完全相同,例如网格的大小、网宽及网格密度等参数,因此需要根据金属丝网橡胶材料的特点重新建立其本构关系式.

本文以圆环嵌套模型为基础,通过对圆环形金属丝网橡胶成型制造过程的分析,结合干摩擦非线性理论及小曲梁模型,建立了金属丝网橡胶材料的非线性本构关系,通过实验数据对所建立的本构关系方程进行数据拟合,得到该材料的非线性本构关系式,并将理论结果与实验结果进行对比分析.

1 金属丝网橡胶本构关系的建立

1.1 圆环嵌套模型

金属丝网橡胶在制作过程中,存在毛坯铺设和卷绕成型过程,先由金属丝网编织机将金属丝编织成金属丝网,制成二维毛坯,再将金属丝网进行相关纹路压制处理后卷绕成三维毛坯,金属丝网橡胶的卷绕过程如图 1 所示.

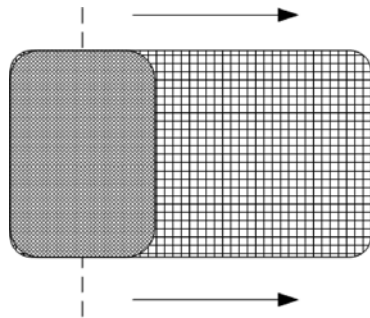


图 1 金属丝网橡胶毛坯卷绕示意图

Fig. 1 Blank winding of metal-net rubber

此时金属丝网橡胶可以近似看作是多个同心圆的嵌套组合,因此,圆环嵌套模型适合金属丝网橡胶材料的本构关系研究;同时,金属丝网橡胶材料是一种阻尼耗能材料,具有明显的非线性特性,在本构关系的研究中其非线性部分不可忽略.基于前人的研究成果并结合金属丝网橡胶材料的加工成型特点,建立金属丝网橡胶的本构关系,为了简化分析过程并运用数学工具,对所研究的金属丝网橡胶做以下几个基本假设:

- 1) 网格的形状是规则的正方形;
- 2) 金属丝网橡胶在径向上匀质的,即网格在径向上是均匀分布的;
- 3) 不计材料在静态加载时金属丝的轴向变形和扭转变形;
- 4) 金属丝网橡胶在单轴压缩方向上其变形是连续可叠加的.

在以上 4 个基本假设的基础上形成圆环嵌套模型,如图 2 所示.

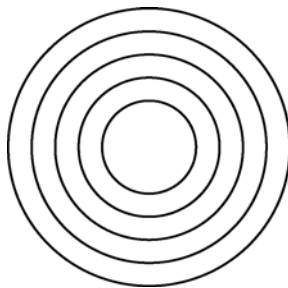


图 2 圆环嵌套模型

Fig. 2 Ring nesting model

设卷绕方向上,单位长度上有 b 个网格,则网格的长度为 $1/b$,毛坯高度方向有 a 个网格.将金属丝网橡胶均匀地分开,每个单元等于一个网格及其周围所占空隙的相加,如图 3 所示.

由此得到金属丝网橡胶毛坯的相对密度为

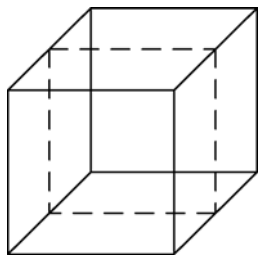


图3 矩形单元示意图

Fig. 3 Schematic diagram of rectangular unit

$$\bar{\rho}_m = \frac{4 \times \frac{\pi d_s^2}{4} \times \frac{1}{b}}{\left(\frac{1}{b}\right)^3} = \pi d_s^2 b^2 \quad (1)$$

式中 d_s 为金属丝的直径, $\bar{\rho}_m$ 为毛坯相对密度。

假设一扇形微元, 尺寸如图4所示, 其体积等于矩形单元的体积, 扇形微元的面积等于 $r d\theta dr + d\theta (dr)^2 / 2$, 其中 r 为扇形半径, θ 为扇形角度。不计高阶项, 则扇形微元的面积等于 $r d\theta dr$, 毛坯的相对密度等于

$$\bar{\rho}_m = \frac{4 \times \frac{\pi d_s^2}{4} \times \frac{1}{b}}{r d\theta dr \times \frac{1}{b}} = \frac{\pi d_s^2}{r d\theta dr} \quad (2)$$

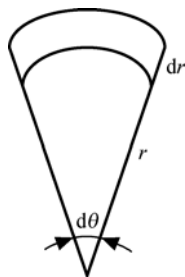


图4 扇形单元示意图

Fig. 4 Schematic diagram of fan unit

假设网格的载荷与变形量之间为线性关系

$$P_1 = k_1 \Delta \quad (3)$$

式中 k_1 为单个网格的刚度, Δ 为单个网格的变形量, P_1 为单个网格所受的载荷。

将式(2)代入式(3)得到单个网格的载荷

$$P_1 = \frac{\bar{\rho}_m k_1 \Delta}{\pi d_s^2} r d\theta dr \quad (4)$$

则1层金属丝网形成的圆环

$$P' = \frac{\bar{\rho}_m k_1 \Delta}{\pi d_s^2} \int_{r_m}^{R_m} \int_0^{2\pi} r d\theta dr = \frac{\bar{\rho}_m}{d_s^2} (R_m^2 - r_m^2) k_1 \Delta' \quad (5)$$

其中 P' 为单层金属丝网所受的载荷, Δ' 为单层金属丝网的变形量, R_m 为金属丝网橡胶毛坯的外半

径, r_m 为金属丝网橡胶毛坯的内半径。

则 i 层圆环金属丝网串联得到毛坯的本构关系

$$P'' = \frac{\bar{\rho}_m}{d_s^2 i} (R_m^2 - r_m^2) k_1 \Delta'' \quad (6)$$

其中 P'' 为金属丝网橡胶毛坯所受的载荷, Δ'' 为金属丝网橡胶毛坯的变形量。

对于三向成型的材料, 若3个方向的压缩比相同, 则毛坯的性能基本能反应成型后材料的性能。但是金属丝网橡胶毛坯在压缩过程中, 径向的压缩变形量不大, 可以忽略, 考虑高度方向上的压缩, 轴向压缩比为 h_2/l , 则压缩成型后金属丝网橡胶的力-位移关系为

$$F = \frac{\frac{\bar{\rho}_m}{d_s^2 i} (R_m^2 - r_m^2) k_1 \delta}{\left(\frac{h_2}{l}\right)^2} = \left(\frac{l}{h_2}\right)^2 \frac{\bar{\rho}_m}{d_s^2 i} (R_m^2 - r_m^2) k_1 \delta \quad (7)$$

式中 F 为金属丝网橡胶成型后所受的载荷, δ 为金属丝网橡胶成型后的压缩位移变形量, h_2 为金属丝网橡胶成型后的高度, l 为金属丝网橡胶毛坯的高度。

由于金属丝网橡胶毛坯的质量等于成型后的材料质量, 得到

$$\bar{\rho}_m l (R_m^2 - r_m^2) = \bar{\rho}_2 h_2 (R_2^2 - r_2^2) \quad (8)$$

即

$$\bar{\rho}_m (R_m^2 - r_m^2) = \frac{\bar{\rho}_2 h_2 (R_2^2 - r_2^2)}{l} \quad (9)$$

式中 $\bar{\rho}_2$ 为金属丝网橡胶成型后的相对密度, R_2 为金属丝网橡胶成型后的外半径, r_2 为金属丝网橡胶成型后的内半径。

将式(9)代入式(7), 得到

$$F = \left(\frac{l}{h_2}\right)^2 \frac{k_1 \delta}{d_s^2 i} \cdot \frac{\bar{\rho}_2 h_2 (R_2^2 - r_2^2)}{l} = \frac{l}{h_2} \cdot \frac{\bar{\rho}_2 (R_2^2 - r_2^2)}{d_s^2 i} k_1 \delta = \frac{l}{h_2} \cdot \frac{\bar{\rho}_2 (D_2^2 - d_2^2)}{4 d_s^2 i} k_1 \delta \quad (10)$$

其中 D_2 为金属丝网橡胶成型后的外径, d_2 为金属丝网橡胶成型后的内径。

1.2 网格刚度计算

图5为小曲梁模型。在载荷作用下, 金属丝网存在弯曲、剪切、扭转3种变形方式, 由于金属丝网的特点, 剪切与扭转几乎可以忽略, 因此, 在计

算变形能时,主要考虑弯曲变形能。

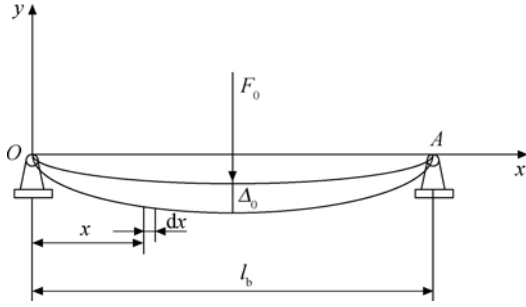


图 5 小曲梁模型

Fig. 5 Small curving beam model

根据虚功原理,小曲梁的变形能 U 等于外力对它所作的功 W ,即

$$U = W \quad (11)$$

$$W = \frac{1}{2} F_0 \Delta_0 \quad (12)$$

$$U = \int_0^{l_b} \frac{M^2(x)}{2E_0 I} dx = \frac{1}{2E_0 I} \int_0^{l_b} M^2(x) dx = \frac{F_0^2 l_b^3}{64 E_0 I} \quad (13)$$

式中 M 为转动惯量, E_0 为金属丝的弹性模量, F_0 为外力, Δ_0 为外力作用下的变形, l_b 为小曲梁梁长, I 为金属丝惯性矩。

金属丝惯性矩

$$I = \frac{\pi d_s^4}{64} \quad (14)$$

代入上式得到

$$F_0 = \frac{\pi d_s^4 E_0}{2 l_b^3} \Delta_0 \quad (15)$$

当 $l_b = 1/b$ 时,则小曲梁刚度

$$k_b = \frac{F_0}{\Delta_0} = \frac{\pi E_0 d_s^4}{2 l_b^3} = \frac{\pi E_0 d_s^4 b^3}{2} \quad (16)$$

1.3 考虑非线性因素

金属橡胶的刚度呈现非线性特性,其中对使用性能影响较大的是 5 次非线性。在静态压缩实验过程中,压缩量增加,构建的高度减小,相对密度增加,从而金属丝网橡胶的刚度不断增大。而压缩面积近似不变。因此可以假设压缩过程中承载面积 S 保持不变,在初始时刻

$$\bar{\rho}_2 = \frac{\rho_2}{\rho_s} = \frac{m_2}{\rho_s S h_2} \quad (17)$$

式中 ρ_s 为制作金属丝网橡胶的金属丝密度, m_2 为金属丝网橡胶的质量。

在压缩过程中

$$\bar{\rho} = \frac{\rho}{\rho_s} = \frac{m_2}{\rho_s S (h_2 - \delta)} = \frac{\bar{\rho}_2 h_2}{h_2 - \delta} \quad (18)$$

式中 $\bar{\rho}$ 为金属丝网橡胶试件在压缩实验过程中的实时相对密度。

将式(18)代入式(10)得到

$$F = \bar{\rho} \frac{h_2 (D_2^2 - d_2^2)}{4 h_2 d_s^2 a} k_1 \delta = \frac{h_2}{h_2 - \delta} \cdot \frac{\bar{\rho}_2 h_2 (D_2^2 - d_2^2)}{4 h_2 d_s^2 a} k_1 \delta \quad (19)$$

应用泰勒展开,取前 5 项

$$F = \bar{\rho} \frac{h_2 (D_2^2 - d_2^2)}{4 h_2 d_s^2 a} k_1 \delta = \frac{\bar{\rho}_2 h_2 (D_2^2 - d_2^2)}{4 h_2 d_s^2 a} k_1 \delta \cdot \left[1 + \frac{\delta}{h_2} + \left(\frac{\delta}{h_2} \right)^2 + \left(\frac{\delta}{h_2} \right)^3 + \left(\frac{\delta}{h_2} \right)^4 \right] = \frac{\bar{\rho}_2 h_2 (D_2^2 - d_2^2) k_1}{4 h_2 d_s^2 a} \cdot \left(\delta + \frac{1}{h_2} \delta^2 + \frac{1}{h_2^2} \delta^3 + \frac{1}{h_2^3} \delta^4 + \frac{1}{h_2^4} \delta^5 \right) \quad (20)$$

加入修正系数,得到加载过程下金属丝网橡胶的非线性本构方程为

$$F = \frac{\bar{\rho}_2 h_2 (D_2^2 - d_2^2) k_1}{4 h_2 d_s^2 a} \cdot \left(A_1 \delta + A_2 \frac{1}{h_2} \delta^2 + A_3 \frac{1}{h_2^2} \delta^3 + A_4 \frac{1}{h_2^3} \delta^4 + A_5 \frac{1}{h_2^4} \delta^5 \right) \quad (21)$$

式中 A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 为拟合参数,同理可得卸载过程下金属丝网橡胶的非线性本构方程为

$$F = \frac{\bar{\rho}_2 h_2 (D_2^2 - d_2^2) k_1}{4 h_2 d_s^2 a} \cdot \left(B_1 \delta + B_2 \frac{1}{h_2} \delta^2 + B_3 \frac{1}{h_2^2} \delta^3 + B_4 \frac{1}{h_2^3} \delta^4 + B_5 \frac{1}{h_2^4} \delta^5 \right) \quad (22)$$

将 $k = \pi E_0 d_s^4 / (2 l_b^3) = \pi E_0 d_s^4 b^3 / 2$ 代入上式,即得金属丝网橡胶加载过程非线性力-位移关系式为

$$F = \frac{\pi E_0 \bar{\rho}_2 d_s^2 b^3 h_2 (D_2^2 - d_2^2)}{8 h_2 a} \cdot \left(A_1 \delta + A_2 \frac{1}{h_2} \delta^2 + A_3 \frac{1}{h_2^2} \delta^3 + A_4 \frac{1}{h_2^3} \delta^4 + A_5 \frac{1}{h_2^4} \delta^5 \right) \quad (23)$$

同理,金属丝网橡胶卸载过程非线性力-位移关系式为

$$F = \frac{\pi E_0 \bar{\rho}_2 d_s^2 b^3 h_2 (D_2^2 - d_2^2)}{8 h_2 a} \cdot$$

$$\left[B_1 \delta + B_2 \frac{1}{h_2} \delta^2 + B_3 \frac{1}{h_2^2} \delta^3 + B_4 \frac{1}{h_2^3} \delta^4 + B_5 \frac{1}{h_2^4} \delta^5 \right] \quad (24)$$

在压缩过程中承载面积 S 基本不变,则应力 σ

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (25)$$

应变 ϵ

$$\epsilon = \frac{\delta}{h_2} \quad (26)$$

代入式(23)和式(24)得到金属丝网橡胶本构关系

加载过程

$$\sigma = \frac{E_0 \bar{\rho}_2 d_s^2 b^3 h_2}{2 a} \cdot \quad (27)$$

$$(A_1 \epsilon + A_2 \epsilon^2 + A_3 \epsilon^3 + A_4 \epsilon^4 + A_5 \epsilon^5)$$

卸载过程

$$\sigma = \frac{E_0 \bar{\rho}_2 d_s^2 b^3 h_2}{2 a} \cdot \quad (28)$$

$$(B_1 \epsilon + B_2 \epsilon^2 + B_3 \epsilon^3 + B_4 \epsilon^4 + B_5 \epsilon^5)$$

2 计算结果与实验结果比较

本文实验所用的金属橡胶采用统一的编织方式和制造方法,即 a, b 和 h_2 为定值,将它们与非线性项的系数相结合得到新的关系式。

加载情况下

$$\sigma = \frac{E_0 \bar{\rho}_2 d_s^2}{2} \cdot (A_1 \epsilon + A_2 \epsilon^2 + A_3 \epsilon^3 + A_4 \epsilon^4 + A_5 \epsilon^5) \quad (29)$$

卸载情况下

$$\sigma = \frac{E_0 \bar{\rho}_2 d_s^2}{2} (B_1 \epsilon + B_2 \epsilon^2 + B_3 \epsilon^3 + B_4 \epsilon^4 + B_5 \epsilon^5) \quad (30)$$

式(29)和式(30)为当制造工艺完全一致时金属丝网橡胶的非线性本构关系,其中各项系数由金属丝网橡胶试件的大量实验确定。

本文对相对密度 $\bar{\rho}_2 = 0.15, 0.18, 0.20$ 和 0.25 的圆环形金属丝网橡胶试件进行静力压缩实验,压缩量为 20% ,试件如图6所示,通过实验数据对静态压缩本构方程进行系数确定,其中,试件的外径 $D_2 = 40$ mm,内径 $d_2 = 11.8$ mm,高度 $h_2 = 20$ mm, $d_s = 0.2$ mm,金属丝弹性模量 $E_0 = 198$ GPa,运用最小二乘法对实验数据进行多项式拟合,确定金属丝网橡胶本构方程中的各项系数并求得平均值。



图6 圆环形金属丝网橡胶

Fig. 6 Circular metal-net rubber

如表1和表2所示分别为不同相对密度的金属丝网橡胶试件加载和卸载各项系数平均值,由图7可以看出,理论拟合曲线与实验曲线具有很好的重合性,所建立的本构关系式能够很好地描述金属丝网橡胶单向受压状态下的非线性力学特性和迟滞特性。在较低相对密度,理论拟合曲线与实验曲线具有极好的重合性,随着相对密度的增加,理论拟合曲线出现轻微波动,重合性降低,这是由于随着相对密度的增加,金属丝网橡胶的非线性特性逐渐增强所导致的。同时,通过比较表1和表2中的加载和卸载各项系数,可以看出,随着应变的次方增加,其相应的系数成指数增大,这是由于应变本身为小于1的小数,随着次方增加其值呈指数降低造成的;且卸载各项系数的绝对值均大于所对应的加载各项系数的绝对值,这是由于金属丝网橡胶材料的滞后特性造成的,加载时由于干摩擦力损耗能量而导致金属丝网橡胶弹性势能降低,从而卸载曲线滞后于加载曲线,并且卸载曲线所围成的面积即是干摩擦力损耗的能量。

表1 圆环形金属丝网橡胶非线性本构关系加载各项系数表

Table 1 Loading coefficients of nonlinear constitutive relation of circular metal-net rubber

相对密度	$A_1/10^{-3}$	A_2	A_3	A_4	A_5
0.15	1.027	-7.550×10^{-3}	0.256	-2.096	8.077
0.18	0.367	2.525×10^{-2}	0.100	-3.676	25.698
0.20	7.706	-0.276	5.111	-38.012	114.268
0.25	-53.68	2.143	-29.572	161.377	-237.736

表 2 圆环形金属丝网橡胶非线性本构关系卸载各项系数表

Table 2 Unloading coefficients of nonlinear constitutive relation of circular metal-net rubber

相对密度	$B_1/10^{-2}$	B_2	B_3	B_4	B_5
0.15	0.294	-0.118	2.012	-13.821	34.663
0.18	2.021	-0.838	13.375	-88.811	213.347
0.20	5.133	-2.139	33.347	-215.156	496.940
0.25	13.9	-5.887	93.824	-625.288	1487.823

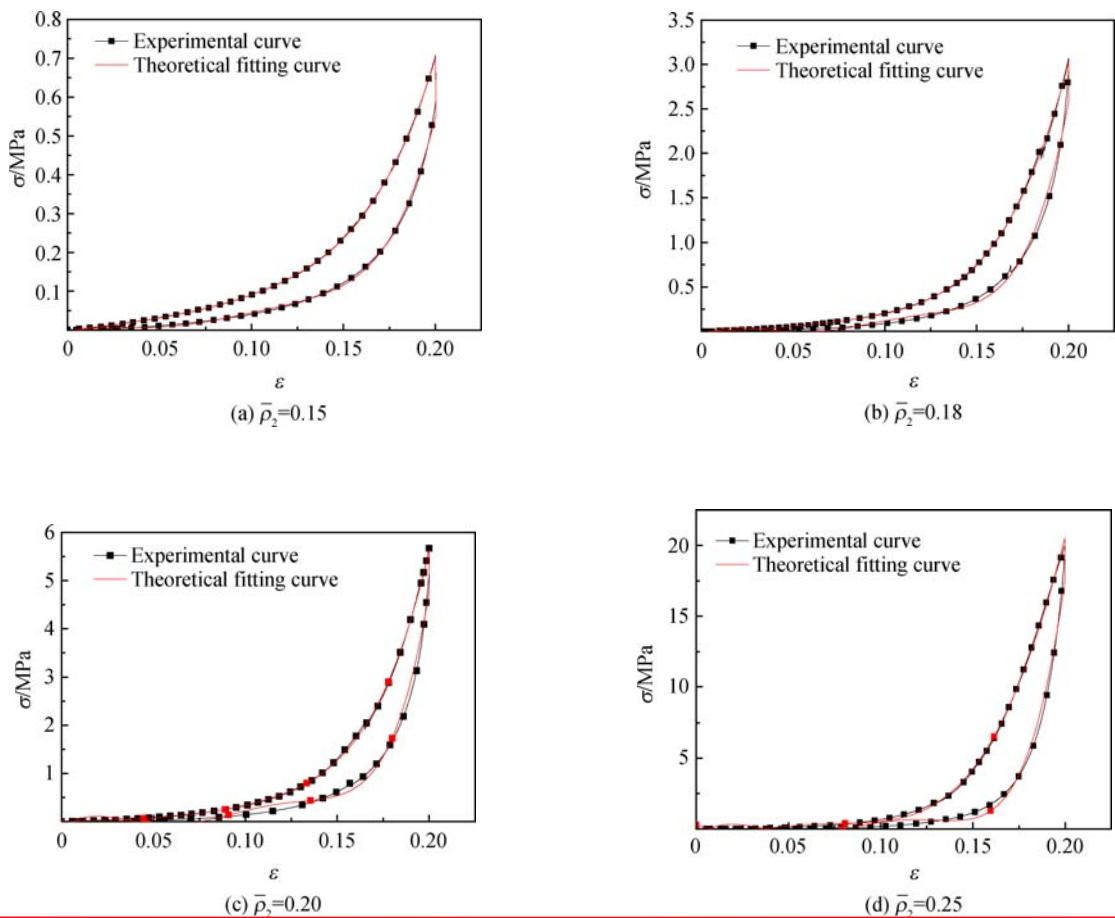


图 7 金属丝网橡胶曲线拟合

Fig.7 Curve fitting of metal-net rubber

3 结 论

本文以圆环嵌套模型为基础,以干摩擦非线性理论为依据,结合小曲梁模型建立了金属丝网橡胶材料的非线性本构关系式,并利用实验数据对所建立的金属丝网橡胶本构方程进行数据拟合,确定了各项拟合系数,得到的理论拟合曲线和实验曲线具有较好的重合性,所建立的本构关系式能够很好地描述金属丝网橡胶的非线性力学特性.此外,所建立的金属丝网橡胶本构关系式还能够很好地反映金属丝网橡胶材料相对密度、金属

丝材质、网格大小及网宽等各相关参数对其非线性力学性能的影响,从而实现了材料结构刚度的预估,为材料的快速制作和设计提供了理论依据,对于金属丝网橡胶材料的工程实际应用具有重要指导意义.

参考文献:

[1] 李玉龙,何忠波,白鸿柏,等.金属橡胶的研究及应用进展[J].兵器材料科学与工程,2011,34(1):103-108.
LI Yulong, HE Zhongbo, BAI Hongbai, et al. Advances in research and application of metal rubber[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2011, 34(1): 103-108. (in

- Chinese)
- [2] MA Yanhong, LIANG Zhichao, WANG Hong, et al. Theoretical and experimental steady-state rotordynamics of an adaptive air film damper with metal rubber[J]. Journal of Sound and Vibration, 2013, 332(22): 5710-5726.
- [3] 董秀萍, 张力. 新型材料金属橡胶建模及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [4] XIA Hongyu, JIANG Hongyuan, WU Guoqi, et al. Research on the sound absorption performance of metal rubber material[J]. Chinese Journal of Acoustics, 2009, 28(2): 154-162.
- [5] YAN Hui, ZHANG Wenjing, JIANG Hongyuan, et al. Energy dissipation of a ring-like metal rubber isolator[J]. Chinese Physics B, 2014, 23(4): 202-205.
- [6] 马艳红, 郭宝亭, 朱梓根. 金属橡胶材料静态特性的研究[J]. 航空动力学报, 2004, 19(3): 326-331.
- MA Yanhong, GUO Baoting, ZHU Zigen. Static characteristics of metal-rubber[J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(3): 326-331. (in Chinese)
- [7] 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(1/2): 207-226.
- [8] ZHANG Dayi, MA Yanhong, HONG Jie, et al. Dynamic mechanical behavior of nickel-based superalloy metal rubber[J]. Materials and Design, 2014, 56(4): 69-77.
- [9] 李雨蕾. 金属橡胶减振及密封构件的设计与应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
- LI Yulei. Design and application on damping and seal member of metal rubber[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013. (in Chinese)
- [10] 李韶华, 杨绍普. 滞回非线性模型的研究进展[J]. 动力学与控制学报, 2006, 4(1): 8-15.
- LI Shaohua, YANG Shaopu. Research status of hysteretic nonlinear modles[J]. Journal of Dynamics and Control, 2006, 4(1): 8-15. (in Chinese)
- [11] 梅小龙, 赵俊生, 张保成, 等. 压缩长度对金属橡胶减振器刚度的影响[J]. 噪声与振动控制, 2013(1): 204-207.
- MEI Xiaolong, ZHAO Junsheng, ZHANG Baocheng, et al. Effect of compressed length on the stiffness of metal rubber vibration absorber[J]. Noise and Vibration Control, 2013(1): 204-207. (in Chinese)
- [12] 郭宝亭, 朱梓根, 崔荣繁, 等. 金属橡胶材料的理论模型研究[J]. 航空动力学报, 2004, 19(3): 314-319.
- GOU Baoting, ZHU Zigen, CUI Rongfan, et al. Theoretical model of metal-rubber[J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(3): 314-319. (in Chinese)
- [13] 马艳红, 全小龙, 朱彬, 等. 金属橡胶热物理性能理论与试验研究[J]. 物理学报, 2013, 62(4): 048101. 1-048101. 10.
- MA Yanhong, TONG Xiaolong, ZHU Bin, et al. Theoretical and experimental investigation on thermophysical properties of metal rubber[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(4): 048101. 1-048101. 10. (in Chinese)
- [14] 切戈达耶夫. 金属橡胶构件的设计[M]. 李中鄂, 译. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [15] 陈艳秋, 郭宝亭, 朱梓根. 金属橡胶减震垫刚度特性及本构关系研究[J]. 航空动力学报, 2002, 17(4): 416-420.
- CHEN Yanqiu, GUO Baoting, ZHU Zigen. The investigation of the stiffness characteristics and the stress-strain relation of metal rubber[J]. Journal of Aerospace Power, 2002, 17(4): 416-420. (in Chinese)
- [16] 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 microsprings[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2005, 20(3): 455-462. (in Chinese)
- [17] 曹凤利, 白鸿柏, 任国全, 等. 金属橡胶恢复力的迟滞模型研究[J]. 中国机械工程, 2014, 25(3): 311-314.
- CAO Fengli, BAI Hongbai, REN Guoquan, et al. Research on hysteresis model of restoring force of metal rubber[J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(3): 311-314. (in Chinese)

(编辑: 陈 越)