

文章编号: 1000-8055 (2004) 03-0326-06

金属橡胶材料静态特性的研究

马艳红, 郭宝亭, 朱梓根

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083)

摘要: 金属橡胶材料是一种新型阻尼材料, 且影响其特性的参数有很多。本文从其本构关系出发, 通过改变不同的影响参数, 针对不同形状、不同几何尺寸的构件, 进行了理论分析和试验研究, 总结出了影响其特性的参数及其变化规律, 为进一步地设计和更好地应用金属橡胶构件提供有意义的依据。

关键词: 航空、航天推进系统; 金属橡胶; 非线性; 各向异性; 成型受压面; 成型非受压面

中图分类号: V231.9

文献标识码: A

Static Characteristics of Metal-Rubber

MA Yan-hong, GUO Bao-ting, ZHU Zi-gen

(School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics,
Beijing 100083, China)

Abstract: Metal-Rubber (MR) is a new damping material, and its characteristics are affected by many parameters. In the paper, based on constitutive relations of MR, theoretical analysis and experimental approaches are presented to study the effects of various MR parameters, such as shape, and size on the characteristics of MR. Some general variation patterns of characteristics of MR were found, which were helpful for better designing and make use of the MR.

Key words: aerospace propulsion system; Metal-Rubber (MR); non-linear; anisotropy; forming pressing-surface; forming nonpressing-surface

1 金属橡胶材料的理论计算

金属橡胶材料是一种高度非线性的各向异性材料。由于其制作工艺的特点, 在其成型受压面和成型非受压面上, 表现出不同的弹性性能, 即工艺弹性正交各向异性。

1.1 金属橡胶材料弹性的预测

在单元体中, 假定金属橡胶材料均匀、均质、正交各向异性。在确定的制作工艺状态下, 从金属橡胶材料的弹性和成型状态出发, 分析单元体中

金属橡胶各个弹性参数的关系。

由于金属橡胶材料制作工艺的特点, 在其成型受压面和成型非受压面上, 表现出不同的弹性性能。因此, 金属橡胶材料有4个独立的弹性参数: E_1 , E_2 , μ_{12} 和 μ_{21} (这里暂不考虑剪切的影响), 对于单元体而言, 它们是均匀、均质意义下的弹性参数, 也就是工程中实用的弹性参数。

公式 (1) 和 (2) 为载荷与变形的关系; 公式 (3) 和 (4) 为应力与应变的关系^[1,2]。

收稿日期: 2003-07-08; 修订日期: 2003-04-11

作者简介: 马艳红 (1975-), 女, 辽宁铁岭人, 北京航空航天大学能源与动力工程学院博士, 主要从事金属橡胶应用技术和结构强度振动研究。

$$P_1 = 7 \times 10^{-5} \times \frac{n}{m} \bar{k} \cdot \frac{2.252 + S_2 \Delta_1}{(2.252 + S_2 \Delta_1)(0.2693 - S_2 |\Delta_1|)^3 + 2.1142 \times S_2 \Delta_1} \Delta_1 \quad (1)$$

$$P_2 = 4.52 \times 10^{-4} \times \frac{n}{m} \bar{k} \cdot \frac{9.3 \times 10^{-3} + (S_2 \Delta_2)^2}{[9.3 \times 10^{-3} + (S_2 \Delta_2)^2](0.2545 - S_2 |\Delta_2|)^3 + 0.0591 \times (S_2 \Delta_2)^2} \Delta_2 \quad (2)$$

$$\sigma_1 = 7 \times 10^{-5} \times \frac{n}{m} \frac{\bar{k}}{U_L} \cdot \frac{0.0874 + S_1 \epsilon_1}{(0.0874 + S_1 \epsilon_1)(0.0183 - S_1 |\epsilon_1|)^3 + 5 \times 10^{-4} \times S_1 \epsilon_1} \epsilon_1 \quad (3)$$

$$\sigma_2 = 0.001 \times \frac{n}{m} \frac{\bar{k}}{U_L} \cdot \frac{1 \times 10^{-4} + (S_1 \epsilon)^2}{[1 \times 10^{-4} + (S_1 \epsilon)^2](0.1171 - S_1 |\epsilon|)^3 + 3.2 \times 10^{-4} \times (S_1 \epsilon)^2} \epsilon \quad (4)$$

其中: $S_1 = UL/mcds$, 无量纲; $S_2 = 1/mcds$, 量纲为长度单位。

也可以将上述4个式子分为两部分, 即:

$$P = F_1(m, n, \bar{k}) \cdot F_2(\Delta)$$

$$\sigma = F_1(m, n, \bar{k}) \cdot F_2(\epsilon)$$

其中: $F_1(m, n, \bar{k})$ 为主要描述性能特性的物理函数, 而 F_2 为主要描述特性曲线的形状函数。

曲线。需要说明的是, 这里只考虑压缩变形特性, 因此, 如无特别说明其变形特性曲线均在第一象限描述。

由图中所示可见, 金属橡胶材料是非线性材料。其刚度特性, 在变形量较小时, 应力应变近似为线性关系。随着变形量的增加, 刚度特性呈现一段软特性, 之后则表现为较强的硬特性。

1.2 金属橡胶材料性能参数的影响作用

从上述理论模型分析中可以看出, 影响金属橡胶材料性能的参数很多, 可设计的参数有丝材、丝径、螺旋径、金属丝密度、金属橡胶材料密度、初始螺旋角; 可设计和调节控制的参数有相对密度、螺旋角的变化等。假设金属橡胶的参数为: 材料 1Cr18Ni9Ti、丝径 d_s 为 0.1 mm、螺旋径 D_1 为 1.1 mm、金属橡胶材料的相对密度 p 为 0.22, 金属丝材料的密度 ρ_s 为 7.8 g/cm³。当保持其它参数不变, 只改变其中一个参数时, 可以得到这个参数对金属橡胶材料应力—应变特性的影响。图2为分别改变丝材、丝径、螺旋径以及相对密度对金属橡胶材料应力—应变特性的影响。

从上面的图中可以看出, 金属橡胶材料, 无论是在成型受压面上加载, 还是在成型非受压面上加载, 都同时存在着各向异性, 且各个参数对金属橡胶材料性能的影响规律是相同的。因此, 这里只要分析其中一种成型面上加载的情况就可以了。图2表明: 随着金属丝径的增加, 非线性弹性模量也增加, 以线性段和硬特性段增加的较多, 随着金属丝径的增加, 其硬特性特征越明显; 随着螺旋径的增加, 非线性弹性模量降低, 以线性段和硬特性段降低的较多, 螺旋径越小, 硬特性特征越明显; 金属丝的材质对金属橡胶材料性能的影响也很

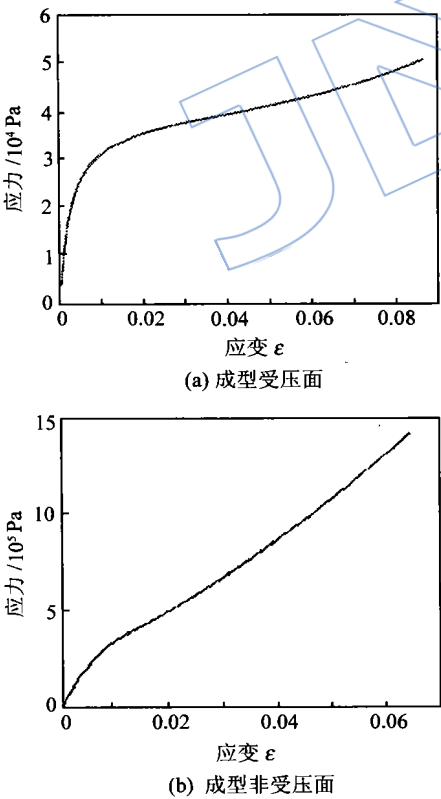


图1 金属橡胶材料应力与应变的关系
Fig.1 Stress-strain relation of MR

图1所示为金属橡胶材料应力与应变的关系

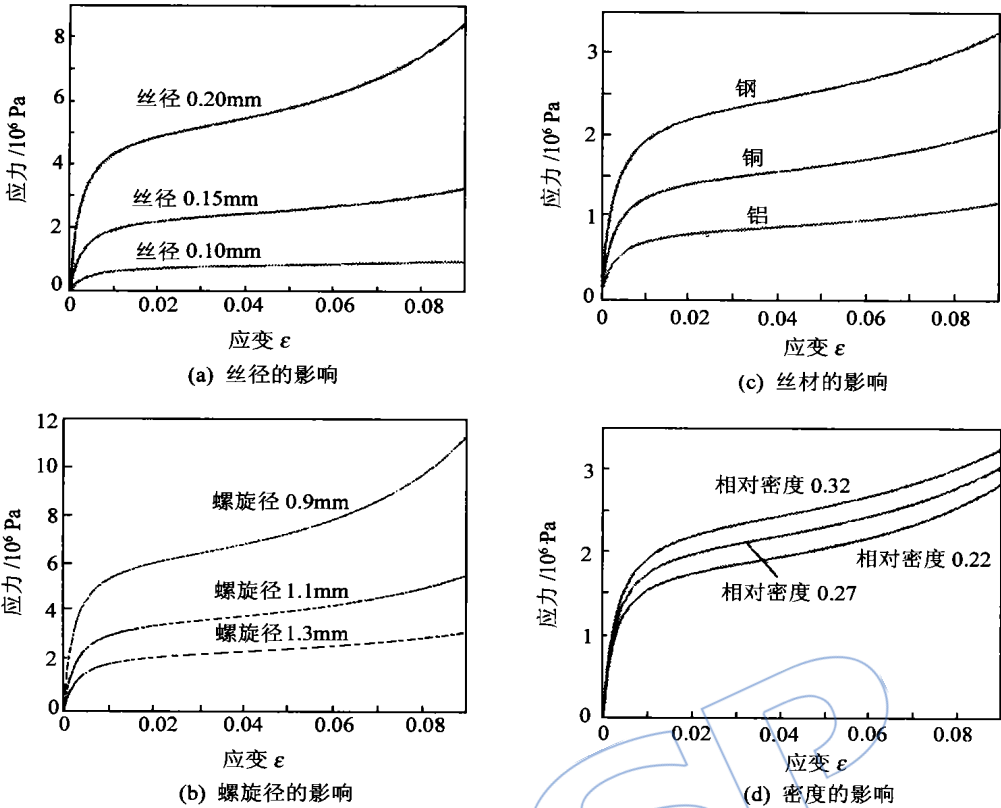


图2 成型受压面
Fig.2 Forming pressing-surface

大,丝材越硬、刚度越高、丝材本身的弹性模量越高,从而金属橡胶材料的非线性弹性模量越高,硬特性特征也越明显,金属橡胶材料的非线性弹性模量以线性段和硬特性段的变化较大;而金属橡胶材料相对密度的增加,非线性弹性模量也增加,这个变化量主要来自于线性段和软特性段^[3],也就是说金属橡胶材料在受载荷作用后,这个变化量主要发生在挤压阶段前,而进入挤压阶段后,非线性弹性模量的增加不明显,硬特性特征也没有明显的改变。

2 金属橡胶材料特性试验

对金属橡胶材料不同的影响参数、不同的形状、不同的几何尺寸,以及不同的加载方式进行试验研究^[4]。

2.1 材料特性试验方法及设备

试验是在疲劳试验机上完成的。试验设备由控制用微机、MTS-407/ Controller、CSS-280疲劳机(带有压力和位移传感器)等组成。图3为金属橡胶材料的部分试验件。

表1 长方体型金属橡胶参数
Table 1 MR parameter of cuboid

试件号	尺寸/cm(长×宽×高)	质量/g	体积/mm ³	相对密度 $p= \rho_{MR}/\rho_s$
16	0.7×1.7×2.3	6.83	2.737	0.32
20	0.7×1.7×1.7	5.05	2.023	0.32
21	0.7×1.7×0.7	1.17	0.833	0.18
22	0.7×1.7×0.7	1.53	0.833	0.236
23	0.7×1.7×0.7	1.77	0.833	0.273
24	0.7×1.7×0.7	2.08	0.833	0.32

表2 垫片式金属橡胶参数
Table 2 MR parameter of gasket

试件号	材 料	尺寸/mm(长×宽×厚)	质量/g	密度/(g/cm ³)	丝径/mm	螺旋径/mm
Dp1	1Cr18Ni9Ti(冷)	17×14×2.2	1.309	2.5	0.1	1.1
Dp2	1Cr18Ni9Ti(冷)	17×14×2.2	1.047	2.0	0.1	1.1
Dp3	1Cr18Ni9Ti(冷)	17×14×3.0	1.428	2.0	0.1	1.1

以上所用试件为受压型,其材料特性试验,也是在压缩载荷作用下完成的。



图3 金属橡胶试验件
Fig.3 MR Test Part

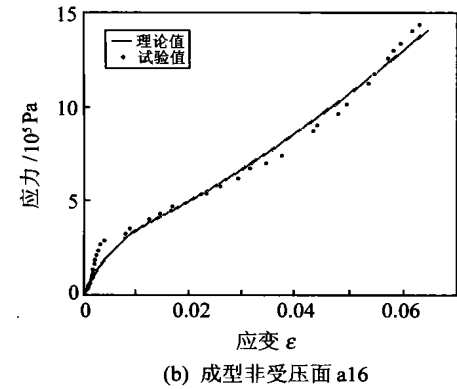
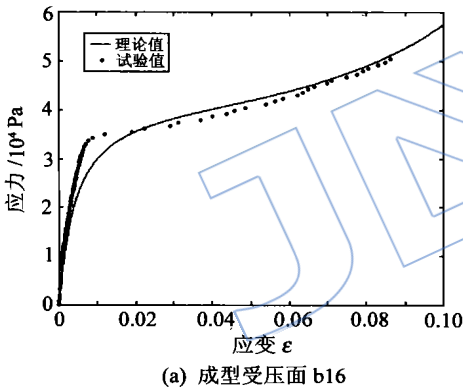


图4 16号试件不同受压面上加载时的应力与应变的关系

Fig.4 Stress-strain relation of test part 16 on different pressing-surface when load

所用金属橡胶材料试验件见表1和表2。表中

数据: 质量/g; 长度/mm。其中: 表1为长方体型金属橡胶, 材料 GH4169; 丝径 $D_s=0.15\text{ mm}$; 螺旋径 $D_i=1.2\text{ mm}$ 。表2为垫片式长方体型金属橡胶, 材料1Cr18Ni9Ti; 其它参数见表中所示。

2.2 材料特性试验结果

前面从金属橡胶材料的本构关系出发, 分析了构成该材料的各个参数对其性能特性的影响。并总结出了各个参数对金属橡胶材料特性的影响规律。下面通过改变不同的物理参数、以及不同形状的金属橡胶材料来进行试验, 并与理论结果作一对比。

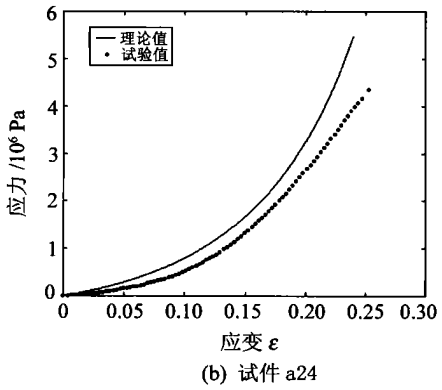
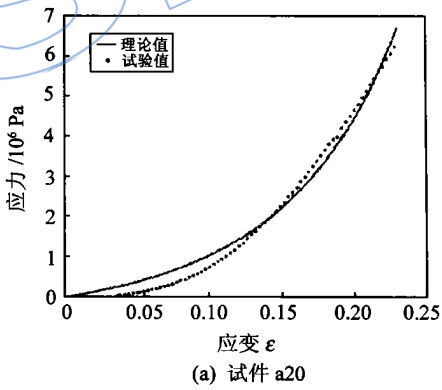


图5 金属橡胶材料长方体试件的应力与应变的关系

Fig.5 Stress-strain relation of MR of cuboid

图4为长方体试件分别在成型受压面 (b16)、成型非受压面 (a16) 上施加载荷时的应力应变关系 (其中符号 a: 表示在成型非受压面上施加载荷; 符号 b: 表示在成型受压面上施加载荷, 以下同)。图5中 a20、a24均为长方体成型非受压面受载的应力应变关系。且试件 a16、a20、a24具有相同的相对密度。其外形尺寸中的高度依次降低, 其余外形尺寸相同。对于成型非受压面来说, 其受载面积依次减小。从图中可以看出, 受载面积较大的, 其试验值与理论值吻合得很好。而受载面积小的, 其试验值与理论值的误差较大。且面积愈小,

理论值愈偏高。因此, 这里的微小单元体与丝径、螺旋径相比不能太小, 否则将无法满材料力学中的“连续性、均匀性假设”。

图6为长方体试件成型非受压面上施加载荷时的应力应变关系。试件 a21, a22和 a23和图5中的试件 a24具有相同的外形尺寸, 而它们的相对密度依次增大。从图中可以看出, 随着相对密度的依次增大, 其试验值与理论值的误差也依次增大。这进一步说明了微小单元体“均匀性假设”的重要性。从金属橡胶材料的制做工艺过程中可以看出, 在相同体积的情况下, 密度愈大, 均匀性越

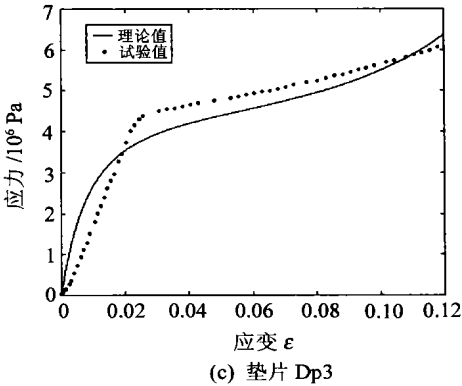
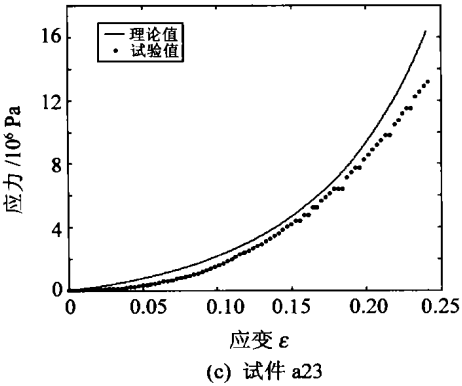
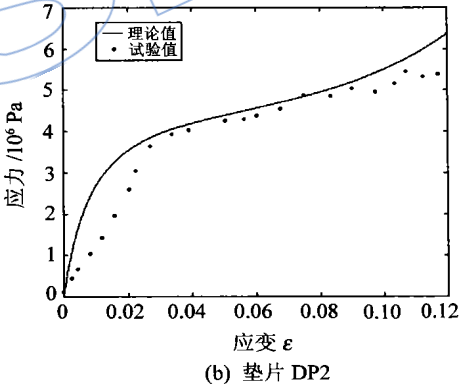
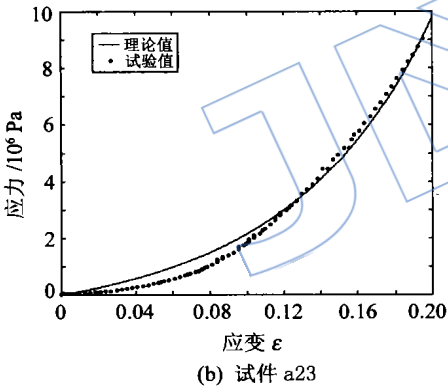
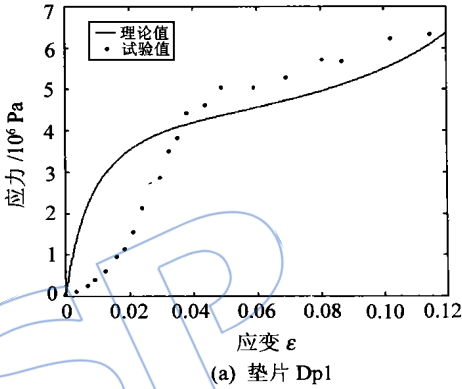
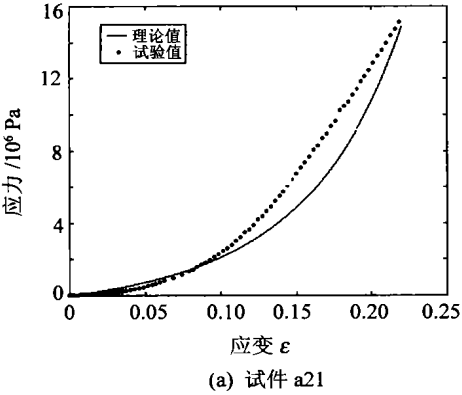


图6 不同密度试件的应力与应变的关系
Fig. 6 Stress-strain relation of MR with different density

图7 不同厚度垫片式试件的应力与应变的关系
Fig. 7 Stress-strain relation of gasket with different thickness

难保证也即均匀性愈差。图7为长方体试件（见表2）成型受压面上施加载荷时的应力应变关系。它们具有相同的相对密度和相同的受压面积，外形尺寸中只有厚度不同，依次为2.2 mm, 3.0 mm 和 5.0 mm。从图中可以看出，试件愈薄，其试验值与理论值在线性段和软特性段上误差愈大；试件愈厚，其试验值与理论值在硬特性段上误差愈大。

从目前金属橡胶材料的制造工艺过程来看，难于控制的环节较多：如缠绕的金属丝螺旋径 D_1 ，在单位长度上很难保证完全相同；在编织挤压过程中，也很难保证金属丝编排分布的均匀性。这些都具有一定的分散度。因此，对于成品件的试验值和理论值会存在一定的误差。如果控制好制作过程中的各个环节，提高金属橡胶材料的制造工艺水平，对于更好地设计和利用金属橡胶材料，将会有非常好的工程实用价值。

3 结 论

本章讨论了金属橡胶材料的影响参数对其性能的影响，针对不同形状、不同几何尺寸，进行了理论分析和试验研究。单元体试件可由公式

(1) ~ (4) 来描述，并可简化成式：

$$P = F_1(m, n, \bar{k}) \cdot F_2(\Delta)$$

$$\sigma = F_1(m, n, \bar{k}) \cdot F_2(\epsilon)$$

其中： $F_1(m, n, \bar{k})$ 为主要描述性能特性的物理函数，而 F_2 为主要描述特性曲线的形状函数。

通过试验给出了单元体、环型金属橡胶材料的本构关系，分析了金属橡胶材料理论值与试验值存在一定误差的原因，并指出了提高其精度的主要环节是提高材料的“均匀性”。

参考文献：

- [1] 郭宝亭. 金属橡胶阻尼器性能和在转子系统减振应用研究 [D]. 北京, 北京航空航天大学, 2002.
- [2] 张英会编著. 弹簧 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [3] Четодаев Д Е, Мулюкин О П, Колтыгин Е В. КОНСТРУИРОВАНИЕ РАБОЧИХ ОРГАНОВ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ ИЗ УПРУГОПОРИСТОГО МАТЕРИАЛАМР [M]. Самарский Государственный Аэрокосмический Университет, 1994.
- [4] 李昕, 蒋瑞英, 陈洪荪, 等编. 弹性与非弹性的测量和应用 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1999.