第 18 卷　第 2 期　2018 年 1 月
1671—1815(2018)002-0066-06

科　学　技　术　与　工　程
Science Technology and Engineering

Vol. 18　No. 2　Jan. 2018
© 2018　Sci. Tech. Engrg.

引用格式: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

一般工业技术

金属橡胶压缩性能影响因素及细观模型研究

吴荣平　白鸿柏*　路纯红
(军械工程学院,石家庄 050003)

摘　要　分析了几种主要制备参数及温度对金属橡胶静态压缩特性的影响,利用悬臂曲梁单元建立了金属橡胶的细观力学模型。经过大量试验,结合最小二乘法,对细观模型的参数进行拟合求解,得到了包含制备参数及温度的模型表达式。通过将模型验证结果与实验曲线对比后发现,理论模型有较高的精度,可以比较全面地反映金属橡胶的刚度特性,为金属橡胶的实际应用提供了理论参考。

关键词　金属橡胶　影响因素　试验分析　细观模型
中图法分类号　TB535;　**文献标志码**　A

随着现代机械、航空航天及军事装备领域的快速发展,传统减振材料的性能难以继续满足现实减振需要,严重限制了工程机械及武器装备的发展[1]。而金属橡胶作为一种干摩擦阻尼材料,具有耐高低温、疲劳寿命长、阻尼大等特点,很好地弥补了传统减振材料性能的不足,非常适合航空航天和军事国防等领域的应用[2,3]。

近年来,随着金属橡胶材料优良性能逐渐显现,国内外学者相继对其展开深入研究,并取得了一定成果。成果最突出的主要集中在模型的构建方面。例如,特洛伊尼科夫建立了描述金属橡胶材料能量耗散过程的角锥模型[4];陈艳秋、朱梓根[5]基于小曲梁单元建立了金属橡胶的本构关系式;李宇燕、黄协清[6]采用多孔材料理论描述了金属橡胶的应力应变关系;等等。但在现有研究成果中,很少涉及金属橡胶制备参数及应用环境的影响分析,这给金属橡胶的制备及应用造成了不小障碍。仅李宇燕[7—9]对高度、承载面积及形状因子等因素进行过分析并取得了良好效果,但由于三者均为尺寸特征因素,分析稍显单一。针对上述问题,现从试验角度入手,定性分析了构件密度、金属丝直径(丝径)、螺旋卷直径(簧径)以及温度对金属橡胶力学特性的影响。采用悬臂曲梁单元建立了金属橡胶的细观形变模型,并利用最小二乘法对模型中的各项系数进行拟合,得到考虑制备参数及环境温度的金属橡胶力与变形关系模型。通过验证,发现该模型具有良好的适用性,为金属橡胶构件的制备及工程应用提供了借鉴。

1　影响因素分析

由大量工程实践可知,金属橡胶的刚度特性受制备参数及应用环境影响十分明显。其中,制备参数主要包括构件的外形尺寸、密度、金属丝直径以及螺旋卷直径,而应用环境中以温度影响最为明显。因此,为更加准确掌握金属橡胶的刚度特性,合理指导构件的设计及应用,采用试验的方法对金属橡胶主要制备参数和温度的影响进行分析。

由于工程应用中金属橡胶构件外形尺寸通常是确定的,且其影响较为直观,因此这里只对试件密度、丝径、簧径和温度进行分析。同时,考虑到材料高温性态的变化,选取 50 ~ 350 ℃温域进行温度影响分析。

1.1　试验设备及试件

压缩试验在济南天辰 WDW—T200 型电子万能试验机上进行,该试验机适用于金属、非金属材料的拉伸、压缩及弯曲等力学特性试验,位移分辨率为 0.001 mm,最大试验力为 200 kN。

为分析上述几种因素的影响,本文采用环形试件,试件由 304 钢丝制备而成,其外形尺寸为:外径

2017 年 5 月 18 日收到　国家自然科学基金(50775220)和武器装备“十二五”预先研究项目(51312060404)资助
第一作者简介:吴荣平(1993—),硕士研究生。研究方向:机械振动与冲击防护。E-mail:wrp01993@163.com。
*通信作者简介:白鸿柏(1964—),教授,博士研究生导师。研究方向:金属橡胶、振动冲击与防护。E-mail:BHB11@sina.com。

$D=58.6$ mm,内径 $d=41$ mm,高 $h=15$ mm,形状及参数如图 1 和图 2 所示,试件的工艺参数如表 1 所示。

图 1　金属橡胶试件

Fig. 1　Metal rubber specimen

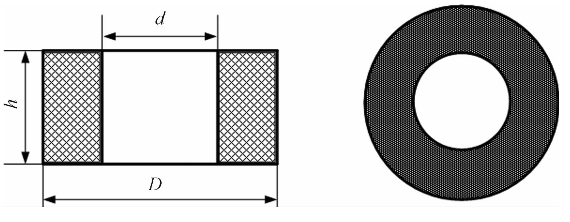

图 2　金属橡胶形状参数

Fig. 2　Metal rubber shape parameters

表 1　试件工艺参数及试验组别

Table 1　Specimen process parameters and test group

组别	密度/(g·cm^{-3})	丝径/mm	簧径/mm	温度/℃
A	2.0, 2.5 3.0, 3.5	0.15	1.7	20
B	2.5	0.1, 0.15, 0.3	1.7	20
C	2.5	0.3	2.2, 3.0, 3.5	20
D	2.5	0.15	1.7	50, 110, 170, 230, 290, 350

表 1 中,组别代表不同试验组所需用试件。其中,A 代表密度试验组;B 代表丝径试验组;C 代表簧径试验组;D 代表温度试验组。

1.2　试验结果及分析

试验采用等速位移控制模式,加载速度为 1 mm/min,位移目标值根据变形全过程确定。试验前,对试件进行多次加卸载,待试件性能稳定后进行试验数据采集。

1.2.1　基本压缩性能分析

图 3 为普通金属橡胶材料的压缩变形曲线,由曲线可看出金属橡胶材料的压缩变形基本经历 3 个阶段,即图中所示的线性阶段Ⅰ、软特性阶段Ⅱ和指数硬化阶段Ⅲ。线性阶段通常很短,阶段内的变形基本由内部空间压缩形成,刚度特性单一,因此载荷与形变量之间主要呈线性关系。软特性阶段材料的非线性特性逐渐明显,这是因为随着形变量的增加,试件内部螺旋卷逐渐形成接触,内部既有空间的压缩也有螺旋卷的接触滑移,刚度特性逐渐复杂。指数硬化阶段材料的刚度以指数形式急剧增大,这是由于随着形变量的增加,材料内部螺旋卷之间的接触非线性增加,接触点间的曲梁长度随之减小、刚度不断增大,积累后在宏观上形成刚度指数增大的现象。

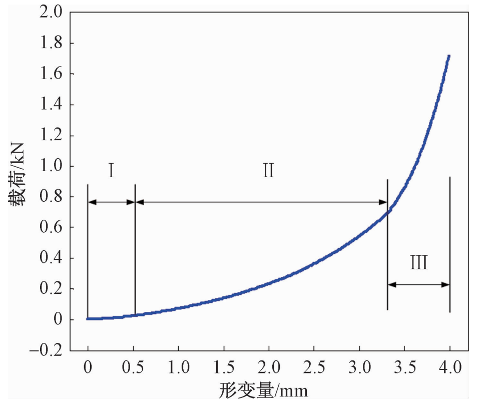

图 3　金属橡胶压缩特性曲线

Fig. 3　Characteristic curve of metal rubber

1.2.2　密度影响

根据 A 组试件的试验数据,可绘得图 4 所示不同密度金属橡胶构件的载荷-变形曲线。

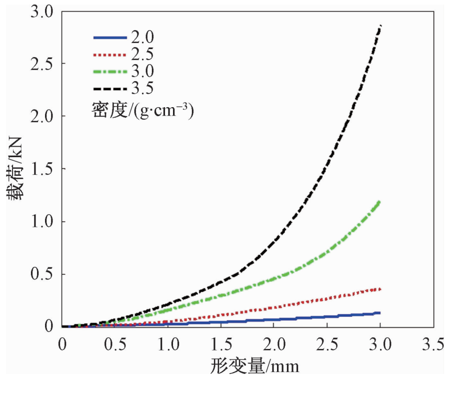

图 4　不同密度金属橡胶载荷-变形曲线

Fig. 4　Load-deformation curve of different density metal rubbers

由图 4 可以看出,随着密度的增加,金属橡胶试件的刚度不断增大;同时,密度大的试件刚度变化更快,更早进入指数硬化阶段。这是因为,在外形尺寸及其他制备参数相同的情况下,试件密度越大,孔隙度就越小,内部螺旋卷数量就越多,相互之间接触就越充分。因此,当形变量相同时,大密度试件中形成的变形曲梁要明显多于小密度试件,且曲梁长度更小、刚度更大,从而反映在试件力学特性上即为大密度试件刚度大且变化速度快。

1.2.3 丝径影响

对 B 组试件进行试验分析,可得到图 5 所示金属丝直径影响下的载荷-变形曲线。

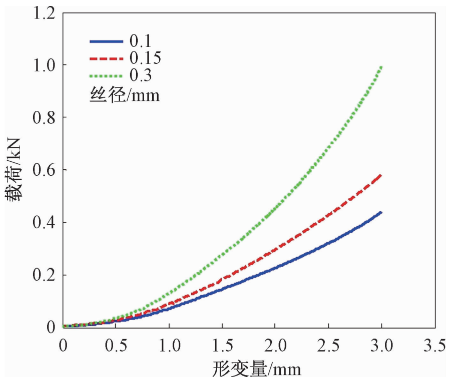

图 5 不同丝径金属橡胶载荷-变形曲线

Fig. 5 Load-deformation curve of different wire diameter metal rubbers

从图 5 可以看出,金属橡胶试件的刚度随丝径的增大而增大,且形变量越大刚度差异越明显。当试件密度及其他制备参数一定的情况下,不同丝径试件之间的差异主要表现为内部曲梁的刚度差异。相同簧径,丝径越大,曲梁刚度就越大,试件整体的刚度也就越大。同时,由于密度相同,试件中接触曲梁的数量大致相等,而曲梁刚度的不同,导致随形变量的增加试件间差异逐渐增大。

1.2.4 簧径影响

根据 C 组试件的试验数据绘制簧径影响下的载荷-变形曲线如图 6 所示。

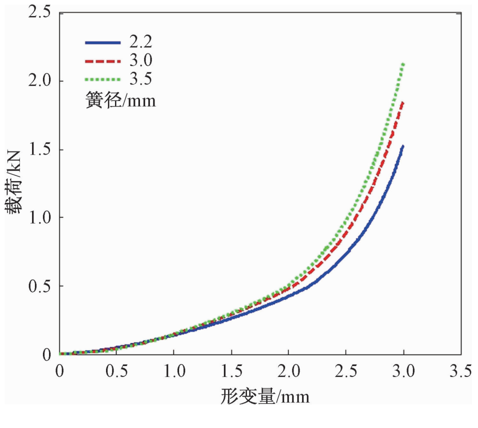

图 6 不同簧径金属橡胶载荷-变形曲线

Fig. 6 Load-deformation curve of different roll diameter metal rubbers

由图 6 可以看出,在簧径影响的载荷-变形曲线中,几种试件线性阶段及软特性阶段初期的刚度差别并不大,在软特性阶段中后期及指数硬化阶段,小簧径试件刚度更大,但大簧径试件更早进入指数硬化阶段。分析原因可知,当试件质量及外形尺寸一定时,大簧径试件中螺旋卷之间的空间更小、曲梁接触更加充分,接触“饱和”更快,即更早进入指数硬化阶段。但当变形进入指数硬化阶段后,试件的刚度主要受内部曲梁刚度的影响,而小簧径试件中曲梁的长度更小、刚度更大,因此其整体刚度会大于大螺旋卷试件。

1.2.5 温度影响

温度影响分析中,选用的为 D 组试件,所得载荷-变形曲线如图 7 所示。

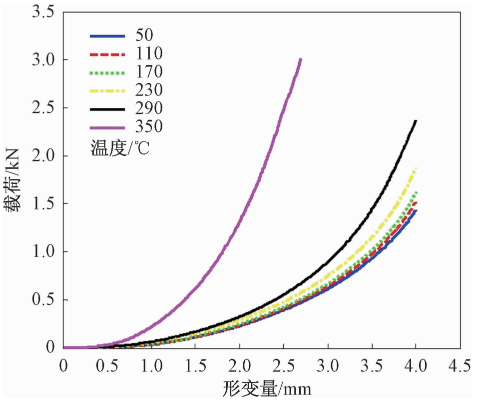

图 7 不同温度下金属橡胶载荷-变形曲线

Fig. 7 Load-deformation curve of metal rubber at different temperatures

由图 7 可以看出,金属橡胶试件的刚度随温度升高呈不断增大的趋势,且软特性与指数硬化阶段不断“前移”。这是由于温度升高时,内部金属丝会逐渐变“软”,而进入软特性阶段后,相同外部载荷作用下温度高的试件形变量会更大且内部接触螺旋卷数量也会更多,因此在变形曲线中,高温度时试件表现出的刚度特性会更大,且更早进入软特性及指数硬化阶段。

通过上述分析,可定性地了解不同工艺参数对金属橡胶材料刚度的影响趋势,但就工程实践而言,还需进一步探索影响的具体表达。

2 细观模型

描述上述因素对金属橡胶材料静态力学性能的影响需要从细观上对金属橡胶的结构与力学关系进行分析,而悬臂曲梁作为螺旋卷的近似结构单元能合理反应其变形特点,很适合作为金属橡胶细观模型分析的基本单元。

2.1 悬臂曲梁受力分析

根据变形特点,可将悬臂曲梁简化成直径为 D 的圆弧,其力学模型如图 8 所示。

根据图 8 所示,并由余弦定理可得:

$$\overline{CD} = R\sqrt{2(1-\cos\theta)} \tag{1}$$

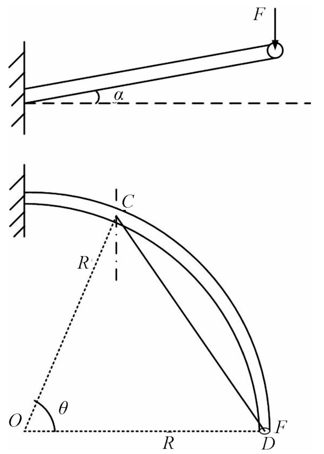

图 8　悬臂曲梁力学模型

Fig. 8　Mechanical model of cantilever beam

图 8 中,C、D 为所在截面处的中心点;R 为螺旋卷的半中径。

悬臂曲梁的截面力矩如图 9 所示,当曲梁端部受到纵向压缩力 F 作用时,在过直线 $\overline{CD}$ 且垂直于受压平面的平面 V 上,会产生大小为 $T_t = F\overline{CD}\cos\alpha$ 的扭矩。将这一扭矩进行分解,分解后可以表示为作用在材料截面平面 N 上的弯矩 M 和作用在曲梁轴线平面上的扭矩 T 。

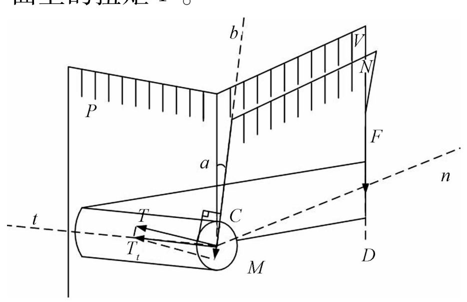

图 9　悬臂曲梁截面力矩分析

Fig. 9　Analysis of section moment of cantilever beam

根据力矩模型的分析,结合理论力学[10]知识可以得到压缩力对截面的弯矩与扭矩:

$$T = FR\sqrt{2(1-\cos\theta)}\cos^2\alpha \tag{2}$$

$$M = FR\sqrt{2(1-\cos\theta)}\cos\alpha\sin\alpha \tag{3}$$

由卡氏定理可得悬臂曲梁受正压载荷作用时的变形:

$$\Delta z = \int_0^l \frac{\partial M}{\partial F}\frac{M}{EI}\mathrm{d}s + \int_0^l \frac{\partial T}{\partial F}\frac{T}{GI_t}\mathrm{d}s \tag{4}$$

式(4)中,E 为材料的弹性模量;G 为切变模量,E 与 G 的关系为 $G = E/2(1+\mu)$,μ 为材料的泊松比;I 、I_t 分别为金属丝截面惯性矩和极惯性矩,$I = \pi d^4/64$,$I_t = \pi d^4/32$,$\mathrm{d}s = D\mathrm{d}\theta/2$ 。

将式(2)、式(3)及上述各参数代入式(4)可得:

$$\Delta z = \frac{16FD^3\cos^2\alpha(1+\mu\cos^2\alpha)}{\pi E d^4}\psi(\theta) \tag{5}$$

其中

$$\psi(\theta) = \theta - \sin\theta \tag{6}$$

则悬臂曲梁的轴向刚度为

$$k_{z1} = \frac{\pi E d^4}{16D^3\cos^2\alpha(1+\mu\cos^2\alpha)}\psi^{-1}(\theta) \tag{7}$$

为处理方便,利用 MATLAB 对 $\psi(\theta)$ 进行拟合,将其简化为

$$\psi(\theta) = \lambda\theta^3 \tag{8}$$

将式(8)代入式(7)可得悬臂曲梁的轴向刚度为

$$k_{z1} = \frac{\lambda\pi E d^4}{16D^3\cos^2\alpha(1+\mu\cos^2\alpha)}\theta^{-3} \tag{9}$$

式(9)中,λ 为拟合常数。

取 1/4 螺旋卷为一个悬臂曲梁,此时 θ 为 $\pi/4$,则曲梁的等效刚度为

$$k_z = \frac{4\lambda E d^4}{\pi^2 D^3\cos^2\alpha(1+\mu\cos^2\alpha)} \tag{10}$$

而每个螺旋卷的等效刚度为

$$k_d = \frac{16\lambda E d^4}{\pi^2 D^3\cos^2\alpha(1+\mu\cos^2\alpha)} \tag{11}$$

2.2　形变模型

金属橡胶构件在成型后基本可视为连续均匀介质,假设单位体积的金属橡胶材料沿受载方向可分为 m 层,每层上有 n 个螺旋卷,则其等效刚度为

$$k_e = \frac{n}{m}k_d \tag{12}$$

式(2)中

$$\frac{n}{m} = \left(\frac{4\bar{\rho}_{MR}}{\pi^2 D d^2}\right)^{1/3} \tag{13}$$

式(3)中,$\bar{\rho}_{MR}$为相对密度。

这样,由式(11)~式(13)可得构件的刚度为

$$k_e = \frac{VCE}{\cos^2\alpha(1+\mu\cos^2\alpha)}\left[\left(\frac{d}{D}\right)^{10}\bar{\rho}_{MR}\right]^{1/3} \tag{14}$$

式(14)中,$C = 2^{14/3}\lambda\pi^{-8/3}$;V 为试件的体积。

根据 2.1 节分析可知,金属橡胶材料的力与位移关系表现出较强的非线性,尤其是软特性及指数硬化阶段,因此其力与变形关系须进行非线性表示。经过大量理论与试验分析发现[11],采用 3 次幂级数多项式对金属橡胶材料的力与位移关系进行表达,可得到很精确的结果。因此,为表达这种非线性特性,结合式(14),可得到金属橡胶材料的力与变形关系式为

$$F = \frac{VE\left[\left(\frac{d}{D}\right)^{10}\bar{\rho}_{MR}\right]^{1/3}}{\cos^2\alpha(1+\mu\cos^2\alpha)}(C_1x + C_2x^2 + C_3x^3) \tag{15}$$

式(15)中,C_1、C_2、C_3 均为拟合系数。

这样就得到了丝径 d、簧径 D 以及相对密度$\bar{\rho}_{MR}$等因素影响下的金属橡胶形变模型。

3 参数拟合及模型验证

由图 6 可以看出,温度对金属橡胶材料刚度特性的影响是十分明显的,而式(15)所确立的关系模型却无法描述温度的影响。因此,为了提高模型的适用性,有必要将温度的影响引入模型。由于温度对螺旋卷相互关系的影响尚未有合理的参数化表达方法,因此本文通过数值的方式将其间接表达为对 C_1、C_2、C_3 三个拟合系数的影响。

考虑温度对金属材料弹性模量的影响,现采用文献[12]中的结论进行表达,表达式为

$$E = E_0\left[1 - m\kappa_s(\Delta T + 293) + \frac{1}{2}m^2\kappa_s^2(\Delta T + 293)^2\right] \tag{16}$$

式(16)中,E_0 为热力学温度零时材料的弹性模量;κ_s 为一定温度下金属丝材的线膨胀系数,这里取 20 ~400 ℃温域内的平均线膨胀系数 $\kappa_s = 18.1 \times 10^{-6}$ m/℃;ΔT 为与常温(20 ℃)之间的温度差;m 为一平均常数,取值 24.66。

3.1 拟合参数分析

当试验只改变温度参数时,力与位移关系模型中的拟合参数只是温度的一元函数,结合试验数据可识别 C_1、C_2、C_3 拟合系数如表 2(试验数据中载荷单位为 kN,变形量单位为 mm)。

表 2 不同温度系数数值

Table 2 Coefficient values of different temperatures

试验号	温度/℃	C_1/(kN·mm^{-1})	C_2/(kN·mm^{-2})	C_3/(kN·mm^{-3})
1	50	0.043 6	0.006 7	0.032 7
2	80	0.038 8	0.005 7	0.034 1
3	110	0.041 0	0.004 1	0.035 5
4	170	0.063 7	−0.014 3	0.040 8
5	230	0.135 2	−0.061 1	0.054 1
6	290	0.201 2	−0.138 9	0.082 7
7	350	0.352 6	−0.151 4	0.120 3

采用三次幂级数的形式可将系数表示为:

$$\begin{cases} C_1 = a_0 + a_1T + a_2T^2 + a_3T^3 \\ C_2 = b_0 + b_1T + b_2T^2 + b_3T^3 \\ C_3 = c_0 + c_1T + c_2T^2 + c_3T^3 \end{cases} \tag{17}$$

同时,根据得到的不同温度下系数的取值,对式(17)进行最小二乘拟合,即可得到各参数(a_0,a_1,a_2,a_3,b_0,b_1,b_2,b_3,c_0,c_1,c_2,c_3),将其带入式(17)可得:

$$\begin{cases} C_1 = 0.089\,3 - 1.283\,8 \times 10^{-3}T + 8.588\,4 \times 10^{-6}T^2 - 9.712\,7 \times 10^{-9}T^3 \\ C_2 = 0.006\,7 - 5.752\,9 \times 10^{-6}T + 5.372\,9 \times 10^{-7}T^2 - 7.759\,4 \times 10^{-9}T^3 \\ C_3 = 0.025\,4 + 2.055\,8 \times 10^{-4}T - 1.567\,5 \times 10^{-6}T^2 + 5.307\,1 \times 10^{-9}T^3 \end{cases} \tag{18}$$

这样,式(15)与式(18)就组成了考虑温度及制备参数影响的金属橡胶载荷变形量关系模型。

3.2 模型验证

根据模型式(15)及式(18)可以大致预估不同温度、不同工艺参数金属橡胶构件的力与变形曲线。这里选取簧径为 1.7 mm、丝径为0.15 mm、密度为 2.5 g/mm^3 的试件 1,簧径为 2.2 mm、丝径为 0.3 mm、密度为 3.0 g/mm^3 的试件 2,分别在 140 ℃及 300 ℃温度下进行试验,将采集到的实验曲线与所得模型曲线进行对比,对比如图 10 和图 11。

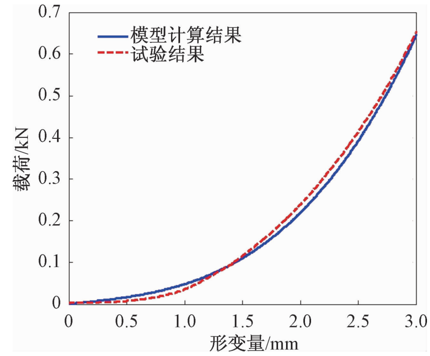

图 10 试件 1 模型计算及试验结果对比

Fig. 10 Comparison of model calculation and experimental results of specimen 1

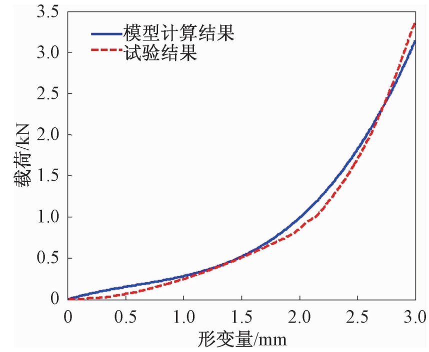

图 11 试件 2 模型计算及试验结果对比

Fig. 11 Comparison of model calculation and experimental results of specimen 2

从图 10 和图 11 中可以看出试件 1 和试件 2 的差距不大。考虑试件制备及测试中误差的存在,可以认为模型对于金属橡胶力学性能的预测是准

确的。

4　结论

通过以上对金属橡胶材料的力学特性分析可得到以下结论。

(1)金属橡胶材料的力学性能受制备参数、应用温度等影响比较明显,工程中须根据应用环境合理选择相应参数。

(2)以悬臂曲梁为基本单元,结合最小二乘拟合的方法分析金属橡胶材料的细观力学性能,能得到满足工程实际的理论结果。

参　考　文　献

1 陈　亚, 白鸿柏, 路纯红. 金属橡胶制造应用及产品标准化的构建. 现代制造工程, 2014;(5): 131—134
Chen Ya, Bai Hongbai, Lu Chunhong. Application of metal rubber and recommendation of product standardization. Moderm Manufacturing Engineering, 2014; (5): 131—134

2 Shinohara T, Yoshida K. Deformation analysis of surface flaws in stainless steel wire drawing. Material Processing Technology, 2005; (162): 579—584

3 Tam K W, Pastouchenko N N, Robert H, *et al*. Noise source distribution in supersonic jets. Journal of Sound and Vibration, 2006; (291): 192—201

4 切戈达耶夫. 金属橡胶构件的设计. 李中郢, 译. 北京: 国防工业出版社, 2000
Chegodae D. The design of metallic rubber component. Li Zhongying, Translated. Beijing: National Defence Industry Press, 2000

5 陈艳秋, 朱梓根. 金属橡胶减振垫刚度特性及本构关系研究. 航空动力学报, 2002; 17(4): 416—420
Chen Yanqiu, Zhu Zigen. The investigation of the stiffness characteristics and the stress-train relation of metal rubber. Journal of Aerospace Power, 2002;17(4): 416—420

6 李宇燕, 黄协清. 金属橡胶材料的非线性刚度. 兵工学报, 2008; 29(7): 820—823
Li Yuyan, Huang Xieqing. Nonlinear stiffness of metal-rubber. Acta Armamentarii, 2008; 29(7): 820—823

7 李宇燕, 黄协清. 形状因子对金属橡胶结构力学性能的影响. 振动与冲击, 2008; 27(6): 46—50
Li Yuyan, Huang Xieqing. Effect of shape factor on mechanical characteristics of metal-rubber. Journal of Vibration and Shock, 2008; 27(6): 46—50

8 李宇燕, 黄协清. 高度对金属橡胶材料力学性能的影响. 航空材料学报, 2010; 30(2): 95—97
Li Yuyan, Huang Xieqing. Effect of height on mechanical properties of metal-rubber. Journal of Aeronautical Materials, 2010; 30(2): 95—97

9 李宇燕, 黄协清. 承载面积对金属橡胶材料本构关系的影响. 振动.测试与诊断, 2010; 30(5): 543—546
Li Yuyan, Huang Xieqing. Effect of loaded area on constitutive relation of metal-rubber. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010; 30(5): 543—546

10 哈尔滨工业大学理论力学教研室. 理论力学. 北京: 高等教育出版社, 2012
Department of Theoretical Mechanics, Harbin Institute of Technology. Theoretical mechanics. Beijing: Higher Education Press, 2012

11 白鸿柏, 路纯红, 曹凤利, 等. 金属橡胶材料及工程应用. 北京: 科学出版社, 2014
Bai Hongbai, Lu Chunhong, Cao Fengli, *et al*. Metal Rubber Materials and Engineering Applications. Bejing: Science Press, 2014

12 费里德曼. 金属机械性能. 北京: 机械工业出版社, 1982
Fredman. Metal mechanical properties. Beijing: Machinery Industry Press, 1982

Influencing Factors of Compression Properties and Mesoscopic Model of Metal Rubber

WU Rong-ping, BAI Hong-bai*, LU Chun-hong

(Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

[**Abstract**] The effects of several major preparation parameters and temperature on the static compression properties of metal rubber are analyzed, and the mesomechanical model of metal rubber is derived by using cantilever beam element. After a large number of experiments, combining with the least squares method, the parameters of the mesoscopic model are fitted, and the expression of the model including preparation parameters and working temperatures is obtained. Comparing model results with test results, it is found that the accuracy of the theoretical model is high and the model can comprehensively describe the stiffness of metal rubbers. It provides a theoretical reference for the practical application of metal rubbers.

[**Key words**] metal rubber　　influence factors　　test analysis　　mesoscopic model