

复合型金属橡胶的静力学模型研究

余慧杰 侯伟平 陈成 倪维宇

(上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093)

摘要: 在静态力学试验的基础上,建立一种复合型金属橡胶(Composite-Metal Rubber, C-MR)的理论模型。采用一种新型制备工艺制备 C-MR,对其进行静态力学试验。结合编织型金属橡胶(Wove-Metal Rubber, W-MR)和缠绕型金属橡胶(Tangled-Metal Rubber, T-MR)的静力学模型,建立了 C-MR 的力学模型,并研究了不同编缠比对 C-MR 力学特性的影响。试验数据和理论模型对比结果表明,该理论模型能够有效预测 C-MR 的力学特性。并且发现,编缠比对 C-MR 的力学特性有显著影响,编缠比越大,C-MR 的刚度和阻尼特性越大。研究结论可为 C-MR 的制备和应用提供理论支持。

关键词: 复合型金属橡胶; 静态力学试验; 力学特性; 力学模型

中图分类号: TB535.1 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2025.07.019

0 引言

金属橡胶是一种兼具刚度与阻尼且具有特殊力学性能的材料^[1],其力学性能受到金属丝种类和金属丝内部微观结构的影响,其内部微观结构主要由制备工艺决定。以往的研究将这类材料归为同一种结构,但是根据制备工艺的不同,金属橡胶又可以分为缠绕型金属橡胶(Tangled-Metal Rubber, T-MR)与编织型金属橡胶(Wove-Metal Rubber, W-MR)。

过去很多学者对金属橡胶的耗能机制^[2]、力学模型^[3]、力学性能以及影响参数^[4]进行了广泛的研究。彭威等^[5]从微弹簧的径向与轴向变形机制出发,建立的本构模型具有合理的微观基础。卢成壮等^[6]基于金属橡胶内部微元螺旋卷结构建立力学模型,通过静态加载试验发现螺旋卷之间的接触状态和数量是影响金属橡胶刚度和阻尼的主要因素。李拓等^[7]通过对编织-嵌槽型金属橡胶的相关结构进行简化并建立力学模型,试验表明该模型可以很好地表征编织-嵌槽型金属橡胶的力学行为;李拓等^[8]通过静态压缩试验对比编织-嵌槽型金属橡胶与普通金属橡胶的力学性能,发现编织-嵌槽型金属橡胶的力学性能更好。对 T-MR 和 W-MR 的 2 种制备工艺的分析表明,不同的制备工艺其内部的微观结构存在显著差异,因此,其力学性能也可能不同。以往的研究只对其中一种制备工艺制备而成的金属橡胶成品进行静力学研究,并没有综合考虑结合 T-MR 和 W-MR 的力学特性研究复合型金属橡胶(Composite-

Metal Rubber, C-MR)的力学特性。基于此,以微元弹簧模型和单元网格模型为基础,结合空心圆柱形金属橡胶静态压缩过程特点,建立 C-MR 的准静态压缩力学模型,通过静态测试试验分析并验证本构模型。

1 C-MR 准静态压缩力学模型

金属橡胶的微观结构与制备工艺有关。T-MR 由连续不断的螺旋卷互相勾连叠加组成,且螺旋卷的节距固定,内部空隙均匀分布,从微观结构看可视为多段微元弹簧的串联与并联[图 1(a)],可将单个微元弹簧[图 1(b)]视为金属橡胶的基本组成单元^[9]。螺旋卷的丝径和外径即是微元弹簧的丝径和中径,相对密度则反映了金属橡胶中微元弹簧的数量。在静态加载中,通过微元弹簧彼此的滑移接触产生的干摩擦,消耗大量外部能量从而达到阻尼耗能的作用。

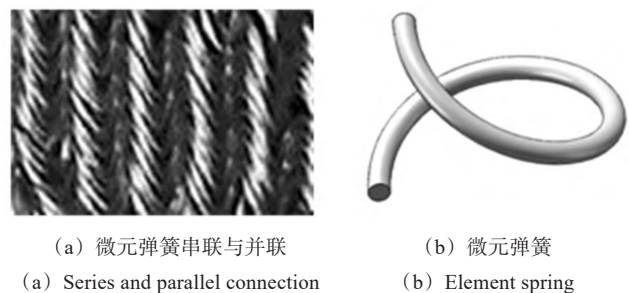


图1 微元弹簧简化模型

Fig. 1 Simplified model of the elementary spring

W-MR 通过筒布卷叠成毛坯后压制成型,其成型面一般由筒布的侧边形成,故 W-MR 的内部结构一般

收稿日期: 2023-11-27 修回日期: 2024-01-04

作者简介: 余慧杰,男,1978年生,福建南靖人,博士,教授,硕士研究生导师;主要研究方向为电子设备可靠性设计、隔振系统设计;E-mail: hjyu@usst.edu.cn。

倪维宇(通信作者),男,1986年生,江苏兴化人,硕士,高级实验师;主要研究方向为机械结构动力学优化设计与测试技术;E-mail:niweiyu138@sina.com。

引用格式: 余慧杰,侯伟平,陈成,等. 复合型金属橡胶的静力学模型研究[J]. 机械强度,2025,47(7):152-158.

YU Huijie, HOU Weiping, CHEN Cheng, et al. Study on the static model of composite metal rubber[J]. Journal of Mechanical Strength, 2025, 47(7): 152-158.

为垂直于成型面横向排布的网格单元[图 2(a)]^[10-11]。而在受到载荷时,W-MR 内部由金属丝组成的网格可以分为 2 种情况:一种是由金属丝之间勾连而形成的横向梁单元,该单元在 W-MR 受到垂直于成型面的载荷时并不会产生变形,上、下层梁单元之间的距离因变形而减小;另一种是由单金属丝弯曲形成的横向 U 形单元,该单元在 W-MR 受到垂直于成型面的载荷时其 U 形底部不变形,而两个 U 形接头处由于内部的轴向力很小,发生了弯曲变形进而带动上、下层的横向梁单元彼此靠近。可将 W-MR 的内部结构进行简化,变为单纯由横向梁单元与横向 V 形单元组成的单元网格结构[图 2(b)]。

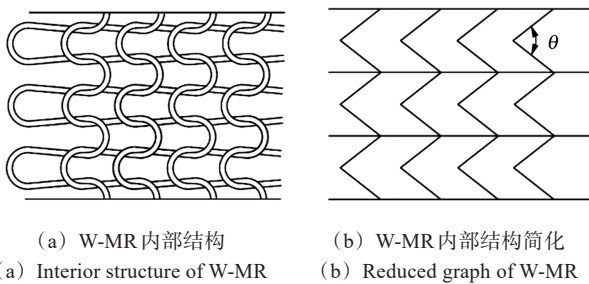


图 2 W-MR 内部结构及简化图

Fig. 2 Internal structure and simplified diagram of W-MR

余慧杰等^[12]在现有金属橡胶力学模型的基础上,根据弹簧理论推导出金属橡胶载荷-位移关系式。经过大量试验和理论分析,采用三次多项式对金属橡胶材料的力与位移关系式进行表达可以得到非常精确的结果,因此最后建立的金属橡胶微元弹簧模型^[13]为

$$\begin{cases} K_T = G/8 \sqrt[3]{(d/D)^{10} \bar{\rho} S H} \\ F_T = K_T (c_1 x + c_2 x^2 + c_3 x^3) \end{cases} \quad (1)$$

式中, K_T 为 T-MR 微元弹簧的刚度; G 为弹簧的剪切模量; d 为微元弹簧丝径; D 为微元弹簧中径(螺旋卷外径); $\bar{\rho}$ 为金属橡胶的相对密度; S 、 H 分别为金属橡胶的成型面面积、成型面高度; F_T 为 T-MR 微元弹簧的载荷; c_1 、 c_2 、 c_3 均为待定系数,可通过试验数据识别得到; x 为金属橡胶的整体位移。

W-MR 的内部结构一般为垂直于成型面横向排布的网格单元^[14]。YANG 等^[15]根据 W-MR 内部每层单元网格都是并联的关系,建立的 W-MR 静力学模型为

$$k_x = 2 \frac{L}{z} k = \frac{3\pi E d^4 L}{32 z l^3 (1 + \cos \theta)} \quad (2)$$

式中, k_x 为 W-MR 每一层的刚度; L 为金属丝筒布长度; z 为单元网格的横向宽度; E 为金属丝材料的弹性模量; l 为单个 V 形单元的一半边长度; θ 为 V 形单元的 V 形角度。实际制备过程中,考虑到金属丝筒布的宽度为 H_w ,单元网格的高度为 $h = 2l \sin(\theta/2)$,纵向的

每一层之间彼此串联,故 W-MR 的总刚度 K_w 为

$$K_w = \left[\frac{1}{(H_w/h) k_x} \right]^1 = \frac{1}{2l \sin(\theta/2)} \times \frac{3\pi E d^4 L H_w}{32 z l^3 (1 + \cos \theta)} = \frac{3\pi E d^4 A \bar{\rho}}{64 l^4 \sin(\theta/2) (1 + \cos \theta)} \quad (3)$$

式(3)中的刚度为定值,没有体现出 W-MR 整体受载时大变形的非线性刚度变化,加入高次项与待定系数进行高次函数修正,修正后的载荷 F_w 与位移表达式为

$$\begin{cases} K_w = \frac{3\pi E d^4 A \bar{\rho}}{64 l^4 \sin(\theta/2) (1 + \cos \theta)} \\ F_w = K_w (c_1 x + c_2 x^2 + c_3 x^3) \end{cases} \quad (4)$$

金属丝筒布在编织时因为编织的物理特性,筒布的径密度不变即单元网格的横向宽度 z 不变, $L \times H_w$ 和 z 的比值固定,且与金属橡胶的相对密度成正比, A 为两者之间的比例系数。

复合金属橡胶的宏观结构可以看成是由等效单元多行、多列分别阵列而成的,并且等效单元之间通过行内并联的方式结合在一起,因此 C-MR 总体结构可以视为 T-MR 与 W-MR 互相并联^[16]。其工艺参数除了金属丝丝径、螺旋卷外径与相对密度之外,复合金属橡胶内部螺旋卷质量和整个复合金属橡胶质量的比值,即编缠比 C_{MR} 对其力学特性也会有影响,即

$$C_{MR} = \frac{m_T}{m_w + m_T} = \frac{m_T}{m_C} \quad (5)$$

式中, m_T 、 m_w 分别为复合金属橡胶内部螺旋卷和外部编织网的质量; m_C 为复合金属橡胶的质量。

引入编缠比系数后,T-MR 的刚度为

$$K_T = \frac{G C_{MR}}{8} \sqrt[3]{\left(\frac{d_T}{D}\right)^{10} \bar{\rho} S H} \quad (6)$$

式中, d_T 为 T-MR 的丝径。则 W-MR 的刚度为

$$K_w = \frac{3\pi E d_w^4 A \bar{\rho} (1 - C_{MR})}{64 l^4 \sin(\theta/2) (1 + \cos \theta)} \quad (7)$$

式中, d_w 为 W-MR 的丝径。

如图 3 所示,C-MR 可以视为由 2 个不同外形尺寸的 T-MR 和 W-MR 互相并联嵌套构成,则整体刚度为两者刚度的叠加,把式(6)、式(7)相加,得到 C-MR 的刚度系数 K_C 为

$$K_C = K_T + K_w = \frac{G C_{MR}}{8} \sqrt[3]{\left(\frac{d_T}{D}\right)^{10} \bar{\rho} S H} + \frac{3\pi E d_w^4 A \bar{\rho} (1 - C_{MR})}{64 l^4 \sin(\theta/2) (1 + \cos \theta)} \quad (8)$$

通过加入编缠比对式(8)进行修正,且由于 C-MR 同样具有鲜明的非线性刚度特性,将其通过高次多项式进行表示。故 C-MR 的静态本构模型^[17]为

$$F_C = \left[\frac{GC_{MR}}{8} \sqrt{\left(\frac{d_T}{D}\right)^{10} \bar{\rho} SH} + \frac{3\pi E d_w^4 A \bar{\rho} (1 - C_{MR})}{64l^4 \sin(\theta/2)(1 + \cos \theta)} \right] \cdot (c_1 x + c_2 x^2 + c_3 x^3) \quad (9)$$

当式(9)中的 C_{MR} 为 0 时, 则得到

$$F_C = F_W = \frac{3\pi E d_w^4 A \bar{\rho}}{64l^4 \sin(\theta/2)(1 + \cos \theta)} (c_1 x + c_2 x^2 + c_3 x^3) \quad (10)$$

此时, C_{MR} 转化为 W-MR 的编缠比。当 $C_{MR} = 1$ 时得到

$$F_C = F_T = \frac{GC_{MR}}{8} \sqrt{\left(\frac{d_T}{D}\right)^{10} \bar{\rho} SH} (c_1 x + c_2 x^2 + c_3 x^3) \quad (11)$$

此时, C_{MR} 转化为 T-MR 的编缠比。

2 金属橡胶材料试件制备与试验

为研究不同的制备工艺对金属橡胶的压缩力学

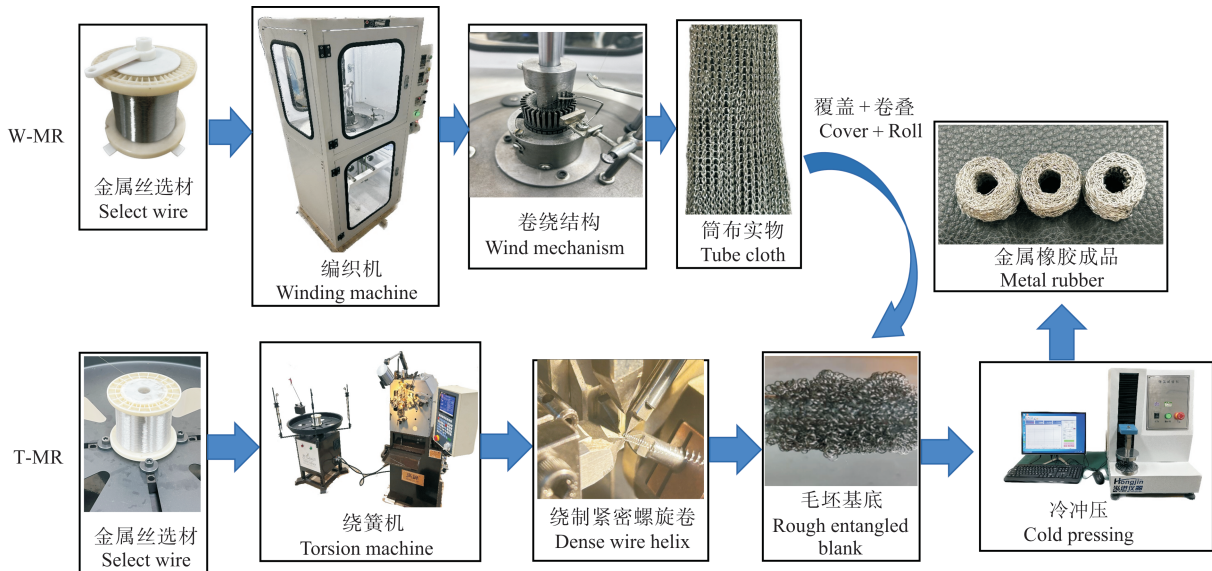


图 4 C-MR 制备工艺流程

Fig. 4 C-MR preparation process

C-MR 的制备工艺流程可以分为以下几个步骤:
 ①将一定量的金属丝分别加工成长度合适且连续均匀的螺旋卷和筒状网布;
 ②如制备 T-MR, 将螺旋卷绕制成毛坯, 作为 C-MR 的基底;
 ③在绕制的 C-MR 基底上, 用金属丝筒网布进行覆盖和卷叠, 使其包裹住内部的基底成为一个整体的毛坯;
 ④将整体毛坯放入模具中进行冲压成型。

2.1 试验方法

本文采用 CMT5105 型微机控制电子万能试验机对制备的金属橡胶进行静态压缩试验, 所制备的金属橡胶外形尺寸为 $\phi 10 \text{ mm} \times \phi 5 \text{ mm} \times 8.5 \text{ mm}$ 。试验机通过上、下夹手分别夹紧夹具的上、下夹柱, 上夹手固定, 下夹手可沿上、下方向缓速移动, 通过夹具对金属橡胶施加静态载荷并读取反馈数据至控制程序。控

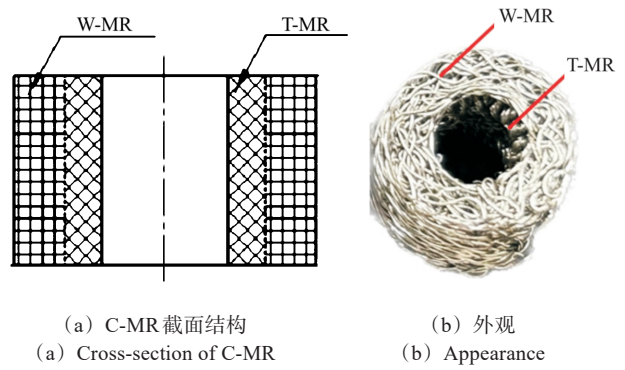


图 3 复合型金属橡胶样品

Fig. 3 Composite-metal rubber sample

性能的影响, 采用 304H 不锈钢 (07Cr19Ni10) 作为金属橡胶的材料, 与普通 304 不锈钢相比, 其含碳量更高, 机械性能更优越。总体的制备工艺流程如图 4 所示。

制方法采用等速位移力控制, 在足够缓慢的加载位移 (0.05 mm/min) 下, 载荷可视为没有冲击的静态加载。金属橡胶的静态力学试验如图 5 所示。

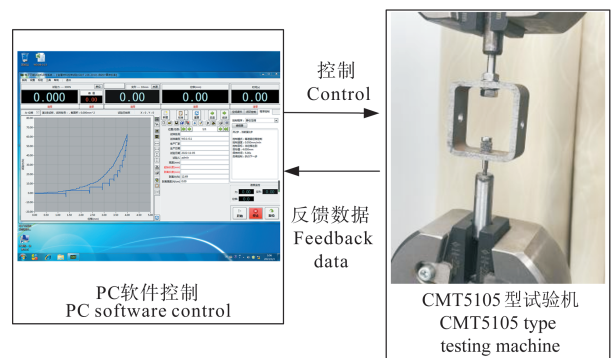


图 5 金属橡胶静态力学试验

Fig. 5 Static mechanical test of the metal rubber

2.2 复合型金属橡胶的力学特性对比

表 1 所列为本次制备的所有 C-MR 试件的参数。对制备的 C-MR 试件进行静态加载试验,得到图 6(a)所示的加载-卸载曲线。由图 6(a)可以看出,随着编缠比增大,曲线整体斜率增大,逐渐向非线性刚度大的方向偏移,并且加载过程中的硬特性阶段也随着编缠比的增大越来越明显。把 $C_{MR}=0$ 、 $C_{MR}=1$ 与其他封闭曲线做对比,结果表明,不同制造工艺的金属橡胶具有的耗能特性也不同。

表 1 不同编缠比 C-MR 试件参数

Tab. 1 Parameters of C-MR specimen with different knitting and winding ratios

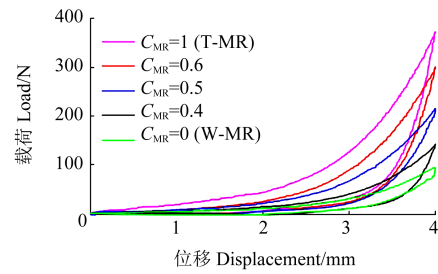
编缠比 Knitting and winding ratio C_{MR}	丝径 Wire diameter/ mm	外径 Outer diameter D /mm	相对密度 Relative density $\bar{\rho}$
0(W-MR)	$d_w=0.08$	—	0.15
0.4、0.5、0.6	$d_t=0.08$ $d_w=0.08$	0.8	0.15
1(T-MR)	$d_t=0.08$	0.8	0.15

由图 6(b)可以看出,在相同加载位移下编缠比越大的 C-MR 试件刚度越大。当加载位移小于 2 mm 时,刚度曲线均较为平缓,此阶段金属橡胶内部金属丝间隙逐渐减小,通过金属丝之间的滑移做功消耗振动能量,此阶段为软特性阶段;而在加载位移超过 2 mm 时,刚度明显增大,曲线的斜率开始快速增加,此阶段金属橡胶内部从滑移状态变为挤压状态,金属丝之间的间隙已经非常小,宏观表现为金属橡胶变“硬”,此阶段为硬特性阶段,且编缠比越大的 C-MR 试件呈现的硬特性现象越明显。图 6(c)表明,在相同相对密度下,随着编缠比增大,能量耗散系数也随之增大。

图 6 体现了编缠比对金属橡胶静力学特性的影响。由图 6 可以看出,随着编缠比逐渐增大,缠绕型金属橡胶结构的占比增多,金属橡胶的静刚度和能量耗散系数都逐渐增大。除此之外,同样体现了在工艺参数相同的情况下,3 种不同方法制备的金属橡胶之间静力学特性的差异^[18]。从编缠比 $C_{MR}=0$ 的 W-MR,到编缠比逐渐增加,直至 $C_{MR}=1$ 的 T-MR,金属橡胶的刚度与能量耗散系数都逐渐增大。

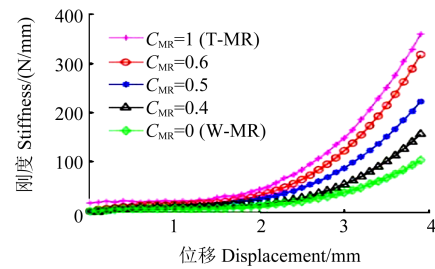
从金属橡胶耗能原理^[19]分析可知,在 T-MR 内部微元弹簧串联并联,在软特性阶段,微元弹簧之间产生挤压、摩擦与变形来消耗受到的载荷能量,为线接触;W-MR 内部为单元网格的层叠和嵌合,在软特性阶段,网格之间先正交滑动,后随着加载位移的增大,网格之间角度减小转为挤压与摩擦来消耗受到的载荷能量,多为网格线圈之间的点接触。与 W-MR 相比,T-MR 之间的线接触有更大的接触面积,能更快进

入硬特性阶段,从而可以消耗更多的能量。



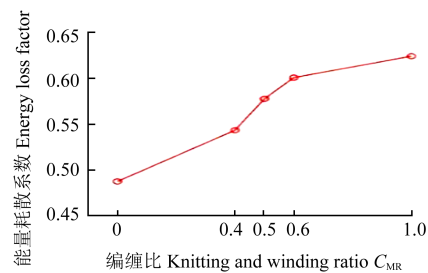
(a) 不同编缠比 C-MR 试件加载-卸载曲线

(a) Loading-unloading curves of C-MR specimen with different knitting and winding ratios



(b) 不同编缠比 C-MR 试件刚度曲线

(b) Stiffness curves of C-MR specimen with different knitting and winding ratios



(c) 不同编缠比 C-MR 试件能量耗散系数

(c) Energy loss factor of C-MR specimen with different knitting and winding ratios

图 6 不同编缠比 C-MR 试件静力学特性

Fig. 6 Static mechanical properties of C-MR specimen with different knitting and winding ratios

3 参数识别与验证

3.1 参数识别

使用表 2 中 5 种不同编缠比的 C-MR 试件静态加载数据用于参数识别,得到结果如图 7 所示。

表 2 用于参数识别的 C-MR 试件工艺参数

Tab. 2 Process parameters of C-MR specimen for parameter identification

试件编号 Specimen number	编缠比 Knitting and winding ratio C_{MR}	丝径 Wire diameter/ mm	外径 Outer diameter D /mm	相对密度 Relative density $\bar{\rho}$
1	0(W-MR)	$d_w=0.08$	—	0.15
2、3、4	0.4、0.5、0.6	$d_t=0.08$ $d_w=0.08$	0.8	0.15
5	1(T-MR)	$d_t=0.08$	0.8	0.15

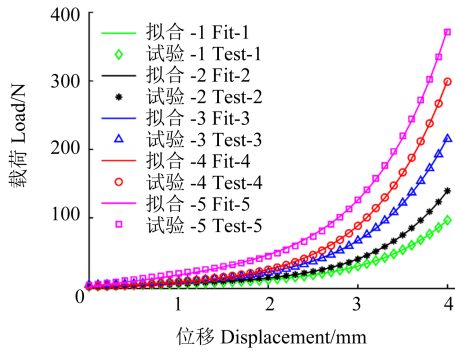


图7 C-MR试件参数识别结果

Fig. 7 Results of parameter identification of C-MR specimen

通过这5组试验数据的参数识别,得到拟合的待定系数 c_1 、 c_2 、 c_3 ,其值与编缠比 C_{MR} 之间的对应关系如表3所示。由图7与表3中的均方根误差值可以看出,该模型对单个C-MR试件的拟合结果较为准确。通过表3可拟合求得由编缠比表示 c_1 、 c_2 、 c_3 的多项式级数。

表3 C-MR试件拟合结果

Tab. 3 Fitting results of C-MR specimen

试件编号 Specimen number	C_{MR}	c_1	c_2	c_3	R^2
1	0	0.566 0	-0.503 0	0.159 2	0.996 8
2	0.4	2.006 2	-1.945 5	0.626 4	0.994 1
3	0.5	3.797 5	-3.533 6	1.158 1	0.998 0
4	0.6	5.606 5	-5.769 1	1.952 2	0.997 1
5	1	12.502 2	-10.071 5	3.251 7	0.998 7

$$\begin{cases} c_1 = -25.27C_{MR}^3 + 49.12C_{MR}^2 - 11.91C_{MR} + 0.564 6 \\ c_2 = 39.79C_{MR}^3 - 66.03C_{MR}^2 + 16.67C_{MR} - 0.506 6 \\ c_3 = -14.74C_{MR}^3 + 24.01C_{MR}^2 - 6.176C_{MR} + 0.160 8 \end{cases} \quad (12)$$

将式(12)代入式(9)中即可得到C-MR力学模型为

$$\left\{ \begin{aligned} F_c &= \left[\frac{GC_{MR}}{8} \sqrt{\left(\frac{d_T}{D}\right)^{10} \bar{\rho} SH} + \frac{3\pi E d_w^4 A \bar{\rho} (1 - C_{MR})}{64l^4 \sin(\theta/2)(1 + \cos \theta)} \right] \cdot \\ & \quad c_1 x + c_2 x^2 + c_3 x^3 \\ c_1 &= -25.27C_{MR}^3 + 49.12C_{MR}^2 - 11.91C_{MR} + 0.564 6 \\ c_2 &= 39.79C_{MR}^3 - 66.03C_{MR}^2 + 16.67C_{MR} - 0.506 6 \\ c_3 &= -14.74C_{MR}^3 + 24.01C_{MR}^2 - 6.176C_{MR} + 0.160 8 \end{aligned} \right. \quad (13)$$

3.2 对比验证

为验证本文提出的C-MR静力学模型具有泛用性,分别制备了编缠比 C_{MR} 为0.2、0.9的试件,其工艺参数如表4所示,分别进行静态加载试验并将相关工艺参数代入式(9),得到C-MR模型理论值与试验值对比,其结果如图8所示。

表4 用于验证的C-MR试件工艺参数

Tab. 4 Process parameters of C-MR specimen for validation

试件编号 Specimen number	编缠比 Knitting and winding ratio C_{MR}	丝径 Wire diameter/mm	外径 Outer diameter D /mm	相对密度 Relative density $\bar{\rho}$
6	0.2	$d_T = 0.1$ $d_w = 0.1$	0.8	0.15
7	0.9	$d_T = 0.1$ $d_w = 0.1$	2.0	0.15

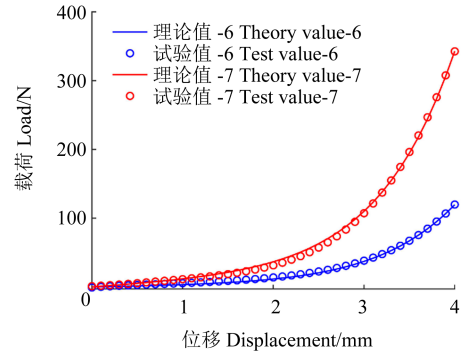


图8 C-MR模型理论值与试验值对比

Fig. 8 Comparison of theoretical and test results of C-MR model

对理论预测值与试验值进行残差分析,结果如表5所示。由表5可知,两者的均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)都较小,且模型对于2个试件的决定系数 R^2 都接近1,表明由该C-MR力学模型得到的理论值与试验得到的实际值较为吻合。这说明本文提出的力学模型能够较准确地描述C-MR的力学特性,其中包含了C-MR的各参数,如编缠比、丝径、外径、相对密度、金属橡胶的材料属性和外形尺寸等,参数较为全面,且能直观地反映出各参数与C-MR静刚度特性之间的定量关系。因此,本文提出的力学模型可以很好地反映C-MR的静态力学性能。

表5 残差分析结果

Tab. 5 Results of the residual analysis

试件编号 Specimen number	C_{MR}	R_{RMSE}	R^2
6	0.2	2.943 4	0.991 1
7	0.9	4.776 9	0.997 3

4 结论

本文结合T-MR和W-MR的制备工艺,开发了一种新的制备工艺制备复合型金属橡胶C-MR。研究了在相同相对密度下、不同编缠比的C-MR的力学性能。根据静态测试结果,对C-MR的静力学模型进行了参

数识别与试验验证。得到主要结论如下:

1)其他工艺参数相同的情况下,复合金属橡胶 C-MR 的编缠比与整体的刚度和能量耗散系数成正比。对于本文开发的复合金属橡胶 C-MR,可通过调节编缠比,得到适合各种工况的刚度、阻尼。在相对密度不变,即制备金属橡胶的材料用量不变的情况下,扩大了金属橡胶的设计范围,对提高金属橡胶材料与构件设计具有指导作用,使金属橡胶能够更好地应用于实际工程。

2)基于微元弹簧模型和单元网格模型,建立了 C-MR 的准静态压缩力学模型。对比试验数据与拟合值发现,两者拟合度较好,这说明该模型可以较准确地描述受静态载荷时 C-MR 的准静态压缩力学特性。

参考文献(References)

- [1] 切戈达耶夫,穆柳金,科尔特平. 金属橡胶构件的设计[M]. 李中郢,译. 北京:国防工业出版社,2000:1-2.
ЧЕГОДАЕВ Д Е, МУЛЮКИН О П, КОЛТЫГИН Е В. Design of metal rubber components[M]. LI Zhongying, Jr. Beijing: National Defense Industry Press,2000:1-2. (In Chinese)
- [2] 郑志,任子林,邹路明,等. 帽形金属橡胶压缩力学性能及耗能机理[J]. 兵器材料科学与工程,2022,45(5):14-19.
ZHENG Zhi, REN Zilin, ZOU Luming, et al. Compressive mechanical property and energy consumption mechanism of hat-shaped metal-rubber[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2022, 45(5):14-19. (In Chinese)
- [3] 邹龙庆,曹义威,付海龙,等. 金属橡胶材料迟滞特性力学模型研究[J]. 噪声与振动控制,2019,39(6):1-5.
ZOU Longqing, CAO Yiwei, FU Hailong, et al. Study on the mechanical model for hysteresis characteristics analysis of metal rubber materials[J]. Noise and Vibration Control, 2019, 39(6):1-5. (In Chinese)
- [4] 彭云强,贾东,钟卫洲,等. 金属橡胶减振器准静态加载力学性能研究[J]. 航空动力学报,2023,38(11):2666-2674.
PENG Yunqiang, JIA Dong, ZHONG Weizhou, et al. Quasi-static mechanical property of metal rubber vibration absorber[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(11):2666-2674. (In Chinese)
- [5] 彭威,白鸿柏,郑坚,等. 金属橡胶材料基于微弹簧组合变形的微观本构模型[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)
- [6] 卢成壮,李静媛,周邦阳,等. 金属橡胶的刚度特性和阻尼试验研究[J]. 振动与冲击,2017,36(8):203-208.
LU Chengzhuang, LI Jingyuan, ZHOU Bangyang, et al. An experimental study on stiffness characteristics and damping of metal rubber[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(8):203-208. (In Chinese)
- [7] 李拓,白鸿柏,路纯红,等. 基于微观结构表征的编织-嵌槽型金属橡胶本构模型[J]. 振动与冲击,2018,37(12):75-82.
LI Tuo, BAI Hongbai, LU Chunhong, et al. Constitutive models of knitted-dapped metal rubber based on microstructure characterization[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(12):75-82. (In Chinese)
- [8] 李拓,白鸿柏,路纯红. 编织-嵌槽型金属橡胶制备工艺及试验研究[J]. 机械科学与技术,2015,34(3):481-484.
LI Tuo, BAI Hongbai, LU Chunhong. Study on preparation technology and tests of knitted-dapped metal rubber[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2015, 34(3):481-484. (In Chinese)
- [9] 李冬伟,白鸿柏,杨建春,等. 金属橡胶弹性元件实验建模研究[J]. 兵器材料科学与工程,2005,28(3):7-10.
LI Dongwei, BAI Hongbai, YANG Jianchun, et al. Test research of mental rubber elastic element based on displacement control[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2005, 28(3):7-10. (In Chinese)
- [10] 邹广平,张冰,唱忠良,等. 弹簧-金属丝网橡胶组合减振器迟滞力学模型及实验研究[J]. 力学学报,2018,50(5):1125-1134.
ZOU Guangping, ZHANG Bing, CHANG Zhongliang, et al. Hysteresis mechanical model and experimental study of spring metal-net rubber combination damper [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2018, 50(5):1125-1134. (In Chinese)
- [11] 王尤颜,白鸿柏,刘远方. 金属橡胶材料压缩性能的微观特征研究[J]. 机械科学与技术,2011,30(3):404-407.
WANG Youyan, BAI Hongbai, LIU Yuanfang. Micro characteristic study of the metal rubber material [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2011, 30(3):404-407. (In Chinese)
- [12] 余慧杰,刘文慧,王亚苏. 金属橡胶静刚度特性及其力学模型研究[J]. 中国机械工程,2016,27(23):3167-3171.
YU Huijie, LIU Wenhui, WANG Yasu. Research on stiffness characteristics and mechanics model of metal rubbers [J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(23):3167-3171. (In Chinese)
- [13] 吴荣平,白鸿柏,路纯红. 金属橡胶压缩性能影响因素及微观模型研究[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. (In Chinese)
- [14] 白鸿柏,路纯红,曹凤利,等. 金属橡胶材料及工程应用[M]. 北京:科学出版社,2014:167-168.
BAI Hongbai, LU Chunhong, CAO Fengli, et al. Metal rubber materials and engineering applications[M]. Beijing: Science Press, 2014:167-168. (In Chinese)
- [15] YANG P, ZHOU T, JIA D, et al. Compressive mechanical behavior

- and model of composite elastic-porous metal materials[J]. Materials Research Express, 2021, 8(12):126518.
- [16] HU J L, DU Q, GAO J H, et al. Compressive mechanical behavior of multiple wire metal rubber[J]. Materials & Design, 2018, 140: 231-240.
- [17] 胡嘉麟. 复合型金属橡胶力学性能的理论及试验研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院工程热物理研究所), 2018: 52-53.
- HU Jialin. Theoretical and experimental study on mechanical properties of composite metal rubber[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Science (Institute of Engineering Thermophys- ics, Chinese Academy of Sciences), 2018:52-53. (In Chinese)
- [18] 杨挺青, 罗波, 徐平, 等. 黏弹性理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 167-169.
- YANG Tingqing, LUO Bo, XU Ping, et al. Viscoelastic theory and application[M]. Beijing: Science Press, 2004:167-169. (In Chinese)
- [19] 王玮, 汤宇, 吴乙万, 等. 盆形金属橡胶三向准静态试验研究[J]. 机械强度, 2023, 45(2): 331-340.
- WANG Wei, TANG Yu, WU Yiwan, et al. Experimental investigation on the tri-directional quasi-static of pot-shaped metal rubber [J]. Journal of Mechanical Strength, 2023, 45 (2) : 331-340. (In Chinese)

Study on the static model of composite metal rubber

YU Huijie HOU Weiping CHEN Cheng NI Weiyu

(School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: A theoretical model of composite metal rubber (C-MR) was established on the basis of static mechanical test. A novel preparation process was used to prepare C-MR, which was subjected to static mechanical tests. The mechanical model of C-MR was established by combining the static mechanical models of wove-metal rubber (W-MR) and tangled-metal rubber (T-MR), and the effects of different knitting and winding ratios on the mechanical properties of C-MR were investigated. The comparison between the test data and the theoretical model shows that the theoretical model can predict the mechanical properties of C-MR effectively. The results show that the knitting and winding ratio has a significant effect on the mechanical properties of C-MR, and the larger the knitting and winding ratio is, the larger the stiffness and damping properties of C-MR are. The conclusion can provide a theoretical support for the preparation and application of C-MR.

Key words: Composite metal rubber; Static mechanical test; Mechanical property; Mechanical model

Corresponding author: NI Weiyu, E-mail: niweiyu138@sina.com

Received: 2023-11-27 Revised: 2024-01-04



2025年 智能传动·智绘未来 中国机械工程学会机械传动分会年会

中国 长春 | 2025年8月8-10日
Changchun | August 8-10, 2025

指导单位: 中国机械工程学会

主办单位: 中国机械工程学会机械传动分会

承办单位: 吉林农业大学 吉林大学 长春理工大学 教育部机械原理课程群虚拟教研室
中国机械总院集团郑州机械研究所有限公司 高端装备机械传动全国重点实验室

媒体支持: 《机械传动》《机械强度》《机械工程学报》《中国表面工程》《轴承》

