

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2024.059

铁粉含量对磁流变弹性体滞回特性的影响及参数模型研究

马乾瑛, 李 帅, 佟翔鹏, 李 裕

(长安大学建筑工程学院, 西安 710061)

摘要: 制备了铁粉含量分别为 30%、45%、60%、75% 的磁流变弹性体(MREs)样品, 通过试验分析了铁粉含量对 MREs 静态和动态性能的影响。结果表明, 随着铁粉含量增加, 材料拉伸强度和断裂伸长率呈负相关, 过高含量会导致机械性能下降。在阻尼滞回性能方面, 随着铁粉含量增加, 材料的最大阻尼力、等效刚度、储能模量和耗散能显著提高, 呈现明显的非线性趋势; 加载频率对材料性能影响呈现复杂的非线性和耦合效应。文中采用 Bouc-Wen 模型并结合遗传算法, 对材料非线性滞回特性进行了参数识别, 取得了良好的拟合效果。综合分析发现, 60% 铁粉含量试样在不同工况下展现出优异的阻尼耗能性能。研究结果揭示了铁粉含量与 MREs 性能的相关性, 为 MREs 的开发和优化提供了理论依据。

关键词: 磁流变弹性体; 羟基铁粉; 力学性能; 滞回曲线; Bouc-Wen 模型

中图分类号: TU533

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2024)12-001-12

Effect of iron powder content on the hysteretic characteristics of magnetorheological elastomers and parametric model study

MA Qianying, LI Shuai, TONG Xiangpeng, LI Yu

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, P. R. China)

Abstract: This study fabricates magnetorheological elastomer (MRE) samples with iron particle contents of 10%, 30%, 60%, and 75%, investigating how iron particle content influences the static and dynamic properties of MREs through experimental tests. Results show a positive correlation between increasing iron particle content and both tensile strength and elongation at break, although excessively high content leads to reduced mechanical properties. In terms of damping and hysteresis performance, higher iron particle content significantly improves maximum damping force, equivalent stiffness, storage modulus, and dissipated energy, displaying a distinct nonlinear trend. Additionally, the influence of loading frequency on material properties exhibited complex nonlinear and coupling effects. The study employs the Bouc-Wen model combined with a genetic algorithm to identify parameters of the material's nonlinear hysteretic characteristics, achieving a strong fit. Comprehensive analysis identifies the sample with 60% iron particle content as having the best damping and energy dissipation performance across various conditions. These findings reveal the correlation between iron particle content and MRE properties, providing a theoretical foundation for the development and optimization of MREs.

收稿日期: 2024-01-14 网络出版日期: 2024-09-20

基金项目: 国家自然科学基金(51208041); 陕西省自然科学基金(2020SF-382, 2014JM2-5080)。

Supported by National Natural Science Foundation of China(51208041), and Natural Science Foundation of Shaanxi Province(2020SF-382, 2014JM2-5080).

作者简介: 马乾瑛(1982—), 男, 副教授, 博士, 主要从事结构减隔震方向研究, (E-mail)mqy@chd.edu.cn。

Keywords: magnetorheological elastomers; carbonyl iron powder; mechanical properties; hysteresis curve; Bouc-Wen model

磁流变弹性体(MREs)通过将微米级磁性颗粒分散于高分子基体中,有效克服了传统磁流变材料中颗粒沉降的问题,确保了材料性能的长期稳定性与可靠性。在外加磁场作用下能够快速调节其刚度和阻尼性,具有响应速度快、可逆性好、可调性强、结构简单易于集成及良好耐用性等优点,在振动控制、传感感应等多个领域具有广阔的应用前景。

目前的研究主要集中于磁流变弹性体的制备、性能测试、仿真与建模等方面,其中,在制备方面,曾建斌等^[1]分析了固化磁场强度对MREs特性的影响;崔树坤等^[2]制备了MREs扣件弹性垫板,得到了应用磁场可显著增强垫板刚度的结论;徐勇等^[3]基于MREs的管材介质压力成形技术,实现了磁场辅助差异化调控;Patel等^[4]研究了片状电解铁粒子基MREs的黏弹性性能,发现铁粒子的形状和分布显著影响材料的黏弹性特性;Tagliabue等^[5]研究了表面处理铁粒子对苯乙烯-丁二烯基热塑性MREs性能的影响,发现表面处理可以改善材料的耐用性和机械性能。Díez等^[6]通过改变软磁性纳米填料的内容和类型,实现了对热塑性弹性体磁流变功能响应的调整。Tahir等^[7]研究了Fe-Co和Fe-Ni填充MREs的体积分数对剪切性能的影响,发现铁和其他金属填料的体积分数变化显著影响材料的剪切性能。在性能测试方面,刘鹏等^[8]设计了机器人铣削颤振抑制用MREs吸振器,验证了低转速下的减振效果;李昂等^[9]和毛新元等^[10]分别研究了MREs在掘进装备和隔振器中的振动控制效果;王鹏等^[11]提出了一种新的MREs模型参数识别方法。在仿真与建模方面,周亚东等^[12]设计了新型磁流变隔震支座并进行了仿真研究;Wang等^[13]建立了MREs磁相关非线性动态力学本构模型;王鹏等^[14]提出了描述MREs滞回特性的分数阶导数改进Bouc-Wen模型。

已有的研究表明,MREs的性能受到磁性填料的类型、形状、分布、表面处理、含量等多种因素的影响,作为磁性填料,铁粉的含量变化会对MREs的力学性能和磁控特性产生重要影响,因此,开展不同加载工况下铁粉含量对磁流变弹性体静、动力学性能的影响,探究宏观力学性能与微观结构之间的关联,并建立和验证描述MREs力学行为的本构模型,有助于揭示MREs黏弹性、磁流变效应、机械强度等参数之间的定量关系,为材料性能调控提供理论指导。

1 材料和制备

1.1 材料选取

顺丁橡胶^[15]具有优异的弹性和韧性,经硫化处理后弹性进一步提升,压缩变形降低,可显著提高其强度,而天然橡胶具有高强度和良好的黏接性能,可增强填料与基体的界面结合力,将天然橡胶和顺丁橡胶相结合作为基体材料,可以发挥各自的优势,兼顾材料的柔韧性和机械强度,既保证了磁流变弹性体的柔韧性,又提供了适度的硬度和刚度,有利于提高材料的磁致响应能力。因此,进行磁流变弹性体的制备时,采用顺丁橡胶与天然橡胶的复合基体,可实现在大变形条件下保持良好的力学性能,增强磁流变效应。

羟基铁粉表面具有大量羟基基团,相比未处理的铁粉氧化程度低,可提供更优异的磁性,表面活性好,与基体具有良好的相容性,可以与弹性体基体产生强界面相互作用力,增强填料与基体的结合力,提高材料的机械强度和使用寿命,同时其纳米级粒径和良好分散性有利于获得均匀和稳定的磁流变效应。因此,选用羟基铁粉作为制备磁流变弹性体的填料,选用磁性颗粒的参数如表1所示。

表1 羟基铁粉组成成分基本参数
Table 1 Basic parameters of carbonyl iron powder's composition

牌号	Fe含量/%	C含量/%	O含量/%	N含量/%	松装密度/ (g·cm ⁻³)	振实密度/ (g·cm ⁻³)	平均密度/ (g·cm ⁻³)
F02	≥98.5	≤0.1	≤0.4	≤0.1	1.0~3.5	2.5~5.0	2~10

为提高磁流变弹性体的力学性能,采用95%高纯度碳纳米管作为补强填料,选用硫磺作为硫化剂进行网联,并添加促进剂DM、氧化锌和硬脂酸作为活化剂以优化硫化过程。根据羟基铁粉的含量,将样品划分为A、B、C、D 4组,通过对不同配比样品的测试比较,系统研究成分比例对材料性能的影响。制备配方和样品编号如表2所示。

表2 不同铁粉含量的MRE材料的质量配比
Table 2 Mass ratio of MRE materials with different iron powder contents

铁粉含量/%	编号	顺丁橡胶	天然橡胶	羟基铁粉	炭黑	环烷油	硫磺	促DM	氧化锌	硬脂酸
30	A	50	50	60	10	10	2	2	5	1.2
45	B	50	50	120	15	15	2	2	5	1.2
60	C	50	50	250	25	25	2	2	5	1.2
75	D	50	50	520	40	40	2	2	5	1.2

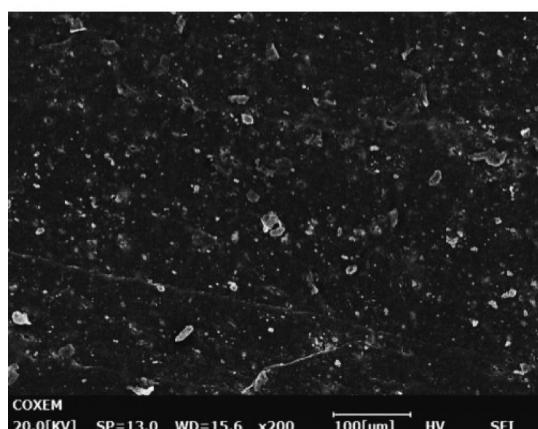
1.2 试样制备

采取有磁场条件下的制备方法,以有效控制磁性颗粒在基体中的排列和取向。将羟基铁粉等磁性颗粒与橡胶基体充分混炼,得到均匀的预混炼胶;然后,将预混炼胶置于外加磁场中进行预结构化处理,使磁性颗粒在磁场的作用下形成链状或柱状的规则排列;最后,在保持外加磁场的同时进行硫化固化,将磁性颗粒的有序结构永久固定在基体中。

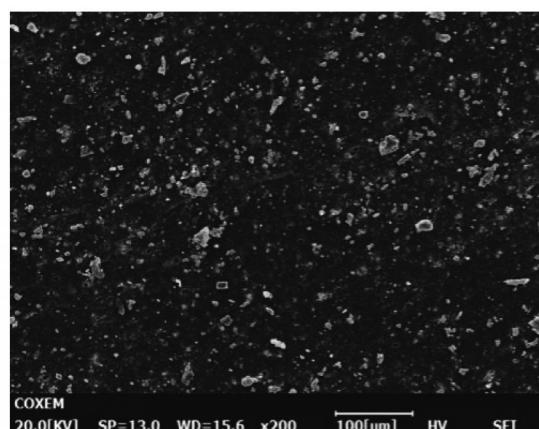
在硫化过程中,为了维持预结构化形成的链状结构完整性,必须施加与预结构化过程相同的外加磁场。此外,优化硫化温度和时间参数至关重要,既要确保硫化反应的完全进行,又要避免过度硫化导致材料力学性能的退化。通过对4组样品(A、B、C、D)硫化过程的比较分析,发现样品的焦烧期和热硫化期相近,根据平坦硫化阶段的工艺正硫化时间,确定最佳硫化条件为140 °C下硫化20 min。其中,C、D组样品的最低扭矩和最高扭矩均高于A、B组,表明铁粉含量会影响基体材料的硫化动力学,铁粉含量越高,硫化反应速率越快。

1.3 微观分析

使用电子扫描显微镜对4组沿磁场方向切开的试样进行扫描,得到内部结构如图1所示。可以看出,随着铁粉含量的增加,材料的微观形貌发生了明显的变化,30%铁粉含量时,材料呈现出较为均匀的基体结构,铁粉颗粒分布相对分散,颗粒之间有明显的间隙;45%铁粉含量时,铁粉颗粒变得更加密集,颗粒间隙减小,材料的整体结构仍然较为均匀;60%铁粉含量时,铁粉颗粒进一步增多,颗粒间几乎没有明显间隙,材料呈现出较为致密的结构;75%铁粉含量时,材料中铁粉颗粒占据主导地位,基体材料较少,铁粉颗粒紧密堆积,形成了高度致密的结构。铁粉含量为75%的样品形成的链状结构数量少于含量为60%的样品,这是因为当铁粉含量接近饱和时,基体中铁粉颗粒之间的排列更加紧密,可用于形成链状结构的空隙减少。这种高填充率下的空间位阻效应,抑制了在外加磁场下铁粉颗粒形成规则排列的链状结构,从而影响材料的宏观性能。



(a) 30%铁粉含量(A组)



(b) 45%铁粉含量(B组)

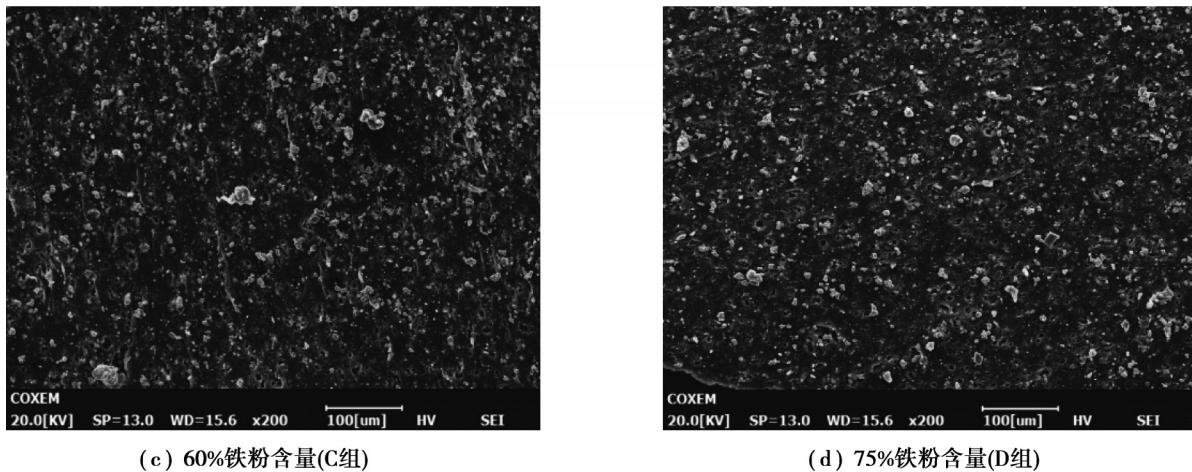


图 1 电镜观测图

Fig. 1 Electron microscope observation images

1.4 拉伸性能

按照国家标准《硫化橡胶或热塑性橡胶拉伸应力应变性能的测定》(GB/T 528—2009)^[16], 对制备的磁流变弹性体材料进行静态拉伸性能测试, 拉伸速率设定为 500 mm/min。对 A、B、C、D 4 组材料分别选取 3 个试样进行拉伸性能测试, 获得了材料的拉伸破坏力-位移曲线, 将试验得到的拉伸强度、断裂伸长率等数据整理于表 3 中, 并绘制出相应的变化趋势如图 2 所示。

表 3 拉伸试验测试结果

Table 3 Tensile test results

铁粉含量/%	拉伸强度 T/MPa	断裂伸长率 $E/\%$	铁粉含量/%	拉伸强度 T/MPa	断裂伸长率 $E/\%$
30	7.88	765	60	6.50	3.75
45	6.85	733	75	3.75	566

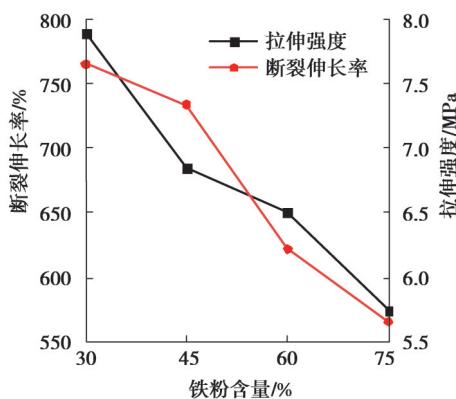


图 2 拉伸强度与断裂伸长率随铁粉含量变化图

Fig. 2 Variation of tensile strength and elongation at break with iron powder contents

表 3 数据表明, 磁流变弹性体的拉伸强度和断裂伸长率与铁粉含量呈负相关。与 A 组相比, B 组样品的拉伸强度降低 1.03 MPa, 断裂伸长率降低 32%; C 组样品的拉伸强度较 B 组进一步降低 0.35 MPa, 断裂伸长率降低 111%。

由图 2 可以看出, 材料的拉伸强度和断裂伸长率随铁粉含量的增加呈线性下降趋势。一方面, 由于铁粉含量的提高增加了材料的刚度, 削弱了材料的弹性变形能力, 导致断裂伸长率下降; 另一方面, 过高的铁粉含量阻碍了硫化过程中橡胶分子链的形成, 从而降低了材料的拉伸强度。

2 滞回性能试验

2.1 加载装置

为深入研究所制备的磁流变弹性体的阻尼滞回性能,设计了三夹板剪切加载装置,如图3所示。外侧对称布置2个夹板,与中板可以产生相对位移,三层板之间对称放置2个圆形磁流变弹性体试件,当中板与外侧板相对移动时,使得被测试的材料样品产生剪切变形。磁流变弹性体试件的厚度为15 mm,剪切面积为7 850 mm²。加载装置外侧的2块铝板通过直径为20 mm的螺栓孔进行连接,确保整体加载装置的稳定性和可靠性,并可以在磁流变弹性体试件上施加预定的压力,为确保实验过程的一致性和可重复性,采用扭矩扳手对螺栓施加精确控制的预紧扭矩,根据螺纹扭矩与轴向预紧力之间的理论关系,通过计算得出了施加在磁流变弹性体试样上的预压应力。为调控实验中的磁场强度,在加载装置的外侧板件上安装了可调节间距的钕磁铁,为实现磁流变弹性体样品的可靠固定,采用铝制螺杆和铜制螺母,通过调节磁铁之间的空间位置,精确控制样品所处的磁场环境。磁场强度由特斯拉仪进行测量,以满足不同工况下的研究需求。动态电液伺服加载系统最大加载频率为30 Hz、行程±200 mm,与作动器串联的测力元件用于记录加载过程中的力数据,位移数据则由线性变量位移传感器采集。

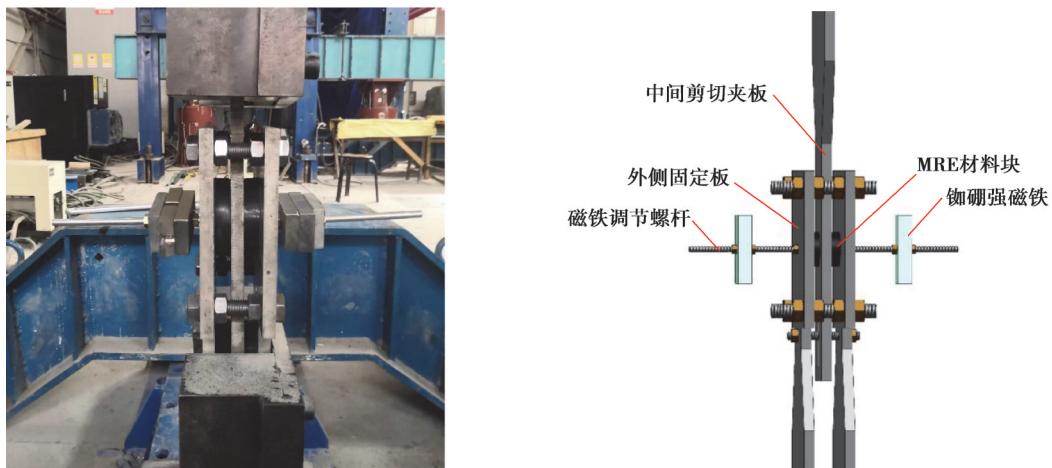


图3 磁流变弹性体剪切加载装置

Fig. 3 Shear loading apparatus for magnetorheological elastomers

试验共测得30%、45%、60%、75% 4种不同铁粉含量的材料在不同外加磁场下的滞回曲线,加载幅值为支座设计限定的最大幅值40%,加载频率为0.5 Hz与1.0 Hz,加载工况如表4所示。

表4 加载工况及变量表

Table 4 Loading conditions and variables

铁粉含量/%	磁场强度/mT	加载频率/Hz	加载幅值/%
30,45,60,75	20,40,60,80	0.5,1.0	40

2.2 评价指标

磁流变弹性体的力学性能^[17]包括最大阻尼力 F_{\max} 、等效刚度 K_{eqv} 、储能模量 G' 、耗散能 E_d 、损耗模量 G'' 和损耗因子 η ,耗散能 E_d 以滞回曲线面积表示。对试验获得的滞回曲线进行深入分析以计算各项力学指标,如图4所示。

最大阻尼力为滞回曲线中提取正负向载荷的最大值,取其绝对值的平均值即为最大阻尼力。计算公式为

$$F_{\max} = \frac{(|F_{\max}^+| + |F_{\max}^-|)}{2} \quad (1)$$

采用滞回曲线上正负向最大位移两点之间的割线斜率来计算等效刚度,表达式为

$$K_{\text{eqv}} = \frac{(|F_1^+| + |F_1^-|)}{(|u_{\max}^+| + |u_{\max}^-|)} \quad (2)$$

储能模量为滞回曲线在最大位移处的割线斜率,反映材料在变形过程中储存弹性能量的能力。剪切储能模量计算公式为

$$G' = \frac{\tau'}{\gamma} \quad (3)$$

$$\tau' = \frac{F_1^+}{i \cdot A} \quad (4)$$

式中: i 为弹性体材料层数; A 为单层弹性体材料接触截面面积; γ 为位移幅值与弹性体层厚度之比。

根据复数模量的概念,损耗模量等于滞回曲线上最大载荷点与最大位移点之间连线的斜率。损耗模量计算公式为

$$G'' = \eta \cdot G' \quad (5)$$

$$\eta = \frac{F_2^+}{F_1^+} \quad (6)$$

式中, η 为损耗因子。

2.3 试验结果及分析

试验结果绘制成滞回曲线如图 5 所示,从不同工况下的滞回曲线可以看出,随着外加磁场强度的增加,同一铁粉材料的滞回曲线斜率相应增大,在 1 Hz 的工作频率下,滞回曲线比 0.5 Hz 时更为饱满。

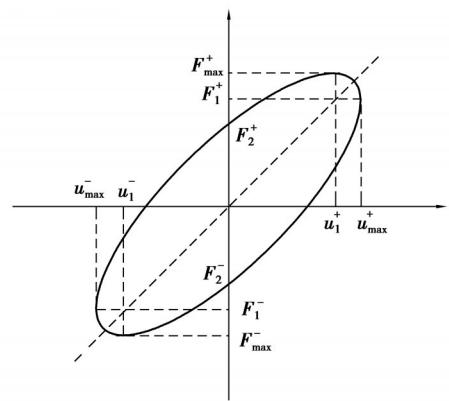
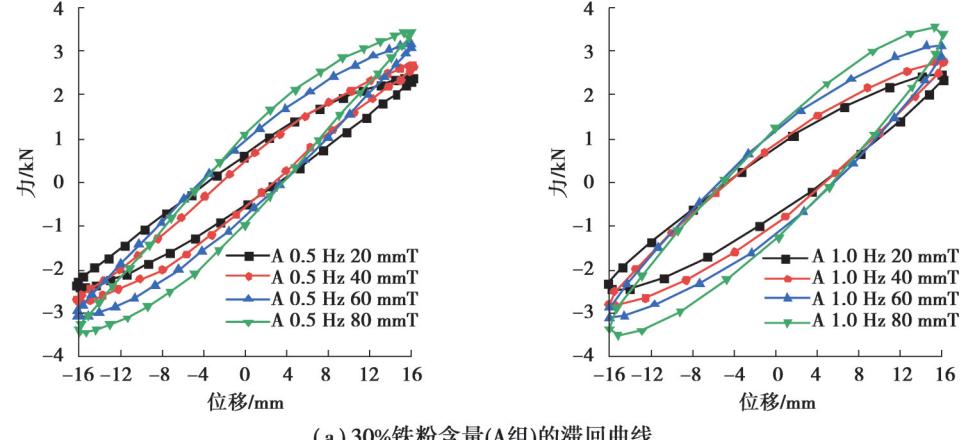
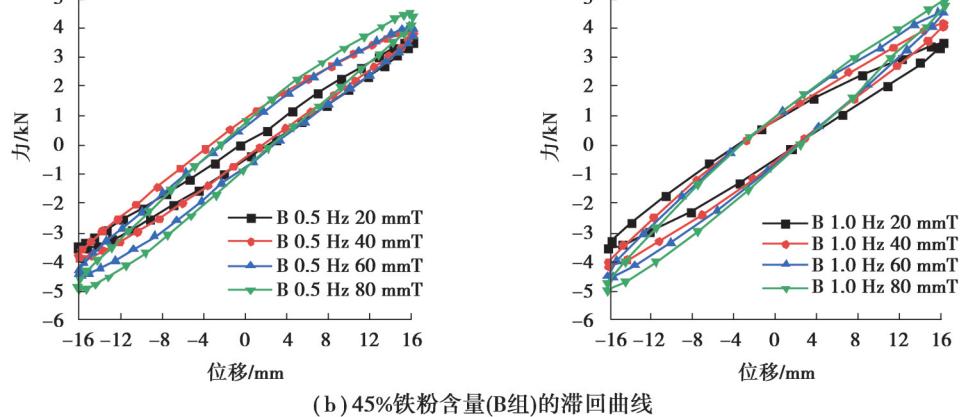


图 4 滞回曲线指标

Fig. 4 Hysteresis curve indicators



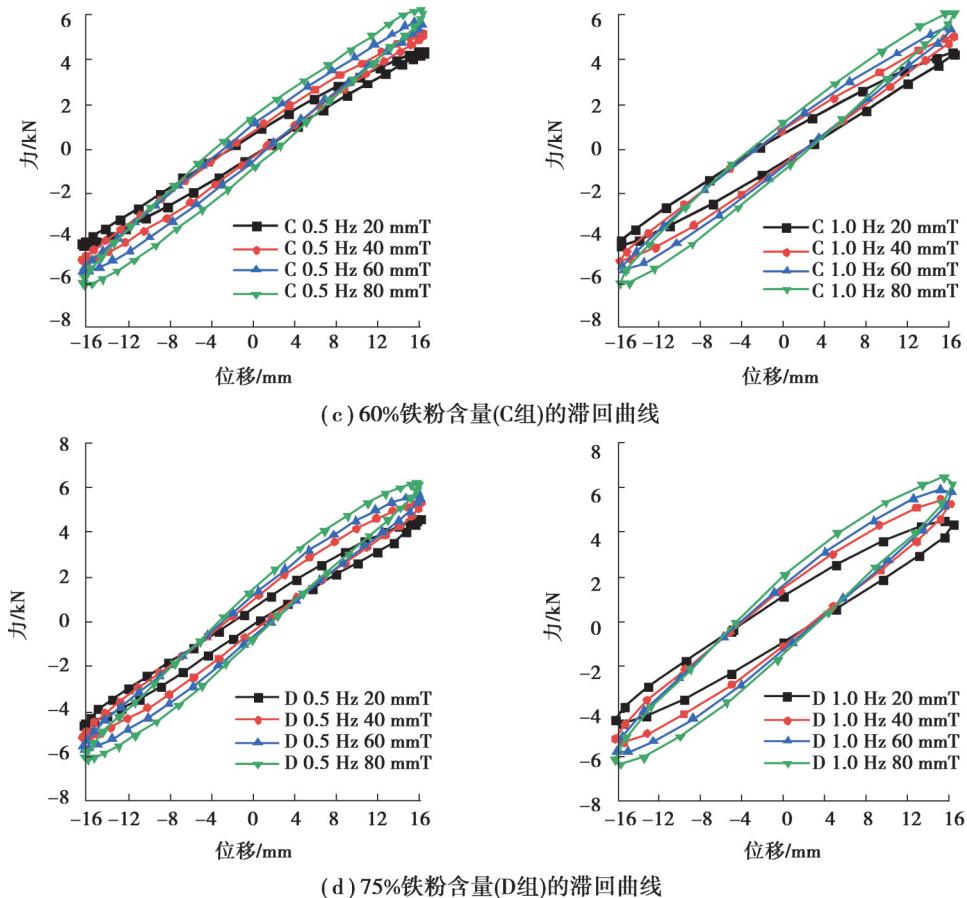


图 5 不同加载工况下的滞回曲线

Fig. 5 Hysteresis curves under different loading conditions

对试验得到的滞回曲线进行处理后,得出了 4 种不同配方的 MRE 材料的力学性能如表 5 所示。可以看出,对于所有铁粉含量的样品,随着磁场强度的增加,最大阻尼力、等效刚度、储能模量、耗散能、损耗模量和损耗因子都呈现出明显的上升趋势。以 30% 和 75% 铁粉含量试样为例,在 0.5 Hz 加载频率下,30% 铁粉含量的样品在磁场强度从 20 mT 增加到 80 mT 时,最大阻尼力从 2.390 0 kN 增加到 3.436 1 kN,提高了 43.77%;75% 铁粉含量的样品在相同条件下,最大阻尼力从 4.610 0 kN 增加到 6.162 3 kN,提高了 33.67%。在 1.0 Hz 加载频率下,30% 铁粉含量的样品在磁场强度从 20 mT 增加到 80 mT 时,最大阻尼力从 2.455 0 kN 增加到 3.519 3 kN,提高了 43.34%;75% 铁粉含量的样品在相同条件下,最大阻尼力从 4.510 0 kN 增加到 6.408 3 kN,提高了 42.09%。

不同铁粉含量,在 1.0 Hz、80 mT 工况下,随着铁粉含量从 30% 增加到 75%,最大阻尼力从 3.519 3 kN 增加到 6.408 3 kN,提高了 82.09%。等效刚度从 0.208 3 kN/mm 增加到 0.379 0 kN/mm,提高了 81.95%。储能模量从 532.793 2 kPa 增加到 969.366 4 kPa,提高了 81.94%。耗散能从 59.303 7 kN·mm 增加到 83.403 0 kN·mm,提高了 40.62%。损耗模量从 193.991 2 kPa 增加到 314.379 6 kPa,提高了 62.07%。损耗因子从 0.364 1 降低到 0.324 3,降低了 10.93%,可见,在相同的磁场强度和加载频率下,提高铁粉含量可以显著改善磁流变弹性体的力学性能。最大阻尼力、等效刚度、储能模量、耗散能和损耗模量都随铁粉含量的增加而大幅提高,幅度在 40.62% 到 82.09% 之间。损耗因子的变化趋势与其他性能指标不同,在相同的磁场强度和加载频率下,损耗因子随铁粉含量的增加反而降低,降低幅度为 10.93%,这是由于铁粉含量的增加在提高材料刚度的同时,也限制了材料的黏弹性变形和能量耗散能力。

加载频率对磁流变弹性体力学性能的影响因铁粉含量和磁场强度的不同而异,不同工况下材料性能对加载频率的敏感性存在显著差异。对于 30% 铁粉含量样品,提高加载频率总体上会导致材料的最大阻尼力、

耗散能和损耗模量的提高,而等效刚度和储能模量略有下降;对于 75% 铁粉含量样品,提高加载频率在低磁场强度(20 mT)下会导致最大阻尼力、等效刚度和储能模量的下降,而耗散能、损耗模量和损耗因子大幅提高;在高磁场强度(80 mT)下,提高加载频率会导致最大阻尼力、耗散能、损耗模量和损耗因子的提高,而等效刚度和储能模量变化很小;对于中等铁粉含量(45% 和 60%)样品,加载频率对材料性能的影响介于低铁粉含量和高铁粉含量样品之间,不同工况下材料性能对加载频率的敏感性存在一定的差异和不确定性。可见,加载频率对磁流变弹性体力学性能的影响具有明显的非线性和复杂性,受材料组分、磁场强度等因素的综合影响。

磁场强度和铁粉含量对磁流变弹性体力学性能的影响存在显著的耦合效应,在低铁粉含量(30%)条件下,提高磁场强度对材料性能的增强效果相对较小,最大阻尼力、等效刚度、储能模量、耗散能和损耗模量的提高幅度在 43%~68% 之间;而在高铁粉含量(75%)条件下,提高磁场强度对材料性能的增强效果更加显著,提高幅度可达 60%~133%;在低磁场强度(20 mT)条件下,提高铁粉含量对材料的最大阻尼力、等效刚度和储能模量的增强效果显著,提高幅度可达 83%~96%,而在高磁场强度(80 mT)条件下,提高铁粉含量对材料性能的增强效果相对较小,提高幅度在 25%~82% 之间。对于耗散能和损耗模量,在低磁场强度(20 mT)条件下,提高铁粉含量会导致这 2 个性能指标略有下降,而在高磁场强度(80 mT)条件下,提高铁粉含量则会导致耗散能和损耗模量的提高。对于损耗因子,在大多数工况下,提高铁粉含量都会导致损耗因子的下降,而提高磁场强度则会导致损耗因子的提高。

表 5 不同加载工况下的力学性能

Table 5 Mechanical properties under different loading conditions

加载 频率	铁粉 含量/%	磁场 强度/mT	最大阻 尼力/kN	等效刚度/ $(kN \cdot mm^{-1})$	储能模量/ kPa	耗散能/ $(kN \cdot mm)$	损耗模量/ kPa	损耗 因子
0.5 Hz	30	20	2.390 0	0.145 5	377.196 8	26.893 4	102.736 4	0.272 4
		40	2.706 5	0.163 3	424.039 2	28.210 8	124.443 6	0.293 5
		60	3.119 7	0.190 4	481.351 6	38.473 6	143.000 8	0.297 1
		80	3.436 1	0.212 0	542.949 2	43.337 4	172.358	0.317 4
	45	20	3.464 7	0.170 0	487.334	26.388 2	100.796 4	0.207 4
		40	3.896 9	0.234 8	603.026 8	32.836 8	138.839 6	0.230 2
		60	4.246 1	0.261 0	669.086 4	36.604 6	133.873 6	0.200 1
		80	4.724 1	0.286 9	734.885 6	40.312 6	159.753 2	0.217 4
	60	20	4.370 0	0.265 9	682.773 6	21.953 4	97.096 8	0.142 2
		40	5.134 2	0.312 8	802.302 0	27.284 0	116.241 6	0.144 9
		60	5.648 6	0.345 7	879.668 0	36.104 8	160.324 8	0.182 3
		80	6.178 9	0.376 6	960.529 6	54.923 6	212.898 8	0.221 6
	75	20	4.610 0	0.284 6	733.703 2	23.441 6	92.707 6	0.126 4
		40	5.277 9	0.320 0	835.699 2	37.374 4	142.222 8	0.170 2
		60	5.667 2	0.338 8	872.806 8	46.955 4	182.172 0	0.208 7
		80	6.162 3	0.377 7	971.715 6	54.677 8	216.464 4	0.222 8

续表 5

加载 频率	铁粉 含量/%	磁场 强度/mT	最大阻 尼力/kN	等效刚度/ (kN·mm ⁻¹)	储能模量/ kPa	耗散能/ (kN·mm)	损耗模量/ kPa	损耗 因子
1.0 Hz	30	20	2.455 0	0.143 6	371.626 0	36.315 7	122.986 4	0.330 9
		40	2.777 6	0.171 6	442.069 6	40.402 9	142.726 0	0.322 9
		60	3.109 7	0.186 2	456.132 4	53.192 5	185.275 2	0.406 2
		80	3.519 3	0.208 3	532.793 2	59.303 7	193.991 2	0.364 1
	45	20	3.530 0	0.218 2	561.816 0	31.379 3	137.100 4	0.244 0
		40	4.175 6	0.250 0	644.116 4	33.348 9	137.609 6	0.213 6
		60	4.518 1	0.277 8	719.072 0	36.682 5	154.722 0	0.215 2
		80	4.518 1	0.299 1	754.925 6	40.060 7	157.819 6	0.209 1
	60	20	4.345 0	0.261 5	674.020 0	29.785 7	122.132 4	0.181 2
		40	5.048 3	0.314 0	803.458 0	35.894 6	148.754 8	0.185 1
		60	5.472 7	0.335 9	853.005 2	40.748 4	164.654	0.193 0
		80	6.072 7	0.376 9	966.490 8	52.114 1	202.084 4	0.209 1
	75	20	4.510 0	0.268 2	689.139 6	52.092 3	184.070 0	0.267 1
		40	5.427 6	0.325 2	830.148 4	62.505 8	230.778 0	0.278 0
		60	5.863 0	0.359 9	912.252 4	70.722 5	251.149 6	0.275 3
		80	6.408 3	0.379 0	969.366 4	83.403 0	314.379 6	0.324 3

从材料的阻尼耗能角度分析, 铁粉含量对磁流变弹性体的耗散能、损耗模量和损耗因子的影响呈现出复杂的非线性特征, 在不同加载工况下表现出显著差异, 尽管 75% 铁粉含量样品在各测试条件下均展现出最优的阻尼力、等效刚度和储能模量, 但 60% 铁粉含量样品却在各工况下表现出更为优异的耗散能和损耗模量, 同时维持较高水平的损耗因子, 综合评估材料的刚度、强度及阻尼耗能, 60% 铁粉含量样品在各测试工况下均展现出最为平衡和优异的综合力学性能, 可以将其视为磁流变弹性体的最优铁粉添加比例。

3 模型参数辨识

为了准确描述磁流变弹性体的非线性滞回特性, 采用 Bouc-Wen 模型^[18]对其滞回曲线进行参数识别。Bouc-Wen 模型是一种广泛应用于滞回系统建模的微分方程模型, 由于 Bouc-Wen 模型中包含多个非线性参数, 传统的参数辨识方法难以获得全局最优解。因此, 文中引入遗传算法这一智能优化方法, 对 Bouc-Wen 模型进行参数识别, 以期获得最优的模型参数, 实现磁流变弹性体滞回特性的精确建模。得到拟合力 $F_{\text{sim}}(t)$ 后, 可得拟合的滞回曲线, 将其与实测所得曲线进行对比, 以 60% 含量试样为例, 得到拟合前后滞回曲线如图 6 所示。

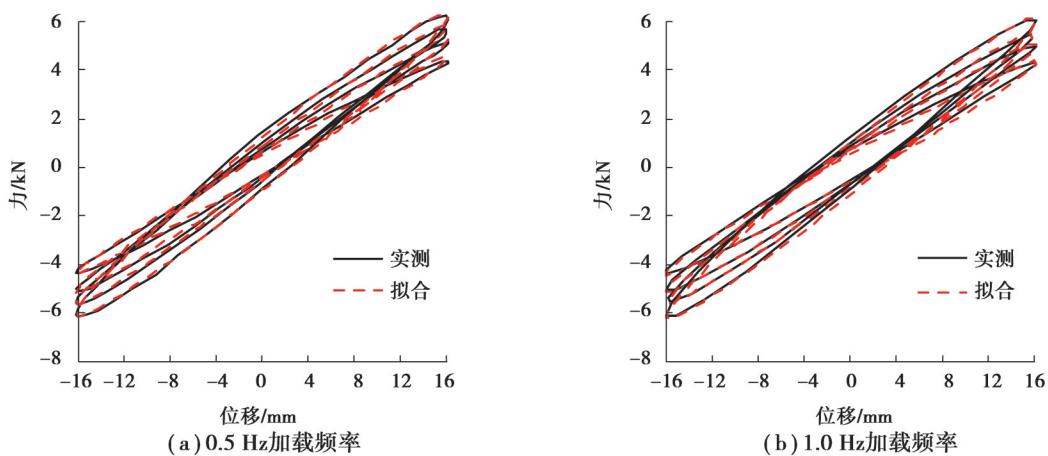


图 6 拟合与实测所得滞回曲线对比图

Fig. 6 Comparison of fitted and experimentally obtained hysteresis curves

可以看出,基于遗传算法优化的 Bouc-Wen 模型对 60% 铁粉含量 MRE 材料的力学性能具有较高的拟合精度,各项力学指标的实测值与拟合值吻合较好,通过力学性能之间的误差对拟合精度进行定量分析,得到各项力学性能数值之间的对比结果如表 6 所示。可以看出,对于最大阻尼力,模型的拟合值与实测值之间的相对误差在 0.97%~2.39% 之间,平均误差为 1.71%,说明 Bouc-Wen 模型能够准确描述 MRE 材料在循环载荷作用下的阻尼力峰值。等效刚度和储能模量的拟合误差分别为 1.35% 和 1.43%,误差范围分别是 0.14%~2.75% 和 0.16%~3.04%,表明模型能够高精度预测材料在载荷作用下的刚度和储能特性。耗散能的拟合结果也显示出较好的一致性,其相对误差在 0.68%~2.64% 之间,平均误差为 1.51%,证明了 Bouc-Wen 模型可以合理估计 MRE 材料在循环载荷下的能量耗散能力。损耗模量的拟合误差略高,误差在 6.89%~9.62% 之间,平均误差为 8.45%。损耗因子的拟合误差在 3.62%~11.18% 之间,平均误差为 7.25%,相对较大,考虑到损耗因子是衡量材料阻尼性能的无量纲参数,该误差仍可接受。

上述结果验证了 Bouc-Wen 模型在描述 MRE 材料的非线性滞回行为方面的适用性和可靠性,为材料的性能评估、优化设计和工程应用奠定了坚实的理论基础。模型的普适性和参数的优化通过遗传算法实现,进一步提高了模型的拟合精度和预测能力。

表 6 60% 铁粉含量 MRE 材料实测与拟合所得力学性能的对比及误差

Table 6 Comparison and error of mechanical properties experimentally measured and fitted

磁场 强度/ mT	加载 频率/ Hz	最大阻尼力/kN			等效刚度/(kN·mm ⁻¹)			储能模量/MPa		
		实测	拟合	误差	实测	拟合	误差	实测	拟合	误差
20	0.5	4.37	4.47	0.023 9	0.27	0.27	0.027 5	682.76	703.56	0.030 4
	1.0	4.35	4.43	0.019 3	0.26	0.27	0.013 8	674.04	677.64	0.005 4
40	0.5	5.13	5.23	0.018 4	0.31	0.32	0.026 8	802.32	819.24	0.021 1
	1.0	5.05	5.12	0.013 8	0.31	0.32	0.013 8	803.44	814.56	0.013 8
60	0.5	5.65	5.77	0.021 5	0.35	0.35	0.015 3	879.68	895.84	0.018 4
	1.0	5.47	5.57	0.017 2	0.34	0.34	0.009 0	853.00	854.36	0.001 6
80	0.5	6.18	6.24	0.009 7	0.38	0.38	0.001 4	960.52	965.20	0.004 8
	1.0	6.07	6.14	0.011 2	0.38	0.38	0.010 1	966.48	975.16	0.009 0
磁场 强度/ mT	加载 频率/ Hz	耗散能/(kN·mm)			损耗模量/MPa			损耗因子		
		实测	拟合	误差	实测	拟合	误差	实测	拟合	误差
20	0.5	21.95	21.78	0.007 7	97.1	87.8	0.096 2	0.142 2	0.126 3	0.111 8
	1.0	29.79	29.16	0.021 0	122.1	111.4	0.087 5	0.181 2	0.164 9	0.089 7
40	0.5	27.28	27.60	0.011 7	116.2	106.0	0.088 5	0.144 9	0.134 9	0.068 9
	1.0	35.89	36.50	0.016 8	148.8	136.2	0.084 2	0.185 1	0.172 7	0.067 3
60	0.5	36.10	36.53	0.011 7	160.3	147.2	0.082 1	0.182 3	0.168 6	0.075 4
	1.0	40.75	41.82	0.026 4	164.6	153.3	0.068 9	0.193 0	0.186 0	0.036 2
80	0.5	54.92	55.29	0.006 8	212.9	193.0	0.093 5	0.221 6	0.209 2	0.055 8
	1.0	52.11	52.91	0.015 3	202.1	185.5	0.082 2	0.209 1	0.199 7	0.045 0

4 结 论

文中研究了不同铁粉含量对磁流变弹性体性能的影响, 通过实验测试和模型参数辨识, 得出以下结论:

- 1) 铁粉含量对磁流变弹性体的力学性能有显著影响, 拉伸强度、断裂伸长率随铁粉含量增加而提高。
- 2) 在阻尼滞回性能方面, 随着铁粉含量和外加磁场强度的增加, 材料的最大阻尼力、等效刚度、储能模量和耗散能均呈现明显增强趋势。
- 3) Bouc-Wen 模型能有效描述磁流变弹性体的非线性滞回特性, 通过遗传算法参数识别获得良好的模型拟合结果。
- 4) 在综合评价各项力学性能后, 发现 60% 铁粉含量样品在不同工况下表现出优异的阻尼耗能性能, 为磁流变弹性体最佳铁粉添加比例。

参考文献

- [1] 曾建斌, 葛现伟, 刘晋彤, 等. 固化磁场强度对磁流变弹性体特性的影响[J]. 磁性材料及器件, 2023, 54(5): 71-77.
Zeng J B, Ge X W, Liu J T, et al. Effect of curing magnetic field strength on properties of magnetorheological elastomers[J]. Journal of Magnetic Materials and Devices, 2023, 54(5): 71-77.(in Chinese)
- [2] 崔树坤, 王亚洲, 周尧, 等. 磁流变弹性体扣件弹性垫板制备及弹性可调性能研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(10): 3759-3767.
Cui S K, Wang Y Z, Zhou Y, et al. Preparation and elastic-adjustable performance of magnetorheological elastomer rail pad for fastening system[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(10): 3759-3767.(in Chinese)
- [3] 徐勇, 李昊, 郭训忠, 等. 基于磁流变弹性体的新型管材成形技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2022, 65(10): 14-22.
Xu Y, Li H, Guo X Z, et al. Research progress on novel tube forming technology based on magnetorheological elastomer[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(10): 14-22.(in Chinese)
- [4] Patel D, Upadhyay R V, Mazlan S A. Particle-reinforced elastomer model to analyse viscoelastic properties of flake-shaped electrolyte iron particle-based magnetorheological elastomer[J]. Smart Material Structures, 2023, 32(9): 095011.
- [5] Tagliabue A, Eblagon F, Clemens F. Analysis of styrene-butadiene based thermoplastic magnetorheological elastomers with surface-treated iron particles[J]. Polymers, 2021, 13(10): 1597.
- [6] Díez A G, Tubio C R, Gómez A, et al. Tuning magnetorheological functional response of thermoplastic elastomers by varying soft-magnetic nanofillers[J]. Polymers for Advanced Technologies, 2022, 33(8): 2610-2619.
- [7] Tahir S, Usman M, Umer M A. Effect of volume fraction on shear mode properties of Fe-co and Fe-Ni filled magneto-rheological elastomers[J]. Polymers, 2022, 14(14): 2968.
- [8] 刘鹏, 李波, 赵威, 等. 一种机器人铣削颤振抑制用磁流变弹性体吸振器的设计与试验研究[J/OL]. 振动工程学报, 2024 [2024-01-15]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1349.tb.20240111.2306.004>.
Liu P, Li B, Zhao W, et al. Design and experimental study of a magnetorheological elastomer vibration absorber for robot milling chatter suppression[J/OL]. Journal of Vibration Engineering, 2024[2024-01-15]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1349.tb.20240111.2306.004>. (in Chinese)
- [9] 李昂, 郭治富, 王腾, 等. 基于磁流变弹性体动力吸振器的掘进装备振动控制[J]. 机电工程, 2024, 41(5): 901-912.
Li A, Guo Z F, Wang T, et al. Vibration reduction of tunneling equipment using magnetorheological elastomer dynamic vibration absorber[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2024, 41(5): 901-912.(in Chinese)
- [10] 毛新元, 祁若龙, 石怀涛, 等. 基于混合式磁流变-橡胶隔振器的设计、分析与实验研究[J]. 机电产品开发与创新, 2023, 36(3): 141-145.
Mao X Y, Qi R L, Shi H T, et al. Design, analysis and experimental study of hybrid MRF-rubber vibration isolator[J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2023, 36(3): 141-145.(in Chinese)
- [11] 王鹏, 杨绍普, 刘永强, 等. 一种磁流变弹性体模型参数识别新方法及其应用研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(11): 189-198, 224.
Wang P, Yang S P, Liu Y Q, et al. A new method for parametric identification of MRE model and its application[J]. Journal of

- Vibration and Shock, 2022, 41(11): 189-198, 224.(in Chinese)
- [12] 周亚东, 葛爱迪, 闫敏杰, 等. 新型磁流变隔震支座的力学动态性能研究[J]. 地震工程与工程振动, 2024, 44(1): 178-186.
Zhou Y D, Ge A D, Yan M J, et al. Study on mechanical dynamic performance of new magnetorheological isolation bearing[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2024, 44(1): 178-186.(in Chinese)
- [13] Wang B C, Li Y, Pang H M, et al. Constitutive modeling of the magnetic-dependent nonlinear dynamic behavior of isotropic magnetorheological elastomers[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2024, 54(1): 0106.
- [14] 王鹏, 杨绍普, 刘永强, 等. 一种描述磁流变弹性体滞回特性的分数阶导数改进 Bouc-Wen 模型[J]. 工程科学学报, 2022, 44(3): 389-401.
Wang P, Yang S P, Liu Y Q, et al. Modified Bouc-Wen model based on a fractional derivative for describing the hysteretic characteristics of magnetorheological elastomers[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(3): 389-401.(in Chinese)
- [15] 王浩, 李兰阁, 王日国, 等. 硫化温度对天然橡胶/顺丁橡胶/反式丁戊橡胶并用胶性能的影响[J]. 橡胶工业, 2024, 71(1): 19-23.
Wang H, Li L G, Wang R G, et al. Influence of vulcanization temperature on properties of NR/BR/TBIR blend[J]. China Rubber Industry, 2024, 71(1): 19-23.(in Chinese)
- [16] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 硫化橡胶或热塑性橡胶 拉伸应力应变性能的测定: GB/T 528—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Rubber, vulcanized or thermoplastic-Determination of tensile stress-strain properties: GB/T 528—2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009. (in Chinese)
- [17] 高宇, 杨伟, 范家浩, 等. 颗粒链取向对磁流变弹性体磁致剪切模量的影响[J]. 重庆大学学报, 2022, 45(3): 41-48.
Gao Y, Yang W, Fan J H, et al. Effect of particle chain orientation on MRE magneto-induced shear modulus[J]. Journal of Chongqing University, 2022, 45(3): 41-48.(in Chinese)
- [18] 杨宇, 杨庆山, 王奇. 基于 Bouc-Wen 模型等效线性化的磁流变弹性体调谐质量阻尼器优化设计[J]. 土木工程与管理学报, 2023, 40(1): 98-108.
Yang Y, Yang Q S, Wang Q. Optimal design of magnetorheological elastomer tuned mass damper based on equivalent linearization of bouc-Wen model[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2023, 40(1): 98-108.(in Chinese)

(编辑 陈移峰)