研究性论文



www.scifootprint.com/Article/List_PCMS.html

磁流变弹性体轴向磁流变效应与 剪切磁流变效应对比研究

李江涛¹, 王 奇², 佟 昱³, 马 宁^{1,*}, 曾耀祥⁴, 赵佳敏⁴, 董旭峰^{3,*}

(1.大连理工大学土木工程学院,大连116024;2.海南大学土木建筑工程学院,海口570228;3.大连理工大学材料科学与工程学院,大连116024;4.北京宇航系统研究所,北京100076)

摘要:磁流变弹性体(Magnetorheological Elastomer, MRE)的磁流变效应表现为其黏弹性可由磁 场实时可逆调控。MRE 智能变刚度隔震装置主要利用材料在剪切方向的磁流变效应,因此对 MRE 磁流变效应的研究集中在剪切方向,然而在竖向隔震中主要依赖于 MRE 的轴向磁流变效 应,为此,本文通过试验对 MRE 在轴向荷载作用下的磁流变效应进行研究,并将其与剪切荷载下 的磁流变效应进行对比分析。基于电子万能试验机及励磁装置设计轴向磁流变效应测试系统,并 采用旋转流变仪研究其剪切磁流变效应。两种模式下,磁场强度在 0~184kA/m 间调节,应变幅 值范围为 5%~15%。测试得到不同磁场下 MRE 的拉压滞回曲线及剪切滞回曲线,并计算其在不 同工况下的黏弹性力学参数。试验结果表明, MRE 在轴向荷载下具有良好的磁致变模量、变阻尼特 性;与剪切工作模式相比,拉压工作模式下的储能模量及损耗模量均有提高, 而阻尼损耗因子较小。 关键词:磁流变弹性体;轴向磁流变效应;剪切磁流变效应

DOI:10. 48014/pcms. 20220327004

引用格式:李江涛,王奇,佟昱,等.磁流变弹性体轴向磁流变效应与剪切磁流变效应对比研究[J]. 中国材料科学进展,2022,1(1):1-10.

0 引言

我国目前已有的住宅和工业建筑中,使用了大 量的振动设备,比如民用建筑中的风机、制冷机、压 气机,工业建筑中的汽轮机、选煤设备(振动筛、离 心机等)、水压机等。建筑物前期设计时,设备荷载 通常考虑为设备重量对结构物的作用,对于后期生 产过程中出现的振动无法充分考虑,导致设备运 行、更新换代以及生产工艺提升过程中出现一系列 振动问题。振动过大不仅影响设备的使用寿命和 安全生产、危害生产工人的身心健康,甚至可能对 建筑结构造成破坏性的损坏^[1-4]。一般的设备减振 隔振装置无法根据振动工况的变化实时调整系统 的刚度或阻尼,甚至存在放大振动的风险。开发具 有刚度或阻尼可调的智能减隔振装置是亟待解决 的问题。具有动态黏弹性实时调节特性的智能材 料是智能减隔振装置设计开发的基础。

磁流变弹性体(Magnetorheological Elastomer,MRE)作为一种新型磁流变智能材料,其动态 黏弹性(储能模量、损耗模量和损耗因子)可以通过 外加磁场迅速、连续、可逆地进行控制,其在土木工 程结构及运载工程结构的智能减隔振中具有广阔 的应用前景^[5-10]。磁流变弹性体通常由磁性颗粒分 散于弹性体基体中制备而成。为增强其剪切磁流 变效应,在薄片形 MRE 制备过程中,通常沿其厚度

* 通讯作者 Corresponding author:马宁, maning@dlut.edu.cn; 董旭峰, dong xf@dlut.edu.cn 收稿日期: 2022-03-27; 录用日期: 2022-04-08; 发表日期: 2022-06-28

其今 (6 日, 国家 白 就 刹 学 其 今 (6 日 (5 9 17 9 4 5 0)) 资 册

基金项目:国家自然科学基金项目(52178459)资助

方向施加取向磁场,使磁性颗粒在基体中形成链状 预结构。现有的 MRE 变刚度隔震支座主要用于控 制结构在水平荷载下的振动^[11-17],利用的是薄片形 MRE 在平面剪切方向(垂直于颗粒成链方向)的磁 流变效应,因此目前对 MRE 的力学性能评价主要 关注其在不同磁场下的剪切动态黏弹性^[18-23]。

然而,建筑物上的振动设备通常以竖向振动为 主要振动模式,MRE 智能隔振支座主要承受轴向 拉压荷载,此时须关注 MRE 在平行于颗粒成链方 向的磁流变效应^[24],即轴向磁流变效应。Kallio 等^[18]利用材料试验机测试了 MRE 压缩方向的力学 特性,得到了其压缩模量和阻尼特性随磁场强度、 频率和应变幅值的变化趋势;Popp等^[25]建立了理 论分析模型,预测 MRE 在不同轴向应变幅值和频 率下的储能模量,理论值与单自由度振动试验吻合 较好;王宇飞等^[26]利用 MTS 试验机对 MRE 进行 了动态压缩性能测试,结果表明预压缩量增加时 MRE 的磁流变效应减小;Fereidooni等^[27]利用 MTS858 疲劳试验机对 MRE 进行了动态拉压试 验,探究了储能模量、损耗模量、损耗因子随磁场强 度、加载频率变化的变化规律。

为测试 MRE 在不同磁场下的轴向动态黏弹 性,上述研究普遍采用在疲劳试验机测试系统中附 加励磁装置的方法。受测试环境的限制,该测试方 法存在结构复杂、磁场强度较小、稳定性差等问题。 相较于轴向磁流变效应测试系统,基于旋转流变仪 的剪切磁流变效应测试技术更为成熟,测试系统结 构较为简单,磁场强度更高,且试验误差相对较小。 因此,建立 MRE 剪切磁流变效应与其轴向磁流变 效应的关系,对于评价 MRE 轴向磁流变效应,指导 MRE 竖向隔震支座的设计具有实际意义。

1 实验设置

1.1 样品制备

制备 MRE 使用的填充相材料为平均粒径 4μm 的羰基铁粉(德国巴斯夫有限责任公司提供),基体 为室温固化的双组分 RTV 硅橡胶(珠海市固加新 材料有限公司提供)。MRE 制备过程中,使用黏度 为 100cSt 的二甲基硅油以减少磁性颗粒的团聚。 羰基铁粉的体积分数为 30%,液态硅橡胶和二甲基 硅油的质量比为 1:1,固化剂的质量为液态硅橡胶 质量的 2%。橡胶类材料的拉压力学性能会受到第 一形状系数 S₁的影响,其计算公式为:

$$S_1 = \frac{D}{4t} \tag{1}$$

式中,D 为样品的横截面直径,t 为样品厚度。 MRE 拉压动态黏弹性测试普遍采用的第一形状系 数在 0.56 到 1 之间,本文取第一形状系数为 1,样 品直径为 20mm,厚度为 5mm。根据旋转流变仪的 测试要求及前人研究,剪切动态黏弹性测试样品直 径为 20mm,厚度为 1mm。

1.2 实验方法和原理

轴向磁流变效应测试系统包括微机控制电子 万能试验机(CMT4504GD)、数据采集系统、供磁装 置三个部分。如图1所示,电子万能试验机用于施 加轴向拉压循环荷载;数据采集系统主要包括 LVDT、力学传感器、IMC采集系统三个部分,用于 采集位移及加载力:供磁装置为 MRE 样品施加可 控磁场,主要包括供磁线圈、隔磁外套、铁芯等。隔 磁外套一方面与铁芯形成闭合磁路,减小磁阻,增 加样品处的磁场强度,另一方面可以减小磁场泄露 对加载设备和测量设备的影响。隔磁外套的正面 开探测孔,以便应用高斯计对磁场强度与线圈两端 电流的关系进行标定。样品置于上部铁芯和下部 铁芯之间,通过铝块与铁芯相连。铝块的作用是增 加样品处的磁阻,避免加载过程中因样品高度变化 导致样品处磁场强度发生明显改变。对 MRE 进 行循环加载, 位移幅值分别为 0.25m、0.5mm、 0.75mm(换算为应变幅值为5%、10%、15%),供 磁装置施加磁场强度分别为 0kA/m、46kA/m、 92kA/m、139kA/m、186kA/m。 根据 Vatandoost 等[24]的研究,不同预加压应变(6%、11%和21%)会 对 MRE 的拉压力学特性产生影响。由于在本试验 中为了探究 MRE 在较大应变幅值(5%~15%)下 的轴向磁流变效应,同时为了避免将样品压坏,将 MRE 的 预 加 压 应 变 取 为 5% (预 压 缩 量 为 0.25mm)。本试验共计测试 15 个工况。

储能模量 E'的计算公式为:

$$E' = \frac{E_t + E_c}{2} \tag{2}$$

n' + n'





式中, E'_t、E'_c分别为滞回曲线受拉侧和受压侧的对 角线斜率。按照黏弹性力学的理论, 损耗因子可以 按照式(3)计算:

$$\eta = \frac{W_{\rm D}}{2\pi W_{\rm S}} \tag{3}$$

式中, $W_{\rm D}$ 为阻尼能,即单位体积的阻尼材料在交变应力及应变下每周耗散的能量,数值上等于应力应变滞回曲线所包围的面积; $W_{\rm s}$ 为弹性应变能,是指材料在 MRE 在应变幅值处的弹性储能,按照式(4)计算:

$$W_{\rm S} = \frac{1}{2} E' \varepsilon_0^2 \tag{4}$$

损耗模量的计算公式如式(5)所示:

$$E'' = \eta E' \tag{5}$$

剪切磁流变效应采用 MCR 301 旋转流变仪 (Anton Paar 公司)测试。为避免 MRE 样品与加载 头之间发生滑移,对 MRE 样品施加预加压力(20N 左右)。设置剪切加载应变幅值为 5%、10%、15%, 磁场强度为 0kA/m、46kA/m、92kA/m、139kA/m、 186kA/m。MRE 的剪切滞回曲线、储能模量、损耗 模量、阻尼损耗因子等参数均可由流变仪数据采集 分析系统直接输出。

2 结果与讨论

2.1 拉压动态黏弹性

图 2(a)、(b)分别为零场及 186kA/m 磁场下, 不同应变幅值下的应力-应变滞回曲线。可以看出, 随着应变幅值的增加,滞回曲线的非线性特征更为 显著。其中,在应变幅值为5%时,滞回曲线基本为 椭圆形,接近于线性黏弹性的特性,而当应变幅值 为15%时,滞回曲线呈现出不规则的椭圆形状,受 拉侧和受压侧曲线明显不对称。造成这种与应变 幅值有关的非对称性的原因是,当样品受拉时样品 的截面面积减小导致测得的应力小于真实应力,导 致受拉侧储能模量随着应变幅值的增加而减小,而当 样品受压时截面面积增加导致测得的应力大于真实 应力,受压侧储能模量随着应变幅值的增加而增加。 图 2(c)、(d)分别为 5%及 15% 轴向应变幅值下, MRE 在不同磁场强度的滞回曲线,从图中可以看出,随着 磁场强度的增加,MRE 拉压滞回曲线的对角线斜率 增加,且滞回圈面积增加,表明 MRE 的轴向储能模量 及耗能能力随磁场强度的增大而增大。如图 2(d)所 示,磁场强度的增加也会导致滞回曲线的非线性特征

更为显著,受拉侧和受压侧曲线不对称性更为明显, 这是因为,当材料受拉时,磁性颗粒之间的间距增加, 颗粒之间的磁相互作用力减小导致储能模量随着应 变幅值的增加而减小,当材料受压时,由于磁性颗粒 之间的间距减小,颗粒之间的磁相互作用力增加导 致储能模量随着应变幅值的增加而增加。

图 3 为轴向储能模量、损耗模量、损耗因子等黏 弹性参数在不同磁场下随应变幅值的变化曲线。 由图可以看出,各参数均随着应变幅值的增加而减 小,并随着磁场强度的增加而增加。其中,轴向损耗 因子随着应变幅值的增加而减小,这是因为,当材料 受到压缩时,材料的内部结构更为紧密,磁性颗粒的 间距减小导致颗粒间的磁相互作用力增加,材料的压 缩刚度随着应变幅值的增加而增加。但是压缩也会 导致颗粒间的可移动范围减小,因此颗粒与基体间的 摩擦耗能随着应变幅值的增加提升不明显。



图 2 MRE 在不同轴向加载工况下的滞回曲线

Fig. 2 Hysteresis curve of MRE under different axial loading conditions





with strain amplitude under different magnetic field strength

2.2 剪切动态黏弹性

图 4(a)、(b)分别为零场下和 186kA/m 磁场下,不同应变幅值下的剪切滞回曲线,可以看出,与 拉压模式不同,剪切滞回曲线的形状呈现出典型的 椭圆形状,具备明显的线性黏弹性特点。随着应变 幅值的增加,滞回曲线对角线斜率明显减小,表明 其储能模量减小。图 4(c)、(d)分别为 5%及 15% 剪切应变幅值下,MRE 在不同磁场强度的滞回曲线, 从图中可以看出随着磁场强度的增加,滞回曲线的对 角线斜率增加,且滞回面积明显增加,表明 MRE 的剪 切储能模量和耗能能力随磁场强度的增大而增大。 图 5 为剪切储能模量、损耗模量、损耗因子等黏 弹性参数在不同磁场下随应变幅值的变化曲线。 从图中可以看出,储能模量、损耗模量随着应变幅 值的增加而降低,随着磁场强度的增加而增加。损 耗因子随着应变幅值的增加而增加,随着磁场强度 的增加而增加。其中,损耗因子随着应变幅值的增 加而增加,这是因为,在剪切受力过程中,随着应变 幅值的增加,磁性颗粒的距离增加,磁相互作用力 减弱,储能模量随着应变幅值的增加而降低,而随 着应变幅值的增加,磁性颗粒与基体之间的摩擦耗 能随着应变幅值的增加而增加。



图 4 MIKE 在不问剪切上优下的滞凹曲线

Fig. 4 Hysteresis curve of MRE under different shear conditions

2.3 轴向磁流变效应和剪切磁流变效应对比

MRE 在轴向荷载和剪切荷载下均表现出显著的磁流变效应。图 6 为应变幅值为 5%和 15%时, MRE 轴向储能模量及剪切储能模量均随磁场强度 的变化曲线。由图可以看出,在相同磁场强度下, MRE 的轴向储能模量高于其剪切储能模量,这是 因为 MRE 的基体材料为硅橡胶,硅橡胶本身作为 一种各向同性材料,轴向模量高于剪切模量。随着 磁场强度的增加,轴向模量与剪切模量的差值几乎 保持不变,在5%应变幅值下,其轴向储能模量较之 剪切储能模量平均提高199kPa;在15%应变幅值 下,平均提高幅度为200kPa。



图 5 不同磁场强度下 MRE 剪切储能模量、损耗模量、损耗因子随应变幅值的变化

Fig. 5 Variation of MRE shear storage modulus, loss modulus and loss factor with strain amplitude under different magnetic field strength



图 6 MRE 轴向储能模量及剪切储能模量随磁场强度的变化 Fig. 6 Variation of MRE axial storage modulus and shear storage modulus with magnetic field strength

图 7(a)、(b)为应变幅值分别为 5%和 15%时, 剪切和拉压损耗模量随磁场强度的变化曲线,MRE 在轴向荷载和剪切荷载下的损耗模量都表现出随 磁场强度的增加而增加的趋势。从图中可以看出, 在相同的磁场强度下,MRE 的轴向损耗模量高于 剪切损耗模量。在 5%的应变幅值下,其轴向损耗 模量较之剪切损耗模量平均提高 73kPa;在 15%的 应变幅值下,平均提高幅度为 4kPa。

图 8(a)、(b)所示为剪切和轴向受力模式下损 耗因子随磁场强度的变化曲线,从图中可以看出, MRE 在轴向荷载和剪切荷载下的损耗因子都呈现 出随磁场强度增加而增加的变化趋势,且 MRE 的 剪切损耗因子高于轴向损耗因子。在 5%的应变幅 值下,其剪切损耗因子相较于轴向损耗因子平均提 高 0.16; 在 15% 的 应 变 幅 值 下, 平 均 提 高 幅 度 为 0.23。



图 7 MRE 轴向损耗模量及剪切损耗模量随磁场强度的变化

Fig. 7 Variation of axial loss modulus and shear loss modulus of MRE with magnetic field strength





3 结论

(1)MRE 在轴向荷载和剪切荷载下都表现 出显著的磁流变效应,其储能模量、损耗模量、 损耗因子等黏弹性参数均随磁场强度的增加而 增加。

(2)MRE 轴向及剪切储能模量、损耗模量均随 应变幅值的增加而减小;轴向损耗因子随着应变幅 值的增加而减小,剪切损耗因子随着应变幅值的增 加而增加。

(3)MRE 的轴向储能模量和损耗模量高于剪 切储能模量和损耗模量;轴向损耗因子小于剪切损 耗因子。 利益冲突:作者声明无利益冲突。

参考文献(References)

- [1] 张荣山. 工程振动与控制[M]. 北京:中国建筑工业出版 社,2003.
- [2] 吴体,肖承波,熊峰.建筑结构中的振动问题与对策[J]. 四川建筑科学研究,2006,32(6):3.
- [3] 中国工程建设标准化协会建筑振动专业委员会.建筑振动工程手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [4] 徐建,尹学军,陈骝.工业工程振动控制关键技术研究进 展[J].建筑结构.2015,45(19):7.
- [5] Blom P,Kari L. Smart audio frequency energy flow control by magneto-sensitive rubber isolators [J]. Smart

Materials & Structures, 2008, 17(1):015043.

https://doi.org/10.1088/0964-1726/17/1/015043.

- [6] Opie S, Yim W. Design and control of a real-time variable modulus vibration isolator[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2011, 22(2):113-125. https://doi.org/10.1177/1045389X10389204.
- [7] Opie S, Yim W. Design and control of a real-time variable stiffness vibration isolator [C]//2009 IEEE/ASME international conference on advanced intelligent mechatronics. IEEE, 2009: 380-385.

https://doi.org/10.1109/AIM.2009.5229983.

- [8] Lerner A A, Cunefare K A. Performance of MRE-based vibration absorbers [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2008, 19(5):551-563. https://doi.org/10.1177/1045389X07077850.
- [9] Deng H X,Gong X L. Application of magnetorheological elastomer to vibration absorber[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2008, 13 (9):1938-1947.

https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2007.03.024.

- [10] Kim Y K, Koo J H, Kim K S, et al. Developing a real time controlled adaptive MRE-based tunable vibration absorber system for a linear cryogenic cooler[C]//2011 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). IEEE, 2011:287-290. https://doi.org/10.1109/AIM.2011.6026978.
- [11] Behrooz M, Wang X, Gordaninejad F. Performance of a new magnetorheological elastomer isolation system [J]. Smart Materials and Structures, 2014, 23(4):045014. https://doi.org/10.1088/0964-1726/23/4/045014.
- [12] Jung H J, Eem S H, Jang D D, et al. Seismic performance analysis of a smart base-isolation system considering dynamics of MR elastomers[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2011, 22(13):1439-1450. https://doi.org/10.1177/1045389X11414224.
- [13] Koo J H, Jang D D, Usman M, et al. A feasibility study on smart base isolation systems using magneto-rheological elastomers[J]. Structural Engineering and Mechanics, 2009, 32(6):755-770. http://dx. doi. org/10. 12989/sem. 2009. 32. 6. 755.
- [14] Eem S H,Jung H J,Koo J H. Application of MR elastomers for improving seismic protection of base-isolated structures [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011,47(10):2901-2904. https://doi.org/10.1109/TMAG.2011.2156771.

- [15] Behrooz M, Sutrisno J, Wang X, et al. A new isolator for vibration control[C]//Active and passive smart structures and integrated systems 2011. SPIE, 2011, 7977: 351-359. http://dx.doi.org/10.1117/12.881871.
- [16] Li Y, Li J, Tian T, et al. A highly adjustable magnetorheological elastomer base isolator for applications of real-time adaptive control [J]. Smart Materials and Structures, 2013, 22(9):095020.

http://dx. doi. org/10. 1088/0964-1726/22/9/095020.

- [17] Wang Q, Dong X, Li L, et al. Study on an improved variable stiffness tuned mass damper based on conical magnetorheological elastomer isolators[J]. Smart Materials and Structures, 2017, 26(10):105028. http://dx. doi. org/10. 1088/1361-665X/aa81e8.
- [18] Kallio M,Lindroos T, Aalto S, et al. Dynamic compression testing of a tunable spring element consisting of a magnetorheological elastomer[J]. Smart Materials and Structures,2007,16(2):506-514. http://dx. doi. org/10. 1088/0964-1726/16/2/032.
- [19] Li J,Gong X,Xu Z B, et al. The effect of pre-structure process on magnetorheological elastomer performance [J]. International Journal of Materials Research,2008, 99(12):1358-1364. https://doi.org/10.3139/146.101775.
- [20] Zhou G Y. Shear properties of a magnetorheological elastomer[J]. Smart Materials and Structures, 2003, 12 (1):139-146.

http://dx. doi. org/10. 1088/0964-1726/12/1/316.

 [21] Jolly M R, Carlson J D, Munoz B C, et al. The Magnetoviscoelastic response of elastomer composites consisting of ferrous particles embedded in a polymer matrix
[J]. Journal of Intelligent Material Systems & Structures, 1996,7(6):613-622.

https://doi.org/10.1177/1045389X9600700601.

- [22] Dong X, Ma N, Qi M, et al. The pressure-dependent MR effect of magnetorheological elastomers[J]. Smart materials and structures, 2012, 21(7):075014. https://doi.org/10.1088/0964-1726/21/7/075014.
- [23] Tian T F, Li W H, Alici G, et al. Microstructure and magnetorheology of graphite-based MR elastomers[J]. RheologicaActa,2011,50(9-10):825-836. https://doi.org/10.1007/s00397-011-0567-9.
- [24] Vatandoost H, Sedaghati R, Rakheja S, et al. Effect of pre-strain on compression mode properties of magnetorheological elastomers [J]. Polymer Testing, 2021,

93:106888.

https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106888.

[25] Popp K M, Kröger M, Li W, et al. MRE properties under shear and squeeze modes and applications[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2010,21(15):1471-1477.

https://doi.org/10.1177/1045389X09355666.

[26] 王宇飞,何琳,杨雪. 磁流变弹性体的动态压缩性能

[J]. 高分子材料科学与工程,2011,27(5):4.

[27] Fereidooni A, Martins A, Wickramasinghe V, et al. Fabrication and characterization of highly controllable magnetorheological material in compression mode[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2020,31(14):1641-1661.

https://doi.org/10.1177/1045389X20930081.

Comparative Study on Axial Magnetorheological Effect and Shear Magnetorheological Effect of Magnetorheological Elastomer

LI Jiangtao¹, WANG Qi², TONG Yu³, MA Ning^{1,*}, ZENG Yaoxiang⁴, ZHAO Jiamin⁴, DONG Xufeng^{3,*}

(1. School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. School of Civil and Architectural Engineering, Hainan University, Haikou 570228, China;
3. School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
4. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: The magnetorheological effect of magnetorheological elastomer (MRE) suggests that the viscoelasticity of MRE can be reversibly regulated by magnetic fields in real time. Presently, MRE intelligent variable stiffness isolation device mainly employs the magnetorheological effect of materials in the shear direction, in which case the research on MRE magnetorheological effect is largely focused on the shear direction. However, in the vertical isolation, such study mainly deals with the axial magnetorheological effect of MRE. Our paper, which studies the magnetorheological effect of MRE under axial load through experiments, tries to draw a comparative analysis between the magnetorheological effect with that under shear load. Based on the electronic universal testing machine and excitation device, the axial magnetorheological effect test system was designed, and the shear magnetorheological effect was studied by rotating rheometer. Under the two operating modes, the magnetic field intensity was adjusted between $0 \sim 184 \text{kA/m}$, whereas the strain amplitude range varied from 5% to 15%. The tension-compressive hysteretic curves and shear hysteretic curves of MRE under different magnetic fields were obtained, and the viscoelastic mechanical parameters under different working conditions were calculated. The test results show that MRE has good characteristics of magnetostrictive variable modulus and variable damping under axial load. Compared with shear mode, the storage modulus and loss modulus under tension-compressive mode are improved, while the damping loss factor is relatively smaller.

Keywords: Magnetorheological elastomer; axial magnetorheological effect; shear magnetorheological effect **DOI**: 10. 48014/pcms. 20220327004

Citation:LI Jiangtao, WANG Qi, TONG Yu, et al. Comparative study on axial magnetorheological effect and shear magnetorheological effect of magnetorheological elastomer[J]. Progress in Chinese Materials Science, 2022, 1(1):1-10.

Copyright © 2022 by author(s) and Science Footprint Press Co., Limited. This article is open accessed under the CC-BY License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

