http://pmse.scu.edu.cn

硅橡胶基磁流变弹性体的压缩力学性能

白 通[1,3], 梁 伟[1,2,3], 钟舜聪[1,2,3], 顾立勋[1,3], 李劲林[2,3]

（1. 福州大学 先进制造学院，福建 泉州 362251；2. 福州大学 机械工程及自动化学院，福建 福州 350108；
3. 福建省太赫兹功能器件与智能传感重点实验室，福建 福州 350108）

摘要：磁流变弹性体在智能缓冲减振等技术领域具有广阔的应用前景。文中利用硅橡胶和羰基铁粉在预结构化条件下制备了各向异性的磁流变弹性体，设计了磁流变弹性体压缩性能测试励磁装置，并采用有限元方法对其磁场分布进行了仿真优化，使弹性体测试区间磁场强度水平方向均匀度小于0.1，竖直方向均匀度小于0.15。最后，在不同励磁电流条件下，采用不同压缩速率对安装在该励磁装置中的不同厚度的磁流变弹性体分别进行了压缩性能测试。结果表明，由于磁场耦合效应，随着厚度的增加，磁致压缩模量从0.08 MPa上升到0.44 MPa再下降到0.05 MPa，磁流变效应从3.98%上升到25.73%再下降到2.82%，呈现先增加后减小的趋势；随着励磁电流的增大，基体中磁性颗粒间相互作用能增大，使得磁流变弹性体的磁致压缩模量随着磁场强度的增强从0.11 MPa增加到0.44 MPa，且应变越大，磁致压缩模量的增幅越明显；磁流变弹性体的压缩模量随压缩速率的增大而增大，且应变和励磁电流越大，压缩速率对压缩模量增强效果越显著。

关键词：磁流变弹性体；硅橡胶基；磁流变效应；压缩模量

中图分类号：TQ334 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-7555（2024）11-0087-09

运载火箭、火炮装置、车辆及各种工程机械运行时经常受到冲击的作用，持续的冲击会对设备结构和性能等产生不利影响。传统的缓冲装置，如橡胶式、弹簧式和液压式缓冲器的性能参数是固定的，在复杂的工况下无法根据外部冲击载荷进行大范围的调节，这使得缓冲效果大打折扣，因此开发一种能随外界条件进行智能调节的缓冲装置迫在眉睫。磁流变弹性体（Magnetorheological elastomer，MRE）是由橡胶类高分子基体和微米级的软磁性颗粒组成的一种智能材料[1]，具有性能稳定、响应迅速的磁控力学性能[2]。因此，它作为智能核心元件在缓冲、可调谐吸振及隔振领域具有广阔的应用前景。

目前，MRE的相关力学性能研究主要集中于剪切力学性能方面。例如，浮洁等[3]制备了多种厚度的各向异性MRE材料，采用流变仪进行了相关剪切性能测试，研究表明，样品厚度对MRE剪切模量和磁流变效应均有显著影响。Abdullah等[4]制备了不同黏度的MRE材料，研究发现，在一定的频率和振幅范围内，随着基体黏度增大，损耗因子逐渐增大，磁流变效应减小。Brancati等[5]针对自制MRE样品进行了剪切周期载荷试验，结果表明，剪切刚度随激励频率和磁场强度增加而增加，阻尼随激励频率的增加而减小，随磁场强度增加而增大。Burgaz等[6]在三元乙丙橡胶(EPDM)中加入炭黑，与羰基铁粉颗粒一起制备成MRE，实验表明，当炭黑的添加量为60 phr时，弹性体剪切性能最好，且磁流变效应高达77%。除此之外，也有学者从磁性颗粒种类[7]、基体制备工艺[8]、温度[9]、预压力[10]及添加剂类别[11,12]等方面进行了研究。MRE的剪切力学性能相较于其它力学量，随外部磁场的变化更加明显。然而，MRE在剪切状

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2024.0206
收稿日期：2023-11-02
基金项目：国家自然科学基金资助项目（52205558）；福建省自然科学基金资助项目（2021J01564，2021J05116）
通讯联系人：梁伟，主要从事智能材料与传感技术研究，E-mail: liangwei@fzu.edu.cn

态下工作时存在2个问题：(1) 无法承载较大形变量，因此仅能作为变刚度元件而不能作为大变形元件；(2) 需要使用特殊黏结剂使其与其它元件黏结，这进一步削弱了它的承载能力。

在拉压力学性能影响因素方面，王宇飞等[13]通过对聚氨酯磁流变弹性体进行了动态压缩测试，研究发现，随着磁场强度增加，弹性体的损耗因子不断增大；磁流变效应随着外加磁场、激励振幅的增加而增大。Zhou等[14]研究了磁性颗粒含量对MRE等双轴疲劳行为的影响，结果表明，随着应力幅值的增大，高颗粒含量MRE的疲劳寿命逐渐缩短。但是，磁流变弹性体同橡胶材料类似，具有复杂的力学特性。当前拉压力学性能的研究大多为交变应力作用下的动态力学特性和疲劳特性研究，对MRE性能认识存在一定的局限性。例如厚度对磁流变效应是否有影响，压缩率对性能是否有作用，磁场强度对不同工况性能影响是否相同等，这均需要进一步的探索。

因此，本文利用硅橡胶基体在有场环境下制备了多种厚度的各向异性磁流变弹性体试样，通过自行设计的励磁装置和电子万能试验机对MRE压缩性能进行测试，分析了不同试样厚度、磁场强度及压缩速率对MRE性能的影响，为其在压缩工作模式的应用设计及优化提供了参考。

1 实验部分

1.1 主要原料

羰基铁粉：型号为EW，平均粒径3 μm，德国BASF公司；硅橡胶基体：型号RTV-2，东莞市宏缘复合材料有限公司；低黏度硅油：型号30WCS，道康宁公司；固化剂正硅酸四乙酯：东莞市宏缘复合材料有限公司。

1.2 磁流变弹性体的制备

依据制备过程中有无外磁场作用，可将其分为各向异性和各项同性两大类。各向同性MRE磁性颗粒随机分散在基体中[15]；各向异性MRE颗粒会在磁场的作用下形成链状结构[16]，这种特殊的链状结构可以大大增强颗粒间的相互作用，进而增强MRE的磁流变效应。为了制备特定形状尺寸的预结构化磁流变弹性体，需要定制专门的模具。另外，考虑到磁流变弹性体的特殊性，对模具提出了两点基本要求：(1) 为使得弹性体处的磁场强度足够大，模具应具备导磁性；(2) 为保证磁流变弹性体混合液不外漏，模具应保证一定的密封性。基于以上两点，本文对模具进行设计制造，如Fig.1所示。模具选材为电工纯铁，设计采用“内模+外模+压模”的分体结构。通过高斯计测量发现该模具可以确保500 mT的稳定磁场环境，满足材料制备磁场强度需求。



Fig. 1 Mold material

硅橡胶基MRE研制的工艺流程如Fig.2所示。制备过程主要分为原材料混合、预结构化和交联固化2个阶段。首先，将15 g硅橡胶基体、2 g低浓度硅油充分混合，使用玻璃搅拌棒搅拌5~10 min，向混合物中添加80 g羰基铁粉，使用玻璃搅拌棒搅拌10~15 min至三者均匀混合，向预混物中添加3 g固化剂，搅拌5~10 min至预聚物均匀混合；然后将预聚物倒入模具中，将模具放置在真空烘箱内，保持－0.009 MPa真空度15~20 min直至气泡完全排

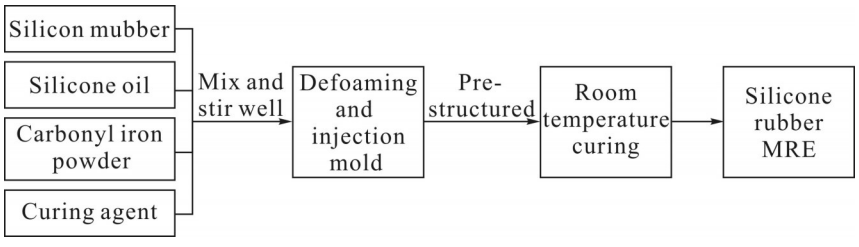


Fig. 2 Silicone rubber MRE preparation process

出;紧接着将抽完真空的模具放置在500 mT磁场产生装置中进行预结构化处理;最后在室温环境下将模具静置8 h至弹性体完全固化,即可制备出羰基铁粉质量分数80%的磁流变弹性体。

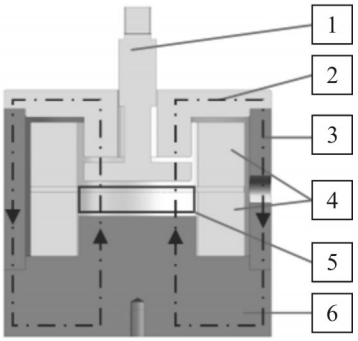


Fig. 3 Excitation device: (1) pressure bar; (2) upper magnetic cover; (3) shell; (4) coil; (5) MRE test area; (6) base

1.3 静态压缩试验

1.3.1 *新型励磁测试装置的设计*:磁流变弹性体不同于传统的橡胶材料,其力学性能与外加磁场强度有关,进而要求其试验装置具备供应磁场的能力。常规测试装置采用永磁体作为磁场发生装置,通过调节2个磁体之间的距离实现磁场可控,但是这种方法不能确保磁场调控精度。基于此,本文对磁流变弹性体的试验装置进行了设计。磁流变弹性体励磁试验装置如Fig.3所示。

该试验装置中,上导磁盖2、外壳3和底座6采用导磁性良好的软磁性材料电工纯铁,从而与MRE工作区间5构成闭环磁路(磁路如图虚线框所示),增强磁场强度;励磁线圈4采用线径1 mm的漆包铜导线,通过调节线圈中的电流改变MRE工作区间5处的磁场强度;压杆1选用DG60无磁钢材料,可以有效避免因压杆运动引起的MRE工作区间的磁场强度变化,同时压杆1与上导磁盖2之间采用大间隙配合,从而确保其上下运动时不与上导磁盖2发生摩擦,减小实验误差。

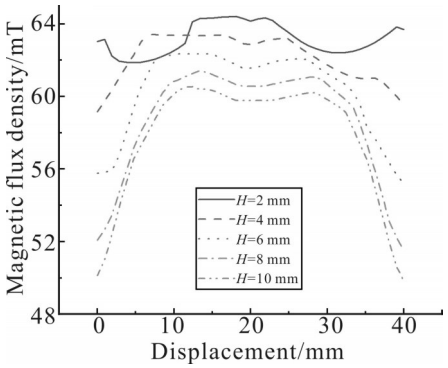


Fig. 4 Magnetic flux intensity profile

本文使用Ansys Workbench中Magnetostatic模块对上述励磁测试装置进行了磁路结构仿真。Fig.4所示为当输入电流为1 A,线圈匝数为920匝时在MRE工作区间的磁感应强度分布图。由图可知,中心区域强度大于两侧强度,且中心区域强度分布均匀性优于两侧。

Fig.5(a)和Fig.5(b)所示分别为磁感应强度在MRE工作区域竖直方向(沿磁力线方向)及水平方向(垂直于磁力线方向)的均匀度分布图。由图可知,其竖直方向均匀度均小于0.15,中心区域小于0.05;其水平方向均匀度均小于0.1。因此,该励磁装置具有良好的磁场强度均匀性,满足实验要求。

试验装置实物图如Fig.6所示。该试验装置结

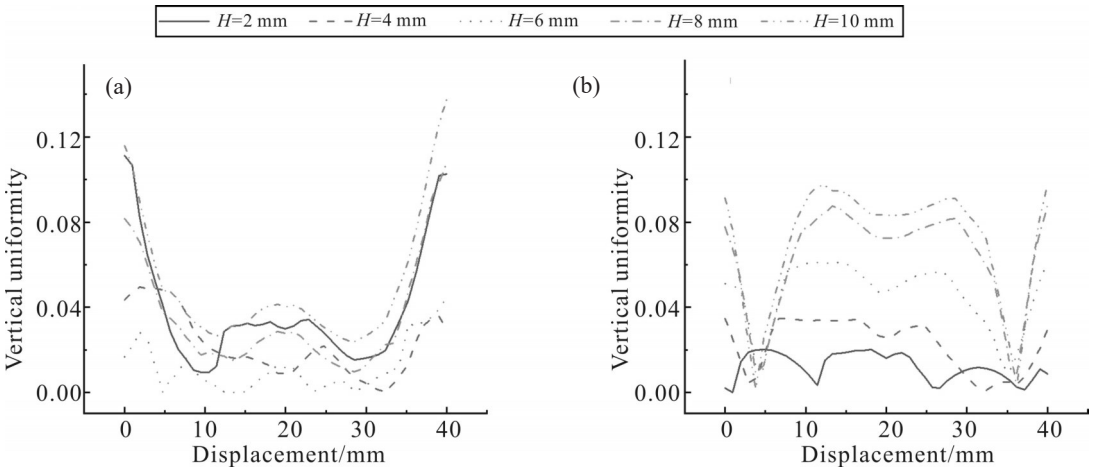


Fig. 5 Uniformity of (a) vertical direction and (b) horizontal direction

构简单紧凑、利于拆卸，且磁场强度调节范围大。特斯拉计测试结果显示，当励磁线圈4中通3 A电流时，MRE工作区间处的磁场强度可达0.2 T。



Fig. 6 Test apparatus

1.3.2 *磁流变弹性体准静态压缩力学性能试验*：对磁流变弹性体试样进行压缩性能的测试，实验中测试参数如Tab.1所示。通过改变励磁线圈中电流的大小，调节磁流变弹性体所在位置磁场强度；压缩方向与磁流变弹性体固化时磁场方向一致。

Tab. 1 Test parameters of MRE

	Test parameters
Thickness/mm	2, 6, 10
Current/A	0, 1, 2, 3
Compression rate/(mm·min^{-1})	1, 5, 10

磁流变弹性体作为一种新型智能材料，目前并没有与其相应的试验标准，本文对其力学性能的测试评价参考国标GBT 7757-2009《硫化橡胶或热塑性橡胶压缩应力应变性能的测定》。试验所用样品通过标准Φ29裁刀裁剪。

电源装置选择迈胜恒流电源MS3010DS，该电源可提供0~10 A的恒定电流。另外，鉴于本文所设计的磁流变弹性体试验装置是通过调节电流的方式控制磁场强度。在一定范围内，电流值同磁场强度成正比。为方便起见，后文均使用电流大小代替磁场强度来对磁流变弹性体力学性能进行表征分析。

试验所用准静态压缩设备为日本岛津AG-Xplus台式电子万能试验机，该设备可以获取实验过程中的力-位移曲线。

1.3.3 *数据处理*：在该实验中，不同厚度的试样每种2个，试验所得到的力-位移曲线为2次试验取平均值所得。此外，需要将试验测得的力-位移数据转换为应力-应变曲线，转换关系为式，

$$\begin{cases}\sigma=\dfrac{F}{A}\\ \varepsilon=\dfrac{l}{L}\end{cases} \tag{1}$$

式中：σ——应力，MPa；F——在应力方向产生变形的力，N；A——试样原始截面积，mm^2；ε——应变，%；l——厚度方向形变量，mm；L——试样的初始厚度尺寸，mm。

磁流变效应计算公式为式，

$$MR_{\text{effect}}=\frac{\Delta K}{K_0}=\frac{K_{\max}-K_0}{K_0} \tag{2}$$

式中：$K_{\max}$——MER在磁场中的最大压缩模量；K_0——零磁场下MRE的压缩模量；ΔK——磁场引起的压缩模量变化量。

2 结果与讨论

2.1 试样厚度对压缩模量的影响

Fig.7所示为不同厚度磁流变弹性体在压缩速率为1 mm/min情况下的应力-应变曲线图。由图可知，不同厚度的试样压缩模量随着测试磁场的增强而呈现不同程度的变大。这主要是因为磁场强度增加，磁性颗粒之间的相互作用力不断增强，基体被周边的磁性颗粒包裹的更加紧密，受到了更大力的作用，导致压缩模量随颗粒相互作用力的增强而增大，宏观表现为不同厚度磁流变弹性体随着测试磁场增强，压缩模量增大。

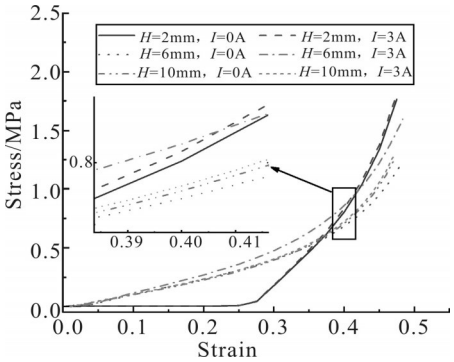


Fig. 7 Stress-strain curves of different thickness

然而，样品的厚度对磁流变弹性体磁致模量和磁流变效应都有一定影响。以应变为0.4为例，如Tab.2所示，2 mm试样的磁致模量为0.08 MPa，磁流变效应仅为3.98%；6 mm试样的磁致模量为0.44

MPa,磁流变效应达到了25.73%;10 mm试样的磁致模量为0.05 MPa,磁流变效应为2.82%。随着试样厚度的增加,磁致模量和磁流变效应出现了先上升后下降的趋势。这主要是因为在外磁场的作用下,MRE中每个颗粒被外加磁场磁化的同时,自身也会产生一个极化场对其它颗粒产生影响。此时,一点的磁场包括外加磁场、颗粒在外加磁场作用下磁化后产生的极化场,这2个磁场将共同对颗粒产生耦合作用。

Tab. 2 Compression modulus of MRE sample MPa

	2 mm	6 mm	10 mm
0 A	2.01	1.71	1.77
3 A	2.09	2.15	1.82

note: strain is 0.4

当颗粒链长度越长时,产生的极化场也越大。因此,在有场固化过程中,厚度较大的试样内部具有较多的长链结构,从而颗粒受到较强的磁场作用,相互间的作用力也相应变大,内部颗粒与基体之间形成的聚集结构也就越紧凑,出现随着厚度的增加,模量逐渐增大的趋势,但随着厚度继续增加,对磁场的穿透能力起到一定的抑制作用,阻碍了长链结构的继续生成,导致厚度较高的试样磁流变效应和磁致模量有所下降。

从上述实验和数据分析可知,2 mm和10 mm试样的磁流变效应较差,因此在后续均采用6 mm试样进行讨论分析。

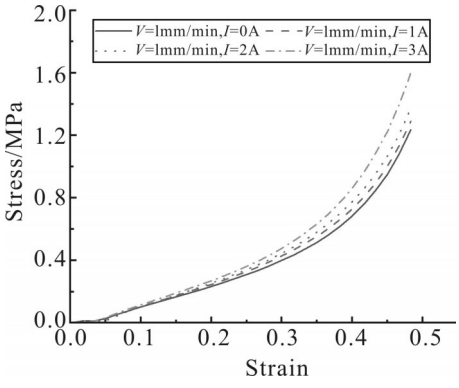


Fig. 8 Stress-strain curves at different current

2.2 电流大小对压缩模量的影响

Fig.8为6 mm厚度磁流变弹性体在不同电流值及压缩速率为1 mm/min情况下的应力-应变图。结果表明,在不同的磁场强度下,试样压缩模量均呈现增长趋势,但这种增长并非均匀线性的。在磁场强度较小时,试样的压缩模量随着磁场强度缓慢增加,当磁场强度进一步增加,磁流变弹性体的压缩模量快速增加。这是因为随着外磁场强度的增强,磁性颗粒的磁化效果增强,颗粒间相互作用变强,进而使得压缩模量快速变大。

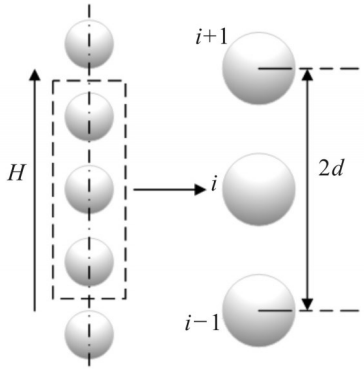


Fig. 9 Magnetic dipole model

Fig.9所示单链中磁性颗粒与此链中其他颗粒之间的磁相互作用能可以表示为

$$U=\frac{-1}{4\pi\mu_0\mu_m}\frac{4\times1.2m^2}{d^3} \tag{3}$$

式中:m——铁磁颗粒的磁偶极矩;μ_m——橡胶基体的相对磁导率;μ_0——真空磁导率;d——链中相邻颗粒的间距,这样,整个的磁能密度可以表示为

$$U_d=\frac{\varphi}{2V}U \tag{4}$$

式中:V——铁磁颗粒的体积;φ——MRE中铁磁颗粒的体积分数。将式代入式可得

$$U_d=\frac{-\varphi}{V\pi\mu_m\mu_0d_0^3}\frac{0.6\mathrm{m}^2}{(1-\varepsilon)^3} \tag{5}$$

因此,MRE的磁致应力可表示为

$$\sigma_m=\frac{\partial U_d}{\partial\varepsilon}=\frac{1.8\varphi m^2}{V\pi\mu_m\mu_0d_0^3}\frac{1}{(1-\varepsilon)^4} \tag{6}$$

由式(b)可知,磁致应力随着磁偶极矩的增大而增大,即随着励磁电流的增大而增大;且当应变增大时,磁致应力增幅更为显著。

如Fig.10所示,在应变大小一定时,随着电流的增大,压缩模量逐步增大,且电流越大压缩模量增量越大;在电流大小一定时,随着应变增大,压缩模量逐渐增大,且应变越大压缩模量增加速度越快。Fig.11为磁流变效应变化曲线图,以应变0.4为例,电流从1 A变化到3 A,压缩模量从1.82 MPa提升到了

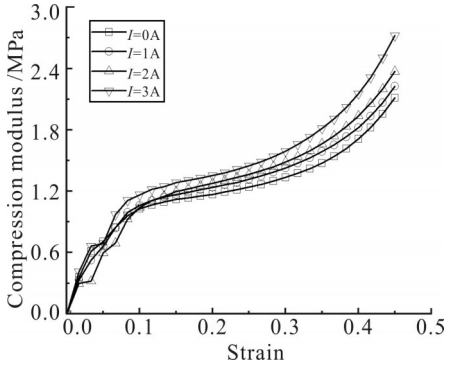


Fig. 10 Compression modulus-strain curves at different current

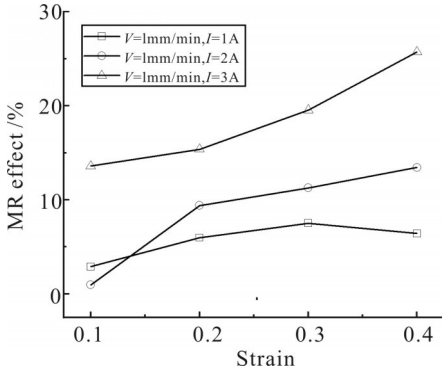


Fig. 11 Magnetorheological effect

2.15 MPa，磁流变效应提升了19.3%。除此之外，可以看出MRE表现出橡胶等高聚物材料类似的硬化现象，即随着压缩应变量的增加，橡胶回弹趋势逐渐增强，表现为宏观强度、模量增大，硬化效应增强。

2.3 压缩速率对压缩模量的影响

Fig.12为厚度6 mm磁流变弹性体在不同压缩速率下的应力-应变曲线图。结果表明，MRE的力学性能具有明显的压缩速率效应。随着压缩速率的增加，MRE的压缩模量逐渐增加。这主要是因为MRE的基体为高聚物橡胶材料，其力学性能的特征之一就是压缩应变率相关性[17]。

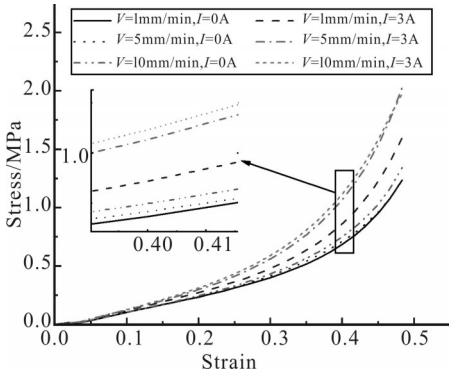


Fig. 12 Stress-strain at different compression rates

Kelvin模型是由1个弹性元件和1个黏性元件并联而成，常用来描述黏弹性材料的力学性质。

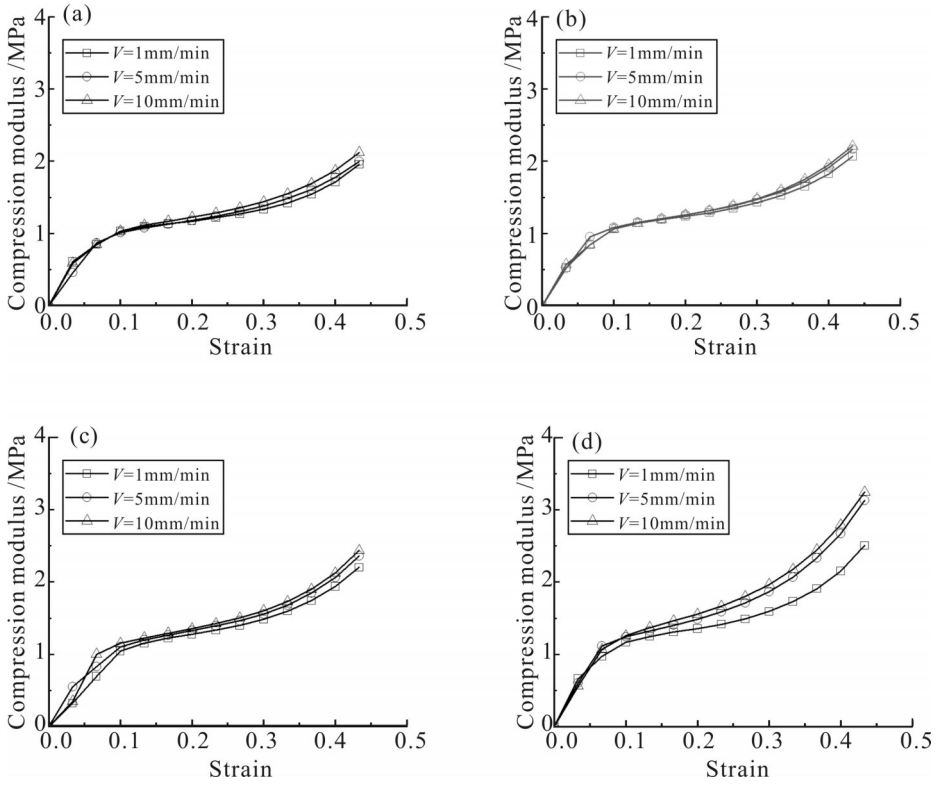


Fig. 13 Compression modulus-strain curves obtained at different compression rates: (a) *I*=0 A; (b) *I*=1 A; (c) *I*=2 A; (d) *I*=3 A

该模型的本构关系为$\sigma = E\varepsilon + \eta\dot{\varepsilon}$。由此可知,在应变量相同时,黏弹性材料的应力随着应变率的增大而增大。

如Fig.13(a)所示,曲线呈现出明显的非线性。在应变低于0.15阶段,不同压缩速率下压缩模量的值差异不明显,这主要是因为在此阶段MRE内部聚合物链发生反弹产生强烈的恢复,压缩速率对MRE力学行为影响微弱;在应变大于0.15阶段,不同压缩速率下压缩模量值差异逐渐明显,这主要是因为MRE内部聚合物链的自由活动能力减弱,压缩速率对MRE力学行为影响逐渐显著。随着压缩速率增大,MRE的压缩模量呈现增大趋势,以应变0.4为例,压缩速率从1 mm/min提升到10 mm/min时,压缩模量从1.71 MPa增大到1.87 MPa,增幅为0.16 MPa,这主要是因为随着压缩速率的增大,MRE内部聚合物链进行重新排列和移动的时间减少,分子结构更趋于刚性,从而提高了材料的压缩模量。

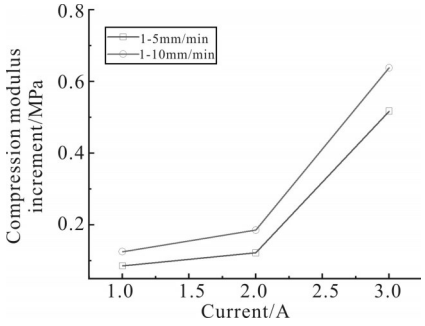


Fig. 14　Different current compression modulus increments at a strain of 0.4

如Fig.13(b~d)所示,随着外部励磁电流的增大,压缩速率对压缩模量增强的效果越明显。Fig.14为应变0.4时,不同电流下压缩模量增量图。其中,当压缩速率从1 mm/min提升到10 mm/min,电流为1 A时其压缩模量增幅为0.125 MPa,电流为2 A时其压缩模量增幅为0.186 MPa,电流为3 A时其压缩模量增幅达到了0.638 MPa。这主要是因为随着外部励磁电流增大,磁性颗粒之间的磁相互作用能使得MRE材料中分子间相互作用力增大,聚合物链的排列和移动变得更为困难,因而压缩速率对压缩模量的增强效果更为显著。

3　结论

本文制备了不同厚度的磁流变弹性体,设计了一套磁流变弹性体压缩性能测试系统,研究了厚度、磁场强度及压缩速率对磁流变弹性体力学性能的影响。

(1)随着试样厚度的增加,试样内部颗粒形成了更多的长链结构,使得磁流变效应和磁致压缩模量呈现增大趋势,但随着厚度不断增加,颗粒自身产生的极化场阻碍了长链结构的生成,导致厚度较高的试样磁流变效应和磁致模量有所下降。

(2)在外磁场作用下,基体中磁性颗粒间相互作用变强,使得磁流变弹性体的磁流变效应和磁致压缩模量随着磁场强度的增加而增加,且压缩应变增大时,磁性颗粒之间间距减小,相互作用进一步增强,从而使得磁流变效应和磁致压缩模量增量更为显著。

(3)磁流变弹性体具有黏弹特性,随着压缩速率的增大,压缩模量不断增大,且应变越大,压缩速率对压缩模量的增强效果越显著。此外,随着外部励磁电流的增大,压缩速率对压缩模量的增强效果越明显。由此证明,磁场对磁流变弹性体黏弹特性具有增强作用。

对磁流变弹性体在承压工况下的磁致压缩模量开展研究,有助于材料的改进,为磁流变弹性体器件设计提供了一定帮助。

参考文献:

[1]　余淼. 刚柔并济——具有磁敏特性的粘弹性智能材料[J]. 中国材料进展, 2018, 37(10): 791-802.
Yu M. Rigid and flexible- viscoelastic smart material with magnetic sensitive properties[J]. Materials China, 2018, 37(10): 791-802.

[2]　刘涛, 黄学功, 马伟佳. 基于遗传算法的MRE隔振器动力学模型识别[J]. 噪声与振动控制, 2021, 41(5): 50-57.
Liu T, Huang X G, Ma W J. Dynamic model identification of MRE isolator based on genetic algorithm[J]. Noise and Vibration Control, 2021, 41(5): 50-57.

[3]　浮洁, 居本祥, 余淼, 等. 磁流变弹性体的厚度对其力学性能的

影响[J]. 功能材料, 2013, 44(9): 1277-1280.

Fu J, Ju B X, Yu M, *et al*. The influence of the thickness of magnetorheological elastomer on its mechanical properties[J]. Journal of Functional Material, 2013, 44(9): 1277-1280.

[4] Abdul Hadi N H N, Ismail H, Abdullah M K, *et al*. Influence of matrix viscosity on the dynamic mechanical performance of magnetorheological elastomers[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2020, 137: 48492.

[5] Brancati R, Di Massa G, Pagano S. Investigation on the mechanical properties of MRE compounds[J]. Machines, 2019, 7: 36.

[6] Burgaz E, Goksuzoglu M. Effects of magnetic particles and carbon black on structure and properties of magnetorheological elastomers[J]. Polymer Testing, 2020, 81: 106233.

[7] Khayam S U, Usman M, Umer M A, *et al*. Development and characterization of a novel hybrid magnetorheological elastomer incorporating micro and nano size iron fillers[J]. Materials & Design, 2020, 192: 108748.

[8] Shi G, Wang W, Lu H, *et al*. Study of crosslink structure and dynamic mechanical properties of magnetorheological elastomer: effect of vulcanization system[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2019, 30: 1189-1199.

[9] 吕佳霖, 杨富锋, 陶玮. 温度对磁流变弹性体力学性能的影响分析[J]. 噪声与振动控制, 2020, 40(2): 81-86.

Lü J L, Yang F F, Tao Y. Effect of temperature on mechanical properties of magnetorheological elastomers[J]. Noise and Vibration Control, 2020, 40(2): 81-86.

[10] 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.

[11] Bastola A K, Hossain M. A review on magneto- mechanical characterizations of magnetorheological elastomers[J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 200: 108348.

[12] Ahmad Khairi M H, Mazlan S A, Ubaidillah, *et al*. Role of additives in enhancing the rheological properties of magnetorheological solids: a review[J]. Advanced Engineering Materials, 2019, 21: 1800696.

[13] 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): 182-185.

Wang Y F, He L, Yang X. Dynamic compression properties of magnetorheological elastomers[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2011, 27(5): 182-185.

[14] Zhou Y, Jerrams S, Betts A, *et al*. The influence of particle content on the equi- biaxial fatigue behaviour of magnetorheological elastomers[J]. Materials & Design, 2015, 67: 398-404.

[15] Choi S S, Nah C, Jo B W. Properties of natural rubber composites reinforced with silica or carbon black: influence of cure accelerator content and filler dispersion[J]. Polymer International, 2003, 52: 1382-1389.

[16] Raa Khimi S, Pickering K L. The effect of silane coupling agent on the dynamic mechanical properties of iron sand/ natural rubber magnetorheological elastomers[J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 90: 115-125.

[17] 刘二强, 肖革胜, 王鹤峰, 等. 单轴拉伸确定粘弹性材料瞬时模量的测试方法[J]. 高分子材料科学与工程, 2016, 32(8): 104-108.

Liu E Q, Xiao G S, Wang H F, *et al*. Test method for determining the instantaneous modulus of viscoelastic materials by uniaxial tensile[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2016, 32 (8): 104-108.

Compressive Mechanical Properties of Silicone Rubber-Based Magnetorheological Elastomers

Tong Bai[1,3], Wei Liang[1,2,3], Shuncong Zhong[1,2,3], Lixun Gu[1,3], Jinlin Li[2,3]

(*1. School of Advanced Manufacturing, Fuzhou University, Quanzhou 362251, China; 2. College of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 3. Fujian Provincial Key Laboratory of Terahertz Functional Devices and Intelligent Sensing, Fuzhou 350108, China*)

ABSTRACT: Magnetorheological elastomers have broad application prospects in intelligent cushioning and vibration reduction. In this paper, the anisotropic magnetorheological elastomers were made by using silicone rubber and carbonyl iron powder under pre- structured conditions, and an exciting device for testing the compression properties of the magnetorheological elastomer was designed. The magnetic field distribution was simulated and optimized by finite element method so that the horizontal uniformity and vertical uniformity of the magnetic field strength in the testing area of the elastomer were less than 0.1 and 0.15 respectively. Finally, the compression properties of different thicknesses of the magnetorheological elastomers were tested with different compression rates at different excitation currents. The experimental results show that, due to magnetic coupling effect, the magnetic compression modulus increases from 0.08 MPa to 0.44 MPa and then decreases from 0.05 MPa with the increase of thickness, and the magnetorheological effect increases from 3.98% to 25.73% and then decreases from 2.82%, showing a trend of first increasing and then decreasing. With the increase of excitation current, the interaction energy between the magnetic particles in the matrix increases, and the magneto-compression modulus of the magnetorheological elastomer increases from 0.11 MPa to 0.44 MPa with the increase of magnetic field intensity. The compression modulus of magnetorheological elastomer increases with the increase of compression rate, and the greater the strain and excitation current are, the more significant the compression rate for the enhancement of compression modulus is.

Keywords: magnetorheological elastomer; silicone rubber base; magnetorheological effect; compression modulus