

文章编号: 1005-0523(2025)01-0097-08



各向同性磁流变弹性体性能测试及研究

尧子健, 胡国良, 喻理梵, 朱文才

(华东交通大学机电与车辆工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 为了得到磁流变弹性体(MRE)随外加磁感应强度和激励频率的性能变化趋势, 制备不同配比的MRE进行相对磁流变效应和剪切模量性能研究。以硅橡胶硅油质量分数之比为3:2为制备基础, 选用高黏度的硅油, 制备3种MRE样品, 分析在振荡剪切模式下, 不同配比、不同剪切应变和剪切频率下MRE的储能模量和剪切模量随磁感应强度的变化以及在不同预压力下MRE法向力的变化趋势。实验结果表明, MRE的储能模量、剪切模量和法向力会随着磁感应强度的增大而增大。测试结果表明, 当预压力由5 N增大到25 N时, MRE法向力最大变化量增大了31.6%。当磁感应强度从0增大到0.8 T时, 样品3的最大储能模量为2.25 MPa, 相对磁流变效应最大可达1 465.60%, 样品3剪切模量最大为2.25 MPa, 相较于零场情况增大了1 400.00%。实验表明, MRE适用于高频率、低剪切应变的工作场合, 80%含量的铁粉能有效提高MRE的力学性能。

关键词: 磁流变弹性体; 储能模量; 剪切模量; 磁流变效应

中图分类号: TP391.4

文献标志码: A

本文引用格式: 尧子健, 胡国良, 喻理梵, 等. 各向同性磁流变弹性体性能测试及研究[J]. 华东交通大学学报, 2025, 42(1): 97-104.

Performance Testing and Analysis of Isotropic Magnetorheological Elastomer

Yao Zijian, Hu Guoliang, Yu Lifan, Zhu Wencai

(School of Mechatronics and Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: In order to obtain the trend of the properties of magnetorheological elastomer (MRE) with the applied magnetic flux density and excitation frequency, MREs with different ratios were prepared to investigate the relative MR effects and shear modulus properties. Three kinds of MRE samples were prepared based on the silicone rubber and silicone oil mass fraction ratio of 3:2, and high viscosity silicone oil was selected to analyze the changes of energy storage modulus and shear modulus with magnetic flux density under oscillatory shear mode with different ratios, different shear strains, and shear frequencies, as well as the trends of MRE normal force under different preloads. The experimental results show that the energy storage modulus, shear modulus and normal force of MRE increase with the increase of magnetic flux density. The results indicate that the maximum change of the MRE normal force increases by 31.6% when the preload is increased from 5 N to 25 N. When the magnetic flux density increases from 0 to 0.8 T, the maximum energy storage modulus of sample 3 is 2.25 MPa, with a maximum relative MRE effect of 1 465.60%, and the maximum shear modulus of sample 3 is 2.25 MPa,

收稿日期: 2024-05-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(52165004); 江西省国际科技合作重点项目(20232BBH80010); 江西省自然科学基金项目(20242BAB25260)

which is an increase of 1 400.00% compared to the zero-field case. This experiment shows that MRE is suitable for high-frequency and low-shear strain application, and iron powder with 80% mass fraction can effectively improve the mechanical properties of MRE.

Key words: magnetorheological elastomer; energy storage modulus; shear modulus; magnetorheological effect

Citation format: YAO Z J, HU G L, YU L F, et al. Performance testing and analysis of isotropic magnetorheological elastomer[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2025, 42(1): 97-104.

磁流变弹性体(MRE)是由微米级的磁性颗粒混合于非导磁的弹性基体(如硅橡胶)中形成的一种新型智能材料^[1-2]。当外部磁场施加在MRE上时,磁性颗粒会发生磁化,产生相互作用力,导致基体内部颗粒排列成链状。当所施加外力改变MRE原有形状后,作用力在材料内部产生反向力矩,因此MRE在外部磁场作用下会产生弹性模量和磁致阻尼,从而改变MRE的刚度和阻尼。当磁场减弱或取消时,颗粒恢复到原来的状态,MRE的刚度也随之恢复。MRE克服了磁流变液稳定性差、易沉淀问题的同时,保留了磁流变材料刚度、阻尼可控的性质,成为目前振动控制应用的理想选择^[3-4]。

1983年,Rigbi等^[5]首次将铁磁性颗粒与天然橡胶混合制备出MRE样品,对铁磁性颗粒如何影响MRE机械性能和磁学性能进行了研究。Wu等^[6]在磁场作用下,缩聚工艺制备了高填充各向异性聚氨酯MRE,研究了增塑剂邻苯二甲酸二异辛酯(DOP)对MRE微观结构和性能的影响。试验表明,DOP显著增强了绝对和相对磁流变效应。Gong等^[7]在不外加磁场的情况下制备了多种各向同性MRE,研究发现当硅橡胶硅油质量分数比为1:1,铁粉含量为60%时,磁流变效应最大。Tian等^[8]以软硅橡胶、各种添加剂和不同质量分数的羰基铁颗粒(CIPs)包覆硅烷偶联剂为原料,制备了各向异性磁流变弹性体。研究了剪切模式下MRE在不同磁场、位移幅值和频率下的动态黏弹性特性。Hu等^[9]制备了一种同时使用硅橡胶和聚氨酯作为基体的混合MRE,实验表明这种混合MRE较单一基体的MRE力学性能更优异。当工作在约0.2 T的磁感应强度时,MRE的剪切模量最大增加可达0.5 MPa。Fan等^[10]研究了不同交联密度和增塑剂含量对MRE的阻尼性能的影响,提出了磁致损耗因子变化的机理,分析表明颗粒重新排列是控制MRE阻尼特性的重要因素。Jiang等^[11]测量了MRE的动态剪切模

量,用来评估相对磁流变效应。结果表明相对MRE效应可达188%。Von等^[12]制备了一种由10 μm和40 μm铁磁颗粒混合的MRE样品,在动态剪切实验中发现MRE的最大相对磁流变效应和粒径无关,体积分数是重要参数,且磁性颗粒位置是无序的。Hemmatian等^[13]分析了剪切工作模式下温度对MRE黏弹性能的影响,结果表明MRE的存储和损耗模量随着温度的升高而降低。以上研究没有具体阐明不同羰基铁粉、硅橡胶和硅油质量比对MRE磁流变效应的影响规律。

基于以上分析,本文在硅橡胶硅油质量分数之比为3:2的基础上,采用高黏度硅油,在不同剪切频率和剪切应变下对3种MRE样品进行性能分析,得出MRE参数与磁感应强度的关系曲线。结果表明,当增大磁感应强度和剪切频率,减少剪切应变时,MRE的储能模量和剪切模量会变大,相对磁流变效应和工作频率范围也随之变大。通过计算分析MRE样品的储能模量和剪切模量的变化趋势及性能结果,选择性能较好的样品,为MRE隔振器的应用提供参考。

1 MRE的制备

1.1 实验原材料

实验制备的MRE以704硅橡胶为基体;填充的软磁性颗粒是羰基铁粉,其粒径为3~5 μm,该羰基铁粉具有稳定的磁导率、低磁滞和高磁饱和率;添加剂为100 Cps的二甲基硅油,可降低固化前硅橡胶的黏度,易于磁性颗粒形成链状结构。制备MRE设备是搅拌机、电子秤、真空桶,且在制备过程中需要用硅油涂抹样品。

1.2 样品制备过程

如图1所示,MRE具体制备过程可分为4步,包括材料提取、混合搅拌、抽真空去气泡及样品固化。

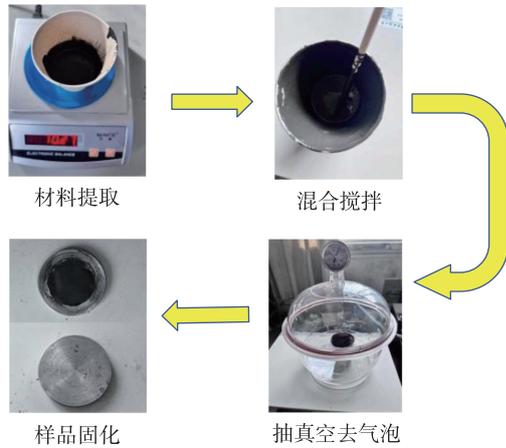


图1 MRE 制备流程图
Fig. 1 Flow chart of MRE preparation

1) 材料提取。按照硅橡胶与硅油的质量分数之比为3:2,依次称取羰基铁粉、硅橡胶和硅油共100 g,质量配比如表1所示,共制备了3种样品。

表1 MRE 配比(质量分数/%)
Tab.1 MRE ratios (mass fraction/%)

样品	羰基铁粉	硅胶	硅油
1	70	18	12
2	75	15	10
3	80	12	8

2) 混合搅拌。根据配比把称量好的铁粉、硅橡胶放入容器进行充分搅拌10 min,使得铁磁性颗粒和硅油充分混合,均匀地分散在硅橡胶基体中。

3) 抽真空去气泡。搅混合均匀的混合物注入模具后放置在真空箱抽真空2 h,尽可能去除混合物中的气泡,使MRE内部颗粒形成理想的链状结构。

4) 样品固化。真空处理后,将混合物取出,随后将经过处理的混合物倒入成型模具中。在封闭模具里对材料施加适当的预紧力,确保材料在模具中均匀分布,有助于成型。经过大约24 h的室温固化后,即可脱模,完成MRE样品制备。制备得到的MRE样品如图2所示,样品半径为1 cm,厚度为1 mm。由于MRE要应用在隔振器中,在工作过程中处于动态应变条件,所以需要研究MRE在动态应变下的特性。

2 MRE 性能测试

将MRE样品置于流变仪的转子与下盘片之



图2 MRE 样品实物图
Fig. 2 Physical drawing of MRE samples

间。利用旋转流变仪对MRE的剪切动态力学性能进行测试,整个测试过程,温度一直维持25 °C,磁感应强度加载范围为0~0.8 T(电流0~5 A)直到MRE材料的储能模量趋于稳定为止。同时为了避免样发生滑移现象,需要对试样施加轴向压力。

MRE的相对磁流变效应是MRE实现智能隔振的重要前提。相对磁流变效应 M_R 可直接反映MRE的流变性能,定义为

$$M_R = \frac{G' - G_0}{G_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: G' 为储能模量,MPa; G_0 为零场模量,MPa; M_R 为MRE的磁流变效应。

2.1 预压力对MRE法向力的影响

图3表明了当旋转流变仪施加不同大小的初始预压力的情况下,样品3所受到的法向力与预压力的变化趋势。从图3中可看出,MRE法向力随磁感应强度的增大表现出逐渐增大的趋势。当磁感应强度达到0.8 T时,法向力变化量逐渐变为0。在

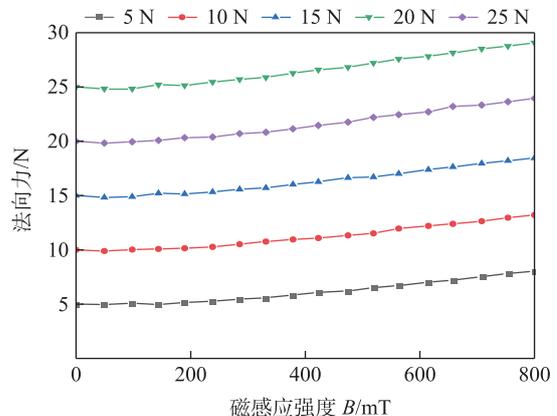


图3 法向力和预压力的变化曲线
Fig. 3 Variation curves of normal force and preload force

MRE 达到饱和状态之后,外加磁感应强度继续增大,MRE 的法向力也能够保持稳定。MRE 的法向力来自磁场作用下铁磁颗粒之间产生的磁相互作用力。因此,当外加磁感应强度持续增大时,内部颗粒的磁化程度会加重,最终趋于饱和磁感应强度。所以,在磁感应强度持续增大时,MRE 法向力变化量的增大趋势会逐渐减小。

由图3可知,当施加的初始预压力设定值不同时,MRE 法向力的变化趋势基本相同。但是当 MRE 的法向力趋于饱和时,不同预压力条件下法向力最大变化量并不相同。根据图3 计算得出在不同初始预压力条件下法向力的最大变化量,结果如图4所示。从图4中可看出,随着预压力的增大,MRE 法向力最大变化量也随之增大。当初始预压力为 5 N 时,最大变化量为 4.21 N;当初始预压力为 25 N 时,最大变化量为 5.54 N,法向力变化量的增长率为 31.6%。测试结果表明,MRE 磁性颗粒被外加磁场磁化,会产生相互作用力。增大初始预压力,会进一步增大颗粒之间的磁相互作用力。

2.2 磁性颗粒含量对 MRE 性能的影响

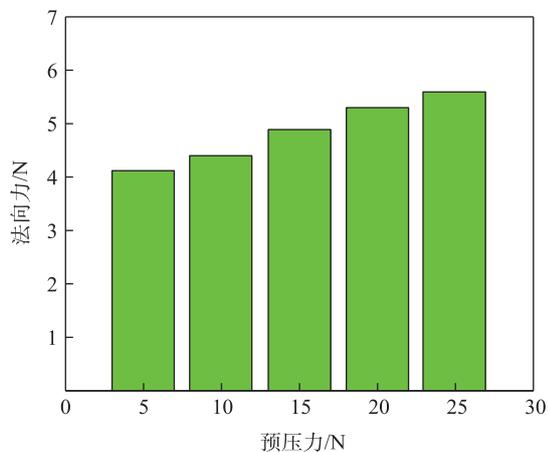


图4 法向力变化量与预压力的关系

Fig. 4 Relationship between the amount of change in normal force and the preload force

测试时剪切应变设定为 0.1%,剪切频率为 8 Hz,其它参数保持不变。图5给出了储能模量随磁感应强度的变化关系。磁感应强度为 0 时,样品 1,样品 2 和样品 3 的零场模量分别为 0.12, 0.13 MPa 和 0.14 MPa。而当磁感应强度为 0.8 T 时,样品 1 的储能模量为 0.84 MPa,相对磁流变效应为 600.00%;样品 2 的储能模量为 1.48 MPa,相对磁流变效应为

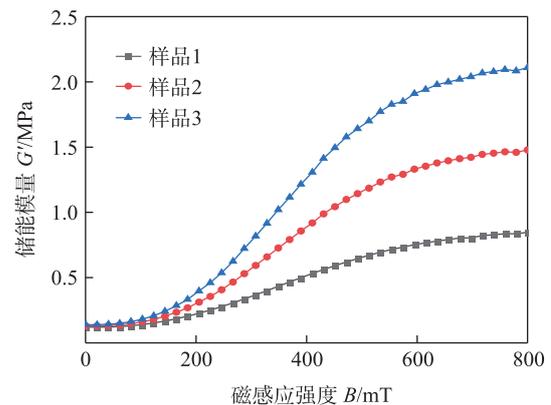


图5 储能模量和磁感应强度的关系

Fig. 5 Relationship between storage modulus and magnetic flux density

1 038.46%;样品 3 的储能模量为 2.11 MPa,相对磁流变效应为 1 407.14%。

图6给出了剪切模量随磁感应强度的变化关系。当磁感应强度为 0 时,样品 1,样品 2 和样品 3 的剪切模量分别为 0.12, 0.13 MPa 和 0.14 MPa。当磁感应强度为 0.8 T 时,样品 1 剪切模量为 0.85 MPa,提高了 608.33%;样品 2 剪切模量为 1.48 MPa,提高了 1038.46%;样品 3 剪切模量为 2.11 MPa,提高了 1047.14%。

MRE 的储能模量与其铁粉含量有着密切关系。当增加铁粉含量时,通常会导致 MRE 的储能模量增大。这主要是因为铁粉颗粒在外加磁场作用下,会形成链状结构,使得整个材料在一定程度上失去了流动性,并展现出类似固体的行为。这种链状结构有效地限制了材料的形变,从而提高了其刚度。然而,随着外加磁感应强度的增大,这种趋

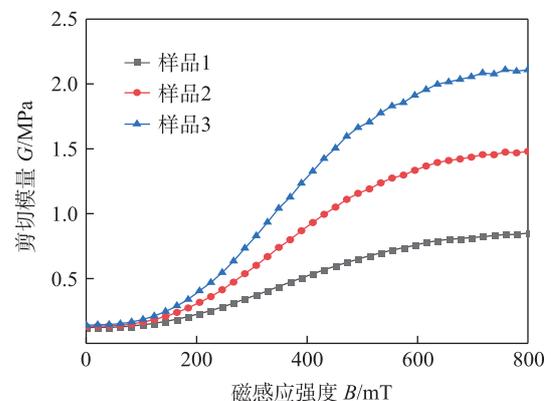


图6 剪切模量和磁感应强度的关系

Fig. 6 Relationship between shear modulus and magnetic flux density

势逐渐减缓。MRE 试样在高磁感应强度下接近饱和状态,此时其内部的磁性颗粒已经达到饱和状态,导致磁性颗粒之间的相互作用不再随着磁感应强度的增加而显著增强。

2.3 剪切应变对MRE性能的影响

为了得到MRE的储能模量和剪切模量随外加剪切应变的变化,测试时剪切应变为0.1%~1.0%,剪切频率为8 Hz,其它参数保持不变。图7所示为MRE的储能模量和剪切模量随磁感应强度的变化曲线。随着外加磁感应强度的增大,各向同性MRE的储能模量逐渐增大。同时,MRE的剪切应变越大,其储能模量反而变得就越小。当磁感应强度为

0~0.6 T时,MRE的储能模量和剪切模量增长迅速。当外加磁感应强度为0.6 T、剪切应变为0.1%时,MRE样品1,样品2和样品3的储能模量分别为0.77,1.38 MPa和2.05 MPa。而外加磁感应强度为0.6 T、剪切应变为1.0%时,MRE样品1的储能模量为0.50 MPa,相对于剪切应变为1.0%时的储能模量减少了35.06%,MRE样品2的储能模量为0.63 MPa,相对于剪切应变为1.0%时的储能模量减少了54.35%,MRE样品3的储能模量为0.90 MPa,相对于剪切应变为1.0%时的储能模量减少了56.10%,即MRE的储能模量随着磁感应强度的增大而增加。

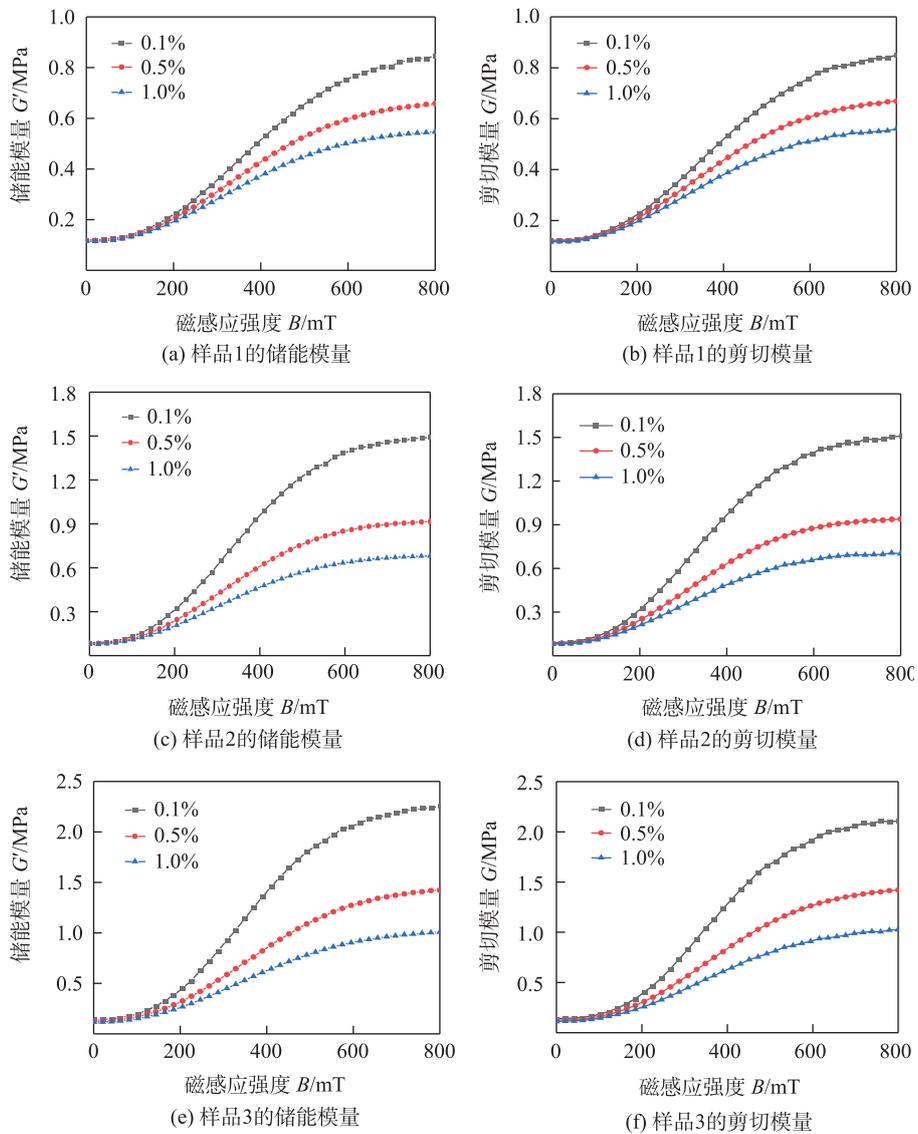


图7 不同剪切应变下模量与磁感应强度的关系

Fig. 7 Relationship between modulus and magnetic flux density at different shear strains

剪切应变为0.1%时,样品1,样品2和样品3的磁流变效应分别为601.50%,1 556.00%和1 464.80%。剪切应变为0.5%时,样品1,样品2和样品3的磁流变效应分别为468.80%,1 057.00%和1 017.70%。剪切应变为1%时,样品1,样品2和样品3的磁流变效应分别为372.10%,760.00%和771.80%。

剪切应变为0.1%,磁感应强度由0增大到0.8 T时,样品1的剪切模量从0.12 MPa增大到0.85 MPa,增大了608.33%;样品2的剪切模量从0.13 MPa增大到了1.48 MPa,增大了1038.46%;样品3的剪切模量从0.14 MPa增大到了2.11 MPa,增大了1 407.14%。

剪切应变为1%,磁感应强度由0增大到0.8 T时,样品1的剪切模量从0.12 MPa增大到0.56 MPa,增大了366.67%;样品2的剪切模量从0.08 MPa增大到了0.70 MPa,增大了775.00%;样品3的剪切模量从0.11 MPa增大到了1.03 MPa,增大了836.36%。

储能模量是描述材料抵抗形变的能力,而剪切应变则是描述形变的程度。如果剪切应变过大,可能会导致MRE的永久性塑性形变,导致材料性能下降。MRE在达到磁饱和时,无法进一步增强磁化效应,当剪切应变增大时,磁性颗粒会更快到达磁

饱和状态,且会导致材料内部产生较大应力和应变,进而影响磁性颗粒的排列和相互作用,使得磁性颗粒分布不均匀,降低磁流变效应,降低储能模量。

2.4 剪切频率对MRE性能的影响

为了得到MRE储能模量和剪切模量随外加剪切频率的变化,测试时剪切频率为2~10 Hz,剪切应变为0.1%,其它参数保持不变。

图8为给定剪切应变下MRE的储能模量和剪切模量随磁感应强度的变化规律。由图8可知,随着外加磁感应强度增大,各向同性MRE的储能模量逐渐增大。同时,MRE的剪切频率越高,其储能模量就越大。

当外加磁感应强度为0.8 T、剪切频率为2 Hz时,MRE样品1的储能模量为0.63 MPa,相对磁流变效应为304.00%;MRE样品2的储能模量为1.08 MPa,相对磁流变效应为1 096.50%;MRE样品3的储能模量为1.35 MPa,相对磁流变效应为894.60%。外加磁感应强度为0.8 T、剪切频率为10 Hz时,MRE样品1的储能模量为0.82 MPa,相对于2 Hz下的储能模量增加了30.16%,相对磁流变效应为404.40%。MRE样品2的储能模量为1.59 MPa,相对于2 Hz剪切频

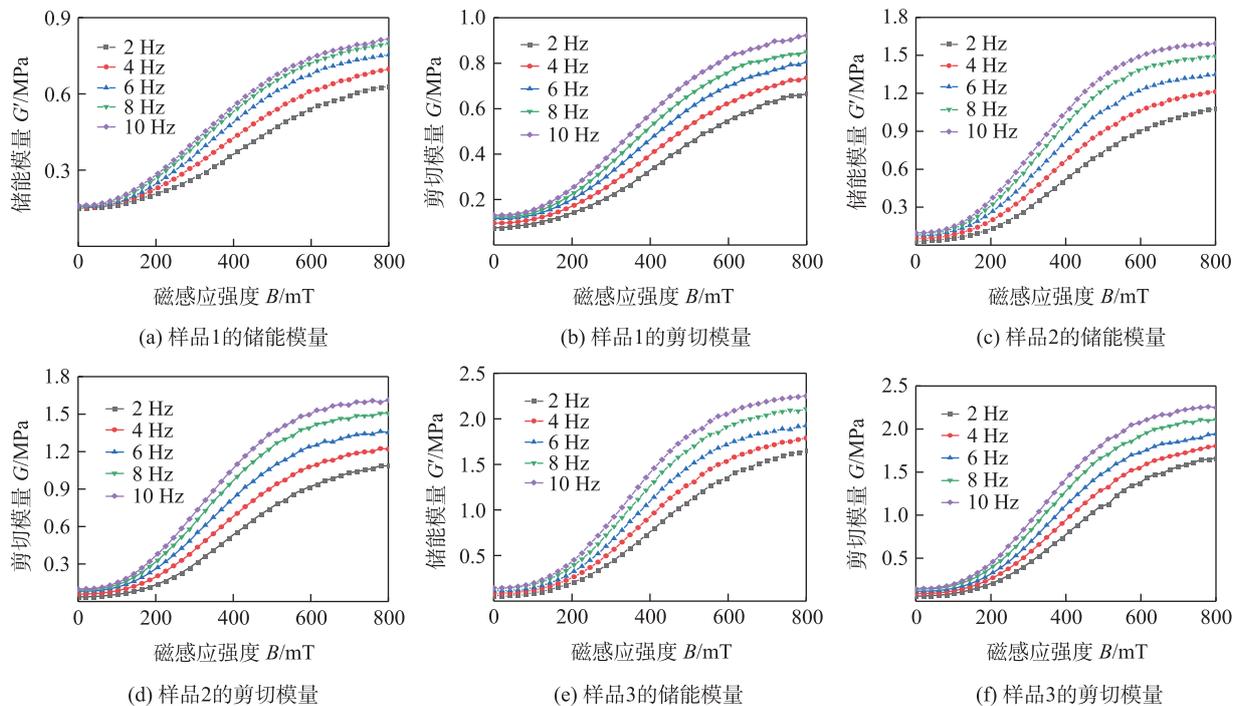


图8 不同剪切频率下模量与磁感应强度的关系

Fig. 8 Relationship between modulus and magnetic flux density at different shear frequencies

率的储能模量增加了47.22%,相对磁流变效应为1 528.90%。MRE样品3的储能模量为2.25 MPa,相对于2 Hz剪切频率的储能模量增加了66.67%,相对磁流变效应为1 465.60%。

剪切频率为2 Hz时,当磁感应强度从0增大到0.8 T时,样品1的剪切模量从0.08 MPa增大到0.66 MPa,增大了725.00%;样品2的剪切模量从0.04 MPa增大到1.09 MPa,增大了2 625.00%;样品3的剪切模量从0.06 MPa增大到1.66 MPa,增大了2 666.67%。

剪切频率为10 Hz时,当磁感应强度从0增大到0.8 T时,样品1的剪切模量从0.08 MPa增大到0.92 MPa,增大了1 050.00%;样品2的剪切模量从0.10 MPa增大到1.61 MPa,增大了1 510.00%;样品3的剪切模量从0.15 MPa增大到2.25 MPa,增大了1 400.00%。

MRE内部磁性颗粒在磁场作用下,需要一定时间形成链状结构来响应磁场变化,在高频率下,颗粒成链速率会加快,且磁性颗粒之间的相互作用会变得更强烈,磁性颗粒含量越高这种现象也就越明显,显著增加MRE的磁化效应,从而提高储能模量。同时,频率越高,磁性颗粒的磁矩方向随磁场的变化调整速率更快,从而提高储能效率。

3 结论

制备了羰基铁粉含量不同的硅橡胶硅油质量分数之比为3:2的MRE样品,测试了3种MRE样品的储能模量以及剪切模量随外加剪切应变和剪切频率的变化趋势,以及不同预压力下MRE的法向力变化曲线。综合样品的相对磁流变效应及剪切模量变化范围的测试结果,本文选用了样品3作为隔振器的试验材料,并在中低频率范围取得了良好的隔振效果。

1) MRE的法向力会随着预压力的增大而增大。当预压力保持不变时,MRE法向力会随着磁感应强度的增大而增大。当预压力为5 N时,法向力变化量4.21 N,当预压力为25 N时,法向力变化量5.54 N,最大变化量为31.6%。

2) MRE的相对磁流变效应会随着磁感应强度的增大而增大,即MRE的磁致储能模量在不断的增大,其中,MRE的相对磁流变效应随着铁粉的质

量分数和剪切频率增大而增大,随着剪切应变的增大而减小。

磁感应强度相同时,剪切频率越大,MRE样品的储能模量和剪切模量增大,最后趋于饱和。达到饱和状态时,最大相对磁流变效应为1 465.60%,剪切模量最大变化量为1 400.00%。相反,MRE的剪切应变越大,会导致MRE的储能模量越小。

为了得到性能更为良好的MRE材料,后续将会考虑在材料制备过程中施加磁场,并且添加添加剂,研究外加磁场及添加剂对MRE样品的剪切模量及储能模量的变化影响,进一步分析MRE剪切模量与隔振器隔振频率的关系,确保适用于不同的工作场合。

参考文献:

- [1] BORIN D, VAGANOV M, ODENBACH S. Magnetic training of the soft magnetorheological elastomers[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2024(589): 171499.
- [2] 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.
- [3] 胡国良, 张杰, 张佳伟, 等. 基于电磁和磁流变弹性体的复合隔振器设计及仿真分析[J]. *南昌工程学院学报*, 2024, 43(3): 1-7.
HU G L, ZHANG J, ZHANG J W, et al. Design and simulation analysis of hybrid isolator based on electromagnetism and magnetorheological elastomer[J]. *Journal of Nanchang Institute of Technology*, 2024, 43(3): 1-7.
- [4] 胡国良, 杨明, 尧子健, 等. 混合式磁流变弹性体隔振器磁场仿真分析[J]. *南昌工程学院学报*, 2023, 42(6): 1-5.
HU G L, Yang M, Yao Z J, et al. Magnetic field simulation analysis of hybrid magnetorheological elastomer isolator[J]. *Journal of Nanchang Institute of Technology*, 2023, 42(6): 1-5.
- [5] RIGBI Z, JILKEN L. The response of an elastomer filled with soft ferrite to mechanical and magnetic influences [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1983, 37(3): 267-276.
- [6] WU J, GONG X, FAN Y, et al. Improving the magnetorheological properties of polyurethane magnetorheological elastomer through plasticization[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2012, 123(4): 2476-2484.

- [7] GONG X L, ZHANG X Z, ZHANG P Q. Fabrication and characterization of isotropic magnetorheological elastomers[J]. *Polymer Testing*, 2005, 24(5): 669-676.
- [8] TIAN Y, HU Z W, GUO Y Q, et al. Experimental and theoretical investigation on magnetorheological elastomers containing carbonyl iron particles coated with silane coupling agent[J]. *Smart Materials and Structures*, 2024, 33(6): 065028.
- [9] HU Y, WANG Y L, GONG X L, et al. New magnetorheological elastomers based on polyurethane/Si-rubber hybrid[J]. *Polymer Testing*, 2005, 24(3): 324-329.
- [10] FAN Y, GONG X, XUAN S, et al. Effect of cross-link density of the matrix on the damping properties of magnetorheological elastomers[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2013, 52(2): 771-778.
- [11] JIANG W, YAO J, GONG X, et al. Enhancement in magnetorheological effect of magnetorheological elastomers by surface modification of iron particles[J]. *Chinese Journal of Chemical Physics*, 2008, 21(1): 87.
- [12] VON LOCKETTE P R, LOFLAND S E, KOO J H, et al. Dynamic characterization of bimodal particle mixtures in silicone rubber magnetorheological materials[J]. *Polymer Testing*, 2008, 27(8): 931-935.
- [13] HEMMATIAN M, SEDAGHATI R, RAKHEJA S. Char-

acterization and modeling of temperature effect on the shear mode properties of magnetorheological elastomers[J]. *Smart Materials and Structures*, 2020, 29(11): 115001.



第一作者: 尧子健(1999—),男,硕士研究生,研究方向为磁流变弹性体隔振器结构设计及性能分析。

E-mail: 1620450267@qq.com。



通信作者: 胡国良(1973—),男,教授,博士生导师,研究方向为磁流变智能器件及结构。E-mail: glhu@ecjtu.edu.cn。

(责任编辑: 熊玲玲)