

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2022.03.005

# 颗粒链取向对磁流变弹性体磁致剪切模量的影响

高宇<sup>1a,1b</sup>, 杨伟<sup>2</sup>, 范家浩<sup>1a,1b</sup>, 姚剑飞<sup>1a,1b</sup>

(1.北京化工大学 a.机电工程学院;b.高端机械装备健康监测与自愈化北京市重点实验室,北京 100029;2.重庆两江新区产业促进局,重庆 401147)

**摘要:**为分析内部颗粒链与外加磁场间取向夹角对磁流变弹性体(MRE)磁致剪切模量的影响,将磁化颗粒视为磁偶极子,仅考虑同一链内磁化颗粒间相互作用,推导了MRE磁致模量的微观模型,在微观层面研究了取向角度对磁致模量的影响。制备了具有不同颗粒链取向角度的MRE试样并进行测试,结果表明微观模型预测趋势与测试结果一致。对该模型进行简化并识别其参数,得到基于参数的磁致模量模型,可预测磁致模量的实际值。

**关键词:**磁流变弹性体;磁偶极子;颗粒链取向;磁致剪切模量;参数识别

中图分类号:O345

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2022)03-041-08

## Effect of particle chain orientation on MRE magneto-induced shear modulus

GAO Yu<sup>1a,1b</sup>, YANG Wei<sup>2</sup>, FAN Jiahao<sup>1a,1b</sup>, YAO Jianfei<sup>1a,1b</sup>

(1a. School of Mechanical and Electrical Engineering; 1b. Beijing Key Laboratory of High-end Mechanical Equipment Health Monitoring and Self-Recovery, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, P. R. China; 2. Chongqing Liangjiang New District Industry Promotion Bureau, Chongqing 401147, P. R. China)

**Abstract:** In order to analyze the effect of the orientation angle between the internal particle chain and the external magnetic field on the magnetorheological elastomer (MRE) magneto-induced shear modulus, the magnetized particles were described as magnetic dipoles, and only the interaction between the magnetized particles in the same chain was considered. The micro-model of magneto-induced modulus of MRE was deduced, and the trend of magneto-induced modulus changing with orientation angle was predicted at the micro-level. MRE samples with different orientation angles of particle chains were prepared and tested. The results show that the predicted trend of the microscopic model is consistent with the experimental results. The model was simplified and its parameters were identified to obtain a parameter-based model of magneto-induced modulus of MRE, which can predict the actual value of magneto-induced modulus.

**Keywords:** magnetorheological elastomer; magnetic dipole; particle chain orientation; magneto-induced shear modulus; parameter identification

收稿日期:2021-10-12

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金项目(JD1909)。

Special Fund Project for Basic Scientific Research Business Expenses of Central Universities (JD1909).

作者简介:高宇(1996—),女,硕士,研究生,主要从事振动控制方向研究,(E-mail)gaoyu\_buct@163.com。

通讯作者:姚剑飞,男,教授,主要从事磁流变方向研究,(E-mail)yaojf@mail.buct.edu.cn。

磁流变弹性体(MRE, magnetorheological elastomer)通常由非磁性聚合物基质和微米级磁性颗粒混合固化而成。固化后,铁磁颗粒被限制在基体中,因此不存在颗粒沉降和稳定性差等问题<sup>[1-2]</sup>。其力学特性可在外加磁场作用下发生显著改变,尤其是宏观的刚度和阻尼可在外加磁场控制下发生快速、连续、可逆的变化<sup>[3-5]</sup>,将 MRE 应用于智能结构、传感机构和振动控制领域具有非常广阔的前景,近年来已成为智能材料研究的一个热点<sup>[6-10]</sup>。

作为一种智能材料,MRE 具有优异的磁控变刚度力学特性,其储能模量可随外加磁场的增大而增大,表现出明显的磁流变效应。为提高 MRE 的磁致力学性能,研究者在基体和填充颗粒的选择、改性等方面进行了大量研究<sup>[11-15]</sup>。研究表明,各向异性 MRE 比各向同性 MRE 具有更好的磁致性能,因此在 MRE 固化过程中通常会施以外加磁场进行预结构化,得到颗粒链与外加磁场同向的各向异性 MRE 样品。当 MRE 中磁性颗粒的体积分数较小时,颗粒在基体中呈链状结构排列。

有学者研究发现,MRE 中颗粒链的排列会对其磁致模量产生较大影响<sup>[16-18]</sup>。从微观角度出发,基于磁偶极子理论建立了 MRE 的磁致剪切模量微观模型,分析了颗粒链取向角度对磁致剪切模量的影响,并预测了磁致剪切模量随取向角度的变化规律。通过对制备试样的测试表明,该微观模型的预测趋势与实验数据完全一致;根据羰基铁粉磁化规律,将微观模型参数简化,采用实测数据对简化模型参数进行识别,得到 MRE 磁致模量的参数模型,结果表明该参数模型能够很好的预测颗粒链取向角度和外加磁场对 MRE 磁致模量的影响。本研究以期 MRE 的制备及磁致机理研究提供相关理论和技术支撑。

## 1 基于偶极子理论的磁致模量微观模型

磁性颗粒是 MRE 具有磁控特性的根本原因。MRE 内部颗粒间的相互作用力一般采用磁偶极子模型计算<sup>[19-21]</sup>。将 MRE 中的磁化颗粒视为大小均匀的磁偶极子,并且忽略基体以及磁化颗粒间磁场的耦合作用,通过分析磁化颗粒间相互作用机理,可得磁致模量的微观模型<sup>[22]</sup>。虽然这种简化会造成一定误差,但预测趋势却是正确的<sup>[23]</sup>。颗粒被磁化后具有与外加磁场方向相同的磁偶极矩,其大小可表示为<sup>[21]</sup>

$$m = \frac{4}{3} \pi a^3 \mu_0 \mu_1 \chi H, \quad (1)$$

式中: $a$  为颗粒半径; $\chi$  为颗粒磁化率; $\mu_0$  为真空磁导率; $\mu_1$  为 MRE 磁导率; $H$  为颗粒所处位置的磁场。当 MRE 中颗粒链相对于外加磁场  $\vec{H}$  具有任意取向角度时,同一链中任意相邻颗粒  $m_i$  与  $m_j$  之间的位置关系如图 1 所示,其中  $\theta$  为颗粒链取向角, $r$  为颗粒间距离。相邻颗粒间的相互作用能可表示为<sup>[24]</sup>

$$E_{ij} = -\frac{m_i m_j}{4\pi\mu_0\mu_1 r^3} [3 \cos^2 \theta - 1], \quad (2)$$

磁化颗粒之间的相互作用力  $\vec{F} = -\nabla(E_{ij})$ , 其中:  $\nabla = \frac{\partial}{\partial r} \hat{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \hat{\theta}$ , 得到

$$\vec{F} = \frac{3m_i m_j}{4\pi\mu_0\mu_1 r^4} [(1 - 3 \cos^2 \theta) \hat{r} - (2 \cos \theta \sin \theta) \hat{\theta}]. \quad (3)$$

其中: $\hat{r}$  代表径向方向单位向量; $\hat{\theta}$  代表角向方向单位向量,其系数正负代表力的方向。从式(3)中可以看出,磁化颗粒间相互作用力具有沿径向和角向的分量,这表明颗粒间相互作用力不仅与其距离有关,还与相对于外加磁场的取向角度  $\theta$  有关<sup>[22]</sup>。相邻颗粒间相互作用力如图 2(a) 所示。当取向角在  $0 \sim 90^\circ$  之间变化时,径向分力和角向分力随取向角  $\theta$  的变化如图 2(b) 所示。其中径向分力先表现为吸引力,在  $\theta \approx 54.74^\circ$  时变为排斥力。

剪切受力是 MRE 的常见工作模式之一。MRE 受剪切时产生变形,变形前后颗粒链与相邻颗粒间几何关系如图 3 所示,假设变形前颗粒间沿磁场方向的距离为  $r_0$ <sup>[22]</sup>,变形前后颗粒间距离分别为  $r_1$  和  $r_2$ ,颗粒链取向角为  $\theta$ ,应变角为  $\delta$ ,剪切力均匀分布在每个颗粒上。

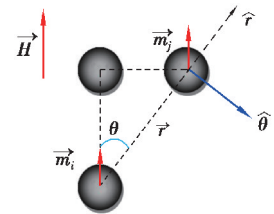


图 1 相邻磁偶极子间的位置关系  
Fig. 1 Positional relationship between adjacent magnetic dipoles

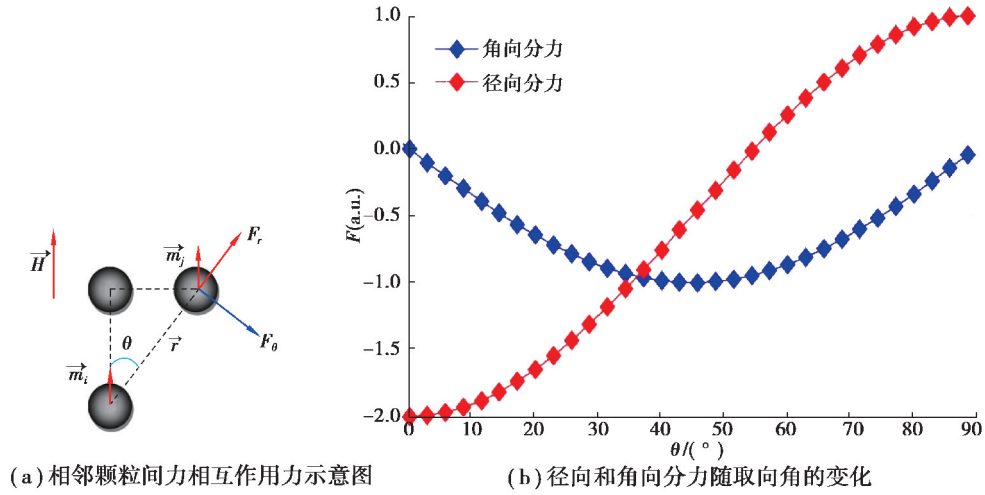


图 2 相邻颗粒间力相互作用力示意图及径向和角向分力随取向角的变化  
 Fig. 2 The schematic illustration of interaction forces between adjacent particles and the variation of radial and angular components with orientation angle

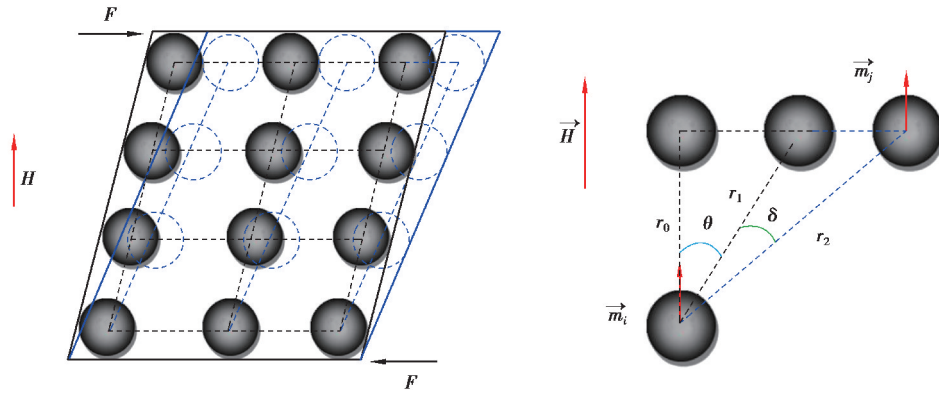


图 3 剪切变形前后颗粒链及相邻磁偶极子间的几何关系  
 Fig. 3 Geometric relationship between particle chains and adjacent magnetic dipoles before and after shear deformation

当 MRE 剪切变形时,在外加磁场作用下,内部磁化颗粒间的相互作用力 $\vec{F}$ 将抵抗变形。假设颗粒大小均匀,则  $m_i = m_j = m$ ,考虑同一链中所有颗粒之间的相互作用,将 $\vec{F}$ 沿水平剪切力方向投影,可得颗粒间抵抗剪切变形的力<sup>[25]</sup>

$$F = \frac{3Cm^2}{2\pi\mu_0\mu_1r^4} [5 \cos^2\theta \sin\theta - \sin\theta], \tag{4}$$

其中,  $C = \sum_{i=1}^n \frac{1}{r^4} \approx 1.082$ 。

磁致剪切模量表达式为<sup>[19]</sup>

$$\Delta G = \frac{nF}{\gamma'}, \tag{5}$$

其中: $n$  为单位截面中粒子链的数量,  $n = \frac{3\varphi r_0}{4\pi a^3}$ ;斜链的剪应变  $\gamma'$  与 MRE 整体剪应变  $\gamma$  之间关系为<sup>[26]</sup>:  $\gamma' = \gamma \cos^2\theta$ ,从而求得 MRE 的磁致剪切模量为

$$\Delta G = \frac{9\varphi Cr_0}{8\pi^2 a^3 \mu_0 \mu_1 r^4 \gamma \cos^2\theta} [5 \cos^2(\theta + \delta) \sin(\theta + \delta) - \sin(\theta + \delta)] m^2, \tag{6}$$

从图 4 中可知:  $\cos(\theta + \delta) = \frac{r_0}{r_2}$ ,  $\cos \theta = \frac{r_0}{r_1}$ , 令

$$K = \frac{[5 \cos^2(\theta + \delta) - 1] \cdot \sin(\theta + \delta) \cdot \cos^4(\theta + \delta)}{\cos^2 \theta} \quad (7)$$

则磁致剪切模量可表示为

$$\Delta G = \frac{9\varphi CK}{8\pi^2 a^3 \mu_0 \mu_1 r_0^3 \gamma} m^2 \quad (8)$$

在(8)中,  $K$  与颗粒链取向角相关, 在相同磁场下, 取其他参数为定值, 可得磁致模量随颗粒链取向角度的变化规律如图 4 所示。

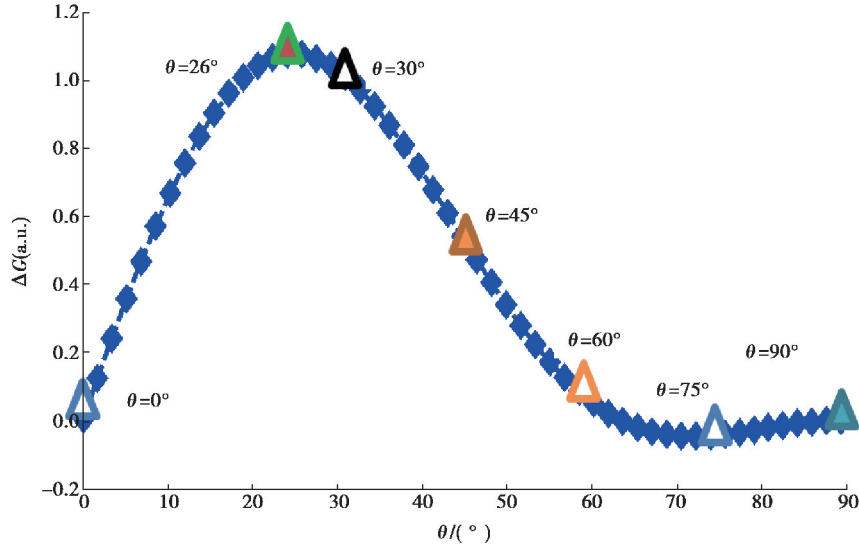


图 4 相同磁场下磁致模量随颗粒链取向角度的变化规律

Fig. 4 Variation of magneto-induced modulus modulus with particle chain orientation angle under the same magnetic field

从图 4 可以看出, 磁致模量随颗粒链取向角度的增大先增大后减小, 在  $26^\circ$  附近达到最大值。当取向角大于  $63^\circ$  时, 出现负磁致模量。在几个特殊的取向角度情况下, 磁致模量的绝对值表现出  $90^\circ < 75^\circ < 0^\circ < 60^\circ < 45^\circ < 30^\circ$ 。从磁化颗粒间的相互作用来看, 当 MRE 受外力剪切发生变形时, 因为取向角度的存在, 在外加磁场作用下, 磁化颗粒间会在剪切方向产生一个相互作用力以抵抗变形<sup>[22]</sup>。当颗粒链与外加磁场的取向角度增大时, 抵抗剪切变形的力先增大后减小, 在  $26^\circ$  附近达到最大值, 直至方向发生改变。因此, 磁致模量也随取向角度先增大后减小, 并在较大角度表现出负磁致模量。从基体的角度看, 磁化颗粒倾向于向外加磁场方向运动。由于固定在基体中的颗粒链与外加磁场方向存在取向夹角, 使得这种趋势更加明显, 受界面处基体的限制, 颗粒产生的位移将使基体产生应力集中, MRE 表现出磁致模量的变化<sup>[22]</sup>。

基于磁偶极子理论的微观磁致模型只考虑了颗粒间相互作用, 未考虑基体与颗粒之间的磁场耦合对 MRE 磁致特性的影响, 因此不能准确预测磁致模量大小。在实际应用中, 为便于控制, 需要准确预测不同磁场下 MRE 的磁致模量, 因此基于参数的磁致模型更具工程应用价值<sup>[22]</sup>。通过实测值对简化微观模型中的参数进行逆向识别, 可得 MRE 磁致模量的参数模型。将式(1)代入式(8)得

$$\Delta G = \frac{2\varphi CK \mu_0 \mu_1}{\gamma} \left(\frac{a}{r_0}\right)^3 [\chi \cdot H]^2 \quad (9)$$

令  $A = \frac{2\varphi C \mu_0 \mu_1}{\gamma} \left(\frac{a}{r_0}\right)^3$ ,  $M = \chi \cdot H$ , 可得简化公式

$$\Delta G = A \cdot K \cdot M^2 \quad (10)$$

其中  $A$  与颗粒粒径、应变、体积分数等参数相关, 可视为常数;  $K$  与颗粒链取向角度相关;  $M$  为磁化强度,

$M = \chi \cdot H$ ,与颗粒的磁化过程相关<sup>[22]</sup>。在羰基铁粉磁化过程中,颗粒磁化率与磁感应强度之间存在非线性特性<sup>[27]</sup>,根据磁化曲线可拟合得到磁化强度与外加磁场之间的经验公式: $M^2 = \alpha B^2 + \beta B$ ,代入式(10)得到磁致模量参数模型

$$\Delta G = aB^2 + bB, \quad (11)$$

该磁致模量参数模型较为简明,仅包含  $a$  和  $b$  2 个参数,其中  $a = AK\alpha$ ,  $b = AK\beta$ ,都与颗粒链的取向角度有关。

## 2 MRE 试样制备及磁致模量测试

为验证以上规律的准确性,制备了具有不同颗粒链取向角度的 MRE 试样并进行动态剪切力学性能测试。制备原料包括聚二甲基硅氧烷、硅油、铂催化剂和粒径分别为  $38 \mu\text{m}$ ,  $75 \mu\text{m}$ ,  $150 \mu\text{m}$  的羰基铁粉。将相同配比的羰基铁粉(质量分数 33.3%)、聚二甲基硅氧烷(质量分数 66.1%)以及硅油在真空状态下同铂催化剂混合搅拌均匀,将混合物倒入铝制模具中并放置在匀强磁场中,通过调整模具与磁场间的夹角,制备得到 3 种不同粒径,颗粒链具有 6 种不同取向角度的 MRE 试样,MRE 试样的颗粒链取向角度分别为  $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $75^\circ$  和  $90^\circ$ 。制备流程如图 5 所示。

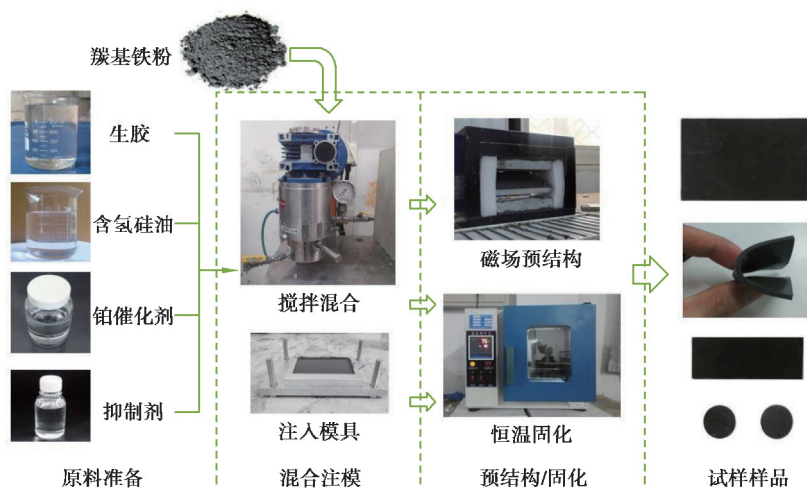


图 5 MRE 试样的制备流程

Fig. 5 MRE sample preparation process

对制备的试样进行磁场扫描测试,采用的仪器为 Physica MCR301 流变仪,其内置的励磁线圈可产生变化的均匀磁场。将试样裁成直径为 20 mm,厚度为 2 mm 的圆片。测试时流变仪平行板与 MRE 表面接触并产生一个预压力(5 N);将流变仪设置为振荡剪切模式,测试频率为 10 Hz;当平行板旋转时,试样受到水平剪切,为保证 MRE 处于线性粘弹性区域内,设置剪切应变为 0.1%<sup>[22]</sup>;通过控制电流改变磁场大小,MRE 内部的颗粒链取向角度为磁场方向和粒子链方向的夹角。

## 3 实验结果分析

测试结果如图 6 所示,测试磁场的变化范围约为 0~1 100 mT,磁致剪切模量随磁场的增大呈非线性增大,这是由于颗粒磁化过程是非线性的。随外加磁场增大,MRE 表现出明显的磁流变效应。3 种不同粒径下 MRE 的磁致模量均表现出相同的规律,即  $90^\circ < 75^\circ < 0^\circ < 60^\circ < 45^\circ < 30^\circ$ ,这与基于磁偶极子理论所推导的微观模型所表现的趋势一致,验证了该微观模型的准确性。

根据实测的磁致剪切模量值,利用最小二乘法对式(11)中的参数进行识别,可得到不同粒径和取向角度下 MRE 的磁致模量参数模型中  $a$ ,  $b$  的数值,如表 1 所示。

表 1 不同粒径和取向角度下 MRE 磁致模量参数模型

Table 1 Parameter model of MRE magneto-induced modulus under different particle size and orientation angle

角度	粒径 38 $\mu\text{m}$		粒径 75 $\mu\text{m}$		粒径 150 $\mu\text{m}$	
	$a$	$b$	$a$	$b$	$a$	$b$
0°	-0.204 6	328.6	-0.367 2	604.8	-0.118	193.4
30°	-0.815 5	1 263	-0.632 9	1 134	-0.921 4	1 450
45°	-0.799 8	1 130	-0.557	1 073	-0.727 1	1 235
60°	-0.176 3	362.2	-0.404 9	731.5	-0.486 3	627.8
75°	-0.165 5	251	-0.081 56	268.9	-0.036 08	54.49
90°	-0.066 38	96.61	-0.030 17	41.87	-0.007 43	11.08

在磁致模量参数模型中,从参数  $a, b$  的数值变化上可以看出,其绝对值都随取向角度的增大先增大后减小,并在 30° 时取得最大值,且在 0~30° 之间变化较大,这表明磁致模量对取向角度在 0~30° 之间的变化较为敏感,这与微观模型中的趋势符合<sup>[22]</sup>。参数模型预测值如图 6 中实线所示,从图中可以看出,在不同的磁场大小下,基于参数的磁致模量模型可较为准确的预测 MRE 的磁致模量值,并且通过控制磁场大小可以改变取模量。为基于 MRE 的器件研究提供了理论参考。

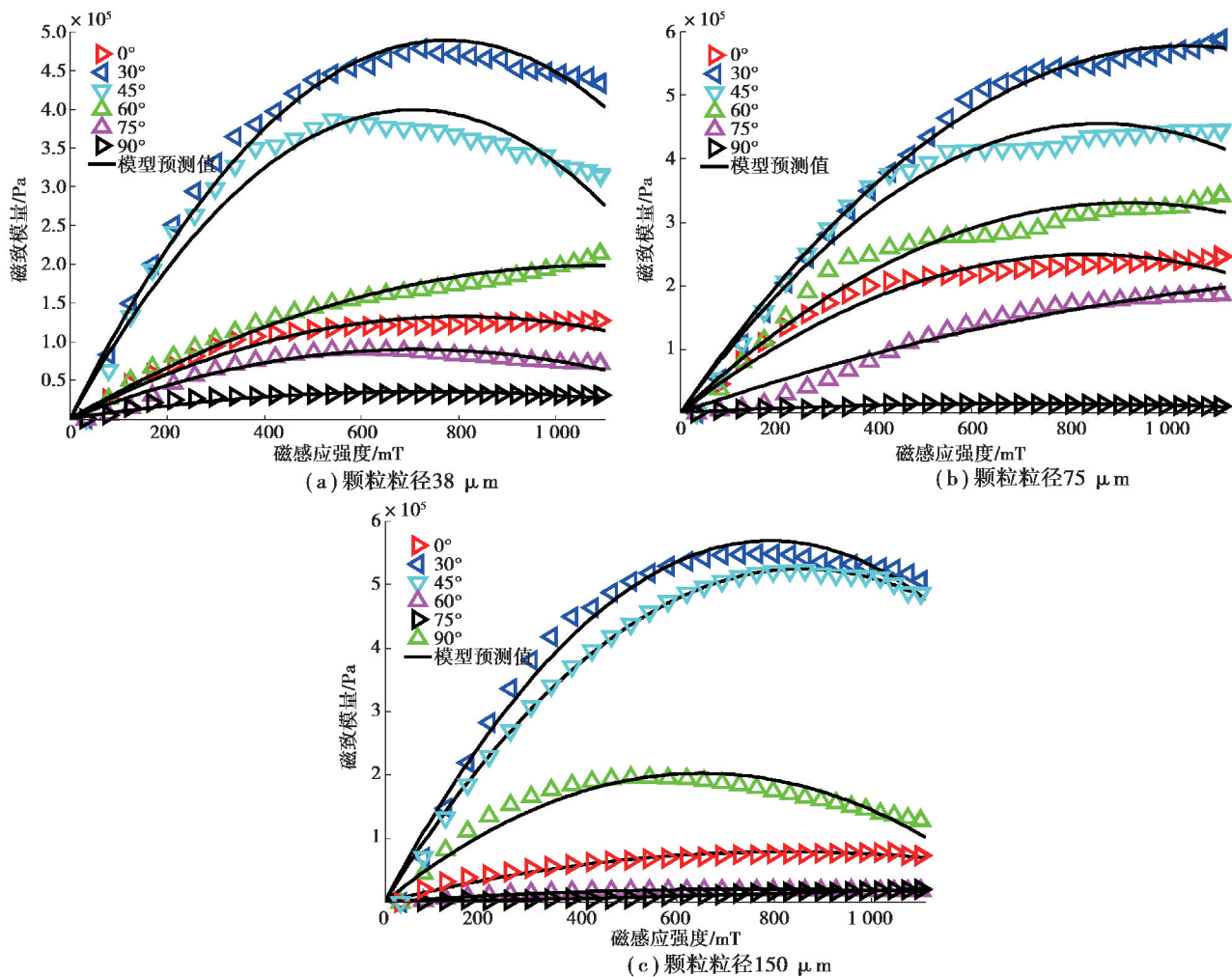


图 6 颗粒链取向角度和磁场对 MRE 磁致模量的影响

Fig. 6 The effect of particle chain orientation angle and magnetic field on MRE magneto-induced modulus

## 4 结 论

基于磁偶极子理论,分析了磁化颗粒之间的相互作用,建立了虑及颗粒链取向角度的 MRE 磁致模量微观模型,通过分析颗粒间相互作用机理,预测了磁致模量随颗粒链取向角的变化趋势。制备了具有不同颗粒链取向角度的 MRE 试样,并测试了不同 MRE 试样的磁致模量。将所提出的磁致模量微观模型简化为含有未知参数的参数模型,并通过测试数据对模型中的参数进行识别,得到具有不同颗粒链取向角度 MRE 的磁致模量参数模型。主要结论如下:

1) MRE 的力学性能不仅依赖于基体材料和颗粒含量,还取决于磁性颗粒在基体中的排列方式。基于磁偶极子理论建立的具有不同颗粒链取向角度的 MRE 的磁致剪切模量微观模型可以较好的解释和预测颗粒链取向角度对 MRE 磁致特性的影响。

2) MRE 的磁致剪切模量与颗粒链取向角度有关。测试结果显示,在 3 种不同粒径(38  $\mu\text{m}$ 、75  $\mu\text{m}$  和 150  $\mu\text{m}$ )下,MRE 的磁致剪切模量均随颗粒链取向角度的增大先增大后减小。颗粒链取向角度为 30°、45°和 60°的 MRE 的磁致剪切模量大于传统的直链 MRE 的磁致剪切模型。因此,通过改变颗粒链取向角度可以提高 MRE 的磁致剪切模量。

3) 具有不同颗粒链取向角度 MRE 的磁致模量参数模型可以较准确的描述颗粒链取向角度和磁场对 MRE 磁致模量的影响。通过对相关参数的讨论可得,MRE 的磁致模量在 30°达到最大值,在 0°~30°之间变化较快,与微观模型预测相符合。

### 参考文献:

- [1] Jolly M R, Carlson J D, Muoz B C. A model of the behaviour of magnetorheological materials [J]. Smart Materials and Structures, 1996, 5(5):607-614.
- [2] Ginder J M, Nichols M E, Eliea L D, et al. Magnetorheological Elastomers: Properties and Applications. Part of the SPIE Conference on Smart Materials Technologies. California, 1999, 3675:131-138.
- [3] Perales-Martinez I A, Palacios-Pineda L M, Lozano-Sanchez L M. Enhancement of a magnetorheological PDMS elastomers with carbonyl iron particles[J]. Polymer Testing, 2017, 57: 78-86.
- [4] Shaoqi L, Yajun L, Yancheng L, et al. Investigation of dynamic properties of isotropic and anisotropic magnetorheological elastomers with a hybrid magnet shear test rig[J]. Smart Materials and Structures, 2020, 29(11):114001.
- [5] Quan S, Li D, Xinglong G, et al. High performance magnetorheological elastomers strengthened by perpendicularly interacted flax fiber and carbonyl iron chains[J]. Smart Materials and Structures, 2020, 29(2):025010.
- [6] Asadi Khanouki Mostafa, Sedaghati Ramin, Hemmatian Masoud. Multi-disciplinary Design Optimization of a Novel Sandwich Beam-Based Adaptive Tuned Vibration Absorber Featuring Magnetorheological Elastomer[J]. Materials, 2020, 13(10):2261.
- [7] Xufeng C, Shouhu X, Jun L, et al. Magnetic-tunable sound absorber based on micro-perforated magnetorheological elastomer[J]. Smart Materials and Structures, 2020, 29(1):015024.
- [8] Armin R, Rasooli A, Sedaghati R, et al. A novel magnetorheological elastomer-based adaptive tuned vibration absorber: design, analysis and experimental characterization[J]. Smart Materials and Structures, 2020, 29(11): 115042.
- [9] Kim H K, Kim H S, Kim Y K. Stiffness control of magnetorheological gels for adaptive tunable vibration absorber [J]. Smart Materials and Structures, 2016, 26(1): 015016.
- [10] Mi Z, Miao Y, Song Q, et al. Investigations on response time of magnetorheological elastomer under compression mode [J]. Smart Materials and Structures, 2018, 27(5): 055017.
- [11] Nabil H. Curing and swelling kinetics of new magnetorheological elastomer based on natural rubber/waste natural rubber gloves composites[J]. Journal of Elastomers & Plastics, 2019, 51(7-8):583-602.
- [12] Zhao D X, S S, Jun T Z, Ying Q G. Performance tests and modeling on high damping magnetorheological elastomers based on bromobutyl rubber[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2018, 29(6):1025-1037.
- [13] Guanxin S, Wenju W, Guoping W, et al. Dynamic mechanical properties of FeSi alloy particles-filled magnetorheological elastomers[J]. Polymer-Plastics Technology and Materials, 2019, 58(15):1625-1637

- [14] Bellan C, Bossis G. Field dependence of viscoelastic properties of elastomers [J]. *International Journal of Modern Physics B*, 2002, 16(17&18): 2447-2453.
- [15] Yu M, Qi S, Fu J, et al. Understanding the reinforcing behaviors of polyaniline-modified carbonyl iron particles in magnetorheological elastomer based on polyurethane/epoxy resin IPNs matrix [J]. *Composites Science and Technology*, 2017(139):36-46.
- [16] Anna B, Stefan F A. Urethane Magnetorheological Elastomers-Manufacturing, Microstructure and Properties [J]. *Smart Materials for Smart Devices and Structures*, 2009(154):107-112.
- [17] Boczkowska A, Awietjan SF, Pietrzko S, et al. Mechanical properties of magnetorheological elastomers under shear deformation [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2011, 43(2): 636-640.
- [18] Tongfei T, Masami N. Fabrication and characterisation of anisotropic magnetorheological elastomer with 45° iron particle alignment at various silicone oil concentrations [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2018, 29(2): 151-159.
- [19] Jolly M R, Carlson J D. The Magnetoviscoelastic Response of Elastomer Composites Consisting of Ferrous Particles Embedded in a Polymer Matrix [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 1996, 7(6): 613-622.
- [20] Davis L C. Model of magnetorheological elastomers [J]. *Appl. Phys.*, 1999, 85(6): 3348-3351.
- [21] Shen Y, Golnaraghi M F, Hepler G R. z. Experimental Research and Modeling of Magnetorheological Elastomers [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2004, 15(1): 27-35.
- [22] 杨伟. 磁流变弹性体磁致特性研究及转子振动抑制用主动器设计 [D]. 北京: 北京化工大学, 2019.  
YANG W. Micromechanics-based magneto-elastic constitutive modeling of particulate composites [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2019.
- [23] Ioan B, Hyoung J C. Preparation and Electro-Thermoconductive characteristics of magneto-rheological suspensions [J]. *International Journal of Modern Physics B*, 2008, 22(29): 5041-5064.
- [24] Yao J, Yang W, Gao Y, et al. Magnetorheological elastomers with particle chain orientation: modelling and experiments [J]. *Smart Materials and Structures*, 2019, 28(9): 095008 -095019.
- [25] 党辉, 朱应顺, 龚兴龙等. 基于分布链修正的磁流变弹性体的物理模型 [J]. *化学物理学报*, 2005, 18(6): 971-975.  
Dang H, Zhu Y S, Gong X L, et al. Revised model of the magnetorheological elastomer based on distributed chains [J]. *Chinese Journal of Chemical Physics*, 2005, 18(6): 971-975 (in Chinese).
- [26] Antonioj. F B, Marcelo k, Mariareginaalca N S. Evaluation of Magnetorheological Suspensions Based on Carbonyl Iron Powders [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2002, 13(7): 471-478.

(编辑 侯 湘)