

取向磁场对钴颗粒填充硅橡胶磁流变弹性体 动态黏弹性的影响

尹兵雪¹, 王明先², 佟昱¹, 钮晨光¹, 张玉生³, 马宁⁴, 董旭峰^{*1}

(1. 大连理工大学 材料科学与工程学院, 大连 116024; 2. 中国空间技术研究院, 北京 100094;

3. 北京卫星制造厂, 北京 100094; 4. 大连理工大学 土木工程学院, 大连 116024)

摘 要: 为了研究取向磁场强度对磁流变弹性体(MRE)动态黏弹性的影响规律及影响机制, 采用溶剂热法制备球状钴颗粒, SEM 和 XRD 表征结果显示, 其粒径为 $1\sim 2\ \mu\text{m}$, 呈密排六方结构。以硅橡胶为基体, 以钴颗粒为填充相, 分别在 0 mT、480 mT、1 154 mT 取向磁场强度下制备 MRE, 并在不同工况下测试其动态黏弹性。实验结果表明, Co 颗粒填充的 MRE 微观结构的有序性随取向磁场强度增大而增加, 其储能模量 G' 、损耗模量 G'' 和磁流变效应也随之提高; 当取向磁场强度增大到一定程度, 由于有序结构趋于稳定, 动态黏弹性随取向磁场的变化较小。

关键词: 磁流变弹性体; 智能材料; 钴颗粒; 取向磁场; 动态黏弹性; 磁流变效应

中图分类号: TB381 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2018)06-1414-07

Effect of orientation magnetic field on dynamic viscoelasticity of cobalt particles filled silicone rubber magnetorheological elastomers

YIN Bingxue¹, WANG Mingxian², TONG Yu¹, NIU Chenguang¹, ZHANG Yusheng³,
MA Ning⁴, DONG Xufeng^{*1}

(1. School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China; 3. Beijing Satellite Factory, Beijing 100094,
China; 4. School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: In order to investigate the mechanism of the effect of orientation magnetic field on dynamic viscoelasticity of cobalt particles filled magnetorheological elastomer (MRE), cobalt particles were synthesized by a solvothermal method. The XRD and SEM results indicate the spherical cobalt particles have close packed hexagonal structure with particle size within the range of $1\sim 2\ \mu\text{m}$. Silicone rubber was used as the matrix to prepare cobalt particles filled MRE. During the curing process, different orientation fields (0 mT, 480 mT and 1 154 mT) were applied to prepare different MRE, and their dynamic viscoelasticity were tested. The results indicate the ordered structure formed by the cobalt particles was enhanced with increasing orientation field. As a result, the storage modulus G' and the loss modulus G'' of Co particles filled(MRE) increase with increasing orientation field. However, when the orientation field exceeds a critical value, the ordered becomes stable, and the effect of orientation field on dynamic viscoelasticity of MREs becomes insignificant.

Keywords: magnetorheological elastomer (MRE); smart materials; cobalt particles; orientation magnetic field; dynamic viscoelasticity; magnetorheological effect

磁流变弹性体(Magnetorheological elastomer, MRE)是磁流变智能材料的新分支, 由微米级软磁

性颗粒与高分子聚合物混合固化制成^[1-2]。由于 MRE 中磁性颗粒被固定在基体中, 与磁流变液相

收稿日期: 2017-06-02; 录用日期: 2017-08-30; 网络出版时间: 2017-09-04 07:09

网络出版地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170904.001>

基金项目: 国家自然科学基金(51478088)

通讯作者: 董旭峰, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为智能复合材料 E-mail: dongxf@dlut.edu.cn

引用格式: 尹兵雪, 王明先, 佟昱, 等. 取向磁场对钴颗粒填充硅橡胶磁流变弹性体动态黏弹性的影响[J]. 复合材料学报, 2018, 35(6): 1414-1420.

YIN B X, WANG M X, TONG Y, et al. Effect of orientation magnetic field on dynamic viscoelasticity of cobalt particles filled silicone rubber magnetorheological elastomers[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(6): 1414-1420 (in Chinese).

比, MRE 的动态黏弹性可通过磁场实时、可逆且迅速调节, 还具有颗粒不沉降、结构稳定性好、设计简单和制备成本低等优势^[3]。

近年来, 国内外学者对 MRE 的制备、评价、机制、理论及应用等进行了全面的研究, 取得了显著的进展。制备方面, 由于硅橡胶具有许多优异性能, 其作为基体得到广泛应用^[4]。除此之外, 研究学者也使用天然橡胶^[5]、异丁烯橡胶^[6]、热塑性聚氨酯橡胶^[7]和混合橡胶^[8]等作为基体制备 MRE。基体的选择对 MRE 的动态黏弹性具有显著的影响, 而对于选定的基体材料, 磁性颗粒的成分、粒径、含量等则是影响 MRE 动态黏弹性, 特别是磁流变效应的关键因素。羰基铁粉(Carbonyl iron, CI)是目前应用最多的磁性颗粒, 其具有饱和磁化强度高、磁导率高和易制备等优点。近年来, 也有学者将铁的氧化物^[9]、Fe、Co、Ni 纳米线^[10]、复合磁性粒子^[11]、硬磁粒子(钡铁氧体、锶铁氧体、钕铁硼、钕铁硼)^[12]和混合颗粒^[13]等作为填充相制备 MRE, 从不同的角度研究了颗粒形貌、成分等因素对 MRE 动态黏弹性及磁流变效应的影响。此外, 也有许多研究通过理论模型分析了 MRE 的工作机制并预测了其性能^[14-18]。由于 MRE 兼有磁流变液和弹性体两方面的诸多优点, 其力学、电学和磁学诸性能可以由外加磁场来控制, 模量可调范围较大, 反应能力迅速, 因此 MRE 在智能减振、隔震等领域的应用研究也成为热点^[19-20]。

从组成和结构上, MRE 属于颗粒填充聚合物基复合材料, 因此, 磁性颗粒在聚合物基体中的分布及排列对 MRE 的性能也具有显著的影响。大量的研究表明, 在羰基铁粉 MRE 制备过程中施加一定的取向磁场, 可使颗粒沿场强方向取向排列, 形成类似 1-3 型的各向异性复合结构, 其垂直于场强方向的动态剪切黏弹性及磁流变效应均高于颗粒随机分布的 0-3 型各向同性磁流变弹性体。Qiao 等^[21]制备了以聚(苯乙烯-*b*-乙烯-丁烯-*b*-苯乙烯)(SEBS)为基体、羰基铁粉为磁性颗粒的各向同性和各向异性 MRE。研究表明, 各向异性 MRE 较各向同性 MRE 具有更高的场诱导模量变化和更大的磁流变效应。WU 等^[22]制备了以羰基铁粉为磁性颗粒、聚氨酯为基体的且掺入增塑剂邻苯二甲酸二异辛酯(DOP)的各向异性 MRE。研究表明, 含 70wt% 羰基铁粉和 15wt% DOP 的各向异性聚氨酯基 MRE 的绝对和相对磁流变效应分别达到 1.16 MPa 和

386.7%。Kaleta, J 等^[23]分别在有取向场和无取向场下制备了以热塑性塑料为基体、60 μm 的 Fe 粒子作为磁性颗粒的 MRE, 并对比分析了两种 MRE 的性能, 结果表明, 各向异性 MRE 比各向同性 MRE 拥有更显著的磁流变效应。CHEN 等和 FAN 等^[24-25]在室温和强磁场条件下, 分别以硅橡胶和天然橡胶为基体、羰基铁粉为磁性颗粒, 制备了 MRE, 并对材料性能进行了研究, 结果表明, 在 1 000 mT 外加磁场下硅橡胶基 MRE 的剪切模量可达到 3.34 MPa, 相对磁流变效应达到 878%; 天然橡胶基 MRE 的模量增加到 3.6 MPa, 相对磁流变效应增加了 133%。然而, 这种规律是否适用于除羰基铁粉以外其他颗粒为填充相的 MRE 还有待验证。更重要的是, 这些研究大都只比较了施加取向场与不施加取向场所制备的 MRE 的性能差异, 而对于取向磁场强度大小对其动态黏弹性的影响规律及机制却鲜见公开研究。

基于此, 本论文以钴颗粒为填充相, 以硅橡胶为基体, 在不同取向磁场下制备 MRE, 观察其微观结构并测试其动态黏弹性, 以了解取向磁场大小对 MRE 性能的影响, 并分析其相关机制。

1 实验材料及方法

1.1 原材料

六水合氯化钴($\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), 天津博迪化工股份有限公司; 乙二醇($\text{CH}_2\text{OH})_2$), 分析纯, 天津市富宇精细化工有限公司; 氢氧化钠(NaOH), 西陇化工股份有限公司; 无水乙醇($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$), 天津市富宇精细化工有限公司; 室温硫化硅橡胶 615 及其硫化剂, 深圳市红叶杰有限公司; 二甲基硅油, 北京航平硅创化工有限公司。

1.2 球状钴颗粒的合成

将 8 mmol $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 和 40 mL $(\text{CH}_2\text{OH})_2$ 加入烧杯一中进行磁力搅拌, 将 30 mmol NaOH 和 40 mL $(\text{CH}_2\text{OH})_2$ 加入烧杯二中进行磁力搅拌; 待两烧杯中的液体搅拌均匀, 将烧杯二中的液体倒入烧杯一中搅拌 30 min。然后将混合液加入高温高压反应釜中, 放入真空干燥箱, 在 200℃ 下保温 10 h。待反应釜自然冷却后将生成的黑色沉淀用 $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ 清洗数次, 60℃ 下真空干燥 24 h 即得到球状钴颗粒。

1.3 钴颗粒填充硅橡胶 MRE 的制备

将硅橡胶、硅油、钴颗粒和固化剂按照质量比

为 1 : 1 : 1.85 : 0.03 搅拌均匀, 将搅拌混合好的粘流态混合物倒入模具中, 并进行抽真空处理 10 min。采用电磁铁系统(力田磁电科技有限公司)施加取向磁场, 分别在 0 mT、480 mT 和 1 154 mT 取向磁场、25℃ 下固化 2.5 h, 得到 MRE 试样。MRE 中钴颗粒体积分数为 10%, 样品直径为 20 mm, 厚 1 mm。图 1 为 MRE 制备系统示意图。

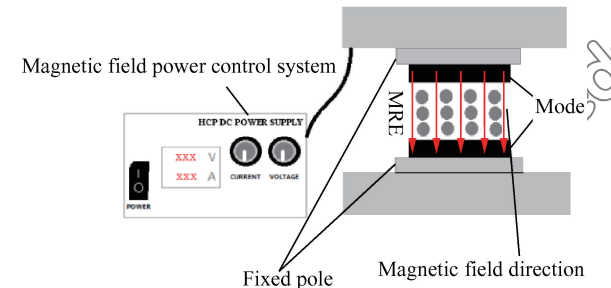


图 1 磁流变弹性体(MRE)制备系统
Fig. 1 Preparing system of magnetorheological elastomers (MRE)

1.4 颗粒表征及 MRE 性能测试

SEM 分析: 采用 QUANTA 450 型钨灯丝扫描电镜观察钴颗粒的形貌及大小及 MRE 截面形貌。

XRD 分析: PANALYTICAL Empyrean 型 X 射线衍射仪, 扫描范围为 30°~80°, 对钴微米颗粒进行晶体结构分析。

使用 MCR301 旋转流变仪(奥地利安东帕公司)在 3 种测试模式下对 MRE 的动态黏弹性进行测试。测试过程中施加的外磁场方向与取向磁场方向相同。频率扫描测试模式中, 不施加外磁场, 设置恒定正弦应变幅值为 0.01%, 频率在 0.1~100 Hz 范围内对数增加; 应变振幅扫描测试模式中, 不施加外磁场, 设置恒定频率 10 Hz, 正弦应变振幅在 0.001%~100% 范围内对数增加; 磁场扫描测试模式中设置恒定应变振幅为 0.01%, 恒定频率为 10 Hz, 磁场强度在 0~300 mT 范围内线性增加。

2 结果与讨论

2.1 钴颗粒表征

钴颗粒的 SEM 图像如图 2 所示。可以看出, 所制备的钴颗粒呈球形, 其粒径在 1~2 μm 范围内。

球状钴颗粒的 XRD 图谱如图 3 所示。通过与编号为 05-0727 的 JCPDS 卡片对比可知, 图中位于 41.68°、44.76°、47.57°、75.94° 和 84.2° 处的衍射峰分别与六方晶型 (hcp) 钴的 (100)、(002)、

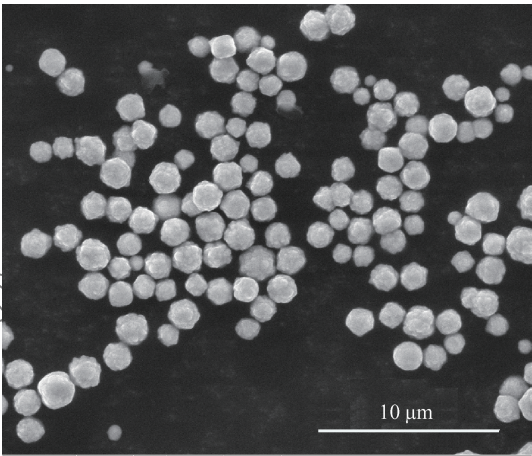


图 2 球状钴颗粒的 SEM 图像
Fig. 2 SEM images of spherical cobalt particles

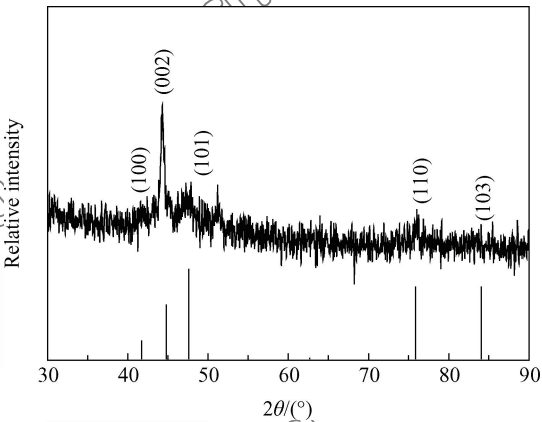


图 3 球状钴颗粒 XRD 图谱
Fig. 3 XRD pattern of spherical cobalt particles

(101)、(110) 和 (103) 晶面对应。图中没有其他杂质峰的出现, 说明所制备的产物是纯净的钴单质。

2.2 不同取向场下钴颗粒填充硅橡胶 MRE 的微观结构

图 4 为不同磁场条件下制备的 3 种钴颗粒填充硅橡胶 MRE 在平行于取向磁场方向的截面 SEM 图像。

从图 4(a)可以看出, 在外加磁场为 0 mT 时制备的 MRE 内部钴颗粒呈无序均匀分布, 呈各向同性结构; 由图 4(b) 和图 4(c) 可知, 480 mT 和 1 154 mT 磁场强度下制备的钴颗粒填充硅橡胶 MRE 内部钴颗粒均沿取向磁场方向定向排布, 均呈各向异性, 但二者差异不明显。可见 480 mT 的取向磁场使钴颗粒在基体中的排布趋于稳定, 施加更高的取向磁场未能使其微观结构表现出显著的

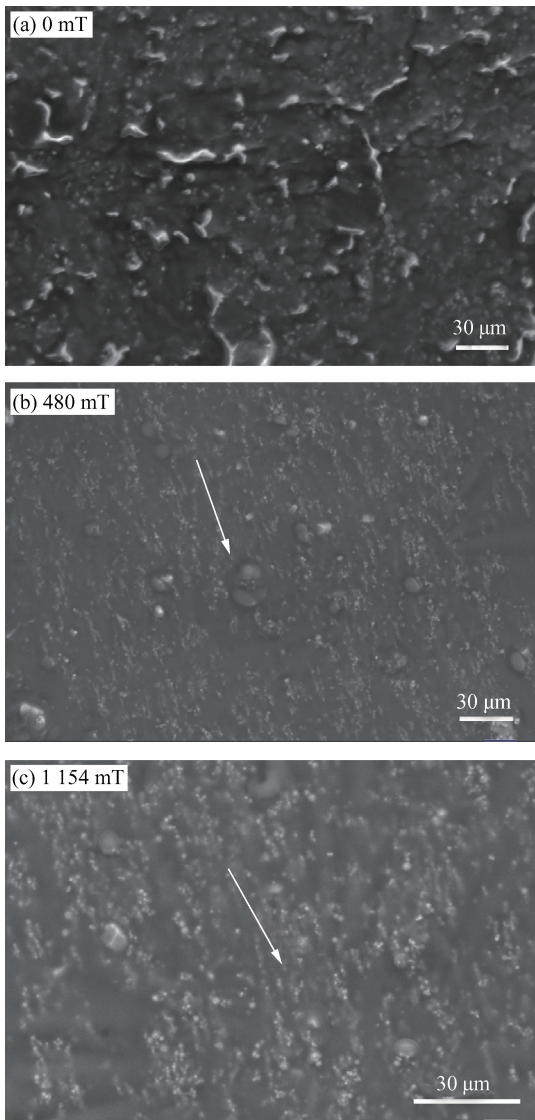


图 4 不同取向磁场强度下制备的钴颗粒填充硅橡胶 MRE 沿取向磁场方向截面 SEM 图像

Fig. 4 SEM images of longitudinal section of the Co particles filled silicone rubber MRE samples prepared under different orientation magnetic fields

变化。

2.3 取向磁场对钴颗粒填充硅橡胶 MRE 动态黏弹性的影响

图 5 为在不同取向磁场强度(0 mT、480 mT 和1 154 mT)下制备的钴颗粒填充硅橡胶 MRE 的零场储能模量 G' 和损耗模量 G'' 随加载频率的变化。可以看出, 3 种 MRE 的 G' 和 G'' 均随加载频率的增大而增大, 当剪切频率小于 10 Hz 时, G' 和 G'' 随频率的增大缓慢增大, 当剪切频率大于 10 Hz 时, 由于基体的链段运动速度无法跟上外加剪切载荷的速度, G' 和 G'' 随加载频率的增加而大幅上升。对比不

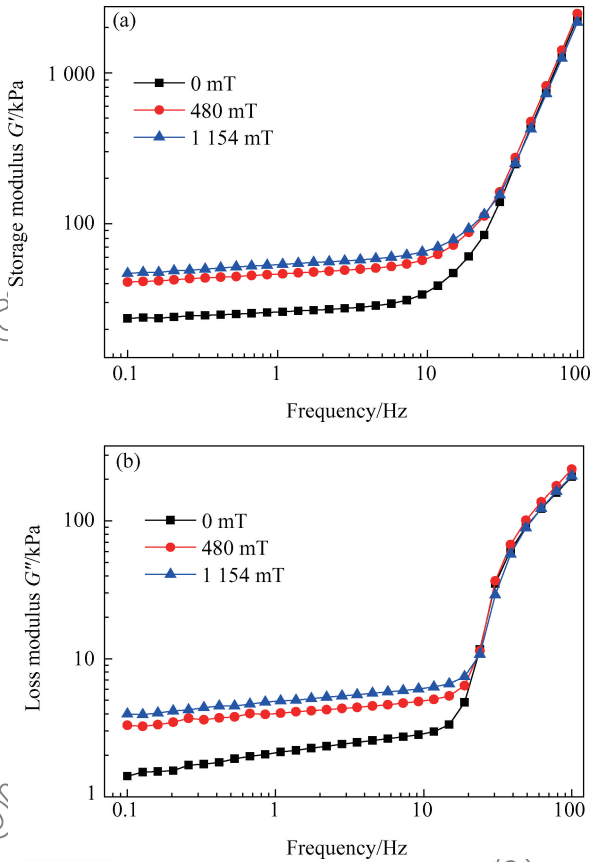


图 5 不同取向磁场强度下制备的钴颗粒填充硅橡胶 MRE 零场储能模量 G' 和损耗模量 G'' 随加载频率的变化

Fig. 5 Storage modulus G' and loss modulus G'' of Co particles filled silicone rubber MRE prepared under different orientation fields as a function of shear frequency

同取向磁场强度下制备的试样, 可以看出, 在有取向磁场下制备的 MRE 较无取向场条件下制备的试样表现出更高的储能模量和损耗模量。在取向磁场下固化的试样中, 钴颗粒沿取向磁场有序排列, 颗粒间的静磁相互作用较无序排列的颗粒增强, 使 MRE 的结构可恢复性增强, 表现为储能模量的提高; 另一方面, 取向磁场下制备的 MRE 表现出更高的损耗模量, 这是由于有序排列的磁性颗粒与基体中“自由橡胶”链段的界面摩擦相互作用增大, 能量耗散增大。钴颗粒填充硅橡胶 MRE 中橡胶可分为结合橡胶、吸留橡胶、壳层橡胶和自由橡胶四部分, 其中, 自由橡胶是在颗粒聚集体之外的部分。MRE 中的界面阻尼耗能主要来自于自由橡胶与颗粒之间的摩擦滑移, 当 MRE 承受剪切应力时, 自由橡胶的分子链段发生伸展、取向和滑移运动时必然会与磁性颗粒有相对运动, 但颗粒仍然不可能脱离橡胶基体, 这是由于磁性颗粒与结合橡胶、

吸留橡胶和壳层橡胶相连接，而这三部分橡胶与颗粒间并不会发生相对滑移^[26]。对比 480 mT 与 1 154 mT 条件下制备的试样可以看出，虽然 1 154 mT 下制备的试样具有较高的储能模量和损耗模量，但较 480 mT 下制备的试样，提高的幅度较小。虽然从微观形貌上 1 154 mT 取向磁场下制备的 MRE 与 480 mT 下制备的试样无直观的显著区别，但仍可推测其较高的储能模量及损耗模量源于其更为“有序”的微观结构。

图 6 为在不同取向磁场强度(0 mT、480 mT 和 1 154 mT)下制备的钴颗粒填充的硅橡胶 MRE 的零场储能模量 G' 和损耗模量 G'' 随应变幅值的变化关系。可知，当应变幅值为 0.001%~0.1% 时，随着应变幅值的增加， G' 和 G'' 近似恒定，这是由于在小应变幅值内，由磁性颗粒形成的微观结构未发生显著变化，MRE 处于线性黏弹区。当应变幅值为 0.1%~10% 时，随着应变幅值的增加， G' 下降， G'' 上升，MRE 进入非线性黏弹区。这是由于在大

应变幅值下，基体的高分子链段和磁性颗粒产生一定的相对运动，导致 MRE 微观结构发生较显著的变化，具体表现为磁性颗粒之间的距离增加，结构恢复能力降低，导致储能模量下降；此外，基体和钴颗粒在界面间产生相对摩擦运动，导致损耗模量上升。当应变幅值超过 10% 时，MRE 的损耗模量急剧增大，甚至超过其储能模量，表明此时 MRE 材料主要表现为黏性行为。由图 6 也可以看出，在取向磁场为 480 mT 下制备的试样储能模量及损耗模量均较无取向磁场下制备的试样有显著提高，而 1 154 mT 下制备的 MRE 的动态剪切模量较 480 mT 制备的试样提高幅度较小。

图 7 为不同取向磁场强度(0 mT、480 mT 和 1 154 mT)下制备的钴颗粒填充硅橡胶 MRE 储能模量 G' 和损耗模量 G'' 随加载磁场的变化关系。可以看出，MRE 的储能模量和损耗模量均随外加磁场强度的增加而增加，表明钴颗粒填充硅橡胶 MRE

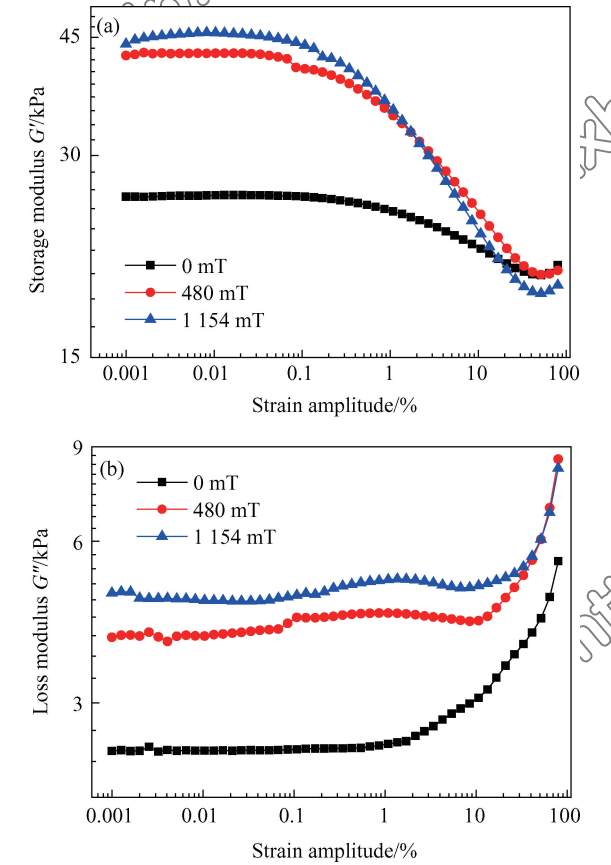


图 6 不同取向磁场强度下制备的钴颗粒填充的硅橡胶 MRE 的零场储能模量 G' 和损耗模量 G'' 随应变幅值的变化
Fig. 6 Storage modulus G' and loss modulus G'' of Co particles filled silicone rubber MRE prepared under different orientation fields as a function of strain amplitude

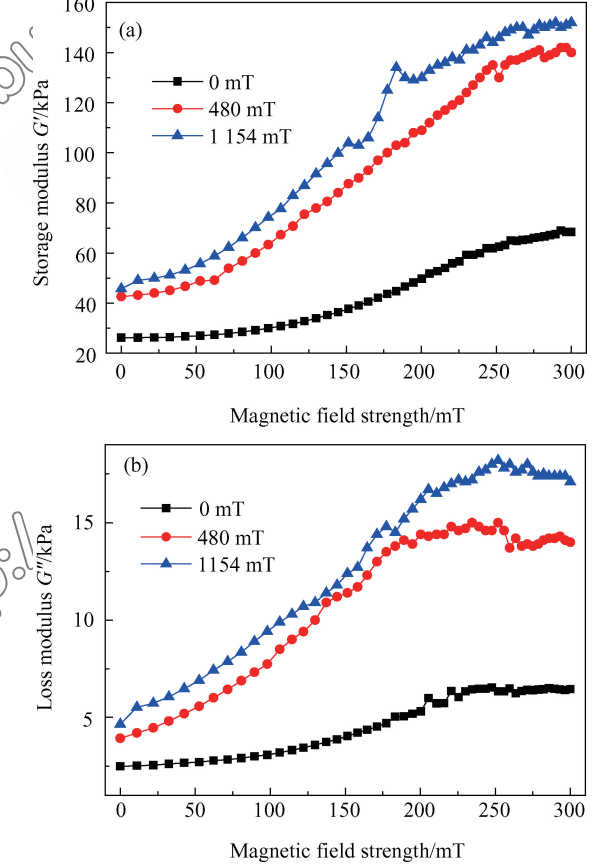


图 7 不同取向磁场强度下制备的钴颗粒填充硅橡胶 MRE 的储能模量 G' 和损耗模量 G'' 随加载磁场的变化
Fig. 7 Storage modulus G' and loss modulus G'' of Co particles filled silicone rubber MRE prepared under different orientation fields as a function of magnetic field strength

具有显著的磁流变效应。在相同外磁场强度下, 取向磁场下制备的钴颗粒填充钴颗粒填充硅橡胶 MRE 的储能模量及损耗模量均高于无取向磁场下制备的试样, 该结果与羰基铁粉 MRE 的规律一致; 而取向磁场强度越大, 动态剪切模量越高, 说明取向磁场对 MRE 的动态力学性能有显著的影响。在取向磁场强度 480 mT 和 1 154 mT 下制备的 MRE 的储能模量和损耗模量相差较小, 这是由于 MRE 中的钴颗粒在 480 mT 取向磁场下已经达到较稳定的取向和排列(如图 4 所示), 钴颗粒间的静磁相互作用力及钴颗粒与基体链段间的界面相互作用均趋于稳定, 施加更高的取向磁场强度对于提高其储能模量和损耗模量的积极效果较为有限。

在应用中主要关注 MRE 相对储能模量随外磁场强度的变化, 即相对磁流变效应, 计算公式为

$$\Delta G'/G'_0 = \frac{G'_H - G'_0}{G'_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $\Delta G'$ 为储能模量变化量; G'_0 为不施加测试磁场时的储能模量(初始储能模量); G'_H 为施加外磁场时的储能模量。相对磁流变效应直接关系到基于 MRE 的变频装置的刚度调节范围。

图 8 为不同取向磁场强度(0 mT、480 mT 和 1 154 mT)下制备的钴颗粒填充的硅橡胶 MRE 相对磁流变效应随加载磁场的变化关系。可知, MRE 的相对磁流变效应随外加磁场强度的增加而增加。施加取向磁场的 MRE 试样, 虽然其零场储能模量较高, 但相对磁流变效应仍较无取向磁场下制备的试样显著提高; 480 mT 及 1 154 mT 下制备

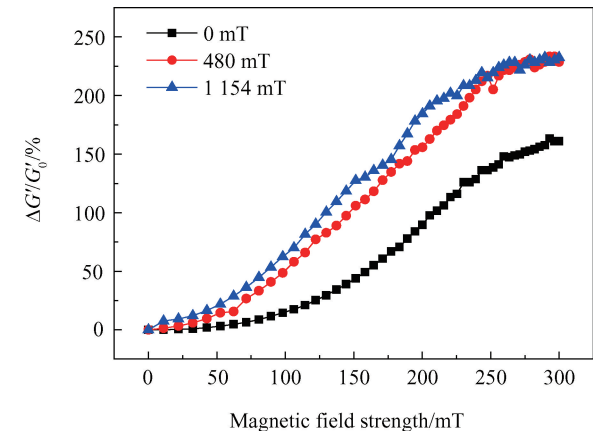


图 8 不同取向磁场强度下制备的钴颗粒填充的硅橡胶 MRE 的相对磁流变效应随加载磁场的变化

Fig. 8 Relative magnetorheological effect of Co particles filled silicone rubber MRE prepared under different orientation fields as a function of magnetic field strength

试样在相对磁流变效应上无显著差异, 这是由于虽然更高的取向磁场提高了 MRE 在外加磁场下的储能模量, 但也几乎同比例地提高了其零场下的储能模量。

3 结 论

(1) 在取向磁场下制备的钴颗粒填充硅橡胶磁流变弹性体(Magnetorheological elastomer, MRE)较无取向场条件下制备的试样表现出更高的零场储能模量和损耗模量。在取向磁场下固化的硅橡胶 MRE 中, 钴颗粒沿取向磁场有序排列, 使 MRE 的结构可恢复性增强, 表现为储能模量的提高; 另一方面, 有序排列的磁性颗粒与基体链段的界面摩擦相互作用增大, 能量耗散增大, 损耗模量增大。

(2) 在 1 154 mT 取向磁场下制备的钴颗粒填充硅橡胶 MRE 的零场储能模量和损耗模量较 480 mT 下制备的试样略有提高, 这是由于硅橡胶 MRE 材料中磁性颗粒排布的“有序性”随取向磁场的增大而提高。二者性能差异较小的原因在于 480 mT 的取向磁场能够使颗粒的排布趋于稳定, 更高的取向磁场对于 MRE 微观结构的改变程度较小。

(3) 有取向场条件下制备的钴颗粒填充的硅橡胶 MRE 的相对磁流变效应较无取向场制备的试样显著提高, 该结果与羰基铁粉填充的 MRE 的规律一致。在体积分数较低时, 1 154 mT 下制备的硅橡胶 MRE 相对磁流变效应与 480 mT 下制备的试样无明显差异, 这是由于更高的取向磁场几乎同比例地提高了硅橡胶 MRE 试样的零场储能模量和有场储能模量。

参考文献:

[1] NGUYEN V Q, RAMANUJAN R V. Novel coiling behavior in magnet-polymer composites[J]. Macromolecular Chemistry and Physics, 2010, 211(6): 618-626.

[2] KASHIMA S, MIYASAKA F, HIRATA K. Novel soft actuator using magnetorheological elastomer[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(4): 1649-1652.

[3] 廖干良, 廖昌荣, 文慧, 等. 磁致链化对磁流变弹性体抗压阻效应的影响[J]. 复合材料学报, 2017, 34(9): 2085-2092.

LIAO Ganliang, LIAO Changrong, WEN Hui, et al. Effect of particle preorientation on the piezoresistivity of magnetorheological elastomer[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(9): 2085-2092 (in Chinese).

[4] BÖSE H, RÖDER R. Magnetorheological elastomers with high variability of their mechanical properties[C]//Journal of

- Physics: Conference Series. 11th Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions, Dresden: IOP Publishing, 2009, 149(1): 012090.
- [5] CHEN L, GONG X L, JIANG W Q, et al. Investigation on magnetorheological elastomers based on natural rubber[J]. *Journal of Materials Science*, 2007, 42(14): 5483-5489.
 - [6] WANG Y, HU Y, WANG Y, et al. Magnetorheological elastomers based on isobutylene-isoprene rubber[J]. *Polymer Engineering and Science*, 2006, 46(3): 264-268.
 - [7] WU J, GONG X L, FAN Y, et al. Anisotropic polyurethane magnetorheological elastomer prepared through in situ polycondensation under a magnetic field[J]. *Smart Materials and Structures*, 2010, 19(10): 105007.
 - [8] HU Y, WANG Y L, GONG X Q, et al. Magnetorheological elastomers based on polyurethane/Si-rubber hybrid[J]. *Polymer Testing*, 2005, 24(3): 324-329.
 - [9] ZABORSKI M, MALSOWSKI M. Magnetorheological elastomer composites[J]. *Progress in Colloid and Polymer Science*, 2011, 138: 21-25.
 - [10] PADALKA O, SONG H J, WERELEY N M, et al. Stiffness and damping in Fe, Co, and Ni nanowire-based magnetorheological elastomeric composites[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2010, 46(6): 2275-2277.
 - [11] LI J, GONG X L, ZHU H, et al. Influence of particle coating on dynamic mechanical behaviors of magnetorheological elastomers[J]. *Polymer Testing*, 2009, 28(3): 331-337.
 - [12] KOO J H, DAWSON A, JUNG H J. Characterization of actuation properties of magnetorheological elastomers with embedded hard magnetic particles[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2012, 23(9): 1049-1054.
 - [13] YU M, ZHU M, FU J, et al. A dimorphic magnetorheological elastomer incorporated with Fe nano-flakes modified carbonyl iron particles: Preparation and characterization[J]. *Smart Materials and Structures*, 2015, 24(11): 115021.
 - [14] 王奇, 董旭峰, 李芦钰, 等. 磁流变弹性体松弛行为的本构描述[J]. *复合材料学报*, 2013(s1): 138-141.
WANG Qi, DONG Xufeng, LI Luyu, et al. Constitutive description for relaxation behavior of magnetorheological elastomer[J]. *Acta Materialia Composita Sinica*, 2013(s1): 138-141 (in Chinese).
 - [15] JOLLY M R, CARLSON J D, MUNOZ B C. A model of the behaviour of magnetorheological materials[J]. *Smart Materials and Structures*, 1996, 5(5): 607-614.
 - [16] ZHANG X, LI W, GONG X L. An effective permeability model to predict field-dependent modulus of magnetorheological elastomers[J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2008, 13(9): 1910-1916.
 - [17] MELENEV P, RAIKHER Y, STEPANOV G, et al. Modeling of the field-induced plasticity of soft magnetic elastomers[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2011, 22(6): 531-538.
 - [18] DANAS K, KANKANALA S V, TRIANTAFYLIDIS N. Experiments and modeling of iron-particle-filled magnetorheological elastomers[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2012, 60(1): 120-138.
 - [19] YORK D, WANG X, GORDANINEJAD F. A new MR fluid-elastomer (MRF-E) vibration isolator[M]//*Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions*, Singapore: World Scientific Publishing, 2007: 87-93.
 - [20] DENG H, WANG L, GONG X. Development of an adaptive tuned vibration absorber with magnetorheological elastomer[J]. *Smart Materials and Structures*, 2006, 15(5): N111-N116.
 - [21] QIAO X, LU X, GONG X, et al. Effect of carbonyl iron concentration and processing conditions on the structure and properties of the thermoplastic magnetorheological elastomer composites based on poly(styrene-*b*-ethylene-co-butylene-*b*-styrene) (SEBS)[J]. *Polymer Testing*, 2015, 47(4): 51-58.
 - [22] WU J K, GONG X L, FAN Y C, et al. Improving the magnetorheological properties of polyurethane magnetorheological elastomer through plasticization[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2012, 123(4): 2476-2484.
 - [23] KALETA J, KRÓLEWICZ M, LEWANDOWSKI D. Magnetomechanical properties of anisotropic and isotropic magnetorheological composites with thermoplastic elastomer matrices[J]. *Smart Materials and Structures*, 2011, 20(8): 085006.
 - [24] GONG X L, CHEN L, LI J F. Study of utilizable magnetorheological elastomers[J]. *International Journal of Modern Physics B*, 2007, 21(28-29): 4875-4882.
 - [25] CHEN L, GONG X L, JIANG W Q, et al. Investigation on magnetorheological elastomers based on natural rubber[J]. *Journal of Materials Science*, 2007, 42(14): 5483-5489.
 - [26] FAN Y C, GONG X L, XUAN S H, et al. Interfacial friction damping properties in magnetorheological elastomers[J]. *Smart Materials and Structures*, 2011, 20(3): 035007.