

石墨添加剂对磁流变脂流变特性的影响

董继强, 叶绪丹, 毛润松, 王 灵
(南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094)

摘 要: 为了研究石墨添加剂对磁流变脂流变特性的影响,采用润滑脂为基体,制备了石墨粉末质量分数为0%,2%,5%,8%,10%的石墨磁流变脂(graphite magnetorheological grease, GMRG)。使用安东帕流变仪测量了5种材料在稳态剪切模式和振荡剪切模式下的流变特性,并对石墨添加剂质量分数对磁流变脂屈服应力和黏弹性的影响进行了研究。结果表明,对比未添加石墨的磁流变脂,石墨质量分数分别为2%,5%,8%和10%的磁流变脂可以在加载电流为3 A时获得更高的屈服应力,并且屈服应力分别提升了40.49%,54.12%,81.48%和147.48%。此外,石墨添加剂质量分数越大,石墨磁流变脂的黏弹性特征就越明显,但获得的相对磁流变效应越小。研究还发现石墨质量分数的变化对石墨磁流变脂的线性黏弹区间影响不大。

关键词: 磁流变脂;石墨;振荡剪切;流变学;屈服应力

中图分类号: TB 381 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)02-0201-08

Effects of Graphite Additives on Rheological Properties of Magnetorheological Grease

DONG Ji-qiang, YE Xu-dan, MAO Run-song, WANG Jiong

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China.
Corresponding author: WANG Jiong, E-mail: wjiong@njust.edu.cn)

Abstract: To study the effect of graphite additive on the rheological properties of magnetorheological grease, graphite magnetorheological grease (GMRG) was prepared. The GMRGs with graphite powder mass fractions of 0%, 2%, 5%, 8% and 10% were prepared using grease as the matrix. The rheological properties of 5 groups of GMRG were measured in steady-state shear and oscillatory shear modes, and the effect of graphite additive mass fraction on yield stress and viscoelasticity was analyzed. The results showed that compared with the magnetorheological grease without graphite powder addition, the GMRG can achieve higher yield stress under the loading current of 3 A. The yield stress of the GMRG was increased by 40.49%, 54.12%, 81.48% and 147.48% with graphite mass fractions of 2%, 5%, 8% and 10%, respectively. In addition, with, the viscoelastic characteristics of the GMRG become more pronounced as the graphite mass fraction increase, but the relative magnetorheological effect achieved by the GMRG becomes smaller. The mass fraction of graphite does not affect the linear viscoelastic range of the GMRG was also found.

Key words: magnetorheological grease; graphite; oscillatory shear; rheology; yield stress

磁流变材料是一种在外加磁场作用下流变特性会发生连续、快速、可逆变化的智能材料。由于这一特性,磁流变材料已被广泛应用于减振器、离合器、控制阀和磁力磨削等常用器件中^[1-2]。磁流变材料实际上是由磁性颗粒、基体和添加剂

等组成的胶体分散体系。根据基体的不同,磁流变材料可为磁流变液、磁流变弹性体、磁流变脂和磁流变胶等^[3]。磁流变脂(magnetorheological grease, MRG)采用润滑脂作为基体,相对于磁流变液和磁流变弹性体等其他磁流变材料,磁流变

收稿日期: 2022-09-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52075264)。

作者简介: 董继强(1998-),男,安徽合肥人,南京理工大学博士研究生;王 灵(1964-),男,江苏南京人,南京理工大学教授,博士生导师。

脂具有抗沉降性好、泄漏少、磁流变效应高和制备简单等优点. 近年来, 国内外研究人员已经探索了多种因素对磁流变脂流变特性的影响^[4-6]. 汪辉兴等^[4]研究了磁流变脂在剪切模式下的流变特性, 并分析了不同铁粉质量分数的磁流变脂的黏度、剪切应力、屈服应力随剪切速率和磁场变化情况. Mohamad 等^[5]测试和分析了磁流变脂在磁场变化下的动态黏弹性特性. 结果表明当磁场强度设置为 0~0.7 T 时, 磁流变脂的黏度和存储模量显著增加. Sahin 等^[6]研究了磁流变脂在不同温度下的屈服应力和流变特性, 发现屈服应力随着温度的上升而下降. 胡志德等^[7]研究了羰基铁粉对锂基磁流变脂动态流变行为的影响, 发现提高羰基铁粉的质量分数, 可调节磁流变脂的结构密度, 改善磁流变脂的磁流变效应.

从形态上, 磁流变材料添加剂可分为液体添加剂和固体添加剂两种. Wang 等^[8]在磁流变脂中添加稀释油作为液体添加剂, 能够降低材料的零场黏度, 但产生的滑动效应也会造成动态屈服应力降低. Mohamad 等^[9]在磁流变脂中使用并比较了 3 种不同类型的稀释油, 包括煤油、蓖麻油、液压油, 发现这些稀释油均能降低材料的零场黏度和屈服应力, 但降低了磁性颗粒与润滑脂的附着程度, 且液体添加剂质量分数大于 10% 后会降低材料稳定性. 在固体添加剂方面, Tarmizi 等^[10]在磁流变脂中加入了 CoFe_2O_4 作为固体磁性添加剂, 增加了材料的剪切应力和屈服应力, 降低了零场黏度, 改善了材料的流变性能. 此外, 石墨作为一种性能优异的非磁性固体添加剂, 具有良好的导热性、稳定性和机械特性, 在磁流变液 (magnetorheological fluid, MRF) 和磁流变弹性体 (magnetorheological elastomers, MRE) 中得到了应用. Thakur 等^[11]发现在 MRF 中添加石墨片作为非磁性固体添加剂, 能够保证磁流变液在高温及高剪切速率下的强度. Tian 等^[12]制备了不同石墨质量分数的石墨基 MRE, 发现石墨粉末能够均匀分布在 MRE 基体中, 使初始力学性能提升, 但降低了材料的磁流变效应. Nasir 等^[13]在磁流变脂中加入了质量分数为 10% 的石墨粉末, 发现磁流变脂的零场黏度和屈服应力都有所提升, 验证了石墨的加入对磁流变学性能的改善有重要的影响.

目前关于固体添加剂对磁流变脂流变特性影响的研究较少, 特别是石墨添加剂对磁流变脂

流变特性的具体影响, 以及石墨对磁流变脂流变特性的改善机理. 此外, 在磁流变制动器、磁流变离合器中, 性能的好坏主要取决于制动力矩和扭矩的大小. 磁流变材料较高的磁致剪切屈服应力可以在不改变器件结构的情况下, 有效提升磁流变制动器、磁流变离合器的制动和传力性能^[14-15]. 为了使磁流变脂在有磁场条件下获得更高的剪切屈服应力, 本文制备了石墨添加剂质量分数为 0%, 2%, 5%, 8%, 10% 共 5 种磁流变脂材料, 利用安东帕 MRC-302 旋转流变仪测试分析了 MRG 在稳态剪切模式和振荡剪切模式下的流变行为, 对理解石墨粉末对 MRG 屈服应力及黏弹性能的影响、揭示石墨对磁流变脂流变特性的改善机理、扩展磁流变脂材料的应用范围有一定的指导意义.

1 磁流变脂制备及实验方案

1.1 磁流变脂材料制备

实验所用的磁流变脂主要由羰基铁粉 (磁性颗粒)、商业润滑脂 (基体) 和超细石墨粉末 (添加剂) 组成. 羰基铁粉采用德国 BASF 公司生产的 CN 规格, 平均直径 5 μm ; 润滑脂基体采用壳牌公司所生产的 2 号商用润滑脂, 皂基类型为锂基, 稠度等级为 000, 40 $^{\circ}\text{C}$ 下运动黏度为 220 mm^2/s , 100 $^{\circ}\text{C}$ 下运动黏度为 19 mm^2/s ; 超细石墨粉末采用南京嘉慧公司生产的超细石墨粉, 平均直径在 5~6 μm 之间, 纯度为 95%, 各种材料的质量分数如表 1 所示.

表 1 各种磁流变脂组成成分(质量分数)
Table 1 Composition of various MRG samples
(mass fraction) %

试样	羰基铁粉	润滑脂	石墨粉末
MRG	70	30	0
GMRG-2	70	28	2
GMRG-5	70	25	5
GMRG-8	70	22	8
GMRG-10	70	20	10

按照表 1 中羰基铁粉、润滑脂和石墨粉末的不同配比, 配制石墨质量分数分别为 0% 的 MRG, 2% 的 GMRG-2, 5% 的 GMRG-5, 8% 的 GMRG-8, 10% 的 GMRG-10 共 5 种磁流变脂. 具体的制备过程为: 首先将称量好的润滑脂置于烧杯中, 利用加热器将润滑脂加热到 80 $^{\circ}\text{C}$ ^[16-17], 同时用机械搅拌器以 800 r/min 的速度搅拌 10 min, 以

打开润滑脂的纤维结构;将称量好的羰基铁粉和石墨粉末加入搅拌过的润滑脂中,然后以机械搅拌器以 800 r/min 的速度继续搅拌 1 h,使羰基铁粉和石墨粉末与润滑脂充分混合;冷却至室温以后,即可得到磁流变脂材料。

1.2 实验方案

实验采用奥地利安东帕公司生产的 MCR302 旋转流变仪,磁场模块采用 MRD180,温控模块采用 JULABO F25,在稳态剪切模式和振荡剪切模式下分别测试磁流变脂的流变特性,测试原理如图 1 所示。使用温控模块保持测试温度恒定,通过磁场模块对 MRG 样品施加指定磁场,然后控制旋转头产生指定剪切速率与应变幅值,力传感器获取响应的实验数据。实验采用 PP20/MRD 测量头,测量头的圆盘有效直径为 20 mm,实验过程中设定测量的样品厚度为 1 mm,测试温度设置为 25 °C。采用电流源磁场加载模块,在实验过程中分别提供 0, 1, 2, 3 A 的加载电流,对应 0, 244, 491, 726 mT 磁场,分别研究材料在不同磁场强度下的流变特性。

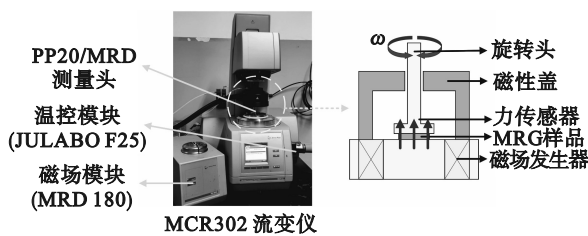


图 1 MCR302 平行板流变仪测试原理

Fig. 1 MCR302 parallel plate rheometer test principle

1.2.1 稳态剪切模式

分别将 5 组样品添加至测试台面,设置剪切速率 $\dot{\gamma}$ 在 0.1~100 s⁻¹ 的范围内按照对数规律变化,以恒定时间选择 30 个数据点进行测量,分别测试 MRG, GMRG-2, GMRG-5, GMRG-8, GMRG-10 在不同电流下的黏度 η 和剪切应力 τ 随剪切速率 $\dot{\gamma}$ 的变化规律。

1.2.2 振荡剪切模式

分别将 5 组样品添加至测试台面,设置振荡恒定频率为 5 Hz,应变幅值 γ 在 0.001%~10% 的范围内按照对数规律变化,以恒定时间选择 30 个数据点进行测量,分别测试 MRG, GMRG-2, GMRG-5, GMRG-8, GMRG-10 在不同电流下的储能模量 G' 和损耗模量 G'' 随应变幅值 γ 的变化规律。

2 测试结果分析

2.1 GMRG 在稳态剪切模式下的流变特性

2.1.1 GMRG 的黏度随剪切速率的变化关系

图 2 是在稳态剪切模式下,MRG 和 GMRG 在不同加载电流条件下的黏度随剪切速率变化曲线。

从图 2 中可以看到,石墨磁流变脂的黏度随着石墨质量分数增大而上升。在加载电流为 0 A 的情况下,MRG 和 GMRG 的黏度都随着剪切速率的增大而减小,原因是磁流变脂采用的基体为润滑脂,其内部为皂纤维高度缠结的网状结构^[18],在剪切速率较低的情况下,稳定的网状结构使得剪切难度大、材料黏度高,而在剪切速率增大后,皂纤维被剪切破坏,黏度降低,体现了磁流变脂的剪切变稀特性。同时,磁流变脂的黏度随着石墨质量分数的增大而升高,原因是石墨粉末能够增强磁流变材料中磁性颗粒与基体的接触^[19]。

在零场情况下,MRG, GMRG-2, GMRG-5 和 GMRG-8 的黏度变化曲线比较接近, GMRG-10 的黏度明显高于其他 3 种材料。在加载电流为 2 A 时,5 种材料的黏度都随着剪切速率的对数上升呈明显的对数下降关系,说明 5 种磁流变脂在有磁场的情况下,也具有稳定的剪切变稀特性。

2.1.2 GMRG 的剪切应力随剪切速率的变化关系

图 3 是在稳态剪切模式下,MRG 和 GMRG 在不同加载电流条件下的剪切应力随剪切速率变化曲线。在不同的加载电流下,MRG 和 GMRG 的剪切应力随剪切速率变化趋势基本一致:在低剪切速率下,剪切应力增长速度快;在高剪切速率下,剪切应力增长速度变慢。从图中可以看出,在不同加载电流下,GMRG 的剪切应力随石墨质量分数的提高而增大。在零场条件下,与未添加石墨粉末的 MRG 相比, GMRG-2, GMRG-5 和 GMRG-8 的剪切应力提升较小,而当电流增大时,石墨对剪切应力的增强作用增大。在零场条件下,材料的剪切应力仍然由基体润滑脂决定;当电流强度增大时,材料的剪切应力主要由铁磁颗粒顺应磁场方向所形成的磁链强度决定。石墨粉末增强了磁性颗粒之间的接触,提高了磁链强度,剪切应力也得到了明显增强。

磁流变脂在零场条件下呈现出非牛顿流体流动特性,而在有磁场条件下呈现出类固体特

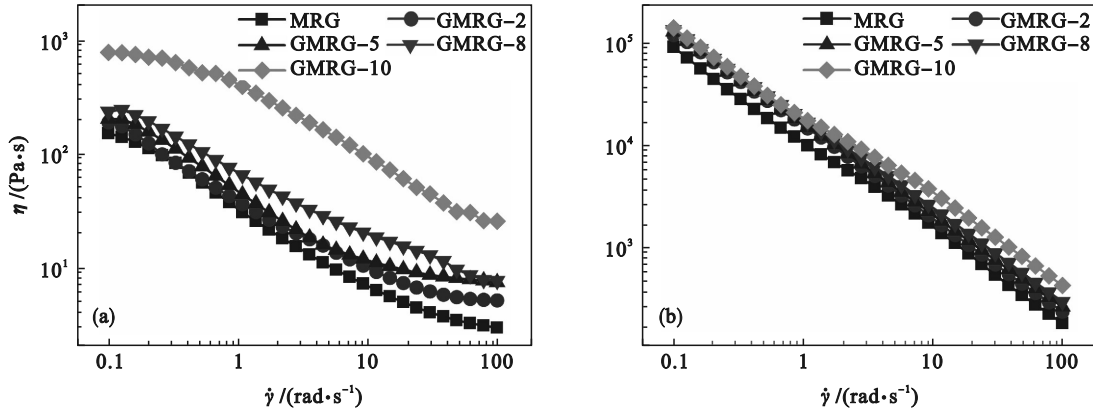


图2 MRG和GMRG在不同加载电流下的黏度随剪切速率变化曲线

Fig. 2 Viscosity versus shear rate curves of MRG and GMRG under different loading currents

(a)一加载电流为 0 A; (b)一加载电流为 2 A.

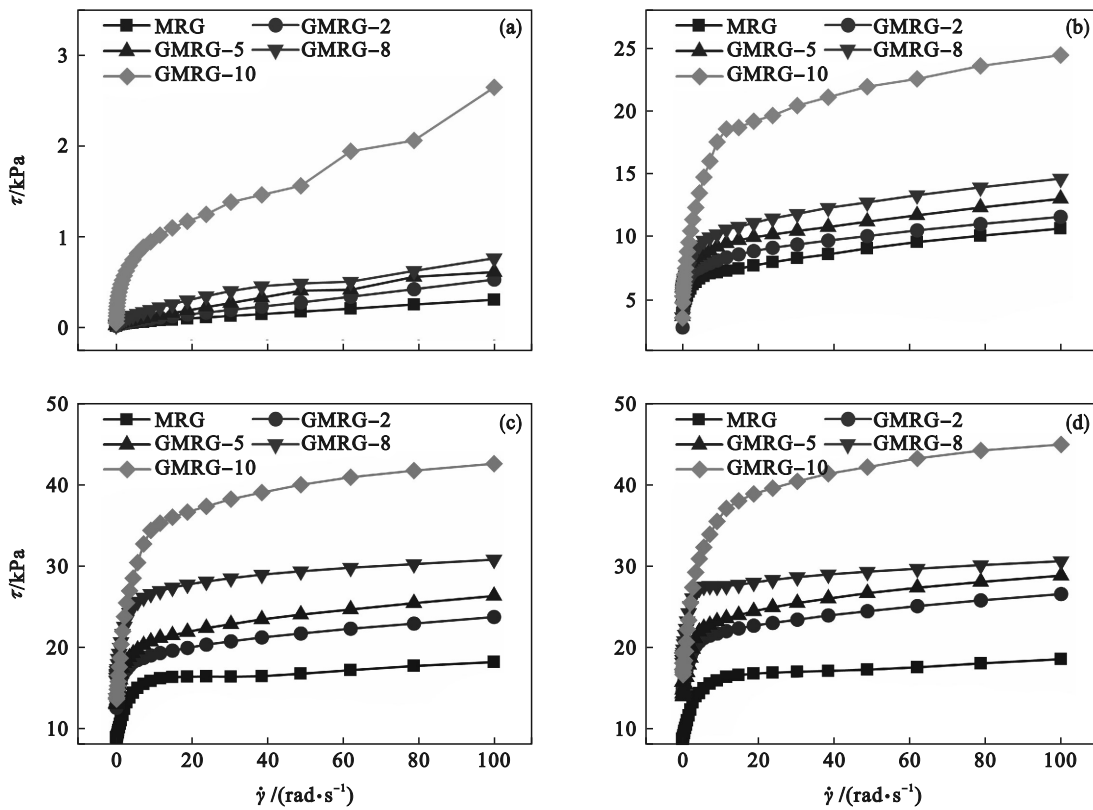


图3 MRG和GMRG在不同加载电流下的剪切应力随剪切速率变化曲线

Fig. 3 Variation of shear stress with shear rate for MRG and GMRG under different loading currents

(a)一加载电流 0 A; (b)一加载电流 1 A; (c)一加载电流 2 A; (d)一加载电流 3 A.

性^[20]. 为了研究石墨添加剂比重对磁流变脂剪切屈服应力的影响,通过对图 3 分析,可使用 Bingham 模型对高剪切速率下的剪切应力进行线性拟合^[21], Bingham 模型描述方程为

$$\left. \begin{aligned} \tau &= \tau_y + \eta\dot{\gamma}, \tau \geq \tau_y; \\ \dot{\gamma} &= 0, \tau < \tau_y. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中, τ_y 为剪切屈服应力. 因此,采用正交距离回归的方式,将剪切速率大于 $35 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ 的数据拟合到 Bingham 模型中,即可得到各加载电流下的剪切屈服应力,如表 2 所示.

将表 2 中的屈服应力进行对比,如图 4 所示,可以看出随着石墨粉末质量分数的提升,在牺牲较小的零场屈服应力条件下, GMRG 可以在加载电流的情况下提升更高的屈服应力. 在不同的加载电流条件下, 5 种材料的屈服应力从 0 ~ 2 A 呈明显的线性上升趋势, 而从 2 ~ 3 A 上升趋势则逐渐缓慢, 说明所制备的 5 种材料在加载电流为 2 A 的条件下已经接近饱和, 石墨添加剂并不会影响磁流变材料的磁场依赖性. 在加载电流为 3 A 条件下, 对比未添加石墨粉末的磁流变脂, 石墨添

表2 MRG与GMRG在各加载电流下的剪切屈服应力
Table 2 The shear yield stress of MRG and GMRG at various loading currents

材料	加载电流/A	磁场强度/mT	屈服应力/Pa
MRG	0	0	33.595
	1	244	7 637.684
	2	491	15 559.783
	3	726	16 050.786
	0	0	46.443
GMRG-2	1	244	8 625.888
	2	491	19 986.305
	3	726	22 550.019
	0	0	172.789
	GMRG-5	1	244
2		491	22 018.794
3		726	24 738.405
0		0	178.179
GMRG-8		1	244
	2	491	28 207.162
	3	726	29 130.154
	0	0	604.490
	GMRG-10	1	244
2		491	37 951.369
3		726	39 755.280
0		0	604.490
0		0	46.443

添加剂质量分数分别为2%,5%,8%和10%的石墨磁流变脂的屈服应力分别提升了40.49%,54.12%,81.48%和147.48%。

同时,在加载电流为0 A的情况下,质量分数为2%,5%和8%的石墨添加剂对磁流变脂的屈服应力提升作用不明显,而质量分数为10%的GMRG-10的屈服应力远远大于其他4种材料,

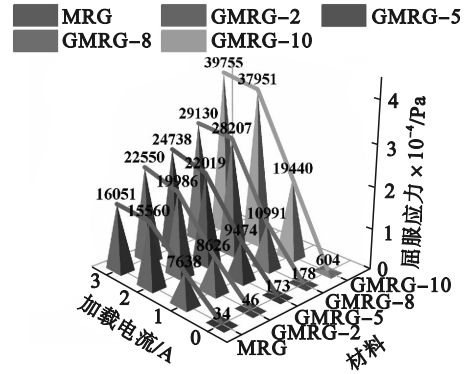


图4 MRG和GMRG屈服应力在加载电流为0 A和3 A下的对比

Fig. 4 Comparison of MRG and GMRG yield stress at loading current of 0 A and 3 A

原因是当材料中的石墨粉末数量较多时,石墨粉末不仅存在于磁性颗粒与基体的连接处,还充斥在基体的皂纤维结构之中,使得基体的皂纤维结构更加稳定并难以破坏,零场屈服应力显著上升。

2.2 GMRG在振荡剪切模式下的流变特性

2.2.1 GMRG的储能模量随应变幅值的变化

在振荡剪切模式下,通过研究储能模量和损耗模量以分析石墨粉末质量分数对GMRG动态黏弹性的影响。

储能模量是材料变形后回弹的指标,表示材料存储变形能量的能力.图5是在振荡剪切模式下,振荡频率为5 Hz,MRG和GMRG在不同加载电流条件下的储能模量随应变幅值 γ 从0.001%到10%的变化曲线.可以看出在各个加载电流下,GMRG的储能模量 G' 随着石墨质量分数的增大而增大,说明石墨粉末能够增强磁流变脂的弹性特征。

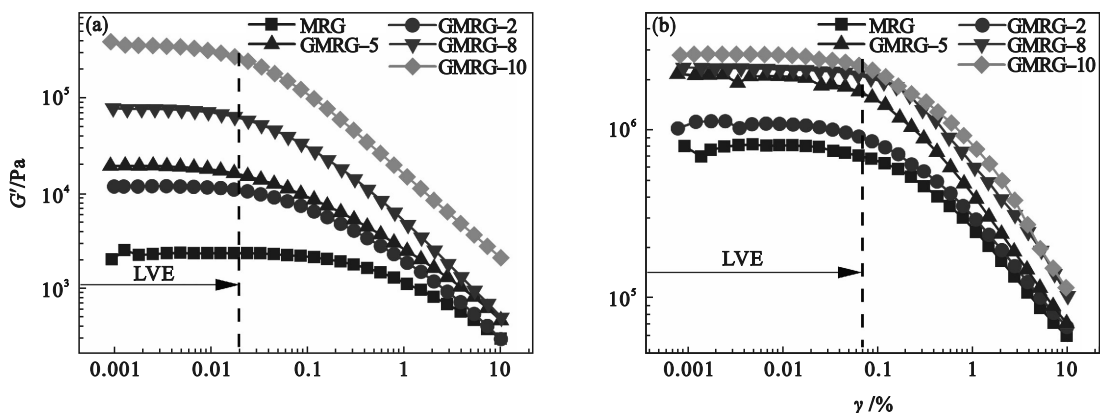


图5 MRG和GMRG在不同加载电流下的储能模量随应变幅值变化曲线

Fig. 5 Variation of storage modulus with shear strain of MRG and GMRG under different currents

(a)—加载电流为0 A; (b)—加载电流为2 A.

在零场条件下,MRG和GMRG的储能模量 G' 随应变幅值 γ 的增大而减小,且材料的储能模量 G' 随石墨质量分数的增大而增大.同时,当应变幅值 γ 较小($\gamma < 0.02\%$)时,储能模量 G' 几乎不随 γ 变化,变化曲线表现为平台状,材料表现为线性黏弹特性,这段区域被称为线性黏弹区间(LVE).线性黏弹区间反映了材料抵抗应变幅值变化的能力,体现了材料的弹性强度^[22].当应变幅值 γ 继续增大至线性黏弹区间以外,储能模量 G' 就随着 γ 的增大而线性减小.原因是当应变幅值继续增大时,材料的弹性被完全破坏,储能模量就随着应变幅值的增大而不断减小.

在有加载电流的条件下,当应变幅值较小($\gamma < 0.07\%$)时,储能模量 G' 几乎不随 γ 变化,但线性黏弹区间长度明显增加,这段区间反映了磁性颗粒顺应磁场方向所形成链状结构的强度.从图中可以看到无论有无加载电流,石墨比重不同都不会对线性黏弹区间长度造成影响.当应变幅值 γ 继续增大时,储能模量 G' 随 γ 的增大而线性下降,这种现象被称为Pane效应^[23].这种现象是因为在有加载电流的条件下,磁性颗粒形成了顺应磁场方向的链状结构,当 γ 较大($\gamma > 0.02\%$)时,链状结构

被破坏,储能模量 G' 就随 γ 的增大而减小^[24].

在各个加载电流条件下,GMRG的储能模量都随着石墨质量分数的增大而上升,原因是石墨粉末对磁性颗粒和基体的增强作用提高了GMRG在零场条件下的纤维结构的强度和在有加载电流条件下的链状结构的刚度,使得GMRG在各个加载电流条件下的储能模量都有所上升.

2.2.2 GMRG的损耗模量随应变幅值的变化

损耗模量 G'' 描述材料产生形变时能量散失为热的现象,反映材料的黏性大小,表现为润滑脂基体与磁性颗粒的相互作用力大小^[25].图6是在振荡剪切模式下,材料在5 Hz振荡频率时,不同加载电流条件下的损耗模量随应变幅值从0.001%到10%的变化曲线.从图中可以看出,石墨含量越高,损耗模量 G'' 的曲线峰值越高,说明石墨粉能够增强磁流变脂的黏性特征.

在加载电流为0 A,即零场条件下,GMRG的损耗模量 G'' 随着石墨质量分数的上升而增大;当应变幅值较小($\gamma < 0.02\%$)时,损耗模量 G'' 受应变幅值 γ 的变化影响较小;当应变幅值较大($\gamma > 0.02\%$)时,MRG和GMRG的损耗模量 G''

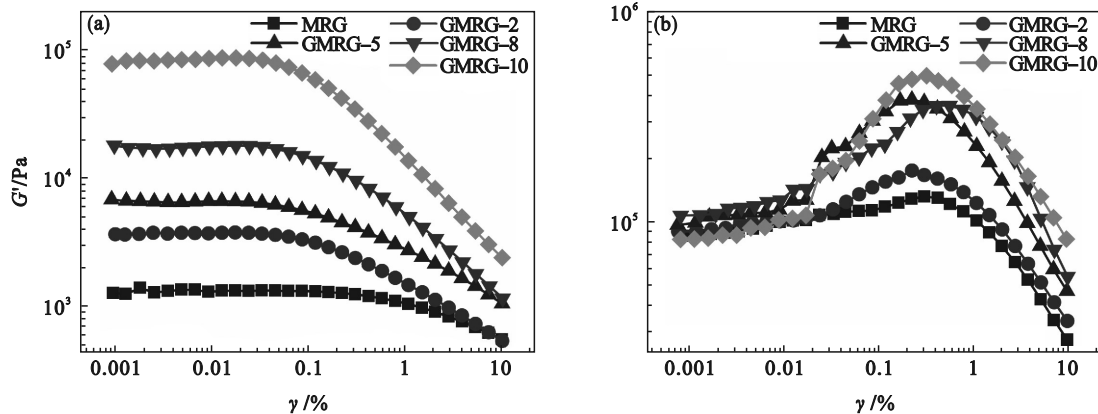


图6 MRG和GMRG在不同加载电流下的损耗模量随应变幅值变化曲线

Fig. 6 Variation of loss modulus with shear strain of MRG and GMRG under different currents

(a)—加载电流为0 A; (b)—加载电流为2 A.

随 γ 的增大而减小,整体趋势与零场条件下的储能模量类似.

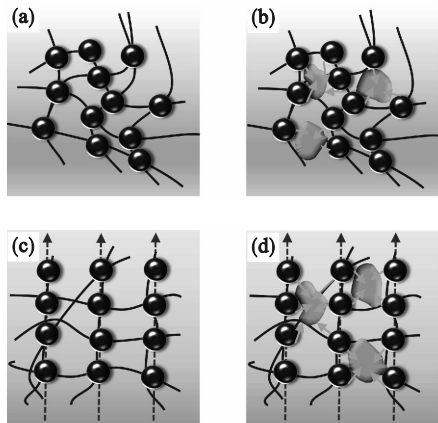
在加载电流的条件下,当应变幅值较小($\gamma < 0.02\%$)时,几种材料在高加载电流条件下,显示出波动的损耗模量.但当应变幅值较大时,损耗模量的变化曲线变得光滑.高磁场条件下,石墨所增强的基体与磁性颗粒之间的接触情况复杂,强化了不规则的纤维结构.另外,损耗模量的曲线峰值随石墨含量而提高,证明了石墨对磁流变

脂材料的黏性特征增强作用.

此外,5种材料的损耗模量都随应变幅值的增大,呈现先增大后减小,出现峰值的变化趋势.这是因为在小剪切应变的条件下,磁链未受到破坏;随着剪切应变的增大,磁链被破坏,损耗模量随之上升;当剪切应变进一步增大时,磁链未成型就已被破坏,表现为损耗模量的减小.

综合所测试的5种材料的流变特性,可知石墨添加剂对磁流变脂中的羰基铁粉与基体的接

触有促进作用,其微观机理作用如图 7 所示. 在无磁场情况下,羰基铁粉附着在润滑脂基体的纤维状网络上;石墨粉末充斥在铁磁颗粒与基体之间,增强了材料的零场黏弹性. 在有磁场条件下,石墨粉末在铁粉作用下充斥在磁链之间,使得磁链强度上升,增强了材料在磁场下的黏弹性.



注:● 羰基铁粉;■ 石墨粉末; / 润滑脂基体; ↑ 磁场方向.

图 7 石墨添加剂对磁流变脂流变特性影响的微观作用机理示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the microscopic mechanism of the effect of graphite additives on the rheological properties of magnetorheological greases

(a)一无磁场的 MRG; (b)一无磁场的 GMRG;
(c)一有磁场的 MRG; (d)一有磁场的 GMRG.

2.3 MRG 和 GMRG 的相对磁流变效应对比

相对磁流变效应是磁流变材料的一个重要性能参数^[26],其计算公式为

$$R_{\text{eff}} = (G' - G_0') / G_0' \quad (2)$$

式中: R_{eff} 为相对磁流变效应; G' 为磁流变材料的磁致储能模量; G_0' 为磁流变材料的零场储能模量. 根据式(2),计算 5 种材料在各种加载电流条件下,应变为 0.012 9%,应变频率为 5 Hz 的相对磁流变效应,如图 8 所示. 各个材料在 3 A 下的磁流变效应最大,如表 3 所示.

胡志德等所制备的磁流变脂,其相对磁流变效应仅有 2350%^[27]. 除 GMRG-10 以外,本文制备的材料磁流变效应均更高,性能更好. 同时,根据 Sukhwani 等设计的磁流变制动器可知,磁流变效应的下降会使得制动器制动功率的可调范围变小;屈服应力更高的磁流变脂制动器具有更高的制动扭矩输出能力^[28]. 因此在实际使用时应结合应用场景做出选择.

随着石墨质量分数的提升,GMRG 的相对磁

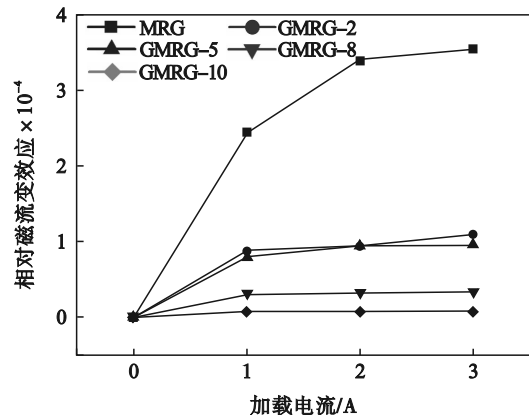


图 8 相对磁流变效应随电流的变化情况

Fig. 8 Variation of the relative magnetorheological effects with different currents

表 3 MRG 与 GMRG 相对磁流变效应对比

Table 3 Comparison of relative magnetorheological effects of MRG and GMRG %

材料	相对磁流变效应 R_{eff}
MRG	35 594.2
GMRG-2	10 922.9
GMRG-5	9 436.8
GMRG-8	3 349.7
GMRG-10	856.7

流变效应越来越低,石墨粉末质量分数为 2%, 5%, 8%, 10% 的石墨磁流变脂在 3 A 下的磁流变效应分别降低了 69.31%, 73.49%, 90.59% 和 97.59%. 原因在于虽然石墨粉末提高了磁致储能模量,但也使得零场储能模量明显上升,在对比计算后 GMRG 的相对磁流变效应会随着石墨质量分数的增大而减小. 因此,虽然石墨添加剂能够增强磁流变脂的屈服应力、改善流变性能,但它也具有使相对磁流变效应下降的缺点.

3 结 论

1) 对比未添加石墨粉末的磁流变脂,在牺牲较小的零场屈服应力条件下,石墨磁流变脂可以在加载电流为 3 A 的情况下获得更高的屈服应力,石墨添加剂质量分数分别为 2%, 5%, 8% 和 10% 的石墨磁流变脂的屈服应力分别提升了 40.49%, 54.12%, 81.48% 和 147.48%.

2) 石墨添加剂的质量分数越大,石墨磁流变脂的黏弹性特征就越明显,但石墨的质量分数不会影响线性黏弹区间.

3) 石墨粉末质量分数越大,石墨磁流变脂的相对磁流变效应越小,对比未添加石墨粉末的磁

流变脂, GMRG-2 的磁流变效应降低了 69.31%, GMRG-5 降低了 73.49%, GMRG-8 降低了 90.59%, GMRG-10 降低了 97.59%。

参考文献:

- [1] Cruze D, Hemalatha G, Jebadurai S, et al. A review on the magnetorheological fluid, damper and its applications for seismic mitigation [J]. *Civil Engineering Journal*, 2018, 4(12):3058-3074.
- [2] Kansal H, Singh A K, Grover V. Magnetorheological nano-finishing of diamagnetic material using permanent magnets tool [J]. *Precision Engineering*, 2017, 51:30-39.
- [3] 杨广鑫, 潘家保, 周陆俊, 等. 磁流变脂材料及其应用研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(23):23183-23191.
(Yang Guang-xin, Pan Jia-bao, Zhou Lu-jun, et al. Research progress and application of magnetorheological grease materials[J]. *Materials Reports*, 2021, 35(23):23183-23191.)
- [4] 汪辉兴, 张广, 欧阳青, 等. 磁流变脂在剪切模式下的流变特性[J]. 上海交通大学学报, 2019, 53(3):380-386.
(Wang Hui-xing, Zhang Guang, Ouyang Qing, et al. Rheological properties of magnetorheological grease under shear mode [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2019, 53(3):380-386.)
- [5] Mohamad N, Mazlan S A, Ubaidillah, et al. The field-dependent rheological properties of magnetorheological grease based on carbonyl-iron-particles [J]. *Smart Material Structures*, 2016, 25(9):095043.
- [6] Sahin H, Gordaninejad F, Wang X, et al. Rheological behavior of magneto-rheological grease (MRG) [J]. *Active & Passive Smart Structures & Integrated Systems*, 2007, 6525(16):65250D-65250D-9.
- [7] 胡志德, 赵湖钧, 王大伟. 羰基铁粉对锂基磁流变脂动态流变行为的影响[J]. 材料导报, 2019, 33(z2):630-633.
(Hu Zhi-de, Zhao Hu-jun, Wang Da-wei. Effect of carbonyl iron on dynamic rheological properties of lithium-based magnetorheological grease [J]. *Materials Reports*, 2019, 33(z2):630-633.)
- [8] Wang K, Dong X, Li J, et al. Effects of silicone oil viscosity and carbonyl iron particle weight fraction and size on yield stress for magnetorheological grease based on a new preparation technique [J]. *Materials*, 2019, 12(11):1778-1794.
- [9] Mohamad N, Rosli M A, Abdul Aziz S A, et al. Intrinsic apparent viscosity and rheological properties of magnetorheological grease with dilution oils [C]// Proceedings of the 6th International Conference and Exhibition on Sustainable Energy and Advanced Materials. Singapore: Springer, 2020: 171-180.
- [10] Tarmizi S, Nordin N A, Mazlan S A, et al. Incorporation of cobalt ferrite on the field dependent performances of magnetorheological grease [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9(6):15566-15574.
- [11] Thakur M K, Sarkar C. Influence of graphite flakes on the strength of magnetorheological fluids at high temperature and its rheology [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2020, 99:4600210.
- [12] Tian T F, Li W H, Alici G, et al. Microstructure and magnetorheology of graphite-based MR elastomers [J]. *Rheologica Acta*, 2011, 50(9/10):825-836.
- [13] Nasir N A M, Nazmi N, Mohamad N, et al. Rheological performance of magnetorheological grease with embedded graphite additives [J]. *Materials*, 2021, 14(17):5091-5105.
- [14] Nguyen N D, Le-Duc T, Hiep L D, et al. Development of a new magnetorheological fluid-based brake with multiple coils placed on the side housings [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2019, 30(5):734-748.
- [15] Pilon R, Landry-Blais A, Gillet B, et al. A magnetic screw pump for magnetorheological clutch durability enhancement [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2020, 31(7):945-955.
- [16] Ye X, Wang J, Wang X, et al. An experimental study on thermo-field rheological properties of lithium-based magnetorheological grease [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022, 648:129047.
- [17] Ye X D, Wang J. Creep and recovery behaviors of lithium-based magnetorheological grease [J]. *Frontiers in Materials*, 2021, 8:668125.
- [18] 杨广鑫, 潘家保, 周陆俊, 等. 热磁耦合作用下磁流变脂剪切稳定性及其机理 [J]. 化工进展, 2021, 40(8):4428-4437.
(Yang Guang-xin, Pan Jia-bao, Zhou Lu-jun, et al. Shear stability and mechanism of magnetorheological grease under thermo-magnetic coupling [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2021, 40(8):4428-4437.)
- [19] Pang H M, Xuan S H, Liu T X, et al. Magnetic field dependent electro-conductivity of the graphite doped magnetorheological plastomers [J]. *Soft Matter*, 2015, 11(34):6893-6902.
- [20] Ahamed R, Choi S, Ferdaus M M. A state of art on magneto-rheological materials and their potential applications [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2018, 29(10):2051-2095.
- [21] Rabbani Y, Ashtiani M, Hashemabadi S H. An experimental study on the effects of temperature and magnetic field strength on the magnetorheological fluid stability and MR effect [J]. *Soft Matter*, 2015, 11(22):4453-4460.
- [22] Delgado M A, Franco J M, Kuhn E. Effect of rheological behaviour of lithium greases on the friction process [J]. *Industrial Lubrication and Tribology*, 2008, 60(1):37-45.
- [23] Guo F, Lin X G, Yu G J. The preparation and testing of rheological properties for single- and double-grading magnetorheological composite gels [J]. *Key Engineering Materials*, 2017, 730:65-71.
- [24] Gong X, Xu Y, Xuan S, et al. The investigation on the nonlinearity of plasticine-like magnetorheological material under oscillatory shear rheometry [J]. *Journal of Rheology*, 2012, 56(6):1375-1391.
- [25] Fan Y C, Gong X L, Jiang W Q, et al. Effect of maleic anhydride on the damping property of magnetorheological elastomers [J]. *Smart Materials and Structures*, 2010, 19(5):055015.
- [26] 马伟佳. 负刚度磁流变弹性体隔振器设计及研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2020.
(Ma Wei-jia. Design and research of negative stiffness magnetorheological elastomer vibration isolator [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2020.)
- [27] 胡志德, 晏华, 王雪梅, 等. 稠化剂含量对磁流变脂流变行为的影响 [J]. 功能材料, 2015, 46(2):2105-2108.
(Hu Zhi-de, Yan Hua, Wang Xue-mei, et al. The effect of soap content on the rheology of mineral oil-based magnetorheological grease [J]. *Journal of Functional Materials*, 2015, 46(2):2105-2108.)
- [28] Sukhwani V K, Hirani H. A comparative study of magnetorheological - fluid - brake and magnetorheological - grease-brake [J]. *Tribology Online*, 2008, 3(1):31-35.