

振荡剪切模式下磁流变脂法向力特性分析

叶绪丹,王灵[†],黄学功

(南京理工大学机械工程学院,江苏南京 210094)

摘要:为了探究磁流变脂的法向力行为,自制了羰基铁粉质量分数分别为 30%、50% 和 70% 的 3 种磁流变脂,采用旋转流变仪测量了磁流变脂在振荡剪切模式下的法向力特性,系统地研究了磁场、时间、应变幅值、频率和温度对法向力的影响. 研究表明,3 种磁流变脂试样的法向力都随着磁场强度增大而增大,当磁场强度为 740 kA/m 时,各试样法向力最大值分别达到了 6.97 N、8.93 N、14.91 N;在不同磁场强度下,时间对磁流变脂法向力值的影响经历轻微减少、恒定不变、缓慢增加 3 个阶段;在整个频率范围内,不同磁场强度的磁流变脂的法向力值变化微小,基本处于一个稳定值;存在一个应变临界值,使得法向力随着应变幅值在临界值之前以较快的速度增大,进一步增大应变幅值且超过该临界值后其增长速度减小;另外,3 种磁流变脂试样的法向力随温度的升高而增大且质量分数为 70% 的试样其法向力值最大. 本研究为磁流变脂器件的设计、优化和应用奠定了理论基础.

关键词:磁流变脂;振荡剪切;法向力;线性黏弹性

中图分类号:TB303

文献标志码:A

Analysis of Normal Force Characteristics for Magnetorheological Grease in Oscillatory Shear Mode

YE Xudan, WANG Jiong[†], HUANG Xuegong

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to investigate the normal force behavior of Magnetorheological Grease (MRG), three magnetorheological greases with carbonyl iron powder mass fractions of 30%, 50% and 70% respectively were fabricated and measured by using a rotational rheometer in the mode of oscillatory shear. And the effects of magnetic field, time, strain amplitude, frequency and temperature on the normal force were systematically analyzed. The results show that the normal force values of three MRG samples increase with the increase of magnetic field strength. When the magnetic field strength is 740 kA/m, the maximum value of each sample reaches 6.97 N, 8.93 N, 14.91 N. Under different magnetic field levels, the influence of time on the normal force of magnetorheological grease undergoes three stages of slight decrease, constant, and slowly increasing. In the entire frequency range, the normal force value of the MRG with different magnetic field strengths changes slightly and basically at a stable value. There is a strain critical value, and the normal force increases with the strain amplitude at a faster speed before the critical value, further increases the strain amplitude and decreases the growth rate after exceeding the critical value. In addition, the normal force of the

* 收稿日期:2019-04-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51675280), National Natural Science Foundation of China(51675280)

作者简介:叶绪丹(1990—),女,安徽安庆人,南京理工大学博士研究生

[†] 通讯联系人, E-mail: wjiong@njust.edu.cn

three MRG samples increases with increasing temperature and the MRG-70 normal force value is the largest. The above study of normal force in MRG is the theoretical basis for the design, optimization and application of magnetorheological grease devices.

Key words: Magnetorheological Grease(MRG); oscillating shear; normal force; linear viscoelasticity

磁流变材料作为一种智能材料,在外加磁场作用下,其流变特性会发生连续、快速、可逆的变化.磁流变材料体系包括磁流变液、磁流变弹性体和磁流变脂等^[1-2].与液态的磁流变液和固态的磁流变弹性体相比,磁流变脂具有抗沉降性能好、泄漏少、磁流变效应高和制备简单等优点^[3],得益于上述优点,使得磁流变脂在缓冲器^[4-5]、离合器^[6]和制动器^[7]等各类器件中具有很好的应用前景.目前,研究人员已经对剪切和振荡模式下的磁流变脂的相关特性(黏度、剪切应力、屈服应力、储能模量和耗能模量等)展开了研究^[8-13].磁流变材料不仅具有垂直于磁场方向的流变剪切性能,还具有沿磁场方向的法向力性能^[14].

磁流变材料的法向力由沿磁场方向的颗粒链引起,方向与剪切应力垂直,其也是磁流变智能器件设计的基础.Yao等^[15]研究了时间、磁场、剪切速率和温度对磁流变液动静态法向力的影响,并将动法向力与静法向力进行比较.结果表明,磁流变液的法向力在很大程度上取决于磁场和温度,与剪切速率的关系为先减小到最小值,然后随着剪切速率的增加而增大.另外,通过动静法向力比较发现,动法向力的值总是大于静法向力;Liao等^[16]在准静态剪切和振荡剪切模式下研究了剪切变形对磁流变弹性法向力的影响.研究显示,两种模式下法向力随磁场的变化趋势都是先减小后增加的趋势;Gong等^[17]通过使用流变仪对磁流变液在稳态剪切和振荡剪切作用下的振荡法向力进行了分析,实验表明,质量分数为30%的磁流变液在稳态剪切和振荡剪切作用下的法向力峰值约为0.4 N和3 N,并且利用动态仿真方法来验证其法向力值的准确性;Yao等^[18]研究了在振荡剪切模式下时间、应变幅度、频率和剪切速率对多孔泡沫金属磁流变液法向力的影响,得到磁场对金属泡沫中磁流变液的法向力有较大影响,而其他因素对其影响较小;Liu等^[19]分别研究了磁流变液在静态和稳态剪切模式下的法向力,得出在静态模式下随着磁通密度增大,法向力先增大后减小,而在稳态剪切模式下,只有当磁通密度达到一定值时,才能清晰地观察

到法向力现象,随着磁场增加,法向力达到最大值,然后减小到一个稳定值;Liao等^[20]对磁流变弹性体在压缩状态下的法向力进行研究,测量发现随着磁场和预压力的增加法向力也随之增加.

迄今为止,国内外学者对法向力行为的研究大多集中在磁流变液或磁流变弹性体上,而对磁流变脂的法向力研究几乎没有发现.然而,由于磁流变脂独特的类固体性质,其法向力必然不同于液态磁流变液和固态磁流变弹性体.因此,亟待开展磁流变脂法向力的研究.本文首先对MR润滑脂的磁性进行测试讨论,然后在振荡剪切模式下对自制的磁流变脂进行法向力特性测试,利用旋转流变仪(MRC-302)分析了磁场、作用时间、应变幅值、载荷频率以及温度对法向力的影响.其研究结果对于设计高精度的磁流变器件、评价材料的流变性能和理解材料结构具有一定的理论指导意义.

1 试样制备与实验原理

1.1 磁流变脂制备

在材料制备方面,主要通过商用搅拌机将羰基铁粉和商业锂基润滑脂在规定的转速和时间内进行搅拌得到磁流变脂试样.其中羰基铁颗粒为德国BASF公司产品,平均尺寸为6 μm ,锂基润滑脂由中国Shell公司制造,作为羰基铁颗粒的载体介质,制备得到的磁流变脂试样如图1所示.

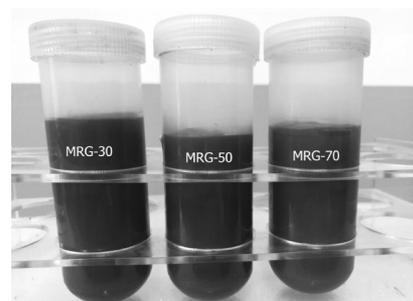


图1 试样图片

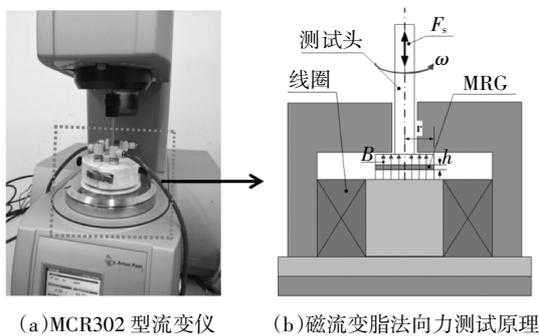
Fig.1 Picture of samples

制备分为 3 个部分:1) 将一定量的润滑脂置于烧杯中,并将其加热至 60 ℃;2)使用搅拌器在 500 r/min 的转速搅拌约 30 min, 再按质量分数分别为 30%、50%和 70%羰基铁粉颗粒置于搅拌过的润滑脂中;3) 使用搅拌器继续搅拌直至润滑脂与颗粒充分混合. 最终得到羰基铁粉颗粒质量分数分别为 30%、50%和 70%的磁流变脂, 分别命名为 MRG-30、MRG-50、MRG-70. 由于润滑脂本身具有高黏度特性,该制备方法可以克服磁流变材料的沉降问题^[9].

1.2 测试设备和实验原理

通过振动样品磁强计 (VSM, Lakeshore, 7404 系列)测试不同 MRG 润滑脂样品的磁性,该实验在室温下进行. 在振荡模式下,使用奥地利安东帕公司生产的 Physica MCR302 对不同试样的磁流变脂法向力进行测试,如图 2(a)所示. 实验中采用 PP20 测试头,将试样放入下端圆盘中,试样厚度 h 为 1 mm,上下圆盘有效直径均为 20 mm,通过水浴控制温度为 20 ℃,最大测试法向力为 50 N,精度为 0.03 N. 用直流电源施加磁场并使其垂直穿过试样,转盘对试样施加正弦应变激励信号,通过力传感器来监测法向力的变化情况.

磁流变脂法向力的测量原理如图 2(b)所示,在磁场作用下,分散在磁流变脂中的铁磁颗粒沿磁场方向形成链或簇状结构,进而对 PP20 测试头产生一个向上的推力(法向力),该推力可由与 PP20 测试头直接相连的法向力传感器测得. 通过控制磁场、作用时间、应变幅值等激励参数,可获得不同外界条件下的磁流变脂法向力的变化情况.



(a)MCR302 型流变仪 (b)磁流变脂法向力测试原理
图 2 法向力测试设备及其原理

Fig.2 Normal force test equipment and its principle

2 结果与讨论

2.1 磁化特性

使用振动磁强计测量了不同磁流变脂试样的磁

性,得到的结果如图 3 所示. 由图 3 可知,当磁场强度非常低时,各试样的磁化曲线呈线性. 若施加的磁场强度达到 10 kA/m 时,质量分数为 70%的 CI 颗粒的磁流变脂表现出最高的饱和磁化强度,即 135.8 emu/g. 另外,随着润滑脂中的 CI 颗粒数量上升,磁流变脂的磁化值将增加,研究表明纯 CI 铁粉具有高饱和磁化强度^[9],约为 206 emu/g.

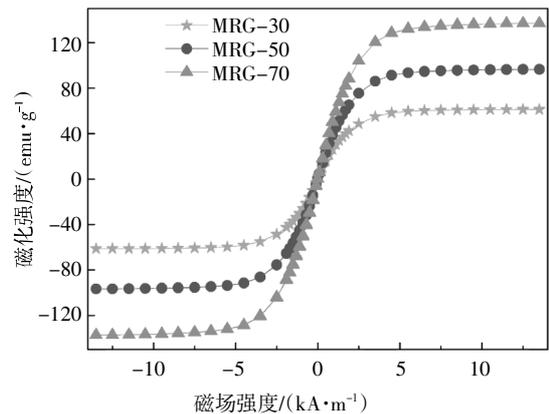


图 3 不同磁流变脂试样的磁化曲线

Fig.3 Magnetization curves of magnetorheological grease of different samples

2.2 振荡模式下磁流变脂的法向力行为

2.2.1 磁场对法向力的影响

在施加应变激励信号幅值 $r_0 = 0.01\%$ 以及频率 $f = 1$ Hz 条件下, 分别对 MRG-30、MRG-50、MRG-70 试样进行磁场强度 H 从 0~740 kA/m 的磁场强度扫描,测得法向力与磁场强度的关系曲线如图 4 所示.

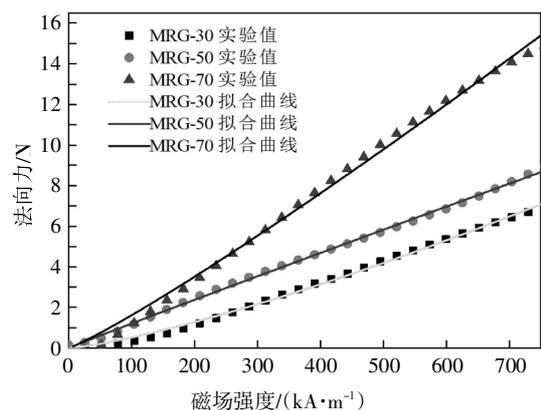


图 4 不同质量分数 MRG 的法向力与磁场强度关系曲线

Fig.4 Relationship between normal force and magnetic field strength of MRG with different mass fractions

由图 4 可知:3 种磁流变脂试样 (MRG-30、MRG-50 和 MRG-70) 的法向力值都随着磁场强度的增大而增大,说明磁场存在时,磁性颗粒会从自由

移动状态转变成链状或柱状,此时有法向力产生,并表现出将设备的两个圆盘推开^[15],若增大磁感应强度,磁性颗粒之间相互挤压明显,会造成法向力增大.此外,从图4可以明显看出,在恒定磁场强度下,试样MRG-70的法向力值最大,如在磁场强度 H 达到740 kA/m时,MRG-30、MRG-50、MRG-70试样的法向力值分别为6.97 N、8.93 N和14.91 N.这是因为,在相同磁场条件下,羰基铁粉含量高的磁流变脂形成了更加粗壮的链或簇状结构,所产生的法向力也就越大.

参照Liu等^[19]对磁通密度与法向力拟合关系的研究结论,将图4的曲线用Origin软件进行拟合,得到法向力与磁场强度的关系如式(1)所示,其中 F 代表法向力, H 代表磁场强度, k 和 α 是拟合后的系数,拟合后的参数值如表1所示.

$$F = kH^\alpha \quad (1)$$

表1 拟合参数
Tab.1 Fitting parameter

试样	k	α
MRG-30	0.001 37	1.29
MRG-50	0.133 5	0.98
MRG-70	0.009 4	1.12

2.2.2 时间对法向力的影响

通过实验研究了MRG-30、MRG-50、MRG-70试样在恒定磁场强度分别为0 kA/m、96 kA/m、194 kA/m、391 kA/m和740 kA/m下时间历程对法向力的影响,设置应变幅值和频率分别为0.01%、1 Hz,整个实验过程持续210 s.结果如图5所示.

由图5可知,试样MRG-30、MRG-50、MRG-70在不同磁场强度下的法向力随时间的变化趋势基本一致.在零磁场强度下,MRG随着测试时间的增加法向力轻微减少,在较低磁场强度分别为96 kA/m、194 kA/m和391 kA/m下,MRG的法向力随测试时间增加呈稳定状态,而在高磁场强度(740 kA/m)作用下,MRG法向力随着测试时间的增加而增加,出现这种现象的原因是,随着磁场的增加,铁磁颗粒链状或簇状结构在增强的同时,磁流变脂的黏度也在不断升高.于是,在高磁场下,磁流脂需要更多的时间才能逐渐形成稳定的链状或簇状结构.值得一提的是,这一结论不同于Yao等^[18]对磁流变液的研究结果.

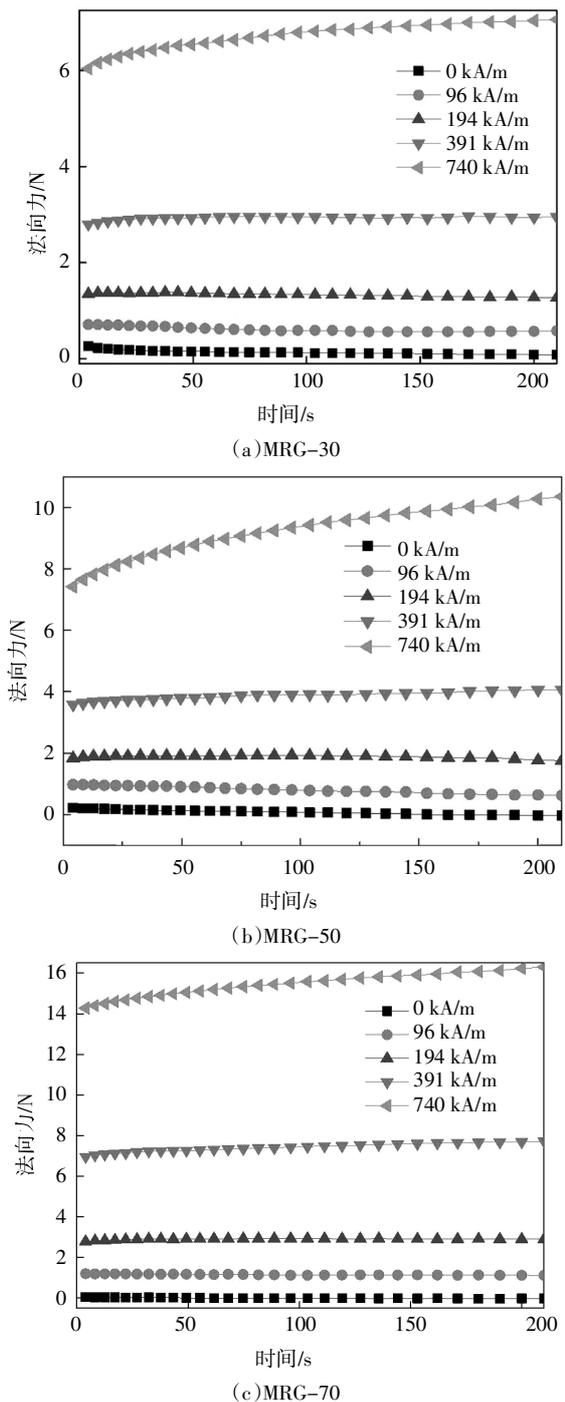


图5 3种MRG试样在不同磁场强度下的法向力随时间的变化曲线

Fig.5 Relationship curves between normal force and frequency of three MRG samples under three different magnetic field strengths

表2列出了当时间为210 s时3种MRG试样在不同磁场强度下的法向力值.从表2可以看出,对于相同质量分数磁流变脂来说,其法向力值随着磁场强度的增大而增大,在固定磁场下可以看出磁流变脂中羰基铁粉质量分数越高,法向力值越大;当磁场强度达到740 kA/m时,测得试样MRG-30、MRG-

50、MRG-70 法向力值分别为 7.06 N、10.35 N 和 16.3 N,这一结论与 2.2.1 节结果相符. 另外,在零磁场条件下,由于磁流变脂的表面张力和重量相互作用,法向力为接近零的负值. 综合以上分析得出,磁流变脂链状或簇状结构的形成以及强弱与外界磁场和羰基铁粉的质量分数有关,在宏观上表现出法向力随时间、磁场和羰基铁粉质量分数发生改变,这对磁流变脂器件设计具有重要的指导作用.

表 2 210 s 时不同试样的 MRG 法向力

Tab.2 The value of normal force under different MRG samples at 210 s

磁场强度 $/(kA \cdot m^{-1})$	法向力/N		
	MRG-30	MRG-50	MRG-70
0	-0.05	-0.04	-0.02
96	0.58	0.62	1.11
194	1.27	1.75	2.9
391	2.95	4.06	7.72
740	7.06	10.35	16.3

2.2.3 应变幅值对法向力的影响

通过设置应变幅值范围,在恒定磁场强度分别为 0 kA/m、96 kA/m、194 kA/m、391 kA/m 和 740 kA/m 时 MRG-30、MRG-50、MRG-70 试样的应变幅值与法向力关系曲线如图 6 所示. 设置应变幅度从 0.1% 扫描到 10%,频率为 1 Hz.

由图 6 可知,磁场强度不超过 96 kA/m 时,3 个 MRG 试样的法向力随着应变幅值的增加而轻微减小,基本趋于稳定值. 当磁场强度为 96~391 kA/m 时,其法向力随着剪切应变幅值的增加先增大后接近恒定值,然而,在相对较高的磁场强度(740 kA/m)下,法向力随着应变幅值的增加而明显增大,说明当磁场强度足够强时,颗粒链在受到变形或破坏后的重建能力随着磁场强度的增加而升高. 在磁场强度较低时,颗粒链在应变扫描发生变形或断裂后,恢复能力较差,导致法向力减小;而在中等磁场强度下,颗粒链在发生变形或断裂后能形成长度更多且形式不同的链结构,并且随着应变幅值的增加逐渐趋于稳定结构,进而使得法向力先增大然后逐渐不变;高磁场条件下,颗粒链在发生变形或断裂后的恢复能力急剧增强,从而表现出法向力随应变幅值升高而升高. 参照磁流变液定义临界应变幅值 r_c 的方法^[18],得到磁流变脂的临界应变幅值,它使得法向力值先快速增加,然后缓慢增加. 如图 6(a)中,当磁场强度为 740 kA/m 时,临界应变幅值 $r_c \approx 0.3\%$,因此,图 6

中存在应变临界值 r_c 且均为 0.3%;当应变幅值很小时,羰基铁粉中颗粒的吸引力会促使颗粒移动并形成沿磁场方向的链状结构. 如果应变幅值超过了临界值,就会减缓法向力的增加,并且在低磁场下随着应变的增加会趋于一个稳定值. 另外,从图 6 中还可以看出,MRG 试样中羰基铁粉质量分数越高,法向力越大,在应变幅值为 10%时,3 种 MRG 试样的最大法向力分别为 9.33 N、16.99 N 和 23.61 N.

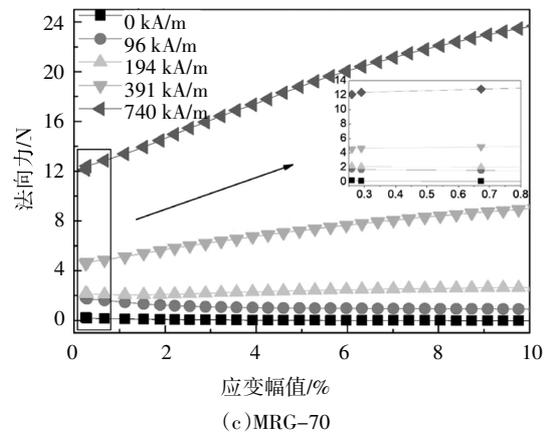
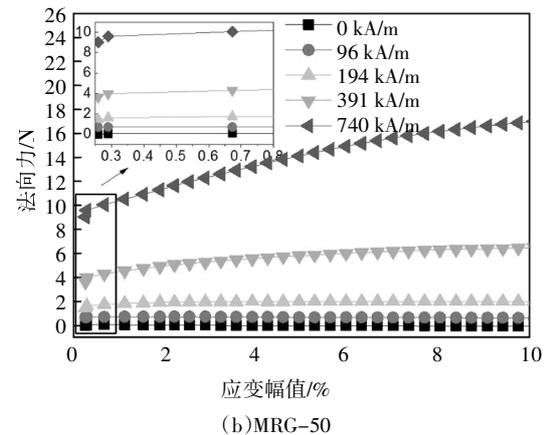
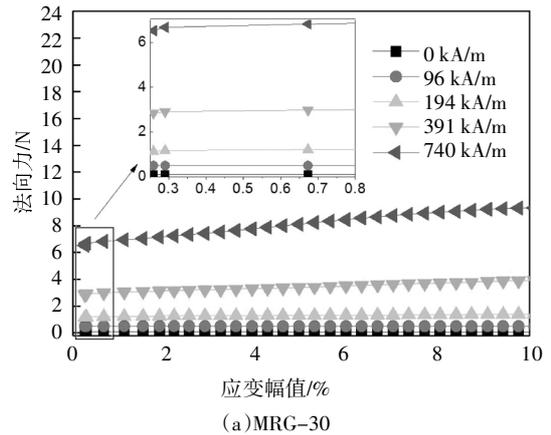
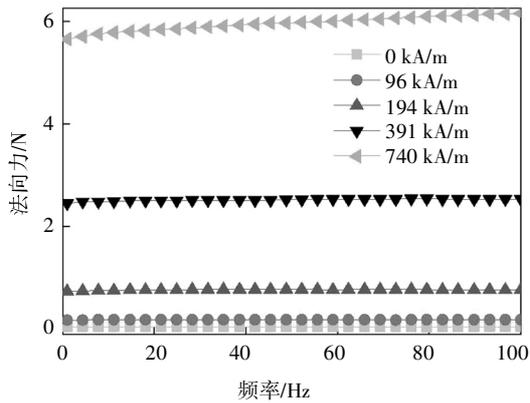


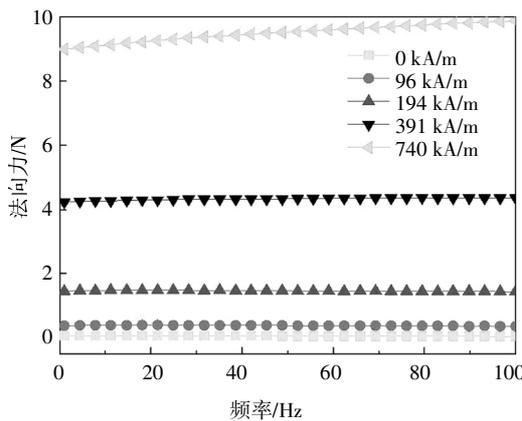
图 6 不同试样的 MRG 法向力与应变幅值关系曲线
Fig.6 Relationship curves between normal force and strain amplitude under different MRG samples

2.2.4 频率对法向力的影响

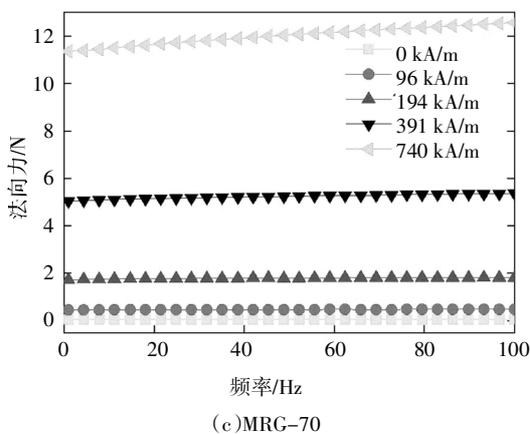
为了研究频率在不同恒定磁场强度下不同试样MRG法向力的影响,设置恒定剪切应变幅值 $r_0 = 0.01\%$,频率为1~100 Hz,分别对MRG-30、MRG-50、MRG-70试样进行不同磁场强度下的频率扫描,其中,磁场强度分别固定在0 kA/m、96 kA/m、194 kA/m、391 kA/m和740 kA/m.实验结果如图7所示.



(a)MRG-30



(b)MRG-50



(c)MRG-70

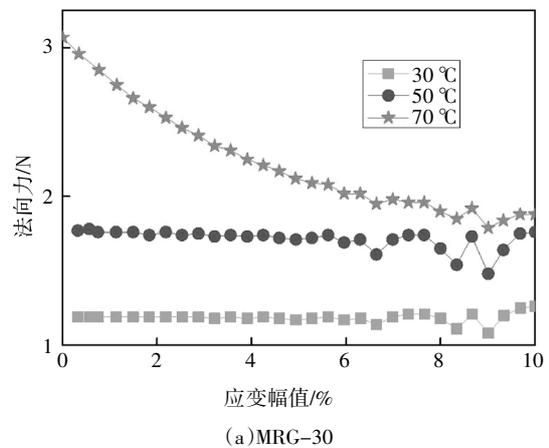
图7 3种不同试样的MRG在不同磁场下法向力与频率的关系曲线

Fig.7 Relationship curves between normal force and frequency of MRG of three different samples under different magnetic fields

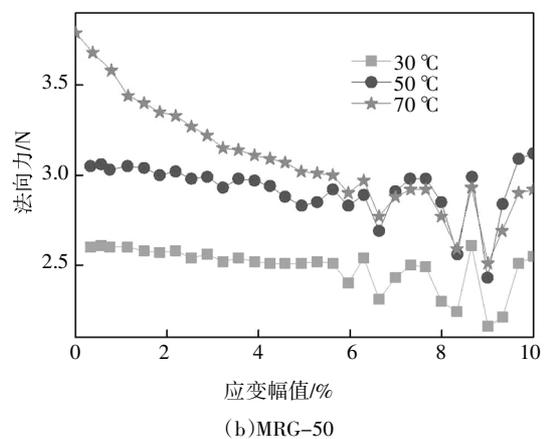
由图7可知,在整个频率范围内,不同MRG试样的法向力值在恒定磁场强度下都保持恒定,但当磁场强度达到740 kA/m时,试样MRG的法向力随频率的增加而轻微增加.磁场对法向力值影响较明显,如当频率 $f = 100$ Hz时,试样MRG-70从零磁场情况下的法向力0.05 N增加到磁场强度为740 kA/m时的12.57 N.另外,在施加同等磁场强度情况下,羰基铁粉的质量分数越高,法向力值越大,例如当磁场强度为391 kA/m时,MRG-30、MRG-50和MRG-70试样的法向力分别为2.53 N、4.36 N和5.37 N.值得注意的是,以上结论与张广等^[21]对磁流变胶的法向力研究基本相同,而与Gong等^[17]对磁流变液的法向力随频率变化而振荡的结论不同,本文磁流变脂的法向力不随频率变化的特性扩宽了其对器件的应用范围.

2.2.5 温度对法向力的影响

测试了3种MRG试样在不同恒定温度下应变幅值对法向力的影响.磁场强度设置为194 kA/m,温度分别为30 °C、50 °C和70 °C,得到关系曲线如图8所示.



(a)MRG-30



(b)MRG-50

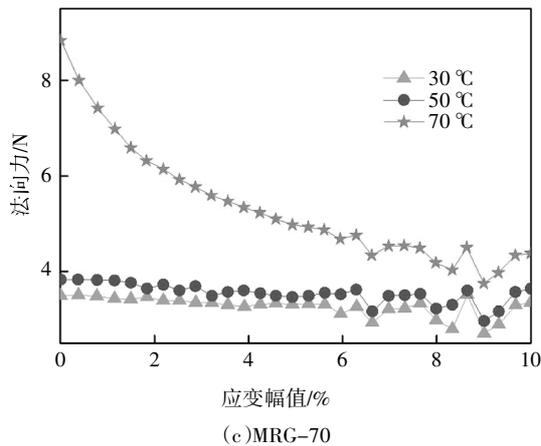


图8 不同试样的MRG剪切应变与法向力的关系曲线

Fig.8 Relationship between normal force and strain amplitude under different MRG samples

从图8可以看出,在温度作用下,3种MRG试样的应变幅值与法向力关系曲线趋势基本一致,当MRG试样温度为30~50℃,应变值约小于6%时,法向力值基本保持不变,而应变值大于6%时,呈现波动.试样温度为70℃时,法向力随应变幅值的增大而减小,在应变值大于6%时也呈现波动.这种不稳定现象是由于布朗力、磁吸引力和断链能力的竞争导致的^[22].此外,在恒定的剪切应变下,法向力随温度的升高而增大,这是由于温度升高使得润滑脂基体黏度降低,高温下更易沿磁场方向排列形成链状结构,最终导致法向力升高.

3 结论

本文以商业润滑脂为基体制备了羰基铁粉质量分数分别为30%、50%和70%的磁流变脂,通过安东帕MCR302型流变仪分别研究了磁场、时间、应变幅值、频率以及温度对磁流变脂法向力的影响.主要结论如下:

1)MRG的法向力随磁场强度的增加而增加,其关系可为 $F = kH^\alpha$;此外,在磁场一定时,随着磁流变脂羰基铁粉含量的升高,MRG的法向力值不断增大.

2)根据磁场强度的不同,将时间对MRG法向力的影响分为3个阶段,即轻微减少、恒定不变以及轻微增加.另外,在零磁场下,由于MRG的表面张力和重量的相互作用,法向力表现为接近零的负值.

3)MRG法向力在不同磁场条件下随应变幅值变化各不相同,当磁场强度不超过96 kA/m时,MRG法向力随着应变幅值的增加小幅度减小;而当磁场强度为96~391 kA/m时,其法向力随着剪切应变幅值先增大后趋于不变;在相对较高的磁场强度(740 kA/m)下,法向力随着应变幅值增大呈明显增大趋势.另外,法向力与外界激励频率(0~100 Hz)几乎无关,并且这种依赖关系不随磁场发生改变.

4)在温度分别为30℃和50℃时,MRG法向力随着应变幅值的增大首先基本保持不变,随后出现波动,而在温度上升到70℃时,法向力在出现波动之前不断减小.此外,当应变幅值一定时,MRG法向力随温度升高而升高.

参考文献

- [1] MOHAMAD N, MAZLAN S A, UBAlDILLAH, *et al.* The field-dependent rheological properties of magnetorheological grease based on carbonyl-iron-particles [J]. *Smart Materials and Structures*, 2016, 25(9): 1-10.
- [2] WEI B, GONG X L, JIANG W Q, *et al.* Study on the properties of magnetorheological gel based on polyurethane [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2010, 118(5): 2765-2771.
- [3] 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 H X, ZHANG G, OUYANG Q, *et al.* Rheological properties of magnetorheological grease under shear mode [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2019, 53(3): 380-386. (In Chinese)
- [4] 欧阳青, 李赵春, 郑佳佳, 等. 多阶并联式磁流变缓冲器可控性分析[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2017, 51(5): 961-968.
OUYANG Q, LI Z C, ZHENG J J, *et al.* Controllability characteristics of magnetorheological damper with multi-stage parallel coil under impact load [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2017, 51(5): 961-968. (In Chinese)
- [5] OUYANG Q, HU H S, QIAN C, *et al.* Investigation of the influence of magnetic field distribution on the magnetorheological absorber with individually controllable coils[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2019, 55(8): 1-13.
- [6] FERNANDEZ M A, CHANG J Y, HUANG C Y. Development of a passive magnetorheological fluid clutch with field-blocking mechanism [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2018, 54(11): 1-5.
- [7] 王道明, 姚兰, 邵文彬, 等. 汽车磁流变液制动器温度特性仿真与试验研究[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(6): 100-107.
WANG D M, YAO L, SHAO W B, *et al.* Simulation and experimen-

- tal study on temperature characteristics of magnetorheological fluid brake for vehicles[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(6): 100—107. (In Chinese)
- [8] RANKIN P J, HORVATH A T, KLINGENBERG D J. Magnetorheology in viscoplastic media[J]. *Rheologica Acta*, 1999, 38(5): 471—477.
- [9] WANG H X, LI Y C, ZHANG G, *et al.* Effect of temperature on rheological properties of lithium-based magnetorheological grease[J]. *Smart Materials and Structures*, 2019, 28(3): 1—16.
- [10] 胡志德, 晏华, 郭小川, 等. 具有阻尼功能的锂基磁流变脂的稳定性及流变性能[J]. *石油学报(石油加工)*, 2015, 31(1): 166—171.
- HU Z D, YAN H, GUO X C, *et al.* Rheological properties and stability of lithium-based magnetorheological grease with damping effect[J]. *Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section)*, 2015, 31(1): 166—171. (In Chinese)
- [11] KIM J E, KO J D, LIU Y D, *et al.* Effect of medium oil on magnetorheology of soft carbonyl iron particles [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2012, 48(11): 3442—3445.
- [12] MOHAMAD N, MAZLAN S A, SABINO U. Effect of carbonyl iron particles composition on the physical characteristics of MR grease [C]// *International Conference & Exhibition on Sustainable Energy & Advanced Materials*. Solo, Indonesia: American Institute of Physics, 2016: 040027-1—040027-6.
- [13] PARK B O, PARK B J, HATO M J, *et al.* Soft magnetic carbonyl iron microsphere dispersed in grease and its rheological characteristics under magnetic field [J]. *Colloid & Polymer Science*, 2011, 289(4): 381—386.
- [14] GUO C Y, GONG X L, XUAN S H, *et al.* An experimental investigation on the normal force behavior of magnetorheological suspensions [J]. *Korea-Australia Rheology Journal*, 2012, 24(3): 171—180.
- [15] YAO X Y, YU M, FU J. Magnetic-enhanced normal force of magnetorheological fluids [J]. *Smart Materials and Structures*, 2015, 24(3): 1—9.
- [16] LIAO G J, GONG X L, XUAN S H. Influence of shear deformation on the normal force of magnetorheological elastomer [J]. *Materials Letters*, 2013, 106: 270—272.
- [17] GONG X L, GUO C Y, XUAN S H, *et al.* Oscillatory normal forces of magnetorheological fluids [J]. *Soft Matter*, 2012, 8(19): 5256—5261.
- [18] YAO X G, LIU C W, LIANG H, *et al.* Normal force of magnetorheological fluids with foam metal under oscillatory shear modes [J]. *Journal of Magnetism & Magnetic Materials*, 2016, 403: 161—166.
- [19] LIU X H, YE D, GAO X L, *et al.* Normal force for static and steady shear mode in magnetorheological fluid [J]. *Journal of Magnetism & Magnetic Materials*, 2016, 398: 137—140.
- [20] LIAO G J, GONG X L, XUAN S H, *et al.* Magnetic-field-induced normal force of magnetorheological elastomer under compression status[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2012, 51(8): 3322—3328.
- [21] 张广, 汪辉兴, 欧阳青, 等. 硅树脂基磁流变胶流变特性研究及 Herschel-Bulkley 模型参数识别 [J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2018, 45(6): 62—71.
- ZHANG G, WANG H X, OUYANG Q, *et al.* Study on the rheological properties of magnetorheological gel based on silicone and Herschel-Bulkley model parameter identification [J]. *Journal of Hunan University(Natural Sciences)*, 2018, 45(6): 62—71. (In Chinese)
- [22] SAHIN H, WANG X J, GORDANINEJAD F, *et al.* Temperature dependence of magneto-rheological materials [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2009, 12(20): 2215—2222.