

铁粉含量对明胶基磁流变胶流变性能的影响

秦利军¹, 龚兴龙¹, 江万权², 李剑锋¹, 彭超¹

(中国科学技术大学 1. 近代力学系, 中国科学院材料力学行为与设计重点实验室;
2. 化学系, 合肥 230026)

摘要: 采用明胶和甘油为连续相制备了不同铁粉含量的磁流变胶, 用流变仪测试了其零场黏度、静态屈服应力、流动剪切应力和储能模量。结果表明: 随铁粉含量的增多, 磁流变胶的零场黏度增大, 加剧了剪切致稀现象; 铁粉含量与静态屈服应力和流动剪切应力成正比线性关系; 铁粉含量可显著提高磁流变胶的储能模量, 扩大其线性粘弹区域。

关键词: 磁流变胶; 磁流变效应; 铁粉

中图分类号: TG146.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2010)05-0008-04

Effect of Iron Powder Content on Rheological Properties of Magnetorheological Glutin Gels

QIN Li-jun¹, GONG Xing-long¹, JIANG Wan-quan², LI Jian-feng¹, PENG Chao¹

(1. CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, Department of Modern Mechanics;
2. Department of Chemistry, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Using glutin and glycerine as continuous phases, magnetorheological gels(MRGs) with various iron powder contents were prepared. The properties of off-state viscosity, static yield stress, flow shear stress of the MRGs and storage modulus were investigated by rheometer. The results show that the off-state viscosity of the MRGs was significantly enhanced with the increase of the iron powder content. And the phenomenon of shear was aggravated. The static yield stress and flow shear stress increased as a linear function of iron powder content. Iron powder content significantly increased the storage modulus and expanded the linear viscoelastic area.

Key words: magnetorheological gel; magnetorheological effect; iron powder

0 引言

磁流变液(Magnetorheological Fluids)是一种由微米级磁性颗粒分散在非磁性基液(矿物油、硅油等)中形成的悬浮体系,在外加磁场下,具有瞬间、可逆地从牛顿流体转变为宾汉塑性体的特殊性能,同时还具有屈服应力高、能耗低、受杂质影响小等特点,已成为国内外研究的热点^[1],主要用来制造吸振器、阻尼器、离合器和抛光器等器件,广泛应用于航空航天、医疗器械、建筑、汽车和精密制造等领域。然而,由于沉降而引起的固、液相分离严重影响了磁流变液的性能,成为磁流变液面临的主要难题之一。

磁流变胶(Magnetorheological Gels, MRGs)是由磁性颗粒、载流液和聚合物胶组成的新型磁流变材料^[2],磁流变胶与磁流变液的主要区别是其中加入了胶质物,胶质物在载流液中形成的网状结构一部分吸附在磁性颗粒表面,一部分分散于载流液中,一方面使得颗粒重力平均分布在基体中,从而显著地提高其沉降稳定性;另一方面颗粒表面的网状结构加大了颗粒间的距离,从而减弱了范德华力,降低了颗粒的团聚,分散性好。它在显著提高沉降稳定性、保持磁流变液优异磁流变效应的同时,又具有一些特殊的性能。如通过调整磁流变胶中胶的含量可以使它的零场黏度连续变化,从而得到介于磁流变液与磁流变弹性体(MREs)之间的磁流变材料,以满足不同应用场合的需要。由于磁流变胶具有这些优异的性能,目前正逐渐成为研究热点,并已在振动控制和阻尼器中得到应用。但是目前磁流变胶还

收稿日期:2009-04-22;修订日期:2009-12-15

作者简介:秦利军(1983-),男,河北邯郸人,硕士研究生。

导师:龚兴龙教授

存在一些问题,如制备过程较复杂、成本较高和屈服应力低等^[3]。为解决此问题,作者课题组采用明胶和甘油形成的凝胶作为连续相来制备磁流变胶,具有制备工艺简单、原料少和成本低等优点。研究表明,明胶基磁流变胶可显著提高材料的沉降稳定性^[4],具有较高的屈服应力^[5]。作为后续研究,作者就铁粉含量对磁流变胶磁流变性能的影响进行了研究。

1 试样制备与试验方法

1.1 试样制备

试验用明胶(化学纯)和甘油(分析纯)均购自国药集团试剂有限公司,羰基铁粉购自德国 BASF 公司,平均粒径为 3 μm。

将水和甘油混合均匀后,加入明胶,置于电炉上加热,同时用玻璃棒搅拌加速明胶溶解。然后,按表 1 中配比将铁粉加入溶胶里,搅拌均匀。为使铁粉分散性较好,防止团聚,要控制铁粉加入速度。待铁粉完全分散于溶胶后,放入冷藏室形成凝胶。

表 1 磁流变胶的配方
Tab. 1 The formula of MRGs

试样	铁粉		明胶 /g	水 /mL	甘油 /mL
	体积分数 ϕ	加入量/g			
0	0	0	0.5	5	15
1	0.09	16.3	0.5	5	15
2	0.13	24.4	0.5	5	15
3	0.19	36.6	0.5	5	15
4	0.26	56.9	0.5	5	15
5	0.38	97.6	0.5	5	15

1.2 试验方法

用 Physica MCR 301 型流变仪在两种不同模式下测定磁流变胶的磁流变性能。磁流变附件为 PS-DC-MR15A,控温附件为 Physica VT 2,测试头为 PP20。PP20 下端盘片有效直径为 20 mm,与测试试样接触,上端与扭矩和位移传感器相连,用以测试试样的剪切应力、剪切应变(率)(见图 1)。试样厚度为 1 mm。线圈产生的磁场通过导磁骨架形成完整的磁路,使试样受到较为均匀且和剪切方向垂直的磁场,测试时通过变化电流控制磁场。控温附件在试样下方控制试验温度,测试温度均设在 25 ℃。

旋转模式:流变仪驱动测试头以旋转的方式对试样进行测试,这种模式下可控参数为剪切应变、剪切率、剪切应力和磁场(电流)等。根据测试需要可变化其中一个参数。在一定的磁场下,变化剪切应力(应力扫描)可得到应力-应变关系曲线,可测得零场黏度(磁场为零时的黏度)和静态屈服应力;固定

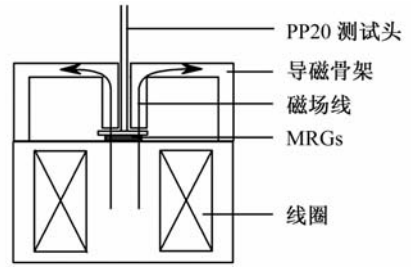


图 1 测试原理示意

Fig. 1 Schematic of the measuring principle

剪切率、变化磁场可测得剪切应力与磁场强度 H 的关系;固定磁场、变化剪切率可测得相同磁场强度下剪切应力与剪切应变间关系。

振荡模式:流变仪以正弦激励力驱动测试头对试样进行测试。这种模式下的可控参数为应变幅值、角频率和磁场等。固定磁场和角频率、变化应变幅值可测得储能模量随应变的变化关系。

2 试验结果与讨论

2.1 铁粉含量对零场黏度的影响

由图 2 可见,磁流变胶的零场黏度随着铁粉含量的增加而上升。未加入铁粉时,零场黏度为一常数,此时表现为牛顿流体;加入铁粉以后,零场黏度随着剪切率而变化,表现为非牛顿流体,并服从式(1)关系^[6]:

$$\eta_0 \propto \dot{\gamma}^{-\Delta} \quad (1)$$

式中: η_0 为零场黏度, $\dot{\gamma}$ 为剪切率; Δ 为稀化参数。通过最小二乘法拟合,得到试样 1~5 的稀化参数 Δ 为 0.22,0.26,0.31,0.62,0.70,即随着铁粉含量增加而增大,这说明铁粉含量使得稀化现象加剧。

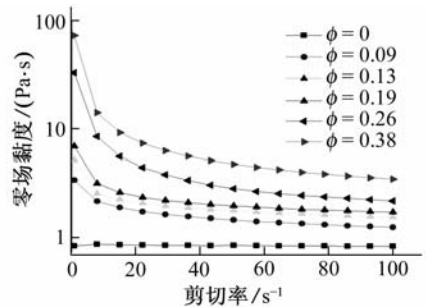


图 2 不同铁粉含量磁流变胶的零场黏度

Fig. 2 Off-state viscosity of MRGs with various iron powder contents

2.2 铁粉含量对静态屈服应力的影响

评价磁流变胶的一个重要指标就是屈服应力,它是弹性区域进入塑性流动区的转折点。在旋转模式下,固定磁场作剪切力扫描,出现明显塑性流动时

对应的应力即为静态屈服应力 τ_{ys} 。由图 3 可以看出,磁流变胶的 τ_{ys} 较高,最高可达 64 kPa($\phi=0.38$, $H=495 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$ 时),这是因为铁颗粒在胶体形成的网状结构中分散较好,可形成更为有序的链状结构^[7],使得其“强度”增加,可以提供更大的剪切屈服应力;同时 τ_{ys} 随铁粉体积分数 ϕ 和磁场强度 H 的增大而增大,与 ϕ 成线性增长,与 H 成非线性增长,其间关系可由式(2)近似描述。虽然 ϕ 和 H 都可以提高 τ_{ys} ,但其作用机理是不同的, ϕ 对 τ_{ys} 的贡献表现为链的“数量”的增加, τ_{ys} 是由材料内部铁颗粒形成的链状结构决定的,而链的多少正比于单位体积中铁颗粒的数量(体积分数),所以 τ_{ys} 与 ϕ 成正比关系; H 对 τ_{ys} 的贡献则表现为链的“质量”的增加,随着 H 的增加,铁颗粒磁化强度增加,磁偶极矩增强,链间作用力加大,使得 τ_{ys} 增大,而饱和磁化强度的存在限制了 τ_{ys} 的进一步增大,所以 τ_{ys} 与 H 的双曲正切关系由磁性颗粒的磁化性质决定。

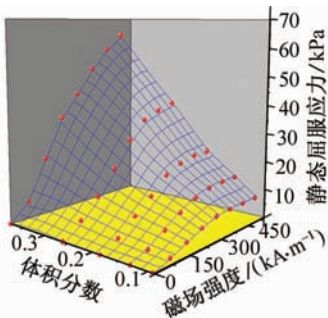


图 3 τ_{ys} 与 H 和 ϕ 的关系

Fig. 3 Relationship between τ_{ys} , H and ϕ

2.3 铁粉含量对流动剪切应力的影响

2.3.1 剪切率一定时

由图 4 可见,流动剪切应力 τ 随 H 的增加而增大,且存在“饱和”现象,这是由磁性颗粒磁化饱和和强度所决定的。 τ 与 H 和 ϕ 的关系可由式(2)描述^[3]:

$$\tau = \tau_{\phi} [\tan(4.2 \times 10^{-3} H + 160) + 0.57] \quad (2)$$

式中: τ 为流动剪切应力; τ_{ϕ} 为剪切应力幅值,是与 ϕ 有关的函数,可通过数据拟合得到; H 为磁场强度。图 4 中的点为试验结果,实线是通过式(2)拟合的曲线,可以看出拟合曲线与试验结果吻合很好。

流动剪切应力 τ 随铁粉含量的增加而增大,式(2)说明铁粉含量对流动剪切应力的影响可体现为其对剪切应力幅值 τ_{ϕ} 的影响,即铁粉含量和磁场强度对磁流变效应的影响是相互独立的。图 5 给出了 τ_{ϕ} 和体积分数 ϕ 的关系,可以看出两者成简单的线性函数关系。

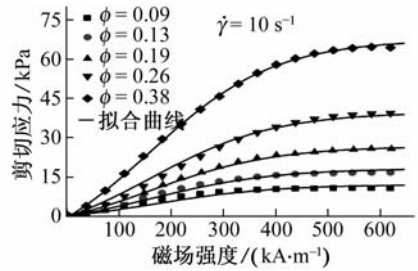


图 4 τ 与 H 的关系曲线

Fig. 4 Relation curves of τ as a function of H

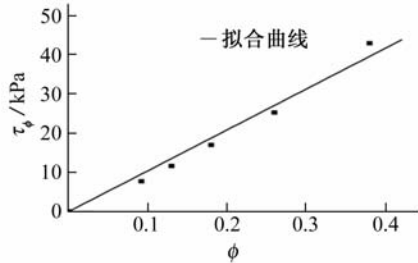


图 5 τ_{ϕ} 与 ϕ 的关系曲线

Fig. 5 Relation curve of τ_{ϕ} as a function of ϕ

2.3.2 磁场强度一定时

由图 6 可见,流动剪切应力曲线随铁粉含量增加而上移,说明磁流变胶内部在链的数量和质量方面的改善使得磁流变胶更加坚固,从而可提供更高的剪切应力。

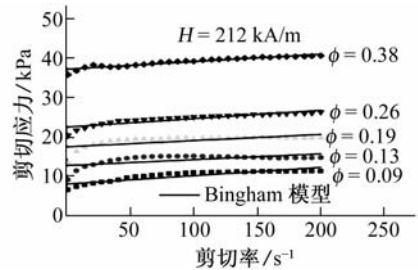


图 6 τ 与 $\dot{\gamma}$ 的关系曲线

Fig. 6 Relation curves of τ as a function of $\dot{\gamma}$

屈服后的流动曲线可由式(3)的 Bingham 模型^[8]来描述:

$$\tau = \tau_{yd} + \eta \dot{\gamma} \quad (3)$$

式中: τ 为总的剪切应力; τ_{yd} 为动态屈服应力,是拟合曲线延伸到 $\dot{\gamma}=0 \text{ s}^{-1}$ 处的应力值; η 为塑性黏度,是拟合直线的斜率; $\dot{\gamma}$ 为剪切率。其中 τ_{yd} , η 是 ϕ 和 H 的函数。由图 6 可以看出,屈服后, τ 近似符合 Bingham 模型,表现出与磁流变液相类似的性能^[9]。当 $\dot{\gamma} < 20 \text{ s}^{-1}$ 时,存在剪切致稀现象,模型有一定误差; $\dot{\gamma} > 20 \text{ s}^{-1}$ 时,试验结果与模型结果吻合很好。表 2 给出了图 6 的拟合结果。

从表 2 可以看出, τ_{yd} 随 ϕ 增加而增大,且比 τ_{ys}

表 2 Bingham 模型的拟合结果

Tab. 2 The fitting results of Bingham model

ϕ	$H / (\text{kA} \cdot \text{m}^{-1})$	$\tau_{\text{ydl}}/\text{kPa}$	$\tau_{\text{ys}}/\text{kPa}$	$\eta/(\text{Pa} \cdot \text{s})$
0.09	212	8.0	6.3	21.1
0.13	212	12.7	9.5	15.0
0.19	212	17.5	12.5	15.8
0.26	212	22.5	19.1	21.3
0.38	212	37.0	34.0	19.4

略大;塑性黏度比零场黏度大,随 ϕ 变化不明显。

2.4 铁粉含量对储能模量的影响

由图 7 可见,开始时各种铁粉含量磁流变胶的储能模量 G' 不随应变幅值 γ 的变化而变化,说明应力是应变的线性函数,储能模量 G' 不随应变幅值 γ 变化的区域称为线性区^[10]。当超过临界值(γ_{lin})时储能模量迅速下降,进入非线性区, γ_{lin} 是维持链状结构不被破坏的最大应变。图 7 中数字是不同铁粉体积分数 ϕ 对应的临界应变值 γ_{lin} ,可以看出铁粉含量的增加可以大大拓展线性区的范围, ϕ 从 0.09 增至 0.38 时, γ_{lin} 增加了近 16 倍;同时在线性区的 G' 随 ϕ 增加而增大, $\phi=0.38$ 时, G' 可达 7.8 MPa。这是因为随着 ϕ 的增加,链变成更为稳定的柱或簇状结构,可抵御更大的应变,提供更高的储能模量。

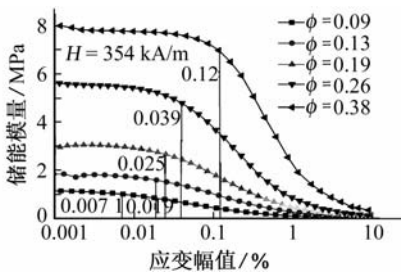


图 7 储能模量与应变幅值的关系曲线

Fig. 7 Relationship curves of storage modulus as a function of strain amplitude

3 结论

(1) 随铁粉含量增多,明胶基磁流变胶的零场

黏度增大,加剧了剪切致稀现象。

(2) 此磁流变胶的静态剪切屈服应力与铁粉体积分数成正比线性关系。

(3) 铁粉含量与流动剪切应力存在简单的正比线性关系;铁粉含量对动态屈服应力影响较大,对塑性黏度影响不明显。

(4) 铁粉含量可大幅度提高磁流变胶的储能模量和扩大其线性粘弹区域。

参考文献:

- [1] SPENCER B F J, SAIN M K. Controlling buildings: a new frontier in feedback[J]. IEEE Control Systems, 1997, 17(6): 19-35.
- [2] WILSON M, FUCHS A, GORDANINEJAD F. Development and characterization of magnetorheological polymer gels[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2002, 84: 2733-2742.
- [3] HU B, FUCHS A, HUSEYIN S, et al. Supramolecular magnetorheological polymer gels[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2006, 100: 2464-2479.
- [4] 叶兴柱, 龚兴龙, 江万权, 等. 磁流变胶的沉降和力学性能研究[J]. 功能材料, 2007, 38(增刊): 1258-1260.
- [5] 叶兴柱, 龚兴龙, 江万权, 等. 新型磁流变胶的流变性能[J]. 机械工程材料, 2007, 38(7): 21-23.
- [6] IKKALA O, BRINKE G T. Hierarchical self-assembly in polymeric complexes: towards functional materials[J]. Chemical Communications, 2004, 19: 2131-2137.
- [7] WILSON M J, XIN M, HOLLAND M, et al. In characterization of magnetorheological polymer gels[C]//The AICHE Annual Conference[S. l.]: [s. n.], 2000.
- [8] GINDER J M, TRIGG G L. Rheology controlled by magnetic fields[M]. New York: VCH Publishers, 1996: 487-503.
- [9] JOLLY M R, BENDER J W, CARLSON J D. Properties and application of commercial magnetorheological fluids[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1999, 10(1): 5-13.
- [10] LI W H, DU H J, CHEN G, et al. Nonlinear viscoelastic properties of MR fluids under large-amplitude-oscillatory-shear[J]. Rheologica Acta, 2003, 42: 280-286.

(上接第 7 页)

参考文献:

- [1] 中国船级社. 材料与焊接规范[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006: 42.
- [2] 许荣昌. 船板钢的发展与生产技术[J]. 莱钢科技, 2007(2): 5-9.

- [3] 马云亭, 叶建军. 铌在低温高强度船体结构钢 EH36 中的应用[J]. 宽厚板, 2002, 6(3): 18-23.
- [4] XUE Xiao-huai, SHAN Yi-yin. Micro structural characteristic of low carbon microalloyed steels produced by thermo-mechanical controlled process[J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 438/440: 285-287.