

磁流变胶的沉降和力学性能研究*

叶兴柱¹, 龚兴龙¹, 江万权², 严长青²

(1.中国科学技术大学 力学和机械工程系, 中国科学院材料力学行为与设计重点实验室, 安徽 合肥 230027;

2.中国科学技术大学 化学系, 安徽 合肥 230026)

摘要: 研制了一种新型的磁流变胶(magnetorheological gels), 它具有良好的沉降稳定性和优良的磁流变效应。在 2500r/min 的离心实验中, 离心 20min 之后才完全沉降; 其剪切应力与剪切速率的关系可用 Herschel-Bukley 模型进行很好的描述; 剪切屈服应力在小磁场下剪切屈服应力与磁场成线性关系, 当磁场为 70kA/m 时, 剪切屈服应力达到了 53.9kPa。

关键词: 流变胶; 沉降性; 剪切应力; 屈服应力

中图分类号: TQ138.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-9731(2007)增刊-1258-03

1 引言

20 世纪 40 年代末 Rabinow 发明磁流变液^[1]。磁流变液是将微米尺寸的磁极化颗粒分散于非磁性液体(矿物油、硅油等)中形成的悬浮体系, 在零场情况下, 其流动性能良好、表观粘度很小; 在外加强磁场作用下表观粘度可在短时间(毫秒级)内增加两个数量级以上, 并呈现类固体特性; 而且这种变化是连续的、可逆的。然而磁流变液在应用上也有限制, 主要是其沉降稳定性差、对器械的密封要求高。因此一种新型的、无沉降磁流变材料——磁流变胶应运而生, 经由美国内华达大学的 Fuchs 等人的系列工作发展后已经形成了一种新型的材料^[2-4], 与磁流变液(magnetorheological fluids)、磁流变泡沫(magnetorheological foams)、磁流变弹性体(magnetorheological elastomer)一样同归属于磁流变材料。磁流变胶是将微米粒径的磁性颗粒均匀分散在溶胶基体中而成的, 与其它的磁流变材料一样, 在外加磁场下, 其力学性能可以发生很大变化, 同时又具有比磁流变液强的沉降稳定性, 因此具有很强的应用前景。

磁流变胶这种新型材料虽然具有很强的应用前景, 然而其目前还存在很多问题需要解决。国外目前的磁流变胶主要是在普通磁流变液的基础上添加自制的聚合物^[2-4]或者是添加纳米硅颗粒^[5,6], 对于前者其制备工艺过于复杂, 其动态剪切应力较小^[3], 而后者虽然可以缓解沉降问题, 但是并不能完全解决。本文采用全新的制备思路, 以溶胶作为连续相的母液, 将微米量级的磁性颗粒均匀地分散到溶液中, 冷藏成凝胶而成。该种磁流变胶不仅制备简单、沉降稳定性好, 同时保持了磁流变

材料的一些共有优点, 譬如在外磁场作用下磁流变胶也具有快速响应的特点, 其力学性能可以发生显著的变化。同时本文也对所制备的磁流变胶的力学性能和沉降稳定性进行了一些研究。

2 材料制备

磁流变胶的主要成份是以磁性铁粉颗粒和凝胶基体组成的。其中磁性颗粒采用德国 BASF 公司的平均粒径为 3.5 μm 的羰基铁粉, 样品中铁粉颗粒的质量分数为 80%; 凝胶基体材料中的明胶(化学纯)和丙三醇(分析纯)均购自国药集团化学试剂有限公司。

磁流变胶制备过程: 将 5ml 水和 15ml 的丙三醇混合均匀, 再将 0.5g 明胶加入其中, 对混合液进行加热, 同时不停的搅拌, 加速明胶的溶解, 控制加热过程直至明胶完全溶解, 得到淡黄色溶胶溶液。在溶胶溶液凝结之前将已经称取好的 95.6g 铁粉分次加入, 先取少许粉体慢慢加入到基液中, 搅拌直至粉体颗粒和溶胶溶液混合均匀, 搅拌下续加其余铁粉, 继续搅拌至均匀。放入冷藏室冷藏成凝胶即可。

3 性能表征

3.1 离心沉降

由于磁流变胶的沉降稳定性较好, 所以在重力沉降的情况下测试其沉降性能需要花费很长的时间, 因此本文采用了离心加速沉降的方法来研究其沉降性能。依据斯托克顿沉降公式:

$$t = \frac{18\eta h}{(\rho_s - \rho_f)R\omega^2 D^2}$$

其中 t 为颗粒的沉降时间, η 为母液粘度, ρ_f 为母液的密度, h 为颗粒的沉降距离, ρ_s 为颗粒的密度, ω 为旋转的角速度, D 为颗粒的直径, R 为颗粒到旋转中心的位置。

磁流变胶中的磁性颗粒和凝胶基体的密度相差很大, 因此在旋转的离心管中磁性颗粒会向底部运动, 靠近旋转中心处会出现颗粒和基体分离的现象。由于离心机中的试管有一定的倾角, 难以直接用析出的体积比来衡量沉降效果, 因此我们采用析出的胶体的质量与样品总体质量比来评价其沉降效果。同时采用相同铁粉质量

* 收到稿件日期: 2007-05-07

通讯作者: 龚兴龙

作者简介: 叶兴柱(1981-), 男, 浙江宁波人, 在读硕士, 师承龚兴龙教授, 主要从事电磁流变智能材料方向的研究。

分数的自制磁流变液进行对比实验,磁流变液为相同型号的铁粉和粘度 1000cp 的硅油,添加剂为 1%质量分数的二氧化硅纳米颗粒的悬浮液。

采用的离心转速为 2500r/min,离心机型号为 TG-WS 台式高速离心机。

3.2 力学性能测试

采用 Physic MCR301 型流变仪以及配备的磁流变附件对磁流变胶力学性能进行测试。

3.2.1 零场剪切应力和剪切速率的关系

通过测试在零场和固定温度下的流动曲线来研究磁流变胶剪切应力和剪切速率的关系,同时对其用流变学模型分析。磁场为零;剪切率为 1~100(1/s)对数增长;温度为室温 25℃。

3.2.2 剪切屈服应力与外加磁场的关系

在 6 个不同磁场下分别测试了同一样品的剪切屈服应力,磁场强度分别为 0, 13, 26.7, 43, 57.1, 70kA/m。为了保持样品在实验过程中的均匀性,消除前次实验中对样品中的影响,每次实验前先进行剪切速率为 5(1/s)的旋转剪切 1min,然后静置 50s,最后才开始测试实验,测试温度为 25℃。

4 实验结果

4.1 离心沉降

图 1 为相同质量分数的磁流变液(MRF)和磁流变胶(MRG)的离心沉降实验结果。横坐标轴为离心时间,纵坐标轴为析出基液占样品总质量的百分数。

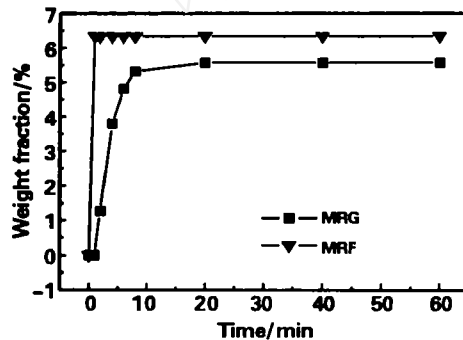


图 1 析出基体的质量分数和离心沉降时间的关系

Fig 1 Settling curves of MRG and MRF

从图中可以看到,磁流变液离心 1min 时,因离心而析出的母液占总质量的 6.5%左右,已经沉降完全;而磁流变胶无明显沉降,析出的母液只占总质量的 1.5%左右,当离心 20min 时才沉降完全,此时析出的基体才占总质量的 5.5%。由此可知磁流变胶的沉降稳定性要远远地好于该种磁流变液。这是因为,磁流变胶的粘度要比磁流变液大得多,同时基体中的胶体结构可以给颗粒足够的支撑,因此其沉降性能好。

4.2 力学性能测试

4.2.1 零场下动态剪切应力和剪切速率的关系

图 2 为零场下剪切应力和剪切速率的关系曲线。其

中点为实验中所测得的剪切应力值,实线为用 Herschel-Bukley 模型^[7]分析所得的曲线(以下简称 H-B 模型),虚线为用 Bingham 模型分析所得的曲线。在剪切速率为 1(1/s)时,动态剪切应力为 341Pa,当剪切速率为 100(1/s)时,动态剪切应力增大到 3.81kPa。由图中的实验所测的数据点不难看出在零场下磁流变胶的动态剪切应力随着剪切速率的增大而增大,对剪切速率有一定的依赖性。图中由 H-B 模型分析所得的曲线(实线)点符合的非常好,而 Bingham 模型分析所得的曲线(虚线)与实验点有一定的误差,说明 H-B 模型更适合用来描述零场下磁流变胶的流动行为。这是因为磁流变胶在屈服后流动行为为非牛顿行为,随着剪切速率的增大,其表观粘度呈明显下降趋势(实验结果见图 3),Bingham 模型虽然对屈服流动后为牛顿行为的流体可以进行很好的描述,但是并不能对非牛顿流体进行很好的描述,H-B 模型可以对牛顿和非牛顿流体屈服后的流动行为都可以进行很好的描述,因此对于该磁流变胶的屈服流动行为用 H-B 模型进行描述。

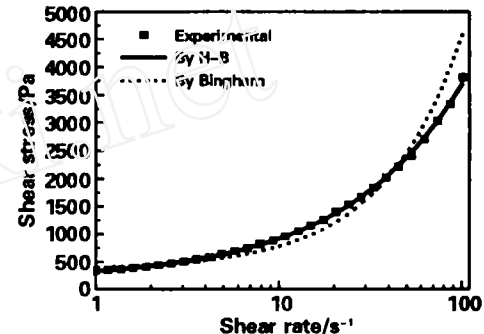


图 2 零场下剪切应力与剪切速率的关系曲线

Fig 2 Shear stress VS shear rate at off-state

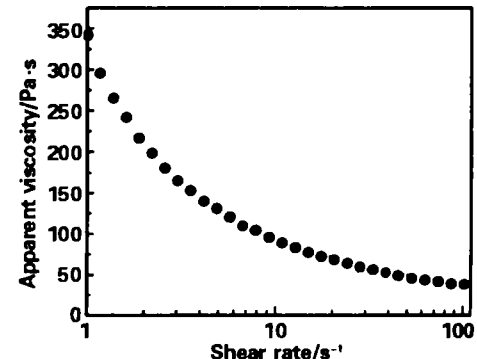


图 3 零场下表观粘度和剪切速率的关系曲线

Fig 3 Apparent viscosity VS shear rate at off-state

4.2.2 剪切屈服应力与外加磁场的关系

图 4 为静态剪切屈服应力与外加磁场的关系曲线。图中的点为实验所测的剪切屈服应力值,实线为由实验数据拟合而成的曲线。零场时静态剪切屈服应力为 199Pa,当磁场为 70kA/m 时,静态剪切屈服应力为 53.9kPa。从图 4 中我们可以看到实验所测得的静态剪切屈服应力值分布在拟合直线附近,与磁场呈线性关系。这是一个很好的特性,对于实际应用非常有利。

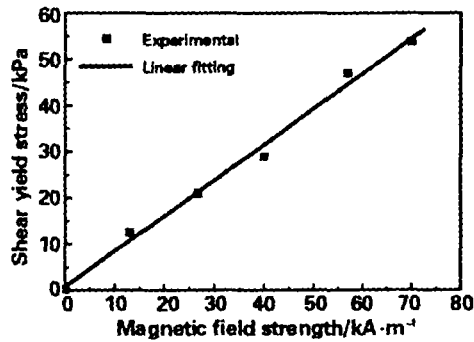


图 4 静态剪切屈服应力与磁场的关系曲线

Fig 4 Shear yield stress VS magnetic field strength

5 结 论

研制了一种新型的磁流变胶, 通过对该磁流变胶的性能进行综合研究后, 得到如下结论:

(1) 磁流变胶的沉降稳定性要大大地优于普通磁流变液;

(2) 零场下磁流变胶的动态剪切应力对剪切速率有一定的依赖性, 屈服流动后呈现出剪切稀化现象, 其流动行为可用 H-B 模型来描述;

(3) 该磁流变胶的静态剪切屈服应力在一定磁场

范围内随磁场线性增加。

磁流变胶作为新型的磁流变材料还需对其性能进行很多的研究, 今后将对影响其性能的温度等因素进行研究, 并对其制备进一步优化。

致谢: 感谢中国科学院“百人计划”对本文的支持!

参考文献:

- [1] Rabinow J. [J]. AIEE Transactions, 1948, 67: 1308-1315.
- [2] Fuchs A, Xin M, Gordaninejad F, et al. [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2004, 92(2): 1176-1182.
- [3] Fuchs A, Hu B, Gordaninejad F, et al. [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2005, 98(6): 2402-2413.
- [4] Fuchs A, Hu B, Gordaninejad F, et al. [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2006, 100(3): 2464-2479.
- [5] de Vicente J, Lopez-Lopez M T, Gonzalez-Caballero F, et al. [J]. Journal of Rheology, 2003, 47(5): 1093-1109.
- [6] Lopez-Lopez M T, de Vicente J, Gonzalez-Caballero F, et al. [J]. Colloids and Surfaces A-Physicochemical and Engineering Aspects, 2005, 264 (1-3): 75-81.
- [7] Wang X, Gordaninejad F. [J]. Journal of Applied Mechanics-Transactions of the ASME, 2007, 74 (1): 13-22.

Study on the properties of magnetorheological gels

YE Xing-zhu¹, GONG Xing-long¹, JIANG Wan-quan², Yan Chang-qing²

(1. CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, Department of Mechanics and Mechanical Engineering, University of Science and Technology of China (USTC), Hefei 230027, China;

2. Department of Chemistry, USTC, Hefei 230026, China)

Abstract: A new kind of magnetorheological materials - magnetorheological gels (MRGs) is studied in this paper. It holds good stability and excellent magnetorheological effect. The experimental results show that it will be settled completely after 20 min when it is rotated at 2500r/min; its behavior can be described by the plastic H-B model; its shear yield stress increases linearly with the applied magnetic field, it can reach 53.9kPa when the applied magnetic field is 70kA/m.

Key words: magnetorheological gels; settling; shear stress; yield stress