

文章编号:1000-582X(2006)07-0124-04

## 实验研究影响磁流变效应的因素\*

司 鹄,吴小一,李晓红

(重庆大学 资源及环境科学学院,重庆 400030)

**摘 要:**磁流变液是由导磁微粒、载液及添加剂组成的悬浮液,因其独特的磁流变效应,在液压、制动振动、驱动、密封等主动和自适应控制方面具有广阔的应用前景.研究磁流变效应是开发磁流变液、优化磁流变液性能以及开发工程应用的关键.为此,应用实验方法研究了磁场强度、微粒的磁化率、体积百分比浓度、微粒大小、添加剂等对磁流变效应的影响,表示了磁流变效应对各种影响因素的响应特性,并分析讨论了其影响机理,为工程开发和制造磁流变液提供了可靠依据,为磁流变技术的发展提供了理论基础.

**关键词:**磁流变液;磁流变效应;剪切应力;剪切应变率

**中图分类号:** O34

**文献标识码:** A

磁流变液(Magneto-rheological Fluid)作为一种智能材料因其独特的磁流变效应和具有变化迅速、连续、高效率、安全可靠等优点,在制动减振,液压传动,离合器,刹车,密封,驱动装置等主动和自适应控制中具有广阔的应用前景.磁流变液是由流体、可磁化的固体微粒以及高分子添加剂组成的悬浮液.磁流变效应是指磁流变液在外部磁场的作用下,流体的流变性(弹性、塑性、粘性)、磁化性、导电性、传热性,以及其他的机械性质和物理学性质发生显著的变化,这种变化是可逆的、可控的.研究磁流变效应是制造磁流变液和开发工程应用的关键问题<sup>[1]</sup>,也是研究磁流变液的热点问题. Groh<sup>[2]</sup>, Eric<sup>[3]</sup>, Erickson<sup>[4]</sup>等应用物理学、分子物理学从理论上研究了磁流变效应,其模型仅考虑磁场强度和固体粒子的磁化率的影响, X. Tang<sup>[5]</sup>实验研究通过改变结构增强磁流变效应,其研究显示采用一种特殊工艺可以改变磁流变效应.大量的资料表明<sup>[6-7]</sup>,系统全面研究磁流变效应的影响因素是进一步研究磁流变效应的基础.作者从实验方面,系统研究了影响磁流变效应的各种因素,为制造性能良好的磁流变体提供了科学依据,使磁流变技术的应用有可靠的理论基础.

### 1 实验方法

磁流变液由悬浮相、表面活性剂或固态胶体稳定

剂、悬浮介质组成.悬浮相采用系列羰基铁粉和铁合金粉,粒子大小为0.5~20 μm,体积分数为15%~30%.添加剂及预处理剂分别采用磺酸盐、油酸、偶联剂、烷基胺磷酸脂、溴化烷基甲基胺、烷氧基硫代磷酸盐、Tween80, OP-10、聚乙二醇、SiO<sub>2</sub>及其它非离子型添加剂等,添加体积浓度为0.5%~6%.悬浮介质分别采用硅油和烃类油.采用合成方法、球磨的配球量法、基液置换法等方法配制磁流变液.

笔者采用自制的磁流变液的磁流变效应测试装置.该装置采用上、下高度平行的两碟片,保证了磁场在磁流变液测试中的均匀性,同时为了克服磁流变液在边界处发生滑移,使得传递到壁面的剪切应力小于流体中的真实应力,该装置使用了高磁导率的材料特制的两碟片解决剪力传递的问题.在室温下,分别对0.1~0.6 T磁场和剪应变率 $\dot{\gamma}=50\sim400$ 不同条件下的磁流变效应进行测量.

### 2 结果与讨论

#### 2.1 磁场强度

图1是磁流变液在不同磁场强度下剪切应力随剪应变率变化的曲线,从图中可以看出,当加入外部磁场时,剪应变率为零时所对应的剪切应力并不为零,表明要使磁流变液发生流动,其剪切应力必须大于某一值,

\* 收稿日期:2006-02-25

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(50135030);重庆市科学应用基础研究资助项目(8034)

作者简介:司鹄(1964-),女,四川营山人,重庆大学教授,博士,主要从事材料力学行为的研究.

即要达到磁流变液的屈服极限, 同时图中表明了随外加磁场强度的增加, 同一剪应变率所对应的剪切应力也随之增加, 此外, 在相同的磁场强度下, 磁流变液的剪切应力随剪应变率变化不很明显。

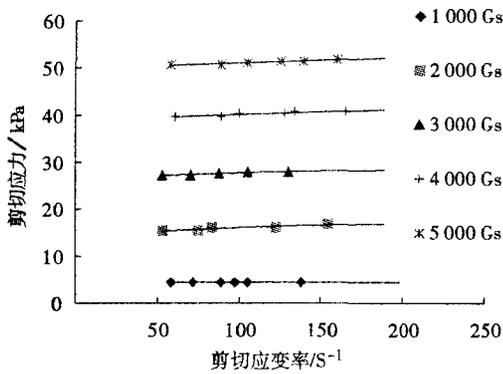


图 1 剪切应力随剪应变率变化的曲线

由于悬浮于基液中的固体磁性粒子在磁场作用下的极化, 使得在基液中作无序状态分布的粒子有序化, 形成粒子链、粒子束, 最后形成某种稳定的结构, 使得磁流变液的黏度增加, 液体变稠, 流动性降低, 液体要恢复流动, 应力必须达到屈服极限, 才能打破这种结构。随着磁场强度的增加, 这种粒子极化后的稳定结构更加牢固和结实, 恢复流动所需的力也相应增大, 因而屈服应力增大。在外加磁场作用下, 在磁流变液中的固体粒子极化形成稳定的网状结构, 是磁流变液变稠、固化以及产生屈服应力现象的主要原因, 也是磁流变效应的主要因素。

图 2 是在剪应变率为  $105/s^{-1}$  时, 3 种不同组分的磁流变液的剪切应力随磁感应强度变化的曲线。从图中可以看出, 3# 试样屈服应力对磁场强度响应特性优于 1#、2# 试样, 3# 试样的智能化性能较好; 曲线呈明显的“S”形, 当磁感应强度大于 3 000 Gs 时, 曲线的斜率随磁感应强度的增加而变小, 剪切应力值最终趋于某一稳定值。实验表明, 当外部磁场强度增加到一定值后, 磁流变液中的磁性介质微粒出现了磁饱和, 从而维系微结构的磁力将不再增加, 表现出剪切应力随磁感应强度的增大而趋于饱和。

图 3 是在不同磁感应强度下的粘度随剪应变率变化的曲线。图中表明, 粘度值不仅受磁场强度的影响, 而且受到剪应变率的影响。随着剪应变率的增加, 粘度减小, 材料表现出剪切稀化效应。同时, 在相同剪应变率下, 粘度随磁场强度的增加而增大, 但当剪应变率达到某一值时, 随着磁场强度的增加粘度无明显变化。

在外加磁场作用下, 在低应变率时 ( $\dot{\gamma} < 400$ ), 磁流变液中微粒极化沿磁场方向成链或束, 随剪应变率

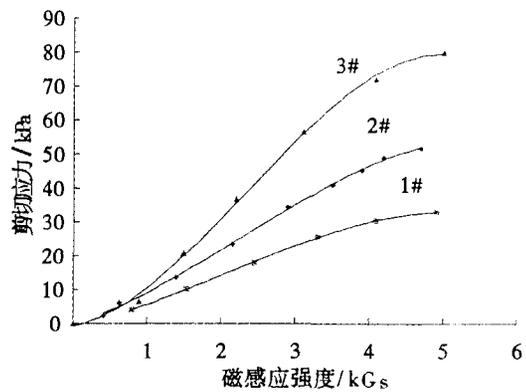


图 2 在剪应变率为  $105/s$  时剪切应力随磁感应强度变化的曲线

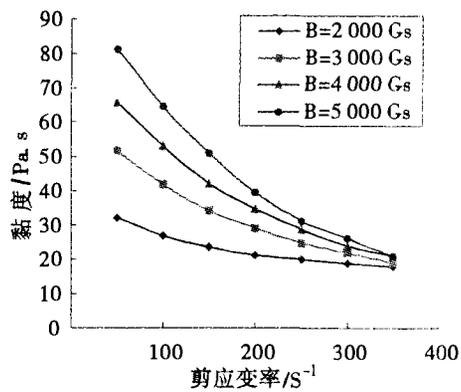


图 3 粘度随剪应变率变化的曲线

$\dot{\gamma}$  增大时, 粒子链或束沿流动方向拉伸、松开, 沿流动方向重新排列, 从而降低了流动阻力, 黏度明显下降。随着剪应变率  $\dot{\gamma}$  继续增加, 特别是在高应变率时 ( $\dot{\gamma} > 400$ ), 粒子重新排列达到一种新的稳定的动态平衡状态, 流动阻力几乎没有变化, 黏度趋于恒定。此时, 磁场强度的变化对黏度几乎没有影响。

### 2.2 介质微粒的磁化率

图 4 是磁化率不同的两种介质微粒组成的磁流变液, 在 3 000 Gs 磁感应强度下, 剪切应力随应变率变化的曲线。图中表明, 在相同磁场强度和剪应变率下, 微粒的磁化强度越高, 磁流变液的磁流变效应越强。

磁流变效应是由于在磁场作用下, 固体粒子和基液中产生了强烈的极化效应, 特别是发生在固体粒子内部和基液接触表面处的极化, 这种极化有极复杂的内容, 除了与外加磁场强度有关外, 还与磁流变体中固体粒子在外加磁场作用下的磁化性能, 亦即粒子的磁导率和磁化率有关。

从微观角度来看, 单一的置于真空的磁性固体粒子, 在磁场作用下形成偶极子, 其偶极矩为:

$$J = \frac{4}{3} \pi r^3 \chi H_0,$$

式中  $r$  为固体粒子的直径,  $\chi$  为固体粒子的磁化率,  $H_0$

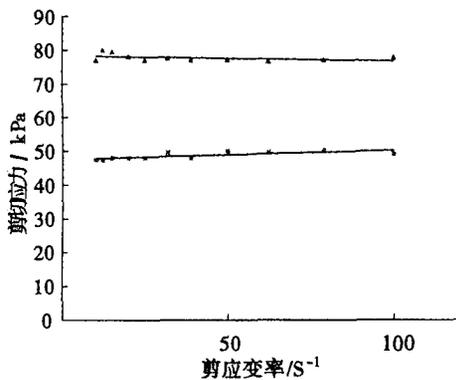


图4 2种不同磷化率的粒子剪切应力随剪切应变率变化的曲线

为外加磁场强度;

磁场中的磁性微粒,单位体积的磁性粒子产生的磁感应偶极矩的大小,即磁化强度为:

$$m = \chi H_0,$$

$$\chi = 4\pi r^3 \frac{\mu_p(H) - 1}{\mu_p(H) + 2},$$

$$\mu_p(H) = 1 + \frac{(\mu_0 - 1) \frac{M_s}{H}}{(\mu_0 - 1) + \frac{M_s}{H}},$$

$$H = AH_0.$$

其中 $\mu_0$ 为固体粒子的真空磁导率, $\mu_p$ 为固体粒子的磁导率, $H$ 为固体粒子局部磁场强度, $A$ 为磁场强度修正系数.因此,磁化能力越强的固体粒子组成的磁流变液,在相同磁场强度下,其磁流变效应越明显,强度越高.

### 2.3 微粒的大小

图5是磁性微粒大小不同的磁流变液,在3000Gs磁感应强度下,剪切应力随剪切应变率变化的曲线.从图中可以看出,随着微粒直径的增加,相同磁场强度和剪切应变率所对应的剪切应力也相应增大.粒子半径 $r$ 越大,两粒子之间的场致磁力就越大,粒子所成链的强度越大,磁流变效应越强;此外,粒子尺寸越大,所要求产生明显磁流变效应的磁场场强越低,即越容易产生明显的磁流变效应.然而,粒子尺寸过大,布朗运动所起的作用减小,粒子在基液中沉淀的趋势增大,容易导致磁流变体出现相分离,影响磁流变体的工作性能,反过来又会影响流体的磁流变性能.当然,粒子尺寸过小,则布朗运动影响大,粒子不易稳定成链,磁流变效应的强度减弱.因此,粒子尺寸既不能过大,也不能过小,应该根据具体的磁流变液选取最优值.

### 2.4 微粒的体积百分率

图6是微粒百分率不同的磁流变液,在3000Gs

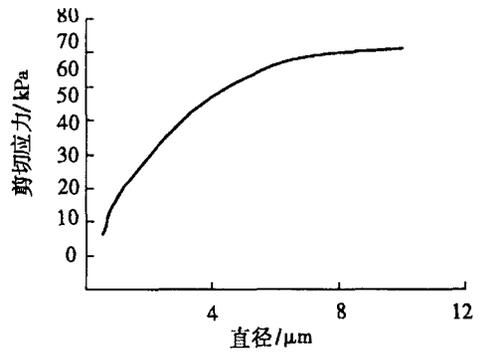


图5 在3kGs下剪切应力随微粒大小变化的曲线

磁感应强度下,剪切应力随剪切应变率变化的曲线.从图中可以看出,随着介质微粒体积百分率的增大,相同磁场强度和剪切应变率所对应的剪切应力也相应增大.体积百分数越大,形成的磁链也多,同时体系的相对磁导率和磁化率就越大,其磁流变效应就越强.当体积百分率过高时,会有一个结构上的突变,即在零场时,出现固化状态.如果作用一个外加磁场,一般不会出现固体粒子重新成链和成网的现象,只是可以强化已有的结构,因此磁流变效应不是很明显.大量的实验表明,体积百分率的佳范围大致在15%~30%之间.

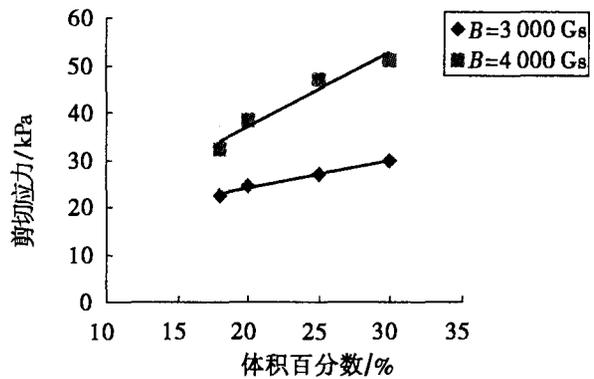


图6 在不同磁感应强度下剪切应力随介质体积百分比变化的曲线

### 2.5 添加剂

同一种基液中加入体积百分数相同的固体微粒,再加入3种不同的添加剂制成3种磁流变液,图7给出在3000Gs时的3种磁流变液的剪切应力随剪切应变率变化的曲线.研究表明,加入不同的添加剂,磁流变液的流变性能将会发生很大改变,因此可以利用加入不同的添加剂达到改变磁流变液性能,增强磁流变效应.添加剂是一种表面活性剂,其主要作用是促进粒子分离,增加磁流变液的悬浮性.不同的添加剂,在粒子表面形成的不同的表层,在外加磁场作用下,粒子表面的极化也会不同,因而磁流变效应不同.

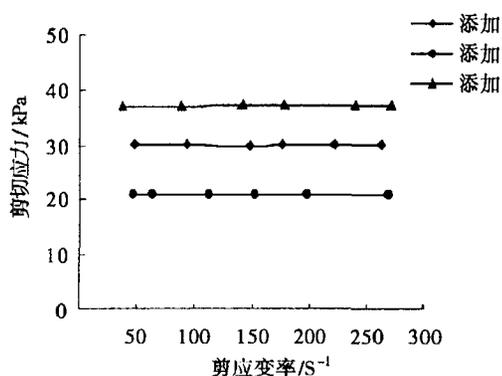


图 7 剪切应力随剪应变率变化的曲线

### 3 结 论

采用实验方法研究了影响磁流变效应 5 种主要因素, 得到磁流变效应取决于外加磁场强度、介质微粒的磁化率、直径大小以及体积百分比浓度、添加剂以及配制工艺等主要因素。当外加磁场强度增加, 磁流变液的应力响应随之增加; 当介质微粒体积百分比增大时应力响应也随之增大; 当磁介质的直径增加应力响应也随之增加。这些皆表明, 磁流变效应随着外加磁场强度的增加、介质微粒的磁化率、体积百分比以及直径的增加而增强, 然而添加剂对磁流变效应的影响是不可忽略的因素。

## Experimental Investigation on Factors for Magnetorheological Effect

SI Hu, WU Xiao-yi, LI Xiao-hong

( College of Resource & Environment Science , Chongqing University, Chongqing 400030, China )

**Abstract:** Magnetorheological ( MR ) fluids are the suspensions consisted of micron size magnetically polarizable particles and carrier liquid as well as some additives. They have broad potential applications such as dampers, brakes, clutches, engine mounts and so on due to their particular magnetorheological effect. This paper experimentally investigates the magnetorheological effect of Magnetorheological ( MR ) fluid. It shows the dependence of magnetorheological effect of MR fluid on the applied magnetic field, the particle susceptibility, the particle volume fraction, the particle size, the additive, and the confecting technology. It describes the response to these factors. The results provide the basis with developing MR fluids and engineering applications.

**Key words:** magnetorheological fluid; magnetorheological effect; shear stress; shear strain rate.

### 参考文献:

- [1] JOLLY M R, BENDER J W, CARLSON J D. Properties and Applications of Commercial Magnetorheological fluids [ Z ]. Proceeding of Smart Structures & Materials, San Diego: California, 1998, 262 - 283.
- [2] GROH B, DIETRICH S. Crystal Structures and Freezing of Dipolar Fluids [ J ]. Physical Review E, 2001, 63 ( 2 ) : 102 - 120.
- [3] ERIC M, FURST, ALICE PGAST. Micromechanics of Magnetorheological Suspensions [ J ]. Phys Rev E, 2000, ( 16 ) : 6 734 - 6 739.
- [4] ERICKSON J S, ARANOVICH G L, DONOHUE M D. A Simple Model for Ordering in Adsorbed Layers [ J ]. Molecular Physics, 2002, 100 : 2 121 - 2 137.
- [5] TANG X, ZHANG X, TAO R. Structure-enhanced Stress of Magnetorheological Fluids [ J ]. J Appl Phys, 2000, 87 ( 5 ) : 2 634 - 2 638.
- [6] ZIPSER L, RICHTER L, LANGE U. Magnetorheologic Fluids for Actuator [ J ]. J Sensors and Actuator A, 2001, 92 : 381 - 325.
- [7] TAKESUE N, ASAOKA H, LIN J, et al. Development and Experiments of Actuator Using MR Fluid [ J ]. IEEE, 2000, 3 : 1 838 - 1 843.

( 编辑 姚 飞 )