

α -Fe 粉体浓悬浮体系的制备及磁流变效应*

江万权^a, 朱春玲^a, 陈祖耀^{**}, 张培强^b

(中国科学技术大学 a. 化学系, b. 力学和机械工程系, 合肥 230026)

摘要: 报道使用价格低廉的还原铁粉制备磁性粒子浓悬浮体系, 对体系磁流变效应进行研究, 并研究了磁性颗粒尺寸和氧化物对悬浮体系力学性质及沉降稳定性的影响。

关键词: 还原铁粉; 磁性粒子浓悬浮体系; 磁流变效应

中图分类号: TF125.8 **文献标识码:** A

1 引言

磁流变液 (Magnetorheological suspension MRS) 是由微米级磁性颗粒均匀分散在特定溶剂中所形成的悬浮体系, 在外加磁场下粘度呈现 2~3 个数量级的变化, 表现上出现类似“液-固”的相变过程。这种磁场下体系流变学性质的急剧变化, 以及所伴随的其它光学、热学和电磁学性质的改变称之为磁流变效应 (Magnetorheological Effect MRE)。由于具备磁流变效应的磁性粒子浓悬浮体系具有机电耦合效应、快速灵敏响应和良好稳定性, MRS 在功能材料研究中得到极大的重视。它在阻尼器、减振器等工程控制器件和大型工程防震抗震及其它领域具有广泛的潜在应用前景^[1-7]。在磁流变液研究中, 磁性材料的制备、选择和修饰改性非常重要。磁性材料应价廉易得, 所制备的磁流变液应具有力学性能高 (在磁场下屈服应力大)、响应快速灵敏、完全可逆以及良好的热稳定性等特点。在磁流变液材料的研究中, 主要使用的是饱和磁化强度较高、结构紧密、堆积密度较大的羰基铁粉。目前主要有两个方面工作: 一是铁磁性材料的混合、合金化和掺杂, 二是复合材料的使用^[8,9]。这两种方法在改善磁流变液力学性能和沉降稳定性方面能够起到很好的作用。我们曾尝试对还原铁粉进行化学修饰, 用 γ 辐照还原方法将纳米 Co 沉积到 Fe 颗粒的表面, 得到纳米粒子修饰的铁粉。使用修饰的 α -Fe 粉体制备的磁流变液剪切应力有较大的提高^[10]。本文报道使用还原铁粉制备磁性粒

子浓悬浮体系, 讨论影响其力学性能和沉降稳定性的因素, 尝试更加便宜、容易获得磁性材料在器件中的应用可能性, 并将此浓悬浮体系应用到减震器中, 可以得到满意的效果。

2 实验部分

2.1 磁性粒子的合成和选择

应用化学合成方法制备出具有不同粒度、形态的铁黄 (FeOOH) 粒子^[11], 粒子的形态和尺寸可以在合成过程中加以控制。所得产物在 400~500°C 脱水后在一定温度下进行还原处理, 得到 0.1~1 μm 的 α -Fe 粉体。市售铁粉经过球磨、筛分处理, 得到颗粒为 1~50 μm 的 α -Fe 粉体, 选取其中合适部分进行浓悬浮体系制备。化学合成和球磨法所获得的 α -Fe 粉的 XRD 图显示所得产物均为纯 α -Fe 相粉体。

2.2 磁性粒子浓悬浮体系的制备

制备磁性粒子浓悬浮体系主要使用球形粒子, 粒度在 0.1~30 μm 之间, 典型样品中磁性颗粒的体积分数 $\varphi \approx 0.2$ 。对磁性粒子表面用适当的表面活性剂进行包裹处理, 以提高颗粒在溶剂中的分散性和稳定性, 再将经化学修饰的磁性颗粒分散到溶剂中, 加入适当的添加剂, 经过充分的研磨、混合, 制备出不同粒度和成分的磁流变液, 进行沉降性能测试和剪切应力的测定。

2.3 力学性能的测定

利用自行设计加工的剪切式磁流变液测试装

* 教育部博士点基金及中国科学技术大学材料力学行为和材料设计实验室资助。 ** 通讯联系人, E-mail: czy@ustc.edu.cn

收稿日期: 2001-08-14; 修回日期: 2001-08-25。

置^[2],测定不同磁场下样品的剪切应力值,分别得到剪切应力对剪切率的变化曲线以及剪切应力对磁场的变化曲线。

2.4 沉降稳定性

将所制备的磁性浓悬浮物质置于粗径圆柱形玻璃管(内径 5 ~ 10 mm)中(选用粗径玻璃管是为了尽量消除毛细现象对沉降的影响),样品经定时观察并按一定时间间隔取样测量其稳定性和沉降情况。

3 结果与讨论

3.1 不同尺寸磁性粒子浓悬浮体系力学性能

对典型样品测试其剪切应力(τ)与剪切率 $\dot{\gamma}$ 的关系,结果表明:对剪切率 $\dot{\gamma}$ 的变化,磁性粒子浓悬浮体系剪切应力 τ 基本保持不变,也就是说,在测试条件下决定磁性粒子浓悬浮体系 τ 值大小的主要因素是磁场强度 B 。图 1 是 α -Fe 磁性粒子浓悬浮体系和同样条件下相同体积分数的羰基铁粉磁流变液剪切应力对剪切率的关系曲线,其中曲线 II 是制备的 α -Fe 磁性粒子浓悬浮体系测量所得,曲线 I 为羰基铁粉 MRS 曲线。由图中可以看出,在相似的磁性颗粒体积分数时,前者的剪切应力要小于后者,这可能是前者粒子的填充密度要小于后者所致。

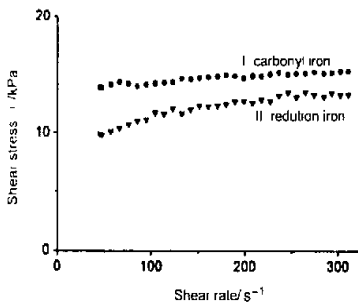


图 1 悬浮体系剪切应力与剪切率关系

Fig. 1 Shear stress vs shear rate of α -Fe suspension

对不同颗粒大小的 α -Fe 磁性粒子制备所得的磁性浓悬浮体系试验其在磁场变化下的剪切应力情况。结果表明:在相同的体积分数($\varphi \approx 0.2$)下,当磁性颗粒粒度较小时,增大 α -Fe 粒子的尺寸能够非常有效地提高磁流变液的力学性能。例如,磁感应强度为 300 mT 时,粒子尺寸从 0.1 μm 增加到 1 μm ,即变化 10 倍时,剪切应力从 2.3 kPa 增大到 8.6 kPa,增加幅度超过 300%。在磁性粒子的尺寸达到一定值以后,颗粒尺寸的增加对剪切应力的影响明显减小。例如,粒子尺寸从 1 μm 增加到 10 μm ,即同样变

化 10 倍时,剪切应力从 8.6 kPa 增大到 10.5 kPa,增加幅度仅有 20%。事实上,粒子尺寸从 5 μm 变化到 30 μm 时,悬浮体系的剪切应力变化已经不很显著。首先这是因为较小粒度的磁性粒子堆积密度较小,在相同体积分数下磁性颗粒的质量分数较小;其次是因为磁性粒子在强磁场下的成链过程中,粒子本身的偶极化作用对力学性能影响很大,而粒度较小的磁铁颗粒其偶极-偶极作用较弱,磁性粒子颗粒粒度增大到一定程度时,磁性粒子本身的偶极化作用增强,因而磁流变液的剪切应力明显提高。但在此基础上继续增大磁性颗粒粒度时,由于磁性粒子本身的偶极化作用已经很强,再增大粒度对提高磁流变液的力学性能作用已经不大。

3.2 氧化物含量对磁流变液力学性能影响

为研究磁性粒子浓悬浮体系中不同组物质对磁流变效应的影响,制备了含不同比例 α -Fe₂O₃ 的 α -Fe 粒子磁性粒子浓悬浮体系,并试验其沉降稳定性和力学性能。零场下和磁感应强度 $B = 300$ mT 时,剪切应力与氧化物加入量关系见图 2。在固体颗粒总体积分数不变时,氧化物的存在将会使磁性粒子浓悬浮体系的剪切应力产生一定的下降,下降程度和氧化物的加入量有关。氧化物加入量(Fe₂O₃ 与 Fe

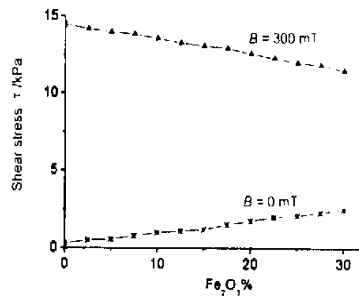


图 2 Fe₂O₃ 的含量对剪切应力影响

Fig. 2 Effect of Fe₂O₃ % on shear stress

加入质量比,下同)小于 5% 时,对体系的剪切应力影响不很明显。在氧化物的比例增大到 15% 时,在零场和较低磁场下,具有相对较大的剪切应力,这是因为氧化物的存在使得相同质量的固体颗粒占有更大的体积空间,因此制备的磁性粒子浓悬浮体系在零场下具有较大的初始粘度。另外,氧化物的比例超过 20% 时,磁性粒子浓悬浮体系 $\tau \sim B$ 曲线斜率较小,不加入氧化物的体系有明显减小,并且在不太大的磁场下就出现磁饱和现象。这是由于氧化物粉体的饱和磁化强度远小于相同粒度大小的金属粉体。总

体而言,在磁性粒子浓悬浮体系中氧化物的存在,会使体系磁饱和强度和屈服强度减小.但在粒子尺寸大小一定时,氧化物比例的上升能使制备的磁性粒子浓悬浮体系沉降稳定性增加.

3.3 沉降稳定性

对磁性粒子浓悬浮体系的沉降稳定性研究表明,磁性粒子的粒度越小,其体系沉降稳定性越好,制备的悬浮体系越稳定.这是因为对于一定大小的球形粒子而言,粒子因重力而沉降的速率取决于磁性颗粒和介质的密度差和介质的粘度.较小的粒子具有相对较小的堆积密度,所制备的磁性粒子浓悬浮体系因重力作用所致的自然下沉及与分散相的分离要比大颗粒磁性粒子所制备的悬浮体系为小.但在一般情况下,不同尺寸磁性颗粒制备的浓悬浮体系,静置一段时间都会出现分层的现象,但只要在使用前加以充分的搅拌,均不影响后续性质的测试.试验同时表明,在磁性粒子浓悬浮体系中加入一定量的氧化物,将使制备的悬浮体系沉降稳定性提高,稳定性提高的程度与氧化物的加入比例呈正相关.因此,在磁性粒子浓悬浮体系中加入适量的氧化物,有助于得到更加稳定的悬浮体系.

4 结论

自磁流变现象发现以来,使用的磁性材料主要是各种尺寸的羰基铁粉,其它类型的磁性物质研究较少.由于羰基铁粉制备过程较复杂,价格相对较高,且不利于制备过程中粒子形态的控制及与其它磁性物质的合金化.还原铁粉价格低廉,且在制备中较容易实现掺杂及合金化,有利于磁性材料的修饰

和改性.本研究工作表明,适当粒度的还原铁粉可以制备出力学性能和稳定性均良好的磁性粒子浓悬浮体系;金属颗粒与氧化物的混合体系有助于提高悬浮体系的沉降稳定性,但使其剪切应力有所减小.

参 考 文 献

- [1] Rabinow J. *AIEE Trans.*, 1948, 67: 1308; U. S. Patent 2575360, 1951
- [2] Carlson J D, Chrzan M J. U. S. Patent 5277282, 1994.
- [3] Lee U, Kim D, Hur N, Jeon D. Proc. of the 7th Int. Conf. on ERF, MRFs, Editor Tao R. Honolulu, Hawaii, July 1999. 674
- [4] Borgmann H. Proceedings of 5th Int. Conf. on New Actuators, Bremen, Germany, June 1996
- [5] Phule P, Ginder J, Jatkar A. *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, 1997, 459: 99
- [6] Ashour O, Rogers C. *J. Intelligent Materials Systems and Structures*, 1996, 7: 123
- [7] Ginder J, Elie L, Davis L. U. S. Patent 5249837, 1996
- [8] Phule P, Jatkar A. Proceedings of the 6th Int. Conf. on ERF, MRF and their Applications, Editor Nakano M, Koyama K. Yonezawa, Japan, July, 1997. 502
- [9] Tanaka M, Hayashi K. *J. Mater. Sci.*, 1990, 25: 987
- [10] Chen Z Y, Tang X, et al. Proc. of the 6th int. Conf. on ERF, MRF and Their Applications., Editor Nakano M, Koyama K. Yonezawa, Japan, July 1997. 22
- [11] Zeng Xuanxing (曾恒兴). *Huaxue Tongbao* (化学通报), 1992, 10: 6
- [12] Zhou Gangyi (周刚毅), Tan Xinlu (唐新鲁), Zhang Peiqiang (张培强). *Mach. Sci. & Tech.* (机械科学与技术), 1998, 17: 101

Preparation of α -Fe Powder Dense Suspensions and its Magnetorheological Effect*

Jiang Wanquan^a, Zhu Chunling^a, Chen Zuyao^{a**}, Zhang Peiqiang^b

^a: Department of Chemistry, ^b: Department of Mechanics & Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

Abstract It is reported that preparation of magnetic particles dense suspensions by cheap reduction iron, and its magnetorheological effect was discussed. The effect of magnetic Fe particles size on mechanic character was investigated by experiments. And the effect of mixing ferric oxide in suspensions on dynamics shear stress and sedimentation stability was studied too.

Key words Reduction iron, Magnetic particles dense suspensions, Magnetorheological effect

* Project supported by Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education and mechanics behavior and design of materials laboratory of University of Science and Technology of China.

** To whom correspondence should be addressed, E-mail: czy@ustc.edu.cn