

超细 α -Fe 粒子对磁性粒子 浓悬浮体系磁流变性能的增强*

江万权^a, 朱春玲^a, 陈祖耀^{a**}, 周刚毅^b, 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: 报道在磁性粒子浓悬浮体系中加入球磨超细 α -Fe 粒子对其磁流变性能的影响, 主要研究其动态屈服应力的变化、沉降稳定性的改变以及超细粒子对相变结构的可能影响。超细 α -Fe 粒子的加入, 能使磁性粒子浓悬浮体系的抗剪切能力有明显变化, 悬浮稳定性增强。对其它几种超细粒子实验结果进行了简要讨论。超细粒子对磁流变性能影响程度取决于加入物与磁性颗粒的重量比例、加入物质的性质以及所加入超细粒子的尺寸。

关键词: 磁性粒子浓悬浮体系; 超细粒子; 增强效应

中图分类号: TF125.8 文献标识码: A

1 引言

磁流变液作为一种新型智能材料, 以其对外加磁场的快速响应和很高的力学性能引起了广泛的兴趣, 同时磁流变液还具有低工作电压、良好的稳定性、高度的抗污染性和可用外加磁场调控性能等特点。应用磁流变液的新型工程实用器件诸如离合器(clutches)、制动闸(brakes)、减振器(shock absorbers)、光学器件高效抛光(optical polishing)、柔性夹具(Flexible fixture)等不仅具备传统器件的全部功能, 同时具有损耗更小、更容易进行自动调节和控制以及响应速度更快的优点, 因而磁流变液的理论和应用是目前引人注目的研究领域^[1-6]。随着磁流变液实用器件的开发和应用, 对磁流变液材料的设计和制备也提出了更高的要求。因此研制具有高力学性能、稳定性良好的新型磁流变液具有重要的意义。同时, 磁流变液的液固“相变”过程及其相变前后的结构变化也具有十分重要的研究价值。为深入探讨影响磁流变液固化机理、微结构及流变学性能的因素, 本文在前人研究的基础上, 从另一个侧面进行工作。在磁性粒子浓悬浮体系中, 加入颗粒尺寸较磁性颗粒小得多的纳米级超细粒子添加物。这种超细粒子添加物能对所加入的磁性粒子浓悬浮体系力学性能产生较大的影响。另外, 添加物质还使制备的磁性粒子浓悬浮体系稳定性显著增强。磁性粒子浓悬浮体系在流变性能和稳定性方面的这种变化, 应该是添加物对体系微结构作用的结果。

2 实验部分

超细 α -Fe 粒子的制备 将一定量微米级 α -Fe 粉体与适量表面活性剂、轻质有机溶剂混

* 国家自然科学基金(No. 19772049)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, Email: czy@ustc.edu.cn

收稿日期: 2001-08-14; 修回日期: 2001-08-25。

合均匀,置于氧化锆球磨机中,选择合适的球/粉体比例进行球磨。球磨时间为48 h到一周,球磨所得样品经X射线衍射和扫描电子显微镜检测其粒度和粒度分布。

磁性粒子浓悬浮液的制备见文献^[7]。制备所用的磁性粒子原料粉体尺寸在3~10 μm ,典型样品的平均粒径为4.2 μm ,超细粒子平均粒径约为50 nm,粒径分布范围20100 nm,在制备过程中加入。为比较起见,样品制备有几种类型的对比试样:即不含超细 $\alpha\text{-Fe}$ 粒子和含有超细 $\alpha\text{-Fe}$ 粒子的磁性粒子浓悬浮液以及仅含纯超细 $\alpha\text{-Fe}$ 粒子悬浮体系。经定时观察并间隔一定时间取样进行分析测量其稳定性和沉降情况。用直接测量方式在自制的碟片旋转式磁流变液测定仪上测定其在磁场下的剪切应力^[8]。

3 结果与讨论

3.1 $\alpha\text{-Fe}$ 粉体的球磨条件

对微米级 $\alpha\text{-Fe}$ 粉体的球磨必须加入表面活性剂和适当的溶剂。因为对于磁性颗粒,球磨粉碎后相互碰撞会导致粒子的团聚,无法得到所需的超细粒子。球磨中加入的表面活性剂量以占粉体量2%~5%为宜。表面活性剂加入量过少不能保证将粒子表面全部包裹,过多将影响球磨效果。适当轻质溶剂的加入能浸润粒子表面从而提高球磨的效率。超细粒子的平均粒径和粒度分布与球磨时间密切相关。对不同球磨时间样品的分析表明,球磨超过48 h粒子尺寸就会显著减小。球磨超过144 h以后,粒子的尺寸与球磨时间无关。图1是球磨96 h的超细 $\alpha\text{-Fe}$ 粉XRD图,可见XRD谱明显宽化,显示类似纳米 $\alpha\text{-Fe}$ 的形状。由谢乐公式计算出平均粒径约为50 nm,这与TEM观测得到的结果一致。

3.2 超细粒子对磁流变性能的影响

实验指出:在磁性粒子浓悬浮体系中加入不同性质的超细粒子对其磁流变性能的影响区别很大;而对于同种超细粒子,其磁流变性能的变化与超细粒子的加入量有关。一般而言,超细粒子的加入均能使磁性粒子浓悬浮体系的动态屈服应力增强,但明显有些超细粒子的增强效果并不十分理想。然而,对于所有研究的超细颗粒或纳米粒子,动态屈服应力的变化均与小粒子的加入量密切相关。我们主要以添加物为超细 $\alpha\text{-Fe}$ 粒子作为研究对象,在 $\alpha\text{-Fe}$ 与磁性颗粒比例(重量比,下同)小于5%时,磁性粒子浓悬浮体系磁流变性能与 $\alpha\text{-Fe}$ 粒子的加入基本无关,剪切应力只是略有增加,添加物质对悬浮体系力学性能的增强很不明显。加入量在5%~10%时,所制备磁性粒子浓悬浮体系的力学性能随加入量不断增强,但增强效应与 $\alpha\text{-Fe}$ 粉体的加入量并不成正比,剪切应力的增加值保持在一定的范围内。加入量在10%~30%时,磁性粒子浓悬浮体系剪切应力有较大幅度的增加,在400 mT以上的磁场下,剪切应力净增加值在30%以上。但加入的超细 $\alpha\text{-Fe}$ 粉体量太大时,悬浮体系初始粘度明显增大。图2给出了加入30%超细 $\alpha\text{-Fe}$ 粉体时,所制备的浓悬浮体系磁流变液剪切应力磁场变化的情况,中间的曲线是未加超细粉体的情况。由图2可见,在 $\alpha\text{-Fe}$ 粉体的加入量达到30%时,零场粘度较大,存在一定的剪切应力。这可能是由于超细粒子团聚引起的结果。

在磁流变液固化的过程中,同一方向磁性颗粒在磁场作用下沿着一定的方向成线状排列,而在垂直磁场方向同一平面的近距离粒子之间也要发生相互作用,形成一定的排列形式。

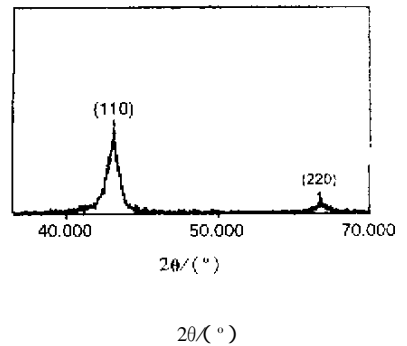


图1 球磨超细 $\alpha\text{-Fe}$ 粉体XRD图

Fig. 1 X-ray diffraction of milling superfine $\alpha\text{-Fe}$

2001 年 10 月

CHINESE JOURNAL OF CHEMICAL PHYSICS

Oct. 2001

这些磁性颗粒在外场下相互作用构成一定的结构形式, 这样固化的磁流变液就形成了外面是线型聚集连续的链, 链与链相互作用形成中间有一定量的溶剂和一定空隙的结构空间。当对固化的磁流变液进行剪切时, 需要加以额外的能量结构才会被破坏。形成的结构越紧密、缺陷越少则其对应的剪切应力越大。在磁流变液中加入少量的 α -Fe 粉体以后, 超顺磁性的小粒子与溶剂一起渗透在磁流变液所形成的结构空隙中, 相当于结构的空隙减少并部分满足微米磁性颗粒由于空间位阻产生的磁场强度要求, 降低了磁流变液的结构缺陷, 因此使磁流变液的力学性能增强。我们对磁场下固化的磁性粒子浓悬浮体系进行的结构观测和研究结果表明: 在沿磁场方向上, 明显可以看出颗粒之间总体呈现链状排列形态, 而且这种链状与所加磁场的强弱有关。其中的微结构和粒子之间的相互作用有待于进一步的研究工作, α -Fe 粒子可能在磁流变液的微结构中起重要作用。

3.3 加入其它超细粒子或纳米物质的影响

加入其它超细粒子或纳米物质到磁性粒子浓悬浮体系时, 得到和 α -Fe 粉体基本一致的结果, 而某些磁性纳米粒子的加入对磁流变效应的增强更加显著。实验结果表明, 在磁性粒子浓悬浮体系中加入本实验室合成的纳米级聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA)、纳米 γ -Fe₂O₃ 以及 Fe₃O₄ 时, 均能产生磁流变性能的增强效应。但在较高磁感应强度下 (大于 400 mT), PMMA 增强效应要明显低于纳米 γ -Fe₂O₃ 和 Fe₃O₄, 而加入量较大时, Fe₃O₄ 的增强效应在三种超细粒子中最佳。需要指出的是, 由于非磁性纳米粒子 PMMA 的密度和强度较小, 容易浮游在悬浮体系的表面, 因而加入这种非磁性粒子的浓悬浮体系均匀性和稳定性都较加入超细 α -Fe 粉体、 γ -Fe₂O₃ 以及 Fe₃O₄ 的样品为差, 而且剪切时易产生纳米颗粒聚集现象。非磁性粒子对磁流变性能的增强较为有限, PMMA 所能增大的最大剪切应力大约在 10% 左右, 增强效应的显著程度低于加入磁性超细粒子的试样。

3.4 纳米物质对沉降稳定性的影响

磁性颗粒由于本身固有磁矩的作用, 具有强烈的聚集倾向。在浓悬浮体系中加入纳米物质所制备的磁流变液, 其沉降稳定性明显增强。纳米物质的加入, 使得它与溶剂共同构成的分散介质的密度增大, 这样分散介质与磁性颗粒的密度差减小, 使两者的密度更加“匹配”, 增大了分散体系的稳定性。此外, 在磁流变液中加入纳米物质以后, 纳米物质本身由于布朗运动能够克服重力的作用, 颗粒均匀分散在溶剂中, 在体系中的不断运动和多次碰撞也消耗磁性颗粒下降时的动能, 对微米尺寸的磁性颗粒聚集和沉降起到阻碍的作用, 并且能够“支撑”下沉的微米磁性颗粒, 因而使悬浮体系的稳定性增加。

4 结 论

在磁性粒子浓悬浮体系中加入适量的超细粒子或纳米级磁性物质, 可以使体系的磁流变性能产生显著变化, 在磁场下的剪切应力明显增加。但这种变化与物质的加入量密切相关。加入超细 α -Fe 粉体小于 5% 时, 基本上对体系磁流变性质没有影响。加入量在 10%~30% 时,

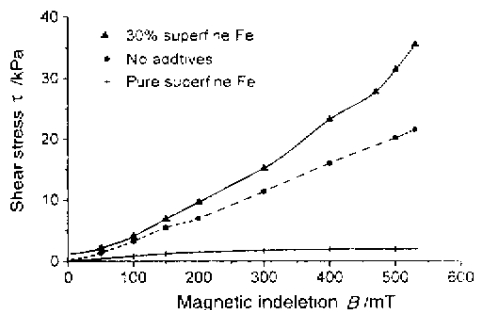


图 2 浓悬浮体系加入 α -Fe 粉体前后剪切应力比较

Fig. 2 Comparison the results between samples containing super fine Fe or not

浓悬浮体系剪切应力净增加值快速增大。加入量为 30% 时,在 400 mT 以上的磁场下剪切应力净增加值在 30% 以上。此外,一定量此类添加物质的加入,可以有效地增加悬浮体系的稳定性。对磁性粒子浓悬浮体系的研究结果,同样适用于能够应用在器件中的实用性磁流变液。因此,在新型高性能磁流变液材料的设计、制备中,适当种类和适量的超细粒子及纳米添加物质可能会使所得到的磁流变液力学性能更加优越,更加均匀,稳定性更好。

参 考 文 献

- [1] Ginder J , Elie L , Davis L . U.S. Patent 5249837 , 1996
- [2] Bolter R , Janocha H , Hellbruck St , Kormann C . Proceedings of 5th Int. Conf. on New Actuators , Bremen , Germany , June 1996 , 26
- [3] Pan Sheng (潘胜) , Wu Jianyao (吴建耀) , Hu Lin (胡林) , Shen Feng (沈峰) , Sun Meng (孙猛) , Zhou Luwei (周鲁卫) . *Func. Mater.* (功能材料) , 1997 , 28 : 264
- [4] Takimoto J , Masubuchi Y , Koyama K . Proc. of the 6th int. conf. on ERF , MRF and their Applications , 1998 , 454
- [5] Fujita T , Yoshimura K , Seki Y , Dodbiba G , Miyazaki T . Proc. of the 7th int. conf. on ERF , MRSs , Editor Tao R . Honolulu , Hawaii , July 1999 , 709
- [6] Wang Z , Fang H , Lin Z , Zhou L . Proc. of the 7th int. conf. on ERF and MRSs , Editor Tao R . Honolulu , Hawaii , July 1999 : 322
- [7] Jiang Wanquan (江万权) , Tang Xinlu (唐新鲁) , Zhang Guochun (张国春) , Jin Yun (金昀) , Zhu Yurui (朱玉瑞) , Chen Zuyao (陈祖耀) , Zhang Peiqiang (张培强) . *Mach. Sci. & Tech.* (机械科学与技术) , 1998 , 17 : 125
- [8] Zhou Gangyi (周刚毅) , Tang Xinlu (唐新鲁) , Zhang Peiqiang (张培强) . *Mach. Sci. & Tech.* (机械科学与技术) , 1998 , 17 : 101

The Enhanced MR Effect of Dense Magnetic Particles Suspensions Consisting of Superfine $\alpha - \text{Fe}$ Particles^{*}

Jiang Wanquan^a , Zhu Chunling^a , Chen Zuyao^{a**} , Zhou Gangyi^b , Zhang Peiqiang^b
 (a . Department of Chemistry , b . Department of Mechanics and Mechanical Engineering ,
 University of Science and Technology of China , Hefei 230026)

Abstract It is reported that magnetorheological (MR) effect was enhanced when superfine $\alpha - \text{Fe}$ particles and other nanosize particles were added to suspensions of dense micron magnetic particles . The effect of adding superfine particles on dynamics shear stress , sedimentation stability and structure of solidified MR of magnetic suspensions were studied . The experiment showed considerable increase of shear stress and much stability of sedimentation when the suspension consisting of superfine particles . The enhanced MR effect by superfine particles dealt with the properties , weight ratio and scale of superfine particles .

Key words Dense micron particles suspension , Superfine particle , MR effect enhanced

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 19772049) and mechanics behavior and design of materials laboratory of University of Science and Technology of China .

** To whom correspondence should be addressed , Email : czy@ustc.edu.cn