

中空 Fe_3O_4 磁性纳米球的合成及其磁流变液应用研究

王如平¹, 李亚坤^{1,*}, 司方方¹, 祁雄威¹, 耿佳宏¹, 王光硕^{1,2,3,*}

(1. 河北工程大学 材料科学与工程学院, 邯郸 056038;

2. 河北工程大学 河北省改性塑料技术创新中心, 邯郸 056038;

3. 河北工程大学 邯郸市新型无机非金属材料重点实验室, 邯郸 056038)

摘要:磁流变液是一种发展迅速具有优异性能的新兴智能材料,具有快速的响应时间、可逆的流变特性、可控的机械性能和广泛的温度范围,被广泛地应用于减震器、离合器、传感器、阻尼器等工程领域。本研究采用一步水热法制备出中空结构 Fe_3O_4 磁性纳米球,然后采用扫描电子显微镜、透射电子显微镜、X-射线衍射和超导量子磁力干涉仪等分析技术对其形貌、结构和磁性能等综合特性进行了深入研究,进而利用制备的中空 Fe_3O_4 磁性纳米球为分散相制备出均匀的磁流变液,最后采用旋转流变仪和直接观察法分别测试了磁流变液的流变性能和沉降稳定性。

关键词: Fe_3O_4 纳米球;中空结构;磁流变液;沉降稳定性

DOI:10.48014/pcms.20220809001

引用格式:王如平,李亚坤,司方方,等. 中空 Fe_3O_4 磁性纳米球的合成及其磁流变液应用研究[J]. 中国材料科学进展,2022,1(2):38-44.

0 引言

磁流变液(MR)属于智能流体的范畴,通常是由软磁颗粒均匀分散于高黏度的硅油、矿物油和离子液体中所形成的一种稳定的悬浮液。无外部磁场作用时,磁流变液通常表现出无序的液态,具有与牛顿流体类似的特性;施加外部磁场作用后,悬浮的磁性颗粒在磁场作用下顺着磁场方向生成牢固的链状或棒状结构,呈现类固体材料的特性^[1-3]。因此,磁流变液的流变性能参数可以通过控制外加磁场实现自由调控,正是由于这些独特的性质使磁流变液在阻尼器、控制器、传感器、高精度抛光和医疗产业等领域表现出诱人的应用前景^[4-7]。

磁流变液的两个核心组分是磁性颗粒和载液,其中磁性颗粒的基本特性直接影响着磁流变液的

流变性能和沉降稳定性。随着纳米科学和无机化学的快速发展,磁性纳米材料作为分散相在磁流变液中的应用研究也趋于广泛。磁流变液中常见的磁性纳米材料的形貌包括纳米球、纳米片和纳米线等。磁流变液中磁性颗粒的选择包括粒径、形貌、结构和磁性能等特征对其综合性能影响很大。研究指出,磁流变液中磁性颗粒一般要求为顺磁性,同时要求具有显著的饱和磁化强度和可忽略不计的剩磁及矫顽力,因此与这些性能相对应的铁酸盐类磁性纳米粒子及其复合材料在磁流变液中具有重要的应用潜力^[8-10]。羰基铁粉具有价格便宜、粒径适中和饱和磁化强度高特点,已经在磁流变液及其器件的制备方面被广泛使用。但需要引起人们注意的是,羰基铁粉本身的密度一般远远大于所使用载液的密度,二者密度的明显不相容往往会引

* 通讯作者 Corresponding author:李亚坤, 2334670952@qq.com;王光硕, wgs8136@163.com

收稿日期:2022-09-25; 录用日期:2022-09-26; 发表日期:2022-09-30

基金项目:河北省大中学生科技创新能力培育专项项目(编号:22E50122D);河北省大学生创新创业训练计划项目(编号:S202210076006);河北工程大学大学生创新创业训练计划项目(编号:X202210076043)

起磁流变液不容忽视的沉降问题,导致磁流变液的流变性能降低和长期使用稳定性变差。与羰基铁粉的密度(约 $7.8\text{g}/\text{cm}^3$)相比,铁酸盐纳米粒子及其复合材料的密度明显降低(约 $4.3\text{g}/\text{cm}^3$),有望获得流变性能适中和沉降稳定性高的磁流变液。Nugroho 等^[11]采用化学共沉淀法制备出不同摩尔比锰取代的铁酸钴磁性纳米粒子,并研究了其在磁流变液中的应用潜力,研究表明锰掺杂铁酸钴磁性纳米粒子的引入显著增大了起始磁流变液的屈服应力。Du 等^[12]采用两步法制备出仿生百香果形貌的 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}$ 复合纳米球,独特的百香果结构提供了复合纳米球高活性表面,有利于磁流变液中载液的渗透和界面润湿。结果表明, $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}$ 纳米球基磁流变液具有良好的沉降稳定性和低的零场黏度。

本研究首先采用一步水热法制备出中空结构 Fe_3O_4 磁性纳米球,采用电子显微技术分析 Fe_3O_4 纳米球的形貌、结构和尺寸,采用 X-射线衍射测试 Fe_3O_4 纳米球的结晶结构,采用超导量子磁力干涉仪分析 Fe_3O_4 纳米球的磁性能;然后以制备的中空 Fe_3O_4 磁性纳米球为分散相,以高黏度二甲基硅油为连续相,制备出对应的中空 Fe_3O_4 纳米球基磁流变液,最后采用旋转流变仪研究磁流变液在不同磁场强度下的流变性能以及基于直接观察法研究磁流变液的沉降稳定性。

1 实验部分

1.1 实验原料

六水合氯化铁(99%,分析纯),乙二胺(99%,分析纯),聚乙烯吡咯烷酮(99%,分析纯),二甲基硅油(99%,分析纯)和乙二醇(98.5%,分析纯)等均从西亚化学科技有限公司购买。实验中涉及的所有试剂都没有经过进一步的提纯和其他处理,直接使用。

1.2 中空 Fe_3O_4 磁性纳米球的合成

本研究采用无模板的溶剂热法一步制备出中空结构 Fe_3O_4 磁性纳米球。具体的实验步骤如下:准确称量 1.08g 六水合氯化铁将其完全溶解于 40mL 乙二醇中,磁力搅拌 30min 至铁盐溶解充分,

紧接着加入 4.0g 的聚乙烯吡咯烷酮,将溶液加热到 60°C ,持续搅拌 30min,停止加热。随后添加 2.5mL 的碱性试剂乙二胺,继续施加搅拌 30min。待所有原材料混合均匀后,将最终形成的反应原料装入密闭的专用合成反应釜,放入鼓风干燥箱, 200°C 下反应 12h。反应结束后,自然降温,利用方块磁铁分离反应沉淀物,去离子水清洗数次, 60°C 干燥 12h,得到中空 Fe_3O_4 磁性纳米球。

1.3 材料表征

采用 S-4800 扫描电子显微镜(日立,日本)对中空 Fe_3O_4 磁性纳米球进行形貌和尺寸观察,磁性样品悬浮于无水乙醇中,机械搅拌后超声分散完全,然后转移到导电胶上进行电镜观察,加速电压设为 20kV;采用 G2 F20 透射电子显微镜(赛默飞世尔,美国)对中空 Fe_3O_4 磁性纳米球的形貌和微观结构进行测试,将均匀分散的磁性颗粒转移至碳支持膜铜网上,加速电压设为 180kV;采用 Ultima IV X-射线衍射仪(理学,日本)对中空 Fe_3O_4 磁性纳米球进行结晶结构测试,以铜靶产生的 K_α 为射线源,设定电压 40kV,电流 35mA,扫描速率 $2.5^\circ/\text{min}$,扫描角度值 $5^\circ\sim 75^\circ$;采用 MPMS3 超导量子磁力干涉仪(量子设计,美国)对中空 Fe_3O_4 磁性纳米球的磁性能进行测试,磁场范围为 $-25000\text{Oe}\sim 25000\text{Oe}$ 。

1.4 磁流变液的制备及其流变性能测试

本研究以制备的中空 Fe_3O_4 磁性纳米球作为分散相,以高黏度二甲基硅油为连续相,将分散相分散于连续相中制备磁流变液。将称量好的中空 Fe_3O_4 磁性纳米球置于二甲基硅油中,玻璃棒搅拌均匀,然后施加超声震荡 5min 形成均匀的磁流变液,磁流变液中的磁性颗粒质量分数定为 25%。在室温下用使用 MCR301 旋转流变仪(安东帕,奥地利)处于静态剪切模式时研究磁流变液在不同磁场作用下(0, 82, 142, 186, 220 和 $250\text{kA}/\text{m}$)的流变性能。采用比色皿直接观察法评估制备的磁流变液的沉降稳定性情况,以计算得到的沉降比和沉降时间的关系表示磁流变液的沉降稳定性。

2 结果与讨论

图 1 为制备的中空 Fe_3O_4 磁性纳米球有代表

性的扫描电镜照片。从拍照的电镜图中我们可以清楚地观察到,制备的磁性颗粒呈现不规则的球形形貌,颗粒表面光滑且有部分棱角存在。需要注意的是,制备的 Fe_3O_4 磁性颗粒观察到一定程度的团聚聚集现象,这主要是由于磁性颗粒本身高的表面能和磁性颗粒之间强的磁吸引作用所致。有意思的是,从破碎颗粒的扫描电镜照片中可以直接观察到中空结构的 Fe_3O_4 磁性纳米球存在。此外,为了深入评价制备的 Fe_3O_4 磁性纳米球的形貌和微观结构,本文进一步借助透射电子显微镜进行分析观察。图 2 显示出代表性的中空 Fe_3O_4 磁性纳米球的透射电镜照片。从图中我们可以清楚地判别制备的样品为典型的中空介孔结构,这和前面提到的扫描电子显微镜的观察结果一致。与固体实心纳米球相比,中空 Fe_3O_4 纳米球具有更低的颗粒密度,可以显著降低磁流变液分散相和连续相之间的密度不匹配,从理论上更有助于改善磁流变液的长期稳定性。此外,我们采用 Nano Measure 软件基于电镜结果直接测量中空 Fe_3O_4 磁性纳米球的颗粒尺寸,其颗粒直径为 280nm 左右。

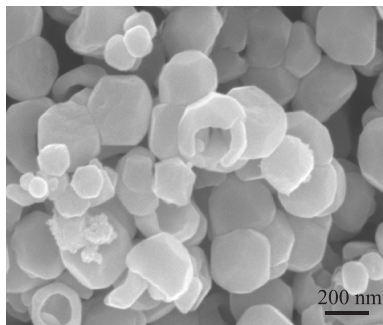


图 1 中空 Fe_3O_4 磁性纳米球的扫描电镜照片

Fig. 1 Scanning electron microscopic images of hollow Fe_3O_4 magnetic nanospheres

为了确定样品的结晶结构,本研究采用 X-射线衍射法对制备的中空 Fe_3O_4 磁性纳米球进行测试表征,结果如图 3 所示。X-射线衍射图中可以直接观察到窄的尖锐特征峰,表明测试样品具有良好的结晶结构和小的结晶尺寸。在衍射角 2θ 为 18.4° 、 30.2° 、 35.7° 、 37.1° 、 43.2° 、 53.4° 、 57.1° 和 62.6° 处出现明显的特征衍射峰,可以很好地归属于尖晶石结构 Fe_3O_4 的(111)、(220)、(311)、(222)、(400)、(422)、(511)和(440)晶面。此外,图 3 中除了

Fe_3O_4 的特征峰之外不含有归属于杂质物相的特征衍射峰,表明面制备的中空 Fe_3O_4 磁性纳米球具有高的纯度。

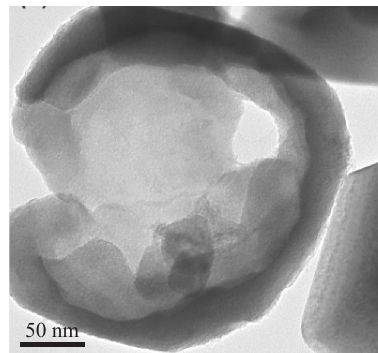


图 2 中空 Fe_3O_4 磁性纳米球的透射电子照片

Fig. 2 Transmission electron images of hollow Fe_3O_4 magnetic nanospheres

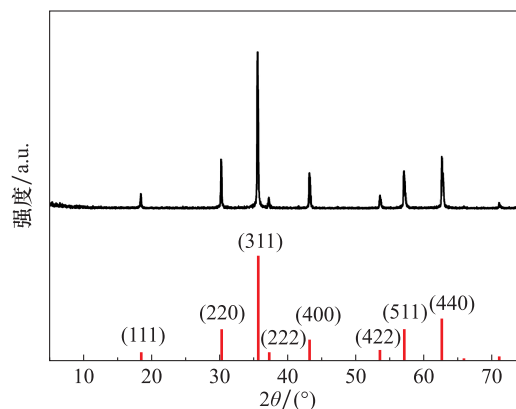


图 3 中空 Fe_3O_4 磁性纳米球的 X-射线衍射图

Fig. 3 X-ray diffraction patterns of hollow Fe_3O_4 magnetic nanospheres

磁流变液中分散相磁性能的强弱直接关系着制备的磁流变液的流变性能的好坏。本研究采用超导量子磁力干涉仪在室温下测量了制备的中空 Fe_3O_4 磁性纳米球的磁性能。图 4 显示了中空 Fe_3O_4 磁性纳米球的室温磁化曲线。可以看到,该磁化曲线遵循朗之万顺磁性理论,呈现典型的 S 形,剩磁和矫顽力几乎为零,表明中空 Fe_3O_4 磁性纳米球呈现出磁性纳米粒子独特的室温超顺磁性。此外,从记录的磁化曲线我们可以计算得到中空 Fe_3O_4 磁性纳米球的饱和磁化强度,其数值确定为 42.4 emu/g 。可以期待,特殊的磁性能使制备的中空 Fe_3O_4 磁性纳米球在磁流变液及其器件方面具

有良好的应用前景。超顺磁性可以确保磁流变液在移除外部磁场后悬浮的磁性颗粒能够迅速地恢复到起始的均匀分散状态,而相对较高的饱和磁化强度能够赋予制备的磁流变液较大的屈服强度。

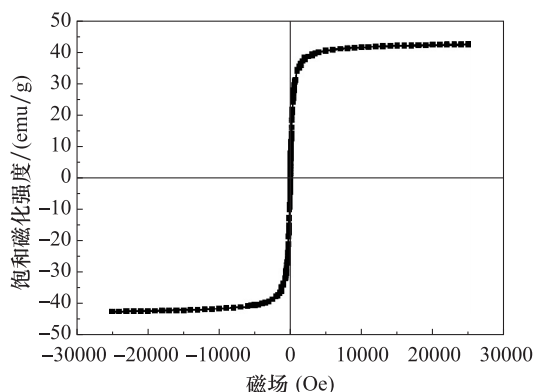


图4 中空 Fe_3O_4 磁性纳米球的室温磁化曲线

Fig. 4 Magnetization curves of hollow Fe_3O_4 magnetic nanospheres at room temperature

为了制备均匀稳定的磁流变液(质量浓度为25%),本研究将制备的中空 Fe_3O_4 磁性纳米球超声分散于高黏度二甲基硅油中。图5显示了制备的中空 Fe_3O_4 纳米球基磁流变液在施加不同强度磁场情况下(0, 82, 142, 186, 220 和 250 kA/m)的静态剪切模式测试结果。在施加的外部磁场为零时,可以观察到中空 Fe_3O_4 纳米球基磁流变液的剪切应力与外部剪切速率基本符合线性函数关系,表现出典型的牛顿流体行为。当施加不同强度的外部磁场时,制备的磁流变液的剪切应力表现出随外部施加磁场强度的不断变强而逐渐增大的趋势,这种依赖关系可归功于磁流变液中的链状结构随着磁场强度的逐渐增大而逐渐变强^[13,14]。对于同样强度的磁场,剪切速率对剪切应力的影响不大,剪切应力的数值大体保持不变,呈现出宾汉非牛顿流体行为。

屈服强度对于磁流变液的评估及其磁流变液器件的设计都是一个重要的流变参数。本研究中基于宾汉塑性流体公式对图5所示的曲线进行数值模拟用以计算磁流变液的动态屈服强度。采用 Origin 软件拟合得到的曲线外延与 Y 轴相交, Y 轴上的截距被认为是磁流变液在相应外部施加磁场下的动态屈服强度。图6显示了制备的中空 Fe_3O_4 纳米球基磁流变液的屈服强度与外部施加磁场强

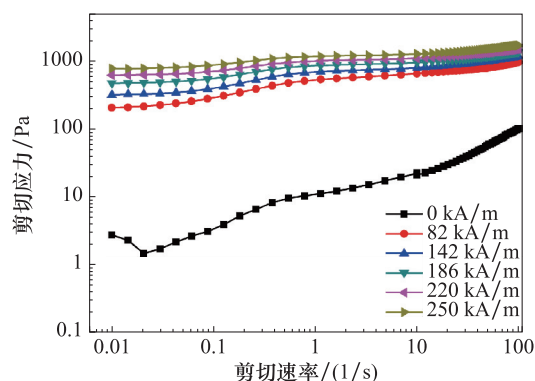


图5 中空 Fe_3O_4 纳米球基磁流变液
剪切应力与剪切速率曲线

Fig. 5 Shear stress versus shear rate curves of hollow Fe_3O_4 nanosphere-based magnetorheology fluid

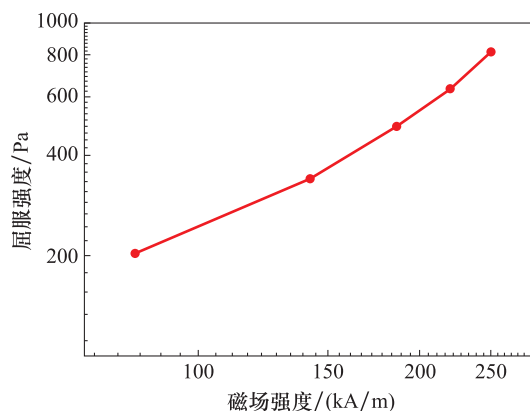


图6 中空 Fe_3O_4 纳米球基磁流变液
屈服强度与磁场强度关系曲线

Fig. 6 Relationship between yield strength versus magnetic field strength curve of hollow Fe_3O_4 nanosphere-based magnetorheological fluid

度的对应关系。从图中可知,磁流变液的动态屈服强度显示出随着外部施加磁场强度的增强而逐渐增大,该现象暗示制备的中空 Fe_3O_4 纳米球基磁流变液具有典型的磁流变效应。

为了考察制备的中空 Fe_3O_4 纳米球基磁流变液流变性能的可逆性,我们通过测试循环开关外部磁场观察磁流变液的瞬时行为进行研究,结果如图7所示。磁场作用于磁流变液的持续时间为30s,磁场关闭的持续时间为15s,测试过程中剪切速率固定为1/s。从图中我们可以清楚地观察到,当对磁流变液施加外部磁场后,磁流变液的剪切应力呈现突然和迅速的增加直到最大值;当撤掉外部磁场

后,磁流变液的剪切应力马上表现出对应的响应并降低至零,这种现象表明磁流变液中链状结构的形成和破坏是瞬时可逆的,可以通过调控外部磁场的开关实现磁流变液流变性能的智能控制^[15]。需要指出的是,本研究揭示的磁流变液流变性能的可逆性也为磁流变液及其器件的长期贮存和工程应用提供了可靠保障。

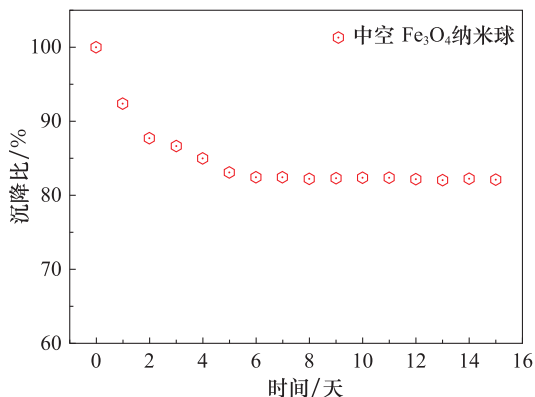


图7 中空 Fe_3O_4 纳米球基磁流变液瞬时响应曲线

Fig. 7 Transient response curve of hollow Fe_3O_4 nanosphere-based magnetorheological fluid

图8为制备的中空 Fe_3O_4 纳米球基磁流变液的沉降比随沉降时间变化的曲线图。内部插图为制备的磁流变液在沉降前后的数码照片。在起始的沉降时间内,磁流变液出现一个较快的沉降,这主要是由于重力的影响。当沉降时间大于15h后,磁流变液的沉降曲线基本维持不变,其最终的沉降比达到85%,表明制备的中空 Fe_3O_4 纳米球基磁流

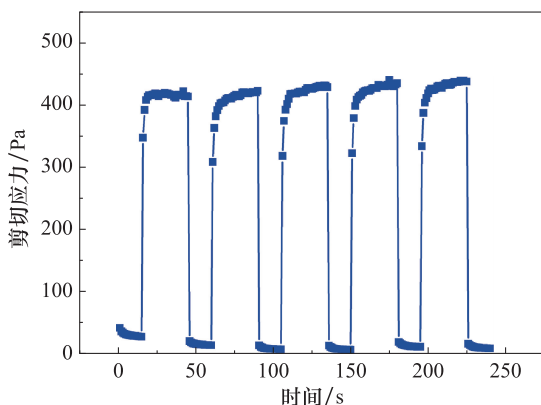


图8 中空 Fe_3O_4 纳米球基磁流变液沉降比与时间曲线图

Fig. 8 sedimentary ratio versus time curve of hollow Fe_3O_4 nanosphere-based magnetorheological fluid

变液具有突出的抗沉降能力。与现有报道的磁流变液相比^[16,17],我们制备的中空 Fe_3O_4 纳米球基磁流变液显示出更高的沉降稳定性,这主要归功于本研究合成的 Fe_3O_4 纳米球具有独特的中空结构。一方面,中空结构与固体实心结构相比具有更低的密度,可以有效地降低磁流变液载液和分散颗粒之间的密度不匹配,造就了中空 Fe_3O_4 纳米球基磁流变液突出的沉降稳定性;另一方面,中空结构的 Fe_3O_4 纳米球类似一个个微小的囊泡,可以在磁流变液的载液中很好的漂浮,也从另一方面为磁流变液沉降稳定性的提升起到积极作用。

3 结论

本研究报道了一种新型中空 Fe_3O_4 纳米球基磁流变液的制备及性能研究。结果表明,中空 Fe_3O_4 纳米球的构建可以通过简单的一步溶解热法实现,不需要复杂的程序和额外的模板。制备的中空 Fe_3O_4 纳米球具有均匀的颗粒尺寸、高的饱和磁化强度和独特的超顺磁性,使其在高性能磁流变液方面具有良好的应用潜力。流变实验表明,本研究发展的中空 Fe_3O_4 纳米球基磁流变液具有典型的场致增强的流变性能和显著的沉降稳定性,为磁流变液在工程领域的长期贮存和实际使用提供了有效途径。

利益冲突:作者声明无利益冲突。

参考文献(References)

- [1] 马良,肖萍,王任胜,等. 磁流变液中磁性颗粒成链与团聚的临界特征分析[J]. 东北大学学报, 2018, 39(3): 383-388.
<https://doi.org/10.12068/j.issn.1005-3026.2018.03.016>
- [2] Zhao P H, Li X G, Tong Y, et al. Effect of the interface between magnetic particles and carrier liquids on magnetorheological properties and sedimentation of magnetorheological fluids: A molecular dynamics simulation and experimental insights[J]. Journal of Molecular Liquids, 2021, 342: 117377.
<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.117377>
- [3] 陈维清,杜成斌,万发学. 表面活性剂与触变剂对磁流变液沉降稳定性的影响[J]. 磁性材料及器件, 2010, 41

- (2):55-57.
<https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-3830.2010.02.013>
- [4] Moghadam M G E, Shahmardan M M, Norouzi M. Dissipative particle dynamics modeling of a mini-MR damper focus on magnetic fluid[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2019, 283: 736-747.
<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.03.131>
- [5] Joko U Sutrisno, Purwanto A, Mazlan S A. Recent progress on magnetorheological solids: Materials, fabrication, testing, and applications[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2015, 17(5): 563-597.
<https://doi.org/10.1002/adem.201400258>
- [6] Do X P, Choi S B. High loaded mounts for vibration control using magnetorheological fluids: Review of design configuration [J]. *Shock and Vibration*, 2015, 2015: 915859.
<http://dx.doi.org/10.1155/2015/915859>
- [7] Hu T, Xuan S H, Ding L, et al. Liquid metal circuit based magnetoresistive strain sensor with discriminating magnetic and mechanical sensitivity[J]. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 2020, 314: 128095.
<https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.128095>
- [8] Dong Y Z, Esmaeilnezhad E, Choi H J. Core-shell structured magnetite-poly(diphenylamine) microspheres and their tunable dual response under magnetic and electric fields[J]. *Langmuir*, 2021, 37: 2298-2311.
<https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.0c02951>
- [9] Ruan X H, Pei L, Xuan S H, et al. The rheological responds of the superparamagnetic fluid based on Fe_3O_4 hollow nanospheres[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2017, 429: 1-10.
<https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.01.003>
- [10] Wang G S, Zhao D X, Li N N, et al. Facile synthesis of hierarchically structured flower-like Fe_3O_4 microspheres for high-performance magnetorheological fluids [J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2019, 79: 217-225.
<https://doi.org/10.1016/j.jiec.2019.06.040>
- [11] Nugroho K C, Ubaidillah B, Purnama, Mas'udi A, et al. The effect of $\text{Mn}_x\text{Co}_{(1-x)}\text{Fe}_2\text{O}_4$ with $x = 0, 0.25$ and 0.5 as nanoparticles additives in magnetorheological fluid [J]. *Smart Materials and Structures*, 2020, 29(11): 114004.
<https://doi.org/10.1088/1361-665X/abb354>
- [12] Du Z W, Qiu Y, Niu T C, et al. Bio-Inspired passion fruit-like Fe_3O_4 @C nanospheres enabling high-stability magnetorheological performances[J]. *Langmuir*, 2020, 36(26): 7706-7714.
<https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.0c00301>
- [13] 朱绪力, 孙慧敏, 刘南南, 等. 不同体积分数磁流变液对其剪切特性的影响[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(14): 183-186.
<https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-1815.2019.14.026>
- [14] Kim M J, Han W J, Kim Y H, et al. Effect of a hard magnetic particle additive on rheological characteristics of microspherical carbonyl iron-based magnetorheological fluid[J]. *Colloids and Surfaces, A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2016, 502: 812-820.
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2016.07.070>
- [15] 胡国良, 吴礼繁. 磁流变制动器结构设计研究现状分析[J]. *华东交通大学学报*, 2020, 37(5): 1-8.
<https://doi.org/10.16749/j.cnki.jecjtu.2020.05.001>
- [16] Chuah W H, Zhang W L, Choi H J, et al. Magnetorheology of core-shell structured carbonyl iron/polystyrene foam microparticles suspension with enhanced stability [J]. *Macromolecules*, 2015, 48(19): 7311-7319.
<https://doi.org/10.1021/acs.macromol.5b01430>
- [17] Tong Y, Dong X F, Qi M. High performance magnetorheological fluids with flower-like cobalt particles[J]. *Smart Materials and Structures*, 2017, 26: 025023.
<https://doi.org/10.1088/1361-665X/aa57cc>

Synthesis of Hollow Fe_3O_4 Magnetic Nanospheres and Their Application in Magnetorheological Fluids

WANG Ruping¹, LI Yakun, SI Fangfang¹, QI Xiongwei¹,
GENG Jiahong¹, WANG Guangshuo^{1,2,3,*}

(1. School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. Technology Innovation Center of Modified Plastics of Hebei Province, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 3. Key Laboratory of New Inorganic Nonmetallic Composite of Handan, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: Magnetorheological fluid (MRF) is a rapidly developing emerging intelligent material with excellent properties, featuring fast response time, reversible rheological properties, controllable mechanical properties and a wide range of operating temperature. It is widely used in engineering fields such as shock absorbers, clutches, sensors and dampers. In this paper, hollow structured Fe_3O_4 magnetic nanospheres were synthesized by using a facile one-step hydrothermal method, and then their comprehensive properties such as morphology, structure and magnetic properties were thoroughly characterized by using analytical techniques such as scanning electron microscope, transmission electron microscope, X-ray diffraction and superconducting quantum magnetic interferometry, and then, a homogeneous magnetorheological fluid was prepared by using the prepared hollow Fe_3O_4 magnetic nanospheres as the dispersed phase, and finally the rheological properties and sedimentary stability of magnetorheological fluid were tested by rotational rheometer and direct observation method respectively.

Keywords: Fe_3O_4 nanospheres; hollow structure; magnetorheological fluid; sedimentary stability

DOI: 10. 48014/ pcms. 20220809001

Citation: WANG Ruping, LI Yakun, SI Fangfang, et al. Synthesis of hollow Fe_3O_4 magnetic nanospheres and their application in magnetorheological fluids[J]. Progress in Chinese Materials Sciences, 2022, 1(2): 38-44.

Copyright © 2022 by author(s) and Science Footprint Press Co., Limited. This article is open accessed under the CC-BY License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

