

磁性液体纳米磁性颗粒磁场诱导链状结构研究

李艳琴^{1,2}, 部德才^{1,2}, 李学慧²

(1. 大连理工大学 物理与光电工程学院, 大连 116024; 2. 大连大学 物理科学与技术学院, 大连 116622)

摘 要: 研究了磁性液体在有、无外加磁场作用时磁性液体中纳米磁性颗粒的微观排列结构, 发现无外加磁场作用时磁性颗粒随机均匀分布在载液中, 有外加均匀磁场作用时, 磁性颗粒沿磁场方向排列成均匀链状结构。当外加均匀磁场强度为 11.1 kA/m, TEM 照片清晰显示磁性颗粒排列成一条链状结构, 随着外加均匀磁场强度逐渐增强到 28.6 kA/m, 更多磁性颗粒沿磁场方向紧密排列成链状结构。在外加梯度磁场作用下, 铁芯中心处磁场强度为 28.7 kA/m 时, 大量磁性颗粒聚集于线圈中心轴附近形成复杂链状团簇结构; 沿 r 轴方向磁场强度较弱的地方, 较少磁性颗粒排列成链状结构。当磁场梯度从 1.73 kA/m² 逐渐增加到 5.11 kA/m² 时, 磁场梯度轴线上的磁性颗粒团簇结构由稀疏逐渐变成为密集。磁场诱导磁性颗粒链状排列结构的研究对磁性液体在机械工程、生物工程、热力工程等领域的应用有重要意义。

关 键 词: 磁性液体; 透射电子显微镜; 链状结构; 磁偶极子

中图分类号: TM271 文献标识码: A

Magnetic Field Induced Chain Alignment of Ferroparticles in Magnetic Fluid

LI Yan-Qin^{1,2}, BU De-Cai^{1,2}, LI Xue-Hui²

(1. School of Physics and Optoelectronic Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. College of Physical Science and Technology, Dalian University, Dalian 116622, China)

Abstract: Chain alignment of suspended-ferroparticles in a carrier fluid exposed to the external magnetic field was investigated theoretically and experimentally. The results show that without the external magnetic field the ferroparticles were randomly distributed and when exposed to uniform magnetic field the turned out to be a chained-alignment pattern along the external magnetic field orientation at intensity of 11.1 kA/m. With the external uniform magnetic field intensity up to 28.6 kA/m, more ferroparticles closely aggregated to a chained-alignment pattern along the magnetic field direction. When the magnetic field intensity reached 28.7 kA/m in the gradient magnetic field, a large number of ferroparticles gathered around the coils and formed complex clusters, while a small number of ferroparticles demonstrated a chain-alignment pattern along r direction with weaker magnetic field intensity. When the magnetic field gradient was gradually increasing from 1.73 kA/m² to 5.11 kA/m², the cluster pattern of ferroparticles turned out to be dense along the axis. This research may enhance the applications of magnetic fluid in the fields of mechanical engineering, bioengineering and thermodynamic engineering.

Key words: magnetic fluid; transmission electron microscopy; chained-alignment; magnetic dipole

磁性液体是由包覆表面活性剂的纳米磁性颗粒 分散在载液中形成的一种超顺磁性的固液两相胶体

收稿日期: 2012-09-10; 收到修改稿日期: 2012-12-30

基金项目: 国家自然科学基金(51077006, 50677005) National Natural Science Foundation of China(51077006, 50677005)

作者简介: 李艳琴(1979-), 女, 博士研究生. E-mail: liyanqin_dlu@126.com

通讯作者: 李学慧, 教授. E-mail: lxh49dlu@163.com

溶液。处于磁场中的磁性液体既具有固体材料的磁性,又具有液体的流动性,是一种性能独特的软磁智能材料^[1-2],已广泛应用于润滑、密封、研磨、分离、生物医药等领域^[3-7]。无外加磁场作用时,磁性颗粒在载液中随机均匀分布。当外加磁场作用于磁性液体时,磁性颗粒沿磁场方向呈准直线链状排列,材料结构的改变影响了磁性液体的内禀性能和流动性能,导致材料性能发生根本性变化,如磁粘滞效应^[8]、磁热效应^[9]、磁光效应^[10]等。因此,有效掌握外加磁场作用下磁性颗粒的微观排列结构对磁性液体在机械、生物和热力工程等领域的应用有重要意义。已有研究证明磁性液体的链状结构改变了磁性液体的输运性质^[11]。目前关于外加磁场作用下磁性颗粒链状排列结构的理论研究已有大量报道^[12-15]。

Hong^[16]和 Horng^[17]等使用光学显微镜研究了外加磁场作用下磁性液体薄膜的排列结构,由于受实验手段限制,对于磁场诱导下磁性颗粒的微观排列情况以及外加磁场对磁性颗粒排列的理论分析尚未见报道。本研究采用透射电子显微镜(TEM)作为表征手段,研究了平行磁场作用下磁性颗粒的准直线链状结构,理论上诠释了磁场对链状结构的影响机理。该研究有望对磁性液体的输运性质及磁粘滞性质等提供实验和理论指导。

1 实验

采用等离子体法制备^[18-19]磁性液体。将 7#白油和 PBSI-941 表面活性剂按 5.5:1.0 配制,常压下加温进行超声波分散,使二者充分混合,倒入反应腔;通 Ar 置换反应腔内空气,使用交变高频脉冲电压对 NH_3 和 Ar 放电产生氮的活性粒子;按比例将 $\text{Fe}(\text{CO})_5$ 注入反应腔,加温分解 $\text{Fe}(\text{CO})_5$,生成的铁粒子和氮的活性粒子重新组合,控制好反应温度和时间,合成氮化铁磁性液体。透射电子显微镜样品的制备装置示意图如图 1 所示。将 200 μL 磁性液体分散于 1000 μL 无水乙醇中,超声振荡该混合液约 15 min,使磁性液体均匀分散于无水乙醇中,形成一待测样品分散液。根据研究需要,利用转动手轮调节铜网位置,确保铜网表面平行磁场方向并置于需要测试的磁场位置。将铜网浸入分散液中静置 1 min,快速拉起铜网,磁性颗粒的链状结构被铜网捞起。将铜网置于封口膜上干燥,至此磁场中磁性液体的透射电子显微镜测试样品制备完毕^[20]。使用 JEM-2000EX 透射电子显微镜观察均匀磁场和梯度磁场中磁性颗粒的排列情况。将铜网表面平行磁场方向水平放置于线圈 11 产生的均匀磁场中心位置,

观察均匀磁场对磁性颗粒排列结构的影响;将铜网表面平行磁场方向竖直放置于线圈 19 产生的梯度磁场的铁芯中心位置,观察磁场强度及磁场梯度对磁性颗粒排列结构的影响。以铜网中心为坐标原点,建立如图所示的柱坐标系。

2 实验结果与讨论

2.1 无外加磁场时磁性颗粒的排列结构

图 2 为无外加磁场作用时磁性颗粒的 TEM 照片,照片中黑色的准圆球为磁性颗粒,表面包覆一层单分子层表面活性剂,防止磁性颗粒团簇聚集。

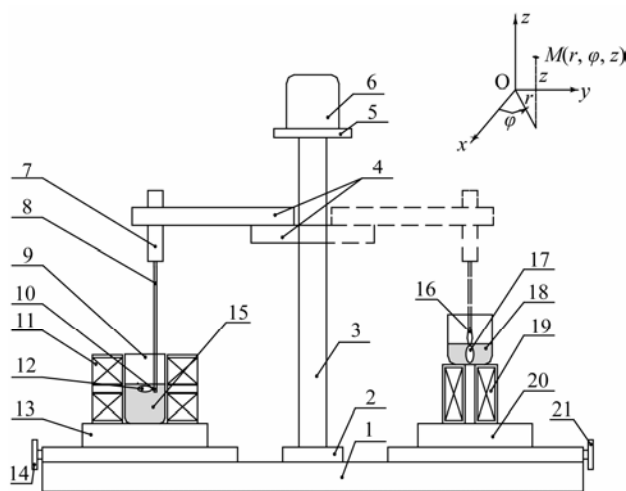


图 1 透射电子显微镜样品制备装置示意图

Fig. 1 The apparatus of samples preparing for TEM

1. lamp stand 2. fixed platform 3. guide pillar 4. collection plate 5. supporting base 6. step motor 7. collection pillar 8. gripper 9. bottle 10/16. tweezers 11/19 magnetic coil 12/17. copper grid 13/20. movement platform 14/21. hand wheel 15/18. dispersion solution

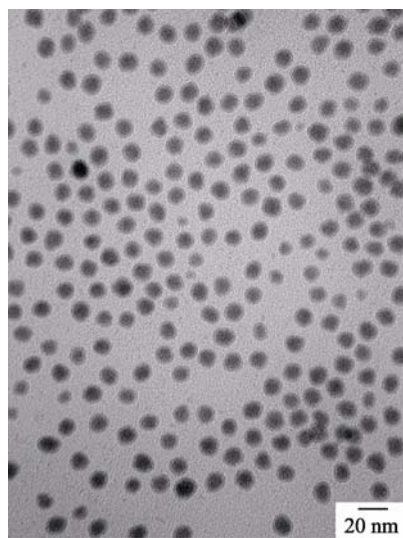


图 2 无外加磁场作用时磁性颗粒 TEM 照片

Fig. 2 TEM image of ferroparticles without external magnetic field

TEM 照片显示无外加磁场作用时磁性颗粒随机均匀分布, 由表面活性剂分子层引起的排斥力足以克服磁性颗粒之间的磁吸引力, 磁性液体不会出现凝聚现象, 实验结果与理论研究一致^[21-22]。统计平均法分析了 TEM 照片磁性颗粒粒径分布情况, 由图 3 可知磁性颗粒的粒径范围是 9~15 nm。粒径尺寸小于单畴临界尺寸, 磁性颗粒呈单畴结构, 因此磁性颗粒可视为磁偶极子, 磁偶极子的磁矩方向在由磁晶各向异性决定的易磁化方向上, 各磁偶极子的易磁化方向不同, 磁矩方向也不同, 因此无外加磁场作用时, 各磁偶极子的磁矩方向各异、磁矩互相抵消, 磁性液体不显示宏观磁性。

2.2 平行磁场中磁性颗粒的排列结构

将铜网表面平行磁场方向水平放置于线圈 11 产生的均匀磁场中心位置, 分别对线圈施加 0.2、0.6 和 1.0 A 电流, 磁场强度分别为 11.1、19.9、28.6 kA/m。从图 4 的 TEM 照片中清晰观察到了均匀磁场中磁性颗粒沿磁场方向的链状排列结构, 磁性颗粒之间的间隙是磁吸引力和表面活性剂分子层引起的排斥力共同作用的结果。而 Horng 等^[17]使用光学显微镜仅观察到了磁性液体薄膜沿磁场方向的线性排列, 未能观察到磁性颗粒的链状排列结构。本研究中当磁场强度为 11.1 kA/m 时, 仅观察到一条磁性颗粒沿磁场方向的链状结构; 磁场强度为 19.9 kA/m 时, 较多磁性颗粒沿磁场方向排列成链状结构; 当磁场强度增强到 28.6 kA/m 时, 磁性颗粒沿磁场方向紧密排列成一条长磁链^[21,23]。图 4(c)中还观察到部分磁性颗粒出现了重叠现象, 这可能是由于磁场较强造成。

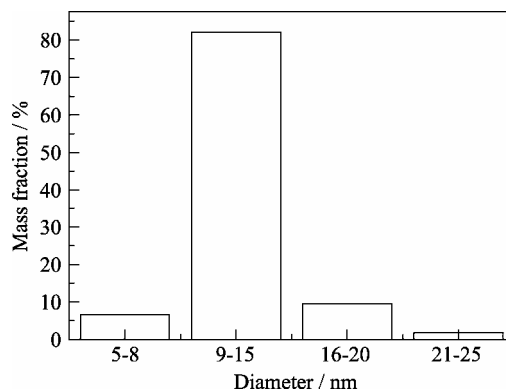


图 3 磁性颗粒粒径柱状分布图

Fig. 3 Histogram of ferroparticles diameter distribution

将铜网表面平行磁场方向竖直放置于线圈 19 产生的梯度磁场的铁芯中心位置, 分别对线圈施加 0.2、0.6 和 1.0 A 电流, 铁芯中心处的磁场强度分别为 9.6、20.7、28.7 kA/m。从图 5 的 TEM 照片观察到梯度磁场中球状的磁性颗粒沿磁场方向排列成链状结构, 随着线圈磁场强度逐渐增强, 较多磁性颗粒沿磁场方向聚集和排列; 磁场强度最强的线圈中心轴聚集了大量磁性颗粒, 形成了复杂的链状团簇结构。图 5(b)和(c)中还显示, 沿 r 轴方向磁场强度较弱的地方, 较少磁性颗粒排列成链状结构。仔细观察图 5(c)中线圈中心轴上形成的复杂链状团簇结构发现, 从复杂链状团簇结构的边缘到中心, 磁性颗粒由稀疏结构逐渐变成密集结构。

比较图 4(c)和图 5(c)发现, 28.6 kA/m 的均匀磁场中仅观察到磁性颗粒的均匀链状结构; 而铁芯中心磁场强度为 28.7 kA/m 的梯度磁场中, 观察到了磁性颗粒的复杂链状团簇结构。在 $0 < r < 0.15$ cm 范围内, 磁

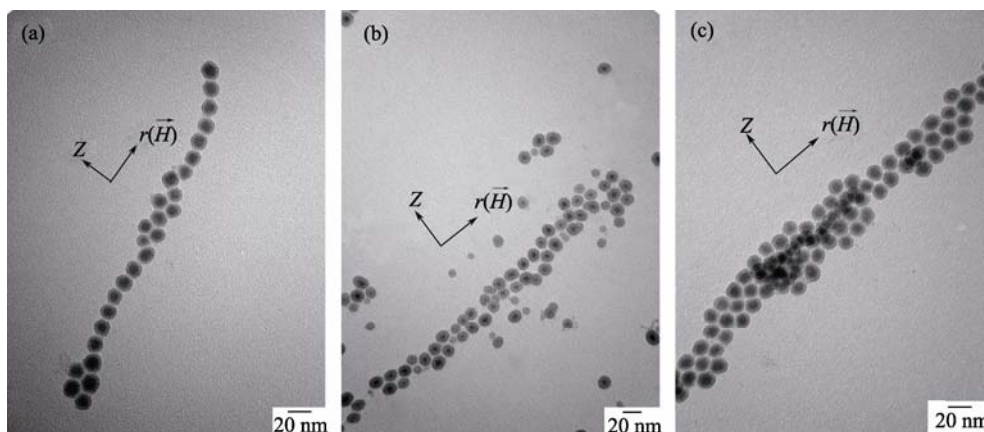


图 4 均匀磁场中磁性颗粒 TEM 照片

Fig. 4 TEM images of ferroparticles exposed to uniform magnetic field at 11.1 (a), 19.9 (b), 28.6 (c) kA/m

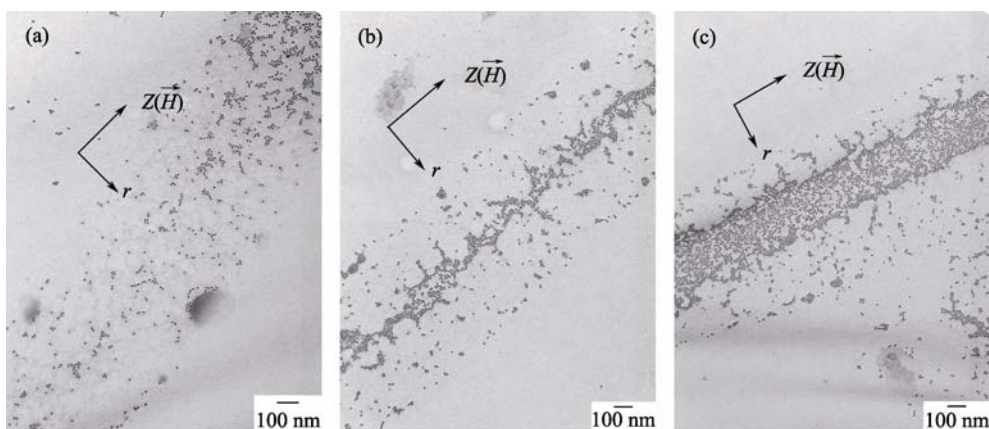


图 5 梯度磁场中磁性颗粒 TEM 照片

Fig. 5 TEM images of ferroparticles exposed to gradient magnetic field at 9.6 (a), 20.7 (b), 28.7 (c) kA/m in the center of coils

场梯度从 1.73 kA/m^2 逐渐增加到 5.11 kA/m^2 时, 磁场梯度轴线上的磁性颗粒团簇结构由稀疏逐渐变为密集。该结构是磁场强度和磁场梯度共同影响的结果。

2.3 磁性颗粒准直线链状结构理论分析

磁性液体中磁性颗粒所受的作用势能主要有: 磁性颗粒之间的磁吸引势能、由表面活性剂分子层引起的排斥势能和外加磁场的作用势能。磁性液体中磁性颗粒呈单畴结构^[24], 每个磁性颗粒是一个磁偶极子, 磁性液体可视为众多磁偶极子的集合。两个磁偶极子之间的磁吸引势能 u_{ij}^m 、由表面活性剂分子层引起的排斥势能 u_{ij}^r 和外加磁场的作用势能 u_i^h 分别为^[21]:

$$u_{ij}^m = \frac{\mu_0}{4\pi r_{ij}^3} \{ \vec{m}_i \cdot \vec{m}_j - 3(\vec{m}_i \cdot \vec{r}_{ij})(\vec{m}_j \cdot \vec{r}_{ij}) \} \quad (1)$$

$$u_{ij}^r = \frac{\pi d_0^2 \xi}{2} \left\{ 2 - \frac{2r_{ij}}{\delta} \ln \left(\frac{d}{r_{ij}} \right) - \frac{r_{ij} - d_0}{\delta} \right\} \quad (2)$$

$$u_i^h = -\mu_0 \vec{m}_i \cdot \vec{H} \quad (3)$$

式中, 下标 i 和 j 表示粒子的标号; μ_0 为真空磁导率; r_{ij} 为磁性颗粒间距离; \vec{m}_i 为磁偶极子的固有磁矩; d_0 为磁性颗粒直径, δ 为表面活性剂分子层厚度, $d = d_0 + 2\delta$; ξ 为磁性颗粒单位面积上表面活性剂分子数; \vec{H} 为外加磁场。

由(1)式可知, 当磁偶极子的磁矩沿外加磁场方向排列时, 磁偶极子之间的磁吸引势能最大, 两个磁偶极子沿外加磁场方向形成二聚体; 随着外加磁场强度增强, 当第三个磁偶极子与二聚体作用时最稳定的结构是沿磁场方向形成链状排列^[25]。在 $d_0 \leq r_{ij} \leq d$ 的表面活性剂分子层引起的排斥势能作用范围内, 该排斥势能也影响磁性颗粒的排列结

构, 磁性颗粒之间的间隙就是磁吸引力和排斥力共同作用的结果。李强等^[21]的研究结果表明, 外加磁场强度较弱时, 磁偶极子之间的磁吸引势能大于外加磁场作用势能, 磁吸引势能占主导地位, 磁性液体中的大部分磁性颗粒仍处于随机分布状态; 随着外加磁场强度增强, 外加磁场作用势能占主导地位, 大量磁性颗粒沿外加磁场方向形成链状结构。理论分析与均匀磁场中 TEM 观察结果一致, 外加磁场强度较弱时, 少量磁性颗粒沿磁场方向排列成链状结构; 随着外加磁场强度增强, 较多磁性颗粒沿磁场方向形成紧密排列的长磁链。

将外加磁场作用势能 u_i^h 对位置矢量求导数, 可得外加磁场对磁偶极子的作用力 \vec{F}_i^h 为:

$$\vec{F}_i^h = \mu_0 (\vec{m}_i \cdot \nabla) \vec{H} \quad (4)$$

磁偶极子的磁矩可表示为:

$$\vec{m}_i = m_{iz} \vec{e}_z + m_{ir} \vec{e}_r \quad (5)$$

考虑外加磁场满足柱对称 $H_\phi = 0$, 轴线附近的磁场用柱坐标表示为:

$$\vec{H}(z, r, \phi) = \vec{H}(z, r) = H_z \vec{e}_z + H_r \vec{e}_r \quad (6)$$

式中, \vec{e}_z 和 \vec{e}_r 为柱坐标的单位矢量。

将铜网表面平行磁场方向竖直放置于线圈 19 产生的梯度磁场的铁芯中心位置, 此时外加磁场对磁偶极子的切向力可表示为 $F_{iz} = \mu_0 m_{iz} \frac{\partial H_z}{\partial z}$ 。在 0.3 cm

铜网直径范围内, H_z 近似为常数, $\frac{\partial H_z}{\partial z}$ 趋于零, 沿 z 轴方向磁性颗粒均匀排列成链状结构; 随着磁场强度增强, 各磁偶极子的磁矩方向转向磁场方向, 磁吸引力逐渐增大, 磁性颗粒形成了链状团簇结构, 理论分析与梯度磁场中 TEM 观察结果一致。

图6为不同电流下沿 r 轴方向的磁场强度曲线,线圈中心轴磁场强度最大,各磁偶极子磁矩方向与外加磁场方向一致,磁吸引力最大,因此磁性颗粒沿 z 轴形成复杂链状团簇结构;随着 r 增大磁场强度逐渐减弱,各磁偶极子磁矩方向与外加磁场方向存在一定夹角,磁吸引力减弱,少量磁性颗粒排列成准直线链状结构。

使用Origin软件对磁场强度曲线进行高斯拟合,再对拟合曲线求偏导数可得磁场梯度曲线。在 $0 < r < 3.00$ cm的区域内,磁场梯度 $\frac{\partial H}{\partial r} < 0$,磁场梯度和磁场强度方向相反,为研究方便取绝对值,图7为不同电流下沿 r 轴方向的磁场梯度曲线。当线圈电流为1.0 A时,在 $0 < r < 0.15$ cm范围内,磁场梯度从 1.73 kA/m^2 逐渐增加到 5.11 kA/m^2 ,由磁偶极子的所受径向力 $F_{ir} = \mu_0 m_{ir} \frac{\partial H_r}{\partial r}$ 可知,磁偶极子之间的磁吸引力也逐渐增大,磁矩方向转向磁场方向,导致磁场梯度轴线上磁性颗粒复杂团簇结构由稀疏逐渐变为密集。由以上分析可知,磁性颗粒链状排列结构同时受磁场强度和磁场梯度影响,磁场强度越

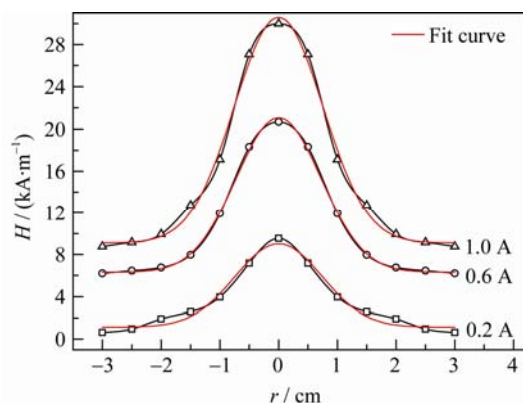


图6 不同电流下沿 r 轴方向的磁场强度

Fig. 6 Magnetic field curve along r axis for different current

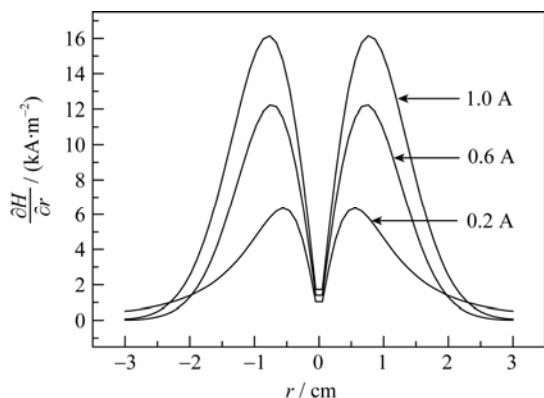


图7 不同电流下沿 r 轴方向的磁场梯度

Fig. 7 Magnetic field gradient curve along r axis for different current

强,磁性颗粒紧密排列成均匀链状结构;磁场梯度越大,磁性颗粒越容易聚集形成复杂链状团簇结构,此结论尚未看到相关文献报道。

3 结论

采用透射电子显微镜(TEM)表征了磁性液体在有、无外加磁场作用时磁性颗粒的微观排列结构。TEM结果表明磁性液体中磁性颗粒呈单畴磁结构。

1) 无外加磁场作用时,磁性颗粒随机均匀分布在载液中,各磁偶极子磁矩方向杂乱无章、互相抵消,磁性液体不显示宏观磁性。

2) 均匀磁场中磁性颗粒沿磁场方向呈准直线链状结构排列。外加均匀磁场强度较弱时,磁偶极子之间的磁吸引势能占主导地位,少量磁性颗粒排列成链状结构,颗粒之间的间隙是磁吸引力和表面活性剂分子层引起的排斥力共同作用的结果。当外加磁场强度为 28.6 kA/m 时,外加磁场作用势能占主导地位,更多磁性颗粒沿磁场方向紧密排列成一条长磁链。

3) 在外加梯度磁场作用下,磁场强度最强的线圈中心轴聚集了大量磁性颗粒,形成了复杂的链状团簇结构;沿 r 轴方向磁场强度较弱的地方,较少磁性颗粒排列成链状结构。磁场梯度从 1.73 kA/m^2 逐渐增加到 5.11 kA/m^2 ,磁场梯度轴线上磁性颗粒的复杂团簇结构由稀疏结构逐渐变成密集结构。磁性颗粒链状排列结构同时受磁场强度和磁场梯度影响,磁场强度越强,磁性颗粒越容易紧密排列成均匀链状结构;磁场梯度越大,磁性颗粒越容易聚集形成复杂链状团簇结构。

参考文献:

- [1] Rosensweig R E. Magnetic fluids. *Annual Reviews Fluid Mechanics*, 1987, **19**: 437–463.
- [2] GUO Guang-Sheng, WANG Zhi-Hua, YU Shi, et al. Preparation of iron-nitride magnetic fluid by vapor-liquid chemical reaction. *Journal of Inorganic Materials*, 2000, **15**(5): 921–925.
- [3] Burcan Jan, Burcan-Piotrowicz Ewa, Sławińska Anna. Investigation on magnetic fluids as lubricant. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 2004, **11**(4): 338–342.
- [4] ZOU Ji-Bin, ZOU Ji-Ming, HU Jian-Hui. Design and pressure control of high-pressure differential magnetic fluid seals. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2003, **39**(5): 2651–2653.
- [5] ZHANG Bo, Nakajima Arira. Dynamics of magnetic fluid support grinding of Si_3N_4 ceramic balls for ultraprecision bearings and its

- importance in spherical surface generation. *Precision Engineering*, 2003, **27**(1): 1–8.
- [6] Thurm S, Odenbach S. Magnetic separation of ferrofluids. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2002, **252**: 247–249.
- [7] LIU Rui-Ting, LIU Jie, TONG Jie-Qiong, *et al.* Heating effect and biocompatibility of bacterial magnetosomes as potential materials used in magnetic fluid hyperthermia. *Progress in Natural Science: Materials International*, 2012, **22**(1): 31–39.
- [8] Lira S A, Miranda J A. Adhesion properties of chain-forming ferrofluids. *Physical Review E*, 2009, **79**(4): 046303–1–8.
- [9] Gonzales-Weimuller Marcela, Zeisberger Matthias, Krishnan Kannan M. Size-dependant heating rates of iron oxide nanoparticles for magnetic fluid hyperthermia. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2009, **321**(13): 1947–1950.
- [10] PU Sheng-Li, DAI Min, SUN Guo-Qing. Longitudinal field-induced polarized light transmittance of magnetic fluids. *Optics Communications*, 2010, **283**(20): 4012–4016.
- [11] LI Qiang, XUAN Yi-Min, WANG Jian. Experiment investigations on transport properties of magnetic fluids. *Experimental Thermal and fluid Science*, 2005, **30**(2): 109–116.
- [12] Yoshihisa Enomoto, Katsumi Oba, Masafumi Okada. Simulation study on microstructure formations in magnetic fluids. *Physica A*, 2003, **330**(3/4): 496–506.
- [13] Ivanov Alexey O, Kantorovich Sofia S, Mendelev Valentin S, *et al.* Ferrofluid aggregation in chains under the influence of a magnetic field. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2006, **300**(1): e206–e209.
- [14] Cerdá J J, Kantorovich S, Holm C. Aggregate formation in ferrofluid monolayers: simulations and theory. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2008, **20**(20): 204125–1–5.
- [15] Pyanzina E, Kantorovich S, CerdáJuan J, *et al.* Structure factor of ferrofluids with chain aggregates: theory and computer simulations. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2011, **323**(10): 1263–1268.
- [16] Hong Chin-Yih, Jang I J, Horng H E, *et al.* Ordered structures in Fe_3O_4 kerosene-based ferrofluids. *Journal of Applied Physics*, 1997, **81**(8): 4275–4277.
- [17] Horng H E, Hong Chin-Yih, Yang S Y, *et al.* Novel properties and applications in magnetic fluids. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2001, **62**(9/10): 1749–1764.
- [18] LI Yan-Qin, LI Xue-Hui, AN Hong, *et al.* Preparation using plasma and research of surface tension coefficient for magnetic fluid. *Metallic Functional Materials*, 2009, **16**(6): 8–10.
- [19] 李学慧, 刘志升, 李艳琴, 等. 交变电场/温度场协同合成纳米磁性润滑油的方法及装置. 中国发明专利, ZL200910011126.8, 2011.12.7.
- [20] 李艳琴, 李学慧, 徐 萍. 磁场中磁性液体透射电子显微镜观测样品制备方法. 中国发明专利, ZL20120204709.4, 2012.6.21.
- [21] LI Qiang, XUAN Yi-Min, LI Bin. Simulation and control scheme of microstructure in magnetic fluids. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2007, **50**(3): 371–379.
- [22] WANG Shi-Bin, DU Lin, SUN Cai-Xin, *et al.* Agglomeration of aqueous ferrofluid subjected to the magnetic field by 3-D dissipative particle dynamics simulation. *Journal of Functional Materials*, 2011, **42**(2): 298–301.
- [23] Yang S Y, Tse W S, Hrong H E, *et al.* Optical anisotropy induced by external magnetic fields on magnetic fluid films. *Journal of Magnetism and Magnetic Material*, 2001, **226-230**: 1992–1994.
- [24] WANG Zuo-Wei, Holm Christian, Müller Walter Hanns. Boundary condition effects in the simulation study of equilibrium properties of magnetic dipolar fluids. *Journal of Chemical Physics*, 2003, **119**(1): 379–387.
- [25] Barrett Matthew, Deschner Andreas, Embs Jan P, *et al.* Chain formation in a magnetic fluid under the influence of strong magnetic fields studied by small angle neutron scattering. *Soft Matter*, 2011, **7**(14): 6678–6683.