

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2015.07.018

$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{Ni}_2\text{O}_3$ 复合纳米微粒基二元磁性液体的制备及场致光透射特性^①

林立华¹, 周群¹, 卜胜利², 汤猛¹,
马珊珊¹, 崔连敏¹, 郭露芳¹, 杨欣¹

1. 上海理工大学 大学物理实验中心, 上海 200093; 2. 上海理工大学 理学院, 上海 200093

摘要: 介绍了由强磁 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{Ni}_2\text{O}_3$ 复合纳米微粒和弱磁 $\text{Fe}_5\text{O}_7(\text{OH}) \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 纳米微粒构成的二元磁性液体的制备方法, 并用 X 射线衍射仪、透射电子显微镜、振动样品磁强计分别对这两种微粒的晶体结构、表面形貌及其磁性进行了表征. 同时测量了单元磁性液体和二元磁性液体在平行于激光照射方向且具有不同梯度外磁场作用下场致光透射强度的弛豫变化, 揭示了二元磁性液体有不同于单元磁性液体的特征弛豫时间, 并从微观结构上分析了产生弛豫时间差异的原因.

关键词: 磁性液体; 光透射率; 弛豫变化; 调变效应

中图分类号: O482.54

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2015)07-0122-07

磁性液体是一种液态磁性功能材料^[1-2], 通常仅有一种微粒分散相. 有国外研究组开展了具有两种微粒分散相的磁性液体混合物的研究工作, 得到不同于单一分散相磁性液体的实验结果^[3-7]. 李建课题组受此启发, 提出了在磁性液体中用磁双分散模型代替尺寸双分散模型的磁性液体体系, 拓宽了磁性液体的研究体系, 并从实验上制备了由强磁性(铁磁或亚铁磁)和弱磁性(顺磁或反铁磁)纳米微粒合成的二元磁性液体, 得到了一些很有意义的实验结果^[8]. 磁性液体的场致光透射弛豫过程反映了磁性液体的场致微结构变化^[9-10], 然而前人的研究成果主要集中在对二元磁性液体光透射率大小的变化以及随磁场的开关响应方面的研究^[11], 而对于二元磁性液体场致光透射强度变化的特征弛豫时间的研究较为少见. 事实上, 对磁性液体场致光透射强度变化特征弛豫时间的研究在实际应用方面更加有利. 鉴于此, 本文制备了由强磁 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{Ni}_2\text{O}_3$ 复合纳米微粒和弱磁 $\text{Fe}_5\text{O}_7(\text{OH}) \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 水铁矿纳米微粒合成的二元磁性液体, 对比研究了单元和二元磁性液体场致光透射强度变化的特征弛豫时间, 并从微观结构对其进行了分析.

1 实验

1.1 纳米微粒的制备与表征

1.1.1 纳米微粒的制备

本研究中的强磁 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{Ni}_2\text{O}_3$ 复合纳米微粒的制备分为两个步骤: 首先采用化学共沉淀法制备

① 收稿日期: 2014-06-18

基金项目: 上海高校青年教师培养资助计划(ZZSLG4029); 上海市自然科学基金(BZR1427400).

作者简介: 林立华(1987-), 男, 福建龙岩人, 硕士研究生, 主要从事磁性液体的制备及物理性质研究.

通信作者: 卜胜利, 教授.

FeOOH/Ni(OH)₂ 前驱体. 其次采用化学诱导相变法^[12]制备 γ -Fe₂O₃/Ni₂O₃ 复合纳米微粒. 在制备过程中, 用 FeCl₃ · 6H₂O, Ni(NO₃)₂ · 6H₂O, NaOH, FeCl₂ · 4H₂O 作为原料. 在常温下, 将 FeCl₃ · 6H₂O 溶液和 Ni(NO₃)₂ · 6H₂O 溶液以 $n(\text{Fe}^{3+}) : n(\text{Ni}^{2+}) = 2 : 1$ 的比例混合, 再加入适量的 NaOH, 充分搅拌使之混合均匀. 将混合液加热至沸腾, 持续沸腾 5 min 后从电炉上取下, 自然冷却, 冷却过程中逐渐出现黑色前驱体沉淀. 用极稀 HNO₃ 溶液(0.01 mol/L, 400 mL)对沉淀物进行清洗, 直到 pH 值接近 7~8. 其化学反应式为:



然后将制备出的前驱体加入到沸腾的 FeCl₂ 溶液(0.1 mol/L, 400 mL)中, 保持沸腾 30 min. 在加热及沸腾过程中不断搅拌. 随后让其自然冷却, 用丙酮脱水并干燥, 即, 可得到 γ -Fe₂O₃/Ni₂O₃ 纳米微粒.

弱磁水铁矿(Fe₅O₇(OH) · 4H₂O)纳米团簇的制备步骤如下: 将 0.1 mol 大小约为 0.1 μm 的 CuO 粉末加入到沸腾的 Fe(NO₃)₃ 溶液(0.25 mol/L, 400 mL)中, 持续沸腾 30 min, 并不断搅拌. 停止加热后, 沉淀物逐渐从溶液中析出, 约 2 h 后沉淀完毕. 然后用丙酮清洗、脱水, 干燥后所得的产物即为水铁矿纳米微粒. 其化学反应式可表示为:



1.1.2 纳米微粒的表征

用 X 射线衍射仪(XRD, XD-2)对样品的晶体结构进行了分析(图 1); 用透射电子显微镜(TEM, JEM-2100F)观察了样品的形态, 并分析了其微粒粒径的大小(图 2). 用 HH-5 型振动样品磁强计(VSM)测量了 γ -Fe₂O₃/Ni₂O₃ 微粒和 Fe₅O₇(OH) · 4H₂O 纳米团簇的比磁化强度(图 3).

1) 晶体结构分析. X 射线衍射分析表明: a 样品中的主要成分为 γ -Fe₂O₃, 另外还有微量的 Ni₂O₃ (图 1 中箭头所指). b 样品的衍射图谱显现出低结晶衍射图样, 与呈双峰衍射的 Fe₅O₇(OH) · 4H₂O 水铁矿^[13-14]吻合.

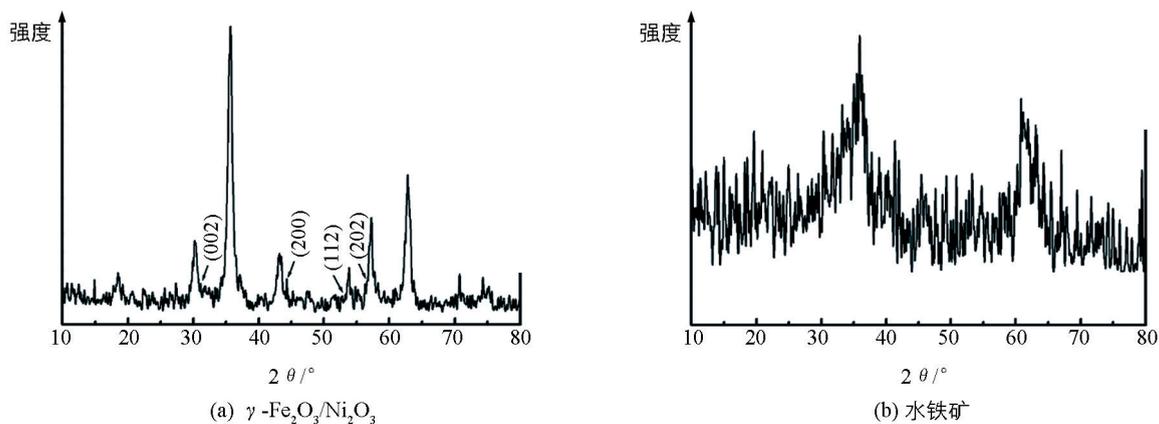


图 1 γ -Fe₂O₃/Ni₂O₃ (a)和水铁矿(b)的 XRD 衍射图谱

2) 形貌观察. 图 2(a)为所制备的 γ -Fe₂O₃/Ni₂O₃ 微粒的 TEM 照片. 从图 2 上可以看出, 微粒的形态近似呈球形, 且大小均匀. 经统计分析, 微粒的平均粒径为 11 nm^[15]. 图 2(b)是 Fe₅O₇(OH) · 4H₂O 的 TEM 照片. 采用粒径分析方法对其进行统计分析, 可得到其平均粒径为 5.69 nm.

3) 磁化强度的测量. 在室温下, 用振动样品磁强计测量了 γ -Fe₂O₃/Ni₂O₃ 微粒和 Fe₅O₇(OH) · 4H₂O 微粒的磁化曲线(图 3). 测量结果表明, γ -Fe₂O₃/Ni₂O₃ 为强磁性纳米微粒, Fe₅O₇(OH) · 4H₂O 微粒呈现弱磁性, 与水铁矿反铁磁^[16]的特征一致.

根据高场下 $\sigma \sim 1/H$ 的关系, 可求出 γ -Fe₂O₃/Ni₂O₃ 微粒的比饱和磁化强度 σ_s 为 58.73 A · m²/kg; 水铁矿纳米团簇呈弱磁性, 在 $9/4\pi \times 10^6$ A/m 时, 比磁化强度 σ 为 7.90 A · m²/kg.

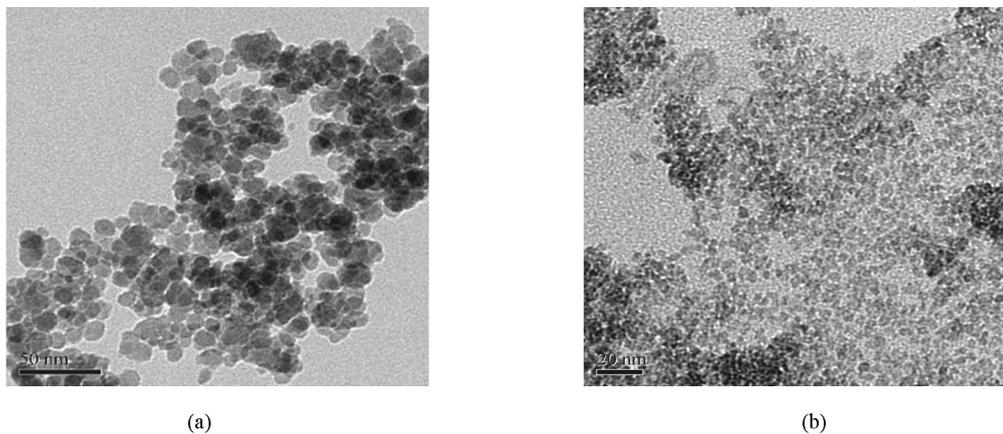
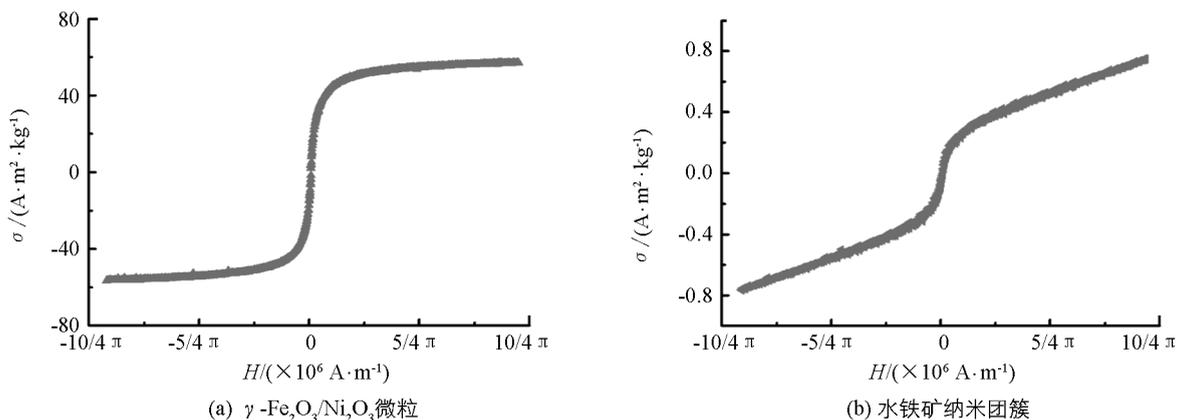


图 2 微粒的 TEM 图

图 3 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{Ni}_2\text{O}_3$ 微粒和水铁矿纳米团簇的磁化曲线

1.2 磁性液体合成

1.2.1 单元磁性液体的合成

将制备的 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{Ni}_2\text{O}_3$ 微粒和 $\text{Fe}_5\text{O}_7(\text{OH}) \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 微粒分别配制成体积分数为 2% 的母液. 然后将其稀释, 分别得到 $\phi_\gamma = 0.4\%$, 0.8% 和 $\phi_{\text{FH}} = 0.4\%$, 0.8% 的单元磁性液体.

1.2.2 二元磁性液体的合成

采用两种磁性液体等体积混合的方法合成二元磁性液体. 将 $\phi_\gamma = 0.8\%$ 和 $\phi_{\text{FH}} = 0.8\%$ 的单元磁性液体进行等体积混合, 即可得到 $\phi_\gamma = 0.4\%$ - $\phi_{\text{FH}} = 0.4\%$ 的二元磁性液体.

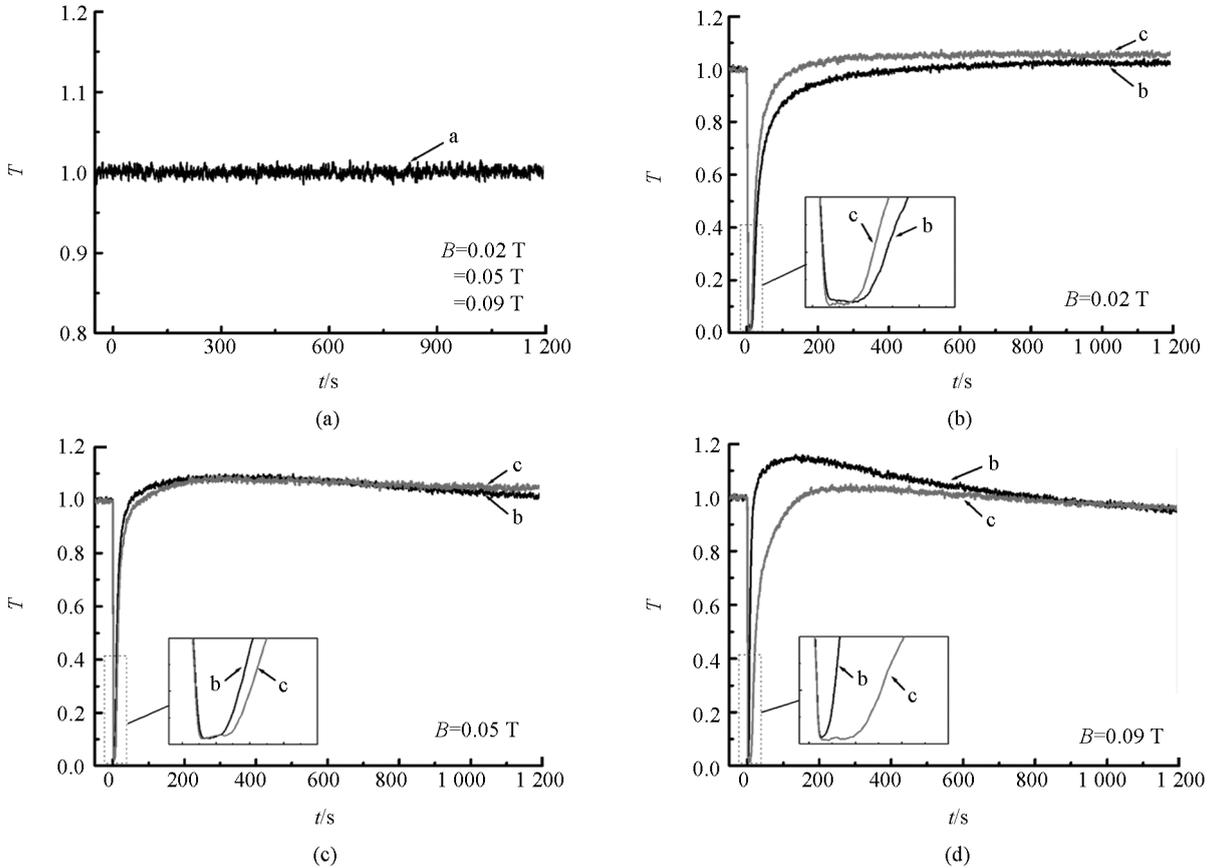
1.3 场致光透射性质测量

将待测磁性液体装在一个扁平的玻璃盒 ($15\text{ mm} \times 15\text{ mm} \times 0.53\text{ mm}$) 中, 制成磁性液体薄膜. 采用本实验室自组装的磁光测量装置^[9-10] 测量单元和二元磁性液体的场致光透射性质的变化, 实验发现: 在磁场作用下, 透过磁性液体薄膜的光强度可被磁场调控. 图 4 给出了不同外磁场强度下单元磁性液体和二元磁性液体的相对光透射强度 T (加场后与加场前的透射强度之比) 随时间的变化曲线, 在 $t=0$ 时加上磁场. 分别测量了单元 $\phi_\gamma = 0.4\%$, $\phi_{\text{FH}} = 0.4\%$ 和二元 $\phi_\gamma = 0.4\%$ - $\phi_{\text{FH}} = 0.4\%$ 这 3 种磁性液体分别在中心磁场强度 $B = 0.02, 0.05, 0.09\text{ T}$ 的梯度磁场作用下的光透射弛豫曲线, 主要实验结果见图 4.

从图 4(a) 可知, 对于 $\phi_{\text{FH}} = 0.4\%$ 弱磁性 $\text{Fe}_5\text{O}_7(\text{OH}) \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 磁性液体来说, 加上不同强度的磁场后, 其透射率都不随时间的变化而变化. 这表明在磁场作用下, 弱性的水铁矿胶体并没有形成向磁场中心会聚的链状团聚, 因此其透射率 T 始终保持在 1 左右.

由图 4 所示的磁性液体场致光透射规律的 $T-t$ 曲线可知, 磁性液体的光透射率从开始加磁场至下降到最小值的时间为 Δt_1 , 又从最小值回复到最大值所需时间为 Δt_2 , 这两者因磁性液体的构成不同或磁场强度

的不同而产生差异,所以可称之为光透射弛豫特征时间, Δt_1 称为光透射强度下降特征弛豫时间, Δt_2 称为光透射强度回复(上升)特征弛豫时间. 在本研究中,将单元 $\phi_\gamma=0.4\%$ 和二元 $\phi_\gamma=0.4\%-\phi_{\text{FH}}=0.4\%$ 磁性液体的下降弛豫时间分别表示为 Δt_1 和 $\Delta t'_1$, 上升弛豫时间表示为 $\Delta t_2, \Delta t'_2$. 这两种磁性液体的特征弛豫时间见表 1.



a 为 $\text{Fe}_5\text{O}_7(\text{OH}) \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 磁性液体; b 为 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{Ni}_2\text{O}_3$ 磁性液体; c 为 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{Ni}_2\text{O}_3\text{-Fe}_5\text{O}_7(\text{OH}) \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 磁性液体.

图 4 场致光透射变化曲线

表 1 磁性液体场致光透射特征弛豫时间

B/T	0.02	0.05	0.09
$\Delta t_1/\text{s}$	11.25	4.65	3.44
$\Delta t'_1/\text{s}$	9.19	3.03	2.21
$\Delta t_2/\text{s}$	521.28	206.34	130.69
$\Delta t'_2/\text{s}$	316.20	213.22	203.02

2 讨论

从表 1 的测量结果中可以看出,单元 $\phi_\gamma=0.4\%$ 和二元 $\phi_\gamma=0.4\%-\phi_{\text{FH}}=0.4\%$ 磁性液体的光透射弛豫下降弛豫时间和上升弛豫时间都随磁场强度的增大而减小,且在相同的磁场强度下,二元磁性液体的光透射强度下降弛豫时间比单元磁性液体的下降弛豫时间短;而上升弛豫时间除了在 $B=0.02\text{ T}$ 时,二元磁性液体比单元磁性液体短以外,在 $B=0.05\text{ T}$ 和 0.09 T 时,二元磁性液体的上升弛豫时间都比单元磁性液体长. 这表明在 $\phi_\gamma=0.4\%-\phi_{\text{FH}}=0.4\%$ 二元磁性液体中,场致光透射弛豫现象主要取决于强磁体系 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{Ni}_2\text{O}_3$ 微粒形成的场致结构,而弱磁水铁矿微粒虽然不能形成场致结构,但会对强磁体系产生一定的调制作用.

两种磁性液体在磁场作用下的光透射变化规律可分为两个阶段:第一阶段是磁性液体加磁场后到光透

射率达到最小值的这段时间, 即光透射强度的下降弛豫时间 Δt_1 和 $\Delta t'_1$; 第二阶段是光透射率从最小值上升到最大值的这段时间, 即光透射强度的上升弛豫时间 Δt_2 和 $\Delta t'_2$. 场致光透射的变化曲线表明, 对于体积分数一定的单元 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{Ni}_2\text{O}_3$ 磁性液体, 随着外磁场的增大, 光透射率达到最小值的时间 Δt_1 越小, 透射率达到的最小值也越小, 从最小值上升到最大值的时间 Δt_2 越小. 由强磁 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{Ni}_2\text{O}_3$ 微粒和弱磁 $\text{Fe}_5\text{O}_7(\text{OH}) \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 纳米微粒构成的二元磁性液体的场致光透射的变化规律与单元 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{Ni}_2\text{O}_3$ 磁性液体的变化规律类似, 但各阶段弛豫时间的快慢各不相同. 这表明, 二元磁性液体和单元磁性液体的光透射强度变化所对应的磁性液体的场致结构各不相同.

对磁性液体的场致光透射变化机理可作如下解释: 磁性液体中的微粒在磁场作用下会形成链状结构, 微粒链中微粒的磁矩方向相同, 首尾相连, 因此可将整条链视为磁矩为 M 的磁偶极子. 由于磁场存在着径向梯度 $\frac{\partial B}{\partial r}$, 则微粒链将受到指向磁场中心轴的力 F_C , 称为磁会聚力:

$$F_C = -M \left| \frac{\partial B_z}{\partial r} \right| \quad (1)$$

同时, 同向磁偶极子之间存在磁发散力 F_D ; 此外, 本实验所制备的磁性液体为离子型磁性液体, 表面都带有正电荷, 所以微粒链之间又都存在着静电斥力 F_e . 由于微粒所带的正电荷与基液中的负电荷有平衡作用, 因此在考虑微粒链的相互作用时可忽略 F_e 的作用. 两平行微粒链的磁发散力 F_D ^[17] 可表示为:

$$F_D = \frac{3\langle N \rangle M^2}{8\pi\Delta r^4} \quad (2)$$

由(2)式可知, F_D 与微粒链之间的距离 Δr 成减函数关系.

第一阶段, 刚加磁场时, 微粒链形成后受到的力 $F_C > F_D$ 而向磁场中心会聚, 使得近轴的光通道变窄, 根据“几何遮蔽效应”^[8], 光的透射率将变小. 随着 Δr 的减小, 微粒链之间的磁发散力 F_D 便会增大, 而磁感应强度梯度减小, F_C 也减小. 当 $F_C = F_D$ 时, 此时微粒链向轴运动的速度达到最大. 当微粒链继续向中心运动时, $F_C < F_D$, 此时微粒链将做减速运动, 当微粒链的速度为 0 时, 链间距离达到最小, 因此透射率最小.

第二阶段, 当微粒链的速度为 0 后, 链间斥力占主导, 链间距会逐渐增大, 所以透射率又会回升. 对于单元 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{Ni}_2\text{O}_3$ 磁性液体, 随着中心磁场 B_0 的增大, 微粒链受到的力 F_C 越大, 它向中心轴运动的加速度越大, 运动到中心轴的时间越短, 微粒链靠得越近, 即光透射率达到的最小值越小, 所用的时间越短; 中心磁场越大, 链间距达到最小值的距离越小, F_D 要比 F_C 大很多, 所以链间的排斥力越大, 运动加速度越大, 微粒链分开得越快, 透射率回升得也越快. 所以对于单元 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{Ni}_2\text{O}_3$ 磁性液体, 随着中心磁场的增大, Δt_1 和 Δt_2 都减小.

而对于 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{Ni}_2\text{O}_3\text{-Fe}_5\text{O}_7(\text{OH}) \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 二元磁性液体, 外加磁场后弱磁 $\text{Fe}_5\text{O}_7(\text{OH}) \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 微粒不能形成链状结构, 即在磁场力的作用下也不会向中心会聚. 微粒呈随机分布状态, 故其透射率不随时间的改变而改变(图 4(a)). 在磁场作用下, 只有强磁 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{Ni}_2\text{O}_3$ 微粒能形成链状结构, 所以二元磁性液体随中心磁场的增大, $\Delta t'_1$ 和 $\Delta t'_2$ 的变化情况跟单元磁性液体类似. 同时, 可把弱磁性微粒与基液看成一个体系, 而强磁性微粒均匀分散在这个体系中. 虽然弱磁性微粒在磁场作用下不能形成链状结构, 但它会对强磁微粒链有一定的调变作用, 其机理分析如下:

1) 二元磁性液体中, 由于弱磁性微粒的存在会使强磁性微粒易形成较小的短链, 此时磁性微粒链在基液中运动要受到粘滞阻力^[17]:

$$F_V = \eta u C_D \quad (3)$$

式中: η 为基液的粘滞系数, u 为链运动速度, C_D 为阻力系数. 其中 C_D 与在基液中运动的微粒链的长短有关, 微粒链越短, 微粒链在基液中运动受到的阻力越小. 而且, 强磁微粒链在向光轴方向会聚时, 链间被磁化的弱磁微粒将被压缩, 致使在微粒链的两侧弱磁微粒的密度不同, 靠近光轴内侧的微粒数密度小于外侧

的弱磁微粒数密度,因而外侧的弱磁微粒会形成“排空力”^[18],其结果是增大了有效磁会聚力.因此,在相同梯度磁场下,二元磁性液体与单元强磁性液体相比,向磁场中心会聚的时间更短,所以 $\Delta t'_1$ 比 Δt_1 小.

2) 在二元磁性液体强磁微粒链上升弛豫过程中,随着中心磁场增大,强磁微粒链间距达到最小值的距离越小,链间的排斥力越大,强磁微粒链分开的速度越快.由于粘滞阻力 F_V 正比于微粒链的运动速度 u ,故当中心磁场的强度达到 0.05 T 以上时,链运动速度 u 增大对 F_V 的影响大于弱磁微粒对强磁微粒成链长短的影响.而且,在微粒链间距达到最小值后分开的过程中,微粒链两侧弱磁微粒的密度较高且如同气体分子一般分散在磁性液体中,对强磁微粒链的扩散运动产生更大的阻碍作用.正是由于微粒链运动速度增大和弱磁微粒阻碍的影响,所以当中心磁场的强度达到 0.05 T 以上时, $\Delta t'_2$ 大于 Δt_2 .

3 结 论

由粒径大小约为 11 nm 的 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{Ni}_2\text{O}_3$ 强磁微粒和 6 nm 的 $\text{Fe}_5\text{O}_7(\text{OH}) \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 弱磁微粒合成的二元磁性液体,具有磁性双分散的特征,其产生光透射弛豫现象的场致结构主要产生于强磁体系的微结构链运动弛豫.单元 $\phi_\gamma=0.4\%$ 和二元 $\phi_\gamma=0.4\%-\phi_{\text{FH}}=0.4\%$ 磁性液体的光透射弛豫下降弛豫时间和上升弛豫时间都随磁场强度的增大而减小,且在相同的磁场强度下,二元磁性液体的光透射强度下降弛豫时间比单元磁性液体的下降弛豫时间短;而上升弛豫时间除了在 $B=0.05$ T 时,二元磁性液体比单元磁性液体短以外,在 $B=0.05$ T 和 0.09 T 时,二元磁性液体的上升弛豫时间都比单元磁性液体长.这表明在 $\phi_\gamma=0.4\%-\phi_{\text{FH}}=0.4\%$ 二元磁性液体中,场致光透射弛豫现象主要取决于强磁体系 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{Ni}_2\text{O}_3$ 微粒形成的场致结构,而弱磁水铁矿微粒虽然不能形成场致结构,但会对强磁体系产生一定的调制作用.而且随磁场强度的不同,弱磁微粒产生的调变程度也将不同.本文从场致微粒链结构的变化方面对其机理进行了解释.

参考文献:

- [1] 李德才. 磁性液体理论及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [2] 卜胜利, 陈险峰. 纳米磁性液体的分散稳定性分析 [J]. 上海理工大学学报, 2008, 30(4): 335-338, 344.
- [3] DONATINI F, SAHSAH H, MONIN J. Pure Faraday Rotator: A Ferrofluid Mixing Method [J]. Appl Opt, 1997, 36(31): 8165-8170.
- [4] MASHEVA V, GRIGOROVA M, VALKOV N, et al. On the Magnetic Properties of Nanosized CoFe_2O_4 [J]. J Magn Magn Mater, 1999, 196/197(1): 128-130.
- [5] ISLAM M F, LIN K H, LACOSTE D, et al. Field-Induced Structures in Miscible Ferrofluid Suspensions with and Without Latex Spheres [J]. Phys Rev E, 2003, 67(2): 021402-1-021402-8.
- [6] PATEL R, CLAPADHYHY R V V, MEHTA R V. Optical Properties of Magnetic and Non-Magnetic Composite of Ferrofluids [J]. J Magn Magn Mater, 2006, 300(1): e217-e220.
- [7] GE Jian-ping, HU Yong-xing, ZHANG Tie-rui, et al. Self-Assembly and Field-Responsive Optical Diffractions of Superparamagnetic Colloids [J]. Langmuir 2008, 24(7): 3671-3680.
- [8] 李 建. 二元磁性液体及其调变效应 [J]. 功能材料, 2010, 41(论文集): 146-149.
- [9] LI Jian, LIU Xiao-dong, LIN Yue-qiang, et al. Field Modulation of Light Transmission Through Ferrofluidfilm [J]. Appl Phys Lett, 2007, 91(25): 253108-1-253108-7.
- [10] LI Jian, LIU Xiao-dong, LIN Yue-qiang, et al. Relaxation Behavior Measuring of Transmitted Light Through Ferrofluids film [J]. Appl Phys B: Lasers Opt, 2006, 82(1): 81-84.
- [11] ZHANG Ting-zhen, LI Jian, MIAO Hua, et al. Enhancement of the Field Modulation of Light Transmission Through Films of Binary Ferrofluids [J]. Phys Rev E, 2010, 82: 021403-1-021403-8.
- [12] MIAO Hua, LI Jian, LIN Yue-qiang, et al. Characterization of $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ Nanoparticles Prepared By Transformation of $\alpha\text{-FeOOH}$ [J]. Chinese Sci Bull, 2011, 56(22): 2383-2388.
- [13] RISTIC M, DEGRARE E, MUSIC S, et al. Orehoval, Transformation of Low Crystalline Ferrihydrite to $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ in the Solid State [J]. J Mol Stru, 2007, 834-836: 454-460.

- [14] SCHWORTMANN U, FRIEDL J, STANJEK H. Form Fe(III) Ions to Ferrihydrite and then to Hemite [J]. *J Coll Inter Sci*, 1999, 209(1): 215–223.
- [15] 林立华, 李 建, 张清梅, 等. $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{Ni}_2\text{O}_3$ 复合磁性纳米微粒及磁性液体的磁化特性 [J]. *西南大学学报: 自然科学版*, 2012, 34(3): 49–53.
- [16] ROSE J, MANCEAU A, MASION A, et al. Structure and Mechanisms of Formation of $\text{FeOOH}(\text{NO}_3)$ Oligomers in the Early Stages of Hydrolysis [J]. *Langmuir* 1997, 13(12): 3240–3246.
- [17] LI Jian, LIU Xiao-dong, LIN Yue-qiang, et al. Field-Induced Transmission of Light in Ionic Ferrofluids of Tunable Viscosity [J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2004, 37(24): 3357–3360.
- [18] ZUBAREV A Y, ISKAKOVA L Y. Structural Transformations in Polydisperse Ferrofluids [J]. *Colloid J*, 2003, 65(6): 711–719.

Preparation of Binary Ferrofluids Based on $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{Ni}_2\text{O}_3$ Composite Nanoparticles and Their Properties of Magneto-Light Transmission

LIN Li-hua¹, ZHOU Qun¹, PU Sheng-li², TANG Meng¹,
MA Shan-shan¹, CUI Lian-min¹, GUO Lu-fang¹, YANG Xin¹

1. *Experiment Center of College Physics, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;*

2. *College of Science, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China*

Abstract: The procedures for the preparation of binary ferrofluids based on strong magnetic $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{Ni}_2\text{O}_3$ composite nanoparticles and weak magnetic $\text{Fe}_5\text{O}_7(\text{OH}) \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ nanoparticles are described in this paper. The crystal structure, the surface morphology and the magnetization of the $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{Ni}_2\text{O}_3$ composite nanoparticles and the $\text{Fe}_5\text{O}_7(\text{OH}) \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ nanoparticles are characterized by X-ray diffraction (XRD), transmission electron microscopy and vibrating sample magnetometer (VSM), respectively. The relaxation changes in the strength of field-induced light transmission through $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{Ni}_2\text{O}_3$ ferrofluids, $\text{Fe}_5\text{O}_7(\text{OH}) \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ferrofluids and binary ferrofluids under different magnetic fields parallel to the light direction are measured. The results show that the binary ferrofluids are different from $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{Ni}_2\text{O}_3$ ferrofluids in their relaxation time and such differences are interpreted from the perspective of their different microstructures.

Key words: ferrofluid; light transmission; relaxation change; modulation effect

责任编辑 潘春燕

