

尖晶石型铁氧体磁液的磁化特性研究与应用

Research and application of magnetizing characteristics of spinel ferrite magnetic fluid

中华人民共和国广东省广州市第六中学

GUANGZHOU NO. 6 MIDDLE SCHOOL/ GUANGZHOU / GUANGDONG PROVINCE / THE
PEOPLE REPUBLIC OF CHINA

参赛队员姓名：詹弘易、高泉勇、符馨滢

中学：广州市第六中学

省份：广东省

国家/地区：中国

指导教师姓名：璩斌

论文题目：尖晶石型铁氧体磁液的磁化特性
研究与应用

Research and application of magnetizing
characteristics of spinel ferrite magnetic fluid

二零一七年九月

摘要

论文标题：尖晶石型铁氧体磁液的磁化特性研究与应用

铁磁流体，是一种新型的功能材料，应用十分广泛。磁化特性是铁磁材料的应用基础，开展相关研究解决铁磁流体材料的稳定性问题是十分必要的。

Fe_3O_4 是由 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 和 O^{2-} 通过离子键组合起来的复杂离子晶体，属于尖晶石型晶体结构。当使用微粒与基载液、活性剂配置为磁性流体后，由于铁磁微粒直径约 10nm，可近似看作磁畴，因此原本在晶体状态下磁化过程中的磁畴壁厚度可看作发生变化。同时磁流体的稳定性对其性能的发挥以及长期保存至关重要。而固相纳米微粒与基液的密度差异大，在重力作用下趋于沉降，并且微粒的表面效应和界面效应导致纳米颗粒表面具有较大的自由能，因此，颗粒发生沉降甚至团聚是一种自发的过程。而一旦发生沉降和团聚，将影响铁磁流体的整体性能甚至丧失使用功能。因此对沉降与团聚情况进行评价尤其必要。

本文主要围绕磁流体磁化特性研究与研究成果应用两部分展开。本文对铁磁流体的磁化过程进行研究与建模，并用磁天平进行实验分析，理论与实验具有良好的 consistency。主要研究成果如下：

- 1.通过对磁流体磁化特性的研究，我们发现其磁化能损耗最小时对应的最佳粉末浓度为 25%-35%。
- 2.通过对磁畴壁厚度以及相应磁化过程的建模与实验研究，我们发现了磁流体不同链状结构与场强大小的对应关系并实现了其链状结构的可控。
- 3.根据实验所得创新发明了一种新型书写装置与磁性毛笔，改善了现有磁性画板像素底、笔迹不连续，水写布稳定性差、保留时间短的问题，提高了艺术表现力，有效验证了研究成果。

关键词：尖晶石型铁氧体；磁性液体；稳定性；磁性画板；矫顽力；

Abstract

Title: Research and application of magnetizing characteristics of spinel ferrite magnetic fluid

Ferromagnetic fluid is a new kind of functional material, which is widely used nowadays. The magnetic characteristic of the ferromagnetic fluid is the basic of its use. So it's absolutely necessary for us to carry out a series research to work out the stability problem of it.

Fe_3O_4 is a complex ionic crystal composed of Fe^{2+} , Fe^{3+} and O^{2-} by ionic bonding, with the structure similar to that of spinel crystal structure. Ferromagnetic particles are about 10nm in diameter and can be approximated as magnetic single domain, when it is configured as a magnetic fluid with the basic carrier fluids and the active agents, the thickness of the magnetic domain wall in the magnetic process of the crystal state can be regarded as a change. At the same time, the stability of magnetic fluid is essential for its performance and long-term preservation. The density of the solid phase nanoparticles differs greatly from that of the basic liquid and tends to settle under the action of gravity. Surface effect and interface effect leads to the surface of nanoparticles with a large amount of free energy, thus it is a spontaneous process on nanoparticles settling even agglomeration. Once settlement and agglomeration occur, the overall performance of ferromagnetic fluid will be affected, or even be out of condition. Therefore, it is necessary to evaluate the settlement and agglomeration.

This paper is mainly focusing around the research about the magnetized characteristic of ferromagnetic fluid and the application of our research findings. In this paper, the magnetization process of ferromagnetic fluid is studied and modeled. The experimental results are tested by a magnetic balance. The theoretical and experimental results are in good agreement. The following are our mainly study results.

1. From the research of the magnetized characteristic of ferromagnetic fluid, we find the optimum concentration of the magnetic powder with the fewest cost of magnetization energy is about 25%~35%

2. Through our modeling and experiments about the thickness of the domain wall and its magnetizing process, we find the relationship between different chain structures of the ferromagnetic fluid and the field strength. Also, we achieve to control its chain structures.

3. According to our experiments, we invent a new kind of writing device and magnetic writing brush, which improve the weaknesses in currency magnetic sketchpads and water jet cloth. It also improve the artistic expression and test our research findings effectively.

Keywords: spinel ferrite; magnetic fluid; stableness; magnetic sketchpad; coercive force

本论文物理量单位及符号

量的名称	名称	符号	常用换算单位
长度	米	m	1m=10 ² cm
质量	千克	Kg	1kg=10 ³ g
密度	千克每立方米	kg/m ³	1kg/m ³ =10 ⁻³ g/cm ³
时间	秒	s	
(平面)角	弧度	rad	
面积	平方米	m ²	1 m ² =10 ⁴ cm ²
力	牛顿	N	
速度	米每秒	m/s	1m/s=10 ³ mm/s
静磁能	焦每米的立方	J/m ³	
磁矩	安米平方	A·m ²	1A·m ² =10 ³ G·cm ³
磁导率	亨利/米	H/m	
压强	帕斯卡	Pa	
磁化强度	安每米	A/m	1A/m=10 ⁻³ G
频率	赫兹	Hz	
磁通密度	特斯拉	T	1T=10 ⁴ G

附表文本中出现的符号及其意义

符号	意义
N_A	阿伏伽德罗常数
μ_B	波尔磁子数
m	每个分子的饱和磁矩
M_{mol}	铁氧体的克分子量 (IS)
x	单位晶胞的分子数
a	晶胞的晶格常数
p	孔隙率 (%)
d_x	铁氧体的理论密度
δ	单位重量饱和磁化强度 (A/m)
M_s	单位分铁氧体的饱和磁化强度 (A/m)
B	磁感应强度 (高斯 Gs)
μ	磁导率 (亨利/米 H/m)
H	磁场强度 (A/m)
I	电流 (A)
n	螺线管匝数
L	螺线管长度
H_d	退磁场 (A/m)
N	退磁因子
H_s	有效磁场 (A/m)
J	磁棒中心处的本征磁感应强度 (T)
μ_s	有效磁导率 (%)
B_e	磁感应强度 (T)
H_a, H_b, H_c	临界场强 (A/m)

目录

摘要.....	II
Abstract.....	III
本论文物理量单位及符号.....	IV
目录.....	1
1 绪论.....	2
2 铁晶体、铁氧体与尖晶石型晶体结构及磁性.....	2
2.1 Fe ₃ O ₄ 的磁性与饱和磁化强度理论值.....	5
2.2 磁导率.....	7
2.3 磁畴与磁畴壁.....	8
2.4 磁流体的认识与研究.....	9
2.5 磁流体的磁化特性.....	9
3 磁流体磁化过程与模型建立.....	10
3.1 不同直径微粒的磁化实验.....	10
3.2 磁场的场强分布评估.....	12
3.2.1 数据处理.....	12
3.3 实验现象分析.....	14
3.4 稳恒磁场下链式结构磁化过程分析.....	14
3.5 铁氧体磁流体的磁化过程建模.....	16
4 流体磁化特性实验研究.....	18
4.1 未经超声处理时的磁化特性.....	19
4.2 超声处理 6h 与 72h 后磁化特性.....	20
4.3 磁化特性的跟踪研究.....	23
4.3.1 样品上部清液样品的跟踪研究.....	23
4.3.2 样品下部沉降与团聚样品的跟踪研究.....	24
4.3.3 样品上部清液的提取与磁化特性实验.....	26
5 铁氧体及其掺杂物的应用.....	27
5.1 磁流体书写装置.....	27
5.2 结构示意图.....	27
5.3 铁磁凝胶的选择与分析.....	27
5.4 书写装置中笔迹保留的理论分析.....	29
5.5 书画装置显示效果评估.....	35
5.6 可行性研究.....	37
6 结论与展望.....	39
参考文献.....	40

1 绪论

磁铁作为一种性质丰富的天然物质对人类历史的发展有着不可磨灭的作用。5000年前人们第一次发现了天然磁铁(Fe_3O_4)；2300年前中国人将天然磁铁磨成勺型放在光滑的平面上,在地磁的作用下,勺柄指南,曰“司南”,此即世界上第一个指南仪,这也是最广为人知的人们第一次将磁铁投入到人类社会应用当中的文献记载；1820年丹麦物理学家H. C. 奥斯特发现电流感生磁力；1831年英国物理学家M. 法拉第发现电磁感应现象等等。而关于磁流体,1832年法拉第首次提出有关磁流体力学问题。1940~1948年阿尔文提出带电单粒子在磁场中运动轨道的“引导中心”理论、磁冻结定理、磁流体力学波和太阳黑子理论,1949年他在《宇宙动力学》一书中集中讨论了他的主要工作,推动了磁流体力学的发展。1950年伦德奎斯特首次探讨了利用磁场来保存等离子体的所谓磁约束问题,即磁流体静力学问题。美国最先将宇航用的喷气燃料制成磁性液体,通过永磁加以控制,克服了失重状态下燃料不能正常工作的问题。1965年,美国航天局的Papell发明了磁流体并首次将其应用于宇航服可动部位的真空密封。此后,磁流体凭借其丰富的性质进入了人们的视野。

磁流体既具有磁特性,又兼有流动性,还具有磁热、磁光等特殊性能。自二十世纪七十年代起,国内外对磁流体的研究和应用开发十分活跃,其应用范围不断拓展。

机械密封是磁流体最广泛的一项应用,优点是密闭性好以及摩擦力极小,并且在高速运动中有用功的损耗非常低。然而目前来看,也有不适合应用的范围。铁磁流体目前并不适用于和液体相接触的密封,因为在与其他液体相接触时会相互混杂导致稳定性降低,使密封失效;而在高温环境下,由于纳米微粒热运动导致磁化强度降低以及基载液的蒸发损耗,使得磁流体同样无法应用。

磁流体的稳定性对其性能的发挥以及长期保存至关重要。而固相纳米微粒与基液的密度差异大,在重力作用下趋于沉降,且由于微粒的表面效应和界面效应导致纳米颗粒表面具有较大的自由能,因此,颗粒发生沉降甚至团聚是一种自发的过程。而一旦发生沉降和团聚,将影响铁磁流体的整体性能甚至丧失使用功能。因此对沉降与团聚情况进行评价尤其必要。但是由于处于混悬状态的磁流体透光性差,除非发生沉聚,否则难以运用常规光学检测手段对团聚体粒径大小进行分析与评价。考虑到铁磁流体具有强磁性特点,但又与铁磁性物质不同——其磁化特性曲线中没有磁滞回线,因此可以用磁天平对铁磁流体磁化特性进行实验研究。于是在经过大量的实验后我们终于发现在浓度为25%~35%之间其稳定性能最佳,同时为了能够直观的验证这一发现,我们设计出一款新型书画装置,并试图通过书写的效果来展示我们的研究成果。

现有磁性画板是通过磁性笔吸引磁粉或磁珠在画板上留下痕迹来实现书写功能的。但无论是磁粉还是磁珠在笔迹的控制和表现力方面均由于像素不够或者笔迹不连续而显弱势,难以达到传统书画艺术在技巧、技法方面的表现力要求。因磁流体具有良好的流动性及磁化特性,我们试图以磁流体做为“墨水”创造出一种新型书写装置,改变这一现状。

2 铁晶体、铁氧体与尖晶石型晶体结构及磁性

固体根据有无熔点分为晶体、非晶体。

晶体又分为多晶体、单晶体。其中多晶体是由很多晶粒组成的,表面看起来混乱无序。它是由许多晶核同时生长起来而形成的,如金属物质。

单晶体则是完整的一块晶体,如天然矿石。单晶体在技术上的应用越来越广泛,如半导

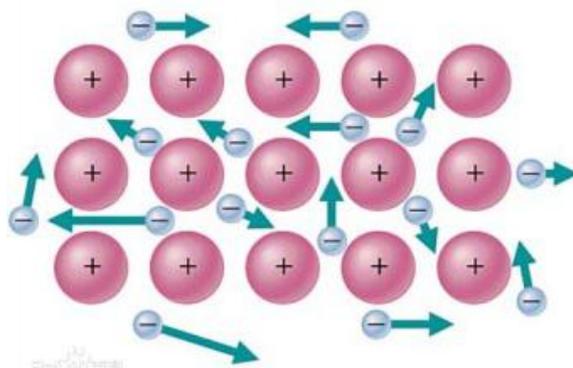
尖晶石型铁氧体磁液的磁化特性研究与应用

Research and application of magnetizing characteristics of spinel ferrite magnetic fluid

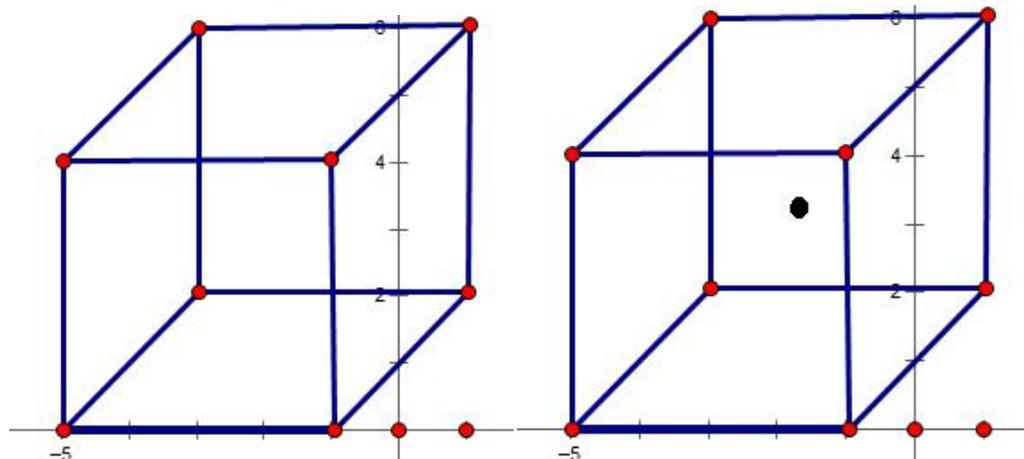
体、铁氧体等, 尤其与铁氧体的磁性有着密切的关系, 因此进一步研究铁氧体的结晶状态显得很有必要。

晶体与气体、液体以及非晶质固体的本质区别是结构上的长程有序。晶体是由构造基元(原子、原子团或离子团)接近无穷的、周期性的反复排列组成的。图 2-1(a)所示为在一个平面规则排列原子球的一个最简单的形式。如果把这样的原子层累积起来, 各层的球一一对应, 就会形成所谓的立方晶格ⁱ。

简单的立方晶格的原子球心显然形成一个三维的立方格子结构, 如图 2-1 (b)。它表示出这个格子的一个典型单元, 全部格子可以看作顺着三个方向反复排列的单元。所以, 也可以用图 2-1 (c) 表示所谓的体心立方晶格, 而 Fe 等元素就具有体心立方晶格。



(a)



简单立方 (b)

体心立方 (c)

图 2-1

在室温下, 铁晶体结构为体心立方ⁱⁱ, 但如果升高温度或加大压强, 就会使其晶体结构发生突变, 这种变化为相变。同时, 其磁学性质也会发生改变。如图 2-2。

尖晶石型铁氧体磁液的磁化特性研究与应用

Research and application of magnetizing characteristics of spinel ferrite magnetic fluid

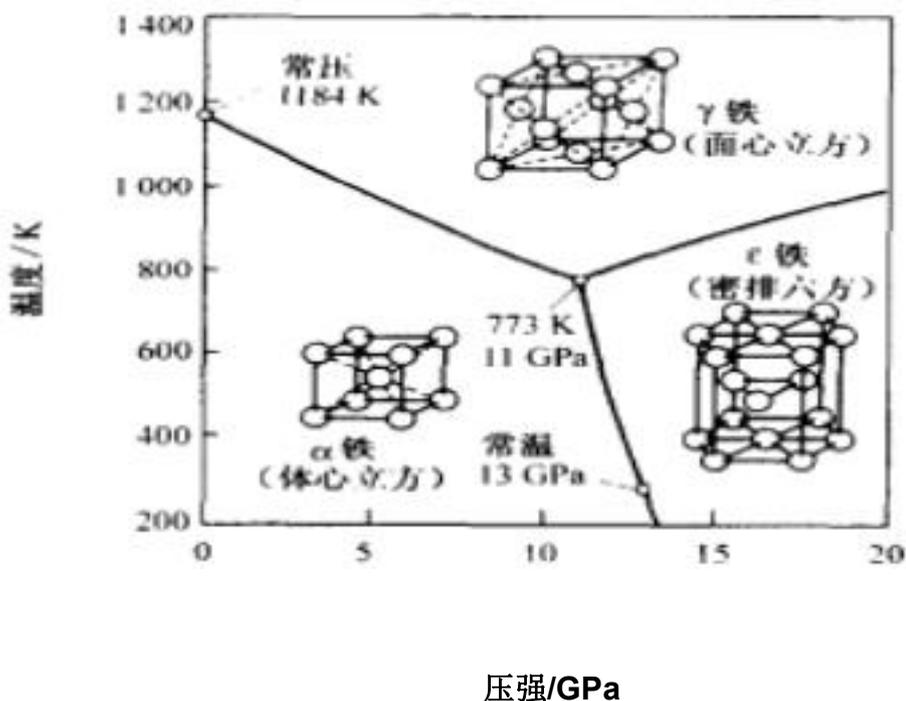
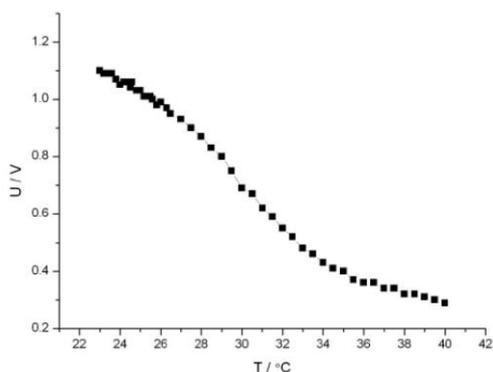
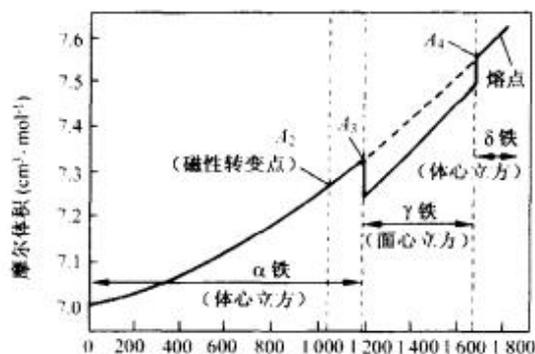


图 2-2



温度与磁化强度关系



温度与形态的变化

图 2-3

铁的相结构随温度压强变化的关系

当物体为尖晶石型晶体时, 我们可以用 AB_2O_4 来表示它 (A 为三价, B 为二价)。A、B 离子和氧离子密堆积后会构成 64 个四面体空隙镶 32 个八面体空隙, 由此可得出一个晶胞共有 96 个之多空隙。如图 2-4, 每个晶胞的尖晶石铁氧体实际上会有 8 个 AB_2O_4 分子, 可是只有 8 个金属离子 A 位 (8d) 16 个金属离子 (16d), 这是化学价平衡的结果, 因而能够得出 72 个空隙是缺位。虽然这种缺位由离子间化学价的平衡作用等因素决定, 但是却十分容易被其他金属离子充填和代替, 这时它就可以被制成具有不同性能的软磁、矩成、旋磁、压磁材料, 并得到十分广泛应用的结构基础, 也为铁氧体的掺杂改性提供了十分优良的效果。

Fe_3O_4 是由 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 、 O^{2-} 通过离子键组合起来的复杂离子晶体, 其结构与尖晶石型晶体结构相仿。因此我们后面的研究主要使用 Fe_3O_4 为研究对象。

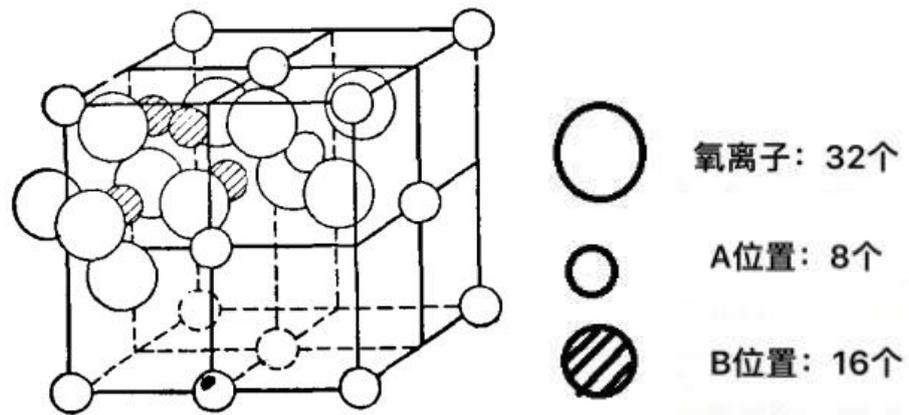


图 2-4

2.1 Fe₃O₄ 的磁性与饱和磁化强度理论值

在 Fe₃O₄ 的晶格中, 金属离子 Fe 半径大约 0.83×10^{-10} 米, 在最相邻的 A 位和 B 位上时, 被离子半径较大的非磁性氧离子 O²⁻ 隔开ⁱⁱⁱ (半径约 1.32×10^{-10} 米)。并且由于金属离子之间的距离太大, 电子不能有直接交换作用, 而只能通过中间非磁性氧离子间接进行。所以在铁氧体的交换过程中, 一定有氧离子的价电子参与。而对于这种通过氧离子而发生的交换作用叫做间接交换作用或者超交换作用。如图 2-5 所示。在金属离子和氧离子近似排列成直线时超交换作用最大, 垂直时最小, 相应距离近的超交换作用大, 距离远的超交换作用小。

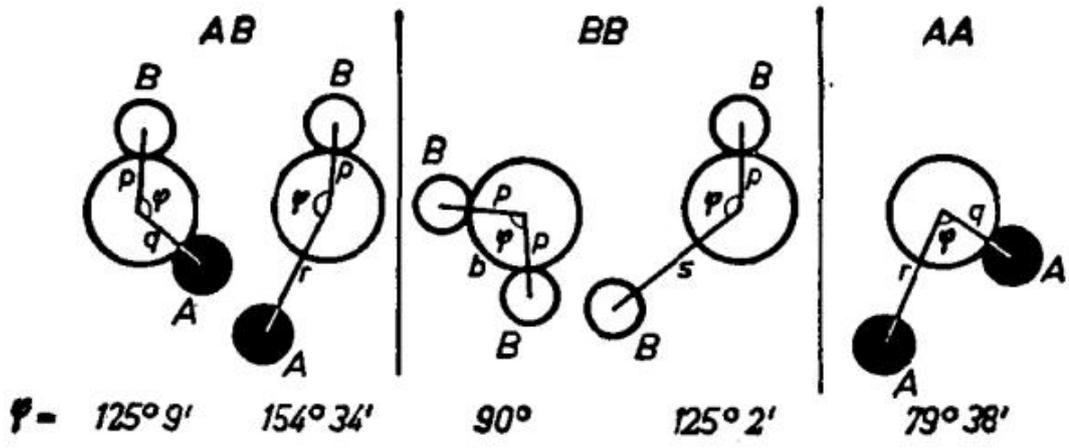


图 2-5 尖晶石型铁氧体超交换作用的离子组态示意图

尖晶石型铁氧体磁液的磁化特性研究与应用

Research and application of magnetizing characteristics of spinel ferrite magnetic fluid

表 1-1 不同 z 离子组态下晶格常数

离子组态	夹角 Φ	离子距离 (晶格常数)	
		Me-O	Me-Me
A-B	125° 9'	q=0.216 p=0.25	0.415
	154° 34'	p=0.25 r=0.415	0.61
B-B	90°	p=0.25	0.35
	125° 2'	p=0.25 s=0.43	0.66
A-A	79° 38'	q=0.216 r=0.415	0.43

由上表可见, A-B 间的超交换作用是主要的, B-B 的交换作用为次要的, A-A 间的交换作用最弱, 但后两者的离子磁矩排列为平行, 因此 A、B 间的磁矩是反向平衡。

表 1-2 几种尖晶石型单位分铁氧体的饱和磁化强度 M_s 和单位重量饱和磁化强度 σ_s

铁氧体	0K			20°C		
	σ_s [高斯·厘米 ³ /克]	M_s [高斯]	$4\pi M_s$ [高斯]	σ [高斯·厘米 ³ /克]	M_s [高斯]	$4\pi M_s$ [高斯]
MnFe ₂ O ₄	112	560	7000	80	400	5000
Fe ₃ O ₄	98	510	6400	92	480	6000
CoFe ₂ O ₄	90	475	6000	80	425	5300
NiFe ₂ O ₄	56	300	3800	50	270	3400
CuFe ₂ O ₄	30	160	2000	25	135	1700
MgFe ₂ O ₄	31	140	1800	27	120	1500
Li _{0.5} Fe _{2.5} O ₄	69	330	4200	65	310	3900

注: 单位重量的饱和磁化强度

$$\sigma_s = \frac{N_A \mu_B}{M_{mol}} m = \frac{5585}{M_{mol}} m \left[\frac{\text{高斯} \cdot \text{厘米}^3}{\text{克}} \right]$$

饱和磁化强度

$$M_s = \frac{X \mu_B}{a^3} m [\text{高斯}], \text{ 或}$$

$$M_s = (1-P) d_x \sigma [\text{高斯}]$$

$$M_s = \frac{m}{V}$$

N_A ---阿伏伽德罗常数 6.02×10^{23} /克分子

μ_b ---波尔磁子数 0.9273×10^{-20} 【达因·厘米】

m ---每个分子的饱和磁矩

M_{mol} ---铁氧体的克分子量，尖晶石型一般在 200~240 之间

x ---单位晶胞的分子数，尖晶石型铁氧体的 $x=8$

a ---晶胞的晶格常数

P ---孔隙率

d_x ---铁氧体的理论密度.

V 为颗粒体积

由此我们可以计算铁磁凝胶所产生的饱和磁化强度，进而可以对书写时磁液的受力进行分析，这会在下文进行讨论。

2.2 磁导率

表示磁介质磁性的物理量。磁感应强度 B 是表示某介质中磁场强弱的一个物理量，单位为高斯(或简称高)。同 H 一样，来源于电流；所不同者， B 和周围介质有密切关系。在有磁介质的情况下， B 和 H 之比值称为该介质的磁导率 μ ：

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (2.6)$$

由式子可知在外加磁场趋近于 0 时，要使磁感应强度尽可能大，则必须选取磁导率较大的物质。

μ 表示介质经过磁力线的能力，是代表介质磁性强弱的物理量。

磁感应强度 B 和电流 I 的强度成比例，并和电流所经过的导线形状、在磁场中的位置和周围的介质有关。

$$H = \frac{0.4\pi nI}{L} \quad (2.7)$$

于是由式(2.7)和(2.6)式可以得出长螺线管电流所产生的磁场感应强度：

$$B = \frac{0.4\mu\pi nI}{L} \quad (2.8)$$

式中 n 是螺线管的匝数， L 为螺线管的长度【厘米】。

综合上述，磁场强度 H 不随磁介质而变，而磁感应强度 B 却随介质磁导率 μ 不同而变化。在真空中 $B=H$ 。但在磁介质中，由于介质受磁场强度 H 的作用而磁化，而使磁感应强度 B 增大，因此也可以认为 B 取决于磁介质的磁导率 μ ，不同介质的 μ 不同， B 也各异。

2.3 磁畴与磁畴壁

铁磁体内部的原子磁矩自动定向排列形成自发磁化, 对应自发磁化区域叫做磁畴, 其半径尺寸一般在 10nm 数量级, 是原子半径尺寸的 10^{13} 倍。实验上, 可以使用粉纹法或巴克豪森效应实验观察到磁畴的存在。如图 2-9

在自发磁化状态下的磁畴内部原子磁矩彼此反平行, 相邻磁畴之间磁矩逐渐改变的方向的过渡层为磁畴壁 (或布洛赫壁)。

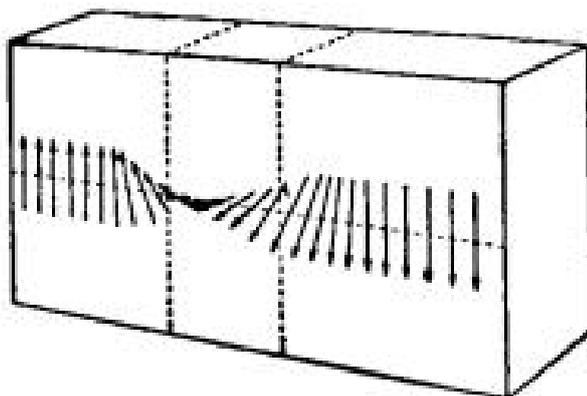


图 2-9 磁畴壁位置和形状示意图

在未外加磁场时, 磁粒内每个磁畴的自发磁化方向是不同的, 如图 2-10 (a) 所示, 因此整体上不显现出磁性。而一旦外加磁场后, 随着外磁场的增强, 铁磁质的磁化过程大致如下:

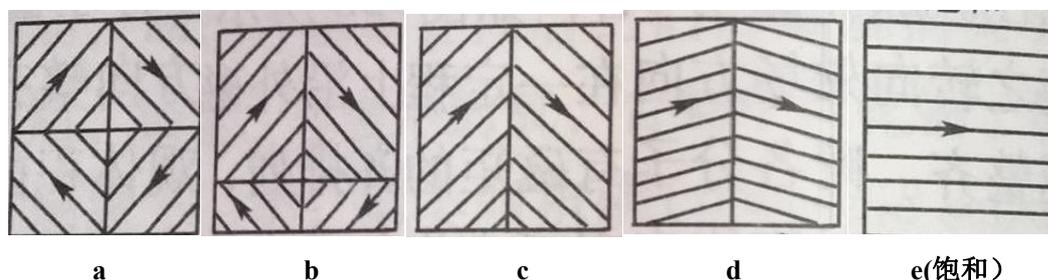


图 2-10 单晶结构铁磁质的磁化

(1) 如图 2-10 (b) 所示, 通过畴壁的移动, 某些磁化方向与外磁场方向接近的磁畴扩大了空间, 吞并了邻近磁化方向与外磁场反向的磁畴^{iv}。此时若撤去外磁场, 畴壁退回原处, 整体又不显磁性, 这称为可逆位移阶段;

(2) 如图 2-10 (c) 所示, 畴壁出现急剧移动, 磁化强度急剧增大。这个过程不再可逆, 称为不磁化阶段;

(3) 如图 2-10 (d) 所示, 各磁畴的磁化方向在不同程度上转向外磁场方向, 铁磁质在宏观上显示出较强的磁性, 称为磁畴磁矩的转动阶段;

(4) 如图 2-10 (e) 所示, 各磁畴沿磁矩已经完全整齐排列, 所以磁化强度非常大, 即磁性极强, 这就是它比顺磁性和抗磁性强的原因。

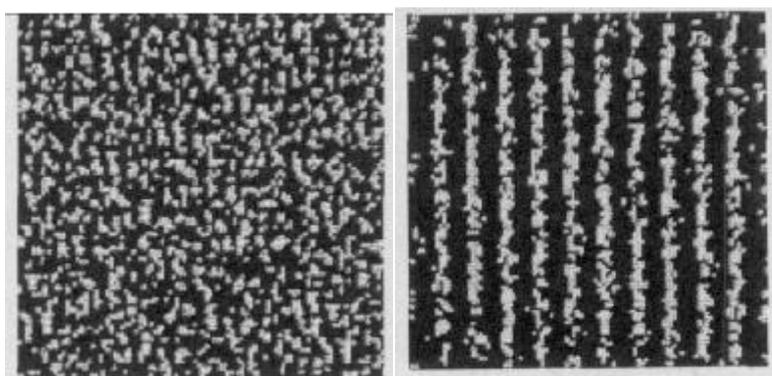
2.4 磁流体的认识与研究

铁磁流体又叫磁性液体, 是一种新型的功能材料。它并非磁性材料的液态状态, 而是把经表面活性剂处理过的超细磁性微粒 (10nm 左右) 高度分散在基液中形成一种磁性胶体溶液。磁性微粒通常是由 Fe_3O_4 , $\Sigma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, Ni, Co, 和 Fe 等金属组成的, 表现出磁性。而基液可以是由水、有机溶液、碳氢化合物以及汞等单一或通过配方组合的液态物质, 这使得磁流体也具有流体的性质。其主要磁学特性包括磁化特性、粘度特性、磁热特性及热磁对流性质等。

2.5 磁流体的磁化特性

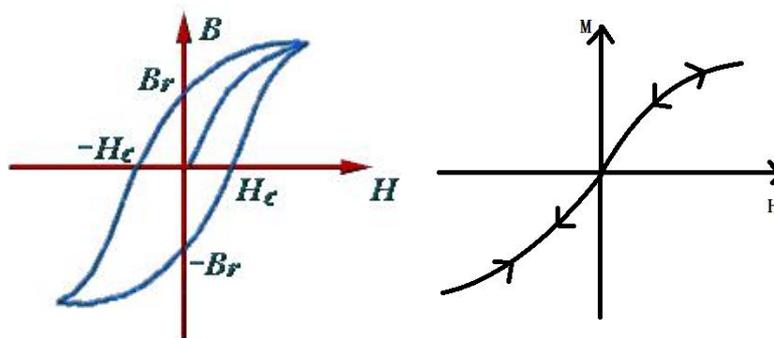
磁液中的微粒尺寸很小, 可以看作是磁畴或近磁畴的, 按磁畴的自发磁化特点, 均应有自发磁化的特征。而微粒中由于有基液和活性剂, 因此磁流体中的磁畴壁厚度比固态晶体中要厚, 而磁畴壁角度将在较大范围内变化。并且这些固相颗粒, 在基液中进行布朗运动, 它们的磁矩是杂乱无章的, 因此磁液显现超顺磁性。但当外加磁场时, 粒子的磁矩便接近有序排列, 于是使磁液处于被磁化的状态。

如图 2-11 所示。可以看出, 饱和磁化强度 M_s 是磁液的重要性能指标之一。其磁化——退磁——磁化过程的曲线呈 S 形状。如图 2-12。这说明磁性液体没有剩余磁感应强度和矫顽力。磁流体达到饱和时的磁场强度大约为 1~13mT 左右。



(a) 在无磁场作用下粒子的分布 (b) 在磁场作用下粒子的分布

图 2-11 铁磁微粒分布情况



(a) 铁磁物质磁化曲线图

(b) 磁流体磁化曲线

图 2-12 磁化曲线

3 磁流体磁化过程与模型建立

3.1 不同直径微粒的磁化实验

因为磁流体具有 S 形状的磁化特性曲线, 所以我们可以看作是使用软磁材料的磁化特性进行分析。软磁材料在磁中性状态下, 受到逐渐增加的外磁场的作用而磁化时, 其磁化强度 M 随外界磁场 H 而变化的关系曲线如图 3-1:

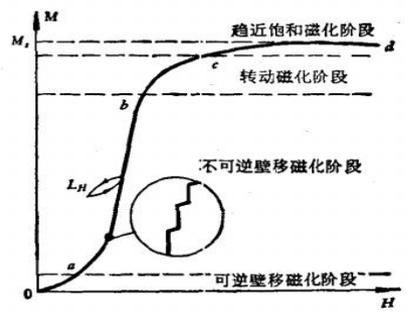


图 3-1 磁化曲线与磁化过程示意图

在上图曲线微弱磁场 H 从 0-a 阶段的磁化为可逆的, 即 H 从 0 到 H_a 再从 H_a 到 0 的过程中, 磁化强度 M 会近似退回到 0。磁导率 μ 和 H 之间是线性关系的。

当 H 增大到 $H_a - H_b$ 阶段时, M 随 H 快速增加, 经过最大磁导率 μ_{max} 和最大磁化率 X_{max} , 出现巴克豪森跳跃, 磁矩的变化较大。即使 H 减少至 0, 磁化强度 M 的曲线出现一定滞后。

当 H 继续增大到较强磁场 $H_b - H_c$ 阶段时磁化曲线逐渐平缓, H 再大幅增加而 M 不变化。

当 H 涨价到 $H_c - H_d$ 之间时, 趋近饱和磁化状态, 接近顺磁特性。

由于磁性材料内部并未发生化学变化, 可以用相变理论对磁化过程进行解释。相变指的是物质从一种相转变为另一种相的过程。物质的物理、化学性质完全相同, 与其他部分具有明显分界面的均匀部分称为相。与固、液、气三态对应, 一般物质有固相、液相、气相。磁流体在被磁化到过渡磁化的过程中, 可以根据磁场大小区分为不同的相态。我们知道, 由于磁化颗粒间的力各向异性, 因而在外加磁场下颗粒首先形成沿外场方向的链结构。单链形成后, 它们之间通过相互作用, 再形成纤维状柱状结构。

我们可以通过直径为 1mm 的小铁珠放置在磁场中看到链状结构的生成。

尖晶石型铁氧体磁液的磁化特性研究与应用
Research and application of magnetizing characteristics of spinel ferrite magnetic fluid

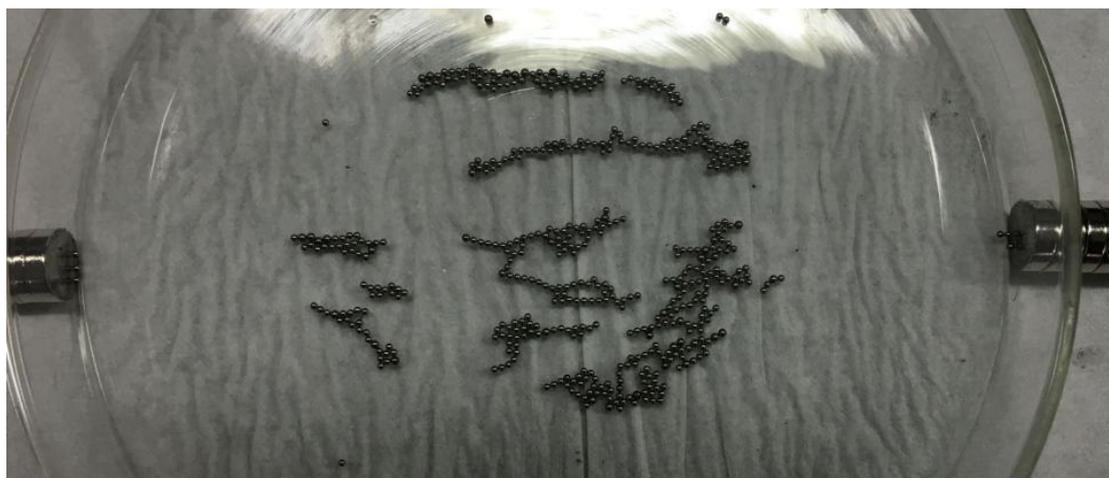


图 3-2

为了更清楚地探究磁单畴被磁化的过程，选用了直径分别为 1mm 的铁球 (a)、0.1mm 的铁粉 (b) 和 10nm 的 Fe_3O_4 (c) 进行磁化过程观察 (a₁) (b₁) (c₁)。

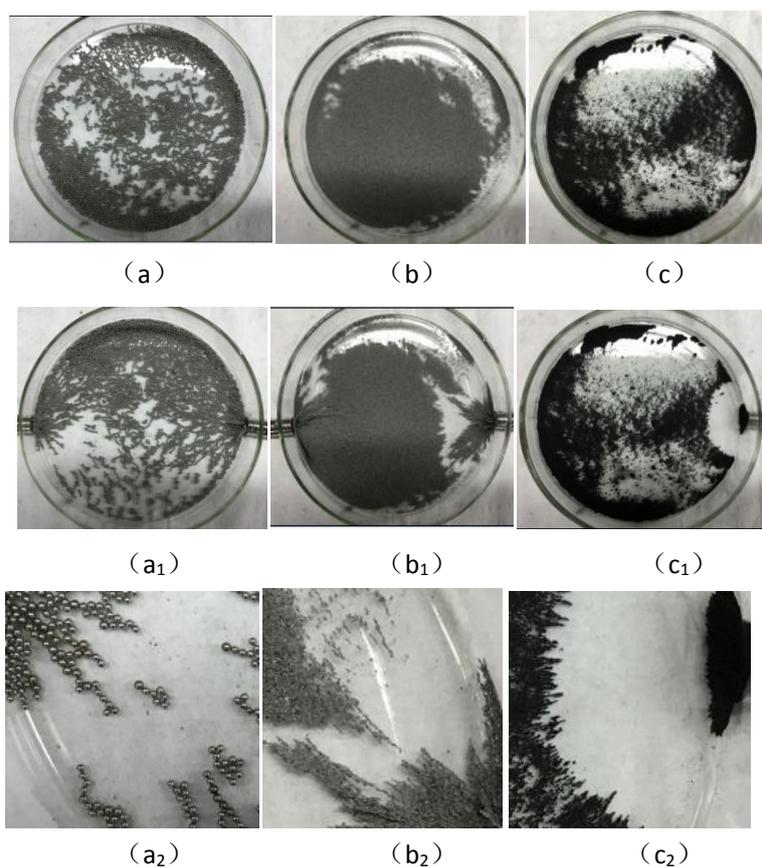


图 3-3

分析照片细节 (a₂) (b₂) (c₂) 可以发现，靠近磁极附近，均出现长链结构，并且当磁场力在某临界状态时，微粒直径越小，与容器摩擦力越小，越容易被移动到磁极附近；而离开磁极一定距离以外，则长链与短链结构并存。

3.2 磁场的场强分布评估

利用场强计对 3.1 实验所用的永磁铁的磁场强度分布做了系列研究。

将圆柱形磁铁中心作为原点，轴向为 x 轴，磁场强度随永磁铁表面距离 x 增加而迅速减

少；将 x 中心场强 B_x 、 $\frac{B_x}{2}$ 、0 对应位置进行打点，并做封闭连线后，发现其分布基本为

以 Y 轴为对称的蝶型图案；叠加磁铁越多，相同水平距离下中心场强 B_x 越大。并且在距离

永磁铁端面约 1-2cm 处中心磁场分布范围相对最大。



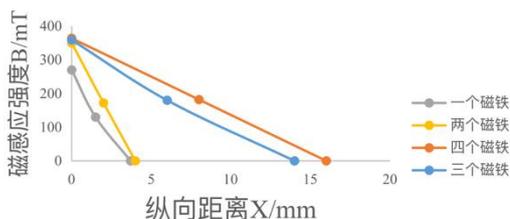
(特斯拉计)

(操作图解)

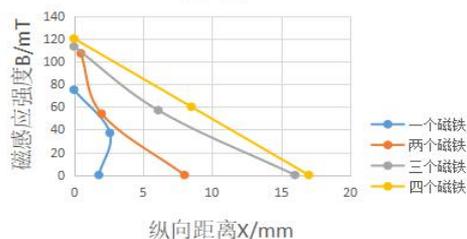
图 3-3

3.2.1 数据处理

水平距离0mm下，磁感应强度与纵向距离的关系



纵向距离与磁感应强度在水平距离为 0.5cm 的关系



尖晶石型铁氧体磁液的磁化特性研究与应用

Research and application of magnetizing characteristics of spinel ferrite magnetic fluid

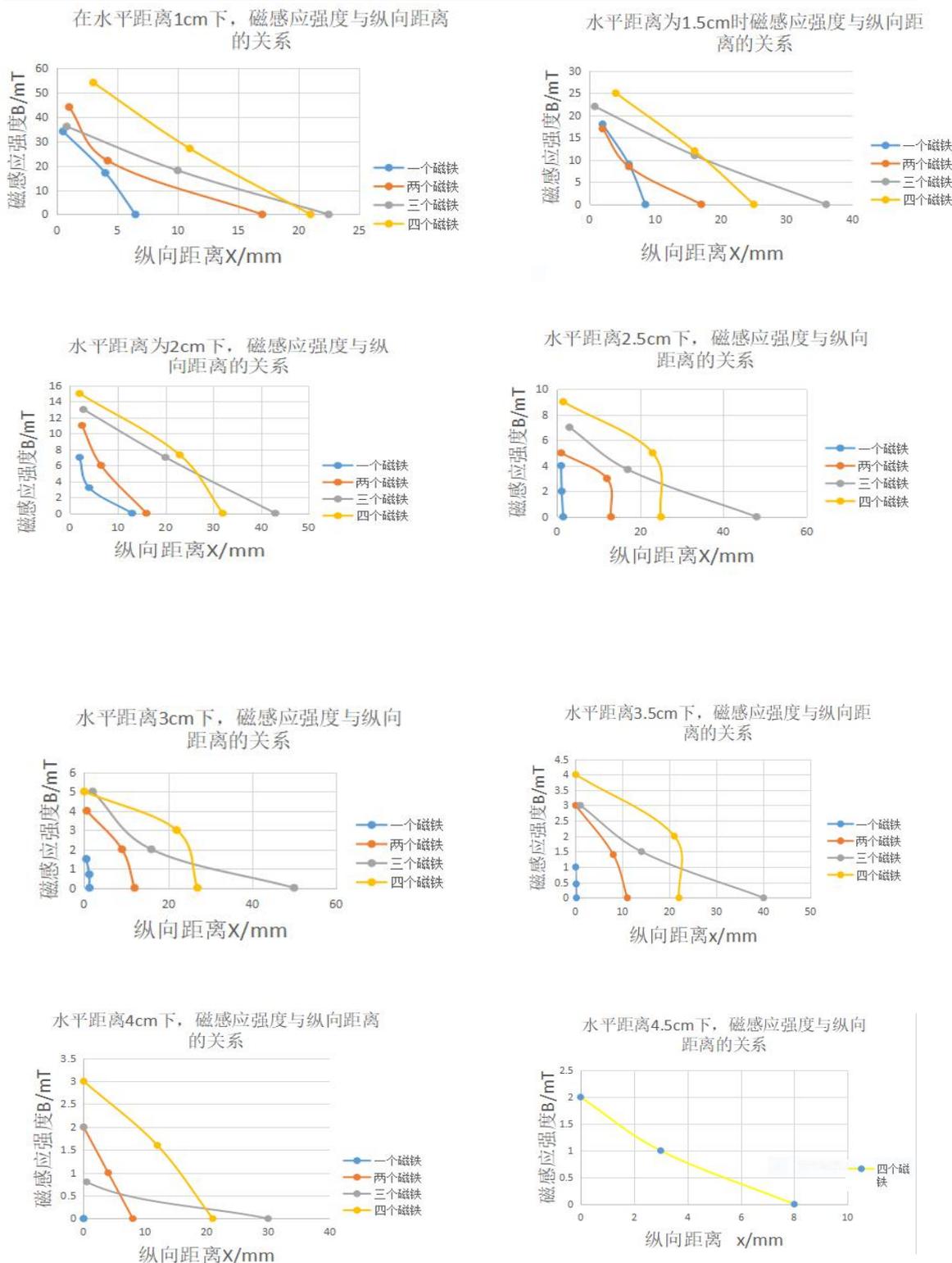


图 3-4 不同距离 x 下场强随 y 的分布数据

尖晶石型铁氧体磁液的磁化特性研究与应用

Research and application of magnetizing characteristics of spinel ferrite magnetic fluid

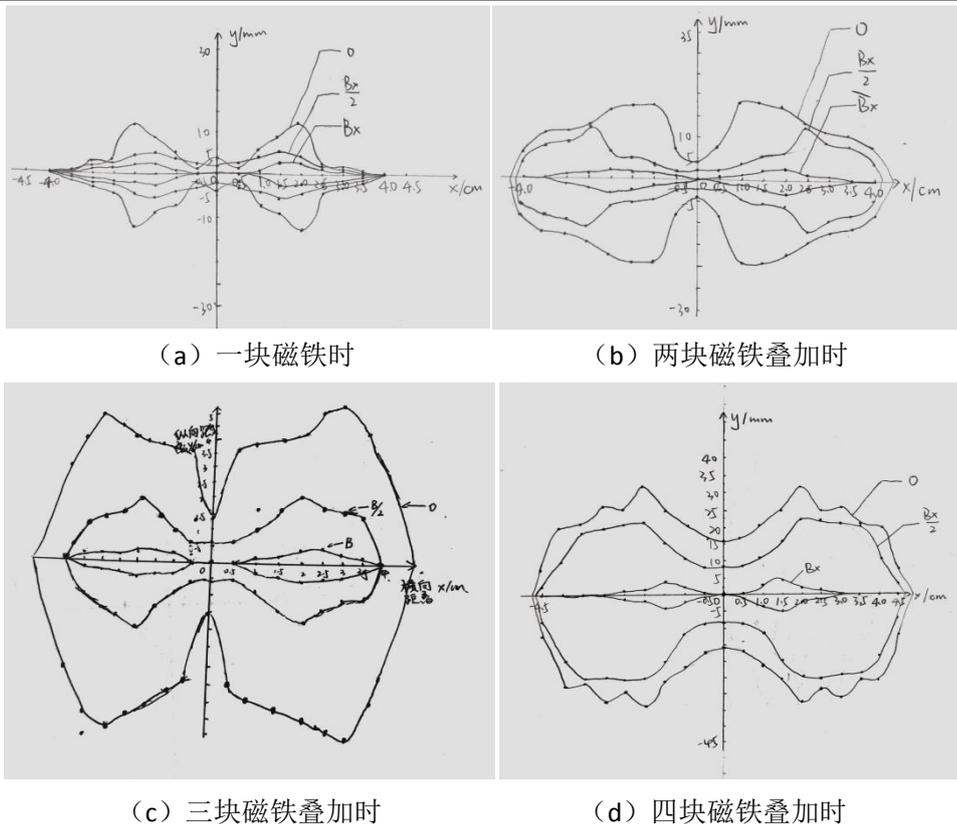


图 3-5 永磁铁磁场分布

3.3 实验现象分析

综合 3.1 实验现象和永磁铁磁场分布关系后, 可以发现在永磁铁表面距离约 1.5-2cm 范围内, 磁感应强度约 15mT, 大约为铁磁体的饱和磁化强度, 铁氧体磁性微粒能被磁化并被移动, 微粒直径越小其长链结构越容易断裂缩塌。

距离永磁铁表面 2cm-4cm 范围内, 磁感应强度从约 10mT 迅速衰减到 1mT 以下, 属于微弱磁场范围, 在此区域长、短链式结构可以共存。

超过 4cm 的距离以后, 磁场基本趋向 0, 但不同区域需考虑附近存在的链式结构的磁化特点的影响。

3.4 稳恒磁场下链式结构磁化过程分析

当存在外部稳恒磁场时, 铁磁流体中铁磁微粒按磁场方向形成链状有序分布^{vi}。假设将其中的一条链看成成长径比(长度/直径, L/R)较大的棒状铁磁体, 则该棒状磁体沿轴向放置于磁场方向, 受到磁场磁化以后, 在磁体的右端出现 N 极, 左端出现 s 极, 如图 3-5 所示。磁力线从 N 出发, 终止于 S。在磁体内部, 磁力线从 N 到 S, 起着退磁的作用, 称为退磁场 H_d 。

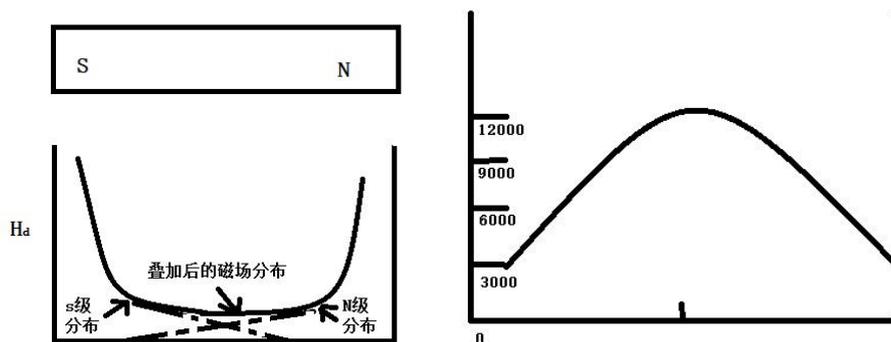
图 3-6 (a) 显示退磁场沿磁棒长度方向的分布, 虚线表示每个磁极的 H_d 沿长度的变化规律,

实线表示两个磁极的 H_d 的合成曲线。 H_d 在两个极面处最大, 在磁棒中心最小。图 3-6 (b)

尖晶石型铁氧体磁液的磁化特性研究与应用

Research and application of magnetizing characteristics of spinel ferrite magnetic fluid

是磁感应强度 B 沿磁棒的分布状况。



(a) H_d 沿磁棒的长度方向的分布 (b) B 沿磁棒的长度方向的分布

图 3-6 沿磁棒长度方向的磁场分布

在均匀的磁场中，放入一个磁体，就要改变原来的场分布。只要磁棒的磁导率比周围空间的磁导率高，磁棒就能集中磁通，而在磁棒长度中心附近的外侧各点上的场就要削弱。如果在均匀场中放入的是抗磁性材料，则得到相反的结果，此时通过材料内的 B 比周围的低。将一个未经磁化的物体放入磁场后，也将改变场的分布，改变的程度与物体的磁导率有关，磁导率越高，场分布的改变愈明显。如果放入的是弱磁材料，则对场的影响实际上可以忽略。图 3-7 (a) 表示均匀磁场的分布状态。3-7 (b) 表示在无外场作用下，磁铁 B 的分布。3-8 (c) 表示 (a) 和 (b) 的矢量和^{vii}。

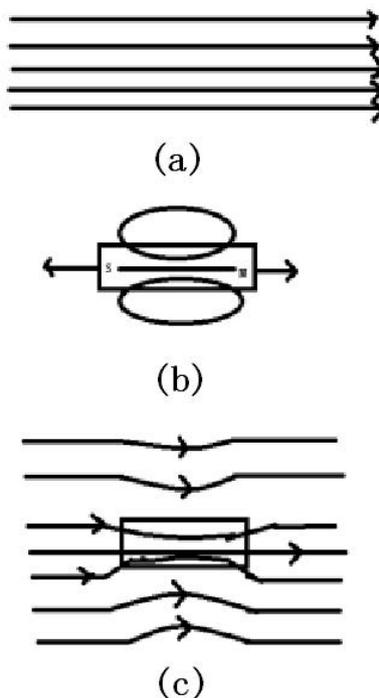


图 3-7 在均匀磁场中放入一个磁导率大于 1 的磁体后的情况

因为磁性材料的磁化状态会受到退磁场的影响, 设外加磁场为 H_0 。受到退磁场 H_d 的作用, 产生的有效磁场 H_s 为

$$H_s = H_0 + H_d \quad (3.8)$$

磁体的退磁场 H_d 与磁化强度 M_s 成正比, N 为退磁因子, 决定于磁体的形状。

$$H_d = -NM_s = -\frac{NJ}{\mu_0} \quad (3.9)$$

一般情况下, 退磁场 H_d 或退磁因子 N 沿磁体长度改变, 越靠近两端, 退磁效应越强。磁棒中心截面上的磁感应强度 B_e 通常用下式表示, J 为磁棒中心处的本征磁感应强度。

$$B_e = \mu_0 H + J + \mu_0 H_d \quad (3.10)$$

$$= J + \mu_0 \left(H - \frac{NJ}{\mu_0} \right) \quad (3.11)$$

若认为某处的磁场为水平的均匀磁场, 由

$$B = \mu_0 H \quad (3.12)$$

可以得到某处的磁场强度 H 。由于磁棒所形成磁路为开路, 磁路受到退磁场作用, 磁棒两端退磁效应明显, 中部退磁场最弱。由于退磁场不同, 使磁棒产生不均匀磁化, 在磁棒中心的截面上受到的退磁场最小, 合成磁场最大, 因而该处的磁感应强度 B_e 值最高。

在两个端面处受到的退磁场最大, 合成磁场最小, 因此在端面处的磁感应强度最小。如果使用有效磁导率 μ_s 表示磁棒实际的磁导率, 磁棒内 B 将放大 μ_s 倍。磁棒的有效磁导率 μ_s 比材料磁导率 μ 低, 降低程度由磁芯的集合形状和尺寸决定。

若磁棒长度/直径比值 $L/R=1$ 时, 则 $\mu_s \leq 2$; $L/R=5$ 时, $\mu_s \leq 30$; $L/R=10$ 时, $\mu_s \leq 70$ 。

若磁棒无限长, 则磁棒有效磁导率 μ_s 越接近材料磁导率 μ 。因磁性微粒直径在 nm 级别, 长度比极大, 因此可近似认为磁导率为 μ 。

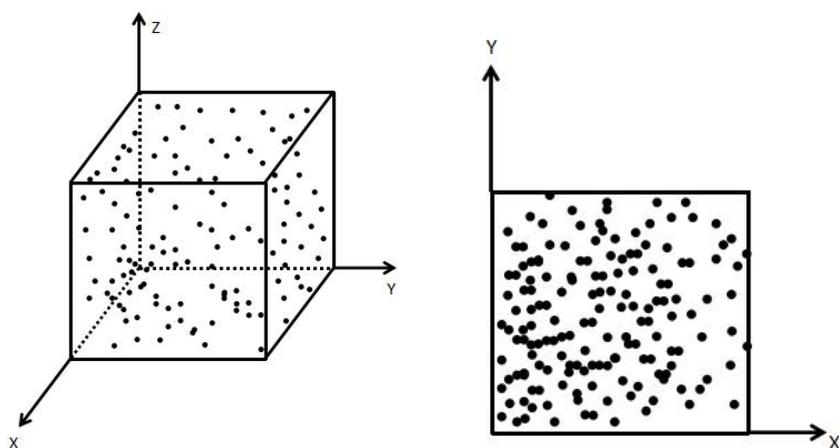
3.5 铁氧体磁流体的磁化过程建模

综合以上实验与分析, 认为磁流体由液态向类固态转变^[8]的过程中, 存在三个临界场强 $H_a < H_b < H_c$ 。当 $H < H_a$ (H_a 对于空气磁感应强度大约 1mT) 时, 磁流体处颗粒悬浮, 类似无规则分布的“气态”磁性微粒做布朗运动; 当 $H_a < H < H_b$ 时 (H_b 对应磁感应强度大约 5mT), 出现短链与颗粒共存的状态; 当 $H_b < H < H_c$ 时 (H_c 对于磁感应强度大约 15mT), 处于向列型晶流状态; 当 $H > H_c$ 时, 系统出现稳定的柱状固体状态; 但 H 再增强以

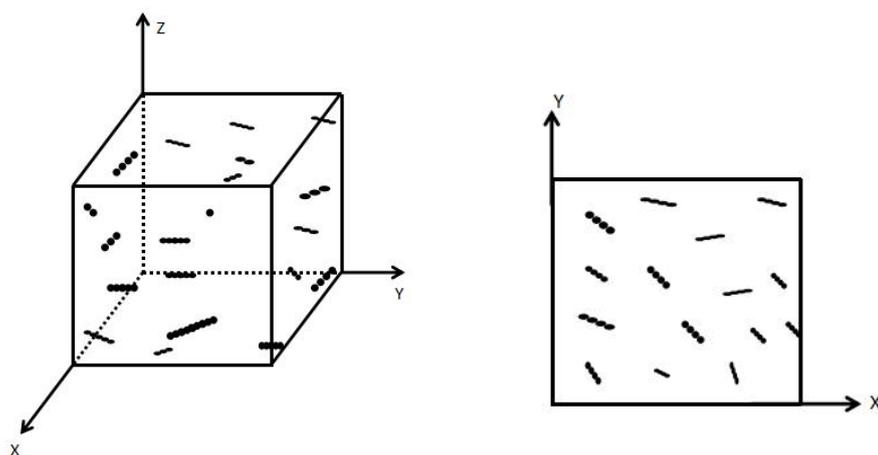
尖晶石型铁氧体磁液的磁化特性研究与应用

Research and application of magnetizing characteristics of spinel ferrite magnetic fluid

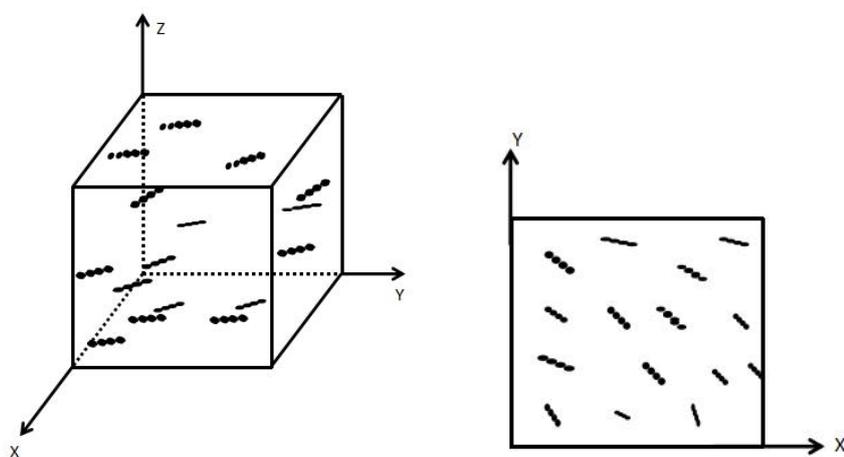
后, 由于磁场力做功, 将破坏长链结构, 磁性微粒链发生断裂坍塌并产生在磁极表面的团聚现象^{viii}。



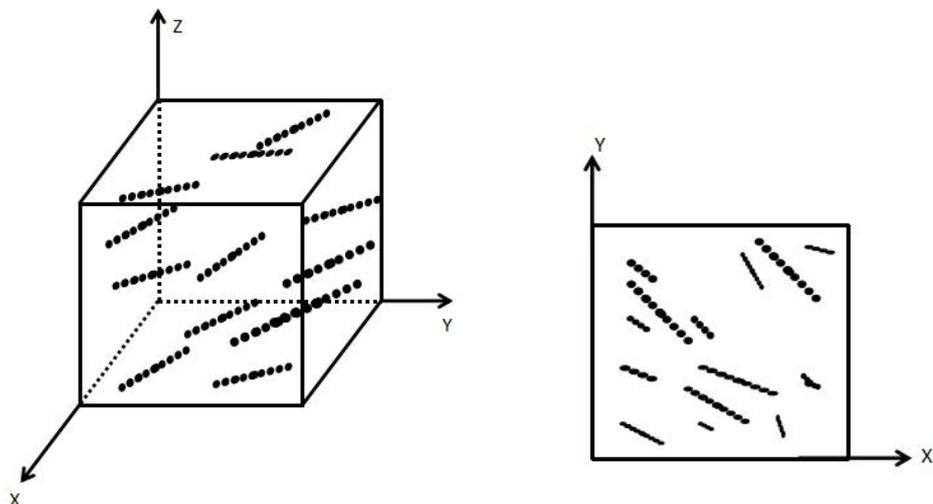
(a) $B=0$



(b) $B=5.0 \times 10^{-3}$



(c) $B=8.0 \times 10^{-3}$



(d) $B = 1.5 \times 10^{-2}$

图 3-13 磁液在平行磁场下粒子分布形态

4 流体磁化特性实验研究

实验目的：对铁磁流体磁化特性进行研究探讨磁畴壁厚度与磁化关系

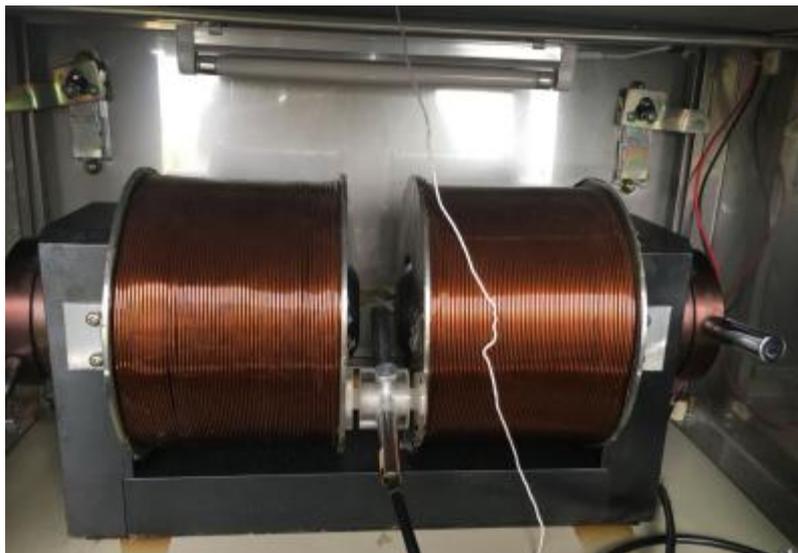
使用仪器：分析天平、磁天平



(a) 电子分析天平



(b) 磁天平



(c) 稳恒磁场

图 4-1 实验仪器

把表面活性剂处理过的铁磁性微粒分散在基液中形成磁性胶体溶液后。铁磁流体具有强磁性特点，但又与铁磁性物质不同，其磁化特性曲线中没有磁滞回线。可以用磁天平进行磁化特性的测定。

实验步骤:

称量定量 Fe_3O_4 粉末与甘油按不同浓度配制铁磁液体，置于稳恒磁场中，通过调整线圈的励磁电流获得 0-750mT 的恒稳磁场，并记录下不同磁场下样品的视重。将质量变化量 Δm 与磁感应强度 B 的曲线描绘出来。

4.1 未经超声处理时的磁化特性

为保持较稳定的磁流体磁畴壁距离，特使用粘滞力大的甘油配制浓度分别为 5%、10%、50% 的 Fe_3O_4 磁流体样品，与用于对比的未研磨 Fe_3O_4 粉末置于恒稳磁场下，并将所记录数据描绘 $\Delta m - B$ 关系曲线，如图 4-2

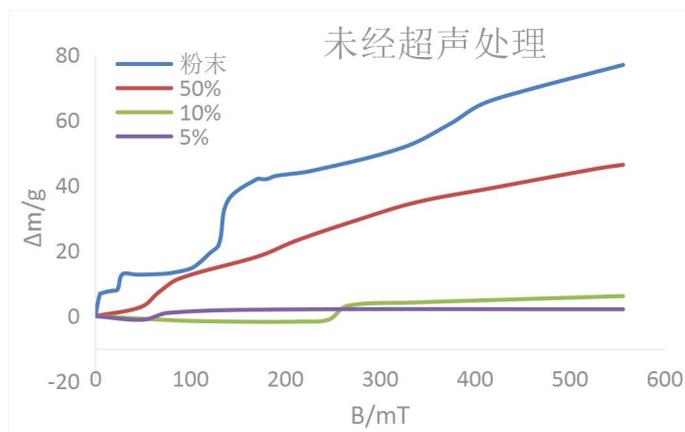


图 4-2 未经超声振荡处理的样品磁化特性

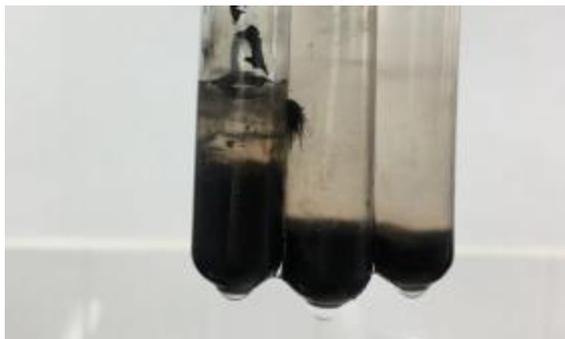


图 4-3 右侧两个发生完全沉聚的磁性液体（右一 5%、右二 10%）

实验发现, Fe_3O_4 粉末样品在 0mT、25mT、150mT 处有明显的饱和磁化台阶; 50%浓度的样品在 50mT 处有明显的饱和磁化台阶; 5%浓度的样品在磁场从 0 增大到 50mT 之间发生视重减少情况, 之后视重增加并迅速达到饱和磁化; 10%浓度的样品在磁场从 0 增大到 250mT 处出现视重减少情况, 之后视重增加并迅速达到饱和磁化。而经过测量的 5%与 10%浓度样品, Fe_3O_4 微粒发生完全沉聚到试管底部。

参考图 4-2、4-3 并分析实验结果。50%浓度的样品与粉末样品在磁场增大过程中, 内部微粒将按磁场方向排列成链状样品, 磁液内部有效磁导率 μ_s 逐渐增加并趋向 Fe_3O_4 的磁导

率 μ , 而磁液内部 B 将比实际磁场计测得数值更大, 因此铁磁微粒将迅速被饱和磁化形成磁化曲线台阶。继续增大磁场后, 链状样品的末端断裂, 微粒向更强磁场方向运动, 并开始形成下一级台阶。

而用于比较的粉末样品并未进行研磨, 内部存在较多大颗粒团聚, 且团聚体与微粒之间没有表面活性剂, 因此其磁化曲线呈现出在对应分布较集中的若干个粒径尺寸上明显的饱和磁化台阶。

而 5%与 10%浓度样品, 由于固相微粒在磁液中所占比例过少, 随着磁场增加, 迅速沉聚到试管底部 (见图 4-3), 使其完全处在磁场梯度很小的磁场中, 因此整个样品增重明显变小。而在完全沉聚之前, 由于内部磁感应强度 B 以平方关系持续增加, 使在一定范围内视重减少。

该实验表明, 在无法获得完全均匀分散的低浓度样品之前, 应尽量避免再采用低浓度样品进行实验。

所见饱和磁化台阶与铁氧体晶体内部巴克豪森效应呈现效果一致。即每个台阶均表示磁流体内部的某些尺寸微粒在混悬状态下, 在磁场力超过甘油粘滞力以后在甘油内部发生转动。

4.2 超声处理 6h 与 72h 后磁化特性

重新配置 20%、25%、35%、40%、50%浓度的样品, 并经过 40khz 超声振荡分别处理 6 小时后与 72 小时后置于恒稳磁场下, 并将所记录数据描绘 $\Delta m - B$ 关系曲线, 见图 4-5。

尖晶石型铁氧体磁液的磁化特性研究与应用
 Research and application of magnetizing characteristics of spinel ferrite magnetic fluid



图 4-4 从左到右依次为 50%、40%、35%、25%、20%

50%样品经过 6h 超声振荡处理以后, 在 25mT、150mT 出现饱和磁化台阶; 而经过 72h 超声振荡处理以后, 在 350mT、650mT 处出现不明显的饱和磁化台阶。

40%样品未能测得有规律的实验数据, 以下不作比较。

35%样品经过 6h 超声振荡处理以后, 在 150mT、400mT 出现饱和磁化台阶; 而经过 72h 超声振荡处理以后, 在 250mT、400mT、650mT 处出现不明显的饱和磁化台阶。

25%样品经过 6h 超声振荡处理以后, 在 200mT 出现饱和磁化台阶; 而经过 72h 超声振荡处理以后, 未出现明显的饱和磁化台阶。

20%样品经过 6h 超声振荡处理以后, 在 50mT、200mT 出现饱和磁化台阶, 并且由于浓度较低, 200mT 以后沉聚明显, 样品视重发生减少; 而经过 72h 超声振荡处理以后, 在 150mT 和 650mT 出现不明显的饱和磁化台阶。

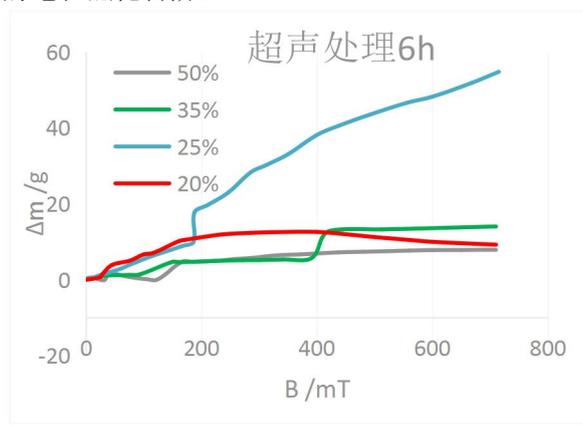


图 4-5 超声处理 6h 后

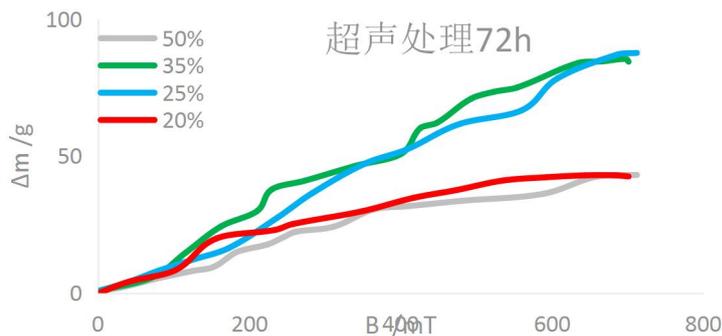


图 4-6 超声处理 72 小时后

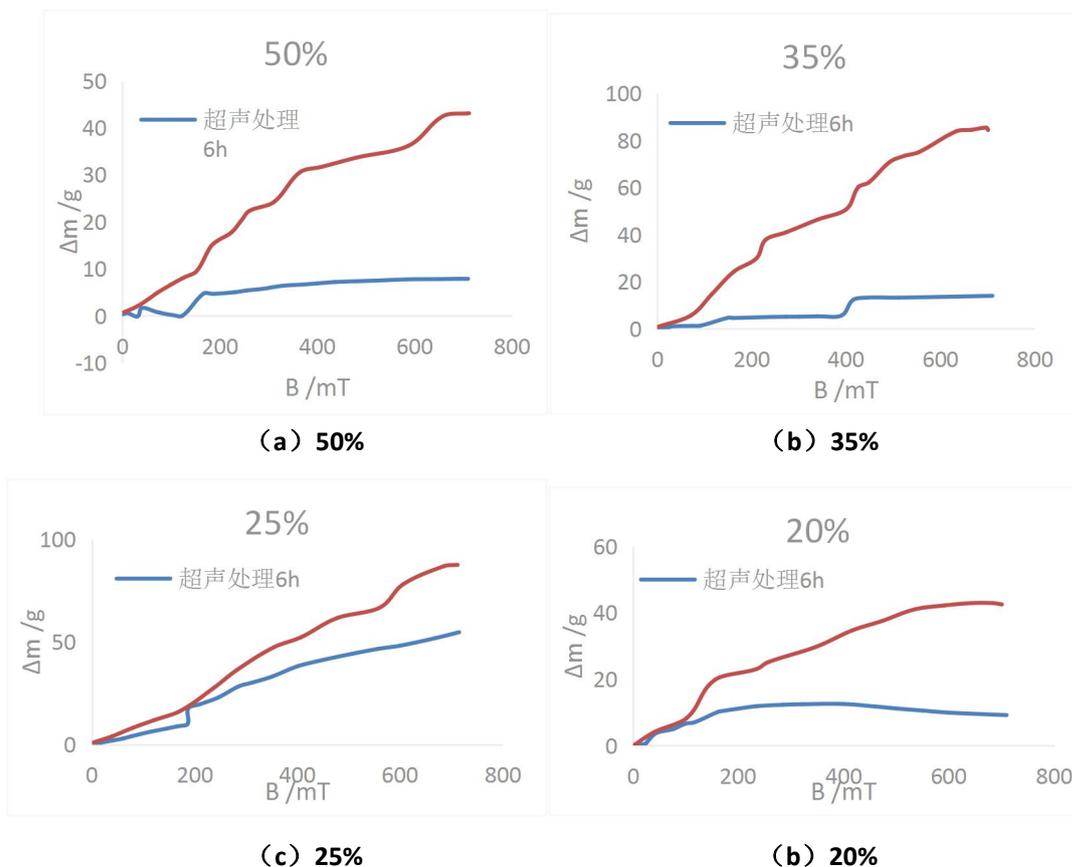


图 4-7 各浓度样品对比图

实验表明, 除 20% 样品外, 未发现有样品视重减少情况, 并且经超声处理时间越长, 饱和磁化现象越不明显, 样品在磁化特性曲线中饱和磁化台阶数量也将减少或向更高磁化强度 B 方向转移。表明经过超声振荡处理后, 样品沉降与团聚状况得到改善, 并且该改善情况能体现在样品的磁化特性曲线上: 团聚体粒径越小, 对应饱和磁化强度越大; 团聚体粒径分布越分散, 对应饱和磁化现象越不明显。

并且, 经过 72h 的超声振荡处理以后的样品比只经过 6h 超声振荡处理的样品具有更高的视重增重 Δm , 其中 25% 与 35% 浓度样品视重增重 Δm 最为明显。这表明磁流体中, 更均匀的固相微粒分布与更小的固相微粒粒径以及特定的微粒浓度将带来更好的磁化效果。并且在浓度在 25%-35% 范围内的磁畴壁厚度在可以在较少磁损耗的基础上达到更好的磁化效果。

4.3 磁化特性的跟踪研究

实验 4.2 的样品再经过静置 20 天 (d) 后, 样品中的固相颗粒都出现了大幅度的沉降与团聚。具体如图 4-8 所示:

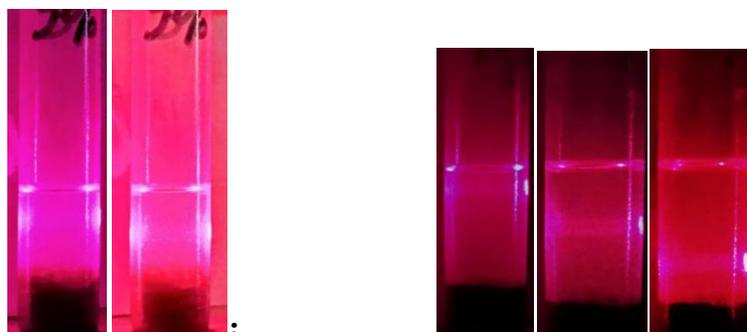


图 4-8 静置 20d 后样品情况
(从左到右为铁磁粉末、20%、25%、35%、40%、50%)

由于样品变化明显, 本文将继续对样品的下部沉降与团聚固态物与上部清液的稳定性进行更深一步的探究。

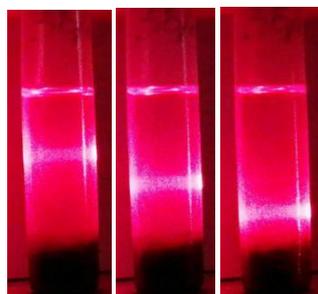
4.3.1 样品上部清液样品的跟踪研究

首先, 我们对样品的上层清液进行了丁达尔现象的探究。其中在黑暗环境下, 使用半导体激光器对不同样品的上层清液的不同高度分别进行照射, 并观察现象, 见图 4-9。

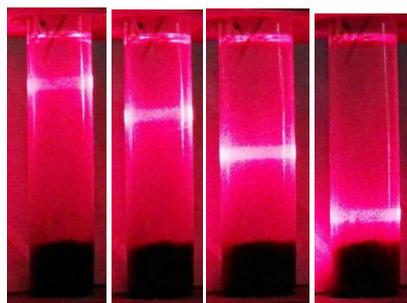


(a) 50%浓度

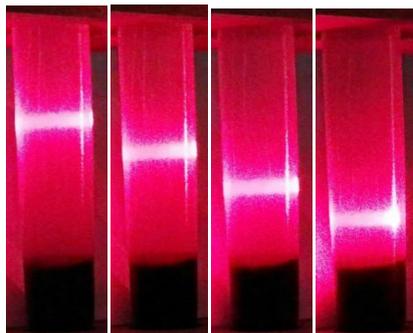
(b) 40%浓度



(c) 35%浓度



(d) 25%浓度



(e) 20%浓度

图 4-9 铁磁流体沉降与团聚后上层清液的丁达尔现象探究

观察现象表明, 浓度为 35%、25%、20%的样品的清液部分在通过激光照射时在垂直于光线的方向上可看到一条明亮的通路, 丁达尔现象明显。而浓度为 50%、40%的样品清液部分丁达尔现象不明显。并且, 同一种浓度的样品中, 下部清液的丁达尔现象比上部清液明显。由此知道, 该清液为胶体, 但其是否仍具有的磁性液体的相关性质情况未知。

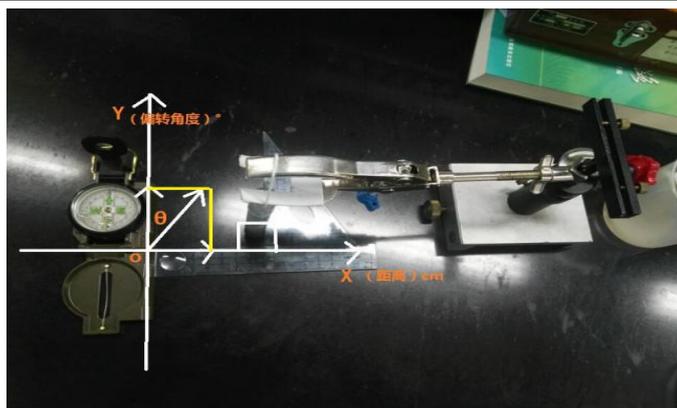
就同一样品的不同高度来看, 光路的明亮程度与光线照射所在的液体高度成反比。说明磁性颗粒的分布随液体深度越深而分布越多。就不同样品同一高度而言, 光路的明亮程度在浓度 20%的样品最为明亮。接着则是 25%与 35%的样品。说明在经过长时间静置之后浓度 20%、25%、35%的样品中依然有部分固态微粒混悬在基载液中并拥有较好的稳定性。而之前稳定性不佳的浓度为 40%与 50%的样品由于样品浓度高, 发生团聚的几率更大, 且经过静置后聚沉更明显, 清液中所含的固相颗粒分布更加松散, 丁达尔现象就没那么明显。

4.3.2 样品下部沉降与团聚样品的跟踪研究

由于样品曾在强磁场中进行过测试, 部分固态微粒被磁化, 在沉降和团聚过程中, 尺度小的微粒将随尺度大的微粒的磁化方向而有序排列, 并最终沉降与团聚为有统一磁化方向的永磁体。为证明以上分析, 本文利用永磁体指南针的偏转影响特性进行实验验证。实验装置如图 17, 指南针按地磁南极指向方向为 Y 轴, 垂直地磁方向为 X 轴, 指针与 Y 轴间夹角为偏转方向 θ 。

尖晶石型铁氧体磁液的磁化特性研究与应用

Research and application of magnetizing characteristics of spinel ferrite magnetic fluid



(a) 装置示意图



(b) 实验现象 1



(c) 实验现象 2

图 4-10 沉降与团聚体永磁特性研究的实验

将样品在 X 轴上移动, 并测量样品到原点的距离 l 与导致指针的偏转角度 θ 。随后本文将在不同距离下所对应的偏转角度用数据拟合的方法, 绘出如下图像:

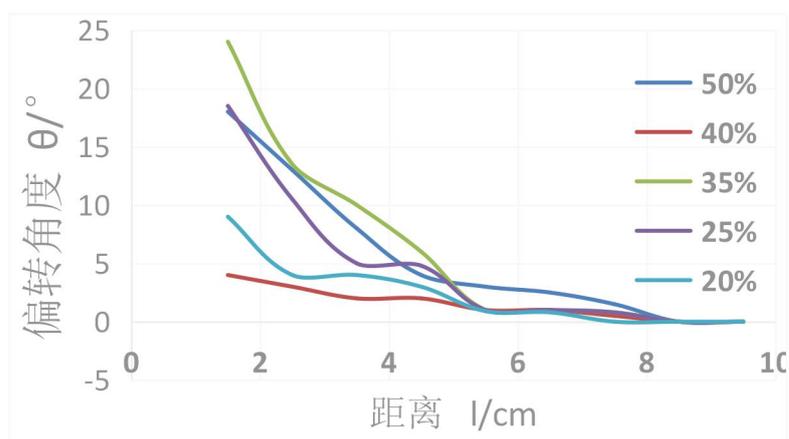


图 4-11 沉降&团聚体永磁特性研究的实验数据

数据见图 4-11, 综合 4.2 的实验数据: 浓度为 35%、25% 的样品沉降与团聚体磁性强度最为突出, 说明在离开强磁场后静置且发生团聚和沉降的过程中, 尺度小的微粒随尺度较大的团聚体的磁化方向发生大范围有序排列, 并最终形成磁化方向一致的永磁体, 所得磁性最强。

而 50% 的样品的沉降与团聚体磁性也不弱, 结合 4.2 的实验结论, 考虑: 浓度较大的团聚体在实验时被恒稳磁场饱和磁化, 磁场去掉并静置过程中, 磁性得以保留, 但由于较大团

尖晶石型铁氧体磁液的磁化特性研究与应用

Research and application of magnetizing characteristics of spinel ferrite magnetic fluid

聚块间摩擦力较大, 样品内部部分区域磁化方向并不一致。

可见 4.2 实验中配制的 25%-35%浓度的铁磁流体样品, 是具有更均匀的固相微粒分布与更小的固相微粒粒径的, 这与 4.2 的实验结论一致, 即更均匀的固相微粒分布与更小的固相微粒粒径以及特定的微粒浓度将带来更好的磁化效果。

4.3.3 样品上部清液的提取与磁化特性实验

那么样品上部清液中的混悬微粒对样品又起到什么作用呢? 我将 25%和 35%样品的上部清液进行收集, 见图 4-12, 并再次使用磁天平进行磁化特性实验。为进行对比, 还使用分析纯的甘油也进行磁化特性实验。



图 4-12 收集得到的 25%和 35%样品上部清液

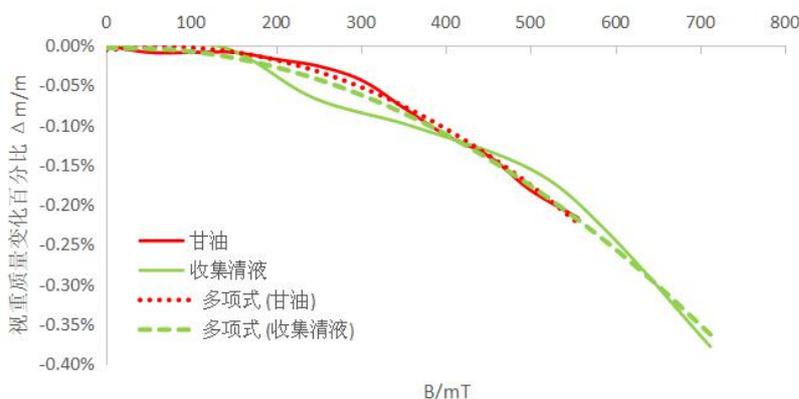


图 4-13 甘油与收集得到清液的视重质量变化百分比与磁场强度变化关系

实验结果表明, 样品上部清液虽然为胶体, 但其磁化特性经多项式拟合后, 与分析纯甘油的磁化特性一致, 具有抗磁性。视重质量变化随磁场变大而有微弱的减少, 且清液样品比分析纯甘油减少略多。视重质量的微弱变化可能来自于混悬的极微量固相铁磁性微粒。但此处于实验样品过少, 暂未能得到更有规律的数据结论。

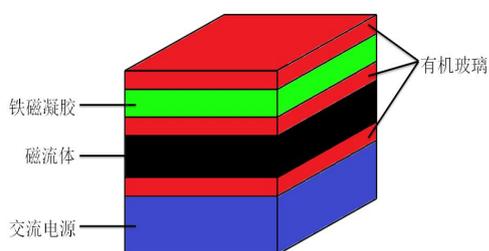
5 铁氧体及其掺杂物的应用

根据上述研究, 浓度约为 25%-35% 的尖晶石型铁氧体磁液在约 10mT 左右的较弱磁场中能达到较低磁损的磁化, 同时具有磁学的性质以及液体的流动性。因此, 我们利用其特性设计了如下装置。

5.1 磁流体书写装置

我们考虑使用一块大的画板, 不分割小的储存仓。由于磁流体里面磁性微粒很小, 在通过对磁性笔笔触的磁场设计, 可以对磁性透光面板进行磁化, 并在相应区域留下与笔迹一致的磁化图案, 从而吸引磁流体在一定高度下附着在磁性透光面板背面, 显留下笔迹信息。这种装置的书写原理是通过使用磁性毛笔吸附磁流体到达面板以达到显示笔迹的效果, 同时可通过改变笔到面板的距离改变对笔迹粗细的要求。

5.2 结构示意图



书画板装置的结构介绍

所用材料: 平板玻璃、卡拉胶、铁粉、磁流体、可被磁化的铁板。

红色层: 有机玻璃

绿色层: 铁磁凝胶

黑色层: 磁流体

蓝色层: 交流电源

笔的装置结构介绍

材料: 纤维笔毛、塑料外壳、强磁块

塑料外壳: 保护和支撑内部结构。

强磁: 提供强磁场, 控制磁液的走向。

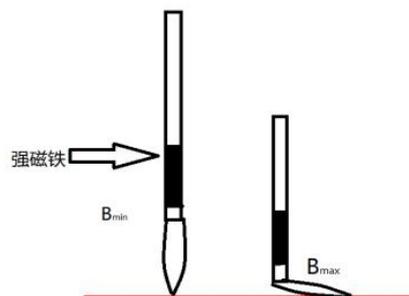


图 5-2

5.3 铁磁凝胶的选择与分析

为使得被吸上来的磁流体能够稳定的留在表面上, 从而使笔迹保留, 同时在不影响视觉效果的下, 本文使用的铁磁凝胶并不是严格的磁凝胶, 而是非磁性的凝胶与磁性物质的混合物。其制备方法为: 使用卡拉胶粉末与水按一定比例配置, 并加入铁粉混合形成铁磁凝胶。首先我们选取卡拉胶粉与水的比例分别为 1:100, 1:150, 1:200。进行配置。定量卡拉胶的质量为 1kg, 分别加入不同量的水。得出不同的样品。并经过反复退火使凝胶中各组分更加均匀。最后通过调整对比度可以发现影响其透光性的杂质分布情况。如图 5-3:

尖晶石型铁氧体磁液的磁化特性研究与应用

Research and application of magnetizing characteristics of spinel ferrite magnetic fluid

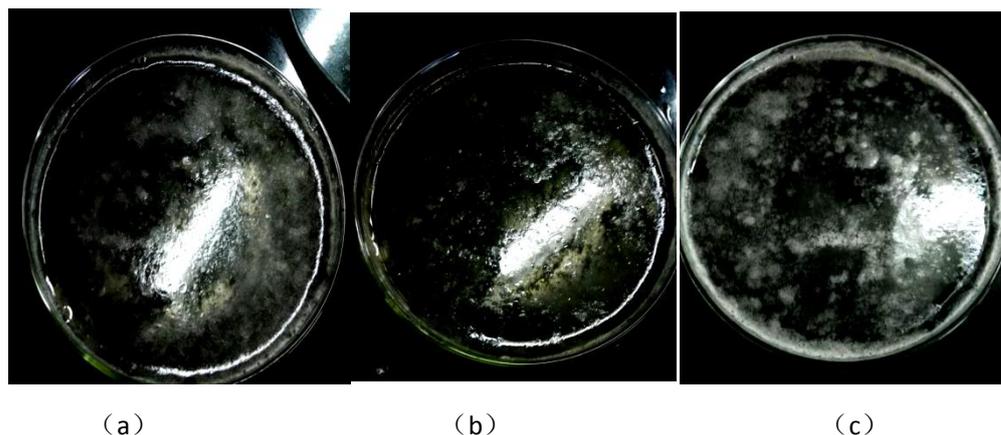
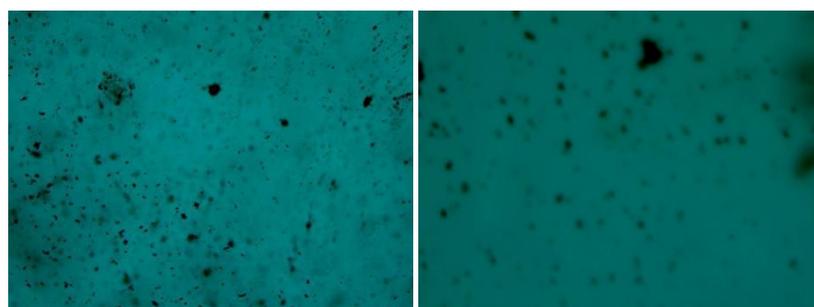


图 5-3

由此可见, 相比之下 (a), 样品所具有的杂质较少, 固对其透光性的影响不大, 因此采用卡拉胶粉与水质量比为 1:100. 所产生的实验效果更好。

接下来则对铁粉浓度不同的情况下, 铁粉分布的研究。我们取铁粉浓度为 30%、40%、50%, 经过配置后在光学显微镜下进行拍照。如图 5-4 所示:

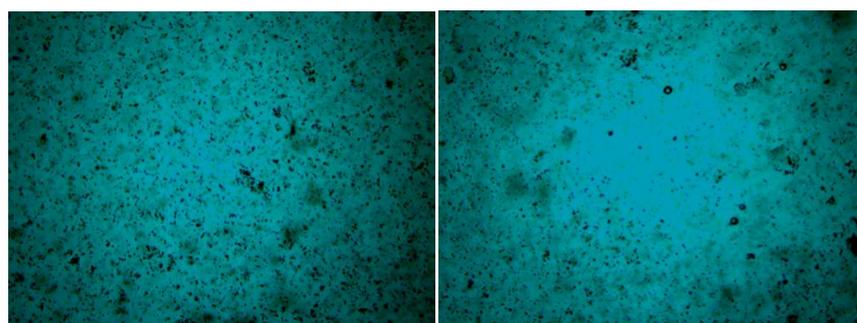
30%



放大倍数 10× 10

10×40

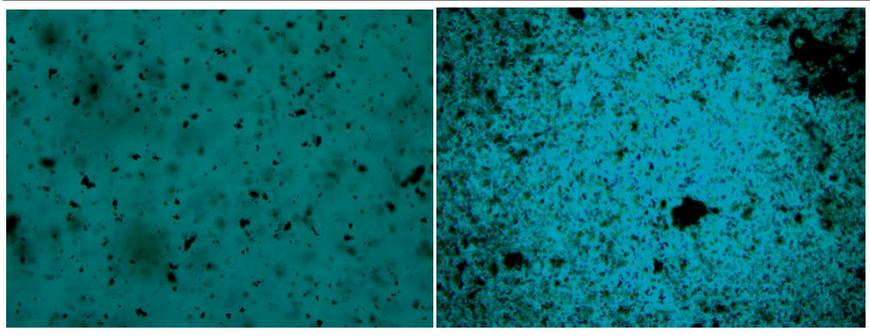
40%



放大倍数 10× 10

10×40

50%



放大倍数 10× 10

10×40

图 5-4

由此可见, 铁粉浓度为 40% 的样品, 铁颗粒分布不仅分散均匀, 且无出现颗粒聚集的情况。这使得在外加磁场下, 颗粒磁化后所产生的磁场相对均匀, 稳定。综上所述, 采用卡拉胶粉与水质量比 1:100, 铁粉颗粒浓度为 40% 的样品制成的铁磁凝胶, 吸附磁流体的效果最好。

5.4 书写装置中笔迹保留的理论分析

在正常情况下, 由于固相纳米微粒与基液的密度差异大, 在重力作用下趋于沉降, 并且微粒的表面效应和界面效应导致纳米颗粒表面具有较大的自由能, 因此, 颗粒发生沉降甚至团聚是一种自发的过程。固我们可以认为磁液在正常情况下将会沉降在装置底部。以及在无施加外磁场时, 笔迹便自发消失。因此我们只需考虑保持笔迹的情况。

首先对笔进行分析。

因为笔是由磁铁所构成的, 所以获得磁铁的磁场情况是十分必要的。由于磁感应强度 B 不断变化, 因此我们需要找出 B 的函数关系式。考虑到磁体结构特殊, 我们使用二元二次非线性回归方程进行拟合。

设

$$B(x, y) = ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f \quad (5.5)$$

则余项

$$R_i = (ax_i^2 + bx_i y_i + cy_i^2 + dx_i + ey_i + f - B_i)^2 \quad (5.6)$$

余项和

$$R = \sum_{i=1}^n R_i = \sum_{i=1}^n (ax_i^2 + bx_i y_i + cy_i^2 + dx_i + ey_i + f - B_i)^2 \quad (5.7)$$

求出余项和函数对 6 个变量的偏导数

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial R}{\partial a} &= \sum_{i=1}^n 2x_i^2 (ax_i^2 + bx_i y_i + cy_i^2 + dx_i + ey_i + f - B_i) \\
 \frac{\partial R}{\partial b} &= \sum_{i=1}^n 2x_i y_i (ax_i^2 + bx_i y_i + cy_i^2 + dx_i + ey_i + f - B_i) \\
 \frac{\partial R}{\partial c} &= \sum_{i=1}^n 2y_i^2 (ax_i^2 + bx_i y_i + cy_i^2 + dx_i + ey_i + f - B_i) \\
 \frac{\partial R}{\partial d} &= \sum_{i=1}^n 2x_i (ax_i^2 + bx_i y_i + cy_i^2 + dx_i + ey_i + f - B_i) \\
 \frac{\partial R}{\partial e} &= \sum_{i=1}^n 2y_i (ax_i^2 + bx_i y_i + cy_i^2 + dx_i + ey_i + f - B_i) \\
 \frac{\partial R}{\partial f} &= \sum_{i=1}^n 2(ax_i^2 + bx_i y_i + cy_i^2 + dx_i + ey_i + f - B_i)
 \end{aligned} \tag{5.8}$$

分别令其等于零, 有

$$\begin{cases}
 a \sum_{i=1}^n x_i^4 + b \sum_{i=1}^n x_i^3 y_i + c \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i^2 + d \sum_{i=1}^n x_i^3 + e \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i + f \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n x_i^2 B_i \\
 a \sum_{i=1}^n x_i^3 y_i + b \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i^2 + c \sum_{i=1}^n x_i y_i^3 + d \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i + e \sum_{i=1}^n x_i y_i^2 + f \sum_{i=1}^n x_i y_i = \sum_{i=1}^n x_i y_i B_i \\
 a \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i^2 + b \sum_{i=1}^n x_i y_i^3 + c \sum_{i=1}^n y_i^4 + d \sum_{i=1}^n x_i y_i^2 + e \sum_{i=1}^n y_i^3 + f \sum_{i=1}^n y_i^2 = \sum_{i=1}^n y_i^2 B_i \\
 a \sum_{i=1}^n x_i^3 + b \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i + c \sum_{i=1}^n x_i y_i^2 + d \sum_{i=1}^n x_i^2 + e \sum_{i=1}^n x_i y_i + f \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n x_i B_i \\
 a \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i + b \sum_{i=1}^n x_i y_i^2 + c \sum_{i=1}^n y_i^3 + d \sum_{i=1}^n x_i y_i + e \sum_{i=1}^n y_i^2 + f \sum_{i=1}^n y_i = \sum_{i=1}^n y_i B_i \\
 a \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \sum_{i=1}^n x_i y_i + c \sum_{i=1}^n y_i^2 + d \sum_{i=1}^n x_i + e \sum_{i=1}^n y_i + f \cdot n = \sum_{i=1}^n B_i
 \end{cases} \tag{5.9}$$

其系数行列式

$$D = \begin{vmatrix}
 \sum_{i=1}^n x_i^4 & \sum_{i=1}^n x_i^3 y_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^3 & \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 \\
 \sum_{i=1}^n x_i^3 y_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i y_i^3 & \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i & \sum_{i=1}^n x_i y_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i y_i \\
 \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i y_i^3 & \sum_{i=1}^n y_i^4 & \sum_{i=1}^n x_i y_i^2 & \sum_{i=1}^n y_i^3 & \sum_{i=1}^n y_i^2 \\
 \sum_{i=1}^n x_i^3 & \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i & \sum_{i=1}^n x_i y_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n x_i \\
 \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i & \sum_{i=1}^n x_i y_i^2 & \sum_{i=1}^n y_i^3 & \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n y_i^2 & \sum_{i=1}^n y_i \\
 \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n y_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n y_i & n
 \end{vmatrix} \tag{5.10}$$

常数项列矩阵

尖晶石型铁氧体磁液的磁化特性研究与应用

Research and application of magnetizing characteristics of spinel ferrite magnetic fluid

$$C = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_i^2 B_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i B_i \\ \sum_{i=1}^n y_i^2 B_i \\ \sum_{i=1}^n x_i B_i \\ \sum_{i=1}^n y_i B_i \\ \sum_{i=1}^n B_i \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

用常数项列矩阵分别代替系数行列式的各列可得到

$$D_a、D_b、D_c、D_d、D_e、D_f$$

于是有

$$a = \frac{D_a}{D}、b = \frac{D_b}{D}、c = \frac{D_c}{D}、d = \frac{D_d}{D}、e = \frac{D_e}{D}、f = \frac{D_f}{D} \quad (5.12)$$

即

$$B(x, y) = \frac{D_a}{D} x^2 + \frac{D_b}{D} xy + \frac{D_c}{D} y^2 + \frac{D_d}{D} x + \frac{D_e}{D} y + \frac{D_f}{D} \quad (5.13)$$

代入数据可知

$$B(x, y) = 0.182914x^2 + 0.3127xy + 0.29337y^2 + 13.902x + 16.5681y + 256.2052 \quad (5.14)$$

方差分析	df	SS	MS	F	Significance F
回归分析	5	124126.2	24825.25	15.16761	2.33E-06
残差	21	34371.27	1636.727		
总计	26	158497.5			

图 5-15

由数据分析可知其显著性水平小于标准值 0.05, 且趋近于零。可见回归可靠性较高。于是我们将其绘制成三维图像, 也与平面图具有相当大的相似度。

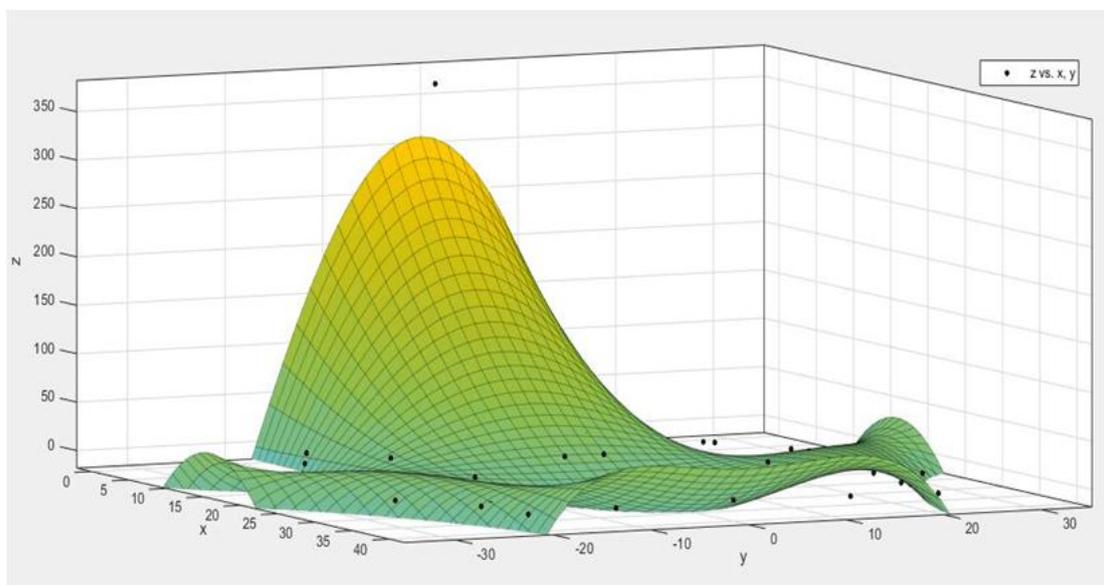


图 5-16

在获知笔中磁铁的磁场情况后，我们对铁磁凝胶对磁流体的吸附情况进行分析。

因为磁流体中各组分均匀分布，且尺寸极其微小，所以每个微粒都属于单畴物质。固我们可以使用圆球形线圈来作为固相微粒的磁学模型，由于磁流体在外磁场的作用下形成垂直链，所以分析铁磁凝胶下方的任意一条垂直链即可代表整个磁流体的受力情况。

由于垂直链中的磁偶极子互相共轴平行，所以我们首先对共轴平行的磁偶极子之间的受力公式进行简要的阐述。在 origin 有一磁矩为 m 的磁偶极子，它在距离 r 处产生的磁场为：

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi r^3} \left(\frac{3(m \cdot r)r}{r^2} - m \right) \quad (5.17)$$

假设有另一磁矩为 m' 的磁偶极子处于 B 中，则他们的磁位能为：

$$W_m = -m' \cdot B = -\frac{\mu_0}{4\pi r^3} \left(\frac{3(m \cdot r)(m' \cdot r)}{r^2} - m \cdot m' \right) = -\frac{\mu_0}{4\pi r^3} \left(\frac{3(m \cdot r_0)(m' \cdot r_0)}{r^2} - m \cdot m' \right) \quad (5.18)$$

r_0 是 r 方向单位矢量。

当 m' 发生平移或者转动时，磁位能将相应改变 ΔW_m ，外磁场做功 ΔA ，根据能量守恒，应有

$$\Delta A = -\Delta W_m \quad (5.19)$$

因此 m' 在磁场中受到的力 F 与力矩 L 分别为：

$$F = -\frac{dW_m}{dr} = -\frac{3\mu_0}{4\pi r^4} [3(m \cdot r_0)(m' \cdot r_0) - m \cdot m']$$

$$L = -\frac{dW_m}{d\theta} = \frac{d(m' \cdot B \cos \theta)}{d\theta} = -m' \cdot B \sin \theta \quad (5.20)$$

当两个磁偶极子共轴平时:

$$\mathbf{m}_1 \cdot \mathbf{r}_0 = m_1, \quad \mathbf{m}_2 \cdot \mathbf{r}_0 = m_2, \quad \mathbf{m}_1 \cdot \mathbf{m}_2 = m_1 \cdot m_2 \quad (5.21)$$

可知它们相互作用力为

$$F = -\frac{6\mu_0 m_1 m_2}{4\pi r^4} \quad (5.21)$$

力矩

$$L = 0 \quad (5.22)$$

在得到磁偶极子之间的受力公式后, 我们便可以对磁流体中的磁偶极子的受力进行研究。
 m 为磁流体垂直链正上方铁磁凝胶中所对应的磁偶极子。设 m 与 m_0 的距离为 d , m_i 与 m_{i+1} 之间的距离为 r , 假定所有磁偶极子的重力均为 G 。

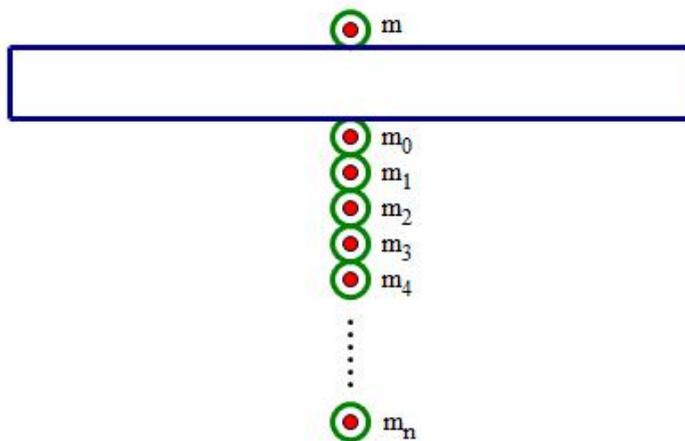


图 5-23

如图 5-23, 首先对 m_0 进行受力分析, m_0 受到下方 n 个磁偶极子对它产生的作用力

$$F_{\text{down}} = \frac{6\mu_0 m_0 m_1}{4\pi r^4} + \frac{6\mu_0 m_0 m_2}{4\pi (2r)^4} + \frac{6\mu_0 m_0 m_3}{4\pi (3r)^4} + \dots + \frac{6\mu_0 m_0 m_n}{4\pi (nr)^4} = \frac{6\mu_0 m_0}{4\pi r^4} \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{i^4} \quad (5.24)$$

上方磁偶极子对它的作用力

$$F_{\text{up}} = \frac{6\mu_0 m}{4\pi d^4} \quad (5.25)$$

由于 m_0 受力平衡, 所以有

尖晶石型铁氧体磁液的磁化特性研究与应用

Research and application of magnetizing characteristics of spinel ferrite magnetic fluid

$$\frac{6\mu m_0}{4\pi r^4} \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{i^4} + G = \frac{6\mu m_0 m}{4\pi d^4} \quad (5.26)$$

分析 m_1 , 有

$$\frac{6\mu m_1}{4\pi r^4} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{m_{i+1}}{i^4} + G = \frac{6\mu m_0 m}{4\pi(d+r)^4} + \frac{6\mu m_0 m_1}{4\pi r^4} \quad (5.27)$$

分析 m_2 , 有

$$\frac{6\mu m_2}{4\pi r^4} \sum_{i=1}^{n-2} \frac{m_{i+2}}{i^4} + G = \frac{6\mu m_0 m}{4\pi(d+2r)^4} + \frac{6\mu m_2}{4\pi r^4} \sum_{i=0}^1 \frac{m_i}{(2-i)^4} \quad (5.28)$$

分析 m_3 , 有

$$\frac{6\mu m_3}{4\pi r^4} \sum_{i=1}^{n-3} \frac{m_{i+3}}{i^4} + G = \frac{6\mu m_0 m}{4\pi(d+3r)^4} + \frac{6\mu m_3}{4\pi r^4} \sum_{i=0}^2 \frac{m_i}{(3-i)^4} \quad (5.29)$$

以此类推, 分析 m_k , 有

$$\frac{6\mu m_k}{4\pi r^4} \sum_{i=1}^{n-k} \frac{m_{i+k}}{i^4} + G = \frac{6\mu m_0 m}{4\pi(d+kr)^4} + \frac{6\mu m_k}{4\pi r^4} \sum_{i=0}^{k-1} \frac{m_i}{(k-i)^4} \quad (5.30)$$

最终, 对于 m_n , 有

$$G = \frac{6\mu m_n m}{4\pi(d+nr)^4} + \frac{6\mu m_n}{4\pi r^4} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{m_i}{(n-i)^4} \quad (5.31)$$

$n+1$ 式相加, 有

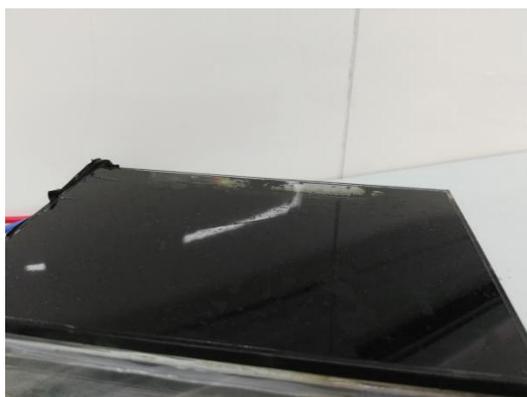
$$\sum_{j=0}^{n-1} \left(\frac{6\mu m_j}{4\pi r^4} \sum_{i=1}^{n-j} \frac{m_{i+j}}{i^4} \right) + (n+1)G = \sum_{j=0}^n \frac{6\mu m_j m}{4\pi(d+jr)^4} + \sum_{j=1}^n \left(\frac{6\mu m_j}{4\pi r^4} \sum_{i=0}^{j-1} \frac{m_i}{(j-i)^4} \right) \quad (5.32)$$

由于垂直链正上方铁磁凝胶中所对应的磁偶极子的磁矩即为铁磁凝胶所带的磁矩, 因此可知铁磁凝胶所需的磁矩至少为

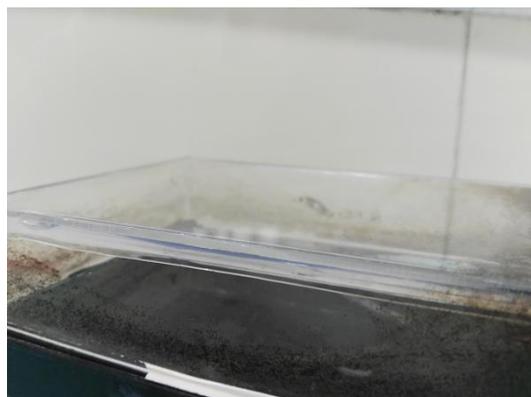
$$m = \frac{\sum_{j=0}^{n-1} \left(\frac{6\mu m_j}{4\pi r^4} \sum_{i=1}^{n-j} \frac{m_{i+j}}{i^4} \right) - \sum_{j=1}^n \left(\frac{6\mu m_j}{4\pi r^4} \sum_{i=0}^{j-1} \frac{m_i}{(j-i)^4} \right) + (n+1)G}{\sum_{j=0}^n \frac{6\mu m_j}{4\pi(d+jr)^4}} \quad (5.33)$$

因此我们便可以通过上式来求得笔在该位置所需产生的磁场强度, 从而决定笔的设计结构。

经过上述受力分析, 我们所设计的书写装置, 在擦除时的效果如下:



写满时



擦除后

图 5-34

5.5 书画装置显示效果评估

通过透光性能形成笔迹的形貌,同时由于磁流体在磁场下显现出磁性,因此可以通过磁力去改变其形态及位置。而通过开启或关闭磁场,便能选择性地将磁流体吸附在特定位置。若改变磁流体附着面磁场分布,将能达到动态动画的效果,如图 5-35。



(a) 无磁场时分布均匀的磁流体



(b) 磁场变化后铁磁微粒聚集形成规律图样

尖晶石型铁氧体磁液的磁化特性研究与应用

Research and application of magnetizing characteristics of spinel ferrite magnetic fluid



(c) 磁场撤离后规律图样继续保持
图 5-35 磁流体书写效果图

于是我们便利用我们自己设计出的一套较为简单的装置来展示和验证我们的猜想。如图 5-36。

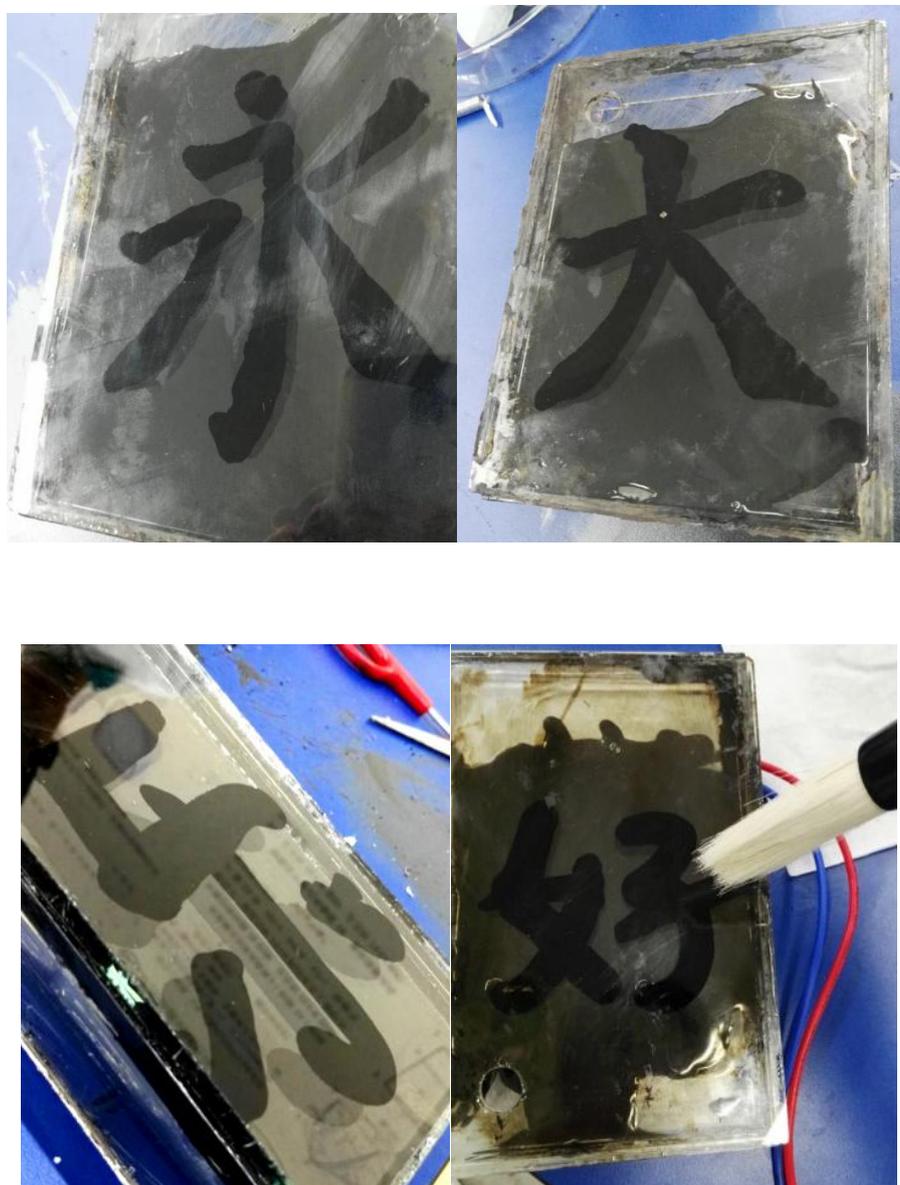


图 5-36

尖晶石型铁氧体磁液的磁化特性研究与应用

Research and application of magnetizing characteristics of spinel ferrite magnetic fluid

由于磁流体具有流动性,且不会出现水分被吸附的影响,所以其产生的字迹与墨水极为相似,但又具有传统书法不可比拟的优势。由此我们决定使用磁流体作为书画装置的“墨水”。在操作验证其书写效果时,为了尽量仿真毛笔的书写感觉,我们在其笔尖处固定了强磁铁。

5.6 可行性研究

通过配置不同基载液的磁流体分别在相同或是不同浓度下改变磁铁到磁流体的距离,从而观察磁流体在上述不同情况下所展现的各种形态,并对这些现象进行进一步的分析。

首先选择的四种基载液分别为酒精,甘油,蓖麻油,水。并在浓度为 20%-35% 之间进行测试。

接下来先对磁场对磁流体分布影响进行探究。我采用水基型磁流体通过改变磁场的大小来观察磁流体的分布情况。这对书画装置中控制笔迹的技术影响较大。情况如下:

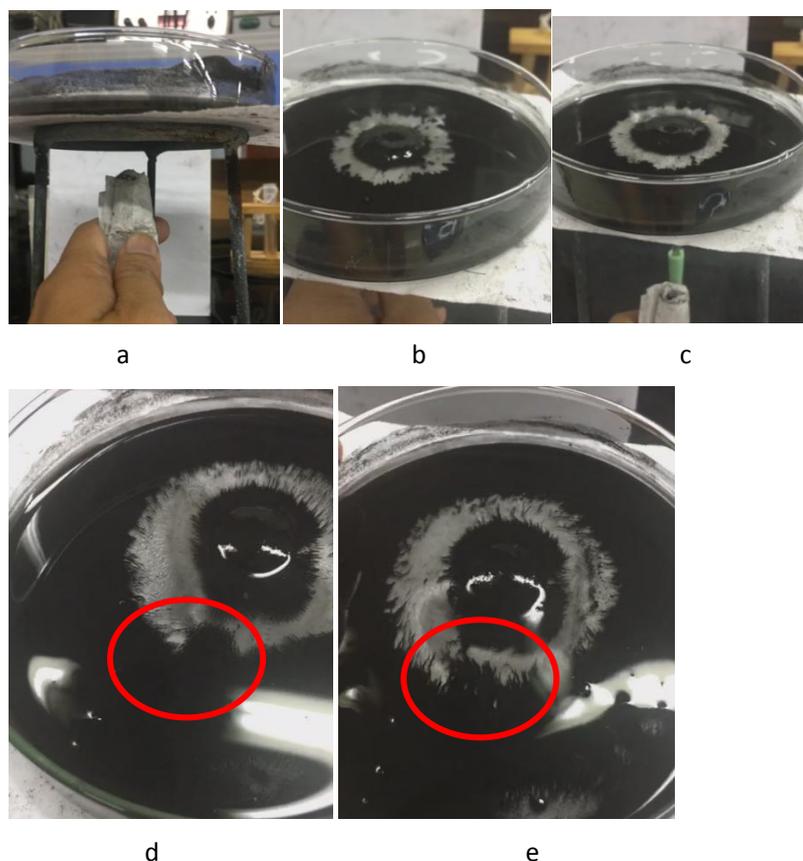


图 5-37 磁场对磁流体分布影响

实验发现: (a) 永磁铁接近磁流体 (b) 磁铁在底部紧密接触造成磁流体凝聚 (c) 撤掉永磁铁后晃动凝聚块不散开 (d) 磁铁在距离底部 1cm 处造成磁流体凝聚 (e) 经过简单摇晃后 (d) 图凝聚散开

这说明磁铁与磁流体之间的距离将对磁液所展现的形态、效果产生较大影响。于是本文开始对不同基载液以及不同浓度下的磁流体进行测试: (以下照片顺序为磁铁距离顺序分别为 0cm、0.5cm、1cm、1.5cm、2cm) 通过大量的现象分析我们选取了效果最为明显的图片进行展示。如图 5-38。

尖晶石型铁氧体磁液的磁化特性研究与应用

Research and application of magnetizing characteristics of spinel ferrite magnetic fluid

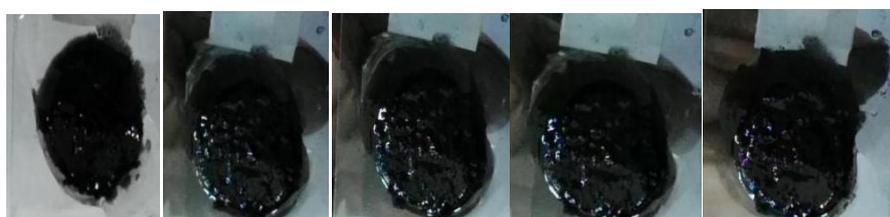
水基

35%

侧拍



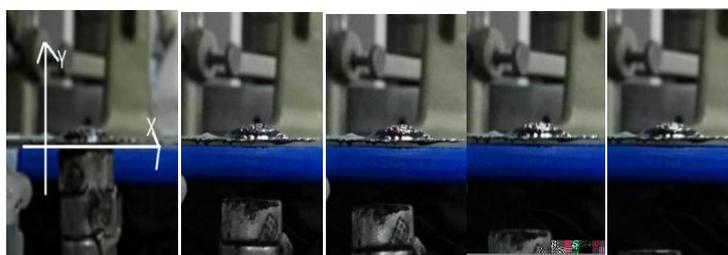
竖拍



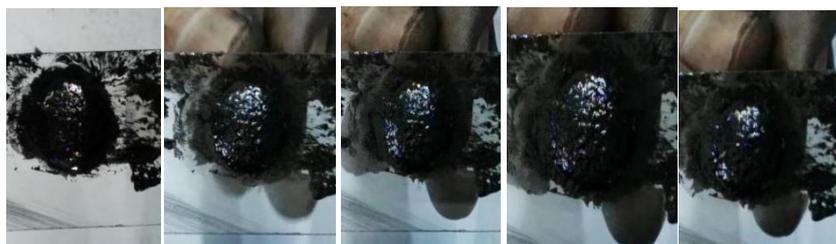
甘油

35%

侧拍



竖拍



蓖麻油

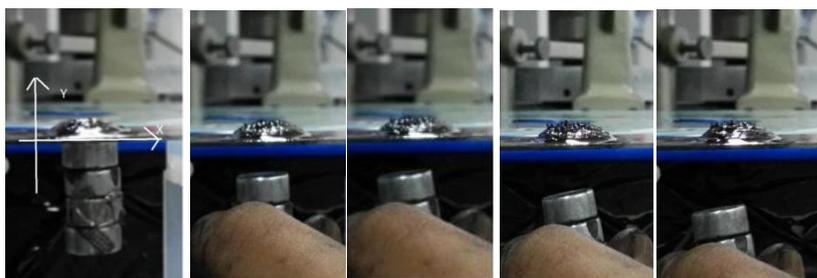
35%

尖晶石型铁氧体磁液的磁化特性研究与应用 Research and application of magnetizing characteristics of spinel ferrite magnetic fluid

竖拍



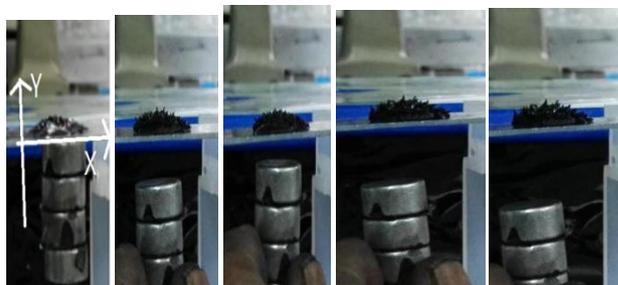
侧拍



酒精

35%

侧拍



竖拍



图 5-38

6 结论与展望

通过对尖晶石型铁氧体磁液的晶体结构分析,磁畴特点磁畴壁厚度以及相应磁化过程的建模与实验研究,我们得到尖晶石型铁氧体磁流体的磁化模型。即认为磁流体中的铁磁性微

尖晶石型铁氧体磁液的磁化特性研究与应用

Research and application of magnetizing characteristics of spinel ferrite magnetic fluid

粒直径约 10nm, 相当于磁畴单体, 磁畴间由于存在基载液与表面活性剂, 使磁流体的磁畴壁较晶体状态下更厚。当在外加磁场作用下, 由磁流体液态向类固态转变的过程中¹³, 存在三个临界场强 $H_a < H_b < H_c$ 。当 $H < H_a$ (H_a 对于空气磁感应强度大约 1mT) 时, 磁流体处颗粒悬浮, 类似无规则分布的“气态”磁性微粒做布朗运动; 当 $H_a < H < H_b$ 时 (H_b 对应磁感应强度大约 5mT), 出现短链与颗粒共存的状态; 当 $H_b < H < H_c$ 时 (H_c 对于磁感应强度大约 15mT), 处于向列型晶流状态; 当 $H > H_c$ 时, 系统出现稳定的柱状固体状态; 但 H 再增强以后, 由于磁场力做功, 将破坏向列型长链结构, 磁性微粒链发生断裂坍塌并产生在磁极表面的团聚现象。

通过磁天平对自行配置的磁流体进行分析研究, 我们发现介于 25%-35% 之间的样品由于磁畴壁厚度合适, 具有更均匀的固相微粒分布与更小的固相微粒粒径, 因此其磁化特性最佳, 主要表现为在一定磁场变化范围内, 有更高的视重变化; 静置后沉降与团聚体按磁化方向自发有序排列。同时, 采用较长时间的超声振荡处理, 使磁流体内固相微粒分布更均匀与分散后, 将能在较少磁能耗下达到更高磁化效果。将为我后续获得更稳定的铁磁流体进行应用研究奠定了宝贵的基础。

于是我们利用该磁化模型, 试图创造性地提出一种基于磁流体的书画装置, 并对其中的运动进行数学分析。当书写笔提供 5-15mT 可变磁场时, 将在使用薄膜“磁凝胶”的面板上产生局部磁化, 局部磁化区域使装置上下面板内密封的磁流体处于 5mT 左右的磁场中, 并保持竖立的短链结构, 使面板上原透光区域变为不透光, 并使书写笔迹暂时性保留下来。当需要擦除时, 只需要提供一个微弱交变磁场, 即可使磁化区域消磁。

经过上述装置的检验, 我们很好的将磁流体的磁化理论付诸于现实之中。其产生的笔迹效果虽暂时无法达到飘若浮云, 矫若惊龙那般优美, 但我们仍然解决了许多目前书写装置中存在的不足。展望未来我们将继续致力于笔迹效果的优化, 以期能够完全解决书写带给人们的烦恼。

同时, 我们希望在进一步深化研究后, 有望拓展应用到太空推进器中尖头的操控、生物热疗中作为药物载体提高靶向性、人工智能中集成电路的优化等更广阔的领域, 为社会科技发展做出更有效、更深远的贡献。

参考文献

尖晶石型铁氧体磁液的磁化特性研究与应用

Research and application of magnetizing characteristics of spinel ferrite magnetic fluid

- ⁱ[1] 黄昆. 固体物理学[M]. 北京大学出版社:黄昆, 2014. 2-3
- ⁱⁱ[2] 田明波. 磁性材料[M]. 清华大学出版社:田明波, 2000. 48-49;27-29;351-352
- ⁱⁱⁱ[3] 周志刚. 铁氧体磁性材料[M]. 北京科学出版社:周志刚,1981.28-29;82-85;58-60;144-146
- [4] 赵凯华, 张维善. 新概念高中物理读本[M]. 人民教育出版社:赵凯华 张维善, 2008.129-130
- ^v[5] 王瑞金, 王常斌. 磁流体技术的工业应用[D]. 浙江大学:王瑞金 王常斌, 2004
- ^{vi}[6] 李艳琴, 张宏剑. 古埃磁天平法研究 ϵ -Fe₃N 磁性液体的磁化率和饱和磁化强度[D]. 大连大学:李艳琴 张宏剑, 2017
- ^{vii}[7] 倪新梅. 大学物理实验[M]. 华南理工大学出版社:倪新梅, 2005. 192-197
- ^{viii}[8] 李传军, 任忠鸣. 强磁场下相变研究进展[D]. 上海大学:李传军 任忠鸣, 2011
- ^{ix} [9] 武丽艳, 郑文君, 尚贞锋.Gouy 磁天平法测定物质磁化率实验数据处理公式的讨论[J]. 大学化学, 2006, 21(5); 51-52
- ^{ix}[10] 王小云. 磁流变液的相变及结构研究[D]. 湘潭大学:王小云, 2004

附录——实验日常





致谢

通过这一阶段的努力, 我们的论文《尖晶石型铁氧体磁液的磁化特性研究》终于能够完稿了。本论文是在导师璩斌老师的悉心指导下完成的, 导师渊博的专业知识, 严谨的治学态度, 精益求精的工作作风, 诲人不倦的高尚师德, 严以律己、宽以待人的崇高风范, 朴实无华、平易近人的人格魅力对我影响深远。不仅使我们树立了远大的学术目标、掌握了基本的研究方法, 还使我们明白了许多待人接物与为人处事的道理。本论文从选题到完成, 每一步都倾注了导师大量的心血。在此, 谨向导师表示崇高的敬意和衷心的感谢!

本论文的顺利完成, 离不开各位老师、同学和朋友的关心和帮助。但是我们也要感谢家长们在背后的默默支持, 他们不仅仅在经济与精神上提供帮助, 在研究方法上也给予了我们丰富的经验, 使我们的探究过程少走了许多弯路。

从论文选题到搜索资料, 从定下初稿到反复修改, 期间经历了喜悦、忧虑以及最后完稿时的万分喜悦, 随着最后一个句点的输入, 复杂的心情终于得以放下。回想研究时的酸甜苦辣以及所经历的各种挫折, 现在不禁感慨或许通往成功的道路一定是崎岖不平的吧!

研究过程中, 我们三位成员互相帮助, 一路同行, 在这几个月完全拧成了一股绳。人各有所长, 所以小组中的各种工作都是经过深思熟虑后分配给每个成员来完成它。组长詹弘易主要负责论文的起稿工作和指导整个实验过程, 组员高泉勇主要负责进行实验以及对现象的分析, 组员符馨滢主要负责协助实验进行、论文的翻译修改及数据分析。最后, 谢谢论文评

阅老师们的辛苦工作。并再次衷心感谢我的家人、朋友，以及同学们，是在他们的鼓励和支持下我才得以顺利完成此论文。

路还长，唯勤勉前行。

学术诚信声明

本参赛团队声明所提交的论文是在指导老师指导下进行的研究工作和取得的研究成果。尽本团队所知，除了文中特别加以标注和致谢中所罗列的内容以外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果。若有不实之处，本人愿意承担一切相关责任。

尖晶石型铁氧体磁液的磁化特性研究与应用
Research and application of magnetizing characteristics of spinel ferrite magnetic fluid

参赛队员：詹弘易、高泉勇、符馨滢

指导老师：璩斌

二零一七年九月十五日