

中華民國 第 49 屆中小學科學展覽會
作品說明書

高中組 化學科

第二名

最佳創意獎

040208

101 大樓抗震的啟發

—智慧型避震系統磁性液體合成研究

學校名稱：臺北市私立復興實驗高級中學

作者： 高二 芮裕洋 高二 王絢 高二 劉于瑄	指導老師： 蘇淑于
----------------------------------	--------------

關鍵詞：奈米磁性粒子合成、

磁性液體流變、降伏應力

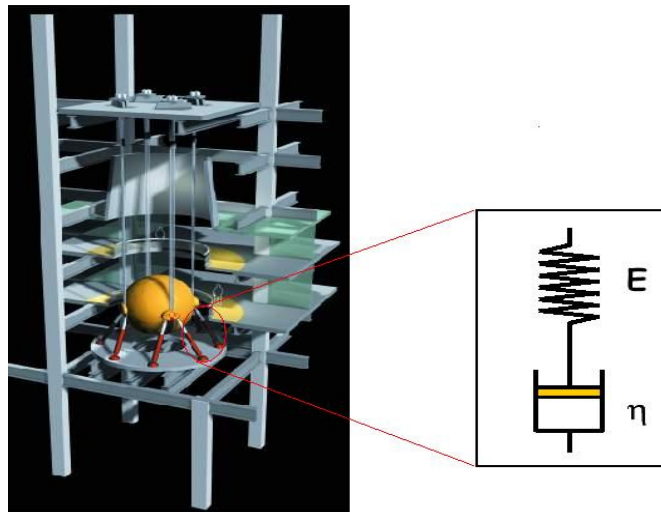
101 大樓抗震的啓發—智慧型避震系統磁性液體合成研究

摘要

101 大樓「智慧型阻尼器」引發我們的好奇。其內所使用之磁流變系統為控制阻尼的關鍵。本專題研究不同之磁性流體如何經由控制磁場達到控制流體黏滯性的目的。第一部分為奈米磁性粒子合成，第二部份為磁性液體流動行為研究。首先經由三種不同的方法，合成 Fe_3O_4 (圓形 30nm；星形 40nm(core)), CoFe_2O_4 (圓形 10nm；近圓形 3nm), 及 Fe_3O_4 nanowire ($40 \times 40 \times 200 \text{nm}^3$) 等磁性粒子。流變測試可得到以下結論 (1) CoFe_2O_4 之降伏應力較 Fe_3O_4 高約 3 至 10 倍 (2) 粒子大有利於降伏應力增強 (3) 圓形粒子降伏應力較星形粒子優 (4) 棒形 Fe_3O_4 微米粒子的降伏應力較 Fe_3O_4 奈米顆粒高出甚多。(5) 極限磁力度會隨著粒子濃度增大而增大。(6) 要達到相同之降伏應力，可選擇稀的粒子濃度但高磁場，或高粒子濃度低磁場來完成。以上結論，為開發未來「智慧型阻尼器」值得進一步研究的方向。

壹、研究動機

921 的地震帶給大家恐怖的經驗，但為何台北市仍然可以蓋 101 超高大樓？在偶然的機會下我們看到 Discovery 頻道介紹 101 特殊設計抗強震的避震阻尼器，覺得非常有趣，因而引發了我們研究的興趣。101 避震的基本構造，如圖一所示。它是由 8 根避震阻尼器，配上一 3-D 平衡緩衝鋼球所組成。震動的吸能及消能全賴 8 根避震阻尼器完成。

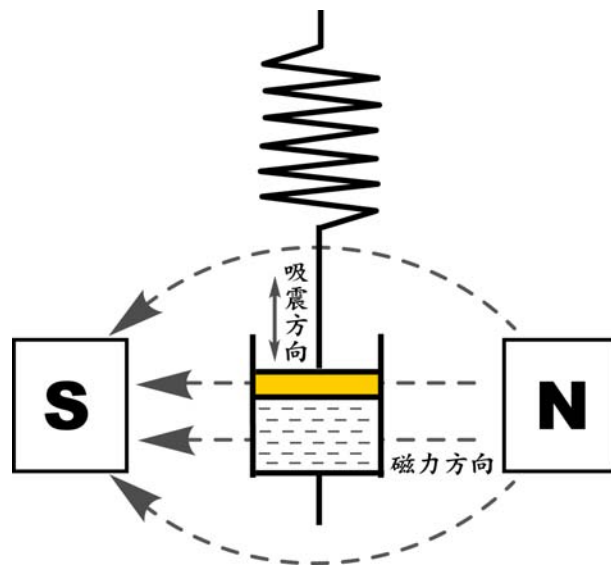


圖一 101 大樓避震的基本構造

但是高中課本在講述白努力方程式時提到：理想流體沒有黏滯性，不會因內部的摩擦效應而損失能量。但這便與我們先前在 Discovery 頻道上看到介紹 101 大樓避震阻尼器的運作原理不同，因而引發了我們研究此專題的興趣。我們透過專題選修課教授的指導，讓我們對組尼器有更多的認識，使我們能在此知識背景下建立實驗。再者，我們希望能夠找出消震的有效方法，把地震的傷害影響減至最低，使我們的生活品質有更多保障。避震阻尼器是一個由彈簧及油壓統所組成的唧筒(4)。彈簧的功能，在瞬間吸收震動的能量。然而吸收後能量的釋放，便要靠油壓筒液體的黏滯摩擦消耗來完成。由於震動的能量有大有小，消能的效果便受到考驗，若是液體黏滯程度太小，則對大能量的釋放會超過負荷反而讓殘餘能量回饋使震動持續；反之若液體黏滯程度太大，則對小能量的釋放便不靈敏而失效。故如何在阻尼器中，使黏滯程度可因震動大小不同而做改變，亦即所謂「智慧型阻尼器」(Smart Suspension)，便成爲一個有趣的題目。

貳、研究目的

先進的「智慧型阻尼器設計」(7)為一種磁流變消能器，藉由電力控制液體中的微小磁性懸浮物質呈現不同程度的排列，因排列方向與流體運動方向近乎垂直(如圖二所示)，黏度便會呈現不同程度的增大。簡言之，本計劃可在不同磁力的作用下使液體黏滯程度改變。如此無論是大震動或小震動，消能的效果可因液體黏滯的調整而保持最佳狀態。因此我們的目標便是針對此「微小磁性懸浮體」做較深入的研究。希望經由化學合成的控制，調配出具不同形狀及不同大小的磁性奈米粒子，之後與矽油調配成不同功效的磁性流體，從事磁流變測試，以達成我們從事本研究的目的。



圖二 磁流變阻尼器示意圖

磁性粒子受不同大小磁力影響做不同程度的順向排列，流體黏滯程度因而不同

參、研究設備及器材

一、本實驗所用藥品：

(一) Benzyl ether 分子式： $(C_6H_5CH_2)_2O$ ；分子量：198.27 g/mol 純度：98%；

High Boiling Point: 295-298 °C; 廠商：ACROS

(二) Cobalt(II) acetylacetonate 分子式： $C_{10}H_{14}CoO_4$ ；分子量:257.14 g/mol

純度:99%；廠商: ACROS

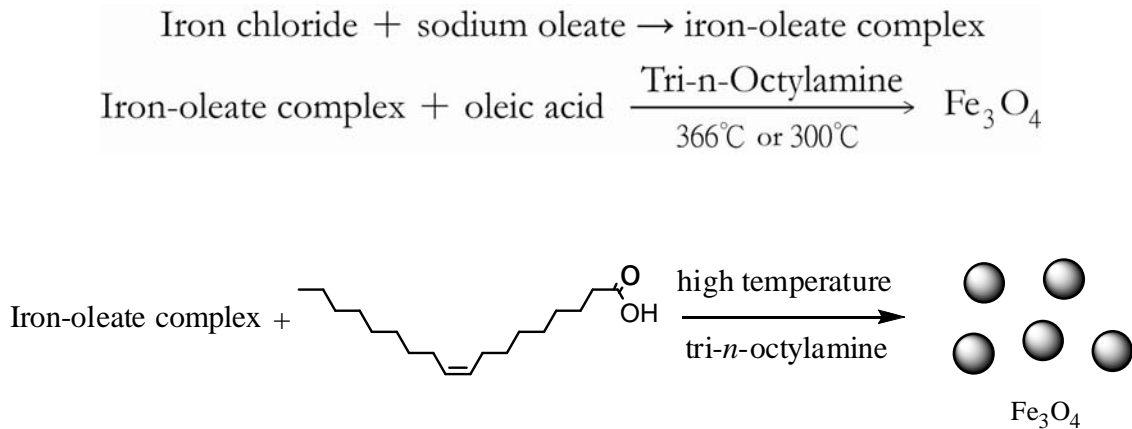
- (三) Deionized water 以逆滲透壓超純水系統純化，在25°C時，電阻值在18.2MΩ·cm。
廠商：岑祥公司
- (四) Ethanol (乙醇) 分子式： $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ ；分子量：46 g/mol 純度：99%；
廠商：Mallinckrodt
- (五) Iron(III) acetylacetonate 分子式： $\text{C}_{15}\text{H}_{21}\text{FeO}_6$ ；分子量：353.17 g/mol
純度：99+%；廠商：ACROS
- (六) Iron chloride hexahydrate 分子式： $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ；分子量：270 g/mol 廠商：ACROS
- (七) Oleic acid 分子式： $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$ ；分子量：282 g/mol
廠商：ACROS
- (八) Oleyamine 分子式： $\text{C}_{18}\text{H}_{37}\text{N}$ ；分子量：267.50 純度：80~90%；廠商：ACROS
- (九) Silicon oil 廠商：島久藥品株式會社；Dow Corning Co. (10 cp; 100 cp)
- (十) Sodium oleate 分子式： $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COONa}$ ；分子量：304 g/mol
廠商：ACROS
- (十一) 1,2-tetradecanediol 分子式： $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11}\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_2\text{OH}$ ；分子量：230.39 g/mol
廠商：ALDRICH
- (十二) Tri-*n*-Octylamine 分子式： $[\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7]_3\text{N}$ ；分子量：353 g/mol 廠商：TCI

二、本實驗所用儀器：

- (一) 穿透式電子顯微鏡 (transmission electron microscopy, TEM) 廠商：Hitachi 型號：H-7100
- (二) 純水機 廠商：Millipore 26
- (三) 旋轉濃縮機(Rotary evaporator) 廠商：EYELA 型號：N-1000
- (四) 高速離心機 廠商：HERMLE 型號：Z 400
- (五) X-光粉末繞射儀 (XRD) 廠牌：PANalytical 型號：X' Pert PRO
- (六) 流變儀：Anton Paar Physica MCR301 MRD,
- (七) 烘箱：Risen RUD-40 No.0814
- (八) 冷凍乾燥機：Kingmech FD3-12P No.1710

肆、研究過程或方法

一、氧化鐵 (Fe₃O₄) 奈米顆粒製備 (6)



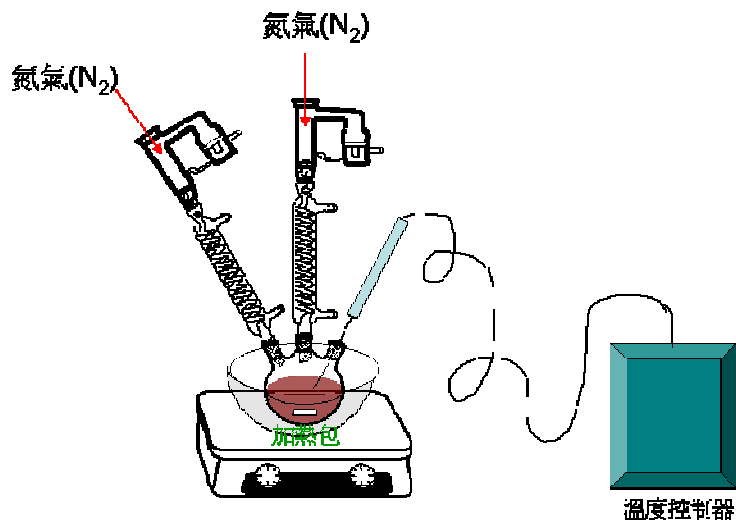
圖三-1 Fe₃O₄ 粒子之製備流程

(一) Iron-oleate complex :

1. 取 iron chloride 10.8g (80mmol) , sodium oleate 36.5g (240mmol) 加入乙醇(80ml) , 純水 (60ml) 及 hexane(140ml) 之混合溶液中。
2. 置於 500ml 之三頸圓底瓶, 將混合溶液充分攪拌後, 架上冷凝系統。加熱至 70°C , 恆溫 4.5 個小時, 再以 60 毫升純水萃取三次, 保存於 hexane 中。

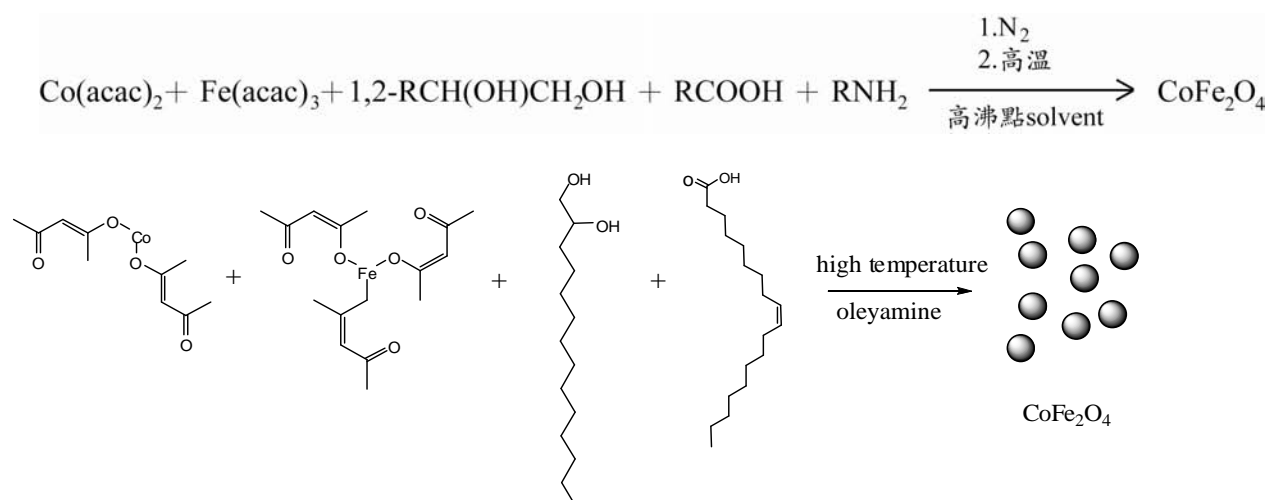
(二) Fe₃O₄ :

1. 取 iron-oleate complex 9g , oleic acid 1.7g 加入 30g 的 tri-*n*-octylamine 中, 攪拌均勻。
2. 以 3.3°C/min 的升溫速率升溫至(1)300°C 或(2) 366°C , 恆溫 30min 。
3. 以乙醇和 hexane 交替洗淨 Fe₃O₄ 粒子表面多餘的 oleic acid 。



圖三-2 Fe₃O₄ 粒子之製備實驗裝置圖

二、氧化鐵鈷 (CoFe₂O₄) 奈米顆粒製備 (5, 8)



圖四 氧化鐵鈷 (CoFe₂O₄) 奈米顆粒製備

- (一) 取 Iron III acetylacetonato (Fe(acac)₃) 0.714g, Cobalt(II) acetylacetonate (Co(acac)₂) 0.260g, 1, 2-Tetradecanediol 2.56g, Oleic acid(RCOOH) 1.79g, Oleylamine(approximate C₁₈ Content), RNH₂) 2g 及 Benzyl ether 20ml。
- (二) 在恆溫 200°C 下反應 0.5 小時，再升溫至 265°C，恆溫 0.5 小時。或在恆溫 200°C 下反應 2 小時，再升溫至 300°C，恆溫 1 小時。

三、氧化鐵(Fe₃O₄)Nanowire 製備 (1, 3)

- (一) 取氯化亞鐵(iron chloride tetrahydrate)6g 與氯化鐵(iron chloride hexahydrate)12g 以去離子水 25ml 混合成離子溶液。
- (二) 於機械攪拌下快速添加氨水(ammonium hydroxide)50ml，持續攪拌 6 分鐘，經共沉澱法即可得磁性氧化鐵奈米粒子(Fe₃O₄ nanoparticles)。
- (三) 後將磁性氧化鐵奈米粒子以冷凍乾燥除去多於水分。
- (四) 取 0.5g nanoparticles 於壓力反應瓶中，並添加濃度為 15m 之氫氧化鈉(sodium hydroxide)溶液。
- (五) 置於烘箱，以 120°C 進行反應經水熱(2 atm)，反應三天可得磁性氧化鐵奈米線(Fe₃O₄ nanowires)。

四、磁性流體之製備:

一、製備樣品依序為：

- (a) $\text{Fe}_3\text{O}_4(300^\circ\text{C})$, (b) $\text{Fe}_3\text{O}_4(366^\circ\text{C})$, (c) $\text{CoFe}_2\text{O}_4(265^\circ\text{C})$, (d) $\text{CoFe}_2\text{O}_4(300^\circ\text{C})$,
(e) Fe_3O_4 (高溫高壓棒狀)

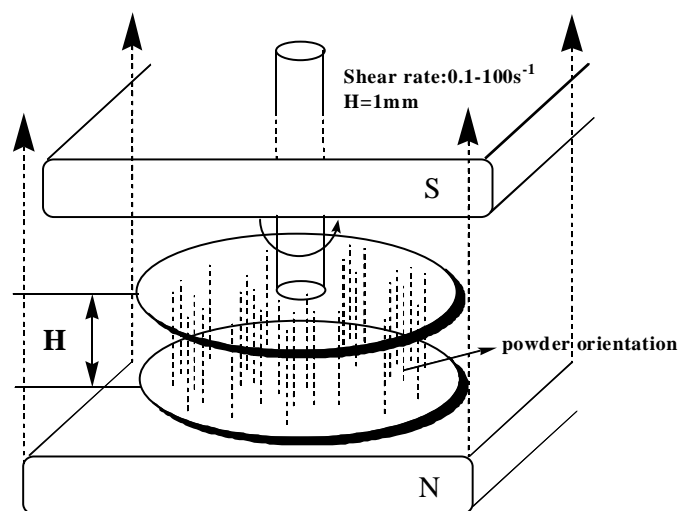
二、步驟：

1. 將 0.2g 的待測物(條件(a)至(e)均相同)加入 1.5ml 的矽油(Dow Corning Co.,黏度 100cp)中，並攪拌均勻，必要時以超音波輔助分散。
2. 倒入流變儀下板的凹槽。
3. 降下上盤，使上下間距為 0.1cm 。
4. 控制變儀的溫度維持在攝氏 25 度。
5. 在不同安培的條件下，分別測出待測物之降伏應力。

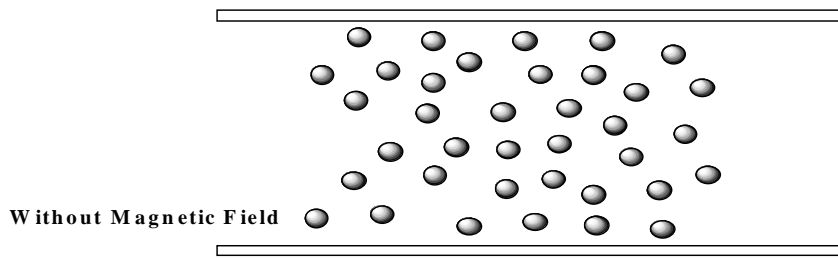
五、磁流變的原理

磁流變之基本操作，如圖五所示。其為一雙平板的黏度測試儀，平板間距 1mm。平板上下加上磁場。若此時加入我們所合成之磁性流體 (0.2g 磁粒子加入 1.5ml 矽油中(100cp))，測流體之磁性粒子會產生順向性，且此順向性與平板之流動方向呈垂直，亦即順向度愈大，將愈會阻礙流體之流動，而得到較大之黏度。

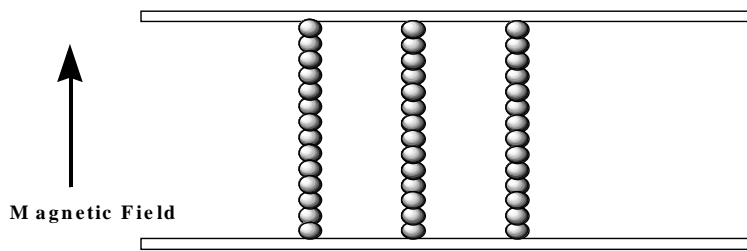
圖六為磁流變示意圖，在流體粒子因磁場而順向時，過小的剪切力將會使流體不能流動(如圖六-2)，而產生所謂降伏應力。降伏壓力愈大，則表示所混配的磁流體有愈好的磁控效果。



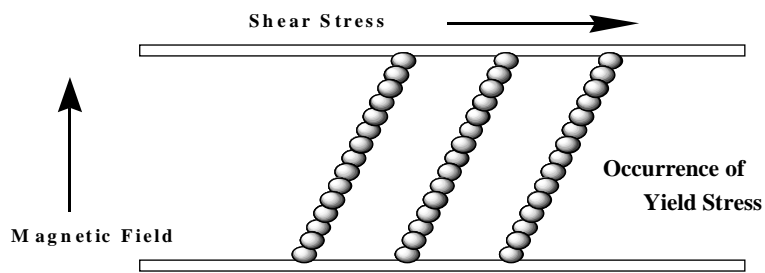
圖五 雙平板磁流變儀原理示意圖



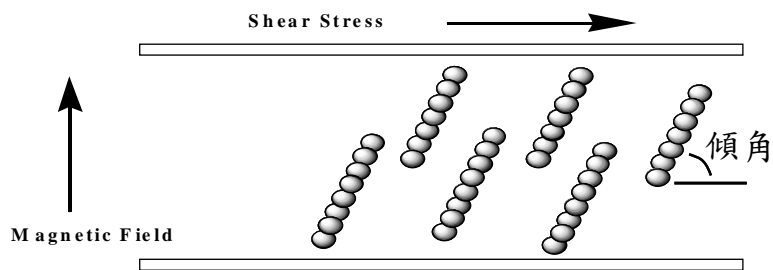
圖六-1



圖六-2



圖六-3



圖六-4

圖六 降伏應力示意圖

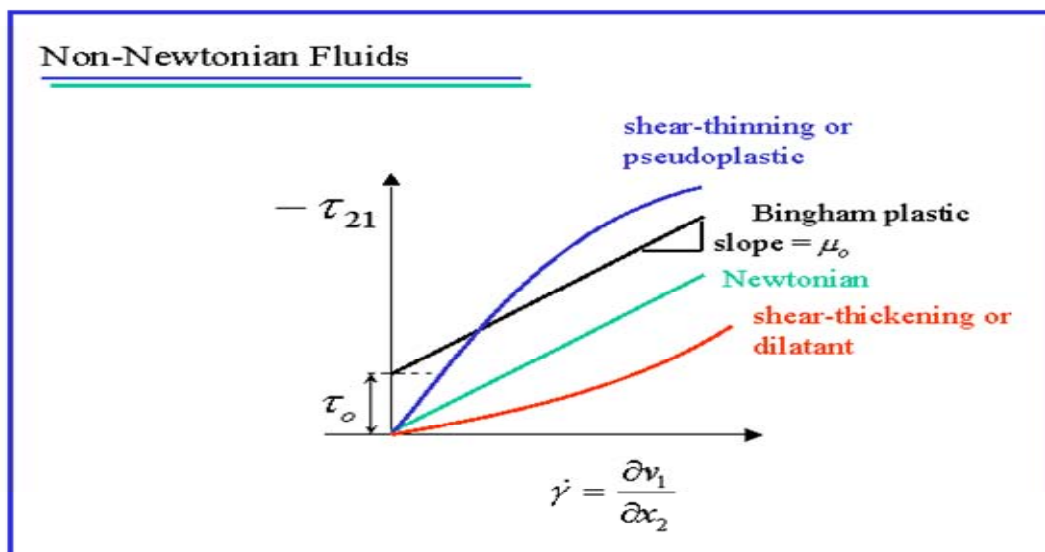
圖七為剪切力與剪切率之作圖。一般小分子的流體多呈現牛頓流體(綠色線)，而若磁流體經磁場的作用，則會形成所謂賓漢流體(黑色線)。賓漢流體有所謂降伏應力(τ_0)，流體在磁場作用下，需超過此應力值，流體方可流動。而我們依「表象黏度」(apparent viscosity, μ_a)之定義(Eq.(1))(4)

$$\tau = \tau_0 + \mu_0 \dot{\gamma}$$

$$\mu_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + \mu_0 \quad (1)$$

在 Eq.(1) 中 τ 為剪切應力， τ_0 為降伏應力， μ_0 為類牛頓黏度， $\dot{\gamma}$ 為剪切率，亦即剪切速度之梯度， μ_a 則為表象黏度，為實驗設定點之剪切力與剪切率的比值。

可知在剪切率固定時，降伏應力愈大，所得到之表象黏度便愈大。亦即我們可透過電流的強度，調整磁場的大小，更進一步得到黏度。

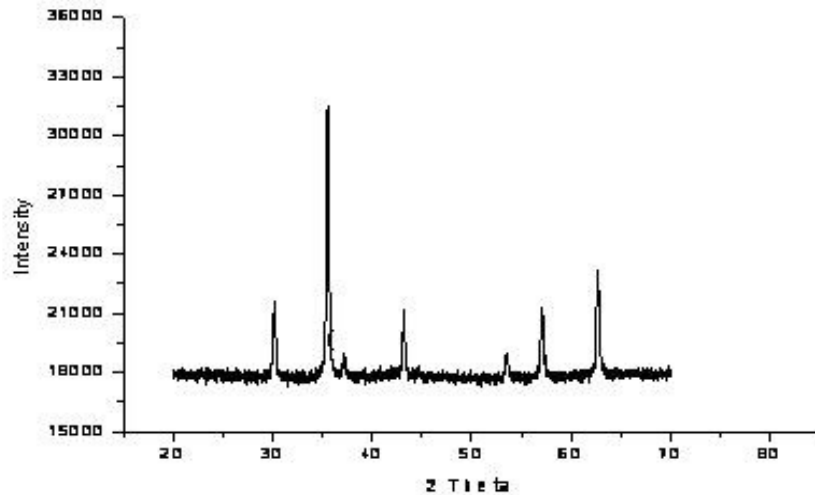


圖七 牛頓及賓漢流體示意圖

伍、研究結果與討論

一、磁性極子在不同合成條件下之形態分析

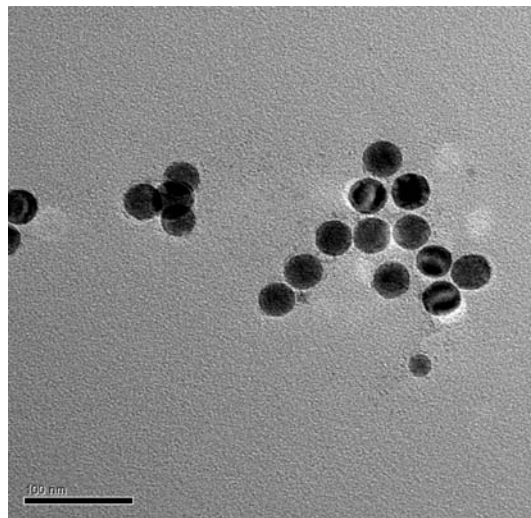
1. Fe_3O_4



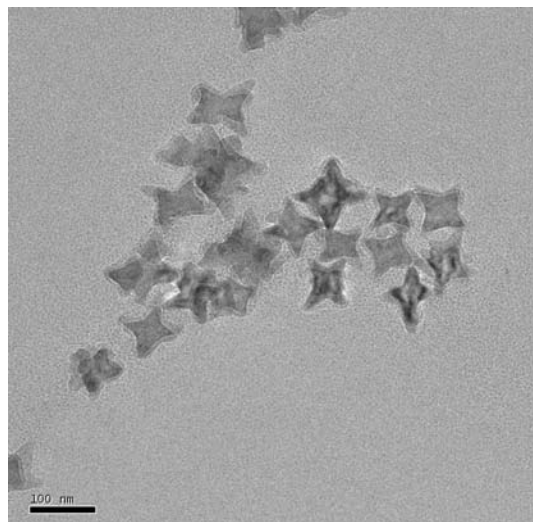
圖八 Fe_3O_4 之 X-ray Diffraction 圖譜

- (1) 本研究合成出之 Fe_3O_4 粒子，其廣角 X-ray Diffraction 分析圖譜如圖八所示，所有的結晶特徵 (30.1, 35.4, 37.0, 43.1, 53.4, 56.9, 62.5) 均與文獻相似(1)，證明合成之粒子確實為 Fe_3O_4 結晶粒。
- (2) 圖九至圖十一為 Fe_3O_4 粒子在各種不同實驗合成條件下所呈現 TEM 圖，圖九及圖十分別為製程(一)油酸製程在 366°C 及 300°C 之結果，結果顯示在低溫 300°C 製程會呈現星形，其內徑約長 40nm 之角尖至角尖之對絞距離則可達 80nm。而高溫 366°C 下則顯現出大小較規律的圓形(約 30nm)，此結果意味著高溫可得到較圓且較均勻之粒子，低溫則得到非圓形甚至多銳角形之粒子。
- (3) 一般而言，結晶分為「成核」及「成長」兩階段，低溫有利成核但不利成長，高溫則正相反。故低溫時因反應物擴散速率較慢，晶核較不易均勻成長形成 3-D 對稱的圓形，反而是層積之凸面，因較容易捕捉 Fe_3O_4 生成物而使結晶繼續順凸面生長。如此，非圓形甚至多銳角形便因此形成。然而在高溫時因擴散速率快，晶核之各面向均勻，造成許多生成物之層積同時進行，凸面來不及形成，而取代之的是均勻成長的圓形晶體。

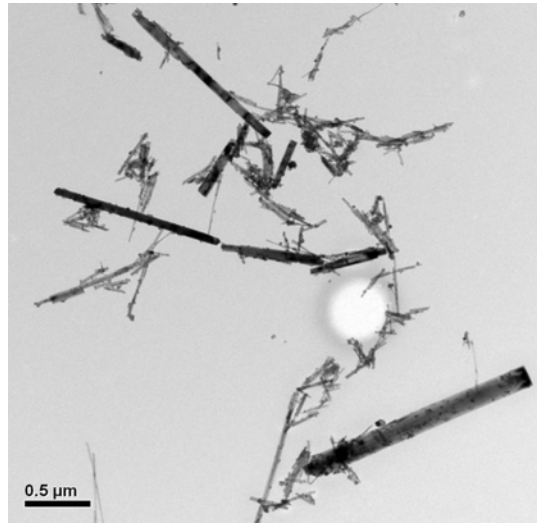
(4) 圖十一則為我們用高溫高壓浴法將 Fe_3O_4 之奈米粒子進一步形成長棒狀。圖十一-1 為磁棒典型之形狀。圖十一-2 則為磁棒形成前其奈米粒子之 TEM 圖。由圖十一-2 我們可知其粒子直徑從數奈米製 10 奈米左右，然經高溫高壓浴法後，其可形成 $(40 \times 40 \times 200 \text{ nm}^3)$ 之磁棒。就流變而言，不對稱的物體應會對賓漢流體在流動之前與之後的降伏壓力有很大的差別，此亦為我們選擇合成此一磁性材料做本實驗的目的。



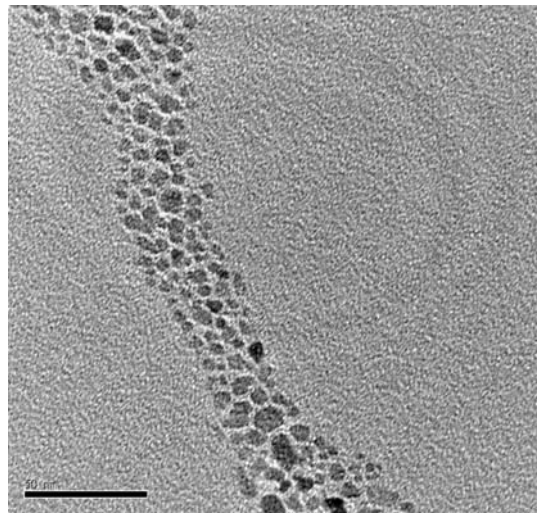
圖九 Fe_3O_4 在 366°C 下合成顆粒之 TEM 照片



圖十 Fe_3O_4 在 300°C 下合成顆粒之 TEM 照片

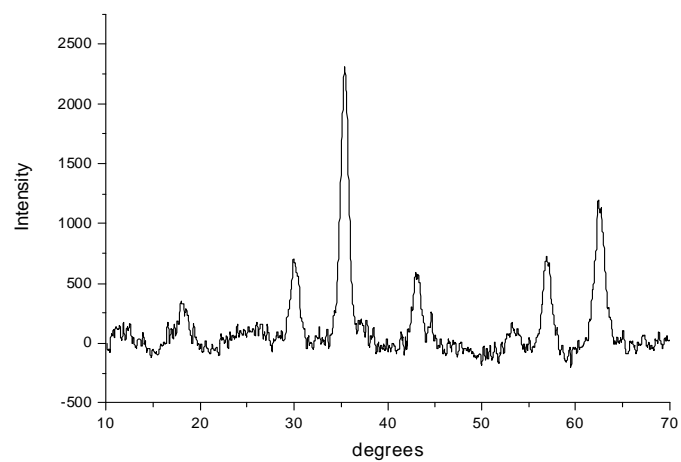


圖十一-1 Fe₃O₄ Nanawire 高溫高壓(120°C,2atm)成形後之 TEM 照片



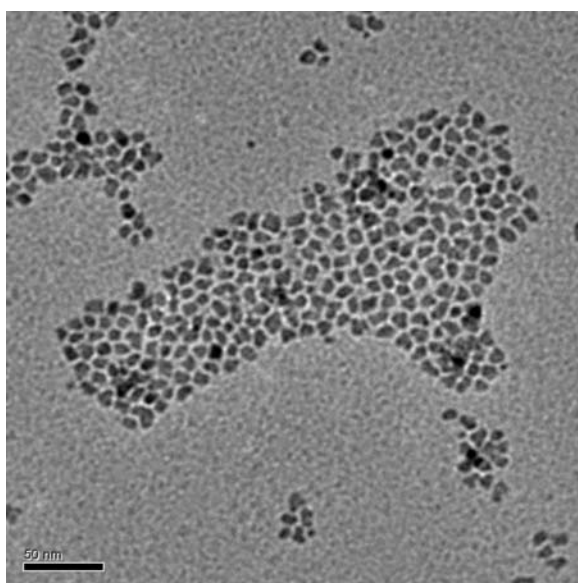
圖十一-2 Fe₃O₄ Nanawire 成形前，其 Nanoparticle 之 TEM 照片

2. CoFe₂O₄

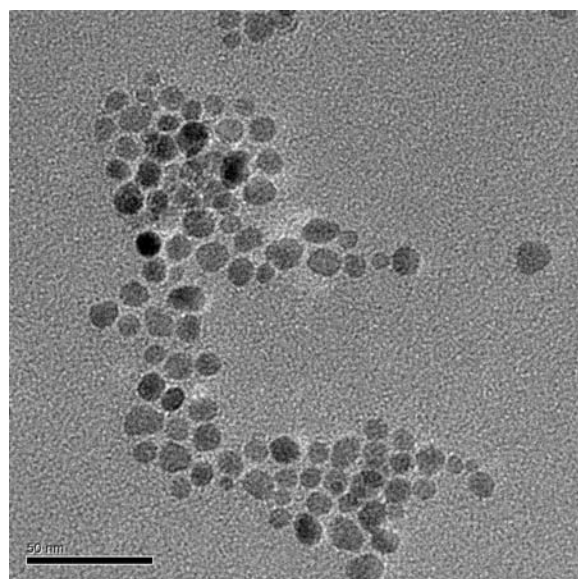


圖十二 CoFe₂O₄ 之 X-ray Diffraction 圖譜

- (1) 本研究合成出之 CoFe_2O_4 粒子，其廣角 X-ray Diffraction 分析圖譜如圖十二所示，所有的結晶特徵 (18.1, 30.2, 35.7, 43.5, 57.6, 63.1) 均與文獻相似(5)，證明我們所合成之粒子確實為 CoFe_2O_4 結晶粒。
- (2) 圖十三及圖十四則為 CoFe_2O_4 分別在低溫 265°C 及高溫 300°C 合成顆粒之 TEM 照片，兩者都呈現近圓形，但高溫下顆粒大小較均勻，且圓形較顯著，其大小約為 10nm。相對的在低溫時，其顆粒呈現近似圓形，大小約為 3~5nm。此形狀上之差異與之前 Fe_3O_4 所得之結果類似，都呈現高溫有利於圓形之形成，可歸因於擴散速率於高溫時較快所致。



圖十三、 CoFe_2O_4 在 265°C 下合成顆粒之 TEM 照片



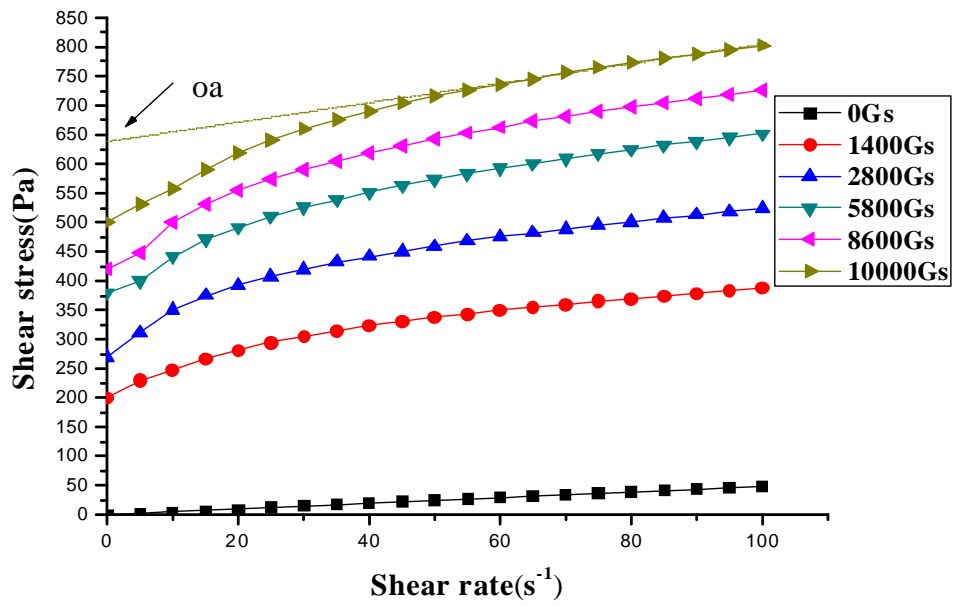
圖十四、 CoFe_2O_4 在 300°C 下合成顆粒之 TEM 照片

二、各磁性粒子之磁流變分析

1. 磁場強度、粒子濃度對磁流變之影響

- (1) 圖十五為 CoFe_2O_4 (300°C 下合成)分散於矽油(PDMS, 12 wt%)之磁流變圖。很明顯可看出當磁場增加時流體由牛頓流體變成賓漢流體。隨著磁場的增高，不但降伏應力(τ_0)增大，且流體的類牛頓黏度(μ_0)也不斷的增大。其 μ_0 及 τ_0 隨磁力增大數據如表一所示。
- (2) 表一顯示出兩種降伏應力值。一為推使平板開始流動之第一個量測應力質，我們定義為 τ_{0i} ；一為最終黏度經外差至剪切率為 0 時之值，我們定義為 τ_{0a} 。後者略高於前者，但兩值均隨磁力之增大而增大。
- (3) 磁力增加時，圖六-3 之可降伏範圍—亦即磁粒子線受剪切產生變形但不斷裂之範圍—自然因此增大。又若磁粒子線被拉斷後，各分散粒子團原本應隨剪切力之運動方向前進，亦即順向而流。但卻因磁力的作用，使粒子團在流動過程中依然保持一與流動方向偏離之傾角。傾角愈大，會使流體流動遭受較大的阻力，黏滯力因此增多。因而所得到之類牛頓黏度(μ_0)會隨磁力之增大而變大。事實上，賓漢降伏應力(τ_0)及類牛頓黏度(μ_0)並不會一直隨著磁力的增大而增大，所有的磁性流體都應有其極限的應力度。
- (4) 圖十六為 Fe_3O_4 (366°C)在不同濃度下其降伏應力對磁力之關係，很顯然的，降伏應力隨磁力增大而增大。但對於低濃度之 Fe_3O_4 液體我們觀察到「極限磁力度」的現象，亦即降伏應力自磁力飽和點後就不會隨磁力的增大而增大。圖十六可看出對於 3 wt % Fe_3O_4 的液體，其極限磁力度為 6000GS，對 6 wt % Fe_3O_4 其極限為 8600GS。但對於 12 wt % 的 Fe_3O_4 其極限值高於我們儀器可量測之範圍(1000GS)，故未能得其值。

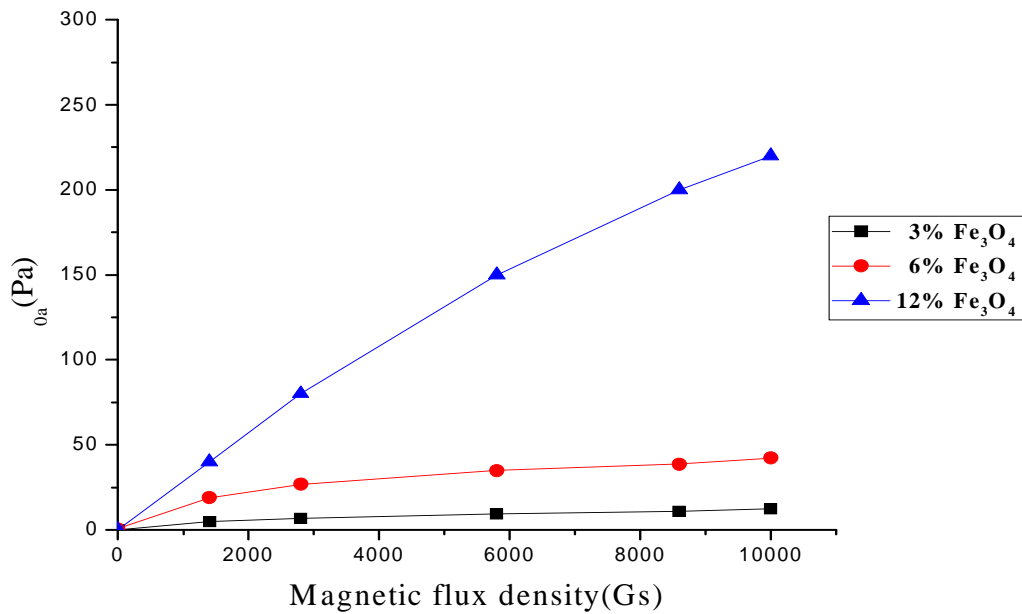
綜合以上幾點，我們發現極限磁力度會隨著粒子濃度的增大而增大。要達到相同之降伏應力，我們可選擇稀的粒子濃度但高磁場，或高粒子濃度但低磁場來完成。



圖十五 CoFe₂O₄(300°C下合成)之顆粒在不同磁場下,其剪應力與剪切率之關係圖

表一 不同磁力下 τ_o 及 μ_o 之值

磁場強度	τ_{oi} (Pa)	τ_{oa} (Pa)	μ_o (Pa S)
0 Gs	0	0	0.5
1400 Gs	188.8	296.8	0.9
2800 Gs	270.4	404.3	1.2
5800 Gs	387.9	511.5	1.4
8600 Gs	423.6	576.7	1.5
10000 Gs	502.1	644.3	1.6

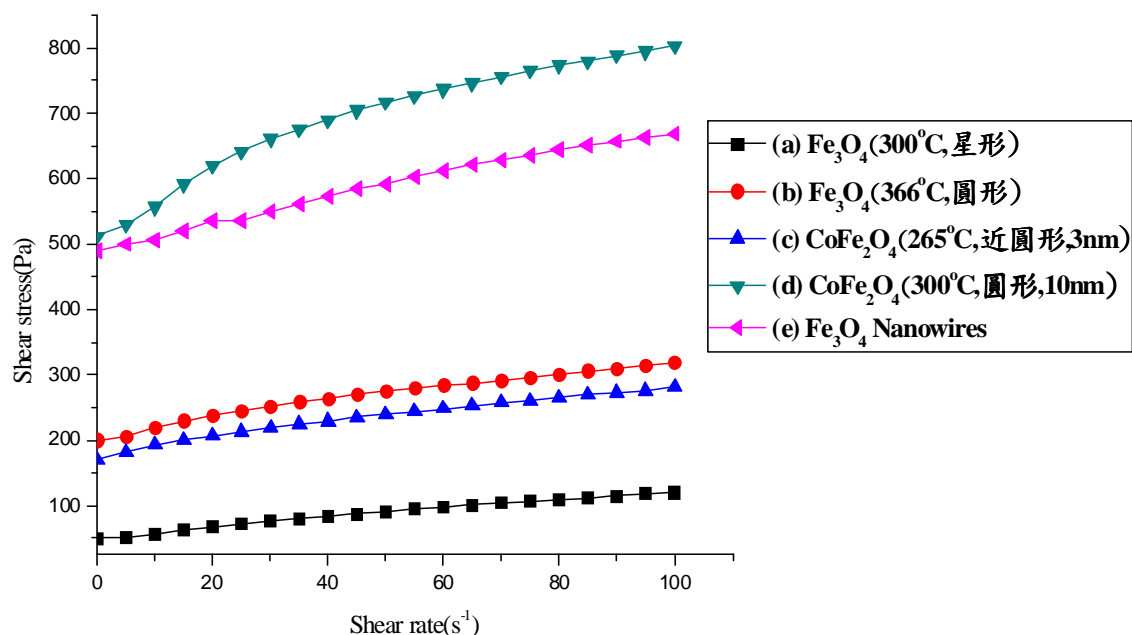


圖十六 不同濃度之 Fe₃O₄(366 °C)流體其降伏應力(τ_{0a})與磁場強度(Gs)的關係

2. 不同磁性粒子之流變行為差異

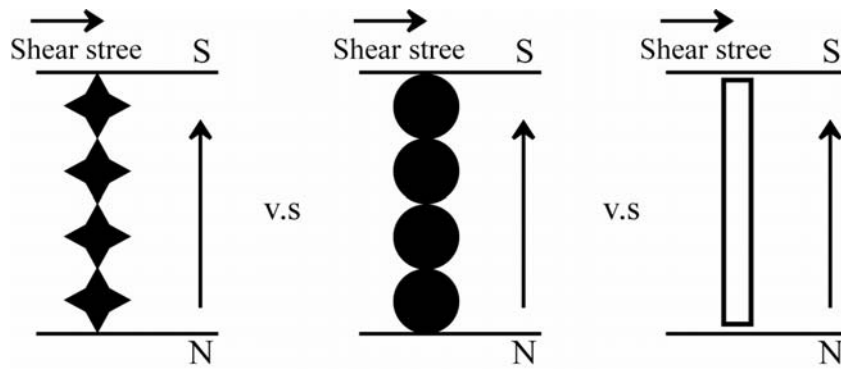
- (1) 圖十七為在本計劃 5 種不同條件下所合成之磁性粒子，其磁流變行為的差異。由圖十七我們可知 CoFe₂O₄ 系列之降伏應力明顯的較 Fe₃O₄ 系列來得高。
- (2) 鐵鈷之氧化物其磁力較鐵氧化物為佳，文獻中探討較少，主要是除了組成元素不同外，各氧化物不同的結晶形態對磁力亦有影響，故較無精確控制變因後之比較結果。但鈷之磁化性較鐵為佳倒是不容置疑的。鈷之居禮溫度(Curie Temp)〔亦即失去磁力的臨界溫度〕(9)，為所有金屬及金屬氧化物中之最高(1388K)，較鐵之 1043 K 及鎳之 627 K 為高。代表其順磁性最大及穩定度最佳。因此，本實驗所發現鐵鈷氧化物之磁流變較鐵氧化物為佳，是合理的結果。
- (3) 相同的粒子 CoFe₂O₄，相似的形狀(圓形或近圓形)，但不同的粒徑對磁流變的影響亦顯示於圖十七。由圖十七我們可看出 CoFe₂O₄(10nm)有最好的降伏應力(644Pa)及類牛頓黏度(1.6 Pa S)。但形狀略小的 CoFe₂O₄(3nm)呈現較差的結果(188Pa)，其降伏應力僅有前者之 1/3。

(4) 理論而言，愈大的粒子其接連點愈少，受剪應力破壞的機會較小，因此可以得到較佳的磁流變降伏應力是合理的現象。



圖十七 各種不同磁粒子之磁流變形為(10000GS , 25°C , 12 wt%於矽油中)

(5) 圖十七亦顯示，Fe₃O₄ 在 366°C 所形成之圓形粒子，較 300°C 所形成之星形粒子，有較佳的降伏應力。若我們仔細觀察星形粒子之核心直徑(40nm)，要較圓形粒子直徑(30nm) 為大，依上述鈷鐵氧化物之結果，粒子大者應較有利於降伏應力之提高，但本實驗呈相反之結果，推論其主要原因在於星形之接合為尖點與尖點之連結 (如圖十八所示)，其穩定度較近似圓形顆粒的連結情形為差，亦即較易被剪切力破壞其脆弱的接合點，因此得到較差的降伏力。



圖十八 星形與近圓形顆粒受磁力影響之順向示意圖

(6) 由圖十七也可發現另一個有趣的現象，為棒狀的 Fe_3O_4 較所有顆粒狀之 Fe_3O_4 為優。以理論而言，棒狀代表上述圓形或星形顆粒之連接點消失而連成一體(如圖十八所示)。其對剪切力造成形變的抵抗力自然較佳。然棒狀有它的缺點，因為根據粒子在液體中分散之原理，當粒子直徑為 $1\ \mu\text{m}$ 以下時，布朗運動(2)(亦即液體分子之熱運動衝擊懸浮粒子造成粒子隨意運動)可以克服粒子本身的重力，如此粒子便不會沉降而能長時間懸浮於液體中(本計劃以矽油為液體)。然而本計劃之棒狀粒子其長度長達 $2-3\ \mu\text{m}$ ，長期放置會有沉降之虞。且沉降後是否會引發聚集(Agglomeration)(2)，是本計劃日後所需探討的問題。不過就目前經短時間製備磁流體之測試結果看來，棒狀磁體是一個不錯的選擇。

陸、結論及應用

本專題在研究不同之磁性流體如何經由控制磁場達到控制流體黏滯性的目的。我們首先經由三種不同的氧化粒子以 **Colloid Solution Synthesis** 方式合成，形成 Fe_3O_4 (圓形 30nm；星形 40nm(core))， CoFe_2O_4 (圓形 10nm；近圓形 3nm)，及 Fe_3O_4 nanowire ($40\times 40\times 200\text{nm}^3$) 等三種不同磁性粒子。合成中發現 Fe_3O_4 在高溫($366\ ^\circ\text{C}$)易形成圓形均勻粒子，低溫($300\ ^\circ\text{C}$)則 Fe_3O_4 較有可能形成多銳角形粒子。

而流變測試可得到以下重要結論：

1. CoFe_2O_4 之降伏應力較 Fe_3O_4 高約 3 至 10 倍。
2. CoFe_2O_4 粒子實驗可知，對同為圓形但粒子大小不同者，粒子大對降伏應力之增強有較佳之效果。

3. 圓形粒子降伏應力較星形粒子為優。
4. 棒形 Fe_3O_4 微米粒子的降伏應力較 Fe_3O_4 奈米顆粒高出甚多，顯示棒形在磁流變之幾何效果最佳。
5. 極限磁力度會隨著粒子濃度的增大而增大。
6. 要達到相同之降伏應力，我們可選擇稀的粒子濃度但高磁場，或高粒子濃度低磁場來完成。

以上結論，可用在建築及車輛工業目前正研發中的「智慧型阻尼器」上，使阻尼器之液體黏滯性可因震動之不同而由電場加以調整。可供調整幅度愈大，制震效果愈佳。本研究僅加入 12 wt %之各式磁性粒子，便得到非常大的降伏應力調整空間(0~644Pa)。實驗顯示，鐵鈷氧化物，顆粒較大或為棒狀不對稱粒子，可做為未來「**智慧型阻尼器**」精進研發之方向。

磁性流体除了在上述「智慧型阻尼器」外，更可應用在另一高科技領域----**高真空抽氣 pump** ($< 10^5$ torr) 之**軸承封氣材料 (Liquid O-Ring)**。主要是利用磁性奈米粒子吸附在軸承表面，使油封之油料能因而更緊貼於軸承，讓軸承在快速轉動時不易漏油及洩氣，再加上奈米磁粒子受磁力影響順向緊密排列，造成良好空氣阻隔 (Gas Barrier)效果，達到高真空油封的目的。在此，奈米磁性粒子粒徑小且磁性強為主要選擇標準。我們在磁流變所測得之高降伏應力，低類牛頓黏度，及小而對稱性高的奈米顆粒 CoFe_2O_4 (10nm)，為很好的選擇。

本研究實證了磁性流體因外部磁力的改變，而使流體中的磁性粒子形成不同的排列結構，打破了流體不易受控制的刻板印象，許多智慧流體的應用(如前述兩例)便因而產生。目前世界上對此研發仍屬前期。拜奈米研究的蓬勃發展，高懸浮性奈米磁粒子之合成已陸續有研究成果發表。然如何順此趨勢，發展出高磁力，高懸浮性，及不同形狀的奈米磁性粒子與磁性流體，仍是今後科學家們努力的目標。

柒、 參考文獻

- (1) He, K.; Xu, C.Y.; Zhen, L.; W.Z. Shao, 2007, “Hydrothermal Synthesis and Characterization of Single-crystalline Fe_3O_4 Nanowires with High Aspect Ratio and Uniformity.” , *Material Letters*, **61**, pp3159-3162.
- (2) Larson, R.G., *The Structure and Rheology of Complex Fluids*, Oxford U. Press, Oxford, p332, 1999.
- (3) Lian, S.; Wang, E.; Gao, L.; Kang, Z.; Wu, D.; Lan, Y.; Xu, L.’ 2004, “Growth of Single-crystal Magnetite Nanowires from Fe_3O_4 nanoparticles in a surfactant-free Hydrothermal Process.” , *Solid State Commun.*, **132**, pp 375-378.
- (4) Morrison, F.A., *Understanding Rheology*, Oxford University Press, Oxford, pp231-232, pp266-268, 2001.
- (5) Maaz, K.; Mumtaz A.; Hasanain, S.K.; Ceylan, A., 2007, “Synthesis and Magnetic Properties of Cobalt Ferrite (CoFe_2O_4) Nanoparticles Prepared by Wet Chemical Route.” , *J. Magnetism Magnetic Mater.* **308**, pp289-295.
- (6) Park, J.; An, K. Hwang Y.; Park, J.G.; Noh, H.J.; Kim, JY.; Park, J.H.; Hwang, N.M.; Hyeon, T., 2004, “Ultra-large-scale Syntheses of Monodisperse Nanocrystals.” , *Nature Materials*, **3**, pp891-895.
- (7) Stanway, R., 2004, “Smart Fluids:Current and Future Development.” , *Mater. Sci., Eng.*, **20**, pp931-939.
- (8) Sun, S.; Zeng, H.; Robinson, D.B.; Raoux, S.; Rice, P. M.S.; Wang, X.; Li, G., 2004, “Monodisperse MFe_2O_4 (M= Fe, Co, Mn) Nanoparticles.” *J. Am. Chem. Soc.*, **126**, pp273-279.
- (9) Wikipedia, 2008, “A selection of crystalline ferromagnetic materials, along with their Curie temperatures in Kelvins.” , *Ferromagnetism--Ferromagnetic materials section*, Wikipedia, the free encyclopedia.

【評語】 040208

本件作品具有創意，探討磁性液體應用於避震系統的可能性。由於作者對磁場強度、鐵鈷氧化物的變項作了探討因而了解其避震效果，此結果具有實用與學術發展的潛力，值得鼓勵。