

中華民國第 61 屆中小學科學展覽會
作品說明書

高級中等學校組 化學科

探究精神獎

050204

運「鐵」成「峰」——鐵磁流體的製備條件研究
與磁場下的流變效應

學校名稱：新北市立丹鳳高級中學

作者： 高三 王家瀚 高一 徐士涵	指導老師： 詹堯舜
-------------------------	--------------

關鍵詞：磁流體、奈米科技、流變

摘要

本研究嘗試製作商用規格，並具備相同流變現象的鐵磁流體。我們收集大量鐵磁流體製作的文獻，但普遍未提到具有良好流變性質成品的關鍵因素。為此我們設計了一套標準製作流程及器材，找出成分比例（鐵源、界面活性劑、載液）和合成步驟（攪拌、酸化、洗滌、乾燥）及反應環境（溫度、空氣）對鐵磁流體的影響。使用 ImageJ 計算尖峰數。利用 SEM、EDS 與 XRD 分析，成功製得粒徑 < 15 nm 之奈米粒子。

製程中是否接觸空氣對奈米粒子的磁性產生極大的影響，未通氮氣保護時酸化 pH=2.5-3；而通氮氣保護時酸化 pH=4 時，具有最佳的磁性。然而酸化至 pH=6 時化學性質最為穩定。混合水與磁流體時觀察液面產生的特殊現象，尚未被文獻提出。我們稱之為一種新形態的「不穩定現象」。

壹、研究動機

磁流體(ferrofluid)是一種具有磁性的奈米分子，尺寸通常於 10 奈米或是更小。由磁性分子、界面活性劑與載液組成。於 1963 年由 NASA 工程師 Steve Papell 所發明，最初的目的是作為無重力下油品輸送的解決方案，但由於某些因素最終 NASA 採用了其他解決方案。

話雖如此，由於磁流體由於具有無可取代的「超順磁性」性質。因此現今被廣泛應用於資訊儲存、生醫、機械工程與教育等高科技領域。目前各種潛在應用仍不斷被發掘，例如：理論物理、機械、醫療、環境工程、智能材料與藝術等領域。

我們基於對「鐵磁流體流變」的好奇，以及想創造出新的鐵磁流體之期望，以不斷嘗試改善的方式，創造出優於市面上以及其他曾經研究者之磁流體，來提升鐵磁流體應用於生活上的發展。

因此本實驗之目的為研究具有流變現象之鐵磁流體製作方法，並了解其性質以及應用。不同於網路上普遍製作鐵磁流體方法，本文嘗試結合多篇合成文獻，簡化、改良並摸索出產率極高的合成方式。克服各種技術困難，尋找出材料最便宜、簡單且無需太多專業實驗器材的合成配方和步驟，並對於過程中發現的各種流變現象進行探討與解釋，最後歸納出不同性質之鐵磁流體其最佳應用層面。

貳、研究目的

- 一、嘗試不同條件製作具流變現象之磁流體
- 二、改良步驟並設計所需實驗器材
- 三、研究流變現象
- 四、探討成分（鐵源、界面活性劑、載液）和合成步驟（攪拌、酸化、洗滌、乾燥）及反應環境（溫度、空氣）對鐵磁流體的影響

參、研究設備及器材

一、研究器材

表一、本研究使用之藥品（研究者製）

Z-R 試劑	丙酮	油酸	氨水	酒精
氫氧化鈉	硫酸亞鐵銨	氯化鐵	煤油	碘化鉀
碘酸鉀	過錳酸鉀	鹽酸	硫代硫酸鈉	十二烷基 苯磺酸鈉

表二、本研究使用之實驗材料（研究者製）

保鮮膜	乾燥劑	普通磁鐵	橡皮筋	鋼絲絨
膠帶	碳粉	橄欖油	橡膠管	針筒
鐵片	凡士林	扳手		

表三、本研究使用之實驗器材（研究者製）

安全吸球	血清瓶	刻度吸量管	定量瓶	抽氣漏斗
洗滌瓶	玻棒	量筒	電磁加熱攪拌器	滴定管
滴定管架	滴管	漏斗	磁攪拌子	廣用試紙
燒杯	錐形瓶	濾紙	藥勺	鑷子

二、研究設備

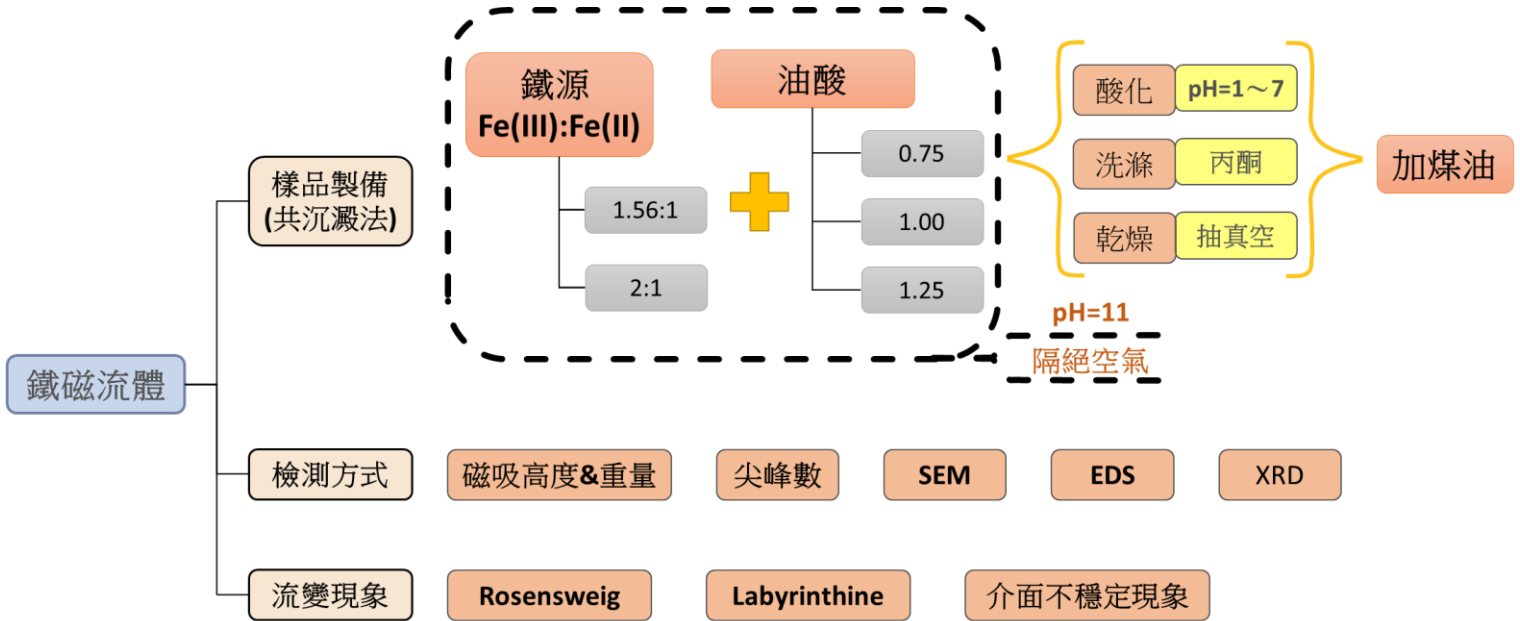
表四、本研究使用之設備（研究者製）

pH 計	研磨機	釷鐵硼磁鐵	真空機	游標卡尺
				
電子秤	精密天平	SEM	XRD	氮氣鋼瓶



肆、研究過程或方法

一、研究架構



二、文獻探討

(一) 合成方法，介紹如下 (表五)

表五：奈米粒子合成方法 (研究者製)

製備方式	概述
水熱法	在高溫及高壓環境下合成磁性粒子，在水溶液或蒸汽等流體中合成。
化學共沉法	利用氯化鐵及氯化亞鐵混合並倒至鹼液 (沉澱劑) 中。加入界面活性劑然後水洗及沉降，再分散到分散劑中。
粉碎法	將磁性粒子和界面活性劑混合並磨碎。
氣相沉積法	利用揮發性金屬化合物蒸氣來合成奈米粒子。特點為大小分佈均勻。
溶膠凝膠法	以易水解的金屬結合物為原料，使之在某種溶劑中與水發生反應，經過水解和縮聚過程逐漸膠化，再經乾燥和鍛燒得到所需氧化物奈米粉末。
熱分解法	將磁性材料的原料融入有機溶劑，加熱分解出游離金屬，並在溶液中加入分散劑後分離。溶入載液後即得到鐵磁流體。

(二) 磁性的分類

當物質放置於外加磁場時，某些物質會產生磁化現象，此時磁場與磁化強度的數學

關係可表示為：

$$M = \chi_m H$$

1. 公式原理：

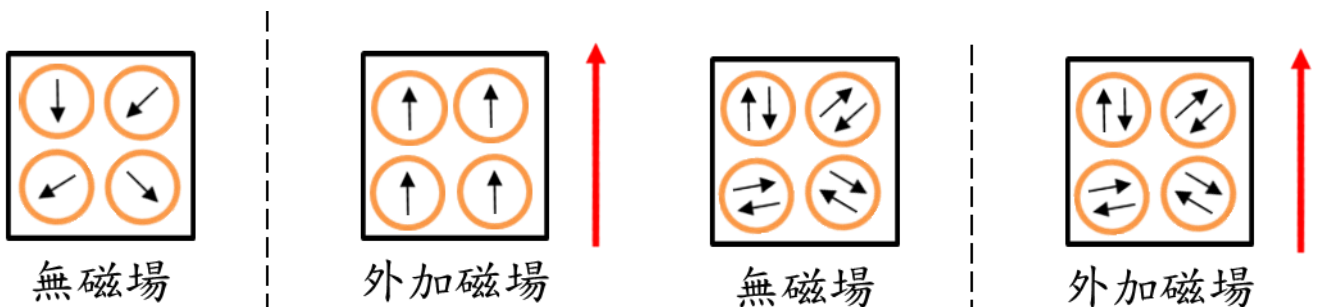
- (1) 磁化強度 (M)：用於衡量物體磁性。其定義為單位體積下的磁偶極矩，SI 單位為安培/公尺(A/m)。當鐵磁性物質置於外磁場下時，其內部會被磁化，而磁化的程度即是「磁化強度」，不斷增大外磁場後，其磁化強度會停止增加於一個穩定的數值上，而此數值稱為「飽和磁化強度」，如預測量飽和磁化強度，可由測量磁滯曲線得知。
- (2) 磁場強度 (H)：本實驗的磁場來源為釹鐵硼磁鐵，主要的成份為 $Nd_2Fe_{14}B$ ，具有較高之磁場強度。
- (3) 磁化率 (χ_m)：依據磁化率的變化特徵可將磁性物質分為五類物質，順磁性 (Paramagnetic)、反磁性 (Diamagnetic)、鐵磁性 (Ferromagnetic)、反鐵磁 (Antiferromagnetic) 和亞鐵磁性 (Ferrimagnetic)。

2. 順磁性：

物質 χ_m 為極小正值，通常在 $10^{-3} \sim 10^{-6}$ 之間，由原子或分子內不成對電子造成。通常狀態下，由於「熱擾動效應」使粒子磁矩方向不一致，而導致淨磁矩為零。但受外加磁場影響時，不成對電子易受外部磁場影響，磁矩朝順磁場方向排列。

3. 反磁性：

物質 χ_m 為極小負值，通常在 -10^{-5} 左右，反磁性物質內部原子或分子皆為成對電子，淨磁矩為零。但受外加磁場作用時，由於冷次定律，電子軌道發生感應而產生反向磁矩，故磁化率為負值。



圖一：順磁性示意圖 (研究者製)

圖二：反磁性示意圖 (研究者製)

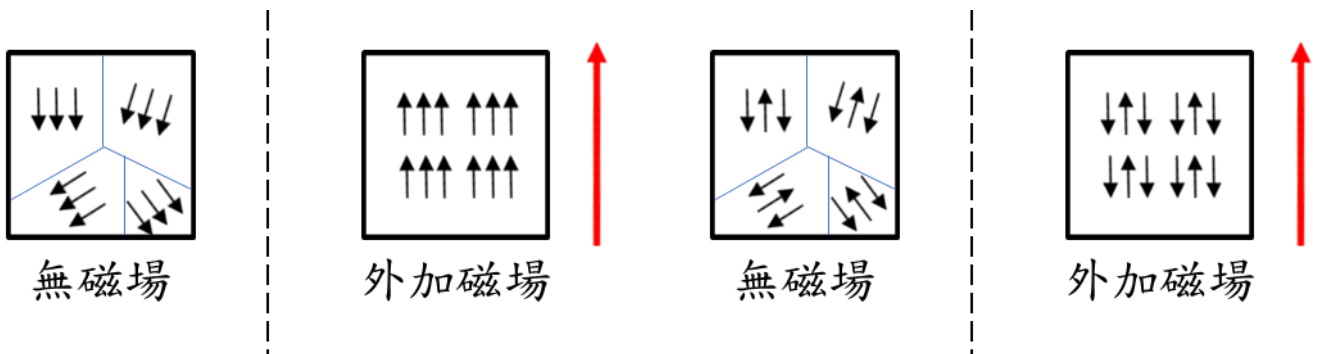
此反向磁矩通常很微弱，相比於順磁性、鐵磁性等物質，因此一般可視為無磁性。但所有物質皆有反磁性，且此磁化率數值不會隨溫度、磁場改變。

4. 鐵磁性：

與順磁性物質一樣，具有不成對電子，能夠產生磁矩。物質的 χ_m 大於零且數量級很大，約為 $10^1 \sim 10^6$ 。每個磁域 (magnetic domain) 皆具有不為零的磁矩，但方向不一定相同，因此不一定能顯示出磁性。但當外加磁場時，磁與會逐漸轉至同一方向，當所有磁域皆轉至同一方向時，此時的磁化值稱為飽和磁化量 M_s 。

5. 亞鐵磁性：

亞鐵磁性內部磁矩結構與反鐵磁性相同，只是相反方向的磁矩大小不同。相反方向磁矩互相抵銷後，總磁矩不為零。亞鐵磁性表現出的性質與鐵磁性類似，但其 χ_m 低於鐵磁性，大約 $10 \sim 10^3$ 。本實驗所製備之 Fe_3O_4 等尖晶石系物質多為此類。

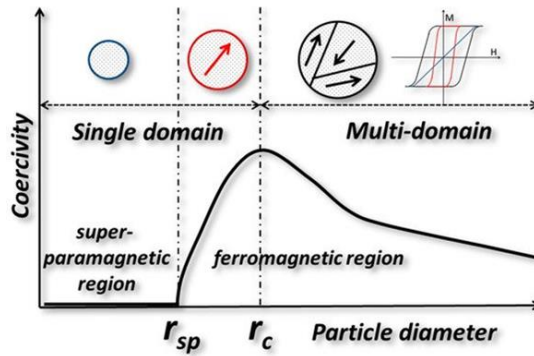


圖三：鐵磁性示意圖（研究者製）

圖四：亞鐵磁性示意圖（研究者製）

6. 超順磁性：

出現在小的磁性粒子中，如奈米尺寸之鐵磁性或亞鐵磁性粒子，與順磁性類似但磁化率卻要更大。由於每個磁性粒子可視為一個磁域，液體中熱擾動造成總磁矩為零。當外加磁場時每個磁域又會沿著外加磁場排列而產生磁矩。超順磁性的出現與粒子尺寸有關。如圖五，如欲知道鐵磁流體是否具有超順磁性，其中必要之條件為磁性粒子必須小於臨界半徑 (r_c)，才有可能表現出超順磁性，其矯頑磁力會隨著粒徑變小而隨之減少，且其有利於成為無晶界之磁性粒子；如果大於 r_c ，則不會呈現任何磁性，其矯頑磁力則是隨著粒徑變大而減少。

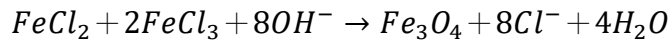


圖五：超順磁性示意圖

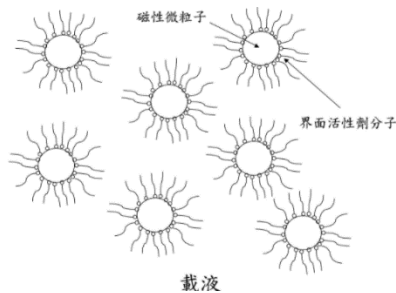
(資料來源： Madumali Kalubowilage et al, 2019 年)

(三) 磁流體介紹：

化學共沉法反應式如下



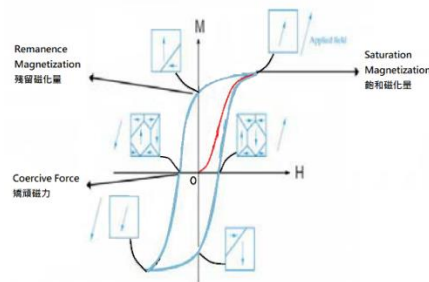
Fe_3O_4 原為不溶於水之黑色晶體。但藉由前驅物與沉澱劑快速反應，形成可溶之「奈米粒子」，將其懸浮於載液形成膠體溶液時，由於本身粒子極小，熱運動使磁矩排列混亂，總磁矩為零。但當有外來磁場時，磁矩會規則排列，而具有順磁性。



圖六：磁性分子溶於載液示意圖

(資料來源： 錳鋅鐵氧化物磁性流體之製備及分散研究，顏雅侖，2002)

(四) 磁滯現象



圖七：磁滯曲線示意圖

(資料來源： 磁性基本特性及磁性材料應用，杜怡君等)

「磁滯現象」是指鐵磁性材料在磁化和去磁的過程中，由於其內部的「偶極子」保持受磁場影響後的排列方向，使其在移除外加磁場後，依然保有部分磁性。

從文獻中可知，物質達到「飽和磁化量 (Magnetic Saturation)」之後，將外加磁場逐漸降低為零時，其磁偶極強度會沿著與「原先增大曲線」之相異曲線減弱，但並不會歸零，稱為「殘磁」。若要去除殘磁，則須外加反方向之磁場，此反向磁場之強度稱為矯頑力 (Magnetic Coercivity)。同理，反向磁場持續增強而又減弱後，亦會產生殘磁。生活中常見的硬碟、信用卡，即是利用磁滯現象來儲存數據。

(五) 鐵磁流體之穩定性

1. 膠體溶液

由煤油當作懸浮液所製成的鐵磁流體屬於疏水性之膠體溶液，故會因為凡得瓦力、磁吸引作用、排斥作用而懸浮於載液中，不因重力而沉澱。

(1) 凡得瓦力

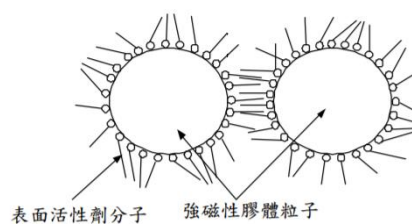
凡得瓦力會發生在不帶電荷的原子或分子之間，由相互作用所引起的吸引力。

(2) 磁吸引作用

當流體中粒子磁矩平行且作用在同一線上時，會產生相對應的吸引力。

(3) 排斥作用

磁性粒子上之界面活性劑會產生排斥作用，因為界面活性劑之立體障礙所致。



圖八：磁性粒子示意圖

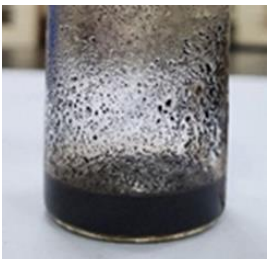
(資料來源：錳鋅鐵氧化物磁性流體之製備及分散研究，顏雅命，2002)

三、前置實驗

我們參考徐光宏 (2002)、NileRed (2019)、池厚亘 (2012)、陳朝光 (2003)、王思雅 (2015) 等人之作法，嘗試各種前驅物與反應條件，並測試磁流體性質，看看是否能達到我們對於流變性質的基本要求。各種實驗條件與結果如表六所示。

表六：前置實驗總表

前置實驗編號	前驅物	沉澱劑	界面活性劑	載液	攪拌速率 (rpm)	共沉溫度 (°C)	初始 pH 值	純化方式	羅森史維格峰
1	$FeCl_3 \cdot (NH_4)_2Fe(SO_4)_2$ (2 : 1)	NaOH	10mL 十二烷基苯磺酸鈉	乙酸乙酯 / 正己烷	1500	室溫	11	水洗	無 (圖九)
2									無 (圖十)
3			10mL 油酸	煤油				水洗、烘箱(60°C)	無 (圖十一)
4									無 (圖十二)
5			2mL 油酸					無	
6								酸化、水洗、真空乾燥	無 (圖十三)
7	$FeCl_3 \cdot FeCl_2$ (2 : 1)	NH ₄ OH	1mL 油酸		5000			酸化、水洗、真空乾燥	無 (圖十四)
8	$FeCl_3 \cdot FeCl_2$ (1.75 : 1)			酸化、水洗、丙酮除水、真空乾燥				有 (圖十五)	



圖九：幾乎不溶於載液



圖十：可溶於載液



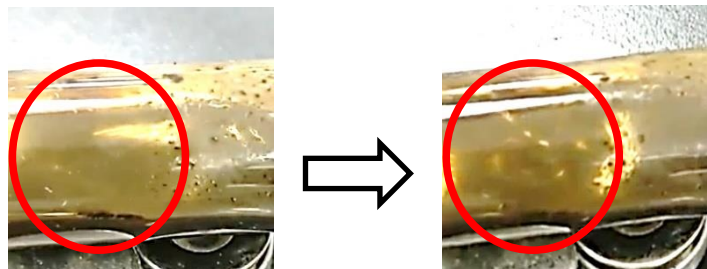
圖十一：磁鐵一吸便會沉澱



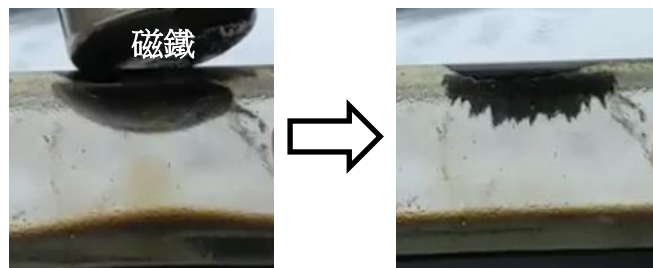
圖十二：磁吸後無任何反應



圖十三：未完全乾燥的糊狀物



圖十四：開始具有流變性，能感應磁場



圖十五：出現羅森史維格不穩定現

四、實驗過程

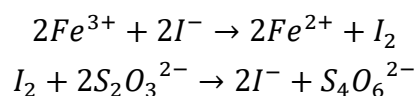
由前置實驗累積足夠經驗與數據後，開始製作鐵磁流體，並測量具有流變性質的鐵磁流體樣本，然後依照教授建議以 SEM、EDS 與 XRD 對樣本的組成與性質進行分析。以下是本實驗合成鐵磁奈米分子所使用的方式：

(一) 製作磁流體原料

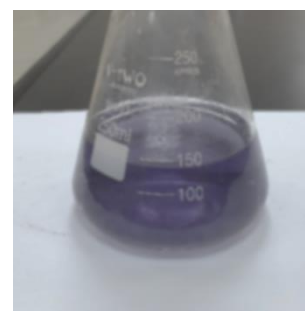
1. 配置氯化鐵溶液：

- (1) 將潮解之氯化鐵固體加水溶解
- (2) 抽氣過濾掉雜質，得到深棕色的氯化鐵溶液（圖十六）

2. 滴定氯化鐵溶液：



- (1) 量取 1 mL 氯化鐵溶液，稀釋定量至 100 mL 為樣品
- (2) 取 20 mL 樣品至錐形瓶，加入 0.1g 碘化鉀固體
- (3) 以 0.01 M 硫代硫酸鈉溶液滴定至淡黃色，加入 1% 澱粉溶液（圖十七）
- (4) 滴定至溶液無色，加入過量 1 mL 硫代硫酸鈉溶液，紀錄滴定之體積（圖十八）
- (5) 以 0.0125 M 碘溶液進行回滴至淡藍色出現，紀錄滴定之體積（圖十九）
- (6) 重複滴定，計算氯化鐵溶液之濃度為 1.0221M



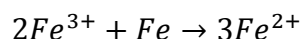
圖十六：深棕色的氯化鐵溶液

圖十七：滴定至淡黃色

圖十八：滴定至無色

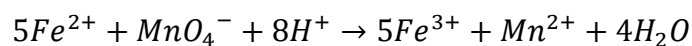
圖十九：回滴至淡藍色

3. 配置氯化亞鐵溶液：



- (1) 將鋼絲絨加入氯化鐵溶液，加熱攪拌，加入鹽酸催化反應
- (2) 等溶液變成綠色，冷卻後抽氣過濾掉雜質，得到翠綠色的氯化亞鐵溶液

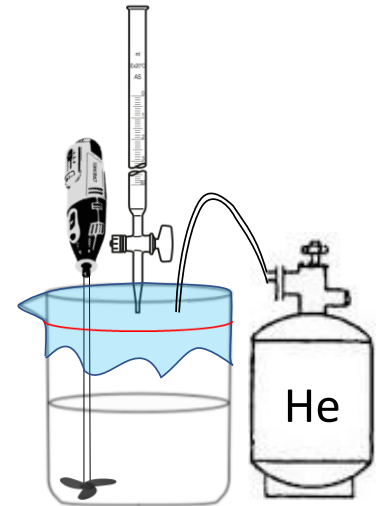
4. 滴定氯化亞鐵溶液：



- (1) 量取 1 mL 氯化亞鐵溶液，稀釋定量至 100mL 為樣品
- (2) 取 20 mL 樣品至錐形瓶，並加入 1 mL Z-R 試劑
- (3) 以 0.01 M 過錳酸鉀溶液滴定至粉紅色，紀錄滴定之體積
- (4) 重複滴定，計算氯化亞鐵溶液之濃度為 2.1625M

(二) 製作磁流體

1. 取 3.2mL 氯化亞鐵溶液和 10.6mL 氯化鐵溶液混合後加至滴定管中
2. 以量筒量取 80mL 氨水加至燒杯(1L)中，為調整 pH=11 並大反應空間，加水至 600mL
3. 保鮮膜和橡皮筋封住燒杯口，於保鮮膜上開三個洞，接上自製攪拌器、滴定管和氦氣鋼瓶（圖二十）
4. 以針頭注入氦氣至燒杯，壓力計讀數 0.2kg/cm^2
5. 進料速率 4mL/min ，攪拌速率 5000rpm 進行混合
6. 混合完後加入 1mL 油酸，持續攪拌 2 分鐘
7. 隨後加入鹽酸，調整 pH 值，產生沉澱
8. 將沉澱物移至小燒杯，以去離子水進行多次清洗
9. 以丙酮去除水份，進行真空乾燥
10. 最後秤取適量樣品加入煤油，即完成磁流體



圖二十：實驗裝置示意圖

(三) 測量尖峰數量

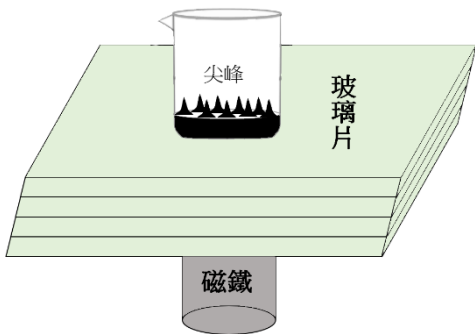
1. 將配置好的磁流體至於固定之 25mL 燒杯
2. 於燒杯正下方設置固定的強力磁鐵
3. 之後分別放上不同數量之玻璃片於燒杯和磁鐵間（圖二十一）
4. 記錄不同距離下的尖峰數

(四) 測量磁吸重量

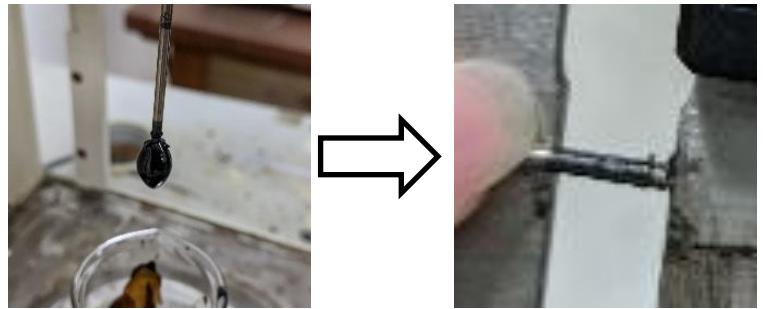
1. 將配置好的磁流體至於固定之 25mL 燒杯（口徑 32.09 mm）
2. 將燒杯放於精密天平上，歸零
3. 用自制定點磁吸裝置吸取燒杯中之磁流體
4. 紀錄精密天平上所減少重量

(五) 測量磁吸高度

1. 將配置好的磁流體至於固定之 25mL 燒杯 (口徑 32.09mm)
2. 用自製定點磁吸裝置吸取燒杯中之磁流體
3. 將自製定點磁吸裝置上之磁鐵移開，使無法沾附在裝置上之磁流體流回燒杯
4. 游標卡尺測量磁流體沾附之高度，並紀錄 (圖二十二)



圖二十一：測量尖峰數量示意圖



圖二十二：測量磁吸高度

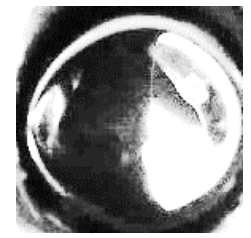

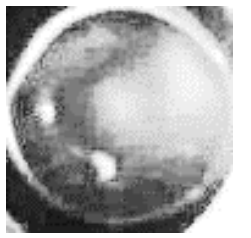
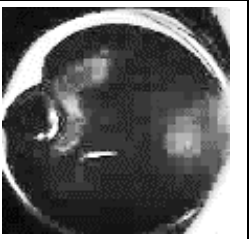


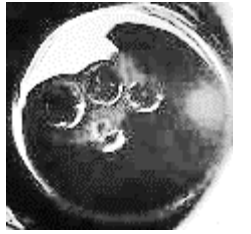
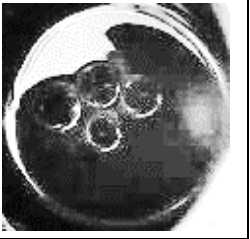
伍、研究結果與討論

一、流變效應（以相同樣品進行測試，合成條件：油酸 1mL、酸化條件 pH=6、未通氮氣）

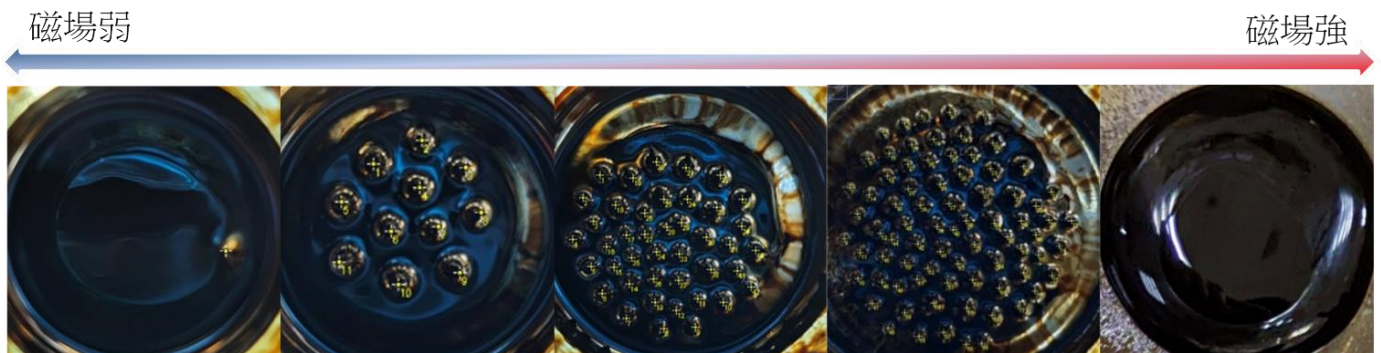
（一）Rosensweig 不穩定

將標準樣品移入磁場，在固定磁場下，調整磁場強度使其最多感應四個尖峰。在較弱磁場下，令尖峰依序出現，花費 4 秒達到平衡（表七）。

表七：Rosensweig 不穩定現象

0.5 秒	1 秒	1.5 秒	2 秒
			
2.5 秒	3 秒	3.5 秒	4 秒
			

關於羅森史維格尖峰的成因，Mislav Trbušić (2019) 提到「This implies a balance of the gravitational and magnetic forces in every physical small volume within a fluid, with addition of surface force at the liquid free surface.」。尖峰是各種不同類型的作用力平衡的結果，必須結合流體力學與電磁學才可以解釋。若定性描述其成因，即磁鐵距離越近，單位面積的磁力線增加，流體會響應磁力線分裂成較多的峰。但磁場過強又會導致其尖峰距離太近，產生毛細現象而使峰消失，變為球形（圖二十三）。



















圖二十三：不同磁場下的羅森史維格峰（研究者製）

(二) Labyrinthine 不穩定

將標準樣品封入兩片玻璃片中，填充水形成雙界面，以固定磁場吸引可觀察到不相溶界面間的不穩定現象。由於垂直面被擋住磁流體，因此在磁場作用下往平面發展，花費 14 秒達到平衡（表八）。

表八：Labyrinthine 不穩定現象

0 秒	1 秒	2 秒	3 秒
			
4 秒	5 秒	6 秒	7 秒
			
8 秒	9 秒	10 秒	11 秒
			
12 秒	13 秒	14 秒	15 秒
			

迷宮不穩定與初始形狀有關，如果拉遠磁鐵在拉近可以得到重複圖案。但如果磁場完全消失，再令磁力線重新經過磁流體，可能得到不同的隨機圖案。(圖二十四)

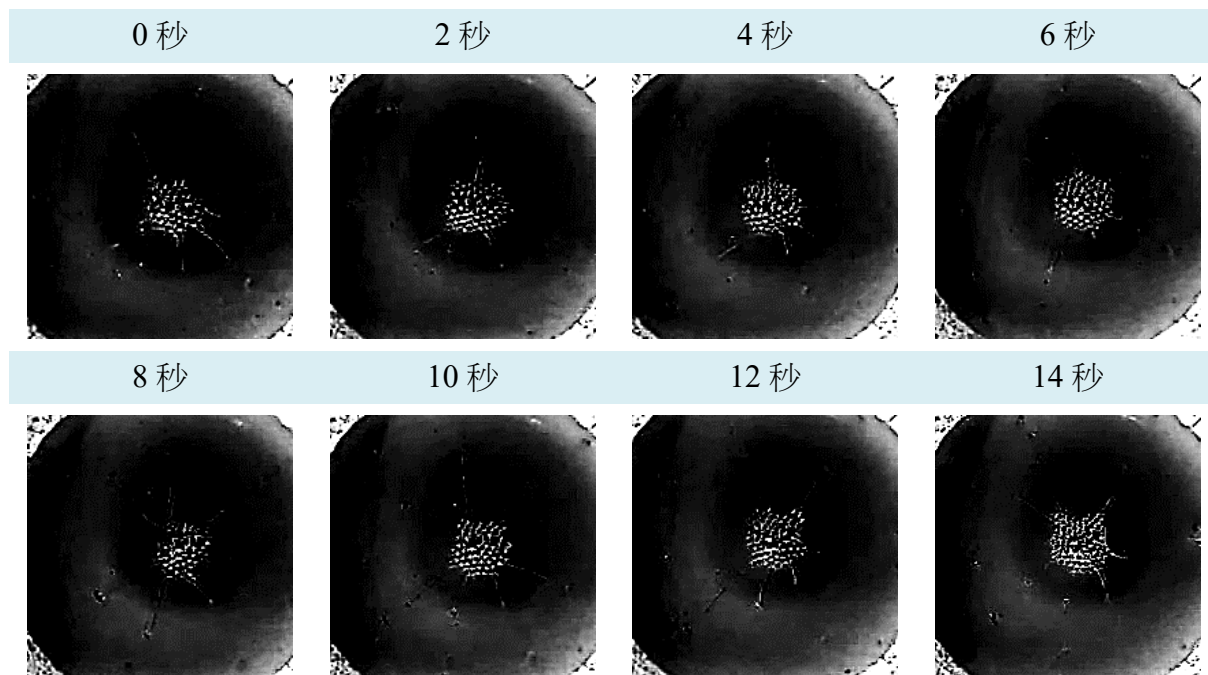


圖二十四：不同迷宮圖案

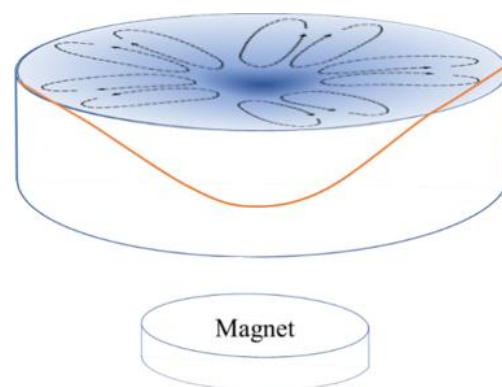
(三) 液面不穩定效應

當給予一磁場於鐵磁流體下方時，殘留於容器壁與水面的鐵磁流體會被吸引，從而產生低谷，油性的鐵磁粒子使表面形成一層低表面張力的磁性薄膜，有趣的是，這些磁性小油滴會不斷往復運動直到液面被覆蓋完全再也沒有活動空間為止。

表九：液面不穩定效應



我們認為可能的成因為「Marangoni 效應」：不同流體間的表面張力不同，因而引起的質傳現象，流體會從表面張力小流向表面張力大。由於油滴本身具有介面活性劑的性質，當磁流體聚集時，低谷的表面張力下降，高處的表面張力上升，表面張力差使油滴逆流向上移動。往上途中又因高處的油滴聚集使表面張力下降，又回到低谷，如此往復。

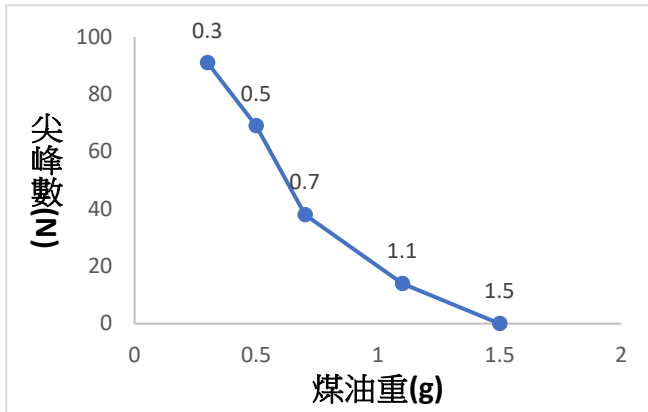


圖二十五：Marangoni 效應示意圖

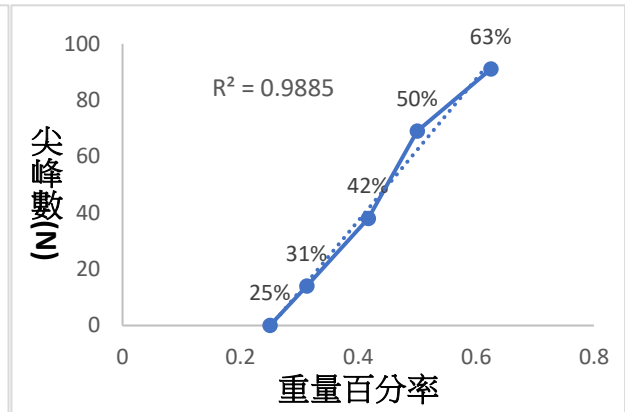
二、煤油量對磁流體性質的影響

對酸化條件 pH=6 之樣品取 0.5 g 在相同磁場下觀察其尖峰數。當煤油重量越少尖峰數越多（圖二十六），換算為重量百分濃度，粒子濃度與尖峰數量呈高度線性相關（圖二十七）。但當粒子濃度為 50%時出現非線性變化，我們不確定對後續的研究是否有影響，

因此我們將後續實驗製作之樣品濃度定為 42%。



圖二十六：煤油重 vs. 尖峰數

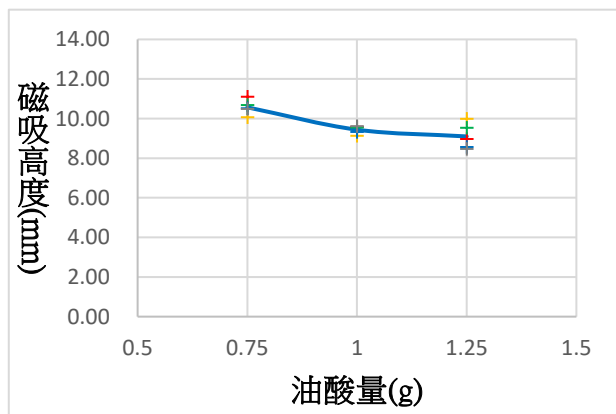


圖二十七：重量百分率 vs. 尖峰數

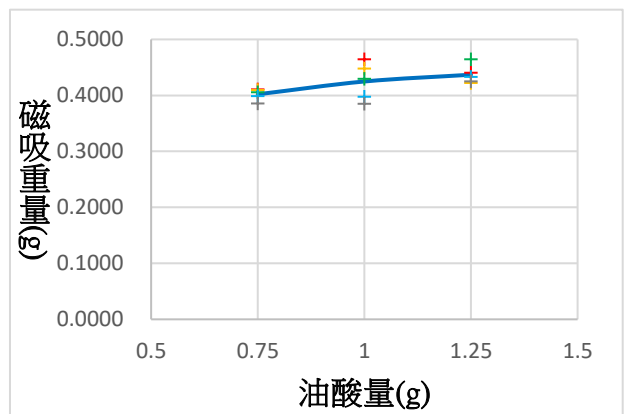
三、油酸量對磁流體性質的影響

(一) 磁吸裝置測量結果

在操縱因素為油酸量的狀況下，由圖二十八、圖二十九可以看出油酸量為 0.75mL 時有最大磁吸高度及最小磁吸重量；而當油酸量為 1.25mL 時有最小磁吸高度及最大磁吸重量。上述的磁吸重量的變動率較大，而磁吸高度與材料磁化率呈正比 (1-1)。



圖二十九：油酸量 vs. 磁吸高度

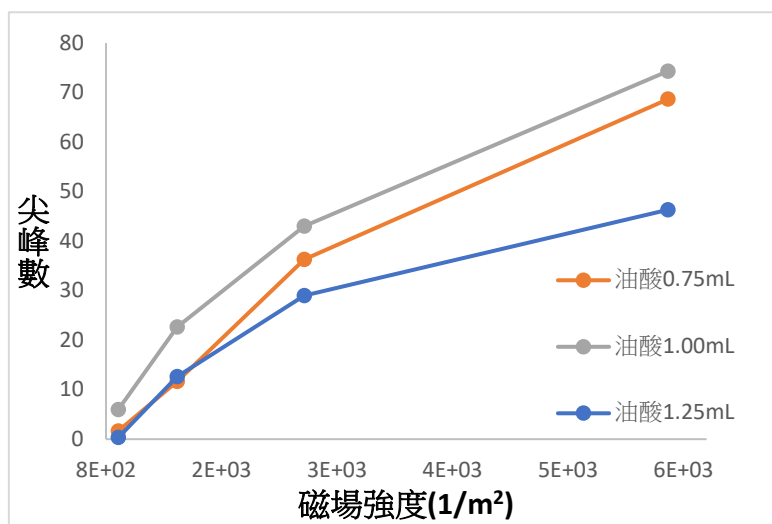


圖二十八：油酸量 vs. 磁吸重量

(藍線為測量平均線，其 y 軸方向上下五個點，分別代表 5 次測量結果)

(二) 羅森史維格峰測量結果

圖三十一可得知，當油酸添加量為 1.00 mL 時，會有最多之尖峰數。因此本研究皆以 1.00 mL 添加量，作為後續實驗樣品的合成條件。

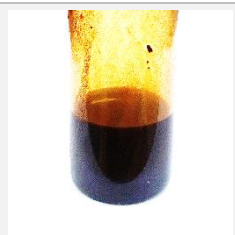

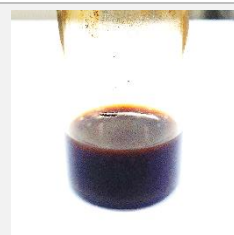
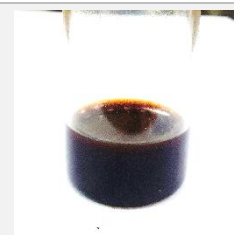
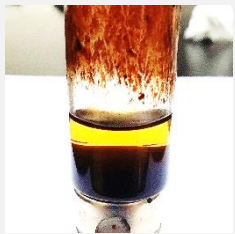
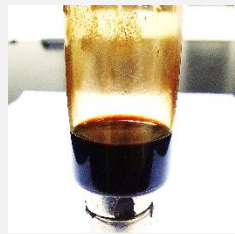
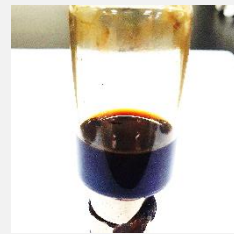







圖三十：不同油酸量之尖峰數比較

(三) 綜合比較

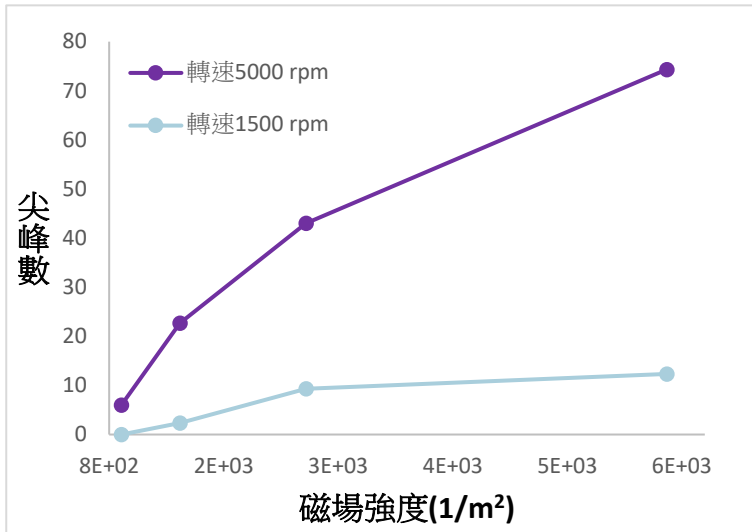
下表（表十）描述油酸的量如何影響尖峰數，油酸不夠多時奈米粒子無法順利懸浮於載液；但油酸多於 1.25 mL，亦會降低尖峰解析度與數量（圖三十）。

表十：油酸量差異比較表

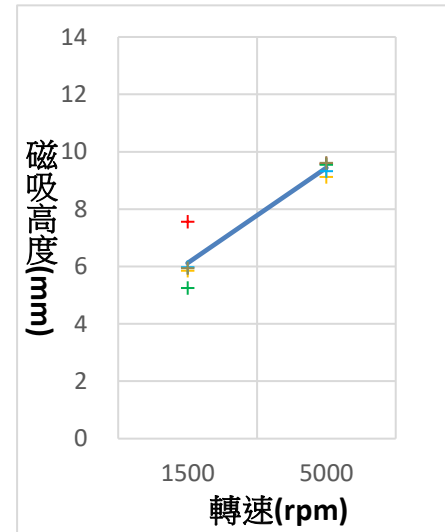
油酸量		0.12mL	0.50mL	1.00mL	2.00mL
樣品	磁吸前				
	磁吸後				
	尖峰				
說明		觀察到分層現象，無法產生 Rosensweig 尖峰	未觀察到明顯分層，能夠產生 Rosensweig 尖峰	未觀察到明顯分層，產生較小的 Rosensweig 尖峰	未觀察到明顯分層，產生更大而較少 Rosensweig 尖峰

四、攪拌速率對磁流體性質的影響

由圖三十一可知，磁吸高度與尖峰數呈正相關。轉速越大樣品的尖峰數越多，但轉速過快會捲入空氣，反而使 Fe_3O_4 迅速氧化變質。若要提高轉速，環境應避免與氧氣接觸。



圖三十一(a)：轉速 vs. 尖峰數



圖三十一(b)：轉速 vs. 磁吸高度

五、本研究製備樣品的基本性質

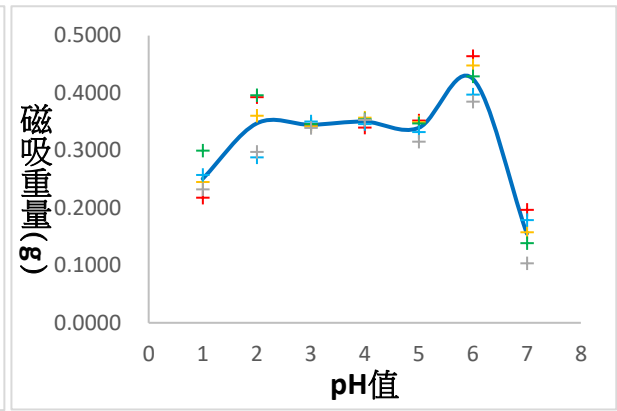
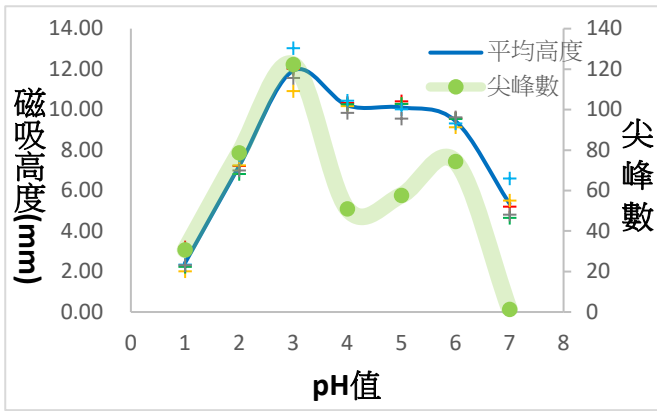
(一) 磁化率對羅森史維格尖峰數的影響

由於我們沒有能測量磁化率的專業儀器，我們參考 Je-Ee. Ho and Hong T. Young (2009) 的研究，利用強力磁鐵與鐵棒測量磁吸高度（圖二十一），並依據下式推估磁化率。

$$\Delta h = \frac{X_m B^2}{2\rho g\mu_0} \quad (1-2)$$

(二) 公式原理：

1. 磁場強度 (B)：本實驗使用同一塊釹鐵硼磁鐵，確保產生之磁場相同。
2. 流體密度 (ρ)：皆為相同重量百分率，推測流體密度相差不大。
3. 重力加速度 (g)：在地表上此數值為定值 9.80665 m/s^2 。
4. 真空磁導率 (μ_0)：在地表上此數值為定值 $4\pi \times 10^{-7} \text{ V} \cdot \text{s}/(\text{A} \cdot \text{m})$ 。
5. 磁吸高度 (Δh)：鐵棒上磁流體能爬到的最遠距離。



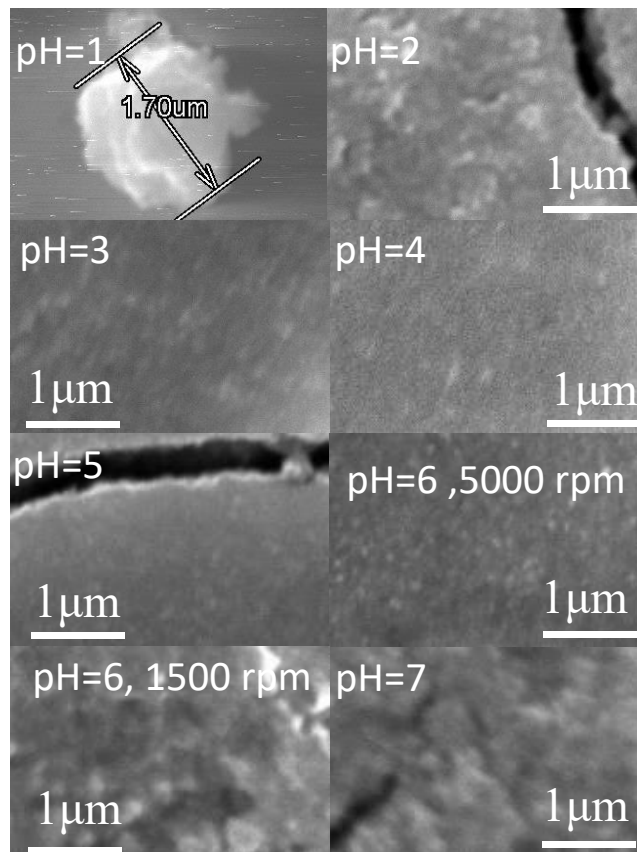
圖三十二：pH 值 vs. 磁吸高度&尖峰數

圖三十三：pH 值 vs. 磁吸重量

(藍色線是測量平均，y 軸方向上下五個點，分別分別代表 5 次測量結果。)

可知尖峰數與磁吸高度有相似的趨勢 (圖三十二)，由磁吸高度的測量，可知 pH=3 有最大的磁化強度。但反常的，磁吸高度與磁吸重量呈相反趨勢 (圖三十三)，

(三) SEM 分析



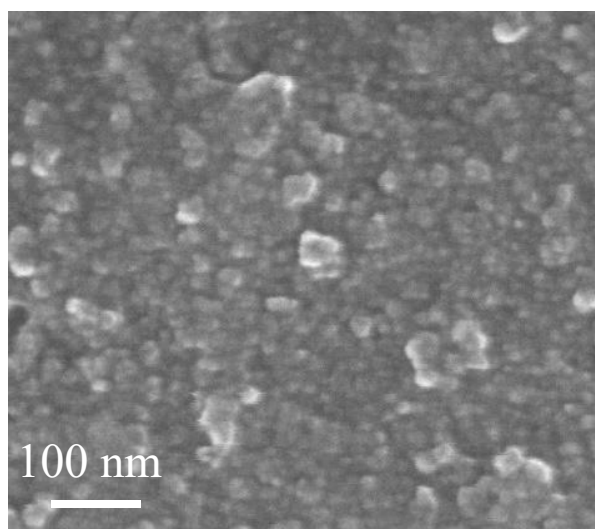
圖三十四：熱鎢絲 SEM 拍攝的樣品表面

(標註 1500rpm 代表每分鐘轉速，其餘未加註者轉速皆為 5000 rpm。)

以溶劑塗佈於玻璃基板表面後風乾，並以 SEM 觀測，發現樣品 pH=1 的表面最為粗

糙，與溶劑互溶性差，有許多大小不一的團聚物。樣品 pH=2、pH=3、pH=4、pH=5、pH=6, 5000 rpm 表面形成平坦薄膜，由於使用溶劑塗佈，蒸發時樣品表面會產生一些寬 0.5 μm 之細小裂縫。樣品 pH=6,1500rpm、pH=7 的薄膜表面粗糙，雖無較大團聚物，但與溶劑互溶性差。

相較於樣品 pH=1 所看到的團聚分子粒徑約 1.7 μm 。薄膜樣品 pH=2~5 與 pH=6, 5000 rpm 表面結構更為細緻，由於分子粒徑太小，鐵磁粒子單元僅能看到較細小的灰白色顆粒。進一步以場發射 SEM 觀察 pH=6 樣品，大部分顆粒之粒徑 <20 nm。



圖三十五：場發射 SEM 拍攝 pH=6,5000rpm 樣品表面

另外撕掉碳膠帶的過程中，會造成薄膜的破壞，其破壞程度取決於樣品與表面的結合性質。我們發現 pH=2、pH=3 樣品更能抵抗外力的破壞從而保持薄膜的完整性。

(四) EDS 分析

表十一：EDS 分析（已去除玻璃基板中含矽之訊號，含量為 4.66%）

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
C	6	K-Series	9.93	10.42	22.6	1.89
N	7	K-Series	0.62	0.65	1.21	0.33
O	8	K-Series	28.39	29.77	48.49	3.86
Cl	17	K-Series	0.33	0.35	0.26	0.05
Fe	26	K-Series	56.07	58.81	27.44	1.76

以 EDS 分析 pH=2 樣品的主要成分，原子含量百分比分別為：C(22.6%)、N(1.21%)、O(48.49%)、Cl(0.26%)、Fe(27.44%)。化合物的式量推測為 $Fe_1O_{1.77-x}C_{0.82}$ 。Fe 來源於前驅物，O 主要來源為沉澱劑、油酸與玻璃基板，C 來源於表面的介面活性劑。

其餘微量的 N 、 Cl 來源為氨水與鹽酸，可能於純化過程中未被水洗去之殘留物。

由於粒子表面上含大量油酸 ($C_{18}H_{34}O_2$)，並且測量時使用玻璃基板 (SiO_2)，若將表面上的油酸與二氧化矽基板含氧之重量訊號扣除並換算為原子百分比，此氧化鐵粒子式量為 $Fe_1O_{1.34}$ ，推測此奈米粒子之主成分為 Fe_3O_4 。

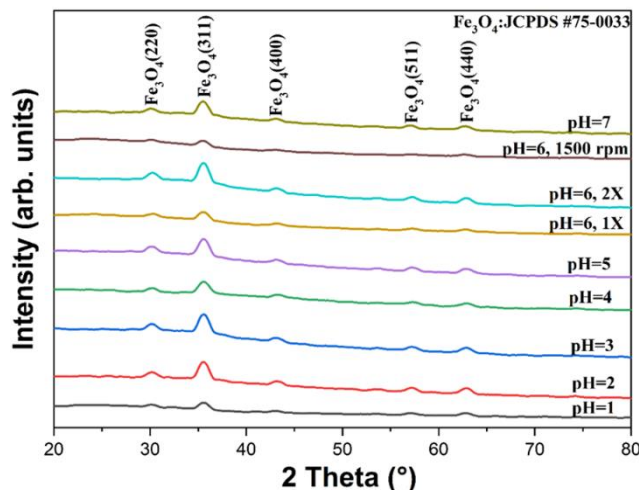
計算過程如下：

$$\frac{\left(28.39 - 4.66 \times \frac{32}{28} - 9.93 \times \frac{2 \times 16}{12 \times 18}\right)}{\frac{16}{56.07}} = 1.34$$

(五) XRD 分析

1. 樣品成分檢測

將每份樣品經過 XRD 檢測後，可以得到每份樣品的初始數據，之後以 origin 繪圖軟體將初始數據的 Angle 和 Intensity 數據繪製成圖三十六，接著比對資料庫 JCPDS 裡的 75-0033 編號，可以看出資料庫裡的 Fe_3O_4 之五種明顯繞射峰和我們所測量的樣品之繞射峰呈現一致。化合物在 pH=2~7 的變化下依然維持安定，但發現在 pH=1 時 (311) 面強度發生顯著變化，可以看出晶體結構在更酸的環境下產生改變。



圖三十六：樣品之 X 光繞射圖

(標註 1X 代表常規合成時反應物用量，2X 代表合成時反應物的量加倍)

2. 晶粒尺寸

將由初始數據製作出的 X 光繞射圖譜以 Jade 軟體進行分析，可以得到半高寬及兩倍入射角的數據，之後經由 Scherrer 公式：

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (1-3)$$

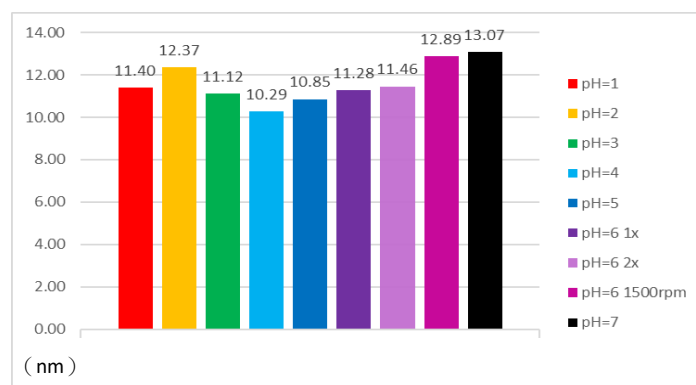
即可算出晶粒尺寸（圖三十七）。

(1) 公式原理：

- i. 晶粒尺寸 (D): 由於晶粒並非球形，因此所得之晶粒尺寸為不同方向厚度的平均值。如預測得的晶粒尺寸越準，需取繞射峰足夠強、穩定的峰。
- ii. Scherrer 常數 (k): 取決於晶粒形狀，如果晶粒為球形，需使用之數值為 1.075; 如果晶粒為立方形，如 Fe_3O_4 為面心立方 (FCC)，使用之數值為 0.89。
- iii. X 光波長 (λ): 此處使用之數值為 1.540562\AA 。
- iv. 半高寬 (β): 是指在一個峰當中，前後兩個數值等於峰值一半的點之間的距離。常用來判別晶體結構好壞，如果半高寬越寬代表晶粒越小，
- v. 入射角 (θ): 需將原數據的兩倍入射角轉換為一倍並改為弧度單位使用。

(2) 樣品性質與晶粒關係

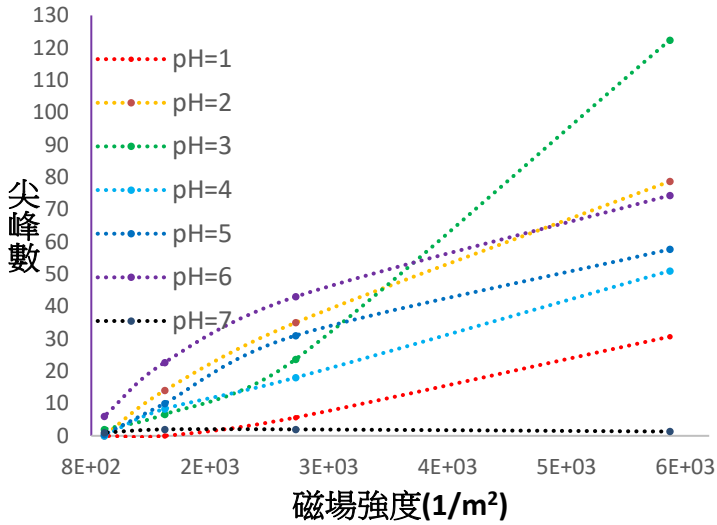
以(311)面繞射圖譜計算粒徑（圖三十七）。證明本實驗方法製作之奈米分子，能滿足超順磁性的發生條件(1-50 nm)。可以看出酸化 pH 值對粒徑影響不大。根據文獻，粒徑越小其磁性亦會越強，理論上 pH=4 樣品磁性最好。但根據本實驗測量，在 pH=3 時會有最強磁性（圖三十二），兩者不完全符合。由於 Scherrer 公式是統計非連續晶面的間距，因此無法判斷此數值代表粒徑寬度，或是極小晶體之晶界。且 SEM 僅能觀察到薄膜連續面，不足以辨識完整顆粒大小。因此現階段只能推測 pH=3 時會有最佳的磁化率。如欲知曉其細部差異，只能待未來以 TEM 進行觀測。



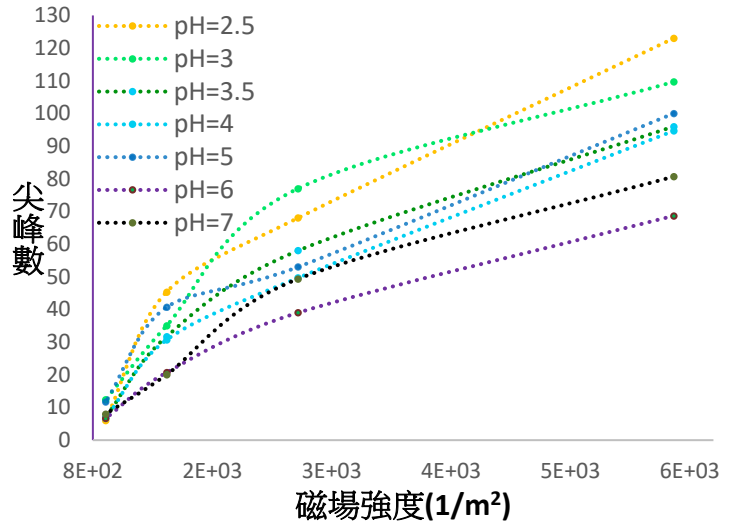
圖三十七：樣品之晶粒尺寸

六、探討 pH 值如何影響磁流體的流變性質

(一) 一般情況下，不同反應溫度的 pH 值效應



圖三十八：室溫 30°C 下製備

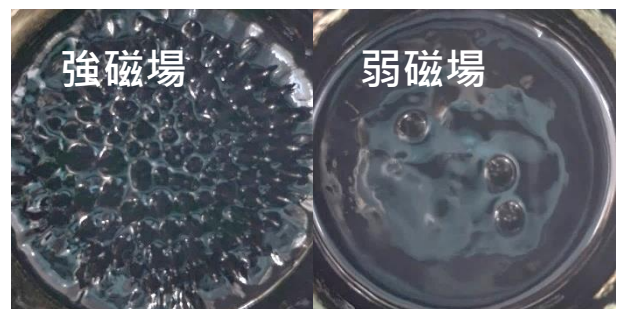


圖三十九：加熱至 40~50°C 製備

圖三十八、圖三十九分別為不同的溫度下製作之樣品，測量在不同磁場強度下尖峰數的變化。室溫下 pH=3 具有特別大的尖峰數，pH=7 能產生尖峰，但數量極少。高溫環境下 pH=1、pH=2 無法形成穩定懸浮之磁流體，並在 pH=2.5 具有最大的尖峰數。圖四十、圖四十一比較兩者的外觀，室溫 pH=3 生成之磁流體更均質，尖峰的排列更具規律性且大小一致，加熱條件下 pH=2.5 生成之磁流體，液體黏滯性較高，有更多機會生成大小不一的尖峰。

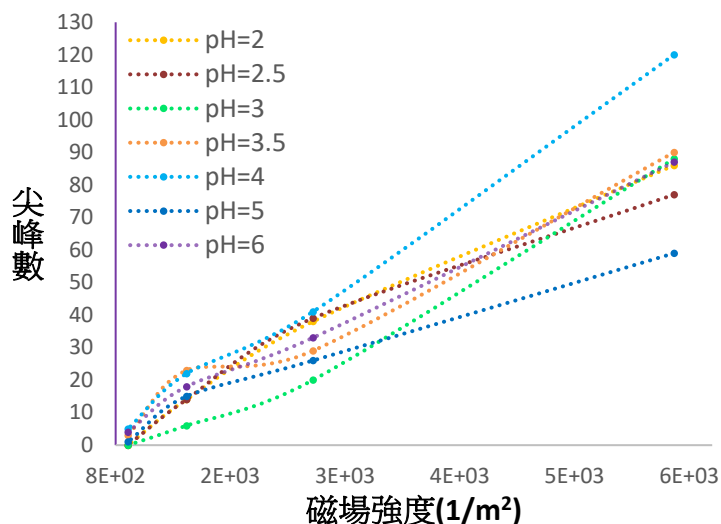


圖四十：室溫 30°C 下製備，pH=3

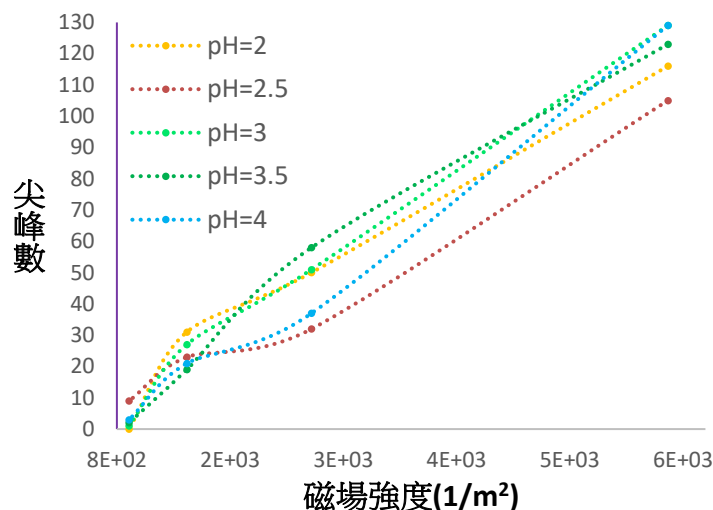


圖四十一：加熱至 40~50°C 製備，pH=2.5

(二) 通入氮氣的環境下，不同 $Fe^{3+} : Fe^{2+}$ 組成的 pH 值效應

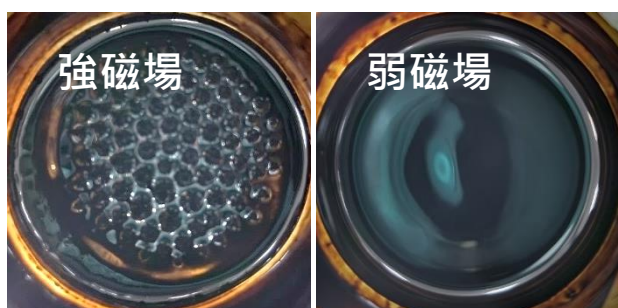


圖四十二： $Fe^{3+}/Fe^{2+} = 1.56$



圖四十三： $Fe^{3+}/Fe^{2+} = 2$

由圖四十二、圖四十三顯示，使用氮氣抑制氧化的強況下，不同的 $Fe^{3+} : Fe^{2+}$ 比例，在磁場下有截然不同的流變曲線。 $Fe^{3+}/Fe^{2+} = 1.5$ 時較為低平，各 pH 值之間尖峰數差異大且在 pH=4 有最大的尖峰數。 $Fe^{3+}/Fe^{2+} = 2$ 時較陡直，且無論酸化 pH 為多少都有較高的尖峰數。雖然 $Fe^{3+}/Fe^{2+} = 2$ 有高的尖峰數量，但液面較為粗糙，相比之下 $Fe^{3+}/Fe^{2+}=1.56$ 時液面更光滑均質。

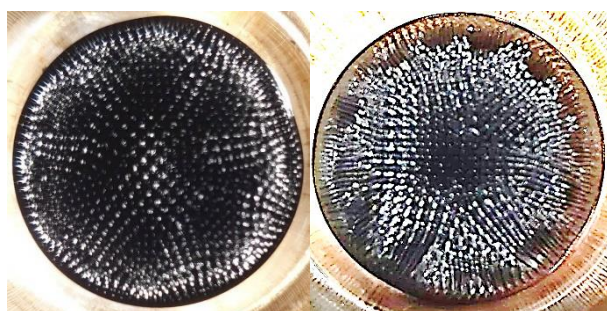


圖四十四： $Fe^{3+}/Fe^{2+} = 1.56$ ，pH=4。



圖四十五： $Fe^{3+}/Fe^{2+} = 2$ ，pH=4。

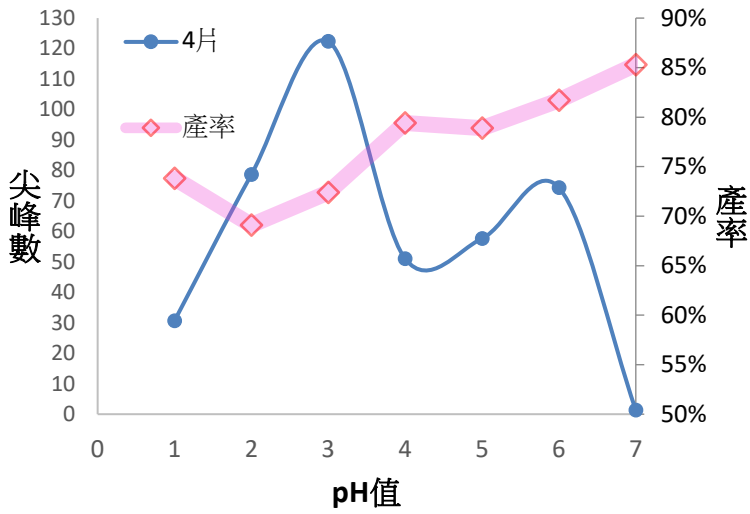
由圖四十四、圖四十五可知當 Fe^{2+} 較少時尖峰數會較多，但比較市售之鐵磁流體來看，反而是 Fe^{2+} 較多時其流變現象更為接近，雖然尖峰較少，卻出現了與市售相似之幾何花紋（圖四十六），推測過量的 Fe^{2+} 能夠使磁流體有更好的性質。



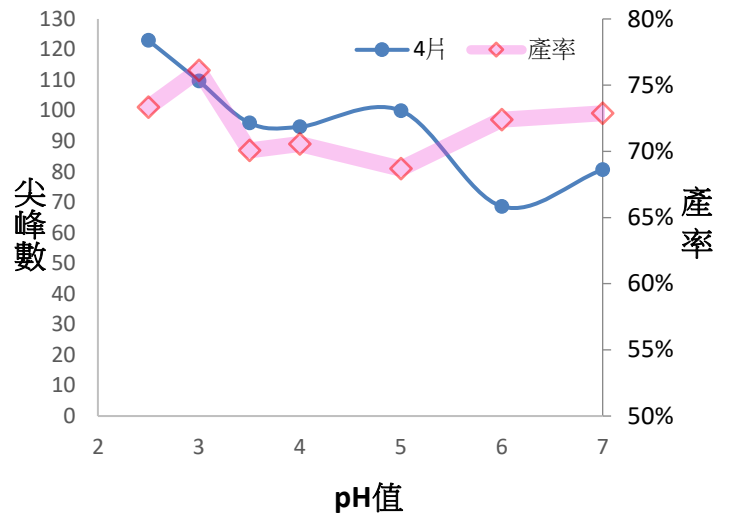
圖四十六：幾何花紋（左）市售（右）自製

七、探討 pH 值與產率的關係

(一) 一般情況下，不同反應溫度的產率



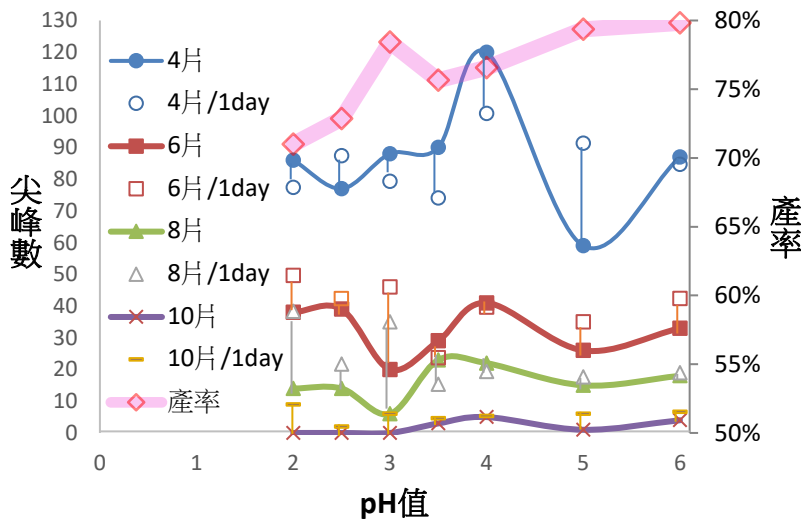
圖四十七：室溫 30°C 下製備



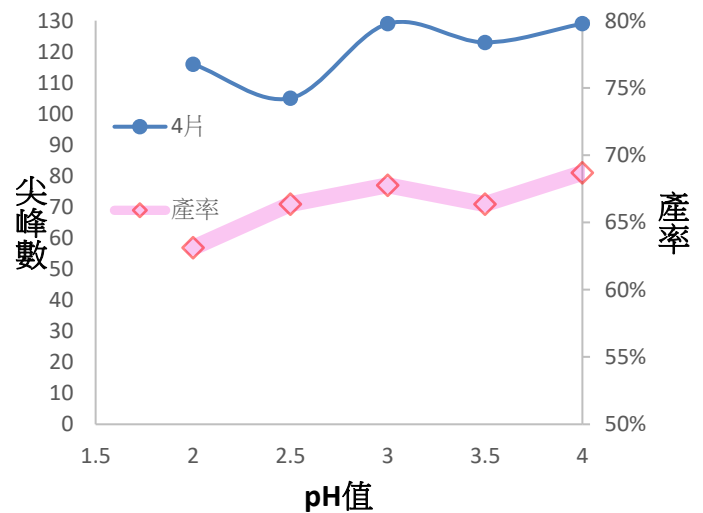
圖四十八：加熱至 40~50°C 製備

室溫下產率隨 pH 值降低而減少（圖四十七）。高溫的情況下產率不受 pH 值降低影響，但普遍變低（圖四十八）。藍線為該樣品在最高磁場(距磁鐵 4 片玻璃)下測得的尖峰數，室溫下尖峰數與產率呈負相關，推測由於氧化會使產物變重，產率越高代表樣品有較多氧化，導致磁性略為下降。

(二) 通入氬氣的環境下，不同 $Fe^{3+} : Fe^{2+}$ 組成的產率



圖四十九： $Fe^{3+} / Fe^{2+} = 1.56$



圖五十： $Fe^{3+} / Fe^{2+} = 2$

圖四十九、圖五十顯示，兩種情況下產率皆隨著 pH 值降低而減少。無論何種情況 Fe^{3+} 皆為限量試劑，理論上產率相同。但過量的 Fe^{2+} 的情況下產率明顯提升，不同於未通氮氣的情況，通氮氣的情況下尖峰數與產率的相關性小。

八、不同 pH 值樣品的化學穩定性

圖四十九中，實心點與空心點的垂直連線代表同一樣品經過一天再度測量尖峰數的變化量，在不同磁場強度下(距離磁鐵 4、6、8、10 片玻璃)，pH=6 樣品變化最少具有最高的化學穩定度。

九、本實驗製備之鐵磁流體可行應用

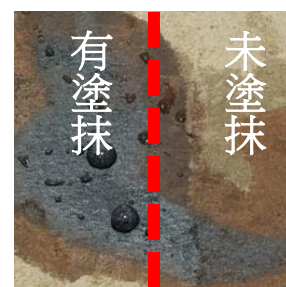
(一) 磁性鍍膜：

在研究鐵磁流體時，我們發現當磁流體乾掉時，其仍會表現出一般鐵粉之磁性。因此我們透過塗抹的方式，使一些有細小孔洞之物質能帶有磁性，如紙張、木頭。且此薄膜表面具有疏水層，能阻止水分子侵入，並使其具有一定磁性可受磁場感應。

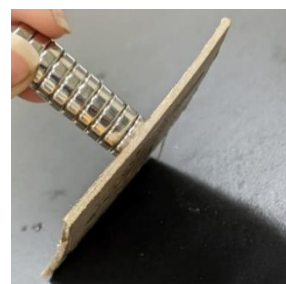
(二) 磁場指示器：可做為科學教育玩具。

(三) 未來具有潛力應用：

1. 表面張力測量：研究液面受磁場吸引之凹陷程度。
2. 醫學熱療：磁奈米分子表面修飾葡萄糖或細胞受體分子，並運用高週波磁場加熱磁流體殺死病菌。
3. 電子設備散熱流體。
4. 加密系統：利用 Labyrinthine 不穩定，產生隨機圖形。
5. 智慧減震阻尼器：可利用磁場控制黏度。



圖五十一：磁性鍍膜



圖五十二：磁性鍍膜效果



圖五十三：磁場指示器

陸、結論

一、依據本實驗結果，以共沉法製備具羅森史維格尖峰之鐵磁流體，最好能滿足以下條件：

- (一) 無可見雜質純度高之前驅物，並以足夠高的速度(5000rpm)攪拌。
- (二) 在鹼性環境下加入界面活性劑充分攪拌後，必須酸化至 $\text{pH} \leq 6$ 。
- (三) 使用低沸點液體進行清洗，並以減壓法去除殘餘水份，避免加熱。
- (四) 適當的加過量 Fe^{2+} 有助於提升產率，由於亞鐵具有還原性與環境中的氧氣反應，避免 Fe_3O_4 氧化為 Fe_2O_3 。
- (五) 需加入適量載液與煤油，建議載液占總質量不多於 75%，我們認為油酸加入量為 1mL

時 $\left(\frac{W_{\text{理論產率}}}{W_{\text{油酸}}} = 1.41 \right)$ 最佳比例。

二、分析樣品的特性可以得知：

- (一) 除了尖峰型與迷宮型，本研究中另外發現水面上的磁流體的油性薄膜，可以產生小粒子，在液面上不斷的往復運動，此現象並沒有被過往文獻提出，我們認為發生在液面上的是一種新型態的「不穩定現象」。
- (二) 由於磁吸高度正比於磁化率，並與尖峰數相關，尖峰數越多原則上鐵磁流體的磁化強度越高。
- (三) 固定磁場下，磁性粒子重量濃度小於 40%時，濃度與產生之尖峰數量呈正比。
- (四) XRD 表明 pH 值對粒徑影響不大，約略 10-13 nm 左右。
- (五) 但由 SEM 圖譜顯示在 $\text{pH}=1$ 時粒子性質發生改變，發生大量團聚，巨觀上亦不能懸浮於載液。推測由於酸性下粒子表面生成 $\text{Fe}-\text{OH}_2^+$ 因形成膠體帶電粒子，不利於油酸分子吸附，導致分子間容易團聚。

三、pH 值對於尖峰數的影響：

- (一) 通常狀態下(30°C)時 $\text{pH}=2.5-3$ 具有最高的尖峰數。
- (二) 加熱使鐵磁流體(40°C-50°C)可在更低的 pH 值(2.5)產生高尖峰數，但在更酸的情況下 $\text{pH} < 2$ ，則發生沉澱無法生成磁流體。

- (三) 通常狀態下，在高速攪拌的過程中必然伴隨若干氧化，由於過量的 Fe^{2+} 可代替奈米鐵磁粒子氧化，氧化的同時產生 Fe^{3+} 與過量的 Fe^{2+} 生成更多的磁鐵礦，因而具有保護作用。但由尖峰數與產率呈負相關，代表產率越高氧化越嚴重。
- (四) 在氮氣保護的環境下，產率與尖峰數的相關性低。由於抑制了環境的含氧量，產率較為一致，但仍可發現 pH 值愈低產率越低，是由於 Fe_3O_4 與 H^+ 反應變成 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 與 H_2O 導致固體減少產率下降。
- (五) 通氮氣保護下，pH=6 樣品不會產生不溶物且油酸塗佈完整，不易因接觸空氣而變質。化學穩定性較高。
- (六) 比較不同 Fe^{3+}/Fe^{2+} 比例的反應條件，過量的 Fe^{2+} 明顯產率更高，在 pH=4 有明顯的最高峰數，且能有效提升磁流體的品質。。

柒、未來展望

磁流體至今已有多年的發展，市面上有著各種型號，但卻鮮少有關其製作的方式。本研究已粗略掌握化學共沉法部分要點，製作出尖峰數極多的鐵磁流體，並在標準品與樣品上得到具體之研究成果。

但由於 COVID-19 疫情的影響，導致後期無法到學校完成後續實驗，因此在日後會先針對「溫度」、「反應時間」、「鐵源濃度和比例」等變因進行探討，也將進一步執行更為困難的「置換原子」和「表面修飾」。未來若能朝上述兩改進方向進行研究，開發磁流體的獨特流變現象，相信有更深、更廣的應用領域。

捌、參考資料及其他

中文部分：

陳朝光（2003）磁性流變流體之基礎與應用研究(1/2) 行政院國家科學委員會專題研究計畫
（計畫編號: NSC91-2212-E-006-155-）

王思雅、王暄荏、盧淑君（2015）跳舞的黑色精靈-論磁性流體的製作與在磁場中的表現
取自中學生網站

徐光宏（2002）磁性流變流體之製程研究(未出版的碩士論文) 臺南：國立成功大學機械工程學系

池厚亘（2012）團簇型金-鐵核殼奈米粒子的製備與應用

趙彥賓（2006）磁流變液體之調製及其分散安定性之研究(未出版的碩士論文) 國立成功大學土木工程研究所

顏雅倫（2002）錳鋅鐵氧化物磁性流體之製備及其分散研究(未出版的碩士論文) 國立成功大學資源工程研究所

英文部分：

Madumali Kalubowilage, Katharine Janik and Stefan H. Bossmann(2019) Review Magnetic Nanomaterials for Magnetically-Aided Drug Delivery and Hyperthermia. Appl. Sci. 2019, 9(14), 2927; <https://doi.org/10.3390/app9142927>

Mislav Trbušić, Miloš Beković and Anton Hamler (2019) Magnetic field distribution in a magnetic liquid spike. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Volume 479, 1 June 2019, Pages 185-191

網路資源：

杜怡君、張毓娟、翁乙王、蘇怡帆、陳世毓、梁哲銘、葉巧雯、吳信璋、卓育泯（2008）
台大化學系「磁性基本特性及磁性材料應用」 取自

<https://www.ch.ntu.edu.tw/~rslu/teaching/pdf97/material/5.pdf>

李聖尉（2011）「磁性物質（I）-反磁性、順磁性（Magnetic Material-I）」 高瞻自然科學教育平台 取自

<https://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=22512>

李聖尉（2011）「磁性物質（II）-反磁性、順磁性（Magnetic Material-II）」 高瞻自然科學教育平台 取自

<https://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=22506>

NileRed（2019）「Making ferrofluid from scratch」 Youtube 取自

<https://www.youtube.com/watch?v=6L8yUY-doNc>

【評語】 050204

本研究嘗試製作商用規格，並具備相同流變現象的鐵磁流體。使用 ImageJ 計算尖峰數。利用 SEM、EDS 與 XRD 分析，成功製得粒徑 < 15 nm 之奈米粒子，具有探究精神。但未提到具有良好流變性質成品的關鍵因素。且部份實驗為文獻已有或類似步驟，似乎沒有找出最佳反應參數方法?且觀察到的現象需要更進一步實驗數據分析其原因(表面張力測量)。

作品簡報

運「鐵」成「峰」——

鐵磁流體的製備條件研究與磁場下的流變效應

高級中等學校組
化學科

介紹



Fig. 1 磁流體之不穩定現象。形狀使重力、磁力、表面能最低^[1]。

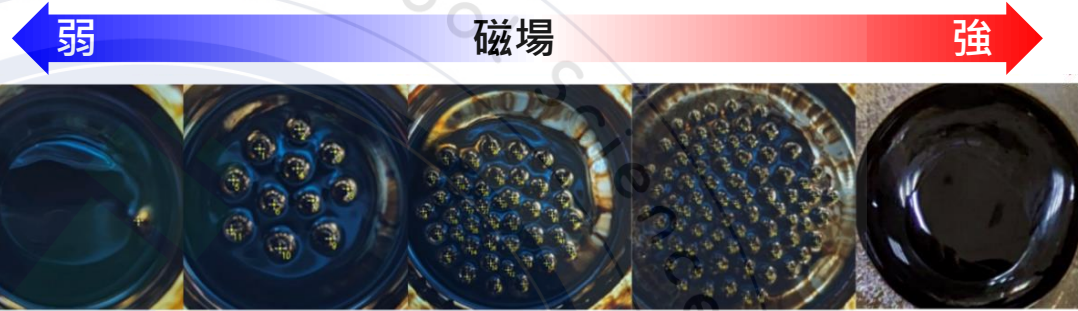


Fig. 2 **強磁場**之Rosensweig尖峰較矮、密集。持續增強磁場，毛細作用將導致液體包覆，使尖峰消失。

研究目的

1. 最佳化製作條件
2. 酸化的pH值效應
3. 控制溫度&控制氧化的影響
4. 研究不穩定現象

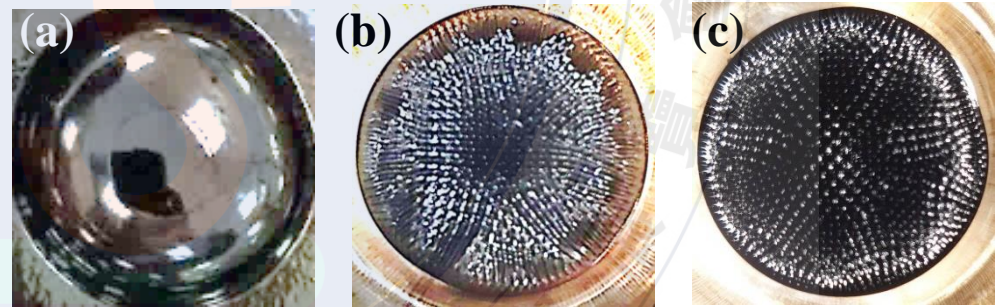


Fig. 3 強磁場下的磁流體外觀
(a)未控制酸化 (b)控制酸化 (c)市售磁流體

[1] R. E. Rosensweig(2013) *Ferrohydrodynamics*. Courier Corporation.

合成方式



[2] 顏雅倫(2002) 錳鋅鐵氧化物磁性流體之製備及分散研究, 成功大學, 台南。

[3] NileRed(2019) Making ferrofluid from scratch, Youtube.

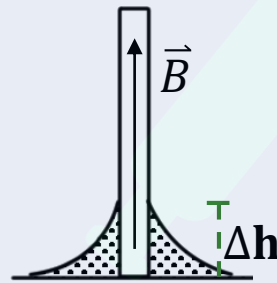
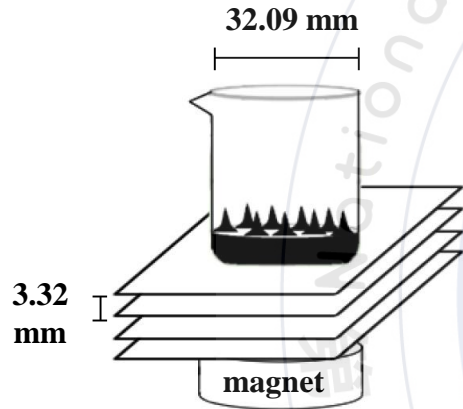
測量方式

尖峰數量

磁化率

元素組成

粒徑資訊



EDS

SEM、XRD

固定磁場下，改變玻璃片的數量 (4、6、8、10片)

$$\Delta h = \frac{X_m B^2}{2\rho g \mu_0} \quad [3]$$

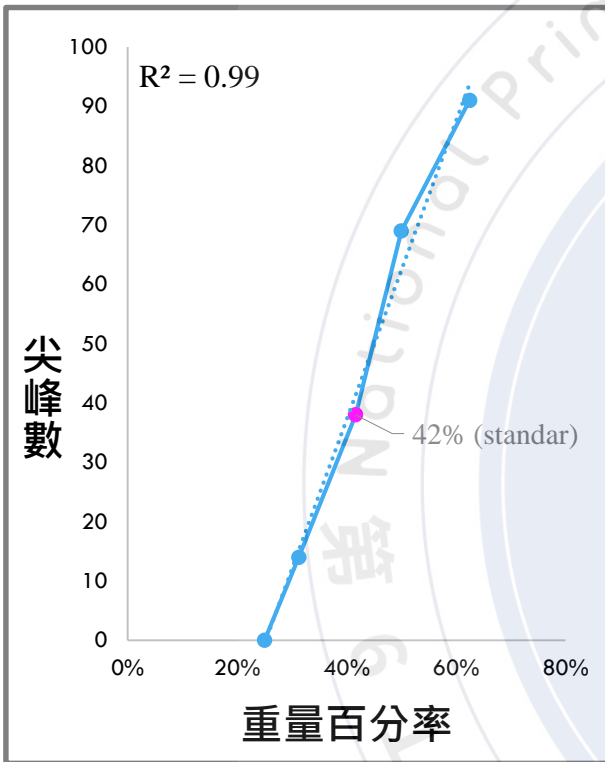
El	atom. C
C	22.60 %
N	1.21 %
O	48.49 %
Cl	0.26 %
Fe	27.44 %

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos\theta}$$

(Scherrer equation)

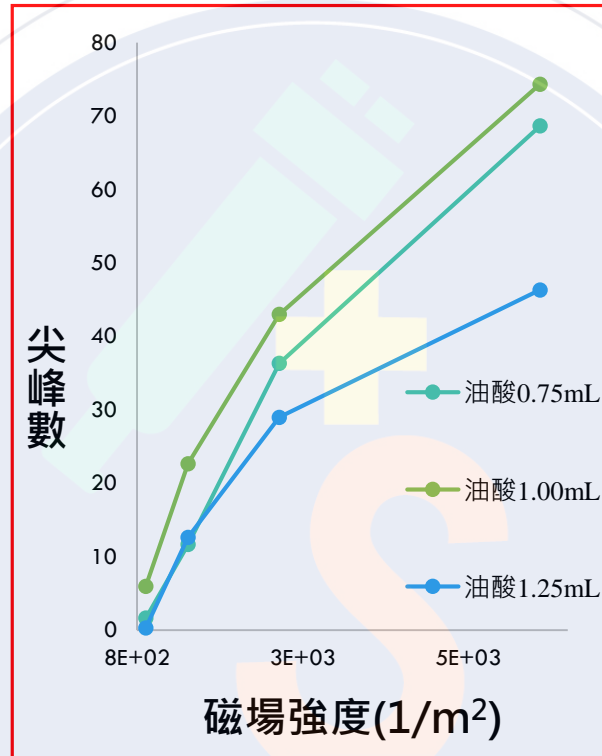
[4] Je-Ee. Ho, Hong T. Young (2009) Measuring the Magnetization of Nano Ferro-Fluid with D.C Electromagnetic Application. Journal of Nanoscience and Nanotechnology Vol.9, 4293–4297.

合成變因討論



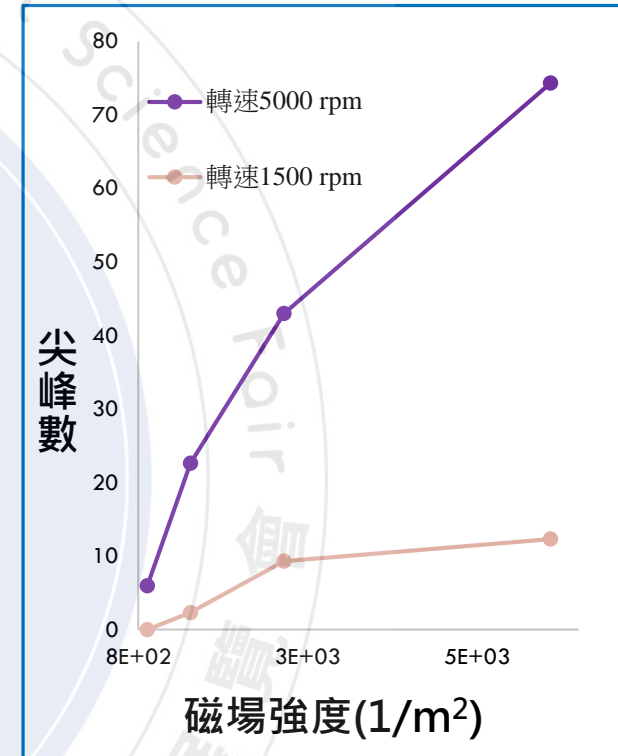
煤油量

尖峰數量與粒子的密度有高度正相關，但濃度50%時出現非線性變化。



油酸量

油酸量1 mL時有最佳的性質，最佳比例與比表面積相關，能有效的避免氧化^[4]。

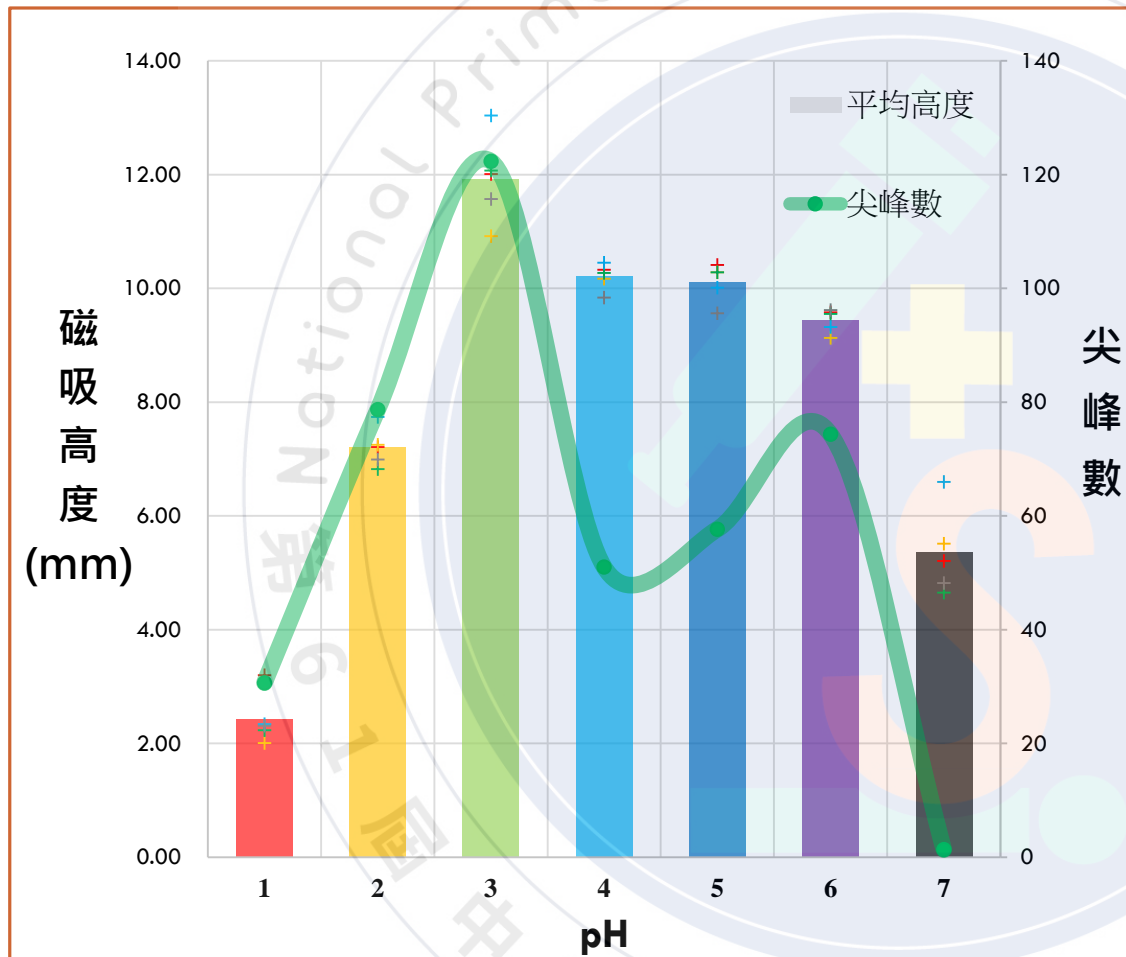


轉速

轉速越高，性質越佳，但氧化的風險也越高。

[5] F. C. Nalle, R. Wahid, I. Wulandari, A. Sabarudin (2019) SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF MAGNETIC Fe₃O₄ NANOPARTICLES USING OLEIC ACID AS STABILIZING AGENT, Rasayan Journal of Chemistry Vol.12(1), 14-21.

酸化pH值對磁化率(X_m)的影響



酸化pH值

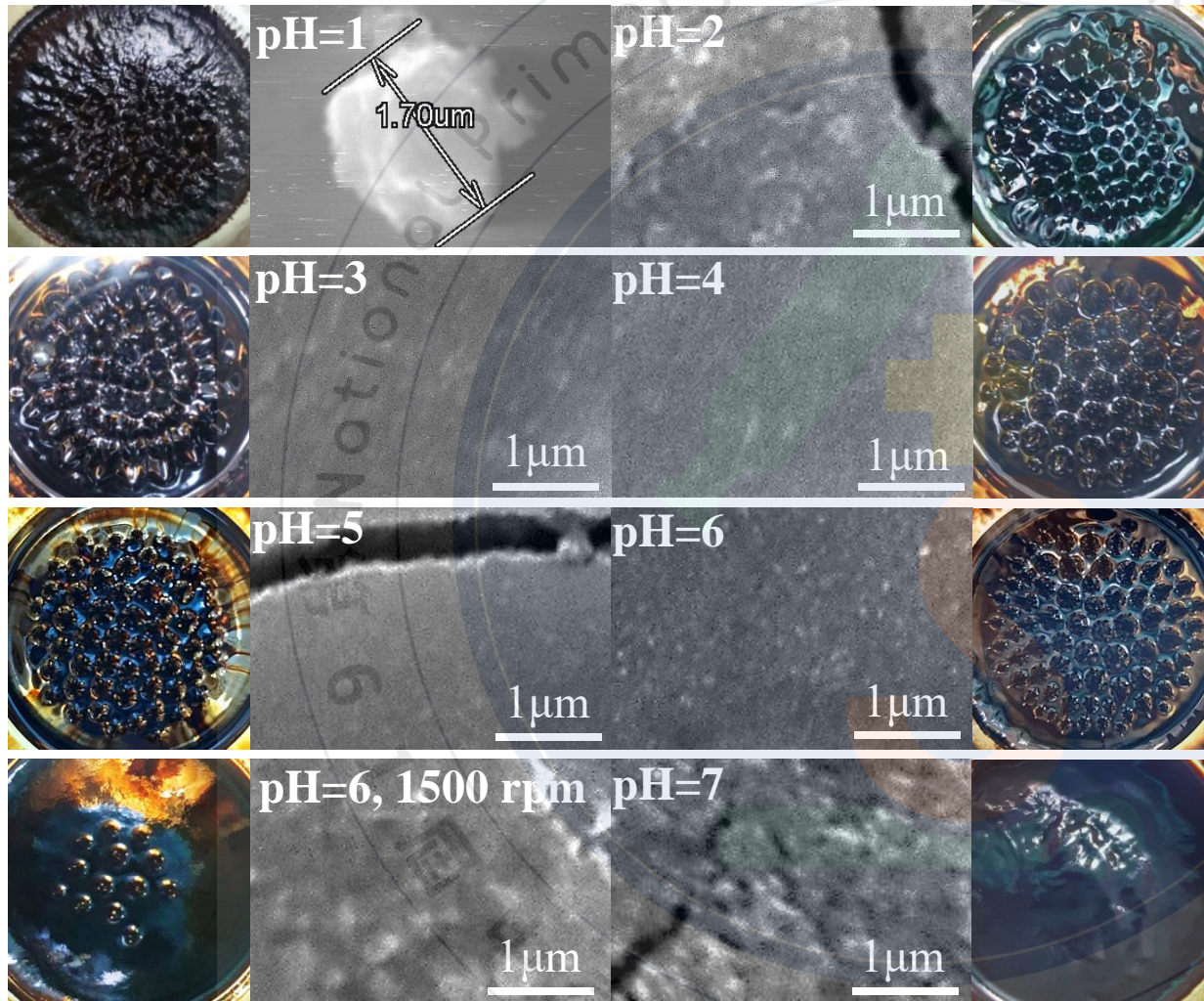
隨著溶液越酸，磁化率上升，
到pH=3時有最佳的磁化率。
但在更酸情況下pH≤2時，磁
化率開始減弱。

磁化率與尖峰數有正相關，但
尖峰數量取決於流體黏度，因
此趨勢不完全吻合。

pH=4-6時尖峰數量變少但磁
化率不變，推測是油酸由物理
吸附過渡為化學吸附^[6]導致。

[6] 張國範，朱陽戈，馮其明，盧毅屏，歐樂明（2009）油酸钠对微细粒钛铁矿的捕收机理，中国有色金属学报，第19卷第2期。

薄膜樣品SEM分析



pH=2-6溶液穩定。由於 Fe_3O_4 等電位點pH=6-7^[7]，推測粒子表面帶正電荷，油酸根有效結合避免沉澱。

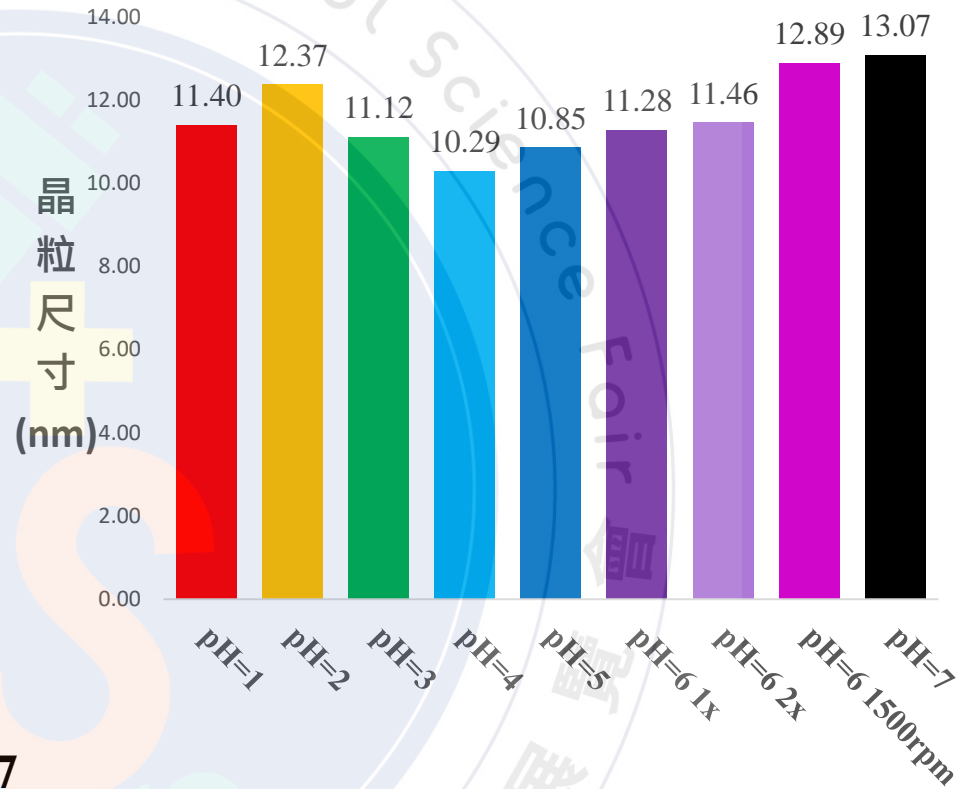
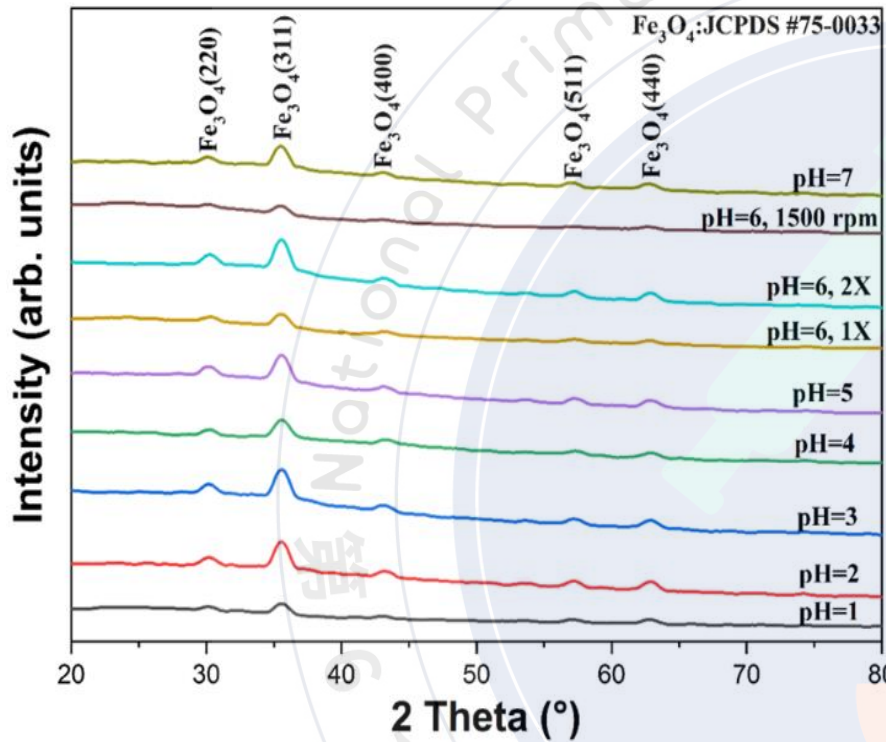
pH=7無尖鋒，推測粒子表面帶負電荷，油酸根無法有效吸附於奈米粒子。

pH=1粒子發生團聚。流體性質似固體粉末，多為矮棘狀突起。

低轉速(1500 rpm)，薄膜表面粗糙，流體尖峰數少

[7] A. Daggetti; G. Lodi; S. Trasatti (1983). Interfacial properties of oxides used as anodes in the electrochemical technology. , 8(1), 1-90.

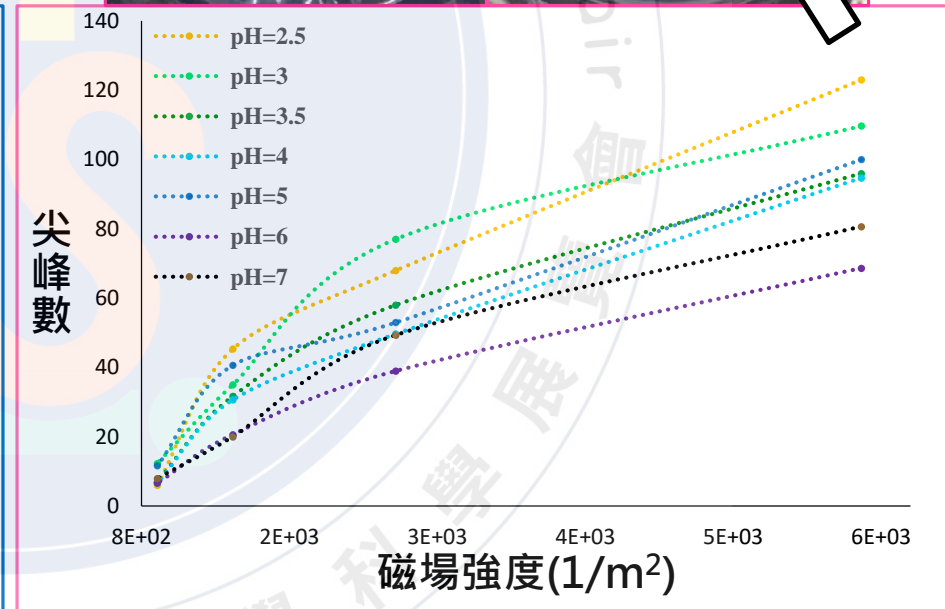
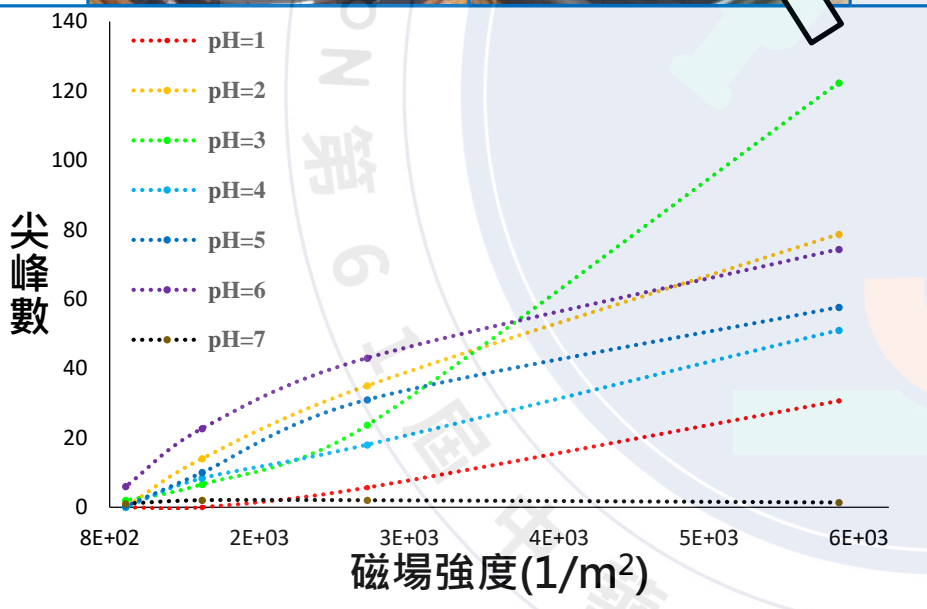
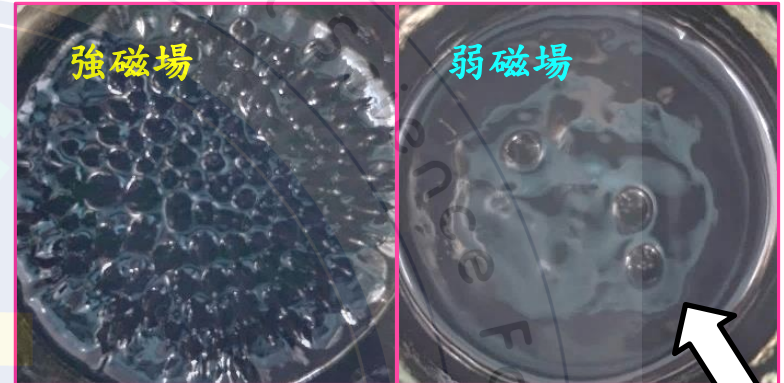
XRD粒徑資訊



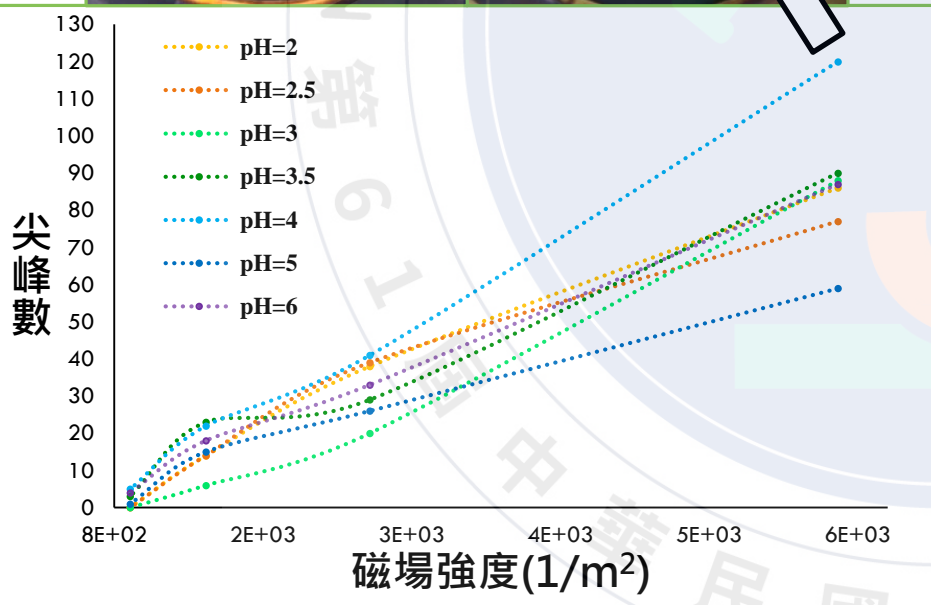
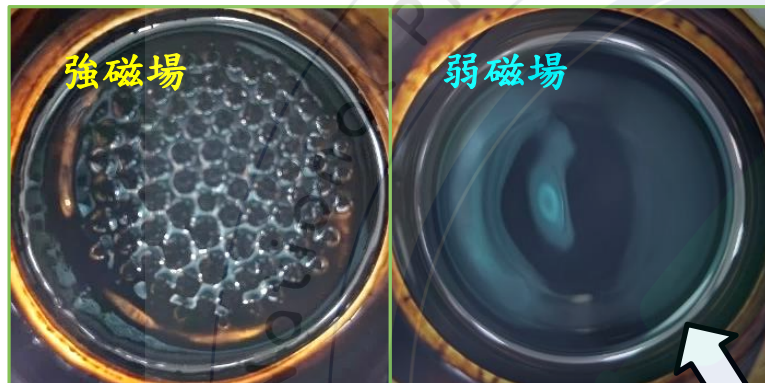
XRD顯示主要成份Fe₃O₄，化合物在pH=2~7的變化下依然維持安定。但在pH=1時(311)面強度發生顯著變化，晶體結構在更酸的環境下產生改變。

粒徑隨pH降低而減小，在pH=4有最小粒徑。在pH=6時反應物的添加量不影響粒徑，但轉速越高粒徑越小。

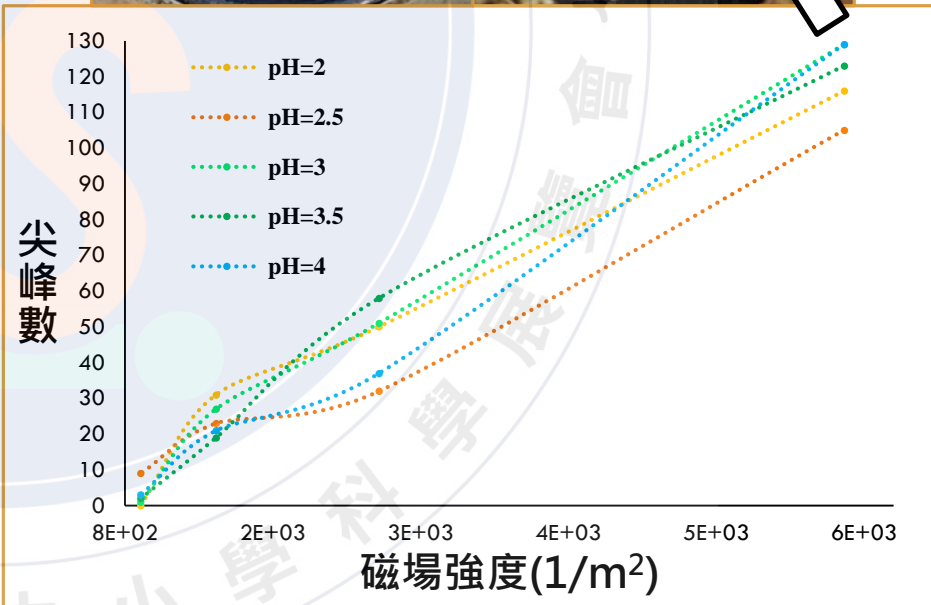
一般環境下，不同反應溫度的pH值效應



通入氮氣的環境下- 不同 Fe^{3+}/Fe^{2+} 組成的pH值效應



$$Fe^{3+}/Fe^{2+} = 1.56$$



$$Fe^{3+}/Fe^{2+} = 2$$

液面不穩定現象

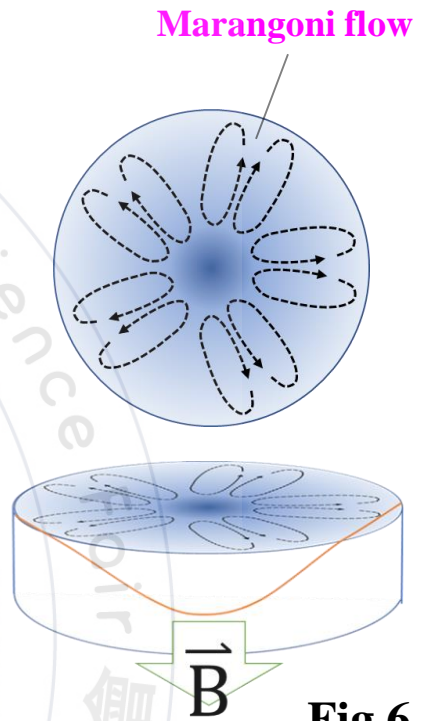
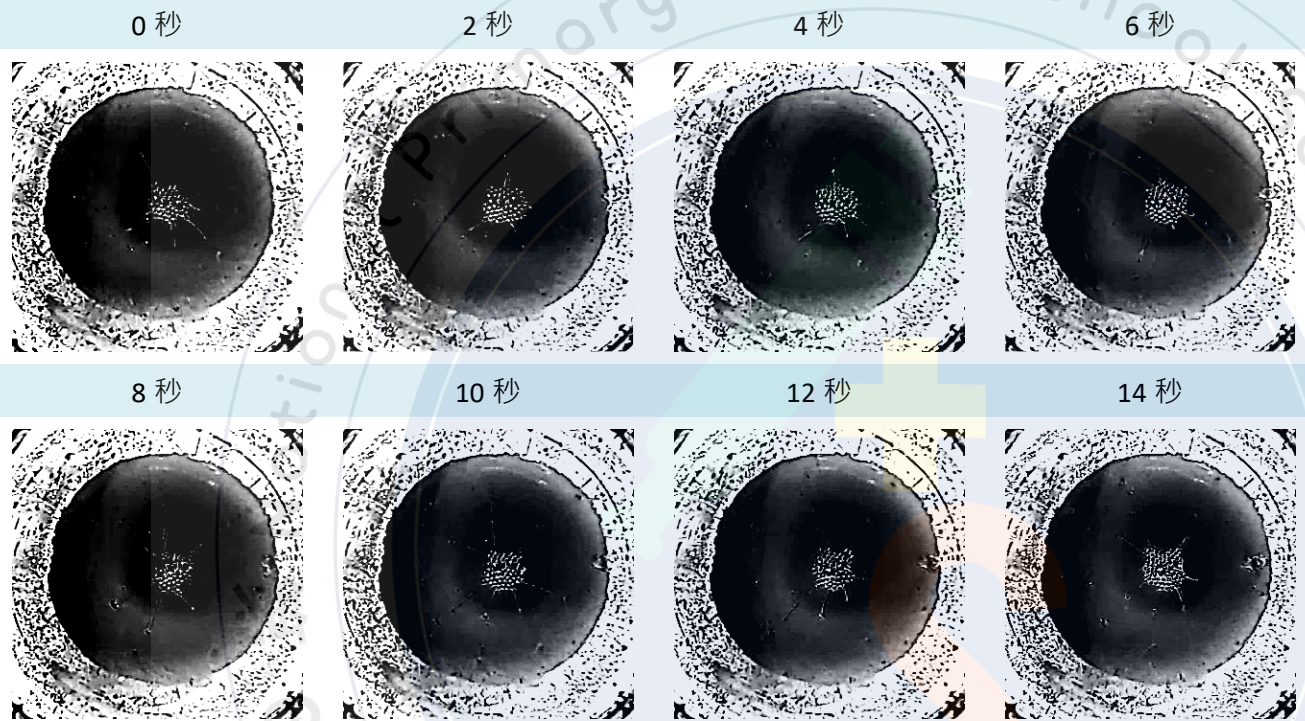


Fig.6



「**Marangoni效應**」：不同流體間的表面張力不同，而引起的質傳現象。流體會從表面張力小流向表面張力大。

當磁流體液胞聚集時，低谷的表面張力下降，高處的表面張力上升，表面張力差使油滴逆流向上移動。油滴往上途中又因磁力與重力吸引回到低谷。

水面上的磁流體液胞

結論

1. 推薦反應條件為**高轉速**，**高純度鐵源**， $W_{Fe_3O_4 \text{ 理論產量}}/W_{\text{油酸}}=1.41$ 。
2. 我們發現新型態的液面不穩定，推測屬於**Marangoni效應**。
3. 酸化pH越低粒徑越小，**pH \leq 3**粒徑開始變大，pH=1晶相發生改變。
4. 酸化至**pH=3-4**，流體性質最佳；而酸化至**pH=6**時，穩定不易變質。
5. 過量的 Fe^{2+} 可使產率變高，成品均勻流動性佳，黏度低。

參考資料

- [1] R. E. Rosensweig(2013) *Ferrohydrodynamics*. Courier Corporation.
- [2] 顏雅命(2002) 錳鋅鐵氧化物磁性流體之製備及分散研究，成功大學，台南。
- [3] NileRed(2019) Making ferrofluid from scratch, Youtube.
- [4] Je-Ee. Ho, Hong T. Young (2009) Measuring the Magnetization of Nano Ferro-Fluid with D.C Electromagnetic Application. Journal of Nanoscience and Nanotechnology Vol.9, 4293–4297.
- [5] F. C. Nalle, R. Wahid, I. Wulandari, A. Sabarudin (2019) SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF MAGNETIC Fe_3O_4 NANOPARTICLES USING OLEIC ACID AS STABILIZING AGENT, Rasayan Journal of Chemistry Vol.12(1), 14-21.
- [6] A. Daggetti; G. Lodi; S. Trasatti (1983). Interfacial properties of oxides used as anodes in the electrochemical technology. , 8(1), 1–90.

