

2013 臺灣國際科學展覽會

優勝作品專輯

作品編號	140032
參展科別	物理與太空科學科
作品名稱	磁性流體在外加磁場下之有序結構與光學研究
得獎獎項	三等獎

就讀學校	臺北市立建國高級中學
指導教師	傅昭銘、柳順儒
作者姓名	杜懿修、謝郡庭、汪東霆

關 鍵 字 散射、超順磁磁性流體、磁柱

作者簡介



我是杜懿修，建中高三生，對科學充滿濃厚興趣，對大自然滿懷熱情，从小就著手進行各類科學研究。我著迷於物理與地球科學，參加過各式競賽，像是物理及地科奧林匹亞競賽，也曾經代表國家前往阿根廷參加國際地球科學奧林匹亞，幸運獲得金牌。我的興趣是各式運動、棋藝、小提琴、野外冒險，喜歡親近大自然，並探討自然的奧秘。



我是汪東霆，目前就讀建國高中三年級，因為對科學研究特別有興趣，所以常於寒暑假期間參與校外科學營隊，並利用課餘時間投入科展研究，已參加過校內科展及北市科展獎助計畫，這次與夥伴們把研究成果投稿於國際科展，以期能夠藉由這種場合，累積研究發表的經驗，並測試看看我們的研究是否獲得贊同。



我是謝郡庭，目前就讀建國中學三年級。基於對物理的興趣，我常常利用假日或課餘時間參加校外學術單位所舉辦的講座及研習活動，如「臺灣大學高中科學人才培育計畫」、「中研院原分所」系列演講與體驗活動等等。我也參加了許多物理競賽，例如物理奧林匹亞等等。很希望能藉由參與科展的機會來學習經驗，並充實自己的物理知識。

摘要

本實驗乃研究超順磁性流體薄膜在通入垂直場後磁顆粒的動力學過程，以及排列的結構、磁鍊的幾何性質。我們使用了兩種創新的方法，分別是改良傳統磁性流體製造方法，避免磁性流體因凝聚而造成干擾；另一個是除了以往以電場或顯微鏡探討磁鍊的性質，使用 Rayleigh scattering 以及光遮蔽的方法，以 CCD 量測雷射透射光強度的時變率，改變不同變因(磁場大小、磁性流體樣本厚度、磁性流體濃度)，由於其結構性質影響了透射光強度，故分析透射光強度與諸變因間的關係，並與顯微鏡下的觀察結果比較，做出磁致散射動力學過程詮釋。

壹、 研究動機

在學到電磁學的單元時，想到了曾經看到有關於磁性顆粒的文獻，參考了前人的研究後，了解到大家利用磁光效應、磁雙折射及二色性等磁性流體的物理現象，來研究磁場下磁性流體的穩定結構，以及利用顯微鏡來直接觀察在磁場或電場下的磁性流體結構變化。我們想到或許可以利用磁性流體在磁場所造成的散射現象及光屏蔽效應，來反推其結構的動態變化，並提出我們的假設，再與顯微鏡下拍攝的結果進行比對，驗證我們的想法。

貳、 研究目的

1. 改善現有的磁流體樣本製作方法。
2. 探討通入正交磁性流體薄膜的磁場後，磁流體在垂直方向造成之 cotton effect，並造成的磁致散射，其光強度隨時間的變化。
3. 分別改變磁場強度、磁性流體薄膜厚度、磁性流體濃度等變因，測量光強度隨時間的變化。
4. 利用顯微攝影將磁性流體薄膜通入垂直磁場，探討視野中磁性流體的結構變化、磁鍊半徑變化、磁鍊密度變化。
5. 利用散射方式以及顯微攝影解釋磁性流體中的磁性顆粒在磁場下的結構改變過程動力學。

參、 研究設備及器材

一、磁流體樣本

1. FeSO_4 、 FeCl_3 (以 1:2 混合製成 Fe_3O_4)
2. 去離子水、 NaOH 足量
3. 各種分散劑，如 DEX、四鉀胺、油酸等足量
4. 滴定管一個

5. 磁性攪拌子一個
6. 載玻片足量
7. 蓋玻片足量
8. AB 膠、凡士林足量
9. 壓克力圓板數個
10. 螺絲螺帽數組

二、實驗設備

1. 氦氖雷射一個 (接於一台電源供應器)
2. 自製螺線管兩個
3. 高斯計一台
4. 光感測器一個 (連接電腦)(有濾光裝置,可排除雷射以外波長的雜光)
5. 電源供應器一台
6. 顯微鏡一台
7. 桌上型三用電表一台
8. 超音波震盪器一台

肆、研究過程或方法

一、磁流體的製作

1. FeSO₄ and FeCl₃ are taken in 1:2 molar ratios in 100ml deionized water to prepare the solution of them and the sol is stirred in a magnetic stirrer. [0.1 mole: 0.2 mole are taken in 100 ml of H₂O]
2. 4 gm of NaOH (1M) are added into 100 ml of deionized water to make NaOH solution. The addition of NaOH into H₂O has to be very slow to avoid huge liberation of heat. The solution is cooled to room temperature.
3. The solution of NaOH is added drop by drop to the aqueous solution of FeSO₄ and FeCl₃ so that it reaches a pH value of 12 at room temperature.

4. After stirring the solution for 20 minutes, 2 ml of Oleic acid is added to the solution.
5. Finally the powders are dispersed in kerosene to obtain the magnetic fluid.

二、磁性流體樣本製作

(一)方法一

1. 將已製備的磁性流體放入超音波震盪器，啟動 20 分鐘，以避免長時間久置所造成的部分凝聚。
2. 切割出 0.1mm 厚的塑膠薄片，並於中間切去 1cm x1cm 的小正方形，使其中空，並將中空塑膠薄片塗上單層凡士林，塗面朝下，平貼於載玻片上。
3. 用 pipet 吸取適量磁性流體，並滴於塑膠薄片中央中空處，再將塑膠薄片另一面塗上單層凡士林，蓋上蓋玻片。
4. 於蓋玻片四邊塗上 AB 膠，待其風乾，便可得到成品。

(二)方法二

1. 將已製備的磁性流體放入超音波震盪器，啟動 20 分鐘，以避免長時間久置所造成的部分凝聚。
2. 在圓形壓克力板內接正三角形頂點處，鑽三個大小合宜的洞，製作數個備用。
3. 取三個螺絲穿過壓克力圓板的三個小洞，朝上平放於桌面，取一 O-ring 放置於壓克力板中央。
4. 用 pipet 吸取適量磁性流體，並滴於 O-ring 中央，取另一壓克力圓板由上而下穿過螺絲，用力壓緊並鎖上螺母，調整螺母高度，以製造不同厚度的磁性流體樣本。
5. 以厚度約 0.1mm 的軟性橡膠薄膜取代 O-ring，以製造更薄的磁性流體樣本，成品如(圖 4-1)所示。

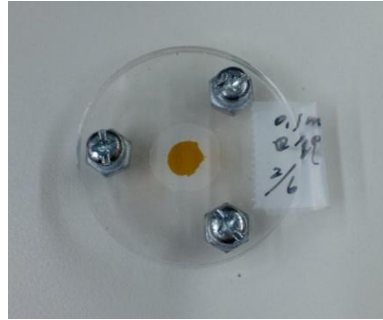


圖 4-1 磁流體樣本

(三)方法二為自行改良方法一的新做法，用途在於避免磁性流體因為碰到凡士林所造成的凝聚現象，以及改善 AB 膠因氣密性的不足導致無法放到超音波震盪器裡的缺陷，故本篇實驗皆以方法二來做磁性流體的樣本。

三、實驗裝置架設

(一)光軸軌道

在直線光軸軌上架設依序架設氦氖雷射、光路調節器、線圈、光路調節器、光感測器(ccd)，如圖(4-2)。

1. 利用兩個光路調節器調整雷射光平行於光軸軌道，並穿過線圈中軸，平行於螺線管中央磁場方向，打在光感測器的中央。
2. 氦氖雷射接上一台直流電源供應器。線圈也接上一台直流電源供應器，並且串連一台桌上型三用電表。光感測器連接電腦，搭配 LabView 軟體輸出。



圖 4-2 光軸軌道

(二)顯微鏡

1. 在顯微鏡載物臺上平放一線圈，使其中軸平行於顯微鏡的光軸。
2. 顯微鏡加裝顯微攝影 ccd 並連接至電腦，藉由 arcsoft showbiz 軟體拍攝。線圈接上一台直流電源供應器，並且串連一台桌上型三用電表。

四、實驗操作

(一)線圈磁場測量

1. 線圈接上一台直流電源供應器，並且串連一台桌上型三用電表。
2. 架設一台高斯計，固定探棒於線圈中央。
3. 通以 0.05A，紀錄安培計讀數與高斯計讀數。
4. 改變電流大小，依序通 0.1A、0.15A、0.2A 等，取得 20 組數據。

(二)光軸軌道

1. 以分散劑為四甲胺的磁性流體，製作方法二的磁性流體樣本。實測厚度為 0.13mm。
2. 將樣本置入光軸軌道組的線圈中央均勻磁場處，樣本平面方向向量平行光軸，開啟氬氖雷射的電源供應器，輸出電流 0.04A，調整線圈高度使光點打在磁性流體上。
3. 開啟 LabView，設定每 0.1 秒讀取一個數據，讓電腦讀取未加磁場下，雷射光通過磁性流體樣本的光強度。
4. 10 秒後開啟線圈的電流供應器，輸出 0.2A，讓電腦讀取加平行磁場下，雷射光通過磁性流體樣本的光強度變化。
5. 待其光強度隨時間的變化圖中，已可明顯的看到光強度到達最低點，並且逐漸上升時，關閉線圈的電流供應器，再停止 LabView，並將所讀取的數據以記事本儲存。
6. 取出磁性流體樣本，放入超音波震盪器，啟動 5 分鐘，使已凝聚的磁性流體顆粒分開，並均勻分散於流體中。

7. 改變線圈的電流供應器所輸出的電流，重覆步驟 3~6，每次增加 0.5A，做到 0.8A，取 13 組數據。
8. 改變磁性流體樣本厚度，重覆步驟 3~6，固定電流為 0.7A，取 6 組數據。
9. 改變磁性流體濃度，重覆步驟 3~6，固定電流為 0.7A，取得多組數據。

(三)顯微攝影

1. 以分散劑為四甲胺的磁性流體，製作方法二的磁性流體樣本。實測厚度為 0.13mm。
2. 事先計算實驗三與實驗二的線圈磁場互換關係，並求出等效於實驗二時 0.6A 所輸出的磁場所需的電流大小。
3. 將磁性流體樣本置入顯微鏡載物臺上架設的線圈中央均勻磁場處，樣本平面方向向量平行顯微鏡光軸。
4. 以 CCD 攝影機拍攝 100X 物鏡下的磁性流體，將影像傳回電腦，使用 arcsoft showbiz 來進行攝影。
5. 於拍攝開始 5 秒後，開啟線圈的電流供應器，輸出約 1.02A 的電流，再微調使桌上型三用電表上讀數符合步驟 2 的計算結果。
6. 待拍攝時間超過實驗二從開磁場到光強度最低點所經過的時間時，關閉線圈的電流供應器，停止並儲存所拍攝的影片。
7. 取出磁性流體樣本，放入超音波震盪器，啟動 5 分鐘，使已凝聚的磁性流體顆粒分開，並均勻分散於流體中。
8. 重複步驟 3~7，取得 4 個影片。

五、數據分析處理

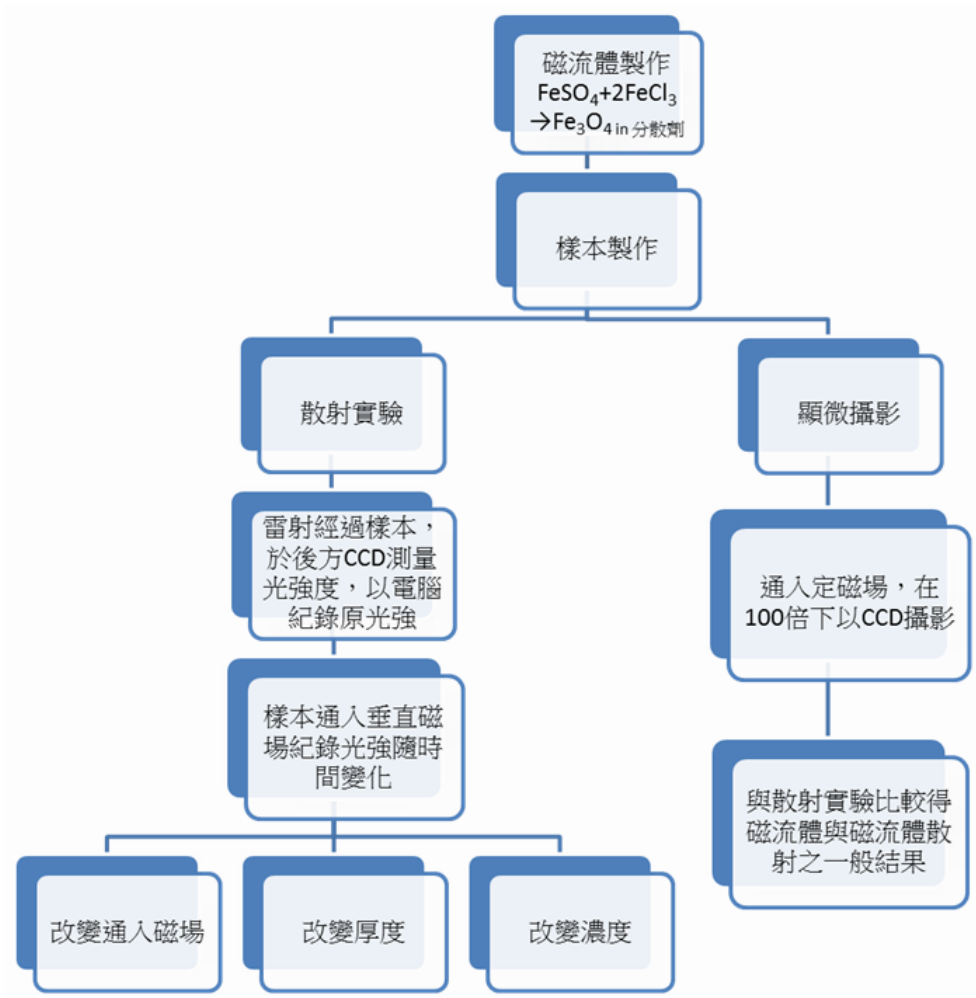
(一)光軸軌道

1. 用 Excel 開啟光軸軌道實驗的一組數據。
2. 透射光強度由 CCD 轉換為電訊號(電壓)傳至電腦。

3. 取 $T=2\sim 8$ 秒的 60 組光強度數據的平均，做為未加磁場下，雷射光通過磁性流體樣本的光強度 V_0 。
4. 以開啟磁場瞬間到關掉磁場的數據，做光強度與時間的散布圖，並以六次多項式趨近線逼近圖形。
5. 求出趨近線最低值以及穩定值，讀取所對應的光強度，做為加磁場下，雷射光通過磁性流體樣本的光強度最小值 V_{min} 和光強度穩定值 V_{steady} ，所對應的時間做為加磁場瞬間到光強度最小值所需要的時間 T_{min} 。

(二)顯微攝影

1. 開啟顯微攝影實驗的影片，每 2 秒擷取一個畫面，直到影片結束。
2. 量取各影像中磁柱的密度、磁練半徑。



伍、 研究結果

一、通入外加磁場所造成的透射光強度隨時間變化圖

(一)使用分散劑四甲胺，磁性流體薄膜厚度 1mm

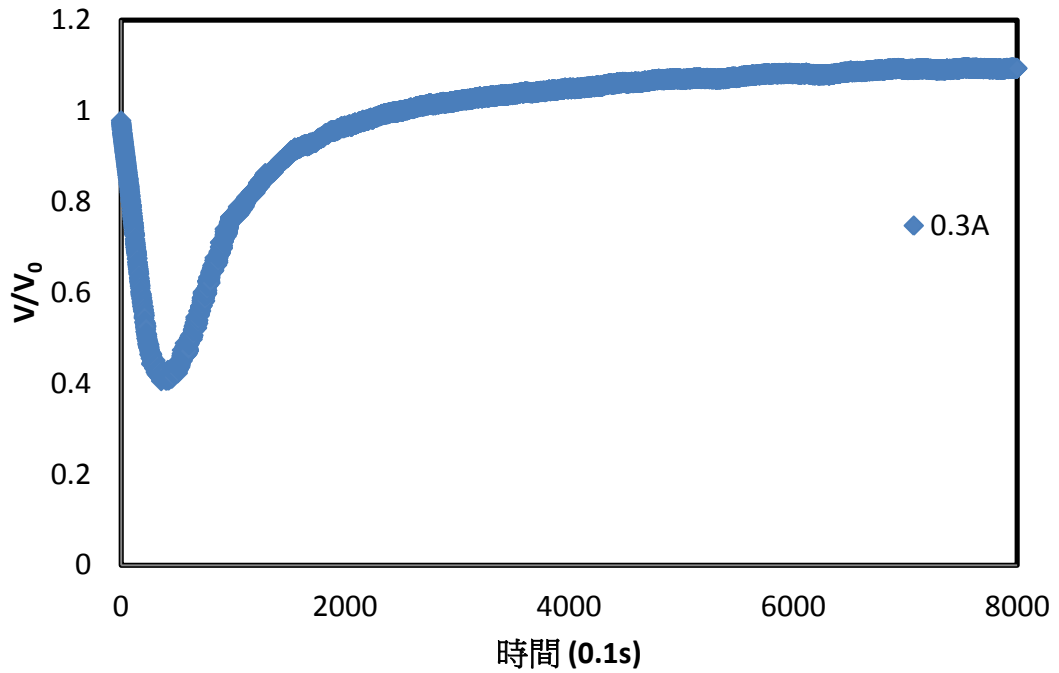


圖 5-1 光強度 V 與時間的關係圖

通入外加磁場後，透射光強度先急遽減少，然後緩慢上升，最後達穩定值。

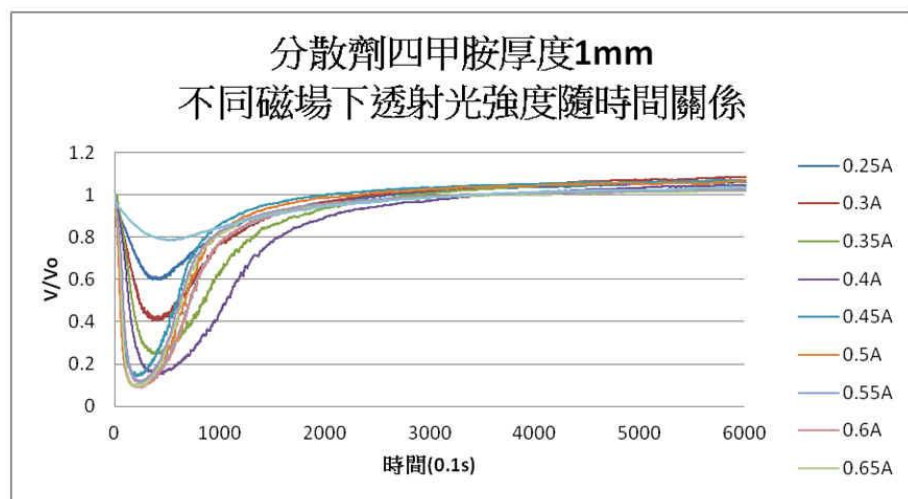


圖 5-2 不同磁場大小的光強度 V 與時間關係疊圖

二、磁場大小對散射之光強最低點及平衡點之影響

(一)使用分散劑四甲胺，磁性流體薄膜厚度 1mm

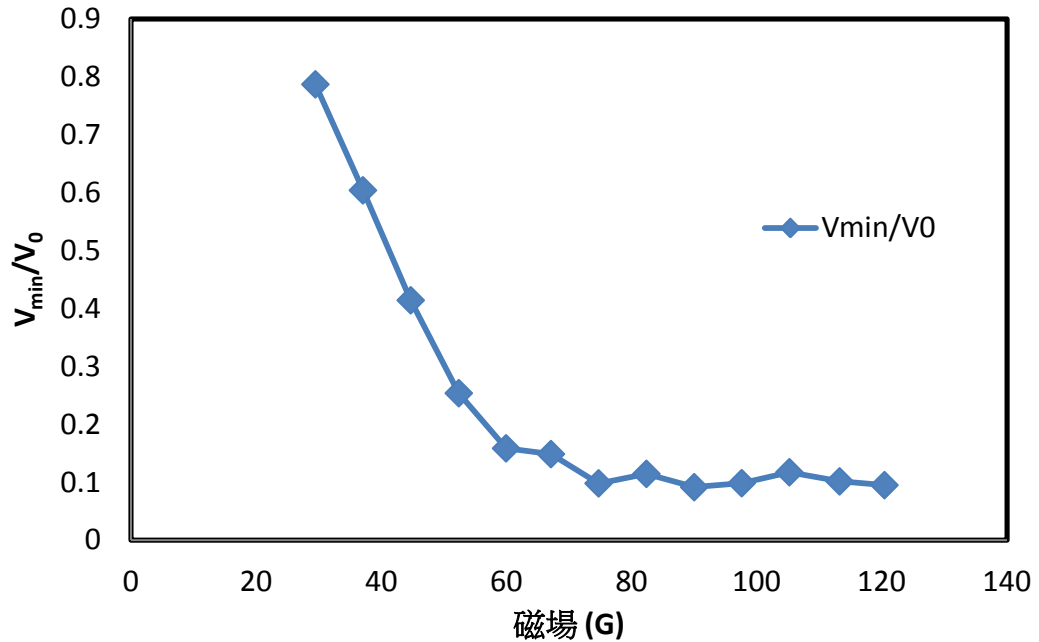


圖 5-3 V_{\min}/V_0 與磁場的關係圖

由圖(5-3)可知 1mm 厚的磁流體，其磁場越大，光強度最小值之衰減量越大，然而在約 65G 時，趨勢漸緩， V_{\min}/V_0 值大約為 0.1。

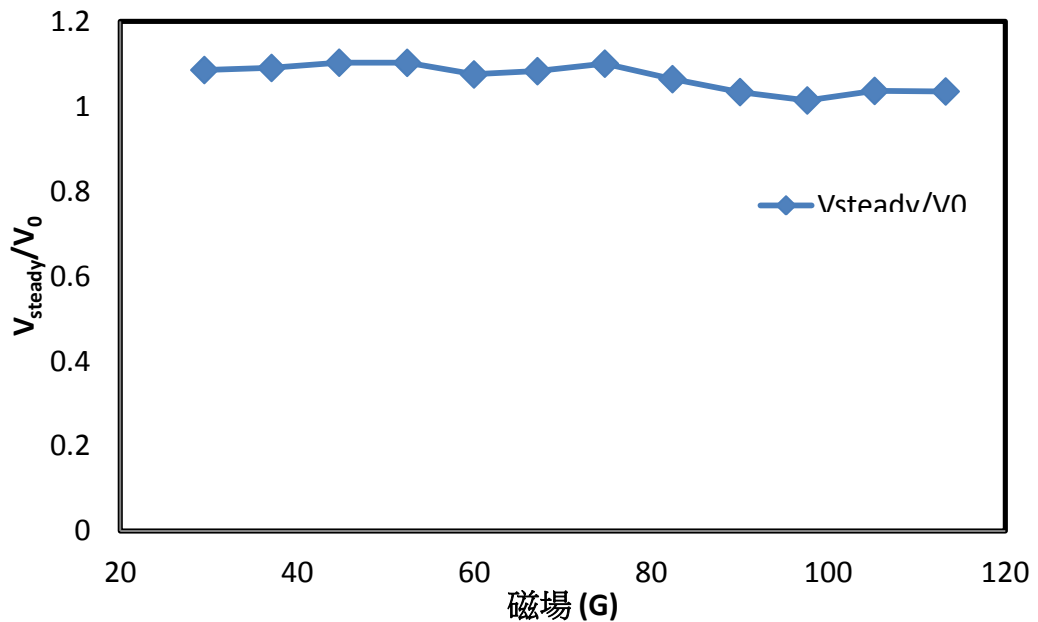


圖 5-4 V_{steady}/V_0 與磁場的關係圖

由圖 5-4 可發現 V_{steady}/V_0 幾乎與磁場大小無關。

三、磁場大小對散射之光強度下降時間之影響

(一)使用分散劑四甲胺，磁性流體薄膜厚度 0.13mm

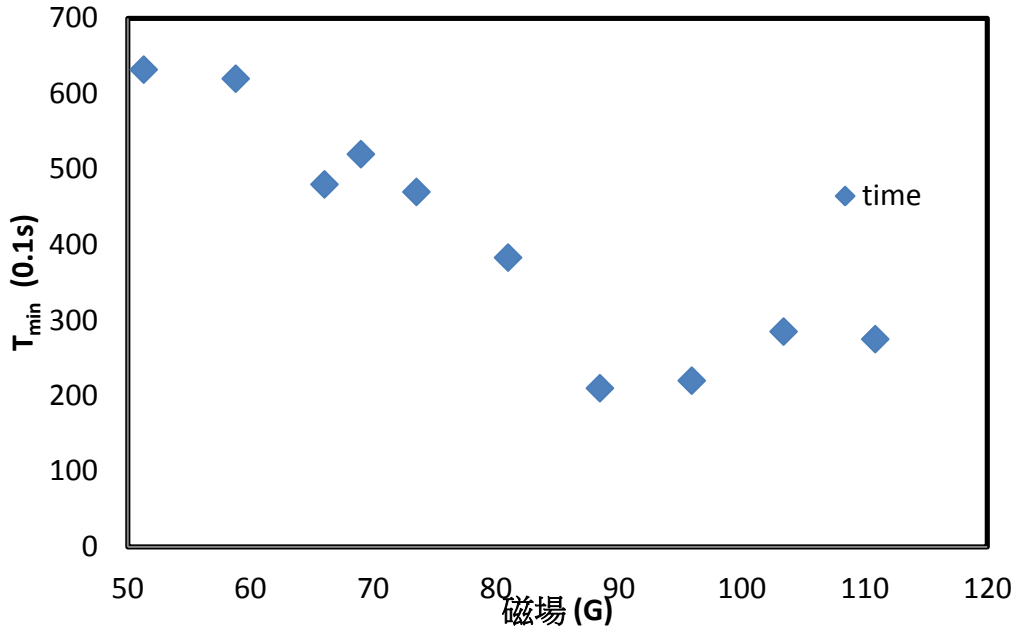


圖 5-5 至光強度最低點時間 T_{min} 與磁場關係圖

由圖(5-5)可見磁場越大，則至光強度最低點時間越短，即磁流體排列的速度越快。

(二)使用分散劑四甲胺，磁性流體薄膜厚度 1mm

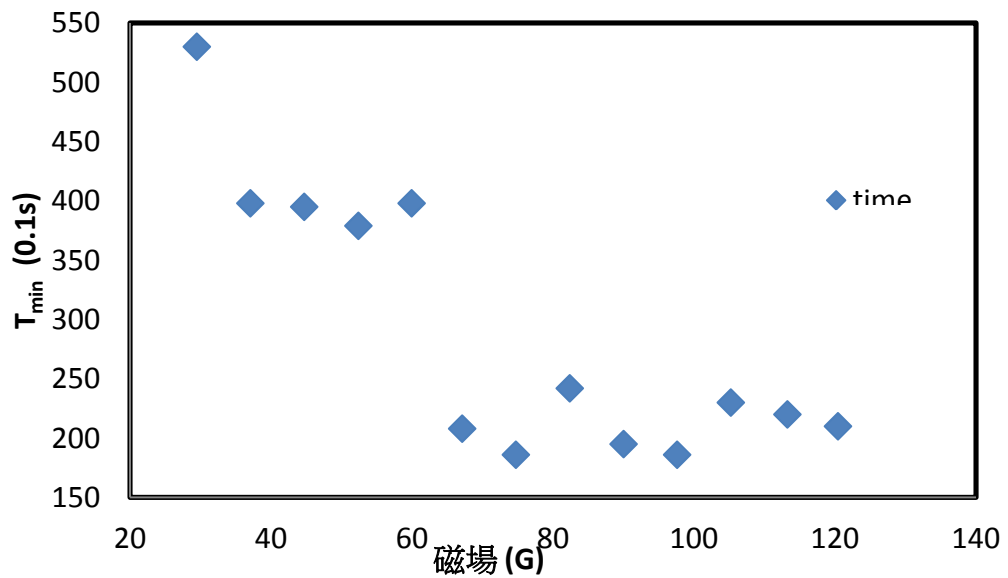


圖 5-6 至光強度最低點時間 T_{min} 與磁場關係圖

由圖(5-6)可見磁場越大，則至光強度最低點時間越短，即磁流體排列的速度越快。

四、磁性流體薄膜厚度對散射光強最低點及時間之影響

(一)使用分散劑 PEG，磁性流體濃度 5mg/mL，磁場 105G

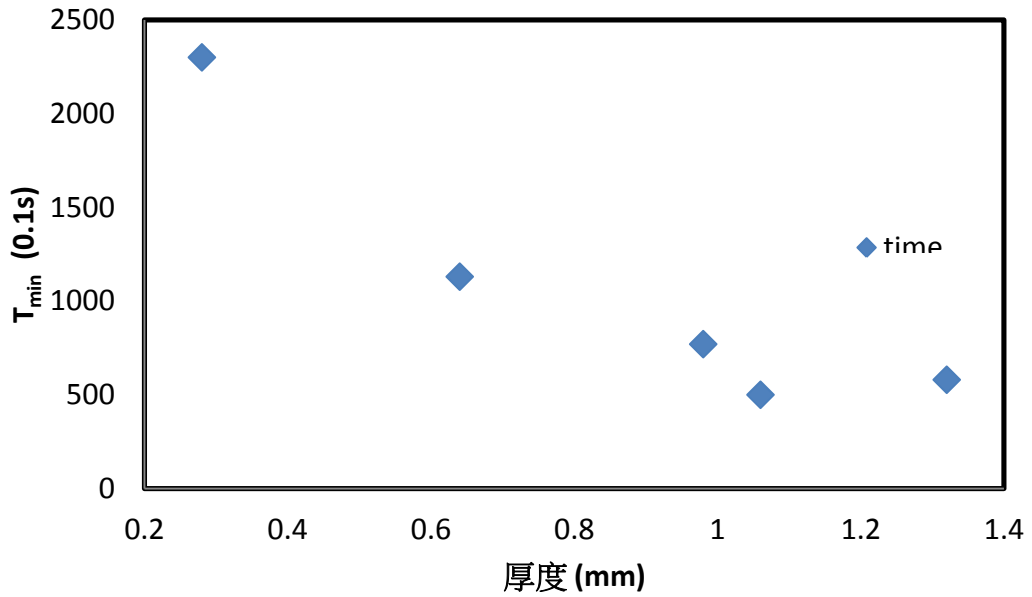


圖 5-7 至光強最低點時間 T_{\min} 與磁流體薄膜厚度關係圖

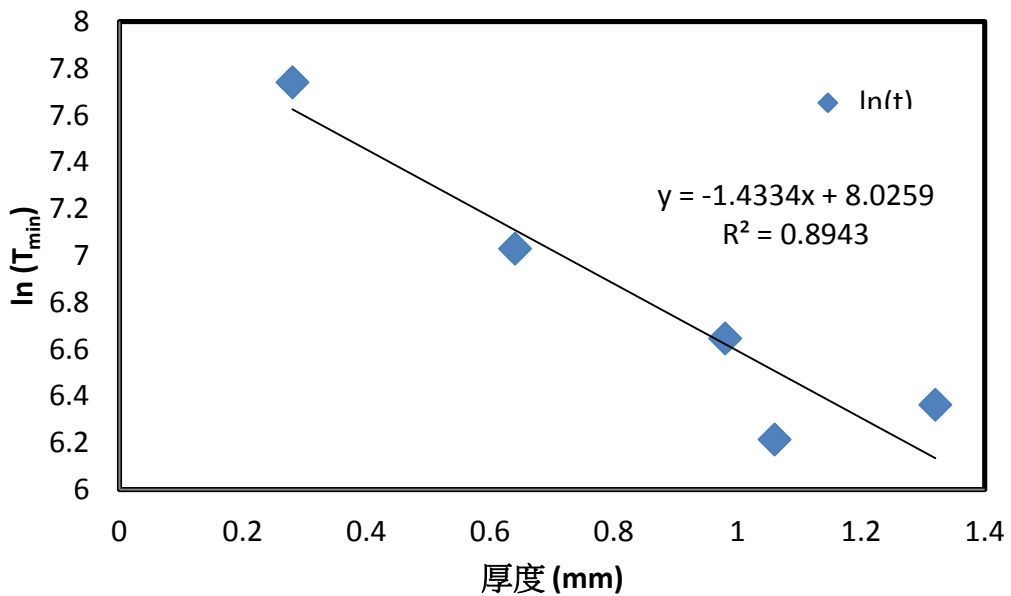


圖 5-8 $\ln(T_{\min})$ 與磁流體薄膜厚度關係圖

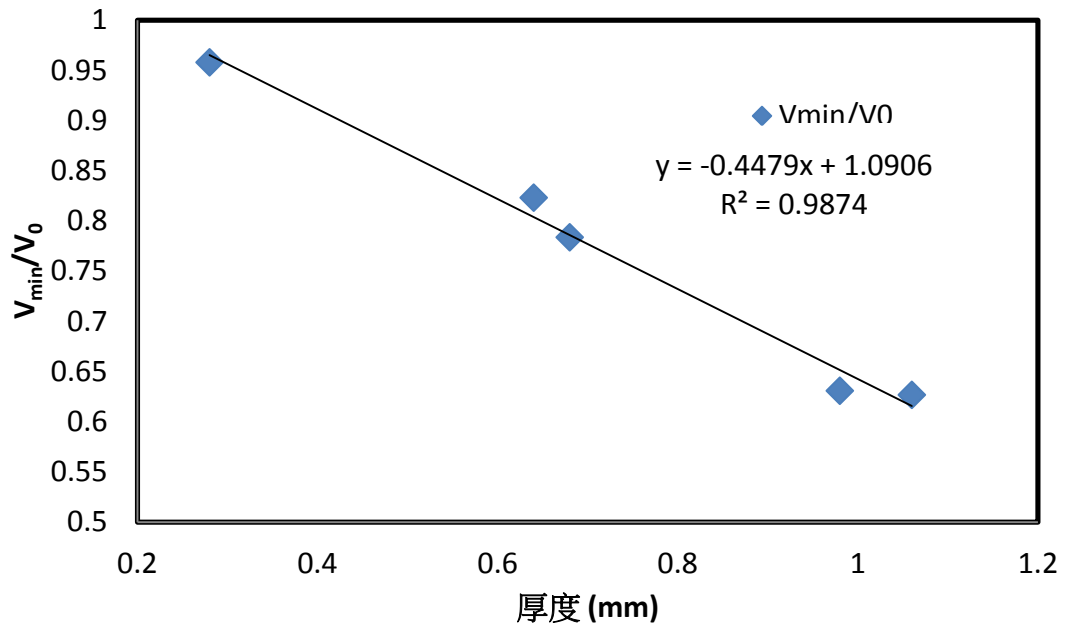


圖 5-9 光強度最低點 V_{min} 與磁流體薄膜厚度關係圖

由圖 5-7 可知厚度越大至光強最低點時間 T_{min} 也越小，所以對 T_{min} 取自然對數 $\ln(T_{min})$ 並與厚度作圖，如圖 5-8 所示，呈現一次線性遞減函數。

由圖 5-9 可知光強度最低點 V_{min} 與厚度為一次線性遞減函數。

五、磁性流體濃度對散射光強最低點及時間之影響

(一) 使用分散劑四甲胺，厚度 1.135mm，磁場 87G

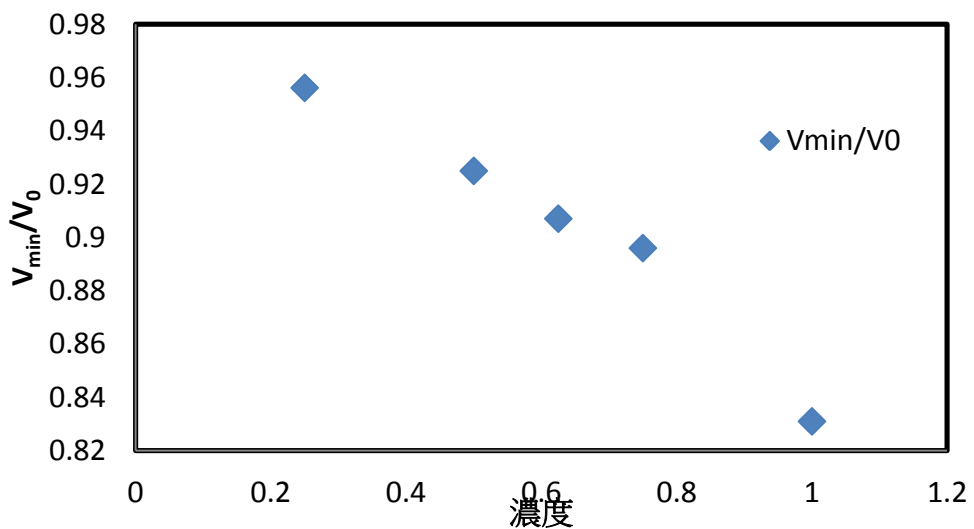


圖 5-10 光強度最低點 V_{min} 與磁性流體濃度關係圖

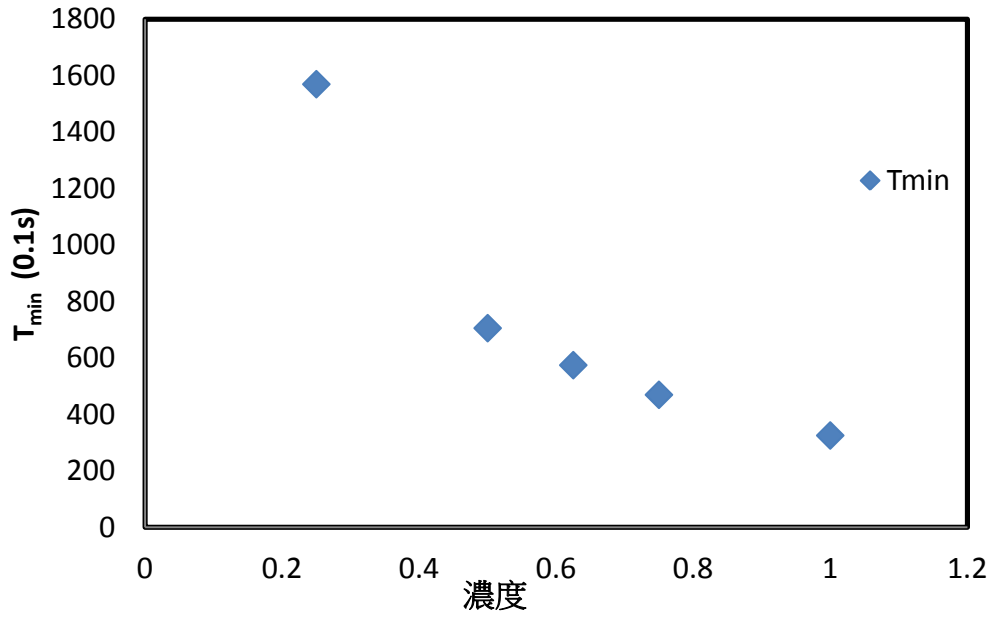


圖 5-11 至光強最低點時間 T_{min} 與磁性流體濃度關係圖

自圖 5-11，可看出濃度越大，光強度最低點 V_{min} 越小，而由圖 5-11，可看出濃度越大，到達最低點的時間越短。

六、顯微攝影下的磁性流體與磁性流體散射之一般結果

(一)下列幾張照片為將分散劑四甲胺厚度 0.13mm 之磁流體樣本置於顯微鏡下，加上 88.45G 的磁場後磁流體的變化。

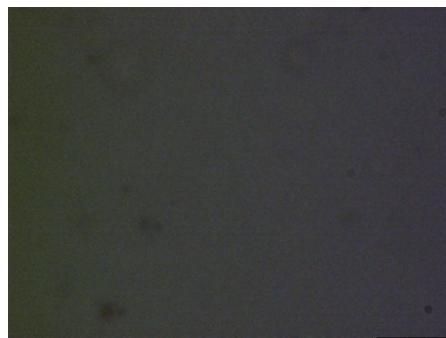


圖 5-11 通入磁場前

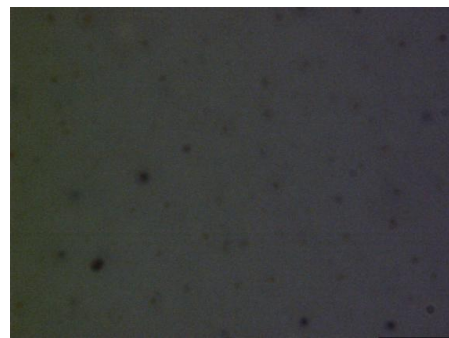


圖 5-12 通入磁場後 3 秒
磁顆粒漸漸聚集為磁柱

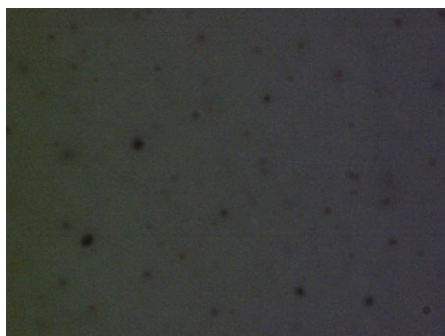


圖 5-13 通入磁場後 5 秒
磁柱的密度愈來愈高，光強漸減

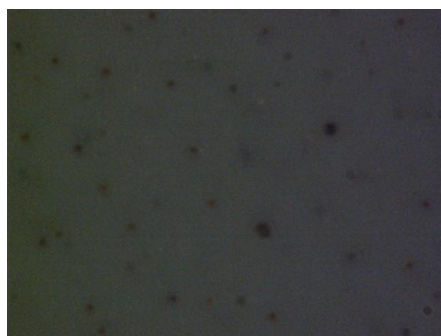


圖 5-14 通入磁場後 10 秒，磁柱
密度達到最大值，光強達極小值



圖 5-15 通入磁場後 30 秒
磁柱之間互相聚集，但過程緩慢



圖 5-16 通入磁場後 90 秒
逐漸形成穩定結構

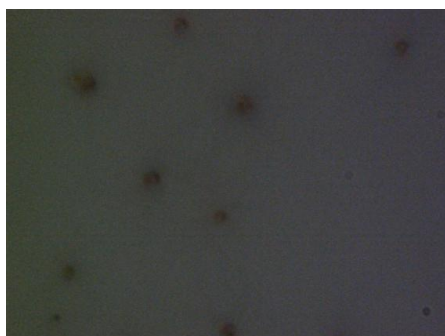


圖 5-17 通入磁場後 210 秒已形成穩定結構雛型，光強度達穩定值

七、顯微攝影下的磁流體與磁流體散射之統一

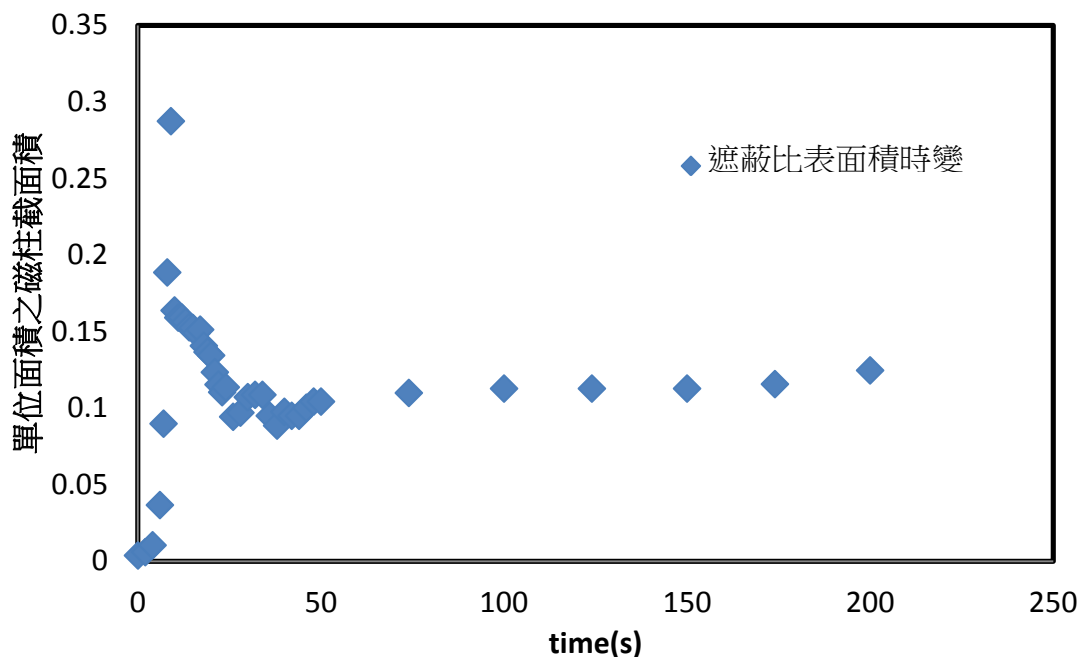


圖 5-18 二維方向上的磁柱遮蔽比表面積時變圖

隨著時間增加，磁柱半徑與單位面積的數目隨時變化，導致在二維單位面積中的磁柱投影量隨時間有先增後減，最後達到穩定。

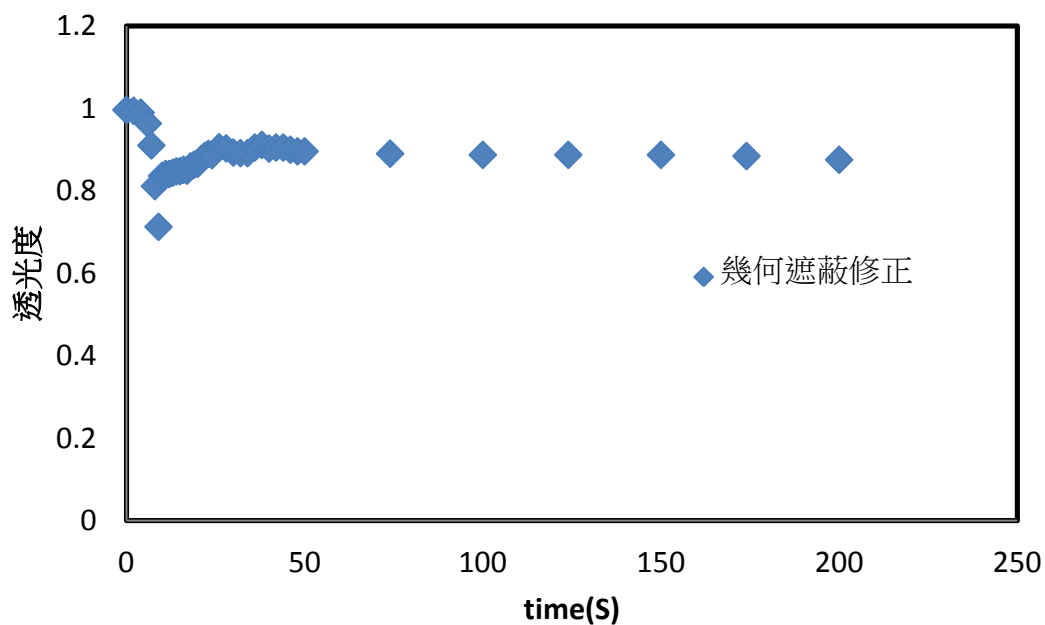


圖 5-19 二維方向上非磁柱遮蔽比表面積時變圖(幾何遮蔽)

若液相區域可完全透光，則由 $1 - (\text{圖 18 之單位面積之磁柱截面積})$ ，

可得到圖 5-19 二維方向上非磁柱遮蔽比表面積時變圖(幾何遮蔽)，已經有類似透射光實驗中的光強隨時變化。

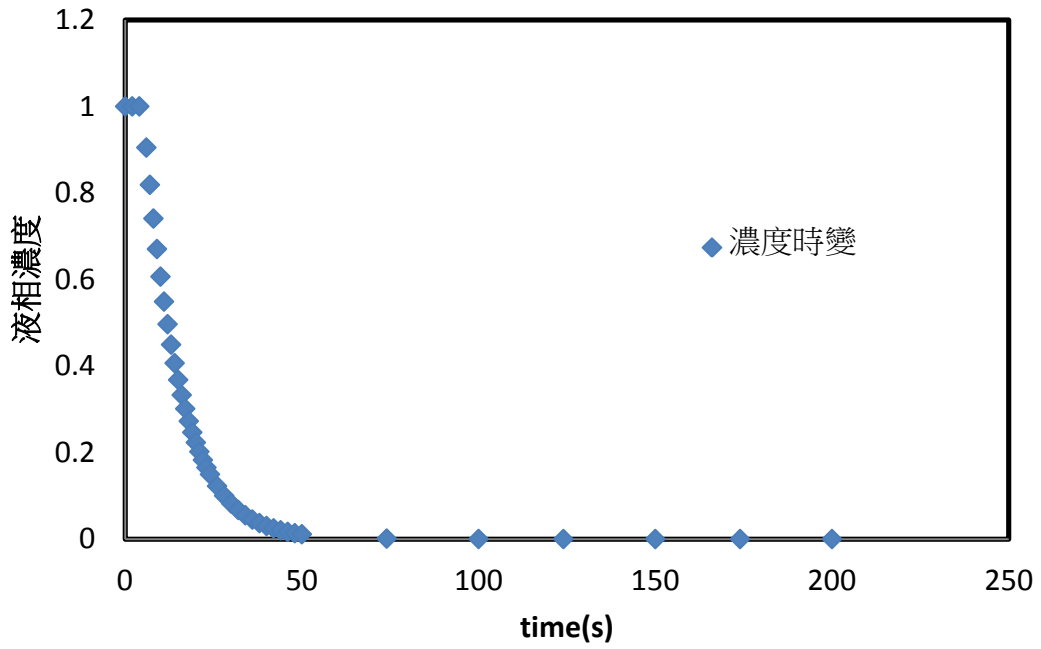


圖 5-20 液相區域之濃度時變圖

隨著時間增加，液相區域之濃度做 EXP 遞減。

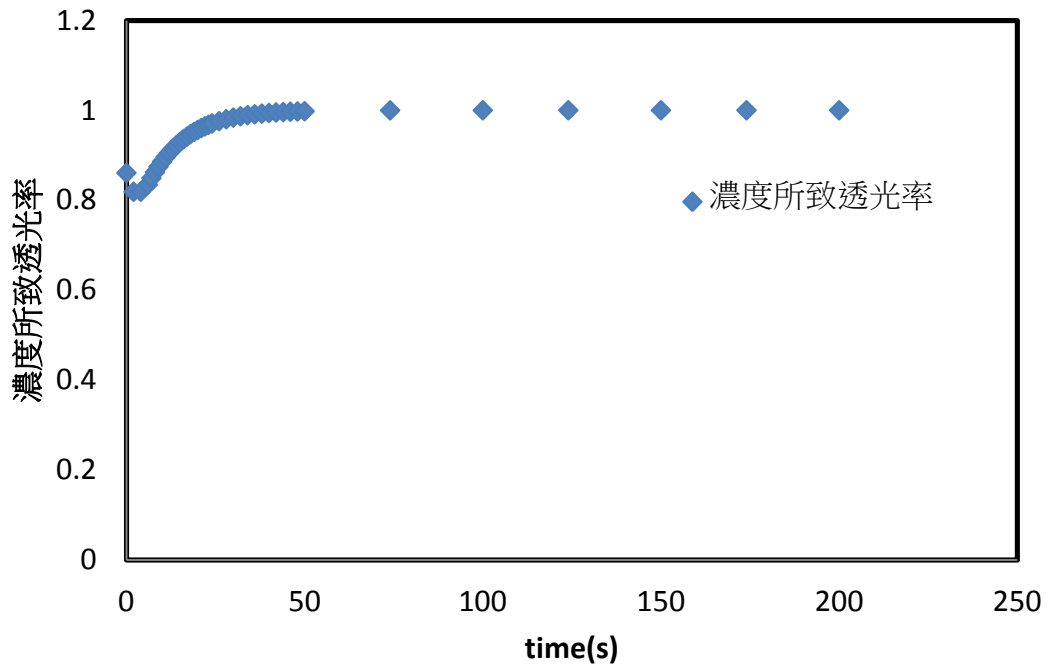


圖 5-21 濃度所致液相區域之透光時變率(散射修正)

隨著時間增加，液相區域之濃度做 EXP 遞減，而且液相區域之透光時變率隨時做 exp 增大，最後達到穩定。

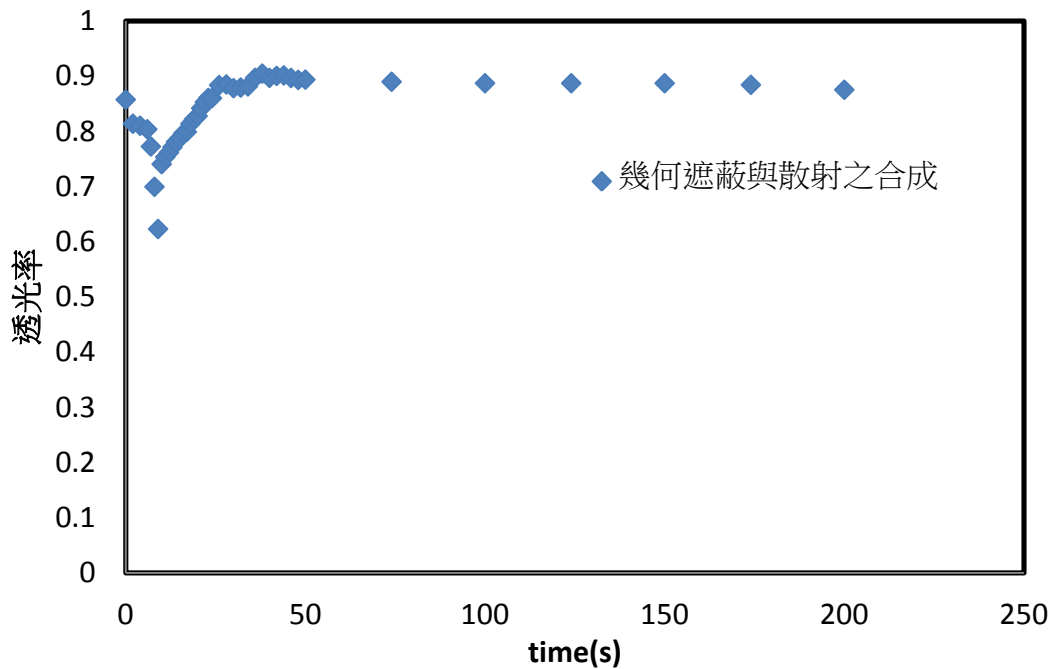


圖 5-22 隨著時間的增加，幾何遮蔽與散射影響的疊加(二階修正)

圖 5-22 為圖 5-19 與圖 5-21 相乘，考慮幾何遮蔽與散射二影響，而此結果逐步逼近光軸實驗的數據，且穩定態算出的透光率大於原光強。

陸、 討論

1. 磁性流體可視為眾多細小的磁矩構成之，所以通入磁場後，磁矩將做某種與磁場相關的運動，甚至構成特定結構，所以通入磁場後磁性流體散射光強度的變化，是磁顆粒排列過程以及形成的構造所致。在通入磁場前，磁顆粒做無規律的運動(布朗運動)，因為分散劑與表面帶有的少許電荷排斥影響，磁流體不至於凝集。在通入磁場後磁顆粒的磁偶極方向部分轉為與磁場同向。其中的能量主要是磁偶極間位能還有磁矩與外加磁場的磁位能($-\mu \cdot B$)、凡德瓦力的位能，為了達成能量的最低值，磁顆粒漸漸聚集，磁顆粒的半徑增加，並且密度增加，故在顯微鏡視野下逐漸出現一點一點的影像，所以有效散射面積加大，雷

射光強開始衰減。最後有規律的排列，磁矩首尾相接成一長鏈，產生磁柱或稱作磁鍊，磁性流體中產生相轉變(液相和固相)。此後磁柱又會互相聚集，磁柱密度漸漸減少，為光強度上升階段。最後磁柱達到穩定結構，光強度也達到穩定值。以上的光強度先降後升的結果在不同外加磁場大小、不同厚度的所有情況皆與實驗結果相符。

2. 未通磁場前，磁顆粒很小，小於光波長，這時散射適用銳利散射。通入磁場後，磁顆粒逐漸凝聚為磁柱，磁柱半徑漸漸增大(在顯微鏡下逐漸出現一點一點的磁柱)。這時半徑已大於光波長，銳利散射在磁柱不適用，但在液相區域仍適用，這時推測由於磁柱在二維方向投影面積已明顯小於未通入磁場前有效遮蔽面積，散射的效應影響小於幾何遮蔽(geography shadow)效應。藉由顯微鏡觀察以及光強度隨時間變化圖的比較，發現磁柱半徑及數密度愈大，光強度的確愈小，與實驗結果相符。
3. 觀察「磁場大小對散射之衰減量之影響」此實驗，可以發現在通入不同外加磁場下，所接收的光強度最低值與磁場大小的關係，其最低值隨著磁場增強而減少，而且光強度的遞減率(-dI/dB)隨著磁場的增大漸減，使通入磁場達一定強度後，透射光強度最低的值大略維持一定，由討論第一點提到，所接收的光強度不同是因為其中磁流體結構上的不同，所以由研究結果可以推測在磁場達一定值後，各外加磁場在接收的光強度最低值時刻所造成的磁鍊結構是相近的。針對以上兩個結果，我們認為磁顆粒聚集，以及磁柱間互相聚集是同時進行，考慮兩個力，分別為磁偶矩所產生的排斥力與磁束之磁偶矩和外加磁場的吸引力，外加磁場的吸引力決定磁偶矩在加入磁場時，順著磁場方向的磁偶極比率，當外加磁場越大，越多的磁偶極順著磁場方向，磁偶矩之間的交互作用強，容易首尾相接形成磁鍊，而外加磁場越小時，磁偶極方向即越凌亂，磁偶矩之間的交互作用不大，需要較長時間排列，所以磁顆粒聚集的過程與磁場有關，愈大的磁場聚集愈快。當外加磁場大時，磁顆粒迅速的聚集成為數眾多的磁柱，這時單位截面積出現

密度很高的磁柱量，有效遮蔽面積加大，使透射光強度減少。而當外加磁場小，其聚集成磁柱較慢，在形成磁柱的發展過程中，磁顆粒的偶極方向變換過程中，已經先聚集，因此在透射光強最低點時其單位截面積磁柱密度低，這造成了透射光強最低值隨著磁場增強而減少。至於在磁場達一定值後，各外加磁場在接收的光強度最低值時刻所造成的磁鏈結構是相近的原因乃是外加磁場達到一定值後，幾乎所有磁偶矩均受強大磁場影響，達到順著磁場方向，故偶極間方向相同，形成磁鍊的力亦相同，所以結構相同導致的透射光強度趨於一定值，排列的動力過程所致的至光強度最低點時間也將趨於一值，與實驗「磁場大小對散射之光強度下降時間之影響」中時間在大磁場下隨磁場變化量(-dt/dB)趨緩、實驗「磁場大小對散射之衰減量之影響」中，使用分散劑四甲胺，磁性流體薄膜厚度 1mm 的實驗結果—使通入磁場達一定強度後，透射光強度最低的值大略維持一定，兩個實驗結果相契合。

4. 在光強度漸增大的過程中，不同層間之磁偶矩漸首尾相連，形成長鏈的磁柱，所以磁鍊數密度下降，所以透射光強度逐漸上升。至於上升一段時間後，最後達到能量最低的結構，透射光強度達到穩定，這就是穩定值的光強，其間距與磁場大小有關，但在我們討論的磁場範圍內，不論磁場為何，磁柱的截面積 \times 磁柱密度(磁鍊總截面積)為小量，其 1-磁柱的截面積 \times 磁柱密度(光可經散射衰減而透過磁流體薄膜的區域)相差無幾，故實驗「透射光穩定值隨磁場變化關係」的研究結果顯示不同磁場下的磁流體透射光穩定值大略相同，對於其透射光強度大於原光強的解釋是磁偶矩受到其磁鍊中眾多磁偶矩間之吸引，被磁鍊捕獲，於是磁鍊半徑逐漸加大，但其增加幅度不大，反而因為磁性流體的濃度固定，形成半徑更大的磁柱亦代表分散在磁流體中的磁顆粒減少，減少了銳利散射(Rayleigh scattering)，由於穩定態之 1-磁柱的截面積 \times 磁柱密度(光可經散射衰減而透過磁流體薄膜的區域)相差無幾，所以可以比較通入磁場前及穩定態之液相部分，結果因為穩定態之銳利散射較小，透射光強也就加大。

5. 改變磁流體薄膜的厚度，測量 V_{\min}/V_0 和 t_{\min} ，發現皆隨厚度增加而減少。 V_{\min}/V_0 與厚度的關係在 d (厚度)小於 1.2mm 的區間呈線性關係，因為磁柱的長度不致太長，增加厚度時，會形成不同層，遮蔽面積加大，而 V_{\min}/V_0 隨厚度增加而減少，在厚度不大時，層間重疊不大，故大致呈線性。磁流體至光強度最低值的時間隨厚度增大而減短，但非線性關係，從 $\ln(T)-d$ (厚度)關係圖可知 $T_{\min}-d$ (厚度)大致呈現 exp 衰減，因為厚度越大，不同層間磁矩的極化越明顯，但逐漸趨近飽和磁化率，此時增加厚度對時間影響減少。
6. 改變磁流體的濃度，測量 V_{\min}/V_0 和 T_{\min} ，發現皆隨濃度的增加而減少。 V_{\min}/V_0 與濃度的關係在濃度 0.2 到 1 之間呈遞減關係。增加濃度時，直接影響磁性流體的顆粒密度，進而影響在 V_{\min} 時形成磁鍊的數密度，有效遮蔽面積加大， V_{\min} 值也相對減少。磁性流體至光強度最低值的時間 T_{\min} 隨濃度增大而減短，但非線性關係，從圖 5-11 所示 T_{\min} -濃度呈現 exp 衰減，因為濃度越大，層與層間的磁鍊數增加，導致不同層間磁矩的極化也越明顯，但逐漸趨近飽和磁化率，此時增加濃度對時間影響減少，另外濃度此變因將在討論 7 進一步討論。
7. 最後我們比較顯微攝影下的磁流體與磁流體散射實驗，試圖建構統一顯微攝影與透射光衰減量的理論，推導如下：

(1) 對於圖 5-18，我們可以由顯微射影找出數密度(N)及磁鍊半徑(r)隨時間的函數 $N(t)r(t)$ ，並由此畫出圖 5-18 二維方向上的磁柱遮蔽比表面積時變圖。

(2) 如果假設磁流體透射光變化皆為幾何遮蔽(geography shadow)，則光強度初變小是因為數密度之上升，後增大是因為形成磁鍊後，不同層間互相遮蔽，均投影至二維方向的一點上，若令二維投影方向之無磁柱區域(液相)面積 \propto 透射光強，即無磁柱透射光區(液相)的透射光比率不隨時間改變，則：

$$I = I_0 \times \left(1 - n\pi r^2 / \text{area}\right) \quad 1 \text{ 式}$$

其中 n 為視野下所觀察之平均磁柱數目， I_0 為初光強， r 為磁柱之半徑， $area$ 為全視野面積，令 $k = n\pi r^2/area$ ，則簡化為 $I = I_0 \times (1 - k)$ ，其圖如 5-19，已作出主要近似。

(3) 然而因為無磁柱透射光區(液相)的透射光比率隨時間改變，所以我們做第二階近似：

因為磁顆粒直徑在 100\AA ，所以在銳利散射(Rayleigh scattering)適用範圍，於是應用膠體溶液散射透射光

$$I = I_0 e^{-C\mu d} \quad 2 \text{ 式}$$

其中 I_0 為原光強， C 為濃度， d 為薄膜厚度， μ 為銳利散射的係數(2000)，視不同分散劑而定。將 2 式代入 1 式，得

$$I = I_0 \times (1 - k) \times e^{-C\mu d} \quad 3 \text{ 式}$$

(4) 其中由於磁顆粒數守恆，將各層均勻的磁柱整併成一長度微薄膜厚度的磁練

於是：

$$C = f(t) = \begin{cases} 1, t < 5 \\ e^{-m(t-10)}, t \geq 5 \end{cases}$$

其中而 $t < 5\text{sec}$ 表未通入磁場，濃度為 1，隨著加入磁場，磁顆粒逐漸產生，濃度下降，而時間 10sec 時透射光產達最低值， m 為 0.1。

將其代入 2 式

$$I = I_0 e^{-(e^{-m(t-10)})\mu d} \quad 4 \text{ 式}$$

為圖 5-21，即液相濃度減少導致散射減弱效應所造成之結果，這個修正解釋了穩定態光強大於原光強，為討論 4 之佐證。

最後帶入 3 式

$$I = I_0 \times (1 - k) \times e^{-(e^{-m(t-10)})\mu d} \quad 5 \text{ 式}$$

上式為 5-19 的函數乘以 5-21 的函數，得到圖 5-22，此圖與透射光實驗的圖形相似，足以證明磁性流體在外加磁場下之有序結構有幾何遮蔽及濃度減少導致散射減弱效應共同影響，而這個結構

也影響了透射光強，故藉由測量透射光強的手法是合理的，顯微攝影的結論是與光軸實驗等價，不管是透射光強度如何變化，從其結構所推演之 $I = I_0 \times (1 - k) \times e^{-(e^{-m(t-t_0)})\mu d}$ ，建構了透射光強度的理論模型，說明以上磁柱的結構的動力學理論是正確的，可以連結顯微鏡之微觀尺度與統計觀點的量取透射光強度衰減，就好比氣體動力論中聯結壓力與 V_{rms} ，這是本實驗的一貢獻。

柒、 結論

1. 通入外加磁場後，透射光強度隨時間先減少後增加，最後達到穩定值。
2. 通入磁場後，磁顆粒凝聚成磁柱，磁柱的數密度及半徑越來越大，達到光強度極小值，而後磁柱互相聚集，漸漸形成穩定結構，光強度達穩定值。透過顯微鏡觀察以及透射光隨時間變化圖的比較，能了解磁顆粒在通入磁場後的動力學。
3. 通入外加磁場後，磁鍊的結構造成透射光強度差異，磁場越強，透射光最低值越小透射光強度達最低點的時間越小，皆在磁場達一定值後，時間及光強趨於一值。
4. 比較不同厚度的樣本，越厚的磁流體，透射光強度最低值越小，達最低值的時間也越短。
5. 比較不同濃度的樣本，濃度越大光強度最低值越小，到達光強度最低點的時間也越短，而透射光強度隨濃度的關係呈一次線性關係，到達最低點的時間則與濃度成 \exp 衰減關係。
6. 整合雷射實驗與顯微攝影的數據，我們推論光強度時變率與銳利散射和幾何遮蔽有關，並導出一個光強度時變率與時間的關係式，並且能符合之前的研究數據。

捌、 參考資料及其他

1. 黃忠良 (民 88)。磁性流體理論與應用。臺南市：復漢。
2. 李和山 (民 92)。磁流體在外加磁場下之偏振光特性研究。國立中山大學物理學研究所碩士論文，未出版，高雄市。
3. B. Payet, A. Siblini, M. F. Blanc-Mignon, and G. Noyel (1999):
Comparison between a Magneto-Optical Method and Fannin's Technique for the Measurement of Brown's Relaxation Frequency of Ferrofluids.
4. Mark Ivey, Jing Liu, Yun Zhu, and Serge Cutillas (2000):
Magnetic-field-induced structural transitions in a ferrofluid emulsion.

評語

1. 能以透光率探討磁顆粒在外加磁場下集體行為。
2. 加磁場後，初期磁顆粒排列對透光之影響，值得再深入討論，僅以遮擋討論，似乎較難完全理解達 80% 的遮擋。
3. 建議再以同一樣品，而讓溶液蒸發改變濃度，觀察實驗結果。