

台灣二〇〇二年國際科學展覽會

科 別：物理科

作品名稱：機能性材料的光學性質

得獎獎項：物理科佳作

學 校：國立臺南第一高級中學

作 者：陳登豪

作者簡介



作者：陳登豪 就讀學校：台南一中 指導老師：鄧明聖

我生長於一個溫馨的家庭，自小接受良好的教育，以及培養對任何事物客觀且好奇的態度。由於在成大任教的父親屢獲「傑出工程教授獎」，自小便對研究一類的事感到興趣，希望在科學的領域能有一番突破；在因緣巧合下，參與了此次的科展。在好勝心與對研究工作的執著下，我終於在這頗具難度的實驗中有了小小的成果。最感謝的莫過於家人的支持與師長的協助，讓我得以一圓科學夢。參加科展讓我學到一個完全不同的人生經驗，相信我高中生活中最大的收穫。

摘要

本實驗使用磁流變流體(Magnetorheological fluid, MRF)來觀察其磁場作用下的光學性質。本實驗採用 Lord 公司的 MRF-132LD 磁流變流體加以稀釋到不同的重量濃度，並以氫氟酸蝕刻玻片產生不同的厚度。吾人觀察到濃度參數及厚度參數均對 MRF 薄膜的光繞射產生影響。膜厚越薄，產生的繞射較明顯，而重量濃度較小的溶液亦有較大的繞射角度。吾人亦移動上下兩玻片相對位置，施加剪力的作用，繞射現象也產生明顯的改變。

Abstract

The Magnetorheological fluid (MRF) is used to observe the optical properties under the vertical magnetic field. The MRF-132LD from Lord Company is used. The MRF is diluted to different weight ratio of particulate and carrier fluid. The different thicknesses of the MRF thin film are also made with the diluted MRF. The concentration of the MRF and the thickness of the thin film are both found to have significant effects on the optical diffraction phenomenon. The optical diffraction is also found to be affected by the applied shear force to the thin film.

壹、研究動機

在課業繁忙之餘，出外走走散散心，抬頭望著那晴空萬里時，不覺想到，天空中的顏色，常常變幻無窮，時紅時藍，甚至灰濛濛的，又空氣污染嚴重時，會呈現較暗的色澤，為什麼呢？這是因為空氣中懸浮顆粒增加的原因。回家打開液晶螢幕發現，液晶材料會因為電壓的改變而產生色彩的變化，是材料中晶體的方向因電場的作用而改變，不禁令吾人想到，若液體中也有懸浮顆粒，是否也會因為磁場的改變而產生光學性質的變化？這樣有趣的題目，令吾人忍不住想研究一番。而本實驗主要在探討磁流變流體的光學特性。

貳、研究目的

- 一、藉由實驗過程證實磁場是否真的對磁流變流體造成影響及其在磁場下所產生的光學性質。
- 二、觀察是否具有懸浮溶液的特性，及與其他溶液間之差異，希望能發現較特殊之處。
- 三、觀察磁場作用下所產生的光學性質並紀錄之，而後探討其中的特性。
- 四、希望藉其特性找出可實際應用的相關用途。

參、研究設備器材

1、雷射光源	2、光學鏡片
3、白光光源	4、望遠鏡頭（產生平行光）
5、高感光單眼相機	6、顯微鏡
7、強力磁鐵	8、高斯計
9、電子游標尺	10、數位相機及數位攝影機
11、表面粗度儀(α -step)	
消耗材料	
1、矽油	2、磁流變流體（MRF132LD, 重量百分濃度 84%, Lord）
3、玻片	4、氫氟酸（腐蝕玻璃）

肆、理論及方法

磁流變流體與膠狀磁性流體

以下先對磁流變流體(magnetorheological fluid, MRF)與膠狀磁性流體(colloidal magnetic fluid)的特性作一比較[1,2,3]。

- 一、兩者同樣都是在不導磁的溶媒(medium)中加入高濃度的微小粒子及適當的活性劑(或穩定劑)。微小粒子的直徑大小：膠狀磁性流體粒子一般在 5-10 奈米(nm)間，磁流變流體粒子大小一般在 0.1-10 微米(μm)間。

二、由於粒子較小，膠狀磁性流體在外加磁場作用下沒有如磁流變流體顯現的流體流動間阻力而且流體的流變特性也極小。但也由於粒子夠小，藉著布朗熱運動在溶液中均勻散佈。對其施予外磁場時，則會出現有序結構。當光通過此有序的結構時，則會產生磁光現象。在工業上，對膠狀磁性流體磁光效應的現象可應用於磁場感測器、光調變器(利用磁場及透光率的關係)…等。

三、磁流變流體在加予磁場時，其流體間的黏度將隨之增加，流變性質改變。磁流變流體的流變性、受磁場、電場、熱、聲等狀況下的機械與物理性質已經廣泛地受到重視，而可控制的流變性質更是主要的應用根本。在應用上，需求為初始時黏度極低、加予高磁場時有最大剪應力值、反應時間快、磁滯效應低、低功率消耗和溫度穩定性高，應用例有磁流變流體節流閥、振動避振器、吸振器、油封…等。在光學性質方面，與磁性流體相比較，從事於磁流變流體光學性質方面研究的學者可說是少之又少。

由於磁流變流體粒子大於磁性流體粒子仍甚多，以致在外加磁場作用下其粒子的排列並無法如磁性流體中粒子一般極完美規則性排列。但吾人仍可以從光的繞射圖案來將磁流變流體中之粒子排列以等效的方式對應到磁性流體粒子之六角形規則排列。

流體粒子的六角形晶格結構排列

作用於流體中強磁性膠體粒子間的主要力有三[1] - 強磁性膠體粒子間的磁力、凡得瓦爾(Van der Waals)引力、包覆球表面的界面活性劑分子所致的反斥力。

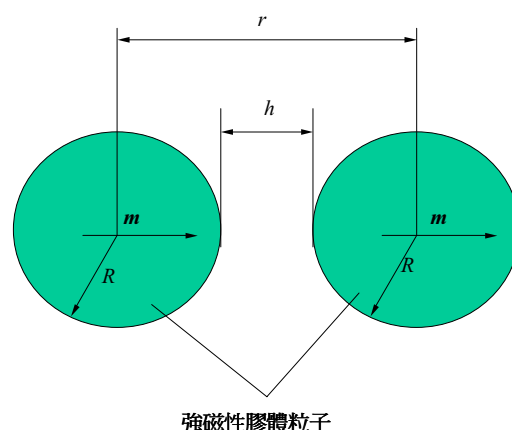


圖 4-1 強磁性膠體粒子間的磁吸引力

如圖 4-1 所示，兩粒子的磁矩平行並且兩粒子在該方向並列時，作用於此二粒子的磁力為引力。磁引力位能 E_{mag} 為

$$E_{mag} = -\frac{m^2}{2\pi\mu_0(2R+h)^3} \quad (4-1)$$

其中 m 為球的磁矩、 μ_0 為真空的導磁係數、 R 為粒子半徑、 h 為球的表面間距離。

凡得瓦爾引力常為距離的 6 次方項與 12 次方項之和，作用於半徑 R 球間的凡得瓦爾引力之位能 E_{vw} 為

$$E_{vw} = \frac{-A}{6} \left\{ \frac{R^2}{h^2 + 4Rh} + \frac{R^2}{(h + 2R)^2} + \ln \left[\frac{h^2 + 4Rh}{(h + 2R)^2} \right] \right\} \quad (4-2)$$

A 為正常數。

包覆球表面的界面活性劑分子所致的力是反斥力。Rosensweig 把 Mackor 所導兩平面間界面活性劑所致的反斥力擴展用於作用於球間的力。模型如圖 4-2 所示，把界面活性劑的分子視為長 δ 的硬棒狀分子，棒狀分子的一方附著於球面的表面，以此點為中心自由旋轉。當兩相對面的距離大於 2δ 時，附著的界面活性劑分子旋轉不受妨礙。二面距離 h 為 2δ 以上時，如圖 4-2 所示，附著各平面的分子間互不妨礙對方的旋轉。Rosensweig 將半徑 R 球間立體障礙的能量 E_{rep} 表示成

$$E_{rep} = \begin{cases} 2\pi R^2 NkT \left[2 - \left(\frac{h+2R}{\delta} \right) \ln \left(\frac{\delta+R}{h+2R} \right) - \frac{h}{\delta} \right], & h \leq 2\delta \\ 0, & h > 2\delta \end{cases} \quad (4-3)$$

式中 N 為附著於球面單位面積的界面活性劑分子數、 k 為波茲曼(Boltzmann)常數、 T 為絕對溫度。

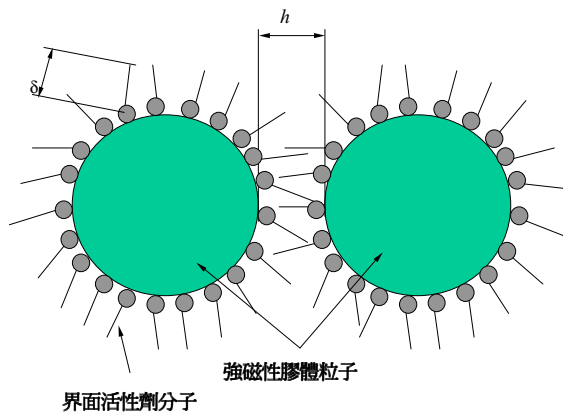


圖 4-2 界面活性劑分子所致的立體障礙

以上為磁性流體中膠體粒子間的主要作用力產生的能量，此三種力中前二者為吸引力，只最後一個為斥力。為得膠體粒子的分散安定性，最後的力不可或缺。因此，為使強磁性膠體粒子一個個安定分散於流體中，界面活性劑與溶媒的適配是重要的問題，而可由這三種主要作用力所致的能量 E_{mag} 、 E_{vw} 、 E_{rep} 總和來加以探討。

強磁性膠體粒子在外部磁場下，強磁性膠體粒子凝集成鏈狀叢集時能量較低。根據文獻 [4,5,6]，強磁性膠體粒子在外加垂直磁場作用下，將形成二度空間中有序的六角形晶格結構排列(圖 4-3)。

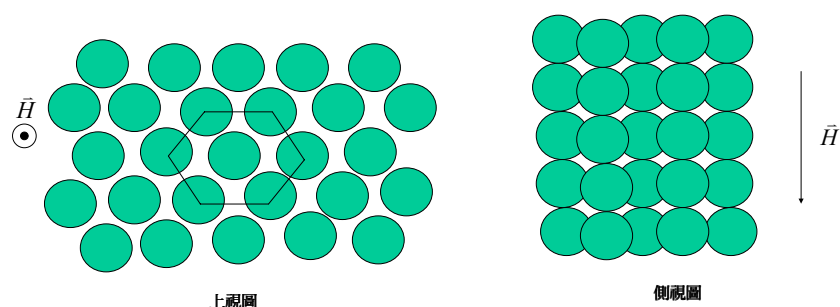


圖 4-3 二維六角形晶格有序排列

多圓孔的繞射

由於本實驗所產生的光柵是由近六角形晶格排列的磁性圓柱體所形成，又根據互補原理 (Babinet's principle)[7]得知，討論圓柱體的繞射現象和討論圓孔的繞射現象是一樣。根據參考文獻[7]，圓孔的繞射強度公式表示為

$$I(\theta) = I(0) \left[\frac{2J_1(1/2 \cdot ka \sin \theta)}{1/2 \cdot ka \sin \theta} \right]^2 \quad (4-4)$$

式子中 $I(0) = (C\pi R^2)^2$ 為 $\theta = 0^\circ$ 時的強度、 a 為圓柱體的直徑、 J_1 為第一階第一類貝索函數(the Bessel function of the first kind, order one)。

磁流變流體薄膜受到外加磁場作用後，流體中的粒子成近六角形結構有序排列為二維之光柵。故光柵的繞射公式中除了圓孔繞射所形成的強度包跡外，尚需乘以一干涉因子。因此，完整的繞射公式應為

$$I(\theta) = I(0) \left[\frac{2J_1(1/2 \cdot ka \sin \theta)}{1/2 \cdot ka \sin \theta} \right]^2 \left[\frac{\sin N_s (1/2 \cdot kd \sin \theta)}{\sin(1/2 \cdot kd \sin \theta)} \right]^2 \quad (4-5)$$

式中 d 為磁性圓柱體之間距、 N_s 是光柵中狹縫的數目。上式中繞射因子為決定強度的因素，而干涉因子決定出干涉造成主極大的角度(圖 4-4)。

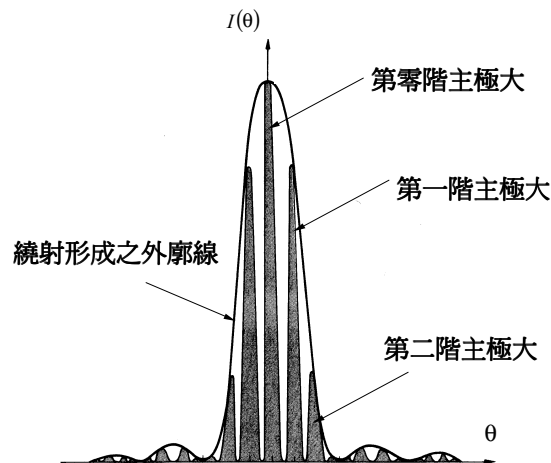
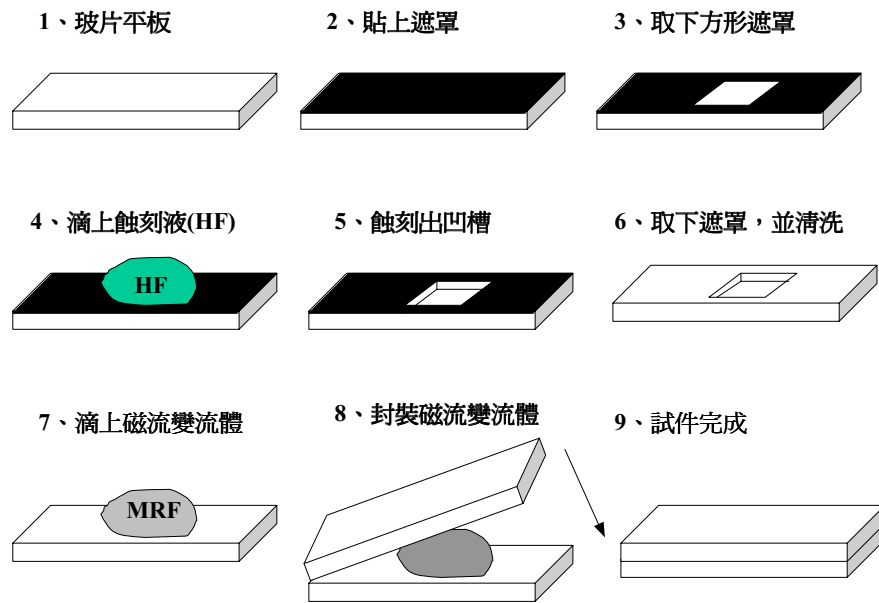


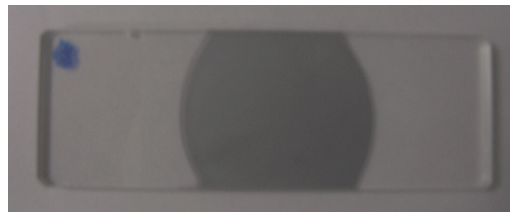
圖 4-4 多圓孔繞射強度示意圖

伍、步驟及方法

- 一、以矽油稀釋購得的 MRF(84%)配置出 20%、30%、40%、50%之 MRF。
- 二、控制時間，藉氫氟酸腐蝕玻片，以獲得本實驗中所需僅數拾微米(μm)薄的厚度，試件製作過程及成品如圖 5-1。



(a) MRF 試件製作過程



(b) MRF 試件完成品

圖 5-1 MRF 試件

- 三、利用玻棒攪拌流體，將玻棒上之流體滴一滴至具凹槽的玻片，再以另一完好玻片覆蓋之，施力使其均勻擴散；由於流體之內聚力及附著力，停止施力後厚度不再變化，試件完成。
- 四、將兩磁鐵各上下放置於一 U 型鐵中，使磁力線不分散而增大磁場作用面積，如圖 5-2。並在中間放兩片反射鏡，使雷射光能從垂直磁場方向打入，沿著磁場方向穿透試件，再從垂直磁場方向射出打在屏幕上，如圖 5-3。

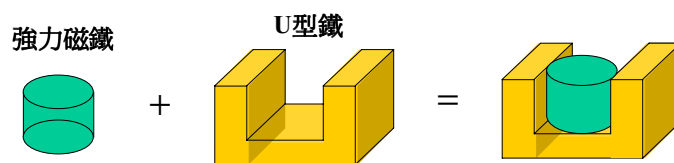


圖 5-2 磁場來源製作

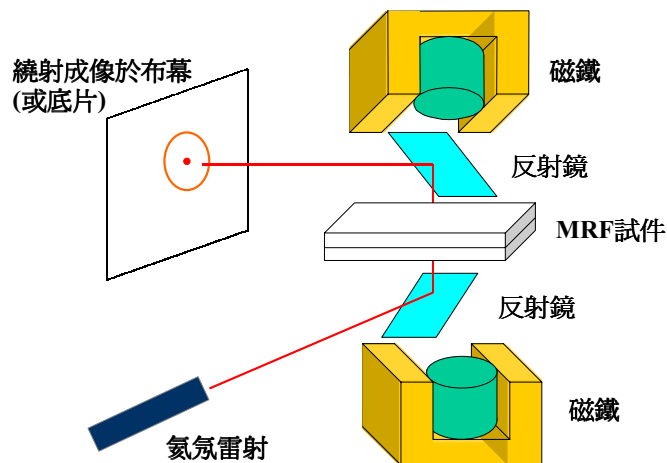


圖 5-3(a) MRF 雷射光繞射實驗架構示意圖

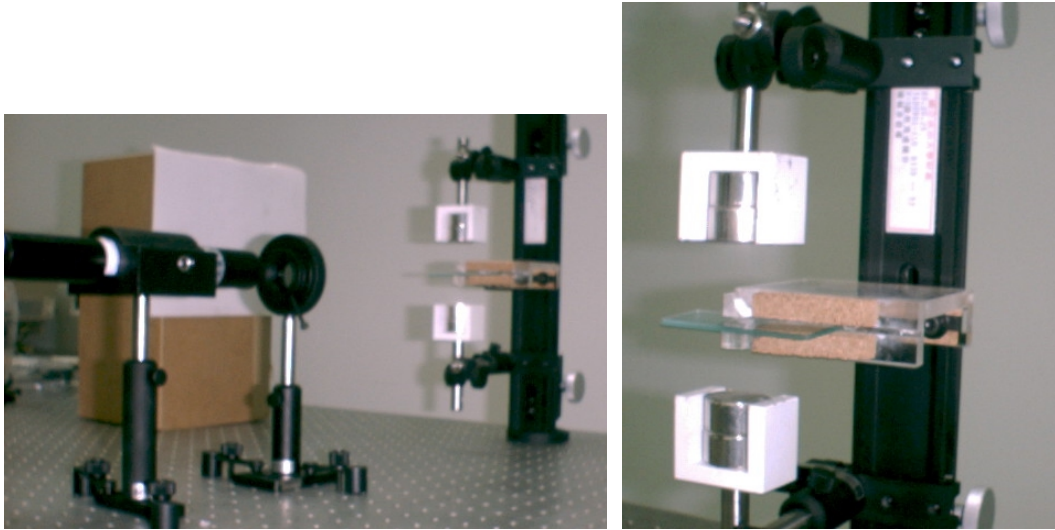


圖 5-3(b) MRF 雷射光繞射實驗架構圖

- 五、將試件置於磁場結構下，以氦氖雷射穿透之，觀察其繞射情形，並紀錄圖形，比較不同厚度、濃度下所造成的影響。
- 六、在磁場作用下，將其中的試件上下兩試件做相對位置的移動，觀察繞射情形的變化，並紀錄造成最清晰及最明顯變化圖形的相對位移。

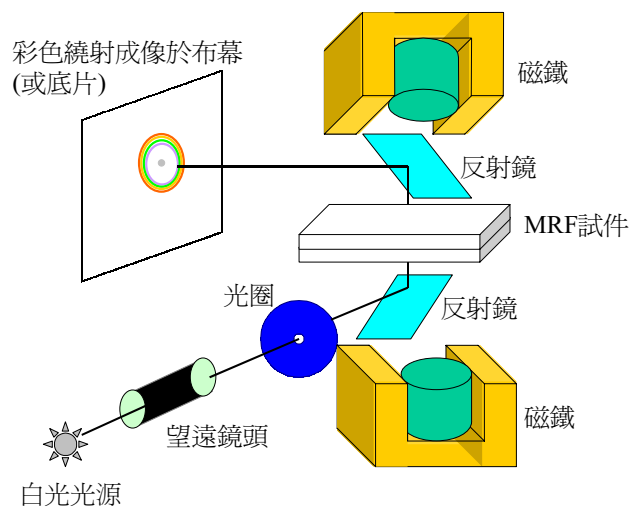


圖 5-4(a) MRF 白光繞射實驗之架構示意圖

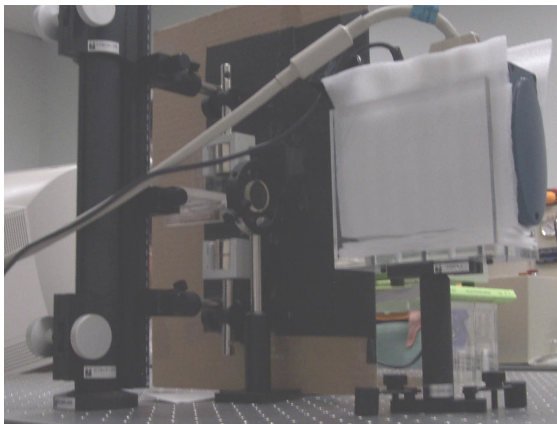
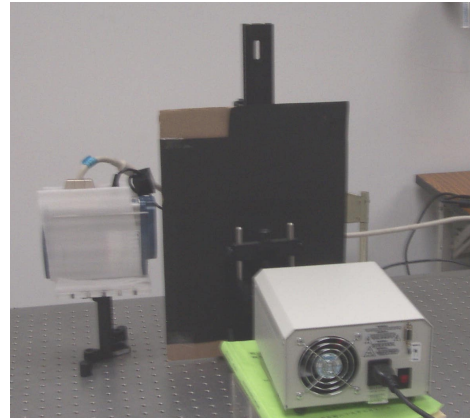
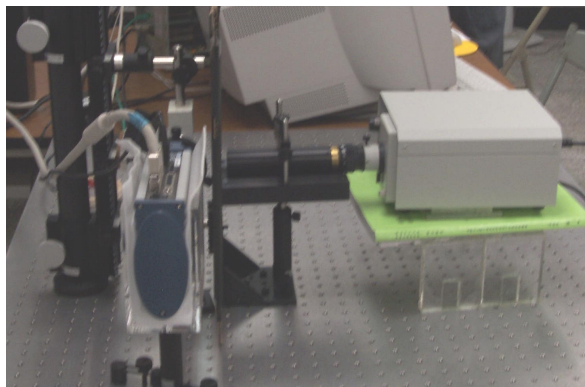
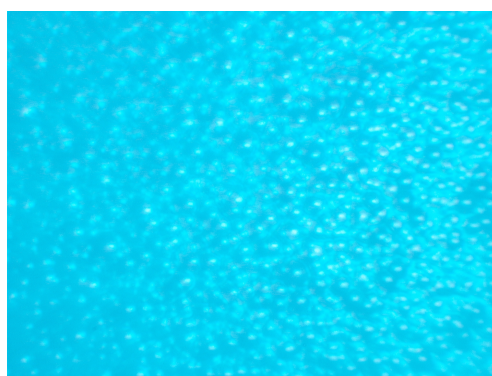


圖 5-4(b) MRF 白光繞射實驗架構

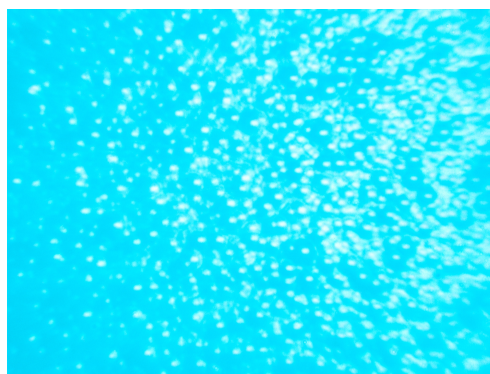
- 七、以白光光源搭配望遠鏡頭製造平行光，藉由光圈控制透光之面積，穿透試件形成彩色繞射圖形，加以證實繞射確由 MRF 在磁場作用下所產生，白光繞射實驗架構如圖 5-4。
- 八、以顯微鏡觀察試件施加磁場前後顆粒排列的情形並以數位相機照相紀錄之。
- 九、經由表面粗度儀測得玻片腐蝕半分鐘深度為 $13.9\ \mu\text{m}$ 、1 分鐘為 $18.1\ \mu\text{m}$ 、2 分鐘為 $25.1\ \mu\text{m}$ 、4 分鐘為 $29.3\ \mu\text{m}$ 。而未腐蝕兩片玻片夾起來的厚度，則視為 MRF 中一粒鐵粉的大小為 $3\ \mu\text{m}$ [2]。

陸、結果

- 一、由圖 6-1，吾人可清楚看出在磁場作用下的確對磁流變體產生影響，鐵粉經由磁鐵吸引而產生較規則的排列，其緻密的空隙足以使雷射及平行白光產生明顯的繞射圖紋。顯微鏡所照出來的圖中，白點是鐵粉間所造成的空隙，比較兩圖，可輕易地看出未加磁場者排列較疏鬆，光點大小不一且不均勻分布，而磁場作用下的空隙較為緻密且分散較均勻，因而可造成繞射。



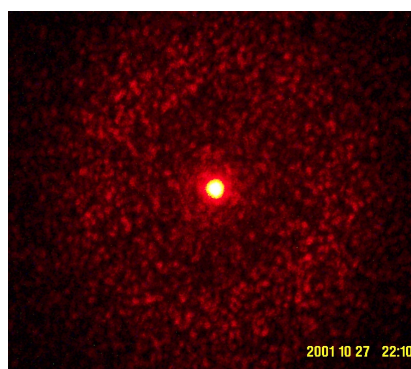
(a) 無磁場作用



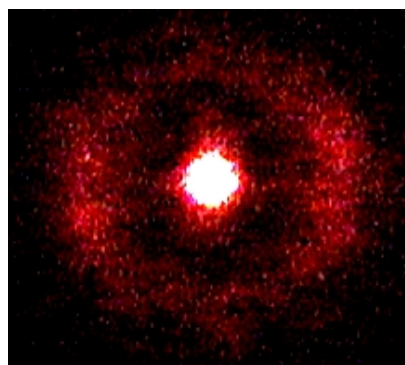
(b) 磁場作用後

圖 6-1 MRF 顯微鏡下架構圖

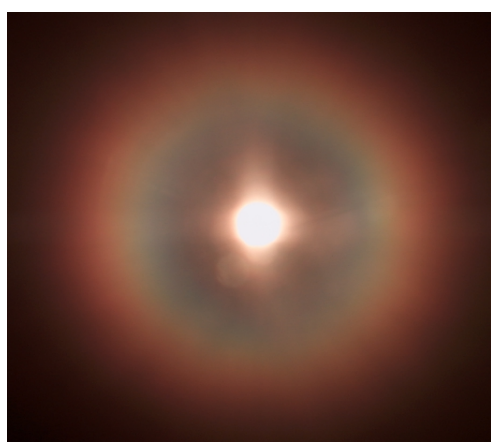
二、由圖 6-2 的得知，在無磁場作用下流體不能產生繞射情形，雷射光打過去只是一片紅光，參考圖 6-2(a)；而磁場作用下則可形成繞射圖紋[圖 6-2(b)]。另以平行白光為光源照射磁場作用下之流體，則可得彩色繞射圖紋[參考圖 6-2(c)]，這更加可以證明繞射現象的產生。圖 6-2(c)為白光光源通過於 MRF 光柵後繞射的光互相干涉產生的圓環狀干涉圖案。中央部分為各色光之疊加，仍為白色。彩色漸層光環則因各色光波長不同，所生成干涉角度亦不同之故。紅光波長最長故在最外圍，向內依序顯示出橙、黃、綠、藍及紫色等。



(a) 無磁場作用



(b) 磁場作用後



(c) 磁場作用後

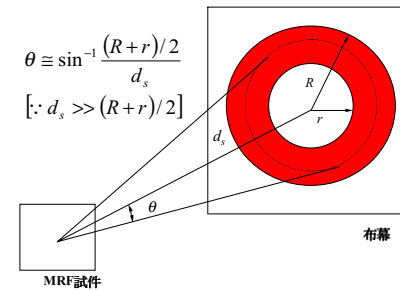
圖 6-2 光通過 MRF 後(c) 磁場作用後繞射圖案(a)及(b)之光源為雷射光、(c)之光源為白光

表 6-1 磁通密度為 400 G，不同磁流變流體厚度、濃度、相對移動與繞射圖形大小之關係

磁通密度：400 G；布幕與試件距離 $d_s = 200$ cm											
濃度	相對移動	未腐蝕 ($3\mu m$)		1/2 分鐘厚度 ($13.9\mu m$)		1 分鐘厚度 ($18.1\mu m$)		2 分鐘厚度 ($25.1\mu m$)		4 分鐘厚度 ($29.3\mu m$)	
		半徑 ¹	相對位移 ²	半徑	相對位移	半徑	相對位移	半徑	相對位移	半徑	相對位移
20%	無	4.72		4.6		4.0		3.9		3.88	
	有	4.0	7.5~10.7	3.0	5.7~6.0	3.0	4.7~6.4	3.0	4.2~6.8	3.0	4.5~5.3
30%	無	5.0		3.95		3.73		3.3		3.25	
	有	4.0	7.7~8.7	4.0	8.5~9.5	3.0	6.8~9.1	3.0	6.7~8.2	3.0	6.8~7.3
40%	無	4.0		3.03		3.24		3.2		2.95	
	有	4.0	0	4.0	6.2~7.7	3.0	0	3.0	0	3.0	0
50%	無	3.03		2.34		1.57		1.62		1.6	
	有	5.0	2.5~3.3	4.0	11.9~14.9	4.0	10.3~14.0	4.0	6.7~8.1	4.0	2.5~3.3

¹ 半徑所指的為繞射圖形之內圈半徑與外圈半徑(如右圖)之平均(取十次量測數據之平均值)，單位為公分。

² 相對位移單位為公釐。相對位移等於 0 表示圖形無明顯變化。



三、表 6-1 為不同磁流變流體厚度、濃度、相對移動與繞射圖形大小之關係紀錄。在數據中吾人可以發現厚度及濃度對繞射圖紋的產生均有一定的影響。其影響相對比較下並非呈線性關係。雷射所打出的繞射光點會有暈開的現象，所以其平均半徑測量中誤差在正負 2 毫米內視為相同。由圖 6-3 可以看出來，厚度超過了一定的值後，對流體所產生的變化程度就變得極小。由圖 6-4，吾人了解濃度對圖形大小的影響比較大，大抵上濃度愈高所呈現的圖形就愈小，變化的程度也較大。

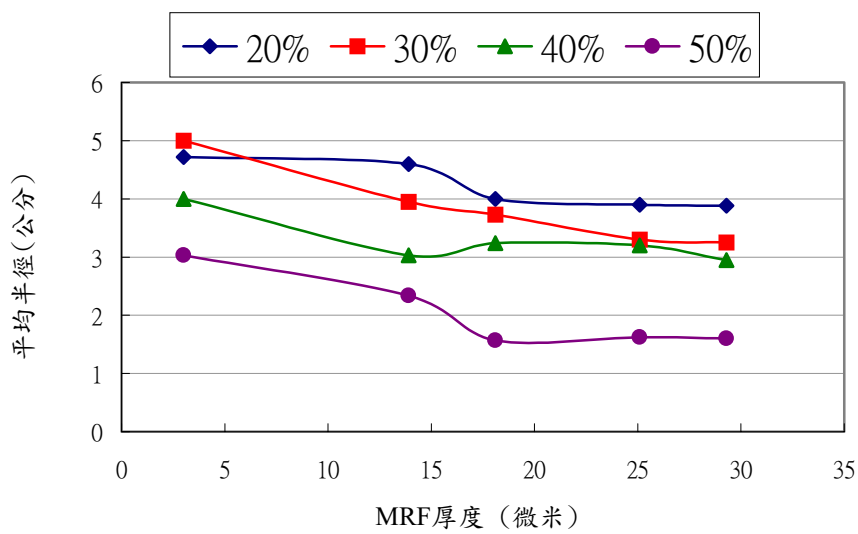


圖 6-3 固定濃度下，腐蝕厚度與圖形大小之關係

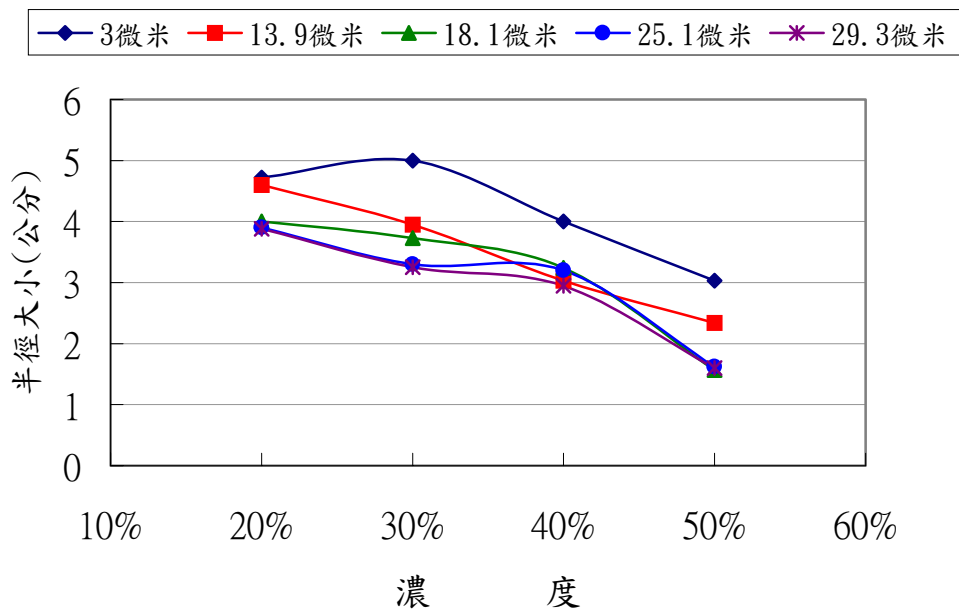


圖 6-4 固定腐蝕時間下，濃度與圖形大小之關係

四、經過計算(參考表 6-1 中附圖)本實驗所產生的繞射角度極小。對於實驗中最大半徑為 5 公分的繞射圖案，其繞射角只有 1.43 度，最小的繞射圖案半徑 1.6 公分，其繞射角更只有 0.46 度，這與文獻[4]上動輒 10 度以上差距甚大，原因在於所用的鐵粉大小不同，但此特性也許更適合應用在以精密微小取勝的高科技產品上。

五、本實驗之另外發現 -

MRF 在磁場中施以外力使上下玻片相對移動後繞射圖紋會產生明顯的改變(圖 6-5)，將其恢復原位後卻不再變回原圖形；而將試件在磁場外相對移動後再次置入磁場中，則又呈現最初的圖形；在移動過程中取其最明顯的圖形然後以游標尺大略測量其玻片間相對位移量(見表 6-1)，很明顯地看到最明顯的變化皆有一定的位移範圍，約在 3 毫米內。不同的濃度會有不同的變化，而同一濃度不同厚度間大都變化成同一圖形。由圖 6-5 可以看到，無論任何流體濃度、試件厚度，在相對移動後，半徑大小皆集中在一定範圍內，有趨向最穩定狀態的現象。

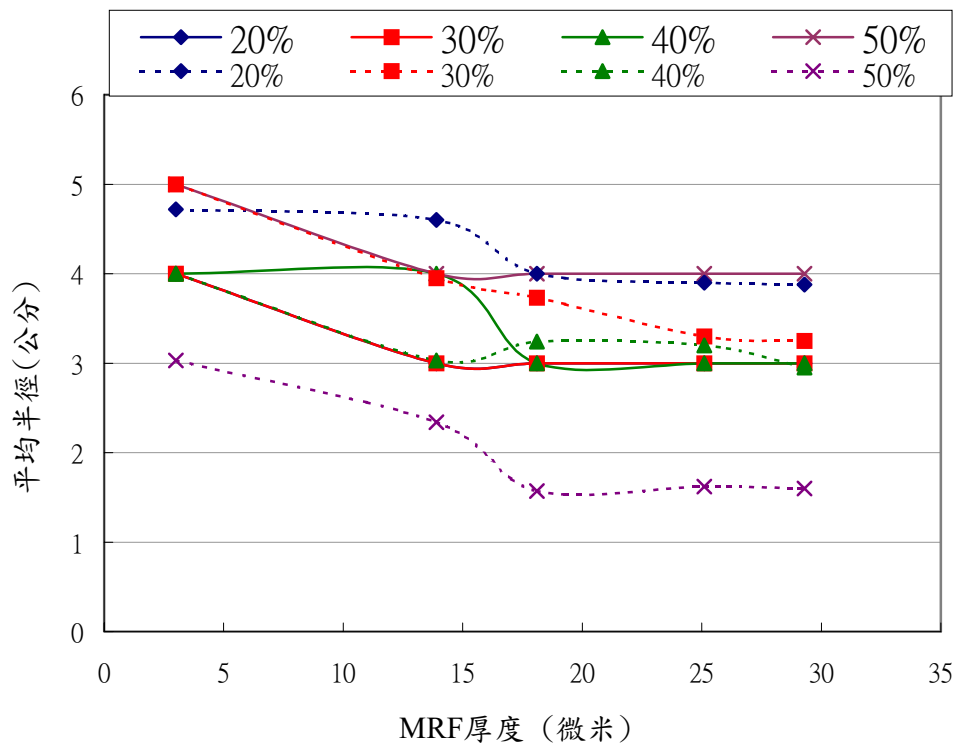


圖 6-5 相對移動後之繞射圖形大小變化
(虛線：無相對移動、實線：有相對移動)

六、吾人可由表 6-1 數據中看到，40%的流體有較穩定的狀態，其繞射圖形半徑大小變化，在不同試件厚度及玻片間之相對移動方面，大都在誤差範圍正負 2 mm 內，因此吾人可以推論 MRF 在某特定濃度內將可呈現最穩定狀態，即不受厚度影響，相對移動後也變為同一大小之繞射圖形，而預估應在 40%附近，但尚需更多的時間與更精密的測量來完成。

柒、討論

- 一、因為本實驗所使用的 MRF 乃商業及工業上所用之產品，鐵粉顆粒直徑約 $3 \mu\text{m}$ [2]，不像一般書籍裡所討論的為 5-10 nm 級的，以致於其特性有些許出入，繞射角度偏小，但仍足以觀察其現象。
- 二、在 400 G 磁場下磁流變流體似乎所形成的晶格排序，有一最大密度，及有一固定長度，見圖 4-3，吾人之證據有三：
 1. 圖 6-3 中發現愈薄的的流體層其圖形半徑愈大，這代表單位面積上 N_s 數目較多(見公式 4-5)，但當厚度超過某一定值後半徑不再縮小。

2. 圖 6-3 中 20%濃度下圖形半徑最大，超過者半徑變小，可能因無法排入晶格者反倒擠入流體中，使單位面積 N_s 數目變少，故半徑變小。
3. 圖 6-5 磁場作用下，用一橫向應切力，對 20%者可能使六角晶格重疊而變長， N_s 變少，而使半徑變小。

吾人以爲最直接證據是由顯微鏡來看，並加上改變強磁場的大小來加以輔助證實，此點尚待後續實驗來證明。

- 三、本擬自己製作出電磁鐵以利於控制磁場大小，但欲達到實驗中所要求的磁力，以吾人現有的資源和技術有所困難，因爲吾人曉得若要看磁場的影響必須相差數百高斯以上，那這變因就無法有較多的取樣；強力磁鐵較難以控制磁場大小爲變因，因兩磁鐵間距離須小而不便測量磁場大小，而且電磁鐵所生的高溫亦會影響其狀態，所以暫不討論磁場大小對其變化。希望將來有辦法可使用現成安全且磁力強大的電磁鐵，如此實驗結果便可以趨於完善。
- 四、由於吾人發現，MRF 在磁場中兩玻片相對移動下，不論濃度厚度皆可產生某種程度的規則變化，因此想把這現象運用於現實生活中，依照它(1)只在磁場下作用；(2)起初不同濃度不同厚度有不同變化；(3)移動後產生規則變化；(4)移動後不恢復原樣；(5)磁場外移動再放入恢復原樣等特性，可依此層層關卡設計光電儀器之類的產品，相信可有不錯的成果。
- 五、由於時間和設備的不足，本欲以兩試件分別在磁場下作用，藉兩者的繞射形成干涉，如此便可由其干涉的微量變化，輕易地計算出 MRF 間的變化，也可準確地測量出 MRF 的相對位移，若設計得當便可完成良好的感測器。
- 六、本實驗所使用的磁流變流體其鐵粉的顆粉爲 $3 \mu\text{m}$ ，價格比磁性流體的 5-10 nm 便宜很多。如果使用鐵粉顆粒較小，MRF 應會有更好的光學效果，而且價格亦不會像磁性流體那麼昂貴，因而更適合使用在量測及光電儀器之設計上。

捌、參考資料

- 一、黃忠良，磁性流體理論應用，復漢，1999.
- 二、J. David Carlson and Mark R. Jolly, “MR fluid, foam and elastomer devices” , Mechatronics, Vol. 10, 555-569, 2000.
- 三、Osama Ashour and Craig A. Rogers, “Magnetorheological fluids: Materials, Characterization, and Devices” , Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 7, 123-130, 1996.

- 四、李淑蓮, 磁性流體薄膜之磁色效應, 國立台灣師範大學碩士論文, 1998.
- 五、H. E. Horng, C. Y. Hong, S. L. Lee, C. H. Ho, S. Y. Yang, and H. C. Yang, “Magnetochromatics resulted from optical gratings of magnetic fluid films subjected to perpendicular magnetic fields” , Journal of Applied Physics, Vol. 88, No. 10, 5904-5908, 2000.
- 六、C. Y. Hong, I. J. Jang, H. E. Horng, C. J. Hsu, Y. D. Yao, and H. C. Yang, “Ordered structures in Fe_3O_4 kerosene-based ferrofluids” , Journal of Applied Physics, Vol. 81, No. 8, 4275-4277, 1997.
- 七、E. Hecht, Optics, 3rd edition, Addison-Wesley, 1998.

評 語

- (1) 本作品係為觀察磁流變流體在磁場作用下的光學性質，藉由實驗探討測得不同濃度及厚度對磁流體薄膜的光繞射產生的影響，作者完成試件製作，設計實驗可行，以數位相機拍為顆粒排列的情形，頗為生動、難得，研究精神可佩。
- (2) 本作品主題為光學性質的探討，若給予時間，繼續研究，在感測器加以改良，當可獲得較為完實準確的成果。