

國立交通大學

機械工程學系

碩士論文

磁性液滴薄層分裂之研究

Breakups of a Thin Ferrofluid Layer

研究生：李奇軒

指導教授：陳慶耀 博士

中華民國九十八年七月

磁性液滴薄層分裂之研究
Breakups of a Thin Ferroluid Layer

研究生：李奇軒

Student : Ji-Shiuan Li

指導教授：陳慶耀

Advisor : Ching-Yao Chen



A Thesis

**Submitted to Department of Mechanical Engineering
College of Engineering
National Chiao Tung University
in Partial Fulfillment of The Requirements
for the Degree of
Master of Science
in
Mechanical Engineering
July 2009
Hsinchu, Taiwan, Republic in China**

中華民國九十八年七月

磁性液滴薄層分裂之研究

研究生：李奇軒

指導教授：陳慶耀

國立交通大學機械工程學系

摘要

磁性流體具有液體的可流動性，又可受到外加磁場的控制，所以在應用上有日新月異的突破。在此研究中磁性流體受到垂直磁場影響下產生介面不穩定現象。本研究利用實驗來進行探討，微小磁性液滴薄膜在垂直磁場的影響作用下，所產生的介面現象及羅森史維格不穩定現象，並在不同的實驗條件下進行磁性液滴分裂的觀察。為了降低磁性液滴與介面的接觸角所以將載具預濕後進行實驗，由於磁性液滴與預濕表面之間的接觸角極小，如同磁性液滴均勻平貼在載具上，並同時使用過飽和及穩定性兩種不同的磁性流體，在受到不同的垂直磁場影響作用下，觀察並比較磁性液滴的分裂情況。利用分裂後的次液滴體積約相同的關係，推算出分裂數 N 與磁性液滴薄膜初始面積 A 的關係式 $N \sim A$ 。實驗的數據與推導之數學式 $d \sim 1/M^2$ 相近，則可以得到磁性液滴半徑與磁化率的平方成反比之關係式。本文並同時探討比較過飽和及穩定性磁性流體在分裂後的次液滴分裂速度及分裂顆數以及結構穩定性之差異性。

關鍵字：微小磁性液滴薄膜，羅森史維格不穩定現象

誌謝

首先，我要感謝家人及女友對我的支持，使我在學業上能夠專心的全力衝刺。再來，要感謝陳慶耀老師，老師除了對我在研究上做指導，也常利用許多機會教育的時候教導我為人處事的道理。在日常生活中，老師更關心實驗室每一位同學的學習情況及生活上是否需要幫助，讓我感覺到能加入複雜性流體實驗室這個大家庭是件很快樂的事情。

在碩士班這兩年當中，不管是在研究上或是生活上所遇到的問題，都要感謝老師及同窗好友，宏元、詒翔的幫助，以及實驗室學姐琦雯，學弟妹們柏瑋、裕盛、啟鳴、佳芬的幫忙，才能使我克服研究上的低潮。

最後要感謝熱流應用實驗室的博士班學長信宏、崇綱、玠超三位學長的大力幫忙，使得複雜性流體實驗室在草創的期間能夠順利成立。並且在實驗分析上提供許多意見使得在實驗數據分析上更加完整。



目錄

摘要	I
誌謝.....	II
表目錄.....	V
圖目錄.....	VI
符號說明.....	VII
第一章 緒論	1
1.1 前言	1
1.1.1 磁性流體介紹.....	1
1.1.2 磁性流體之構造.....	2
1.1.3 磁性流體之製造方法.....	2
1.1.4 磁性流體之特性及應用.....	3
1.2 磁性液滴界面不穩定現象之型態	3
1.3 磁性流體受垂直磁場影響所產生的界面不穩定現象	4
1.4 磁性流體受徑向磁場影響所產生的界面不穩定現象	5
1.5 新型態之混合型界面-Hybrid 不穩定	6
1.6 文獻回顧	6
1.7 研究動機及目的	7
第二章 理論背景與實驗原理	20
2.1 理論背景	20
2.2 實驗規劃	22
2.2.1 實驗參數.....	22
2.2.2 實驗儀器及實驗操作步驟說明.....	22
第三章 結果與分析	29
3.1 預濕平板上進行實驗	29
3.1.1 分裂情況.....	29
3.1.1.1 過飽和磁性流體於垂直磁場為 765 Oe 之分裂情況..	29

3.1.1.2	穩定之磁性流體於垂直磁場為 765 Oe 之分裂情況..	31
3.1.1.3	穩定之磁性流體於垂直磁場為 676 Oe 之分裂情況..	33
3.1.1.4	穩定之磁性流體於垂直磁場為 588 Oe 之分裂情況..	34
3.1.2	綜合討論.....	34
3.1.2.1	磁性液滴薄膜在預濕平板上的分裂情況.....	34
3.1.2.2	磁性液滴薄膜在不同磁場大小下的分裂情況.....	35
3.1.2.3	過飽和之磁性流體與穩定之磁性流體.....	35
3.1.2.4	相同磁場大小影響下過飽和及穩定磁性流體之差異.	36
3.2	物理分析.....	36
3.2.1	接觸角 θ	36
3.2.2	穩定性討論.....	37
3.2.3	液滴原始面積與分裂顆數關係式.....	39
第四章	結論.....	57
參考文獻	58



表目錄

表 1 磁性流體的製造方法	19
表 2 磁性流體的相關參數	28
表 3 實驗數值表	56



圖目錄

圖 1-1 磁性流體構成圖	9
圖 1-2 (a)產生均勻垂直磁場之 Helmholtz 線圈組; (b)產生線性徑向磁場之反 Helmholtz 線圈組	10
圖 1-3 Hele-Shaw cell 流場	10
圖 1-4 磁性液滴與環境空氣界面產生之迷宮型指狀化不穩定現象	11
圖 1-5 磁性液滴於可互溶界面間產生之迷宮型指狀化不穩定現象	12
圖 1-6 較大型液滴下界面會產生二次波型	13
圖 1-7 羅森史維格不穩定現象	13
圖 1-8 旋轉磁場及垂直磁場作用下所產生介面演變	14
圖 1-9 磁性液體在 Hele-Shaw cell 流場中受垂直磁場及切線方向磁場的模擬	14
圖 1-10 磁性液滴受徑向磁場梯度之吸引	15
圖 1-11 羅森史維格結構物介面間呈現六角形的形狀	16
圖 1-12 大型容器內可發現許多不穩定的單獨波存在	16
圖 1-13 磁性流體表面趨勢的不穩定現象	17
圖 1-14 觀察分裂情況並將分裂的情況做分類	18
圖 2-1 實驗架構圖	23
圖 2-2 實驗示意圖	23
圖 2-3 實驗規畫圖	24
圖 2-4 可變焦微觀察量測系統	25
圖 2-5 PR9323 可程式化電源供應器	26
圖 2-6 桌上型高斯計	26
圖 2-7 線圈之正向磁場側向分佈情形	27
圖 2-8 EMG901 飽和磁化曲線圖	27
圖 3-1 平板已預濕之磁性液滴且直徑為 1740 μm 之分裂情況	40
圖 3-2 平板已預濕之磁性液滴且直徑為 2250 μm 之分裂情況	41

圖 3-3 平板已預濕之磁性液滴且直徑為 2743 μm 之分裂情況.....	42
圖 3-4 平板已預濕之磁性液滴且直徑為 3110 μm 之分裂情況.....	43
圖 3-5 平板已預濕之磁性液滴且直徑為 1794 μm 之分裂情況.....	44
圖 3-6 平板已預濕之磁性液滴且直徑為 2276 μm 之分裂情況.....	45
圖 3-7 平板已預濕之磁性液滴且直徑為 2740 μm 之分裂情況.....	46
圖 3-8 平板已預濕之磁性液滴且直徑為 3098 μm 之分裂情況.....	47
圖 3-9 平板已預濕之磁性液滴且直徑為 1741 μm 之分裂情況.....	48
圖 3-10 平板已預濕之磁性液滴且直徑為 2330 μm 之分裂情況.....	49
圖 3-11 平板已預濕之磁性液滴且直徑為 2741 μm 之分裂情況.....	50
圖 3-12 平板已預濕之磁性液滴且直徑為 3083 μm 之分裂情況.....	51
圖 3-13 預濕平板之磁性液滴且磁場為 588Oe 之分裂情況.....	52
圖 3-14 預濕平板之磁性液滴且磁場為 676Oe 分裂後外圍次液滴坍塌情況	53
圖 3-15 預濕平板之磁性液滴且磁場為 765 Oe 分裂後外圍次液滴坍塌情況	53
圖 3-16 預濕平板之過飽和磁性液滴且磁場為 765 Oe 分裂後之次液滴分裂 情況.....	53
圖 3-17 預濕平板之磁性液滴原始面積與分裂後次液滴顆數關係圖	54
圖 3-18 預濕平板之磁性液滴原始面積與分裂後次液滴大小關係圖	54
圖 3-19 Young's Equation 介面與表面張力關係.....	55
圖 3-20 磁性液滴示意圖	55
圖 3-21 磁性液滴在預濕平板上之示意圖	56

符 號 說 明

D	磁性液滴直徑
A	磁性液滴面積
h_0	磁性液滴中心高度
d_c	中心液滴直徑
d_c	次液滴直徑
V_{cap}	磁性液滴總體積
V_c	中心液滴體積
V_s	次液滴體積
H	磁場強度
M_s	飽和磁化率
η	黏滯度
ρ	密度
θ	接觸角
γ^{sl}	液體與載具平板的介面張力
γ^{sv}	載具平板與空氣的表面張力
γ^{lv}	液體與空氣間的表面張力
R	曲率半徑
N	分裂顆數

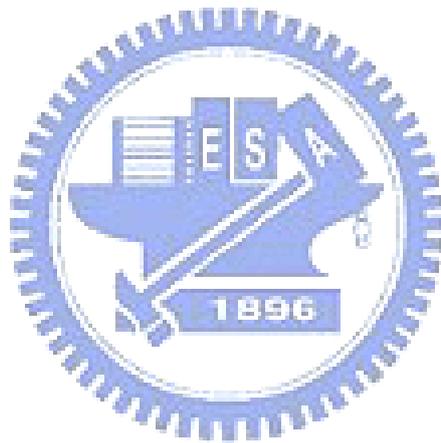


p_m 磁力

p_s 表面張壓

μ_0 導磁率

γ 表面張力



第一章 緒論

1.1 前言

1.1.1 磁性流體介紹

鐵磁性流體(ferrofluids，或簡稱為磁性流體)為一人工合成流體，此流體組成，包含奈米級鐵磁性粒子(氧化鐵粒子)、表面活性劑(surfactant)與載基流體(base fluid)。基本上，磁性流體最主要的製造方法是經由化學合成的方法，將表面活性劑依附在奈米級鐵磁粒子上面，並將其均勻溶解於水性或油性之載基流體中，使其同時具有磁性而且可流動之雙重特性。而利用此特性，有別於一般流體之較不可操控性，磁性流體則可利用外部磁場加以控制流體流動，故而磁性流體通常亦被稱為智慧型流體或功能性流體，且因其奈米級粒子尺寸，可充分使用於相關先進生物科技與微奈米流體機械系統。

現階段成熟之磁流體一般應用主要在於三大部分:(a)太空科技、(b)阻尼機制及(c)軸封技術。於太空中，因受無重力因素影響，傳統利用自然對流所設計之熱傳導機構(如熱管)無法有效應用，因而可使用磁性流體，並以外加磁場替代重力場產生對流效應。再者一般而言，磁流體之黏滯度會隨著外加磁場之存在而顯著增加，在常見的阻尼器中可藉由局部的磁場強度，來增大黏性效應，因而被廣泛應用為阻尼機制。而於軸封方面，則著眼於磁流體可為外加磁場所支持而附著於軸壁，無須如一般流體需要容器支撐，即可有效分隔軸封。在其他未來應用方面，磁流體粒子之奈米級尺度及其於溫度變化下所產生之磁力變化，亦可運用在新一代之電子冷卻系統，配合新近發展之微流道機構，可將原本於微流道中用於散熱用之工作流體加置磁性粒子，而利用磁性粒子吸熱產生之磁化現象，推動流體循環以進行熱量傳輸，達到散熱效果。同時磁性粒子因其優異之生物相容性，及其奈米特質，亦已被應用於生物醫學技術上，如細胞分離、精準釋藥與腫

瘤細胞之追蹤與治療技術等。

欲充分進行上述磁性流體之工程應用，必需仰賴對磁性流體操控性之充分了解，同時除了工程應用外，磁性流體受磁場影響下之複雜界面變化，於單純物理或藝術觀點而言，亦充滿研究價值。故而對磁性流體界面之研究，於磁性流體於 1960 年代被合成成功後，一直為研究人員努力之重要項目，其中對磁液滴之界面變化更是研究之焦點。本研究即專就一微小磁性流體液滴，受一均勻垂直磁場下之界面型態變化進行探討，並試圖以不同接觸條件及流體組合，操控其界面型態變化。

1.1.2 磁性流體之構造

磁性流體是由強磁性膠粒子、溶媒、界面活性劑所組成(如圖 1-1)，而磁性流體中的強磁性膠粒子的大小為 $0.01 \mu m$ ，為單磁區構造，如只把強磁性超微粒子溶入液體中，強磁性超微粒子間會以磁引力相吸引，凝聚沉澱，所以磁性流體才會以界面活性劑的分子包覆強磁性超微粒子表面，使強磁性超微粒子間不會太接近。而強磁性超微粒子因溶媒分子的不規則衝撞進行布朗運動，不會沉澱，所以藉由界面活性劑的功能和布朗運動，磁性流體成為非常安定的膠體溶液。依強磁性膠體粒子的不同，磁性流體分別稱為氧化物磁性流體(鐵氧體之氧化物磁性體)和金屬磁性流體(鈷之類金屬磁性體)，氧化物磁流體又依溶媒種類決定性質和作用。

1.1.3 磁性流體之製造方法

磁性流體的製程則可分為兩個階段，第一階段是把強磁性物質變成超微粒子或加工成超微粒子形狀的製程；第二階段是為防止強磁性超微粒子凝集，以介面活性劑包住強磁性超微粒子而分散的製程。磁性流體的製造方法除了粉碎法外，還有火花侵蝕法、共沉法、熱分解

法、真空蒸發法、紫外線分解法及電著法(如表 1)。

1.1.4 磁性流體之特性及應用

一般而言導磁體都是固體，如鐵、鈷、鎳及其合金，而磁性液體卻是液種液態材料，既有液體的可流動性，又有導磁體的物理特性，可以利用外加磁場來控制，物理、化學和機械方面成為熱門的研究[1-2]。隨著科技的日新月異，磁性流體被應用的地方也越來越多，而且應用的範圍相當廣泛[3-7]，如應用在軸承的密封、塵封、氣封、液封等方面，都是利用磁性流體軸封不論靜止或轉動，都可是洩漏量為零。磁性流體的磁光效應可用於感測器，磁性流體的磁光效應是指使磁性流體成薄膜而讓光通過時，施加於磁性流體薄膜的磁場會造成很大的磁光效應，此效應可應用在磁場感測器、光電元件上。磁性流體也可應用在醫療上，利用制癌劑混入磁性流體製成乳液，注入血管，從外部以磁場把含制癌劑的乳液導入患部，以制癌劑釋放藥性治療病變的癌細胞，因制癌劑也會對正常的細胞有強力作用，所以制癌劑最好只集中於癌細胞患部，利用磁性流體可藉由磁場力集中癌細胞患部，而磁性流體對人體無不良影響，可由人體排出。其次在醫療的應用為 X 光的顯影劑，通常胃癌檢診用 X 光造影劑是用含 BaSO₄ 的糊狀飲料。但是以鐵氧體為強磁性膠體粒子的磁性流體，因鐵氧體膠體粒子會吸收 X 光，所以磁性流體可成顯影劑，但此時只飲用或塗用磁性流體，未利用磁性流體的磁性質。

1.2 磁性液滴界面不穩定現象之型態

利用一線圈組以 Helmholtz 或反 Helmholtz 方式通以電流，以產生均勻垂直磁場或線性徑向磁場，使微小磁性流體液滴界面產生變化。若將上述之線圈組施以相同方向之電流(Helmholtz 方式，圖 1-2)，則可於平板上產生一均勻向上之垂直磁場。於傳統磁性流體

受一均勻垂直磁場影響下之界面型態研究中，可分為二大類型：(1)突峰型-即所謂 Rosensweig 不穩定；(2)迷宮型-即所謂 Labyrinthine 不穩定。上述突峰型與迷宮型二不穩定型態，因不管於發生狀況或其力學機制均不相同，故而被歸類分屬二不同研究課題。近期則有研究利用混合界面條件，發展一簡單之實驗設計，使此二不穩定之型態同時發生，而產生(3)混合型-Hybrid 不穩定。以下謹就此三大類型進行介紹。

1.3 磁性流體受垂直磁場影響所產生的界面不穩定現象

在現今的科學界中，磁性流體的研究漸漸引起學者的興趣，由於磁性流體具有液體的可流動性，又可受到外加磁場的控制，打破了傳統水往下流的觀念，所以在應用上面也有日新月異的突破，然而在於磁性流體受到垂直磁場的作用下，所產生的相關物理機制，也越來越被受矚目，在此研究中磁性流體受到垂直磁場影響下所以產生的介面不穩定現象，成為了對磁性流體不可獲缺的相關研究。

磁性流體受垂直磁場影響所產生的介面不穩定現象，其中介面不穩定現象之一為複雜性指狀化現象，當磁性流體液滴被限制在近似 2D 的 Hele-Shaw cell 流場(如圖 1-3)中並施加均勻垂直磁場，產生介面互相競爭的指狀物，這種現象被稱為複雜性指狀化現象[8-11]。於傳統研究此迷宮型不穩定現象均著眼於不可互溶流體界面(如磁性流體液滴於環境空氣)[12]，此一典型之不可互溶界面現象如下圖 1-4 所示[13]。此迷宮式界面不穩定現象之典型特徵乃在於形成細長之指狀化細絲，並進行曲折與分叉之二次不穩定現象，且指狀化細絲間因具磁極而不產生接觸合併。

近年來，因注重微流體混合之研究及實驗技巧之進步，此一於可

互溶界面間之類似迷宮型不穩定現象方開始被重視並研究。圖 1-5 為一典型微小液滴(直徑約 1.8mm)於一可互溶環境中之類似迷宮型不穩定現象[14]。於此一可互溶情形下，因無明顯表面張力之作用，其界面與上述傳統不可互溶之迷宮型不穩定現象呈現非常不同特徵。其界面指狀化細絲並較不呈細長，且數量明顯增多。同時可互溶界面實驗亦發現，於較大型液滴下，除界面會產生指狀化之細絲外，其整體界面亦會產生二次波型(如圖 1-6 所示原始直徑 24.6mm 之液滴[15])。

在此本研究的課題是針對另一種介面不穩定現象來做討論，我們所討論的是羅森史維格不穩定現象[16-17]，它是一種介面不穩定現象，當我們將磁性流體放置在載具上，並施以垂直磁場給它，因為此時磁性流體並無加蓋設限，磁性流體受到磁場影響，產生沿垂直磁場方向的垂直拉力，使磁性流體受到磁化，介面產生突起的三維針狀結構物(如圖 1-7)，這種三維結構物就稱之為羅森史維格結構物，這種現象被稱為羅森史維格不穩定現象，也有很多學者進行實驗或使用數值模擬來探討介面不穩定的情形，如 Rhodes 將磁性流體放置於 Hele-shaw cell 流場中，磁性流體受到旋轉磁場及垂直磁場作用下所產生的介面演變不穩定現象[18](如圖 1-8)，另外一些學者使用數值模擬的方法，研究磁性流體在 Hele-shaw cell 流場受垂直磁場及切線方向磁場影響所產生複雜性指狀化現象這方面也有不錯的成果(如圖 1-9) [19]。經物理的探討羅森史維格不穩定現象，是由重力場、磁場及表面張力三者相互競爭所產生的三維結構物。

1.4 磁性流體受徑向磁場影響所產生的界面不穩定現象

若將電磁線圈組施以相反方向之電流(反 Helmholtz 方式)，則可於平板上產生一線性之徑向磁場。則磁性液滴受徑向磁場梯度之吸引，會產生如圖 1-10 所示一輻射型界面不穩定現象[20]。於此線性磁

場強度下，磁場對此磁性液滴施加之向外徑向磁力為與其徑向距離成正比關係。此與徑向距離成正比關係之徑向力與旋轉塗覆中利用旋轉產生與徑向距離成正比關係之離心力具相同之力學機制。液滴界面受一徑向力吸引，使液滴界面往外伸展，為因應面積之展延，液滴厚度則產生薄化。然而因徑向吸引力隨著徑向距離加大而增劇烈，於超過某展延半徑後，則界面開始產生不穩定現象。

1.5 新型態之混合型界面-Hybrid 不穩定

傳統上，上述突峰型與迷宮型二不穩定型態，因不管於發生狀況或其力學機制均不相同，故而被歸類分屬二不同研究課題。而此二不穩定型態則可改良上述之可互溶迷宮型不穩定實驗條件，使此二不穩定之型態同時發生，且因此二不穩定型態之相互影響，亦產生有別於其個別發生時之現象[14,21]。一開始液滴仍呈現突出峰型不穩定之單1突出峰，然而隨時間增加，此突出峰基部與可互溶流體混合擴散影響，致使磁力減弱無法平衡重力與表面張力，故而突出峰高度隨時間遞減直到完全沒入可互溶流體層，如圖 1-10 上列之側視圖所示。於此情形下，可互溶流體層與外空氣界面之表面張力提供部分類似上平板之限制，故而於平面上亦產生迷宮型不穩定現象，而此現象亦因突出峰高度遞減，而產生類似於額外注入流體之徑向對流，使界面分裂不穩定更為明顯。

1.6 文獻回顧

磁性流體問世至今，已有相當多的研究及應用被討論，而羅森史維格介面不穩定現象也是當今被探討的現象之一，在此提出三例最具代表性的研究，其一是在西元 2001 年，麻省理工的學者 Zahn[22]，他在一大型的載具上放置磁性流體，此磁性流體具有大面積及厚度，當給予它垂直磁場後，磁性流體受到垂直磁場的影響下，產生了羅森

史維格結構(如圖 1-11)，在圖中可明顯觀察到在兩個相鄰的羅森史維格結構物介面間是呈現六角形的形狀，這些六角形的形狀，經學者的研究發現，這種情形跟磁性流體最小表面張力有相當大的關係存在。而另一個代表性研究是 Rither and Barashenkov[23]等學者，在大型的載具上放置大量的磁性流體，使磁性流體擁有大面積及大厚度的條件來進行實驗，在施加垂直磁場並控制整個磁場強度，讓磁場維持在相同瞬間磁場下，在大型磁流體介面下(如圖 1-12)可以明顯地發現一些不穩定的單獨波，這是之前研究所沒有發現的。在 2007 年 Gollwitzer、Matthies、Rither、Rehberg and Tobiska[24]等學者，利用 X 射線技術觀測磁性流體表面趨勢的不穩定現象，同時透過有限元素法得到磁場對於磁性流體表面趨勢之數值模擬，在圖 1-13 中觀察到在連續增加的磁場中，因為磁場的不均勻現象使得羅森史維格結構物由容器邊緣逐漸往中心發生。並同時用數值方法模擬羅森史維格三維結構物，如圖 1-14。2008 年 Zhi-Yuan Chang[25]，從實驗中探討微小磁性液滴薄膜在垂直磁場的影響作用下，同時在不同介面條件下進行磁性液滴分裂的觀察並討論所產生的介面現象及羅森史維格不穩定現象。在觀察分裂情況的同時將分裂的情況做分類(如圖 1-15)。

1.7 研究動機及目的

磁性流體具有液體的可流動性特性，又可受外加磁場來控制，所以被稱為智慧型流體，不僅如此，磁性流體的比重、表面張力、黏性、光學分異性等，都會因為外加磁場的改變而有所不同，所以得以應用的範圍相當廣泛，而在現今的相關研究，大多是針對較大的磁性液體表面積，或是大尺寸的磁性液體來進行相關研究，相對的，在微機電的時代來臨，磁性流體面臨到微尺寸的應用為首要的問題，如何將微米等級的磁性液滴做均勻分割，又如何以非侵入式的方法，來將液滴分離並將它個別收集，這成為我們這研究最主要的課題之一。

然而在未來應用上，如果可以利用非侵入式的方法，使液滴進行均勻分離，那在生物醫療應用上，可以利用磁性流體表面附著化學官能基，來進行檢體的分離及檢測，在進行藥物治療時，使液滴再分裂成更微小液滴，進入微血管進行治療等，在微機電領域，可以設計非機械式制動器，或非機械式控制閥等等，我們如果將磁性流體更微小化，可以應用的範圍更可大大延伸。本研究從磁性液滴與環境的介面性質來做研究，使用不同的方法來研究液滴分裂的差異性，並討論其物理現象，找出控制液滴分離的最佳方法。



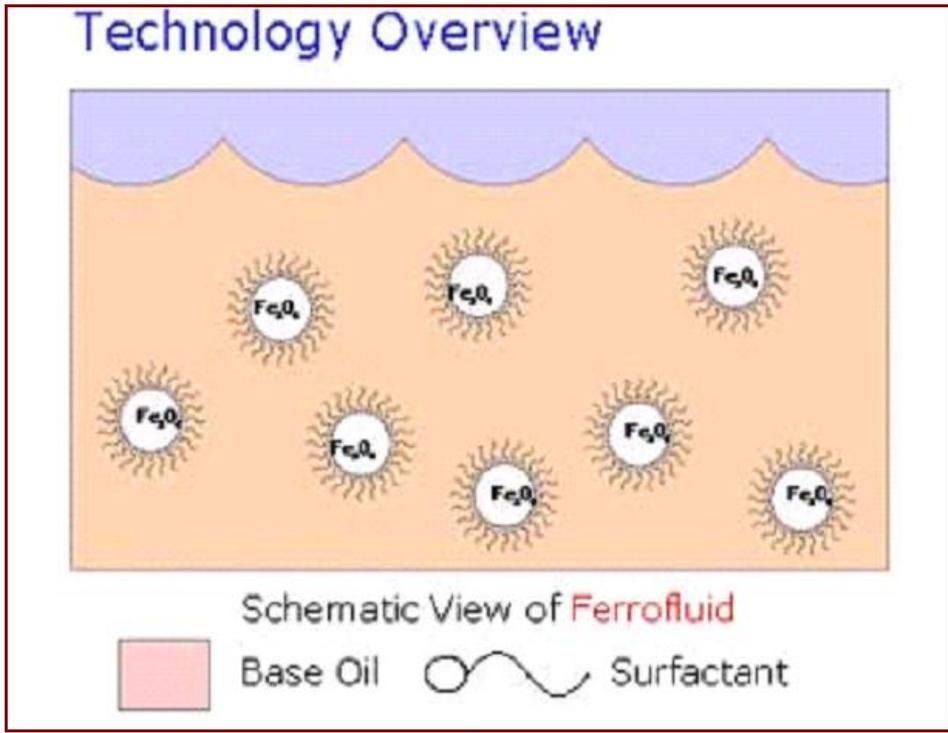


圖 1-1 磁性流體構成圖

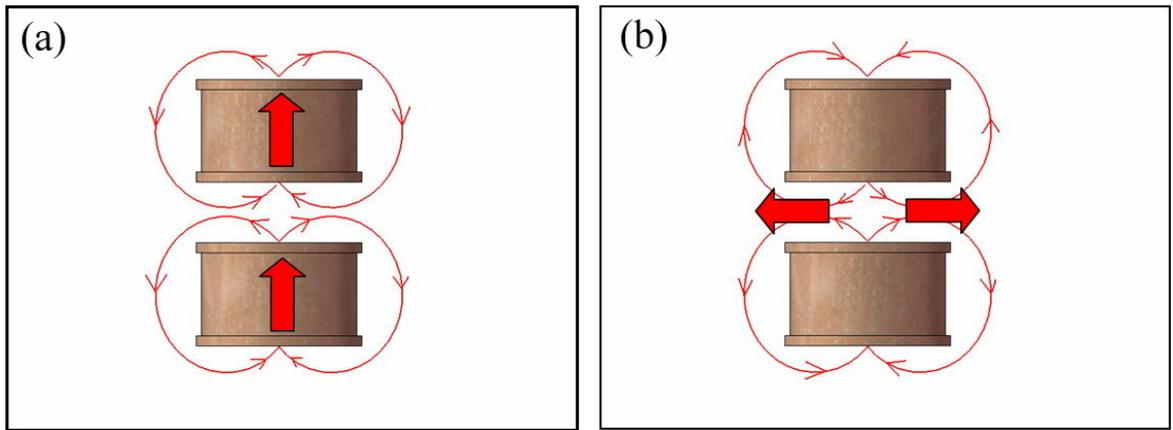


圖 1-2 (a)產生均勻垂直磁場之 Helmholtz 線圈組;
 (b)產生線性徑向磁場之反 Helmholtz 線圈組

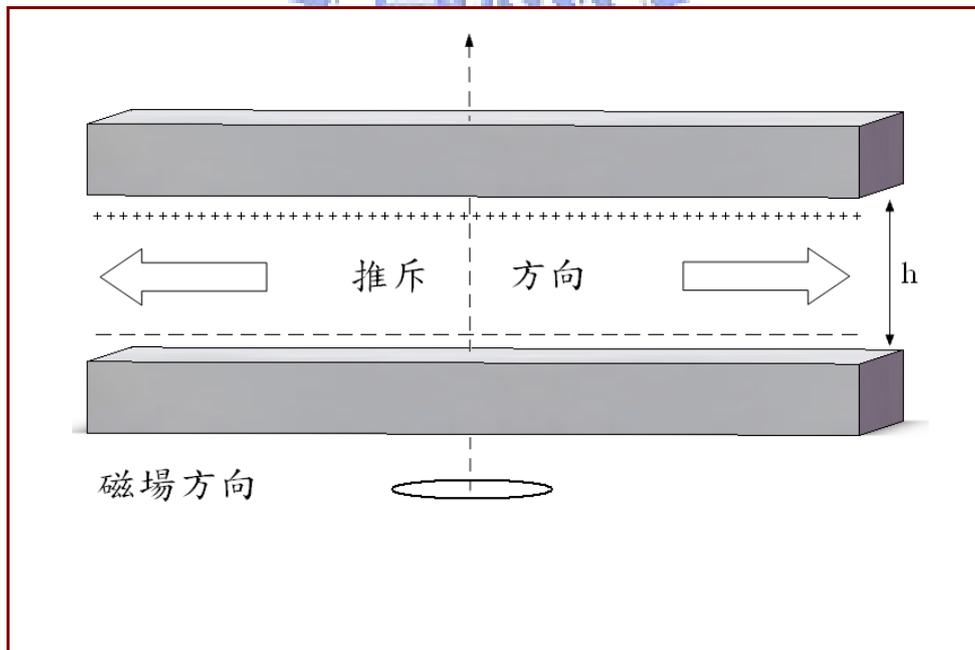


圖 1-3 Hele-Shaw cell 流場

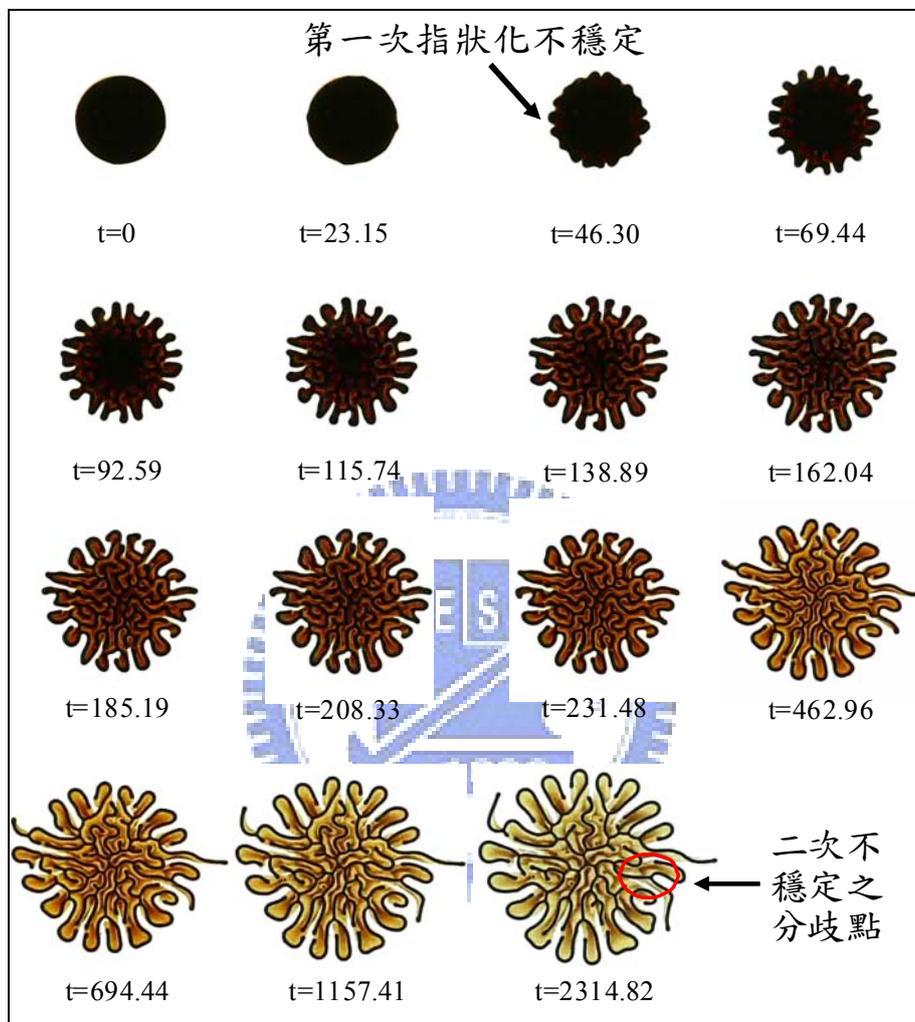


圖 1-4 磁性液滴與環境空氣界面產生之迷宮型指狀化不穩定現象

[13]

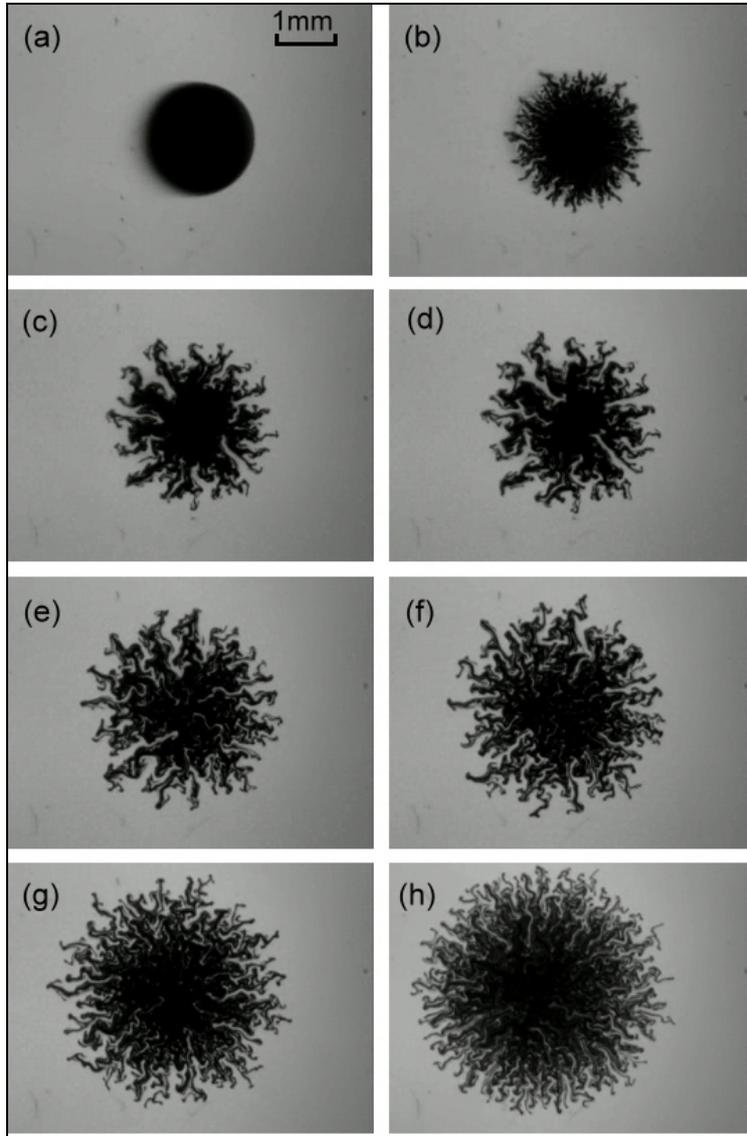


圖 1-5 磁性液滴於可互溶界面間產生之迷宮型指狀化不穩定現象

[14]

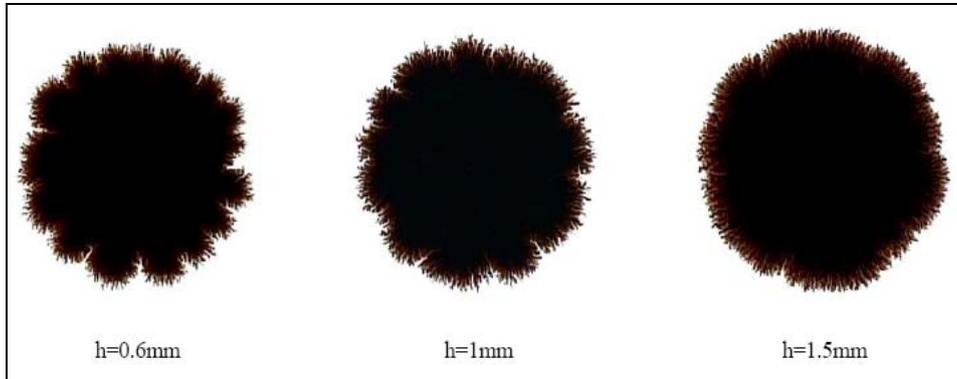


圖 1-6 較大型液滴下界面會產生二次波型[15]



圖 1-7 羅森史維格不穩定現象[17]

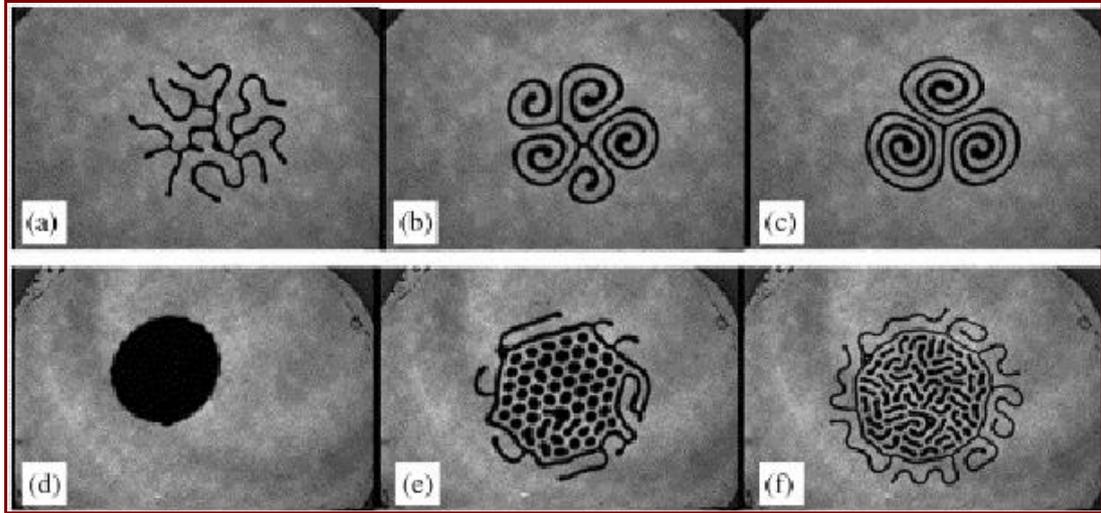


圖 1-8 旋轉磁場及垂直磁場作用下所產生介面演變[18]

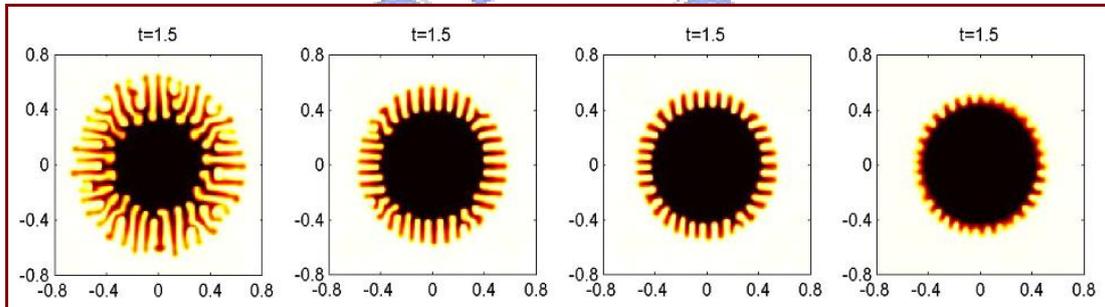


圖 1-9 磁性液體在 Hele-Shaw cell 流場中受垂直磁場及切線方向磁

場的模擬[19]

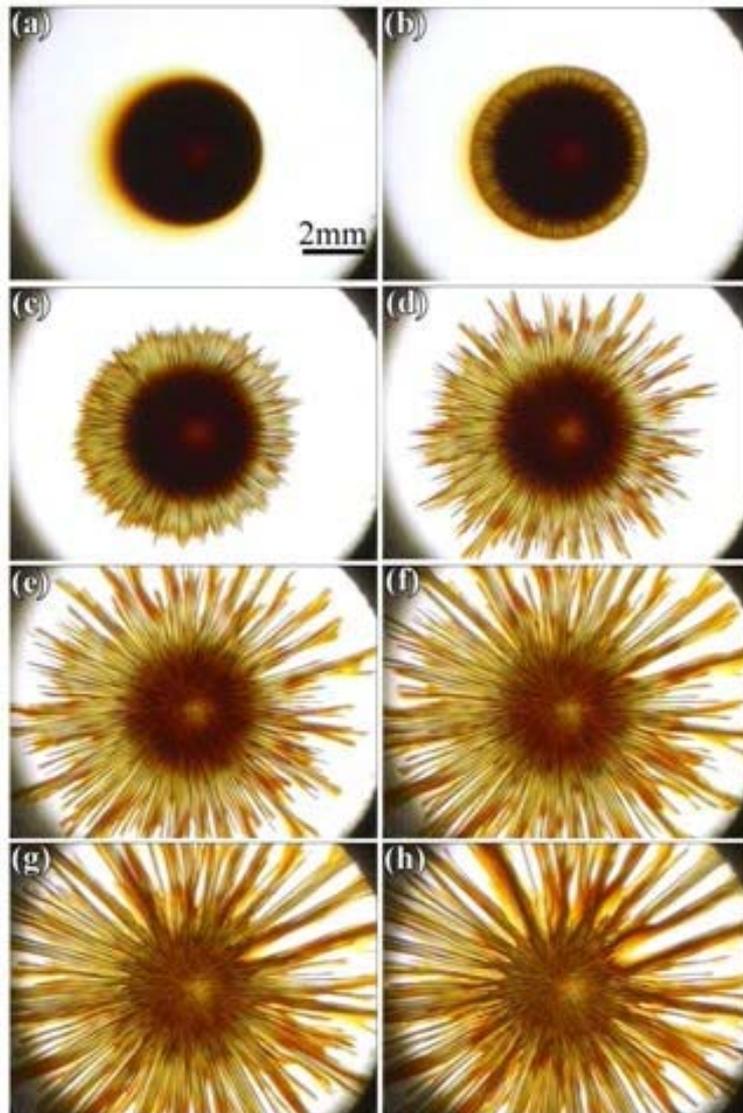


圖 1-10 磁性液滴受徑向磁場梯度之吸引產生之新型態之輻射型界面不穩定現象[20]

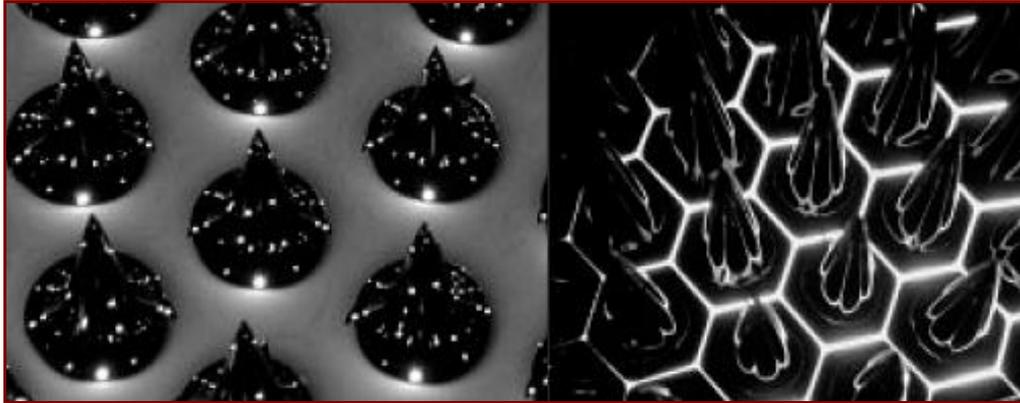


圖 1-11 羅森史維格結構物介面間呈現六角形的形狀[22]



圖 1-12 大型容器內可發現許多不穩定的單獨波存在[23]

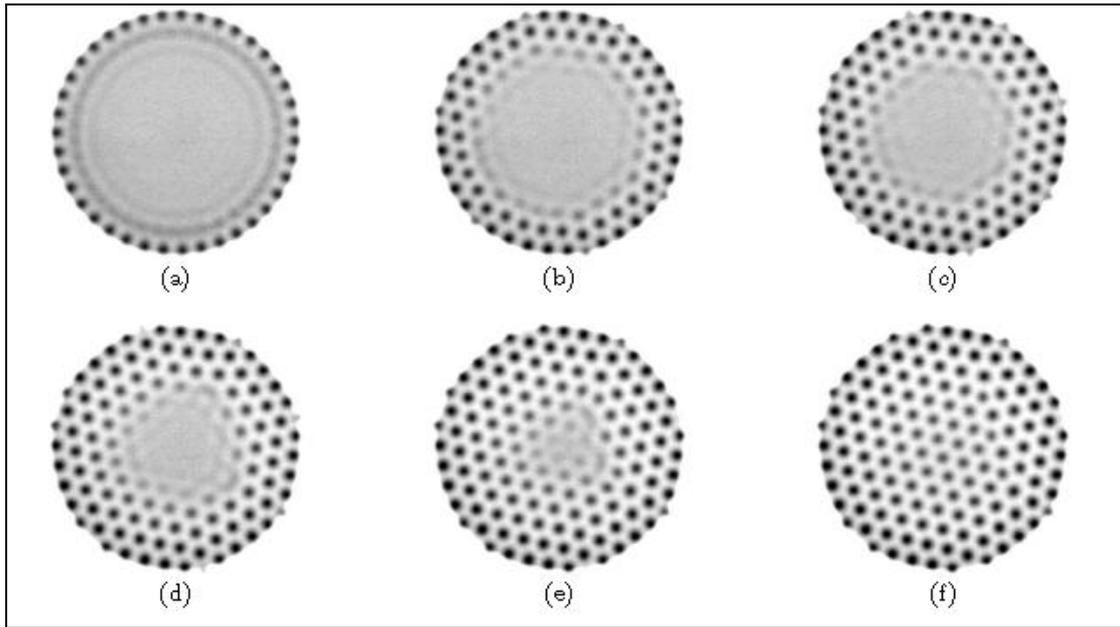


圖 1-13 磁性流體表面趨勢的不穩定現象[24]

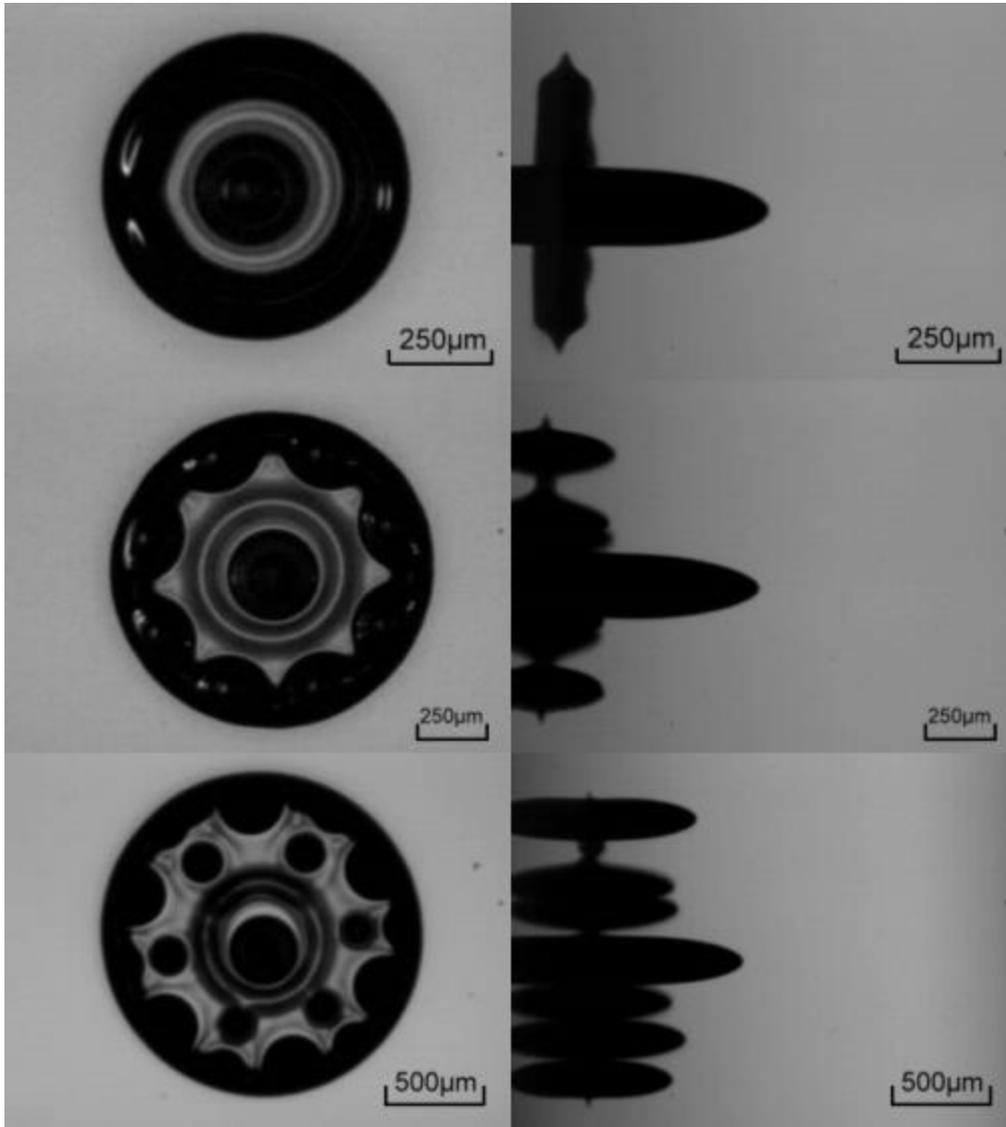


圖 1-14 觀察分裂情況並將分裂的情況做分類[25]

表 1 磁性流體的製造方法

粉碎法	將強磁性磁鐵礦在粉碎機中粉碎成超微粒子，再加介面活性劑，安定分散於溶媒，形成磁性流體。
火花侵蝕法	把金屬電極插入液體中，在液體放電，使電極金屬以膠體粒子形溶入液體中，亦即火花放電使電極金屬蒸發，在液體中急冷，成為超微粒子。
共沉法	用第一鐵鹽與第二鐵鹽在水中反應時，會產生磁鐵礦微粒子，即可生成磁性流體。
熱分解法	把化學上不安定的有機金屬熱分解，析出金屬單體，此時析出的金屬成為超微粒子析出溶媒中，作為磁性流體。
真空蒸發法	在抽真空的鐘罩中，把金屬加熱蒸發，在真空中急冷，作成金屬的超微粒子，形成磁性流體。
紫外線分解法	以高能量光(紫外線)取代熱分解，分解有機金屬，作為金屬的超微粒子，形成磁性流體。
電著法	把水銀為陰極裝入 FeSO ₄ 水溶液，通電流而溶解，於是 Fe 離子析出，此時攪拌水銀析出超微粒子，分散於水銀中，預先使錫溶於水中，阻止鐵超微粒子成長，生成安定的水銀溶媒鐵膠體粒子磁性流體。

第二章 理論背景與實驗原理

實驗場地現址位於國立交通大學工程五館複雜性流體實驗室內，設備場地大小為 5.2 公尺長，0.9 公尺寬，高度為 1 公尺，實驗設備有以下設備：可變焦光學元件兩組、萬向支架兩台、三軸移動載物平台、電源供應器兩台、光源產生器兩台、線圈組、電腦及螢幕。實驗架構圖如圖 2-1 所示。

本實驗將探討當開啟電源供應器使線圈產生磁場，此時磁性流體的反應經由可變焦光學元件將實驗影像(靜態及動態)顯示於螢幕上並且記錄於電腦裡，實驗示意圖如圖 2-2 所示。

2.1 理論背景

在 Gollwitzer [18]等學者的文獻中，得知 Maxwell equation 應用在不導電的磁性流體中可簡化為：

$$\text{Curl}H = 0 \quad (2-1)$$

$$\text{div}B = 0 \quad (2-2)$$

並假設液體外無磁化現象，則 Navier-Stokes equation 可化簡為：

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u\right) - \nabla \cdot \tau = -\rho g e_z \quad (2-3)$$

$$\text{div}u = 0 \quad (2-4)$$

τ 為應力張量，可表示為：

$$\tau = \eta(\nabla u + \nabla u^T) - \left(p + \frac{\mu_0}{2} H^2\right) I + H \otimes B \quad (2-5)$$

$$p_m = \mu_0 \int_0^H M(h) dh \quad (2-6)$$

其中， $p = p_{hyd} + p_m$

在只考慮 y 方向速度 ($u \equiv 0$) 的情況下則 Navier-Stokes equation 可化簡為：

$$\nabla p = -\rho g e_z + \mu_0 M \nabla H \quad (2-7)$$

再由 Young-Laplace equation， $[[\tau]]n = \sigma \kappa n$ 表示為兩介面之力平衡，經簡化後可得到下列平衡方程式：

$$\sigma \kappa + \rho g h = \mu_0 \int_0^H M(h) dh + \frac{\mu_0}{2} (M \cdot n)^2 - p_0 \quad (2-8)$$

不考慮大氣壓力 p_0 及因為實驗所觀測到的羅森史維格結構物高度極小，故最後平衡方程式表示為

$$\sigma \kappa \sim \mu_0 \int_0^H M(h) dh + \frac{\mu_0}{2} (M \cdot n)^2 \quad (2-9)$$

故此方程式是由表面能量與磁能所主導。



2.2 實驗規劃

2.2.1 實驗參數

本實驗的實驗條件為預濕平板在磁場分別為 765 Oe、676 Oe 及 588 Oe 下，以不同直徑之磁性液滴進行實驗。並另外嘗試磁場為 765 Oe 情況下使用過飽和磁性流體進行實驗。實驗規畫圖如圖 2-3 所示。

2.2.2 實驗儀器及實驗操作步驟說明

實驗儀器總共有可變焦為觀察量測系統、電源供應器、高斯計、磁性流體、載具、線圈及電腦。

首先，將電腦及兩套影像擷取系統(如圖 2-4)開啟，使畫面同時傳至電腦，並可從螢幕畫面中看到實驗畫面。所使用的磁性流體為型號 EMG901 的輕礦油基磁性流體。其中，磁性流體的黏滯度 $\mu = 10cp$ 、密度 $\rho d = 1.53g/ml$ 和飽和磁化率 $M_s = 660Oe$ 。將磁性液滴滴定在載具上，並同時先由肉眼觀察液滴輪廓是否完整，若完整即可放置線圈組中。若否，則用酒精擦拭清潔平板，並再次重新滴定磁性液滴。然後，平板放置線圈組後，開始校正兩套影像擷取系統所拍攝到的正拍影像及側拍影像是否對應在相同位置。在將電源供應器(如圖 2-5)及線圈組經由電線連接並開啟電源供應器，此時觀察正拍影像及側拍影像是否為同步畫面。此時為了確保實驗實所以用的磁場為垂直磁場，實驗前先將線圈進行供電產生磁場後以高斯計探棒(如圖 2-6)進行磁場的量測，量測後結果如圖 2-8 所示。於是，我們可以確定實驗時所使用的磁場是由垂直磁場所主導的。將所有的測試動作完畢後，將磁性液滴滴定於平板上，在放置於線圈組之磁場中心。將電源供應器及線圈組連接後，設定電流量後，使電源供應器供電於線圈組並同時產生磁場，此時電腦透過影像擷取系統記錄下實驗畫面。最後，當實驗結束時，關閉電源供應器，並將平板擦拭清潔乾淨，同時等待線圈組溫度返回初始狀態，再接著下一次實驗。

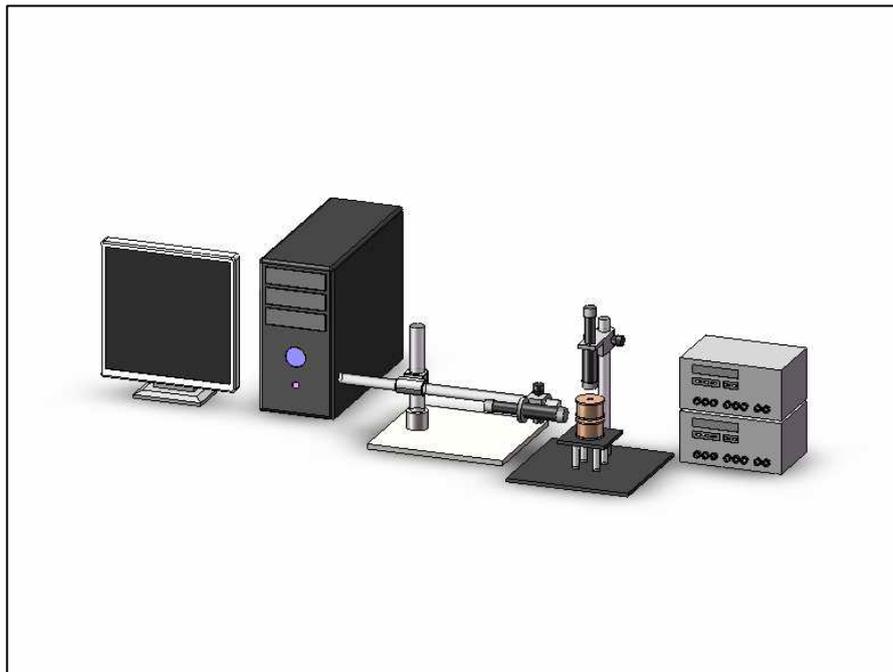


圖 2-1 實驗架構圖

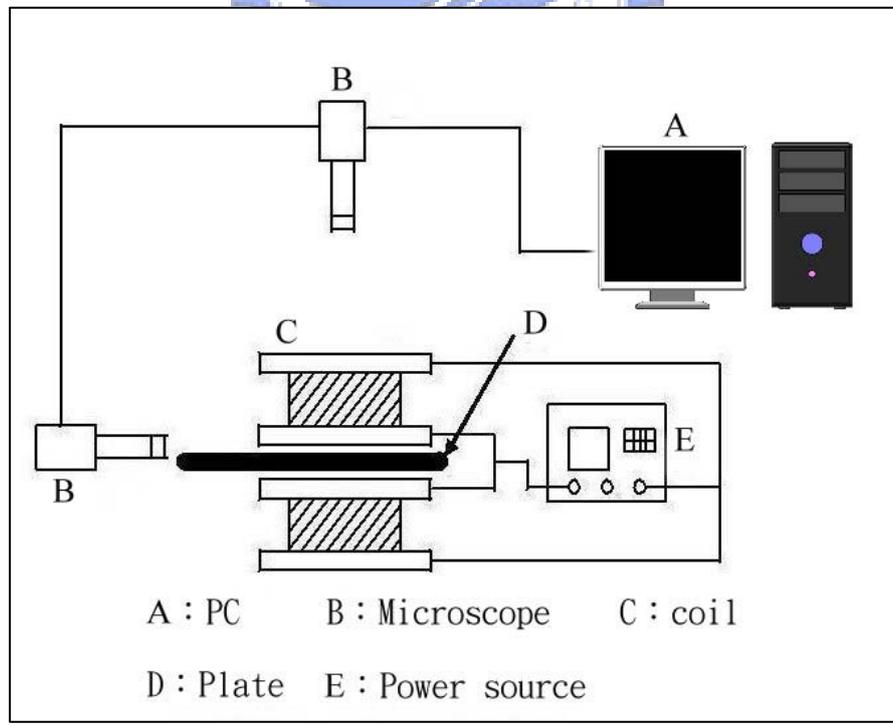


圖 2-2 實驗示意圖

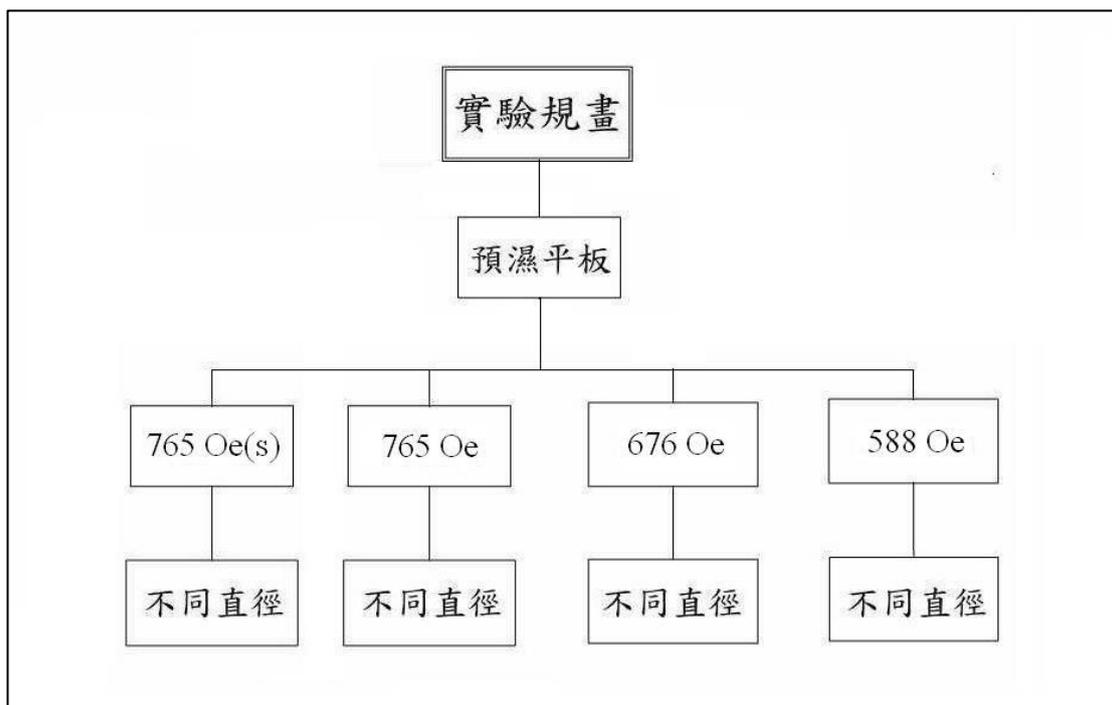


圖 2-3 實驗規畫圖

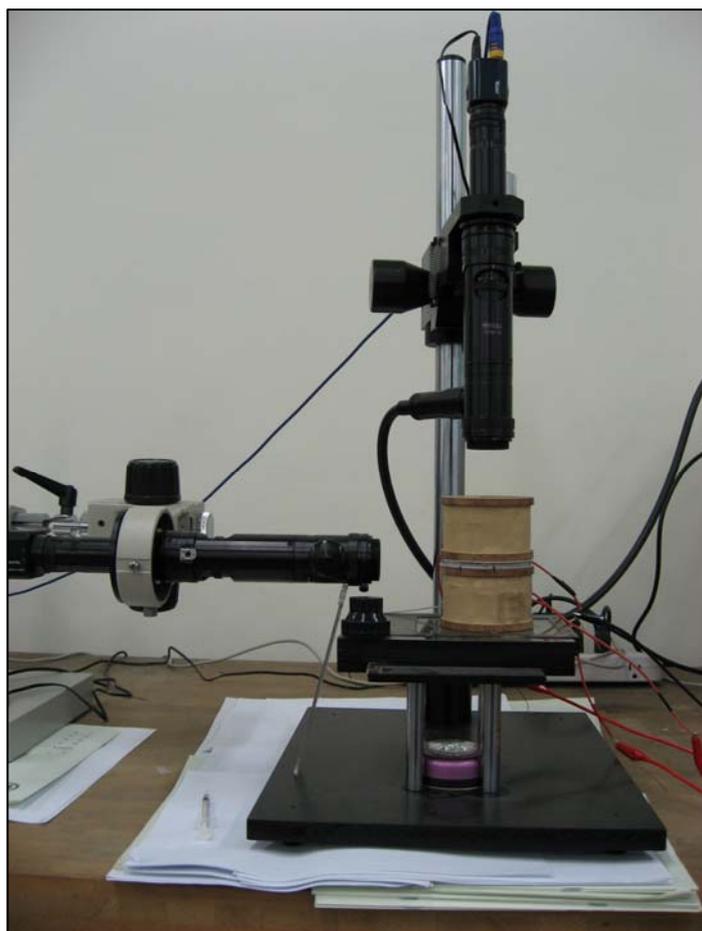


圖 2-4 可變焦微觀察量測系統



圖 2- 5 PR9323 可程式化電源供應器



圖 2- 6 桌上型高斯計

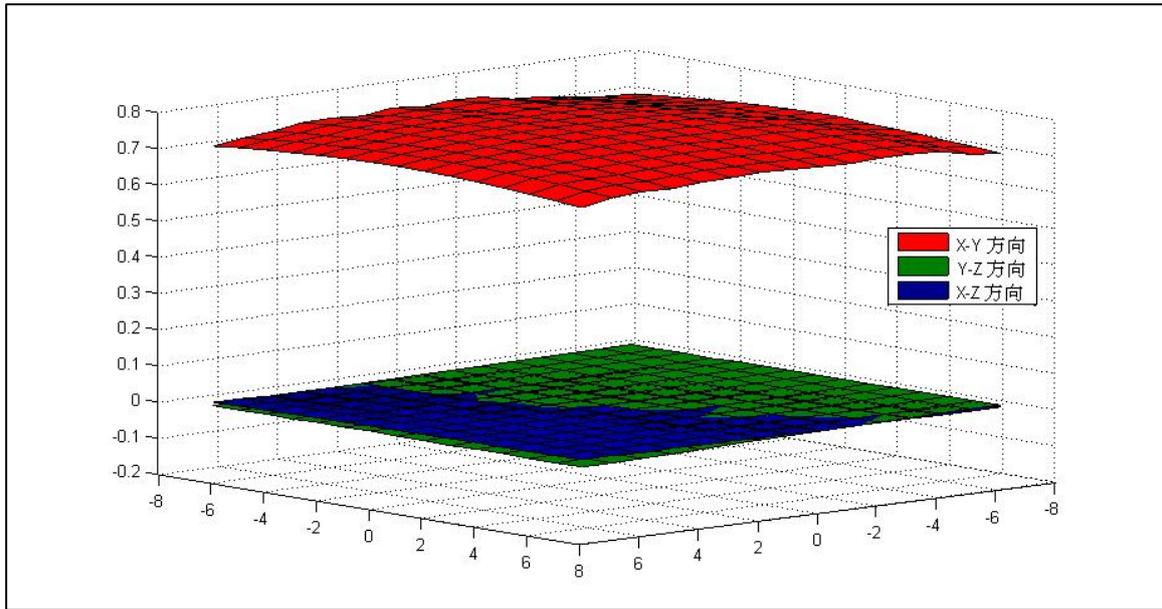


圖 2- 7 線圈之正向磁場側向分佈情形

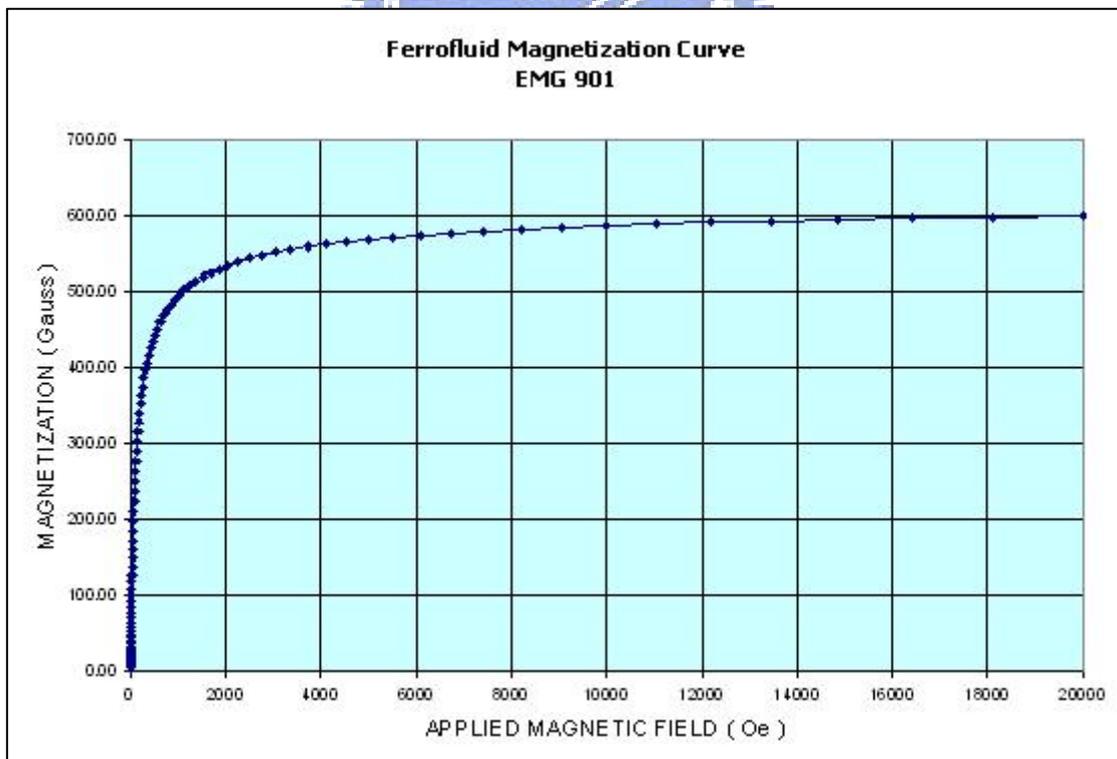


圖 2- 8 EMG901 飽和磁化曲線圖

表 2 磁性流體的相關參數

Fluid Type	M_s (gauss)	Viscosity @ 27° C	Avg. Particle Size	Initial Susceptibility	Density (gm/ml)
EMG 901	600	10 cp	100 Å	3.00	1.53



第三章 結果與分析

本研究主要目的在於將羅森史維格不穩定現象，應用在於微液滴的分裂，所以重點在於觀察磁性流體液滴薄膜，當受到垂直磁場的影響下，所產生液滴分裂的各種情形，根據實驗規畫的情況，可從實驗中得到磁性液滴薄膜在預濕平板上，隨著不同直徑大小，做有系統的分類。

3.1 預濕平板上進行實驗

若要觀察羅森史維格不穩定現象，則必需要清楚的觀察到三維的羅森史維格結構物，本研究致力於觀察完整的羅森史維格不穩定現象的發展情形，所以由圖可以觀察到液滴分裂的上視圖及側視圖。

3.1.1 分裂情況

預濕平板的目的在於改變磁性液滴與平板的接觸角角度。先利用磁性流體溶媒在載具平板表面上預濕，再將磁性流體滴定於預濕平板上。此時如圖所示，可以觀察到磁性液滴上視圖及側視圖，可以發現到預濕後滴定的磁性液滴均勻地貼附載具平板上。同時，根據實驗規畫的情況，將隨著不同磁場的情況下及隨著不同直徑的磁性液滴薄膜進行實驗。

3.1.1.1 過飽和磁性流體於垂直磁場為765 Oe之分裂情況

使用過飽和之磁性液滴在不同直徑大小於 765 Oe 的垂直磁場作用，在直徑為 1740 μm 的情況中，如圖 3-1(a)所示。剛開始時可以從上視圖中清楚地看見磁性液滴完整的輪廓，並從側視圖中看見磁性液滴均勻地貼附載具平板上，與磁性液滴滴定在乾燥平板的情況相比，可以發現在磁性液滴與載具平板之間的接觸角已大幅的減小。此時設定電源供應器輸出電流為 2.6 安培，使線圈組產生磁場強度為 765

Oe，因受垂直磁場產生之垂直拉力，如圖 3-1(d)、3-1(e)所示，可以看見磁性液滴慢慢地均勻分裂並各自單獨地形成羅森史維格結構物，與乾燥平板的情況相比發現分裂後的羅森史維格

結構物高度皆為相同高度，這是因為此時所使用之磁性流體的濃度較濃，使得分裂後之次液滴磁力與本身重力達成平衡，形成穩定狀態。在此實驗後經軟體計算得知，分裂顆數為 178 顆，分裂後的次液滴平均大小為 309 μm 。而後因關閉電源供應器造成磁場關閉使得羅森史維格結構物坍塌，如圖 3-1(f)所示。

從圖 3-2(a)可以得知直徑為 2250 μm 的磁性液滴，從側視圖可得知磁性液滴與載具平板之間的接觸角也是大幅地減小並且磁性液滴也是均勻地貼附載具平板上。由此可得知，先預濕載具平板可以使接觸角大幅地減小。當線圈組產生磁場強度為 765 Oe 情況時，磁性液滴分裂情況如圖 3-2(b)~3-2(e)所示。此時可發現到因受垂直磁場產生之垂直拉力，使得磁性液滴從液滴尖點開始慢慢地均勻分裂並各自單獨地形成羅森史維格結構物，分裂後次液滴高度皆為相同高度，並得知分裂後顆數為 235 顆，分裂後的次液滴平均大小為 214 μm 。而後因關閉電源供應器造成磁場關閉使得羅森史維格結構物坍塌，如圖 3-2(f)所示。

若將磁性液滴直徑再增加，如圖 3-3(a)所示直徑為 2743 μm 。如同預期磁性液滴與載具平板之間的接觸角很小等同磁性液滴均勻地貼附在載具平板上。當線圈組產生磁場強度為 765 Oe 情況時，磁性液滴分裂情況如圖 3-3(b)~3-3(e)所示。因受垂直磁場產生之垂直拉力，使得磁性液滴慢慢地均勻分裂並各自單獨地形成羅森史維格結構物，分裂後次液滴高度為相同高度，此時的分裂顆數為 273 顆，分裂

後的次液滴平均大小為 $230\mu\text{m}$ 。在與直徑較小的磁性液滴相比時，分裂顆數較為增多。假設兩個不同直徑的磁性液滴分裂後的次液滴體積相同，因為分裂後次液滴高度皆相同，所以可以發現到磁性液滴分裂顆數 N 與磁性液滴初始面積 A 成正比。由此關係式可推測當磁性液滴直徑越大時，分裂後顆數也會較多。而後因關閉電源供應器造成磁場關閉使得羅森史維格結構物坍塌，如圖 3-3(f)所示。

將磁性液滴直徑再增加，由圖 3-4(a)所示直徑為 $3310\mu\text{m}$ 。正如同剛剛所推測的關係式，磁性液滴分裂顆數 N 與磁性液滴初始面積 A 平方成正比。從圖 3-4(d)、3-4(e)的分裂情況可以得知分裂後次液滴顆數更多，分裂顆數為 395 顆，分裂後的次液滴平均大小為 $223\mu\text{m}$ ，即可印證所推測的關係式。

3.1.1.2 穩定之磁性流體於垂直磁場為 765 Oe 之分裂情況

再來是使用穩定之磁性液滴在不同直徑大小於 765 Oe 的垂直磁場作用下的分裂情況。由圖 3-5(a)所示，這是直徑為 $1794\mu\text{m}$ 之磁性液滴。從上視圖中清楚地看見磁性液滴完整的輪廓，並從側視圖中看見磁性液滴均勻地貼附載具平板上。設定電源供應器輸出電流為 2.6 安培，使線圈組產生磁場強度為 765 Oe，因受垂直磁場產生之垂直拉力，如圖 3-5(b)、3-5(c)所示，磁性液滴迅速地分裂並各自單獨地形成羅森史維格結構物，從圖 3-5(d)、3-5(e)可以看到此時因磁性流體為穩定之磁性流體，故最外圍之次液滴於分裂時，因為本身的濃度較稀使得個別的次液滴磁力較小並且無法與本身的重力達平衡，故在分裂後即迅速坍塌。與過飽和之磁性液滴實驗相比，當磁場開啟時，過飽和磁性流體之外圍次液滴之磁力與重力互為平衡。但穩定磁性流體之次液滴卻因磁力與重力不平衡坍塌，但中心部分之次液滴高度仍為相同高度。在此實驗後經軟體計算得知，分裂顆數為 73 顆，分裂後的次液滴平均大小為 $309\mu\text{m}$ 。而後因關閉電源供應器造成磁場關閉使得羅森

史維格結構物坍塌，如圖3-9(f)所示。

將直徑增大為 $2276\mu\text{m}$ 的磁性液滴，如圖 3-6(a)。在輸出電流為 2.6 安培，線圈組產生磁場強度為 765 Oe 的情況時，因磁性流體受垂直磁場產生之垂直拉力，使得磁性液滴迅速地分裂，磁性液滴分裂情況如圖 3-6(d)、3-6(e)所示。穩定磁性流體之最外圍次液滴仍因磁力與重力不平衡而坍塌，但中心部分之次液滴高度仍為相同高度。經計算後得知分裂後顆數為 114 顆，分裂後的次液滴平均大小為 $306\mu\text{m}$ 。而後因關閉電源供應器造成磁場關閉使得羅森史維格結構物坍塌，如圖 3-6(f)所示。

若將磁性液滴直徑再增加，如圖 3-7(a)所示直徑為 $2740\mu\text{m}$ 。磁性液滴分裂情況如圖 3-7(b)、3-7(c)所示。因受垂直磁場產生之垂直拉力，使得磁性液滴迅速地均勻分裂並各自單獨地形成羅森史維格結構物，從圖 3-7(d)、3-7(e)可以看到此時最外圍之次液滴仍因磁力與重力不平衡而坍塌但中心的次液滴高度為相同高度，此時的分裂顆數為 164 顆，分裂後的次液滴平均大小為 $314\mu\text{m}$ 。在與直徑較小的磁性液滴相比時，分裂顆數較為增多。與前面所推測磁性液滴分裂顆數 N 與磁性液滴初始面積 A 成正比相符合。由此關係式可推測當磁性液滴直徑越大時，分裂後顆數也會較多。而後因關閉電源供應器造成磁場關閉使得羅森史維格結構物坍塌，如圖 3-7(f)所示。

將磁性液滴直徑再加大，由圖 3-8(a)所示直徑為 $3098\mu\text{m}$ 。正如同所推測的關係式，磁性液滴分裂顆數 N 與磁性液滴初始面積 A 成正比。從圖 3-8(d)、3-8(e)的分裂情況可以得知分裂後次液滴顆數更多，分裂顆數為 233 顆，分裂後的次液滴平均大小為 $316\mu\text{m}$ ，即可印證所推測的關係式。

3.1.1.3 穩定之磁性流體於垂直磁場為676 Oe之分裂情況

使用穩定之磁性液滴在不同直徑大小於 676 Oe 的垂直磁場作用下的分裂情況。由圖 3-9(a)所示，直徑為 1741 μm 之磁性液滴。設定電源供應器輸出電流為 2.3 安培，使線圈組產生磁場強度為 676 Oe，因受垂直磁場產生之垂直拉力，如圖 3-9(b)、3-9(c)所示，磁性液滴迅速地分裂並各自單獨地形成羅森史維格結構物，此時可以觀察到因磁性流體為穩定之磁性流體，故最外圍之次液滴於分裂時，因為本身的濃度較稀使得個別的次液滴磁力較小並且無法與本身的重力達平衡，故在分裂後即迅速坍塌。在此實驗後經軟體計算得知，分裂顆數為 48 顆，分裂後的次液滴平均大小為 321 μm 。而後因關閉電源供應器造成磁場關閉使得羅森史維格結構物坍塌，如圖 3-9(f)所示。

將直徑增大為 2330 μm 的磁性液滴，如圖 3-10(a)。在輸出電流為 2.3 安培，線圈組產生磁場強度為 676 Oe 的情況時，因磁性流體受垂直磁場產生之垂直拉力，使得磁性液滴迅速地分裂，磁性液滴分裂情況如圖 3-10(b)、3-10(c)所示。但從圖 3-10(d)、3-10(e)可以看到此時穩定磁性流體之最外圍次液滴仍因磁力與重力不平衡而坍塌，但中心部分之次液滴高度仍為相同高度。經計算後得知分裂後顆數為 96 顆，分裂後的次液滴平均大小為 328 μm 。而後因關閉電源供應器造成磁場關閉使得羅森史維格結構物坍塌，如圖 3-10(f)所示。

若將磁性液滴直徑再增加，如圖 3-11(a)所示直徑為 2743 μm 。磁性液滴分裂情況如圖 3-11(b)、3-11(c)所示。因受垂直磁場產生之垂直拉力，使得磁性液滴迅速地均勻分裂並各自單獨地形成羅森史維格結構物，最外圍之次液滴仍因磁力與重力不平衡而坍塌但中心的次液滴高度為相同高度，此時的分裂顆數為 123 顆，分裂後的次液滴平均大小為 344 μm 。在與直徑較小的磁性液滴相比時，分裂顆數較為增

多。與前面所推測磁性液滴分裂顆數 N 與磁性液滴初始面積 A 成正比相符合。由此關係式可推測當磁性液滴直徑越大時，分裂後顆數也會較多。而後因關閉電源供應器造成磁場關閉使得羅森史維格結構物坍塌，如圖 3-11(f)所示。

將磁性液滴直徑再加大，由圖 3-12(a)所示直徑為 $3083\mu\text{m}$ 。正如同所推測的關係式，磁性液滴分裂顆數 N 與磁性液滴初始面積 A 成正比。從圖 3-12(d)、3-12(e)的分裂情況可以得知分裂後次液滴顆數更多，分裂顆數為 152 顆，分裂後的次液滴平均大小為 $351\mu\text{m}$ 。

3.1.1.4 穩定之磁性流體於垂直磁場為 588 Oe 之分裂情況

由圖 3-13 所示，圖(a)、(g)、(l)、(q)分別為 $2000\mu\text{m}$ 、 $2200\mu\text{m}$ 、 $2705\mu\text{m}$ 、 $2982\mu\text{m}$ 。由圖中上至下的順序分別為穩定之磁性流體受垂直磁場作用下的分裂情況。在此實驗裡跟以上的實驗現象相似，分裂後最外圍之次液滴仍迅速坍塌，但中心部分之次液滴高度仍為相同高度。其中分裂後顆數及分裂後平均大小分別為 48 顆 $320\mu\text{m}$ 、59 顆 $334\mu\text{m}$ 、90 顆 $340\mu\text{m}$ 、110 顆 $351\mu\text{m}$ 。由圖中可得知當直徑越大時分裂後次液滴越多，與先前所推測的關係式相符合。

3.1.2 綜合討論

3.1.2.1 磁性液滴薄膜在預濕平板上的分裂情況

由圖 3-13 所示，這是磁場為 588Oe 之分裂情況，從圖中可以得知預濕平板能使磁性液滴的接觸角 θ 降低甚至是完全附著於平板上，由磁性液滴整體來看，磁性液滴的液滴高度 h 變得均一高度，如圖 3-21，藉由均一的液滴高度避免較大突出的中心液滴產生，使磁性液滴的分裂均勻化。磁性液滴受到垂直磁場產生拉力的影響，如圖所示產生磁性液滴的分裂情形，由於磁性液滴高度變為較一致，當磁

性液滴受到垂直磁場的磁力拉引後，磁性液滴隨著磁力分布，在給予磁場的同時形成個別單獨的次液滴，由上視圖觀察後計算，發現分裂後的次液滴直徑幾乎相同，從側視圖角度來看，分裂後的次液滴高度也幾乎相近，由得到的次液滴直徑及次液滴高度去估算，可以得到各個次液滴有相近的體積。但在最外圍之次液滴則因磁性液滴的最外圍與預濕平板之液體有互溶的現象，使得最外圍的次液滴濃度下降，也就是說最外圍的個別次液滴磁化率較小，所以磁力與個別次液滴重量不平衡而產生坍塌。在接下來的討論中會就不同磁場大小、不同原始液滴大小甚至是磁性流體的濃度差異以及物理特性做分析。

3.1.2.2 磁性液滴薄膜在不同磁場大小下的分裂情況

在使用穩定性磁流體的情況但不同磁場的實驗條件下，當不同大小的磁性液滴進行實驗，可以發現會有以下相同的分裂情況，分裂速度快、分裂後最外圍次液滴結構迅速坍塌，外圍次液滴會有相互吸引的情況，但在中心部份次液滴結構卻是相當穩定且獨立，如圖 3-13、3-14、3-15 所示。在外圍的次液滴坍塌情況，因液滴最外圍與預濕平板之液體有互溶的現象，使得最外圍的次液滴濃度下降，造成個別次液滴的磁化率較小，所以磁力與個別次液滴的重量不平衡而產生坍塌。並同時可以觀察到在相同大小的磁性液滴情況下，磁場越大，分裂後次液滴顆數就越多。

由圖 3-17，當磁性液滴大小固定在 4mm^2 時，可以比較出分裂顆數多寡為 $7650\text{e} > 6760\text{e} > 5880\text{e}$ 。但在圖 3-18 卻可以發現分裂後次液滴大小卻是 $5880\text{e} > 6760\text{e} > 7650\text{e}$ 。所以磁場越大，分裂後次液滴大小是越小。

3.1.2.3 過飽和之磁性流體與穩定之磁性流體

磁性流體最主要的製造方法，是將表面活性劑依附在奈米級鐵磁

粒子上面，並將其均勻溶解於水性或油性之載基流體中，則此稱之為穩定磁性流體。當載基流體因揮發等因素使磁性流體的濃度較濃及有沉澱的現象產生時，則稱之為過飽和磁性流體。

3.1.2.4 相同磁場大小影響下過飽和及穩定磁性流體之差異

磁場同為 765 Oe 時，在圖 3-15 及圖 3-16 可以觀察到不同大小的磁性液滴分裂情況，過飽和之磁性流體在電源供應器開啟後，磁性液滴會緩慢的分裂成個別穩定結構的次液滴，在分裂的同時個別的次液滴的磁極方向皆為相同，所以兩相鄰間次液滴之間應會有相斥力的產生。在實驗中可以觀察到相鄰兩次液滴的間隙越來越大，因此可以看出此種排斥現象為相斥力使然。並由實驗截圖(圖 3-2、3-3)可以得知當原始液滴有尖點時，次液滴將會從尖點產生並且向外緩慢形成個別次液滴。

由圖 3-17 可以得知分裂顆數 N 與磁性液滴薄膜初始面積 A 的關係式為正比關係，並可以在相同的初始面積情況下相比較可以得知過飽和磁性流體的分裂顆數較穩定性磁性流體的分裂顆數多。但由圖 3-18 可以得知，在相同磁場的情況下，過飽和磁性流體分裂後次液滴平均大小為 $218 \mu\text{m}$ ，穩定性磁性流體分裂後次液滴平均大小為 $318 \mu\text{m}$ 。所以得到結果為過飽和磁性流體分裂顆數較多但分裂後次液滴平均大小較小。

3.2 物理分析

3.2.1 接觸角 θ

如圖 3-19 Young's Equation 介面與表面張力關係所示，當一顆液滴處於平衡狀態下時， $\gamma^{sv} = \gamma^{sl} + \gamma^{lv} \cos\theta$ 成立， θ 為接觸角， γ^{sl} 為液體與載具平板的介面張力， γ^{sv} 為載具平板與空氣的表面張力， γ^{lv} 為液體與空氣間的表面張力。在實驗中所使用的磁性流體、載具平板及接

觸空氣，這三者都固定不變，則可以得到磁性液滴與空氣及載具平板間的接觸角 θ 將會固定一致，不會隨磁性液滴直徑的變化作改變，而在未預濕平板實驗的磁性液滴體積為一圓球帽狀，如圖 3-20 所示。由實驗的圖片可以看出有預濕的磁性液滴接觸角會大大降低，在從圖 3-21 示意圖可以得知預濕後的磁性液滴均勻地貼附在載具平板上。由整體來看可以看出液滴的中心最大高度 h_0 與各處高度 h 均為相同高度。

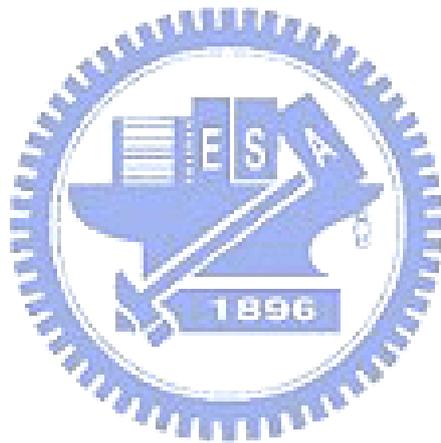
3.2.2 穩定性討論

如圖 3-21，當磁性液滴與平板接觸的起始接觸角 θ 固定，隨著位置的變化，磁性液滴高度 h 皆相同，所受的壓力也皆相同，在此實驗中的物理機制中是由表面能量、位能及磁能三者相互平衡。但由於分裂後次液滴結構物的高度極小，因此將忽略位能，故最後表面能量與磁能為主要的物理參數。由數學式 2-9 可知，表面能量項正比於磁能項，因為 σ 為常數且曲率與曲率半徑表示為 $\kappa \sim 1/d$ ，故可得到磁性液滴半徑與磁能項的平方成反比 ($d \sim 1/M^2$) 之關係。由表 3 得知實驗的各項數值，當磁場強度為 765Oe，平均分裂大小為 310 μm ，磁化強度 475。磁場強度為 676Oe，平均分裂大小為 328 μm ，磁化強度為 466。磁場強度為 588Oe，平均分裂大小為 350 μm ，磁化強度為 454。則可由 $d \sim 1/M^2$ 的關係式得到

$$\frac{d_1}{d_2} \cong \frac{M_2^2}{M_1^2}$$

當磁場強度為 765Oe 時， $d_1=310\mu\text{m}$ ， $M_1=475\text{A/m}$ ；磁場強度為 676Oe 時， $d_2=328\mu\text{m}$ ， $M_2=466\text{A/m}$ 。則由上式計算後，左式為 0.945，右式為 0.962。則此可知與數學式 2-9 的推導結果相近。而當磁場強度為 588Oe 時， $d_3=328\mu\text{m}$ ， $M_3=466\text{A/m}$ 。將 d_2 、 d_3 、 M_2 、 M_3 之數值代入上式計算後左式為 0.93，右式為 0.94。與所推導之數學式的結果

相近。於是可以推測出由磁化強度為已知條件，即可得知分裂後平均大小約為多少。因為分裂後次液滴高度幾乎相同，於是可由分裂後平均大小與磁性液滴原始面積計算得到分裂後顆數為多少。並由下述推導得知分裂顆數與磁性液滴原始面積成正比的關係做為相輔關係式。



3.2.3 液滴原始面積與分裂顆數關係式

經由實驗後處理得到，不同的磁性液滴直徑的液滴，在預濕表面上的磁性液滴高度 h 都相同如圖 3-21，而且經由計算得到，不同大小的磁性液滴在受到垂直磁場影響後產生分裂，所得到分裂後的次液滴大小及次液滴高度均約相等，所以我們估計磁性液滴在預濕平板上進行分裂，分裂後的次液滴體積約相等，由此我們可以試推算其關係。

1. 分裂前-

$$V_1 = A_1 h_0 \Rightarrow N_1$$

V_1, V_2 : 初始液滴體積

$$V_2 = A_2 h_0 \Rightarrow N_2$$

A_1, A_2 : 初始液滴面積

2. 分裂後-

h_0 : 初液滴高度

$$d_1 = d_2$$

N_1, N_2 : 次液滴分裂顆數

$$v_1 \approx d_1^2 h$$

d_1, d_2 : 次液滴直徑

$$v_2 \approx d_2^2 h$$

v_1, v_2 : 次液滴體積

h : 次液滴高度

3. 1、2 結合-

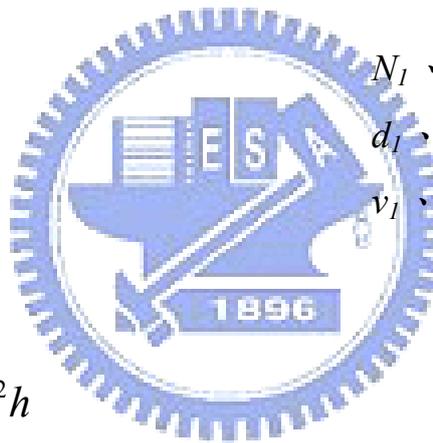
$$V_1 = N_1 v_1 \approx N_1 d_1^2 h$$

$$V_2 = N_2 v_2 \approx N_2 d_2^2 h$$

$$\frac{N_1 d_1^2 h}{N_2 d_2^2 h} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{A_1 h_0}{A_2 h_0}$$

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{A_1}{A_2}$$

$$\Rightarrow N \propto A$$



所以可以發現到磁性液滴分裂顆數 N 與磁性液滴面積 A 成正比之關係。

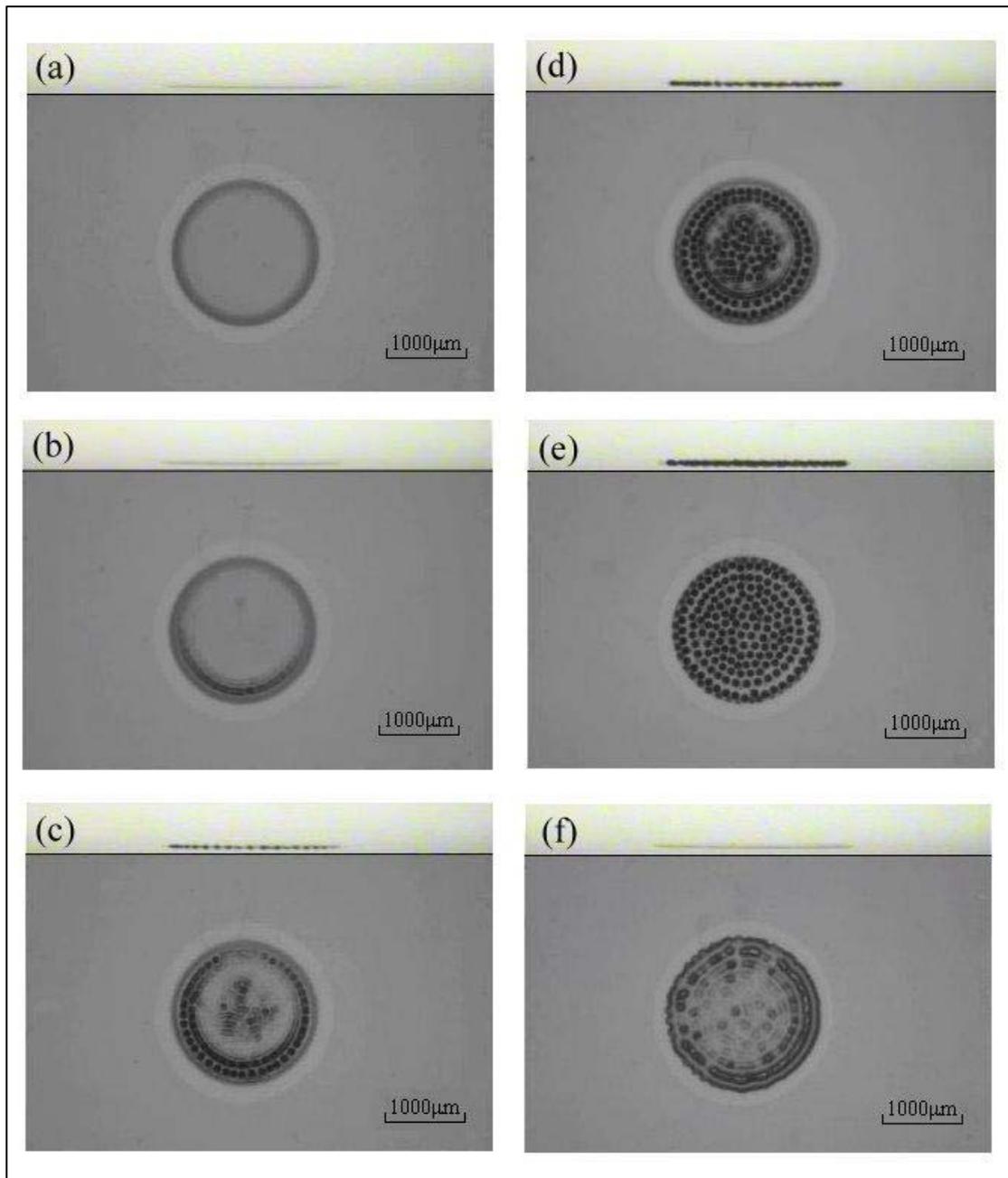


圖 3-1 平板已預濕之磁性液滴且直徑為 $1740\mu\text{m}$ 之分裂情況
 (a) $t=0\text{ s}$, (b) $t=8\text{ s}$, (c) $t=9\text{ s}$, (d) $t=10\text{ s}$, (e) $t=18\text{ s}$ and (f) $t=30\text{ s}$ ($H=0\text{ Oe}$)

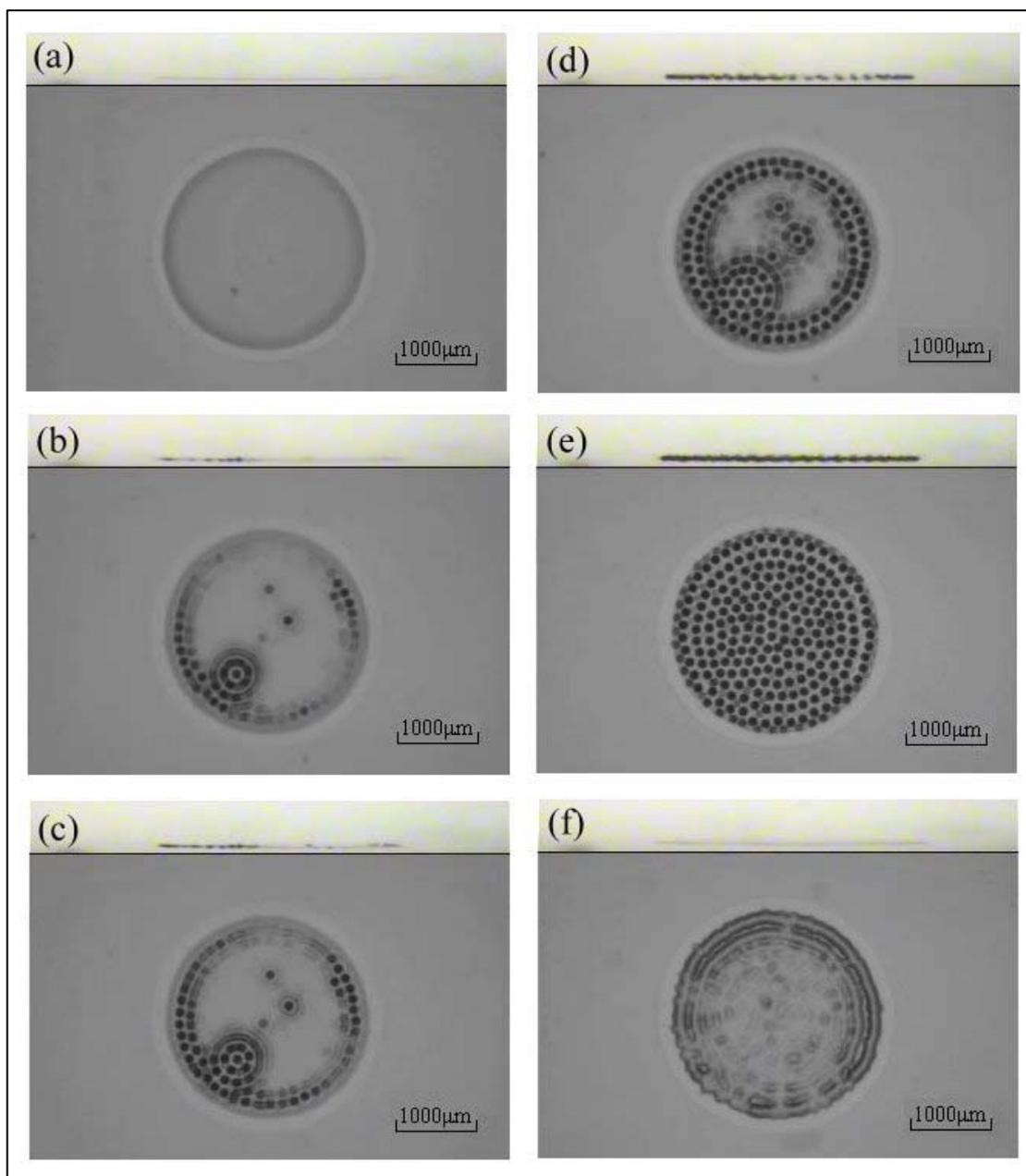


圖 3-2 平板已預濕之磁性液滴且直徑為 $2250\mu\text{m}$ 之分裂情況
 (a) $t=0\text{ s}$, (b) $t=8\text{ s}$, (c) $t=9\text{ s}$, (d) $t=10\text{ s}$, (e) $t=18\text{ s}$ and (f) $t=30\text{ s}$ ($H=0\text{ Oe}$)

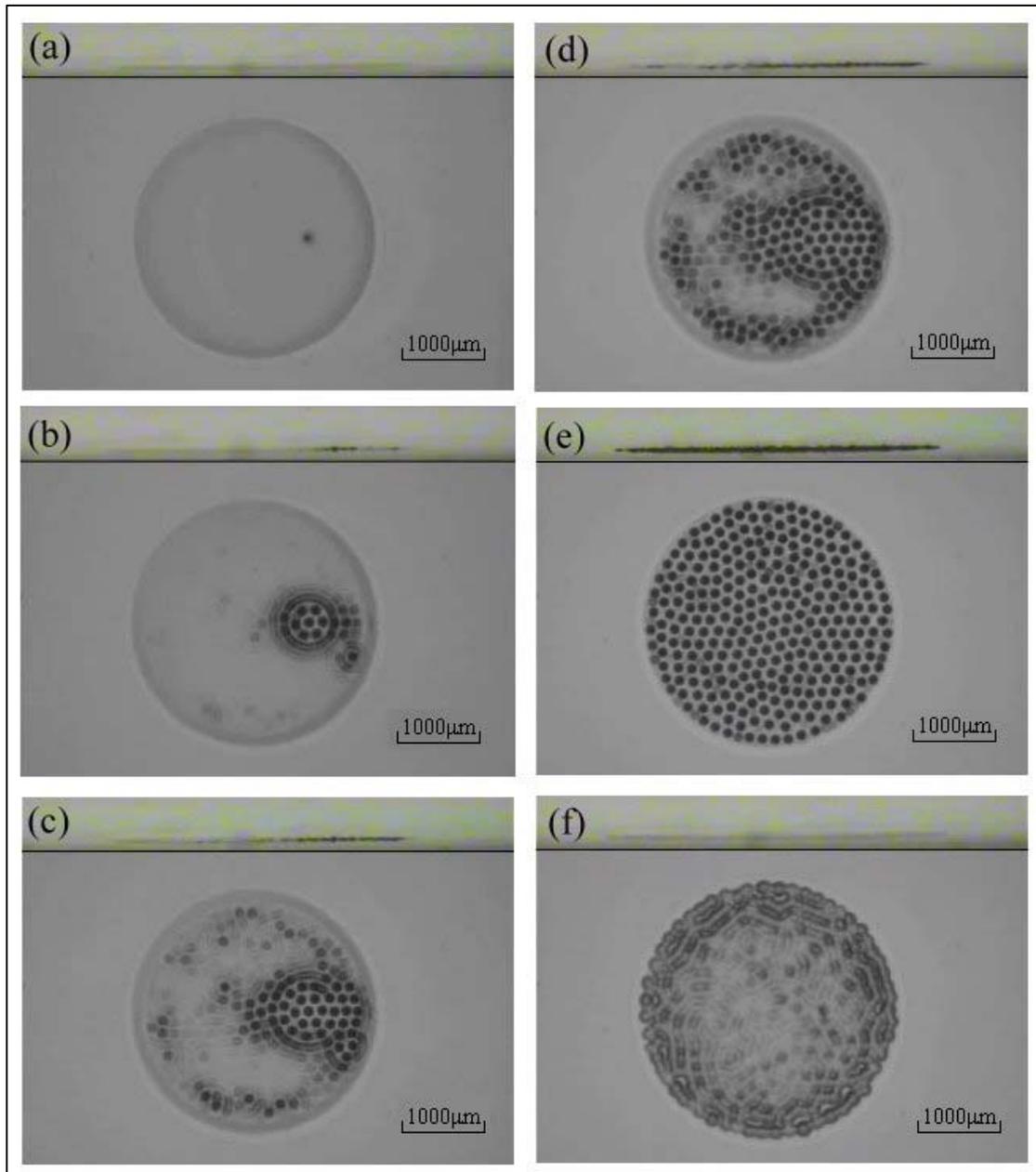


圖 3-3 平板已預濕之磁性液滴且直徑為 $2743\mu\text{m}$ 之分裂情況
 (a) $t=0\text{ s}$, (b) $t=6\text{ s}$, (c) $t=7\text{ s}$, (d) $t=9\text{ s}$, (e) $t=18\text{ s}$ and (f) $t=39\text{ s}$ ($H=0\text{ Oe}$)

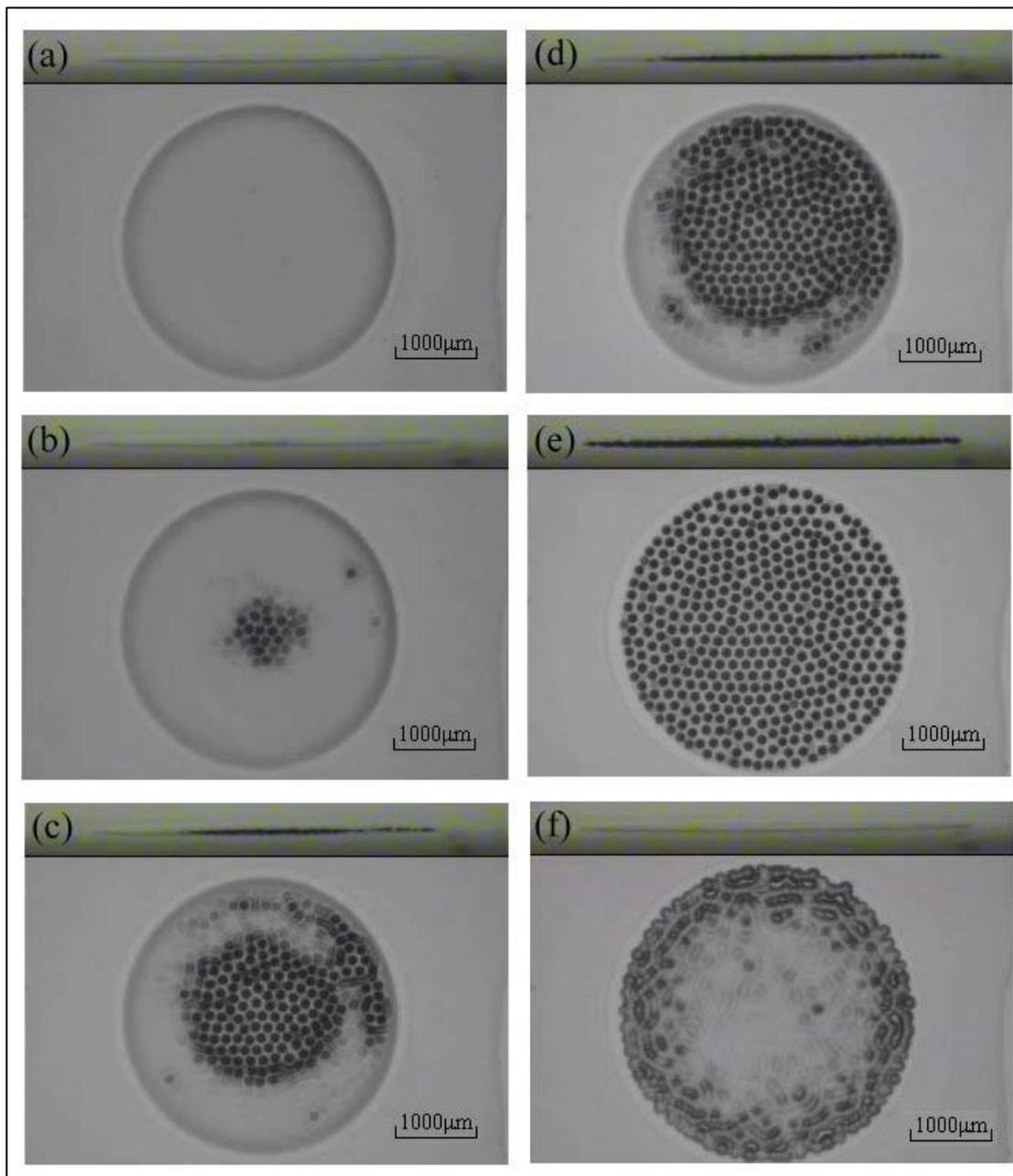


圖 3-4 平板已預濕之磁性液滴且直徑為 $3110\mu\text{m}$ 之分裂情況
 (a) $t=0\text{ s}$, (b) $t=5\text{ s}$, (c) $t=6\text{ s}$, (d) $t=7\text{ s}$, (e) $t=15\text{ s}$ and (f) $t=30\text{ s}$ ($H=0\text{ Oe}$)

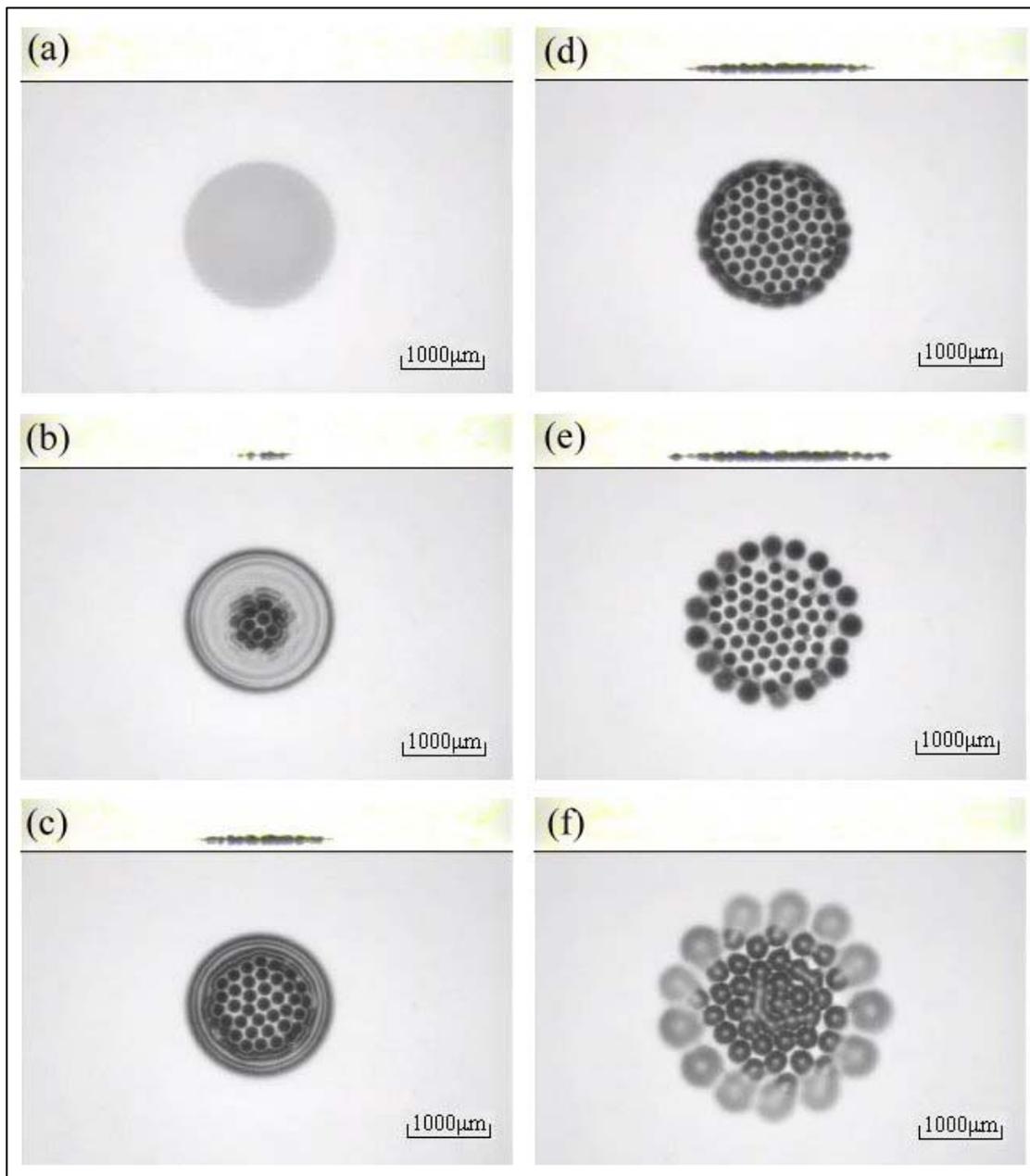


圖 3-5 平板已預濕之磁性液滴且直徑為 $1794\mu\text{m}$ 之分裂情況
 (a) $t=0\text{ s}$, (b) $t=0.2\text{ s}$, (c) $t=0.6\text{ s}$, (d) $t=0.8\text{ s}$, (e) $t=1\text{ s}$ and (f) $t=13\text{ s}$ ($H=0\text{ Oe}$)

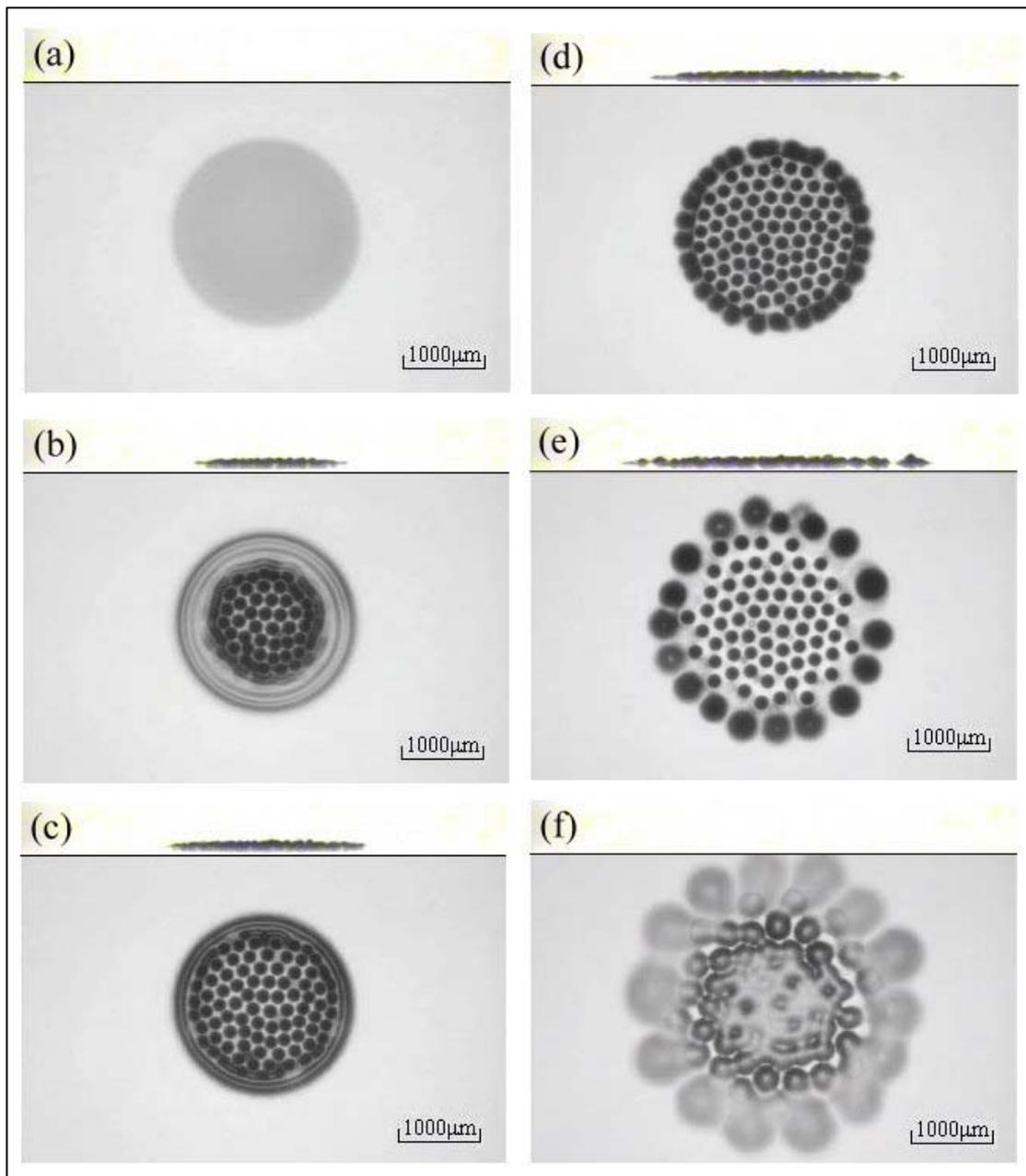


圖 3-6 平板已預濕之磁性液滴且直徑為 $2276\mu\text{m}$ 之分裂情況
 (a) $t=0\text{ s}$, (b) $t=0.2\text{ s}$, (c) $t=0.6\text{ s}$, (d) $t=0.8\text{ s}$, (e) $t=1\text{ s}$ and (f) $t=10\text{ s}$ ($H=0\text{ Oe}$)

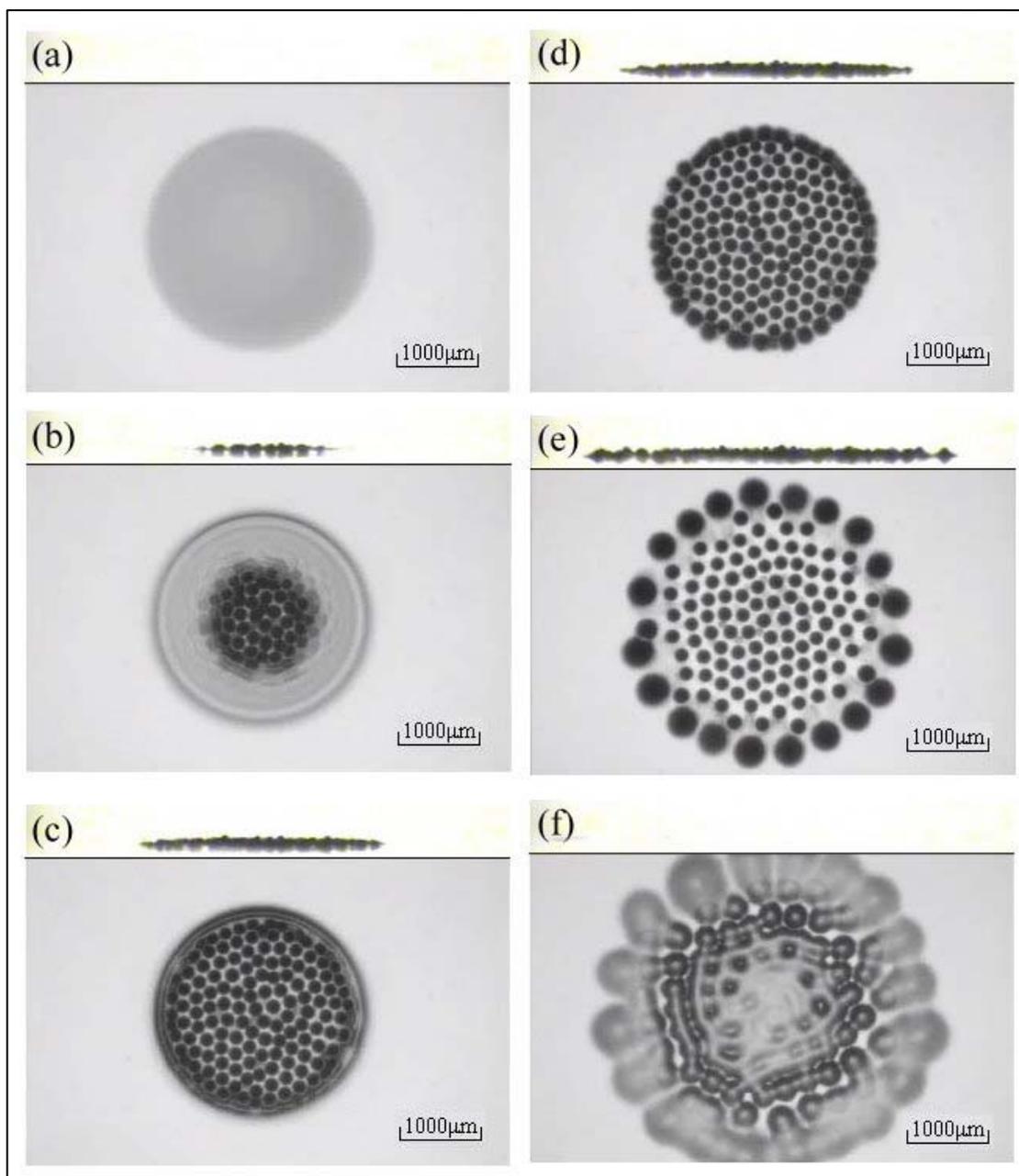


圖 3-7 平板已預濕之磁性液滴且直徑為 $2740\mu\text{m}$ 之分裂情況
 (a) $t=0\text{ s}$, (b) $t=0.2\text{ s}$, (c) $t=0.6\text{ s}$, (d) $t=0.8\text{ s}$, (e) $t=1\text{ s}$ and (f) $t=10\text{ s}$ ($H=0\text{ Oe}$)

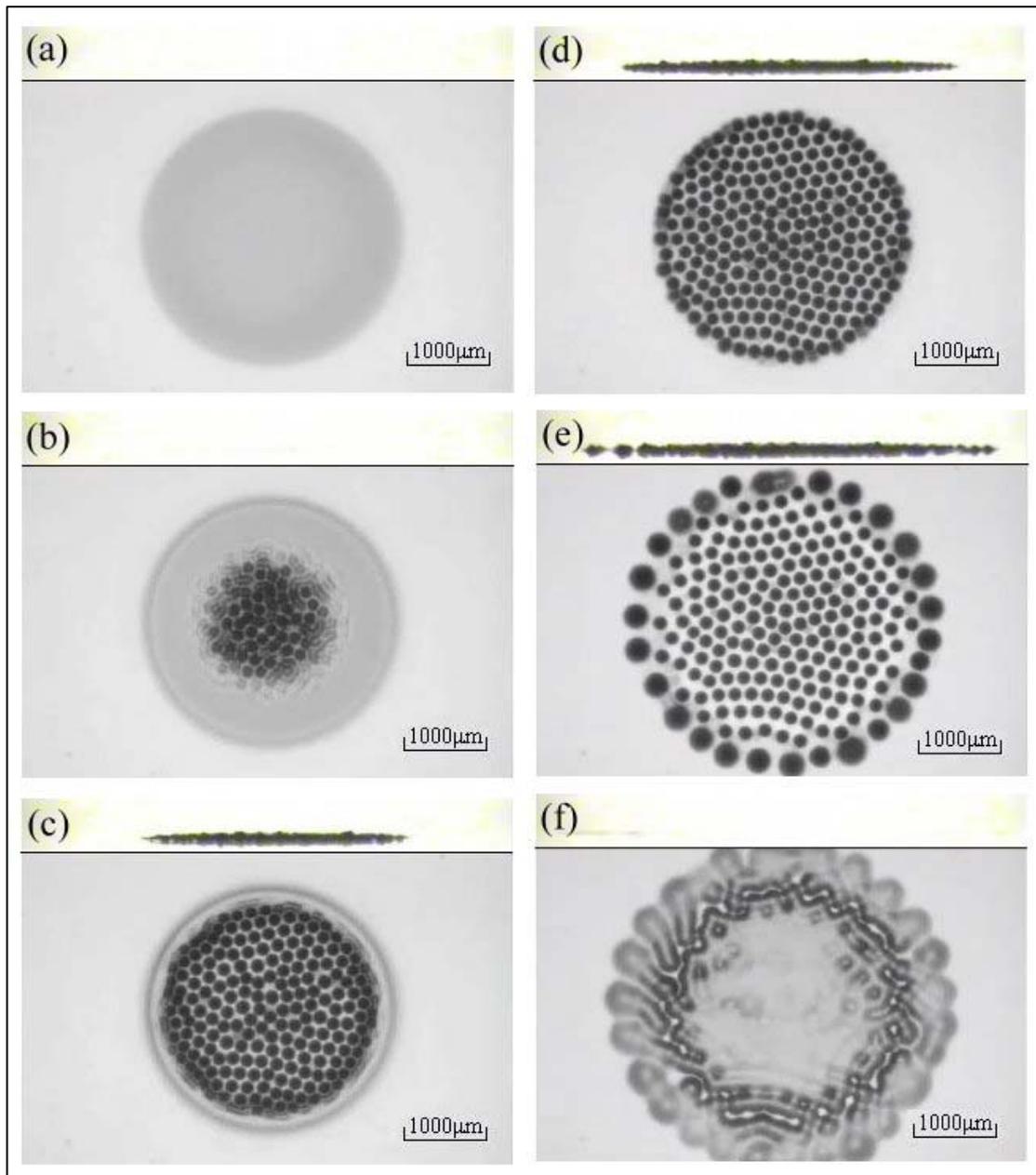


圖 3-8 平板已預濕之磁性液滴且直徑為 $3098\mu\text{m}$ 之分裂情況
 (a) $t=0\text{ s}$, (b) $t=0.2\text{ s}$, (c) $t=0.6\text{ s}$, (d) $t=0.8\text{ s}$, (e) $t=1\text{ s}$ and (f) $t=10\text{ s}$ ($H=0\text{ Oe}$)

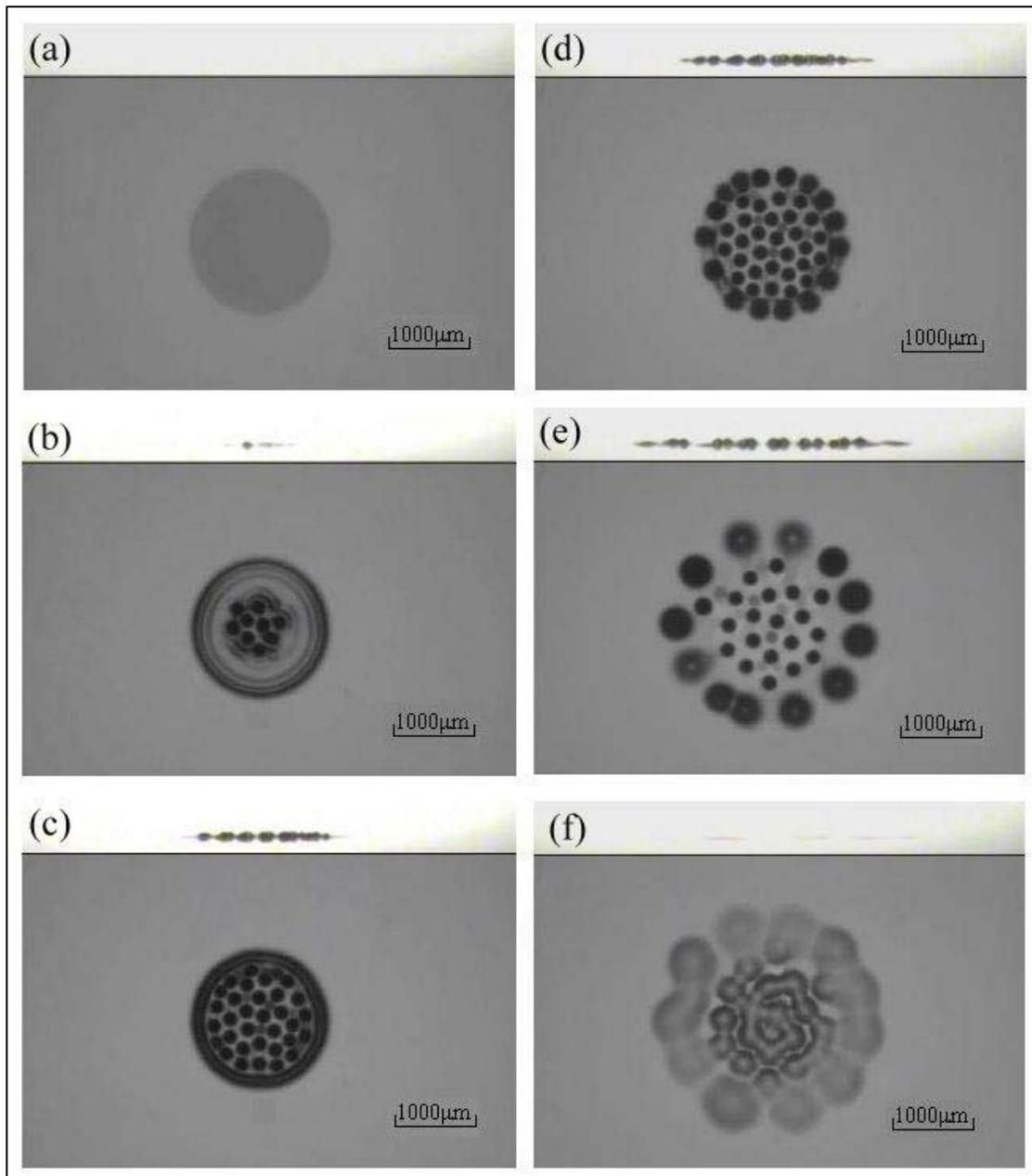


圖 3-9 平板已預濕之磁性液滴且直徑為 $1741\mu\text{m}$ 之分裂情況
 (a) $t=0\text{ s}$, (b) $t=0.2\text{ s}$, (c) $t=0.6\text{ s}$, (d) $t=0.8\text{ s}$, (e) $t=1\text{ s}$ and (f) $t=10\text{ s}$ ($H=0\text{ Oe}$)

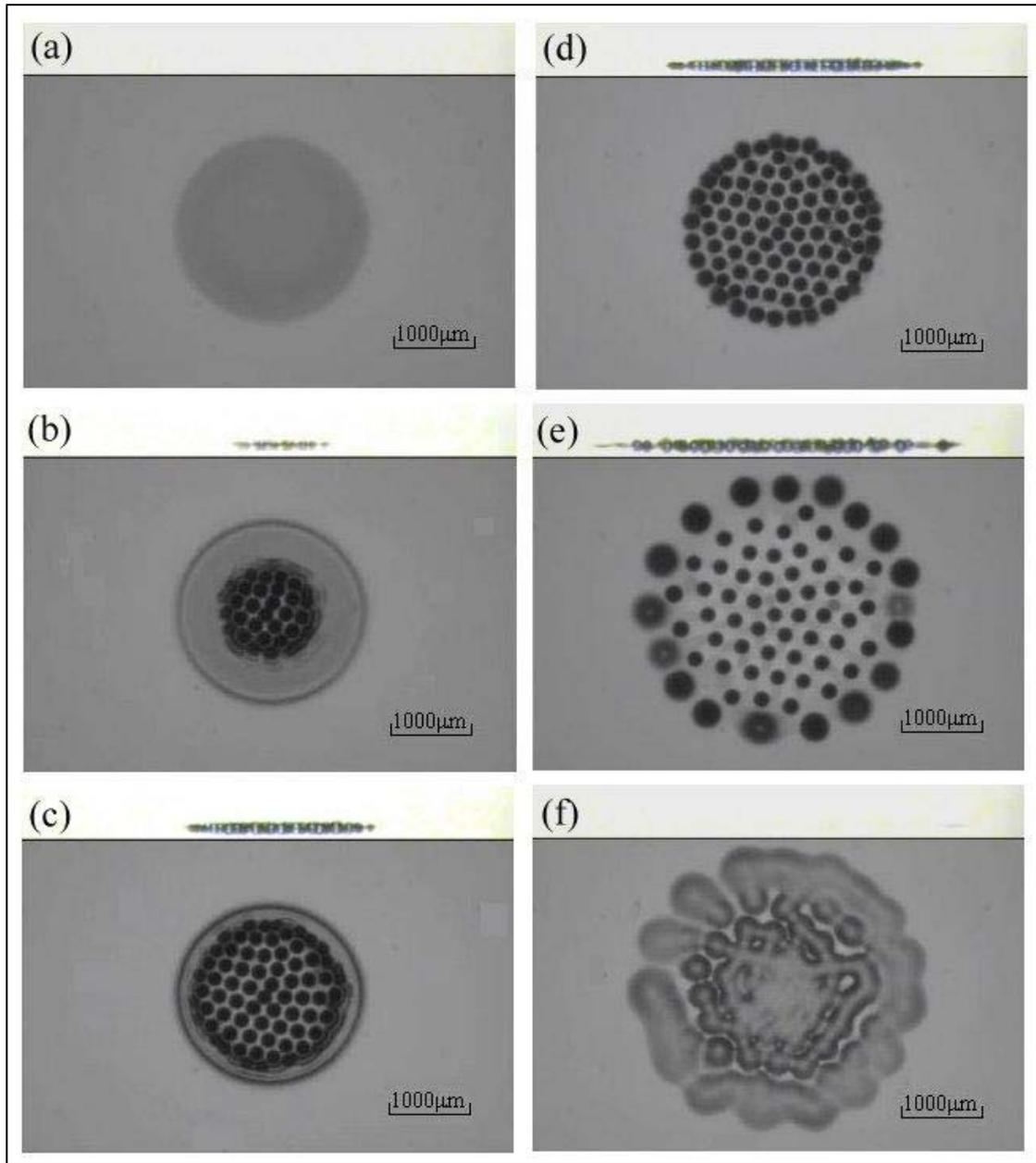


圖 3-10 平板已預濕之磁性液滴且直徑為 $2330\mu\text{m}$ 之分裂情況
 (a) $t=0\text{ s}$, (b) $t=0.2\text{ s}$, (c) $t=0.6\text{ s}$, (d) $t=0.8\text{ s}$, (e) $t=1\text{ s}$ and (f) $t=10\text{ s}$ ($H=0\text{ Oe}$)

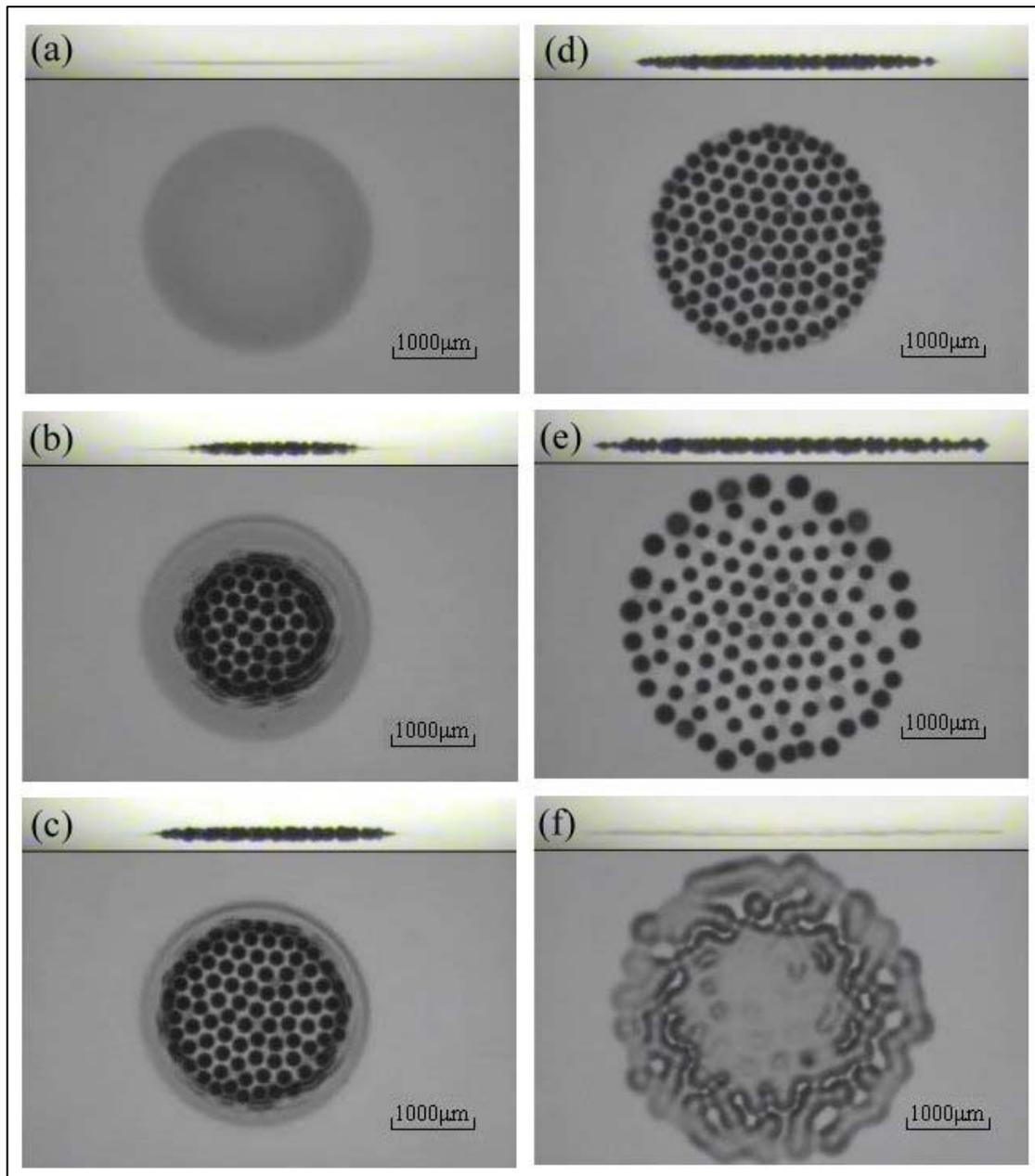


圖 3-11 平板已預濕之磁性液滴且直徑為 $2741\mu\text{m}$ 之分裂情況
 (a) $t=0\text{ s}$, (b) $t=0.2\text{ s}$, (c) $t=0.6\text{ s}$, (d) $t=0.8\text{ s}$, (e) $t=1\text{ s}$ and (f) $t=10\text{ s}$ ($H=0\text{ Oe}$)

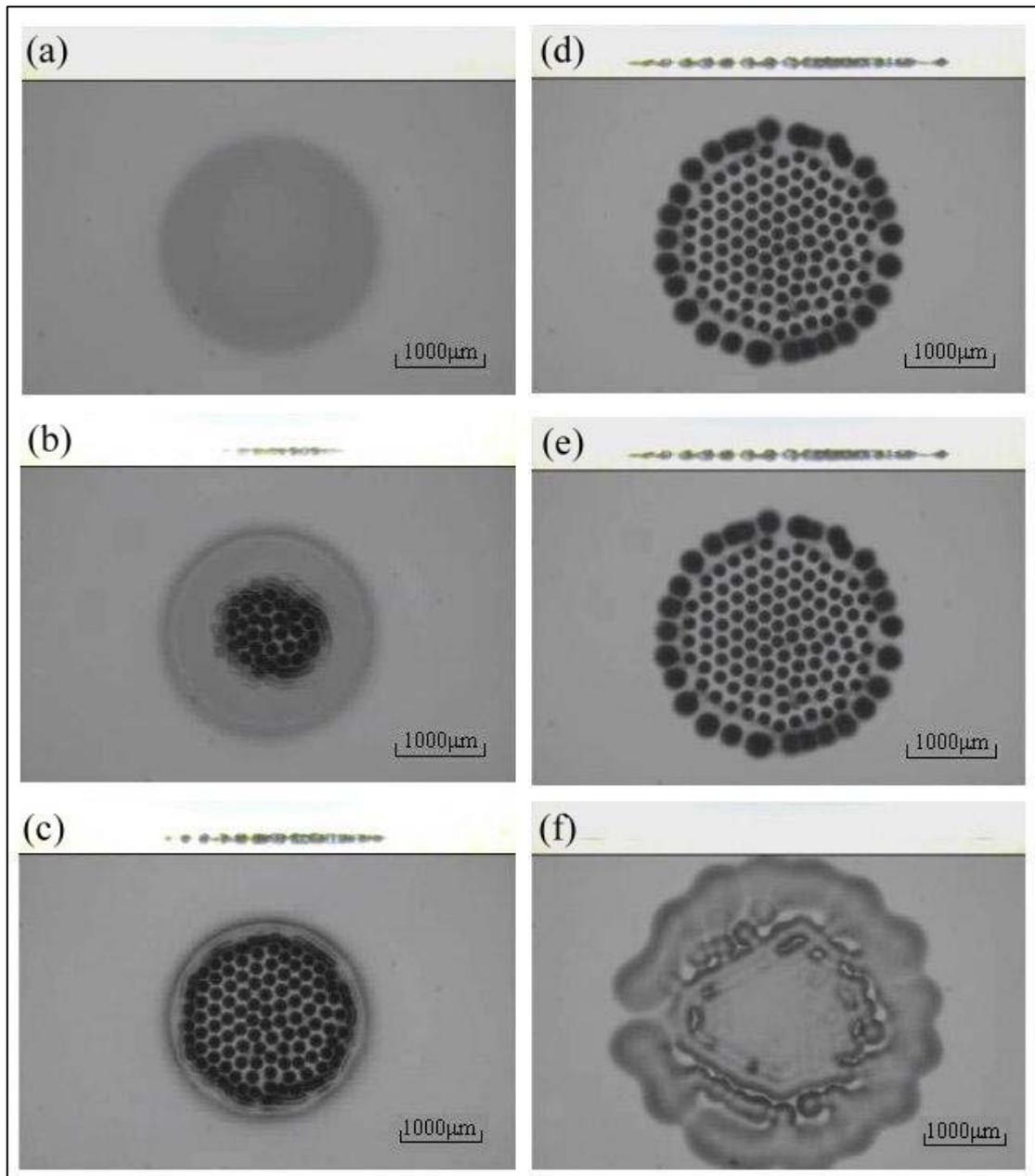


圖 3-12 平板已預濕之磁性液滴且直徑為 $3083\mu\text{m}$ 之分裂情況
 (a) $t=0\text{ s}$, (b) $t=0.2\text{ s}$, (c) $t=0.6\text{ s}$, (d) $t=0.8\text{ s}$, (e) $t=1\text{ s}$ and (f) $t=10\text{ s}$ ($H=0\text{ Oe}$)

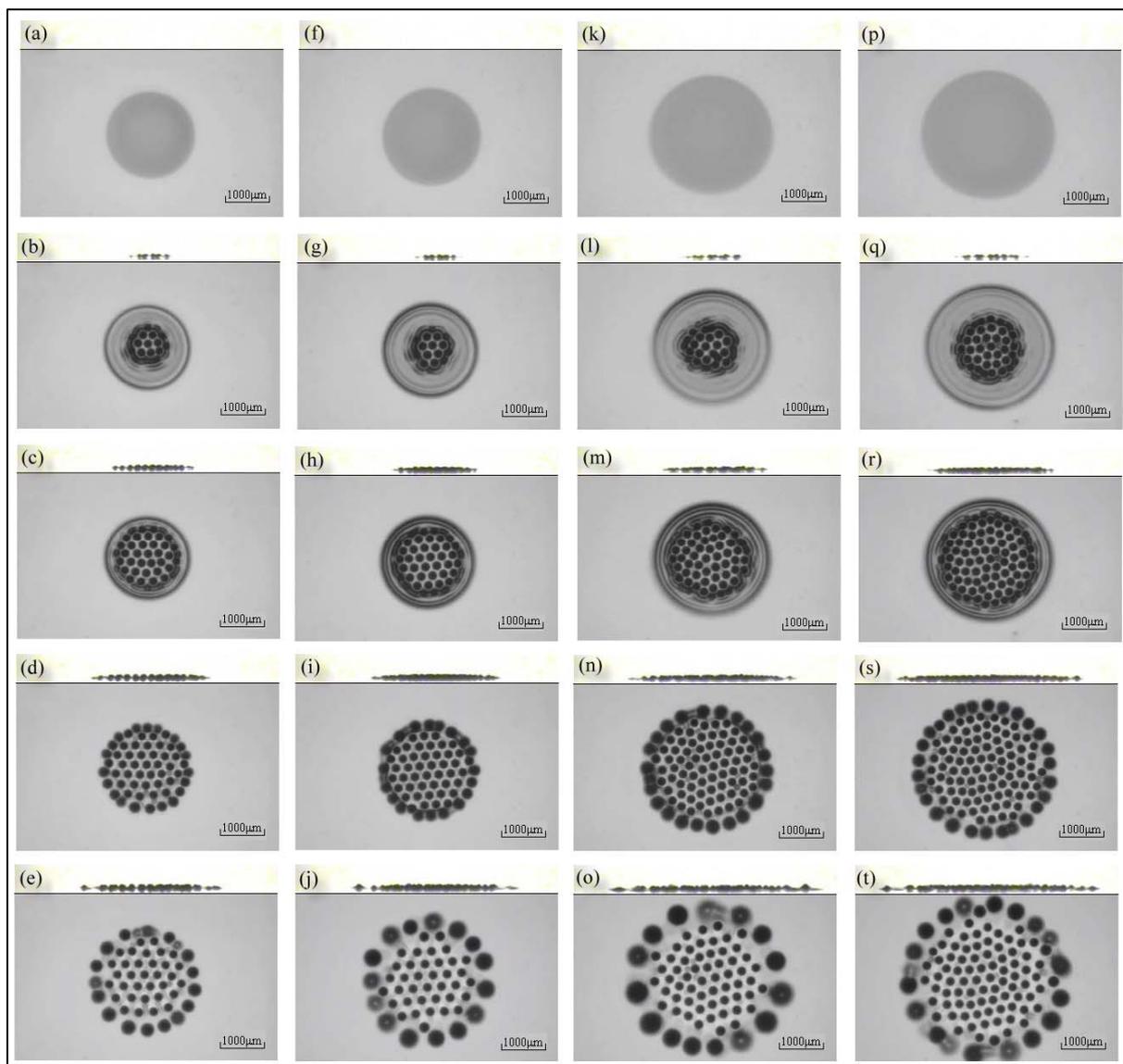


圖 3-13 預濕平板之磁性液滴且磁場為 588Oe 之分裂情況

- (a) (f) (k) (p) $t=0$ s,
 (b) (g) (l) (q) $t=0.2$ s,
 (c) (h) (m) (r) $t=0.6$ s,
 (d) (i) (n) (s) $t=0.8$ s,
 (e) (j) (o) (t) $t=1$ s,

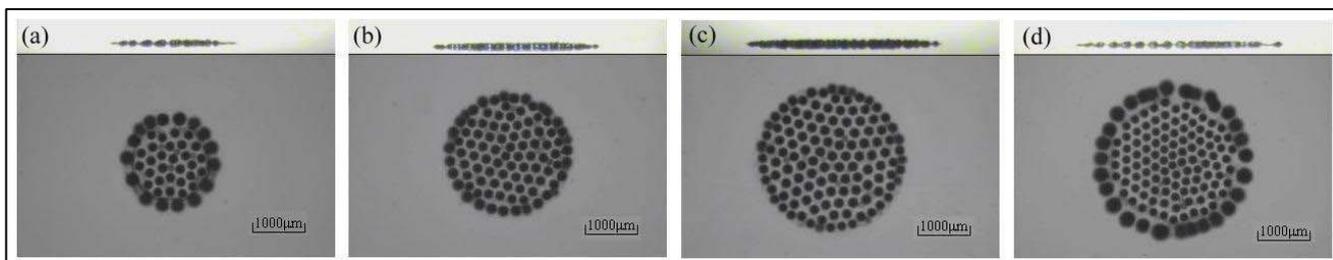


圖 3-14 預濕平板之磁性液滴且磁場為 676Oe 分裂後外圍次液滴坍塌情況

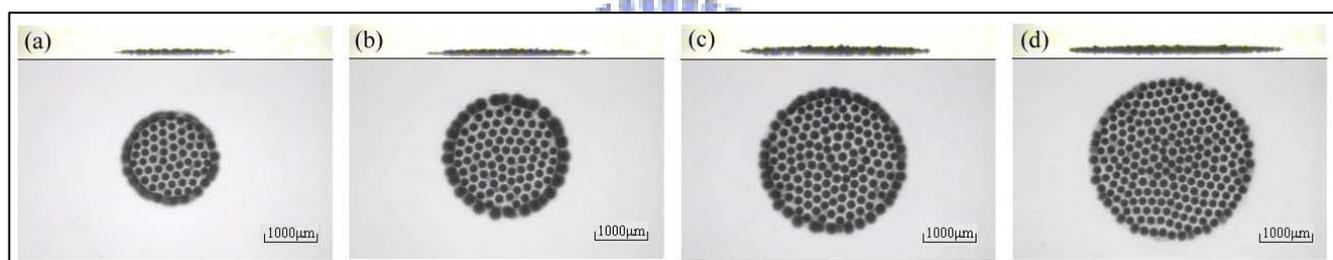


圖 3-15 預濕平板之磁性液滴且磁場為 765 Oe 分裂後外圍次液滴坍塌情況

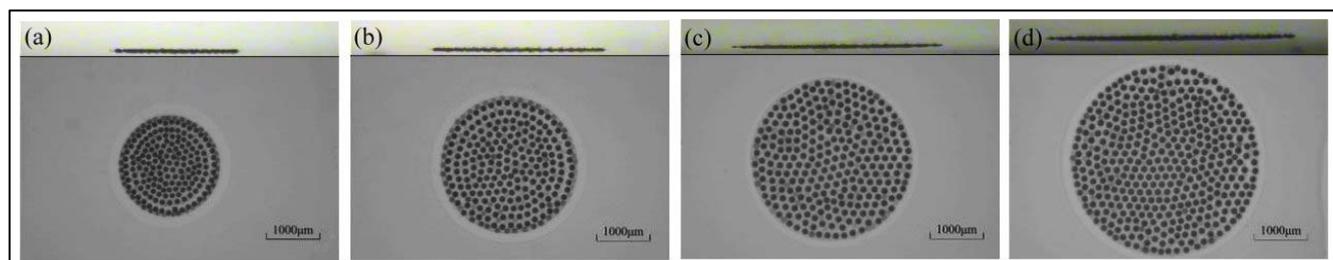


圖 3-16 預濕平板之過飽和磁性液滴且磁場為 765 Oe 分裂後之次液滴分裂情況

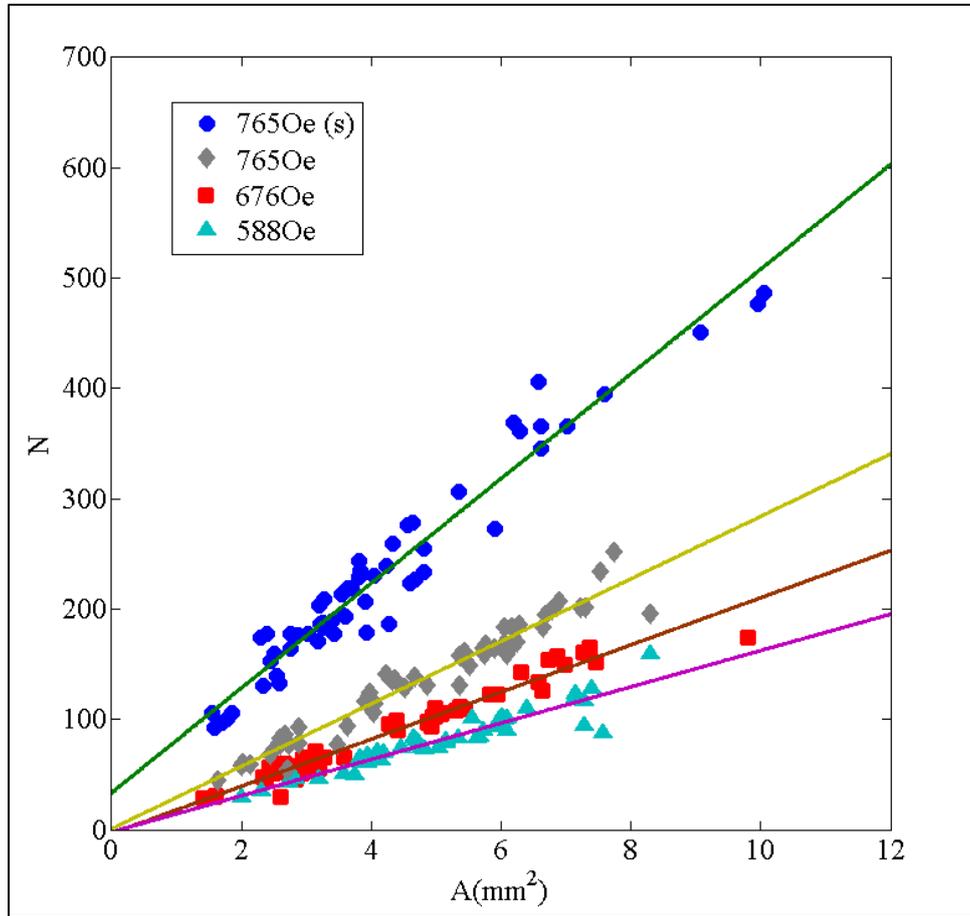


圖 3-17 預濕平板之磁性液滴原始面積與分裂後次液滴顆數關係圖

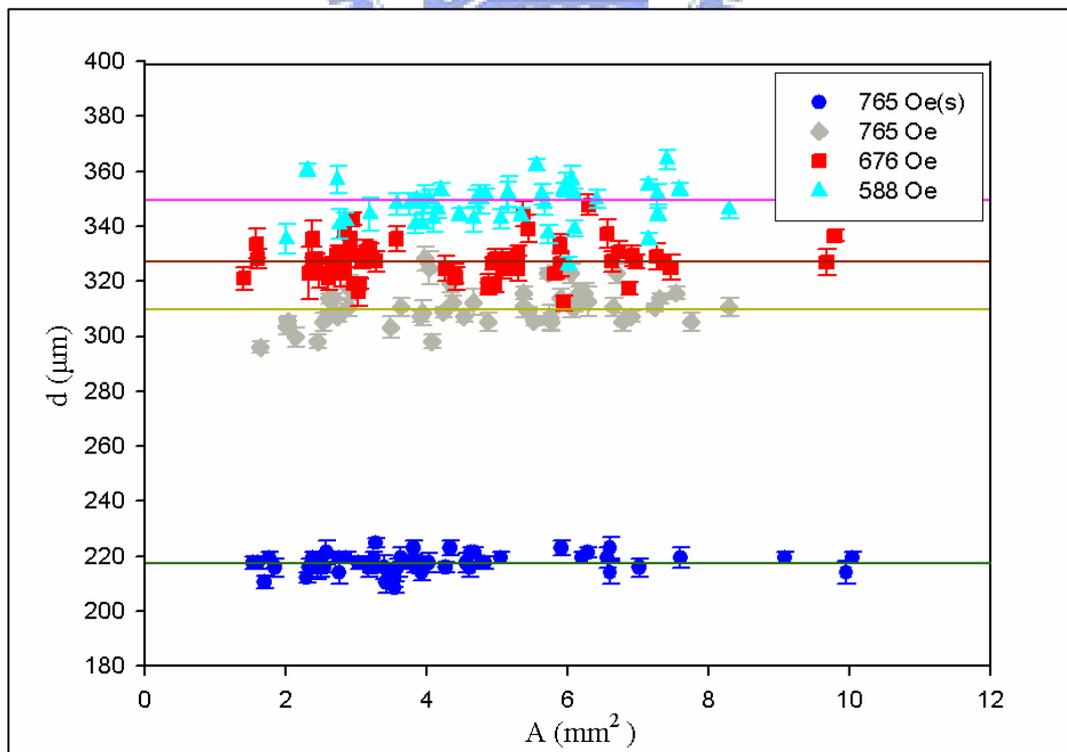


圖 3-18 預濕平板之磁性液滴原始面積與分裂後次液滴大小關係圖

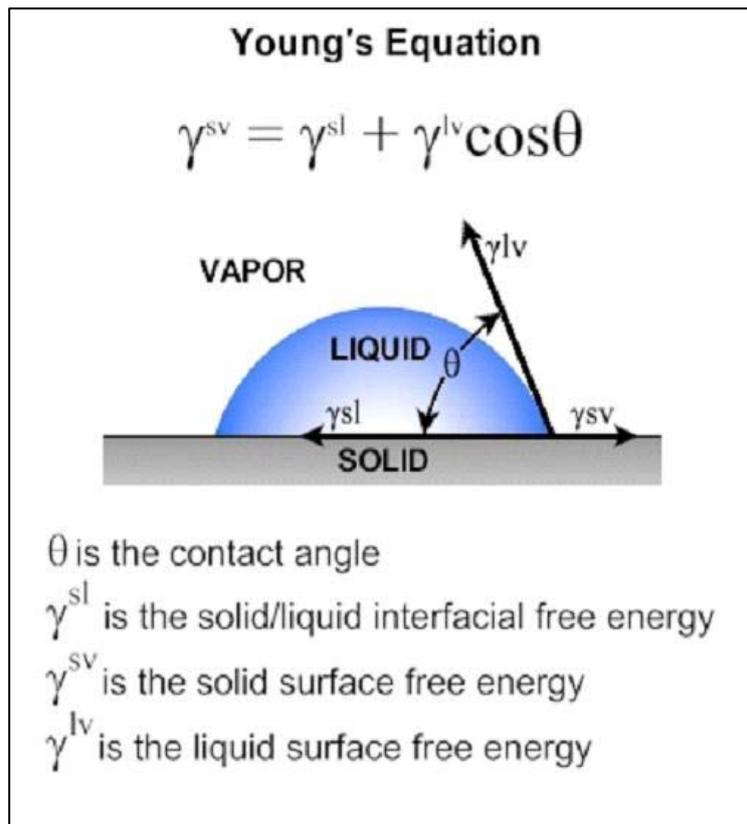


圖 3-19 Young's Equation 介面與表面張力關係

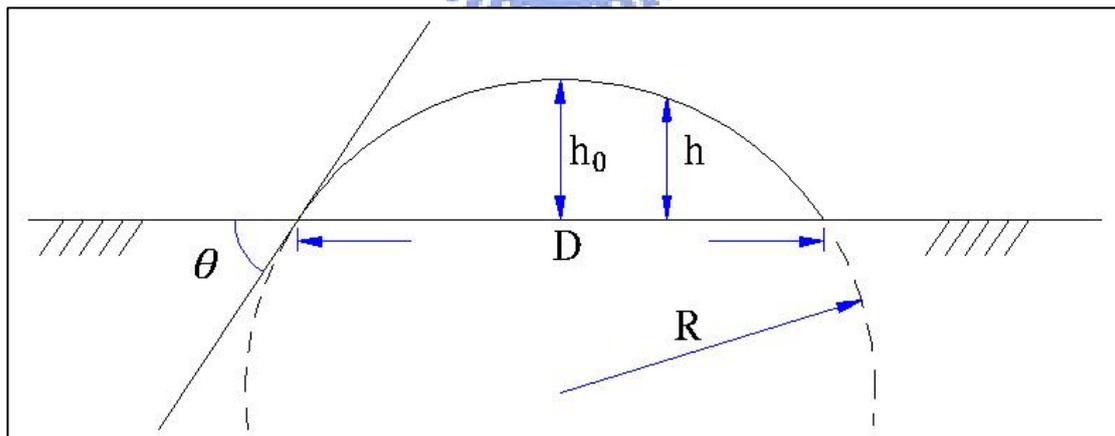


圖 3-20 磁性液滴示意圖

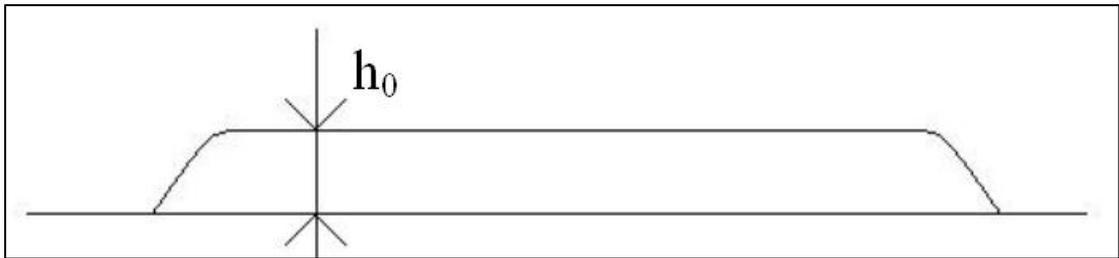


圖 3-21 磁性液滴在預濕平板上之示意圖



I(A)	H(Oe)	\bar{N}	$\bar{d} (\mu m)$	E	M
2.6 (S)	765	223	218	2.87×10^5	475
2.6	765	113	310	2.87×10^5	475
2.3	676	81	328	2.47×10^5	466
2.0	588	63	350	2.06×10^5	454

*A=4mm²

*1Oe=80A/m

第四章 結論

在現今的科學界中，磁性流體的研究漸漸引起學者的興趣，由於磁性流體具有液體的可流動性，又可受到外加磁場的控制，打破了傳統水往下流的觀念，所以在應用上面也有日新月異的突破，然而在於磁性流體受到垂直磁場的作用下，所產生的相關物理機制，也越來越被受矚目，在此研究中磁性流體受到垂直磁場影響下所以產生的介面不穩定現象，成為了對磁性流體不可獲缺的相關研究。

本研究目的在於如何使磁性液滴在利用垂直磁場的作用下，控制磁性液滴產生均勻的分裂，所以使液滴均勻分裂是最主要的課題，由於接觸角 θ 的關係，使得磁性液滴產生較高的液滴中心高度，將實驗接觸條件改成預濕表面來進行實驗，接觸角 θ 大大的減小，使得液滴高度 h 一致，液滴分裂情況也變得相當均勻，分裂後的次液滴體積也都相同，經由推算得到的 $N \propto A$ 關係式，這表示已經可以掌握磁性液滴的分裂趨勢。並從數學式推導出 $d \sim 1/M^2$ 之關係式，將實驗數據代入得到相當吻合之結果，由此可知經由 $N \propto A$ 與 $d \sim 1/M^2$ 兩者關係式，將可以預測分離後次液滴大小及次液滴顆數。

在磁性液滴原始面積為相同大小時，分別在不同磁場及不同飽和度的條件下觀察分裂情形，可以得知分裂速度：穩定性磁性流體 > 過飽和磁性流體；相對地，分裂後次液滴的穩定度：過飽和磁性流體 > 穩定性磁性流體。同時利用尖點技術可以在使用過飽和磁性流體時，在液滴分裂前就可先預測會如何分裂及分裂後次液滴的排列情況。

參考文獻

- [1] R. E. Rosensweig, "Ferrohydrodynamics" Cambridge University Press, Cambridge, (1985).
- [2] E. Blums, A. Cebers, and M. Maiorov, "Magnetic fluids" de Gruyter, New York, (1997).
- [3] H. Yamaguchi, I. Kobori, N. Kobayashi, "Numerical study of flow state for a magnetic fluid heat transport device" J. Magn. Magn. Mater. 201 260-263(1999).
- [4] H. Yamaguchi, I. Kobori, Y. Uehata, "Heat transfer in natural convection of magnetic fluids" J. Magn. Magn. Mater. 13 4, 501~507(1999).
- [5] S. Kamiyama, K. Ueno, Y. Yokota, "Numerical analysis of unsteady gas-liquid two-phase flow of magnetic fluid" J. Magn. Magn. Mater, 201 271~275(1999).
- [6] K. Raj, R. Moskowitz, "A review of damping applications of ferrofluids" IEEE Transaction on Magetics, vol. Mag-16(1980).
- [7] M. Dababneh, N. Ayoub, I. Odeh, N. Laham "Viscosity, resistivity and surface tension measurement of Fe_3O_4 ferrofluid" "J. Magn. Magn. Mater. 125 34~38(1993).
- [8] A. Cebers and M. Maiorov, "Magneto hydrodynamics" (N.Y) 16, 21, (1980).
- [9] S. A. Langer, R. E. Goldstein, and D. P. Jackson, "Dynamics of labyrinthine pattern formation in magnetic fields", Phys. Rev. A 46, 4894, (1992).
- [10] D. P. Jackson, R. E. Goldstein, and A. Cebers, "Hydrodynamics of fingering instabilities in dipolar domains", Phys. Rev. E 50, 298, (1994).
- [11] G. Pacitto, C. Flament, J.-C. Bacir, and M. Widom, "Rayleigh-Taylor Instability with magnetic fluids: Experiment and theory" Phys. Rev. E 62, 7941 (2000).
- [12] A. J. Dickstein, S. Erramilli, R. E. Goldstein, D. P. Jackson, and S. A. Langer, "Labyrinthine Pattern Formation in Magnetic Fluids" Science 261, 1012 (1993).
- [13] C.-Y. Wen, C.-Y. Chen, C.-H. Tsai and D.-C. Kuan, "Labyrinthine Instabilities of a Magnetic Droplet in a Hele-Shaw Cell," Magnetohydrodynamics, 41, 3, 215 (2006).
- [14] C.-Y. Chen, W.-K. Tsai and Jose Miranda, "A hybrid ferrohydrodynamic instability: coexisting peak and labyrinthine patterns," Phys. Review E, 77, 056306 (2008).
- [15] C.-Y. Wen, C.-Y. Chen, C.-H. Tsai and D.-C. Kuan, "Experimental Studies of Labyrinthine Instabilities of Miscible Ferrofluids in a Hele-Shaw Cell," Phys. Fluids, 19, 084101 (2008).
- [16] M. D. Cowley and R. E. Rosensweig, "The interfacial stability of a ferromagnetic fluid", J. Fluid Mech. 30 671, (1967).

- [17] R. Friedrichs and A. Engel, "Pattern and wave number selection in magnetic fluids", *Phys. Rev. E* 64, 021406, (2001).
- [18] S. Rhodes, J. Perez, S. Elborai, S.-H. Lee, and M. Zahn, "Ferrofluid spiral formations and continuous-to-discrete phase transitions under simultaneously applied DC axial and AC in-plane rotating magnetic fields" *J. Magn. Magn. Mater.* 289, 353, (2005).
- [19] C.-Y. Chen, S.-Y. Wu and C.-H. Chen, "Numerical Simulations of Fingering Patterns in a Lifting Flow of Confined Miscible Magnetic Fluid", Proc. of the 13th (ROC) National Conference on Computational Fluid Dynamics, 1306, August 17-19; Taipei County, Taiwan, (2006).
- [20] C.-Y. Chen, Y. S. Yang and Jose Miranda, "Miscible Ferrofluid Patterns in a Radial Magnetic Field," Submitted (2009).
- [21] S. Benka, "Physics update: Peaks and labyrinths in a magnetic fluid", *Physics Today*, 61, 6, 20 (2008).
- [22] M. Zahn, "Magnetic fluids and nanoparticle applications to nanotechnology", *Journal of Nanoparticle Research*, 3, 73, (2001).
- [23] R. Richter and I. V. Barashenkov, "Two-dimensional solitons on the surface of magnetic fluids", *Phys. Rev. Lett.*, 94, 184503, (2005).
- [24] C. Gollwitzer, G. Matthies, R. Rither, I. Rehberg and L. Tobiska, "The surface topography of a magnetic fluid a quantitative comparison between experiment and numerical simulation", *J. Fluid Mech.*, 571, 455-474, (2007).
- [25] 鄭智元, "羅森史維格不穩定現象應用於微液滴分離之研究", 國立雲林科技大學碩士論文, 台灣, (2008).
- [26] O. Sero-Guillaume, D. Zouaoui, D. Bernardin and J. Brancher, "The shape of magnetic liquid drop", *J. Fluid Mech.*, 241-251, (1992).
- [27] A. Lange, H. Langer and A. Engel, "Dynamics of a single peak of the Rosensweig instability in a magnetic fluid", *Physica D*, 140, 194, (2000).
- [28] S. Bohlius, H. Pleiner and H. Brand, "Solution of the adjoint problem for instability with a deformable surface: Rosensweig and Marangoni instability", *Phys. Fluids*, 19, 0941 03, (2007).
- [29] C.-Y. Chen and L.-W. Lo, "Breakup of thin films of micro magnetic drops in perpendicular fields", *J. Magn. Magn. Mater.* 305, 2, 440, (2006).
- [30] C.-Y. Chen and L.-W. Lo, "Influences of Field Conditions to the Rupturing Instability of a Circular Magnetic Thin Film, Magnetohydrodynamic", 42, 1, 31, (2006).
- [31] C.-Y. Chen, C.-H. Chen and L.-W. Lo, "Breakup and Separation of Micro Magnetic Droplets in a Perpendicular Field", *J. Magn. Magn. Mater.*, 310, 2P2, 2832, (2007).

- [32] Z.-Y. Cheng and C.-Y. Chen, “Influences of Wetting Condition to Rosensweig Instability of a Ferrofluid Droplet”, Proc. of the 31st (ROC) National Conference on Applied and Theoretical Mechanics, Dec. 21-22, Kaohsiung, Taiwan. (2007).
- [33] C.Rinaldi, A. Chaves,S.Elborai,X. He and M. Zahn, “Magnetic fluid rheology and flows”Interface Science, 10, 141(2005).

