

# 國立交通大學

機械工程學系

碩士論文

垂直與徑向磁場交互作用應用於塗佈技術之研究

Pattern of Ferrofluid in a Vertical and Radial Magnetic Field and  
Applications in Coating Technology

研究生：巫文良

指導教授：陳慶耀 博士

中華民國一百年七月

垂直與徑向磁場交互作用應用於塗佈技術之研究

**Pattern of Ferrofluid in a Vertical and Radial Magnetic Field and  
Applications in Coating Technology**

研究生：巫文良

Student : Wen-Liang Wu

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 2011**

**Hsinchu, Taiwan, Republic of China**

中華民國一十年七月

# 垂直與徑向磁場交互作用應用於塗佈技術之研究

學生：巫文良

指導教授：陳慶耀

國立交通大學機械工程學系碩士班

## 摘要

本文以實驗方法研究磁性流體於大氣環境下，兩不可互溶系統承受兩種不同磁場形態作用下之界面不穩定的擴展運動情形。不同於傳統旋轉塗佈技術是利用高速旋轉以產生離心力的方式使液體向外擴張，本研究使用徑向磁場所產生的磁力使磁性液體向外擴張而進行塗覆。同時因為磁場強度為線性分佈，其力學機制與旋轉塗佈之離心力機制相似，徑向力與徑向半徑  $r$  皆成正比。於一純粹徑向磁場，因受初使表面張力影響，無法有效率擴展液滴。本研究創新利用垂直磁場先行破壞液滴界面，分裂成數顆液滴，之後再施與徑向磁場，即可有效擴展液滴進行塗佈工作。實驗主要的目的為研究磁場強度與初始液滴大小對液滴擴張運動的影響。此種外觀之劇烈形態變化由一開始之未開啟磁場時所保持的圓形，最後轉變為磁場開啟後期之複雜的指狀化星形。實驗數據分析結果，在徑向磁場機制下無因次面積與時間 ( $A' \sim t'^{\gamma}$ ) 呈現  $\gamma=0.4897$  的指數關係；垂直與徑向磁場機制下無因次面積增加量與時間 ( $\Delta A' \sim t'^{\alpha}$ ) 呈現  $\alpha=0.99959$  的指數關係。

關鍵字：指狀化現象、徑向磁場、塗佈技術。

## 誌謝

很高興進到國立交通大學機械研究所就讀，讓我有更多的學習資源可以利用，更有幸進到「複雜性流體實驗室」，成為研究室的一員。在碩士班的兩年求學過程當中，首先要感謝我的指導老師陳慶耀教授，在課業上的學習或是實驗過程中遇到瓶頸時的鼓勵與引導，讓學生可以在兩年的求學期間順利的完成學業以及研究上論文的呈現；在教授的指導下順利發表至國際期刊 *Physical Review E*，且順利提案“塗佈裝置、塗佈方法以及控制磁性流體之方法”中華民國發明專利申請中，再次謝謝我的指導教授。

感謝同一計畫的詒翔學長在剛開始對我的指導，也要感謝實驗室學長柏瑋、啟鳴、裕盛、佳芬、聖焱、彥宏，在我架設實驗儀器與實驗數據分析上的協助，感謝同窗好友國安、世聰、杰民在碩班修課過程中的互相幫忙，還要感謝實驗室學弟彥志、隆福、育辰、定弘對實驗室活動的協助及雜事上的幫忙，讓我可以更專心於實驗研究上。

最後，更要感謝一路支持我的家人對於我的養育之恩和辛苦的栽培，在求學生涯過程中所給予我很多的鼓勵和支持，使我可以順利完成碩士學位；並且感謝在這段期間內給予我幫助的人，在此獻上最大的敬意和謝意。

# 目錄

摘要.....	i
誌謝.....	ii
目錄.....	iii
表目錄.....	v
圖目錄.....	vi
符號說明.....	ix
第一章 緒論.....	1
1-1 前言.....	1
1-2 文獻回顧.....	4
1-3 研究動機及目的.....	8
第二章 實驗原理、方法及設備.....	27
2-1 實驗儀器說明.....	27
2-2 理論背景.....	28
2-3 實驗步驟.....	30
第三章 結果與討論.....	39
3-1 徑向磁場實驗.....	39
3-2 轉變磁場型態.....	42

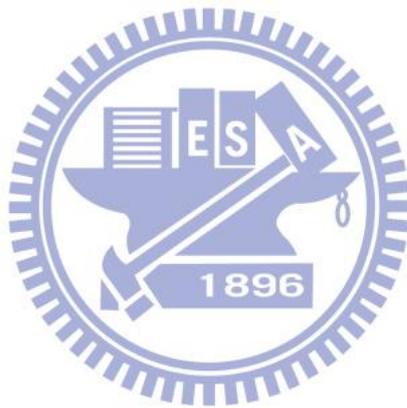


3-3 受到垂直與徑向磁場下產生一連串變化 .....	43
3-3-1 於 2.2A 磁場交互作用 .....	43
3-3-2 於 2.6A 磁場交互作用 .....	44
3-3-3 於 3.0A 磁場交互作用 .....	46
3-3-4 不同徑向磁場大小之比較 .....	47
3-4 磁性液滴塗覆厚度均勻性 .....	48
第四章 結論 .....	75
參考文獻 .....	77



## 表目錄

表 1-1 磁性流體的製造方法.....	26
表 2-1 高斯計規格.....	37
表 2-2 電流與磁場強度對應表.....	38
表 2-3 Light Mineral Oil Based Ferrofluids.....	38



## 圖目錄

圖 1-1 磁性流體包含奈米級鐵磁性粒子、表面活性劑與載基流體.....	11
圖 1-2 羅森史維格結構物[1].....	11
圖 1-3 介面呈現六角形的羅森史維格結構物[2].....	12
圖 1-4 大型容器中產生不穩定單獨波[3].....	12
圖 1-5 利用 X 射線技術觀測磁流體表面產生羅森史維格不穩定現象[4]..	13
圖 1-6 磁性液滴分裂情形[5].....	13
圖 1-7 受垂直磁場影響磁性液滴薄層在預濕情況下所產生分裂之情形[7]	14
圖 1-8 磁性液滴突破可互溶液體層所產生的界面不穩定現象.....	14
圖 1-9 Hele-Shaw Cell 示意圖[9].....	15
圖 1-10 磁性液滴與空氣界面產生之迷宮型不穩定現象[11].....	15
圖 1-11 於 Hele-Shaw 機制，可互溶液體受磁場作用產生迷宮型現象[13]	16
圖 1-12 混合型不穩定之界面分裂[14,15].....	16
圖 1-13 受到垂直磁場及旋轉磁場影響下所產生之界面演變[16].....	17
圖 1-14 模擬受垂直磁場及切線方向磁場影響所產生之現象[17].....	17
圖 1-15 磁性液滴受到徑向磁場作用，產生一連串指狀化現象[18].....	18
圖 1-16 混合水溶液陽離子表面活性劑和有機鹽產生不穩定現象[20].....	19
圖 1-17 徑向磁場作用時界面發展以及指狀化結構的增長[21].....	19
圖 1-18 在旋轉的 Hele-Shaw Cell 中薄液滴層塗佈向外擴展[22].....	20
圖 1-19 數值模擬於旋轉的機制下可互溶液體界面情況[23].....	20
圖 1-20 模擬不可互溶界面下指狀化現象的形狀以及其長度分佈[24].....	21
圖 1-21 磁性液滴在非磁性流體中施以旋轉磁場所產生指狀化現象[25]...	21
圖 1-22 數值模擬高速旋轉中，可互溶液滴界面不穩定現象[26].....	22
圖 1-23 旋轉塗佈指狀化不穩定現象[27].....	22

圖 1-24 高速旋轉產生指狀化現象[28]	23
圖 1-25 聚合物的界面流動圖案[30]	23
圖 1-26 EMG901 在甘油薄層上塗覆過程	24
圖 1-27 EMG901 在大氣中塗覆過程	24
圖 1-28 EMG905 與甘油型態變化(一)	25
圖 1-29 EMG905 與甘油型態變化(二)	25
圖 2-1 實驗設備之架構圖	32
圖 2-2 線圈繪製圖、手工打造線圈與磁場測量示意圖	32
圖 2-3 可程式電源供應器	33
圖 2-4 垂直磁場與徑向磁場示意圖	33
圖 2-5 實驗分析量測 $H_x$ , $H_y$ 以及 $H_z$ 三個方向磁場	34
圖 2-6 徑向距離與磁場大小成近似正比關係-徑向磁場	34
圖 2-7 CCD 攝影機、光學顯微鏡及實驗平台	35
圖 2-8 輕礦油基系列 EMG900/ EMG901/ EMG905	36
圖 2-9 EMG905 磁化率曲線	36
圖 3-1 徑向磁場作用( $H_0 = 288$ Oe), $d = 7.70$ mm, 指狀化過程	50
圖 3-2 徑向磁場作用( $H_0 = 288$ Oe), $d = 6.44$ mm, 指狀化過程	51
圖 3-3 徑向磁場作用( $H_0 = 288$ Oe), 不同液滴直徑所產生指狀化現象	52
圖 3-4 徑向磁場作用( $H_0 = 288$ Oe), 不同磁流體所產生指狀化現象	52
圖 3-5 於徑向磁場作用下( $H_0 = 288$ Oe), 面積比較圖	53
圖 3-6 不同機制磁場作用產生一連串指狀化現象	54
圖 3-7 不同機制磁場作用, 面積比較圖	55
圖 3-8 垂直與徑向磁場作用面積隨時間成長的各階段	55
圖 3-9 垂直與徑向磁場作用( $H_0 = 211$ Oe), $d = 6.35$ mm, 指狀化過程	56
圖 3-10 垂直與徑向磁場作用( $H_0 = 211$ Oe), $d = 5.12$ mm, 指狀化過程	57

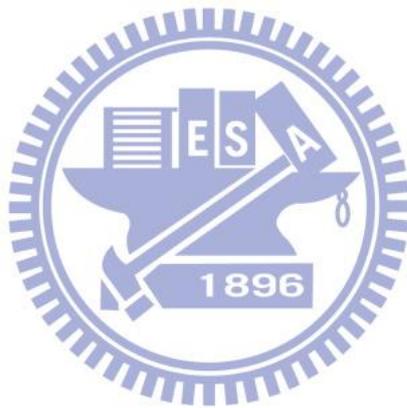
圖 3- 11 垂直與徑向磁場作用( $H_0 = 211$ Oe), $d=5.39$ mm, 指狀化過程 .....	58
圖 3- 12 垂直與徑向磁場作用( $H_0 = 211$ Oe), $d=7.16$ mm, 指狀化過程 .....	59
圖 3- 13 垂直與徑向磁場作用( $H_0 = 211$ Oe), $d=7.37$ mm, 指狀化過程 .....	60
圖 3- 14 垂直與徑向磁場作用( $H_0 = 211$ Oe), $d=7.50$ mm, 指狀化過程 .....	61
圖 3- 15 垂直與徑向磁場作用( $H_0 = 211$ Oe), $d=7.95$ mm, 指狀化過程 .....	62
圖 3- 16 垂直與徑向磁場作用( $H_0 = 211$ Oe), 不同液滴直徑指狀化過程....	63
圖 3- 17 垂直與徑向磁場作用( $H_0 = 250$ Oe), $d=5.31$ mm, 指狀化過程 .....	64
圖 3- 18 垂直與徑向磁場作用( $H_0 = 250$ Oe), $d=6.03$ mm, 指狀化過程 .....	65
圖 3- 19 垂直與徑向磁場作用( $H_0 = 250$ Oe), $d=6.04$ mm, 指狀化過程 .....	66
圖 3- 20 垂直與徑向磁場作用( $H_0 = 250$ Oe), $d=6.75$ mm, 指狀化過程 .....	67
圖 3- 21 垂直與徑向磁場作用( $H_0 = 250$ Oe), 不同液滴直徑指狀化過程....	68
圖 3- 22 垂直與徑向磁場作用( $H_0 = 288$ Oe), $d=5.11$ mm, 指狀化過程 .....	69
圖 3- 23 垂直與徑向磁場作用( $H_0 = 288$ Oe), 不同液滴直徑指狀化過程....	70
圖 3- 24 垂直與徑向磁場作用, 面積比較圖.....	71
圖 3- 25 所有受垂直與徑向磁場作用範例的指數分佈 .....	72
圖 3- 26 不同徑向磁場大小下, $N_p$ 與 $N_f$ 分佈圖 .....	72
圖 3- 27 受垂直與徑向磁場作用, 不同直徑大小及指狀化數目的探討 .....	73
圖 3- 28 不同亮度 $I_g$ 值的比較分析 .....	73
圖 3- 29 不同磁場機制下其面積塗覆過程, 均勻度之變化 .....	74

## 符號說明

$d$	磁性流體液滴直徑
$H$	磁場強度
$\mu$	磁性流體黏滯度
$\rho$	磁性流體密度
$M_s$	磁性流體飽和磁化率
$H_v$	垂直磁場
$H_r$	徑向磁場
$H_x$	$x$ 方向之磁場
$H_y$	$y$ 方向之磁場
$H_z$	$z$ 方向之磁場
$r$	徑向距離
$L$	中心點距離邊界之距離
$f_m$	單位體積磁力
$\tau$	特徵時間
$A_0$	初始面積
$I_g$	灰階之亮度強度值
$A'$	面積無因次化



$t'$	時間無因次化
$\Delta A$	面積增加量
$\Delta A'$	無因次化面積增加量
$N_p$	液滴外圍顆數
$N_f$	液滴產生指狀化根數



# 第一章 緒論

## 1-1 前言

鐵磁性流體(ferrofluids，或簡稱為磁性流體)為一人工合成流體，為一九六五年由美國航空太空總署(NASA) S.S.Papell 發明，當時阿波羅計劃首創人類登入月球時，其磁性流體因而首度亮相，由於太空人漫步月球時，處於真空狀態，必須利用磁性流體使太空衣內部保持一定的大氣壓力並且能使頭盔可以自由旋轉，而發明了磁性流體。

磁性流體的組成，包括奈米級鐵磁性膠粒子(氧化鐵粒子)、表面活性劑與載基流體如圖 1-1 所示。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，並將其均勻溶解於載基流體中。磁性流體之鐵奈米粒子通常來自於磁鐵礦、赤鐵礦或是其它包含鐵的混合物。一般而言，導磁體通常為固體，像是鐵、鈷、鎳及其合金。而磁流體為一種固液共存的磁性材料，既具有液體的流動性，又有導磁固體的物理特性。因此我們可以利用磁性流體的這項特性，藉由外加的磁場來控制磁性流體運動方式，而磁性流體又稱為智慧型流體或功能型流體。

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所示。

磁性流體為平均粒徑約為10奈米，由具強磁性之鐵氧化合物，通常可將此強磁性超微粒表面包覆一層界面活性劑，而透過界面活性劑的作用或是以布朗運動之方式均勻散佈於溶媒中的膠體溶液，磁性奈米粒子受到布朗運動之影響，因此較不易受到磁力、凡得瓦力及重力的影響而產生聚集沉澱。

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，打破了傳統水往低處流的觀念，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磁場效應的作用下，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。

磁性液體在不同磁場強度作用下，其黏滯度也會有所改變，而這項特性可使磁性液體有效地應用於阻尼機構中。在工業方面，磁懸浮式旋轉機制使旋轉軸承少了摩擦阻力的限制，所以可製造高速旋轉儀器，如高速渦輪引擎、高速分子渦輪幫浦、汽車引擎等，超強磁鐵材料更使得發電機的發電效率大幅提昇。磁性奈米粒子也可大幅提升磁記錄媒體的超高儲存容量，如磁碟、磁碟機等。在交通方面，磁性粒子也能應用在超高速、無噪音、無磨擦兼節能省電又具環保效益的磁浮列車。磁性液體中的奈米顆粒可穿過細胞膜，並且可以隨著人體代謝排除體外，目前在生物醫學方面，廣泛地應用於多種生物醫學檢測和醫藥治療的應用上，如定點標靶藥物傳輸、精確釋藥、大幅提高基因治療的有效轉殖效率、改進醫學影像對比劑的效應與磁熱治療，以及快速有效地分離細胞、DNA和各種生物單元等方面有相當大的發展性。於微機電系統與生醫檢測技術中，常需要有於微量液體樣本中採取更微量檢體之情形，故也有學者研究磁性液滴分裂，可發展一簡易非侵入式且快速之微液滴分割技術，應用於進行微量液體分割與收集之技術。而磁性流體中的熱磁自由對流效應也遠比一般重力環境下浮

力誘導的自然對流還要顯著，因此可用來加強變壓器等高功率散熱裝置的冷卻效率。磁性流體也可當作一種冷卻劑，當溫度高於某一定值時，磁性流體將不再具有磁性，附近溫度低的流體將會將其推出，而當溫度下降後，磁性液體又會再被吸引，將無磁性的流體推出，如此的循環之下，可達到散熱的效果。在旋轉機構之接觸面上滴些磁性流體，藉由磁場將其限制於固定的地方，使磁性液體能夠在所設計的位置上扮演油封的角色。另外，利用磁性液體在徑向磁場下可達到近似於旋轉塗佈的效果，可用於半導體產業的晶圓。

現階段成熟的磁性流體技術應用在很多方面：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。於國防科技上，美國空軍引入磁流體和非磁性物質製成的雷達吸波材料作為飛行器上的塗料，這種材料減少電磁波反射因而減少飛行器被雷達所偵測。於醫療領域中，可被用於癌症的檢測，同時有許多醫療實驗利用鐵磁流體摘除腫瘤，鐵磁流體可以被注入腫瘤體並被置於快速變化的磁場當中，由此鐵磁流體在腫瘤中運動產生摩擦熱從而破壞腫瘤。於太空科技中，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。

液體旋轉塗佈在現今半導體產業之應用佔有重要的地位，半導體產業對於矽晶圓表層覆膜所採用之旋轉塗佈方式其需求也是日新月異。由於薄膜的形成是將高分子溶液注於晶圓之中心點，再靠著高速旋轉晶圓所產生之離心力，使得中心點的溶液可以均勻的向外側擴散，最後達到我們所需要的厚度即完成塗佈程序。而因為離心力的作用，在旋轉塗佈時所產生的不穩定指狀化會在連續薄膜波前處產生，由於流體向外發展時會選擇阻力少的突出不穩定指狀物向外擴散，因此液體在晶圓表面之最大塗佈面積無法達到有效率的最大值，也成為半導體製程上需要突破的一門課題。

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，於磁性流體在 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之一。本文將近年來研究於一微小磁性流體液滴，受不同型式磁場下，產生之界面型態變化進行介紹，並試圖以不同接觸條件及流體組合，操控其界面型態變化。

旋轉塗佈技術為將塗佈溶液置於欲塗覆之平面中心，接著旋轉平面產生離心力使得溶液可以向外延展，而塗覆於平面上。本文建立一新的磁力機制，與旋轉塗佈中旋轉所產生之離心力，兩者皆與徑向距離  $r$  成正比且可以避免高速旋轉塗佈時所產生之儀器不穩定、過熱、以及安全上種種之顧慮，本實驗試圖以靜止裝置之徑向磁力取代高速旋轉之塗佈技術。

此裝置將可有效且簡易進行具磁性之液體薄層塗佈之須要。本實驗裝置採用磁場變化所產生的磁力以取代傳統旋轉塗佈之離心力，研究與探討當微小磁性液滴置此平板上，藉由磁性液滴受徑向磁場梯度之改變，會產生一類似旋轉塗佈之新型態輻射型界面不穩定現象。

## 1-2 文獻回顧

利用一組Helmholtz線圈通以固定電流，以產生垂直磁場或徑向磁場，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，則可於實驗平板上產生一均勻向上之垂直磁場。界面不穩定現象可分為四大類型，於傳統磁性流體研究中受一均勻垂直磁場影響下之界面型態可分為 (1)羅森史維格不穩定; (2)迷宮型(Labyrinthine)不穩定現象。上述羅森史維格型與迷宮型二不穩定型態，因其力學機制均不相同產生不同的界面型態，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。若將Helmholtz線圈施以相反方向之電流，則於實驗平板上產生一線性磁場大小之徑向磁場，其型態為(4)複雜指狀化現象。

磁性流體受到磁場之作用下而產生界面不穩定現象，在工程科學和藝術上也使學者感到興趣；將磁性流體放置在載具上，施以垂直磁場於液滴中心，此時磁性流體並無加上蓋限制，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，磁性液體與空氣之界面產生新型態的結構物(如圖1-2)，此結構物即為羅森史維格不穩定現象[1]。經Zahn學者的研究發現，在兩個相鄰的羅森史維格結構物介面間呈現六角形的形狀(如圖1-3)，這種情形跟磁性流體最小表面張力有相當大的關係存在[2]。

而另一個代表性研究是Rither等學者，在大型的載具上放置大量的磁性流體，使磁性流體擁有較大面積及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1-4)可以明顯地發現一些不穩定的單獨波[3]。利用X射線技術Gollwitzer et al. 觀測磁性流體表面產生之羅森史維格不穩定現象，透過有限元素法模擬出磁性流體表面趨勢，觀察到在持續增加的磁場中，因為磁場的不均勻現象使得羅森史維格現象由容器邊緣逐漸往中心發生[4] (如圖1-5)。

磁性液滴在均勻垂直磁場的作用下產生的不穩定分裂已由實驗觀察所得[5,6] (如圖 1-6 所示)，這些磁性液滴分裂之模式與初始尺寸大小有一定的關聯性，有四種不同磁性液滴的分裂模式。

將羅森史維格不穩定現象應用在於微液滴的分裂，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，來進行液滴分隔及收集[7] (如圖 1-7)，在此研究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。另外也有學者研究在液滴有限高度之不可互溶與可互溶液體層內，當受到垂直磁場影響下，磁性液滴突破不可互溶液體層或可互溶液體層所產生的界面不穩定現象(如圖 1-8) [8]。透過對磁性流體更進一步的了解，像是流動性和不穩定性，可使磁性流體應用在許多方面，例如熱效應及生物醫學應用也兼具藝術的價值等。

若將羅森史維格不穩定現象之實驗條件改變，將磁性流體液滴受限於二平板間(形成所謂Hele-Shaw Cell，如圖1-9) [9]，並施予與平板垂直之磁場，因原欲往上方突出發展之突峰型受上平板限制無法形成，故而轉而往與平板平行之方向進行，並而產生複雜迷宮式之型態[10,11,12]。圖1-10為空氣中屬於不可互溶兩種流體界面，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。而在可互溶液體界面實驗中；Wen et al.等學者透過低黏滯度柴油和磁性流體進行可互溶實驗觀察，當磁性流體受到垂直磁場下會形成數個大波指狀化不穩定界面產生[13] (如圖1-11)。而磁性流體受垂直磁場所產生的另一種界面不穩定現象，Chen et al.在磁性流體與可互溶液體的實驗中發現羅森史維格不穩定與迷宮化現象同時存在的現象。磁場開啟後，首先迅速地產生羅森史維格突出峰，此突出峰逐漸地隨著時間而慢慢衰退，最終又再浸入周圍之可互溶液體[14,15] (如圖1-12)。

磁性流體除了受到單一磁場會產生不穩定現象外，若使磁性流體同時受兩種磁場之影響也會產生另一種形式的不穩定現象。Rhodes et al.將磁性流體置於Hele-Shaw Cell機制中，同時施予垂直磁場及旋轉磁場，當磁性流體受垂直磁場影響時產生迷宮化現象，同時又受到順時針方向的旋轉磁場之影響而使得磁性流體分支末端產生了順時針方向的彎曲[16] (如圖1-13)。此外，其他學者利用數值模擬的方式，研究磁性流體受垂直磁場及切線方向磁場影響所產生之複雜性指狀化現象[17] (如圖1-14)。

磁性流體除了受到傳統磁場機制作用之外，近期也有學者研究當磁性液滴受到徑向磁場所產生的指狀化現象，此種型態之不穩定現象，也有不少相關文獻。Chen et al.在實驗當中將磁性流體薄層滴於平板上，在磁性流體表層覆蓋可互溶之溶媒，開啟徑向磁場後可看見原本為圓形的磁性液滴發展成為煙火般之指狀化現象[18] (如圖1-15)。文獻中針對不同原始直徑的液滴及不同磁場強度下所產生之指狀化現象做了分析[19]。

另一個研究，在注入機制亦有許多介面不穩定現象的探討。Podgorski et al.指出在均勻混合水溶液陽離子表面活性劑和有機鹽之間，會產生一個指狀化的高彈性蟲狀膠束液不穩定現象，此指狀化的穩定度取決於兩溶液注入的速度(如圖1-16) [20]。Oliveira模擬當徑向磁場作用時界面的穩定性以及指狀化結構的增長反應，並預測磁性液滴在旋轉Hele-Shaw Cell 受到徑向磁場的作用所發生的情況(如圖1-17) [21]。Chen et al.指出在旋轉的Hele-Shaw Cell 機制中，注入可互溶液體所導致薄液滴層塗佈向外擴展 (如圖1-18) [22]。

至於本文所欲探討之指狀化不穩定其先前相關研究文獻分別針對於不可互溶和可互溶界面作探討，在此兩種界面不同界面研究上，其不穩定現象使很多學者感到興趣，產生界面不穩定的力學機制為磁場作用的徑向力，本實驗所產生徑向磁場與旋轉力學機制類似，我們嘗試進行作一些比較。

有多篇文獻以不同理論方法加以探討旋轉機制。Chen et al.以數值模擬於旋轉機制下，可互溶液體中受到離心力與科氏力效應，對其形態變化產生重大影響[23] (如圖1-19)。Miranda et al利用數值模擬，發現在旋轉的Hele-Shaw Cell 不可互溶界面下，液體的黏滯度影響指狀化現象的形狀以及其指狀化長度分佈。當指狀化現象發生或是切斷的時候，其混合界面內部流體黏度較小[24] (如圖1-20)。Lebedev et al.將磁性液滴滴入相同密度之非磁性液體中，並施加旋轉磁場，發現當旋轉磁場有微小的偏差時，對於旋

轉運動的液滴會有重大的影響[25] (如圖1-21)。Chen et al.數值模擬出高速旋轉可互溶液滴在Hele-Shaw Cell 中呈現出具傾斜角之指狀化不穩定現象[26] (如圖1-22)。Wang et al.實驗研究中，研究了旋轉塗佈的指狀化不穩定與最大半徑現象會受到高旋轉Bond 數的影響，並指出透過注入方式在高Bond 數與低Bond 數會造成指狀化數量與最大半徑之不同[27]，其實驗結果如下圖(如圖1-23)。Holloway et al.研究發現旋轉速度與指狀化數目的關係[28] (如圖1-24)，有關於流體力學的液滴界面不穩定現象會產生特殊的形狀或是對稱性，創造了對於藝術上設計的可能性[29,30] (如圖1-25)。其中旋轉塗佈之力學機制與本實驗所產生徑向磁場的力學機制極為相似，因此本研究的徑向磁場界面不穩定與旋轉塗覆離心力產生之界面不穩定可做為類比。

### 1-3 研究動機及目的



磁性流體具有液體的可流動性，又可受外部磁場效應的改變來控制其運動模式，因此又被稱為智慧型流體。除此之外磁性流體的性質如：比重、表面張力、黏滯性及光學分異性等皆會因外部磁場的改變而有所改變，因此增加了工程研究的應用範圍，欲充分進行上述磁性流體之應用，必需對於磁性流體的操控性有充分的了解。然而磁性流體的應用不僅僅跨足了機械、微機電甚至是生醫工程方面有越來越多的學者感到興趣，本實驗研究磁性液滴受到兩種不同磁場影響，磁性液滴界面發生改變產生像旋轉塗覆的指狀化。

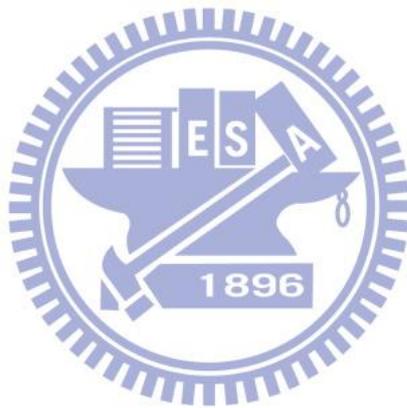
磁性液滴有許多相關文獻，多數在理論和實驗上分別針對可互溶[31-34]與不可互溶[35-38]的複雜指狀化不穩定現象作探討重點，因此我們打算在研究中，以創新磁場的條件下，嘗試在徑向磁場，觀察磁流體於不可互溶界面不穩定現象之研究。本實驗主要研究不可互溶(於大氣中)具磁性的液滴介面行為的轉變，實驗當中所產生的徑向磁場與傳統旋轉塗佈研究相類

似之力學機制作比較，在此線性磁場強度下，磁場強度大小對磁性液滴施加之向外的徑向磁力與其徑向距離成正比關係。文中利用垂直磁場與徑向磁場兩個不同的磁場機制下進行具磁性液滴的塗覆，起初磁性液滴的分裂改變初始液滴形狀，接著轉換磁場機制為徑向磁力往外進行塗覆，其中磁場產生的徑向力與旋轉塗佈中高速旋轉產生之離心力具有相同之力學機制，故可將徑向磁場與旋轉塗佈離心力產生之界面不穩定可做為類比；但兩種機制不同的地方，於旋轉塗佈實驗所需之高轉速儀器，其精準性及安全性都有所顧慮，使用徑向磁場於靜止之實驗系統中，可望得到操作簡單且量測容易之實驗數據。

在未來新發展的科技中 3C 產品不斷的精美化，應用於半導體產業更成為不可或缺的一部分。除了利用傳統旋轉進行塗覆外，本實驗所採用的徑向磁場可與旋轉塗覆有相似的力學機制，且避免高速旋轉塗佈時所產生之儀器不穩定、過熱、以及安全上種種顧慮。在此研究中更創新改變磁場機制，利用垂直磁場先行破壞液滴界面之後再施與徑向磁場，即可有效率擴展液性液滴進行所需的塗佈工作。

除了上述的指狀化現象的探討，吾人在起初研究磁性流體的界面型態的演變也觀察到不同條件之下磁性液滴型態上的變化。圖 1-26 為使用 EMG901 磁性液滴滴於甘油薄膜層上，兩者為不可互溶，距中心 7.5mm 產生大約 102 Oe 的徑向磁場，液滴均勻的往外進行塗覆。圖 1-27 為使用 EMG901 直接滴於玻片上與大氣之中，距中心 7.5mm 產生大約 102 Oe 的徑向磁場，兩者為不可互溶之探討，相似於一般常見的旋轉塗覆方式，但在此實驗條件下很難控制可以達到均勻的往四周塗覆。圖 1-28 為先使用 EMG905 滴於玻片上再於液滴中央滴入甘油；開啟垂直磁場，加上距中心 15mm 產生大約 300 Oe 的徑向磁場，在垂直磁場作用下，在中央外圍形成環狀並在外面周圍產生數顆小液滴，最後只受徑向磁場影響外圍液滴往外塗覆。圖 1-29 為先在玻片上滴入小顆甘油再注入 EMG905 磁性液滴；開啟

垂直磁場，距中心 15mm 產生大約 300 Oe 的徑向磁場；於垂直磁場下在中央形成串連的小液滴並在外面周圍產生數顆小液滴，不同於圖 1-28，位於中央的串連液滴會隨著磁場作用下液滴顆數改變，最後只受徑向磁場影響外圍液滴往外塗覆。



## Technology Overview

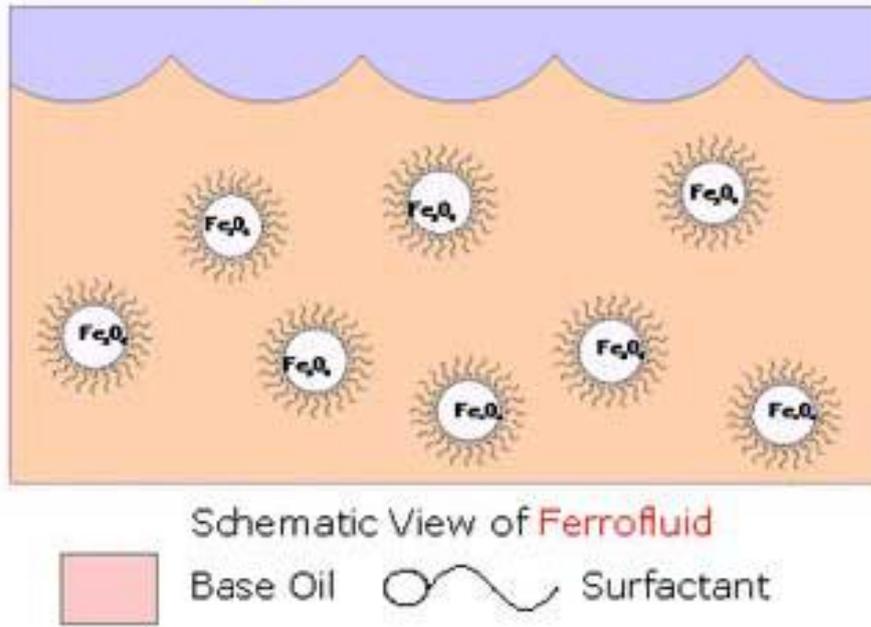


圖 1-1 磁性流體包含奈米級鐵磁性粒子、表面活性劑與載基流體



圖 1-2 羅森史維格結構物[1]

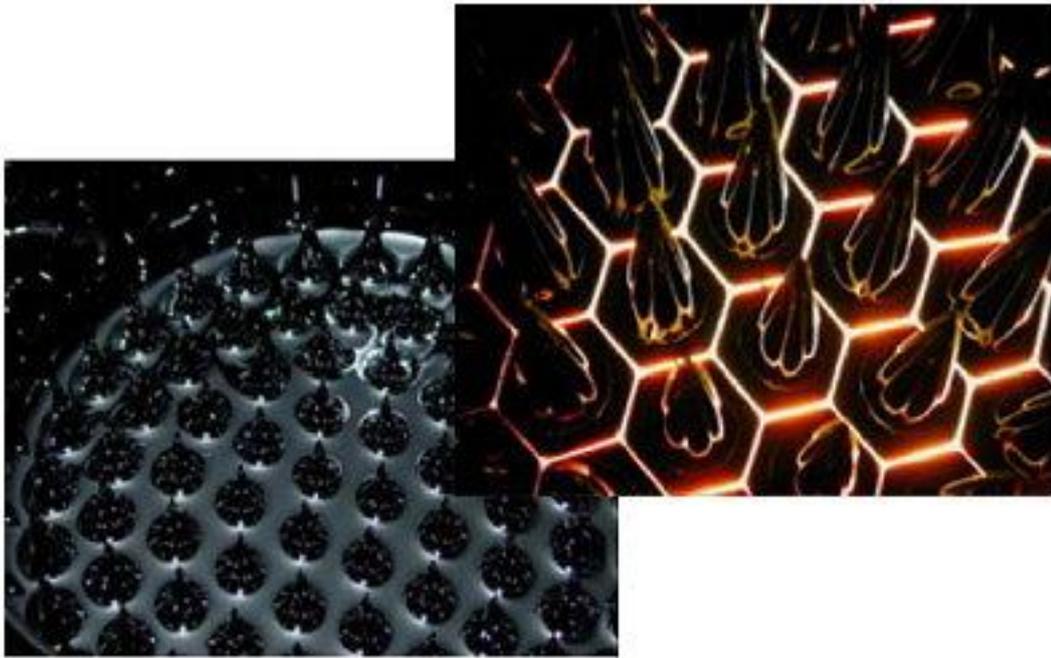


圖 1-3 介面呈現六角形的羅森史維格結構物[2]



圖 1-4 大型容器中產生不穩定單獨波[3]

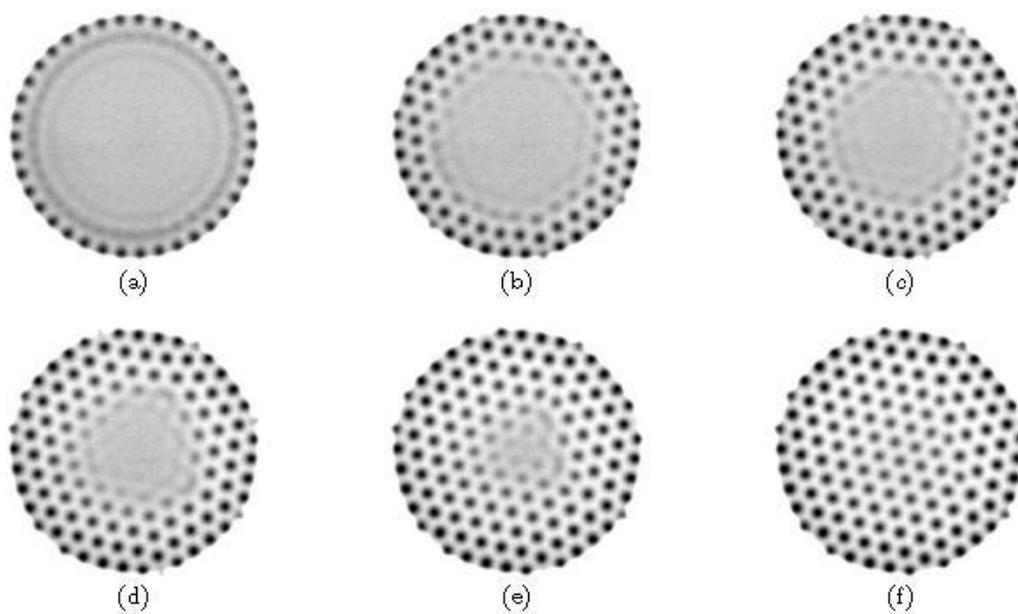


圖 1-5 利用 X 射線技術觀測磁流體表面產生羅森史維格不穩定現象[4]

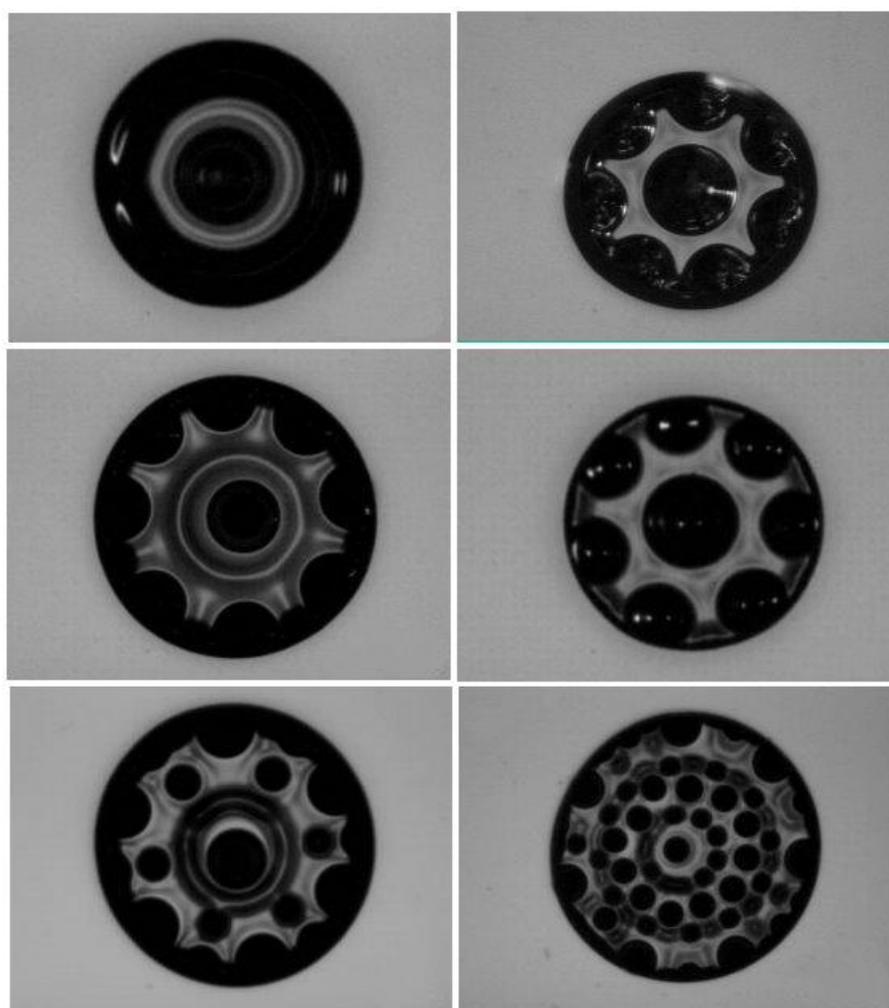


圖 1-6 磁性液滴分裂情形[5]

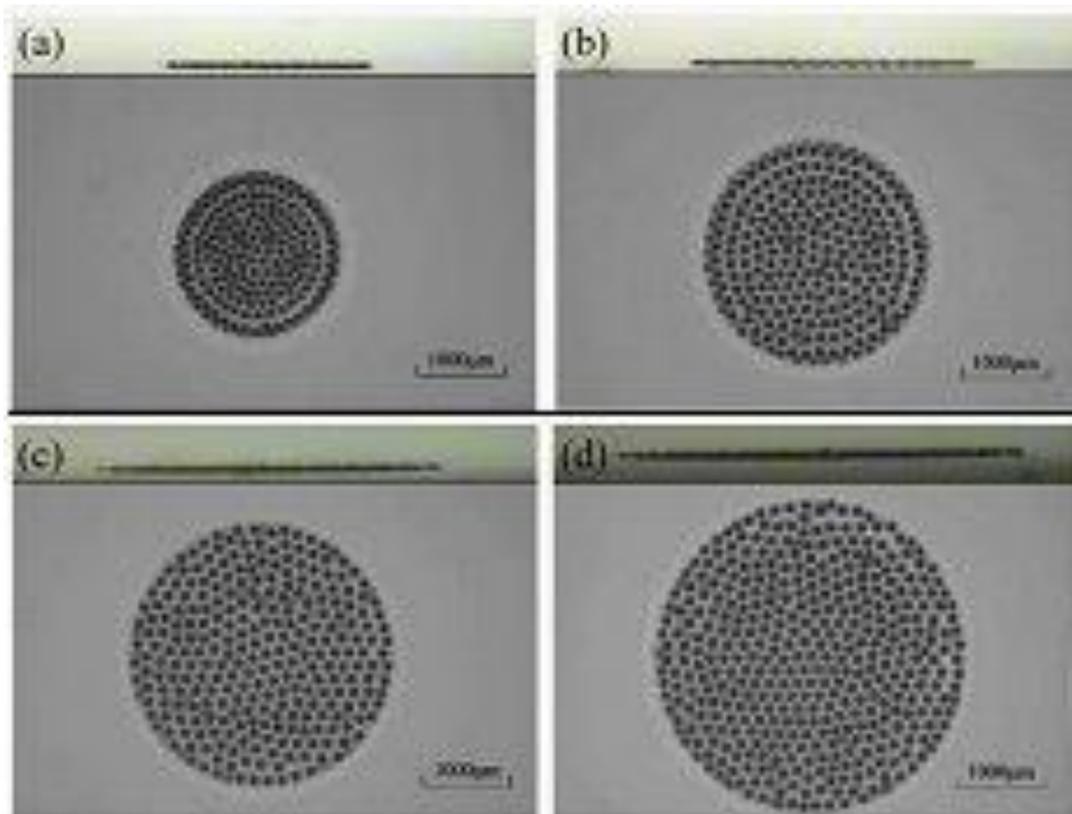


圖 1-7 受垂直磁場影響磁性液滴薄層在預濕情況下所產生分裂之情形[7]

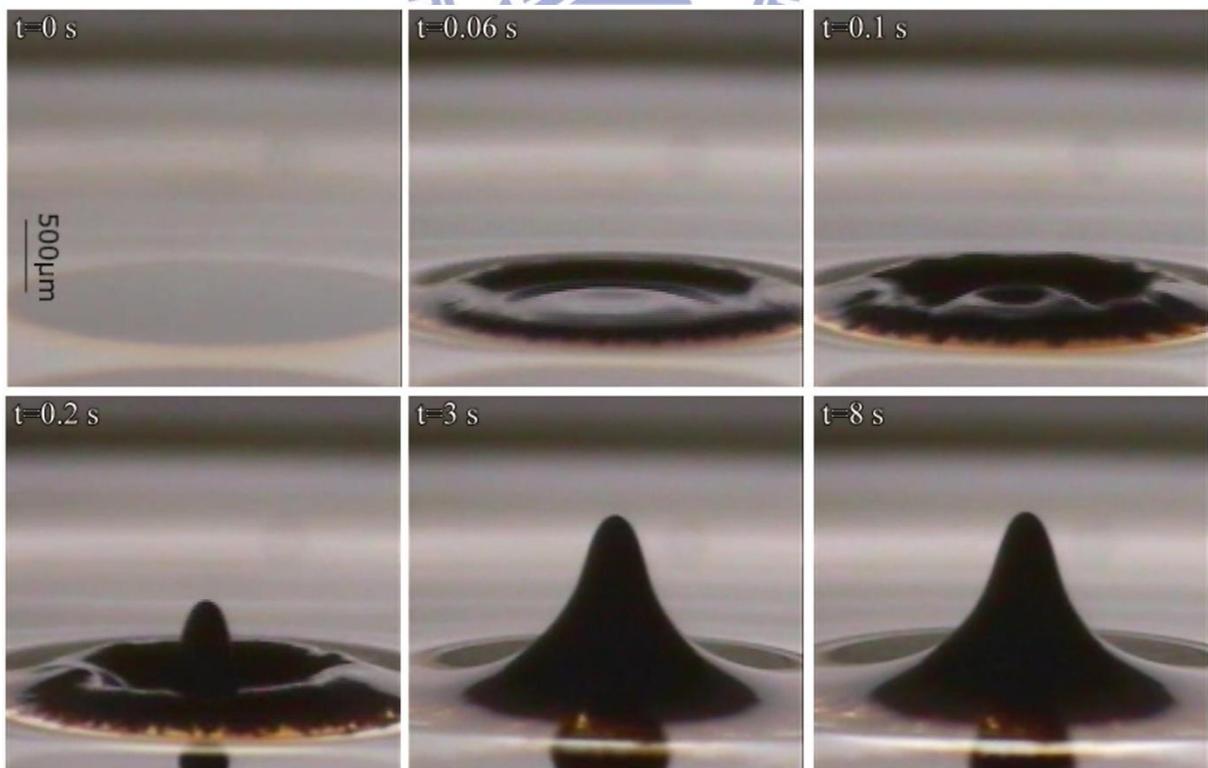


圖 1-8 磁性液滴突破可互溶液體層所產生的界面不穩定現象

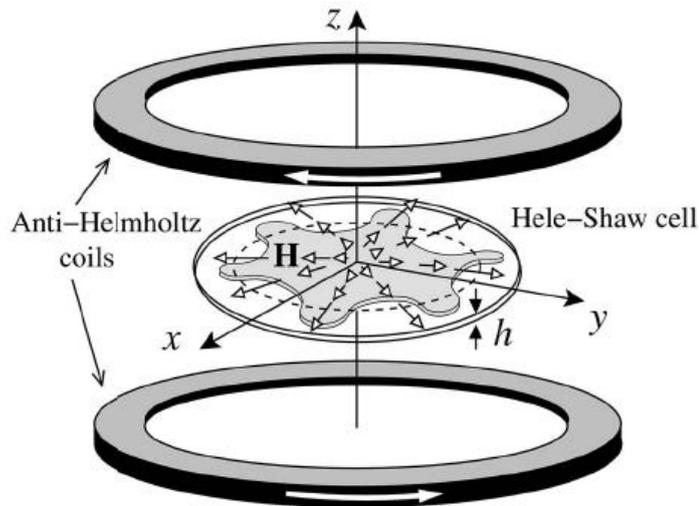


圖 1-9 Hele-Shaw Cell 示意圖[9]

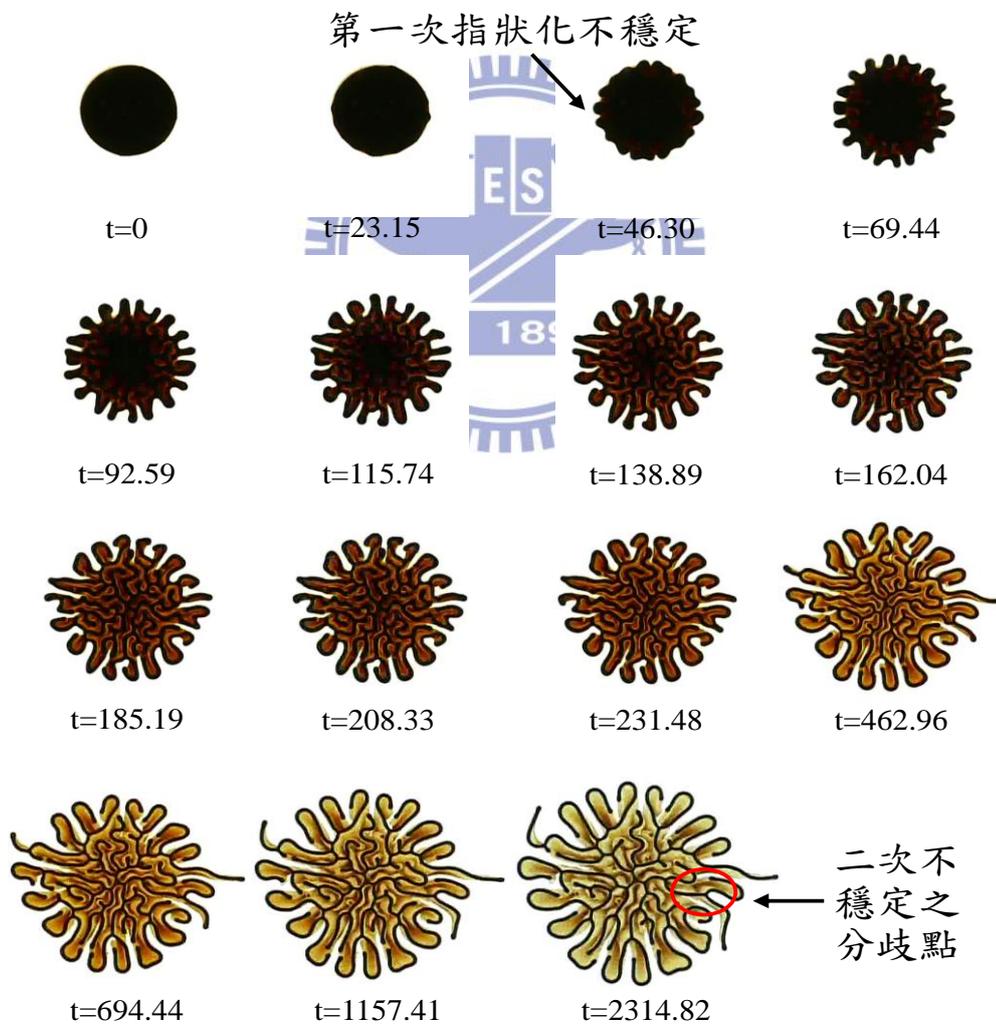


圖 1-10 磁性液滴與空氣界面產生之迷宮型不穩定現象[11]

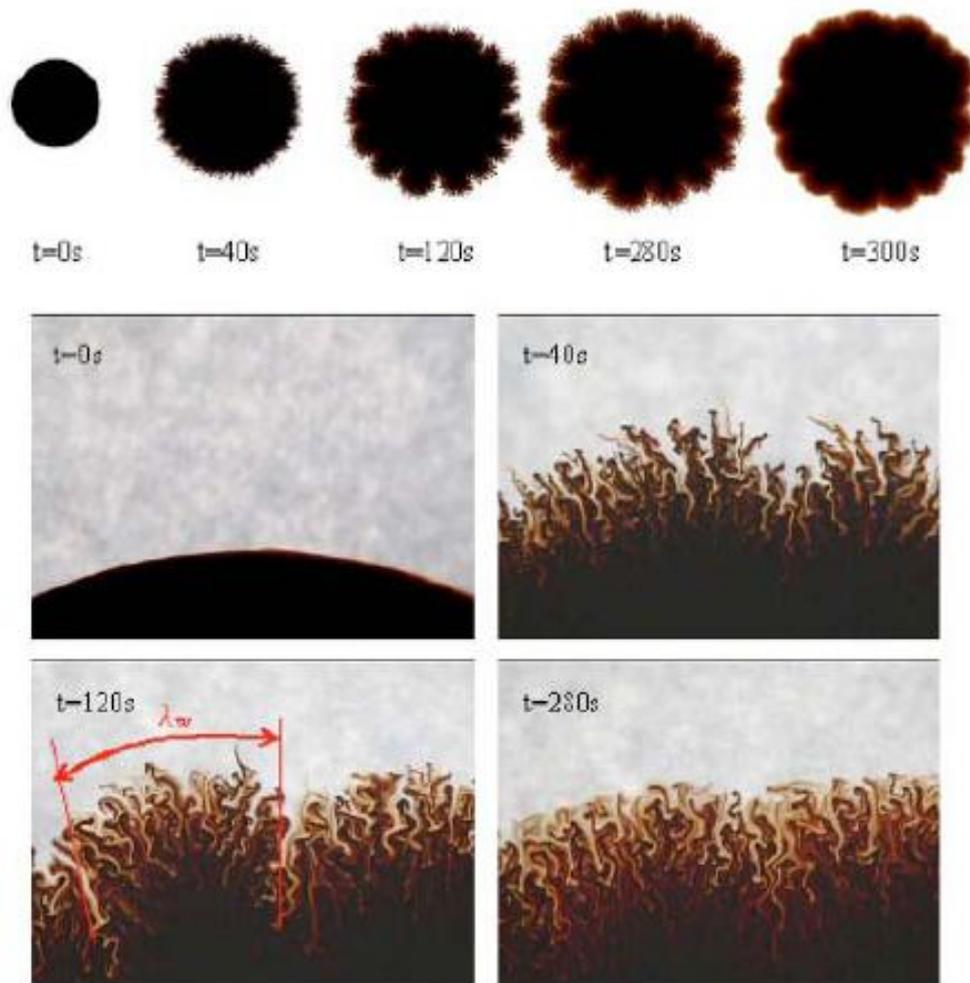


圖 1-11 於 Hele-Shaw 機制下，可互溶流體受磁場作用產生迷宮型現象[13]

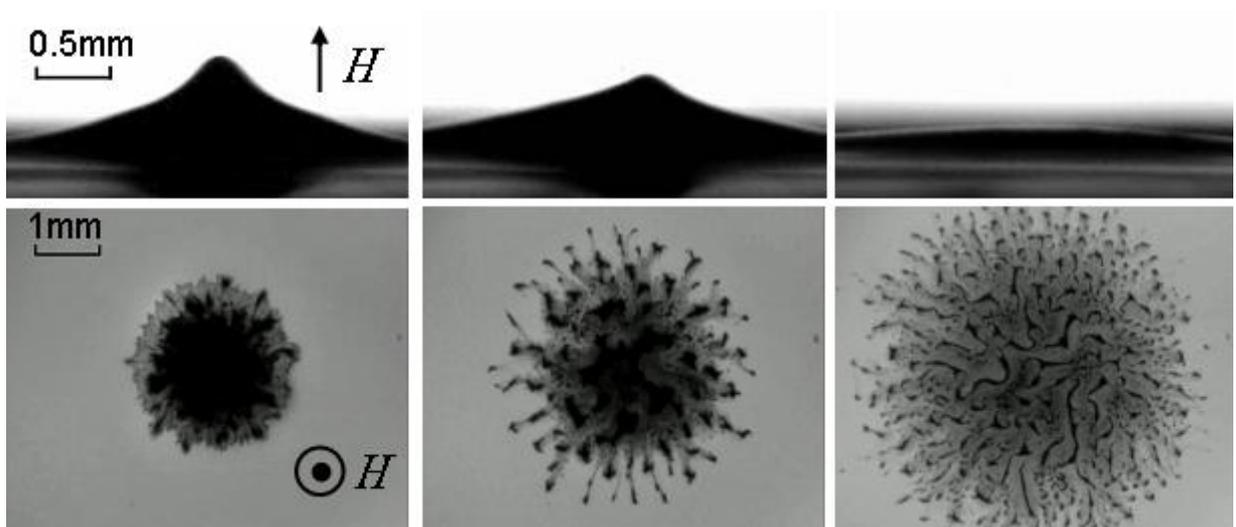


圖 1-12 混合型不穩定之界面分裂[14,15]

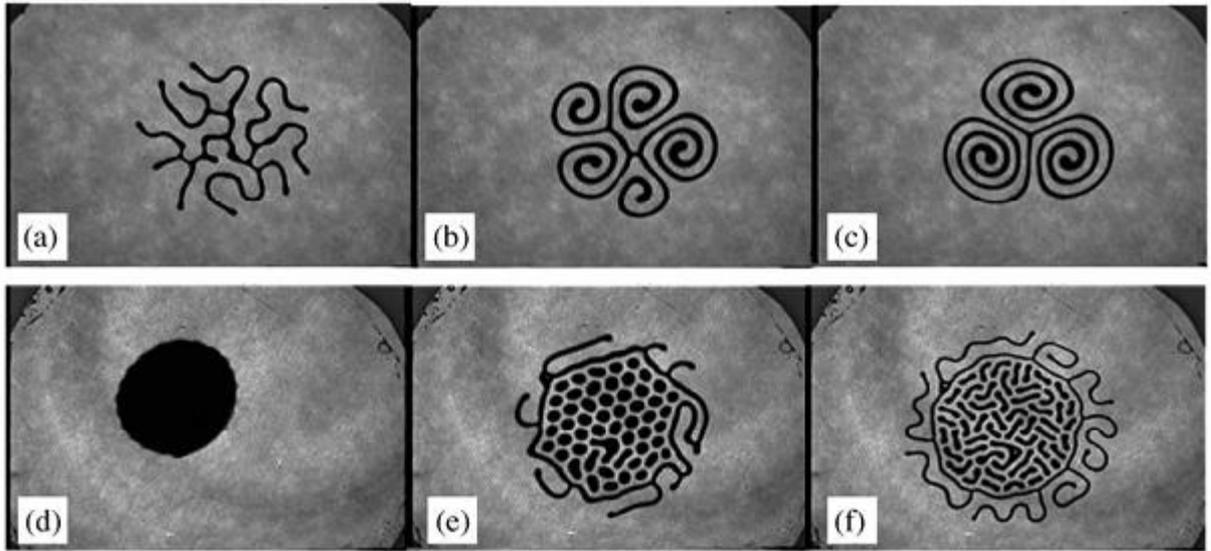


圖 1-13 受到垂直磁場及旋轉磁場影響下所產生之界面演變[16]

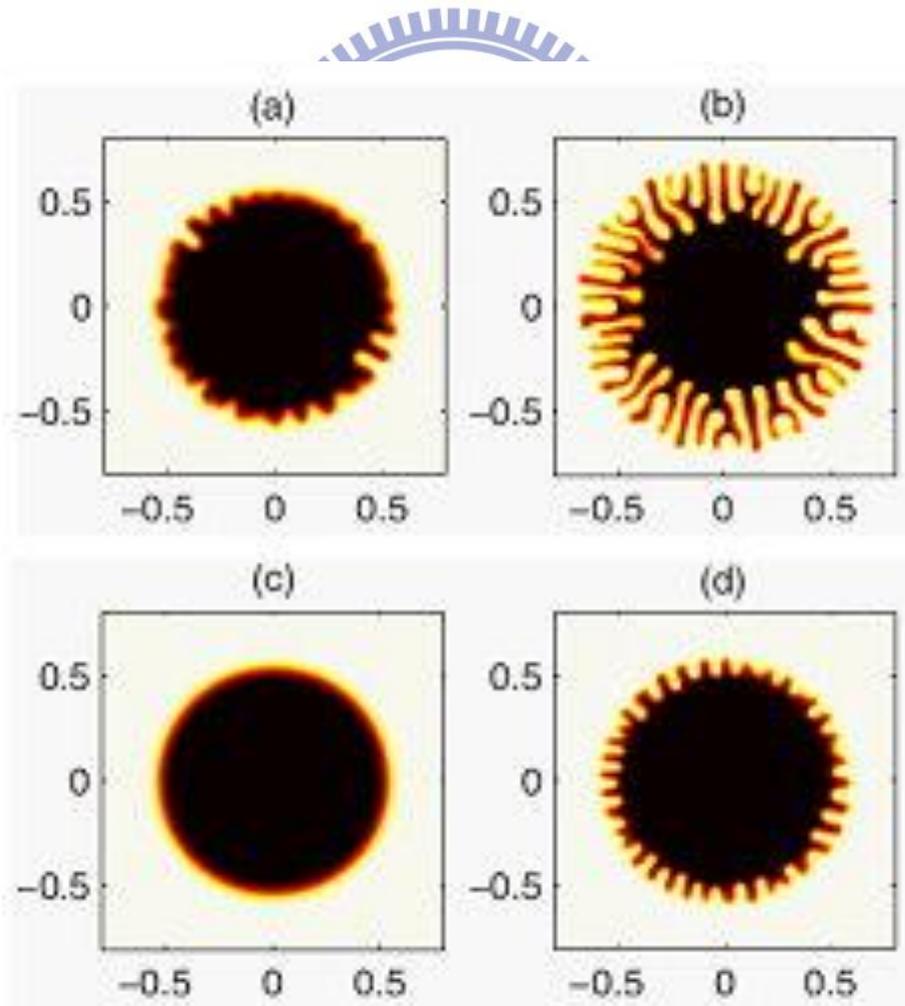


圖 1-14 模擬受垂直磁場及切線方向磁場影響所產生之現象[17]

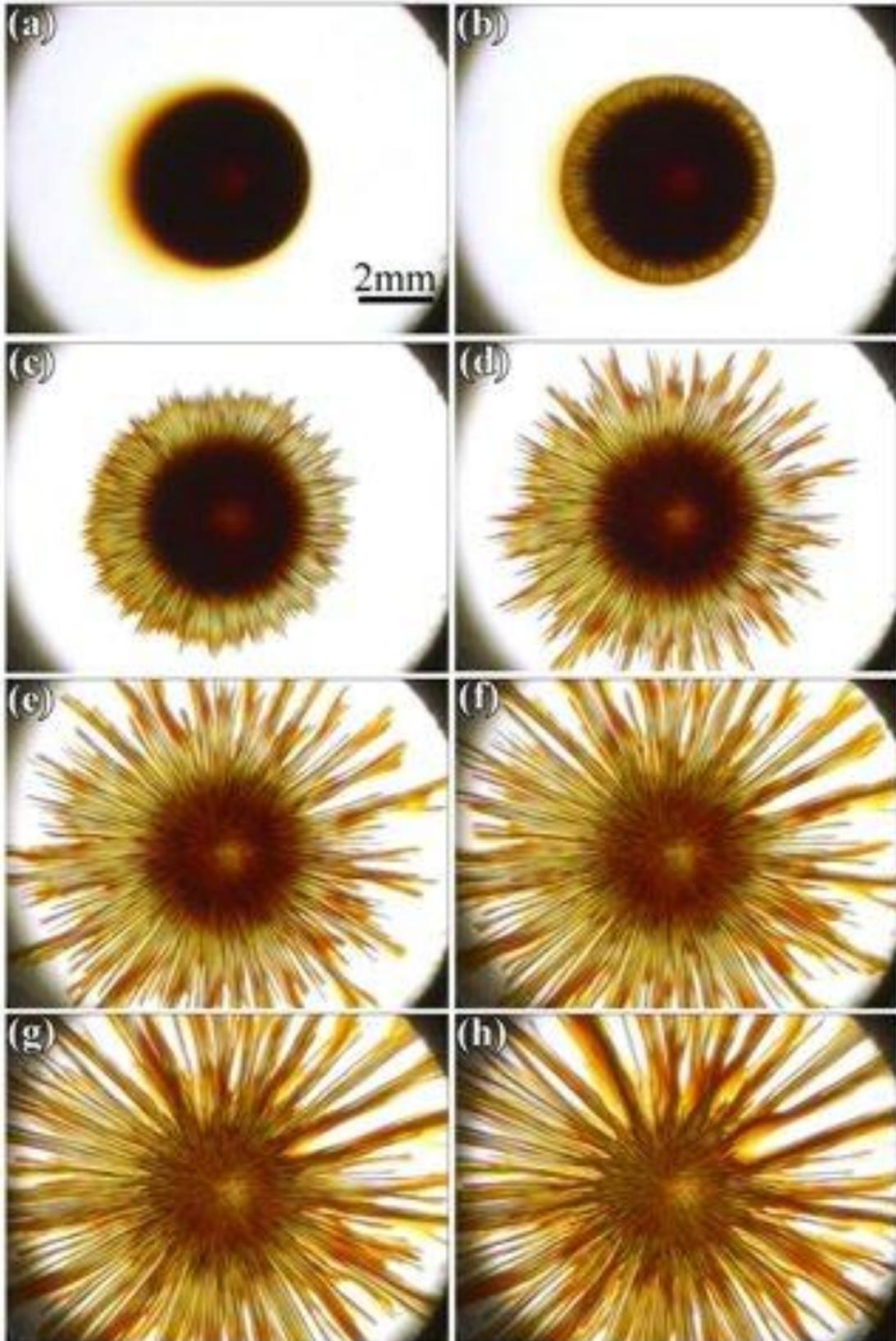


圖 1- 15 磁性液滴受到徑向磁場作用，產生一連串指狀化現象[18]

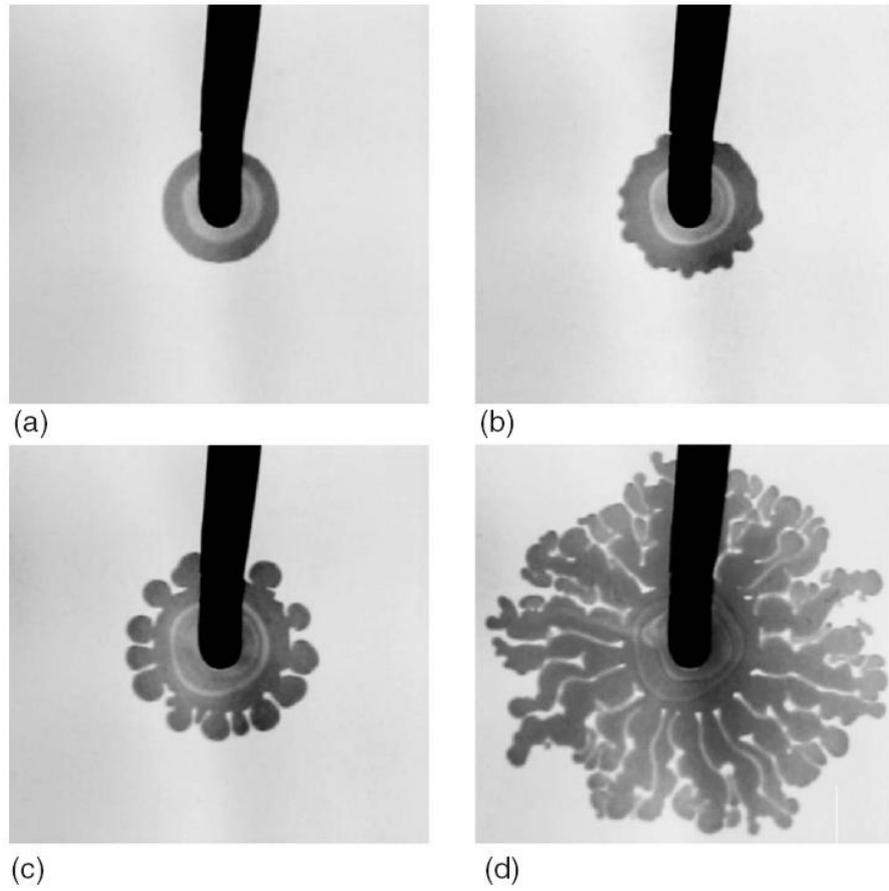


圖 1-16 混合水溶液陽離子表面活性劑和有機鹽產生不穩定現象[20]

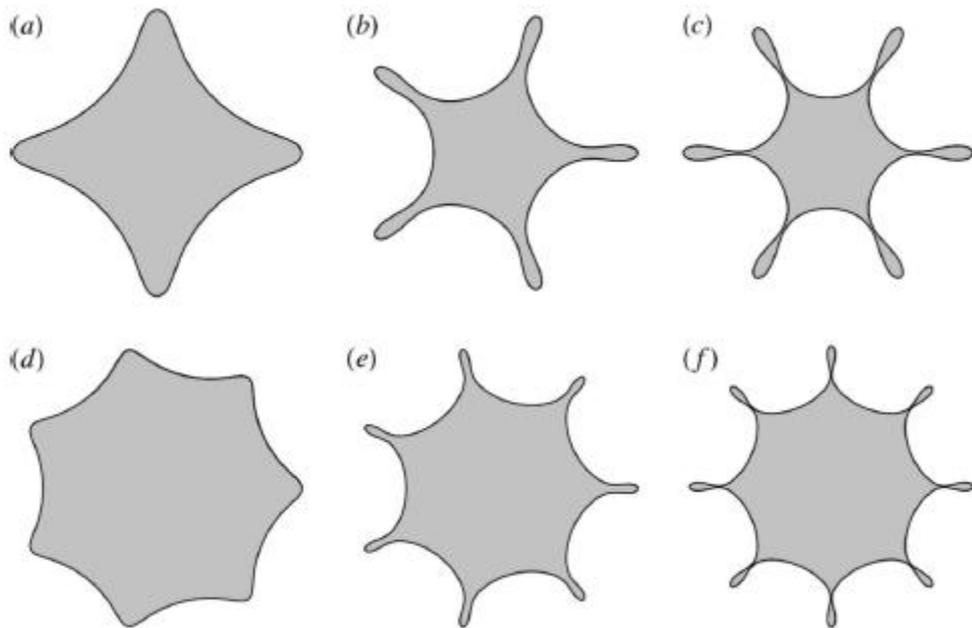


圖 1-17 徑向磁場作用時界面發展以及指狀化結構的增長[21]

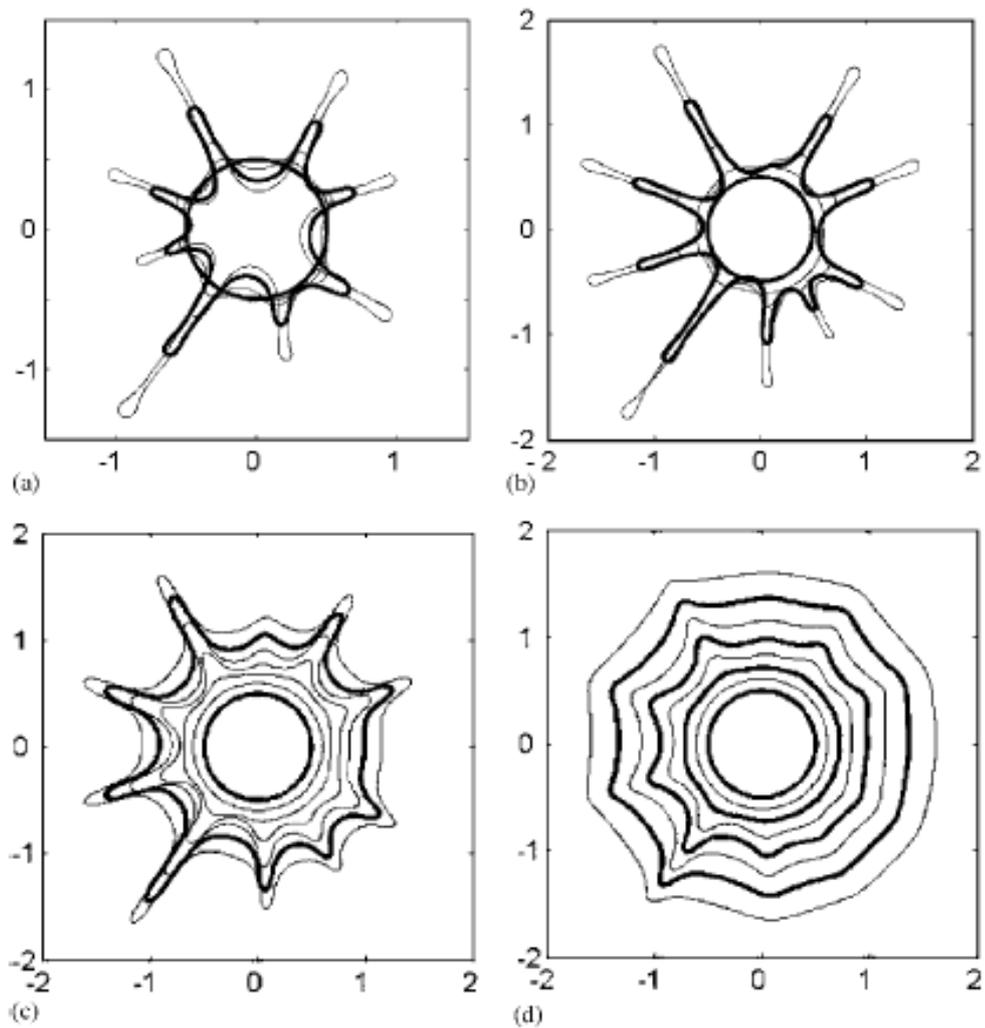


圖 1-18 在旋轉的 Hele-Shaw Cell 中薄液滴層塗佈向外擴展[22]

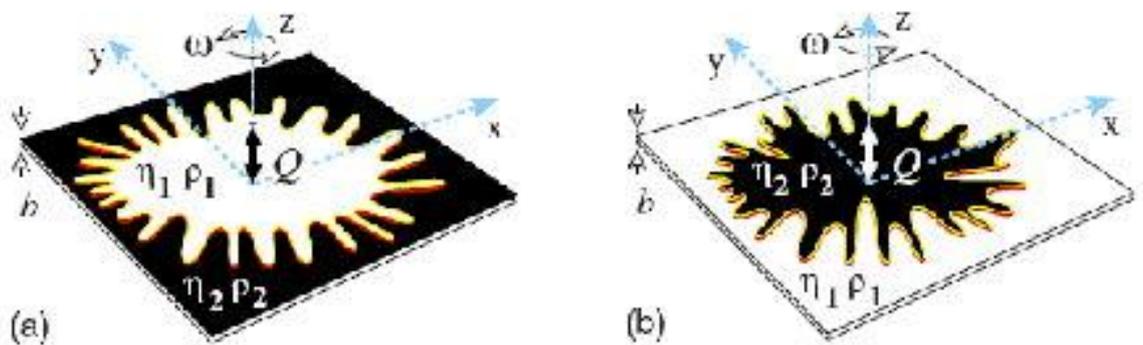


圖 1-19 數值模擬於旋轉的機制下可互溶液體界面情況[23]

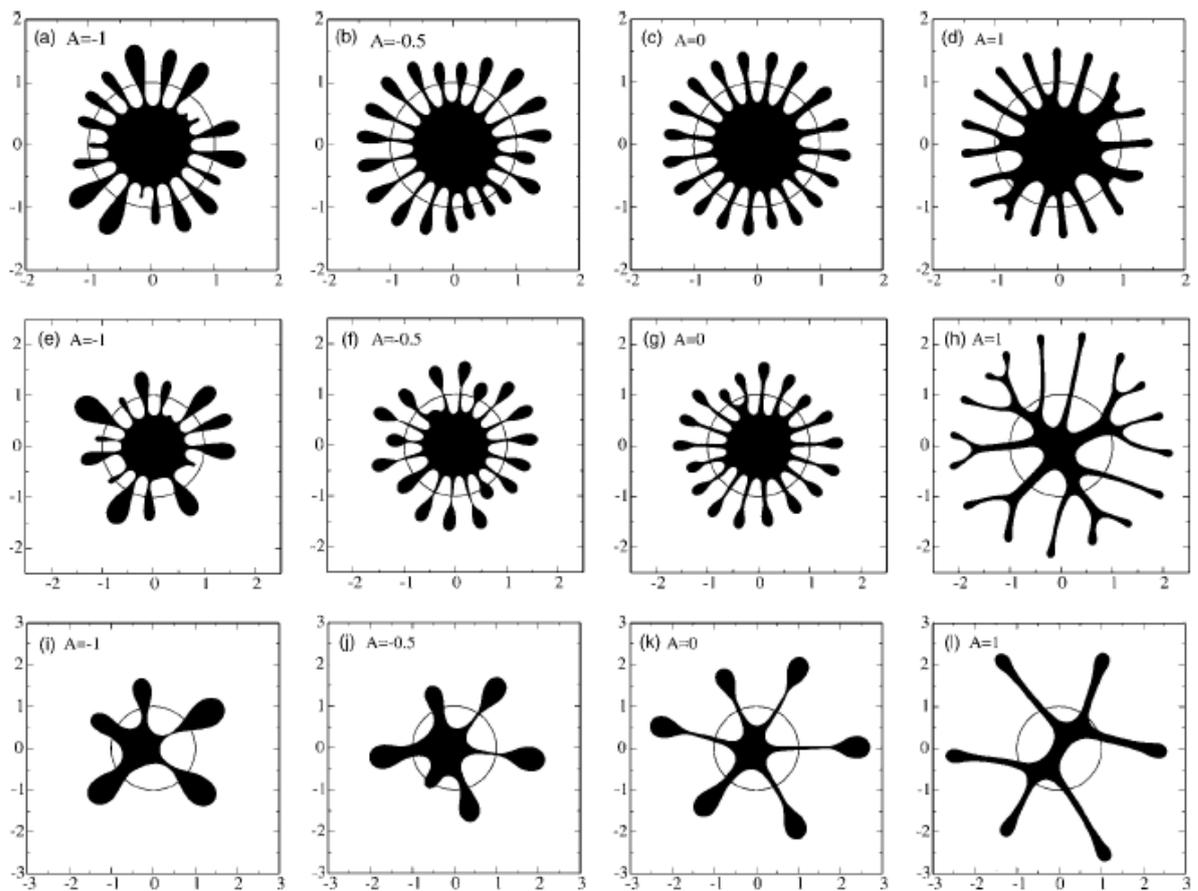


圖 1-20 模擬不可互溶界面下指狀化現象的形狀以及其長度分佈[24]

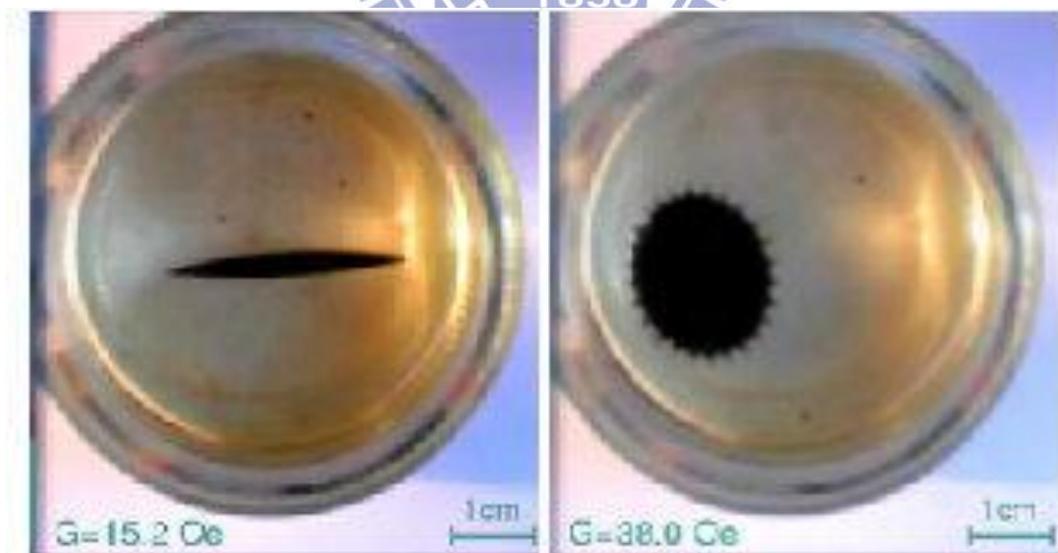


圖 1-21 磁性液滴在非磁性流體中施以旋轉磁場所產生指狀化現象[25]

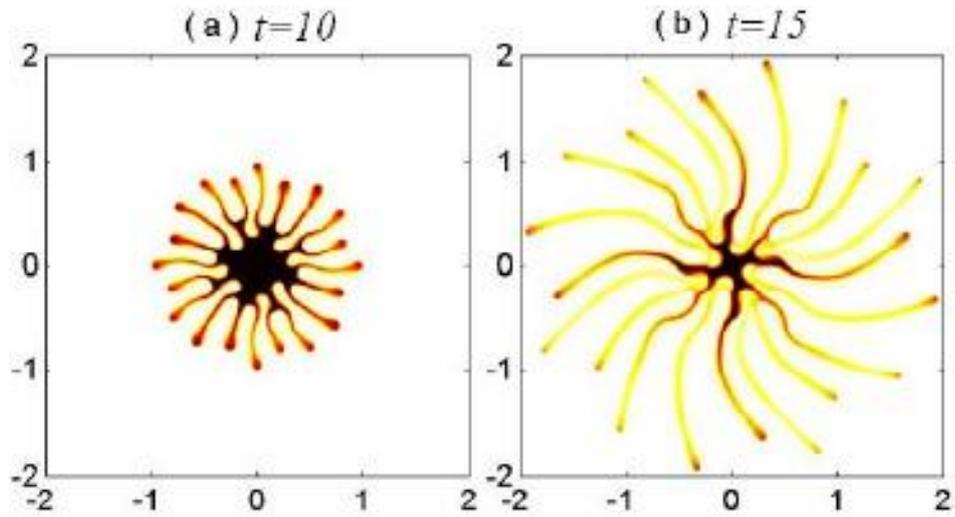


圖 1-22 數值模擬高速旋轉中，可互溶液滴界面不穩定現象[26]

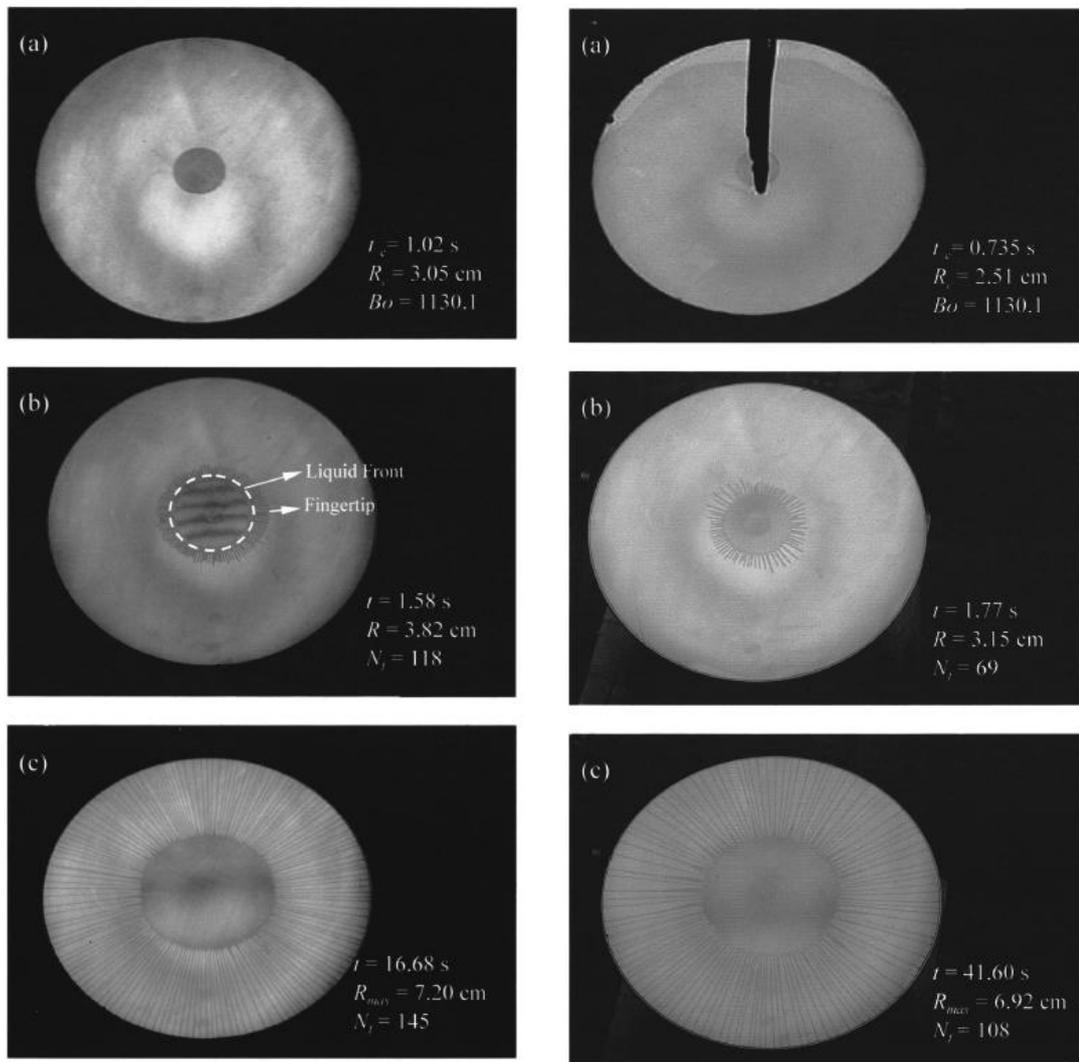


圖 1-23 旋轉塗佈指狀化不穩定現象[27]

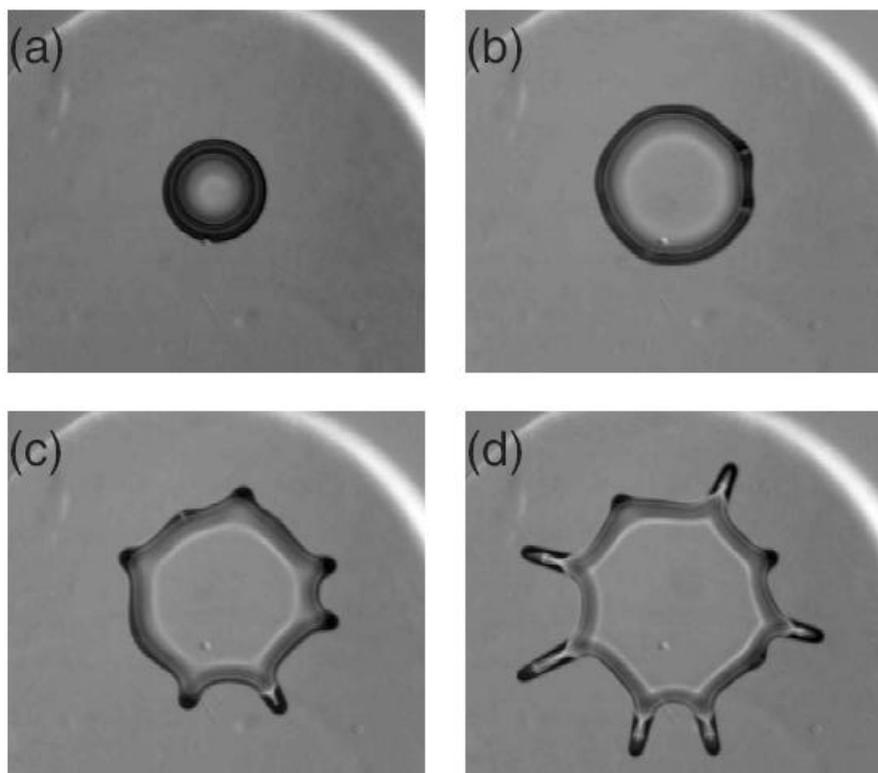


圖 1-24 高速旋轉產生指狀化現象[28]

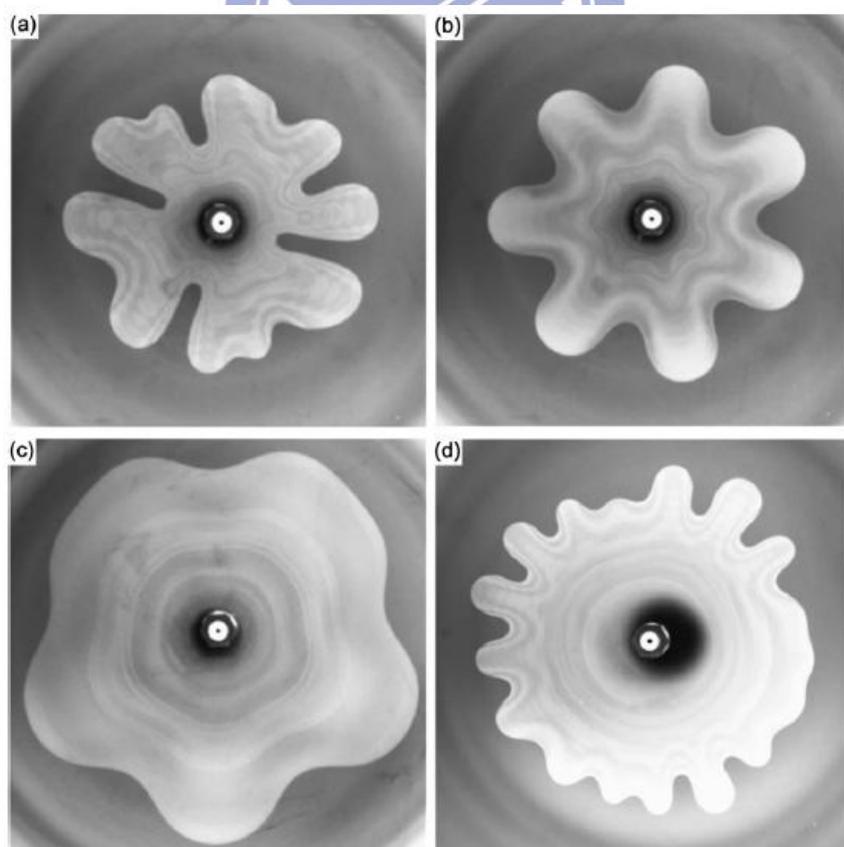


圖 1-25 聚合物的界面流動圖案[30]

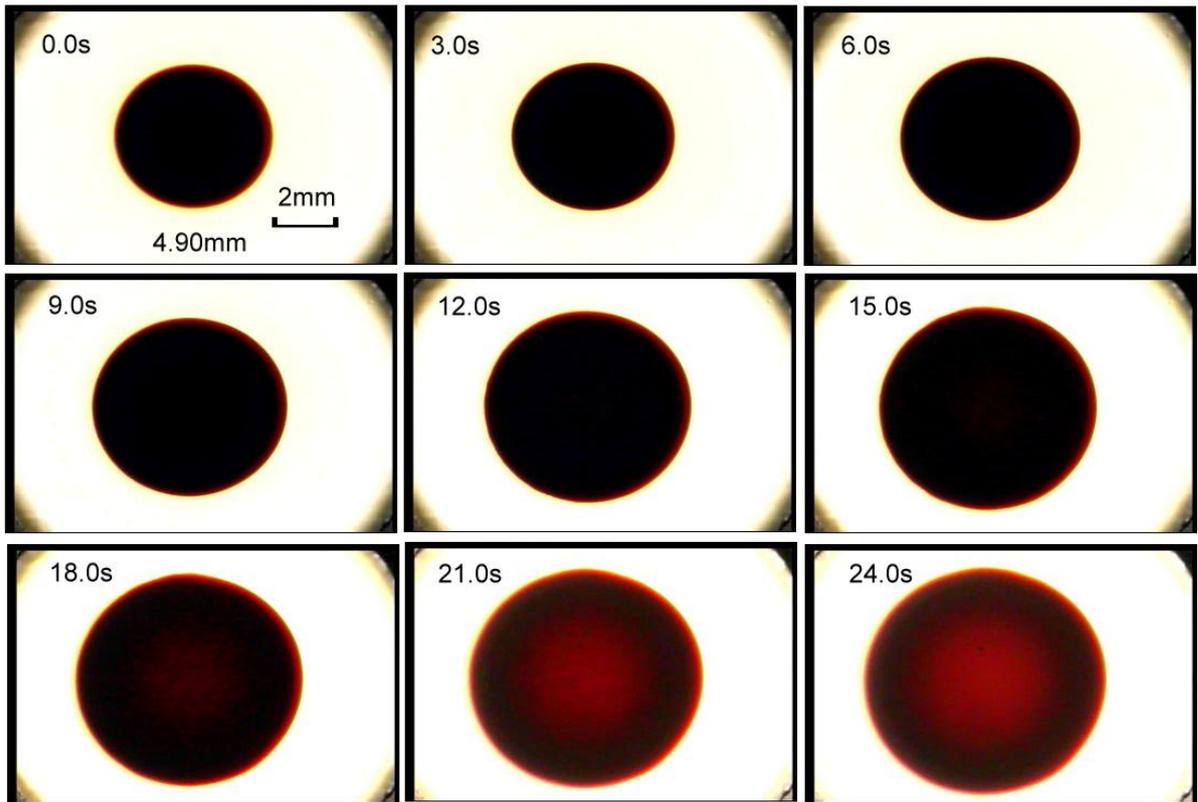


圖 1- 26 EMG901 在甘油薄層上塗覆過程

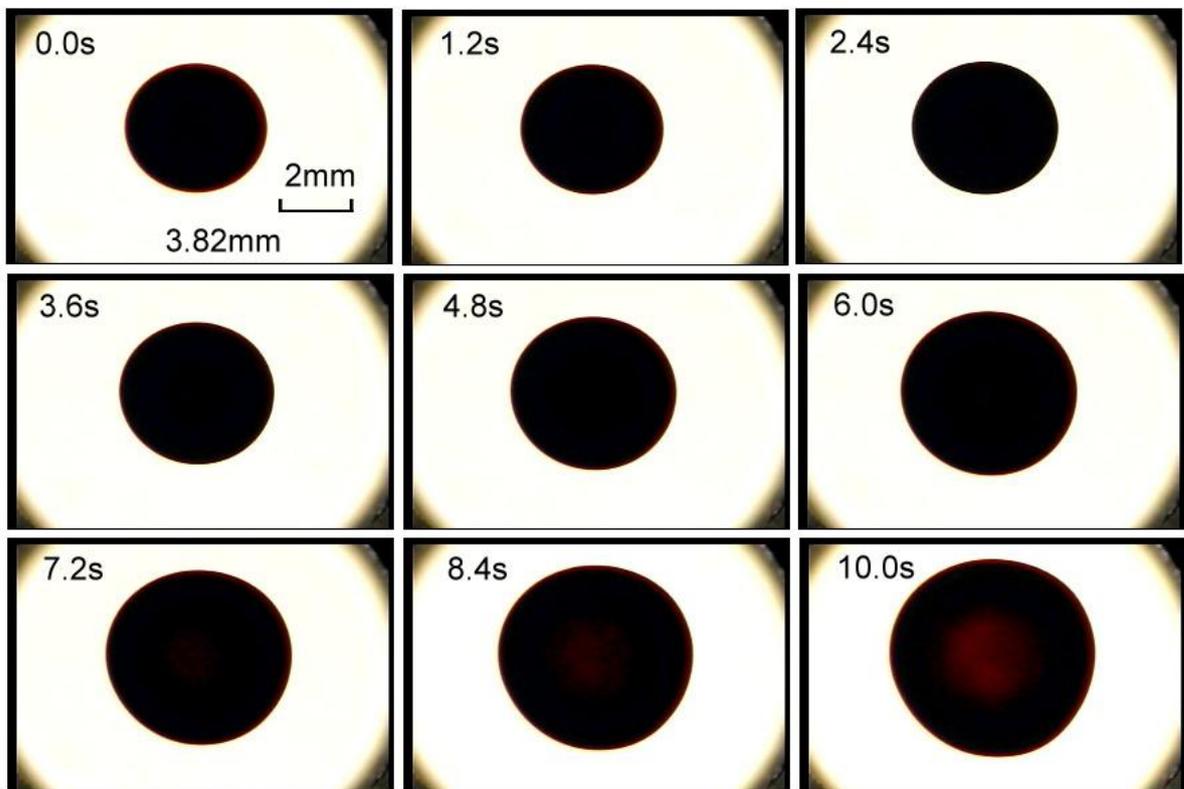


圖 1- 27 EMG901 在大氣中塗覆過程

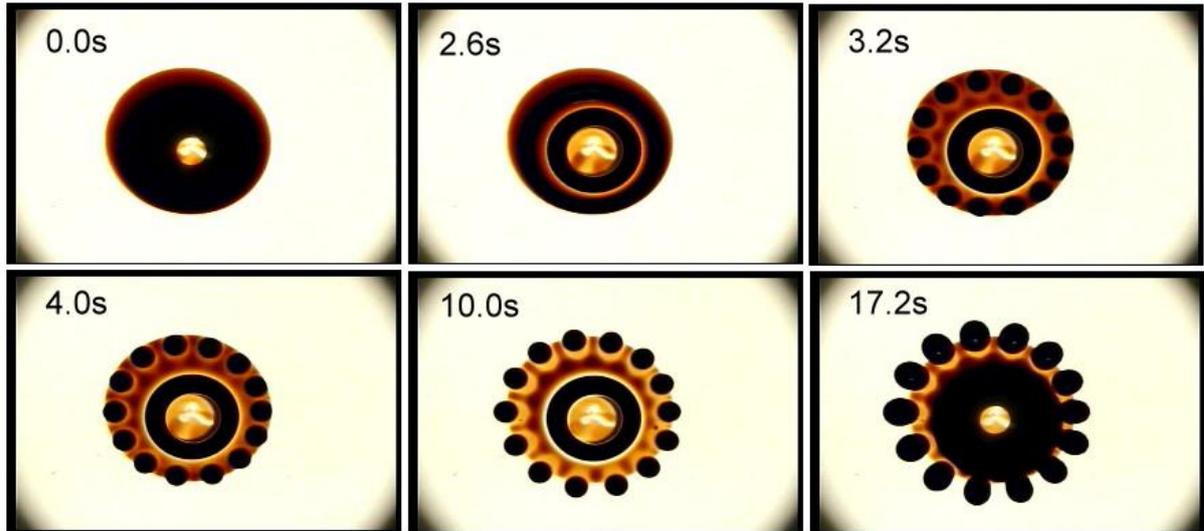


圖 1-28 EMG905 與甘油型態變化(一)

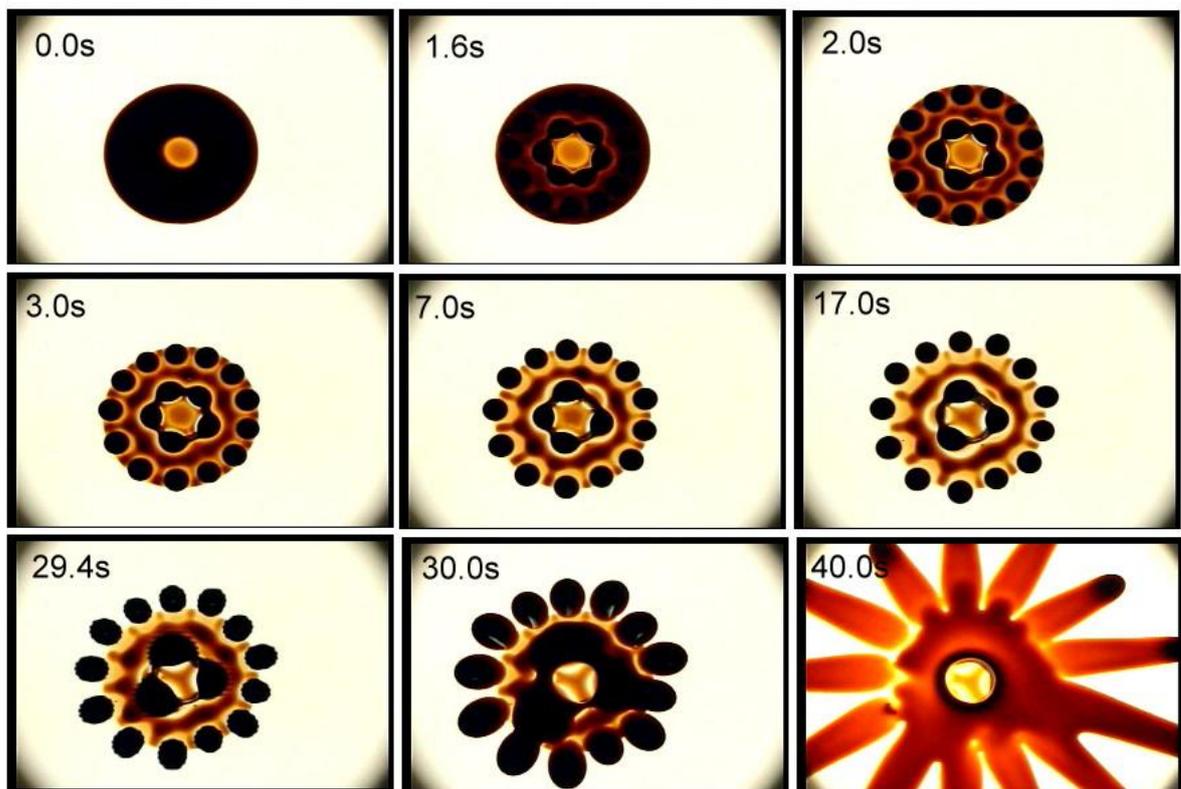


圖 1-29 EMG905 與甘油型態變化(二)

表 1-1 磁性流體的製造方法

製造方法	說明
粉碎法	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，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 $\text{FeSO}_4$ 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 實驗原理、方法及設備

本研究當中，將探討當開啟直流電源供應器使一組Helmholtz線圈產生磁場，以轉變不同的磁場型式下，觀察對磁性液滴的界面變化，經由可變焦距光學顯微鏡觀察磁性液滴分裂、產生海星形指狀化不穩定現象，並將實驗影像利用CCD攝影機擷取影像，最後分析實驗影片及數據整理，實驗設備之架構如圖2-1所示。

### 2-1 實驗儀器說明

本研究實驗硬體設備主要有光學顯微鏡平台、直流電源供應器、手工打造Helmholtz線圈(如圖2-2)、EMG系列磁性流體、高斯計、背光板、電腦。利用此實驗架構，觀察有限中心孔線圈下(L=15mm)，磁性液滴變化情形。觀察到磁性流體液滴於不可互溶(大氣中)施加徑向磁場時，會產生指狀化的界面不穩定現象；若施以垂直與徑向磁場，則液滴分裂小顆液滴再生長成海星形指狀化圖案。

實驗的磁場是由可程式直流電源供應器產生，如圖 2-3，其提供固定直流電流給一組 Helmholtz 線圈，當電源供應器在開啟的瞬間會產生一均勻的磁場，當只接通下方線圈則磁性液滴受到垂直於平板方向的磁場作用，若將其一線圈倒置使得正負線圈之垂直磁場相抵消，而產生實驗所需的徑向磁場，如圖 2-4 所示。實驗用的線圈是由手工打造，因此與理論上有些許的誤差，在 30mm×30 mm 平面上共 961 個測量點，磁場大小由高斯計 SYPRIS 6010 型號如表 2-1，設定一固定電流  $I=1.0A$ ，量測各點三個方向磁場分別為  $H_x$ 、 $H_y$  以及  $H_z$  如圖 2-5 所示，觀察  $H_z$  方向的磁場遠小於  $H_x$ 、 $H_y$  方向磁場，故可忽略  $H_z$  對磁場之影響。繪製出徑向距離與磁場大小成近似正比關係如圖 2-5 所示，由圖 2-6 看出本文所採用之徑向磁場與徑向距離  $r$

呈近似線性關係，定義徑向磁場  $H_r$  為  $[H_x^2 + H_y^2]^{1/2}$ ；電源供應器之電流是維持固定，在 2.2 A、2.6A、3.0A 電流大小下，單一線圈所產生的垂直磁場強度 ( $H_v$ ) 分別為  $H_v=300$  Oe、355 Oe 以及 400Oe，徑向磁場 ( $H_o$ ) 強度分別為  $H_o=211$  Oe、250 Oe 以及 288Oe，如表 2-2。

磁性液滴界面不穩定發展過程中，影像資料藉由 CCD 攝影機，從上拍正視方向直接錄製整個液滴塗覆過程。於 CCD 攝影機上加裝光學鏡頭，以至於能夠清晰得觀察到微細界面型態，最後影片經由傳輸線儲存到電腦，影片再加以擷取圖片大小為 720×480 像素，經過影像灰階處理判斷液性液滴塗覆的有效面積，最後透過商業軟體 MATLAB 程式語言，加以分析實驗數據，繪製出實驗圖形與表格以得到精準的實驗結果。

## 2-2 理論背景

徑向磁場大小與徑向距離  $r$  呈線性關係此關係可表示為

$$H \approx H_r \hat{r} = \frac{H_0}{L} r \hat{r} \quad (1)$$

在此  $\hat{r}$  表示徑向方向向外的單位向量， $H_r$  表示為距中心距離 ( $r \leq 15\text{mm}$ ) 時之平均磁場強度。本實驗當中設定三種徑向磁場強度， $H_0 = 211\text{Oe}$ ， $250\text{Oe}$ ， $288\text{Oe}$ ；對應的電流分別為 2.2A，2.6A，3.0A。從理論上的觀點來說，x-y 平面之磁場結構是由  $\nabla \cdot H = 0$  以及 z 方向之均勻磁場，因此整體磁場可以寫成

$$H(r, z) = H_r(r) \hat{r} + H_z(z) \hat{z} \quad (2)$$

$$\frac{H_r}{H_z} \sim -\frac{1}{2} \frac{r}{z} \quad (3)$$

由於 anti-Helmholtz 之關係，z 遠小於 r 故磁場可簡化為(3)式。配合我們實

驗所測量出之結果會發現 $H_r$ 遠大於 $H_z$ 是合理之預測。

又徑向磁力密度可表示為

$$f_m = \mu_0 M \nabla H_r \quad (4)$$

而磁化率之定義為

$$M = \chi H \quad (5)$$

將上式代入(4)式可得到磁化強度

$$f_m(r) = \mu_0 \chi \left(\frac{H_0}{L}\right)^2 r \quad (6)$$

由上述式子可得到特徵時間及特徵面積項，時間無因次化項可列為

$$\tau = \eta_d L^2 / \mu_0 d^2 H_0^2 \quad (7)$$

面積無因次化則以液滴初始面積為基準化簡為下式

$$A_0 = \pi d^2 / 4 \quad (8)$$

並由上述特徵時間及特徵面積為主，來進行本文之無因次分析。

無因次化時間為

$$t' = t / \tau \quad (9)$$

無因次化面積為

$$A' = A / A_0 \quad (10)$$

無因次化展延面積為下式

$$\Delta A' = A' - 1 \quad (11)$$

## 2-3 實驗步驟

首先利用水平儀校正實驗平台，使得儀器可以保持水平以不至於對液滴造成不穩定界面。架設好實驗用的 CCD 攝影機，調整攝影機的色溫及彩度、改善對比並調整解析度使得液滴輪廓清晰可辨，使液滴可以完美呈現。調整背光板亮度以改善對鏡頭光線的反射以免影響到截圖的品質。最後開啟影像擷取軟體，完成初步實驗儀器準備。

將實驗用的線圈，置放於實驗平台上如圖 2-7；並串連使用可程式直流電源供應器連接於線圈組，徑向磁場機制中，調整玻片高度使液滴在垂直方向受到磁力合力為零，只單純受到徑向的磁力影響。在垂直磁場機制中，關閉上方的線圈，只由下方線圈作用產生實驗當中所需磁場。

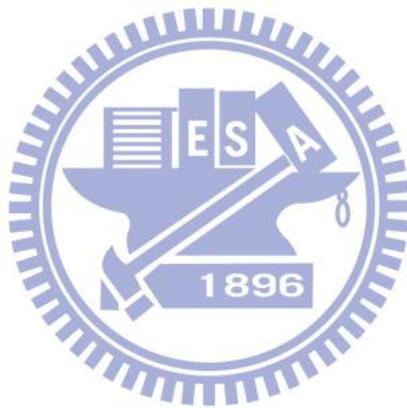
實驗當中的磁性液滴是由 Ferrotec Corporation 所生產的，所使用磁性流體為輕礦油基 EMG 系列如圖 2-8，不同性質的磁性液滴如表 2-3；實驗當中主要使用 EMG905 磁性流體，特性為黏滯度  $\mu = 9 \text{ cp}$ 、密度  $\rho_d = 1.24 \text{ g/ml}$  和飽和磁化率  $M_s = 400 \text{ Oe}$ ，EMG905 磁化率如圖 2-9

正式開始實驗時拿取載玻片，將磁性液滴對應於磁場的相對位置，將滴有磁性流體之載玻片放置於線圈的磁場中心。預備工作結束之後，接著開啟錄影功能，以便實驗結束後的截圖數據分析；接著開啟電源供應器，將電流設定為實驗所需之電流大小，使線圈通電後能產生磁場。觀察磁性液滴的界面發展，直到磁性流體界面完全發展至觀察範圍外再關閉錄影，即結束本次液滴界面研究實驗。

實驗結束後，關閉電源供應器。將實驗所用的載玻片取下並利用乳化劑(TWEEN 80)清洗磁性流體，清洗完後用拭鏡紙擦拭載玻片，待續下一組

實驗的進行。因通過電流的線圈組產生實驗當中所需磁場，使得線圈的溫度慢慢升高，實驗數回後取下線圈，使之冷卻至常溫；以免電阻的上升造成電流的下降使得實驗造成誤差。

後續將所錄製到的影片，利用Photo Impact、Corel Video Studio及Ulead GIF Animator等影像分析軟體，截取成圖片，觀察磁性流體與不可互溶開啟磁場瞬間所產生的界面不穩定現象並加以分析歸納。最後利用MATLAB 程式語言，灰階化後加以分析實驗數據，繪製出相關實驗圖形與製成圖表，以得到精準的實驗結果。



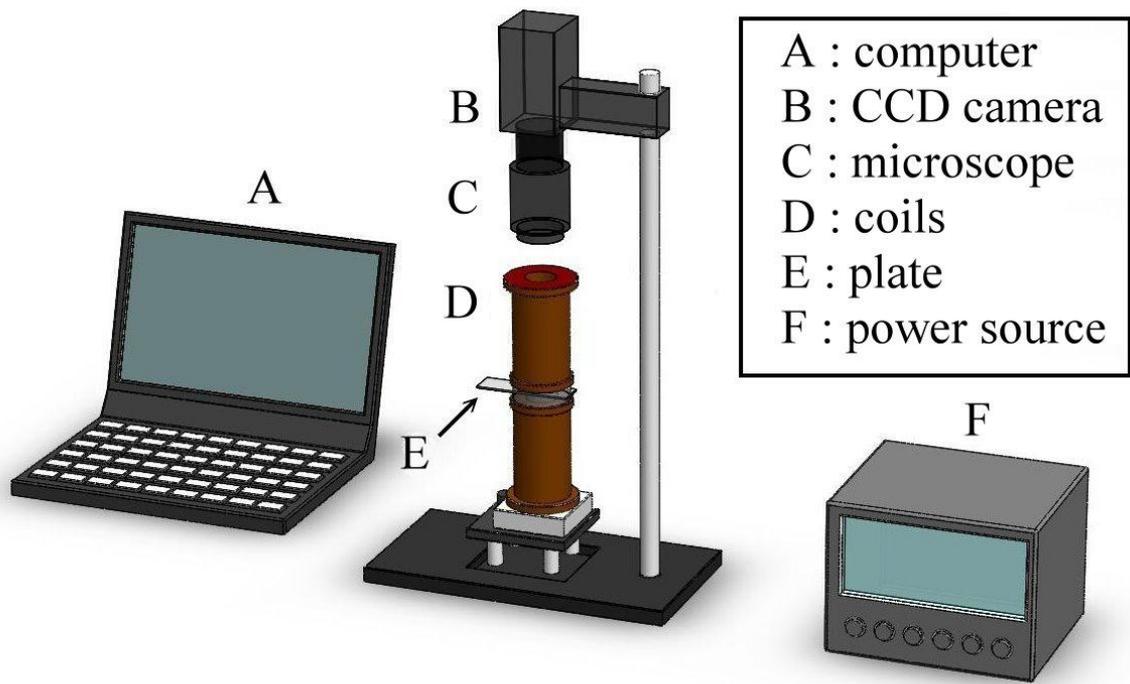


圖 2-1 實驗設備之架構圖

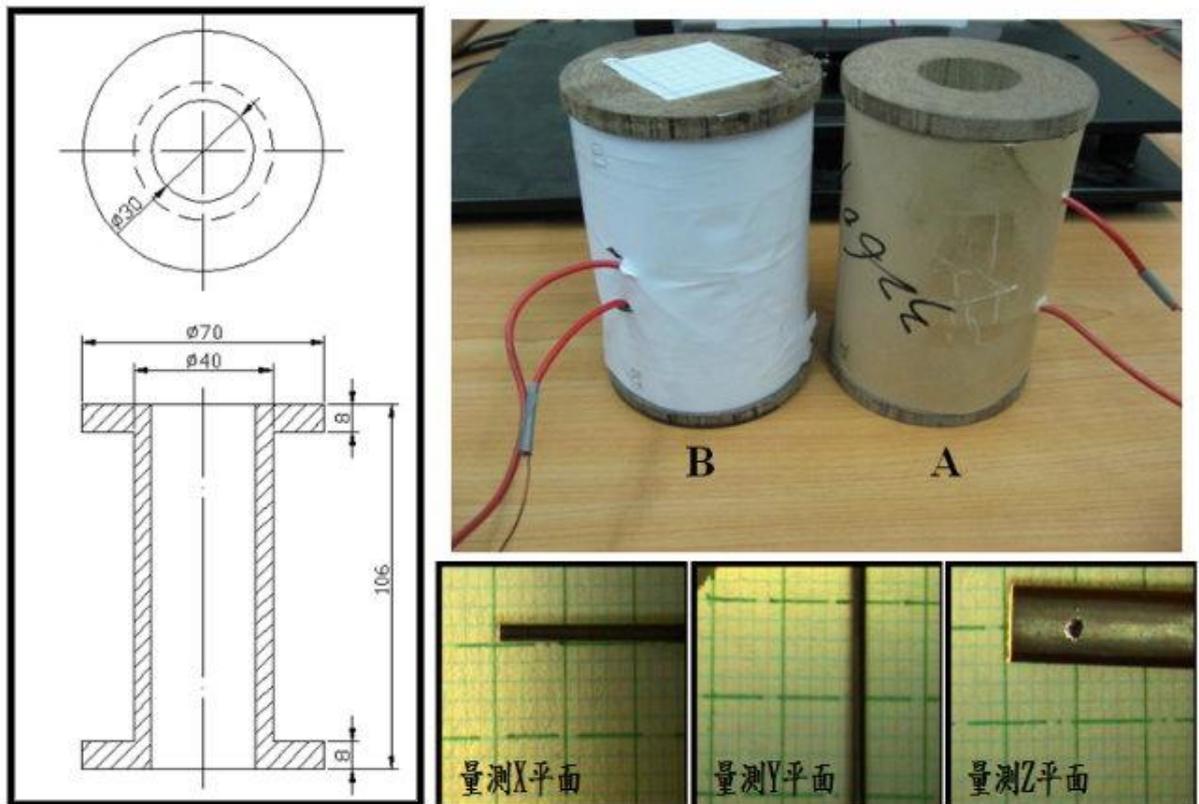


圖 2-2 線圈繪製圖、手工打造線圈與磁場測量示意圖



圖 2-3 可程式電源供應器

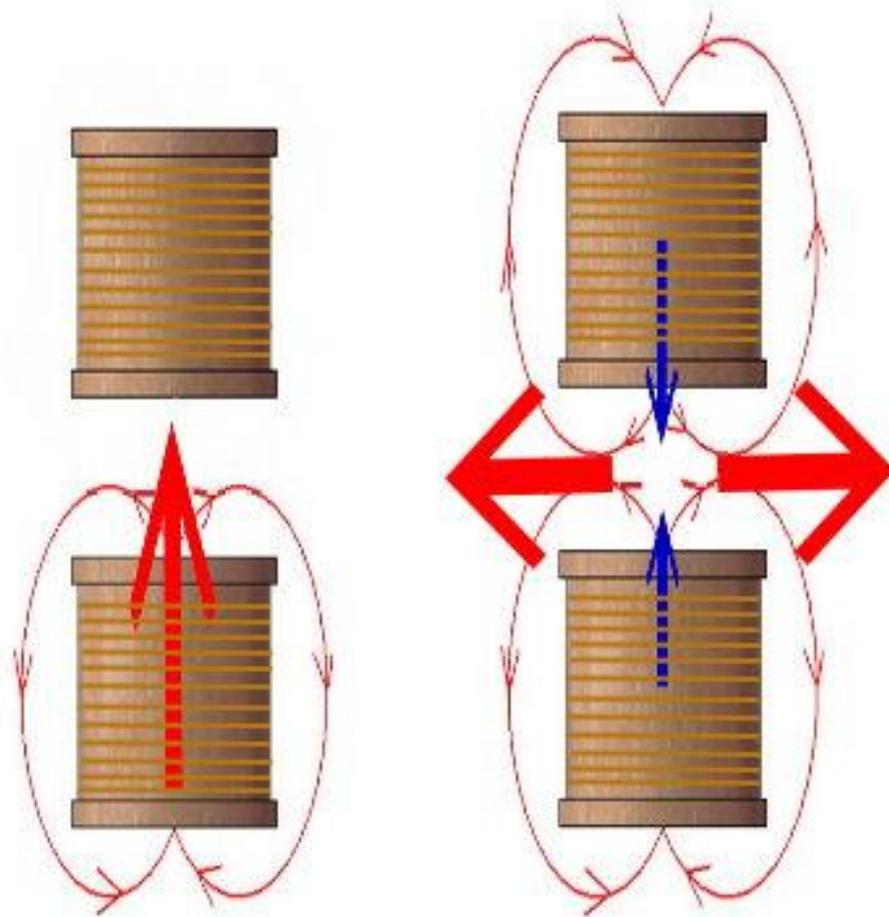


圖 2-4 垂直磁場與徑向磁場示意圖

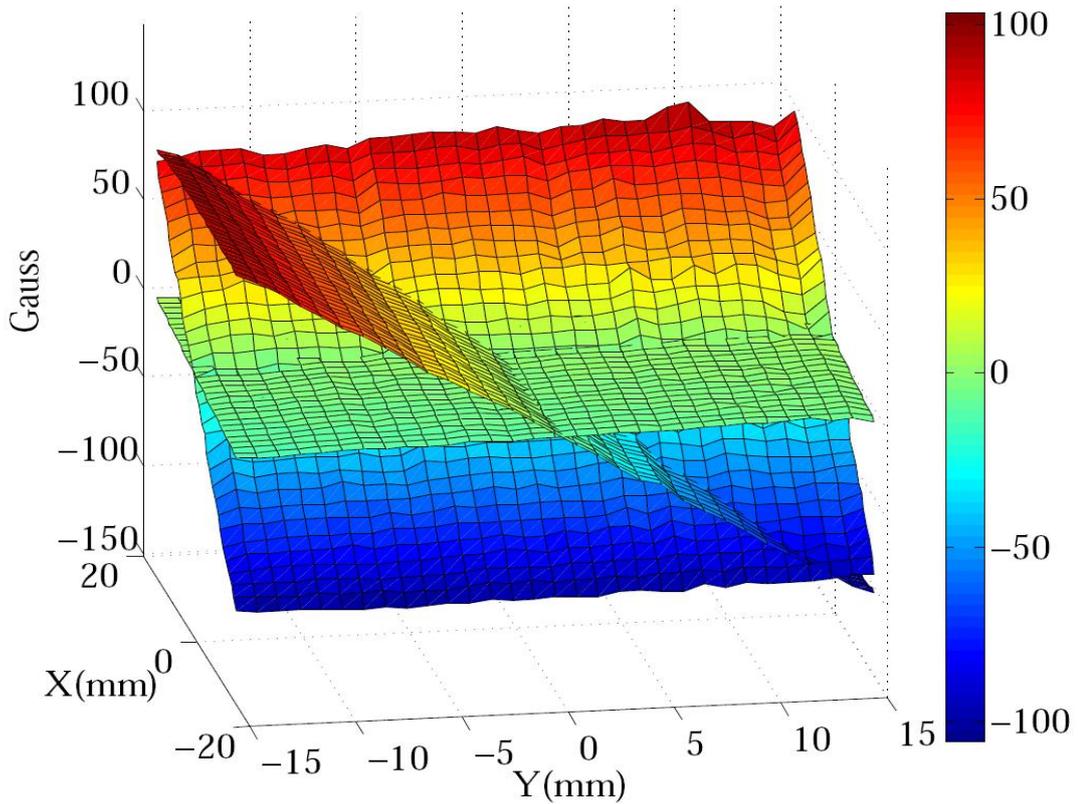


圖 2-5 實驗分析量測  $H_x$ ,  $H_y$  以及  $H_z$  三個方向磁場

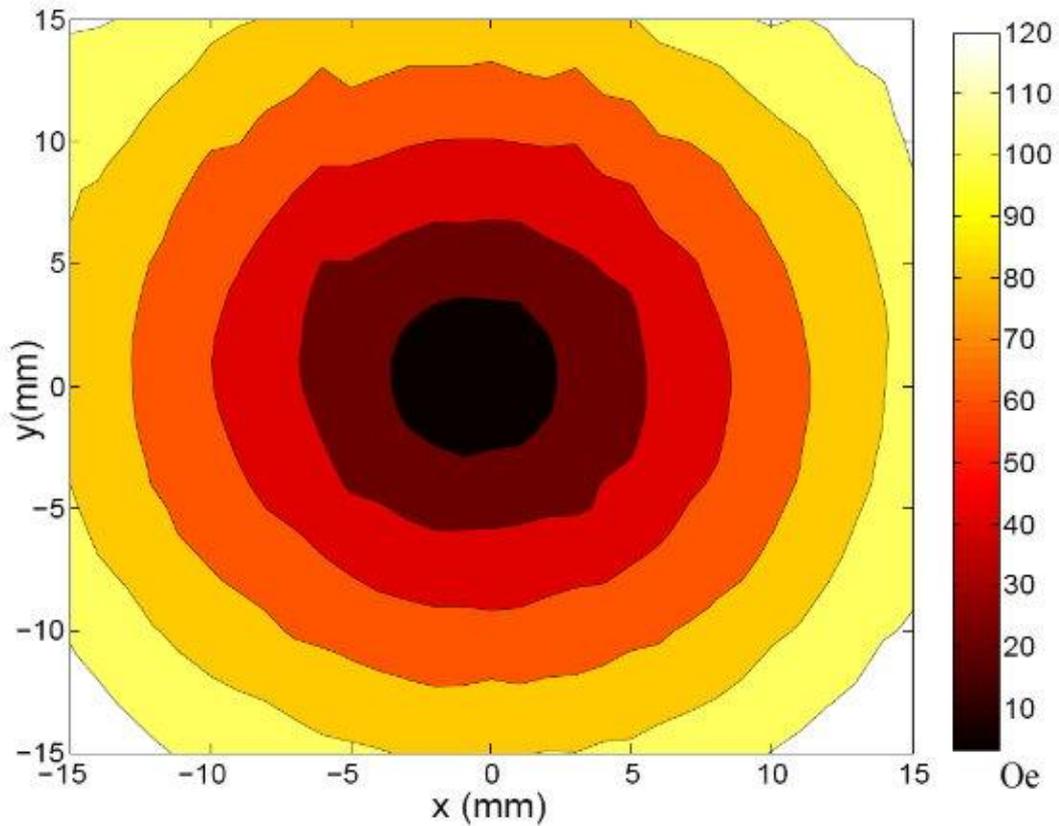


圖 2-6 徑向距離與磁場大小成近似正比關係-徑向磁場

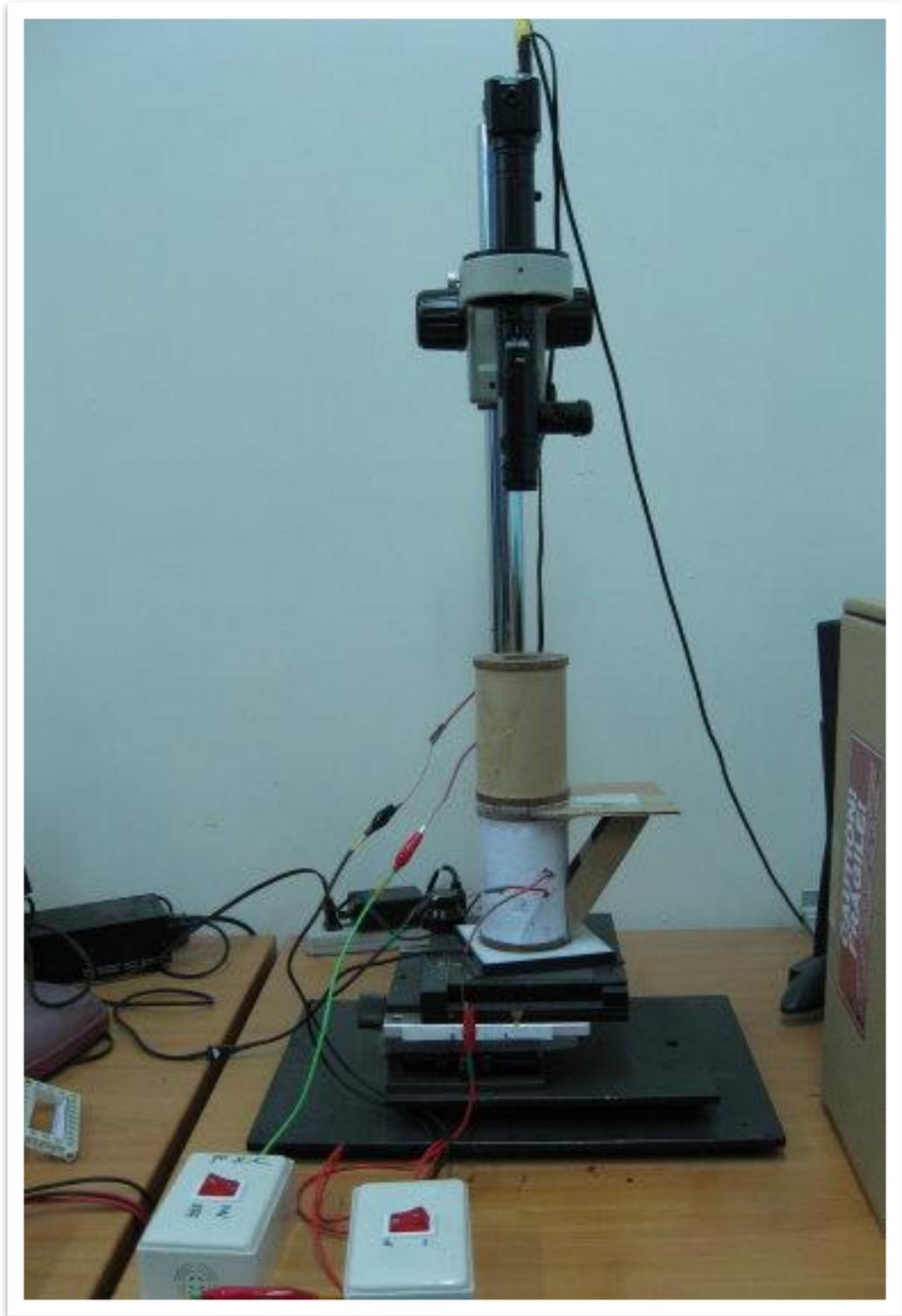


圖 2-7 CCD 攝影機、光學顯微鏡及實驗平台



圖 2-8 輕礦油基系列 EMG900/ EMG901/ EMG905

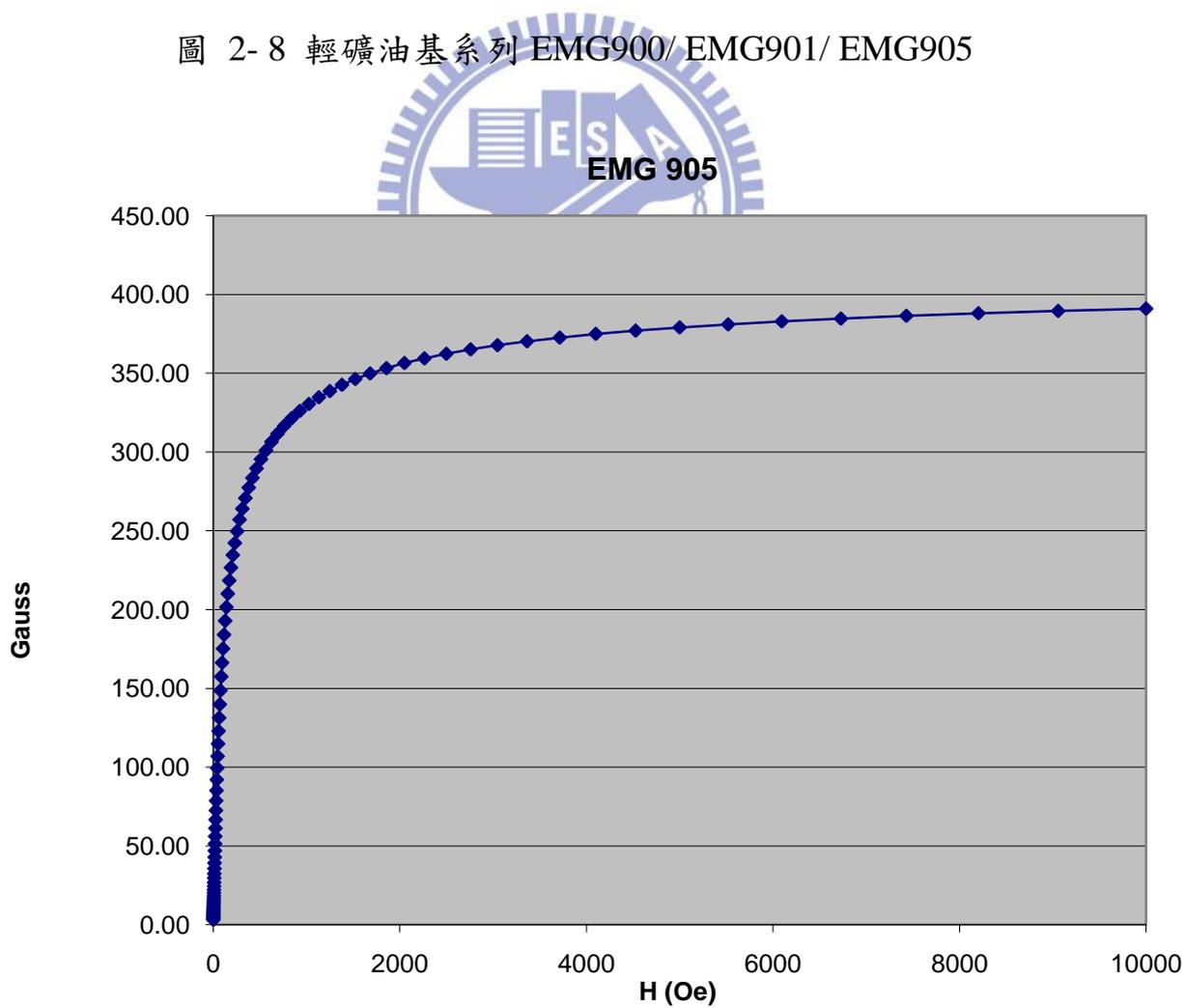


圖 2-9 EMG905 磁化率曲線

表 2-1 高斯計規格

桌上型高斯計		探棒	
名稱	規格	名稱	規格
廠牌	F.W.BELL/SYPRIS	量測範圍	直徑 0.2~19mm
型號	6010	長度/厚度	10 mm / 1mm 橫向探棒
精度	0.25%	長度/直徑	20 mm / 6.5 mm 軸向探棒
量測範圍	1mG~300KG		
顯示幕	LCD		

表 2-2 電流與磁場強度對應表

電源供應器			
電 流	2.2A	2.6A	3.0A
徑向磁場	211(Oe)	250(Oe)	288(Oe)
垂直磁場	300(Oe)	355(Oe)	400(Oe)

表 2-3 Light Mineral Oil Based Ferrofluids

Fluid Type	$M_s$ (Gauss)	Viscosity @ 27° C	Avg. Particle Size	Density (gm/ml)
<b>EMG 900</b>	<b>900</b>	<b>60 cp</b>	<b>100 Å</b>	<b>1.74</b>
<b>EMG 901</b>	<b>600</b>	<b>10 cp</b>	<b>100 Å</b>	<b>1.53</b>
<b>EMG 905</b>	<b>400</b>	<b>9 cp</b>	<b>100 Å</b>	<b>1.24</b>
<b>EMG 909</b>	200	6 cp	100 Å	1.02
<b>EMG 911</b>	100	4 cp	100 Å	0.89
<b>EMG 912</b>	50	2 cp	100 Å	0.84

## 第三章 結果與討論

本實驗觀察與分析在磁性液滴於空氣中，開啟電源產生磁場，在磁場的作用下出現一連串指狀化之界面不穩定現象，主要探討磁場強度、指狀化數目、液滴塗佈範圍和作用時間對液滴運動模式之影響。本文進行了眾多數量的實驗，使用不同的初始液滴直徑大小，以及三種不同的磁場強度，以期待能找出能符合其運動模式之理論；利用徑向磁場與旋轉塗佈技術之相似性，建構一創新之塗佈技術裝置，此裝置可有效於簡易靜止之機構上，進行平面上磁性液體之塗佈。

與旋轉塗佈相類似之力學機制作比較，本文以實驗研究磁性流體液滴在大氣中兩者屬於不可互溶體，磁性液滴置於平板中心且施加徑向磁場，產生指狀化的磁流體界面不穩定現象，以求發現此種液滴擴張運動的現象。於此相同梯度的線性磁場強度下，磁場對此磁性液滴施加之向外徑向磁力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，與旋轉塗佈中利用旋轉產生與徑向距離成正比關係之離心力具有相同之力學機制，故此徑向磁場界面不穩定與旋轉塗佈離心力產生之界面不穩定可做為類比的關係。

### 3-1 徑向磁場實驗

在徑向磁場實驗中，當磁性液滴（液滴直徑約  $d = 7.70 \text{ mm}$ ）受到通電流  $I = 3.0 \text{ A}$  ( $H_0 = 288 \text{ Oe}$ ) 之外界徑向磁場吸引，在平板上之類二維運動與變化情況，如圖 3-1 所示。圖 3-1 是由電子顯微鏡拍攝記錄之一系列照片。將磁性液滴注入於平板對應於線圈磁力之中心點處，如圖 3-1(a)所示。當磁場啟動產生磁力，磁性液滴被磁化，液滴保持初始形狀慢慢向外塗覆如圖

3-1(b)。隨著徑向磁場的持續作用，在液滴邊緣發生不穩定而產生鋸齒狀，如圖 3-1(c)、(d)。在剛開始的塗覆階段，出現的顛簸即接下來發展出主導指狀物，如圖 3-1(e)。經過一段發展時間，主導指狀物發展到磁場的外圍，次要的主導指狀物才依循指狀物方向進行塗覆如圖 3-1(f)~(h)。在磁場的持續作用下，位於中心的磁性液滴就會依循指狀物方向進行塗覆，隨後將磁場關閉即完成本次的塗覆實驗。另一個徑向磁場的範例如圖 3-2，為相同電流下磁性液滴（液滴直徑約  $d = 6.44 \text{ mm}$ ）受到外界徑向磁場吸引產生一連串變化情形。圖 3-2(a)為一開始的液滴直徑，當液滴邊緣產生鋸齒狀發展出主導指狀物如圖 3-2(b)~(e)，隨後次主導指狀物產生並進行增長如圖 3-2(f)~(h)。

在初始階段液滴邊緣的鋸齒狀使得界面不穩定決定了接下來磁性液滴塗覆的幾何圖形。首先出現的主導指狀物，先進行液滴的塗覆當發展到線圈邊緣，次要的主導指狀物產生，進行下一階段的液滴塗覆。圖 3-3 中為受到徑向磁力 288Oe 三組的實驗影片截圖，液滴直徑分別 6.44mm(第一列)，7.03mm(第二列)，7.70mm(第三列)。一開始出現擾動，產生主導指狀物，隨後液滴的塗覆增長。在之前的文獻，當液體在旋轉塗佈的過程，因為離心力的作用，使得不穩定手指狀流會在連續薄膜波前處產生，本實驗徑向磁場實驗中也可明顯觀察出此現象。先前文獻當中，非磁性液滴在旋轉塗覆中所產生離心力與徑向磁場的磁力，兩者皆與徑向距離  $r$  成正比的線性關係；故兩者有著相對應的力學機制，我們進行多組的徑向磁場實驗與旋轉塗覆進行比較。

在此我們使用 EMG 系列的磁性液滴，不同磁性液滴性質進行徑向磁力機制實驗，發現在 EMG905 磁性液滴下，比較容易得到均勻的塗覆。在 EMG901 與 EMG900 則較不易產生理想的實驗結果如圖 3-4。

為了能精確分析實驗結果，將實驗影片截圖像素大小為 720x480 影像

至 MATLAB 圖像處理軟體。確定灰階的亮度起始數值，完整的初始磁性液滴面積可以被正確計算出來，在影像處理軟體當中定義磁性液滴黑色區塊數值為 0，而液滴背景為全白的數值為 1，在本文後面的章節將會對於此亮度值的設定加以說明。

在其產生界面不穩定的過程當中，磁力大小的影響以及黏滯力的扮演重要的角色。徑向磁力密度則表示為

$$f_m = \mu_0 M \nabla H_r \quad (1)$$

其中  $\mu_0$  為自由空間滲透率，M 為磁流體之磁化率。

磁性液滴之磁化率可以近似用一個線性關係來表示，

$$M(r) = \chi H_r(r) \quad (2)$$

而  $\chi$  則表示為磁化率。合併(1)(2)此兩關係式

$$f_m(r) = \mu_0 \chi \left( \frac{H_0}{L} \right)^2 r$$

然而在液滴外圍環區是向外力最主要作用的地方，而其內部中心區域則沒有受到影響，在旋轉塗覆實驗當中液滴臨界半徑與時間的指數關係式為 1/4。值得注意的是，這種磁場作用的機制與離心力驅動影響極為相似，此種影響多半發生於不可互溶旋轉流體和旋轉塗佈過程中。我們試著將實驗數據面積與時間無因次化  $A' \sim t'^{\nu}$ ，若特徵時間分析為

$$\tau = \eta_d L^2 / \mu_0 d_l^2 H_0^2$$

其中  $d_l$  為開始受到徑向磁場影響下的直徑液滴

而初始液滴面積表示為

$$A_0 = \pi d^2 / 4$$

則面積與時間無因次化後可表示成

$$A' = A / A_0$$

$$t' = t / \tau$$

將實驗數據分析可得到指數的平均值 $\gamma=0.4897$ ，標準差為0.0310，如圖3-5。在這個意義上，圖3-5的行為描述可以代表著廣泛的實驗數據結果。實驗結果得知在徑向磁力機制下有下列指數關係

$$A' \sim t^{0.4897}$$

## 3-2 轉變磁場型態

在流體力學當中，以可視化的觀點來說，希望可以實驗出漂亮且對稱性的幾何圖形，但是實驗過程中，產生初始液滴的不穩定性、試片上的缺陷或是在磁場本身的均勻性，很難去要求的實驗變數。圖3-6 (a)~(d)為開啟單一徑向磁場 ( $H_0 = 288 \text{ Oe}$ ) 的第一種機制，產生磁力吸引被磁化之初始磁性液滴直徑 $d=7.70\text{mm}$ 如圖3-6 (a)，磁性液滴邊界開始產生輕微形變，液滴起初保持圓形均勻往外塗覆如圖3-6(b)。隨著磁場的持續作用慢慢開始出現界面的不穩定，指狀化現象繼續向外延伸也開始出現長短不一之突出指狀物，如圖3-6 (c)。液滴受到外圍更大的磁場作用依循著剛出現的指狀物進行塗覆而使液滴均勻的向外延展，達到所需的厚度而關閉磁場，如圖3-6 (d)。在圖3-6(a)~(d)，是相當難得可以塗覆出特殊且對稱的圖形。為了克服實驗上的困難，我們提出了一個改變液滴界面不穩定的控制方法，圖3-6 (e)~(h)為垂直與徑向磁場交互作用下，使液滴能更均勻向外塗覆的第二種機制。首先開啟垂直磁場使液滴被磁化其初始磁性液滴直徑 $d=7.6\text{mm}$ 如圖3-6 (e)，受到徑向電流 $I = 3.0 \text{ A}$  ( $H_0 = 288 \text{ Oe}$ ) 之外界垂直磁力的影響，磁性液滴慢慢地均勻分裂成小顆液滴並各自單獨向外飄移形成羅森史維格結構物，在外圍所形成的液滴顆數可被我們所操縱，分裂成數顆小液滴並往外飄移構成待會所要塗覆的薄膜雛型，如圖3-6(f)所示。關閉垂直磁場，剛所形成的羅森史維格結構物崩解，液滴邊緣產生規則的界面不穩定現象如圖3-6(g)，接下來開啟徑向磁場使平板上的液滴受到徑向磁場誘導，使液滴進行擴散模式並且產生指狀化且呈現出對稱性和形狀如圖3-6 (h)。

比較上述兩種不同型態磁場變化下，於上百組實驗中觀察磁性液滴塗覆行為。第一種機制，單純受到徑向磁場的磁力作用液滴剛開始均勻向外擴展，但一開始注入液滴，注入的角度不易控制使得液滴不穩定性無法確定，或是說實驗上的線圈是由手工打造，因此磁場均勻性多多少少會有誤差，液滴很容易產生偏移而使液滴受到的磁力大小不同；當一開始液滴界面無法達到一致性，也不容易產生均勻的指狀物，使其無法達到有效的塗覆面積。第二種機制，創新的磁場變化，先行產生垂直磁場再改為徑向磁場，先使液滴改變表面張力而產生羅森史維格結構物，分裂的小液滴規則的向外延展，關閉垂直磁場而使小顆液滴崩解，使得原本的液滴邊緣產生不穩定之介面型態，進而可以比較容易產生均勻指狀物而向外塗覆。兩種不一樣的磁場型態，它們的塗佈範圍和磁場作用時間對液滴運動模式有相當的一致性如圖 3-7，但在第二種機制下，利用垂直與徑向磁場交互作用更容易達到我們所需。

第二種機制下，在垂直與徑向磁場作用下，面積隨時間的成長可以分為下列 5 個階段，如圖 3-8；I：注入磁性液滴保持原來形狀，II：在垂直磁場作用下磁性液滴在外圍分裂成數顆液滴( $N_p$ )並往外飄移，III：垂直與徑向磁場的切換過程，小顆液滴崩解形成一個新的連續結構形狀，面積突然增加並且呈現出薄膜雛型，IV：在徑向磁場作用下，磁性液滴依循著剛生成的薄膜雛型生成出數根指狀化數目( $N_f$ )，中間液滴依循指狀化方向進行塗覆，V：面積隨時間增長趨勢下降，液滴塗覆超出我們所觀測範圍，故不在我們所探討範圍及進行分析。

### 3-3 受到垂直與徑向磁場下產生一連串變化

#### 3-3-1 於 2.2A 磁場交互作用

將實驗影片截圖加以分析，在各不同時間點下液滴型態的改變。圖 3-9 為在 2.2A 磁場作用下產生一系列指狀化過程，滴入磁性液滴(液滴直徑約 6.35mm)， $t=0\text{sec}$  如圖 3-9(a)，開啟垂直磁場產生 300Oe 的磁力大小，磁性液滴在此磁力的作用下  $t=1\text{sec}$  於液滴外圍產生 6 顆小液滴( $N_p=6$ ) 如圖 3-9(b)，垂直磁場持續作用下  $t=4\text{sec}$  更明顯可以看出分裂出的小液滴向外漂移如圖 3-9(c)，關閉垂直磁場使小顆液滴崩解產生一個連續的界面型態為接下來塗覆的薄膜雛型  $t=7\text{sec}$  如圖 3-9(d)，再開啟徑向磁場使中心的磁性液滴受到外圍磁力的作用向外進行塗覆。觀察圖 3-9(e)~(h) 為在  $t=10、11、12、13\text{sec}$  產生 6 根指狀化數目( $N_f$ )，位於磁場中心的磁性液滴並且依循指狀化方向進行塗覆。待磁性液滴塗覆超出觀察範圍外則關閉磁場，完成本次磁性液滴的塗覆實驗。

在下列幾組範例中改變液滴直徑，為在相同電流( $I=2.2\text{A}$ )產生垂直磁場( $H_v=300\text{Oe}$ )及徑向磁場( $H_o=211\text{Oe}$ )，磁性液滴產生一連串指狀化現象；圖 3-10~圖 3-15 為液滴直徑 5.12、5.39、7.16、7.37、7.50、7.95mm，分別產生 4、5、8、9、10、10 根的指狀物( $N_f$ )。在較小直徑的液滴中，由於受到較小的磁力影響所以塗覆過程相較於大直徑的液滴直徑來的趨緩，但最終也可以達到我們所預期的結果。

將上述不同液滴直徑大小產生的指狀化過程，截取成圖 3-16 並將以分析比較。於第一行當中，觀察出在不同液滴直徑大小下在外圍生成的液滴顆數( $N_p$ )，第二行為液滴崩解後液滴生成沿著固定根數指狀物( $N_f$ )方向進行塗覆，第三行為最後磁性液滴的塗覆結果。從圖 3-16 中觀察出，外圍小顆的液滴顆數等於特定的根數指狀化數目( $N_p=N_f$ )。

### 3-3-2 於 2.6A 磁場交互作用

我們嘗試著將磁場改變，改變電流大小，於 2.6A 的線圈作用下，使其

產生垂直磁場( $H_v=3550\text{e}$ )及徑向磁場( $H_o=2500\text{e}$ )。圖 3-17 為在 2.6A 磁場作用下產生一系列指狀化過程，滴入磁性液滴(液滴直徑約 5.31mm)， $t=0\text{sec}$  如圖 3-17(a)，開啟垂直磁場，磁性液滴在此磁力的作用下當  $t=2.8\text{sec}$  於液滴外圍產生 6 顆主要的液滴( $N_p=6$ ) 如圖 3-17(b)，垂直磁場持續作用下  $t=5.6\text{sec}$  更明顯可以看出分裂的液滴向外飄移如圖 3-17(c)，關閉垂直磁場使小顆液滴崩解產生一個連續的界面型態為接下來塗覆的薄膜雛型  $t=11.2\text{sec}$  如圖 3-17(d)，再開徑向磁場使中心的磁性液滴受到外圍磁力的作用向外進行塗覆。觀察圖 3-17(e)~(h)為在  $t=14$ 、 $16.8$ 、 $19.6$ 、 $23\text{sec}$  產生 6 根指狀化手指( $N_f$ )，位於磁場中心的磁性液滴並且依循指狀化方向進行塗覆。待磁性液滴塗覆超出觀察範圍外則關閉磁場，完成本次磁性液滴塗覆實驗。

在下列幾組範例中改變液滴直徑，為在相同電流( $I=2.6\text{A}$ )產生垂直磁場( $H_v=3550\text{e}$ )及徑向磁場( $H_o=2500\text{e}$ )，磁性液滴產生一連串指狀化現象；圖 3-18~圖 3-20 為液滴直徑 6.03、6.04、6.75mm，分別產生 8、9、10 根的指狀物( $N_f$ )。

將不同液滴直徑大小產生的指狀化過程，截取成圖 3-21 並將以分析比較。於第一行當中，觀察出在不同液滴直徑大小下在外圍生成的液滴顆數( $N_p$ )，第二行為液滴崩解後液滴生成沿著固定根數指狀物( $N_f$ )方向進行塗覆，第三行為最後磁性液滴的塗覆結果。從圖 3-21 中觀察出，第一列中液滴直徑大小  $d=5.31\text{mm}$  外圍的液滴分裂成 11 顆大小並列的液滴，但主要可以觀察出有 6 個主要液滴的形成，並生成指狀物 ( $N_p=N_f=6$ )。第二列中液滴直徑大小  $d=6.03\text{mm}$  外圍的液滴分裂成 11 顆大小並列的液滴，但主要有 8 個主要液滴的形成，並生成指狀物 ( $N_p=N_f=8$ )。第三列中液滴直徑大小  $d=6.04\text{mm}$  外圍的液滴分裂成 9 顆小液滴，並生成指狀物 ( $N_p=N_f=9$ )。第四列中液滴直徑大小  $d=6.75\text{mm}$  外圍的液滴分裂成 13 顆大小並列的液滴，但主要還是可以觀察出有 11 個主要液滴的形成，但只生成 10 根的指狀物 ( $N_p=11$ ； $N_f=10$ )，是由於在有限的周長下坍塌的小液滴會受到侷限，使液

滴界面發生不均勻的改變，待後續章節進行更進一步分析。

### 3-3-3 於 3.0A 磁場交互作用

當電流  $I=3.0A$ ，線圈產生垂直磁場( $H_v=400Oe$ )及徑向磁場( $H_o=288Oe$ )；圖 3-22 為一系列指狀化過程，滴入磁性液滴(液滴直徑約 5.11mm)， $t=0sec$  如圖 3-22(a)為液滴初始形狀，開啟垂直磁場，磁性液滴在此磁力的作用下當  $t=2.6sec$  於液滴外圍產生 10 顆主要的液滴( $N_p=10$ )且向外漂移如圖 3-22(b)，關閉垂直磁場使顆液滴崩解產生一個連續的界面型態為接下來塗覆的薄膜雛型， $t=5.2sec$  如圖 3-22(c)，再開啟徑向磁場使中心的磁性液滴受到外圍磁力的作用向外進行塗覆，但是在有限的周長下，液滴坍塌後始得界面不穩定發生如圖 3-22(d)。觀察圖 3-22(e)~(h)為在  $t=13$ 、15.6、22、30sec 產生 10 根指狀化手指( $N_f$ )，位於磁場中心的磁性液滴依循指狀化方向進行塗覆，但無法較平穩的進行塗覆。

將不同液滴直徑大小產生的指狀化過程，截取成圖 3-23 並將以分析比較。第一列中液滴直徑大小  $d=7.61\text{ mm}$  外圍的液滴分裂成 17 顆的小液滴，但只生成 11 根的指狀物 ( $N_p=17$ ； $N_f=11$ )。第二列中液滴直徑大小  $d=6.72\text{ mm}$  外圍的液滴分裂成 15 顆的小液滴，但只生成 10 根的指狀物 ( $N_p=15$ ； $N_f=10$ )。第三列中液滴直徑大小  $d=7.11\text{ mm}$  外圍的液滴分裂成 18 顆的小液滴，但只生成 10 根的指狀物 ( $N_p=18$ ； $N_f=10$ )。與 2.2A 和 2.6A 有很大的差異；在 3.0A 電流下，實驗結果得到  $N_f \leq N_p$  的關係，雖然磁場加大，分裂越多的液滴顆數，但是讓我們無法有效的掌控其指狀化數目的發展關係。

### 3-3-4 不同徑向磁場大小之比較

在電流大小 $I=2.2\text{A}$ 、 $2.6\text{A}$ 及 $3.0\text{A}$ 受到垂直及徑向磁場作用的面積時間圖，繪製成圖3-24。除了先前探討的無因次面積，我們還可以發現到一個值得注意的事實，當我們考慮到隨著時間的增加，面積的增加量定義為

$$\Delta A = A - A_0$$

定義為依據時間所變化的面積差，其初始值為 $t=0$ 。圖3-24標繪出無因次化之面積增加項 $\Delta A' = A' - 1$ 為 $t'$ 之函數， $\Delta A'$ 的變化確立了一個普遍的機制，液滴塗覆最終的結果將會遵循一個共同的指數關係

$$\Delta A' \sim t'^{\alpha}$$

經過長期時間後，於電流 $I=2.2\text{A}$ 磁場作用下，得到無因次面積增長與無因次時間的平均指數關係 $\alpha=1.061$ ，當 $I=2.6\text{A}$ 磁場作用下 $\alpha=0.969$ ，當 $I=3.0\text{A}$ 磁場作用下 $\alpha=0.957$ ；我們實驗超過上百組，實驗出在不同的徑向磁場作用下，歸納出一個平均值 $\alpha=0.99959$ 標準差為 $0.0693$ 。磁性液滴受磁場影響最後的增長將會遵循一個指數關係

$$\Delta A' \sim t'^{0.99959}$$

圖3-24為三組不同磁場大小，液滴隨時間增長及無因次化分析分別為： $2.2\text{A}$ 產生徑向磁場 $211\text{Oe}$ 、 $2.6\text{A}$ 產生徑向磁場 $250\text{Oe}$ 、 $3.0\text{A}$ 產生徑向磁場 $288\text{Oe}$ ；所有實驗範例的指數分佈如圖3-25。

在剛所提到磁性液滴受到不同磁場的影響下，在液滴的外圍會產生小顆液滴，所生成的液滴顆數( $N_p$ )與接下來發展的指狀化數目( $N_f$ )關係如圖3-26。圖3-26(a)為在徑向磁場為 $H_0=211$ 和 $H_0=250\text{Oe}$ ，觀察出生成的液滴顆數與指狀化數目近似( $N_p \approx N_f$ )，液滴顆數( $N_p$ )及指狀化數目( $N_f$ )隨著液滴直徑增加而呈現線性關係；圖3-26(b)為在徑向磁場為 $H_0=288\text{Oe}$ ；則出現較大落差的液滴顆數與指狀化數目的數據分佈，實驗結果得到 $N_f \leq N_p$ 的關係。其結

論為在較小的磁場下，液滴外圍分裂的顆數比較少，比較容易發展出指狀物；若磁場增強外圍分裂的顆數多，但在有限的周長下，小顆液滴的界面會去互相消長，故無法成長出一樣數目的指狀物。

最後我們所探討的一個問題，為在徑向磁場為  $H_0=211$  Oe 下分析兩種情況在不同直徑大小及指狀化數目的探討，圖 3-27：(1)在類似大小的液滴直徑下產生不同數目的指狀化現象；在液滴直徑約 4.7mm 分別生長出 3、4 根不同數目的指狀物，在面積最後的塗覆結果大小一致如圖 3-2(a)，觀察其無因次面積與無因次時間，發現較少的指狀化數目 ( $N_{f,1}=3 < N_{f,2}=4$ ) 在相同無因次時間點下有較大的面積關係如圖 3-2(b)，而在無因次面積增長為保持相同的指數關係如圖 3-2(c)；相同範例為液滴直徑大小約 5.5mm、6.0mm、6.35mm，一樣有著相同的結論。(2) 在產生相同數目的指狀化根數而液滴直徑大小不同；在指狀化根數為 4 ( $N_f=4$ )，在較大顆的液滴直徑下，於相同無因次時間點下也有著較大的面積關係，而在無因次面積增長為保持相同的指數關係；相同範例為指狀化根數分別為 5、6 的情況下有著相同的結論。

### 3-4 磁性液滴塗覆厚度均勻性

首先我們為先前設定的亮度值作說明，如果我們假設不同的初始灰階亮度值，可能會對  $A$ ， $A'$  以及  $\Delta A'$  的量有所不同的結果，這個動作將讓我們測試如圖 3-28(c) 的指數正確度是否足夠。

在圖 3-28 中我們得知設定  $I_0$  值以量測面積，而測定的面積經由不斷變化的型態發展，使得灰階的亮度設定不容易完全的決定。由於影像擷取圖片的關係，液滴邊界不清晰，我們合理預期液滴的外觀尺寸將會依據特定的初始點亮度來決定。為表明此重要觀點，我們描繪出圖 3-28，觀察  $A$ ， $A'$  以及  $\Delta A'$  與時間之變化，考慮到  $I_0$  值以及與增長模式相關之物理參數。而這張

圖的主旨是取決於設定不同的灰階亮度初始值 $I_g$ ，其相對應之面積與時間相關圖。由圖中我們舉例說明兩種不同液滴直徑大小，在不同亮度值的設定其最終結果相當明確，當初始亮度值改變後，關於 $A$ ， $A'$ 以及 $\Delta A'$ 的變化相當輕微。舉例說明，在圖3-5(a)中較大的液滴面積結果在高亮度值仍然如昔。此外，同樣清楚的是在總體之發展趨勢都非常一致，所以一般而言液滴的反應變化並不嚴格取決於初始值的設定。而最後要證明的，在圖3-28(c)中儘管亮度初始值已改變，但我們仍證明了 $\Delta A' \sim t^{0.99959}$ 之結論仍然與圖3-24(b)相同。最後則是要強調我們文中所提及之結論皆是擁有一定的實驗量所推論出，並且符合圖3-28之說明例證。這重要的證明具體化了我們先前發現之指數，並言明了我們選取一恰當之亮度初始值。實驗當中皆選取 $I_g=0.92$ ，為利用實驗室0.001mm尺規，擷取影像圖片，再利用圖片像素作比較找出一固定數值

如同先前所提及，我們可以計算出面積之演化型態，由液滴初始點之亮度為基準，再轉為灰階圖片，並計算這些圖片中小於初始點亮度的圖素。在這個概念下我們使用MATLAB進行影像處理轉灰階圖像，並且測量灰階之亮度強度存為矩陣，截取實驗影片像素大小為720×480，並且定義為 $I_g$ ，範圍在0（圖片中最黑區域）到1（背景光亮區域）之間，因此 $0 \leq I_g \leq 1$ 。實驗分析中，統一截取以圖片中間作分析，故不能代表剛好為液滴中心的位置，但此分析只為找出液滴塗覆的均勻性。圖3-6(a)~(d)及3-6(e)~(h)分別為兩種不同磁場機制下其面積塗覆過程，y 軸隨著時間以及演化型態變化之灰階強度分佈如圖3-29(a)和(b)分別所示。在圖3-29中我們可以看到當初始亮度分佈在 $t = 0.0\text{sec}$ 有一個清楚平坦之低凹處於中心區域，是為磁性液滴之原本的形體，經過一段時間的磁力作用，灰階強度會逐漸減少而漸趨於平緩，在灰階強度變化可觀察出液滴隨著時間增加推論其厚度也會逐漸變薄且均勻塗覆的趨勢。

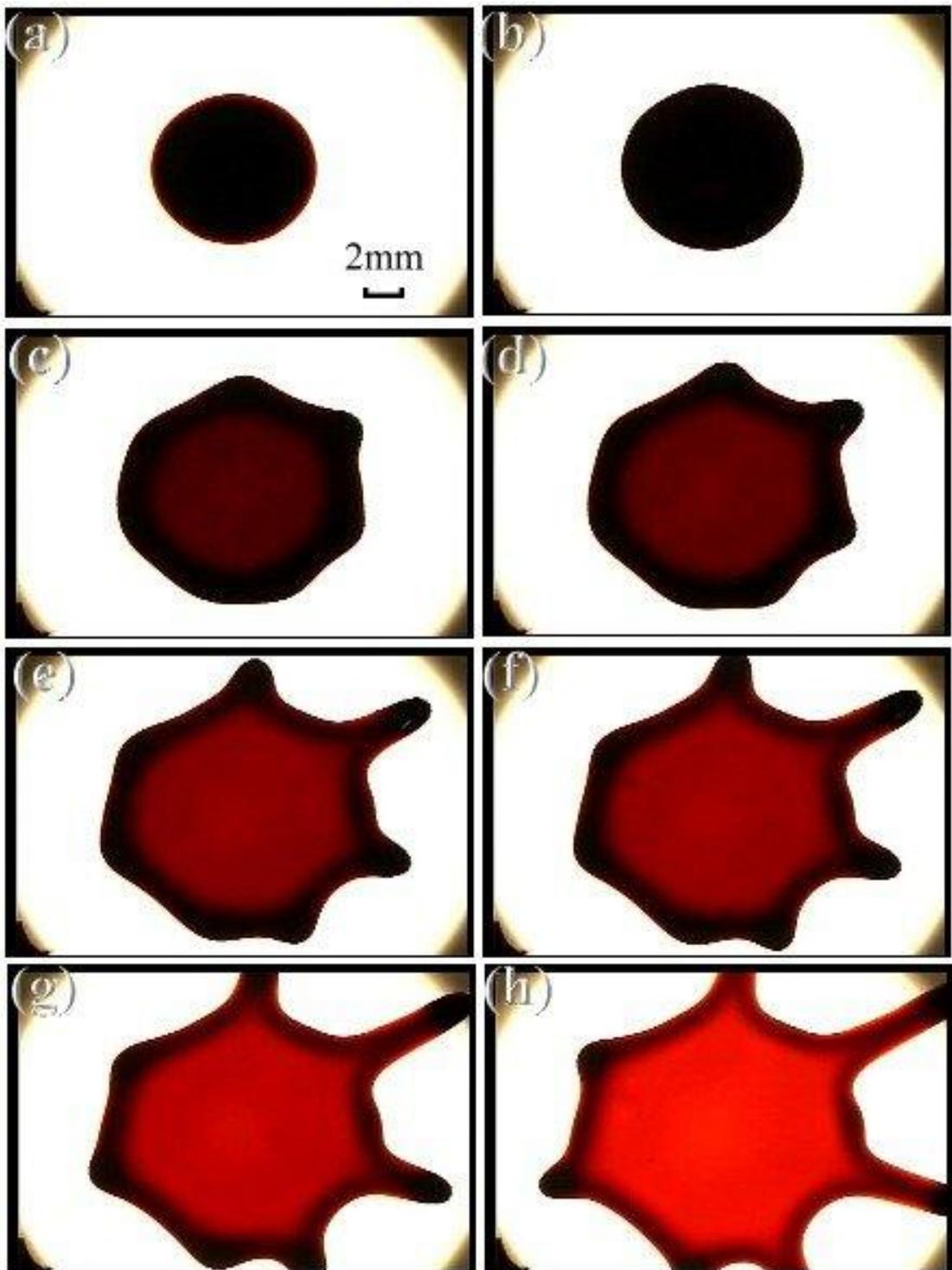


圖 3- 1 徑向磁場作用( $H_0= 288$  Oe) ,  $d=7.70$ mm , 指狀化過程

(a) $t=0.0$ s; (b)1.2s; (c)2.4s; (d)5.4s;  
(e)5.6s; (f)5.8s; (g)6.2s, and (h)6.6s.

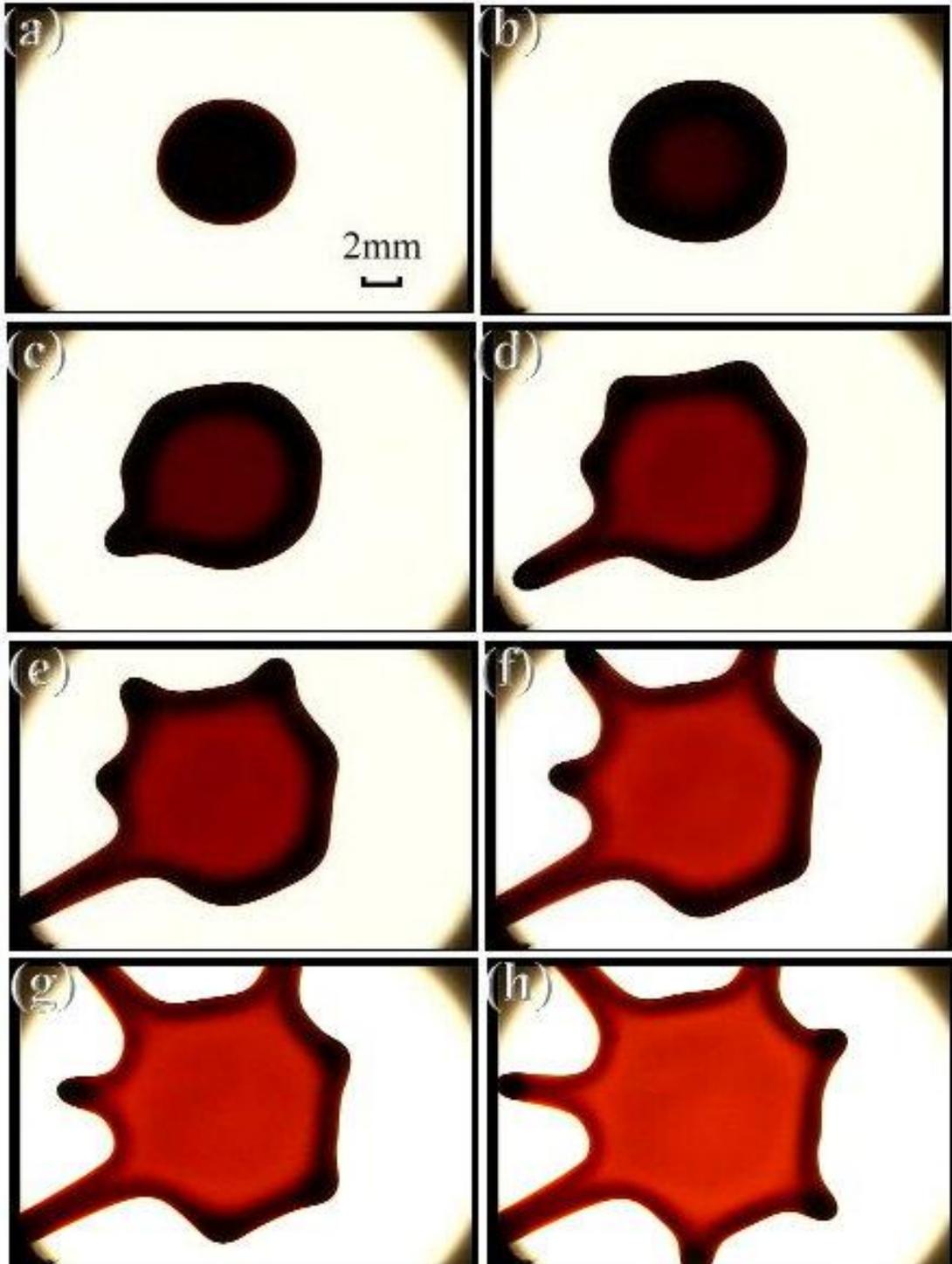


圖 3- 2 徑向磁場作用( $H_0 = 288$  Oe) ,  $d=6.44$ mm , 指狀化過程

(a) $t=0.0$ s; (b) $2.2$ s; (c) $3.2$ s; (d) $3.8$ s;  
(e) $4.4$ s; (f) $5.4$ s; (g) $6.4$ s, and (h) $8.0$ s.

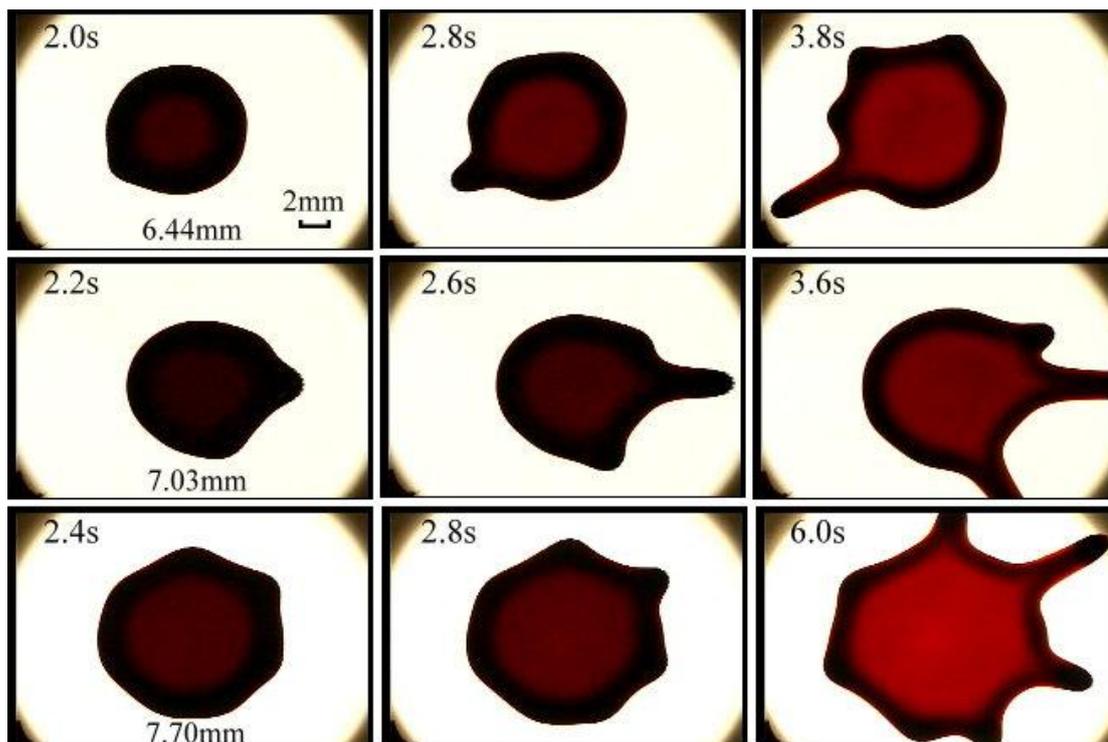


圖 3-3 徑向磁場作用( $H_0 = 288 \text{ Oe}$ )，不同液滴直徑所產生指狀化現象

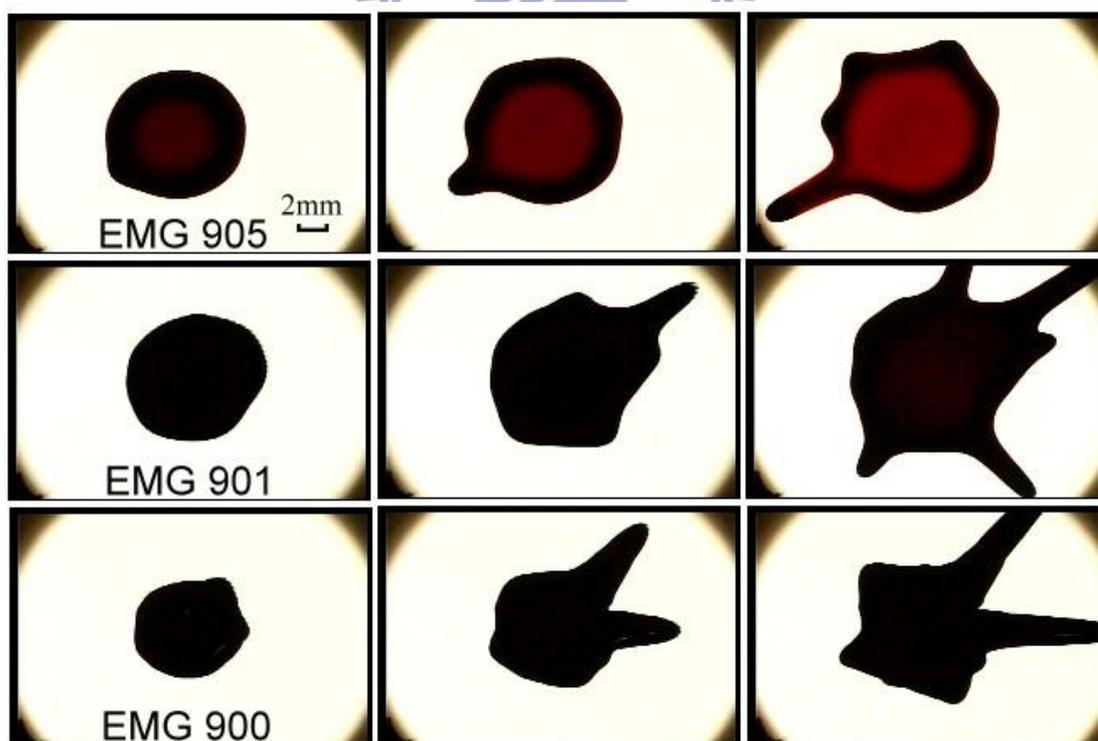


圖 3-4 徑向磁場作用( $H_0 = 288 \text{ Oe}$ )，不同磁流體所產生指狀化現象

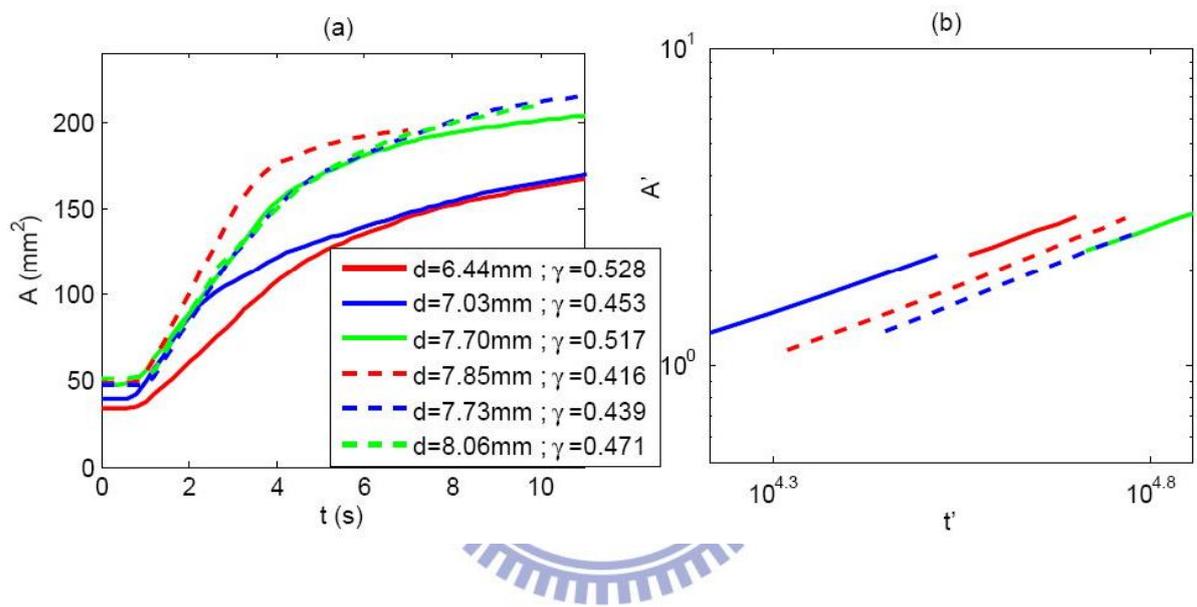


圖 3-5 於徑向磁場作用下( $H_0 = 288$  Oe)，面積比較圖

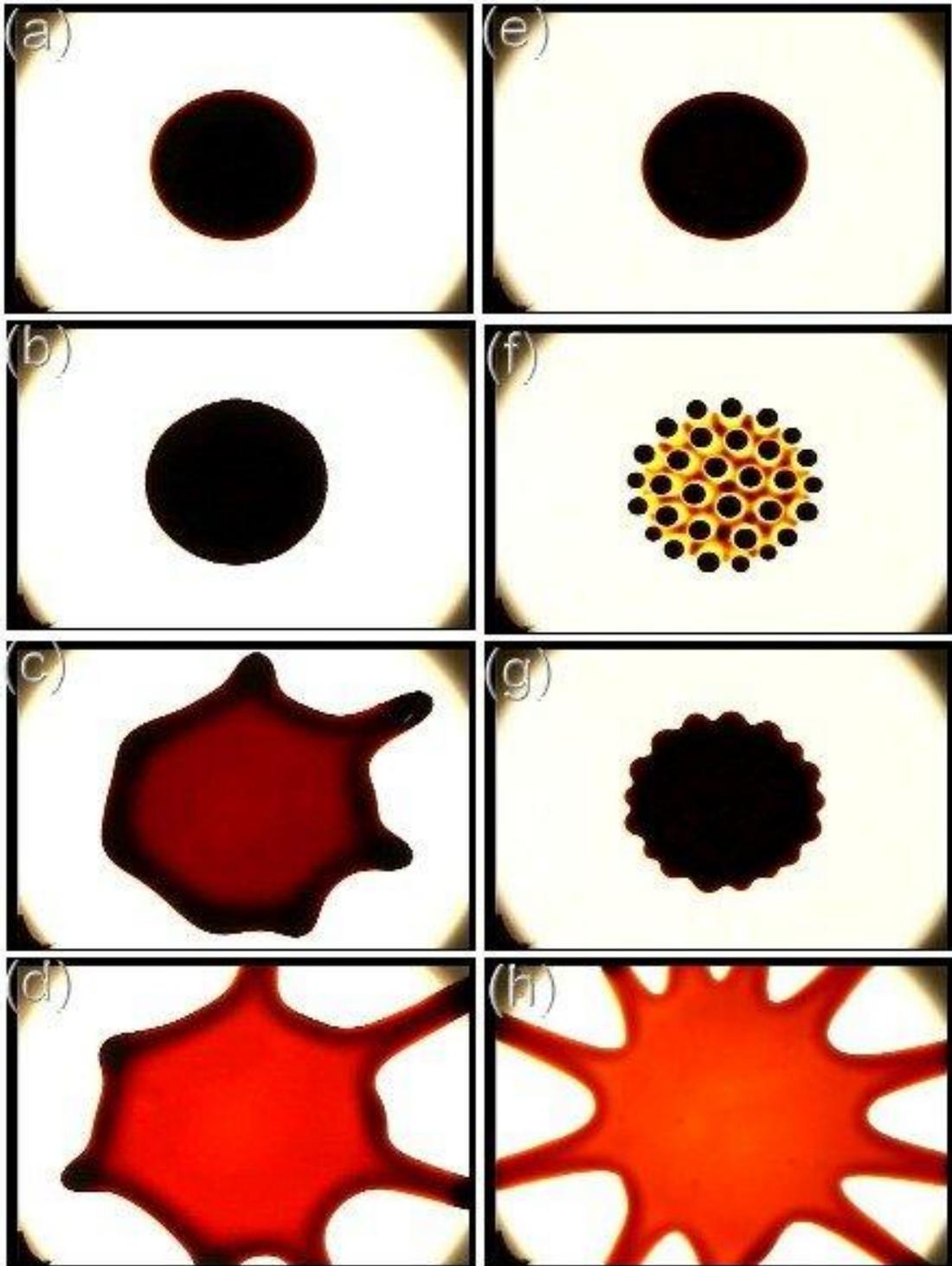


圖 3-6 不同機制磁場作用產生一連串指狀化現象  
 受徑向磁場作用(a) $t=0.0s$ ; (b) $1.2s$ ; (c) $3.6s$ ; (d) $4.6s$ ;  
 垂直與徑向磁場作用(e) $t=0.0s$ ; (f) $1.8s$ ; (g) $2.6s$ ; (h) $12.0s$

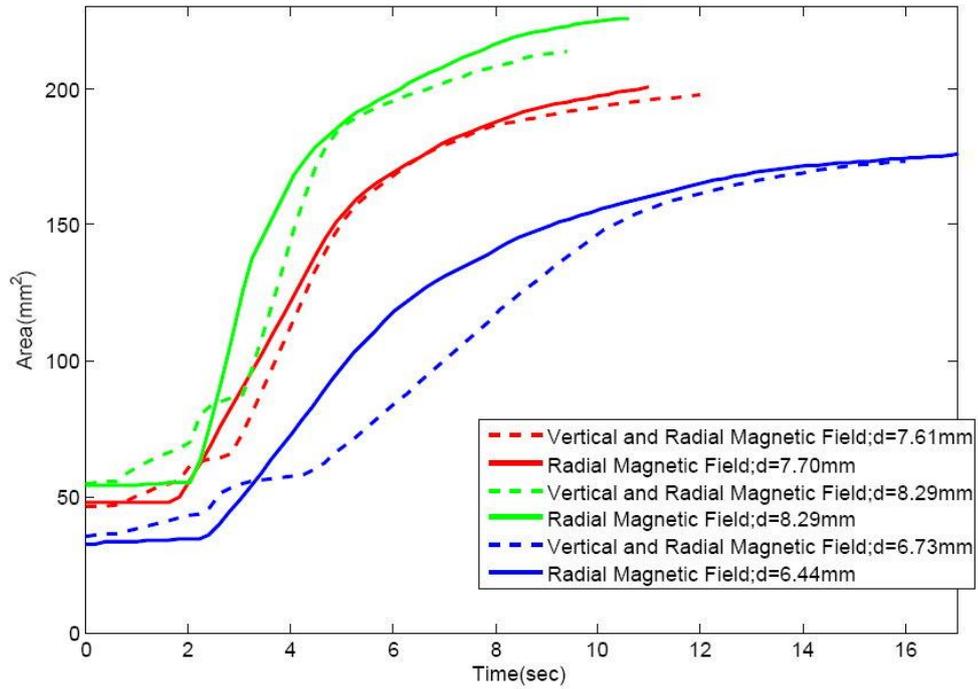


圖 3-7 不同機制磁場作用，面積比較圖

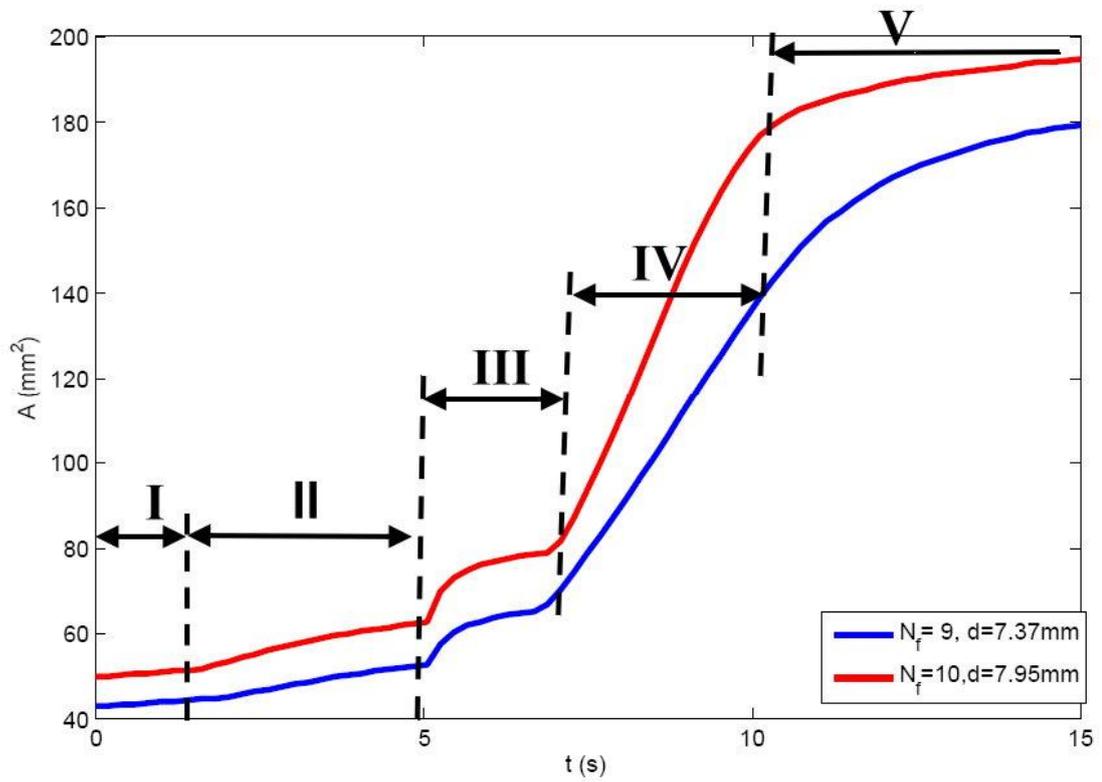


圖 3-8 垂直與徑向磁場作用面積隨時間成長的各階段

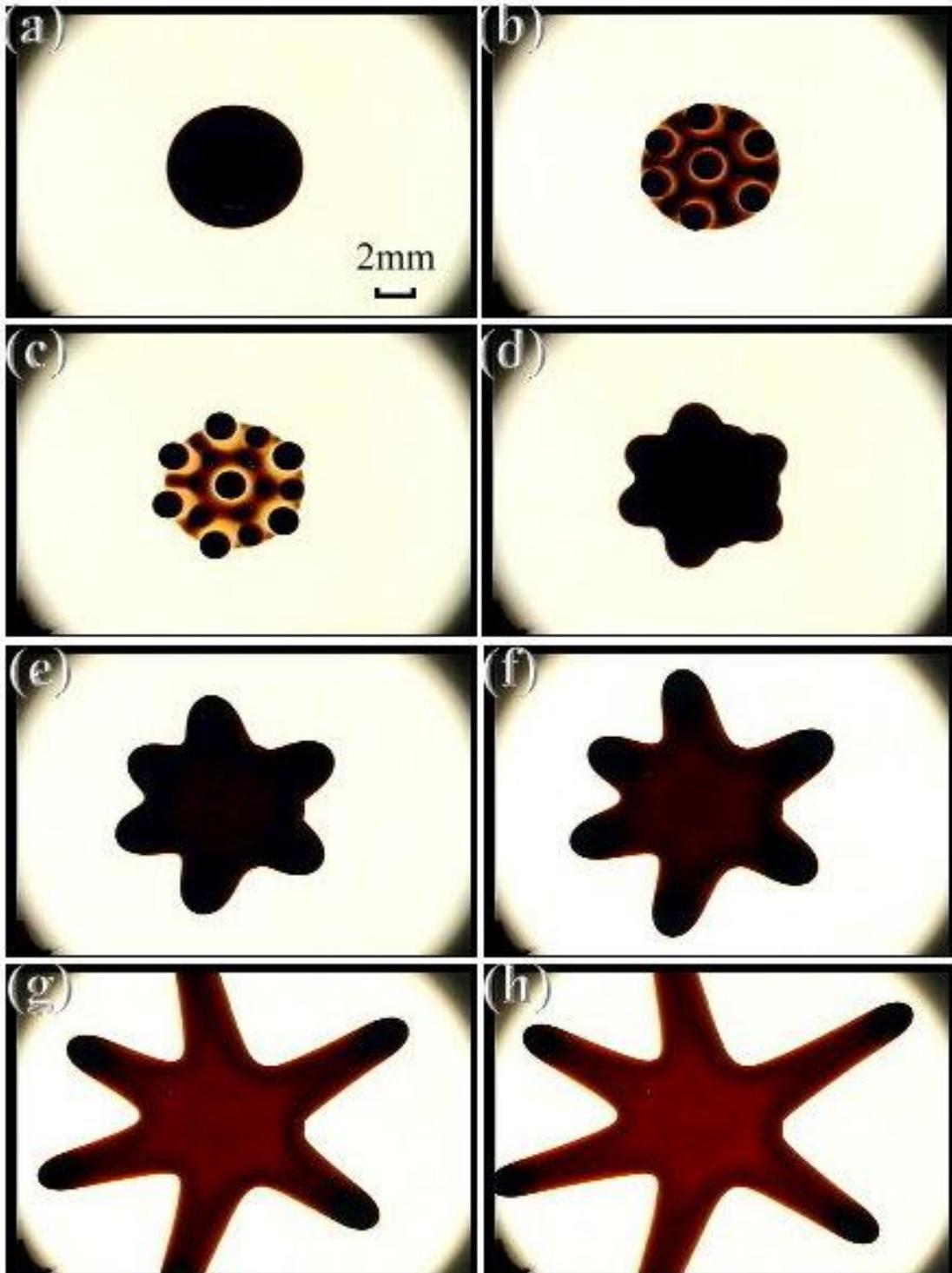


圖 3-9 垂直與徑向磁場作用( $H_0 = 211$  Oe),  $d=6.35$ mm, 指狀化過程

(a) $t=0.0$ s; (b) $1.0$ s; (c) $4.0$ s; (d) $7.0$ s;  
(e) $10.0$ s; (f) $11.0$ s; (g) $12.0$ s, and (h) $13.0$ s.

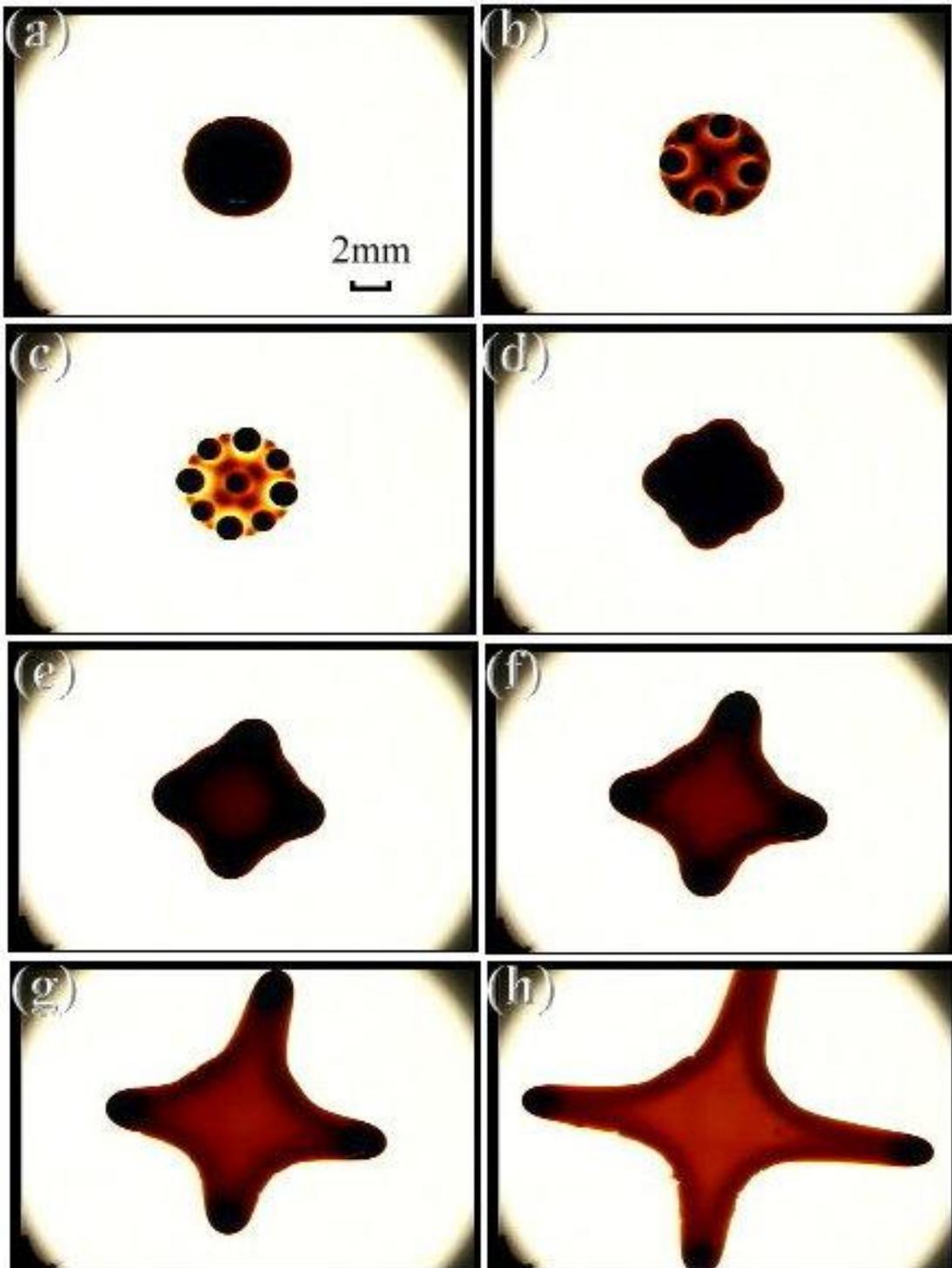


圖 3- 10 垂直與徑向磁場作用( $H_0 = 211$  Oe) ,  $d=5.12$ mm , 指狀化過程

(a) $t=0.0$ s; (b)1.2s; (c)4.4s; (d)7.6s;  
(e)10.8s; (f)14.0s; (g)17.2s, and (h)23.0s.

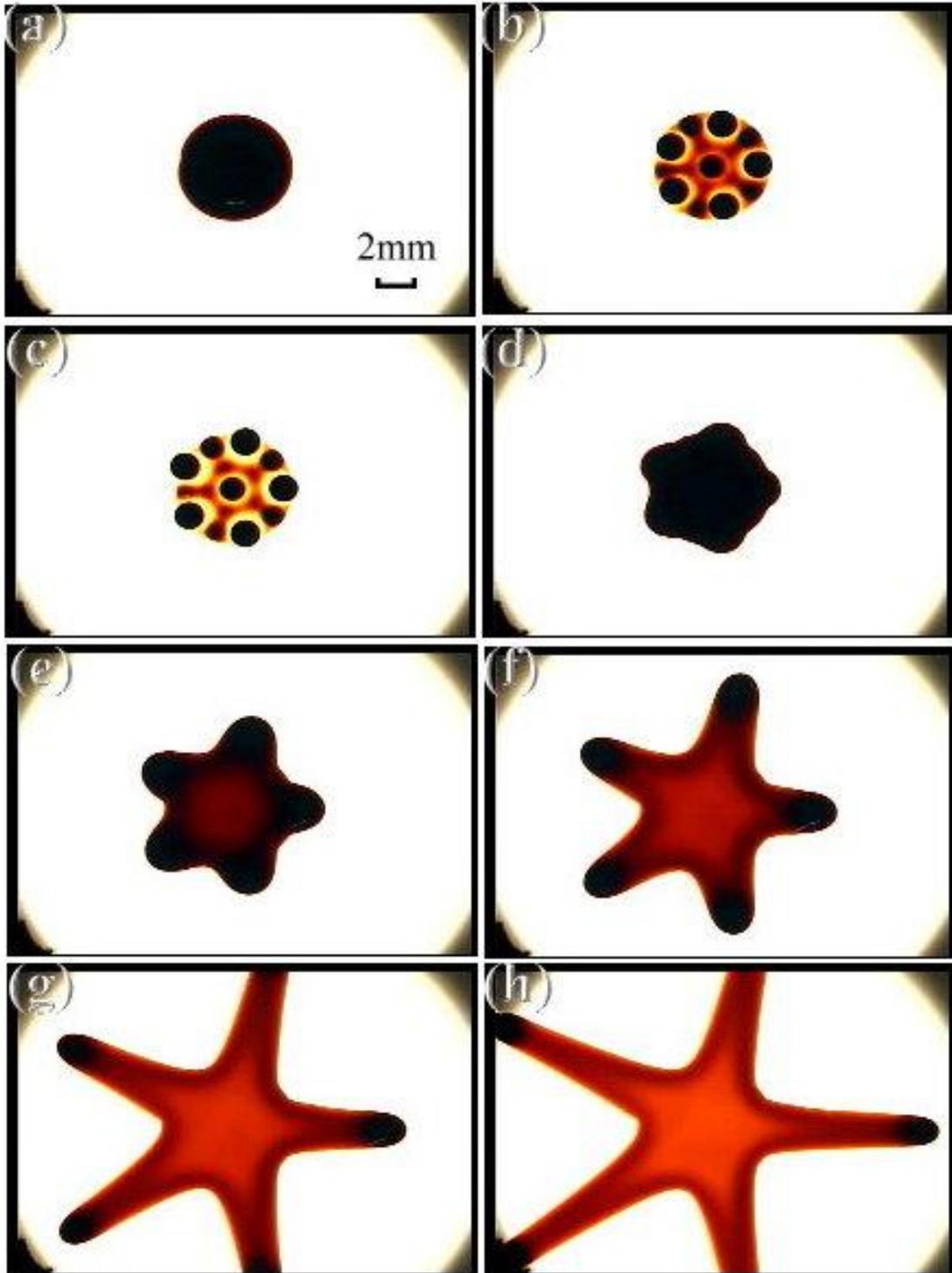


圖 3- 11 垂直與徑向磁場作用( $H_0 = 211$  Oe) ,  $d=5.39$ mm , 指狀化過程

(a) $t=0.0$ s; (b)1.4s; (c)4.2s; (d)7.0s;  
(e)9.8s; (f)12.6s; (g)15.0s, and (h)18.0s.

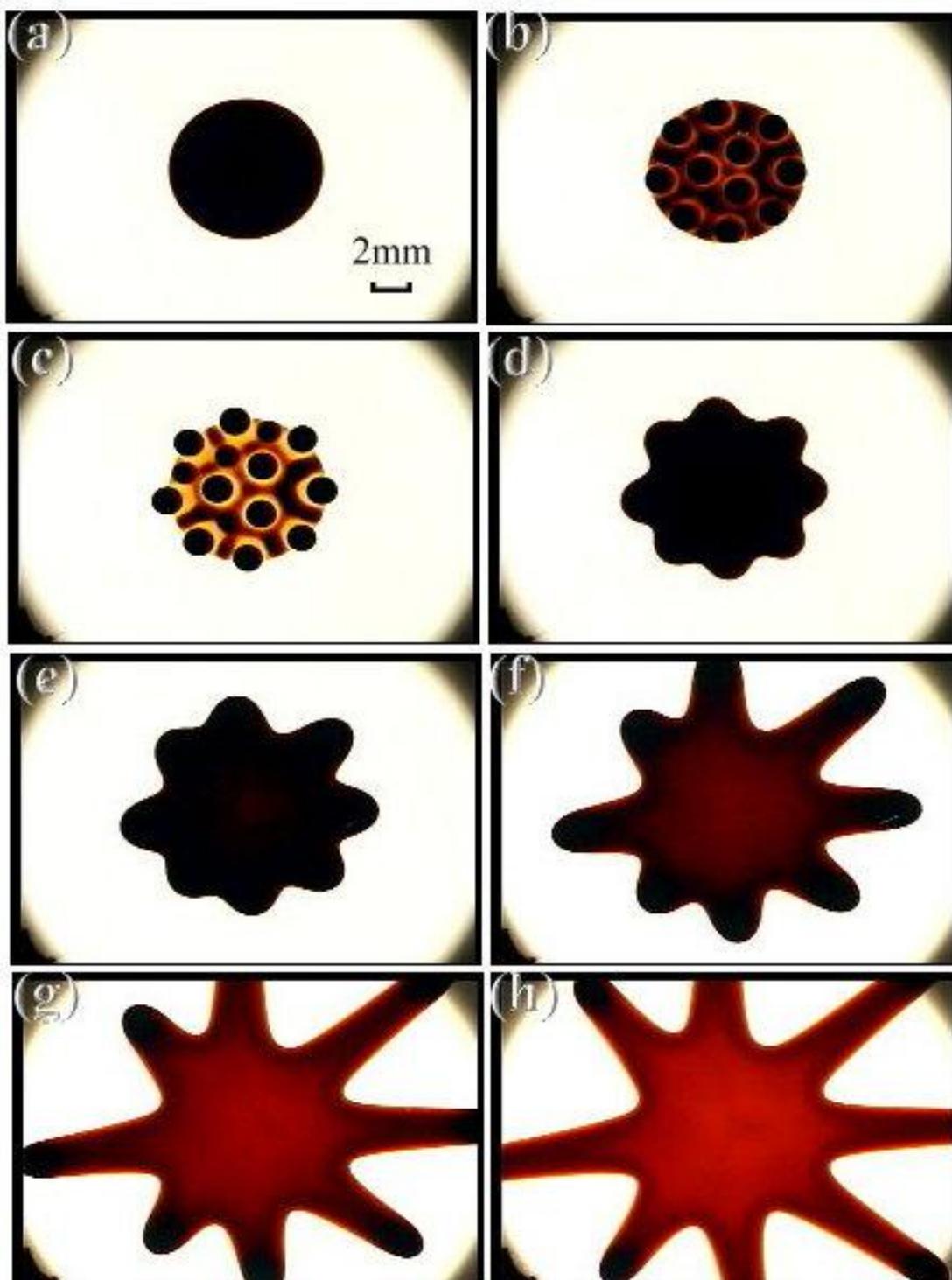


圖 3- 12 垂直與徑向磁場作用( $H_0 = 211$  Oe) ,  $d=7.16$ mm , 指狀化過程

(a) $t=0.0$ s; (b)1.8s; (c)3.6s; (d)5.4s;  
(e)7.2s; (f)9.0s; (g)10.8s, and (h)13.0s.

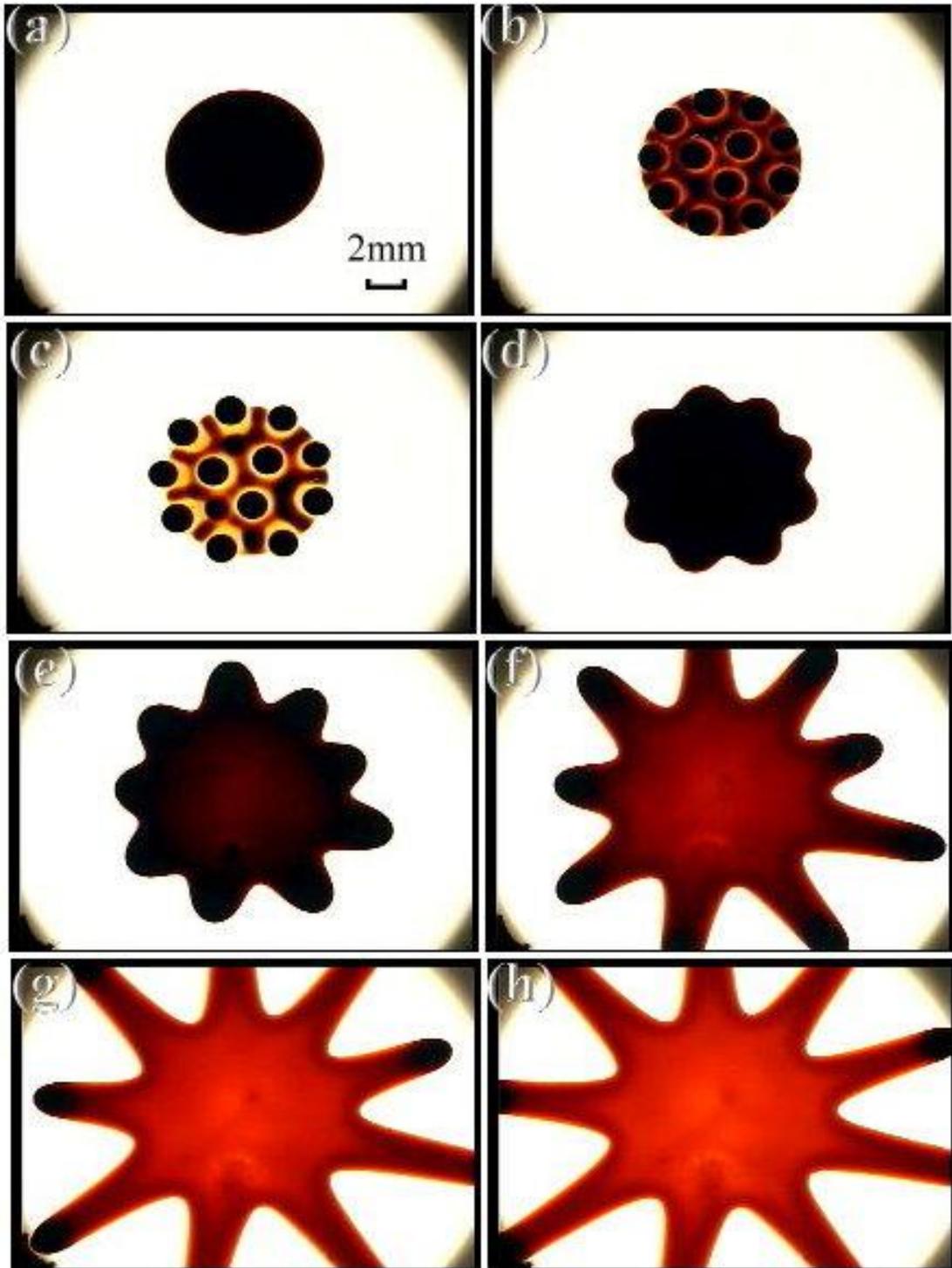


圖 3- 13 垂直與徑向磁場作用( $H_0 = 211$  Oe) ,  $d=7.37$ mm , 指狀化過程

(a) $t=0.0$ s; (b) $2.2$ s; (c) $4.4$ s; (d) $6.6$ s;  
(e) $9.2$ s; (f) $11.0$ s; (g) $13.2$ s, and (h) $15.0$ s.

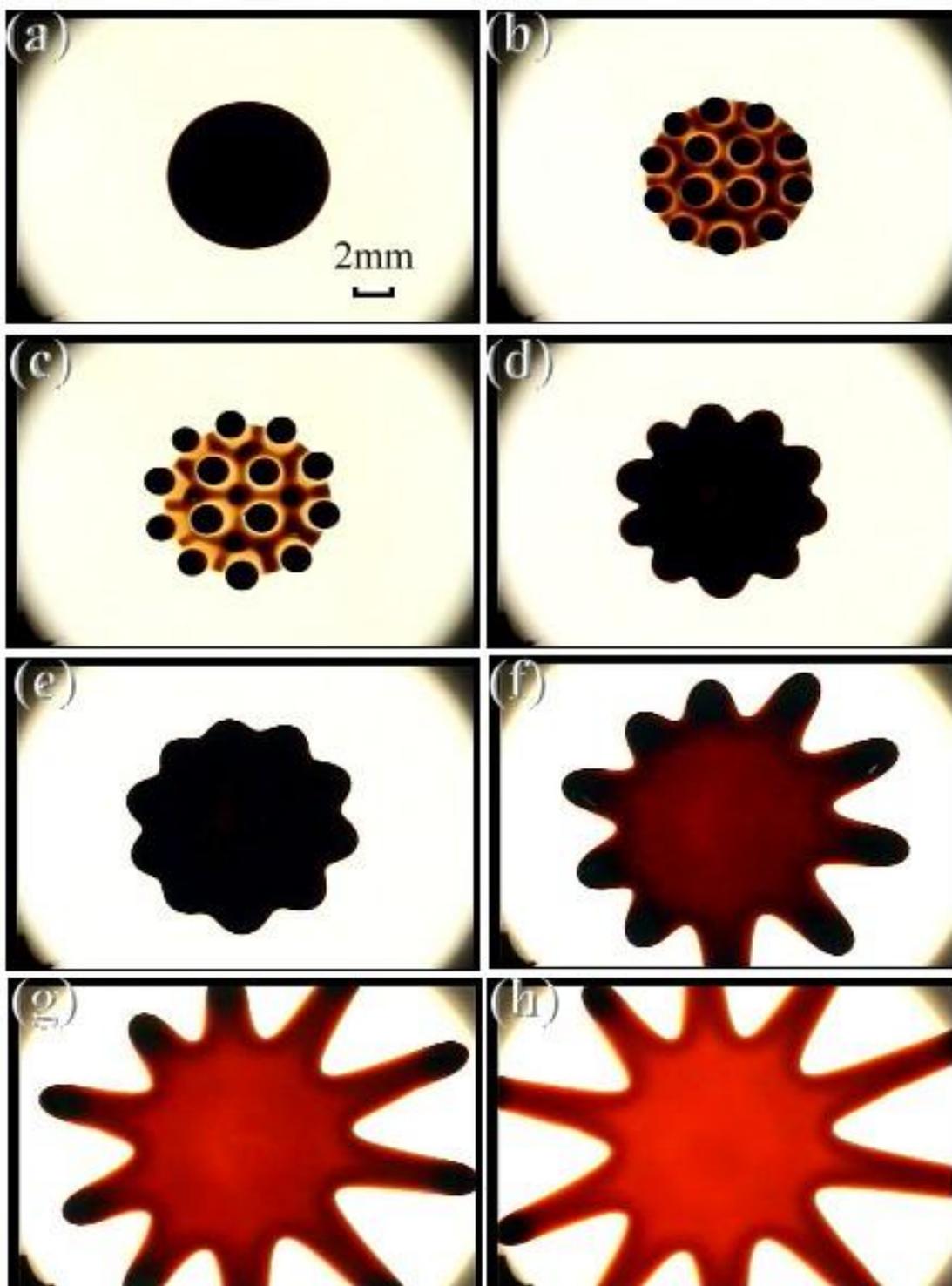


圖 3- 14 垂直與徑向磁場作用( $H_0 = 211$  Oe) ,  $d=7.50$ mm , 指狀化過程

(a) $t=0.0$ s; (b) $1.8$ s; (c) $4.6$ s; (d) $6.2$ s;  
(e) $8.2$ s; (f) $10.2$ s; (g) $11.6$ s, and (h) $13.6$ s.

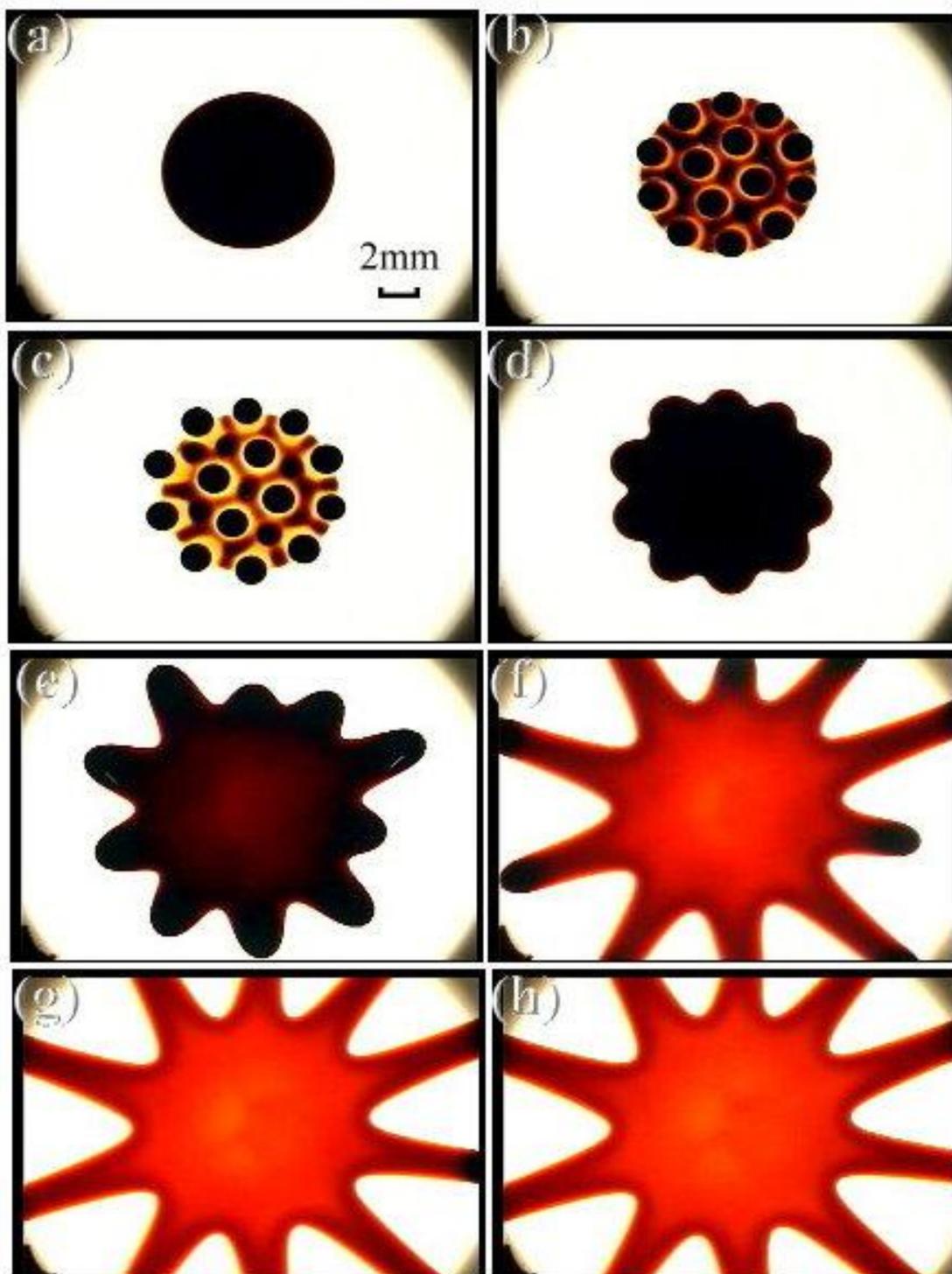


圖 3- 15 垂直與徑向磁場作用( $H_0 = 211$  Oe) ,  $d=7.95$ mm , 指狀化過程

(a) $t=0.0$ s; (b) $2.2$ s; (c) $4.4$ s; (d) $6.6$ s;  
(e) $8.8$ s; (f) $11.0$ s; (g) $13.2$ s, and (h) $15.0$ s.

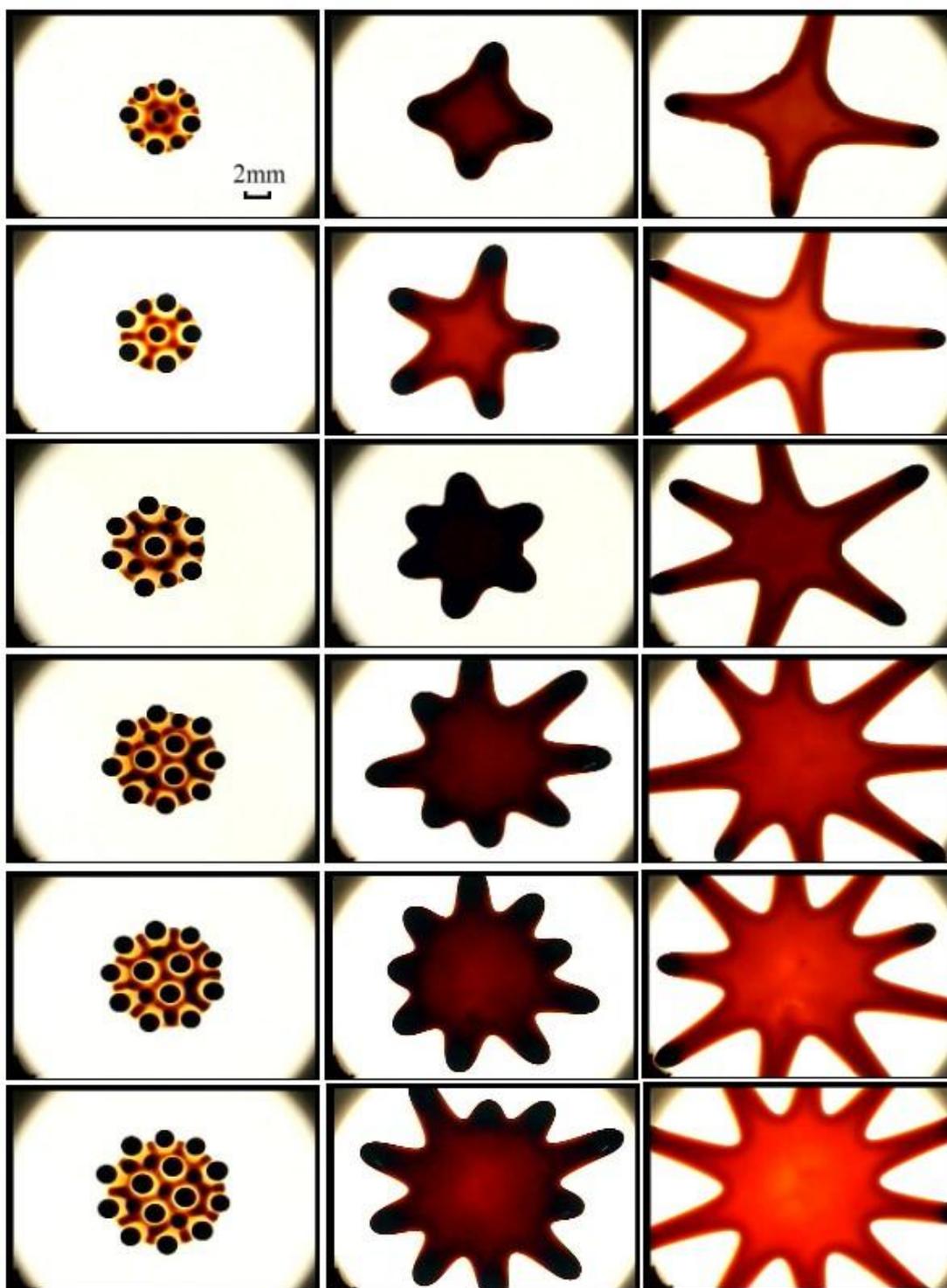


圖 3- 16 垂直與徑向磁場作用( $H_0 = 211$  Oe)，不同液滴直徑指狀化過程

第一行：不同液滴直徑大小下在外圍生成的液滴顆數( $N_p$ )，第二行：液滴沿著特定根數指狀物( $N_f$ )方向進行塗覆，第三行：最後磁性液滴的塗覆結果。

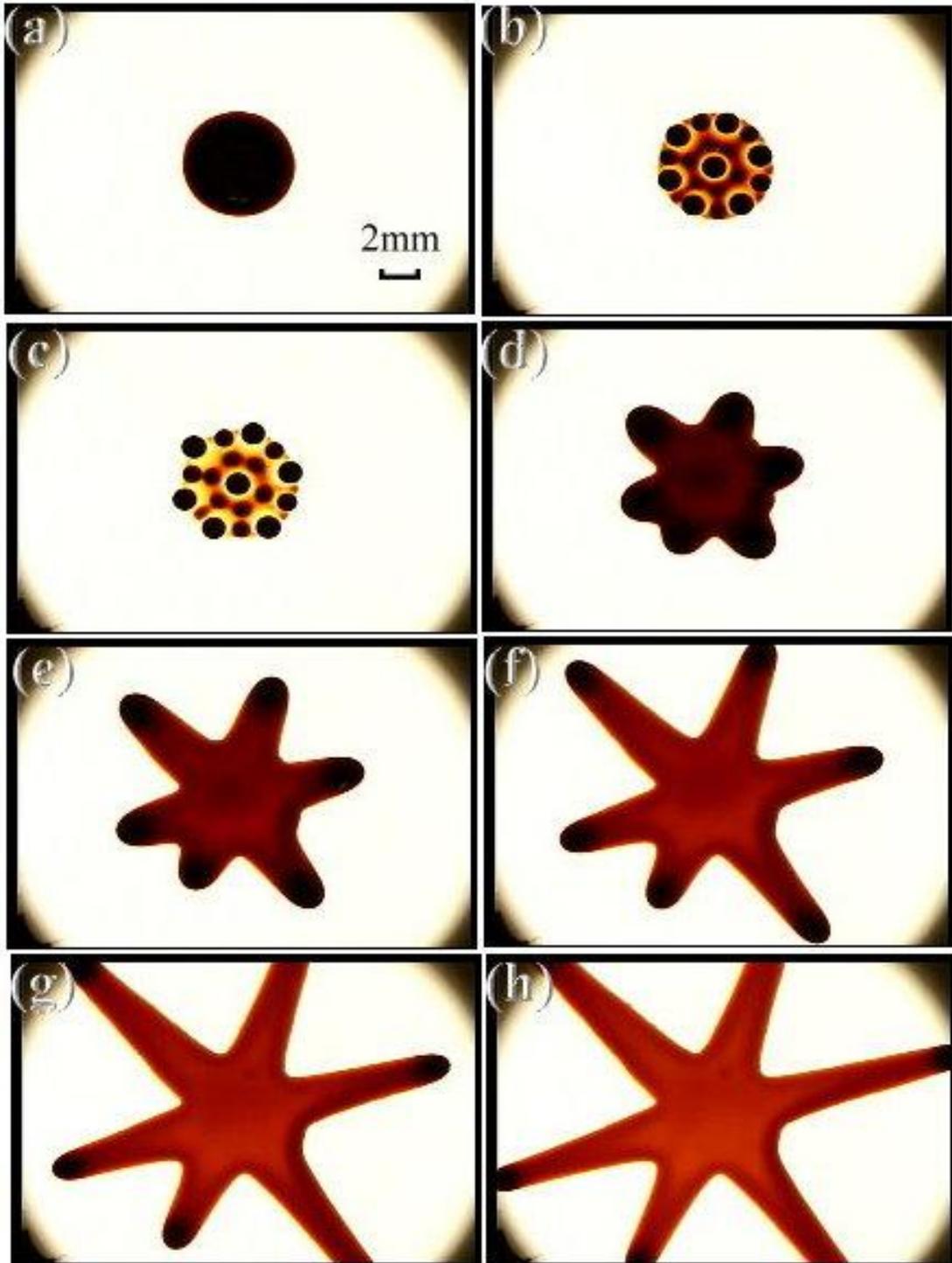


圖 3- 17 垂直與徑向磁場作用( $H_0 = 250$  Oe) ,  $d=5.31$ mm , 指狀化過程

(a) $t=0.0$ s; (b) $2.8$ s; (c) $5.6$ s; (d) $11.2$ s;  
(e) $14.0$ s; (f) $16.8$ s; (g) $19.6$ s, and (h) $23.0$ s.

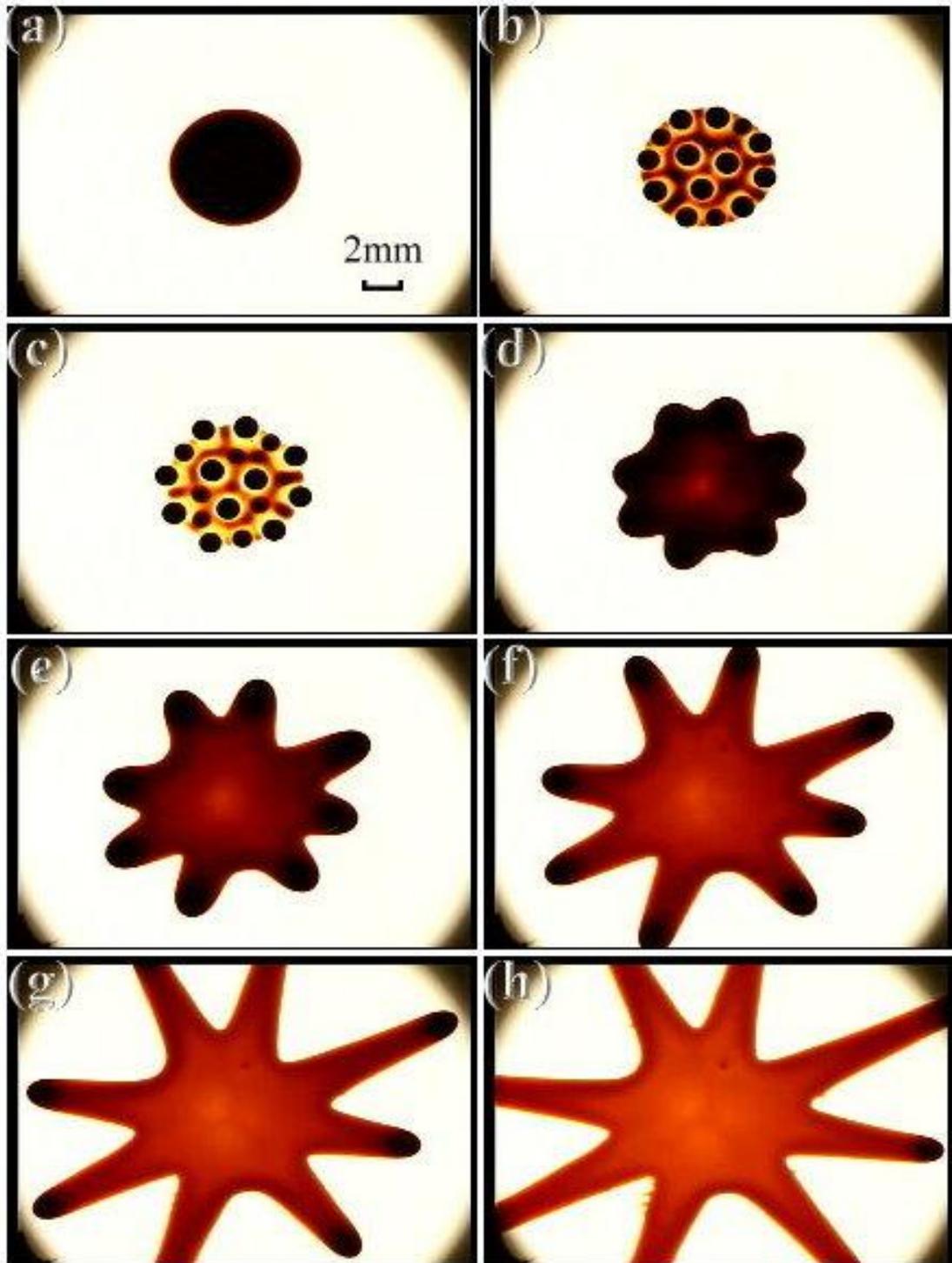


圖 3- 18 垂直與徑向磁場作用( $H_0 = 250$  Oe) ,  $d=6.03$ mm , 指狀化過程

(a) $t=0.0$ s; (b) $3.2$ s; (c) $6.0$ s; (d) $9.0$ s;  
(e) $12.0$ s; (f) $15.0$ s; (g) $18.0$ s, and (h) $23.0$ s.

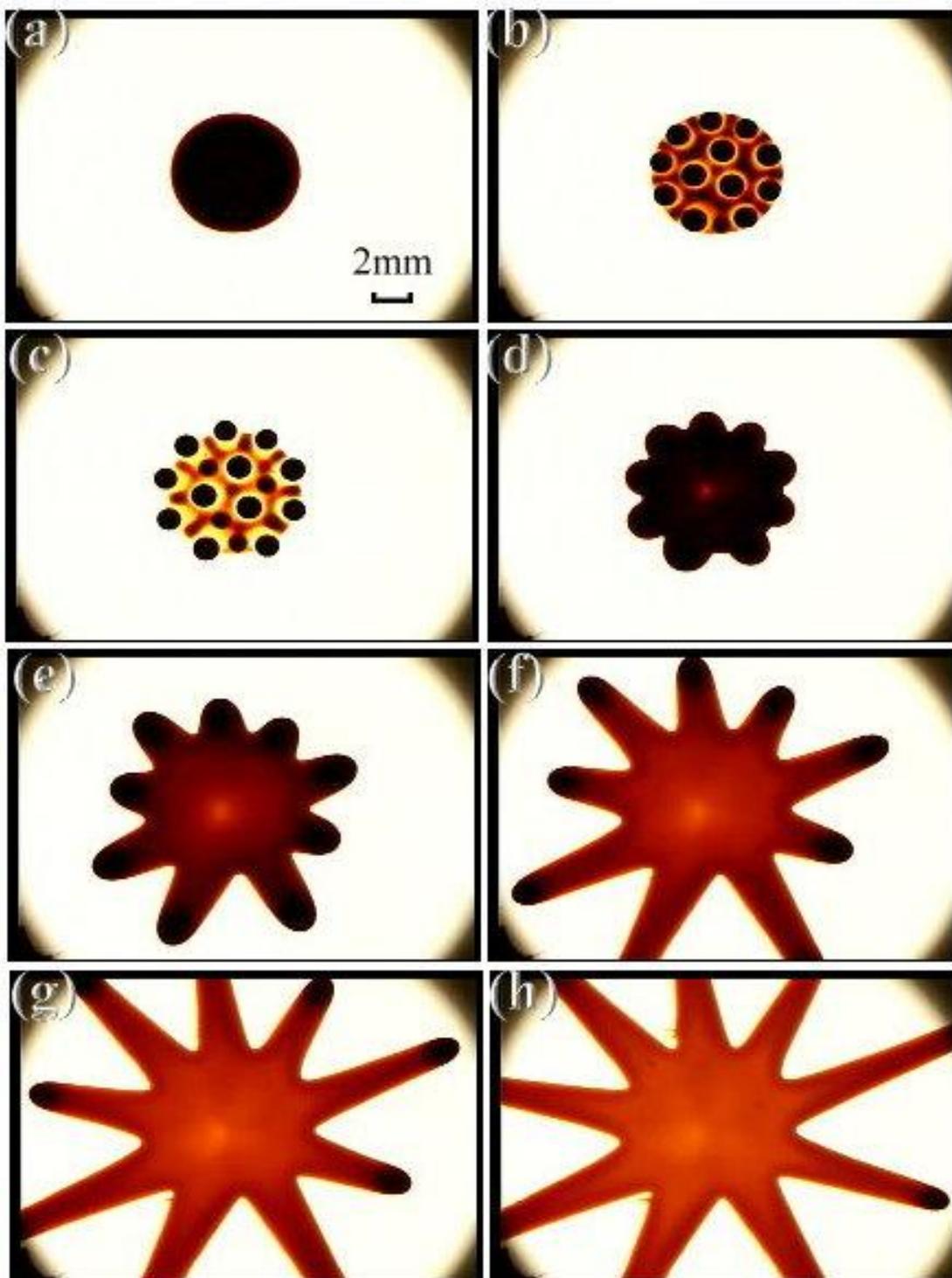


圖 3- 19 垂直與徑向磁場作用( $H_0 = 250$  Oe) ,  $d=6.04$ mm , 指狀化過程

(a) $t=0.0$ s; (b)3.2s; (c)6.4s; (d)9.6s;

(e)12.8s; (f)16.0s; (g)19.2s, and (h)25.0s.

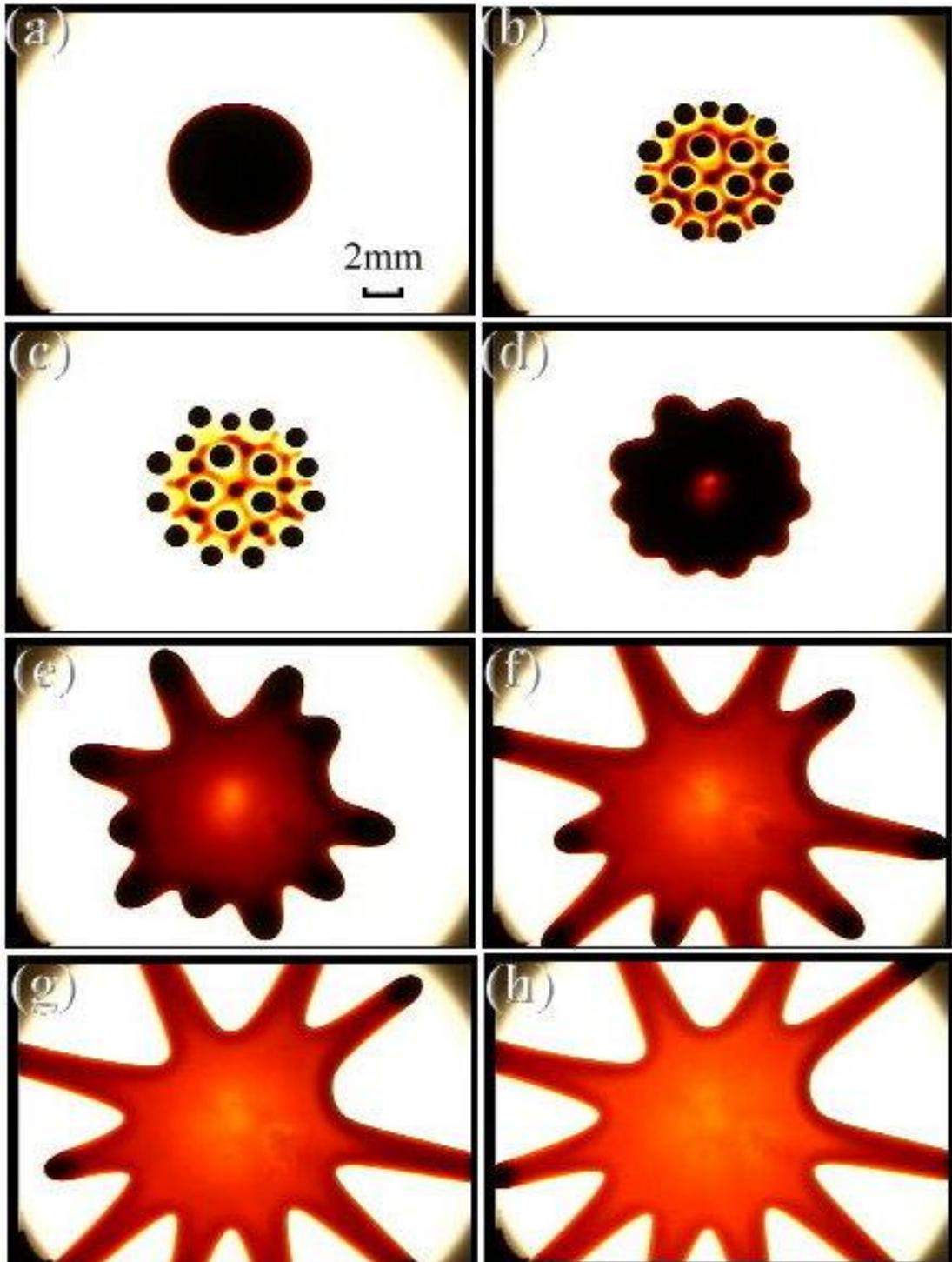


圖 3- 20 垂直與徑向磁場作用( $H_0 = 250$  Oe) ,  $d=6.75$ mm , 指狀化過程

(a) $t=0.0$ s; (b)2.8s; (c)5.6s; (d)8.4s;  
 (e)11.2s; (f)14.0s; (g)16.8s, and (h)20.0s.

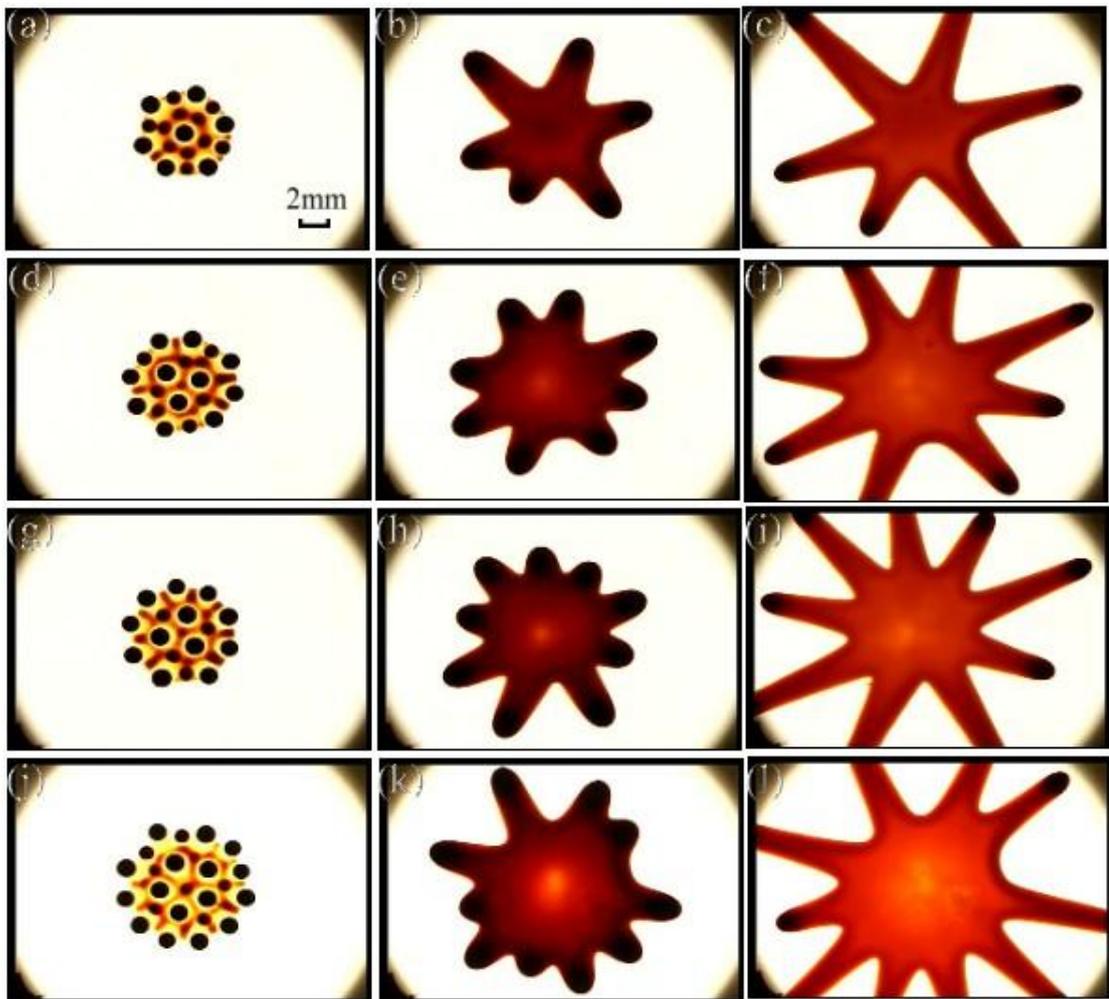


圖 3- 21 垂直與徑向磁場作用( $H_0 = 250$  Oe)，不同液滴直徑指狀化過程

第一行：不同液滴直徑大小下在外圍生成的液滴顆數( $N_p$ )，第二行：液滴沿著特定根數指狀物( $N_f$ )方向進行塗覆，第三行：最後磁性液滴的塗覆結果。

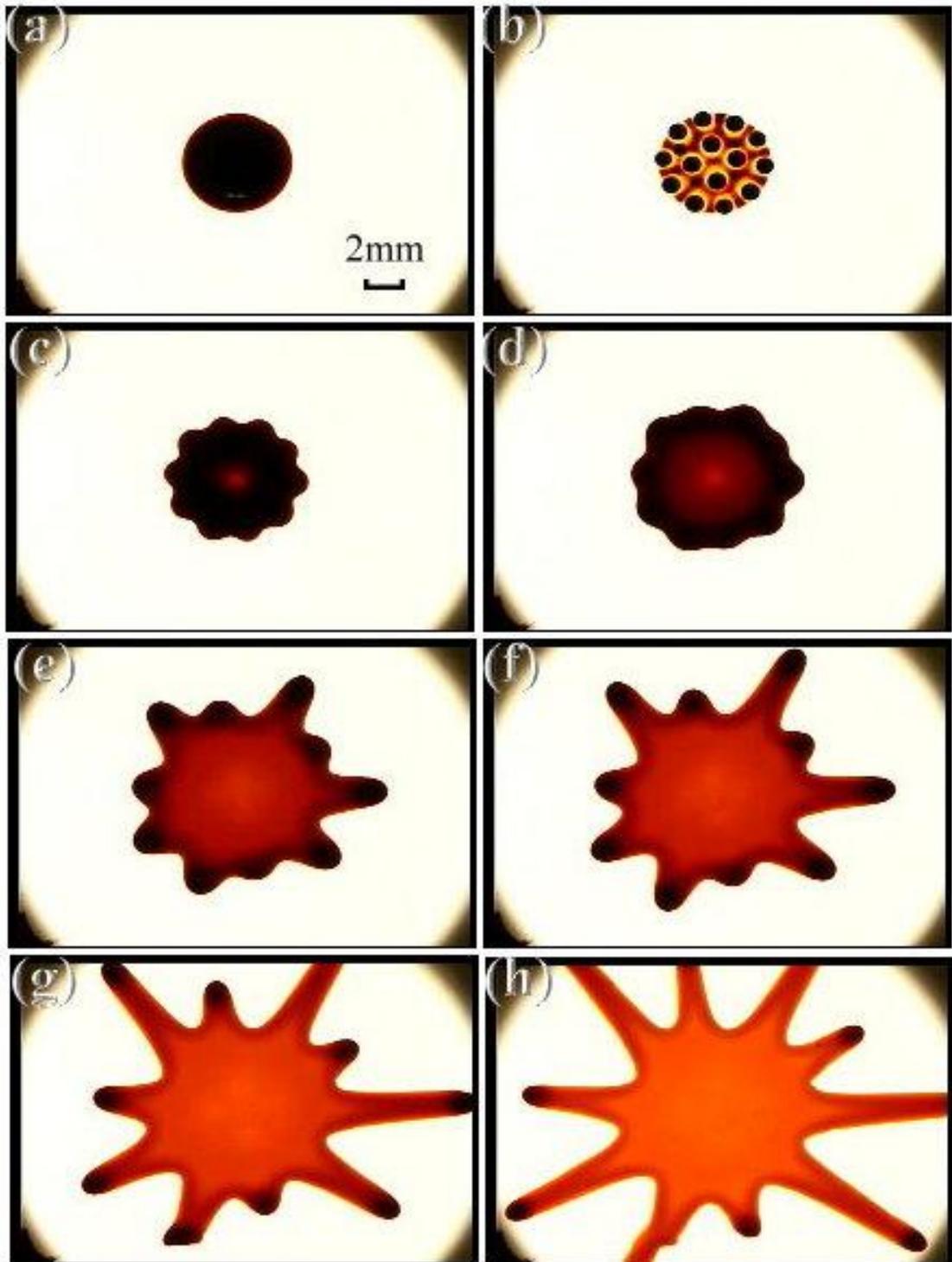


圖 3- 22 垂直與徑向磁場作用( $H_0 = 288\text{Oe}$ )， $d=5.11\text{mm}$ ，指狀化過程

(a) $t=0.0\text{s}$ ; (b) $2.6\text{s}$ ; (c) $5.2\text{s}$ ; (d) $7.8\text{s}$ ;  
(e) $13.0\text{s}$ ; (f) $15.6\text{s}$ ; (g) $22.0\text{s}$ , and (h) $30.0\text{s}$ .

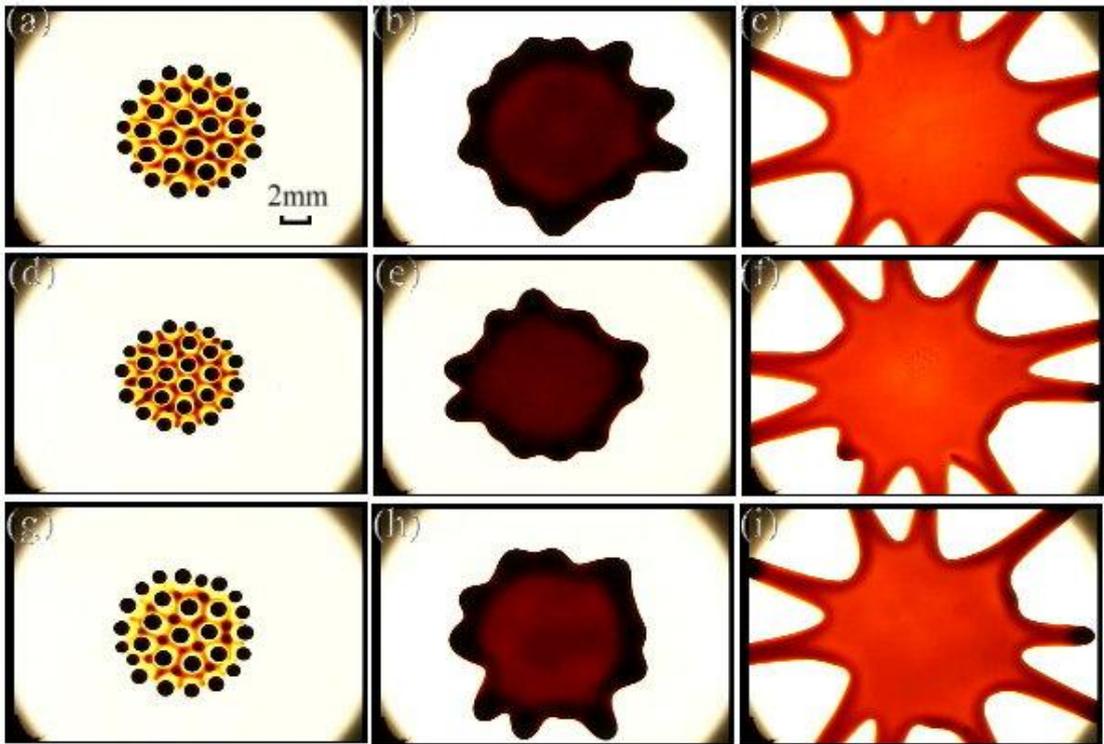


圖 3- 23 垂直與徑向磁場作用( $H_0 = 288$  Oe)，不同液滴直徑指狀化過程

第一行：不同液滴直徑大小下在外圍生成的液滴顆數( $N_p$ )，第二行：液滴沿著特定根數指狀物( $N_f$ )方向進行塗覆，第三行：最後磁性液滴的塗覆結果。

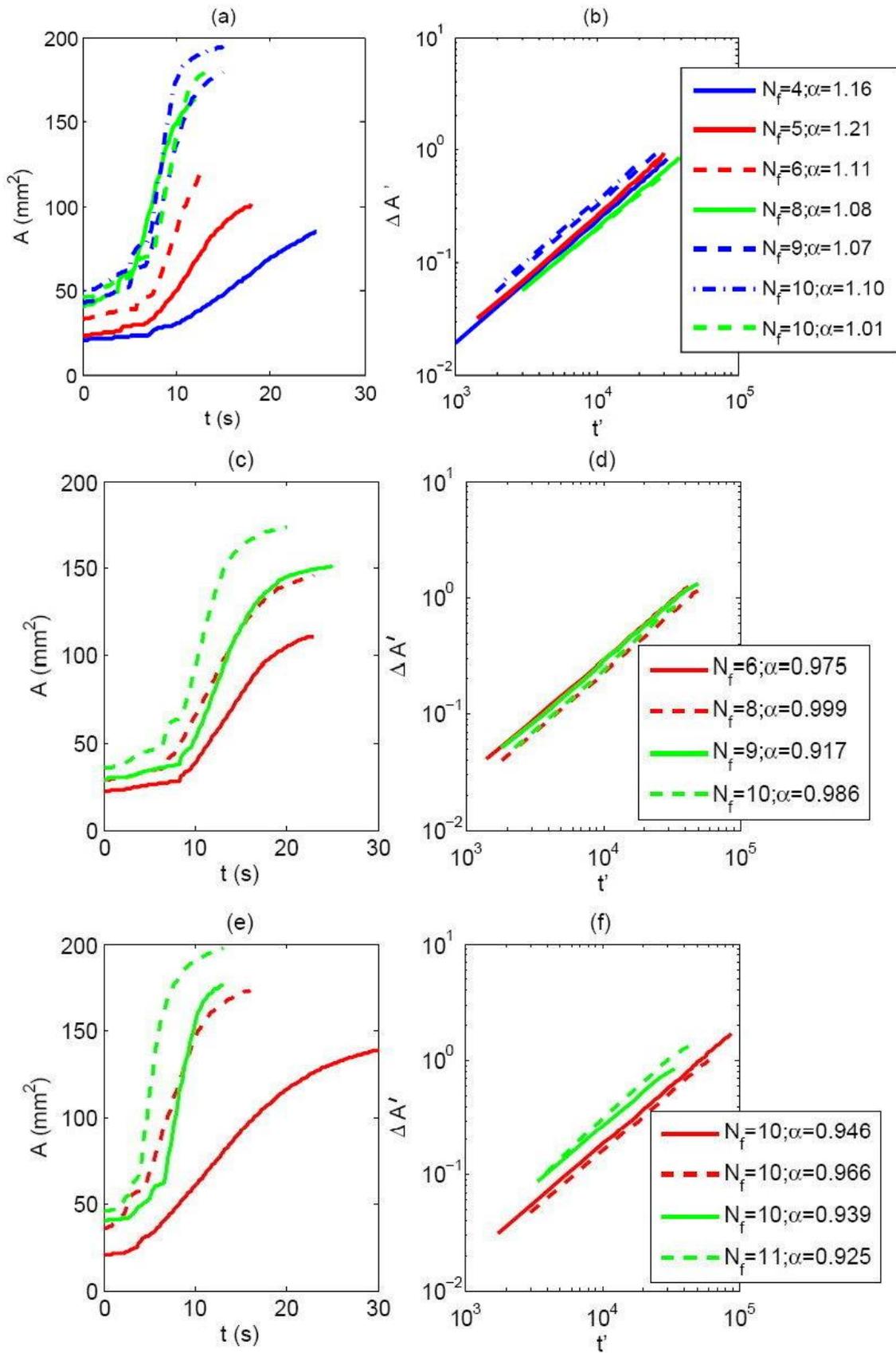


圖 3-24 垂直與徑向磁場作用，面積比較圖

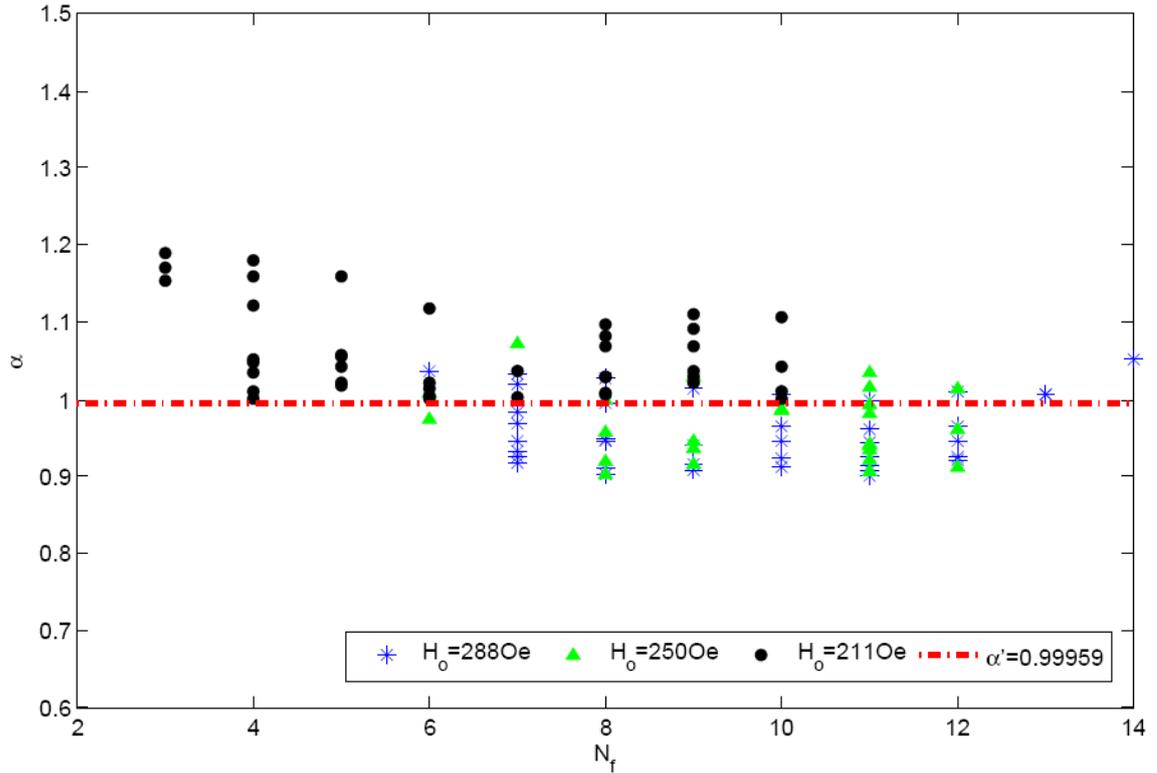


圖 3-25 所有受垂直與徑向磁場作用範例的指數分佈

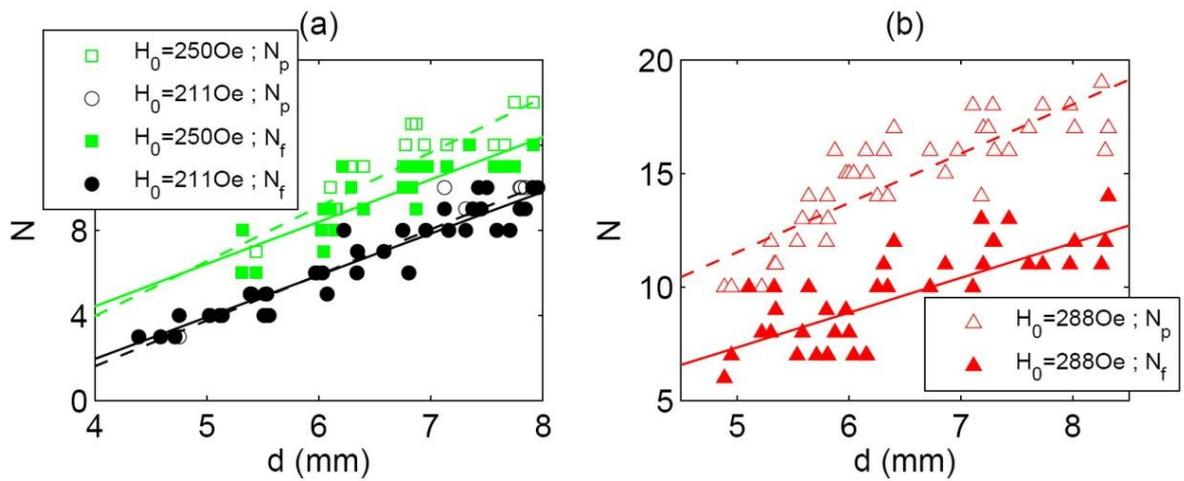


圖 3-26 不同徑向磁場大小下， $N_p$  與  $N_f$  分佈圖

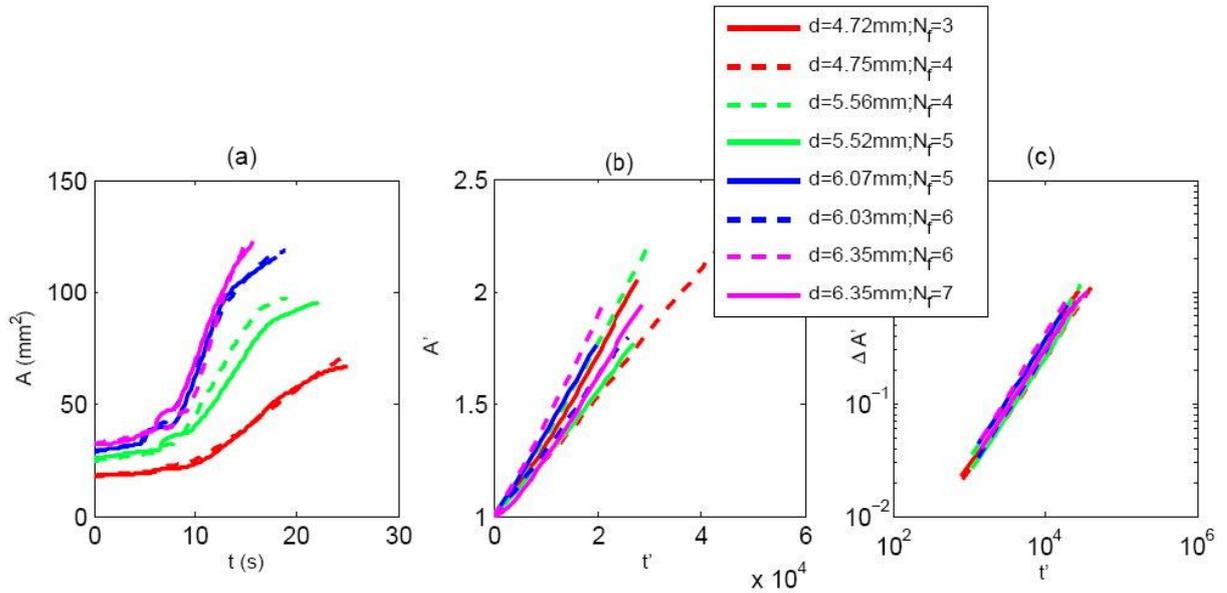


圖 3-27 受垂直與徑向磁場作用，不同直徑大小及指狀化數目的探討

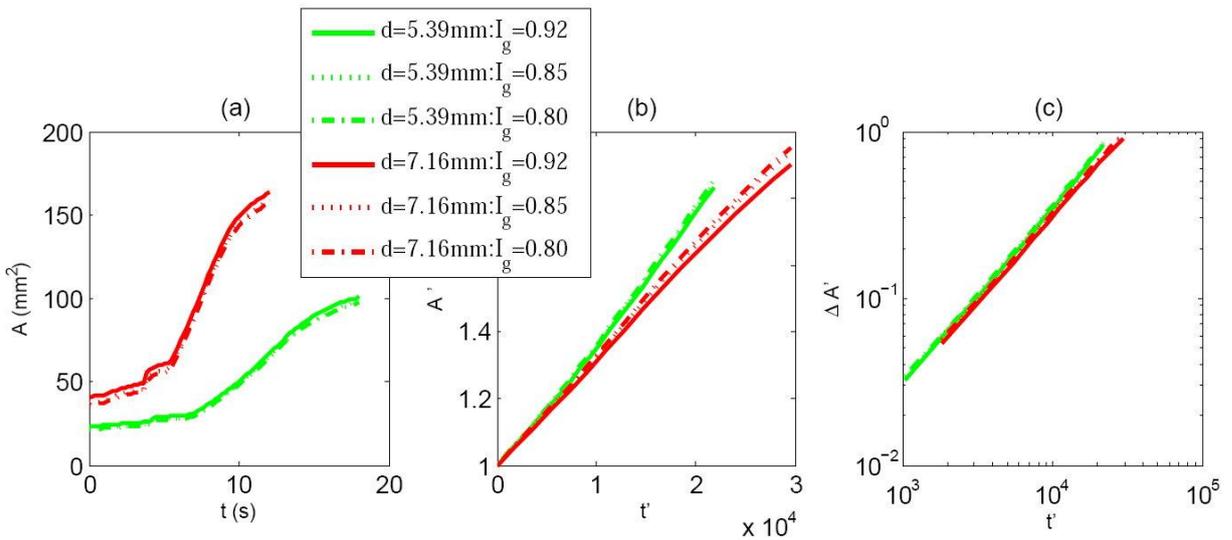


圖 3-28 不同亮度  $I_g$  值的比較分析

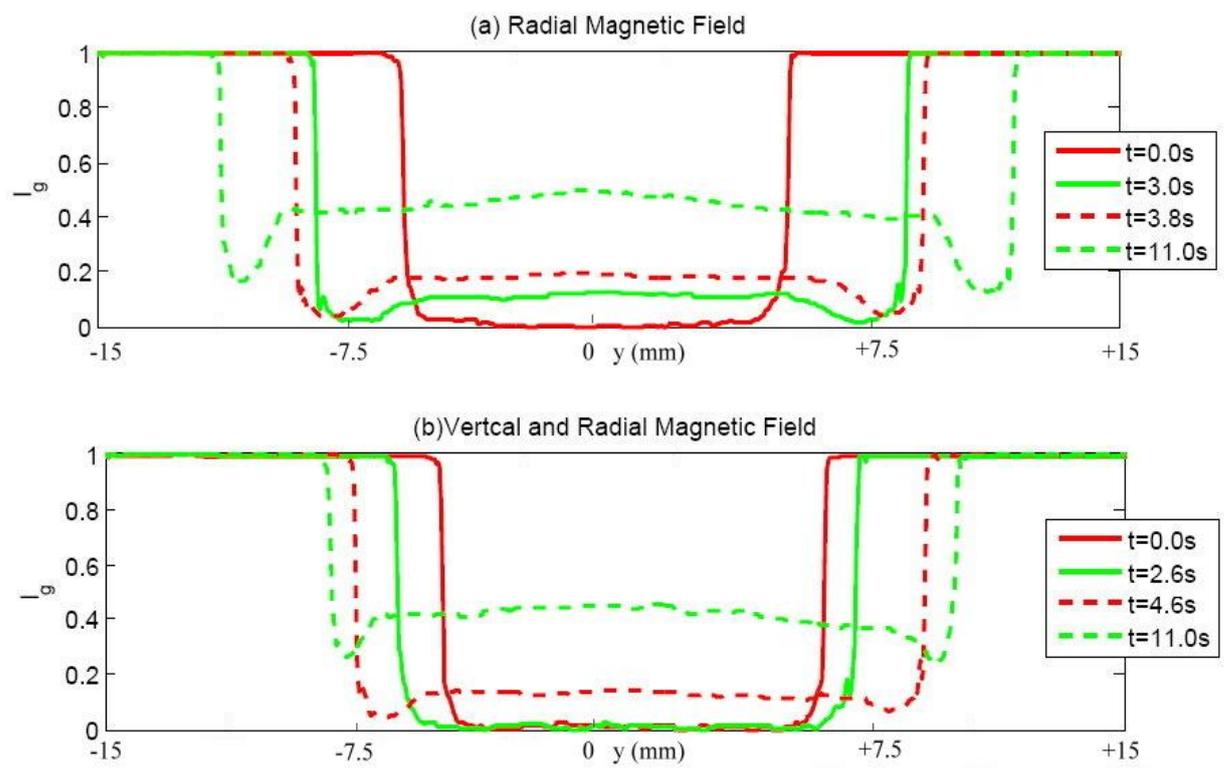


圖 3-29 不同磁場機制下其面積塗覆過程，均勻度之變化

## 第四章 結論

利用垂直磁場產生液滴界面不穩定，再利用徑向磁場向外塗覆與旋轉塗佈技術力學機制上之相似性，建構一創新之磁性液滴塗佈技術之裝置，此裝置可有效於簡易靜止之機構上。平版上具磁性液滴於空氣中，因兩者屬於不可互溶界面，受表面張力之影響，其延展界面相對較為穩定可以達到更有效之塗佈。

在傳統的旋轉塗佈技術中，是利用儀器高速旋轉使其產生與徑向距離成正比關係之離心力，進行液滴的延展，與本文中所使用的徑向磁場，其所產生向外之徑向磁力與其徑向距離也是成正比的關係，兩者是為相同之力學機制，故此徑向磁場界面不穩定與旋轉塗佈離心力產生之界面不穩定可做為類比。但實驗當中之徑向磁場裝置，則更精簡的儀器配備，並無使用複雜之高速旋轉機構。比對於旋轉塗佈的系統架構，本文磁場之系統架構較為簡單平穩，且兩者之結果相類似，因此將來也許可利用徑向磁場之系統加以改進旋轉塗佈之系統缺失，如高速旋轉所產生的不穩定、系統過熱，甚至是安全性上的問題。

在現今的科學研究中，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，打破了傳統水往低處流的觀念，所以在應用上面也有日新月異的突破，然而磁性流體受到磁場的作用下，所產生相關物理機制，也越來越被受矚目，在此研究磁性流體受到垂直及徑向磁場影響下，所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。

磁性流體是可受外在磁場控制的智慧型流體，本文利用磁性流體與不可互溶液體受垂直及徑向磁場作用所產生的界面不穩定現象，在實驗方面

有一定的困難度存在，我們分析並歸納出其面積延展關係。

研究中討論薄層磁流體液滴的面積塗覆變化，當系統置於一組線圈的中心處，液滴受到純徑向磁場的作用因此延展，相似於傳統的旋轉塗覆而產生界面不穩定的型態；若受到垂直與徑向磁場的交互作用，則先行破壞液滴界面，之後再施與徑向磁場，即可有效擴展液滴進行塗佈工作。實驗主要的目的為研究磁場強度與初始液滴大小對液滴擴張運動的影響。此種外觀之劇烈形態變化由一開始之未開啟磁場時所保持的圓形，最後轉變為磁場開啟後期之複雜的指狀化星形。

本文的實驗數據分析根據一些變因，其中包括各種不同的初始液滴直徑、產生的小液滴顆數和三種變化的磁場強度。在眾多的實驗數據分析下，磁性液滴受到徑向磁場影響最後的將會遵循一個指數關係  $A' \sim t^{0.4897}$ ；而在垂直與徑向磁場的交互作用下有  $\Delta A' \sim t^{0.99959}$  的指數關係。



## 參考文獻

- [1]M. D. Cowley and R. E. Rosensweig, “The interfacial stability of a ferromagnetic fluid,” J. Fluid Mech., 30, 671(1967).
- [2]M. Zahn, “Magnetic fluids and nanoparticle applications to nanotechnology” , Journal of Nanoparticle Research, 3, 73, (2001)
- [3]R. Richter and I. V. Barashenkov, “Two-dimensional solitons on the surface of magnetic fluids” , Phys.Rev.Lett., 94, 184503, (2005).
- [4] C. Gollwitzer, G. Matthies, R. Rither, I. Rehberg and L. Tobiska, “Surface topography of a magnetic fluid-a quantitative comparison between experiment and numerical simulation” , J.Fluid Mech,571,455-474,(2007).
- [5]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).
- [6]Ching-Yao Chen and Z.-Y. Cheng, “An experimental study on Rosensweig instability of a ferrofluid droplet” ,PHYSICS OF FLUIDS 20, 054105 (2008)
- [7]C.-Y. Chen and C.-S. Li, “Ordered microdroplet formations of thin ferrofluid layer breakups” ,Phys. Fluids 22, 014105 (2010).
- [8]劉佳芬, “磁性流體在有限厚度流體層之界面不穩定現象研究”, 國立交通大學碩士論文, (2010)
- [9]R. M. Oliveira and J. A. Miranda, “Ferrofluid patterns in a radial magnetic field: Linear stability, nonlinear dynamics, and exact solutions,” Phys. Rev. E 77, 016304(2008).
- [10]L. Romankiw, M. Slusarczyk and D. Thompson, “Liquid magnetic bubbles,” IEEE Trans. Magnetics, vol. MAG-11, pp. R25(1975).
- [11]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).
- [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 and D.-C. Kuan, “Experimental Studies of Labyrinthine Instabilities of Miscible Ferrofluids in a Hele-Shaw Cell,” Phys. Fluids , 19, 8,084101 (2007).
- [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]S. Benka, “Physics update: Peaks and labyrinths in a magnetic fluid” , Physics Today,61, 6, 20 (2008).
- [16]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).
- [17]C.-Y. Chen, S.-Y. Wu and J. Miranda, “Fingering Patterns in the Lifting Flow of a Confined Miscible Ferrofluid,” *Phys. Rev. E.*, 75, 036310 (2007).
- [18]C.-Y.Chen, Y. S. Yang and Jose Miranda, “Miscible Ferrofluid Patterns in a Radial Magnetic Field,” *Phys. Rev. E* 80, 016314(2009).
- [19]楊詒翔, ” 徑向磁場應用於塗佈技術之研究”, 國立交通大學碩士論文, (2009)
- [20] T. Podgorski, M. C. Sostarecz, S. Zorman, and A. Belmonte, “Fingering instabilities of a reactive micellar interface,” *Phys. Review E*, 76, 016202 (2007).
- [21] R. M. Oliveira and J. A. Miranda, “Ferrofluid patterns in a radial magnetic field: Linear stability, nonlinear dynamics, and exact solutions,” *Phys. Rev. E* 77, 016304(2008).
- [22]C.-H. Chen and C.-Y. Chen, “Fingering patterns on an expanding miscible drop in a rotating Hele-Shaw cell,” *Int. J. Numer. Meth. Fluids* , 54:1201,1214(2007).
- [23]C-Y Chen, C.-W. Huang, H. Gadêlha, and J. A. Miranda, “Radial viscous fingering in miscible Hele-Shaw flows: A numerical study,” *Phys. Review E*, 77,016306(2008).
- [24]J. A. Miranda and E. Alvarez-Lacalle, “Viscosity contrast effects on fingering formation in rotating Hele-Shaw flows,” *Phys. Review E*, 72, 026306 (2005).
- [25]A. V. Lebedev, A. Engel, K. I. Morozov, and H. Bauke, “Ferrofluid drops in rotating magnetic fields,” *New Journal of Physics* 5,57.1 – 57.20(2003).
- [26]C.-H. Chen and C.-Y. Chen, “Numerical simulations of interfacial instabilities on a rotating miscible droplet in a time-dependent gap Hele – Shaw cell with significant Coriolis effects,” *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, 51:881 – 895(2006).
- [27]M.-W. Wang and F.-C. Chou, “Fingering Instability and Maximum Radius at High Rotational Bond Number,” *Journal of The Electrochemical Society*, 148 (5) G283-G290(2001).
- [28]Kristi E. Holloway,Piotr Habdas,Naeim Semsarillar, Kim Burfitt,1 and John R. de Bruyn1, “Spreading and fingering in spin coating” ,*PHYSICAL REVIEW E* 75, 046308 ( 2007 )
- [29]A. Leshchiner, M. Thrasher, M. B. Mineev-Weinstein and H. L. Swinney, “Harmonic moment dynamics in Laplacian growth” ,*PHYSICAL REVIEW E* 81, 016206 ( 2010)
- [30]S. W. Li, J. S. Lowengrub, J. Fontana, and P. Palffy-Muhoray, “Control of Viscous Fingering Patterns in a Radial Hele-Shaw Cell” *Phys. Rev. Lett.* 102, 174501 (2009).
- [31]C.-Y. Chen, “Numerical simulations of fingering instabilities in miscible magnetic fluids in a Hele-Shaw cell and the effects of Korteweg stresses” *Phys. Fluids* , 15, no. 4, 1086 (2003).
- [32]A. Igonin and A. Cebers, “Labyrinthine Instability of miscible magnetic fluids,” *Phys. Fluids* , 15, 6, 1734(2003).

- [33]C.-Y. Chen and H.-J. Wu, “Numerical simulations of interfacial instabilities on a rotating miscible magnetic droplet with effects of Korteweg stresses,” *Phys. Fluids* ,17, 4, 04210 (2005).
- [34]C.-Y. Chen, S.-Y. Wu and J. Miranda, “Fingering Patterns in the Lifting Flow of a Confined Miscible Ferrofluid,” *Phys. Rev. E.*, 75, 036310 (2007).
- [35]C. J. A T. Maxworthy, “An experimental study of miscible displacement with gravity-override and viscosity-contrast in a Hele Shaw cell,” *Exp Fluids* , 44:781 – 794(2008).
- [36]S. Rhodes, X. He, S. Elborai, S.-H. Lee and M. Zahn, “Magnetic fluid behavior in uniform DC, AC, and rotating magnetic fields,” *J. Magn. Magn. Mater.*, 64, 513(2006).
- [37]Y.I. Dikansky, O. A. Nechaeva, “Electrohydrodynamical instability of microdrops shapes in a magnetic fluid,” *J. Magn. Magn. Mater.*, 289, 90(2004).
- [38]I. Drikis and A. Cebers, “Viscous fingering in magnetic fluids: numerical simulation of radial Hele-Shaw flow,” *J. Magn. Magn. Matter* , 201, 339(1999).

