

# 國立交通大學

## 機械工程學系

### 碩士論文

磁性流體在有限厚度流體層之界面不穩定現象研究

Instabilities of Ferrofluids Immersed in Fluid Layer with a  
Finite Thickness

研究生：劉佳芬

指導教授：陳慶耀 博士

中華民國九十九年七月一日

**磁性流體在有限厚度流體層之界面不穩定現象研究**

**Instabilities of Ferrofluids Immersed in Fluid Layer with a Finite  
Thickness**

研究生：劉佳芬

Student : Jia-Fen Liu

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 2010**

**Hsinchu, Taiwan, Republic of China**

中華民國九十九年七月一日

# 磁性流體在有限厚度流體層之界面不穩定現象研究

學生:劉佳芬

指導教授:陳慶耀

國立交通大學機械工程學系碩士班

## 摘要

本文以實驗方法有系統地研究磁性流體沉浸於薄層的非磁性流體中受均勻垂直磁場所產生的羅森史維格不穩定現象發展情形。對於不同初始直徑和不同磁場強度的可互溶液滴而言，我們論證了其所產生的混合型不穩定現象(同時產生突出峰和迷宮化現象)，並且彼此間力學的發展互相耦合。對於初始直徑較小的液滴而言，因受限於流體層內而形成受到迷宮化不穩定現象主宰的情形。當磁性流體的體積足夠時，三維的突出峰將突破流體層表面，此時則主要受到羅森史維格不穩定現象主導。另一方面，在目前的實驗當中，不可互溶液滴則受到表面張力的限制而無迷宮化現象的產生。在本文中不可互溶液滴形成的羅森史維格不穩定現象，我們觀察到其有明顯的不同階段產生。在磁場關閉後再開啟時可觀察到有趣的羅森史維格不穩定現象。

關鍵字：磁性流體，垂直磁場，羅森史維格不穩定現象，迷宮化現象，混合型不穩定現象。

## 誌 謝

在兩年的碩士求學生涯中，首先要感謝老師陳慶耀教授在論文研究過程中所給予的指導與鼓勵，並感謝老師在實驗過程中遇到瓶頸時，適時地給予改善的方法和意見，讓學生在求學期間能夠順利地完成學業以及將論文完整地呈現。此外，也相當感激老師在為人處事方面的教導和在生活上的關心與照顧，讓學生在研究所期間學習到許多處理和解決問題的能力與方法。

同時也必須感謝詒翔、奇軒學長在架設實驗設備和操作實驗儀器所給予的教導與宏元學長在分析處理方面的幫助，以及同窗好友柏瑋、啟鳴、裕盛在撰寫論文過程中所給予的支持與鼓勵，還有立杰學長、琦雯學姐以及文良、杰民、世聰、國安等諸位學弟的幫忙與協助，才能使我的實驗結果完整呈現。

最後，要感謝的是家人對於我的養育之恩和栽培，在求學生涯過程中所給予我的關心和支持。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
圖目錄	V
表目錄	X
符號說明	XI
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、設備及方法	21
2-1 實驗儀器及說明	21
2-2 實驗步驟	22
2-3 理論背景	23
第三章 結果與討論	31
3-1 磁性流體與不可互溶液體於垂直磁場為 350 Oe 之情況	31
3-2 磁性流體與不可互溶液體於垂直磁場為 440 Oe 之情況	33
3-3 磁性流體與不可互溶液體於垂直磁場為 510 Oe 之情況	35

3-4 磁性流體與可互溶液體受垂直磁場所產生之情形 .....	37
3-5 磁性流體與可互溶液體於垂直磁場為 350 Oe 之情況 .....	37
3-6 磁性流體與可互溶液體於垂直磁場為 440 Oe 之情況 .....	39
3-7 磁性流體與可互溶液體於垂直磁場為 510 Oe 之情況 .....	41
3-8 分析與比較 .....	43
第四章 結論 .....	69
參考文獻 .....	71



## 圖目錄

圖 1-1 磁性流體包括奈米級鐵磁性膠粒子(氧化鐵粒子)、表面活性劑 (surfactant)與載基流體(base fluid) .....	10
圖 1-2 羅森史維格結構物 .....	11
圖 1-3 磁性液滴在垂直磁場下產生中心突峰狀結構物及外圍環型次液滴[2] .....	11
圖 1-4 利用 X 射線技術觀測磁性流體表面產生之羅森史維格不穩定現象[3] .....	12
圖 1-5 大型容器內可以明顯地發現一些不穩定的單獨波存在[4].....	12
圖 1-6 磁性流體與不可互溶液體在垂直磁場下產生的複雜迷宮化現象[5]	13
圖 1-7 Hele-Shaw 示意圖[11].....	13
圖 1-8 磁性液體與低黏滯度柴油所產生之迷宮型不穩定現象[6].....	14
圖 1-9 突出峰(上列)與迷宮型不穩定現象(下列)同時存在的現象[8].....	14
圖 1-10 磁性流體與可互溶液體在徑向磁場下產生的指狀化現象[9].....	15
圖 1-11 模擬不可互溶界面下，液體的黏度會影響指狀化現象的形狀以及其 長度分佈[10].....	16
圖 1-12 不同磁化率之磁性液滴受旋轉磁場所產生的指狀化現象[11].....	16
圖 1-13 以數值模擬在旋轉的機制下，可互溶液體中離心力與科氏力對型態 與變化產生重大影響[12].....	17
圖 1-14 磁性液滴滴入相同密度之非磁性液體中，施以不同大小之旋轉磁場	

時，對於旋轉運動中之液滴會有重大的影響[13].....	17
圖 1-15 高速旋轉可互溶液滴在 Hele-Shaw Cell 中受離心力與科氏力之影響，而呈現出具傾斜角之指狀化不穩定現象[14].....	18
圖 1-16 旋轉磁場及垂直磁場下所產生之界面演變[15].....	18
圖 1-17 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[16]	19
圖 1-18 磁性液滴薄層在預濕情況下受垂直磁場所產生之分裂情形[17] ...	19
圖 2-1 實驗架構圖.....	26
圖 2-2 實驗示意圖.....	26
圖 2-3 磁性流體(EMG 901).....	27
圖 2-4 磁性流體(EMG 901)之磁化率曲線圖.....	27
圖 2-5 可程式化電源供應器.....	28
圖 2-6 線圈通過電流產生向上的磁場.....	28
圖 2-7 高斯計及碳棒.....	29
圖 2-8 X—Y—Z 平面磁場分佈.....	29
圖 2-9 光學顯微鏡平台及 CCD 攝影機.....	30
圖 3-1 磁性液滴( $D=750\ \mu\text{m}$ )受到垂直磁場( $H=350\ \text{Oe}$ )所產生之羅森史維格不穩定現象。.....	45
圖 3-2 磁性液滴( $D=844\ \mu\text{m}$ )受到垂直磁場( $H=350\ \text{Oe}$ )所產生之羅森史維格不穩定現象。.....	46



圖 3-3 磁性液滴( $D=939 \mu\text{m}$ )受到垂直磁場( $H=350 \text{ Oe}$ )所產生之羅森史維格不穩定現象。 .....	47
圖 3-4 磁性液滴( $D=1060 \mu\text{m}$ )受到垂直磁場( $H=350 \text{ Oe}$ )所產生之羅森史維格不穩定現象。 .....	48
圖 3-5 磁性液滴( $D=786 \mu\text{m}$ )受到垂直磁場( $H=440 \text{ Oe}$ )所產生之羅森史維格不穩定現象。 .....	49
圖 3-6 磁性液滴( $D=794 \mu\text{m}$ )受到垂直磁場( $H=440 \text{ Oe}$ )所產生之羅森史維格不穩定現象。 .....	50
圖 3-7 磁性液滴( $D=896 \mu\text{m}$ )受到垂直磁場( $H=440 \text{ Oe}$ )所產生之羅森史維格不穩定現象。 .....	51
圖 3-8 磁性液滴( $D=1051 \mu\text{m}$ )受到垂直磁場( $H=440 \text{ Oe}$ )所產生之羅森史維格不穩定現象。 .....	52
圖 3-9 磁性液滴( $D=930 \mu\text{m}$ )加入不可互溶液體受到垂直磁場( $H=510 \text{ Oe}$ )所產生之羅森史維格不穩定現象。 .....	53
圖 3-10 磁性液滴( $D=1120 \mu\text{m}$ )加入不可互溶液體受到垂直磁場( $H=510 \text{ Oe}$ )所產生之羅森史維格不穩定現象。 .....	54
圖 3-11 磁性液滴( $D=1140 \mu\text{m}$ )加入不可互溶液體受到垂直磁場( $H=510 \text{ Oe}$ )所產生之羅森史維格不穩定現象。 .....	55
圖 3-12 磁性液滴( $D=1190 \mu\text{m}$ )加入不可互溶液體受到垂直磁場( $H=510 \text{ Oe}$ )	

所產生之羅森史維格不穩定現象。.....	56
圖 3-13 磁性液滴( $D=1080\ \mu\text{m}$ )加入不可互溶液體受到垂直磁場( $H=350\ \text{Oe}$ )	
所產生之第一類羅森史維格不穩定現象。.....	57
圖 3-14 磁性液滴( $D=2560\ \mu\text{m}$ )加入不可互溶液體受到垂直磁場( $H=350\ \text{Oe}$ )	
所產生之第二類羅森史維格不穩定現象。.....	58
圖 3-15 磁性液滴( $D=3410\ \mu\text{m}$ )加入不可互溶液體受到垂直磁場( $H=350\ \text{Oe}$ )	
所產生之第三類羅森史維格不穩定現象。.....	59
圖 3-16 磁性液滴( $D=3980\ \mu\text{m}$ )加入不可互溶液體受到垂直磁場( $H=350\ \text{Oe}$ )	
所產生之第四類羅森史維格不穩定現象。.....	60
圖 3-17 磁性液滴( $D=1000\ \mu\text{m}$ )加入不可互溶液體受到垂直磁場( $H=440\ \text{Oe}$ )	
所產生之第一類羅森史維格不穩定現象。.....	61
圖 3-18 磁性液滴( $D=2240\ \mu\text{m}$ )加入不可互溶液體受到垂直磁場( $H=440\ \text{Oe}$ )	
所產生之第二類羅森史維格不穩定現象。.....	62
圖 3-19 磁性液滴( $D=3460\ \mu\text{m}$ )加入不可互溶液體受到垂直磁場( $H=440\ \text{Oe}$ )	
所產生之第三類羅森史維格不穩定現象。.....	63
圖 3-20 磁性液滴( $D=4070\ \mu\text{m}$ )加入不可互溶液體受到垂直磁場( $H=440\ \text{Oe}$ )	
所產生之第四類羅森史維格不穩定現象。.....	64
圖 3-21 磁性液滴( $D=1100\ \mu\text{m}$ )加入不可互溶液體受到垂直磁場( $H=510\ \text{Oe}$ )	
所產生之第一類羅森史維格不穩定現象。.....	65

圖 3-22 磁性液滴( $D=2250\ \mu\text{m}$ )加入不可互溶液體受到垂直磁場( $H=510\ \text{Oe}$ )  
所產生之第二類羅森史維格不穩定現象。 ..... 66

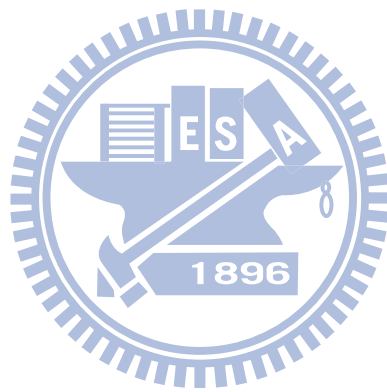
圖 3-23 磁性液滴( $D=3610\ \mu\text{m}$ )加入不可互溶液體受到垂直磁場( $H=510\ \text{Oe}$ )  
所產生之第二類羅森史維格不穩定現象。 ..... 67

圖 3-24 磁性液滴( $D=3830\ \mu\text{m}$ )加入不可互溶液體受到垂直磁場( $H=510\ \text{Oe}$ )  
所產生之第四類羅森史維格不穩定現象。 ..... 68



# 表目錄

表 1-1 磁性流體的製造方法..... 20



## 符號說明

$\lambda$	特徵長度
$h$	液滴缺口寬度
$\mu$	流體黏滯度
$\rho$	流體密度
$M_s$	磁性流體飽和磁化率
$H$	磁場強度
$B$	磁通量密度
$M$	磁化強度
$\chi_0$	初始磁化率
$u$	流體速度
$\tau$	應力張量
$\mu_0$	真空磁導率
$p$	總壓力
$p_{hyd}$	流體靜壓力
$p_m$	磁性流體壓力
$\sigma$	表面張力係數
$\kappa$	曲率總合
$D$	磁性液滴直徑



# 第一章 緒論

## 1-1 前言

磁性流體目前在生醫工程方面佔有重要的地位，過去使用一般傳統藥物治療，對於殺死有害細胞有一定療效，但間接也可能導致健康細胞之受損。而利用磁性奈米粒子與藥物放在一起，藉由磁場的產生使藥物能正確抵達人體所需治療處，並可減少藥劑用量以降低使用藥物對人體所帶來之副作用。因此透過標靶治療能有效增進治療疾病之效率且能降低有用細胞受到藥物所產生之危害。

本文主要藉由磁性液體與不可互溶液體(即甘油)和可互溶液體(即溶媒)在磁場作用下分別突破甘油和溶媒液面之研究來對界面不穩定現象做初步研究，透過磁性流體與不可互溶液體和可互溶液體達到充份混合，更進一步希望能將磁性液體應用於更廣泛的層面。

磁性流體為平均粒徑約為 10 奈米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。

磁流體的組成如圖 1-1 所示，包括奈米級鐵磁性膠粒子(氧化鐵粒子)、表面活性劑(surfactant)與載基流體(base fluid)。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，藉由外加磁場來控制磁性流體的運動方式，而磁性流體又稱為智慧型流體或功能型流體。

而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，以界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，還有共沉法、火花侵蝕法、熱分解法、紫外線分解法、真空蒸發法及電著法，如表 1-1 所示。

1930 年代 Elmore 採用化學沈澱法製成了世界上最早的水基四氧化三鐵磁流體，由於當時分佈於膠體溶液內的磁性微粒子含量甚少，仍不能被磁鐵所吸附。1969 年由美國航空太空總署科學家 Papell 將鐵磁礦與表面活性劑結合，經由長時間的研磨形成超微顆粒，並使表面活性劑披覆於顆粒表面，使磁性顆粒安定分散於溶媒中，形成磁性流體。

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。

磁性流體為一廣受工業及生醫工程所重視的材料。磁性流體的首次應用是 NASA 利用磁性流體所具有的磁性與流體之雙重特性，作為活動部位之真空封阻材料，並將其應用於太空船和太空衣上。

磁性液體在不同磁場強度作用之下，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，如高速分子渦輪幫浦、高速渦輪引擎、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、磁性記憶體等。在交通方面，磁性粒子也能應用在超高速、無噪音、無磨擦(不接觸鐵軌)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，故研究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，可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。

現階段成熟之磁流體一般應用主要在於三大部份：(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無法有效應用，因此可使用磁性流體替代，並以外加磁場替代重力場產生對流效應。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，來增加變黏性效應，因而被廣泛應用於阻尼機制。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，無需如一般流體需要容器支撐，即可有效分離軸封。

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。

## 1-2 文獻回顧

磁性流體在磁場作用下可產生突峰狀之結構物，或是隨著磁場作形變、移動、旋轉等不同運動方式。磁性流體在垂直磁場以及徑向磁場作用下，產生之界面不穩定現象可分為四大類型：(a)突峰型，即羅森史維格不穩定現象；(b)迷宮型(Labyrinthine)不穩定現象；(c)前述兩項所產生之混合型(Hybrid)不穩定現象；(d)複雜指狀化現象。

一般而言，可磁化與非磁性液體之界面在磁場作用下會有不穩定現象產生，而藉著表面張力及重力可使磁性液體達到平衡穩定之狀態。在磁場作用之下，磁性液體開始產生不穩定現象，磁性液體的臨界磁化程度與磁化強度及感磁強度呈非線性關係。Rosensweig等學者在實驗中利用包含可磁化之強磁性粒子的膠體溶液(即磁性液體)，利用空氣和水造成密度的差異，藉由量測結果證實臨界磁化率的預測。當磁場開啟時，磁性液體與空氣之界面產生新型態的結構物(如圖1-2所示)，此結構物即為羅森史維格不穩定現象[1]，突出液面的磁性流體呈現規則的六角型態，此結構物有著高度穩定性，且突出峰頂點的間距可從不穩定平坦界面之臨界波數合理推得。

微米級磁性液滴在均勻垂直磁場下所產生的不穩定分裂已由實驗觀察所得[2](如圖1-3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。磁性液滴的尺寸分布範圍在400至1400  $\mu\text{m}$ ，依據原始液滴大小的

不同，可將磁性液滴的分裂模式分為下列四大類型：(a)液滴直徑小於400  $\mu\text{m}$ ，此型態之液滴中心逐漸發展成穩定之突峰狀結構物，而液滴邊緣則均勻形成數個尚未為完全發展之環型次液滴；(b)液滴直徑介於500至1000  $\mu\text{m}$ ，仍然有中心突峰狀結構物及外圍環型次液滴的產生，在此類型之下有更多次液滴的產生，而離中心越遠的次液滴越不穩定；(c)液滴直徑介於1100至1400  $\mu\text{m}$ ，有更多的次液滴分裂產生，每顆次液滴之體積比起液滴原始尺寸較小時所產生的次液滴要來得小，而次液滴的大小也從中心往邊緣逐漸變小；(d)液滴直徑大於1500  $\mu\text{m}$ ，比起尺寸較小的液滴有更不穩定的現象，而次液滴之分裂也較為紊亂、不規則。

在2007年，Gollwitzer *et al.*[3]利用X射線技術觀測磁性流體表面產生之羅森史維格不穩定現象，並透過有限元素法模擬出磁性流體表面趨勢，在圖1-4中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。

而另一個代表性研究是Rither[4]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1-5)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。

研究磁性流體所產生之迷宮型不穩定現象在1975年已有了開端，Romankiw *et al.*[5]模擬50至1000  $\mu\text{m}$ 大小的磁性流體與不可互溶液體所形成之液滴在垂直磁場的作用下產生的複雜迷宮化現象(如圖1-6所示)。前述迷宮化現象之產生是由於將磁性流體置於有凹槽之平板中，利用凹槽上方加蓋一平板使得磁性流體受限於兩平板間(即Hele-Shaw Cell，如圖1-7)，施予垂直磁場後，原先往上發展之磁性流體因受到凹槽上方之平板阻擋無法繼續向上，轉而往徑向方向發展，成為複雜迷宮化現象。

近年來研究迷宮型不穩定現象以期推導出此現象之特徵與關係式。Wen *et al.* 利用磁性液體與低黏滯度柴油放置於Hele-Shaw Cell中[6]，開啟磁場後產生迷宮型不穩定現象(如圖1-8所示)，並形成數個大波指狀化不穩定界面，藉此探討第三維效應的影響。迷宮型不穩定現象有兩個明顯特徵：(a)可互溶之迷宮型指狀化現象是由磁場產生之磁極所形成；(b)第二次分裂之迷宮化現象是因原本向上發展的磁性液體受到平板阻擋，進而往徑向方向發展。迷宮型指狀化現象的產生主要是受磁場強度和磁性液滴缺口寬度所影響。其中，第二次分裂的迷宮化現象和液滴缺口寬度有相當程度的關聯，特徵長度 $\lambda$ 為缺口寬度 $h$ 呈線性關係，可寫成 $\lambda \approx (7 \pm 1)h$ 的關係式。

除前段所述之外，磁性流體以近似二維的結構在磁場下產生迷宮化現象是包括中極兩性的單層膜、磁液滴薄層等許多系統形成錯綜複雜的模式之一。Dickstein *et al.* [7]指出迷宮化現象對於初始條件相當敏感，這也顯示了空間中有絕大部份的地方能源極小，某部份迷宮化現象的幾何特徵表明許多極小能量幾乎擁有同等之能量。

若將迷宮型不穩定現象所利用之Hele-Shaw Cell上平板移除，使磁性流體完全浸於可互溶液體中，再施予一均勻垂直磁場，一開始液滴仍呈現羅森史維格之突出峰，然而隨著時間的增加，此突出峰基部逐漸與可互溶液體擴散影響，致使磁力減弱無法平衡重力與表面張力，因而突出峰高度隨時間遞減直到完全沒入可互溶液體層。

而上述磁性流體所產生的另一種界面不穩定現象，也有一些相關研究。Chen *et al.* [8]在磁性流體與可互溶液體的實驗中發現突出峰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，最終又再度浸入周圍之可互溶液體(如圖1-9)。羅森史維格突出峰的上升與降落意味著同時出現迷宮型不穩定現象的特殊結構，而此現象是由於可互溶液體層外部之徑向流動所引起。

磁性流體除了受到垂直磁場的作用之外，受到徑向磁場則會產生指狀化現象，而此現象可應用於旋轉塗佈技術。此種型態之不穩定現象，也有不少相關文獻。Chen *et al.*[9]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(如圖1-10所示)。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，進而發展出無因次化面積增長率是時間的三分之四次方。另外一篇文獻則探討了磁性流體與不可互溶液體在徑向磁場下所產生的指狀化現象(圖1-11)，Miranda[10]利用數值方法模擬在不同液體的黏度之下，指狀化現象的形狀以及其長度分部皆會受其影響。當在徑向磁場下，界面的穩定性及指狀化現象的增長反應(圖1-12)在最近有相關之文獻討論，由Oliveira[11]等學者研究出當磁場強度增加時，指狀化的結構會變得更加細長，而模擬出的指狀化現象呈現多邊形之情況。

除了前述提到的磁流體不穩定現象外，也有許多關於塗佈技術及其他學術的相關文獻。Chen *et al.*[12]以數值模擬在旋轉的機制下，可互溶液體中離心力與科氏力對型態與變化產生重大影響(如圖1-13)。Lebedev *et al.*[13]將磁性液滴滴入相同密度之非磁性液體中，並施以旋轉磁場之後發現，當旋轉磁場有微小的偏差時，對於旋轉運動中之液滴會有重大的影響(如圖1-14)。Chen *et al.*[14]數值模擬出高速旋轉可互溶液滴在Hele-Shaw Cell中受離心力與科氏力之影響，而呈現出具傾斜角之指狀化不穩定現象，其結果如圖1-15。以上為指狀化不穩定於旋轉界面的相關研究。

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[15]。Rhodes *et al.*將磁性流體置於Hele-Shaw Cell中，同時施予垂直磁場及順時針之旋轉磁場，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(如圖1-16)。此外，其

他學者利用數值模擬的方式，研究磁性流體在不同Korteweg應力下，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[16](如圖1-17)。

藉由磁性流體在磁場下所產生的液滴分裂情形，可利用此方式來進行液滴分隔及收集[17](圖1-18)。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等。

另一方面，磁性流體在受磁場作用之下會產生近似於偶極流體之現象。Langer等學者藉由二維偶極能量方程式做為液滴邊界形狀，而所產生的指狀現象與熱力變化有極大的關聯[17]。在偶極流體與周圍環境之邊界壓力是取決於表面張力及載有電流的導線所產生之磁場兩者競爭之結果，而在此分析方面可能與超導體有所關聯[18]。

藉由不同密度的磁性流體反應也可觀察到產生類似於指狀化之不穩定現象。Pacitto等學者將密度較大的磁性流體與密度較小的不可互溶流體混合，在開啟磁場後發現隨著磁場的增加，波長跟著遞減；而界面指狀化現象在前期是呈指數增加[19]。

### 1-3 研究動機及目的

磁性流體具有液體的可流動性，又可受外加磁場來控制其運動模式，因此被稱做智慧型流體。除此之外磁性流體的比重、表面張力、黏滯性及光學分異性等皆會因外加磁場的改變而有所不同，因此應用範圍可說相當廣泛，欲充分進行上述磁性流體之應用，必需仰賴對磁性流體操控性之充分了解。而目前許多關於磁性流體之研究，大部分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一些相關研究。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，本文中利用微米級之磁

液滴，以期藉由磁性液滴與不可互溶液體以及可互溶液體間之作用，來進一步更加了解磁性流體在不可互溶液體和可互溶液體中之運動情形，使磁性流體的應用能更廣泛更成熟。

而在未來應用上，如果能穩定控制磁性流體的運動方式，則可利用磁性流體表面附著官能基，來進行檢體的分離及檢測；或甚至是在進行藥物治療時，利用磁場將液滴分裂為更小之次液滴以進入微血管進行治療；也可將藥物與磁性流體做結合，經由磁場作用到達受傷部位，使得藥物做更精確之標靶治療，以降低對非受損部位的副作用；而在微機電領域則可設計非機械式控制閥等相關應用。若能將磁性流體更加微小化以及更加充分了解磁性流體在磁場作用下之物理現象，則其可應用之範圍便可擴大延伸。



## Technology Overview

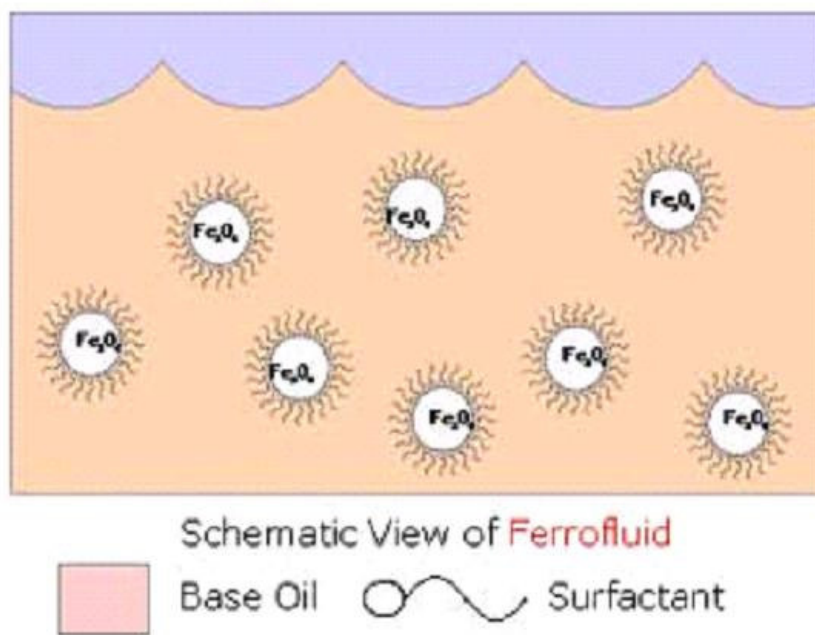


圖1-1 磁性流體包括奈米級鐵磁性膠粒子(氧化鐵粒子)、表面活性劑 (surfactant)與載基流體(base fluid)

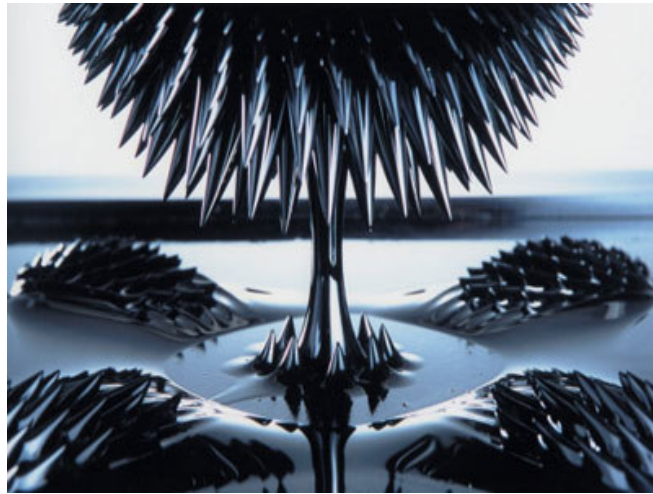


圖1-2 羅森史維格結構物

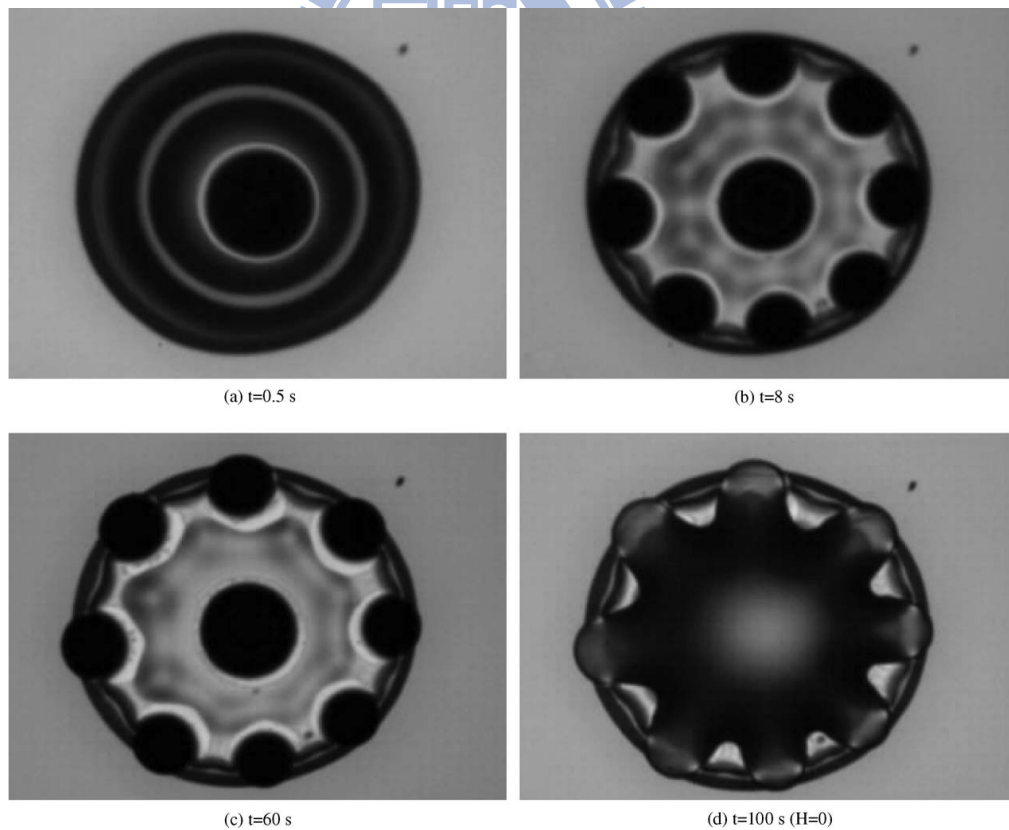


圖1-3 磁性液滴在垂直磁場下產生中心突峰狀結構物及外圍環型次液滴[2]



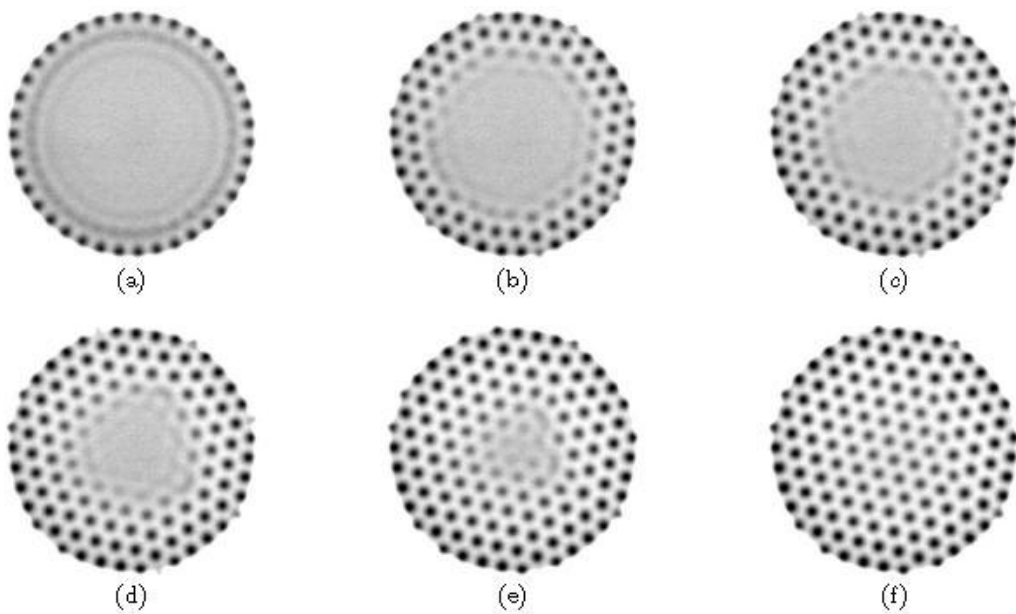


圖1-4 利用X射線技術觀測磁性流體表面產生之羅森史維格不穩定現象[3]



圖1-5 大型容器內可以明顯地發現一些不穩定的單獨波存在[4]

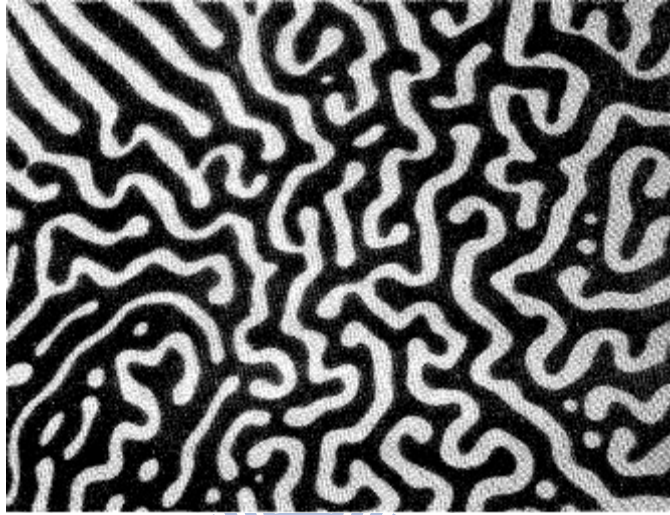


圖1-6 磁性流體與不可互溶液體在垂直磁場下產生的複雜迷宮化現象[5]

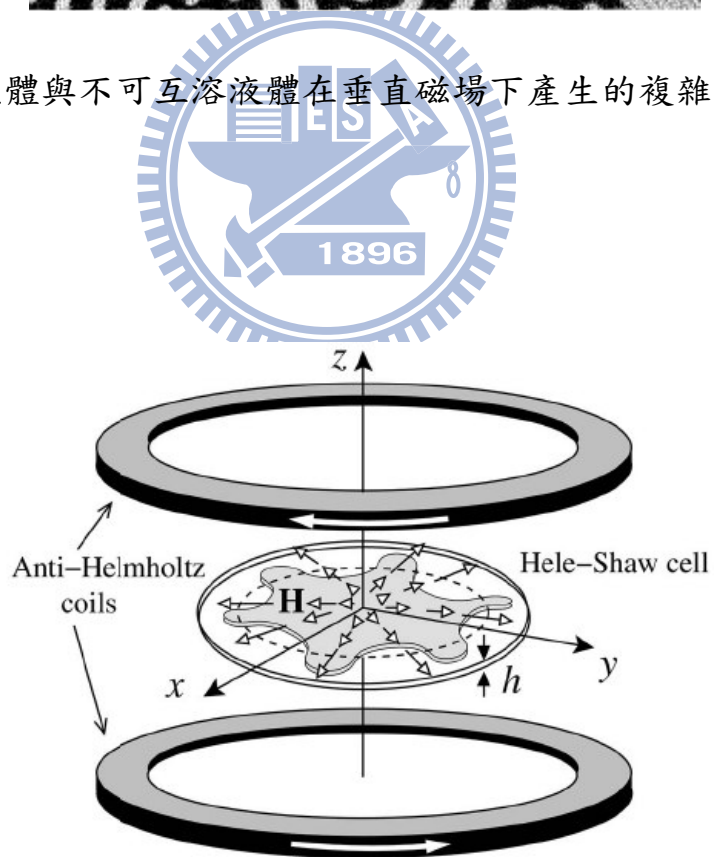


圖1-7 Hele-Shaw示意圖[11]

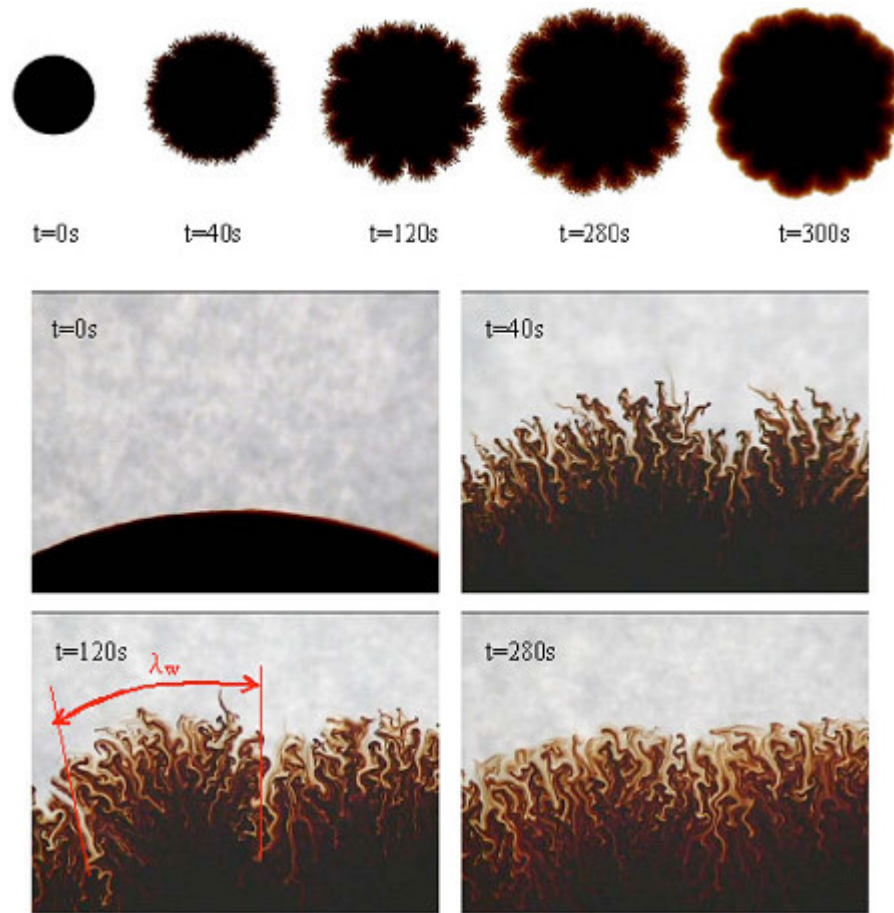


圖1-8 磁性液體與低黏滯度柴油所產生之迷宮型不穩定現象[6]

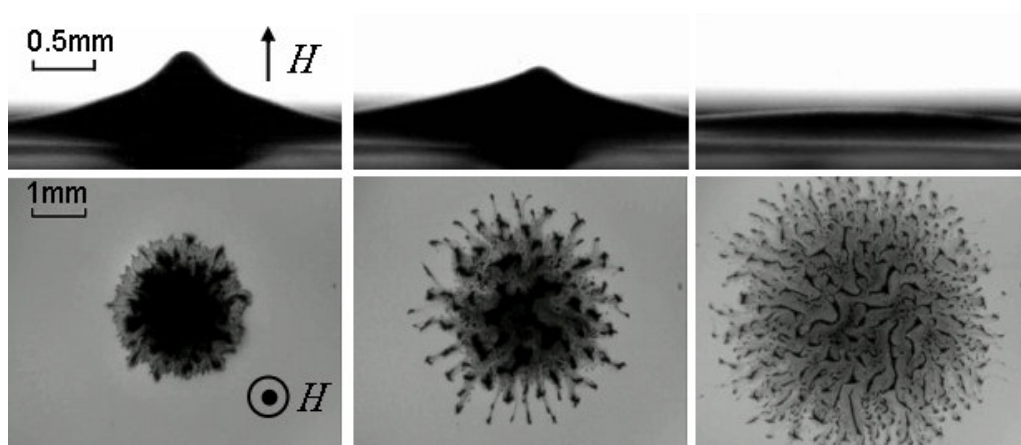


圖1-9 突出峰(上列)與迷宮型不穩定現象(下列)同時存在的現象[8]

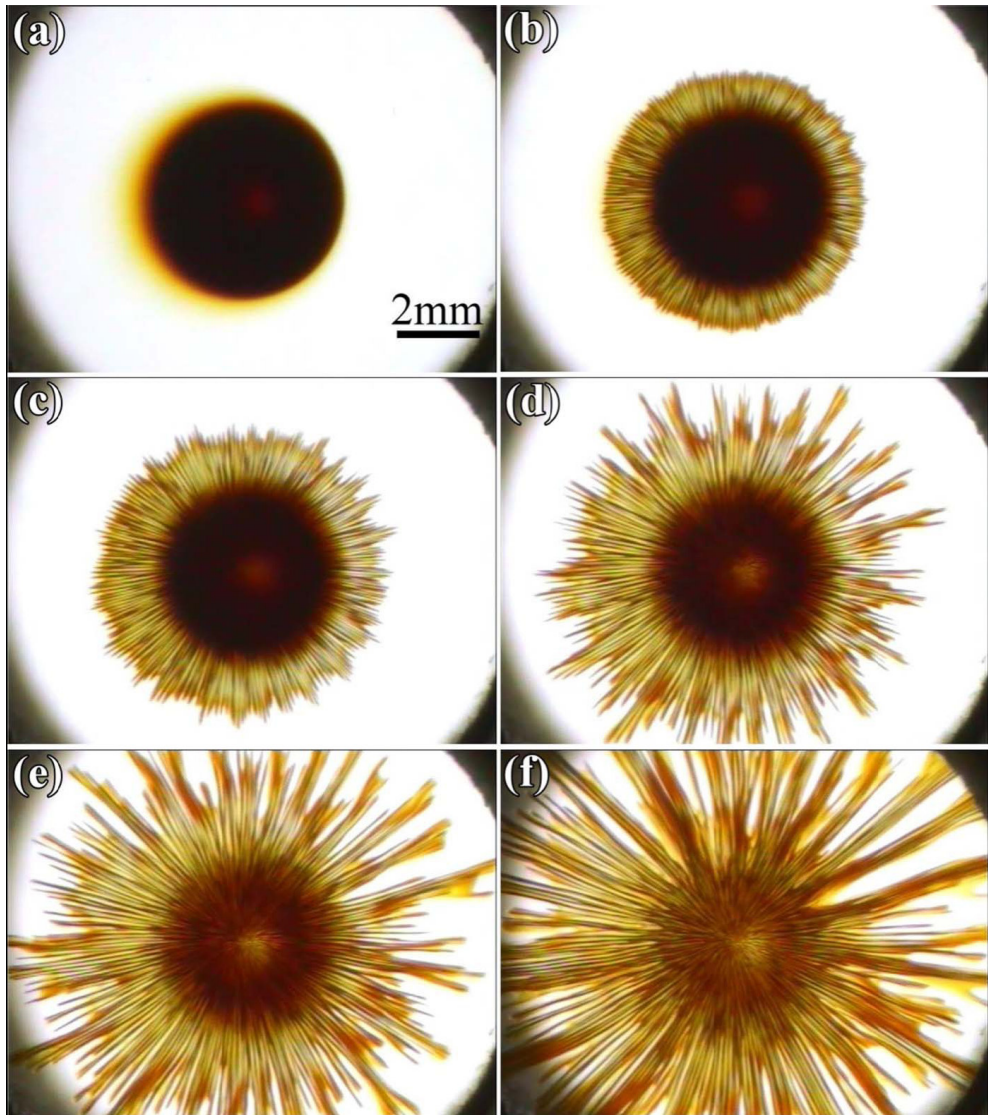


圖1-10 磁性流體與可互溶液體在徑向磁場下產生的指狀化現象[9]

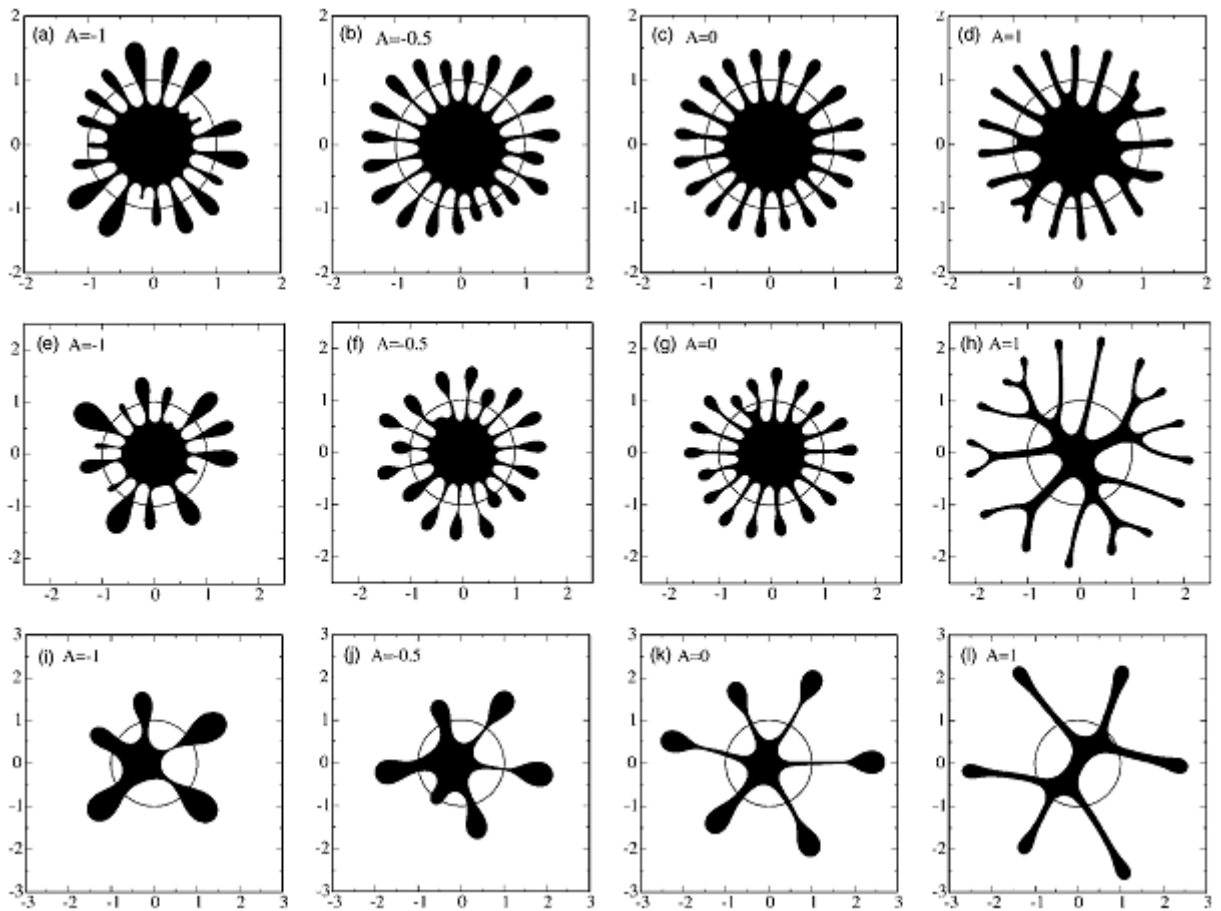


圖1-11模擬不可互溶界面下，液體的黏度會影響指狀化現象的形狀以及其長度分佈[10]

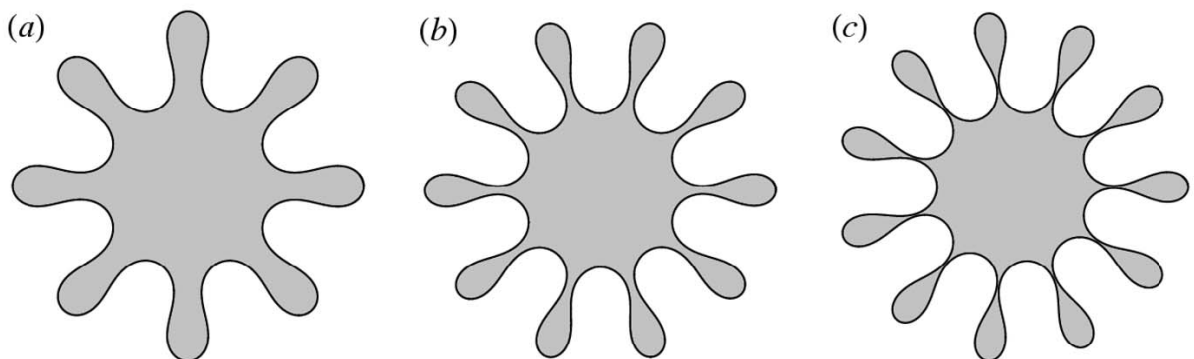


圖1-12 不同磁化率之磁性液滴受旋轉磁場所產生的指狀化現象[11]

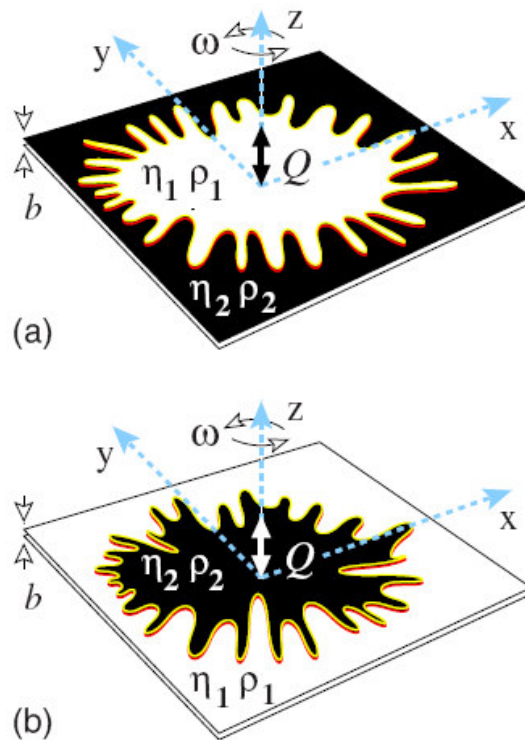


圖1-13以數值模擬在旋轉的機制下，可互溶液體中離心力與科氏力對型態與變化產生重大影響[12]

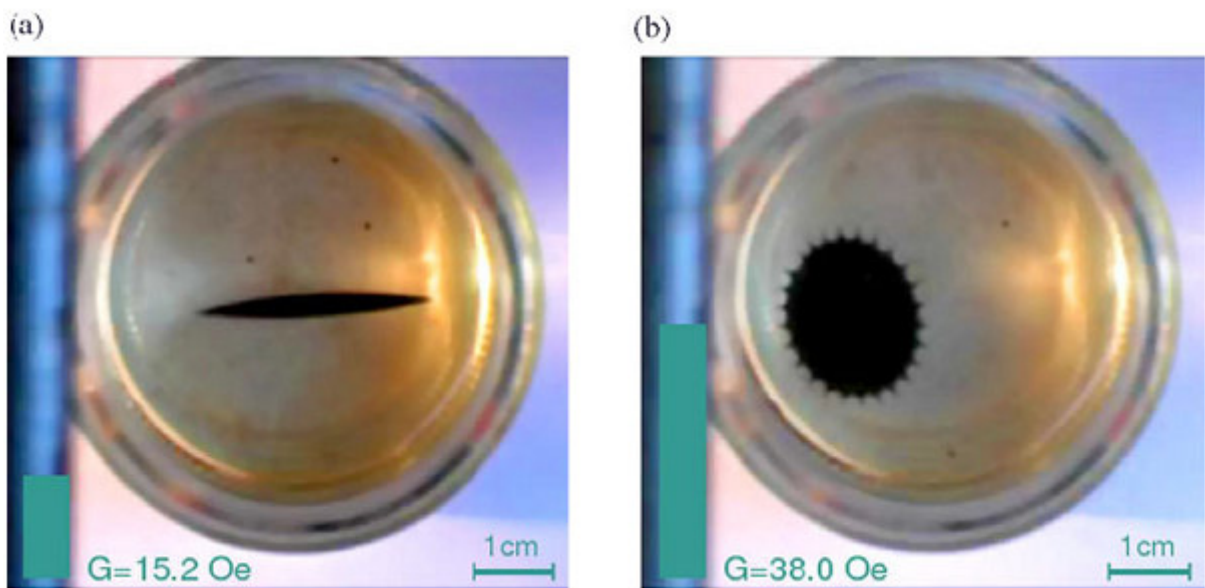


圖1-14 磁性液滴滴入相同密度之非磁性液體中，施以不同大小之旋轉磁場時，對於旋轉運動中之液滴會有重大的影響[13]

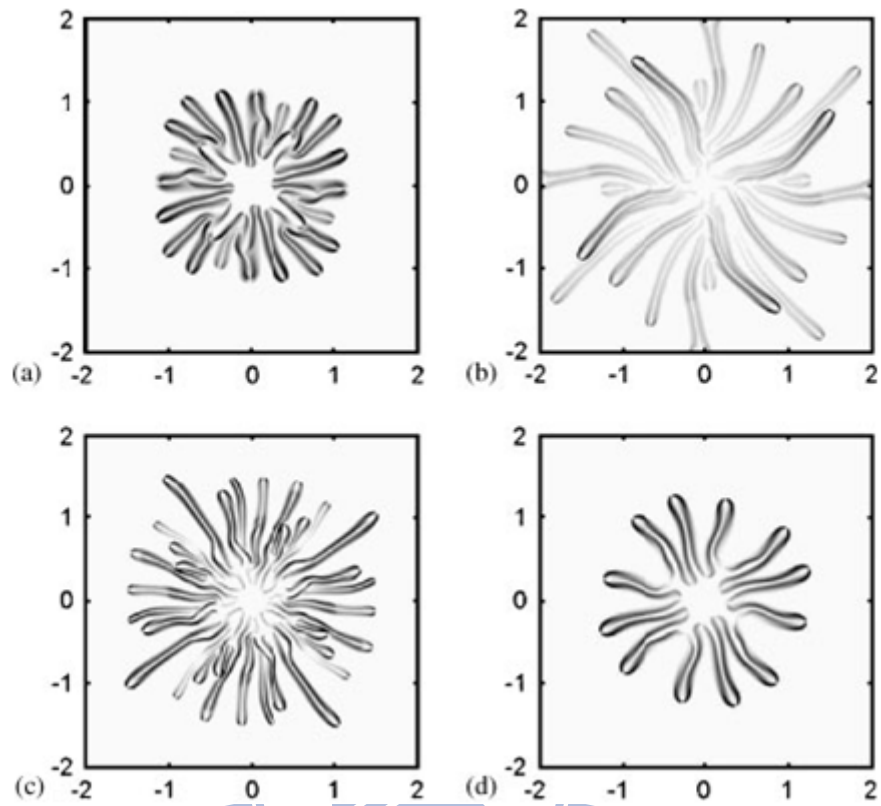


圖1-15 高速旋轉可互溶液滴在Hele-Shaw Cell中受離心力與科氏力之影響，而呈現出具傾斜角之指狀化不穩定現象[14]

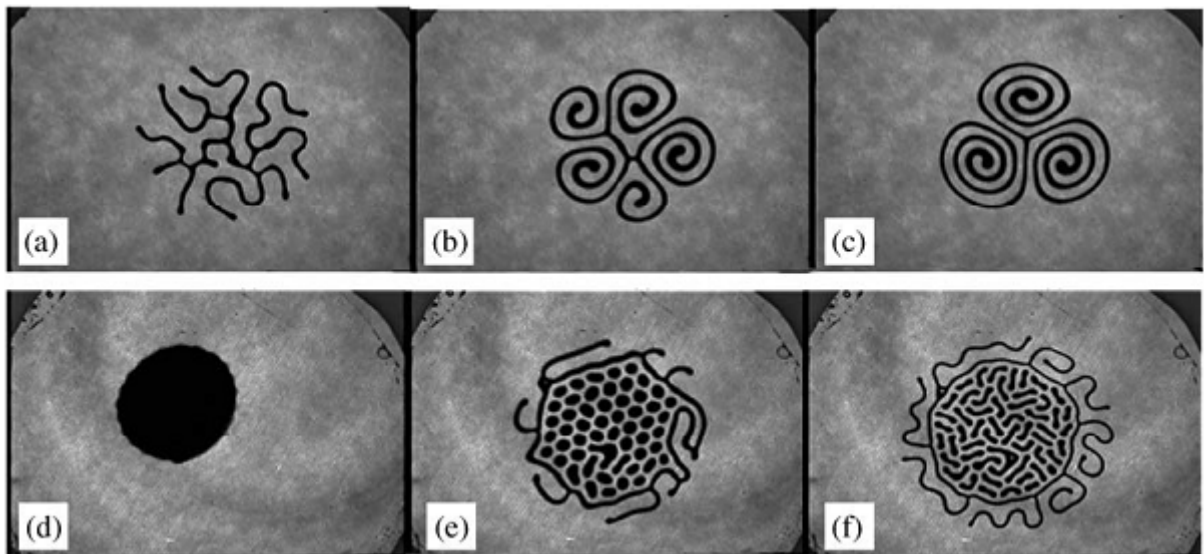


圖1-16 旋轉磁場及垂直磁場下所產生之界面演變[15]

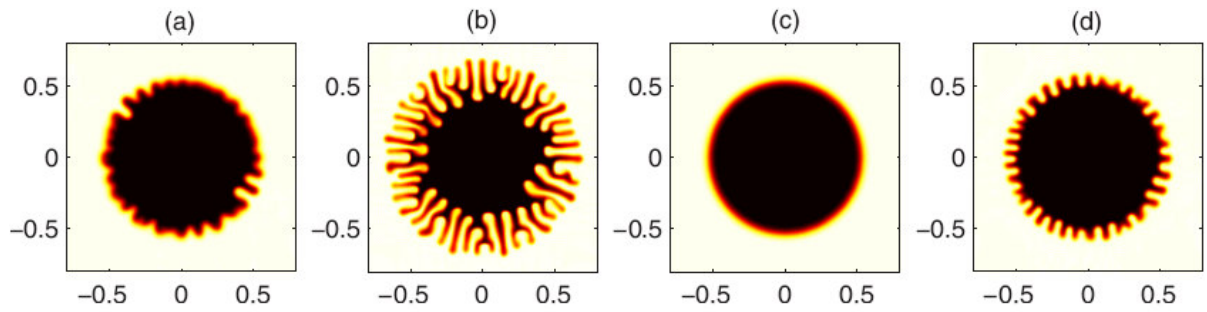


圖1-17受垂直磁場及切線方向磁場影響所產生之複雜性指狀化現象[16]

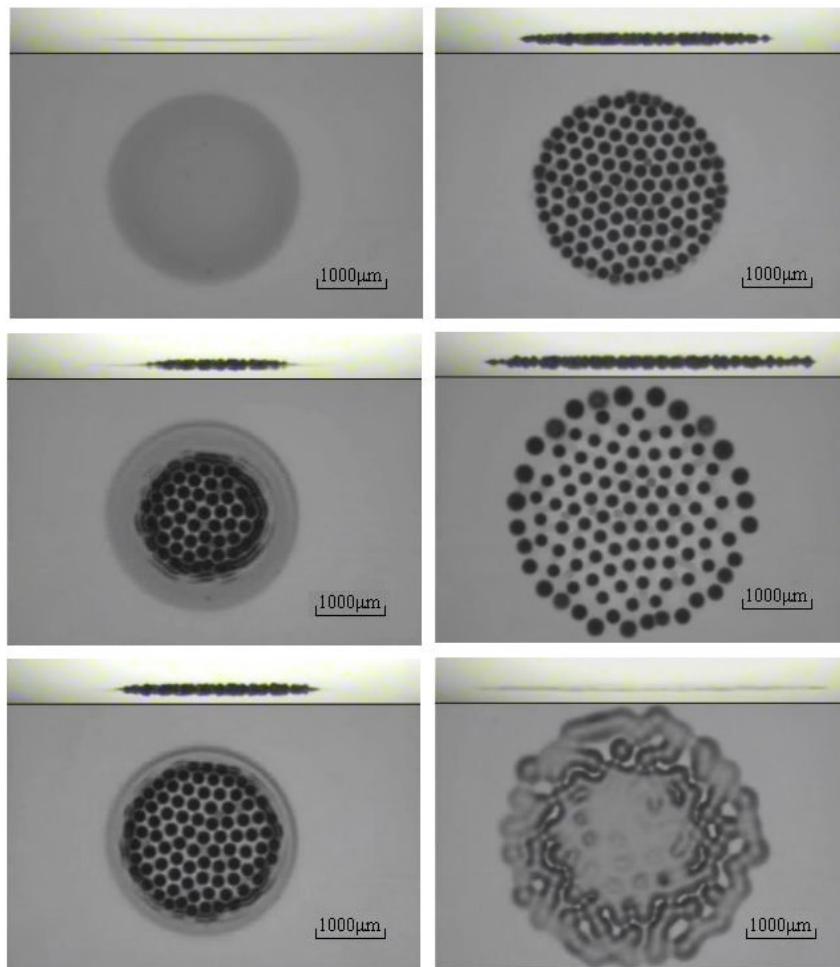


圖1-18 磁性液滴薄層在預濕情況下受垂直磁場所產生之分裂情形[17]



表1-1 磁性流體的製造方法

<p>粉碎法</p>	<p>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。</p>
<p>火花侵蝕法</p>	<p>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。</p>
<p>共沉法</p>	<p>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。</p>
<p>熱分解法</p>	<p>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。</p>
<p>真空蒸發法</p>	<p>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。</p>
<p>紫外線分解法</p>	<p>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。</p>
<p>電著法</p>	<p>把水銀為陰極裝入 <math>\text{FeSO}_4</math> 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。</p>

## 第二章 實驗原理、設備及方法

本實驗將探討當開啟電源供應器使線圈產生磁場時，磁性液滴與甘油和溶媒在垂直磁場下經由可變焦距光學顯微鏡所觀察到之界面不穩定現象，並將實驗影像顯示且記錄於電腦裡，其中實驗設備之架構如圖2-1所示。

### 2-1 實驗儀器及說明

本研究之實驗設備主要包括磁性流體、丙三醇(甘油)、溶媒、有凹槽的石英載玻片、光學顯微鏡、電源供應器、高斯計、碳棒、背光板、線圈組、電腦。將本研究之實驗設備簡單繪製成實驗示意圖如圖2-2所示，利用上述實驗設備可觀察到磁性流體加入不可互溶液體和可互溶液體時，施加垂直磁場時，磁性流體產生突破甘油液面及溶媒表層的現象，而此現象可藉由CCD攝影機拍攝並紀錄於電腦裡。

最初磁性液滴被放置於具有凹槽的載玻片中央，而定義液滴中心為座標系統(x,y,z)原點，載玻片平面為x-y平面。本實驗所使用的磁性流體為輕礦油基 EMG 901(如圖2-3)，磁性流體的黏滯度  $\mu = 10cp$ 、密度  $\rho = 1.53gm/ml$  及飽和磁化率  $M_s = 600Oe$ (如圖2-4)；實驗中所使用的丙三醇(甘油)黏滯度  $\mu = 1500cp$ 、密度  $\rho = 1.26gm/ml$ ；而EMG 911系列的溶媒黏滯度為  $\mu = 4cp$ ，密度則為  $\rho = 0.89gm/ml$ 。一開始磁性液滴因表面張力作用，滴於凹槽載玻片中央呈現圓弧狀之球型，在丙三醇(甘油)加入後，磁性液滴起初所呈現的球型便轉而變為一扁平圓形；磁性液滴加入溶媒後，則因互相混合的緣故而使得液滴邊緣產生較為不清楚的邊界。

垂直磁場是利用可程式電源供應器(如圖2-5)提供固定電流至線圈組，在電源供應器開啟瞬間會產生一均勻的磁場，而後藉由兩個線圈通電所產

生之正負電極形成向上的垂直磁場(如圖2-6)，磁性液滴突破甘油液面所需之磁力即是藉由線圈所產生的磁場而形成。調整電源供應器不同的電流值可產生不同強度的垂直磁場，本文所設定之磁場強度為350 Oe、440 Oe及510 Oe，其所對應之電流值為1.8A、2.2A及2.6A。磁場的分佈是由高斯計SYPRIS 6010型號及碳棒量測得出，如圖2-7，此時設定電流為3A，可量測出三個平面的磁場分佈曲線，如圖2-8、2-9及2-10所示。由於本文之線圈是由手工打造，因此或多或少皆有所誤差。從分佈曲線可看出x-y平面磁場仍遠大於y-z及x-z兩個平面的磁場強度。

磁性液滴在甘油液體中，開啟磁場後，磁性液滴產生向上突破甘油的情形可藉由CCD攝影機(如圖2-11)錄製到整體運動情形；同樣地，磁性流體加入溶媒後所產生的羅森史維格不穩定現象也可經由CCD攝影機錄製。CCD攝影機上加裝光學顯微鏡，可由上方及側方清楚觀察到液面邊界的運動，其中側方顯微鏡約呈俯角 $15^\circ$ 拍攝磁性液滴所產生的羅森史維格不穩定現象，而後經由傳輸線連結到電腦裡。

## 2-2 實驗步驟

實驗開始前先將載玻片用酒精擦拭乾淨以除去上面的棉屑及灰塵，之後將磁性流體滴於載玻片之中間凹槽內，在磁性液滴之上方滴入丙三醇(甘油)，使得磁性液滴完全被覆蓋在甘油之內，接著將滴有磁性液滴之載具放置於兩線圈中間，使其對準磁場中央；同樣地，可互溶液體的實驗則為先將磁性液滴滴於石英載玻片中間凹槽，並在磁性液滴上方滴入EMG 900系列之溶媒，而後將載玻片置於線圈中間使其位於磁場中心。

將載具與線圈組放置於光學顯微鏡平台後，開啟背光板使其亮度足以呈現明顯對比，而後調整焦距使上拍及側拍鏡頭都能夠清楚看見液滴外圍輪廓，此時上拍所設定之光學顯微鏡焦距為1X，且鏡頭前方加裝0.5倍的鏡

片；而側拍光學顯微鏡的焦距則為0.6X，前方無加裝任何倍率之鏡片。而隨著磁性液滴的直徑由幾百微米增加至幾千微米時，上拍及側拍鏡頭的倍率也隨之減小。接著我們利用影像擷取軟體(Power Director 5)錄製顯微鏡所拍攝到之畫面。

在開啟磁場前，先利用可程式化電源供應器設定電流開啟及關閉所持續之時間，吾人設定電流在前10秒內維持固定輸出，而10秒過後則有2秒的時間停止輸出電流，如此重覆開啟電流兩次。在開啟錄影功能後，接著打開電源供應器，按下AUTO鍵使所需之電流強度經由線路到達線圈，而產生向上的垂直磁場，並錄製磁性液滴受垂直磁場作用所產生的運動情況，當關閉輸出電流且磁場隨之消失後便停止錄影。

待實驗結束後，關閉電源供應器及背光板。將實驗所用的載玻片取下並利用乳化劑(TWEEN 80)清洗磁性流體與甘油以及磁性流體與溶媒的混合物，清洗完後用拭鏡紙擦拭載玻片，以用於下次實驗。而線圈組因通過電流產生磁場使得線圈的溫度升高，必須待線圈冷卻至室溫後，方可進行下次實驗。

後續將所錄製到的影片經過處理後，利用Virtual Dub、Photo Impact、Corel Video Studio及Ulead GIF Animator等影像分析軟體，觀察磁性流體與不可互溶及可互溶液體中在開啟磁場瞬間所產生的界面不穩定現象並加以分析歸納。

## 2-3 理論背景

在Gollwitzer等學者[3]的文獻中，可得知當考慮水平且無邊界的磁性流體，對於不導電的磁性流體，其Maxwell equation可化簡為：

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

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

磁性流體內的磁化率假設遵守以下方程式：

$$M(H) = M_s^* \left( \coth(\gamma|H|) - \frac{1}{\gamma|H|} \right) \frac{H}{|H|}, \quad \gamma = \frac{3\chi_0}{M_s^*} \quad (2-3)$$

而磁性流體外圍無磁化現象，則可得到Navier-Stokes equation為下列方程式：

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla) u \right) - \nabla \cdot \tau = -\rho g e_z \quad (2-4)$$

$$\text{div } u = 0 \quad (2-5)$$

$\tau$  為應力張量，可表示為：

$$\tau = \eta (\nabla u + \nabla u^T) - \left( p + \frac{\mu_0}{2} H^2 \right) I + H \otimes B \quad (2-6)$$

其中  $p = p_{hyd} + p_m$ ， $p_{hyd}$  為流體靜壓力而  $p_m$  為磁性流體之壓力，可寫成：

$$p_m = \mu_0 \int_0^H M(h) dh \quad (2-7)$$

考慮靜止狀態則  $u \equiv 0$ ，(2-4)式可改寫為：

$$\nabla p = -\rho g e_z + \mu_0 M \nabla H \quad (2-8)$$

兩界面之間達到平衡所產生的力可由Young-Laplace equation來表示如下：

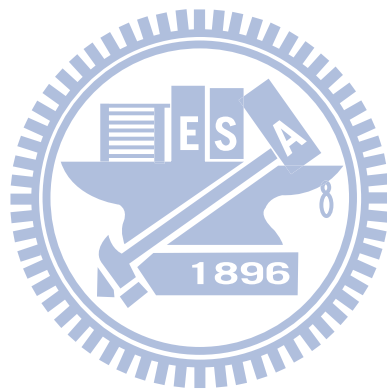
$$\llbracket \tau \rrbracket n = \sigma \kappa n \quad (2-9)$$

將(2-8)式積分並加入(2-9)式可得到以下關係式：

$$\sigma \kappa + \rho g z = \mu_0 \int_0^H M(h) dh + \frac{\mu_0}{2} (M \cdot n)^2 - p_0 \quad (2-10)$$

在(2-10)式中，等號左邊為表面張力與流體靜壓力，等號右邊前兩項為磁能

項，而  $p_0$  為當時環境大氣壓力，視為一常數。



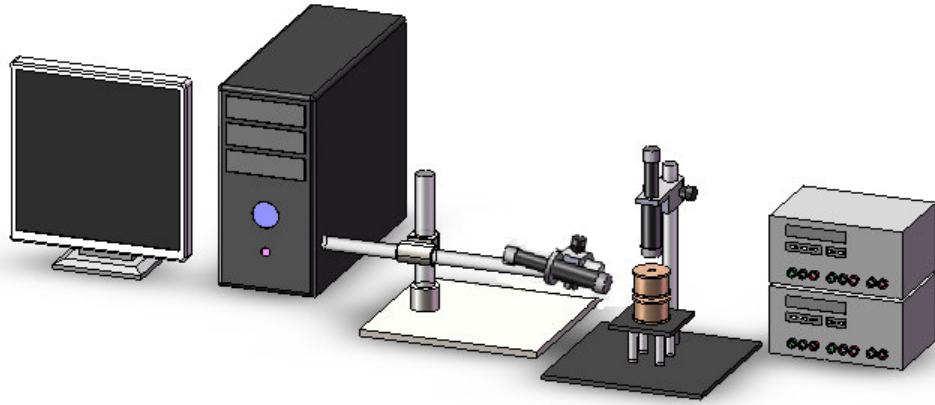


圖2-1 實驗架構圖

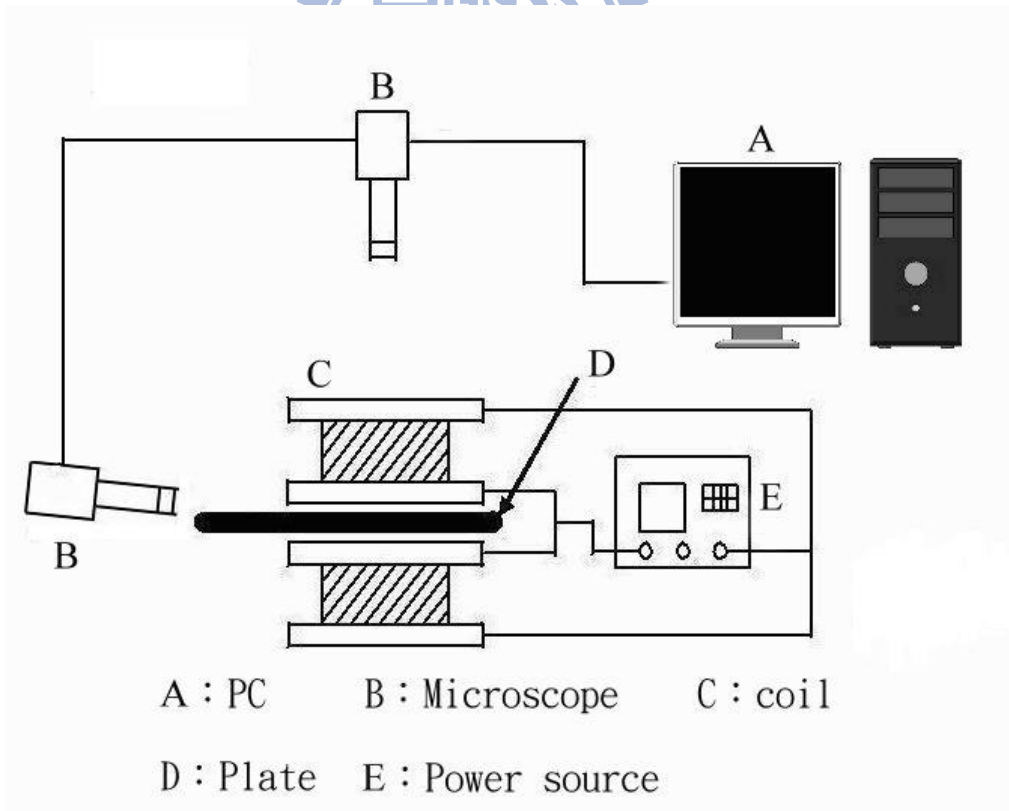


圖2-2 實驗示意圖



圖2-3 磁性流體(EMG 901)

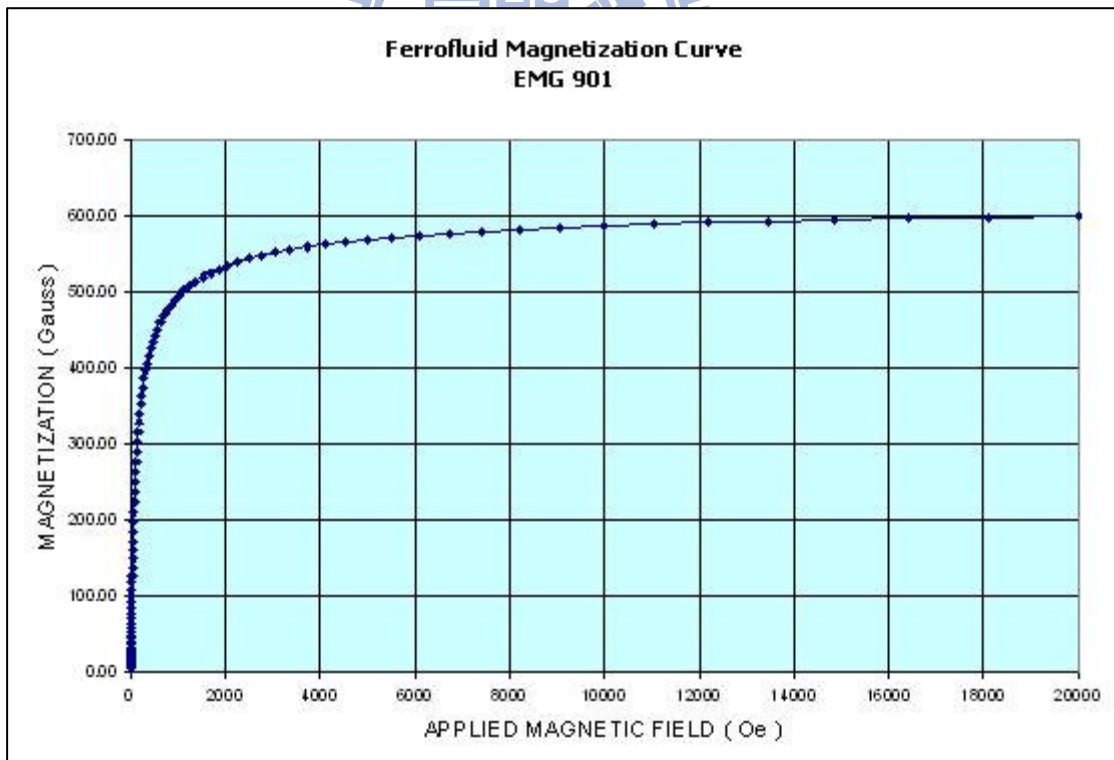


圖2-4 磁性流體(EMG 901)之磁化率曲線圖



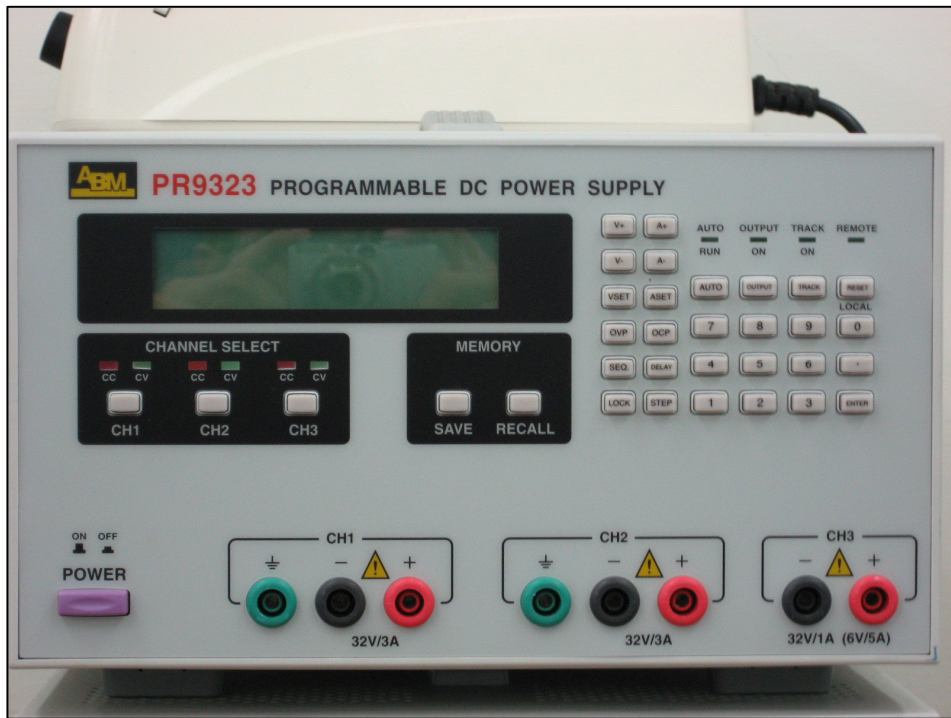


圖2-5 可程式化電源供應器

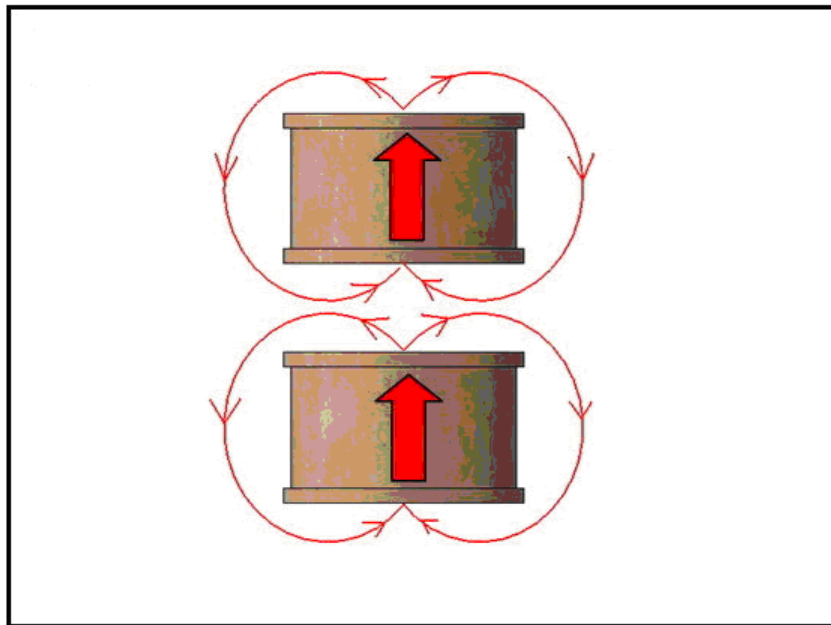


圖2-6 線圈通過電流產生向上的磁場



圖2-7 高斯計及碳棒

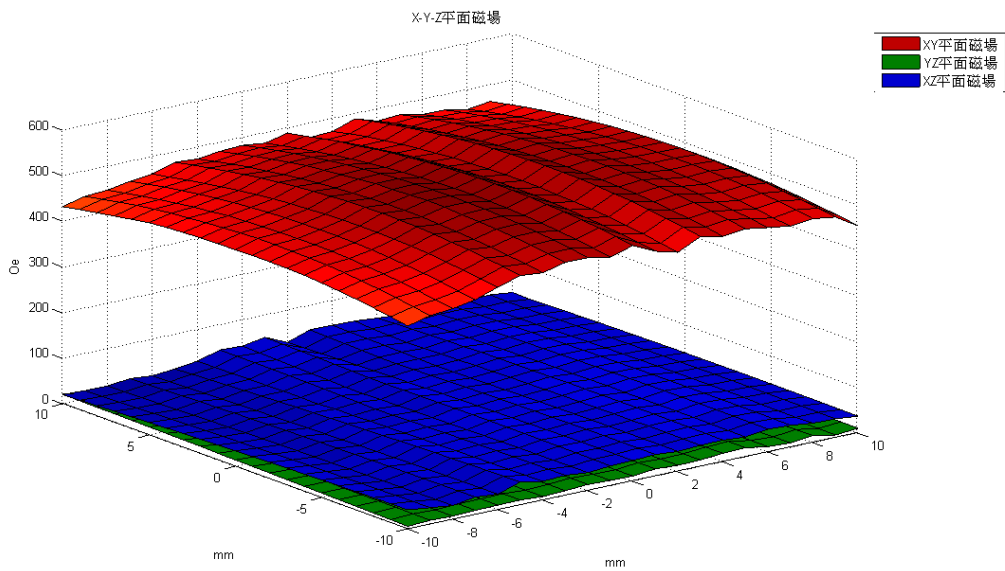


圖2-8 X-Y-Z平面磁場分佈

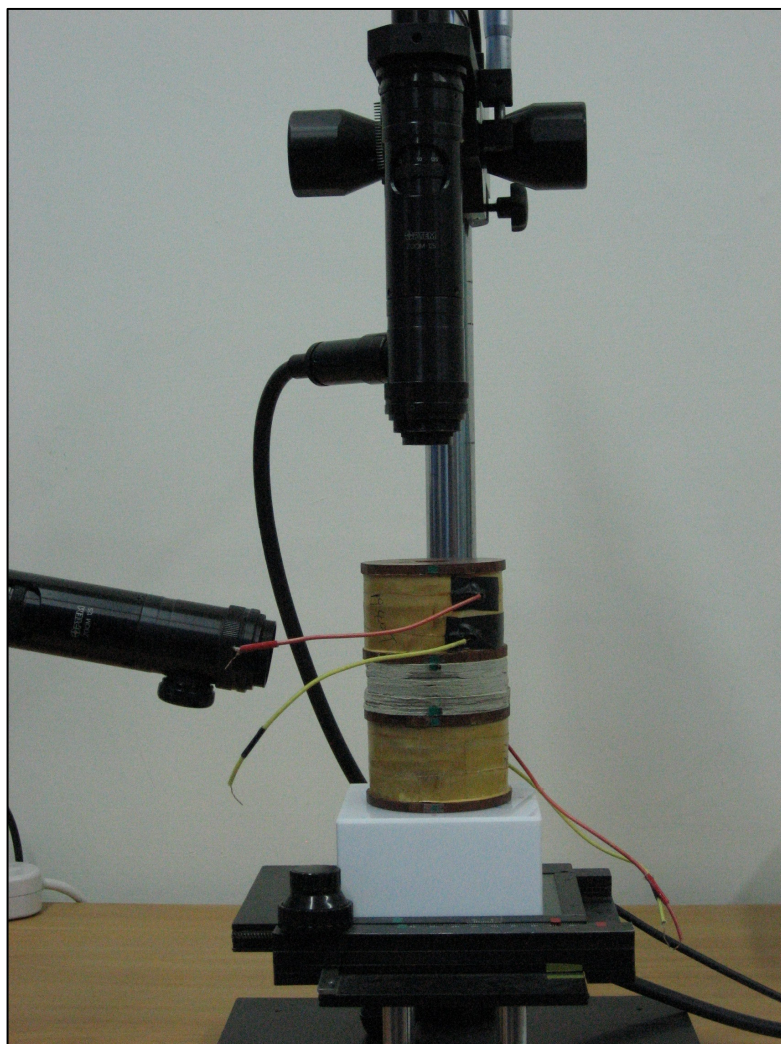


圖2-9 光學顯微鏡平台及CCD攝影機

## 第三章 結果與討論

本研究主要目的在於磁性液滴在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，根據實驗規畫之情況，隨著不同磁場(改變電流  $I$ )與不同直徑大小作一系列有系統的分類，以其能找出磁性流體在兩種不同液體中所產生的界面不穩定現象之差異性。

### 3-1 磁性流體與不可互溶液體於垂直磁場為350 Oe之情況

當磁性液滴在不同大小直徑且相同磁場強度下，其突出甘油之情況可由一系列影片之截圖加以分析描述。圖3-1為液滴直徑750  $\mu\text{m}$ 之分裂情形，剛開始可清楚看見磁性流體於甘油中完整明顯的輪廓，並從側視圖中看見甘油的液面高度，如圖3-1(a)所示。此時電源供應器所設定的電流為1.8 A，所產生的磁場為350 Oe，當電流通過線圈產生垂直磁場後，可發現磁性液滴開始產生向上運動之現象，而液滴頂端邊緣與甘油液面接觸，此時可看見明顯的表面張力互相作用，如圖3-1(b)。當磁場作用於磁性液滴所產生的磁力足以與重力及表面張力相抗衡時，液滴突破甘油表面產生羅森史維格不穩定現象，如圖3-1(c)。而後隨著磁場的消失，羅森史維格結構物也隨之坍塌，原先突破甘油液面之液滴因不可互溶的關係漂浮於甘油層上面，如圖3-1(d)。當磁場再度開啟時，於甘油層下方的磁性液滴因磁力作用突破甘油液面，且因部分磁性流體已漂浮於甘油上方，故其羅森史維格結構物高度較無先前高，如圖3-1(e)。當磁性液滴再度突破甘油液面時，隨著羅森史維格結構物的產生，漂浮於甘油液面上的磁性流體開始往徑向方向移動，使其呈現一環狀分佈，如圖3-1(f)。

若將液滴直徑增加至840  $\mu\text{m}$ ，則其分裂情形如圖3-2所示，可發現其分裂模式與液滴直徑較小有些許的相似性。一開始仍可從上視及側視圖清楚

看見磁性液滴的輪廓，如圖3-2(a)。當開始產生垂直磁場後，從側視圖可看見液滴向上突起並接觸到甘油液面，而從上視圖可發現液滴直徑因往上發展的緣故明顯變小，如圖3-2(b)。當磁力足以抵抗表面張力時，可看見磁性液滴突破甘油表面產生羅森史維格不穩定現象，如圖3-2(c)。當磁場關閉後，羅森史維格結構物也隨之坍塌，從上視圖可清楚看見原先突出甘油液面的磁性流體也隨著磁力的消失而漂浮於甘油表面，如圖3-2(d)。當垂直磁場再度產生時，其所產生的羅森史維格結構物較先前的高度小，乃因絕大部分的磁性流體已漂浮在甘油表面層，如圖3-2(e)。漂浮於甘油表面的磁性流體在磁場的作用之下產生高度較小的次液滴，並隨著對流效應而往徑向方向輻射狀移動，如圖3-2(f)。

當液滴直徑約為940  $\mu\text{m}$ 且於磁場強度為350 Oe時，受到垂直磁場所產生之垂直拉力及甘油表面與磁性液滴所產生的表面張力之影響，使液滴頂端與甘油液面接觸，當磁性液滴及甘油兩者間之表面張力互相競爭時，液滴尚未突破甘油層，如圖3-3(b)。當液滴所受的磁力足以抵抗其表面張力時，磁性液滴開始突破甘油表面形成一個三維的羅森史維格不穩定結構物，且此結構物之高度明顯比初始直徑小的液滴所產生的結構物高，如圖3-3(c)。在關閉磁場後，羅森史維格結構物也隨之坍塌，並往徑向方向擴張，如圖3-3(d)。將磁場再度開啟時，在甘油層內及甘油層表面之磁性液滴受垂直磁場之作用產生高度較小的結構物，並開始產生比直徑小的液滴更為混亂之徑向偏移，如圖3-3(f)。

當磁性液滴的直徑增大為1060  $\mu\text{m}$ 時，在垂直磁場下其液滴頂端與甘油層之接觸面更為不平整，如圖3-4(b)。當液滴突破甘油表面時，可明顯看出羅森史維格結構物高於之前原始直徑較小的三個範例，如圖3-4(c)。當垂直磁場關閉後，大部分的液滴漂浮於甘油液面上方，因甘油與磁性流體彼此不可互溶的特性，導致甘油層上方的磁性流體無法再與甘油層內之磁性流體充分混合，如圖3-4(d)。當垂直磁場再度作用於磁性液滴時，除了在磁場

中心所產生的羅森史維格結構物之外，外圍也產生了一圈高度較小的次液滴結構物，如圖3-4(e)。而比起原始直徑較小的液滴而言，第二次開啟磁場所產生的三維結構物明顯較多，並隨著離磁場中心的距離以近似層狀之方式排列，如圖3-4(f)。

由上述四個範例可以發現磁性流體在垂直磁場作用下，其產生的羅森史維格結構物高度大小與初始直徑有一定的相關性，當磁場關閉再度開啟時，第二次所產生的三維結構物與其浮在甘油液面上的磁性流體多少也有一定之相關性。當磁性液滴的直徑越大，其受相同強度之垂直磁場時，產生的羅森史維格結構物較高，並有較多部分之磁性流體於磁場關閉時浮於甘油表面，因而導致第二次開啟磁場時，除了中心所產生的羅森史維格結構物之外，甘油表層的磁性流體也受垂直磁場的作用而產生以環狀排列且高度較小的次液滴。

### 3-2 磁性流體與不可互溶液體於垂直磁場為440 Oe之情況

當我們將電源供應器的電流設定在2.2 A，此時磁場強度為440 Oe。不同直徑大小的磁性液滴受到垂直磁場作用下產生的羅森史維格不穩定現象可用影片的截圖來加以描述。圖3-5為直徑大小780  $\mu\text{m}$ 的液滴分裂情形，一開始磁場尚未開啟時，上拍及側拍中液滴的輪廓明顯而清楚，如圖3-5(a)。當電源供應器開啟，線圈通過電流時，產生最大垂直磁場強度約為440 Oe，此時磁性液滴受到磁力作用產生向上突起的現象並使得甘油液面中央往下凹陷，如圖3-5(b)。當液滴所受磁力足以抵抗表面張力時，磁性液滴便突破甘油表面產生羅森史維格結構物，如圖3-5(c)。當磁場關閉時，磁性液滴因沒有磁力的支撐而產生塌陷的現象，部分磁性流體漂浮於甘油層上方，如圖3-5(d)。接著時間停隔兩秒後再度開啟磁場，可明顯看出產生的羅森史維格結構物高度較小，且外圍有一圈磁性流體往徑向方向發展，如圖3-5(e)。而漂浮在甘油表面的磁性流體受垂直磁場作用後，在甘油表面產生高度微

小的羅森史維格結構物，如圖3-5(f)。

若磁性液滴的直徑增加為790  $\mu\text{m}$ ，其運動模式與直徑較小的範例有類似之情形。剛開始磁場仍未開啟前，可看見磁性液滴輪廓與甘油液面，如圖3-6(a)。電流通過線圈組產生垂直磁場後，磁性液體產生突峰狀並與甘油液面接觸，此時因表面張力與磁力相抗衡，故其液滴仍未突破甘油表面，約莫持續2秒的時間，如圖3-6(b)。當磁力作用在液滴的影響大過表面張力後，磁性液滴開始突破甘油液面形成三維之不穩定結構物，並因磁場些許的不均勻現象導致羅森史維格結構物有移動之情形，如圖3-6(c)。當磁場消失後，此不穩定結構物也隨之消失，如圖3-6(d)。再度將磁場開啟後，可看見次液滴的產生，隨著磁力線的分佈導致浮在甘油表面的磁性流體有逐漸向外飄移的趨勢，如圖3-6(e)。當甘油表面上的磁性流體受垂直磁場作用後，也產生不穩定的羅森史維格結構物，並逐漸向外飄移，如圖3-6(f)。

當液滴直徑為900  $\mu\text{m}$ 時且垂直磁場強度為440 Oe下，可看見磁性流體與甘油液面接觸的曲線相較於相同磁場直徑較小的液滴變得比較不平滑，因磁場的增加使磁力變大，而磁性流體與甘油接觸面產生不規則的曲線，如圖3-7(b)。而從側拍畫面可粗略計算出產生羅森史維格結構物的高度約為1100 $\mu\text{m}$ ，如圖3-7(c)。當磁場關閉再開啟後，隨著初始直徑的增加及磁場強度的增加，此時浮在甘油層表面的磁性流體有逐漸變多的趨勢，而這些磁性流體也受垂直磁場的影響而產生不穩定結構物，並開始在甘油層上方有更為紊亂及不規則的運動，如圖3-7(e)。

若液滴直徑增加為1050  $\mu\text{m}$ 之情況下，當磁場開啟的瞬間，在液滴上方邊緣呈現近似尖錐狀的結構，並帶動甘油液面往上突出而呈現尖錐狀的情形，導致中間的甘油層變薄並往四周流動，如圖3-8(b)。當磁力作用於磁性流體的影響大於表面張力時，液滴突破甘油液面形成高度約為1400 $\mu\text{m}$ 的三維不穩定結構物，因液滴向上發展的緣故，從上拍畫面可清楚看見直徑明

顯變小，如圖3-8(c)。當磁場關閉後，液滴所產生的不穩定結構物也隨之坍塌，原先於甘油層內的磁性流體分為兩部分，一部分仍留在甘油層內，而另一部分隨著羅森史維格結構物的坍塌而浮在甘油層上方，而藉由甘油的不可互溶性使此兩部分的磁性流體隔絕，如圖3-8(d)。再度開啟磁場後，原先在甘油層內的磁性流體再次形成羅森史維格結構物，而浮在甘油層表面的磁性流體則於甘油層上方產生微小的次液滴，並隨著對流效應及磁場的影響往外擴展，如圖3-8(e)及圖3-8(f)。

隨著磁場的增加，可以發現在相近初始直徑的情況下，磁場強度越強其液滴分裂產生羅森史維格結構物的高度也有越高的趨勢，而當液滴分裂的高度越高，在磁場關閉後其停留在甘油層上方的磁性流體也越多，這也導致了磁場再度開啟時在甘油層上方的磁性流體產生更多的次液滴，而所產生的次液滴高度將變得較小。

### 3-3 磁性流體與不可互溶液體於垂直磁場為510 Oe之情況

當線圈組通過的電流增加為2.6A時，線圈所產生的垂直磁場增加為510 Oe，不同直徑大小的磁性流體在甘油層內所產生的羅森史維格不穩定現象如圖片所示。在磁場開啟前，液滴直徑為930  $\mu\text{m}$ 的磁性液滴呈完整的圓形，如圖3-9(a)。在磁場開啟後，磁性液滴受到垂直磁場的作用而產生向上突起的現象，在磁力、表面張力、重力及黏滯力相互競爭下，造成甘油與磁性液滴的界面產生非圓形之曲率，如圖3-9(b)。在垂直磁力持續作用下，磁性流體產生三維羅森史維格結構物，如圖3-9(c)。當垂直磁場消失時，羅森史維格結構物也隨之消失，如圖3-9(d)。先前所產生的羅森史維格結構物在磁場消失時產生坍塌，並由於磁性流體與甘油不可互溶的特性，使得坍塌的磁性流體被隔絕在甘油液面上方，在磁場再度開啟時，於甘油底層的磁性流體突破甘油液面形成羅森史維格結構物，殘留在甘油液面上方的磁性流體也形成了高度微小的羅森史維格結構物，如圖3-9(e)。在甘油層上方的磁



性流體受到磁力互相排斥與底層中央產生的羅森史維格結構物所造成的表面波動影響而逐漸往徑向方向運動，如圖3-9(f)。

圖3-10為液滴直徑為1120  $\mu\text{m}$ 的磁性液滴在垂直磁場強度為510 Oe時所產生的羅森史維格不穩定現象之截圖。磁場尚未開啟前，從上拍及側拍畫面可看見磁性液滴的形狀，如圖3-10(a)。在磁場開啟時，磁性液滴受垂直磁力作用而在甘油液面形成不平滑的曲率，如圖3-10(b)。接著可看見磁性液滴突破甘油液面所產生的羅森史維格不穩定現象，並隨著此現象的產生使甘油液面有表面波動的產生，如圖3-10(c)。當電源供應器有2秒的時間停止供應電流時，磁性液滴也隨之坍塌，如圖3-10(d)。磁場再度開啟瞬間，於甘油底層和表層的磁性流體皆產生了明顯的突出峰，如圖3-10(e)。在甘油表層的磁性流體在產生羅森史維格結構物時，受到彼此間磁力互相排斥的作用和甘油液面的表面波動而產生飄移，如圖3-10(f)。

當液滴直徑為1140  $\mu\text{m}$ 時，垂直磁場產生的瞬間，磁性液滴受垂直磁力作用在甘油液面形成了不平滑的曲率，如圖3-11(b)。當磁性液滴突破甘油液面形成羅森史維格結構物時，受到磁力、表面張力、重力及黏滯力影響而呈現不穩定的狀態，如圖3-11(c)。將電源供應器開關短暫關閉使線圈無電流通過，此時垂直磁場減弱導致羅森史維格不穩定現象隨之消失，如圖3-11(d)。當打開電源供應器時，電流通過線圈再度產生垂直磁場，殘留於甘油表層的磁性流體受磁力和表面波動形成高度微小且範圍較大的突出峰，並和甘油底層的磁性流體共同形成三維羅森史維格結構物，如圖3-11(e)。於甘油表面的磁性流體受到表面波動及彼此間磁力互相排斥的影響而逐漸往徑向方向擴散，如圖3-11(f)。

液滴直徑為1190  $\mu\text{m}$ 時，受垂直磁場所產生的羅森史維格不穩定現象如圖3-12。在垂直磁場產生瞬間，磁性流體受垂直磁力作用在甘油液面形成不平滑的曲率，而液滴中央受到密集磁力線與磁場強度較大的關係產生高度

較其他區域略高的不平滑曲率，如圖3-12(b)。隨著液滴直徑與磁場強度的增加，仍未突破甘油液面的磁性流體在甘油底層分裂成許多微小的羅森史維格結構物，如圖3-12(c)。垂直磁場消失後，羅森史維格結構物坍塌並有部分磁性流體殘留在甘油表層上方，因甘油與磁性流體不可互溶的關係使在甘油底層與甘油表層上方的磁性流體被不可互溶液體隔絕。磁場再度開啟時，在甘油底層的磁性流體受到甘油黏滯力而產生單一羅森史維格結構物，殘留在甘油表層上方的磁性流體同時與甘油和空氣接觸，因此形成與單獨在空氣中所產生的羅森史維格結構物有些許類似之情形(分裂許多高度相近的羅森史維格結構物)，如圖3-12(e)。在甘油表層上方的羅森史維格結構物受到彼此間磁力互相排斥與表面波動而往徑向方向漂移，如圖3-12(f)。

### 3-4 磁性流體與可互溶液體受垂直磁場所產生之情形

相對於磁性流體與不可互溶液體受垂直磁場所產生的單一羅森史維格結構物；磁性流體與可互溶液體受垂直磁場所產生的界面不穩定現象大致上可以分成四個類型：(I)單純迷宮化(Labyrinthine)現象；(II)迷宮化現象與單一羅森史維格結構物同時產生；(III)多個羅森史維格結構物逐漸形成單一羅森史維格結構物並同時產生迷宮化現象；(IV)形成多個羅森史維格結構物並伴隨著迷宮化現象的產生。而造成此四個類型的差異則主要取決於磁性液滴的直徑大小。

### 3-5 磁性流體與可互溶液體於垂直磁場為350 Oe之情況

當線圈組所產生的垂直磁場為350 Oe時，磁性流體與EMG系列溶媒在垂直磁場下產生的第一類界面不穩定現象如影片截圖所示。液滴直徑的大小為1080  $\mu\text{m}$ 時，由磁場尚未開啟前的影片截圖(圖3-13(a))可發現因磁性流體與溶媒可互溶的緣故，使得液滴形成了較模糊的邊界。在磁場開啟後約

0.1秒可看見迷宮化現象從液滴邊緣開始產生，如圖3-13(b)。在磁場產生的瞬間受到垂直磁力產生的羅森史維格不穩定現象受到可互溶液體的緣故致使磁力減弱，因此側拍畫面無法看見羅森史維格結構物的產生，但可發現液面有波動起伏的現象產生，而上拍畫面可看見複雜迷宮化現象，如圖3-13(c)及(d)。隨著迷宮化現象的發展，磁性液滴與溶媒逐漸混合導致磁性流體的濃度隨之降低，如圖3-13(e)及(f)。

大小為2560  $\mu\text{m}$ 的磁性液滴與溶媒在磁場尚未產生前，液滴邊緣部分呈現互溶的現象，如圖3-14(a)。在磁場開啟約0.06秒左右，磁性液滴產生環狀突起並且伴隨著複雜迷宮化現象的產生，如圖3-14(b)。隨著垂直磁力持續作用於磁性流體與溶媒的混合物，造成了磁性液滴表面形成了更不規則的起伏，如圖3-14(c)。而在垂直磁場作用約0.2秒後，於液滴中心產生了較初期的羅森史維格結構物，而其周圍形成了環狀且不規則的液面起伏，如圖3-14(d)。隨著磁力持續作用於磁性流體，其將發展成為較完整的羅森史維格結構物，而在液滴邊緣處則持續形成複雜迷宮化現象，如圖3-14(e)及(f)。而我們將同時產生單一羅森史維格結構物與複雜迷宮化現象的情況歸類為第二類型。

隨著液滴直徑增加為3410  $\mu\text{m}$ ，其所產生的界面不穩定現象也有不一樣的情形產生。在垂直磁場產生後約0.1秒左右，磁性液滴產生了環狀突起，並相較於液滴直徑略小的磁性流體有更明顯且近乎圓形的環形區產生，而液滴邊緣則因與溶媒混合較多的部分則開始出現迷宮化現象，如圖3-15(b)。在磁場開啟約0.5秒後，磁性流體形成許多高低不同的羅森史維格結構物，而液滴邊緣則有更明顯的迷宮化現象產生，如圖3-15(d)。這些高度不同的羅森史維格結構物將逐漸聚集形成單一羅森史維格結構物，並隨著磁性流體與溶媒的混合，複雜迷宮化現象的分支也變得更加細長，如圖3-15(e)及(f)。我們將多個羅森史維格結構物逐漸形成單一羅森史維格結構物並伴隨複雜迷宮化現象的情形歸類為第三類型。

當液滴直徑為3980  $\mu\text{m}$ 時所產生的界面不穩定現象也有不同的類型產生。在磁場開啟約0.1秒左右，磁性液滴形成圓環狀的突起，如圖3-16(b)。當磁力作用在磁性流體的時間逐漸增加時，先前圓環狀的突起部分逐漸形成許多大小高低不一致的羅森史維格結構物，從液滴邊緣可看見複雜迷宮化現象的初期逐漸形成，如圖3-16(c)及(d)。這些羅森史維格結構物除了會因磁力互相排斥之外卻也會產生聚集的現象，使得彼此較靠近的羅森史維格結構物容易逐漸混合形成同一羅森史維格結構物，如圖3-16(e)及(f)。而此種多個羅森史維格結構物與複雜迷宮化現象同時存在的情形則分類為第四類型。


### 3-6 磁性流體與可互溶液體於垂直磁場為440 Oe之情況

在磁場強度增加為440 Oe時，磁性流體與可互溶液體受垂直磁場所產生的界面不穩定現象大致上也可分為四個類型。

當直徑大小約為1000  $\mu\text{m}$ 的磁性流體受到磁場強度為440 Oe的垂直磁力作用下，羅森史維格結構物受到與溶媒互溶而致使磁力減弱產生相當迅速地坍塌，直徑較小的磁性液滴形成的羅森史維格結構物皆會有此種迅速坍塌的現象產生。從側拍畫面可看見磁性流體與溶媒所形成的液面在磁場開啟瞬間(約0.1秒)有短暫起伏的現象，而此時所產生的迷宮化現象仍可看見初始的液滴邊緣，如圖3-17(b)。當磁力持續作用於磁性流體上，迷宮化現象的範圍也逐漸往徑向方向外圍發展，在磁性流體與溶媒混合部分較少時，較能清楚看見迷宮現象所形成的分支，如圖3-17(c)及(d)。隨著磁性流體與溶媒混合的部分增加，迷宮化現象的輪廓變得較不明顯，而其分支在徑向方向呈現不規則狀之發展，如圖3-17(e)及(f)。此種界面不穩定現象的發展情形屬於第一類。

隨著液滴直徑增加為大約2240  $\mu\text{m}$ ，原本液滴較小的磁性流體造成羅森

史維格結構物迅速坍塌的現象在直徑較大的液滴則較不易產生。在磁場開啟後約0.07秒，磁性流體已經產生了相當明顯且接近圓形的液面起伏，如圖3-18(b)。直至目前的影像截圖可看出在磁場產生的瞬間，磁性流體隨即形成羅森史維格不穩定現象。在磁場最強的液滴中心形成高度較大的羅森史維格結構物，而在其附近的磁性流體則呈現較低窪之趨勢，如圖3-18(c)。當磁性流體凹陷處受垂直磁力而逐漸往上發展致使羅森史維格結構物成一完整發展，和在空氣中所產生的羅森史維格不穩定現象相比，本實驗中羅森史維格結構物底部及邊緣呈現較大之曲率，如圖3-18(d)。而隨著時間增加，磁性流體與溶媒溶合的部分也隨之增加，複雜迷宮化現象逐漸往外發展，使得羅森史維格結構物的高度逐漸下降，如圖3-18(e)及(f)。此種單一羅森史維格不穩定結構物與複雜迷宮化現象同時存在的情形，我們將之歸類為第二類型。



隨著磁性液滴直徑的增加，液滴輪廓邊緣較不易產生混濁的情況，如圖3-19(a)。在垂直磁場產生約0.07秒後，由液滴邊緣先產生環狀突起，在較靠近中間處也有高度較低的突起，如圖3-19(b)。位於中間及液滴邊緣的磁性流體高度隨時間逐漸增加，在液滴最邊緣處已開始有迷宮化現象的產生，如圖3-19(c)。在磁場產生約0.2秒後，較靠近磁場中心處的磁性流體形成數個羅森史維格結構物，而較接近邊緣的磁性流體仍維持環狀突起，如圖3-19(d)。位於中間的羅森史維格結構物高度逐漸增加，而使得位於這些羅森史維格結構物附近的磁性流體減少，從上拍畫面可看見在液滴中間附近產生了近似在空氣中的分裂情形，在液滴邊緣則是複雜化迷宮現象的產生，如圖3-19(e)。在磁場開啟後約8秒，數個羅森史維格結構物已互相混合形成單一羅森史維格結構物，複雜迷宮化現象的分支也越來越密集，如圖3-19(f)。由多個羅森史維格結構物形成單一羅森史維格結構物且伴隨複雜化迷宮化現象的過程屬於第三類不穩定現象。

磁性液滴直徑為4070  $\mu\text{m}$ 所產生的界面不穩定現象如影片截圖所示。在

磁場開啟後約0.07秒，磁性流體表面產生了一些不規則的起伏，而這些不規則起伏也造成液滴邊緣有細微的迷宮化現象產生，如圖3-20(b)。接著在靠近液滴邊緣形成了環狀突起，其高度則是高低不一致，如圖3-20(c)。而在液滴中心附近的磁性流體則突起形成數個羅森史維格結構物，原先在液滴邊緣的環狀突起也逐漸與羅森史維格結構物混合，如圖3-20(d)。從上拍及側拍畫面可看見於液滴中心附近所產生的羅森史維格結構物與液滴邊緣所形成的複雜迷宮化現象，如圖3-20(e)及(f)。上述數個羅森史維格不穩定結構物與迷宮化現象同時存在的過程屬於第四類型。

### 3-7 磁性流體與可互溶液體於垂直磁場為510 Oe之情況

當通過電源供應器的電流增加為2.6A時，可產生的最大垂直磁場為510 Oe，而磁性流體與可互溶液體(溶媒)所產生的界面不穩定現象同樣也可分為四個類型。

直徑大小約為1100  $\mu\text{m}$ 的磁性液滴在受垂直磁場的作用之下，根據實驗量測值，液滴中心處有較強的磁場強度產生，因此可由側拍畫面看見液滴中心有些許的起伏，而在邊緣處則開始形成迷宮化現象，如圖3-21(b)。當磁性液滴與溶媒逐漸混合使磁性流體的濃度下降造成所受磁力減弱並受重力影響而產生坍塌，而隨著複雜迷宮化現象逐漸往徑向方向發展，磁性流體與溶媒也有更多的混合，如圖3-21(c)、(d)、(e)及(f)。產生複雜迷宮化現象的原因主要是由於磁性流體與溶媒可互溶的緣故，使原本受垂直磁力而產生的羅森史維格結構物受到濃度降低而使磁力減弱產生坍塌，進而轉往徑向發展成為迷宮化現象。上述此種界面不穩定現象屬於第一類型。

當液滴直徑增加為2250  $\mu\text{m}$ 時其所產生的界面不穩定現象為第二類型。在磁場開啟後約0.07秒左右，由側拍畫面可看見磁性液滴形成環狀不規則的突起，如圖3-22(b)。而這些呈環狀突起的磁性流體會逐漸往液滴中央

聚集，在液滴中心附近的磁性流體則呈現凹陷狀，如圖3-22(c)。液滴中心的突出峰會產生些許的位移，在此過程當中於液滴中心附近呈凹陷處的地方會逐漸與附近的磁性流體形成完整的羅森史維格結構物，如圖3-22(d)。而此羅森史維格結構物也會受到磁力或是整體液面的影響而產生位移，上拍的畫面則可明顯看到迷宮化現象的產生，如圖3-22(e)及(f)。

當液滴直徑增加為3610  $\mu\text{m}$ ，其所產生的界面不穩定現象仍屬於第二類型。在磁場開啟後約0.1秒左右，磁性液滴形成環狀突起，相較於磁場強度較小及直徑較小的液滴有較高的環狀突起產生，如圖3-23(b)。在磁場產生後約0.26秒左右，在磁場中心產生了高度最大的羅森史維格結構物，有別於磁場中心產生高度最大的羅森史維格結構物，在其附近則呈現凹陷處，如圖3-23(c)。而這些凹陷的地方將逐漸隨垂直磁場的方向發展並逐漸往液滴中心靠近，如圖3-23(d)。當部分磁性流體逐漸往中央處靠近時，使得磁化率增加而產生了更大高度的羅森史維格結構物，其中也有部分磁性流體(例如在底部的部分)與溶媒混合使得磁化率下降而產生複雜迷宮化現象，如圖3-23(e)及(f)。

直徑增加為3830  $\mu\text{m}$ 的磁性液滴所產生的界面不穩定現象屬於第四類型。在磁場開啟後約0.1秒同樣的可看見環狀突起的產生伴隨著液滴中心的凹陷處，如圖3-24(b)。而在磁場開啟後約0.26秒左右，液滴凹陷處的地方開始形成兩三個羅森史維格結構物並且產生不規則的運動方式，而在液滴邊緣的磁性流體則產生類似輻射對稱的迷宮化現象，如圖3-24(c)及(d)。羅森史維格結構物的頂端與不可互溶的空氣接觸，因此磁化率的變化不多；相對地，底部的磁性流體則與可互溶的溶媒接觸，導致磁性流體濃度下降並造成磁化率的降低，可明顯看出液滴中央形成羅森史維格結構物與液滴底層形成迷宮化現象的兩種型態，如圖3-24(e)及(f)。

### 3-8 分析與比較

我們分析磁性流體與不可互溶液體(即甘油)，其界面不穩定現象的發展過程，可發現在磁場開啟瞬間，磁性液滴受到磁力的作用而往上發展，但因受到表面張力作用影響使其高度停留些許時間後才突破甘油液面形成羅森史維格結構物。而隨著初始直徑的增加其羅森史維格結構物的最大高度也隨之增加。當液滴直徑增加時，磁場關閉後有較大量的磁性流體停留於甘油液面上，當再度開啟磁場時，於不可互溶液體底層的磁性流體仍會再次突破甘油液面，而甘油液面上方的磁性流體則會隨著磁力線之分佈或是對流效應產生不規則之飄移。

分析不同直徑大小的磁性液滴高度隨時間的變化可得到下列特性：開啟磁場瞬間，磁性液滴因垂直磁力的作用產生往上發展的現象，但因表面張力作用而仍未突破甘油液面，而隨著磁場強度的增加可發現突破甘油液面前之高度有增加的現象。

若我們將磁性流體放置於可互溶與不可互溶的流體中(溶媒與甘油)，觀察其受垂直磁場下所產生的羅森史維格不穩定現象，可得到以下幾項特性。當磁性流體於溶媒中受垂直磁場所產生的羅森史維格不穩定現象有其特性：(a)在液滴直徑較小(約為1000  $\mu\text{m}$ )的磁性液滴會從液滴邊緣開始產生複雜迷宮化現象，液面會有些許起伏；(b)直徑較大(約2000  $\mu\text{m}$ ~2500  $\mu\text{m}$ )的磁性液滴在中心會產生單一的羅森史維格結構物，而液滴邊緣逐漸與溶媒混合的部分則產生複雜化迷宮現象；(c)直徑約為3500  $\mu\text{m}$ 的磁性液滴在初期形成多個羅森史維格結構物，隨著時間的增加將變為單一羅森史維格結構物，並伴隨著迷宮化現象的產生；(d)直徑約為4000  $\mu\text{m}$ 的磁性液滴則形成許多羅森史維格結構物並且同時產生複雜迷宮化現象。磁性流體置於甘油內受垂直磁場作用下所產生的羅森史維格結構物則有下列特性：(a)當磁場開啟時，磁性液滴受垂直磁力的作用而往上凸起，而因甘油表面張力



之作用使其產生單一之羅森史維格結構物；(b)當磁場關閉時，受垂直磁力消失之緣故使羅森史維格結構物坍塌並殘留於甘油液面上方；(c)當再度開啟磁場時，殘留於甘油液面上方的磁性流體與空氣接觸並開始分裂成許多大小相近的羅森史維格結構物，並在甘油液面上方產生飄移；(d)而在甘油層底部之磁性液滴仍產生單一的羅森史維格結構物。

磁性流體受垂直磁場所產生的界面不穩定現象受到可互溶及不可互溶液體兩者的影響。首先在不可互溶方面，在磁場消失後，部分突破甘油液面的磁性流體無法回到甘油底層，因此再度開啟磁場時，磁性流體將分成兩部分(分別為甘油表層和底層的磁性流體)，而在甘油表層的磁性流體同時與甘油和空氣接觸，在甘油底層的磁性流體則單獨只與甘油接觸；相對地，磁性流體與溶媒則因互相混合的緣故，在關閉磁場前後較無明顯的區別，這一點和不可互溶的範例有明顯的差異性。



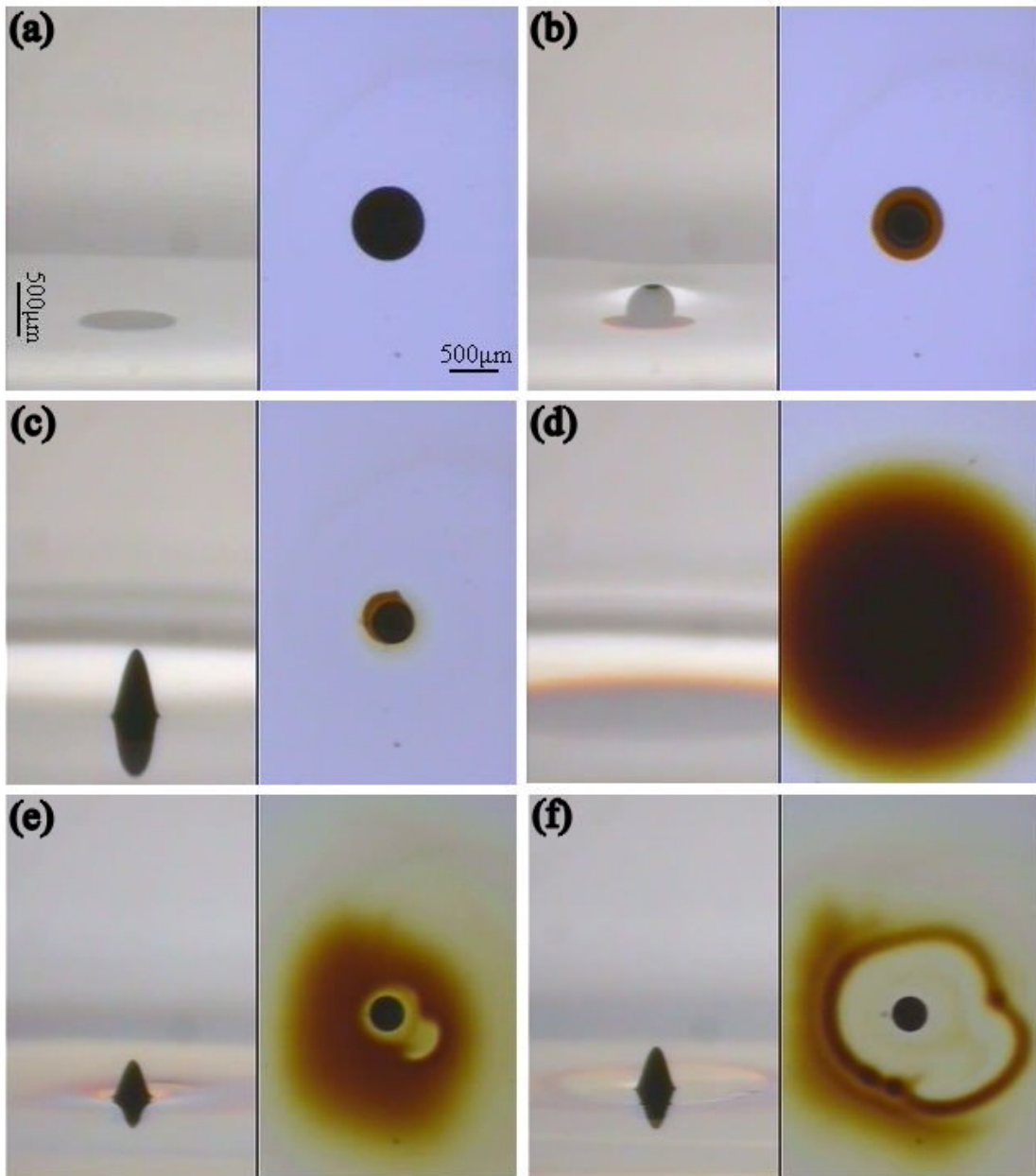


圖3-1 磁性液滴( $D=750 \mu\text{m}$ )加入不可互溶液體受到垂直磁場( $H=350 \text{ Oe}$ )所產生之羅森史維格不穩定現象。

(a) $t=0 \text{ s}$ , (b)  $t=0.2 \text{ s}$ , (c)  $t=5.2 \text{ s}$ , (d)  $t=11 \text{ s}$ , (e)  $t=16.3 \text{ s}$ , and (f)  $t=20.9 \text{ s}$

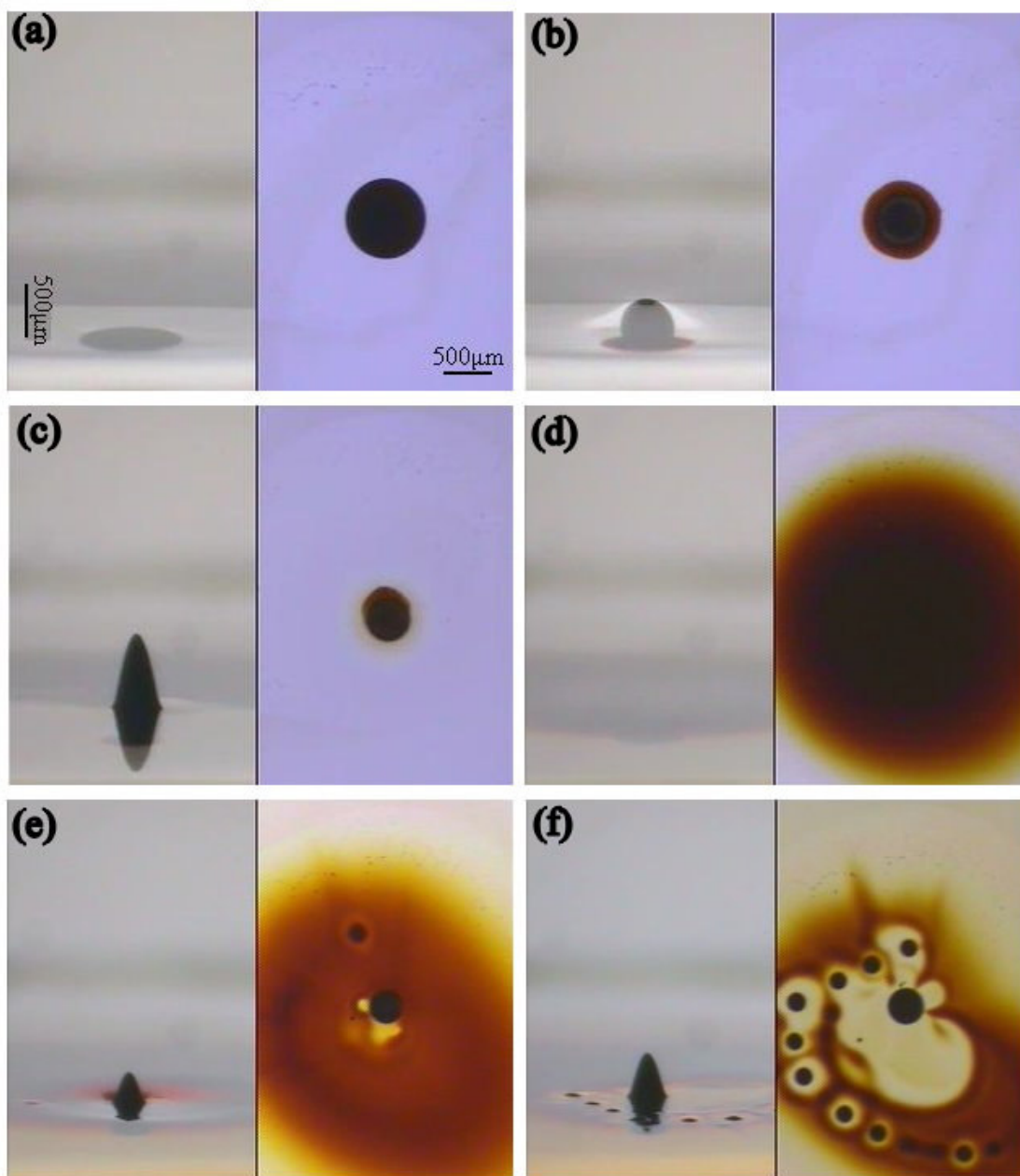


圖3-2 磁性液滴( $D=840\ \mu\text{m}$ )加入不可互溶液體受到垂直磁場( $H=350\ \text{Oe}$ )所產生之羅森史維格不穩定現象。

(a) $t=0\ \text{s}$ , (b)  $t=0.3\ \text{s}$ , (c)  $t=4\ \text{s}$ , (d)  $t=11.1\ \text{s}$ , (e)  $t=13.5\ \text{s}$ , and (f)  $t=18.3\ \text{s}$

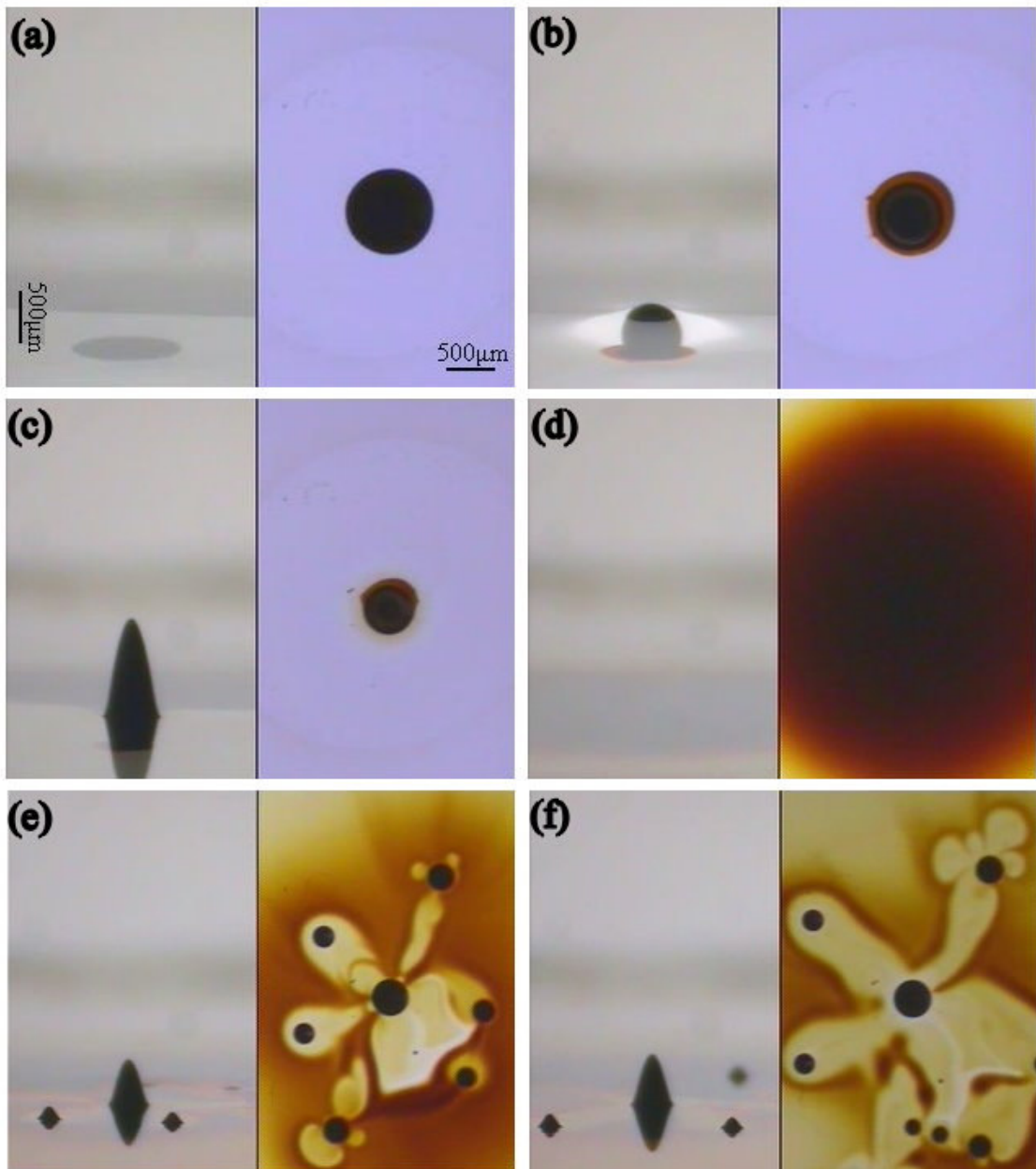


圖3-3 磁性液滴( $D=940\ \mu\text{m}$ )加入不可互溶液體受到垂直磁場( $H=350\ \text{Oe}$ )所產生之羅森史維格不穩定現象。

(a) $t=0\ \text{s}$ , (b)  $t=0.5\ \text{s}$ , (c)  $t=6.4\ \text{s}$ , (d)  $t=11.2\ \text{s}$ , (e)  $t=16.2\ \text{s}$ , and (f)  $t=21.6\ \text{s}$

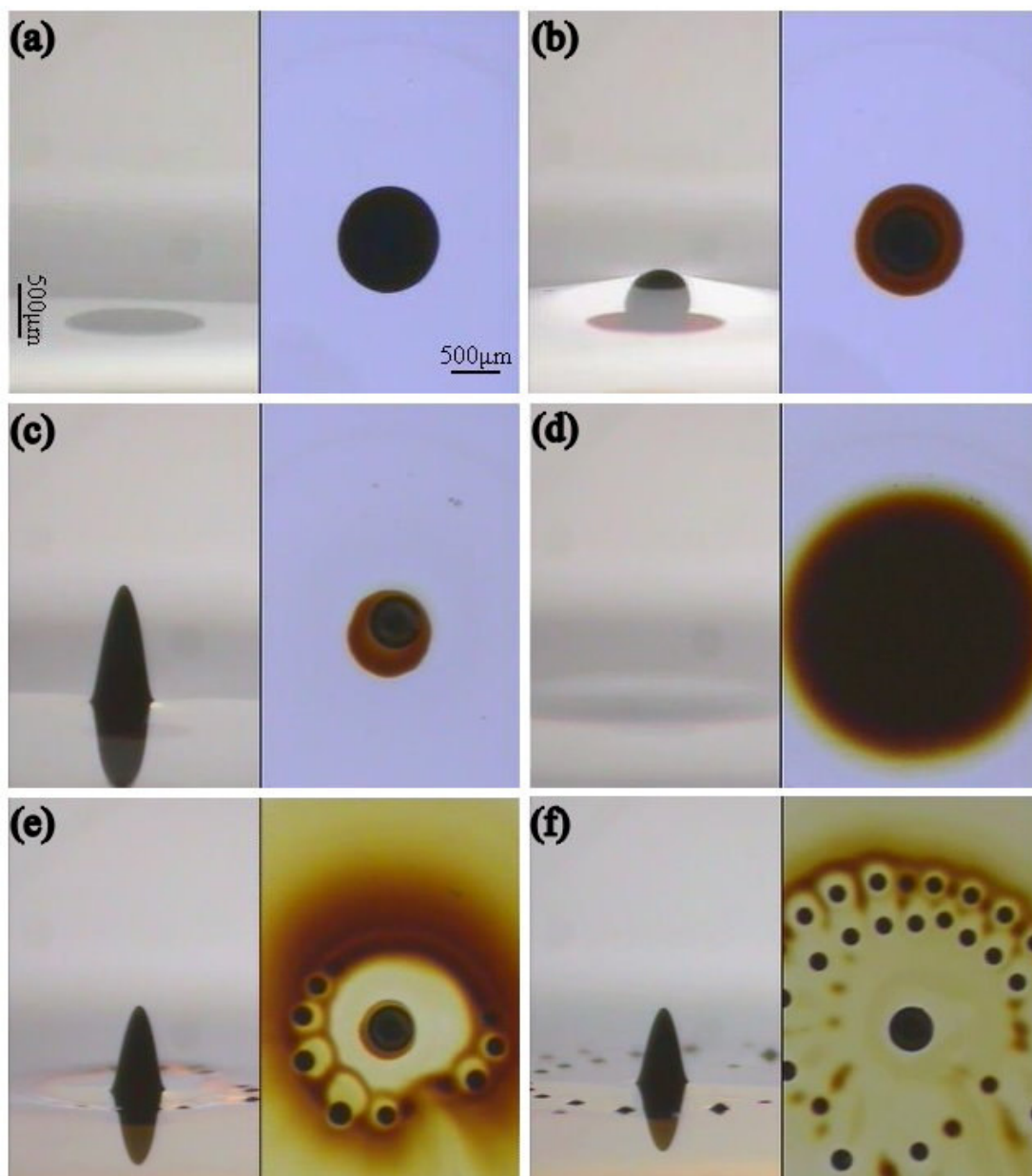


圖3-4 磁性液滴( $D=1060 \mu\text{m}$ )加入不可互溶液體受到垂直磁場( $H=350 \text{ Oe}$ )所產生之羅森史維格不穩定現象。

(a)  $t=0 \text{ s}$ , (b)  $t=0.3 \text{ s}$ , (c)  $t=5.2 \text{ s}$ , (d)  $t=10.5 \text{ s}$ , (e)  $t=15.6 \text{ s}$ , and (f)  $t=20.7 \text{ s}$

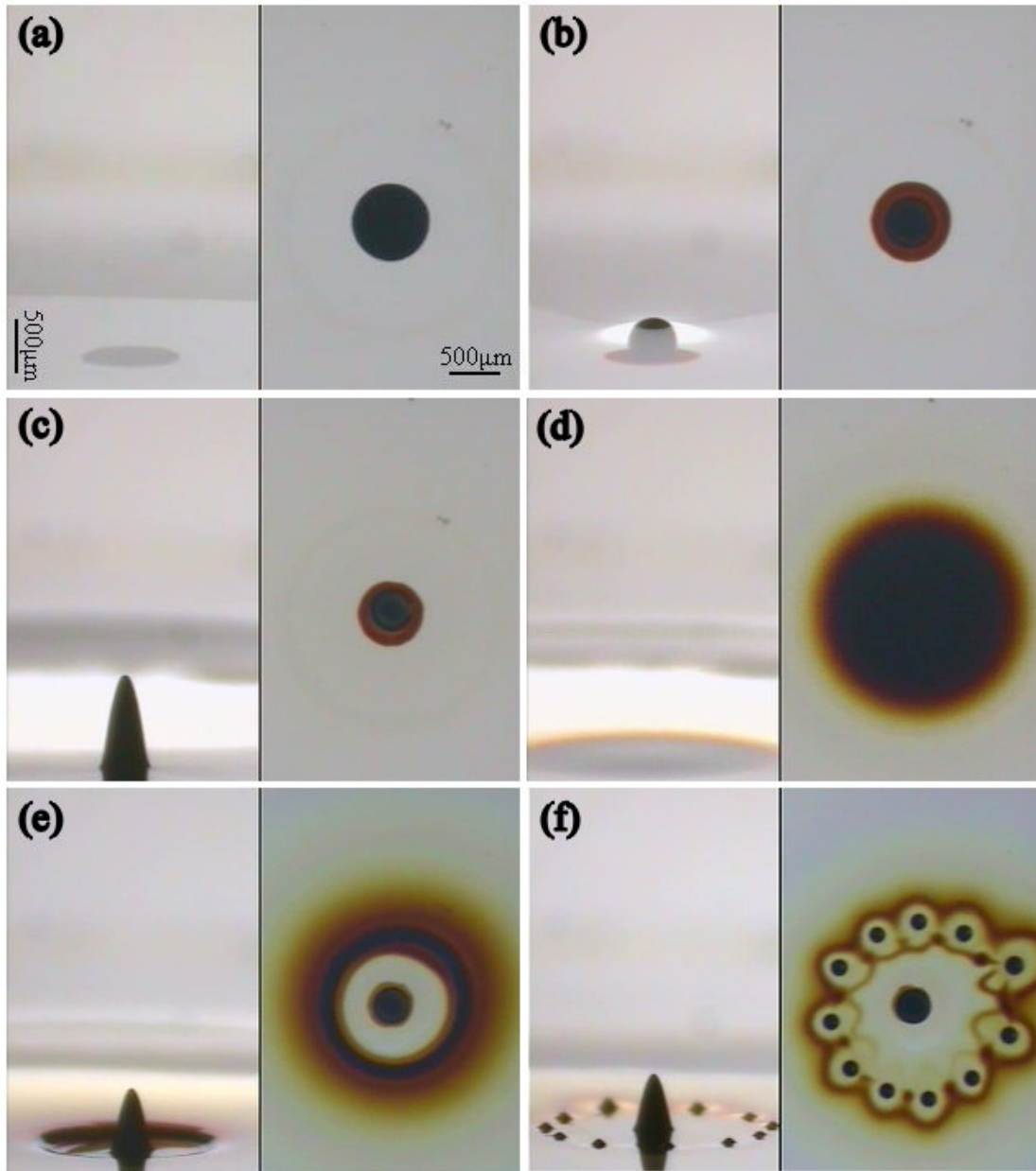


圖3-5 磁性液滴( $D=780\ \mu\text{m}$ )加入不可互溶液體受到垂直磁場( $H=440\ \text{Oe}$ )所產生之羅森史維格不穩定現象。

(a) $t=0\ \text{s}$ , (b)  $t=0.8\ \text{s}$ , (c)  $t=4.4\ \text{s}$ , (d)  $t=10.6\ \text{s}$ , (e)  $t=15.3\ \text{s}$ , and (f)  $t=18.5\ \text{s}$

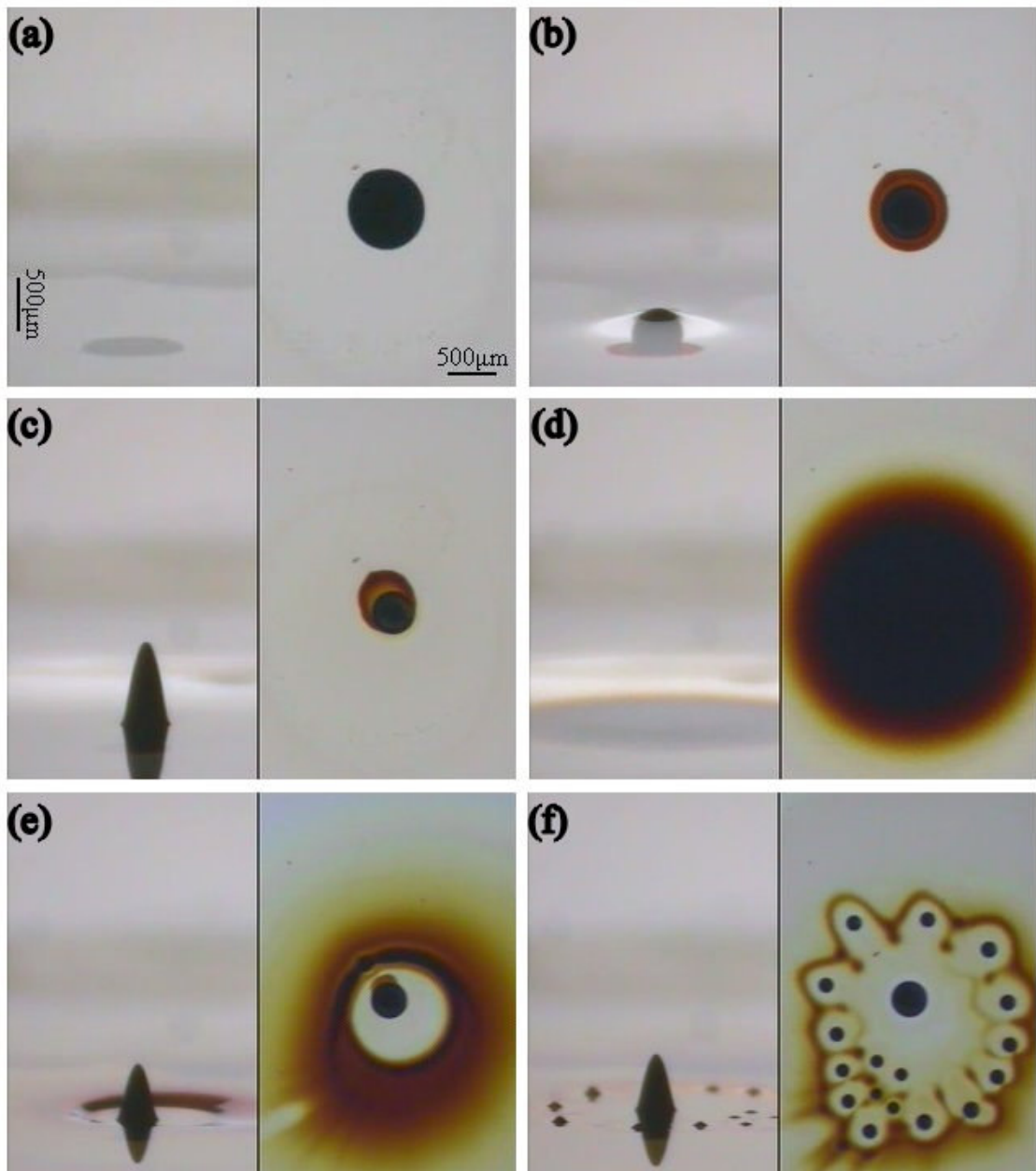


圖3-6 磁性液滴( $D=790\ \mu\text{m}$ )加入不可互溶液體受到垂直磁場( $H=440\ \text{Oe}$ )所產生之羅森史維格不穩定現象。

(a) $t=0\ \text{s}$ , (b)  $t=0.5\ \text{s}$ , (c)  $t=5.2\ \text{s}$ , (d)  $t=10.7\ \text{s}$ , (e)  $t=14.7\ \text{s}$ , and (f)  $t=19.3\ \text{s}$

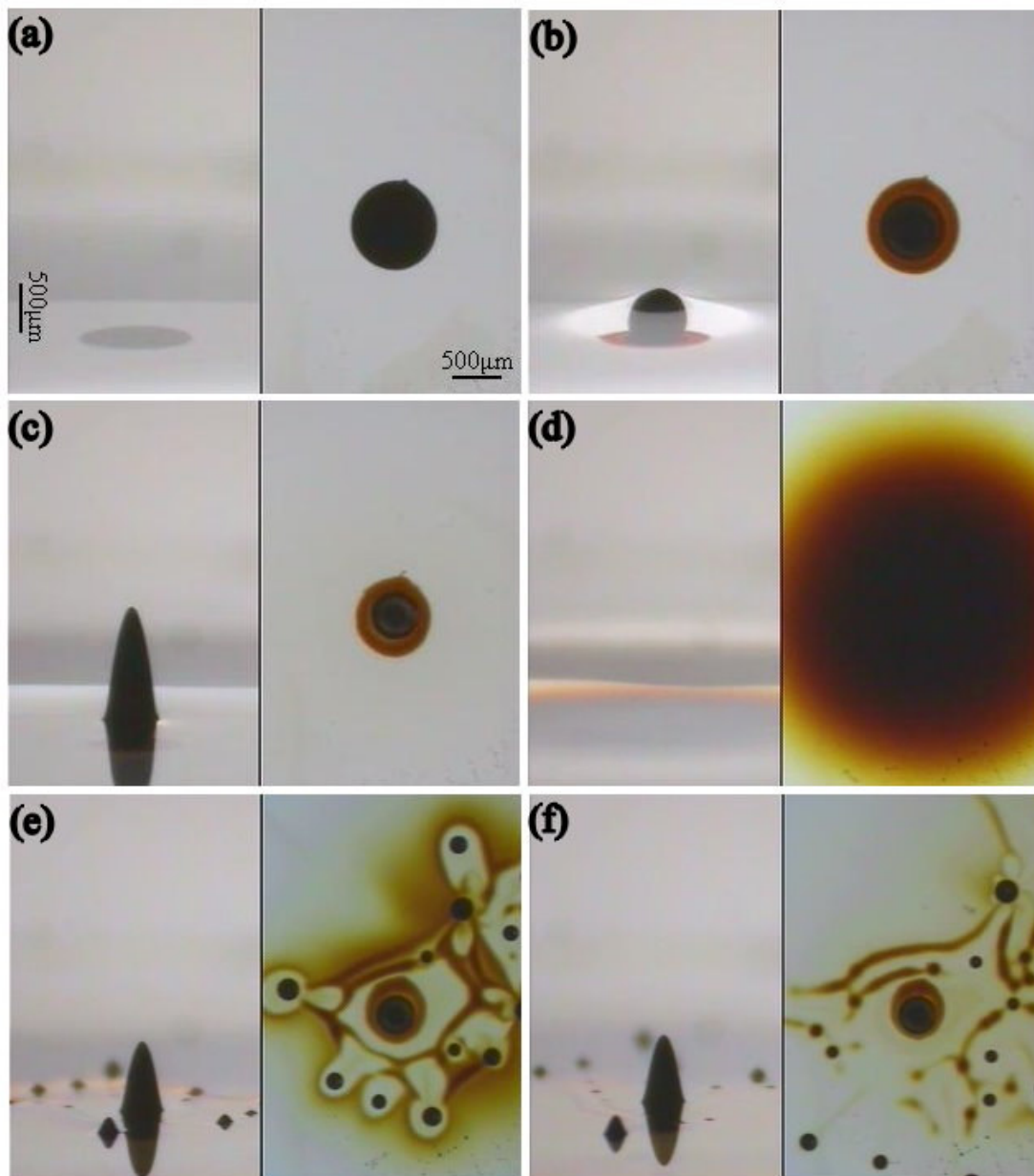


圖3-7 磁性液滴( $D=900\ \mu\text{m}$ )加入不可互溶液體受到垂直磁場( $H=440\ \text{Oe}$ )所產生之羅森史維格不穩定現象。

(a) $t=0\ \text{s}$ , (b)  $t=0.9\ \text{s}$ , (c)  $t=6.1\ \text{s}$ , (d)  $t=11.4\ \text{s}$ , (e)  $t=16.6\ \text{s}$ , and (f)  $t=21.2\ \text{s}$



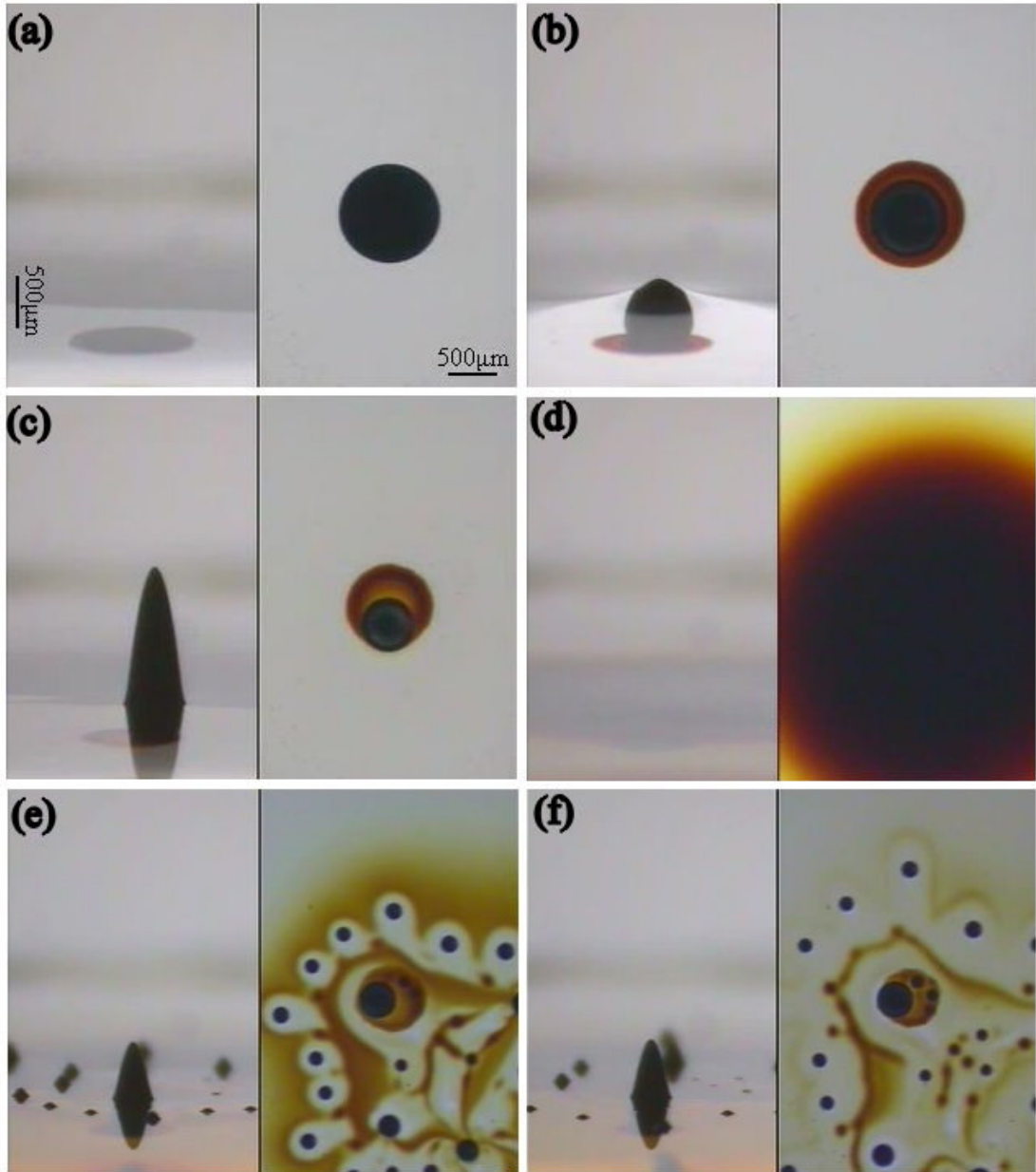


圖3-8 磁性液滴( $D=1050\ \mu\text{m}$ )加入不可互溶液體受到垂直磁場( $H=440\ \text{Oe}$ )所產生之羅森史維格不穩定現象。

(a) $t=0\ \text{s}$ , (b)  $t=0.9\ \text{s}$ , (c)  $t=6.5\ \text{s}$ , (d)  $t=11.6\ \text{s}$ , (e)  $t=16.4\ \text{s}$ , and (f)  $t=22\ \text{s}$

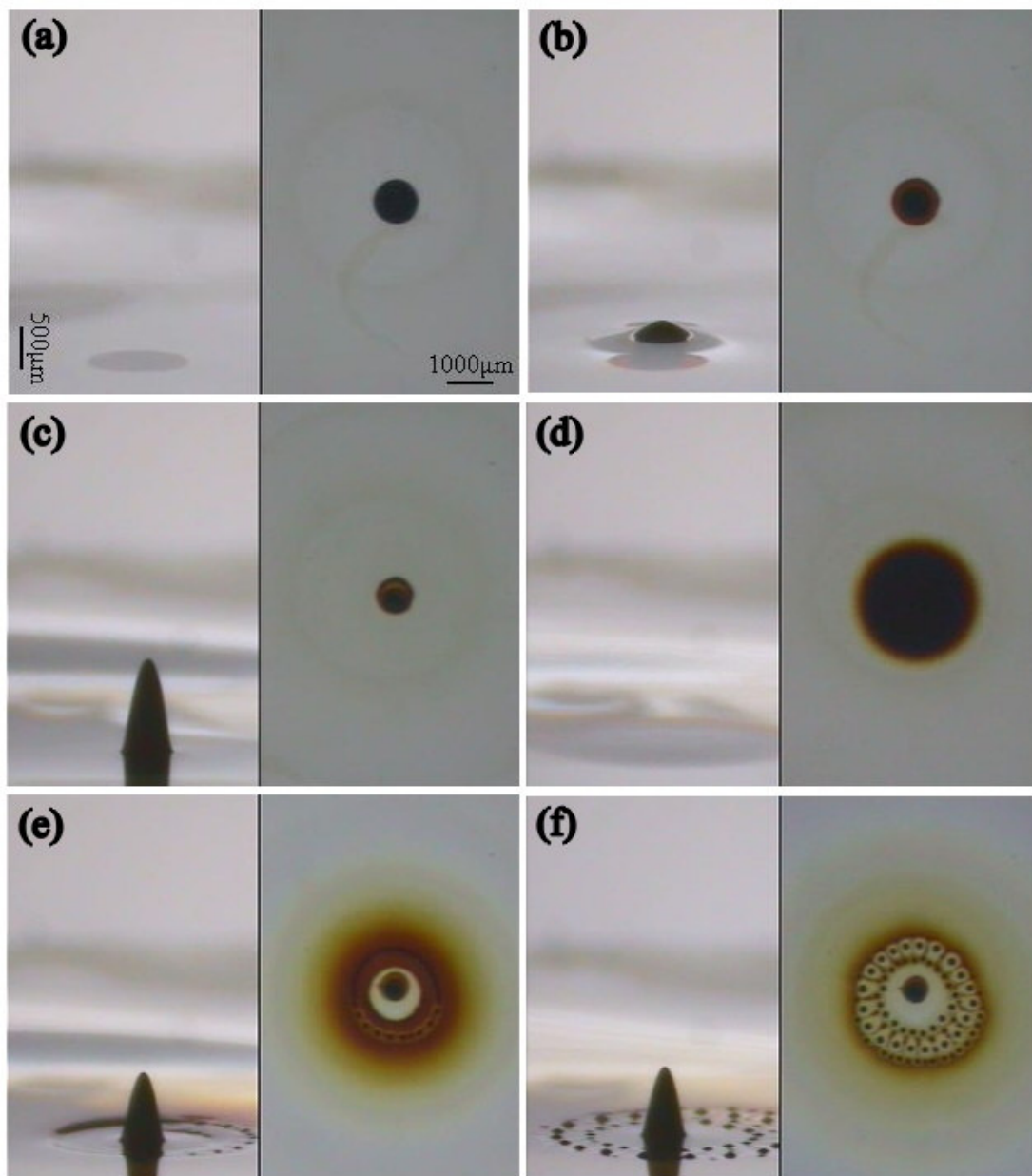


圖3-9 磁性液滴( $D=930\ \mu\text{m}$ )加入不可互溶液體受到垂直磁場( $H=510\ \text{Oe}$ )所產生之羅森史維格不穩定現象。

(a) $t=0\ \text{s}$ , (b)  $t=0.7\ \text{s}$ , (c)  $t=4.7\ \text{s}$ , (d)  $t=10.5\ \text{s}$ , (e)  $t=13\ \text{s}$ , and (f)  $t=15.4\ \text{s}$

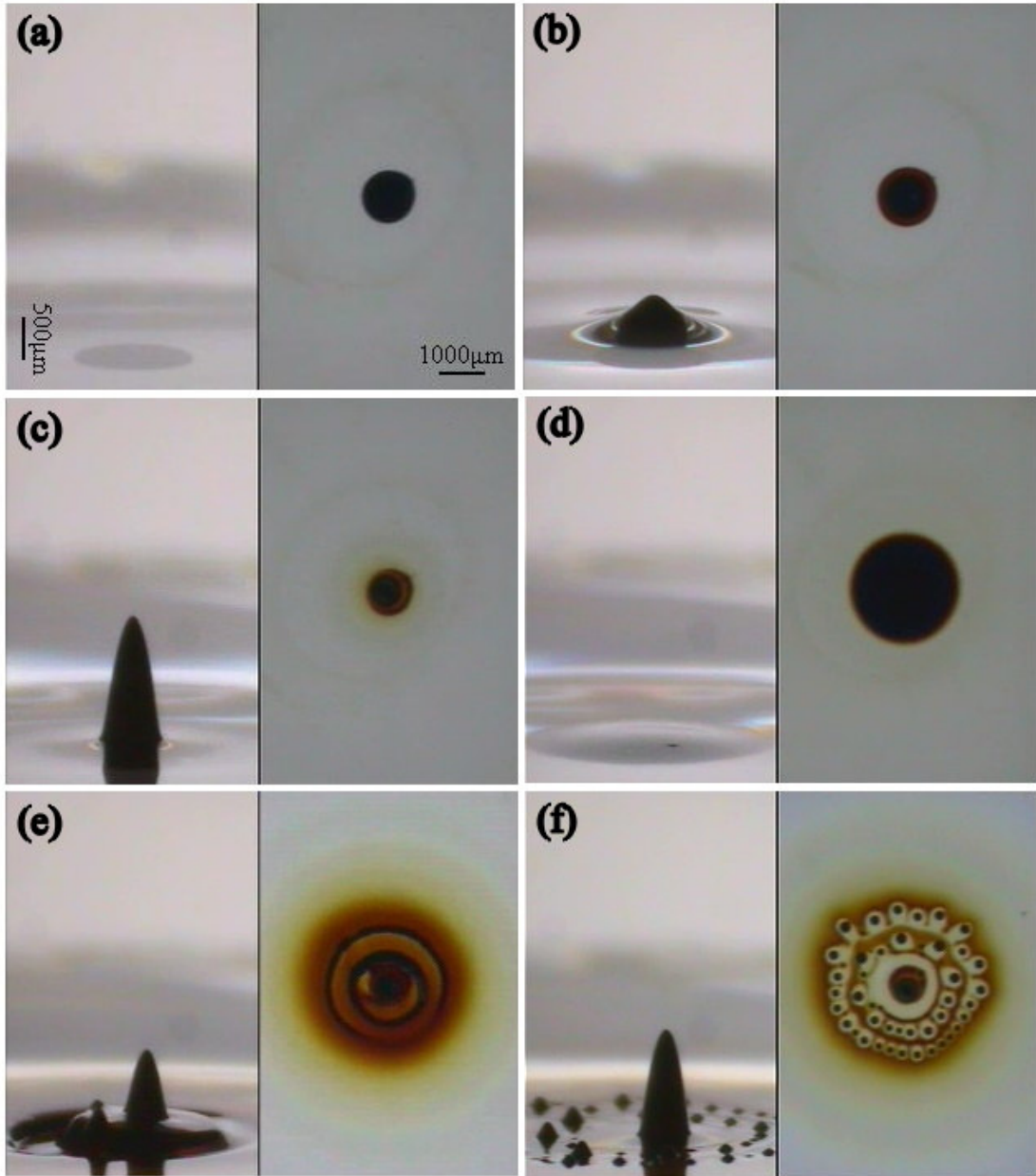


圖3-10 磁性液滴( $D=1120\ \mu\text{m}$ )加入不可互溶液體受到垂直磁場( $H=510\ \text{Oe}$ )所產生之羅森史維格不穩定現象。

(a) $t=0\ \text{s}$ , (b)  $t=0.6\ \text{s}$ , (c)  $t=6.2\ \text{s}$ , (d)  $t=10.4\ \text{s}$ , (e)  $t=12.3\ \text{s}$ , and (f)  $t=14.2\ \text{s}$

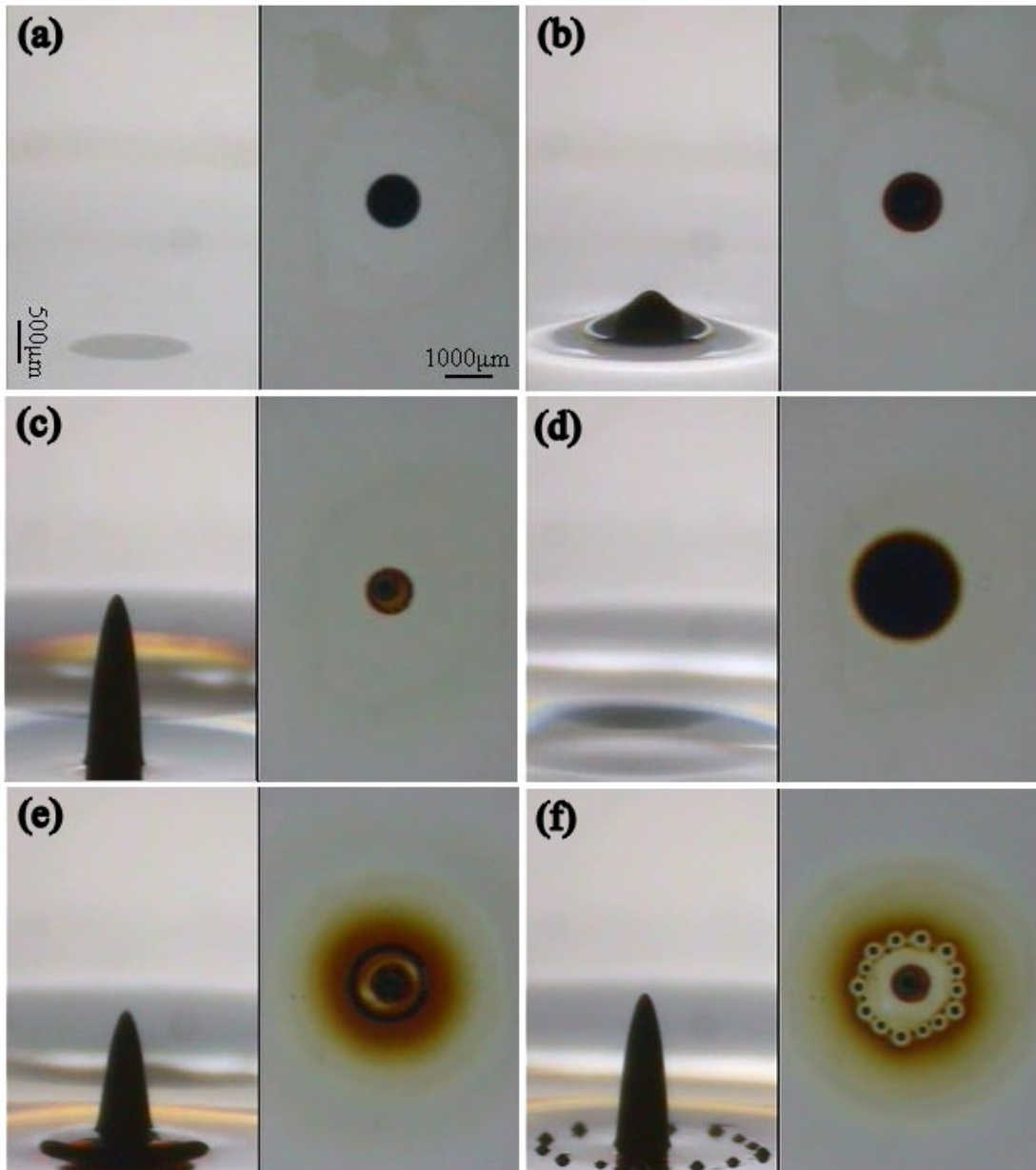


圖3-11 磁性液滴( $D=1140 \mu\text{m}$ )加入不可互溶液體受到垂直磁場( $H=510 \text{ Oe}$ )所產生之羅森史維格不穩定現象。

(a)  $t=0 \text{ s}$ , (b)  $t=0.7 \text{ s}$ , (c)  $t=5.4 \text{ s}$ , (d)  $t=10.5 \text{ s}$ , (e)  $t=12.4 \text{ s}$ , and (f)  $t=14.3 \text{ s}$

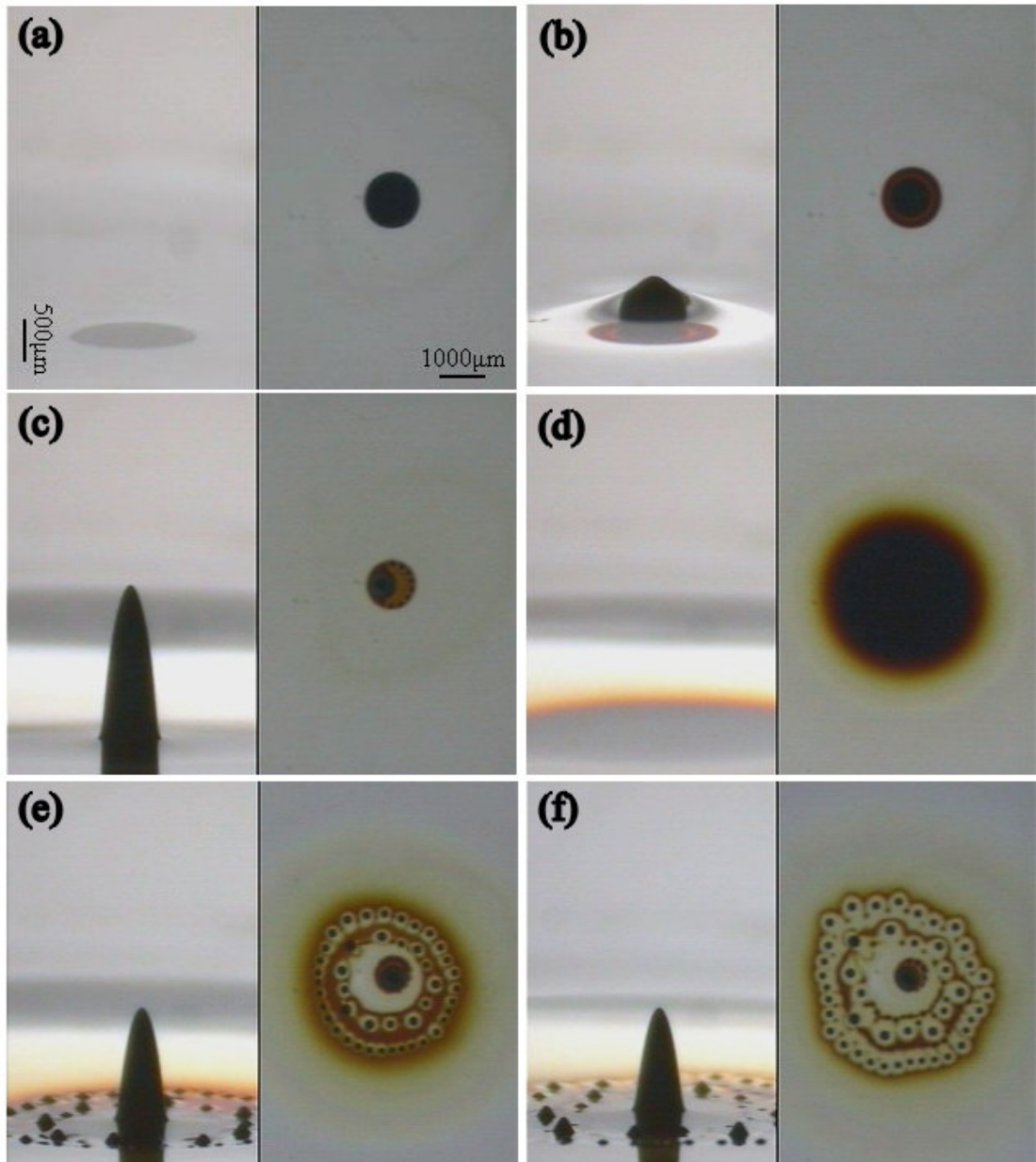


圖3-12 磁性液滴( $D=1190\ \mu\text{m}$ )加入不可互溶液體受到垂直磁場( $H=510\ \text{Oe}$ )所產生之羅森史維格不穩定現象。

(a) $t=0\ \text{s}$ , (b)  $t=0.8\ \text{s}$ , (c)  $t=4.6\ \text{s}$ , (d)  $t=11.4\ \text{s}$ , (e)  $t=13.6\ \text{s}$ , and (f)  $t=16.2\ \text{s}$

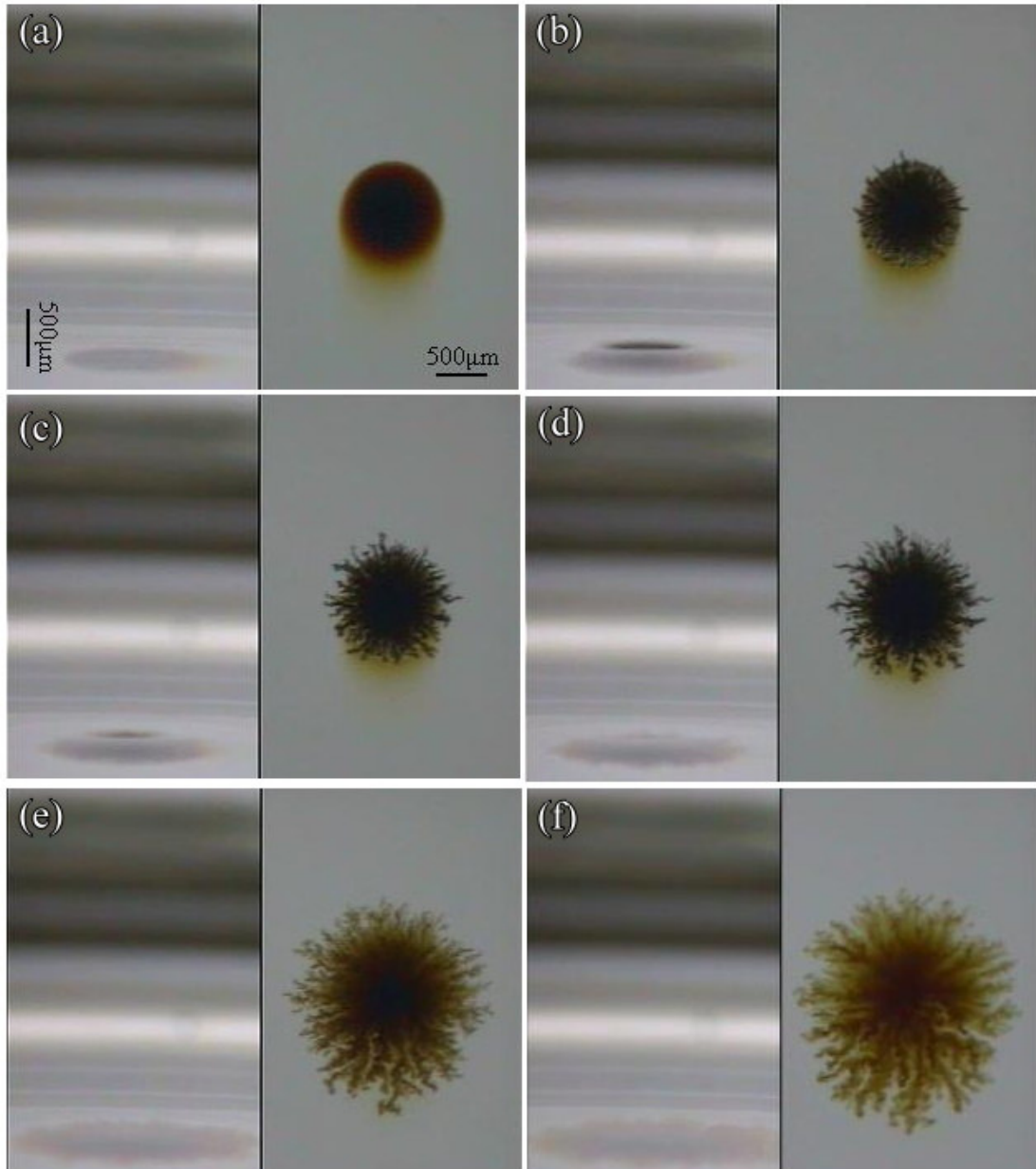


圖3-13 磁性液滴( $D=1080\ \mu\text{m}$ )加入可互溶液體受到垂直磁場( $H=350\ \text{Oe}$ )

所產生之第一類羅森史維格不穩定現象。

(a) $t=0\ \text{s}$ , (b)  $t=0.1\ \text{s}$ , (c)  $t=0.2\ \text{s}$ , (d)  $t=0.4\ \text{s}$ , (e)  $t=3\ \text{s}$ , and (f)  $t=8\ \text{s}$

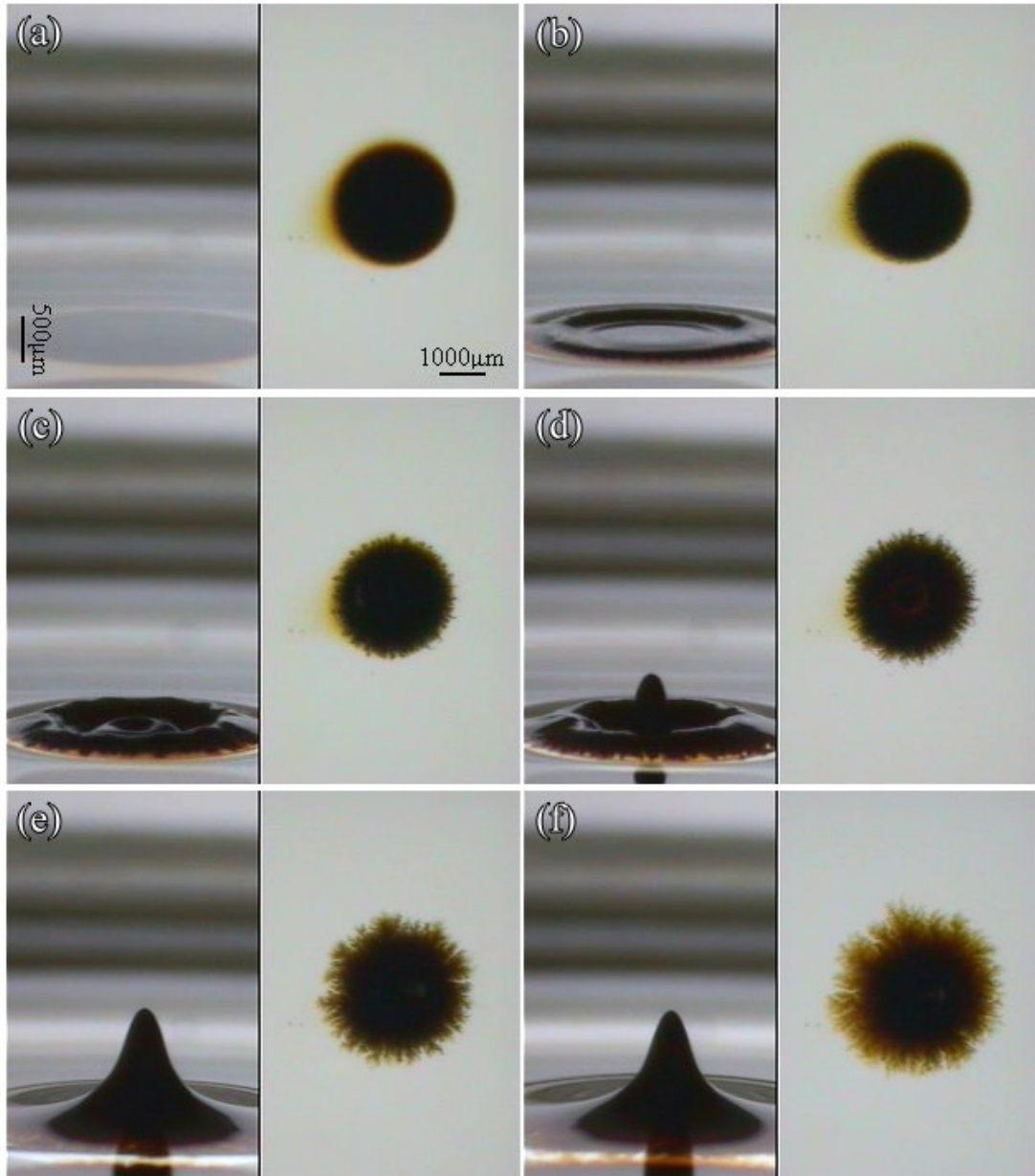


圖3-14 磁性液滴( $D=2560 \mu\text{m}$ )加入可互溶液體受到垂直磁場( $H=350 \text{ Oe}$ )

所產生之第二類羅森史維格不穩定現象。

(a) $t=0 \text{ s}$ , (b)  $t=0.06 \text{ s}$ , (c)  $t=0.1 \text{ s}$ , (d)  $t=0.2 \text{ s}$ , (e)  $t=3 \text{ s}$ , and (f)  $t=8 \text{ s}$

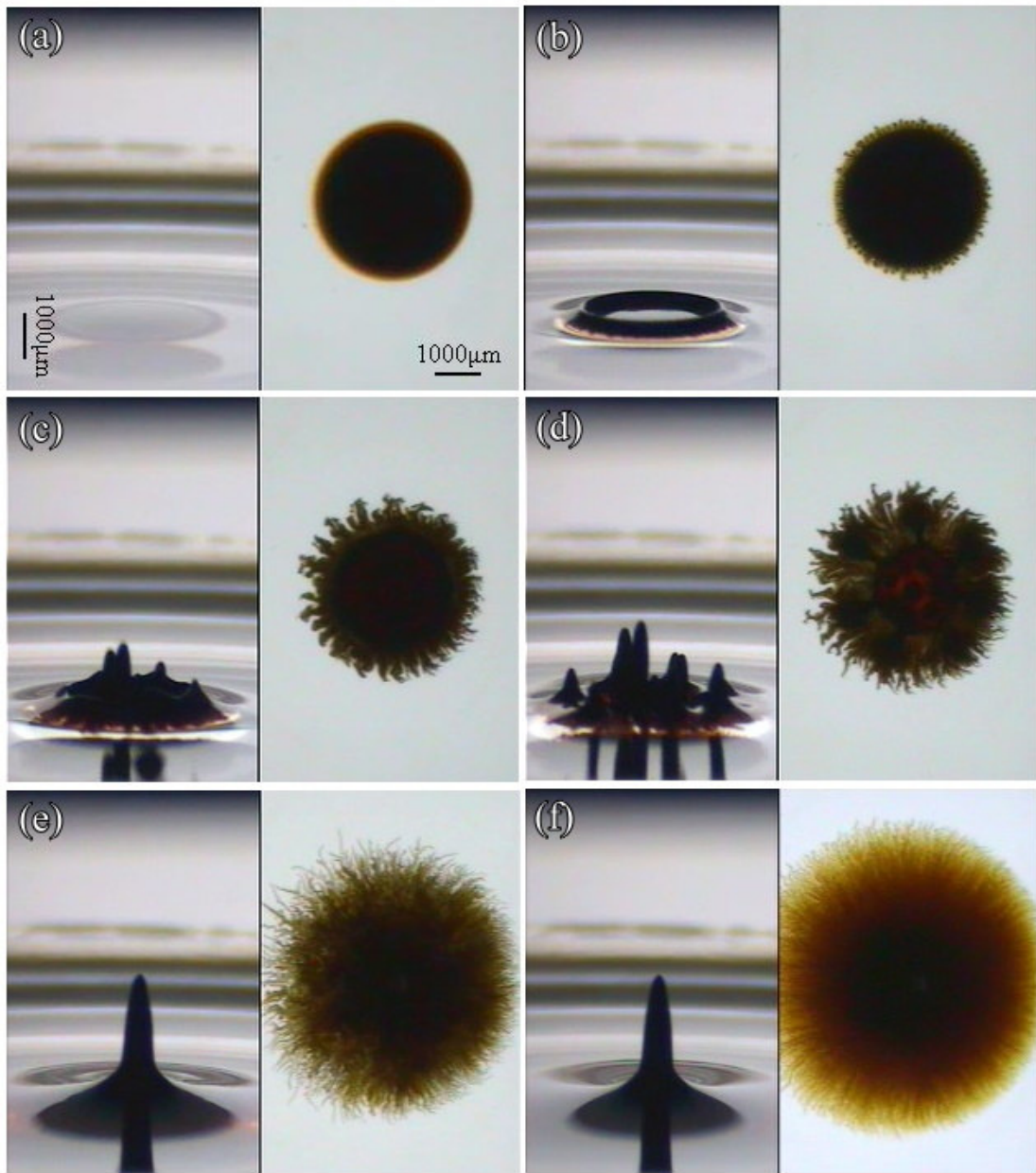


圖3-15 磁性液滴( $D=3410 \mu\text{m}$ )加入可互溶液體受到垂直磁場( $H=350 \text{ Oe}$ )

所產生之第三類羅森史維格不穩定現象。

(a) $t=0 \text{ s}$ , (b)  $t=0.1 \text{ s}$ , (c)  $t=0.5 \text{ s}$ , (d)  $t=1 \text{ s}$ , (e)  $t=3 \text{ s}$ , and (f)  $t=8 \text{ s}$



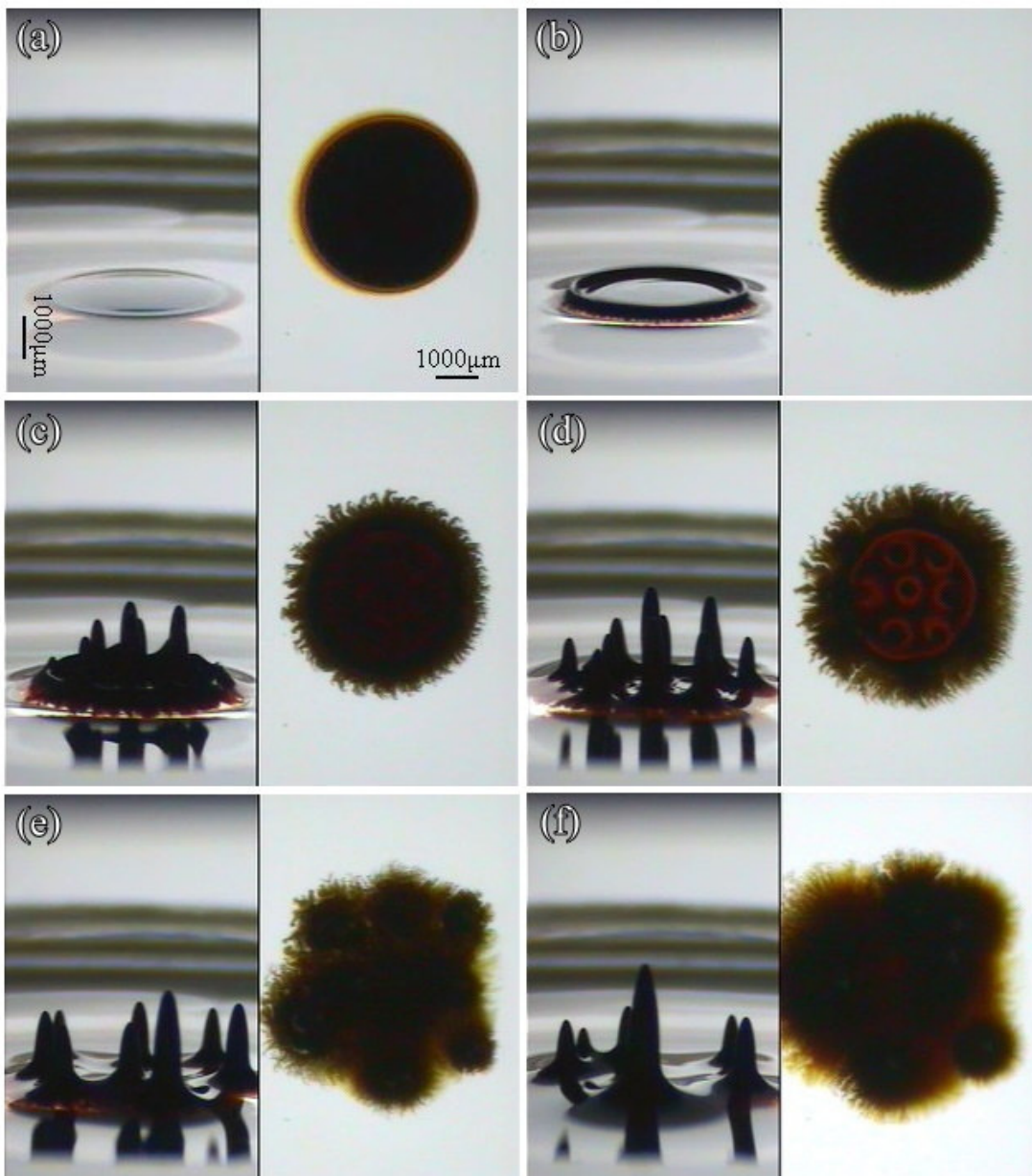


圖3-16 磁性液滴( $D=3980 \mu\text{m}$ )加入可互溶液體受到垂直磁場( $H=350 \text{ Oe}$ )

所產生之第四類羅森史維格不穩定現象。

(a) $t=0 \text{ s}$ , (b)  $t=0.1 \text{ s}$ , (c)  $t=0.5 \text{ s}$ , (d)  $t=1 \text{ s}$ , (e)  $t=3 \text{ s}$ , and (f)  $t=8 \text{ s}$

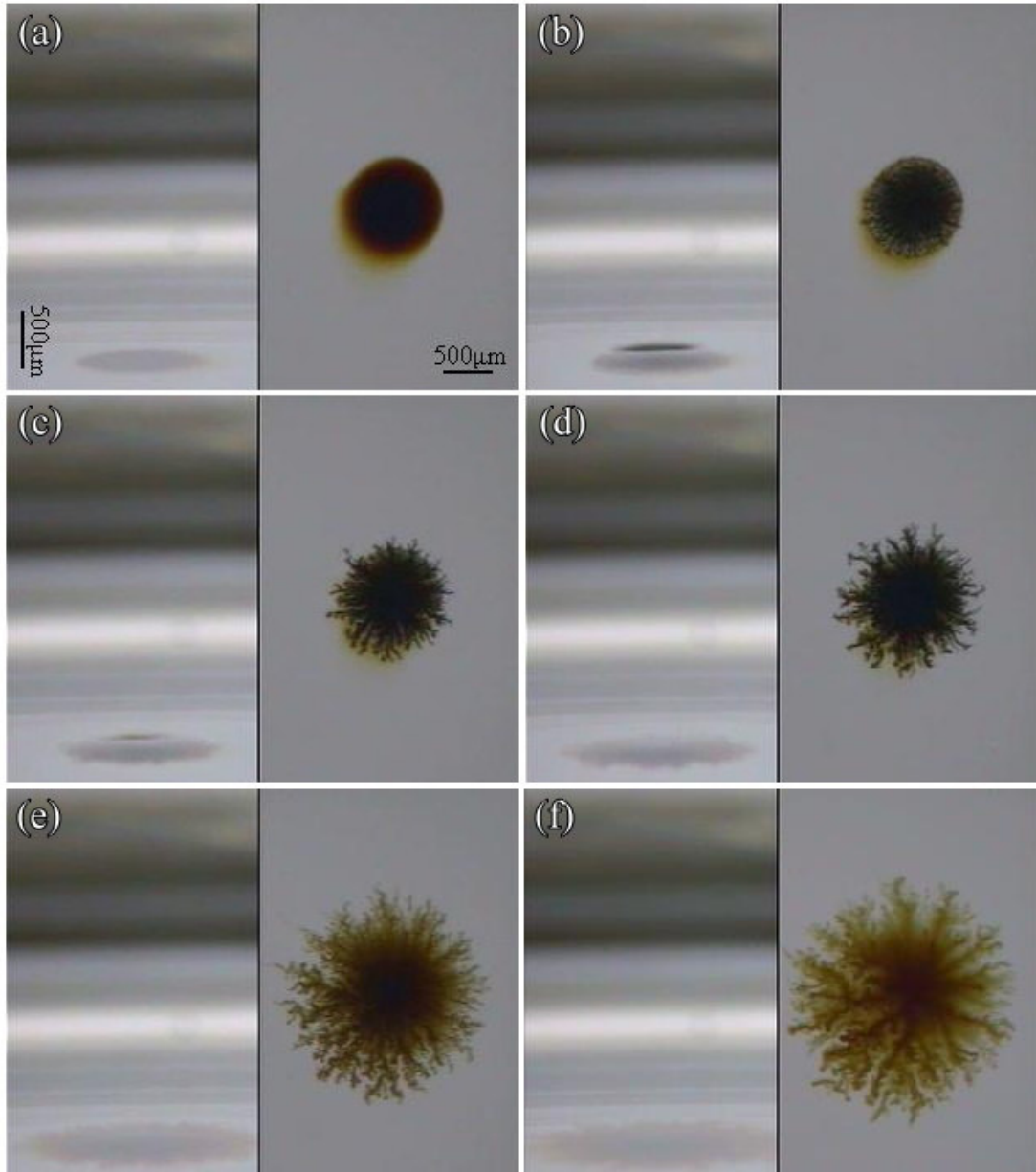


圖3-17 磁性液滴( $D=1000\ \mu\text{m}$ )加入可互溶液體受到垂直磁場( $H=440\ \text{Oe}$ )

所產生之第一類羅森史維格不穩定現象。

(a) $t=0\ \text{s}$ , (b)  $t=0.1\ \text{s}$ , (c)  $t=0.2\ \text{s}$ , (d)  $t=0.4\ \text{s}$ , (e)  $t=3\ \text{s}$ , and (f)  $t=8\ \text{s}$

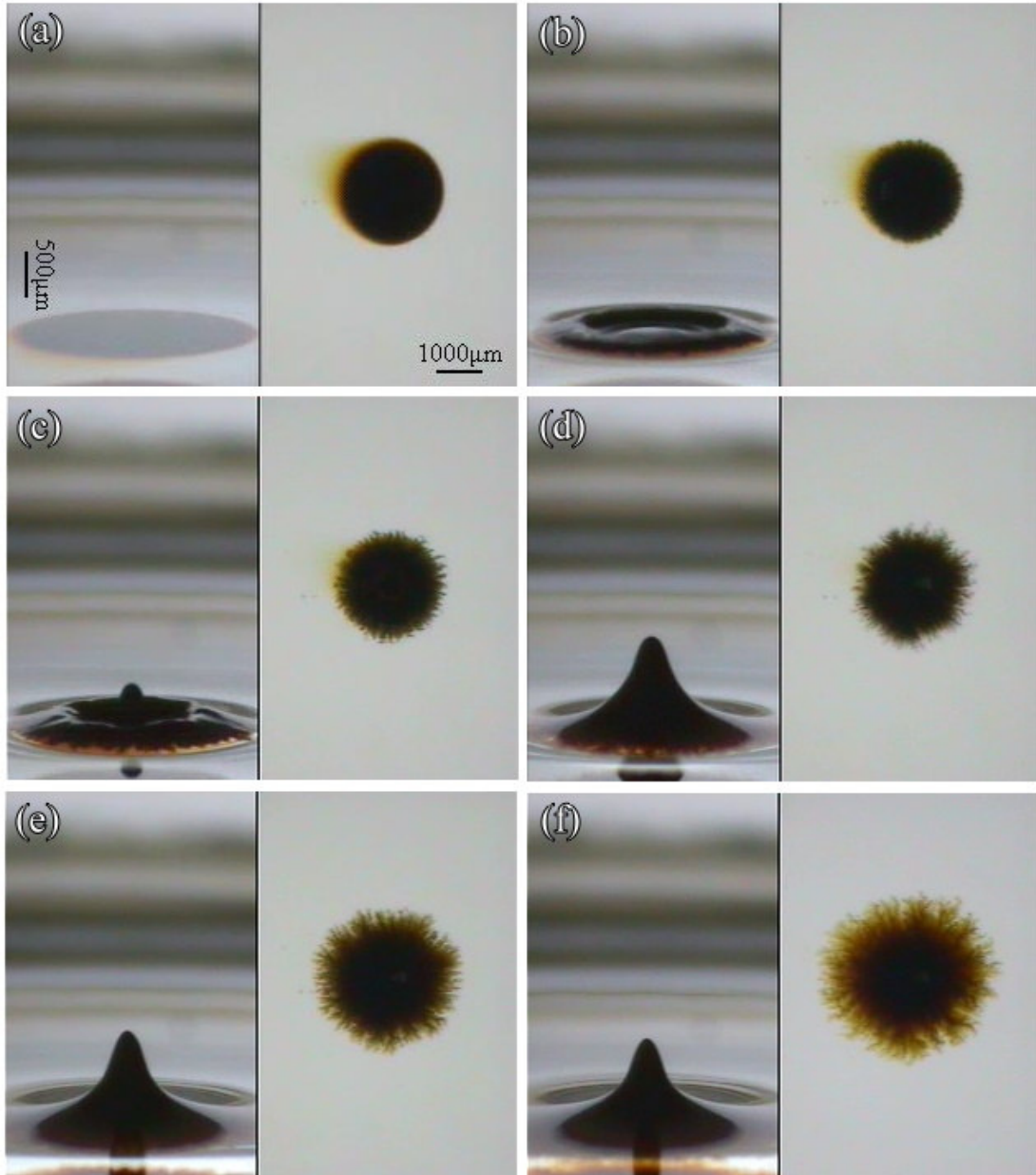


圖3-18 磁性液滴( $D=2240\ \mu\text{m}$ )加入可互溶液體受到垂直磁場( $H=440\ \text{Oe}$ )

所產生之第二類羅森史維格不穩定現象。

(a) $t=0\ \text{s}$ , (b)  $t=0.07\ \text{s}$ , (c)  $t=0.1\ \text{s}$ , (d)  $t=0.4\ \text{s}$ , (e)  $t=3\ \text{s}$ , and (f)  $t=8\ \text{s}$

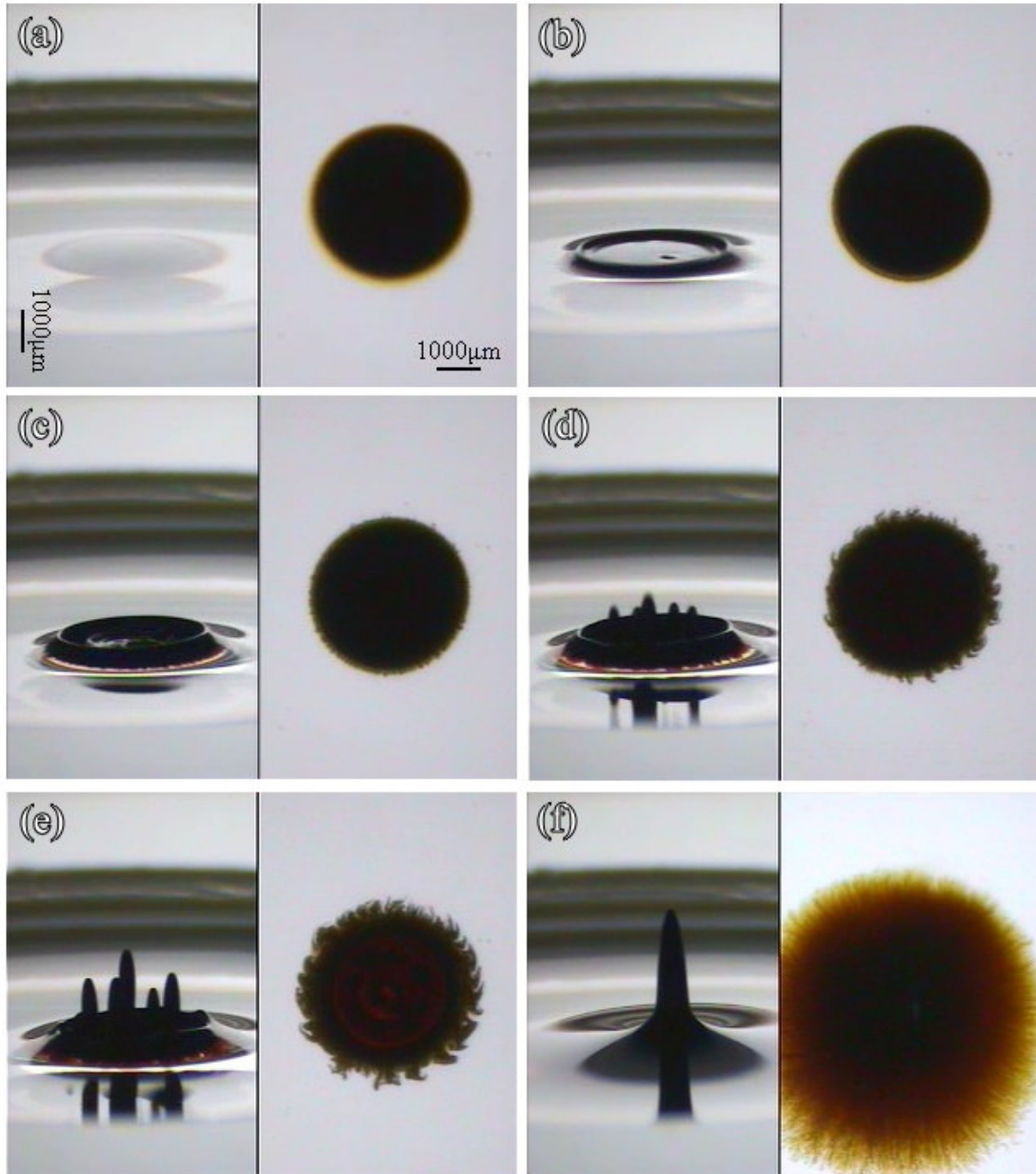


圖3-19 磁性液滴( $D=3460 \mu\text{m}$ )加入可互溶液體受到垂直磁場( $H=440 \text{ Oe}$ )

所產生之第三類羅森史維格不穩定現象。

(a) $t=0 \text{ s}$ , (b)  $t=0.07 \text{ s}$ , (c)  $t=0.1 \text{ s}$ , (d)  $t=0.2 \text{ s}$ , (e)  $t=0.4 \text{ s}$ , and (f)  $t=8 \text{ s}$

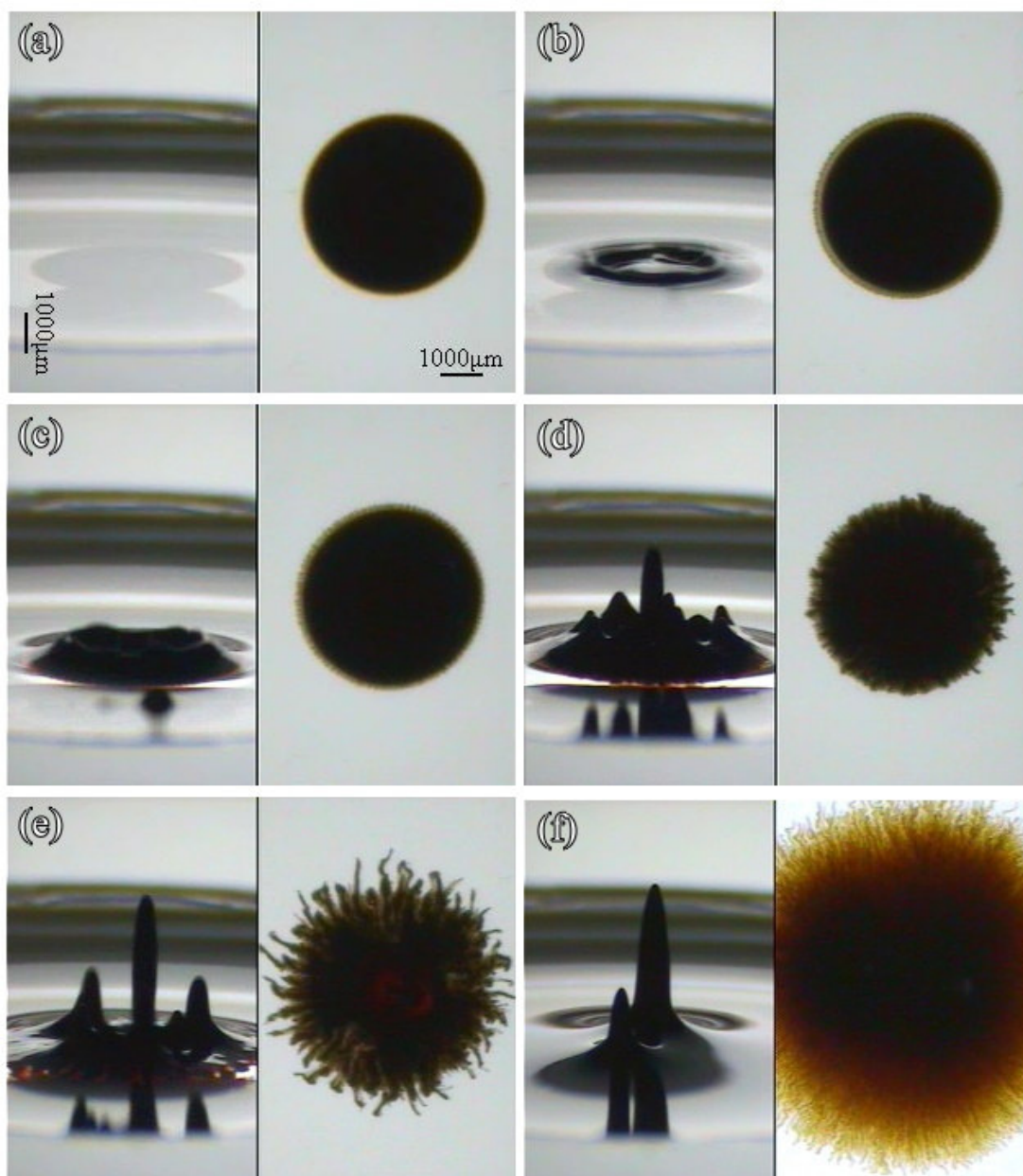


圖3-20 磁性液滴( $D=4070 \mu\text{m}$ )加入可互溶液體受到垂直磁場( $H=440 \text{ Oe}$ )

所產生之第四類羅森史維格不穩定現象。

(a) $t=0 \text{ s}$ , (b)  $t=0.07 \text{ s}$ , (c)  $t=0.1 \text{ s}$ , (d)  $t=0.23 \text{ s}$ , (e)  $t=0.4 \text{ s}$ , and (f)  $t=8 \text{ s}$

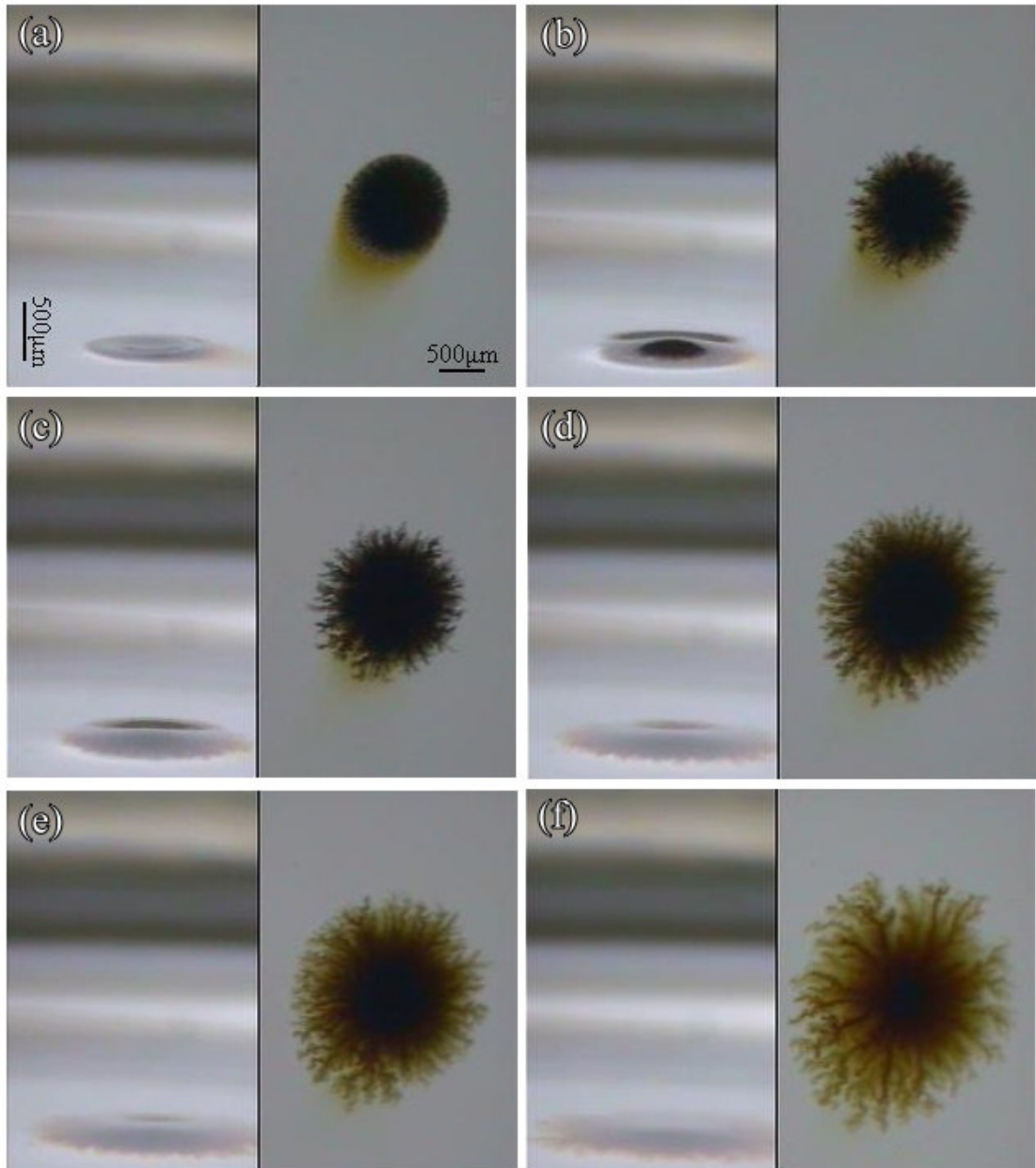


圖3-21 磁性液滴( $D=1100\ \mu\text{m}$ )加入可互溶液體受到垂直磁場( $H=510\ \text{Oe}$ )

所產生之第一類羅森史維格不穩定現象。

(a) $t=0\ \text{s}$ , (b)  $t=0.1\ \text{s}$ , (c)  $t=0.4\ \text{s}$ , (d)  $t=1.6\ \text{s}$ , (e)  $t=3\ \text{s}$ , and (f)  $t=8\ \text{s}$

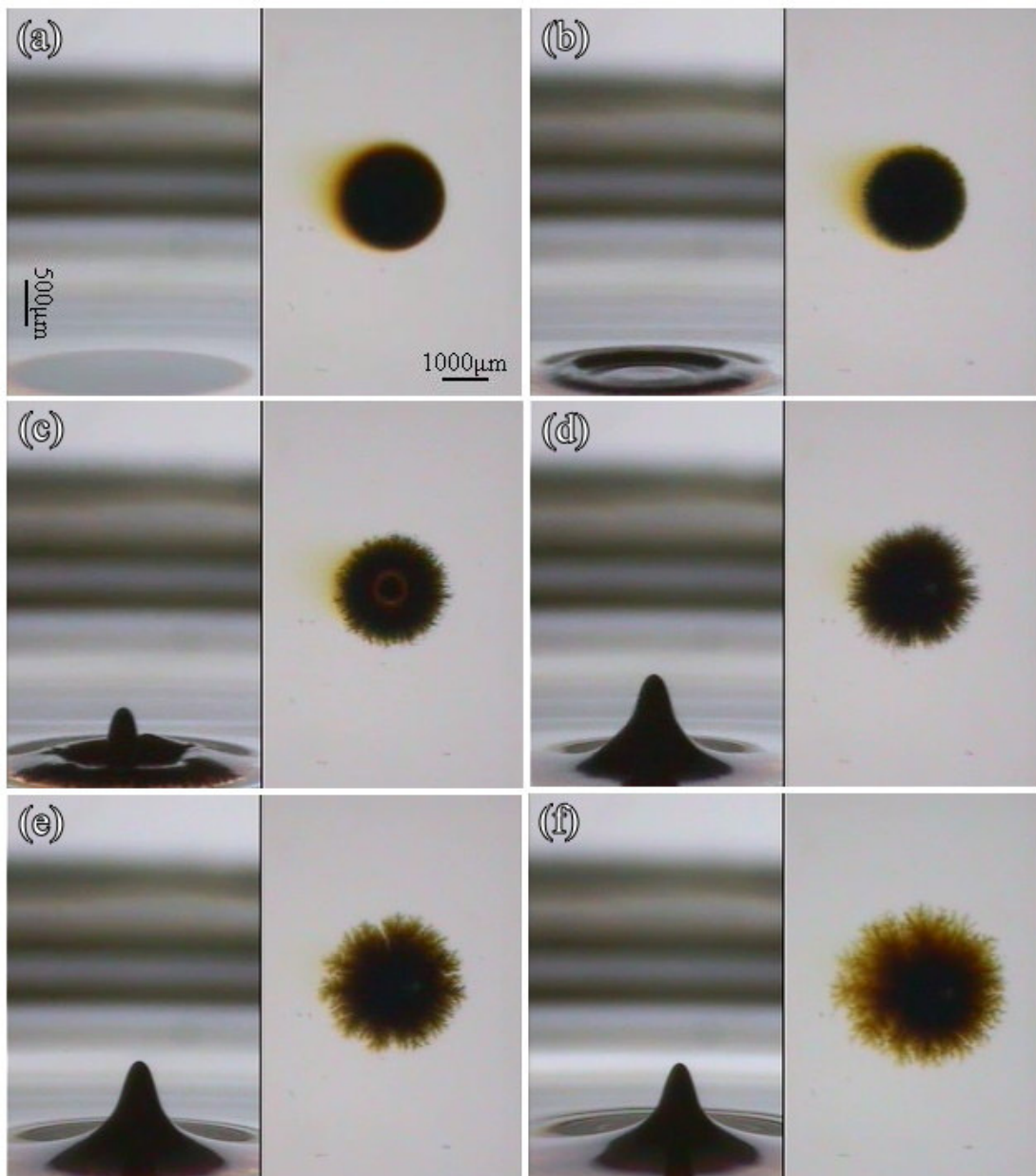


圖3-22 磁性液滴( $D=2250 \mu\text{m}$ )加入可互溶液體受到垂直磁場( $H=510 \text{ Oe}$ )

所產生之第二類羅森史維格不穩定現象。

(a) $t=0 \text{ s}$ , (b)  $t=0.07 \text{ s}$ , (c)  $t=0.13 \text{ s}$ , (d)  $t=0.37 \text{ s}$ , (e)  $t=3 \text{ s}$ , and (f)  $t=8 \text{ s}$

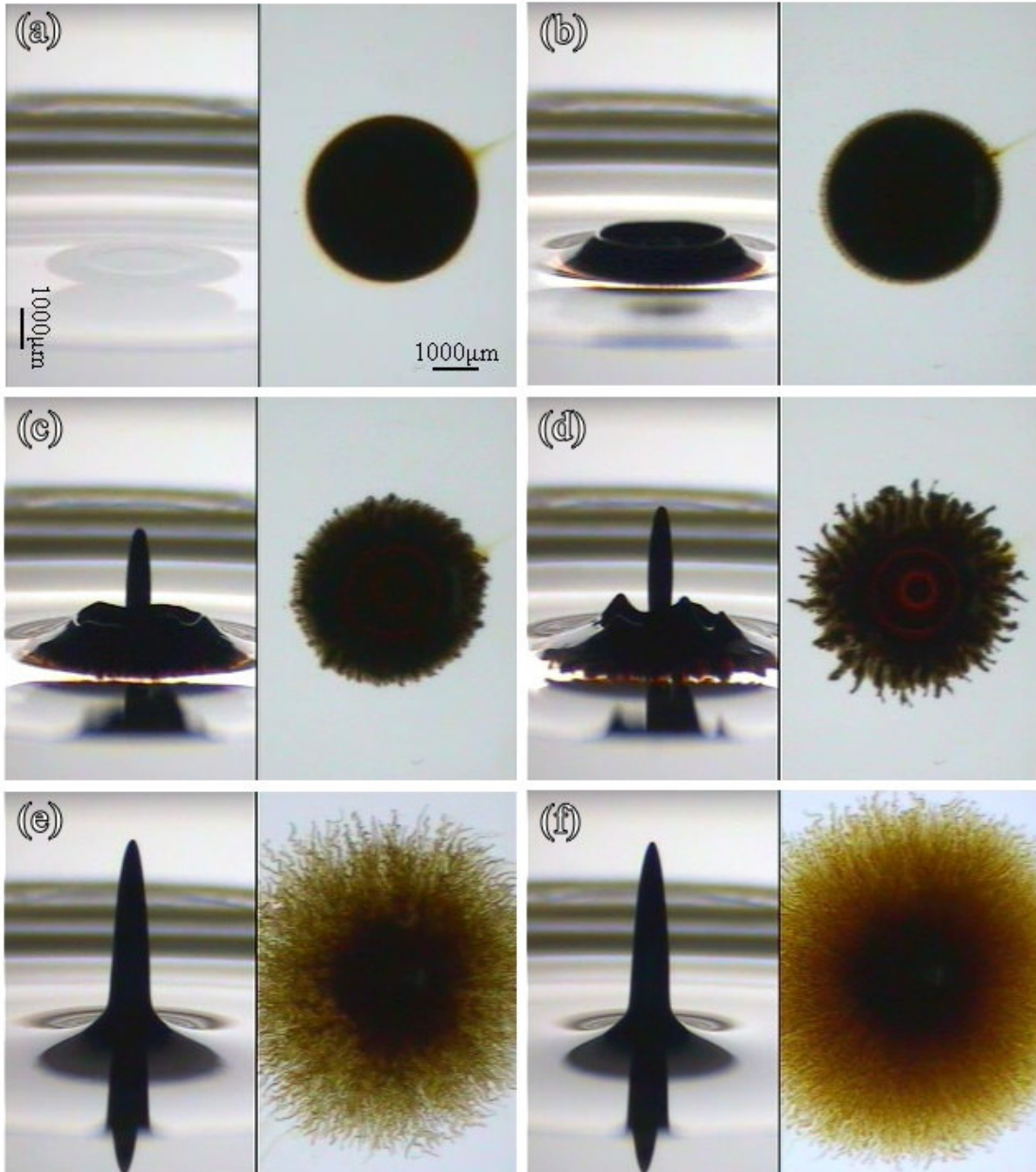


圖3-23 磁性液滴( $D=3610 \mu\text{m}$ )加入可互溶液體受到垂直磁場( $H=510 \text{ Oe}$ )

所產生之第二類羅森史維格不穩定現象。

(a) $t=0 \text{ s}$ , (b)  $t=0.1 \text{ s}$ , (c)  $t=0.26 \text{ s}$ , (d)  $t=0.4 \text{ s}$ , (e)  $t=3 \text{ s}$ , and (f)  $t=8 \text{ s}$



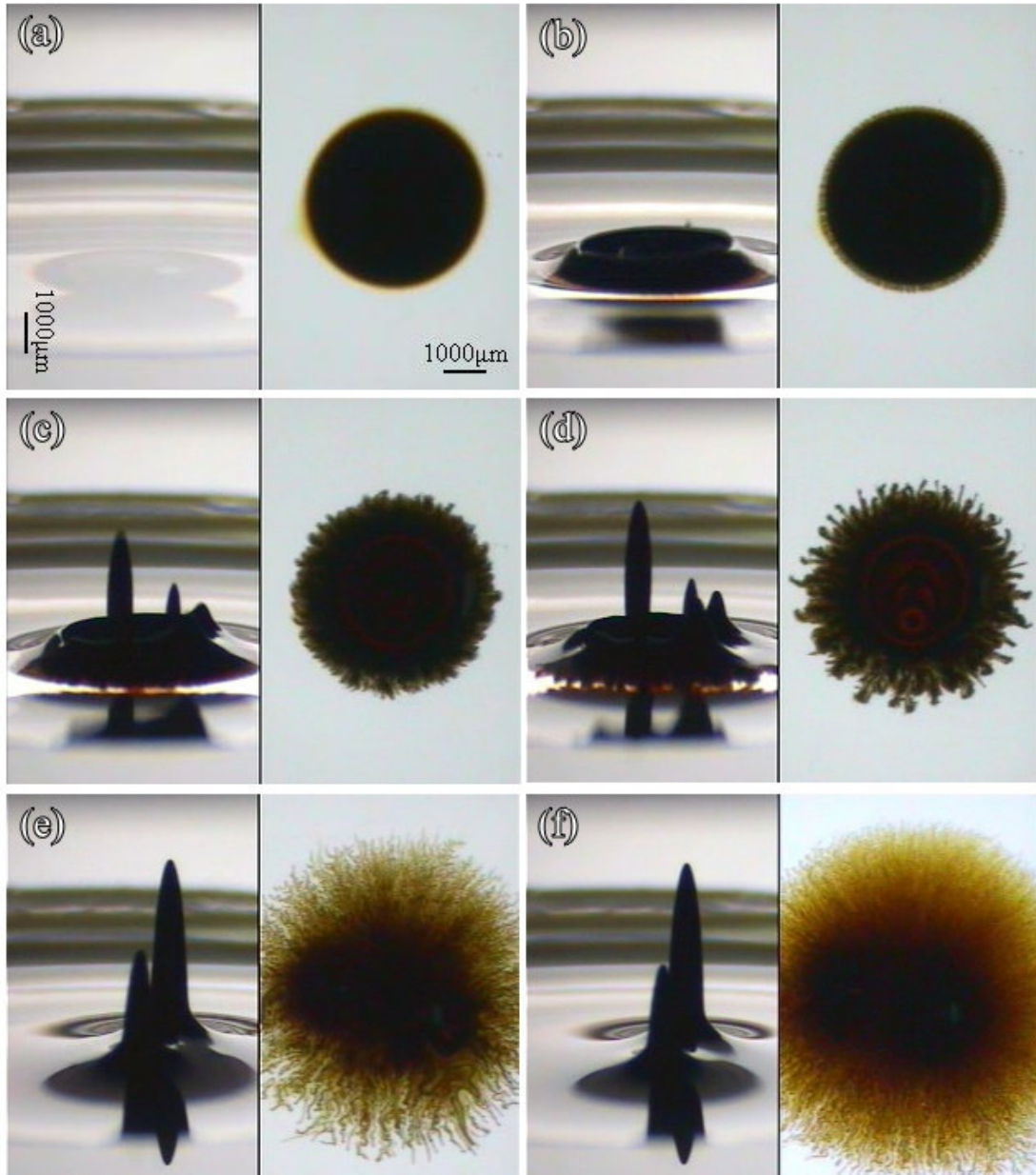


圖3-24 磁性液滴( $D=3830 \mu\text{m}$ )加入可互溶液體受到垂直磁場( $H=510 \text{ Oe}$ )

所產生之第四類羅森史維格不穩定現象。

(a) $t=0 \text{ s}$ , (b)  $t=0.1 \text{ s}$ , (c)  $t=0.26 \text{ s}$ , (d)  $t=0.4 \text{ s}$ , (e)  $t=3 \text{ s}$ , and (f)  $t=8 \text{ s}$

## 第四章 結論

本實驗所設定的電流值分別為1.8 A、2.2 A及2.6 A，其所對應的磁場強度分別為350 Oe、440 Oe及510 Oe。在不可互溶的範例中，藉由不同初始直徑大小的比較，在相同磁場強度下，液滴所產生的羅森史維格不穩定結構物之高度會隨著液滴直徑的大小而呈現正比之關係，當液滴直徑增加時其所產生的突峰狀結構物高度也有更高之趨勢，並且浮於甘油層表面的磁性流體體積也較多，這也導致甘油表面有更多次液滴的產生，並在甘油表面與空氣接觸的地方產生了些許對流或受磁力線分佈影響的情形，以致於次液滴開始往徑向方向之外圍做不規則的移動。

在不可互溶的範例中，相近直徑但磁場強度不同的情形下，可發現磁場強度增加後，導致磁性液滴通過較大的磁通量而改變了羅森史維格結構物之高度，其高度有明顯上升的趨勢，因磁場關閉導致液滴坍塌的現象也隨著磁場強度的增加有明顯擴大的趨勢，甘油表面之磁性流體於再度開啟磁場時，殘留於甘油表層上的磁性流體產生些許類似磁對流之現象，使次液滴產生不規則運動，並與空氣接觸後，磁性流體相當於在空氣與甘油的夾層中，產生了更為紊亂的運動方式，在本文中我們將之歸類為另一種型態的混合型不穩定現象，即雙羅森史維格不穩定現象。

在可互溶的範例中，磁性流體的量將直接影響其所產生的界面不穩定現象，當溶媒的量為一固定值時，液滴直徑的大小將決定兩者混合後之濃度，液滴直徑較小時其混合物的濃度較低，使得磁性流體的磁化率下降，此時平面複雜迷宮化現象將成為主導界面不穩定現象的主因，因此液滴也較不易形成羅森史維格結構物；相反地，當液滴直徑較大時，其與溶媒的混合物濃度較高，並且也有較高的磁化率，此時的界面不穩定現象則由三維的羅森史維格結構物所主導，使其混合物足以抵抗重力形成羅森史維格結構物，而液滴邊緣則與溶媒接觸形成了迷宮化現象。

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可互溶及不可互溶液體受垂直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不同類型的界面不穩定現象，根據不同的初始直徑和三種不同的磁場強度來做為變因，當磁性流體同時與可互溶及不可互溶液體反應時，在可互溶的範例中，本文發現其不同型態的不穩定現象，大致上可分為四個類型；而不可互溶的範例中可得知在磁場關閉前後所形成不同的不穩定現象，也包括其與空氣的接觸。磁性流體處於這三種不同流體中，受到磁力、本身液滴的重力、黏滯力與表面張力的作用，其間的物理運動模式可說相當複雜，未來我們希望能針對各種不同流體界面間的不穩定現象做理論上的分析，以期能對磁性流體及界面不穩定現象的物理特性與各種力彼此間競爭的情形有更進一步的瞭解。



## 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] 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).
- [3] 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).
- [4] R. Richter and I. V. Barashenkov, "Two-dimensional solitons on the surface of magnetic fluids", *Phys. Rev. Lett.*, 94, 184503, (2005).
- [5] L. Romankiw, M. Slusarczyk and D. Thompson, "Liquid magnetic bubbles," *IEEE Trans. Magnetics*, vol. MAG-11, pp. R25(1975).
- [6] 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).
- [7] 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).
- [8] C.-Y. Chen, W.-K. Tsai and Jose Miranda, "A hybrid ferrohydrodynamic instability: coexisting peak and labyrinthine patterns," *Phys. Review E*, 77, 056306 (2008).
- [9] C.-Y. Chen, Y. S. Yang and Jose Miranda, "Miscible Ferrofluid Patterns in a Radial Magnetic Field," Submitted(2009).
- [10] J. A. Miranda and E. Alvarez-Lacalle, "Viscosity contrast effects on fingering formation in rotating Hele-Shaw flows," *Phys. Review E*, 72, 026306 (2005).
- [11] 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).
- [12] 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).
- [13] 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).
- [14] 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).
- [15] 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).

[16] 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).

[17]李奇軒, ”磁性液滴薄層分裂之研究”, 國立交通大學碩士論文, (2009)

[18]S.A.Langer,R. E. Goldstein, and D.P. Jackson, “Dynamics of labyrinthine pattern formation in magnetic fields ”,*Phys.Rev.A*46,4894, (1992).

[19] D. P. Jackson,R. E. Goldstein,and A. Cebers,“Hydrodynamics of fingering instabilities in dipolar domains ”,*Phys.Rev.E*50,298,(1994).

[20]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).

[21]Ching-Yao Chen, “Numerical simulations of fingering instabilities in miscible magnetic fluids in a Hele-Shaw cell and the effects of Korteweg stresses”, *Phys. Fluids* 15, 1086 (2003).

[22]R. Friedrichs and A. Engel, “Pattern and wave number selection in magnetic fluids”,*Phys.Rev.E* 64,021406,(2001).

[23]O. Sero-Guillaume,D. Zouaoui, D. Bernardin and J. Brancher, “The shape of magnetic liquid drop”,*J. Fluid Mech.*,241-251,(1992).

[24]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).

[25]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).

[26] Ching-Yao Chen, Z.-Y. Cheng, “An experimental study on Rosensweig instability of a ferrofluid droplet”, *PHYSICS OF FLUIDS* 20, 054105 (2008).

[27]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).

[28]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).

[29]C.Rinaldi, A. Chaves,S.Elborai,X. He and M. Zahn, “Magnetic fluid rheology and flows”*Interface Science*, 10, 141(2005).

[30] E. P. Furlani, K. C. Ng, “Analytical model of magnetic nanoparticle transport and capture in the microvasculature”, *Phys. Rev. E* 73, 061919 (2006).

[31] 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).