

2023 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 160012

參展科別 物理與天文學

作品名稱 液滴爆炸

得獎獎項 四等獎

就讀學校 嘉義縣私立協同高級中學

指導教師 何世明、蕭嘉偉

作者姓名 伍瀚煦、陳羿宏、莊毓飛

關鍵詞 馬倫哥尼效應、表面能、表面張力

作者簡介



我們是來自嘉義縣協同高中高二的學生陳羿宏(中)、莊毓飛(右二)、伍瀚煦(右一)。在從小到大的觀念中，我們以為”實驗”這種東西只會在課本、電視、實驗室內，沒想到其實可以利用生活中的東西就能做出來。所以我們就利用生活中唾手可得的材料研究液滴爆炸這個主題，很高興能大家分享我們的研究結果。

摘要

本研究探討乙醇水溶液液滴於疏水流體表面之分裂現象。此現象可利用揮發造成乙醇之濃度梯度所驅動的表面張力梯度來解釋，此現象又稱為馬倫哥尼效應 (Marangoni Effect)。液體為達到最低表面能而改變表面積的普托瑞立不穩定現象 (Plateau Rayleigh Instability) 也可以做為液滴分裂的解釋之一。

在研究中，研究團隊發現溶液在油面上會隨時間分裂出子液滴，並對於最終子液滴的半徑與分裂現象分別進行定量與定性之探討。本研究於先遣實驗中發現乙醇水溶液濃度之臨界下限為 65%~67% 重量百分濃度，並以大於(含)此濃度之溶液進行關於乙醇濃度、溶液體積與油層厚度、油層黏度四項參數對於最終子液滴半徑、分裂時間、液滴最大擴散半徑與擴散半徑演變之影響，也針對與參考文獻所選用液體不同深入探討異丙醇與乙醇的蒸發速率的差異如何影響實驗結果。

壹、前言

一、研究動機

我們在網路上看到有人把染色的酒精水溶液滴到油上，發現他會分裂成許多的小液滴。好奇為何會有此現象發生，我們決定研究這個現象。在研究過程中，我們發現一些關於表面能和表面張力的概念，這是現在的高中課程所學習不到的，所以我們決定進一步去探討表面能和表面張力如何影響？甚至是酒精濃度、油高、油的黏度和液滴體積如何影響實驗時間、液滴的最大擴散半徑及分裂的最終液滴大小？

二、研究目的

- (一) 研究母液滴產生分裂的原因。
- (二) 測量臨界條件(臨界濃度、體積、油高)。
- (三) 改變酒精濃度探討液滴的擴散半徑、反應所需時間、最終液滴大小及最大

半徑和最終液滴半徑之間的關係。

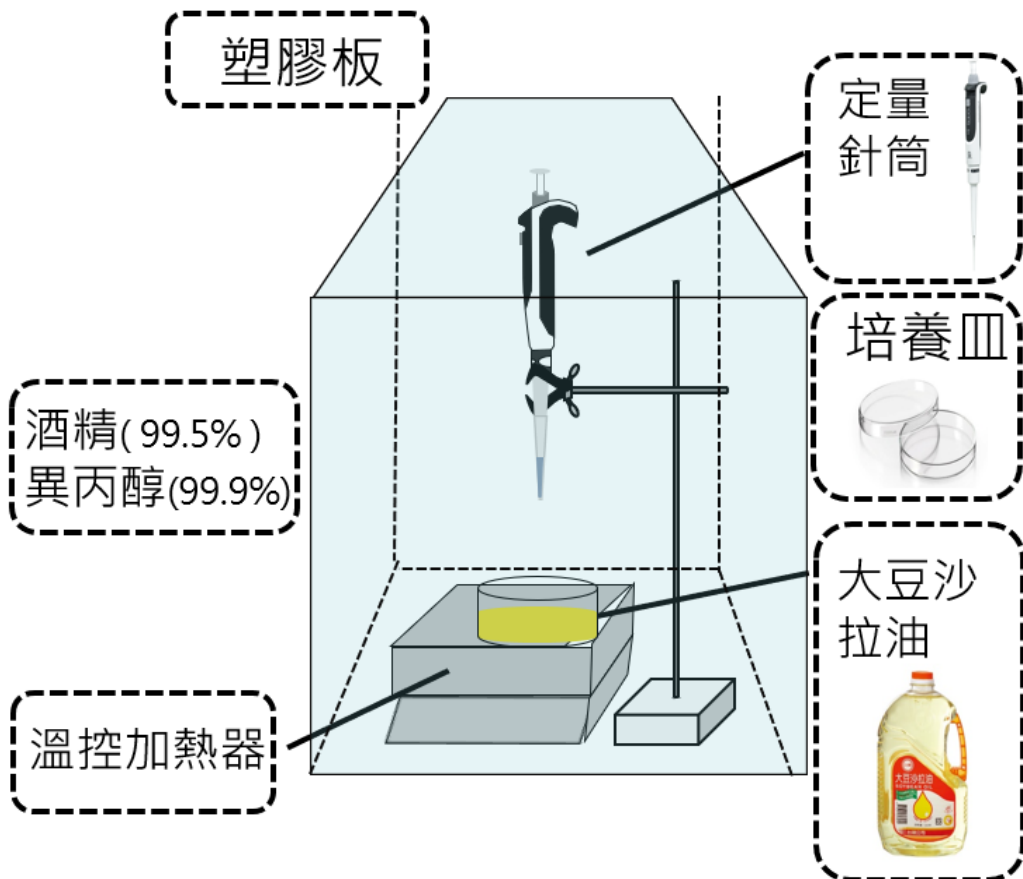
(四)改變酒精水溶液液滴的體積，探討它的擴散半徑、反應所需時間、最終液滴大小及最大半徑和最終液滴大小之間的關係。

(五)改變油的厚度，探討它的擴散半徑、反應所需時間、最終液滴大小及最大半徑和最終液滴大小之間的關係。

(六)改變油的黏度，探討它的擴散半徑、反應所需時間、最終液滴大小及最大半徑和最終液滴大小之間的關係。

(七)將實驗數據做成圖表並分析比對，並將圖表疊合，探討不同變因的實驗結果之間的關係。

貳、研究器材與架設



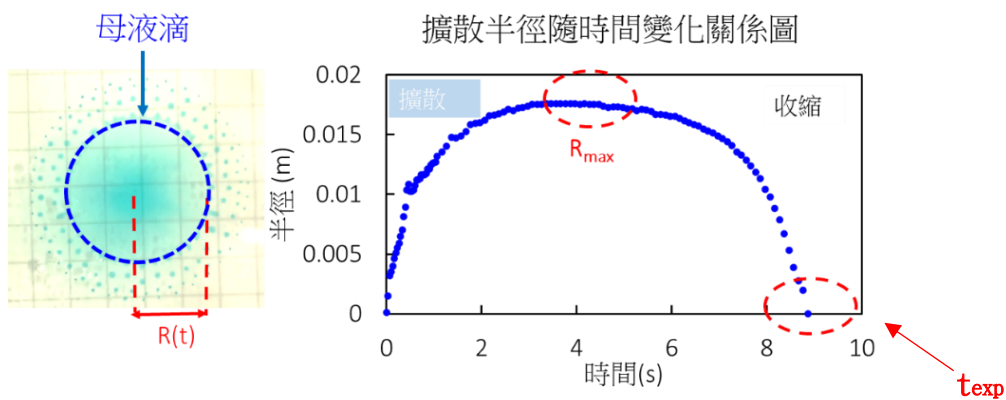
▲實驗架設示意圖

塑膠板是用來降低周遭空氣對實驗的擾動，溫控加熱器是為了固定油的黏度，定量針筒是用來控制初始液滴的體積。

參、現象解釋和定義

(一) 名詞解釋和定義

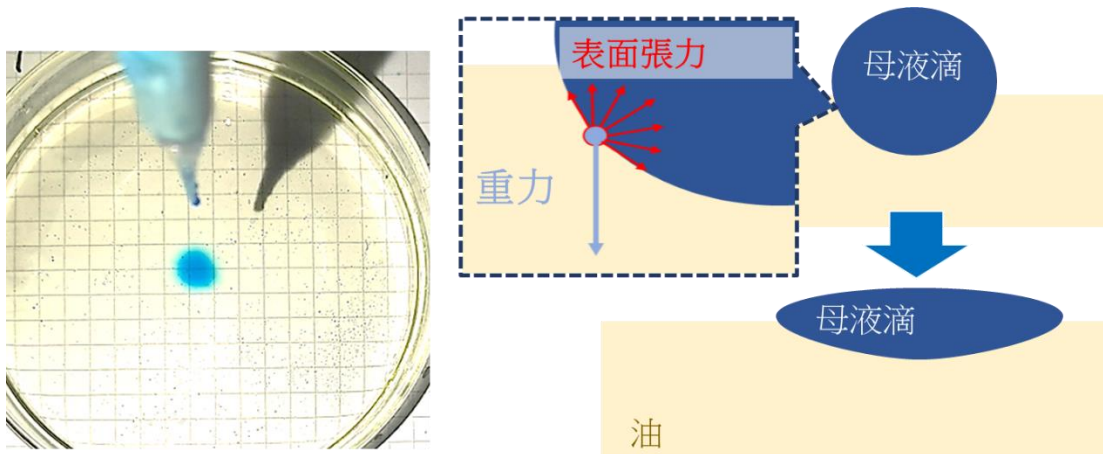
1. 母液滴：初始滴下的液滴，並觀察他的分裂情形。
2. 最大半徑(R_{max})：母液滴從擴散到開始收縮時所達到的最大半徑。
3. 反應時間(t_{exp})：母液滴從擴散到收縮回一點的所需時間。
4. 擴散半徑(R_t)：母液滴從擴散到收縮回一點的半徑，會隨著時間發展擴散並收縮，下圖為示意圖。



(二). 現象解釋

我們將此反應分為四個階段：

第一階段：重力影響

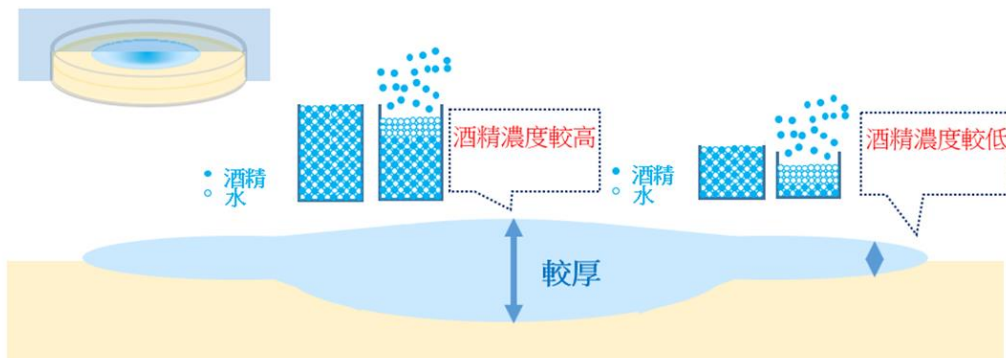


▲圖(一)

因為重力造成影響，重力會將初始液滴往下拉，而液滴所擁有的表面張力不足以將液滴維持為球型，所以初始液滴形狀變扁平（如圖一）。

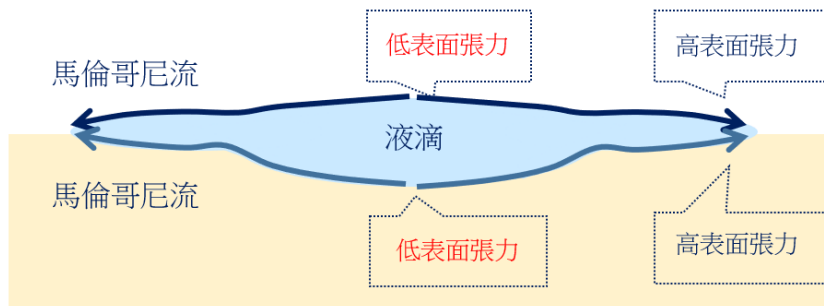
第二階段：濃度梯度 —— 馬倫哥尼流

馬倫哥尼現象(Marangoni effect)意旨在於流體中表面張力差異造成的梯度產生由張力低處指狀高處的淨力，導致流體朝表面張力較高處流動的效應。此流動現象也被稱為馬倫哥尼流。



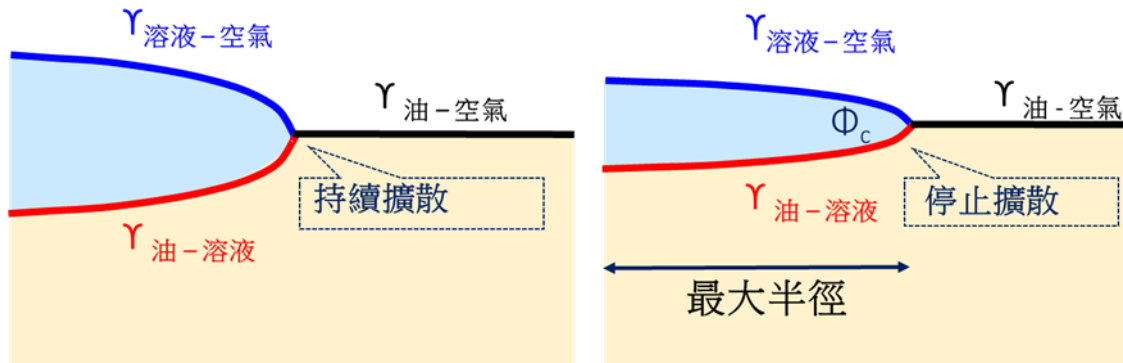
▲圖（二）

在經歷第一階段後，液滴的邊緣厚度較中心厚度薄，而酒精自溶液中蒸發的速度在暴露相同表面積是相同的，故隨著時間演變，液滴邊緣的酒精濃度在邊緣處較中心處低(酒精的蒸氣壓大於水，故溶液蒸發的物質主要是酒精)（如圖二）。



▲圖（三）

已知酒精的表面張力較低，故酒精濃度的差異在液滴的邊緣處和中心處產生表面張力梯度，符合產生一由內朝外流動之馬倫哥尼流的條件，可以解釋液滴在第二階段中朝外擴張的現象（如圖三）。



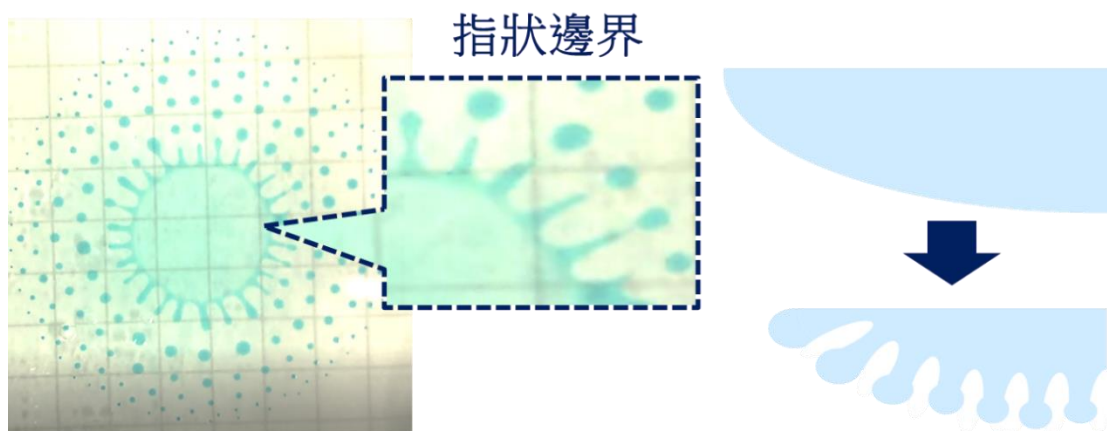
▲圖（四）

▲圖（五）

因為整個系統會上維持最小表面能，所以當 $\gamma_{油-溶液} + \gamma_{溶液-空氣} > \gamma_{油-空氣}$ 時，液滴會以增加表面積的方式來減少表面能（如圖四）

（ γ ：表面張力）。因為當液滴的濃度到達濃度 Φ_c 時，液滴會停止擴散，所以 Φ_c 會被定義為臨界濃度（如圖五）。

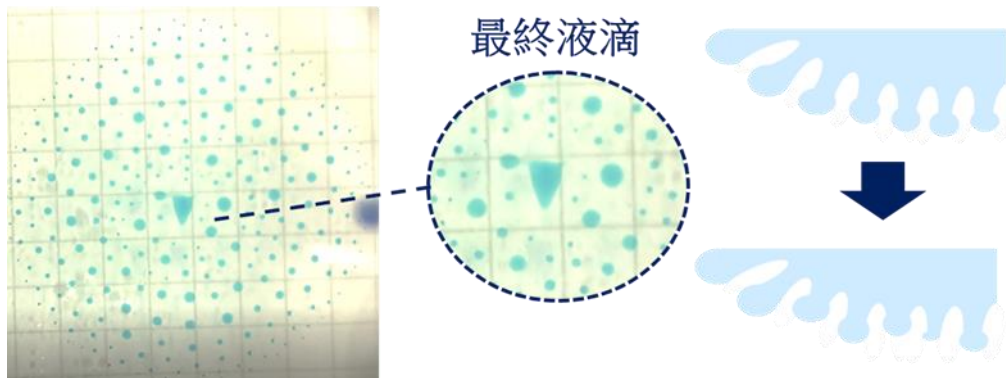
第三階段：不同形狀之間的不同的表面能



▲圖（六）

為了維持最小表面能，液滴會嘗試減少其表面積，再加上邊界的不穩定，邊界開始變薄，因此會造成液滴的邊界由平滑邊界變為指狀邊界（如圖六）。

第四階段：液滴最終的分裂 ----- 普托瑞力不穩定性



下圖為橫切面示意圖



▲圖（七）

為了維持最小表面能，液滴會減少其表面積，再加上邊界的不穩定性，最後由指狀邊界分裂出多小液滴（如圖七）。

最終液滴：初始液滴最後分裂出的小液滴。

肆、研究方法與測量

一、實驗步驟

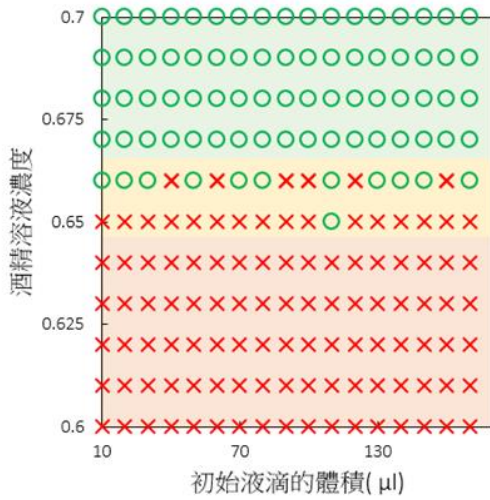
1. 架設 pipet 滴管及鐵架並用水平儀確認滴管與桌面垂直。
2. 架設攝影機調整視野到可以拍到水噴出清晰影像的適當位置，並確保其與桌面平行。
3. 利用溫控加熱器控制油溫並用溫度計測量油溫，分別將大豆沙拉油加熱至所需溫度 25°C。
4. 利用攝影機拍攝液滴分裂的情形重複以上步驟五次以上，每次需確認操作成功。

二、測量臨界條件

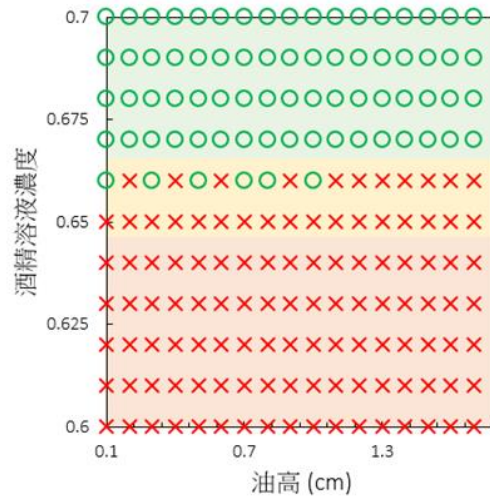
圖八為液滴體積變化及油高變化與現象發生之臨界濃度相圖，由實驗結果得知

此現象的臨界條件只和酒精濃度有關。

當變因為體積時的邊界濃度



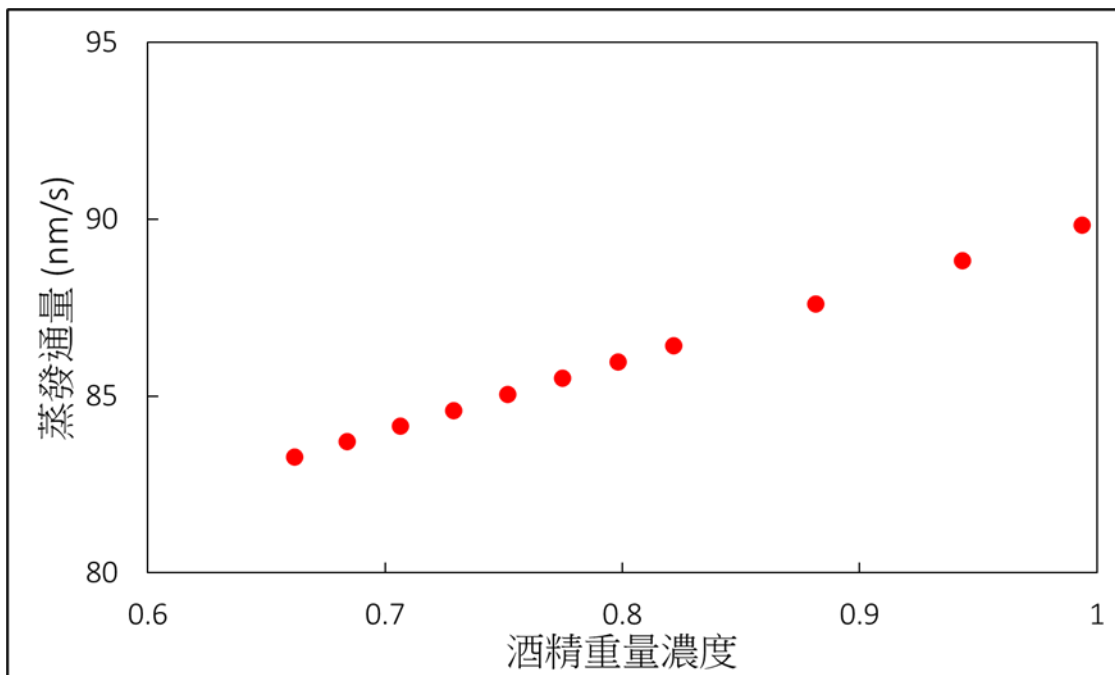
當變因為油高時的邊界濃度



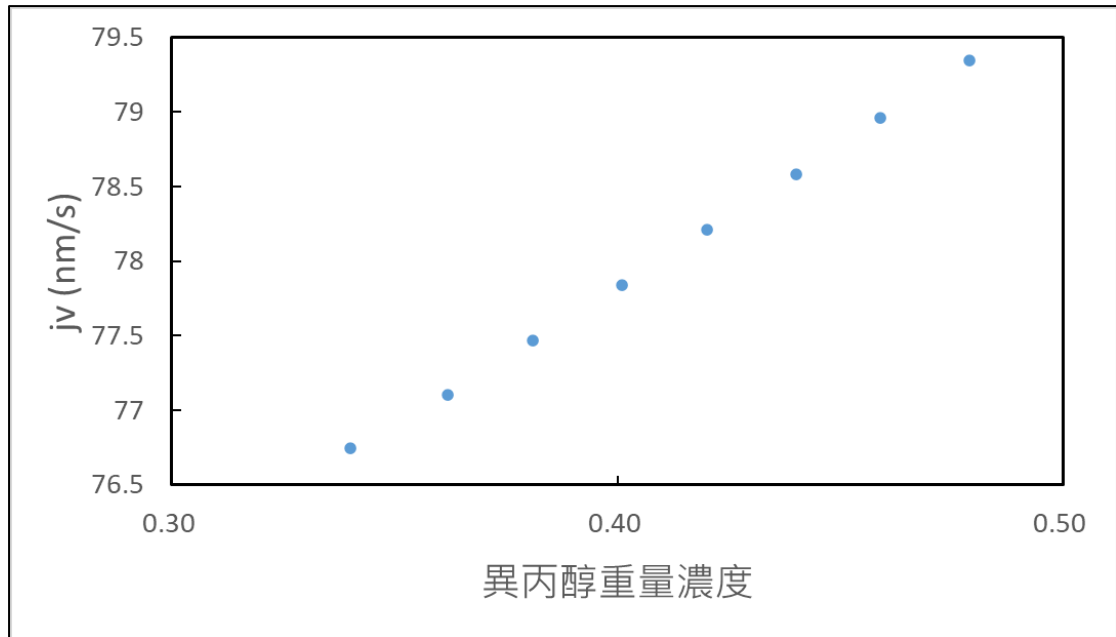
▲圖 (八)

三、 測量酒精的蒸發通量

我們將培養皿先放在精密電子秤上，歸零後倒入不同濃度的異丙醇或是酒精水溶液，紀錄 30 秒內質量變化，再將數據用 excel 分析得出蒸發通量。圖 (九) 及圖 (十) 為實驗結果。



▲圖 (九)



▲圖 (十)

伍、定量理論

(一)基本假設

我們假設母液滴可以被視為具有有效張力 γ 的單一界面。兩個界面的表面張力的組合為：

$$\gamma = \gamma_{\text{溶液-空氣}} + \gamma_{\text{油-空氣}} \quad (1)$$

(二)方程式推導

由於表面張力差 $\Delta\gamma$ 觸發馬蘭哥尼流，母液滴將在表面擴散，我們定義表面張力差 $\Delta\gamma$ 為：

$$\Delta\gamma = \gamma_c - \gamma_0 \quad (2)$$

其中 γ_c 為酒精在臨界濃度 ϕ_c 時的表面張力， γ_0 是酒精初始濃度 ϕ_0 時的表面張力，驅動流動的表面張力梯度為：

$$\Delta \frac{\gamma}{R^*} \quad (3)$$

R^* 是母液滴的特徵半徑。因此，可以推導出實驗的時間尺度 (τ)：

$$\tau = \frac{R^*}{V} \quad (4)$$

其中 V 是馬蘭戈尼流的流速。接著，我們根據文獻[1]得知表面張力相當於油的黏滯力造成的遲滯現象，由此推導出：

$$V \sim \frac{\Delta\gamma H}{\eta_o R^*} \quad (5)$$

其中 H 是油的高度， η_o 是油的黏度。此外，反應的時間酒精會蒸發，可通過以下公式計算：

$$(\phi_o \Omega_o - \phi_c \Omega_f) = j_v R^{*2} \tau \quad (6)$$

其中 Ω_o 和 Ω_f 分別對應於液滴的初始體積和最終體積。 j_v 是在先遣實驗測得的酒精的蒸發通量(nm/s)。通過結合方程式(1)至(6)，我們可以推導出實驗的時間尺度(τ)和液滴的特徵半徑(R^*)：

$$R^* = \left[\frac{(\phi_o - \phi_c) \Delta\gamma H \Omega_o}{(1 - \phi_c) \eta_o j_v} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (7)$$

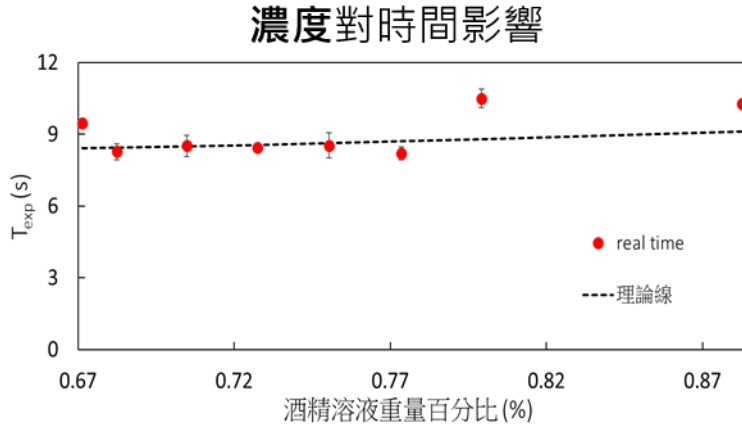
$$\tau = \frac{R^*}{V} = \left[\frac{(\phi_o - \phi_c) \eta_o \Omega_o}{(1 - \phi_c) \Delta\gamma H j_v} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

我們在實驗中測得最大半徑 R_{\max} 和反應時間 t_{exp} ， R_{\max} 和 t_{exp} 會分別和 R^* 與 τ 呈線性關係。

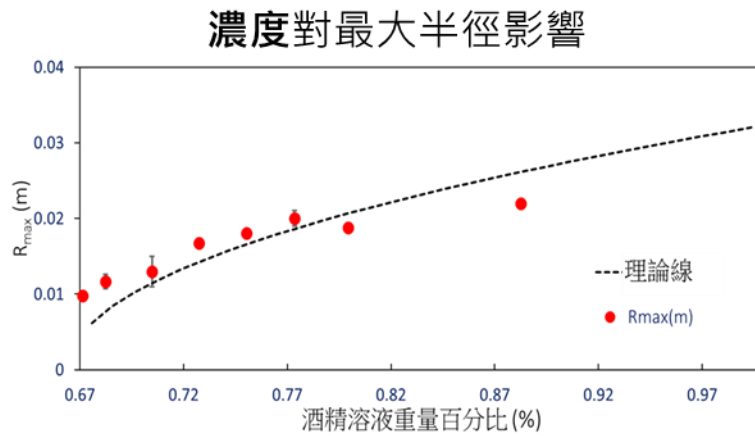
陸、研究結果

(一) 改變酒精溶液濃度

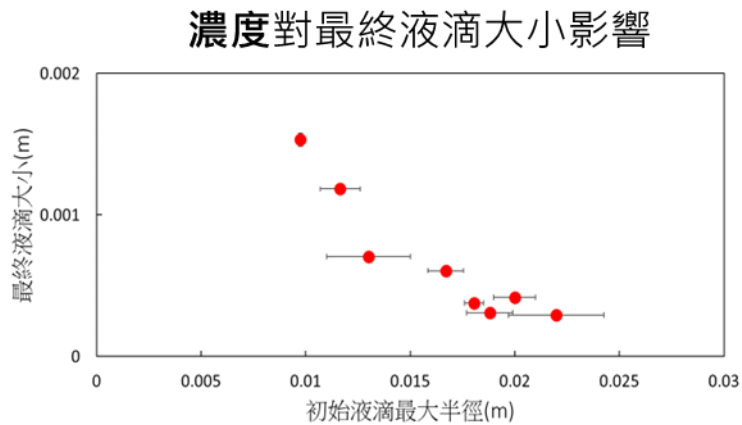
1. 時間變化



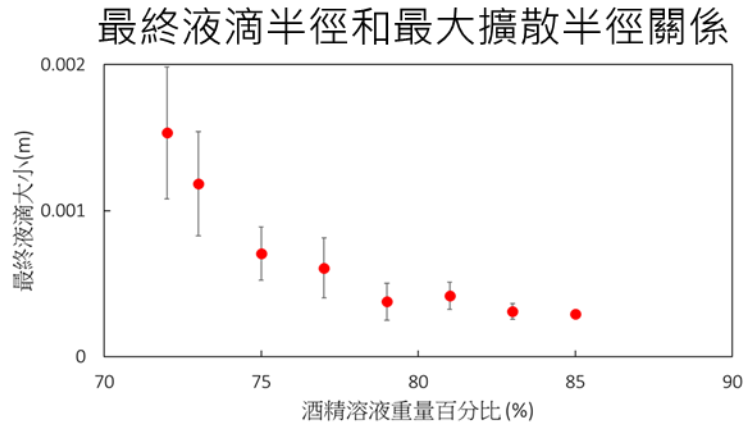
2. 最大半徑變化



3. 最終液滴半徑變化

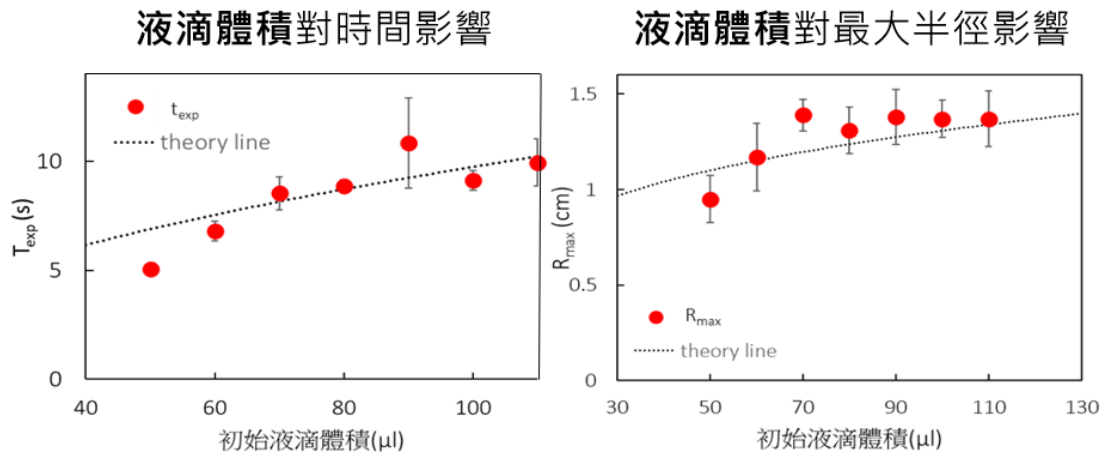


4. 最終液滴與最大半徑的關係

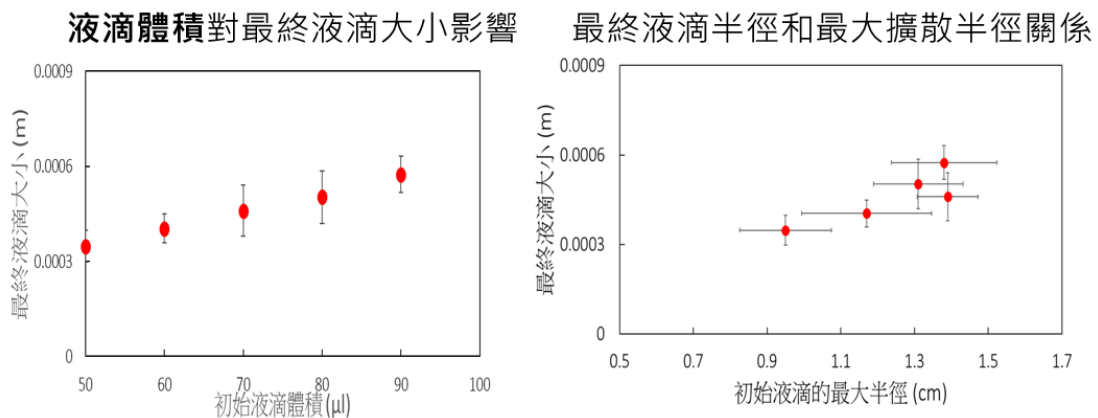


(二) 改變初始液滴體積

1. 對時間及最大半徑影響

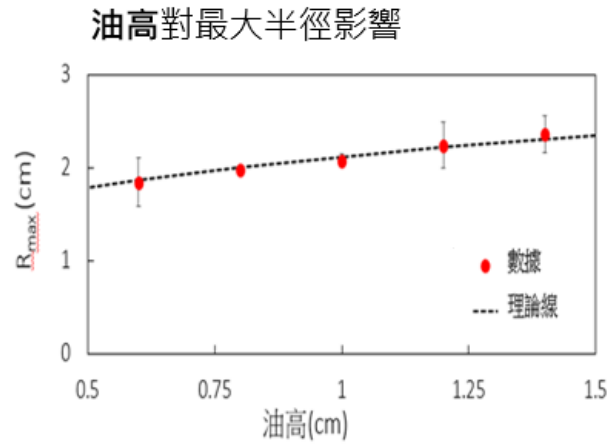
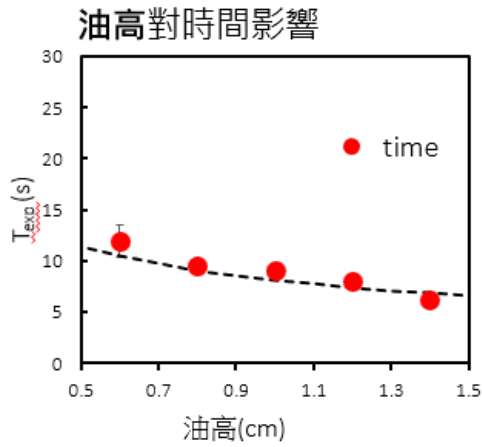


2. 對最終液滴大小及最終液滴大小和最大半徑的關係

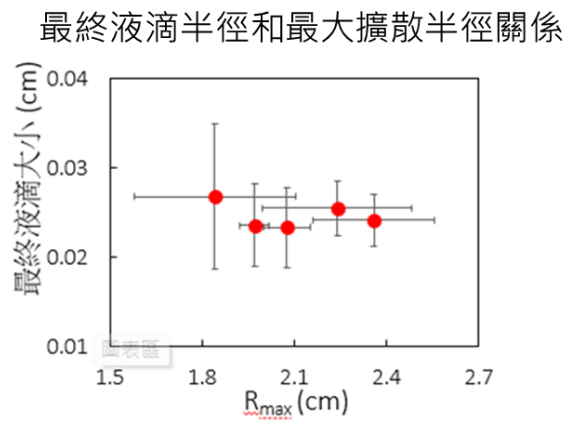
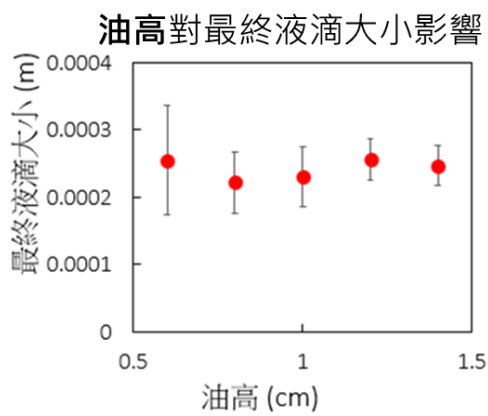


(三) 改變油高

1. 對時間及最大半徑影響

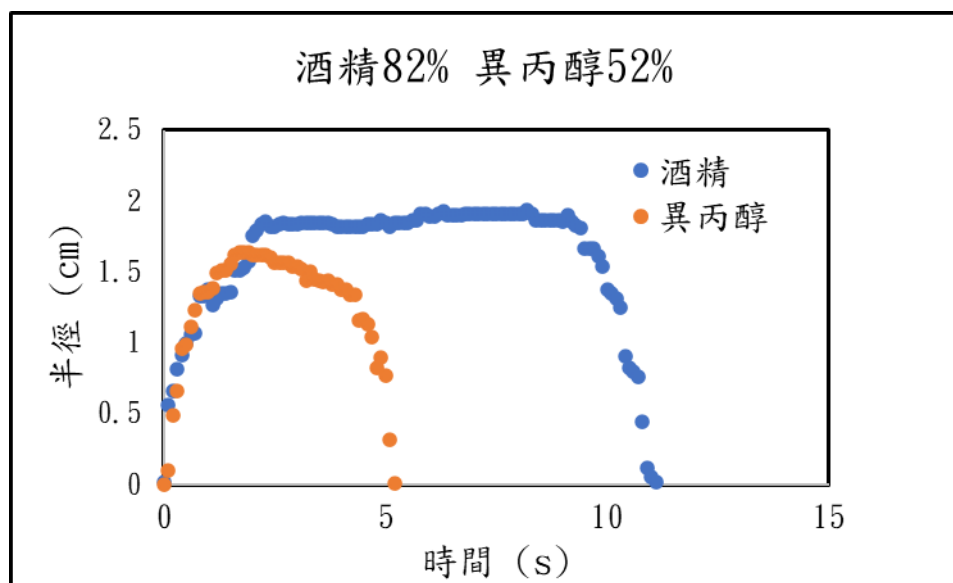


2. 對最終液滴大小影響及最終液滴半徑和最大擴散半徑關係



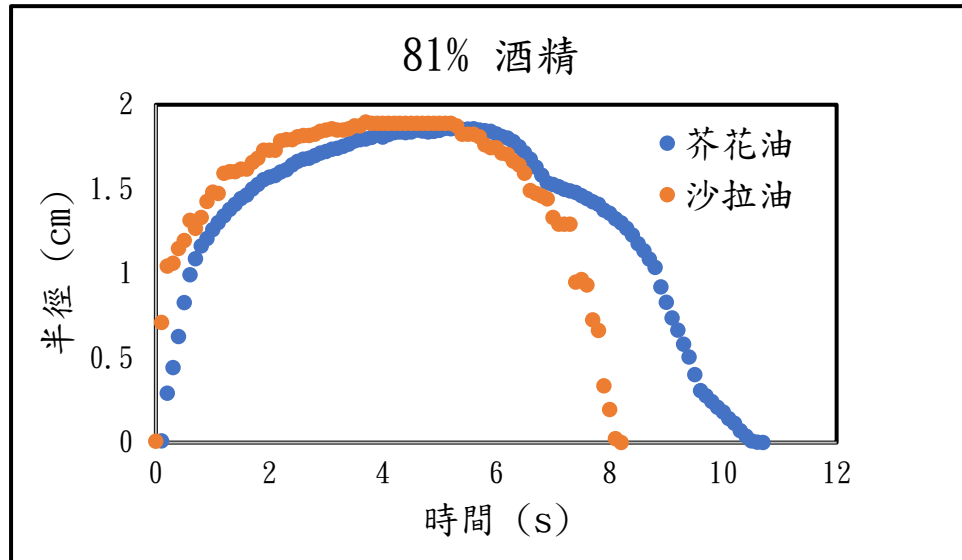
(四) 改變滴入液體的液體

1. 時間對半徑的擴散流程圖

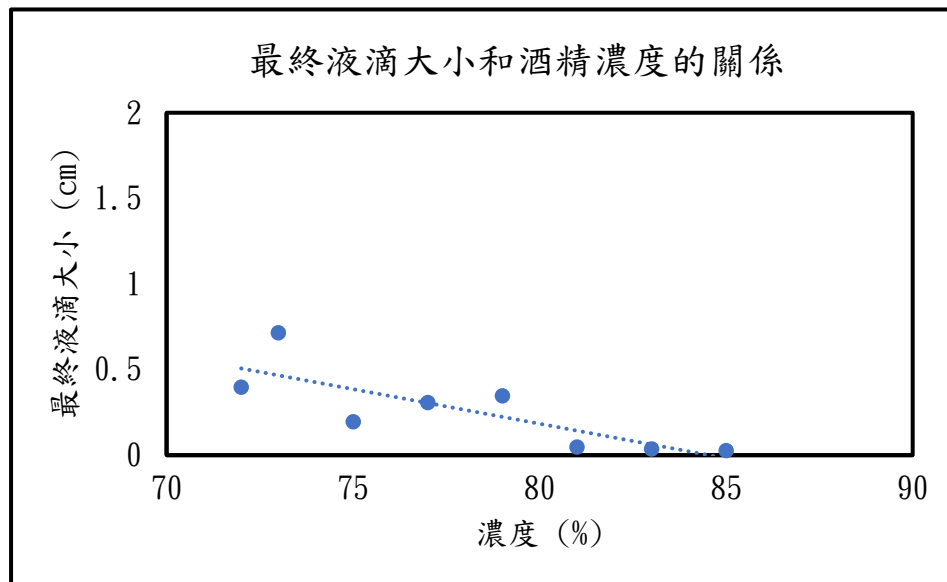


(伍) 改變黏度

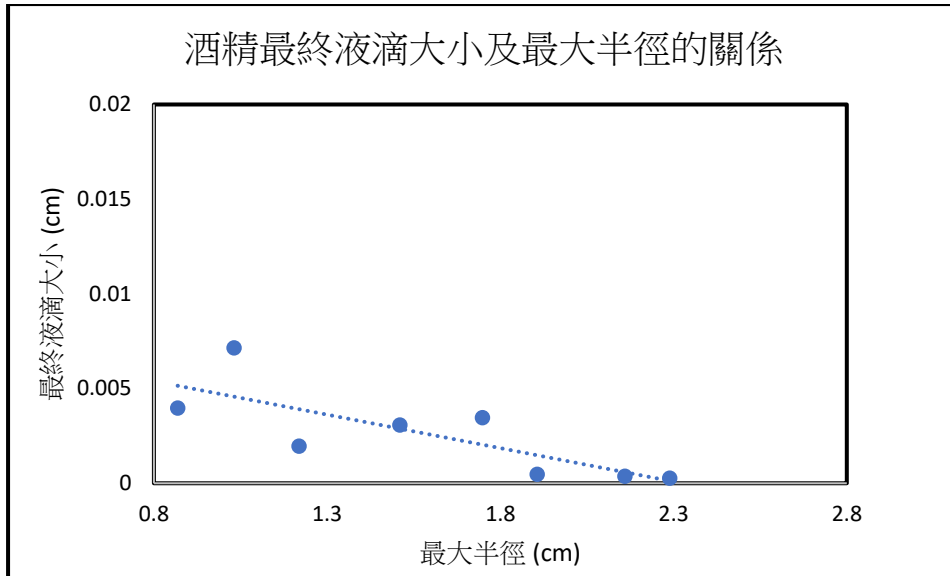
1. 時間對半徑的擴散流程圖



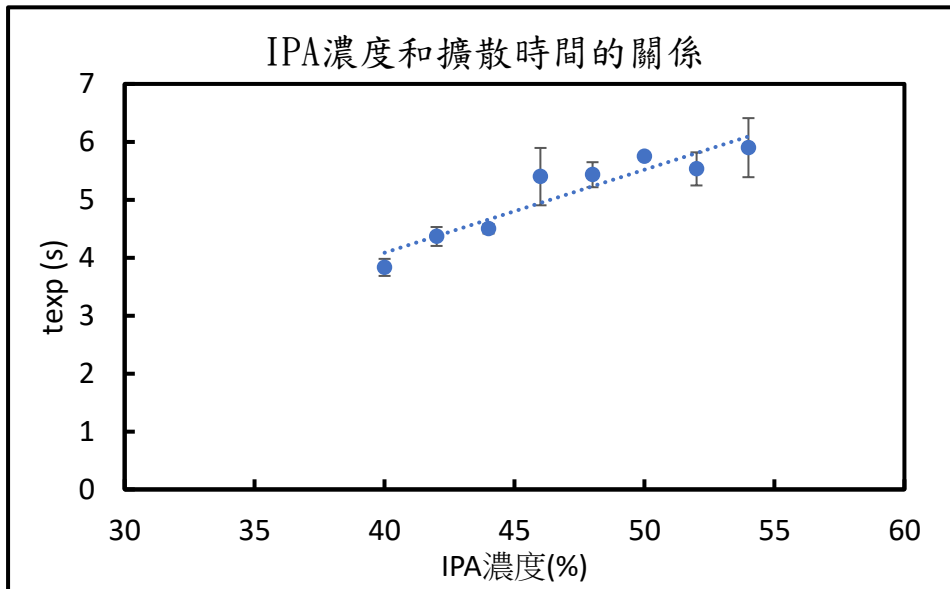
2. 對最終液滴大小影響



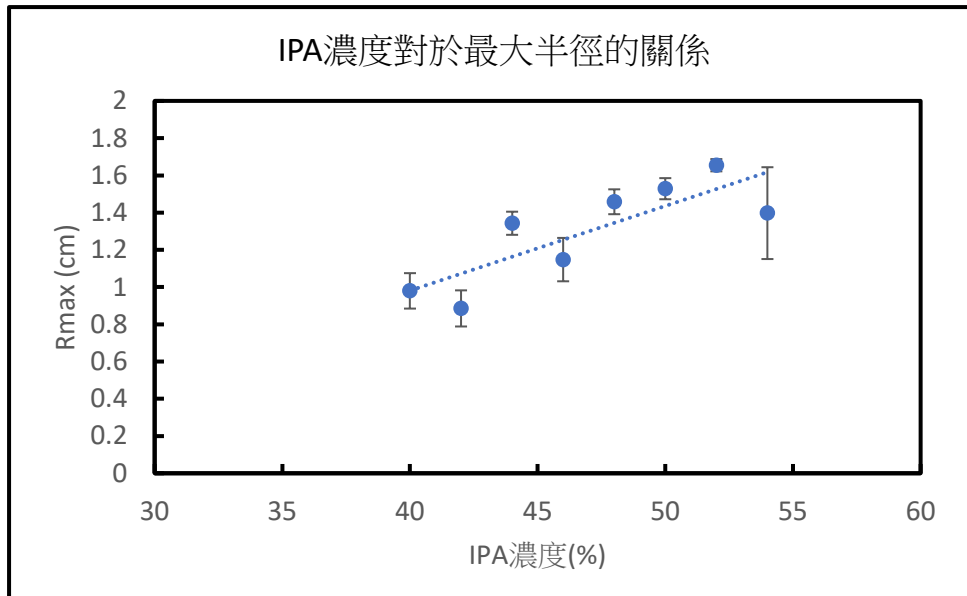
3. 最終液滴大小及最大半徑的關係



4. 不同 IPA 濃度對擴散時間的影響



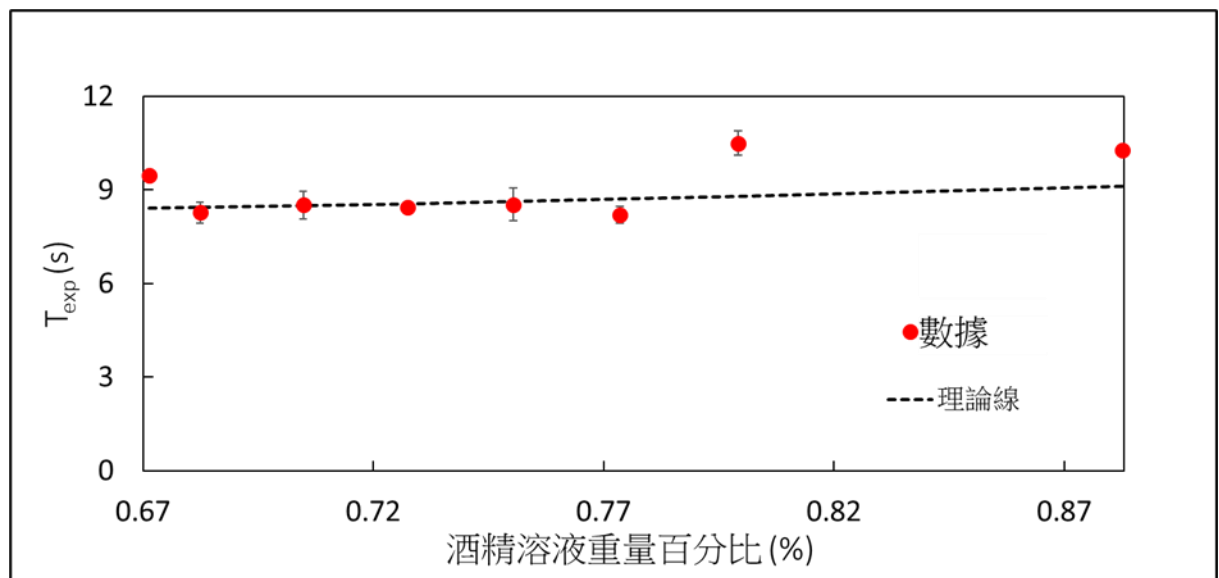
5. 不同異丙醇濃度對最大半徑的影響



柒、討論

(一) 研究結果與理論比對、解釋

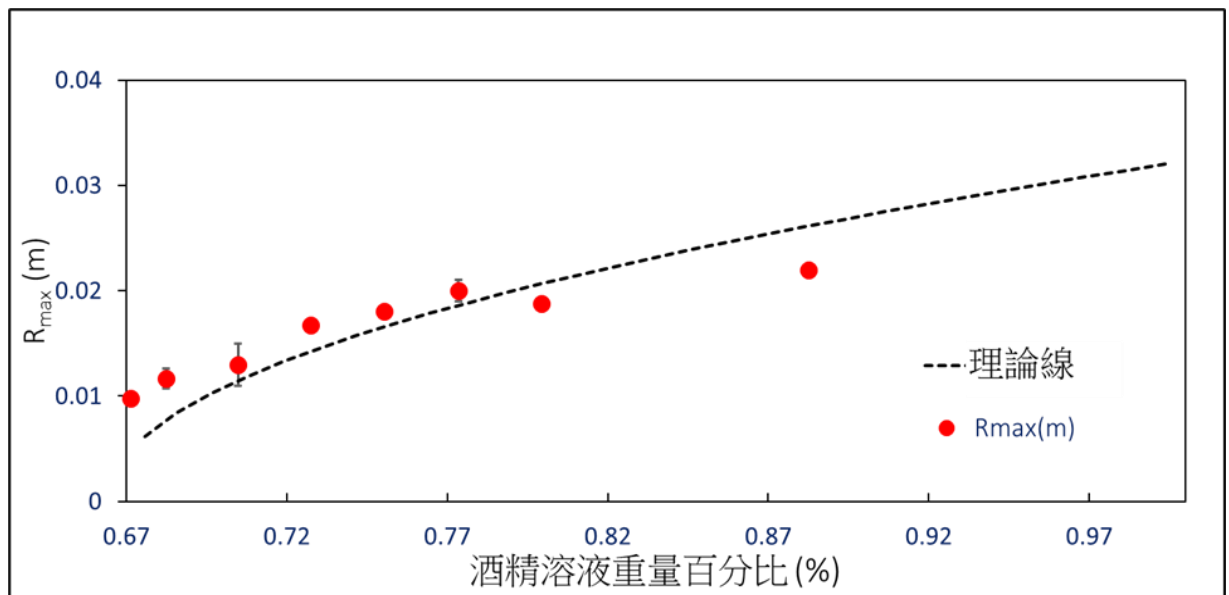
實驗一中，改變酒精濃度，探討改變酒精濃度對液滴的擴散半徑、最終液滴大小及反應所需時間。此實驗改變的是酒精的濃度會改變實驗的濃度差（公式(7)和(8)中的 $(\phi_0 - \phi_c)$ ），並且畫出時間的理論線。



▲圖（十一）

圖（十一）為改變酒精濃度對時間的影響，濃度越大，反應時間越長。這是因為當酒精從愈高濃度要達到邊界濃度所需要的時間就會愈多，所以實驗所需要

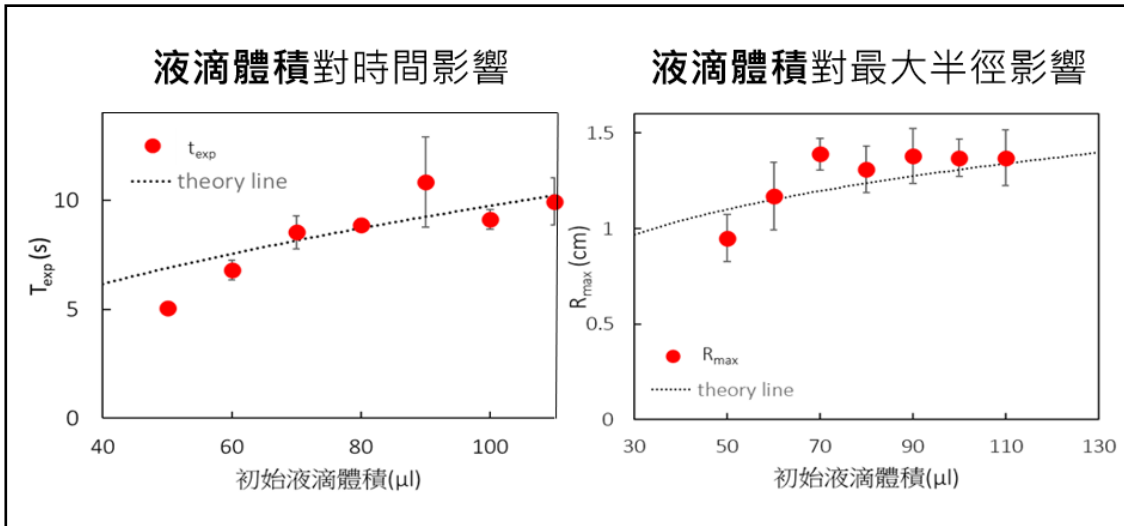
的時間就會愈多。



▲圖 (十二)

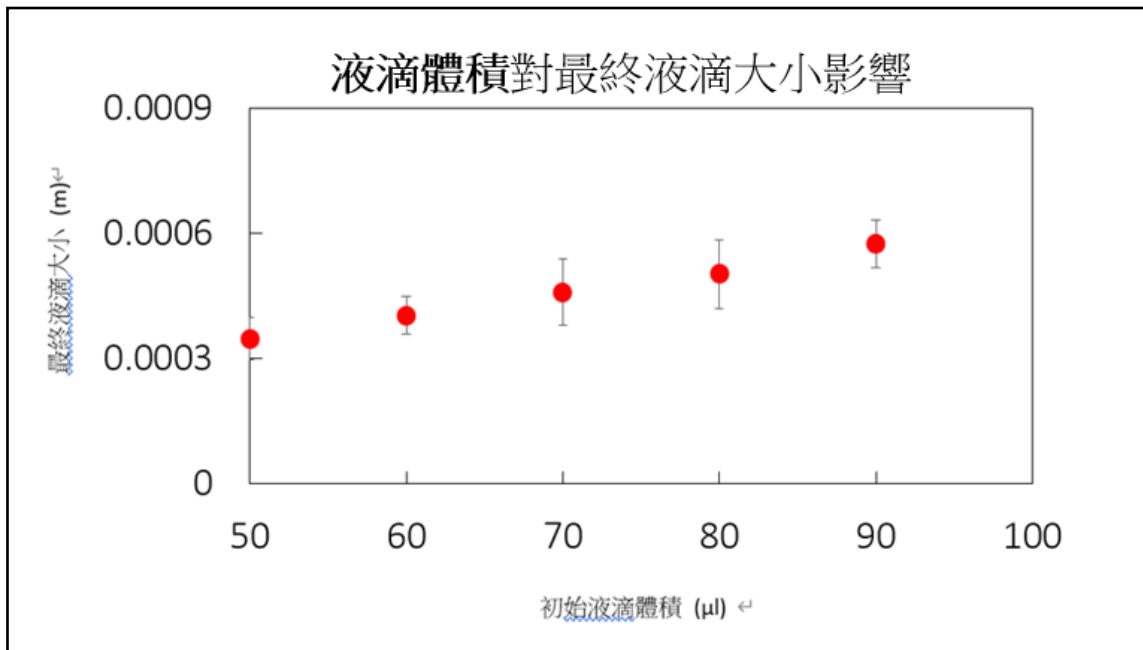
圖 (十二) 為改變酒精濃度對最大半徑的影響，**最大半徑**會和酒精濃度呈正相關，因為**當時間增加**，液滴會有更多時間外擴。**最終液滴大小**主要與母液滴最大半徑有關，而且是正相關，酒精濃度變大時最大半徑也會跟著變大，因此酒精濃度增加，最終液滴大小便會降低。

實驗二中，改變酒精液滴(特徵半徑與時間公式中的 Ω)，探討改變酒精體積對液滴的擴散半徑、最終液滴大小及反應所需時間。體積不同時，較大的體積需要更多時間蒸發，**造成反應時間變長**，但因為當液滴重量到一定值時，會因為太重而受到**重力**影響，使表面張力不足以帶動液滴擴散，造成最大半徑的增加趨勢將受到限制。圖 (十三) 為實驗結果。

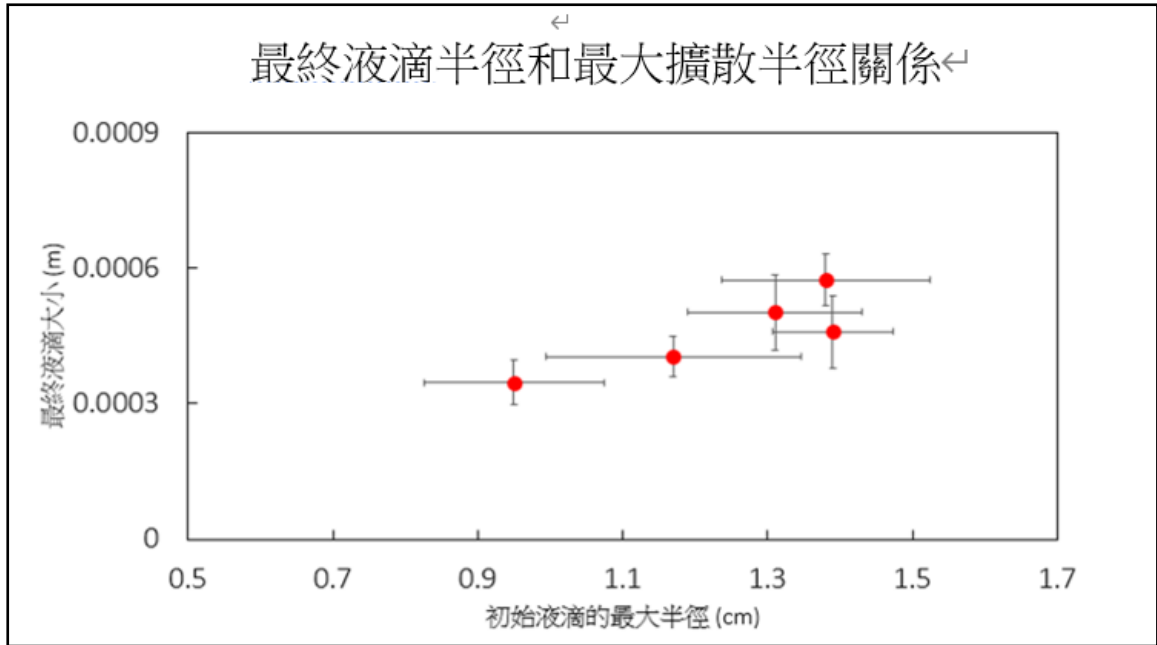


▲圖 (十三)

因為最大半徑的增加趨勢受到限制，多餘的體積將會被附加在最終液滴上。所以最終液滴大小和最大半徑有正向關係。圖 (十四) 和圖 (十五) 為實驗結果。

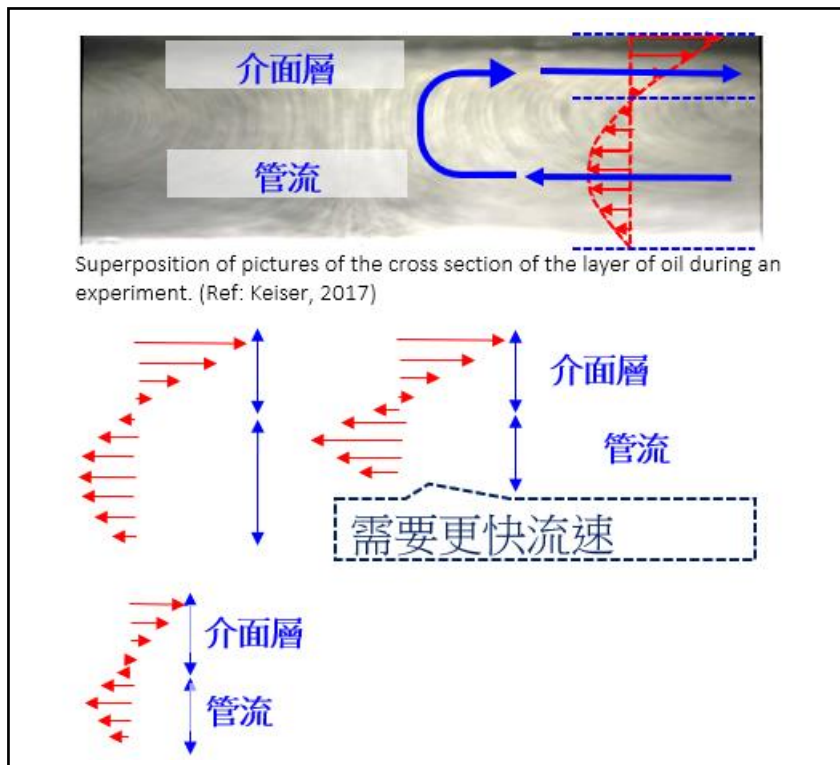


▲圖 (十四)

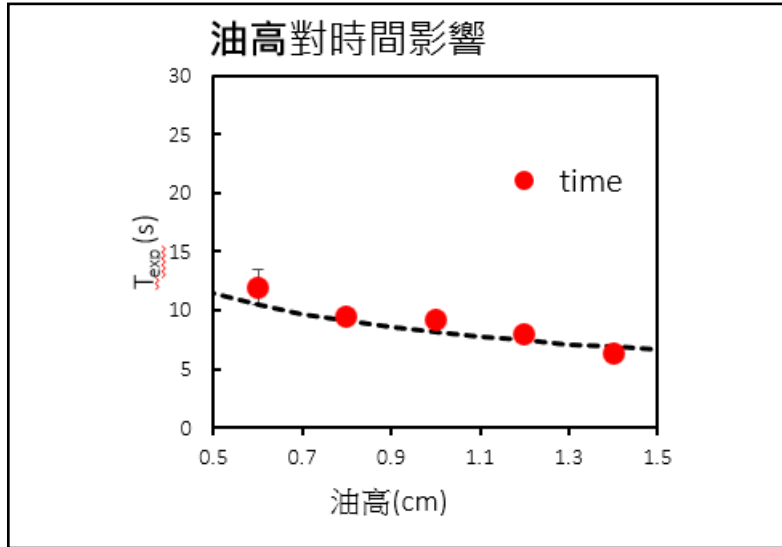


▲圖 (十五)

實驗三中，改變油的厚度，探討油的厚度對擴散半徑、最終液滴大小及反應所需時間。當油高減少時，因為介面層厚度固定，所以管流厚度會下降而需要更快的流速（如圖十六）。但是因為系統整體的能量被限制，所以整個系統的流速都將被降低，造成總反應時間增加（如圖十七）。

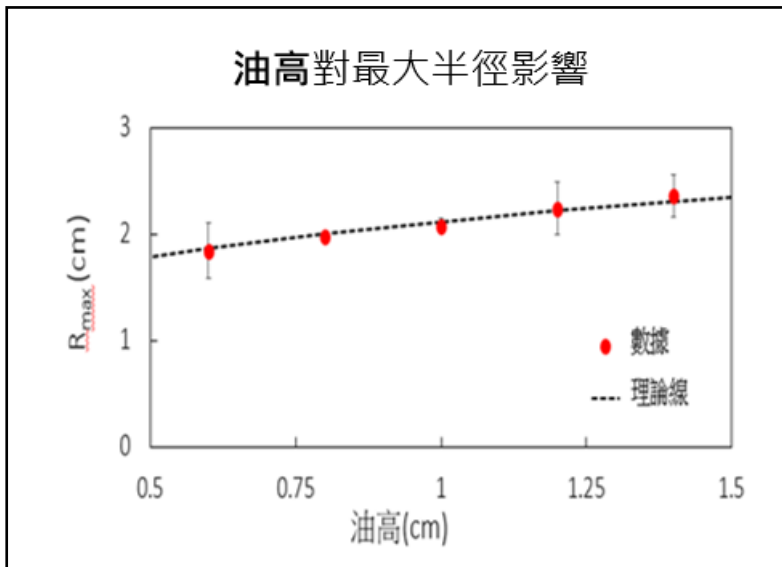


▲圖 (十六)

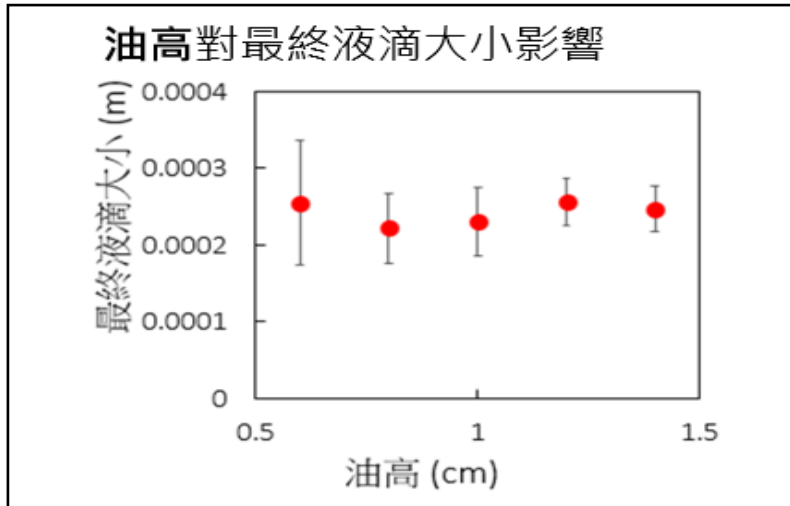


▲圖 (十七)

因為反應時間會在油高減少時增加，而液滴會在擴散到最大半徑前先蒸發到臨界濃度並停止擴散，所以當油高減少時會有較小的最大擴散半徑。當體積固定時，擴散半徑愈大，初始液滴的邊界的厚度將會愈薄，所以最終液滴大小下降。圖 (十八) 和圖 (十九) 為實驗結果。

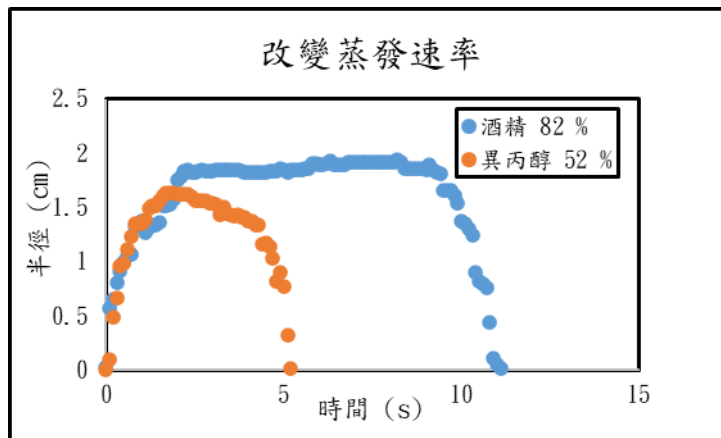


▲圖 (十八)



▲圖 (十九)

實驗四中，改變液滴的蒸發速率探討其對最大半徑、實驗時間的影響。當兩種溶液的液滴與臨界濃度相差的度數一樣的時候，因為異丙醇會蒸發的比較快的關係，所以液滴會比較快發展現象，所以實驗時間較短。而為在有限時間內完成現象，所以液滴的最大擴散半徑會比較小。圖 (二十) 為研究結果。

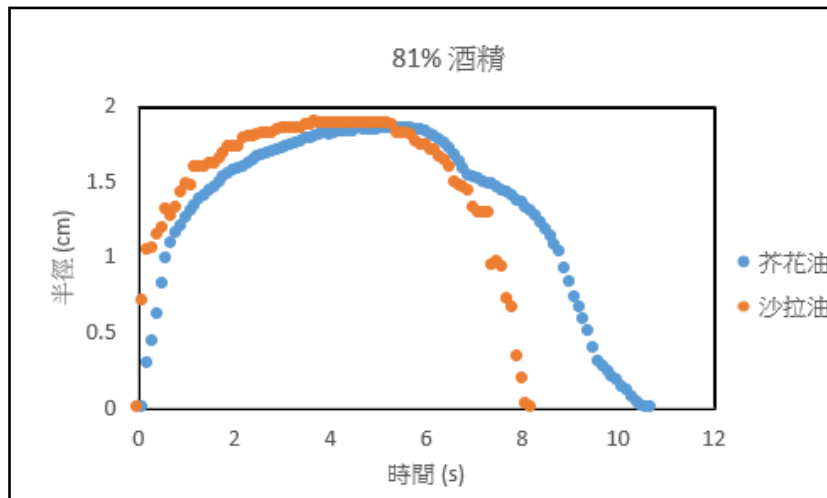


▲圖 (二十)

實驗伍中，改變油的黏度，探討其對實驗時間、最大半徑的影響。在使用黏度較高的油並改變濃度的實驗中，我們得到和使用黏度較低的油一樣的實驗結果，發現實驗時間及濃度會有正向關係。而因為油黏度較高，所以流動速度較慢，會需要更多時間完成現象。所以在比較相同濃度但不同黏度的實驗中，我們發現黏度較高的油實驗所需的時間會比較長。因為在擴散到更大之前就會蒸

發到臨界濃度並不再擴散，所以黏度較高的油會有比較小的最大擴散半徑。圖

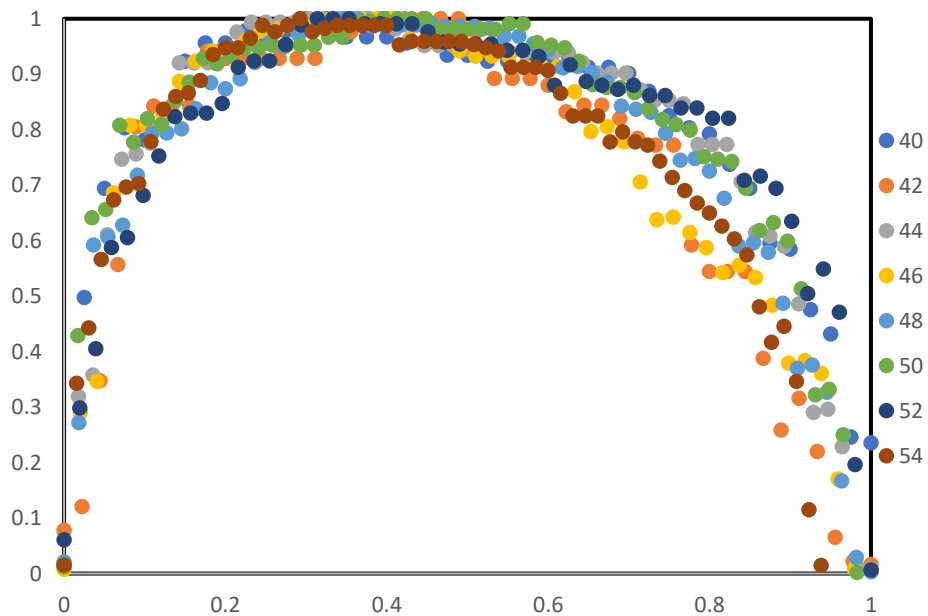
(二十一) 為研究結果。



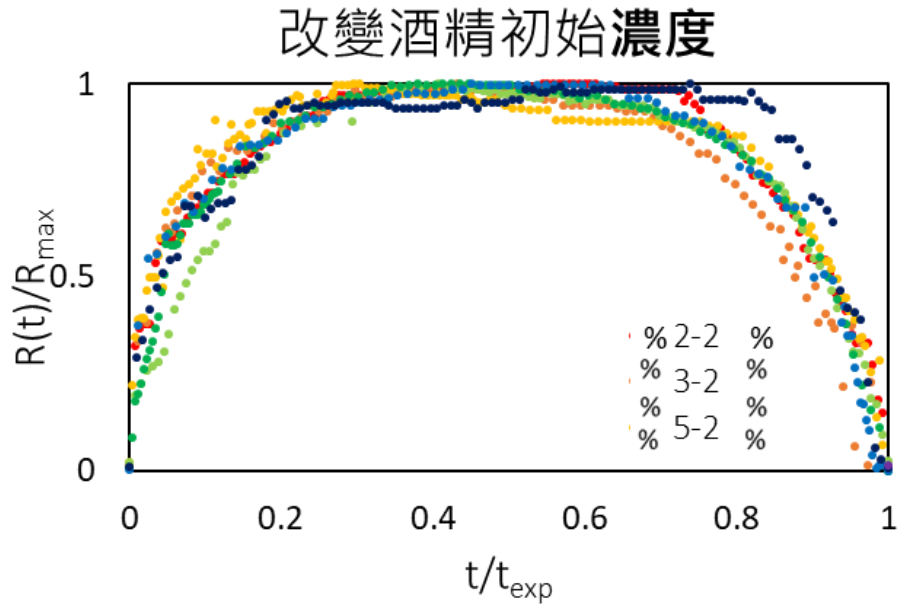
▲圖 (二十一)

(二) 數據重疊分析

改變IPA初始濃度

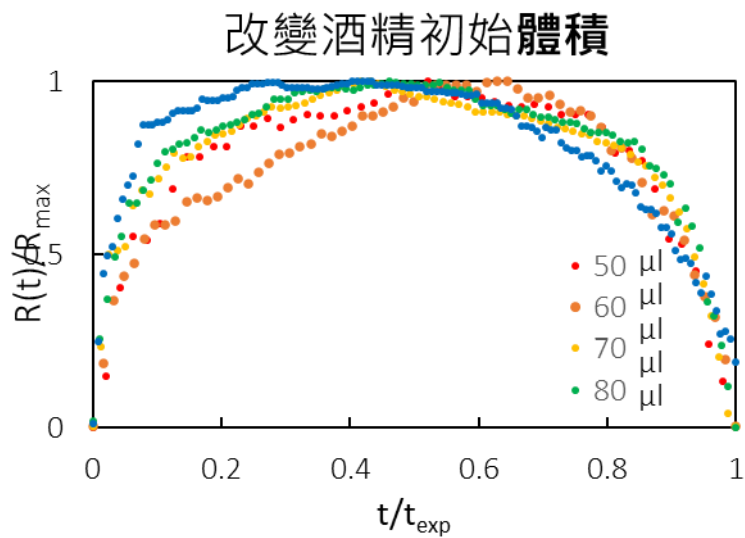


▲圖 (二十二)



▲圖（二十三）

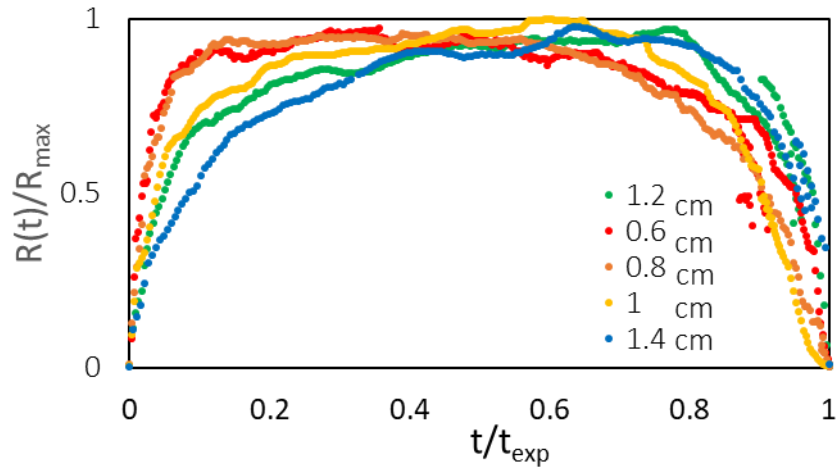
經過比例定律進行數據標準化，再將各不同濃度疊圖分析，在改變濃度的實驗中，我們發現不同濃度半徑隨時間變化的趨勢是大致相同的（如圖二十二、二十三）。



▲圖（二十四）

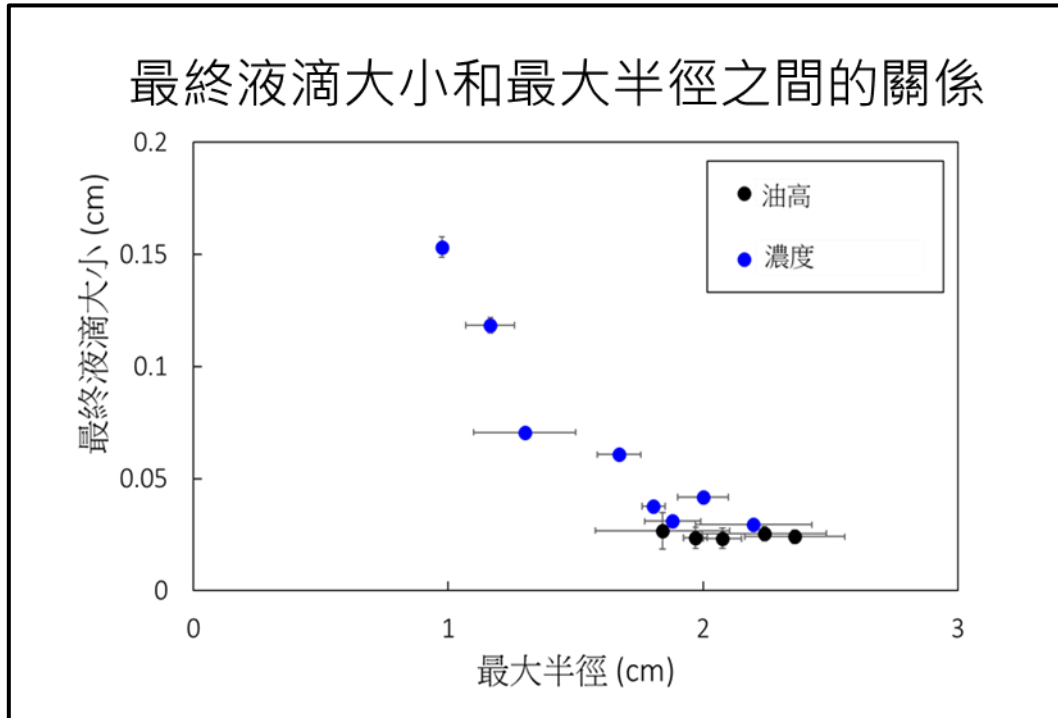
當液滴的體積增加時，會因為重力的影響造成表面張力不足以拉動液滴擴散，故會較早達到最大半徑，使圖形產生偏差（如圖二十四）。

改變油高



▲圖（二十五）

當油高減少時，因為擴散速度過慢的關係，會在擴散的更大之前達到臨界濃度並停止擴散，所以會有較小的擴散半徑。故油高減少時會較早達到最大半徑，使圖形產生偏移。而因為油高增加時會較慢達到最大半徑所以圖形偏移方向與低油高相反（如圖二十五）。



▲圖（二十六）

在油高的實驗中，我們所繪製出來的關於最終液滴大小和最大半徑的關係途

中，可以看到負相關的趨勢是不明顯的。不過，如果與改變濃度的實驗中比較最終液滴大小和最大半徑的關係圖進行疊圖分析，就能發現其實兩者的趨勢會接近，皆為負相關（如圖二十六）。

捌、結論

一、 酒精滴到油上的現象可以分成四個階段：

1. 重力會使母液滴變扁平。
2. 因為液滴各部分濃度不同造成的表面張力梯度的關係，會造成馬倫哥尼流。
3. 液滴為了維持最小表面能，會減少其表面積，讓他由平滑邊界變成指狀邊界。之後為了繼續縮減表面積和無法抵抗表面張力，分裂成許多小液滴。

二、 改變酒精濃度因為蒸發時間差異造成的最大半徑和反應時間的關係圖呈正相關，卻因邊界體積減少造成與最終液滴大小關係圖呈負相關。

三、 酒精體積因為較大體積需較多時間蒸發，邊界也有較多體積的關係，與最大半徑、反應時間和最終液滴大小的關係圖呈正相關。

四、 油高因管流與介面層的關係，與最大半徑呈正相關，但與反應時間和最終液滴大小呈負相關

五、 其反應時間與半徑的變化可以使用比例定律解釋，但仍可能因為變因的不同造成趨勢有些微的落差。

六、 當變因為油高或溶液濃度時，最大半徑與最終液滴大小呈負相關

七、 當蒸發速率變大時，因為較快的蒸發，所以實驗整體時間會較少，並有較小的最大半徑。

八、 當疏水性液體的黏度變大時，因為較慢的移動速率，整體的實驗時間會變長。時間愈長時，液滴會再擴散的更大前達到臨界速率，所以會有比較小的最大半徑。

玖、參考資料

1. Keiser, L., Bense, H., Colinet, P., Bico, J., Reyssat, E., 2017.
Marangoni Bursting: Evaporation-Induced Emulsification of Binary
Mixtures on a Liquid Layer. Physical Review Letters 118..
doi:10.1103/physrevlett.118.074504
2. 高中選修化學 ----- 蒸氣壓
3. 高中選修物理 ----- 表面張力與表面能
4. 高中選修物理 ----- 黏度與物體流速之影響

【評語】 160012

此作品研究液滴在介面的擴散行為，討論表面張力、介面能的影響，利用高速攝影紀錄液滴在介面型態改變的過程，據以計算液滴及時大小，實驗內容豐富。建議探討數據擬合偏差的原因，考慮是否有被忽略的因素，可讓作品更完善。