

2020 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

- 作品編號** 160027
- 參展科別** 物理與天文學
- 作品名稱** 高電場下含界面活性劑二氧化矽-矽油液體
之機械力學特性 與結構探討
- 得獎獎項** 大會獎：一等獎
出國正選代表
耶魯科學與工程學會獎
- 就讀學校** 臺北市立第一女子高級中學
- 指導教師** 簡麗賢、江宏仁
- 作者姓名** 張譯心
- 關鍵詞** 電流變液、矽油分子長度、界面活性劑

作者簡介



我是張譯心(左邊)，目前就讀北一女中二年級，喜歡戶外活動和音樂。

在設法讓自己看懂文獻、設計實驗、執行實驗的過程中，除了學到了不少物理/研究/英文相關的知識之外，也發現物理比想像中的還要好玩，和自己真的懂得很少。

真的很謝謝教授和老師不厭其煩地和我討論，讓我學到很多；實驗室學長姊在我遇到困難的時候幫助我；和很多很多人。

摘要

本研究以添加界面活性劑、二氧化矽及矽油的電流變液作為研究對象，探討矽油的黏度以及添加界面活性劑對電流變液的影響。並希望引入此現象於以高電壓驅動動態摺紙的 DLZ(dielectrorphoetic liquid zipping)結構中，增進其性能。

研究發現不同黏度的矽油會對電流變效果造成影響。以低黏度(10cst)的矽油製成的電流變液，黏度變化於 6kV 時可達原本黏度的 2.4 倍，而以高黏度(350cst)的矽油製成的電流變液，黏度變化則可達原本黏度的 9.7 倍。在實驗時也發現，穿透裝有電流變液比色管的光線在施加電壓後減少，黏度越大，減少的幅度越大，並與界面活性劑的存在有關。因此推論：黏度大的矽油因分子長度較長，藉由界面活性劑作用，更容易和二氧化矽粒子形成整齊結構，因為單一矽油分子可連接更多二氧化矽顆粒。這讓電流變液的黏度改變；同時整齊的結構會使電流變液的散射能力減弱，使接收到的散射光減少。

未來將以顯微鏡直接觀察電流變液的內部結構，並以水及酒精取代界面活性劑，以了解在矽油分子長度改變以及有無添加界面活性劑下電流變液黏度變化的機制，並應用在 DLZ 結構中，完善原本在單純液體中只有考慮介電常數的理論，增加黏度與液體內部結構的討論。

Abstract

In this study, we sought the effect of adding surfactant and different silicone oil viscosities on ER (electrorheological) fluids, also expect to introduce this phenomena to high-voltage driven active origami structure DLZ (dielectrorphoetic liquid zipping), to enhance its performance.

Results show that viscosity of silicone oil will affect ER fluid's properties. ER fluids consist of low viscosity (10cst), will increase 2.4 times of its original viscosity when applied 6kV voltage; ER fluids consist of high viscosity will increase 9.7 times. We also observed a decrease in lights penetrating through colorimetric tube with ER fluids when applied voltage, with higher viscosity, the light decreases more, and it's showed related to the appearance of surfactant. Interfering from these results, having bigger chain length of molecules, silicone oil with higher viscosity is able to connect more SiO₂ particles under surfactant's affect, and thus easier to form a neater structure, increasing the fluid's viscosity, and decrease the light scattered from the fluid.

In the future, we will observe the fluid's structure directly through microscope, and replace surfactant with water and ethanol, in order to more clearly understand the how different viscosity and surfactant influence ER fluid's structure, also apply those results to DLZ structure, complete the original theory only considering permittivity of pure fluid, adding discussion about viscosity and the fluid's inner structure.

一、前言

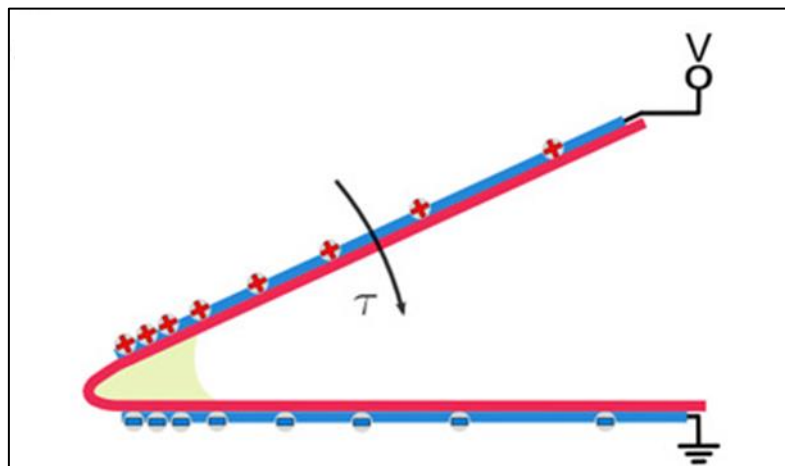
(一)初步研究及研究背景

1. 動態摺紙及 DLZ 構造的初步研究

對摺紙很有興趣，摺紙結構有很多特殊的性質(如 waterbomb 結構有負的蒲松比)，能被運用在各種領域中，而其中最為廣泛應用的領域之一即為軟機器人；摺紙結構體積小、能執行的動作相對複雜。但目前驅動動態摺紙結構的方法，很多都需要複雜的材料，效率也不甚高。

藉由進行一系列模仿 DLZ(dielectrophoretic liquid zipping)的實驗後，發現矽油黏度和 DLZ 的響應效果有關(也就可以推論矽油的分子長度可能和 DLZ 的響應效果有關)，且此響應效果不如論文中提出有二次方關係(如附錄中實驗圖表)，驅動狀況也不是很好，因此希望能夠找出出現上述兩種結果的原因。

DLZ 閉合的原理為:利用液滴在兩片電極接縫處因為和空氣的介電常數差異，產生壓力差，推擠液滴向前，不斷重複這個過程，達到閉合的效果。最後將電極維持在閉合狀態靠的則是介電泳力。(如圖一，紅色為絕緣層，在我的實驗中用的是投影片；藍色是電極，在我的實驗中用的是錫箔紙)



圖一 DLZ 構造

2. 電流變液

一開始會想到電流變液是因為它在電場下會因為介電粒子在絕緣液體中排列整齊，而改變黏度。因此若在 DLZ 中添加電流變液，或許能將裝置的響應效果變得很好。

藉由文獻查詢，由《influence of liquid phase on nanoparticle-based giant electrorheological fluid》得知電流變液的電流變效果同時也會受到電流變液中添加的矽油黏度影響，且有人提出表面極化飽和假設，和 DLZ 中響應效果和電壓不成二次方關係的現象類似。由於電流變液和 DLZ 裝置同樣都有在絕緣液體中互相吸引的介電質(在電流變液中是二氧化矽粒子;在 DLZ 構造中是兩片電極)，因此可能可以藉由實驗電流變液的相關性質，了解在 DLZ 構造中發生的這些現

象，如矽油黏度是如何影響 DLZ 裝置的響應效果，將原本只有考慮液體介電常數的理論中加入一些關於液體黏度、內部結構的討論。

但由於沒辦法像參考的論文中製造複雜的介電粒子，因此使用界面活性劑、二氧化矽及矽油製作具良好電流變效果的電流變液作為研究對象；同時在探討黏度之外，也針對界面活性劑於電流變液中扮演的角色進行實驗。因此整個實驗的最主要目的，就是了解矽油的黏度以及添加界面活性劑對電流變液的影響。

(二) 研究目的及問題

1. 研究矽油黏度對電流變效果的影響

- (1) 不同黏度的矽油在添加界面活性劑及親水二氧化矽粒子的系統中是否仍會對電流變效果造成影響?
- (2) 是否能觀察到表面極化飽和現象?

2. 觀察電流變液微觀型態及光學性質變化

- (1) 電流變液的光學性質是否會和電流變效果有關?
- (2) 由微觀型態觀察及光學性質變化是否能解釋界面活性劑及不同黏度的矽油於電流變液中扮演的角色?

3. 改變添加液體

- (1) 添加液體對電流變效果的影響?
- (2) 能增加電流變效果的液體需有什麼樣的性質?

4. 應用在 DLZ 構造

- (1) 是否能用電流變液的實驗結果解釋在 DLZ 構造中看到的一些現象?
- (2) 電流變液是否能讓此裝置的響應效果變佳?
- (3) 電流變液承受張力和剪力的能力是否相同?

二、研究過程及方法

(一) 研究器材

1. 研究材料
Percoll、350cst 矽油、10cst 矽油
2. 研究器材
CCD、筆電、比色管、小鋼球、銅膠帶、研鉢研杵、高壓電源供應器、電源供應器、手電筒、燒杯、塑膠試管、vortex、超音波震盪器
3. 分析軟體
IC Capture、imageJ、excel

(二) 實驗方法及步驟

1. 製作電流變液
 - (1) 將 percoll 以電磁攪拌器蒸乾後磨碎，得二氧化矽粉末
 - (2) 將 2.3 公克二氧化矽粉末及 0.2ml trixon-x-100 加入 8ml 矽油(體積百分比比例)

分別為 10%、2.5%、87.5%)

- (3) 用 vortex 先將電流變液初步混合均勻
- (4) 用超音波震盪器震盪一小時，使其完全混合均勻
- (5) 依實驗目的需求加入不同黏度矽油或液體(如:以酒精取代界面活性劑)



圖一 配置好的電流變液

2. 測試電流變液黏度



圖二 電流變液黏度測試裝置

- (1) 在裝置後方架設手電筒，並用電源供應器調整至適當亮度，使小鋼球能被看見
- (2) 將小鋼球於比色管液面靜止釋放
- (3) 以 CCD 拍攝小球沉降過程
- (4) 用 imageJ 計算小球沉降速率
- (5) 假設小球下沉為等速，阻力和小球重力達平衡，而阻力依 stoke's law 和黏度有關。因此可由下式計算出電流變液黏度(單位為泊)。

$$\mu = \frac{(m - \rho V)g}{6\pi r v}$$

3. 測試電流變液光學性質



圖三 測量裝置及 imageJ 頁面

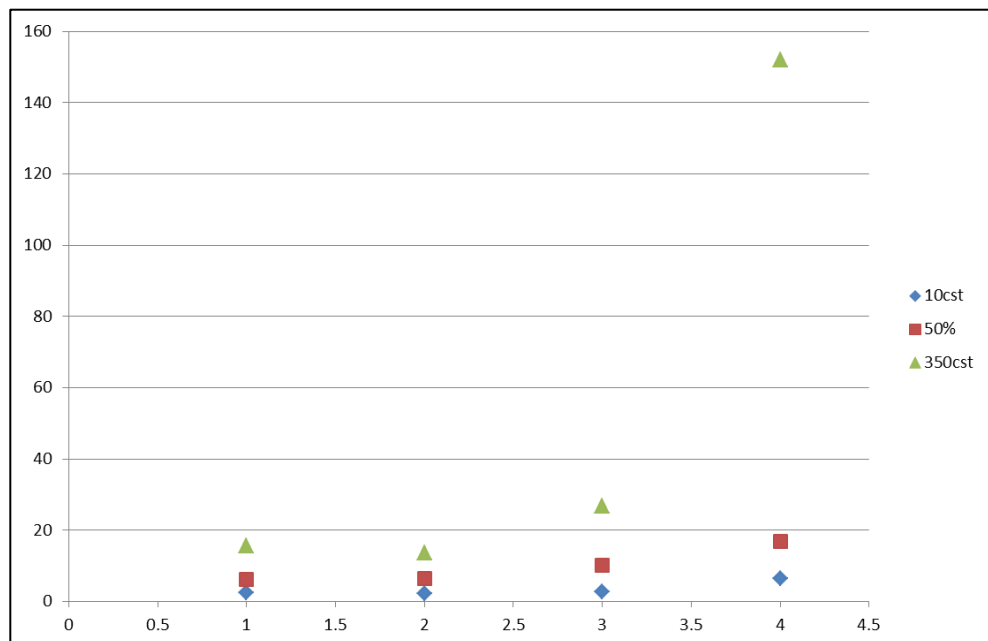
- (1) 在此研究中，電流變液在開電壓前後，CCD 透過裝有矽油的比色管接收到手電筒的光亮度會有改變。由於不確定是透射、吸收散射或其他因素導致這種亮度改變，因此統稱為電流變液的光學性質。
- (2) 用 imageJ 分析實驗影片，先將電流變液範圍用工具框出。
- (3) 使用 measure 功能測量電流變液範圍 pixel 數及整體灰階值(mean gray value)
- (4) 相除得平均每個像素的灰階值，並將開電壓前後數值相減，可做為衡量亮度變化標準。

(註: 單一像素的灰階值範圍由黑(0)到白(255)，表示灰階影像明亮程度。)

三、研究結果、討論與未來展望

1. 研究矽油黏度對電流變效果的影響(實驗一)

- (1) 不同黏度的矽油在添加界面活性劑及親水二氧化矽粒子的系統中是否仍會對電流變效果造成影響?



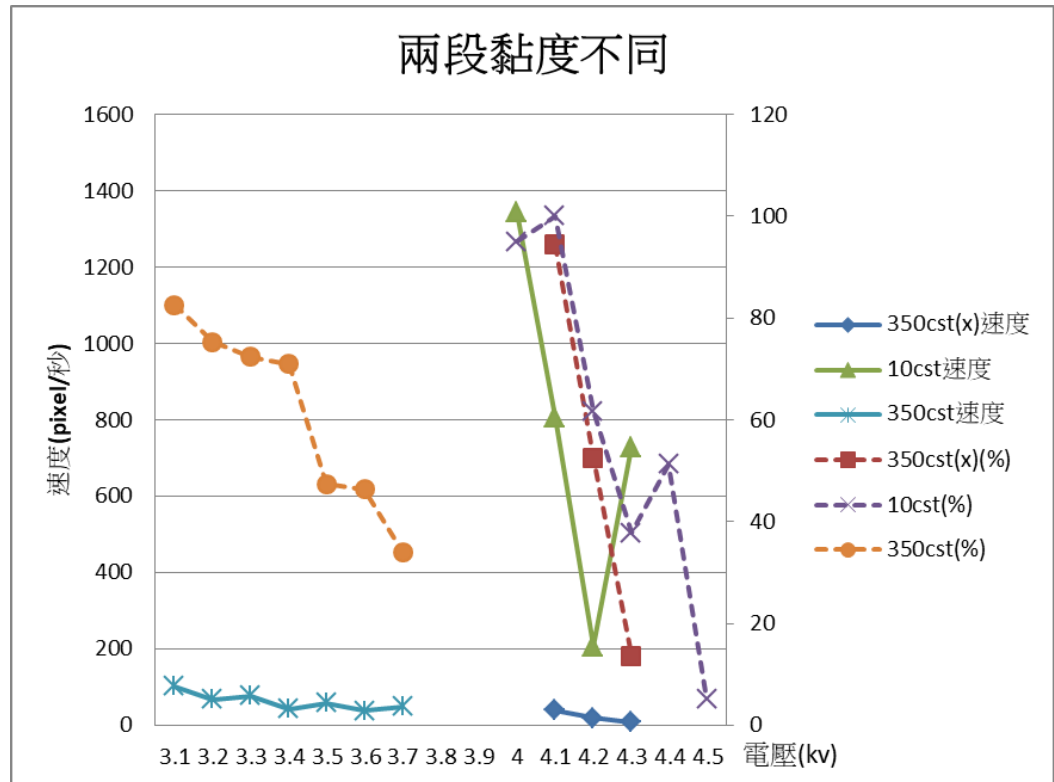
圖四 矽油黏度和電流變液的關係(縱軸為黏度，單位泊；橫軸為電壓)

- i. 由圖四中得知，黏度越大的矽油，施加電壓後的黏度增加越多，電流

變效果越佳；在 trixon-x-100、二氧化矽及矽油的電流變液中，矽油的原始黏度的確會影響到其電流變效果。且 350cst 的矽油製作的電流變液和電壓大致成二次方關係。

- II. 推測可能是因為黏度大的矽油分子長度較長，在施加電壓後比較容易和二氧化矽形成結構，使黏度變大。由於我的二氧化矽粒子是由 percoll，也就是含有二氧化矽的溶液中取得的，因此它的表面親水，可藉由界面活性劑將其和矽油分子黏在一起，越長的矽油分子就可以黏越多二氧化矽粒子，達越好的凝集效果，在通上電壓後二氧化矽也比較容易排列，形成整齊結構，增加電流變液黏度。
- III. 界面活性劑還可能扮演界面活性劑橋的角色，這個部分在實驗三中會再敘述。
- IV. 在實驗影片中還觀察到有趣的現象:手電筒的光通過電流變液到 CCD 接收的光，會因為開了電壓而減少，而且電流變效果越好的液體，初步分析光線，減少的光也越多。由於電流變液的黏度和其內部結構有關，找出穿透光變暗的原因後，或許可用分析電流變液對穿透光的影響來推測其內部結構的某些資訊。因此進一步進行了實驗二。
- V. 另外由於中間黏度的矽油是由 10cst 和 350cst 的矽油混合而成，未來希望能直接用 100cst 的矽油做實驗，看效果是否相同。

(2) 是否能觀察到表面極化飽和現象?



圖五 小球沉降速度及具液體性質佔電流變液體積百分比

- I. 在此實驗中，觀察電流變液的流變效果是否真的和電壓的二次方有關(實驗一中的電壓間距太寬，無法計算)，若沒有，是否能觀察到近於線

性的關係，也就是表面極化飽和現象。(介電粒子表面累積的電荷達飽和，無法再進行更多的極化，無法和電場完全響應。)所以挑選在此實驗系統下電流變液黏度變化最劇烈的區段，希望能找到明顯電壓和電流變液黏度的關係。(電壓太大，電流變液黏度太高，小球重力不足以使電流變液流動；電壓太小，沒有電流變效果。黏度變化最劇烈的區段即為由完全可流動變為完全不可流動的區段。)

- II. 在此區段中實驗時，沒有直接觀察到電壓和黏度的關係；反而小球在液體中運動一段時間後，會停止運動。在圖五中列出原始矽油濃度為 350cst、10cst 的電流變液(註:350cst(x)為原始矽油濃度為 350cst，沒有添加界面活性劑的矽油。)有流動性質的體積佔所有電流變液體積的百分比，以及小球在上方液體的流動速度。可以大致看出，隨著電壓變大，具流動性質的體積減少，同時小球在該區域運動的速度也會越慢。
- III.



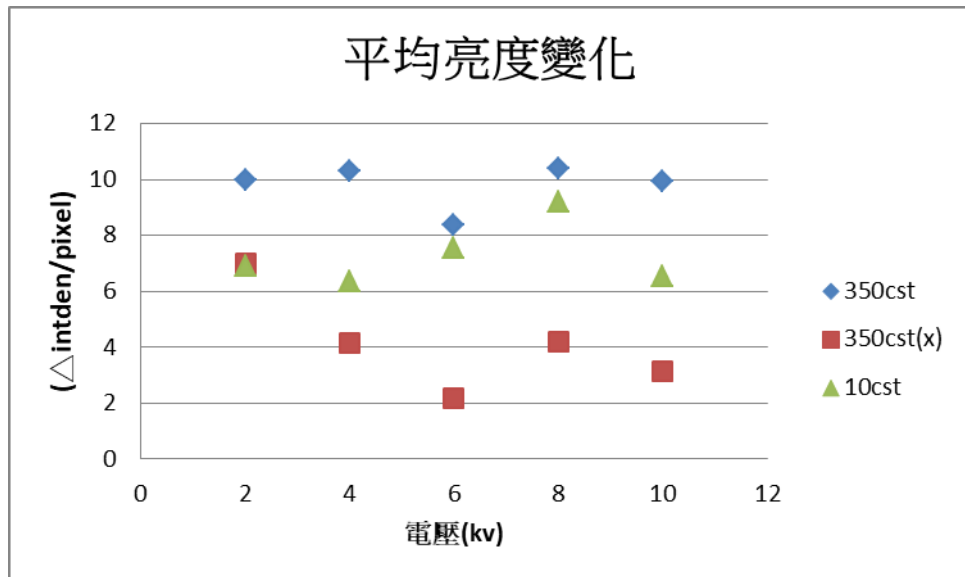
圖六 施加電壓後二氧化矽粒子的排列情形

一開始對此現象的解釋是小球在運動過程中，把像是在圖六中看到的這些條狀結構推擠到下方，讓下方液體的密度變大；或是實驗時而二氧化矽粒子沉澱。但因為在關閉電壓後小球隨即由靜止位置落下，且下落速度沒有明顯降低，因此推測不會是上述兩種解釋造成密度差，進而導致小球在電流變液中停止，而很有可能是因為在放置小球時沒有完全靜止，讓小球有初速，因此才會讓兩段液體中小球的運動速度不同。

- IV. 若之後實驗證實和小球的初速無關，希望能找出造成這種類似非牛頓流體中剪切增稠現象的成因。而圖六中的條狀結構是否真的為二氧化矽粒子的真實排列情形也有待確認。

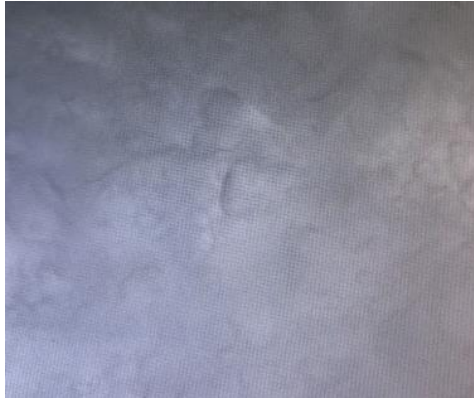
2. 觀察電流變液微觀型態及光學性質變化(實驗二)

- (1) 電流變液的光學性質是否會和電流變效果有關?



圖七 亮度變化和不同原始黏度電流變液的關係

- I. 在這個實驗中，由於亮度的測量很容易受到人為誤差或環境因素(日光燈閃動、手電筒位置因為桌面晃動而改變)影響，尤其測量亮度的範圍是手動選取的，因此實驗結果可能不甚準確。但還是可以推測光線的變化和電流變效果有關；且 350cst，有加矽油的界面活性劑整體來看效果是最佳的。同時也證實在施加電壓後穿透光的確有減少。未來希望能更準確地測試穿透光多寡，並用較不容易受到干擾的方法測量其亮度，如固定圈選範圍、在沒有其他照明的環境下進行實驗等。
 - II. 推測我們在 CCD 中接收到的多數為散射光，原因有二：第一是手電筒光源和 CCD 並不呈一直線，因此接收到的是散射光，第二是用偏振片檢驗，接收到的光源沒有明顯偏振性質，且二氧化矽粒子的直徑不足以產生偏振後方手電筒的光。但如果能再用上述的方法精確的測試會使此推測更可信。
 - III. 由實驗中可知，電流變液的光線變化，在不同黏度間的差異為 1.2 倍，有無添加界面活性劑之差異為 2.4 倍。因此界面活性劑的添加與否對電流變液結構有一定影響。
 - IV. 散射光減弱的原因可能是因為內部結構在施加電壓後被排列整齊，使液體的散射能力變弱。350cst 的散射效果最佳也符合在實驗一中的推論，分子長度長且有添加界面活性劑的矽油較容易在電壓下有能夠使黏度變大的結構。
- (2) 由微觀型態觀察及光學性質變化是否能解釋界面活性劑及不同黏度的矽油於電流變液中扮演的腳色？



圖八 電流變液在顯微鏡下的影像

- I. 直接將待測的電流變液放入倒立式顯微鏡觀察，沒辦法很有效的看出電流變液中發生什麼事情，可能需要將矽油染色能直接看出二氧化矽粒子和矽油的位置；如果此方法能清楚看出電流變液的內部結構，或許還能將界面活性劑染測，直接觀察界面活性劑在電流變液中的作用。
- II. 若光學顯微鏡解析度不夠，會需要其它能得知二氧化矽排列狀況及界面活性劑分布的方法。目前只有想到在溶液裡在不影響電流變液效果的狀況下散布很多磁性小顆粒，在另一側用磁鐵吸引這些顆粒，在不同二氧化矽粒子的分布狀況中這些小顆粒運動的狀況也會不同。

3. 改變添加液體

(1) 添加液體對電流變效果的影響？

好奇界面活性劑究竟是因為在兩個二氧化矽粒子中間形成界面活性劑橋、本身介電常數大使二氧化矽粒子更好地被極化或者是讓矽油分子更好地黏附到二氧化矽粒子上所以讓裝置的電流變效果變好，我在電流變液中用酒精取代界面活性劑，試試看會對電流變效果造成什麼影響。

結果在製作電流變液的過程中遇到一些困難，主要是無法確定酒精是否有妥善地混合入矽油中。電流變液的電流變效果和原本添加界面活性劑的效果差不多，但由於通入電壓太高，酒精一下就沸騰了。另外也試了非極性的界面活性劑 SDS，同樣也對電流變效果沒有很多影響。

由於酒精不親油，但二氧化矽粒子相對於酒精可能更不親油，因此酒精也有可能在二氧化矽粒子中間形成連接兩個粒子的結構，或將矽油黏附到二氧化矽粒子上。也有可能酒精沒有完整地混入矽油，而是在矽油中形成很多介電小泡，變成另一個介電粒子，和二氧化矽共同排列成矽油中的整齊條狀結構。

(2) 能增加電流變效果的液體需有什麼樣的性質？

若能藉由加入不同的液體得知加入電流變液的液體需要什麼樣的性質，如親水、有低表面張力、不導電、介電常數高等等，就能推測它在電流變液中的作用。未來希望能加入純水(不導電且介電常數高)，並且再次針對添

加酒精的電流變液進行製作過程的改良及測試。

4. 應用在 DLZ 構造

- (1) 是否能用電流變液的實驗結果解釋在 DLZ 構造中看到的一些現象?

由於沒有觀察到表面極化飽和，因此沒辦法針對這個部分推論，但關於矽油的分子長度對裝置響應效果的影響，會需要等上述的實驗完成後才能繼續驗證。

- (2) 電流變液是否能讓此裝置的響應效果變佳?

在上述實驗過後，將電流變液加入 DLZ 構造作為介電質，看裝置的響應效果是否變好，結果沒有。可能是測試閉合力的方法牽涉到將電極拉開的過程，而電極被拉開，在提供的電位差相同的狀況下，電場會隨著距離減弱。但同時也有可能是因為在電流變液中形成的結構能承受張力和剪力的能力不同。

- (3) 電流變液承受張力和剪力的能力是否相同?

預計先使用兩片電極，對其施加剪力，看效果如何。若效果有很大的差異，很有可能是因為兩個測試系統有很大不同，才讓電流變液無法在 DLZ 構造中發揮作用。須將系統改良後(如將電極表面變得更親水，讓親水的二氧化矽粒子能更有效地貼附到電極上)才能將兩個系統放在一起比較，或是把電流變液放在 DLZ 構造中應用。

四、結論

由實驗一及實驗二中，發現電流變液的電流變效果會受到矽油黏度的影響，矽油黏度越大，電流變效果越佳，且穿透光變化越大。黏度 350cst 的矽油製成的電流變液，黏度變化於 6kV 時可達原本黏度的 9.7 倍，而不同黏度間的差異最多可達 3.9 倍。而電流變液的光線變化，在不同黏度間的差異為 1.2 倍，有無添加界面活性劑之差異為 2.4 倍。推測是因為黏度大的矽油，分子長度較長，藉由界面活性劑作用，更容易和二氧化矽粒子形成整齊結構，讓電流變液的黏度改變。沒有觀察到表面極化飽和的現象，但在同一次實驗中觀察到電流變液有兩個黏度，需再實驗看是否為小球初速亦或是其他原因影響。

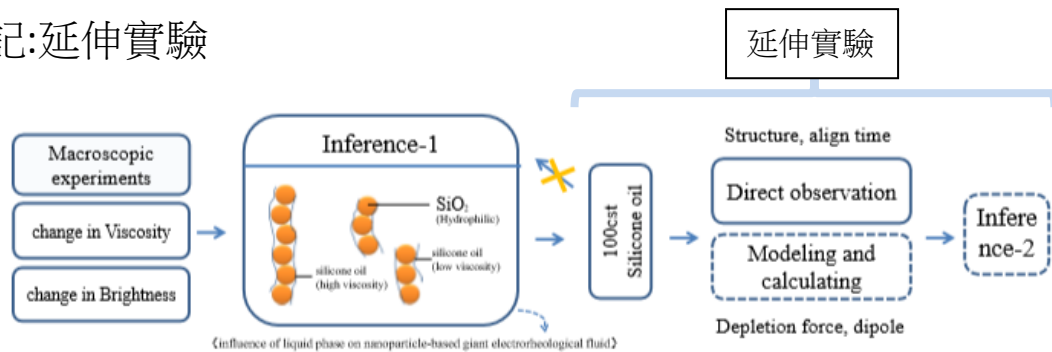
未來希望能更精確地測量數據，並藉由未完成的實驗三、四、五更了解在實驗一、二中觀察到的某些現象的成因，藉此更加清楚電流變液受矽油黏度及界面活性劑影響黏度變化的機制，並針對 DLZ 結構和電流變液做實驗。

五、參考文獻

- 一、M.Taghavi, T. Helps, J.Rossiter, (2018). Electro-ribbon actuators and electro-origami robots, Sci. Robot.3, eaau9795

- 二、X.Gong, J.Wu, X.Huang, W.Wen, P.Sheng(2008). Influence of liquid phase on nanoparticle-based giant electrorheological fluid, Nanotechnology 19
- 三、溫維佳等(2003)·巨電流變效應及其機理·研究快訊 32 卷第 12 期
- 四、2018 年國際科展作品《界面活性劑對電流變液的影響》

六、後記:延伸實驗

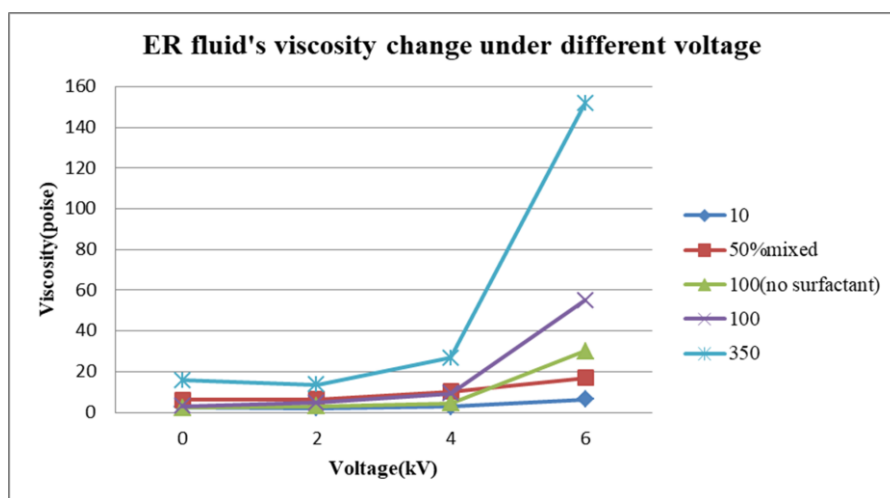


之後也按照計畫用 100cst 的矽油製成的電流變液做了實驗，發現 100cst 的矽油效果最好，因此之前的推論無法完全解釋在這個系統內發生的電流變現象為何會有這些特性。所以，又改良之前的觀測方法，用顯微鏡觀察了二氧化矽鍊的外觀及形成過程，也針對新的推論--空乏力和電偶極，做了模擬和計算。

原本預計加入不同介電常數的液體，但仍然無法克服酒精沸騰、加水導電等問題，因此先用模擬。

結果顯示，雖然黏度越大的矽油，二氧化矽鍊的寬度和長度以及二氧化矽粒子之間的空乏力最大(計算結果)，但因為鍊的形成速度緩慢，是導致 100cst 矽油製成的電流變液效果最佳的可能原因。同時，添加界面活性劑可以讓鍊的形成速度變快，也可以讓極化率(單位體積電偶極總和)增加三倍(模擬結果)。

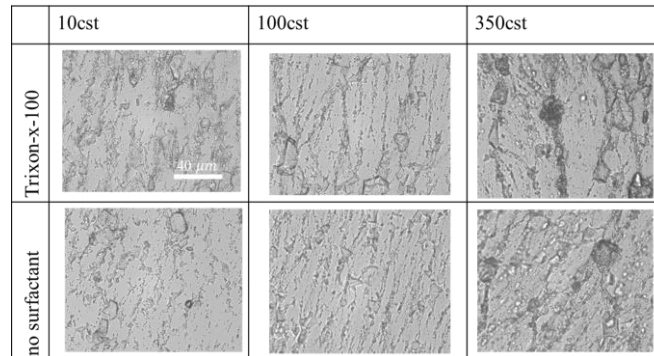
但因為實驗有些誤差，有待改善，且未考慮水/界面活性劑橋假說(Kim 2001)，未來將改善實驗精準度，並進行針對空乏力、電偶極、水橋假說的實際實驗。在之前 DLZ 實驗的實驗影片中，也發現了類似水橋的現象，說不定可以用巨觀的實驗來模擬二氧化矽粒子之間微觀的物理現象。這個系統比想像中的還要複雜。



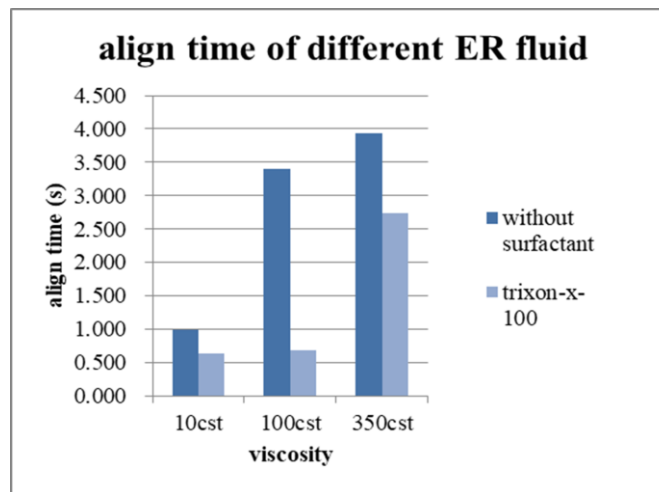
圖九 不同電流變液在不同電壓下的黏度

background Voltage(kV)	10cst	50%mixed	350cst	100cst	100cst(x)
0	2.54609	6.069037	15.68430124	2.881581	2.16915
2	2.158696	6.3605	13.60838444	4.572904	3.02023
4	2.652038	10.24504	26.79955828	9.122968	4.35316
6	6.293762	16.84243	152.0133324	55.07847	30.20466
increased rate	2.471932	2.775141	9.692069162	19.11398	13.92465

表一 不同電流變液在不同電壓下的黏度及年度變化率



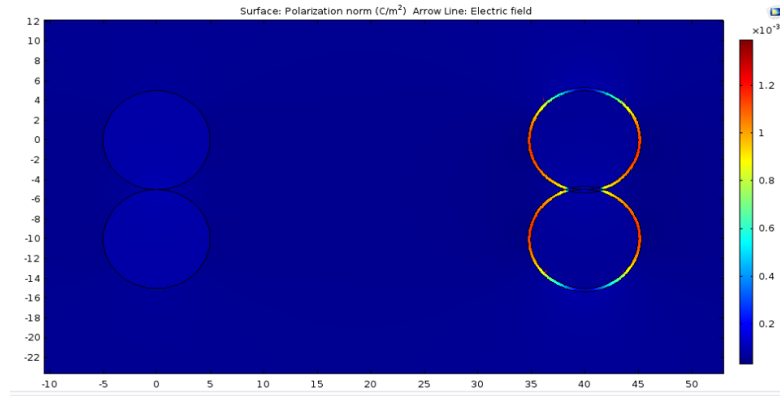
圖十 不同電流變液的顯微鏡照片



圖十一 在不同電流變液中二氧化矽鍊形成的時間

viscosity	\bar{M}	n(bonds)	$R_s (10^{-12}m)$	specific gravity	$V_o (10^{-18}m^3)$	mol-J
10cst	1250	16.890	303.300	0.935	3.611E-07	1.118E-48
100cst	5970	80.600	774.600	0.966	2.356E-06	1.578E-48
350cst	13650	184.400	1272.700	0.970	6.360E-06	1.871E-48

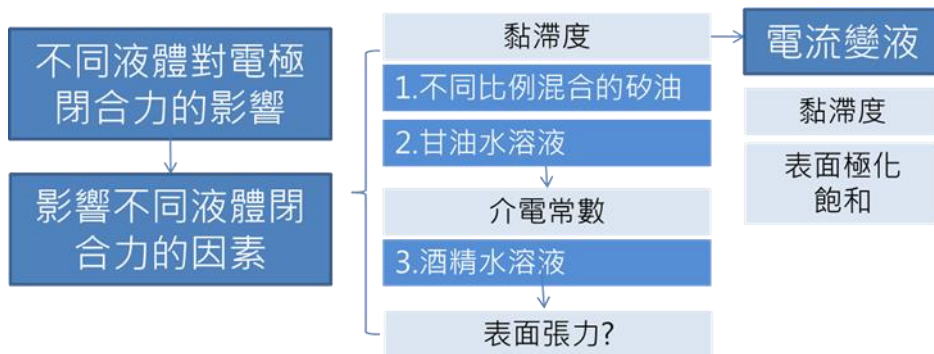
表二 空乏力計算結果



圖十二 電偶極模擬結果

七、附錄(DLZ 實驗)

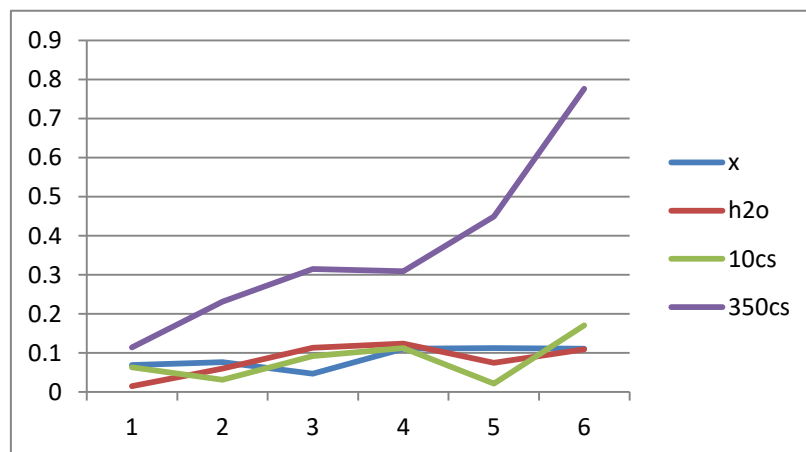
(一) 研究流程



(二) 實驗數據

一、不同液體對電極閉合力的影響

(1) 不同種類的液體

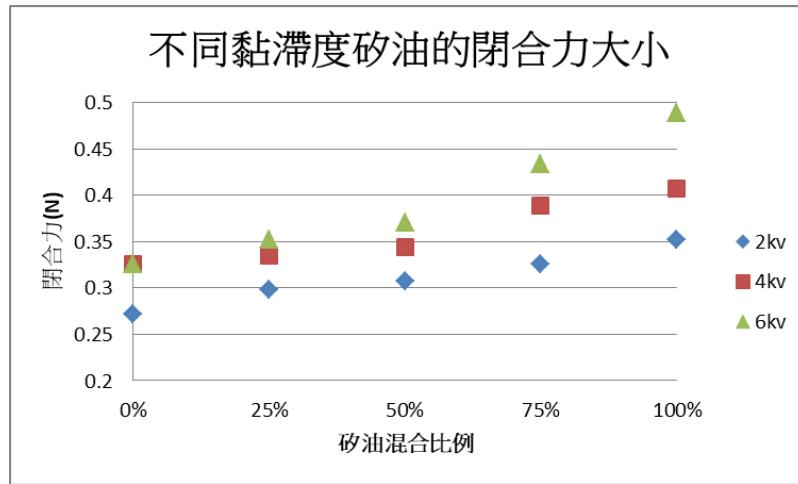


圖一 在不同電壓下，不同液體的閉合力大小

- i. 在第一個實驗中，由於在影片檔案中發現使用的橡皮筋和後三個實驗的不同，因此無法將橡皮筋單位長度的形變量直接轉換為力。但伸長量仍舊與閉合力的大小成正比；因此由圖中得出黏度為 350cst 的矽油效果最佳。

- ii. 初步推測，由於不同黏滯度矽油的介電常數約介於 2.18-2.88 之間，因此在此造成兩種矽油響應效果差異這麼大的原因，只有液體的黏度。至於水的響應效果很差，由於水的介電常數很高，推測是因為表面張力太大，影響了裝置的響應效果。因此，在下一個實驗中，以不同比例將矽油混和，配製不同黏滯度的矽油，觀察其對閉合力的影響。
- iii. 另外，在此實驗中也大致驗證了公式中提到的，閉合力和電壓大小成正相關，但無法明確看出它和電壓二次方的關係。

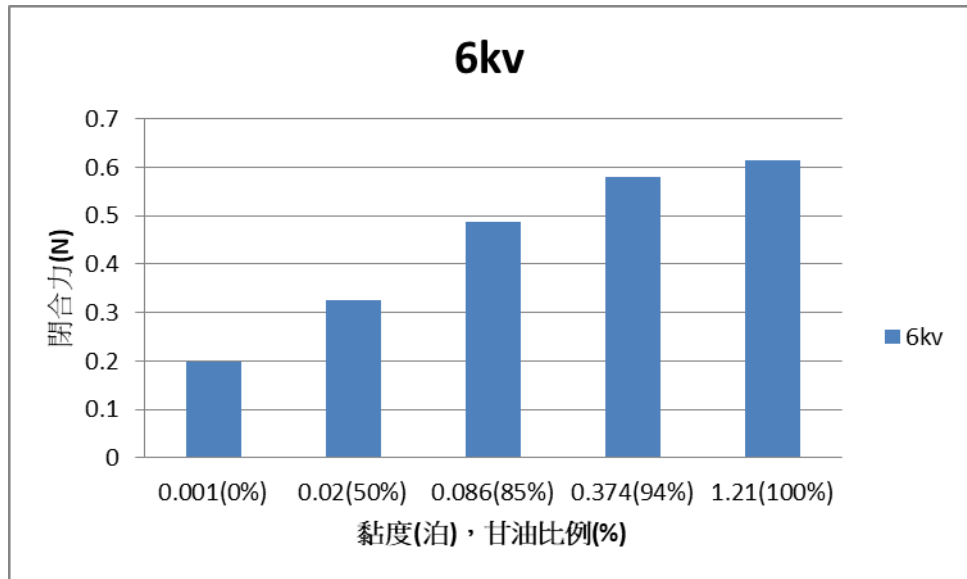
(2) 不同黏滯度的矽油



圖二 不同黏滯度矽油的閉合力大小

- i. 如圖，黏滯度的確會對電極的閉合力造成影響。且隨著黏滯度變大，閉合力也變大。推測原因可能有二:第一，這個現象是由人為誤差造成。黏滯度大的矽油，流動較慢，因此在同樣的拉動速度下，黏度大的矽油較不易讓電極分開。但後來簡單的實驗拉動速度對實驗是否會造成誤差，發現不會，因此，就有可能是原因二:矽油的分子長度不同，影響其在高電場下的某些行為。
- ii. 好奇除了矽油之外，水和甘油的系統是否也會有同樣對黏滯度的反應。矽油的黏度不同，是由於分子長度不同；而水和甘油混合比例不同，造成黏度不同的原因，則和水和甘油之間的氫鍵有關。

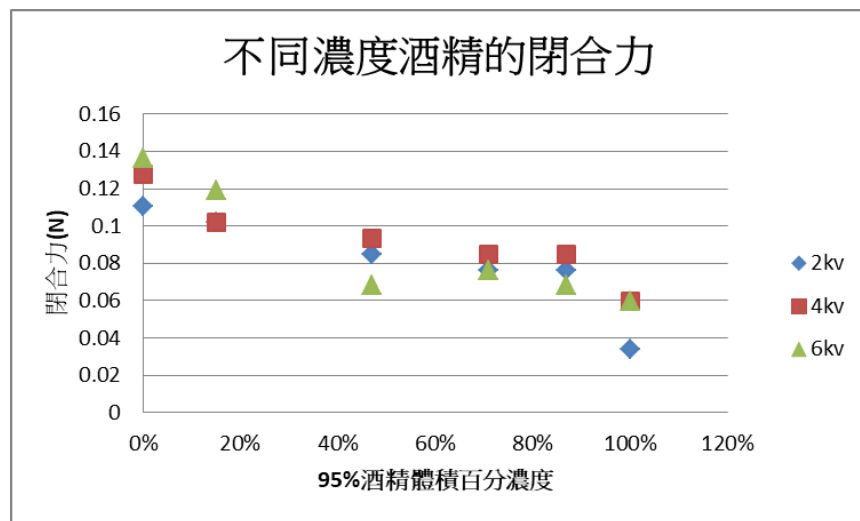
(3) 不同黏滯度的甘油水溶液



圖三 在 6kV 下，不同濃度甘油水溶液對閉合力的影響

- i. 從圖中可以看到，不同濃度的甘油水溶液同樣也會對閉合力造成影響；而有趣的一點是，甘油的介電常數約為 20 而水的介電常數約為 70，在此實驗中，黏度的影響比介電常數來的大。但在參考的論文中，並沒有提到黏度對此裝置響應效果的影響。

(4) 不同介電常數的酒精水溶液

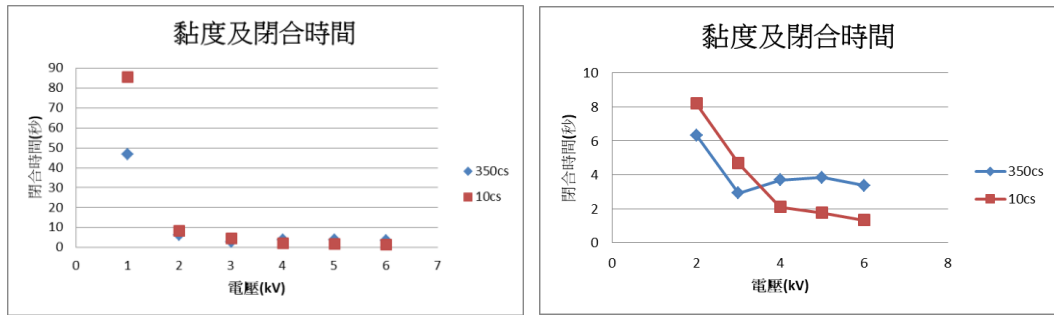


圖四 酒精濃度對電極閉合力的影響

- i. 由實驗結果驗證公式中介電常數越高，由於液體被電極化的能力越佳，電極之間的閉合效果也越好。
- ii. 但是由於水和酒精本身的閉合效果都不如矽油或甘油佳，因此在此實驗中數據會有比較多的波動和誤差。推測效果差的原因和表面張力及黏度有關。

二、電極動態過程中的影響因素

(1) 矽油的黏滯度



圖五 懸掛實驗裝置中，矽油黏度對閉合時間的影響

- i. 在這個實驗中使用的是最軟的絕緣膠帶，雖然負重效果很差，但能夠很明顯的看出每個實驗的差異。左圖是電壓由 1kV 至 6kV 的實驗結果，右圖為 2kV 至 6kV 的放大圖。在高電壓時，10cst 的矽油由於流動較快，閉和時間較快；在低電壓時，350cst 的矽油效果卻變得較佳，可能是因為 350cst 的響應效果較好，受電極閉合能力受電壓影響較 10cst 小。

【評語】 160027

1. 主題的新穎性：二氧化矽-矽油液體的電導行為，值的再探究。
2. 實驗設計：探討物理變數嫌合宜，分析建議可再深入，並可再變換參數延伸實驗。可再就應用性探索。