

2021 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 160003

參展科別 物理與天文學

作品名稱 **Order Restoration in Perturbed
Electrorheological Fluids**

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、界面活性劑、動態修復

作者簡介



我是張譯心，目前就讀北一女中三年級，喜歡戶外活動和音樂。很幸運能進入實驗室做實驗，在中間發現物理其實很好玩、也做了很多實驗看了很多文獻，是一次非常難忘的經驗(在顯微鏡下面看二氧化矽顆粒動來動去真的很有趣!)。很感謝江教授和簡老師不厭其煩地和我討論實驗，實驗室的學長姐在我遇到困難的時候幫助我，還有很多很多人!

摘要

電流變液是一種由介電顆粒和絕緣液體混合而成的特殊流體，在外加電場到電流變液後，二氧化矽沿著電場排列成整齊的鏈狀結構，提升電流變液的黏度。

在這個研究中，使用添加了界面活性劑、親水二氧化矽顆粒以及矽油的電流變液作為研究對象，發現電流變液的黏度可以隨電場增加而有效地增加，且增加的效果會同時受到矽油初始黏度和是否添加界面活性劑的影響，但並非初始黏度越高效果越好，且添加界面活性劑在每一種初始黏度造成的影響也不同。

影響黏度的機制則和液體在電場下的靜態結構以及結構被破壞後的修復速度有關。比較黏度測量、散射光實驗、顯微鏡觀察等實驗結果後，推測該機制作用原理如下：

當矽油的初始黏度較小時，由於二氧化矽鏈的結構較不穩定且修復速度較快，因此主要會是修復速度在控制矽油的黏度，添加界面活性劑後，它會在親水的顆粒表面形成一層高介電常數的薄膜，提升顆粒的極化率，進而加速結構的修復、使液體的黏度增加。而當初始黏度較大時，由於修復速度較緩慢但結構相對較穩定，因此是由結構來決定矽油的黏度。

Abstract

It is known that applying electric field is able to adjust the viscosity of a non-conducting fluid emerged with dielectric particles, known as electrorheological (ER) fluid, and the viscosity of an ER fluid is controlled by the degree of alignment of the dielectric particles.

In this study, a non-linear behavior of the ER fluid is observed. I use a simple ER fluid system that contained silica particles, silicone oil and little surfactant (triton x-100); the fluid's viscosity is able to be changed largely by the electric field.

Results show that surfactant's appearance will enhance the fluid's ER behavior, and silicone oil's initial viscosity also has an effect on it too. The mechanism of how these factors influence the fluid is related to both the fluid's static configuration and dynamic response.

When ER fluid's initial viscosity is low, the stabilization of ER fluid's inner particle-chain alignment mainly results from order restoration of disengaged particles under flow. While adding surfactant increases polarization of the particles by creating a high permittivity layer around it, faster restoration of particle chain is observed, effectively increases the fluid's viscosity under electric field.

As for ER fluids made of higher viscosity, the fluid's static configuration plays a more important role, since a slow restoration rate can't contribute much to the viscosity change.

In conclusion, our results suggest that the ER fluid's rheological property not only relates to the fluid's inner structure but also the structure's dynamic response. By considering dynamic response, we might be able to create an effective adjustable damper from low-initial viscosity ER fluids.

一、前言

(一) 研究動機

在去年關於電流變液的研究中，發現在添加界面活性劑的二氧化矽-矽油液體在電場下的變化情形比想像中的還要複雜，且在黏度測試實驗中增加電壓參數的變化及測試的次數後，發現空乏力和水/界面活性劑橋假說無法完整地解釋所得的數據，因此想透過設計不同的實驗，用不同的角度觀察添加界面活性劑的電流變液性質(如光學性質等)，以提出更完善的推論。

(二) 研究目的及問題

1. 測量不同電流變液的初始條件對電流變效果的影響
 - (1) 矽油初始黏度對液體電流變效果的影響
 - (2) 添加界面活性劑對液體電流變效果的影響
2. 觀察電流變液內部結構
 - (1) 散射光強度變化測量
 - (2) 顯微鏡觀察
 - (3) 二氧化矽鍊排列時間觀察

二、研究過程及方法

(一) 研究器材

1. 研究材料
Percoll(細胞層析液)、triton-x-100(界面活性劑)、黏度 10/100/350cst 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、雷射筆
3. 計算軟體
COMSOL multi physics
4. 分析軟體
IC Capture、imageJ、excel

(二) 實驗方法及步驟

1. 製作電流變液

name \ Volume fraction	oil	particles	surfactant
10% ER fluid	88%	10%	2%
5% ER fluid	94%	5%	1%

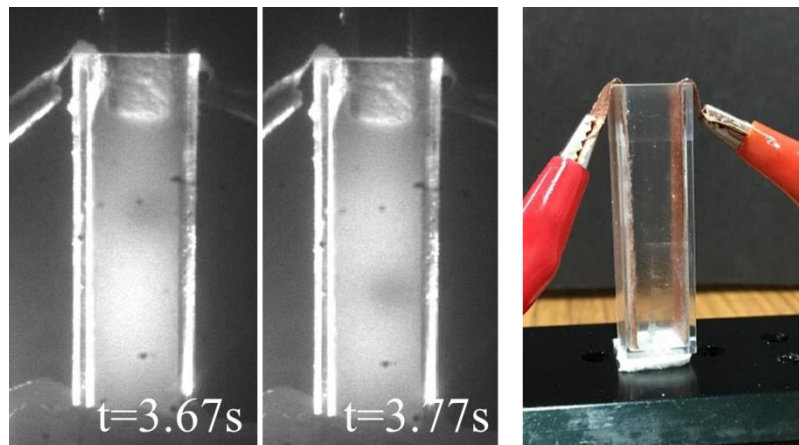
表一 電流變液成分比例

- (1) 將 percoll 以電磁攪拌器蒸乾一小時後用研鉢研杵磨碎，得二氧化矽粉末
- (2) 將部分二氧化矽顆粒均勻塗抹至載玻片，檢查其大小約為 $5\mu\text{m}$ (如圖一(右))
- (3) 如表一，加入相應體積比的油和界面活性劑至二氧化矽顆粒中(二氧化矽密度取 2.65 公克/立方公分)
- (4) 用 vortex 先將電流變液初步混合均勻
- (5) 用超音波震盪器震盪一小時，使其完全混合均勻
- (6) 依實驗目的需求加入不同黏度矽油



圖一 (左)配置好的電流變液/(右)直徑約 $5\mu\text{m}$ 的二氧化矽顆粒

2. 測試電流變液黏度



圖二 電流變液黏度測試裝置(左:小球掉落的狀況；右:黏度測量裝置)

- (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(如圖二左)
- (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)。

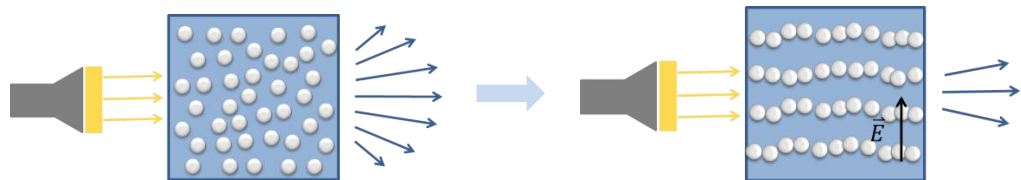
$$\mu = \frac{(m - \rho V)g}{6\pi r v}$$

(μ :黏度/ m :小球質量/ ρ :密度/ V :體積/ g :重力加速度/ r :小球半徑/ v :沉降速率)

3. 測試電流變液光學性質



圖三 測量裝置及 imageJ 頁面

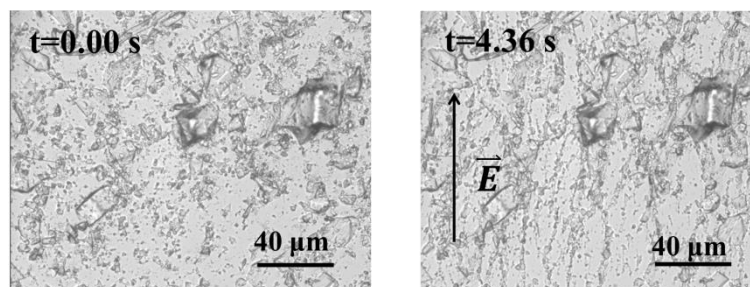


圖四 施加電場使液體散射能力變弱，CCD 接收到的光減少

(灰色圓圈:二氧化矽顆粒/淺藍色背景:矽油/藍色箭頭:散射光)

- (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，此亮度變化推測是因為二氧化矽形成的鏈狀結構在電場下變的較整齊，導致液體內部結構散射能力變弱。(如圖四)
- (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。)

4. 觀察液體中的二氧化矽鍊靜態結構及其修復情況

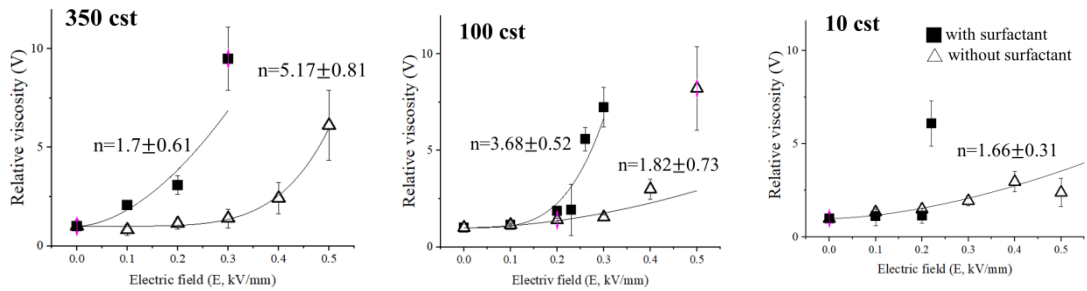


圖五 施加電場後，二氧化矽顆粒沿電場排列成鍊狀結構

- (1) 將 5% 的電流變液(參見表一) 1mL 滴至貼有銅電極的載玻片上
- (2) 開啟電壓，紀錄開啟電壓至二氧化矽形成完整鍊狀結構的時間，用來比較二氧化矽顆粒於矽油中移動的速度
- (3) 觀察含有不同黏度、界面活性劑的電流變液內部二氧化矽鍊結構

三、研究結果

1. 測量不同電流變液的初始條件對電流變效果的影響

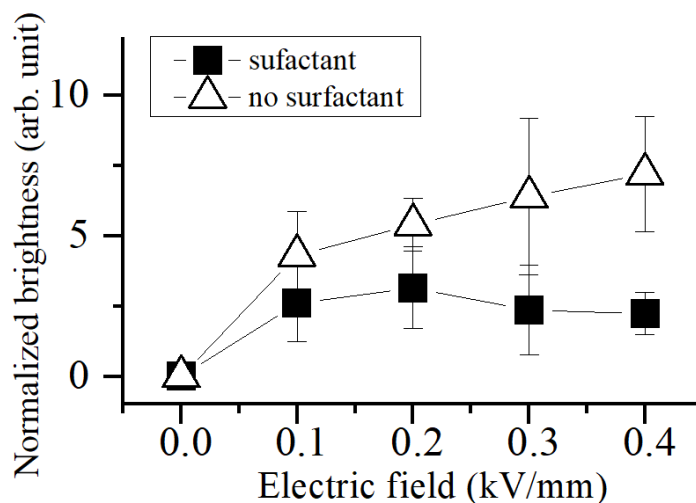


圖六 不同初始黏度和界面活性劑添加狀況的電流變液黏度隨電場的變化

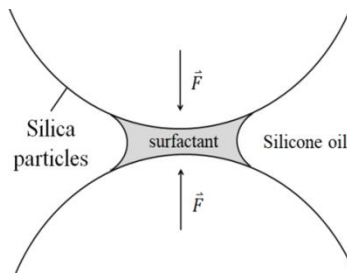
- i. 在沒有添加界面活性劑的情況下，若用算式 $\mu = aE^n + k$ 大致求出黏度隨電場變化的指數 n (a、k 為常數)，得知初始黏度越大的矽油，其黏度隨電場的變化越明顯。
- ii. 添加界面活性劑能增加黏度變化，但初始黏度不同，增加的效率也不同，其中以 10cst 效率最佳；而在初始黏度 350cst 的液體中，雖然黏度增加，但 n 值下降。
- iii. 在添加了界面活性劑的狀況下，則發現 100cst 對電場的響應效果較 350cst 佳；10cst 的矽油則在電場 0.25kV/mm 處有劇烈的黏度增加。

2. 觀察電流變液內部結構

(1) 散射光變化測量



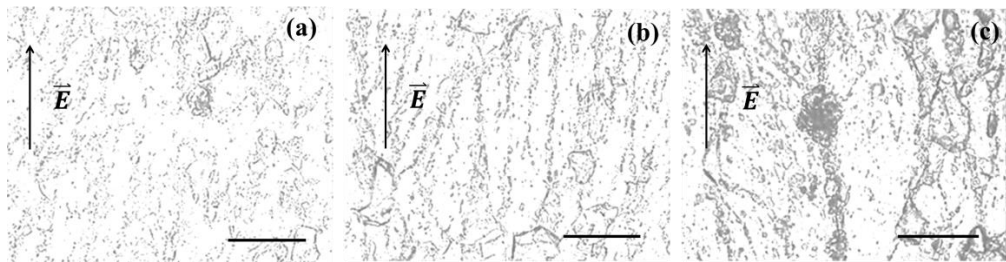
圖七 電流變液散射光變化隨電場的變化



圖八 水-界面活性劑橋假說(Kim,2001)

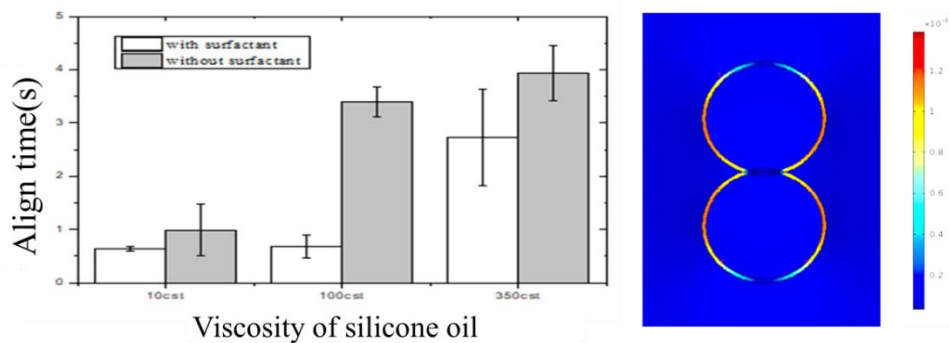
- i. 在添加界面活性劑之後，開電壓前後散射光亮度的變化減少；推測是因為添加界面活性劑後，在二氧化矽顆粒之間形成如圖八的界面活性劑橋，使二氧化矽顆粒在較低的電壓即可形成整齊的鍊狀結構。
- ii. 在沒有界面活性劑的液體中，電壓越高，散射光強度變化越大；根據上述的推論，在這裡發生的情況就是因為沒有界面活性劑橋，需要更大的電壓，二氧化矽顆粒才會形成它最終的鍊狀結構。

(2) 顯微鏡觀察



圖九 二氧化矽顆粒於不同黏度的矽油中，在 0.4kV/mm 電場下的排列情形 (a:10cst /b:100cst /c:350cst，比例尺 40 μ m)

- i. 是否添加界面活性劑對二氧化矽鍊長度的影響沒有很大，故在此僅列出不同黏度比較的照片。
 - ii. 在黏度越大的矽油中，二氧化矽顆粒會形成越長的鍊狀結構；推測這和矽油的分子長度有關，黏度越大的矽油，其分子長度越長，二氧化矽顆粒在較長的矽油分子中間較容易形成明顯的結構。
 - iii.
- (3) 二氧化矽鍊排列時間觀察



圖十 二氧化矽顆粒於不同黏度矽油中的排列時間/電偶極模擬結果

- i. 添加了界面活性劑或者初始黏度較低的矽油，有較快的排列時間。
- ii. 推測是因為界面活性劑於親水的二氧化矽顆粒表面形成了一層高介電常數薄膜，使顆粒整體的極化率提升。大致上用軟體計算後，這次實驗的界面活性劑量可使顆粒整體的極化率增加約 3 倍。

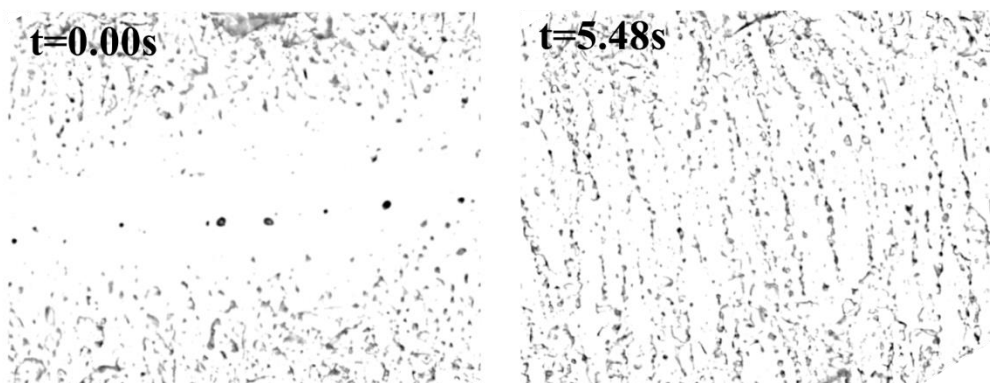
四、討論

(一) 造成不同初始條件黏度隨電場變化情況差異的原因

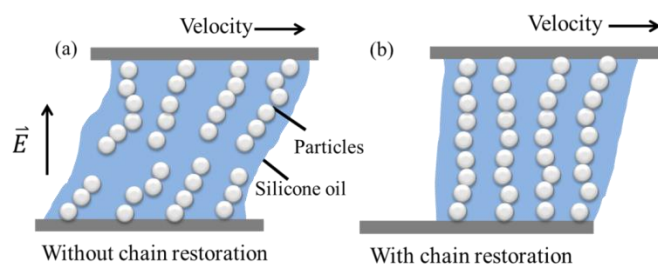
在**實驗(一)**中，發現添加界面活性劑後，初始黏度越低的液體反而有較多的黏度變化，和先前研究(如《電流變效應及其機理》)中提到，測量降伏應力的趨勢不同。且由**實驗(二)-(1)**中的結果中得出，添加界面活性劑會使液體更快達到它最穩定的結構，也就是說，在繼續增加電壓只是讓二氧化矽顆粒中間的吸引力變強，不會再繼續影響它結構的整齊度(散射能力)。若電流變液的黏度變化主要是受到其內部結構變化的影響，那在黏度測量結果中，添加界面活性劑後的黏度雖然增加，但隨電場的變化率應該要較小，不會出現較大的 n 值。

而由**實驗(二)-(2)**的結果中則得到影響液體內部結構的主要是矽油的分子長度，且不管是否添加界面活性劑，黏度越大的矽油中皆有較長的二氧化矽鍊。在指觀察液體靜態結構的狀況下，無法完整地解釋黏度變化的數據。

後來，觀察到如**圖十一**的修復狀況，發現二氧化矽鍊在電場下會有修復的情形。因為測量的參數是黏度，所以在討論造成黏度變化差異的原因時，不應該只關注液體的靜態結構，也應該把動態的修復加入討論。小球在下沉的過程中，受力的結構不只是有小球接觸到的二氧化矽鍊，小球前、後的液體都會影響它的下沉速率，因此整體結構的修復狀況也會影響小球的下沉情形，也就是整個液體的黏度(**圖十二**)。



圖十一 二氧化矽鍊於電場下的修復



圖十二 二氧化矽鍊的修復造成液體的黏度提升

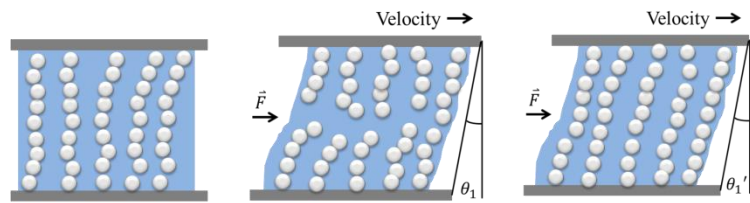
(二) 提出可能的黏度控制機制

因為靜態的結構和動態的修復都能夠解釋部分的數據，因此推論是由此兩種因素共同決定液體的黏度。如圖十三，當液體的黏度較低，修復速度較破壞速度快，且二氧化矽鍊較短(實驗(二)-(2))，結構不強，此時主要是修復在控制液體的黏度，因此在添加界面活性劑後，加速了修復(實驗(二)-(3))，使 100cst 的 n 值變大，還讓 10cst 的樣本在 0.25kV/mm 的電場下有急遽的黏度增加。

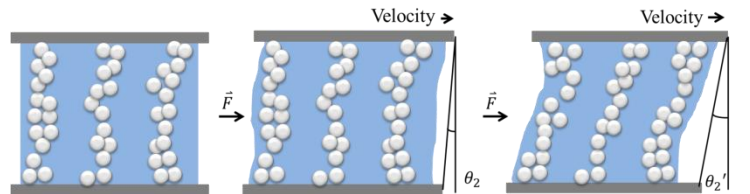
而當液體的黏度較高，二氧化矽鍊的修復速率較破壞速率慢，因為修復的影響不顯著且結構的強度強(實驗(二)-(2))，主要會是結構控制液體的黏度。而在添加界面活性劑後，350cst 的樣本變化率會較低也是因為在這個情況下主要是結構在控制它的黏度(實驗(二)-(1))。

If...

Disturb rate < restoration rate
(10, 100cst)



Disturb rate > restoration rate
(350cst)



圖十三 有兩個互相競爭的機制在控制電流變液的黏度變化

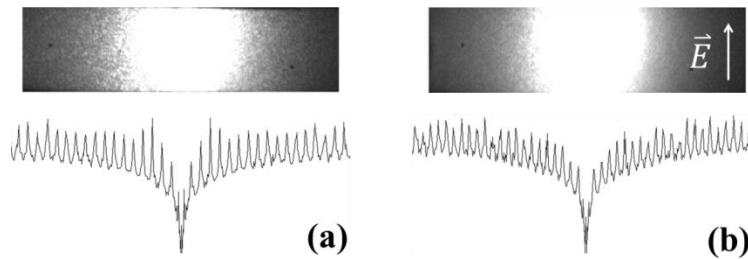
(三) 改變顆粒表面特性以證實推論

上述的假設皆建立在界面活性劑會在二氧化矽顆粒表面形成薄膜、在二氧化矽顆粒中間形成界面活性劑橋的前提下，但無法直接觀察是否有這個薄膜的存在。因此希望嘗試將二氧化矽顆粒暴露於矽烷(Silane)蒸汽中，去除其親水特性，使界面活性劑無法附著於顆粒表面，觀察由此種二氧化矽顆粒製成的電流變液在添加界面活性劑後是否也有相同的性質變化。目前已經用玻片放置在矽烷蒸汽中兩天，確認這種方法的確會改變玻璃表面的親水性(水珠接觸角有改變)，但尚無法確認二氧化矽顆粒表面是否有均勻地附著矽烷。

(四) 雷射散射光實驗

在實驗(二)-(1)中，藉由散射光的變化探討液體內部結構的排列情形，但由於使用的是一般的手電筒，可能會有較多的變因無法控制，因此嘗試改用雷射光測量散射光強度。在查詢文獻後，得知已有相關實驗，使用雷射光的散射訊號，也就是光斑(speckle)來觀察一材料的表面特性。

將原始的散射光訊號經快速傅立葉轉換後，得到如圖十三的鋸齒狀圖樣(灰階值描點後的結果)。推測是由於液體內部有週期性的結構，才會在 imagej 的 FFT 分析結果中看到這樣的亮度變化，但確切的涵義還需要進一步查詢。若成功分析出雷射光散射的資料，或許可以觀察更大面積的液體結構，並在小球落下的同時追蹤液體的結構變化，直接驗證提出的假說。



圖十三 CCD 中的雷射光斑影像和快速傅立葉轉換後的訊號，(a)關電源(b)開電源

(五) 未來展望

- (1) 找到檢測矽烷是否有均勻分布的方法
- (2) 了解雷射光散射圖樣經快速傅立葉轉換後代表的意義，並嘗試觀察液體在被破壞過程中確切的結構變化
- (3) 用計算或程式模擬確認二氧化矽鍊的修復確實能使電流變液的黏度增加；證實若液體具有修復的能力，會改變它流動的性質

五、結論

影響電流變液黏度的機制和液體在電場下的靜態結構以及結構被破壞後的修復速度有關。比較黏度測量、散射光實驗、顯微鏡觀察等實驗結果後，推測該機制作用原理如下：

當矽油的初始黏度較小時，由於二氧化矽鍊的結構較不穩定且修復速度較快，因此主要會是修復速度在控制矽油的黏度，添加界面活性劑後，它會在親水的顆粒表面形成一層高介電常數的薄膜，提升顆粒的極化率，進而加速結構的修復、使液體的黏度增加。而當初始黏度較大時，由於修復速度較緩慢但結構相對較穩定，因此是由結構來決定矽油的黏度。

六、參考文獻

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

【評語】 160003

作者用添加了界面活性劑、親水二氧化矽顆粒以及矽油的電流變液作為研究對象，其黏度可以隨電場增加而有效地增加，而影響黏度的機制則和液體在電場下的靜態結構以及結構被破壞後的修復速度有關。以電場排列黏滯液體中的極性圓球，非新穎物理議題。2020 ISEF 代表，與去年內容相較，未見新穎設計，但較少新穎結論。