

# 中華民國第 62 屆中小學科學展覽會

## 作品說明書

---

國小組 物理科

佳作

080103

碳粒的奇幻漂流—液態蠟的熱對流現象探討

學校名稱：澎湖縣馬公市馬公國民小學

|   |                     |
|---|---------------------|
| 作者：<br>小六 涂宜茜<br>小六 許樂淇<br>小六 張本願<br>小六 葉柏熠 | 指導老師：<br>陳河開<br>林鈺坤 |
|---|---------------------|

關鍵詞：熱對流、蠟油

## 摘要

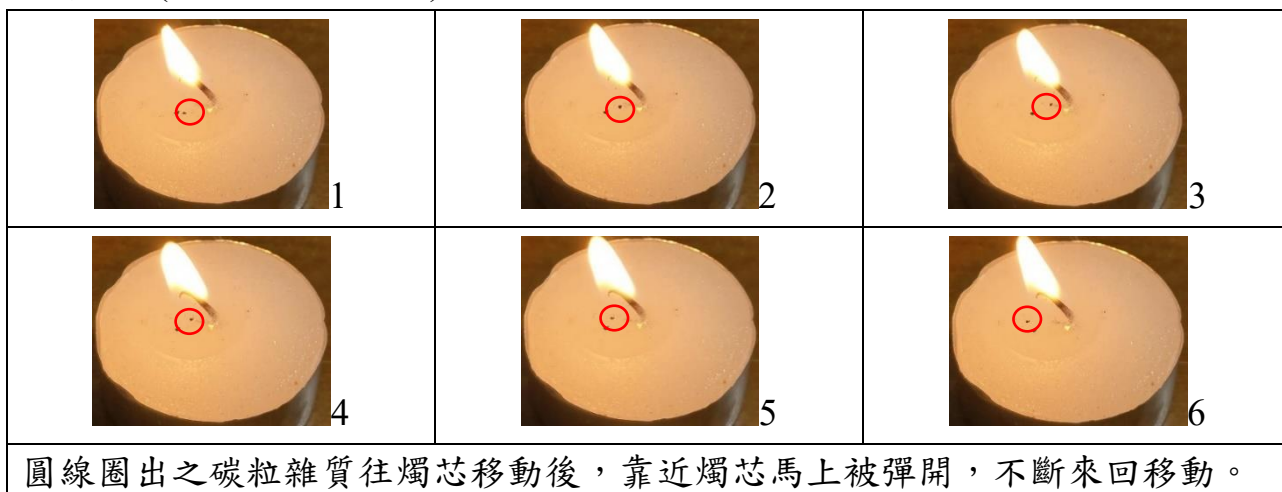
本作品探討蠟油池的碳粒移動。觀察碳粒來回軌跡，測量蠟油的溫度梯度變化，記錄碳粒雜質往返燭芯的週期。比較石蠟、大豆蠟、果凍蠟在燃燒時的碳粒移動差異。再以銅線取代燭芯，以排除毛細作用影響，觀察碳粒在蠟油池的移動情形。最後，觀察碳粒雜質在同一個蠟油池、2個同時燃燒的燭芯之間的移動情形。

研究發現：1.碳粒在不同的蠟油池皆具有向燭芯移動，且被推開加速離開的規律現象；2.碳粒移動週期與速度，跟蠟油池內的溫度梯度變化情形有關，溫度梯度變化大，碳粒移動的往返時間短，代表蠟油流動速度快；3.碳粒的移動也會受到毛細作用的影響；4.碳粒移軌跡偏隨機移動；5.相鄰燭芯燃燒時，形成兩組循環系統，移動趨勢視蠟油溫度而不斷變化。

## 壹、前言

### 一、研究動機

偶然發現在加熱精油用的蠟燭中，液態蠟油池內，有一些燭芯未完全燃燒而掉落的黑色雜質。在燭芯燃燒時，碳粒雜質在蠟油池移動，逐漸往燭芯的方向加速，彷彿碰到燭芯後被反彈！我們在教室重複這一個實驗時，這樣的情形不斷重複(如下表補充說明)。







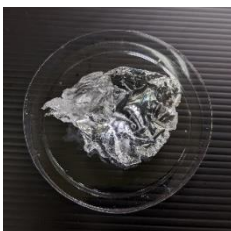


於是我們猜想：根據蠟燭燃燒現象，吸引碳粒往燭芯移動的力量應來自於燭芯燃燒時向上的毛細作用所導引，以及蠟油受熱時的熱對流現象。至於接近燭芯後為什麼會立即向外加速移動的現象，則是我們思考後仍無法理解的。因

此，探究碳粒雜質在燃燒時的液態蠟油池移動情形，以及燃燒燭芯時，蠟油的流動方向，是我們這份作品要研究的主題。

## 二、研究目的

- (一) 探討不同材質的蠟燭燃燒時，蠟油池內的碳粒雜質移動情形。
- (二) 分析銅線加熱與燭芯燃燒時，蠟油池內的碳粒移動軌跡及差異。
- (三) 比較不同碳粒在蠟油池內的移動差異。
- (四) 探討相鄰相同雙燭芯燃燒時，蠟油池內的碳粒雜質移動情形。

## 貳、研究設備及器材

| 項目     | 照片   | 項目           | 照片  |
|--------|--|--------------|---|
| 石蠟     |    | 透明蠟燭模        |   |
| 大豆蠟    |   | 數位放大鏡 (500倍) |  |
| 果凍蠟    |   | 燭芯           |  |
| 電偶式溫度計 |  |              |   |

## 參、研究過程及方法

### 一、製作統一大小的蠟燭

在網路上購買大豆蠟及果凍蠟的原料，加熱後倒入統一規格的透明圓形模，放入燭芯後。另外購買加熱精油燈用的石蠟，取出後直接塞入透明圓形模。製作成三種相同大小，但不同材料的蠟燭。



### 二、測量蠟油池的溫度

研究小組以 2 部數字式熱電偶溫度計測量蠟油池之溫度，以燭芯為中心，燃燒時利用鑷子將燭芯擺直後，3 分鐘後開始測量距離燭芯 0.3 公分、0.6 公分、0.9 公分及 1.2 公分之蠟油池表面及底部溫度，將熱偶線的測溫頭間隔 0.3 公分固定，同時測得 4 個點的溫度。每一種蠟燭各準備 3 個，各測量 10 次，共測得每一種蠟燭的 4 個溫度點各 30 次的數據，取平均值。實驗示意圖如下圖 1 所示。

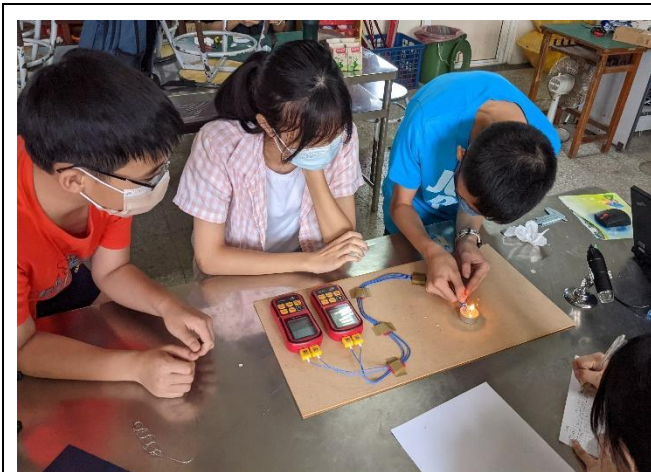


圖 1 測量蠟油池溫度梯度



圖 2 記錄蠟油池內的碳粒雜質移動情形

### 三、在蠟油池中添入雜質

由於每一個蠟燭製成時，肉眼幾乎看不出雜質，以數位放大鏡觀察，各式雜質很難辨別是屬於何種雜質。於是研究小組利用紙杯背面蒐集蠟燭未完全燃



燒的碳粒，再以大頭針沾附於上，放進蠟油池內。藉以觀察碳粒在蠟油池中的移動情形。

#### 四、觀察蠟油池內雜質移動並記錄實驗數據

將每一種蠟燭放在於固定位置，擺放數位放大鏡連接筆電，點燃後3分鐘形成蠟油池後開始錄影，藉由放大後的畫面標定碳顆粒，從雜質最接近燭芯開始計時，計算來回4次所需的秒數。以及燭芯底部、0.3公分、0.6公分、1.2公分的蠟油池表面溫度。實驗裝置圖2所示。

#### 四、觀察加熱銅管形成的蠟油池之雜質移動情形

除去電線的塑膠皮，將銅線彎折，使一端伸入蠟油底部，上方彎折成小圈，穿入40W的電烙鐵，利用電烙鐵產生的高溫(361.5°C)傳導至蠟燭，使形成蠟油池，再觀察雜質在蠟油池中的移動情形。並測量銅線底部、0.3公分、0.6公分、0.9公分、1.2公分的蠟油溫度。實驗裝置如圖3、圖4所示。



圖3 加熱銅管觀察蠟油池內的碳粒雜質移動情形

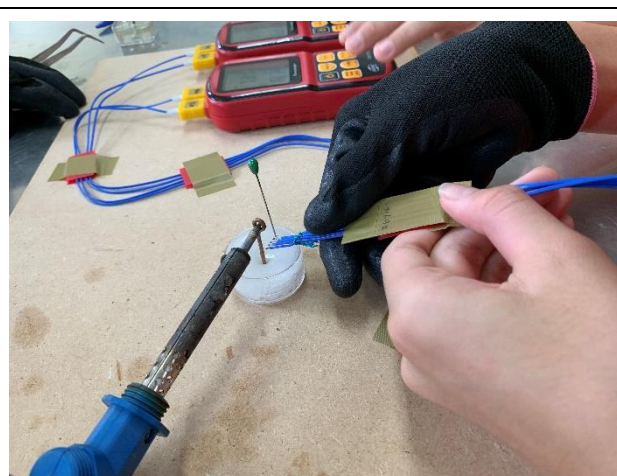


圖4 測量加熱銅管之溫度梯度變化

#### 五、觀察同一蠟油池內含雙燭芯的雜質移動情形

製作同一規格之石蠟，但是在兩端放入2個相同的燭芯，點燃燭芯後，觀察在兩個燭芯之間的雜質之移動情形。

### 肆、研究結果

#### 一、不同蠟燭燃燒時形成之蠟油池大小及溫度梯度

點燃燭芯後等待3分鐘，測量蠟油池的直徑，每一種蠟燭測量3次，取平均值後整理成表1。

表1 不同蠟燭燃燒時之蠟油池直徑(單位：cm)

| 蠟燭種類            | 石蠟  | 大豆蠟 | 果凍蠟 |
|-----------------|-----|-----|-----|
| 蠟油池直徑<br>(3分鐘)  | 1.2 | 1.6 | 2.3 |
| 蠟油池直徑<br>(15分鐘) | 2.4 | 3.7 | 3.7 |

表 1 可以看出，果凍蠟在相同的時間熔化的面積最大，石蠟最小。不過，等到 15 分鐘後，果凍蠟跟大豆蠟在塑膠模的範圍內皆成液狀，而石蠟仍然是有範圍的蠟油池，代表溫度均衡的程度有差異。根據化工公司網路資料，果凍蠟熔點約在 60-70°C，大豆蠟熔點約在 51.1~54.4°C，石蠟熔點約在約 57.5~61°C。三者的熔點差距在 10°C 以內，因此蠟熔化的面積與溫度的傳播有關，不同的蠟在液態時流動的速度不同。

為了觀察蠟油池不同地區的溫度變化，將四組電偶式溫度探針並排，同時測量距離燭芯不同距離的溫度點，結果整理如表 2。

表 2 不同蠟燭之蠟油池溫度梯度變化(溫度單位：°C)

| 蠟燭種類 | 距燭芯距離          |       |       |       |                |       |       |       |
|------|----------------|-------|-------|-------|----------------|-------|-------|-------|
|      | 平均表面溫度 (單位：°C) |       |       |       | 平均底部溫度 (單位：°C) |       |       |       |
|      | 0.3cm          | 0.6cm | 0.9cm | 1.2cm | 0.3cm          | 0.6cm | 0.9cm | 1.2cm |
| 石蠟   | 89.3           | 70.71 | 65.59 | 60.98 | 58.19          | 57.84 | 57.90 | 57.87 |
| 大豆蠟  | 71.46          | 63.97 | 65.42 | 53.80 | 63.1           | 64.75 | 63.61 | 62.08 |
| 果凍蠟  | 107.13         | 95.88 | 88.42 | 83.26 | 88.36          | 83.42 | 84.11 | 80.25 |

由表 2 可知，蠟油池內的液態果凍蠟的溫度最高、石蠟次之，大豆蠟的溫度最低。三種蠟油的表面溫度比底部溫度高，且離燭芯 1.2cm 的表面溫度仍然高於燭芯底部。進一步繪製三種蠟油池的表面及底部溫度梯度變化，如圖 5、圖 6。

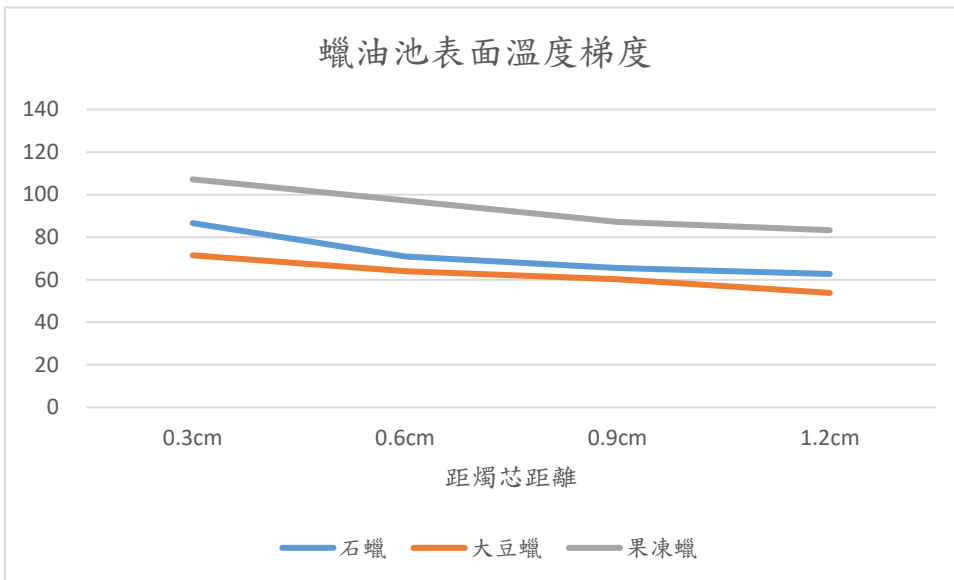


圖 5 三種蠟油池的表面溫度梯度變化圖

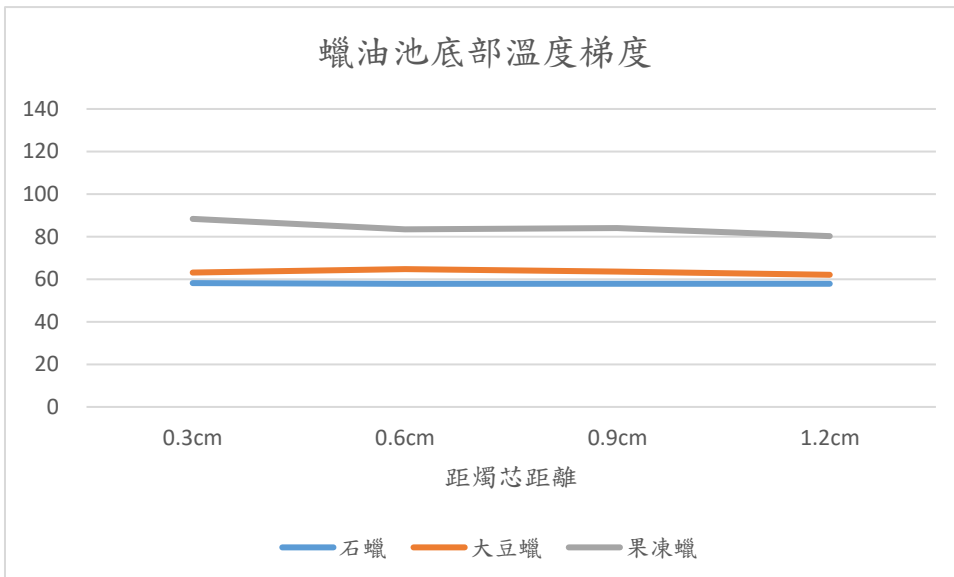


圖 6 三種蠟油池的底面溫度梯度變化圖

根據 3 種折線圖，果凍蠟自燭芯 0.3 公分處到 1.2 公分處，平均表面溫度變化達 23.87°C、石蠟溫差 28.32°C、大豆蠟溫差 17.66°C。底部的溫度變化變化較表面溫度變化小。

表面溫度皆大於底部溫度，但由於不同蠟油池的底部深度不同，所得到的數據僅參考趨勢部分。

綜合表 1、表 2 與圖 5、圖 6，本研究採用的三種蠟，液態蠟熔點不同、燃燒時的各區溫度分布不同，燃燒 10 分鐘內的蠟油池的面積也不相同。

## 二、不同種類蠟油池內的雜質移動情形

蠟燭燃燒 3 分鐘後，開始記錄。為了固定觀察的範圍，在距離燭芯 1 公分

處插入細針，只觀察在細針附近往返的碳粒。根據數位放大鏡錄影結果，記錄每一種蠟油池的碳粒往來 4 次的時間。每一種蠟燭有 3 個，每一種觀察 10 次，取得每一種蠟油池的碳粒往返數據 30 次，平均值整理如表 3。

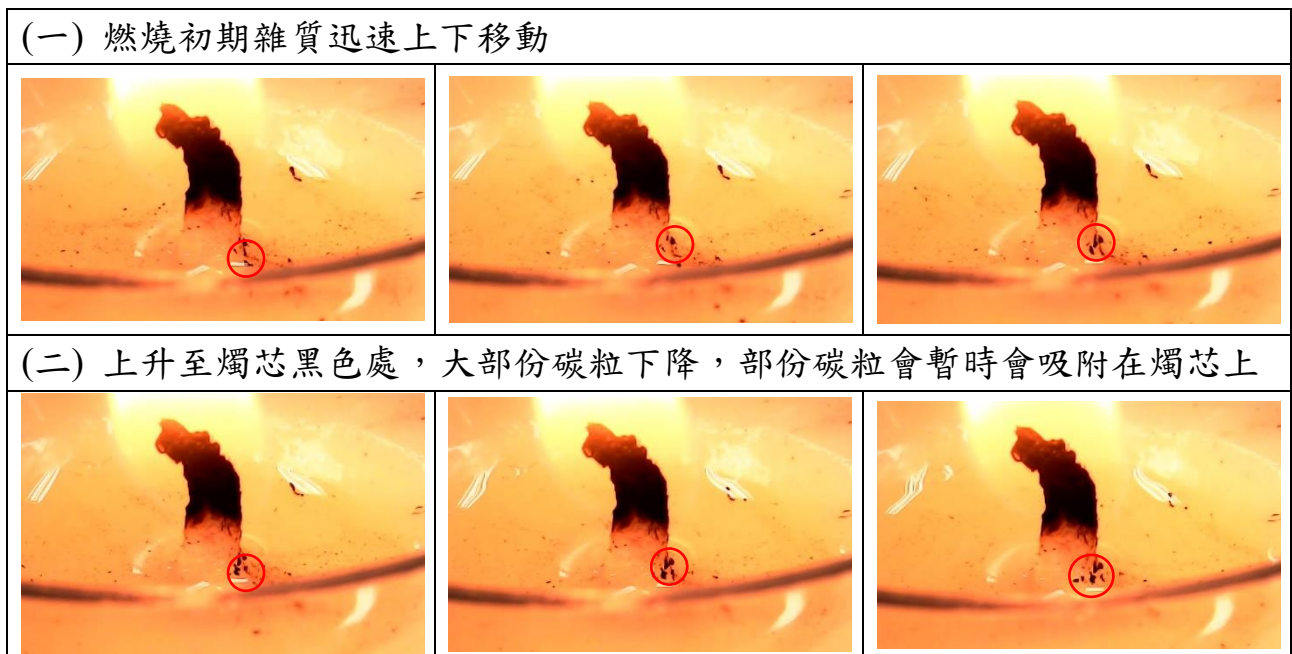
表 3 碳粒在不同蠟油池內的移動週期

| 蠟燭            | 石蠟油池碳粒 | 大豆蠟油池碳粒 | 果凍蠟油池碳粒 |
|---------------|--------|---------|---------|
| 每 4 次歷時平均值(秒) | 15.46  | 34.29   | 23.9    |
| 平均每次歷時(秒)     | 3.87   | 8.57    | 5.98    |

根據表 3，碳粒在不同種類的蠟油池內移動週期差異頗大，石蠟來回 4 次所需的平均時間最短，果凍蠟與大豆蠟所需的時間最長。代表碳粒在石蠟的蠟油池內移動速度較快，往返燭芯的週期較短。

研究小組將細針尖端放入蠟油池，藉以影片中的針頭位置來測量碳粒移動的範圍，發現雜質在液態大豆蠟的移動範圍最大、石蠟範圍最小。範圍大，移動距離較遠，花費的時間較長，是影響週期的主要因素。

根據放大影像顯示，在燭芯燃燒初期，會發現靠近燭芯的碳粒雜質運動迅速，上下快速移動，隨著蠟油池逐漸擴大，碳粒雜質的移動範圍也跟著變大。分析碳粒在蠟油池的移動，可以歸納出以下特徵：





(續上頁)

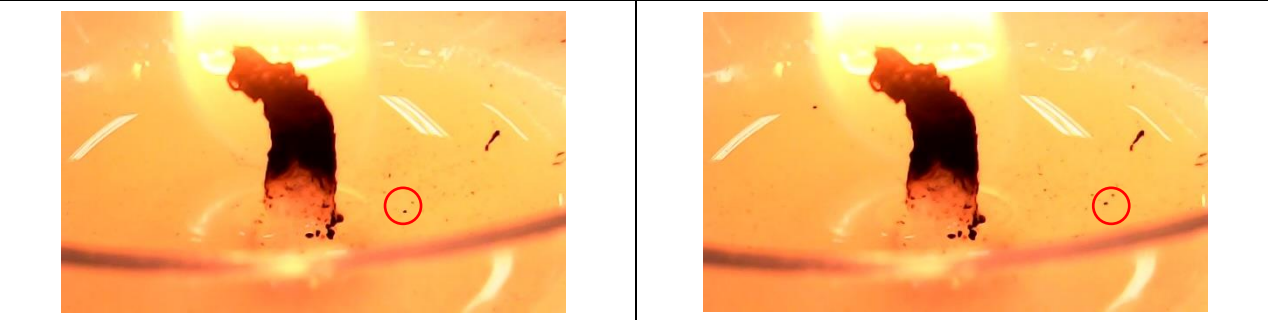
(三) 蠟油池擴大後，碳粒水平移動明顯，經放大鏡檢視，大部份的碳粒並沒有觸碰到燭芯便被推移加速離開



(四) 蠟油池底部的碳粒上升至燭芯附近再被推移至遠處



(五) 接近與離開的瞬間，碳粒速度最快



為了驗證碳粒運動跟溫度的關係，我們將表 2 跟表 3 交叉分析，由於我們觀察的碳粒運動範圍大部份都在距離燭芯 1 公分左右，因此將不同液態蠟表面的溫度與平均一次的週期，製作散佈圖，如圖 7。

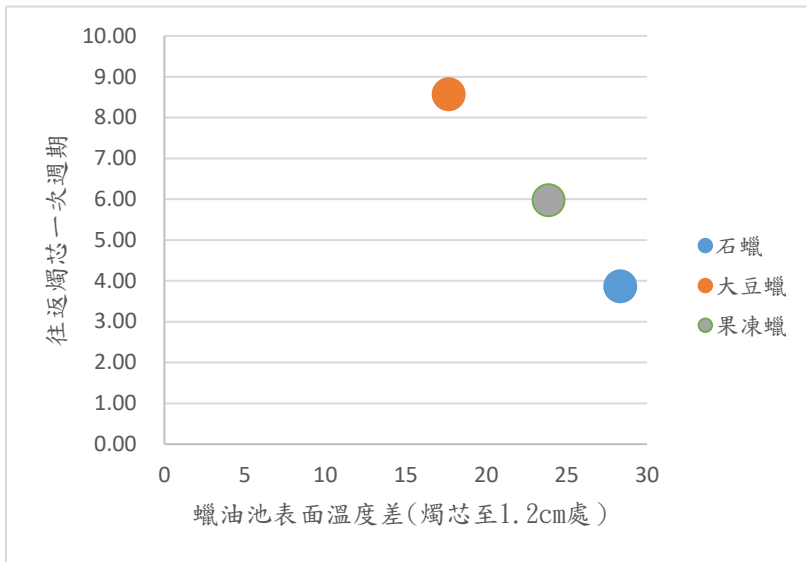





圖 7 不同液態蠟移動週期與蠟油池溫度差之關聯

檢視圖 7 可以發現，不同材質的蠟燭，溫度差最大的石蠟，移動的週期最短，大豆蠟油池溫差最小，移動的週期最長。溫度差影響碳粒移動週期。

### 三、加熱銅管形成的蠟油池之碳粒移動情形

除了溫度差所造成的移動，我們假設棉製的燭芯對於蠟油的毛細作用，再加上液態蠟加熱成氣態蠟的過程，會有一股向上的牽引力，可能是影響蠟油池內碳粒移動的原因。所以利用加熱銅線的方式來當做熱源，使蠟油對熱源的毛細作用降到最低。除了觀察週期外，一併也利用熱電偶溫度計測測蠟油池的溫度梯度（每一種測量 10 次，取平均值），如表 4。

表 4 銅管加熱之蠟油池碳粒雜質移動情形

| 材質   | 石蠟  | 大豆蠟  | 果凍蠟   |
|------|---|--|---|
| 照片   |  |  |  |
| 運動描述 | 以銅線為中心水平方向來回呈旋渦狀迅速移動，移動範圍約 0.3cm。只有少數碳粒接近銅管後有加速離開燭芯的情形                              | 由下而上緩慢循環，移動範圍約 0.6cm。大部分碳粒從邊緣利動到銅管底部，接近銅管後向上，仍有加速離開燭芯的情形                             | 以銅線為中心水平方向來回水平循環，範圍約 0.6cm 碳粒靠近銅管後沒有加速離開燭芯的情形   |

| 距銅線之平均溫度 | 位置    | 表面    | 底部    | 表面    | 底部    | 表面    | 底部    |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|          | 0.3cm | 73.01 | 60.22 | 70.33 | 62.40 | 87.89 | 70.41 |
|          | 0.6cm | 69.81 | 58.89 | 69.37 | 63.16 | 83.90 | 67.37 |
|          | 0.9cm | 68.10 | 58.20 | 64.41 | 62.75 | 80.55 | 61.81 |
|          | 1.2cm | 65.08 | 57.44 | 63.25 | 57.39 | 73.52 | 54.55 |

根據表 4 結果，加熱銅線使熱傳導至蠟燭，形成的蠟油池範圍較小，碳粒移動情形隨著蠟燭的種類而有不同表現。石蠟油裡的碳粒來回迅速，靠近銅管呈現水平的旋渦外觀。大豆蠟油裡的碳粒由燭芯底部向上後，仍加速離開燭芯，但循環的範圍較棉芯燃燒時小。果凍蠟油裡的碳粒移動速度緩慢，且靠近銅管的碳粒沒有呈現加速離開的現象。

比較蠟油池的溫度梯次變化，仍是果凍蠟表面溫度最高、石蠟次之、大豆蠟最低。但仍然低於燭芯燃燒時的溫度，約 10~15°C。從溫度差異來看，銅線受熱傳導產生的熱源，蠟油池的溫度，並沒有像燭芯燃燒般的高溫，因此碳粒移動範圍較小，也會影響碳粒的移動速度。

綜合上面分析，當排除蠟油沿著燭芯向上的毛細作用與氣化作用力，三種蠟油池的碳粒移動就呈現完全不同的軌跡，這點跟燭芯燃燒時，3 種蠟油池碳粒移動具有加速離開的一致性不同。代表毛細作用與氣化作用力，仍會影響碳粒在蠟油池的移動軌跡。

#### 四、同一蠟油池內含二支燭芯的雜質移動情形

為了進一步觀察相鄰的燃燒燭芯對於兩者間的碳粒雜質運動，是否會有相互影響，我們在相同大小的蠟燭模內設置了雙燭芯蠟燭，兩燭芯之間相距約 1.2 公分。點燃後 3 分鐘，錄製的雜質影像如圖 8 所示。

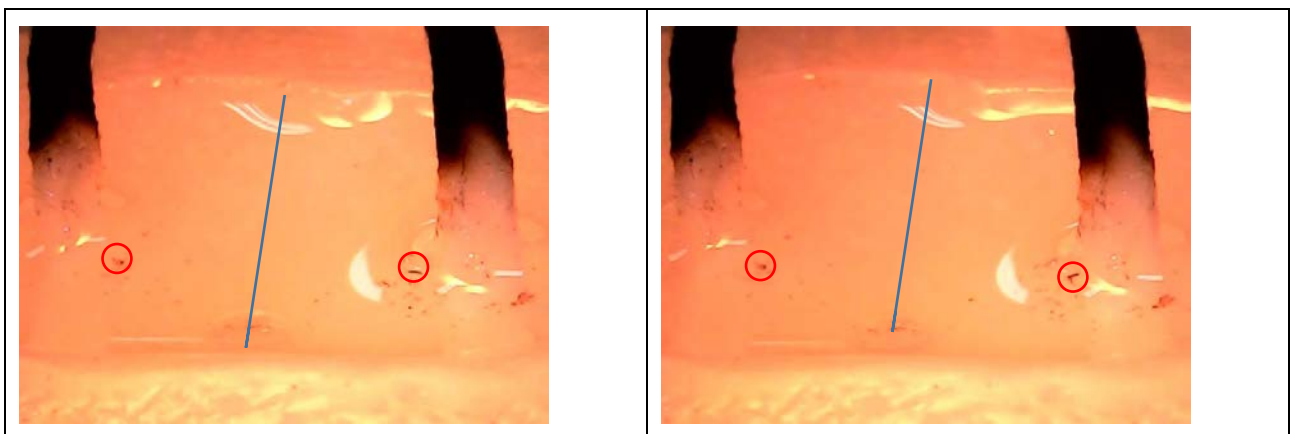


圖 8 雙燭芯蠟油池內的碳粒雜質移動情形

實驗結果顯示，相鄰燭芯內的碳粒，靠近燭芯的碳粒仍然向燭芯移動，且靠近及推開的速度都有加速的情形，底部的碳粒也都呈現向上移動後，接近燭芯再被推開的情形。

在燭芯中間的碳粒，在左右兩邊燭芯的作用下，並未出現明顯的往特定燭芯移動的情形，呈現左右晃動的混沌現象。研究小組也發現，部份碳粒在被彈開的時候，由於加速過快，往另一端的燭芯移動後，開始在另一個燭芯的往返循環。

## 伍、討論

### 一、碳粒雜質的移動作用力

根據本研究的各個實驗結果，大致可以歸納出蠟油池內的碳粒雜質受力情形，碳粒移動代表蠟油的流動情形，移動速度愈快，代表蠟油的流速愈快，可分為三個部份探討。

#### (一)蠟油的熱對流與溫度梯度：

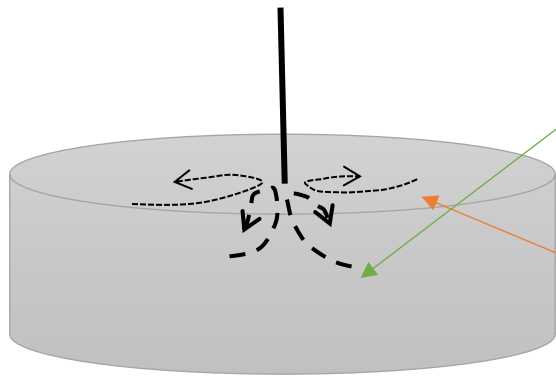
碳粒雜質向熱源移動，最主要的作用力仍然是液態蠟的熱對流所驅動。研究小組根據圖 4 之溫度梯度與移動範圍與週期，分析出碳粒往返移動的週期，與位移兩端的溫度差有關，溫度梯度變化愈大者，移動的時間愈短。然而蠟油池的溫度變化是動態的，同一個點的蠟油溫度會隨著燭焰在空氣中燃燒的晃動而有不同。

#### (二)蠟油在燭芯的毛細作用：

1. 蠟油因毛細作用隨著燭芯往上的作用力，使得部份的碳微粒被吸附在燭芯上，而加熱的銅線並沒有吸碳微粒的現象。
2. 從數位放大鏡觀察，密度較小的碳粒在蠟油表面的移動，石蠟油池的碳粒目測之移動軌跡具水平方向之渦流特徵，沒有加速接近或離開的現象；大豆蠟油池的碳粒則呈現穩定的循環運動，仍有加速接近及離開的現象；果凍蠟油池的碳粒則只有水平來回，也沒有加速接近或離開的現象。
3. 缺少毛細作用後，蠟油流動的情形就變得非常不穩定，我們推論是蠟油池內各個地方的溫度差異，造成流動的不一致。

仔細觀察燭芯燃燒時的移動軌跡，接近蠟油池的碳粒移動軌跡並非具有一致性，在底部的碳粒明顯由下斜向上，往燭芯移動。兩側的碳粒呈約略呈現弧形軌跡，並且大部份在還沒有接觸到燭芯前就被彈開。經過討論，研究小組推測本現象可能來自於蠟油池的熱對流與燭芯毛細作用相互產生的多重渦流效應，繪製及說明如圖 9。





在燭芯下方往上的熱對流，因為碳粒隨著液態蠟受熱為氣態蠟後溫度下降，隨即因為重力而往下。

側邊水平移動的碳粒在接近燭芯的同時，未能觸碰到燭芯就被往下的冷卻渦流推擠離開。

圖 9 蠟油流動情形示意圖

### (三) 碳粒的移動隨機無法預測

從數位放大鏡檢視的影片，使得一般無法目視看到的碳微粒可以被觀察到。也因此發現到在計算往返週期時間時，碳微粒的運動軌跡並不固定，大致呈環狀扁橢圓的軌跡來移動，也有出現碳微粒加速離開後，離燭芯太遠而停止再返回中心的現象，而這種現象以蠟油溫度較低的大豆蠟最常出現。

## 二、雜質的種類

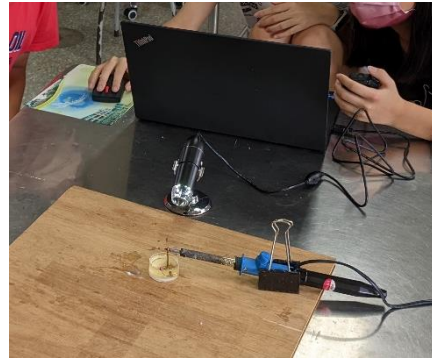
除了未完全燃燒的蠟所形成的碳微粒外，研究小組嘗試採用木屑、細保麗龍球放入蠟油池觀察。發現木屑跟碳微粒一樣，也會在蠟油池中隨著蠟油的熱對流而移動，但由於木屑較重，因此運動一段時間後就沉入蠟油池底不再移動。而保麗龍球因為質量太輕，一放到蠟油池，便立即被蠟油的表面張力彈至最外圍，並且沒有再往燭芯移動的現象。

## 三、銅線的導熱裝置

研究小組曾將銅線兩端接上電源供應器，想藉由通電產生的電阻熱效應來加熱，產生的導熱效果並不理想。也曾以本生燈加熱於銅線一端，發現隨著銅線的長度，銅線的溫度下降得很快。因此，最後決定以表面溫度約達  $350^{\circ}\text{C}$  的電烙鐵來導熱，並縮短銅線的導熱長度，使得導熱 3 分鐘後，蠟油池的範圍較另外二種方法大。



原本設置的銅管導熱裝置



改良後的銅管導熱裝置

## 陸、結論

本研究從微觀的觀察實驗開始，測量碳微粒在蠟油池的運動軌跡，並且試著以熱對流的原理來思考驗證，納入溫度與移動週期測量。獲得以下研究結論。

- 一、不同材質的蠟燭燃燒時，蠟油池的碳粒雜質皆具有向燭芯移動，靠近燭芯後馬上加速離開的規律現象。
- 二、同一蠟油池內的蠟油流動速度不等速，燭芯附近的蠟油會加速向燭心流動，沒有氣化的蠟油旋即加速離開。
- 三、蠟油池的碳粒移動週期與速度，主要跟蠟油池內的溫度梯度變化有關，溫度梯度變化大的石蠟，碳粒雜質移動的往返時間較短。
- 四、比較銅線加熱與燭焰加熱後發現，碳粒的移動軌跡也會受到燭芯毛細作用及蠟油氣化作用的影響，而有一致性的特徵。
- 五、碳粒在蠟油池的軌跡偏隨機移動，每一次往返的路徑不盡相同。
- 六、肉眼所見較大的雜質移動，會令人誤以為碰撞燭芯而反彈，經數位放大觀察發現，水平移動的微粒受到燭芯近側由下而上的渦流壓力而彈開，並沒有觸碰到燭芯。
- 七、兩個相鄰燭芯形成的蠟油池，會形成兩組碳粒循環系統，介於中線的碳粒，移動方向隨機無法預測。

## 柒、參考資料

1. 王文竹審訂(2006)。自然科學圖解百科—物質與化學(I)。新北市：泛亞文化
2. 倪簡白(2012)。法拉第的蠟燭科學。台北市：臺灣商務。
3. 陳偉民(2012)。觀念化學小學堂。台北市：天下文化。
4. 日本 Newton Press(2019)。大有學問的「火的本質」。載於國中·高中化學：讓人愛上化學的視覺讀本 (p.148)。新北市：人人出版。

## 【評語】 080103

本作品探討點燃燭芯時的液態蠟油池溫度分布對於碳粒雜質移動的影響，以及蠟油的流動方向，並以數位放大鏡連接筆電錄影。雖然以熱對流來說明觀測到的現象，但對於熱對流與往復運動的關聯，仍未提供明確的機制與定量的佐證。有趣的觀測，在控制變因與定量觀測與分析仍有增進的空間。

## 作品簡報

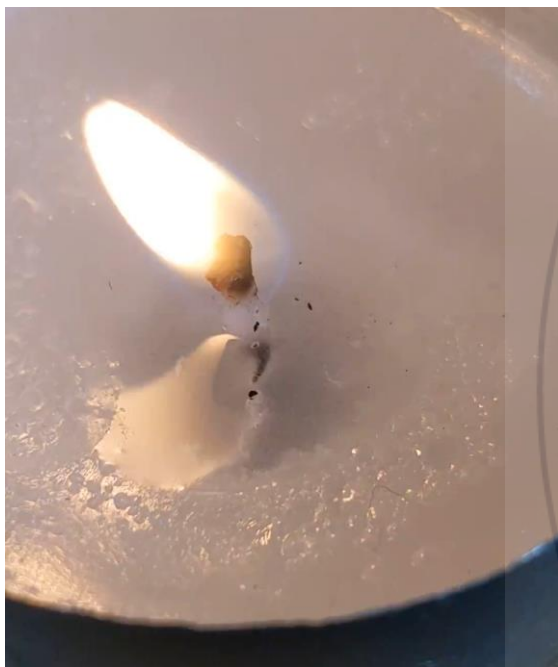


---

# 碳粒的奇幻漂流— 液態蠟的熱對流現象探討

國小組 物理科

---



燭芯燃燒時，碳粒雜質往燭芯的方向加速移動，輕觸燭芯後迅速反彈，這樣的情形不斷重複。

### 研究問題

燭芯上的  
毛細作用



液態蠟油  
的熱對流

碳粒為什麼會反覆  
移動？



## 研究方法與實驗設計

|     | 燭芯燃燒   | 銅線導熱 |
|-----|--|------|
| 石蠟  | 1. 製作統一規格的蠟燭。                                  |      |
| 大豆蠟 | 2. 添加碳粒雜質。                                     |      |
| 果凍蠟 | 3. 以電偶式溫度計4部，同時測量距離燭芯0.3、0.6、0.9、1.2公分位置的蠟油溫度。 |      |
|     | 4. 測量距燭芯1公分附近碳粒的往來週期。                          |      |
|     | 5. 觀察雙燭芯燃燒時的碳粒移動情形。                            |      |
|     | 6. 採用較粗燭芯，觀察碳粒移動情形。                            |      |

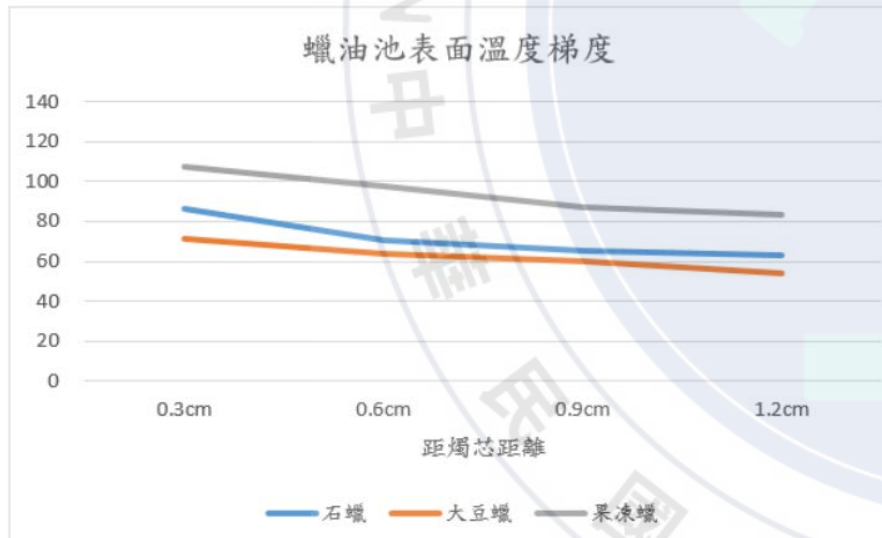
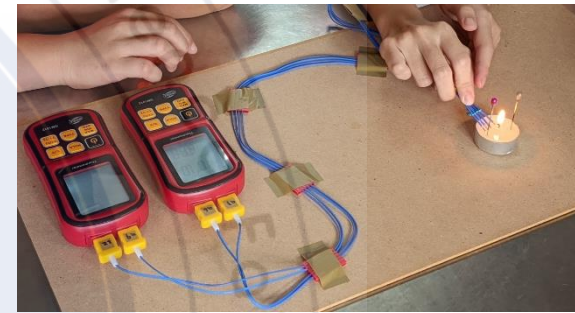


## 研究結果

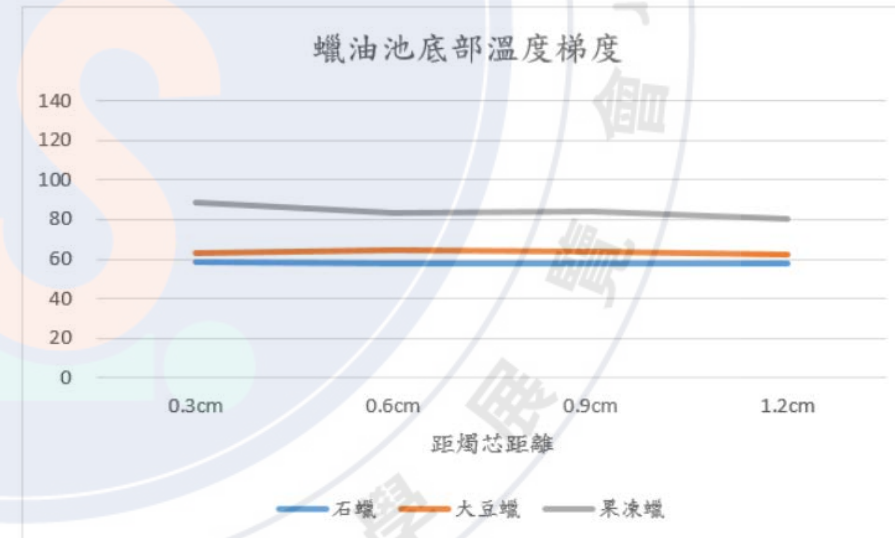
# 不同蠟燭燃燒時之蠟油池溫度梯度變化

不同蠟燭之蠟油池溫度梯度變化(溫度單位：°C)

| 蠟燭種類 | 距燭芯距離          |       |       |       |                |       |       |       |
|------|----------------|-------|-------|-------|----------------|-------|-------|-------|
|      | 平均表面溫度 (單位：°C) |       |       |       | 平均底部溫度 (單位：°C) |       |       |       |
|      | 0.3cm          | 0.6cm | 0.9cm | 1.2cm | 0.3cm          | 0.6cm | 0.9cm | 1.2cm |
| 石蠟   | 89.3           | 70.71 | 65.59 | 60.98 | 58.19          | 57.84 | 57.90 | 57.87 |
| 大豆蠟  | 71.46          | 63.97 | 65.42 | 53.80 | 63.1           | 64.75 | 63.61 | 62.08 |
| 果凍蠟  | 107.13         | 95.88 | 88.42 | 83.26 | 88.36          | 83.42 | 84.11 | 80.25 |



三種蠟油池的表面溫度梯度變化圖



三種蠟油池的底面溫度梯度變化圖



## 研究結果

# 不同種類蠟油池內的碳粒移動情形

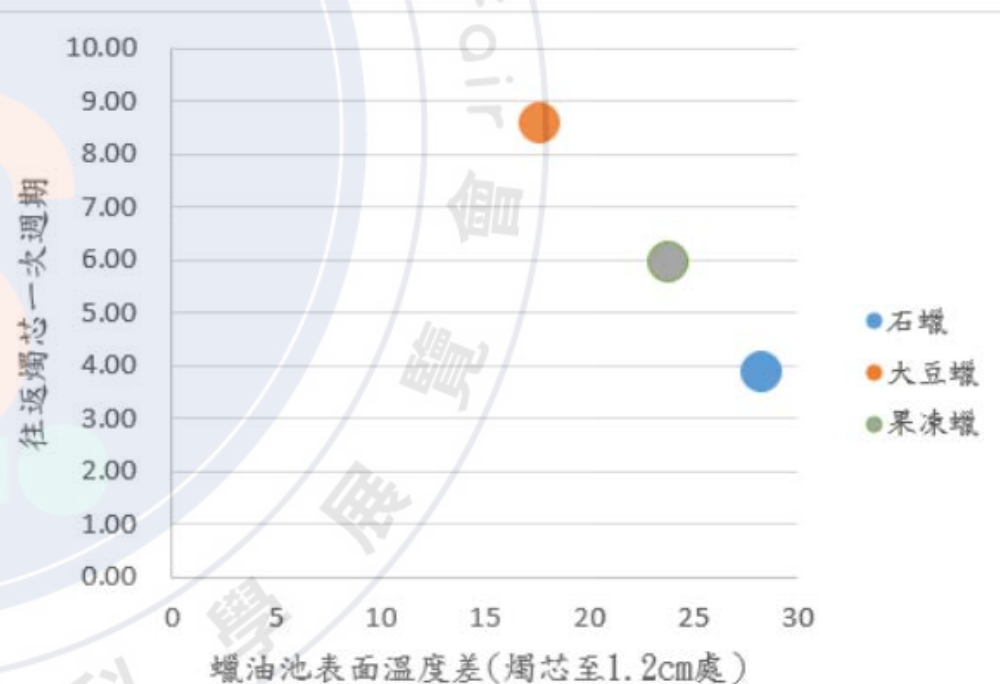


碳粒在不同蠟油池內的移動週期

| 蠟燭          | 石蠟油池碳粒 | 大豆蠟油池碳粒 | 果凍蠟油池碳粒 |
|-------------|--------|---------|---------|
| 每4次歷時平均值(秒) | 15.46  | 34.29   | 23.9    |
| 平均每次歷時(秒)   | 3.87   | 8.57    | 5.98    |

為驗證碳粒運動跟溫度的關係，將移動週期跟蠟油表面溫差做為縱軸與橫軸，交叉分析後繪製散佈圖

不同材質的蠟燭，溫度差最大的石蠟，移動的週期最短；大豆蠟油池溫差最小，移動的週期最長。溫度差影響碳粒移動週期。




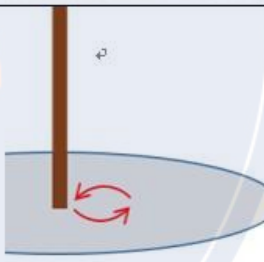
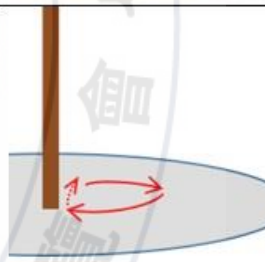
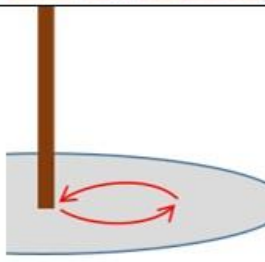


不同液態蠟移動週期與蠟油池溫度差之關聯

## 研究結果

# 以銅線導熱取代燭焰熱源—碳粒移動特徵說明

銅線加熱之蠟油池碳粒移動情形

| 材質 | 石蠟  | 大豆蠟   | 果凍蠟   |
|----|---|---|---|
| 照片 |  |  |  |
| 圖示 |  |  |  |

### • 石蠟碳粒：

1. 以銅線為中心水平來回呈橢圓狀迅速移動，範圍約0.3cm。
2. 僅少數碳粒接近銅線後有加速離開燭芯的情形。

### • 大豆蠟碳粒：

1. 由下而上緩慢循環，範圍約0.6cm。
2. 大部分碳粒從邊緣移動到銅線底部，接近銅線後向上，仍有加速離開燭芯的情形。




### • 果凍蠟碳粒：

1. 以銅線為中心水平方向來回水平循環，範圍約0.6cm。
2. 碳粒靠近銅線後沒有加速離開燭芯的情形。

## 研究結果

# 以銅線導熱取代燭焰熱源—碳粒移動特徵說明

銅線加熱之蠟油池碳粒雜質移動情形

| 材質            |       | 石蠟  |       | 大豆蠟  |       | 果凍蠟   |       |
|---------------|-------|---|-------|--|-------|---|-------|
| 照片            |       |  |       |  |       |  |       |
| 距銅線之平均溫度 (°C) | 位置    | 表面  | 底部    | 表面   | 底部    | 表面  | 底部    |
|               | 0.3cm | 73.01   | 60.22 | 70.33  | 62.40 | 87.89   | 70.41 |
|               | 0.6cm | 69.81   | 58.89 | 69.37  | 63.16 | 83.90   | 67.37 |
|               | 0.9cm | 68.10   | 58.20 | 64.41  | 62.75 | 80.55   | 61.81 |
|               | 1.2cm | 65.08   | 57.44 | 63.25  | 57.39 | 73.52   | 54.55 |

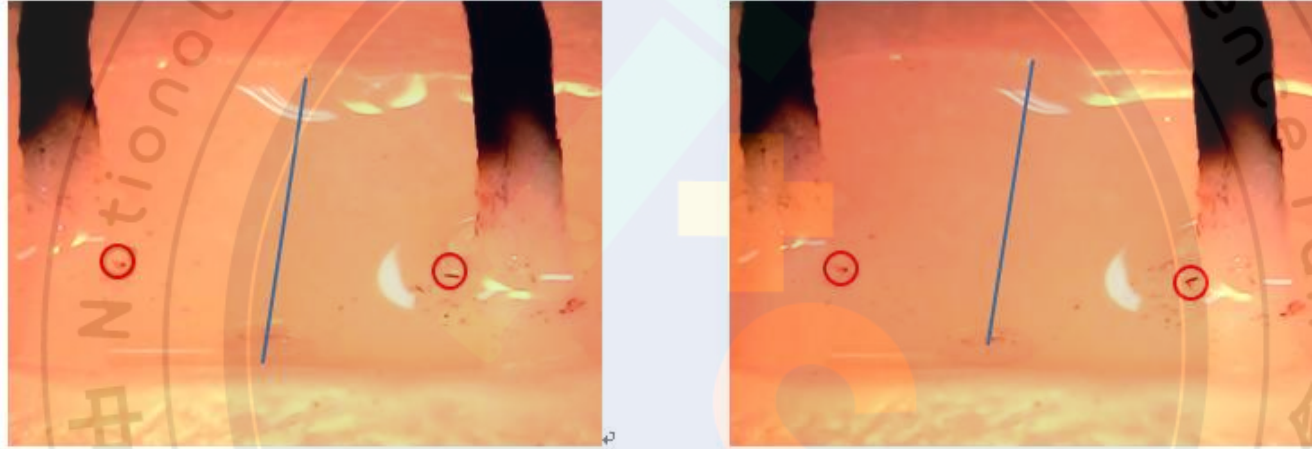
- 從溫度差異來看，銅線受熱傳導產生的熱源溫度較低，蠟油池因輻射熱減弱，因此碳粒移動範圍較小，也會影響碳粒的移動速度。

- 排除蠟油沿著燭芯向上的毛細作用與氣化作用力，三種蠟油池的碳粒移動就呈現完全不同的軌跡，除了大豆蠟，溫度較高的石蠟與果凍蠟的碳粒，並沒有中心移動後又加速離開！
- 推測當毛細作用與氣化作用力消失後，因為穩定且較低溫的熱源，石蠟與果凍蠟油內的熱對流形成穩定的渦流循環。而大豆蠟在相同的熱源與加熱時間下，溫度較低，銅線附近的蠟油受熱較慢，等到一定溫度與溫差後，才突然向外加速。



## 研究結果

# 同一蠟油池內含二支燭芯的雜質移動情形



雙燭芯蠟油池內的碳粒雜質移動情形

- 靠近燭芯的碳粒移動情形不變一向燭芯移動，且靠近及推開的速度都有加速的情形。
- 在左右燭芯中間的碳粒，並未出現明顯的往特定燭芯移動的情形，呈現左右晃動的混沌現象。
- 部份碳粒在被彈開的時候，由於加速過快，往另一端的燭芯移動後，開始在另一個燭芯的往返循環。



## 研究結果

# 較長與較粗的燭芯燃燒時，碳粒的移動情形

## 較長的燭芯



長燭芯燃燒之蠟油溫度梯度 (10 次平均溫度 $^{\circ}\text{C}$ )

| 蠟燭    | 石蠟    | 大豆蠟   | 果凍蠟    |
|-------|-------|-------|--------|
| 0.3cm | 91.42 | 75.34 | 109.1  |
| 0.6cm | 83.45 | 73.24 | 100.26 |
| 0.9cm | 76.95 | 71.05 | 89.44  |
| 1.2cm | 67.14 | 68.05 | 82.18  |

1. 過長的燭芯燃燒不會形成較大燭焰，一段時間後，與短燭芯結果相同。
2. 長燭芯燃燒形成的蠟油池各點溫度，與短燭芯差異不大。

## 較粗的燭芯



粗燭芯燃燒之蠟油溫度梯度

| 蠟燭    | 石蠟           | 大豆蠟   | 果凍蠟    |
|-------|--------------|-------|--------|
| 0.3cm | 蠟油池面積小，僅燭芯週圍 | 76.52 | 129.83 |
| 0.6cm |              | 71.35 | 129.13 |
| 0.9cm |              | 64.6  | 122.57 |
| 1.2cm |              | 57.95 | 123.63 |

1. 粗燭芯形成的燭焰較大，不易測量蠟油池的碳粒周期。
2. 燭焰大，果凍蠟溫度梯度變化小，碳粒移動無規律軌跡
3. 大豆蠟碳粒移動情形與細燭芯時相似，但目測之移動周期較短。
4. 燭焰大，石蠟內蠟油池淺且小，推測為毛細作用強，石蠟受熱從固態到氣態時間極短。

## 討論

# 碳粒受到的力

## 蠟油的熱對流與溫度梯度

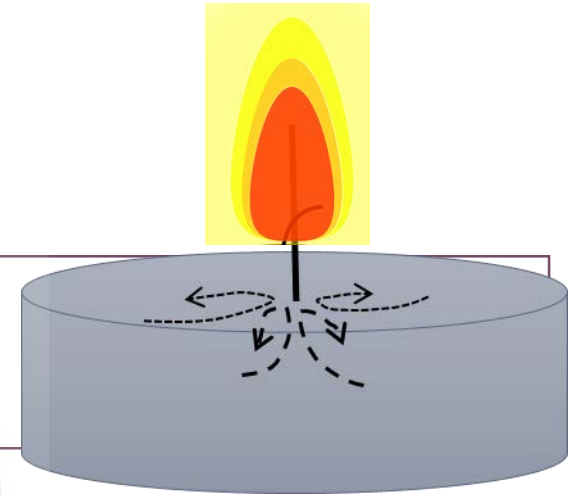
- 溫度梯度變化愈大者，碳粒移動的週期愈短。
- 燭芯附近的蠟油蒸發為氣態後，碳粒溫度驟降，碳粒往外加速移動。

## 蠟油在燭芯的毛細作用

- 部份的碳粒被吸附在燭芯上，加熱的銅線上並沒有吸附碳粒的現象。
- 燭芯加熱，底部碳粒由下斜向上，兩側碳粒約呈現弧形軌跡。銅線加熱的蠟油，碳粒移動呈現不一致，推論當缺少毛細作用時，銅線熱源對蠟油的加熱程度有限，無法形成奇特的現象。
- 還沒有接觸到燭芯前就被彈開，我們推測是蠟油池的熱對流產生多重的渦流效應，如右上圖。

## 碳粒的移動隨機無法預測

- 碳粒的運動軌跡並不固定，大致呈環狀扁橢圓的軌跡來移動。
- 也有出現碳粒被彈開後，離燭芯太遠而停止往中心移動，大部份出現在大豆蠟油的實驗。



## 討論

# 雜質的種類與銅線的導熱裝置改良

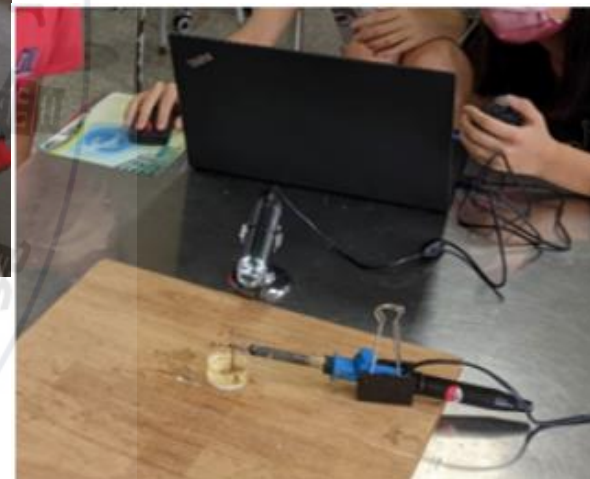
## 雜質種類

- 除了碳粒，研究小組嘗試採用木屑、細保麗龍球放入蠟油池觀察。
- 木屑跟碳粒一樣，也會在蠟油池中隨著蠟油的熱對流而移動，但木屑較重，運動一段時間後就沉入蠟油池底不再移動。
- 保麗龍球一放到蠟油池，便立即被蠟油的表面張力彈至最外圍，並且沒有再往燭芯移動的現象。

## 導熱裝置



原本設置的銅線導熱裝置。



改良後的銅線導熱裝置。



---

## 結論

1. 材質不同的蠟燭，蠟油池的碳粒雜質皆具有向燭芯移動，靠近燭芯後馬上加速離開的規律現象。
  2. 同一蠟油池內的蠟油流動速度不等速，燭芯附近的蠟油會加速向燭芯流動，沒有氣化的蠟油旋即加速離開。
  3. 蠟油池的碳粒移動週期與速度，跟蠟油池內的溫度梯度變化有關，溫度梯度變化大的石蠟，碳粒雜質移動的往返時間較短。
  4. 比較銅線加熱與燭焰加熱後發現，碳粒的移動軌跡受到燭芯毛細作用及蠟油氣化作用的影響，而出現一致性的向外加速。
  5. 碳粒在蠟油池的軌跡偏隨機移動，每一次往返的路徑不盡相同。
  6. 肉眼所見較大的雜質移動，會令人誤以為碰撞燭芯而反彈，經數位放大觀察發現，水平移動的微粒受到燭芯近側由下而上的渦流壓力而彈開，並沒有觸碰到燭芯。
  7. 兩個相鄰燭芯形成的蠟油池，會形成兩組碳粒循環系統，界於中線的碳粒，移動方向隨機無法預測。
-