

2023 年【科學探究競賽-這樣教我就懂】

普高組 成果報告表單

題目名稱：使用重量測量的方式探討蠟燭燃燒與水位的關係

一、摘要

本組研究主題：以電子秤紀錄蠟燭在燃燒過程，燒杯內空氣重量 W 隨燃燒時間 t 的關係，探討造成水位上升的成因。發現在燃燒過程，系統的重量先緩慢減少，然後突然劇烈減少，在蠟燭熄滅瞬間，水面上升，伴隨著系統重量逐漸回升，達最大值後再緩慢略降至穩定值。推測系統減少的重量即為排出空氣的重量，此以理論計算予以證實。在燃燒的過程，杯內的水會先下降，當水位降至最底端，杯內的部分空氣被排出，最後在蠟燭熄滅瞬間，水位急速上升。

二、探究題目與動機

本組基於挑戰心理，想要設計一個全新的實驗方法來探討實驗變因與結果都難以測量的蠟燭燃燒、水位上升的實驗。利用瓶內氣體重量的變化計算來探討水位上升的原理。

三、探究目的與假設

- 目的：
- (1) 探討瓶內氣體重量 W 、水位上升高度 h 隨時間 t 的變化關係與原理
 - (2) 探討水位上升高度 h 、瓶內氣體減少重量 W 與蠟燭數量 N 的關係
 - (3) 探討水位上升高度 h 、瓶內氣體減少重量 W 與燒杯容積 V 的關係
 - (4) 探討水位上升高度 h 、瓶內氣體減少重量 W 與蠟燭長度 L 的關係

假設 1：耗氧理論

蠟燭為混合物，在此以分子式的燃燒為例：



標示為 1000 mL 的燒杯截面積 $A = \pi \times 5^2 = 78.5 \text{ cm}^2$

容積 $V = \text{燒杯截面積} \times (\text{燒杯高度} - \text{水位高度}) = 78.5 \times (14.75 - 1.1) = 1070 \text{ mL}$

含氧氣體積 = $1070 \times 20\% = 214 \text{ mL}$

完全燃燒後產生的二氧化碳體積 = $214 \times \frac{25}{38} = 141 \text{ mL}$

\Rightarrow 若瓶內氧氣完全燃燒，水位上升高度 $h = \frac{214 - 141}{78.5} \doteq 0.93 \text{ cm}$

假設 2：理想氣體方程式

燒杯容積 $V = 1070 \text{ mL}$ 溫度 $T = 301.6 \text{ K}$

燒杯內氣體莫耳數 $n = \frac{PV}{RT} = \frac{1 \times 1.07}{0.082 \times 301.6} = 0.043 \text{ mole}$

由實驗得知：蠟燭數量 $N = 1$ 時 水面上升高度 $h = 0.38 \text{ cm}$ 杯內溫度 $T' = 330 \text{ K}$

此時燒杯內氣體莫耳數 $n' = \frac{PV'}{RT} = \frac{1 \times (1.07 - 78.5 \times 0.38 \div 1000)}{0.082 \times 301.6} = 0.038 \text{ mole}$

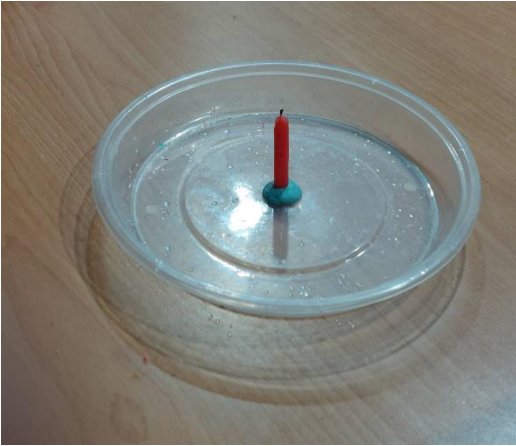
排出氣體莫耳數 $\Delta n = n - n' = 0.043 - 0.038 = 0.005 \text{ mole}$

排出氣體重量 $W = 0.005 \times 28.8 = 0.14 \text{ gw}$ 氣體理論減少重量

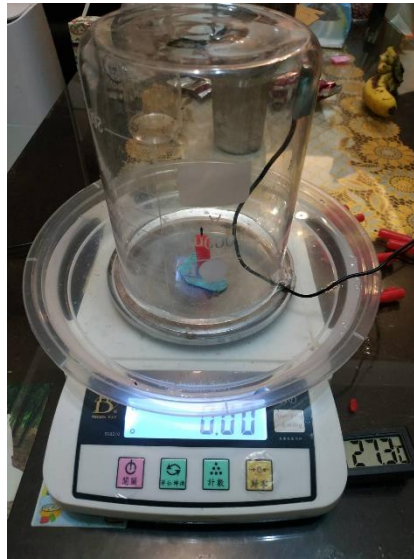
四、探究方法與驗證步驟

一、實驗設備與器材：

蠟燭(長度 4 公分、寬度 0.8 公分)、燒杯(半徑 $r = 5\text{ cm}$ 、高 $H = 14.75\text{ cm}$ ；半徑 $r = 4\text{ cm}$ 、高 $H = 12.0\text{ cm}$ ；半徑 $r = 3\text{ cm}$ 、高 $H = 9.85\text{ cm}$)、電子秤、溫度計、打火機、塑膠盤、黏土



圖(1)



圖(2)

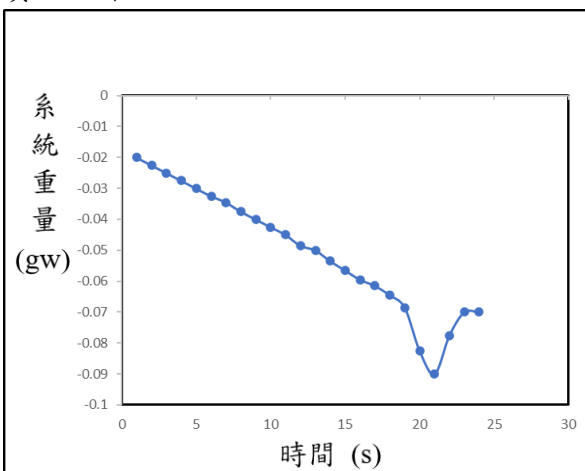
二、實驗：將整個系統放在電子秤上，測量其重量變化。由燒杯內氣體重量的減少量 W 來推測水面上升高度 h 。

實驗步驟：

1. 如圖(1)所示，將蠟燭以黏土固定在塑膠盤上
2. 如圖(2)所示，將整個系統放置在電子秤上測量
3. 將溫度計以黏土固定在燒杯上，蓋在蠟燭上後將電子秤歸零
4. 點燃蠟燭，蓋上燒杯，觀察其杯內溫度、水面高度、系統重量變化
5. 待蠟燭熄滅後，杯內水位不再變化，用尺測量燒杯內水位上升高度 h
6. 用手機將過程全程錄影記錄

實驗一：觀察系統重量與時間的關係

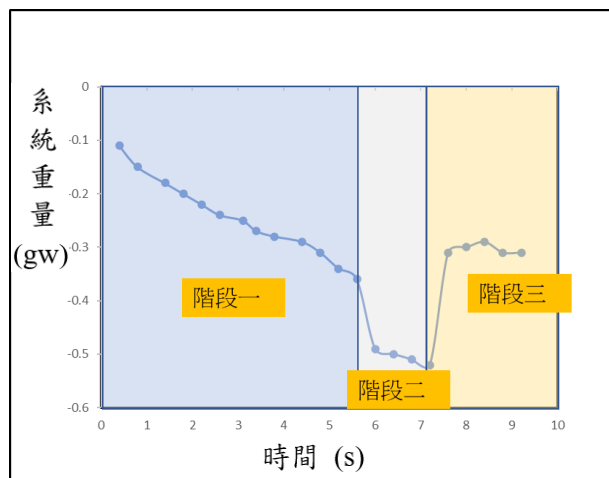
實驗結果：



圖(3)：蠟燭數量 $N = 1$

平均水位上升高度 $h = 0.38\text{ cm}$

燒杯內平均溫度 $T = 56\text{ }^{\circ}\text{C}$



圖(4)：蠟燭數量 $N = 3$ ：

實驗結果：蠟燭燃燒過程可分成三個階段：

階段一：如圖(5)所示，水面下降至最底點前，系統重量緩慢減少

在此過程，杯內氣體尚未排出，氣體莫耳數 n 不變，而杯內氣體壓力 $P = \text{大氣壓力} - \text{燒杯內外水壓差}$ ，因水壓極小，可忽略不計，即杯內氣體壓力 P 維持 1 大氣壓力。

由 $PV = nRT$ V 與 T 成正比，蠟燭緩慢燃燒過程，水面緩慢下降。

既然杯內氣體尚未排出，系統重量應該維持不變。但因杯內水面下降，此時重心降低，產生視重問題，如同電梯加速度往下，裡面的人視重減輕一樣，此時因水位下降，所以整體重心降低，造成重量緩慢變輕的現象。

註：杯內水面下降、杯外水面隨之上升，系統重心應不變，但杯內的水位於秤盤中央，而杯外的水位於秤盤外側，顯然位於秤盤中央的水造成的影響較大。

階段二：如圖(6)所示，水面下降至最底點，系統重量突然減少

當水位降到最低點時，開始排出氣體。在此階段，燒杯內容積 V 不變、內外壓力皆為一大氣壓， P 維持不變

由 $PV = nRT$ n 與 T 成反比，燒杯內的溫度升高，造成杯內氣體莫耳數 n 減少，使系統重量減少。此時蠟燭持續熄滅，溫度持續上升，將氣體排出，此過程將會持續到蠟燭周圍氧氣燒完前一刻。

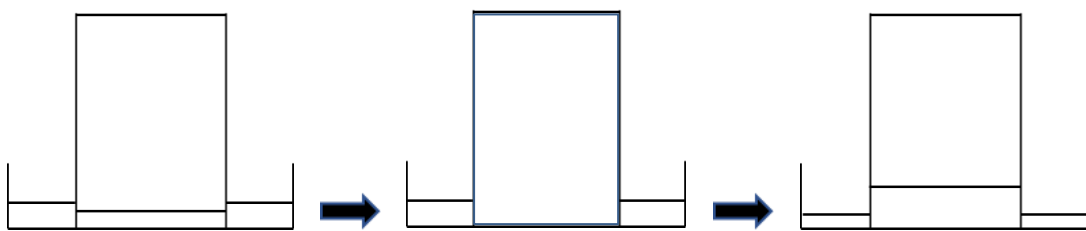
階段三：如圖(7)所示，蠟燭熄滅，水位迅速上升，系統重量迅速回升，之後趨於穩定。

因蠟燭熄滅，杯內熱量散失至燒杯及外部，造成杯內溫度下降，水面上升形成密閉空間，氣體莫耳數 n' 不變，而杯內氣體壓力 P 維持 1 大氣壓力。

由 $PV = nRT$ V 與 T 成正比，溫度 T 持續下降， V 隨之變小，造成水面上升。

此時系統重量會上升則因為視重及被水流帶入燒杯的空氣影響。水位上升，造成重心上升，因此系統重量上升；而在水位上升過程，水快速流進燒杯，根據白努力定律得知，流速快、壓力小，此時就會有一些空氣伴隨水流入燒杯，造成重量上升。

水位變化示意圖：



圖(5)

圖(6)

圖(7)

實驗二：改變蠟燭數量 N

1. 實驗變因

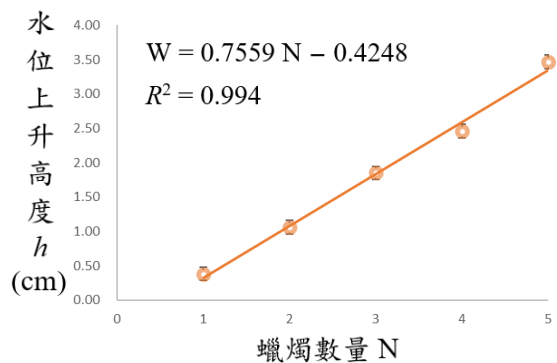
控制變因：蠟燭直徑 0.8 cm、蠟燭長度 4 cm、初始水面高度 1.1 cm、初始溫度 28.5 °C
燒杯容積 1150 mL

操縱變因：蠟燭數量 N ($N = 1 \sim 5$)

應變變因：杯內水位上升高度 h

2. 實驗結果：

(1) 蠟燭數量 N 越多，水位上升高度 h 越大，如圖(8)所示。

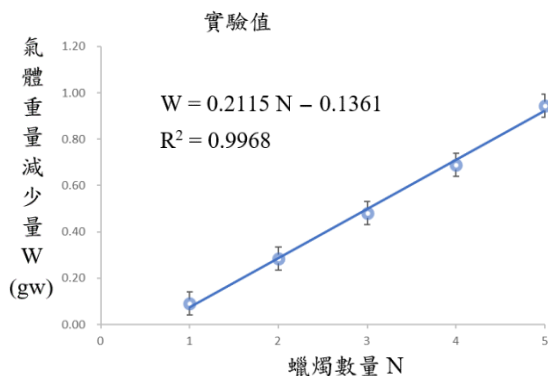


圖(8)

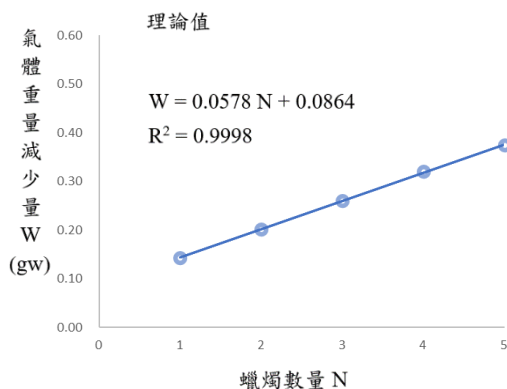
分析：若杯內氧氣完全燃燒，則不論蠟燭數量，燃燒產生的熱量應相等，造成水面上升高度 h 應相等。然而實驗結果並非如此，故推測杯內氧氣並非完全燃燒，當蠟燭數量 N 越大，可有效燃燒 O_2 增加，造成放熱量增加、溫度上升多，水位上升高度 h 大。但蠟燭數量 N 越多時，耗氧速度越快，故燃燒時間越短。

蠟燭數量 N	1	2	3	4	5
平均燃燒時間 t (s)	20.1	14.3	7.8	5.2	3.3

(2) 蠟燭數量 N 越多，則系統減少的重量 W 越大，如圖(9)所示。



圖(9)



圖(10)

分析：由電子秤測量結果為實驗值，利用假設 2 的方式計算所得的結果為理論值，如圖(10)所示，兩者皆隨蠟燭數量越多而變大，但理論值低於實驗值。此因理論值係利用燃燒理論、理想氣體方程式求得，未考慮到氣體熱膨脹效應。

實驗三：改變燒杯的容積

1. 實驗變因

控制變因：蠟燭直徑 0.8 cm、蠟燭長度 4 cm、初始水面高度 1.1 cm、初始溫度 28.5 °C

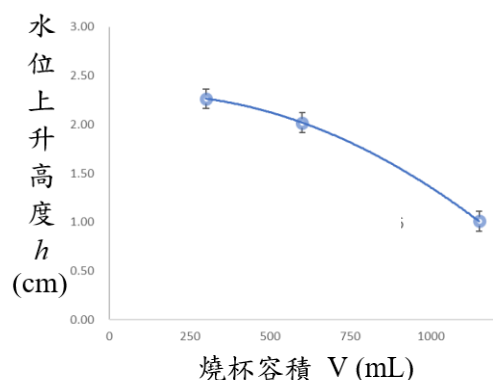
蠟燭數量 $N = 2$

操縱變因：燒杯容積 V ($V = 1150 \text{ mL}$ 、 600 mL 、 300 mL)

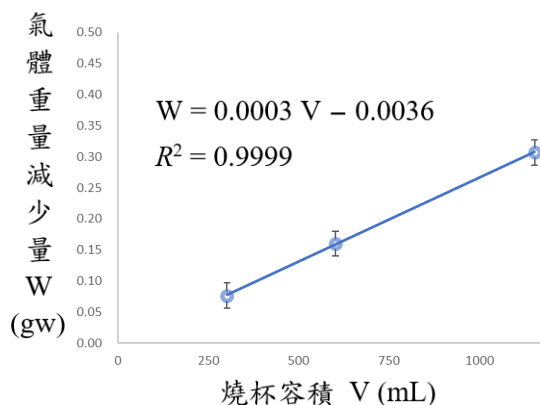
應變變因：杯內水位上升高度 h

2. 實驗結果：

(1) 燒杯截面積越大，則杯內水位上升高度 h 越小，如圖(11)所示。



圖(11)



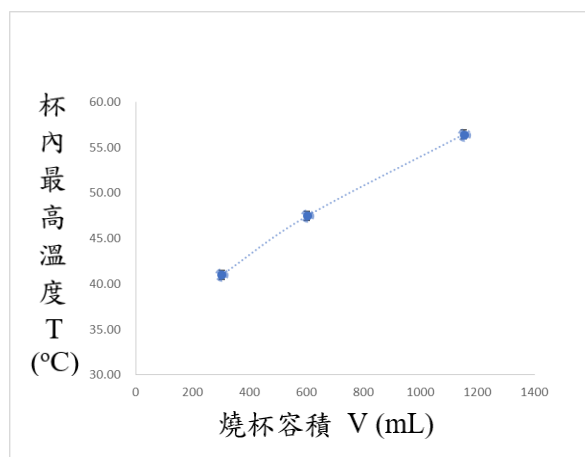
圖(12)

分析：因容積較小的燒杯，其截面積比較小，故其水位上升高度較多。

(2) 燒杯容積越小時，則氣體重量減少量 W 越小，如圖(12)所示。

分析：因燒杯容積越小，則內部氣體總量越少，能助燃而產生的熱量自然越少，排出氣體量越少。

(3) 燒杯容積越小，則杯內最高溫度越小，如圖(13)所示。



圖(13)

分析：燒杯內溫度最高處是蠟燭的正上方，但此處無法代表燒杯內氣體的平均溫度。嚴格而言，其實無一處的溫度可代表氣體的平均溫度，只能以與燭火等高處的杯壁內緣附近的氣體溫度表示。

因燒杯容積越小，則內部氣體總量越少，蠟燭燃燒時間越短，產生的熱量越少，造成溫度上升量越小。

實驗四：改變蠟燭的長度

1. 實驗變因

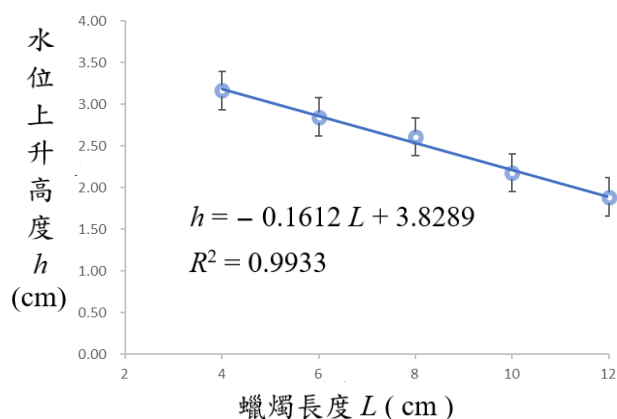
控制變因：蠟燭直徑 1.5 cm、蠟燭數量 $N = 1$ 、初始水面高度 1.1 cm、初始溫度 28.5 °C

操縱變因：蠟燭長度 L ($L = 4$ cm、6 cm、8 cm、10 cm、12 cm)

應變變因：杯內水位上升高度 h 蠟燭長度 L (cm)

2. 實驗結果：

(1) 蠟燭長度 L 越長，則水位上升高度 h 越小，如圖(14)所示。



圖(14)

分析：蠟燭燃燒時，熱空氣往上。當蠟燭長度 L 越長，直立高度越高，產生對流範圍較小，只能利用燒杯上方的空氣幫助燃燒；反之，蠟燭長度 L 越短，則熱源在較低處，產生對流的範圍較大，能同時利用燒杯上方及下方空氣幫助燃燒，故水位上升高度較大。

(2) 蠟燭長度 L 越長時，則燃燒時間 t 越短

蠟燭長度 L (cm)	4	6	8	10	12
平均燃燒時間 t (s)	12.1	10.7	10.2	9.5	7.2

分析：同水量上升高度，蠟燭過長時，僅能燃燒到靠近燒杯上方的空氣，沒辦法燃燒到燒杯下方的空氣，使燃燒的時間縮短

五、結論與生活應用

結論：

本作品利用電子秤測量在燃燒過程中系統重量隨時間的變化，可清楚推測各階段水位變化的成因。並得到以下關係：

1. 蠟燭數量 N 越多，則水位上升高度 h 越大，燃燒時間 t 越短。
2. 燒杯容積越大，則水位上升高度 h 越小。
3. 蠟燭長度 L 越長，則水位上升高度 h 越小，燃燒時間 t 越短。

應用：

1. 密閉容器內的氣體熱脹冷縮現象已應用在中醫拔罐療法。
2. 汽車輪胎的熱漲冷縮也會影響性能安全，可以用此實驗方法計算並解決安全問題。

參考資料

1. 【這樣教我就懂】 高中（職）組成果報告表單題目名稱：蠟燭燃燒
https://sciexplore2021.colife.org.tw/uploadfiles/TM3b90031dac/TM3b90031dac.pdf?fbclid=IwAR2Rz46aGh6g0FG1MF-re1A10p9PVC8G-nRAAtMqOqg1Xb27chgpkThmX_rI