

作品名稱

## 小偵探破除科學大迷失-蠟燭悶熄的因素再探討

摘要

本研究結合五下自然「空氣與燃燒」單元學習內容，並且透過學童生活經驗發覺：蠟燭燃燒需要氧氣，二氧化碳氣體則可以滅火，廣口瓶內到底是少了氧氣的助燃性，還是增加二氧化碳氣體的非助燃性，導致蠟燭火焰熄滅，孰重孰輕，值得探討…

經由蠟燭燃燒和火焰熄滅現象觀察，蠟燭燭火在倒蓋廣口瓶中受到空氣對流作用，沉降氣流含有燃燒生成的較高濃度的二氧化碳氣體籠罩而熄滅；廣口瓶體積大小跟瓶內燭火燃燒時間成線性相關，廣口瓶體積每增加 100ml，燃燒時間就增加 3 秒鐘。燭火熄滅時，廣口瓶內氧氣體積百分濃度為 17%，二氧化碳體積百分濃度增為 3.7%，推算燃燒過程，廣口瓶中每秒鐘氣體變化率(氧氣消滅或二氧化碳氣體生成)為 0.42~0.01(%/秒)，廣口瓶體積越小，氣體變化率越大。

人體呼出氣體含氧量剩約14%，表示人體呼吸作用的氧氣利用率，不同性別、年紀和身體健壯會有不同的氧氣利用率。

# 小偵探破除科學大迷失-蠟燭悶熄的因素再探討

## 壹、研究動機

這是一個不起眼的生活素養問題-「瓶中燃燒的蠟燭為什麼會熄滅？」問了校園中非自然科老師和同學這個問題，十之八九都會回答：「瓶中空氣(氧氣)被燒光了」，或是「瓶中充滿了不可燃氣體(二氧化碳)」…等等，這樣的科學迷失一直都存在國小校園師生錯誤觀念中，儘管幾屆科展研究「蠟燭燃燒」資料，例如：1/5 疑惑-悶熄蠟燭實驗的探討(44屆全國科展)、悶熄蠟燭燃燒實驗的重新設計(46屆台北市科展)、教科書錯了嗎？課本燃燒實驗的重新探究(48屆全國科展)…等，但是這些研究多侷限在破解水盆中杯內水位上升1/5的科學迷失探討，鮮少研究蠟燭熄滅現象和杯內空氣濃度變化的觀察；同時，五上自然課本第三單元「空氣與燃燒」的學習活動，利用五官察覺燃燒時所產生的各種現象，讓我們了解並探討氧及二氧化碳的特性。於是，我們上實驗課時，從操作「點燃一支蠟燭，仔細觀察，你有什麼發現？」到「用玻璃杯蓋住燃燒中的蠟燭，燭火會有什麼變化？」，發現除了跟課本所探討的氧氣和二氧化碳等氣體性質會影響燃燒外，影響悶熄蠟燭燃燒時間的因素似乎很多，值得我們做一個研究探討，於是在老師的鼓勵之下我們做了這個研究。



圖 自然課本第三單元「空氣與燃燒」

## 貳、研究目的

- 一、空氣中蠟燭燃燒的毛細現象探討
- 二、蠟燭燭火的悶熄現象觀察探討
- 三、蠟燭的燭火悶熄時間研究
- 四、呼吸作用和燃燒作用的氣體濃度變化研究

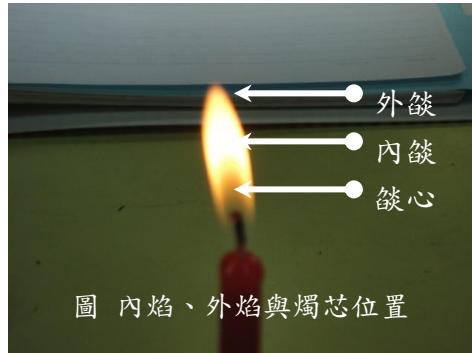
## 參、研究設備及器材

長、短蠟燭、玻璃板、鑷子、針筒、250ml 廣口瓶、500ml 廣口瓶、1000ml 廣口瓶、2500ml 廣口瓶、10000ml 廣口瓶、計時碼表、二氧化碳濃度偵測器、(GasAlertMicro5-PID)氧氣濃度偵測器

## 肆、研究過程及結果

### 一、空氣中蠟燭燃燒的毛細現象探討。

想法：在四下自然第二單元「毛細現象」的例子有談到蠟燭燃燒，因此我們對燭芯棉線是如何毛細上升「蠟油」，想要做一個探討，而在課本單元「熱的傳播與保溫」教師手冊的第167頁又說到「最適當的加熱位置是在外焰」，因為它的溫度最高，這跟燭芯棉線的毛細現象蠟油有關嗎？

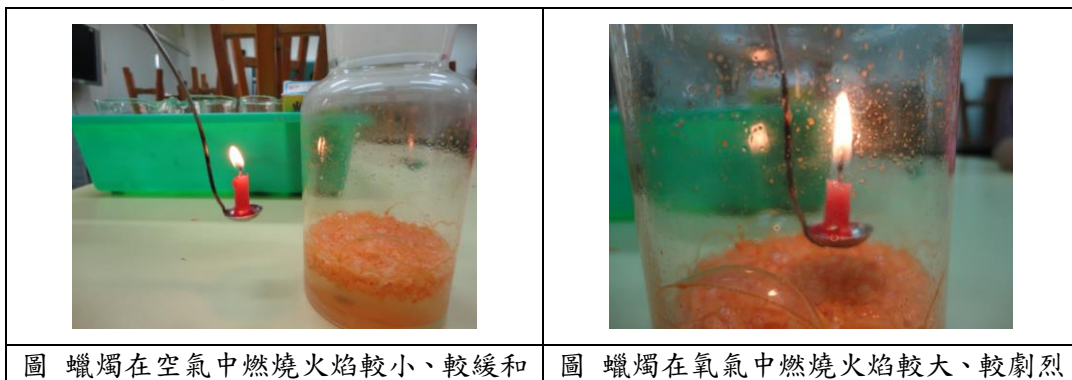


### 步驟：

1. 點燃一支蠟燭，觀察記錄蠟燭燃燒及蓋上廣口瓶蠟燭熄滅前的各種現象
2. 將點燃的蠟燭，利用鑷子分別夾住燭芯頂端、中部、底部，觀察哪一支蠟燭會先熄滅？

### 結果：

1. 空氣中的氣體，約有五分之一是氧氣，其餘約五分之四是氮，二氧化碳只占0.03%，由五上的「雙氧水和胡蘿蔔反應產生氧氣」實驗，再觀察蠟燭燃燒的情形，我們知道空氣中的氧氣是可以幫助燃燒的氣體，而且比較蠟燭在氧氣中會比在空氣中燃燒更劇烈，火焰高度較高。



2. 蠟燭成品包含中間棉線和包覆蠟塊兩個部份。棉線可以用來點火再利用「毛細作用」—燃燒時，棉線下端熔化的蠟油（液體）被吸附上來。仔細觀察燭心與液態蠟的交界處有非常淡的蒸氣狀蠟（氣體），我們利用注射針筒靠近燭蕊最暗處的內焰可以汲吸一些白色霧狀氣體蠟。（如下圖）可見燭芯是將液體蠟油毛細作用的引線再變成蒸氣狀可燃燒的蠟氣。因此，我們日常生活中，蠟燭一吹就熄滅，原因就是將這可燃物氣體蠟吹走了，蠟燭沒有可燃氣體燃料可燒就會熄滅了。



圖 利用注射針筒靠近燭蕊最暗處(燄心)可以吸入白色霧狀氣體蠟

圖 空氣中擠出注射筒內的白色霧狀氣體蠟

3. 當以口輕吹或手搨燭火時，因為毛細吸附的蠟油從燭芯汽化上昇過程，歪斜的燭火造成直線汽化蠟燃燒不完全，而冒出類似懸浮顆粒的黑煙，而不是汽化的白色霧狀氣體蠟(白煙)。

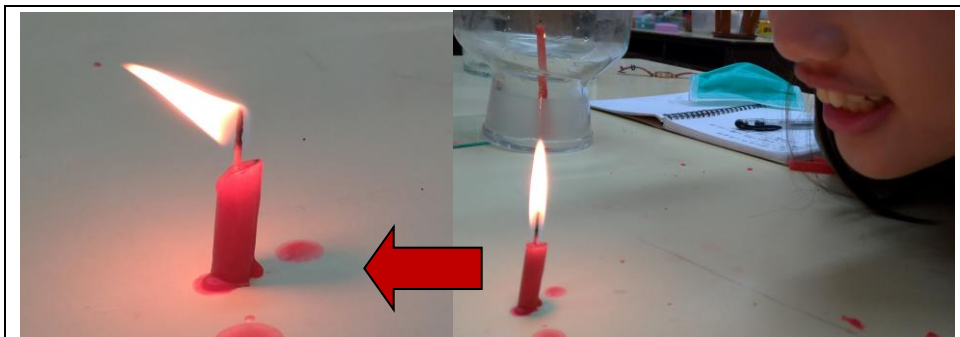


圖 歪斜的燭火會冒出燃燒不完全的黑煙



影片說明：手搨燭火歪斜冒黑煙



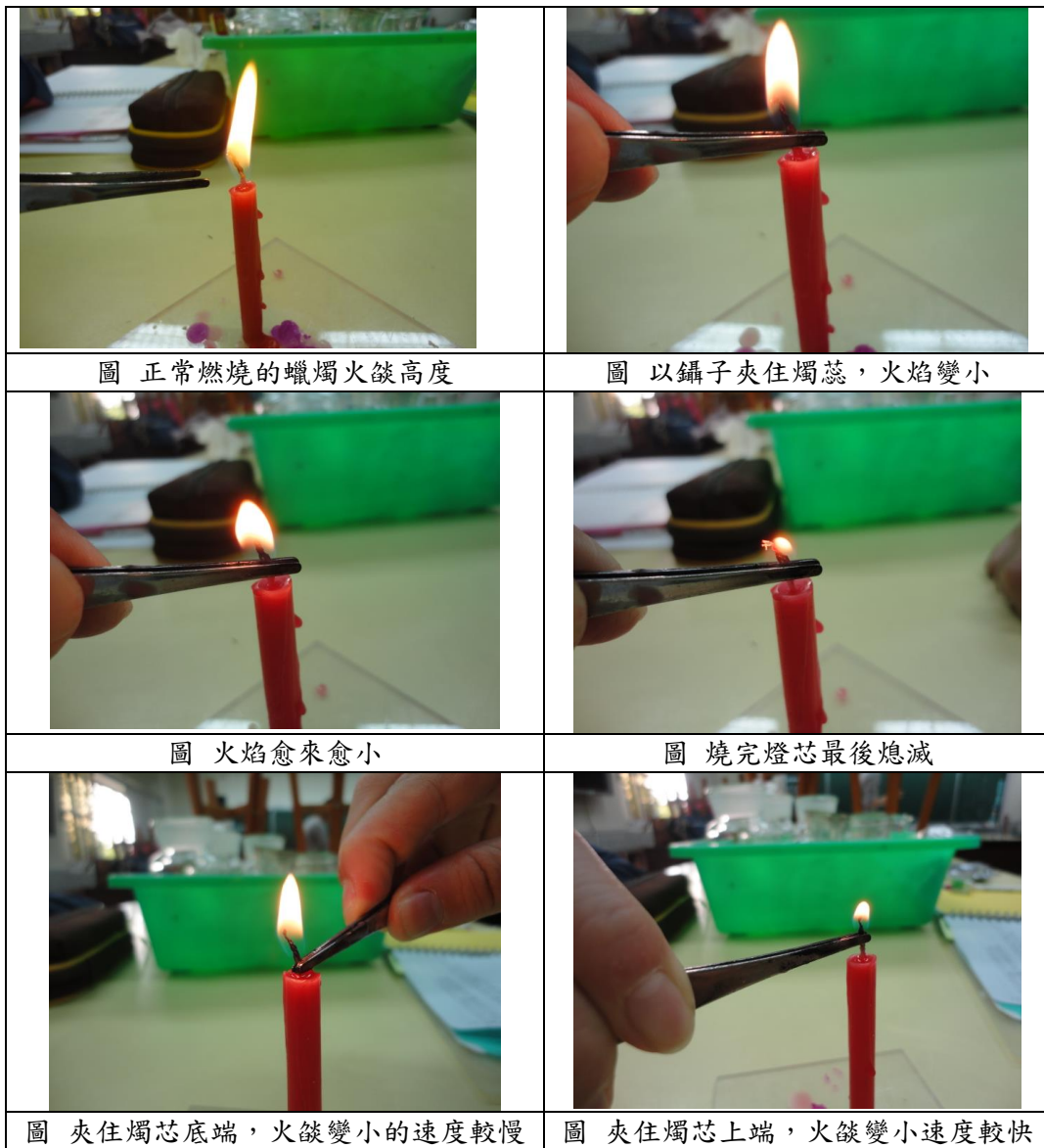
影片說明：輕吹燭火歪斜冒黑煙

4. 利用鑷子分別夾住燭芯引線頂端、中部、底部來阻斷毛細作用的進行，觀察哪一支蠟燭會先熄滅？剩餘的燃燒時間記錄結果如下：

鑷子夾住部位 至熄滅的時間	燭蕊頂端	燭蕊中部	燭蕊底部
第一次	10.9	33.2	33.6
第二次	11.3	33.0	29.1
第三次	14.4	31.4	49.2
平均	12.2	32.5	37.3

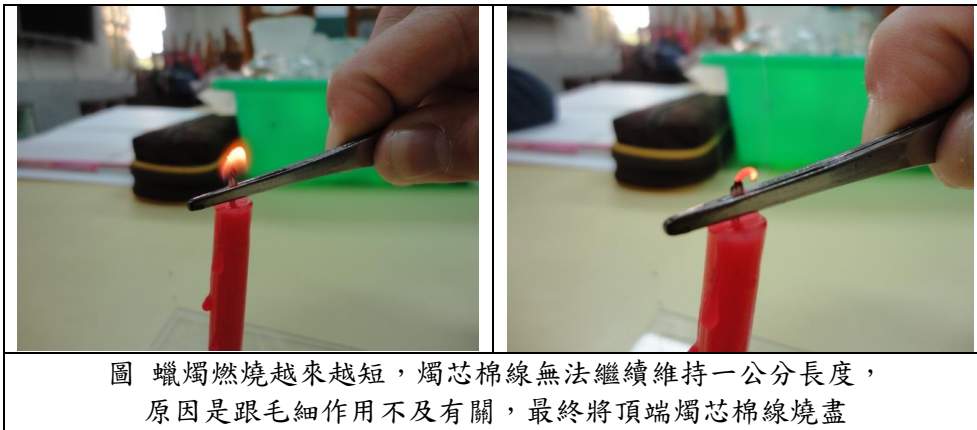
由以上實驗數據，可以看出以鑷子夾住燭芯棉線不同位置，頂端瞬間停止毛細現象，阻隔蠟油汽化高溫燃燒的機會而較快熄滅；但夾住燭芯中部或燭芯底部雖然也會阻隔蠟油的毛細汽化高溫燃燒，但是夾住位置較下端、上方尚有較長殘餘棉線和殘存毛細液態蠟油汽化，使得餘火能繼續延續逐漸燒完燭芯棉線和蠟油，所以熄滅前剩餘燃燒時間較長。





5. 由此可以說明：在一般蠟燭燃燒情況，為什麼蠟燭越燒越短但是燭芯棉線卻能始終維持約一公分的長度而不會越來越長，這是因為毛細作用蠟液的持續消耗，原會使得露在空氣中的燭芯越來越長，但是裸露太長的棉線燭芯卻因為毛細作用高度不及將液態蠟吸到最頂端成為蒸氣可燃蠟，所以在瞬間蠟液蒸發燒光無蠟氣可燃的同時也把一公分長之外的棉質燭芯給燒焦成灰燼，使蠟燭燭芯棉線能夠不斷的維持一定長度。





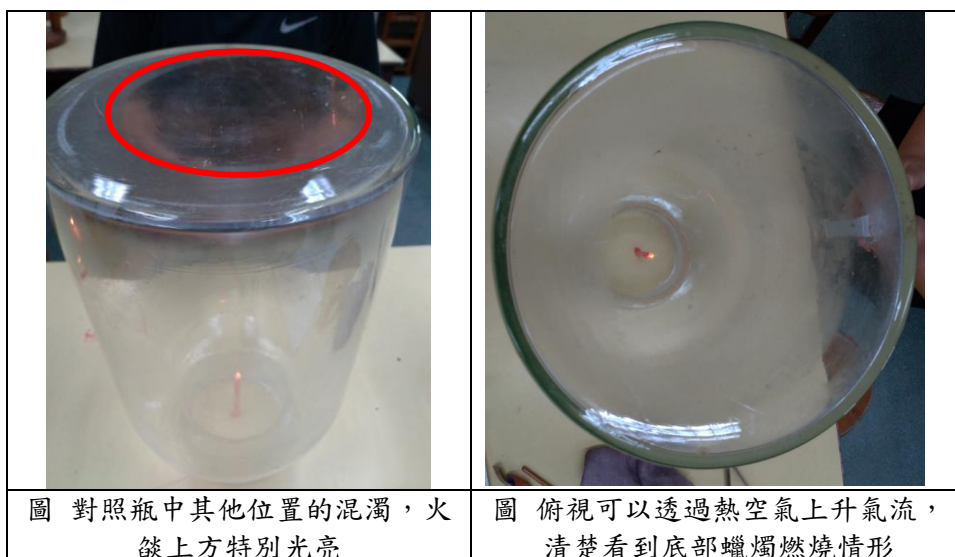
## 二、蠟燭燭火的悶熄現象觀察探討。

想法：五上課程「空氣與燃燒」單元，在單元實驗中「小蘇打粉和醋酸作用產生二氧化碳可以滅火」，說明二氧化碳氣體不可燃也不助燃；同時，我們發現二氧化碳氣體比一般空氣氣體重，可以澆灌沉降在燃燒蠟燭火焰上，隔絕空氣讓燭芯沒有氧氣助燃而熄滅。蠟燭燃燒需要氧氣，二氧化碳則是會造成蠟燭火焰熄滅，到底是少了氧氣的助燃性，還是增加二氧化碳的非助燃性，導致廣口瓶中蠟燭火焰的熄滅，孰重孰輕，值得探討…

- 步驟：
1. 將點燃的蠟燭以 500ml 廣口瓶倒蓋住，觀察記錄蠟燭火焰悶熄前的各種現象。
  2. 取檸檬酸 10c. c. 加入空飲料杯和 10 公克小蘇打粉作用產生二氧化碳氣體，澆灌於蠟燭燭火，觀察是否熄滅。
  3. 將 250、500、1000、2500 和 10000ml 等不同體積大小廣口瓶倒蓋在蠟燭燭火，觀察紀錄是否有餘火復燃現象。

結果：

1. 燃燒的蠟燭在倒蓋的廣口瓶中，瓶頂會出現有光亮晶瑩的圓形面積，對照其他位置的混濁情形，顯示蠟燭燃燒過程有熱氣上升情形，熱氣上升沖刷到瓶頂，造成火焰上方位置有圓面積光亮的情形。



2. 利用酸和小蘇打粉作用生成無色、無味的二氧化碳氣體，澆灌燃燒的燭火，結果將火焰澆熄，說明二氧化碳氣體分子重量大於空氣平均重量，二氧化碳氣體沉降瞬間包覆燭火，隔離助燃氣體氧氣造成燭火立即熄滅。



圖 二氧化碳氣體比一般空氣氣體重，可以澆灌沉降在燃燒蠟燭火焰上，隔絕空氣讓燭芯沒有氧氣助燃而熄滅



影片說明：二氧化碳澆熄燭火

3. 在廣口瓶中悶熄的燭火，熄滅的瞬間會有白色霧狀氣流沉降，顯示燃燒過程中二氧化碳等無色氣體隨著熱空氣上升到瓶頂再沉降下來，我們認為：當瓶內空氣中二氧化碳氣體濃度逐漸累加，助燃的氧氣氣體濃度漸漸消減的情況下，這種氧氣不足的沉降氣流就將燭火澆熄了。

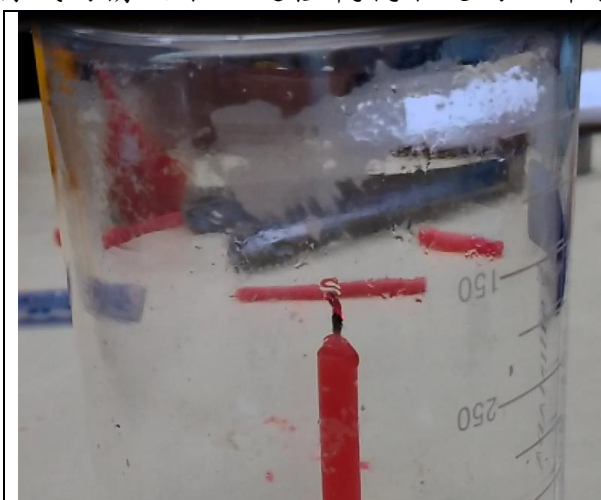


圖 燭火熄滅瞬間冒出一股白色霧狀氣流






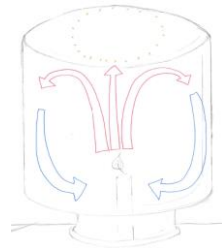
影片說明：  
燭火熄滅瞬間白色霧狀上升氣流到瓶頂後沉降下來

4. 餘火熄滅瞬間，燭芯上方突然冒出一縷白煙裊裊升起，由實驗一我們認為是燭油汽化後的白色霧狀氣體蠟，但在沒有足夠助燃氣體氧氣的燃燒



條件下，熄滅瞬間所產生的一縷來不及燃燒的霧狀氣體蠟白煙。

5. 蠟燭火焰在不同大小廣口瓶中熄滅前，會有火焰復燃的情形，體積越大的廣口瓶復燃次數越多、復燃的情形也越明顯。

瓶體積	250ml	500ml	1000ml	2500ml	10000ml
有無復燃情形	無復燃，直接熄滅冒煙	無復燃，慢慢熄滅，有餘火亮光後熄滅冒煙	有復燃1次的情形，餘火突然又變小火燃燒，最終熄滅冒煙	餘火復燃3-4次，一次比一次復燃火焰更小更不明顯，	復燃5-6次，第一次復燃甚至是中火大小規模
操作影片					
繪圖說明	廣口瓶體積越大，可運用的空間助燃氣體量愈多，下沉氣流造成復燃次數越多、越明顯				

觀察燭火的復燃情形，我們認為是熱空氣上升、冷空氣下降的對流作用造成，廣口瓶體積越大，可以循環的空氣越多，可運用的氧氣助燃氣體量愈多；但是，隨著復燃循環次數越多，氣體循環規模變小，氧氣助燃氣體量就減少，餘火欲振乏力最終熄滅冒煙。

6. 以清洗過但未擦乾的廣口瓶操作實驗，我們發現蠟燭燭火熄滅瞬間，廣口瓶瓶口內緣會有冒泡情形，我們認為是燃燒過程，瓶內溫度升高氣體受熱膨脹，但是，殘餘燭火提供熱量不足膨脹氣體體積，瞬間熄滅之後，氣體冷卻體積減縮吸引瓶外空氣往內擠壓而出持續冒泡情形。

	
影片說明：廣口瓶燭火熄滅瞬間瓶口內緣冒泡	影片說明：燭火熄滅後瓶口內緣持續冒泡



### 三、蠟燭的燭火悶熄時間研究

想法：從以上的觀察實驗，我們知道不助燃的二氧化碳氣體分子的重量大於空氣的平均重量之性質可以澆熄燭火；同時，從倒蓋廣口瓶悶熄燭火的觀察實驗，也顯示倒蓋瓶中熱空氣上升、冷空氣下降的過程中，沉降的空氣裡不可燃二氧化碳氣體等會壟罩燭火造成熄滅；而在討論影響燭火剩餘燃燒時間的因素時，我們思考了廣口瓶燭火受空間中氧氣逐漸變少而二氧化碳逐漸增多的影響。就先前研究資料顯示，水槽裡倒蓋廣口瓶中長蠟燭會較短蠟燭早熄滅，就像是高個子和矮個子的人分別吸收上層和底層的空氣一樣，壟罩下來的不足量氧氣的氣流就造成長蠟燭先熄滅；於是我們就繼續完成在倒蓋廣口瓶中燭火燃燒時間的比較實驗。同時，我們假設：蠟燭長度一樣，在不同體積的廣口瓶中，燭火燃燒時間是否跟廣口瓶體積大小成線性關係的正比呢？值得探討…

- 步驟：1. 點燃 10 公分和 1 公分之長和短兩支不同蠟燭，以 500 毫升燒杯倒蓋後，記錄比較兩支蠟燭燭火熄滅時間。
2. 取 250ml、500ml、1000ml、2500ml 及 10000ml 等不同體積廣口瓶，操作蠟燭燭火悶熄實驗，並觀察紀錄及作圖比較。
3. 取 500 ml 廣口瓶倒蓋在底端是整塊及 3/4 塊油土上的蠟燭燭火，觀察比較密合度是否影響燭火燃燒時間。



圖 250、500、1000、2500 和 10000ml 廣口瓶

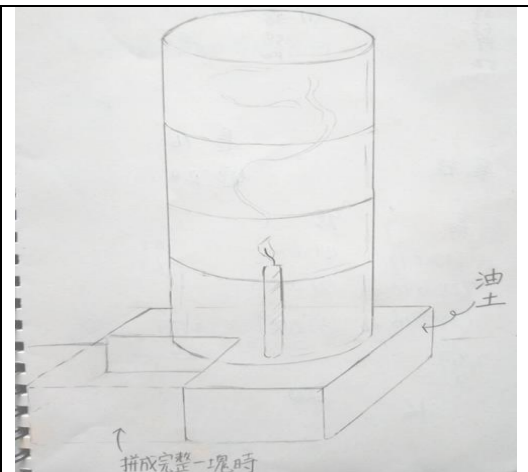


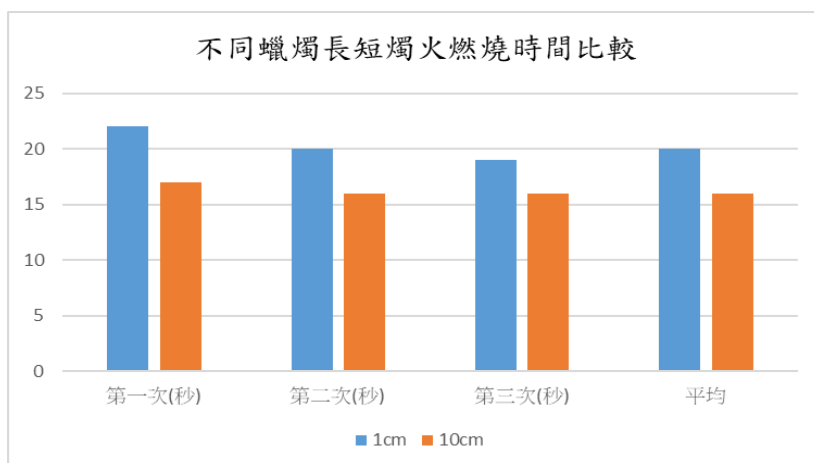
圖 底端密合度操作實驗裝置說明

結果：

1. 三次的蠟燭長度 1 公分和 10 公分燭火燃燒時間結果如下：

蠟燭長度	1cm	10cm
第一次(秒)	22.0	17.2
第二次(秒)	20.6	16.4
第三次(秒)	19.8	16.2
平均	20.8	16.6

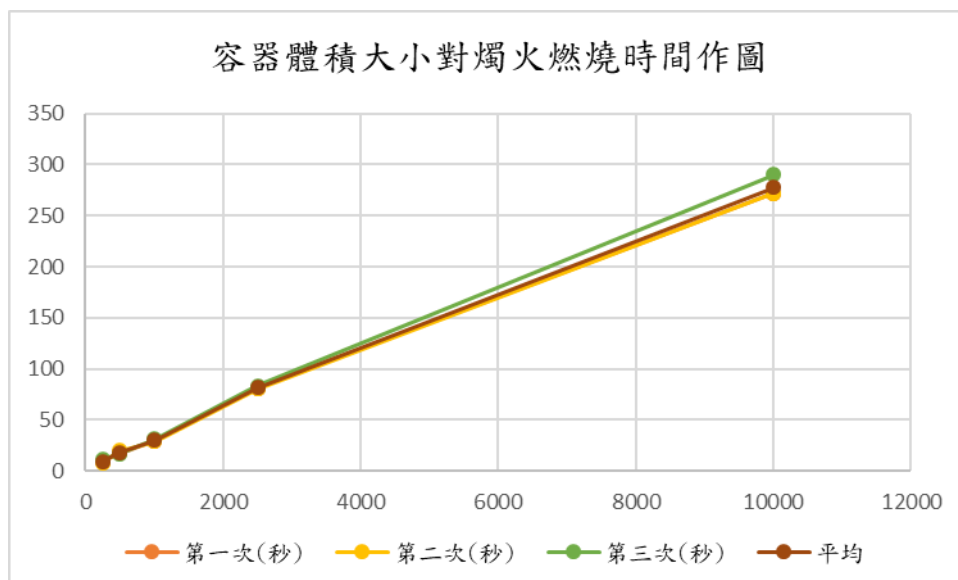
作圖：



顯示，10 公分長蠟燭會比 1 公分短蠟燭的燭火早熄滅，時間少了四秒鐘大約是短少了五分之一時間。

2. 容器體積會不會影響燃燒時間?我們利用 250、500、1000、2500、10000ml 廣口瓶測量紀錄時間，各做三次結果如下：

容器體積	250ml	500ml	1000ml	2500ml	10000ml
第一次(秒)	9.2	17.6	29.3	80.6	271.8
第二次(秒)	7.9	20.1	28.8	80.5	271.7
第三次(秒)	11.0	16.9	31.0	83.1	290.0
平均	9.4	18.2	29.7	81.4	277.8







由圖表數據可以看出，同樣長度(10 公分)蠟燭燭火在不同廣口瓶容器體積大小的燃燒時間是呈現線性的正比關係，廣口瓶體積每增大 100ml，燃燒時間增加 3 秒鐘。

3. 我們操作比較底端是整塊及 3/4 塊油土的蠟燭燭火燃燒時間實驗，結果如下：

底端油土	整塊	4/3 塊
第一次(秒)	38.2	39.9
第二次(秒)	37.3	49.1
第三次(秒)	40.0	52.3
平均	38.5	47.1

由燭火燃燒時間數據可以看出，瓶底端是 3/4 塊油土，留有空間可以讓瓶外的冷空氣從底下補充進來混合空氣，可以燃燒時間較長（多了將近 9 秒），最後仍因由熱空氣上升氣流沉降下來的不足量氧氣（或增量的二氧化碳濃度）導致熄滅。

	
<p>圖 底端是整塊油土的燭火燃燒情形</p>	<p>圖 熄滅瞬間燭心冒出白色燭油煙霧</p>
	
<p>圖 底端 3/4 塊油土的裝置</p>	<p>影片說明：3/4 塊油土. 熄滅時冒白煙</p>

#### 四、呼吸作用和燃燒作用的氣體濃度變化研究

想法：我們都知道，氧氣幫助燃燒然後產生二氧化碳，那麼，廣口瓶中蠟燭燃燒過後的氧氣真的都燒完了嗎？都變成二氧化碳氣體不可燃也不助燃嗎？同時，人的呼吸作用也是一種耗氧的作用，呼出的氣體中它的濃度變化又是如何呢？會讓氧氣濃度減少多少呢？

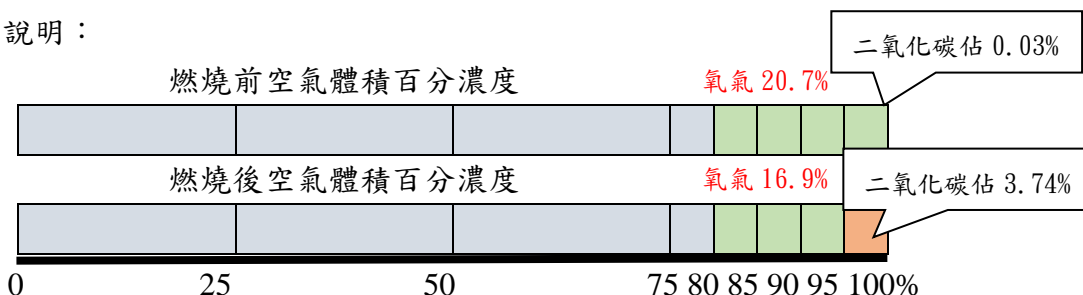
- 步驟：1. 將點燃的蠟燭以 2500ml 廣口瓶倒蓋住，再以氣體濃度偵測器觀察記錄蠟燭火焰閃熄前後的氧氣濃度變化。  
 2. 使用氣體偵測器測量記錄廣口瓶中蠟燭火焰熄滅前、後氧氣和二氧化碳濃度變化情形。  
 3. 以口對準 500ml 廣口瓶長吹氣十次，再以氣體濃度偵測器觀察記錄瓶中氧氣濃度變化。

結果：

1. 以氣體濃度偵測器測出未燃燒前廣口瓶中空氣氧平均佔 20.7%（體積百分濃度），二氧化碳濃度 283~524 PPM(平均佔 0.03%)；燃燒後，氧氣/二氧化碳體積百分濃度為：

燃燒後氣體濃度	10000ML		2500ML	
	第一次(氧氣/二氧化碳濃度%)	17.3	4.01	17.0
第二次(氧氣/二氧化碳濃度%)	16.9	3.72	17.1	3.56
第三次(氧氣/二氧化碳濃度%)	16.6	3.42	16.6	3.72
平均(氧氣/二氧化碳濃度%)	16.9	3.72	16.9	3.76

作圖說明：



2. 平均而言，廣口瓶中蠟燭火燃燒前後氧氣濃度變化(20.7% -16.9% =3.8%)減少了約 4% 的濃度，而二氧化碳體積百分濃度則從不到 1% 增加到近 4% (3.74% -0.03% =3.71%)。實驗結果顯示：當瓶內氧氣濃度下降低於 17.0%，或是更正確的說，瓶中環境二氧化碳體積濃度達到 3-4%時蠟燭火就會熄滅。
3. 由實驗三「不同容器體積燭火燃燒時間」數據，我們再以蠟燭火燃燒時瓶中氣體變化量 4%，除以耗時秒數，得出大約一秒鐘廣口瓶內空氣體積百分濃度變化率為：0.42~0.01(%/秒)，容器體積越大變化率越小。



容器體積	250ml	500ml	1000ml	2500ml	10000ml
平均燃燒時間(秒)	9.4	18.2	29.7	81.4	277.8
氣體變化率(%/秒)	0.42	0.21	0.13	0.04	0.01



圖 燃燒前瓶內 CO2 濃度 524PPM

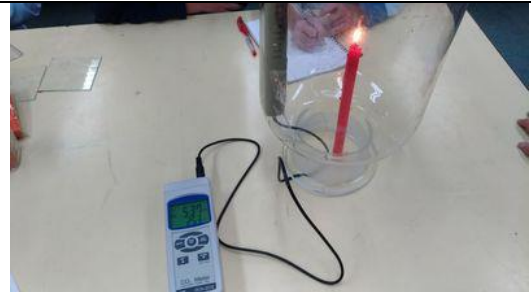


圖 燃燒過程瓶內 CO2 濃度逐漸增加

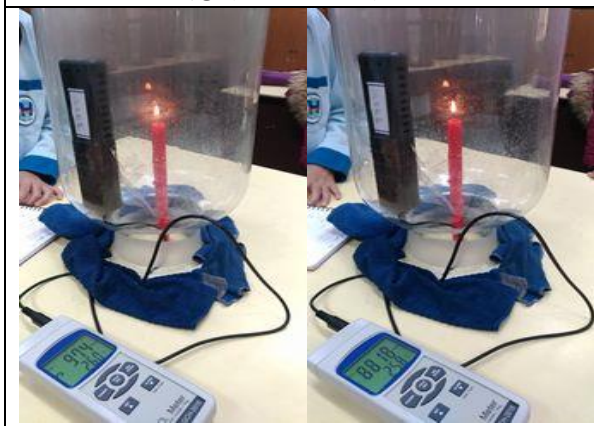


圖 過程中瓶內 CO2 濃度和溫度增加



圖 燃燒後瓶內 CO2 濃度 3.72%



圖 燃燒前瓶內氧氣濃度 20.9%



圖 燃燒前瓶內氧氣濃度 16.9%



圖 燃燒過程氧氣濃度逐漸降低



圖 氧氣濃度偵測器

4. 另外，由化學式： $O_2 + C \rightarrow CO_2$ ；以及實驗數據可以看出，瓶內空氣中的氧氣體積百分濃度燃燒減少約4%，同時產生二氧化碳氣體體積約4%，就像是一份的”原料”用掉了，然後生成一份的”產品”，整體而言，氣體的體積應該是一樣的，並不會說瓶內空氣（嚴格說就是氧氣）被燒掉了，而空氣體積減少的情形；這就是「物質不滅」的原理。
5. 在操作「呼吸作用耗掉多少氧氣-呼氣測量氧氣濃度減少多少」實驗，我們呼氣十次在500ML廣口瓶裡，然後用氧氣偵測儀測量，結果如下：

氧氣濃度(%)	孩童①	孩童②	孩童③	成人①	成人②	成人③
第一次	19.6	19.2	19.3	19.3	18.9	18.2
第二次	19.0	19.5	18.9	19.0	19.3	17.6
第三次	19.2	19.4	19.4	19.7	18.9	15.5
平均	19.3	19.4	19.2	19.3	19.0	17.1

由以上數據顯示，呼出氣體的耗氧率(氧氣體積消滅)大約1.5%~3.8%，其中，成人①是四十多歲女老師，成人②是五十多歲男老師，而成人③則是三十歲身強力壯的消防隊員，明顯看出個人耗氧率的差別；不過，平均而言近2%的耗氧率(氧氣體積消滅)不高，我們研判可能是操作方式上不理想：因為，十次呼出氣體混合稀釋廣口瓶中原本存在的空氣(氧氣)濃度，造成耗氧率不高所致。因此，我們又改為鼻腔直接呼氣來測氧氣濃度變化的實驗。



圖 在廣口瓶中吹器十次

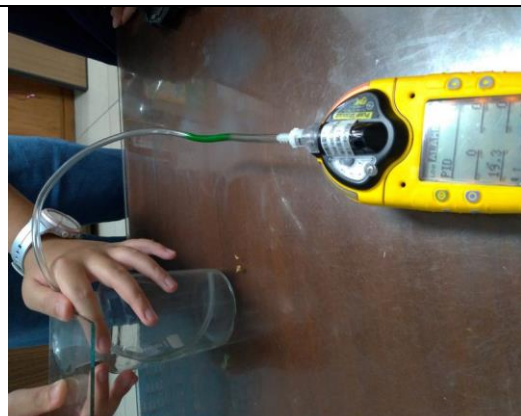


圖 測出瓶內氧氣體積濃度



圖 操作前氧氣濃度 20.9%



圖 測出瓶內氧氣體積濃度 18.9%



6. 將氧氣偵測儀感測管端直接貼近鼻腔呼氣，所測得氧氣體積百分濃度：

氧氣濃度(%)	孩童①	孩童②	孩童③	成人①	成人②	成人③
第一次	17.9	18.3	18.6	18.2	17.0	11.4
第二次	18.8	18.3	19.0	18.6	14.3	12.2
第三次	13.2	16.0	16.2	18.4	11.5	11.7
平均	16.6	17.5	17.9	18.4	14.3	11.6

由以上數據，可以發現人體鼻腔呼氣中氧氣體積百分濃度約是11.6~18.4%，氧氣消滅百分比(耗氧率)明顯提高了!同樣的，身強力壯的消防隊員成人③耗氧率可達9.3%之多，可見常運動的身體的氧氣利用率會提高，這是運動生理學所強調的。

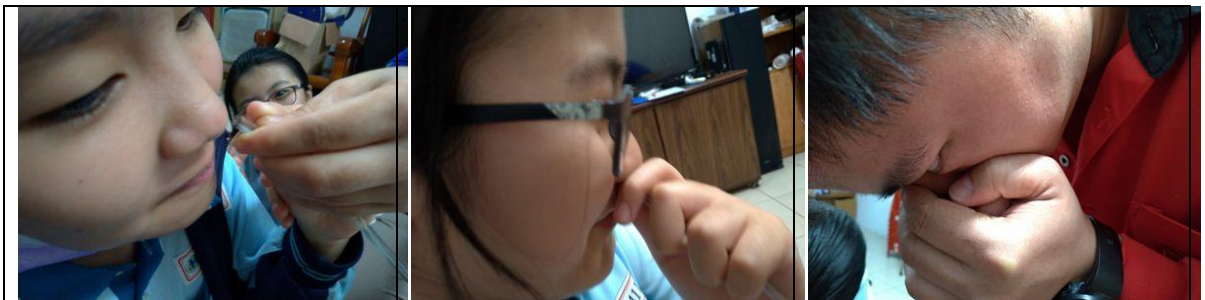


圖 以鼻腔呼氣測量氧氣體積百分濃度



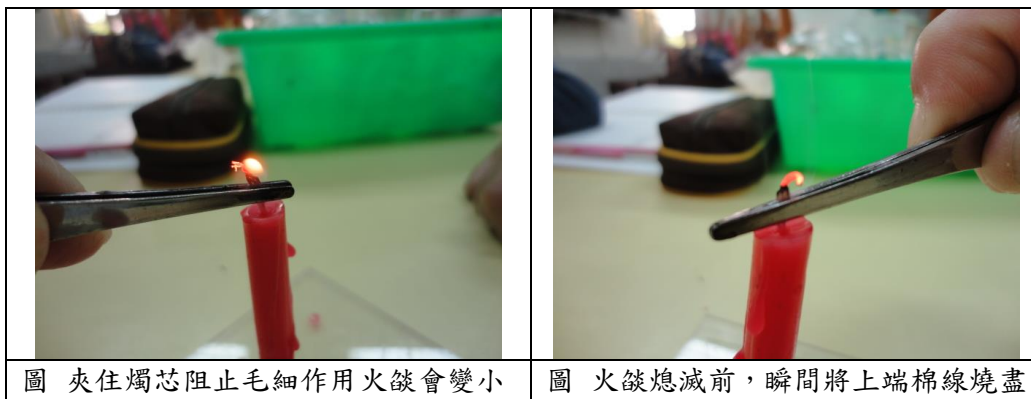
圖 氧氣體積百分濃度 18.8%

圖 氧氣體積百分濃度 15.2%

圖 氧氣體積百分濃度 12.2%

## 伍、結論

1. 蠟燭燃燒時，燭芯棉線將液體蠟油毛細作用再變成蒸氣狀可燃燒的蠟氣，利用鑷子夾住燭芯棉線阻斷毛細作用的進行，發現火燄會慢慢變小最終熄滅；而夾住燭芯的不同段位置時，蠟燭剩餘燃燒時間由小到大為燭芯頂端 < 中段 < 底部，同時，當阻斷燭芯棉線毛細作用的進行，使棉線無法將液態臘毛細到最頂端成為可燃的蒸氣蠟，所以在燭芯棉線中臘液及蒸氣燒光沒有其他可燃物的瞬時之間就把燭芯棉線當可燃物直接給燒掉了，而無法吹熄燭火時維持的一般毛細長度 1 公分。



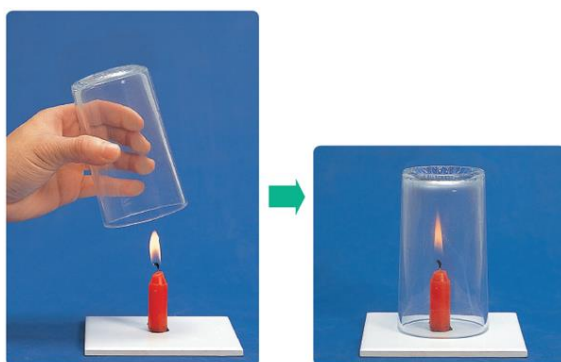
2. 蠟燭餘火熄滅瞬間燭芯棉線上方會冒出一股白煙，那是燭油液體經燭芯棉線毛細作用到火焰焰心的蠟燭蒸氣，遇助燃氧氣不足(吹熄)或二氧化碳不可燃氣體壅罩隔絕時，燭火熄滅，就冒出一縷白色煙霧。實驗過程中，我們就以出現此現象來判定蠟燭悶熄時間的紀錄終點，但是，實驗過程燭火眼看快熄滅時卻會有「復燃」的情形發生，這種「復燃」現象的明顯程度和次數隨著廣口瓶體積的增大而有增多且明顯的情形，我們認為是跟瓶內體積空間大增加氣流循環供給殘餘有效可燃氧氣的機會。
3. 但是，在空氣中燃燒的蠟燭火焰，當它的焰芯、內焰和外焰不呈一直線，歪斜情況下，蠟燭燭芯棉線上方則會飄出一股黑煙，我們認為這是因為白色霧狀可燃氣體蠟在氧氣供給量不足(搨風時)時，冒出燃燃不完全的黑色懸浮碳顆粒氣流。
4. 利用檸檬酸和小蘇打粉作用生成無色、無味的二氧化碳氣體，來澆熄燃燒的火焰，說明倒蓋廣口瓶內燃燒上升高濃度(體積百分濃度 3%)不助燃的二氧化碳氣流再沉降下來確實會讓燭火熄滅；在長短蠟燭燃燒實驗中，10 公分長蠟燭燭火較 1 公分短蠟燭先遇到沉降的二氧化碳氣流，所以先熄滅，燃燒時間較短；另外，廣口瓶體積越大，蠟燭燃燒時間越久，【體積大小】和【燃燒時間】兩者呈線性正比關係。
5. 蠟燭燃燒熱能使廣口瓶內氣體體積膨脹，相反的，在蠟燭熄滅時廣口瓶內緣持續不斷地冒氣泡，說明冷縮的瓶內體積將瓶外的空氣吸進來。在倒蓋瓶底放 3/4 塊油土的燃燒時間比較放整塊油土(密合空間)更長，說



- 明了1/4的底端空間還是可以將瓶外的部分空氣吸進來混合提高氧氣濃度而有復燃現象，但是，最終仍抵不過沉降的二氧化碳氣流而熄滅。
6. 使用氣體偵測器量出：未燃燒前廣口瓶中空氣氧的體積百分濃度約佔 20.7%，二氧化碳濃度則是 0.03%；燃燒後，氧氣濃度減少了 3.8% / 二氧化碳體積百分濃度增加了 3.7%，顯示，當瓶內氧氣濃度下降低於 17.0%，或更正確的說，瓶中環境二氧化碳體積濃度達到 3-4%時蠟燭燭火就會熄滅。
  7. 由氧氣/二氧化碳的氣體體積變化量 4%以及瓶內燭火燃燒時間秒數，可以算出一秒鐘廣口瓶內空氣體積百分濃度變化率約為：0.42~0.01(%/秒)，隨著容器體積越大，氧氣/二氧化碳的變化率越小。
  8. 經由測量人體鼻腔呼氣中的氧氣濃度，可以得到氧氣消滅百分比(耗氧率)約是 2.5~9.3%，經由呼吸作用進入肺臟的肺泡微血管氣體交換之後，呼出的氣體含氧率，跟年紀、性別和運動體格有所差異，運動員和大人的氧氣利用率會比較好，我們是喜歡運動的五年級女生，氧氣利用率竟可以高過女老師，除了高興之外還要請老師跟我們一起多運動。

## 陸、討論

1. 這雖然是從一個簡單的課本實驗單元探討，我們發現蠟燭燃燒過程的學問真的很多，用玻璃杯蓋住燃燒中的蠟燭，蠟燭會熄滅是因為新生成的高濃度體積(接近 4%)二氧化碳熱氣，受到「熱空氣上升，冷空氣下降」的對流壟罩所造成。事實上，空氣中不助燃氣體除了二氧化碳外，絕大部分是氮氣，本研究因應課本中二氧化碳滅火原理，所以只單就二氧化碳氣體觀點來看蠟燭燭火的熄滅。



2. 在長短蠟燭的燃燒實驗中，可以看到長蠟燭燭火先熄滅，這是因為逐漸生成的高體積濃度二氧化碳熱氣都先囤積在倒蓋的上層瓶底，而瓶內底層還留存有殘留的氧氣可用，造成長蠟燭較短蠟燭先熄滅。這現象說明了火災現場要趴低身體逃生的道理。



自然課本五下火災逃生圖

3. 倒蓋的廣口瓶中蠟燭燭火會因高體積濃度的二氧化碳熱對流而熄滅；但是，正立的廣口瓶中蠟燭燭火則因高體積濃度的二氧化碳熱氣流沒有頂蓋而下降高體積濃度的二氧化碳氣流，所以，可以持續不斷的燃燒。



圖 高體積濃度的二氧化碳熱氣流因為沒有頂蓋下降籠罩

4. 人體細胞透過呼吸作用，釋出能量以維持細胞活動；呼吸作用耗用氧，產生二氧化碳，是由呼吸道構造所組成（鼻腔>咽>喉>氣管>支氣管>肺內小支氣管>肺內氣囊）。我們第一次操作呼氣實驗，雖然預想嘴巴也有與呼吸道連結，但是呼氣的耗氧率效果卻不明顯，才發現我們的實驗設計忘了廣口瓶內原本就存在的空氣濃度…最後將氣體偵測管靠近鼻子直接呼氣，才得到不一樣的數據。

## 柒、參考資料及其他

1. 1/5 疑惑-悶熄蠟燭實驗的探討 第 44 屆全國中小學科展  
<https://www.ntsec.edu.tw/Science-Content.aspx?cat=83&a=6821&fld=&key=&isd=1&icop=10&p=99&sid=1234>
2. 悶熄蠟燭燃燒實驗的重新設計 第 46 屆台北市科展  
<http://w3.hyps.tp.edu.tw/~natu/science/10104.pdf>
3. 教科書錯了嗎？課本燃燒實驗的重新探究 第 48 屆全國中小學科展  
<http://163.17.241.1/yenhc/site/documents/48%E7%87%83%E7%87%92%E5%AF%A6%E9%A9%97.pdf>