

中華民國第42屆中小學科學展覽會

∴∴ 作品說明書 ∴∴

國小-物理科

科 別：物 理 科

組 別：國 小 組

作品名稱：慢慢高升

關 鍵 詞：氧氣、二氧化碳、熱脹冷縮

編 號：080122

學校名稱：

高雄縣路竹鄉大社國民小學

作者姓名：

蕭伊玲、徐銘謙、鄧婉妤、林伊晨

指導老師：

陳榮祥、孫瑞陽



慢 慢 高 升

摘 要

有關悶熄蠟燭後水面上升之現象，對於其原理解釋，本小組認為有問題，經一連串實驗發現，水面上升第一階段是因為空氣「熱脹冷縮」所導致，第二階段水面上升則是因為二氧化碳容易溶解於水，蠟燭熄火之後 3 分鐘之內都屬於第一階段，本研究發現許多教科書對於原裡的解釋有誤，本研究同時發現一種方法可使蠟燭悶熄後水位上升最高達 80 %。

壹、研究動機

自然老師問我們要不要做科展，我們說好。題目呢？老師說前年他指導一篇悶熄蠟燭的實驗（步步高升），比賽成績不錯，那篇研究還有許多問題存在，值得進一步研究，等待我們來解答，我們就說好，然後老師表演了一次實驗，用罩杯悶熄蠟燭，燭火熄滅時，果然裡面的水會往上升，還真有趣，大家越玩越好玩，所以我們的題目就這樣定下來了。老師說課本的說法錯了，課本可能會錯嗎？這個研究兼具物理、化學現象，因為主因可能是空氣「熱脹冷縮」現象，所以參加物理組比賽。

有關「悶熄蠟燭實驗」在國立編譯館自然課本（民 86 年）五上第二課「氧和二氧化碳」、康軒四上第四單元（民 89 年）以及南一版四下第三課（民 90 年）都有介紹。

貳、研究目的

我們企圖尋找證據，說明「悶熄蠟燭」時水面上升的主因是空氣熱脹冷縮的影響，而不是氧氣燒光的影響，另外我們也想玩一玩，看看悶熄蠟燭實驗，是否可以變化出一些其他有趣的現象。探究問題如下：

- （一）不同大小、形狀的罩杯，對於水面上升的高度是否有影響？
- （二）嘗試各種方法，看看水面上升最高可以到達多高？
- （三）控制各種條件，看看如何控制，水面才可以剛好到達 1/5 的高度？
- （四）是否真的有什麼方法，讓水面反而下降？
- （五）利用一些沒有燃燒而只有溫度變化的實驗，控制水的升降。
- （六）利用鋼棉生鏽，減少氧氣但是不產生溫度變化。
- （七）測量蠟燭燭火以及周圍的溫度
- （八）罩杯內外的水面好像不是一樣高？
- （九）二氧化碳到底是否有溶解到水裡？
- （十）釐清空氣「熱脹冷縮」和氧氣減少兩種因素，對水位上升到底有多少影響？
- （十一）重新對「悶熄蠟燭」水面上升之原因提出完整的解釋。

參、研究器材設備

蠟燭、玻璃罩杯 (250ml、500ml、750ml、1000ml、1500ml) 數位式溫度計、溫度計探針、石蕊試紙、數位式酸鹼量測棒、線香、鋼棉、量尺、全域試紙、醋酸、小蘇打、二氧化錳、雙氧水，廣用指示劑，紙黏土、烤箱。

肆、研究過程、方法與結果

五上自然課本中「悶熄蠟燭」的實驗是這樣：水箱裝一些水，中間放 1 根蠟燭，點燃蠟燭，然後用一個罩杯把蠟燭蓋住，過了幾秒後，蠟燭慢慢熄滅，箱子中的水會上升跑進罩杯中，到了約佔 1/5 的體積時會停止上升，最後罩杯中的水位明顯高過外面水箱中的水位。於是說「可證明」：蠟燭燃燒需要氧氣，氧氣佔空氣體積的 1/5 (國立編譯館教學指引, P42、P50、P51)。

老師以前指導的作品「步步高升」，確實找到許多證據證明空氣熱脹冷縮是很重要的因素，但是上一回實驗算是蠻簡單的，有些地方無法交代清楚，只能說空氣熱脹冷縮的影響「真的很大」，也不知道有多大！這一次我們特別花了二千多元買了一隻可以量到 1000 的溫度計，這樣就可以量出蠟燭燭火上方的溫度了，不需要再用估計的。

底下就是我們所設計一連串實驗的探究過程：

一、不同大小、形狀的罩杯，對於水面上升的高度是否有影響？

偶然間我們發現用 1000ml 的罩杯，水位上升好像比較低，所以我們想測試罩杯的容量大小、形狀是否會影響水位高度，有時我們說「高度」，其實是講「體積」，因為玻璃杯都是標示 (ml)。實驗 1 是用各種不同容量 (250ml、500ml、750ml、1000ml、1500ml) 的圓柱型燒杯「悶熄蠟燭」。結果如下：

表 1：各種不同容量的圓柱型燒杯「悶熄蠟燭」實驗。

	250ml	500ml	750ml	1000ml	1500ml
熄火時間 (sec)	4	5	13	15	18
水位上升位置 (ml)	90	125	150	160	220
所佔罩杯容積百分比 %	36	25	20	16	14.67
燭火溫度 (上方 1cm)	320	220	350	400	300
燭火溫度 (上方 3cm)	220	174	190	220	248

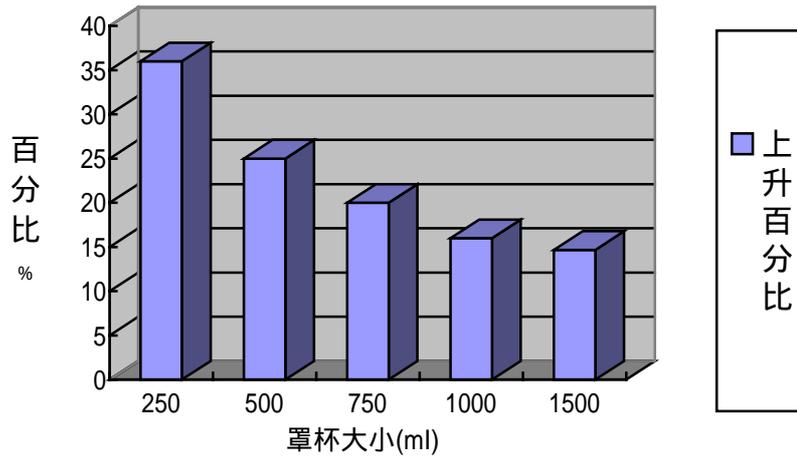


圖1：不同形狀上升百分比



P1：測量燭火上方高度 1cm 處的溫度



P2：可以清楚看到 250ml 的罩杯，上升 36 %



P3：1000ml 的罩杯上升 16 %



P4：1500ml 的罩杯上升最少

實驗結果發現越小的罩杯水位上升越高，原因應該是罩杯越小空氣平均溫度越高。250ml 罩杯中的蠟燭可以加熱得溫度比較高，而且罩杯越狹長，空氣在燭火上方自然溫度比較高。

二、嘗試各種方法，看看水面上升最高可以到達多高？

以前的研究發現，若是提高空氣的溫度，往往水面上升會超過 1/5。我們的研究小組，將要嘗試各種方法，看看水面上升可以提高到多高。

(一) 方法一：用衛生紙沾一些酒精燃燒，丟進最小的罩杯裡。我們預期酒精燃燒溫度很高，用各種罩杯試看看。

表 2：用酒精燃燒，然後悶熄

水位	罩杯大小	250ml	500ml	750ml	1000ml	1500ml
上升高度 (ml)	第一次	80	250	410	440	850
	第二次	70	240	410	510	950
	第三次	80	220	420	550	850
	最高一次之百分比	32 %	50 %	56 %	55 %	63 %
	平均百分比	31 %	47.3 %	55 %	50 %	59 %

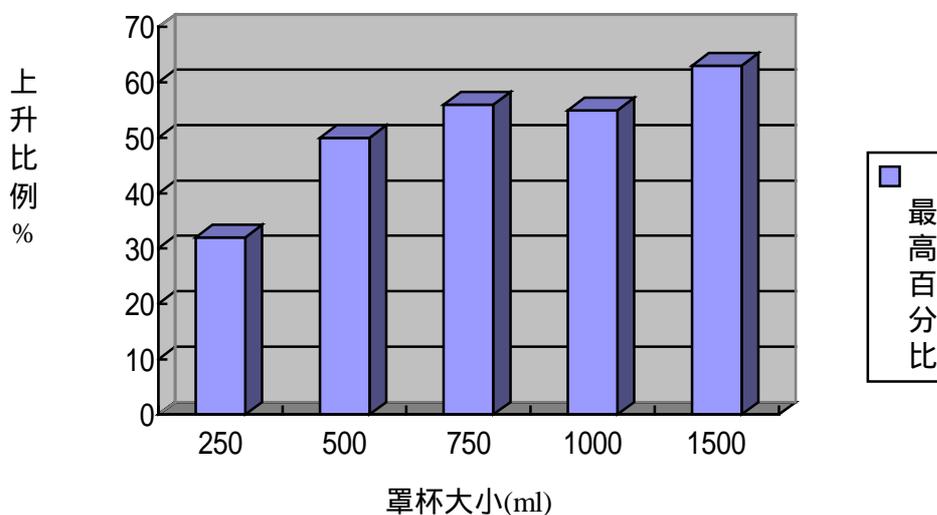


圖 2：利用酒精燃燒看上升比例

結果：除了 250ml 的罩杯之外，其餘的罩杯利用酒精燃燒，平均大約都可以使水位上升約 50 % 以上。而且越大的燒杯上升越多，與悶熄蠟燭剛好相反。我們發現越大的燒杯酒精燃燒越旺，而 250ml 最小的燒杯衛生紙沾酒精很容易熄火，根本難以將空氣加熱。因為酒精燃燒劇烈所以越大的燒杯反而上升越高。因為上升都超過一半，顯然無法用「氧氣說」解釋。



P5 : 1500ml 罩杯上升約 850ml



P6 : 1000ml 罩杯上升約 50 %

三、控制各種條件，看看如何控制，水面才可以剛好到達 1/5 的高度？

(一) 從實驗 1 可以知道,750ml 的罩杯實驗起來最容易使水位上升 1/5,所以先用 750ml 的罩杯做實驗。控制不同的蕊心長度。

表 3-1：嘗試如何上升會剛好 1/5？

蕊心高度 mm	13		10		5	
次數	第 1 次	第 2 次	第 1 次	第 2 次	第 1 次	第 2 次
上升 (ml)	180	180	150	150	100	120
時間 (sec)	8		10	8	19	16
溫度上方 1cm ()	330	420	435	465	350	465
燭火高度 cm	3.0	3.0	3.0	3.5	1.0	2.5
平均上升體積 ml	180		150		110	
百分比	24 %		20 %		14.7 %	

罩杯為 750ml

結果：燃燒一根蠟燭，上升大約都在 1/5 上下，因為燭火燃燒很不穩定，造成上升高度也不穩定，若是蕊心長 1cm，燭火高 3cm，燭火上方 1cm 處溫度控制在 435 左右，那麼可以造成上升 1/5，不過仍然不是很穩定。從表 3-1 可以發現蕊心長度越長，火焰高度越高，則上升高度會越高。

(二) 若是沒有剛好 1/5，如何調整？

表 3-2：上升若非 1/5，如何調整？

	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次
蕊心長度 (mm)	6	6	7	8	9
燭火高度 (mm)	35	45	25	29	30
燭火頂端溫度 ()	510	532	522	495	503
燭火上方 1cm 溫度 ()	360	350	350	349	298
悶熄燃燒時間 (sec)	8	7	5	6	4
上升高度 (ml)	125	125	135	115	135
上升百分比 (%)	25	25	27	23	27
調整方法		加熱水	加熱水	加熱水	加熱水
上升百分比 (%)		20	20	20	20
是否剛好 1/5		Yes	Yes	Yes	Yes

罩杯為 500ml



結果：與實驗 1 類似，因為用 500ml 的罩杯，幾乎水面上升都會超過 20%，這時只要在罩杯淋上一些熱水就可以控制罩杯內的水位，使上升的水位剛好停在 1/5，也就是說可以用空氣溫度來加以控制。

P 7：750ml 的罩杯最容易上升 1/5

四、是否真的有什麼方法，讓水面反而下降？

據說利用線香燃燒造成煙霧，可使水位下降，我們很好奇想試試看。看看是否水位真的會下降。

表 4：利用線香悶熄

	250ml 第一次	500ml 第一次	250ml 第二次	500ml 第二次	1500ml 第一次	1500ml 第二次
開始	19mm	0mm	0mm	6mm	0	
1 分鐘後結果	22mm	0mm	2mm	4mm	下降 60ml	
2 分鐘後結果	25mm	0mm	4mm	3mm	下降 50ml	
3 分鐘後結果	25mm	0mm	11mm	5mm		
4 分鐘後結果	25mm	0mm	12mm	6mm		

5 分鐘後結果	26mm	0mm	12mm	7mm		
6 分鐘後結果	26mm	4mm	12mm	7mm		
7 分鐘後結果	26mm	4mm	12mm	7mm		
8 分鐘後結果	27mm	4mm	12mm	7mm		恢復原狀
9 分鐘後結果	27mm	4.5mm	13mm	8mm		
10 分鐘後結果	27mm	4.5mm	13mm	8mm		
12 分鐘後結果			13mm	9mm		
1 天之後結果			17mm	14mm		
2 天之後結果			20mm	18mm	恢復原狀	
3 天之後結果			22mm	20mm		
4 天之後結果			25mm	22mm		
	前 8 分鐘有很多煙，約 8 分鐘後無煙	開始時無水，20 秒時開始冒泡，1 分鐘才停止，一直冒煙，6 分鐘水才開始上升			開始時有冒氣泡	沒有冒氣泡

結果：用 500ml 的罩杯，一開始時都會有一些些下降，過了幾分鐘水位又會回升。1500ml 的罩杯也會有水位下降現象，不過放置久了就會又上升。250ml 的罩杯似乎一開始就上升。線香會造成水位下降應該是線香溫度不高，可是產生煙霧造成空氣中氣體分子數增加，但是等到煙霧散掉就通通會上升。



P8：線香開始悶熄時有許多煙霧



P9：悶熄 250ml 的罩杯



P10：悶熄 1500ml 的罩杯煙霧很多
造成一開始水位一些些下降



P11：罩杯水位降低

五、利用一些沒有燃燒而只有溫度變化的實驗，控制水的升降。

為了分開溫度變化和燃燒的複雜反應。我們設計一個沒有化學反應的實驗，就是設計成只有溫度變化。實驗 5-1：準備 250ml 的罩杯，將冰塊加入水裡降低溫度看看有沒有什麼改變。

表 5-1：蓋上罩杯後加冰塊

時間	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18
溫度	27.8	13.5	11.6	11.0	9.7	9.1	8.8	8.4	7.9	7.8
外面水位 高度 ml	1.8	12	12	11.8	11.9	12	12	12	12	12
裡面水位 高度 ml	1.8	3.4	3.4	3.5	3.5	3.5	3.6	3.6	3.6	3.6

結果：我們原先預期溫度下降時，裡面水位會上升，可是效果很不明顯，可能因為用冰塊降溫，只能降低約 20℃，與蠟燭燃燒然後熄滅超過 450℃ 的溫度差，這樣的降溫幅度很小，所以沒看到明顯效果。我們需要提高溫度差。

接著，設計實驗 5-2，把剛剛的裝置放到烤箱，罩杯中放置一根靈敏的「筆形溫度計」，可以精確量出罩杯中的溫度。結果發現烤箱溫度升高時水位逐漸下降。

表 5-2：蓋上罩杯後放到烤箱

時間	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18
溫度	6.6	6.6	7.3	8.3	10.5	17.9	24.4	32.5	38.4	看不到（起霧）
外面水位 高度	12	12	12	12	12	12.2	12.4	12.7	12.8	
裡面水位 高度	3.6	3.5	3.0	2.6	2.1	1.5	1.1	0.7	0.1	0

18 分鐘以後，250ml 的罩杯裡面的水位下降到 0，20 分鐘以後，則大約每過 30 秒就會冒出氣泡，而水早就被擠光了。至於罩杯內空氣的溫度到底是幾度並不確定，因為溫度計量到的是水溫而非空氣溫度，水溫最高時則到達 68。實驗 5-2 不太成功是因為我們把溫度計插到水裡是不對的，而且當溫度升高時就起霧，無法觀察。因此我們再設計實驗 5-3。

實驗 5-3 將溫度計插到空氣中，當空氣膨脹時罩杯浮起，實驗差點又失敗，趕快用紙黏土固定住；當水位降到 0 時，則趕快降低溫度以免空氣變成氣泡跑掉。

表 5-3：改良後的烤箱實驗

溫度		30	55	82	72	69	66	44	做到一半，罩杯有點浮起來，無法繼續看水位刻度，後來用紙黏土固定重做		
水位 ml		180	125	50	90	110	125	155			
溫度	30	40	44	50	60	85	95	100	110	120	126
溫度 K	303	313	317	323	333	358	368	373	383	393	399
水位 ml	180	160	155	125	100	50	40	30	20	10	0
空氣體積 cc	265	285	290	320	345	395	405	415	425	435	445
溫度		122	67	46	44	40	30				
水位 ml		0	125	130	150	160	180				

剛開始時空氣柱高 12.5 cm 體積 265cm

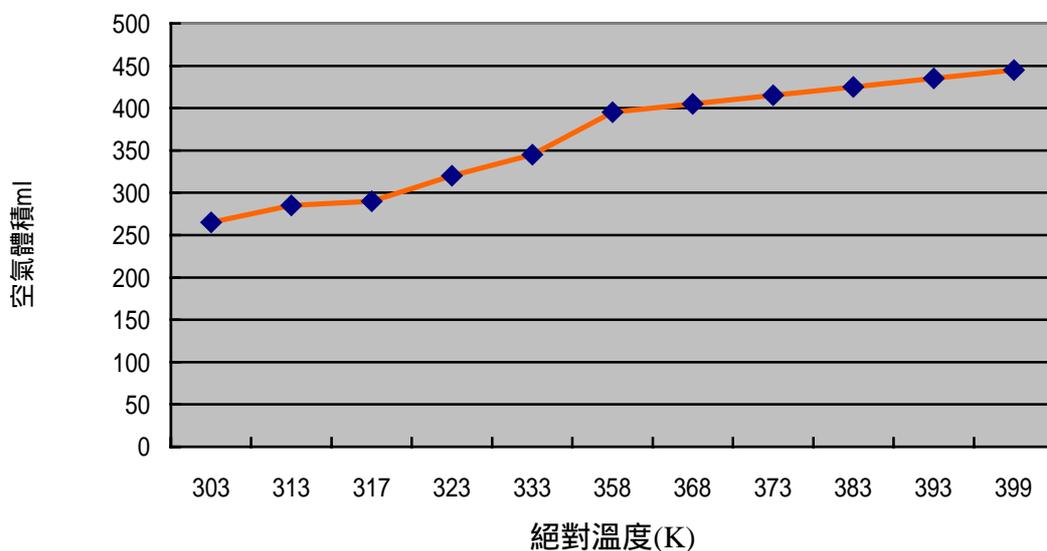


圖3：空氣體積與溫度關係圖



P12：實驗 5-2 裝置



P13：實驗 5-2 裝置



P14：可以清楚讀出溫度的實驗 5-3
上升到 70.2 ，水位下降 90ml

這個實驗證明空氣會熱脹冷縮而且會造成水位升降，這個實驗控制變因是空氣柱的溫度。此實驗沒有燃燒現象，沒有化學反應，只有溫度的變化造成空氣熱脹冷縮。可以看出溫度增加，體積確實跟著膨脹。

開始時空氣體積 $3.1416 \times 2.6 \times 2.6 \times 12.5 = 265.4652 \text{cm}^3$

溫度 30 (303K) \rightarrow 126 (399K) 水位 180ml \rightarrow 0ml

在「步步高升」作品中利用 $V = V_0 \cdot T$ 公式算空氣膨脹體積應該是錯的，這個公式是在算液體的膨脹，不適用於氣體。

本實驗最大價值在於，沒任何燃燒現象，控制溫度上升，則可使水位下降。證明悶熄蠟燭時溫度的急遽下降，空氣體積減少，會導致水位上升。

六、利用鋼棉生鏽，減少氧氣但是不產生溫度變化。

設計一個實驗會減少氧氣，但是不會產生劇烈溫度變化，六年級的鋼棉生鏽實驗很適合。

表 6：鋼棉生鏽減少氧氣實驗

	浸純水						浸食用醋					
時間	第 1 天	第 2 天	第 3 天	第 4 天	第 7 天	第 10 天	第 1 天	第 4 天	第 5 天	第 6 天	第 7 天	第 10 天
水位上升高度 cm	0	1	1	1.3	1.5	1.9	0	1.7	1.8	1.5	1.5	1.8
溫度	28	28	28	29.4	28.7	28.7	29	29	28	26.6	29.4	28.7
上升百分比						10 %						9 %

罩杯 500ml 高度 19.8cm

鐵生鏽反應如下： $4\text{Fe}+3\text{O}_2+2\text{H}_2\text{O}\rightarrow 2\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$ （氧化鐵水合物）

這個反應會消耗氧氣，不會產生二氧化碳。因此空氣體積會減少，產升的水氣很多會黏在罩杯成為水珠。浸食用醋會生鏽比較快，但是 10 天之後都差不多，都上升 10%，這個實驗可證明空氣中有「氧氣」，但是無法證明氧氣是 20%。



圖 15：鋼棉生鏽變色，產生很多水珠



圖 16：鋼棉生鏽會導致水位上升

七、測量蠟燭燭火以及周圍的溫度

蠟燭燃燒，到底溫度有多高呢？做一個測量

表 7：測量蠟燭周圍的溫度

燭火上方	距離	0cm	1cm	2cm	3cm	4cm	5cm	8cm	10cm	15cm
	溫度	520	420	270	245	190	102	80	64	59.5
燭火本身	位置	頂端	中間	底部						
	溫度	600	580	420						
燃燒五分鐘最高 617										

室溫 29，燭火高度 4.5cm，探測棒可量到 1000

這樣的結果，顯示燭火附近溫度隨距離逐漸下降，罩杯頂端大約 60 ，燭火頂端最高大約 617 ，不過實際測量時，發現溫度計顯示燭火頂端溫度在 500 ~600 之間，呈現不穩定的狀況，經過這樣的測量證實蠟燭燭火產升的溫度很不穩定。罩杯溫度約在 60~600 之間，罩杯中空氣平均溫度只能用估計的，大約 80 100 。



P17：測量燭火上方 5cm 的溫度



P18：測量燭火上方 15cm 的溫度

八、罩杯內外的水面好像不是一樣高？

偶然間我們發現悶熄蠟燭時，剛蓋下去時水位高度好像不是每次都一樣，那測量就不準了？所以我們就把 250ml 到 1500ml 的罩杯都拿來測試一番。

表 8-1：1000ml 的罩杯蓋上時裡面的水位

罩杯高度 200mm

外面水高	罩杯放置方法	裡面高	罩杯大小	
第 1 次	4cm	從上往下放	10mm	1000ml
第 2 次		從水面上搖一搖在蓋起來	10mm	1000ml
第 3 次		先側放在蓋起來	29mm	1000ml
第 4 次		從上往下放	8mm	1000ml
第 5 次		先側放再蓋起來	38mm	1000ml
第 6 次		從水面上搖一搖再蓋起來	15mm	1000ml
第 1 次	8cm	從上往下放	9mm	1000ml
第 2 次		從水面上搖一搖再蓋起來	32mm	1000ml
第 3 次		先側放再蓋起來	165mm	1000ml
第 4 次		從上往下放	11mm	1000ml
第 5 次		先側放再蓋起來	171mm	1000ml
第 1 次	12cm	從上往下放	18mm	1000ml
第 2 次		從水面上搖一搖再蓋起來	25mm	1000ml
第 3 次		先側放再蓋起來	197mm	1000ml
第 4 次		從上往下放	19mm	1000ml
第 5 次		先側放再蓋起來	197mm	1000ml

結果發現：先側放再蓋起來有時會使罩杯裝滿水，而搖一搖再蓋起來會比較多水，至於由上往下放則幾乎全部是空氣，因為悶熄蠟燭時都是由上往下放，罩杯中會有一些水但是不會很多。若是罩杯有空氣進入，倒起來就不會全滿，顯然空氣是有體積的。若是罩杯中沒有空氣，直立起來罩杯中的水會滿滿的，水位高過外面。此為大氣壓力的顯現。不過做悶熄蠟燭實驗時，外面的水還是不要裝太多，這樣悶熄一開始時罩杯中水會比較少。還有就是我們發現由上往下放時，罩杯中往往都會有一些水，裡面並非都是空空的。

九、二氧化碳到底是否有溶解到水裡？

蠟燭燃燒是會產生二氧化碳的，空氣體積並非無端減少，產生的二氧化碳是否會立刻溶解到水裡，我們設計了以下實驗：

(一) 二氧化碳對水的反應：二氧化碳 + 搖晃 (無燃燒)

醋酸 + 小蘇打 → 二氧化碳

我們把製造出的二氧化碳裝在罩杯中，倒過來放在水裡，沒有進行蠟燭燃燒，然後加以搖晃。

表 9-1 二氧化碳 + 搖晃 (無燃燒)

500ml 罩杯裝 CO ₂ ，水盆裝自來水			500ml 罩杯裝 CO ₂ ，水盆裝廣用指示計			250ml 罩杯裝 CO ₂ ，盆子裝澄清石灰水	
時間 min	第 1 次 實驗水位	第 2 次 實驗水位	水位 ml	廣用指示 計顏色	數位式酸鹼指 示計 PH 質	水 位 高 度 ml	澄清石灰水狀況
0	20	80	20	綠	8.2	0	一點點混濁
0.5	50	100	40	黃綠		20	白白的
1	110	150	70	黃綠		30	有點乳白色
2	150	175	120	黃	6.8	40	變乳白色
3	210	310	140	黃		45	完全變成乳白色
4	250	320	160	黃橙	6.7	50	完全變成乳白色
5	290	325	180	黃橙	6.6	53	完全變成乳白色
6	300	325	210	黃橙	6.6	55	完全變成乳白色
7	310	325	225	黃橙	6.6	58	完全變成乳白色
8	330	325	225	黃橙	6.6	58	完全變成乳白色
9	335	340	230	黃橙	6.6	59	完全變成乳白色
10	335	345	235	黃橙	6.6	60	完全變成乳白色
11	340	350	240	黃橙	6.6	60	完全變成乳白色
12	345	350	245	黃橙	6.6	60	完全變成乳白色
13	345		260	黃橙	6.6	60	完全變成乳白色
14	345		260	黃橙	6.6	60	完全變成乳白色
15	345						

實驗發現：CO₂ 確實容易溶於水，不斷搖晃水就慢慢上升，最高可以上升 70 %。這是很重要的發現，也就是說根本不需要用火，就有辦法讓水上升 70 %。CO₂ 確實容易溶於水，而且會使弱鹼性的自來水變成弱酸性（成為碳酸，H₂CO₃），一開始溶解時廣用指示劑就從綠色變成黃綠色再變成黃色，PH 值就從 8.2 變成 6.8。而澄清石灰水對 CO₂ 反應也是靈敏，只要一碰到一些些就會有一些混濁。用 250ml 的罩杯，盆子裝澄清石灰水 CO₂ 似乎不太能溶解，只有上升 24 %。



P19：搖晃前廣用指示計呈現綠色



P20：搖晃後廣用指示計慢慢變成橙色

（二）各種氣體悶熄蠟燭後搖晃的反應

實驗 9-2 悶熄蠟燭 + 搖晃

本實驗分別在罩杯內裝空氣、氧氣然後悶熄蠟燭。接著進行搖晃。

利用二氧化錳 MnO₂ 加雙養水可製造氧氣



可使用集氣瓶收集到純氧，利用純氧的罩杯做實驗，將蠟燭悶熄，會產生許多二氧化碳，然後劇烈搖晃，看看否水位會上升，結果如表 9-2。

發現：罩杯裝氧氣時，可燃燒很久（28 秒），而且很亮，但是升高 120ml（略大於 1/5），跟裝空氣差不多（燃燒約 10 秒），這個實驗明顯說明，不管罩杯當的氣體其中氧氣是 20 % 或 100 %，也不管燃燒時間是多久，熄火時水的上升都差不多，都是比 1/5 多一些。可見上升 1/5 跟氧氣被消耗的量沒有關係。而且悶熄後水的 PH 值沒變化，廣用指示劑也沒變色，若是裝澄清石灰水則沒有混濁。可見產升的二氧化碳短時間內幾乎沒有溶解到水裡。

一開始搖晃，水位就會上升，若是裝澄清石灰水就會變混濁，若是裝廣用指示計 PH 值就下降。可見是一開始搖晃 CO₂ 才慢慢溶解到水裡，空氣體積減少，水才繼續上升，因為二氧化碳容易溶解在水裡。蠟燭剛悶熄時，若不加以搖晃，幾分鐘之內，CO₂ 都不太會溶解到水裡。經過十幾分鐘的搖晃，裝空氣的水位可以由 1/5 上升到 2/5，裝氧氣的則由 24 % 上升到 53 %，所以裝氧氣的罩杯經過燃燒產生的 CO₂ 比較多。裝空氣的罩杯，熄滅後再搖晃似乎無法再多上升 20 %；裝氧氣的則再多上升 33 %，此時就是 O₂ 消耗，CO₂ 溶解的因素了。

表 9-2 悶熄蠟燭 + 搖晃

時間	罩杯裝 O ₂			罩杯裝空氣 (放到自來水)			罩杯裝空氣 (放到澄清石灰水)		
燃燒至 熄火時間	28 sec			10 sec			11sec		
量測內容	水位高度 ml	廣用指 示計顏色	酸鹼指示 計偵測 PH	水位高度	廣用指 示計顏色	酸鹼指 示計偵 測 PH	水位高度 ml	酸鹼指 示計偵 測 PH	澄清石灰水 狀況
0 sec	120	綠	8.0	110	綠	8.1	120	12.3	沒混濁
30 sec	153	黃綠	7.3	115	綠	8.0	150	12.3	有一些混濁
1 min	170	黃綠	6.7	120	綠	7.6	155	12.3	有一點乳白色
2	200	黃	6.6	125	綠	7.5	155	12.3	乳白色
3	220	黃橙色	6.6	125	綠	7.5	160	12.3	乳白色
4	226	黃橙色	6.5	145	綠	7.4	160	12.3	乳白色
5	240	黃橙色	6.5	160	綠	7.3	160	12.3	乳白色
6	250	黃橙色	6.4	165	綠	7.3	160	12.4	乳白色
7	260	黃橙色	6.5	165	綠	7.3			
8	260	黃橙色	6.5	165	綠	7.4			
9	260	黃橙色	6.6	180	綠	7.5			
10	260	黃橙色	6.7	185	綠	7.5			
11	265	黃橙色	6.7	195	綠	7.5			
12	265	黃橙色	6.8	200	綠	7.6			
13				200		7.6			
14				200		7.6			
15				200		7.6			

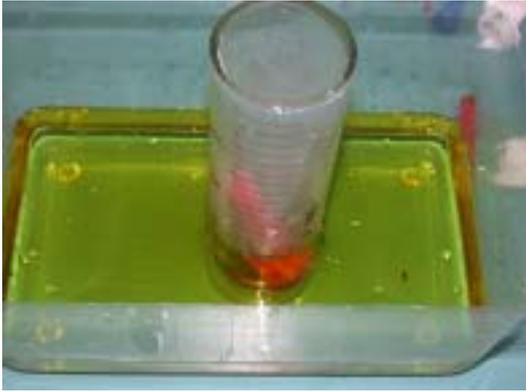
實驗罩杯為 500ml



P21 : 搖晃前先用酸鹼指示計量測 PH 值



P22 : 用 O₂ 悶熄蠟燭後開始搖晃



P23：用 O₂ 悶熄後搖晃一下後變成黃色



P24：用 O₂ 悶熄後繼續搖晃變成黃橙色



P25：搖晃前澄清石灰水是透明的



P26：搖晃後水位升高，石灰水變混濁

(三) 氧氣、二氧化碳、空氣靜止放置

表 9-3：不同的氣體蓋住水靜止放置

時間	罩杯裝 C O ₂ (ml)	罩杯裝 O ₂ (ml)	罩杯裝空氣 (ml)
一開始	70	13	10
1min	70	13	10
2min	70	13	10
3min	70	13	10
4min	71	14	11
5min	71	14	11
10min	75	16	12
15min	80	18	15
20min	80	21	18
25min	83	23	20
30min	85	26	23
40min	90	28	27
24hours	350	39	35
48hours	500	50	40

68hours	700	55	42
92hours	700	60	50
100hours	750	70	71
180hours	765	80	75
276hours	780	110	105
348hours	790	125	110

罩杯 1000ml

發現：二氧化碳確實很容易溶於水，可使水位上升高達 79 %，氧氣和空氣靜止時都不容易溶於水，但是這個實驗有一個重要發現就是二氧化碳雖然很容易溶於水；但是靜止放置時雖經過 3 分鐘，幾乎沒有反應，所以悶熄蠟燭所產升的二氧化碳 3 分鐘之內可以說完全是不可能溶於水的。空氣和氧氣都會溶於水，但是很緩慢，5 分鐘之內都沒有反應。這個實驗證明悶熄蠟燭時氧氣雖然經過燃燒產生二氧化碳，但是二氧化碳還是在罩杯內，3 分鐘之內不易發現溶解於水。

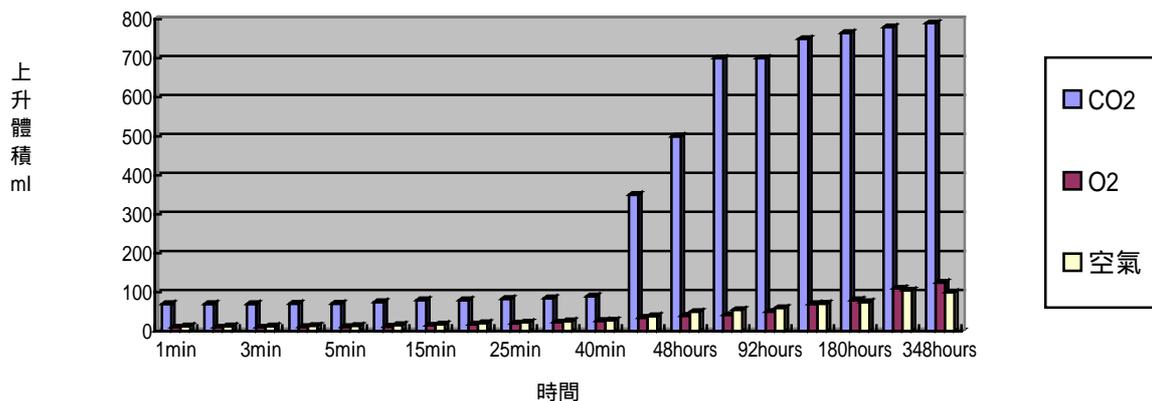


圖 4：罩杯蓋住不同氣體靜止放置



P27：三種氣體放置兩天，左邊 CO₂ 已明顯上升



P28：放置三天時 CO₂ 上升 75 % (左邊)

(四) 利用氧氣、二氧化碳、空氣悶熄蠟燭後靜止放置

表 9-4：不同氣體悶熄後靜止放置

時間	罩杯放空氣			罩杯放二氧化碳			罩杯放氧氣		
	第一次		第二次	第一次		第二次	第一次		第二次
量測內容	水位 (ml)	石灰水顏色	水位 (ml)	水位 (ml)	石灰水顏色	水位 (ml)	水位(ml)	石灰水顏色	水位 (ml)
蠟燭熄火時間	2sec	表面混濁	5sec	0sec	表面混濁	0sec	7sec	有 1 公分混濁	11sec
一開始	90		76	20		30	140		120
1min	95		90	15		30	150		130
2min	95		90	15		30	150		130
3min	95		90	15		30	150		130
4min	97		90	15		31	150		130
5min	97		90	15		31	150		130
10min	98		90	18		34	151		132
15min	98		90	18		34	152		134
20min	99		91	18		35	153		135
30min	99		91	20		36	155		135
18 小時			94			65			159
24 小時	100	表面輕微混濁		62	罩杯中沒有混濁		190	罩杯中間部分有混濁	
48 小時	100	輕微混濁		68	罩杯中沒有混濁		200	50ml 以下出現乳白色	
68 小時	100			77			200	50ml 以下出現乳白色	
92 小時	100	輕微混濁		77			200		
98 小時			94			91			169
122 小時			95			99			170
242 小時			99			118			180

罩杯為 250ml，第一次實驗水盆中倒入澄清石灰水；第二次實驗水盆中放入自來水

悶熄空氣雖然放置很久也上升不多，可能是燃燒時間只有 2 秒，裡面 CO₂ 含量不多，所以只有第一階段「熱脹冷縮」上升。而氧氣罩杯和二氧化碳罩杯因為裡面都有很多 CO₂，所以都會慢慢上升，同樣的 5 分鐘之內都看不到變化。裝 O₂ 的罩杯第一次實驗罩杯悶熄時上升 56%，放置 2 天之後則 **上升到 80%**，已經創下我們實驗的紀錄。

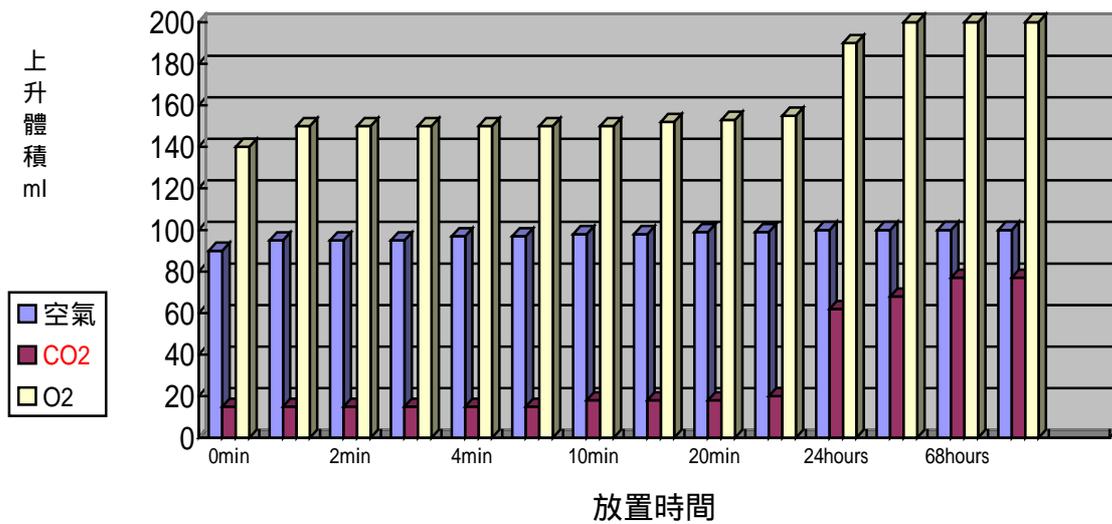


圖5：悶熄後放置一段時間



P29：悶熄後靜止放置實驗裝置



P31：裝 O₂ 的罩杯上升 80 % 放大圖



P30：裝 O₂ 的罩杯上升 80 %

發現：實驗九的各種實驗發現可以摘要於下：

1. 二氧化碳容易溶於水，但是悶熄蠟燭時，3 分鐘之內不會溶解於水，偵測方式有
 - (1) 利用酸鹼偵測器量 PH 值 (是否變弱酸)
 - (2) 利用廣用指示劑看水有沒有變色 (黃色)
 - (3) 利用澄清石灰水 (是否變混濁)

以上三種偵測二氧化碳是否溶於水的方法都是很靈敏的。悶熄蠟燭在燭火熄滅後一般水位上升都是在 30 秒之內完成，所以此時間內二氧化碳幾乎沒有溶解到水裡，但是經過劇烈搖晃或靜止放置半小時後就會慢慢溶解到水裡，這樣也會導致水位繼續上升。

2. 在實驗 9-2 悶熄蠟燭時，如果用空氣（氧氣佔 20 %）悶熄燃燒 11 秒或用純氧氣悶熄（100 % 的氧氣）劇烈燃燒 28 秒，500ml 的罩杯竟然都是上升 24 %，可見上升高度和氧氣消耗多少沒有關係。在實驗 9-4 不管是用氧氣還是空氣悶熄，都發現第二次悶熄燃燒時間比第一次久，可是上升反而比較少，可見水位上升多少，和消耗氧氣多少無關。以上兩個實驗可以完全推翻「教學指引」的理論。不過實驗 9-4（250ml）和實驗 9-2（500ml）結果又不太一樣，這個差異應該是罩杯大小的影響，在實驗 1 當中就發現罩杯大小會影響水位高度。實驗 9-4 中，用氧氣悶熄會上升比較高（56 %），用空氣悶熄上升比較低（36 %），應該是在純氧中火焰燃燒劇烈的關係。為何第二次燃燒比較久，上升比較少，應該是燭火大小的關係，而且 250ml 罩杯對溫度反應最靈敏。

十、釐清空氣「熱脹冷縮」和氧氣減少兩種因素，對水位上升到底有多少影響？

蠟燭是石油化學產物，屬於一種石蠟（Paraffin wax）製品，是一種混合物。其成分為 C_nH_{2n+2} ，（ $C_{18}H_{38}$ 至 $C_{32}H_{66}$ ）。若是為 $C_{25}H_{52}$ 則反應式為 $C_{25}H_{52} + 38O_2 \rightarrow 25CO_2 + 26H_2O$ （參考資料 12），所以 1ml O_2 並非產生 1ml CO_2 ，體積不相同，另外也有產生水蒸氣，有蒸氣壓。

1 大氣壓，20 時 O_2 在水中溶解度：0.031 ml/ml 水（王，p268；陳，p147）

CO_2 在水中溶解度：0.88ml/ml 水

在 20 一大氣壓時，每 1000ml 的水可溶解 880ml 的 CO_2 ，而溶解 31ml 的氧氣，相差達 28 倍，但是蠟燭剛熄滅時未加以搖晃， CO_2 不會立即溶解。網路上（參 12）有人認為「燃燒蠟燭生成的 CO_2 ，可認為絕大多數都溶於水了」，經過我們的實驗發現是完全錯誤的。蠟燭燃燒雖然耗掉氧氣（約 1/5），但是也產生 CO_2 ，體積不見得相等。在短短幾秒鐘之內， CO_2 並沒有溶解在水裡，此從澄清石灰水可以判斷。 CO_2 的確容易溶解到水裡，但是必須經過好幾個小時，或劇烈搖晃才會慢慢溶解到水裡，造成氣體的量減少。從實驗 9 可知，悶熄時剛剛產升的二氧化碳在 3 分鐘之內，幾乎沒有溶解到水裡。蠟燭燃燒既產生 CO_2 又產生 H_2O ，真是有點複雜。 H_2O 跑去哪裡呢？若是不考慮 H_2O 的產生，那麼產升的 CO_2 有可能比消耗的 O_2 少，但是蠟燭的成分又不一定是 $C_{25}H_{52}$ 。

在「步步高升」的實驗 6 當中，也發現悶熄蠟燭一開始燭火燃燒最旺盛時有 9.6 秒 水面並不上升，而是在燭火熄滅的前後幾秒快速上升，結合「步步高升」的實驗 6 和「慢慢高升」的實驗 9，可以很肯定的下結論：蠟燭熄火前後溫度急速降低才是水面急速上升的原因，氧氣消耗的量沒有影響。

十一、重新對「悶熄蠟燭」水面上升之原因提出完整的解釋。

蠟燭燃燒時，附近空氣很熱（約 50 ~600 之間），假設平均約 90 （363K）。蓋住燒杯後，溫度回到 30 （303K），平均溫度約下降 60 。空氣熱脹冷縮，體積減少約 1/5。所以體積約減少 1/5，這是空氣溫度降低的效果。

罩杯內體積減少，壓力也降低，於是產生內外壓力差，壓力不平衡的結果，罩杯外大氣壓力向上推升水位，使水位上升，達到壓力平衡（1 大氣壓），這一階段可稱為第一階段，此時幾乎只有空氣熱脹冷縮的影響。上升的幅度很不穩定，主要是看燃燒情況，若是用一根蠟燭則往往上升在 1/5 左右，若用衛生紙沾酒精則上升往往超過 1/2。

消耗氧氣的影響是在蠟燭熄滅後，此時一部份的氧氣已經變成 CO₂，CO₂ 比較容易溶於水，大約是氧氣的 28 倍，1000ml 的水可溶解 880ml 的 CO₂。悶熄後靜置一段時間，CO₂ 會逐漸溶解到水裡，這時才是真正的消耗氧氣，空氣體積減少，但是一般無法再多上升 1/5，因為悶熄蠟燭時，氧氣並沒有燒光，而是燒到一個程度，CO₂ 濃度太高，就會熄滅，所以第二階段可以再上升，但是增加幅度會少於 1/5。

簡言之，對於悶熄一根蠟燭的情形水面上升原裡的解釋，其實可分為兩階段：

（一）第一階段：蓋上罩杯到悶熄後約 1 分鐘之內，是因為空氣體積熱脹冷縮的關係，上升約 1/5，一般人以為想要得到的理論已經「證實」，就把實驗裝置拆了。

對於自然課本中「悶熄蠟燭」的實驗，我們試著提出我們自己的解釋：

1. 當蠟燭慢慢熄滅後，溫度下降慢慢停止。因為溫度下降，所以罩杯中空氣體積縮小。

查理定律： $V_2/V_1=T_2/T_1$ $V_2=V_1 \times T_2/T_1=(303K/363K) \times V_1=0.83 V_1$

2. 溫度越高，空氣膨脹越厲害，罩杯蓋起來後，體積下降越多，水位上升越高，所以影響水位高低的關鍵是空氣的溫度，實驗雖做了很多個，其實只是加熱方式的不同而已。

（二）第二階段：1 分鐘後開始放置一段時間或加以搖晃，因為 CO₂ 容易溶於水，空氣體積會再減少，水位繼續上升。

伍、結論

- 一、 本研究總共做了十幾個實驗，終於可以把「步步高升」當中留下的問題解開，就是悶熄蠟燭時水面上升的原因是因為熄火時溫度下降「空氣熱脹冷縮」的影響。不能用 1 根蠟燭的實驗水上升接近 1/5 的現象證明空氣中的含氧量，因為燃燒之後會產生二氧化碳，實驗 9 甚至發現空氣中含氧量根本對上升高度沒有任何影響
- 二、 本研究除了解開悶熄蠟燭原裡的謎題，也有另一重要發現，就是將實驗裝置放置幾天或是將之劇烈搖晃，都可以使水位繼續上升，這樣的第二階段上升是靠著 CO₂ 容易溶解於水的特性，上升會比較慢，所以本研究題目就取為「慢慢高升」。一般的悶熄蠟燭實驗大家只知道水位會上升 20%，在「步步高升」的研究，最高曾經到達 64%，我們的研究則可以讓水位繼續上升達 80%，真是太奇妙了！
- 三、 所謂「氧氣減少所以水位上升」的說法，也是有此現象，就是鋼棉生鏽的實驗，因為空氣中氧氣減少，而且鋼棉生鏽只產生 H₂O，不會產生 CO₂，所以水位確實也上升，不過很難上升到 1/5，所以想要證明空氣中有 1/5 的氧氣，可能得想想其

他辦法了。因為蠟燭燃燒雖消耗氧氣但是會產生二氧化碳，二氧化碳不會馬上自動溶解於水。

- 四、不同大小形狀的罩杯，在許多實驗中其水位上升都會有差異。250ml 的罩杯體積小而且比較狹長，在「悶熄蠟燭」實驗中水位上升最高，用酒精燃燒上升卻最低。
- 五、利用線香燃燒，一開始時會造成水位略微下降，等煙霧散掉之後還是會上升，但是達不到 1/5。
- 六、蠟燭燃燒最高溫在火焰頂端約可達 600 ，附近 1cm 之間約 400~600 ，一般悶熄蠟燭熄火前後罩杯內平均降溫約 50 80 ，燭火燃燒本身很不穩定，所以水位上升體積也不太固定。

陸、心得與感想

很多人都先有了「空氣中氧氣佔 1/5」的觀念再來做悶熄蠟燭的實驗，做出來的差異都當作「實驗誤差」看待，造成觀察失真，也不曾反思氧氣燒掉了，難道都不會產生 CO₂ 嗎？為什麼空氣體積就平白減少 1/5？經過老師的教導與啟發，我們才發現以前自己想法太單純了，我們進行的許多實驗，讓我們重新思考到「水位上升」的原因，也看到許多有趣的現象，並且擴大我們對「空氣性質」的瞭解，這次的研究不但好玩，也收穫不少。老師說這次「慢慢高升」的研究，比「步步高升」，更為成功，我們聽了很高興！

我們本來以為消耗的氧氣和產生 CO₂ 是等體積，以為這個研究可以結束了，後來從網路查到 $C_{25}H_{52} + 38O_2 \rightarrow 25CO_2 + 26 H_2O$ 這個式子，而且有人又說蠟燭是由多種烴類 (C_nH_n，C_nH_{2n+2}) 混和而成，簡直快暈倒了，加上 H₂O，體積變化很複雜。如果消耗的氧氣和 CO₂ 不是等體積，那麼整個過程實在又開始複雜起來了，科學研究似乎沒有終點！

柒、參考資料：

1. 謝基生 (民 81): 空氣的性質與實驗。鐘文出版社。
2. 國民小學自然課本第九冊 (五上), 國立編譯館主編, 民 88 改編本七版
3. 國民小學自然科學教學指引第九冊 (五上), 國立編譯館主編, 民 86 改編本三版。
4. 奇妙的大氣壓力, 華一書局, 民 81, 馮鵬年撰文。
5. 普通物理學 (上冊), Halliday and Resnick, 曹培熙譯, 曉園出版社。
6. 化學 (上、下冊), 陳國成、陳紹光著, 大中國圖書公司, 民 85。
7. 普通化學, 王澄霞、魏明通著, 三民書局, 民 72。
8. 國小自然教學指引五上, 康軒文化事業, 89 年 9 月。
9. 國民小學自然四下, 南一書局, 90 年 2 月。
10. 國民小學六上教學指引, 國立編譯館主編, 民 84 年。
11. 「步步高升」, 第四十屆中小學科學展覽會優勝作品專輯 (民 90 年), p52~64。
12. <http://www.iest.edu.tw/study/computer/1097/e4/4-6.htm>
13. <http://scit.ncue.edu.tw/sci-fair/21-3.htm>