

燭火和氧關係的延伸探討—
一個有關國小自然科第九冊第三單元
教學活動二的定量研究

An Extension of the Relationship between
Candel Flame and Oxygen-
A Quantitative Study Related to the Contents of
the Learning Activity 2 of Unit 3 in Elementary-school
Natural Science Textbooks Volume 9

張自立
Tzyh-lee Chang

國立台北師範學院學報第十二期
中華民國八十八年六月出版
National Taipei Teachers College
Taipei, Taiwan, Republic of China
June 1999

燭火和氧關係的延伸探討—— 一個有關國小自然科第九冊 第三單元教學活動二的定量研究

張自立*

摘 要

大多數國小老師和師院學生對國小自然科第九冊第三單元教學活動二的內容，理解的不夠透徹。本研究針對他們的迷思，分別在相關原理和實驗操作上加以澄清，並指出從實驗結果中，可獲致何種程度的結論。

*張自立：自然科學教育學系副教授

4. 就計算瓶內氣體分子數減少率的目的而言，在測量燭火熄滅後瓶口至瓶內水面距離時，不必保持瓶口至瓶外水面距離與先前決定基準點時相同，但就觀察瓶內水位在燭火熄滅後上升多少的目的而言，就應保持瓶口至瓶外水面距離與先前決定基準點時相同。

(三)實驗結果

1. 從個別的悶熄蠟燭實驗數據，可決定該次實驗中瓶內空氣分子數的減少率。

2. 一般操作悶熄燭火實驗時，由於不能確知氧是否被完全耗盡，故求燃燒後，瓶內空氣中有多少二氧化碳取代氧的體積，是不實際的。

也許我們會質疑，國小學童要了解這麼多嗎？由於小學生尚不清楚波義耳定律，故當然不必對小朋友做如此深入的探討及剖析。事實上，新課程中(國民小學自然科課程實驗研究委員會，民85)已將觀察水位上升的內容刪除了，並改以將蠟燭直接固定在桌上，再反置燒杯，觀察燭火的變化。所以在新課程中，問題就變單純多了。這似乎是新課程在課程內容方面，參照教師反應意見，所做的改進，亦即內容方面以配合兒童身心發展及解決日常生活問題為優先，並加以淺化與簡化(毛松霖，民83)。可是燒杯直接蓋在桌上，並不能將外界空氣完全隔絕，所以在觀察蠟燭燃燒時，除了必需考慮可能有尚未耗盡的氧之外，尚需考慮可從杯口和桌面接觸空隙進出的空氣，不宜將燭火熄滅歸因為杯內已無氧氣，而應解釋為氧氣變稀薄，在接觸火燄機率逐漸減小下，導致火燄的熄滅。

雖然新課程已避開燭火熄滅水位升高的實驗，但是，我認為國小自然科老師還是該對此問題進行較深入的了解。畢竟如果問題存在，它就不會因為我們不予理會，而消失不見。亞里斯多德說過：「一知半解的學問是危險的東西。」不是嗎？

燭火和氧關係的延伸探討—— 一個有關國小自然科第九冊 第三單元教學活動二的定量研究

張自立*

壹、探討動機

本學期(八十六學年度第二學期)擔任音教系二年級「自然科學概論」授課時，有位同學上台做實驗報告，他所做的實驗是：將蠟燭固定在保麗龍板上並點燃放置在一裝水的盆中，再用玻璃杯反蓋在蠟燭上，當燭火熄滅時，杯內水位升高。當我問全班同學原因時，全班同學異口同聲地回答：「熱脹冷縮」，並說他們上學期全班做過這個實驗，這是全班討論的結果，並強調小學課本也有這個實驗，而且課本的解釋是錯的。當我再問同學們：「水位上升高度應該是從何處開始量起的呢？」是①燭火熄滅後，杯內水面的高度減去燭火點燃前杯外水面的高度？②燭火熄滅後杯內水面的高度較杯外水面多出來的高度？③燭火熄滅後，從在水面下杯口位置量至杯內水面的高度？還是④以上皆非。同學們對以上的問題普遍皆認為是②，其實正確的答案應該是④，水位上升應指的是燭火在熄滅後杯內水面的高度，減去蠟燭點燃前杯內水面的高度。

同學的迷思概念引起了我的興趣，遂去查了一下小學課本，果真在國小自然科學課本第九冊(國立編譯館，民82)中發現了一模一樣的教材。在第九冊第三單元教學活動二(空氣中含有氧氣嗎？)的部分內容是：把點燃的蠟燭移到裝有水(約3公分)的水族箱內，蓋上玻璃瓶，觀察燭火的變化。當燭火熄滅後，觀察瓶內水位的變化。玻璃瓶中的水位，為什麼會上升？玻璃瓶中，水沒有上升的部分，是不是表示空氣中還有其他不能幫助燃燒的氣體？關於這些問題，國小自然科學教學指引第九冊(國立編譯館，民82)的說明如下：兒童應能從玻璃瓶悶熄水面上蠟燭的現象，指出空氣中含有氧氣；並由燭火熄滅，水位上升一部分的現象，說明空氣中含有氧和

*張自立：自然科學教育學系副教授

其他不能幫助燃燒的氣體。至於玻璃瓶中的水位為什麼會上升呢？指引中的回答是：「蠟燭燃燒時，用掉了瓶中的氧氣。水位上升補充了用掉的氧氣所占的空間。水沒有上升的部分代表空氣中除了氧氣外，還有其他的氣體。這些氣體不會幫助燃燒。」指引在注意事項中指出：本單元並不探討氧氣在空氣中所占的比例(1/5)，只談到燃燒用掉氧氣，其占有的空間會被水填補，空氣中仍含有大部分不能幫助燃燒的氣體，這些氣體主要是氮氣(約占4/5)。

指引上的說明，可能會讓一些小學老師認為水位上升應該是1/5左右，但是實驗結果往往卻令老師或學生們對此一解釋採取懷疑甚至不認同的態度。本文之目的即在探討此一現象，並希望能對此一問題產生較深入的了解。但在探討之前，先讓我們來看看未來自然科老師(數理系自然組同學)對這個問題有些什麼看法。

貳、問卷內容及實施方式

問卷對象是數理系二年級所有自然組同學，正巧他們在大一修課時，全班就曾針對此一問題做過實驗及討論。所以如果數二自然組與音二同學對此一問題仍具有某些迷思概念，則如何澄清它們及設計實驗來更徹底地探討此一問題，便是一個重要的課題，而此亦正是本文之目的。

問卷實施方式是將問卷題目合併在理論力學期中考考題當中，但只占總成績10%，如此一方面可讓同學重新思考並且重視此問題，另一方面也可確保同學作答時態度認真。全體作答人數合計46人。

問卷內容如下：國小自然科學課本第九冊(國立編譯館，民82)第三單元教學活動二(空氣中含有氧氣嗎？)的部分內容是：把點燃的蠟燭移到裝有水(約3公分)的水族箱內，蓋上玻璃瓶，觀察燭火的變化。當燭火熄滅後，觀察瓶內水位的變化。玻璃瓶中的水位，為什麼會上升？玻璃瓶中，水沒有上升的部分，是不是表示空氣中還有其他不能幫助燃燒的氣體？

問題：

- (a)請就你記憶所及，敘述以前國小老師解釋水位變化的理由。
- (b)詳述你自己對這問題的見解。

參、問卷分析

對於問題(a)的回答是相當一致的。幾乎所有作答者皆認為他們的國小老師對燭

火熄滅時水位會上升的說明，是完全依照課本及指引的解釋，亦即蠟燭燃燒消耗完氧，水然後就會填補氧所占空間的位置，導致水位上升。至於對問題(b)，回答較不一致。以下綜合作答者本身之錯誤見解，將其歸納分七項條述，並在同類錯誤見解之後，隨即附上個人修正意見及評論。

(1)當瓶中氧氣消耗完之後，壓力會減少，水位會上升。但是瓶中其他空氣受熱之後，壓力也會增加。若壓力增加大於壓力減小，則水面亦可能下降。

(2)瓶內水位是先降後升，因燃燒的蠟燭使瓶內的溫度高於瓶外，所以瓶內的氣體經加熱後膨脹，故會先將瓶內的水向下擠壓，所以看起來剛開始時，水面會先下降，但在瓶內的氧氣被消耗完了之後，燭火就會熄滅，且瓶內溫度也會漸漸回復到原來的溫度，氣體壓力也漸漸變小，此時瓶外的水就會被推擠進來，水面也就上升了，上升至一高度就會停止是由於瓶內外的壓力已達到一個平衡。

對(1)與(2)的修正意見：

以上的觀念基本上是不明確的。事實上在所有回答者中，無人指出當將玻璃瓶反置入未點燃蠟燭之水族箱中，瓶內水位會下降(指與瓶外水位比較而言)至瓶口附近稍高一點之處。所以當考慮瓶內蠟燭熄滅後，水位上升有多高時，應先將瓶(內含未點燃之蠟燭)倒置入水族箱中某一位置，測瓶內外水位高度，然後將蠟燭點燃，又置瓶並待燭火熄後，溫度回復至室溫之時，移動瓶使瓶口至瓶外水位間之距離與先前之情況(蠟燭未點燃)相同，再測瓶內水位高度，如此測得之蠟燭燃燒前後瓶內水位高度增加之量，才是我們所欲求得的水位變化。至於水位升高的程度則與玻璃瓶內空氣分子數多寡、玻璃瓶高度(假設玻璃瓶橫截面為一定值)及瓶口在水中深度有關，所以瓶內水位較瓶外水位低或高應視以上這些因素而定。

(3)當玻璃瓶覆蓋在不同數量的蠟燭上時，瓶內水位上升之高度就不同，所以水位上升與所消耗氧之間的關係不大。

(4)在玻璃瓶中放一枝蠟燭或十枝蠟燭燃燒，所造成的水位上升高度差異非常大。

對(3)與(4)的評論：

以上的觀察確實會發生，但是問題在於因為沒有釐清實驗條件，所以觀察到的現象已經與所欲探討的問題風馬牛不相及了。我們所欲探討的是：覆蓋在燭火上的玻璃瓶空間中，在燃燒前後所產生的空氣壓力變化。為什麼說以上兩點觀察及其推論不成立呢？因為在多根蠟燭劇烈燃燒之下，很容易就看到氣泡從反置的玻璃瓶口處向外冒出，這樣就會讓瓶內氣體流失，而無法達成最初觀察的目的。所以要探討玻璃瓶內空氣因燃燒而致的壓力改變時，先決條件就是在實驗觀察當中，不能有氣

泡產生，否則觀察的結果就不可能準確。

(5)水位上升是由於瓶內空氣熱脹冷縮的結果。當蠟燭燃燒時，空氣膨脹，促使水位下降，當燭火熄滅之後，由於溫度下降，空氣體積收縮，所以水位上升。因此，瓶子口徑的大小，燭火距離水面的高低和火燄的大小等因素，都會影響水位上升的高度。

(6)水位上升並非氧氣用完的緣故，是因熱脹冷縮的原理。當蠟燭點燃時，水位會先下降，當蠟燭熄滅後，由於空氣溫度下降，水位因壓力差而上升。所以如果燭火愈大，因壓力差也愈大，水位上升速度就會變快，高度也會增加。

(7)水位的上升與燭火燃燒到熄滅之間的溫度差有關，這個溫度改變造成瓶內壓力急速下降，水位隨即急速上升。

對(5)至(7)的評論：

上述中第(5)項，將水位上升的結果直接歸因為空氣體積的變化，這個觀念基本上是不對的。這樣的推論犯了倒果為因的錯誤。事實上水位上升或空氣體積變化都是果而非因，真正的因是壓力平衡。水位最後的位置應該是壓力平衡的位置，也就是說如果瓶內水位高於瓶外水位，則瓶內氣壓加上瓶內、外水面高度差的壓力(取正值)，會等於瓶外氣壓，而若瓶內水面低於瓶外水面，則瓶內氣壓會等於瓶外氣壓加上瓶內、外水面高度差的壓力(取正值)。所以水位的改變是肇因於壓力的平衡，而此亦導致了瓶內空氣體積的變化。在上述第(6)、(7)項中，溫度被突顯成一個導致水位改變的決定因素，但溫度的變化雖在燃燒反應中無法避免，可是事實上，理想的實驗應該是在瓶內空氣於燃燒前後溫度相同的條件下，比較水位的變化，所以燃燒後應等一段時間，讓玻璃瓶內空氣溫度下降。因此水位改變不應歸因於溫度的變化。此外，在實驗中，如果火焰過大，很容易造成在反置玻璃瓶時產生氣泡，造成瓶內原有空氣外洩，破壞了實驗的條件。而瓶口大小(亦即瓶子半徑)本身雖是決定瓶子內部體積的因素之一，但若其大小一定，則瓶內空氣體積改變量就只與瓶高有關，而與瓶口半徑大小無關，故水位升高多少也只與瓶高有關而與半徑大小無關。至於燭火距離水面的高低，會影響水位升高的高度，其原因可能是當燭火熄滅之時，氧氣未用完的量與燭火高度有關。事實上，在燃燒過程中，燃燒產生的二氧化碳越來越多，它們與不參與燃燒的氮氣包圍住火焰，使得尚未參與燃燒過程的氧越來越不易接觸燭火，所以當燭火熄滅時，極可能有尚未耗盡的氧氣。

為求澄清以上的迷思及更具體的闡明問題，我們必需做實驗，但在實驗之前，先對實驗原理做一簡短的說明。

肆、實驗原理

根據波義耳定律(Benson, 1991)：當氣體密度夠低時，在一定溫度下，一定質量的氣體，其體積與壓力成反比。由此可知如果我們假設波義耳定律對玻璃瓶內的空氣可近似地成立，則瓶內在無燭火燃燒情況下，空氣壓力與體積的乘積應為一常數。在下面的第一個實驗部分，我們將先驗證上述的正確性，至於更詳盡的驗證，將另文討論(Chang, et al., 1999)。第二個實驗當然就是我們最終的興趣，亦即探究瓶內蠟燭燃燒如何影響水位的變化。在探究這個題目之前，我們知道溫度會影響瓶內氣體的體積(或壓力)，故在燭火熄滅後，應待玻璃瓶內空氣溫度降至瓶內蠟燭未點燃前的溫度，再測水位高度，如此在相同溫度下，才能藉測量氣體的體積(或壓力)，比較出燃燒前後瓶內氣體壓力、體積和氣體分子數的變化。

伍、實驗結果與討論

實驗一

準備一透明壓克力水族箱，並將水倒入其中。準備好量尺。實驗在室溫下進行，量筒或玻璃瓶內除空氣外不含任何東西。共取五組數據，其中第(1)組用的是10ml玻璃量筒，第(2)組是100ml玻璃量筒，第(3)組是1000ml玻璃量筒，第(4)和第(5)組是圓筒形大玻璃瓶。相關數據請參見表1。

在表1中筒或瓶體積(測量值)的求得方式是先將筒或瓶裝滿水，再用量筒測量水的體積即得。從測量所得的體積 V_2 與利用公式計算所得的 V_1 相差不大的情形，可推知筒或瓶可視為是半徑固定的圓筒。對均勻的圓筒而言，其體積的變化，就等於高度的變化，這也就是在表1中倒數第二欄位中B的求法。在計算由於水位差所造成的瓶內壓力增加值 x 時，我們是以假設大氣壓力為一大氣壓做參考。因為1037cm水柱高的壓力相當於一大氣壓(此值為假設室溫在25°C條件下，由下列公式得出： $101,325 \text{ 牛頓/米}^2 = P(\text{仟克/米}^3) \times g(\text{米/秒}^2) \times H(\text{m})$ ，其中 $g = 9.80 \text{ 米/秒}^2$ ， P 是水在25°C時的密度，其值為 997.0449 仟克/米^3 (Weast, 1986)，而 H 即為所得出之值)，故可知筒或瓶內增加的壓力為 x 大氣壓， $x = (d - w) \div 1037$ ，其中 d 代表筒或瓶口至筒或瓶外的水面距離， w 代表筒或瓶口至筒或瓶內的水面距離， d 及 w 的測量值皆以公分為單位。接著再由波義耳定律，推知體積減少為原來之 A 倍， $A = 1 \div (1 + x)$ 。上式之

A值與假設筒或瓶為均勻圓筒，由計算體積變化相當於計算高度變化所得之B值 ($B = (h - w) \div h$ ，其中h為筒或瓶高，w為筒或瓶口至筒或瓶內的水面距離)比較，相差無幾。表1中第(1)、(2)、(3)列數據分別是使用10ml、100ml和1000ml的一般玻璃量筒，而(4)和(5)是使用圓筒形大玻璃瓶。(4)和(5)是特意將瓶口至瓶外水面距離設定在兩個不同值，以求瓶口至瓶內水面距離之變化。A與B之誤差百分比列於表1中最後一欄，由欄中數據可知所有誤差百分比皆小於1%，誤差產生主要原因為大氣壓力可能並非如假設的1atm，且一大氣壓相當的水柱高度與水的密度亦即溫度有關，若溫度與所假設的25°C有些出入，則亦會造成誤差。至於要減少水面位置判讀所造成的誤差，首先要在判讀時平視水面，這時會發現水面上有一薄層，此薄層上層邊界是由水和玻璃接觸所造成，而下層邊界是水面中央凹陷部分所造成，水面位置應採取記錄下層邊界較準確。

表1 在室溫下，藉測量各種不同容器內、外水位高度，以求得其中氣體體積與壓力。
在表中第一欄內，(1)是使用10ml玻璃量筒，(2)是100ml玻璃量筒，(3)是1000ml玻璃量筒，(4)和(5)是圓筒形大玻璃瓶。

	筒(瓶)口至筒(瓶)外水面距離 [d, cm]	筒(瓶)口至筒(瓶)內水面距離 [w, cm]	筒(瓶)高 [h, cm]	筒(瓶)內部直徑 [2r, cm]	筒(瓶)內部體積 [$\pi r^2 h = v_1$, cm ³]	筒(瓶)內部體積 [測量值 = v_2 , cm ³]	筒(瓶)內部壓力增加值 [(d-w) ÷ 1037 = x, atm]	筒(瓶)內部體積減少比率* [1 ÷ (1 + x) = A]	筒(瓶)內部體積減少比率** [(h-w) ÷ h = B]	誤差 [A - B ÷ A, %]
(1)	10.1	0.2	14.7	1.1	13.97	14.0	0.00955	0.991	0.986	0.42
(2)	10.2	0.2	22	2.8	135.5	136	0.00964	0.990	0.991	0.046
(3)	10.5	0.6	44.4	5.7	1133	1210	0.00955	0.991	0.986	0.41
(4)	12	0.5	28.8	10.3	2399.7	2370	0.0111	0.989	0.983	0.65
(5)	4.8	0.2	28.8	10.3	2399.7	2370	0.00444	0.996	0.993	0.25

*由波義耳定律得知。

**直接由測量而得，[筒(瓶)高 - 筒(瓶)內水位高度] ÷ 筒(瓶)高 = [筒(瓶)內部體積 - 筒(瓶)口至筒(瓶)內水面高度所包含之體積] ÷ 筒(瓶)內部體積。

本實驗指出下列兩個觀點：

(1)筒或瓶內部與外部水面不一樣高，內部水面的位置是由筒(或瓶)內空氣壓力等於筒(或瓶)外空氣壓力加上水位的壓力差所決定的。所以，若在做燭火實驗時，未先做本實驗，就容易在一看到燭火燃燒過程時，便以為筒或瓶內部水面變化是由於燃燒時空氣先膨脹後又收縮所造成，這是應該首先釐清及導正的。

(2)教科書中內容敘述「把點燃的蠟燭移到裝有水(約3公分)的水族箱內,蓋上玻璃瓶(應指直接蓋至底部),觀察燭火的變化。當燭火熄滅後,觀察瓶內水位的變化。玻璃瓶中的水位,為什麼會上升?玻璃瓶中,水沒有上升的部分,是不是表示空氣中還有其他不能幫助燃燒的氣體?」。文中問到了水位為什麼會上升?在水很淺(如課本所言3cm)的水族箱內,玻璃瓶內部水位是有可能會高於瓶外水位(還是要視瓶之內徑及高度而定),但是如課本這樣的敘述是極易造成一般人誤解的。一般人做蠟燭燃燒實驗時,若未先比較未點燃蠟燭情形時的瓶內外水面高度,就很可能誤認瓶內空氣體積變化的基準點是從瓶外水面相齊的水位起算,而當水族箱內水較深時(如10cm,而非3cm時)往往最後在燭火熄滅後,發現瓶內水位比瓶外低,而質疑課本的正確性,並做出似是而非的解釋。表1所呈現的數據明確的告訴我們瓶內空氣體積變化的基準點並非是與瓶外水面相齊的水位,而應是從燭火尚未點燃時的瓶內水面高度起算。而且燃燒後,瓶內水面高度不一定會比瓶外水面高度來得高。假設瓶子半徑一定,則瓶內水面高度將完全由瓶內氣體分子數,瓶口在水中深度及瓶子高度所決定。當瓶內氣體分子數一定時,水深(指瓶外水面高度減去瓶內水面高度)的壓力即決定了瓶內空氣體積的改變量,而由於體積的變化與瓶子外型有關,因此瓶內水位的上升高度就與瓶子本身的高度(假設瓶子半徑不變)有關了。

實驗二

本實驗進行方式如實驗一,在操作上本實驗與實驗一不同的是在本實驗中大玻璃瓶內包含了蠟燭,而在實驗一中則無。為了考量蠟燭在瓶中占最小體積比例,故只採用實驗一中的大玻璃瓶。實驗前先準備一半徑小於大玻璃瓶半徑之透明壓克力圓盤,並將蠟燭固定在盤中心處。本實驗之目的正是要定量地測量蠟燭的燃燒—熄滅過程,對瓶內氣體的壓力、體積和分子數的影響。相關的實驗數據請見表2及表3。

表2 本實驗採用實驗一中的大玻璃瓶,操作時讓透明壓克力圓盤及固定在盤中心之蠟燭包含於瓶內,但不點燃蠟燭。本表中瓶口至瓶內、外水面距離的數據將在表3中應用到。

瓶口至瓶外水面距離 [d, cm]	瓶口至瓶內水面距離 [w, cm]	瓶內壓力增加值 [(d-w) ÷ 1037 = x, atm]	瓶內體積減少比率 [1 ÷ (1+x) = A]	瓶內體積減少比率* [(h-w) ÷ h = B, h=28.8cm]	誤差 [A-B ÷ A, %]
11.1	0.45	0.0103	0.990	0.984	0.55

* (瓶高—瓶內水位高度) ÷ 瓶高 ≈ (瓶體積—瓶口至瓶內水面高度所包含的體積) ÷ 瓶體積, 取近似是由於瓶內包含圓盤及蠟燭, 但考慮其所占體積不大, 故近似值應可成立。

表3 本實驗探究蠟燭燃燒與瓶內水位上升之間的關係。實驗中所測得的瓶口至瓶外水面距離必須與表2中數據(亦即蠟燭未點燃情況下)保持一致,如此才能比較蠟燭在燃燒前後所造成的水位變化量。

瓶口至瓶外水面距離 [d, cm]	瓶口至瓶內水面距離 [w', cm]	瓶口至瓶內水面距離* [w, cm]	點燃蠟燭情況下,水位差造成瓶內壓力超過大氣壓力之值 [(d-w')÷1037=x, atm]	未點燃蠟燭情況下,水位差造成瓶內壓力超過大氣壓力之值 [(d-w)÷1037=y, atm]	蠟燭燃燒後瓶內氣體分子數變化率 [(1+x)(28.8-3.0)÷(1+y)(28.8-0.45)=z]
11.1	3.0	0.45	0.00781	0.0103	0.908

*w之數值由表2得來,為蠟燭未點燃之情況。

表2類似表1,但表2中只有關於大玻璃瓶內含未點燃蠟燭的數據(表1包含的是空筒或空瓶的數據,而表3是大玻璃瓶內含蠟燭經過燃燒—熄滅過程之數據)。只使用大玻璃瓶的原因,主要是由於壓克力圓盤加上蠟燭在瓶內所占體積比例很小,故在做體積減少比率計算(見表2倒數第二欄)時,可忽略盤及蠟燭所占體積。表2的數據顯示當瓶口至瓶外水面距離為某一特定值(11.1cm)時,瓶口至瓶內水面距離之值(0.45cm)。我們需要應用這些數據在表3瓶內氣體分子數減少比率的計算上面(見表3)。在表2中的最後一欄,可發現瓶內體積減少比率的誤差百分比小於1%,故得知假設蠟燭在瓶中所占空間可以忽略不計是可接受的,因此在倒數第二欄中的公式仍可被用來近似地估計體積減少比率。

在表3中,實驗數據的獲得方式是在將蠟燭點燃後,立刻將玻璃瓶反置其上,並注意不產生氣泡,以免影響實驗的正確性。此外,在燭火熄滅後也必需等瓶子回復至室溫,水位不再變化時,才進行水位高度的測量。

表3中的最後一欄是有關瓶內氣體分子在燭火熄滅後與蠟燭點燃前的比率。這個數據的計算方式是依據理想氣體定律的公式 $PV = NKT$,亦即當溫度在燃燒前後成一致時,則在燃燒前氣體分子的壓力(假設大氣壓力為一大氣壓時,其值為 $1+y$,其中 y 代表燃燒前瓶內外水位壓力差,也是燃燒前瓶內壓力超過一大氣壓之值)乘上氣體分子的體積(事實上因橫截面不變,故可僅以高度代表體積,高度值為 $h-w=28.8\text{cm}-0.45\text{cm}=28.35\text{cm}$)再除以燃燒前氣體分子的數目,應等於燃燒後氣體分子的壓力(其值為 $1+x$,其中 x 代表燃燒後瓶內外水位壓力差,也是燃燒後瓶內壓力超過一大氣壓之值)乘上氣體分子的體積(仍以高度代表體積,其值為 $h-w'=28.8\text{cm}-3.0\text{cm}=25.8\text{cm}$)再除以燃燒後氣體分子的數目。因此燃燒後氣體分子變化率 $z=(\text{燃燒後氣體分子數})\div(\text{燃燒前氣體分子數})=[(1+x)(25.8)]\div[(1+y)(28.35)]$ 。從計算得到的數值 $z=0.908$,可得知蠟燭燃燒後瓶內氣體分子數減少了

9.2%。在蠟燭燃燒後，空氣成份中氮氣與氫氣的分子數(Weast, 1986)應不變，氧分子數減少，二氧化碳分子數增加，至於水蒸氣分子則要視情形而定。若在燃燒前後，各等候足夠長的時間才測量水位，則由於水蒸氣的蒸發與凝結已達成平衡，且在相同溫度下，水蒸氣壓值為定值(Weast, 1986)，則這時由於燃燒後瓶內體積減小，故水蒸氣分子數目亦應減少(在 P 、 T 不變下，若 V 變小，則 N 也變小)。但若在燃燒前後並未等候夠長的時間就進行測量，就可能會得到水蒸氣分子數目在燃燒後增加的結果。對上述這些分子數目於燃燒後產生變化的分子而言，其改變量多寡，並非在每次燃燒過程時皆一成不變，理由如下述。

由表3及上述的計算雖然可獲得蠟燭燃燒後，瓶內分子數減少率的資訊，但是本實驗所得到的0.908倍的減少率，應視為是個別實驗下的特例，而不是一般性的結果，也就是說當使用不同粗細、長短的蠟燭做實驗時，會發現燭火熄滅後，在瓶口至瓶外水面距離保持一定的條件下，瓶口至瓶內的水面距離並不一致的情形，因此導致計算出不同的瓶內分子數減少率的結果。這個事實暗示氧氣可能在燭火熄滅之後，並未完全耗盡。這是很合理的。蠟燭在燃燒過程中，由於占大部分空氣體積的氮及不斷增加的二氧化碳，使得逐漸稀少的氧氣接近燭火的機率越來越低，所以極有可能在燭火熄滅之後，瓶內仍有殘存的氧氣。因此蠟燭若是長短、粗細不同，燃燒時由於燭火高低位置及大小等因素，便有可能造成耗掉的氧氣量也不同，而最後導致不同的水位上升高度。

陸、結論

為澄清一般人對悶熄燭火的迷思，以下分實驗原理、實驗操作和實驗結果三部分摘要敘述如下：

(一)實驗原理

1. 蠟燭不管是在燃燒之前還是之後，玻璃瓶內水面的位置皆是由壓力平衡這個因素所決定。

2. 波義耳定律可被用來解釋瓶內氣體在蠟燭燃燒前後壓力和體積的變化。

(二)實驗操作

1. 確立水位上升的基準點是在蠟燭未點燃情形下，瓶內水面的位置。

2. 覆蓋玻璃瓶時，不可有氣泡產生。

3. 燭火熄滅後，待瓶內溫度回復至與蠟燭點燃前瓶內溫度相當時，才可測量水位。

參考文獻

- 毛松霖(民83)：國民小學自然科新課程概說。臺灣省國民學校教師研習會，頁1-22。
- 國民小學自然科課程實驗研究委員會(民85)：國民小學自然實驗本第八冊。臺灣省國民學校教師研習會，單元四，頁55-70。
- 國民小學自然科課程實驗研究委員會(民85)：國民小學自然實驗本第八冊教師手冊。臺灣省國民學校教師研習會，單元四，頁93-124。
- 國立編譯館(民82)：國民小學自然科學第九冊。臺灣書店，單元三，頁18-28。
- 國立編譯館(民82)：國民小學自然科學教學指引第九冊。臺灣書店，單元三，頁40-64。
- Benson, Harris (1991). *University physics*. Singapore: John Wiley & Sons.
- Chang, T.L., Chang, P.L. & Cheung, H.C. (1999). *A connection of ideal gas law by experiment*. (submitted).
- Weast, R.C. Ed. (1986). *CRC handbook of chemistry and physics*. 67th Ed., Boca Raton: CRC Press.

An Extension of the Relationship between Candel Flame and Oxygen— A Quantitative Study Related to the Contents of the Learning Activity 2 of Unit 3 in Elementary-school Natural Science Textbooks Volume 9

*Tzyh-lee Chang**

ABSTRACT

Most of elementary-school teachers and teachers' college students do not have a thorough understanding about the contents of the learning activity 2 of unit 3 in elementary-school natural science textbooks volume 9. This study tries to get rid of their misconception by clarifying related theorem and experimental procedures. It also points out what conclusions can be drawn from the experimental results.

*張自立：自然科學教育學系副教授

