

蠟燭的化學史

The Chemical History of a Candle

作者：Michael Faraday (麥可·法拉第)

譯者：胡景瀚*、林奕秀

國立彰化師範大學化學系

*chingkth@cc.ncue.edu.tw

第四章 蠟燭中的氫變成水、水中的氧

我發現你們還沒對蠟燭厭煩，否則你們就不會對我們現在研究的東西還如此感到興趣。蠟燭燃燒時，我們發現蠟燭燃燒製造的水就跟周遭的水一樣。對水更進一步地檢驗時，我們發現了奇妙的「氫」——我們的罐子裡就裝著這輕盈的物質。接著還見識到「氫」燃燒的力量，以及氫氣燃燒所製造的水。我也簡單地介紹了一個裝置，這個裝置使用化學的力量、或說能量；裝置上的電線為我們傳遞這股化學力量。我還談到，我會運用這股能量來分解水，看看水裡面，除了氫還有甚麼。你還記得，在水通過鐵管後，雖然我們製造了很多的氣體，我們不可能得到一樣重的水蒸氣。

■ 通電析出溶液中的鉛或銅

現在我們要來看看水裡面另一個物質是甚麼？你將會了解這個裝置的特性和用途，就讓我們來做點實驗吧！首先，我把一些已知的物質放在一起，看看這個裝置如何影響它們。這裡有銅（觀察它可能經歷的變化），而這裡有硝酸；你將發現它是很強的化學試

劑——當我把硝酸淋上銅的時候，將出現很強的反應。¹⁹現在放出美麗的紅色蒸氣，但我們其實不需要這種氣體。²⁰安德森先生會在出煙口捂住蒸氣一會兒，這樣我們就可以在不被干擾的情況下來進行實驗。我把銅放進燒瓶，它溶解在液體中，使得酸和水變成藍色的液體。這液體裡面有銅以及其它東西，而且我打算讓你這種液體在伏特電池如何作用。同時，我會做另一個實驗，讓你曉得它擁有的能量。對我們而言，這是種像水的物質——也就是說它包含了我們還不知道的部分，就像水包含了我們不知道的物質。

現在我把醋酸鉛溶液倒到紙上並均勻塗開來，然後把電力加到它上面，觀察會發生甚麼事？說不定會出現幾件對我們有用的事情呢。我把這張被溶液浸濕的紙放到錫箔上；錫箔很好用，因為它能让實驗桌保持乾淨，也有利於導電。而且啊，你看看，這劑溶液完全不受影響，無論是底下的錫箔或任

¹⁹ 反應為：



²⁰ 這氣體為上述反應之 NO_2 。

何與之接觸的東西；因此，我們能放心地使用我們的裝置。首先呢，先來確認我們的裝置是否就定位了。電線就在這裡。讓我們檢查一下，看看它的狀態是不是和上次一樣。我們有辦法能夠很快地判別出來。當我把它們接在一塊兒時，沒有電流通過，因為電極尚未接通；現在安德森先生給我打了個信號（電線末端突然出現閃光），這表示電路通了。我請安德森先生暫時中斷電池的電路，然後我用鉑線連接電池的兩極；如果我能讓這一大段金屬線燒起來，我們就能安全地進行實驗。現在你將見識這股力量。（電路連接，鉑線變得又熱又紅。）電力美妙地流過金屬線，我刻意使用細的導線，好讓給你看到這強大的力量，我們將藉著這股電力來檢視水。

在我手上有兩片鉑，如果我把它們放在這張紙上（在錫箔上含醋酸鉛溶液的紙），不會起任何反應；當我把鉑再拿起來，一樣沒有反應。如果我把電池兩極的任何一端分別放在鉑片上，沒有發生任何事；它們各自分開沒有反應；如果我同時把兩極都接上鉑片，你看發生了什麼事！（在電池兩極底下分別出現了棕色的點）。²¹看看這動作造成的結果，觀察我如何從那白色的鉑片弄出棕色的東西。無疑地，如果我仔細計畫、安排，把接上錫箔的電極接觸紙——哈！在紙上有好棒的結果，我來看看能不能用這東西在紙上寫字——如果你想叫它「電」訊也可以。（演講者用電線的一端在紙上寫下「年輕人」。）²²你看，我們得到的結果多麼漂亮。

從這個溶液中，我們得到一些原本不知道的東西。現在，讓我們從安德森先生手上把燒瓶拿過來，看看我們能從中取得什麼。在進行實驗時，我們也從銅和硝酸製造出這些液體。雖然我做實驗顯得有點趕、有點混亂，但是我還是比較喜歡讓你現場看到這是怎麼完成，而不是我自己預先做好的。

現在看看發生了什麼事。這兩塊鉑片便是裝置兩端的電極（或者我也能立刻製造出來）；我要把電極接觸溶液，就像我們剛剛在紙上做的那樣。無論溶液是抹在紙上或裝在玻璃罐裡，都沒有關係，只要電極和溶液有接觸就行。如果我單單把鉑片放入溶液，它們被拿出來的樣子就跟剛進去一樣——白白淨淨（在沒有連接電池時，把鉑片放入溶液）；但當我們通上電力（鉑片和電池連接，再次浸入溶液），你看看這個（演示其中一片鉑），它馬上變成銅了！就跟以前一樣。它變得像一片銅，可是另一邊的鉑（演示另一片鉑）還是乾乾淨淨的。如果我交換這兩片鉑的位置，銅會離開右邊、跑到左邊；現在附著銅的鉑片會變乾淨，而原本乾淨的鉑片則被附上一層銅。因此你曉得，我們溶入液體的銅可以利用這個裝置再取出來。

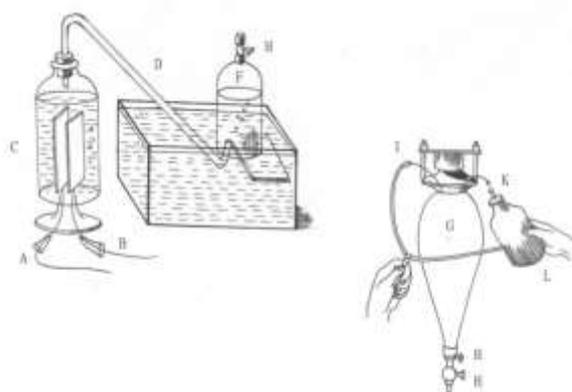


圖 18

²¹ 醋酸鉛溶液電解時在負極會有棕色的鉛沉澱。

²² 這一系列演講的對象是青少年，所以法拉第在紙上寫下「年輕人」(juvenile)。

■ 水電解後產生的氣體，以萊頓瓶通電後又變回水

先把溶液擱在旁邊，讓我們先來看看這個裝置（圖 18）對水產生的影響。這裡有兩片鉑，我打算用來做為電池的兩極。(C) 這個容器做成這種形狀，好讓我把裝置分解成各個部分，方便你觀察它的構造。我在(A)和(B)這兩個小杯子裡倒入汞，汞接觸連接鉑片的電線。往(C)容器倒入含有一點酸的溶液（放入含酸的溶液只是為了促進反應進行，反應過程中含酸溶液本身並不會發生變化），然後在(C)容器的頂端接一根玻璃彎管(D)——這根管子可能讓你想起上一堂課的實驗，那根穿過火爐的導管，像個鐵槍管；玻璃管彎(D)從下方進入罐子(F)。

現在我已經組裝好這個裝置，我們要用不同方式來讓水反應。上次我讓水通過燒得火紅的鐵管，現在我要讓電流通過容器裡面的溶液。水可能被煮滾，如果水真的滾了，我們就會得到水蒸氣；你也知道，水蒸氣遇冷會凝結——你已經曉得了這個道理，無論我是否把水煮滾。可是呢，水也可能不會被煮滾，而是出現其它的結果。你總要做實驗，而且要觀察才會知道。我在(A)和(B)這兩端分別接上電線，很快就會發現有沒有干擾產生？很好，水好像滾起來了，但它真的是「滾」了嗎？

讓我們來檢驗看看冒出來的氣體，這是不是水蒸氣？如果冒出來的東西是蒸氣，我想你很快就會看到(F)罐子內充滿了水蒸氣。但它真的是水蒸氣嗎？喔喔，這一定不是水蒸氣，你看見了，它沒有發生蒸氣該有

的變化。它維持在水面上，所以不可能是水蒸氣；但這一定是某種氣體。這是甚麼呢？是氫嗎，或其它東西呢？就讓我們來檢查看看吧。如果是氫氣，那它就會燃燒（法拉第引燃部分蒐集到的氣體，氣體燃燒起來且發出爆炸聲）。

這絕對是可燃的氣體，但燃燒的方式不像氫氣，氫氣燃燒沒有這樣的雜音；但它進行燃燒時，火光的顏色和氫氣很像；不過，它能在不接觸空氣的狀態下燃燒。這就是為什麼我選用了另一個裝置，好指出來讓你看到：實驗中這個氣體的特殊之處。我用一個密閉的容器代換原本的開放容器（我們的電池如此活躍，不只讓水銀滾了起來，也使一切運作良好——沒錯，而且是活跳跳地好極了）；我將呈現給你看，這種氣體能在沒有空氣的狀態下燃燒，雖然不知道它是甚麼東西；它所進行的燃燒作用不同於蠟燭，蠟燭要有空氣才能燃燒。做這個實驗的方法如下：玻璃瓶(G)的兩旁接著可以運送電力的鉑線(I)和(K)。把玻璃瓶(G)接上幫浦，我們就可以把容器裡抽真空。抽完空氣之後把這組東西接在(F)罐子上，並把接口旋緊，讓剛才伏特電池作用產生的氣體——伏特電池與水作用產生的氣體，也就是水變成的氣體——進入容器(G)。²³

我敢說，我們的氣體真的是從水變成的。我們不只改變了水的狀態，也確實把它變成了氣態的物質。我把剛才已經連接的(G)和(H)，再接上另一個(H)，同樣旋

²³ 如圖 18。也就是右方的((G)-(H)-(H))接在左方(F)-(H)上，由上而下依序為(G)-(H)-(H)-(H)-(F)。

緊接口、把管道接好；當我打開活栓時(H H H)·觀察(F)罐中的水面·我們看到氣體上升。現在我把活栓組關起來·因為氣體已經裝滿了容器·成功地把氣體送入(G)·我用萊頓瓶(L)²⁴送進閃電·到時原本乾淨透明的容器·就會變得黯沉。可是呢·你並不會聽到爆炸聲·因為容器(G)很堅固·不會讓爆炸聲傳出來。(瓶中閃過一道火光·點燃爆炸性混合物。)你看到那耀眼的光芒了嗎？如果我再次把容器(G)接上罐子(F)·然後打開活栓組·氣體也會再次上升。(打開活栓組。)那些氣體(指先前進入容器(G)的氣體·也就是剛剛被電力引燃而爆炸的氣體)消失了·就像你在這裡看到的·它們騰下空間·新的氣體就湧了進來。水就是從那些氣體形成的；如果重覆剛才的操作(再次進行剛才的實驗)·從水上升的動作·我們得知容器內再次成為真空的狀態。在爆炸之後·容器內成為真空·因為我們電解水產生的氣體在火光下發生爆炸·然後變回水；你看到·上面的容器(F)裡面有涓滴水流沿著瓶身匯聚在瓶底。

剛才我們只討論水·沒有理會空氣的部分。蠟燭在空氣的幫助下才產生水；但在剛才的實驗中·水不需要空氣就可以被製造出來。因此水應該含有蠟燭從空氣中取得的物質·這種物質能和氫混合·製造出水來。

■ 電解水的產物是二倍體積的氫氣和一倍體積的氧氣

你剛剛看到·電池的一端抓住了銅·從裝著藍色溶液的容器裡把銅取出來。這就是電線所造成的影響；我們真的能說·如果電池對於金屬溶液有這樣的力量·這不就表示：我們也可能分解出水的成分·然後把這些成分保存下來嗎？我要用這兩個電極·也就是電池的兩端來做實驗·看看這個裝置(圖19)裡的水會起怎樣的變化？在這個裝置裡·電線的兩端·A端和B端離得遠遠的。兩邊各有個小小的、鑽洞的層架·電池的兩極可以放在層架上。這樣的裝置分開兩邊通電後產生的氣體；好讓你看清楚·水在這裡不是變成了水蒸氣·而是純氣體。電線現在和裝水的容器恰到好處地完美連接·你看到泡泡冒上來；我們把這些泡泡蒐集起來·看看它們究竟是甚麼？我把玻璃圓筒(O)注滿水·蓋在電池的(A)端·另一邊(B)端也蓋上一個玻璃圓筒(H)。所以現在我們有一對裝置·兩邊都會產生氣體·兩個玻璃筒也都會被氣體充滿。開始囉！右邊(H)瓶內很快充滿了氣體·左邊的(O)瓶則比較慢；雖然有一些氣泡跑走了·但是反應仍然穩定地進行。而且啊·如果兩個瓶子一樣大·其中一瓶的氣體體積是另一瓶的兩倍。外觀上它們都一樣·都是無色的氣體·留在水面上方沒有發生凝結作用。我們可以做實驗來辨別這兩種氣體。我們得到不少的氣體·我們可以輕易地用實驗來檢查它們。我先來檢驗(H)罐內的東西·希望你準備好辨別出其實它就是氫。

²⁴ 萊頓瓶(Leyden Jar 或 Leiden Jar)·紀念荷蘭萊頓大學(Leiden University)教授 Pieter van Musschenbroek (1692-1761)於1745年成功地利用盛水玻璃瓶儲存電。萊頓瓶是相當原始的電容器·用來進行電的實驗。

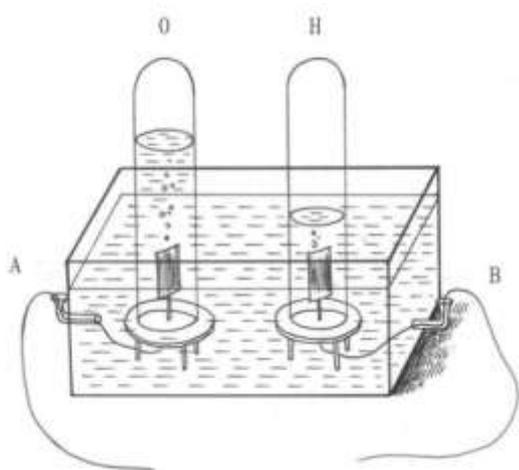


圖 19

回想一下氫的性質，它很輕，在倒過來的瓶子裡不會下沉而且逸散，在廣口瓶瓶口燒起來時有蒼白的火焰；現在來看看，這氣體是不是完全符合氫反應的狀況？如果這氣體是氫，當我把廣口瓶倒過來時，它還是會留在罐子裡。(點火，氫燃燒起來。)在另一個瓶子裡面的，是甚麼東西呢？你曉得了，這兩種東西混合後會形成一種爆炸性物質。我們發現這氣體是水的成分之一，也是讓氫燃燒的物質，但它究竟是甚麼呢？容器裡的水由兩種東西組成，我們發現其中之一是氫；那麼，在電解實驗前，水的另外一個成分，也就是我們現在得到的氣體，到底是甚麼呢？這種氣體本身不會燃燒，但會讓木屑燒起來。(演講者點燃木屑的尾端，投入裝著氣體的罐子。)你看，它如何激化木屑的燃燒，它讓木屑燒得比在空氣中還激烈。你看到它這個樣子，這氣體是水裡面的另外一種物質，我們也知道蠟燭燃燒產生水，那麼它一定是取自於空氣。它叫甚麼名字呢，A、B 或 C？我們叫它 O，也就是「氧」(oxygen)，

這名字很好，也很響亮。這就是水裡的氧，氧佔了水的一大部分。

■ 氧比氫重 8 倍，佔了水重量的 8/9

現在我們漸漸明瞭我們的實驗和研究；在檢驗過這些結果之後，我們很快就會知道蠟燭如何在空氣中燃燒。當我們這樣分析水的時候——也就是說，從中分離或電解出水的成分時，我們得到兩倍體積的氫，以及一倍體積的氧，氧能讓氫燃燒。從這張表格我們可以發現，相較於氫，氧是很重的氣體。氧就是氫之外，水的另一個成分。

	重量百分比	重量比
氧	88.9	8
氫	11.1	1

■ 用氯酸鉀和氧化錳製造氧氣

介紹過如何把氧從水中分解出來之後，我最好現在就告訴你——這麼大量的氧是如何得到的。你馬上想像得到——氧存在空氣中；沒有氧的話，蠟燭能燃燒產生水嗎？絕對不會有這種事發生！就化學來講，蠟燭燃燒產生水的過程，不可能沒有氧的參與。我們能從空氣取出氧嗎？我們能從空氣中得到它，但過程既複雜且困難；不過我這裡有個好方法。這種物質稱為「黑色氧化錳」，是種很黑也很好用的礦物(圖 20)；把它燒得火紅，就會產生氧氣。這個鐵罐裡裝著一些黑色氧化錳，罐子上接著一根鐵彎管。

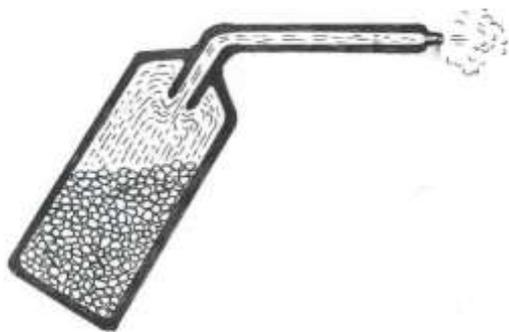


圖 20

這兒升好了一堆火，安德森先生會把鐵罐插入火中，這裝置是鐵做的，可以耐高溫。這是叫做「氯酸鉀」的鹽類，大量製造用於漂白、化學和醫藥，也用來做煙火或其它用途。把一些氯酸鉀和氧化錳混合（氧化銅或氧化鐵也都可以）後放入鐵瓶，不用等到它們燒成火紅，混合物就會釋放出充足的氧氣。²⁵我並不打算製造出太多的氧氣，只要夠用就可以了。如果加熱太慢的話，最先產生的氣體會和原本就在鐵瓶內的氣體混合，被稀釋掉了。你會發現，普通酒精燈的熱就足以製造出足夠的氧氣。你看看，從那麼少量的混合物中冒出了這麼多的氣體。我們會檢驗並觀察這種氣體的性質。用這個方法製造出來的物質，就像電池實驗產生的氣體，透明、不溶於水，看起來就像周遭的空氣。這個瓶子內裝著空氣，混合實驗製造出來的氧氣。我們把第一批混合物捨棄，這樣我們才能得到穩定的實驗結果。在電解水實驗時，我們從水中得到氧氣，氧很能促進木頭、蠟或其它東西的燃燒，我們或許可以期待這些氣體也有相同的性質。

■ 氧氣會助燃

我們來試試看吧！你看到蠟燭在空氣中燃燒，而蠟燭在我們製造出來的氣體中是這樣燃燒的（把蠟燭放低、放入充滿氣體的瓶子）（圖 21）。你看，它燒起來又亮又美！你還可以進一步觀察：這是一種「重」的氣體；氫氣會像氣球般往上飄，假如沒有包覆氣體的載具，也就是氣球的話，氫氣甚至會上升得更快。雖然我們從水得到的氫，在體積上是氧的兩倍；但在重量上，氫並不是氧的兩倍，因為其中之一比較重，而另一者比較輕。我們有測量氣體或空氣重量的方法；但我不想離題，就讓我直接告訴你它們的重量。1 公升的氫，重量約為 0.09 公克；而相同體積的氧，其重量卻有 1.24 公克，它們的重量差別非常大。所以，我們或許可以像用天平秤重一樣，論斤論兩的求得氣體的重量，你馬上就會看到了。



圖 21

氧氣助燃，我們就可以用助燃的特性來比較氧和空氣比較。我拿一段蠟燭簡單地做

²⁵ 反應為氯酸鉀和二氧化錳加熱產生氧氣，二氧化錳為催化劑。

$$2\text{KClO}_3(s) \rightarrow 3\text{O}_2(g) + 2\text{KCl}(aq)$$

個簡單的實驗。這根蠟燭正在空氣中燃燒，它在氧氣中會是甚麼狀況呢？我把整瓶氧氣蓋在蠟燭上方，好讓你比較燭火在氧氣和空氣裡的反應。喔，看看這個！看起來就好像電池電極冒出來的火花。它的反應非常活潑，而且我們沒有製造出新的物質。當我們用這氣體取代空氣，一樣地會產生水，和蠟燭在空氣中燃燒的結果是一樣的。

現在我們得到了關於這種新物質的知識，我們更深入研究，讓我們對這個蠟燭產物有更完整的了解。這種物質支持燃燒作用的力量非常了不起。例如這個構造簡單的燈，是我們現在許多燈具的前身，像是燈塔、顯微照明等等。如果這個燈的目的是讓火燒得更亮，你可能會說：「如果蠟燭在氧氣中燃燒得更好，油燈不也會這樣嗎？」嗯，是這樣子沒錯。安德森先生從氧氣儲備庫接出一根管子，我把這管子放進不完全燃燒的火焰中（圖 22）。氧氣進來了，你看火燒得好旺啊！但如果我停止氧氣進入，燈會變成怎樣呢？（氧氣氣流被阻斷，油燈回復原先黯淡的模樣）。

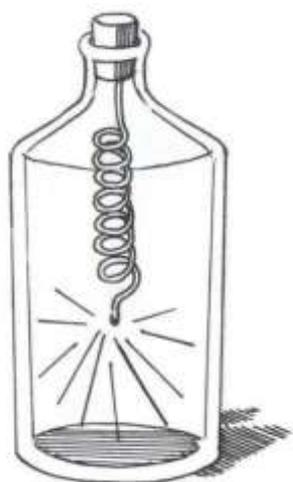


圖 22

多麼神奇啊，我們用氧氣加速了燃燒。它不只影響氫氣、碳或蠟燭的燃燒，也加強所有東西的燃燒作用。我們用鐵來作例子，鐵在空氣中只會稍微燃燒。這裡有瓶氧氣和一小段鐵線，即使這條鐵線和我的手腕一樣粗，它的燃燒狀況也是一樣的。首先，我把一小塊木頭放上鐵線，然後把木頭點火，讓它們一起落入瓶中。現在木頭著火了，就是在氧氣裡應有的燃燒程度，接著火焰會迅速地傳到鐵。鐵線現在燒得亮晃晃的，而且會持續一段時間。只要我們提供氧氣，就能讓氧繼續燃燒，直到鐵消耗殆盡（圖 23）。

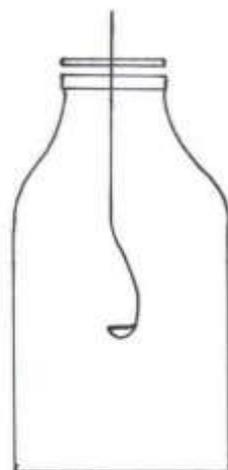


圖 23

現在把這放在一旁，來處理其它物質；因為時間有限，我們只能做有限的實驗。我們把一塊硫磺放入氧氣中，你會發現任何能在空氣中燃燒的，在氧氣裡會燒得更激烈；這讓你聯想到，空氣中協助物質燃燒的力量，應該是空氣中有氧的緣故。硫磺在氧氣裡靜靜地燃燒，但你可不要搞錯了，雖然它悶不吭聲地燒著，相對於在空氣中的燃燒，這個反應可是相當活躍的。

我現在給你看看另一種物質，磷的燃燒。磷是一種非常易燃的物質，如果它在空氣中就燒成這樣了，在氧裡面會怎樣呢？我不會讓磷完全燃燒，因為我如果那樣做，可能會使得裝置爆炸，甚至瓶子也可能破掉。你看看它在空氣中的燃燒狀態，再看看當我把它放入氧氣之後，它燃燒的光芒多麼燦爛（把點燃的磷放入氧氣瓶）！磷的固體粒子在氧氣中發生爆炸，使得燃燒作用變得相當明亮。

到目前為止，我們已經檢驗過氧氣，並測試氧的助燃能力。現在要多花一點時間在「氧」這裡，就像研究氫那樣。你曉得，對於從水分離出來的氫和氧，把它們混合並燃燒，會發生小小的爆炸。你也還記憶猶新，我在玻璃瓶內一同燃燒氧和氫的時候，雖然燒起來的火焰不太亮，但感覺起來卻相當熱。我要把氧和氫依照它們在水中的比例混合、燃燒；這個容器裡就裝著一體積單位的氧和兩體積單位的氫，這樣子混合的氣體就如同我們在電池實驗中得到的氣體。可是要一次把它們燒完，好像有點太多了；所以我用氫和氧的混合氣體來吹肥皂泡泡，然後燃燒這些泡泡，看看氧氣如何協助氫氣燃燒。首先來看看我們是否能吹個泡泡。喔，氣體跑出來了（氣體經過菸斗，灌入肥皂泡泡）。我有一個泡泡了。我用手接下這些泡泡，你可能會覺得我在這個實驗的舉動很奇怪，但這樣呈現可以讓你曉得：我們不能只依賴噪音和聲響，而要相信真正的事實。（法拉第以火引爆泡泡）。我不敢從菸斗尾端點燃泡泡，因為造成的爆炸會往上鑽入玻璃罐，把玻璃炸成碎片。你看的現象，以及耳朵聽到的聲

音便是氧氣快速度和氫結合的過程，以及這個過程釋放出來的力量。

循著我們學習的脈絡，在認識水的過程中我們知道，水和氧氣及空氣都是有關係的。為什麼鉀可以分解水呢？因為鉀和水中的氧結合。當我把鉀放入水中，甚麼東西被釋放出來了呢？鉀丟入水中，鉀本身和氧結合，使得水釋放出氫，接著氫燃燒起來。這一小塊鉀分解水的同時帶走氧，因此從水中把氫釋放出來。²⁶相對的，水在由蠟燭燃燒而來的過程中也從空氣獲得了氧。即使我把鉀放在冰塊上，氫和氧美妙的相互關係，也會因為鉀而燃燒起來。我們將鉀放在冰上，你看這激烈的反應。我演示這些，是為了擴展你對這些東西的認知，如此你或許能知道，環境可以怎樣大大地影響結果。

在示範了以上這些異常激烈的反應之後，下次我們見面時，我會讓你曉得，當我們在一般情況下進行燃燒時，不管是使用蠟燭，路邊的煤氣燈，或是壁爐等等，只要遵守大自然的規則，我們其實不太會遇到甚麼意外或具有危險性的事。

²⁶ 反應為： $2\text{Li}(s) + 2\text{H}_2\text{O}(l) \rightarrow 2\text{LiOH}(aq) + \text{H}_2(g)$