

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

第二章 蠟燭火焰的組成，蠟燭燃燒需要空氣

■ 蠟燭融化成為蠟蒸氣

上回我們講到蠟燭的一般性質和組成，蠟燭內的液體，以及液體如何進入蠟燭的燃燒部位。你曉得，當蠟燭在規律、平穩的空氣中燃燒時，火焰的形狀就像圖上畫的，看起來相當一致，然而火焰的特質是相當引人入勝的。現在我要你注意接下來的事，藉著這些方法，我們可以弄清楚、知道在火焰的某個地方發生了甚麼事——為甚麼會發生？在這過程中它怎麼了；最後，整根蠟燭跑去哪裡了呢？如你所知，蠟燭點燃後如果一直燒得好好的，最後蠟燭會消失，燭臺上一點灰燼的痕跡也沒有——這真是很奇怪的事啊。為了仔細觀察蠟燭，我準備了一些裝置（圖7），看我操作你就知道這些器材怎麼用了。這裡有一根蠟燭；我將把玻璃管的末端插入火焰中央——也就是虎克繪製的圖畫中，顏色較暗的地方，只要在看蠟燭時小心點，燭焰沒有被吹動的話，你隨時都能看到那比較暗的區域。首先，我們就來檢查這比較暗的地方。

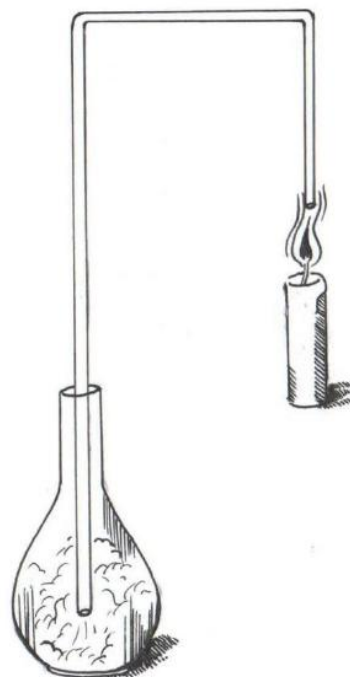


圖 7

現在我把這根玻璃彎管的其中一端插入火焰，你馬上看到有東西從火焰冒出來，經過管子、再從另一端鑽出來；如果我在煙霧冒出的那端放一個燒瓶，收集冒出來的東西並靜置一會兒，你會看到，冒出來的東西慢

慢拉長，然後沿著管子落入燒瓶；如果這東西被直接暴露在開放空間，情況將會很不一樣。煙不只從管子的一端鑽出來，還落到燒瓶底部，好像是種沉重的東西——事實上它的確是。我們發現：蠟燭的蠟形成了蠟「蒸氣」(vapor)——而非「氣體」(gas)。(你一定要知道「氣體」和「蒸氣」的分別：「氣體」是一直處在氣態的；而「蒸氣」在某些條件下會凝結。) 你吹熄蠟燭後聞到的臭味，就是凝結的蠟蒸氣。這和你從火焰外圍收集到的不一樣；為了讓你們更清楚了解，我將製造並點燃蠟蒸氣中的大部分。從一根小小的蠟燭，我們收集到的蠟很少；如果要以科學方法透徹地了解，我們需要大量的蠟，這樣我們才能用各種方法來進行研究。現在安德森先生負責供應熱源，我來呈現這「蒸氣」是甚麼。我將把裝在燒瓶裡的蠟弄熱，因為燭焰內部跟燭蕊周圍的物質都是熱的。(法拉第把一些蠟放進燒瓶，用油燈加熱)。現在，我敢說這已經夠熱了。你看到我放進去的蠟已經變成液體，而且有一點點煙出現。不久就會有蠟蒸氣湧上來。繼續加熱蠟，就能得到更多蠟蒸氣，而且我還可以把蠟蒸氣從燒瓶「倒」出來，倒到平底盤上點火引燃。這的確就是在蠟燭火焰中央取得的蒸氣。讓我們來檢驗看看，在燒瓶裡面的是來自蠟燭中央的蒸氣，它是可燃的。(法拉第朝著充滿煙霧的燒瓶丟入一條點燃的燭蕊)。觀察它的燃燒，這真的是來自蠟燭中間的蒸氣，是它自身的熱製造出來的。這也是你研究蠟燭在燃燒及變化的過程時，首先要考慮的事。現在我把另一根玻璃管小心插入火焰，確保蒸氣會流到管子的另一端；然後，我在另一端點火 (圖 8)，在距離蠟燭這麼遠的地方，也可

以取得蠟燭的火焰。看看它！這不是很棒的實驗嗎？說到供應氣體——喔，我們可以供應蠟燭氣體！你在這裡清楚看見兩種不同的動作——一是蒸氣的「製造」，一是蒸氣的「燃燒」——這兩個動作分別在蠟燭的不同部位同時進行著。

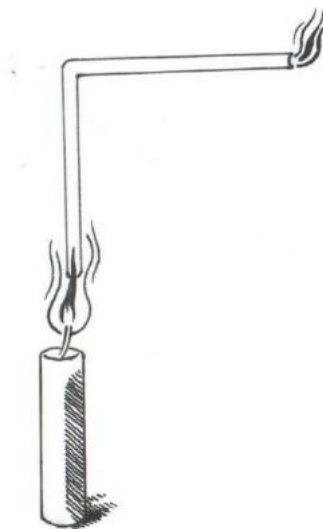


圖 8

■ 火焰上端蠟蒸氣的燃燒

從蠟燭完全燃燒過的部份我們無法取得蠟蒸氣。如果我將管子 (見圖 8) 提高一點，到火焰的上部，那兒蒸氣一被燒光，進入管子的氣體就不再可燃，因為這些氣體已經燃燒過了。那它們是如何進行燃燒的呢？是這樣子的：在火焰中央、燭蕊所在之處有可燃的蠟蒸氣，而火焰外圍有蠟燭燃燒必需的空氣；兩者之間發生劇烈的化學反應，空氣與燃料相互作用，而就在燭光產生的時候，裡面的蒸氣也被消耗殆盡。如果你檢查蠟燭的熱在哪裡，你會發現很有趣的分布狀況。如果我把一張紙靠近燭焰的上方，那麼火焰的熱在哪裡呢？熱不在內部，你看到了嗎？熱

在紙上燒黑的圈上，就在我告訴你的，化學作用發生的地方；雖然我這個實驗不是很嚴謹，但只要實驗沒有受到太多的干擾，紙上都會得到一個燒黑的圈。這個實驗很適合你在家裡做。拿一張紙片，穩定室內空氣，接著讓紙片迅速穿過火焰正中央——（做這個實驗時我不能說話）——然後你會發現，在紙上有兩處燃燒的痕跡，中間的地方只有些許燒焦或完全沒燒到；在你演練過一、兩次，動作很熟練時，你就能好好觀察，找出熱的所在，也就是空氣和燃料混合的地方。

■ 蠟燭燃燒需要空氣

在我們探討這個主題時，這是最重要的：空氣對燃燒作用是不可或缺的；此外，我還得讓你了解，燃燒必須的是新鮮空氣，否則我們的推論和實驗便不完美。這裡有個充滿空氣的罐子，我用罐子蓋住蠟燭，剛開始蠟燭燒得好好的，證明我所言不假。不過，這情況很快就會發生改變。你看，這火焰拉得好高，然後漸漸減弱，最後熄滅。為甚麼火焰熄滅了呢？因為燃燒作用不僅僅需要空氣，這罐子裡一直充滿空氣；火焰燃燒還需要純的、新鮮的空氣。雖然罐子裡滿是空氣，但有些空氣被改變了、有的沒有；罐子裡缺乏足夠的、蠟燭燃燒時必須的新鮮空氣。這些重點是在場的年輕科學家們必須留意的；而且，如果我們更仔細地觀察這種現象，會發現某些推理步驟是非常有趣的。

例如，這是我給你看過的油燈——很適合我們實驗的燈——古老的圓筒心燈。⁶我現

在把它改造得像蠟燭（塞住空氣進入火焰中央的通道）；這裡有棉花吸引油上升，產生錐形的火焰。它的燃燒較為微弱，因為有部分空氣受到限制、進不來。我不讓空氣進到裡面，保留外層火焰，因而使燃燒不很順利。我不讓更多外面的空氣進來，因為燈蕊頗大；如果像圓筒心燈的發明人亞干先生那樣聰明的話，我們從火焰的中心開一條路，讓空氣直通中心，你會看見，它燃燒得比之前漂亮多了。如果我停止供應空氣，請你觀察它如何冒煙；為什麼會這樣冒煙呢？

現在我們來觀察幾個有趣的現象：包括蠟燭的燃燒、蠟燭因為缺乏空氣而熄滅、還有蠟燭的不完全燃燒等等。這是相當有趣的，所以我希望你盡可能地瞭解這些現象。現在我將製造一團大的火焰，因為我們需要一個又大又炫的實例。這裡有個比較大的燭蕊（在一團棉花上燃燒松節油），這些東西和蠟燭一樣。如果燭蕊比較大，就需要供應較多空氣，否則燃燒作用就會不太完全。現在看好了，上升的黑色物質沒入空氣；它是一股規律的氣流。我已經用方法去掉燃燒不完全的地方，以免那些東西干擾你。注意那些飛過火焰的煤灰；因為得不到足夠的空氣，你能從此觀察到所謂的「不完全燃燒」。發生了甚麼事呢？因為有些蠟燭燃燒必須的東西不見了，接著很糟糕的結果就發生了；但我們知道，蠟燭在純粹、適合的空氣中是怎麼燃燒的。剛才我給你看過火焰在紙張留下的燒焦痕跡，我應該也給你看看，在紙張的另一面，蠟燭燃燒一樣產生了煤灰，或者說是木炭或碳。

⁶ 圓筒心燈（Argand lamp）：圓筒心燈於1780年由瑞士科學家亞干（Aimé Argand, 1750-1803）發明，大大改善了當時的油燈照明。

■ 碳粒讓燃燒更為明亮

在我進一演示之前，讓我先向你解釋，這點很關鍵，雖然我用了一根蠟燭演示燃燒的結果；我們必須自問：燃燒作用是否總是經過這種方式呢？或者，火焰還有其它的表現形式？我們很快會發現，的確還有其它形式的火焰，而且非常重要。我認為，呈現出不同形式的火焰的強烈對比，或許是向你們這些年輕人說明這件事的最好方法。這裡有些火藥，你知道火藥燃燒會產生火焰；我們可以中肯地稱之為火焰。它的成分是碳粒和其它物質，這些成分使得火藥燃燒時產生火焰。而這裡有些鐵粉，或者說鐵屑。現在我故意把這兩種東西放在一起燃燒。我會用小研鉢把它們混在一塊。(在我進行這實驗之前，我希望你們之中不會有人因為好玩，在重複這個實驗時受到傷害。如果你小心操作，我們可以善加利用這些材料，但如果一不留神的話，可能會造成嚴重的傷害。)我把火藥放在木頭容器底部，然後和鐵粉混合；混合它們的目的是，要利用火藥點燃鐵屑，讓混合物在空氣中燃燒，如此就可以呈現出「有火焰」與「沒有火焰」這兩種燃燒的差別。這些便是它們的混合物了；當我點燃火藥時，你一定要注意看著，你會發現這裡發生兩種燃燒作用。火藥將燃燒產生火焰，接著鐵屑被點著。鐵屑也會燃燒，但是不產生火焰。它們分別各自地燃燒。(演講者點燃混合物)。火藥的燃燒會產生火焰，不過鐵屑進行的燃燒作用並不一樣。燃燒方式的差異影響燃燒的用途，包括供於照明之用的火焰。當我們用油、氣體或蠟燭來照明時，不同類型的燃燒決定了它們的用途。

火焰有這麼多令人好奇的狀態，需要聰明、機敏的分辨能力來區別各種燃燒的種類。例如，這裡有種很容易燃燒的粉末，由許多不同的粒子組成。這東西叫做石松，裡面每顆粒子都能產生蒸氣和火焰；但要看它們燃燒的話，你得想像它們集合為一股火焰。現在我將升起一團大火，你就能看到它的效果。我們看到的一團火，明顯地是一個個體，但是燃燒時出現的嘈雜的聲音證明了這不是連續或規律的燃燒。這就像是無聲的閃電，還真是蠻像的。(法拉第將玻璃管裡的石松粉吹到火上，並且重覆了兩次。)可這並不是先前我談到的鐵屑燃燒，現在我們回到鐵屑。

假設我拿起一根蠟燭，以肉眼來檢查最亮的地方。那裡有從火焰中得到的黑色粒狀物，你之前已看過很多次了，而現在我打算用不同的方式來取得。我將把蠟燭壁上，因氣流形成的溝槽清乾淨；如果我現在把玻璃管伸進火焰，就像我們之前一個實驗所做的，不過管口比剛剛高一點，只碰到最明亮那部分的上端，你看到結果了。現在管子另一端冒出來的不是剛才的白煙，而是黑煙。喔，它冒出來了，像墨汁一樣的黑煙。這顯然與白煙很不一樣；當我們用火苗去點時會發現點不著，火反而被弄熄了。就像我剛剛所說的，這些粒狀物就是蠟燭的煙；這讓我想到一個蠟燭的古老用處：史衛福特牧師⁷曾經推薦給傭人的娛樂，就是用蠟燭在房間天

⁷ 史衛福特牧師 (Dean Swift, Jonathan Swift, 1667-1745) 愛爾蘭文學家，作品以諷刺挖苦的風格聞名。《格列佛遊記》(Gulliver's Travel) 為其知名作品。史衛福特亦曾從事神職工作，為愛爾蘭都柏林 St. Patrick 大教堂的主持牧師 (Dean)，故法拉第以「Dean Swift」稱之。

花板上寫字。不過，那些黑色物質是甚麼呢？啊，這和蠟燭裡面的碳是一樣的東西。為什麼它從蠟燭裡跑出來了呢？很明顯的是，碳存在蠟燭裡面，否則它就不會出現在這裡了。請你聽清楚了；你或許很難想像，那些在倫敦上空飛揚的煤灰和黑點，就是火焰燃燒的產物。這裡有片石棉心網，火焰過不去，你很快會看見，當我把石棉心網放低，碰到火焰原本很亮的地方，火焰馬上被壓下並且熄滅，然後冒出一團煙。

以下希望你注意：每當物質燃燒，例如被火藥點燃的鐵屑，不一定要處於蒸氣態（無論它變為液態或仍維持固態），它一樣可以大放光明。我刻意利用蠟燭舉出幾個例子，好向你說明這一點；這個結論其實適用於所有物質，無論它們是否正在燃燒——是否放出火焰，只要是固態，它們就會非常明亮。蠟燭火焰就是從這個固態粒子來的。

這裡有條白金線，它不會因為熱而反應。我在火焰中加熱這條金屬線，看它變得有多亮啊！我讓火焰稍微變弱，讓亮度減弱；雖然火焰只給金屬線一點點熱，但你看見了，從火焰來的熱讓白金線變得更加光輝燦爛。這道火焰內含有碳粒，但接下來我要取得一種沒有碳粒的火焰。這個容器裡有一種氣態燃料，這種燃料不含固體粒子；我使用這個材料是因為它燃燒的火焰中沒有固體。但如果我把手上這種固體物質放進這種燃料中，就會產生大量的熱，並且使固體發光發亮。我們用這根管子傳遞這種叫做「氫」的氣體，我們下次碰面時，你就會瞭解了。另外這裡還有一種物質：叫做「氧」，「氫」因為「氧」而燃燒；我們藉由氫和氧燃燒製

造出的熱比從蠟燭得到的更多，但是氫氧混合並不會產生很亮的光。

如果我讓固體物質加入氫氧混合的作用，我們就能製造出強光。如果我把這塊石灰固體——這東西不會燃燒，也不會因為熱而蒸發（也因為它不蒸發，所以總是保持固態，處於加熱的狀態），你很快就可以觀察到：放光的時候發生了甚麼事？我們讓氫和氧接觸，製造出非常強烈的熱；但是這樣的火光很小——這並不是因為缺乏熱，而是因為固態的粒子不夠。我把這塊石灰放入正在氧氣中燃燒的氫氣火焰中，看哪，火焰變得很好亮！石灰的耀眼光芒可以媲美電燈，幾乎等同日光。我這邊還有一塊木炭，它們可以燃燒，也會散發出同樣的光芒，好像蠟燭燃燒一樣。蠟燭火焰裡面的熱分解了蠟蒸氣，釋放出碳粒；被加熱的碳粒上升並放出光芒，最後逸失在空氣中。但是這些燒盡的碳粒離開蠟燭後，不再是碳的形式。它們變成看不見的物質，這個我們以後就會學到。

這個過程不是很美嗎？一塊又黑又髒的木炭變得如此光彩奪目！從此你得到一個結論，就是所有明亮的火焰都含有固體粒子；無論是像蠟燭那樣，在燃燒中製造固體粒子，或像火藥和鐵粉那樣，在燃燒之後產生固體粒子，都帶給了我們輝煌美麗的光芒。

我們再來演示一些實驗（圖 9）。這裡有一塊磷，它燃燒會產生明亮的火焰。很好，現在我們可以推論：磷在燃燒中或是燃燒後都會製造出固體粒子。這是點燃的磷，我用玻璃罩蓋住它，好把所有製造出來的東西關在裡面。這些煙是甚麼樣的東西呢？這些煙

裡面含有磷燃燒產生的粒子。其次，這裡有兩種物質：氯酸鉀和硫化銻。⁸我把這兩種東西混合，待會兒就能用各種方法來點燃它們。為了呈現這個化學反應，我將滴入少許硫酸，馬上它們就會燒起來（演講者用硫酸點燃混合物）。現在從外表來看，你能自己判斷它們燃燒時是否產生固體物質。我已經教導了你一連串的推理，讓你可以回答這個問題：除了飛散的固體粒子之外，這道明亮的火焰裡還有甚麼？

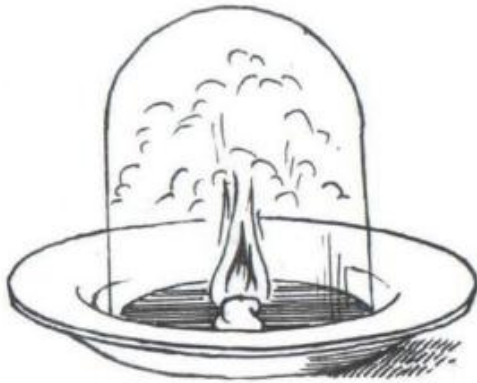


圖 9

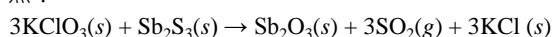
安德森先生在火爐裡面放了個很熱的坩鍋。我打算把一些鋅粉放進坩鍋裡，它們會燒起來、產生火焰，就像火藥的燃燒。我選擇做這個實驗，是因為你在家也能如法炮製。現在我想要你來看看：鋅經過燃燒作用會出現怎樣的結果？喔，它燒起來了——燒得好漂亮，像蠟燭的燃燒一樣。然而那些白煙是甚麼東西呢？那些羊毛般的雲朵又是啥玩意兒？如果你無法上前來看，我們會把它傳到你的面前，這東西就是所謂的「魔法羊

毛」，⁹而坩鍋中也留下了這絨毛般的東西。我會拿一點鋅，再做一些更仔細的實驗。不過你現在就能看到一樣的實驗了。這是一塊鋅；那是火爐（指向氫氣噴射器），然後我們開始燃燒這塊金屬。你看到了，它發光發熱，有燃燒現象，還有燃燒產生的白色物質。所以呢，如果我將氫燃燒的火焰視為蠟燭，用它來點燃鋅，讓你看，像鋅這樣的物質在火焰中如何燃燒；你會發現，只有在燃燒時、當它一直是熱的時候，這種物質才發出如此強烈的光芒。再者，如果我把鋅產生的白色物質放進氫焰——看啊，它多麼光彩炫目！因為它是固體，被燒起來時才能如此光芒四射。

現在我要用和剛才一樣的火焰，從中釋放出碳粒。這裡有些樟腦精，燒起來會產生煙；但如果我用管子把煙裡面的碳粒送進氫的火焰中，你會看到碳粒燃燒起來並大放光明，因為我們在此進行了第二次加熱。你看，這就是二度燃燒的碳粒。你只要拿一張紙擺在後面，就能看到這些碳粒；它們於火焰中產生，被燃燒產生的熱點燃，而當它們這樣燃燒時，便放出亮光。如果碳粒沒有被分離出來，就不會產生這個亮光。燃燒煤氣的火焰會放出亮光，也是因為在燃燒作用中，碳粒被預先分離開來的緣故，這些碳粒和蠟燭裡面的碳粒是一樣的。

我可以輕易地改變這種燃燒方式。舉例來說吧，這是煤氣燃燒所產生的火焰。如果我注入很多的空氣到火焰中，使得碳粒在還

⁸ 硫化銻是火柴和煙火中的成分，和氯酸鉀反應會放出光和熱：



⁹ 魔法羊毛 (philosopher's wool) 為煉金術士儀式中的一部分，將鋅燃燒後得到毛茸茸的氧化鋅，氧化鋅看起來就像羊毛一般。

沒釋放之前就完全燃燒，此時的燃燒就不會有亮光。我可以這樣做：我把鐵網放在煤氣噴嘴上方，然後在鐵網上方點火。煤氣在鐵網上方燒起來了，我們看到了火焰，但這火焰沒有光芒。因為煤氣在燃燒前就已經混合了足夠的空氣；而如果我把鐵網拿高一點，你會看到煤氣噴嘴和鐵網之間沒有火焰。氣體裡原有很多的碳粒；但在燃燒之前，空氣就碰到碳粒並混在一起了，因而使得火焰呈現淡藍色。此外，如果我朝著明亮的煤氣火焰吹氣，使得碳粒在尚未到達放光的位置之前就被燒完，火焰也會變成藍色（法拉第對著煤氣燈送氣，演示他所說的現象）。為什麼在我向煤氣燈的火焰送氣之後，沒有產生亮光呢？唯一的理由便是因為碳粒在從煤氣中分離，被釋放到火焰之前，它就接觸到足夠的空氣而燒光了。燃燒時能否產生亮光的關鍵便在於，固體粒子有沒有在煤氣完全燃燒之前被分離出來。

■ 蠟燭燃燒的產物

你發現有些煤氣燃燒的產物很像蠟燭燃燒的產物，其中有一部分可能被認為是碳，或煤灰；那些碳之後進行燃燒，又產生了其它產物；這讓我們很想弄清楚，後來的這些產物是甚麼？我們已經證明有些東西跑走了；我希望你能了解，其中有多少產物是上升並且進入空氣中的？為了這個目的，我們將進行較大規模的燃燒作用。藉著蠟燭上升的熱氣和兩、三個實驗，將讓你看到上升的氣流；但為了給你這些上升物質「量」方面的概念，我將試著把一些燃燒作用的產物封存起來。為此，我在這裡用上你們男孩子玩的熱氣球（圖 10）；熱氣球只是用來衡量燃

燒結果的手段；我會用相當簡單、合用的方法來製造火焰。我們這麼說吧，底下的平盤就像是蠟燭的「凹槽」，裝在裡面的液體就是燃油，接著我把煙囪放上去；這樣做會比讓氣體隨處亂飄要來的有效。安德森先生現在會點燃液體，而就在煙囪頂端，我們會得到燃燒的產物。一般而言，這根管子上面的東西，和你從蠟燭燃燒得到的東西一模一樣；可是這次燃燒的火焰並不明亮，因為我們使用的物質的含碳量比較少。

我要把熱氣球放上去了——這可不是要表演，因為這不是今天的目的——而是要讓你看看，那些從蠟燭升起的產物，當它們在這裡、從火爐裡上升時，它們的動作產生怎樣的影響。（熱氣球蓋住煙囪，裡面馬上充滿了氣體。）喔！你看它不由自主地上昇了！但我們不能讓它飄起來，因為它飛起來後可能碰到天花板上的煤氣燈，那就麻煩了。（法拉第請人關掉煤氣燈，然後放手讓熱氣球上昇。）這不是讓你親眼看到了嗎，大量的物質被釋放出來。（用一根大玻璃管圈住蠟燭）現在蠟燭的產物正通過這根管子，你就會看到玻璃變得不透明。我想再拿一根蠟燭，把它放在玻璃罐底下，在另一邊也點燃一根蠟燭，讓你看看發生了甚麼事？你看看，玻璃罐的壁變成霧濛濛的，燭光也變得微弱而黯淡。你曉得，就是這物質，使燭光黯淡；也同樣是這東西，使玻璃變得霧濛濛。你回家後拿一根暴露在冷空氣中的湯匙，把它提在蠟燭上方——小心別把湯匙燻黑——你會發現湯匙變成霧霧的，就像玻璃罐那樣。如果你有銀盤或其它銀製品，會得到更好的實驗效果。現在，為了讓你持續思考，

到我們下次見面；我先透露，是「水」造成了霧濛濛的效果。下次見面時我會演示給你看，我們可以輕易地製造出液態的水。

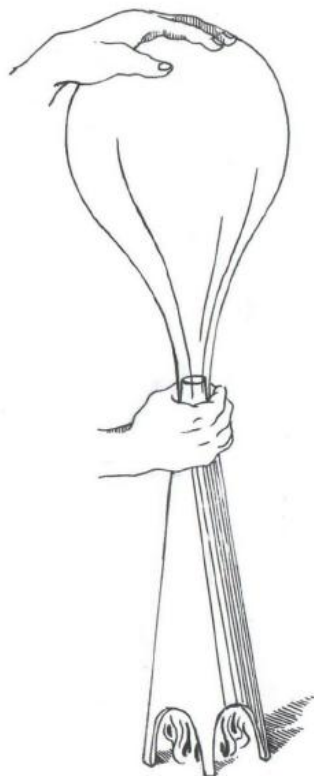


圖 10