

質量守恆定律

——高中化學基本六定律之一

蘇賢錫

國立臺灣師範大學物理系

一、前言

質量守恆定律是自然科學的許多定律中最基本的定律。今天，由我們的眼光來看，其內容是非常明顯的，雖然如此，這定律的發現，其由來並不簡單。

往昔的人認為，化學反應時一部分質量以熱的形態而消失。事實上，發現質量守恆定律的拉本澤，連他自己也認為熱是一種物質，而把它列入元素表中。

拉瓦錫的質量守恆定律，給燃燒理論下了最後的結論，他明確指出，東西燃燒時的反應是，該東西與空氣中的氧發生化合的現象。至此，燃素說終告一命嗚呼。

藍多特以極精密的實驗來確認質量守恆定律後，愛因斯坦緊接著發表質量與能量等值的關係。換言之，質量守恆定律與能量守恆定律，由愛因斯坦來使其合而為一。

如此，我們順利形成更加統一的自然

形象。

二、凡赫芒的想法

假設把秤量好的土壤裝入秤量好的花盆中，播了牽牛花的種籽，不久後就發芽，長出嫩葉，牽牛花逐漸生長，伸出蔓兒，然後開花，等到充分發育以後，把牽牛花拔出來，將留下來的花盆與土壤的重量秤秤看。附著在根部的些許土壤如果不去計較，其重量大概與當初秤量的相差不多。

然而，牽牛花就不同了，與種籽的質量相較，生長後的牽牛花，其質量變成好幾百倍。

且說，牽牛花發育期間，我們供應的只是水而已。因此，牽牛花所增加的質量，完全是由水來造成的。所以一切物質均由水而成。換言之，「萬物皆以水為元素而組成」。

各位讀者認為這種辯論怎樣？各位認為很有道理，抑或認為有點問題？不錯，確實有好多問題。最大的缺點，可能是在於沒有考慮到氣體。牽牛花的質量增加，其主要原因是光合作用所造成的纖維素使植物變大，而植物內又含有大量水份的緣故。除水而外，有關光合作用的主要物質——二氧化碳，沒有考慮到二氧化碳這物質就有問題了。

17世紀初葉，法蘭德斯（Flanders，即現在的比利時）的學者凡赫芒（Jan Baptista van Helmont, 1577-1644）根據自己的觀察，主張「水是萬物的元素」。他把他自己的觀察敘述如下。

「把乾土壤200磅（約90公斤）裝入花盆中，再插入大約5磅重的柳枝，然後僅僅供以水，栽培了5年之久，柳樹生長得綠森森，其重量高達167磅，在這段時間，特別注意防止土壤散失，所以5年後土壤只減少2盎斯（約55公克）。換言之，162磅的植物由水來形成了。」

凡赫芒的解釋，今天任何人都會發覺有問題，到處都是缺點。然而，筆者不是要以這件事實為例來指出往昔的人是如何的幼稚。其實，筆者的意思完全相反。

在考慮物質的變化時，不但必須考慮到外表上的變化，而且也要考慮到質量的變化。這個道理，凡赫芒顯然完全明白了。這個道理的重要性，在他以前的人，沒有人比他認識得更清楚。因此，凡赫芒與

這時代的學者們所做的研究工作，可以說為了即將來臨的18世紀末葉「化學革命」做好鋪路工作。

三、燃素說

東西的燃燒，要理解這種燃燒現象的過程，這可能是自從人類開始用火以來的最重要問題。

有關物質及其變化的想法，從古代到中世紀，一直控制其想法的是，古代希臘大哲學家亞里斯多德（Aristotle, 384 B.C-322 B.C）的「四元素說」。亞里斯多德主張，「一切物質均由火、空氣、水、土這四種元素所組成」。依照這種看法，凡能燃燒的東西，都或多或少含有「火元素」，在適當條件之下，火元素被釋放出來時，東西就燃燒了。

從17世紀末葉到18世紀初葉，有兩位德國人更使這種想法發揚光大。他們是化學家貝哈（Johann Joachim Becher, 1635-1682）與醫學家史達耳（Georg Eanst Stahl, 1660-1734），包含在物質中而能支持燃燒的元素，史達耳管它叫做「燃素（phlogiston）」。

木頭富於燃素，所以容易燃燒，火焰與煙凶猛冒出時，燃素就被釋放出來。燃燒之後留下來的灰，便是燃素被放出來後的「空殼」。

然而，在空氣中加熱金屬（例如水銀

或錫)時所發生的變化,稍微不同於木頭燃燒時的變化。水銀或錫確實發生變化了,可是,留下來的東西(所謂金屬灰)比原來的金屬還要重。

假如燃燒現象是燃素的釋放,則金屬燃燒後留下來的金屬灰質量比原來金屬為大這件事實,應該怎樣說明?雖然凡赫芒注意到質量的變化,但是當時的學者對質量的問題,幾乎沒有特別注意。甚至有人認為燃素具有負的質量。

四、拉瓦錫的想法

法國化學家拉瓦錫(Antoine Lauvent Lavoisier, 1743-1794)一開始從事研究工作時,就知道正確測定質量的重要性。在他以前的人,認為水能變成土。其證據之一是,在玻璃容器中,把水加熱好幾天後,便有少量固體沈澱下來。起初,拉瓦錫也以為這種想法是對的。

為了避免水蒸氣逸散,他用密閉玻璃容器來把水加熱 101 天,沈澱確實出現了。然而,水的質量沒有發生變化,而所產生的沈澱,其質量恰好等於容器減少的質量。所產生的沈澱,原來不是水變成土,而是被熱水浸蝕脫落的玻璃。

透過這種經驗,拉瓦錫學到,不但要觀察可見現象,而且要靠準確的測量,始能得到正確的理論。

關於燃燒現象的研究,拉瓦錫也採取

同樣方法。他把一定量的空氣與金屬(例如錫或水銀)裝入密閉容器中來加熱。結果金屬表面上產生了一層金屬灰。

加熱後,他測定整個容器(包括玻璃容器,金屬、金屬灰、空氣等)的質量。他發現其質量與加熱前的質量完全相等。其次,他測定金屬的質量。一部分金屬變成金屬灰而質量增加了。因此應該有某物失去質量才對。他想,唯一有可能性的是空氣。

部分空氣因燃燒而消失,這件事他有證據可以證明。他一打開密閉容器,空氣就迅速跑進去了。

如此,拉瓦錫證明,從金屬變化到金屬灰的過程,不是金屬失去燃素,而是部分空氣附加在金屬上。

當時精鍊金屬的方法是,把鑽石與木炭一起加熱到相當的高溫。拉瓦錫的說明是,「鑽石是金屬灰,木炭搶去鑽石中的氣體而變成二氧化碳,結果留下金屬了」。

反之,擁護燃素說的學者認為,精鍊就是燃素從木炭移到金屬的過程。

就同一現象而言,拉瓦錫的說明與燃素說是迥然不同的兩種解釋,根據拉瓦錫,燃燒是燃燒物與氣體的結合,而依照燃素學派,燃燒是燃燒物放出燃素的現象。

根據拉瓦錫的想法,燃燒與精鍊時的質量變化,均能說明清楚。金屬灰的質量比原來的金屬為大,其增加量等於所附加的空氣質量。木頭獲得部分空氣而燃燒,

但所生成的物質是氣體。會逃逸掉。因此，看來質量似乎不增加，事實上，灰比原來的木頭為輕。然而，若在密閉容器內燃燒木頭，則由於所產生的氣體留在容器內，燃燒後剩下來的物質之總質量，應該等於當初的木頭與空氣的質量才對。

五、質量守恆定律

做過各種實驗之後，拉瓦錫開始認為，如果就參與化學反應的全部物質與全部生成物而言，質量絕對不會發生變化。

於是，他把這想法整理成為「質量守恆定律」，主張「質量不能創造也不能消失，只是從一種物質變成其他物質而已」。

本來拉瓦錫主張物質不會消失。因此，這定律有時叫做「物質不滅定律」。或「質量不滅定律」。

想到質量守恆定律的，拉瓦錫不是第一個人，與拉瓦錫大約同時代的英國化學家及物理學家卜拉克（Joseph Black，1728-1799，二氧化碳的發現者）與加文狄希（Honry Cavendish，1731-1810，氫的發現者），雖然沒有明白指出，卻使用了質量守恆的概念。

更早時期，俄國自然科學的始祖羅莫諾索夫（Mikhail Vasilievich Lomonosov，1711-1765）曾經假設，一種物質獲得質量時，其他物質必須失去等量的質量，1740年代，在研究燃燒現象時，他指

出，生成物的質量之增加，是由於從空氣搶來「某種東西」的緣故。他也不相信燃素說。

六、拉瓦錫的實驗

1774年11月11日，拉瓦錫在法國研究院（French Academy）發表其論文，現在依照這篇論文，簡單介紹他的實驗如下。這篇論文的目的是要闡明燃燒現象，他的主張是，金屬因燃燒而產生金屬灰，是因為金屬與部分空氣化合，而不是因為金屬失去燃素。

實驗本身極其單純，可是其中出現現在完全不用的好幾個單位，所以下面將其換成現行的單位來說明。

(1) 在體積大約 54 cm^3 ，而質量為 100463 g 的曲頸瓶（retort）內，裝入經過正確稱量的錫 15.2960 g 。

(2) 加熱到錫開始熔解時，在火上封閉曲頸瓶口，在這步驟中，曲頸瓶內的部分空氣被趕出，免得發生爆炸。這時，曲頸瓶與錫的質量和是 25.3236 g ，因此，封閉前的加熱，趕出了 0.0187 g 的空氣。

(3) 加熱曲頸瓶，直到錫熔解為止。這時，錫表面的光輝消失，產生黑色粉末（氧化錫）。繼續加熱到不再變化後予以冷卻。再測定其質量，得 25.3245 g ，加熱前後的差額是 0.0009 g ，可視作誤差而忽視它。

(4) 其次，打開曲頸瓶，測定總質量，打開曲頸瓶時，空氣跑進去，變成了 25.3524 g，質量增加了 0.0101 g。

(5) 另一方面，蒐集錫與金屬灰，測定其質量，得 15.3064 g 與起初相較，增加了 0.0104 g。

換言之，加熱期間附加在錫上的空氣質量 (0.0101 g)，與金屬質量的增加 (0.0104 g)，互相一致。0.0003 g 的差額，是在實驗誤差的範圍內。

此外，封閉曲頸瓶時，瓶內有空氣 0.0509 g 左右，所以因加熱而被金屬所吸收的空氣，是全部的大約 1/5。

拉瓦錫在這篇論文中指出，他使用的天平是特製的，是世界上最準確的天平。

如此，以質量守恆定律為前提，拉瓦錫順利說明金屬的燃燒現象。

七、簡易驗證實驗

今天，為了驗證質量守恆定律，究竟有什麼實驗？

(a) 天平上的化學反應

實驗器材：

錐形燒杯

玻璃試管

硝酸銀水溶液

氯化鈉水溶液

雙盤天平

實驗步驟：

裝有氯化鈉水溶液的燒杯中，放入裝有硝酸銀水溶液的試管，封閉燒杯口後稱其總質量（見圖 1）。

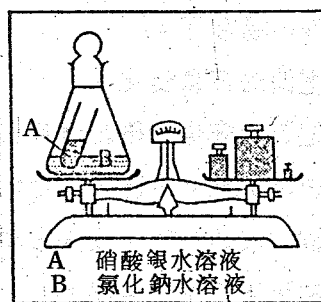


圖 1

把硝酸銀水溶液倒入氯化鈉水溶液中（試管留在燒杯內），使其完成下列化學反應：



氯化銀 (AgCl) 沈澱的造成，可以證明反應已經發生。這時，反應前後的總質量，應該不會發生變化才對。

這種實驗，只要有天平，任何人都能試試看。要混合兩種液體時，如果從燒杯中取出試管，則管底的水會滴下來而質量發生損失，實驗就被破壞，最好是杯口保持封閉，小心傾斜燒杯來使兩種液體混合在一起。

圖 1 中的天平是雙盤天平 (Roberval's balance)，俗稱上皿天平，是中學理化實驗室中常見的器材之一。但是，這種天平的精確度只有 0.01 g 左右，比拉瓦錫所用的天平還要差。這類實驗的價值，全賴天平的精確度，最好是使用精確度 0.01 mg 左右的直接讀數天平 (di-

rect reading balance)，俗稱電動天平，只有一盤。與精確度相差不多的化學天平（chemical balance）比較起來，電動天平的操作容易多了。

(b) 乾電池的質量變化

我們把質量守恒定律當做自明之理來接受，從未懷疑過。因此，混合硝酸銀溶液與氯化鈉溶液的實驗，或許大家覺得這是當然的結果，而感到索然。

因此，現在再來試試看，乾電池使用以後，其質量是否保持一定數值？乾電池內所發生的反應比較複雜。

實驗步驟：

(1) 把乾電池，小型電筒（penlight）與乾燥劑一起放入乾燥器（desiccator）內（蓋子有螺紋的空咖啡瓶也可以）。放置一天後，迅速測定乾電池的質量。

(2) 把乾電池裝入小型電筒來點亮，又放進乾燥器內（見圖2）。

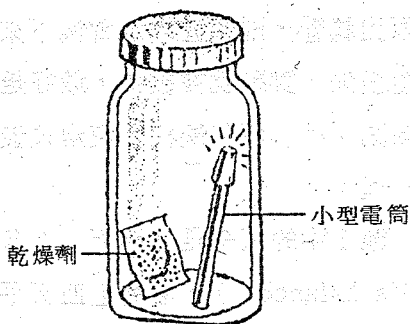


圖2

(3) 燈光顯著減弱時，把電筒內的乾電池取出來，迅速測定其質量。

想一想：

(1) 伴隨放電所產生的化學反應，有

沒有使質量發生變化？若有，其原因是什麼？

(2) 乾電池內在進行怎樣的化學反應？

(3) 裝有乾電池的小型電筒，其質量當然也可以測出。那一種測法比較適合本實驗的目的？

質量的變化，縱然發生，也只是些許，因此，最好是儘量挑選小東西，用適當天平來測定其質量。

利用能夠充電的電池，看看充電過程會不會引起質量的變化。

八、燃燒理論的確立

空氣與金屬及木頭化合，分別生成金屬灰與氣體。可是，只有1/5左右的空氣參與化合。起初，拉瓦錫不能完滿說明，為什麼只有1/5的空氣參與化合。

然而，英國神學家，哲學家及化學家普里斯特利（Joseph Priestley, 1733-1804）發現，把水銀的金屬灰（氧化汞 HgO ）加熱時所得的氣體，這才是支持燃燒的氣體，也就是附加在燃燒物的氣體。把剛剛熄了火的蠟燭放進這氣體中，蠟燭就燃起火焰，把鼯鼠放入裝著這種氣體的密閉容器內，鼯鼠就可以比在普通空氣中活得更久。

由於普里斯特利相信燃素說，他認為他所發現的這種氣體是從空氣中除去燃素的東西，遂把這氣體命名為「脫燃素空氣」。

(dephlogisticated air)」。這是完全不含燃素的氣體，可燃物在這氣體中應該能夠充分放出燃素才對。

拉瓦錫以為空氣含有大約 $1/5$ 的「脫燃素空氣」，剩餘的 $4/5$ 是蘇格蘭醫師、植物學家及化學家拉塞福 (Daniel Rutherford , 1749-1819) 所發現的「燃素化空氣 (phlogisticated air)」。拉塞福把老鼠養在裝著普通空氣的密閉容器中，等到老鼠死後，更在其中繼續燃燒蠟燭或磷，再使最後剩下來的氣體通過鹼性水溶液。

這樣得到的氣體，老鼠在這氣體中再也無法生存，蠟燭也不能燃燒。拉塞福是燃素說的擁護者，他認為這種空氣是由燃素所飽和的，所以在這種空氣中，不能使任何物質燃燒起來放出燃素。於是，他把這氣體命名為「燃素化空氣」。

拉瓦錫認為，「脫燃素空氣」或「燃素化空氣」這種名詞不太妥當，而分別重新命名為 oxygène (英文 oxygen) 與 azote 。Oxygène (法文) 的意義是「製酸的東西」，而這名詞現在仍在沿用。azote 是取自希臘字 azōē (沒有生命)，而這名詞現在只在法國境內使用，今天一般使用的名詞是 nitrogen。甯說，中文分別是氧與氮。

假設空氣是 1 體積的氧與 4 體積的氮之混合物，則有關燃燒的以往實驗結果，悉數可以順利說明清楚。拉瓦錫的新理論

，使化學完全合理化。像燃素這種神秘的東西，終於消失了。此後，只有能夠測定其質量或體積的物質，才能成為化學家的研究對象。

由拉瓦錫創始的這項化學改革，後人稱為「化學革命」。事實上，如果化學要成為一門現代學門，這是必須通過的一關。於是，拉瓦錫被稱為「近代化學之父」。

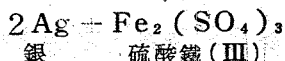
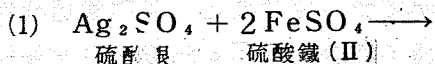
九、藍多特的實驗

拉瓦錫的實驗富於說服力，極其成功。雖然如此，仍有 1 mg 左右的出入。後來的化學家都在懷疑，要是質量發生極其微量的變化，拉瓦錫所用的天平是否仍然能夠發覺出來？

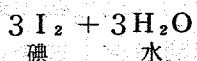
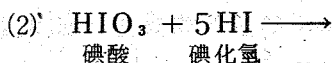
事實上，化學家發現，就某些反應而言，質量的變化可達 0.2 到 0.3 mg。拉瓦錫死後 100 年以上的 19 世紀末葉到 20 世紀初葉，學者們仍然依據這些報告來討論質量守恆定律的真實性。

為了平息這些懷疑，德國化學家藍多特 (Hans Heinrich Landolt , 1831-1910) 製作了新的精密天平，其誤差的最大值是 0.03 mg (= 0.00003 g)。如果在化學反應中，質量發生這數值以上的變化，那就不可能是實驗誤差了。

準備了 10 年以上之後，1906 年他在多數嘗試的溶液反應中，發現下列兩種反應，質量減少得相當多。



9次實驗中，質量減少0.068 mg到0.199 mg



9次實驗中，質量減少0.047 mg到0.177 mg。

除此而外，另外還有超出實驗誤差的反應，只是其質量變化極微而已。質量增加時，其增量均為甚小。54次實驗中，質量增加的有12次，其增量是0.002~0.019 mg。

質量發生變化的理由，藍多特的說明是，大概是像放射性元素那樣，分子崩潰而一部分原子脫離，穿透容器壁而逃逸了。

雖然如此，藍多特希望精益求精。前面所觀察的化學反應，質量的減少僅僅發生在發熱反應時，因此他認為，可能是附著在玻璃器具表面的微量水份，因受熱而蒸發的緣故。

於是，他仔細測定容器的質量，作為修正之用。結果，48次實驗的質量變化值，幾乎都在實驗誤差的範圍內了。1908年，藍多特宣稱，他所研究的15種化學反應中，質量全部未曾發生變化。

現在，由於藍多特的這些實驗，拉瓦錫的「質量守恆定律」終於獲得決定性的

證實。然而，這項最後結論，在藍多特生前未被發表，而是他死後才公布。

藍多特之前，尋求精確天平的人，並不是沒有。可是，專門為了證明質量守恆定律而製作天平來測定的，藍多特是第一個人。

不用說，藍多特的研究，其成功與否，全靠天平的精確度。為了尋找符合這種目的的天平，他走遍了德國、英國與法國。最後，他委託維也納的天平業者劉布列希特，製作了當時世界上最精密的天平。

精密天平置於空氣經過調節的房間，把待測物放在天平盤上後，測定者不必靠近天平，一切操作（例如砝碼的增減）都能在離開了m處以遙控方式來進行。刻度則用望遠鏡來觀測。此外，為了把交通所引起的振動減少到最小程度，測定一律在深夜實施。

經過27,000次的測定之後，藍多特自己也確認，這天平的精確度實在非凡。化學要成為一種學問來發展，在這過程中，往往需要像藍多特這樣辛苦工作的人。

十、愛因斯坦公式

英國數學家、物理學家及天文學家牛頓（Sir Isaac Newton, 1642-1727）開發的物理學，領導了17世紀到19世紀的自然科學。藍多特在牛頓物理學的範圍內證明質量守恆定律時，德裔美國理論

物理學家愛因斯坦 (Albert Einstein , 1879-1955) 則根據其相對論來提出他對質量的新見解。

1905 年，愛因斯坦指出，質量與能量是等值的。一定能量與質量之間的關係，可由下列「愛因斯坦公式 (Einstein's equation)」來表示：

$$E = mc^2$$

式中，E 是能量 (單位是焦耳 J ， $4.18 \text{ J} = 1 \text{ cal}$) ，m 是質量 (kg) 而 c 是真空中光速 ($2.9979 \times 10^8 \text{ m/s}$) 。

根據質量守恆定律，物質不能創造，也不能消失，只是某物質變成其他形態的物質而已。然而，根據愛因斯坦的主張，可能使物質變成能量，也可能使能量變成物質。因能量 E 的變換而取得的物質質量 m，或能夠變成能量 E 的物質之質量 m，均遵循愛因斯坦公式。下面舉出兩個實例。

組成原子核的質子與中子，其質量經常使用 ^{12}C 原子 (即質量數 12 的碳，已被選定為原子量的基準) 的 $1/12$ 做單位，叫做「原子質量單位 (atomic mass unit)」，以符號 u 來表示。 $1 \text{ u} = 1.6606 \times 10^{-24} \text{ g}$ 。

電子、質子與中子，其質量以原子質量單位表示如下：

	符號	質量 (u)
電子	${}_{-1}^0e$	0.000549
質子	${}_1^1p$	1.007276
中子	${}_0^1n$	1.008665

原子核的質量，較其組成子 (即質子與中子) 的質量總和為小。原子核的組成子，其質量總和減去原子核的質量，這差額叫做「質量虧損 (mass defect)」。

由質子與中子來生成穩定原子核時，可以放出龐大的能量，所以這時所減少的質量足夠大，能夠探測出來。質量虧損可以說是以質量來表示的原子核「束縛能 (binding energy)」。

氦原子有 2 個電子，而其原子核由 2 個質子與 2 個中子所組成，所以其組份的總質量是

$$1.007276 \text{ u} \times 2 + 1.008665 \text{ u} \times 2 + 0.000549 \text{ u} \times 2 = 4.03298 \text{ u}$$

然而，氦原子 ${}^4_2\text{He}$ 的質量是 4.00260 u 。因此，氦原子的質量虧損是

$$4.03298 \text{ u} - 4.00260 \text{ u} = 0.03038 \text{ u}$$

把它換算成 1 莫耳的氦，便得 652,136 仟卡 / 莫耳。普通的化合能都是 100 仟卡 / 莫耳左右，可見這束縛能是多麼龐大。

核分裂與核融合時，質量也會減少。鈾 1 莫耳的核分裂，可以產生大約 4.5×10^9 仟卡的熱量。這數值與同重的煤燃燒時的發熱量相較，大約等於 200 萬倍。雖然鈾的分裂產生這麼多的熱量，但其質量頂多減少 0.1 % 而已。

輕原子核經過核融合而成為較重原子核時，質量會減少更多。4 個氫原子核造成 1 個氦原子核，這反應就是太陽能的主源。這時，其質量大約減少 0.7 %，而變

成能量。

核融合炸彈（氫彈）所利用的反應之一，是，氘（ ${}^2_1\text{H}$ ）與氚（ ${}^3_1\text{H}$ ）的融合反應

$${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \longrightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$$

這時，其質量的 0.4% 變成能量。

參考資料

1. 安田德太郎編譯：「大自然科學史」，共 12 卷，（三省堂）。2001。
2. 鎌谷親善等譯：「現代化學史」，（みすず書房）。
3. 久保昌二：「化學史」，（白水社）。