

簡易焰色試驗法的演示

邱智宏
省立三重高中

焰色試驗法是利用熱能將金屬原子或金屬化合物中的電子激發，使其由基態躍遷到激發態，由於電子在激發態不穩定，只停留約 10^{-8} 秒，當電子再回復至基態時，能量以光波的形式釋出，若其波長在 400-700nm 時，便能直接由肉眼觀察其顏色。由於各種原子或分子的能階不同，顯現的顏色自然不同，因此能藉焰色以分辨多種不同的金屬元素。

現行高中化學課本第三冊相關的焰色實驗，使用鉑絲沾取金屬氯化物的水溶液在本生燈上加熱，以觀察不同金屬離子所顯現的顏色，由於水溶液氯化化的速率較慢、本生燈的操作較麻煩及火焰的體積太小等因素，使得實驗的效果並不理想。臺灣師大化學研究所亦曾於教育部的研究專案中進行探討，獲得不錯的結果。現採其精華並以市售化妝用的噴霧器及攜帶型丁烷噴燈等取代課本的實驗器材，能在不遮光的環境下得到清楚的焰色，在課堂中進行演示實驗，對提昇教學效果有相當的助益。

一、實驗原理

焰色試驗法可以用來鑑別不同的金屬元素，尤其是鹼金屬族及鹼土金屬族。將含有金屬離子的溶液經過霧化(aerosol)後，噴入高溫火焰，接著進行去溶劑(desolvation)、氯化(vaporization)、原子化(atomization)及激發(excitation)等一連串過程，使金屬原子因吸收熱能，電子組態由基態(ground state)躍遷至激發狀態(excited state)，而激發態的壽命很短，立刻又躍遷回基態，將多餘的能量以光的形式釋出來($\Delta E=h\nu$)。其中有部分的光波能夠由肉眼鑑別，有些則須借助儀器。由於不同的原子電子能階不同，其高低受到(1)核電荷、(2)電子與原子核間的距離、(3)遮蔽效應等因素的影響。各元素受此三種因素的影響情況不一樣，導致釋放光的波長也不相同，因此可藉由各元素特殊波長的發光，分辨不同的金屬元素。

焰色法效果的好壞和焰色強度有直接的關係，而釋放特定光線的強度(intensity)和下列因素有關：(1)金屬離子在溶液中的濃度、(2)原子在火焰中被激發的速率、(3)溶液引進火焰的速率、(4)火焰的溫度、(5)火焰的成份。因為光線的強度和待測物濃度成正比，可做為焰色法定量的依據。另外火焰的溫度是影響光線強度的重要因素，通常增高火焰的溫度，最能增強光線的強度，但是對於特別容易離子化的元素，例如鋰、鈉、鉀等則不適用。因

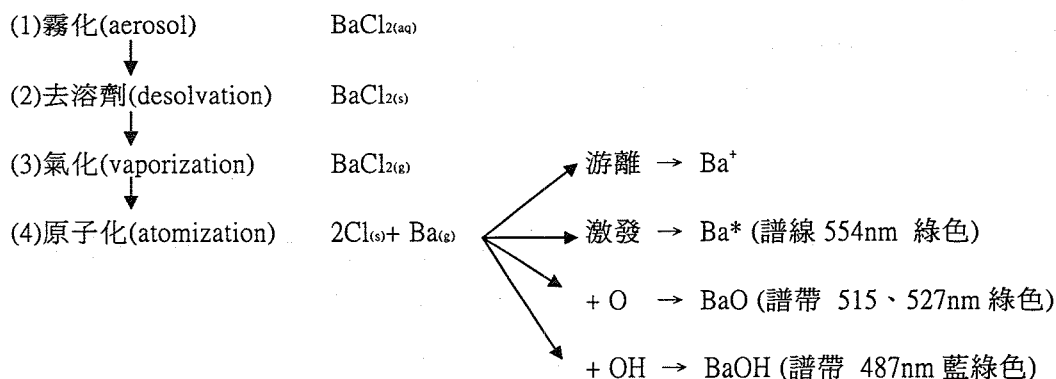
為這些元素加熱太強，則將外層電子移至更高的能階，甚至完全脫離成為離子狀態，反而使光線的強度減弱。儘管如此對多數的金屬，增高火焰便能增高光線的強度，其關係式如下：

$$S = \frac{N_1 \Delta E}{\tau} = \frac{N_0 \Delta E}{\tau} \frac{g_1}{g_2} e^{-\frac{\Delta E}{kT}} \quad (1)$$

其中 S 為發射譜線的強度； N_1 為已激發的原子個數； N_0 為未激發的原子個數； τ 為激發態原子的生命期； ΔE 為激發所需的能量 ($\Delta E = E_1 - E_0$)； g_1/g_2 為基態和激發態的統計加權比例 (ratio of the statistical weights of the ground state and excited state)；T 為火焰的絕對溫度；k 為波次曼常數。由式中可看出發射譜線的強度(S)和已激發的原子個數(N_1)或和 $N_0 e^{-\Delta E/kT}$ 成正比，顯然 T 愈高時，被激發的原子個數愈多，光線的強度愈大。同時因為 $\Delta E = h\nu = hc/\lambda$ ，當 λ 愈小時 ΔE 愈大， $e^{-\Delta E/kT}$ 愈小，所以 S 變小。因此發射的譜線若在波長很短的部分，強度均很弱，例如過渡元素鋅、鎘、汞等。另外溶劑的使用也會影響 S 的大小，因為金屬化合物原子化的過程為吸熱，溶劑若為水，則其在火焰中為吸熱，使得原子化的速率變慢，原子被激發的速率也隨之降低。相反地若使用有機溶劑，則其在火焰中為放熱，使原子化的速率加快，S 因而增強。

元素在火焰中產生原子譜線的同時，也會和由火焰燃料中產生的成分如 O、OH 等，產生金屬氧化物或氫氧化物等的化合物，這些分子經由火焰激發產生分子光譜，這些光譜為帶狀(band)而非線狀(line)。雖然這些現象在鑑別特殊譜線時會產生某種程度的干擾，但由於強度較弱影響不大。另外在分別檢測 Ba、Ca、Sr、Mn 等元素時，因各別產生的 BaOH、CaOH、SrOH、MnOH 或 CaO 等的帶狀光譜，其所產生的特徵譜帶，顯然也有助於鑑別金屬元素的功能。

現以氯化鋇的溶液為例，將焰色試驗法的實際顯色過程做一說明：



上述過程如果由精密儀器偵測，所得的光譜會有多處譜線及譜帶出現，若用肉眼觀察

則火焰顯現出綠色。以下的實驗設計乃根據上述原理，改進現行課本的做法，能得到不錯的演示效果。

二、儀器及試藥

丁烷噴燈一台、50mL 噴霧器 4 個，50 mL 的燒杯 4 個、濾紙 4 張，漏斗 1 個、玻棒 1 支、氯化鉀、氯化鈉、氯化鋇及氯化鋇晶體各數克，乙醇 250 mL。

三、實驗步驟

1. 配製氯化鉀、氯化鈉、氯化鋇及氯化鋇的乙醇溶液各 25mL。配製氯化鉀的飽和水溶液 10 mL，取該溶液 3 mL 及乙醇 30 mL 置入噴霧器中並混合均勻。氯化鈉、氯化鋇及氯化鋇的乙醇溶液作法亦相同。
2. 旋開噴燈的開關後，啟動點火按鈕點焰瓦斯，調整空氣量至焰色呈淡藍至無色。利用噴霧器將乙醇溶液的微細顆粒噴向火焰的頂端。火焰噴出的方向必須和噴霧的方向垂直如圖一，避免將火焰弄熄。
3. 觀察噴霧前後火焰的顏色，並比較不同金屬化合物所顯現的特有顏色。本演示實驗不須遮光設備，但在有遮光的環境下進行，效果更佳

四、實驗結果及討論

上述的實驗結果如表一所示，在演示時能得到清楚而較大體積的焰色相當壯觀，很適合大場所的演示。本實驗所改進的部分有下列各項：(1)攜帶型丁烷噴燈使用起來輕巧方便而且安全，不限定在實驗室內演示。噴燈以丁烷為燃料，整體價格比本生燈、瓦斯筒便宜很多，火焰的溫度也可高達 1300℃。(2)使用乙醇當溶劑，由於乙醇可燃燒並大量放熱使氣化、原子化、激發電子等過程的速率均加快，使欲觀察光線的強度增高。(3)雖然金屬化合物在乙醇中的溶解度不高，但是配製乙醇和水的體積比為 10:1 的溶液，可使鹽類的濃度大幅提高，加上由市售化妝用噴霧器所噴出的溶液顆粒均勻而細小，和現行課本中鉑絲所沾取的溶液比較，不但量較多而且體積大，因此使得特殊焰色的可觀察範圍增大。

表一. 金屬氯化物焰色實驗法的結果

金屬化合物	火焰呈現的顏色
NaCl	黃色
KCl	紫色
SrCl ₂	紅色
BaCl ₂	綠色

(下轉 26 頁)