

臺灣的節慶與化學：平溪天燈

陸冠輝

國立台中高級工業職業學校化工科

luhgh@tcts1.seed.net.tw

■ 天燈的歷史

天燈又稱為孔明燈，最普遍的起源傳說是以三國為背景，劉備為了尋找一位智勇雙全的軍師，而與臥龍諸葛孔明結緣，而當時孔明發現自己的氣數已將盡，因此將竹框糊上紙並點燃，利用熱氣上升原理使其升空，不但安定了軍心，也使得敵軍看到了也不敢輕舉妄動，這就是最早的天燈起源。

另外，也有傳說天燈是諸葛孔明在征伐南蠻之時，為了要由城內向外傳遞軍情所發明的，後來也有人說，因為天燈的形狀很像孔明在指揮作戰時所戴的帽子，所以這也是孔明燈的由來。

又有傳說是民眾要躲避盜匪，在山區避難的村民互報平安所施放的信號，因此天燈又稱為祈福燈。在日據時代，日軍佔領台北平溪十分寮地區，民眾紛紛跑到山中避難，同樣以天燈為信號，後來發展成施放天燈用來祈求平安，所以天燈也稱為平安燈。

天燈在台灣新北市平溪區十分地區的由來因時代久遠而眾說紛紜。有人說是孔明的後代為了不忘先祖，而在每年元宵節的前後施放天燈，用以感懷先祖。另外，也有十分地區的老前輩口述說，在清道光年間，當地居民地處偏僻山區，為了逃避盜匪的侵害而避難於山中，等待危機過後，就用天燈為信號，通知村民可以下山返家。後來，放天燈的儀式保留下來，用來慶祝並向鄰村的居民報平安，由於天燈的升空，有上達天聽的意義，村民們常將祈福、許願的詞句寫在天燈上，等到農曆年正月十五的元宵節施放天燈，



圖 1：台灣平溪天燈節施放天燈

(圖片來源：Wudy 老師)

<http://www.kphoto.com.tw/front/bin/ptdetail.phtml?Part=new353>)

■ 平溪天燈的由來

將一年所想的願望，讓上天眾神保佑。每年元宵節，平溪天燈的活動規模漸大，也讓平溪天燈在台灣並列為「北天燈，南烽炮，東寒單」三大民俗之一的美名，成為地方民俗，具有祈福納喜的象徵，如圖 1 所示。

■ 天燈的製作和施放

天燈的製作大多以純手工進行，很難以機械化方式進行量產。其燈體的材料以棉紙或薄宣紙主，而削成細長形的條狀竹片，以綠竹和桂竹兩種彈性最好，其長度由天燈的圓周大小而定。底座所用的鐵絲，其長度和粗細也依天燈的大小而定。最後，油紙是以拜拜用的金紙為主，並用煤油或沙拉油加以浸泡，這也是天燈施放，升空的動力來源。然而為了方便遊客，販售的天燈皆為製作成品，有些以固體燃料當作燃料，遊客只須挑選喜愛的形式和顏色，即可帶至欲施放的地點。

天燈要施放時，要先準備幾張金紙浸泡於煤油或沙拉油中至完全浸油狀態，或直接用固體燃料，並在天燈上書寫一些祈願話語或加以彩繪。施放時最好三人一組，固定浸泡後的金紙或固體燃料在底座的鐵絲中央，並將金紙弄散以便充份燃燒。接著由兩人提起燈頭的四個角，另一人負責點燃油紙，最後放置天燈底部在地面上。當燃燒的熱空氣充滿在天燈的內部時，天燈就會隨即升上天空。

天燈的油紙或固體燃料的燃燒時間大約為五至六分鐘，其高度可升至五、六百公尺，

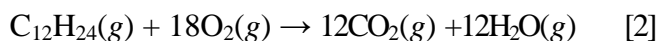
施放時應在空曠且附近上空沒有電纜線等物的地方較佳，風力太大以及下雨時也要避免施放，以避免升高時會產生失敗的現象。最好由有經驗的師傅協助，若自行施放，易發生危險，應注意安全。

■ 原理和概念

燃料、燃燒反應與熱值

煤油 (Kerosene) 是施放天燈時最常的和傳統的燃料，它是從石油分餾時，在 160~300°C 時所取得的烴類 (hydrocarbons)，它的密度約為 0.78~0.81 g/cm³。由於它是一種混合物，其每一分子的碳數約 6~16 個，而煤油芳烴類 (aromatic hydrocarbons) 含量適中，硫含量低，燃燒充分、火眼穩定、不會冒黑煙，不結火花，無明顯臭味，對環境污染小。煤油的燃燒熱類似於柴油，其低熱值 (LHV) 是 43.1 MJ/kg，而其高熱值 (HHV) 是 46.2 MJ/kg。

以煤油中的十二烷和十二烯為例，其燃燒反應如式[1]和[2]所示：



以十二烷為例，假設天燈施放一次使用 16 g 的煤油，以其低熱值計算，其燃燒放出的熱量：

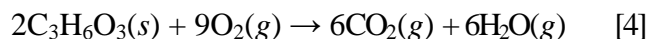
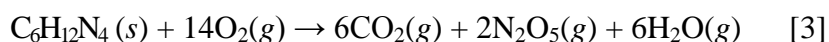
$$\begin{aligned} 16 \text{ g} \times 43.1 \text{ MJ/kg} &= 16 \text{ g} \times 43.1 \times (10^6 \text{ J} / 10^3 \text{ g}) \\ &= 690 \times 10^3 \text{ J} = 690 \text{ kJ} \end{aligned}$$

燃燒產生的 690 kJ 熱量是煤油由化學能轉成熱能，是天燈升空的動力來源。

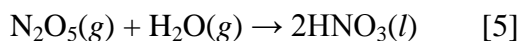
十二烷和二氧化碳的莫耳質量分別為 170.34 g/mol 和 44.01 g/mol。16 g 的十二烷燃燒所排出的 CO₂ 的重量：

$$16 \text{ g} / 170.34 \text{ g/mol} \times (24/2) \times 44.01 \text{ g/mol} = 50. \text{ g}$$

近幾年市售天燈施放的燃料也用固態燃料 (solid fuel) 塊，其原料為六亞甲基四胺 (hexamethylenetetramine, hexamine, or methenamine)，有時與 1,3,5-三聚甲醛 (1,3,5-trioxane) 混合。六亞甲基四胺的分子式為 C₆H₁₂N₄，其莫耳質量為 140.19 g/mol，其高熱值為 30.0 MJ/kg；1,3,5-三聚甲醛的分子式為 C₃H₆O₃，其莫耳質量為 90.08 g/mol。六亞甲基四胺和 1,3,5-三聚甲醛的燃燒反應如式[3]和 [4]所示：



雖然固態燃料燃燒時不會見到煙霧及灰燼，但是其產物含有五氧化二氮，它是硝酸的酸酐，長時間空氣中的水蒸汽反應(水解)而產生硝酸，其反應如式[5]所示。硝酸在雨中會造成酸雨。



以固態燃料的原料是六亞甲基四胺為例，假設天燈施放一次使用 16 g 的固態燃料，以其高熱值計算，其燃燒放出的熱量：

$$16 \text{ g} \times 30.0 \text{ MJ/kg} = 16 \text{ g} \times 30.0 \times (10^6 \text{ J} / 10^3 \text{ g}) \\ = 480 \times 10^3 \text{ J} = 480 \text{ kJ}$$

燃燒產生的 480 kJ 熱量是固態燃料由化

學能轉成熱能，是天燈升空的動力來源。

天燈含內部氣體的密度

「熱」就是氣體分子運動時所需具有的「能量」，當分子運動愈快時，其所需要的「能量」就愈多。亦即，當一種氣體加熱時，它裡面的分子因吸收較多的能量，而使得分子的運動變快，分子間的距離愈來愈大，相對地氣體的體積愈來愈大，而產生膨脹現象。由於氣體分子的質量不會因為溫度的升高而有所改變，因此相同質量的氣體在受熱膨脹後，其密度也就因此變小了。

若空氣視為理想氣體，其成分主要由 78.89% 的氮氣 (N₂) 及 20.95% 的氧氣 (O₂) 所組成，則空氣的平均分子量為：

$$28.01 \text{ g/mol} \times 78.89\% + \\ 32.00 \text{ g/mol} \times 20.95\% = \\ 28.80 \text{ g/mol}$$

除氮氣和氧氣之外，空氣還含有其他氣體。實際上，空氣的平均分子量為 28.97 g/mol。

根據理想氣體定律方程式，如式[6]所示：

$$P \times V = n \times R \times T \quad [6]$$

其中 P 為氣體的壓力， V 為氣體的體積， n 為氣體的莫耳數， R 為氣體定律常數， T 為絕對溫度。

另外，氣體的莫耳數 (n) 可用其質量與莫耳質量來表示如式[7]所示：

$$n = W / M \quad [7]$$

其中 W 為氣體的質量， M 為氣體的分子量。

表 1：空氣的溫度與密度的關係

溫度 (°C)	-20	-10	0	10	20	30	40
密度 (kg/m ³)	1.394	1.341	1.292	1.247	1.204	1.146	1.164
溫度 (°C)	50	60	70	80	90	100	110
密度 (kg/m ³)	1.092	1.060	1.029	1.000	0.972	0.946	0.921
溫度 (°C)	120	130	140	150	160	170	180
密度 (kg/m ³)	0.898	0.876	0.854	0.834	0.815	0.797	0.779
溫度 (°C)	190	200	210	220	230	240	250
密度 (kg/m ³)	0.762	0.746	0.731	0.716	0.702	0.688	0.675

由上面式[6]和[7]可導出式[8]：

$$P \times V = n \times R \times T = (W/M) \times R \times T \quad [8]$$

此外，氣體的密度(d)是氣體的質量(W)與其體積(V)的比值：

$$d = W/V \quad [9]$$

由上面式[8]和[9]可導出式[10]：

$$P \times M = d \times R \times T \quad [10]$$

由式[10]得知，氣體的密度隨溫度和壓力而改變。

在溫度 20°C、壓力為 1 atm 時，計算空氣的密度如下：

$$1 \text{ atm} \times 28.97 \text{ g/mol} = d \times 0.0821 \text{ atm}\cdot\text{L/mol}\cdot\text{K} \times (273 + 20)\text{K}$$

$$d = 1.16 \text{ g/L} = 1.16 \text{ kg/m}^3$$

在溫度 200°C、壓力為 1 atm 時，計算空氣的密度如下：

$$1 \text{ atm} \times 28.97 \text{ g/mol} = d \times 0.0821 \text{ atm}\cdot\text{L/mol}\cdot\text{K} \times (273 + 200)\text{K}$$

$$d = 0.746 \text{ g/L} = 0.746 \text{ kg/m}^3$$

我們也可以利用 [Gas Density Calculator](#)，簡單地設定參數而得到空氣的密度，假設施放天燈的大氣壓力為 760 mmHg，空氣密度的整理數據如表 1 所示，表 1 顯示當空氣的溫度愈高時，其密度是愈小。

接著，我們視天燈的形狀為圓錐台 (circular truncated cone)，圓錐台的體積(V)為：

$$V = \frac{\pi h}{3}(R^2 + r^2 + Rr) \quad [11]$$

此處 h 為圓錐台的高， r 和 R 為圓錐台的上下面的半徑。

我國《天燈施放作業指導要點》規定，天燈最大尺寸，設定為底座直徑 60 公分、高度 130 公分、外圍 360 公分。在此，我們以一個天燈底部直徑為 40 cm、高為 106 cm、頂部直徑為 60 cm，且其重量為 70 g (含一顆 16 g 的固體燃料塊) 為例，此天燈的體積：

$$V = \frac{1}{3}(\pi \times 106 \text{ cm}) \times [(60 \text{ cm} / 2)^2 + (40 \text{ cm} / 2)^2 + (60 \text{ cm} / 2) \times (40 \text{ cm} / 2)]$$

$$V = 210000 \text{ cm}^3 = 210 \text{ L}$$

以一個體積為 210 L 的天燈為例，由表 1 可知，當加熱至 200°C 時其密度為 0.746 g/L，假設天燈內的氣體為空氣（實際上含有二氧化碳和水蒸氣或其他物質），此氣體的重量：

$$210 \text{ L} \times 0.746 \text{ g/L} = 160 \text{ g}$$

此天燈本身的重量和天燈內部燃燒氣體的重量之和：

$$160 \text{ g} + 70 \text{ g} = 230 \text{ g}$$

此天燈含燃燒氣體的總密度：

$$\frac{230 \text{ g}}{210 \text{ L}} = 1.1 \text{ g/L}$$

在 200°C 時天燈含燃燒氣體的總密度為 1.1 g/L，比在 20°C 時空氣的密度 1.204 g/L 為小。密度小者往上移動，因此，天燈的內部氣體在 200°C 時，天燈會往上升。

以此天燈為例，天燈的內部要達到多高的溫度才會上升或低於多少的溫度才會下降呢？我們可先設天燈的內部氣體的重量為 x g，然後知道其氣體密度，再查表 1 而得知。

天燈的內部氣體的重量為 x g，

$$\frac{x \text{ g} + 70 \text{ g}}{210 \text{ L}} = 1.204 \text{ g/L} \cdot x = 182 \text{ g}$$

天燈內部氣體的密度： $\frac{182 \text{ g}}{210 \text{ L}} = 0.87 \text{ g/L}$

查表 1 得知，空氣在 130°C 時的密度為 0.876 g/L，當天燈內部的溫度稍高於 130°C，天燈會上升；低於此溫度時天燈會下降。

浮力對抗重力

天燈升空的原理也可以用「阿基米德原

理 (Archimedes' principle)」來詮釋，其原理說明如下：當物體浸在某液體中時，其密度大於液體密度者會下沉，而其密度小於液體密度者會上浮。同時，物體在液體中的重量會比在空氣中的重量為輕，而減輕的重量等於該物體所排開的液體重量，這就是物體所受的「浮力」。阿基米德原理又稱浮力定律，定律為：物體在流體（液體或氣體）所受浮力的大小，等於被物體排開流體的重力。

天燈內熱空氣的密度比外面冷空氣的密度小，因此根據阿基米德原理的應用，它會產生「浮力」作為其上升的動力，當此浮力大於天燈本身的重力時，便可順利升空。當天燈持續升空時，高空的溫度較低，使得高空的空氣密度會變大，若天燈仍有熱源的支持，則天燈所受浮力會變大，而讓天燈加快升空的速度。

然而，浮力的大小與天燈體積、熱源的供應所造成的密度差有著極密切的關係。亦即浮力是天燈體積與受熱前後密度差的乘積。究竟需要多大的浮力，才能使天燈升空呢？我們透過圓錐台的體積來計算出其天燈的浮力大小。

以上面的天燈為例，天燈的形狀以圓錐台 (circular truncated cone) 體積視之，得到其體積為 210 L。由表 1 可知，在 20°C 時的空氣密度重量為 1.204 g/L，當加熱至 200°C 時其密度為 0.746 g/L。

在 20°C 時，天燈內的空氣重量為： $1.204 \text{ g/L} \times 210 \text{ L} = 253 \text{ g}$ 。

當天燈內的空氣加熱到 200°C 時，空氣的重量變為： $0.746 \text{ g/L} \times 210 \text{ L} = 157 \text{ g}$ 。

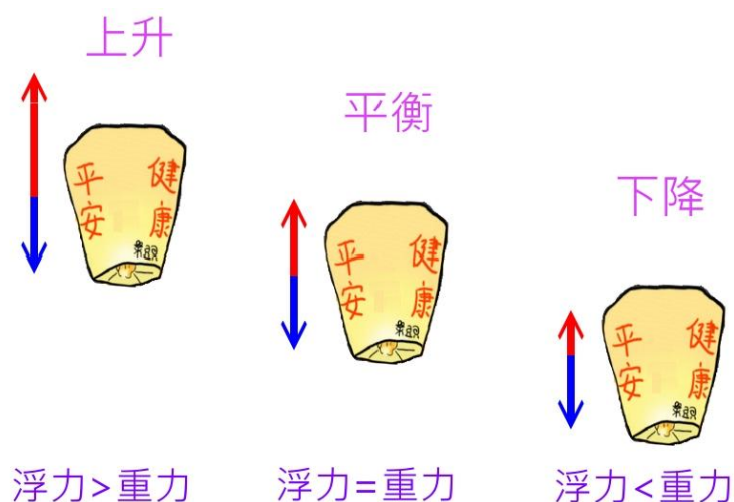


圖 2：天燈的升降對浮力與重力的關係

由此兩不同的空氣的重量之差，可知產生的浮力為 $253\text{ g} - 157\text{ g} = 96\text{ g}$ 。因此製作天燈的材料總重量只要小於 96 g ，就可以使天燈順利升空。此處產生浮力有 96 g ，大於天燈總重 70 g ，因此天燈可以升空。

圖 2 顯示若天燈內的空氣所產生的浮力大於天燈本身的重力，則天燈會升空；若所產生的浮力等於重力，則天燈會保持平衡，不上升也不下降；若天燈內的熱源減弱或消失，其產生的浮力小於重力，天燈會降落。

■ 結語

平溪天燈節慶活動在每年元宵節的前後施放，原本用以感懷先祖，後來成為地方民俗，具有祈福納喜的象徵。天燈是一個底部開口的紙製氣囊，開口處放置燃料，藉由燃燒反應使燃料的化學能轉變成熱能。透過熱能加熱氣體，使氣體膨脹，而排除熱氣體到天燈的外面，導致天燈內部氣體的密度下降。

當天燈本身的重量及內部熱氣體的重量之和與天燈體積之比值小於當時的空氣密度時，天燈會上升。若其比值大於當時的空氣密度時，則天燈無法上升或天燈會下降。天燈升空的原理也可以用「阿基米德原理」來詮釋，當天燈內部的氣體加熱，導致其氣體的重量減少而產生浮力。若產生的浮力大於天燈本身的重力，則天燈會上升。若產生的浮力等於天燈本身的重力，則天燈會漂浮在空中。若產生的浮力小於天燈本身的重力，則天燈不會上升或下降。天燈能夠冉冉上升，其實涉及化學和物理的原理。

■ 參考資料

1. Kerosene, Wikipedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Kerosene>.
2. Heat of combustion, Wikipedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Lower_heating_value#Lower_heating_value.
3. Hexamine fuel tablet, Wikipedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Hexamine_fuel_tablet.
4. Gas Density Calculator, YEROC.US, <http://yeroc.us/calculators/gas-density.php>.
5. 探討「自然與生活科技」的教學設計 - 以天燈為例，
http://ir.lib.ntnu.edu.tw/ir/retrieve/29067/ntnlib_ja_E0201_4102_032.pdf.
6. 願望之翼 — 天燈飛行之探討，
<http://activity.ntsec.gov.tw/activity/race-1/43/pdf/c/080101.pdf>.
7. Physic behind sky lanterns,

- <http://www.instructables.com/id/Physic-behind-sky-lanterns/?ALLSTEPS>.
8. Sky Lantern,
<http://wandering-taiwan.blogspot.tw/2009/09/sky-lantern.html?m=1>.
 9. Sky lantern, Wikipedia,
http://en.wikipedia.org/wiki/Sky_lantern.
 10. Hot Air Balloon Physics,
<http://www.real-world-physics-problems.com/hot-air-balloon-physics.html>.
 11. How Hot Air Balloons Fly,
<https://www.brisbanehotairballooning.com.au/faqs/school/105-how-hot-air-balloons-fly.html>.
 12. An Introduction to Air Density and Density Altitude Calculations,
http://wahiduddin.net/calc/density_altitude.htm