

臺灣的節慶與化學：鹽水蜂炮

許紘齊、楊水平*

國立彰化師範大學化學系

*yangsp@cc.ncue.edu.tw

■ 鹽水蜂炮的由來

鹽水蜂炮 (Yanshui's Beehive Rockets) 是台南市鹽水區每年元宵節著名的節慶活動，2008 年被指定為中華民國文化資產的民俗類，每年吸引十多萬遊客參與盛會。此項活動相傳是從清朝光緒年間開始，傳承至今已有百餘年的歷史，其由來眾說紛紜，其中最為大家樂道的是關聖帝君「驅除瘟疫」之說。現今鹽水蜂炮的節慶特色是由成千上萬的蜂炮（冲天炮，stick rockets）傾巢而出，如眾多火龍竄出，震撼力十足，如圖 1 所示。

時逢光緒 11 年（西元 1885 年）鹽水當地瘟疫肆虐，造成人口外移，市井蕭條。這時鹽水地區的居民們經商議後，決定迎請關聖帝君神轎出巡，祈求驅除瘟疫災厄。透過關聖帝君的指示，在神轎出巡的過程中沿路燃放鞭炮（firecrackers），從正月十三到十五日總共持續了三天的時間，沒想到從此瘟疫竟然被驅除了。此後，為了感念關聖帝君的恩澤，當地居民們決定

每年元宵節舉行「關帝遶境」燃放爆竹的活動。此活動便是鹽水蜂炮節慶的前身，當時的爆竹以鞭炮和焰火為主。關於「驅除瘟疫」之說，有人以科學角度推論，這可能是因為鞭炮的成分硫磺和鞭炮火藥燃燒的產物發揮消毒作用。經過多年的演變，發展出以冲天炮為主的鹽水蜂炮。就風俗而言，蜂炮射向神轎是當地民眾感念關聖帝君恩澤的宗教儀式，遊客檔在神轎前體驗蜂炮威力是一項禁忌。

■ 鹽水蜂炮的炮城



圖 1：鹽水蜂炮的冲天炮如火龍竄出震撼力十足

（圖片來源：Vincent Chien, Flickr,

<https://www.flickr.com/photos/bravesheng/6840510295/>。）



圖 2：沖天炮組成的炮城，單層的傳統炮城（左）和數層的現代炮城（右）

（圖片來源：由左而右，Vincent Chien, Flickr, <https://www.flickr.com/photos/bravesheng/6850965469/>；August Huang, Flickr, <https://www.flickr.com/photos/kaorss/6941599250/in/datetaken/>）

鹽水蜂炮的炮城，又名蜂炮城、蜂炮巢，其主要架構材料為木棒、竹子或鐵搭建而成，由許多沖天炮組成的發炮台。傳統上，以木條製作或竹竿綁成的大型長方體支架，作為炮城的基本結構。在面積最大的兩面，以橫杆由上而下做出分層，作為擺設沖天炮的支架，前後支架必須控制好沖天炮發射的角度，射向神轎。在分層的支架上，先以雙面膠或其他黏著劑固定炮城的炮芯（一種引線）在支架上，並在各層上排放單層或數層的沖天

炮，再黏貼炮芯與沖天炮的引線在一起，有些炮芯再黏貼一層藍色或紅色的薄紙，如圖 2 所示。然後連接炮城兩面的炮芯在一起，使炮芯與引線串串相連，由炮芯和引線的長短來控制蜂炮點燃的時間，如此設計，在某一處點燃炮芯，就可萬炮同時發射或火龍連續四射。

傳統上，鹽水蜂炮的炮城是以竹子或木棒建構其基本架構，自民國 70 年起開始有大

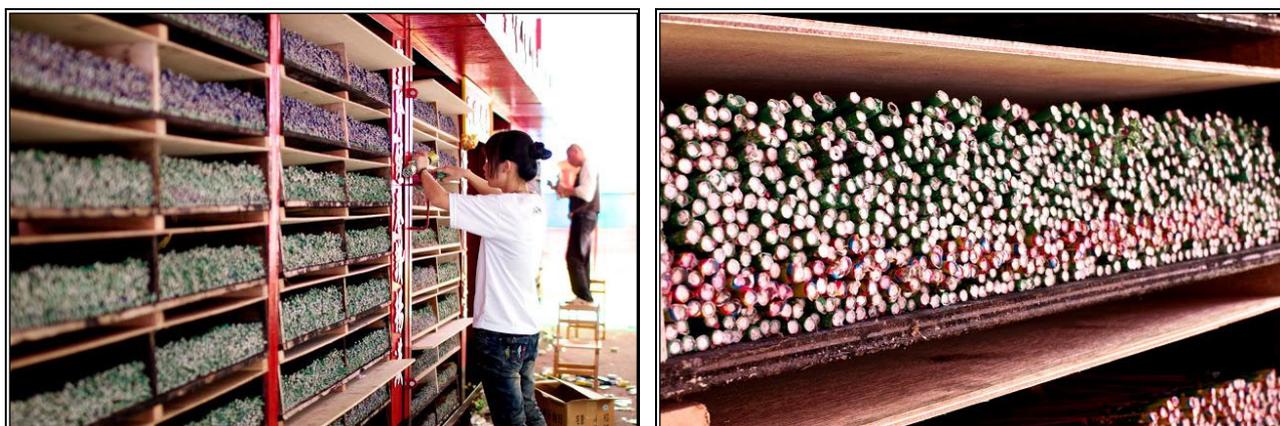


圖 3：有數十萬發沖天炮的炮城（左）和堆疊多層沖天炮的炮城（右）

（圖片來源：Yanshui's Beehive Rockets 鹽水蜂炮，翁郁容的部落格，<http://mi-chanchan.blogspot.tw/2012/03/yanshuis-beehive-rockets.html>。）

型的鐵製炮城出現。在炮城中各層擺放冲天炮的數量可達 108 或 120 支，其支數有象徵各行業興旺與長壽之意。大炮城的大小和分層的蜂炮數量並非固定不變，曾出現數千支或數萬支冲天炮的炮城。有些主炮城的各層蜂炮甚至以十層到二十層的冲天炮堆疊而成的，數量非常可觀，如圖 3 所示。在完成基本結構後，炮城的外表會黏貼紅色等色紙加以裝飾，並寫上祈福的語句，外觀設計成神像、茶壺、動物或卡通人物等各種造型。

2012 年鹽水蜂炮的主炮城「雲端金龍」由 50 萬發冲天炮所組成。2013 年有 40 萬發的「天官賜福」主炮城與 50 萬發的「玄武」炮城，還有 120 座小炮城，總計約有百萬發蜂炮。2014 年的鹽水蜂炮有 200 多座創意炮城，主炮城「關公騎赤兔馬」由鹽水武廟特別打造 12 尺高、寬 6 公尺，有 40 萬支蜂炮，結合高科技 LED 燈，搭配精彩絢麗的煙火秀。成千上萬的冲天炮，如火

龍竄出，震撼力十足，吸引頭戴安全帽，全身包緊緊的遊客們。

■ 冲天炮的内部結構

鹽水蜂炮的冲天炮圓筒是用紙捲成多層的厚粗圓筒，其內部構造除了引線之外，可簡單地分成兩部分，尾部是推進(propellant)區，頭部是爆炸(explosion)區。冲天炮的外部黏貼一支細長的竹棒，作為發射飛行的

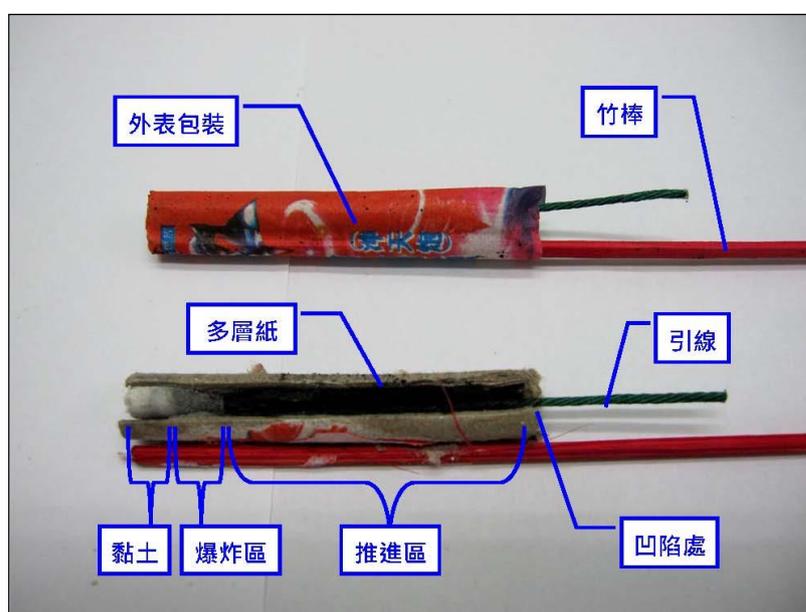


圖 4：冲天炮分成兩部分：尾部的推進區和頭部的爆炸區

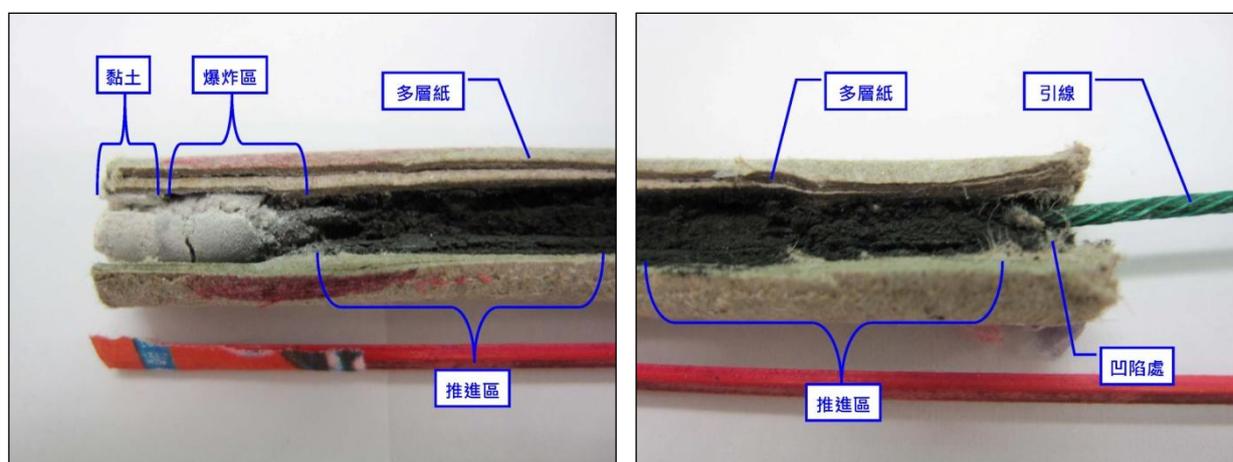


圖 5：冲天炮的内部結構：頂部有黏土和爆炸的火藥、中段有推進火藥，及尾部有引線

穩定作用；還有用色紙包裝，以增加外部的美觀，如圖 4 所示。

推進區的成分主要為碳粉和硝酸鉀，通稱為無硫火藥 (sulfur-free black powder)，呈現黑色，有些冲天炮的推進區添加硫磺，此為火藥 (gunpowder) 或黑火藥 (black powder)，以增加推進的效果。然而，因含有硫磺，使得火藥本身相對敏感，在製造和運送過程中有一定的危險性。爆炸區的主要成分為過氯酸鉀 (potassium perchlorate, KClO_4) 或氯酸鉀 (potassium chlorate, KClO_3)、碳粉、鋁粉、及鋁鎂合金粉所組成的灰色粉末，有些冲天炮會加入少量的硫磺或蔗糖 ($\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$) 當作還原劑，以增加爆炸效果，但具有相當的危險性。

冲天炮的頂部通常用泥土或黏土封閉筒口，以防火藥燃燒產生的氣體衝出；紙筒尾端以凹陷方式夾緊一條引線，在引線燃燒完畢後在此處形成小孔洞。當火藥燃燒時，產生的氣體會在此小孔洞衝出，造成極大的衝力並發出「咻」的聲音，圖 5 為冲天炮內部結構的切開圖。冲天炮的藥品填充順序是，

先在紙筒中填充爆炸區的混合物後，再放入推進區的火藥並放入引線。

二十多年前，鹽水蜂炮使用的冲天炮有塑膠頭，衝力非常強大，像一把刀，會射穿衣物，在皮膚留下深深的割痕。在爆炸後，有些塑膠黏住皮肉，使傷口更加嚴重，甚至炸傷遊客的眼睛。為降低殺傷力，近年來鹽水蜂炮已經禁用塑膠頭，全面採用紙包的冲天炮，降低民眾的受傷。

■ 冲天炮的運作原理 (物理和化學原理)

現今冲天炮使用的引線是延時引線 (Visco fuse)，塗層以綠色或紅色最為常見，它是扭曲的絞線，用於消費者煙火的高品質引線，也用於創造多個煙火燃放時的延遲點火。延時引線是以火藥為核心，直徑 2-3 毫米的絞線，如圖 6 所示。引線的火藥用三層包住，內層是用串繩繞住火藥；第二層是用串繩以相反方向包住內層；外層是塗上低硝酸根的硝化纖維素漆 (low-nitrate nitrocellulose lacquer)，低硝酸根的硝化纖維

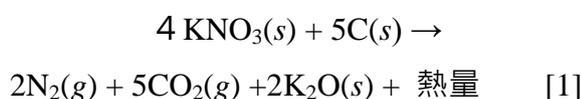


圖 6：燃燒的延時引線

(圖片來源：Fuse_(explosives), Wikipedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Fuse_\(explosives\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Fuse_(explosives)).)

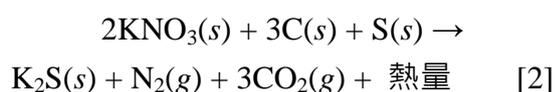
素為低度硝化作用的纖維素，的以避免引線分離並防水和防濕氣。延時引線點燃後，可以在水中燃燒。硝化纖維素具有易燃性，但低硝化的硝化纖維素較不易燃，但比一般紙張較易燃。有關火藥燃燒的化學反應，如見下面沖天炮推進區火藥的燃燒反應。

在引線點燃後，進入推進區硝酸鉀（硝石）和碳粉的燃燒，發生激烈的氧化還原反應，產生氮氣和二氧化碳氣體並隨伴放出大量的熱量，如反應式[1]所示：



此反應產生大量的熱氣體而快速膨脹，造成沖天炮管內的壓力瞬間升高。根據牛頓力學中第三運動定律——作用力等於反作用力，從沖天炮尾端的小孔洞（直徑約 2-3 mm）噴出大量的高壓氣體，其強大的反作用力使得沖天炮向上推進，並發出「咻」的聲音。

此外，碳粉和硝酸鉀加入硫磺稱為火藥或黑火藥，這是早期常用的火藥配方，也常用於現在工業。硝酸鉀、硫磺和碳粉的燃燒反應也是氧化還原反應，產生氮氣和二氧化碳氣體，固體產物為硫化鉀，如反應式[2]所示：



火藥的成分配方之一：重量比為 15 : 3 : 2 的硝酸鉀、碳粉和硫磺，即硝酸鉀的重量佔 75%，碳粉佔 15%，硫磺佔 10%。此配方的莫耳數比是否符合反應式[2]的係數比呢？何種成分是限量試劑？藉由化學計量，我們

可以得知。已知硝酸鉀、碳和硫的莫耳質量分別為 101.1、12.01 和 32.07 g/mol。假設沖天炮的火藥的重量有 100 g，則硝酸鉀有 75 g，碳粉 15 g，硫磺 10 g。三成分的莫耳數分述如下：

$$\begin{aligned} & \text{硝酸鉀的莫耳數} \\ & = 75 \text{ g} / 101.1 \text{ g/mol} = 0.74 \text{ mol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{碳（碳粉）的莫耳數} \\ & = 15 \text{ g} / 12.01 \text{ g/mol} = 1.2 \text{ mol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{硫（硫磺）的莫耳數} \\ & = 10 \text{ g} / 32.07 \text{ g/mol} = 0.31 \text{ mol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{硝酸鉀、碳和硫的莫耳數比} \\ & = 0.74 \text{ mol} : 1.2 \text{ mol} : 0.31 \text{ mol} = 2 : 3.3 : 0.88 \end{aligned}$$

由於各家廠牌沖天炮的火藥成分配方不盡相同，如配方之二：硝酸鉀佔 65-75%，碳粉佔 15-20%，硫磺佔 10-15%，因此產生氮氣和二氧化碳氣體的比例也有差異。假設火藥的重量有 100.0 g，且各成分取中間值，則硝酸鉀有 70.0 g，碳粉 17.5 g，硫磺 12.5 g。三成分的莫耳數分述如下：

$$\begin{aligned} & \text{硝酸鉀的莫耳數} \\ & = 70.0 \text{ g} / 101.1 \text{ g/mol} = 0.692 \text{ mol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{碳（碳粉）的莫耳數} \\ & = 17.5 \text{ g} / 12.01 \text{ g/mol} = 1.40 \text{ mol} \end{aligned}$$

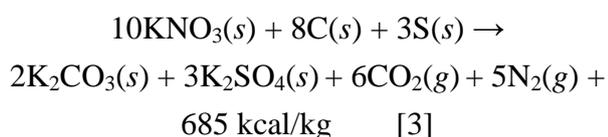
$$\begin{aligned} & \text{硫（硫磺）的莫耳數} \\ & = 12.5 \text{ g} / 32.07 \text{ g/mol} = 0.390 \text{ mol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{硝酸鉀、碳粉和硫磺的莫耳數比} \\ & = 0.692 \text{ mol} : 1.40 \text{ mol} : 0.39 \text{ mol} \\ & = 2 : 4.0 : 1.1 \end{aligned}$$

藉由計算得知，雖然上面兩種配方不同，但是硝酸鉀、碳粉和硫磺的莫耳數比很接近

反應式[2]的係數比。再者，配方之一的限量試劑為硫（硫磺），配方之二的限量試劑為硝酸鉀。

透過文獻資料搜尋，我們亦可找到火藥燃燒的不同反應，如反應式[3]所示。

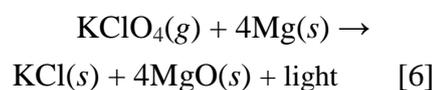
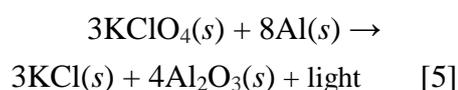
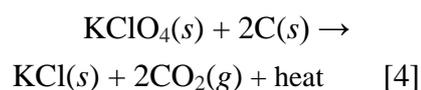


此反應式產生的氣體與反應式[2]相同，但是反應式的係數比不相同。此反應每公斤火藥燃燒產生的熱有 685 kcal，其體積膨脹因子（volume expansion factor）有 5100 倍之多，火藥的密度為約 1.04 g/mL。火藥燃燒產生白色的煙霧是由固體產物碳酸鉀（ K_2CO_3 ）和硫酸鉀（ K_2SO_4 ）所造成的。火藥是所有炸藥中最安全的，對衝擊、摩擦或電火花不敏感。它必須透過加熱或火焰來點燃。濕氣會降低火藥的使用度，乾燥仍不能恢復其性能。

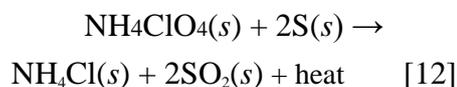
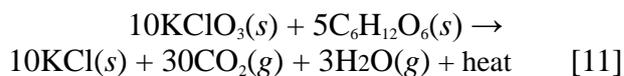
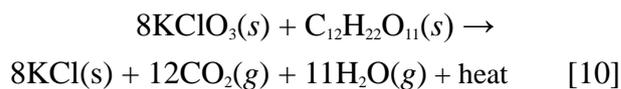
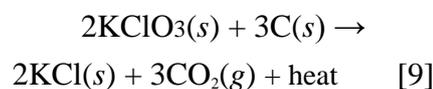
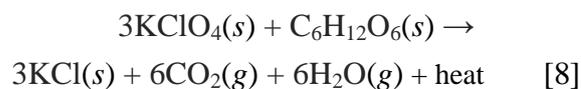
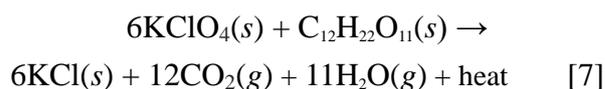
反應式[3]是火藥的代表性反應之一，實際的反應取決於火藥的成分比例、如何製備以及如何引爆。一項實驗研究顯示，火藥燃燒產生 55.91% 的固體產物、42.98% 的氣體產物及 1.11% 的水。固體產物含有碳酸鉀、硫酸鉀、硫化鉀、硫、硝酸鉀、硫氰酸鉀（potassium thiocyanate）、碳、及碳酸銨，氣體產物含有二氧化碳、氮氣、一氧化碳、硫化氫（hydrogen sulfide）、氫氣、及甲烷。由此研究得知，火藥燃燒有殘留的反應物，並非完全燃燒。

冲天炮的爆炸區的主要成分為過氯酸鉀、碳粉、鋁粉和鋁鎂合金粉，過氯酸鉀（氧化劑）和碳粉（還原劑）是爆炸火藥的主要反

應物，點燃後立即進行劇烈的氧化還原反應，產生大量的二氧化碳和熱量，如反應式[4]所示。鋁粉和鋁鎂合金粉是強而有力的閃光粉，鋁和鎂（還原劑）在過氯酸鉀（氧化劑）中燃燒會產生劇烈的白色強光，使冲天炮在爆炸時產生如同仙女棒的白色火花效果，如反應式[5]和[6]所示。



爆炸區的氧化劑除了過氯酸鉀之外，有些配方含有氯酸鉀或過氯酸銨；還原劑除碳粉之外，還有蔗糖（ $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$ ）、葡萄糖（ $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ ）或硫磺等，這些成分的反應都是氧化還原反應，分別如反應式[7]~[12]所示：



在氧化劑與還原劑的挑選上，氯酸鉀不

能與硫磺混合使用，因為硫磺氧化後會產生硫酸和亞硫酸，硫酸會與氯酸鉀反應產生氯酸 (HClO_3)，高濃度的氯酸很不穩定，容易發生自身氧化還原反應，產生過氯酸 (HClO_4) 和亞氯酸 (HClO_2)。若過氯酸鉀與硫磺混合使用，則兩者會直接反應而產生過氯酸。

■ 鞭炮的內部結構及其運作原理(物理和化學原理)

早年鹽水蜂炮的節慶活動使用鞭炮，雖然目前仍然在使用，但是被蜂炮(沖天炮)的聲名大噪所掩蓋。在成分上，鞭炮和沖天炮最大的差異在於鞭炮不需要推進用的火藥，只需要產生爆炸的火藥即可；在構造上，鞭炮的火藥處在近乎密閉系統裡，沖天炮的孔洞開口則較大。

爆竹的火藥配方為硝酸鉀佔 66.6%、硫磺佔 16.6% 及碳粉佔 16.8%；有些配方為硝酸鉀佔 75%、硫磺佔 10%、碳粉佔 15%；有些爆竹的成分含有強氧化劑氯酸鉀或過氯酸鉀；有些鞭炮含有丹紅(四氧化三鉛)，主要用來當作氧化劑和催化劑。單一鞭炮的結構是在硬紙筒中緊密地放入火藥，兩端用泥土或其它粘著劑封閉，一端用易燃的薄紙包



圖 7：鞭炮的外部構造，主要含有多個爆竹筒、內部引線和外部引線

裹火藥當作內部引線，封閉是為了確保火藥燃燒後產生的熱氣體能被密封在硬紙筒中。然後，多個鞭炮兩兩一對用內部引線串接起來，再用外部引線接起來。鞭炮的外部構造如圖 7 所示，其內部構造如圖 8 所示。

鹽水蜂炮節慶使用的鞭炮大多為長串鞭

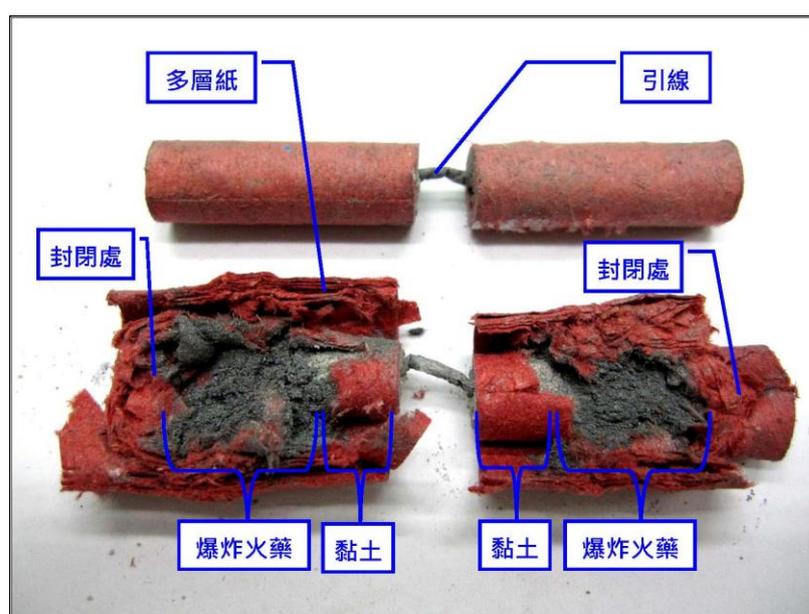


圖 8：鞭炮的內部構造(切開圖)，主要含有黏土和火藥



圖 9：鹽水蜂炮節慶也使用長串鞭炮

(圖片來源：Steve, Flickr,

[https://www.flickr.com/photos/64525258@N00/5455831477/in/datetaken/.](https://www.flickr.com/photos/64525258@N00/5455831477/in/datetaken/))

炮，以分散或集中方式大量地舖在地面上，點燃的爆炸聲音十分震耳且威力非常強大，震撼力十足，如圖 9 所示。長串型鞭炮也常用在廟宇或一般節慶上。

當鞭炮的火藥被引線點燃後，碳粉或硫磺（還原劑）在硝酸鉀、氯酸鉀或過氯酸鉀（氧化劑）的助燃下，反應非常劇烈，瞬間產生出大量的氮氣和二氧化碳等氣體，這些氣體被困住在炮筒中而無法排出，以致內部產生高壓，足以脹破炮筒而突然爆裂，引起空氣劇烈動盪，產生爆炸聲。鞭炮火藥的燃燒反應，與前面提到的冲天炮火藥略同，均為氧化還原反應，如反應式[2]~[4]和[9]所示。

■ 結語

鹽水蜂炮原本是一項宗教的節慶活動，早期以燃放鞭炮為主，經過多年的演變，近年來以施放冲天炮為主。就鞭炮和冲天炮的

成分和結構觀之，兩者最大的差異在於鞭炮不需要推進用的火藥，只需要產生爆炸的火藥即可，冲天炮的火藥則分為推進區和爆炸區；再者，鞭炮的火藥處在近乎密閉系統裡以致無法釋放氣體，冲天炮的孔洞開口則有小洞口而可以釋放氣體。

無論是冲天炮或是鞭炮的火藥，以化學的觀點，其成分燃燒都進行激烈的氧化還原反應，產生氮氣和二氧化碳等氣體，並隨伴放出大量的熱

量，而且引線的燃燒也可以用來氧化還原反應說明。以物理的觀點，冲天炮向上推進可以依據牛頓力學中第三運動定律——作用力等於反作用力來詮釋，鞭炮的爆破可以用壓力來說明。事實上，鹽水蜂炮不僅是宗教節慶的活動，而且是涉及作用力、反作用力、壓力、聲音、火藥、化學成分、氧化劑、還原劑、催化劑、氧化還原反應、燃燒、爆炸、化學計量、限量試劑、不完全燃燒、密閉系統和開放系統等物理和化學概念，很適合用於中學自然科和社會科跨領域的鄉土教學。

■ 參考資料

1. 鹽水蜂炮，維基百科，
<http://zh.wikipedia.org/wiki/鹽水蜂炮>。
2. 爆竹，維基百科，
<http://zh.wikipedia.org/wiki/爆竹>。
3. 臺灣慶元宵-鹽水蜂炮，中華民國交通部觀光局，

http://www.eventaiwan.tw/cal/cal_16943

。

4. 民俗廟會-鹽水蜂炮·臺灣節慶·僑委會 ·
<http://media.huayuworld.org/local/web/chinese/temple/content6.htm> 。
5. Flash! Bang! Whiz!
<https://mysite.du.edu/~jcalvert/phys/bang.htm>.
6. Visco_fuse, Wikipedia,
http://en.wikipedia.org/wiki/Visco_fuse.
7. Fuse (explosive), Wikipedia,
[http://en.wikipedia.org/wiki/Fuse_\(explosives\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Fuse_(explosives)).
8. Rocket (firework), Wikipedia,
[http://en.wikipedia.org/wiki/Rocket_\(firework\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Rocket_(firework)).
9. The Chemistry of Black Powder,
<http://crescentok.com/staff/jaskew/TAH/projects/chemistry/HScheme.htm>.
10. Gunpowder, Wikipedia,
<http://en.wikipedia.org/wiki/Gunpowder>.
11. Gunpowder Explosion Stoichiometry and Gunshot Residue (GSR), ChemPRIME,
[http://wiki.chemprime.chemeddl.org/index.php/Gunpowder_Explosion_Stoichiometry_and_Gunshot_Residue_\(GSR\)](http://wiki.chemprime.chemeddl.org/index.php/Gunpowder_Explosion_Stoichiometry_and_Gunshot_Residue_(GSR)).
12. Firecracker, Wikipedia,
<http://en.wikipedia.org/wiki/Firecracker>.