

臺灣的節慶與化學：臺北 101 跨年煙火（下）

張元宇、楊水平*

國立彰化師範大學化學系

*yangsp@cc.ncue.edu.tw

↑ 承【[臺灣的節慶與化學：臺北 101 跨年煙火（上）](#)】

■ 大樓煙火彈的內部結構

臺北 101 跨年煙火秀的花式（效果）為什麼如此的千變萬化？例如：突然從地平面上爆發的地雷煙火、像噴泉般連續噴出火花的噴泉煙火、快速閃爍星星的閃爍煙火。讓煙火綻放出各式各樣的花式，創作出炫麗的效果，是依賴煙火彈的內部結構設計、精準地控制煙火彈的填充物以及電腦點火控制等。以下就噴泉煙火、地雷煙火和羅馬蠟燭煙火的內部結構詳加說明。

1. 噴泉煙火（Fountain Fireworks）

單管的噴泉煙火由一層圓柱筒所組成的發射管，並有一個塑膠底盤。圓柱筒內的填充物用來產生大量的火花和氣體，頂端塞著一個孔洞的黏土阻氣塞，孔洞放置一條導火索（fuse，引線），如圖 17 所示。燃燒產生氣體和火花由此孔洞噴射而出。若沒有此股噴射的氣流，則此煙火只有微弱的火花。通常噴泉煙火內有一層層交疊的燃燒物質，隨著時間往下燃燒而噴出不同的焰色效果，例如第一層燃燒時可能產生橘色的火花，隨後產生白色和綠色的星星火花。

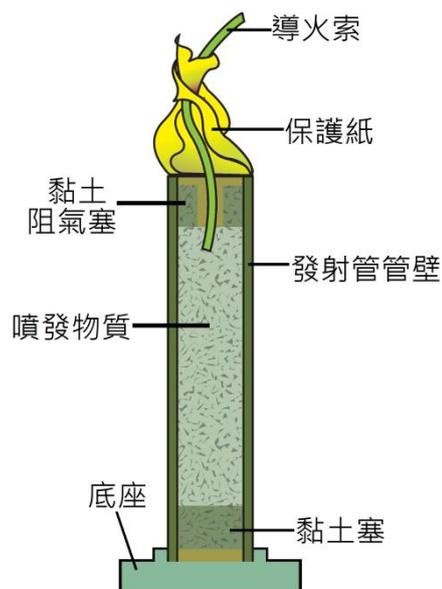


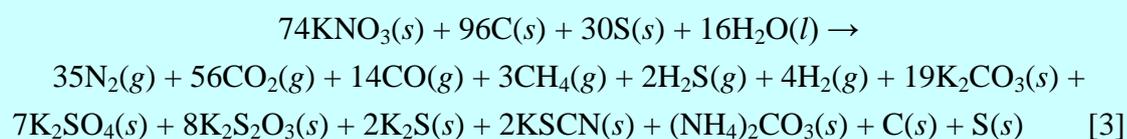
圖 17：噴泉煙火發射筒的內部結構
（繪圖者：陳瑾蓉）

2. 地雷煙火（Mine Fireworks）

地雷煙火基本上是低空的垂直或傾斜的煙火筒，其結構與原理類似於破擊砲，底部以黑火藥為底火，導火索在發射筒的下方，如圖 18 所示。當點燃時，底火燃燒的能量使光珠以扇形（V 型）從煙火筒爆發出來，並使光珠發光。光珠的噴散程度與管長和管寬以及火藥量有關。

黑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%。其配方之二：硝酸鉀佔 65-75%，碳粉佔 15-20%，硫磺佔 10-15%。一項實驗研究顯示，黑火藥燃燒產生 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 (KSCN)、碳及碳酸銨；氣體產物含有二氧化碳、氮氣、一氧化碳、硫化氫、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。

任何傳統的煙火彈的基本成分是黑火藥 (硝酸鉀 75%，15% 炭和 10% 硫的混合物)。就化學反應式而言，為了得到確切的氧平衡 (oxygen balance)，所有發生的化學反應的描述是基於實驗結果的理解，而不是靠經驗。在某些情況下，實際上黑火藥的燃燒可能被認為更複雜的反應。例如，火藥成分含 75.7% 的硝酸鉀、11.7% 的木炭、9.7% 的硫及 2.9% 的水的混合物，依照化學計量，其燃燒的反應可由反應式[3]來表示：



用於煙火的火藥成分並非只有無硫火藥和黑火藥，氧化劑還有過氯酸鉀 (KClO₄)、氯酸鉀或過氯酸銨 (NH₄ClO₄) 等；還原劑還有蔗糖 (C₁₂H₂₂O₁₁) 或葡萄糖 (C₆H₁₂O₆) 等，這些成分的反應都是氧化還原反應，並隨之放出大量的熱。

■ 煙火的顏色

臺北 101 煙火是一項複雜的工作，需要科學和藝術領域的應用，甚至電腦控制的資訊工程。煙火的光點或光束從煙火中噴出被稱為光珠 (stars)，煙火顏色的產生有兩種主要機制：螢光 (luminescence) 和白熾光 (incandescence)。

螢光是利用除熱量之外的能量源所產生的光，亦即無熱量產生的光。有時螢光被稱為冷光 (cold light)，因為它可以發生在室溫和較低的溫度。螢光的產生是提供能量由原子或分子的電子所吸收，導致變成激發態且不穩定。當電子返回較低能量狀態時，能量以光的形式被釋放出來，光的能量決定它的波長和顏色，日光燈和 LED 燈是使用這個原理來發光。通常，煙火的紅、橙、黃、綠、藍和紫的焰色屬於螢光。

白熾光是指對物體施加熱量，使它溫度上升，直到產生可見光的現象。蠟燭燃燒時發出的火焰，即是煙霧的碳分子所產生的白熾狀態，電燈泡也是使用這個原理來發光。

白熾光是熱輻射的一個特殊狀況。

熱量引起物質的溫度上升而導致發熱和發光，當物質變得越來越熱，產生不同顏色的光，起初釋放紅外線，然後紅色、橙色、黃色和白色的光。若煙火的溫度被控制，其成分 (如炭粉和鐵粉) 的發光可被操縱，而得到期望的顏色。金屬如鋁和鎂燃燒產生明亮

的白光，同時增加煙火的溫度。產生白熾光的溫度如下：淡紅光 480°C，暗紅色 580°C，紅色 / 橙色 730°C，明亮橙色 930°C，橙色 / 黃色 1130°C，黃 / 白色 1330°C，白色超過 1430°C。產生綠色和藍色的白熾光需要更高的溫度，無法在煙火中產生。通常，煙火的白光、銀光、黃金光屬於白熾光。

光珠爆炸會產生各種顏色，這是利用不同金屬化合物（金屬鹽）燃燒的特性，例如鈉鹽會放出黃色光芒，鋇鹽則是紅色；但是只要金屬化合物無法快速燃燒，就需要用燃料和強氧化劑。燃料通常是用碳、澱粉或聚氯乙烯（PVC）、氯化橡膠；氧化劑則是氯酸鉀或過氯酸鉀。

純正的煙火色彩需要純的化學成分，即

一樣，成本往往涉及到品質。值得注意的事是，期望某些煙火產生正確顏色的化合物是困難的，在低溫或高溫下有些化合物是不穩定的，例如潮解。為了要求穩定性，企圖以不同的組成混合之設計而得到期望的顏色和亮度也是相當困難的。為了解決這個問題，有些光珠的成分必須先與更穩定的物質結合，在燃燒後才得到期望的焰色，下面是利用一些化學成分來產生不同的煙火焰色，有些焰色的產生必須添加額外的化學成分。

1. 紅光 (Red Light)

藉由提供能量給鋇鹽或鋰鹽，激發鋇或鋰原子外層電子而放射的光，屬於螢光，波長 600-646 nm。碳酸鋰 (lithium carbonate, Li_2CO_3) 可產生紅光，碳酸鋇 (strontium

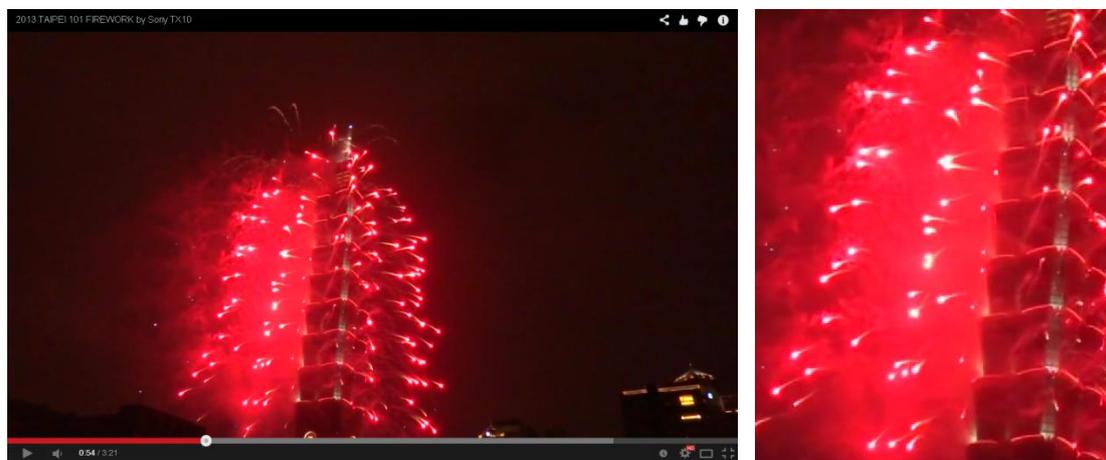


圖 20：碳酸鋇可產生鮮明的紅光

(圖片來源：Su Qing Yuan, 2013 TAIPEI 101 FIREWORK by Sony TX10 · YouTube · <https://www.youtube.com/watch?v=WDWVBn9tHaQ> 。)

使是微量的鈉雜質（黃色）足以壓倒或改變其他顏色。太多煙霧或殘渣會遮蔽期望的顏色，細心的配方是必要的。煙火與其他物品

carbonate, SrCO_3) 可產生鮮明的紅光，如圖 20 所示（左圖為放大圖，以下皆同）。

2. 橙光 (Orange Light)

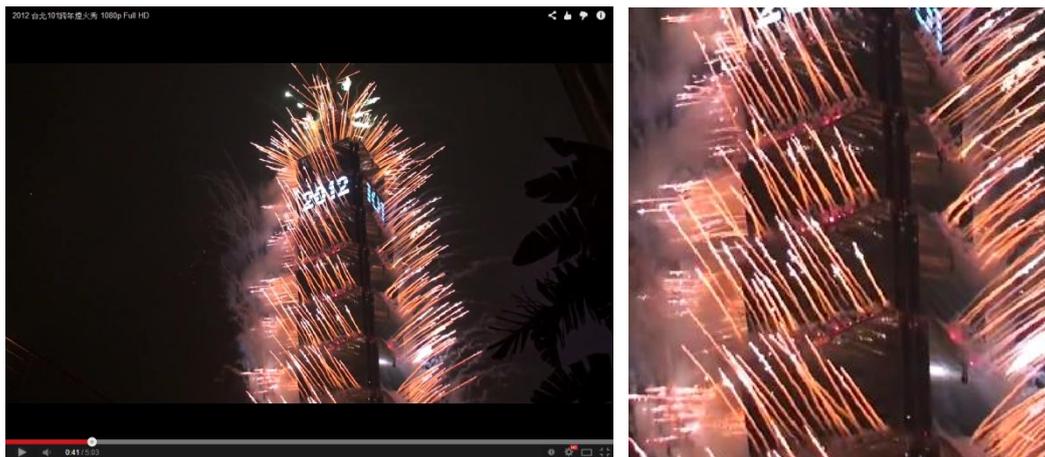


圖 21：氯化鈣或硫酸鈣可產生橙光

(圖片來源：sakaki912 · 2012 台北 101 跨年煙火秀 1080p Full HD · YouTube · <https://www.youtube.com/watch?v=LPeFv48rC4> 。)

藉由提供能量給鈣鹽，激發鈣原子外層電子而放射的光，屬於螢光，波長 591-603 nm。氯化鈣 (calcium chloride, CaCl_2) 或硫酸鈣 (calcium sulfate, $\text{CaSO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ ，此處 $x = 0, 2, 3, 5$) 產生橙光，如圖 21 所示。

3. 黃光 (Yellow Light)

藉由提供能量給鈉鹽，激發鈉原子外層電子而放射的光，屬於螢光，波長 589 nm。氯化鈉 (sodium chloride, NaCl) 可產生黃光，硝酸鈉 (NaNO_3) 與冰晶石 (cryolite, Na_3AlF_6) 混合可產生更強的黃光，如圖 22 所示。

4. 綠光 (Green Light)



圖 22：氯化鈉可產生橙光

(圖片來源：Coro Soak, 2014 Taipei 101 New Year Fireworks, YouTube, <https://www.youtube.com/watch?v=iJcOzJMVLNw> 。)

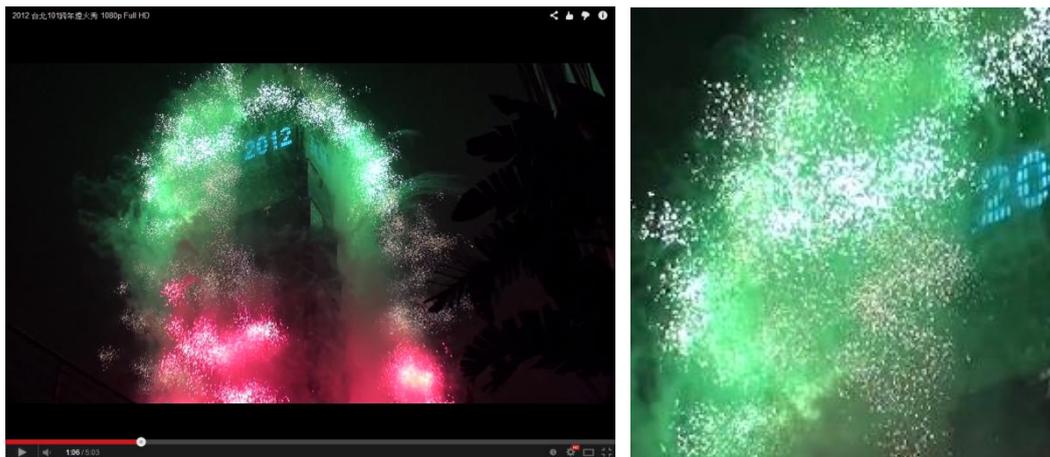


圖 23：銀鹽與氯化物質混合可產生明亮的綠光

(圖片來源：sakaki912 · 2012 台北 101 跨年煙火秀 1080p Full HD · YouTube · <https://www.youtube.com/watch?v=LPeFnv48rC4> 。)

藉由提供能量給銀鹽和氯化橡膠 (chlorinated rubber)，激發銀原子外層電子而放射的光，屬於螢光，波長 511-533 nm。由於氯化銀在室溫下的穩定性低，通常不單獨當作發光劑，因此銀鹽必須與更穩定的化合物 (如氯化橡膠) 相結合，在煙火的混合成分中，燃燒時釋放出氯原子，再生成 BaCl^+ ，產生明亮的綠光，如圖 23 所示。單

獨使用銀鹽於焰火可創造蘋果綠的顏色。

5. 藍光 (Blue Light)

藉由提供能量給氯化亞銅 (copper(I) chloride, CuCl)，激發銅原子外層電子而放射的光，屬於螢光，波長 460-530 nm。由於氯化銅 (copper(II) chloride, CuCl_2) 在高溫下不穩定且在低溫下產生的焰火不明顯，因此不

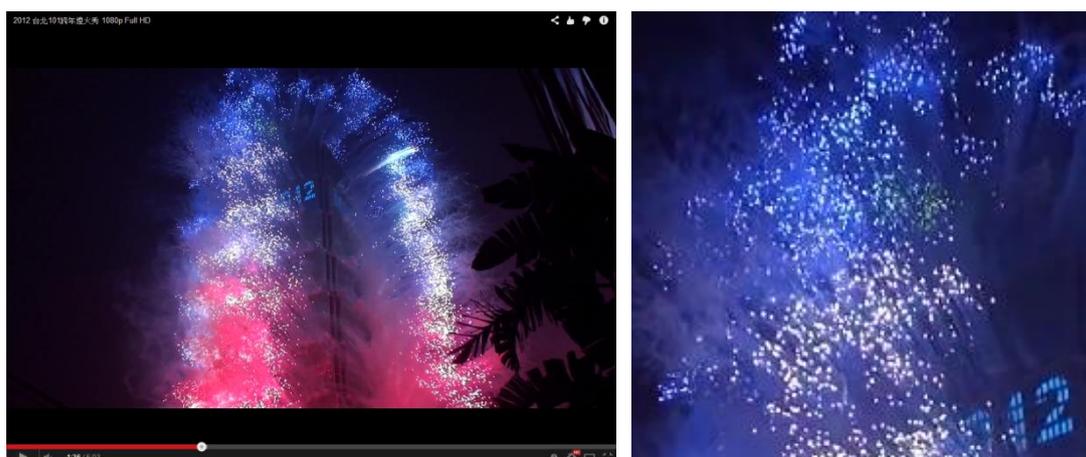


圖 24：氯化亞銅燃燒可放射藍光

(圖片來源：sakaki912 · 2012 台北 101 跨年煙火秀 1080p Full HD · YouTube · <https://www.youtube.com/watch?v=LPeFnv48rC4> 。)

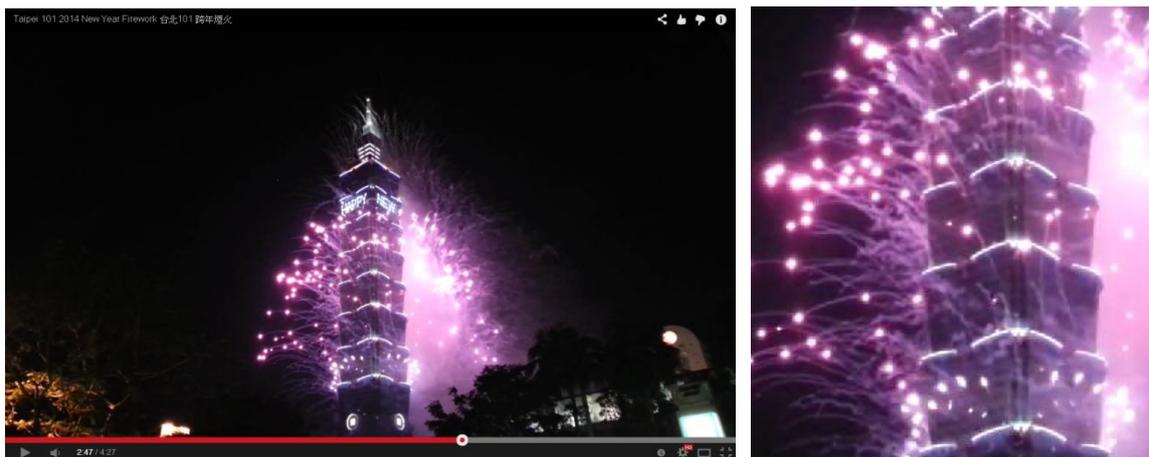


圖 25：煙火的紫光是通過使用紅光和藍光混合一起產生的光

(圖片來源：iamrickz, Taipei 101 2014 New Year Firework 台北 101 跨年煙火 · YouTube · <https://www.youtube.com/watch?v=SIA3AIQNoSM> 。)

單獨使用它當作發光劑。通常，混合銅粉及乙醯亞砷酸銅 (copper acetoarsenite, Paris Green, $\text{Cu}_3\text{As}_2\text{O}_3\text{Cu}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2$) · 加熱燃燒產生氯化亞銅，可放射藍光，如圖 24 所示。單獨使用氯化亞銅可產生翠藍的光，銅粉可產生藍綠色的煙火，銅鹵化物可用來製作藍色的色調。

6. 紫光 (Purple Light)

藉由提供能量給鋇鹽和銅鹽及其穩定物質，激發鋇和銅原子外層電子而放射出混合的紫光，屬於螢光，波長 432-456 nm。由於鉀鹽釋放紫光的強度不佳且價格昂貴，因此通常不當作煙火的發光劑。一般而言，紫光是透過使用紅光和藍光混合一起產生的光，利用碳酸鋇 (紅光) 以及銅和乙醯亞砷酸銅 (藍色) 的混合物燃燒而產生，如圖 25 所示。



圖 26：鎂或鋁粉末燃燒可產生白光

(圖片來源：Arthur Chang · 2011-101 跨年煙火 · YouTube · <https://www.youtube.com/watch?v=LPeFny48rC4> 。)

7. 白光 (White Light)

藉由施加熱量給白熱化的金屬 (如鎂或鋁粉末)，使之升高溫度，產生白光，屬於白熾光，如圖 26 所示。事實上，鎂粉燃燒極其明亮，幾乎令人眼花繚亂的白光，用來產生白色的火花或提高煙花的整體明亮度。鋁粉用於產生白色的火焰和火花。

8. 銀光 (Silver Light)

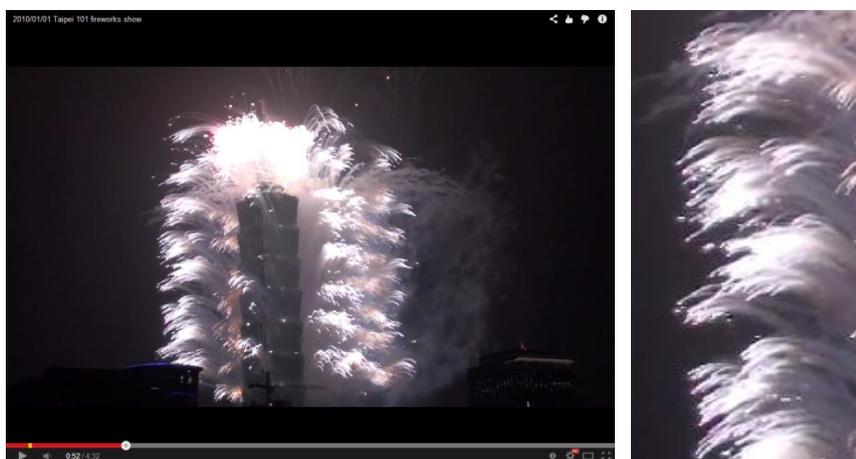


圖 27：多量的鈦粉比例混合可得到偏銀色的火花

(圖片來源：洪英傑 · 2012 跨年 101 煙火 · YouTube · <https://www.youtube.com/watch?v=pcvqK-pgDpU> 。)

藉由施加熱量給鈦、鋁或鎂的粉末或薄片，使之升高溫度，產生銀光，屬於白熾光，如圖 27 所示。鎂粉和鋁粉用於產生白色的火花，而鈦金屬粉末或片狀燃燒可產生銀色的火花。多量的鈦粉以及少量的鎂粉和鋁粉比例混合可得到偏銀色的火花；少量的鈦粉以及比例多量的鎂粉和鋁粉混合可得到偏銀白色的火花。

9. 黃金光 (Gold Light)

藉由施加熱量給鐵與碳的粉末混合物、活性炭粉末或油煙，使之升高溫度，產生黃

金光，屬於白熾光，如圖 28 所示。鐵粉用來產生火花，鐵金屬的溫度高低決定火花的顏色。目前的技術不允許產生足夠的熱量使鐵產生藍光。

臺北 101 大樓 2013 年跨年煙火壯觀的效果持續約 3 分鐘，這些煙火來自西班牙，由於其具有冷螢光和低排放水準，產生低碳排放量的水準，因此這類的煙火變得更環保，也強調優雅和美麗。

現今，嶄新的煙火發展聚焦於富氮化合物 (nitrogen-rich compounds) 的應用。相對於傳統的含碳高能材料，富氮化合物的燃燒是非碳骨架的氧化而形成高熱。對煙火而言，這些高能量材料能夠當作有潛力的推進劑、焰色劑和燃料，最終與低毒性的金屬離子結合，如銅離子代替銀離子。結合富含氮的材料的煙火有幾個優點：唯一或大部分的氣體產物 (無煙霧燃燒)、生成高熱、高推進力、高比衝 (specific impulse) 及高的火焰溫度。

“綠色”煙火 (“Green” fireworks) 主要



圖 28：鐵與碳粉末混合物、活性炭粉末可產生黃金光

(圖片來源：Arthur Chang · 2011-101 跨年煙火.MP4 · YouTube · <https://www.youtube.com/watch?v=LPeFmv48rC4> 。)

是避免過氧酸鹽和重金屬的使用，適用於此類煙火的化合物應該是廉價的且容易合成，以及不具有吸收濕氣的性質。高能量的反應速率應該依期望的目可作調整，其反應通常被分類為“燃燒 (burning) ” (反應速率為每秒數毫米或釐米的範圍) 和 “爆燃 (deflagration) ” (每秒數米) 或 “爆炸 (detonation) ” (每秒數公里)。

■ 結語

近千年來，煙火的顏色是由黑火藥產生的橙色火花和金屬粉末的白色火花，1930 年代以來，全世界的煙火表演變得花樣百出而且嘆為觀止。臺灣煙火表演也日漸精進，高空煙火如精彩且震撼的雙十國慶煙火；地面煙火如帶給國人驚艷和歡樂的臺北 101 跨年煙火。臺北 101 煙火是全球有記錄以來一座施放超大型煙火的摩天大樓，創造煙火表演的奇蹟。在短短三分鐘發射三萬發煙火，這是結合千年煙火的結晶、運用物理化學的原理、融入藝術美學以及精密操控電腦所呈現

的結果。

臺北 101 跨年煙火秀有地雷煙火、噴泉煙火、彗星煙火、飛魚煙火、柳樹煙火、馬尾煙火、閃爍煙火和開掌花煙火等多采多姿的效果，還有紅、橙、黃、綠、藍和紫光的螢光火花以及白光、銀光、黃金光的白熾光火花。這些效果涉及煙火內部結構的設計、煙火花式的藝術構思、高樓平台鷹架的搭建，電腦控制發射煙火的配合，明顯地揭露這類煙火的展現需要跨領域的結合。以化學而言，煙火涉及火藥、化學成分、氧化劑、還原劑、氧化還原反應、燃燒、爆炸、能量、熱量、不完全燃燒、化學計量、波長、光譜學、白熾光、螢光及“綠色”煙火等多重且複雜的化學概念，很適合用於中學自然科、藝術美學和生活科技跨領域的教學。

■ 參考資料

1. 爆竹煙火管理，
<http://www.firebook.tw/lawfiles/b02.pdf>。
2. 臺北 101 跨年煙火表演，維基百科，

- <http://zh.wikipedia.org/wiki/台北101跨年煙火表演>。
- 台北101跨年煙火288秒的璀璨 迎接建國百年榮耀，
http://www2.taipei-101.com.tw/NEWSV/news_in.aspx?News_Sn=114。
 - 低空煙火介紹，
http://www.fireworks.com.tw/service_01.htm。
 - History of Fireworks,
<http://www.pyrouniverse.com/history.htm>.
 - Firework, Wikipedia,
<http://en.wikipedia.org/wiki/Firework>.
 - Different Types of Fireworks - Effects and Patterns,
<http://www.squidoo.com/different-types-of-fireworks-effects-and-patterns>.
 - How Fireworks Work,
<http://www.pyroinnovations.com/devices.html>.
 - The Quick 10: The Names of 10 Fireworks Effects,
<http://mentalfloss.com/article/31097/quick-10-names-10-fireworks-effects>.
 - FIREWORK EFFECTS,
<http://www.fireworksarcade.co.uk/firework-effects>.
 - The Names of 10 Fireworks Effects,
<http://www.pbs.org/a-capitol-fourth/fireworks-fun/firework-names/>.
 - 104 FIREWORK VIDEOS OF CAKE EFFECTS,
<http://www.ghengisfireworks.com/Page/38/104-firework-videos-of-cake-effects.aspx>.
 - Types of Fireworks,
<http://www.manchester-fireworks.com/Collection/information.php/types-fireworks-i-7>.
 - The Magical Colors of Fireworks,
<http://www.colourlovers.com/blog/2008/02/25/the-magical-colors-of-fireworks>.
 - How to Make Gunpowder,
<http://www.wikihow.com/Make-Gunpowder>.
 - Anatomy of a Firework,
http://www.pbs.org/wgbh/nova/fireworks/anat_nf.html.
 - How Fireworks Work,
<http://www.pyrouniverse.com/consumer/howtheywork.htm>.
 - 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)).
 - Klapötke, T. M. and Steinhäuser, G. "Green" Pyrotechnics: A Chemists' Challenge. *Pyrotechnics*, **2008**, Vol. 47, Issue 18, 3330-3347.
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/anie.200704510/pdf>.
 - How are Fireworks Colors Made,
<http://www.sciences360.com/index.php/how-are-fireworks-colors-made-10193/>.
 - Light and Colour,
<http://www.ch.ic.ac.uk/local/projects/gondhia/lightcolour.html>.
 - Chemistry of Firework Colors,
<http://chemistry.about.com/library/weekly/aa062701a.htm>.