製作並示範 壓電塑膠管炮

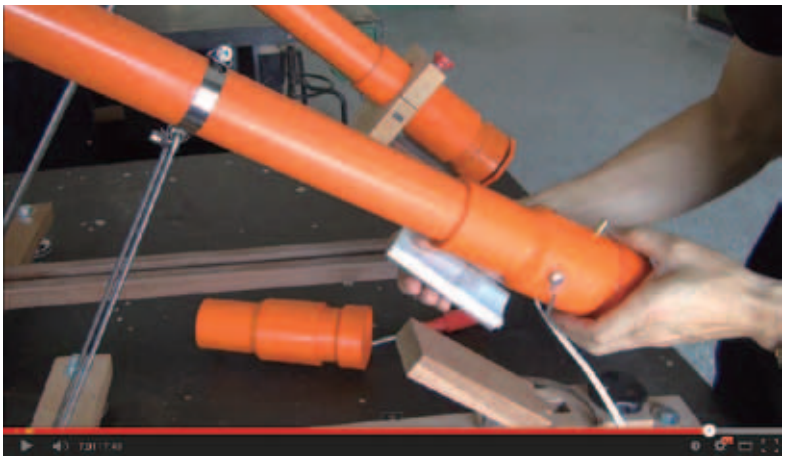
文．圖 / 廖旭茂、卓慶良

利用竹筒製作竹筒炮，在典禮活動中產生巨響，增加活動的歡樂氣氛，已屢見不鮮。惟在都會區竹子取得困難，而且竹炮的管口經過多次爆炸的巨大衝擊，結構常發生爆裂現象。加上點火引爆的不確定感，以致竹筒炮有演示的安全顧慮及耐用性不佳的缺點。本文的塑膠管壓電電石炮為竹筒炮的改良化學實驗教具，是利用一般五金材料行販售的下水道耐壓 PVC 水管零件、烤肉爐的壓電開關、以及結合工藝技術，製作可調整發射角度的壓電電石炮。塑膠管電石炮解決竹筒取得不易、結構不耐衝撞以及引爆有安全顧慮的問題，它的亮眼外觀更呈現了化學與工藝跨領域合作的設計成果。

本文除描述 PVC 壓電電石炮的製作方法外，也提供兩部影片給讀者作為製作和示範的參考，並且詳細地說明此實驗所涉及的原理與概念。

■影片觀賞

影片 1：製作壓電 PVC 管炮（Making a PVC Tube Canon using Piezo igniter），http://www.youtube.com/watch?v=dxiePeHS3p4，YouTube。



影片 2：示範壓電 PVC 管炮（Demonstrating a PVC Tube Cannon with Piezo ignition），http://www.youtube.com/watch?v=ZjTLRu7He4U，YouTube。

製作 PVC 管壓電炮

藥品與器材

橘色 PVC 下水道管（1-1/2”）、異徑接頭（1-1/2”~2”）、清潔口（2”）、PVC 膠合劑，壓電點火器、透明電線、烙鐵、焊錫、不銹鋼條（4 mm）、木製材料及電動工具等。

製作步驟

製作步驟概要：焊接壓電開關及延長導線 → 鑽 PVC 管兩個螺絲孔和一個加水孔 → 焊接導線和螺絲釘 → 組裝可調式支撐炮座。相關詳細步驟，分述如下：

01 先繪出機構組裝圖，再按圖施工組裝。PVC 壓電開關的機構設計，如圖 1 所示：

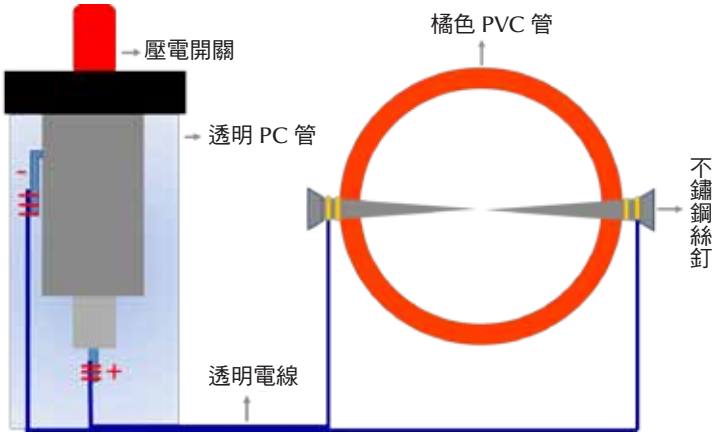


圖 1：壓電開關的連接機構圖。

02 準備焊接工具組、一個壓電點火器以及兩條 50 公分透明電線。用錫焊，連接透明電線與壓電點火器的兩極，焊接完成後，以絕緣膠帶（俗稱電火布）纏繞焊接處數圈，絕緣保護，並套上 12 公分長的透明 PC 管，以利安全操作。壓

電點火器控制開關與電線的連接，如圖 2 所示：

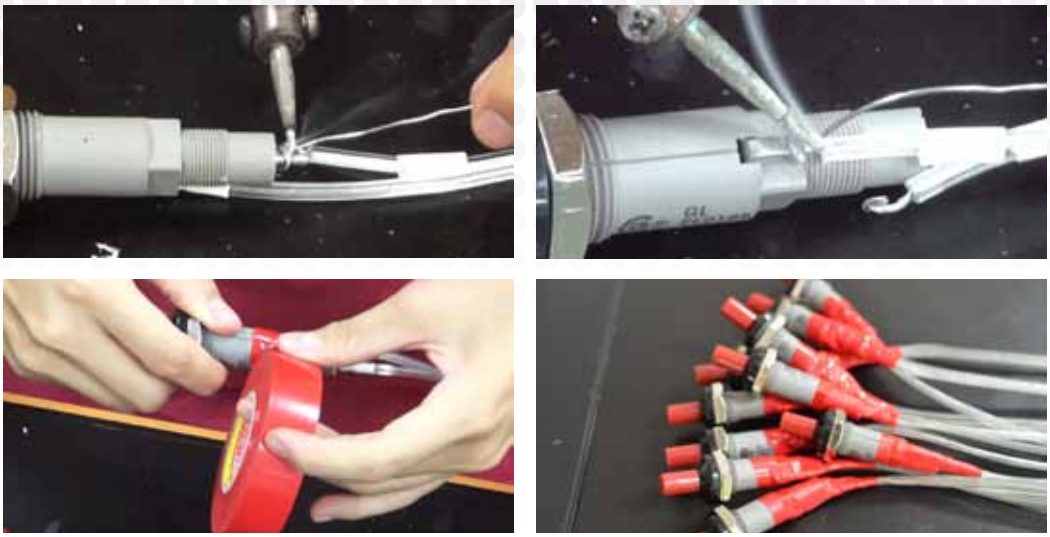


圖 2：壓電點火器控制開關與電線的連接，連接線焊接（左上和右上），焊接處絕緣保護（左下和右下，右下為多個焊接成品）。

03 用硬質塑膠膠合劑，黏著清潔口與異徑接頭在一起，等待膠合劑乾掉，再進行鑽孔。

04 在異徑接頭的 PVC 管上，用電鑽鑽出兩個螺絲孔，鎖入螺絲釘至適當位置後，繞上事先已剝去外皮的透明電線，並以熱熔膠固定之。異徑接頭的 PVC 管內固定鏍絲釘，如圖 3 所示：

圖 3：PVC 管內固定鏍絲釘。

05 用鑽床，鑽出一個加水孔，裝上壁櫥層板用的母架止，再鎖上公架止，即完成活動式加水孔。相關製作流程，如圖 4 所示：

圖 4：PVC 管的活動加水孔製作。

06 組裝可調式炮架：以不銹鋼束帶，固定 PVC 管在事先做好的可調式木製炮座上，安裝金屬收納支撐架，鎖好梅花螺絲與調整腳至水平位置後，即完成可調式炮座 PVC 管壓點電石炮的製作。相關製作流程，如圖 5 所示：

圖 5：可調式炮座與 PVC 管壓電的組裝。

07 製作泡棉彈頭：取一段長約 15 cm 泡棉管（外徑 50 mm，內徑 30 mm），和一段 25 cm 長的泡棉棒（直徑 30 mm），先沾少許的保麗龍膠在泡棉管口，接著塞入泡棉棒在泡棉管中，管與棒的兩端切齊，最後用透明膠帶纏繞數圈固定、可避免強大的爆炸力道使管與棒分離。泡棉的材質太輕，建議在泡棉管內加入一個或兩個華司墊片，可維持泡棉彈頭飛行的穩定度。

示範壓電 PVC 管炮

藥品與器材

安全護目鏡、耳塞、鑷子、碳化鈣（calcium carbide, CaC_2；俗稱電石）、100 mL 量杯（或 50 mL 針筒亦可）、1 L 塑膠試劑瓶（盛水）。

示範過程

01 把製作完成的壓電 PVC 電石炮帶到空曠處，戴好安全護目鏡、耳塞等護具。

02 從藥品罐中選取一顆電石（直徑或邊長在 1 cm 以內），放入清潔口的旋蓋內，並旋緊旋蓋；接著以量杯盛水，從加水孔倒入約 20 mL 的水，立即鎖緊公架止。等待 10~15 秒，按壓壓電的點火控制鈕，進行點火試爆。示範流程，如圖 6 所示：

圖 6：添加電石到清潔口的旋蓋上（左上），旋緊清潔口的旋蓋（右上）；加水（左下）、點燃引爆瞬間（右下）

安全注意事項及廢棄物處理

- 本化學實驗裝置的製作，務必在專業老師的指導下方可製作。
- 碳化鈣不可接觸到眼睛或吸入粉末，以免造成結膜發炎或鼻腔黏膜損傷。萬一皮膚接觸到濕的碳化鈣，會產生強鹼氫氧化鈣，而刺激並灼傷皮膚。
- 引爆後的清理工作，必須戴上乳膠手套，避免接觸到反應後的廢液。以清水沖洗 PVC 管時，在打開清潔口的旋蓋前，可利用塑膠量杯承接，以方便回收廢液，此廢液經沉澱、過濾即為澄清石灰水，可作為高中化學「看誰最會生氣」等實驗之用。
- 示範後的 PVC 管內可能有殘餘的乙炔氣體，切忌眼睛貼近直視管口，以免誤觸開關而釀成危險。
- 黏著 PVC 管的硬質膠合劑有強烈刺鼻味，宜在室外或通風處操作。

與竹筒炮比較

PVC 管壓電炮與傳統竹筒炮的外觀上有很大的不同，竹筒炮的重量比 PVC 管炮為重，當竹筒炮引燃時，必須以點燃的火把或瓦斯點火槍靠近火口，演示者心理壓力較大。竹筒炮的竹材為纖維束，直接折斷直向的竹筒不易，但橫向握裹纖維束的竹筒則相當脆弱，多次引爆後，竹管口常發生開裂現象。反觀，以下水道耐壓 PVC 厚管及壓電開關製作的塑膠管炮，除材料取得方便外，外觀較為輕巧，收納容易，且因 PVC 管的材質屬高分子聚合物，耐壓性高，並兼具彈性，不易發生開口爆裂的現象。

壓電點火器開關是利用機械能轉變為電能，產生火花，進而引爆乙炔氣體的裝置，其優點是：（1）它可以焊接一段適當長度的電線，以遠端來控制開關，免除明火引燃時，需過於靠近竹炮的恐懼。（2）在壓電炮後方有一個可直接旋開的清潔口旋蓋，方便在引爆前放置電石及在引爆後清潔廢液。以及（3）木工製作的可調式炮座，結構穩固紮實、外觀亮眼吸睛，除可做為有機化學演示實驗教具外，而且適當設計的泡棉彈頭，可藉此辦理科學趣味比賽（射遠、射準）。PVC 管炮與竹筒炮的外觀及機構性質，如圖 7、8 和 9 所示。

圖 7：PVC 管壓電炮（左）與竹筒炮（右）的外觀

圖 8：兩種引燃方式（左圖是用壓電開關，右圖是以火把引爆）。

圖 9：多次引爆後的比較，PVC 管炮的管口完整（左），竹筒炮的管口裂開（右）。

原理與概念

PVC 管壓電電石炮的製作和示範涉及之原理有兩個方面：一是壓電點火器的壓電效應（piezoelectric effect）或稱壓電性（piezoelectricity），二是電石與水的反應，產生乙炔氣體；透過壓電點火，瞬間引燃高爆炸性的乙炔氣體。以下分別詳細地說明相關的反應和作用。

壓電效應

壓電效應：晶體的排列具有方向性，若沿著一定的方向施加外力，則晶體發生形變的同時，材料體內的電偶極矩會因壓縮而變短，此時壓電材料為抵抗這變化會在材料表面產生正負電荷，形成極化現象，因此導致介質的兩表面帶有相反電荷，形成一個電場，兩端產生一個電位差。若以導線連接至兩金屬尖端時，按壓之機械能轉換成電能，隨即產生火花放電。日常生活中打火機、熱水器、瓦斯爐等都是利用此原理點燃瓦斯的。

壓電材料具有電介質材料電能與機械能互換的特性，也就是施加電壓即可產生形變，或發生形變就會產生電能。常見的壓電材料可分為單晶壓電，如石英、硫化鎘、鈦酸鋇（barium titanate, $BaTiO_3$）晶體等；除此之外最常使用的多晶壓電材料（又稱壓電陶瓷），是使用鈦酸鉛（lead titanate, $PbTiO_3$）和鋯酸鉛（lead zirconate, $PbZrO_3$）混合製成的複合材料，鋯鈦酸鉛（lead zirconate titanate, $Pb[ZrxTi_{1-x}]O_3$ $0 \le x \le 1$，簡稱 PZT），通電時形變程度最多可達 20%，但鉛具有毒性，製程相當麻煩。石英晶體受應力作用時，機械能轉變為電能，如圖 10 所示。

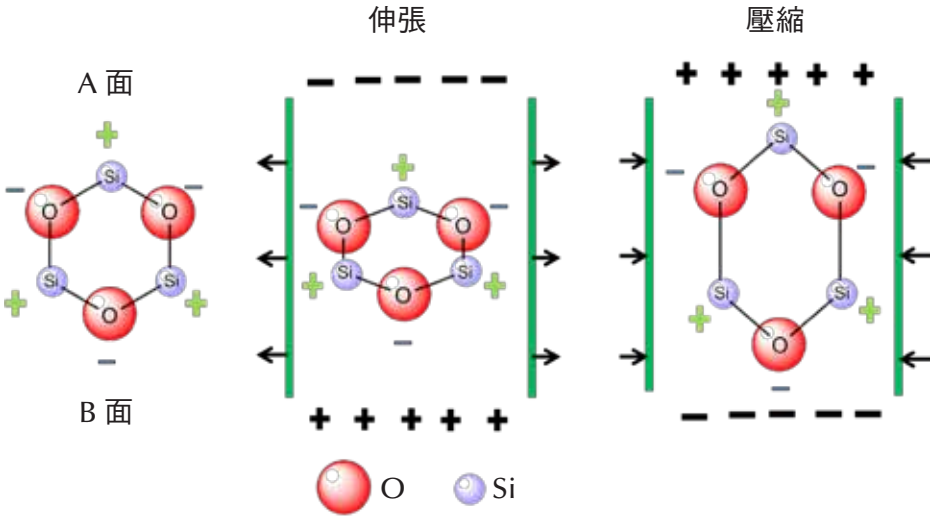


圖 10：石英受應力作用伸張時，相反的兩結晶面產生一個電位差；當應力由伸張改為壓縮時，電位差改向。

電石與水反應

碳化鈣（calcium carbide, CaC_2）俗稱電石，市售的電石多為灰黑色，碳化鈣的含量約 80~85%，其餘為 CaO、Ca_3P_2、CaS、Ca_3N_2 等。因為此類化合物與空氣中的水蒸氣作用而分解出少量的 PH_3、NH_3、H_2S 等氣體，所以電石常有令人作嘔的味道。它與水（H_2O）反應產生乙炔（acetylene, ethyne）氣體，其反應相當快速，過程中還放出大量的熱，如反應

式 [1] 所示：

$$CaC_2(s) + H_2O(l) \rightarrow C_2H_2(g) + Ca(OH)_2(aq) + heat \quad [1]$$

乙炔為高爆炸性的氣體，與適量的空氣（氧氣）混合，極易產生強光與爆炸聲響。在過去的北臺灣金山、石門一帶流行的「礦仔火捕魚」，就是藉由電石加水產生的乙炔氣體，連接一根竹子製成的「火槍」，當在火槍口點火時，隨即產生火焰強光，吸引趨光性的青鱗仔（沙丁魚的一種），聚集而捕撈的一種方法。電石加水的產物之一為二氧化碳氣體，如反應式 [2] 所示。乙炔與不充足的氧氣混合，導致不完全燃燒，產物為一氧化碳氣體或黑色碳粒，如反應式 [3] 或 [4] 所示。

$$2C_2H_2(g) + 5O_2(g) \rightarrow 4CO_2(g) + 2H_2O(g) \quad [2]$$

$$2C_2H_2(g) + O_2(g) \rightarrow 4C(s) + 2H_2O(g) \quad [3]$$

$$2C_2H_2(g) + 3O_2(g) \rightarrow 4CO(g) + 2H_2O(g) \quad [4]$$

乙炔的化學能藏在參鍵之中，在標準狀態下，若兩莫耳的乙炔：約放出高達 2,500 kJ 的熱量，火焰可達 3,300℃的高溫，可用於切割金屬。壓電 PVC 管炮和竹筒炮就是在中空的管內，點燃乙炔氣體，產生的高溫使氣態的產物（二氧化碳和水蒸氣）瞬間膨脹，因而產生令人震耳欲聾的巨響，增添演示效果與熱鬧氣氛。

致謝

感謝國立大甲高中室內設計科卓慶良老師和王楷棋同學協助製作及拍攝影片。

參考資料

1. 蘇明德，壓電陶瓷及導電陶瓷。科學發展，2010，446 期，頁 68~71。http://www.cyut.edu.tw/lms_history/982/sys/read_attach5713.pdf?id=340169。
2. 李明揚，壓電材料新星——環保鐵酸鉍。科學人，2010，95 期。http://sa.ylib.com/MagCont.aspx?Unit=newscan&id=1510。
3. http://www.creationscience.com/onlinebook/Radioactivity3.html
4. Piezoelectricity, Wikipedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Piezoelectricity.
5. Carbide lamp, http://www.youtube.com/watch?v=UqXnBXmPQ3U.

廖旭茂　國立大甲高級中學化學科教師
卓慶良　國立大甲高級中學室內設計科教師