化學遊樂趣——碳黑急急棒

文／高衡成、林佑燐、范靜怡、施佳妤、高憲章

前言

碳黑在一般社會大眾行的印象中，大多是應用在傳統產業中的黑色材料，特別是在橡膠、塑膠和染料等領域的使用比較為人所知。然而，憑藉其優異的特性，碳黑其實不光只是黑色，作為補強材料、抗紫外線、防靜電或是導電塗層等等，讓碳黑材料在許多應用中發揮著關鍵作用。

當前科技日新月異，碳黑的應用領域已不再僅限於傳統產業，尤其在能源元件領域的價值愈加顯著。隨著電動車的興起，鋰電池的應用重新引起了人們的廣泛關注。碳黑具有卓越的導電性及熱穩定性，在各種溫度下都能顯著提升鋰電池的容量及充放電效率，這不僅有助於提高電池性能，也符合現代循環經濟的理念。因此，碳黑無疑是一種值得更多人了解與重視的材料。

要將碳黑以簡單的方式介紹給社會大眾，透過科普實驗動手操作是最直接明白的方式之一，淡江大學理學院科學教育中心長期執行化學遊樂趣活動，本次與國內專門生產碳黑材料的國際中橡集團合作，由淡江科教中心設計教案內容，由國際中橡提供材料，將碳黑以科普實驗的形式透過科普活動帶給各地學生。

開始構思實驗內容時，參考了在綜藝節目中曾經風靡過一段時間的「電流急急棒」，一種利用導電金屬棒在迷宮中行走的裝置，當金屬棒觸碰到管線的瞬間，內部電路會迅速接通，可能發出火花或是警示音來提醒使用者，製造戲劇性的效果，然而在綜藝節目上，電流急急棒是體積很大的一個裝置，要在教室或是實驗室複製一組都不是件容易的事，這時，一個突然的靈感冒了出來，在臺灣坊間還曾經流行過一種迷宮地圖，在紙上把路線畫好之後，把紙捲成一捆，慢慢推著路線往前進，走到死路就失敗重來。參考這種迷宮地圖的設計，並將迷宮地圖和電流急急棒的概念結合起來，用導電型碳黑材料與高組抗型的碳黑材料來製作線路，在外觀上同樣是黑色線條，能夠有視覺效果，卻呈現出幾乎相反的物理特性，接著使用帶有燈號的探針行走迷宮路線，就能夠在一般教室中進行操作與教學，這個實驗的名稱就被設定為「碳黑急急棒」。

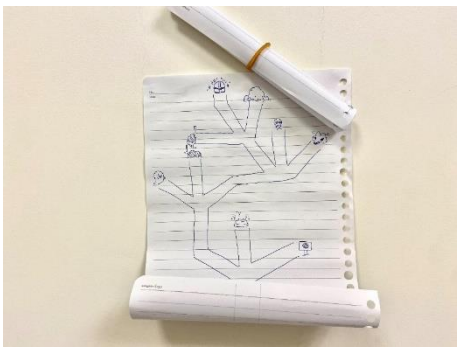

圖 1、紙捲迷宮示意圖

教學內容設計

當設定好遊玩方式之後，碳黑的選擇便成為了首要的難題。與國際中橡的研發部門討論過後，依據實驗設計的目標，國際中橡提供了兩個型號的碳黑產品，兩者皆做過表面改質，其中編號 EREBOS C222 的碳黑改質較多，具有較多的親水官能基，當官能基的量多時，這種碳黑絕緣性也會比較好。相較起來，EREBOS C015 的改質較少，僅帶有少量官能基，而且提升導電性質的聚集體結構值也較高，較容易形成導電通路。兩者的物理特性相反，在粉末狀態的外觀接近。

圖 2、碳黑示意圖（待修改）

其次則是如何用較為直觀的方式呈現導電與高阻抗的特性，實驗會利用特殊設計的 LED 燈泡充當金屬棒的角色，如果今天走到了導電碳黑的路線時，會觸發亮燈效果告訴你走對了，走到高阻抗碳黑的路線上時，LED 燈泡會立刻熄滅，此外即使走在導電碳黑路線，也可能因為錯誤的操作手法，導致距離造成電阻過大而造成燈泡熄滅，讓教師有更多的機會教導這些電學的基本概念，因此「碳黑急急棒」這麼一個蘊含科學又老少咸宜的實驗，就此誕生。

實驗藥品的配方

絕大部分的碳黑材料都是非常細的黑色粉末，從外觀上來看，比雷射印表機的碳粉還要更細，這麼細的粉末不會直接附著在紙材上，此外一般未改質的碳黑材料在水中的分散性不佳，單純以水當溶劑配置的墨水，除了碳黑粉末會聚集造成繪圖時很嚴重的暈染問題，在溶劑乾了之後碳黑也跟著從紙上脫落，因此在調配墨水時，需要添加其他成份來提高墨水的厚度，讓紙張上的墨線均勻，也必須讓碳黑材料能留在紙上。

為此，首先是要讓墨水變得濃稠，必須選擇增稠劑，廚房裡最常用的增稠劑是澱粉或是太白粉，利用澱粉之間的氫鍵在受熱時被破壞，讓水分子可以進入澱粉的結構中，使澱粉吸水而膨脹，形成結構鬆散的黏稠狀液體，達到增稠的效果，在試做墨水配方時，選用了澱粉作為增稠劑，一方面調整澱粉的劑量以提高墨水濃稠度，一方面監控墨線的

導電特性不會因為澱粉添加過量而降低。

除了變稠之外，更重要的是要變黏，以讓碳黑粉末可以黏著在紙材上。而最常見的黏著劑是以聚乙烯醇為主要成份的透明膠水，當聚乙烯醇塗抹在紙張上時，聚乙烯醇和紙張上的纖維素可能產生氫鍵，讓聚乙烯醇親水的部分互相糾纏展生黏性。實驗設計時雖然嘗試過使用聚乙烯醇系列的膠水，但是會使導電性大打折扣，因此使用了阿拉伯膠做為墨水配方中的黏著劑，阿拉伯膠是一種天然樹脂，是食品中常見的添加物，也常做為黏著劑使用，同樣的，阿拉伯膠在添加時也需監測碳黑的導電性質是否有大幅降低，同時在墨線乾了之後，碳黑粉末黏著在紙上的效果是否良好。

最後，為了避免澱粉發霉，可考慮在墨水中加入了極少量的苯甲酸作為防腐劑。苯甲酸是一種有機化合物，屬於芳香族羧酸，它在自然界中廣泛存在，特別是在一些水果，例如藍莓和蔓越莓以及某些香料中，當碳黑墨水配置後不需要保存時，可以省略添加防腐劑的步驟。

圖 3、實驗藥品圖

圖 4、實驗器材圖

實驗藥品｜

國際中橡碳黑 EREBOS C015

國際中橡碳黑 EREBOS C222

澱粉（玉米粉）

阿拉伯膠粉末

苯甲酸

蒸餾水

實驗器材｜

量杯

天平

攪拌棒

含蓋自來水毛筆

含電池燈籠燈具

杜邦線

圖畫紙

2B 鉛筆

橡皮擦

25%阿拉伯膠配製

實驗的第一步是製備阿拉伯膠漿液。取 25g 阿拉伯膠粉末，加入熱水中，攪拌至完全溶解，最終得到 100g 的阿拉伯膠漿液，濃度為 25%。

導電型墨水配置

選用型號為 C015 的導電型碳黑 4.5g 和澱粉 4.5g，均勻混和後加入 13.5g 已調配好的阿拉伯膠漿液，並加入 22.5g 水，可得 45g 的導電型墨水。若須保存超過數日，建議在調配好後加入少量的防腐劑。

高阻抗型墨水配製

選用型號為 C222 的高阻抗型碳黑 6.75g 和澱粉 4.5g，混合均勻後，加入 15.7g 已調配好的 25% 阿拉伯膠漿液，最後再加入 18g 水，可得 45g 的高阻抗型墨水，若須保存超過數日，建議在調配好後加入少量的防腐劑。

檢測工具的製作

用來檢測碳黑急急棒路線圖的工具是含電源的 LED 燈組，以三顆 LR41 型號 1.5V 電池驅動的燈籠 LED 燈為基礎，利用杜邦線，把兩極延伸出約 10 公分，尾端為裸線當作測試用的探針，形成通路時 LED 燈會發亮，斷路時 LED 燈則會熄滅。測試時，兩個探針接觸到導電型碳黑所畫的路線時能夠形成通路，而只要有一端是在高組抗型碳黑的路線上，燈泡就會熄滅，此外即使是在導電型碳黑的路線上，當兩個探針距離過遠時，因為電阻與距離成正比，燈泡也會熄滅。

實驗教學

配合淡江科教中心化學遊樂趣活動的動手做單元環節安排，每一次碳黑急急棒的課程時間約 30 至 40 分鐘，前 5 分鐘進行碳黑材料基本介紹，20 分鐘的實驗操作，最後 5 分鐘解釋實驗中使用的配方和原理。每位同學作作完則可以將自己設計的碳黑迷宮路線圖帶走，偵測用的 LED 燈具則視狀況提供。

在墨水準備好之後，每位實驗者將會獲得一張尺寸適中(A6 大小)的圖畫紙。這些圖畫紙經過裁剪，尺寸統一，以方便實驗操作。同時，每位實驗者還會配發一支 2B 鉛筆與橡皮擦，用於草稿繪製。接下來，為了畫出路線，我們不選擇傳統的水彩筆，而是使用自來水毛筆。這種筆的前端設計有蓋子，使用後可蓋好，避免碳黑墨水四處溢出。最後，為了便於保存每位實驗者的作品，我們準備了與圖畫紙尺寸相匹配的 5 號夾鏈袋。

實驗操作步驟如下。

步驟一：構思迷宮路線

在實驗開始階段，保留一小段時間讓實驗者思考與設計迷宮路線，教師須提醒實驗

者不需設計太過複雜的迷宮線路，由於這些線路需要後續上墨描繪的程序，因此過度複雜的路線會影響接續的每一個操作。

步驟二：畫出正確與錯誤的路徑

在決定好迷宮路線之後，先以 2B 鉛筆以實線描繪出迷宮路線圖的正確路徑，接著以虛線描繪出錯誤的路徑，也就是說這些虛線是用來誤導使用者走向錯誤的路徑，實線與虛線視實驗者的創意，可以是互相交錯，也可以像樹枝狀的展開。這些鉛筆所描繪出的線路是後續描繪墨線的基礎。

步驟三：塗上導電型墨水

這是整個過程中最為關鍵的步驟，將導電墨水畫在每一條實線上，讓每條線條完整且均勻。這樣可以確保電流能夠順利流通，達到預期效果。

步驟四：塗上高阻抗型墨水

接下來，使用高阻抗墨水，根據先前描繪的虛線，將高阻抗墨水畫於每一條線上，讓每條線條完整且均勻。這樣可以確保電流流動受到阻礙，達到預期效果。

步驟五：測試迷宮的正確性

兩種墨水都畫完後，需讓其充分乾燥。隨後，進入測試階段，檢查迷宮的效果。拿起特製的燈泡，當電流通過正確的路徑時，燈泡應該會亮起；若燈泡未亮，則表示可能走錯了路徑。

步驟六：保存迷宮

最後，在完成測試並確認迷宮設計成功後，將迷宮小心地放入夾鏈袋中，以便妥善保存並保護這一獨一無二的創作。

圖 5、碳黑急急棒完成示意圖

實驗注意事項

1、清晰區分實線與虛線

在畫草稿時，必須清楚地區分實線和虛線，這樣才能在使用不同的墨水時，避免畫到錯誤的路線。

2、保持適當的線間距

由於每支畫筆的寬度固定，線與線之間應保持大約一個拇指的寬度。這樣做可以保證路線清晰，避免兩條路線擠在一起。

3、統一使用筆頭較寬的一面

在畫線時，務必統一使用畫筆的較寬一面。這樣能避免讓觀察者輕易辨識出哪條是正確路徑，從而增加實驗的挑戰性和趣味性。

4、確保兩種墨水沒有重疊

當設計的路徑有相互重疊時，畫的墨水應該要以導電型墨水優先，不能讓高阻抗型墨水蓋掉導電型的墨水線，會造成實驗失敗。

5、確保墨水乾透後再進行下一步

每次塗完一種墨水後，可以輕輕搧動，幫助墨水乾燥。在墨水完全乾透之前，不要進行下一步操作。除了避免墨水未乾時互相混合，影響後續步驟的準確性，也避免操作者滿手沾滿墨水。

6、收起導電型墨水

完成使用導電型墨水後，記得將它收起來，以免與接下來的高阻抗墨水混淆。保持工具和墨水的分開使用，避免污染影響接下來的使用者。

相關文案設計

搭配實驗的內容，將碳黑擬人化之後設計出了一系列的碳黑娃娃製作物，導電型碳黑拿著插座與插頭象徵電力的連接，高組抗型碳黑拿著厚厚的盾牌擋住電力通行，增稠劑讓碳黑之間有黏性彼此黏在一起，黏著劑則是把碳黑黏在地上，針對每一個碳黑急急棒中要提醒參與者的特色，皆製作了簡單的海報與說明卡片，在將碳黑急急棒的實驗成品帶回家或與朋友分享時，這些卡片與製作物能夠給予基礎的資訊，加深學習者的印象。

結論

碳黑材料不單只是黑色的粉末，而是非常廣泛的被應用在生活的各種層面中，是一種常被忽略的特殊材料，透過「碳黑急急棒」實驗認識碳黑的其中兩種物理特性，是非常直觀而又容易理解，而添加劑與增稠劑在實驗中所扮演的角色也顯而易見，是非常容易教導給參與者的觀念，透過淡江科教中心與國際中橡的合作，這個創新的科普實驗已經在超過 30 所學校，帶領近千位同學進行操作過，不論大人小孩在測試燈具發亮或熄

滅時都充滿著驚喜的表情，對這個多變的碳黑材料更充滿了好奇心。

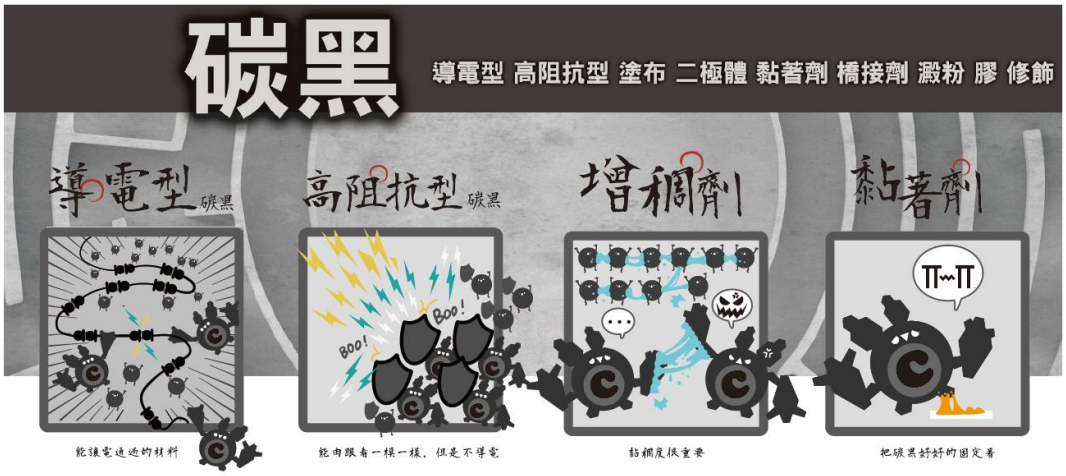

圖 6、碳黑娃娃卡片圖

高衡成、林佑燐、范靜怡、施佳妤、高憲章

淡江大學理學院科學教育中心