彩幻珠實驗—認識高吸水性聚合物

文・圖／周芳妃

前言

自從 1950 年代拋棄式紙尿褲問世以來，大多數現代人在小時候都曾有穿戴紙尿布的經驗。隨著塑膠科技的發展，發明了高吸水性聚合物（superabsorbent polymers，簡稱 SAP），目前不僅已普遍應用的紙尿布商品，包括小孩尿布、成人安全內褲等。高吸水性聚合物也大量應用於農業和園藝，可做為土壤保水劑，避免農作物根部缺水。高吸水性聚合物也可叫高吸水性高分子或高吸水性樹脂，其原料包含了澱粉、改質的纖維素及合成聚合物。目前超強的高吸水性樹脂主成分都是合成聚合物，其在純水中可吸收 30 ～ 70 倍於本身體積的水分，重量變化可達到 500 倍。超強的高吸水性樹脂中最常見的成分為聚丙烯酸與聚丙烯酸鈉的共聚物，它的單體單元包含了丙烯酸單元及丙烯酸鈉單元，部分結構式的示意圖如圖 1。在此共聚物結構中，碳鏈上有許許多多分支的 -COOH 與 $-COO^-$ 原子團，這些 -COOH 與 $-COO^-$ 原子團數量比例不一定為 1:1，彼此的排列順序也沒有規則。-COOH 與 $-COO^-$ 兩種原子團與水分子間都具有很強的氫鍵作用力，因此高吸水性聚合物就可以吸收到很多水分子，形成水凝膠的固體型態。以下利用三個活動中的一些有趣的實驗來認識高吸水性樹脂的性質。

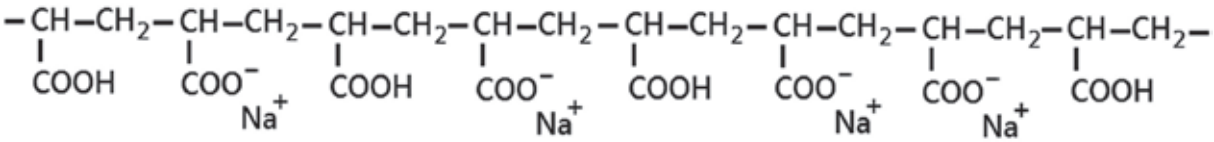


圖 1　聚丙烯酸與聚丙烯酸鈉共聚物的部分結構示意。

活動一、認識高吸水性聚合物的吸水性質

目前市面上國內各式尿布商品與土壤保水劑的吸水物質大多是使用臺灣製造的高吸水性樹脂，在國內化工行裡很容易買到。以下實驗採用編號甲和乙的兩種高吸水性樹脂，甲樹脂為白色粉末狀，市售商品俗稱為「人造雪」，主要使用於尿布內的吸水劑；乙樹脂為白色顆粒狀，主要使用於土壤保水劑，如圖 2 所示。

分別將體積大約為 1 mL 的甲樹脂和乙樹脂放入容量 30 mL 透明塑膠杯中，在杯內每隔 10 秒分次加入一些水，觀察樹脂吸水後的外觀變化，當加入超過杯頂的水時，樹脂吸水變成的水凝膠仍繼續膨脹體積，而出現凸出杯頂的形狀，外觀非常有趣，如圖 3 所示。

圖 2　照片左邊為白色粉末狀的甲樹脂；右邊為白色顆粒狀的乙樹脂。甲樹脂為台塑產品「台速保」，乙樹脂為台塑產品「台麗保」。

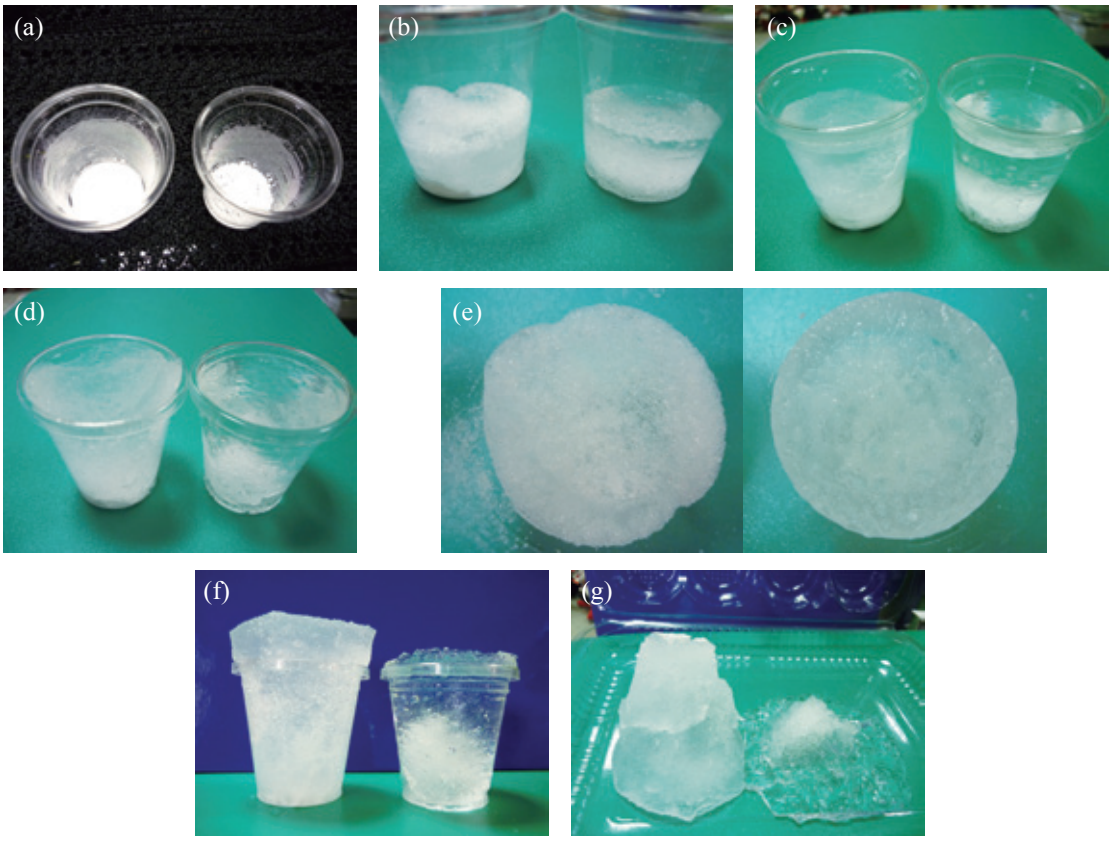


圖 3　高吸水性樹脂加水的外觀變化。圖 (a) ～ (g) 照片裡的左杯為甲樹脂，右杯為乙樹脂。(a) 體積大約為 1 mL 的樹脂；(b) 加入半杯的水；(c) 加入八分滿杯的水；(d) 加入滿杯的水；(e) 吸水過程中的樹脂表面外觀；(f) 加入超過杯頂的水，水凝膠出現凸出杯頂的形狀；(g) 上下顛倒方式將杯子內吸水後的樹脂全部倒出來。

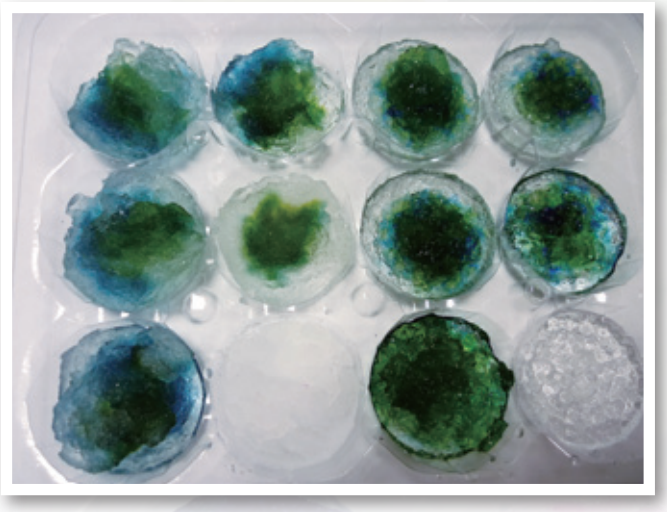
活動二、彩幻珠的酸鹼實驗

高吸水性樹脂加水做成的水凝膠可以大大減緩水分的流動，因此水凝膠中水溶液的溶質粒子擴散速率也大大減慢。利用此種水凝膠特性，在水凝膠中操作一些化學反應，只要不破壞聚合物的結構，就可將一些本來很快的反應調降其反應速率，方便觀察到動態的變化過程。以下的酸鹼中和反應實驗，由於酸鹼指示劑的顏色多彩變化，在此就把變色的水凝膠實驗稱為「彩幻珠的酸鹼實驗」。

「彩幻珠的酸鹼實驗」的準備過程如下：

1. 找個透明薄塑膠做成的 12 格餅盒，將活動一甲、乙兩種樹脂做成的水凝膠分別均量分配到格子中，在水凝膠裡加上數滴廣用指示劑或酚酞，可混合加入這兩種酸鹼指示劑，也可保留一些無色的水凝膠。接著在各個小格中分別加入不同劑量的醋酸（乙酸）溶液或蘇打（碳酸鈉）溶液，無色的水凝膠就不需加入酸或鹼。最後，慢慢攪拌每個小格中的水凝膠，使每個小格中水凝膠出現不同的顏色，如圖 4 所示。
2. 加入的酸鹼試劑濃度較大時，會造成高吸水性樹脂的吸水能力下降，就可觀察到水凝膠的有些水分又流出來了。
3. 在分格的餅乾盒中調出各種顏色的水凝膠之後，取 30 mL 透明塑膠杯，接著將水凝膠一層層放置到杯子裡，依照水凝膠呈現的顏色，由先而後的順序為紅、橙、黃、綠、藍、靛、紫等顏色，此順序也是水凝膠內混合物的酸鹼性質由酸性到鹼性。顏色分層之

(a)



(b)

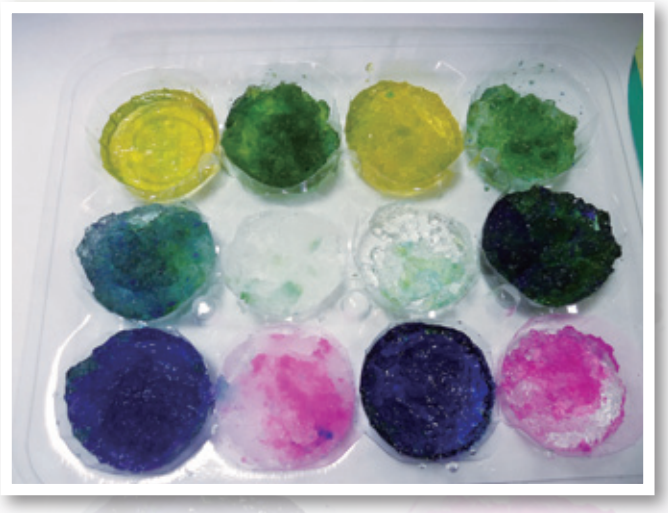


圖 4　彩幻珠酸鹼實驗的準備過程，圖 (a)、(b) 照片裡的左邊 6 格為活動一的甲樹脂，右邊 6 格為乙樹脂。(a) 在水凝膠裡加上數滴廣用指示劑或酚酞；(b) 分別加入不同劑量的醋酸溶液或蘇打溶液。

間也可加入少量透明無色的水凝膠，如圖 5 所示。

4. 將杯子內的七彩水凝膠放置數日，觀察水凝膠的顏色變化，可以發現水凝膠內的酸鹼中和反應速率變得很慢，如圖 6 所示。

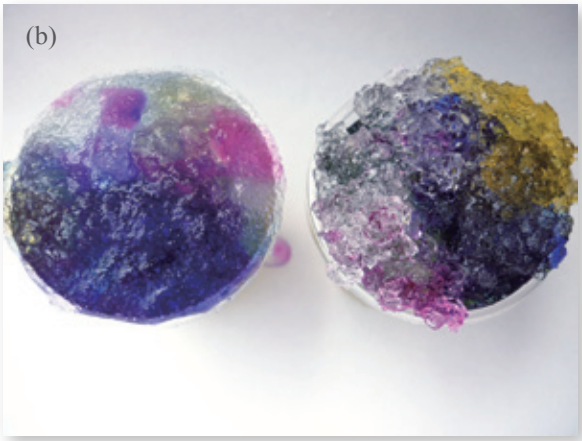


圖 5　將水凝膠一層層放置到杯子裡，由先而後的順序為紅、橙、黃、綠、藍、靛、紫等顏色。圖 (a)、(b) 照片裡的左杯為活動一的甲樹脂，右杯為乙樹脂；(a) 是側照圖，(b) 是杯頂圖。

圖 6　將七彩水凝膠放置一段時間的外觀與顏色變化。圖 (a)、(b) 照片裡的左杯為活動一的甲樹脂，右杯為乙樹脂。(a) 是 2 小時後，七彩顏色分層仍很清楚；(b) 是 7 日後，酸鹼中和反應仍未完全，仍還有三種顏色的分層。

活動三、「彩幻珠搭虹橋」教學方案

廣用指示劑是多種酸鹼指示劑的混合配方，常用的成分配方指示劑有四種：甲基橙、甲基紅、溴瑞香草酚藍及酚酞。利用「彩幻珠的酸鹼實驗」模式，可以發展教學方案來設計酸鹼指示劑的配方，再加上使用適量醋酸及蘇打溶液控制溶液的酸鹼度，做出廣用指示劑的七彩顏色變化。在「彩幻珠搭虹橋」教學方案中，進行流程依序為：認識四種酸鹼指示劑、預測混搭酸鹼指示劑的變色情形、在水凝膠中觀察酸鹼指示劑的顏色變化，最後，再利用

水凝膠製作成七色彩幻珠並且搭出虹橋造型。「彩幻珠搭虹橋」教學方案提供給五年級以上的學生上課時，可進行 2 小時的教學。若是提供給七年級或更高年級以上的學生上課時，可再增加酸鹼指示劑、酸鹼中和反應、聚合物等基礎知識的介紹。

「彩幻珠搭虹橋」教學方案中，每小組所需的器材與藥品清單如下：

蘇打溶液 1%	50 mL
醋酸溶液 1%	50 mL
甲基橙（簡記為 MO）0.05%	10 mL
甲基紅（簡記為 MR）0.05%	10 mL
溴瑞香草酚藍（簡記為 BTB）0.05%	10 mL
酚酞（簡記為 PP）0.05%	10 mL
【0.05% 指示劑配製法：先用酒精配製成 0.1%，加水稀釋為體積 2 倍即可】	
高吸水性樹脂	5 g
50 mL 試藥滴瓶	2 個（盛裝醋酸溶液、蘇打溶液）
10 mL 試藥滴瓶	4 個（盛裝酸鹼指示劑）
夾鏈袋	1 個（盛裝高吸水性樹脂）
分格餅盒（至少 12 格）	1 套
30 mL 塑膠杯	2 個
3 mL 塑膠滴管	2 支
刮勺	2 支
牙籤	12 支
透明膠帶	一些

「彩幻珠搭虹橋」教學的流程如下：

1. 認識四種酸鹼指示劑

認識甲基橙、甲基紅、溴瑞香草酚藍、酚酞四種廠見的酸鹼指示劑，其變色範圍如圖 7 所示。

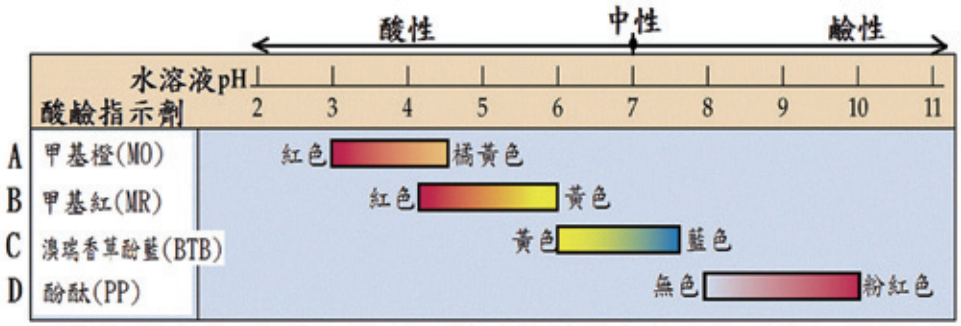


圖 7　四種酸鹼指示劑與其變色範圍。【編號：A = (MO)、B = (MR)、C = (BTB)、D = (PP)】

2. 預測混搭酸鹼指示劑的變色情形

預測混搭酸鹼指示劑的變色的方式可利用直尺放在表 1 上方，由上而下對齊特定 pH 值，先讀出對照到的各指示劑呈現的顏色，再將這些顏色混合起來，用來判斷混合指示劑顏色。例如酸性條件指定放在 pH = 4 時，甲基橙與甲基紅皆呈現紅色，兩者混合仍是呈現紅色；例如中性條件為 pH = 7 時，甲基紅的黃色加上溴瑞香草酚藍的藍色混合可呈現綠色。四種指示劑各種混合模式可按照表 1 進行，也將預測混搭酸鹼指示劑的變色填到表格內。

表1　四種酸鹼指示劑的混合模式與預測顏色

水溶液	指示劑顏色		
指示劑	酸性	中性	鹼性
A+B			
A+C			
A+D			
B+C			
B+D			
C+D			

水溶液	指示劑顏色		
指示劑	酸性	中性	鹼性
A+B+C			
A+B+D			
A+C+D			
B+C+D			
A+B C+D			

註：編號 A = (MO)、B = (MR)、C = (BTB)、D = (PP)

3. 在水凝膠中觀察酸鹼指示劑的顏色變化

將高吸水性樹脂與水混和形成水凝膠，均量分到 12 格餅盒的格子內。在每個格子中調配不同的酸鹼指示劑混合配方，其中可保留一格為透明無色的彩幻珠。接著，在有加入酸鹼指示劑的每個格子中都先加入醋酸溶液 5 滴，然後一邊攪拌，一邊逐滴加入碳酸鈉溶液。每加完 1 滴蘇打溶液就要將溶液攪拌均勻，直到顏色不再變化。觀察水凝膠中酸鹼指示劑的顏色變化過程，依次記錄酸性、中性、鹼性顏色到表 2 中，並將表 2 結果與表 1 的預測做比較。

表2　在水凝膠中的四種酸鹼指示劑的混合模式與記錄顏色的變化結果

水凝膠	指示劑顏色		
指示劑	酸性	中性	鹼性
A+B			
A+C			
A+D			
B+C			
B+D			
C+D			

水凝膠	指示劑顏色		
指示劑	酸性	中性	鹼性
A+B+C			
A+B+D			
A+C+D			
B+C+D			
A+B C+D			

註：編號：A = (MO)、B = (MR)、C = (BTB)、D = (PP)

4. 將水凝膠製作成彩幻珠並且搭出虹橋造型

在前步驟完成之後，12 格的水凝膠都已經是鹼性。接著，繼續加入適量醋酸溶液控制水凝膠的酸鹼度，在 12 格餅盒裡作出多種顏色的彩幻珠，其中可保留一格為透明無色的彩幻珠。操作結果舉例如圖 8 所示。

利用兩個 30 mL 空透明塑膠杯為基座，用透明膠帶做好兩個杯口 5 cm 間距底板。將七色彩幻珠先分層放置到兩個杯子中，再放置到間距的底板，排列彩幻珠做成拱橋形狀，形成漂亮的虹橋作品。不同小組可彼此欣賞作品並互相討論，一些作品舉例如圖 9 所示。

圖 8　在 12 格餅盒裡作出多種顏色彩幻珠。

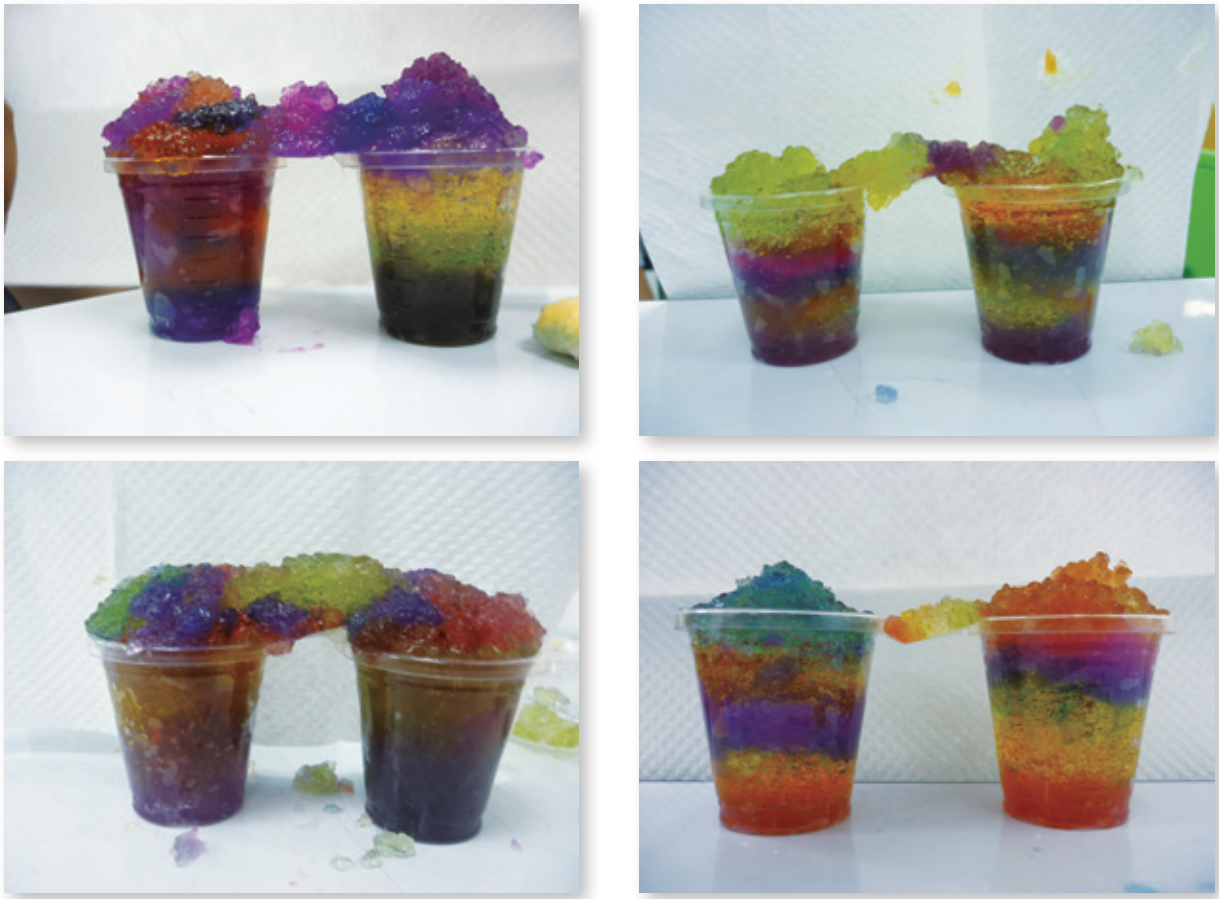


圖 9　各式各樣的彩幻珠搭虹橋作品。

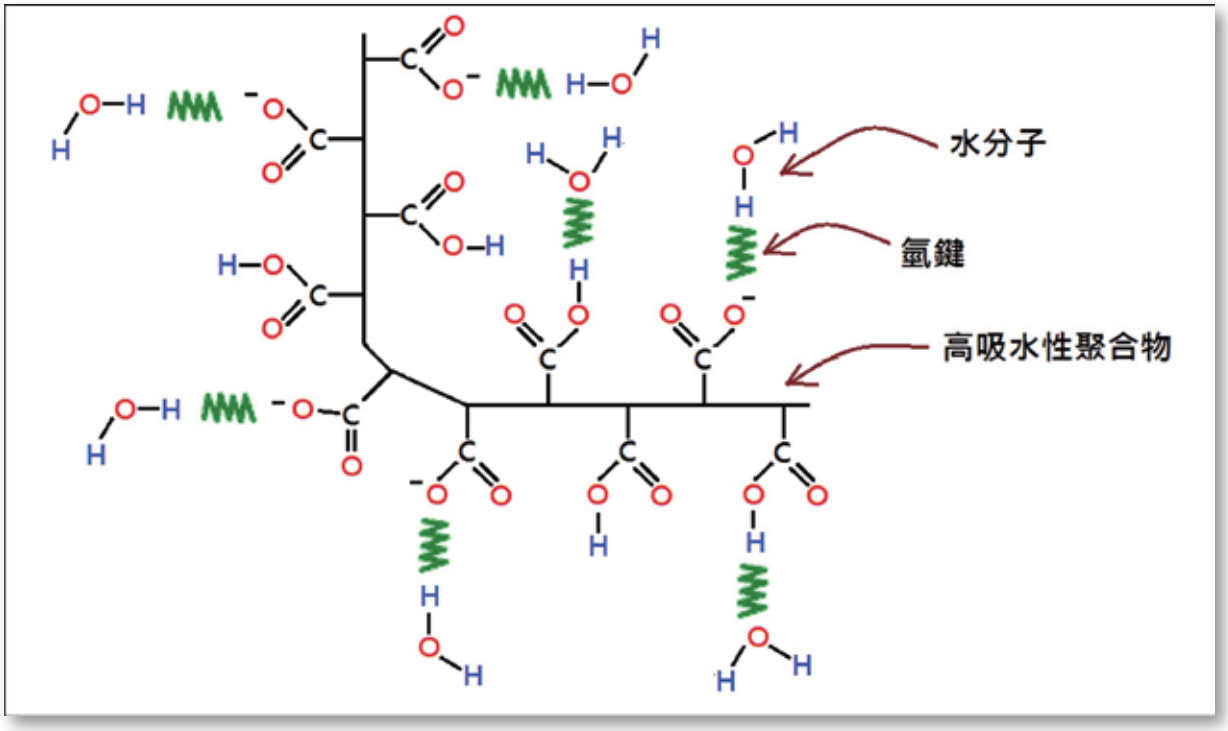


圖 10　高吸水性樹脂結構中的氫鍵作用的示意圖。

教師補充資料

1.　高吸水性樹脂中的網狀結構

高吸水性樹脂之吸水性能與其合成聚合物的網狀結構息息相關。在聚丙烯酸及聚丙烯酸鈉構成的共聚物中，鏈狀聚合物進行少量交聯後，吸水率則會增加為數百倍甚至達到千倍。但是若交聯密度太高，吸水率反而下降。高吸水性樹脂具有適量的網狀結構，可達到最佳的吸水率。依據各種實驗結果，推測水分子主要是被束縛在吸水性樹脂的網狀結構內。若是吸水性樹脂的交聯密度太高，造成網格太小，那麼水分子就不易進入網狀結構內，造成吸水率下降；若是交聯密度太低，造成網格太大，則水分子易流失而不具備保水性。水分子進入聚合物網格後，由於網格碳鏈的彈性以及親水性官能基對水分子的氫鍵束縛，水分子的熱運動受到限制，不易從網格中逸出，因此，高吸水性樹脂的良好保水性也不易受熱影響。高吸水性樹脂達到最佳吸水率時，其在受熱至 100 °C 時，也僅失水約 10% 左右。

2.　高吸水性樹脂中的氫鍵作用

目前超強的高吸水性樹脂中最常用的聚合物為聚丙烯酸與聚丙烯酸鈉的共聚物，它的單體單元包含了丙烯酸單元及丙烯酸鈉單元。在此共聚物結構中，-COOH 與 $-COO^-$ 兩種原子團與水分子間都具有很強的氫鍵作用力，因此高吸水性聚合物就可以吸收到很多水分子，形成水凝膠的固體型態。高吸水性樹脂結構中氫鍵作用的示意圖如圖 10。

周芳妃　臺北市立第一女子高級中學化學科教師