化學遊樂趣：談紙知箋

高衡成[1]、**高憲章**[2]

淡江大學理學院科學教育中心[1]專任助理[2]執行長

國中上歷史的時候，總是會提到人類歷史上的四大發明，其中那位「改良造紙術」的蔡倫，雖然課本只用寥寥數語帶過，但這位古代公務員的貢獻，卻是人類文明史上一次深遠的技術飛躍。他不再依賴昂貴的絲帛，而是巧妙地利用樹皮、破布、麻頭等廢棄材料造紙，不僅大幅提升了紙張的品質，更透過降低生產成本，讓知識得以更廣泛地傳播。他所確立的造紙流程，實際上奠定了今日造紙工藝的基礎，而造紙更是一系列精細物理與化學變化的控制。

手抄紙與箋

即使是在古早的社會，紙張的分類就非常多樣化，例如依時代可以找到表彰人文品味的宋紙或是質地粗曠、用途多元的元紙等、若依原料則是麻、樹皮、動物皮、草紙等等、依產地有所謂的宣紙、開化紙等，古人還會根據不同的用途選擇合適的紙，書畫創作則需要吸墨性佳、能呈現筆鋒層次的紙，官府文書多使用強韌耐久、不易損壞的紙，日常記錄或草稿則可選擇較粗糙、成本較低的紙。

到了現代，紙的功能與用途涵蓋極廣，從粗糙的包裝紙、吸水性強的家庭用紙，到光滑的印刷文化用紙，其功能可以是紀錄、包裝、清潔、印刷等多元用途（圖 1）。它們的物理特性，如強度、白度、厚度、吸墨性等，都根據用途而有巨大差異。相較之下，「箋」則特指用於書信、便條、筆記或小型藝術創作的紙張，更強調書寫的流暢性、墨水的適應性，也非常講究紙張本身的精緻感與美觀度。箋的尺寸通常較小巧，表面可能經過特別的處理，使其觸感更佳，書寫時墨跡清晰，不易暈染。

圖 1

各種功能不同的紙材

製作方法上，儘管紙與箋都依循類似的造紙工序，但箋的製程往往更加精細。這些差異來自造紙工藝中的細部調整，包括原料纖維的種類、不同的添加劑、打漿的細度、抄紙時的水分控制，讓纖維素能夠產出各種不同的紙，並一路延續這項工法到現在。

造紙的工序

傳統造紙工藝通常被歸納為八道主要工法（圖 2），其順序如下：

圖 2
傳統造紙工法

1. 取材 （Selecting Materials）

要製作出特定用途的紙張，取材是決定性的第一步。因為不管是木材、棉麻到稻草，每種原料含有的纖維素特性都有差異，直接影響最終製作出來的紙張質感和強度。而且這些原料不能直接使用，還需要經過好幾個步驟的處理，因為纖維素一向和木質素混合在一起，雖然讓植物有堅硬的枝幹，但會讓紙張變黃變脆，在現代的手工藝或是科普活動中，也能夠用各類的纖維來做為原料，同樣是需要再經過處理。

2. 蒸煮 （Cooking）

在蒸煮階段，為了要將纖維素成功取出，需要藉由化學藥劑來高溫蒸煮分解木質素。常見的的方法有硫酸鹽法（Kraft Process）與亞硫酸鹽法（Sulfite Process）兩種，全球紙漿產量有將近 80%是透過硫酸鹽法。而硫酸鹽法是利用氫氧化鈉（NaOH）與硫化鈉(Na2S)混合的鹼性藥劑當作蒸煮液。經過這個步驟之後，木質素的結構會被破壞，溶解在蒸煮液之中，這個廢液通常會被稱作黑液，需要透過下一個的步驟去除（中華紙漿，2018）。

3. 漂洗 （Washing/Rinsing）

透過反覆的漂洗程序，將殘餘的木質素和雜質徹底清除，最終獲得純淨、可用的

纖維。

4. 散漿 （Pulping/Diluting）

將得到的纖維轉化為紙漿。纖維必須加水稀釋到一個合適的濃度（以本文的實驗為例，常用的濃度約為 1%）。散漿的濃度直接影響纖維在水中能否均勻分佈。如果濃度不對，抄出的紙張就會出現有些地方厚，有些地方薄的狀況，厚薄不均的紙張比較不堪使用。

5. 抄紙 （Sheeting）

將打散的纖維懸浮液（也就是紙漿）從水中過濾，使其在網篩上形成均勻濕紙頁的過程。這一步驟不僅是物理性的過濾，更是纖維素分子鏈進行初步自組裝的關鍵階段。在水中，纖維素纖維被大量水分子包圍，纖維素上的羥基 （-OH） 與水分子形成氫鍵，使纖維分散並帶有微弱的負電荷，彼此保持一定的距離。當紙漿接觸網篩時，水分子迅速排出，纖維則在水流剪切力和重力的作用下，開始在網篩上沉積，彼此初步交織。此時，纖維素上的羥基會開始與相鄰纖維的羥基產生微弱的氫鍵作用，形成最初的物理纏結與化學吸附。這些早期的相互作用雖然不足以賦予紙張強度，卻建立了紙張未來結構的雛形，決定了纖維的排列方向、均勻度與紙張的基礎紋理。若漿料濃度、纖維長度或攪拌方式不當，便會影響纖維的均勻分散與堆疊，使得最終紙張的物理性能，如強度與平滑度等等都會改變。

6. 壓榨 （Pressing）

透過重力或機械壓力，物理性地擠出纖維中的多餘水分，並在外層以吸水布料將水分帶走。當紙漿從網篩上撈起，形成濕潤的紙頁時，其內部仍充滿大量的水分子。壓榨的目的，是透過機械外力擠出這些水分，同時使鬆散的纖維更加緊密地排列。簡單的說，壓力減少了纖維間的距離，將纖維素分子上的羥基帶入彼此更近的「可形成氫鍵距離」，雖然此時氫鍵尚未大量形成，但纖維的物理性壓縮為後續化學鍵奠定了基礎。此外，壓榨給予的外部壓力也能驅除部分空氣，減少紙張孔隙，有助於提高紙張的密度與強度，初步修飾紙張表面。

7. 烘紙 （Drying）

壓榨後的紙張仍含有大量殘餘水分，此時紙張依然柔軟脆弱。烘紙步驟透過熱能，徹底蒸發這些束縛在纖維素分子之間及內部的水分。這是最關鍵的化學轉化時刻。纖維素分子富含的羥基是親水性的，在濕潤環境中，它們與水分子形成大量氫鍵。但隨著水分子被蒸發移除，這些羥基便會轉而與鄰近纖維上的羥基「重新配

對」，形成密集的纖維素-纖維素分子間氫鍵網絡。

這些由無數氫鍵交織而成的網絡，是賦予紙張獨特物理特性的核心。每一條纖維素分子鏈上都有眾多羥基，而這些鏈條又可與其他纖維素鏈透過氫鍵形成纖維。在烘乾過程中，這些弱化學鍵的集體作用，提供了紙張的強度、耐折性與抗撕裂程度。若烘乾不充分，殘留的水分會阻礙氫鍵的有效形成，導致紙張強度不足，易於斷裂，或是很容易撕開。

8. 成紙 （Finishing）

紙張乾燥後，透過壓光、施膠或表面塗佈等後續處理，賦予紙張最終質感與特定功能。從化學角度看，壓光能使紙張表面纖維更加平整、緊密，增加光澤度與平滑度。若進行表面施膠或塗佈，則是在紙張表面添加化學物質，以改善書寫性、抗水性、印刷顯色度，甚至增加防霉等特殊功能。這些表面處理能進一步優化紙張的化學物理性質，使其達到預期的使用要求。

淡江大學理學院科學教育中心（簡稱淡江科教中心）所執行的化學遊樂趣活動，長期與中華紙漿團隊合作，談紙知箋由中華紙漿提供材料，淡江科教中心設計教案，透過化學遊樂趣帶到全台各地學校，讓每位同學都能透過科普實驗的方式，親自體驗手抄紙的部分流程（圖 3）。手抄紙與一般用紙最大的差異在於，它保留了纖維的自然表面與手感，每張紙更能呈現出獨特的紋理。當同學在自己做的手抄紙上留下屬於自己的創作時，更能將這張獨特的手抄紙箋帶回去作為紀念。

圖 3

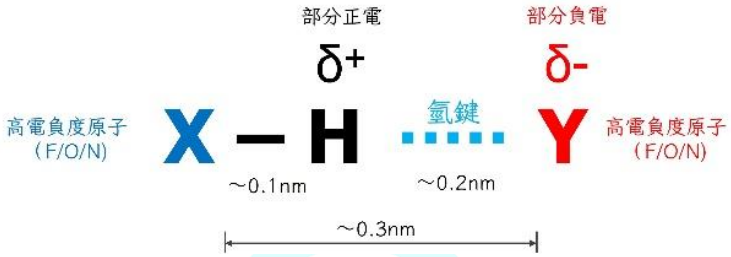
談紙知箋實驗進行過程

實驗原理與程序

氫鍵是一種特殊的分子間作用力（圖 4）。當氫原子與氧、氮或氟等高電負度原子形成共價鍵時，氫原子會帶上部分正電（δ^+），而高電負度原子則帶部分負電（δ^-），並擁有孤電子對。此時，若另一個分子上的高電負度原子，以其孤電子對靠近這

個帶部分正電的氫原子，便產生了「氫鍵」這種吸引力，氫鍵通常可用 X-H…Y 來表示。其中 X 以共價鍵與氫相連，而 Y 則具有較高的電子密度，一般是含有孤電子對的原子。以水分子為例，氧原子上的孤電子對能吸引鄰近水分子中氫原子上的部分正電荷，形成穩固的氫鍵網絡，賦予水獨特的物理性質，在水中的氫鍵常被表示為 O-H…O。

圖 4
氫鍵示意圖

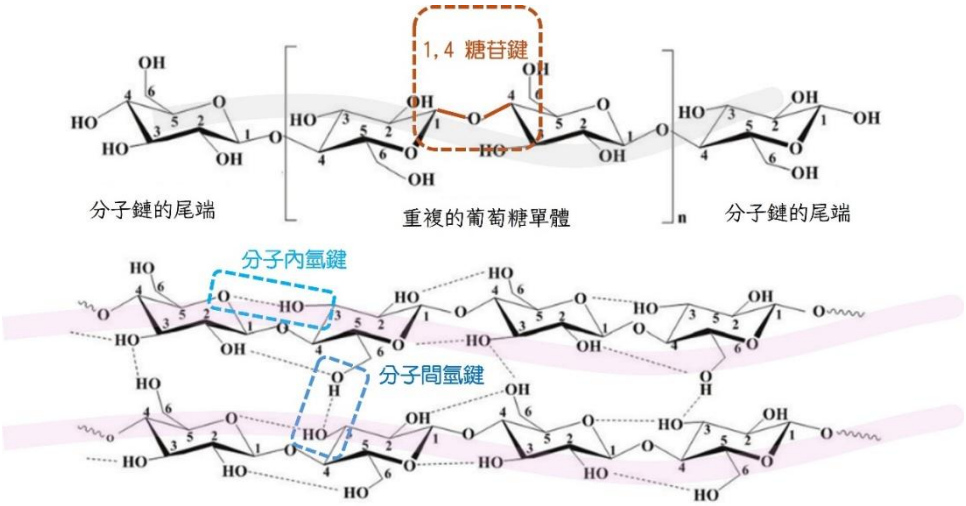


手抄紙的主要成分是植物纖維中的纖維素（圖 5），它是由 D-葡萄糖單元透過 β-1,4-糖苷鍵相連而成的長鏈高分子。在纖維素的每個葡萄糖單元上，都帶有多個羥基（-OH），這些羥基是形成氫鍵的天然位置，代表纖維素能透過氫鍵彼此吸附(Roberts, 1996)。理論上，纖維素間的氫鍵是賦予紙張韌性的關鍵。然而，隨意交纏的纖維素在微觀層面彼此之間的距離可能到了 10-10000nm，其實是遠超氫鍵形成的有效距離（0.15-0.35nm），使得乾燥的纖維即使含有豐富的羥基，也不一定可以形成足夠的分子間氫鍵(Fornué et.al , 2011)。

在抄紙階段，打散的纖維素纖維懸浮於水中。此時，水分子扮演了關鍵的「氫鍵中介」角色，它們與纖維素的羥基形成大量的氫鍵，使纖維分散並保持一定的距離。當水分子在網篩上逐漸排出時，纖維受到水流剪切力和重力作用，開始相互靠近並初步交織。核磁共振研究顯示，即使在紙張含水量仍達 20% 時，纖維間仍被多層水分子隔開。因此，抄紙階段雖然纖維開始堆疊，但主要仍是物理纏結，氫鍵網絡還沒有整個建立起來 (Fornué et.al , 2011) 。

圖 5

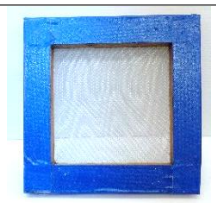
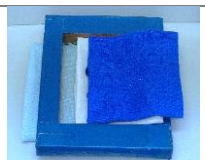
纖維素的結構與分子內、分子間氫鍵



接著必須壓榨，利用物理壓力進一步擠出大量水分，使纖維更加緊密，為氫鍵的形成創造有利條件。隨後的烘乾步驟，則是纖維素化學鍵合的決定性階段。隨著水分持續蒸發，原本纖維素與水分子之間的氫鍵逐漸斷裂。當纖維間的水分子完全退出後，纖維素分子上的羥基便能直接與鄰近纖維上的羥基對位，形成大量且穩定的纖維素-纖維素間氫鍵網絡。這些無數的氫鍵將彼此交錯的纖維素纖維牢固地黏合在一起，構建出一個堅固的三維網狀結構，賦予紙張最終的韌性與結構強度。整個手抄紙製作的過程，從物理靠近到化學鍵結的轉變，是手抄紙製作的原理，更是紙張由柔軟濕漿蛻變為實用載體的關鍵。談紙知箋實驗器材如表 1。

表 1

談紙知箋實驗器材 （含照片）

紙漿板	 **上層是手抄紙，下層是紙漿板**
自製手抄紙網	 手抄紙網
大/小吸水抹布 **不織布抹布**	 由下而上:大吸水抹布，手抄紙網，不織布抹布，小吸水抹布

矽藻土吸水塊	吸除過量水分
3L 塑膠盆	量杯
攪拌器	烤盤
印章/筆	保護手抄紙用的塑膠袋

談紙知箋實驗事前準備重點如下：

一、手抄紙網

本實驗所使用的手抄紙網由淡江科教中心自行製備。製作方式如下：

1. 將四根長 15 cm 的木棒以正方形排列成框架，並確認四角對齊。
2. 使用釘槍將四個接合處固定成穩固的木框。
3. 將細鐵絲網鋪放在木框上，確保中空部分被網面覆蓋，且邊緣有多餘地方可以固定。
4. 用釘槍或固定鐵絲網於木框邊緣。
5. 將多餘或突出之鐵絲邊緣剪除，務必將尖銳部分修整平滑，避免同學的手受傷。
6. 將布膠帶纏繞在木框四周，避免手碰觸到鐵絲。
7. 製作完成後即可使用，每次使用完以清水沖洗後晾乾，即可重複使用。

二、紙漿

紙漿版由中華紙漿花蓮廠所提供，紙漿板的原料取自澳洲尤加利、泰國尤加利、越南相思木等闊葉樹木片，是一種經漂白處理過的短纖維紙漿，在談紙知箋實驗開始前需先配置成 1%的手抄紙漿。

量取紙漿板 20g 和 1980mL 的水置於 3L 的量杯中，並利用攪拌器把紙漿板完全打碎，分布在水中，這樣的份量可以分給 12 位實驗者使用，並分別分裝在兩個 3L 塑膠盆進行操作。

談紙知箋實驗的班級操作方式（包含分組與分桌的方式）如下：

實驗以一桌 4-6 名實驗者為一組一起進行，並準備六個手抄紙網、一盆紙漿、六組不織布、大/小吸水毛巾。並額外準備一桌放置三種不同的器材供所有實驗者使用，分別是:矽藻土吸水塊、烤盤、印章，並以流水線的方式擺放，讓實驗者可以依序使用，

彼此不會互相干擾。

談紙知箋實驗課程時間分配係配合淡江科教中心「化學遊樂趣」活動的動手做單元，每一次「談紙知箋」操作時間約在 30-40 分鐘，由於實驗步驟流程較長，課程安排為：先進行 5 分鐘的步驟解說，接著 20 分鐘學生操作，最後 5 分鐘用於原理講解與課程回饋。

因為實驗時間有限，將著重於體驗抄紙、壓榨、烘紙與成紙四個步驟，還會提供印章或筆，讓實驗者自由發揮創意。至於取材、蒸煮與漂洗等步驟，則透過解說來介紹。實驗結束後，我們也有事先準備好與紙張尺寸匹配的塑膠袋，讓每位實驗者可以將自己製作的手抄紙箋帶回去作紀念（圖 5）。

圖 5

談紙知箋實驗成品

談紙知箋實驗的操作步驟如下（表 2）：

表 2

談紙知箋實驗器材 （含照片）

步驟	說明
1. 抄紙	用手將紙漿攪拌均勻後，將手抄紙網整個放入紙漿盆中；放入後即不需再額外攪拌。水平取起手抄紙網後，將邊緣多餘的紙漿輕輕剝除。
2. 壓榨	將大吸水抹布折成與手抄紙網大小相近後，平放在桌面，並把取出的手抄紙網放在上面，依序擺放小吸水抹布、不織布抹布。之後雙手握拳，對準細鐵網的位置用力向下按壓，直到抹布完全吸滿水為止。
3. 取紙	將吸滿水的抹布移開後，倒扣手抄紙網，並以手輕拍四個角。待手抄紙完整脫落後，即可將手抄紙網移開。

4. 烘紙	使用矽藻土吸水塊按壓手抄紙，進行二次吸水。完成後將手抄紙移至烤盤上烘乾，待水分完全蒸發後即可將手抄紙拿起。
5. 成紙	使用印章或筆在手抄紙上進行彩繪，完成後即可得到屬於自己的手抄紙箋。
6. 保存手抄紙箋	當所有步驟完成後，小心的把成品放入夾鏈袋中，以便妥善保存這專屬於自己的作品。

談紙知箋實驗的注意事項如下：

1. 確保手抄紙漿均勻分布
2. 當手抄紙網從紙漿盆取出後，若發現紙漿分布不均，可以將整個手抄紙漿刮除放回紙漿盆後，重新操作一次。
3. 小心取紙。取紙時盡量拍手抄紙網的四個角，避免直接拍打細鐵網，以免造成手抄紙破裂。

結論

紙雖然是日常生活中再平凡不過的存在，但每一張紙的背後，不僅蘊藏著各式各樣的原料，更藏有肉眼無法直接看見的化學。我們希望透過親手製作手抄紙的體驗，讓實驗者能直觀感受每一道工法的設計，並以化學原理來理解其中的知識。這項科普實驗由淡江科教中心與中華紙漿攜手推動，從 2018 年開始，已走進超過 50 所學校，陪伴近千名同學製作手抄紙。當跟著實驗步驟從抄紙一路到成紙，不只是可以直接感受到古人對這項工法的巧思，認識分子間物理與化學作用力交織的變化，更擁有了一份獨一無二、專屬於自己的手抄紙箋。

謝誌

作者感謝中華紙漿股份有限公司協助提供資料及部分圖片。

參考文獻

中華紙漿（2018）。**談紙之間**。https://www.chp.com.tw/product/product_learn

Fornué, E. D., Allan, G. G., Quiñones, H. J. C., González, G. T., & Saucedo, J. T. (2011, September). Fundamental aspects of adhesion between cellulosic surfaces in contact – A review. *O PAPEL, 72*(9), 85–90. https://newspulpaper.com/wp-content/uploads/2023/08/1359375586_e6c25d9d766ede16d254e50f13f6d026_495274781.pdf

Roberts, J. C. (1996). *The chemistry of paper*. The Royal Society of Chemistry.