

永續化學與生活—

從再生紙到丟棄式尿布

劉廣定

前文(《科學月刊》第43卷(第10期)794~797頁)曾說明一千九百多年前,蔡倫利用樹皮、破布,舊漁網和織布剩下的麻頭等「廢棄物」製成「紙」,不僅是中華民族對世界文明史的一大貢獻,也是歷史記載中利用可再生性原料實現永續化學發展的最早例子。我國在「造紙」的永續發展上還有一項值得稱道的,是將用過的廢紙為原料製造「再生紙」,又稱「還魂紙」。

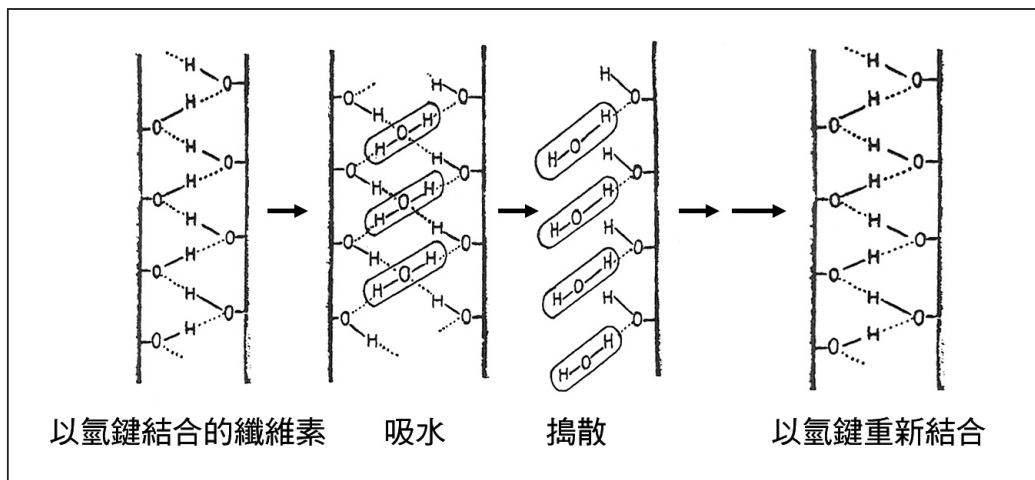
還魂紙

明末宋應星(公元1587~?)的《天工開物》(公元1637年出版)裡〈殺青〉篇記載「造竹紙」時說:……一時書文貴重,其廢紙洗去朱墨汗穢,浸爛入槽再造,全省從前煮浸之力,依然成紙,耗亦不多。南方竹賤之國,不以為然,北方即寸條片角在地,隨手拾起再造,名曰還魂紙。

將用過的紙在水中浸洗,除去紅色與黑色墨跡,及油污等後,再浸泡水中搗碎以破壞纖維素分子間氫鍵,使其分散並吸水膨脹。然後再循製紙過程將打散的纖維素均勻地攤開使水分子進入纖維素與纖維素之間,再經過脫水,纖維素又因「氫鍵」而結合成「再生紙」。(圖一)好像紙死後復活,所以稱為「還魂紙」。

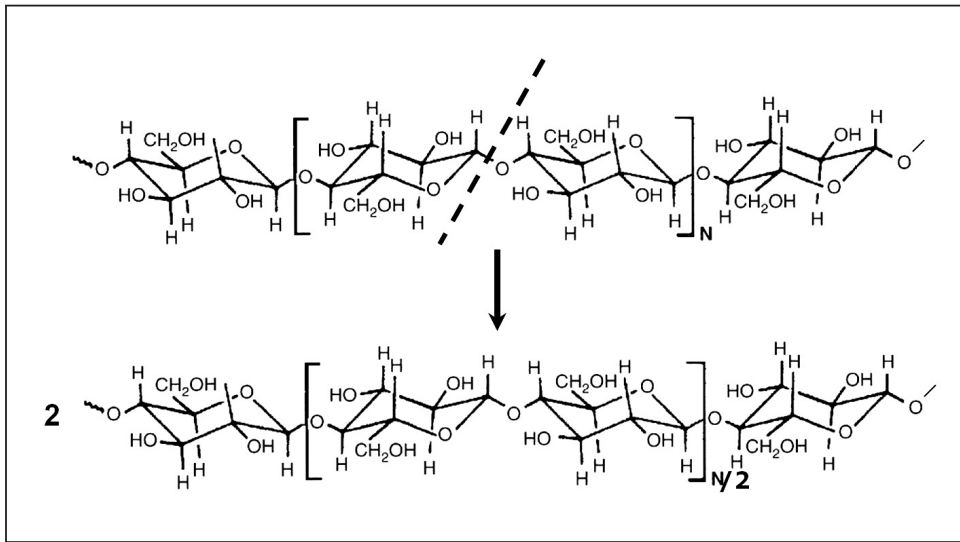
「再生紙」的最早記載為唐末五代至北宋初年人陶穀(公元903~970)的《清異錄》。此人於後晉、後周,及北宋初年,均在朝廷任官,《清異錄》記有許多唐及五代軼事,卷四有「化化牋」條云:

記未冠時遊龍門山寺,欲留詩,求紙。僧以皺紙進,余題大字曰化化牋還之。僧慚懼躬揖,請其故。答曰:紙之麓(粗)惡則供溷材,一化也。丐徒取諸園廁積之家,匠買別抄,麩麵店肆妝芭果藥,遂成此紙,二化也。故曰化化牋。備雜用可也,載字畫不可也。



圖一：形成再生紙的示意圖。

說明在公元922年以前,已將紙「一化」製成質地不良的紙供廁所用(溷材),再將汗穢的紙重製(「二化」)而得不平滑、不能為書畫的「皺紙」,但可供「雜用」而不浪廢。至於品質較好的紙,「一化」再生後仍可用於書寫。北京中國



圖二：纖維素分子內化學鍵斷裂的示意圖。

歷史博物館藏有敦煌石室出土之北宋太祖乾德五年（公元 967 年）寫本《救諸眾生苦難經》所用麻紙，研究發現含有三塊未完全搗碎的故紙殘片，是最早的「再生紙」實物。另據《宋史》卷 181 記載，南宋孝宗隆興元年（公元 1163 年）「湖南漕司根刷舉人廢卷及已毀抹茶引故紙應副，抄作會子」。即用國家考試落榜者之試卷與已作廢的賣茶執照，以及其他用過的紙，重經製漿、抄作成紙，以印錢鈔（會子）。此將大量廢紙回收後再生利用之舉，也是手工業史上的最早記錄。

很可能蔡倫最初試驗造紙時，即取製作失敗或品質不好的產物重複使用，嘗試改進。後人造紙應也會遭遇同樣情況，更可能因原料不足而想到將用過的紙回槽重製。目前全世界各地幾乎都將「廢紙」回收、洗淨重製，反覆多次使用，以節約天然資源。據民國 99 年「臺灣事業廢棄物統計」，臺灣回收的混合廢紙達 20 萬 8989 噸。

無論製造新紙或再生紙都要使用大量的水，平均每噸紙需用 20 噸水。製造「再生紙」也有節約能源和節省用水的功效。據維基百科的資料〔註一〕，由舊報紙製成 1 噸再生紙可

比從新原料（原生紙漿）製 1 噸新紙節省 40% 的電（約 1100 度），減少 35% 水污染和 74% 空氣污染。2004 年歐洲用紙中有 54.6%（約 4130 萬噸）乃回收再用，

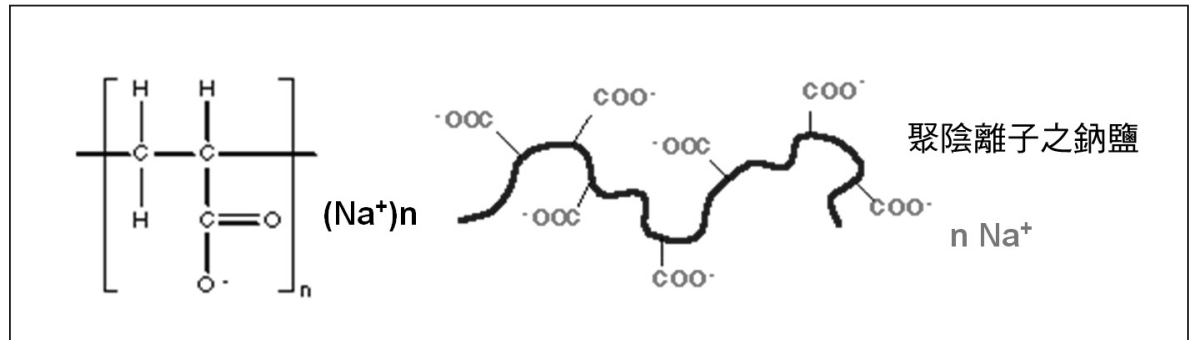
2007 年回收率增到 64.5%。美國 2006 年的廢紙回收率為 53.4%（約 5350 萬噸），預計 2012 年的廢紙回收率可達 55%。

再生紙的相關問題

無論是完全用舊紙做成的舊紙漿，或將舊紙漿與原生紙漿混合製造的紙，都稱為「再生紙」。製造再生紙時主要有脫墨，及纖維劣化的問題。

上文說過製造再生紙時先要將舊紙放入水中，將纖維打散，同時要進行「脫墨（deinking）」。理論上，水溶性的汙物會溶解於水，油溶性的汙物則可因加入「界面性活劑」攪拌後脫離纖維素而除去。實際上，已為纖維素吸收的汙物常會殘留一部分，不能澈底除盡。殘留的各色油墨，將影響舊紙漿的純白度，造成的再生紙也因而不夠純白。如要得到純白的再生紙，則須先將紙漿漂白。再者，一般使用的油墨多以「不可再生性」的石油產品為基底，「脫墨」後廢棄物也不能經一般微生物使其自然分解。均不符合永續化學原則。

現在已有幾種改進的方式。一是以黃豆油代替石油產品為基底，印出的色彩較為鮮明，



圖三：聚丙烯酸鈉分子示意圖。

「脫墨」較為容易也較為澈底，「脫墨」後的廢棄物可經微生物分解。故美國已有約四分之一的報紙、雜誌採用「黃豆油墨(soy-ink)」印刷。唯其缺點是消耗了食用油，導致黃豆及黃豆油價格上漲，對於低收入者不利，不符永續發展的「公義」原則。另一是研發水溶性的「水墨」，2011年已有相當程度的突破，可以用於高速印刷〔註二〕。至於研究使用微生物來分解以石油產品為基底的油墨，使再生紙漿保持純白，則因處理過程耗時太多，成本亦高，故目前還無實用價值。

紙張製成後必經裁切，也可能經過他種機械處理，都會使纖維素分子內的化學鍵斷裂。使用時，以及使用後回收製造再生紙時的脫墨過程也都可能使纖維素的化學鍵斷裂（圖二）。導致纖維素分子長度變短，纖維素與纖維素之間的氫鍵減少，而導致纖維劣化，紙張強度降低。也就是說，再生紙的品質常較差。

因此，由舊紙製造再生紙的次數有限，一般為5~7次。

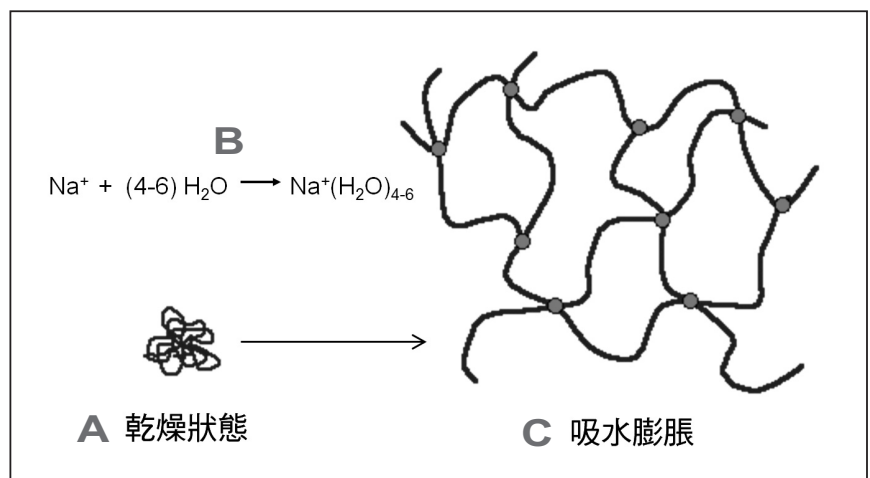
另外一種方式是將舊紙經過處理所得之舊紙漿，與原生紙漿以適當比例混合製成再生紙。這種再生紙的品質

將依混合的比例不同而異，舊紙漿的比例愈大，再生紙的品質也愈差。故可調整新舊紙漿的比例，達到產品的品質要求。

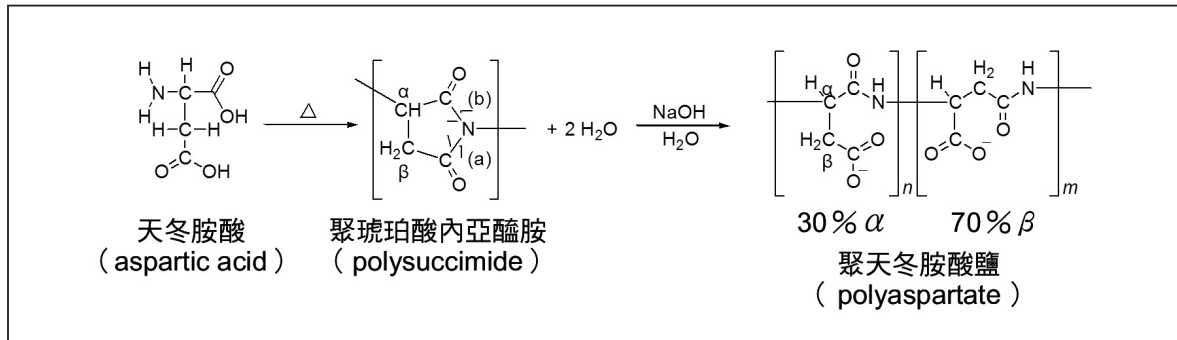
再生紙與衛生紙

古代中國人對如廁後的清潔方式並無明確記載。直到公元六世紀，北齊至隋代的顏之推（531~591）在《顏氏家訓》卷一「治家」第五中說：「吾每讀聖人之書，未嘗不肅敬對之；其故紙有五經詞義，及賢達姓名，不敢穢用也。」表示只可用未經書寫的「故紙」為如廁後用的「衛生紙」（古時稱為「廁紙」或「溷紙」），極可能即是「再生紙」。上文所引公元十世紀《清異錄》所謂「紙之麓惡則供溷材，一化也」應是指第一次「再生」後的紙。因質地不良，只堪供如廁後所用。

筆者早年用過兩種「衛生紙」，幼時用的



圖四：聚丙烯酸鈉交聯式組成及吸水膨脹示意圖。



圖五：聚天冬胺酸鹽製法示意圖。

一種是「草紙」，乃以稻草等為原料製成，黃色，質地粗糙，類似現今祭祀時焚燒用的金銀紙。約在民國40年代和50年代初期用的則是灰色或淡褐色，質地較「草紙」稍微細緻些的「再生紙」。至於襁褓時期則是用棉布做的「尿布」，溼汗後即須更換、洗滌、晾乾後再用。每天好幾次，都靠人力，大人很辛苦，也製造了很多汗水。

丟棄式尿布

約在1950年美國婦人Marion Donovan (1917~1998)發明了丟棄式尿布(disposable diaper)。外為布質，內充多層衛生紙，故又稱「紙尿布」，弄髒了即丟棄，省了洗滌、晾乾的煩瑣工作。1960年代開始流行，也不斷改進，例如以「紙漿(紙絮)」代替紙，以增加吸濕的能力。1980年代發展出使用「超吸收力聚合物(Superabsorbent Polymer 簡稱SAP)」——聚丙烯酸鈉(圖三)、或聚丙烯酸與聚丙烯酸鈉共聚物，使其形成交聯式組成(cross-linking)，(圖四A)是所謂「超薄性」的產品。

由於每個鈉離子可以吸收4到6個水分子(圖四B)，且水合鈉離子之間又可因氫鍵作用而納入更多水分子，故可吸收大量水而膨脹(圖四C)，成為極有效的丟棄式尿布。尤其是現代高齡社會，不少老年人也須要用尿布，丟棄式尿布成為永續社會的必需品。

然而，聚丙烯酸的原料「丙烯酸」極大部分是來自石油產品〔註三〕；吸收了糞尿的聚丙烯酸鈉丟棄式尿布也不能為微生物所分解，須經焚化銷毀。皆與永續化學原則不符。

1990年代初期美國明尼蘇達州當時的一家小公司Donlar Cooperation發明了從胺基酸天冬胺酸(aspartic acid)合成聚天冬胺酸鹽(圖五)代替聚丙烯酸鹽，以製丟棄式尿布。

聚天冬胺酸鹽性質與聚丙烯酸鹽相同。可防止不溶於水之物聚集，有軟化硬水的功能，增加清潔劑洗滌衣物的效果，吸濕力極佳而可用以製造「丟棄式」尿布中的填充料，但具有聚丙烯酸鹽所無的生物可分解性。故可取代一般使用之聚丙烯酸鹽，既有效又不致造成垃圾堆積之問題。該公司因這一發明獲得美國環保署1996年第一屆五項「永續化學挑戰的總統獎」中的「小企業獎」(Small Business Award)。

註一：http://en.wikipedia.org/wiki/Paper_recycling

註二：*Chemical and Engineering News*, Aug. 1, 2011.

註三：自醣類化合物經生物觸媒製造3-羥基丙酸再脫水成丙烯酸的製程已在研發中，*Chemical and Engineering News*, Aug. 27, 2012.

劉廣定 台灣大學化學系名譽教授