

作品名稱：翻轉吧~色紙!紙張捲曲的熱量因素探討

摘 要

本研究透過色紙照光受熱捲曲的實驗，探究自然課本-輻射熱對物質的影響單元。實驗結果顯示，紙張捲曲受到輻射熱源影響，造成紙基水分蒸發以及印刷油墨體積膨脹等因素改變而捲曲。在中午烈陽照射下，各顏色色紙捲曲速度不同，黑色、咖啡色色紙最先捲曲成圓筒狀，紙張表面溫度可達 50°C ；避免受到氣流和濕氣因素影響，我們在模擬陽光輻射的鹵素燈管高溫 50°C 加熱箱實驗，可以在2分鐘時間內看到色紙捲曲成圓筒狀的過程。廣告水彩顏料和壓克力塗料等不同塗層性質，在水分潮濕、低溫環境捲曲方向會有不同；而隔離水汽保鮮盒中的鋁箔色紙捲曲更明顯，說明複合材質紙張的兩層性質不同材料，低溫冷縮造成的紙張明顯捲曲。將這些研究變因、結果應用在生活中常用的紙鈔捲曲，也一樣可以說明防偽金屬條邊會先捲曲，而印刷油墨濃淡也影響紙鈔傳熱捲曲。

壹、研究動機

過農曆新年，除舊布新，家家戶戶貼春聯，但是在除舊春聯時，發現有些經過風吹日曬雨淋脫膠的春聯往往呈現膨脹捲曲，為什麼會這樣？從生活環境的疑問連結到課堂學習的知識，似乎是跟在學校自然課「熱對物質的影響」單元學習中，太陽光輻射熱照射、紙張水分蒸發...等等有關。



圖一 春聯捲曲示意圖

全國科展第54屆作品〈玩顏色調溫度〉以各種顏色粉彩紙曝曬在烈陽下，測出不同顏色粉彩紙吸收太陽的輻射熱不同，黑色最容易吸熱，白色最不吸熱，紅色中等；表面溫度在 35 至 54 度之間。我們想，市面上的亮光春聯紙近似市售色紙，是不是也一樣溫度情況呢？還有，不同顏色色紙捲曲速度相同嗎？

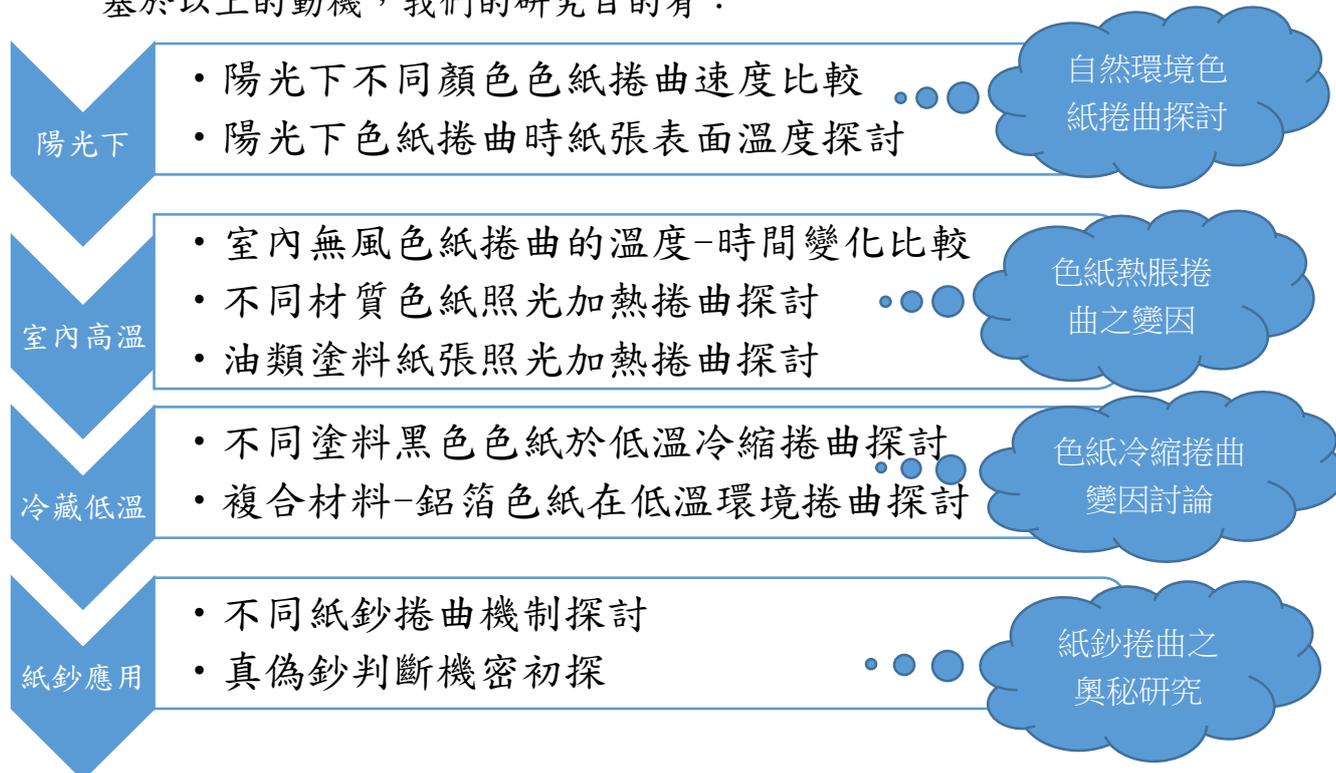
我們探究了紙張紙質的種類，從搜集文獻〈紙張指南-紙張的特性和狀態〉，說明紙張的製造是以磨木漿和棉花製成的，成份中含有碳酸鈣比例：非塗料紙含 15% 以下，塗料紙則在 20% 以下；紙張潮溼程度則控制在 3.7 至 5.5% 。另外，文獻〈認識圖書紙質〉資料說明，色紙是輕量塗佈紙，在較輕磅數紙張表面施以輕量顏料塗佈加工，並經壓光處理之紙類。所以，生活環境的日曬雨淋、颶風下雨，熱漲冷縮似乎都會影響春聯紙張劣化捲曲程度...

於是，我們一起討論了：不同顏色和不同塗料色紙捲曲情況是否不一樣

呢？不同材質、複合材料印刷紙張捲曲情況又如何呢？低溫環境下冷縮捲曲情形呢？生活上常用的鈔票也是紙張，它的捲曲機制又是怎麼樣呢？…種種疑問連結到課堂學習的自然知識，我們就一起做了這個專題研究。

貳、研究目的

基於以上的動機，我們的研究目的有：



參、研究設備及器材

觀測儀器-IR紅外線溫度計、溫溼度計、蠟光色紙(單面色紙、雙面色紙)、定溫加熱用鹵素燈、好市多進口木材紙、春聯紙、廣告單、定溫加熱用鹵素燈、冷藏低溫設備、凡士林、沙拉油、廣告水彩顏料、油性壓克力顏料、美金一元紙鈔、日幣1000元紙鈔、新台幣1000、500和100元紙鈔



肆、研究過程

【研究一】陽光下，不同顏色色紙照光受熱後捲曲順序比較。

實驗〈一〉探討不同顏色的色紙吸收陽光輻射熱量的捲曲變化

實驗步驟：

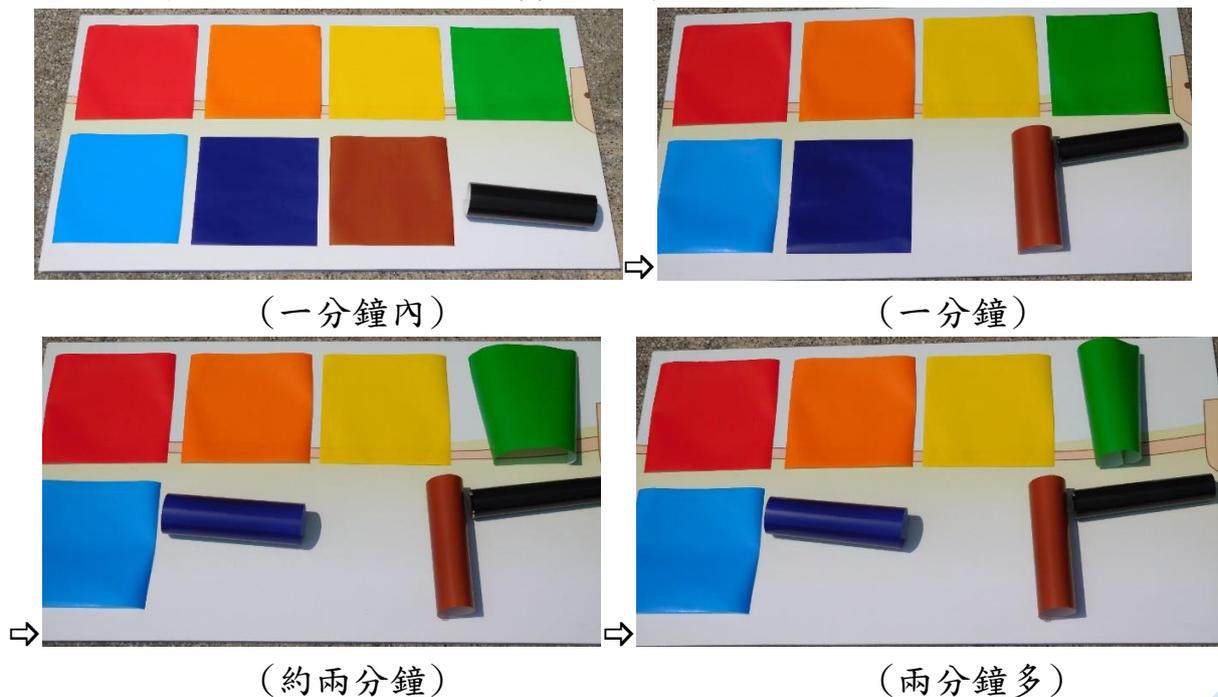
- (一) 取紅色、橘色、黃色、綠色、淺藍色、深藍色、咖啡色和黑色色紙各一張，置於白色PP板上(不黏貼)。
- (二) 將各色色紙白色PP板置放於中午12:00陽光下。
- (三) 觀察記錄各色紙吸收太陽輻射熱後捲曲先後順序。

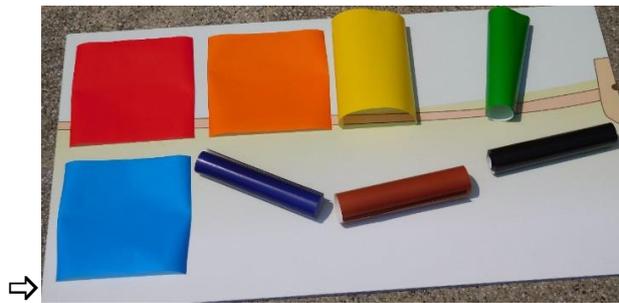
實驗結果：

1. 當天室外溫度 29.3°C ，少雲微風，陽光普照。各顏色色紙在室內的表面溫度均為 21.7°C 和 21.8°C 。

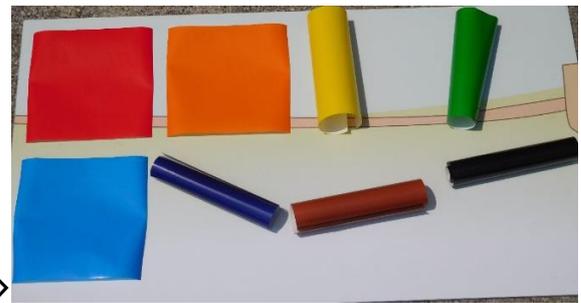


2. 在中午12:00陽光照射下，各色紙捲曲成圓筒狀的順序和時間如下：
黑色 \Rightarrow 咖啡色 \Rightarrow 深藍色 \Rightarrow 綠色 \Rightarrow 黃色 \Rightarrow 淺藍色 \Rightarrow 橘色和紅色





(約七分鐘)



(約十五分鐘)

實驗<二>探討不同顏色的色紙吸收太陽光輻射熱量後20分鐘表面溫度變化

實驗步驟：

- (一) 取紅色、橘色、黃色、綠色、淺藍色、深藍色、咖啡色和黑色色紙各一張，置於白色保麗龍板上，紙張中央以圖釘固定浮貼(避免風吹)。
- (二) 將各色色紙連同保麗龍板置放於中午12:00陽光下照射。
- (三) 20分鐘後觀察記錄各色紙吸收太陽輻射熱後表面溫度。

實驗結果：

1. 當天室外溫度32.1 °C，少雲有風，陽光普照。各顏色色紙在室內的表面溫度約在19.0 °C-19.3 °C。實驗操作過程照片說明如下：



(置放於中午12:00陽光下)



(一分鐘)



(黑色、咖啡色紙明顯變化)



(兩分鐘)



(五分鐘)

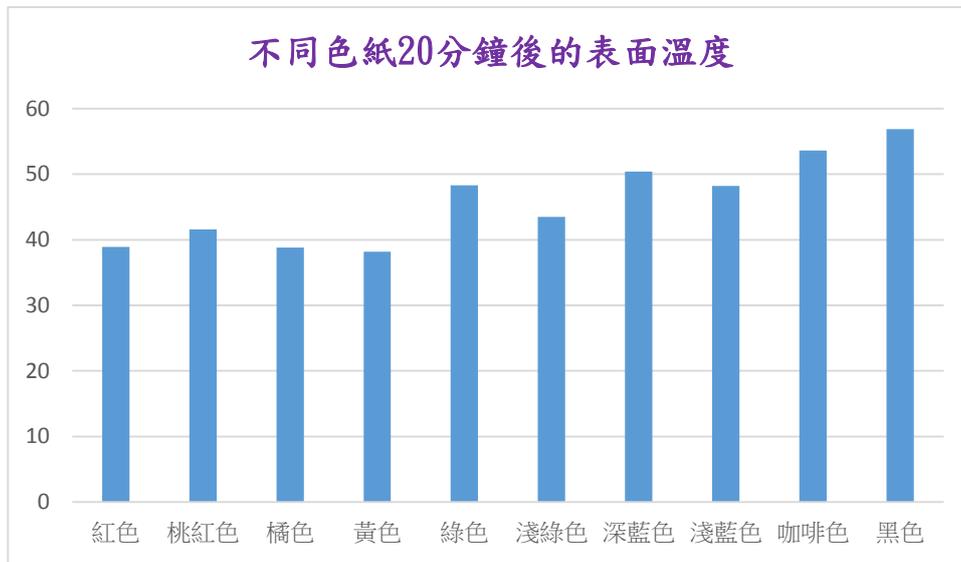


(測各顏色色紙表面溫度)

2. 各顏色色紙20分鐘後的表面溫度三次測量結果和平均溫度如下(表一)：

色紙 溫度	紅色	桃紅色	橘色	黃色	綠色	淺綠色	深藍色	淺藍色	咖啡色	黑色
第一次	39.0	41.5	39.0	38.1	48.4	43.0	50.0	48.1	54.0	56.5
第二次	38.6	41.6	39.0	38.1	47.9	43.7	50.4	48.2	53.5	57.6
第三次	39.1	41.6	38.5	38.5	48.5	43.9	50.7	48.2	53.4	56.6
平均 溫度	38.9	41.6	38.8	38.2	48.3	43.5	50.4	48.2	53.6	56.9

3. 經統計圖表顯示，不同顏色色紙在氣溫溫度32.1 °C下，照射太陽光輻射熱之後，色紙表面溫度都超過32.1 °C，以黑色和咖啡色色紙溫度最高：

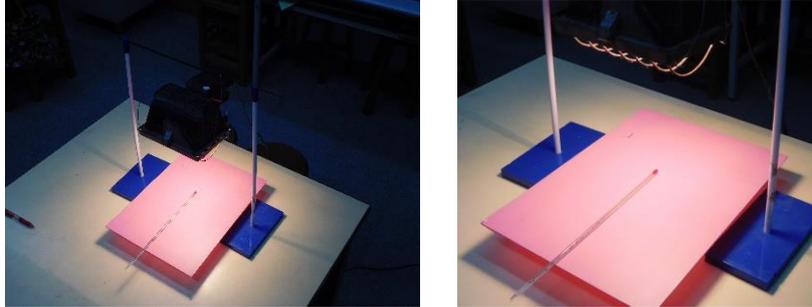


【研究二】室內模擬環境，不同顏色色紙照光受熱後捲曲順序比較

實驗〈三〉探討不同色紙吸收室內固定加熱燈管輻射熱量的捲曲溫度變化

實驗步驟：

(一) 裝置鹵素燈管加熱器(如圖)，調整照射的垂直高度，保持一定溫度。



(二) 取紅色、桃紅色、橘色、黃色、綠色、淺綠色、淺藍色、深藍色、咖啡色和黑色色紙各一張，分別置於相同照射高度的PP板上。

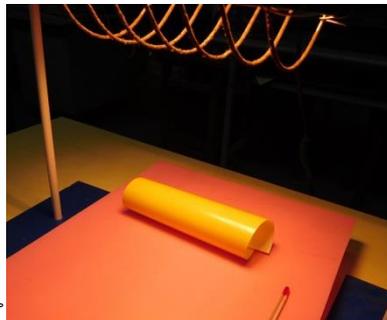
(三) 觀察記錄各色紙吸收鹵素燈輻射熱量後捲曲時的時間和溫度。

實驗結果：

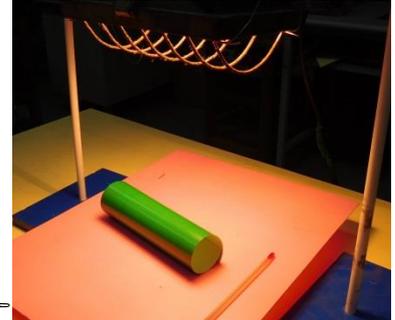
1. 鹵素燈管輻射照熱後，各顏色色紙捲曲實驗照片：



紅色色紙捲曲



黃色色紙捲曲



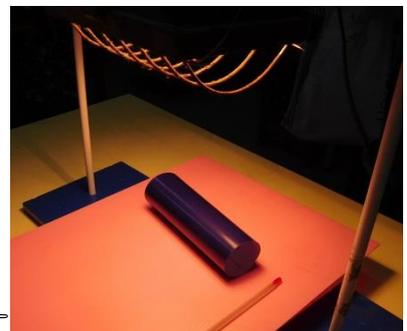
綠色色紙捲曲



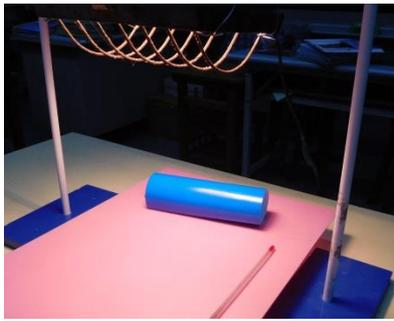
淺綠色色紙捲曲



桃紅色色紙捲曲



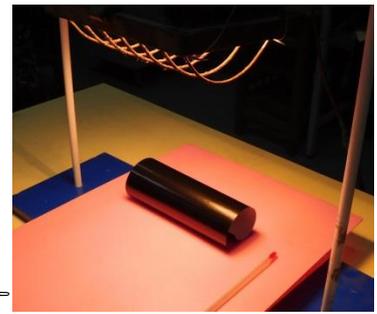
深藍色色紙捲曲



淺藍色色紙捲曲



橘色色紙捲曲



黑色色紙捲曲

2. 模擬太陽光輻射熱照射，將室內鹵素燈管固定垂直高度照射溫度控制在 55°C 左右。記錄各顏色色紙受輻射熱後捲曲的時間和色紙表面溫度如下(表二)：

色紙 時間溫度	紅色	桃紅色	橘色	黃色	綠色	淺綠色	深藍色	淺藍色	咖啡色	黑色
第一次	2分55	3分17	4分06	3分28	4分58	2分46	4分01	4分10	2分38	1分32
第二次	3分00	4分46	4分17	2分58	4分24	2分43	3分31	5分10	2分35	1分13
第三次	3分28	3分43	4分31	3分06	3分57	2分13	3分02	4分20	2分16	1分52
平均時間	3分08	4分01	4分18	3分11	4分26	2分34	3分31	4分33	2分30	1分32
第一次	52.3	48.9	51.6	48.0	48.0	52.4	54.4	48.1	56.9	58.7
第二次	46.8	47.6	54.3	52.6	48.1	49.6	52.0	46.2	55.7	58.6
第三次	53.5	48.0	46.9	49.8	48.8	48.9	53.2	50.0	56.1	58.3
平均溫度	50.9	48.2	50.9	50.1	48.3	50.3	53.2	48.1	56.2	58.5

3. 數據為該次實驗前的實驗有色紙雖然膨脹突起，但是卻卡住沒有下一個動作，維持現狀超過一小時也沒有捲曲，表面溫度維持在 53.4°C 和 51.6°C ，這兩個實驗樣本，我們將它視為失敗、捨棄，而再一次取另一張新色紙實驗所測得的數據。



紅色和橘色色紙澎起卡住不捲曲

4. 10種顏色蠟光色紙受鹵素燈管照射由上往下的輻射熱後，均能在近 50°C 環境溫度下捲曲，捲曲時間都在2-5分鐘內完成。

實驗<四>探討不同材質色紙照光加熱捲曲變化

實驗步驟：

- (一) 為了提升向下照光輻射效果，我們製作鹵素燈管加熱器(如圖)裝置，調整照射的垂直高度，保持一定溫度(約50 °C)。



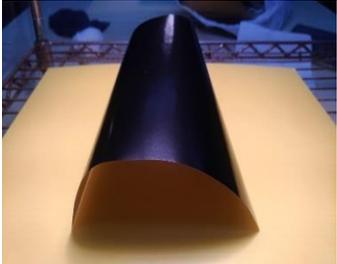
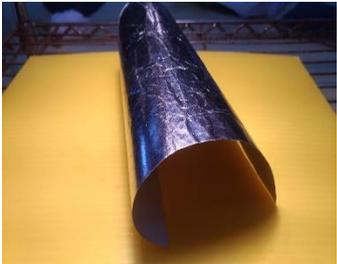
圖 加熱箱三面圍透明壓克力將鹵素燈光輻射熱集中並調整高度避免太熱

- (二) 將市售的黑色木材色紙(Costco，加拿大製)、黑色模造色紙、黑色蠟光色紙和金箔色紙置放鹵素燈管加熱箱中2分鐘，比較不同紙質捲曲情況。
 (三) 重複兩次，列出明顯差異點。

實驗結果：

1. 鹵素燈管加熱2分鐘後不同黑色紙質捲曲情況：

	捲曲速度	照片	捲曲情況
黑色木材色紙	★★★		有捲曲情形，向下捲曲情形明顯，紙張四端角下垂，中央部分隆起，兩分鐘後有少量水汽煙霧出現
黑色模造色紙	★★		有捲曲情形，向下捲曲情形最不明顯，紙張四週邊緣略為往下彎，兩分鐘後紙張變乾硬

黑色蠟光色紙	★★★★		有捲曲彎折，向下捲曲情形非常明顯，一分鐘時間捲曲成半圓狀站立，並且冒出油墨煙狀及味道
金箔色紙	★★★★★		有捲曲彎折，向下捲曲情形最明顯，一放入加熱箱立即有反應，十秒鐘即捲曲成圓管狀

2. 不同材質的色紙，以複合材質金箔色紙捲曲情況最明顯，最快速；同樣黑色色紙，則是有油墨塗層的蠟光色紙捲曲 > 近似畫紙的進口木材紙 > 黑色模造色紙。
3. 複合材質金箔色紙捲曲情況最明顯，這種複合材料色紙的製作方法(參考資料2)是以紙為基底再用黏合劑將鋁箔層合起來成為金箔(鋁箔)色紙。我們將金箔色紙也就是鋁箔色紙以水噴濕，發現色紙金屬面不吸水，而底下白紙面會吸水、體積膨脹，(不用加熱)隨即往金屬面內捲曲，捲曲情況明顯、捲曲速度非常快，十秒鐘左右即完成，可見紙張吸水體積膨脹是影響捲曲的重要因素之一。



圖 金箔紙下層白紙會吸水、體積膨脹並向上捲曲

4. 材質最似市面春聯的蠟光色紙上下兩面表面平滑，皆有輕量塗佈油墨塗層，再經壓光處理(認識圖書紙質)，顯出油亮光滑，其中一面為黑色色料油墨，單面吸熱後油墨膨脹往背面捲曲，反應進行很快。進口木材紙狀似圖畫紙，捲曲作用也很快，因為如圖畫紙質，所以，我們接著思考油墨影響捲曲的實驗，就以進口木材紙為紙基，再加以各種色料塗層來觀察。

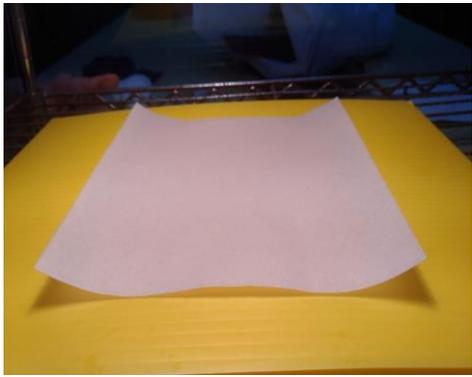
實驗〈五〉模擬不同油類塗料紙張照光加熱捲曲變化

實驗步驟：

- (一) 取白色進口木材紙當作紙基，分別均勻塗上凡士林和沙拉油塗層。
- (二) 將紙張放入鹵素燈管加熱箱兩分鐘，觀察記錄油類塗料紙張照光加熱捲曲情形。
- (三) 重複兩次，列出明顯差異點。

實驗結果：

1. 鹵素燈箱加熱兩分鐘後的油類塗料紙張捲曲情形如下：

	凡士林塗料	沙拉油塗料
照片		
捲曲情況	凡士林固態塊狀油料熔化成液態油狀，聚集表面無法滲進紙基、溶不進去，紙張無捲曲情況	液態狀沙拉油可以滲透進入紙基，均勻分布油料的紙張，由兩側向上捲曲，中央也有微隆起情形

2. 我們認為，油類塗料可以滲進紙基是一個重要關鍵，滲入紙張並且均勻分布油料後，當燈管加熱後，上層水分、油脂蒸發，體積變小，就能拉動紙張向上捲曲。
3. 但是，如果噴水在蠟光黑色色紙上，因為水滴無法均勻滲進油亮黑色塗層，結果造成紙張表面微凹凸、起伏不平，無法整體一致拉動紙張捲曲。



圖 水滴無法均勻滲進黑色塗料層、造成紙張表面起伏不平

4. 我們再以兩張蠟光塗層「春聯紙」實驗，圖左上上的「福」字以噴霧器噴濕，右下的「春」字不噴做對照，同時照光加熱兩分鐘後，「福」字因

為水滴無法完全滲進、也沒有毛細均勻分布在蠟光塗層下的紙基中，所以「福」字呈現起伏不平，而不同於「春」字的蠟光塗層加熱後熱脹往下捲曲。



圖 福字噴濕、春字不噴，同時照光加熱



圖 福字水分無法完全滲入蠟光紙基，呈現起伏不平



圖 春字因蠟光塗料層熱脹，呈現往下捲曲情形

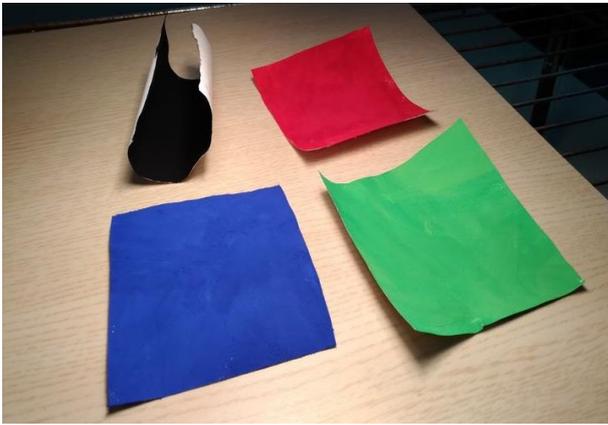
實驗〈六〉探討同種塗料的不同顏色色紙照光加熱捲曲的變化

實驗步驟：

- (一) 取白色進口木材紙當作紙基，並取廣告水彩顏料和油性壓克力顏料。
- (二) 兩種顏料分別均勻塗上紅、藍、綠三原色和黑色塗層。
- (三) 將紙張放入鹵素燈管加熱箱兩分鐘，觀察記錄兩種塗料不同顏色紙張照光加熱捲曲情形。
- (四) 重複兩次，列出明顯差異點。

實驗結果：

1. 鹵素燈箱加熱兩分鐘後的兩種塗料不同顏色紙張捲曲情形如下：

	廣告水彩顏料塗層	油性壓克力顏料塗層
照片		
捲曲情況	廣告水彩顏料塗層色紙中，黑色木材紙向上捲曲情形最明顯，紅色和綠色紙也有向上捲曲情形，藍色木材紙則無捲曲情況	油性壓克力顏料塗層色紙中，紅、藍、綠三原色和黑色木材紙均呈現起伏不平的不明顯捲曲情形，紅色和黑色木材紙中央有微隆起，邊角微向下捲曲情形

2. 以加拿大進口木材紙質而言，我們認為，它的木材造紙原料較單純，纖維紙質近似圖畫紙可均勻塗附顏料，而如同上個實驗結果證明，廣告水彩顏料可以滲進紙基，均勻分布顏料後，經由燈管加熱後，上層顏料水分蒸發體積變小，下層紙基滲入水分體積脹大，整體拉動紙張向上捲曲。其中，黑色顏料吸熱效果好，造成上下層紙基體積差異大、捲曲效果最明顯。
3. 油性壓克力顏料塗層雖可塗附在木材紙上，但是它近似油膏的顏料塗層，密度大、重量重；加上壓克力顏料無法均勻滲透進入木材紙的，均勻分布在紙內纖維層中，因此，照光加熱後，油膏性壓克力顏料體積熱脹，呈現起伏不平的不明顯捲曲情形，膏狀不透水顏料密度又大，反而造成邊角微向下捲曲情形，這跟廣告水彩顏料是有很大差別。

【研究三】低溫環境，不同塗料、不同顏色色紙冷縮捲曲情況探討

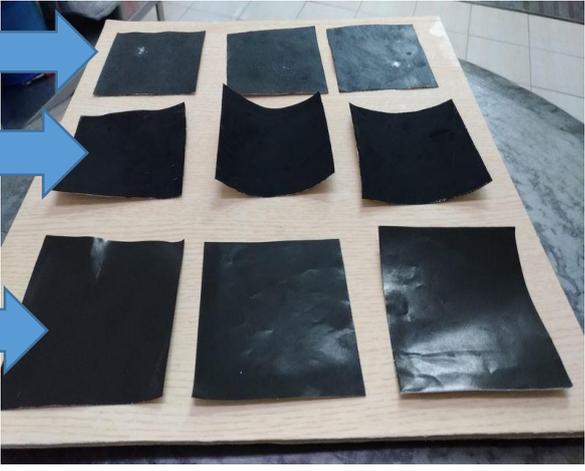
實驗〈七〉探討不同的黑色塗料是否影響紙張低溫冷藏捲曲變化

實驗步驟：

- (一) 取白色進口木材紙當作紙基，並取黑色廣告水彩顏料和油性壓克力顏料。
- (二) 兩種顏料分別均勻塗上黑色塗層。
- (三) 再拿黑色油性蠟光色紙做對照比較。
- (四) 將三種紙張放入低溫冰箱中一小時，觀察記錄色紙低溫捲曲情形。
- (五) 重複兩次，列出明顯差異點。

實驗結果：

1. 三種不同塗料色紙在黑暗低溫冰箱中一小時後捲曲情形如下：

色紙	照片	捲曲情形
壓克力		壓克力顏料色紙幾乎不捲曲，底層木材紙有些微濕潤
水彩顏料		捲曲情形最明顯，每張水彩顏料色紙幾乎都明顯往上捲曲，比較實驗前底層木材紙有些微濕潤
蠟光		捲曲情況第二明顯，油亮光滑表面看不出水漬痕跡，檢察底層白色蠟光紙質亦沒有水漬痕跡

2. 冰箱中的黑暗環境溫度約為 4°C ，溼度達92%，因此，我們認為水彩顏料色紙下層木材紙很容易吸水，紙張在此冰箱潮濕環境中逐漸吸收水分濕氣後，體積膨脹變大；而上層水彩顏料層部份含水，則因為從室溫降低至 4°C 過程，含水廣告顏料層體積略縮小，相對於下層紙質的逐步吸水脹大，就造成紙張往上捲曲，捲曲情形最為明顯。



圖 低溫冷藏冰箱溫度約 4°C ，溼度92%

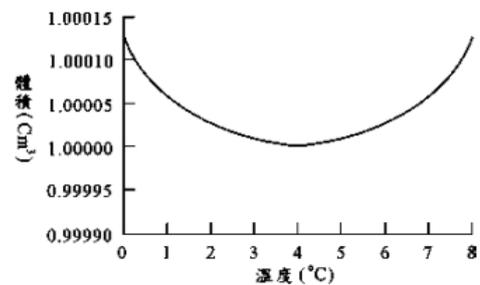


表 水從室溫降至 4°C ，水體積略縮小

3. 相對的，上層不吸水油膏狀的壓克力顏料密度大、重量重，儘管下層紙張吸水膨脹後卻無法有效往上捲曲，造成整張壓克力顏料色紙最無捲曲趨向

，無動於衷。

4. 至於捲曲第二明顯的，兩面明亮光滑的蠟光色紙，就如〈實驗五〉結果所討論，蠟光色紙遇水油亮光蠟層不會均勻吸收水分，會呈現起伏不平；從結果照片前面兩張蠟光色紙確實是呈現起伏不平。至於蠟光色紙捲曲明顯的原因，我們認為冰箱中的黑暗環境中，黑色層相對於底面白色層，更容易散熱捲縮，所以蠟光色紙往上捲曲…為了證明這樣的假設說法，我們就以複合材料金銀箔色紙(鋁箔)來做〈實驗八〉。



圖 低溫環境中三種不同塗料色紙捲曲情形

實驗〈八〉探討複合材料的鋁箔色紙在低溫環境捲曲情形

實驗步驟：

- (一) 有水分的低溫環境-將金銀箔(鋁箔)色紙放進低溫冰箱中一小時後觀察紀錄。
- (二) 隔絕水分的低溫環境-將鋁箔色紙放入密封保鮮盒中，再放進低溫冰箱中一小時後觀察紀錄。
- (三) 重複兩次，列出明顯差異點。

實驗結果：

1. 有水分的低溫環境-鋁箔色紙沒有明顯捲曲情形。

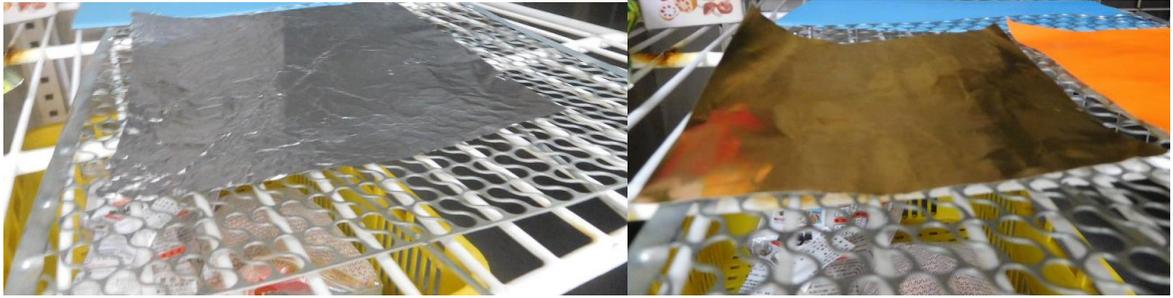


圖 低溫環境-下層紙張吸水造成鋁箔色紙捲曲不明顯

2. 我們認為，鋁箔和下層(不油亮)紙張是兩種完全不同性質的材料複合在一起，本身就有捲曲性的因素(參考資料2)。而在低溫環境中，金屬鋁箔冷縮往上捲曲的物理性質，相對於下層紙張吸收水分低溫近 4°C 體積內縮下捲，兩力較勁平衡結果，鋁箔色紙捲曲情形就不明顯啦。
3. 隔絕水分的低溫環境-密封保鮮盒中鋁箔色紙明顯捲曲。
低溫保鮮盒中，溫度 5°C ，濕度68%，鋁箔色紙明顯向上捲曲，說明了金屬鋁箔冷縮往上捲曲的物理性質明顯。



圖 低溫環境-密封保鮮盒中鋁箔色紙明顯捲曲

【研究四】 紙鈔捲曲機制探討

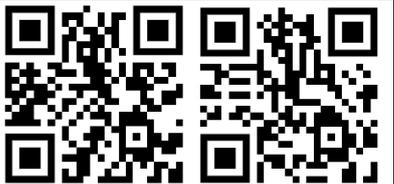
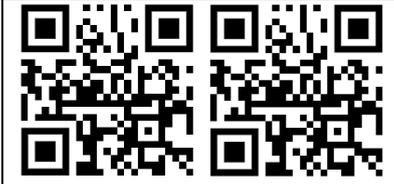
實驗〈九〉一元美鈔、1000元日幣和500元新台幣熱捲曲情況比較。

實驗步驟：

- (一) 將一元美鈔、1000元日幣和500元新台幣分別置放於手掌掌心處，利用手掌體溫分別觀察紙幣捲曲情況並互相比較。
- (二) 重複兩次，列出紙鈔捲曲明顯差異點。

實驗結果：

1. 三種紙幣在手掌心捲曲操作照片如下：

	一元美鈔	1000元日幣	500元新台幣
正面			
背面			
捲曲情況	鈔票長側前後端明顯捲曲；翻面後，紙鈔前後端向上捲曲情形更明顯	鈔票側邊明顯捲曲，捲曲速度最快、反應早；翻面後，側端立刻捲曲	鈔票長側有鋁箔端明顯捲曲；翻面後，紙鈔有鋁箔一端明顯捲曲
捲曲速度	★★★	★★★★★	★★★
實驗影片	 美金1元正面、背面	 日幣 1000 元正面、背面	 台幣 500 元正面、背面

2. 經過仔細觀察，一元美鈔前後邊印刷油墨比較多，美鈔捲曲原因應該是紙鈔前後端較多暗綠、黑色油墨受手掌體熱影響，體積熱脹導致紙鈔往上捲曲。



圖 美金1元前後兩端暗綠黑油墨面積較多

3. 日鈔1000元捲曲速度最快而且明顯，多次實驗都可以發現它是由側邊迅速捲曲，比較整張鈔票印刷面積中央部份淺白，兩側邊顏色暗綠的油墨印刷居多，而且側邊邊條部份閃耀著金屬七彩光澤，研判應該是有鋁箔金屬成分在。

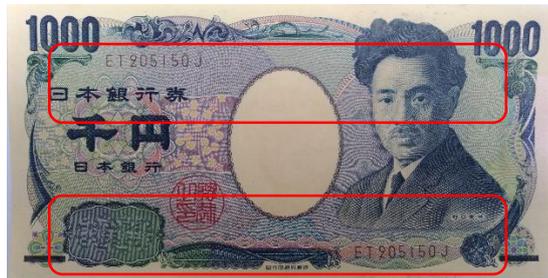


圖 1000元日鈔正面油墨閃耀七彩金屬光澤

4. 不同於美金和日鈔，新台幣500元正面右端有一金屬鋁箔條；隨著手掌體熱傳導之後，金屬鋁箔條端會率先捲起。翻面之後，有鋁箔條端的紙鈔也是較早捲曲。



圖 新台幣500元鈔票正面前邊端有一金屬鋁箔條

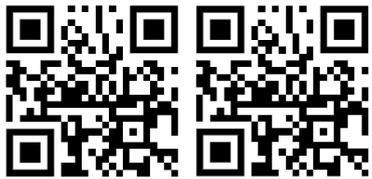
實驗〈十〉探討新台幣1000元、500元和100元三種幣值紙鈔和偽鈔熱脹捲曲情況比較。

實驗步驟：

- (一) 將1000元、500元和100元三種新台幣紙鈔分別置放於手掌掌心處，分別觀察紙幣捲曲情況並互相比較。
- (二) 將三種幣值紙鈔放在酒精燈加热的鐵盤上，觀察記錄紙鈔捲曲情況。
- (三) 將三種幣值紙鈔放在自製鹵素燈照加热箱中，觀察記錄紙鈔捲曲情況。
- (四) 將蒐集到的台幣1000元偽鈔加热，觀察記錄捲曲情況。

實驗結果：

1. 三種幣值紙幣在手掌心捲曲操作照片如下：

	1000元新台幣	500元新台幣	100元新台幣
正面			
背面			
捲曲情況	鈔票捲曲速度快，防偽鋁箔端明顯向上捲曲；翻面後，紙鈔金屬鋁箔端向上捲曲情形明顯，側端油墨濃厚、顏色較暗處有捲曲情形	鈔票捲曲速度最快、反應最早；鋁箔金屬條邊捲曲非常明顯，翻面後，鋁箔邊也立刻捲曲，側端油墨較暗紅處有捲曲情形	鈔票長側有國父像、油墨較濃厚處，逐漸緩緩向上捲曲；翻面後，紙鈔有國父像端一樣緩慢明顯捲曲
速度	★★★	★★★	★★
實驗影片	 台幣1000正面、背面	 台幣500元正面、背面	 台幣100元正面、背面

2. 三種幣值紙幣捲曲速度為：新台幣500元>1000元>100元。其中，500元和1000元紙幣都有金屬鋁箔條，導熱、捲曲效果比100元紙鈔快。但是，票面顏色暗紅色的500元紙鈔，捲曲速度和情形又較票面青紫色的1000元紙鈔快。
3. 新台幣1000元和500元紙鈔都有側邊翻轉向上捲曲情形，仔細觀察鈔票票面，側邊捲曲端都是發生在油墨濃厚、顏色較暗處，由於油墨導熱、體積膨脹，導致鈔票邊端向上捲曲，這種情形，尤其是以翻到背面加熱時更明顯。



圖 1000元防偽金屬鋁箔條和印刷油墨濃暗區域



圖 500元防偽金屬鋁箔條和印刷油墨濃暗區域

4. 為了更進一步探究，新台幣紙鈔金屬鋁箔條和油墨濃淡色彩對鈔票捲曲的影響，我們又利用「向上加熱法」和「向下(照光)加熱法」來觀察三種幣值鈔票捲曲情形，結果發現：「向上加熱法」均勻受熱情況下，暗紅色比青紫色比鮮紅色紙鈔易捲曲，同時，側邊也有翻捲的情形，證明油墨顏色差異和印刷油墨濃暗區域確實影響鈔票受熱捲曲。



圖 向上均勻加熱，觀察防偽金屬鋁箔條和印刷油墨濃暗區域的捲曲

5. 另外，利用「照光加熱箱」均勻「向下加熱」，溫度維持在 50°C 左右，瞬間正面有金屬鋁箔條的500元和1000元紙鈔邊端捲起，而百元鈔也因為往下照光輻射熱量大而微捲曲；翻至背面時，仍然是有鋁箔邊條端率先上捲，研判是熱量傳遞快所造成。比較不同於掌心加熱，是高溫下，100元紙鈔背面100數字端有微上捲。



圖 向下照光輻射均勻加熱，觀察防偽金屬鋁箔條和正反面捲曲的比較

6. 偽鈔受熱也有捲曲情況，但是比較真鈔捲曲，偽鈔的金屬鋁箔條邊端並無明顯捲曲，甚至照光吸熱後的數字「1000」端反而明顯捲曲，同時，偽鈔高溫受熱並沒有像真鈔一樣有油墨蒸發味道，以及微弱油煙等；說明偽鈔紙張受熱後印刷顏料比較不如油墨濃，粗糙的塗繪仿製鋁箔金屬條也無法完整導熱捲曲。



圖 1000元真、偽鈔捲曲情形比較



實驗影片



圖 1000元偽鈔照光受熱捲曲情形

伍、研究結果

1. 不同顏色色紙置放於太陽光輻射熱照射下，捲曲的順序為：黑色⇨咖啡色⇨深藍色⇨綠色⇨黃色⇨淺藍色⇨橘色和紅色，其中，黑色、咖啡色、深藍色和綠色色紙在陽光照射下兩分鐘內及完成捲曲，黃色和淺藍色紙雖然在四分鐘和五分鐘陸續膨脹凸起，但是卻遲至十分鐘和二十分鐘才捲曲。可能原因，根據資料〈光色交響曲—不同顏色對光吸熱的研究與應用〉，在太陽光中，黃光所佔有的能量較多，藍光所佔有的能量較少，因此黃色紙反射黃光，因此吸熱少；而藍色紙反射藍光，因此吸熱多。
2. 測量在中午12:00豔陽照射下的各色紙表面溫度高低，結果為：黑色(56.9

°C)⇒咖啡色(53.6 °C)⇒深藍色(50.4 °C)⇒綠色(48.3 °C)⇒淺藍色(48.2 °C)⇒淺綠色(43.5 °C)⇒桃紅色(41.6 °C)⇒紅色(38.9 °C)⇒橘色(38.8 °C)⇒黃色(38.2 °C)；對照比較當天室外溫度32.1 °C，顯示在陽光照射20分鐘後，各顏色色紙均有蓄積太陽光輻射熱量，並有膨脹凸起微捲曲的情況。其中，黑色和咖啡色色紙情況最為明顯，兩分鐘後即明顯膨脹凸起，紙張表面溫度高達56.9 °C和53.6 °C。

3. 黑色和咖啡色色紙不管是在太陽光輻射或是室內鹵素燈輻射熱實驗中，都是傳熱最快、溫度最高溫的，證明黑色系紙張是蓄熱吸熱最快的顏色。在其他顏色的色紙吸熱蓄熱情況，紅色和橘色色紙在室外太陽光輻射照射下不捲曲，照光20分鐘色紙表面溫度只達38 °C左右；另外，黃色色紙表面溫度只有38 °C，雖然在太陽光輻射照射下有捲曲，但是所花時間卻超過十分鐘。但是，在室內鹵素燈管照射下，紅色、橘色和黃出色紙都能很快的在3、4分鐘內捲曲，而且表面溫度也都達到50 °C，我們研判是鹵素燈管輻射傳熱效率好，瞬間傳送大量輻射熱量導致各顏色色紙短時間都能受熱、蓄熱到紙張捲曲所需的溫度。
4. 不同的黑色紙質，照光加熱後捲曲速度比較結果，有油墨塗層的蠟光色紙>木材紙>模造紙，顯示加熱後的油墨體積均勻膨脹會牽動紙張反向捲曲。而在(油類塗料紙張照光加熱捲曲實驗)中，我們發現，油類塗料必須均勻滲入或黏附紙質，才能牽動紙張捲曲。至於噴水在蠟光色紙上，因為水滴無法均勻滲進油亮黑色塗層，結果造成紙張表面微凹凸、起伏不平，也是無法整體一致拉動紙張捲曲。
5. 不同顏色的廣告水彩顏料塗層色紙捲曲情況也不同，再次顯示顏色差異會導致吸熱捲曲效果差別；但是，對照質量密度較大的油性壓克力塗料色紙捲曲方向相反，可見紙張捲曲的機制，除了吸熱後水分蒸發後會捲曲，顏料塗層的吸熱體積膨脹也會導致往反向捲曲。
6. 低溫環境下，不同塗料的黑色紙張也會捲曲；但是，冰箱除了提供低溫的環境，潮濕的因素也讓白紙紙基吸入濕氣，水分4度的縮小體積與塗料層的冷縮形成方向捲曲的拉鋸戰，導致低溫環境下，紙張捲曲的程度不如加熱捲曲來得明顯。這樣的因素，由隔絕水氣保鮮盒中的鋁箔色紙特別捲曲可以證明。
7. 複合材質(金銀)鋁箔色紙比其他任何塗料色紙都容易捲曲，原因是鋁箔材質不吸水、易導熱，相對於黏附的白紙紙基，金屬鋁箔的熱脹、冷縮很容易讓鋁箔色紙捲曲。
8. 有金屬鋁箔條的鈔票端，很容易導熱捲曲。而印刷油墨的濃淡色彩也影響紙鈔的捲曲速度和程度，油墨濃暗容易吸熱膨脹導致鈔票捲曲。特殊油墨的印刷以及紙質的差異，受熱捲曲速度和程度，也不同於偽鈔捲曲。

陸、討論

1. 在操作紙鈔捲曲實驗中，我們發現千元日鈔在掃描影印時，總是會呈現粉紅畫面；加上我們觀察 1000 元日幣紙鈔非常容易吸熱捲曲，研判日圓紙鈔不同於其他國家紙鈔，它塗覆的特殊印刷油墨可能含有金屬鋁箔等成份，除了會干擾影印機掃描器感光元件，造成掃描結果背景顏色顯現桃紅色色彩外；同時，導致一點點熱量就能引起紙鈔的捲曲。



圖 掃描 1000 元日幣紙鈔會呈現桃紅色干擾色彩

2. 紙張製造過程繁複，木材由細小的細胞膜質纖維 (cellulose fibers) 與稱為木質素 (lignin) 的膠狀物質黏合組成，製造紙漿時利用化學物 (例如石灰、氫氧化鈉、硫化鈉和亞硫酸鹽) 蒸煮木片分解木質素從而將纖維分離。將木片放入稱為蒸煮器的巨大容器內，其功能類似廚房用的壓力鍋，木片及化學物在加壓下蒸煮 1.5 到 4 小時直至成為濕軟如燕麥片的混合物，分離後的纖維可懸浮於水上。混合物經清洗以去除剩餘的化學物和分解的木質素及漂白至合適的白度 (whiteness)。如果是回收紙做成的紙漿紙質則略微不同，但是，工廠品管紙張潮溼程度則控制在 3.7 至 5.5%。因此，色紙吸收輻射熱捲曲成圓筒狀的原因，受環境水分影響很大。

柒、結論

1. 紙張捲曲與否和當時環境的溫度、濕度有關，加上紙張本身材質塗覆顏料和顏色以及受潮、水分蒸發都有關係。以下為捲曲條件：

	紙張紙質	塗料顏色	(不失水)塗料	(含水)顏料層
日照 高溫	蒸發水分紙張 潮濕度降低	暗黑色易吸熱 蒸發水分	油墨受熱體積 膨脹	水分蒸發，體 積縮小
低溫 環境	金屬複合材質 溫冷捲縮	***	油墨低溫體積 縮小	易受潮膨脹， 體積變大

2. 由下往上導熱鈔票捲曲比較向下導熱方式，捲曲效果更明顯。以最簡便的，手掌體熱傳導紙鈔捲曲，發現日幣千元鈔最容易側邊捲曲，除了特殊暗綠油墨易導熱外，閃耀金屬光澤成份也是導熱紙鈔捲曲的原因。而美金一元紙鈔的墨綠油墨集中在鈔票前後端，所以導熱後，前後端捲曲明顯。新

台幣500元暗紅色紙鈔和1000元藍紫色紙鈔邊端都有一條防偽金屬鋁箔條，增加導熱捲曲效果，所以鋁箔端捲曲效果特別明顯；500元暗紅色又比100元鮮紅百元鈔更容易捲曲。偽鈔1000元和真鈔比較，粗糙防偽金屬條並無導熱捲曲的效果，藉此差異，可以簡單判別真假千元紙鈔。

捌、參考資料

1. 玩顏色調溫度 中華民國第 54 屆中小學科學展覽會作品說明書，取自：
<https://activity.ntsec.gov.tw/activity/race-1/54/pdf/080119.pdf>
2. 紙張指南 操作說明書 2013，取自：
http://support.ricoh.com/bb_vloi/pub_e/oi/0001051/0001051822/VD1387960/D1387960_tw.pdf
3. 紙張裱貼印刷與其複合材料適性之探討 陳忠輝. 吳文和. 張慎餘 印刷科技 第三十三卷第一期 行政院中央銀行 2017. 03. 01 出版
4. 認識圖書紙質 張豐吉 佛教圖書館館刊 第43期 95年6月
5. 紙，取自：<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%BA%B8>
6. 光色交響曲—不同顏色對光吸熱的研究與應用 台南市下營國中，取自：
<http://163.26.159.6/wiki/images/1/10/%E5%85%89%E8%89%B2%E4%BA%A4%E9%9F%BF%E6%9B%B2%EF%BC%8D%E4%B8%8D%E5%90%8C%E9%A1%8F%E8%89%B2%E5%B0%8D%E5%85%89%E5%90%B8%E7%86%B1%E7%9A%84%E7%A0%94%E7%A9%B6%E8%88%87%E6%87%89%E7%94%A8.pdf>
7. 色紙顏色對影印品質之影響 農林學報 第 45 卷第 1 期 1996，取自：
<http://sciexplore.colife.org.tw/Upload/2086ac85-218e-441f-af54-bff7334ecc9b-20180409180202410.pdf>