

# 起瓦——困擾書畫收藏家數百年的物理現象

懸宕數千年，只要是捲軸書畫就會遇到的起瓦現象，可以用物理的方式解釋清楚並加以改善。

■ 沈維昭、周明翰、汪依平、  
簡若帆、鄭詠允、洪順興、洪在明

「上壁宜潤，貴其滋潤，下壁宜燥，庶屏瓦患，燥潤失宜，優劣系焉。」明末周嘉胄《裝潢志》。

「起瓦」指的是書畫捲軸在展示時，不管是懸掛或水平擺設，垂直軸桿的兩端會出現外翹的現象，形狀類似瓦片，因此得名。書畫起瓦後，除了妨礙美觀外，還可能加速附近的纖維撕裂和顏料脫落。以往的文物保存者把這種現象歸咎於裝裱後無法避免的瑕疵，例如漿糊塗抹不均勻、把畫心拉平時殘留的張力、組成捲軸的各個成分對於溼度和溫度的不同反應等

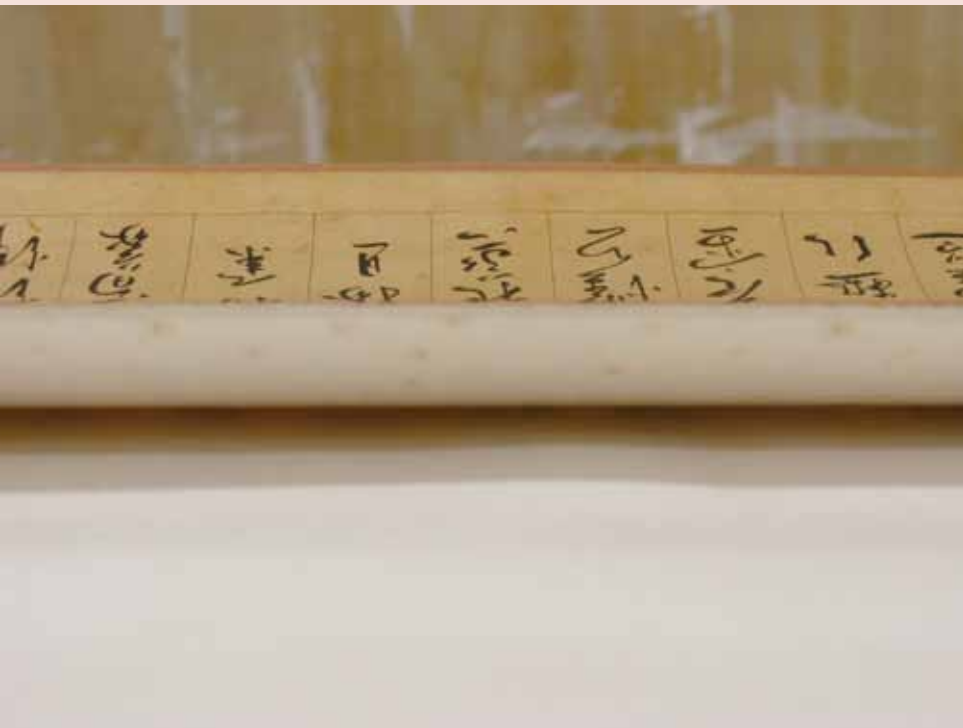
理由，不過一來這些因素不容易控制，二來它們造成畫面的不平整，反應在捲軸兩邊的效應應該有相同的機率是外翹或下凹，甚至像海浪一樣夾雜出現外翹和下凹。鑑於絕大部分捲軸的邊緣都是外翹，我們主張收藏時捲軸曲率造成的塑性變形才是造成起瓦主要的因素，相較於前者，這是可以藉由物理方式來補救的。

第一次接觸文物修復是前年在清華大學光電所介紹揉皺力學時，和負責演講的李瑞光教授閒談，他提到對古畫修復常面對的水平裂痕有興趣，想研究它們出現的位置有無規律。雖然我們之前擅長的揉皺牽涉的形變遠比古畫的捲曲嚴重，但和光



藉著加大捲軸的半徑，可以減輕在收藏期間的塑性形變和內在曲率。

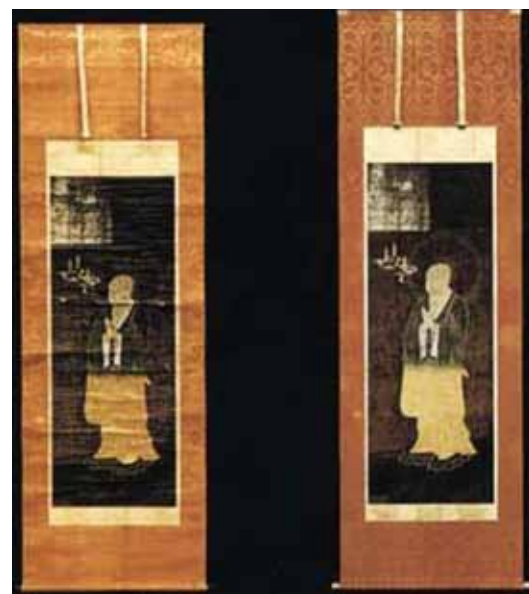
**以往的文物保存者把起瓦現象歸咎於裝裱後無法避免的瑕疵，但收藏時捲軸曲率造成的塑性變形可能才是主要的因素。**



(左)遠端邊緣的起瓦要仔細觀察才看得出來，注意它和右圖起瓦的位置在不同邊，也就是說只要沒有加軸和桿，捲軸書畫的四個邊都會起瓦。(右)這張照片是清華大學人社院展示某位近代畫家的作品時拍的，證明邊緣的確有明顯外翹，由於這不是古畫，也可以推論紙質的老化不是主因。

電的關係比起來還是近許多；再加上發現裝裱和修復是個很封閉（也很賺錢）的行業，在過去那些祖傳祕方甚至傳子不傳女。就像律師知道跟著救火車跑就可以找到生意，我們本能地覺得文物修復領域一定有不少物理學家可以回答的問題。

我們於是厚著臉皮寫信給國立故宮博物院毛遂自薦，很驚訝地，國立故宮博物院登錄保存處竟然很快地回音，邀請我們去演講，順便洽談合作事宜。這個懸宕數千年，只要是捲軸書畫就會遇到的「起瓦」問題，就是這樣聽來的。其實那天故宮的人也是在閒聊時不經意提到，因為過去幾百或上千年的師傅都認為這個現象是裝裱後無法避免的瑕疵，只能靠裝裱時中外各家不同的手藝和經驗來減輕，沒有什麼通則，自然也不會想到要找我們做有系統的研究。



左圖是裝裱前的掛軸（右圖則是修復後的模樣），可以看見畫面上有許多水平的折痕，假以時日，這些地方容易皸裂或掉色。如果可以找出它們背後的物理機制和規律，便可以防範未然。



跪在地上的是我們在國立故宮博物院的合作者洪順興先生，這是洪先生參觀由西尾（Yoshi Nishio）主持的古畫修復工作室所攝。西尾先生（戴眼鏡站立的那位）在美國東岸的知名度很高，裱一幅畫要收費兩、三千美金。

直覺告訴我們他們是錯的，裝裱時引入的張力和漿糊的水分固然會造成紙張的變形，但是書畫是以捲軸方式收藏的事實和它所引入的內在曲率一定扮演了重要的角色。前者或許只能靠經驗，後者卻是由古典力學主宰，可以用物理的方式解釋清楚並加以改善。如愛因斯坦說的：「做研究的第一步是簡化問題。」我們決定暫時撇開裝裱技術和術語所營造的煙霧，先專心探討單層的紙會不會有起瓦的現象。

物理學家喜歡歸納，找出可以一道以貫之的終極理論，我們也不例外。希望研究的是造成起瓦的根本機制，因此剛開始並沒有採用故宮裝裱用的專門紙，只拿一般的 A4 影印紙和廚房用的鋁箔紙，用鉛筆捲成大小不一的圓桶，然後再靠手指把紙的四個角落展開來。果然在平行於捲曲方向（用方向 1 表示）的邊都會翹起來（起瓦），有趣的是同時發現：

- （1）垂直捲曲方向（用方向 2 表示）的另外兩邊也會起瓦，甚至更嚴重，高度大致是前者的兩倍；
- （2）把手指靠近可以減弱起瓦，大致上，起瓦高度  $h$  和該邊的長度  $L$ 、內在曲率  $\phi$ （即圓桶半徑的倒數）跟薄膜厚度  $t$  的關係是： $h \propto L\sqrt{\phi t}$
- （3）紙的中央大致貼著桌面，也就是說起瓦的現象只局限在（四個）邊緣的有限寬度區域（我們戲稱為斑馬線）；
- （4）如果把手指頭放開，薄膜回復的彎曲程度遠不如當初剛捲的樣子，表示展開攤平後會削弱捲軸的內在曲率。因此在討論起瓦和捲軸半徑的關係時，要小心改採後來的值。

為了避免造成實驗誤差，也積極尋找塑性比起紙和鋁箔穩固的別種材料。後來，想到利用在簡報軟體 Power-Point 還沒有流行前，演講用的投影片；把它捲成圓桶後，

用膠帶固定，只要泡幾分鐘熱水就可以使塑性保持得很好，起瓦的程度也比紙和鋁箔明顯許多。小小的一張邊長 10 公分 × 10 公分的塑膠片，如果捲成半徑 1 公分的圓柱，展開後可以產生超過半公分的起瓦。

如果讀者湊巧是物理系的學生，而且擁有 Landau and Lifshitz 寫的彈性力學課本 *Theory of Elasticity*，可以試著寫下針對薄膜，同時包含拉伸和彎曲的微觀位能，來解釋起瓦現象。筆者擔保除了少數高手外，你最終一定會決定還是先去做其他更重要的事情。

讓筆者先和各位分享一個物理學家常用的絕招—量綱分析 (dimension analysis)，用白話講，就是由各個參數的單位來湊答案。由於公式中等號的兩邊必須具有相同的因次，因此在決定起瓦高度的公式裡，所有參數相乘或相除後，最終必須剛好是長度的因次。起瓦高度和薄膜的長、寬、厚度的因次都是長度，衡量材料有多麼難被彎折的彎曲係數  $K_B$  則是能量 (化簡成基本單位時，能量相當於質量乘以長度平方，再除以時間平方)，另一個常見的材料性質波森比 (Poisson ratio)  $\nu$  不帶單位。

這麼一檢查，可以發覺先前假設公式中起瓦高度只跟  $K_B$  及  $\varepsilon$  相關的推導犯了大錯，因為  $K_B$  的質量和時間因次消不掉，起瓦不可能跟  $K_B$  有關！但是這明明不符合直覺，如果  $K_B = 0$ ，薄膜變得軟趴趴，那不管內在曲率  $\phi$  多大，似乎都不預期會起瓦呀。怎麼辦呢？既然預期  $K_B$  要進到起瓦的公式中，一個解決的辦法是引入另一個單位和它差不多的拉伸係數  $K_S$ ，並且利用比值的方式 ( $K_B / K_S$ )，藉著  $K_S$  所攜帶的能量除以長度平方的因次，把  $K_B$  的質量和時間因次消掉。

均勻材料的  $K_B / K_S$  大致等於厚度平方除以 8。理由很簡單，從量綱分析，這個比值攜帶的因次是長度平方，但是  $K_B$  和  $K_S$  兩者都是材料局部的性質，不可能和薄膜的長度、寬度有關，因此  $K_B / K_S$  這比值因次裡的長度一定指的是厚度。由於  $K_B / K_S$  的比值可用薄膜厚度的平方來代換，因此可推論起瓦高度會與薄膜的厚度有關。順便提一下，由於薄膜的厚度很小，拉伸係數  $K_S$  等效地變得很大，因此從能量的觀點來考慮，彎曲形變比起拉伸容易許多，這也是為什麼揉皺過的紙或塑膠袋的面積不會變大或變小。

我們還可以使出物理學家的另一個賴皮招式，利用起瓦現象描述的事實，寫下可以給出這些性質的現象學模型來描述起瓦現象。所謂現象學，說穿了就是指用猜的，因為它不是從微觀嚴格推導，因此可以有無窮多種寫法。事實上，過去半年便更改過不下 6 種版本，每一次都信誓旦旦，非常有自信，但是一旦等到新的實驗結果和它抵觸時，只能窮則變、變則通，像神奇寶貝一樣繼續進化。

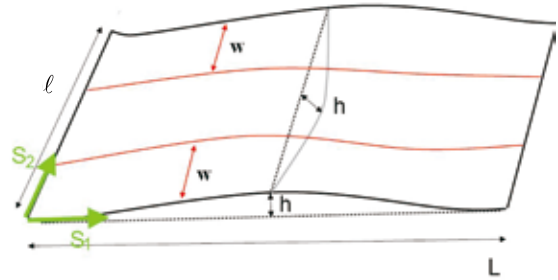
方便起見，以下的討論先針對有軸和桿的捲軸書畫，手指壓住四角的情況。不難想像捲軸在打開前，外層會被拉伸，內層則受到擠壓。塑性暗示當畫展開後，這些形變無法完全回復到零，因此：

- (1) 由於軸和桿的緣故，書畫的內外層在展開後變成的上下層被迫要一樣長，上層因此反過來受到伸展，下層則被擠壓。
- (2) 想像吃紅豆餅時，一口咬下去，內餡會往旁邊爆漿。同樣理由，上(下)層的拉伸(擠壓)會造成另一個方向(方向 2)出現收縮(爆漿)，在紙的上下層不分離的前提下，紙面自然地會翹起來。

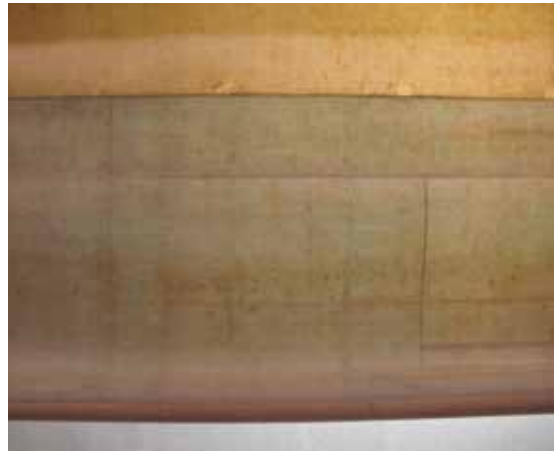


- (3) 但不是剛提醒過桿和軸的存在嗎？當起瓦出現時，該處的紙從桿到軸的距離會拉長，因此會像國中討論的彈簧位能一樣儲存拉伸位能，這就是從量綱分析預期要把拉伸係數  $K_s$  放進來的物理由來。
- (4) 由於畫的中央區域被兩端的斑馬線夾住，比較容易忍住不要出現步驟 2 的收縮（爆漿），好處是可以降低斑馬線在方向 1 的拉伸位能，壞處是要抑制中央區域在方向 2 的自然收縮（爆漿）的趨勢，需要對系統作正功，因此也會累積（拉伸和擠壓）位能。
- (5) 由位能的觀點來看，上面第 3 項希望斑馬線越細越好，第 4 項則希望中間區域越窄越好，顯然這兩件事情是矛盾的。協調的辦法是把兩者的位能加起來，找出總位能的最小值。
- (6) 忘了說，當材料受到擠壓時，它在另外兩個方向的爆漿程度是由波森比  $\nu$  來衡量（它的值大約是 0.3），因此最終導得的公式  $h_1 \approx L\sqrt{\nu\phi t}$  會包含  $\nu$ 。
- (7) 回到沒有軸桿的情況，如果只用指頭壓住四個端點，步驟 1 就可以給出原來桿和軸所在的兩邊的起瓦。因為不需要經過步驟 2，不會用到  $\nu$ ，因此它們的起瓦高度會是  $h_2 \approx \ell\sqrt{\phi t}$ ，其中有關的長度從畫的長邊  $L$  換成寬邊的長度  $\ell$ ，而且少了  $\sqrt{0.3}$  的係數。實驗用的 A4 紙和裁成正方形的塑膠片， $L \approx \ell$ ，因此可以解釋前述起瓦現象的第 1 個觀察  $h_1 \approx h_2 / 2$ 。
- (8) 如果容許紙的  $K_B$  不均勻，和捲軸有關的  $h_1$  公式會多出很有啟發的係數：  

$$h_1 \approx L\sqrt{\nu\phi t} \left( K_{s,middle} / K_{s,margin} \right)^{1/4}$$
 其中  $K_{s,middle}$  和  $K_{s,margin}$  分別代表畫的中央區



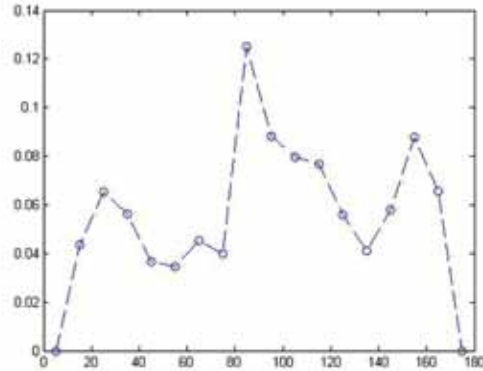
捲曲的方向是  $s_1$ ，對於實際的捲軸書畫， $s_1 = 0$ ， $L$  分別是桿和軸的位置。 $L$ 、 $l$  代表長度和寬度， $w$  是發生起瓦的斑馬線寬度， $h$  則是起瓦高度。斑馬線之間平貼在桌面；不同於斑馬線，當用手指擠壓中間區域時，起瓦高度不會改變。



書畫裝裱時的覆背切割痕跡可以從照片上看出來

域和斑馬線的拉伸係數。這個係數告訴我們，可以藉由減弱  $K_{s,middle}$  和增強  $K_{s,margin}$  來達到抑制起瓦的目的。

但是如何讓薄膜變得比較容易（減弱  $K_s$ ）或難（增強  $K_s$ ）拉伸和擠壓呢？最直接的辦法當然是換材料。不過我們討論的是故宮的古物，加上裝裱是個很傳統的行業，得考慮許多包括實用、美觀和不需要重大改革的因素。



用顯微鏡看到的放大 50 倍的纖維照片。這些纖維有沒有方向性，可以靠影像辨識，利用電腦把每一段纖維的方向平均起來；至於排列整齊的程度，則得計算任意兩段纖維的方向相干函數（correlation function）。以這張照片為例，纖維的角度分布在右圖，縱軸表示機率，橫軸是和水平右方的夾角，顯示主要纖維朝向上方。

為了找出裝裱師傅能夠接受的建議，我們進一步了解一些裝裱的細節，發現以下兩道有趣的手續可能適合切入來改善起瓦現象：

- (1) 裱畫的第三、四層叫覆背（第二層叫小托，日式裝裱的覆背只有一層），是由切割黏貼而成，師傅以為是古人節儉，廢物利用的習慣延用到今日。台灣和日本在細節上有以下的歧異：

	貼紙大小	貼法	貼紙纖維	纖維方向性	黏貼方式
台灣	不等	不規則	短	有	把兩張貼紙邊緣重疊
日本	相同	規則	長	有	只接合邊緣露出的毛邊

我們懷疑這些差異的背後可能藏有老祖宗的智慧。從物理的角度來看，切割相當於引入線缺陷，台灣的重疊貼法使邊緣加厚，等於加強了該處的  $K_s$ ，相對地，日

本的貼法是削弱。至於貼紙的大小分布和貼法，則對應線缺陷的長短和分布的規則性，直覺上不同的裝裱方式對於整體  $K_s$  的影響可能不同。我們除了請故宮用實際的裝裱比較兩者的差異外，也利用分子動力學來模擬檢驗。

另外纖維的主要走向和捲曲方向的夾角也是可以調整的參數，根據塑膠片的實驗，垂直排列比 45 度夾角要起瓦得少一些。如果家裡有做壽司的竹捲簾就很容易想像，竹條和捲曲方向的夾角是 90 度時，捲起來的竹簾完全不會自動彈開來，也就是說彎曲的塑性彰顯不出來。

- (2) 日本師傅在裝裱結束時，習慣用刷子（中國裝裱師傅只用到兩把，這也許就是俗語「這人真有兩把刷子」的由來；日本人比較考究，多達八、九把，這裡指的是一把三十多萬的日本裏打刷）重複戳擊（行話叫「裏打」）畫



收藏時捲軸造成的彎曲變形是大家忽略的另一個因素（圖片來源：種子發）

的底面。國立故宮博物院的合作者認為這可能是因為日本用的漿糊比較不黏，需要用這個方法讓不同層的紙黏得緊一點。

我們把這個裏打動作和日本裝裱的畫比較不起瓦的事實聯想在一起，希望在分子動力學模擬中引入點缺陷，把局部的彈簧變弱，來模擬戳的效果，看它能否降低整體的  $K_s$ 。接著或許可以藉由調整戳的位置、密度和強度，找出減弱起瓦的最佳安排。

讀者如果手頭剛好有不用的紙，拿來實驗看能不能觀察到我們講的起瓦時，要小心一件事情，必須確定桌子不會影響實驗結果。也就是說，如果沒有桌子托住，有沒有可能紙張的中間其實會塌下去。如果屬實，那在考量對於實際觀瞻的影響時，起瓦高度就比較適合定義為（斑馬線）上翹和（中間區域）下凹的和。

另外實驗設計把塑膠片兩頭墊高，來確認肚子下凹的可能。理論分析和實驗結果都顯示，當寬度變小或曲率半徑變大到一個地步時，肚子是有可能下凹，並且起瓦公式和先前不考慮下凹的情況很不一樣。

另外是捲過的紙打開後常會呈螺旋狀，導致曲率並不是常數，而是隨著往外或離軸心越遠，彎曲的程度越不明顯，曲率越小。我們的理論可以計算起瓦程度和最高點偏離畫緣中點的距離，這剛好在故宮（水平）展示的〈清明上河圖〉得到佐證。故宮人員在圖的上下端每隔一段距離會用圖釘固定住，我們注意到圖釘隔開的每一段的起瓦程度的確不同，而且隨著離開軸心逐漸減輕。

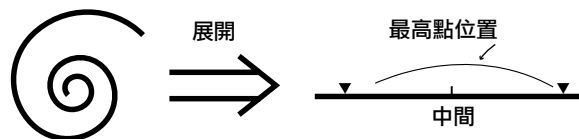
扇形的捲軸通常沒有起瓦的問題，由於它有扇骨的支架，加上圓形的弧邊比較難上翹（實際拿張紙來實驗就知道），因此不難理解。

我們想到這裡的結論或許可以應用到軟式螢幕的開發。為了避免出現類似的起瓦和不均勻的應力分布導致影響液晶的顯示功能，背板的液晶刻槽扮演書畫捲軸的覆背纖維的角色，它們的形狀和方向成為設計師可以調控的參數。

讓我們總結到目前為止，從這個「起瓦的奇異旅程」裡學到什麼。首先是在知識層面外的，如果當初沒有主動跟故宮毛遂自薦，就不會接觸到這個兩方都不知道可以改進的現象，因此厚臉皮是很重要的。其次當然是要保持開放的心胸，願意嘗試不同領域的問題。接著是有容乃大，不要怕別人搶走你的想法，多和別人討論或合作。

回到起瓦現象，我們相信老師傳說的裝裱過程瑕疵的確會有影響，但是在收藏時捲軸造成的彎曲變形卻是大家忽略的另一個因素，可以藉由改變在裝裱時，覆背的纖維走向、覆背的切割方向安排，以及裏打動作的位置和強度來改善。

最後，感謝國科會和（新竹）理論科學中心物理組的支持，以及和蕭百沂、陳培亮、陳宣毅、陳志強四位教授的討論。



我們的理論可以預測起瓦的程度和最高點發生的位置。如果捲軸在展開前的橫截面長得像左邊的螺旋狀（例如捲過的紙就是這樣），也就是說當內在曲率不是定值，會隨離軸心的距離逐漸變弱時，起瓦的最高點會偏離畫緣的中間（往軸心靠近）。這裡的示意圖沒有刻意分辨上下層，右邊展開後，兩端三角形定錨代表軸和桿的位置，實線只是方便襯托灰線（實際薄膜）的上翹或起瓦。

洪在明

清華大學基礎科學研究中心

沈維昭、周明翰、汪依平、  
簡若帆、鄭詠允

清華大學物理系

洪順興

國立故宮博物院登錄保存處

#### 深度閱讀資料

洪順興（2009），從王寵〈千字文〉談周嘉胄《裝潢志》與本幅手卷裝裱，故宮文物月刊，321，100-107。

登石健三（1981），捲軸裱褙法（張世賢譯），故宮季刊，15（3），頁 117-129。

岑德麟（2003），漿糊—書畫裝裱的黏貼劑，故宮文物月刊，238，104-109。

沈維昭、周明翰、汪依平、簡若帆、張景皓、洪順興、洪在明（2013），和故宮博物院合作探討的起瓦現象，物理雙月刊，35（1），68-74。