

中華民國第 55 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國中組 物理科

030107

絲路之旅

學校名稱：臺中市私立曉明女子高級中學(附設國中)

作者： 國二 張詠宜 國二 許允恩 國二 林宜靜	指導老師： 鄭文杰
-----------------------------------------------	------------------

關鍵詞：蜘蛛絲、拉力張弛、彈性

摘要

採集的原始蜘蛛絲在拉伸過程中，其拉力強度並非保持一定，而是在剛開始的時候達到最大值，之後就快速的下降，直到後段才逐漸呈現穩定的拉力，而表現的特色主要是延展性，只有達到高應變情況下，才轉變成為以彈性特色為主，但超過 24.5%應變之後，絲線就開始被破壞。將絲線經過加熱或溶劑浸泡處理，將降低延展性及增加彈性特徵，且於低應變時就會表現出來，但同時也可能會將破壞點降至較低應變量。蜘蛛原絲或經過處理的絲線，最高的彈性量約在 7.5~12%範圍。

壹、研究動機

自古以來人類經由大自然中獲得無數的靈感，也推動文明的進步，大至航空器設備，小至醫藥領域，這些各式各樣的研究都脫離不了仿生學，它也是現在相當熱門的學科，

自然界中昆蟲為了求生存，發展了許多不同的捕食方法，其中蜘蛛絲是隨處可見的一種，在家中打掃常會勾或纏到蜘蛛絲，拉扯時會發現它具延展性且不易斷裂，因此當昆蟲黏附在蛛蛛網上而出力想要掙脫時，它一出力則蛛蛛絲便以一強度來抵抗，同時發生延展性而伸長，利用這種延展性及強度來消耗昆蟲的逃脫力。若蛛蛛絲不具備延展性，則昆蟲的力量極容易拉斷絲線，反之若沒有強度，那昆蟲也會跑走，只有同時具有這兩種特性，才能達到誘捕昆蟲的目的。在大自然中也有很多相似的獵捕方法，例如捕蠅草中的黏液，它也同時具有流動性及彈性，這種黏彈體的物質也可以有效抓住昆蟲。另外漁夫在釣魚時利用拉線與放線的動作來消耗魚的體力，也是一樣的原理。這種有趣的拉伸表現，引起我們對於其特性感到好奇，因此設計了實驗來探討蜘蛛絲的延展性及彈性以及不同試劑的浸泡及加熱對於蜘蛛絲在特性方面的影響。

希望經由這個實驗過程，可以對理化學科中的基本操作及量測有更深一層的瞭解，並且加強對力學的概念。在採集蜘蛛絲的時候，由於必須近距離的接近昆蟲，對於生物知識將有另一種體驗。進行絲線的溶劑浸泡處理過程，可以減少對化學的陌生感，這些綜合的學習體驗，相信對於我們在學習自然與生活科技的知識上將有很大的助益。

貳、研究目的

蜘蛛絲的蛋白質結構具有結晶區域及非結晶性區域，結晶性主要提供強度，而非結晶性則提供延展性。蛋白質的結構會因為外在溫度、溶劑、酸鹼值等因素而產生變化，我們試著將蜘蛛絲以加熱、溶液浸泡等方式進行處理，使其蛋白結構產生變性，並以拉力張弛實驗來觀察這些加工方式對於蜘蛛絲的強度所造成的改變。

參、研究設備器材

一、器材（圖 1~5）

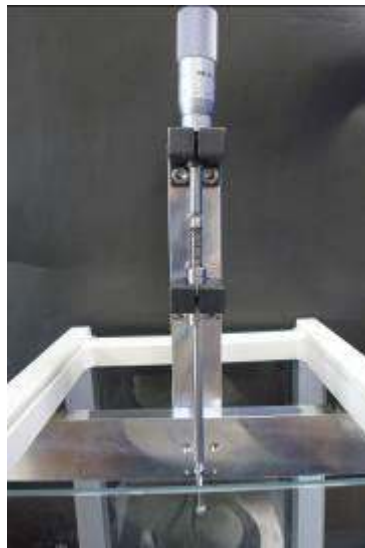
剪刀一把、線 1 捲、鑷子 1 支、鋁線 50 公分、毛細管 12 支、天平 1 台、拉力支架 1 組、分厘卡測頭 1 支、游標尺、加熱器 1 台、顯微鏡 1 台、載玻片 1 片、燒杯、酸鹼試紙、黏膠 1 罐、記錄紙 1 本、油性筆 1 支。

二、試劑

甲醇(200ml)、乙醇(200ml)、丙酮(200ml)、檸檬酸(10g)、蒸餾水(1L)、氫氣 1 瓶。



(圖 1) 天平



(圖 2) 拉力支架



(圖 3) 顯微鏡



(圖 4) 實驗器具



(圖 5) 檸檬酸及 PH 試紙

肆、研究過程及方法

一、蜘蛛絲的採集

因研究需要十二條約十到十五公分長的蜘蛛絲，因此我們到附近的山區採集，發現蜘蛛絲的顏色在陽光下偏白色且極細（圖 6），容易融入背景，使採集時常會無法看到目標。因此準備了一塊黑色紙板，可遮住背景使其容易目視（圖 7）。

採集方式為先找到長度符合的蜘蛛絲後，將直徑約 1mm、長度 50 公分的鋁線兩頭貼上雙面膠（圖 8），再將蜘蛛絲兩頭分別黏在雙面膠上，和蜘蛛網分離後再將其剪下。另外準備若干支空心毛細管，先將一條黑色細線穿過其中心(黑線長度需長於毛細管)預留多餘的黑線在兩端，將其一端多出的黑線與蜘蛛絲的一端捻揉在一起後，另一端多出的黑線拉出，將絲穿過毛細管中（圖 9），完成後將成品放入密封盒中，須注意不可把不同條蜘蛛絲纏在一起以免從毛細管取出時損壞。

將其中一條蜘蛛絲剪下五公分後，其兩端黏在載玻片，如此可以容易在顯微鏡下觀察，而不會受到氣流的擾動。



（圖 6）結網蜘蛛



（圖 7）厚紙板背景



（圖 8）採集用鋁線



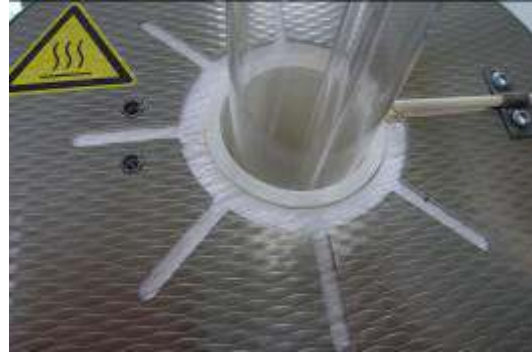
（圖 9）保存於毛細管

二、加熱處理

- (一) 將蜘蛛絲以鋁線固定兩端，並放置於密閉加熱管中（圖 10~11）。
- (二) 注入氫氣於加熱管中將空氣排除，1 小時之後才進行加熱。
- (三) 加熱管緩慢加熱至 100°C，並且保持 100°C 狀態 2 小時，之後自然降溫。
- (四) 進行拉力張弛實驗。



(圖 10) 加熱管中的蜘蛛絲



(圖 11) 加熱

三、浸液處理

- (一) 量取 50ml 的蒸餾水於燒杯中、將檸檬酸逐步少量加入於燒杯中，並且同時攪拌均勻，接著以酸鹼試紙量測，直到溶液 PH 值達到 3 為止（圖 12）。
- (二) 將蜘蛛絲分別浸泡於甲醇、乙醇、丙酮及檸檬酸水等溶劑之中，浸泡時間為 18 小時（圖 13）。
- (三) 取出蜘蛛絲放置於室溫下使其自然乾燥 24 小時。
- (四) 進行拉力張弛實驗。



(圖 12) 檸檬酸水溶液



(圖 13) 蜘蛛絲浸泡

四、拉力張弛測試

(施加一個定數的應變，然後觀察其拉力隨時間而減小情形)

- (一) 細小的蜘蛛絲要量測其伸長量及拉力強度相當不易，因此設計一鋼塊放置於天平之上。當蜘蛛絲上拉鋼塊時，減輕的重量即是拉力的大小。
- (二) 將蜘蛛絲兩端以黏膠固定於螺絲上。
- (三) 在蜘蛛絲呈現鬆弛的狀態下，將一端的螺絲固定於鋼塊，另一端的螺絲固定於拉力桿 (圖 14)。
- (四) 旋轉拉力桿使蜘蛛絲呈直線狀態，穩定之後便將天平歸零，記錄分厘卡的刻度。
- (五) 以游標尺量測蜘蛛絲的初始長度，計算出每次增加 3.5% 應變時所需要的拉伸長度(應變量=拉伸長度÷初始長度)。
- (六) 旋轉拉力桿使其上拉蜘蛛絲，當達到所要的應變長度則停止並且靜置，以數位相機拍攝天平所顯示的重量，之後記錄每 5 秒間隔的重量變化。
- (七) 等到重量穩定之後，記錄最終重量值。
- (八) 緩慢下降拉桿，直到重量回至零點，記錄分厘卡的刻度。將拉伸刻度減此下降刻度即可獲得彈性長度。



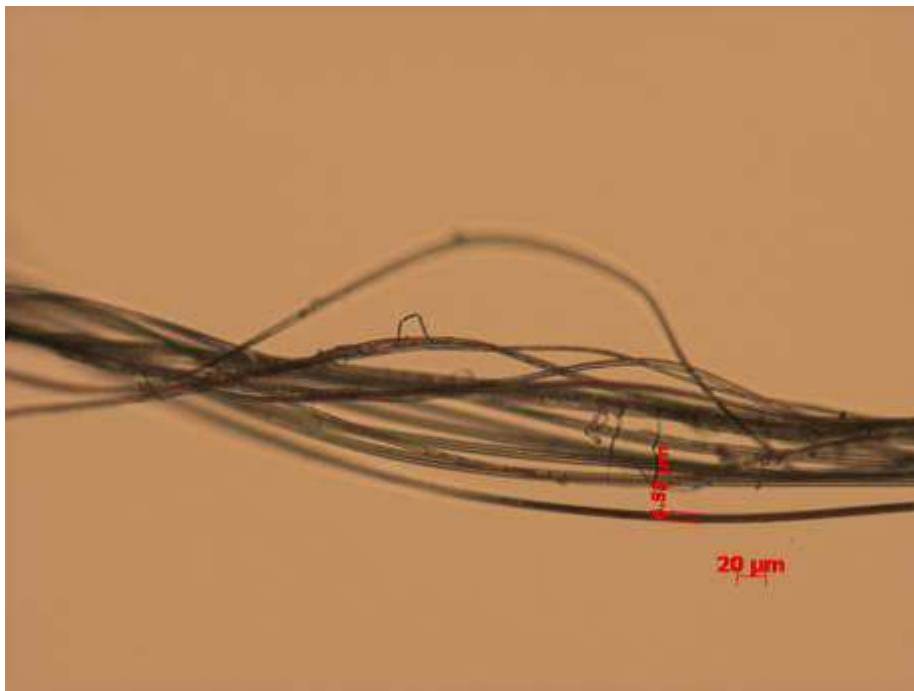
(圖 14) 拉力張弛測試

伍、研究結果與討論

一、觀察

首先以顯微鏡觀察一條採集的蜘蛛絲(下圖)，其構造是由多條的細絲所組成，每一條細絲的直徑約 10~6 μm ，因此平常所見到的蜘蛛絲，其實是由這些更小的細絲所集合而成。因此進行測試的蜘蛛絲，其結構都存在差異，為求客觀的探討，進行拉力張弛實驗時皆以相同的應變量進行，應變量數值有 3.5%、7%、10.5%、14%、17.5%、21%、24.5%、28%。

所獲得的拉力值大小不能直接作為兩絲之間的差異比較，因此分析的數值必須以各絲線本身的長度或拉力作為基本值，如此才能觀察其拉力下降的趨勢以及可以表現出最終拉力特性的彈性量。



蜘蛛絲觀察

二、數值定義

初始拉力：每一次應變開始的最大拉力

最終拉力：最後呈現穩定的拉力

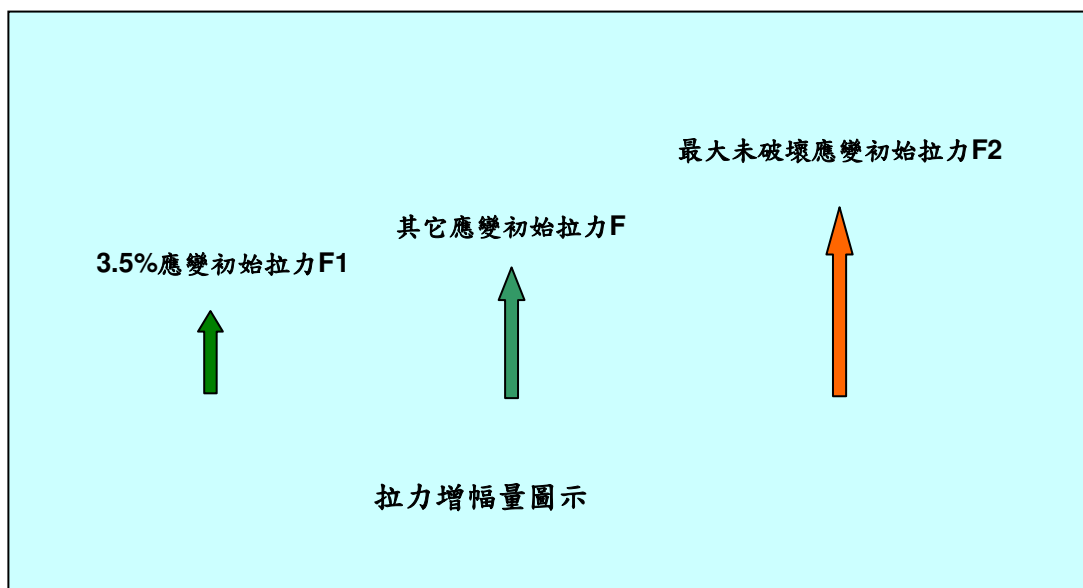
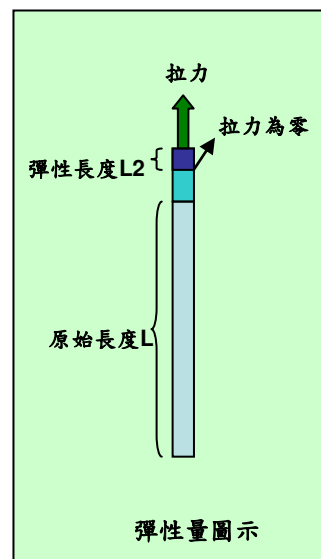
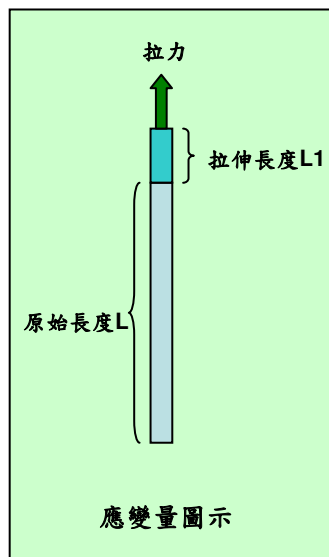
應變量(%)：(拉伸長度 L_1 ÷ 原始長度 L) × 100%

彈性量(%)：(彈性長度 L_2 ÷ 原始長度 L) × 100%

拉力值(mgw)：以重量值表示

拉力增幅量：

(初始拉力 F - 3.5%應變的初始拉力 F_1) ÷ (未達破壞區之內的最大初始拉力 F_2 - 3.5%應變的初始拉力 F_1) × 100%

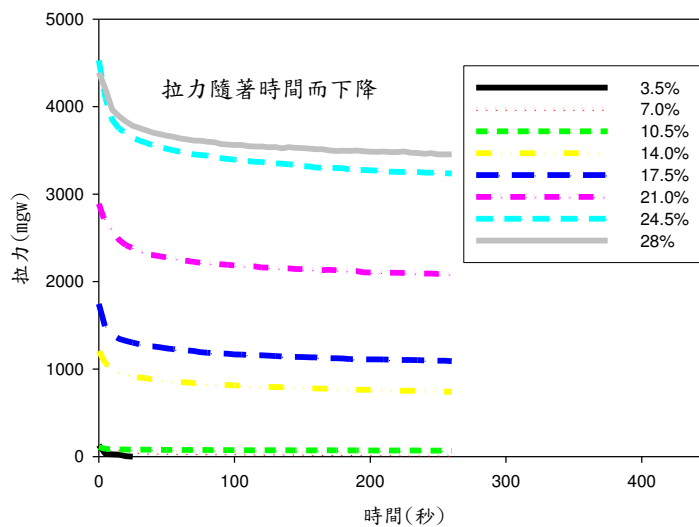


三、原絲拉力張弛測試

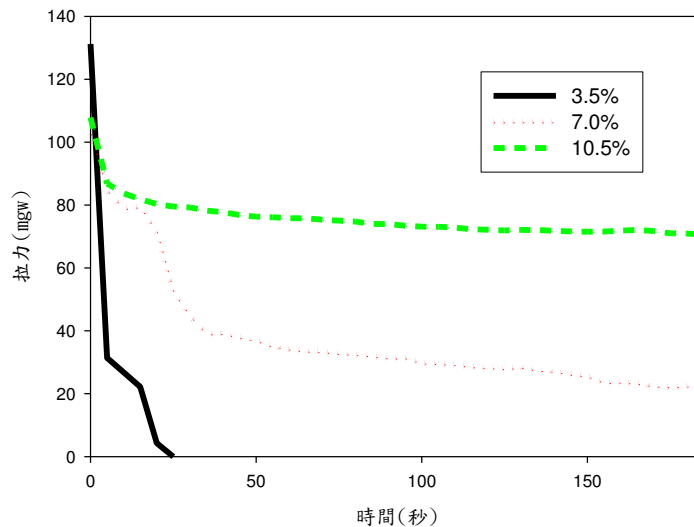
發現蜘蛛絲的拉力並不是一個固定值（圖 15），剛開始伸長的時候，這個初始拉力會達到一個極大值，之後隨著時間增長，拉力快速下降，直到最後達到一穩定的最終拉力。在 3.5% 的應變作用時，拉力很快的下降（圖 16），並且在極短的時間內拉力下降至零，顯示原始的蜘蛛絲於剛開始的 3.5% 應變下，主要的表現以延展性為主，並沒有彈性的作用，這些拉力為蜘蛛絲內部滑動力的作用。

當增加應變量至 7.0% 時，初始拉力也增加，但亦快速下降，最後則呈現一穩定的數值，顯示蜘蛛絲在此應變下，除了延展力之外，也開始表現出彈性的特徵。因此初始拉力為產生延展的滑動力加上彈性力的作用力表現，但最終拉力則只剩彈性力的作用。

10.5%



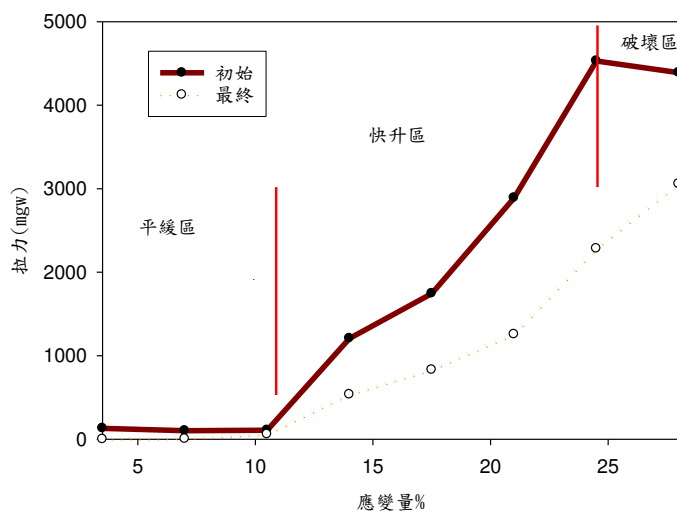
(圖 15) 原絲的拉力張弛



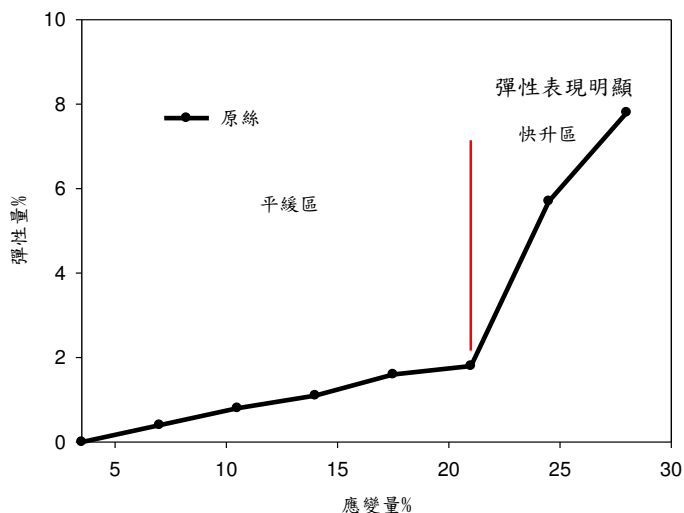
(圖 16) 3.5% 應變時拉力快速下降至零

當經過 3.5~10.5%的平緩區之後，隨著應變的增大，初始拉力及最終拉力都有大幅的提升（圖 17）。其中初始拉力在最後的 24.5%則呈現極大值，而之後的 28%應變時拉力則降低，顯示絲線已開始被破壞。但 28%的應變下，初始拉力雖低於 24.5%，但最終拉力則遠高於 24.5%，顯示 28%應變時蜘蛛絲雖然發生破壞，但由於彈性表現方面高於 24.5%應變，因此最終拉力更高。

另外發現隨著應變的增加，彈性的表現也越來越明顯（圖 18），當經過 21%應變之後，有大幅度的提升。



(圖 17) 原絲的應變與拉力

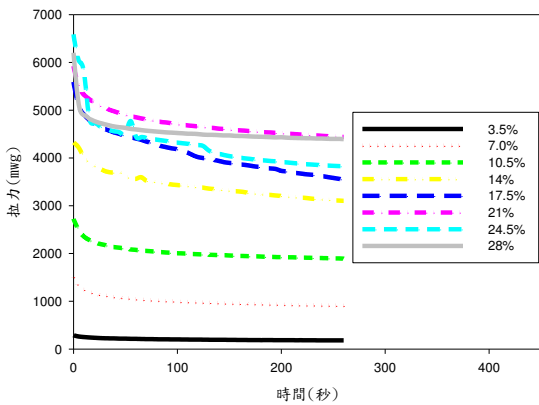


(圖 18) 原絲的應變與彈性量

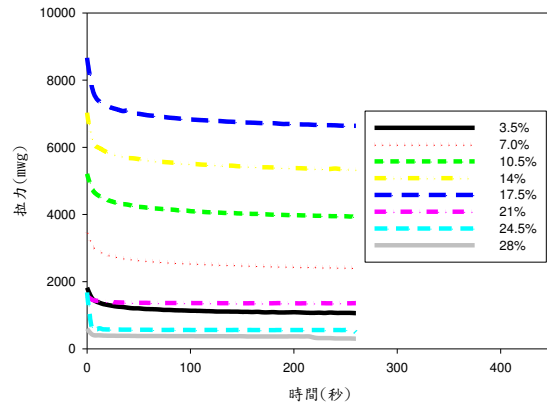
四、經過處理的拉力張弛測試

(一)、拉力鬆弛

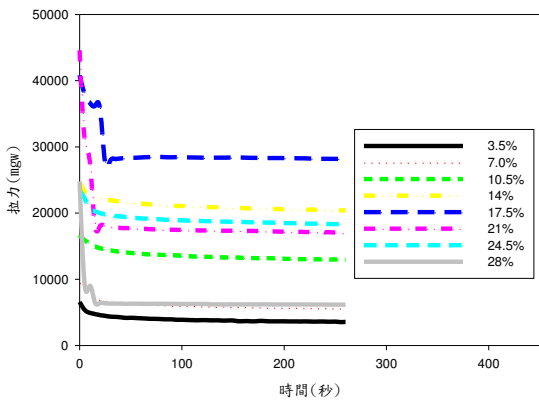
蜘蛛絲不論是經過浸泡或熱處理之後，隨著應變的加大，初始拉力也快速增加，但拉力也隨著時間持續降低（圖 19~22），與原絲的張弛現象相同，都是隨著時間而下降，最後呈現一穩定拉力值。但是經過處理的蜘蛛絲，在剛開始的 3.5% 應變下，初始拉力當達到一個極大值之後，隨著時間的增長，拉力雖然下降，但最後拉力並未下降至零，而是達到一穩定值，這顯示剛開始進行的拉伸，經過處理的蜘蛛絲就具有彈性力的表現。



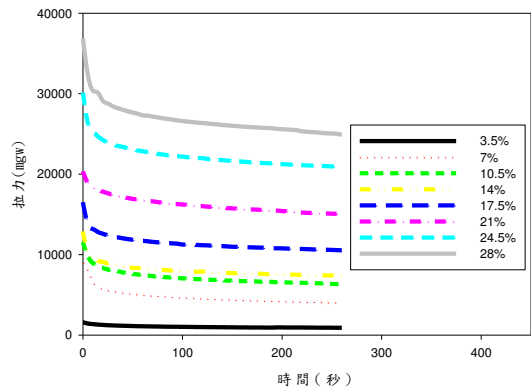
(圖 19) 加熱處理的拉力張弛



(圖 20) 乙醇處理的拉力張弛



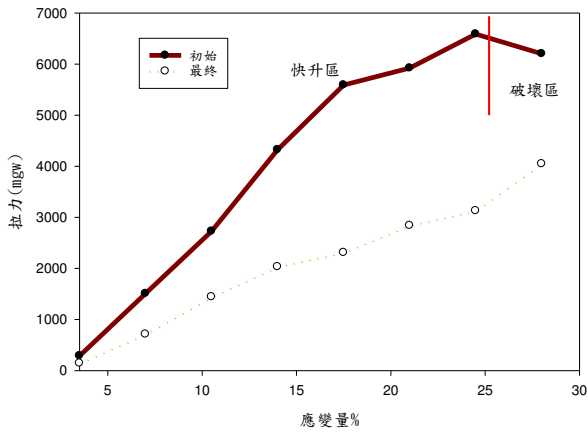
(圖 21) 丙酮處理的拉力張弛



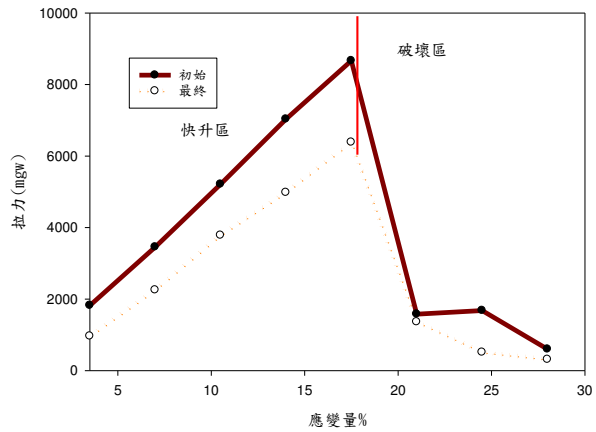
(圖 22) 檸檬酸處理的拉力張弛

(二)、破壞點

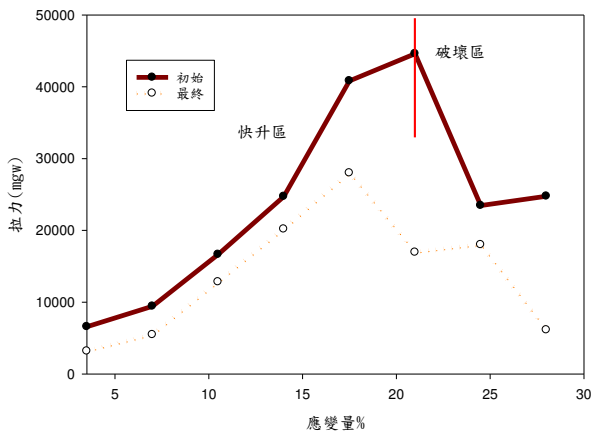
接著隨著應變的加大，它的初始拉力快速增加（圖 23~25），並沒有如原絲一樣的平緩區出現，直到蜘蛛絲開始發生破壞現象，初始拉力才開始下降，破壞的應變點隨不同處理方式而有差異。破壞點各為：熱處理(24.5%)、乙醇(17.5%)、丙酮(21%)，其中檸檬酸最特別，在測試的範圍(3.5~28%)並未有破壞點。



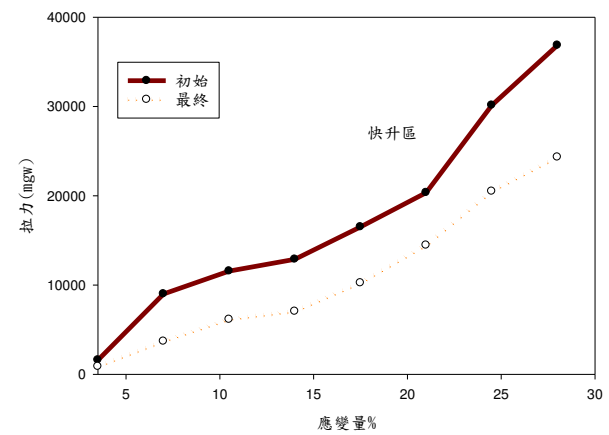
(圖 23) 加熱處理的應變與拉力



(圖 23) 乙醇處理的應變與拉力



(圖 24) 丙酮處理的應變與拉力



(圖 25) 檸檬酸處理的應變與拉力

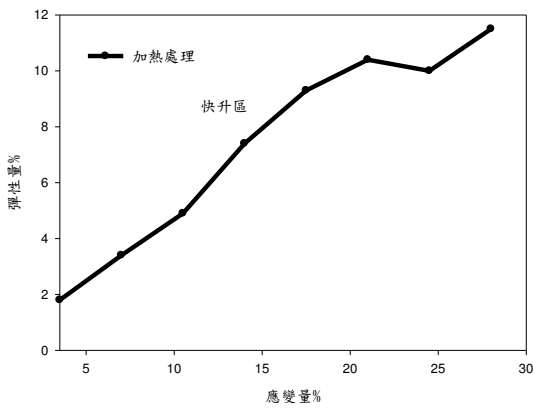
(三)、彈性量

蜘蛛絲經過拉伸之後，開始產生延展滑動，最後當滑動結束，剩下的拉力就是最終拉力，因此最終拉力是彈性能的作用。原絲在 3.5~21%應變之間的彈性量呈現一平緩的微幅上升，只有經過 21%之後才快速增加（圖 18）。

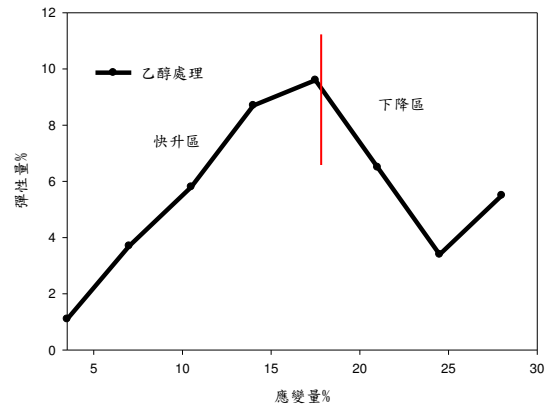
經過加熱處理的絲線，隨著應變的增加，彈性量大幅上升（圖 26）。推測經過加熱之後，排除絲線中的水份，造成內部蛋白質結構更加緊密糾纏，因此水份在蜘蛛絲的延展滑動上應當扮演重要的角色。

在乙醇及丙酮的處理下，彈性量也能隨應變大幅提升（圖 27~28），但在乙醇處理的情況下，經過 17.5%應變之後而絲線產生破壞，彈性量即大幅滑落。丙酮處理則雖然經過破壞區，但彈性量則並未下降，而是保持一平緩區。

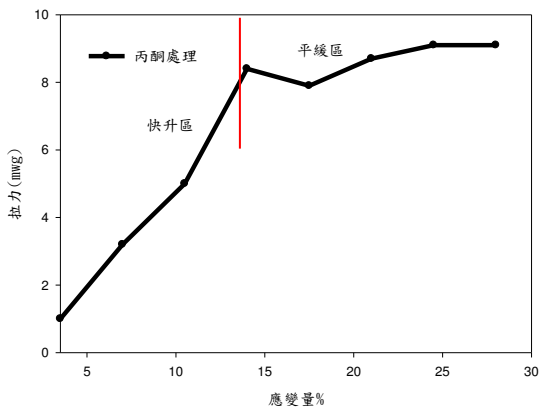
檸檬酸浸泡之後的絲線，在初始應變的時候，彈性量有一小段平緩區（圖 29），之後才開始明顯上升，直到 24.5%應變量之後才下降。



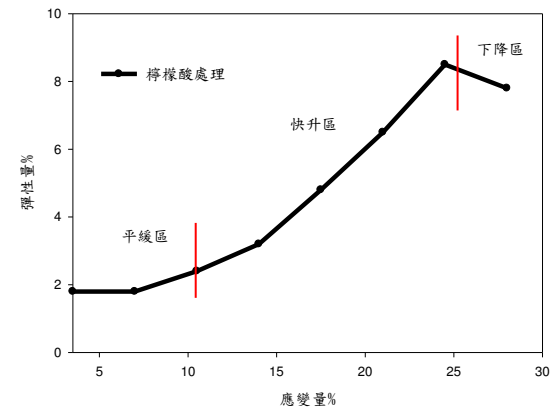
(圖 26) 加熱處理的應變與彈性量



(圖 27) 乙醇處理的應變與彈性量



(圖 28) 丙酮處理的應變與彈性量



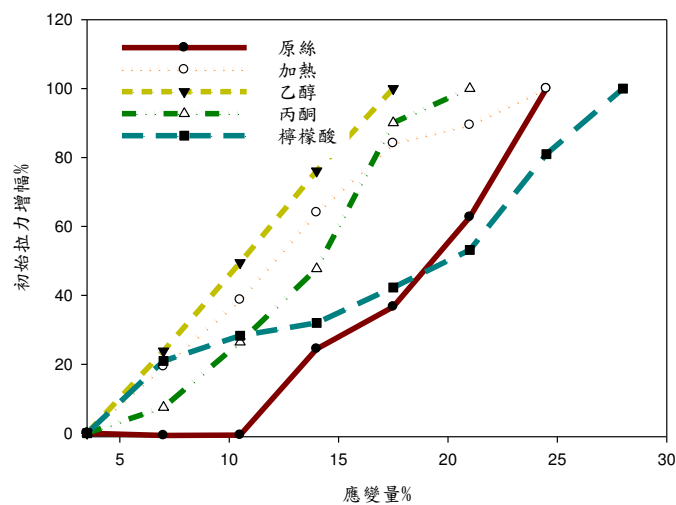
(圖 29) 檸檬酸處理的應變與彈性量

五、綜合評比

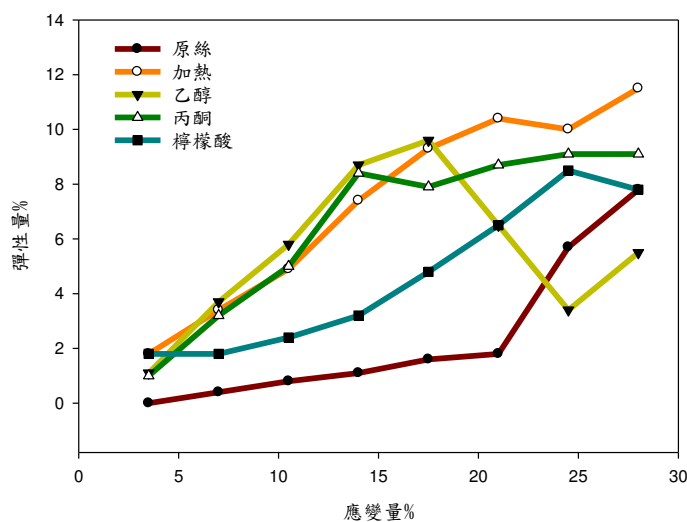
由原絲的量測結果推測蜘蛛獵取昆蟲時，大部份的作用方式是以延展性來消耗獵物體力，最後再以強大的彈性避免獵物逃走。

另外經由加熱、乙醇、丙酮及檸檬酸等處理的絲線，都會有降低延展性，增加彈性的作用，但其中乙醇及丙酮卻會使破壞區提早到達。

綜合拉力張弛測試結果，在初始拉力增幅的表現上（圖 30），以乙醇及加熱處理最優異。另外彈性量的方面（圖 31），丙酮也有優異表現，而乙醇處理雖然前段有著如同加熱與丙酮處理相似的趨勢，但是卻在 17.5% 應變後就產生破壞。檸檬酸的整體表現較為平緩，但直到測試終點卻沒有明顯破壞點。結論以 1~4 級來區分，級數越高代表表現越優異（表 1 及圖 32）。



(圖 30) 各種處理的初始拉力增幅量比較

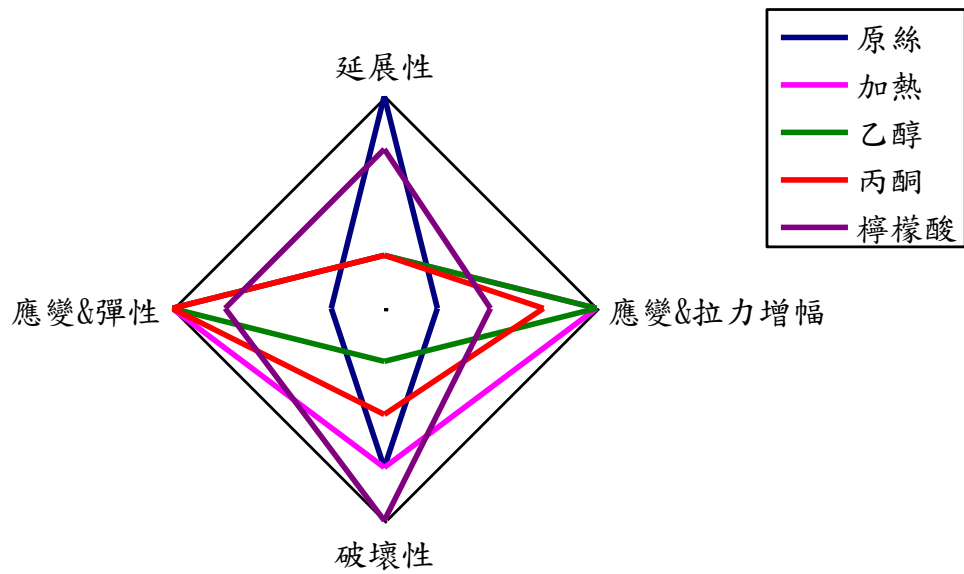


(圖 31) 各種處理的彈性量比較

(表 1) 絲線表現比較圖

	原絲	加熱	乙醇	丙酮	檸檬酸
延展性	★★★★	★	★	★	★★★★
應變&拉力增幅	★	★★★★	★★★★	★★★★	★★
破壞性	★★★★	★★★★	★	★★	★★★★
應變&彈性	★	★★★★	★★★★	★★★★	★★★★

越多★表示該項表現較佳



(圖 32) 絲線表現雷達圖

陸、結論

- 一、初始拉力是由延展力及彈性力的合力表現，但最終拉力則主要為彈性力的表現。
- 二、原始的蜘蛛絲在大部份的應變情況下，主要以延展性表現為主，但在高應變量時則突然轉變成以彈性強度為主，24.5%應變之後蜘蛛絲開始被破壞。
- 三、經過加熱、乙醇、丙酮或檸檬酸等處理之後的蜘蛛絲，在剛開始的應變就具有彈性的特徵，並在整個應變過程中，彈性特徵表現明顯，因此經過處理程序將有助於增加蜘蛛絲的彈性。
- 四、在測試的範圍(3.5~28%)內破壞點的應變量則各有差異：熱處理(24.5%)、乙醇(17.5%)、丙酮(21%)，檸檬酸沒有明顯破壞點。
- 五、蜘蛛絲不論是原絲或經過處理，它的最高彈性量約在7.5~12%範圍。
- 六、經由此蜘蛛絲改質的探討，發現不同處理方式，在延展性、應變&拉力、應變&彈性及破壞點等項目都有各自的優劣性，這些差異的平衡取捨，可以作為未來應用於不同場合下的需求參考。例如：當使用在縫合上，應當減少延展性的表現，增加彈性的特色，避免因延展而無法密合，同時也應降低破壞性，因此採用加熱處理方式可能較為適當。另外作為緩衝作用時，則前段過程需有適當的延展性，後段則需彈性明顯表現出來，此情況下檸檬酸處理可能較適當。
- 七、這些處理的絲線，也可以進行揉捻混絲，形成更多元的特性，如此可以增加蜘蛛絲未來應用的範圍及可能性。

柒、參考資料

- (1) CASE 讀報, <http://case.ntu.edu.tw/blog/?p=17524>
- (2) 維基百科, <http://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%9C%98%E8%9B%9B%E7%B5%B2>
- (3) Lucas, F. *Discovery* **25**, 20 – 26 (1964).
- (4) Vollrath, F., Madsen, B. & Shao, Z. Z. *Proceedings of the Royal Society B* **268**, 2339 – 2346 (2001).
- (5) Griffiths, J. R.; Salanitri, V. R. *Journal of Materials Science* **15**, 491 – 496 (1980).
- (6) Simmons, A. H., Michal, C. A. & Jelinski, L. W.; Michal; Jelinski (1996). "Molecular orientation and two-component nature of the crystalline fraction of spider dragline silk". *Science* **271** (5245): 84 – 87.

【評語】 030107

實驗內容充分取樣多樣性為本研究工作的強項，但局限於蜘蛛絲材料本身的限制，除了已做的延展性及彈性的研究，較難有其他方向的發揮。