

中華民國 第 50 屆中小學科學展覽會  
作品說明書

---

高中組 生物（生命科學）科

第三名

040711

蛹往直前--蛹吊能力

學校名稱：高雄市立高雄高級中學

作者：  高一 林大為  高一 吳旻軒  高一 謝承佑	指導老師：  謝佳昌
-----------------------------------------------	------------------

關鍵詞：蝶蛹、懸絲器、魔鬼氈

## 摘要

本實驗目的為探討蝴蝶蛹能以小面積牢固於葉片或枝條上的原因，從各角度觀察並提出假設，進行相關實驗，瞭解哪些原因可能造成這強大的附著力。首先，我們推測蝴蝶在幼蟲時期的足部構造可能影響成蛹後蛹的附著力，因此 1.我們先從觀察蝴蝶幼蟲尾足開始，發現不同種蝴蝶幼蟲的尾足構造不盡相同。2.在顯微鏡底下觀察蝴蝶蛹的懸絲器，了解懸絲器與絲座附著原理。更進一步瞭解蝶蛹的附著力由那些因子決定，提出各種假設，並以實驗驗證之：1.懸絲器上鉤子數對附著力影響 2.懸絲器面積對附著力影響等。最後以蛹及魔鬼氈的負重實驗驗證上述假設。發現在一定面積中，鉤子數增至某數後，負重能力並不再提升，而皆趨近於某一數值，我們將此鉤子數認定為一個面積中鉤子數的飽和點，而達飽和點鉤子數所能承受的最大重量，亦即此面積所能承受的最大重量。而我們也發現相同形狀的懸絲器中，鉤子數以及面積與附著力具有正相關。

## 壹、前言

### 一、實驗所用蝴蝶種類

我們選取四種垂蛹的蝴蝶：琉璃蛺蝶、紫蛇目蝶、枯葉蝶、黑樹蔭蝶；及帶蛹的四種蝴蝶：大鳳蝶、黑鳳蝶、大紅紋鳳蝶、琉璃帶鳳蝶。

#### (一)成蟲



(圖一) 琉璃蛺蝶



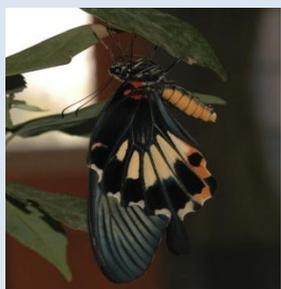
(圖二) 紫蛇目蝶



(圖三) 枯葉蝶



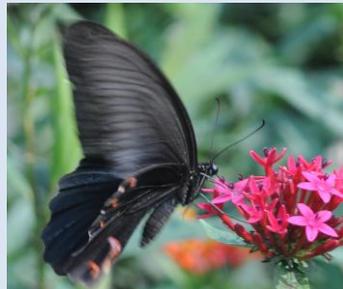
(圖四) 黑樹蔭蝶



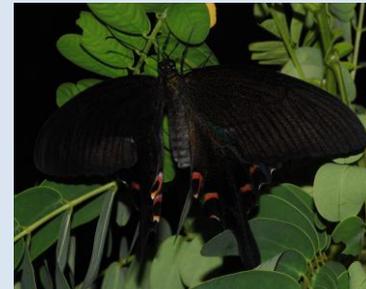
(圖五) 大鳳蝶



(圖六) 黑鳳蝶



(圖七) 大紅紋鳳蝶



(圖八) 琉璃帶鳳蝶

#### (二)幼蟲



(圖九) 琉璃蛺蝶幼蟲



(圖十) 紫蛇目蝶幼蟲



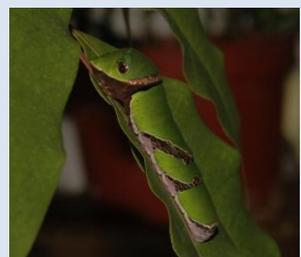
(圖十一) 枯葉蝶幼蟲



(圖十二) 黑樹蔭蝶幼蟲



(圖十三) 大鳳蝶幼蟲



(圖十四) 黑鳳蝶幼蟲

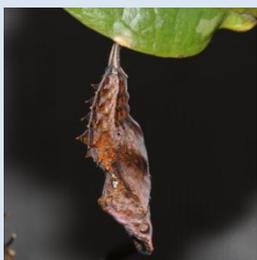


(圖十五) 大紅紋鳳蝶

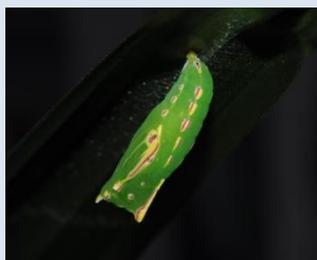


(圖十六) 琉璃帶鳳蝶幼蟲

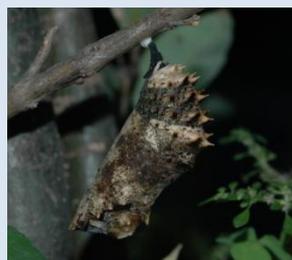
### (三) 蛹



(圖十七) 琉璃蛺蝶蛹



(圖十八) 紫蛇目蝶蛹



(圖十九) 枯葉蝶蛹



(圖二十) 黑樹蔭蝶蛹



(圖二十一) 大鳳蝶蛹



(圖二十二) 黑鳳蝶蛹



(圖二十三) 大紅紋鳳蝶蛹



(圖二十四) 琉璃帶鳳蝶蛹

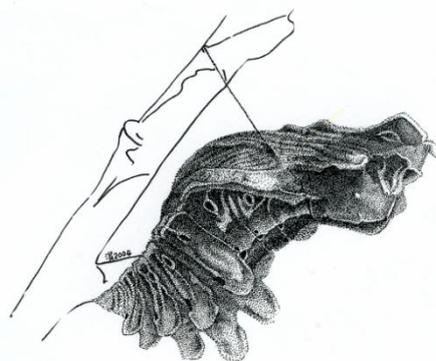
## 二、重要名詞解釋

### (一) 垂蛹、帶蛹

蝴蝶的蛹依固定方式可分成「垂蛹」與「帶蛹」。垂蛹（圖二十五）只有尾端固定在樹枝或樹葉上，頭部朝下吊掛蛹體，如琉璃蛺蝶的蛹。帶蛹（圖二十六）除了尾端固定在附著物外，身上還有一條比一般絲稍粗的線環繞支撐在背側，以腹部靠於樹枝成斜立如鳳蝶的蛹。



(圖二十五) 垂蛹



(圖二十六) 帶蛹

### (二) 懸絲器

懸絲器是幼蟲轉化為蛹時所形成的重要構造，使蛹吊掛或附著於樹枝或樹葉等物上，垂蛹懸絲器較為明顯。（圖二十七）

### (三) 絲座

也稱絲墊，是終齡蟲在成蛹前所完成的絲團。終齡蟲化蛹前尾端懸絲器靠緊絲墊以完成化蛹動作（圖二十八）、（圖二十九）。



(圖二十七) 琉璃蛺蝶懸絲器

#### (四) 幼蟲足部

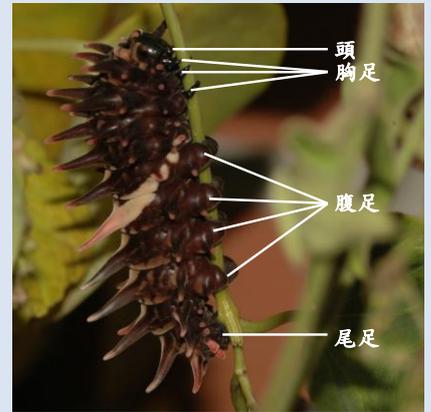
幼蟲足部可分為胸足和腹足。胸足即是往後成蟲的腳；腹足是肉質的突起且沒有分節，是暫時性的結構，成蟲階段便消失，底端有排成環列的小鉤鉤，用來抓緊物體，其中最末一對腹足又稱尾足（圖三十）。我們推測蝴蝶在幼蟲時期的足部構造可能影響成蛹後蛹的附著力，因此我們亦觀察幼蟲尾足之構造以及其附著力。



圖二十八 懸絲器及絲座



圖二十九 絲座放大圖



(圖三十) 幼蟲足部結構

#### 三、研究架構



## 貳、研究動機

高一上學期上基礎生物第二章時，了解生物多樣性的意義。除了人類外，地球還孕育了成千上百萬種的生物以及豐富的生命。節肢動物門的昆蟲綱，包含了許多生活中常見的小動物。生物老師對於蝴蝶也頗有興趣，因此於課程中介紹許多關於蝴蝶的知識，讓我們也想對蝴蝶有進一步的了解。

蝶蛹可僅以小面積的點，堅固地附著於葉子或枝條，我們感到非常好奇，並上網搜尋相關資料，查閱書籍。想了解為何蛹經過風吹雨打，還是能屹立不搖地。經過查詢，發現毛毛蟲在化蛹前，會先吐絲做好絲座，並在成蛹期間，形成懸絲器以黏附在絲座上。蛹即使掉下來，仍可用人工的方式將其重新附於原位，就像原來一樣堅固。我們想觀察懸絲器的構造，並了解其與絲座的關係。再深入研究不同種蝴蝶，其懸絲器有什麼差異，附著力有什麼差別。我們相繼找了一些國內外的網站，也實際觀察顯微鏡下的蛹，發現蛹的懸絲器與絲座間的微妙關係—就像魔鬼氈的鉤子端和毛線端，這更讓我們針對此一主題進行深入的研究。

## 參、研究目的

- 一、探討蝴蝶蛹可以牢固在附著物上原因
- 二、觀察蝴蝶蛹懸絲器型態構造
- 三、探討懸絲器構造是否影響蛹的附著力
- 四、探討絲座是否影響蛹的附著力
- 五、探討足部構造對足部附著力影響
- 六、探討幼蟲足部附著力與成蛹後，蛹之型態之間關係

## 肆、實驗方法及步驟

- 一、實驗器材
  - (一)壓克力板：測量足部附著力實驗中幼蟲所抓附的平面
  - (二)量角器
  - (三)棉線：實驗中用以綑綁蛹與懸掛砝碼
  - (四)鑷子：抓緊蛹尾端的絲座以進行負重實驗
  - (五)砝碼：10g 十個、20g 十個、50g 二十個
  - (六)魔鬼氈
  - (七)老虎鉗
  - (六)培養皿
  - (七)解剖顯微鏡：型號 Leica Zoom 2000，最高倍率 X45；最低 X10.5
  - (八)酒精、丙酮
  - (九)蝴蝶幼蟲：
    - 1.琉璃蛺蝶幼蟲
    - 2.枯葉蝶幼蟲
    - 3.紫蛇目蝶幼蟲
    - 4.黑樹蔭蝶幼蟲
    - 5.大紅紋鳳蝶幼蟲
    - 6.大鳳蝶幼蟲
    - 7.黑鳳蝶幼蟲
    - 8.琉璃帶鳳蝶幼蟲

(十)蝶蛹：

- |             |              |             |
|-------------|--------------|-------------|
| 1.琉璃蛺蝶蛹 5 個 | 2.枯葉蝶蛹 5 個   | 3.紫蛇目蝶蛹 5 個 |
| 4.黑樹蔭蝶蛹 5 個 | 5.大紅紋鳳蝶蛹 5 個 | 6.大鳳蝶蛹 5 個  |
| 7.黑鳳蝶蛹 5 個  | 8.琉璃帶鳳蝶蛹 5 個 | 9.各蝶種空蛹殼    |

(十一)飼養盒 (10.5x4.5x18.5)：飼養幼蟲所需透明空盒(以利觀察幼蟲足部附著情形)



(圖三十一) 飼養盒



(圖三十二) 幼蟲飼養情形

(十二) 食草：契拔葉、觀音棕竹、金桔草、馬兜鈴、魚木葉、易生木

## 二、實驗方法與步驟

### (一) 觀察幼蟲

清理過程中，盒子倒向放置時，發現琉璃蛺蝶和枯葉蝶幼蟲可緊附於盒子表面；反之，另外六種幼蟲較無法附著於盒子上而滑落。因此探討幼蟲具有不同附著力的原因，同時瞭解幼蟲的尾足附著力，是否與蛹的附著力相關。

### (二) 觀察絲座

絲座為懸絲器及固定物的媒介，它必須有能力讓懸絲器的鉤子穩固的懸掛。而每個絲座的環繞、排列方式大致相同，因此對於各物種應具有相同的功能。

### (三) 蛹及懸絲器的觀察

#### 1. 利用解剖顯微鏡進行觀察

初步階段我們利用解剖顯微鏡進行觀察，並且攝影。解剖顯微鏡放大倍率為 45 倍，利用攝影後的照片計算懸絲器的鉤子數、鉤子密度以及懸絲器面積。

懸絲器為蝶蛹的一構造，此構造由數個鉤毛密集排列而成，每個鉤毛終端強烈彎曲。絲座上一條條的絲纏繞住這些鉤子，如同日常生活中我們常使用的魔鬼氈。(圖三十三、三十四)。



(圖三十三) 懸絲器與絲座附著圖



(圖三十四) 魔鬼氈

## 2.利用電子顯微鏡進行觀察

### (1)前置作業

#### a. 蝶種選取

選取垂蛹及帶蛹中具有最強與最差負重能力的四種蝶蛹的蛹殼，分別為琉璃蛺蝶、黑樹蔭蝶、大鳳蝶、琉璃帶鳳蝶。

b. 依序置於 70% 及 100% 酒精中，各放置一晚。

c. 最後置於丙酮放置一晚。

d. 臨界點乾燥

e. 鍍金

### (2)拍攝照片

拍攝的目的為了瞭解懸絲器與絲座的附著狀態，利用電子顯微鏡可呈現高景深的效果，觀察懸絲器顯微構造。拍攝的倍率為 90x、200x、400x 及 1000x。

### (三)實驗假設

由於蛹的懸絲器面積、形狀，鉤子的數量和方向性在不同物種間有很大的差異，實驗中選取帶蛹和垂蛹各四種蝶種進行實驗。因此我們提出以下幾點假設，並進行實驗驗證。

表一 實驗中的蝶蛹類型

蛹的形式	帶蛹	垂蛹
蝶種	大紅紋鳳蝶	琉璃蛺蝶
	大鳳蝶	枯葉蝶
	黑鳳蝶	黑樹蔭蝶
	琉璃帶鳳蝶	紫蛇目蝶

#### 1.假設垂蛹附著力與帶蛹附著力相同

由兩型態蛹的特徵可發現垂蛹只以懸絲器部分黏著絲座以維持蛹體的懸掛，而帶蛹則有額外粗絲環繞於背側以利蛹體的斜立。我們假設垂蛹附著力與帶蛹相同。

#### 2.假設幼蟲足部抓地力與蛹的附著力無關

成蛹的附著力大小，是否是從幼蟲時期就已決定？我們假設幼蟲足部抓地力與蛹的附著力無關。

#### 3.假設懸絲器上附生的鉤子數與蛹的附著力無關

不同種蝴蝶蛹的懸絲器有著不同的鉤子數，我們希望探討它與附著力的關係。假設鉤子數與附著力無關。

#### 4.假設懸絲器面積與蛹的附著力無關

各種蝴蝶蛹所具的懸絲器面積大小不同，是否影響蛹的附著？假設面積與懸絲器和絲座間的支持度無關。

#### 5.假設懸絲器密度與蛹的附著力無關

密度即懸絲器鉤子數與面積的比值，我們假設懸絲器密度與蛹的附著力無關。

#### 6.假設懸絲器形狀與蛹的附著力無關

各種蝶蛹懸絲器形狀不相同，大略分為下列幾種，假設懸絲器形狀與蛹的附著力無關。

註：實驗假設部分，採用統計學中的虛無假設，而統計檢定的結果只有「拒絕」虛無假設以及「不拒絕」虛無假設，此法可排除抽樣誤差的可能性，更能確立研究的結果。

表二 懸絲器形狀

8 字形	圓形	彎月形
		
紫蛇目蝶	琉璃蛺蝶、樹蔭蝶、枯葉蝶	大鳳蝶、黑鳳蝶、大紅紋鳳蝶、琉璃帶鳳蝶

(四)懸絲器面積求法

我們欲求的懸絲器面積極小，不可能以刻度尺測量，而用像素單位來作計算，如後所述。觀察時以相同高度相同倍率(放大 45 倍)為原則，我們將觀察物以鑷子和培養皿來固定(圖三十五)。



(圖三十五) 以鑷子和培養皿固定蛹

觀察物固定後，透過目鏡以數位相機拍攝(必須在相同相機、相同焦距、同邊目鏡的前提下執行)，所得相片物體大小多少會有誤差，但若小心操作就能使誤差值降到最低。再以軟體裁剪圖片，所需的裁剪範圍以懸絲器輪廓為準，若為不規則形則分區塊裁剪，再將總面積加總；以像素的數量表示影像尺寸單位(像素尺寸=影像寬的像素數量 x 影像長的像素數量)。

Ex：一張 6x8 吋的照片以 500dpi 解析度掃描進來時所佔的 Pixel 數為何？

(DPI，所指的是 dot per inch，每一英寸幾個點)

Ans:(6x500)x(8x500)=12000000 (pixel 數)

(五)懸絲器上鉤子數求法 – 直接計數法

將在傳至電腦的照片，配合小畫家，用點的方式，將算過的鉤子點上紅點以避免重(圖三十六)。



(圖三十六)計算完鉤子數的懸絲器

## (六)幼蟲足部附著力實驗

### 1.實驗概述

為計算各蝶種幼蟲足部抓地力的大小，我們將幼蟲放在同一材質(壓克力)平面上，慢慢將此平面推向傾斜，以幼蟲滑落瞬間壓克力板與水平面所夾的角做為我們的數據。

### 2.蝶種的選取

實驗所選用幼蟲為琉璃蛺蝶、枯葉蝶、紫蛇目蝶、樹蔭蝶以及大紅紋鳳蝶、大鳳蝶、黑鳳蝶、琉璃帶鳳蝶。

### 3.實驗器材的搭置

壓克力板一端黏上長方形厚紙板，另一端設障礙物以避免壓克力板滑動影響實驗結果，如(圖三十七)所示。

### 4.實驗中面臨的問題

平面材質的選擇是首要解決的問題，太粗糙的表面將導致幼蟲難以滑落，我們希望得到的數值是  $90^\circ$  以內的角度，壓克力板即是很好的選擇。而在將幼蟲放置在壓克力板上之後，部分幼蟲會開始吐絲，以幫助自身固定，然而這也將會影響實驗結果，因此我們必須確定幼蟲完全沒有進行吐絲的動作後，再進行測量。



(圖三十七) 幼蟲足部附著力測量方法

## (七)懸絲器負重實驗

### 1.實驗概述

為了解懸絲器在絲座上所能負載之最大重量，首先，剪一段適當長的棉線，將一端於懸絲器下緣處打平結兩次，並在棉線下方掛上有鉤砝碼，逐一加重，直到蛹體自絲座上脫離掉落，此即是該蛹所能承受最大重量。

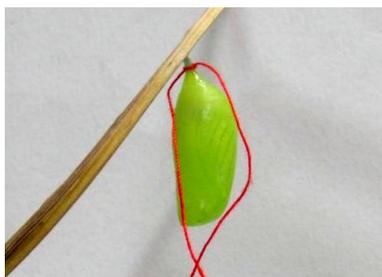
### 2.蝶種的選取

實驗所選用幼蟲為琉璃蛺蝶、枯葉蝶、紫蛇目蝶、樹蔭蝶以及大紅紋鳳蝶、大鳳蝶、黑鳳蝶、琉璃帶鳳蝶。

### 3.實驗器材的搭置

#### (1)蛹的固定

將棉線綁於蛹最堅固的位置—懸絲器尾端(圖三十九)。另外，由於帶蛹懸絲器並不如垂蛹明顯，因此在綁帶蛹時較垂蛹為困難，且在實驗前，須將帶蛹的輔助粗絲先行減斷，使其變為類似垂蛹的形式。



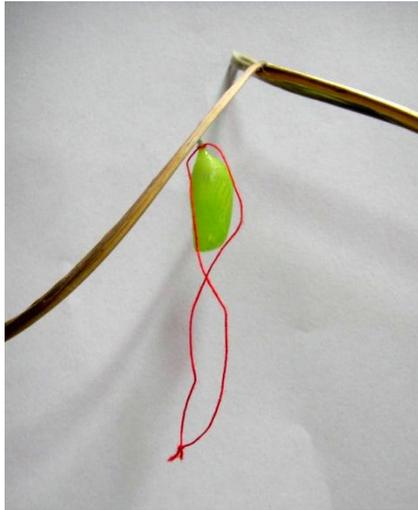
(圖三十八) 棉線綁住蝶蛹



(圖三十九) 棉線綑綁懸絲器

## (2)懸掛砝碼

綁在懸絲器上的棉線下端為環狀，以供懸掛砝碼。



(圖四十) 棉線呈環狀



(圖四十一) 掉落的蛹與砝碼



(圖四十二) 下端懸掛砝碼

## 4.實驗中面臨的問題

### (1)蝴蝶蛹

活蛹在實驗過程中，因受到刺激而常劇烈運動，此會造成實驗上的困難，所以我們必須先將其放入冰箱中一會，待其暫時昏迷後再繼續我們的實驗。

### (2)絲座未完全脫離

在一開始的重量實驗中，實驗所掉落的蛹之懸絲器上還殘留著部分絲座，這代表懸絲器並非真正離開絲座，而是絲座本身斷裂而掉落，所以測出的數值，並非懸絲器真正所能承受的最大重量，而這將會在比對之下出現不準確的結果。而此後，我們發現直接用鑷子捏取絲座進行實驗，懸絲器才會真正離開絲座而掉落，而此測出來的數據才是正確無誤的。



(圖四十三) 即將分離的絲座 (圖四十四) 以鑷子捏住絲座

## (八)魔鬼氈負重實驗

### 1.實驗概述

仿蝶蛹懸絲器，加入我們所要探討的各種變因，以真實魔鬼氈進行實驗。

### 2.設計魔鬼氈

#### (1)鉤子數

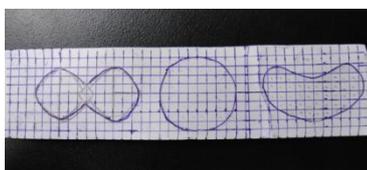
為與蝴蝶蛹懸絲器做比較，我們將同面積的魔鬼氈鉤子數分成 200、140、80 三種。

#### (2)形狀

我們將不同形狀的魔鬼氈控制在同一面積大小。製做的方法是將魔鬼氈背後分為許多小格，以同樣格數組成不同形狀（圖四十五），再將其剪下（圖四十六）。

### 3.實驗器材的搭置

首先將我們所要測試的不同形狀、鉤子數的魔鬼氈（具鉤子部分）剪下，並以針線穿過其中央。剪一段適當長的魔鬼氈（具線團部分），用棉線繞過，其下方環狀即可懸掛砝碼。實驗時，將兩部分黏在一起，上方用老虎鉗夾住魔鬼氈鉤子部分的棉線，慢慢增加砝碼數量（圖五十），待鉤子部分與毛線部分脫離時，即測得其最大負重。



(圖四十五) 分格畫圖



(圖四十六) 剪下不同形狀魔鬼氈



(圖四十七) 針線穿過魔鬼氈

### 4.魔鬼氈鉤子數的飽和點

取面積分別為  $2 \times 2$ 、 $2 \times 3$ 、 $2 \times 4$ 、 $2 \times 5$  ( $\text{cm}^2$ ) 每行 15 根鉤子的魔鬼氈，四種面積皆再分別取 150、180、210、240 個鉤子數作負重實驗，找出可能的飽合點範圍再加以細分，例如：180 根鉤子的負重結果與 240 根鉤子的結果相近，則飽和點可能在此範圍內，再加以細分為 195、210、225 根鉤子進行負重實驗，最後將結果化為折線圖找出飽和點。

### 5.實驗面臨的問題

以方型的魔鬼氈來說，若施力於中心點，將使中間的鉤子與絲團分開，此時，魔鬼氈將彎曲成拱形，使兩旁的鉤子因重力影響更緊黏於絲團部分，而得到的負重結果將不同於實。為改善此問題，我們將魔鬼氈黏於厚紙板上，在整個實驗過程中，將不會彎曲變形產生不準確的結果。



(圖四十八)  
魔鬼氈彎曲成拱形



(圖四十九)  
魔鬼氈黏於厚紙板



(圖五十) 魔鬼氈負重實驗

## 伍、實驗結果

### 一、觀察幼蟲足部



(圖五十一) 琉璃蛺蝶



(圖五十二) 枯葉蝶



(圖五十三) 紫蛇目蝶



(圖五十四) 黑樹蔭蝶



(圖五十五) 大紅紋鳳蝶



(圖五十六) 黑鳳蝶



(圖五十七) 大鳳蝶

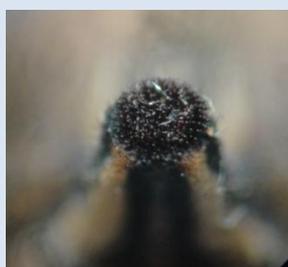


(圖五十八) 琉璃帶鳳蝶

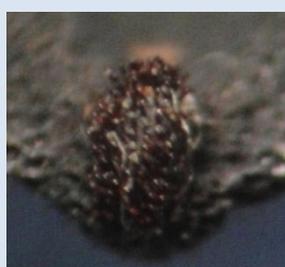
在顯微鏡下觀察，發現琉璃蛺蝶、枯葉蝶幼蟲的足部有明顯鉤狀構造輔助抓緊物體，而另外六種幼蟲的足部雖有小鉤子，但不明顯，幼蟲較常藉吐絲來協助固定身體。

### 二、觀察懸絲器

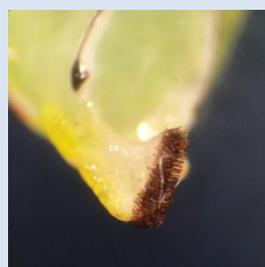
#### 1. 解剖顯微鏡下的懸絲器



(圖五十九) 琉璃蛺蝶



(圖六十) 枯葉蝶



(圖六十一) 紫蛇目蝶



(圖六十二) 黑樹蔭蝶



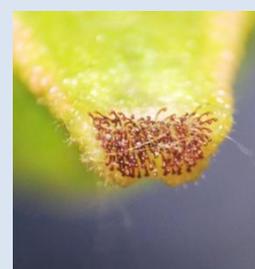
(圖六十三) 大紅紋鳳蝶



(圖六十四) 大鳳蝶



(圖六十五) 黑鳳蝶

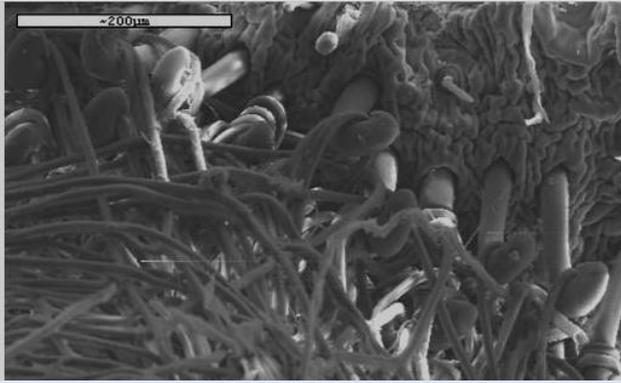


(圖六十六) 琉璃帶鳳蝶

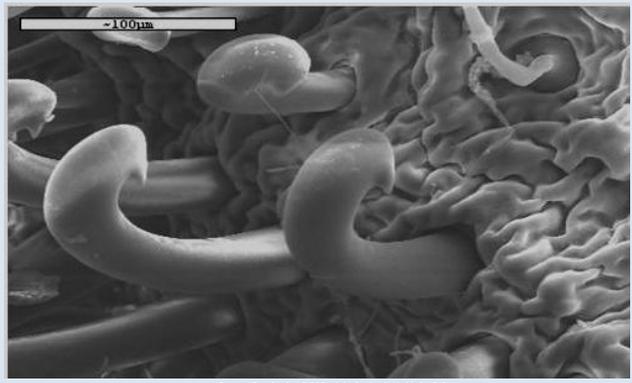
在解剖顯微鏡下，利用 45x 的倍率觀察，並且攝影後，計算每一種蝶蛹的懸絲器鉤子數、鉤子密度，以及懸絲器的面積。

解剖顯微鏡下雖能看出鉤子狀的鉤毛，但論其確切形狀或方向性則無從得知。所以在電子顯微鏡中觀察其形狀以及排列的方向性。

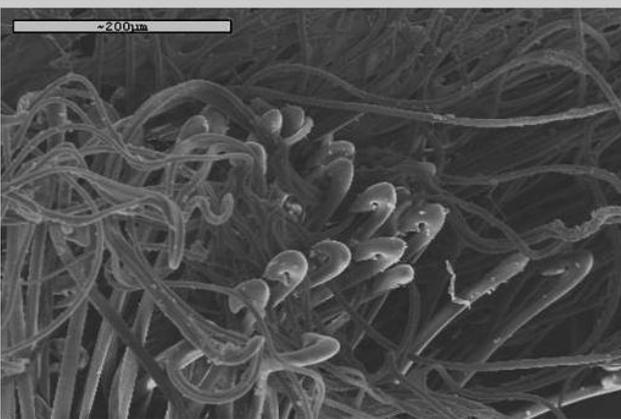
## 2. 電子顯微鏡下觀察懸絲器



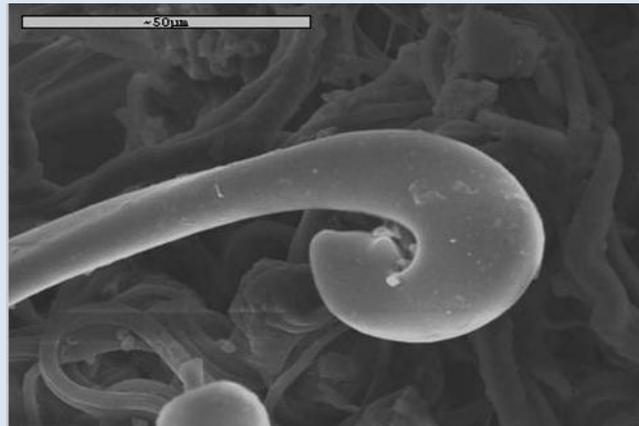
(圖六十七)琉璃蛺蝶懸絲器與絲座(200x)



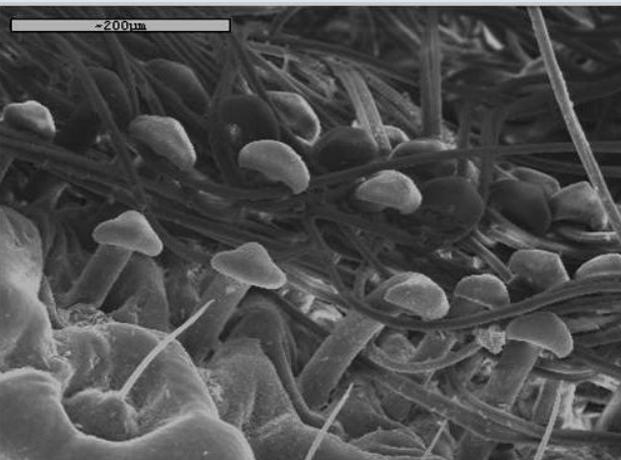
(圖六十八)琉璃蛺蝶懸絲器鉤子(400x)



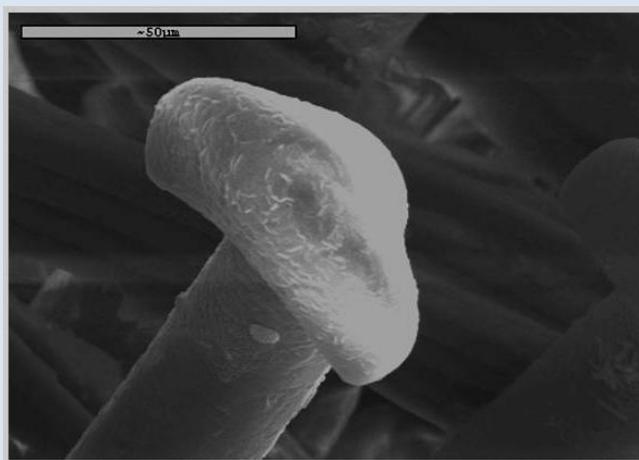
(圖六十九)黑樹蔭蝶懸絲器與絲座(200x)



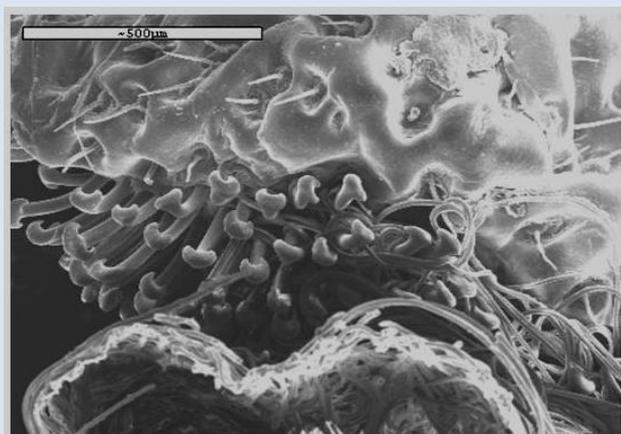
(圖七十)黑樹蔭蝶懸絲器鉤子(1000x)



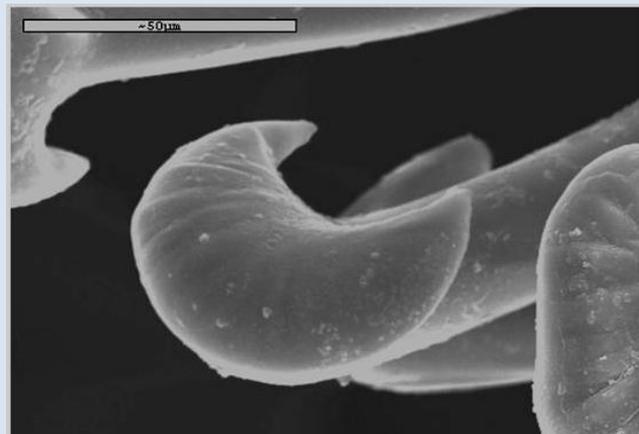
(圖七十一)大鳳蝶懸絲器與絲座(200x)



(圖七十二)大鳳蝶懸絲器鉤子(1000x)



(圖七十三)琉璃帶鳳蝶懸絲器與絲座(90x)



(圖七十四)琉璃帶鳳蝶懸絲器鉤子(1000x)

在我們未用電子顯微鏡觀察懸絲器之前，以為鉤毛形狀應與魔鬼氈無異。事實上，鉤毛除了我們一般所知的鉤子狀外，前端更較魔鬼氈鉤子彎曲（圖五十四），部分蝶種的鉤毛甚至呈現牛角般的形狀（圖五十八）。

黑樹蔭蝶鉤毛較長且生長方向較凌亂（圖五十三），其中更有數個鉤毛斷裂，在之後負重實驗中發現其負重最小。鳳蝶科之鉤毛前端分叉並倒鉤，即上述牛角狀。但發現帶蛹的大鳳蝶和琉璃帶鳳蝶鉤毛形狀差異不大，與絲座附著情形亦相似，對負重能力的影響差異應不明顯。

### 三、幼蟲及蝶蛹實驗數據

#### （一）幼蟲足部附著力實驗

表三 幼蟲附著力結果

蝶種	編號	1	2	3	4	5	平均
琉璃蛺蝶		35°	38°	46°	32°	36°	37.4°
枯葉蝶		32°	35°	45°	58*°	37°	37.75°
紫蛇目蝶		30°	32°	33°	26°	28°	29.8°
黑樹蔭蝶		74*°	38°	37°	26°	30°	32.75°
大紅紋鳳蝶		39°	36°	35°	34°	38°	36.4°
大鳳蝶		38°	29°	28°	25°	35°	31°
黑鳳蝶		39°	36°	35°	42°	30°	36.4°
琉璃帶蝶		38°	23°	22°	32°	36°	30.2°

表格中前四者為垂蛹，後四者為帶蛹。從平均比較後可發現，附著力最大者和最小者角度相差約十度。並將上列數值大小排序得（數據一）。另外，表格中註釋“\*”字號者，由於數值與其他相差過大，將不予列入平均，以免影響結果。

#### （二）蝶蛹的負重實驗

以下為重量實驗所得數據整理後的表格，我們也用電子秤量出各個蝶蛹的淨重，並算出負重和蛹重的比值，比值越大表示能承受比自身重更多倍的重量。

表四 琉璃蛺蝶蛹負重結果

	本身重量	負重	比值(負重/蛹重)
琉璃蛺蝶 1	0.569g	250g	439.367
琉璃蛺蝶 2	0.675g	240g	355.556
琉璃蛺蝶 3	0.608g	220g	361.842
琉璃蛺蝶 4	0.451g	290g	643.016
琉璃蛺蝶 5	0.787g	240g	304.956
	平均重量：0.604g	整體負重：248g	

結果：五隻琉璃蛺蝶蛹的重量差異不大，負重結果亦接近。

表五 枯葉蝶蛹負重結果

	本身重量	負重	比值
枯葉蝶 1	1.395g	230g	164.875
枯葉蝶 2	1.240g	190g	153.226
枯葉蝶 3	1.253g	220g	175.579
枯葉蝶 4	1.385g	150g	108.303
枯葉蝶 5	1.554g	250g	160.875
	平均重量：1.318	整體負重：208g	

結果：五隻枯葉蝶蛹的量差異不大，負重結果亦接近。

表六 紫蛇目蝶蛹負重結果

	本身重量	負重	比值
紫蛇目蝶 1	0.306g	150g	490.196
紫蛇目蝶 2	0.389g	180g	462.725
紫蛇目蝶 3	0.298g	150g	503.356
紫蛇目蝶 4	0.326g	140g	429.448
紫蛇目蝶 5	0.328g	140g	426.830
	平均重量：0.329	整體負重：152g	

結果：五隻紫蛇目蝶蛹的差異不大，負重結果亦接近。

表七 黑樹蔭蝶蛹負重結果

	本身重量	負重	比值
黑樹蔭蝶 1	0.492g	70g	163.170
黑樹蔭蝶 2	0.582g	90g	154.639
黑樹蔭蝶 3	0.518g	150g	289.575
黑樹蔭蝶 4	0.418g	70g	167.464
黑樹蔭蝶 5	0.423g	50g	118.203
	平均重量：0.487	整體負重：86g	

結果：黑樹蔭蝶蛹為本次實驗中負重能力最小，雖蛹重量差異不大，負重結果卻有明顯差異。

表八 大紅紋鳳蝶蛹負重結果

	本身重量	負重	比值
大紅紋鳳蝶 1	1.515g	190g	125.412
大紅紋鳳蝶 2	2.086g	170g	81.496
大紅紋鳳蝶 3	2.058g	350g	170.068
大紅紋鳳蝶 4	1.118g	220g	196.780
大紅紋鳳蝶 5	1.448g	160g	110.497
	平均重量：1.645	整體負重：218g	

結果：五隻大紅紋鳳蝶蛹的重量差異較其他種蛹大，負重結果也有較明顯的差異。

表九 大鳳蝶蛹負重結果

	本身重量	負重	比值
大鳳蝶 1	1.988g	330g	165.996
大鳳蝶 2	1.954g	350g	179.120
大鳳蝶 3	2.087g	350g	167.705
大鳳蝶 4	1.808g	370g	204.646
大鳳蝶 5	2.018g	390g	193.261
	平均重量：1.971g	整體負重：358g	

結果：大鳳蝶為此次實驗中負重能力最大，五隻大鳳蝶蛹的重量差異不大，負重結果亦接近。

表十 黑鳳蝶蛹負重結果

	本身重量	負重	比值
黑鳳蝶 1	1.528g	320g	209.424
黑鳳蝶 2	0.985g	150g	152.284
黑鳳蝶 3	1.189g	170g	142.977
黑鳳蝶 4	1.168g	270g	231.164
黑鳳蝶 5	0.787g	170g	216.010
	平均重量：1.131g	整體負重：216g	

結果：黑鳳蝶 1 重量較其他四者大，負重結果亦較大。

表十一 琉璃帶鳳蝶蛹負重結果

	本身重量	負重	比值
琉璃帶鳳蝶 1	1.704g	100	58.685
琉璃帶鳳蝶 2	1.404g	170	121.083
琉璃帶鳳蝶 3	1.255g	120	95.618
琉璃帶鳳蝶 4	1.167g	240	205.666
琉璃帶鳳蝶 5	1.160g	150	129.310
	平均重量：1.338g	整體負重：156g	

結果：琉璃帶鳳蝶 4 的重量並不大，負重結果卻是最大的。

表十二 負重實驗數據總整表

	平均蛹重量	平均負重	比值
琉璃蛺蝶	0.604g	248g	410.596
枯葉蝶	1.318g	208g	157.814
紫蛇目蝶	0.329g	152g	462.006
黑樹蔭蝶	0.487g	86g	176.591
大紅紋鳳蝶	1.645g	218g	132.552
大鳳蝶	1.971g	358g	181.633
黑鳳蝶	1.131g	216g	190.981
琉璃帶鳳蝶	1.338g	156g	113.043

結果：所有數據整理後可清楚看出他們之間的大小關係，並將此大小順序列為數據(二)。

(三) 懸絲器鉤子數

表十三 懸絲器鉤子數

蝶種 \ 編號	1	2	3	4	5	平均
琉璃蛺蝶	157	167	160	157	222*	172.6
黑樹蔭蝶	105	78	64	73	82	80.4
紫蛇目蝶	209	174	216	175	181	191
枯葉蝶	87	109	82	99	110	97.4
琉璃帶鳳蝶	90	110	107	86	121	102.8
大鳳蝶	212	183	175	197	178	189
大紅紋鳳蝶	182	178	170	136	139	161
黑鳳蝶	123	85	152*	105	131	159.2

單位：個

結果：紫蛇目蝶和黑樹蔭蝶分別為鉤子數最多和最少的蝶種，數量相差約兩倍多。\*為同一蝶種中與其他個體相差較大者。

(四) 懸絲器面積

表十四 懸絲器面積

蝶種 \ 編號	1	2	3	4	5	平均
琉璃蛺蝶	291290	236408	166188	309339	284228	257490.6
黑樹蔭蝶	125798	130088	149364	103241	161968	134091.8
紫蛇目蝶	239643	208765	284865	221418	251388	241215.8
枯葉蝶	213288	230175	167936	208278	226112	209157.8
琉璃帶鳳蝶	333900	372546	292061	250741	374888	324827.2
大鳳蝶	718953	841029	837202	679064	609926	737234.8
大紅紋鳳蝶	520304	386056	609195	634664	564134	542870.6
黑鳳蝶	376940	314814	469859	315868	273346	350165.4

單位：像素

結果：大鳳蝶和黑樹蔭蝶分別為面積最大和最小的蝶種，相差逾六倍之多，且帶蛹懸絲器面積皆比垂蛹來的大。

(五) 懸絲器密度

表十五 懸絲器密度

蝶種 \ 編號	1	2	3	4	5	平均
琉璃蛺蝶	0.00053	0.00071	0.00096	0.00051	0.00078	0.000698
黑樹蔭蝶	0.00083	0.0006	0.00043	0.0007	0.0005	0.000612
紫蛇目蝶	0.00087	0.00083	0.00076	0.00079	0.00072	0.000794
枯葉蝶	0.00041	0.00047	0.00049	0.00048	0.00049	0.000468
大紅紋鳳蝶	0.00027	0.0003	0.00037	0.00034	0.00032	0.00032
大鳳蝶	0.00029	0.00022	0.00021	0.00029	0.00029	0.00026
黑鳳蝶	0.00035	0.00046	0.00028	0.00021	0.00025	0.0003
琉璃帶蝶	0.00033	0.00027	0.00032	0.00033	0.00048	0.000346

單位：個／像素

結果：紫蛇目蝶與大鳳蝶分別為密度最高與最低者，垂蛹的密度結果均比帶蛹大。

#### (六) 總結

1.以幼蟲足部附著力大小排列可得(數據一):

枯葉蝶>琉璃蛺蝶>大紅紋鳳蝶>黑鳳蝶>黑樹蔭蝶>大鳳蝶>琉璃帶鳳蝶>紫蛇目蝶

2.以蝶蛹負重大小排列可得(數據二)

大鳳蝶>琉璃蛺蝶>大紅紋鳳蝶>黑鳳蝶>枯葉蝶>琉璃帶鳳蝶>紫蛇目蝶>黑樹蔭蝶

3.以鉤子數平均多寡來排序可得(數據三)

紫蛇目蝶>大鳳蝶>琉璃蛺蝶>大紅紋鳳蝶>黑鳳蝶>琉璃帶鳳蝶>枯葉蝶>黑樹蔭蝶

4.以面積平均大小排列可得(數據四)

大鳳蝶>大紅紋鳳蝶>黑鳳蝶>琉璃帶鳳蝶>琉璃蛺蝶>紫蛇目蝶>枯葉蝶>黑樹蔭蝶

5.以密度平均大小排列可得(數據五)

紫蛇目蝶>琉璃蛺蝶>黑樹蔭蝶>枯葉蝶>琉璃帶鳳蝶>大紅紋鳳蝶>黑鳳蝶>大鳳蝶

#### 四、魔鬼氈的負重實驗

(一) 測試不同形狀魔鬼氈的負重能力

表十六 魔鬼氈形狀

形狀 \ 編號	1	2	3
圓形	1050g	1050g	1000g
彎月形	800g	700g	800g
八字形	1200g	1050g	1200g

由左表得不同形狀魔鬼氈負重大小順序為八字形>圓形>彎月型。因三者面積及鉤子數皆相等，所以可推得形狀會影響魔鬼氈的負重能力，此與蝶蛹所得結果相同。

(二) 測試不同鉤子數魔鬼氈的負重能力

表十七 魔鬼氈鉤子數

鉤子數 \ 編號	1	2	3
200	1050g	750g	1000g
140	700g	700g	750g
80	450g	400g	500g

由上表發現，鉤子數與負重成正比，此與懸絲器鉤子數對附著力的關係相同。有了這樣結論後，我們進一步做以下討論，以求飽和點的存在與否。

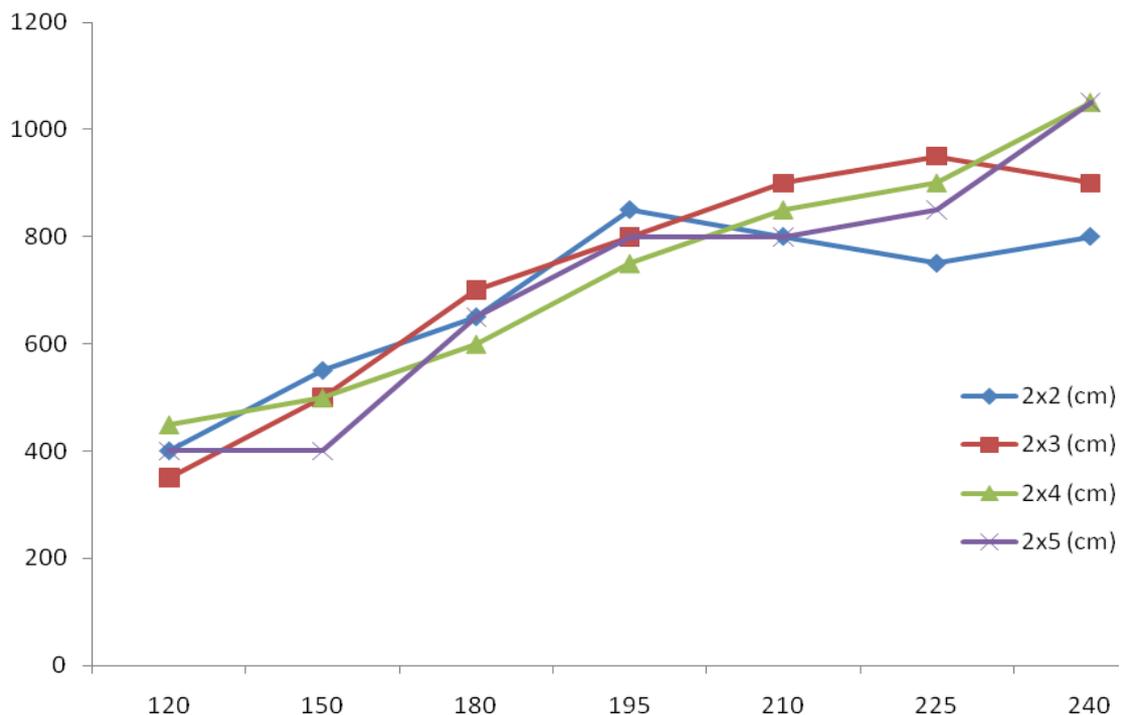
(三) 測試魔鬼氈負重能力的飽和點

表十八 魔鬼氈飽和點

面積 鉤子數	2x2 (cm <sup>2</sup> )	2x3 (cm <sup>2</sup> )	2x4 (cm <sup>2</sup> )	2x5 (cm <sup>2</sup> )
240	800g	900g	1050g	1050g
225*	750g	950g	900g	850g
210	800g	900g	850g	800g
195*	850g	800g	750g	800g
180	650g	700g	600g	650g
150	550g	500g	500g	400g
120	400g	350g	450g	400g

表格中未註釋 \* 者為實驗最初所取的鉤子數，而因發現 210 根鉤子與 240 根鉤子的實驗結果數值相近，推測飽和點可能在此範圍內，所以再細分出註釋 \* 者進行實驗以求得較精確的飽和點，而由已達飽和點的負重重量算出不同面積的最大平均負重。

由（表十八）數據推論 2x2 (cm<sup>2</sup>)的飽和點為 195 根鉤子，而最大平均負重為 800g；2x3 的飽和點為 225 根鉤子而最大負重平均為 925g；2x4 的飽和點大於或等於 240 根鉤子；2x5 的飽和點大於 240 鉤子，但因無法求得 2x4 及 2x5 的確切飽和點，所以無法求出最大平均負重。



(圖七十六) 魔鬼氈負重能力

依照各面積魔鬼氈負重能力所繪成的折線圖。面積 2x2 cm<sup>2</sup> 的曲線在鉤子數達 195 根後負重重量保持在 800g 附近；面積 2x3 cm<sup>2</sup> 的曲線在鉤子數達 225 根後負重重量保持在 925g 附近；面積 2x4 和 2x5 cm<sup>2</sup> 的曲線承如以上困難尚無法找出飽和點及最大平均負重。

## 陸、討論

假設（一）：假設垂蛹附著力與帶蛹附著力相同

由數據（二）得知，負重力大小順序為大鳳蝶（帶蛹）>琉璃蛺蝶（垂蛹）>大紅紋鳳蝶（帶蛹）>黑鳳蝶（帶蛹）>枯葉蝶（垂蛹）>琉璃帶鳳蝶（帶蛹）>紫蛇目蝶（垂蛹）>黑樹蔭蝶（垂蛹）。可看出不同蝶種的蛹具有不同的附著力，但無法歸納出垂蛹與帶蛹附著力關係，因此拒絕此假設。

假設（二）：假設幼蟲時期足部抓地力與蛹的附著力無關

由數據（一）與數據（二）的比較得知，幼蟲時期足部對平面附著力大小順序為枯葉蝶>琉璃蛺蝶>大紅紋鳳蝶>黑鳳蝶>黑樹蔭蝶>大鳳蝶>琉璃帶鳳蝶>紫蛇目蝶，而此與蛹能承受最大重量大小順序無明顯關係，無法否決此假設，因此幼蟲時期足部抓地力與蛹的附著力無關。

假設（三）：假設懸絲器上附生的鉤子數與蛹的附著力無關

由數據（三）鉤子數量順序為紫蛇目蝶>大鳳蝶>琉璃蛺蝶>大紅紋鳳蝶>黑鳳蝶>琉璃帶鳳蝶>枯葉蝶>黑樹蔭蝶，此順序與數據（二）直接比較下看似不符，但若將各蝶種懸絲器依形狀分類後再做比較，可發現同形狀懸絲器鉤子數與附著力成正向關係，否決此假設，因此鉤子數與蛹的附著力有關。

假設（四）：假設懸絲器面積與蛹的附著力無關

由數據（四）可得面積大小順序為大鳳蝶>大紅紋鳳蝶>黑鳳蝶>琉璃帶鳳蝶>琉璃蛺蝶>紫蛇目蝶>枯葉蝶>黑樹蔭蝶，此順序與數據（二）整體而言並不相符，再如假設（三）所述，可得知若在相同形狀情況下，面積則會與附著力成正向關係。因此否決此假設，懸絲器面積與蛹的附著力有關。

假設（五）：假設懸絲器密度與蛹的附著力無關

由數據（五）得知密度大小順序為紫蛇目蝶>琉璃蛺蝶>黑樹蔭蝶>枯葉蝶>琉璃帶鳳蝶>大紅紋鳳蝶>黑鳳蝶>大鳳蝶，此與數據（二）順序不符，即使將各蝶蛹依形狀分類結果亦然，因此無法否決此假設，得知懸絲器密度與蛹的附著力無關。

假設（六）：假設懸絲器形狀與蛹的附著力無關

懸絲器形狀大致可分為8字形、圓形及彎月形，雖然從數據（二）中無法比較出不同形狀懸絲器間的負重能力大小，但從假設（三）與假設（四）的討論結果可知，懸絲器形狀確實對附著力有一定程度上的影響，因此否決此假設，得知懸絲器形狀與蛹的附著力有關。

## 柒、結論

- 一、幼蟲時期足部鉤子明顯則抓地力高。
- 二、帶蛹與垂蛹附著力不同，但沒有絕對的高或低。
- 三、幼蟲時期足部抓地力與成蛹後的附著力無明顯關係。
- 四、懸絲器形狀與附著力有明顯關係。

- 五、懸絲器相同形狀下，面積愈大，蝶蛹附著力也愈大。
- 六、懸絲器相同形狀下，鉤子數愈多，蝶蛹附著力也愈大。
- 七、在一定面積中，鉤子數達到一定數量後，附著力將不再增加而維持在一平均值。

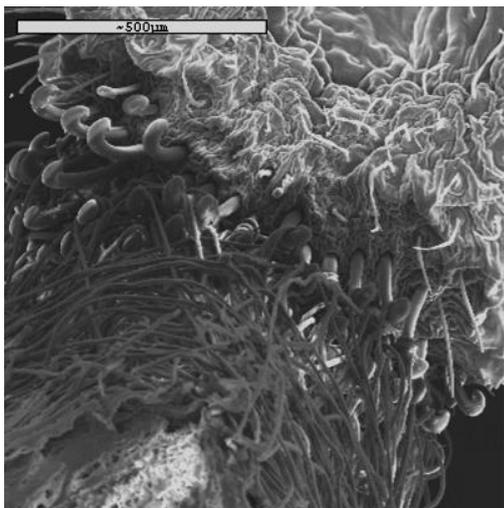
## 捌、未來實驗建議

實驗過程中，由於電子顯微鏡具有較佳的景深，鉤子的立體程度更為明顯，可將懸絲器上的鉤子數更準確的數出。而至於面積的計算，建議使用 PhotoImpact 依輪廓剪裁後，以像素為單位藉測量工具算出各懸絲器面積。

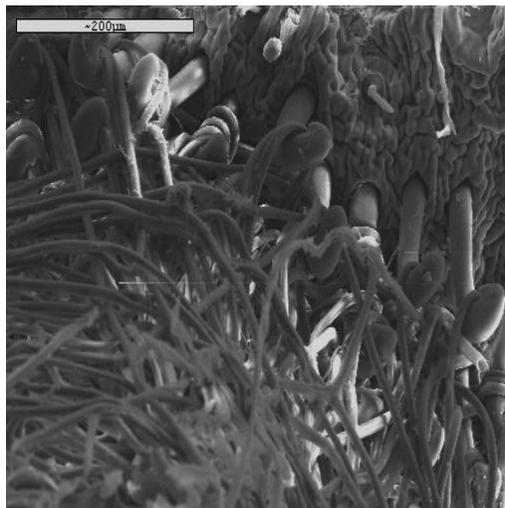
## 玖、參考文獻及其他

- 註一：國立暨南國際大學：國科會數位博物館。蝴蝶基本資料。  
(取自：<http://turing.csie.ntu.edu.tw/ncnudlm/index.htm>)
- 註二：李銘崇架設：台中縣華龍國小昆蟲館。蝴蝶資本資料。  
(取自：<http://www.hlps.tcc.edu.tw/insect/index.html>)
- 註三：台灣蝴蝶保育學會。相關詢問。(取自：<http://www.butterfly.org.tw/home.php>)
- 註四：Wiley InterScience。懸絲器的概述。(取自：<http://www3.interscience.wiley.com/cgi-bin/home>)
- 註五：王重雄教授。國立台灣大學昆蟲病理研究室。“[wangch@ntu.edu.tw](mailto:wangch@ntu.edu.tw)” 相關詢問。
- 註六：陳暉教授。國立中央大學化材系教授。“[huichen0510@gmail.com](mailto:huichen0510@gmail.com)” 相關詢問。
- 註七：羅裕龍教授。成大特聘教授。“[loyl@mail.ncku.edu.tw](mailto:loyl@mail.ncku.edu.tw)” 相關詢問。
- 註八：鄭瑞洲。國立科學工藝博物館研究人員。“[adam@mail.nstm.gov](mailto:adam@mail.nstm.gov)” 相關詢問。
- 註九：虛無假設之相關知識。(取自：[http://www.investopedia.com/terms/n/null\\_hypothesis.asp](http://www.investopedia.com/terms/n/null_hypothesis.asp))
- 註十：廖智安。1999。台灣昆蟲記。大樹文化事業股份有限公司。
- 註十一：濱野榮次。1987。臺灣蝶類生態圖鑑(中文版)。牛頓出版社。
- 註十二：李俊延、張玉珍。1988。臺灣蝶類圖說<一>。臺灣省立博物館。
- 註十四：徐堉峰。1999。台灣蝶圖鑑。台灣省立鳳凰谷鳥園。
- 註十三：張永仁。2000。台灣賞蝶圖鑑。晨星出版有限公司。
- 註十五：蔡百峻。1986。蝴蝶生態簡介。墾丁出版社。

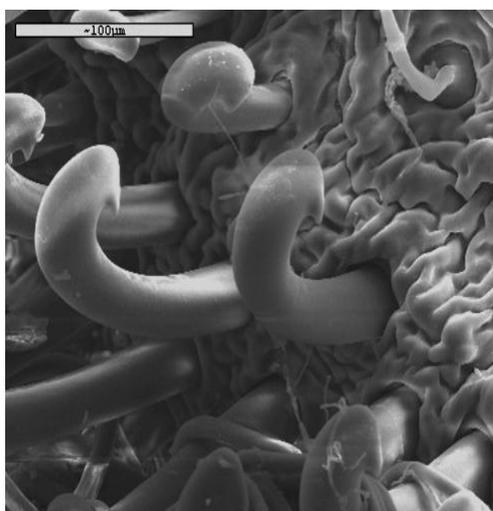
附錄(實驗中蝶蛹懸絲器的電子顯微鏡圖)：



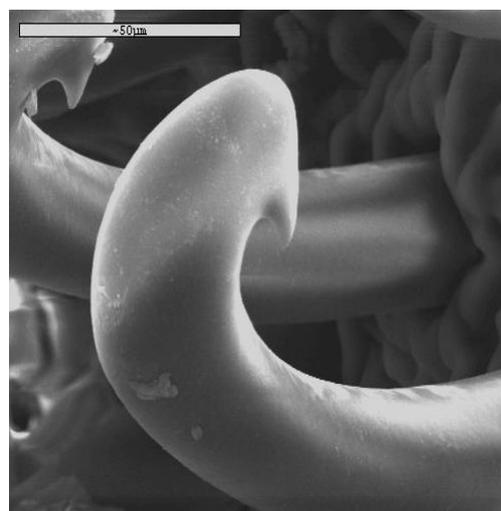
琉璃蛺蝶懸絲器+絲座 (90×)



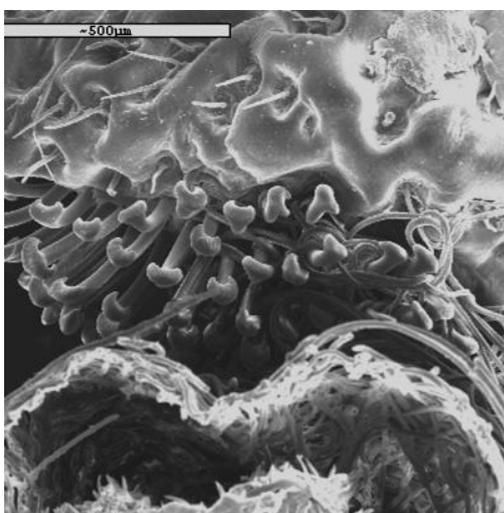
琉璃蛺蝶懸絲器+絲座 (200×)



琉璃蛺蝶懸絲器鉤子 (400×)



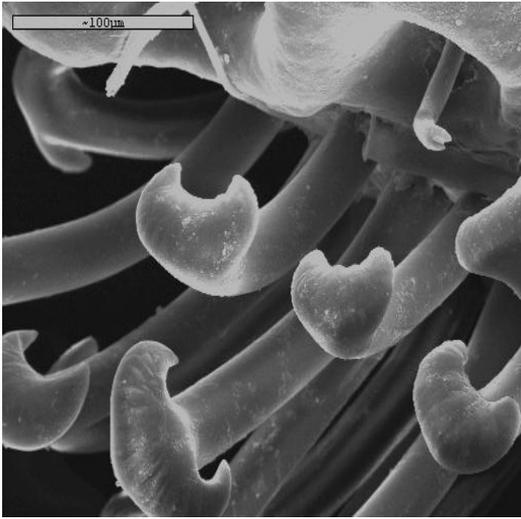
琉璃蛺蝶懸絲器鉤子 (1000×)



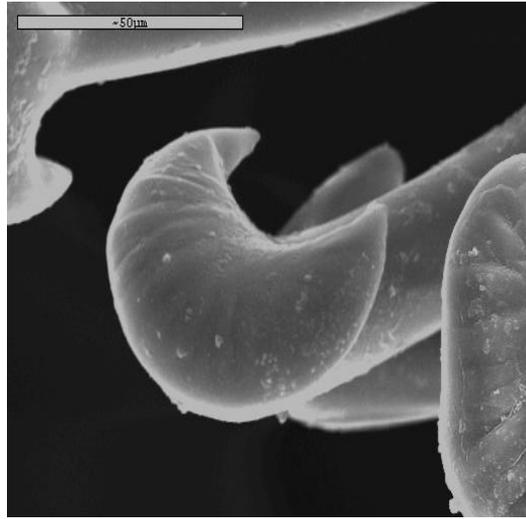
琉璃帶鳳蝶懸絲器+絲座 (90×)



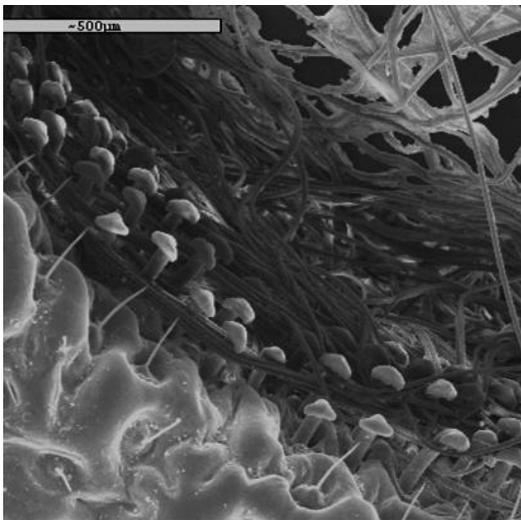
琉璃帶鳳蝶懸絲器+絲座 (200×)



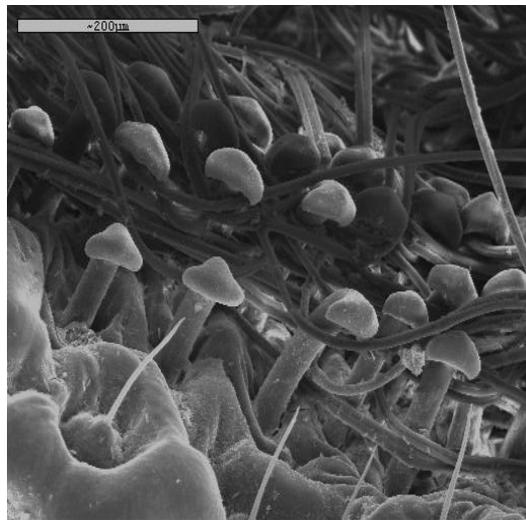
琉璃帶鳳蝶懸絲器鉤子 (400×)



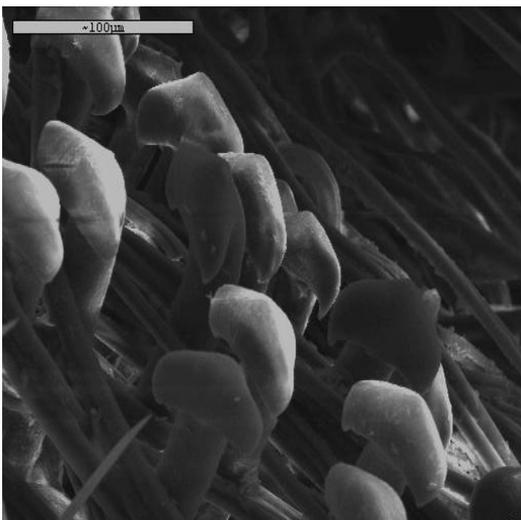
琉璃帶鳳蝶懸絲器鉤子 (1000×)



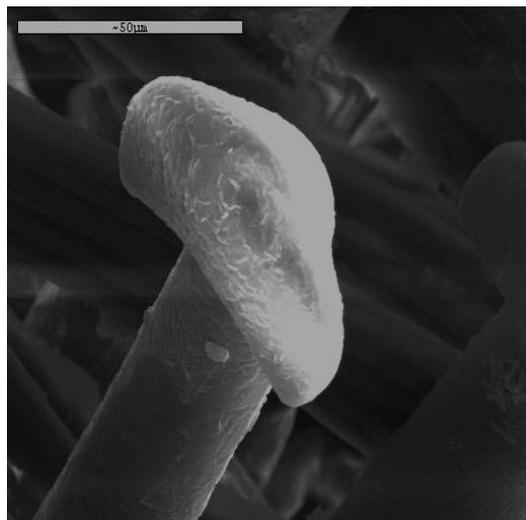
大鳳蝶懸絲器+絲座 (90×)



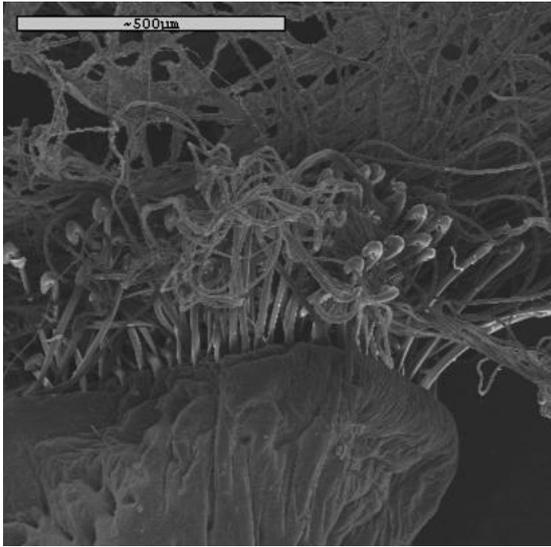
大鳳蝶懸絲器+絲座 (200×)



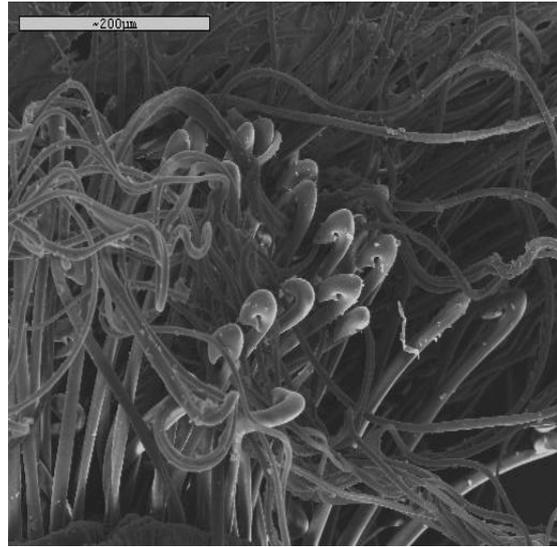
大鳳蝶懸絲器+絲座 (400×)



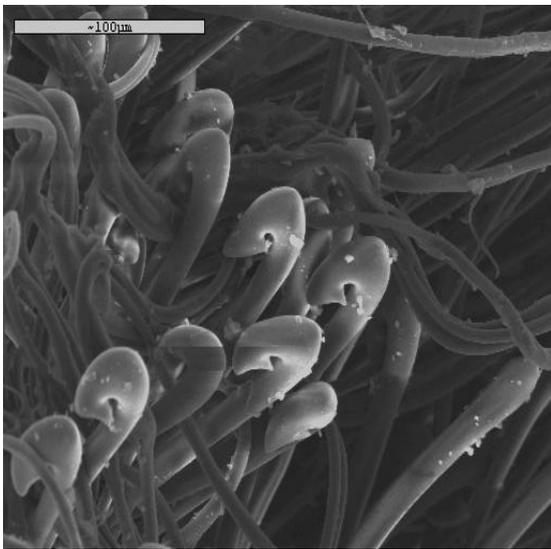
大鳳蝶懸絲器鉤子 (1000×)



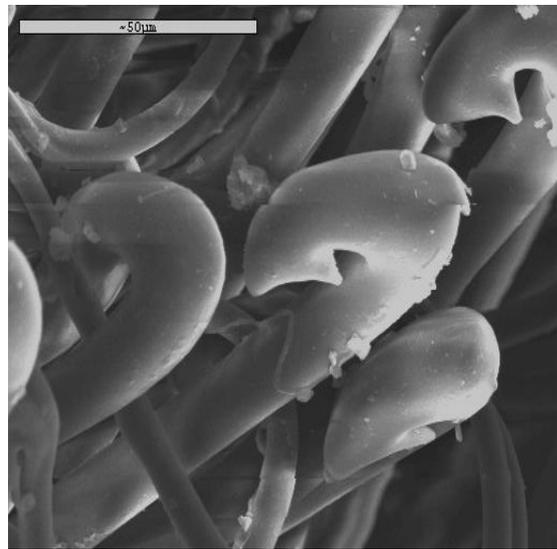
黑樹蔭蝶懸絲器+絲座 (90x)



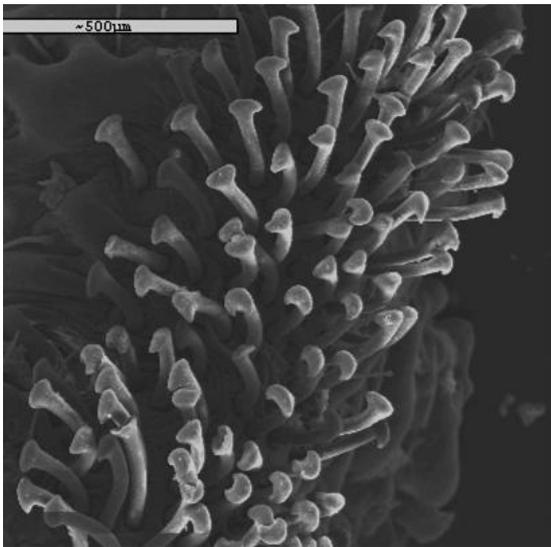
黑樹蔭蝶懸絲器+絲座 (90x)



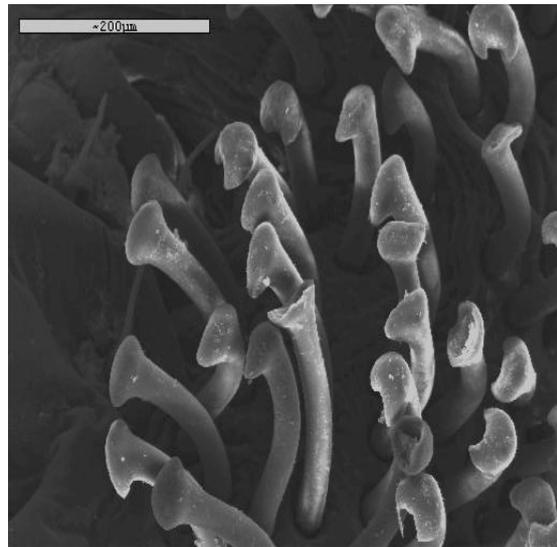
黑樹蔭蝶懸絲器+絲座 (400x)



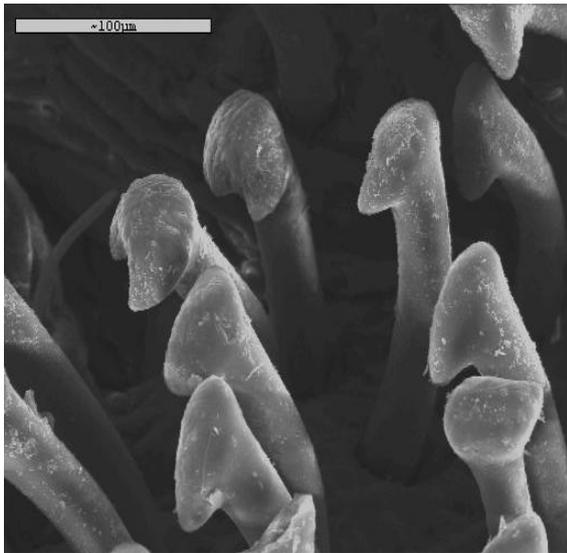
黑樹蔭蝶懸絲器鉤子 (1000x)



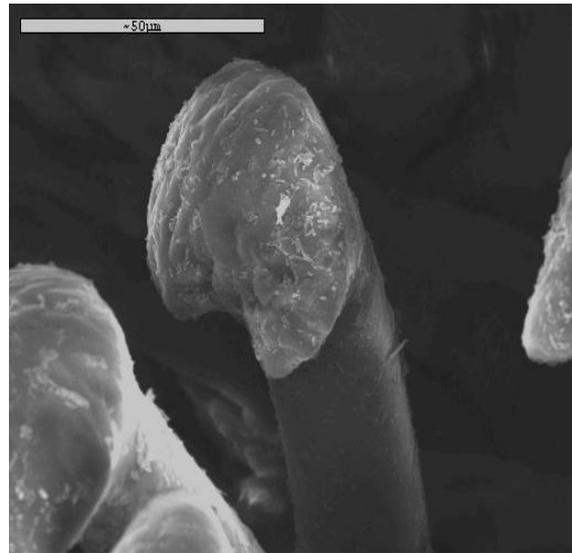
琉璃帶鳳蝶懸絲器鉤子 (90x)



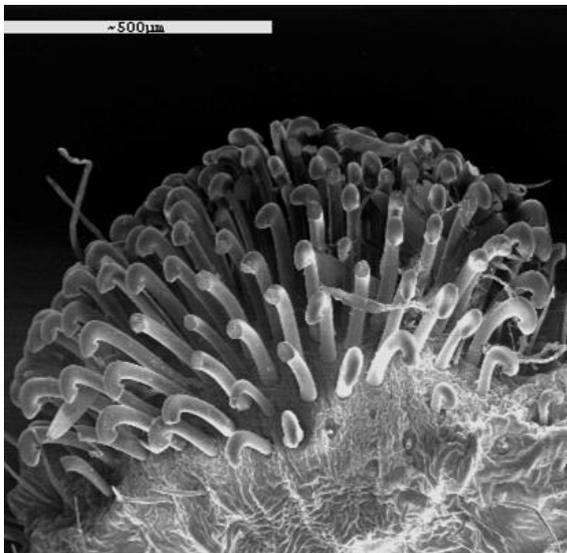
琉璃帶鳳蝶懸絲器鉤子 (200x)



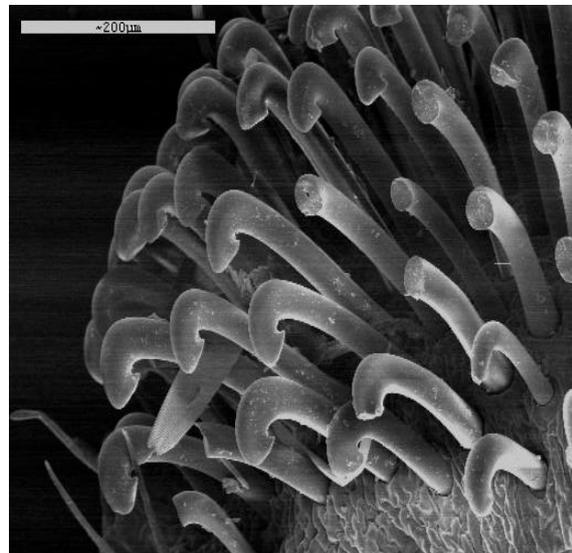
琉璃帶鳳蝶懸絲器鉤子 (400x)



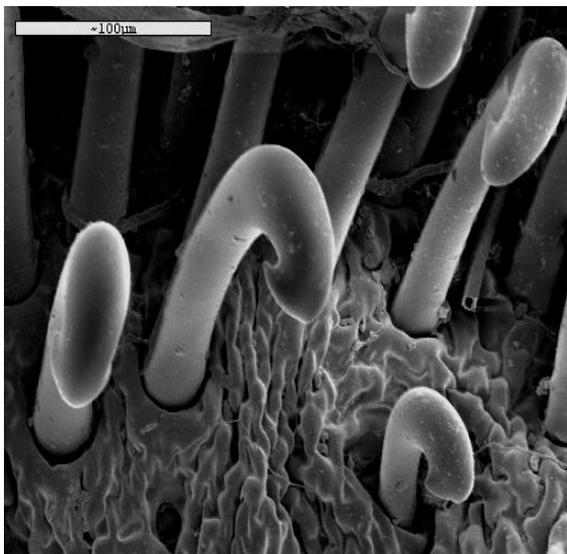
琉璃帶鳳蝶懸絲器鉤子 (1000x)



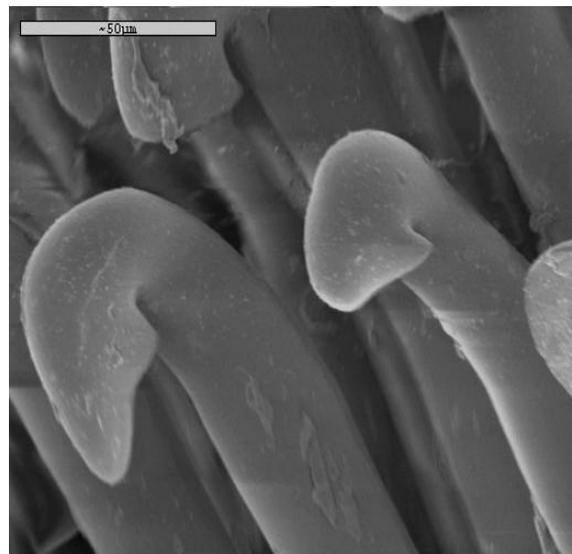
琉璃蛺蝶懸絲器鉤子 (90x)



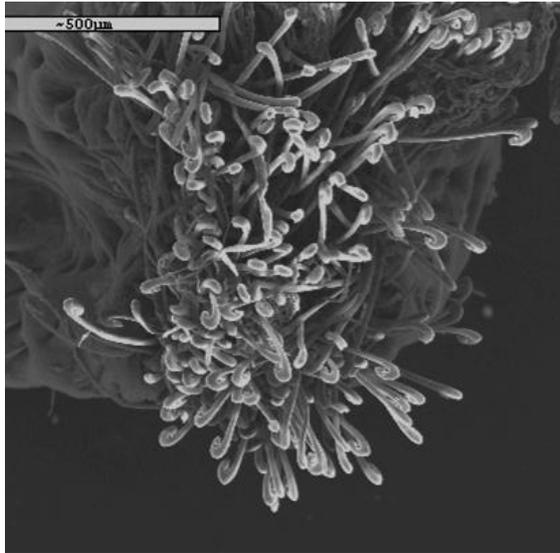
琉璃蛺蝶懸絲器鉤子 (200x)



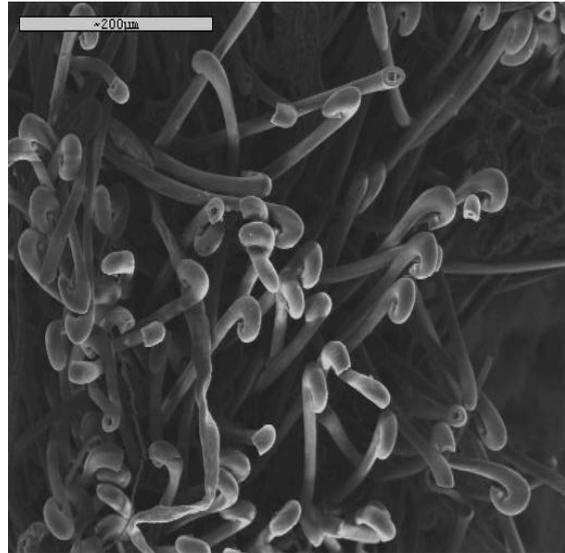
琉璃蛺蝶懸絲器鉤子 (400x)



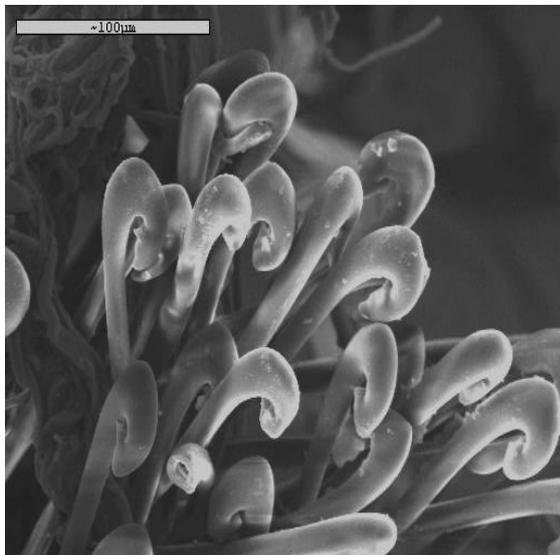
琉璃蛺蝶懸絲器鉤子 (1000x)



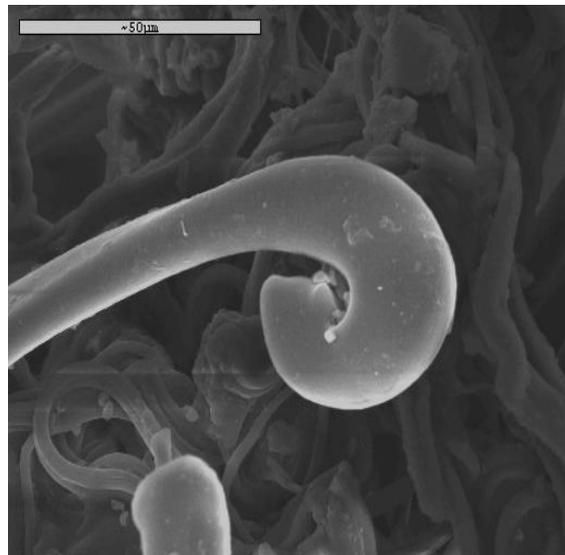
黑樹蔭蝶懸絲器鉤子 (90x)



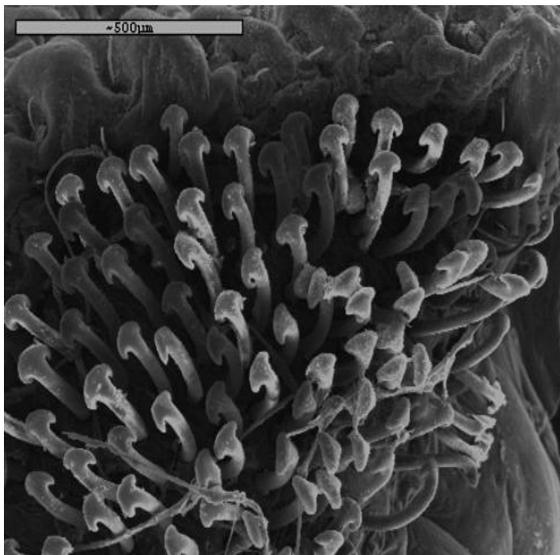
黑樹蔭蝶懸絲器鉤子 (200x)



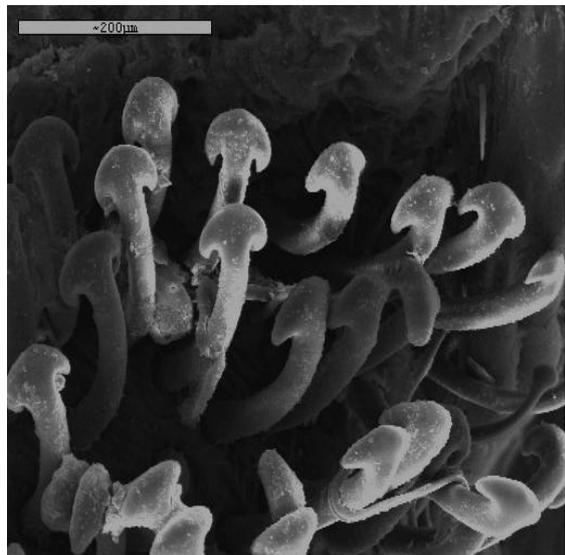
黑樹蔭蝶懸絲器鉤子 (400x)



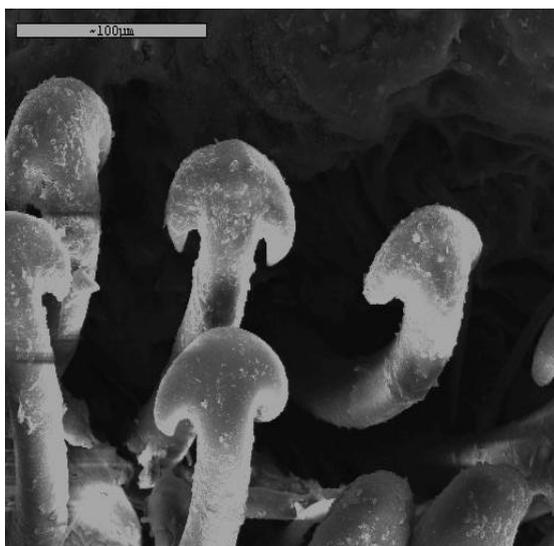
黑樹蔭蝶懸絲器鉤子 (1000x)



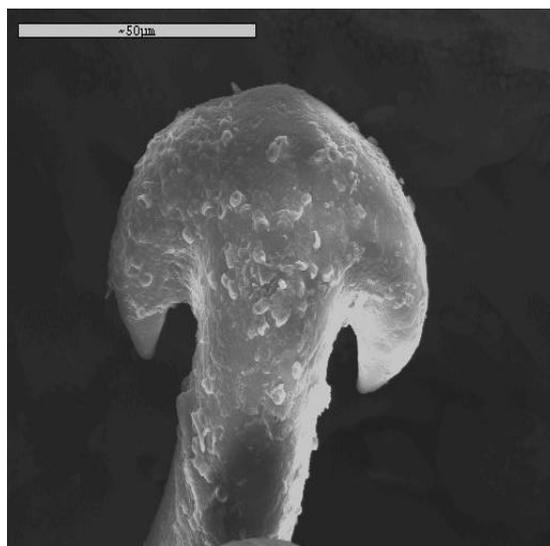
大鳳蝶懸絲器鉤子 (90x)



大鳳蝶懸絲器鉤子 (200x)



大鳳蝶懸絲器鉤子 (400×)



大鳳蝶懸絲器鉤子 (1000×)

## 【評語】 040711

1. 魔鬼氈模擬僅能適用面積或鉤子數的影響。
2. 鉤子數量對負重是否為線性正相關？
3. 懸重器非平面結構需聚焦探討。