

中華民國第 55 屆中小學科學展覽會 作品說明書

高中組 物理科

040114

人造肌肉

學校名稱：嘉義縣私立協同高級中學

作者： 高二 張家銘 高一 譚 天 高一 吳峻綸	指導老師： 何世明 蕭嘉偉
---	-----------------------------

關鍵詞：聚合物、彈性係數、熱力學

摘要

取一聚合物線，固定一端後加以旋轉，可得一螺旋狀之類彈簧結構。將其加熱定型，便成為一隨溫度升降而伸縮之「人造肌肉」。改變聚合物線粗細、加熱之溫度和時間、馬達扭力與轉向等變因，此人造肌肉之物理性質亦隨之改變。我們可藉由實驗觀測此現象，並探討其變動關係，再以理論驗證。期望能藉此控制人造肌肉之性質，以增進其應用。

壹、 研究動機

過去科學家曾使用金屬線和奈米碳管製成人造肌肉，但成本太高且難以駕馭，因此改用聚乙烯和尼龍製成的高強度聚合物纖維，這種材料較便宜且常見，像釣魚線與縫線就是使用此種材料製成。科學家將這兩種材質捲曲、盤繞成束，以製成人造肌肉，並利用溫度的改變使其放鬆或收縮。當溫度上升時，肌肉會扭曲收縮，產生力量；冷卻時，肌肉會回復原長，溫度的調節可藉由電池或是氣溫的變化控制。使用普通的釣魚線和縫紉用線製造出的人造肌肉纖維，所產生的力量可達人類肌肉的 100 倍。因此，我們決定以此種便宜且易取得的材料製造人工肌肉，並加以研究其性質，期望能找出與真實肌肉之異同，以便改善與應用之。

貳、 研究目的

一、 研究人造肌肉的製作

- (一) 兩端拉力如何影響釣魚線的捲曲過程
- (二) 熱定型溫度對熱定型結果之影響

二、 人造肌肉的相關測量

- (一) 人造肌肉的基本物理性質
- (二) 溫度與人造肌肉的物理性質的關係
- (三) 粗細與人造肌肉的物理性質的關係
- (四) 馬達轉向與人造肌肉的物理性質的關係

參、研究設備及器材

一、聚合物

(一) 尼龍製釣魚線

(二) 不同口徑

1. No.6：基本實驗測量
2. No.1~No.6：以粗細為變因時使用



尼龍製釣魚線

二、轉動器具

(一) 組合馬達

1. 可調速馬達+原子筆勾
2. 轉速：0~1040 rpm



組合馬達

三、加熱器具

(一) 烘箱

1. 溫度：0~300 °C

四、定型器具

(一) 熱定型器

1. 熱定型器=木棒+長尾夾*2
2. 耐烘箱高溫，不易形變或相變化



烘箱

五、測量工具

(一) 木尺

1. 長度：40 cm
2. 熱膨脹係數低，提高實驗準確度



木尺

(二) 溫度計

(三) 拉力計

六、分析工具

(一) Excel



拉力計

肆、研究過程與方法

一、人造肌肉的製作

(一) 旋轉聚合物

將釣魚線的一端固定在馬達上，另一端固定於拉力計上(如下圖一)；觀察拉力計讀數，比較在不同拉力下聚合物扭轉產出物的結構差異。



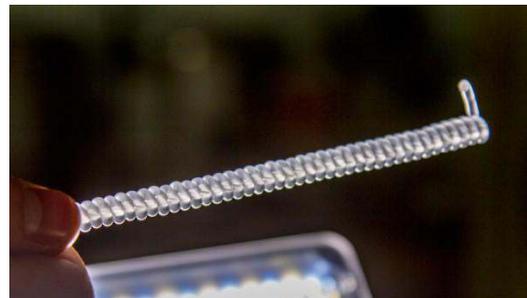
圖一、拉力實驗圖(左為馬達端，右為拉力計端)

(二) 熱定型

將旋轉完畢的彈簧狀產物固定至熱定型器(如下圖二)上，放進烘箱中帶溫度升至 180 °C，再取出進行急速冷卻的處理，最後從熱定型器上取下的就是人造肌肉(如下圖三)了。



圖二、熱定型器組合圖

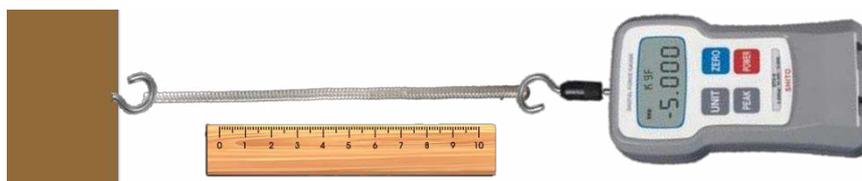


圖三、人造肌肉成品圖

二、人造肌肉的相關測量

(一) 人造肌肉的物理性質：

將熱定型後的人造肌肉一端固定於一固定端，另一端固定於拉力計上(如下圖四)；緩慢施力並記錄其長度，繪製施力對長度變化量趨勢圖，探討人造肌肉與一般彈簧之間的物理性質差異。



圖四、彈性係數測量實驗示意圖(左為固定端，右為拉力計端)

(二) 人造肌肉的物理性質 vs 溫度

1. 彈性係數 vs 溫度：

將熱定型後的人造肌肉下掛一重物，懸掛於烘箱中，加熱並記錄其長度變化量由 40°C 至 140°C(如下圖五)；而後將長度變化量及重物重量相比，利用虎克定律換算成彈性係數，繪出彈性係數對溫度趨勢圖。

2. 長度比例 vs 溫度：

將熱定型後的人造肌肉自然擺放於烘箱中，加熱並記錄其長度由 40°C 至 140°C(如下圖六)；而後將後來長度比上原長，定義為長度比例，繪出長度比例對溫度趨勢圖。



圖五、彈性係數對溫度實驗示意圖
(烘箱中為人造肌肉下掛定重重物)



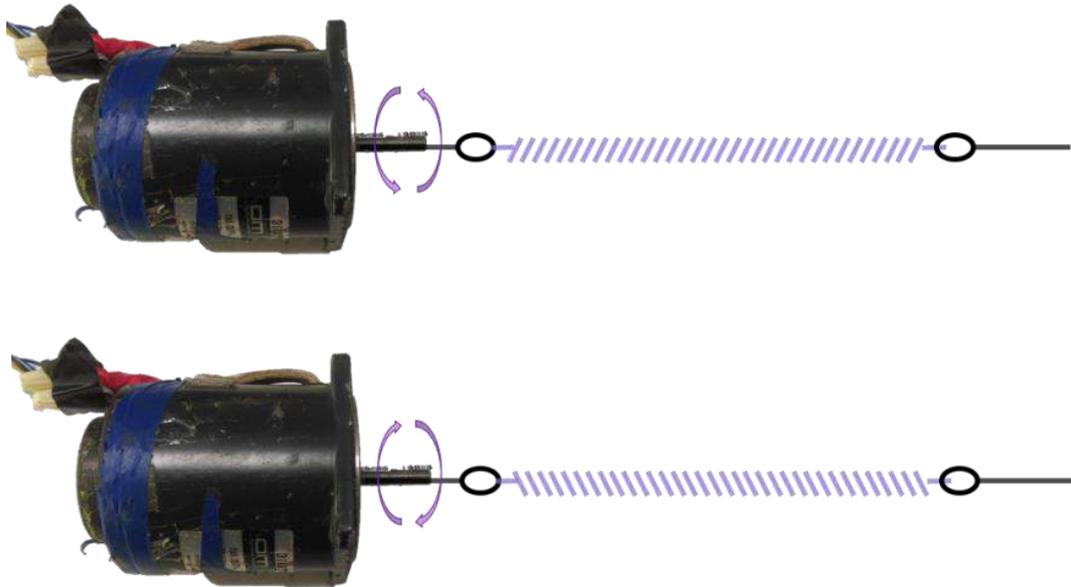
圖六、長度比例對溫度實驗示意圖
(烘箱中為無負重長度之人造肌肉)

(三) 粗細

改變釣魚線的粗細，重新實驗上述的三個人造肌肉物理性質測量的實驗，繪製成圖表比較其差異。另外，我們也測量了在不同粗細的釣魚線下，人造肌肉的彈性限度，並繪成圖表比較其差異。

(四) 馬達轉向

利用馬達可控轉向的特性，我們改變了馬達的旋轉方向，並保持兩次實驗釣魚線頭尾方向一致(如下圖七);而後我們將這兩條旋轉方向不同的人造肌肉做熱定型的處理，再使用烘箱作長度比例對溫度的實驗，繪出兩條不同旋轉方向人造肌肉的趨勢線。



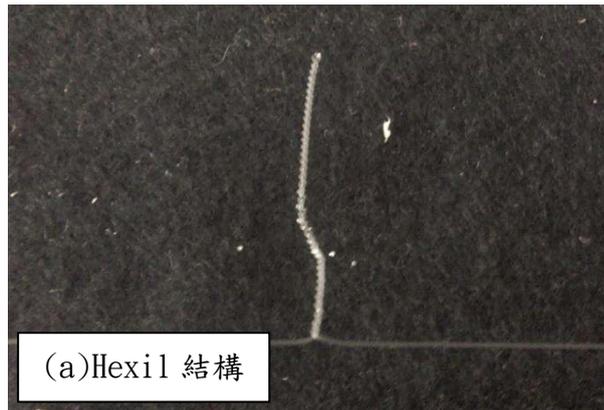
圖七、改變馬達轉向示意圖

伍、 研究結果

一、 人造肌肉的製作

(一) 旋轉聚合物

在只改變拉力的情況下，我們發現釣魚線產生了三種不同的結構(如下圖八)：

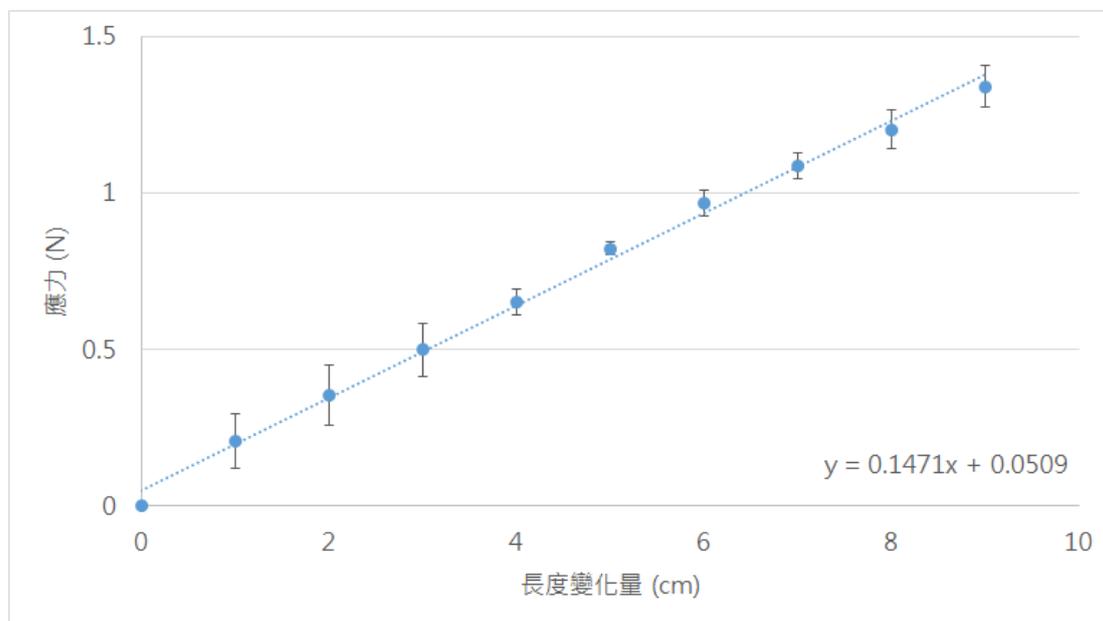


圖八、不同應力下的釣魚線結構結果圖
(a)拉力太小(b)拉力適當(c)拉力過大

實驗結果：釣魚線在一定的拉力範圍下會形成彈簧狀結構，若拉力太小則形成 Helix 結構，拉力適當則形成彈簧狀結構，拉力過大則會導致釣魚線斷裂。

二、人造肌肉的相關測量

(一) 定溫下人造肌肉物理性質

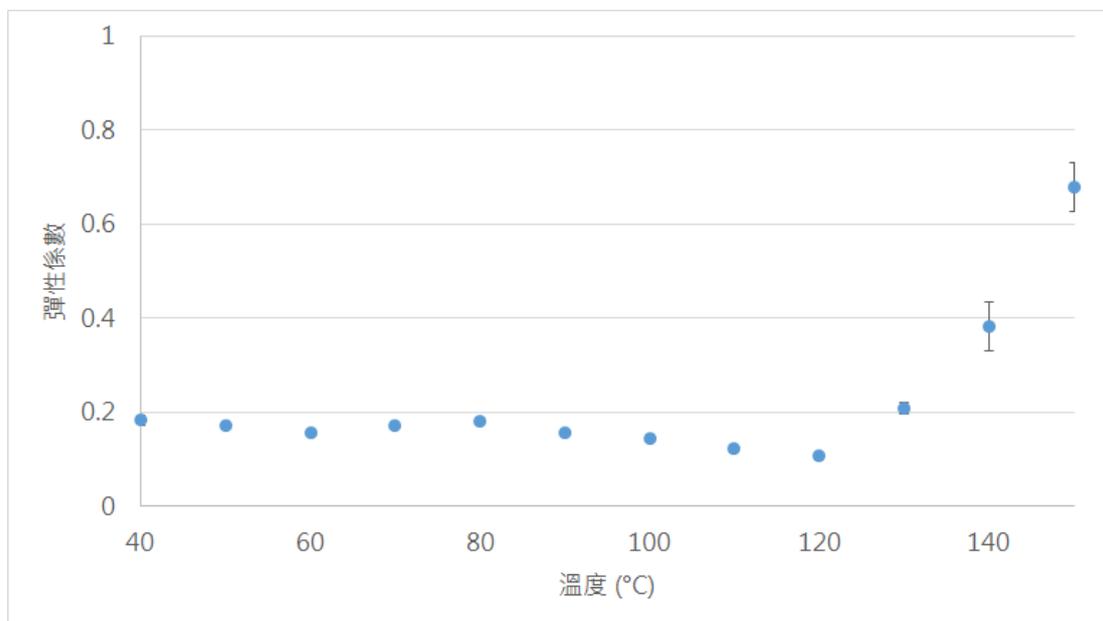


圖九、應力對長度變化量趨勢圖

實驗結果：在定溫下人造肌肉具有一般彈簧特性

(二) 溫度對於人造肌肉物理性質的影響

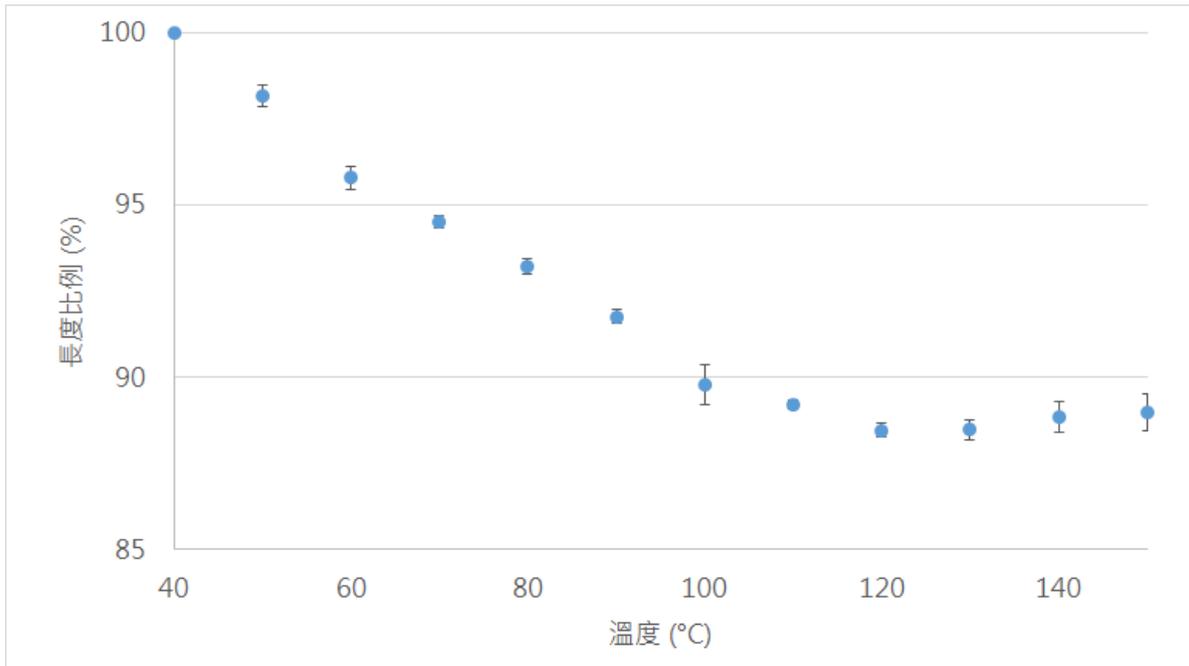
1. 彈性係數 vs 溫度



圖十、彈性係數對溫度趨勢圖

實驗結果：在特定溫度之後，彈性係數急遽升高

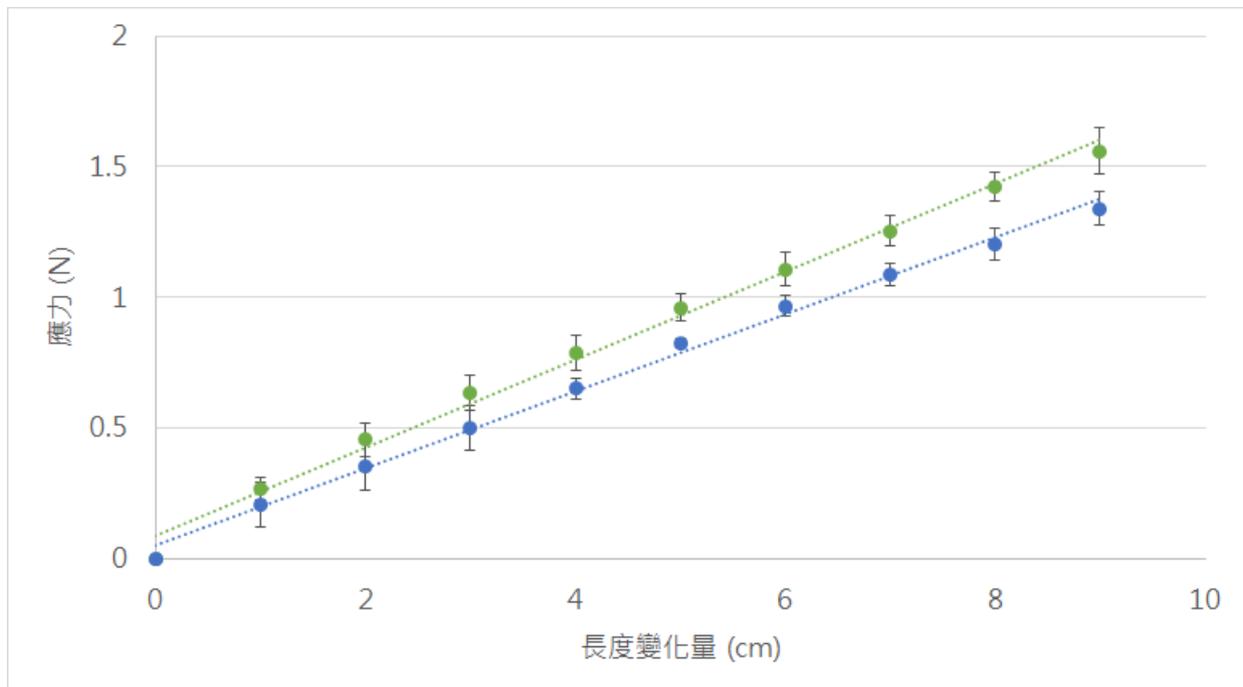
2. 溫度 vs 長度比例



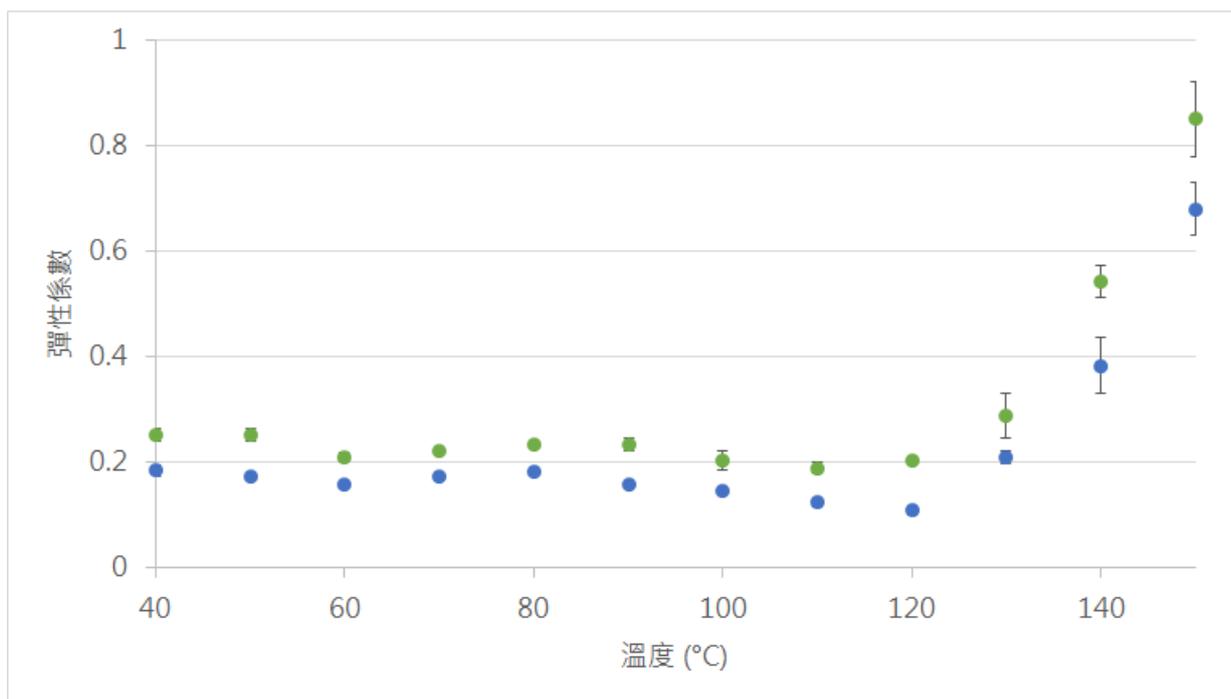
圖十一、長度比例對溫度趨勢圖

實驗結果：在特定溫度之後，長度比例不減反增

(三) 變因：釣魚線粗細

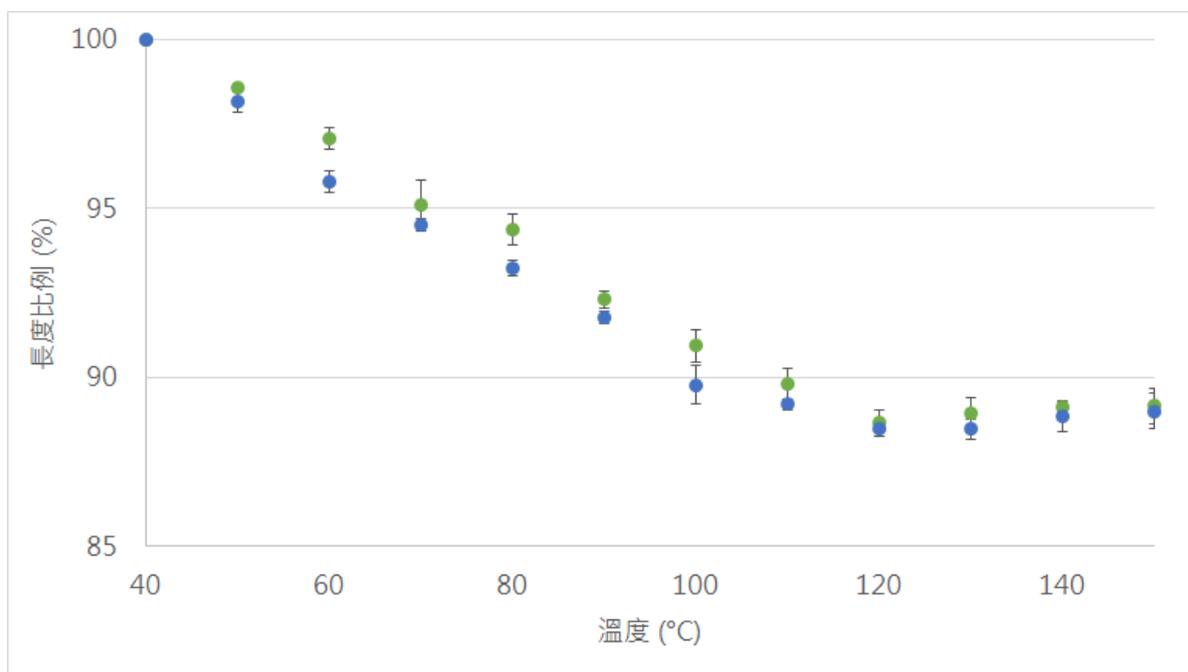


圖十二、不同口徑下應力對長度變化量趨勢圖
(藍色線為 No. 6 口徑 0.4mm，綠色線為 No. 4 口徑 0.34mm)



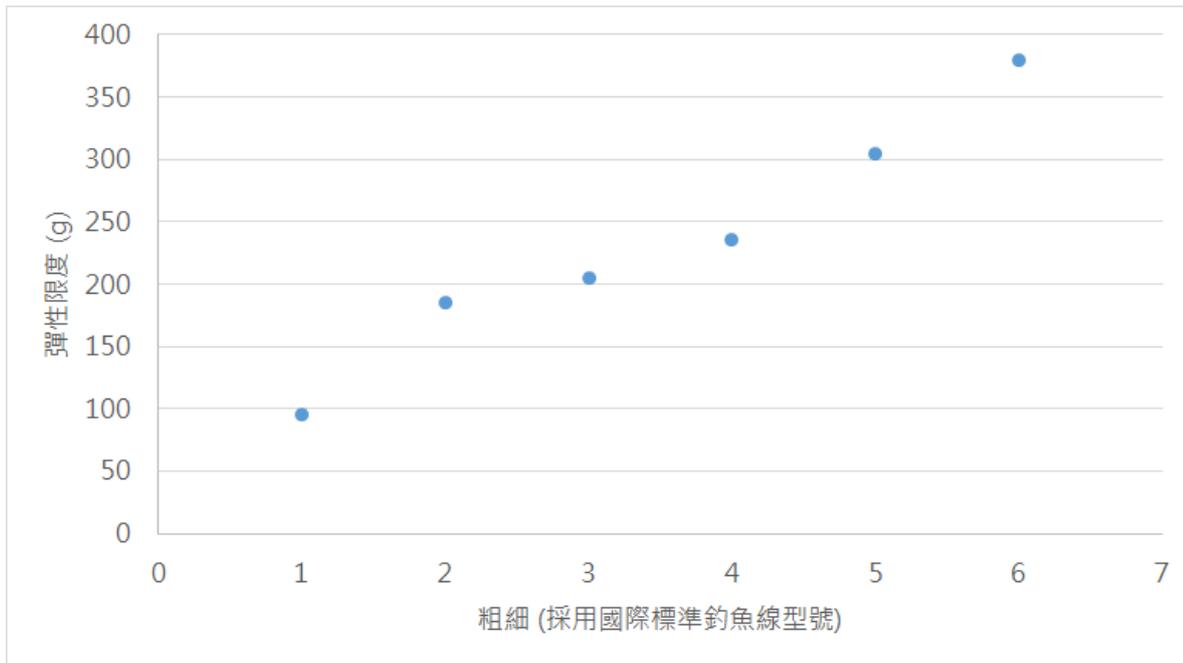
圖十三、不同口徑下溫度對彈性係數趨勢圖
 (藍色線為 No. 6 口徑 0.4mm，綠色線為 No. 4 口徑 0.34mm)

實驗結果：在不同粗細下，彈性係數隨溫度變化趨勢相似



圖十四、不同口徑下溫度對長度比例趨勢圖
 (藍色線為 No. 6 口徑 0.4mm，綠色線為 No. 4 口徑 0.34mm)

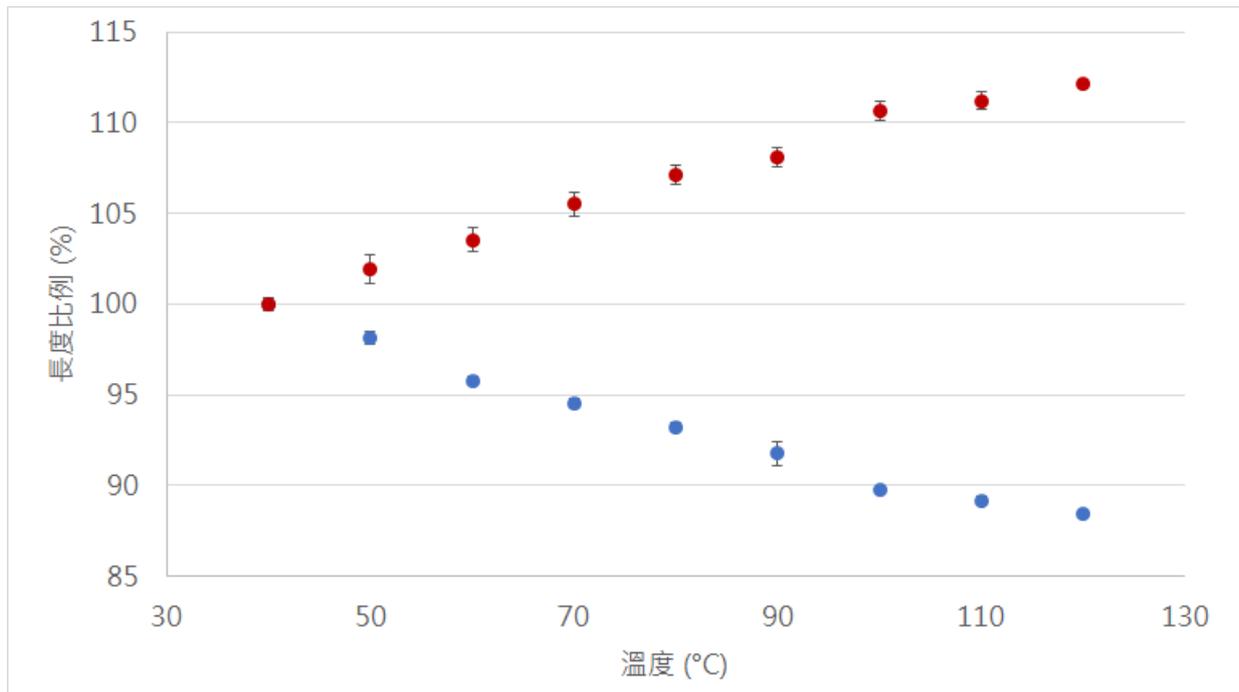
實驗結果：在不同粗細下，彈性係數、長度比例隨溫度變化趨勢相似



圖十五、人造肌肉彈性限度對粗細趨勢圖

實驗結果：人造肌肉的彈性限度與粗細呈正相關

(四) 變因：馬達轉向



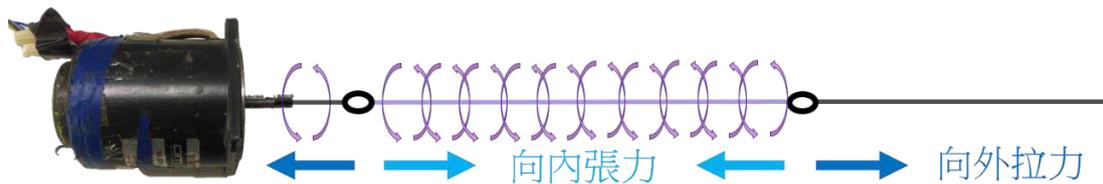
圖十六、不同馬達轉向之人造肌肉長度比例對溫度趨勢圖
(藍色線為順向肌肉、紅色線為反向肌肉)

實驗結果：馬達轉向影響長度比例正負變化

陸、 討論

一、 為何在不同的拉力下扭轉釣魚線會產生不同的結構？

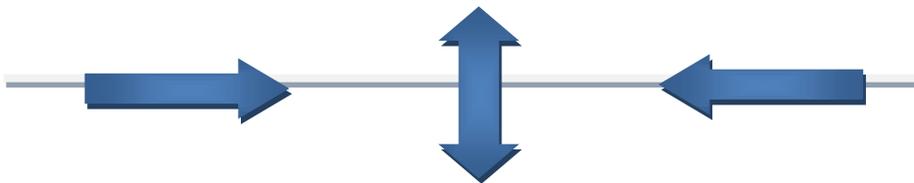
討論：當釣魚線被馬達扭轉時，會產生一個向內的張力(如下圖十七)，若向內的張力大於向外拉力，則釣魚線向內收聚，形成 Helix 結構；若向內張力等於向外拉力，則釣魚線等速收縮成彈簧結構；若向內張力小於向外拉力，釣魚線將會因為支撐不了而斷裂。



圖十七、釣魚線扭轉時受力圖

二、 人造肌肉為何受熱會變短？

討論：人造肌肉為聚合物原料製成，受熱後動能提高，各分子上下運動漸趨劇烈，以至於肌肉左右收縮(如下圖十八)。



圖十八、微觀人造肌肉加熱時內部受力圖

三、 為何人造肌肉在到達特定溫度之後，其物理特性會有大幅度的改變？

討論：在熱定型後的人造肌肉，彈簧狀的構造間夾有一些縫隙(如下圖十九)；在加熱過程中，順向肌肉會收縮，當到達一定溫度時，彈簧狀構造間的縫隙將被填滿(如下圖二十)，

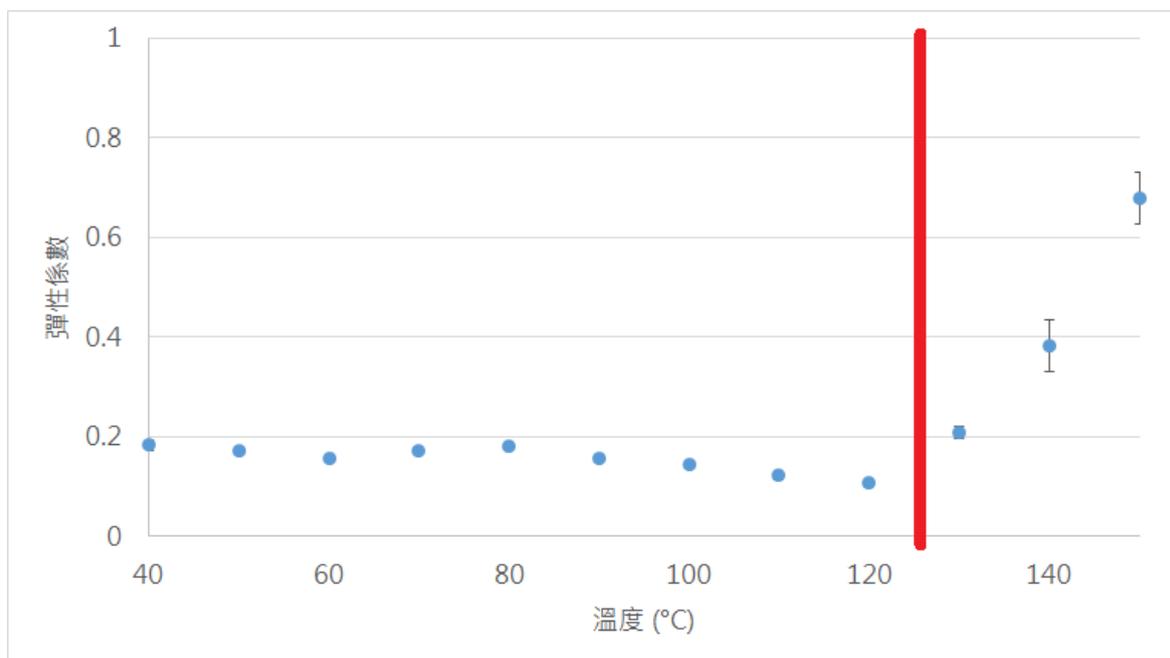


圖十九、有間隙的人造肌肉結構



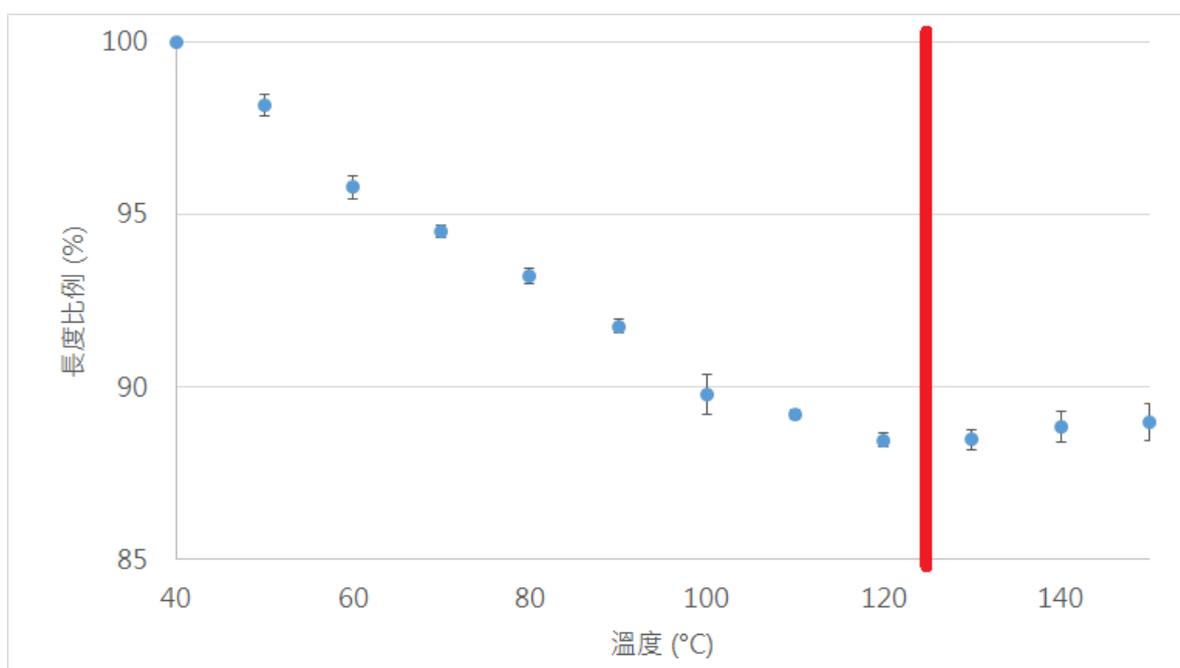
圖二十、間隙被填滿的人造肌肉結構

人造肌肉間間隙被填滿導致其縮短長度變化量驟減，利用虎克定律可知此時的彈性係數將在負重不變的情形下驟增(如下圖二十一)。



圖二十一、溫度對彈性係數趨勢圖

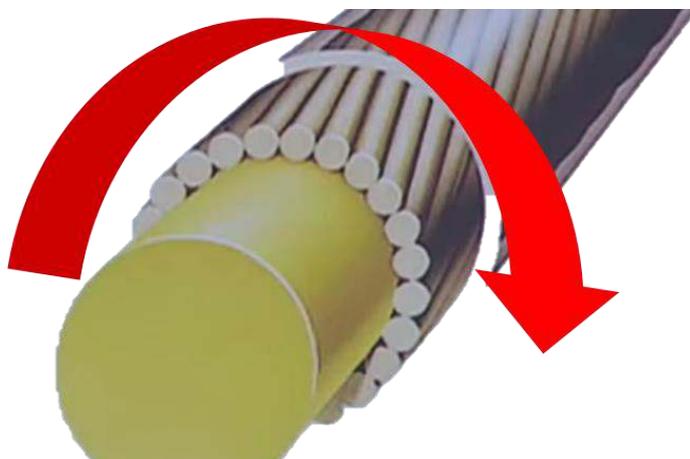
而導致長度比例在特定溫度後不減反增的原因也是因為彈簧狀構造間的縫隙被填滿，以致此時人造肌肉幾乎等於線狀物，故加熱時不再縮短，反而呈線性熱膨脹(如下圖二十二)。



圖二十二、溫度對長度比例趨勢圖

四、在不同的馬達旋轉方向下，為何會製造出受熱性質相反的人造肌肉？

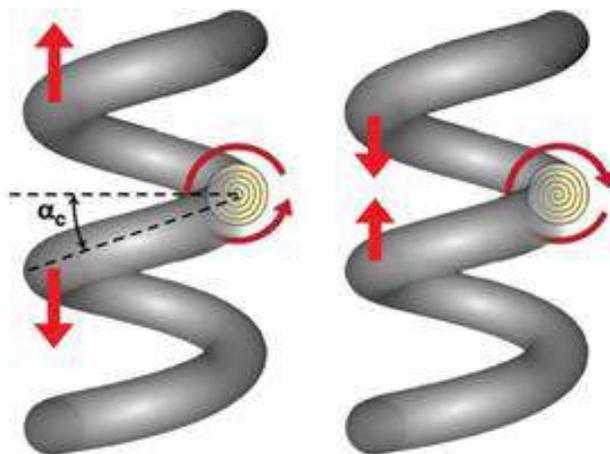
討論：在釣魚線的製作過程中，工廠將數條細小的聚合物纖維纏捲在一起，在旋轉後，每條釣魚線本身會有自己的特定纖維旋轉方向(如下圖二十三)。



圖二十三、釣魚線本身的特定纖維旋轉方向

而當我們在扭轉釣魚線時，若順著此纖維旋轉方向扭轉，則生產出來的定義為「順向(Homochiral)肌肉」；反之，若逆著其纖維方向扭轉，則定義為「反向(Heterochiral)肌肉」。

順向肌肉及反向肌肉之所以會有不同的受熱長度變化率，在於兩者受熱後其纖維本身收縮拉聚，在順向肌肉形成一個向內的拉力，在反向肌肉則形成向外的推力，導致順向肌肉收縮、反向肌肉增長(如下圖二十四)。



圖二十四、人造肌肉順向、反向時微觀受力圖(左圖為反向，右圖為順向)

柒、 結論

一、 人造肌肉製作：

(一) 旋轉聚合物：

在不同拉力下產生的人造肌肉之型態會有所不同，當馬達旋轉產生向內張力大於向外拉力時，釣魚線會形成 Helix；而在向內張力與向外拉力相等時，聚合物線就會形成彈簧狀結構；最後，當向外拉力大於向內張力時，聚合物線會斷裂。

(二) 熱定型

二、 人造肌肉的性質測量

(一) 定溫下人造肌肉物理性質：在不改變外溫的前提下，熱定型完成的人造肌肉的物理性質與彈簧並無太大差異；我們可以從實驗數據得知，人造肌肉遵循虎克定律。

(二) 溫度對於人造肌肉物理性質的影響

1. 溫度 vs 彈性係數：在特定的溫度之下，人造肌肉的彈性係數並不會有太大的差別；但達到一定溫度後，由於聚合物間的縫隙被填滿，因而導致彈性係數急遽上升。
2. 溫度 vs 長度比例：在特定的溫度之下，人造肌肉的長度比例隨溫度上升呈穩定縮減；但達到一定溫度後，由於聚合物間的縫隙被填滿，因而導致人造肌肉的長度比例呈線性熱膨脹。

(三) 馬達轉向：馬達轉向與聚合物纖維的方向將導致人造肌肉有順向肌肉及反向肌肉的差異。加熱時，順向肌肉的纖維會產生一向內的力而收縮；反之，反向肌肉的纖維則會產生向外的推力而增長。

捌、 應用

- 一、 **需要「超人力」的裝置**：一束人工肌肉的直徑約是人類髮絲的 10 倍，收縮時可舉起 7.25 公斤，是同樣大小天然肌肉的 100 倍，如果將 100 束聚集模擬天然肌肉的作用，則幾乎可以舉起一噸的重量。
- 二、 **穿戴式外骨骼的改進**：傳統穿戴式外骨骼由於大小和重量的關係，限制了使用者的靈活性。希望這種用電池供電的肌肉，能解決此問題，幫助腰部以下癱瘓的病人重新站起來，甚至行走。
- 三、 **人形機器人的建造**：此外由於它的體積小，也可以用在較小尺度的裝置上，可以讓人形機器人面部表情更逼真。
- 四、 **進行微創手術**：用以替代及修復真實肌肉。
- 五、 **製作自動調溫衣物**：用聚合物線圈織成「可以呼吸」的材質，織料孔隙會隨氣溫打開或關閉，幫助通風或防風。
- 六、 **熱療**：以此模型模擬可得知人體肌肉受熱縮障情形，並可以此模擬熱療成效之過程。

玖、參考文獻

- [1] Carter S. Haines, Márcio D. Lima, Na Li, Geoffrey M. Spinks, Javad Foroughi, John D. W. Madden, Shi Hyeong Kim, Shaoli Fang, Mônica Jung de Andrade, Fatma Göktepe, Özer Göktepe, Seyed M. Mirvakili, Sina Naficy, Xavier Lepró, Jiyoung Oh, Mikhail E. Kozlov, Seon Jeong Kim, Xiuru Xu, Benjamin J. Swedlove, Gordon G. Wallace, Ray H. Baughman. **Artificial Muscles from Fishing Line and Sewing Thread.**(2014).
- [2] D. Cooper. Spun fishing line turned into muscle.(ABC Science, 2014).
- [3] A. Khan. Watch: Scientists make super-strong artificial muscle from fishing line.(LA Times, 2014).
- [4] 四、高三選修物理(上) 第一章 熱力學

【評語】 040114

本項作品探討人造肌肉的物理性質。作者使用成本低且易取得的聚乙烯和尼龍製成的高強度聚合物纖維，如釣魚線與縫線，作為材料，來探討製作過程、溫度、粗細、馬達轉向與人造肌肉物理性質的關係。本項作品的結果有助於未來應用發展的參考。

在這項研究裡，作者態度認真，並設計實驗控制不同變因，是一項很好的科學訓練。作者也試圖解釋馬達順向及反向扭轉製成的人造肌肉對溫度改變的不同反應。有關這些解釋，假如能進一步設計不同的實驗來驗證則更佳。另外，有關在外加拉力較小的情況下，扭轉過程造成的捲曲現象或許值得進一步研究。