

作品名稱：

如「交」似「聯」--橡皮筋於勒沙特列原理及聚合物交聯現象實驗改良的應用



成果報告書

作品名稱：

如「交」似「聯」--橡皮筋於勒沙特列原理及聚合物交聯現象實驗改良的應用

摘要

本研究以橡皮筋演示交聯作用和勒沙特列原理，符合綠色化學原則中防廢、再生、簡潔的宗旨。在交聯作用實驗中，冷燙劑第一劑(還原劑)可破壞雙硫鍵，交聯密度下降，因此使彈力下降，或最大溶脹體積上升。冷燙劑第二劑(氧化劑)則使雙硫鍵重新形成，交聯密度上升，因此彈力上升，或最大溶脹體積下降。而冷燙劑可重複用至少 3 次仍有顯著效果，比原本可能造成水管堵塞且一次性的硼砂彈力球和水凝膠實驗更防廢且減毒。在勒沙特列原理實驗中，橡皮筋被加熱時，會先縮短，分子結構傾向亂度較高，但最後逐漸伸長；而橡皮筋拉長或扭曲成螺旋時，平衡系統傾向抵銷此因素，所以朝放熱反應進行，而縮短或鬆開橡皮筋時則相反，橡皮筋從環境中吸收熱能，此結果可應用於降溫裝置的製作。橡皮筋加熱的實驗，只要 45 秒內就可看到效果，而且和拉長橡皮筋的實驗一樣，裝置和步驟都易於操作，符合簡潔原則。此外，橡皮筋可重複使用，不需藥品廢棄物處理，比二氧化氮、氯化亞鈷等實驗的毒性更低。

壹、研究動機

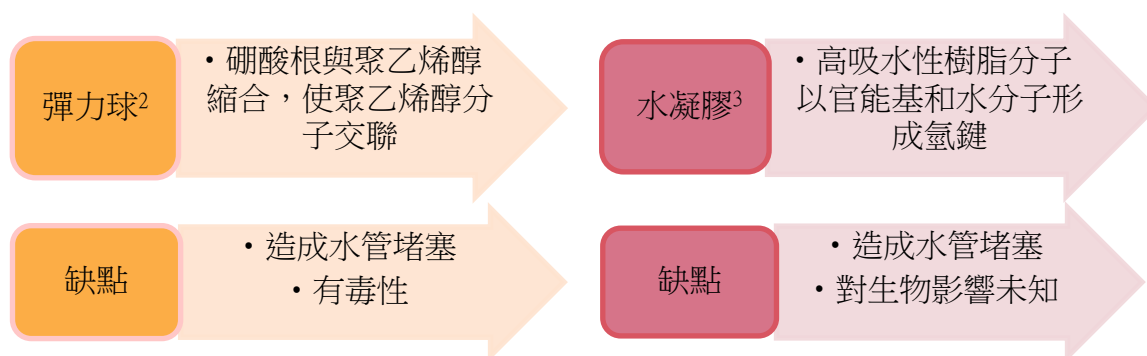
在生活中我們常使用橡皮筋，用完後就丟到垃圾桶中，沒有重複利用，雖然垃圾量看似少，但是燃燒後對環境也是負擔。為尋找橡皮筋是否有其他化學相關用途，我首先上網蒐集資料，並發現外國有教師用加熱橡皮筋後會使其縮短的效應來演示勒沙特列原理和反應熵概念¹。根據此發現，我決定探索如何重複利用橡皮筋並用簡便方式展示勒沙特列原理，達到綠色化學原則中防廢、再生、簡潔的宗旨，並可作為基礎化學中物質間的反應單元的實驗。

橡皮筋有彈性的原因是雙硫鍵構成的交叉鏈結，所以我想橡皮筋也可以展示選修化學中有機化合物單元的交聯作用(crosslink)。目前展示交聯作用的實驗有用聚乙烯醇與硼砂製作彈性球²或用高吸水性樹脂加水做成的水凝膠³。兩者共同的缺點是若排入水管易造成堵塞，在綠色化學原則中低毒原則方面仍有改善空間。為了用橡皮筋實驗替代，我從破壞橡膠分子間交聯的角度出發，搜尋可破壞雙硫鍵的化學藥劑，最後選擇對環境污染較小的冷燙劑作為藥品，並做實驗了解冷燙劑濃度對橡皮筋彈力和交聯程度的影響，最後歸納出適合在課堂上演示實驗的方式，甚至可以簡易的在家操作。

貳、研究目的

一、改善交聯作用演示實驗

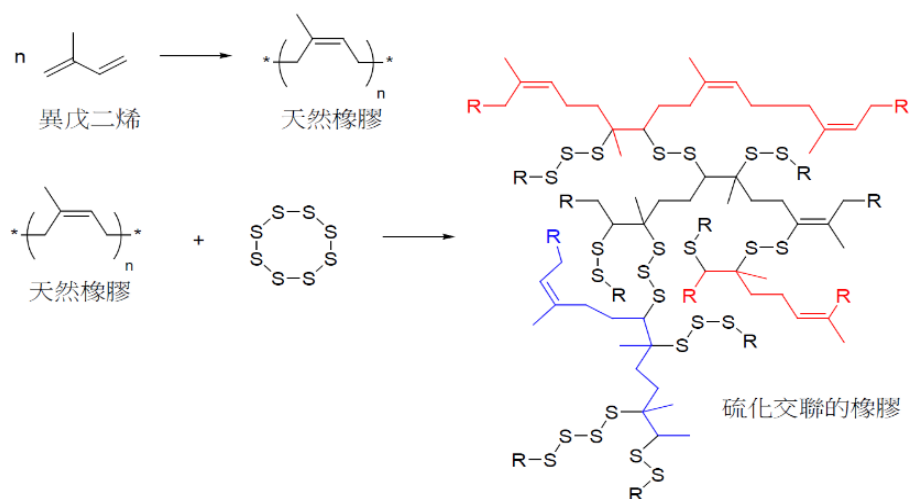
目前高中課程尚未有交聯作用實驗，但已有需多相關實驗可展示交聯作用，其簡介和對應缺點如下所示：



圖一、交聯作用演示實驗和缺點(研究者繪製)

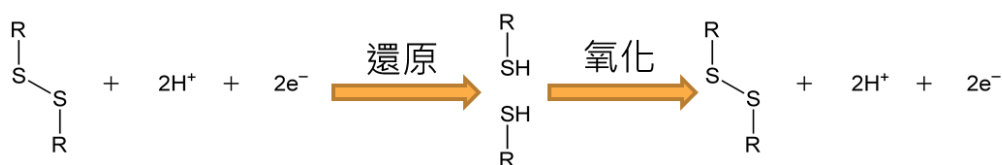
為改善以上實驗缺點，本研究用冷燙劑的第一劑和第二劑作為使交叉鏈結破壞和再生的藥品，並且透過分析藥劑處理前後彈性的差異來了解交聯作用對彈性的影響，進而用溶脹實驗驗證冷燙劑處理前後橡皮筋的交叉鏈結密度的改變是否符合：

(一)、探討橡皮筋經氧化劑和還原劑處理前後交聯的差異：冷燙劑的第一劑是還原劑，使雙硫鍵斷裂，交叉鏈結減少；第二劑則是氧化劑，使分子間的雙硫鍵重新形成，交叉鏈結增加，如下圖二、三所示。本研究中先將橡皮筋浸泡在不同濃度的冷燙劑中，再比較浸泡前後懸掛重物時彈性的差異，並分析冷燙劑濃度對實驗結果的影響。實驗使用的冷燙劑可以透過稀釋而重複使用，最後再統一排放，而本研究也探討冷燙劑和橡皮筋能重複用多少次。本實驗符合綠色化學原則：防廢、簡潔。



圖二、橡膠的聚合和交聯作用。

(取自 <https://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=52090>)



冷燙劑	第一劑	第二劑
屬性	還原劑	氧化劑
雙硫鍵	破壞	形成
交叉鏈結	減少	增加
彈性	下降	上升

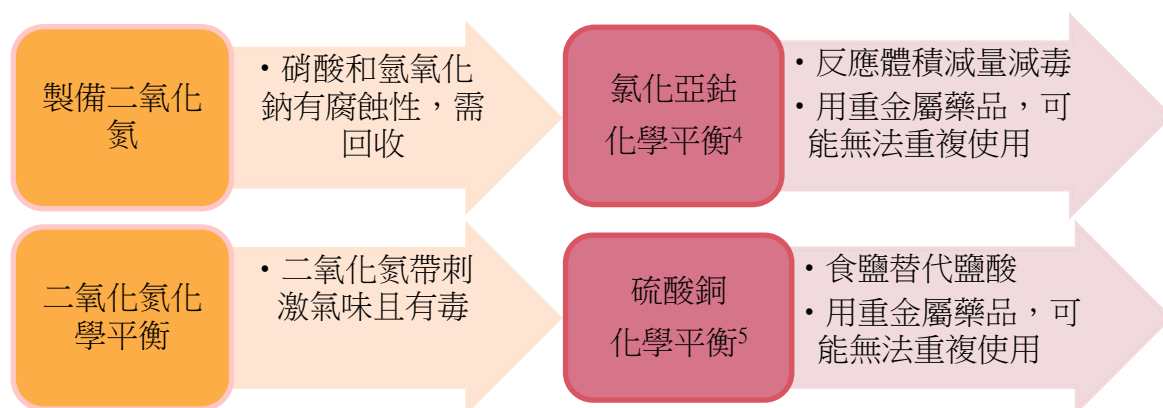
圖三、冷燙劑一二劑特性整理表(研究者繪製)

(二)、溶脹實驗探討橡皮筋經氧化劑和還原劑處理前後交聯密度的改變：為驗證浸泡冷燙劑後橡皮筋的交聯密度改變，且要得知改變程度，本研究透過溶脹實驗測量橡皮筋經氧化劑和還原劑處理後交聯密度的改變。本次溶脹實驗使用的有機溶劑

是酒精，可重複使用。本實驗符合綠色化學原則：防廢、簡潔、再生。

二、改善勒沙特列原理演示實驗

高中課程中勒沙特列原理演示實驗和其對應缺點如下圖四所示：



圖四、勒沙特列原理演示實驗和缺點(研究者繪製)

為改善上述實驗缺點並清楚展示勒沙特列原理，本研究用橡皮筋作為反應物，以溫度或施外力作為使化學平衡移動的變因，就以下二面向實驗：

(一)、探討熱對橡皮筋彈力的影響：透過用吹風機加熱吊掛重物的橡皮筋，並記錄電子秤的讀值，藉由分析實驗數據了解熱對橡皮筋彈性的影響。本研究可展示吸熱放熱的可逆反應、反應熵和勒沙特列原理的概念，且橡皮筋回復室溫後可重複利用。本實驗符合綠色化學原則：防廢、簡潔、再生。

(二)、探討橡皮筋在拉伸和螺旋情況下溫度的改變：拉伸橡皮筋時橡皮筋有溫度變化，此稱為彈熱效應 (Gough-Joule effect)⁶。有科學家利用此原理將鎳鈦記憶合金螺旋扭曲後再鬆開，製作成可以使溫度下降的裝置⁷。本研究中以簡單方式代替此實驗。本研究探討拉伸（分為單條和十條）、螺旋、超螺旋四種方式處理橡皮筋並鬆開後橡皮筋溫度下降程度的差異，藉以了解不同處理方式對彈熱效應的影響，並找出可讓溫度降幅最大的處理方式。本實驗符合綠色化學原則：防廢、簡潔、再生。

參、研究設備及器材

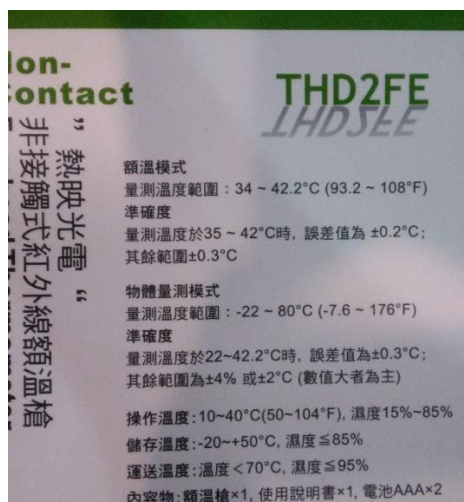
一、橡皮筋經氧化劑和還原劑處理後交聯的差異：冷燙劑、小橡皮筋(波拉貝爾牌，長度為 6.80 公分，粗細為 0.15 公分)、大橡皮筋(徠福牌，長度為 11.50 公分，粗細為 0.31 公分)、樣品瓶、電子秤、支架、固定夾、重物（牛奶瓶，194.91 gw）

二、溶脹實驗：25 mL 量筒、滴管、酒精、兩種橡皮筋

三、熱對橡皮筋彈力影響：小橡皮筋(波拉貝爾牌)、大橡皮筋(徠福牌)、電子秤、吹風

機、溫度計、支架、固定夾、計時器、重物（牛奶瓶，194.91 gw）、相機

四、橡皮筋在拉伸和螺旋情況下溫度的改變：小橡皮筋(波拉貝爾牌)、大橡皮筋(徠福牌)、紅外線感測溫度計(熱映光電牌，量測溫度範圍是-22 到 80 °C，誤差±0.3 °C，詳細內容參見圖三)



圖五、紅外線溫度計包裝說明

六、實驗用的冷燙劑是法拉西施牌珍珠乳冷燙液，第一劑成分是 11.6%巰基乙酸銨，第二劑成分是 7.0%溴酸鈉，以下是藥品性質表：

表一、藥品性質表

藥品	巰基乙酸銨	溴酸鈉
化學式	$\text{HSCH}_2\text{CO}_2\text{NH}_4$	NaBrO_3
CAS號	5421-46-5	7789-38-0
莫耳質量	109.15 g/mol	150.892 g/mol
熔點	無資料	381°C
沸點	無資料	1390°C
密度	1.190 g/cm ³	3.339 g/cm ³
外觀	無色透明液體	白色固體
溶解度	無資料	27.5 g/100mL(水)
避免物質	強氧化劑	砷、碳、金屬、有機物、金屬硫化物、磷或

		硫、酸、還原劑、可燃物
緊急處理	滅火：水霧、二氧化碳 吸入：移至空氣流通處，並送醫。 皮膚、眼睛接觸：用大量清水沖洗並送醫	滅火：水霧。此物為氧化劑，會增加燃燒速率，使可燃物自燃。 吸入：移至空氣流通處，並送醫。 皮膚、眼睛接觸：用大量清水沖洗並送醫
是否需回收	否	

參考資料：https://www.chemblink.com/MSDS/MSDSFiles/5421-46-5_Sigma-Aldrich.pdf 和
<https://reurl.cc/8GrEZ7>

肆、研究過程或方法

一、橡皮筋經氧化劑和還原劑處理後交聯的差異：

(一)、原本實驗：

1. 橡皮筋一端繫於重物，另一端繫於支架。讓重物(194.91 gw) 放在天秤上，紀錄未泡冷燙劑時的天秤讀數(如下圖六)。並且在裝置上做記號，以控制變因。
2. 戴上手套，將冷燙劑的第一劑 10mL 加入樣品瓶。
3. 用鑷子將橡皮筋加入樣品瓶(如下圖七)，等 15 分鐘（燙髮所需時間長度）。
4. 取出橡皮筋，用冷水沖洗乾淨，擦乾。把樣品瓶中第一劑倒出並清洗乾淨。
5. 將橡皮筋連接到重物上，並掛在支架做記號的位置處，測量並紀錄第一劑浸泡完的橡皮筋的彈力差異。註: 彈力=牛奶瓶重量-天秤讀數
6. 將冷燙劑的第二劑 10mL 加入樣品瓶。
7. 用鑷子將橡皮筋加入樣品瓶，等待 15 分鐘。
8. 取出橡皮筋，用冷水沖洗乾淨，擦乾。把樣品瓶中第二劑倒出並清洗乾淨。
9. 將橡皮筋連接到重物上，並掛在支架做記號的位置處，測量並紀錄第二劑浸泡完的橡皮筋的彈力差異。

10. 重複步驟 1 到 9，但把小橡皮筋換成大橡皮筋做。

(二)、減量減廢優化實驗：

1. 重複實驗(一)，但將冷燙劑濃度稀釋為 75%、50%、25%、10%，並重複各實驗五次，對比其和實驗一實驗結果的差異，以找出適合在課堂上示範進行破壞交叉鏈結後對橡皮筋彈力的影響的實驗的且毒性較低的濃度。
2. 重複實驗(一)，但燙髮劑的一、二劑重複用來浸泡，分為泡 1、2、3、4、5 次，每次泡完的橡皮筋再測彈力差異。每次浸泡的燙髮劑濃度控制為 25%。
3. 重複實驗(一)，但同一條橡皮筋重複浸泡燙髮劑多次，分為泡 1、2、3、4、5 次，每次泡完的橡皮筋再測彈力差異。每次浸泡的燙髮劑濃度控制為 25%。



圖六、實驗裝置圖



圖七、重複使用數次的冷燙劑(左為第一劑，右為第二劑)

二、溶脹實驗：

(一)、原本實驗

1. 將 3 條小橡皮筋用排酒精法測量體積。
2. 在量筒中用滴管加入 5 mL 酒精，並在裡面加入 9 條小橡皮筋（確保小橡皮筋完全浸入酒精液面下）後，靜置 20 分鐘。
3. 取出小橡皮筋並用排酒精法測體積，再計算體積的增加百分比。
4. 重複步驟 1 到 3，但是將 9 條小橡皮筋換成 3 條大橡皮筋來做。

(二)、減量減廢優化實驗

1. 重複上述步驟，但換成用實驗三加完第一劑和第二劑的橡皮筋做。
2. 重複上述步驟，但是冷燙劑換成 75%、50%、25%、10%。

三、熱對橡皮筋彈力影響：

1. 將 3 條橡皮筋綁在一起，其中一端固定在重物上。
2. 將橡皮筋一端固定在支架上，使重物懸空。調整支架上固定夾位置，讓重物放在電子天秤上。（如實驗一的裝置）
3. 用吹風機對著橡皮筋吹熱風（78 °C），同時計時，每 5 秒紀錄一次數據，紀錄到 45 秒停止。紀錄的方式是透過相機錄影，之後再看影片紀錄。

四、橡皮筋在拉伸和螺旋情況下溫度的改變：

(一)、單條橡皮筋在拉伸情況下溫度的改變

1. 用紅外線感測溫度計測量小橡皮筋原本溫度。
2. 將小橡皮筋拉長至 30 公分後測量溫度。
3. 連續拉長 10 秒後，測量鬆開瞬間小橡皮筋的溫度。（統一放在桌子上測量，以避免手的熱傳導）
4. 重複步驟 1 到 3，但將小橡皮筋換成大橡皮筋做。

(二)、橡皮筋在螺旋和超螺旋情況下溫度的改變

1. 用紅外線感測溫度計測量小橡皮筋原本溫度。
2. 將橡皮筋捲成雙股螺旋狀（抓住橡皮筋兩端扭轉）20 圈，測量其溫度。
3. 快速鬆開橡皮筋使其掉到桌上，並立即測量其溫度。
4. 重新把橡皮筋捲成超螺旋狀（兩手各拿橡皮筋的一端並拉開，拇指摸著橡皮

筋，在食指上搓動。放開之後也不會恢復原狀）20 圈，測量其溫度。

5.快速鬆開橡皮筋使其掉到桌上，並立即測量其溫度。

6.重複步驟 1 到 5，但將小橡皮筋換成大橡皮筋、泡冷燙劑第一劑的橡皮筋。

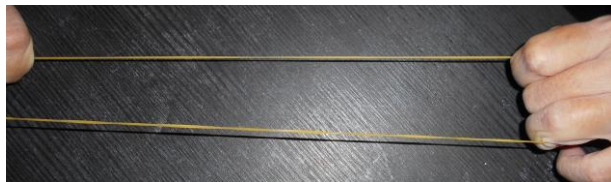
註：螺旋和超螺旋示意圖和實驗操作過程圖如下：



圖八、螺旋示意圖



圖九、超螺旋示意圖



圖十、拉開橡皮筋

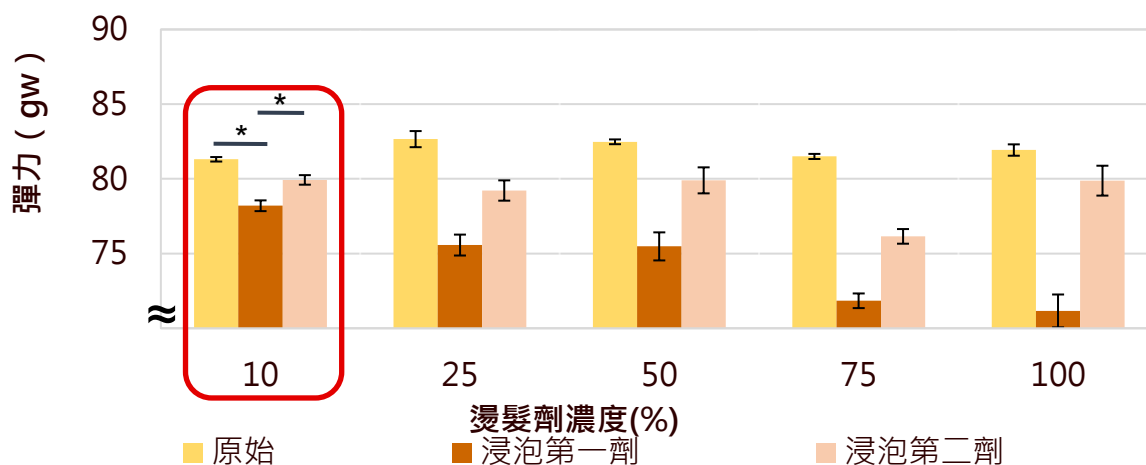


圖十一、測量橡皮筋溫度

伍、研究結果

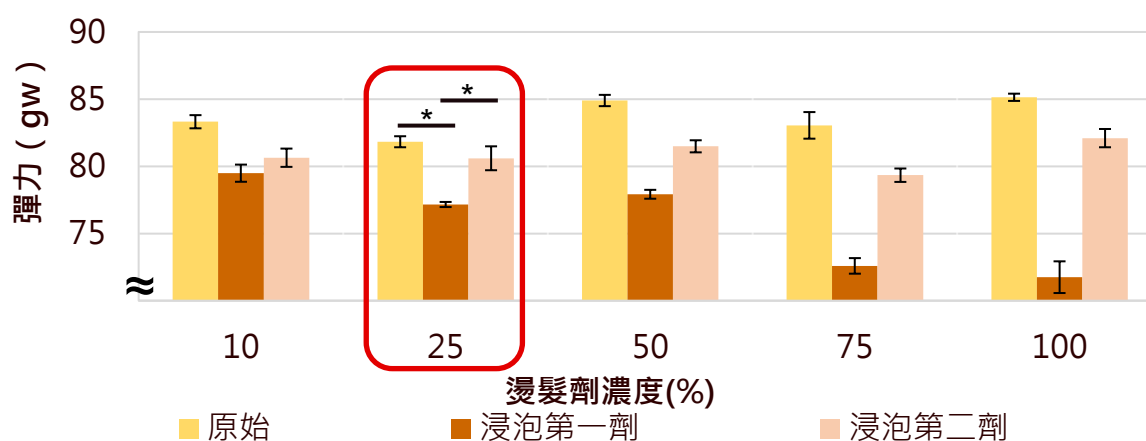
一、橡皮筋經氧化劑和還原劑處理後交聯的差異：

小橡皮筋彈力和浸泡燙髮劑濃度的關係圖



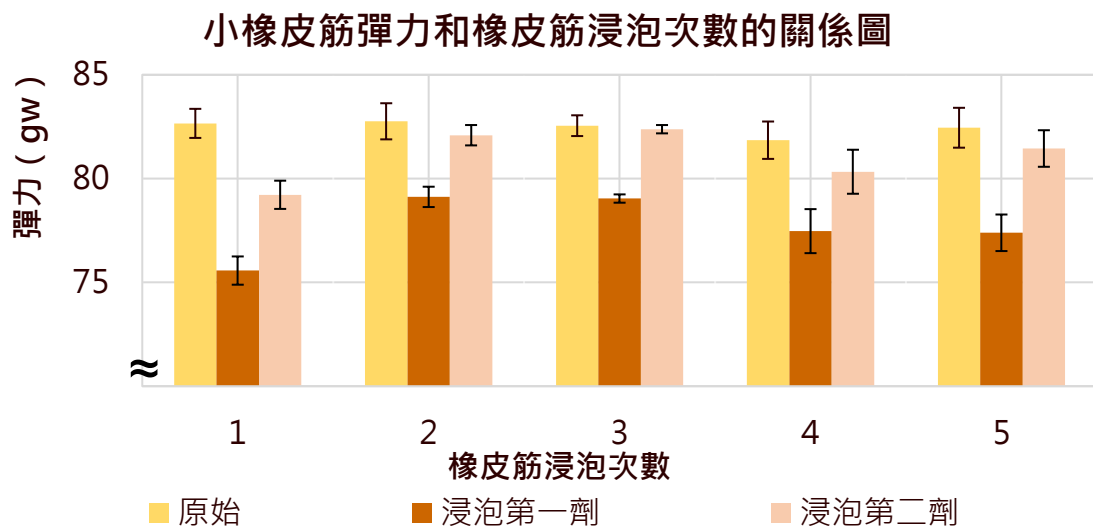
圖十二、小橡皮筋懸掛重物重量和浸泡冷燙劑濃度的關係圖

大橡皮筋彈力和浸泡燙髮劑濃度的關係圖

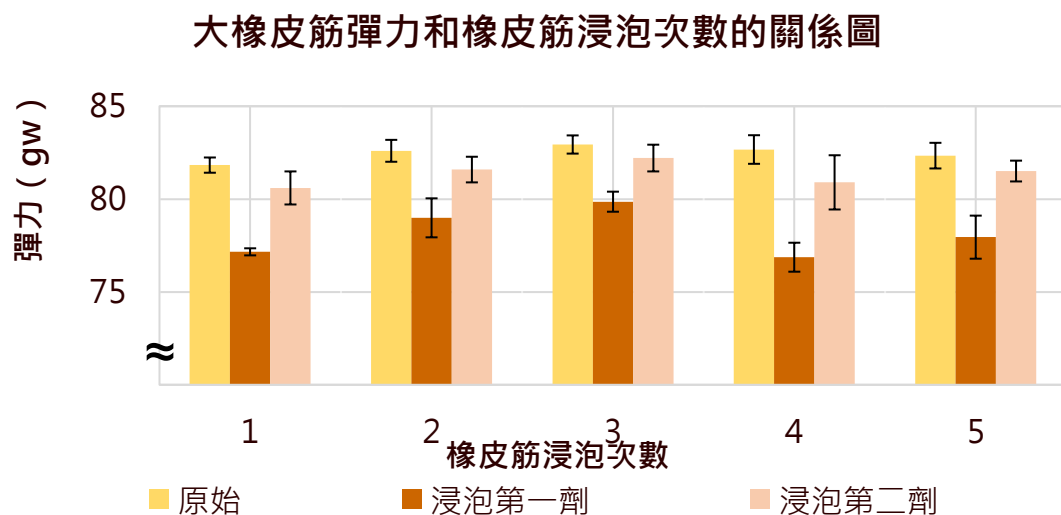


圖十三、大橡皮筋懸掛重物重量和浸泡冷燙劑濃度的關係圖

由圖十二、十三可知，浸泡第一劑後橡皮筋彈力下降，且燙髮劑濃度越高，下降幅度越大；而浸泡第二劑後橡皮筋彈力上升，且燙髮劑濃度越高，上升越高，但無法恢復到原本的彈力。圖中用紅色框框圈起 25%燙髮劑是因為此濃度操作實驗毒性最低且實驗結果之間仍有顯著差異，而 10%燙髮劑組則是大橡皮筋的實驗結果之間信賴區間重疊。這就是為何之後燙髮劑和橡皮筋重複浸泡實驗要用 25%燙髮劑為控制變因的原因。

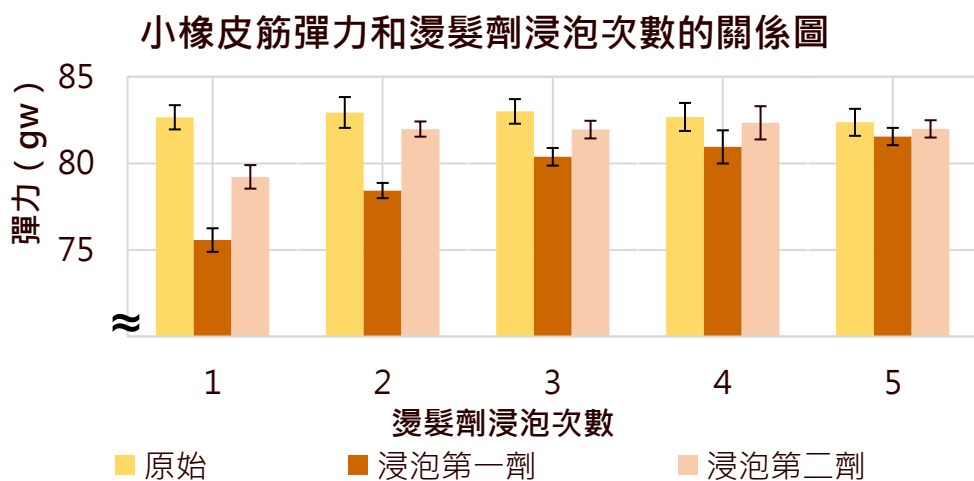


圖十四、小橡皮筋彈力和橡皮筋浸泡次數的關係圖

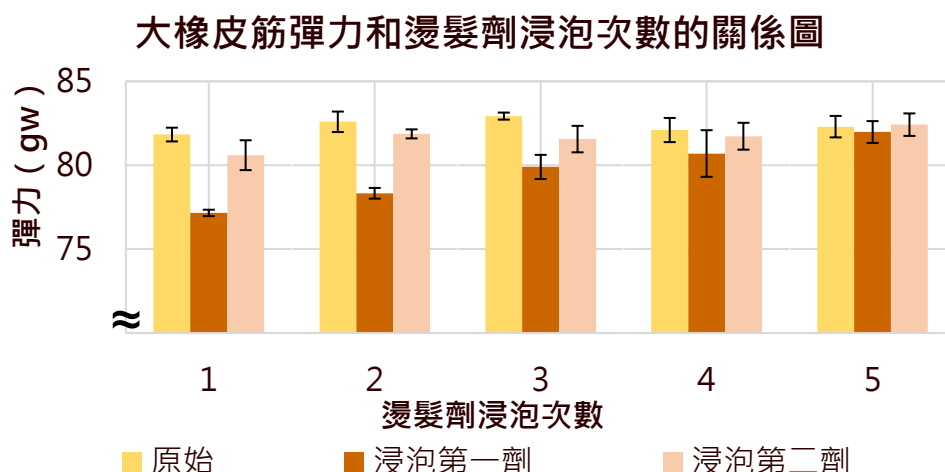


圖十五、大橡皮筋彈力和橡皮筋浸泡次數的關係圖

由圖十四、十五可知橡皮筋重複浸泡越多次，浸泡第一劑的彈力下降和浸泡第二劑的彈力上升越少，但此規律並不明顯，而且浸泡五次後實驗結果間仍有顯著差異。



圖十六、小橡皮筋彈力和燙髮劑浸泡次數的關係圖



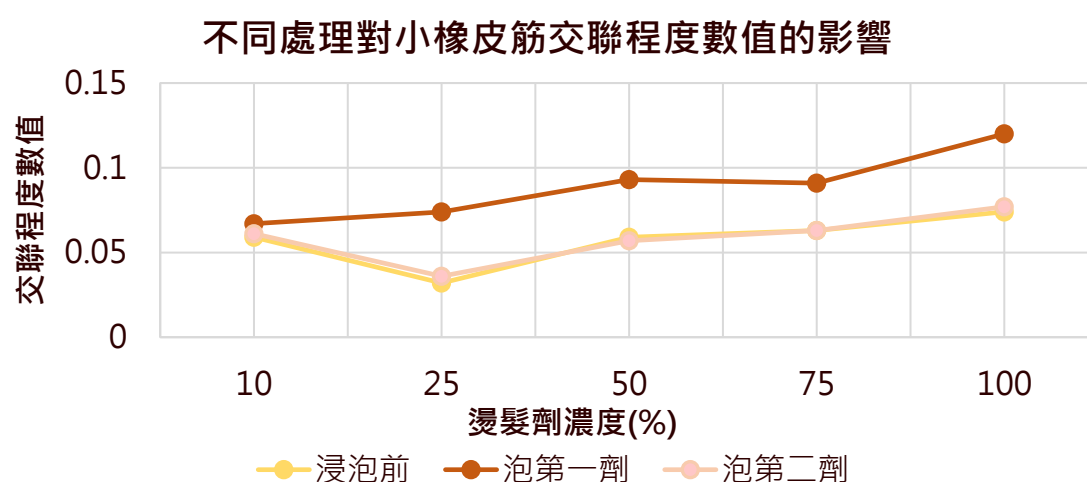
圖十七、大橡皮筋彈力和燙髮劑浸泡次數的關係圖

由圖十六、十七可知燙髮劑重複泡越多次，泡第一劑的彈力下降和泡第二劑的彈力上升越少，而且泡三次以上，實驗結果間就無顯著差異，信賴區間重疊。而以上六圖中每個長條的樣本數是 5，誤差算法是 95%CI，公式為 $1.96 \times \frac{SD}{\sqrt{n}}$ ， $SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$ ， x_i 為資料觀測值， \bar{x} 為平均值， n 為觀測值個數。

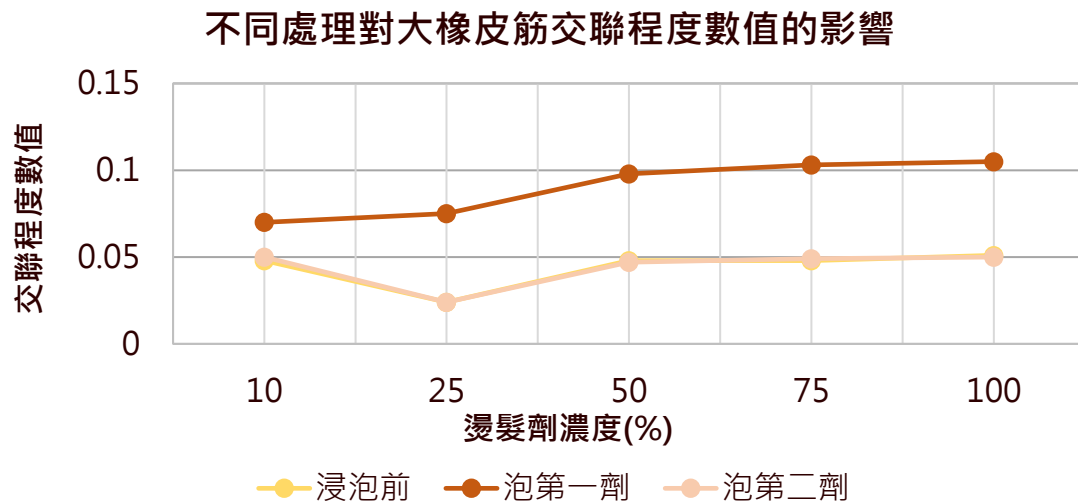
二、溶脹實驗：

概念說明:當橡皮筋交聯程度越大，酒精越不容易滲入橡皮筋內部造成體積膨脹，故

本研究以 $\frac{\text{溶脹後體積} - \text{原本體積}}{\text{原本體積}}$ 的數值代表交聯程度，數值越大代表交聯程度越低。



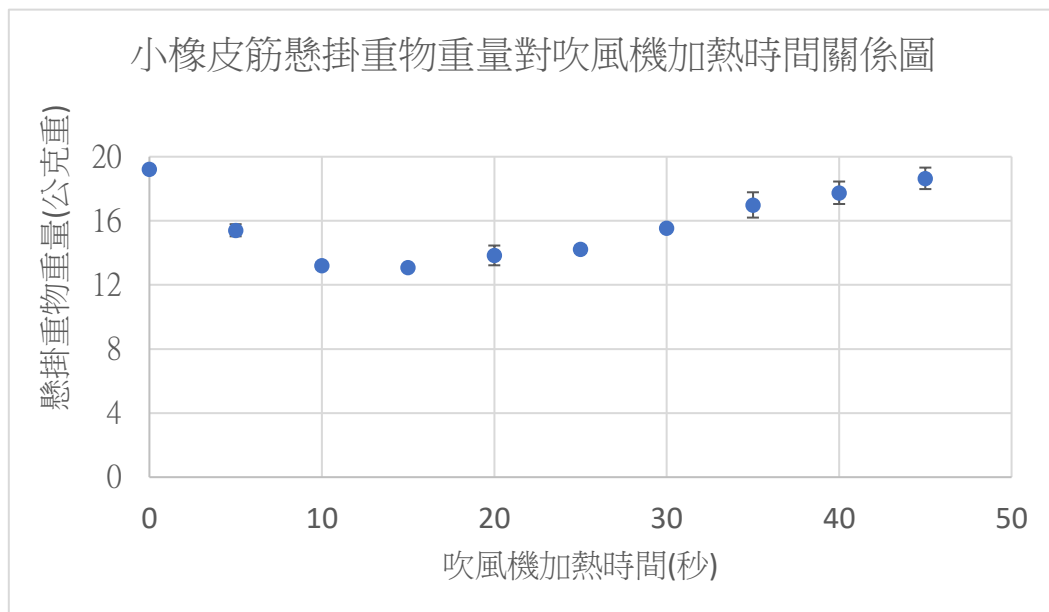
圖十八、不同處理對小橡皮筋交聯程度的影響圖



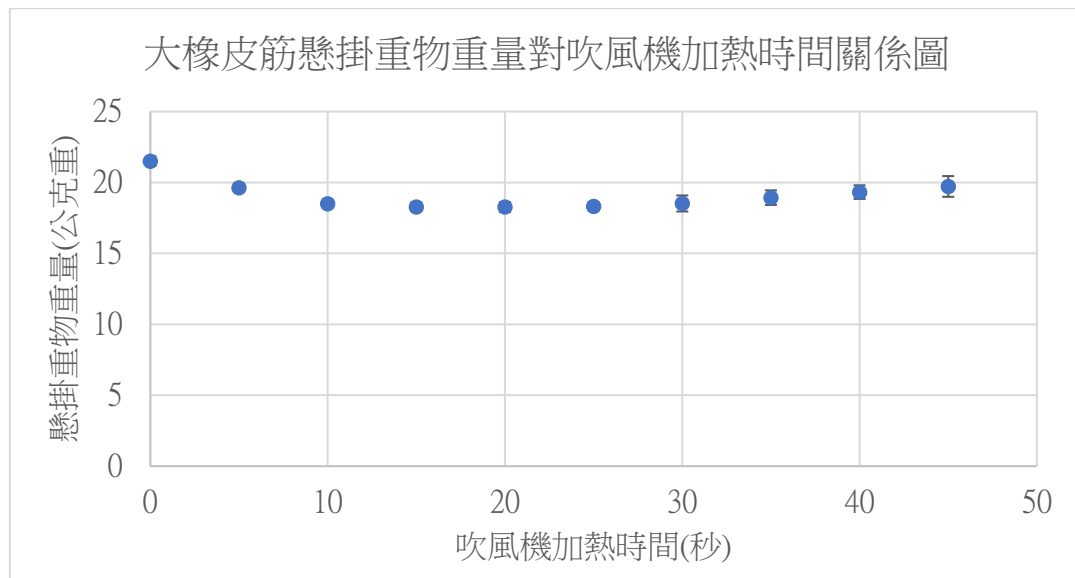
圖十九、不同處理對大橡皮筋交聯程度的影響圖

由圖十八和十九可知橡皮筋浸泡第一劑後，交聯程度數值上升，代表交聯程度下降，而且燙髮劑濃度越高，交聯程度數值上升數值越高。浸泡第二劑後，交聯程度數值下降，代表交聯程度上升，且每組都有回復到初始的交聯程度附近。

三、熱對橡皮筋彈力的影響：



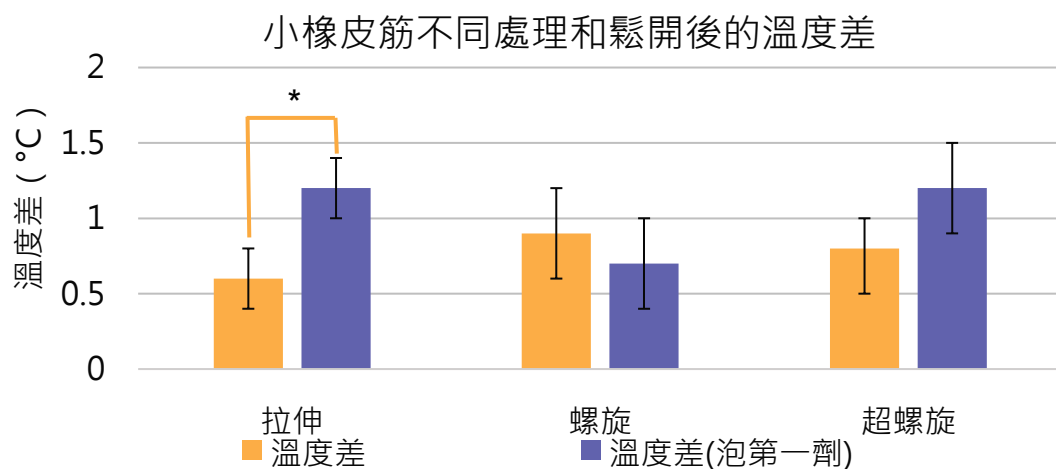
圖二十、小橡皮筋懸掛重物重量對吹風機加熱時間關係圖



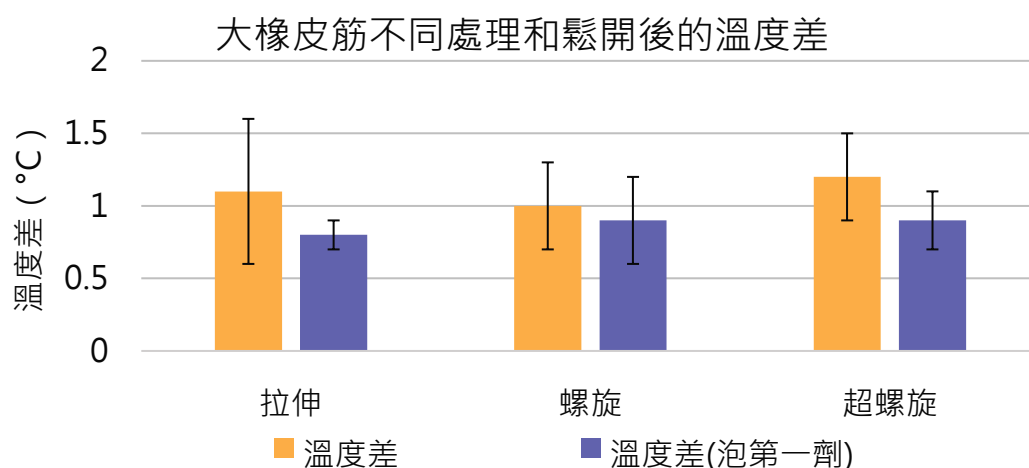
圖二十一、大橡皮筋懸掛重物重量對吹風機加熱時間關係圖

由圖二十和二十一可知，剛開始加熱的前 15 到 20 秒重量都持續遞減，代表橡皮筋持續縮短，彈力持續上升；25 到 30 秒後重量就慢慢回升，代表橡皮筋持續伸長，彈力持續下降，但在 45 秒時都沒回到原本重量。加熱小橡皮筋和大橡皮筋時，雖然一開始電子天秤顯示重量皆降低，但小橡皮筋組下降較多，平均有 6.6gw，而大橡皮筋組只有 3.2 gw。而最後 45 秒時兩組個別的平均重量都回升至低於初始值 1.8 gw 左右。兩圖中每個數據點的樣本數為 3，誤差算法是 95%CI，公式為 $1.96 \times \frac{SD}{\sqrt{n}}$ ， $SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$ ， x_i 為資料觀測值， \bar{x} 為平均值，n 為觀測值個數。

四、橡皮筋在拉伸和螺旋情況下溫度的改變：



圖二十二、小橡皮筋不同處理時捲緊和鬆開後的溫度差長條圖



圖二十三、大橡皮筋不同處理時捲緊和鬆開後的溫度差長條圖

由圖二十二和二十三可知，螺旋和超螺旋的降溫效果較單條拉伸組好，但是沒有顯著差異，而浸泡燙髮劑後實驗結果其實沒有顯著差異，因為橘色長條的信賴區間大都和紫色的重疊，除單條小橡皮筋組拉伸和縮短的有顯著差異之外。上兩圖每個長條的數據是以拉長或螺旋後再放鬆的溫度差計算，樣本數為 5，誤差算法是 95%CI，公式為

$$1.96 \times \frac{SD}{\sqrt{n}}, SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, x_i \text{ 為資料觀測值}, \bar{x} \text{ 為平均值}, n \text{ 為觀測值個數}。$$

陸、討論

一、橡皮筋經氧化劑和還原劑處理後交聯的差異：(參考圖十二、十三；減量減毒優化實驗參考圖十四-十七)

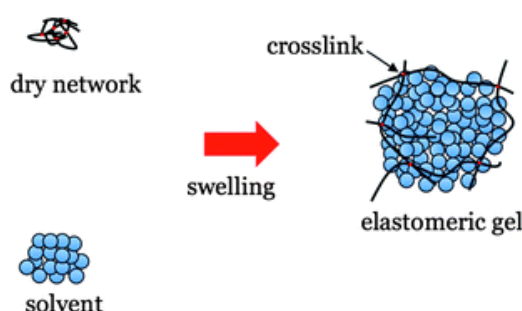
整體來說，冷燙劑的第一劑濃度越高，浸泡後橡皮筋彈力越低；且冷燙劑的第二劑的濃度越高，浸泡後橡皮筋的彈力回復越高。雖然浸泡第二劑後橡皮筋彈力會回復，但無法恢復至原本水平。由此可知冷燙劑中第一劑可破壞雙硫鍵，此時橡皮筋中的分子鏈之間的交叉鏈結被破壞，導致彈性下降，於是電子天秤上顯示的重量較重。之後橡皮筋浸泡第二劑的溴酸鈉後重新形成交叉鏈結，於是彈性上升，但沒有回到原本的彈性。而大橡皮筋在浸泡完第二劑後比小橡皮筋恢復成較接近原本的彈性。

綜整本實驗，橡皮筋經氧化劑和還原劑處理後性質的差異若要在課堂上演示實驗，且毒性較低的濃度為 25%，因浸泡 10%冷燙劑組的彈力改變無顯著差異。此外，就重複使用層面而言，燙髮劑和橡皮筋重複使用越多次，橡皮筋的彈力皆變化越小，且燙髮

劑重複用 3 次、橡皮筋重複用 5 次時彈力改變仍有顯著差異，證明本實驗適合重複使用，符合防廢原則。

二、溶脹實驗：(參考圖十八、十九)

分子交聯的網狀結構能吸收溶劑而脹大，此現象稱為溶脹作用(如下圖二十四)。溶脹時體積只脹到一固定值，稱為最大溶脹。最大溶脹體積和交聯密度有關，因吸收溶劑時，交聯網絡抵抗膨脹而將溶劑擠出網外，所以當溶劑進入壓力與交聯網絡彈性收縮力相等時，即達溶脹平衡。本研究用溶脹平衡原理測得交聯密度，進而分析浸泡冷燙劑後橡皮筋交聯密度的改變。



圖二十四、溶脹作用示意圖

(取自 Jianyu Li, Yuhang Hu, Joost J. Vlassak & Zhigang Suo. (2012). Experimental determination of equations of state for ideal elastomeric gels. *Soft Matter*. 8, 8121-8128.)

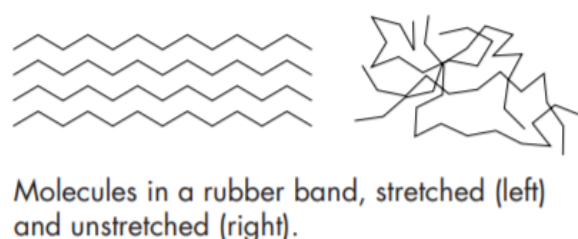
整體來說，第一劑濃度越高，浸泡後測得的交聯程度數值越高，代表交聯密度越低。而浸泡第二劑後交聯程度數值會回復到初始值附近。由實驗結果可知第一劑破壞雙硫鍵，故浸泡後交聯密度下降，最大溶脹體積上升；第二劑使交叉鏈結重新形成，故浸泡後交聯密度會上升，最大溶脹體積下降。本實驗可進一步驗證浸泡冷燙劑各劑後交聯密度的改變，且實驗材料簡單。但因本實驗操作較耗時，不建議課堂示範。

三、熱對橡皮筋彈力影響：(參考圖二十、二十一)

由實驗結果可知，橡皮筋的收縮是吸熱反應。簡單用勒沙特列原理判斷，加熱橡皮筋時，平衡系統會傾向抵銷此因素的方向移動，也就是反應會往吸熱反應的方向走，然而為何橡皮筋會縮短則須更深入的解釋。

更深入的解釋可根據吉布斯自由能公式 $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$ 預期：若加熱橡皮筋，懸掛重物

重量就會因橡皮筋縮短而不斷減少，但有極值，因橡皮筋原本是拉長狀態，變回縮短狀態是亂度增加（ $\Delta S > 0$ ）的過程，而且過程中 ΔH 也是正值，因此 ΔG 一開始是負值，之後因 ΔH 不斷上升，但橡皮筋溫度（ T ）上升幅度不大，使 $\Delta H - T\Delta S > 0$ ，導致縮短反應自發傾向變小，之後縮短的橡皮筋因為重物重量而向下拉伸，所以重量在 15 到 20 秒間達最低點後就會慢慢回升。而為何橡皮筋變回縮短狀態是亂度增加呢？從分子觀點來看，拉伸狀態的橡皮筋分子排列整齊，亂度較低；縮短狀態的則亂度較高（如圖二十五）。由此可歸納，加熱時橡皮筋會縮短，亂度增加，但是到一定值就不繼續縮短。



圖二十五、橡皮筋不同狀態的分子排列情形

(取自 Warren Hirsch.(2002).Rubber Bands, Free Energy, and Le Châtelier's Principle. *Journal of Chemical Education* 79(2), 200A-B.)

四、橡皮筋在拉伸和螺旋情況下溫度的改變：(參考圖二十二、二十三)

(一)、單條橡皮筋拉伸和縮短的比較

由實驗結果可知橡皮筋拉長時溫度升高，縮短時溫度降低。大橡皮筋和小橡皮筋拉長時溫度平均升高 0.3 到 0.4℃，無顯著差異；而縮短時大橡皮筋降溫較顯著，平均降 0.7℃，小橡皮筋只有 0.3℃。如果比較拉長後和縮短時的溫度差，大橡皮筋平均降 1.1℃，小橡皮筋平均降 0.7℃。

(二)、橡皮筋螺旋和超螺旋比較

由實驗結果可知，將橡皮筋捲成螺旋和超螺旋後再鬆開都會有降溫效果，且降溫幅度相當，平均都降 0.9 到 1.3℃ 之間。

(三)、整體降溫幅度比較

捲成螺旋和超螺旋再縮短 > 單條橡皮筋拉伸後再縮短

(四)、浸泡冷燙劑的影響

各組溫度差無明顯差距，僅單條小橡皮筋組上升較顯著。由此可見浸泡冷燙劑

後，橡皮筋的彈熱效應沒有明顯變化。

本實驗的原理是勒沙特列原理和彈熱效應，當橡皮筋拉長時，溫度上升，而當橡皮筋被放開時，平衡系統傾向抵銷此因素的方向移動，因此橡皮筋縮短，溫度下降。本實驗和實驗三的關係十分密切，實驗三是改變橡皮筋溫度使其長度改變；本實驗則是改變橡皮筋長度而使其溫度改變，透過這兩個實驗，可以清楚展示勒沙特列原理，且比起傳統的二氧化氮、氯化亞鈷或硫酸銅的實驗更加符合防廢、簡潔、再生原則，更沒有使用任何有害藥品。

柒、結論

- 一、橡皮筋第一劑濃度越高，浸泡後橡皮筋彈力越低；且第二劑濃度越高，浸泡後橡皮筋的彈力回復越高。雖然浸泡第二劑後橡皮筋彈力會回復，但無法恢復至原本水平。由此可知第一劑使交聯密度下降，而第二劑使交聯密度上升。
- 二、適合在課堂上演示冷燙劑對橡皮筋影響的實驗且毒性較低的濃度為 25%，且燙髮劑重複使用 3 次和橡皮筋重複使用 5 次以內仍有顯著效果。
- 三、第一劑濃度越高，浸泡後測得的交聯程度數值越高，代表交聯程度越低。而浸泡第二劑後交聯程度數值回到初始值附近。此可驗證浸泡冷燙劑後交聯程度的改變。
- 四、加熱橡皮筋的前 15 到 20 秒其懸掛重物重量會遞減，到了 25 到 30 秒後重量慢慢回升，但 45 秒時沒有回到原本的重量。由此可驗證橡皮筋的收縮是吸熱反應。
- 六、橡皮筋拉長或捲成螺旋或超螺旋時溫度升高，鬆開時溫度降低。整體降溫幅度排名為捲成螺旋和超螺旋後縮短>單條橡皮筋拉伸後縮短。
- 七、本研究的實驗可演示交聯作用和勒沙特列原理，且符合綠色化學原則中防廢、簡潔、再生原則。

捌、參考資料及其他

一、參考資料：

- 1.Warren Hirsch.(2002).Rubber Bands, Free Energy, and Le Châtelier's Principle. *Journal of Chemical Education* 79(2), 200A-B.
- 2.楊水平(2011)。變態的膠水---聚乙烯醇與硼砂的交聯作用。2020 年 9 月 10 日，取自

中學化學示範實驗網站 <http://blog.ncue.edu.tw/yangsp/doc/26876>

- 3.周芳妃(2015)。彩幻珠實驗—認識高吸水性聚合物。科學研習，54，31-38。
- 4.賴景泓、鄭如芳(2014)。利用氯化亞鈷取代二氧化氮與鉻酸根的化學平衡實驗。取自綠色化學教育網。
- 5.游喻婷、李昱嫻(2014)。勒沙特列原理與平衡移動。取自綠色化學教育網。
- 6.Gough – Joule effect。2020 年 8 月 9 日，取自
https://en.wikipedia.org/wiki/Gough%E2%80%93Joule_effect
- 7.RunWang1&Shaoli Fang et al.(2019). Torsional refrigeration by twisted, coiled, and supercoiled fibers. *Science*.366(6462), 216-221.
- 8.Jianyu Li, Yuhang Hu, Joost J. Vlassak & Zhigang Suo. (2012). Experimental determination of equations of state for ideal elastomeric gels. *Soft Matter*. 8, 8121-8128.
- 9.童世煌(2012)。高分子材料的流動性與彈性。科學發展，476，16-21。
- 10.完美的聚合物晶體。2020 年 8 月 9 日，取自
<https://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=52090>

二、原始數據：

(一)、橡皮筋經氧化劑和還原劑處理後交聯的差異：

表二、浸泡未稀釋冷燙劑的實驗結果

組別	小橡皮筋			大橡皮筋		
狀態	原本重量(gw)	泡第一劑後重量(gw)	泡第二劑後重量(gw)	原本重量(gw)	泡第一劑後重量(gw)	泡第二劑後重量(gw)
第一次	79.88	90.43	81.78	75.39	86.90	77.83
第二次	78.90	91.15	79.90	75.89	89.83	79.87
第三次	78.92	89.72	82.10	75.96	89.58	78.89
第四次	78.90	87.93	79.92	75.96	89.97	79.43
第五次	78.89	90.11	82.04	76.23	90.13	78.65
平均	79.10	89.87	81.15	75.89	89.28	78.93
標準差	0.44	1.20	1.14	0.31	1.35	0.78

表三、浸泡 75%冷燙劑的實驗結果

組別	小橡皮筋			大橡皮筋		
狀態	原本重量(gw)	泡第一劑後重量(gw)	泡第二劑後重量(gw)	原本重量(gw)	泡第一劑後重量(gw)	泡第二劑後重量(gw)
第一次	79.28	88.52	84.71	78.82	89.32	81.57
第二次	79.71	88.73	84.01	78.42	87.58	80.89
第三次	79.45	89.34	85.48	78.73	88.03	81.74
第四次	79.74	89.43	84.96	76.07	88.53	82.48
第五次	79.47	89.92	85.22	77.84	88.72	81.75
平均	79.53	89.19	84.88	77.98	88.44	81.69
標準差	0.19	0.56	0.56	1.13	0.66	0.57

表四、浸泡 50%冷燙劑的實驗結果

組別	小橡皮筋			大橡皮筋		
狀態	原本重量(gw)	泡第一劑後重量(gw)	泡第二劑後重量(gw)	原本重量(gw)	泡第一劑後重量(gw)	泡第二劑後重量(gw)
第一次	78.71	86.68	80.29	76.78	83.24	79.75
第二次	78.23	84.34	80.41	75.63	83.08	79.00
第三次	78.64	85.49	82.54	76.48	83.39	79.65
第四次	78.61	84.67	80.61	75.95	82.46	79.07
第五次	78.58	86.59	81.78	75.83	83.36	80.24
平均	78.55	85.55	81.13	76.13	83.11	79.54
標準差	0.19	1.07	0.99	0.48	0.38	0.51

表五、浸泡 25%冷燙劑的實驗結果

組別	小橡皮筋			大橡皮筋		
狀態	原本重量(gw)	泡第一劑後重量(gw)	泡第二劑後重量(gw)	原本重量(gw)	泡第一劑後重量(gw)	泡第二劑後重量(gw)

第一次	78.41	84.99	80.76	79.79	83.58	81.23
第二次	77.36	85.20	81.62	78.87	83.72	79.86
第三次	78.89	86.85	82.75	79.03	84.03	79.30
第四次	78.32	84.92	81.53	78.72	84.12	80.04
第五次	78.85	85.35	82.39	79.61	83.89	81.74
平均	78.37	85.46	81.81	79.20	83.87	80.43
標準差	0.62	0.79	0.78	0.47	0.22	1.01

表六、浸泡 10%冷燙劑的實驗結果

組別	小橡皮筋			大橡皮筋		
狀態	原本重量(gw)	泡第一劑後重量(gw)	泡第二劑後重量(gw)	原本重量(gw)	泡第一劑後重量(gw)	泡第二劑後重量(gw)
第一次	79.51	82.30	81.65	77.33	81.63	80.01
第二次	79.57	82.63	80.92	77.80	81.57	79.95
第三次	79.92	83.27	81.08	78.64	82.68	81.55
第四次	79.78	82.74	80.66	77.36	80.77	79.64
第五次	79.80	83.23	81.21	77.41	81.03	80.79
平均	79.72	82.83	81.10	77.71	81.54	80.39
標準差	0.17	0.41	0.37	0.55	0.74	0.78

以下是減量減毒實驗的結果：

表七、橡皮筋重複浸泡二次實驗結果

組別	小橡皮筋			大橡皮筋		
狀態	原本重量(gw)	泡第一劑後重量(gw)	泡第二劑後重量(gw)	原本重量(gw)	泡第一劑後重量(gw)	泡第二劑後重量(gw)
第一次	78.26	82.23	79.01	78.83	82.89	80.03
第二次	77.43	83.31	78.36	77.64	80.78	79.37

第三次	78.10	80.69	79.58	78.56	82.23	80.23
第四次	79.26	81.33	78.39	79.27	83.44	79.34
第五次	78.30	82.01	79.38	77.85	80.84	78.23
平均	78.27	81.91	78.94	78.43	82.04	79.44
標準差	0.59	0.88	0.50	0.61	1.07	0.70

表八、橡皮筋重複浸泡三次實驗結果

組別	小橡皮筋			大橡皮筋		
狀態	原本重量(gw)	泡第一劑後重量(gw)	泡第二劑後重量(gw)	原本重量(gw)	泡第一劑後重量(gw)	泡第二劑後重量(gw)
第一次	78.92	81.10	78.59	78.43	80.54	78.17
第二次	77.63	81.91	78.67	77.24	81.23	77.92
第三次	78.45	82.33	78.65	77.89	80.92	78.69
第四次	78.26	82.04	79.03	78.20	82.17	79.84
第五次	79.14	82.59	78.33	78.71	80.99	79.47
平均	78.48	81.99	78.65	78.09	81.17	78.82
標準差	0.53	0.51	0.22	0.50	0.55	0.74

表九、橡皮筋重複浸泡四次實驗結果

組別	小橡皮筋			大橡皮筋		
狀態	原本重量(gw)	泡第一劑後重量(gw)	泡第二劑後重量(gw)	原本重量(gw)	泡第一劑後重量(gw)	泡第二劑後重量(gw)
第一次	79.28	83.29	81.18	77.97	83.72	78.89
第二次	78.65	82.07	79.81	78.29	84.62	79.82
第三次	79.63	83.92	82.61	79.75	85.31	81.34
第四次	78.45	84.87	79.87	77.36	82.96	78.31
第五次	79.87	83.66	80.02	78.42	84.19	82.31

平均	79.18	83.56	80.70	78.36	84.16	80.13
標準差	0.55	0.91	1.08	0.79	0.80	1.49

表十、橡皮筋重複浸泡五次實驗結果

組別	小橡皮筋			大橡皮筋		
狀態	原本重量(gw)	泡第一劑後重量(gw)	泡第二劑後重量(gw)	原本重量(gw)	泡第一劑後重量(gw)	泡第二劑後重量(gw)
第一次	79.53	84.61	79.99	78.89	83.42	80.03
第二次	78.27	84.92	78.89	79.84	84.53	79.48
第三次	77.62	83.25	78.52	78.44	81.49	80.00
第四次	78.64	83.09	81.07	78.61	84.06	79.63
第五次	78.86	82.31	79.44	77.68	81.92	78.47
平均	78.58	83.64	79.58	78.69	83.08	79.52
標準差	0.63	0.98	0.90	0.70	1.19	0.57

表十一、冷燙劑重複浸泡二次實驗結果

組別	小橡皮筋			大橡皮筋		
狀態	原本重量(gw)	泡第一劑後重量(gw)	泡第二劑後重量(gw)	原本重量(gw)	泡第一劑後重量(gw)	泡第二劑後重量(gw)
第一次	78.45	83.73	78.77	78.65	83.01	78.84
第二次	78.00	83.41	79.31	77.34	83.17	79.62
第三次	79.21	81.16	79.18	78.40	82.46	79.16
第四次	77.13	82.45	79.64	79.24	82.31	79.25
第五次	77.64	82.23	78.35	78.56	82.57	78.95
平均	78.09	82.60	79.05	78.44	82.70	79.16
標準差	0.71	0.91	0.45	0.62	0.33	0.27

表十二、冷燙劑重複浸泡三次實驗結果

組別	小橡皮筋			大橡皮筋		
狀態	原本重量(gw)	泡第一劑後重量(gw)	泡第二劑後重量(gw)	原本重量(gw)	泡第一劑後重量(gw)	泡第二劑後重量(gw)
第一次	76.51	81.63	79.19	77.89	80.67	77.92
第二次	78.33	79.92	78.78	78.08	80.25	79.62
第三次	78.53	80.03	78.46	78.45	82.38	80.03
第四次	78.62	81.41	80.01	77.87	80.92	79.62
第五次	78.17	80.27	78.97	78.21	81.41	80.14
平均	78.03	80.65	79.08	78.10	81.13	79.47
標準差	0.78	0.72	0.52	0.22	0.73	0.80

表十三、冷燙劑重複浸泡四次實驗結果

組別	小橡皮筋			大橡皮筋		
狀態	原本重量(gw)	泡第一劑後重量(gw)	泡第二劑後重量(gw)	原本重量(gw)	泡第一劑後重量(gw)	泡第二劑後重量(gw)
第一次	78.23	79.78	78.11	79.10	80.37	79.23
第二次	79.84	80.12	79.89	78.61	79.99	78.91
第三次	78.36	81.34	79.74	79.84	80.13	80.01
第四次	77.29	78.81	77.36	77.68	78.38	78.03
第五次	78.04	80.37	78.33	79.41	82.79	80.33
平均	78.35	80.08	78.69	78.93	80.33	79.30
標準差	0.83	0.82	0.98	0.74	1.42	0.82

表十四、冷燙劑重複浸泡五次實驗結果

組別	小橡皮筋			大橡皮筋		
狀態	原本重量(gw)	泡第一劑後重量(gw)	泡第二劑後重量(gw)	原本重量(gw)	泡第一劑後重量(gw)	泡第二劑後重量(gw)

第一次	78.36	78.75	78.51	78.29	78.44	78.61
第二次	79.02	79.15	79.11	78.97	79.69	79.15
第三次	79.89	80.96	79.99	79.20	79.41	77.84
第四次	77.64	78.92	78.86	79.48	79.62	79.57
第五次	78.39	79.63	78.75	77.69	78.07	77.89
平均	78.66	79.48	79.04	78.73	79.05	78.61
標準差	0.75	0.80	0.51	0.65	0.66	0.68

(二)、溶脹實驗：

表十五、未稀釋冷燙劑實驗結果

橡皮筋	浸泡程序	原本體積	溶脹後體積	體積增加百分比
小	未浸泡	2.7 mL	2.9 mL	7.4%
	泡第一劑	2.5 mL	2.7 mL	12.0%
	泡第二劑	2.6 mL	2.8 mL	7.7%
大	未浸泡	3.9 mL	4.1 mL	5.1%
	泡第一劑	3.8 mL	4.2 mL	10.5%
	泡第二劑	4.0 mL	4.2 mL	5.0%

表十六、75%冷燙劑實驗結果

橡皮筋	浸泡程序	原本體積	溶脹後體積	體積增加百分比
小	未浸泡	3.2 mL	3.4 mL	6.3%
	泡第一劑	3.4 mL	3.8 mL	9.1%
	泡第二劑	3.2 mL	3.4 mL	6.3%
大	未浸泡	4.2 mL	4.4 mL	4.8%
	泡第一劑	3.9 mL	4.3 mL	10.3%
	泡第二劑	4.1 mL	4.3 mL	4.9%

表十七、50%冷燙劑實驗結果

橡皮筋	浸泡程序	原本體積	溶脹後體積	體積增加百分比
小	未浸泡	3.4 mL	3.6 mL	5.9%
	泡第一劑	4.3 mL	4.7 mL	9.3%
	泡第二劑	3.5 mL	3.7 mL	5.7%
大	未浸泡	4.2 mL	4.4 mL	4.8%
	泡第一劑	4.1 mL	4.5 mL	9.8%
	泡第二劑	4.3 mL	4.5 mL	4.7%

表十八、25%冷燙劑實驗結果

橡皮筋	浸泡程序	原本體積	溶脹後體積	體積增加百分比
小	未浸泡	3.1 mL	3.2 mL	3.2%
	泡第一劑	2.7 mL	2.9 mL	7.4%
	泡第二劑	2.8 mL	2.9 mL	3.6%
大	未浸泡	4.2 mL	4.3 mL	2.4%
	泡第一劑	4.0 mL	4.3 mL	7.5%
	泡第二劑	4.1 mL	4.2 mL	2.4%

表十九、10%冷燙劑實驗結果

橡皮筋	浸泡程序	原本體積	溶脹後體積	體積增加百分比
小	未浸泡	3.4 mL	3.5 mL	5.9%
	泡第一劑	3.0 mL	3.2 mL	6.7%
	泡第二劑	3.3 mL	3.5 mL	6.1%
大	未浸泡	4.2 mL	4.4 mL	4.8%
	泡第一劑	4.3 mL	4.6 mL	7.0%
	泡第二劑	4.0 mL	4.2 mL	5.0%

三、熱對橡皮筋彈力的影響：

表二十、小橡皮筋實驗結果

時間	第一次重量(gw)	第二次重量(gw)	第三次重量(gw)	平均	標準差
0 s	19.22	19.23	19.25	19.23	0.02
5 s	15.11	15.34	15.77	15.41	0.34
10 s	12.98	13.27	13.35	13.20	0.19
15 s	13.05	12.97	13.23	13.08	0.13
20 s	14.30	13.24	13.99	13.84	0.55
25 s	14.41	14.01	14.23	14.22	0.20
30 s	15.53	15.47	15.65	15.55	0.09
35 s	17.74	16.87	16.36	16.99	0.70
40 s	18.44	17.24	17.57	17.75	0.62
45 s	19.18	18.76	18.01	18.65	0.59

表二十一、大橡皮筋實驗結果

時間	第一次重量(gw)	第二次重量(gw)	第三次重量(gw)	平均	標準差
0 s	21.85	21.35	21.31	21.50	0.30
5 s	19.86	19.36	19.67	19.63	0.25
10 s	18.31	18.44	18.78	18.51	0.24
15 s	18.04	18.26	18.58	18.29	0.27
20 s	17.92	18.37	18.51	18.27	0.31
25 s	18.03	18.43	18.50	18.32	0.25
30 s	17.97	18.94	18.66	18.52	0.50
35 s	18.42	19.29	19.09	18.93	0.46
40 s	18.86	19.70	19.39	19.32	0.42
45 s	19.07	20.36	19.73	19.72	0.65

四、橡皮筋在拉伸和螺旋情況下溫度的改變：

表二十二、拉伸橡皮筋實驗結果（以*標註拉長和縮短後溫度有顯著差異，顯著差異定義為差 1°C 以上）

組別	小橡皮筋			大橡皮筋		
溫度 (°C)	原本	拉長後	縮短後	原本	拉長後	縮短後
第一次	30.0	30.3	29.5	29.6	30.0	29.3
第二次	29.4	29.9	29.2	29.3	29.5	29.0
第三次	29.7	30.0	29.2	29.4	30.0	29.2
第四次	29.7	29.9	29.4	29.9	30.3	28.5
第五次	29.5	29.7	29.4	29.5	30.2	28.5
平均	29.7	30.0	29.3	29.6	30.0	28.9 *
標準差	0.2	0.2	0.1	0.2	0.3	0.4

表二十三、螺旋橡皮筋實驗結果

組別	小橡皮筋			大橡皮筋		
溫度 (°C)	原本	拉長後	縮短後	原本	拉長後	縮短後
第一次	29.7	30.9	29.6	28.9	30.3	28.9
第二次	29.5	30.9	30.4	29.5	30.0	29.1
第三次	29.2	30.2	29.6	29.6	30.5	29.5
第四次	29.6	30.1	29.3	29.6	29.9	28.8
第五次	29.4	29.7	28.6	29.3	29.9	29.3
平均	29.5	30.4	29.5	29.4	30.1	29.1 *
標準差	0.2	0.5	0.6	0.3	0.3	0.3

表二十四、超螺旋橡皮筋實驗結果

組別	小橡皮筋			大橡皮筋		
溫度 (°C)	原本	拉長後	縮短後	原本	拉長後	縮短後
第一次	29.7	30.8	30.2	28.9	30.2	29.2

第二次	29.5	30.2	29.4	29.5	30.1	29.0
第三次	29.2	30.6	29.5	29.6	30.2	28.6
第四次	29.6	30.4	29.4	29.6	30.1	29.4
第五次	29.4	30.3	29.6	29.3	30.5	29.0
平均	29.5	30.5	29.6	29.4	30.2	29.0 *
標準差	0.2	0.2	0.3	0.3	0.2	0.3

表二十五、泡冷燙劑第一劑後拉伸橡皮筋實驗結果

組別	小橡皮筋			大橡皮筋		
溫度 (°C)	原本	拉長後	縮短後	原本	拉長後	縮短後
第一次	22.0	23.3	22.2	22.3	23.5	22.6
第二次	22.2	23.1	22.1	22.3	23.4	22.5
第三次	22.4	23.4	22.5	22.5	23.1	22.4
第四次	22.4	23.3	21.9	22.7	23.7	22.9
第五次	22.3	23.5	22.1	22.3	23.5	22.6
平均	22.3	23.3	22.2*	22.4	23.4	22.6
標準差	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2

表二十六、泡冷燙劑第一劑後螺旋橡皮筋實驗結果

組別	小橡皮筋			大橡皮筋		
溫度 (°C)	原本	拉長後	縮短後	原本	拉長後	縮短後
第一次	22.5	23.9	22.8	22.9	24.2	23.3
第二次	23.0	23.7	23.3	22.7	23.8	22.7
第三次	22.6	24.0	23.0	23.0	24.5	23.2
第四次	22.8	23.6	23.2	22.8	23.9	23.6
第五次	22.8	23.8	23.3	22.6	23.4	22.7
平均	22.7	23.8	23.1	22.8	24.0	23.1

標準差	0.2	0.1	0.2	0.1	0.4	0.4
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

表二十七、泡冷燙劑第一劑後超螺旋橡皮筋實驗結果

組別	小橡皮筋			大橡皮筋		
溫度 (°C)	原本	拉長後	縮短後	原本	拉長後	縮短後
第一次	22.5	23.8	23.1	22.8	24.1	23.1
第二次	22.9	23.9	22.6	22.9	23.6	22.7
第三次	22.8	24.4	23.1	22.9	23.8	23.2
第四次	22.9	24.6	23.0	23.2	24.3	23.2
第五次	22.8	24.3	23.0	23.0	23.6	22.8
平均	22.8	24.2	23.0*	23.0	23.9	23.0
標準差	0.2	0.3	0.2	0.1	0.3	0.2