

# 【2021 全國科學探究競賽-這樣教我就懂】

## 高中 ( 職 ) 組 成果報告表單

### 題目名稱：彈力四射-彈力球製作與改良

#### 一、摘要：

本研究主要針對彈力球的製作與改良，先以不同的預測試實驗找出最方便的實驗方法，最佳方式為以直接釋放球體方式進行測試，底面材料為奈米板。依此前述最佳方式，再以不同的材料製作彈力球並測試分析各種材質之最佳條件，材料包含三大類：洋菜、膠水(聚乙烯醇)及澱粉等。其中，洋菜之最佳製作條件為：濃度 10.7%，加熱至 80°C。膠水球之最佳製作條件為：交聯劑使用三偏磷酸鈉，濃度 25%，並且添加碳酸鈉為副電解質。澱粉之最佳製作條件為：使用樹薯粉，以吉力丁為增稠劑。搓揉時間影響不大，而不論是否欲久置都應添加修飾澱粉，增加澱粉的交聯程度。

經由我們實驗所得數據，我們得到下列結論：要作出恢復係數最佳的彈力球，應選擇支鏈較少的聚合物，以免形成鏈結時被支鏈干擾。若挑選膠水為交聯劑，可選擇溶於水中後 pH 值較高的電解質做為交聯劑，因膠水遇鹼水解度會上升，溶出更多膠水，能與電解質發生交聯反應。若選澱粉作為材料，則應注意添加的修飾澱粉應包含「乙醯化」結構，能夠加強澱粉間鏈結的產生。同時還要注意盡快測試，避免澱粉老化。不論使用何種材料，都應控制交聯的程度，不可添加過多交聯劑，交聯程度過高反而會使彈力球失去彈性。

#### 二、探究題目與動機

最近我們在網路上發現許多有關「自製史萊姆」的文章和影片，其中大部分內容都是講述如何利用膠水及硼砂製作具有些微黏性、果凍狀的史萊姆。我們的成員們在看到這些相關網站後便突發奇想，思考著如果在膠水中加入更多硼砂，是否可以使「史萊姆再硬化」，變成一顆彈力球？從一開始這個問題繼續延伸思考使我們的主題——「彈力球的製作與改良」逐步成形。我們開始尋找生活周邊能見到具有彈力的物質，希望能以此做為原料，製作出恢復係數最佳的彈力球。最後，我們找上了洋菜和麵粉，當然還有最一開始的膠水混硼砂。洋菜粉的主要功能是製作洋菜凍和果凍，我們認為如果稍微增加果凍的硬度並製成球狀，使其能夠承受足夠的外力，就有機會成為彈力球。至於麵粉的部分，我們連結了製作麵包的麵粉，芎芎用的澱粉以及可使水溶液成為凝膠狀物質的增稠劑。我們猜測將二者混和後，仿製做麵包的方式，也能成為彈力球。最後，我們決定採用不同交聯劑與膠水混合後，測試是否真的能夠符合我們最一開始的猜想，作出恢復係數最佳的彈力球。

#### 三、探究目的與假設

本次的探究主題和彈力的測定有著極大關係，物體彈力測量通常是藉由比較恢復係數實現。恢復係數是判斷一物體彈力好壞的指標，能夠反應出兩個物體之間的反彈程度並將其化為具體的數值，不同的兩物體所產生的恢復係數個不相同。我們將恢復係數作為我們各實驗比較的依據，而為了了解不同實驗方法結果是否有差異及找出最方便的測試方法。

因此，本次探究將先針對恢復係數的測量方法進行三項預測試實驗，分別為：

1.直接釋放球體，在不同的高度進行測量其反彈高度，測試釋放高度與反彈高度之相關性。

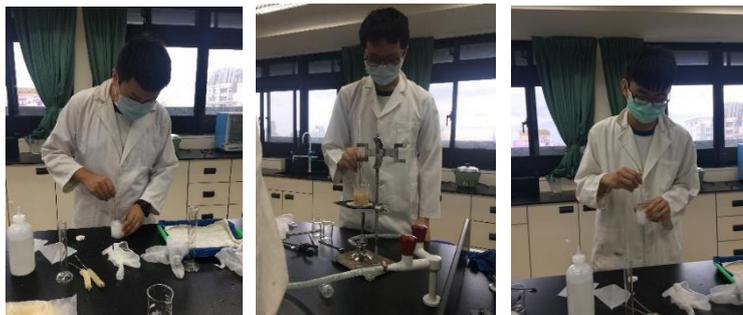
- 直接釋放球體，在相同高度下，使用不同的底面接觸材質進行比較，測試底面接觸材質與反彈高度之相關性。
- 以衝擊擺來進行擺角與彈力球的恢復係數關係之分析。

最後參考交聯反應的原理，並以預測試實驗所得最佳測試方式，分別使用洋菜、膠水(聚乙烯醇加交聯劑)及澱粉(樹薯粉及麵粉)製作成彈力球，並依上述之預試驗結果，選用最佳的實驗方式，進行彈性之測試，以了解各種材質之最佳彈性條件。

#### 四、探究方法與驗證步驟

##### (一)實驗材料

洋菜、聚乙烯醇、交聯劑(包含：硼砂、食鹽以及三偏磷酸鈉)、高筋麵粉、中筋麵粉、低筋麵粉、樹薯粉、修飾澱粉(乙醯化己二酸二澱粉)、增稠劑(吉力丁、鹿角菜膠、刺槐豆膠以及關華豆膠)。

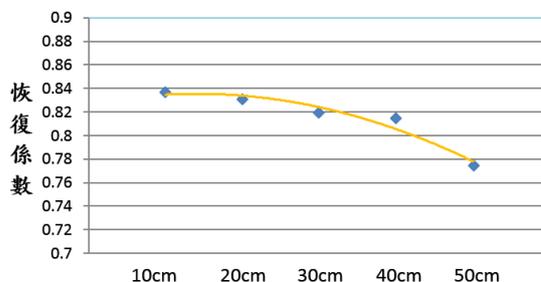


##### (二)實驗方法及結果

###### 1.預試實驗：

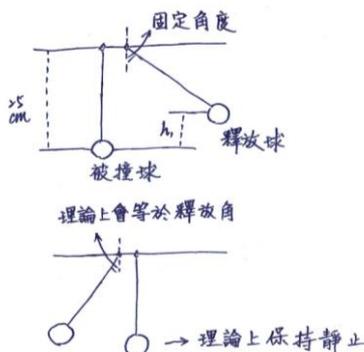
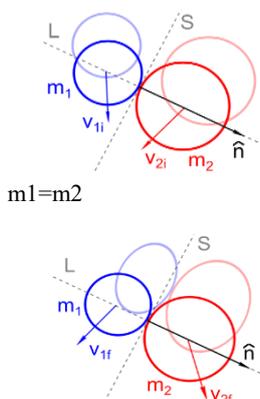
###### (1)觀察釋放高度所造成的彈力測量差異：

根據實驗結果我們發現不同釋放高度下所測量到彈力球恢復係數有所不同(如下圖)，原因是彈力球自靜止釋放開始到與接觸面發生碰撞前及碰撞反彈後到反彈至最高點前兩段過程中，空氣阻力都持續對系統做負功，使能量產生耗損。通過數據，我們能看出釋放高度在 10~20 公分間時，恢復係數的差異大小，在 20 公分後，誤差開始逐漸擴大。經過評估之後，我們決定在接下來的實驗中，將測試高度固定在 20 公分處，一方面可以顧及實驗的精準度，另一方面也不會造成測量上的困難。



###### (2)以衝擊擺來做恢復係數的分析：

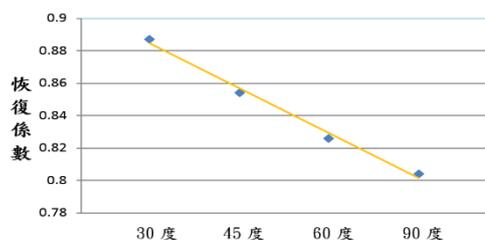
衝擊擺的運作方式如下圖及公式，之後我們將所得出的反彈高度利用上述公式換算成恢復係數做比較。



$$C_r = \frac{V_{2f} - V_{1f}}{V_{1i} - V_{2i}} = \frac{\sqrt{h_2'} - \sqrt{h_1'}}{\sqrt{h_1} - \sqrt{h_2}}$$

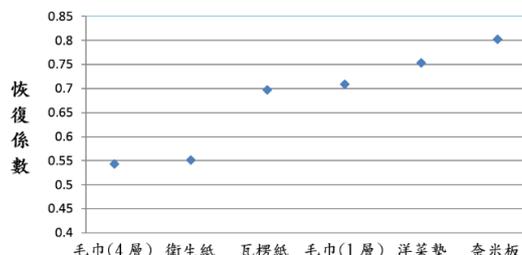
- h1: m1 釋放高度
- h2: m2 釋放高度
- h1': m1 反彈高度
- h2': m2 反彈高度

我們將反彈高度利用上述公式換算成恢復係數做比較(如下圖)，發現擺角與彈力球恢復比例呈負相關。理論上碰撞時能量應完全轉移，反彈角度都應和釋放角度相同，但所測得結果為負相關，應是在過程中空氣阻力所造成能量耗損。



(3)不同的接觸材質來對恢復係數做比較：

我們選用許多接觸材質，並比較所得數據(如右圖)，歸納出愈硬的接觸材質測得彈力係數愈高，我們推測有兩項可能原因產生此現象。第一是因為較軟的接觸面材質(如毛巾)在與彈力球發生撞擊時會將彈力球部分的能量吸收；較硬的接觸材質則因性質接近剛體，撞擊時所吸收的能量較少，所以測得的彈力較高，實驗結果以奈米板的結果為最佳。



## 2.彈性球實驗：

在彈力球實際製作前，首先要了解交聯反應，指線性或者是輕度支鏈型聚合物互相纏繞摺疊後，產生縱向鍵結使整個結構較為緊密，原本為「二維」聚合物成為「三維網狀結構」。不論在物理或化學上都有交聯反應，在大部分情況下，化學交聯較物理交聯穩定，且物理交聯通常具可逆性，化學交聯則通常無。物理性交聯常以氫鍵或離子鍵為鍵結，而化學交聯則大多是以脫水後所產生的共價鍵為鍵結。



交聯後聚合物因為由二維結構轉變成三維結構，因此失去原本所具有的「流動性」，形成形狀較為固定的固體或凝膠體。聚合物依據交聯程度不同，會獲得不同物理性質：低密度交聯會降低聚合物黏性；中密度交聯會使聚合物產生彈性；高密度交聯會使物體變得堅硬。在我們這一系列實驗中所要利用的就是聚合物在中密度交聯時產生彈性之特性。

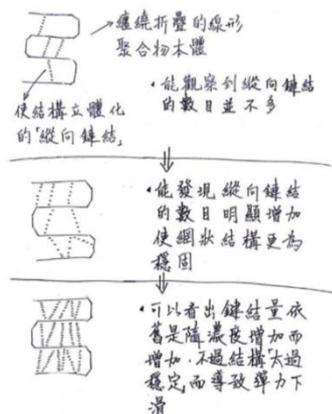
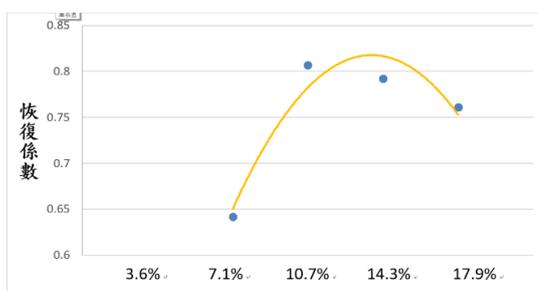
應用以上的原理，我們使用不同的材質做為製造彈力球的原料，製作出不同的彈力球：

### (1)洋菜球

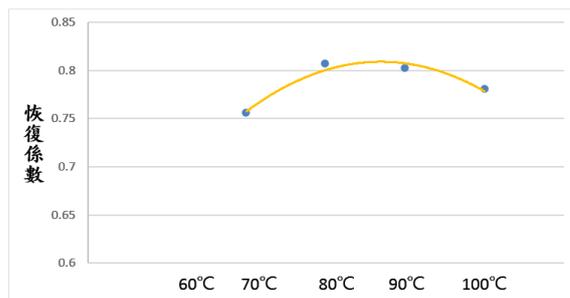


洋菜，又稱寒天、瓊脂，一般是從海藻中提煉出來。洋菜由半乳糖及其衍生物構成，半乳糖為葡萄糖的同分異構物，是從乳糖所水解出的一種單醣。洋菜結構中含有很多羥基，因此當將洋菜粉溶於水加熱至 70°C 以上會讓洋菜分子之間產生可逆的物理交聯反應，形成大量氫鍵彼此相互鍵結的熱塑性、鏈狀、縮合、同源聚合物。

在製作洋菜球實驗中我們分別以洋菜比例、加熱溫度來進行討論。經過測試，我們發現洋菜球在 10.7% 配置下彈力最佳(如右圖)，洋菜比例較少，洋菜球的彈力會大幅下降，甚至在 3.6% 的時候無法成球，內部的交聯反應未完全。在洋菜比例較高時，恢復係數則會緩緩的下降，應是交聯的密度太高，而使彈力球趨向堅硬(如左下圖)。



在溫度方面，我們發現(如下圖)，加熱溫度需大於 70°C，否則達不到洋菜發生交聯反應最低活化能，而當溫度過高時，彈力也會緩慢下降，應是加熱時所蒸發掉的水分造成洋菜與水的比例上升，進而使得彈力變差。



由以上實驗結果可知洋菜球與水

**最佳比例為 10.7%，製作洋菜球最佳加熱溫度約為 90 度。**

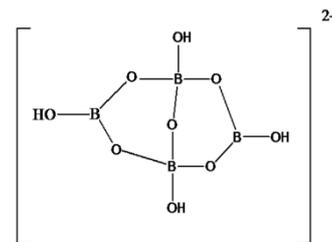
## (2) 膠水球(PVA 球)



膠水主要成分為聚乙烯醇，也就是 PVA。PVA 是一種鏈狀聚合物，且具有水溶性。因為各分子間彼此以氫鍵相互鏈結，因此較不易活動，故溶於水呈黏稠狀。

交聯劑本身並非聚合物，亦不會產生交聯。

其主要功能在於添加交聯劑至聚合物後，能夠使線性的聚合物更加緊密的互相纏繞，作用類似於交聯過程中所需的化學鍵結。能夠有效提高聚合物的強度和彈性。在本次的實驗中，我們將會使用到三種交聯劑，分別是硼砂、食鹽以及三偏磷酸鈉。硼砂又稱四硼酸鈉(如右圖)，溶於水中之後會產生硼酸和一個四配位的鹼性硼酸鹽，最終水溶液呈鹼性。



三偏磷酸鈉分子式為  $\text{Na}_3\text{P}_3\text{O}_9$ ，是三偏磷酸的其中一種鈉鹽。他是一種環狀結構的聚合磷酸鹽，一般作為食品的交流劑，具類似硼砂的功能，因此市面上已經將具有毒性的硼砂替換成三偏磷酸鈉。三偏磷酸鈉同樣能取代硼砂與 PVA 產生交聯作用，不過兩者在形成縱向鏈結的方式不同。硼砂是以氫鍵鏈結，而三偏磷酸鈉則是以脫水的方式產生鏈結，因此與硼砂不同，三偏磷酸鈉與 PVA 交聯所產生的鏈結較硼砂強，且為不可逆反應。

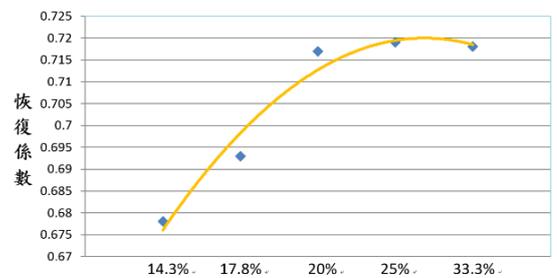
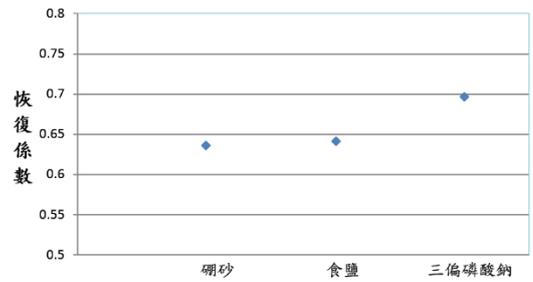
食鹽是日常生活常用的電解質，簡式為  $\text{NaCl}$ ，是一種離子晶體，每個鈉離子都被六個氯離子包圍，氯離子則相反，透過鈉、氯離子間的離子鍵連結，以雙面心立方堆積方式堆疊而成。在 PVA 中加入食鹽會導致 PVA 大分子間和分子內氫鍵被破壞，使水分子和 PVA

間的氫鍵數增加，也就是 PVA 的溶解性增加。

根據數據(如右圖)我們發現三者的恢復係數相差並不大，較明顯的只有三偏磷酸鈉略高於硼砂和食鹽。我們認為這是因為各交聯劑能產生的交聯效果差不多，而因為三偏磷酸鈉所產生的鍵結是化學鍵結，因此效果略佳於其餘二者。

接著我們測試的是交聯劑濃度對膠水球彈力的影響。從實驗圖得知(如右圖)，在最初的時候，恢復係數隨著交聯劑濃度的上升而快速上升，到了 25% 的時候來到了最高點，並在 33.3% 的時候開始略微下降。這裡同樣是因為交聯劑濃度在 25% 的時候最接近中密度交聯，因此彈力球具有最好的彈力。當比例到 33.3% 時，球體反而偏向高密度交聯，所以失去了彈性，轉而變堅硬。

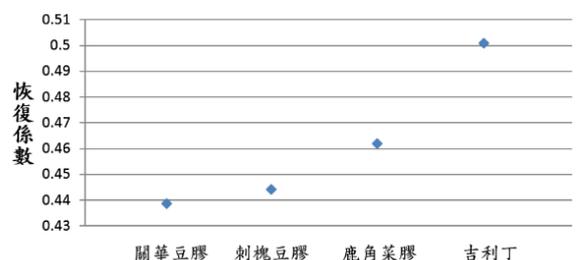
最後我們加入不同副電解質對 PVA 球進行分析。從結果可看出不論加入何種副電解質都會使膠水球彈力變好。加入碳酸鈉的膠水球恢復係數最高，碳酸氫鈉次之，而加入硫酸鈉的球恢復係數最低。推測是因為這三種電解質溶於水後 pH 值不同導致此差異。在 PVA 中加入副電解質使 PVA 發生鹽析反應，使水分子與解離出的電解質產生水合，疏水端相互結合產生沉澱，幫助 PVA 與交聯劑間交聯反應。PVA 是聚醋酸乙烯酯在鹼作用下所水解出的產物，所以當 PVA 遇鹼時水解度上升，使更多 PVA 可以與硼砂進行反應。在我們選用的這三種電解質水溶液當中，碳酸鈉的 pH 值大約落在 9~11 之間，碳酸鈉大約為 8.5，而硫酸鈉因為  $\text{Na}^+$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  都是強酸強鹼根，因此呈中性。



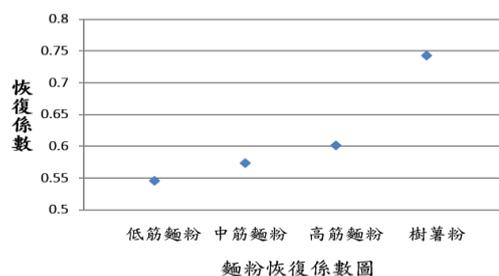
### (3) 麵粉球



麵粉又可以被細分為許多的種類，我們總共選用了高筋麵粉、中筋麵粉、低筋麵粉、樹薯粉這四類來做為實驗的變因，這四種麵粉主要是透過他們的蛋白質含量進行分類。我們將麵團加入水、修飾澱粉和增稠劑後，接著持續的搓揉麵團，此時麵團中蛋白質的胺基酸長鏈中的兩個硫原子會彼此產生鍵結形成雙硫鍵，亦可稱為麵筋。搓揉完後放入模具讓麵團靜置發酵，烤箱加熱而製成彈力球。此外，增稠劑的添加可以使麵粉之間的交聯提升，使其結構變硬，彈力提升。麵粉與水混合後直接加熱所製作出來的成品彈性可能不足以使它成為彈力球，因此我們需要另外再加入增稠劑以增加其彈性。我們所選擇的增稠劑有鹿角菜膠、關華豆膠、刺槐豆膠和吉利丁四種。經過我們的實驗(如右圖)得到加入吉利丁作為增稠劑，所測出的彈力較高，對麵粉間的交聯鍵結有較好的效果。



使用低筋、中筋、高筋麵粉和樹薯粉做比較，差異在於蛋白質的含量，樹薯粉為無筋麵粉，僅含極少量蛋白質，主要由大量支鏈澱粉組成。樹薯粉彈力較低筋、中筋、高筋麵粉高(如右圖)。因樹薯粉鍵結方式與含筋麵粉不盡相同，樹薯粉間交聯鍵結是靠著其所含大量支鏈澱粉彼此間氫鍵所形成；而含筋麵粉則是靠內部蛋白質，經過搓揉至出筋所形成的雙硫鍵彼此交聯產生彈力，因在受到直鏈澱粉的影響下，支鏈澱粉間的作用力並不大。比較兩者之下樹薯粉的交聯較緊密，因此彈力來得較好。



經過我們實驗測試，驗證沒有加入修飾澱粉的麵團球會隨著時間外表逐漸變得乾硬老化，不易形變而使彈力下降。此外添加修飾澱粉除了預防麵粉老化，還可以提升麵粉分子之間的鍵結強度，使得彈力恢復提升。

## 五、結論與生活應用

在這一系列的實驗過程中，我們在進行每一次實驗之前，都會對實驗結果進行預測。經過和實驗結果的對照後，我們發現在大部分的預測中，我們都能頗為精準的與結果吻合。經過了這些實驗，我們得到了下列的結論：

1. 聚合物交聯程度與其彈力在達到一峰值後反而會下降。洋菜球約在濃度為 10.7%時，而膠水球則約在濃度為 25%時彈力達到最高點。
2. 洋菜球和膠水球的彈力並列最佳，樹薯粉球次之，麵粉球最差。
3. 膠水加入電解質後會發生鹽析反應和水合反應，疏水端相互吸引發生沉澱反應，大幅度增加膠水的交聯效果。
4. 膠水在鹼中會發生水解反應，使更多膠水能發生交聯反應，提升彈力。
5. 在麵粉球中加入特定的修飾澱粉(乙醯化己二酸二澱粉)不只可以防止澱粉老化，修飾澱粉中，乙醯化的部分還能使麵粉球產生更多共價鍵，形成更強的交聯。
6. 聚合物中「支鏈」的存在會對聚合物產生鍵結造成阻礙，降低聚合物的交聯程度。
7. 形成化學鍵結的聚合物所具有的彈力效果因為鍵結強度不同的關係，會較形成物理鍵結的聚合物來的好。

## 參考資料

1. 白沙化學驚奇秀,鼻涕蟲和彈性球: [http://blog.ncue.edu.tw/sys/lib/read\\_attach.php?id=10795](http://blog.ncue.edu.tw/sys/lib/read_attach.php?id=10795)
2. 動動手:彈彈波: [https://www.mingpaocanada.com/van/htm/News/20170406/HK-gfy1\\_er\\_r.htm](https://www.mingpaocanada.com/van/htm/News/20170406/HK-gfy1_er_r.htm)
3. 彈性球--膠水系列 3 之 1: <https://www.ntcu.edu.tw/scigame/chemistry/chemistry-024.html>
4. MadSci Network: <http://www.madsci.org/posts/archives/2003-12/1070294201.Ch.r.html>
5. 明膠的溶膠-凝膠相變化與微乳液-有機凝膠相變化, 梁崇正, 國立中央大學博碩士論文。