

中華民國第 59 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國小組 物理科

第一名

080117

你真的知道凹陷乒乓球是為什麼復原的嗎？

學校名稱：臺北市士林區蘭雅國民小學

作者： 小六 林煒翔	指導老師： 柯俊男
---------------	--------------

關鍵詞：氣體壓力、熱漲冷縮、乒乓球

得獎感言

59 屆全國科展參賽心得

回到兩年前的夏天，在各縣市科展好手齊聚一堂的雲林全國科展會場裡。當時的我是第一次參加全國科展比賽，抱持著好奇與觀摩交流的心態，認識了許多朋友，也對科展實驗有了更深入的了解，在那次的比賽我只拿到了佳作，雖然是第一次參展，不過我相信經過這次的洗禮，下次一定可以拿到更好的成績。我們不必成為一位完全的贏家，但一定要作為一位充滿自信的挑戰者。過了兩年，我再次地回到了這個舞台，不想留下任何的遺憾，更不想讓眼前的榮耀錯過。

這次會選擇研究凹陷乒乓球復原的題目，是因為在六年級上學期的自然課時，做過有關氣體熱脹冷縮的實驗，發現氣球裝在加熱的燒瓶口並沒有膨漲的非常多，但是凹陷乒乓球在受熱後卻可以復原，因此我認為乒乓球復原的原因不單只是氣體的熱脹冷縮效應。經過一番研究，我發現球殼受熱的作用可能也是乒乓球復原的主要原因之一，所以我便將氣體受熱膨脹與球殼受熱列入可能復原的主要原因。當我們更深入的了解時，便會發現有些事並不是完全被瞭解，而是還藏有許多的疑問。

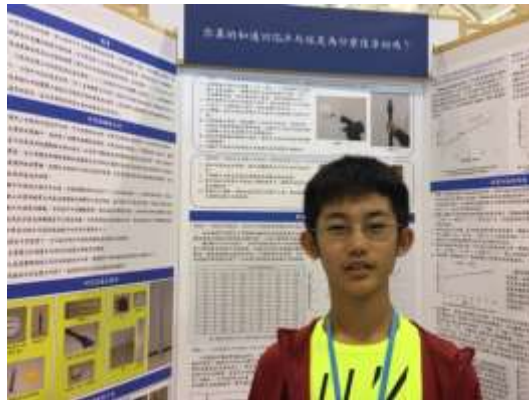
在研究過程當中，棘手的困難如岩漿從火山口噴發了出來。印象中，最深刻的困難是市售的壓力計不夠靈敏，無法測出乒乓球體內氣體受熱膨脹後的壓力，因為氣體受熱產生的壓力實在太小，所以我在爸爸的建議下採用自製的 U 型管壓力計來測量。當有問題擋在路前面，換條路走走看，便有希望解決問題。

然而，即使解決了一個難題，也不代表接下來會一帆風順，例如 U 型管壓力計與乒乓球的接縫處容易漏氣，就是馬上必須跨過的另一面高牆，經過一番嘗試，最後使用防漏膠帶與環保黏土才解決了漏氣的問題。科學研究的過程就如同在狂風暴雨下慢跑，只有堅持不放棄，才有機會在太陽出現後，看到繽紛的彩虹。

這次的全國科展讓我在國小畢業時，留下了一個深刻難忘的回憶。我的作品最後能夠在講台上受到大會評審的肯定，這都要感謝許多師長以及家人持續的支持和陪伴，謝謝爸爸犧牲許多時間陪我進行研究並傳授許多科學知識，也感謝老師在集訓以及科展時給予我很多的指教與訓練。在這次的參賽經驗裡面我學習到生活無處不存在科學，有些事看似理所當然，其實並非全然正確，我們應該對所有事情都抱持著存疑的態度，用嚴謹的科學精神與方法去驗證，才能對現象背後的道理有真正的瞭解。



以自製的壓力計測量加熱乒乓球內的氣體壓力。



與參賽作品海報合影。



獲獎後與指導老師合影。

摘要

針對乒乓球凹陷後，放入熱水中可以恢復圓球面的現象，不論是課堂、書本，或是網路上的資料，都將原因歸咎於氣體的熱脹冷縮效應，似乎都忽略了乒乓球殼本身的受熱效應。我們因此設計了四個實驗，希望透過實驗結果的分析能夠確實了解乒乓球凹陷後能夠復原的原因。我們測量了（一）乒乓球在不同水溫下，可復原的最大凹陷深度與水溫的關係，（二）水溫與乒乓球內氣體壓力的關係，（三）純粹氣體壓力作用下，凹陷乒乓球的復原結果，（四）無氣體壓力作用時，純粹乒乓球殼受熱的效果。實驗結果說明，乒乓球受熱增加的氣體壓力遠低於足夠使凹陷球殼復原的壓力，因此簡單以氣體熱脹冷縮效應解釋凹陷乒乓球殼復原的說法並沒有完整呈現背後的物理原因。

壹、研究動機

課堂上有提到凹陷的乒乓球，可以透過熱水加熱，利用空氣熱脹冷縮的特性，使凹陷部分回復原形，然而在氣體受熱膨脹的實驗中，我們利用氣球套住燒杯口，再將燒杯放入沸水中觀察，結果原本扁平的氣球因為氣體膨脹而樹立起來，但是用手觸摸氣球時可以明顯發現氣球是相當柔軟，手指可以輕易將氣球壓扁，這不禁讓我們懷疑膨脹的氣體真的有足夠的力量將凹陷的乒乓球撐回原來的形狀嗎？因此我們希望透過詳細的實驗研究，來探討凹陷的乒乓球在受熱過程中產生復原作用的主要因素為何？是否真是因為空氣的熱脹冷縮造成？還是有其他的因素才是復原的主要作用？

貳、研究目的

將乒乓球放在熱水中加熱，受熱影響的部分包括了(一)乒乓球的球殼，(二)球殼內部的空氣。書本上與網路上的資料〔詳見參考資料〕通常以空氣受熱膨脹的原因，解釋凹陷的乒乓球在放入熱水中後產生復原的現象，此說法是認為乒乓球殼內的空氣在熱水加熱過程中逐漸膨脹，但受到乒乓球體積限制，因而轉變為內部壓力的增加，進而將凹陷部分擠壓回原來圓形的球面，這是把球殼內部空氣受熱的作用當成主要的因素，而忽略球殼本身受熱的作用，因此我們設計以下幾種實驗，測試這兩種作用在凹陷乒乓球受熱復原過程中所佔有的重要性大小。

- 一、 測試在不同溫度時，凹陷乒乓球可復原的最大凹陷深度。

- 二、 以自製壓力計測量乒乓球內空氣壓力與溫度的關係。
- 三、 以打氣筒實際測試不同凹陷深度的乒乓球，測量不同凹陷深度乒乓球恢復圓球形所需施打的壓力大小。
- 四、 測試在缺少球內空氣壓力的作用下，溫度與凹陷乒乓球復原的關係。

參、 研究設備及器材

<p>一、標準 ABS 材質乒乓球(球直徑 40 mm)</p> 	<p>二、燒杯</p> 
<p>三、溫度計</p> 	<p>四、游標卡尺</p> 
<p>五、附壓力計的打氣筒與球針</p> 	<p>六、金屬棒與球面參考模型</p> 

七、螺絲起子



八、捲尺



九、耐高溫、防水、防漏膠帶



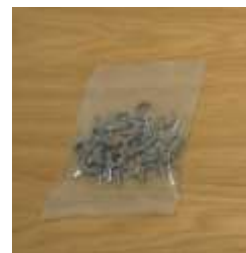
十、環保黏土



十一、自製 U 型管壓力計



材料：長條木板、塑膠水管、固定釘、固定腳架



肆、研究過程或方法

一、 實驗一

- (一) 以金屬棒對乒乓球施加壓力，造成乒乓球面產生凹陷。若施力太小時，產生些微凹陷的乒乓球，即可因乒乓球殼自身的彈性性質，而自動使得凹陷球面復原，因此唯有施加足夠的力量，乒乓球的凹陷才能夠確實成立。



- (二) 將乒乓球剪成半球形狀，並在半球頂打一孔洞，作為測量乒乓球凹陷深度的【球面參考模型】。
- (三) 利用【球面參考模型】覆蓋於乒乓球的凹陷部分，再以游標卡尺的深度尺深入【球面參考模型】的孔洞，用以測量凹陷深度。



- (四) 以熱水瓶煮沸開水，倒入燒杯中，待其冷卻至所要的溫度後開始實驗。
- (五) 將凹陷的乒乓球放入燒杯熱水中，觀察是否造成凹陷的復原。
- (六) 將成功產生復原結果的水溫與凹陷深度記錄下來。
- (七) 重複以上過程，測試水溫在 45°C 到 82°C 之間，特定溫度下可以復原的乒乓球最大凹陷深度。

二、 實驗二

- (一) 市面上的簡易壓力計一般 最小刻度是 1 psi 的大小，精確度不夠，無法用於測量熱水造成的乒乓球內壓力的變化，因此我們自製了 U 型管壓力計，用來測試乒乓球內壓力的變化。
- (二) 將乒乓球以螺絲起子鑽一小孔用來連接壓力計的塑膠水管一端，連接點以防熱、防水、防滲膠帶密封，再以環保黏土覆蓋，確保連接處不會產生空氣的外洩。



- (三) 將連接好的乒乓球放入特定水溫的燒杯中，觀察 U 型管中水面的高度變化，等待高度穩定後，測量 U 型管兩側水位的高低差，並記錄下燒杯水的溫度與 U 型管水位高低差。



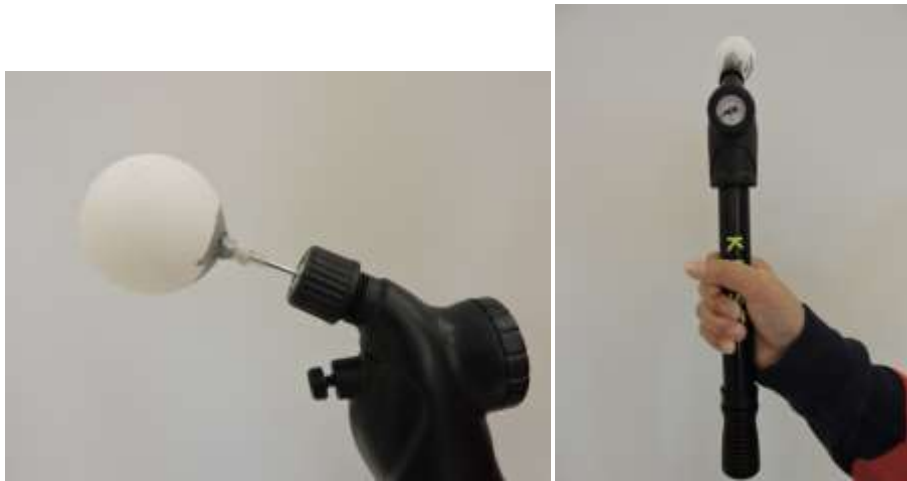
- (四) 測試不同水溫在 30°C 到 80°C 之間，產生水位高低差的變化。

三、 實驗三

- (一) 以螺絲起子將乒乓球鑽一小孔，插入一小段塑膠管作為連接打氣筒的接口，塑

膠管與乒乓球以防熱、防水、防滲膠帶密封，再以環保黏土覆蓋，確保氣體無外洩。

- (二) 將附有壓力計的打氣筒接上球針，再把球針插入乒乓球的小孔內，以環保黏土密封，確保不會氣體外洩。
- (三) 以實驗一的乒乓球凹陷製作方法產生凹陷深度不同的乒乓球。
- (四) 手動推進打氣筒，將氣體打入凹陷乒乓球，同時利用手機慢動作錄影，記錄下乒乓球凹陷面的變化過程以及打氣筒壓力計的讀數變化。
- (五) 檢視手機錄製的慢動作畫面，確認乒乓球凹陷恢復時的壓力錶數值。
- (六) 記錄乒乓球的凹陷深度以及恢復球面時的壓力錶數值。



四、 實驗四

- (一) 將乒乓球切成半球形，再以金屬棒在乒乓球面上施加壓力，造成球面的凹陷。



- (二) 以游標卡尺與【球面參考模型】測量凹陷的深度



- (三) 以熱水瓶煮沸開水，倒入燒杯中，待其冷卻至所要的溫度後開始實驗。
- (四) 將凹陷的半球形乒乓球放入燒杯熱水中，觀察凹陷是否回復成圓球面。
- (五) 將成功產生復原結果的水溫與凹陷深度記錄下來。
- (六) 重複以上過程，測試水溫在 45°C 到 80°C 之間，特定溫度可以復原的乒乓球最大凹陷深度。

伍、 研究結果

實驗一：測試在不同溫度時，凹陷乒乓球可復原的最大凹陷深度。

以固定方式，利用金屬棒對乒乓球施加壓力，造成乒乓球表面產生凹陷。透過施力大小的不同，產生凹陷程度不同的乒乓球，再以游標卡尺測量凹陷的深度。

凹陷深度的測量是以事先準備的半球形乒乓球為參考標準，將其覆蓋在凹陷的部位上，做為原本未凹陷球面的參考，透過半球形表面上事先挖好的小孔，可以將游標卡尺的深度尺深入小孔，以測量凹陷的深度。

以不同水溫測試不同凹陷程度的乒乓球，在水溫 45°C 到 82°C 的範圍內，測試在特定水溫下，可以和不可以恢復圓球面的乒乓球凹陷深度，並將成功恢復圓球面的水溫及凹陷深度記錄於表 1，以估計每個特定溫度可以恢復的最大凹陷深度。

實驗一結果：

溫度 (°C)	乒乓球凹陷深度 (mm)				
	1	2	3	4	5
45	2.4	2.0	2.05	2.1	1.95
48	2.45	1.85	0.9	2.0	2.2
50	2.2	2.0	2.3	3.05	2.55
53	2.75	2.4	2.6	2.9	2.15
55	3.5	3.1	3.2	2.35	2.1
57	3.25	2.5	1.95	3.3	2.2
60	4.1	3.55	3.15	2.8	2.25
62	2.2	1.85	3.25	2.95	2.8
65	3.45	3.55	4.0	2.2	2.1
67	3.3	2.6	2.2	2.05	2.8
70	4.6	3.2	2.05	3.4	2.1
72	3.3	3.45	2.85	4.3	4.05
75	2.35	3.25	3.0	4.25	4.0
78	4.8	3.35	4.15	4.6	4.5
80	4.4	3.1	2.8	2.2	2.1
82	4.0	2.35	3.6	5.2	2.8

表 1 不同水溫時，測量到的乒乓球可復原凹陷深度。

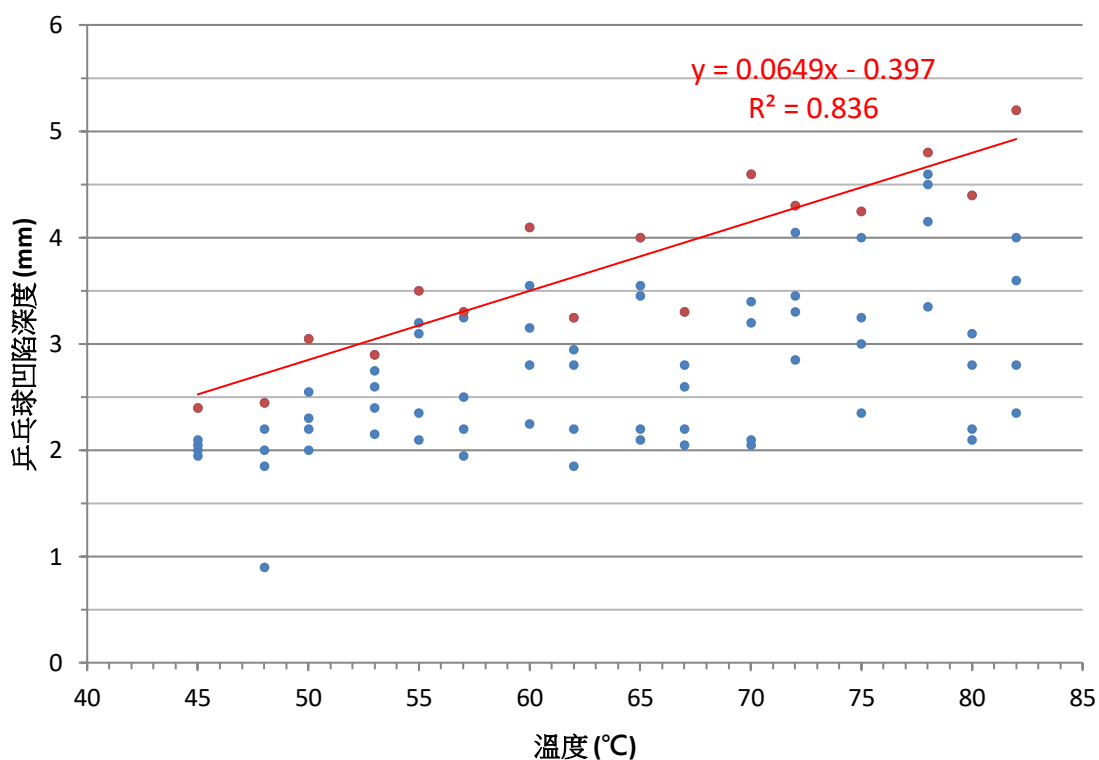


圖 1 乒乓球可復原凹陷深度與溫度的關係，紅點為對應溫度的最大凹陷深度，紅色趨勢線是以紅點數據產生的回歸曲線。

圖 1 顯示在不同水溫下，不同凹陷程度的乒乓球，經過熱水浸泡後可以回復球形的結果，標示紅點的數據是在該水溫下得到復原的最大凹陷深度，紅線是不同溫度紅點數據的趨勢線(回歸曲線)，由趨勢線可以看出水溫較低時，可恢復球面的凹陷深度較淺，要復原較深凹陷的乒乓球，必須增高水的溫度。另外，根據趨勢線我們也可以估算在任一溫度，同時具有球內空氣受熱與乒乓球殼受熱的兩種作用下，乒乓球可恢復球面的最大凹陷深度。

實驗二：以自製壓力計測量乒乓球內空氣壓力與溫度的關係。

在實驗中，以 500 毫升燒杯準備溫度 35°C、40°C、45°C、50°C、55°C、60°C、65°C、70°C、75°C、80°C 的熱水各約 300 毫升，將接於 U 型管一端的乒乓球分別置於不同溫度的熱水中，觀察 U 型管中水位高低的變化，等待水位變化達到穩定時，測量 U 型管兩邊的水位高低差 Δ ，單位為「釐米水柱(cmH₂O)」，此水位高低差 Δ 代表乒乓球內氣體壓力的大小。針對各個溫度的熱水進行 5 次的測量，並求出平均值與標準差，實驗結果記錄於表 2.1 中。

常見市面上測量壓力的壓力錶單位為「磅每平方英吋(psi)」，轉換關係為【1 cmH₂O = 0.0142229 psi】，表 2.2 記錄以 psi 為單位的壓力。

實驗二結果：

溫度 (°C)	水位高低差 Δ (cmH ₂ O)						
	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均	標準差
30	6.0	6.8	6.1	6.2	6.3	6.3	0.3
35	11.4	13.0	11.8	12.8	11.9	12.2	0.7
40	16.4	17.4	16.8	16.8	17.0	16.9	0.4
45	22.4	22.5	22.7	21.8	22.7	22.4	0.4
50	26.7	26.4	29.5	28.6	28.8	28.0	1.4
55	31.3	31.6	35.3	33.2	33.1	32.9	1.6
60	36.6	39.0	38.6	39.5	39.2	38.6	1.2
65	39.4	42.3	43.0	43.5	43.0	42.2	1.6
70	43.6	45.1	47.7	49.8	48.7	47.0	2.6
75	51.2	55.6	55.7	57.3	56.0	55.2	2.3
80	57.3	58.6	59.5	59.8	59.2	58.9	1.0

表 2.1 不同溫度時對應的 U 型管水位高低差。

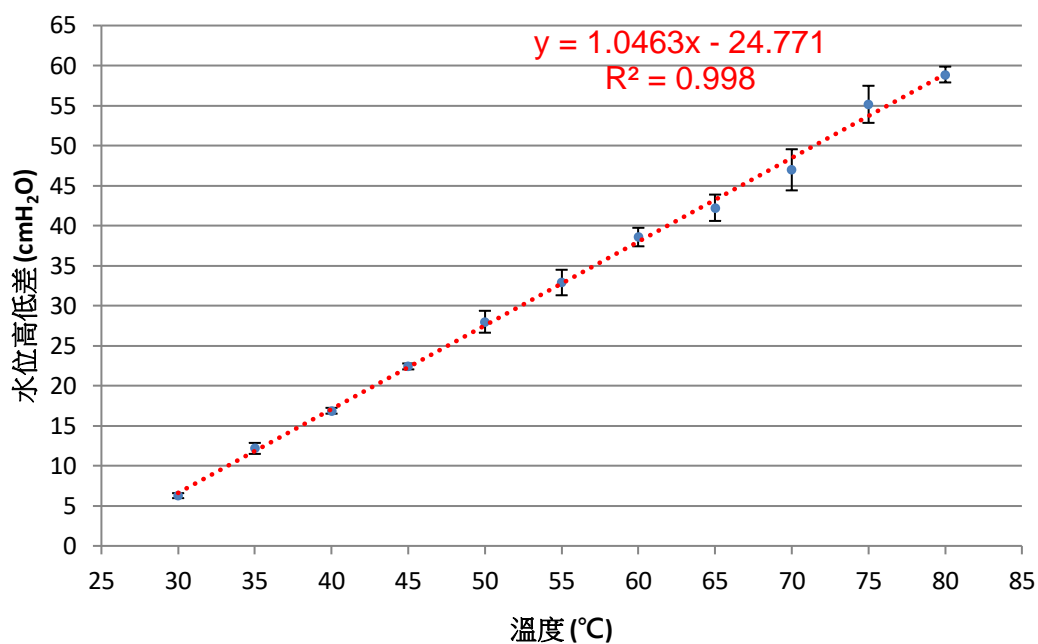


圖 2.1 溫度與 U 型管水位高低差的線性關係。

溫度 (°C)	壓力(psi)						
	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均	標準差
30	0.085	0.097	0.087	0.088	0.09	0.089	0.004
35	0.162	0.185	0.168	0.182	0.169	0.173	0.010
40	0.233	0.247	0.239	0.239	0.242	0.24	0.005
45	0.319	0.32	0.323	0.31	0.323	0.319	0.005
50	0.38	0.375	0.42	0.407	0.41	0.398	0.019
55	0.445	0.449	0.502	0.472	0.471	0.468	0.023
60	0.521	0.555	0.549	0.562	0.558	0.549	0.016
65	0.56	0.602	0.612	0.619	0.612	0.601	0.023
70	0.62	0.641	0.678	0.708	0.693	0.668	0.037
75	0.728	0.791	0.792	0.815	0.796	0.785	0.033
80	0.815	0.833	0.846	0.851	0.842	0.837	0.014

表 2.2 不同溫度時對應的乒乓球內氣體壓力。

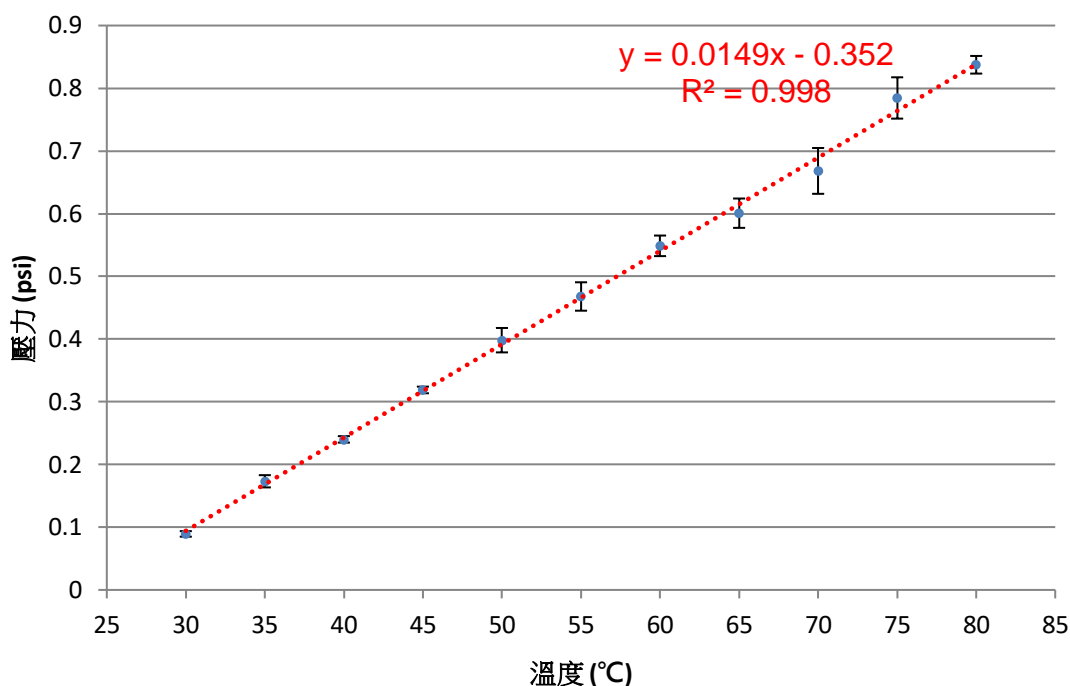


圖 2.2 溫度與乒乓球內氣體壓力的線性關係。

圖 2.1 與圖 2.2 清楚顯示乒乓球在溫度逐漸增加的水中，球內的壓力也逐漸增高，壓力與水溫呈現正比關係。

實驗三：以打氣筒實際測試不同凹陷深度的乒乓球，測量不同凹陷深度乒乓球恢復圓球形所需施打的壓力大小。

先以螺絲起子將乒乓球鑽一小孔，作為連接打氣筒的接口，再利用實驗一的乒乓球凹陷製作方法，產生凹陷深度不同的乒乓球。開始測量時，先將打氣筒接上乒乓球接口，確認接口沒有漏氣產生，當開始打氣時，同時以手機慢動作錄影，記錄下施打氣體進入乒乓球的過程，以及打氣筒壓力計的讀數變化。完成後檢視慢動作畫面，確認乒乓球恢復球形時的壓力數值。

實驗三結果：

乒乓球的凹陷深度 (mm)	恢復圓形乒乓球的壓力(psi)
2.05	7
2.25	9
2.3	10
2.4	11.5

2.55	12
2.6	16
2.65	16
2.7	16
2.85	16
3.05	18
3.3	18
3.5	20
3.7	20.7
3.8	25

表 3 乒乓球不同凹陷深度所對應的復原壓力。

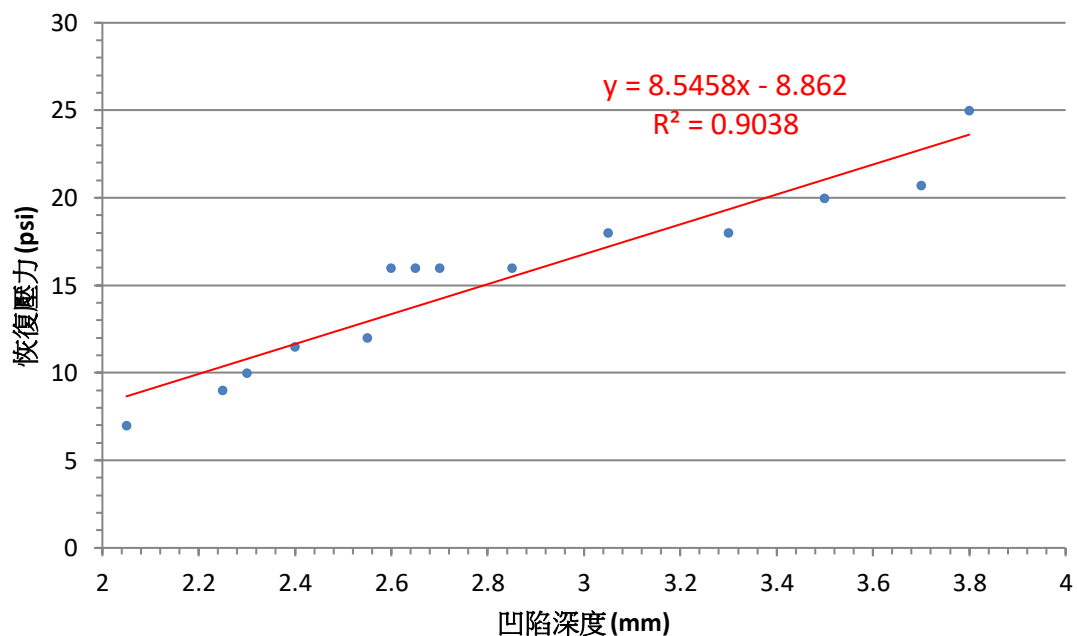


圖 3 乒乓球凹陷深度與乒乓球恢復球形所需壓力的關係。

圖 3 說明要使得凹陷乒乓球回復圓球形，打氣筒對乒乓球必須施加的壓力與乒乓球凹陷深度之間有一正比的關係，凹陷深度越深，打氣筒必須施加更大壓力，乒乓球的凹陷才能復原。實驗結果顯示當凹陷深度 2.05 mm 時，復原乒乓球的壓力至少要 7 psi，而凹陷深度 3.8 mm 時，壓力要增加至 25 psi。

實驗四：測試在缺少球內空氣壓力的作用下，溫度與凹陷乒乓球復原的關係。

將乒乓球切開成半球形，這時不再有球內空氣膨脹產生壓力的作用，只剩下乒乓球殼受熱後的效應，我們以實驗一相同的方式對半球形乒乓球製造不同的凹陷深度，測試在水溫 45°C 到 80°C 的範圍內，每個特定溫度可以恢復以及不能恢復圓球面的凹陷深度，並將成功恢復圓球面的凹陷深度與水溫記錄於表 4，以估計每個特定溫度可以恢復的最大凹陷深度。

實驗四結果：

溫度 (°C)	半球形乒乓球凹陷深度 (mm)				
	1	2	3	4	5
45	2.3	2.25	2.1	2.05	2.0
50	2.8	2.65	2.6	2.55	2.05
55	3.2	2.95	2.8	2.7	2.05
60	4.05	3.15	2.8	2.4	2.3
65	4.05	3.35	3.1	2.75	2.45
70	3.95	3.75	3.05	2.6	2.4
75	4.25	4.05	3.2	2.95	2.75
80	4.55	3.1	3.05	2.65	2.5

表 4 不同水溫時，測量到的半球形乒乓球可復原凹陷深度。

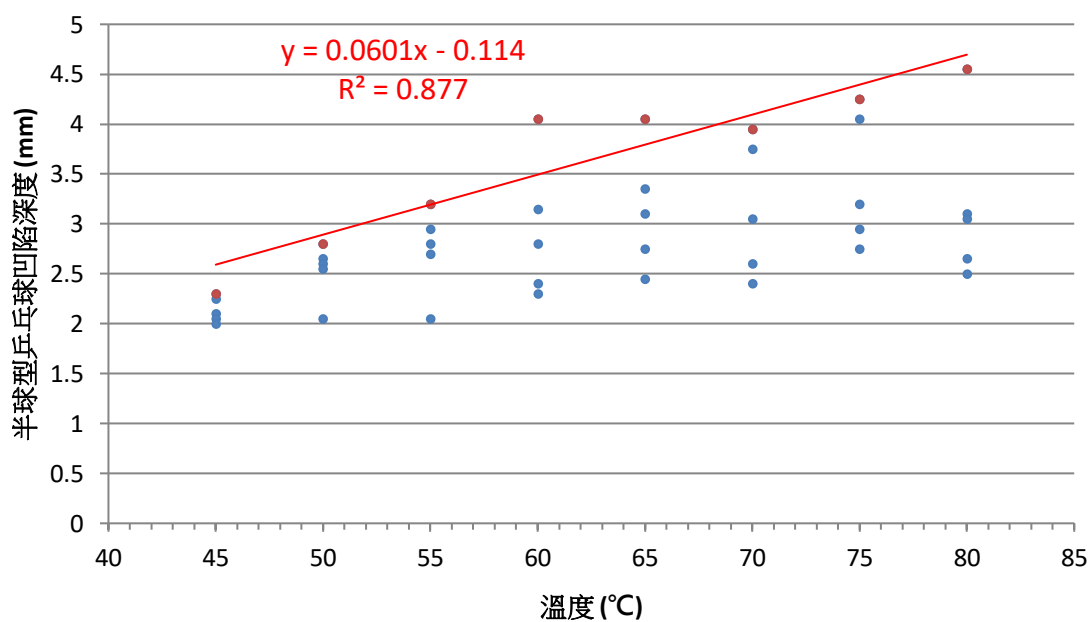


圖 4 半球形乒乓球可復原凹陷深度與溫度的關係，紅點為對應溫度的最大凹陷深度，紅色趨勢線是以紅點數據產生的回歸曲線

圖 4 顯示在不同水溫下，不同凹陷程度的半球形乒乓球，經過熱水浸泡後可以回復球面的結果，標示紅點的數據是在該水溫下可以復原的最大凹陷深度，紅線是以不同溫度的紅點數據產生的趨勢線，可以用來估計各個溫度下，沒有球內空氣的作用，乒乓球可恢復球面的最大凹陷深度。

陸、 討論

一、 實驗一

實驗過程發現乒乓球本身具有彈性，當施力產生的凹陷深度不夠大時，凹陷會因乒乓球本身的彈力，在沒有其他外在幫助下而復原。實驗結果得知每個溫度條件下，所能夠復原的凹陷深度有一限度，觀察不同溫度的結果以及根據線性迴歸分析，可以歸納出溫度與最大可復原凹陷深度的關係：**【 $y = 0.0649x - 0.397$ ； $x =$ 溫度($^{\circ}\text{C}$)， $y =$ 最大凹陷深度(mm)】**。

二、 實驗二

由實驗一的過程，可以發現凹陷乒乓球放入熱水中可以產生復原效果，我們合理假設凹陷乒乓球復原的原因是來自於兩個因素：(一) 球殼內部空氣受熱，(二) 乒乓球殼受熱。在實驗二裡，我們測量球殼內部空氣受熱膨脹後造成的壓力變化，當溫度由 30°C 增加到 80°C 時，壓力大約從 0.1 psi 增加到 0.85 psi ，將這段溫度範圍的實驗數據以線性迴歸進行分析，結果顯示溫度與壓力關係為：**【 $y = 0.0149x - 0.352$ ； $x =$ 溫度($^{\circ}\text{C}$)， $y =$ 壓力(psi)】**。

三、 實驗三

透過實驗三，我們希望釐清若沒有乒乓球殼受熱的作用，而只有球殼內部空氣壓力的作用下，需要多大的壓力才能將凹陷乒乓球復原。由實驗結果我們獲得凹陷深度與恢復所需的壓力之間有以下的關係：**【 $y = 8.5458x - 8.862$ ； $x =$ 凹陷深度(mm)， $y =$ 恢復壓力(psi)】**，在凹陷深度範圍 2 mm 到 4 mm 之間，實驗所需的復

原壓力由大約 7 psi 增加到 25 psi。

四、 實驗四

在實驗四裡，我們測試若沒有球殼內部空氣的作用，而只有乒乓球殼受熱作用時，凹陷球殼在熱水中的恢復情況。以線性迴歸分析實驗結果，我們得到溫度與最大可復原凹陷深度的關係：**【 $y = 0.0601x - 0.114$ ； $x =$ 溫度($^{\circ}\text{C}$)， $y =$ 最大凹陷深度(mm)】**。

五、 比較實驗一與實驗四

將實驗一與實驗四得到的溫度與最大可復原凹陷深度關係加以比較，結果如下圖：

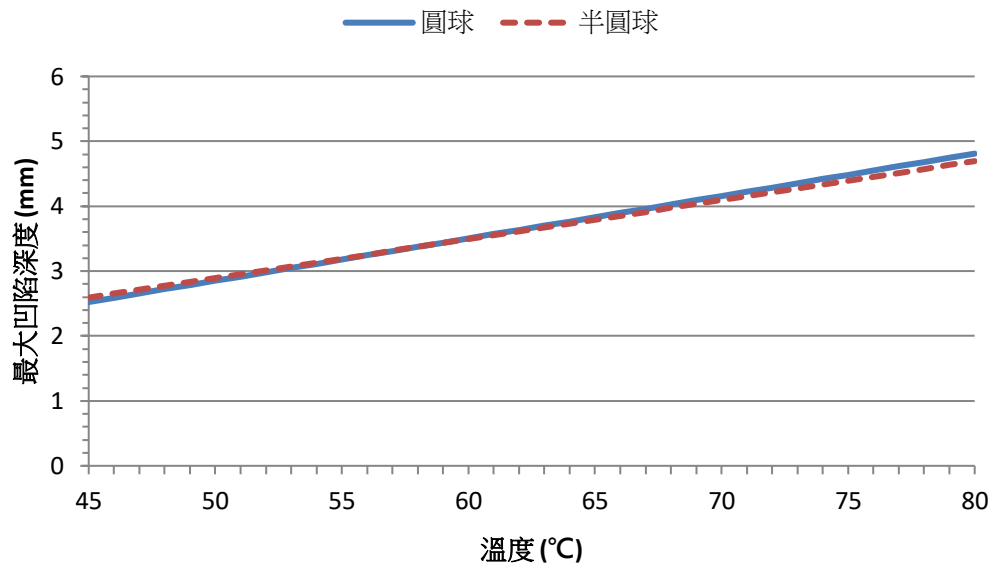


圖 5 比較有與無球殼內的空氣，最大可復原凹陷深度與溫度的關係。

比較結果清楚顯示，同一溫度下的可復原最大凹陷的深度，在沒有球殼內空氣受熱作用(半圓球：紅虛線)時，與有球殼內空氣受熱作用(圓球：藍實線)時的結果是相當的，並無明顯差異。由此可以推斷球殼內空氣受熱膨脹而造成的壓力增加效果，對凹陷乒乓球的復原產生極小的作用，因此球殼本身受熱的作用是凹陷乒乓球可以復原的主要原因。

六、 比較實驗一、實驗二與實驗三

根據實驗一、二、三的結果，我們可以進一步估計球殼內空氣受熱，在不同溫度的條件下，對不同凹陷深度復原的貢獻比率變化。由實驗一的結果(圖 1 趨勢線)，可以觀察到某一特定凹陷深度下，乒乓球復原所需要最小熱水溫度，我們選定四個凹陷深度，2.52 mm、3.17 mm、3.82 mm、4.47 mm 做比較，對應的復原所需最小溫度是 45°C、55°C、65°C、75°C。由實驗三的關係式(圖 3 趨勢線)，可以得到每個凹陷深度所需要的恢復壓力大小，分別是 12.7 psi、18.2 psi、23.8 psi、29.3 psi。根據實驗二結果(圖 2.2)的溫度與壓力關係式，可以得到每個凹陷深度下，最小熱水溫度到 80°C 之間，乒乓球內空氣的壓力變化，將球內壓力變化與對應凹陷深度的恢復壓力相比，可以得到球內空氣壓力對凹陷恢復所需壓力佔有的百分比，比較結果如下圖：

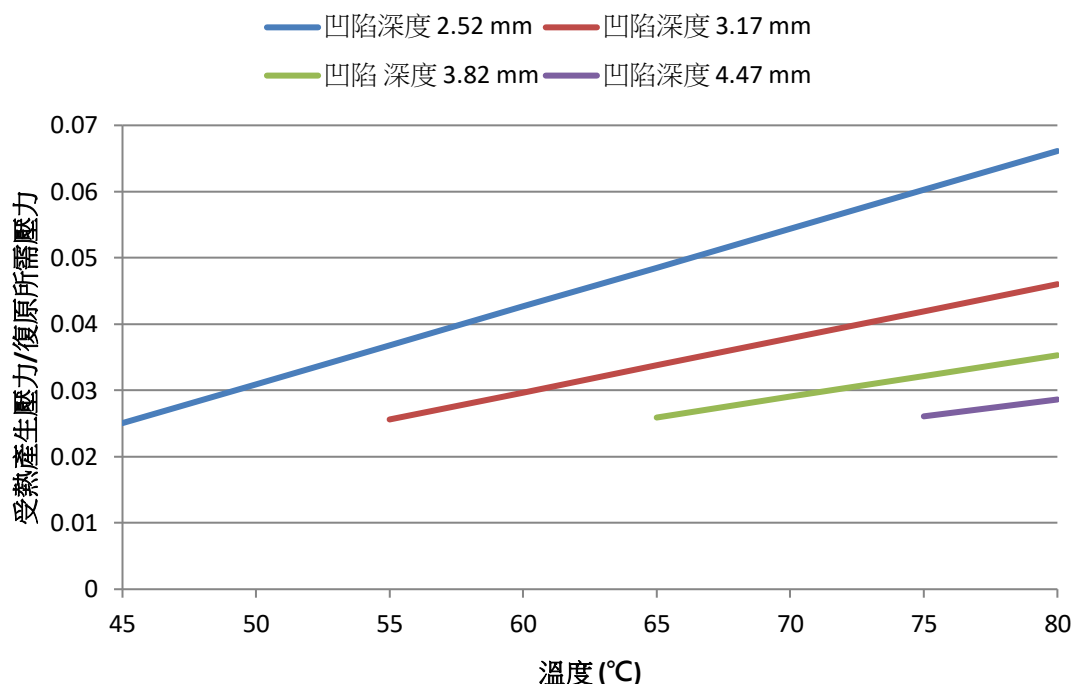


圖 6 溫度對乒乓球內空氣受熱產生壓力與恢復凹陷所需壓力之間比例的關係。

由比較結果可以歸納出，球殼內部空氣受熱產生的壓力對凹陷乒乓球恢復所需壓力佔有的比率相當低，約在 2-7% 之間。不同凹陷深度的乒乓球，在最小溫度

時，球內空氣受熱的壓力與所需的壓力比值相當，約 2.5%，但凹陷深度較小時 (2.52 mm)，溫度升高造成球內的壓力增加，對於凹陷恢復的貢獻也增加，由 45°C 的 2.5% 增加到 80°C 的 6.7%；當凹陷深度較大時 (4.47 mm)，凹陷恢復的最小溫度增高至 75°C，因此溫度增加的空間有限，對於凹陷恢復的貢獻也有限，只能由 75°C 的 2.6% 增加到 80°C 的 2.9%。

柒、 結論

本實驗目的在澄清關於凹陷乒乓球放入熱水中可以恢復圓球面的主要原因，書本上常見的解釋為乒乓球內空氣的熱脹冷縮效應，我們合理懷疑以此產生的壓力變化不足以造成凹陷乒乓球的復原，於是提出合理假設，除了(一)乒乓球殼內的空氣受熱效應外，還有(二)球殼本身的受熱效應可造成凹陷乒乓球復原。

由設計的實驗一確實觀察到凹陷乒乓球在熱水作用下可以產生復原的現象，且不同的熱水溫度對能夠恢復的凹陷深度有其限制。我們以實驗二確認乒乓球殼內的空氣在不同熱水中可以產生的壓力大小，並以實驗三在無球殼受熱作用的條件下，測得乒乓球凹陷復原所需的氣體壓力，由此歸納出，球殼內部空氣受熱產生的壓力與凹陷乒乓球恢復所需壓力的百分比，在不同溫度範圍內，貢獻比例在 2% 至 7% 之間，其中值得注意不同凹陷深度的比較，當溫度達到復原凹陷的最低要求時，如圖 6 所示凹陷深度 2.52mm、3.17mm、3.82mm 與 4.47mm 的要求分別是溫度 45°C、55°C、65°C 與 75°C，此時乒乓球內空氣受熱膨脹增加的氣體壓力，占所需要的凹陷恢復壓力比例都在 2.5% 左右，顯見得不論在何種凹陷深度下，乒乓球復原的最低溫度能提供的乒乓球氣體壓力的貢獻，都是極小的一部分，換言之，乒乓球殼受熱的作用同樣是隨著溫度增高而增加，並且對乒乓球凹陷的復原占有主要的貢獻。另一方面，我們由實驗四結果與實驗一結果的比較可以看出，在缺少球殼內空氣受熱的效應下，只利用球殼本身的受熱效應，達到的乒乓球凹陷恢復效果，與同時具備兩者受熱效應所產生的凹陷恢復效果幾乎一樣。

綜合以上的實驗結果，我們可以說明凹陷乒乓球放入熱水中之所以可以恢復圓球面，主要是乒乓球殼本身受高溫作用產生的效果，雖然球殼內的氣體同時受到高溫作用會產生壓力增加的效果，但是由我們的實驗證實，增加的氣體壓力遠低於足夠使凹陷球殼復原的壓力，

因此簡單以氣體熱脹冷縮效應解釋凹陷乒乓球殼復原的說法並沒有將現象觀察背後的物理因素完整的說明。

捌、 未來展望

這次實驗的研究說明了凹陷乒乓球之所以在熱水中可以復原，主要並不是球內空氣膨脹的因素，而是乒乓球殼本身受熱作用後的反應，因此乒乓球的材質與溫度變化的關係也是我們感興趣的課題，目前國際標準的乒乓球材質是 ABS 塑膠(A 代表丙烯晴、B 代表丁二烯、S 代表苯乙烯)，也是一般市售乒乓球的標準材質，假若改變乒乓球的材質，對於凹陷乒乓球的復原是否也會造成影響？此外，我們也好奇乒乓球的圓球形結構，對於凹陷乒乓球受熱復原的過程是否有影響？在這次研究實驗中，我們有使用到半圓形的乒乓球，之所以採用半圓形，其目的在消除球內空氣的作用，同時又希望減少乒乓球外觀的變異度，而半圓球的形狀能夠使凹陷部分的四周與原本的圓球形差異較少，如果能夠比較平面上的凹陷與圓球形上凹陷的復原差異，則圓球形結構對乒乓球凹陷復原是否有幫助，也許就能有更進一步的了解。

玖、 參考資料及其他

王鼎銘、李清勝、林英智等 (2016)。自然與生活科技 6 上。臺北市：康軒文教事業。

翰林出版事業股份有限公司(2017 年 9 月 15 日)。國小_自然_熱脹冷縮的應用【翰林出版_五上_第三單元 熱對物質的影響】。學習吧 LearnMode 。取自

<https://www.learnmode.net/flip/video/56249>

台中市政府教育局。溫度會影響物質的形態。教育雲教育媒體影音。取自

https://video.cloud.edu.tw/video/co_video_content.php?p=297692

生活裡的科學 (2013 年 10 月 19 日)。伸縮自如熱脹冷縮。大愛電視。取自

<https://www.youtube.com/watch?v=zZI8JIE156g>

Pressure. (2014, June 26). BBC Bitesize. Retrieved from

<https://www.bbc.com/bitesize/guides/zrcmn39/revision/3>

國家度量衡標準實驗室。「單位換算」。取自 <https://www.nml.org.tw/unit-conversion.html?view=unitconversion&typeid=6>

【評語】 080117

1. 能設計不同讓凹陷乒乓球復原的實驗，釐清實際造成的因素，具有創意。
2. 研究目的明確，適合國小學童進行科學探究。
3. 方法合宜，數據表達清晰。

摘要

針對乒乓球凹陷後，放入熱水中可以恢復圓球面的現象，不論是課堂、書本，或是網路上的資料，都將原因歸咎於氣體的熱脹冷縮效應，似乎都忽略了乒乓球殼本身的受熱效應。我們因此設計了四個實驗，希望透過實驗結果的分析能夠確實了解乒乓球凹陷後能夠復原的原因。我們測量了（一）乒乓球在不同水溫下，可復原的最大凹陷深度與水溫的關係；（二）水溫與乒乓球內氣體壓力的關係；（三）純粹氣體壓力作用下，凹陷乒乓球的復原結果；（四）無氣體壓力作用時，純粹乒乓球殼受熱的效果。實驗結果說明，乒乓球受熱增加的氣體壓力遠低於足夠使凹陷球殼復原的壓力，因此簡單以氣體熱脹冷縮效應解釋凹陷乒乓球殼復原的說法，並沒有將現象背後主要的物理因素完整呈現。

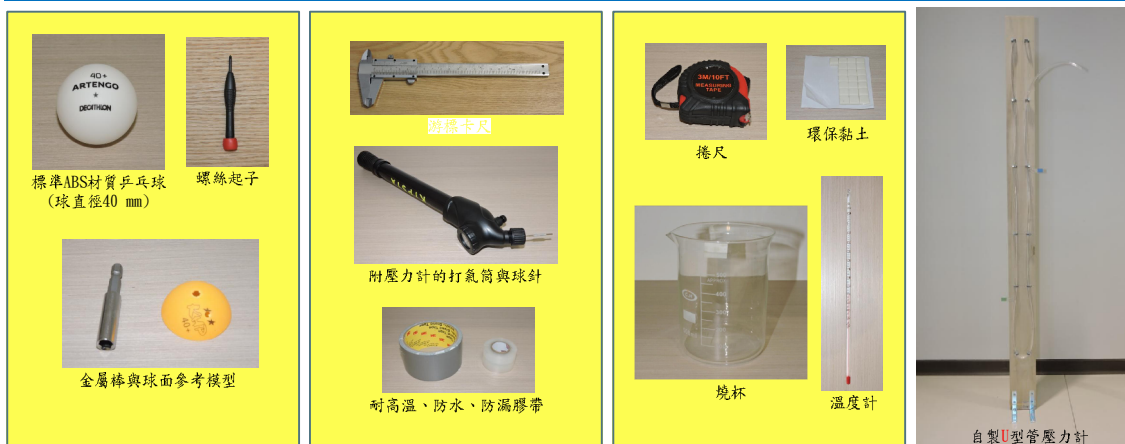
研究動機與目的

課堂上有提到凹陷的乒乓球，可以透過熱水加熱，利用空氣熱脹冷縮的特性，使凹陷部分回復原形，然而在課堂的實驗中，我們做了氣體受熱膨脹的實驗，利用氣球套住燒杯口，再將燒杯放入沸水中，觀察原本扁平的氣球因氣體膨脹而樹立起來，但是用手觸摸氣球會明顯發現氣球是相當柔軟，手指可以輕易將氣球壓扁，這不禁讓我們懷疑膨脹的氣體真的有足夠的力量將凹陷的乒乓球撐回原來的形狀嗎？因此我們希望透過詳細的實驗，來探討凹陷的乒乓球在受熱作用後，是否真得是因為空氣的熱脹冷縮而復原，或是有其他原因造成的結果。

將乒乓球放在熱水中加熱，受熱影響的部分包括了（一）乒乓球的球殼，（二）球殼內部的空氣。書本上與網路上的資料通常以空氣受熱膨脹來解釋乒乓球凹陷後，放入熱水中可復原的現象，此說法是認為空氣受熱在乒乓球殼內膨脹，但受到乒乓球體積限制，因此造成內部壓力變大，進而將凹陷部分擠壓回原來球面，這是把空氣受熱膨脹當作主要的效應，而忽略球殼本身受熱的作用，因此我們設計以下實驗來測試這兩種作用在凹陷乒乓球受熱過程中所佔有的重要性大小。

- 一. 測試在不同溫度下，可以使凹陷乒乓球恢復圓球面的最大凹陷深度。
- 二. 以自製壓力計測量乒乓球內空氣壓力與溫度的關係。
- 三. 以打氣筒實際測試不同凹陷深度的乒乓球，測量將乒乓球恢復球型所需施打的壓力大小。
- 四. 測試無球內空氣壓力作用下，溫度與凹陷乒乓球恢復球面的關係。

研究設備及器材



研究過程與方法

實驗一：測試不同溫度，凹陷乒乓球能夠恢復圓球面的最大凹陷深度。

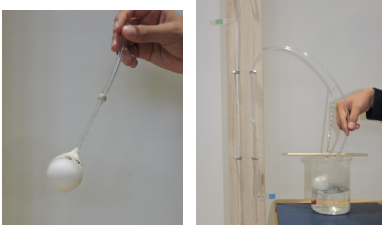
- 一. 以金屬棒對乒乓球施力，造成乒乓球產生凹陷。
- 二. 利用【球面參考模型】覆蓋於乒乓球凹陷部分，再以游標卡尺的深度尺深入【球面參考模型】的孔洞，用以測量凹陷深度。
- 三. 將凹陷的乒乓球放入燒杯熱水中，觀察是否造成凹陷的復原。
- 四. 重複以上過程，測試水溫在45°C到82°C之間，特定溫度下能復原的最大凹陷深度。



步驟一

實驗二：以自製壓力計測量乒乓球內空氣壓力與溫度的關係。

- 一. 將乒乓球以螺絲起子鑽一小孔用來連接壓力計的塑膠水管，連接點以防熱、防水、防滲膠帶密封，再以環保黏土覆蓋，確保連接處不會產生空氣的外洩。
- 二. 將乒乓球放入特定水溫的燒杯中，觀察U型管中水的高度變化，等待高度穩定後，測量U型管兩側水位的高低差，並記錄下燒杯水的溫度與U型管水位高低差。
- 三. 測試水溫在30°C到80°C之間所產生的水位高低差變化。

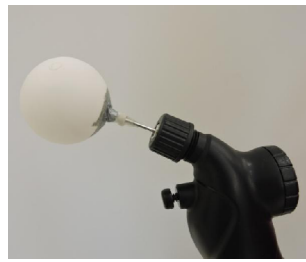


步驟一

步驟二

實驗三：以打氣筒實際測試不同凹陷深度的乒乓球，測量將乒乓球恢復球型所需施打的壓力大小。

- 一. 以螺絲起子將乒乓球鑽一小孔，插入一小段塑膠管作為連接打氣筒的接口，塑膠管與乒乓球連接處以防熱、防水、防滲膠帶密封，再以環保黏土覆蓋，確保氣體無外洩。
- 二. 將附有壓力計的打氣筒接上球針，再把球針插入乒乓球的小孔內，以環保黏土密封，確保氣體不會外洩。
- 三. 以實驗一的乒乓球凹陷製作方法產生凹陷深度不同的乒乓球。
- 四. 手動推進打氣筒，將氣體打入凹陷乒乓球內，同時利用 iPhone 手機的慢動作錄影功能，記錄下乒乓球凹陷面的變化過程以及打氣筒壓力計的讀數變化。
- 五. 檢視手機錄製的慢動作畫面，確認乒乓球凹陷恢復時的壓力錶數值。
- 六. 記錄乒乓球的凹陷深度以及恢復球面時的壓力錶數值。



步驟一、二

實驗四：無球內空氣壓力作用時，測試溫度與凹陷乒乓球恢復球面的關係。

- 一. 將乒乓球切成半球型，再以金屬棒在乒乓球上施力造成凹陷。
- 二. 以游標卡尺與【球面參考模型】測量凹陷的深度。
- 三. 將凹陷的半球型乒乓球放入燒杯熱水中，觀察凹陷是否回復成圓球面。
- 四. 重複以上過程，測試水溫在45°C到80°C之間，特定溫度可以復原的最大凹陷深度。



步驟一

實驗結果

實驗一：測試不同溫度，凹陷乒乓球能夠恢復圓球面的最大凹陷深度。

在水溫45°C到82°C之間測試各種不同凹陷程度的乒乓球，觀察特定水溫能否使凹陷乒乓球恢復圓球面。將成功恢復圓球面的水溫及凹陷深度記錄於表1，以估計每個特定溫度可以恢復的最大凹陷深度。

圖1顯示在不同水溫下，不同凹陷程度的乒乓球經過熱水浸泡後，可以回復球型的結果。標示紅點的數據是在該水溫下得到復原的最大凹陷深度，紅線是各個紅點數據的趨勢線，由趨勢線可以看出水溫較低時，可恢復球面的凹陷深度較淺，要復原較深凹陷的乒乓球，必須增高水的溫度。另外，根據趨勢線我們也可以估算在任一溫度，當球內空氣與乒乓球殼同時受熱作用下，乒乓球可恢復球面的最大凹陷深度。

溫度(°C)	乒乓球凹陷深度(mm)				
	1	2	3	4	5
45	2.4	2.0	2.05	2.1	1.95
48	2.45	1.85	0.9	2.0	2.2
50	2.2	2.0	2.3	3.05	2.55
53	2.75	2.4	2.6	2.9	2.15
55	3.5	3.1	3.2	2.35	2.1
57	3.25	2.5	1.95	3.3	2.2
60	4.1	3.55	3.15	2.8	2.25
62	2.2	1.85	3.25	2.95	2.8
65	3.45	3.55	4.0	2.2	2.1
67	3.3	2.6	2.2	2.05	2.8
70	4.6	3.2	2.05	3.4	2.1
72	3.3	3.45	2.85	4.3	4.05
75	2.35	3.25	3.0	4.25	4.0
78	4.8	3.35	4.15	4.6	4.5
80	4.4	3.1	2.8	2.2	2.1
82	4.0	2.35	3.6	5.2	2.8

表1 水溫45°C到82°C之間，測得可復原的不同凹陷程度乒乓球。

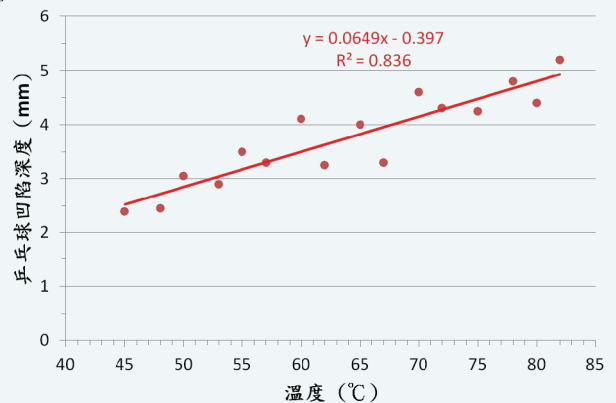


圖1 乒乓球可復原凹陷深度與溫度的關係，紅點為對應溫度的最大凹陷深度，紅色趨勢線是以紅點數據產生的回歸曲線。

實驗二：以自製壓力計測量乒乓球內空氣壓力與溫度的關係。

以500毫升燒杯準備溫度35°C、40°C、45°C、50°C、55°C、60°C、65°C、70°C、75°C、80°C的熱水各約300毫升，將接於U型管一端的乒乓球分別置於不同溫度的熱水中，觀察U型管中水位高低的變化，等待水位變化達到穩定時，測量U型管兩邊的水位高低差 Δ ，單位為「釐米水柱(cmH_2O)」，此水位高低差 Δ 代表乒乓球內壓力的大小，針對各個溫度的熱水進行5次的測量，並求出平均值與標準差。常見市面上測量壓力的壓力錶單位為「磅每平方英吋(psi)」，轉換關係為【 $1 \text{ cmH}_2\text{O} = 0.0142229 \text{ psi}$ 】，表2記錄以psi為壓力單位的實驗結果。圖2清楚顯示乒乓球在溫度逐漸增加的水中，球內的壓力也逐漸增高，壓力與水溫呈現正比關係。

溫度(°C)	壓力(psi)						
	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均	標準差
30	0.085	0.097	0.087	0.088	0.09	0.089	0.004
35	0.162	0.185	0.168	0.182	0.169	0.173	0.010
40	0.233	0.247	0.239	0.239	0.242	0.24	0.005
45	0.319	0.32	0.323	0.31	0.323	0.319	0.005
50	0.38	0.375	0.42	0.407	0.41	0.398	0.019
55	0.445	0.449	0.502	0.472	0.471	0.468	0.023
60	0.521	0.555	0.549	0.562	0.558	0.549	0.016
65	0.56	0.602	0.612	0.619	0.612	0.601	0.023
70	0.62	0.641	0.678	0.708	0.693	0.668	0.037
75	0.728	0.791	0.792	0.815	0.796	0.785	0.033
80	0.815	0.833	0.846	0.851	0.842	0.837	0.014

表2 不同溫度時對應的乒乓球內氣體壓力。

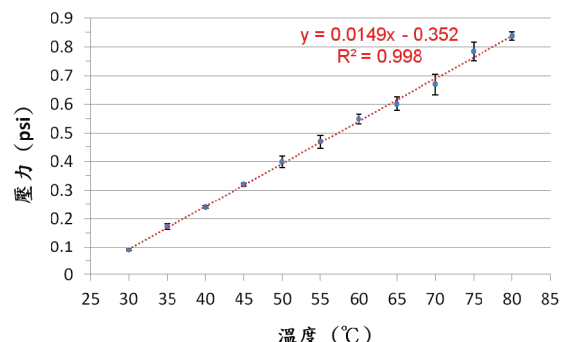


圖2 溫度與乒乓球內氣體壓力的線性關係，紅色虛線是數據點的

實驗三：以打氣筒實際測試不同凹陷深度的乒乓球，測量將乒乓球恢復球型所需施打的壓力大小。

圖3顯示回復圓球型時，乒乓球所須的壓力與乒乓球凹陷深度有一正比的關係，凹陷深度越深，打氣筒必須施加更大壓力，乒乓球的凹陷才能復原。實驗結果顯示當凹陷深度2.05mm時，復原乒乓球的壓力至少要7psi，而凹陷深度3.8mm時，壓力要增加至25psi

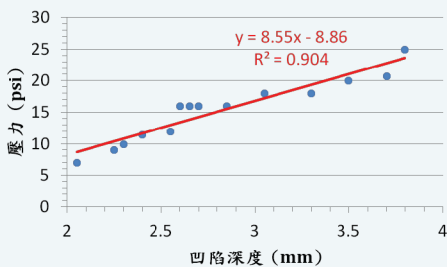


圖3 乒乓球凹陷深度與乒乓球恢復球形所需壓力的關係，紅色趨勢線是藍色數據點產生的回歸曲線。

實驗四：無球內空氣壓力作用時，測試溫度與凹陷乒乓球恢復球面的關係。

將乒乓球切開成半球型，這時不再有球內空氣膨脹產生的作用，只剩下乒乓球殼受熱的效應。圖4顯示在不同水溫下，不同凹陷程度的半球型乒乓球經熱水浸泡後能夠回復球面的結果，紅色趨勢線可用來估計在各個溫度，無球內空氣作用時，乒乓球可恢復球面的最大凹陷深度。

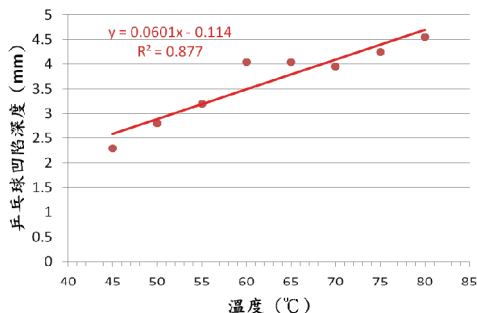


圖4 半球形乒乓球可復原凹陷深度與溫度的關係，紅點標示該水溫下可以復原的最大凹陷深度，紅色趨勢線是紅色數據點的回歸曲線。

結果討論與結論

- 實驗一的過程發現乒乓球本身具有彈性，當施力產生的凹陷深度不夠大時，凹陷會因乒乓球本身的彈力，在沒有其他外在幫助下而復原。實驗結果得知每個溫度條件下，所能夠復原的凹陷深度有一限度，觀察不同溫度的結果，可以歸納出溫度與最大可復原凹陷深度的關係為：【 $y = 0.0649x - 0.397$; $x =$ 溫度(°C), $y =$ 最大凹陷深度(mm)】。
- 實驗二測量乒乓球受熱造成的內部空氣壓力變化，實驗結果顯示溫度與壓力的關係為：【 $y = 0.0149x - 0.352$; $x =$ 溫度(°C), $y =$ 壓力(psi)】。在溫度由30°C增加到80°C的範圍內，壓力大約從0.1psi增加到0.85psi。
- 當乒乓球完全不加熱，而只增加球殼內部的空氣壓力，實驗三得知凹陷深度與恢復球面所需的壓力之間有以下關係：【 $y = 8.55x - 8.86$; $x =$ 凹陷深度(mm), $y =$ 恢復壓力(psi)】，在凹陷深度範圍2mm到4mm之間，所需的復原壓力由大約7psi增加到25psi。
- 當沒有球殼內部空氣作用，而只有乒乓球殼受熱作用，實驗四得到溫度與最大可復原凹陷深度的關係：【 $y = 0.0601x - 0.114$; $x =$ 溫度(°C), $y =$ 最大凹陷深度(mm)】。
- 比較實驗一與實驗四的「溫度與最大可復原凹陷深度關係」，結果如圖5。

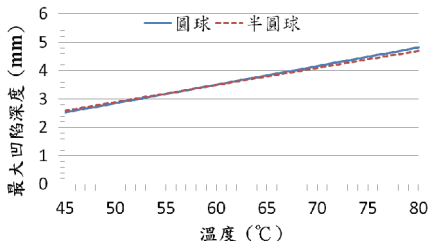


圖5 比較圓球與半圓球在最大可復原凹陷深度上的差異。

圖5清楚顯示，同一溫度下球殼可復原的最大凹陷深度，在無空氣受熱作用(半圓球；紅虛線)，與有空氣受熱作用(圓球；藍實線)的結果是相當的，並無明顯差異。由此推斷球殼內空氣受熱膨脹，造成壓力增加的效果，對凹陷乒乓球復原的作用極小，因此球殼本身受熱的作用是凹陷乒乓球可以復原的主要原因。

- 比較實驗一、實驗二與實驗三的結果，可以估計在不同溫度條件下，球殼內空氣受熱對不同凹陷深度復原的貢獻比率。由實驗一的結果(圖1趨勢線)，可以觀察到某一特定凹陷深度下，乒乓球復原所需要的最低水溫。選定四個凹陷深度，2.52mm、3.17mm、3.82mm、4.47mm做比較，對應的復原最低溫度是45°C、55°C、65°C、75°C，由實驗三的關係式(圖3趨勢線)，可以得到每個凹陷深度所需要的恢復壓力大小，分別是12.7psi、18.2psi、23.8psi、29.3psi。根據實驗二結果(圖2趨勢線)的溫度與壓力關係式，可知每個凹陷深度在最低水溫到80°C之間，對應的乒乓球內空氣壓力，將各個球內壓力與對應凹陷深度的恢復壓力相比，可以得到球內空氣壓力對凹陷恢復所需壓力佔有的百分比，比較結果如圖6。

由比較結果可以歸納出，球殼內部空氣受熱產生的壓力對凹陷乒乓球恢復所需壓力佔有的比率相當低，約在2-7%之間。不同凹陷深度的乒乓球，在最低溫度時(此時球殼與空氣受熱作用都是最大化)，球內空氣受熱的壓力與所需的壓力比值相當，約2.5%，但溫度升高至80°C時，2.52mm凹陷深度的壓力比值增加至6.6%；而4.47mm凹陷深度的壓力比值只增加至2.9%。

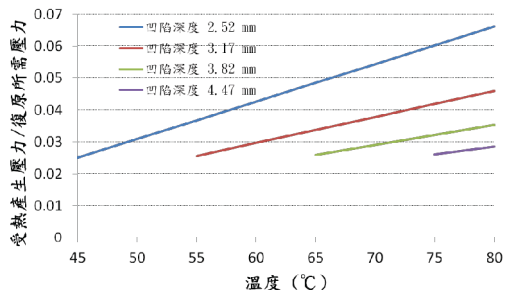


圖6 受熱壓力與所需壓力比值隨溫度變化的趨勢。

- 綜合以上的實驗結果，我們可以說明凹陷乒乓球放入熱水中之所以可以復原回圓球面，主要是乒乓球殼本身受高溫作用產生的效果，雖然球殼內的氣體同時受到高溫作用會產生壓力增加的效果，但是由我們的實驗證實，增加的氣體壓力遠低於足夠使凹陷球殼復原的壓力，因此簡單以氣體熱脹冷縮效應解釋凹

參考資料

- 王鼎銘、李清勝、林英智等(2016)。自然與生活科技6上。臺北市：康軒文教事業。
- 翰林出版專業股份有限公司(2017年9月15日)。國小_自然_熱脹冷縮的應用【翰林出版_五上_第三單元_熱對物質的影響】。學習吧LearnMode。取自<https://www.learnmode.net/flip/video/56249>
- 台中市政府教育局。溫度會影響物質的形態。教育雲教育媒體影音。取自https://video.cloud.edu.tw/video/co_video_content.php?p=297692
- 生活裡的科學(2013年10月19日)。伸縮自如熱脹冷縮。大愛電視。取自<https://www.youtube.com/watch?v=zI8J1E156g>
- Pressure. (2014, June 26). BBC Bitesize. Retrieved from <https://www.bbc.com/bitesize/guides/zrcnm39/revision/3>
- 國家度量衡標準實驗室。「單位換算」。取自 <https://www.nml.org.tw/unit-conversion.html?view=unitconversion&typeid=6>