

中華民國第 64 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國小組 物理科

第三名

080108

等一下！第一名的結論對嗎？-有關凹陷乒乓球
如何復原的研究

學校名稱：龍騰學校財團法人新北市林口康橋國際高
級中等學校

作者： 小五 盧煒翰 小五 陳庭緯 小五 趙祖玄 小五 吳昀采 小五 高宇熙 小五 陳祈瑞	指導老師： 張基航 徐佳璋
---	-----------------------------

關鍵詞：熱脹冷縮、乒乓球、凹陷復原

摘要

59 屆國展國小組物理科第一名作品提到「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」。實際經驗：凹陷乒乓球一旦有孔就無法遇熱復原，所以想確認實驗。

用自製壓球器確保凹陷的深度與形狀後，確認相同凹陷乒乓球遇熱後沒孔的球可復原，有孔的則不能。利用自製氣壓計確認了 59 小物 作品中球殼內部空氣受熱產生的壓力被嚴重低估、讓凹陷乒乓球恢復所需壓力被高估。

我們重要實驗的結論有二，第一：「氣體受熱膨脹是讓本研究中凹陷乒乓球復原的重要原因」此與 59 小物 的結論不同。第二：我們體驗到同稱作"凹陷乒乓球"，差異可能非常大(材質、厚薄、凹陷形狀...)，因此還是可能在某些狀況下 59 小物 觀察的現象存在。

壹、前言(含研究動機、目的、文獻回顧)

一、研究動機：

在聽到最新的研究結論「凹陷乒乓球放入熱水中可以恢復是球殼本身受高溫作用產生的效果」(第 59 屆全國科展物理科第一名作品「你真的知道凹陷乒乓球是為什麼復原的嗎？」(林煒翔, 2019)，後稱此作品為：59 小物) 時，覺得驚訝。這與實際生活經驗不符！以前用熱水燙有孔洞的凹陷乒乓球時，從沒成功讓凹陷復原過。缺少了內部空氣的膨脹推力的狀況下時，在以往的實際經驗中，凹陷是無法復原的。所以我們開始進行了一系列的研究，想確認到底發生了什麼事。

二、文獻回顧：

大家口中所說的乒乓球，都會是相同的東西嗎？以前乒乓球的材質是賽璐璐，2014 後連材質都改為了塑膠(ABS)，連標準乒乓球的大小也有了數次的改變。(掰咖老師, 2015)。現在的乒乓球還依照硬度等特質區分為三級(乒乓社交開球網, 2017)。所以大家生活經驗中的乒乓球，其實可能是不一樣的(材質、大小等...)。因此彼此間的表現可能是不大一致的。

整理 59 小物研究方法，推論其研究可能有以下的問題：

59 小物研究小結	59 小物研究方法	可能問題
凹陷乒乓球會復原，遇熱是主因。	測試在不同溫度時，凹陷乒乓球可復原的最大凹陷深度。	<ul style="list-style-type: none"> ● 他們自製的凹陷乒乓球需靜置一段時間，才能確定這些乒乓球不屬於會「緩慢復原的乒乓球」（見本文之觀察描述）
乒乓球泡熱水後產生的氣壓不大	燒杯裝熱水，泡入乒乓球後，利用自製壓力計測量空氣壓力。	<p>以下因素，可能導致壓力被低估：</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 加熱後未注意讓氣體體積保持一致，以致氣體膨脹，壓力下降。 ● 燒杯裝熱水，溫度下降快。 ● 乒乓球沒壓入熱水中，膨脹出球的氣體也未泡熱水。 ● 黏接球與管路之間可能漏氣。
推出乒乓球凹陷所需的壓力太大	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。	<p>可能會讓「推出乒乓凹陷」所需壓力被高估的可能如下：</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 59 小物測試的是室溫下較硬的乒乓球，但實際要復原的是高溫下較軟的乒乓球，所需壓力應該會較小。 ● 打氣時若接球處漏氣，打氣筒端的壓力會較高。 ● 打氣的過程與動作“可能”太快速激烈，易操作過頭，讀到較高的數值。
無氣體壓力作用時，純粹乒乓球殼受熱即可讓凹陷復原。	將乒乓球切成半球形，用金屬棒壓凹後泡熱水，觀察恢復狀況。	<ul style="list-style-type: none"> ● 球切除的越多，剩餘的部分應該越容易扭動變形，也會比較容易翻回原狀。不能用這代表整顆乒乓球的表現。

名詞定義：

- 1、我們將生活中可見到的乒乓球凹陷稱為**真實凹陷**，我們所壓製出的稱為**自製凹陷**
- 2、我們將乒乓球凹陷最深的凹陷深度稱為**深淺**。壓製物體所採用的立體形狀稱為**形狀**（本文中採用球形與指甲型），凹陷內部所壓出的白線狀的較尖銳摺痕稱為**摺痕**
- 3、第 59 屆全國科展物理科作品「你真的知道凹陷乒乓球是為什麼復原的嗎？」此作品為：**59 小物**



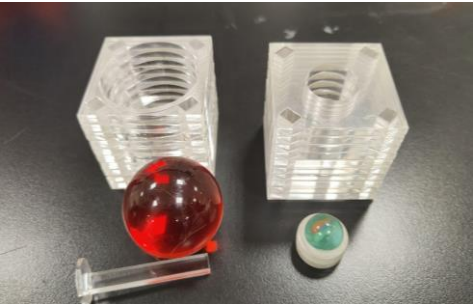


- 4、 壓力單位：後續我們都是利用高低水位差來衡量氣壓大小，因此本文中將統一採用“cm 水柱高”當作壓力的單位。經查資料一大氣壓為 1033.6 cm 水柱高。1 psi 為 71.28 cm 水柱高。

貳、 研究設備及器材

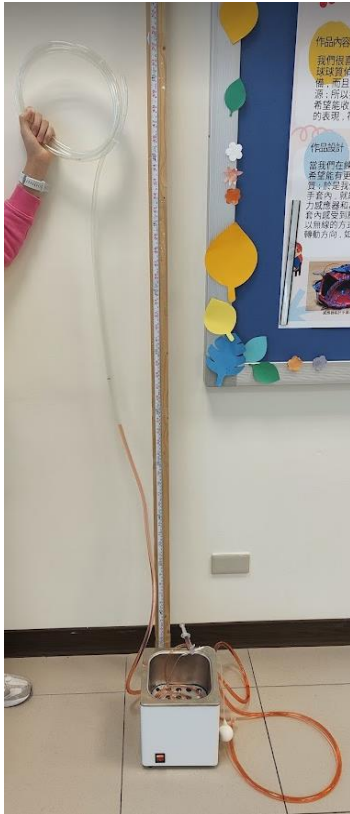
一、 研究材料：乒乓球(照片由第一作者拍攝)

研究一用球：	後續其他研究用球：
 <p>Huieson(3 星) prokennex(2 星) Khp(2 星) Trops(1 星) 無標示黃球</p>	 <p>二星無標 材質 ABS 40mm 購自蝦皮</p>

二、 研究設備：自製壓球器(照片由第一作者拍攝)

壓球器	第一代 壓球器	第二代 壓球器
		
可調整 壓塊	<p>球狀壓塊（可調整按壓深度）</p> 	<p>指甲狀壓塊（可調整按壓深度）</p> 
	材料	 <p>直徑 4cm 壓克力球（同乒乓球大） 直徑 1.6cm 彈珠、直徑 2cm 金屬片 委託學校創課教室，利用雷切機切 0.5cm 厚透明壓克力片，切出符合我們需求的樣式。</p>

三、研究設備：自製水浴控溫壓力計(照片由第一作者拍攝)

	 <p>管材</p> <p>粗管內徑 8mm 細管內徑 4mm</p>		 <p>點滴管</p>	 <p>針筒</p>		
	 <p>7.9mm Y型接頭</p>	 <p>8mm 三通接頭</p>	 <p>8-8 mm 軟管閥門</p>	 <p>8.0-4.0 8.0-4.0 寶塔彎頭</p>	 <p>4mm 4mm三通閥</p>	 <p>點滴管用 三向閥</p>
	 <p>其他</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 電熱數顯恆溫水浴鍋 JOANLAB BSH-1 (300W) ● 木棍 ● 捲尺 					

四、研究設備：自製 乒乓球凹陷深度測量器 (照片由第一作者拍攝)

第一代	第二代
	
 <p>同 59 小物作法，取半顆乒乓球鑽孔，罩於待測凹陷上方。用游標卡尺穿過孔測量下方凹陷深度。但在本實驗多剪縫以確保上下貼合。</p>	 <p>搭配數位游標卡尺（廠牌：Mitutoyo 型號 CD-15AX），將待測乒乓球與數位游標卡尺穩定固定在自製乒乓球凹陷深度測量器上，以測量深度。</p>

參、研究流程

研究 1 測試鑽不鑽孔，對凹陷乒乓球復原的影響

結果：有孔，就一定不復原（不鑽孔 3/5 復原）

檢討：也可能因為壓出的凹陷不同所造成

（未鑽孔球，正好壓出的凹陷較淺）

因此該想辦法讓每個凹陷的壓痕都一樣。



研究 2 製作可以穩定控制深度、形狀的：壓球器



研究 3 該壓怎樣的凹陷？如何壓呢？

預先討論的假設：要壓出不會自動復原，但是可復原的凹陷

如何確定成功的壓出了「不會自動復原的凹陷」，需要精密測量

先需要製作可靠的：乒乓球凹陷深度測量器

結果：由自製凹陷深度測量器確認了：成功的壓製出了不會自動復原的凹陷



利用製作的「不會自動復原的凹陷」，進行後續實驗

研究 4 同樣的凹陷，鑽不鑽孔對復原的影響？

結果：相同壓製條件的 10 球，有洞就不復原（5/5），沒洞全復原（5/5）



研究 5 59 小物中，加熱乒乓球中的氣壓是否被低估？

先需要製作可靠的：氣壓計（5-1）

結果：由自製壓力計所測值為 59 小物的 5 倍。氣體加熱增壓被嚴重低估（5-2）



研究 6 59 小物中，推出凹陷所需的壓力有高估嗎？

推論：若如 59 小物結論「乒乓球遇熱自動復原才是主因」，代表此時推出凹陷所需壓力應接近“0”。此即可判斷 59 小物測量復原所需壓力是 7~25psi 已高估

實測結果：80 cm 水柱高就能將 80°C 的乒乓球凹陷復原。是 59 小物所說的 1/22

研究1、 確認：「不靠氣體膨脹， 只靠加熱就能讓乒乓球的凹陷復原嗎？」

一、 目的：

確認是否單純只靠泡熱水就能讓乒乓球的凹陷復原（利用鑽洞去除內部氣體熱脹的壓力）？59小物用半個乒乓球來做此測試，我們認為半個乒乓球的表現不能代表真實的狀況，因此在此用整個乒乓球來做實驗。

二、 研究過程或方法：

- (一) 本研究所有實驗相關相片都為作者/指導老師拍攝。
- (二) 拿兩顆相同品牌（共 5 個品牌）的乒乓球，用木棒（長 5mm 寬 1mm）將每一顆乒乓球壓凹。若凹陷不夠深，乒乓球的球殼會自動彈回。所以需要施加足夠的力量，才能讓做出凹陷的乒乓球。
- (三) 將同樣品牌的乒乓球一顆凹陷的乒乓球用電鑽鑽洞，另一個保持凹陷。



圖一、乒乓球進行鑽洞(照片由第一作者拍攝)

- (四) 煮沸熱水後倒入燒杯中，並且用溫度計測量水溫（大約 70c-80°C）。
- (五) 將同一組乒乓球同時放進熱水裡並且用鐵網把乒乓球壓在水中，乒乓球要持續在水中，泡在水中的過程中要使用計時器計時 30 秒。
- (六) 記錄復原得最快時間，超過一分鐘若還沒有復原則稱為“沒有復原”，停止測試。

三、 研究結果：

品牌	鑽孔	沒鑽孔
Huieson(3星)	未復原	復原
prokennex(2星)	未復原	未復原
Khp(2星)	未復原	未復原
Trops(1星)	未復原	復原
無標示黃球	未復原	復原

5個品牌各取2個相同的乒乓球，一個打孔，另一個不打孔。10顆球全壓凹後泡熱水。沒打洞的5個之中有3個凹陷復原了。但只**要乒乓球鑽了洞，受熱後凹陷就不能復原。**

表 1 單純壓凹的乒乓球，復原的結果

四、 討論：

- (1) 鑽孔後的乒乓球在加熱後，內部膨脹的空氣都外洩了，所以失去了氣體熱脹時向外的推力。此時全部的凹陷都沒辦法復原，所以**看得出氣體熱脹，應該就是乒乓球復原的關鍵。**
- (2) 沒有鑽洞的凹陷乒乓球遇熱時，5個有2個不可復原，這也是可以理解的。一定有些嚴重的凹陷就算泡熱水也是無法復原的。
- (3) 實作後發現：**很難壓出相同深度、形狀的凹陷。**所以再仔細想想：「實驗結果發現：鑽洞後遇熱不復原，會不會不是因為有洞，而是因為正好這些自製凹陷太難復原了？」
- (4) 我們**應該要想辦法，同時在實驗組與對照組壓出相同深度、形狀的自製凹陷。**如此才能真正的確認是否「乒乓球只要有破洞，原本可以回復的凹陷就一定不會復原了」。（也才能確認:氣體熱脹的推力，是復原凹陷的關鍵力量）。

研究2、製作可以穩定控制深度、形狀的：壓球器

我們需要一個可以控制按壓乒乓球凹陷**深度**與**形狀**的工具，所以我們接下來需要設計並製造出，符合這個需求的壓球器。在成功製造出壓球器後進一步發現：乒乓球的凹陷不似想像中的單純。後續利用壓球器這個工具進行了有關乒乓球凹陷的研究

階段一 製造可控制**按壓深度**及**形狀**的穩定的壓球器


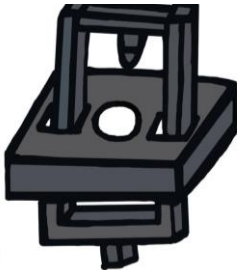

一、目的：

設計並製造出可以控制按壓乒乓球凹陷**深度**與**形狀**的工具

二、研究過程或方法：

(1) 需求考量與設計

為了達到以上的目的，我們開始考慮怎麼處理：

想辦法解決：	設計圖示	討論與分析
<p>1. 怎麼控制凹陷深度？ 建議：用現有的 L 型鐵棍，擠壓放在板上的乒乓球，下拉 1 公分就能壓出 1 公分的凹陷。</p>		<p>L 型鐵棍下拉時感覺會變形，可能向下拉 1 公分，頂點只下降 0.5。壓球效果可能不均勻。</p>
<p>2. 怎麼控制凹陷深度？ 建議：兩側都加鐵架，拉下時才能穩固壓球</p>		<p>可以，但有點難做</p>
<p>3. 該用哪種形狀壓球？ 建議：最單純的是球形，但半徑該多大呢？最單純的就是取與乒乓球一樣大的球來壓。可以向內壓出跟原本乒乓球相同弧度的凹陷。</p>		<p>要想辦法買直徑 4 公分的硬球，或是自己想辦法做出一個。</p>


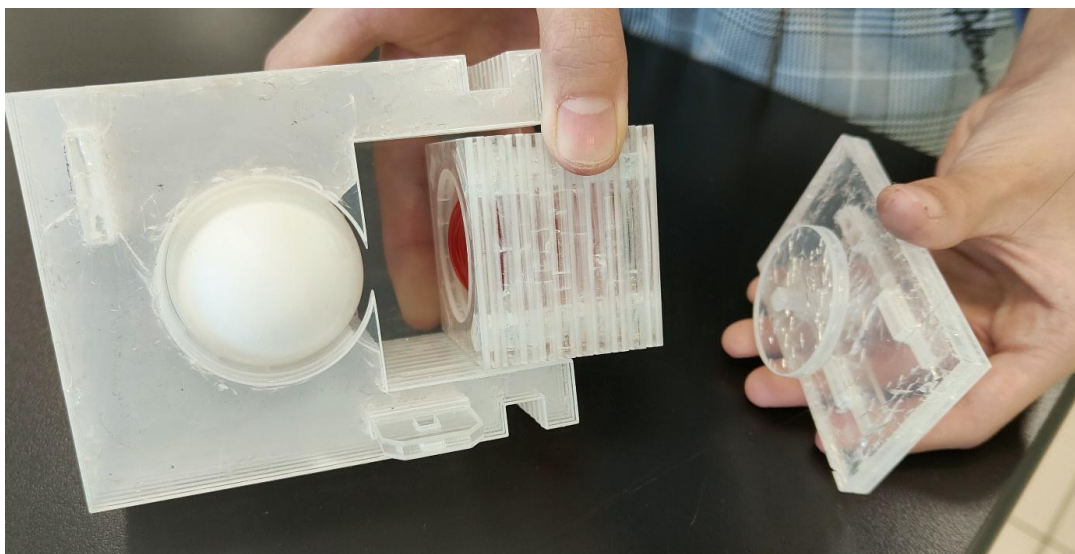
<p>4. 用球壓乒乓球時，怎麼控制壓球下的深度？</p> <p>建議：找內徑 4cm，高 8cm 的管子，乒乓球先放入，上面壓上等大的硬球。用塞子按壓硬球，壓入管口多深，就能在乒乓球上壓出多深的球形凹陷。</p>		<p>壓球器底部應為球形。避免乒乓球在受壓時像泡泡般變形（變扁），造成受壓處不變形。</p>
--	--	--

表 3 壓球器設計考量

經討論後決定採取方法（四）設計出一個可以控制壓深度及固定按壓形狀的工具，主要是要求底部設計成圓形，避免壓球時，球底部變平及按壓深度由上蓋控制，此方法按壓出來的形狀我們覺得最均勻。找人依照這個概念製作出能控制深度與形狀的壓球工具。

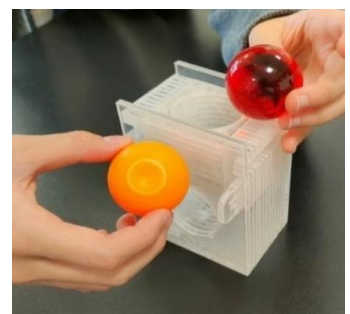
（2） 實際製作並測試(第一代壓球器)

雷切出一片片的壓克力板後，組合出我們需要的器具(含 2 個互相垂直的圓形管道)，這樣可以準確的控制大小與形狀。另外在網路上找到直徑為 4 公分的壓克力球，利用它來壓乒乓球，組成了這個壓球器。



圖二、自製壓球器(照片由第一作者拍攝)

乒乓球放在底下的橫管中，紅壓克力球放在上方的垂直管中，未用力壓時紅球上緣貼齊垂直管的上緣。因此在最上方蓋上壓克力蓋板時，蓋板下緣正好會接觸到紅球上緣。在紅球與蓋板間加入小圓墊片，蓋板用力下壓到底，此時小圓片有多厚，紅壓克力球就會下降多高，也就能在下方的乒乓球上壓出這個高度的凹陷。



三、 結果：

成功製做出可以壓製出特定深度、特定形狀的凹陷(如右圖三：照片由第一作者拍攝)。

四、 討論

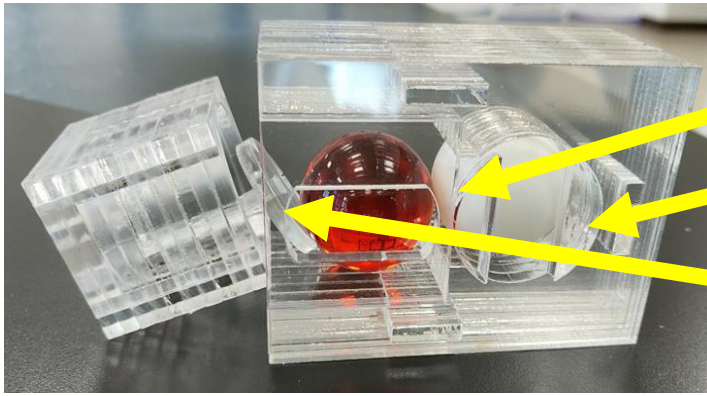
發現問題	解決策略	設計圖示
上方的壓板壓下時有點彎曲變形。	壓板加厚，並跟垂直管合為一體成碗狀	
回收壓克力板製成的壓板開始粉碎	改用全新壓克力板	
各零件尺寸太剛好，易卡住，不易操作	各零件間切割時留縫隙，只留 1 片側板以方便取出壓塊	

階段二 第二代壓球器的製作（更可靠、更好用）



- 壓到底，可以準確控制壓克力球壓下深度。
- 板與垂直管合為一體，成碗狀結構。
- 空隙較大方便操作
- 使用全新壓克力

圖四、自製壓球器(照片由第一作者拍攝)

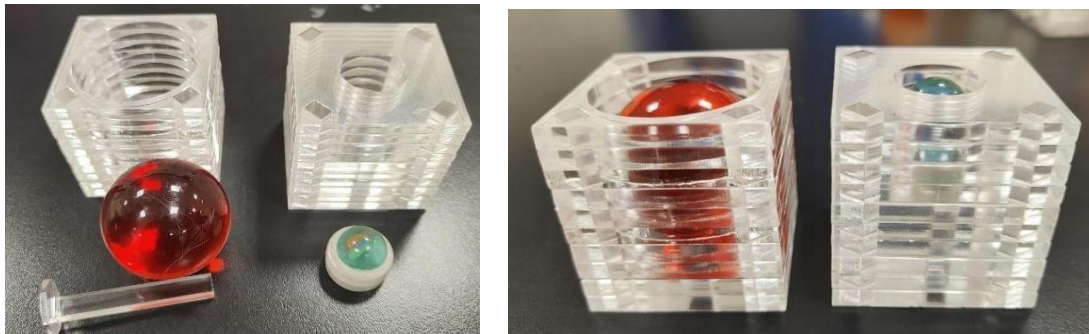


- 只有一面測板，壓塊方便取出
- 留空隙，容易推出乒乓球
- 墊片厚度決定壓球深度

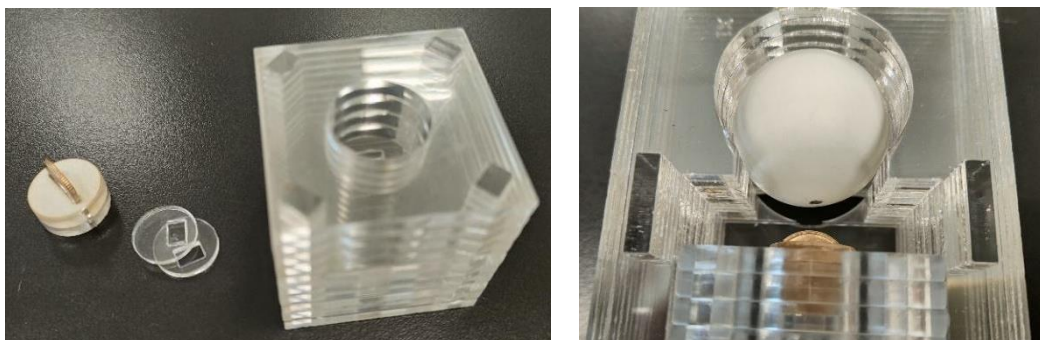
圖五、自製壓球器(照片由第一作者拍攝)

階段三 製作各種不同形狀的壓塊

我們製作出三種類型的壓塊，希望在測試後能摸索到；何種特質的壓痕才能壓出 “不可復原的凹陷”



圖五、兩種類型的壓塊(大球型 與 小球型)(照片由第一作者拍攝)



圖六：指甲狀的壓塊(照片由第一作者拍攝)

研究3、 如何才能按壓出不會自動復原的凹陷？

一、 目的：

製作壓球器後，在後續的研究過程中慢慢發現，乒乓球上的凹陷比想像中的複雜。成功按壓出一個深 5mm 的凹陷，很可能過 20 分鐘後再測量後發現只剩 4mm 深。所以我們根據實驗經驗，針對按壓後凹陷的結果分類，將按壓所造成的凹陷分成了 4 種。

- (一) 按壓完瞬間復原。(例如桌球選手殺球)
- (二) 按壓完有明顯凹陷，但慢慢自動復原。
- (三) 按壓完有明顯凹陷，但不燙熱水，不會復原。
- (四) 永遠無法復原。(只要按壓的力氣夠大，一定可變這樣)

我們的研究對象是真實情境中的凹陷。真實凹陷一定屬於第三或第四類的凹陷。我們**需要先製造不會復原的凹陷**，才有可能利用此確認什麼因素讓它能遇熱復原的(氣壓或是高溫)。

階段一：第二類凹陷的發現(明顯有凹陷，但慢慢自動復原)

過程：利用壓球器將直徑 4 公分壓克力球，壓入乒乓球 5mm。

結果：發現可壓出明顯凹陷，但慢慢會變淺。如右圖，右方凹陷慢慢自動復原。



圖七：壓痕(照片由第一作者拍攝)

階段二：確認按壓**形狀**與**深度**何者是按出不會復原凹陷的關鍵

二、 研究過程：

1. 壓塊改為較尖，直徑 16mm 的彈珠，利用墊片改變按壓深度(1mm、3mm、5mm 三種深度)。
2. 每種深度各按 5 顆乒乓球，按 10 秒後量測凹陷深度。
3. 靜置十分鐘後再測量一次，觀察是否自動復原
4. 80°C 熱水浸泡 3 分鐘後，再量一次，以確認是否是第四類凹陷(永遠無法復原的凹陷)



圖八：壓球器使用(照片由第一作者拍攝)

三、研究結果：

壓球深度	1mm					
球編號	1	2	3	4	5	平均
壓完後的深度	0.3	0.2	0.1	0.3	0.3	0.24
放 10 分鐘後的深度	0.2	0.2	0.3	0.2	0.3	0.24
80°C 3 分鐘後	0.9	0.3	0.6	0.5	0.7	0.6

由平均值看似馬上復原了

壓球深度	3mm					
球編號	6	7	8	9	10	平均
壓完後的深度	3.9	3.9	2.2	3.2	1.1	2.86
放 10 分鐘後的深度	3.6	3.9	0.7	3.5	0.8	2.5
80°C 3 分鐘後	0.9	1.1	0.5	0.9	0.8	0.84

由平均值看似慢慢自動復原，加熱水後馬上復原

壓球深度	5mm					
球編號	11	12	13	14	15	平均
壓完後的深度	5.4	4.9	5.2	4.8	5.2	5.1
放 10 分鐘後的深度	6	5.9	5.8	5.5	5.7	5.78
80°C 3 分鐘後	5.5	4.9	3.9	5.8	5.6	5.14

由平均值看似此組已屬於永遠無法復原。

四、討論：

1. 結果符合預期：壓痕太淺，馬上復原。壓痕太深則永遠無法復原。
2. 細看數據，可發現會有 10 分鐘過後，凹陷深度比剛壓時還大的現象。推測應為測量誤差所造成的。

階段三：確認按壓摺痕是否是按出不會復原凹陷的關鍵

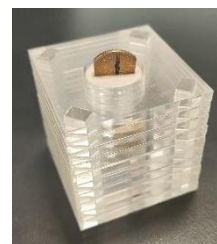
一、研究過程

(一) 將壓球器壓出來的形狀由從圓形改成不規則型。

(二) 將壓球的彈珠換成可以模擬指甲形狀的硬幣。

按壓後利用半殼測量深度，靜置 10 分鐘、20 分鐘後再各測量一次。

放置 80°C 熱水中，一發現有復原的球時即停止實驗並計時。



圖九：壓球器使用(照片由第一作者拍攝)

二、研究結果：

壓球深度	7.2mm			
球編號	1	2	3	平均
壓完後的深度	5.2	4.5	4.2	4.6
放 10 分鐘後的深度	4.5	4.15	5	4.6
放 20 分鐘後的深度	4.4	4.4	4	4.3
80°C 14 秒	未復原	復原	復原	

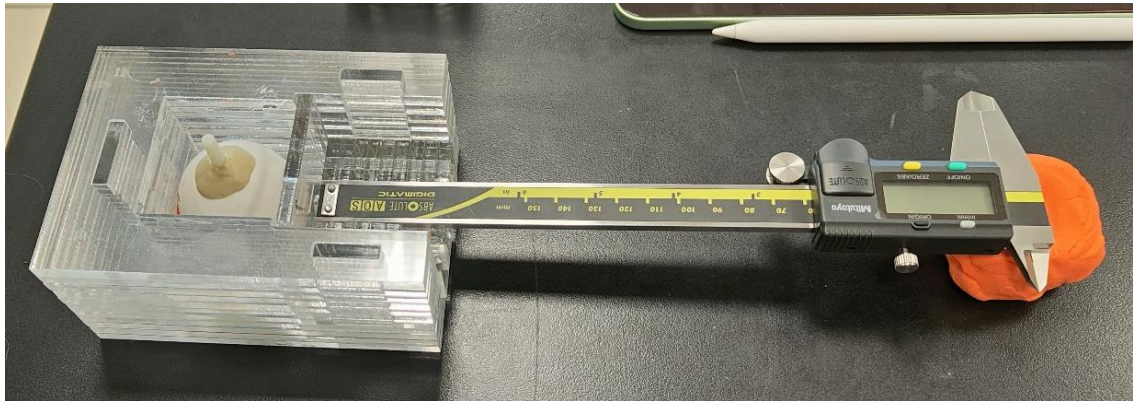
三、討論：

- (1) 由綠框數值可知，此自製凹陷已近似為不可復原的凹陷。
- (2) 實驗數據會有放了 10 分鐘後，凹陷反而變深的不合理現象，這個應該是測量不准所造成的。
- (3) 檢討測量方法，可能會造成實驗不準的原因有三個。
 1. 協助測量的乒乓球半殼每次貼上的距離有變化。
 2. 每次測量凹陷時的位置有改變。
 3. 游標卡尺不易判讀，就算判讀正確也不能即時的測量。

階段四：改用新製、可靠的：乒乓球凹陷深度測量器，再一次確認按壓摺痕是否按出不會復原凹陷的關鍵

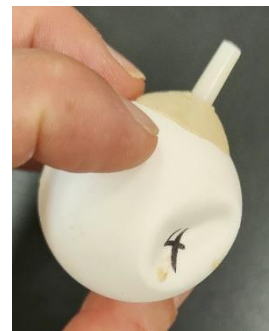
一、研究過程：

- (一) 預先將乒乓球放入新製的**乒乓球凹陷深度測量器**，利用固定在上面數位卡尺，快速而正確的判讀出未按壓前的距離。



圖九：將乒乓球放入新製的乒乓球凹陷深度測量器(照片由第一作者拍攝)

- (二) 利用指甲狀壓塊，壓入乒乓球 5mm 深按壓，按壓後馬上做連續 3 次的測量
- (三) 計時 10 分鐘後，再利用**乒乓球凹陷深度測量器**連續測量同一處的凹陷深度 3 次。(共四顆)
- (四) 紀錄實驗並解析數據。

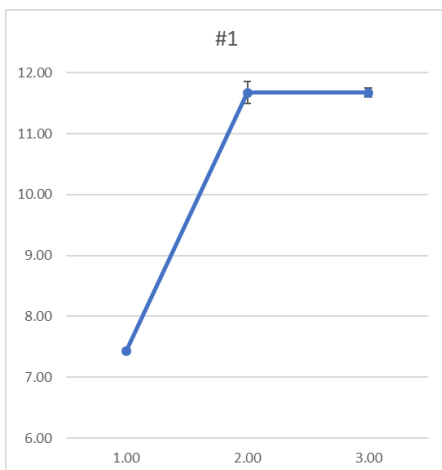
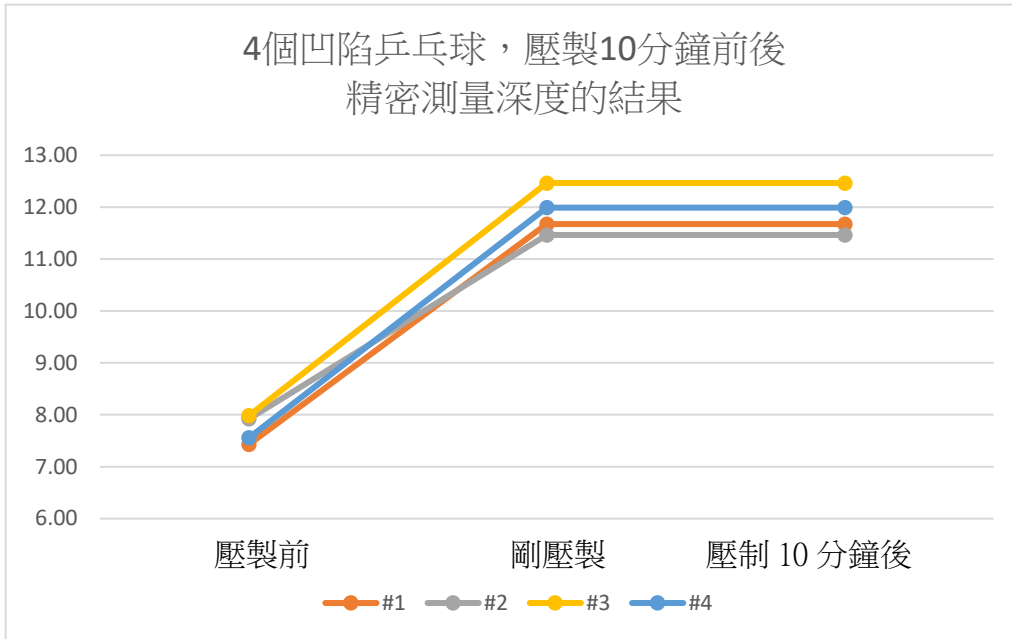


圖十：乒乓球壓痕(照片由第一作者拍攝)

二、實驗結果

	第幾顆球 第幾次測量	#1	#2	#3	#4
壓前	1	7.4	7.89	8.01	7.6
	2	7.41	7.96	7.97	7.55
	3	7.48	7.91	7.97	7.52
	平均	7.43	7.92	7.98	7.56
壓完	1	11.48	11.49	12.45	11.98
	2	11.7	11.5	12.49	11.99
	3	11.84	11.4	12.45	12
	平均	11.67	11.46	12.46	11.99
10 分鐘後	1	11.12	11.25	12.38	12.31
	2	11.09	11.37	12.39	12.3
	3	11.23	11.42	12.42	12.36

	平均	11.67	11.46	12.46	11.99
--	----	-------	-------	-------	-------



左圖為#1 號球的測量結果，看得出利用自製乒乓球凹陷深度測量器，已經可以精準的測量乒乓球凹陷。

由上圖 4 個由指甲狀壓器壓製 10 分鐘前後的表現，可以看得出來：壓出摺痕後，確定的確可以製造出不可復原的凹陷。

研究4、相同凹陷的乒乓球，鑽孔不鑽孔對復原有何影響？

一、目的：

在研究一時雖然已可觀察出：只要有鑽孔，乒乓球上原本遇熱可以復原的凹陷就沒辦法復原了。但在研究一的實驗中，實驗組與對照組除了有沒有孔的差別外，彼此間的凹陷其實也不同。在研究二中，設計並製做出可以按壓出固定尺寸**深度**、**形狀**與**摺痕**凹陷的壓球器後。

在研究三中確認了有摺痕的凹陷才是能穩定存在的凹陷（也才能模擬真實凹陷）

因此在本研究四，將利用壓球器在一批乒乓球上分別壓出**穩定存在的**、**相同的**凹陷來做測試。以更精確的確認：是否只要鑽洞，乒乓球的凹陷就算泡熱水也不能復原。（所有乒乓球上的凹陷狀況都一樣）

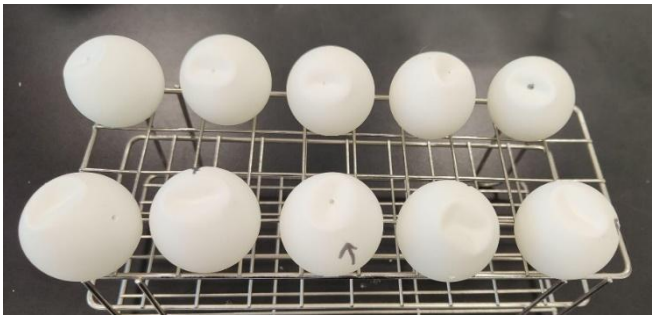
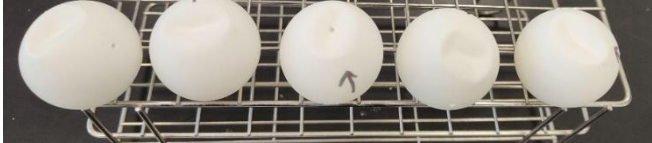


二、研究過程或方法：

- (一) 取 10 顆球相同的乒乓球，5 顆鑽小孔，5 顆不鑽孔當對照組。
- (二) 用硬幣壓球器按壓乒乓球 8mm 深，10 秒。
- (三) 10 顆球都浸入 80°C 熱水中 25 秒。

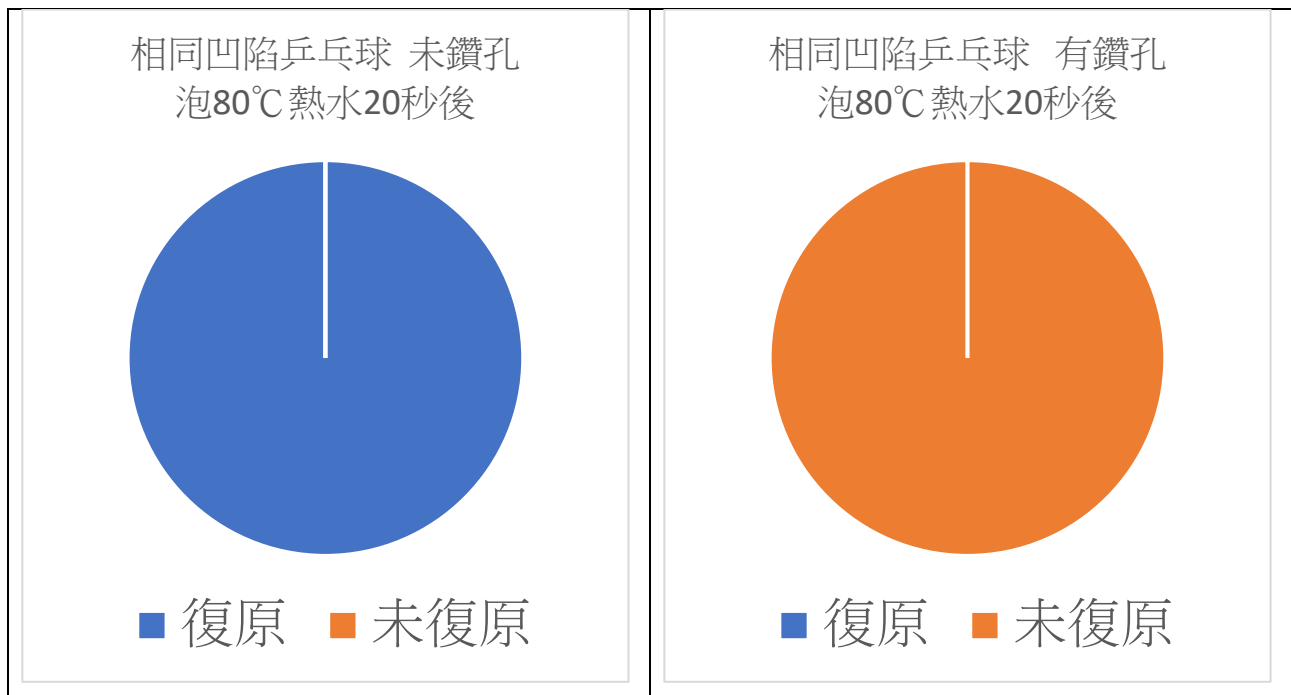


圖十一：乒乓球(照片由第一作者拍攝)

三、研究結果：

泡 80°C 熱水前 (照片由第一作者拍攝)	有鑽孔	
	沒有鑽孔	
泡 80°C 熱水後 (照片由第一作者拍攝)	有鑽孔	
	沒有鑽孔	

沒鑽洞的 5 顆乒乓球泡熱水後，凹陷全部都復原了。但乒乓球只要有破洞，泡熱水後凹陷就都沒有辦法復原了。



四、討論：

- (1) 在研究一時已經可觀察出：只要有鑽孔，乒乓球上原本遇熱可以復原的凹陷就沒辦法復原了。但在研究一的實驗中，實驗組與對照組除了有沒有孔的差別外，彼此間的凹陷其實也不同。
- (2) 由本實驗可看出，不論加熱對於復原凹陷有多大的貢獻，只要沒有乒乓球內部因氣體膨脹趨勢而產生的壓力，凹陷乒乓球就不會復原。**氣體膨脹的壓力才會是讓凹陷乒乓球復原的關鍵。**
- (3) 在歷經研究三（對於乒乓球凹陷的特性）的研究後知道，理解到凹陷其實是有各種不同樣式的，是否有某些類型的真實凹陷，真的單單只靠加熱就能自動復原，就還需另外再確認了。

研究5、 59小物中，加熱乒乓球中的氣壓是否被低估？

研究 5-1：自製：可以控制水壓，並能精準衡量壓力的壓力計

一、設計與製作 階段 1：如何注水以升高水壓

(一) 目的：

因為外面賣得壓力計，最小刻度是 1 psi (71.28 cm 水柱高)的大小，非常粗略，沒辦法符合我們的需求，因此我們自製了 U 型水管壓力計，用來測試乒乓球內的壓力。

(二) 研究過程或方法：

(1) 討論設計如何慢慢的升高水位以加壓，結果如下。

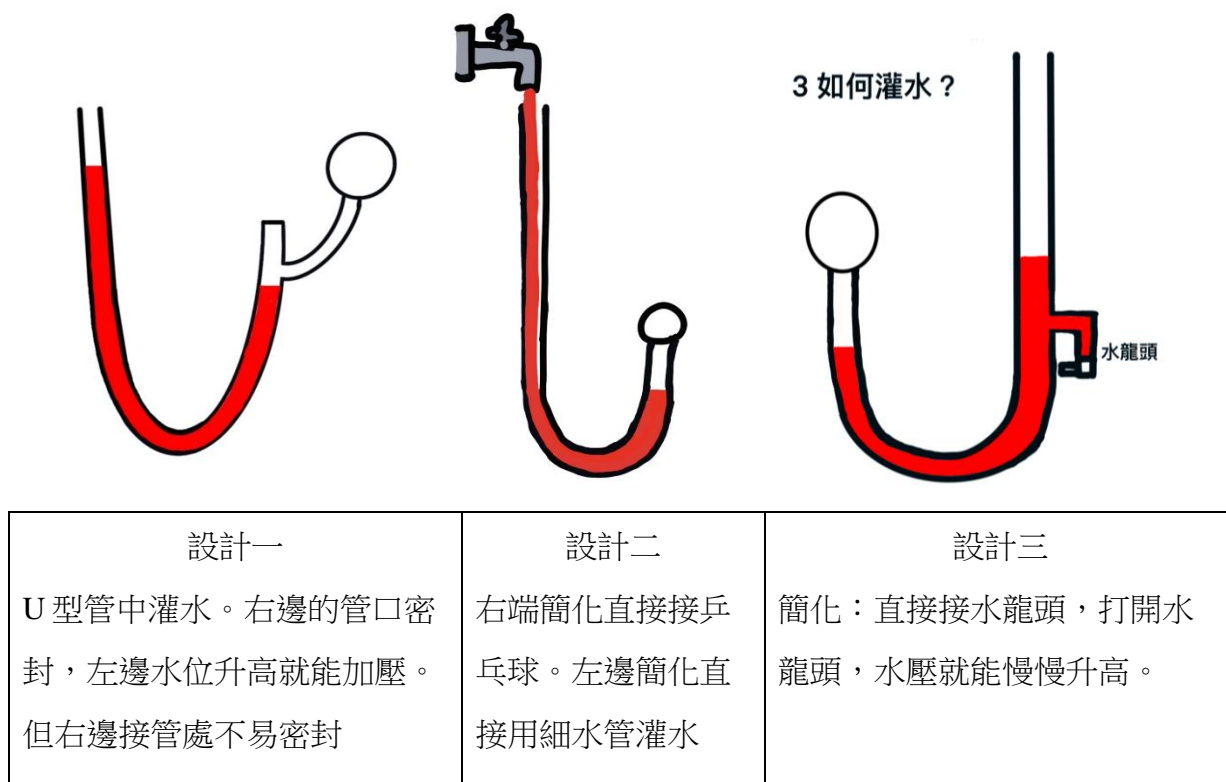


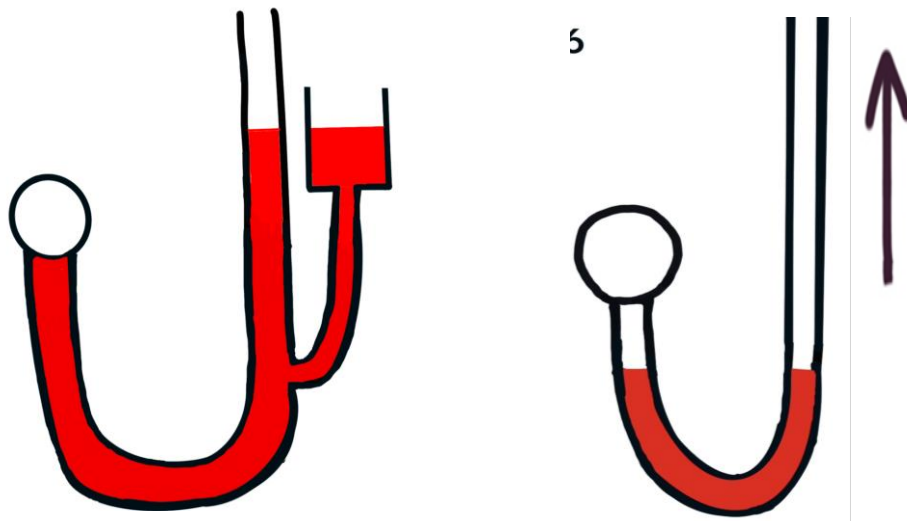
圖 2. U 型水管型壓力計，如何灌水的設計

(三) 測試結果：

水龍頭灌水量太大，水流太強，管中都是氣泡，無法控制水位高低，失敗(實驗瞬間結束，沒有照相)。

二、設計與製作 階段 2：如何改良升水壓的方法

(一) 目的：改良加大水壓的方法，需要能以緩和、可控制的方法升壓。



設計四	設計五
想通了，用牛奶罐取代水龍頭。接在管子上利用連通管原理，抬高牛奶瓶即可以讓水壓上升	最後想通：我們直接抬高裝了水的水管，就能讓水壓溫和的上升。

圖 3.壓力計 改良設計圖

設計與製作 階段 3：要如何調節乒乓球端的起始空氣量

圖十二：乒乓球(照片由第一作者拍攝)



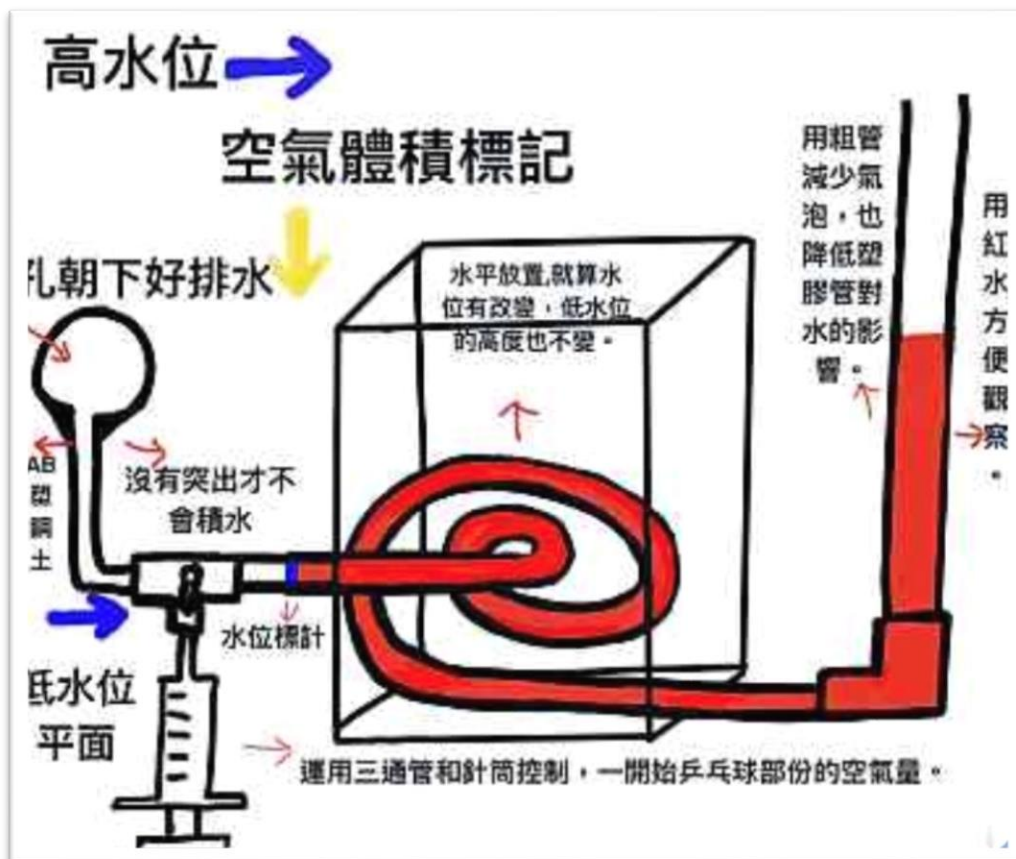
1. 乒乓球端加入三通閥，讓密封在乒乓球端的空氣可以洩出，讓末端空氣達到實驗起始（水位）位置
2. 粗水管灌水後，接上直角轉接頭後開始實驗

(二) 結果：失敗，原因如下：

1. U型下垂太短，乒乓球內氣體一遇熱膨脹就衝到粗水管處，開始向上移動，飄出水面後流失。
2. 空氣調節閥會漏氣。鎖緊此閥門後明顯有漏氣。
3. 三通閥安裝在球上時，有段管子戳入於乒乓球內，所以水一旦進入就出不來。
4. 根據這次經驗，我們進行了後續的修改。

設計與製作 階段 4：如何避免：1. 空氣一膨脹就跑掉了、2. 閥門漏氣、3. 水一進球內就出不來

(一) 畫出設計圖：



圖十三：第三代壓力計設計圖(照片由第一作者畫)

(二) 製作過程：

- (1) 空氣調節閥門改用不會漏水漏氣的打點滴用器材（點滴用三向閥 如圖）。
- (2) 確保乒乓球泡熱水時，有完全的水浴(注意用不銹鋼網將乒乓球壓進熱水中)。
- (3) 確保管路不漏氣：



(三) 結果：

組裝完畢進行實驗時，提高水管增加水壓時時，水位並不會慢慢地降低。由此可確認：「所有接點都沒有滲漏的現象」。

圖十四：空氣調節閥門(照片由第一作者拍攝)

研究 5-2：用自製氣壓計測量乒乓球內氣體，遇熱後壓力是否被低估

(一) 目的：

他們的實驗二中，我們認為乒乓球內的壓力大小被低估，因此我們設計了這個實驗來確認泡熱水時，乒乓球內的壓力是多少。

我們設計了一款利用連通管原理的壓力計（如下）來測量泡熱水時，乒乓球內的壓力是多少。利用自製的可靠壓力計，測量熱水給乒乓球的壓力，並且了解水溫跟乒乓球內氣體的關係。確認他們的測量的氣壓是否被低估。

(二) 研究過程或方法：

- (1) 管線安裝完畢後，在乒乓球泡熱水前（內外壓力相同）讓 U 型管中的紅水高低水位一致（不拉高水位，讓乒乓球內額外加壓）。見下圖左藍色標記。
- (2) 實驗前利用針筒，透過三向閥抽吸乒乓球端的空氣，讓實驗開始前此處的空氣體積是固定的（讓乒乓端的空氣達到下圖左中的黃色箭頭處，這個空氣與水面的介面也就是未來實驗時的低水位處）。
- (3) 倒水入水槽，將乒乓球放入水槽中再用不鏽鋼網壓入水中，準備開始實驗。
- (4) 開始加熱
- (5) 乒乓球內氣體開始膨脹，低水位的介面會向遠離乒乓球的方向移動。

- (6) 拉高粗水管，讓低水位水面朝向乒乓球方向移動，一直到低水位界面回到原先標示處。此時判讀高低水位差。
- (7) 多加了這麼大的水壓，才將加熱後的乒乓球內的氣體，壓回原本大小的體積。所以此時高低的水位差，也就是乒乓球因為加熱所增加的氣體壓力。
- (8) 當水溫逐漸從 30 度升高到 80 度時，第一人觀測低水位標線並發出指令「高一些、高一些…」，第二人根據指令逐漸拉高粗水管，讓高水位逐漸升高，並喊出水位差刻度「45 公分、45.5 公分…」，第三人根據恆溫槽所顯示的即時水溫報出當時溫度「70 度...71 度...72 度...」。第四人記錄水溫每升高 5 度時的高低水位差。
- (9) 把結果記錄成表格來和他們的實驗結果比較。



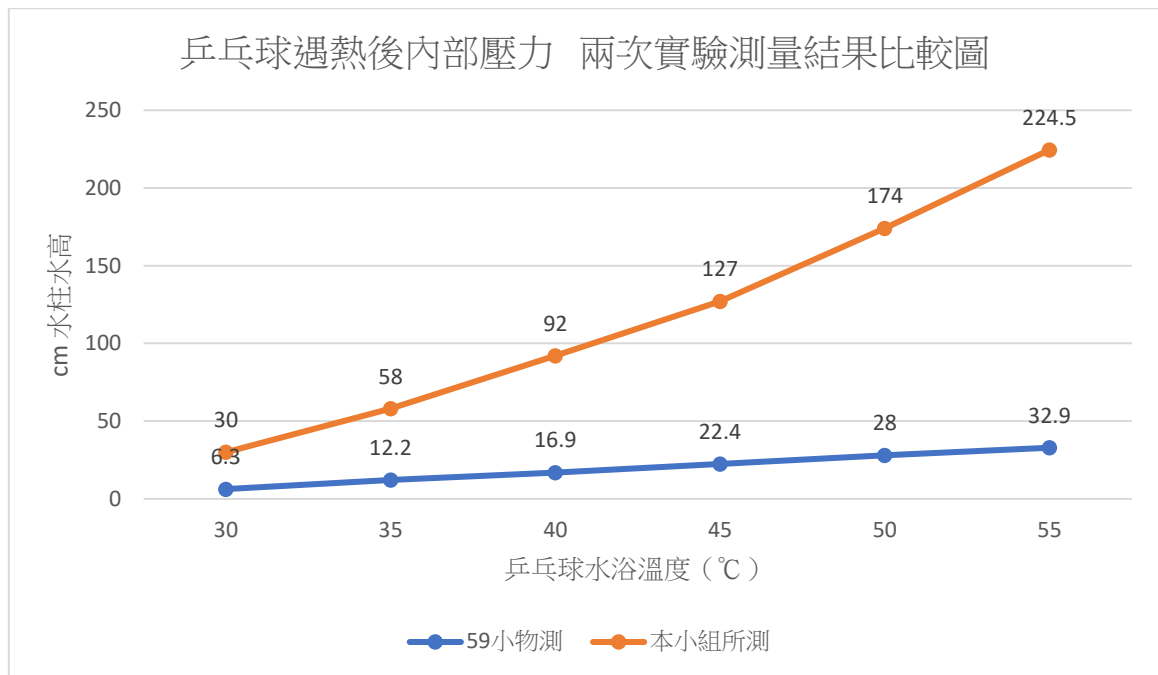
圖十五：器材 (照片由第一作者拍攝)

(三) 研究結果：

- (1) 研究數據及結果如下，特別要說明的是：我們預定一直測試到 80°C，但測到 76°C時水位已經高過我們原本準備的最高刻度了（木棍長 300cm），

高低水位差（單位 cm）

溫度 (°C)	30	35	40	45	50	55
本小組 第 1 次測量	30	58	93	127	175	224
本小組 第 2 次測量	30	58	91	127	173	225
本小組所測 (平均壓力)	30	58	92	127	174	224.5
59 小物測	6.3	12.2	16.9	22.4	28	32.9



(四) 討論：

- 1、以 55°C 的表現為例，我們所測出乒乓球內壓力的升高平均值是 224.5 cm 水柱高，他們的測量值是 32.9cm 公分水柱高。我們所測得的壓力值是他們的 6.8 倍。在此證明了我們的看法：他們對“乒乓球因為增溫而升高的壓力”嚴重低估。
- 2、「管路漏氣」、「利用燒杯裝熱水可能導致水溫降低」、「乒乓球泡熱水時沒有全壓入熱水中」（這個我們有明顯觀察到）都是造成他們低估“氣體因熱脹增壓”可能的原因。
- 3、但研判造成他們低估最大的關鍵原因應該在於：想衡量：加溫後乒乓球內氣體所增加外推力（因氣體熱脹造成的），不能測量漏了氣的乒乓球。他們的乒乓球在加熱後球內所膨脹的氣體應該有部分跑入了 U 型管中。
- 4、要確保「加熱後球內的空氣被壓回了原體積」，才能用「此時的外加壓力」來估量「完整乒乓球遇熱後內部氣體所增加的壓力」。

研究6、 確認「復原凹陷乒乓球所需壓力」是否被高估？

一、 目的：

利用嚴謹製作的自製壓力計，衡量凹陷乒乓球在泡 80°C 熱水時，復原凹陷所需要的壓力有多大。並依據研究結果判斷：在 80°C 水溫中，乒乓球內氣體膨脹的壓力是否能提供復原凹陷所需要的壓力。

二、 研究過程或方法：

過程：

- (一) 在壓球器內墊 4 片 1.8mm 的壓克力板 1 和元硬幣，營造出 7.2mm 高的指甲形深度
- (二) 壓球器壓球 10 秒
- (三) 測量壓完球後的深度，靜置 10 分鐘後，再測量深度（確認是否會自動復原）
- (四) 將此凹陷乒乓球接上自製壓力計。
- (五) 實驗前確認水管中水位與低水位相同
- (六) 將凹陷的乒乓球泡入 80 度熱水中，並用鐵網壓住乒乓球
- (七) 將水管往上提高（每次升高 1cm）直到乒乓球復原，並記錄當時高低水位差。

三、 研究結果：

- (一) 此指甲壓球器成功的壓出 4.2mm 凹陷，10 分鐘後維持為 4.1mm，成功按壓出不可自動復原的凹陷。
- (二) 當高低水位差為 80 公分時，此凹陷完全復原。

四、 討論：

- (一) 依 59 小物的結論推論，乒乓球遇熱自動復原才是主因，這代表在此狀況下，推出凹陷所需的壓力接近” 0” ，已經可以判斷打氣筒研究中所測出推出冷球凹陷的壓力 7 ~25PSI（499~1782 水柱高）是嚴重高估。
- (二) 我們發現在 80 公分的水柱高壓力，就能將 80°C 下乒乓球的凹陷復原。但他們的研究（p.12）測量出，在室溫下乒乓球要復原的壓力近 25psi（1782 cm 水柱高）是我們測量值的 22.1 倍，明顯被高估。高估的原因可能來自於利用打氣筒的壓力表所造

成的，但預估最大的原因應該來自於他用來估計需要多大壓力才能推出凹陷，用的是室溫下的冷球。其實所需要推出凹陷的對象是泡在熱水中的球，應該比軟，要推出凹陷所需的壓力會比冷球小很多。

- (三) 根據他們的研究在第 16 頁中分析得出“受熱產生的壓力/復原所需的壓力”最高還不及於 0.07，顯示能提供的壓力還不及所需要壓力的 7%。他們根據此下了重要的結論：「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。」

(P.15)。但根據我們的研究（“在 80°C 下產生的壓力估計為 261.1 公分水柱高”在 80°C 下讓 4.2mm 凹陷復原所需的壓力是 80 公分水柱高”）=3.26。氣體熱脹所造成的壓力是足以讓一顆凹陷的乒乓復原的。

- (四) 由研究四也可看出缺乏內部氣體膨脹推力的乒乓球，其凹陷遇熱也無法復原。同樣情況下，泡熱水的具有內部氣體膨脹推力的乒乓球，其凹陷則都能復原。氣體遇熱膨脹的確是讓乒乓球復原的關鍵因素。

肆、結 論

- 一、 我們在研究一中，發現了有鑽洞的乒乓球不會復原；沒鑽洞的可以復原。
- 二、 為了讓乒乓球凹陷的深度、形狀一致，我們開始製作出可以壓製固定深度、形狀與壓痕的壓球器，能夠穩定的壓出特定尺寸的凹陷提供後續的研究。
- 三、 我們研究的對象是不可自然復原的凹陷，除了深度與形狀之外，壓出摺痕會是製作凹陷的不可復原性的關鍵。
- 四、 我們在能夠製造出相同的凹陷後，進一步的確認了鑽洞的都無法復原，沒鑽洞的都可以復原。氣體膨脹是復原凹陷的關鍵。
- 五、 利用我們自製的準確壓力計，確認了乒乓球遇熱所增加的氣壓被他們嚴重低估（55°C 時相差 6.8 倍），主因應是他們沒有外加壓力，讓乒乓球內氣體體積維持不變。
- 六、 59小物利用打氣筒壓力計去估計：讓凹陷的乒乓球復原需要多大壓力時，測試結果被嚴重高估，足足和我們相差了 22.1 倍。其主因為：乒乓球遇熱要利用氣壓推出凹陷時，需要克服的是熱乒乓球殼，而非室溫下的冷球殼。

伍、參考文獻資料

參照

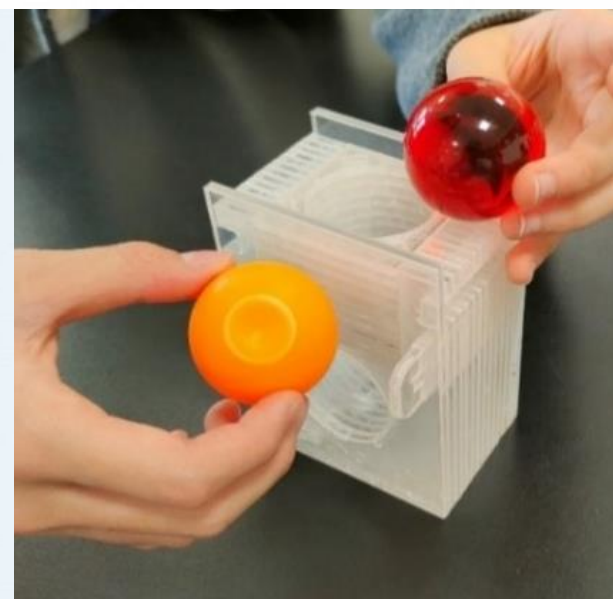
- 乒乓社交開球網. (2017 年 7 月 31 日). 桌球一星二星三星有什麼區別? (開球網). 擷取自 每日頭條: <https://kknews.cc/zh-tw/digital/6p6my9p.html>
- 林煒翔. (2019). 凹陷乒乓球放入熱水中可以恢復是球殼本身受高溫作用產生的效果. 高雄市: 國立臺灣科學教育館.
- 辦咖老師. (2015 年 April 月 4 日). 【桌球喇低賽】桌「球」的變革(內含兩部影片) - 桌球. 2024 年 June 月 9 日 擷取自 運動視界: <https://www.sportsv.net/articles/11513>

【評語】 080108

本作品主要探討凹陷乒乓球如何復原的原因，企圖對之前科展作品推論的諸多疑點提出不同看法。為了驗證新的論點，也設計改良版實驗器材與數據分析，並以自製氣壓計量化乒乓球內部壓力，來了解熱水增加的氣壓能否復原乒乓球，可看出作者對主題有相當完整的科學問題辯證能力，利用科學證據來反駁之前的結論，討論面向完整且深入仔細。此研究充分展現了科學研究是不斷求真的驗證過程，是不錯的作品。

作品簡報

等一下!第一名的結論對嗎?-



有關凹陷乒乓球如何復原的研究

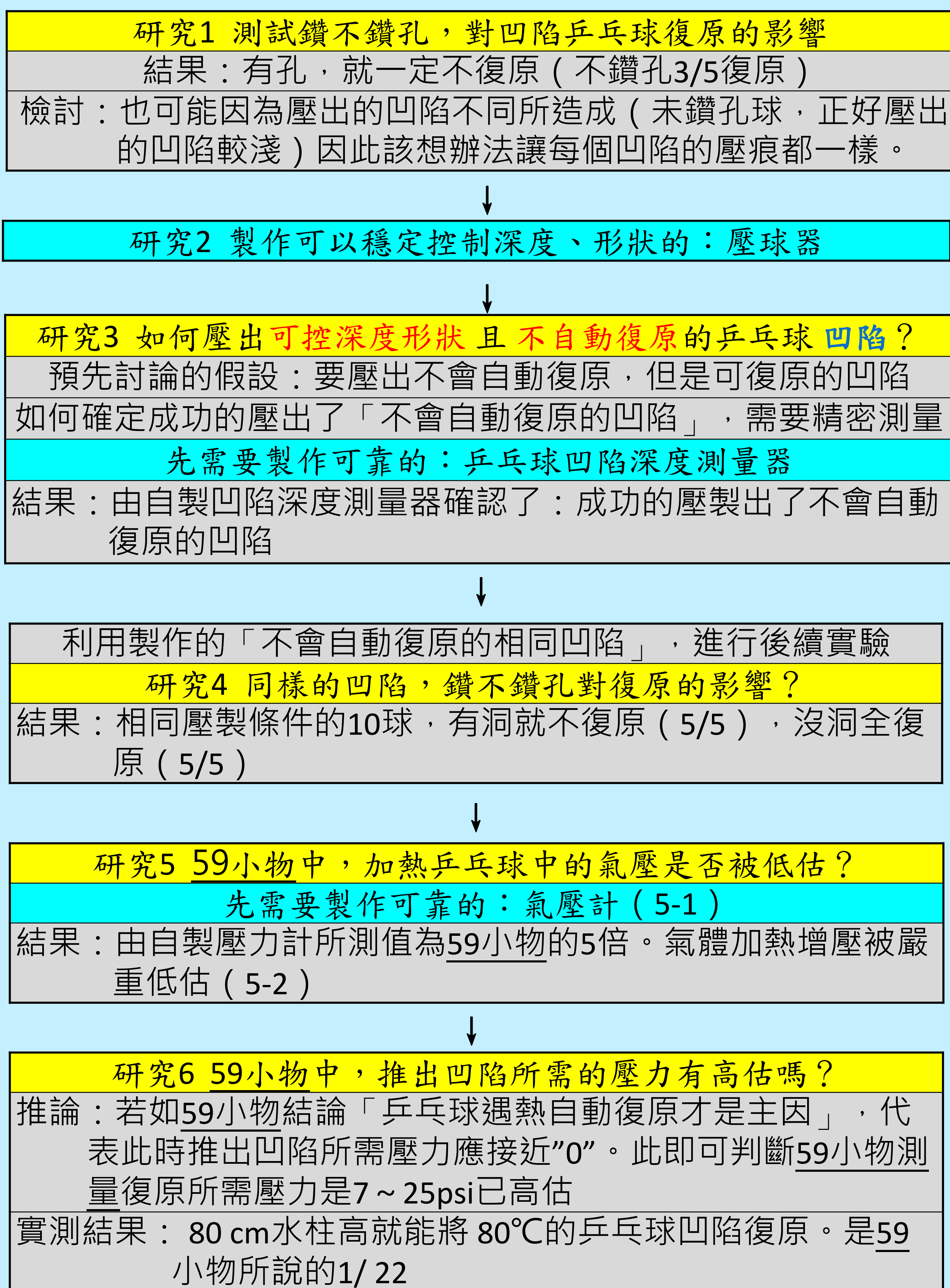
摘要

59屆國展國小組物理科第一名作品(後稱：59小物)提到「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」。但實際經驗是：凹陷乒乓球一旦有孔就無法遇熱復原，所以想確認怎麼了。用自製壓球器確保凹陷的深度與形狀後，確認了相同凹陷乒乓球遇熱後沒孔的球可復原，有孔的則不能。利用自製氣壓計確認了59小物作品中球殼內部空氣受熱產生的壓力被嚴重低估、讓凹陷乒乓球恢復所需壓力被高估。我們重要實驗的結論有二，第一：「氣體受熱膨脹是讓本研究中凹陷乒乓球復原的重要原因」此與59小物的結論不同。第二：我們體驗到同稱作"凹陷乒乓球"，差異可能非常大(材質、厚薄、凹陷形狀...)，因此還是可能在某些狀況下59小物觀察的現象存在。

文獻回顧：

59小物研究	可能問題
測量不同溫度時，凹陷乒乓球可復原的最大凹陷深度。 ※推論熱是復原主因。	我們發現：常有「會緩慢復原的乒乓球」。 他們的球可能原本就會自動復原。
燒杯裝熱水，泡入乒乓球後，利用自製壓力計測量空氣壓力。 ※推論：泡熱水產生的氣壓很小	以下因素可能導致壓力被低估 ● 加熱後氣體膨脹，壓力下降 ● 燒杯中熱水降溫快。 ● 乒乓球沒壓入熱水中。 ● 漏氣。
以打氣筒測量復原凹陷所需壓力。 ※推論：推出凹陷所需的壓力很大。	可能高估原因： ● 59小物測試室溫下的乒乓球但要實際復原的是熱水中的軟乒乓球。 ● 可能漏氣。 ● 打氣筒太快速激烈，易過頭
金屬棒壓凹切一半的乒乓球後泡熱水，觀察恢復狀況。 ※推論：凹陷乒乓球遇熱自動復原。	● 半球不能代表全球。

研究流程



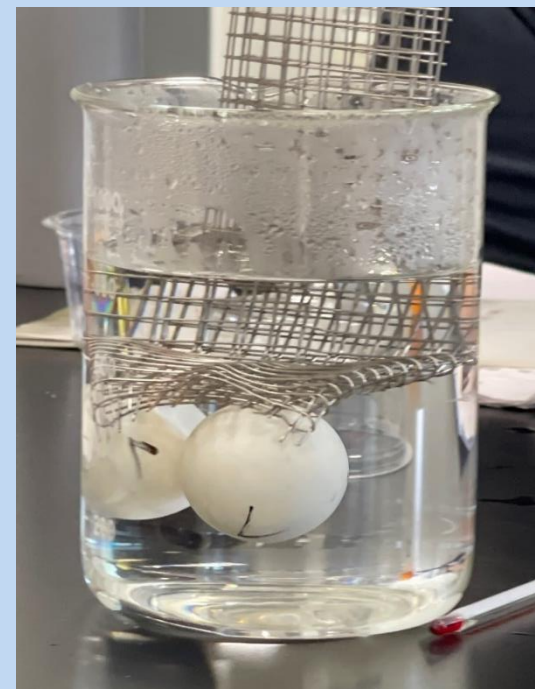
研究器材與裝置



研究過程與方法

研究1 測試鑽不鑽孔，對凹陷乒乓球復原的影響

目的：確認是否單純只靠泡熱水就能讓乒乓球的凹陷復原(利用鑽洞去除內部氣體熱脹的壓力)? 他們的研究用半個乒乓球來做此測試，我們認為**半個乒乓球表現不能代表真實的狀況**，因此**在此用整個乒乓球來做實驗**。



研究結果：(自行製表)

品牌	鑽孔	沒鑽孔
Huieson(3星)	未復原	復原
prokennex(2星)	未復原	未復原
Khp(2星)	未復原	未復原
Trops(1星)	未復原	復原
無標示黃球	未復原	復原

5個品牌各取2個相同的乒乓球，一個打孔，另一個不打孔。10顆球全壓凹後泡熱水。沒打洞的5個之中有3個凹陷復原了。但**只要乒乓球鑽了洞，受熱後凹陷就不能復原**。

結論：我們得知，如果乒乓球鑽了洞，由於球體內空氣膨脹後的壓力直接外洩，導致乒乓球的凹陷無法復原，也能得出乒乓球裡的空氣，因熱而膨脹所產生的壓力，是乒乓球凹陷復原的主因。

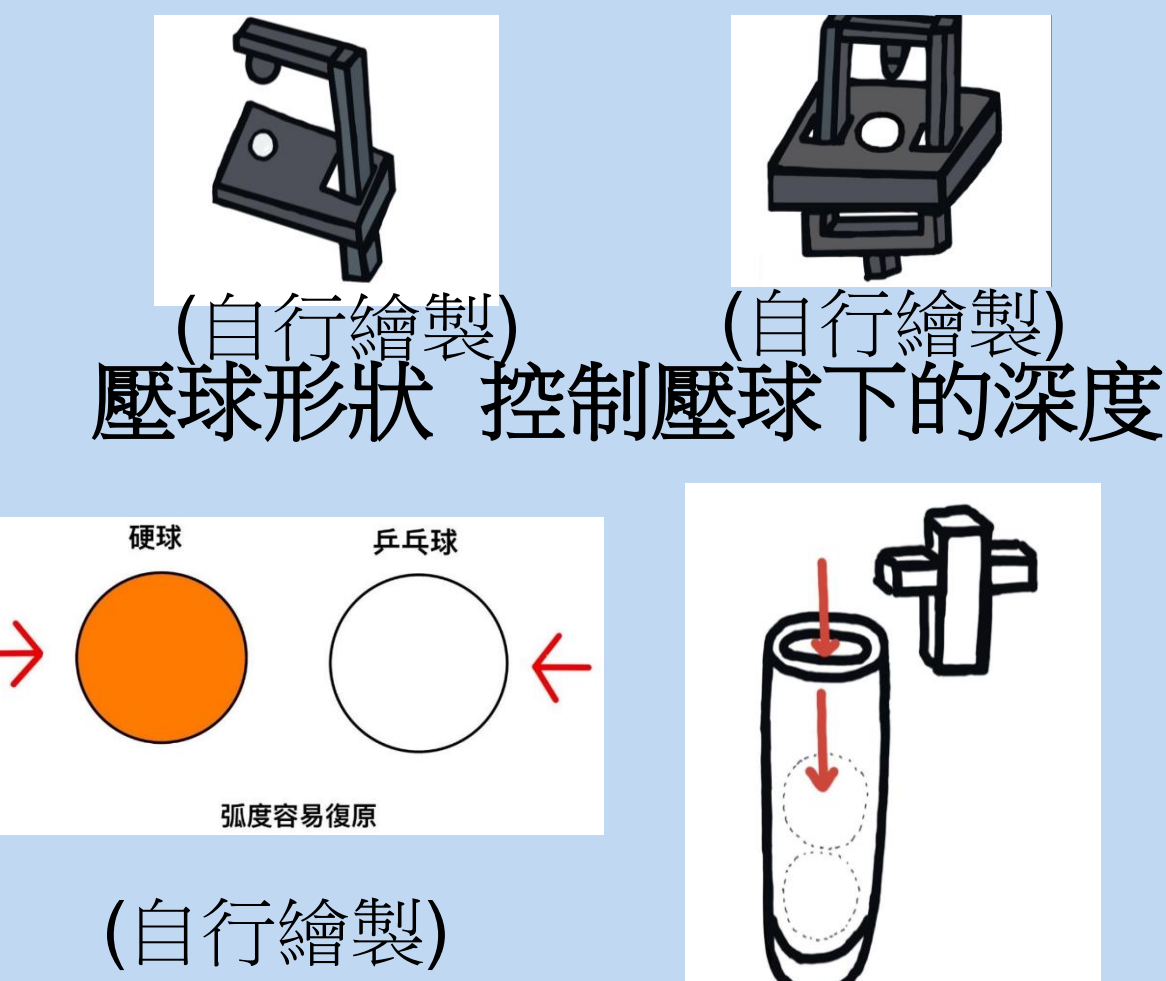
研究2 如何穩定的壓球(每次能用相同形狀壓入相同深度)

階段一 製造可控制**按壓深度**及**形狀**的穩定的壓球器

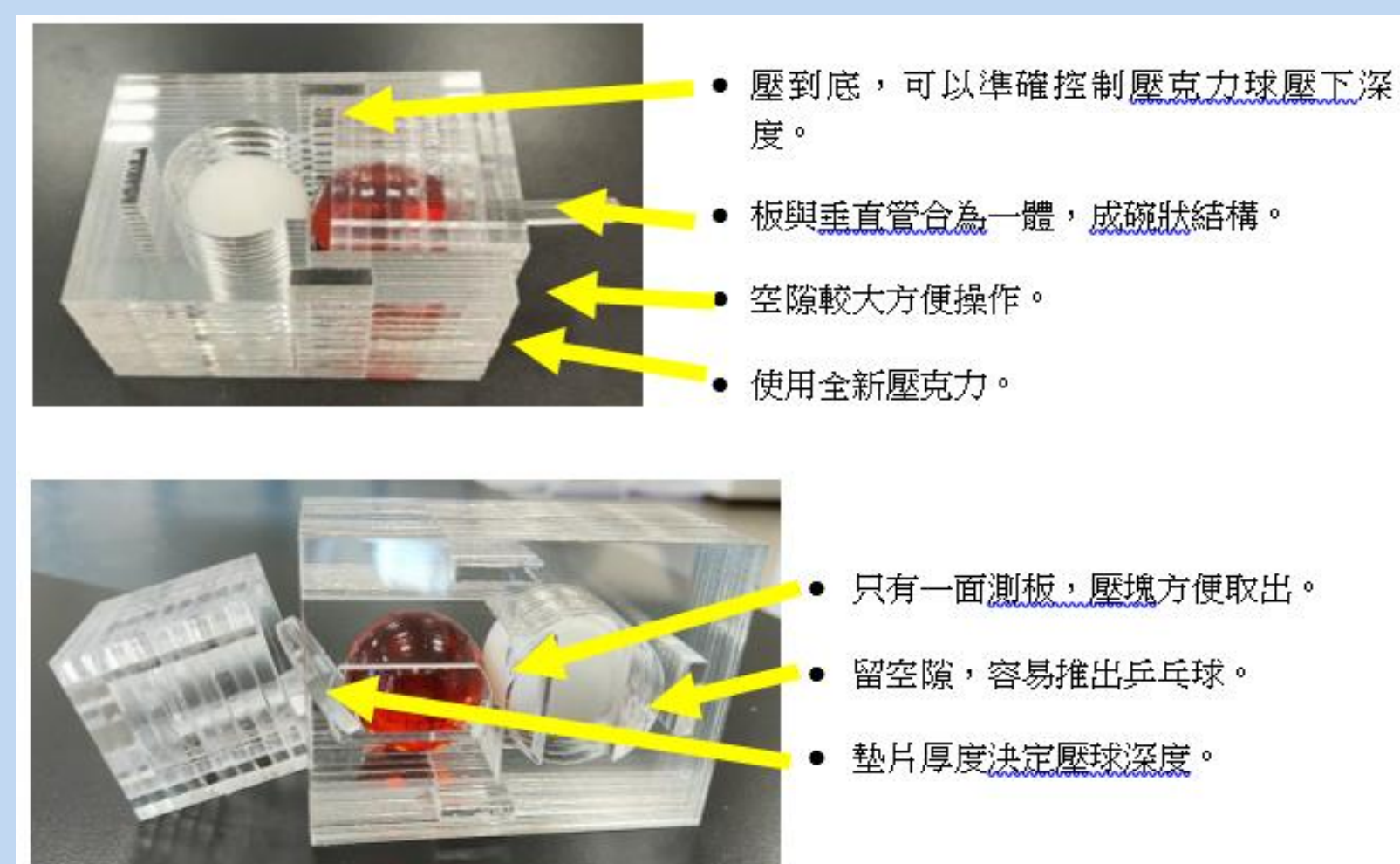
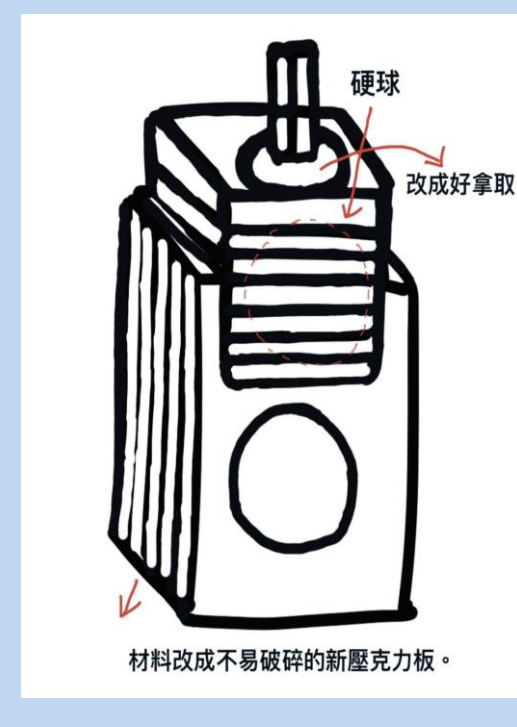
階段二 第二代壓球器的製作(更可靠、更好用)

目的：設計並製造出可以控制按壓乒乓球凹陷**深度與形狀**的工具。

控制凹陷深度

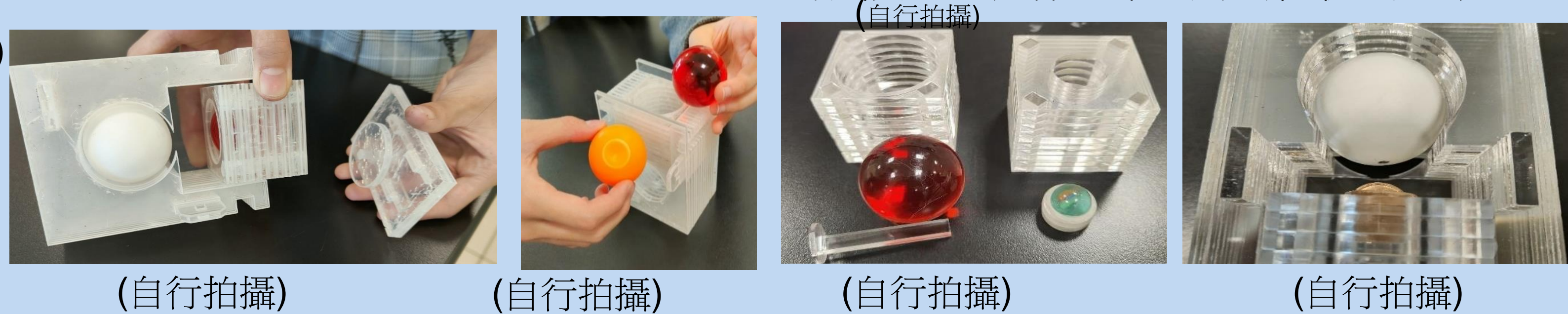


發現問題	解決策略
上方的壓板壓下時有點彎曲變形。	壓板加厚，並跟垂直管合為一體成碗狀
回收壓克力板製成的壓板開始粉碎	改用全新壓克力板
各零件尺寸太剛好易卡住，不易操作	各零件間切割時留縫隙，只留1片側板以方便取出壓塊



階段三 製作各種不同形狀的壓塊

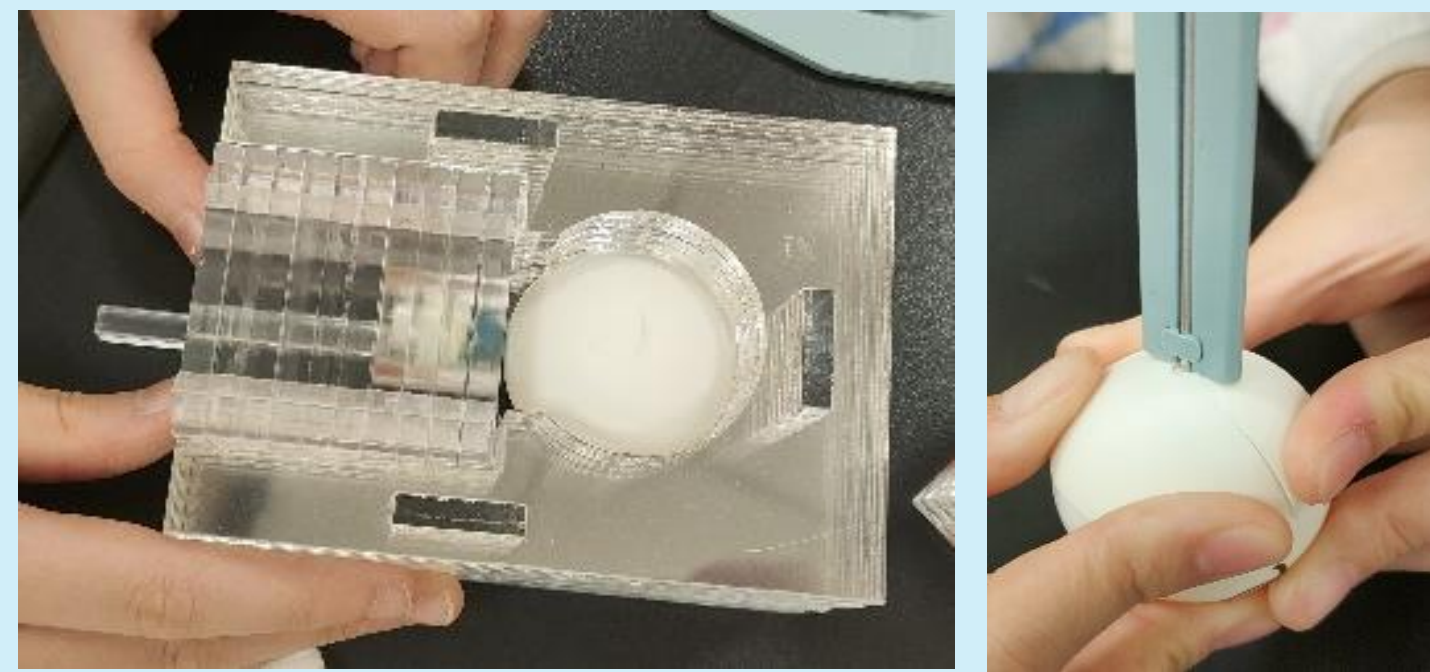
結果：成功製做出可以**壓製出特定深度、特定形狀的凹陷**。



結論：我們能成功利用第二代壓球器，穩定押出固定深度與形狀的凹痕，來進行後續實驗。

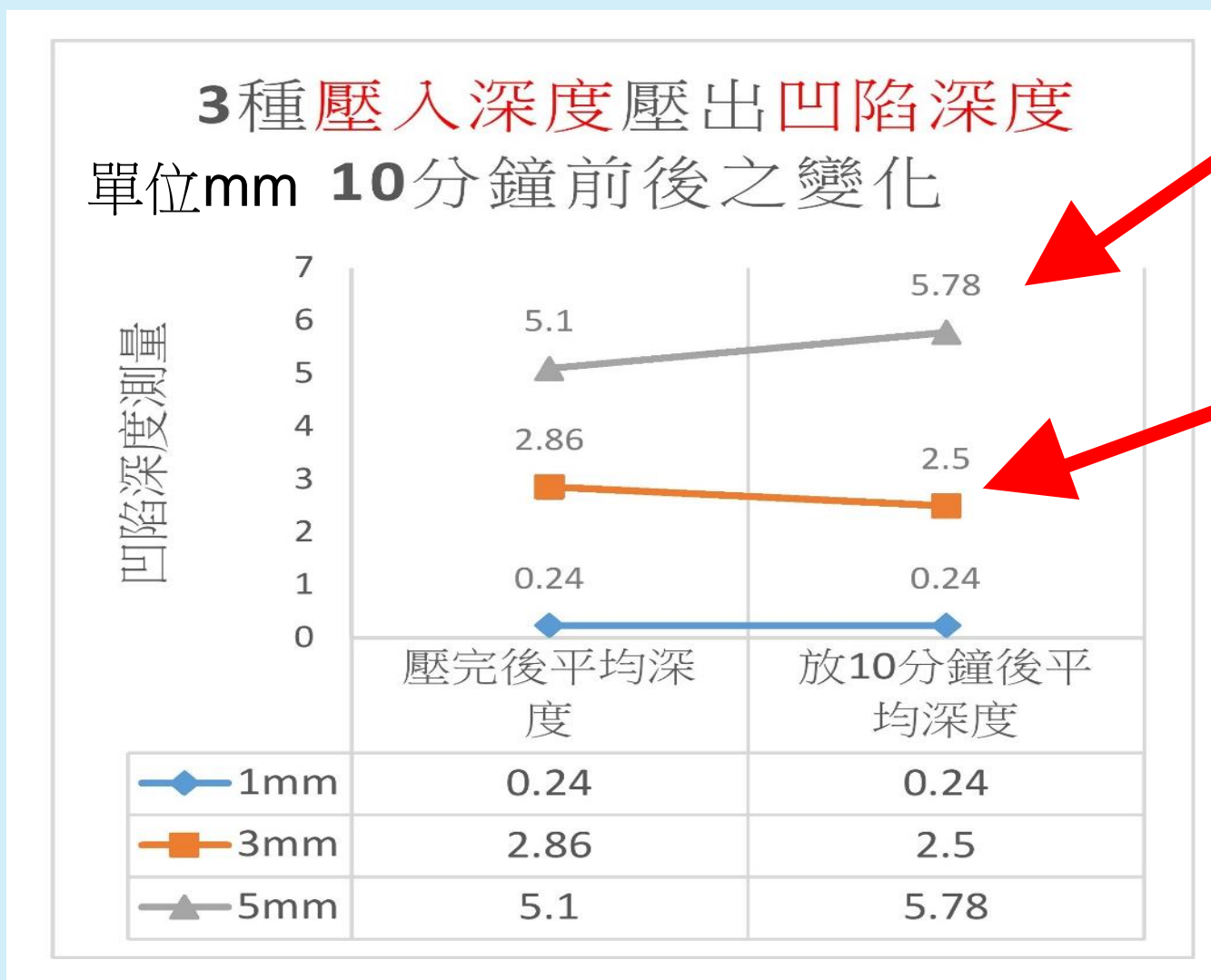
研究3 如何壓出相同的凹陷？

階段一：嘗試利用可以控制深度及形狀的壓球器，壓出一模一樣的凹陷



1. 利用彈珠壓球器，壓出1mm、3mm、5mm深度凹陷各5球。
2. 壓完馬上用59小物的方法測量凹陷深度。算出平均值。
3. 放置10分鐘後如上重複再做一次，整理成右圖。

結果：



討論：

1. 10分鐘後深度變大不合理，應該是測量的方法不準確造成。
2. 所以我們需要：改善測量的方法。
3. 我們發現乒乓球不像黏土，會有些緩慢復原的凹陷(如右)。深度變淺可能是因為緩慢復原造成的。
4. 真實凹陷一定不會自動復原，會變化的凹陷彼此也很難相同。所以我們需要：找到製作不可復原凹陷的方法。

說明：
我們曾經壓製出兩個相同的凹陷，可以觀察到右方凹陷慢慢自動復原



階段二：改善測量的方法

討論與考量：

1. 59小物測量法，不能保證每次測都測在凹陷中的同一個位置上。
2. 測量的半球有彈性，下壓時可能會變化(應該要每次測相同位置)
3. 用游標卡尺判讀得太慢，測量剛壓製的深度時，較晚測量的球可能其實已經有變化了(應該要快速測量)

解決策略：

1. 利用製造壓球器的方法，固定待測乒乓與卡尺(以確認測量相同位置)
2. 改用數位游標卡尺(更快速正確)。

結果：



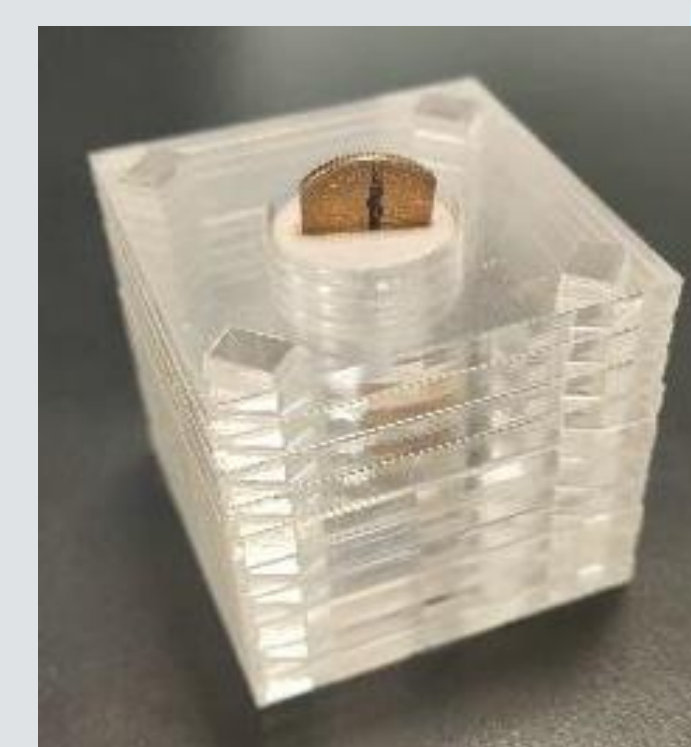
階段三：找到製作不可復原凹陷的方法



討論與考量：

1. 依據經驗，球狀的圓滑凹陷容易緩慢復原，推測有摺痕的凹陷會卡住，比較不會復原。
2. 蒐集桌球隊打凹的乒乓球觀察(如左)，發現符合我們的推測(真實凹陷幾乎都有摺痕)
3. 因此我們希望壓出摺痕，製作出不可復原的凹陷。才能做出相同凹陷，提供後續實驗。

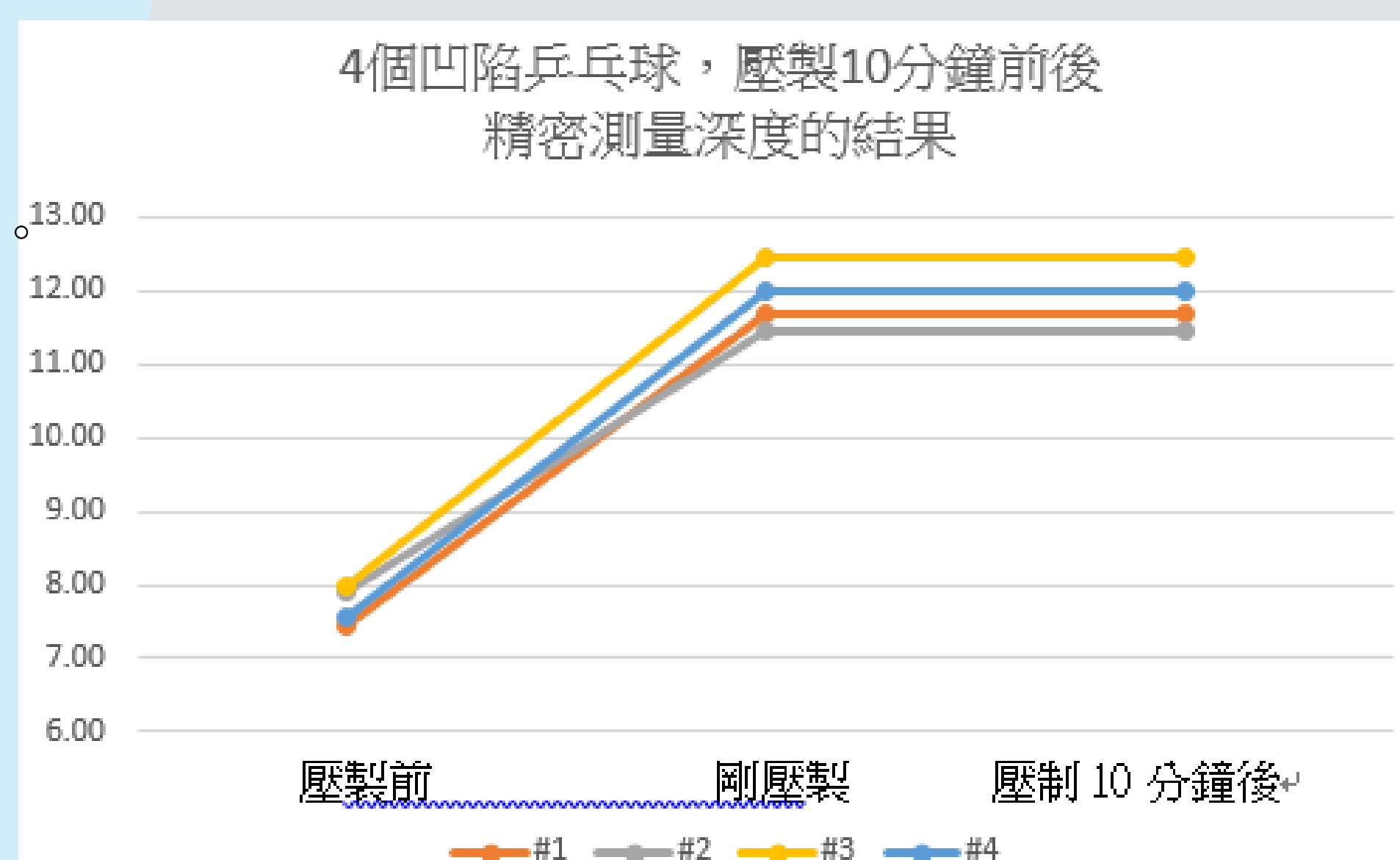
過程：



1. 取4球，利用指甲狀金屬片壓塊，壓出5mm有摺痕凹陷。
2. 壓製後馬上用自製測量儀連續測3次深度
3. 靜待10分鐘後再測一次

結果：

1. 有摺痕則不復原
2. 整理平均數據如右表



討論：

1. 壓製後10分鐘內深度測量值(1個球共6次)都沒變化，代表：我們新建立的測量方法十分精確。
2. 壓製後10分鐘內，凹陷深度都沒變化，代表：我們成功壓製出不可復原的凹陷。

以第1顆球為例，測量最大值與最小值十分相近，可見測量方法精確



研究4 同樣的凹陷，鑽不鑽孔對復原的影響？

目的：

將利用壓球器在一批乒乓球上分別壓出穩定存在的、相同的凹陷來做測試。以更精確的確認：是否只要鑽洞，乒乓球的凹陷就算泡熱水也不能復原。(所有乒乓球上的凹陷狀況都一樣)。

浸泡80°C熱水



(自行拍攝)

研究結果：

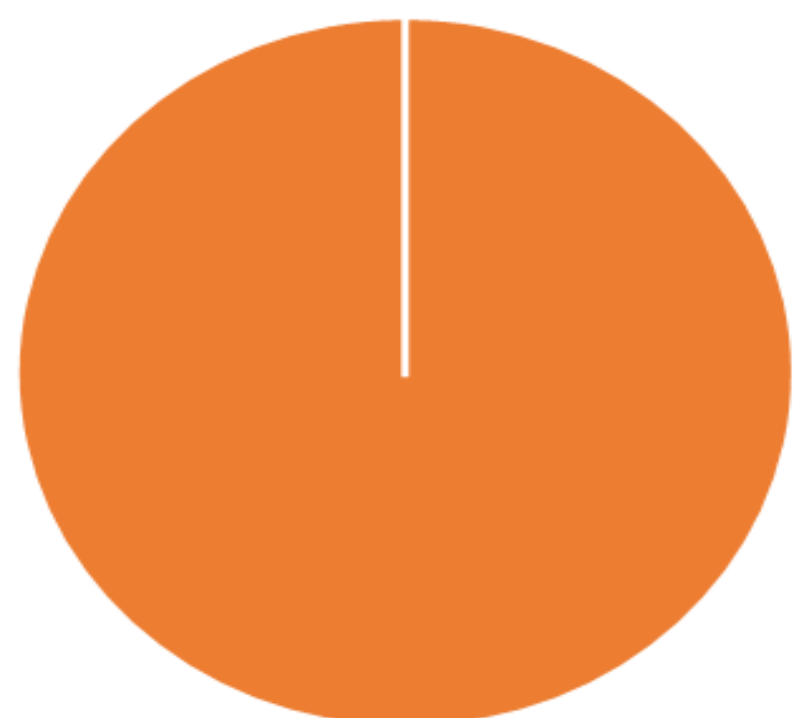
有鑽孔

沒鑽孔



(自行拍攝)

相同凹陷乒乓球 有鑽孔
泡80°C熱水20秒後



■ 復原 ■ 未復原

(自行繪製)

相同凹陷乒乓球 未鑽孔
泡80°C熱水20秒後



■ 復原 ■ 未復原

(自行繪製)

討論：

在研究一時已經可觀察出：只要有鑽孔，乒乓球上原本遇熱可以復原的凹陷就沒辦法復原了。但在研究一的實驗中，實驗組與對照組除了有沒有孔的差別外，彼此間的凹陷其實也不同。

由本實驗可看出，不論加熱對於復原凹陷有多大的貢獻，只要沒有乒乓球內部因氣體膨脹趨勢而產生的壓力，凹陷乒乓球就不會復原。氣體膨脹的壓力才會是讓凹陷乒乓球復原的關鍵。

在歷經研究三(對於乒乓球凹陷的特性)的研究後知道，理解到凹陷其實是有各種不同樣式的，是否有某些類型的真實凹陷，真的單單只靠加熱就能自動復原，就還需另外再確認了。

結論：氣體膨脹的壓力，才是讓凹陷乒乓球復原的關鍵。

研究5 59小物中，加熱乒乓球中的氣壓是否被低估？

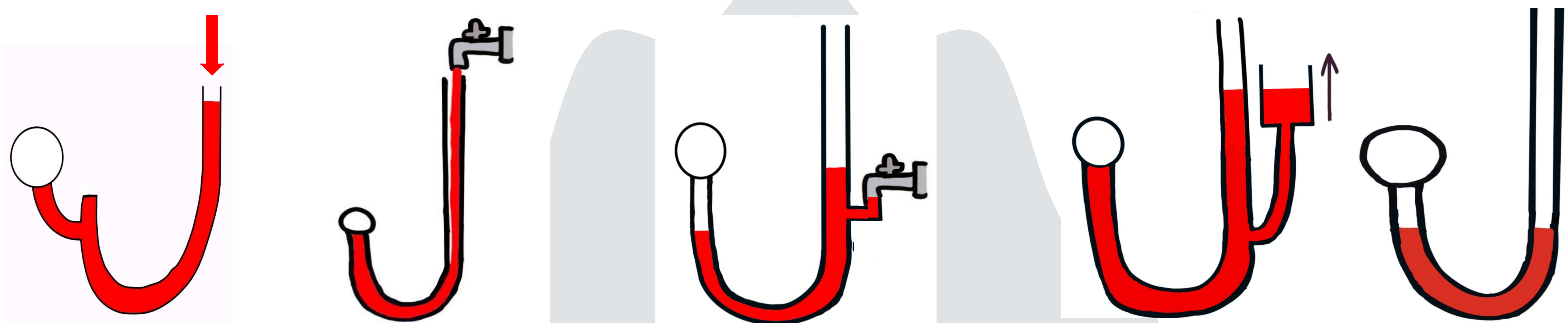
研究5-1：自製：可以控制水壓，並能精準衡量壓力的壓力計

目的：

因為外面賣得壓力計，最小刻度是 1 psi (71.28 cm水柱高)的大小，不夠精確（球針壓力計的問題），沒辦法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。

階段1：如何注水以升高水壓

階段2：如何改良升水壓的方法



設計一(自行繪製)

設計二(自行繪製)

設計三(自行繪製)

設計四(自行繪製)

設計五(自行繪製)

階段3：要如何調節乒乓球端的起始空氣量

研究5-2：用自製氣壓計測量乒乓球內氣體，遇熱後壓力是否被低估



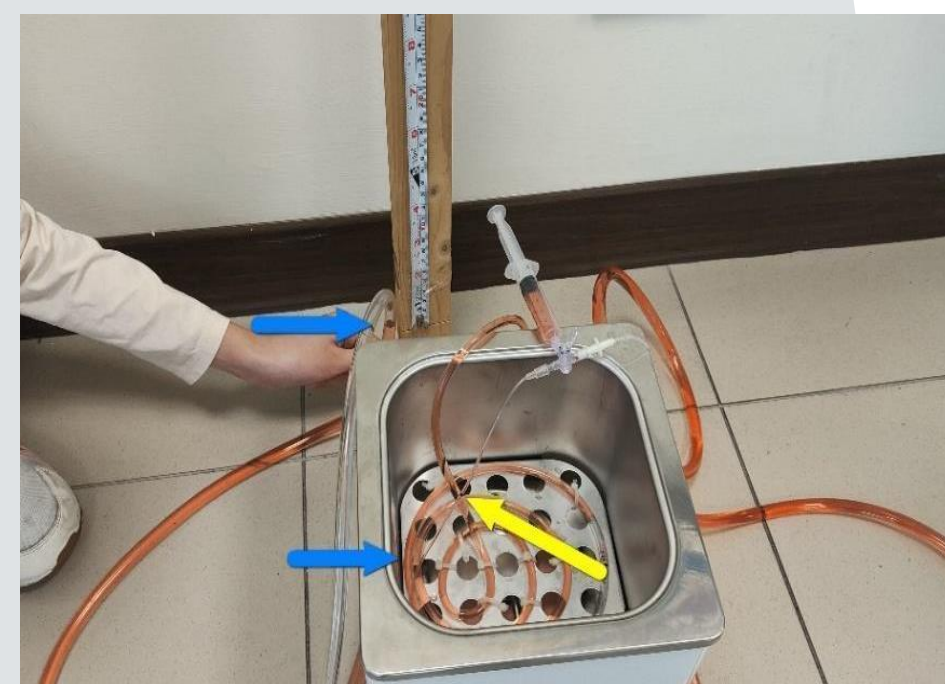
(自行拍攝)



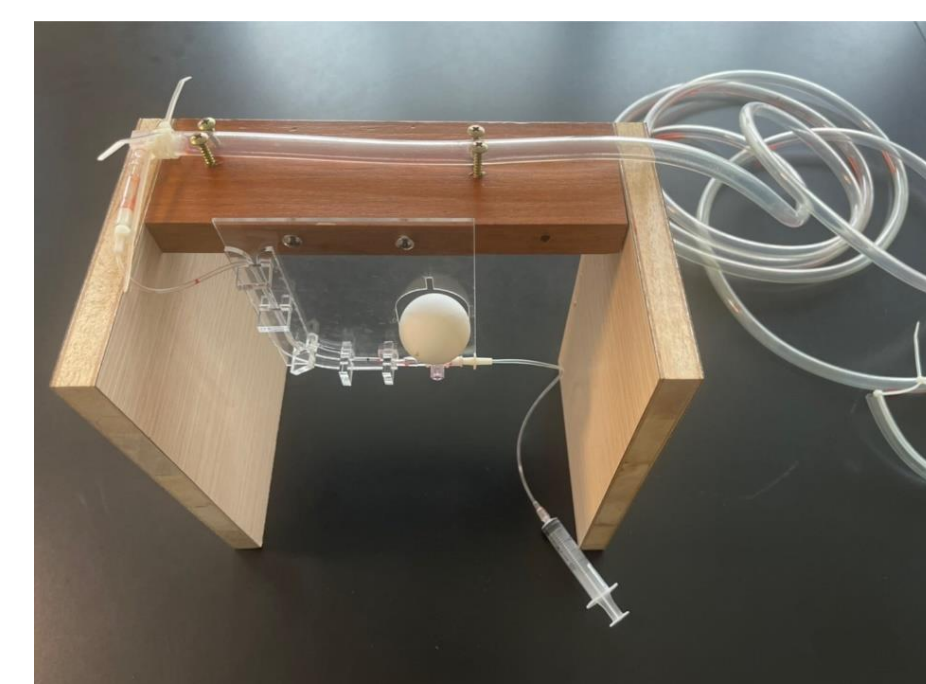
加入三通閥以排出多餘氣體

(自行拍攝)

階段4：如何避免：1.空氣一膨脹就跑掉了、2.閥門漏氣、3.水一進球內就出不來

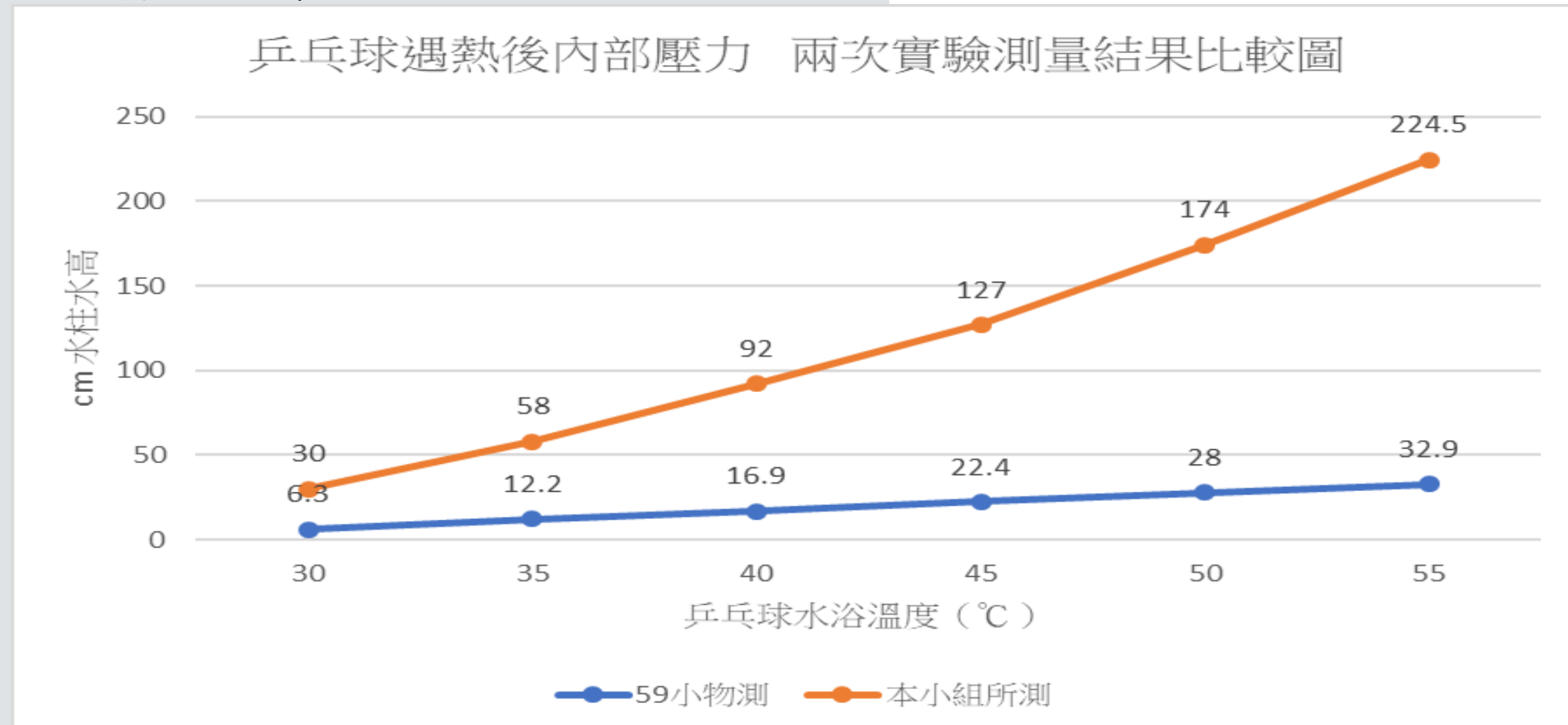


(自行拍攝)



(自行拍攝)

研究結果



(自行繪製)

結論：當水溫從低溫升至高溫時，乒乓球內部壓力有顯著的增加，我們測得的壓力比59小物足足多了5倍以上，這證明了他們的實驗低估了乒乓球受熱後內部壓力的變化。

研究6 59小物中，推出凹陷所需的壓力有高估嗎？

目的：

利用嚴謹製作的自製壓力計，衡量凹陷乒乓球在泡 80°C熱水時，復原凹陷所需要的壓力有多大。並依據研究結果判斷：在 80°C水溫中，乒乓球內氣體膨脹的壓力是否能提供復原凹陷所需要的壓力。

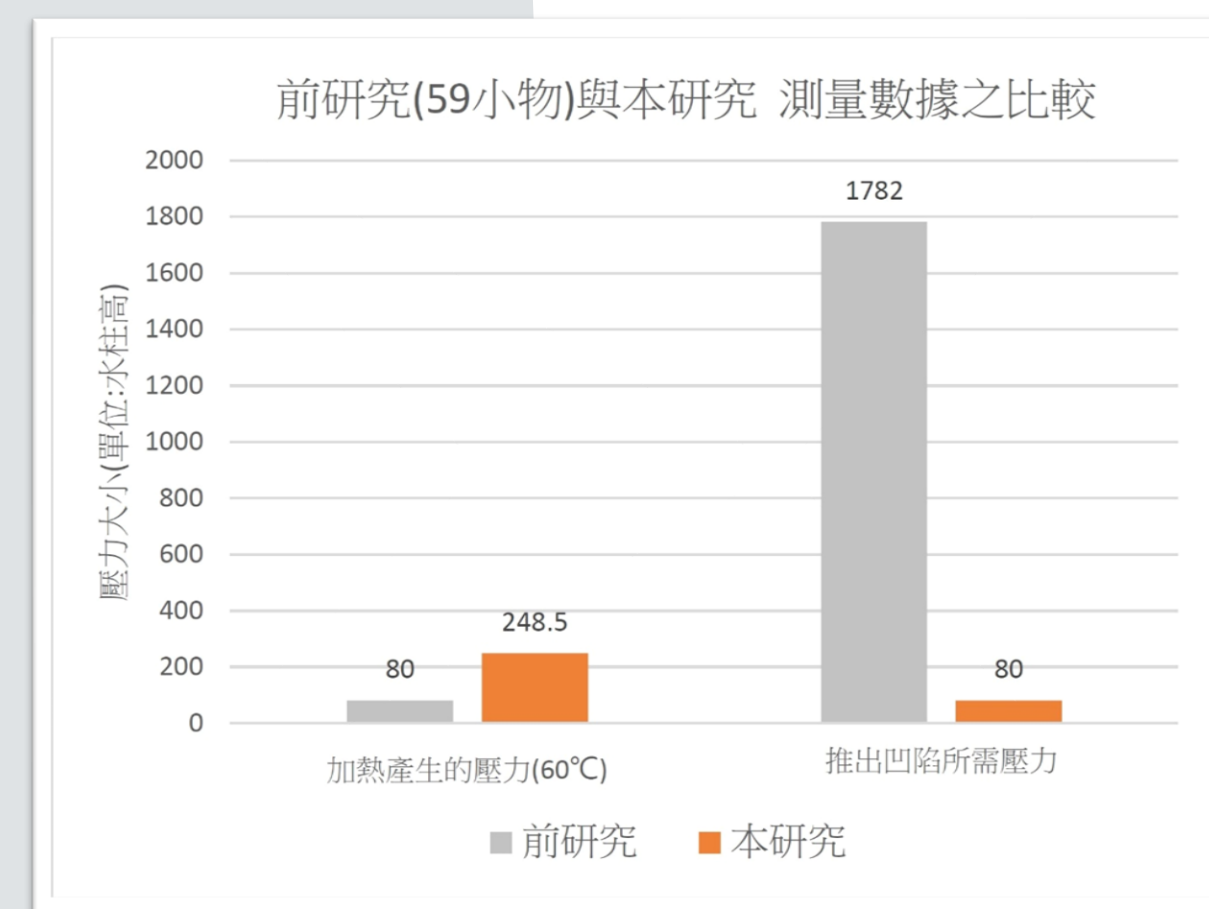
研究過程與方法：

- (一) 在壓球器內墊 4 片 1.8mm 的壓克力板 1 和元硬幣，營造出 7.2mm 高的指甲形深度。
- (二) 壓球器壓球 10 秒。
- (三) 測量壓完球後的深度，靜置 10 分鐘再測量深度，確認是否會自動復原。
- (四) 將此凹陷乒乓球接上自製壓力計。
- (五) 實驗前確認水管中水位與低水位相同。
- (六) 將凹陷的乒乓球泡入 80 度熱水中，並用鐵網壓住乒乓球
- (七) 將水管往上提高（每次升高 1cm）直到乒乓球復原，並記錄當時高低水位差。

研究結果：

- (一) 此指甲壓球器成功的壓出 4.2mm 凹陷，10 分鐘後維持為 4.1mm，成功按壓出不可自動復原的凹陷。
- (二) 當高低水位差為 80 公分時，此凹陷完全復原。
利用自製氣壓計確認了**59小物作品中讓凹陷乒乓球恢復所需壓力被高估**。
- (三) 59小物利用打氣筒壓力計去估計：讓凹陷的乒乓球復原需要多大壓力時，測試結果被嚴重高估，足足和我們相差了22.1倍。

結論：利用自製水浴控溫壓力計測量出59小物在測量凹陷乒乓球需要多少壓力才能復原的實驗結果被嚴重高估。



(自行繪製)

結論

- 一、我們在研究一中，發現了有鑽洞的乒乓球不會復原；沒鑽洞的可以復原。
- 二、為了讓乒乓球凹陷的深度、形狀一致，我們開始製作出**可以壓製固定深度、形狀與壓痕的壓球器**，能夠穩定的壓出特定尺寸的凹陷提供後續的研究。
- 三、我們研究的對象是不可自然復原的凹陷，除了深度與形狀之外，壓出**摺痕**是製作凹陷的**不可復原性的關鍵**。
- 四、我們在能夠製造出相同的凹陷後，進一步的確認了鑽洞的都無法復原，沒鑽洞的都可以復原。**氣體膨脹是復原凹陷的關鍵**。
- 五、利用我們自製的準確壓力計，確認了乒乓球遇熱所增加的氣壓被他們嚴重低估（55°C時相差6.8倍），主因應是他們沒有外加壓力，讓乒乓球內氣體體積維持不變。
- 六、乒乓球遇熱要利用氣壓推出凹陷時，需要克服的是熱乒乓球殼，而非室溫下的冷球殼。

參考文獻

- 乒乓社交開球網. (2017年7月31日). 桌球一星二星三星有什麼區別? (開球網). 擷取自 每日頭條: <https://kknews.cc/zh-tw/digital/6p6my9p.html>
- 林煒翔. (2019). 凹陷乒乓球放入熱水中可以恢復是球殼本身受高溫作用產生的效果. 高雄市: 國立臺灣科學教育館.
- 掰咖老師. (2015年April月4日). 【桌球喇低賽】桌「球」的變革(內含兩部影片) - 桌球. 2024年June月9日 擷取自 運動視界: <https://www.sportsv.net/articles/11513>