

第二十一屆旺宏科學獎

創意說明書

參賽編號：SA21-282

作品名稱：長條形氣球的尾巴

姓名：陳品安

關鍵字：氣球、張力

摘要

長條形氣球在充氣後，並非整條同時膨脹，而是從前端某處突然脹起，因此會出現小尾巴。而氣球膨脹的瞬間，整體壓力會驟降，且前段膨脹的同時後段縮小。在實驗中透過自製壓力計測量半徑、長度與壓力的關係，試圖解釋長條形氣球小尾巴出現的原因。

壹、 研究動機

我們觀察到長條形氣球打氣過程中，靠近打氣筒的部分會突然的脹大，剩下部分還是維持與原本的粗細差不多，持續充氣後會從原本脹大的地方開始往後延伸，而不是整條一起脹大，後來思考過後發覺，同一條氣球的內外壓力差應該要相同，但它卻同時存在兩種不同膨脹程度，且與塑膠袋被吹脹時的膨脹情形不同，我們想透過實驗了解這個現象發生的原因，並提出解釋。

長條形氣球原始形狀。



充氣過程中，部分膨脹，部分與原氣球粗細相似。



完全充氣。



貳、 研究目的

- 一、 長條形氣球的小尾巴出現的原因。
- 二、 為什麼氣球總是由靠近吹口的部分脹大。
- 三、 氣球為什麼會突然膨脹，膨脹後反而容易繼續吹大。

參、 研究過程

一、 原理說明

(一) 膜張力：我們這個實驗借用表面張力的概念，來描述氣球膜張緊時，它單位長度上垂直拉力的大小，我們將其稱為「氣球的膜張力」。

(二) 分析實驗一中，環狀氣球膜承重時的受力，取其下半片討論，所受向上的力由膜張力提供，大小為 $2T_y d$ ，所受向下的力為承重 F ；忽略氣球膜本身的重量。

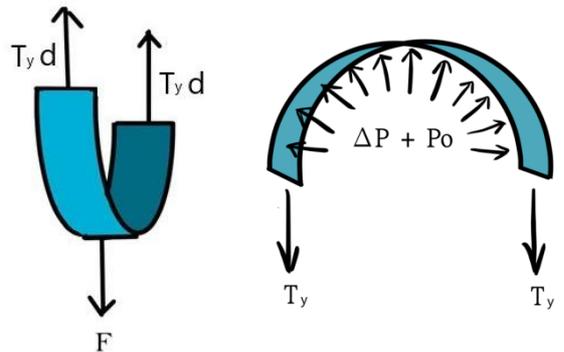
$$\text{關係式： } F = 2T_y d$$

測量長度 d 與承重 F ，可以推得氣球的張力 T_y 。量取環狀氣球拉伸後的周長，可以推得同樣周長對應之氣球被吹脹時的半徑 r 。因此最後我們可以求得氣球被吹脹為半徑 r 時的膜張力 T_y 。

d ：環狀氣球寬

F ：承受重量

T_y ：膜張力



- (三) 當氣球被吹脹至半徑 r 時，取其中一段寬度 d 的環狀氣球膜，分析其上半部的受力：其所受向上的力 $\Delta P * 2rd$ ，所受向下的力為 $2T_y d$ ，忽略氣球膜本身的重量。

$$\Delta P \times 2r \times d = 2T_y \times d \rightarrow \Delta P(r) = T_y/r$$

ΔP ：計示壓力

r ：環狀氣球半徑

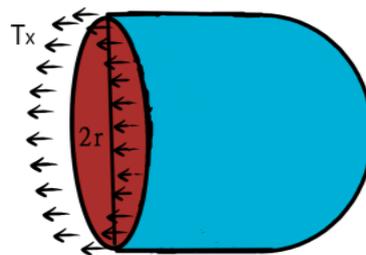
T_y ：膜張力

d ：環狀氣球寬



- (四) 當氣球被吹脹至半徑 r 時，取上圖中氣球的右半條，將其簡化成下圖所示，分析其受力：其所受向右的力 $\Delta P * \pi r^2$ ，所受向左的力為 $T_x * 2\pi r$ 。因此可以求得 ΔP 與 T_x 的關係式為：

$$\Delta P * \pi r^2 = T_x * 2\pi r \rightarrow \Delta P = 2 * T_x/r$$



$$T_x * 2\pi r = \Delta P * r^2 \pi$$

與上段 T_y 對照，可得在相同的氣球半徑與 ΔP 的情況下，

T_x 與 T_y 的比為1:2。

二、 實驗裝置與器材

- (一) 主要器材：環狀氣球膜（將圓形氣球裁切出相同寬度的環狀膜片）、三種規格的長條氣球、砝碼。

160Q 長條氣球	260Q 長條氣球	360Q 長條氣球
		
圓形氣球上裁切下的 環狀氣球膜		
		

(二) 實驗設置

1. 實驗一：探討環狀氣球膜的長度與所承受拉力的關係。
 - (1) 環狀氣球膜一端固定，另一端掛上砝碼。
 - (2) 測量環狀氣球膜在不同承重下的拉長及縮回之伸長量。

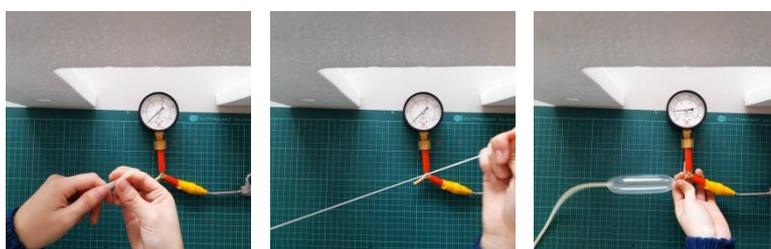


2. 實驗二：氣球在被拉長的情況下，是否比較容易被吹脹。

(1) 拉長氣球的同時充氣。



(2) 先拉長氣球經過一段時間後放回，再充氣。



3. 實驗三：

(1) 測量氣球在「未充氣」、「已充氣準備脹大」、「充氣後已脹大」的部份的周長。

- A. 將長條氣球、打氣機套上接頭，並充氣。
- B. 充氣到標記的記號。
- C. 用棉線分別在未脹大、準備脹大、已脹大的部分測量周長。



(2) 固定壓力與周長、長度的關係。

- A. 在氣球的中段取一段長20公分的欲測長度，

用筆在上面做記號，預留2公分的緩衝區域（在充氣過程中，如果要剛好充到20公分可能因為施力不同，氣球脹大後在長度的測量上較不精準，多畫了欲測長度後面的2公分，是為了比較好測量），再取一段充氣後沒有要被我們吹脹的部分3公分，同樣做上記號。

- B. 測量未充氣時的周長。
- C. 將長條氣球、打氣機套上接頭，並充氣。
- D. 充氣到標記的位置。
- E. 用棉線分別測量未吹脹區域周長、未吹脹區域長度、吹脹區域周長、吹脹區域長度，並記錄。

4. 實驗四：氣球不同位置的厚薄分佈和初始膨脹位置的關係。

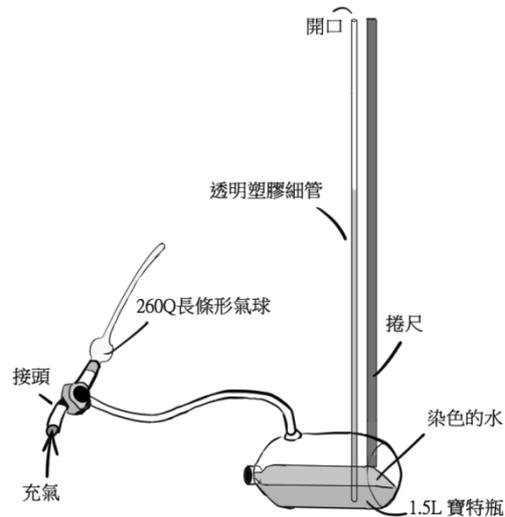
(1) 透過螺旋測微器量測氣球前段、中段、尾段厚度。



5. 實驗五：改良實驗三，用自製水壓計測量。

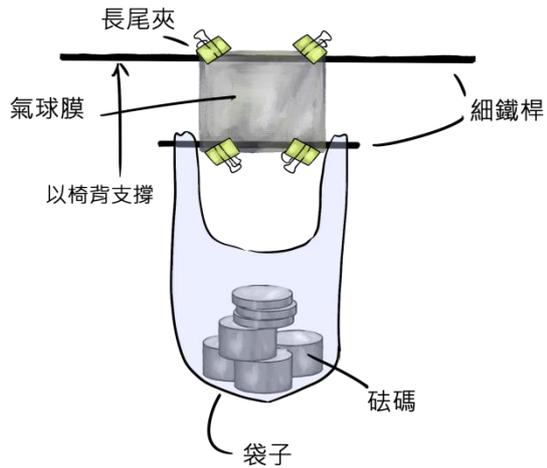
在充氣過程尾端和前端未脹大以及脹大時的
周長、長度關係。

- (1) 自製開管壓力計，利用水柱高測得壓力。
- (2) 在氣球上畫要測的部分，靠近吹口處取1公分、中段取5公分。
- (3) 依照預定的壓力值充氣。
- (4) 利用細繩纏繞，量測氣球前端1公分處以及尾端5公分處的周長、長度。



6. 實驗六：改良實驗一，測量長條形氣球在不同寬度
下，其長度與所掛重量的關係。

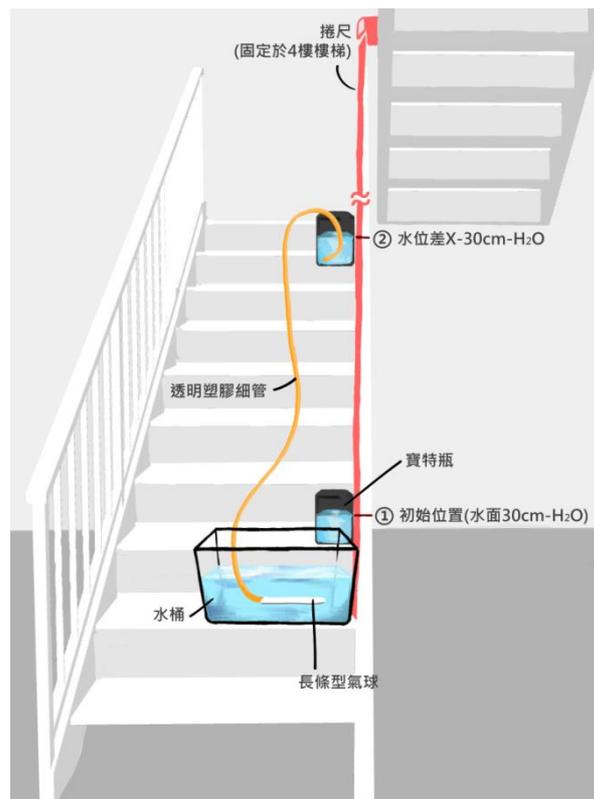
- (1) 環狀氣球膜拉開到指定長度，一端固定，另
一端掛上砝碼。
- (2) 測量氣球膜長度。



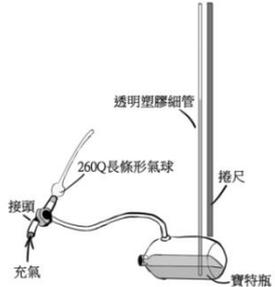
7. 實驗七：改良實驗五，在水中測量氣球在不同壓力下，長度方向及周長方向的形變率。

(1) 吹脹氣球並在前端以及後端畫上長寬為15cm和5cm的長方形，並將氣球洩氣放入水中，以水將氣球充脹。

(2) 將此氣球放入水中，抬高裝滿水的寶特瓶，每上升30cm測量一次長方形的長與寬的數值。

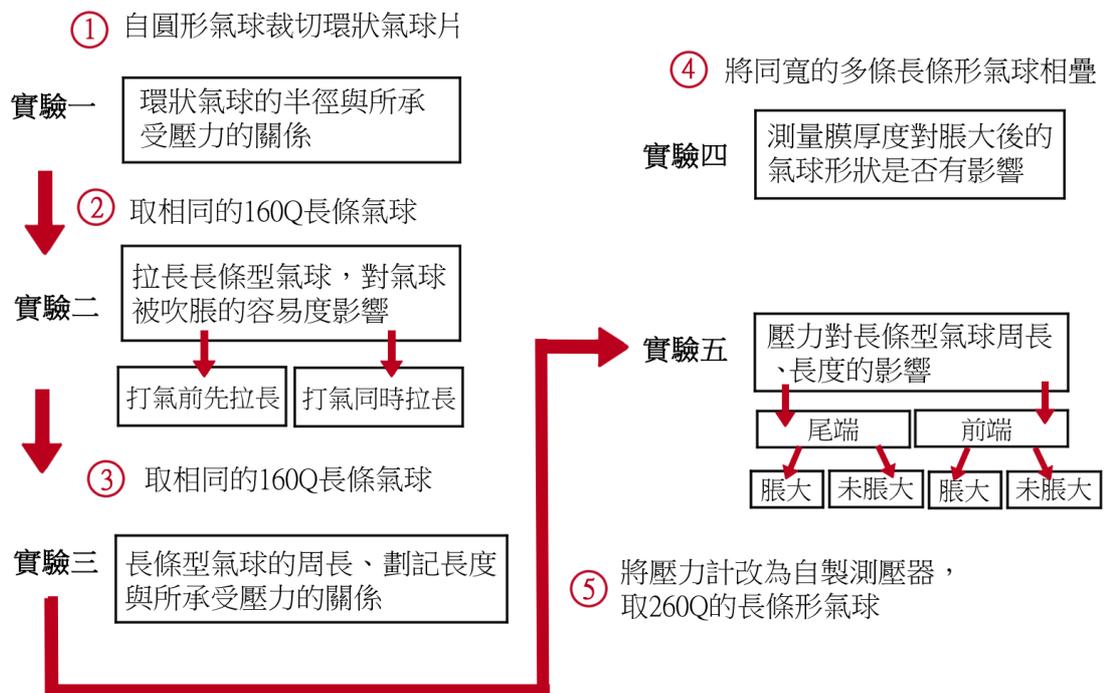


(三) 耗材與其他器材：膠帶、打氣機、鐵尺、切割墊、奇異筆、梯子、剪刀、捲尺、美工刀、接頭、壓力計、打氣筒、透明塑膠細管、方格紙、塑鋼土、接著劑、螺旋測微器。

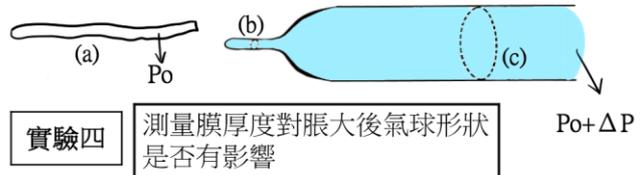
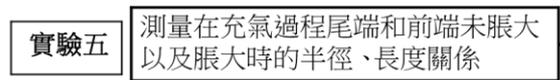
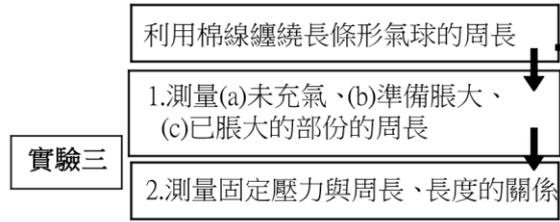
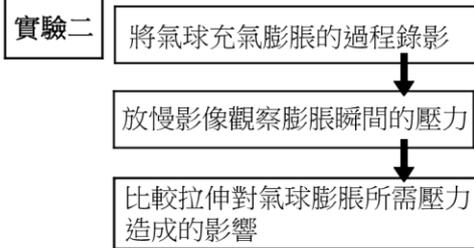
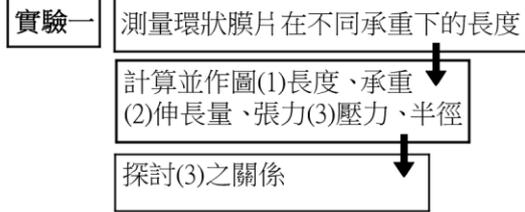
三通接頭	無液壓力計 (上限 1bar、 最小刻度 0.02bar)	自製壓力計 (上限 0.4bar、 最小刻度 0.001bar)
		

三、 實驗流程

變因設計與實驗步驟



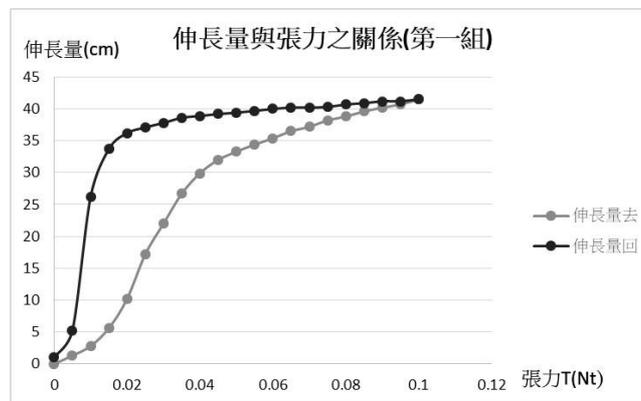
量測及分析數據



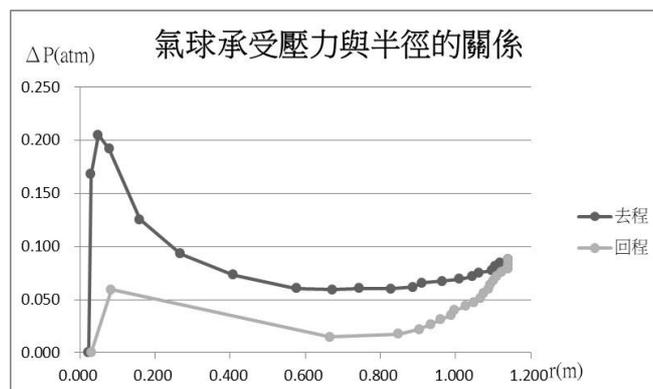
四、數據分析

(一) 實驗一：探討環狀氣球的半徑 r 與所承受壓力的關係。

1. 原長 8cm 寬 2cm 的氣球膜伸長量與受力的關係。



2. 推測的氣球壓力變化與半徑的關係。



使用下列方程式求得氣球半徑與壓力之可能關係：

$$\Delta P(r) \times 2r \times d = 2T_y(r) \times d \rightarrow \Delta P(r) = T_y(r)/r$$

如上六表所示，在實驗一-1中觀察到長度隨著砝碼重量增加，中段斜率相對前後較高；在實驗一-2將實驗一-1的數據換算成伸長量與張力，可以看到與實驗一-1相同的趨勢；在實驗一-3中觀察到氣球在越過一個最高壓力值後，壓力陡降，半徑迅速增加，且回程時所需壓力較去程小。

(二) 實驗二：氣球在被拉長的情況下，是否比較容易被吹脹。

	第 1 組	第 2 組	第 3 組	第 4 組	第 5 組	平均
未先拉長要吹脹氣球 所需的壓力 (atm)	0.360	0.320	0.380	0.320	0.340	0.343
拉長同時打氣要吹脹 氣球所需的壓力 (atm)	0.200	0.180	0.240	0.160	0.220	0.200
先拉長要氣球一段時 間，放回後再充氣， 吹脹所需的壓力 (atm)	0.180	0.140	0.260	0.180	0.200	0.192

觀察此實驗過程，在長條氣球剛膨脹起來的瞬間，平均壓力會突增0.34atm，再降回大約0.26atm；而拉長同時打氣、先經過拉長的氣球，膨脹所需之最高壓力皆不到0.34 atm，下降至平均0.2 atm和0.192 atm。由於拉長一段時間，再放回的所需壓力，和拉長同時吹氣類似，推測是因為橡皮拉長會變質所造成，在實驗一中，回彈時彈力減小可能是相同原因。

(三) 實驗三：

1. 固定壓力與周長、長度的關係。

	未吹脹區周長比	未吹脹區長度比	吹脹區周長比	吹脹區長度比
充氣前：充氣後	1：1.96	1：1	1：9.90	1：4.6

原本未吹脹區域的周長以及長度分別是1cm以及3cm，在充氣時此區域數值變為約2cm以及3cm，可以知道在充氣過程中，雖然它尚未被充起來，長度變化小至觀察不到，但周長有增加，而脹起來的區域，在充氣前周長一樣是1cm，長度取中間段20cm，充氣後分別變為約10cm以及約90cm。由充氣前與充氣後周長長度的膨脹比。

$\frac{\Delta y}{y_0} : \frac{\Delta x}{x_0} = \frac{10-1}{1} : \frac{90-20}{20} = 2.6:1$ ，雖然和 $T_y T_x$ 的2:1有些差距，但是，考慮到橡皮膜並不完美符合虎克定律，所以還算合理。

(四) 實驗四：氣球不同位置的厚薄分佈和初始膨脹位置的關係。

1. 160Q的氣球

與吹口處距離 (cm)	1	5	10	15	20	25	30
膜厚度 (mm)	0.240	0.247	0.265	0.268	0.292	0.296	0.321

2. 360Q的氣球

與吹口處距離 (cm)	1	5	10	15	20	25	30
膜厚度 (mm)	0.252	0.264	0.286	0.297	0.317	0.329	0.344

(圖、160Q的氣球)



(圖、360Q的氣球)

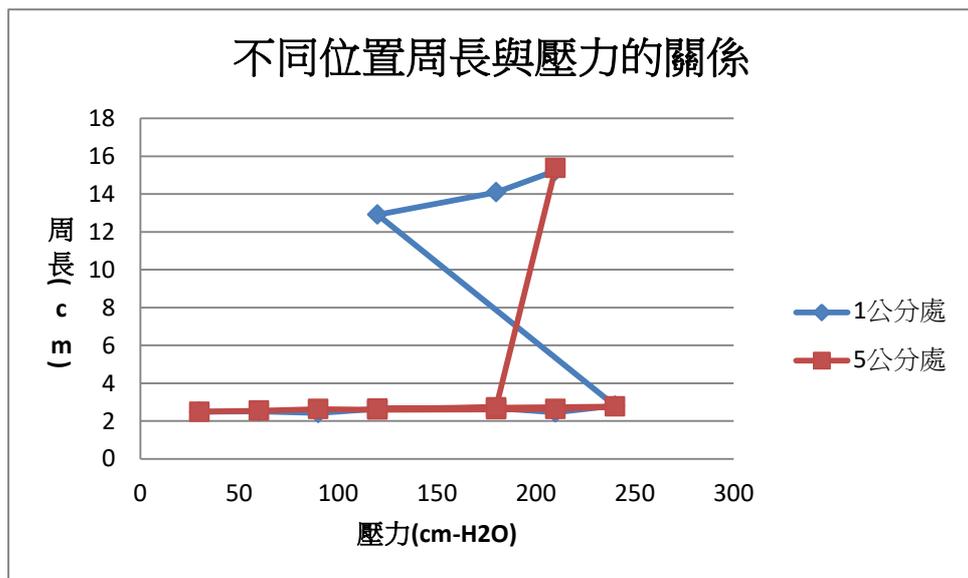


實驗中，我們可以從表格看到其實同一顆氣球，內部厚薄並不相同，越往吹口越薄，越往尾巴的部分越厚，我們推測可能與氣球的製作過程有關。

為了證明真的是氣球膜厚度使氣球從吹口處脹大，我們將氣球開口處封起，並在尾端開洞，得到相同的結果，氣球皆從我們測出氣球膜較薄處脹起。

(五) 實驗五：在充氣過程尾端和前端未脹大以及脹大時的周長、長度關係。

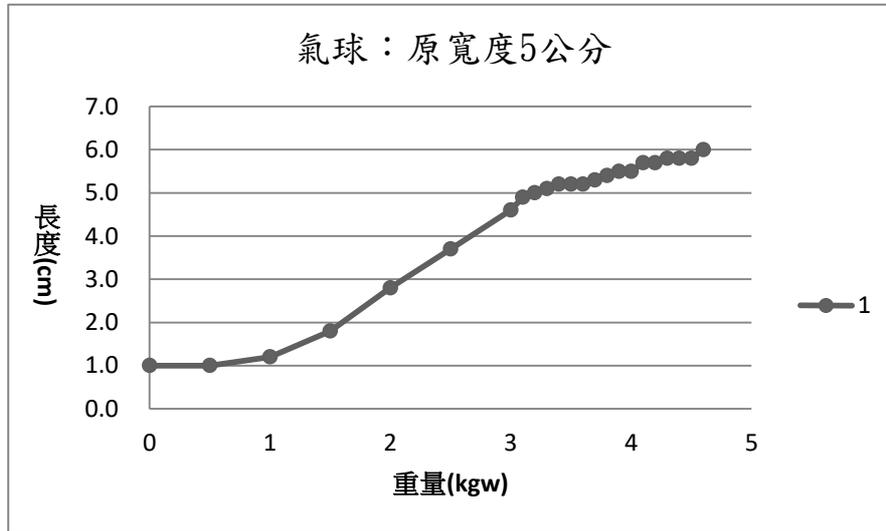
1. 周長與壓力的關係



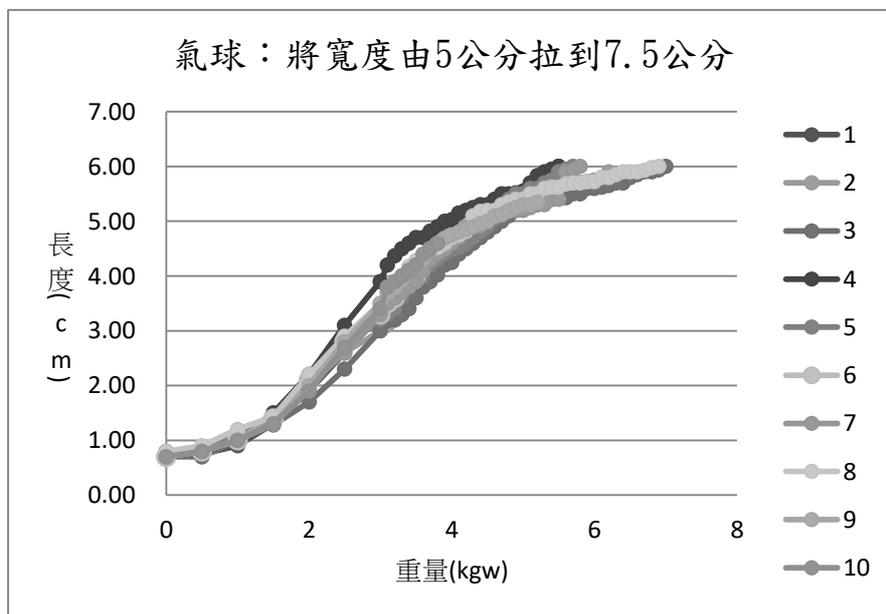
上方兩個圖表是在前面一公分處沒有脹大的情況下，分別測量前面一公分處以及後面五公分處的周長，我們可以由圖表知道，在充氣過程中，如果沒有一個地方脹大的話，整條氣球其實會一起變粗，直到靠近吹口處的部分脹大之後，尾端還沒脹大部分的周長會稍微變小，我們推測此現象是尾端的氣體在前端膨脹同時向前衝，導致氣球前端迅速膨脹，如果又持續充氣，它會繼續變粗直到脹大。

(六) 實驗六：考慮到氣球膜的受力可能和兩方向之形變都有關，因此將氣球膜拉到不同寬度下，測量長條形氣球長度與所掛重量的關係。

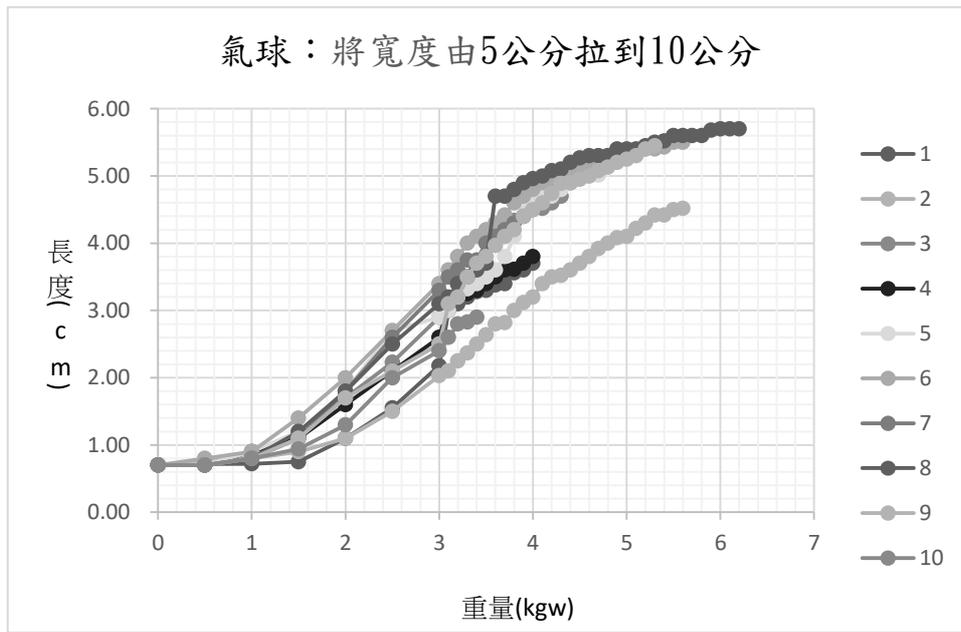
1. 原寬度5公分



2. 將寬度由5公分拉長到7.5公分

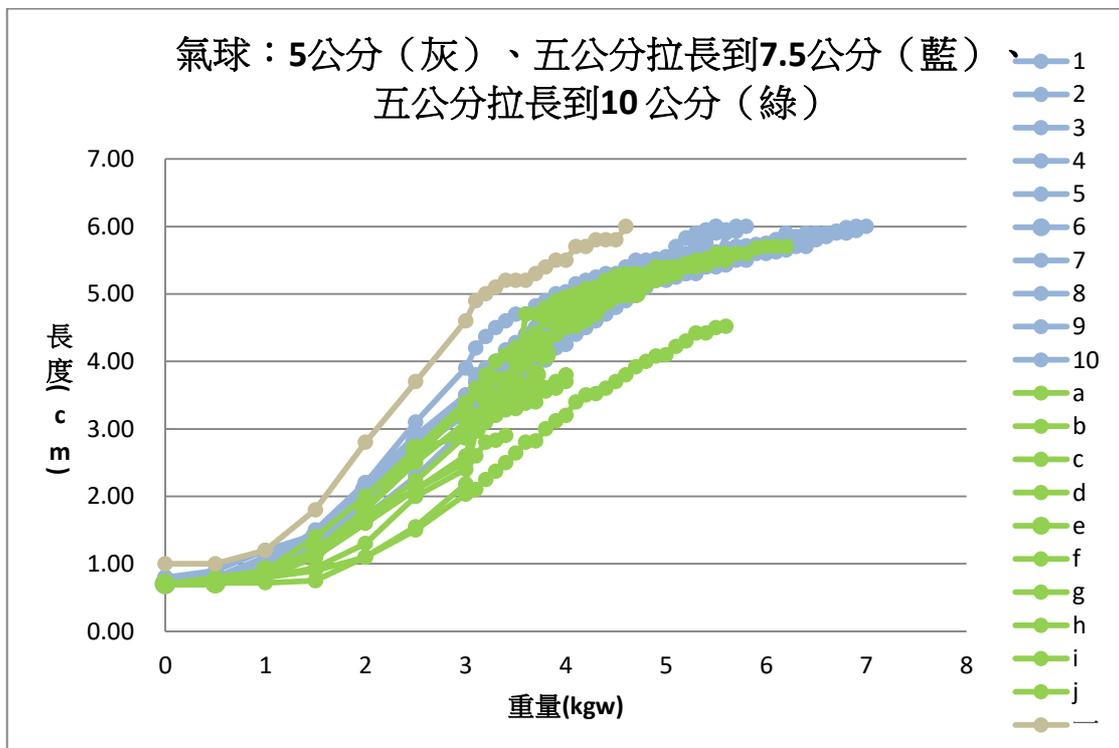


3. 將寬度由5公分拉長到10公分



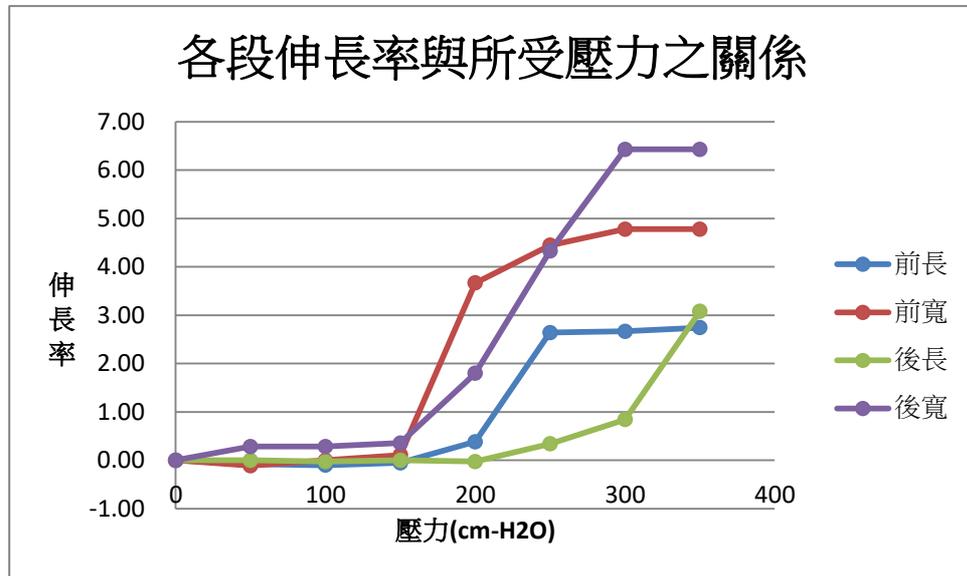
多筆數數劇中可以觀察到氣球開始破裂。

4. 三張圖比較



由上圖可以看到，在三種沿長度方向的拉長情況下，所掛重物與周長方向長度的趨勢是大致相同的，都在最一開始以及最後的K值較大，中間則是K值較小，氣球較易被拉長。而長度方向拉長越長，在周長方向要拉到相同長度所需要的力較大。

(七) 實驗七：中氣球在不同壓力（每上升30cmH₂O量一次）下，分別測量長度方向及周長方向長度。

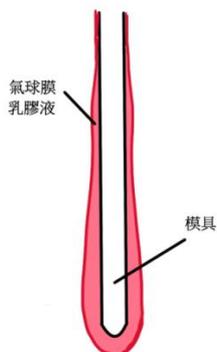


肆、 結論

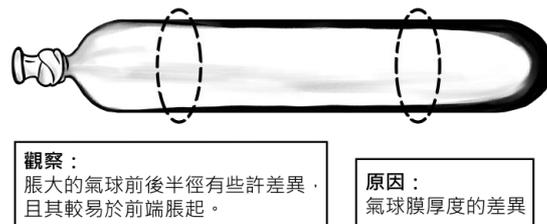
一、 特殊現象及可能成因

(一) 特殊現象：氣球脹大都是從離打氣筒較近的地方開始膨脹。

可能成因：氣球在製作過程中，可能因為製作方式是垂直浸入乳膠液，並垂直拿起，液體受重力向下流，積聚在後半部，而造成吹口處（前端）氣球膜較薄，中、後端較厚。



(氣球膜成形示意圖)



(氣球膜厚薄示意圖)

(二) 特殊現象：吹脹那一刻壓力突然迅速增加，後來又降下來。

可能成因：吹脹前氣球會整體同時些微脹大，當到達膨脹與未膨脹之間的臨界區但尚未脹起時，壓力可以達到最高值；接著氣球從最脆弱的那一處膨起，內部空間變大，整體壓力驟降。

(三) 特殊現象：氣球脹大，會從已經被吹脹的部分往尾端膨脹。

可能成因：氣球被吹脹後，在膨脹與未膨脹之間，氣球膜會先被撐開一些，如果再持續充氣，交界處部分已經先被撐開一些的部分，因為半徑增加，膨脹需要的壓力變小，所以會從那裡開始膨脹。

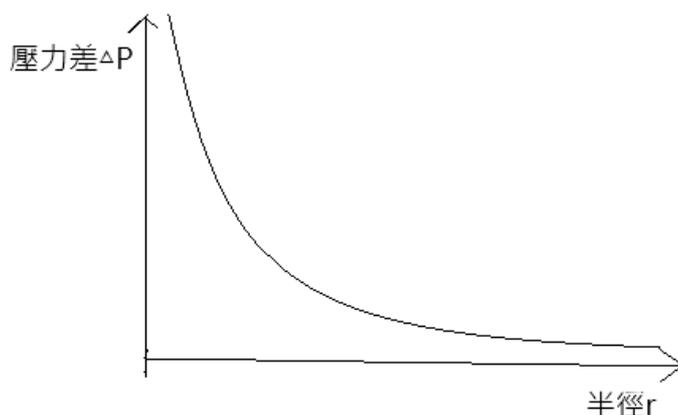
伍、 討論及應用

一、 討論

(一) 假設氣球膜的膜張力 T 為定值，類似液體表面張力，且忽略氣球原本大小。

$$\pi r^2 \Delta P = 2\pi r T, \quad \Delta P = \frac{2T}{r}$$

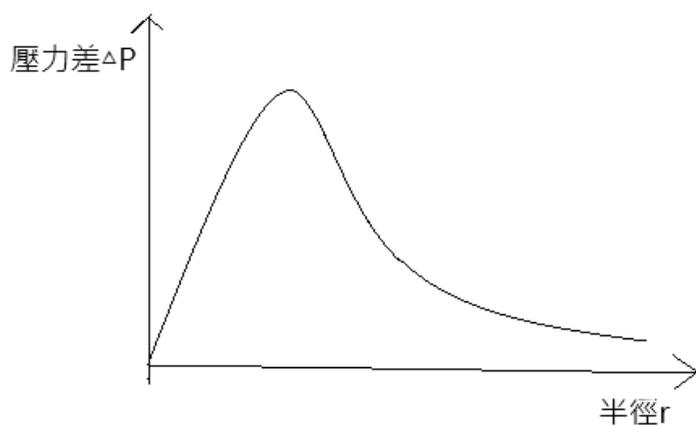
氣球呈現圓球型，壓力差一開始很大，接下來一直減少。壓力差和半徑成反比。



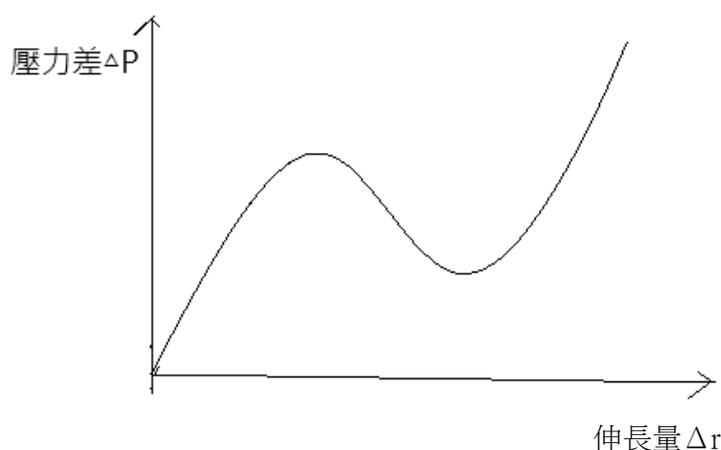
(二) 若固定寬度的氣球膜的拉力符合虎克定律，且考慮氣球原長。

$$\Delta P = \frac{2T_x}{r} = \frac{2F_x/2\pi r}{r} = \frac{2 \cdot 2\pi r_0 K \Delta x / 2\pi r}{r}$$

$$= \frac{2 \left[\frac{2\pi r_0 K \frac{\Delta r}{2}}{2\pi(r_0 + \Delta r)} \right]}{(r_0 + \Delta r)} = r_0 K \frac{\Delta r}{(\Delta r + r_0)^2}$$



(三) 若氣球膜的張力一開始符合虎克定律，但是後來力常數突然變很大。



(四) 由以上討論可得知，長條形氣球之所以會有小尾巴的原因：氣球膜在氣球膨脹的過程，和吹脹肥皂泡的最大不同處有兩

個：一、氣球有原始長度，所以會造成內外壓力差先增後減。二、氣球膜的彈力常數，會在接近彈性限度時，大幅增加。所以氣球吹脹到一定程度之後，內外壓力差轉為增加。這兩個效應合併，使得氣球在吹脹過程的壓力的變化，呈現如圖的趨勢。當吹氣球越過第一個壓力峰值之後，氣球會突然膨脹，其實同一壓力下，會有兩個可以存在的半徑。這個是長條氣球有小尾巴的原因。

- (五) 利用充水來取代打氣，來測量氣球內外壓力的優點。1、廉價打氣筒會有漏氣的問題，在不斷打氣的過程中，很難維持壓力穩定。改成利用水柱提供的水壓，可以得到很穩定的壓力數據。精密度可達到一公分水柱高以內。2、幫氣球打氣時，在氣球越過臨界壓力突然膨脹時，整體的壓力會突然下降，整體的體積會突然增加，氣球後半部以及打氣筒內的空氣會衝向膨脹區，使得膨脹的過程非常突然。幫氣球充水的時候，雖然壓力突然下降，但是水的體積不會改變，膨脹因此變得比較和緩，較容易測量。3、在水中對氣球充水，氣球的溫度可以維持固定，不會發熱，橡皮變質的情況變得輕微。

二、未來展望

- (一) 能更一步探討在未脹大與脹大區域交界（弧線）處的相關函數、斜率。
- (二) 我們想了解在充氣過程中為什麼氣球會突然膨脹，希望能透過方程式得到簡單的數學關係式，將未脹大與突然脹起中間的數據藉由此公式推導出來，但我們尚未求出此方程式的次方，因

此也無法準確推論 T_x 以及 T_y ，原本試圖用實驗六實測數據來了解 T_x 以及 T_y ，但因為氣球膜太過脆弱又太過強韌，而無法完成此一目標。

$$T_y = K\left(1 + \frac{\Delta L}{L_0}\right)^{-1} \times \left[x\left(\frac{\Delta r}{r_0}\right)^m + y\left(\frac{\Delta L}{L_0}\right)^n\right]$$

$$T_x = K\left(1 + \frac{\Delta r}{r_0}\right)^{-1} \times \left[x\left(\frac{\Delta L}{L_0}\right)^m + y\left(\frac{\Delta r}{r_0}\right)^n\right]$$

$$T_y = 2T_x$$

(三) 利用方格來繼續研究氣球脹大和縮小之間氣球膜兩側的關係。

陸、 參考資料

一、 周紀霖、柯明志、張婷宣 (2019)。揚眉吐「氣」—雙氣球實驗之探討。
小論文第 1081031 梯次特優得獎作品。

[2019092712390914.pdf \(shs.edu.tw\)](https://shs.edu.tw/2019092712390914.pdf)

二、 氣球製作過程

[氣球製造商 - 大倫氣球工廠 \(prolloon.com\)](http://prolloon.com)

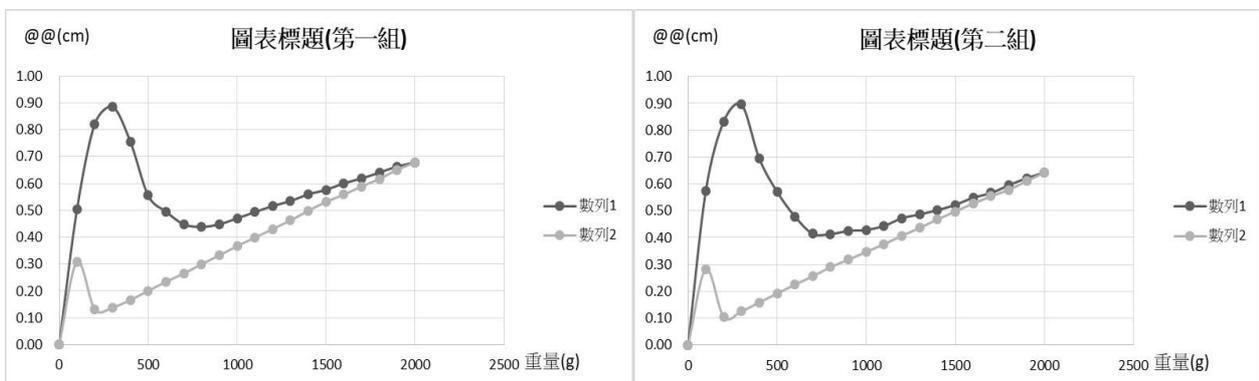
三、 吳大猷 (1995)。高級中學物理第二冊 (修訂十版)。台北市：國立編譯館。

柒、 附錄

一、 實驗數據

1. 實驗一：

(1) 環狀薄膜長度變化與掛物重量之關係。

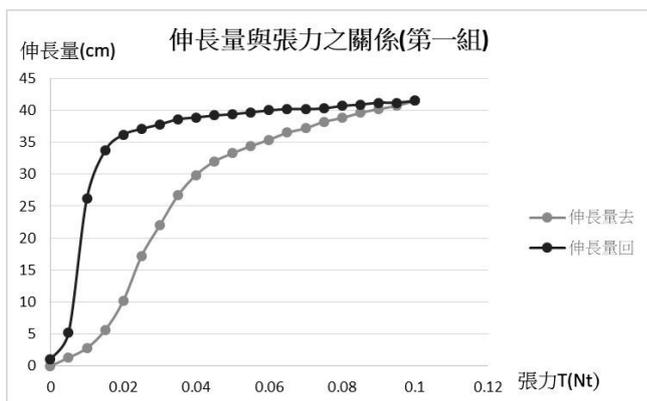


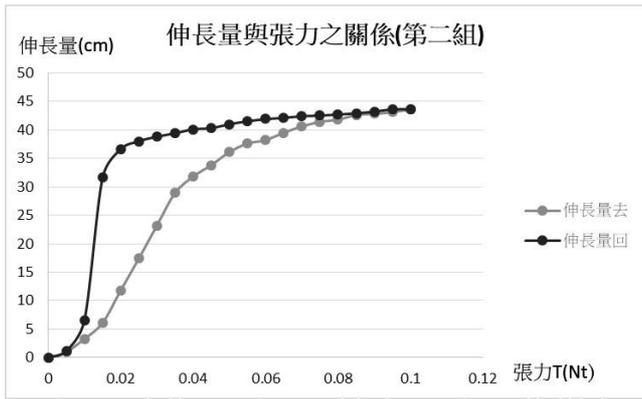
重量 (g)	去程長度 (cm)	回程長度 (cm)
0	12.2	13.4
100	13.2	18.8
200	15.5	43.8
300	18.3	48.8
400	24	50.2
500	29.6	51
600	35.4	51.6
700	41.1	52.3
800	44	52.5
900	46	53.2
1000	48.3	53.7

1100	49.8	54.1
1200	50.4	54.3
1300	51.7	54.6
1400	52.8	54.7
1500	53.6	54.9
1600	54	55.1
1700	54.8	55.4
1800	55	55.8
1900	55.3	55.8
2000	55.8	55.8

重量 (g)	去程長度 (cm)	回程長度 (cm)
0	12.8	13.8
100	14.1	18
200	15.6	39
300	18.4	46.5
400	23	49
500	30	49.9
600	34.8	50.6
700	39.5	51.4
800	42.7	51.7
900	44.8	52
1000	46.1	52.2
1100	47.2	52.5
1200	48.2	52.8
1300	49.3	53
1400	50	53
1500	51	53.1
1600	51.6	53.5
1700	52.4	53.7
1800	53	54
1900	53.5	54
2000	54.3	54.3

(2) 伸長量與張力的關係。

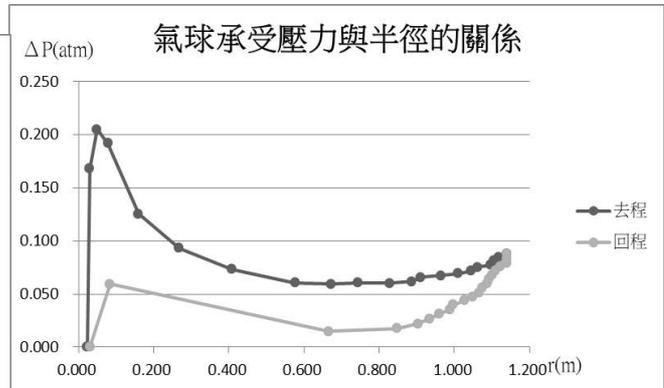
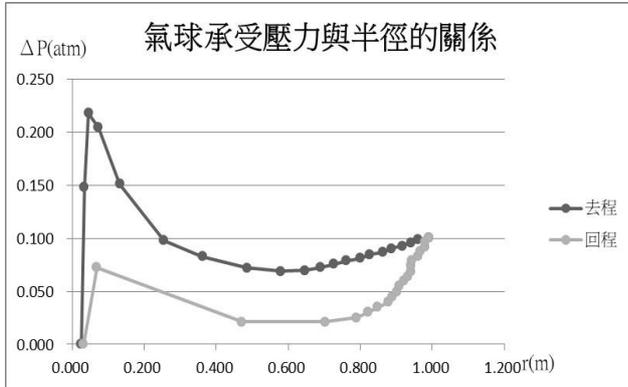




伸長量去 (cm)	伸長量回 (cm)	T (N)
0	0	0
10.2	36.2	0.02
17.2	37.1	0.025
22	37.8	0.03
26.7	38.6	0.035
29.9	38.9	0.04
32	39.2	0.045
33.3	39.4	0.05
34.4	39.7	0.055
35.4	40	0.06
36.5	40.2	0.065
37.2	40.2	0.07
38.2	40.3	0.075
38.8	40.7	0.08
39.6	40.9	0.085
40.2	41.2	0.09
40.7	41.2	0.095
41.5	41.5	0.1

伸長量去 (cm)	伸長量回 (cm)	T (N)
0	0	0
1	1.2	0.005
3.3	6.6	0.01
6.1	31.6	0.015
11.8	36.6	0.02
17.4	38	0.025
23.2	38.8	0.03
28.9	39.4	0.035
31.8	40.1	0.04
33.8	40.3	0.045
36.1	41	0.05
37.6	41.5	0.055
38.2	41.9	0.06
39.5	42.1	0.065
40.6	42.4	0.07
41.4	42.5	0.075
41.8	42.7	0.08
42.6	42.9	0.085
42.8	43.2	0.09
43.1	43.6	0.095
43.6	43.6	0.1

(3) 氣球壓力變化與半徑的關係。



去程 r(m)	回程 r(m)	去程 ΔP (atm)	回程 ΔP (atm)
0.025	0.032	0.000	0.000
0.034	0.069	0.148	0.072
0.046	0.472	0.218	0.021
0.073	0.703	0.205	0.021
0.132	0.790	0.151	0.025
0.255	0.823	0.098	0.030
0.362	0.849	0.083	0.035
0.486	0.879	0.072	0.040
0.580	0.890	0.069	0.045
0.646	0.901	0.070	0.050
0.689	0.909	0.073	0.055
0.727	0.921	0.076	0.060
0.762	0.932	0.079	0.064
0.801	0.940	0.081	0.069
0.826	0.940	0.085	0.074
0.864	0.944	0.087	0.079

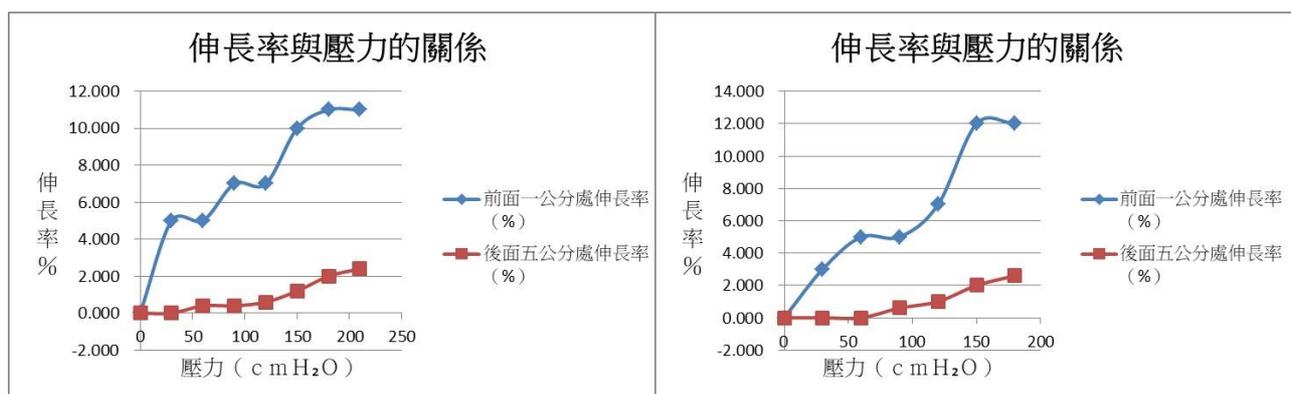
0.886	0.960	0.090	0.083
0.917	0.968	0.093	0.088
0.940	0.980	0.096	0.092
0.960	0.980	0.099	0.097

去程 r(m)	回程 r(m)	去程 ΔP (atm)	回程 ΔP (atm)
0.025	0.032	0.000	0.000
0.034	0.069	0.148	0.072
0.046	0.472	0.218	0.021
0.073	0.703	0.205	0.021
0.132	0.790	0.151	0.025
0.255	0.823	0.098	0.030
0.362	0.849	0.083	0.035
0.486	0.879	0.072	0.040
0.580	0.890	0.069	0.045
0.646	0.901	0.070	0.050
0.689	0.909	0.073	0.055
0.727	0.921	0.076	0.060
0.762	0.932	0.079	0.064
0.801	0.940	0.081	0.069
0.826	0.940	0.085	0.074
0.864	0.944	0.087	0.079
0.886	0.960	0.090	0.083
0.917	0.968	0.093	0.088
0.940	0.980	0.096	0.092
0.960	0.980	0.099	0.097

2. 實驗五

(1) 伸長率與壓力的關係

壓力 (cmH ₂ O)	0	30	60	90	120	150	180
前面一公分處 伸長率 (%)	0.0	3.0	5.0	5.0	7.0	12.0	12.0
後面五公分處 伸長率 (%)	0.0	0.0	0.0	0.6	1.0	2.0	2.6

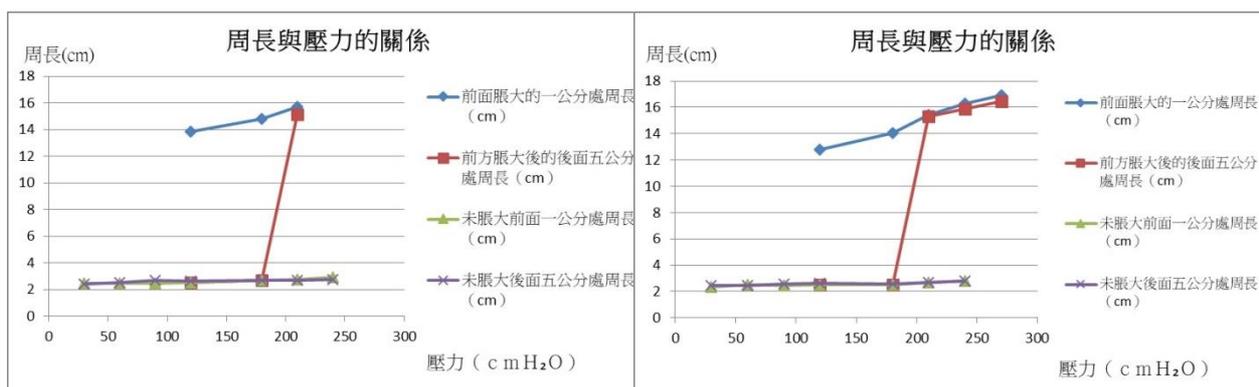


壓力 (cmH ₂ O)	0	30	60	90	120	150	180	210
前面一公分處 伸長率 (%)	0.0	5.0	5.0	7.0	7.0	10.0	11.0	11.0
後面五公分處 伸長率 (%)	0.0	0.0	0.4	0.4	0.6	1.2	2.0	2.4

(2) 周長與壓力的關係

壓力 (cmH ₂ O)	30	60	90	120	150	180	210
未脹大前面一公分處周長 (cm)	2.32	2.5	2.48	2.52	2.53	2.71	2.79
未脹大後面五公分處周長 (cm)	2.45	2.45	2.55	2.61	2.58	2.69	2.81

壓力 (cmH ₂ O)	120	150	180	210	240
前面脹大的一公分處周長 (cm)	12.79	14.05	15.4	16.27	16.93
前方脹大後的後面五公分處周長 (cm)	2.53	2.54	15.33	15.91	16.44



壓力 (cmH ₂ O)	30	60	90	120	150	180	210
前面一公分處周長 (cm)	2.45	2.44	2.45	2.53	2.71	2.74	2.91

後面五公分處 周長 (cm)	2.41	2.53	2.67	2.61	2.68	2.7	2.73
-------------------	------	------	------	------	------	-----	------

壓力 (cmH ₂ O)	120	150	180
前面脹大的一公分 處周長 (cm)	13.85	14.8	15.68
前方脹大後的後面 五公分處周長 (cm)	2.5	2.69	15.16

3. 實驗六

(1) 5公分

重量(kgw)	長度(cm)
0	1.0
0.5	1.0
1.0	1.2
1.5	1.8
2.0	2.8
2.5	3.7
3.0	4.6
3.1	4.9
3.2	5.0
3.3	5.1
3.4	5.2
3.5	5.2
3.6	5.2

3.7	5.3
3.8	5.4
3.9	5.5
4.0	5.5
4.1	5.7
4.2	5.7
4.3	5.8
4.4	5.8
4.5	5.8
4.6	6.0

(2) 5公分拉長成7.5公分

1		2		3		4		5	
重量(kgw)	長度(cm)								
0	0.70	0	0.70	0	0.70	0	0.80	0	0.70
0.5	0.75	0.5	0.80	0.5	0.70	0.5	0.80	0.5	0.80
1.0	0.90	1.0	1.00	1.0	1.00	1.0	1.00	1.0	1.10
1.5	1.30	1.5	1.34	1.5	1.28	1.5	1.50	1.5	1.40
2.0	1.90	2.0	2.00	2.0	1.70	2.0	2.20	2.0	2.00
2.5	2.60	2.5	2.60	2.5	2.30	2.5	3.10	2.5	2.70
3.0	3.28	3.0	3.00	3.0	3.00	3.0	3.90	3.0	3.20
3.1	3.30	3.1	3.10	3.1	3.18	3.1	4.20	3.1	3.30
3.2	3.50	3.2	3.20	3.2	3.20	3.2	4.37	3.2	3.40
3.3	3.58	3.3	3.30	3.3	3.30	3.3	4.50	3.3	3.60
3.4	3.70	3.4	4.00	3.4	3.40	3.4	4.60	3.4	3.80
3.5	3.90	3.5	4.20	3.5	3.60	3.5	4.70	3.5	3.90
3.6	4.00	3.6	4.30	3.6	3.80	3.6	4.70	3.6	4.00

3.7	4.10	3.7	4.40	3.7	3.90	3.7	4.82	3.7	4.20
3.8	4.20	3.8	4.57	3.8	4.02	3.8	4.90	3.8	4.30
3.9	4.30	3.9	4.70	3.9	4.20	3.9	5.00	3.9	4.40
4.0	4.40	4.0	4.78	4.0	4.25	4.0	5.03	4.0	4.48
4.1	4.50	4.1	4.80	4.1	4.40	4.1	5.15	4.1	4.52
4.2	4.70	4.2	4.90	4.2	4.50	4.2	5.20	4.2	4.60
4.3	4.90	4.3	5.00	4.3	4.60	4.3	5.25	4.3	4.70
4.4	5.08	4.4	5.10	4.4	4.70	4.4	5.30	4.4	4.80
4.5	5.10	4.5	5.13	4.5	4.80	4.5	5.30	4.5	4.90
4.6	5.20	4.6	5.18	4.6	4.90	4.6	5.40	4.6	5.04
4.7	5.20	4.7	5.20	4.7	5.00	4.7	5.50	4.7	5.10
4.8	5.23	4.8	5.32	4.8	5.10	4.8	5.50	4.8	5.40
4.9	5.30	4.9	5.40	4.9	5.20	4.9	5.52	4.9	5.50
5.0	5.32	5.0	5.40	5.0	5.26	5.0	5.55	5.0	5.50
5.1	5.40	5.1	5.50	5.1	5.28	5.1	5.70	5.1	5.60
5.2	5.40	5.2	5.50	5.2	5.30	5.2	5.83	5.2	5.60
5.3	5.70	5.3	5.52	5.3	5.34	5.3	5.90	5.3	5.70
5.4	5.90	5.4	5.60	5.4	5.40	5.4	5.95	5.4	5.75
5.5	6.00	5.5	5.60	5.5	5.41	5.5	6.00	5.5	5.90
		5.6	5.65	5.6	5.43			5.6	5.95
		5.7	5.70	5.7	5.50			5.7	6.00
		5.8	5.71	5.8	5.50				
		5.9	5.73	5.9	5.60				
		6.0	5.75	6.0	5.60				
		6.1	5.80	6.1	5.62				
		6.2	5.90	6.2	5.65				
				6.3	5.70				
				6.4	5.70				
				6.5	5.80				
6.6	5.85								

		6.7	5.90
		6.8	5.90
		6.9	5.94
		7.0	6.00

6		7		8		9		10	
重量(kgw)	長度(cm)								
0	0.70	0	0.70	0	0.80	0	0.70	0	0.70
0.5	0.80	0.5	0.80	0.5	0.90	0.5	0.80	0.5	0.80
1.0	1.00	1.0	1.00	1.0	1.20	1.0	1.00	1.0	1.00
1.5	1.40	1.5	1.35	1.5	1.43	1.5	1.30	1.5	1.30
2.0	2.10	2.0	2.10	2.0	2.20	2.0	2.00	2.0	1.90
2.5	2.80	2.5	2.60	2.5	2.90	2.5	2.80	2.5	2.70
3.0	3.30	3.0	3.30	3.0	3.50	3.0	3.50	3.0	3.40
3.1	3.50	3.1	3.50	3.1	3.70	3.1	3.70	3.1	3.80
3.2	3.60	3.2	3.60	3.2	3.80	3.2	3.80	3.2	3.90
3.3	3.80	3.3	3.70	3.3	4.00	3.3	3.92	3.3	4.00
3.4	3.90	3.4	3.80	3.4	4.17	3.4	4.10	3.4	4.10
3.5	4.00	3.5	3.90	3.5	4.28	3.5	4.20	3.5	4.20
		3.6	4.10	3.6	4.38	3.6	4.30	3.6	4.40
		3.7	4.30	3.7	4.50	3.7	4.50	3.7	4.50
		3.8	4.40	3.8	4.52	3.8	4.60	3.8	4.60
		3.9	4.50	3.9	4.60	3.9	4.69		
		4.0	4.60	4.0	4.70	4.0	4.75		
		4.1	4.70	4.1	4.75	4.1	4.80		
		4.2	4.80	4.2	4.82	4.2	4.85		
		4.3	4.90	4.3	5.10	4.3	4.90		
		4.4	4.92	4.4	5.18	4.4	4.96		
		4.5	5.00	4.5	5.20	4.5	5.00		
		4.6	5.08	4.6	5.20	4.6	5.10		

	4.7	5.12	4.7	5.30	4.7	5.13
	4.8	5.18	4.8	5.35	4.8	5.20
	4.9	5.20	4.9	5.40	4.9	5.25
	5.0	5.20	5.0	5.40	5.0	5.30
	5.1	5.25	5.1	5.50	5.1	5.30
	5.2	5.30	5.2	5.50	5.2	5.35
	5.3	5.30	5.3	5.60		
	5.4	5.40	5.4	5.62		
	5.5	5.40	5.5	5.62		
	5.6	5.90	5.6	5.68		
	5.7	5.93	5.7	5.70		
	5.8	6.00	5.8	5.70		
			5.9	5.72		
			6.0	5.72		
			6.1	5.80		
			6.2	5.80		
			6.3	5.85		
			6.4	5.90		
			6.5	5.90		
			6.6	5.90		
			6.7	5.93		
			6.8	5.98		
			6.9	6.00		

(3) 5公分拉長成10公分

1		2		3		4		5	
重量(kgw)	長度(cm)								
0	0.70	0	0.70	0	0.70	0	0.70	0	0.70
0.5	0.72	0.5	0.77	0.5	0.70	0.5	0.70	0.5	0.71

1.0	0.72	1.0	0.80	1.0	0.80	1.0	0.90	1.0	0.90	
1.5	0.75	1.5	0.90	1.5	1.15	1.5	1.10	1.5	1.20	
2.0	1.10	2.0	1.10	2.0	1.70	2.0	1.60	2.0	1.80	
2.5	1.55	2.5	1.50	2.5	2.23	2.5	2.10	2.5	2.70	
3.0	2.18	3.0	2.03	3.0	2.90	3.0	2.60	3.0	2.90	
3.1	3.00	3.1	2.10	3.1	3.00	3.1	3.10	3.1	3.00	
3.2	3.10	3.2	2.25	3.2	3.40	3.2	3.20	3.2	3.20	
3.3	3.20	3.3	2.37	3.3	3.50	3.3	3.25	3.3	3.32	
3.4	3.28	3.4	2.50	3.4	3.60	3.4	3.30	3.4	3.40	
3.5	3.30	3.5	2.64	3.5	3.62	3.5	3.40	3.5	3.50	
3.6	3.38	3.6	2.80	3.6	4.10	3.6	3.50	3.6	3.60	
3.7	3.40	3.7	2.82	3.7	4.20	3.7	3.60	3.7	3.80	
3.8	3.56	3.8	3.00	3.8	4.34	3.8	3.61	3.8	4.10	
3.9	3.60	3.9	3.12	3.9	4.40	3.9	3.70	3.9	4.60	
4.0	3.70	4.0	3.20	4.0	4.50	4.0	3.80	4.0	4.65	
		4.1	3.40	4.1	4.52			4.1	4.70	
		4.2	3.50	4.2	4.60			4.2	4.70	
		4.3	3.52	4.3	4.70			4.3	4.80	
		4.4	3.60	4.4	4.90			4.4	4.90	
		4.5	3.70	4.5	5.00			4.5	5.00	
		4.6	3.80					4.6	5.01	
		4.7	3.92					4.7	5.01	
		4.8	4.00							
		4.9	4.08							
		5.0	4.10							
		5.1	4.22							
		5.2	4.30							
		5.3	4.42							
		5.4	4.42							
5.5	4.50									

	5.6	4.52
--	-----	------

6		7		8		9		10	
重量(kgw)	長度(cm)								
0	0.70	0	0.70	0	0.70	0	0.70	0	0.70
0.5	0.80	0.5	0.70	0.5	0.70	0.5	0.70	0.5	0.70
1.0	0.90	1.0	0.80	1.0	0.80	1.0	0.80	1.0	0.80
1.5	1.40	1.5	1.10	1.5	1.20	1.5	1.10	1.5	0.94
2.0	2.00	2.0	1.80	2.0	1.80	2.0	1.70	2.0	1.30
2.5	2.70	2.5	2.60	2.5	2.50	2.5	2.10	2.5	2.00
3.0	3.40	3.0	3.30	3.0	3.10	3.0	2.50	3.0	2.40
3.1	3.60	3.1	3.50	3.1	3.20	3.1	3.10	3.1	2.60
3.2	3.80	3.2	3.60	3.2	3.40	3.2	3.20	3.2	2.80
3.3	4.00	3.3	3.75	3.3	3.50	3.3	3.50	3.3	2.83
3.4	4.10	3.4	3.75	3.4	3.60	3.4	3.70	3.4	2.90
3.5	4.20	3.5	4.00	3.5	3.70	3.5	3.80		
3.6	4.30	3.6	4.10	3.6	4.70	3.6	3.97		
3.7	4.42	3.7	4.20	3.7	4.70	3.7	4.10		
3.8	4.60	3.8	4.30	3.8	4.80	3.8	4.20		
3.9	4.70	3.9	4.40	3.9	4.90	3.9	4.40		
4.0	4.80			4.0	4.96	4.0	4.50		
4.1	4.90			4.1	5.00	4.1	4.60		
4.2	4.93			4.2	5.08	4.2	4.74		
4.3	5.00			4.3	5.10	4.3	4.89		
4.4	5.05			4.4	5.20	4.4	4.90		
4.5	5.10			4.5	5.27	4.5	4.95		
4.6	5.16			4.6	5.30	4.6	5.00		
4.7	5.20			4.7	5.30	4.7	5.08		
4.8	5.22			4.8	5.30	4.8	5.13		

4.9	5.30		4.9	5.40	4.9	5.20
5.0	5.30		5.0	5.40	5.0	5.25
5.1	5.33		5.1	5.40	5.1	5.30
5.2	5.40		5.2	5.45	5.2	5.40
5.3	5.40		5.3	5.50	5.3	5.45
5.4	5.43		5.4	5.52		
5.5	5.50		5.5	5.60		
5.6	5.50		5.6	5.60		
			5.7	5.60		
			5.8	5.60		
			5.9	5.68		
			6.0	5.70		
			6.1	5.70		
			6.2	5.70		

4. 實驗七

(1) 第一組

P(cm-H ₂ O)	前長 (cm)	前寬 (cm)	後長 (cm)	後寬 (cm)
0	3.9	0.9	3.8	0.7
50	3.6	0.8	3.8	0.9
100	3.5	0.9	3.7	0.9
150	3.7	1	3.8	0.95
200	5.4	4.2	3.7	1.96
250	14.2	4.9	5.1	3.73
300	14.3	5.2	7	5.2
350	14.6	5.2	15.5	5.2
400	15	5.5	/	/
P(cm-H ₂ O)	前長 伸長率	前寬 伸長率	後長 伸長率	後寬伸長率

0	0.00	0.00	0.00	0.00
50	-0.08	-0.11	0.00	0.29
100	-0.10	0.00	-0.03	0.29
150	-0.05	0.11	0.00	0.36
200	0.38	3.67	-0.03	1.80
250	2.64	4.44	0.34	4.33
300	2.67	4.78	0.84	6.43
350	2.74	4.78	3.08	6.43
400	2.85	5.11		

(2) 第二組

P(cm-H ₂ O)	前長 (cm)	前寬 (cm)	後長 (cm)	後寬 (cm)
0	3.7	0.7	3.7	0.8
50	3.48	0.7	3.65	0.7
100	3.35	0.81	3.6	0.8
150	3.42	0.82	3.7	0.9
200	14.5	4.4	3.5	0.8
250	14.8	5	14.8	4.6
300	15.9	5.5	/	5

(3) 第三組

P(cm-H ₂ O)	前長 (cm)	前寬 (cm)	後長 (cm)	後寬 (cm)
0	4	0.9	3.8	0.7
50	3.4	0.8	3.6	0.8
100	3.45	0.8	3.5	0.8

150	3.6	0.95	3.6	0.9
200	12.2	3.6	4.7	0.82
250	13.5	4.9	4.95	6.6
300	13.6	5.15	14.2	5
350	14.45	5.25	15	5.32
400	16.3	5.6	15.8	5.55