

中華民國第 58 屆中小學科學展覽會
作品說明書

國小組 物理科

第二名

080108

空氣炮的密碼

學校名稱：新北市蘆洲區仁愛國民小學

作者： 小五 薛羽硯 小五 莊詠晴 小五 林靖恩	指導老師： 陳秀蕙 張霽秀
---	-----------------------------

關鍵詞：空氣炮、渦環、完全發展流

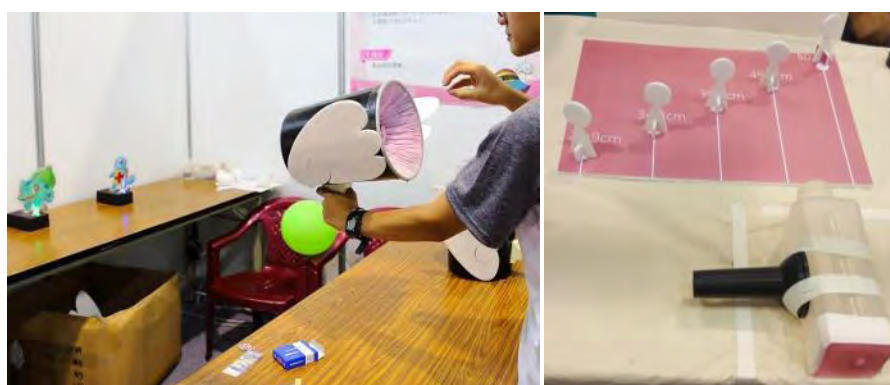
摘要

科學攤位上的空氣炮引起我們的好奇心，於是和同學開始研究如何做出威力較大的空氣炮，實驗發現：

1. 空氣炮內的氣體形成「完全發展流」時，衝出的威力最大；若筒長太長，反而會因為筒壁的黏滯力使衝力變小。
2. 孔形越接近圓形，越能形成清楚的渦環，讓空氣炮的衝力變大，氣流移動距離較遠。
3. 拉力增加時，因為形成完全發展流所需的進口區變長，最佳筒長也會變長。
4. 在拉力 2 kgw 時，製作空氣炮的最佳比例為：「孔徑 d :筒徑 D :筒長 $L = 1:2:9$ 」。
5. 通常製作空氣炮時，桶子的筒徑和筒長已固定，以筒徑的 46~51%做孔徑，也能做出衝力較佳的空氣炮。

壹、研究動機

暑假在科學攤位上看到「拉射式空氣炮」，回來和同學一起做了來玩，為了做出威力較強的空氣炮，就開始進行研究。



用粗橡皮筋加塑膠袋拉射

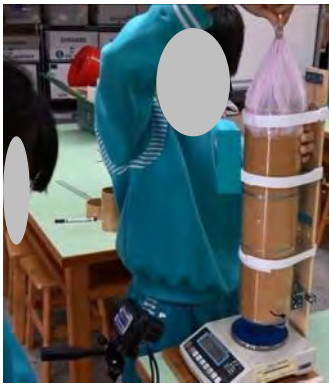
用氣球皮拉射

貳、研究目的

- 一、探討空氣炮的原理
- 二、探討「孔徑、筒徑、筒長、孔形、拉力」對空氣炮衝力的影響
- 三、探討「筒長與孔徑」對空氣炮衝力的影響
- 四、探討「相同容量、不同筒形」對空氣炮衝力的影響
- 五、找出製作空氣炮的最佳比例

參、研究設備及器材

電子秤、行李拉秤、割圓器、鋸子、剪刀、美工刀、數位相機、腳架、捲尺、大小紙筒、塑膠桶、鬆緊繩、垃圾袋、橡皮筋、鑰匙圈、膠帶、木板、L型鐵片、一字鐵片、鏢絲、魔鬼粘、安全錐、滑輪實驗支架、AirZooka空氣砲玩具



測量空氣炮氣流衝力的
實驗情形



依據實驗需要
切出不同的筒長

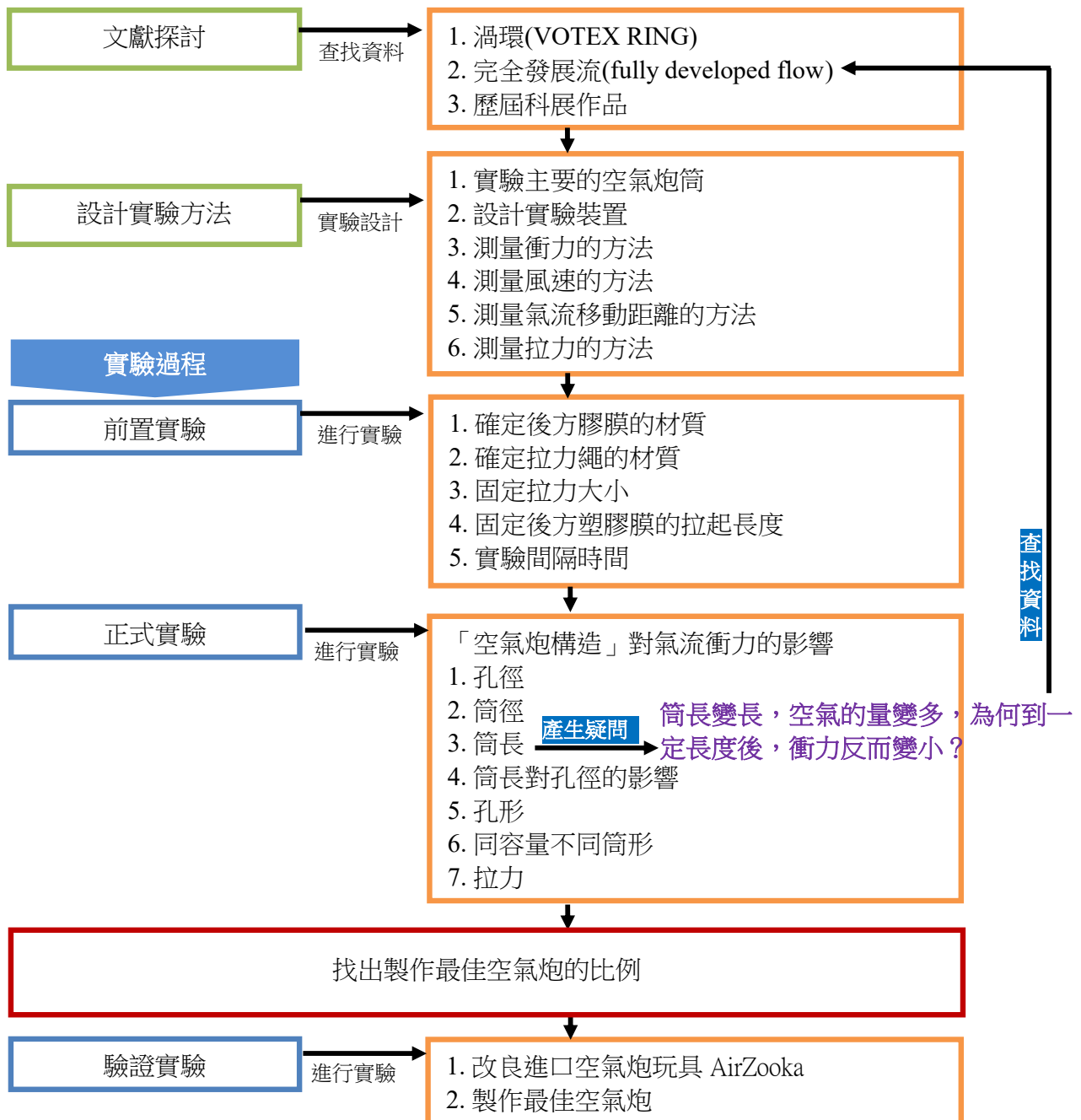


切下安全錐
做錐形空氣炮



固定測量飄行距離
的滑輪實驗支架

肆、流程圖



伍、研究方法

一、文獻探討

(一) 渦環 (Vortex Ring)

在桶中放入煙霧，然後拍打桶子，將會看到煙霧像甜甜圈似地從圓孔飛出來(圖 1)。會產生甜甜圈般的煙霧，是因各部分空氣流速不一致所造成的。

流體力學有個很重要概念：白努力定理。就是當流體流經較狹隘的出口時，會有比較快的流速；中心流速較快，外側流速較慢。

所以我們可以看到煙霧從圓孔噴出時，由中心向外側翻轉的甜甜圈狀煙霧，而且邊移動邊翻轉(圖 2)(參考資料一)。



圖 1 煙霧像甜甜圈似地從圓孔飛出來，a、b 為網路圖片，c 為我們實驗情形

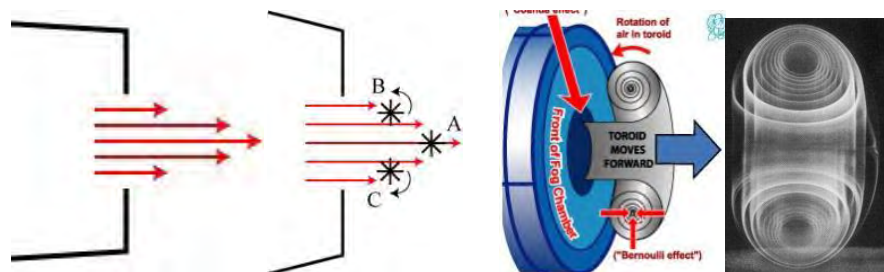


圖 2 空氣流出圓孔時由中心向外側翻轉

(二) 完全發展流 (fully developed flow)

那空氣炮筒內的空氣是怎麼流動的呢？

我們拍打或拉射空氣炮時，是以外力強制驅動筒內的空氣，這時筒內空氣流動過程中，「靠近管壁的部分會產生黏滯剪應力，而此黏滯力會影響到氣體流動」。(參考資料二)

流體在管內流動情形如圖 3(參考資料三)，「流體流進管路後，因流體與管路間之黏滯力造成邊界層(boundary layer)的產生與增厚，邊界層增厚至管路半徑後不再增加，由管路進口到此處之距離稱為『進口區(entrance region)』，自此以後流體之速度分佈不再改變，此區稱為『完全成形區(fully-developed region)』。」(參考資料三)

依據參考資料二和參考資料三的說法，空氣炮的最佳筒長要能使筒內氣體形成完全發展流再噴出，才能達到最大衝力。

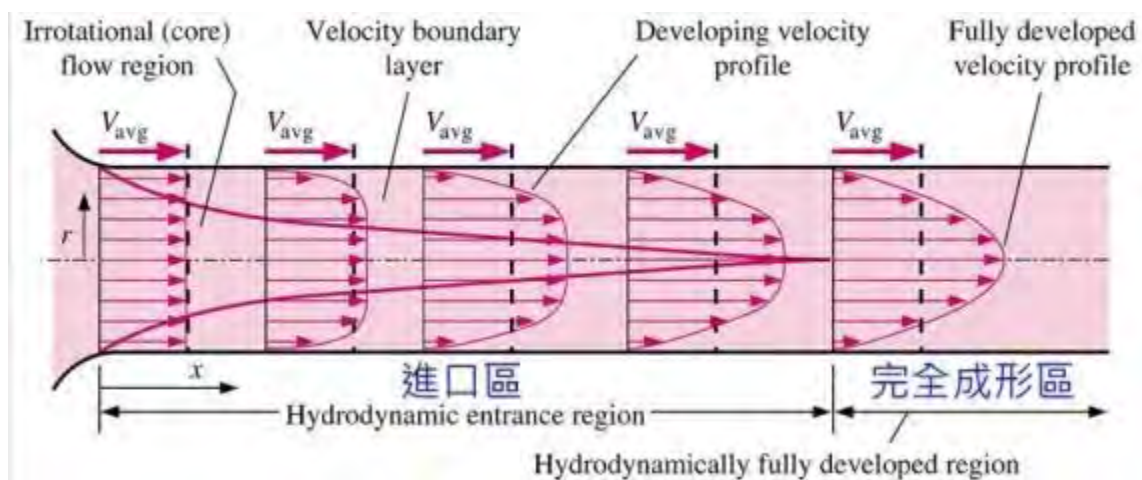


圖 3 流體在管內流動情形

(三) 歷屆科展作品

全國科展 47 屆「哆啦 A 夢的空氣炮」主要是探討炮身長度、孔洞數量多少、瓶蓋孔徑大小、不同的氣球長度等因素，對空氣炮威力的影響；可惜他們沒有控制拉力的大小，用這樣的測量結果來比較空氣炮威力，不夠準確，而且也沒有對觀察到的現象進一步做原理的探討(參考資料四)。

作品中以「紙條架」來測量空氣炮的威力範圍，我們參考他們方法(圖 4a)，利用教室的滑輪支架，做成衛生紙架(圖 4b)，來測量氣流移動的距離。



圖 4 參考「哆啦 A 夢的空氣炮」(圖 a)，做出測量氣流移動距離的方法(圖 b)

二、實驗方法

(一) 實驗主要用的空氣炮筒

原本要用寶特瓶來做空氣炮，但考慮到瓶子的曲線及表面紋路也可能影響氣流衝力，

所以我們希望找到「材質及厚度均勻、無曲線、無紋路」的瓶子做為空氣炮的筒身，正好自然教室內有樂器單元用的大鼓小鼓教具(圖 5)，完全符合我們的需求。

我們在瓶子表面貼上一層膠帶，這樣實驗時要用膠帶來組合或拆下就更方便了(圖 6)。

製作好的空氣炮如圖 7，我們定義筒徑為 D 、孔徑為 d 、筒長為 L 、拉起高度為 h 。改變筒長的方式則是再繼續往前串聯筒身(圖 8)，由於大鼓小鼓的筒長為 15 cm，因此我們每次增加筒長都是 15 cm。

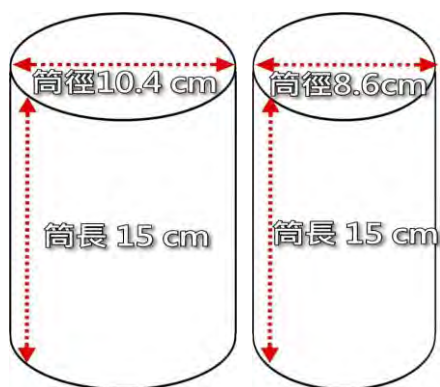


圖 5 不同筒徑的空氣炮筒



圖 6 在紙筒表面貼上膠帶，方便多次撕貼

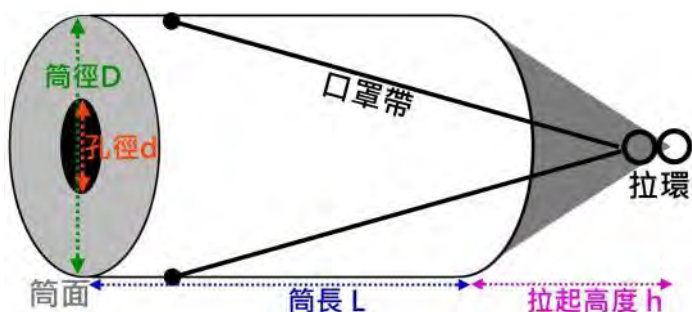


圖 7 空氣炮的構造

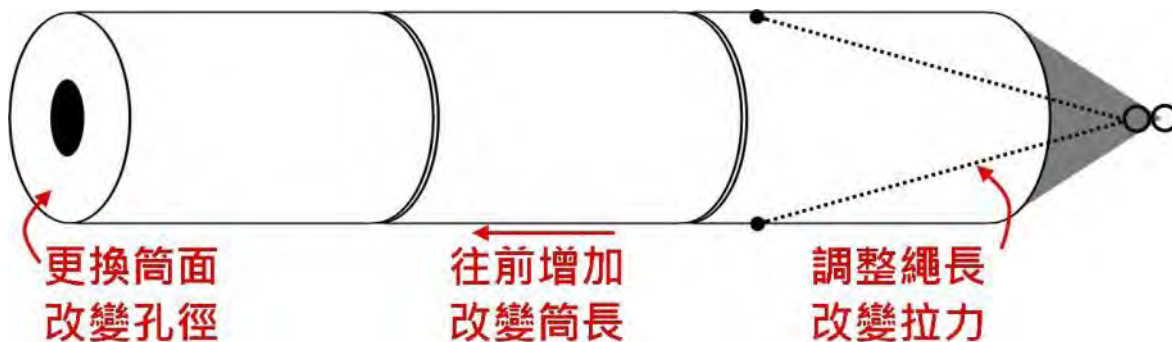


圖 8 固定空氣炮拉力，再往前增加筒長

(二) 設計實驗裝置



圖 9 固定空氣炮與秤的距離

(三) 測量衝力

我們看過有人用「吹熄幾根蠟燭」或「吹倒幾個紙杯」的方法來比較空氣炮的威力，但這種方法會因為瞄不準而產生極大的誤差。

記得老師上課時提到，人站上體重計時，測量到的就是人在地球受到的引力，那麼秤應該也可以測量出空氣炮的氣流衝力。我們將空氣炮轉成直的，炮口向下時，噴出的氣體會撞到電子秤，此時電子秤顯示的數字，即為空氣炮的衝力，精確度可達 0.01 gw(圖 10)。



圖 10 氣流衝出炮孔打在秤面上

(四) 測量風速

我們利用風速計測量距離炮口 3 cm、30 cm 的氣流速度。



圖 11 風速計測量衝出氣流的速度

(五) 測量氣流移動距離

我們利用自然教室內做滑輪實驗的架子，將底座每隔 20 cm 固定好，實驗時 L 型鐵棒插入底座，上面掛上衛生紙。只要有被吹動，就將鐵棒插到更遠的底座，直到衛生紙沒被吹動，再以 5 cm 往回微調底座，直到衛生紙被微微吹動，這時距離就是氣流移動的最長距離。



圖 12 測量氣流移動的距離

(六) 測量拉力

空氣炮後方的拉力，我們利用行李吊秤來測量調整，測量的方式如圖 13，我們做完一組實驗就會測拉力有沒有改變，再進行下個實驗。



圖 13 用行李拉秤來調整拉力

陸、研究結果

一、前置實驗

實驗 1-1 後方膠膜的材質

原本我們用不同材質做成平面的膜，以拍打方式做為空氣炮動力來源，但氣流衝力太小，電子秤有時沒反應，只有用氣球拉的時候，能看到數值的變化(圖 14)。不過氣球實在太容易破掉，我們搭配鬆緊繩和垃圾袋，做成可調整拉力的裝置(圖 15)，本來為了不容易破，用黑色大型塑膠袋，結果材質太硬，彈回直接卡住，所以垃圾袋材質越薄、軟越好，拉起彈回時才不會卡住。



圖 14 拍打不同材質的膜，但衝力太小



圖 15 薄垃圾袋做的膜

實驗 1-2 用口罩鬆緊繩做拉力

我們剪下 20 cm 的口罩帶，拉長 2 倍後測量長度，連續 50 次後，長度從 20 cm 變成 20.05 cm，只變長一點點，每次拉長的程度都沒有改變，一包 206 cm 只要 15 元，做一組 2 kgw 的拉力裝置只需 25 cm，所以口罩帶很適合用來實驗做空氣炮的拉力繩。



圖 16 便宜好用的口罩鬆緊帶

實驗 1-3 固定拉力為 2 kgw

我們製作 7 個的空氣炮筒，拉力分別調整為 1 kgw、1.5 kgw、2 kgw、2.5 kgw、3 kgw、3.5 kgw、4 kgw。接著找來 100 名 5 年級同學，從拉力小的開始拉，能一次完全拉開，就繼續挑戰更大力的，看每個人能拉多大力的空氣炮。實驗結果如表 1，大多數同學能輕鬆拉開 2 kgw 的空氣炮筒，接下來的實驗，就以 2 kgw 做為空氣炮的拉力。

表 1 5 年級學生拉力人數統計

拉力(kgw)	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	合計
性別								(人)
男(人)	0	1	36	5	4	2	2	50
女(人)	0	2	33	4	1	0	0	50

實驗 1-4 後方塑膠膜拉起 7 cm

我們將後方的垃圾袋分別拉高為 2、4、6、8、10、12 cm，再調整鬆緊繩的長度，將拉力固定為 2 kgw，重複實驗 6 次，實驗結果如表 2。

發現 10、12 cm 的會卡住，無法完全縮回筒內，所以不能和 2~8 cm 的數據一起分析，以免影響分析的可靠度。

不過在拉力 2 kgw 下，2~8 cm 都能順利彈縮回筒內，依據 2~8 cm 的趨勢公式，我們可推算出拉起高度在 7 cm 時，空氣炮的衝力最大。因此，我們實驗中的空氣炮都以 7 cm 做為後方膠膜的拉起高度。

表 2 後方塑膠膜拉起高度對衝力的影響

實驗次數 拉起高度(cm)	1	2	3	4	5	6	氣流衝力 平均(gw)	備註
2	1.70	1.58	1.77	1.72	1.60	1.77	1.690	
4	2.79	3.08	2.69	3.05	2.33	2.89	2.805	
6	4.33	3.71	3.45	3.39	3.97	3.41	3.710	
8	3.45	3.50	3.59	3.67	3.44	3.55	3.533	
10	1.67	1.85	1.76	1.69	1.70	1.78	1.742	卡住
12	1.50	1.32	1.75	1.25	1.83	1.49	1.523	卡住

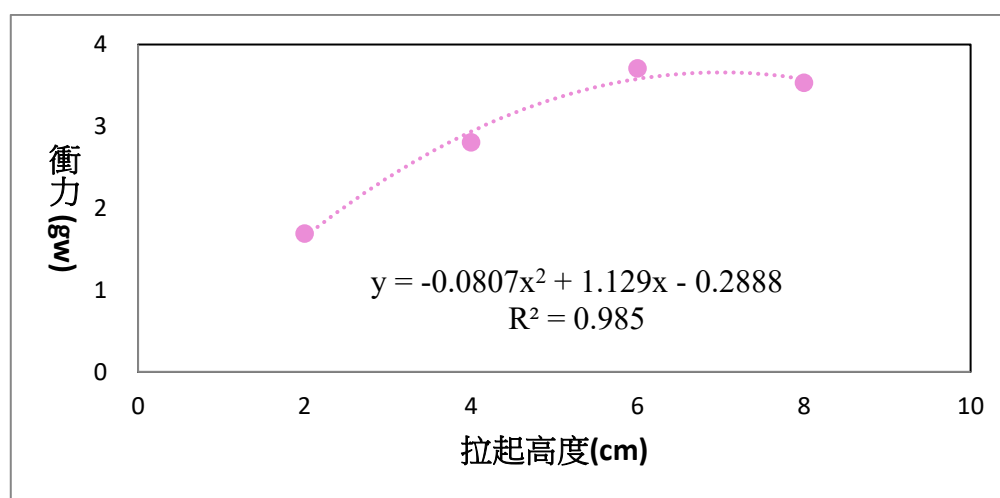


圖 17 後方塑膠膜拉起高度對衝力的影響

表 3 依據圖 17 的趨勢公式推算衝力

拉起高度(cm)	衝力(gw)
X	Y
6.7	3.653
6.8	3.657
6.9	3.659
7.0	3.660
7.1	3.659
7.2	3.657
7.3	3.652



圖 18 拉起高度不同，12 cm 的太長，彈回時會卡在筒口

實驗 1-5 實驗間隔時間

我們發現拉射空氣炮時，第二次的衝力都比第一次小，可能是因為兩次間隔時間太短，空氣還來不及補滿，使第二次的被推出去空氣變少，導致衝力變小。所以我們把實驗的間隔拉長到 15 秒，這樣測到的數據比較穩定，不會忽大忽小。

二、「孔徑」、「筒徑」對空氣炮衝力的影響

實驗 2-1 「孔徑」、「筒徑」對空氣炮衝力的影響

(一) 實驗方法

1. **控制變因**：固定拉力為 2 kgw、拉起高度為 7 cm、筒長為 15 cm。
2. **操縱變因**：改變筒面的孔徑，以電子秤測量空氣炮的衝力變化，每個孔徑做 6 次。
3. 以筒徑 8.6 cm 的空氣炮筒，測量不同孔徑的衝力變化。
4. 以筒徑 10.4 cm 的空氣炮筒，測量不同孔徑的衝力變化。

(二) 實驗結果

表 4 筒徑 8.6 cm 時，不同孔徑的衝力變化

次數 孔徑(cm)	1	2	3	4	5	6	氣流衝力 平均(gw)
1	0.58	0.68	0.59	0.64	0.6	0.61	0.616
2	1.68	1.55	1.62	1.68	1.72	1.59	1.639
3	2.25	1.98	2.21	2.31	1.97	2.15	2.145
4	2.01	1.82	1.85	2.06	1.91	1.97	1.936
5	1.61	1.46	1.74	1.52	1.44	1.54	1.551
6	0.85	0.77	0.84	0.71	0.91	0.81	0.814

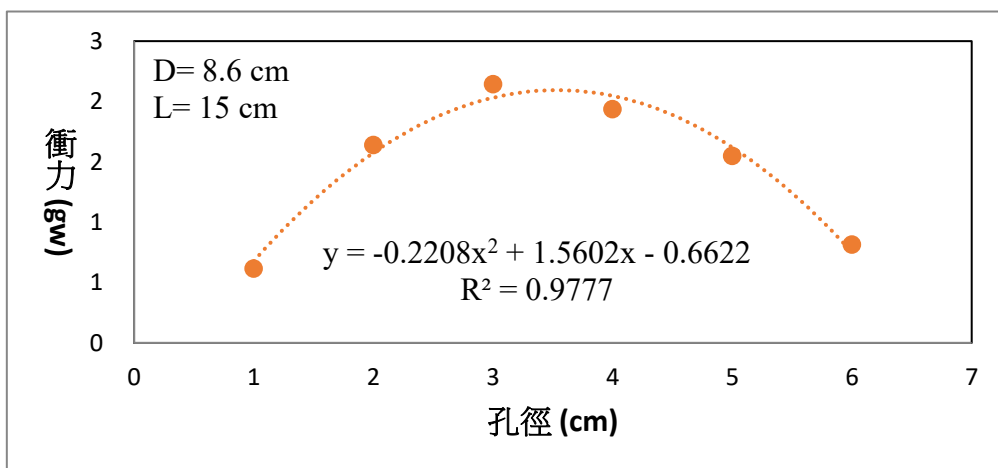


圖 19 筒徑 8.6 cm 時，不同孔徑的衝力變化

表 5 依據圖 19 的趨勢公式推算衝力

孔徑(cm)	衝力(gw)
X	Y
3.3	2.082
3.4	2.090
3.5	2.094
3.6	2.093
3.7	2.088
3.8	2.078

$$y = -0.2208x^2 + 1.5602x - 0.6622$$

表 6 筒徑 10.4 cm 時，不同孔徑的衝力變化

孔徑(cm)	次數	1	2	3	4	5	6	氣流衝力 平均(gw)
1		0.58	0.54	0.59	0.62	0.65	0.63	0.602
2		2.61	2.56	2.17	2.51	2.41	2.64	2.484
3		2.99	3.61	3.69	3.82	3.78	3.57	3.577
4		3.79	3.99	3.98	3.62	3.54	3.82	3.790
5		3.06	2.97	3.05	3.19	2.89	3.01	3.028
6		2.08	2.26	1.94	2.05	2.11	1.97	2.068
7		0.98	1.09	1.21	1.07	0.96	1.15	1.077

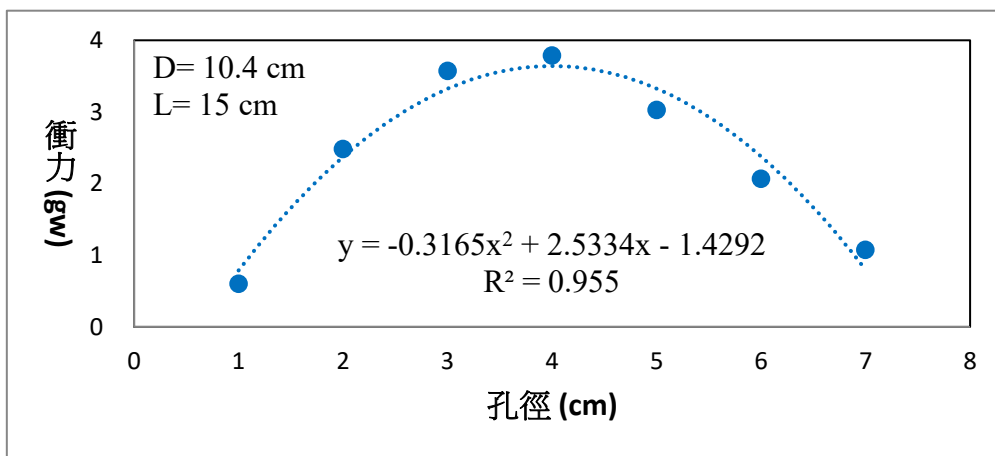


圖 20 筒徑 10.4 cm 時，不同孔徑的衝力變化

表 7 依據圖 20 的趨勢公式推算衝力

孔徑(cm)	衝力(gw)
X	Y
3.7	3.611
3.8	3.627
3.9	3.637
4.0	3.640
4.1	3.637
4.2	3.628
4.3	3.612

$$y = -0.3165x^2 + 2.5334x - 1.4292$$

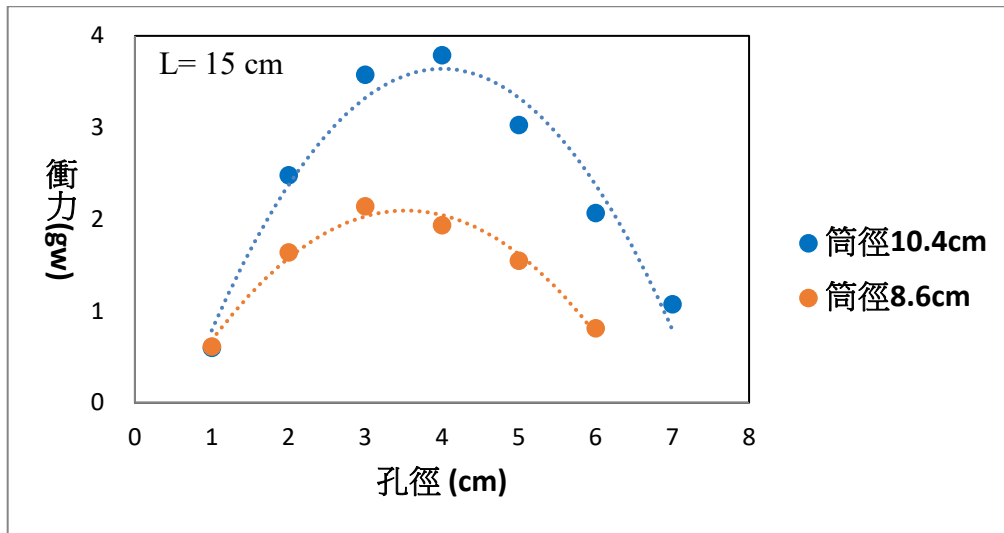


圖 21 不同筒徑的衝力變化

(三) 實驗討論

1. 從圖 19、圖 20 可以發現，筒徑、筒長相同時，孔徑的大小會影響空氣炮的衝力。
2. 依據趨勢公式推算出使筒徑 8.6cm 空氣炮產生最大衝力的最佳孔徑為 3.5 cm，筒徑 10.4cm 空氣炮的最佳孔徑為 4.0 cm。接下來實驗的孔徑就以這個尺寸來做。
3. 這個最佳孔徑會隨著空氣炮的筒徑變大而變大。
4. 由圖 21 可以發現，孔徑相同時，筒徑大的空氣炮產生的衝力比較大。我們認為可能是筒徑大的每次衝出來的空氣較多，所以衝力也比較大。



圖 22 不同孔徑的筒面

三、「筒長」對空氣炮衝力的影響

實驗 3-1 筒長對空氣炮衝力的影響

(四) 實驗方法

1. **控制變因**：固定拉力為 2 kgw、拉起高度為 7 cm、筒長為 15 cm。
分別做出筒徑 8.6 cm(孔徑 3.5 cm)和 10.4 cm(孔徑 4.0 cm)的空氣炮筒。
2. **操縱變因**：改變筒長，每次加長 15 cm，以電子秤測量衝力變化，直到衝力下降則不再加長，每個筒長做 6 次。

(五) 實驗結果

表 8 筒徑 8.6 cm 時，不同筒長的衝力變化

次數 筒長(cm)	1	2	3	4	5	6	氣流衝力 平均(gw)
15	1.98	2.11	2.05	1.90	2.25	2.01	2.050
30	3.55	3.82	3.43	3.67	3.46	3.73	3.610
45	2.99	3.15	2.89	3.38	2.84	3.05	3.050

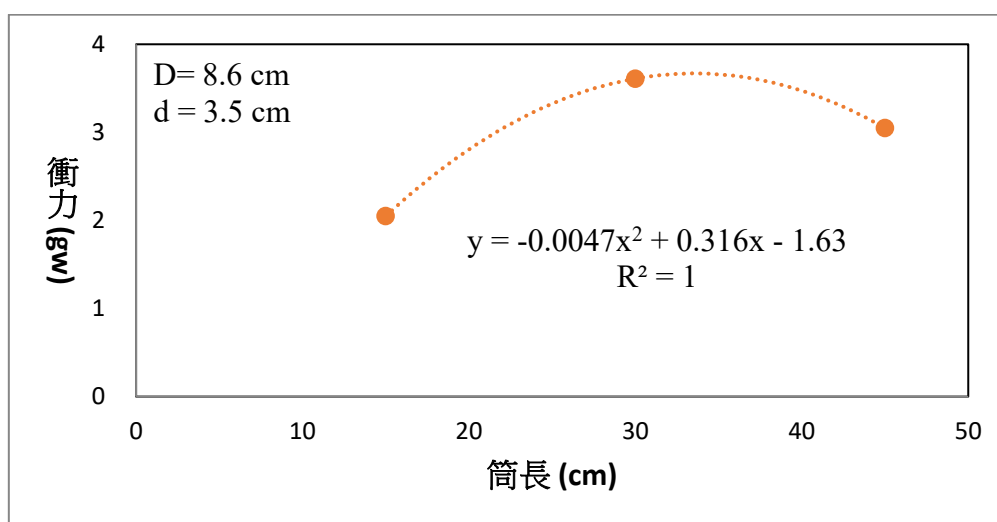


圖 23 筒徑 8.6 cm 時，不同筒長的衝力變化

表 9 依據圖 23 的趨勢公式推算衝力

筒長(cm)	衝力(gw)
X	Y
31	3.649
32	3.669
33	3.680
34	3.681
35	3.673
36	3.655
37	3.628

表 10 筒徑 10.4 cm 的空氣炮，不同筒長的衝力變化

次數 筒長(cm)	1	2	3	4	5	6	氣流衝力 平均(gw)
15	3.79	3.99	3.98	3.62	3.54	3.82	3.790
30	4.62	4.49	4.64	4.78	4.59	4.61	4.622
45	4.36	5.07	4.98	4.40	4.89	4.73	4.738
60	5.01	4.43	5.41	4.27	3.90	3.59	4.435

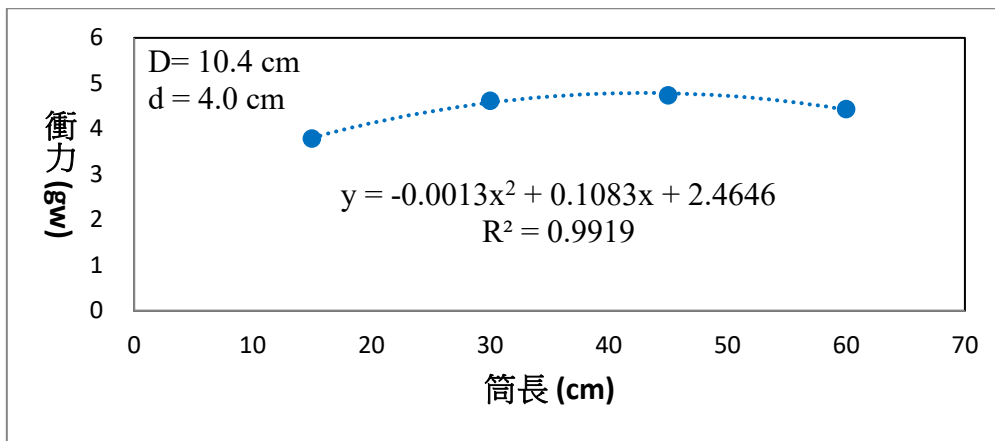


圖 24 筒徑 10.4 cm 的空氣炮，不同筒長的衝力變化

表 11 依據圖 24 的趨勢公式推算衝力

筒長(cm)	衝力(gw)
X	Y
39	4.7110
40	4.7166
41	4.7196
42	4.7200
43	4.7178
44	4.7130
45	4.7056

(六) 實驗討論

1. 依據趨勢公式推算出使筒徑 8.6 cm 空氣炮衝力最大的最佳筒長為 34 cm，筒徑 10.4 cm 空氣炮的最佳筒長為 42 cm，最佳筒長會隨著空氣炮的筒徑變大而變長。
2. 我們發現，筒長變長、空氣炮衝力也跟著變大，但筒長增加到一定長度後，空氣炮的衝力反而開始變小，依據文獻探討二，我們認為應該是筒長增加到完全成形區的長度，讓筒內的氣體成為「完全發展流」噴出炮孔，使衝力變大；但筒身繼續增長，會讓原本的「完全發展流」繼續留在管內流動，這時管壁的黏滯力會減弱氣體流動，使得衝力才會變小。
3. 空氣炮的最佳筒長要能使筒內氣體形成完全發展流再噴出，才能達到最大衝力。
4. 空氣炮的衝力隨著筒長的增加，會像圖 23、圖 24 出現最大值後下降，所以後續實驗時，如果測得的衝力開始下降，表示衝力的最大值已經出現，就不需要繼續增加筒長。



圖 25 用不同的筒長來實驗，找出最佳筒長

實驗 3-2 筒長對孔徑的影響

(一) 實驗方法

1. **控制變因**：固定拉力為 2 kgw、拉起高度為 7 cm。

做出筒徑 8.6 cm、筒長分別為 15、30、45、60 cm 的空氣炮 4 筒。

再做出筒徑 10.4 cm，筒長分別為 15、30、45、60、75、90 cm，的空氣炮 6 筒。

2. **操縱變因**：改變空氣炮的筒面孔徑。

筒徑 8.6 cm 的空氣炮做孔徑 2~6 cm。

筒徑 10.4 cm 的空氣炮做孔徑 3~7 cm。

3. 以電子秤測量空氣炮的衝力變化，每個孔徑做 6 次平均。

(二) 實驗結果

表 12 筒徑 8.6 cm 的空氣炮，在筒長變長時，孔徑 2~6 cm 的衝力變化

筒長(cm)	15	30	45	60
孔徑(cm)				
2	1.539	2.627	2.005	1.811
3	2.145	3.112	3.080	3.083
4	1.936	3.494	3.690	3.393
5	1.551	3.277	3.363	2.965
6	0.814	2.490	2.120	2.272

衝力平均(gw)

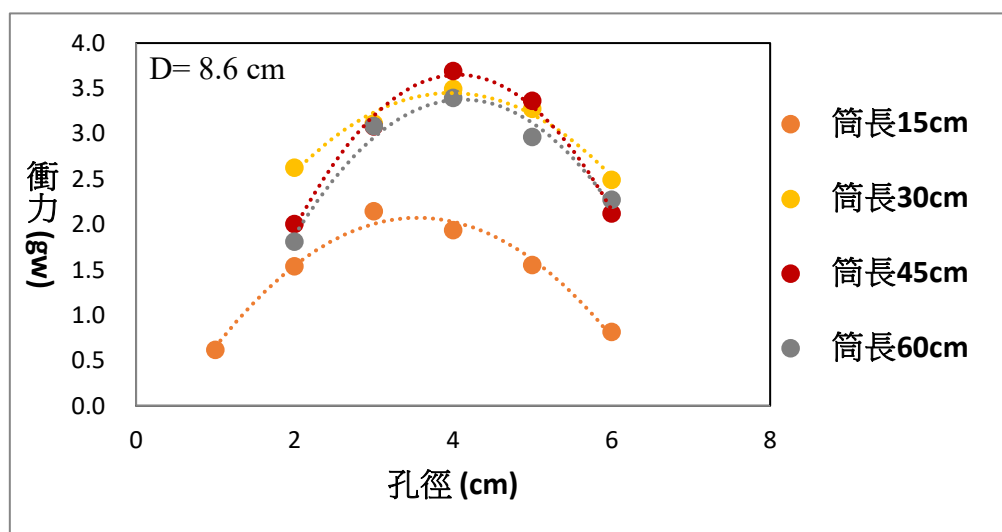


圖 26 筒徑 8.6 cm 的空氣炮，在筒長變長時，孔徑 2~6 cm 的衝力變化

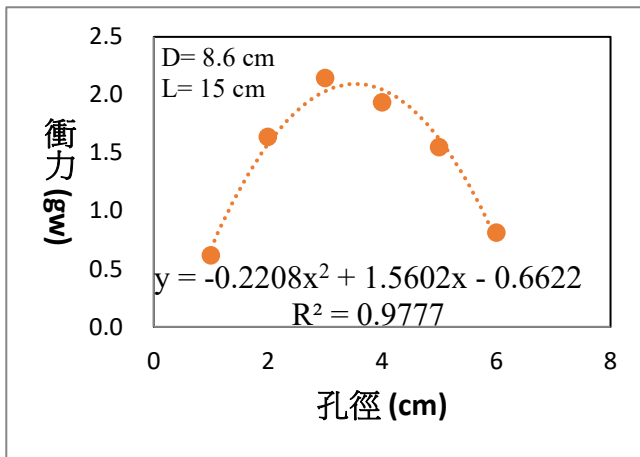


圖 27 筒徑 8.6 cm 空氣炮筒長 15 cm 時不同孔徑的衝力變化(資料來自圖 19)

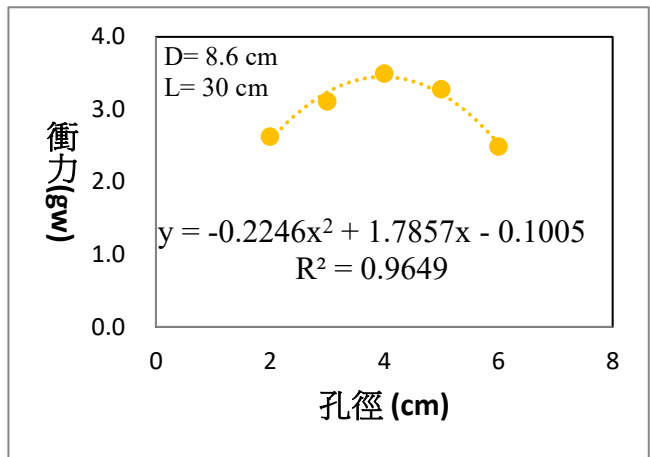


圖 28 筒徑 8.6 cm 空氣炮筒長 30 cm 時不同孔徑的衝力變化

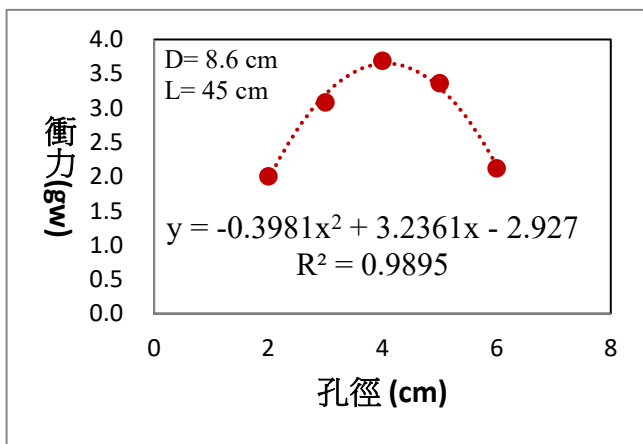


圖 29 筒徑 8.6 cm 空氣炮筒長 45 cm 時不同孔徑的衝力變化

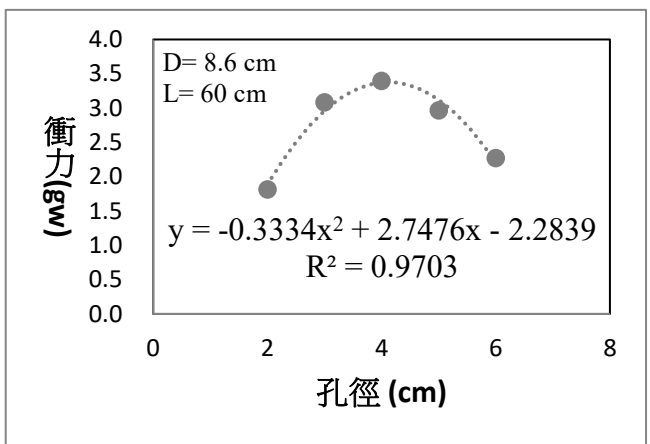


圖 30 筒徑 8.6 cm 空氣炮筒長 60 cm 時不同孔徑的衝力變化

表 13 筒徑 8.6 cm 的空氣炮，在筒長變長時，根據趨勢公式推算出最佳孔徑

筒長(cm)	15	30	45	60
孔徑(cm)				
3.4	2.090	3.375	3.474	3.204
3.5	<u>2.094</u>	3.398	3.523	3.249
3.6	2.093	3.417	3.564	3.287
3.7	2.088	3.432	3.597	3.318
3.8	2.078	3.442	3.622	3.343
3.9	2.064	3.448	3.639	3.361
4.0	2.046	<u>3.449</u>	3.648	3.372
4.1	2.023	3.445	<u>3.649</u>	<u>3.377</u>
4.2	1.996	3.437	3.642	3.375
4.3	1.964	3.425	3.627	3.366
4.4	1.928	3.408	3.605	3.351

衝力(gw)

表 14 筒徑 10.4 cm 的空氣炮，在筒長變長時，孔徑 3~7 cm 的衝力變化

筒長(cm)	15	30	45	60	75	90
孔徑(cm)						
3	3.577	2.897	3.463	3.600	2.829	2.492
4	3.790	4.517	4.738	4.436	4.306	4.269
5	3.028	4.608	5.077	4.800	4.930	4.933
6	2.068	3.680	4.780	4.668	4.734	4.783
7	1.076	2.300	3.960	3.950	3.648	3.730

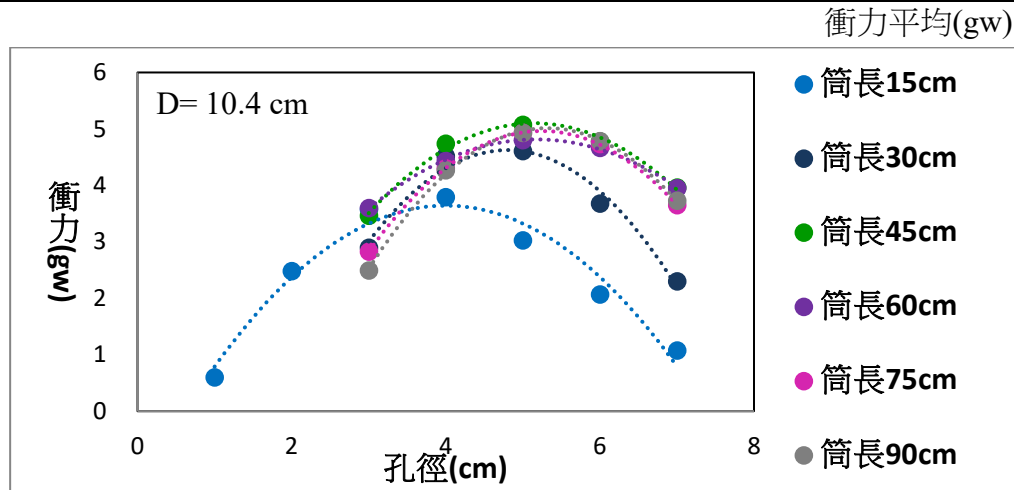


圖 31 筒徑 10.4 cm 的空氣炮，在筒長變長時，孔徑 3~7 cm 的衝力變化

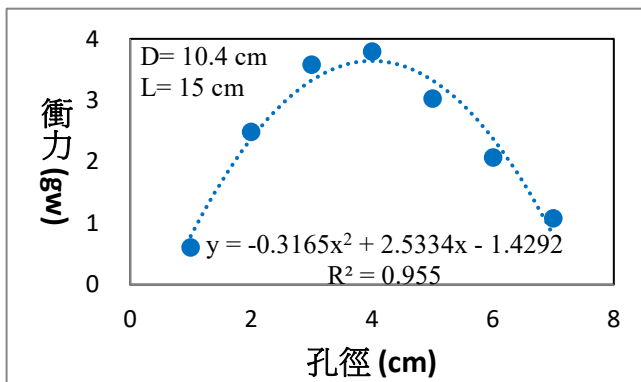


圖 32 筒徑 10.4 cm 空氣炮筒長 15 cm 時不同孔徑的衝力變化(資料來自圖 20)

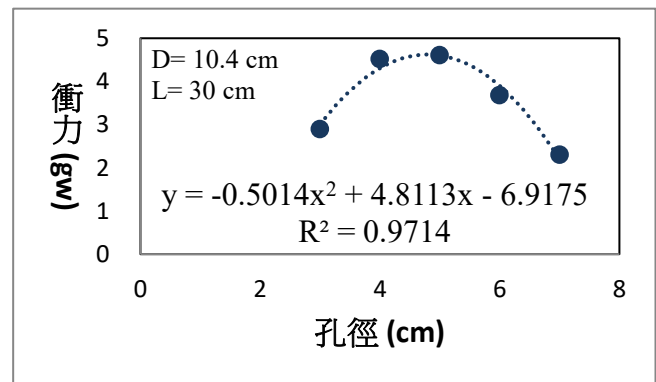


圖 33 筒徑 10.4 cm 空氣炮筒長 30 cm 時不同孔徑的衝力變化

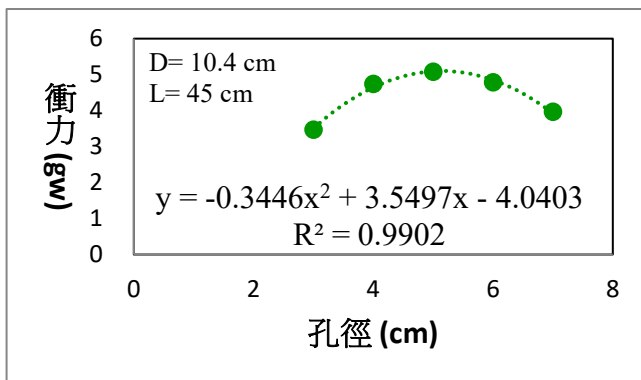


圖 34 筒徑 10.4 cm 空氣炮筒長 45 cm 時不同孔徑的衝力變化

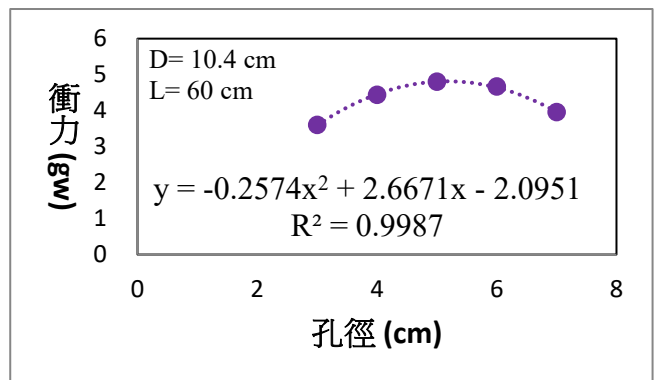


圖 35 筒徑 10.4 cm 空氣炮筒長 60 cm 時不同孔徑的衝力變化

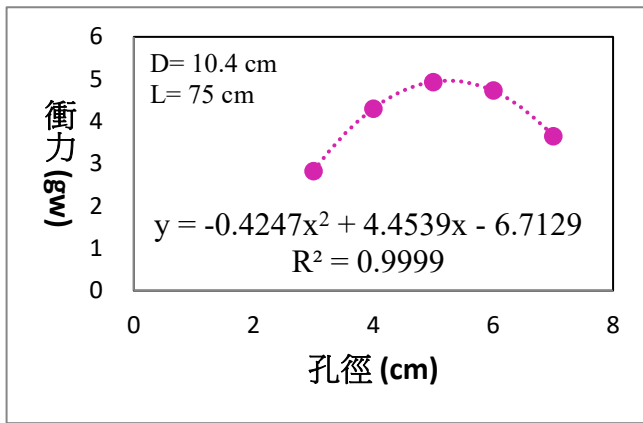


圖 36 筒徑 10.4 cm 空氣炮筒長 75 cm 時不同孔徑的衝力變化

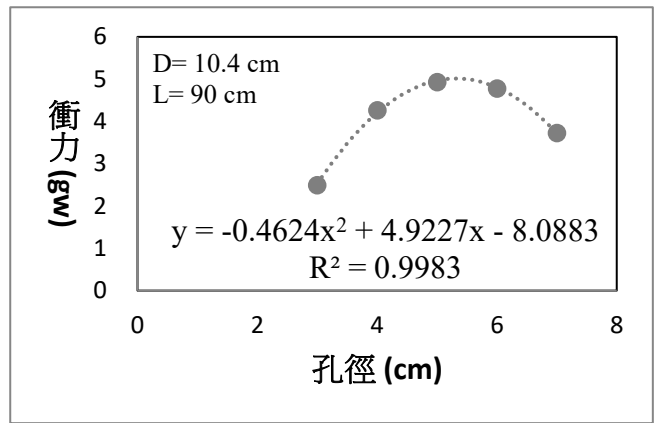


圖 37 筒徑 10.4 cm 空氣炮筒長 90cm 時不同孔徑的衝力變化

表 15 筒徑 10.4 cm 的空氣炮，在筒長變長時，根據趨勢公式推算出最佳孔徑

筒長(cm)	15	30	45	60	75	90
孔徑(cm)						
3.9	3.638	4.220	4.562	4.392	4.198	4.077
4.0	3.641	4.305	4.645	4.455	4.308	4.204
4.1	3.638	4.380	4.721	4.513	4.409	4.322
4.2	3.629	4.445	4.790	4.566	4.502	4.430
4.3	3.613	4.500	4.852	4.614	4.586	4.530
4.4	3.591	4.545	4.907	4.657	4.662	4.620
4.5	3.563	4.580	4.955	4.695	4.729	4.700
4.6	3.528	4.605	4.997	4.727	4.788	4.772
4.7	3.487	4.620	5.031	4.754	4.839	4.834
4.8	3.440	4.624	5.059	4.776	4.881	4.887
4.9	3.386	4.619	5.079	4.794	4.914	4.931
5.0	3.326	4.604	5.093	4.805	4.939	4.965
5.1	3.260	4.579	5.100	4.812	4.956	4.990
5.2	3.187	4.543	5.100	4.814	4.963	5.006
5.3	3.108	4.498	5.093	4.810	4.963	5.013
5.4	3.023	4.443	5.080	4.801	4.954	5.011

衝力(gw)

表 16 在不同筒長下，孔徑對筒徑的比例

筒長(cm)	15	30	45	60	75	90
筒徑(cm)						
8.6	3.5	4.0	4.1	4.1		
10.4	4.0	4.8	5.1	5.2	5.3	5.3
孔徑÷筒徑	40.7%	46.5%	47.6%	47.7%		
孔徑÷筒徑	38.5%	46.1%	49.0%	50.0%	51.0%	51.0%

孔徑(cm)

(三) 實驗討論

- 1.筒長改變時，最佳孔徑也會改變；但筒長超過實驗 3-1 的最佳筒長時，最佳孔徑會開始趨近一個定值，孔徑約為筒徑的 50%，所以「最佳孔徑 d ：筒徑 $D = 1 : 2$ 」。
- 2.按照這個比例，筒徑 10.4 cm 的最佳孔徑應該是 5.2 cm，所以在實驗 3-1，以孔徑 4 cm 找出最佳筒長 42 cm，就不是真正的最佳筒長，應該用最佳孔徑 5.2 cm 來找最佳筒長才對。
- 3.在固定拉力 2 kgw 時，做筒長 30 cm 的空氣炮，最佳孔徑約為筒徑的 46% (表 16)，筒長更長時，最佳孔徑的比例約接近 51% (表 16)。一般空氣炮筒，都是直接拿個桶子來做，筒徑和筒長已固定，只能改變孔徑來做出較佳的空氣炮，按照我們的實驗結果，挖出筒徑的 46~51% 做孔徑，就能做出衝力較大的空氣炮。



圖 38 每種筒長都要改變孔徑，來進行實驗

實驗 3-3 找出 $D=10.4\text{cm}$ 的真正最佳筒長

(一) 實驗方法

1. **控制變因**：筒徑 $D = 10.4\text{ cm}$ ，固定拉力為 2 kgw、拉起高度為 7 cm，孔徑 5.2 cm。
2. **操縱變因**：改變空氣炮的筒長，15~ 60 cm。
3. 以電子秤測量空氣炮的衝力變化，每個筒長做 6 次平均。

(二) 實驗結果

表 17 筒徑 10.4 cm，孔徑 5.2 cm，不同筒長的衝力變化

筒長(cm)	15	30	45	60
平均衝力(gw)	3.045	4.762	5.151	4.99

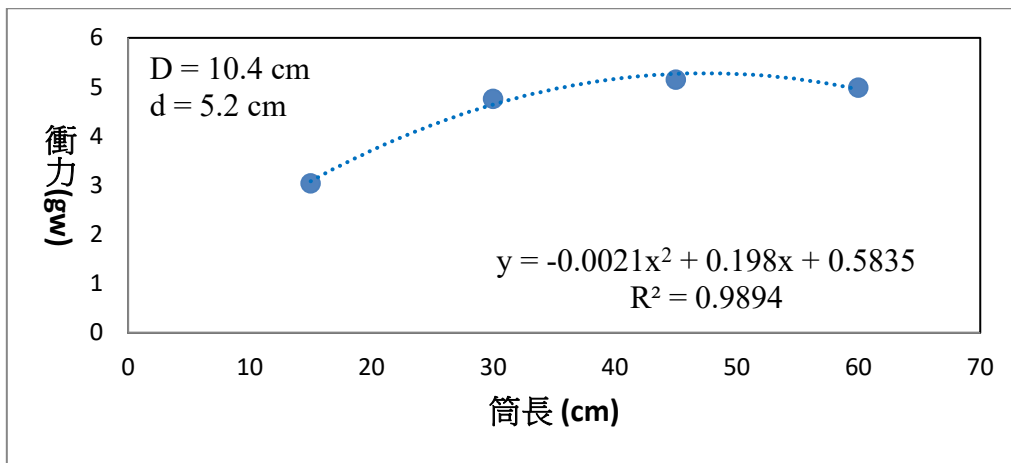


圖 39 筒徑 10.4 cm，孔徑 5.2 cm，不同筒長的衝力變化

表 18 依照圖 39 的趨勢公式推算衝力

筒長(cm)	衝力(gw)
X	Y
44	5.230
45	5.241
46	5.248
47	5.251
48	5.249
49	5.243
50	5.234

(三) 實驗討論

1. 根據實驗 3-2，衝力最大時，孔徑 d ：筒徑 $D = 1 : 2$ ，固定這個比例，我們找出在拉力 2 kgw 時，筒徑 10.4 cm 的真正最佳筒長 L 為 47 cm，發現 $D : L = 1 : 4.5 = 2 : 9$ 。
2. 綜合前面的實驗結果，我們可以確定，在拉力 2 kgw 時，製作空氣炮的最佳比例為：
「孔徑 d ：筒徑 D ：筒長 $L = 1 : 2 : 9$ 」

四、「孔形」對空氣炮的影響

實驗 4-1 「孔形」對空氣炮的影響

(一) 實驗方法

1. **控制變因**：固定拉力為 2 kgw，拉起高度為 7 cm，做出筒徑 10.4 cm 的最佳空氣炮（實驗 3-3，筒長 47 cm、孔徑 5.2 cm）。
2. **操縱變因**：5.2 cm 圓孔的面積為 21.24 cm^2 ，做出同面積的長方形、正方形、正三角形、等腰三角形，橢圓形、半圓形、偏圓等 7 種孔形。改變空氣炮的筒面孔形，以電子秤測量衝力、風速計測量風速、衛生紙架測飄行距離的變化，每個孔形做 6 次。

(二) 實驗結果

表 19 同面積不同孔形的尺寸

形狀	直徑/長/底/短軸(cm)	寬/高/長軸(cm)	面積(cm ²)
圓形	5.20		21.24
長方形	9.30	2.30	21.39
正方形	4.60	4.60	21.16
正三角形	5.00	8.66	21.65
等腰三角形	4.60	9.30	21.39
橢圓	3.80	7.10	21.19
半圓	7.40		21.50

表 20 同面積不同孔形的衝力變化

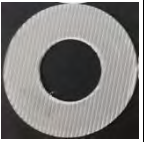
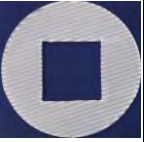






















照片	筒面孔形	氣流衝力 平均(gw)	風速(m/s)			飄行距離 (cm)	備註
			出口 3 cm	出口 30 cm	減速		
	圓形	5.27	3.30	1.80	-1.50	220	圓形的能形成清楚渦環，效果最好
	正方形	5.08	3.20	1.67	-1.53	205	接近圓形的能形成清楚渦環，效果較好，
	正三角形	5.12	3.23	1.60	-1.63	175	先是正三角形、再倒三角形，然後是模糊的渦環，容易散開，跑不遠。
	長方形	6.44	3.70	1.10	-2.60	140	扁形使出口衝力變大，但未形成渦環，容易散開，出口 30 cm 風速明顯下降，所以跑不遠。
	等腰 三角形	5.98	2.97	1.47	-1.50	150	模糊的變形渦環
	橢圓	4.99	2.80	1.40	-1.40	155	邊前進邊變形的渦環
	半圓	4.75	3.17	1.23	-1.94	155	與橢圓類似，但更模糊
	偏圓	4.83	3.00	1.10	-1.90	180	圓形的能形成渦環，但氣流不是從中間噴出，衝力較弱。

表 21 不同孔形的氣流變化

孔形	氣流形狀
圓形 	
正方形 	
正三角形 	
長方形 	
等腰三角形 	
橢圓 	
半圓 	
偏圓 	

(三) 實驗討論

1. 圓形的孔能形成清楚的渦環，效果最好；正方形接近圓形的孔，也能形成渦環，效果也不差。
2. 長方形較扁，出口衝力較大，但未形成渦環，一下子就散開，出口 30 cm 風速就明顯下降，所以跑不遠。
3. 橢圓形最有趣，實驗時可以清楚看到變形的煙圈，它形成一邊前進一邊變形的渦環。
4. 圓孔在正中間時，氣流衝力比偏圓大，應該是因為完全發展流形成在管內正中間，所以從中間噴出的衝力較大。

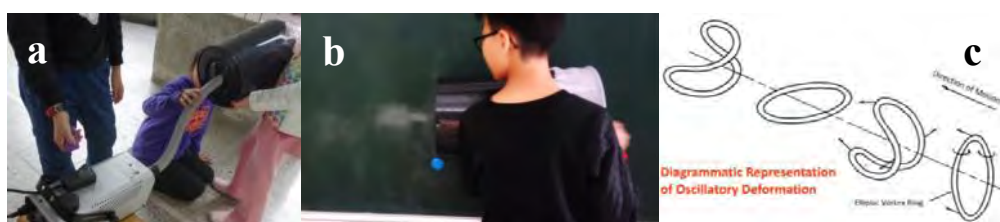


圖 40 裝入煙霧(圖 a)，進行觀測(圖 b)，橢圓形邊跑邊變形的渦環(圖 c 參考資料五)

五、「筒形」對空氣炮衝力的影響

實驗 5-1 同容量不同形狀的空氣炮

(一) 實驗方法

1. 控制變因：固定拉力為 2 kgw、拉起高度為 7 cm、孔徑 5.2 cm、容量約為 3800 ml。
2. 操縱變因：做出容量相同、筒形不同的空氣炮，以電子秤測量空氣炮的衝力變化，每個筒形做 6 次。

表 22 容量相同，筒形不同的空氣炮

筒形	筒徑(cm)	筒長(cm)	容量(ml)
1	18.0	15	3817.032
2	10.4	45	3822.687

(二) 實驗結果

表 23 容量相同，筒形不同的空氣炮的衝力

筒形	筒徑(cm)	衝力平均(gw)	備註
 1	18.0	4.487	
 2	10.4	5.151	數據來自表 17

(三) 實驗討論

1. 從實驗發現，容量相同下，筒長較長的空氣炮衝力較大，我們認為是因為筒身長度足夠讓筒內空氣達到完全發展流，所以長空氣炮比短空氣炮的衝力大。

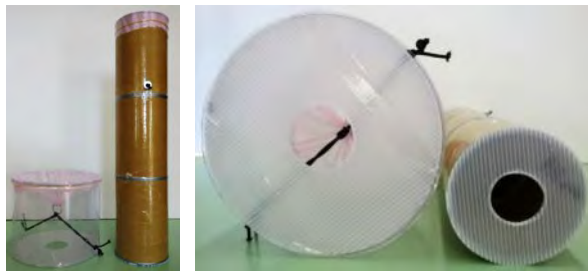


圖 41 容量相同，筒形不同的空氣炮

六、「拉力」對筒長的影響

實驗 6-1 拉力對筒長的影響

(一) 實驗方法

1. **控制變因**：固定拉起高度為 7 cm、孔徑 5.2 cm、筒徑 10.4 cm。
1. **操縱變因**：拉力 2 kgw、4 kgw。
2. 拉力 4 kgw，改變筒長 15-75 cm，以電子秤測量衝力變化，每個筒長做 6 次。
3. 拉力 2 kgw 就用實驗 3-1 表 10 的數據。

(二) 實驗結果

表 24 拉力 4 kgw 時，不同筒長的衝力變化

次數 筒長(cm)	1	2	3	4	5	6	氣流衝力 平均(gw)
15	3.11	3.02	3.37	2.89	2.99	3.10	3.08
30	4.10	4.99	4.90	3.26	4.33	4.28	4.31
45	4.91	5.34	5.52	5.47	5.13	5.56	5.32
60	5.66	6.12	6.01	5.61	5.91	5.65	5.83
75	5.74	5.71	4.92	5.95	5.33	5.76	5.57

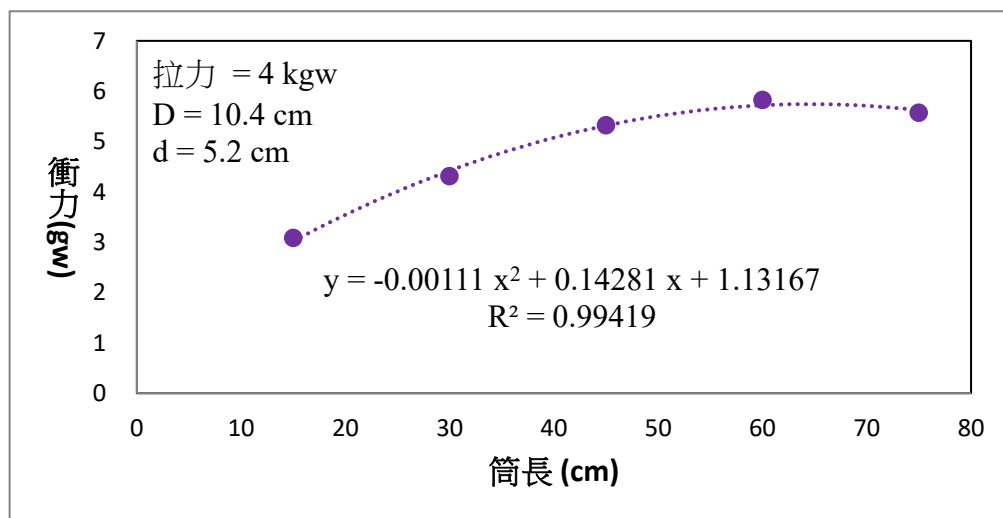


圖 42 拉力 4 kgw 時，不同筒長的衝力變化

表 25 依據圖 42 的趨勢公式推算衝力

筒長(cm)	衝力(gw)
61	5.713
62	5.719
63	5.723
64	5.725
65	5.725
66	5.722
67	5.717
68	5.710

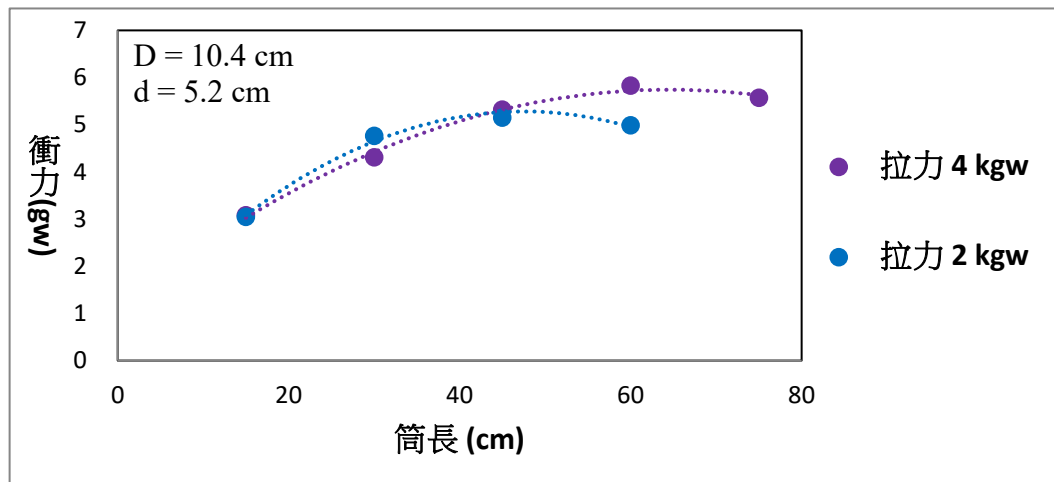


圖 43 不同拉力的衝力變化

(三) 實驗討論

1. 拉力由 2 kgw 增加為 4 kgw，最佳筒長也從 47cm 增長到 64~65 cm；我們認為推動筒內空氣的拉力增加，會使形成完全發展流的進口區變長(文獻探討二)，所以最佳筒長也變長。
2. 由圖 44 還發現，拉力 4 kgw 在筒長 30 多 cm 以下時，衝力反而比拉力 2 kgw 的還小；可能是因為筒長較短時，拉力 4 kgw 推出的空氣還在 1 或 2(圖 45)就衝出筒外，而拉力 2 kgw 的應該已到 3 或 4 才衝出筒外，所以 4 kgw 的衝力反而比較小。

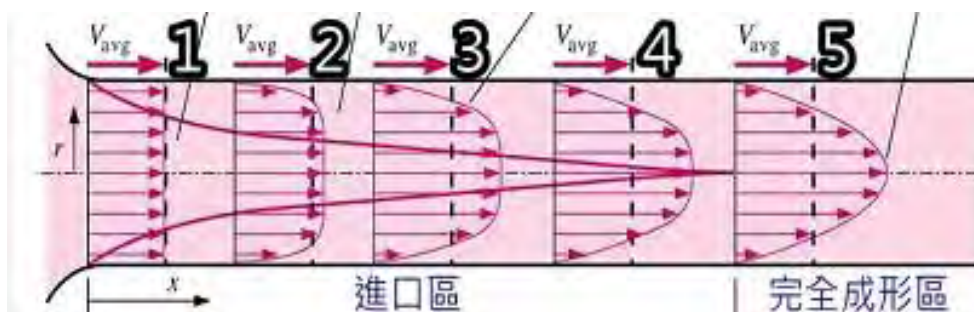


圖 44 流體在管內流動情形

七、最佳空氣炮

實驗 7-1 改良市售空氣炮

(一) 實驗方法

1. **控制變因**：使用同一個筒徑 19 cm 的 AirZooka 空氣砲(690 元)，拉力 6 kgw。
2. **操縱變因**：改變孔徑大小，原始孔徑為 11.2 cm，依實驗 3-2 表 16，最佳孔徑=筒徑的 50%，做出新孔徑為 9.5 cm。
3. **改變進口空氣砲的孔徑大小**，以電子秤測量衝力、風速計測量風速、衛生紙架測飄行距離的變化，每個孔徑做 6 次

(二) 實驗結果

表 26 AirZooka 空氣砲，改變孔徑後的變化

孔徑	氣流衝力 平均(gw)	風速(m/s)			飄行距離 (cm)
		出口 3cm	出口 30cm	減速	
11.2 cm	14.922	3.6	2.8	-0.8	460
9.5 cm	18.063	3.9	3.1	-0.8	475

(三) 實驗討論

1. 以實驗 3-2 的最佳孔徑比例，把 AirZooka 空氣砲的孔徑變小後，衝力變大、風速變快、飄行距離更遠，證明實驗 3-2 的最佳孔徑比例是真的能做出衝力更大的空氣砲。
2. 當 2 側筒徑不同時，到底從哪個方筒拉射空氣砲的衝力會比較大呢？實驗發現，由大→小拉射產生的衝力為 3.818 gw，比由小→大的 3.157 gw 大(圖 46)。一般常見拿垃圾桶來做空氣砲，為了方便都是桶底挖孔、桶口做拉射，正好由大→小拉射，我們證明了這樣的方向的確能增加空氣砲的威力。

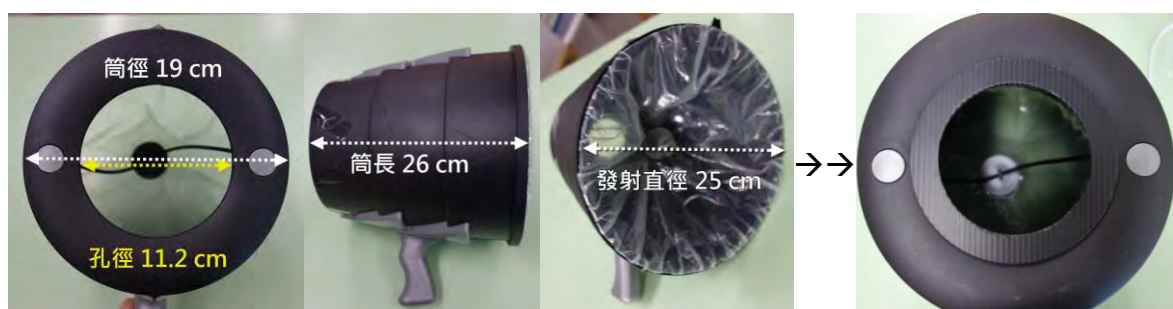


圖 45 把 AirZooka 空氣砲的孔徑變小後，威力變強



圖 46 左邊由大→小，右邊由小→大

實驗 7-2 製作最佳空氣炮

(一) 實驗方法

1. **控制變因**：用筒徑和AirZooka空氣砲相同桶子，拉力同樣為 6 kgw，拉起高度與AirZooka空氣砲相同。
2. **操縱變因**：依實驗3-2的最佳比例，製做筒長85.5 cm (19×4.5)、孔徑9.5 cm (19÷2)的空氣砲。以電子秤測量衝力、風速計測量風速、衛生紙架測飄行距離變化，重覆6次。
3. 將拉力改為 2 kgw，測量衝力、風速、飄行距離，重覆6次。

(二) 實驗結果

表 27 筒徑相同，最佳比例空氣砲和 AirZooka 空氣砲的威力比較

空氣砲種類	氣流衝力 平均(gw)	風速(m/s)			飄行距離 (cm)
		出口 3cm	出口 30cm	減速	
AirZooka (6 gw 拉力)	14.922	3.6	2.8	-0.8	460
最佳比例 (6 gw 拉力)	23.115	4.5	3.9	-0.6	505
最佳比例 (2gw 拉力)	18.455	3.8	3.1	-0.7	470

(三) 實驗討論

1. 我們用實驗 3-3 得到的空氣砲最佳比例 $d : D : L = 1 : 2 : 9$ ，成功做出比 AirZooka 威力還強的最佳比例空氣砲，證明這個比例的確可行。
2. AirZooka 的拉力為 6 kgw，就算把最佳比例空氣砲的拉力變小為 2 kgw，衝力仍然比 AirZooka 大。
3. 找出空氣砲的最佳比例後，我們在炮口加上扇葉，發現風力槳能使衝力增加到 30.40 gw (圖 48 a)、風扇則增加到 24.15 gw (圖 48 b)，能增強空氣砲的威力。



圖 47 AirZooka 和同筒徑的最佳比例空氣砲

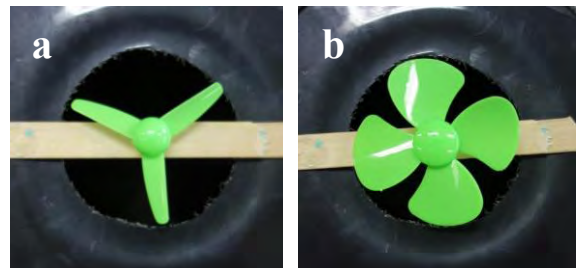


圖 48 a 風力槳衝力大、b 風扇

柒、討論

- 一、孔徑的大小會影響空氣砲的衝力，但不是越大越好，依據實驗 2-1 的結果，可推算出在拉力 2 kgw 時，筒徑 8.6 cm 空氣砲的最佳孔徑為 3.5 cm，筒徑 10.4 cm 空氣砲的最佳孔徑為 4.0 cm。這個最佳孔徑會隨著筒徑變大而變大。
- 二、孔徑、筒長相同時，筒徑大的空氣砲產生的衝力比較大。我們認為可能是筒徑大的每次衝出來的空氣較多，所以衝力也比較大。
- 三、依據實驗 3-1 的結果，可推算在拉力 2 kgw 時，筒徑 8.6 cm、孔徑 3.5 cm 空氣砲的最佳筒長為 34 cm，筒徑 10.4 cm、孔徑 4.0 cm 空氣砲的最佳筒長為 42 cm，最佳筒長會隨著

空氣炮的筒徑變大而變長。

- 四、在實驗 3-1 我們也發現，筒長變長、空氣炮衝力也跟著變大，但筒長增加到一定長度後，空氣炮的衝力反而開始變小，依據文獻探討二，我們認為應該是筒長增加到完全成形區的長度，讓筒內的氣體成為「完全發展流」噴出炮孔，使衝力變大；但筒身繼續增長，會讓原本的「完全發展流」繼續留在管內流動，這時管壁的黏滯力會減弱氣體流動，使得衝力才會變小。
- 五、**空氣炮的最佳筒長要能使筒內氣體形成完全發展流再噴出，才能達到最大衝力。**
- 六、在實驗 3-2 發現，筒長改變時，最佳孔徑也會改變；但筒長超過最佳筒長時，最佳孔徑會開始趨近一個定值，孔徑約為筒徑的 50%，所以「**最佳孔徑 d ：筒徑 $D = 1 : 2$** 」。
- 七、由表 16 可以看到，拉力 2 kgw 時，筒長 30 cm 時，最佳孔徑約為筒徑的 46%，筒長更長時，最佳孔徑的比例約接近 51%。一般空氣炮筒，都是直接拿個桶子來做，筒徑和筒長已固定，只能改變孔徑來做出衝力較大的空氣炮，按照我們的實驗結果，**以筒徑的 46~51% 做孔徑，就能做出衝力較大的空氣炮。**
- 八、按照實驗 3-2 的比例，衝力最大時，孔徑 d ：筒徑 $D = 1 : 2$ ，所以筒徑 10.4 cm 的最佳孔徑應該是 5.2 cm，在實驗 3-1 以孔徑 4 cm 找出的最佳筒長 42 cm，就不是真正的最佳筒長，應該用最佳孔徑 5.2 cm 來找最佳筒長才對；果然在實驗 3-3 我們找出筒徑 10.4 cm 的真正最佳筒長 L 為 47 cm，發現「**筒徑 D ：筒長 $L = 1 : 4.5 = 2 : 9$** 」。
- 九、綜合前面的實驗結果，我們可以確定，**在拉力 2 kgw 時，製作空氣炮的最佳比例為：「孔徑 d ：筒徑 D ：筒長 $L = 1 : 2 : 9$ 」**
- 十、孔形越接近圓形，越能形成清楚的渦環，使空氣炮的衝力變大、氣流移動距離較遠；長方形較扁，出口衝力較大，但未形成渦環，一下子就散開，出口 30 cm 風速就明顯下降，所以跑不遠；橢圓形也能清楚看到變形的渦環，但它一邊前進一邊變形，所以跑不遠；偏圓也是圓形，但因為完全發展流形成在管內正中間，所以從偏圓流出的衝力比較小。
- 十一、因為筒長較長時，筒內的空氣比較能形成完全發展流，從實驗 5-1 發現，容量相同時，筒長較長的空氣炮果然衝力比較大。
- 十二、拉力增加，最佳筒長也變長，是因為形成完全發展流所需的進口區變長(文獻探討二)，所以如果筒長太短，拉力大的衝力反而比較小。
- 十三、AirZooka 的筒徑 19 cm，以實驗 3-2 的最佳孔徑比例，把 AirZooka 空氣炮的孔徑由 11.2 cm 變小為 9.5 cm 後，衝力果然變大。
- 十四、AirZooka 的拉力為 6 kgw，用實驗 3-3 得到的空氣炮最佳比例 $d : D : L = 1 : 2 : 9$ ，成功做出和 AirZooka 筒徑、拉力相同、但威力更強的空氣炮，證明這個比例的確可行；就算把拉力變小為 2 kgw，衝力仍然比 AirZooka 大。

捌、結論

- 一、拉射空氣炮時，炮筒內的空氣前進時會逐漸形成完全發展流，當筒內氣體形成完全發展流再噴出，空氣炮的衝力最大；若筒長太長，反而會因為筒壁的黏滯力使衝力變小；當空氣流出炮孔，因為中間流速快，會形成向外翻轉的甜甜圈狀渦環。
- 二、孔徑、筒徑、筒長、孔形、拉力都會影響空氣炮的衝力；孔形越接近圓形，越能形成清楚的渦環，使空氣炮的衝力變大；拉力增加時，因為形成完全發展流所需的進口區變長最佳筒長也會變長。
- 三、在拉力 2 kgw 時，製作空氣炮的最佳比例為：「孔徑 d ：筒徑 D ：筒長 $L = 1 : 2 : 9$ 」
- 四、任意拿個桶子來做空氣炮，以筒徑的 46~51% 做孔徑，就能做出衝力較大的空氣炮。

玖、未來展望

我們在實驗 7-2 的最佳比例空氣炮的炮口加上扇葉，明顯使空氣炮威力更強，表示影響空氣炮的因素還很多；未來我們想嘗試更多不同種類的扇葉(圖 49 a)、或是在炮筒內加上紋路(圖 49 b)、或是以筒身有紋路的來做空氣炮筒(圖 49 c)，看看是否能找出更多增加「拉射式空氣炮」衝力的方法。

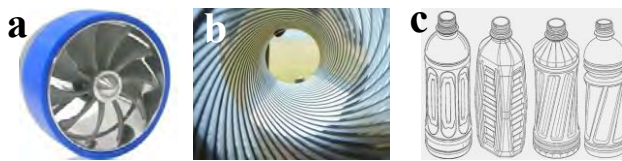


圖 49 a 渦輪扇、b 螺旋紋路、c 有紋路的瓶子

壹拾、參考資料

- 一、空氣砲之科學原理新興國中. (無日期). 空氣砲之科學原理. 擷取自 blog.hhjh.tp.edu.tw/gallery/6/6-6728.doc
- 二、黃一玄. (2014 年 12 月 15 日). 黏度 (或稱黏滯性). (國立台灣大學) 擷取自 科學 Online 高瞻自然科學教學資源平台: <http://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=59367>
- 三、義守大學. (無日期). 第八章 管路流體. 擷取自 www.isu.edu.tw/upload/81201/15/news/postfile_14150.doc
- 四、李佳螢, 張瑞宏, 王馨柔, & 蔡家銘. (無日期). 哆啦 A 夢的空氣炮. 擷取自 47 屆中小學科學展覽會: <https://activity.ntsec.gov.tw/activity/race-1/47/elementary/080803.pdf>
- 五、Circular and Elliptic Vortex Ring
<https://www.youtube.com/watch?v=cAMDJoY9-RA&list=FLCywNq0AGwKdBfcH7ls45jA&t=0s&index=27>
- 六、The Vortex Ring, Close Up, in Slow Motion
<https://www.youtube.com/watch?v=Sj9irzI-Pzw&index=60&list=FLCywNq0AGwKdBfcH7ls45jA>
- 七、翰林版自然與生活科技三上第三單元，空氣和風
- 八、翰林版自然與生活科技三上第四單元，空氣和燃燒

【評語】 080108

這項工作利用不同桶身本身的幾何形狀還有相對應的幾何參數對於空氣砲產生的影響。藉由一系列的工作來找出最佳的情況。整體實驗的設計、思維、與控制操作變因都十分的詳盡。實驗變因討論完善，能找出最佳比例。對於炮桶與開口的幾何形狀有深入的研究。相當值得肯定。內容對於空氣砲的產生機制和相對應的物理原理都有明確和合理的解釋說明。利用一系列合理的測量方法有效找出影響的條件，研究過程的討論嚴謹，有系統地歸納出裝置之最佳比例，也對於觀測的結果有合理的說明。此外，研究工作用了一些具有科學意義的數學分析來增強整體研究的討論完整度。整體工作算是很完整和合理，算是一項很不錯的主題研究工作。

壹、摘要

科學攤位上的空氣炮引起我們的好奇心，於是和同學開始研究如何做出威力較大的空氣炮，實驗發現：

1. 空氣炮內的氣體形成「完全發展流」時，衝出的威力最大；若筒長太長，反而會因為筒壁的黏滯力使衝力變小。
2. 孔形越接近圓形，越能形成清楚的渦環，讓空氣炮的衝力變大，氣流移動距離較遠。
3. 拉力增加時，因為形成完全發展流所需的進口區變長，最佳筒長也會變長。
4. 在拉力 2 kgw 時，製作空氣炮的最佳比例為：「孔徑 d : 筒徑 D : 筒長 $L = 1 : 2 : 9$ 」。
5. 通常製作空氣炮時，桶子的筒徑和筒長已固定，以筒徑的 46~51% 做孔徑，也能做出衝力較佳的空氣炮。
6. 在筒內加上螺旋，可使空氣炮的威力增加 29%，並穩定快速的直射到 3.8 倍的距離。

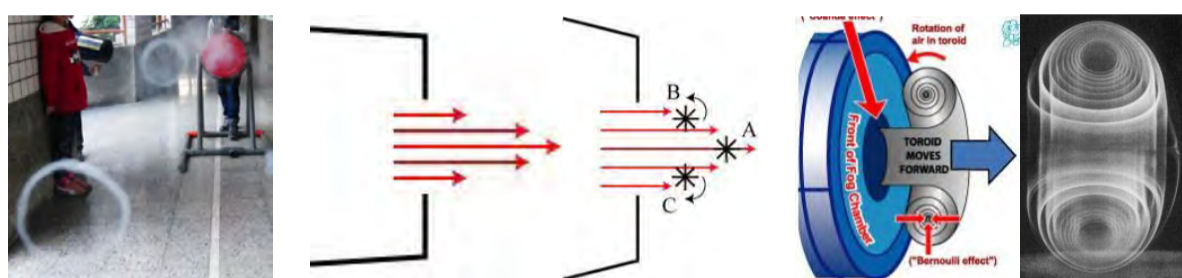
貳、研究目的

- 一、探討空氣炮的原理
- 二、探討「孔徑、筒徑、筒長、孔形、拉力」對空氣炮衝力的影響
- 三、探討「筒長與孔徑」對空氣炮衝力的影響
- 四、探討「相同容量、不同筒形」對空氣炮衝力的影響
- 五、找出製作空氣炮的最佳比例

參、原理探究

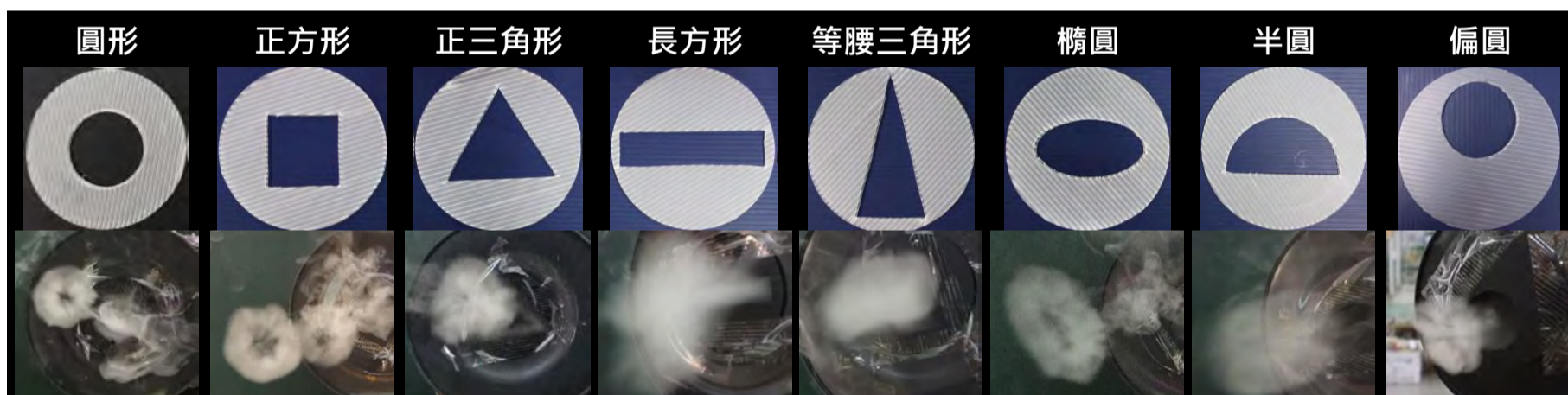
渦環 (Vortex Ring)

在桶中放入煙霧，然後拍打桶子，會看到煙霧像甜甜圈一樣從圓孔飛出來。這是因為，當流體流經較狹隘的出口時，中心流速較快，外側流速較慢。所以空氣從圓孔噴出時，會由中心向外側翻轉的渦環，而且邊移動邊翻轉。



空氣流出圓孔時，由中心向外側翻轉

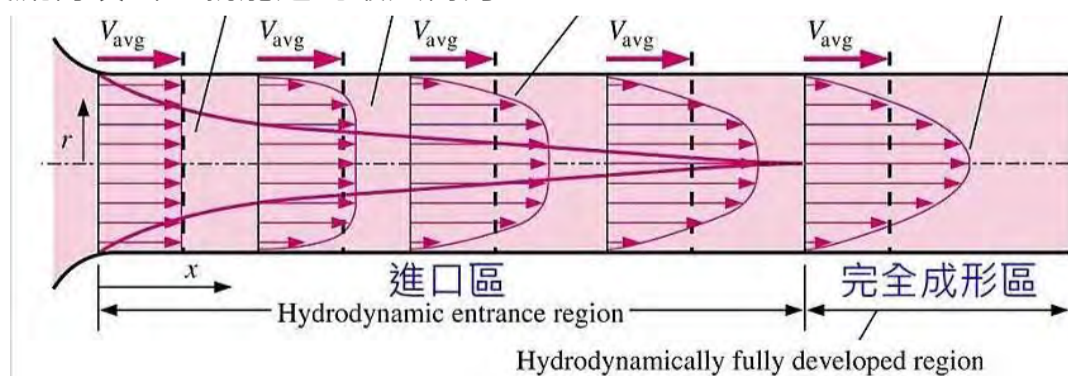
圓形的孔能形成清楚的渦環，效果最好；正方形接近圓形的孔，也能形成渦環，效果也不差。長方形較扁，出口衝力較大，但未形成渦環，一下子就散開，所以跑不遠。橢圓形很有趣，實驗時可以清楚看到變形的煙圈，形成一邊前進一邊變形的渦環。圓孔在正中時，氣流衝力比偏圓大，應該是因為完全發展流形成在管內正中間，所以從中間噴出的衝力較大。



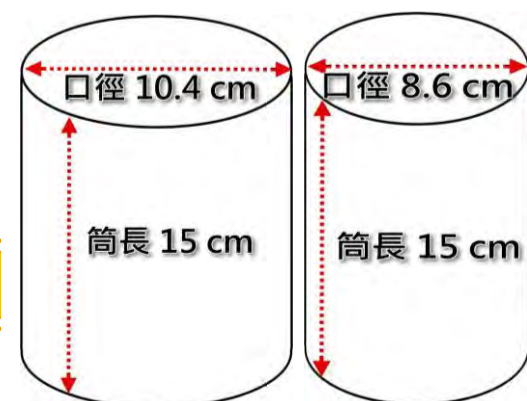
完全發展流 (fully developed flow)

那空氣炮筒內的空氣是怎麼流動的呢？

拉射空氣炮時，是以外力強制驅動筒內的空氣，空氣在筒內流動時，靠近管壁的部分會產生黏滯力，造成邊界層 (boundary layer) 的產生與增厚，邊界層增厚至管路半徑後不再增加，由管路進口到此處的距離稱為『進口區 (entrance region)』，自此以後流體之速度分佈不再改變，此區稱為『完全成形區 (fully-developed region)』。假如空氣炮的最佳筒長能使筒內氣體形成完全發展流再噴出，就能達到最大衝力。



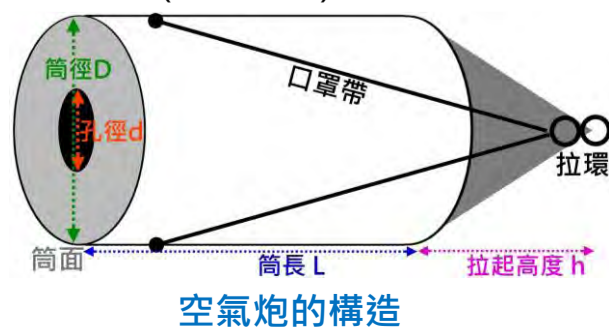
完全發展流的形成：流體在管內流動情形



肆、實驗設置

設計空氣炮筒、方便控制變因

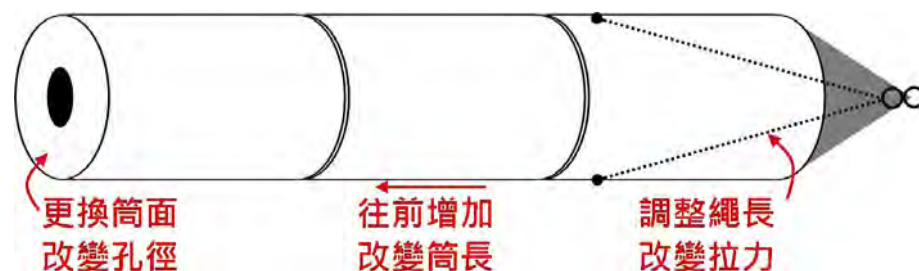
我們以「材質及厚度均勻、無曲線、無紋路」的瓶子做為空氣炮筒，表面貼上一層膠帶，方便實驗時組合、拆解。製作好的空氣炮(如圖下左)，我們定義筒徑為 D 、孔徑為 d 、筒長為 L 、拉起高度為 h (固定為 7 cm)。改變筒長的方式是再繼續往前串聯筒身(如圖下右)，紙筒高度為 15 cm，因此我們每次增加筒長都是 15 cm。



空氣炮的構造

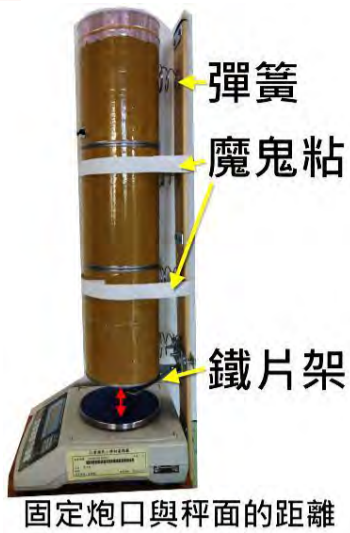


完成的空氣炮



固定空氣炮拉力，再往前增加筒長

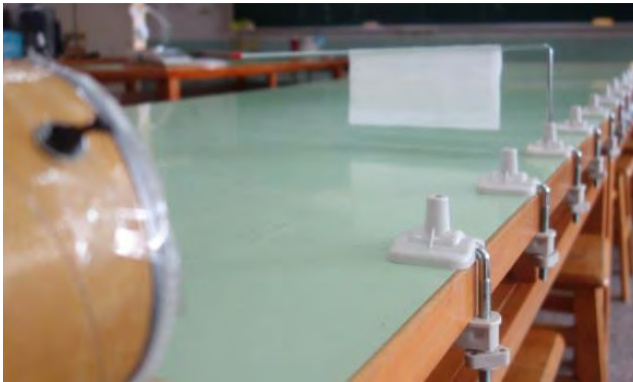
設計測量工具、精確測量結果



固定炮口與秤面的距離



以電子秤測量衝力
精確度可達 0.01 gw



設計測量
渦環飄行距離的工具



固定距離
測量風速

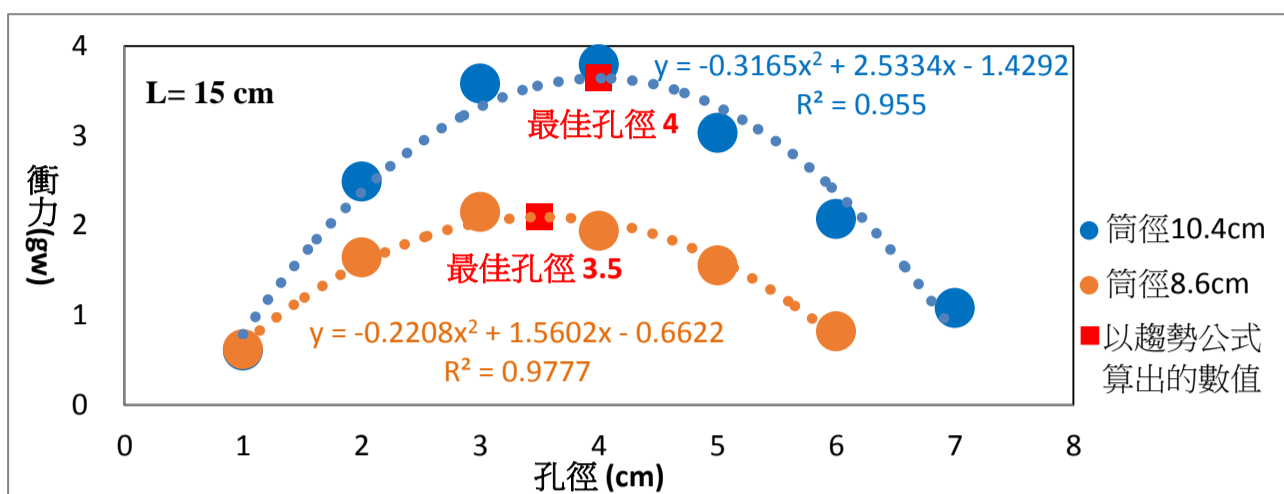


拉力固定
2 kgw

伍、研究結果

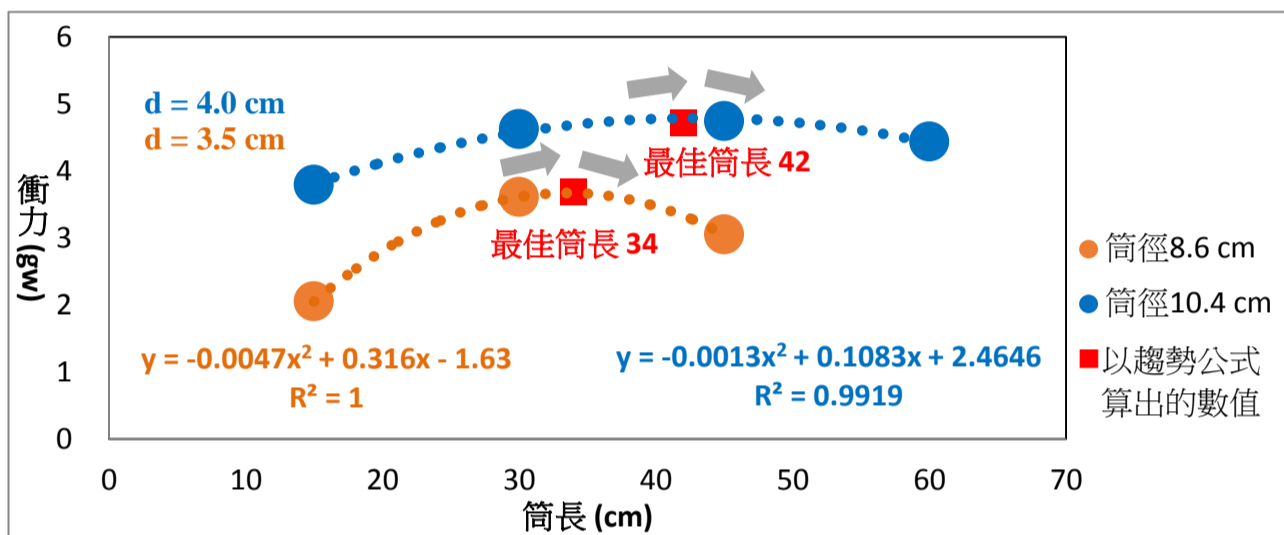
1 「最佳孔徑」會隨筒徑變大

當筒長固定時，最佳孔徑會隨著空氣炮的筒徑變大而變大。依據趨勢公式可推算出，使筒徑 8.6 cm 空氣炮產生最大衝力的最佳孔徑為 3.5 cm，筒徑 10.4 cm 空氣炮的最佳孔徑為 4.0 cm。



2 能形成「完全發展流」的筒長才是「最佳筒長」

當孔徑固定時，最佳筒長會隨著筒徑變大而變長。但筒長增加到一定長度後，空氣炮的衝力反而開始變小，這是因為最佳筒長能讓筒內的氣體成為「完全發展流」噴出炮孔，使衝力變大；但筒身繼續增長，原本的「完全發展流」繼續留在管內流動，這時管壁的黏滯力會減弱氣體流動，使得衝力變小。能使筒內氣體形成完全發展流的筒長，就是最佳筒長。



3 「最佳孔徑」為筒徑的 50%

當筒徑固定時，最佳孔徑會隨著筒長改變；以筒徑 10.4 cm 的空氣炮筒來實驗，可以看到，隨著筒長增加，最佳孔徑也會跟著變大，並且漸漸趨近一個定值，這時的孔徑約為筒徑的 50%，所以「最佳孔徑 d ：筒徑 $D = 1 : 2$ 」。

如果任意拿個桶子來做，筒徑和筒長已固定，可以依照我們的實驗結果，挖出筒徑的 46~51% 做孔徑，也能做出衝力較大的空氣炮。

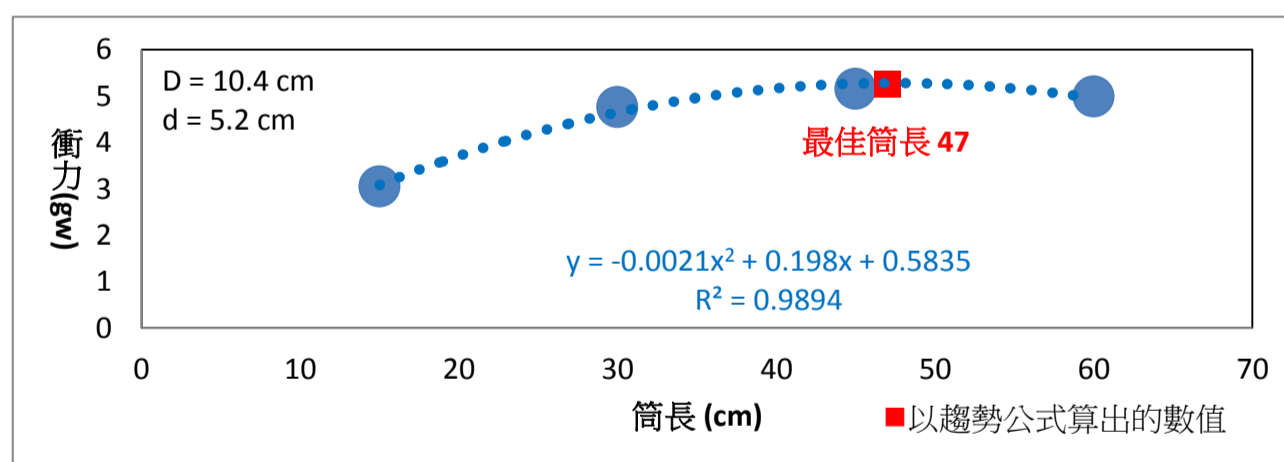
筒徑 10.4 時，在不同筒長下，孔徑對筒徑的比例

筒長(cm)	15	30	45	60	75	90
最佳孔徑(cm)	4.0	4.8	5.1	5.2	5.3	5.3
最佳孔徑 ÷ 筒徑 10.4	38.5%	46.1%	49.0%	50.0%	51.0%	51.0%

4 「真正的最佳筒長」是筒徑的 4.5 倍

接著，我們以筒徑 10.4 cm 的 50% = 5.2 cm 做最佳孔徑，找出筒徑 10.4 cm 的真正最佳筒長 L 為 47 cm，於是發現這樣的比例，「筒徑 D ：最佳筒長 $L = 1 : 4.5 = 2 : 9$ 」。

綜合前面的實驗結果，我們可以確定，固定拉力 2 kgw 時，製作空氣炮的最佳比例為：「孔徑 d ：筒徑 D ：筒長 $L = 1 : 2 : 9$ 」

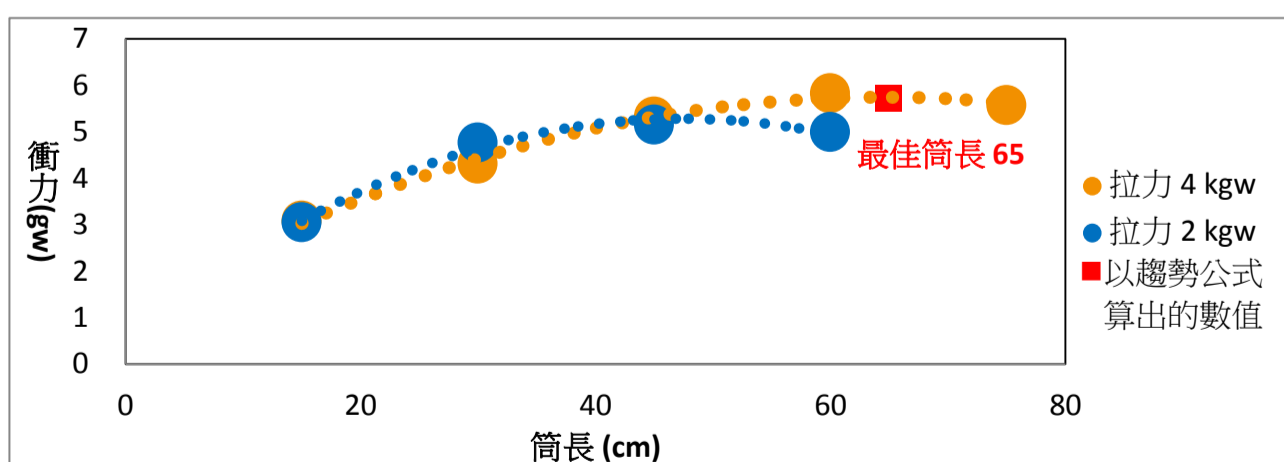


5 「拉力」增大，會使最佳筒長變長

推動筒內空氣的拉力增加，會使形成完全發展流的進口區變長，所以最佳筒長也從 47 cm 變長為 65 cm，是筒徑的 6.25 倍。



同容量空氣炮，長形的威力較大



6 容量相同時，「筒形較長」的衝力較大

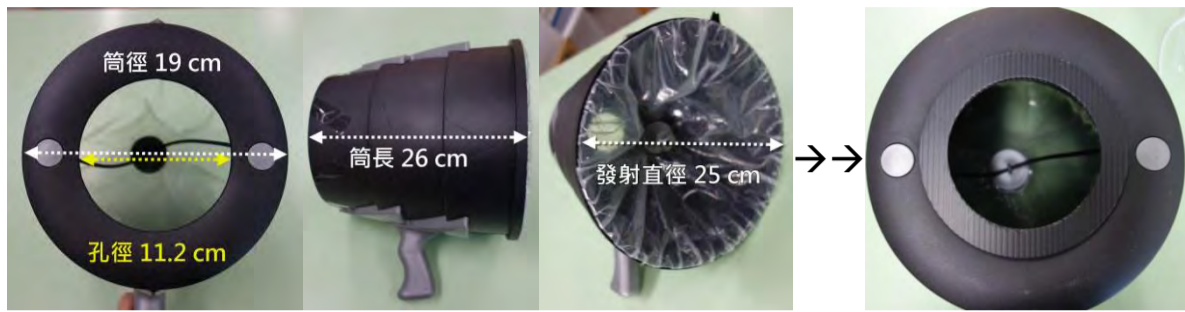
容量相同下，筒長較長的空氣炮衝力較大，我們認為是因為筒身長度足夠讓筒內空氣達到完全發展流，所以長空氣炮比短空氣炮的衝力大。

7 製作最佳空氣炮

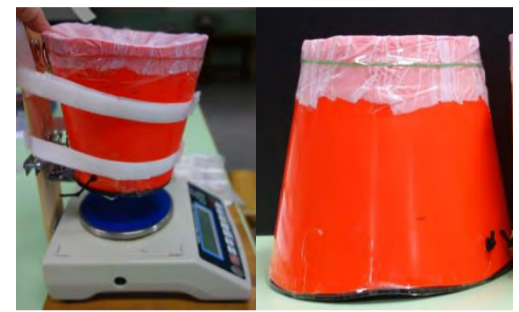
改良 孔徑 AirZooka → 縮小孔徑為筒徑的 50% → 威力增強 20%

把 AirZooka 空氣砲的孔徑變小為 50%，衝力變大、風速變快、飄行距離更遠，證明「最佳孔徑比例」是真的能做出衝力更大的空氣砲。實驗也發現，由筒徑大→筒徑小拉射時衝力比較大，這樣的方向能增加空氣砲的威力。

孔徑	氣流衝力平均(gw)	風速(m/s)			飄行距離(cm)
		出口 3 cm	出口 30 cm	速度變化	
11.2 cm	14.92	3.6	2.8	-0.8	460
9.5 cm	18.06 增加 20%	3.9	3.1	-0.8	475



把 AirZooka 空氣砲的孔徑變小後，威力變強



左邊由大→小，右邊由小→大

改造 比例 AirZooka → 最佳比例 → 威力倍增

用空氣砲最佳比例「 $d : D : L = 1 : 2 : 9$ 」，成功做出比 AirZooka 威力還強的最佳比例空氣砲，證明最佳比例的確可行。就算把最佳比例空氣砲的拉力變小為 2 kgw，衝力增加到 18.45 gw，比 AirZooka 強 23%。



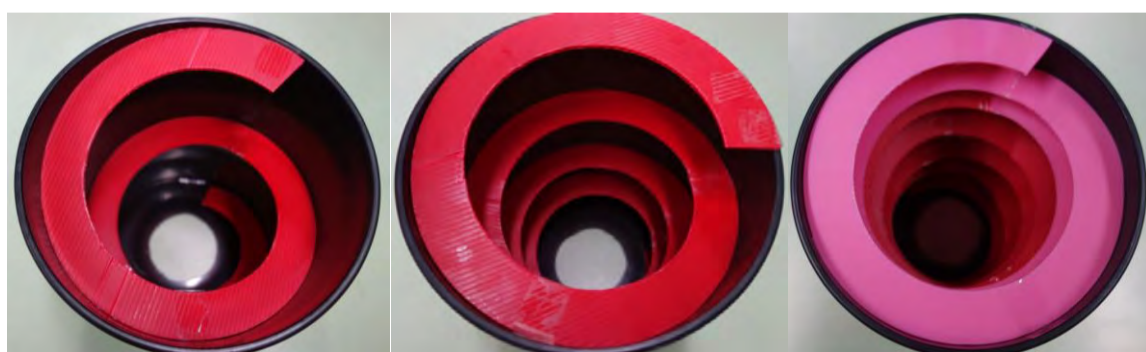
AirZooka 和 筒徑相同的最佳比例空氣砲 →

空氣砲種類	氣流衝力平均(gw)	風速(m/s)			飄行距離(cm)
		出口 3 cm	出口 30 cm	速度變化	
AirZooka (6 kgw 拉力)	14.92	3.6	2.8	-0.8	460
最佳比例 (6 kgw 拉力)	23.11 幾乎多一倍	4.5	3.9	-0.6	505
最佳比例 (2 kgw 拉力)	18.45	3.8	3.1	-0.7	470

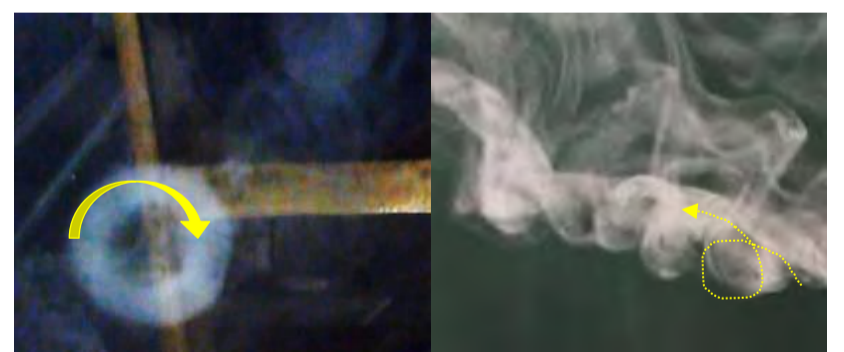
改造 筒內 最佳比例 → 加上螺旋 → 射程更遠

現代槍管內壁有螺旋狀分布的膛線，可使子彈在發射時沿著膛線旋轉，增加彈道穩定性及有效射程；我們仿效它在筒內加上螺旋，除了威力變大之外，出口 30 cm 風速的差距明顯變小，能更穩定更快的直射到更遠的距離。

空氣砲種類	氣流衝力平均(gw)	風速(m/s)			飄行距離(cm)
		出口 3 cm	出口 30 cm	速度變化	
最佳比例 (2 kgw 拉力)	18.45	3.8	3.1	-0.7	470
最佳比例 (2 kgw 拉力)+ 3 cm 螺旋 2 圈	21.52 增加 17 %	3.8	3.5	-0.3	1440 3.1 倍
最佳比例 (2 kgw 拉力)+ 3 cm 螺旋 4 圈	23.31 增加 26 %	3.9	3.7	-0.2	1650 3.5 倍
最佳比例 (2 kgw 拉力)+ 3 cm 螺旋 6 圈	23.80 增加 29 %	3.9	3.7	-0.2	1770 3.8 倍



筒內加上螺旋，衝力更大，可穩定直射到更遠的地方



渦環會一邊旋轉，一邊前進

陸、結論

- 一、拉射空氣砲，筒內的空氣前進時，會逐漸形成完全發展流，當筒內氣體形成完全發展流再噴出，空氣砲的衝力最大；若筒長太長，會因為筒壁的黏滯力而使衝力變小；當空氣流出炮孔，因為中間流速快，會形成向外翻轉的甜甜圈狀渦環。
- 二、孔徑、筒徑、筒長、孔形、拉力都會影響空氣砲的衝力；孔形越接近圓形，越能形成清楚的渦環，使空氣砲的衝力變大；拉力增加時，因為形成完全發展流所需的進口區變長，最佳筒長也會變長。
- 三、在拉力 2 kgw 時，製作空氣砲的最佳比例為：「孔徑 d ：筒徑 D ：筒長 $L = 1 : 2 : 9$ 」
- 四、任意拿個桶子來做空氣砲，以筒徑的 46~51% 做孔徑，就能做出衝力較大的空氣砲。
- 五、在筒內加上螺旋，可使空氣砲的威力增加 29%，並穩定快速的直射到 3.8 倍的距離。

柒、未來展望

我們在最佳比例空氣砲筒內加上螺旋後，使威力增加。這表示影響空氣砲的因素還很多；未來我們想嘗試在炮筒內加上不同紋路(圖 A)、或是以筒身有紋路的來做空氣砲筒(圖 B)，看看是否能找出更多增加「拉射式空氣砲」衝力的方法。



A 螺旋紋路

B 有紋路的瓶子