

中華民國第 63 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高中組 物理與天文學科

第三名

051810

聲聲不熄--熱聲效應之探討

學校名稱：國立彰化女子高級中學

作者： 高二 陳諭儀 高二 楊采文 高二 周宸葳	指導老師： 張國志
---	------------------

關鍵詞：熱聲 thermoacoustic、引擎

摘要

本實驗以試管、鋼絲絨、酒精燈為主體，將鋼絲絨放入試管做為發聲裝置，並以酒精燈加熱試管，使鋼絲絨兩端產生溫差，而後產生音波，利用音訊分析軟體進行錄音、分析，搭配溫度感測器記錄、分析溫度，藉以探討此裝置發聲的成因以及相關參數對其聲音的影響。

本研究分析了裝置發聲之過程，並製作五種變因，分別為鋼絲絨密度、試管口徑、試管長度、鋼絲絨位置以及試管與火焰距離，並統整出四點通則 1.溫差與分貝有直接關聯 2.發聲與熱穿透深度、堆棧位置和空氣黏性有關 3.綜合熱穿透深度以及空氣黏性，發聲效果較佳者，會有上升速率快下降速率慢的特性 4.堆棧所在位置之空氣塊移動及壓縮性，影響其音量、發聲時間與上升下降速率。

研究動機

一次偶然在網路上看到一個與此實驗相關的影片，影片中只使用少少三種器材就能發出頗大聲的聲音，而對此實驗感到好奇，又因過去曾學習音樂，對聲音的敏感度較高，引起了我們做此實驗的興趣。

此裝置涉及與黎開管相似的發聲原理，而在網路上與黎開管相關實驗資料不多，與本實驗相關的又更少，因此我們決定以此裝置所發出的聲音為主要研究對象，找出此裝置發聲的特性與原理。

壹、 研究目的

- 一、探討聲音發聲與消失的過程
- 二、探討鋼絲絨密度對發聲的影響
- 三、探討試管口徑對發聲的影響
- 四、探討試管長度對發聲的影響
- 五、探討鋼絲絨位置對發聲的影響
- 六、探討火焰與試管距離對發聲的影響
- 七、分析不同角度所測得之聲音
- 八、觀察試管內空氣流動情形

貳、 研究設備及器材

一、實驗器材

			
溫度感測器*2	數據擷取機*3	試管架+試管夾	各規格試管
			
指向性麥克風	矽利康	熱像儀	酒精燈
			
鋼絲絨	裝水燒杯	沾水試鏡紙*2	聲音感測器*2
			
電子秤	音訊分析軟體		數據擷取程式

表 1：實驗器材表

二、實驗裝置

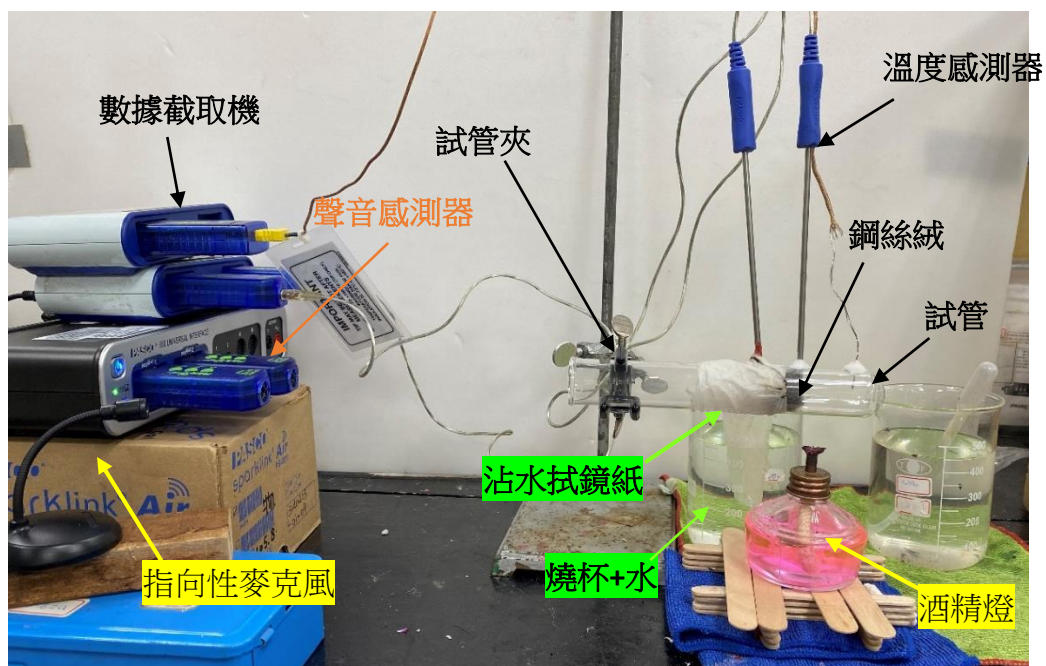


圖 1：溫度、分貝及頻率實驗配置圖

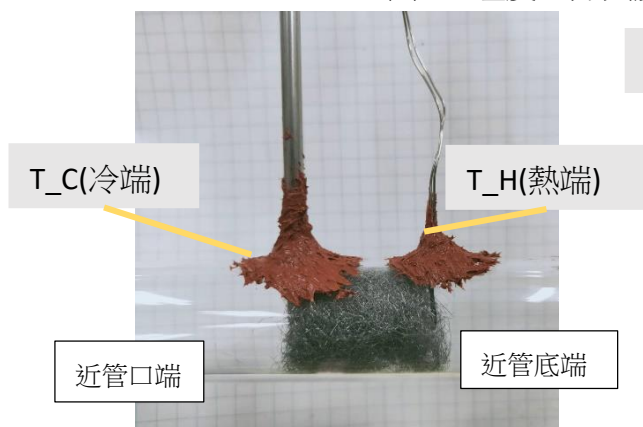


圖 2：插入溫度感應器處放大圖



圖 3：冷卻裝置放大圖

三、試管尺寸

代號	直徑(內徑)(cm)	管長(cm)
XL	2.8	20
M	2.2	20
XM	1.8	20
XS	1.8	15
40 公分試管	1.8	40

表 2：試管代號及尺寸對照表

註：代號+數字代表鋼絲絨密度為(數字)的(代號)試管，例如：XL4 代表鋼絲絨密度為 4，試管口徑為 2.8cm、長度為 20cm。

四、鋼絲絨密度對照表及鋼絲絨捲法

(一)鋼絲絨密度對照表

真實密度計算方法為： $\frac{\text{鋼絲絨質量}}{A \cdot \pi (1/8 \text{ 管長})}$ 其中 A 為截面積，計算方法為 $\left(\frac{\text{試管內徑}}{2}\right)^2$

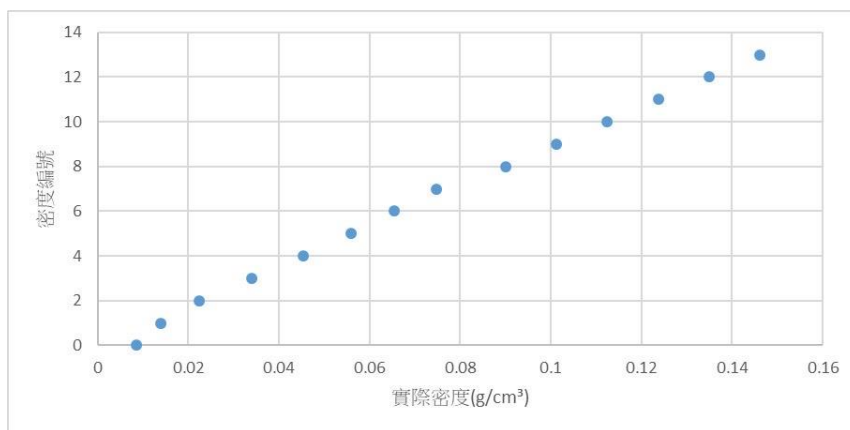


圖 4: 鋼絲絨密度對照圖

為方便記錄，我們將密度 0.0223 g/cm^3 編號為密度 2、密度 0.0339 g/cm^3 編號為密度 3，並以此類推。在距離火焰高度、鋼絲絨位置實驗中，鋼絲絨密度計算方法為

$\frac{\text{鋼絲絨質量}}{A \cdot \pi \cdot 2.5}$ (此兩實驗皆固定鋼絲絨長度為 2.5 公分)。

(二)鋼絲絨捲法

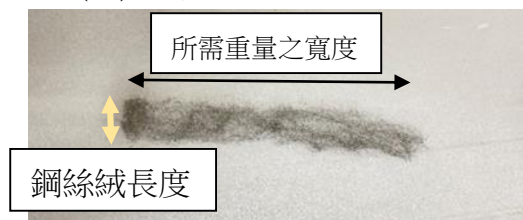


圖 5



圖 6

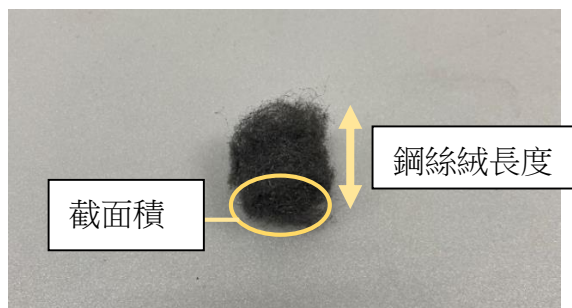


圖 7

剪出一條所需長度的鋼絲絨(圖 5)，寬度用來控制所需的重量，再將鋼絲絨沿寬邊捲起(圖 6)，圖 7 為捲好之成品。如此一來鋼絲絨長度得以固定、放入試管後截面積也得以固定(由試管內徑決定)，透過改變重量便能定量改變密度。

肆、 研究方法

一、測量溫度、分貝、頻率之實驗

(一)實驗步驟

1. 使用電鑽在試管目標位置鑽洞。
2. 將鋼絲絨放入試管內目標位置，並將試管固定於試管夾上，與酒精燈位置相距 2.5 公分(酒精燈蕊 0.6 公分)。
3. 分別將溫度感測器放入試管洞口內，使用矽利康將感測器固定。

4. 將溫度、聲音感應器接上數據擷取機後連接至電腦。

5. 調整酒精燈的位置，使其燈芯中心對齊鋼絲絨底端(不燒到鋼絲絨)。

6. 在對齊鋼絲絨中間處纏上一張折半並沾水的拭鏡紙後，再取一張折半並沾水的拭鏡紙，一端連接纏繞試管之拭鏡紙，一端放入裝水燒杯中(如圖 8)。



7. 將聲音感測器對準試管管口，距離管口 20

公分；指向性麥克風放在距試管口 25 公分、與平行試管夾角約 16° 處。

8. 點燃酒精燈，並利用音訊分析軟體 Audacity、配合數據擷取程式 SPARKvue、熱像儀，紀錄聲音頻譜、試管內外溫度及聲音分貝變化。

(二)操縱變因

1. 鋼絲絨密度：固定試管口徑及長度，分別使用密度 1~9 的鋼絲絨。

2. 試管口徑：固定鋼絲絨密度與試管長度，分別使用口徑 1.8、2.4、3 公分的試管。

3. 試管長度：固定試管口徑、固定鋼絲絨密度，分別使用 15、20、40 公分的試管。

二、鋼絲絨位置實驗

(一)實驗步驟

1. 將鋼絲絨放入試管內目標位置，並將試管固定於試管夾上，與酒精燈相距 2 公分。

2. 將聲音感測器接上數據擷取機後連接至電腦。

3. 調整酒精燈的位置，使其燈芯中心對齊鋼絲絨底端(不燒到鋼絲絨)。

4. 在對齊鋼絲絨中間處纏上一張折半並沾水的拭鏡紙後，再取一張折半並沾水的拭鏡紙，一端連接纏繞試管之拭鏡紙，一端放入裝水燒杯中。

5. 指向性麥克風放在距試管口 25 公分並與試管平行。

6. 點燃酒精燈，並利用音訊分析軟體 Audacity、熱像儀，紀錄聲音頻譜、試管外溫度及聲音分貝變化。

(二)操縱變因

1. 鋼絲絨位置：固定鋼絲絨密度、試管口徑及長度，將鋼絲絨放於距管口 13~35 公分處。

三、距離火焰高度實驗

(一)實驗步驟

1. 使用電鑽將距試管目標位置鑽洞。

2. 將鋼絲絨放入試管目標位置，並將試管固定於試管夾上，與酒精燈相距特定距離。

3. 分別將溫度感測器放入試管洞口內，使用矽利康將感測器固定於試管。

4. 將溫度、聲音感測器接上數據擷取機後連接至電腦。

5. 調整酒精燈的位置，使其燈芯中心對齊鋼絲絨底端(不燒到鋼絲絨)。

6. 在對齊鋼絲絨中間處纏上一張折半並沾水的拭鏡紙後，再取一張折半並沾水的拭鏡紙，一端連接纏繞試管之拭鏡紙，一端放入裝水燒杯中。

7. 將聲音感測器對準試管管口，距離管口 20 公分；指向性麥克風放在距試管口 25 公分、與平行試管夾角約 16° 處。

8. 點燃酒精燈，並利用音訊分析軟體 Audacity、配合數據擷取程式 SPARKvue、熱像

儀，紀錄聲音頻譜、試管內外溫度及聲音分貝變化。

(二)操作變因

1. 試管與酒精燈芯位置距離：固定試管長度口徑以及鋼絲絨密度，分別將試管架於距離酒精燈芯位置 1.25、2.5、5 公分。

伍、理論探討

一、熱聲(thermoacoustic)

(一) 發聲原理

熱聲裝置內空氣吸能震盪發聲，近似史特林引擎工作原理。放置堆棧使細管一端高溫一端低溫，使其可即時加熱以及冷卻管內空氣後，空氣在細管內振盪並形成駐波。史特林引擎自高溫處吸熱、低溫處放熱並做功。而熱聲裝置因熱無法完全轉變為功(聲能)(如右圖 9)，效率必小於 1，由熱力學第二定律得知任何熱機效率皆小於卡諾熱機。

(二)史特林引擎

根據文獻解釋，史特林引擎是一種外燃引擎，利用氣體吸收熱源能量，使氣體熱漲冷縮做功(使活塞運動)，然後接觸冷源，使氣體壓縮、活塞復位，工作流體(空氣)重複此循環過程。

熱聲引擎與史特林引擎相似處在於，兩者都是以熱、冷兩區塊，以加熱、冷卻來使流體重複運動。

(三)熱穿透深度及熱擴散係數：

1. 熱穿透深度為聲波振盪在 π 分之一個周期的時間內熱量能夠擴散之距離。本熱聲裝置之熱端空氣主要被鋼絲絨(堆棧)加熱，而在鋼絲絨熱穿透深度內之空氣才來的及被加熱，且又不至於因為空氣之黏度而消耗太多震動能量。熱穿透深度公式為：

$$\delta_R = \sqrt{\frac{K}{\pi f \rho C_p}}, \quad K = \text{空氣熱傳導係數}; C_p = \text{空氣等壓比熱}; \rho = \text{氣體的密度(在室溫 } 20^\circ\text{C)}$$

時，空氣之 $K=0.02587\text{W/m-K}$ 、 $C_p=315\text{ cal/Nm}^3$ 、 $\rho=1.204\text{ kg/m}^3$ ；空氣在 $20^\circ\text{C} \sim 300^\circ\text{C}$ 之 $K=0.02587 \sim 0.04441\text{ W/m-K}$ 、 $C_p = 315 \sim 320\text{ cal/Nm}^3$ 。

2. 溫度不均勻物體之溫度均勻速度可由熱擴散係數表示。公式為： $\alpha = \lambda / \rho c$ ， α =熱擴散係數； λ =熱導係數； ρ =密度； c =熱容。

(四)卡諾效率：由熱力學第一定律 $Q_h = Q_l + W$ 。(W=聲音能量)，從高溫源提取熱量轉化為功，卡諾熱機的效率是

$$\frac{T_H - T_C}{T_H}。T_H \text{ 可取鋼絲絨熱端之溫度。}$$

(五)堆棧在不同位置聲音穩定時分貝與單位體積的膨脹量

$$\frac{\Delta V(x,t)}{V} = -k_2 R \cos(kx) \cos \omega t \text{ 與空氣移動性有關，} x \text{ 為空氣}$$

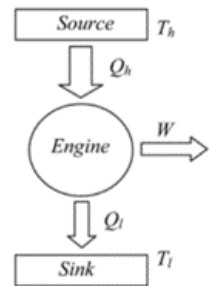


圖 9

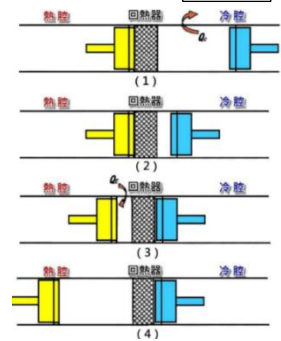


圖 10

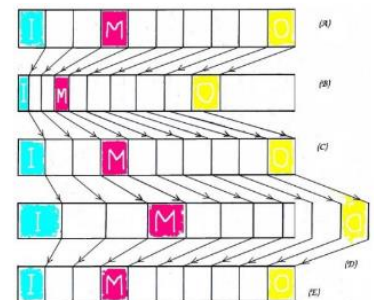


圖 11(圖源:周鑑恆教授之論文)

塊位置。圖 12 中， $y_m = |2R\sin kx|$ 、 $(\frac{\Delta v}{v})_m = |2RK\cos kx|$ ， $\lambda = \frac{4L}{1}$ 。將上兩式繪製成右

圖 12 可以發現，綜合考量空氣移動及壓縮性，將鋼絲絨放置於距試管管底約 1/4 處時，對試管發聲會有較佳的作用。

二、熱傳播學

熱量的傳遞通常是從高溫物體到低溫物體。根據熱力學第一定律，傳熱會改變所涉及的兩個系統之內能。

(一)熱傳導：因分子的震動和轉動造成能量的運輸，是經由靜止流體或固體的熱傳遞。對於兩個平面之間的熱傳遞，熱傳導速率公式為：

$$\frac{Q}{t} = \frac{\kappa A(T_{hot} - T_{cold})}{d}$$

(公式中 κ 為熱傳導係數(W/m.k)， Q

為熱量(W)， d 為熱傳導距離(m)， A_c 為熱傳經過物件之截面面積(m²)， ΔT 為冷熱端溫度差)

(二) 熱對流：對流是通過流體(例如空氣或水)的質量運動進行的熱傳遞，同時攜帶能量。熱對流速率公式：

$$dQ/dt = h A(T_H - T_L) \frac{dQ}{dt} = h A * (T_H - T_L)$$

(Q ：熱能， t ：時間， h ：熱對流係數 A ：截面積， $T_H - T_L$ ：溫差)

(三)熱輻射：溫度高於絕對零的物體發出的電磁輻射。

輻射功率： $M = \epsilon \sigma T^4$ (輻射發射率： M ，物體的輻射係數： ϵ ，斯特凡-波茲曼常數： $\sigma = 5.67 \times 10^{-11} \text{ kW/m}^2 \text{ K}^4$ ，物體的絕對溫度： T ，截面積： A)

三、駐波

當兩個振幅、波長、頻率皆相同的波往相反的方向行進，兩波動相遇互相干涉後就產生駐波(如閉管內入射波以及反射波的干涉)。

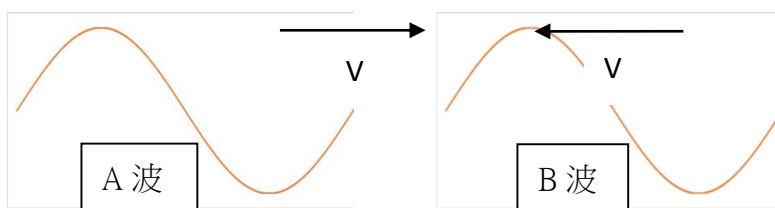


圖 15(左)、圖 16(右)：為駐波形成示意圖

A 波向右前進 $y_1 = R\sin(kx - \omega t)$

B 波向左前進 $y_2 = R\sin(kx + \omega t)$

兩波在 $kx = n\pi$ (n 為整數) 即 $x = \frac{n\lambda}{2}$ 之處，任何時刻 t 之位移皆為 0，兩波形成駐波後，

這些位移為 0 處為節點。

兩波相遇重疊：

$$y = y_1 + y_2 = R\sin(kx - \omega t) + R\sin(kx + \omega t) = 2R\sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right)\cos(\omega t)$$

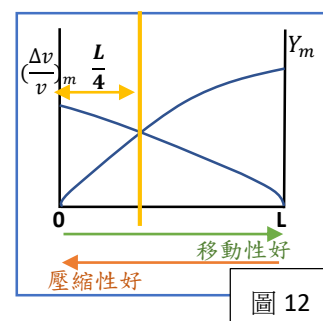


圖 12



圖 13

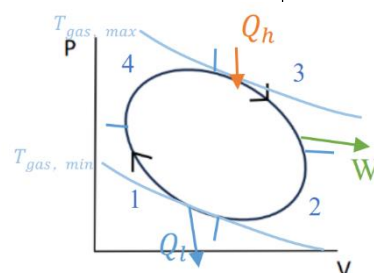


圖 14: 參考 swift 之論文

註： y_1, y_2, y 為行進波上質點之位移， $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 為波數， $\omega = \frac{2\pi}{T}$ 為角頻率，波速 $v = \frac{\omega}{k}$ 。

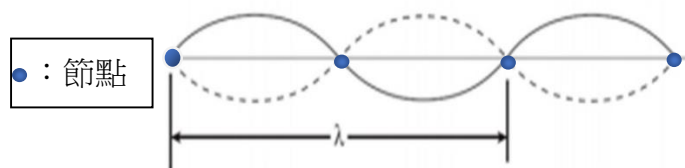


圖 17：A 波、B 波相遇重疊後示意圖

A 波、B 波相遇重疊後，形成看似在原地上下振動的波(若虛線波為恰經 $\frac{1}{2}$ 週期時之波形，則實線為恰經 1 週期時的波形)。

(一) 開管、閉管駐波

1. 開管駐波：兩端為開口端，駐波頻率 $f = \left(\frac{nv}{2\ell}\right)$ (n ：波腹數量 v ：波速 ℓ ：管長)。此實驗裝置無法符合兩端皆為開口或皆為閉口之條件。
2. 閉管駐波：一端為開口端(固定端)，一端為閉口端(自由端)，駐波頻率 $f = \left(\frac{nv}{4\ell}\right)$ ， n =奇數。根據試管形狀推斷，此實驗裝置應為閉管駐波，因此，將試管口做為開口端，試管底部作為自由端，可利用公式推斷出試管內空氣振動之基音頻率及波腹、波節數。

由駐波公式推斷出，頻率正比於波腹數量、波速，反比於管長。若駐波頻率為基頻之 n 倍，則開管駐波(兩端為開口端)之 n 可為數列 1、2、3、4……，而閉管(一端為開口端，一端為自由端)駐波之 n 僅可為數列 1、3、5、7……。

(二) 管口修正量

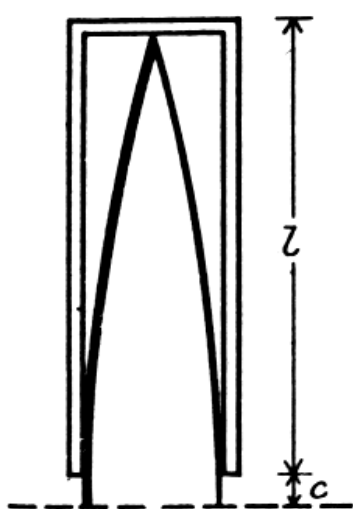


圖 18：閉管等效管長示意圖

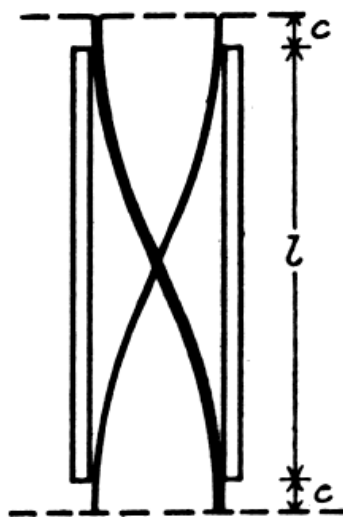


圖 19：開管等效管長示意圖

圖源:第 58 屆科展多多笛的發聲原理及各種因素對頻率之探討

管內的空氣柱形成駐波時，由於管內空氣柱之慣性，使反射波不在開口形成反射，也就是通常管口不會是駐波的波腹處，而是在管口外一小段距離 c 處，而此段距離稱之為管口修

正量，延長之後的點為管內聲能真正向周圍空間傳播的聲源，且原本的管長加上管口修正量稱為等效管長。

閉管的情況下等效管長為 $L+c$ ，在開管的情況下等效管長為 $L+2c$ 。一般採用管口修正量 $c=0.4r$ (r 為內管半徑)。但是修正量與波長有關，當波長越小，修正量也越小。

$$\text{開管駐波管口修正量公式：}\lambda = 4(L + c) \rightarrow f = \frac{nv}{2(L+0.8r)}$$

$$\text{閉管駐波管口修正量公式：}\lambda = 2(L + 2c) \rightarrow f = \frac{nv}{4(L+0.4r)}$$

(L 為原始管長， v 為當時聲速，基頻時 $n=1$)。

(三)其餘修正

細管在管長與口徑比值適中的情況下，可由開、閉管駐波簡單算出頻率，但當管子太粗時，除了軸向形成駐波外，沿管徑方向亦會形成駐波，此時管徑越大將造成頻率越低；管子太細時，管中振動的空氣會與管壁摩擦產生熱能而消耗動能，也將影響振動情形。

四、聲波速度與溫度關係

聲音的速率正比於「介質彈性係數」與「介質密度」比值的平方根，常受到周遭環境條件改變的影響。所以聲音在空氣中傳遞的速率便與溫度有關，公式為 $v = (331 + 0.6t) \text{ m/s}(t=^{\circ}\text{C})$ 。

五、熱量

熱量為由溫度差所轉換之能量，計算公式為 $Q = S \times m \times \Delta t$ (Q 為熱量(J)， S 為比熱 ($\text{J/K} \cdot \text{g}$)， Δt 為溫度差(K))。

六、多孔性介質

本實驗裝置中使用到的鋼絲絨屬於多孔性介質，是由許多骨架形成大量微小縫隙的物質。

陸、研究結果

一、聲音發聲與消失的過程

在各項實驗中，不論變因為何，聲音分貝上升、下降時以及發出聲音之頻率皆有一定的特性，以下分點論述。

(一)加熱發聲

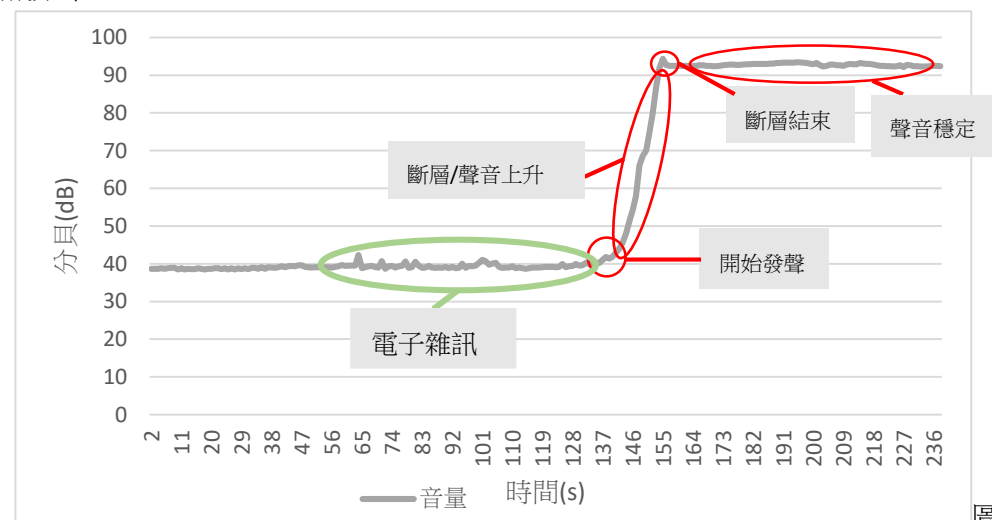


圖 20

上圖 20 為試管開始加熱，並發出聲音的過程，我們將此过程分別定義為開始發聲、聲音分貝上升、斷層結束、聲音穩定，如上圖。

聲音分貝上升時間就是斷層持續時間，將它定義為斷層結束時刻減去開始發聲時刻。我們發現試管開始發聲之初分貝會快速上升，在圖形上的呈現與斷層相似。

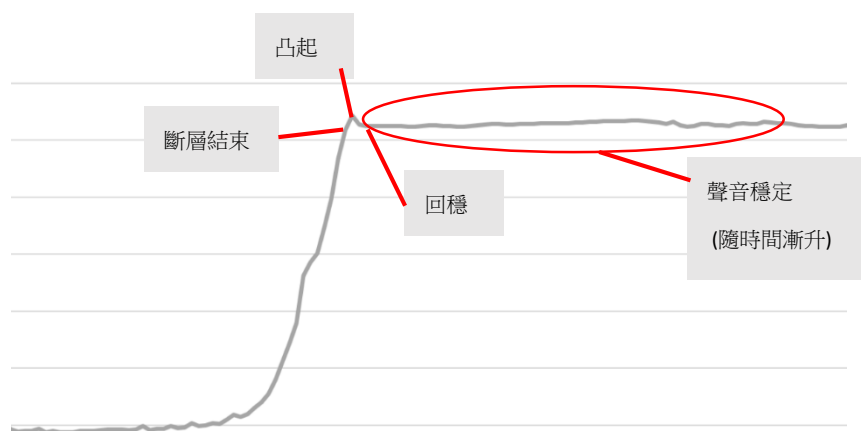


圖 21

如上圖 21，我們將斷層結束部分放大檢視，可以發現在斷層結束後，會有一段時間，聲音分貝經歷凸起與回穩，後隨著時間作穩定變化。我們將斷層剛結束時分貝最高的部分定義為凸起，之後聲音下降到較低的部分定義為回穩。這段不穩定的時間並非在所有條件下都會出現，且出現的時間、長度、凸起的程度也不一定。

(二)移開火源，聲音消失

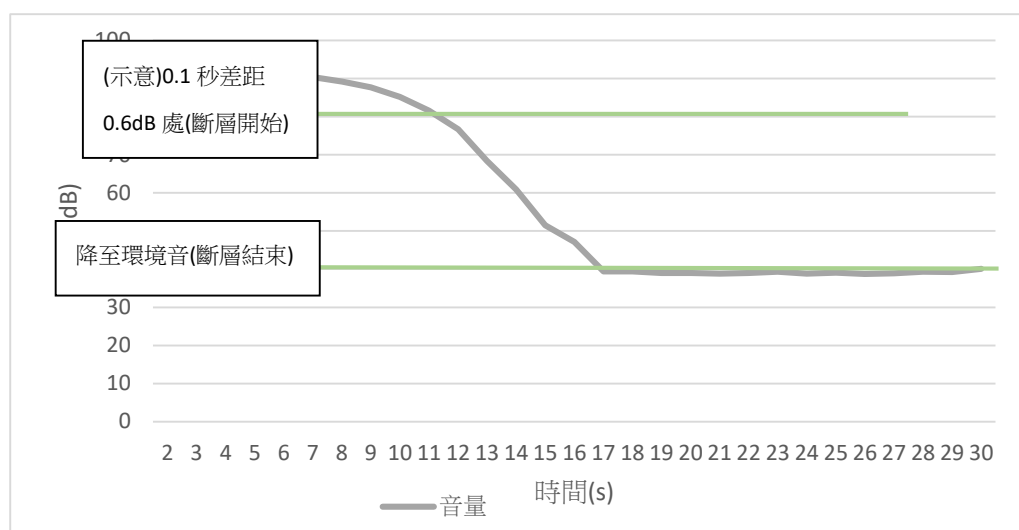


圖 22：下降分

貝圖

上圖是將酒精燈移開停止加熱後的聲音分貝變化，我們將聲音逐漸下降的過程，分別定義成聲音分貝下降之斷層開始、聲音結束、聲音分貝下降斷層持續時間。可以看到聲音下降程度會隨時間變大，在圖上產生類似斷層之樣貌，因此我們將分貝相差 6dB/s 時，定義為斷層開始，降至環境音定義為聲音結束，斷層持續時長則是聲音結束時間減去斷層開始時間。

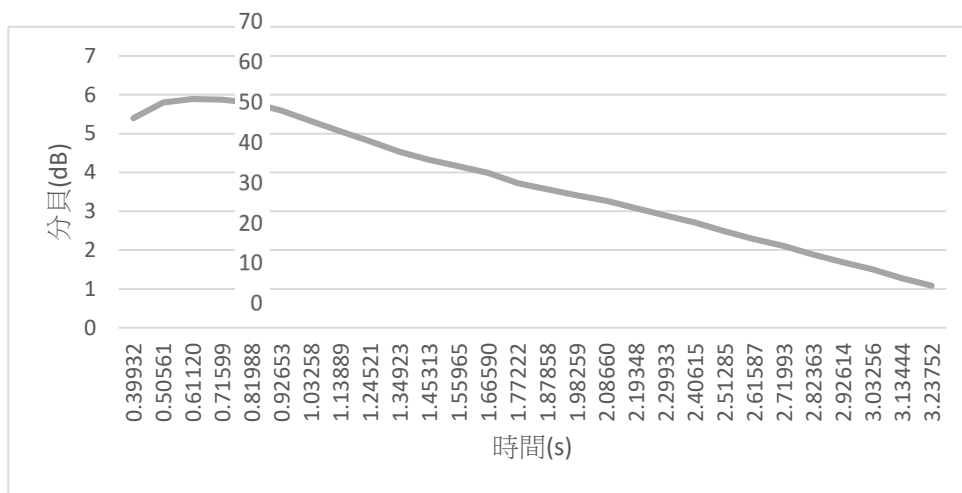


圖 23：下降分貝圖(2)

上圖為停止加熱後一小段時間之分貝變化，我們發現在某些條件下，即使不再加熱，聲音仍會持續上升一段時間，再下降。

(三)頻率分析

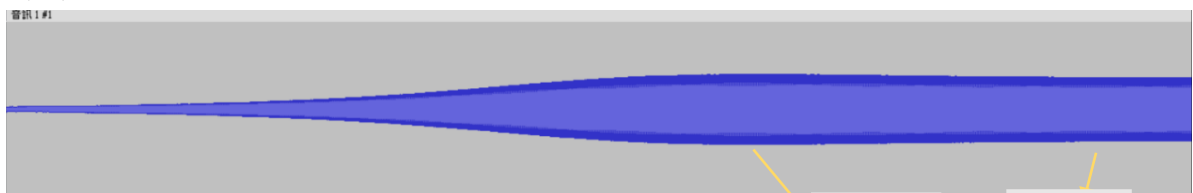


圖 24

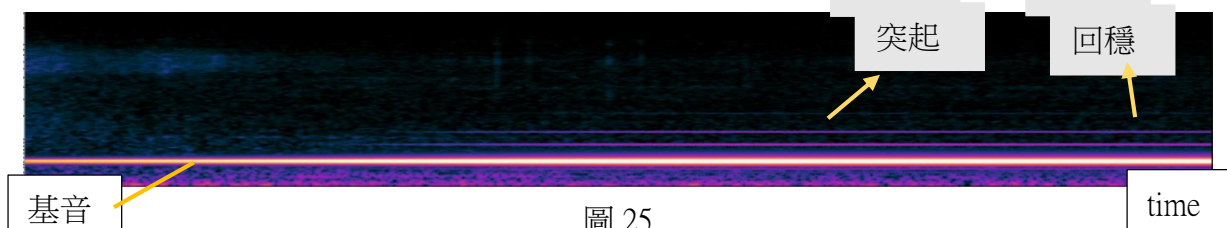


圖 25

上兩圖為同一時間段之波形圖與時頻圖，將兩圖上下對比可發現，發聲一開始基頻先出現，約在接近凸起處出現第一泛音與第二泛音，但第二泛音顏色較第一泛音淡，代表其相對能量較小，而第三、五泛音則在其後接續出現(配合圖 25)。時頻圖上凸起和回穩與其他時刻並無太大差距，但能看出第五泛音在凸起時分貝變大、回穩時變小。

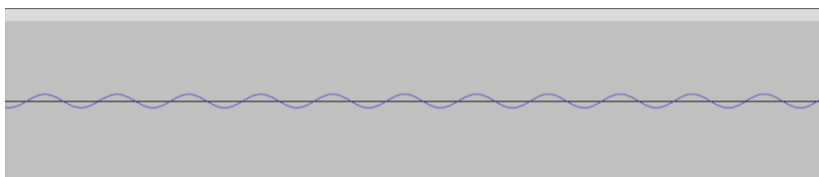


圖 26：波形圖(將波段放大)

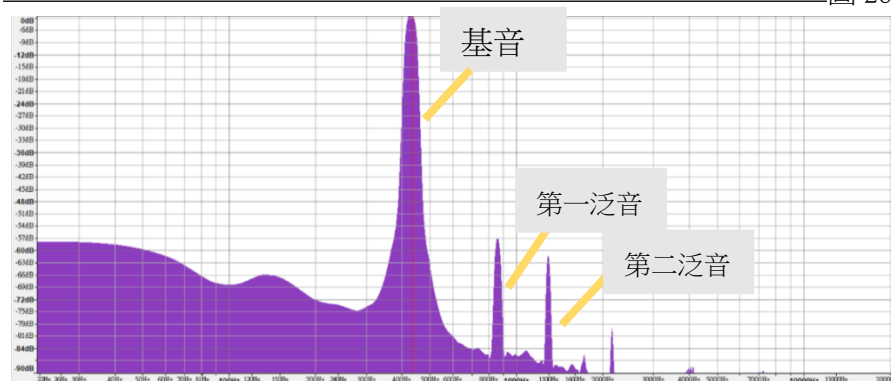
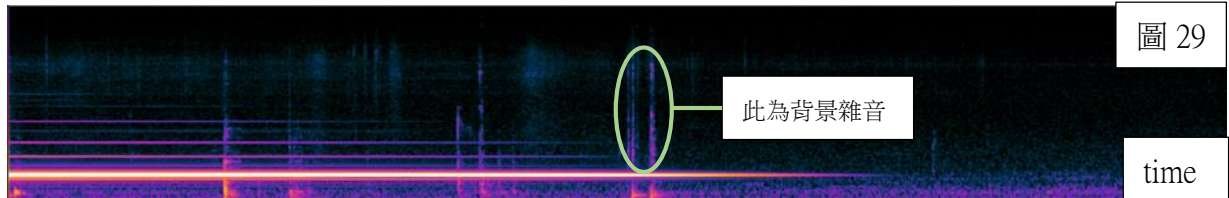
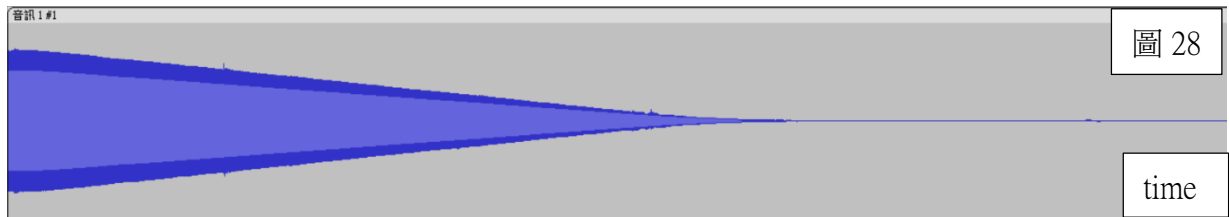


圖 27：頻譜分析圖

根據圖 26、27 還可發現，由於基音與泛音之分貝差距大(圖 27)，導致雖然有泛音的存在，波形卻近似基音的單頻波(圖 26)。



兩圖(28、29)為同一時段之波形圖與時頻圖，可以看到基頻慢慢消失，其他泛音皆逐漸消失，而頻率較高的泛音較快消失。

二、鋼絲絨密度對發聲的影響(試管口徑 2.2cm、長度 20cm、鋼絲絨置於距試管管底 1/3 處)

(一)不同鋼絲絨密度聲音上升之結果

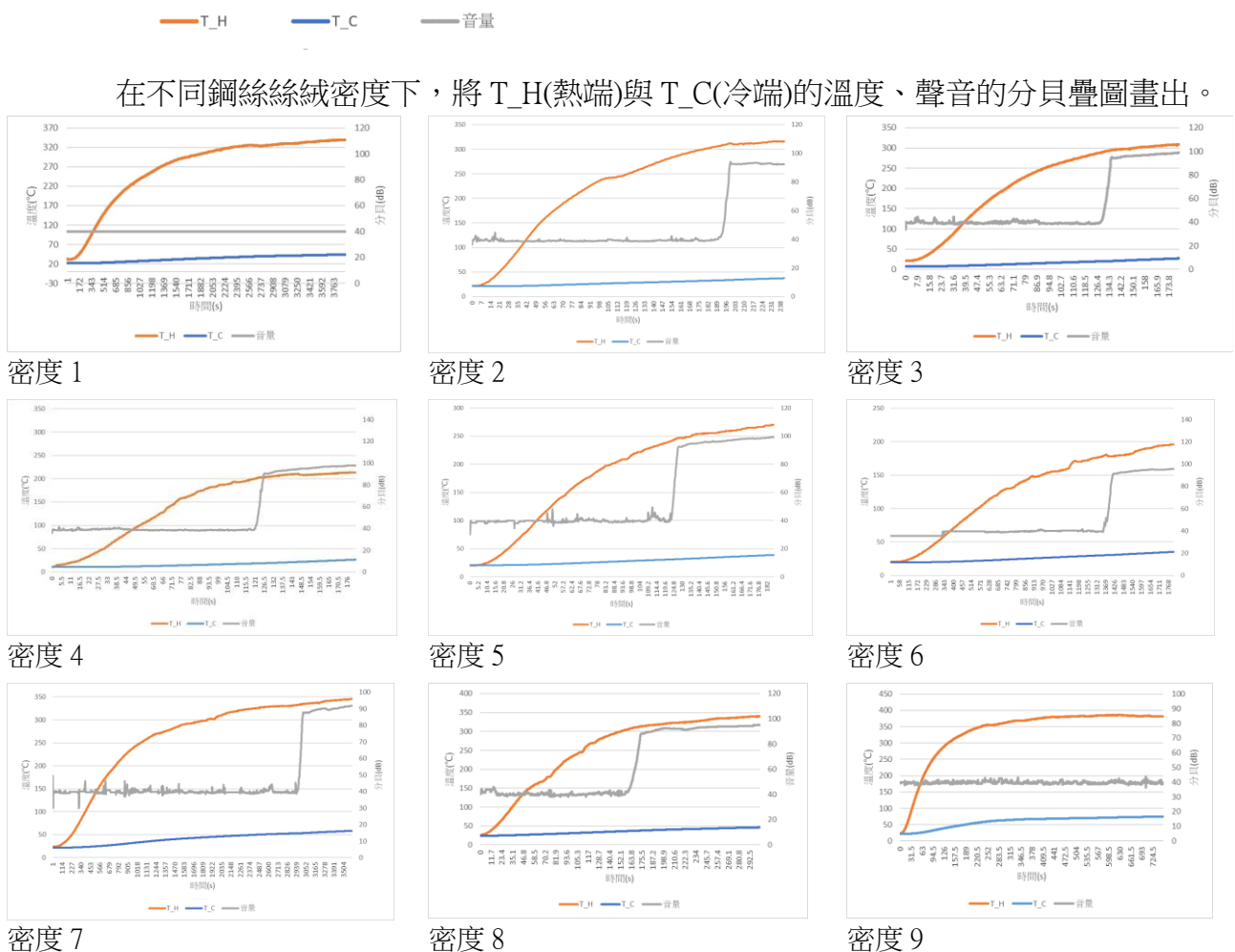


表 3

對比上表中各圖可以發現，聲音上升斷層結束後，溫度與分貝的上升趨勢呈現正相

關，而在鋼絲絨密度 1~9 中，只有密度 2~8 可以使試管發聲，且在密度 4 時會最快發出聲音。

當密度在極值或極值附近，聲音穩定或溫度的上升速度趨緩時，熱端溫度較高，冷端溫度上升幅度也較多，而冷熱端溫差越大，聲音分貝有越大的趨勢，但各密度聲音達穩定後音量皆約介在 90~100dB 之間。

(二)不同鋼絲絨密度聲音下降之結果

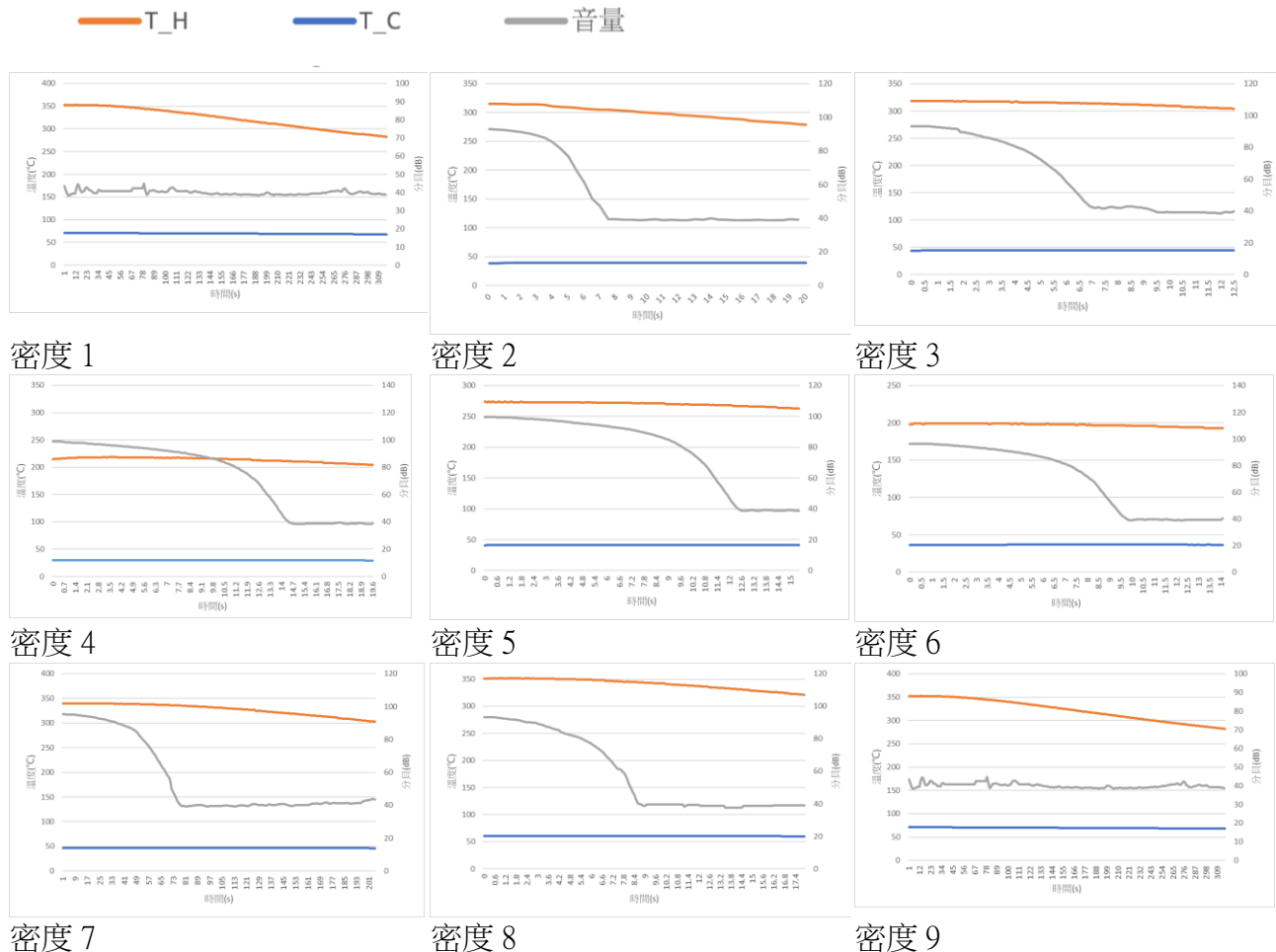


表 4

對比上表可發現，密度 2~8(可使試管發聲密度)在移開火源後，溫度會下降的較密度 1、9(無法發聲之密度)慢，而部分密度移開火源後，熱端溫度會先些微上升後下降。

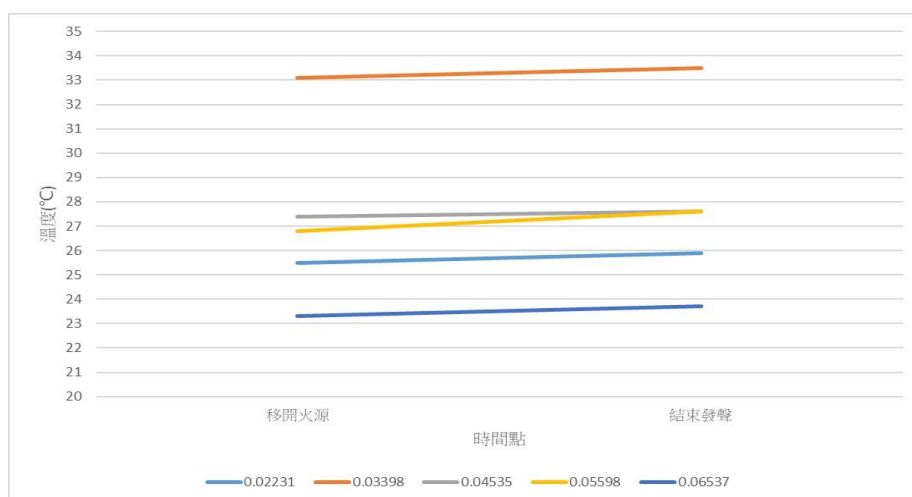


圖 30

經過數據確認，移開火源後，熱端溫度會些微上升，後下降，冷端溫度則會些微上升後持續一段時間才下降。根據上圖 30 可發現，移開火源後 T_C(冷端)溫度在各密度下皆會上升約 0.5~1°C。

(三)以隔熱棉作為堆棧之結果

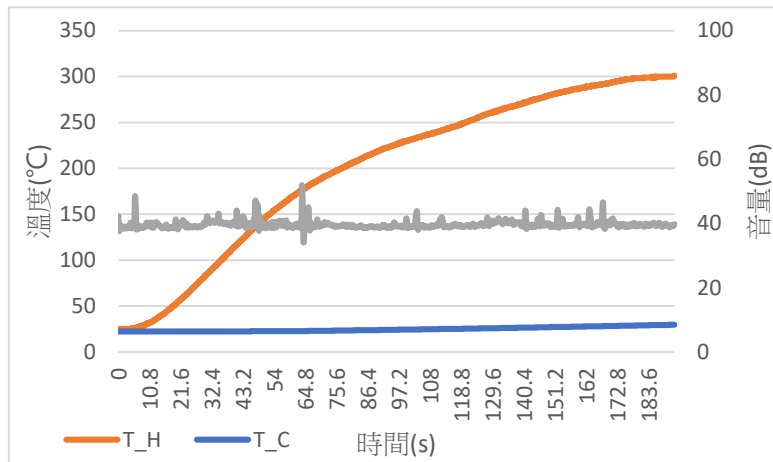


圖 31

隔熱棉代替鋼絲絨作為堆棧，加熱試管後無法發聲，且可以發現冷端上升速率較以鋼絲絨作為堆棧時慢很多，表示熱流(熱空氣塊)無法通過，由此可知空氣塊運動會影響聲音的產生。

(四)不同鋼絲絨密度之頻率

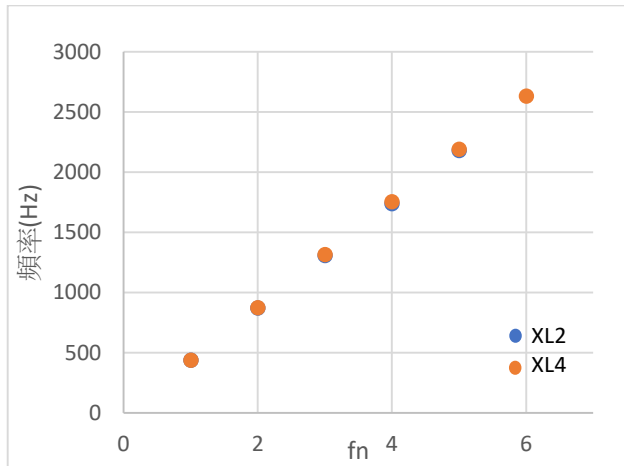


圖 32:密度 2、4 頻率圖(口徑 2.8cm 長度 20cm)

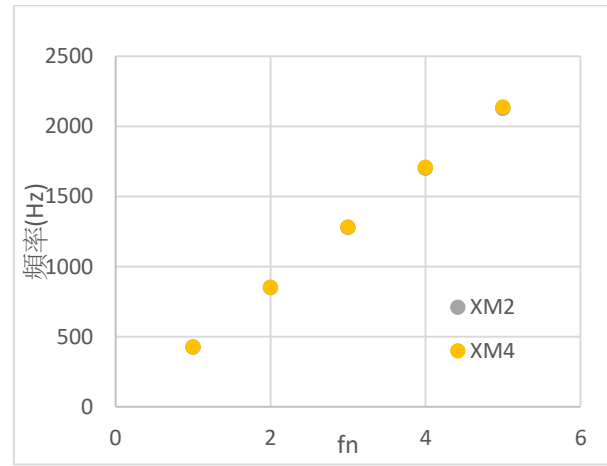
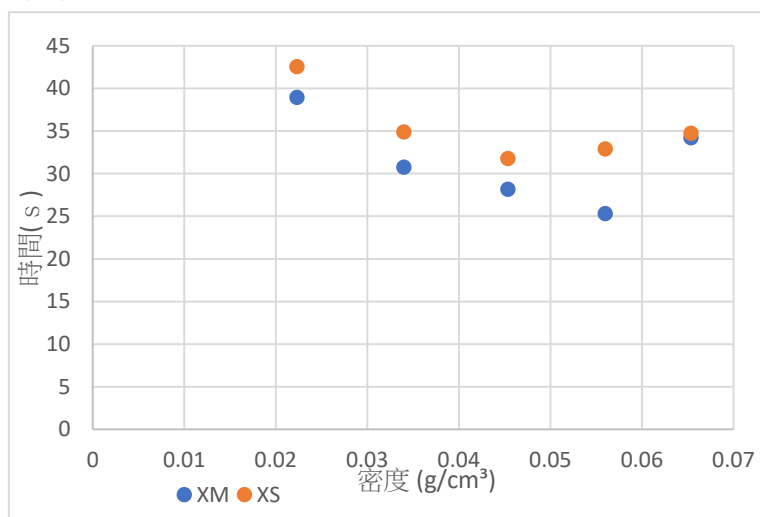


圖 33:密度 2、4 頻率圖(口徑 2.2cm 長度 20cm)

由上兩圖可以發現，密度越小頻率會稍低，但差距小，可知鋼絲絨密度對於頻率可說沒有很大的影響。

三、試管長度對發聲的影響(XM 口徑 1.8cm、長度 20cm；XS 口徑 1.8cm、長度 15cm)

(一)不同試管長度發聲所需時間



從圖中可以看到，試管長度越短時，需要越長的加熱時間才能使試管發出聲音。

圖 34(圖中資料點左起為密度 2、密度 3...以此類推)

(二)不同試管長度之頻率

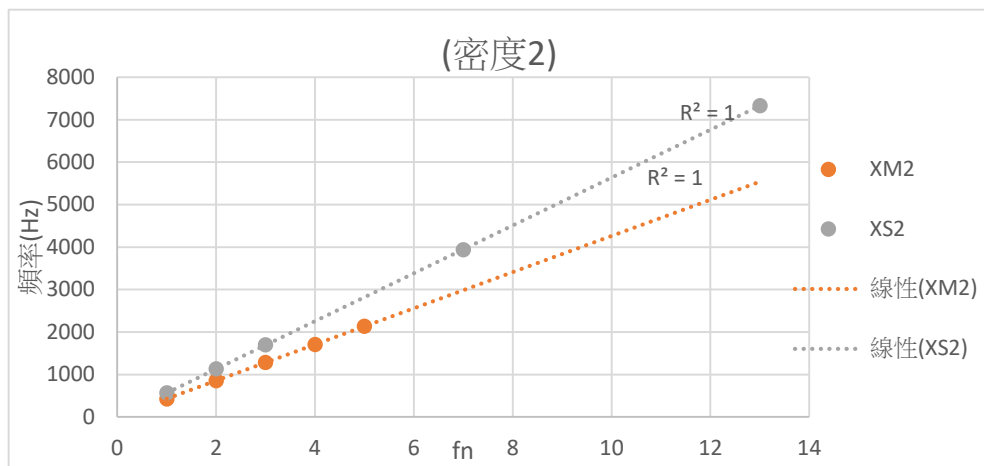


圖 35

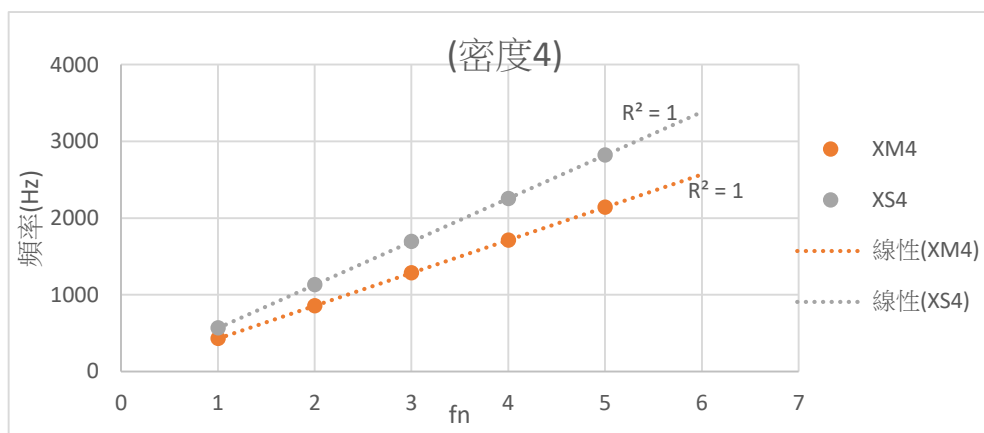


圖 36

由上兩圖可以發現，不論鋼絲絨密度為何，當試管長度越短，頻率會越高。

四、試管口徑對發聲的影響(XL 口徑 2.8cm、長度 20cm；XM 口徑 2.2cm、長度 20cm)

(一)不同試管口徑發聲所需時間

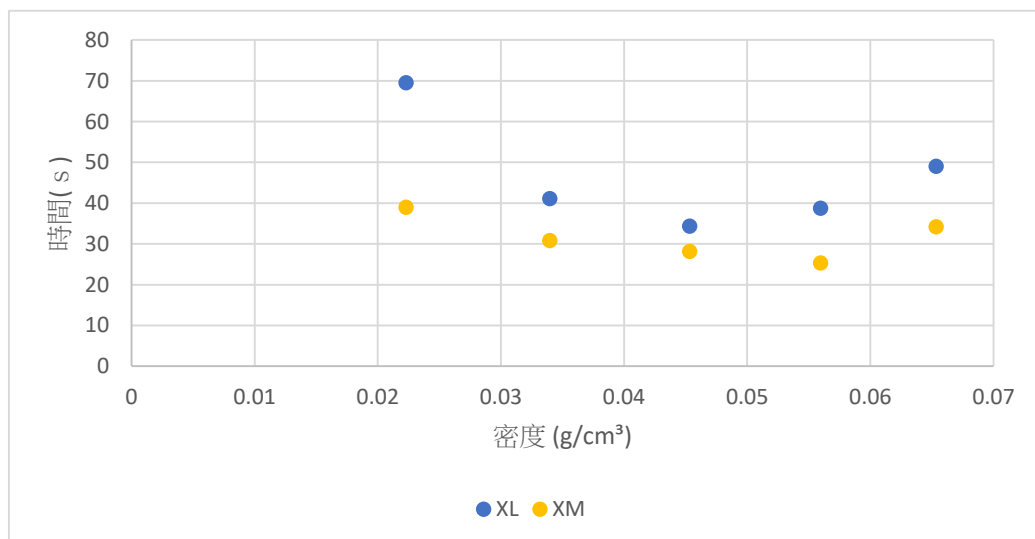


圖 37(圖中資料點左起為密度 2、密度 3...以此類推)

從圖表中可以大致看到，當口徑越大時，加熱時間要越久才能發出聲音，此部分可由駐波公式解釋。

(二)不同試管口徑之頻率

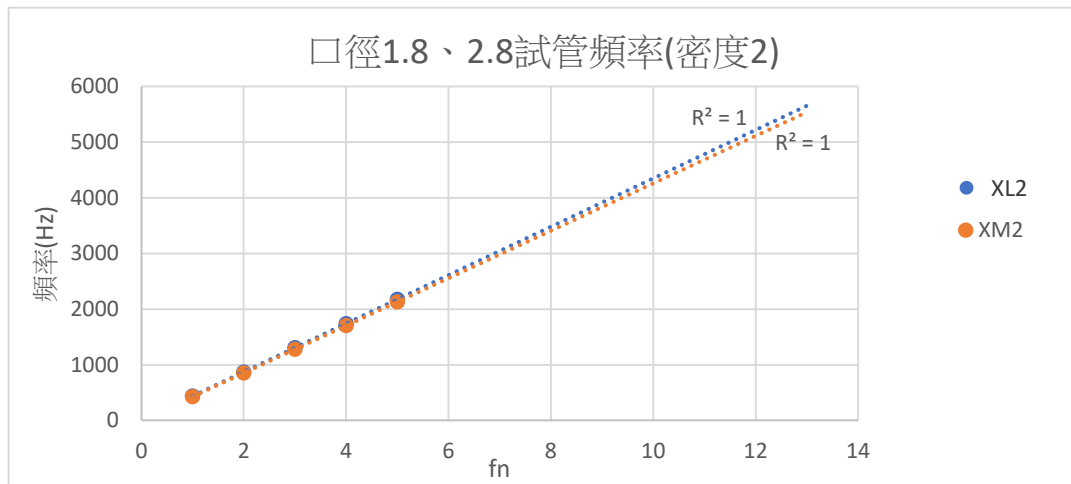


圖 38

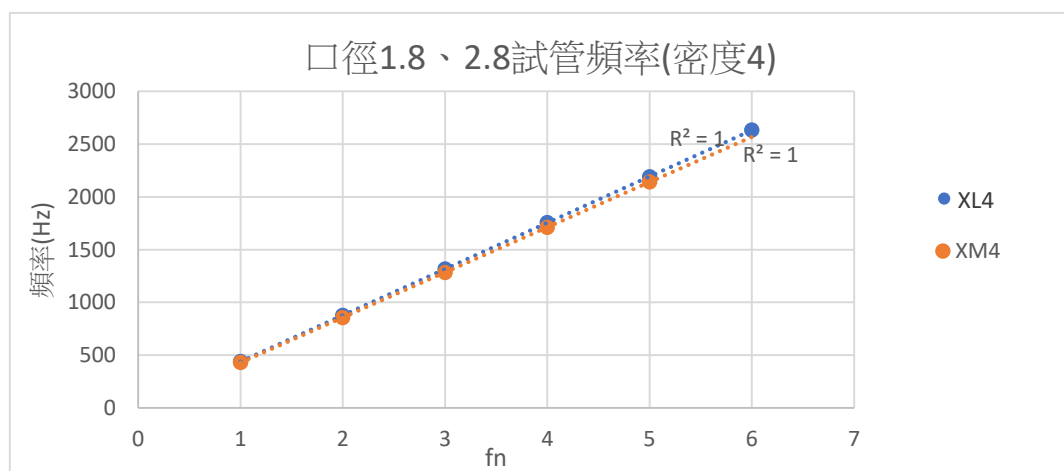


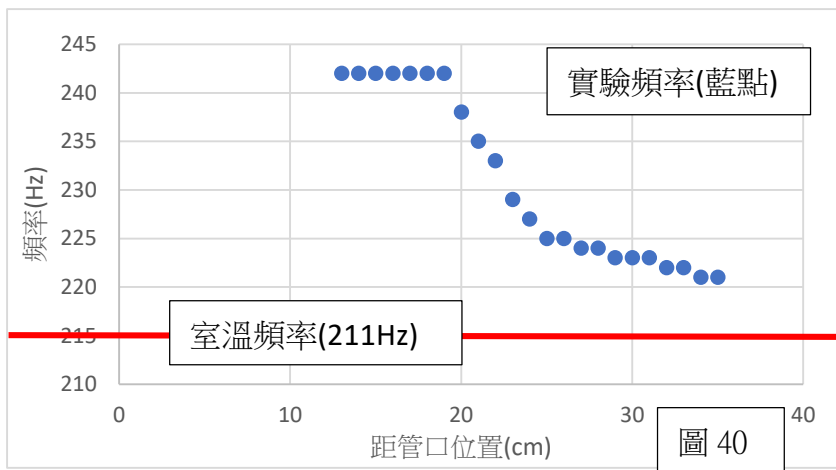
圖 39

由上兩圖可以發現，口徑較大頻率較高，但差距不大，實驗結果和管樂器的發聲原理不同，管樂器為口徑越大頻率越低，但此時驗裝置結果與管樂器相反。

五、鋼絲絨位置對發聲的影響(口徑 1.8cm、長度 40cm)

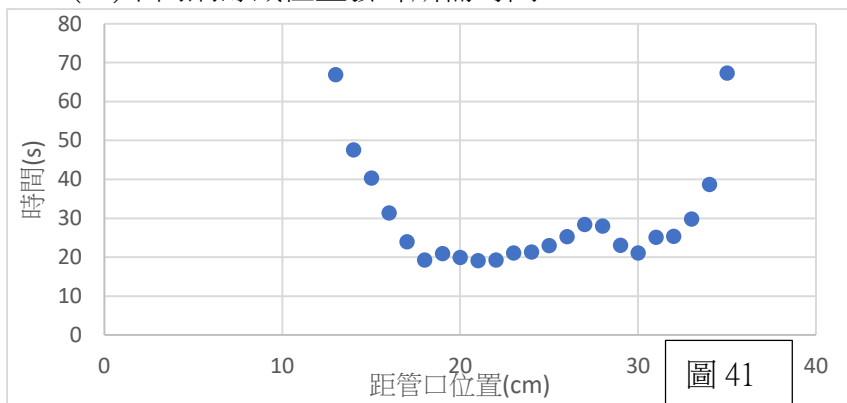
我們利用口徑 1.8cm，長度 40cm 的試管進行不同鋼絲絨位置的實驗，定義管口到鋼絲絨中央的距離為變因，遠離管口一公分進行一次實驗，冷端的衛生紙以及用來加熱的酒精燈，與鋼絲絨的相對位置不變，也就是其絕對位置隨著鋼絲絨位置改變。在此實驗中因為鋼絲絨位置有很多，測量鋼絲絨兩端溫度的孔洞也將需要鑽在不同位置，因此我們不以插入溫度計的方式測溫，而是轉成利用熱像儀觀察溫度變化及分布。

(一)不同鋼絲絨位置之頻率



左圖是鋼絲絨在試管內不同位置下的發聲頻率，可以看到實驗頻率皆大於以室溫帶入公式計算的頻率，根據聲速公式 $v = 331 + 0.6t$ 以及閉管駐波公式 $f = (\frac{nv}{4l})$ 可知，加熱使平均溫度高於室溫，由於聲速會跟著改變，頻率也將高於以室溫帶入公式所得。

(二)不同鋼絲絨位置發聲所需時間



左圖為不同鋼絲絨位置下的開始發聲時間圖。可以發現鋼絲絨在可發聲位置的極限兩端，以及鋼絲絨距離試管口 26cm~29cm 時，會需要較長的時間才開始發聲。

(三)不同鋼絲絨位置聲音上升下降速率

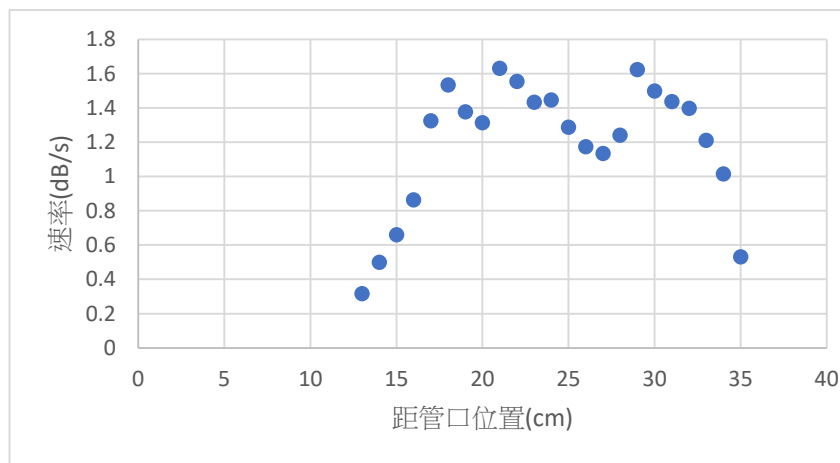


圖 42:上升速率

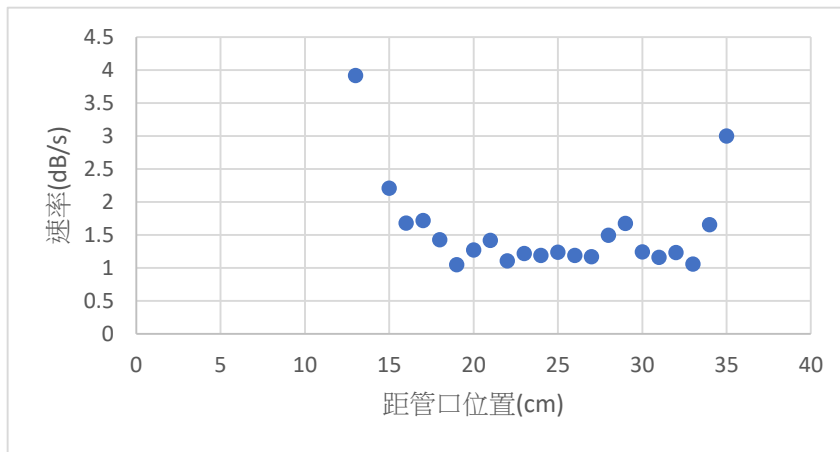


圖 43:下降速率

我們發現鋼絲絨位在可發聲的極端位置時，分貝上升速率較慢，而下降速率較快，而我們推測，分貝上升速率越快，下降速率越慢之現象與熱聲的效果好壞有關。

(四)不同鋼絲絨位置之分貝

下圖是不同鋼絲絨位置下發聲穩定時的分貝，可以看到當鋼絲絨位置距離管口越遠(越靠近底端)時，大致有分貝越大聲的趨勢。

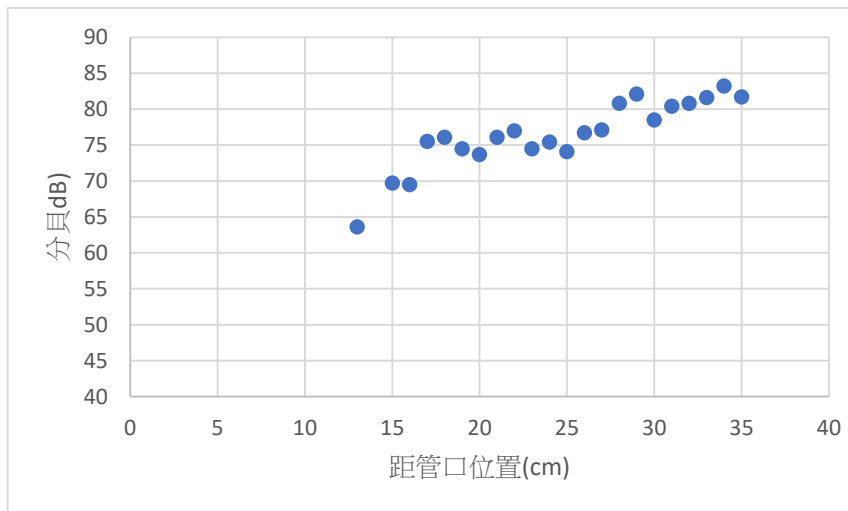


圖 44:穩定分貝

六、火焰與試管距離對發聲的影響(試管口徑 1.8cm、長度 40cm)

(一)不同火焰與試管距離之發聲所需時間

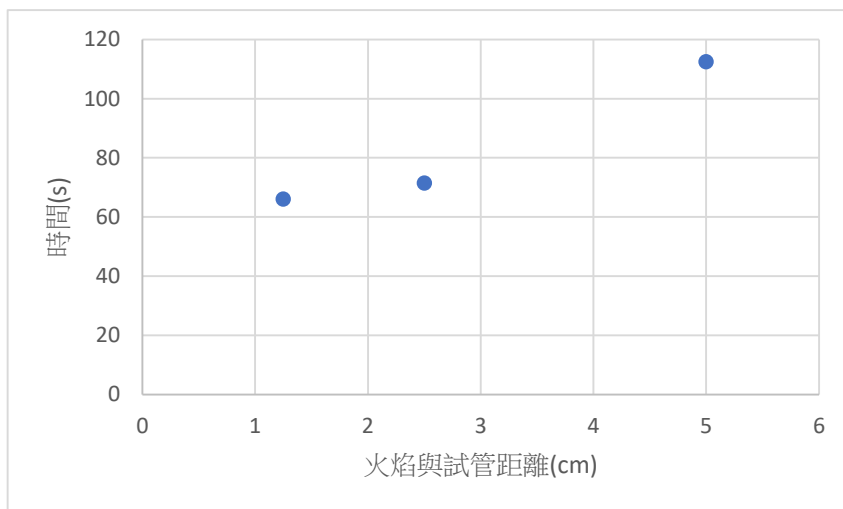


圖 45:開始發聲時間

火焰離試管距離越遠，需要越長的時間才可以使試管發聲，但火焰還是須距試管特

定距離內，才可使試管發聲(過遠無法發聲)。

(二) 不同火焰與試管距離之溫差

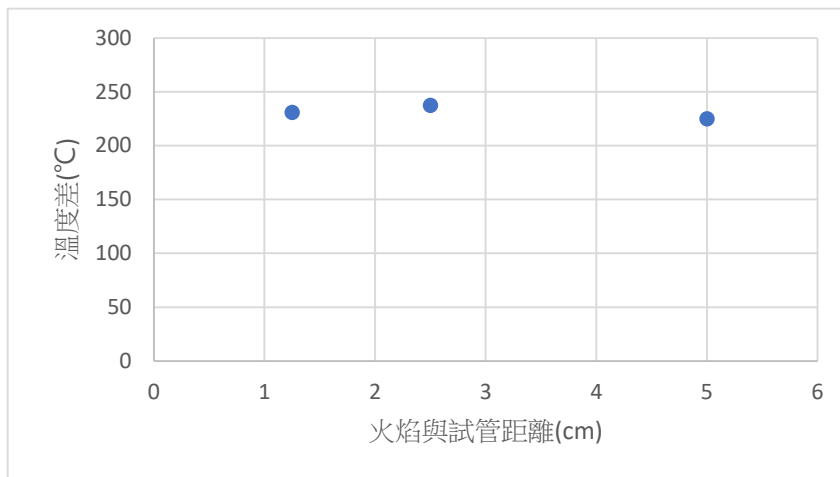


圖 46:溫差

上圖為發聲時冷端與熱端的溫差，可以看到不論火焰與試管之間的距離為何，開始發聲的溫差皆約在 $220^{\circ}\text{C} \sim 240^{\circ}\text{C}$ 。

七、不同角度所測得聲音分貝及頻率(試管口徑 1.8cm、長度 20cm)

我們將指向麥克風放置於面向試管管口，與試管平行，距試管 15 公分處，並定義此為麥克風與試管夾角零度。如下圖 47

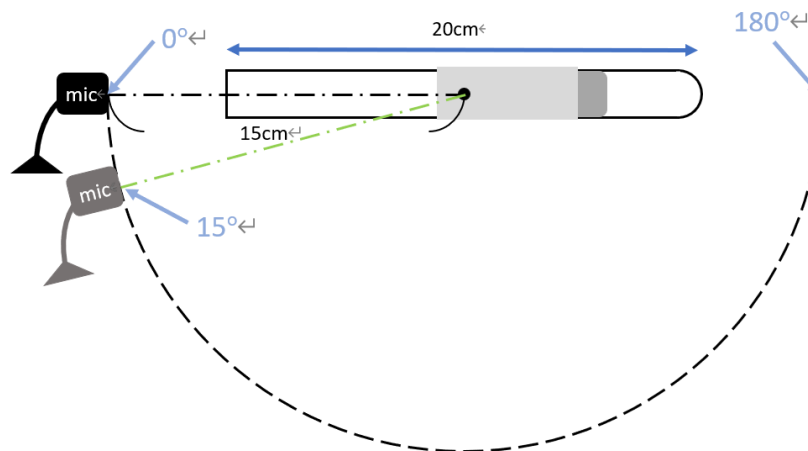


圖 47

從試管上方視，麥克風每逆時針轉動 15 度取一數據，得到結果如下圖。

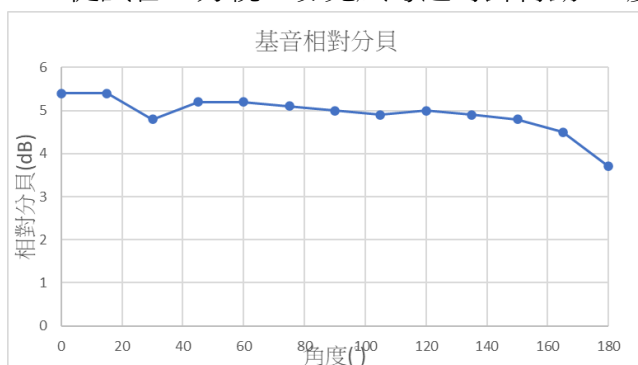


圖 48

由圖中可以發現聲音相對分貝在角度越大時分貝越小，可知所發聲音具有指向性，而開口前方音量最大。

柒、討論

一、實驗裝置冷卻的方法

在實驗中若沒有進行冷卻將無法持續發聲，雖在所需發生的時間較短的條件下，會短時間發聲，但加熱一小段時間後聲音又會消失，這是因為熱到達冷端時，空氣冷卻速率低，使冷端溫度過高無法產生溫差，進而使其發聲，或產生溫差後，因冷端溫度上升，溫差又降低。本組利用拭鏡紙包覆冷端並且放入裝水燒杯如圖 3、圖 8、圖 50，利用水分蒸發拉升其餘水分子之特性與毛細現象，再加熱中持續補充定量的水，因此拭鏡紙不會乾涸，可持續冷卻試管。

二、聲音發聲與消失的過程

(一)分貝上升

根據理論，此實驗裝置無法像黎開管一樣藉由熱空氣上升來使空氣向特定方向流通，冷空氣流入降溫產生溫差，因此，我們藉由濕拭鏡紙冷卻試管，並藉由毛細現象使其能夠持續進行降溫，藉此造成溫差，使裝置發聲。

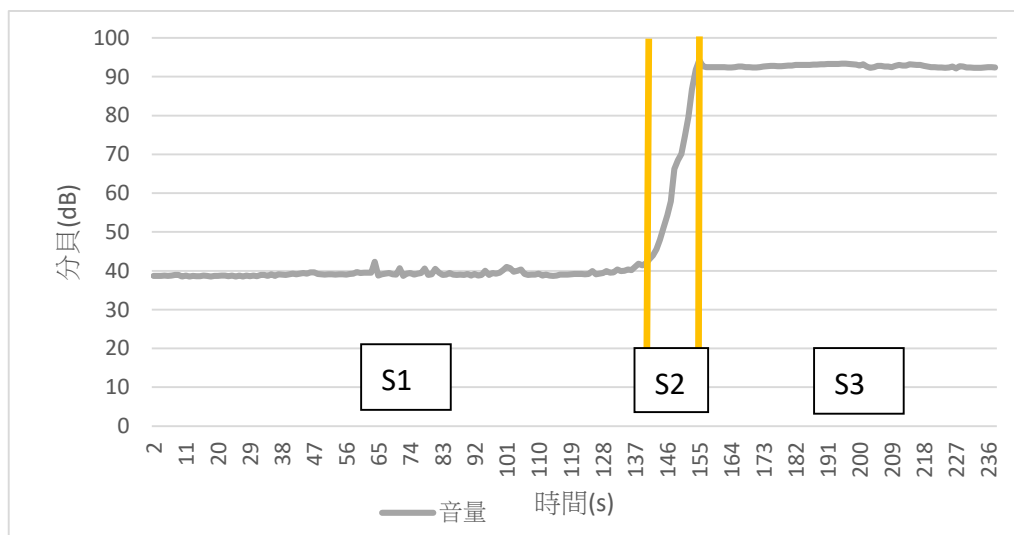
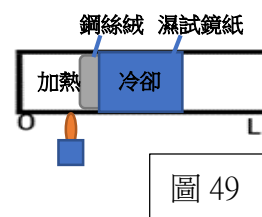


圖 50

由上圖 50 可以看到，在 S1 時間內，裝置尚未發出聲音，我們推測是因在加熱過程中，溫度漸升高，加熱端空氣的內能會逐漸增加，等到鋼絲絨兩端溫差達一定程度時，就會發出聲音(S2 時間內)，形成分貝快速變大的斷層，而因為聲音產生後，試管還在持續加熱(S3 時間內)，聲音的振幅就會因溫差繼續增加而隨時間漸上升。

(二)分貝下降

根據理論，要使空氣柱震動發聲有其中兩個必要條件，一為需要冷空氣流通，持續冷卻加熱端膨脹之空氣，二為需持續加熱，使空氣能持續膨脹，而只要能造成溫差就能同時達到此兩條件。當停止加熱後，溫差漸小，空氣無法持續膨脹震動，聲音應漸消失。

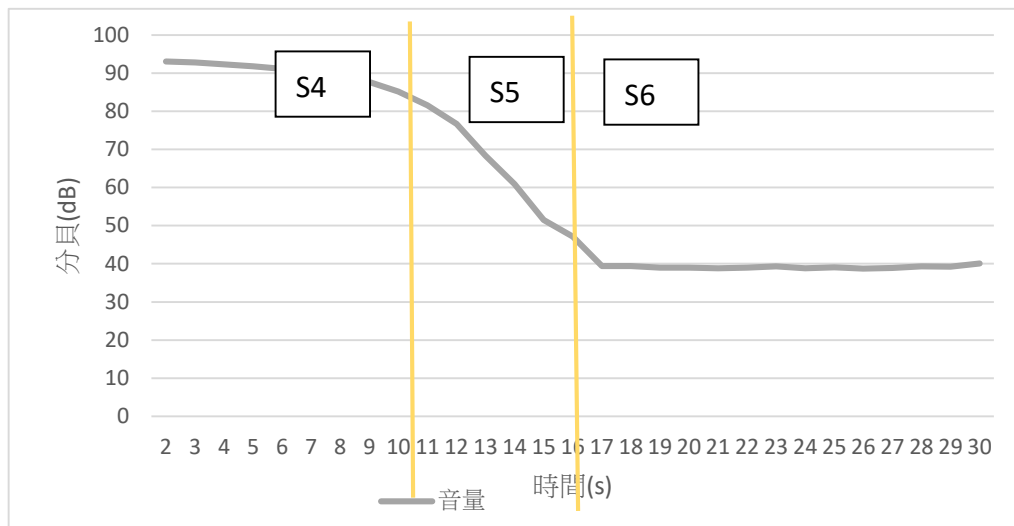


圖 51

根據上圖 51 可以發現，停止加熱後聲音會逐漸消失，符合理論，而形成斷層的原因，我們推測是由於火源移開後，雖然不再有熱源加熱空氣，但短時時間內(S4 時間內)還足夠維持溫差，使空氣振動形成聲音，所以一開始只造成振幅變小音量降低，等到空氣冷卻至一定程度(S5 時間內)，不足以維持溫差使裝置發聲，音量便會快速下降，不再產生聲音(S6 時間內)。

我們推測熱端溫度在熱源移開後會上升(圖 30)是因空氣振盪會使空氣塊運動的更快，而停止加熱後空氣流通減慢，使冷卻速度減慢，導致溫度先些微上升，後下降。

(三)過衝現象

凸起發生在分貝快速上升(上升斷層)剛結束時，分貝會超越正常分貝後又降回，是熱聲振盪振幅飽和中，典型的過衝(overshoot)行為。

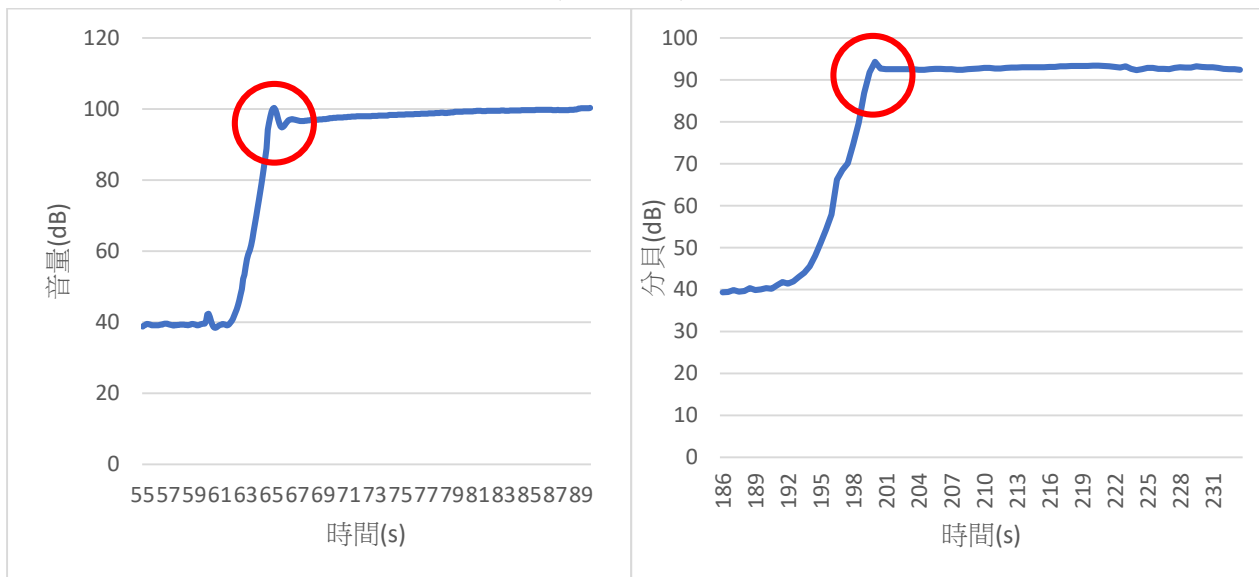


圖 52

圖 53

上面兩張圖為展示不同情況下可能有不同之過衝現象，包含過衝的時間長短、振幅等，此線段為非線性的過程，因此難以預判得知，學界仍在研究中。

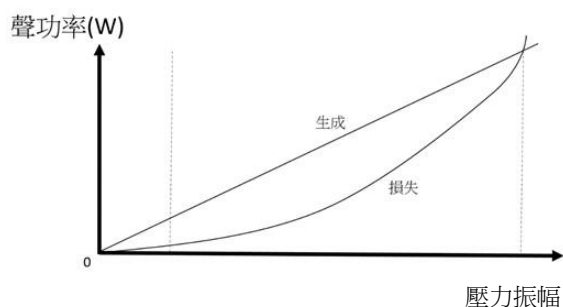


圖 54

左圖為引擎啟動時的非線性損失，我們推測這與過衝現象有關聯，當生成量大於損失量時，聲音會急速上升產生斷層，而到一個程度後，損失量會快速增加大於生成量，聲音也會明顯下降，而產生我們觀察到的過衝現象。

(四)發聲頻率

1.時頻圖中泛音出現順序、泛音分貝大小

圖 25 中，因為越高頻率的泛音需要越多的能量才能激發，因此在時頻圖中會越晚出現，而剛激發之頻率強度會隨加熱時間增長而漸大，所以高頻泛音相對強度有越小的趨勢。

2.實驗頻率與計算頻率差異

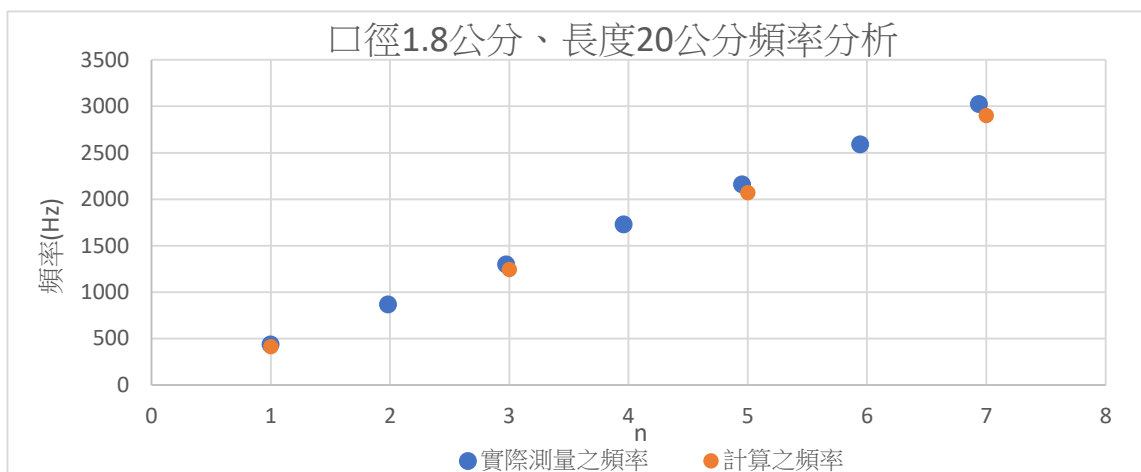


圖 55

我們在計算發聲之頻率時，使用室溫帶入公式。此實驗裝置有冷、熱端之差異，冷端溫度與室溫差距不大，但整根試管的平均溫度因熱端之存在而大於室溫，帶入駐波公式 $f = \frac{nv}{4\ell}$ 時，因 v 較室溫高所以實驗頻率較計算之頻率高。

由試管外型判斷，此實驗裝置理論上應為閉管駐波，但因試管的邊界條件無法將基頻之 2、4、6...等偶數倍泛音消除，只能將其頻率分貝降低，所以在實際實驗中出現的頻率並不完全符合理論，如上圖 55。

二、鋼絲絨密度與發聲之關係(口徑 2.2cm、長度 20cm)

(一)鋼絲絨密度 1、4、9 聲音上升比較

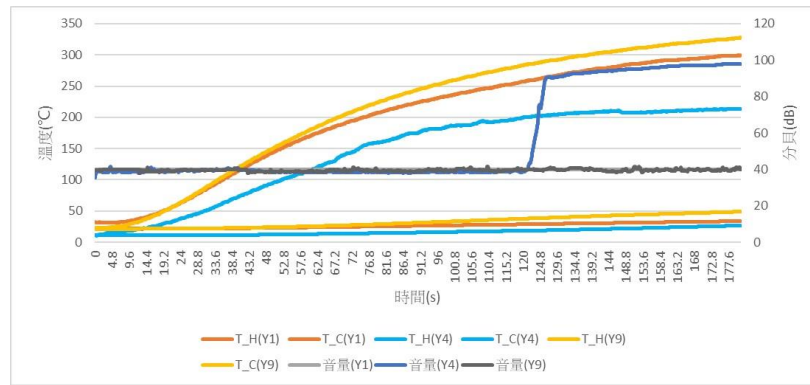
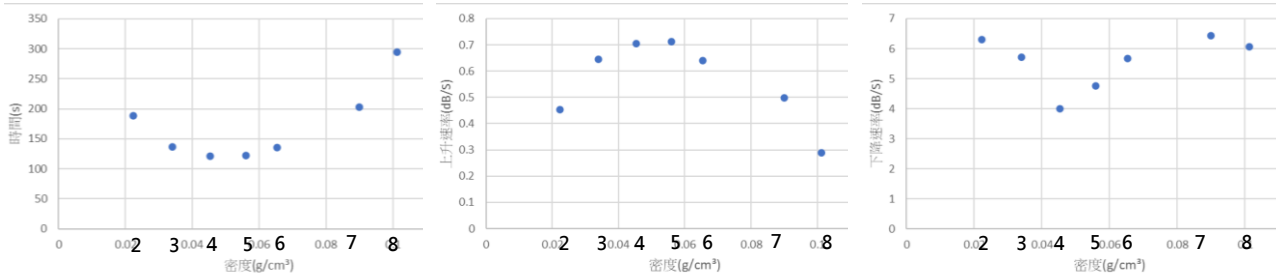


圖 56(橘色為密度一；藍色為密度四；黃色為密度九)

根據 $Q_h = Q_l + W$ (W =聲音能量) 因發聲試管一部份熱能轉為聲能，所以試管未發聲之熱端溫度會高於有發聲試管之熱端溫度。密度 4 發聲後，熱端溫度上升速率會較未發聲時趨緩之現象，也可用前述公式說明。

(二)不同鋼絲絨密度之發聲時間與分貝上升下降速率比較



各密度發聲時間比較圖

各密度上升速率比較圖

各密度下降速率比較圖

表 5

當較快發聲時，分貝上升速率越快，下降速率越慢，我們推測此為綜合熱穿透深度和黏性損耗之影響。據公式算出，鋼絲絨造成試管內熱穿透深度接近 0.0539cm 時，對發聲會有較佳的作用。可發現鋼絲絨密度 4 左右較快發聲，且越遠離其密度產生聲音所需時間越長，我們推測密度為 3、4、5 附近時，鋼絲絨造成試管內熱穿透深度接近 0.0539cm，而分貝上升速率快、下降速率慢則為鋼絲絨造成試管發聲效果較佳時的現象。

各密度之下降斷層斜率皆比上升斷層斜率大，代表聲音分貝下降時的速度比上升快，我們推測是因聲音上升時，酒精燃燒不斷給予空氣熱能，達到足夠溫差後，分貝是因內能累積而持續上升，但移開火源瞬間熱源完全消失，聲音下降時，只剩冷卻端冷卻空氣，溫差快速降低，所以聲音下降的較上升時快。

(三)不同鋼絲絨密度溫差與分貝之關係

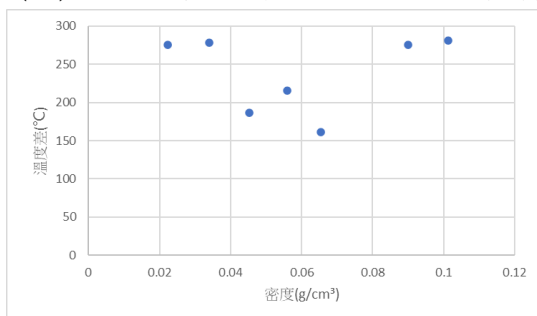


圖 57:各密度穩定發聲時溫差比較圖

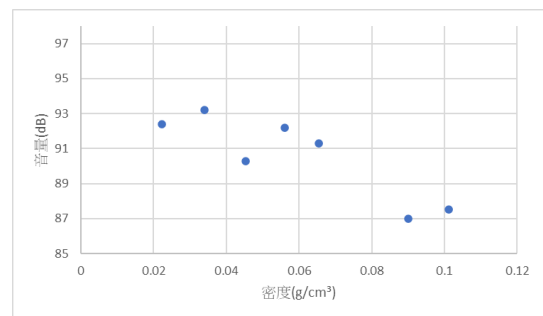


圖 58:各密度穩定發聲時分貝比較圖

冷熱端溫差越大聲音分貝有越大的趨勢，但在密度 7、8 時並不完全符合趨勢，推

測這是因為鋼絲絨密度過大會阻礙空氣的流通，進而使分貝變小。因此，要使試管發聲效果較好，需要適當密度之鋼絲絨。

為證明鋼絲絨密度對聲音分貝有一定影響，我們將正弦波產生器接上長管如下圖，並在長管自底端(封閉端)算起 1/3 處放入不同密度之鋼絲絨，使喇叭發出長管自然頻率之基音、第三諧音、第五諧音，固定喇叭聲音分貝 (dB)，測其通過鋼絲絨後之分貝差距，獲得結果如下圖。

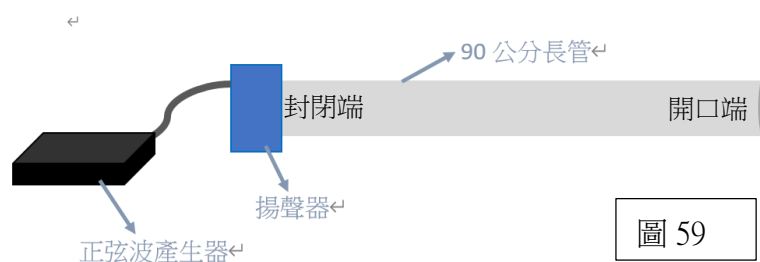


圖 59

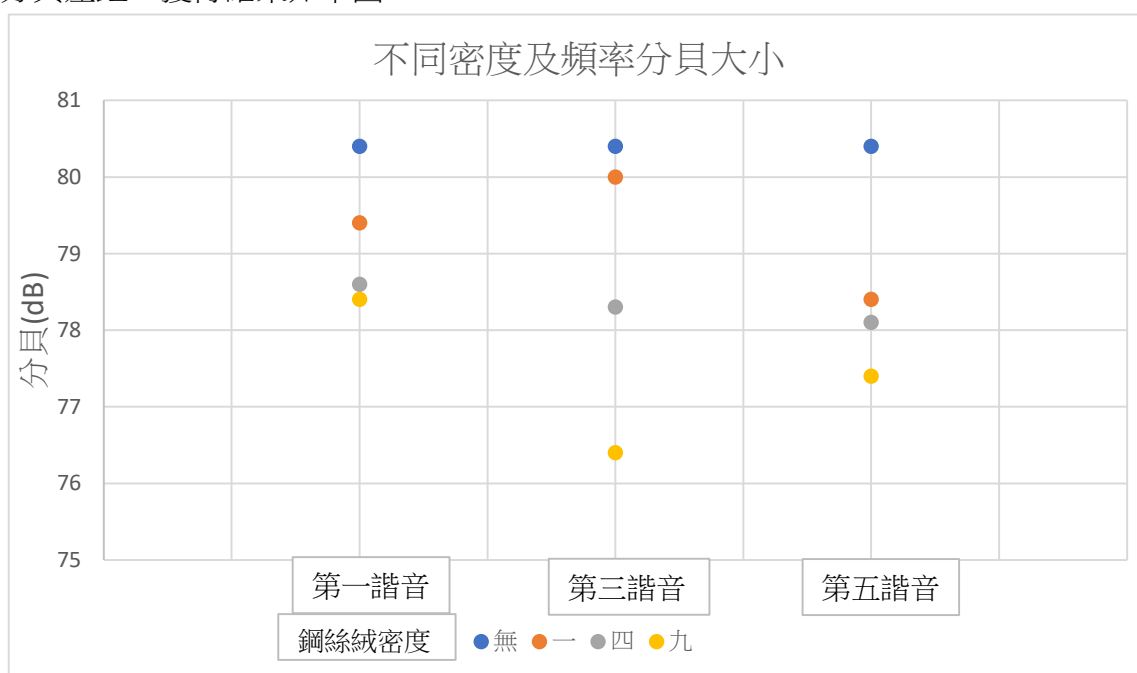


圖 60

實驗結果證明了鋼絲絨有阻隔聲音之效果，而密度越大之鋼絲絨阻隔聲音效果越佳。造成此現象是因多孔隙介質中空氣振動時與鋼絲絨摩擦，所以導致聲能損失，音量下降。

(四)不同鋼絲絨密度之效率

1. 燃燒熱與聲能之轉換(試管口徑 2.2cm、長度 20cm，鋼絲絨密度 4)

我們為了計算出酒精燃燒熱，實驗時皆將含色素 75%酒精換成 95%酒精，每秒放出之熱量為 129.66J/s，並對比聲音發出時之聲能，聲能的計算方式分貝數 =

$10 \log \frac{I}{I_0}$ ，斷層結束穩定發聲時分貝為 90.2 dB， $I = 10^{-2.98} \cong 0.001$ ，能量為 $P(j) =$

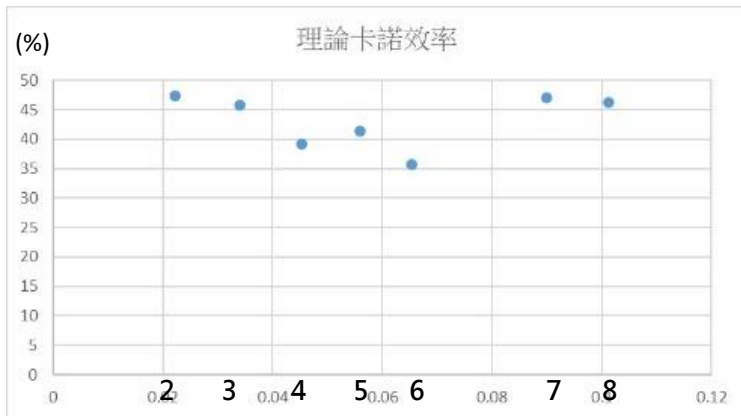
$I \times 4\pi r^2$ ， r 為管口距分貝計的距離， $P \cong 0.00052j$ ，作為酒精燃燒轉成聲能之能量，發現聲能約只吸收了 0.0004%的酒精燃燒放出之熱量，並推測大部分之能量都散失於空氣中或被試管吸收。為證明此想法，我們還計算出了熱端空氣之熱量，溫度

熱量計算方式是 $Q(j) = s \left(\frac{j}{\text{Kg} \times ^\circ\text{C}} \right) \times m(\text{Kg}) \times \Delta T(^{\circ}\text{C})$ ，聲音上升時間為 5.2 秒，溫度

相差 3.5 $^{\circ}\text{C}$ ，因此在聲音上升的時間的熱量約為 $1035 \times 1.96 \times 10^{-5} \times 3.5 \cong 0.0695j$ ，約為酒精燃燒之熱量的 0.05%，證明了大部份熱量並未被試管所吸收。

(實際酒精燈燃燒的能量散失以及加熱時能量的累積我們無法估算，將造成誤差)

2. 卡諾效率



根據卡諾效率的公式 $(T_H - T_C)/T_H$ 計算出各密度的效率如左圖，可以看到效率介於 35%~50% 之間，而實際效率因為損耗必小於卡諾效率，尚待進一步實驗設計來測量。

配合上述(表 5)所說，大致符合分貝上升速率越快、下降速率越慢會有效果越佳之趨勢。

圖 61

(五) 不同試管長度可發聲之鋼絲絨密度

我們將不同密度之鋼絲絨分別置於試管口徑 1.8cm 且長度 15、20、40cm 試管的距管底 1/3 管長處，找出其可發聲最大最小鋼絲絨密度並繪製出下圖。

密度	0.00582	0.00852	0.01392	0.022308	0.03398	0.04535	0.05598	0.065365	0.07476	0.08998	0.10121	0.11245	0.12369	0.13493	0.14617
密度編號	-0.5	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
15															
20															
40															

圖 62

根據熱穿透公式 $\delta_R = \sqrt{\frac{K}{\pi f \rho C_p}}$ ，因試管越長，頻率越低，熱穿透深度越高，熱穿透

深度越高表示鋼絲絨即使較疏鬆，熱能也能夠傳遞，因此越長的試管之最低發聲密度越低；而試管越短，最高可發聲鋼絲絨密度越低，是由於多孔性介質損耗的特性為頻率越高，損耗越多，所以導致鋼絲絨密度在較不密時就無法發聲。

三、試管規格對聲音的影響

(一) 試管長度

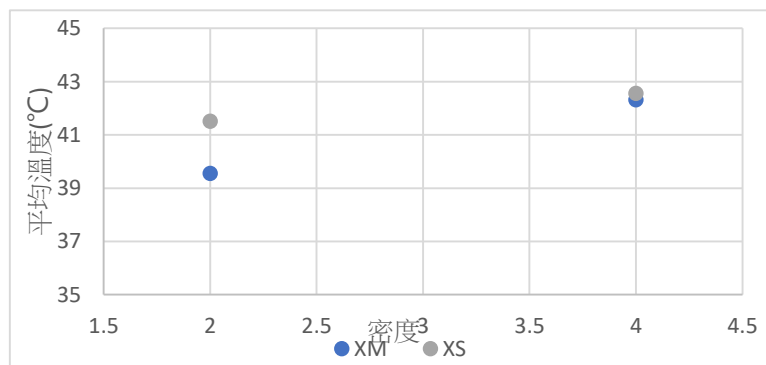


圖 63

根據理論，空氣柱越短，聲音頻率越高，空氣柱越長，聲音頻率越低，公式為 $f = \frac{v}{4L}$ (f 為頻率， v 為聲速， L 為管長)，而我們的實驗結果符合理論，且發聲頻率越高，試管內均溫越高(如圖 63)。

(二) 試管口徑

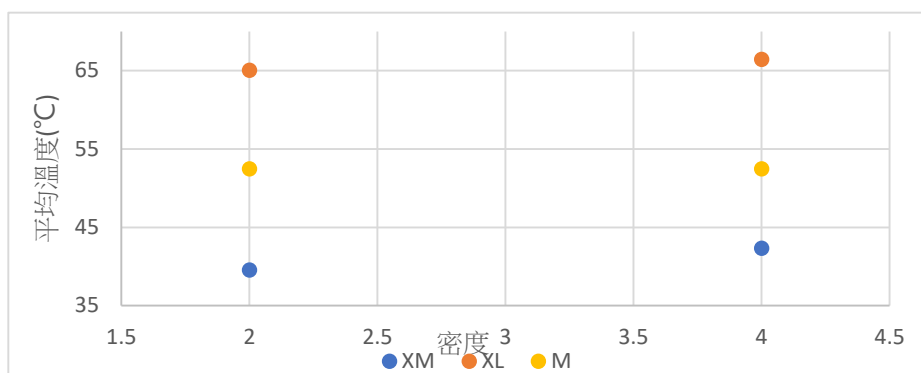


圖 64

由於燃燒中的酒精燈傳熱傳遞速率穩定，因此試管口徑越大應需要越久的時間才能使其累積到所需溫差並發出聲音，且發聲時試管平均溫度較高(如圖 64)。

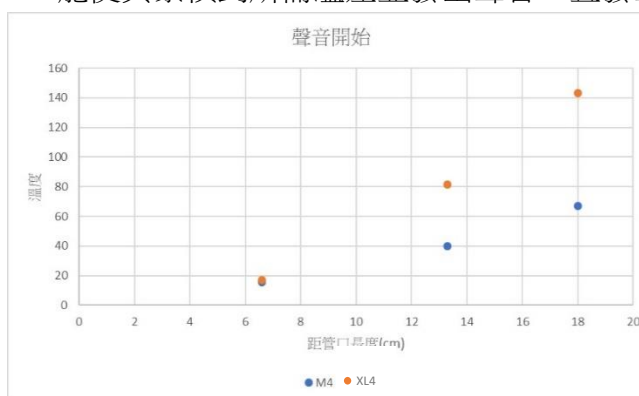


圖 65

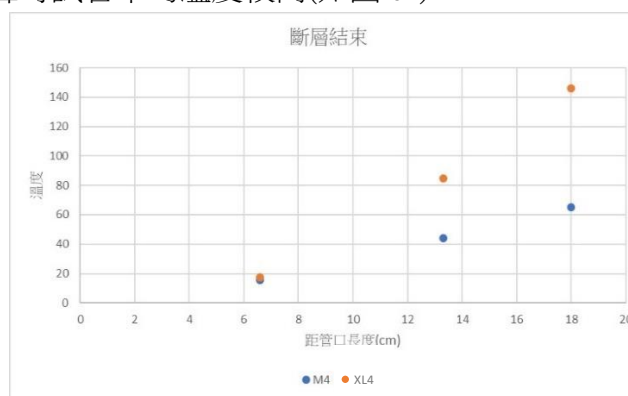


圖 66

由上圖 65、66 可以發現，試管在聲音開始以及斷層結束時，口徑 2.8 公分試管之冷、熱端溫差皆較口徑 2.2 公分試管大，由於冷端溫度變化相較不大，溫差越大所需加熱時間越長，也代表試管平均溫度越高，而試管平均溫度越高頻率就會越高。

四、鋼絲絨位置 (試管口徑 1.8cm、長度 40cm)

(一)發聲頻率

鋼絲絨距離管口 13cm~35cm 時試管才會發聲，在距離管口 20cm~35cm 時，離管口越近頻率會越高，但在距管口 13cm~19cm 頻率皆相同，根據熱像儀顯示(圖 68、圖 69)，當越靠近管口時，後段被加熱的空氣柱越長，因此平均溫度會越高，頻率也越高；在距離管口 13cm~19cm 頻率皆相同是因為鋼絲絨位置足夠前面，酒精燈能加熱的空氣柱長度小於後段長度，所以這段距離的加熱空氣柱長度都相同，平均溫度也相同，頻率也相同。

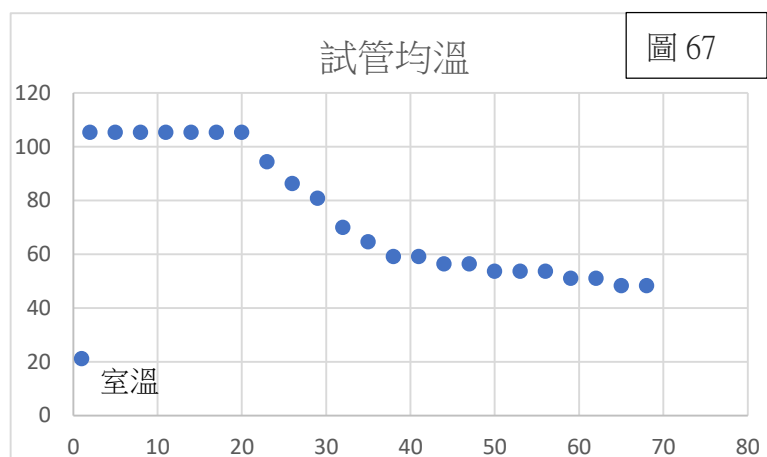


圖 67

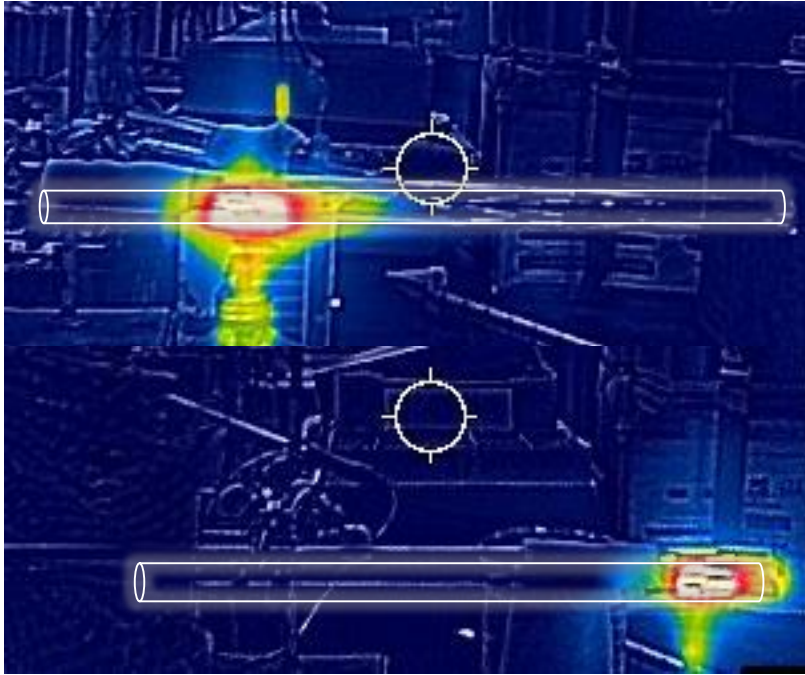
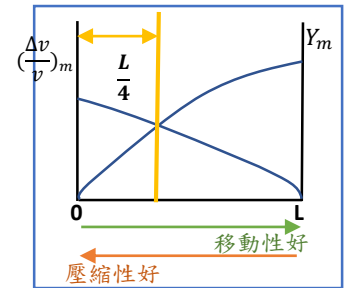


圖 68

圖 69(左)圖 12(下)



(二)發聲時間與速率

將上兩圖其與加熱發聲的上升速率(圖 42)和移開火源聲音消失的下降速率(圖 43)交叉比對可以發現，大致上發聲所需時間越短，上升速率越快、下降速率越慢，我們認為這是熱聲效果較佳時的特性。根據理論這與熱穿透深度和空氣黏性、空氣塊移動及壓縮性之影響有關，使鋼絲絨置於距試管管口 19~27cm、試管 1/4 處(距試管口 30cm 左右)時效果較佳。

(三)聲音分貝

根據理論以及先前提到各變因的結果，分貝與溫差有直接的關係，雖然我們沒有在試管上鑽洞測溫，但是從熱像儀的圖像中可以看到(圖 68、69)，越靠近管底時，加熱的空氣柱會越短，因此熱量會越集中，就會有越大的溫差，便可以發出越大的聲音。

五、火焰與試管距離

根據實驗結果可以知道，火焰與試管之間的距離特定範圍內，其冷熱端溫差達到一定程度便可以開始發聲，再次驗證了發聲的條件為溫差(若火焰距試管過遠，無法使其達成溫差，便無法發聲)，溫差越高，空氣振盪越強烈，聲音振幅也會越大。

六、拍音

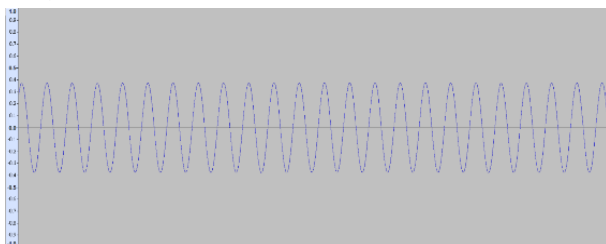


圖 70:一根試管穩定發聲波形圖

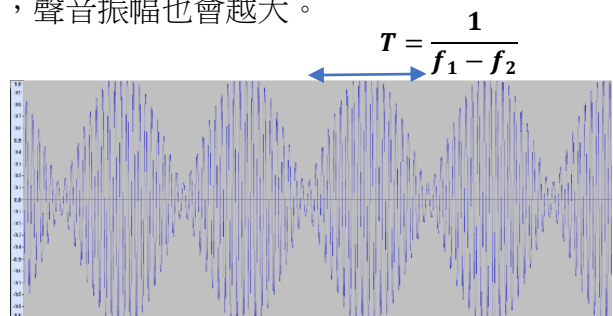


圖 71:兩根試管穩定發聲波形圖

第一根基頻(Hz)	第二根基頻(Hz)	波包頻率(Hz)
376	396	20

表 6

使兩根試管同時發聲，發現一根試管發聲為單頻，兩根試管發聲會互相干涉產生波包。

根據理論，兩個同振幅、頻率極相近的聲波同時發聲，所得到的聲波為兩頻率互相干涉形成之合成波，稱為拍音，此時振幅忽大忽小形成波包，公式為:

$$a\sin(2\pi f_1 t) + a\sin(2\pi f_2 t) = 2a\cos(2\pi \frac{f_1 - f_2}{2} t)\sin(2\pi \frac{f_1 + f_2}{2} t)$$

波包頻率(拍頻)為兩試管頻率相減 $f_{beat} = |f_1 - f_2|$ ，如上表 6，實驗結果與理論相符，表示熱聲發聲有很好的同調性。

七、試管內空氣流動

(一)以保麗龍球測試

在試管內放入直徑 0.3mm 的保麗龍小球，發現在試管發聲後，保麗龍球會呈現如下兩圖，並且緩慢向前移動後掉出試管，且越靠近管口之保麗龍小球移動的速度越快，可以用靠近管口之空氣移動性較佳這點解釋(圖 12)。



圖 72



圖 73

(二)管口空氣流通方向測試

為觀測試管發聲時管口之空氣流通，我們放置質量較輕的衛生紙在試管管口，發現當試管發聲時，衛生紙會飄向管口如下圖。

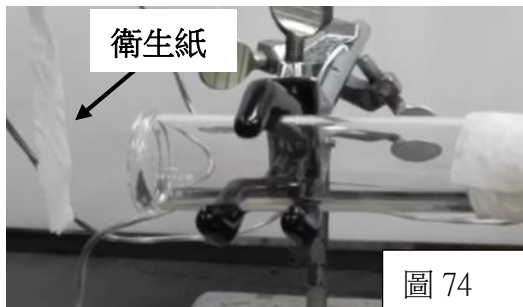


圖 74



圖 75

搭配保麗龍球的移動方向，推測管內空氣由試管外圈吹出，試管内圈吸入。

(三)管口遮蔽

我們使用輕黏土分別遮蔽發聲試管之管口中間、管口外圍，發現遮蔽管口中間(表面積:2.5434cm²)時，發聲頻率會變低，且音量下降，遮蔽外圍(表面積:4.8815cm²)時，試管則無法發聲。

八、孔隙大小和熱擴散距離比值分析法

1.我們利用等效流道半徑公式 $r_0 = \frac{\sqrt{d_w d_h}}{2}$ (d_w : 鋼絲線徑 = 0.00010256m ; d_h : 水力直徑)

得 r_0 和堆棧密度呈負相關，而同長度試管在不同密度時堆棧冷熱端

溫差與熱穿透深度會呈正相關，這是因為熱穿透深度公式 $\delta_R = \sqrt{\frac{K}{\pi f \rho C_p}}$ 中，同長度試管

發聲頻率很接近，溫差越大時平均溫度也會越高，而 $\frac{k}{\rho C_p}$ 之值在平均溫度((冷端溫度+熱端溫度)*1/2)越高時越大。

2.目前熱聲學界公認可以用等效流道半徑(r_0)與熱穿透深度(δ_R)的比值來判斷發聲與否，此外，以試管 XM 在不同可發聲密度之條件下，我們另外發現上述比值越大分貝數有越大的趨勢。

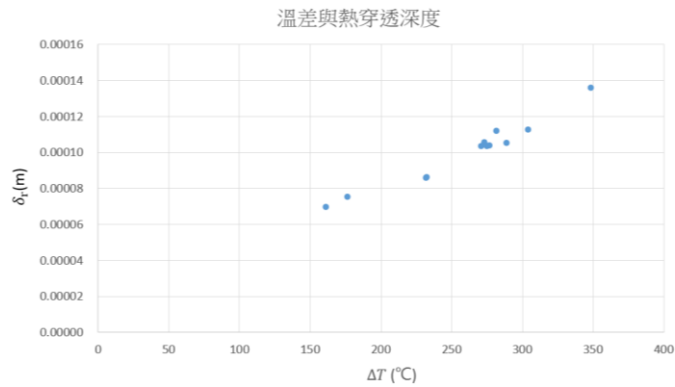


圖 76

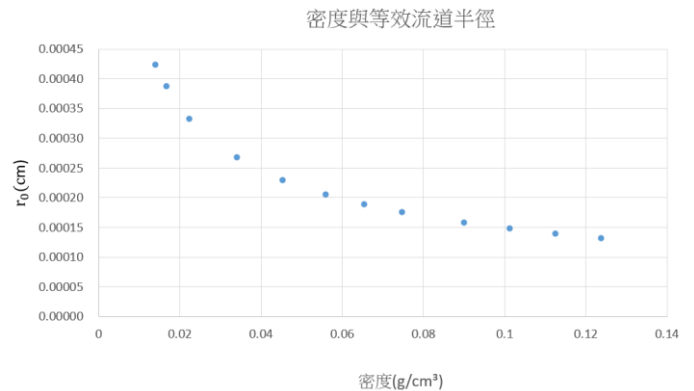


圖 77

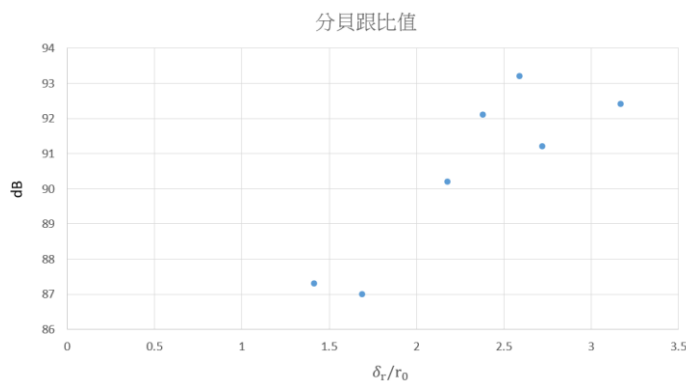


圖 78(左)

捌、結論

一、熱聲效應為氣體吸熱和壓力波動交互作用之現象,發出之聲音為近單頻,同調性、指向性佳之聲源,似雷射,此效應涉及聲波和熱傳之耦合。

(一)聲音上升時會產生過衝現象,聲音穩定後音量與溫差呈現正相關。

二、各參數對溫度、頻率、發聲之關係

(一)試管口徑 2.2cm、長度 20cm 時,只有密度 2~8 是恰好可以使試管發聲,是綜合熱穿透深度和黏性損耗之影響,改成較中間密度加熱到有發聲的時間短、上升快、下降慢之特性。

(二)試管越長可發聲鋼絲絨密度範圍越大,與多孔隙介質特性有關。

(三)管長越長頻率越低,口徑越大頻率越高(與管樂器發聲不同),鋼絲絨密度幾乎不影響頻率。

三、鋼絲絨位置與熱聲效應之關係

(一)鋼絲絨置於試管兩端及距管口 25~30 公分處音量最大,此為綜合熱穿透深度和黏性損耗與試管內空氣的移動及壓縮性之影響。

(二)鋼絲絨位置越靠近管底,管內平均溫度越接近室溫,頻率越低,但太靠近試管,試管整體平均溫度不再變化,頻率也相同。

四、邊界條件

遮蔽管口可使頻率下降,分貝下降,或不發聲,可見邊界條件對於發聲有頗大的影響。

玖、參考文獻資料

- 一、聲波【觀念】縱波駐波(1／2)：開管駐波(選修物理Ⅲ). 吳旭明 x 蔡佳玲-物理學習網
- 二、A high performance thermoacoustic engine M.E. H. Tijani;S. Spoelstra, Journal of Applied Physics 110, 093519 (2011)
- 三、中華民國第 52 屆中小學科學展覽會作品說明書，天籟之音~超級煙囪叭!叭!叭!
- 四、物理教育學刊 2015, 第十六卷第二期, 101-112
- 五、中華民國第 55 屆中小學科學展覽會，淺層地熱之研究與低溫史特林發動機之應用

【評語】 051810

本實驗以試管、鋼絲絨、酒精燈為主體，將鋼絲絨放入試管，並以酒精燈加熱試管，使鋼絲絨兩端產生溫差，而後產生音波之熱聲現象，利用音訊分析軟體進行錄音、分析，搭配溫度感測器記錄、分析溫度，藉以探討此裝置發聲的成因以及相關參數對其聲音的影響。實驗設計、數據、分析的創新性：有詳實的實驗觀察及記錄，以鋼絲絨密度、溫差梯度、溫差位置、試管長度為參數探討各參數的發聲效率。惟熱聲效應是一個常討論的議題，發聲機制與定量分析需有更明確的理論計算支持，及更多不同的設計實驗與創新的想法。

作品海報

聲聲不熄

——熱聲效應之探討

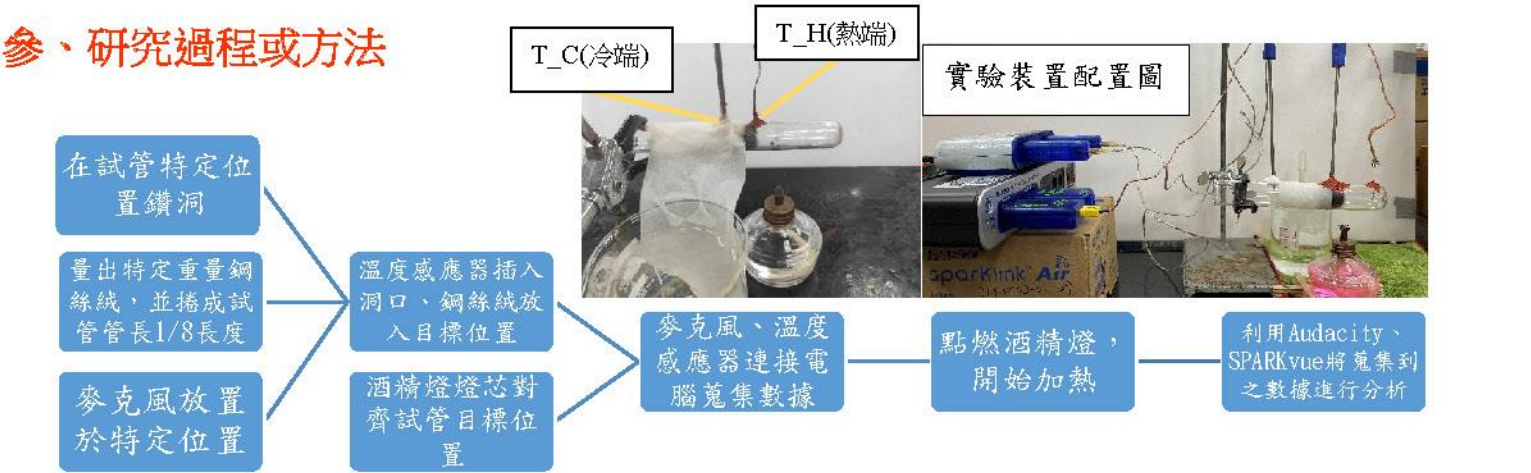
壹、研究動機

一次偶然在網路上看到與此實驗相關的影片，且發現網路上與黎開管、熱聲相關實驗資料很少，因此我們決定以此裝置所發出的聲音為主要研究對象，找出此裝置發聲的特性與原理。

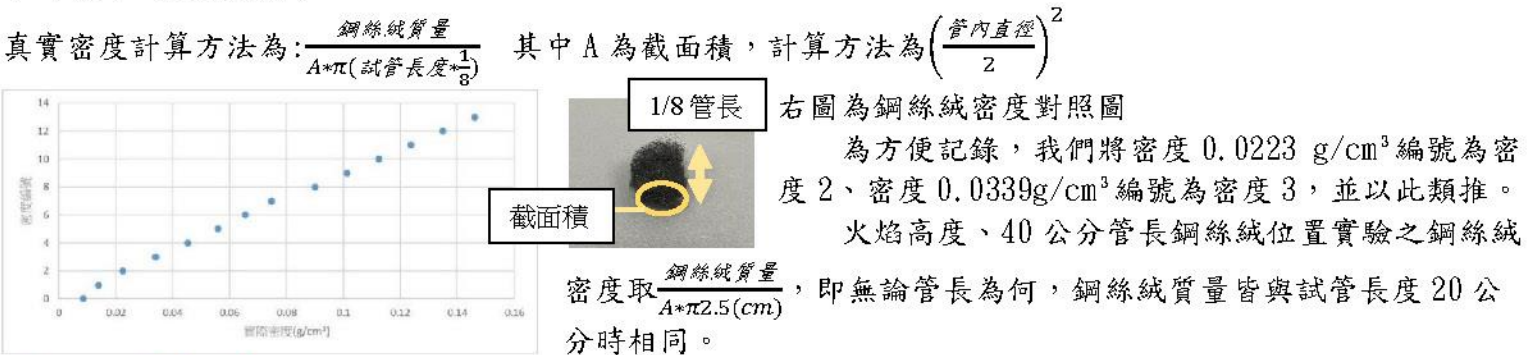
貳、研究目的

- 一、聲音產生之過程
- 二、各變因(鋼絲絨密度及位置、試管長度、試管口徑)對聲音之影響
- 三、溫度與聲音之關係
- 四、各條件下頻率之關係
- 五、分析不同角度所測得之聲音

參、研究過程或方法



(一)鋼絲絨密度對照表



肆、理論探討

一、熱聲(thermoacoustic)

(一)放置堆棧使細管一端高溫一端低溫，使其可即時加熱以及冷卻空氣後，空氣在細管內振盪並形成駐波。與熱機工作原理相似，兩者皆自高溫處吸熱、低溫處放熱並做功或使空氣震盪，但熱聲裝置因熱無法完全轉變為功(說明在 5、6)，效率必小於 1，也可從熱力學第一定律得知其效率小於卡諾熱機。

1. 熱穿透深度: 聲波振盪在 2π 分之一個週期時間內熱量能夠擴散多遠，本熱聲裝置之熱端空氣主要被鋼絲絨(堆棧)加熱，而在鋼絲絨熱穿透深度內之空氣才不至於因為空氣之黏度而消耗太多震動能量，來的及被加熱。熱穿透深度公式為： $\delta_R = \sqrt{\frac{K}{\pi f \rho C_p}}$ (K=空氣熱傳導係數； C_p =空氣等壓比熱； ρ =氣體的密度)

2. 聲速公式為 $v = (331 + 0.6T) \text{ m/s} \cdot T: ^\circ\text{C}$

3. 卡諾效率: 由熱力學第一定律 $Q_h = Q_l + W$ (W=聲音能量)，從高溫源提取熱量轉化為功，卡諾熱機的效率是 $\frac{T_H - T_C}{T_H}$ 。(如右圖)， T_H 可取鋼絲絨之溫度。

4. 不同位置穩定時分貝與單位體積的膨脹量 $\frac{\Delta V(x,t)}{V} = -k2R\cos(kx)\cos\omega t$ 與空氣移動性有關，x 為空氣塊位置。

5. 左圖中 $y_m = |2R\sin kx| \cdot (\frac{\Delta v}{v})_m = |2RK\cos kx| \cdot \lambda = \frac{4L}{1} \cdot \Delta P = P_{聲} - P_{無聲} = -B \frac{\Delta v}{v} = -\rho v_{聲}^2 \frac{\Delta v}{v}$

圖: 參考 swift 之論文

二、熱傳播學

1. 熱傳導: 因分子的無規律運動造成熱量的運輸。熱傳導速率公式為 $\frac{Q}{t} = \frac{\kappa A (T_{hot} - T_{cold})}{d}$ (公式中 k 為熱傳導係數(W/m.k)，Q 為熱量(W)，d 為熱傳導距離(m)，Ac 為熱傳經過物件之截面面積(m2)， ΔT 為冷熱端的溫度差)

2. 熱對流是通過流體的質量運動進行的熱傳遞，同時攜帶能量。熱對流速率公式: $dQ/dt = h A (T_H - T_L)$ (Q: 熱能，t: 時間，h: 平均熱對流係數 A: 截面積， $T_H - T_L$: 溫差)

3. 熱輻射: 輻射功率: $M = \epsilon \sigma T^4$ (輻射發射率: M，物體輻射係數: ϵ ，斯特凡-波茲曼常數: $\sigma = 5.67 \times 10^{-11} \text{ kW/m}^2 \text{ K}^4$ ，物體絕對溫度: T，截面積: A)

三、駐波

左波向右前進 $y_1 = R\sin(kx - \omega t)$ 右波向左前進 $y_2 = R\sin(kx + \omega t)$

兩波頻率、振幅相同，方向相反。

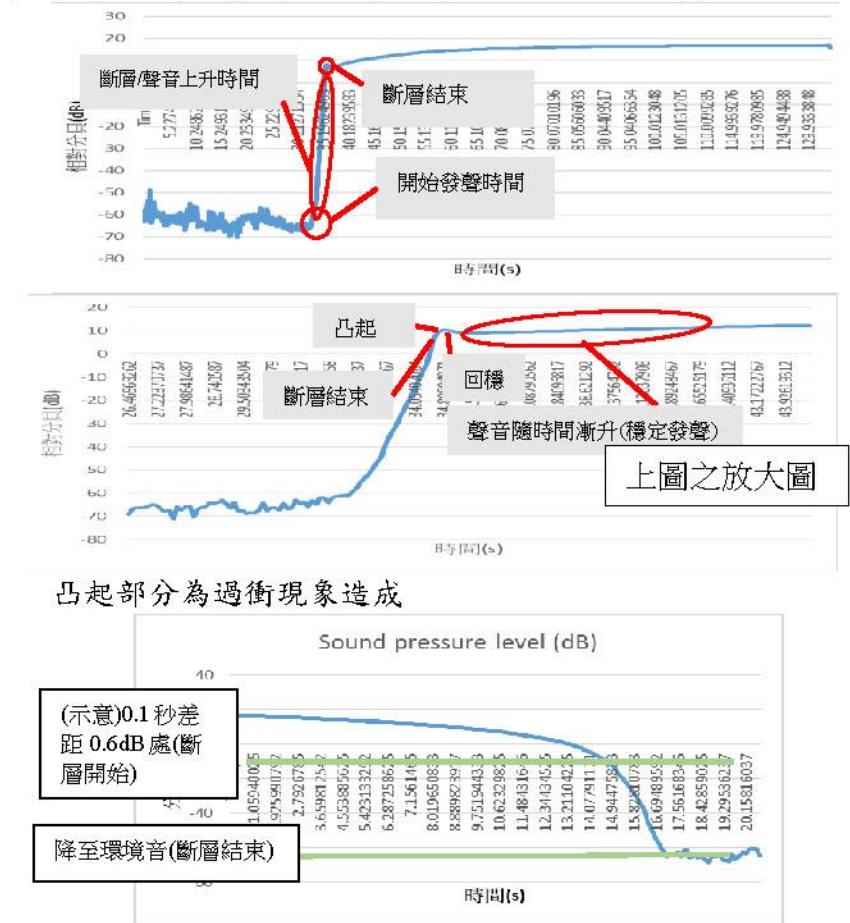
兩波相遇重疊 $y = y_1 + y_2 = R\sin(kx - \omega t) + R\sin(kx + \omega t) = 2R\sin(\frac{2\pi}{\lambda}x) \cos(\omega t)$

註: y_1, y_2, y 為行進波上質點之位移， $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 為波數， $\omega = \frac{2\pi}{T}$ 為角頻率，波速 $v = \frac{w}{k}$ 。閉管駐波: 一端為開口端，一端為自由端駐波頻率 $f = (nv/4l)$ ，n=奇數。

伍、實驗結果與討論

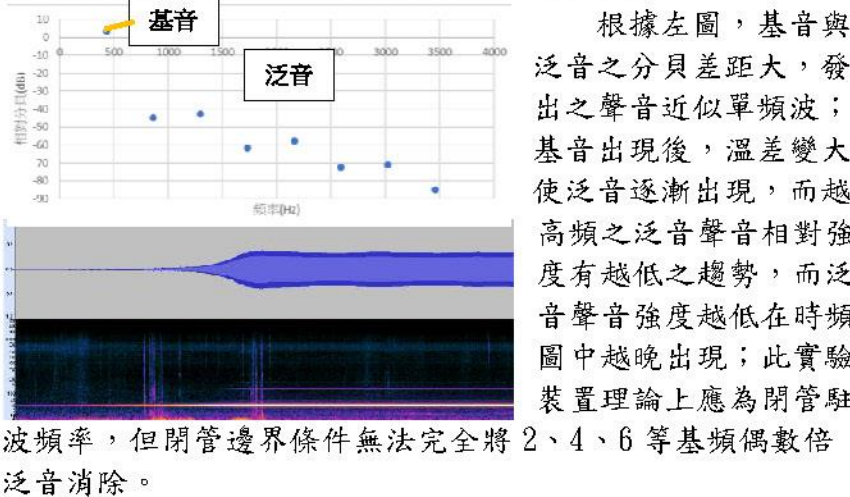
一、聲音出現與消失的過程

(一)加熱發聲、移開火源聲音消失分貝變化及定義



發聲及聲音消失過程出現分貝快速上升或下降，定義其為斷層。

(二)頻率分析(鋼絲絨位置:距試管管底 1/3 試管管長處)

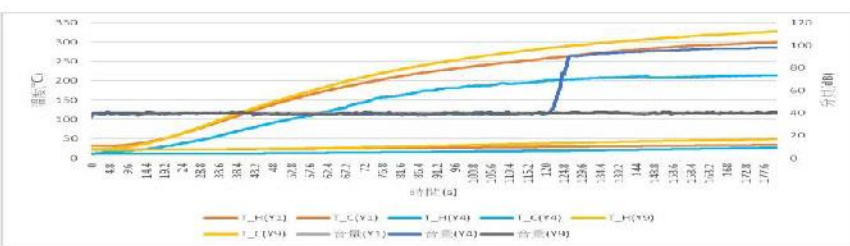
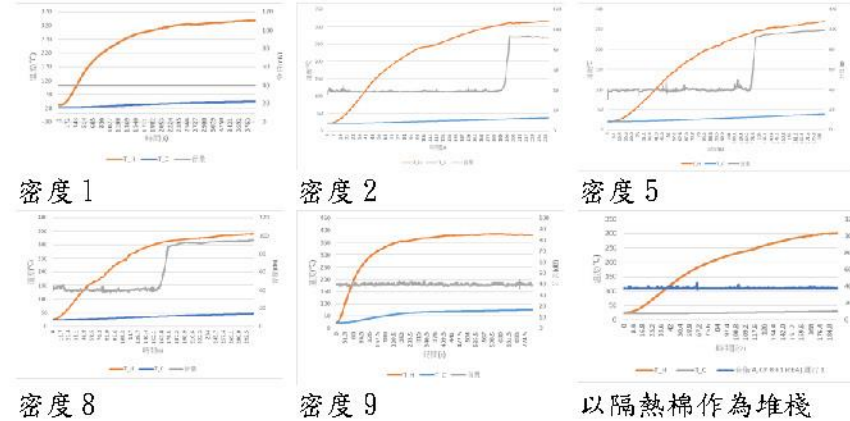


二、各參數對溫度或發聲之影響

(一)鋼絲絨密度對溫度及發聲之關係(試管口徑 2.2cm、長度 20cm)

1. 加熱時溫度及分貝圖

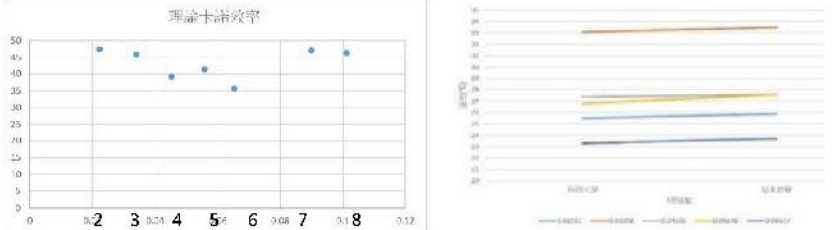
在不同鋼絲絨密度下，將 T_C 與 T_H 的溫度、聲音的分貝疊圖畫出。(密度 1、9 無法發聲，2~8 可發聲)



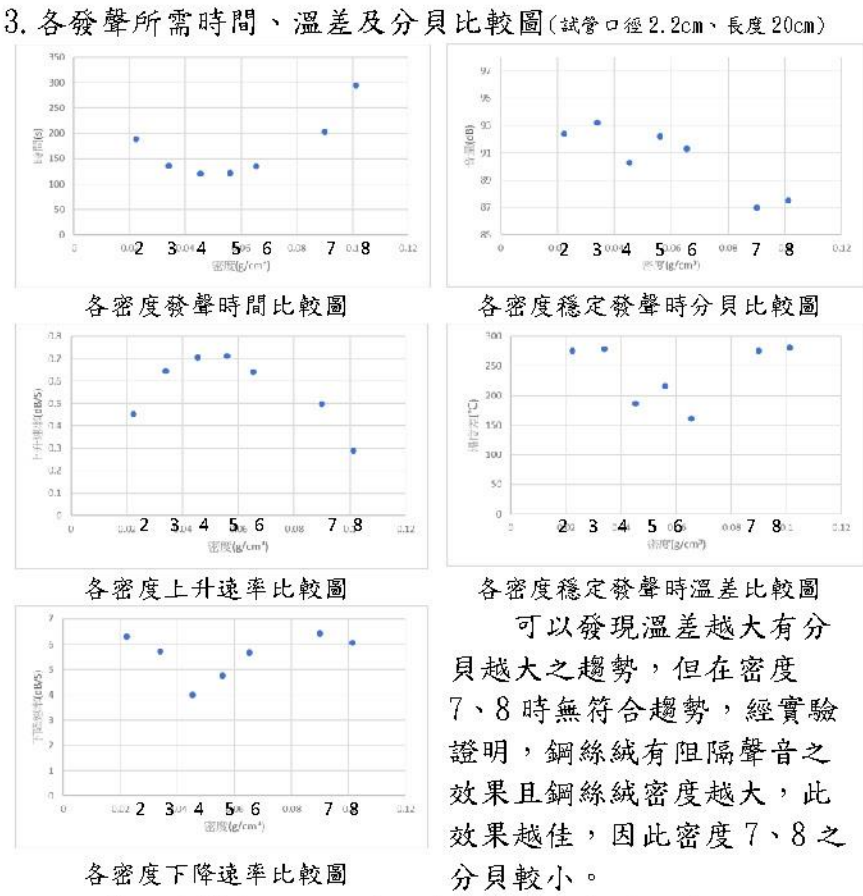
密度 1、9 無法使試管發聲，代表在密度 1 時鋼絲絨過於稀疏，密度 9 時鋼絲絨密度過高，由圖中可知，無法發聲時導熱皆較發聲之密度迅速，穩定溫度也較高，後者是因發聲時 $Q_h = Q_l + W$ (W = 聲音能量)，發聲時一部份熱能會轉為聲能導致。以隔熱棉作為堆棧可以發現冷端上升速率慢很多，顯示熱流無法通過，代表空氣不流通此裝置將無法發出聲音。

2. 停止加熱後 T_C 溫度上升圖

因空氣振盪會使空氣流通的更快，移開火源後短時間內空氣流通減慢，使冷卻速度減慢，但因玻璃比熱較高，熱傳導及對流還再繼續，因此 T_C 端溫度在熱源移開後溫度先些微上升，後下降(幅度約 0.5°C~1°C)，如下圖(右)。



3. 各發聲所需時間、溫差及分貝比較圖(試管口徑 2.2cm、長度 20cm)



根據公式算出，鋼絲絨造成試管內熱穿透深度接近 0.00498cm 時，對發聲會有較佳的作用，才會使鋼絲在特定密度時能較快發聲，此時，分貝上升速率越快，下降速率越慢，我們推測這是綜合熱穿透深度和黏性損耗之影響。

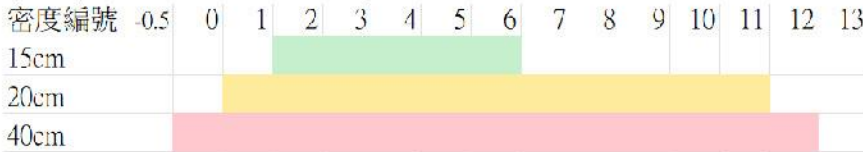
為證明鋼絲絨密度對聲音分貝有一定影響，我們將正弦波產生器接上長管如下圖，並在長管自底端(封閉端)

算起 1/3 處放入不同密度之鋼絲絨，使喇叭發出長管自然頻率之基音、第三諧音、第五諧音，固定喇叭聲音分貝(dB)，測其通過鋼絲絨後之分貝差距，獲得結果如下圖。



4. 不同試管長度可發聲之鋼絲絨密度

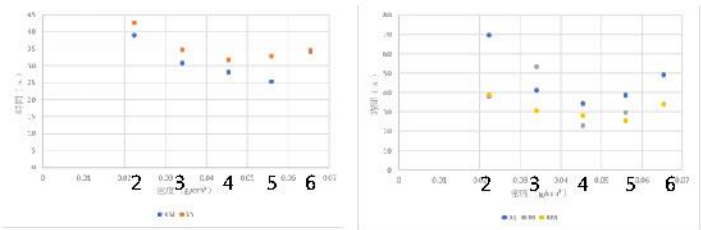
我們將不同密度之鋼絲絨分別置於試管口徑 1.8cm 且長度 15、20、40cm 試管的距管管底 1/3 管長處，找出其可發聲最大最小鋼絲絨密度並繪製出下圖。



根據熱穿透公式 $\delta_R = \sqrt{\frac{K}{\pi f \rho c_p}}$ ，因試管越長，頻率越低，熱穿透深度越大，熱穿透深度越大表示鋼絲絨即使較疏鬆，鋼絲熱能有效傳遞給空氣，因此越長的試管之最低發聲密度越低；而試管越短，最高可發聲鋼絲絨密度越低，推測是由於多孔性介質損耗的特性為頻率越高，損耗越多，所以導致鋼絲絨密度在較不密時就無法發聲。

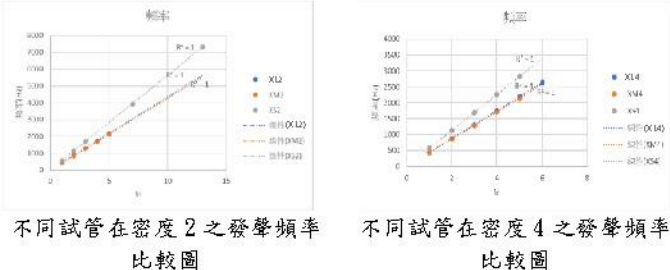
(二)試管長度、口徑對開始發生時間之關係

(XL:長20cm、口徑:2.8cm;M:長20)
試管長度越短、口徑越大，需要越久才能發出聲音
試管，這是因口徑越大，需更多的能量達成所需溫差並發出聲音，因此加熱時間需越長。



試管長度與發聲時間關係圖 試管口徑與發聲時間關係圖

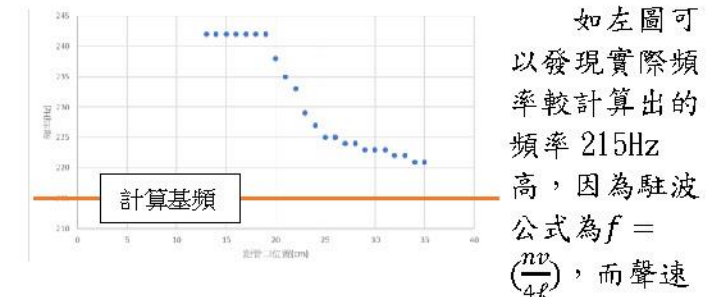
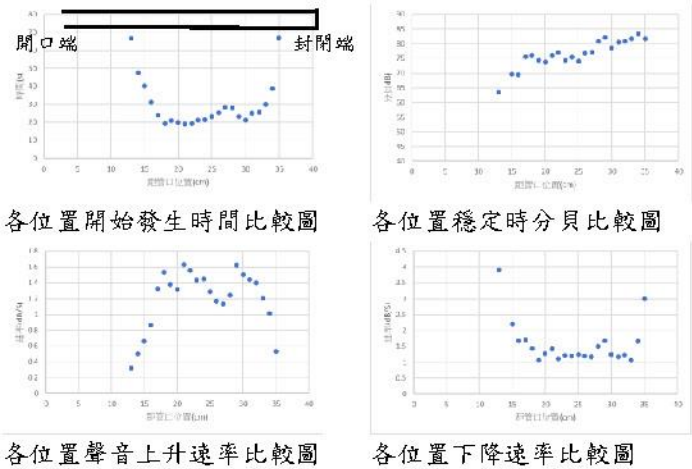
而由下圖可見，當密度為2、4時，管長相同的XL與XM試管中可以觀察到，口徑較大頻率較高。XM與XS口徑相同，管長較長時頻率較低。



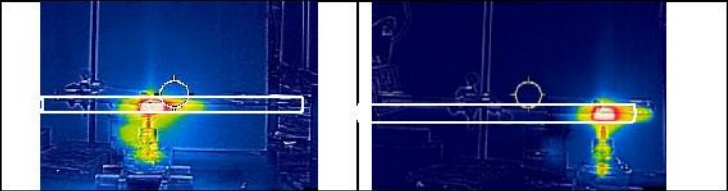
不同試管在密度2之發聲頻率比較圖 不同試管在密度4之發聲頻率比較圖

(三)鋼絲絨位置對開始發聲時間、聲音上升下降之速率及聲音分貝之關係(試管口徑1.8cm、長度40cm)

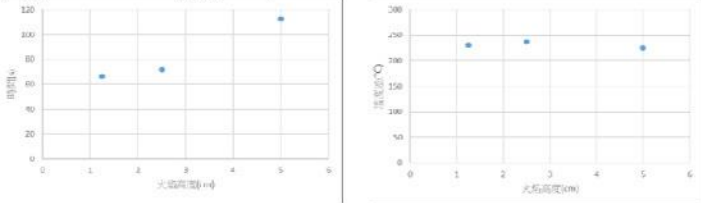
將鋼絲絨置於試管兩端以及距管口25~30公分時較慢發聲，又以置於試管兩端最慢。而圖中也符合越快發聲上升速率越快，下降速率越慢之趨勢，如同二-(一)-3之說法。不同位置穩定時分貝不同之現象與 $\frac{\Delta V(x,t)}{V} = -k2R\cos(kx)\cos\omega t$ 及空氣移動性有關，x為空氣塊位置。



如左圖可以發現實際頻率較計算出的頻率215Hz高，因為駐波公式為 $f = \frac{nv}{4L}$ ，而聲速 $V=331+0.6t$ ，鋼絲絨越靠近管口，整根試管平均溫度因的熱空氣柱越長而越高，進而使V較大，頻率也隨之較大，而當鋼絲絨足夠遠離管底時，頻率不變，推測管內平均溫度可能就不再改變。而此現象可能也與試管受熱面積有關。



(四)試管距火焰之遠近對溫差及發聲時間之影響(試管口徑1.8cm、長度20cm)



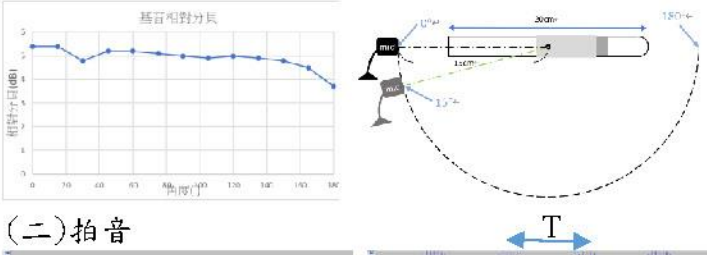
火高開始發聲時間比較圖 火高溫差比較圖

由上圖(左)可發現，發聲時冷熱端溫差約在224~237°C，在可發聲範圍內(距火源0~7.8cm)，試管距火焰高度越大，試管單位面積在單位時間內所吸收的熱降低，加熱時間就越長。

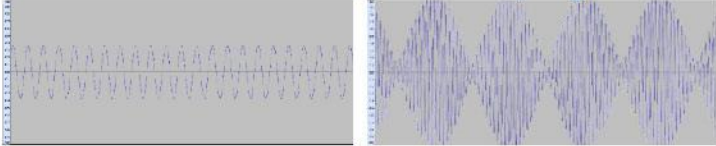
三、熱聲聲音特性

(一)指向性

將指向性麥克風在發聲試管周圍測分貝(0°~180°)，發現裝置之發聲具指向性。



(二)拍音



一根試管穩定發聲

兩根試管穩定發聲

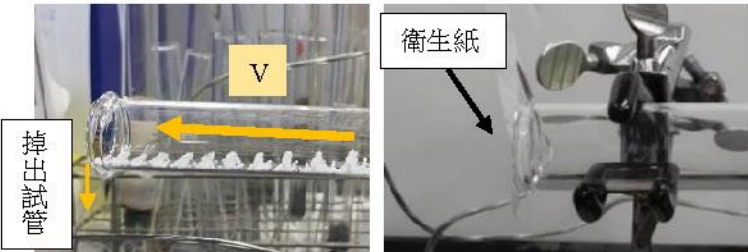
第一根基頻(Hz)	第二根基頻(Hz)	波包頻率(Hz)
376	396	20

兩根試管發聲時互相干涉產生拍音，根據波包頻率公式： $T = \frac{1}{f_1 - f_2}$ 實驗結果與理論相符。

四、試管氣流

(一)管口空氣流通方向

試管發聲時，衛生紙會飄向管口如下圖(右)。



(二)遮蔽部分管口觀測

使用輕黏土分別遮蔽發聲試管之管口中間、管口外圍，發現遮蔽管口中間(表面積:2.5434cm²)時，發聲頻率會變低，且音量下降，遮蔽外圍(表面積:4.8815cm²)時，試管則無法發聲。

(三)試管內空氣流動

在試管內放入直徑0.3mm的保麗龍球，發聲後，保麗龍球呈現如上圖(左)，且緩慢向前移動後掉出試管，且越靠近管口之保麗龍小球移動的速度越快，證實靠近管口之空氣移動性較佳這點。

陸、結論

一、熱聲效應為氣體吸熱和壓力波動交互作用之現象，發出之聲音為近單頻，同調性、指向性佳之聲源，似雷射，此效應涉及聲波和熱傳之耦合。

(一)聲音上升時會產生過衝現象，聲音穩定後音量與溫差呈現正相關。

二、各參數對溫度、頻率、發聲之關係

(一)試管口徑2.2cm、長度20cm時，只有密度2~8是恰好可以使試管發聲，是綜合熱穿透深度和黏性損耗之特性，此綜合效率較佳時有發聲的時間短，上升快、下降慢之特性。

(二)試管越長可發聲鋼絲絨密度範圍越大，與多孔介質特性有關。

(三)管長越長頻率越低，口徑越大頻率越高(與管樂器發聲理論不同)，鋼絲絨密度幾乎不影響頻率。

三、鋼絲絨位置與熱聲效應之關係

(一)鋼絲絨置於試管兩端及距管口25~30公分處音量最大，此為綜合熱穿透深度和黏性損耗與試管內空氣的移動及壓縮性之影響。

(二)頻率受到管內溫度影響，鋼絲絨位置越靠近管底，管內平均溫度越接近室溫，頻率越低，但近管口一定範圍內，試管整體平均溫度會相同，頻率也相同。

柒、參考資料

一、物理教育學刊 2015，第十六卷第二期，101-112

二、A high performance thermoacoustic engine M. E. H. Tijani; S. Spoelstra Journal of Applied Physics 110, 093519 (2011)