

中華民國第四十六屆中小學科學展覽會  
作品說明書

---

國中組 生活與應用科學科

佳作

030805

聲音與溫度的對話－探討聲波冷卻

學校名稱：臺中市立安和國民中學

|   |                     |
|---|---------------------|
| 作者：<br>國二 蔡雅馨<br>國二 黃梓燕<br>國二 陳心茹<br>國二 陳奕如 | 指導老師：<br>黃富翔<br>王誌毅 |
|---|---------------------|

關鍵詞：熱聲效應、熱滲透深度、比熱

## 摘要

本研究是利用「熱聲效應」來探討聲波冷卻的原理，並製作一個簡單的聲波冷卻裝置，而此裝置分別由揚聲器、共振管、片堆及熱交換器等四個主要部分所構成，並利用聲音編輯軟體讓揚聲器產生所需的頻率之聲波，讓共振管內產生共振駐波使工作氣體能作壓縮及膨脹，並且在片堆內能將聲能轉換成熱能以達到降溫的效果。

本研究針對不同的聲波頻率、片堆間隙及熱交換器高度來探討聲波冷卻的效率。研究後發現下列幾點：

### 一、聲波頻率愈高並不能提升冷卻的效率

根據聲波冷卻的原理發現工作氣體在進行熱交換循環時有一定的週期時間，當聲波的頻率愈高則工作氣體進行熱交換的週期時間愈短，反而無法有效的進行熱交換使得冷卻的效果降低。

### 二、片堆的間隙大小與共振管內的工作氣體性質及聲波頻率有關

本研究的片堆間隙是以  $357\text{ Hz}$  的聲波頻率計算而得，並根據聲波冷卻的原理將片堆的間隙的大小設計成接近四倍的熱滲透深度。經實驗的結果發現在  $357\text{ Hz}$  的頻率下，片堆間隙愈接近四倍的熱滲透深度時所得之冷卻效果愈佳。

### 三、熱交換銅片的高度愈高其冷卻效果愈好

本研究在加裝熱交換器的實驗結果發現，於相同的片堆間隙及聲波頻率的條件下，高度較高的熱交換器之冷卻效果確實會比高度較低者佳。

## 壹、研究動機

在二年級上學期的自然與生活科技課程中，我們學到了「波的傳遞性質」，波的頻率、波長及週期等。在課堂中老師上到聲波的部分時，也特別提到利用聲波傳遞能量的原理來讓溫度產生變化的例子，使我們對聲波有更進一步的了解，且在這之後便開始思考一些問題，若頻率改變時是否會影響溫度的變化？若改變片堆的間隙是否也會影響溫度的變化？熱交換器的尺寸大小對溫度的變化是否也會有影響？於是和老師一起討論如何利用聲波冷卻的原理來探討聲波與溫度之間的關係。

## 貳、研究目的

- 一、探討聲波冷卻的原理。
- 二、探討聲波頻率對溫度變化的影響。
- 三、探討片堆間隙對溫度變化的影響。
- 四、探討熱交換器的高度對溫度變化的影響。

## 參、研究設備及器材

### 一、硬體部分：

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 桌上型電腦 (CPU P4 1.8G) 內含音效卡     | 1 台 |
| 共振管 (內徑 2.6cm 外徑 3cm 長度 24cm) | 1 支 |
| 揚聲器 (8 歐姆 直徑 6cm 平均功率 20W)    | 1 個 |
| 彩色底片 (KODAK 200 36 底片)        | 3 卷 |
| 3M 彩色膠帶 (0.2mm × 9mm)         | 3 卷 |
| 銅片 (5mm × 0.2mm × 200mm)      | 2 片 |
| 銅片 (10mm × 0.2mm × 200mm)     | 2 片 |
| 負溫度熱敏電阻 (DKF103N3 10KΩ ±3%)   | 6 個 |
| 電子式三用電錶                       | 2 個 |

### 二、軟體部分：

|                     |     |
|---------------------|-----|
| GoldWave 5.0        | 1 套 |
| Microsoft Office XP | 1 套 |

### 三、實驗裝置示意圖：

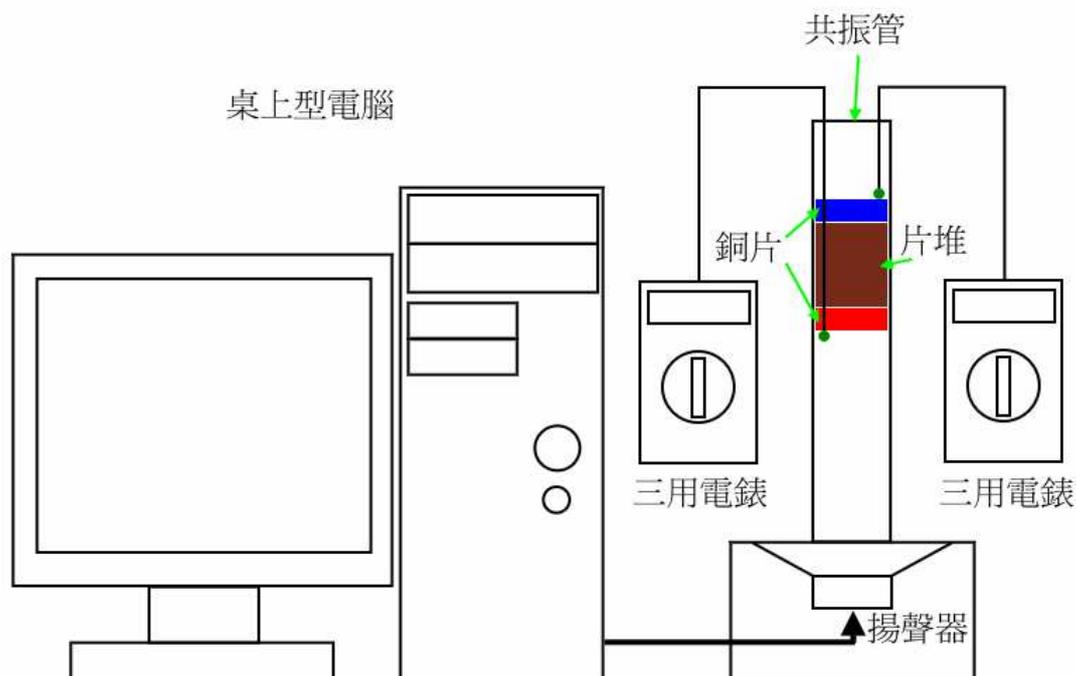


圖 1 實驗裝置示意圖

## 肆、研究過程或方法

### 一、研究方法

#### (一) 理論探討

##### 1. 聲波的性質

##### (1) 聲波傳遞原理

聲波的傳遞是藉由介質的壓縮擾動，而形成一個沿傳遞方向做疏密變化的縱波 (longitudinal wave) 如圖 2 中的氣體分子壓縮擾動所示：

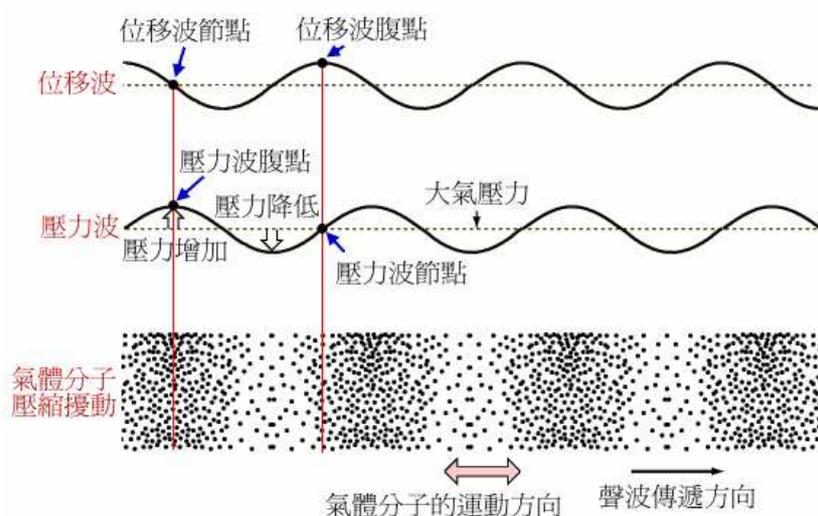


圖 2 聲波傳遞示意圖

由圖 2 可看出聲音藉由氣體分子壓縮擾動所形成的縱波能以位移波及壓力波二個橫波來表示。若聲波的頻率為固定，則壓力波及位移波可以視為二個相

位相差 90 度的正弦波，且可以發現壓力波的節點（node）恰為位移波的腹點（anti-node），而壓力波的腹點恰為位移波的節點。

(2) 聲波的速度

聲波的速度即為聲波的傳播速度，只和它的傳遞介質密度、溫度有關，與聲音的頻率、音量無關。若由波的定義來看，假設聲波的頻率為  $f$ ，其在空氣中的波長為  $\lambda$ ，則聲波的速度  $v$  與頻率  $f$  及波長  $\lambda$  的關係為：

$$v = \lambda f \quad (1)$$

由於聲波在空氣中的速度與溫度有關，所以可以用 (2) 式來表示：

$$v_{\text{sound in air}} \approx 331.4 + 0.6T_c \quad (m/s) \quad (2)$$

(2) 式中的  $T_c$  為空氣的攝氏溫度，因此由 (1) 及 (2) 式可得聲波在空氣中傳遞時其頻率及波長與空氣溫度之間的關係為：

$$\lambda f \approx 331.4 + 0.6T_c \quad (3)$$

2 · 單邊閉口型空氣柱內的駐波現象

(1) 駐波(standing wave)的定義

若有兩個振幅、波長、頻率皆相同的正弦波，一個為入射波另一個為反射波當其傳遞方向相反時會形成建設性干涉合成波，此現象即為駐波，如圖 3 所示：

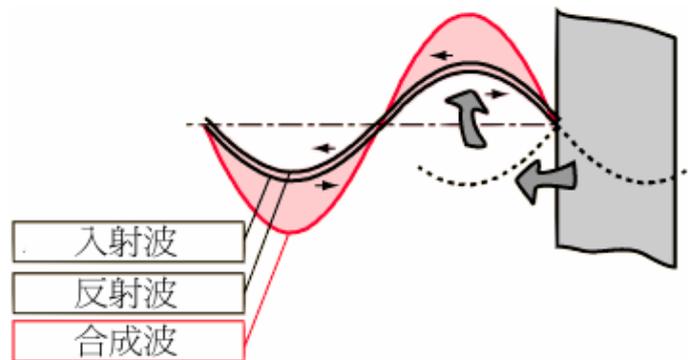


圖 3 駐波示意圖

由圖 3 可知合成的駐波其波長、週期皆與入射波及反射波相同，但振幅卻比入射波及反射波大。

(2) 單邊閉口型空氣柱內的駐波

當聲波在單邊口型空氣柱內傳播時，其壓力波與位移波就如圖 4 所示：

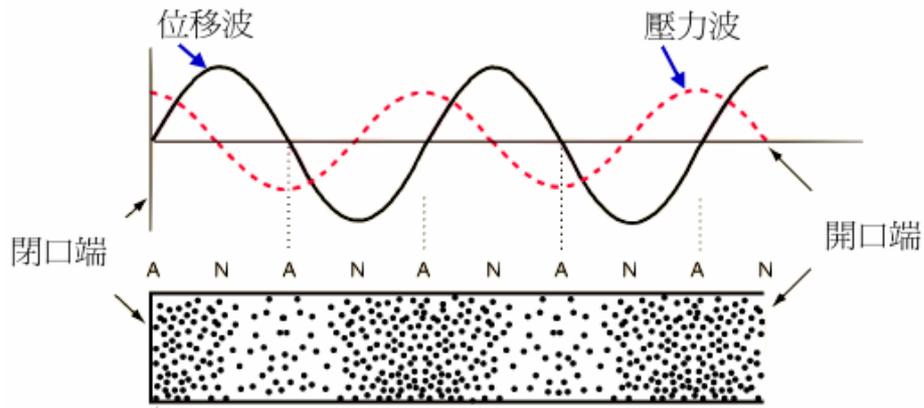


圖 4 聲波在單邊閉口型空氣柱內傳播示意圖

由圖中可以知道在空氣柱的閉口端，其聲波的壓力為最大而氣體氣分子的位移為零，但相反的在空氣柱的開口端，其聲波的壓力為零（以標準大氣壓為基準）而氣體氣分子的位移為最大，因此不同聲波頻率對單邊閉口型空氣柱內所液生的駐波波形也會不同，如圖 5 所示：

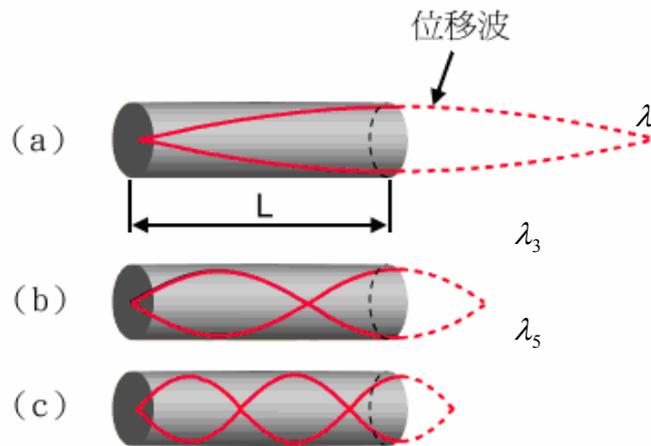


圖 5 單邊閉口型空氣柱內不同頻率所對應的駐波波形

對於圖 5 而言若聲波在空氣柱內的傳遞速度為  $v$ ，則對於 (a) 而言，假設其位移波的波長為  $\lambda_1$ 、頻率為  $f_1$ 。由圖中可看出  $\lambda_1 = 4L$ ，因此由 (1) 式可知：

$$f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{4L} \quad (4)$$

同理對於 (b) 而言，假設其位移波的波長為  $\lambda_3$ 、頻率為  $f_3$ 。由圖中可看出  $\lambda_3 = \frac{4}{3}L$

因此：

$$f_3 = \frac{v}{\lambda_3} = \frac{v}{\frac{4L}{3}} = \frac{3v}{4L} \quad (5)$$

對於 (c) 而言，假設其位移波的波長為  $\lambda_5$ 、頻率為  $f_5$ 。由圖中可看出  $\lambda_5 = \frac{4}{5}L$

因此：

$$f_5 = \frac{v}{\lambda_5} = \frac{v}{\frac{4L}{5}} = \frac{5v}{4L} \quad (6)$$

由上述的推導可以得出單邊閉口型空氣柱內的聲波頻率、速度及空氣柱長度之間的關係為：

$$f_n = \frac{nv}{4L} = \frac{n(331+0.6T)}{4L}, \text{ 其中 } n=1,3,5,\dots \quad (7)$$

### 3 · 聲波冷卻的原理

聲波冷卻是利用熱聲效應的原理讓熱能與聲能的產生相互轉換的機制，例如將兩段不同溫度的玻璃管接合時，會造成兩段玻璃管內的空氣膨脹和壓縮，因而發出聲音，此即為熱聲效應。

聲波冷卻的裝置是應用熱聲效應以產生冷卻能力，而其主要的構成元件有下列四項：

- (1) 聲波驅動器 (Wave Generator)
- (2) 共振管 (Resonator Tube)
- (3) 片堆 (Stack)
- (4) 熱交換器 (Heat Exchanger)

在聲波冷卻的裝置中利用聲波驅動器讓共振管內產生一個單一頻率的共振聲波，而此共振的聲波會對共振管內的工作氣體做功，使其在共振管內做往覆的運動，當共振管內的工作氣體受到不同的聲波壓力擾動的作用時，會使得片堆中的工作氣體壓縮及膨脹而產生溫度變化，然後再透過熱交換器進行熱量傳遞。

由於聲波冷卻是利用工作氣體在片堆中進行壓縮及膨脹而產生溫度的變化，因此片堆在聲波冷卻裝置中即扮演核心元件的角色。

如圖 6 所示，即為利用聲波達到冷卻效果的循環過程：

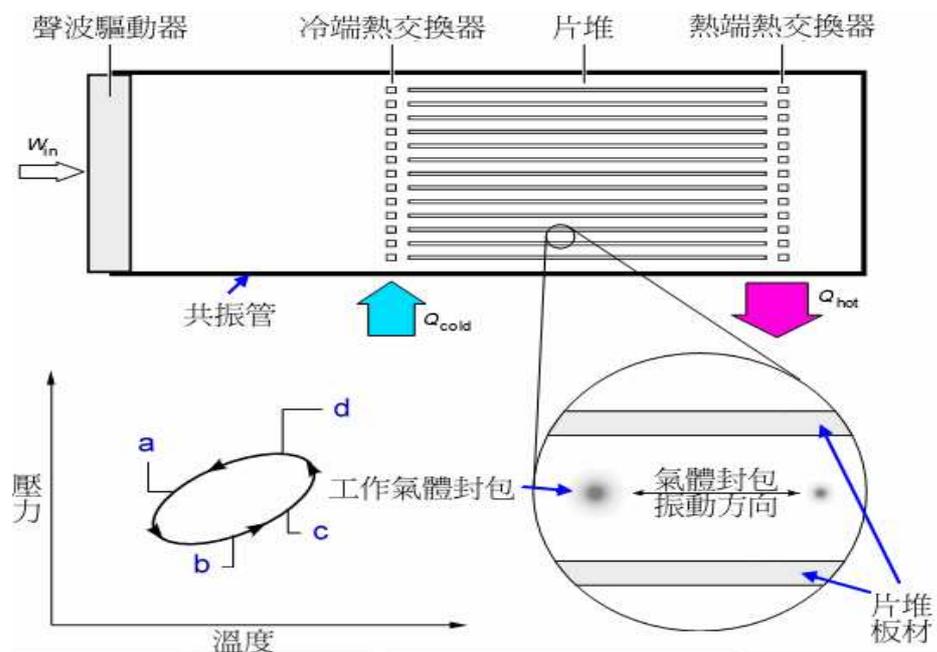


圖 6 聲波冷卻循環過程示意圖

由圖 6 可以知道聲波冷卻的工作原理基本上可分為圖中的 a、b、c、d 四個步驟：

- (a) 氣體封包在片堆中往左邊移動時，正好往壓力波的節點(node)方向移動，此時壓力變小使體積開始膨脹而降低溫度。
- (b) 當氣體封包在片堆中移動到壓力波的節點時，因氣體的溫度降至比冷交換器還低，所以氣體開始由冷交換器吸收熱量 ( $Q_{cold}$ )。
- (c) 氣體封包開始向右往壓力波的腹點移動，此時壓力增加體積受到壓縮而使氣體封包的溫度開始上升。
- (d) 當氣體封包在片堆中移動到壓力波的腹點時，此時壓力最大體積最小且溫度最高，所以氣體封包會將熱量釋放給熱交換器 ( $Q_{hot}$ )。

在共振管中的片堆是由一片片低導熱度的材質所堆疊而成，而片堆內每片板材之間以特定距離  $d$  隔開。片堆的間隔距離  $d$  與工作氣體的熱滲透深度 (The thermal penetration depth,  $\delta_k$ ) 有關，而工作氣體的熱滲透深度  $\delta_k$  又與工作氣體的導熱率

( $k$ )、密度 ( $\rho$ )、定壓比熱 ( $c_p$ ) 及駐波的頻率 ( $f$ ) 有關，其之間的關係可以

(8) 式表示：

$$\delta_k = \sqrt{\frac{k}{\pi f \rho c_p}} \quad (8)$$

## (二) 硬體架設

本研究的實驗裝置如圖 7 所示：



圖 7 實驗裝置

## 1. 聲波驅動器

在本實驗裝置中，聲波驅動器是以一個直徑 6cm，線圈阻值為 8 歐姆，平均功率為 20W 的揚聲器配合 GoldWave 軟體透過電腦音效卡讓揚聲器發出固定頻率的聲波，使共振管內產生共振駐波，如圖 8 所示：

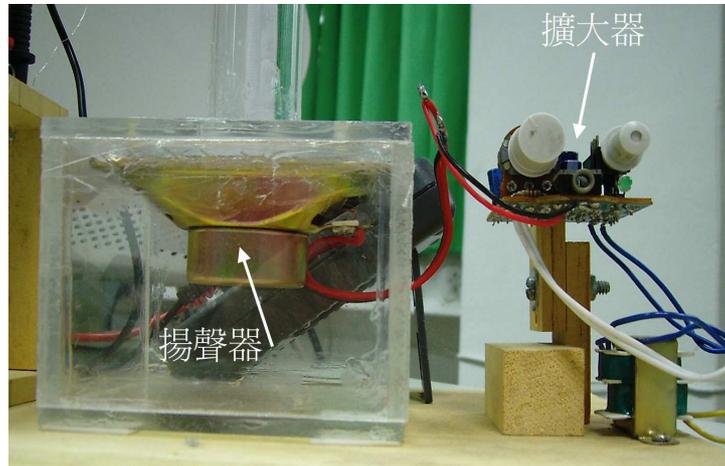


圖 8 聲波驅動器

## 2. 片堆

本研究所使用的片堆材料為 KODAK 200 底片，在底片的背面每隔 5mm 貼上一條彩色膠帶，讓底片捲繞後能形成適當的間隙，如圖 9 所示：

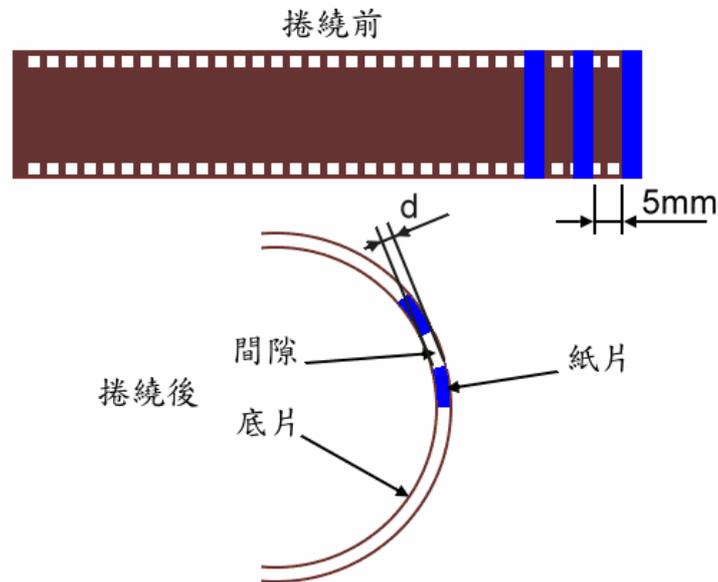


圖 9 底片捲繞而成的片堆示意圖

根據 (8) 式可知熱滲透深度與頻率有關，因此先由 (7) 式計算出頻率  $f_1$ ：

共振管長度 ( $L$ ):  $24\text{ cm} = 0.24\text{ m}$

室溫:  $20^\circ\text{C}$

$$\Rightarrow f_1 = \frac{331 + 0.6 \times 20}{4 \times 0.24} \cong 357\text{ Hz}$$

另外 (8) 式的各參數值為：

空氣導熱率 ( $k$ ) :  $0.005736 \text{ cal/m} \cdot \text{K} \cdot \text{s}$

空氣密度 ( $\rho$ ) :  $1205 \text{ g/m}^3$

乾空氣定壓比熱 ( $c_p$ ) :  $0.240 \text{ cal/g} \cdot \text{K}$

將頻率及上列各參數代入 (8) 式即可求得熱滲透深度為：

$$\Rightarrow \delta_k = \sqrt{\frac{0.005736}{\pi \times 357 \times 1205 \times 0.24}} = 1.33 \times 10^{-4} \text{ m} = 0.133 \text{ mm}$$

根據參考文獻四可知片堆的最佳間隙為  $d = 4\delta_k = 0.532 \text{ mm}$ ，因此本實驗製作間隙  $d$  分別為  $0.4 \text{ mm}$  及  $0.6 \text{ mm}$  等二種片堆，如圖 10 所示。

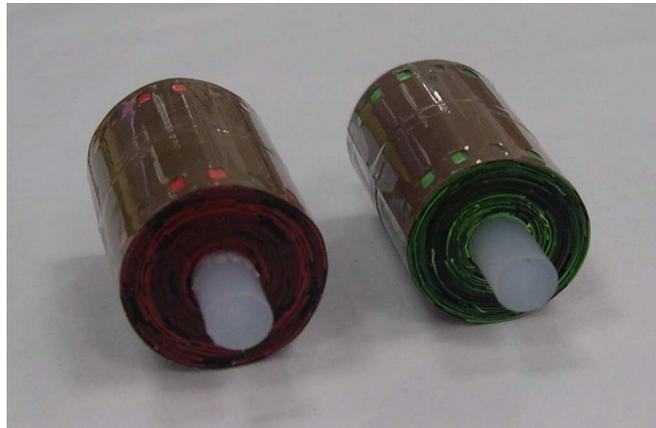


圖 10 完成後之片堆

### 3 · 共振管

利用外徑 3cm、內徑 2.6cm、長度 24cm 的透明壓克力管作為本實驗的共振管，如圖 11 所示：



圖 11 壓克力共振管

#### 4 · 熱交換器

將厚度為 $0.2\text{mm}$ 的銅片裁成 $(5\text{mm} \times 200\text{mm})$ 及 $(10\text{mm} \times 200\text{mm})$ 各兩片，並捲繞成柱狀，如圖 12 所示：



圖 12 熱交換器銅片

#### 5 · 負熱敏電阻：

本實驗所採用的負溫度熱敏電阻型號為 DKF103N3  $10\text{K}\Omega \pm 3\%$  (如圖 13 所示)，其電阻值與溫度之間的關係為：



圖 13 DKF103N3  $10\text{K}\Omega \pm 3\%$ 負熱敏電阻

(圖摘錄自廣華電子網站 <http://www.cpu.com.tw/kh/index.html>)

$$R = R_0 \exp B \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \quad (9)$$

$R$ ：末電阻值

$R_0$ ：初電阻值

$B$ ：負溫度熱敏電阻參數 (本實驗所使用的負溫度熱敏電阻參數為  $B = 324\text{K}$ )

$T$ ：末溫度 (單位為  $\text{K}$ )

$T_0$ ：初溫度 (單位為  $\text{K}$ )

修改 (9) 即可由末電阻值直接求得末溫度：

$$T = \frac{T_0}{1 + \frac{T_0}{B} \ln\left(\frac{R}{R_0}\right)} - 273 \quad (\text{單位 } ^\circ\text{C}) \quad (10)$$

## (二) 研究過程

本研究主要是希望探討片堆的間隙、聲波頻率及熱交換片對共振管內的工作氣體之溫度的影響。

實驗一：探討在未加裝熱交換片的情況下，片堆間隙與頻率對溫度變化的影響。

- 1、先根據 (7) 式利用 GoldWave 軟體產生所需的  $f_1$ 、 $f_3$ 、 $f_5$  頻率聲音檔案 (如圖 14 所示)：

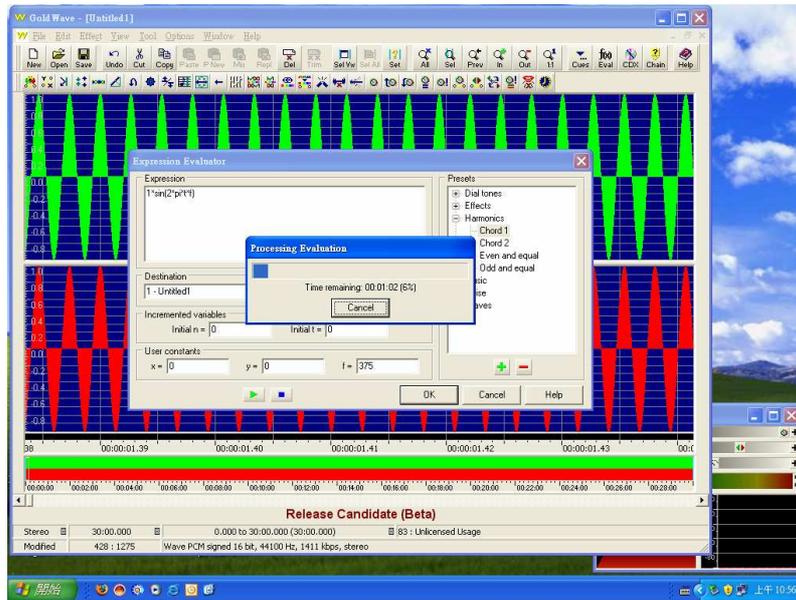


圖 14 利用 GoldWave 軟體產生所需的頻率

- 2、將二個負熱敏電阻分別以膠帶固定在間隙為  $0.4\text{ mm}$  片堆的上下二端，然後放入共振管內，並置於離閉口端  $3\text{ cm}$  處 (如圖 15 所示)。

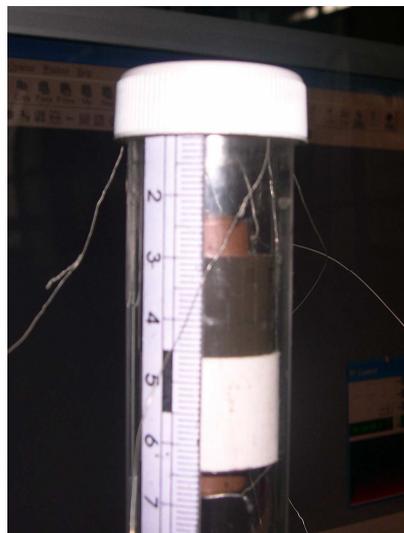


圖 15 片堆置入共振管內示意圖

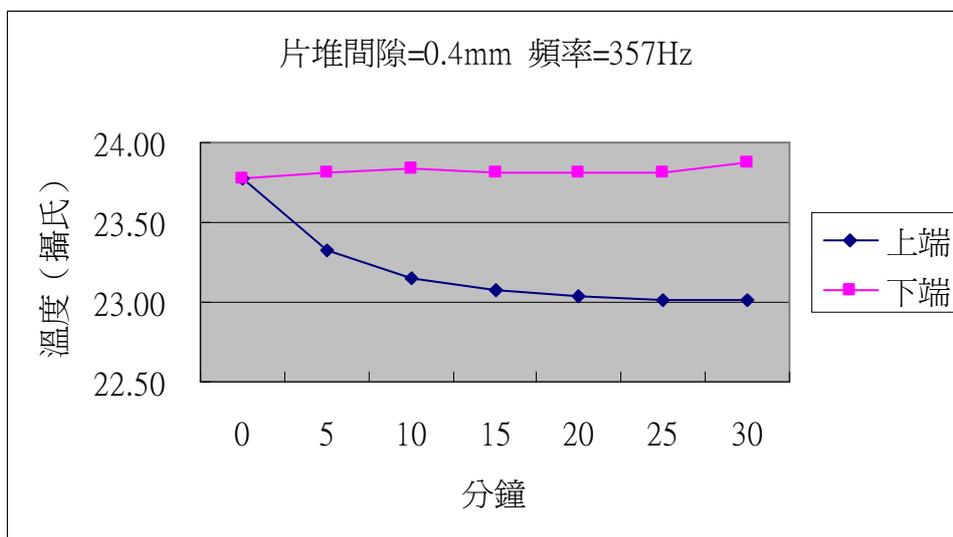
- 3、將二個負熱敏電阻分別接到三用電錶，並打開三用電開關調整至測量電阻  $20\text{ K}\Omega$  的位置上，並記錄其電阻值以作為初始電阻值。
- 4、利用 GlodWave 播放聲波，並每隔 5 分鐘再記錄電阻值一次(總測試時間為 30 分鐘)。
- 5、將所記錄的電阻值利用 (10) 式轉換成溫度，以觀察其變化情形。
- 6、再將片堆改成間隙為  $0.6\text{ mm}$  的片堆，然後再依步驟 2~5 開始測試。

實驗二：探討在有加裝熱交換片的情況下，片堆與頻率對溫度變化的影響。

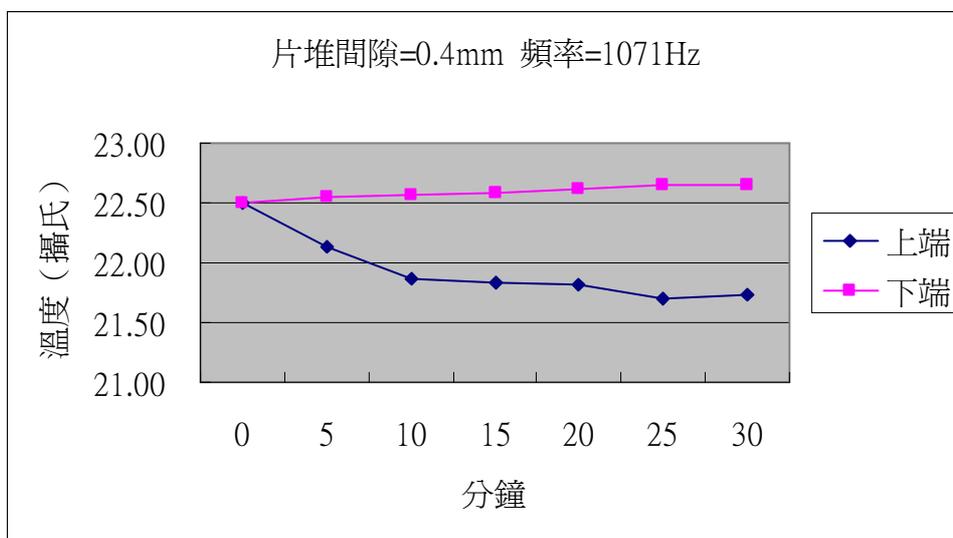
- 1、將  $5\text{ mm} \times 200\text{ mm}$  的銅片固定在片堆的上下二端。
- 2、按照實驗一的步驟操作一次。
- 3、再將銅片換成  $10\text{ mm} \times 200\text{ mm}$  的規格，然後再依實驗一的步驟操作一次。

## 伍、研究結果

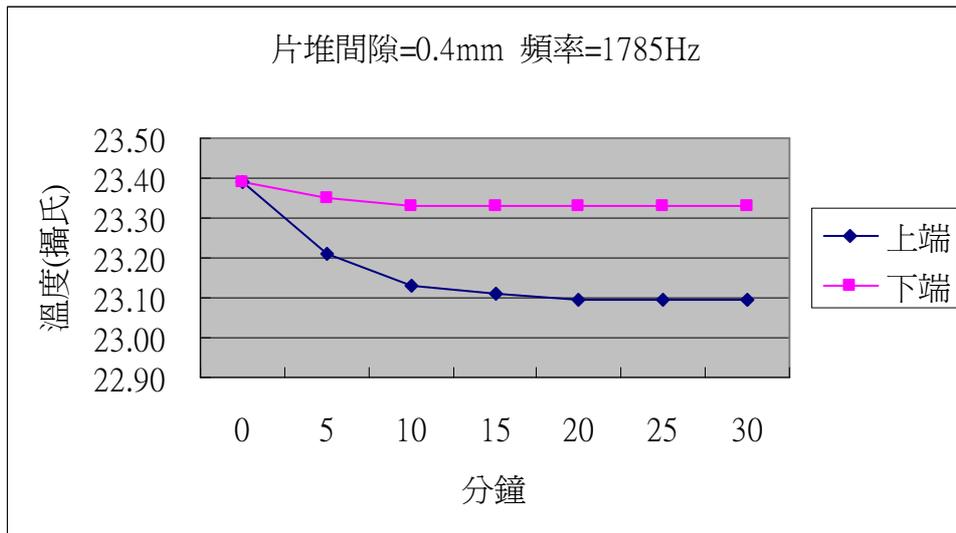
實驗一：在無熱交換銅片的情況下，不同的片堆間隙與頻率對溫度變化的影響



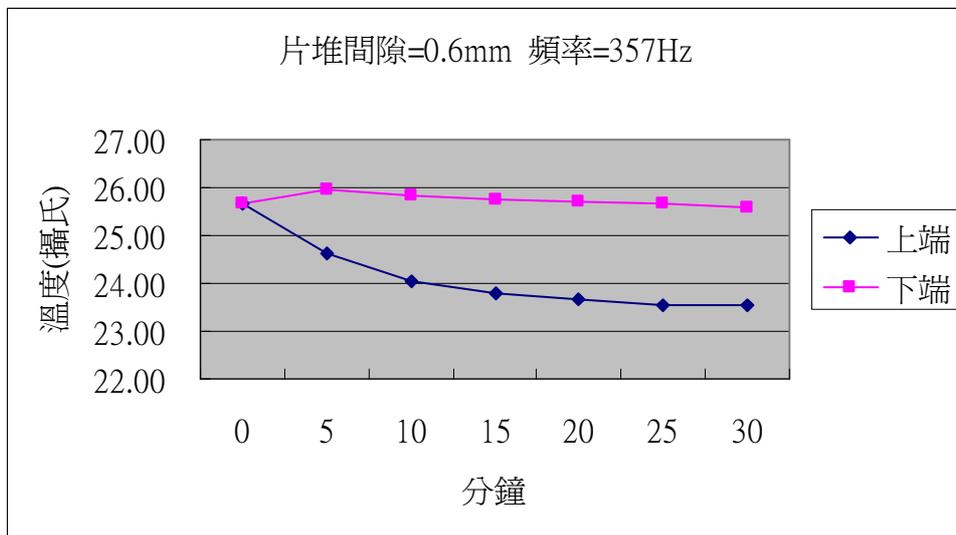
圖表 1



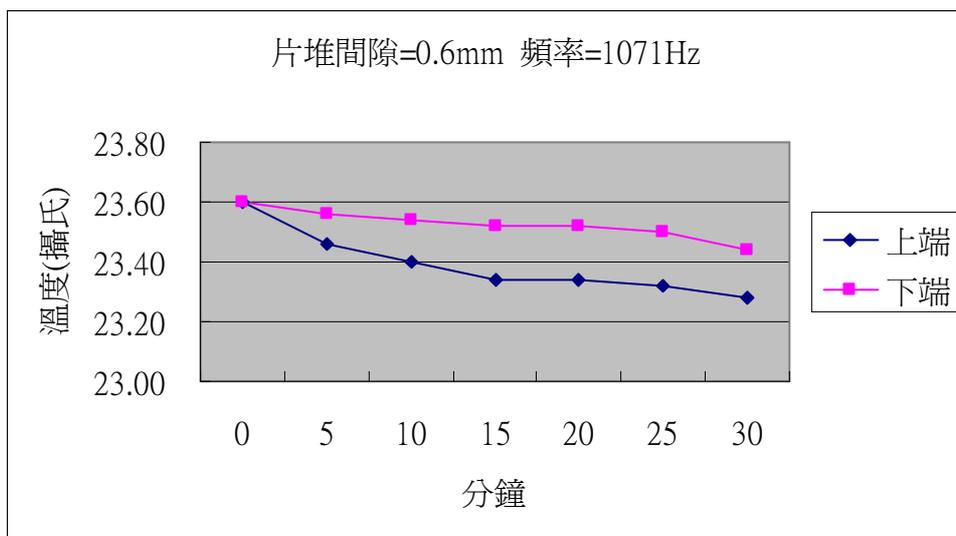
圖表 2



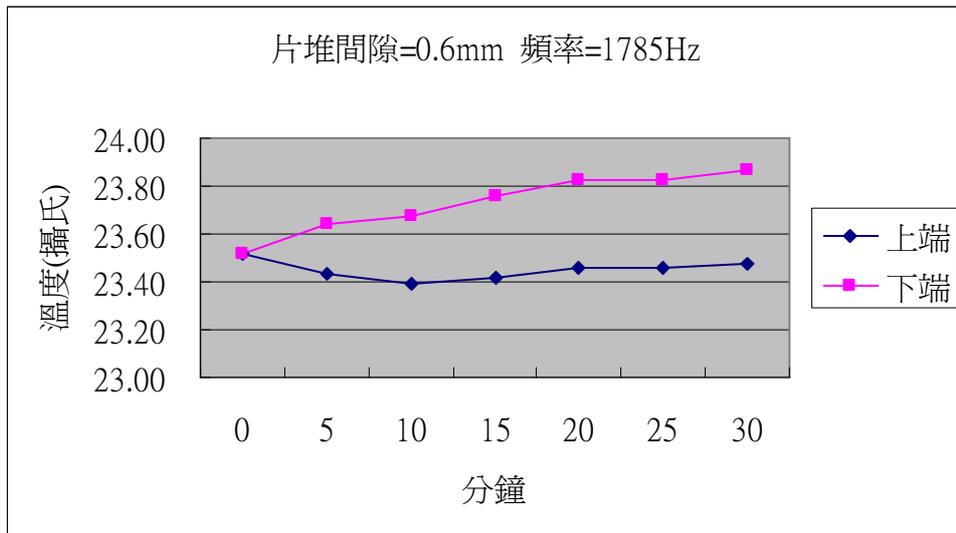
圖表 3



圖表 4

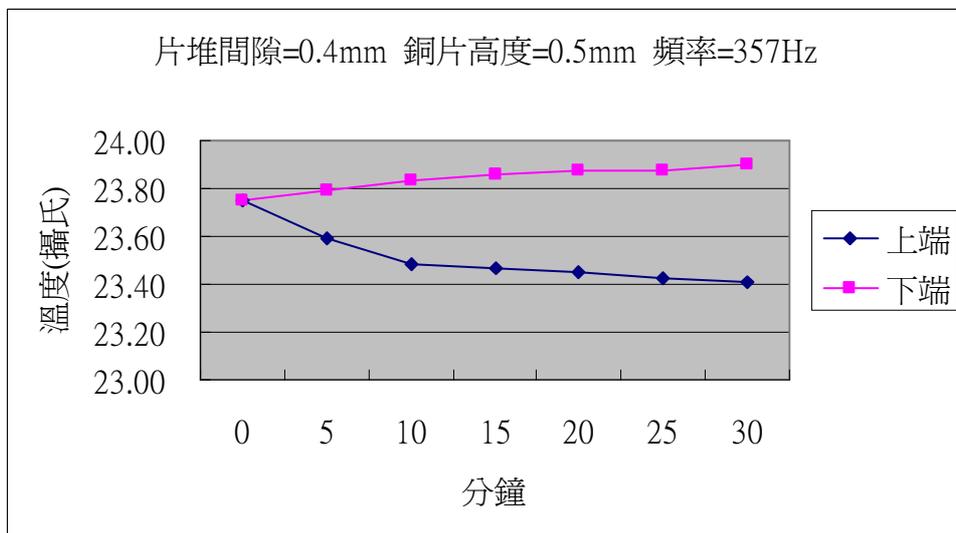


圖表 5

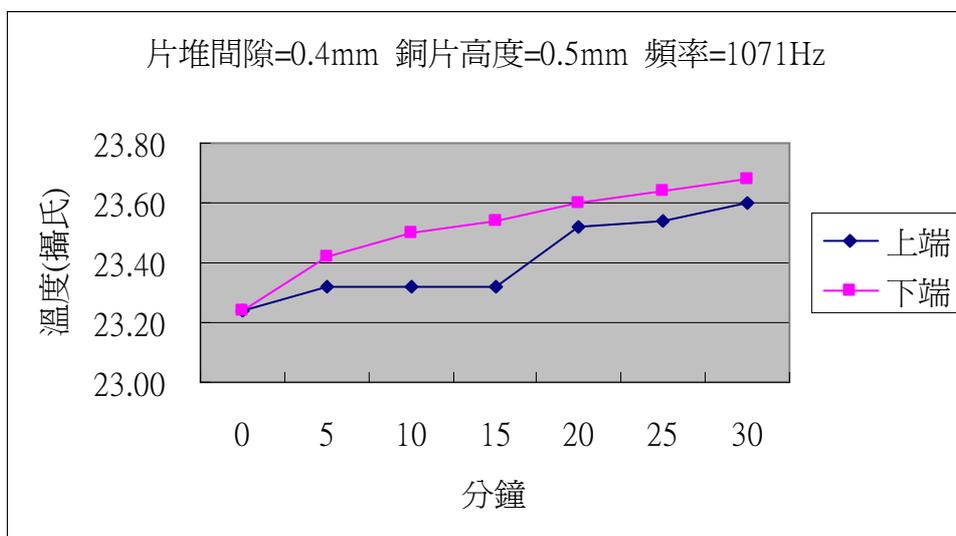


圖表 6

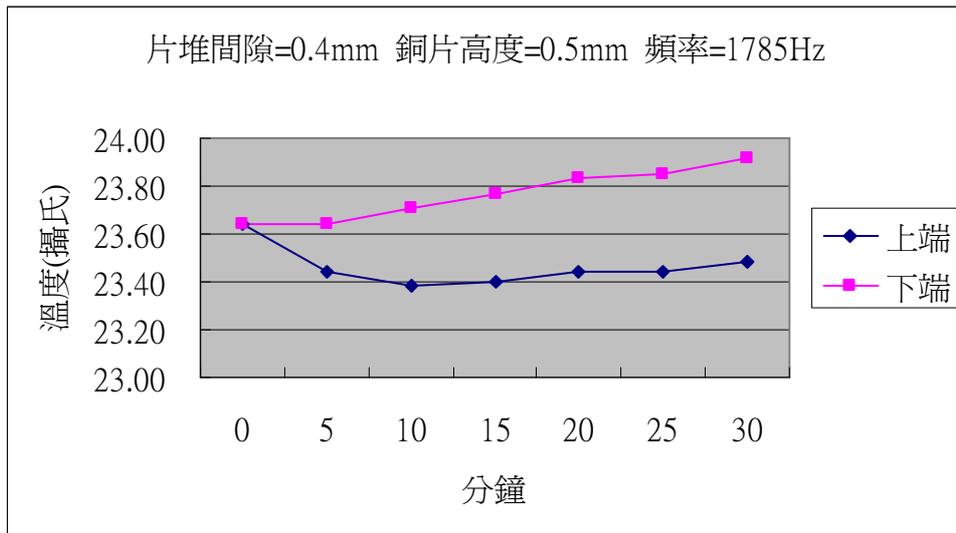
實驗二：在有熱交換銅片的情況下，不同的片堆間隙與頻率對溫度變化的影響



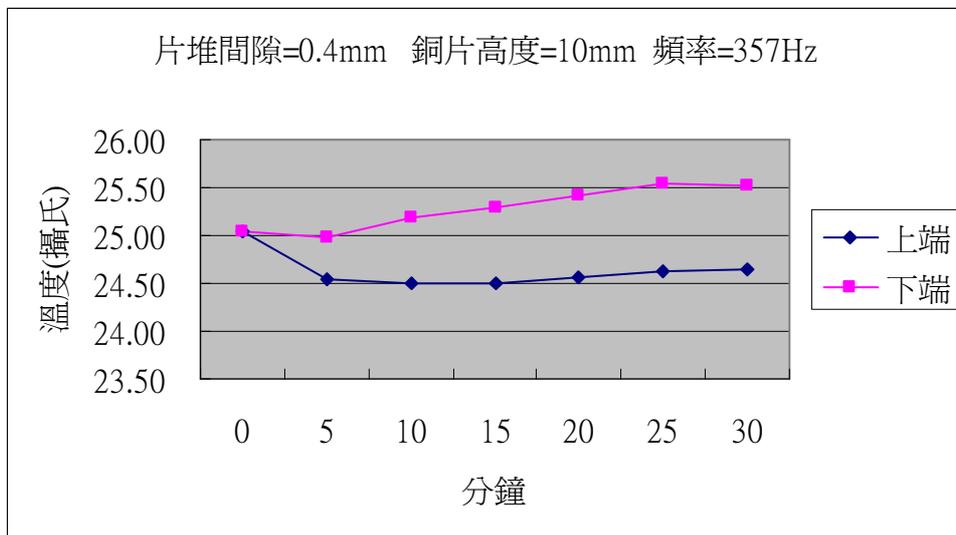
圖表 7



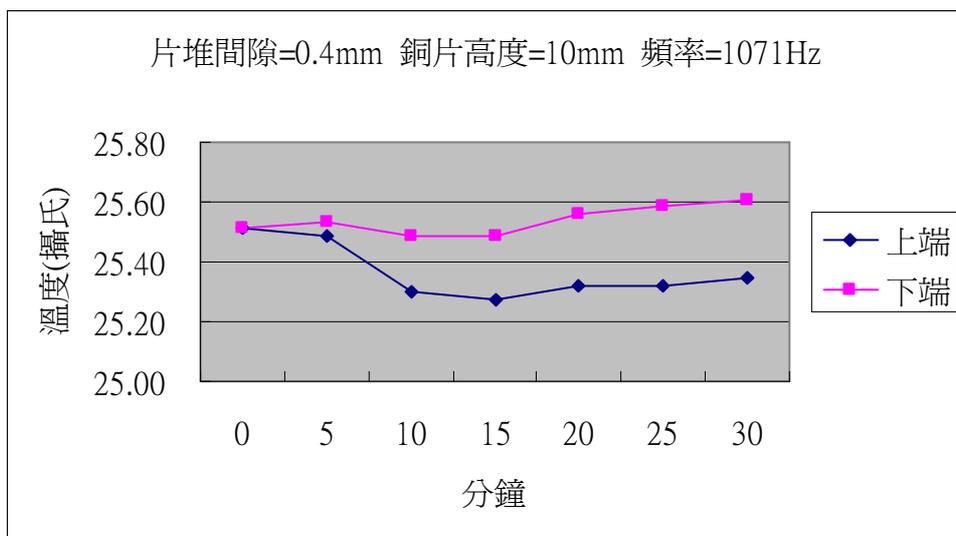
圖表 8



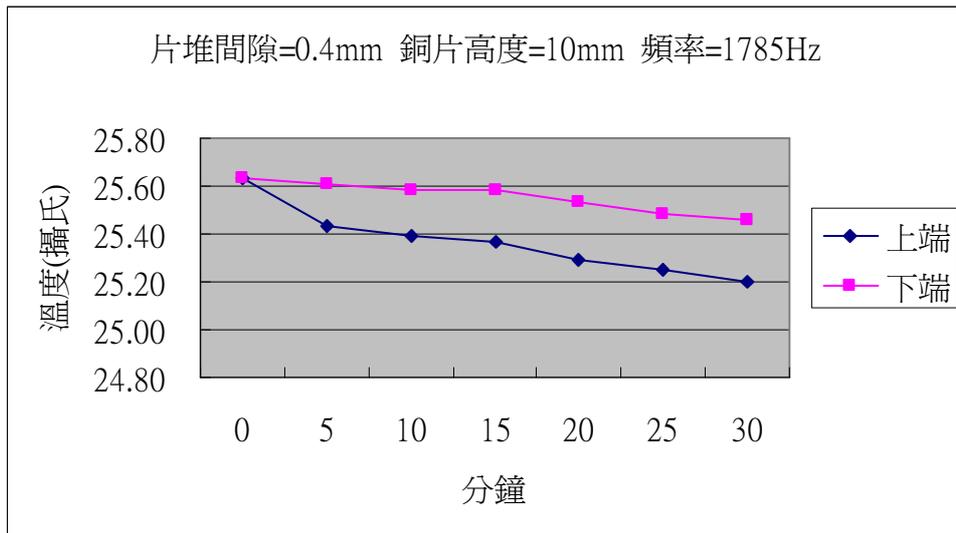
圖表 9



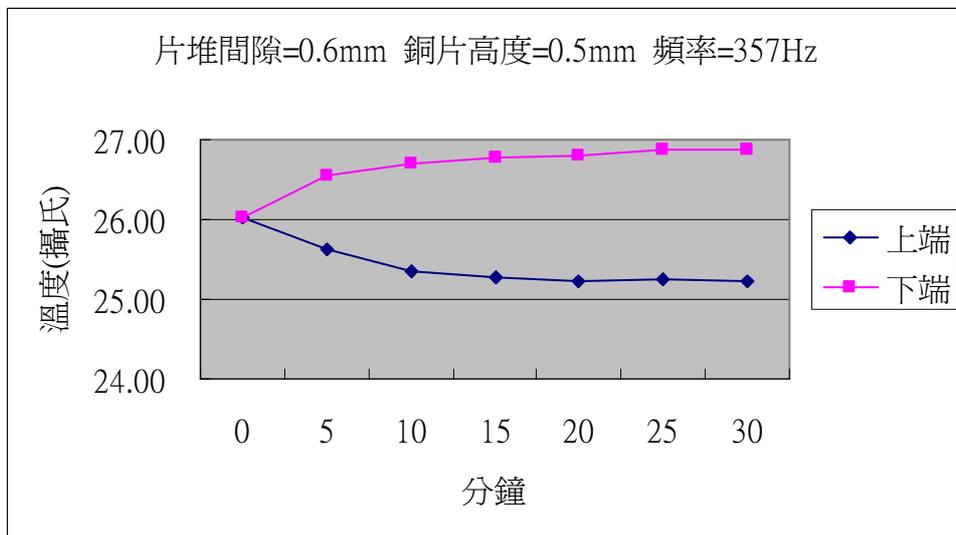
圖表 10



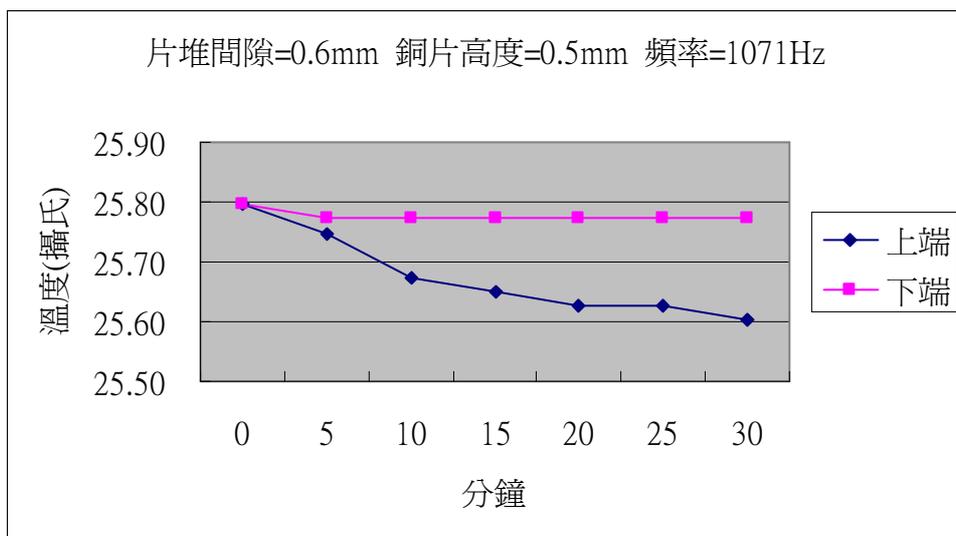
圖表 11



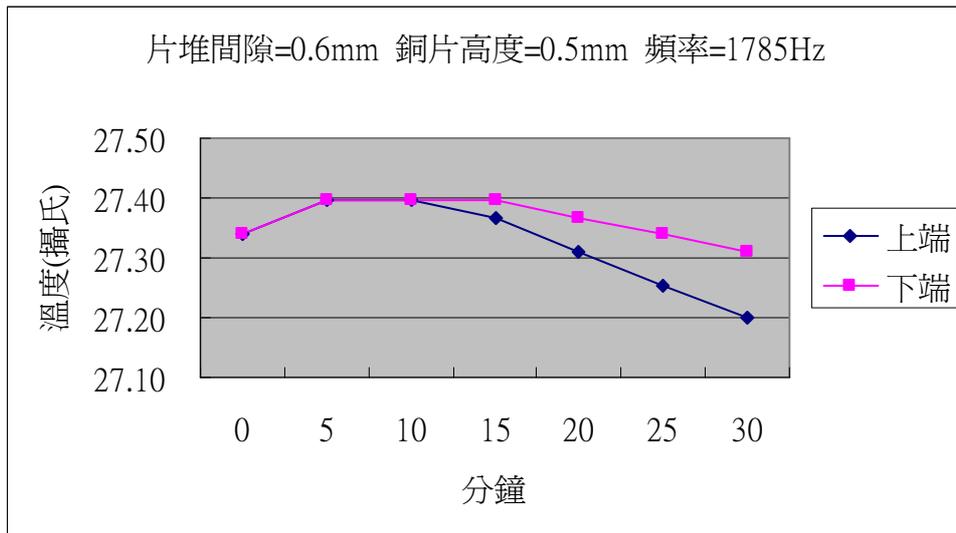
圖表 12



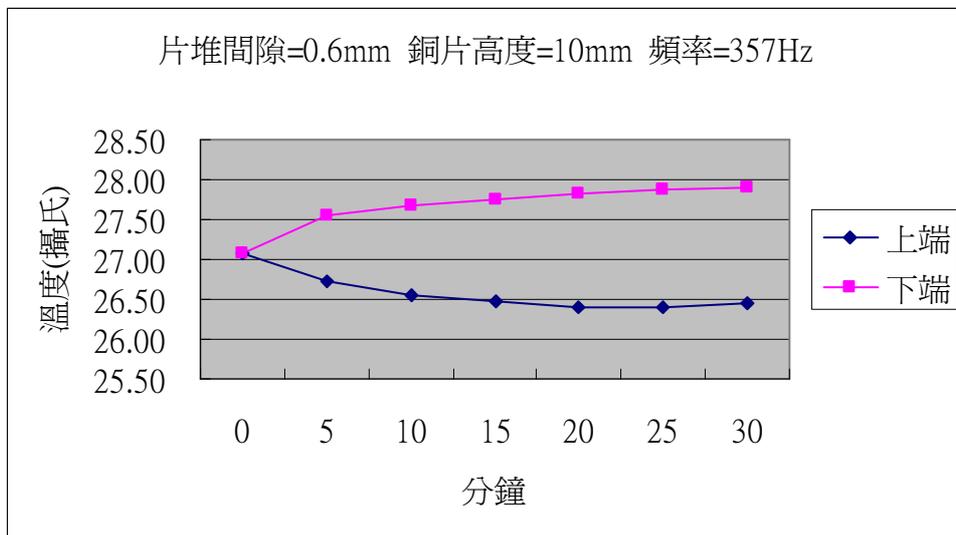
圖表 13



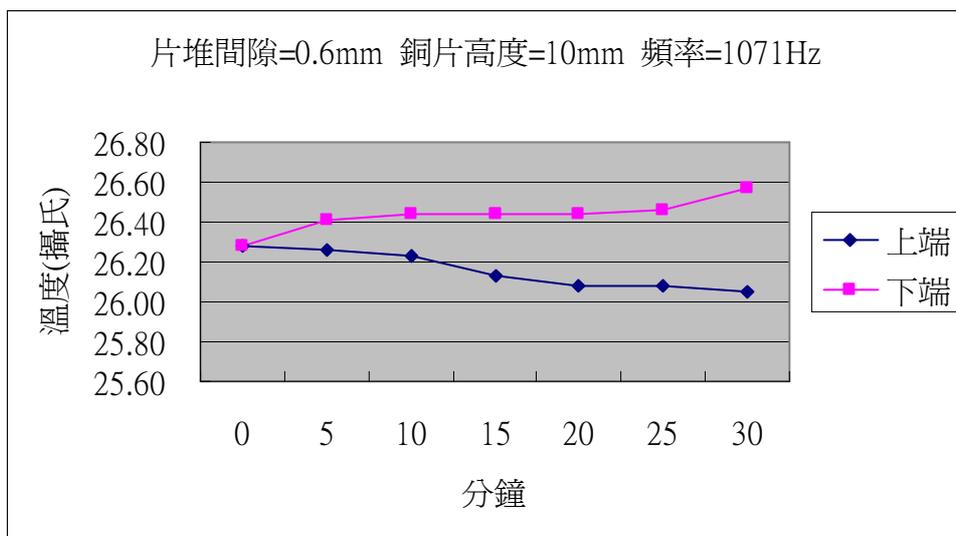
圖表 14



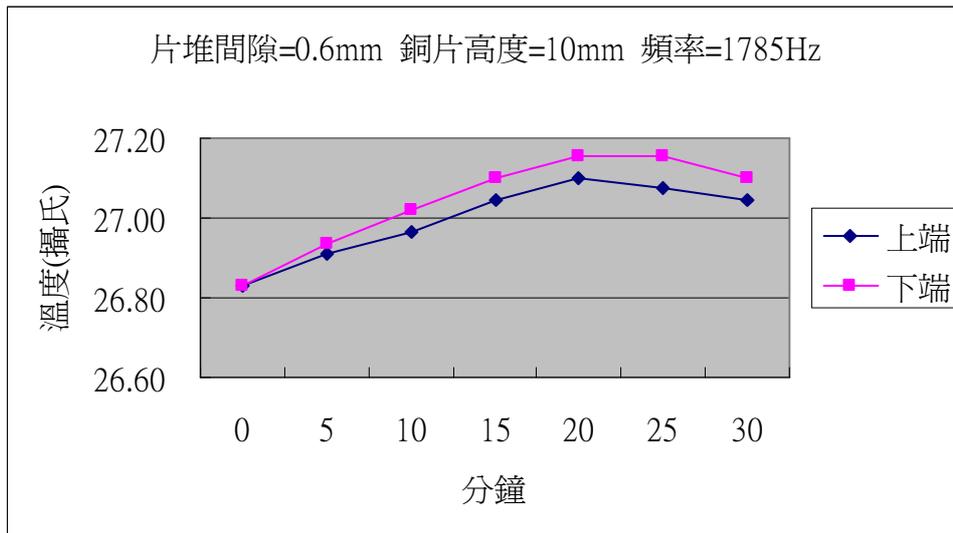
圖表 15



圖表 16



圖表 17



圖表 18

表一：各實驗條件下測試 30 分鐘後片堆上端的溫度變化結果

| 片堆間隙   | 頻率      | 無熱交換片     | 有熱交換片     |            |
|--------|---------|-----------|-----------|------------|
|        |         |           | 銅片高度：5 mm | 銅片高度：10 mm |
| 0.4 mm | 357 Hz  | 下降 0.76°C | 下降 0.34°C | 下降 0.78°C  |
|        | 1071 Hz | 下降 0.77°C | 上升 0.36°C | 下降 0.20°C  |
|        | 1785 Hz | 下降 0.30°C | 下降 0.16°C | 下降 0.14°C  |
| 0.6 mm | 357 Hz  | 下降 2.14°C | 下降 0.39°C | 下降 0.64°C  |
|        | 1071 Hz | 下降 0.32°C | 下降 0.17°C | 下降 0.23°C  |
|        | 1785 Hz | 下降 0.04°C | 下降 0.43°C | 上升 0.22°C  |

表二：各實驗條件下測試 30 分鐘後片堆下端的溫度變化結果

| 片堆間隙   | 頻率      | 無熱交換片     | 有熱交換片     |            |
|--------|---------|-----------|-----------|------------|
|        |         |           | 銅片高度：5 mm | 銅片高度：10 mm |
| 0.4 mm | 357 Hz  | 上升 0.11°C | 上升 0.15°C | 上升 0.86°C  |
|        | 1071 Hz | 上升 0.15°C | 上升 0.44°C | 下降 0.03°C  |
|        | 1785 Hz | 下降 0.06°C | 上升 0.27°C | 下降 0.03°C  |
| 0.6 mm | 357 Hz  | 下降 0.08°C | 上升 0.47°C | 上升 0.72°C  |
|        | 1071 Hz | 下降 0.16°C | 上升 0.10°C | 上升 0.29°C  |
|        | 1785 Hz | 上升 0.34°C | 下降 0.17°C | 上升 0.27°C  |

## 陸、討論

### 一、聲波頻率的高低對片堆降溫效果的影響：

由表一可以看出當聲波的頻率愈高時降溫的效果就愈差，其主要的原由可用二個部分來探討，一個是氣體封包在與片堆進行熱傳的過程中所需的時間  $t$ ，另一個則是片堆的比熱  $S$ 。

$$\text{熱傳時間與聲波的頻率關係爲：} t = \frac{1}{\pi f} \quad (11)$$

片堆比熱  $S$  與熱傳時間  $t$  的關係爲： $S = \frac{H}{M \times t}$   $H$ ：片堆所吸收的熱量  $M$ ：片堆質量

$$H = M \times S \times t \quad (12)$$

將 (11) 式代入 (12) 可得：

$$H = \frac{M \times S}{\pi f} \quad (13)$$

由 (13) 式可知當聲波的頻率愈高則片堆所吸收的熱量愈少。

二、片堆間隙的大小對降溫效果的影響：

由理論可知最佳的片堆間隙應爲熱滲透深度的四倍 ( $d = 4\delta_k$ )，即

$$d = 4\delta_k = 4 \sqrt{\frac{k}{\pi f \rho c_p}} \quad (14)$$

由 (14) 式可看出當頻率愈高時片堆的間隙要愈小。

三、熱交換銅片的大小對降溫效果的影響：

熱交換銅片主要是在於輔助片堆吸收熱量的功能以提高降溫的效率，而根據 (13) 式可知當熱交換銅片的質量  $M$  增加時，所能吸收的熱量  $H$  也隨之提高，因此由表一可以看出在頻率爲  $357 \text{ Hz}$  時銅片高度爲  $10 \text{ mm}$  的效果比  $5 \text{ mm}$  的來得高。

另外在沒有加裝熱交換器與有加裝熱交換片的驗結果發現，有加熱交換片的冷卻效果比沒有加熱交換片者來得差，其原因可能是本研究的熱交換器是以銅片捲繞而成，其捲繞後的間隙無法和片堆的間隙配合，造成在加裝熱交換器後反而破壞了工作氣體在片堆內的擾動，使得聲波冷卻的效率降低。

## 柒、結論

本研究的結果顯示在聲波頻率爲  $357 \text{ Hz}$  時各實驗的降溫效果較佳，主要是本研究乃以此頻率計算熱滲透深度  $\delta_k$  而決定所要的片堆間隙，因此片堆可以說是整個冷卻裝置的核心。對於片堆間隙的設計必須考量下列幾項因素：

一、工作氣體的性質：

不同的工作氣體其導熱率 ( $k$ )、密度 ( $\rho$ ) 及定壓比熱 ( $c_p$ ) 等性質也會有所變化，在這三個性質中片堆間隙與導熱率成正比但與密度及定壓比熱成反比的關係。

二、共振管的長度：

共振管的長度會影響共振的頻率，當共振管愈長則共振駐波的頻率就愈低，反之當共振管愈短則共振駐波的頻率就愈高。

### 三、片堆的材質：

片堆材料的比熱性質會影響降溫的效率，因此片堆材料的比熱要愈大愈好，但也必須考量到其加工製造的便利性。

### 四、熱交換器的材質與高度：

熱交換器是爲了提高降溫的效率，因此在工作氣體進行熱傳的過程中必須能有效的進行熱交換，所以熱交換器的比熱要大，而且高度增加相對的其質量也變大，如此便能提高熱交換過程中所需吸的熱量。

## 捌、參考資料

- 一、自然與生活科技第三冊，南一出版社。
- 二、工研院能資所 周雅文，93 年 06 月技術，聲音的魔力-奧妙的聲波冷卻，技術尖兵 第 114 期號—『創新』。
- 三、Daniel A. , Russell , Pontus Weibull, 22 April 2002. Tabletop thermoacoustic refrigerator for demonstrations. American Association of Physics Teachers.
- 四、Los Alamos Science Number 21 1993. Malone Refrigeration/Thermoacoustic Engines and Refrigerators.
- 五、HyperPhysics.(2005 C.R. Nave Georgia State University) from <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>

評 語

030805 聲音與溫度的對話-探討聲波冷卻

本作品利用熱聲效應做為散熱裝置的效益，分別探討聲音頻率、共振對散熱的效果。作品具創意，具實用潛力。是一佳作。