

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

第二名

051805

波妞的熱管-氣泡週期性生滅運動的探討

學校名稱：國立羅東高級中學

作者： 高二 林敬軒 高二 游紫然 高二 鍾宜臻	指導老師： 鍾佩玲
---	------------------

關鍵詞：氣泡、池沸騰、熱學耦合

摘要

我們經過一系列的實驗，確認鎳鉻絲經由玻璃管壁、水將熱沿徑向傳導給氣泡吸收，類似池沸騰作用，大氣泡會因熱傳導效果差而截斷傳熱，降低吸熱效果；同時因氣泡往下方冷水庫延展擴張，除了經由冷管壁傳導、冷水對流置換來散熱外，膨脹變大的氣泡也因表面積的增加而加大了輻射散熱作用。因此，要使波妞的熱管形成大氣泡，且能穩定持續地週期性生滅，需要使其儲熱與放熱速率達到一個動態的平衡，故我們僅能在特定的實驗條件下看到這個現象。此外，在進一步的實驗中，我們將波妞熱管設置了上、下兩個加熱區，意外看到了大氣泡的耦合作用，十分地有趣，也應用作為我們突破管徑過大實驗限制的方法。

壹、研究動機

日本著名動畫「崖上的波妞」中，有一段劇情是：當陸地被大水覆蓋而只能靠船行交通時，小男孩藉由一根僅靠油燈加熱的銅管(排出的蒸氣)來使他的鐵皮小船獲得動力。當時看完電影就覺得這個裝置很酷，近來網路視頻中也有一個科學裝置與其原理相似：頂部密封的玻璃管裝滿水並垂直安裝，管的底端浸入盛有冷水的燒杯中，加熱玻璃管的一小段，會見到管內產生大氣泡的週期性生滅現象。我們對於這個現象的產生及原理感到好奇，也發現並不是只要有加熱密封倒置的試管就可以產生大氣泡，因此開始了這個研究。

貳、研究目的

我們推估在波妞的熱管中能週期性地形成大氣泡生滅現象，類似在地底岩層中形成間歇噴泉的機制：蓄熱與放熱交替循環，並達到一個動態的平衡。為探究哪些因素影響波妞熱管中的這個動態平衡，並能穩定產生大氣泡的週期性生滅運動，將根據下列目的來進行實驗：

- 一、前測實驗：
 - 1.探討不同管徑大小對波妞熱管產生氣泡的影響
 - 2.探討不同體積的冷水庫對波妞熱管產生氣泡的影響
- 二、探討玻璃管內徑大小對大氣泡生滅週期長短之影響
- 三、探討加熱區的位置(距離冷水液面的高度)對大氣泡生滅週期長短之影響
- 四、探討上、下兩個加熱區對大氣泡生滅運動的影響

參、研究設備與器材

一、實驗器材：

支架 1 付

熱輻射溫度計 1 台

熱電阻溫度計 1 台

直流電源供應器 1 台

鱷魚夾電線 數條

鎳鉻絲(線徑 0.25mm) 數公尺

燒杯(100mL、250mL、500mL 及 1000mL) 各 1 個

滴定管(壁厚 1mm，內徑 6、13、18 mm，管長 30cm) 各 1 支

耐熱玻璃管(壁厚 1mm，內徑 4、5、6、7、8、9、10 mm，管長 40 cm) 各 1 支

耐熱玻璃管(壁厚 1.2 mm，外徑 14、15、16、17、18 mm，管長 40 cm) 各 1 支

耐熱玻璃管(外徑 13 mm，壁厚 1.2、1.6、2.0、2.4 mm，管長 40 cm) 各 1 支

二、實驗裝置：

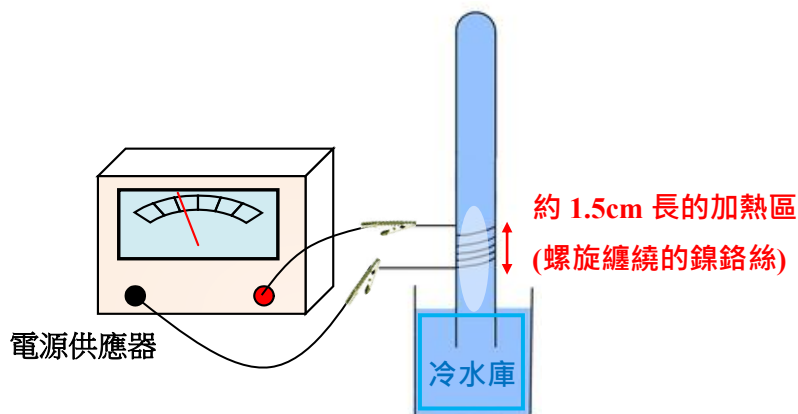


圖 1. 波紐的熱管實驗裝置示意圖



圖 2. 波紐的熱管裝置照片

表 1、實驗報告中，各物理量的代號說明表。

代號	單位	意涵
D	mm	玻璃管的內徑大小
d	mm	玻璃管的管壁厚度
V	mL	冷水庫的水體積量
T_b	°C	穩定形成大氣泡時的加熱區(氣泡)溫度
T_w	°C	冷水庫的水溫、未通電前的玻璃管內水溫
h	cm	加熱區最下方鎳鉻絲與燒杯內冷水面的距離
τ	s	穩定形成大氣泡後，大氣泡生滅的平均週期
s	cm	下方加熱區上緣與上方加熱區的下緣間距

肆、研究過程與方法

一、波妞熱管內形成大氣泡週期性生滅現象的原因與機制研究：

(一)、研究流程：

I

文獻探討

- 1.認識與了解「池沸騰曲線」。
- 2.認識與了解「張馳振盪器」。

II

測試調整實驗裝置以能穩定形成大氣泡的生滅

- 1.改變不同管徑的大小，觀察並攝影記錄在熱管內形成氣泡的情況。
- 2.改變不同的冷水庫水量，觀察並攝影記錄在熱管內形成氣泡的情況。
- 3.將冷水庫的水體染色，觀察並攝影記錄在熱管內水體與冷水庫交換的情形。

III

探討不同管徑大小對大氣泡生滅週期的影響

選用壁厚 1 mm、管內徑分別為 6、7、8、9 及 10 mm、長度 40cm 的細長玻璃管，裝滿水後垂直倒置於裝有 250 mL、20°C 冷水的燒杯內，在距離冷水面上方 5 cm 處纏繞鎳鉻絲線，利用電源供應器輸出 20V、3.5A 的電來加熱波妞的熱管。使用手機攝影記錄下熱管內氣泡形成的情況，並利用電腦軟體-Tracker 來分析、計算大氣泡的生滅週期。

IV

探討不同加熱位置(距離冷水液面的高度)對大氣泡生滅週期的影響

選用壁厚 1 mm、管內徑 9 mm、長度 40cm 的細長玻璃管，裝滿水後垂直倒置於裝有 250 mL、24°C 冷水的燒杯內，分別在距離冷水面 5、8、10.5、13、15.5、18 cm 處纏繞鎳鉻絲線，利用電源供應器輸出 20V、3.5A 的電來加熱波妞的熱管。使用手機攝影記錄下熱管內氣泡形成的情況，並利用電腦軟體-Tracker 來分析、計算大氣泡的生滅週期。

(二)、大氣泡生滅週期的時間計算方式：

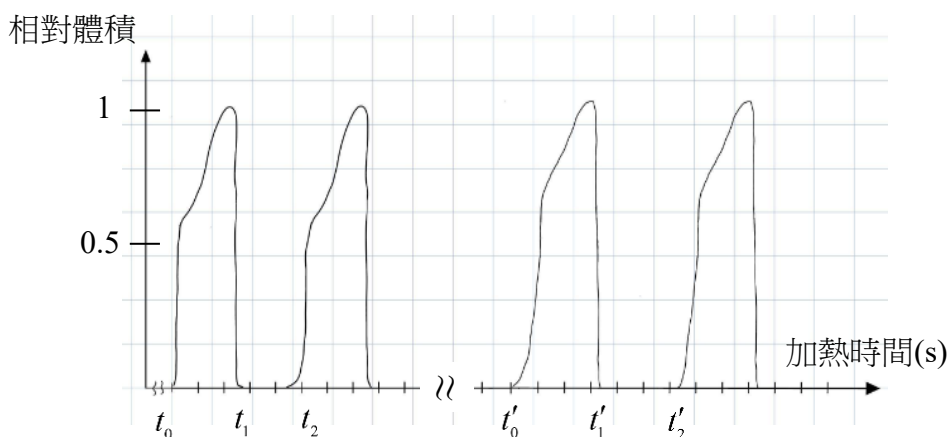


圖 3. 大氣泡體積隨時間的變化曲線示意圖

1. 利用 Tracker 軟體，將實驗錄製的影片，每一針、一針地播放(間距 0.033 秒)，讀取出從玻璃管開始加熱後，穩定出現大氣泡週期生滅時，每一個大氣泡出現及覆滅的時刻，連續記錄 3 分鐘。再進一步利用 Excel 進行統計分析及不確定度評估，取得每間隔 30 個大氣泡生滅的平均週期。

2. 如圖 3，我們討論的數據中，大氣泡的生滅週期 $\tau = t_2 - t_0$ 。

備註：我們計算大氣泡平均生滅週期時，每取 30 個連續氣泡的週期後，剔除(平均值 ± 2

個標準差)的數據，再取平均值及組合不確定 $u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$ 。

二、兩個加熱區的大氣泡耦合現象研究：

(一)、研究流程：

I

文獻探討

1. 認識與了解力學系統的耦合現象。

II

探討兩個加熱區的氣泡耦合作用

選用壁厚 1 mm、管內徑 7 mm、長度 40cm 的細長玻璃管，裝滿水後垂直倒置於裝有 500 mL、20°C 冷水的燒杯內，在距離冷水面上方 5 cm 處纏繞鎳鉻絲加熱區一，再由加熱區上方間距 7.5、10、12.5 及 15 cm 處纏繞鎳鉻絲加熱區二，利用電源供應器輸出 20V、3.5A 的電來加熱波妞的熱管，使用手機攝影記錄下熱管內氣泡的耦合作用來討論分析。

伍、研究結果

一、測試調整實驗裝置以能穩定形成大氣泡的生滅：

(一)相同熱源、相同冷水庫，不同管徑大小加熱後的氣泡生成情況比較如圖 4。

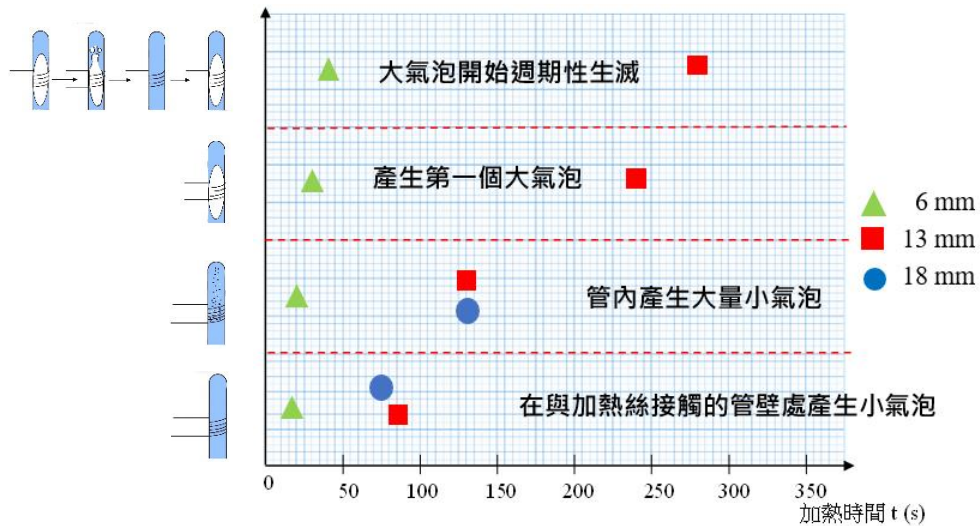


圖 4、不同管徑大小之氣泡生成階段圖

1.在大管徑的波妞熱管中，無法形成大氣泡，而小管徑則很快地在 1 分鐘內形成大氣泡，且能持續不斷地產生氣泡的生滅運動。

2.推論大氣泡的形成需要有效地將熱從管壁加熱絲處，沿徑向往內傳至管中心，以使整個加熱區冷水同時達沸點溫度而氣化形成大氣泡。

⇒ 考慮徑向傳熱效率，我們將選用 6 ~ 10 mm 的玻璃管內徑來做下一步的進階實驗。

(二)相同熱源、相同管徑，不同冷水庫體積加熱後的比較如圖 5。

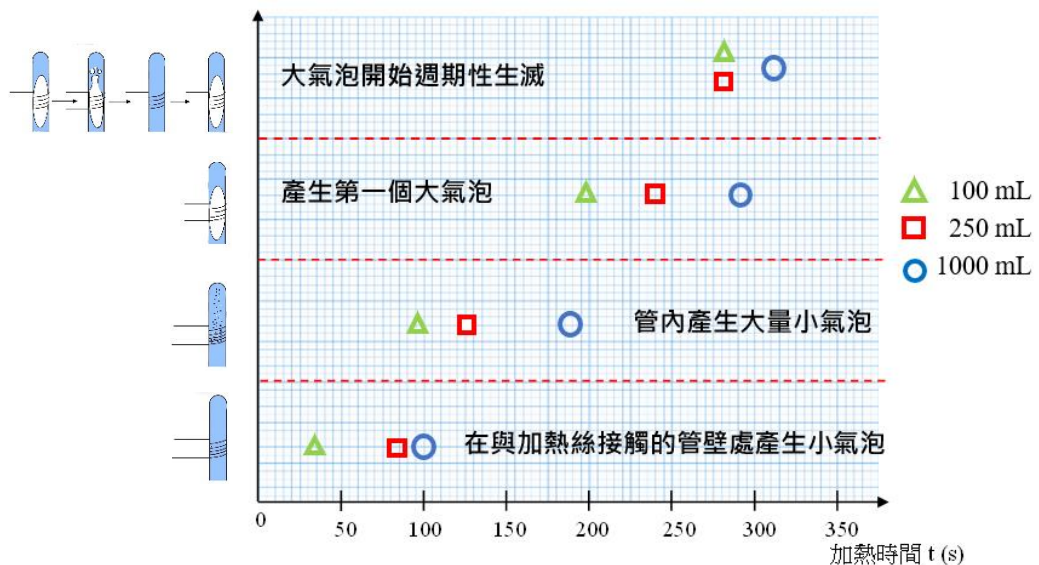


圖 5、不同冷水庫水量之氣泡生成階段圖

1.使用小管徑的波妞熱管，不論下方冷水庫多寡，均能產生週期性大氣泡生滅現象。但冷水庫水量愈少，大氣泡形成愈早。

2.推論當冷水庫水量少時，其熱容量較小，對上方玻璃管的加熱影響較小，因此加熱絲的供熱量可以主要提供給管內的水，以蓄積氣化成大氣泡所需的能量，故大氣泡生成的時間較早。

⇒ 考慮實驗時的操作效率及觀察的效益，我們將選用 250 mL 的冷水庫來做下一步的進階實驗。

(三)將冷水庫進行染色，確認波妞的熱管中是否有水體的對流交換，如圖 6。

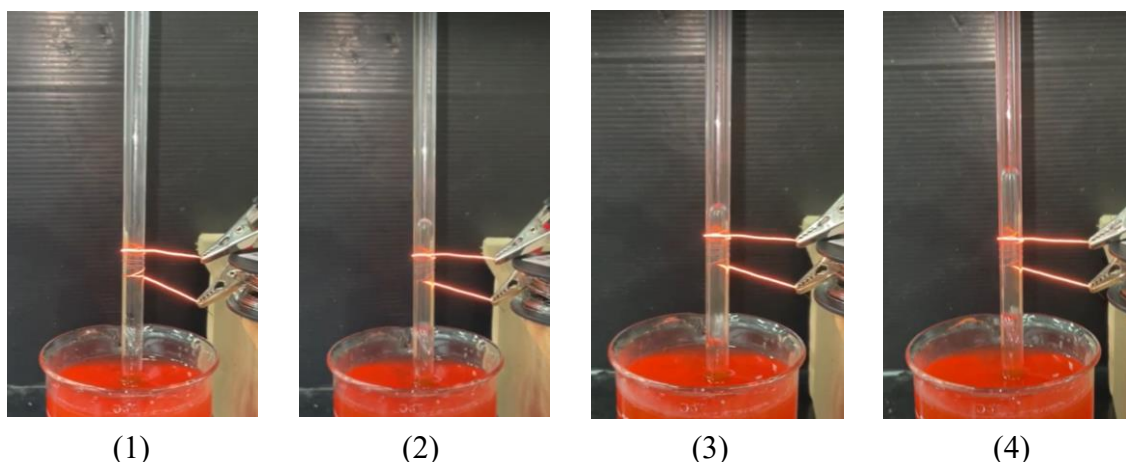


圖 6、加熱管內形成大氣泡的週期生滅後，每一次的氣泡向下擴張延展再往上收縮減小消失，就像汲水泵一樣，會使得冷水庫裡的紅色墨水，逐漸置換熱管內的水體，十多次大氣泡生滅後，整支細玻璃管內都已置換成紅色的墨水。

二、探討玻璃管內徑大小對大氣泡生滅週期長短之影響：

表 2、波妞的熱管管內徑不同時，大氣泡生滅現象的比較表。

D (mm)	4	5	6	7	8
τ (s)	—	—	2.02 ± 0.11	0.931 ± 0.049	—
生滅現象	不論如何減小加熱的電流，管內一下子就形成一個大氣泡阻絕傳熱，無法週期性生滅。(此外，若持續加熱玻璃管，會使其熔融變形)		可以穩定規律地產生大氣泡週期性生滅。	可以最穩定規律地產生大氣泡週期性生滅。	雖然此管可以週期性地產生大氣泡生滅，但會在 4 或 5 次生滅後，突然產生一次特大氣泡張馳，隔較長時間後又開始週期產生大氣泡生滅。

三、探討加熱區的位置(距離冷水液面的高度)對大氣泡生滅週期長短之影響：

1.我們利用 Tracker 軟體，將實驗錄製的影片，取得在不同加熱高度時，每間隔 30 個大氣泡生滅的平均週期，記錄如表 3。

表 3、波妞的熱管加熱位置不同時，大氣泡的生滅週期紀錄表。

h (cm)	τ_{1-30} (s)	τ_{31-60} (s)	τ_{61-90} (s)
15.50	1.435 ± 0.069	2.10 ± 0.11	2.836 ± 0.088
13.00	0.783 ± 0.032	0.842 ± 0.066	1.56 ± 0.10
10.50	0.928 ± 0.055	1.605 ± 0.060	2.279 ± 0.082
8.00	1.059 ± 0.058	1.127 ± 0.043	1.606 ± 0.034
5.00	0.931 ± 0.049	1.321 ± 0.065	1.435 ± 0.069

2.將表 3 的實驗結果，利用 Excel 作成圖 7。

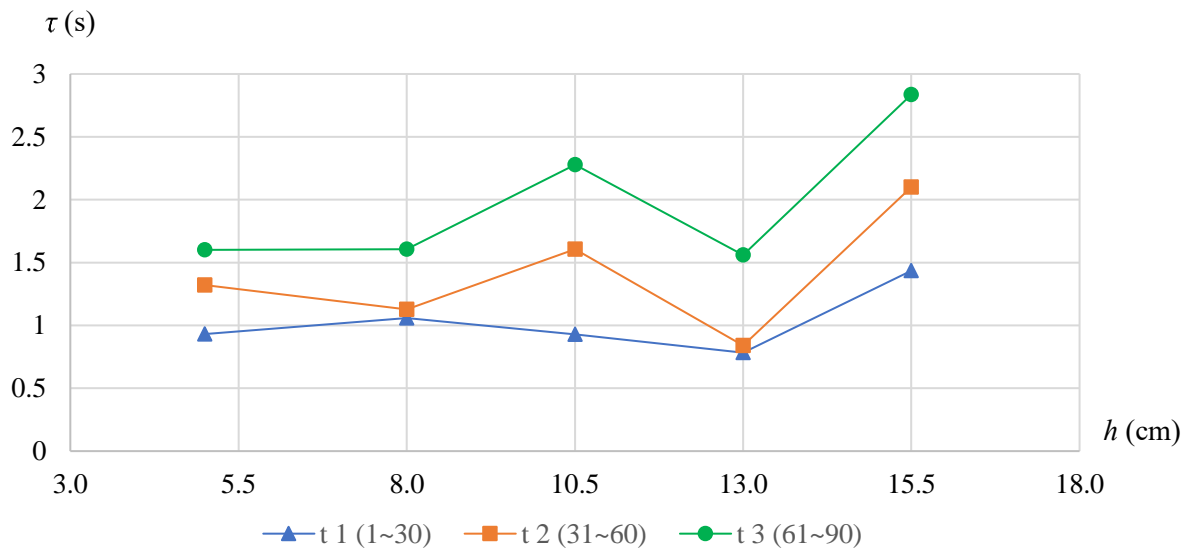




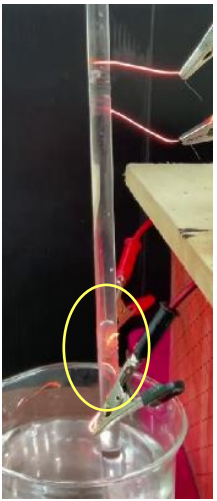
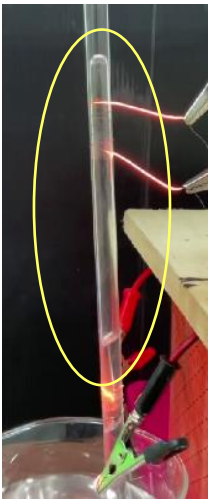
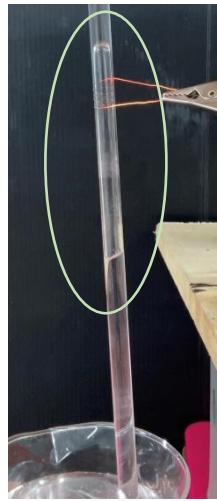
圖 7、不同加熱位置(距離水面高)，管徑 9mm 的波妞管之氣泡生滅週期變化走勢圖

3.由圖 7 可看出，加熱區與冷水庫間距 13.00 cm 時，大氣泡的生滅週期會比其他位置來得短；而在間距 15.50 cm 時，生滅週期又會比其他位置來得長。

此外，當加熱時間愈久，大氣泡生滅週期都會變得愈長($\tau_3 > \tau_2 > \tau_1$)。

四、探討上、下兩個加熱區對大氣泡生滅運動的影響：

表 4. $D = 7.0 \text{ mm}$ 、 $d = 1.0 \text{ mm}$ 的波妞熱管在兩種不同加熱區個數的大氣泡生滅運動比較

兩個加熱區 ($s = 12.5 \text{ cm}$)				一個加熱區
				
(a)初始	(b)前期/交替期	(c)穩定期	(d)大氣泡形成	
上下同時產生大氣泡	上方先產生大氣泡，接著下方也出現大氣泡，之後兩者又同時產生大氣泡	只有上方能產生大氣泡，且比單一加熱區形成的大氣泡更長	大氣泡延展長度比耦合大氣泡的長度短數公分	

如表 4 中所示，我們在波妞熱管上加了兩個相同的加熱區(一樣的鎳鉻絲纏繞方式、加熱功率)，兩者間距為 $s = 7.5$ 、 10.0 、 12.5 、 15.0 cm 的改變，均可以看到相同的現象：

- (a)初始：當管內水體達過渡沸騰時，上下幾乎同時產生大氣泡。
- (b)交替期：再次形成大氣泡時，上方加熱區會早於下方加熱區，兩者先後交替形成大氣泡。
- (c)穩定期：只有上方加熱區持續有大氣泡的週期性生滅，但下方加熱區再也不形成氣泡了。

且在這四種間距的實驗結果中， $s = 12.5 \text{ cm}$ 時波妞熱管內有最穩定的(a)(b)(c)三歷程可供比較觀察，所以後續將選兩加熱區間距 12.5 cm 、管徑 6 、 7 、 8 、 9 、 10 mm 的五種波妞熱管作進一步的實驗。

日常生活中，我們知道很多的力學耦合系統，如兩質點的耦合振盪、兩單擺的耦合擺動，這些耦合系統都是兩個物體藉由中間的媒介物質如彈簧、繩子來傳遞交換彼此間的能量，達到穩定的耦合運動。因此，當我們一看到實驗四的結果，馬上聯想到，這是否也算是一種熱學系統的耦合現象？

陸、討論

第一部份、波妞熱管內形成大氣泡週期性生滅現象的原因與機制研究：

一、建立模型：

由前面一系列的實驗測試後，我們針對「波妞的熱管」的吸放熱機制，搭配圖示說明，提出一個模型如下：

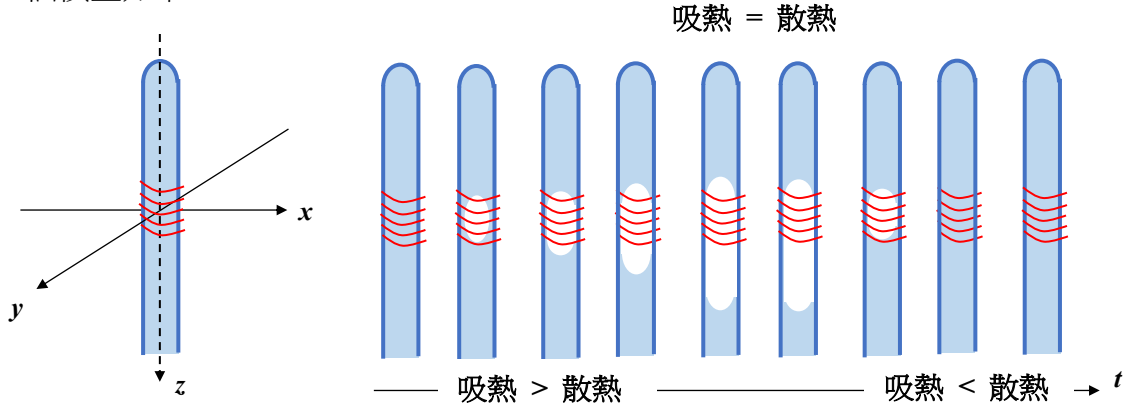


圖 8、在一個週期的時間裡，波妞熱管中的大氣泡生成覆滅示意圖。

機制	說明	示意圖
吸熱 儲能	<p>由纏繞鎳鉻絲的玻璃壁沿徑向，將熱由高溫絲線→玻璃管壁→管內水體→大氣泡。</p> <p>①當加熱區內水體中心達飽和蒸氣壓時，大氣泡由加熱區管徑中心處生成。</p> <p>②大氣泡出現後會繼續由高溫的玻璃管壁吸收熱量，持續增大體積，此時因為上方為密閉封口，玻璃管本身又狹長細窄，大氣泡由加熱區向下端擴張延展。</p>	<p>徑向傳熱</p> <p>大氣泡從出現至體積增加到完全貼合管壁時，會成為一個截斷徑向傳熱的自動開關。</p>
散熱 放能	<p>當大氣泡增大體積並向玻璃管下端擴張延展時，不僅減少沿徑向的熱傳導吸熱(因為氣體的熱傳導係數遠小於水)，同時也藉由</p> <p>①與冷水區管壁接觸傳導散熱。</p> <p>②在大氣泡持續週期性生滅時，類似汲水泵將管內高溫水體與冷水庫的低溫水體對流散熱。</p> <p>③高溫的大氣泡因體積膨脹而加大與環境的作用面積，加快熱的幅散。</p>	<p>①與冷水區管壁接觸傳導散熱</p> <p>②汲水泵的對流散熱</p> <p>③大氣泡往上下延展，增加散熱面積，加快散熱。</p>
<p>當大氣泡的吸熱速率與散熱速率達動態平衡時，大氣泡可以週期性地生滅。</p>		

(一)氣泡的吸熱機制：

1.當通電的鎳鉻絲經玻璃管壁沿徑向往管內水體供熱時，根據熱傳導公式：

$$\frac{dQ}{dt} = -KA \frac{dT}{d\ell}, \text{ 我們知道沿徑向的熱通量 } q'' \left(\frac{dQ}{A \cdot dt} = -K \frac{dT}{d\ell} \right) \text{ 大小將由傳熱物質}$$

的導熱係數決定。

大氣泡一開始是在管內熱通量最大的中心軸處水體出現，並藉由持續的吸熱，體積漸漸變大直至完全貼合管壁。已知 20 °C 冷水的導熱係數 $K_{\text{水}} = 0.59 (\text{W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ，空氣的導熱係數 $K_{\text{空氣}} = 0.024 (\text{W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ，兩者差了近 25 倍，因為 $K_{\text{氣體}}$ 大大小於 $K_{\text{水}}$ ，降低了管內的熱通量，使得氣泡吸熱效果大減。

(二)氣泡的散熱機制：

1.當大氣泡沿 Z 軸向下擴張至接近冷水庫時，因為與冷水的溫差，又可以經由導熱玻璃將熱傳給冷水庫散熱。

2.當大氣泡週期性生滅運動時，會像汲水泵一樣，不斷地從冷水庫中抽取冷水與玻璃管內的熱水置換，因而產生類似熱對流換熱的效果。

3.已知物體的淨熱輻射功率 $P_{\text{net}} = e\sigma A(T_{\text{rad}}^4 - T_{\text{env}}^4) \propto A$ (e 為物體的發射率， σ 為史蒂芬-波茲曼常數， A 為物體與環境的接觸面積， T_{rad} 為物體的絕對溫度， T_{env} 為環境的絕對溫度)。當大氣泡形成時，因為玻璃管上方為密閉封口，本身又狹長細窄，大氣泡因此由加熱區向下端擴張延展，增大散熱面積 A ，加快了散熱功率。

二、驗證模型：

1.因為我們的熱管是一種圓柱體的徑向傳熱，假設管的內半徑為 R 、大氣泡的起使半徑為 r_0 ，加熱區的玻璃柱長為 Z ，且管壁溫度為 T_h ，氣泡壁的溫度 T_b ，則

$$\because P_{\text{熱傳}} = -K_{\text{水}}(2\pi r \cdot Z) \frac{dT}{dr} \Rightarrow P \int_R^{r_0} \frac{dr}{r} = -K_{\text{水}} 2\pi Z \int_{T_h}^{T_b} dT \therefore P \cdot \ln\left(\frac{r_0}{R}\right) = 2\pi Z K_{\text{水}}(T_h - T_b) \cdots \text{式(1)}$$

由式(1)可看出，當鎳鉻絲的供熱功率穩定，使用管徑大小 ($R = \frac{D}{2}$) 不同但管壁均為 1 mm 的玻璃管做實驗二時，管內壁溫度 T_h 可視為均相同，且大氣泡恰由管中心形成時的溫度 T_b 也相同，故管徑愈大時，熱管對氣泡的傳熱功率愈大，預測 D 愈大時，氣泡的生滅週期會愈短。(實驗結果： $D = 7\text{mm}$ 的週期確實小於 6mm 的週期)

- 2.由我們實驗二的結果表 3 可看出，當管徑太小時，除了徑向熱傳導的距離小，傳熱很快，且要加熱氣化的總水體也很少，大氣泡很快地形成，並迅速地貼合管壁，造成熱管內類似達到薄膜沸騰，因此徑向的熱通量降低，大氣泡體積維持不變，且因無法向下擴張延展散熱，也不會消失。(此時若不趕緊關閉電熱絲，玻璃管壁會過熱熔融。)
- 3.我們觀察實驗影片可以看出，改變加熱位置時，只有 $h = 5 \text{ cm}$ 處加熱時的大氣泡會向下伸長而觸及冷水面，其餘僅往下變大但不會觸及冷水面，推估隨著加熱位置愈高，藉由冷管壁散熱及汲水泵的熱對流交換愈差，大氣泡主要透過熱幅射散熱，故高度最高的 15.5 cm 大氣泡生滅週期最長。而高度 13.0 cm 的大氣泡生滅週期最短，應該是因為此處還有汲水泵的熱對流交換效果。
- 4.由實驗三的結果圖 7 可看出，大氣泡的生滅週期會隨加熱時間增加而變長。推論隨著持續的加熱，冷水庫的水溫也逐漸上升(實驗前後溫差約 $3\sim 5^{\circ}\text{C}$)，減低氣泡觸及冷水區的熱傳、氣泡汲水泵的熱對流等，氣泡的生滅週期因而變長。

第二部分、兩個加熱區的大氣泡耦合現象研究：

一、耦合機制：

由實驗二的結果，我們知道管徑 7.0 mm 的波妞熱管可以最穩定地產生大氣泡週期生滅運動，因此選其來做兩個加熱區的實驗。由實驗四的結果表 4 可以看到，兩個加熱區一開始同時產生大氣泡，在幾次的交替或同時出現大氣泡後，僅有上方加熱區能形成大氣泡，而且這個大氣泡的體積會明顯大過只有一個加熱區時的大氣泡。我們覺得這個現象很有趣，覺得類似力學的耦合作用：如下頁圖 9，波妞熱管上有兩個相同的加熱區，當管內達到過渡沸騰時，管內應該都能形成大氣泡。然而因為兩加熱區在同一玻璃管中，兩區之間的水體成為耦合傳遞能量的媒介，下方加熱區提供的熱會因為上下兩區之間的熱(水)對流，而將從鎳鉻絲得到的熱往上傳給上方加熱區，故而最終只看到上方加熱區能形成更大、持續更久的大氣泡，而下方蓄熱不足，無法達過過渡沸騰，形成不了大氣泡。

也因為上下兩個大氣泡的能量耦合是藉由兩加熱區中間的水體對流達成，故當兩區之間的距離 s 愈短時(對流路徑愈短，水體熱混合愈快)，兩區確實愈快達到耦合作用。

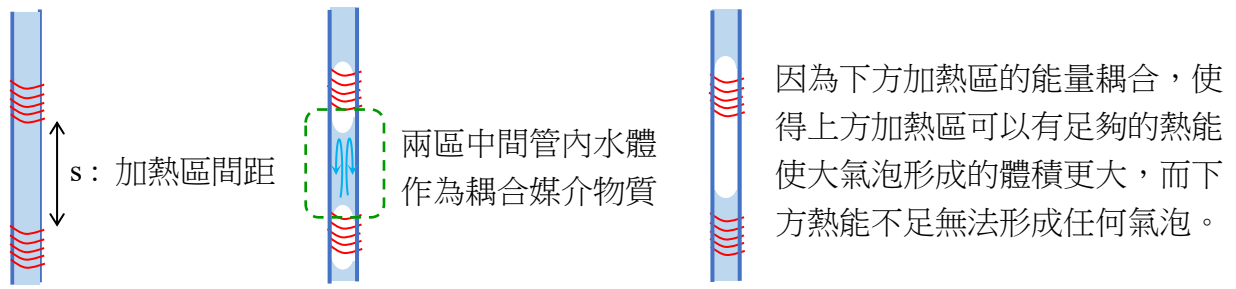


圖 9、兩加熱區的大氣泡耦合作用說明示意圖

二、氣泡耦合應用：

我們本來在只有一個加熱區的實驗中，使用管內徑為 8、9 及 10 mm 的波紐熱管均無法產生規律地大氣泡週期性生滅，就我們對波紐熱管的大氣泡生滅原因所建立的模型，可以知道應該是管徑過大，作用水體較多，徑向熱傳的熱通量不足，無法使管內水體穩定地達到吸放熱的動態平衡。若我們能增加電源供應器的供熱功率，就可以收集更多有效的數據來定量分析管徑對大氣泡生滅週期的影響，可惜我們的電源供應器又有輸出功率的上限，而有了兩個加熱區的熱能耦合作用，就可以突破這個限制。

我們將管內徑 8 mm 的波紐熱管加裝了間距 12.5 cm 的兩個加熱區，果真可以在上方形成穩定的耦合大氣泡週期性生滅運動，但管內的耦合大氣泡在下方的外型不是球形截面，而是形成漩渦型，如圖 10 所示；而 10 mm 管內徑裡的耦合大氣泡在形成過程，通常是分散形成幾個中型氣泡，再由上往下串接成一個大氣泡，並在加熱後第 110 秒左右，耦合大氣泡增大至非常快速地把管內的水完全下壓推出管內，而停止了週期性生滅(此時須盡快關閉電源供熱，以免玻璃管熔融變形，且在關閉電源後，又立刻看到管內底部水又再度上升回填充滿管內)，如圖 11 所示。

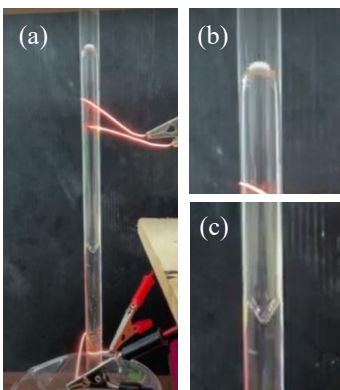


圖 10、管內徑 8 mm 裡的耦合大氣泡

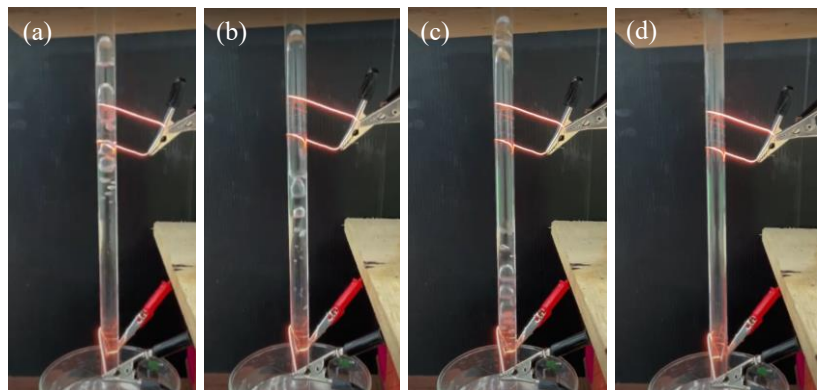


圖 11、10 mm 管內徑的耦合大氣泡最終會壓力大至將水推出管內而截斷週期性生滅運動。

柒、結論

一開始我們實驗時，因為選材不對，只看到試管內由加熱區生成許多小氣泡往上移動累積成大氣泡，並逐漸將水面下推，根本看不到大氣泡週期性生滅現象。後來不斷地調整、測試，終於有數據可以討論成因。

被鎳鉻絲纏繞的管內水體吸收足夠的熱量而汽化形成大氣泡，大氣泡會吸收熱量繼續膨脹(過渡沸騰)，因玻璃管上端封閉，氣泡無法壓縮水體往上移動，而往加熱區下方擴張延展。當氣泡往下延展變大時，除了可經由與冷管壁接觸的傳導散熱，也在往下擴張延展、復收縮變小消失時，類似汲水泵而將冷水庫的冷水與熱管內的熱水進行和緩的對流，產生了熱交換，此外，大氣泡本身的體積膨脹也增加了與低溫環境的接觸面積，加快了熱輻射的散熱速率。

而波妞熱管的管徑大大決定了吸熱效率，若管徑太細，加熱區管內的水體會達到類似池沸騰曲線的薄膜沸騰，有熔融玻璃管的危險。而管徑太大，又無法使管內的水體達到一致性的沸騰氣化形成大氣泡，而是不斷地形成大量的小氣泡(核態沸騰)。因此，適當配置波妞熱管管徑的大小、冷水庫的水量、鎳鉻絲纏繞的位置及電熱絲的供熱功率，才可以看到可愛的大氣泡週期性生滅現象。

另外，在波妞的熱管上、下間隔一段距離安裝兩個加熱區，可以藉由兩加熱區之間管內的水體作為能量傳遞物質，看到兩加熱區原先同時產生大氣泡，之後因熱對流為單向往上傳熱(不像力學系統為雙向能量交換)，故最終只在上方加熱區看到一個耦合大氣泡的週期性生滅運動。

捌、參考文獻資料

1. GetAClass - Физика в опытах и экспериментах (2021 年 10 月 09 日)。Пульсирующая тепловая трубка [影片]。YouTube。 <https://www.youtube.com/watch?v=NKNYKW-PNyA>
2. Science Direct (2021)。池沸騰曲線。 <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/pool-boiling-curve>
3. 維基百科(2022 年 11 月 28 日)。張馳振盪器。 https://en.wikipedia.org/wiki/Relaxation_Oscillator
4. 國立中央大學物理學系-物理史觀(2019 年 10 月 31 日)。耦合振盪。 http://140.115.30.57/phy_history/history_couple.htm

【評語】 051805

此實驗的重點在於探討波姆熱管中氣泡的週期性生滅運動的形成條件。作者控制數個變因，找出產生週期性氣泡的最佳配置，並初步建立吸熱速率與散熱速率達動態平衡的模型解釋實驗結果。作者可針對定量理論模型加強。

作品海報

波妞的熱管- 氣泡週期性生滅運動的探討

摘要

我們經過一系列的實驗，確認鎳絲經由玻璃管壁、水將熱沿徑向傳導給氣泡吸收，類似池沸騰作用，大氣泡會因熱傳導效果差而截斷傳熱，降低吸熱效果；同時因氣泡往下方冷水庫延展擴張，除了經由冷管壁傳導、冷水對流置換來散熱外，膨脹變大的氣泡也因面積的增加而加入了輻射散熱作用。因此，要使波妞的熱管形成大氣泡，且能穩定持續地週期性生滅，需要使其儲熱與放熱速率達到一個動態的平衡，故我們僅能在特定的實驗條件下看到這個現象。此外，在進一步的實驗中，我們將波妞熱管設置了上、下兩個加熱區，意外看到了大氣泡的耦合作用，十分地有趣，也應用作為我們突破管徑過大實驗限制的方法。

壹、研究動機

日本著名動畫「崖上的波妞」中，有一段劇情是：當陸地被人水覆蓋而只能靠船行交通時，小男孩藉由一根僅靠油燈加熱的銅管(排出的蒸氣)來使他的鐵皮小船獲得動力。當時看完電影就覺得這個裝置很酷，近來網路視頻中有一個科學裝置與其原理相似：頂部密封的玻璃管裝滿水並垂直安裝，管的底端浸入盛有冷水的燒杯中，加熱玻璃管的一小段會見到管內產生大氣泡的週期性生滅現象。我們對於這個現象的產生及原理感到好奇，也發現並不是只要有加熱密封倒置的試管就可以產生大氣泡，因此開始了這個研究。

貳、研究目的

我們推估在波妞的熱管中能週期性地形成大氣泡生滅現象，類似在地底岩層中形成間歇噴泉的機制：蓄熱與放熱交替循環，並達到一個動態的平衡，為探究哪些因素影響波妞熱管中的這個動態平衡，並能穩定產生大氣泡的週期性生滅運動，將根據下列目的來進行實驗：

一、前測實驗：

1. 探討不同管徑大小對波妞熱管產生氣泡的影響
2. 探討不同體積的冷水庫對波妞熱管產生氣泡的影響

二、探討玻璃管內徑大小對大氣泡生滅週期長短之影響

三、探討加熱區的位置(距離冷水液面的高度)對大氣泡生滅週期長短之影響

四、探討上、下兩個加熱區對大氣泡生滅運動的影響

參、研究設備與器材

一、實驗器材

支架 / 電源供應器 / 鱷魚夾電線 / 溫度計 / 鎳絲 / 燒杯 / 滷定管 / 耐熱玻璃管

二、實驗裝置

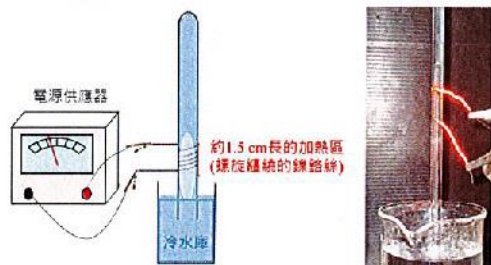


圖 1、波妞的熱管實驗裝置示意圖

圖 2、波妞的熱管裝置照片

肆、研究過程與方法

一、研究流程：



二、大氣泡生滅週期的時間計算方式：

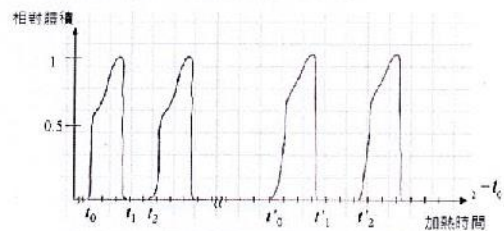


圖 3、大氣泡體積隨時間的變化曲線示意圖

1. 利用Tracker軟體，將實驗錄製的影片，每一幀、一幀地播放(間距0.033秒)，讀取出從玻璃管開始加熱後，穩定出現大氣泡週期生滅時，每一個大氣泡出現及覆滅的時刻，連續記錄3分鐘。再進一步利用Excel進行統計分析及不確定度評估，取得每間隔30個大氣泡生滅的平均週期。
2. 如圖 3，我們討論的數據中，大氣泡的生滅週期

註：我們計算大氣泡平均生滅週期時，每取30個連續氣泡的週期後，剔除(平均值±2個標準差)的數據後，再取平均值及組合不確定

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2}$$

伍、研究結果

實驗一、測試調整實驗裝置使能穩定形成大氣泡的生滅

(一) 相同熱源、相同冷水庫，不同管徑大小：

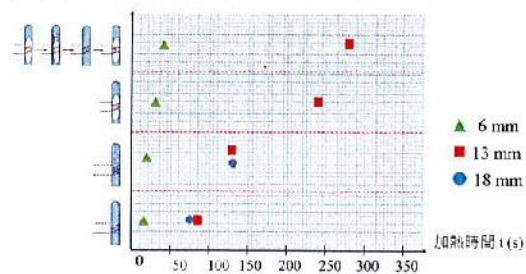


圖 4、不同管徑大小之氣泡生成階段圖

(二) 相同熱源、相同管徑大小，不同冷水庫水量：

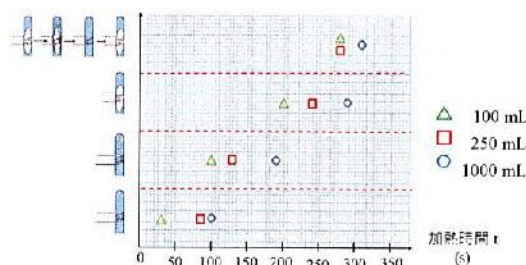


圖 5、不同冷水庫水量之氣泡生成階段圖

(三) 將冷水庫進行染色，確認波妞的熱管中是否有水體的對流交換：

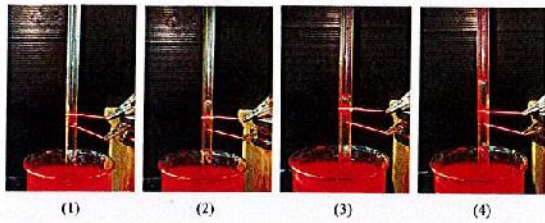


圖 6. 數次大氣泡生滅後，管內水體已與燒杯內的紅墨水產生互換

實驗二、探討玻璃管內徑大小對大氣泡生滅週期長短之影響

表 2. 波妞的熱管管內徑不同時，大氣泡生滅現象的比較表。

D (mm)	4	5	6	7	8
τ (s)	-	-	2.02 ± 0.11	0.931 ± 0.049	-
生滅現象	不論如何減小加熱的電流，管內一下子就形成一個大氣泡阻礙傳熱，無法週期性生滅。 (此外，若持續增加玻璃管，會使其容易變形)	可以穩定規律地產生大氣泡週期性生滅。	可以最穩定規律地產生大氣泡週期性生滅。	雖然此管可以週期性地產生大氣泡生滅，但會在 4 或 5 次生滅後，突然產生一次特大氣泡漲熱，隔較長時間後又開始週期產生大氣泡生滅。	-

實驗三、探討加熱區的位置(距離冷水液面的高度)對大氣泡生滅週期長短之影響

表 3. 波妞的熱管加熱位置不同時，大氣泡的生滅週期紀錄表。

h (cm)	τ_{1-30} (s)	τ_{21-60} (s)	τ_{61-90} (s)
15.50	1.435 ± 0.069	2.10 ± 0.11	2.836 ± 0.088
13.00	0.783 ± 0.032	0.842 ± 0.066	1.56 ± 0.10
10.50	0.928 ± 0.055	1.605 ± 0.060	2.279 ± 0.082
8.00	1.059 ± 0.058	1.127 ± 0.043	1.606 ± 0.034
5.00	0.933 ± 0.049	1.321 ± 0.065	1.435 ± 0.069

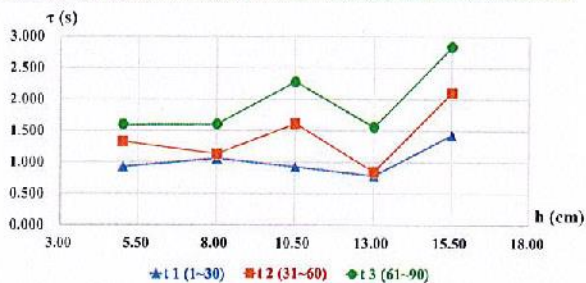


圖 7. 不同加熱位置，管徑 7mm 的波妞管之氣泡生滅週期變化走勢圖

由圖 7 可看出，加熱區與冷水庫間距 13.00 cm 時，大氣泡的生滅週期會比其他加熱位置的來得短，而在間距 15.50 cm 時，生滅週期又會比其他位置的來得長。此外，當加熱時間愈久，大氣泡生滅週期都會變得愈長 ($\tau_3 > \tau_2 > \tau_1$)。

實驗四、探討上、下兩個加熱區對大氣泡生滅運動的影響：

表 4. D = 7.0 mm、d = 1.0 mm 的波妞熱管在兩種不同加熱區個數的大氣泡生滅運動比較

兩個加熱區 (s = 12.5 cm)			一個加熱區
(a) 初始	(b) 前期/交替期	(c) 穩定期	(d) 大氣泡形成
上下同時產生大氣泡	上方先產生大氣泡，接著下方也出現大氣泡，之後兩者又同時產生大氣泡	只有上方形成大氣泡，且比單一加熱區形成的大氣泡長度更長	單一大氣泡延長長度比耦合大氣泡的長度短數公分

伍、討論

第一部份、

波妞熱管內形成大氣泡週期性生滅現象的原因與機制研究：

一、建立模型：

由前面一系列的實驗測試後，我們針對「波妞的熱管」的吸放熱機制，搭配圖示說明，提出一個模型如圖 8：

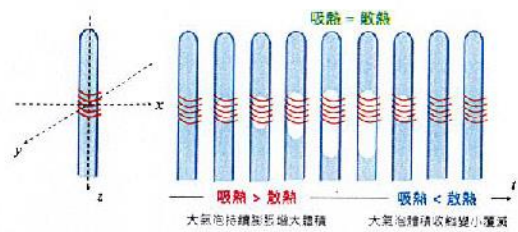
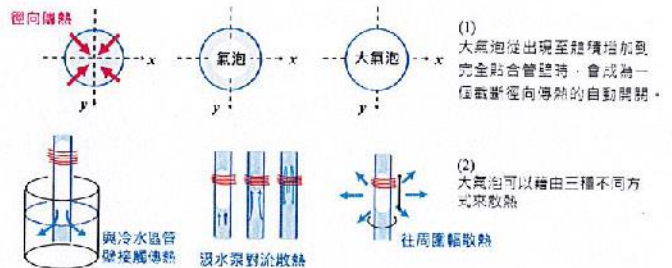


圖 8. 在一個週期的時間裡，波妞熱管中的大氣泡生成覆滅示意圖。



(一) 氣泡的吸熱機制：

- 當通電的鎢鎢絲線玻璃管壁沿徑向管內水體供熱時，根據熱傳導公式： $\frac{dQ}{dt} = -KA \frac{dT}{dx}$ ，我們可以知道沿徑向的熱通量 $q' = \frac{dQ}{A \cdot dt} = -K \frac{dT}{dx}$ 大小將由傳熱物質的導熱係數決定。大氣泡一開始是在管內熱通量最大的中心軸處水體出現，並藉由持續的吸熱，體積漸漸變大直至完全貼合管壁。已知 20°C 冷水的導熱係數 $K_w = 0.59 (W/m \cdot C)$ ，空氣的導熱係數 $K_{air} = 0.024 (W/m \cdot C)$ ，兩者差了近 25 倍，因為 K_{air} 大大小於 K_w ，降低了管內的熱通量，使得氣泡吸熱效果大減。

(二) 氣泡的散熱機制：

- 當大氣泡沿 Z 軸向下擴張至接近冷水庫時，因為與冷水的溫差，又可以經由導熱玻璃將熱傳給冷水庫散熱。
- 當大氣泡週期性生滅運動時，會像汲水泵一樣，不斷地從冷水庫中抽取冷水與玻璃管內的熱水置換，因而產生類似對流換熱的效果。
- 已知物體的淨熱輻射功率 $P_{net} = \epsilon \sigma A (T_{obj}^4 - T_{env}^4) \approx \epsilon \sigma A (T_{obj} - T_{env}) (T_{obj} + T_{env})$ (ϵ 為物體的發射率， σ 為史帝芬-波茲曼常數， A 為物體與環境的接觸面積， T_{obj} 為物體的絕對溫度， T_{env} 為環境的絕對溫度)。當大氣泡形成時，因為玻璃管上方為密封封口，本身又狹長細窄，大氣泡因此由加熱區向下端擴張延展，增大散熱面積 A ，加快了散熱功率。

二、驗證模型：

- 因為我們的熱管是一種圓柱體的徑向傳熱，假設管的內半徑為 R ，大氣泡的起始半徑為 r_0 ，加熱區的玻璃柱長為 Z ，且管壁溫度為 T_h ，氣泡壁的溫度 T_b ，則 $\therefore P_{in} = -K_w (2\pi r - Z) \frac{dT}{dr}$
 $\Rightarrow P_{in} \frac{dr}{r} = -K_w 2\pi Z \int_{T_b}^{T_h} dT \quad \therefore P_{in} \ln \left(\frac{r}{R} \right) = 2\pi Z K_w (T_h - T_b) \dots \dots$ 式(1)
 由式(1)可看出，使用管徑大小 ($R = \frac{D}{2}$) 不同但管壁均為 1mm 的玻璃管做實驗二時，管內壁溫度 T_h 及大氣泡恰由管中心形成時的溫度 T_b 可視為均相同，故管徑愈大時，熱管對氣泡的傳熱功率愈大，預測 D 愈大時，氣泡的生滅週期會愈短。(實驗結果： $D=7mm$ 的週期確實小於 $6mm$ 的週期)
- 由我們實驗二的結果表 3 可看出，當管徑太小時，大氣泡很快地形成，並迅速地貼合管壁，造成熱管內類似達到薄膜沸騰。(此時若不趕緊關閉電熱絲，玻璃管壁會過熱熔融。)
- 從實驗影片可以看出，改變加熱位置時，除了 $h=5cm$ 處加熱時的大氣泡，其餘管徑的氣泡僅往下變大但不會觸及冷水面，推估加熱位置愈高，藉由傳導及熱對流交換得散熱效果愈差，但大氣泡主要透過熱輻射散熱，故高度最高的 15.5 cm 大氣泡生滅週期最長，而高度 13.0 cm 的大氣泡生滅週期最短，應該是因為此處還有汲水泵的熱對流交換效果。
- 由實驗三的結果圖 7 可看出，大氣泡的生滅週期會隨加熱時間增加而變長，推論隨著持續的加熱，冷水庫的水溫也逐漸上升(實驗前後溫差約 3~5°C)，減低氣泡觸及冷水區的熱傳、氣泡汲水泵的熱對流等，氣泡的生滅週期因而變長。

第二部分、兩個加熱區的大氣泡耦合現象研究：

一、耦合機制：

由實驗二的結果，我們知道管徑7.0 mm的波妞熱管可以最穩定地產生大氣泡週期性生滅運動，因此選其來做兩個加熱區的實驗。由實驗四的結果表4可以看到，兩個加熱區一開始同時產生大氣泡，在幾次的交替或同時出現大氣泡後，僅有上方加熱區能形成大氣泡，而且這個大氣泡的體積會明顯大過只有一個加熱區時的大氣泡。我們覺得這個現象很有趣，覺得類似力學的耦合作用，如圖9，波妞熱管上有兩個相同的加熱區，當管內達到過渡沸騰時，管內應該都能形成大氣泡。然而因為兩加熱區在同一玻璃管中，兩區之間的水體成為耦合傳遞能量的媒介，下方加熱區提供的熱會因為上下兩區之間熱(水)對流，而將從鎳絲得到的熱往上傳給上方加熱區，故而最終只看到上方加熱區能形成更大、持續更久的大氣泡，而下方蓄熱不足，無法達到過渡沸騰，形成不了大氣泡。

也因為上下兩個大氣泡的能量耦合是藉由兩加熱區中間的水體對流達成，故當兩區之間的距離 s 愈短時(對流路徑愈短、水體熱混合愈快)，兩區確實愈快達到耦合作用。

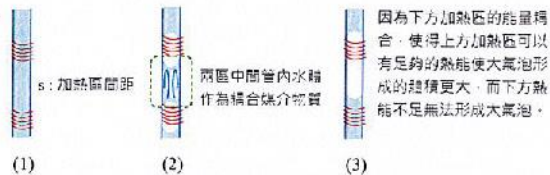


圖9、兩加熱區的大氣泡耦合作用說明示意圖

二、氣泡耦合應用：

我們本來在只有一個加熱區的實驗中，使用管內徑為8、9及10 mm的波妞熱管均無法產生規律地大氣泡週期性生滅，就我們對波妞熱管的人氣泡生滅原因所建立的模型，可以知道應該是管徑過大，作用水體較多，徑向熱傳的熱通量不足，無法使管內水體穩定地達到吸放熱的動態平衡。若我們能增加電源供應器的供熱功率，就可以收集更多有效的數據來定量分析管徑對大氣泡生滅週期的影響，可惜我們的電源供應器又有輸出功率的上限，而有了兩個加熱區的熱能耦合作用，就可以突破這個限制。

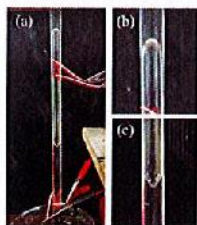


圖10、管內徑8 mm的波妞熱管的耦合大氣泡

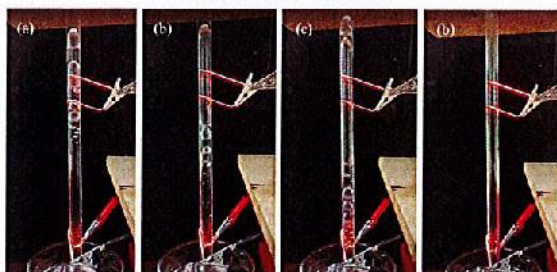


圖11、10 mm管內徑的耦合大氣泡最終會壓力大至將水推出管內而截斷週期性生滅運動。



我們將管內徑8 mm的波妞熱管加裝了間距12.5 cm的兩個加熱區，果真可以在上方形成穩定的耦合大氣泡週期性生滅運動，但管內的耦合大氣泡在下方的外型不是球形截面，而是形成漩渦型，如圖10所示；而10 mm管內徑裡的耦合大氣泡在形成過程，通常是分散形成幾個中型氣泡，再由上往下串接成一個大氣泡，並在加熱後第110秒左右，耦合大氣泡增大至非常快速地把管內的水完全下壓推出管內，而停止了週期性生滅(此時須盡快關閉電源供熱，以免玻璃管熔變形，且在關閉電源後，又立刻看到管內底部水又再度上升回填充滿管內)，如圖11所示。

柒、結論

一開始我們實驗時，因為選材不對，只看到試管內由加熱區生成許多小氣泡往上移動累積成人氣泡，並逐漸將水面下推，根本看不到大氣泡週期性生滅現象。後來不斷地調整、測試，終於有數據可以討論其成因。

被鎳絲纏繞的管內水體吸收足夠的熱量而汽化形成人氣泡，大氣泡會吸收熱量繼續膨脹(過渡沸騰)，因玻璃管上端封閉，氣泡無法壓縮水體往上移動，而往加熱區下方擴張延展。當氣泡往下延展變大時，除了可經由與冷管壁接觸的傳導散熱，也在往下擴張延展、復收縮變小消失時，類似汲水泵而將冷庫的冷水與熱管內的熱水進行和緩的對流，產生了熱交換，此外，大氣泡本身的體積膨脹也增加了與低溫環境的接觸面積，加快了熱輻射的散熱速率。

而波妞熱管的管徑大大決定了吸熱效率，若管徑太細，加熱區管內的水體會達到類似池沸騰曲線的薄膜沸騰，有熔毀玻璃管的危險，而管徑太大，又無法使管內的水體達到一致性的沸騰氣化形成大氣泡，而是不斷地形成大量的小氣泡(核態沸騰)，因此，適當配置波妞熱管管徑的大小、冷庫的水量、鎳絲纏繞的位置及電熱絲的供熱功率，才可以看到可愛的大氣泡週期性生滅現象。

此外，在波妞的熱管上，下間隔一段距離安裝兩個加熱區，可以藉由兩加熱區之間管內的水體作為能量傳遞物質，看到兩加熱區原先同時產生大氣泡，之後因熱對流為單向往上傳熱(不像力學系統為雙向能量交換)，故最終只在上方加熱區看到一個耦合大氣泡的週期性生滅運動。

當波妞熱管裡穩定形成大氣泡週期性生滅時，我們可以聽到每次大氣泡一生成時，伴隨會有喘喘聲，並且在加熱夠久時產生爆音(伴隨震動、晃動)，這是我們未來還可以再進一步探究的部分。

捌、參考文獻資料

1. GetAClass - Физика в опытах и экспериментах (2021年10月09日), Пульсирующая тепловая трубка [影片], YouTube, <https://www.youtube.com/watch?v=NKNYKW-PNyA>
2. Science Direct (2021), 池沸騰曲線, <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/pool-boiling-curve>
3. 維基百科(2022年11月28日), 張弛振盪器, https://en.wikipedia.org/wiki/Relaxation_Oscillator
4. 國立中央大學物理學系-物理史觀(2019年10月31日), 耦合振盪, http://140.115.30.57/phy_history/history_couple.htm

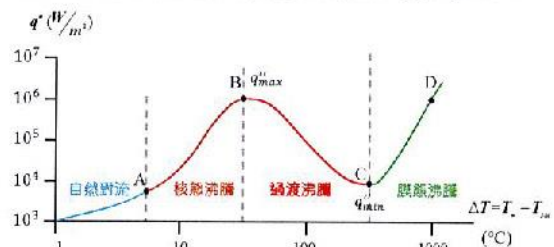


圖12、池沸騰曲線(自繪)