

中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高級中等學校組 物理與天文學科

051820

「蝕」無忌憚—空蝕效應中空穴產生的機制及特性之探討

學校名稱： 國立新竹女子高級中學

作者：	指導老師：
高二 何沛妤	張弘
高二 胡芳語	
高二 張宇帆	

關鍵詞： 空蝕效應

摘要

本實驗探討空蝕效應空穴產生和氣泡附著於鋁箔紙上的情形。我們使用超音波洗淨機為製造超音波場的工具，將固定大小的鋁箔紙放入超音波場中產生破洞，透過破洞在鋁箔紙上的分布，推論在腔體裡氣泡的分布與傾向附著的部分，也利用顯微鏡在微觀下更仔細地觀察破洞的擴張情形，藉以得知氣泡如何在鋁箔紙上附著。

實驗中我們利用不同觀察方式，推論出氣泡在鋁箔紙上造成破壞的位置，也利用顯微鏡實際觀察破洞，確認我們的推論，使用顯微鏡實際看到破洞後，我們透過破洞的變化，建立許多模型，最後根據我們推導出的理論製作程式，模擬一個完整的鋁箔紙，按照這些氣泡產生與附著機制產出的破洞分布，和實驗結果有無相符，再次證明我們對氣泡的理論。

壹、前言

一、研究動機

先前我們在網路上看到了一個影片，內容是鼓蝦利用空蝕效應產生衝擊波進而捕食獵物，我們在查詢多方文獻後得知，原來空蝕效應是液體於低壓時瞬間汽化引發氣泡產生，而這些氣泡非常不穩定，只要與周圍壓力場的差異過大就會迅速發生塌陷，釋放出強大的衝擊波及對周圍物體造成破壞，而根據資料（商周出版，2022）鼓蝦就是透過鱉口瞬間的閉合，射出高速水柱，在高速的流體中因壓力變化發生了空蝕現象，對獵物造成衝擊波，進而成功捕食獵物。

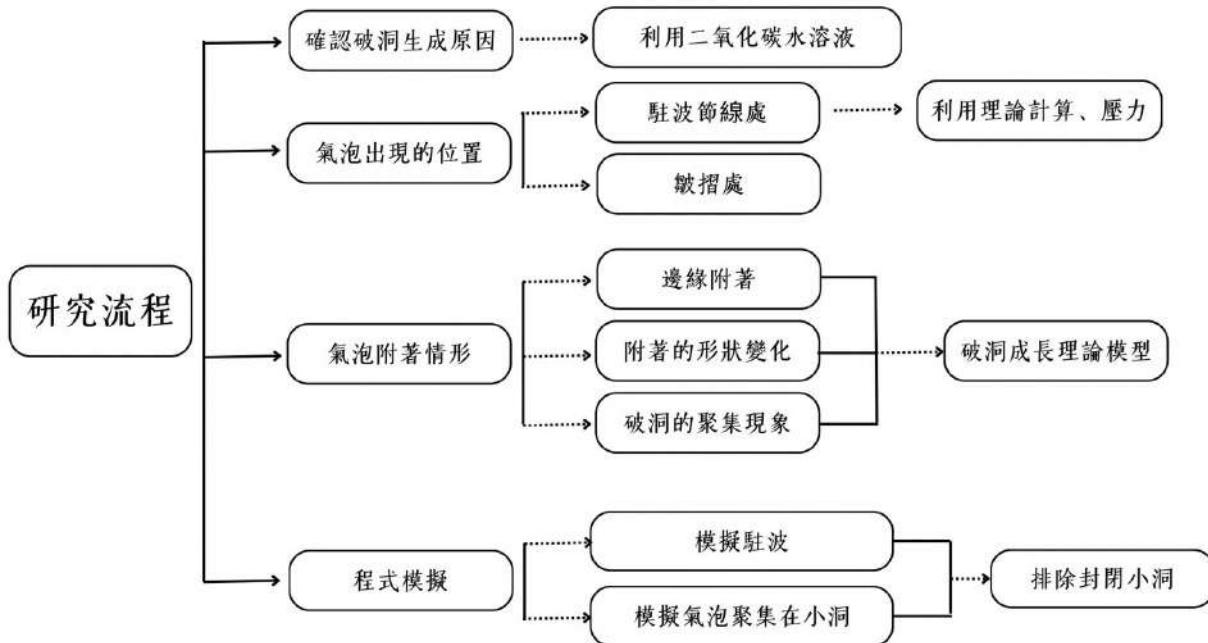
在了解鼓蝦是如何利用空蝕效應捕食後，我們對此現象產生興趣，決定於本研究中探討空蝕效應的原理及成因，因此利用超音波洗淨機模擬超音波場產生空蝕效應，並放入固定大小的鋁箔紙進行震盪，在震盪後觀察其破壞情形。

二、研究目的

- (一) 驗證鋁箔紙上的孔洞是由超音波場下的空蝕效應產生
- (二) 觀察鋁箔紙分析破洞分布，確認氣泡產生的位置有何特性
 - 1. 歸納氣泡分佈的規律性
 - 2. 分析氣泡產生區域及其原由
 - 3. 利用不同高度壓力數據驗證模型
- (三) 比較影響氣泡生成分布因素之間的關係
- (四) 由分析破洞面積對時間的關係，了解氣泡的附著過程
 - 1. 分析巨觀下氣泡附著情形
 - 2. 分析微觀下氣泡附著情形
 - 3. 由破洞時變率推論氣泡附著隨時間對鋁箔紙的破壞
 - 4. 研究破洞初期的洞口變化
- (五) 利用電腦程式模擬孔洞的產生

三、研究流程

圖 1、研究流程圖



圖表來源：研究者自行製作

四、文獻回顧

(一) 先前的研究

在第 63 屆的中小學科學展覽會中已經有人研究過空蝕效應在不同變因的情況下造成的破壞以及氣泡在空間場中的分布（程貫恆等，2023），他們的研究主要著重於空蝕效應造成的結果，以及駐波是如何影響氣泡的分布，我們則針對空穴產生的機制及造成破壞的過程進行了更深入的探討。

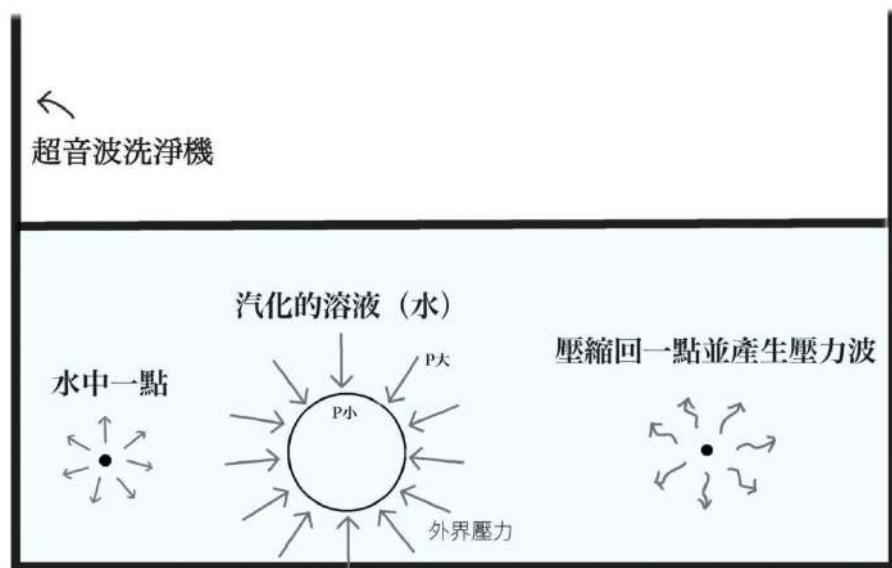
(二) 空蝕現象的介紹

根據文獻（ViorelPuiuPaun, 2020）指出空蝕效應造成的破壞是因為氣泡的塌陷，而氣泡的產生是因為液體震盪造成小區塊壓力降到低於當前溫度下液體的蒸氣壓，進而產生氣泡（氣泡內為汽化的溶液），此時氣泡內的壓力只有液體本身的蒸氣壓，當空腔大部分充滿蒸氣並承受非常快速的壓力上升時，它會劇烈內爆並導致非常高的壓力峰值，最後產生破壞。

(三) 根據文獻建立的的理論模型

根據文獻內容，我們建立了空蝕現象的理論模型，如圖一，在超音波場的影響下產生了壓力較小處，液體因而汽化產生一空穴，後又因外界壓力大於空穴內的壓力使得氣泡破裂，並產生噴流變回一點。

圖 2、空蝕現象理論模型



圖表來源：研究者自行製作

貳、研究設備及器材

一、實驗器材

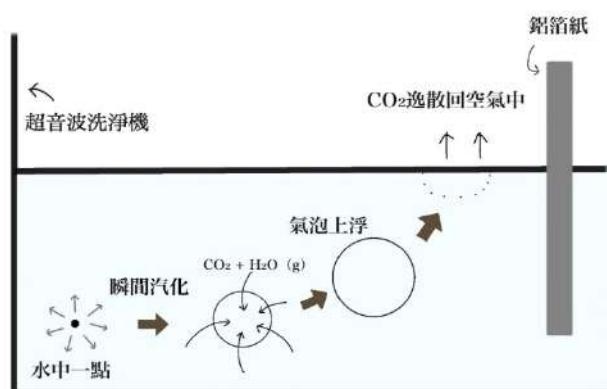
鋁箔紙	竹筷	超音波洗淨機	長尾夾
尺寸:13*6.5	一根	一臺	一個
			
燒杯	手機	分析軟體:ImageJ	複式顯微鏡
1000 毫升、500 毫升	一臺	略	倍率：40X
			
電阻式壓力感測器	Arduino 擴展板	USB 傳輸線	杜邦線
一個	一個	一條	九條
			

參、研究過程或方法

一、驗證鋁箔紙上的孔洞是由超音波場下的空蝕效應產生

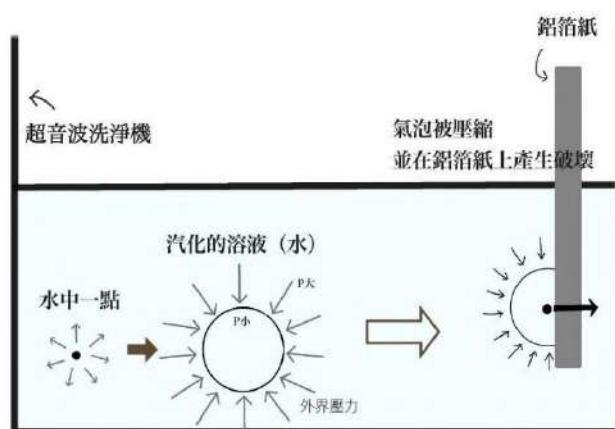
(一) 根據空蝕效應的原理，我們認為在水中，因超音波場的影響下，於低壓處產生微泡，或稱之為空穴，而這些小氣泡在因與周圍壓力場的差異而發生塌陷後，產生的衝擊波會對鋁箔紙造成破壞，然而，在二氧化碳水溶液中，二氧化碳會流入即將塌陷的微小氣泡中，而這個氣泡回浮上水面，最後逸散進空氣中，因此不會對鋁箔紙造成破壞。故我們希望透過比較鋁箔紙在分別裝有水及二氧化碳水溶液的超音波洗淨機中受到的破壞驗證此假說。二氧化碳水溶液下空蝕模型如圖3，水下空蝕模型如圖4。

圖3、二氧化碳水溶液下空蝕模型



圖表來源：研究者自行製作

圖4、水下空蝕模型



圖表來源：研究者自行製作

(二) 肉眼下觀察二氧化碳水溶液對平滑鋁箔紙的影響

實驗過程：將鋁箔紙分別放入裝有自來水及二氧化碳水溶液的超音波洗淨機中，震盪五分鐘，觀察鋁箔紙破洞情形。

(三) 顯微鏡下觀察二氧化碳水溶液對洞口的影響

實驗過程：在自來水震盪下先產生一小洞用顯微鏡紀錄，再放入二氧化碳水溶液下震盪 5 分鐘，觀察破洞成長情形。

二、觀察鋁箔紙分析破洞分布，確認氣泡產生的位置有何特性

(一) 歸納氣泡分佈的規律性

實驗過程：將鋁箔紙放入裝有自來水超音波洗淨機中，震盪五分鐘並重複 20 次，歸納鋁箔紙的破洞分佈。

(二) 分析氣泡產生區域及其原由

對歸納出的圖表進行分析，推測造成此分佈的原因。

(三) 利用不同高度壓力數據驗證模型

先前的研究中（程貫恆等，2023），他們成功觀察到空蝕效應造成的破壞在鋁箔紙上的水平分布，並且利用壓力感測器量測洗淨槽中的壓力來推測壓力與破壞情形之關聯，所以我們決定重置量測壓力的實驗。

實驗過程：將壓力感測器放入超音波場中，量測不同位置壓力峰值與週期。

三、比較影響氣泡生成分布因素之間的關係

(一) 根據鋁箔紙上的破洞分布，大概可以得知影響氣泡生成分布因素有節線和皺褶，分析兩個變因下空化泡在超音波場的分布及產生原因。

(二) 實驗過程：將一平滑鋁箔紙腹線處摺上皺摺，放入水中震盪 5 分鐘，利用 ImageJ 分別分析鋁箔紙節線處及皺摺處破洞情形。再將一張無經過操作的鋁箔紙放入水中震盪 5 分鐘，兩張鋁箔紙進行對比。

四、由分析破洞面積對時間的關係，了解氣泡的附著過程

(一) 分析巨觀下氣泡附著情形

實驗過程：將鋁箔紙放入裝有自來水的超音波洗淨機中，震盪 5 分鐘，匯入圖像分析軟體 ImageJ，利用洞徑分析功能量測鋁箔紙破洞之面積及周長。

(二) 分析微觀下氣泡附著情形

實驗過程：將鋁箔紙放入裝有自來水的超音波洗淨機中，震盪 40 秒後選定一個洞，以顯微鏡觀察並拍照記錄原始大小。每震盪 10 秒將鋁箔紙取出並拍照紀錄孔洞大小變化，匯入圖像分析軟體 ImageJ，利用洞徑分析功能量測鋁箔紙破洞周長。

(三) 由破洞時變率推論氣泡附著隨時間對鋁箔紙的破壞

實驗過程：將鋁箔紙放入裝有自來水的超音波洗淨機中，震盪 5 分鐘後，匯入圖像軟體 ImageJ，利用洞徑分析功能量測鋁箔紙上每個破洞的大小進行排序，觀察彼此的關係。

(四) 研究破洞初期的洞口變化

觀察最小破洞的面積成長情形，實驗過程：使用顯微鏡，在已產生破洞的鋁箔紙上找出最小的破洞，後續持續觀察它的擴張情形。

五、利用電腦程式模擬孔洞的產生

(一) 我們希望利用電腦程式加入不同的條件並將結果視覺化，並進行分析比對，以此驗證我們的假說

(二) 實驗過程: 我們利用 Python 這個程式語言，先建立一個陣列，在每個元素中都填入 0，這個陣列代表鋁箔紙中不同位置的破洞與否，其中 0 代表完整，1 代表破洞，另外再建立一個代表閾值的陣列，當元素中的閾值低於我們賦予的破洞臨界值時，該位置產生破洞，這方便我們調整不同位置的破洞機率，最後利用 Matplotlib 套件進行視覺化。

1. 模擬破洞完全隨機分布於鋁箔紙上，且尚未進行擴張的情形
2. 考慮駐波的因素，利用餘弦函數調整閾值，模擬超音波場的影響。
3. 首先讓破洞隨機產生於不同位置上產生初始破洞，後續降低已破洞周圍區域的閾值，並偵測鄰近破洞處多寡，以此模擬破洞在擴張時容易附著於已破洞處的特性。
4. 同時加入超音波場以及鄰近破洞的影響，並加入可調整影響比例的參數，藉此模擬實際破洞情形。
5. 利用表格進行比對，並將實際拍攝的鋁箔紙照片繪製成相同解析度且經過二值化處理的圖片，與模擬的圖片進行比對，其中，黑色代表完整、白色代表破洞。
6. 模擬鋁箔紙的破壞達到一定程度後，因金屬疲勞產生大片剝落的情形，並排除白色破洞區域中間出現的黑色封閉小洞。
7. 利用實驗二、觀察鋁箔紙分析破洞分布，確認氣泡產生的位置有何特性中所提出的數量分布建立機率，模擬更為貼近實際情形的水平分布。

肆、研究結果與分析

一、驗證鋁箔紙上的孔洞是由超音波場下的空蝕效應產生

(一) 實驗結果分析

1.肉眼下觀察二氣化碳水溶液對平滑鋁箔紙的影響

圖 5 為放入二氣化碳水溶液中震盪 5 分鐘的鋁箔紙，肉眼觀察下，鋁箔紙沒有任何破壞且表面依舊平滑，圖 6 為放入自來水中震盪 5 分鐘的鋁箔紙，可以明顯看出，表面產生了許多破洞且變得粗糙。

圖 5、放入二氣化碳水溶液中震盪 5 分鐘的鋁箔紙	圖 6、放入自來水中震盪 5 分鐘的鋁箔紙
	

2.顯微鏡下觀察二氣化碳水溶液對洞口的影響

由圖 7 到圖 8，鋁箔紙放入二氣化碳水溶液震盪 5 分鐘後，洞口並沒有擴大的情形，對比圖 9 圖 10 在水中明顯擴大，證實無論在巨觀或微觀觀察下，二氣化碳水溶液都不會產生空蝕現象。

圖 7、顯微鏡觀察下，先前放入水中震盪產生的小洞	圖 8、顯微鏡觀察下，再放入二氣化碳水溶液震盪 5 分鐘後的洞口情形
	

圖 9、顯微鏡觀察下，放入水中震盪	圖 10、顯微鏡觀察下，放回水中再震
-------------------	--------------------

產生的小洞	燙 5 分鐘後的洞口情形
	

圖表來源：研究者自行製作

圖表來源：研究者自行製作

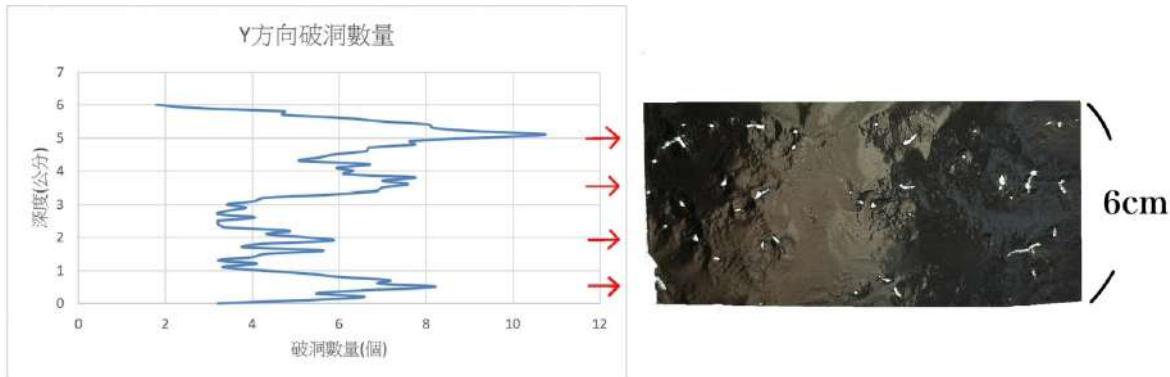
(二) 兩實驗結果皆支持了我們對於空穴產生的模型，並且也藉由兩者的差異驗證鋁箔紙上的破壞的確是由空蝕效應產生，與我們的結論相符。而我們先前也有網路資料（鄭永銘，2020）指出，空蝕效應並不會在二氧化碳水溶液中發生。

二、觀察鋁箔紙分析破洞分布，確認氣泡產生的位置有何特性

(一) 歸納氣泡分佈的規律性

使用 Image J 分析放入超音波洗淨機震盪後的 20 張鋁箔紙，利用 EXCEL 計算 20 張鋁箔紙上各深度破洞數量的平均，得出 Y 方向破洞數量圖如圖 11，圖 11 中的圖表為 20 張鋁箔紙數據的平均，而右方的鋁箔紙為 20 張中取一張做為參考，數據峰值也和平均後的結果大致相同，因此用此張鋁箔紙進行對照。

圖 11、Y 方向破洞數量圖



圖表來源：研究者自行製作

觀察數據可以發現第一條破洞密集處為水面下 0.85cm，且四條破洞密集處之間的距離大約為 1.7cm。

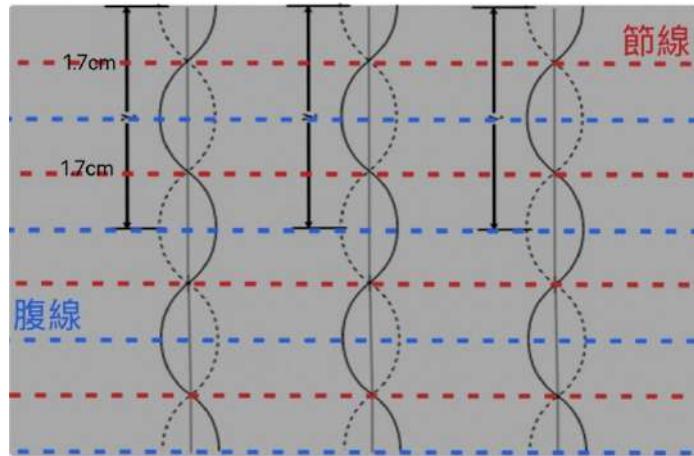
(二) 分析氣泡產生區域及其原由

我們發現破洞在水平分布上具規律性，垂直分布則無。根據圖 11 歸納出的破洞密集處，我們觀察出了四條易產生破洞的水平線，進一步推測破洞分布可能和駐波有關，計算此超音波場的駐波波長，算式如下：我們使用的超音波洗淨機頻率是 40kHz，水中聲速大約為 1500 m/s，那麼波長 λ 為： $\lambda=fv=40000(\text{Hz})1500(\text{m/s})=0.0375 \text{ m}=3.75 \text{ cm}$ 。

根據計算，兩節線間的間距為半波長約等於 1.8cm，理論模型如圖 12。將理論模型對照實驗結果，量測兩節線的距離大約為 1.7cm，和理論大致吻合，而造成些微差距的原因可能為，超音波洗淨機產生的頻率有誤差或實驗過程中水下鋁箔紙無法在震盪期間完全垂直於底腔，造成破洞分布與理論有些微差異。

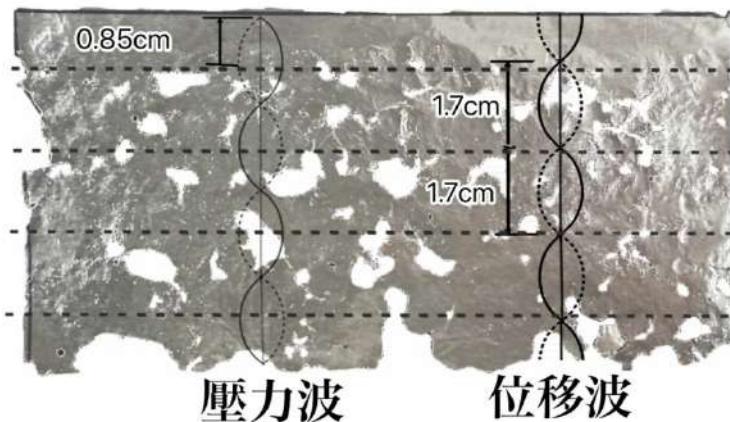
至於破洞產生在節線處的原因，如圖 13，位移波節點處壓力波為腹點，相反地，在位移波腹點處壓力波為節點，因此可以得知駐波節線處雖然震盪幅度較小，但產生的壓力差較大，使得空蝕效應在此處更為明顯。

圖 12、駐波理論模型



圖表來源：研究者自行製作

圖 13、理論模型對照實驗結果

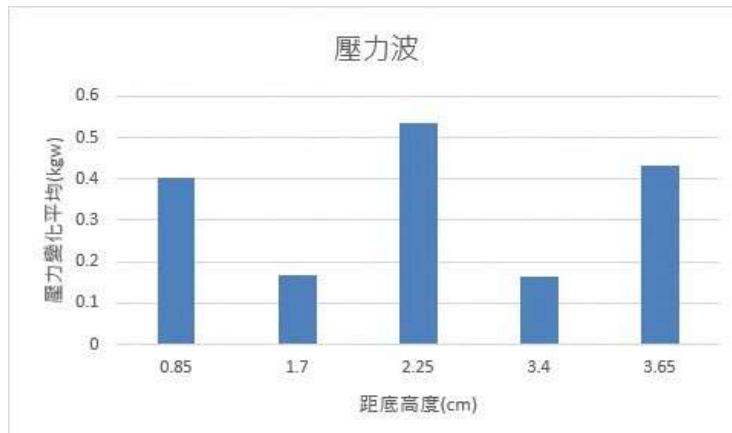


圖表來源：研究者自行製作

(三) 利用不同高度壓力數據驗證模型

我們使用壓力感測器測量距離箱底不同高度，壓力的變化，紀錄 15 秒內各位置的壓力，取平均值繪製圖表，如圖 14。對應我們的駐波理論模型，0.85 公分、2.25 公分、3.65 公分處為節線，而 1.7 公分、3.4 公分的腹線處，可以明顯看到節線處的壓力變化比腹線處更顯著，符合壓力波的分布。此實驗結果和先前的研究結果（程貫恆等，2023）相符，透過再三的驗證，我們確認駐波理論模型是正確的。

圖 14、壓力波數據



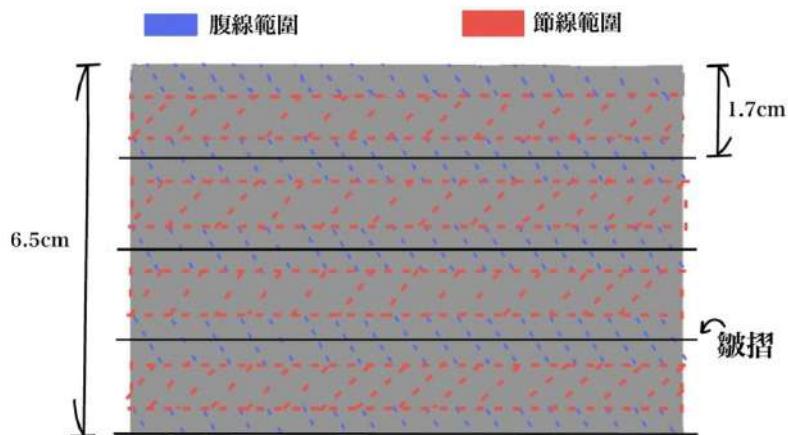
圖表來源：研究者自行製作

三、比較影響氣泡生成分布因素之間的關係

(一) 比較鋁箔紙上皺摺與節線對氣泡的影響

1.在先前的實驗中，我們發現鋁箔紙上的節線分布有時較不明顯，因此設計實驗比較皺褶和節線吸引與產生氣泡的情形，圖 15 為在腹線處摺上皺褶的鋁箔紙，推測有皺摺出現的鋁箔紙其節線分布會受到影響。

圖 15、摺上皺摺的鋁箔紙



圖表來源：研究者自行製作

2. 實驗結果：

	有皺摺的鋁箔紙	平滑的鋁箔紙
節線處	47283(單位面積)	452350(單位面積)
腹線處 (皺摺處)	1306834(單位面積)	

摺上皺摺的鋁箔紙其皺摺處與節線處破洞比值約為 27 倍，比較有摺皺摺與沒摺皺摺節線的破洞面積可以得知，摺上皺摺的鋁箔紙其氣泡因為被皺摺吸引所以破洞面積變小，而皺摺處會生成更多的氣泡。

3.原理分析

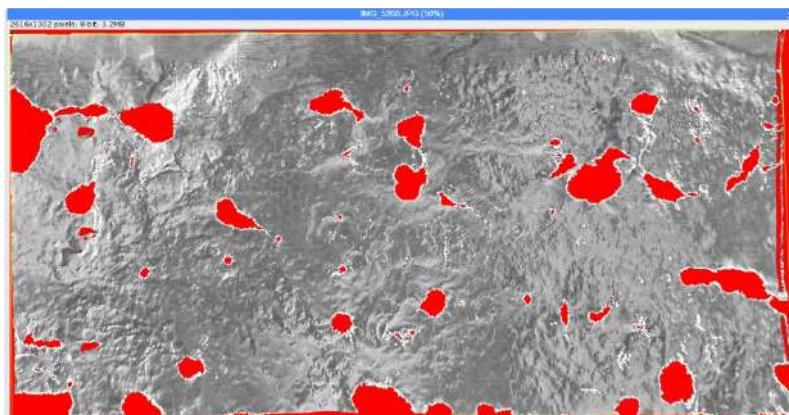
對於氣泡較傾向於附著在粗糙或皺褶處，我們查詢了文獻(Weihui Xu et al., 2021)，他們對粗糙度如何影響氣泡的附著及破裂做出結論，隨著粗糙度的增加，低壓區域不斷擴大，使得空穴數量大幅增加，也就是說，壁面粗糙度會大幅影響汽蝕的發展。結合流體力學的理論，氣泡成核往往需要“氣泡核”，而這通常存在於固體表面的裂縫、凹坑，並且粗糙表面會造成局部流速和壓力分佈不均，容易產生小尺度的渦流與分離區，導致局部壓力降低，更容易產生空穴。

四、由分析破洞面積對時間的關係，了解氣泡的附著過程

(一) 分析巨觀下氣泡附著情形

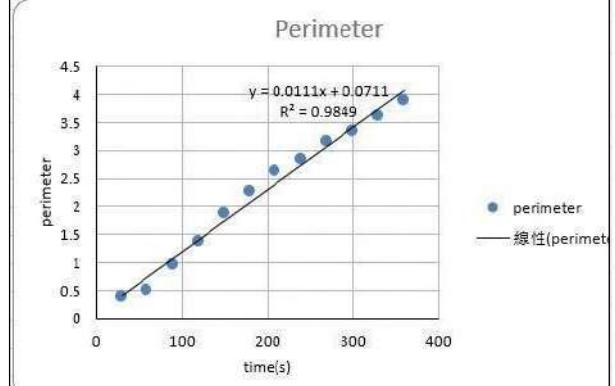
1. 使用 Imagej 對鋁箔紙水下範圍進行破洞分析，如圖 16，得出破洞洞口總周長與時間關係圖和破洞面積占水面下的面積之百分比與時間關係圖，如圖 17、圖 18。

圖 16、水下範圍破洞分析



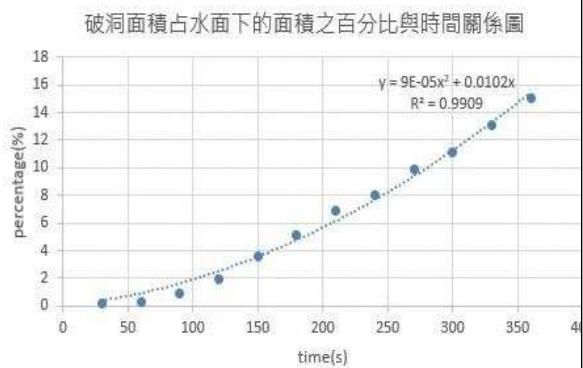
圖表來源：研究者自行製作

圖 17、破洞洞口總周長與時間關係圖



圖表來源：研究者自行製作

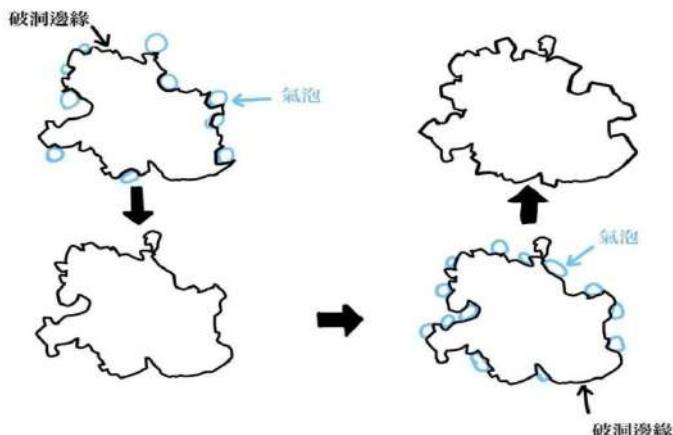
圖 18、破洞面積占水面下的面積之百分比與時間關係圖



圖表來源：研究者自行製作

2.透過分析圖表的數據變化，破洞周長和時間成正比，破洞面積則和時間成二次函數關係，根據此結果我們推知氣泡會在洞口邊緣附著因此周長會和時間成正比，而由於更大的周長會提供更廣泛的附著範圍，這將進一步加速破洞的擴大速度，使破洞的面積和時間成二次函數關係。以下為我們根據實驗結果分析出的邊緣附著模型，如圖 19。

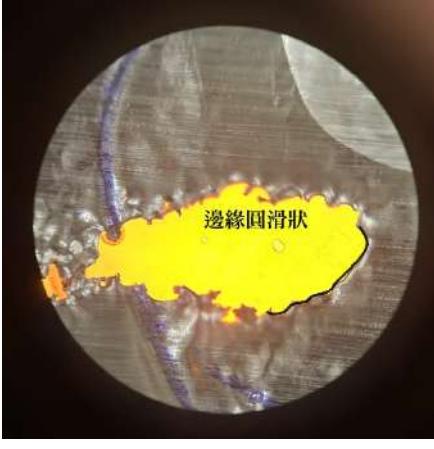
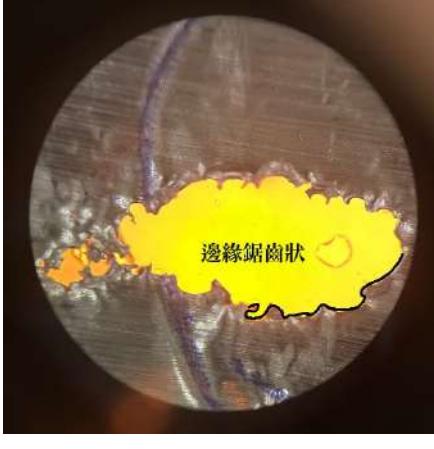
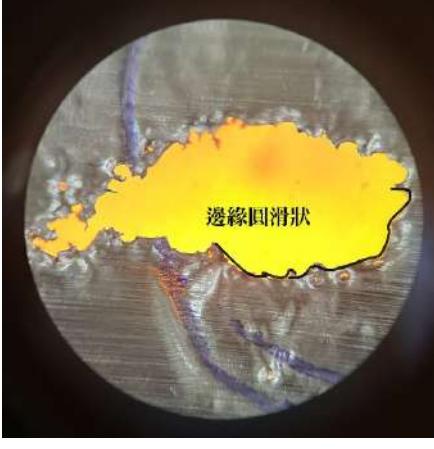
圖 19、邊緣附著模型



圖表來源：研究者自行製作

(二) 分析微觀下氣泡附著情形

1.顯微鏡下破洞邊緣形狀變化

圖 20(鋸)	圖 21(圓)
	
圖 22(鋸)	圖 23(圓)
	

圖表來源：研究者自行製作

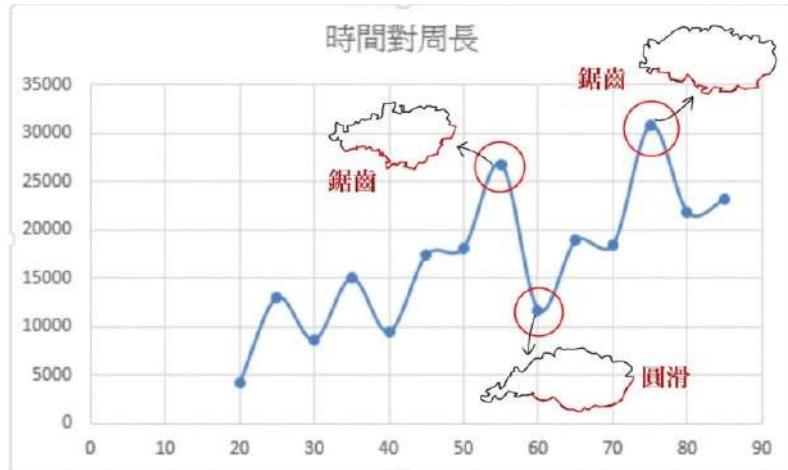
破洞邊緣形狀如圖 20 到 23，隨著時間變化，原先洞口由鋸齒狀變圓滑狀，再隔一段時間後，變回鋸齒。破洞周長隨時間變化增加，但因為會有圓滑狀與鋸齒狀的差異，鋸齒狀時周長較圓滑狀時長，變化過程可能會呈現總體趨勢上升，但每隔一段時間較前一個時間點下降的圖像。

2.顯微鏡下破洞時間對周長的關係

知道破洞邊圓形狀的變化後我們做了周長變化圖，如圖 24，周長會隨著時間有高低起伏，整體為向上成長。此曲線與巨觀觀察下不同，原因為，微觀下方會紀錄到鋸齒與圓滑周長的差異，而在巨觀觀察下，我們只能記錄到洞口

周長整體的擴張。

圖 24、顯微鏡下時間對周長關係圖

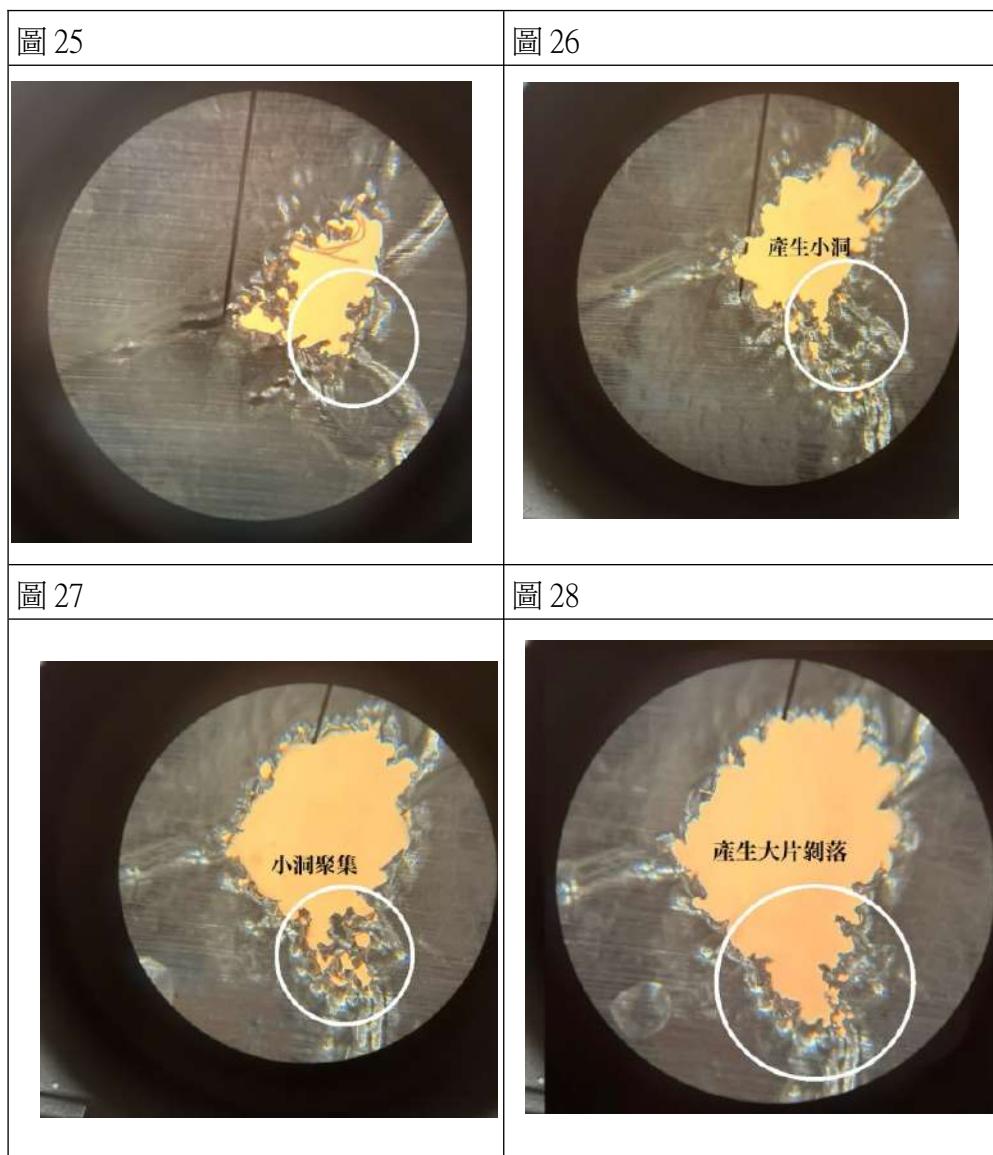


圖表來源：研究者自行製作

3. 顯微鏡下氣泡的聚集

聚集擴大：使用顯微鏡觀察後，我們發現破洞的擴張主要是因為小洞的聚集，如圖 25 到圖 26，破洞下方產生了許多小洞，這些小洞並非直接存在於洞口邊緣，而是在破洞的附近，圖 27 小洞開始結合，到了圖 28 下方小洞聚集處完全和原洞合併。

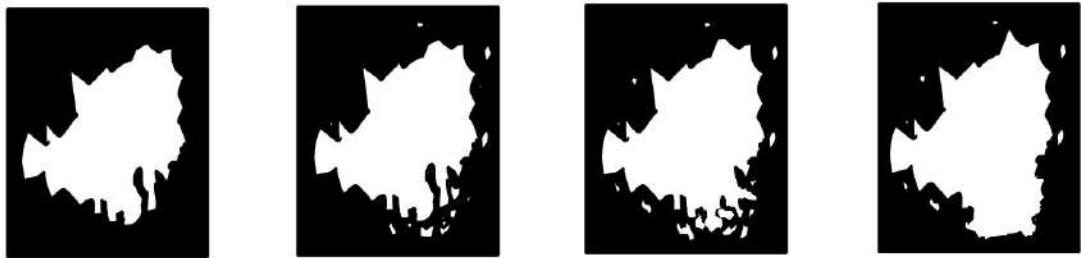
大片剝落：當小洞因聚集將一區塊完全圍住，這個區塊會因為邊緣皆被小洞破壞產生大片剝落，如圖 27 到圖 28，下方鋁箔直接剝落。



圖表來源：研究者自行製作

因此我們認為洞的大幅擴張可能非其自身擴大產生，是因為一開始產生鋸齒，吸引氣泡，在其周圍聚集產生更多氣泡，當破洞聚集且與原先洞口融合時，洞口就會大幅擴大。當然的，氣泡也會直接附著在洞口邊緣，進行小幅度的擴張。針對聚集擴大以及大片剝落，我們修正了邊緣附著模型，如圖 29。

圖 29、邊緣附著模型(修正版)



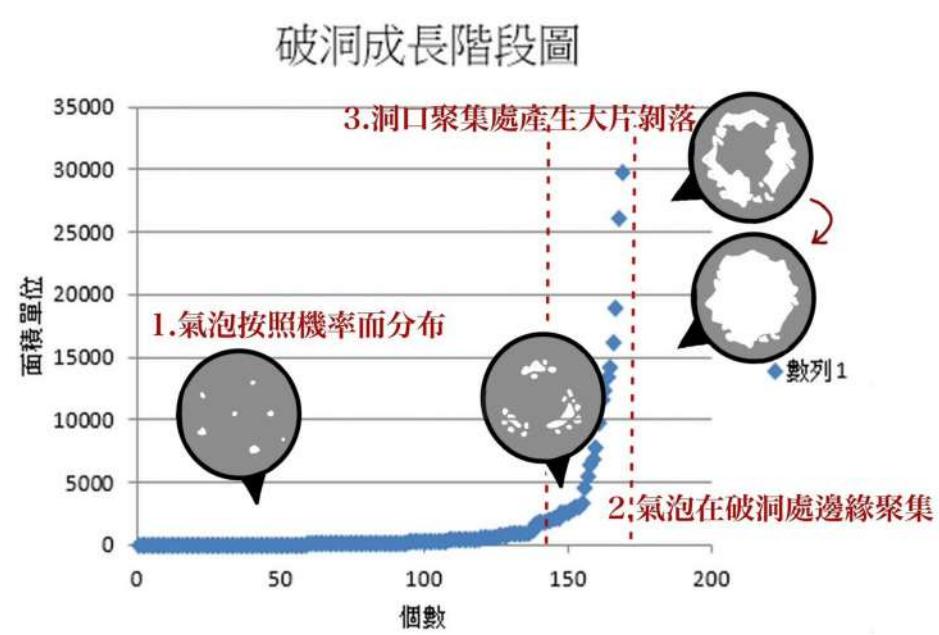
圖表來源：研究者自行製作

模型中白色區塊為破洞處而黑色區塊為鋁箔紙，第二張圖片的洞口下方因為邊緣較為鋸齒，因此在洞口附近產生了較多的小洞，到了第三張圖片小洞開始聚集，最後第四張圖產生大片剝落與原洞結合。

(三) 時變率推論氣泡附著隨時間對鋁箔紙的破壞

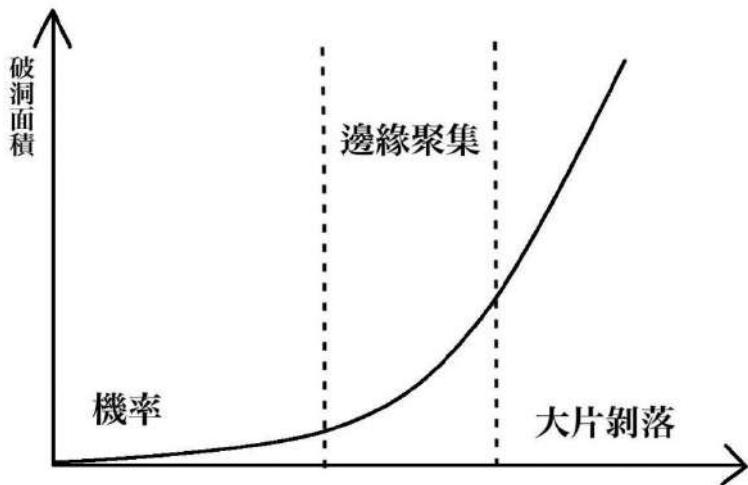
鋁箔紙上會一直產生新的小洞，而原先的洞會持續擴張，因此若我們分析整張鋁箔紙，會同時記錄到剛出現的洞與已經擴大的洞。將洞口依面積大小排序得出破洞成長階段圖，如圖 30，因為每個洞存在時間不同，這個趨勢也可以解釋為單一破洞隨時間的破洞成長，分析圖表後我們認為洞口面積成長分成三個階段，第一階段是在機率分布下產生的初始破洞，當洞口在機率分布下擴大到一定程度，氣泡開始在其周圍產生聚集，這時的斜率會略微上升，最後當小洞圍住一個範圍，鋁箔紙產生大片剝落，面積成長斜率最高。根據實驗數據以及理論分析，我們建立了破洞成長理論模型，如圖 31。

圖 30、破洞成長階段圖



圖表來源：研究者自行製作

圖 31、破洞成長理論模型



圖表來源：研究者自行製作

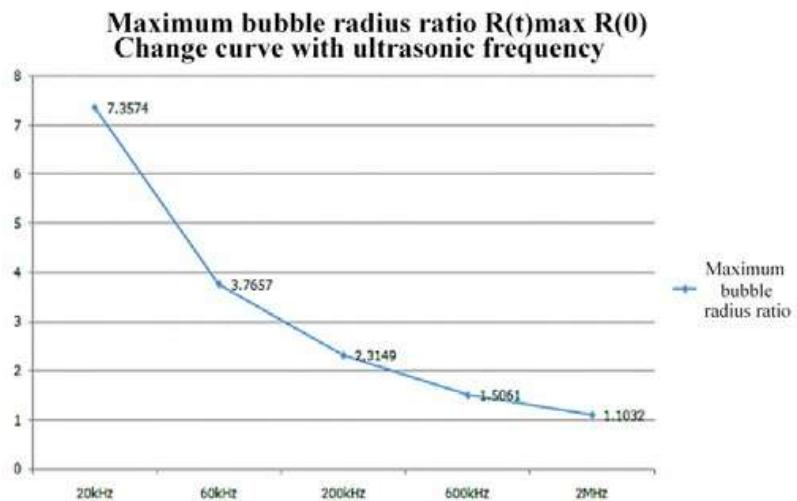
(四) 研究破洞初期的洞口變化

1、根據文獻(YanLi et al., 2020)，不同的頻率下會產生不同大小的氣泡如圖 32，對比我們的超音波洗淨機頻率，產生的氣泡半徑約為 6 微米，此大小的氣泡所產生的破壞面積會對應，震盪後的鋁箔紙上尚未開始擴大的洞口，我們將它設定為最小的洞。

2、對此我們將鋁箔紙放入顯微鏡中，找到最小的洞，後續持續記錄此洞口的擴張情形如圖 33，觀察洞口可以發現洞口的非常慢，還處於機率分布的時期，此時的面積成長不呈二次函數圖形，如圖 34。在成長曲線中可以發現第二個點

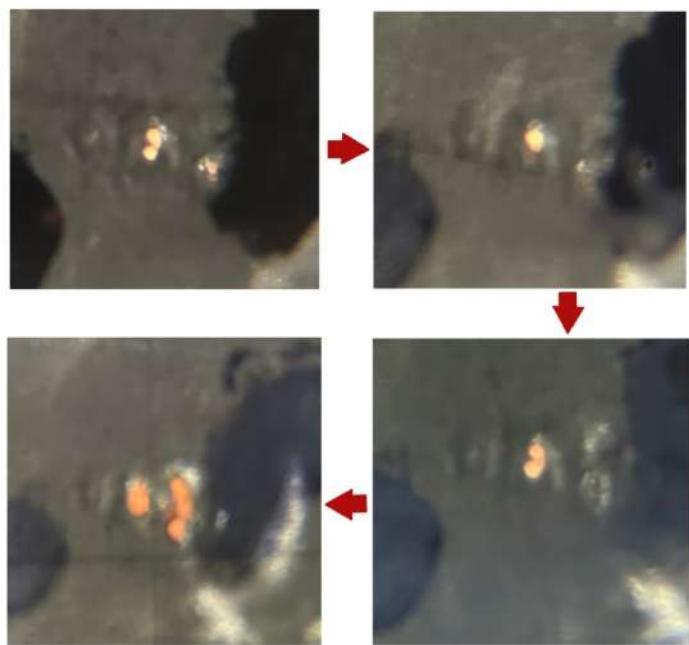
周長與面積都下降了，造成此現象的原因為，鋁箔紙沒有完全斷裂，當這一小塊鋁箔因為後續的震盪翻回來，原本存在的洞口就會消失。

圖 32、頻率對氣泡半徑關係圖



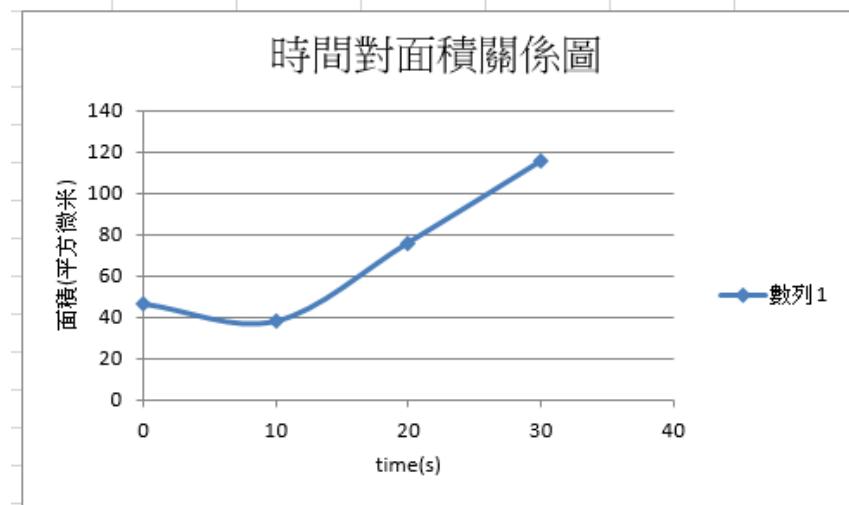
圖表來源：YanLi et al.(2020)

圖 33、顯微鏡下的最小破洞擴張情形



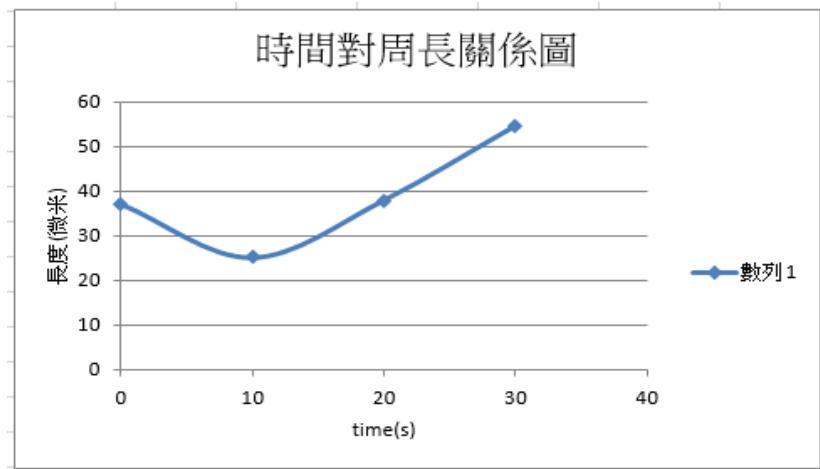
圖表來源：研究者自行製作

圖 34、最小的洞時間對面積關係圖



圖表來源：研究者自行製作

圖 35、最小的洞時間對周長關係圖



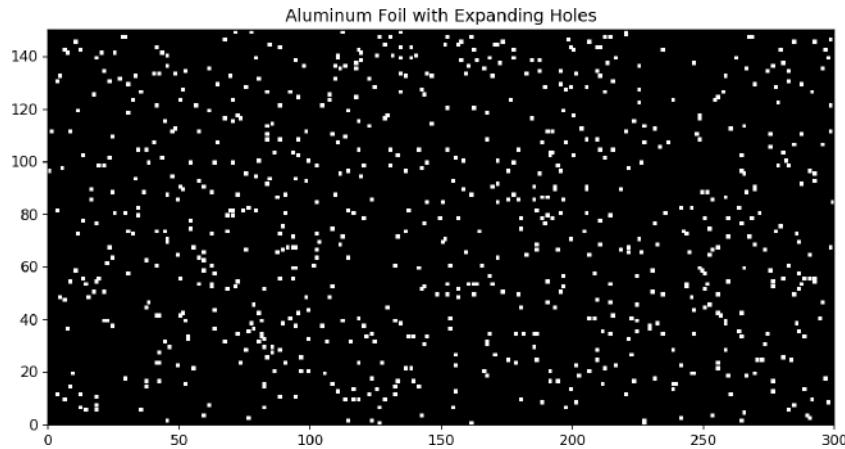
圖表來源：研究者自行製作

3.由周長與面積成長曲線，我們可以確認當洞口面積太小時，洞口的擴張會隨機率分布，此階段的面積成長較緩慢，不呈二次函數，也驗證了我們的破洞成長理論模型的機率分布階段。

五、利用電腦程式模擬孔洞的產生

(一) 模擬破洞完全隨機分布於鋁箔紙上，且尚未進行擴張的情形。

圖 36、模擬破洞完全隨機分布於鋁箔紙上的結果

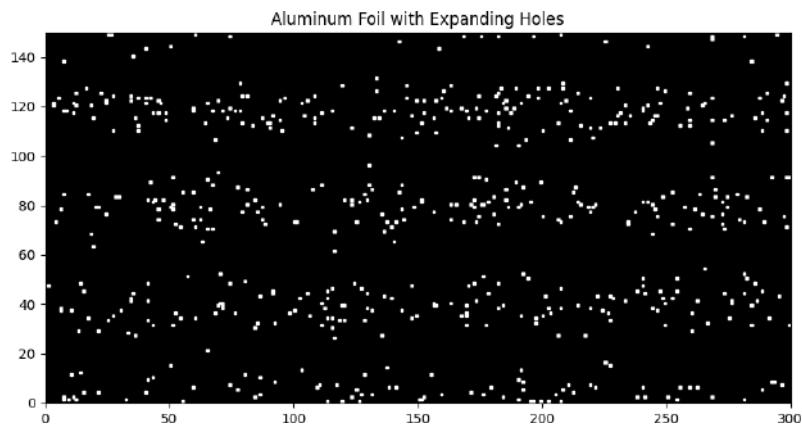


圖表來源：研究者自行製作

如圖 36 所示，破洞完全隨機散布於鋁箔紙，沒有呈現先前觀察到的水平分布，也沒有聚集的現象，不符合實際情形。

(二) 考慮駐波的因素，利用餘弦函數調整閾值，模擬超音波場的影響。

圖 37、模擬駐波的影響之結果

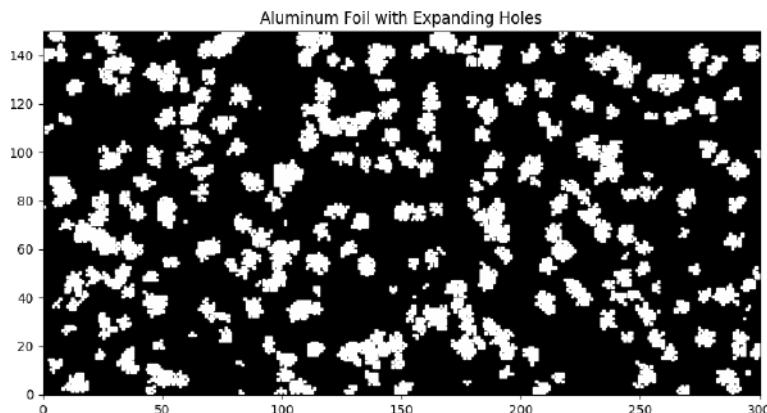


圖表來源：研究者自行製作

如圖 37，相較於完全隨機分布，加入餘弦函數後的程式成功模擬了我們所觀察到的水平分布，在節線處產生較多的破洞，反之，腹線處破洞較少，然而，此圖並未呈現後續的擴張情形以及聚集的特性。

(三) 首先讓破洞於隨機位置上產生初始破洞，後續降低已破洞周圍區域的閾值，並偵測鄰近破洞處多寡，以此模擬破洞容易附著於已破洞處的特性。

圖 38、模擬破洞附著於已破洞處之結果

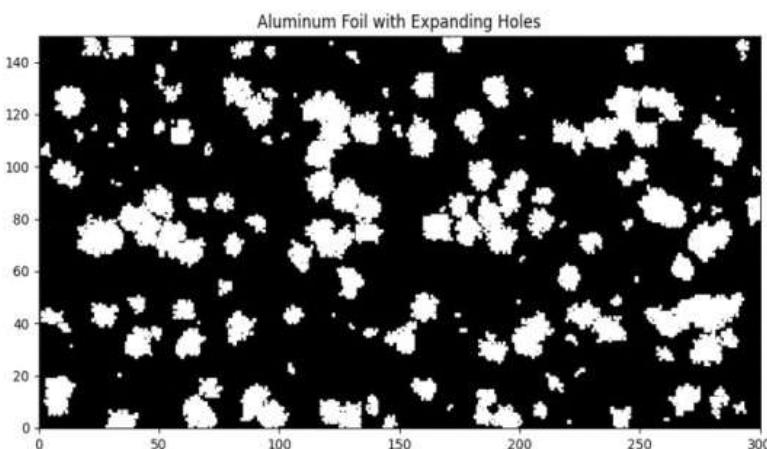


圖表來源：研究者自行製作

如圖 38 觀察破洞單一破洞的大小及形狀，此圖符合實際情況下孔洞在震盪超過五分鐘後的擴張情形，也顯現出孔洞容易聚集在破壞較嚴重處的特性，但由於閾值沒有隨位置調整，因此並未呈現超音波場影響下的破洞水平分布。

(四) 同時加入超音波場以及鄰近破洞的影響，並加入可調整影響比例的參數，藉此模擬實際破洞情形。

圖 39、同時模擬破洞附著於已破洞處及駐波影響之結果



圖表來源：研究者自行製作

如圖所示，在同時加入超音波場的影響以及聚集特性的模擬後，產生的圖形較接近實際情形，其中孔洞的大小差異是由於產生時間不同，其餘在水平分布及孔洞形狀上，皆符合我們的預測。

(五) 利用表格將圖 36 到圖 39 進行比對，並將實際拍攝的鋁箔紙照片繪製成相同解析度且黑色代表完整、白色代表破洞的圖片，與模擬的圖片進行比對。

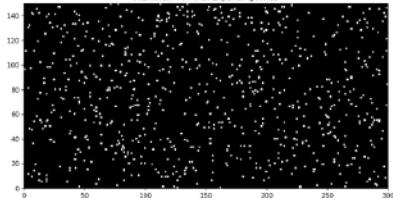
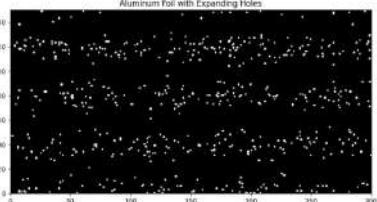
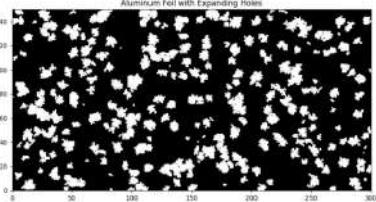
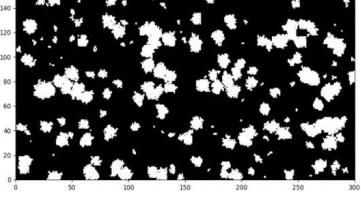
	無超音波場的影響	有超音波場的影響
無擴張		
有擴張		

圖 40、實際拍攝鋁箔紙並進行二值化處理的圖片



圖表來源：研究者自行製作

與實際拍攝並進行二值化處理的圖片進行比對後，可以看見，有同時模擬擴張與超音波場影響的圖片最符合實際情況。

即便如此，我們發現白色破洞區域中間可能出現應該要呈現白色的黑色封閉小洞，破洞的形狀及大小差異依然有些不符合實際情況，因此我們會在後續的實驗中排除這些問題持續優化我們的模擬結果。

(六) 模擬鋁箔紙的破壞達到一定程度後，因金屬疲勞產生大片剝落的情形，並排除白色破洞區域中間出現的黑色封閉小洞。

圖 39、同時模擬擴張及駐波影響分布之結果

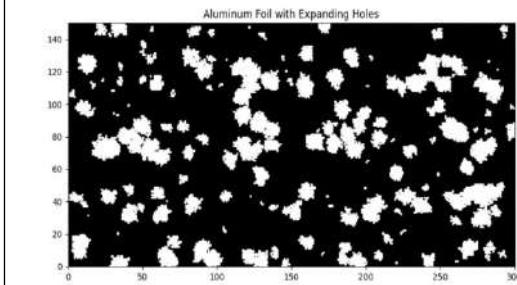
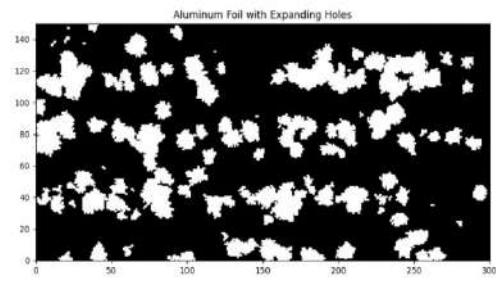


圖 41、排除白色破洞區域中間出現的黑色封閉小洞及過小的黑色區域之結果

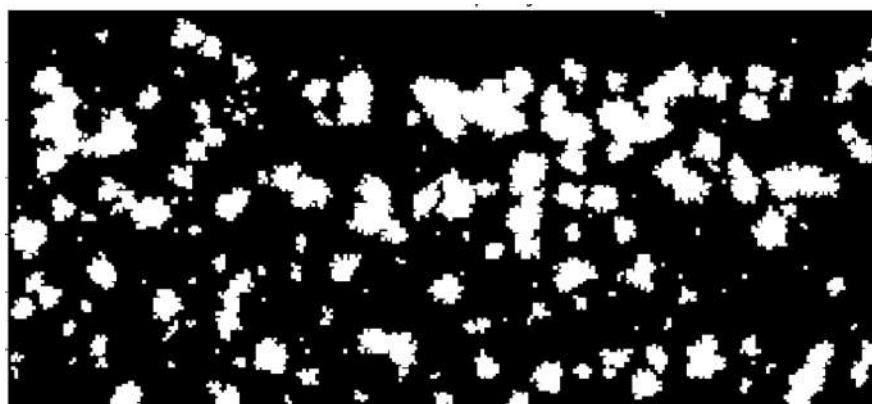


左圖（圖 39）為僅模擬擴張與超音波場影響的圖片，可以看見，許多白色區塊聚集後中間會出現非常小塊的黑色區域，但在實際情況下，那些過小的鋁箔紙會因金屬疲勞而剝落，形成較大的孔洞。

右圖（圖 41）的模擬結果排除了封閉黑色區域並且讓白色區域周圍過小的黑色區域自動變為白色，較貼近實際情形。

（七）利用實驗二、觀察鋁箔紙分析破洞分布，確認氣泡產生的位置有何特性中所提出的數量分布建立機率，模擬更為貼近實際情形的水平分布。

圖 42、利用破洞數量分析數據建立機率分布之結果



圖表來源：研究者自行製作

圖中可看見破洞大小分層的情形與實際情形相符，代表擴張機制的體現，另外重新依實際實驗數據建立的機率分布取代了原先用來模擬駐波影響的餘弦函數，使結果更為貼近實際的情形。

伍、結論

一、氣泡產生位置的特性

我們成功利用超音波洗淨機產生空蝕效應，並提出鋁箔紙產生破洞的模型，分析鋁箔紙的破洞分佈，我們模擬出腔體內節腹線高度，並使用壓力感測器確認了氣泡會在節線處產生氣泡並發生空蝕現象，證明了駐波和空蝕效應的直接關係；皺褶處也會產生氣泡，且皺褶處會吸引原本在節線處的氣泡，使節線處的破洞分布較不明顯。

二、了解氣泡的附著過程

(一) 在巨觀下，我們繪製了時間分別對周長和時間的關係圖，由此推論氣泡會在邊緣附著，進而使用顯微鏡在微觀下觀察破洞的變化

(二) 破洞會因為從邊緣開始擴大，而有鋸齒和圓滑之間的變化，此變化會導致周長在微觀下呈現高低起伏，和巨觀下的正比有所落差。

(三) 在微觀觀察後，我們由新破洞的產生位置推論了氣泡的附著位置，氣泡會在邊緣附著造成洞口的微幅增長，也會在洞口附近產生新的小洞進行聚集和大片剝落造成洞口的大幅擴張。

(四) 分析整張鋁箔紙，我們得到了破洞時變率的圖表，藉以得知破洞的破壞分成三個階段，第一段的機率分布，第二階段的小洞聚集，第三階段的大片剝落。

(五) 透過文獻(YanLi et al, 2020)我們知道了氣泡有一定的大小，因此我們想從一個破洞剛生成開始，了解他後續的成長情形，經過實驗，我們得知破洞在還很小的時候，面積成長非常緩慢，符合破洞成長階段的機率分布。

三、利用電腦程式模擬孔洞的產生

(一) 我們成功利用電腦程式模擬只有駐波影響及只有往孔洞聚集的兩個模型，將兩項便因綜合起來的模型也是最貼近實際情況的，後續為了模擬鋁箔紙大片剝落的情形，我們加入了程式碼排除白色區域中間的小洞，再將過小的黑色區域也排除，產生的結果又更貼近了實際情形。

(二) 針對水平分布的模擬，我們透過數量分析建立出的破洞機率分布讓孔洞的分布相較原先的餘弦函數更貼近實際情形。

(三) 利用程式模擬的結果，雖無法完全重現空蝕效應對鋁箔產生的破壞，但也證實了我們在先前實驗中推測的破洞產生機制皆正確。

陸、參考文獻

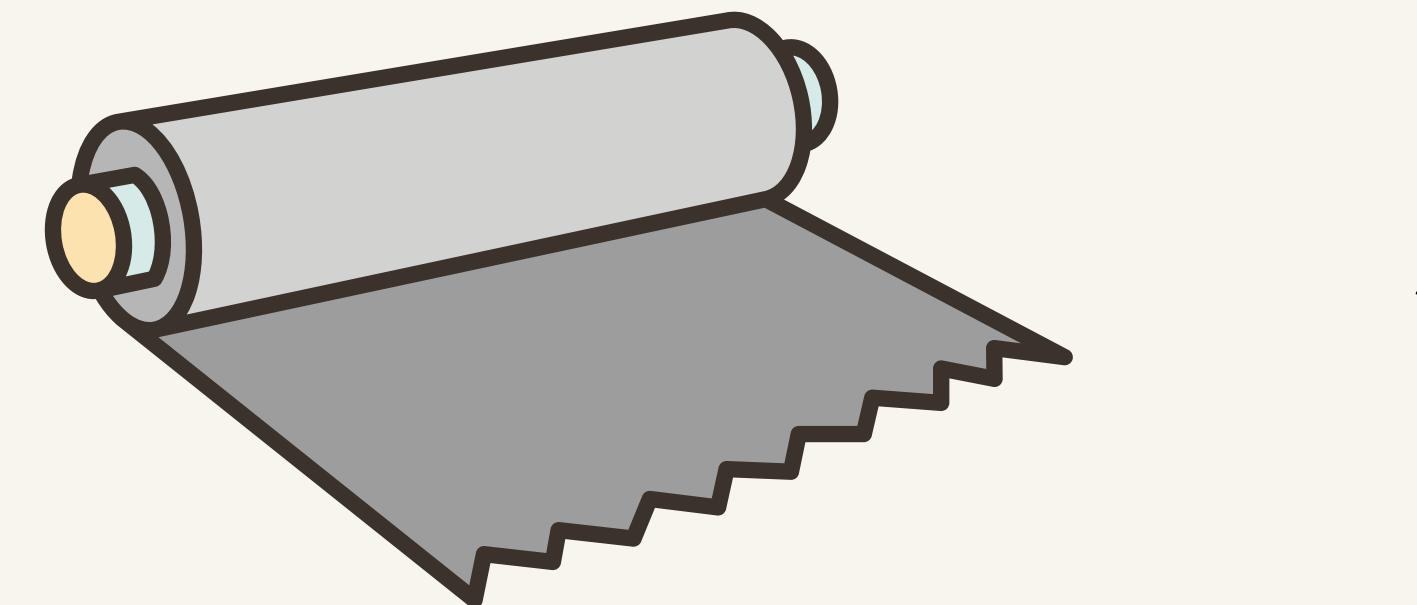
- 一、Paun, Viorel-Puiu&Patrascoiu, Constantin(2010,January3) Ideal Cavitation Erosion Process and Characteristic Erosion Curves. *Revista de Chimie-Bucharest-Original Edition*, 6(13), 281.
https://www.researchgate.net/publication/356503796_Ideal_Cavitation_Erosion_Process_and_Characteristic_Erosion_Curves
- 二、鄭永銘(2020 年 8 月 1 日)。氣功破瓶。
<https://masters.tw/255834/break-a-bottle-with-bare-hands>
- 三、Marcus Weber, Judith Weber(2022)。神奇物理學。商周出版。
- 四、程貫恆、蔡承圻、簡敬倫(2023)。「蝕」破天驚~超聲波場中空蝕效應之破壞情形分析。
<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/63/senior.html>
- 五、Weihui Xu, Xiaoke He, Xiao Hou, Zhihao Huang, Weishu Wang(2021, May2). Influence of wall roughness on cavitation performance of centrifugal pump, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 43(314), 8-11.
https://www.researchgate.net/figure/influence-of-wall-roughness-on-pump-cavitation-performance-a-Effect-of-roughness-on-head_fig4_351897877
- 六、Yan Li¹, Dawei Zhang¹, Peiyu Zhang(2020, March 31). Study on transdermal drug delivery with microneedle array, *Materials Science and Engineering*. 768(5), 4.
https://www.researchgate.net/publication/340313814_Study_on_transdermal_drug_delivery_with_microneedle_array

【評語】051820

本作品主題具科學深度與應用潛力·空蝕效應是流體動力學中非常具有挑戰性的現象，與工程、航太、醫療器材等領域皆有密切關聯。以超音波洗淨機模擬其過程，展現極佳的題材轉化與應用能力。本作品實驗設計縝密，層次分明研究從驗證氣泡產生與破洞成因開始，逐層展開對氣泡分布、附著行為、皺摺與節線的影響、以及時間變化的分析。操作方法多元，涵蓋肉眼觀察、顯微鏡分析、壓力感測器量測與影像處理（ImageJ），科學方法嚴謹周全。唯觀察超音波在二氧化碳水溶液入射到鋁箔紙的蝕刻行為，並非新穎議題。統計量化程度仍可提升·未來或可嘗試其他材料以及不同的超音波頻率。

作品海報

「蝕」無忌憚——空蝕效應中空穴產生的



機制及特性之探討

摘要

本實驗探討空蝕效應空穴產生和氣泡附著於鋁箔紙上的情形。我們使用超音波洗淨機為製造超音波場的工具，將固定大小的鋁箔紙放入超音波場中產生破洞，透過破洞在鋁箔紙上的分布，推論在腔體裡氣泡的分布與傾向附著的部分，也利用顯微鏡在微觀下更仔細地觀察破洞的擴張情形，藉以得知氣泡如何在鋁箔紙上附著。

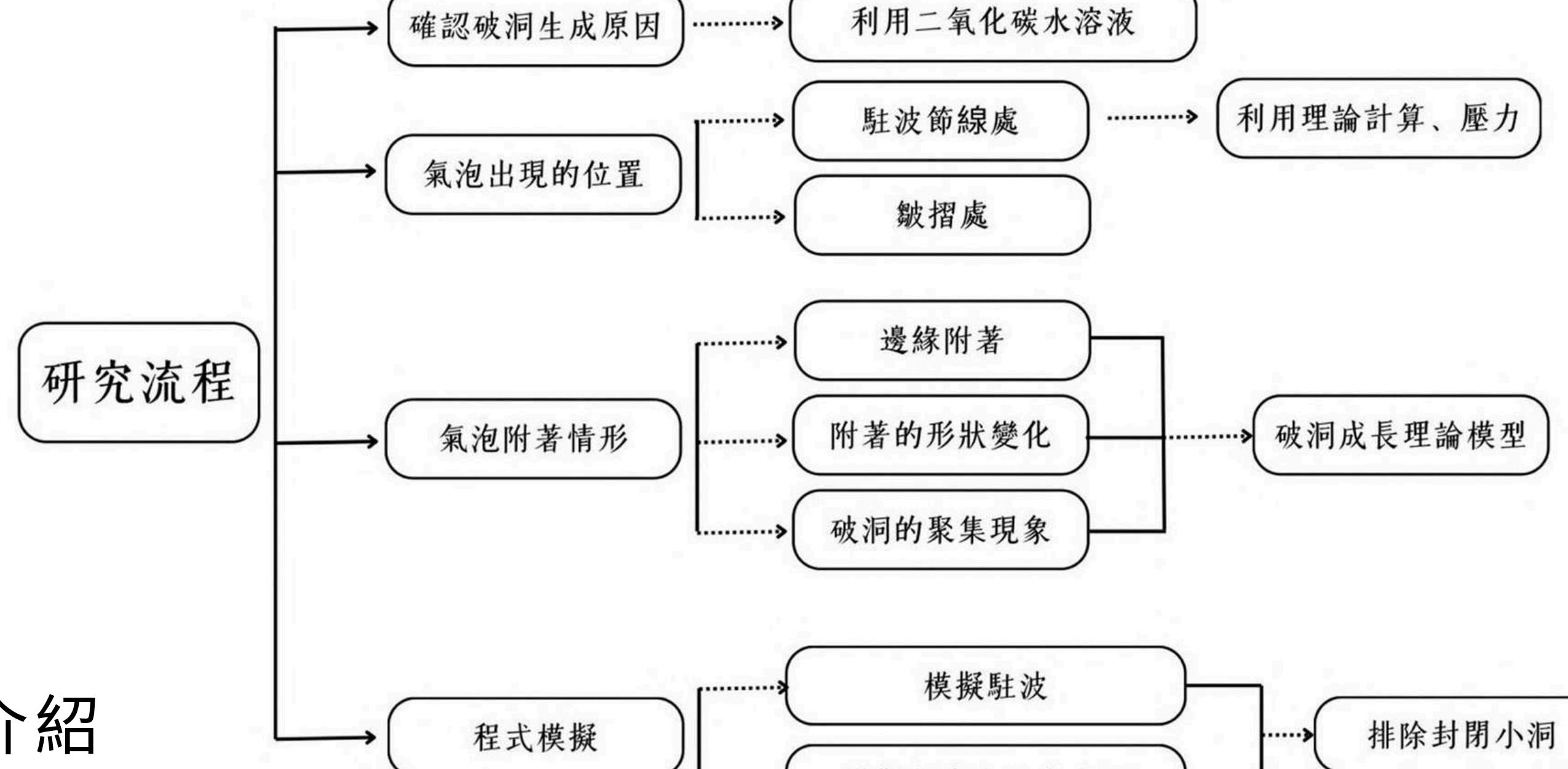
壹、前言

一、實驗動機

先前我們在網路上看到了一個影片，內容是鼓蝦利用空蝕效應產生衝擊波進而捕食獵物，在了解鼓蝦是如何利用空蝕效應捕食後，我們對此現象產生興趣，決定於本研究中探討空蝕效應的原理及成因，因此利用超音波洗淨機模擬超音波場產生空蝕效應，並放入固定大小的鋁箔紙進行震盪，在震盪後觀察其破壞情形。

二、研究目的

- (一) 驗證鋁箔紙上的孔洞是由超音波場下的空蝕效應產生
- (二) 觀察鋁箔紙分析破洞分布，確認氣泡產生的位置有何特性
 1. 歸納氣泡分佈的規律性
 2. 分析氣泡產生區域及其原由
 3. 利用不同高度壓力數據驗證模型
- (三) 比較影響氣泡生成分布因素之間的關係
- (四) 由分析破洞面積對時間的關係，了解氣泡的附著過程
 - 1、分析巨觀下氣泡附著情形
 - 2、分析微觀下氣泡附著情形
 - 3、由破洞時變率推論氣泡附著隨時間對鋁箔紙的破壞
 - 4、研究破洞初期的洞口變化
- (五) 利用電腦程式模擬孔洞的產生



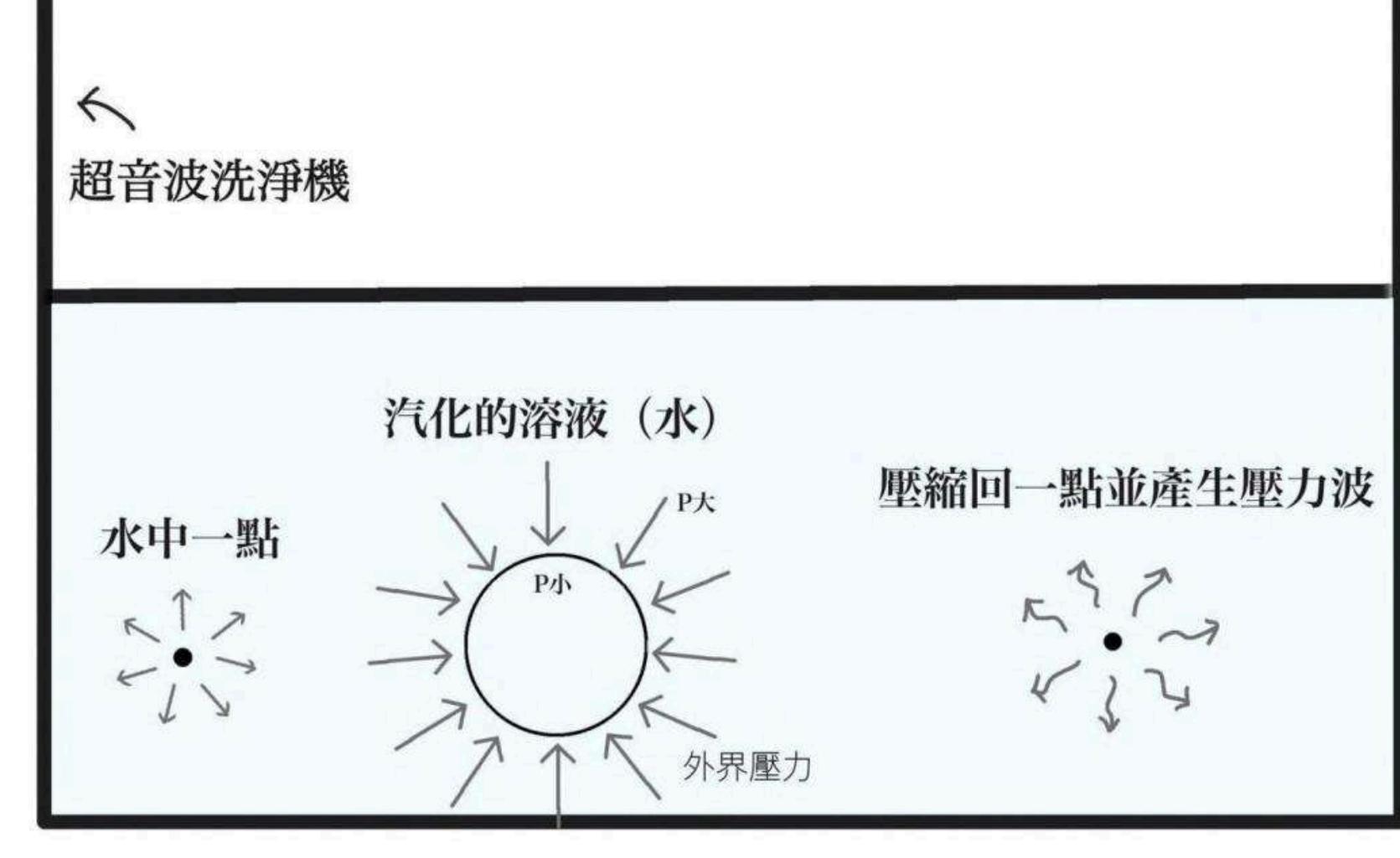
三、文獻回顧

(一) 空蝕現象的介紹

根據文獻 (ViorelPuiuPaun, 2020) 指出空蝕效應造成的破壞是因為氣泡的塌陷，而氣泡的產生是因為液體震盪造成小區塊壓力降到低於當前溫度下液體的蒸氣壓，進而產生氣泡（氣泡內為汽化的溶液），此時氣泡內的壓力只有液體本身的蒸氣壓，當空腔大部分充滿蒸氣並承受非常快速的壓力上升時，它會劇烈爆破並導致非常高的壓力峰值，最後產生破壞。

(二) 根據文獻建立的理論模型

根據文獻內容，我們建立了空蝕現象的理論模型，如圖一，在超音波場的影響下產生了壓力較小處，液體因而汽化產生一空穴，後又因外界壓力大於空穴內的壓力使得氣泡破裂，並產生噴流變回一點。



圖一、空蝕現象理論模型

貳、研究方法與結果分析

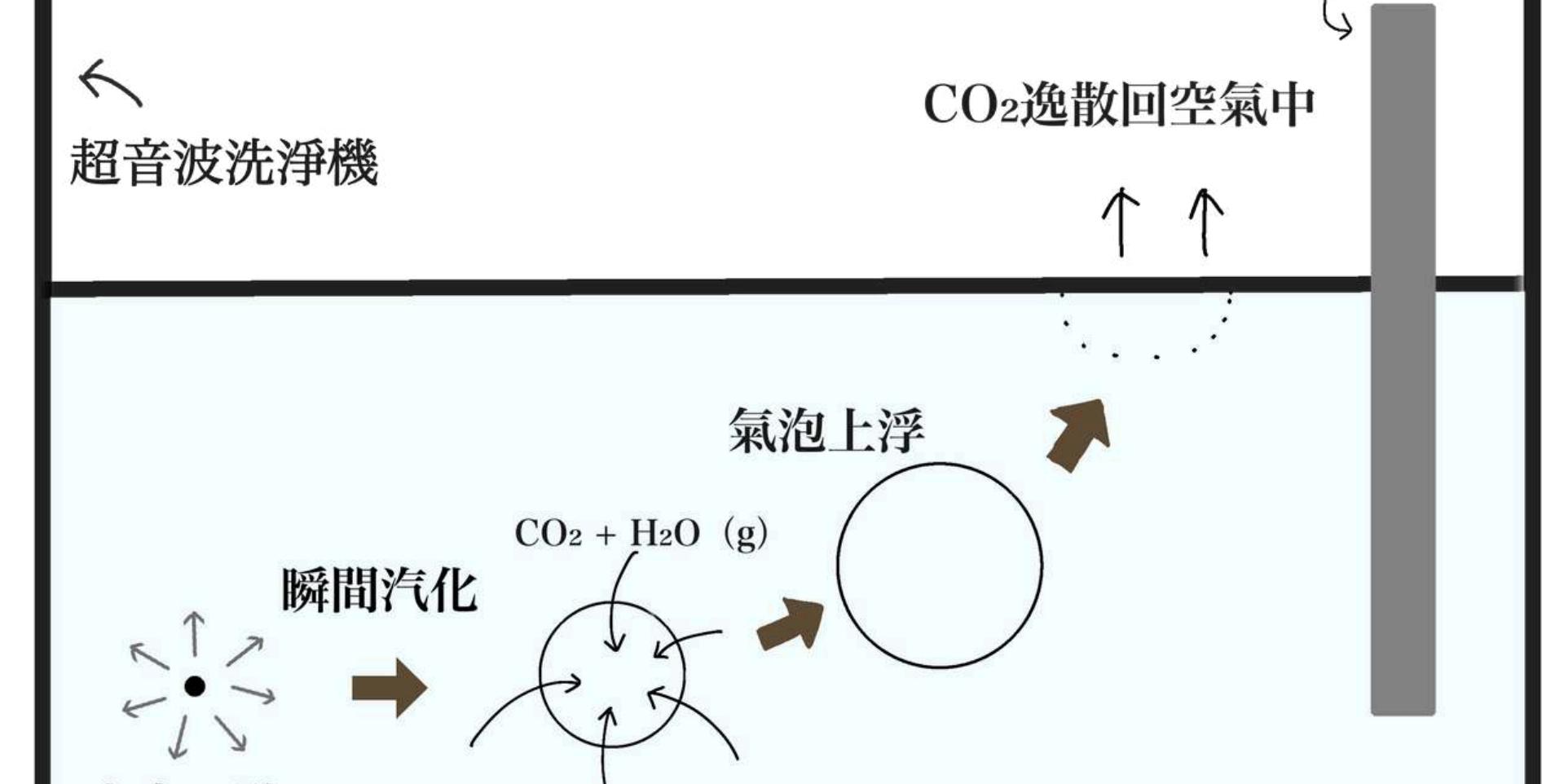
一、驗證鋁箔紙上的孔洞是由超音波場下的空蝕效應產生

(一) 實驗結果分析

1、肉眼下觀察二氧化碳水溶液對平滑鋁箔紙的影響

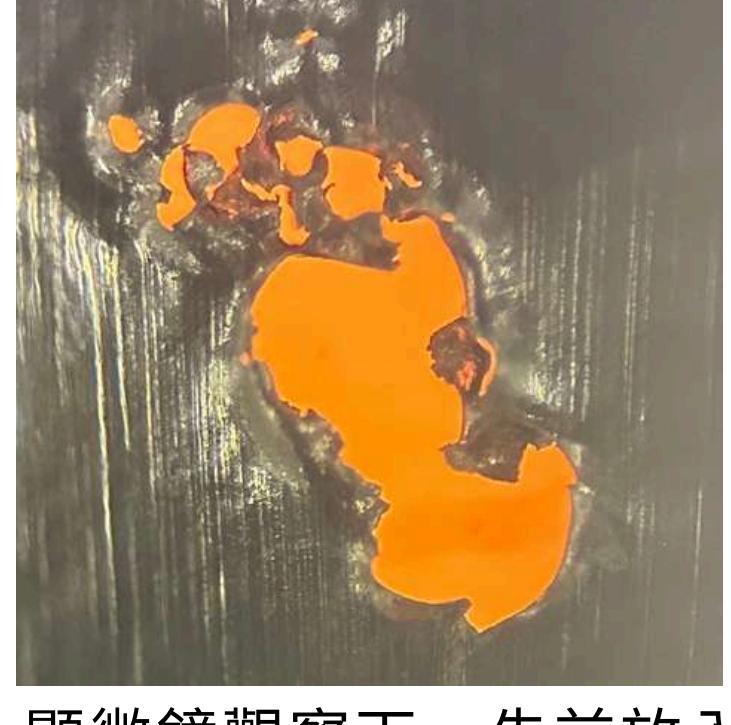


圖二、放入二氧化碳水溶液中震盪 5 分鐘的鋁箔紙(左)、放入自來水中震盪 5 分鐘的鋁箔紙(右)

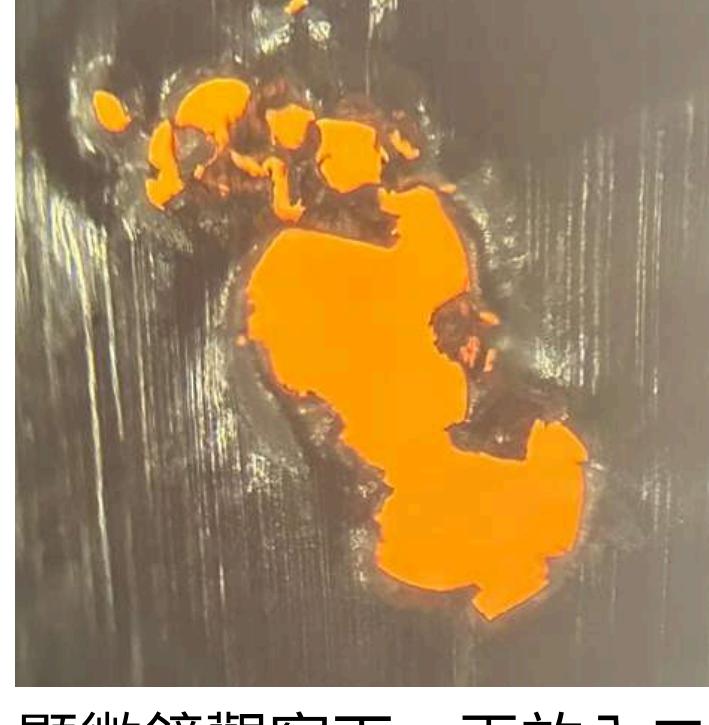


圖三、二氧化碳水溶液下空蝕模型

2、顯微鏡下觀察二氧化碳水溶液對洞口的影響



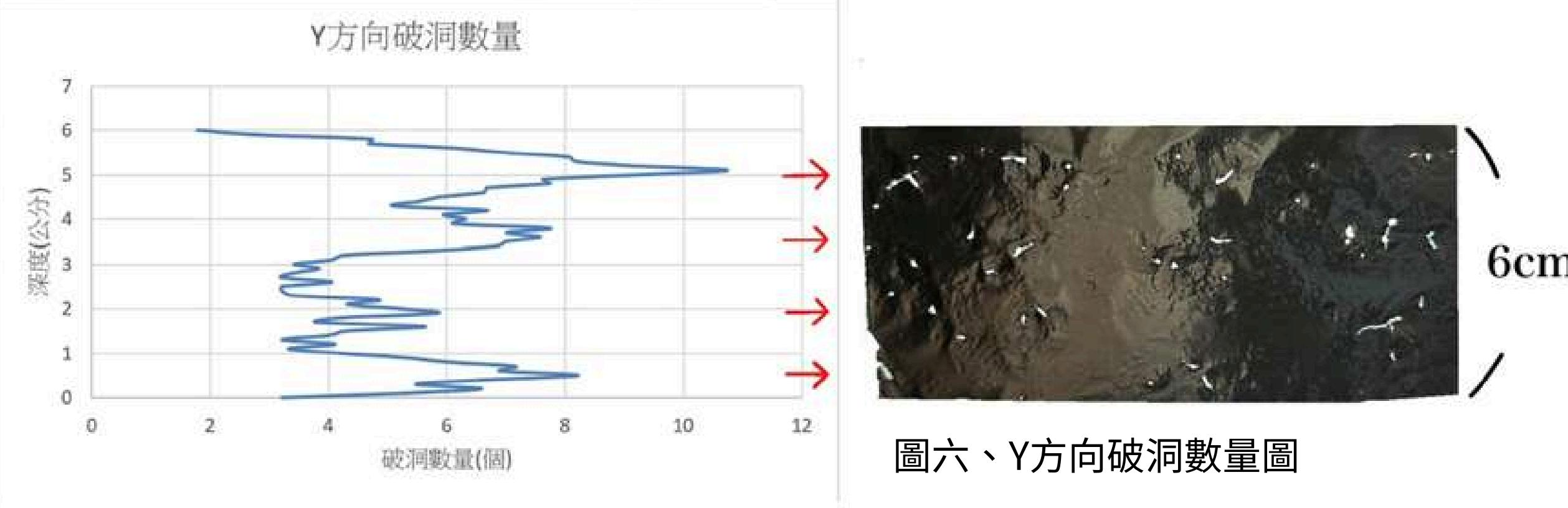
圖四、顯微鏡觀察下，先前放入水 中震盪產生的小洞



圖五、顯微鏡觀察下，再放入二氣化碳 水溶液震盪 5 分鐘後的洞口情形

二、觀察鋁箔紙分析破洞分布，確認氣泡產生的位置有何特性

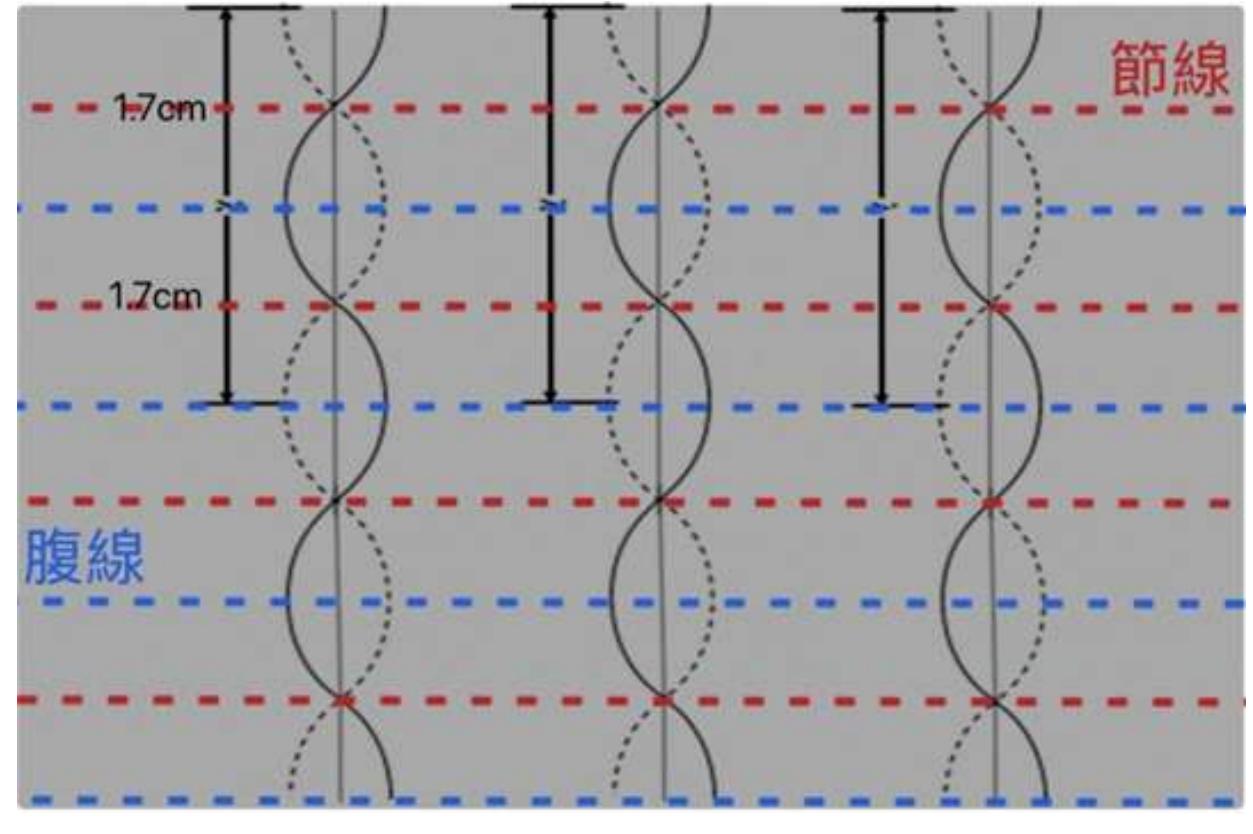
(一) 歸納氣泡分佈的規律性



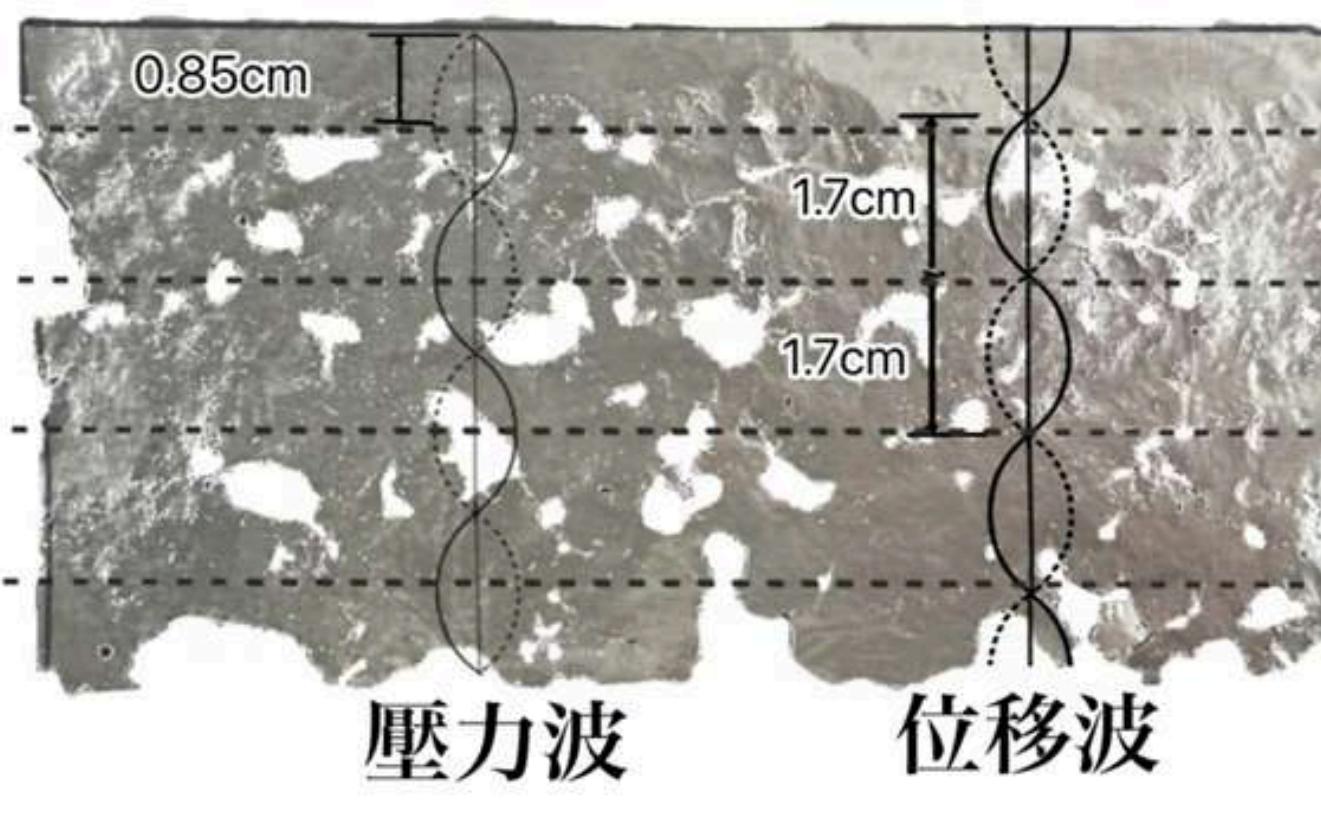
圖六、Y方向破洞數量圖

(二) 分析氣泡產生區域及其原由

根據計算，兩節線間的間距為半波長約等於 1.8cm，將理論模型對照實驗結果，量測破洞密集處(兩節線)的距離大約為 1.7cm，和理論大致吻合。而破洞產生在節線處的原因是由於駐波節線處雖然震盪幅度較小，但產生的壓力差較大，使得空蝕效應在此處更為明顯。

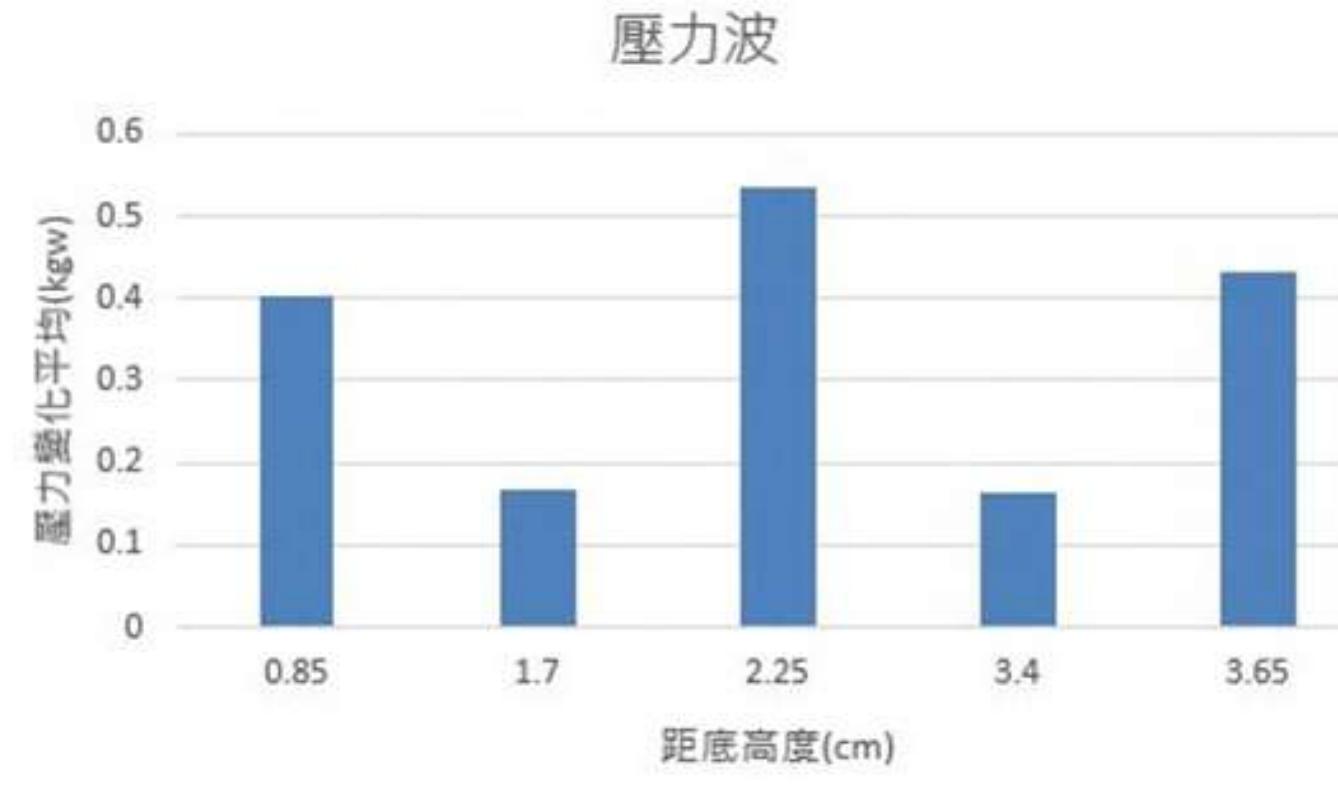


圖七、駐波理論模型



圖八、理論模型對照實驗結果

(二) 利用不同高度壓力數據驗證模型

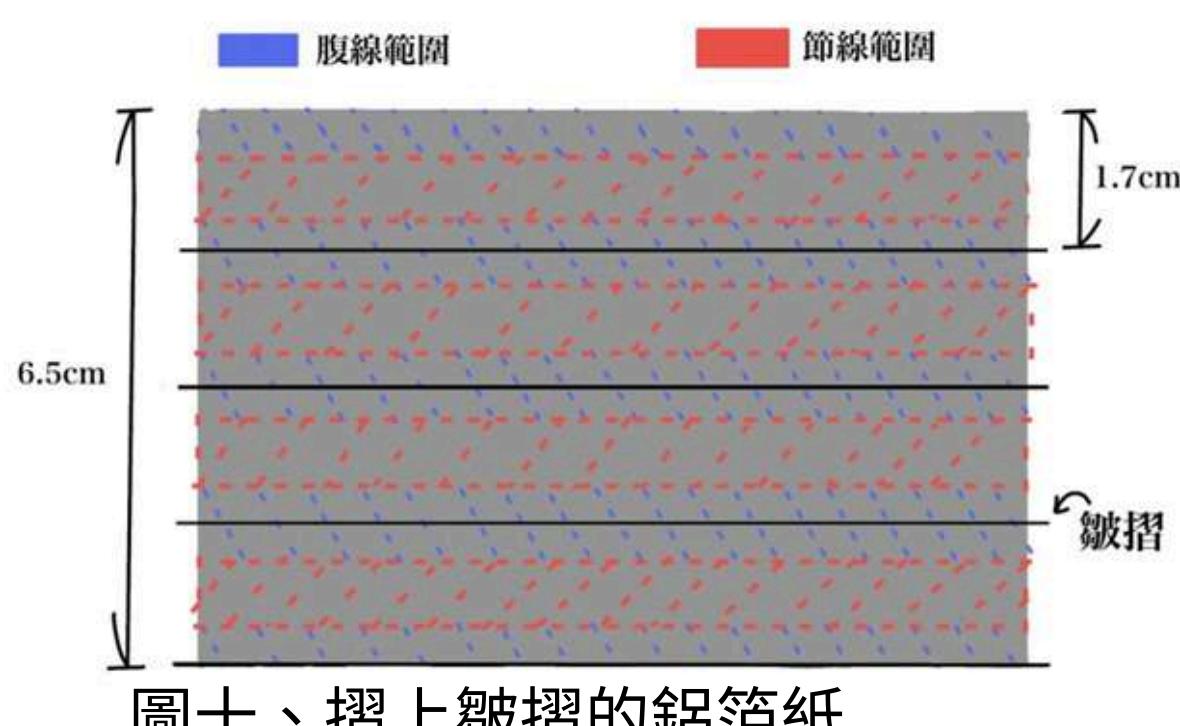


圖九、壓力波數據

三、比較影響氣泡生成分布因素之間的關係

(一) 比較鋁箔紙上皺褶與節線對氣泡的影響

- 1、設計實驗比較皺褶和節線吸引與產生氣泡的情形。
- 2、分析實驗結果，在腹線摺上皺褶的鋁箔紙其氣泡會被皺褶吸引所以節線處破洞面積變小。



圖十、摺上皺褶的鋁箔紙

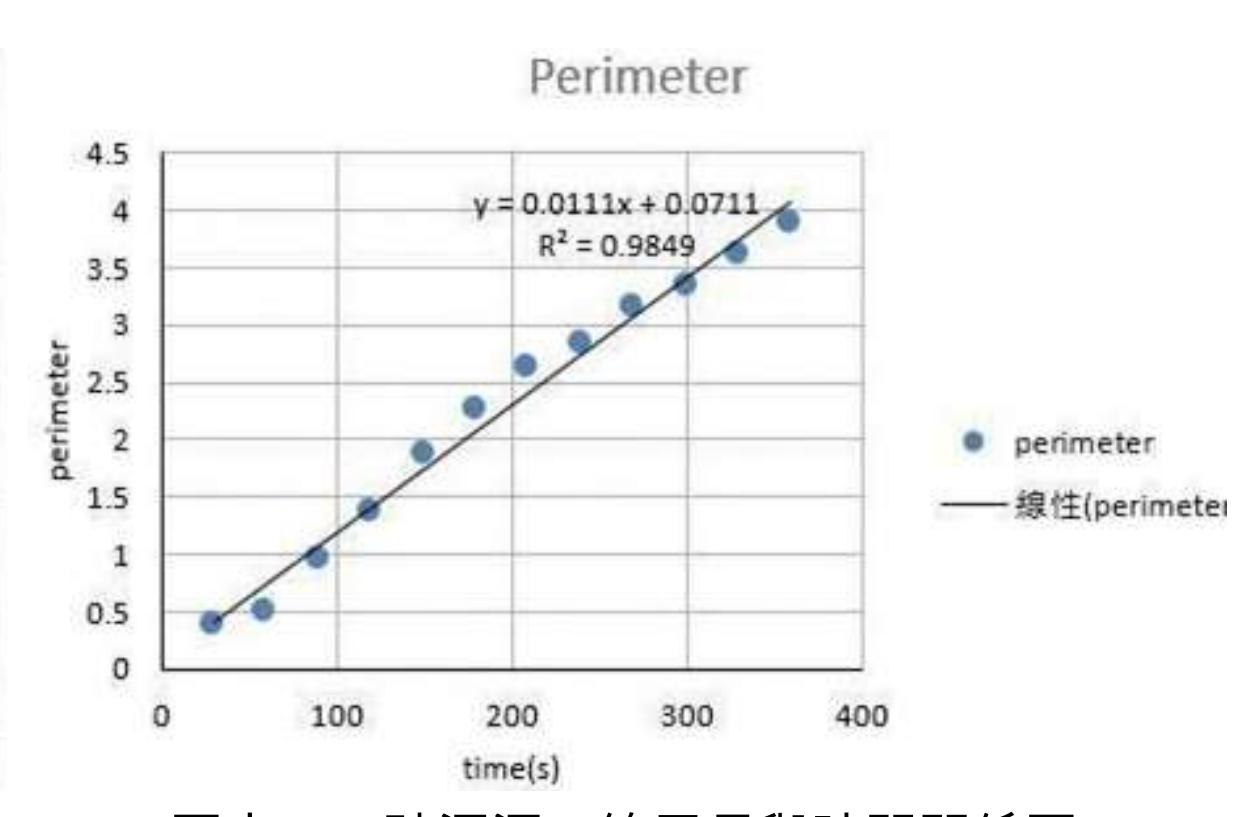
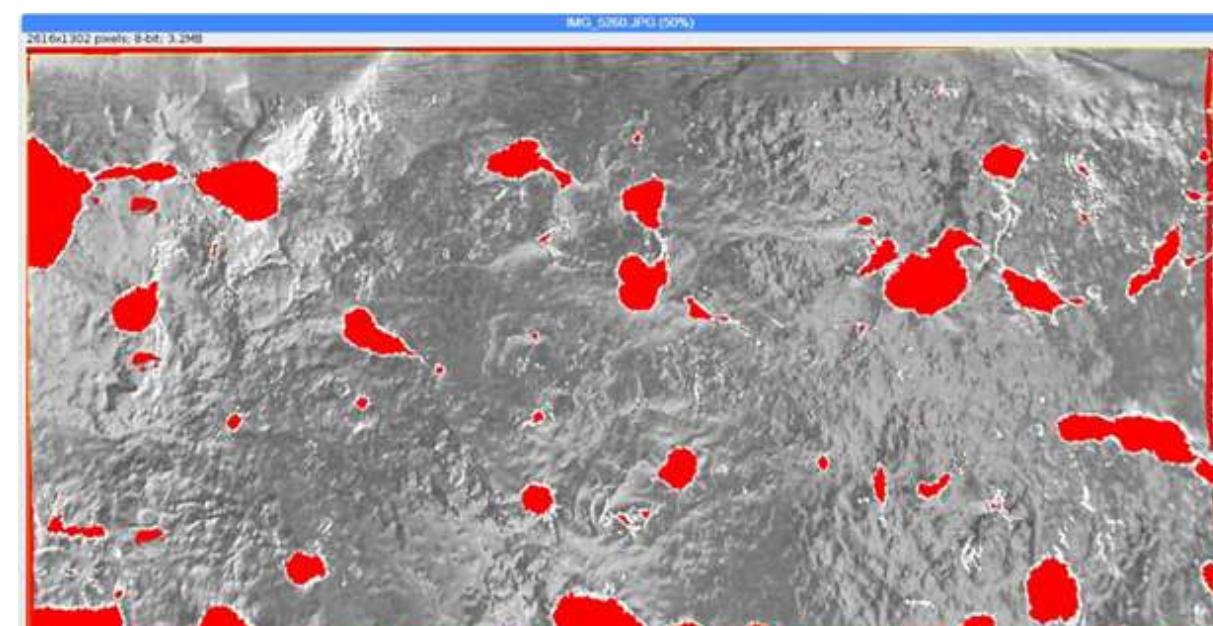
	有折皺摺
節線上破洞面積	3.49%
腹線上破洞面積	96.5%

四、分析破洞面積對時間的關係，了解氣泡附著過程

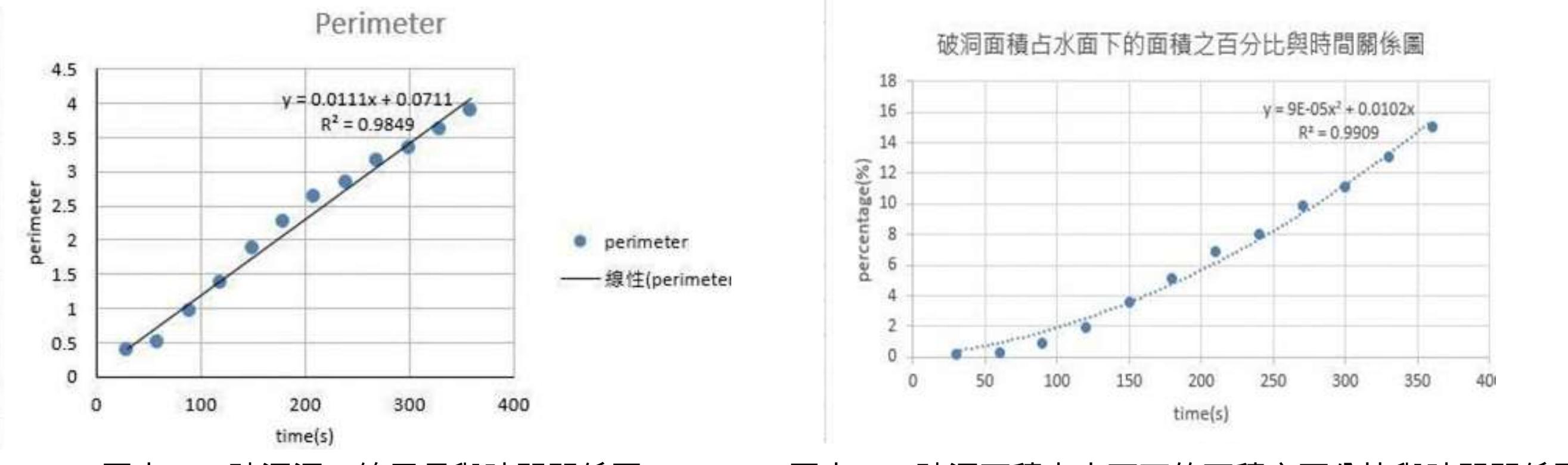
(一) 分析巨觀下氣泡附著情形

1. 分析圖表，破洞周長和時間成正比，破洞面積則和時間成二次函數關係

圖十一、水下範圍破洞分析



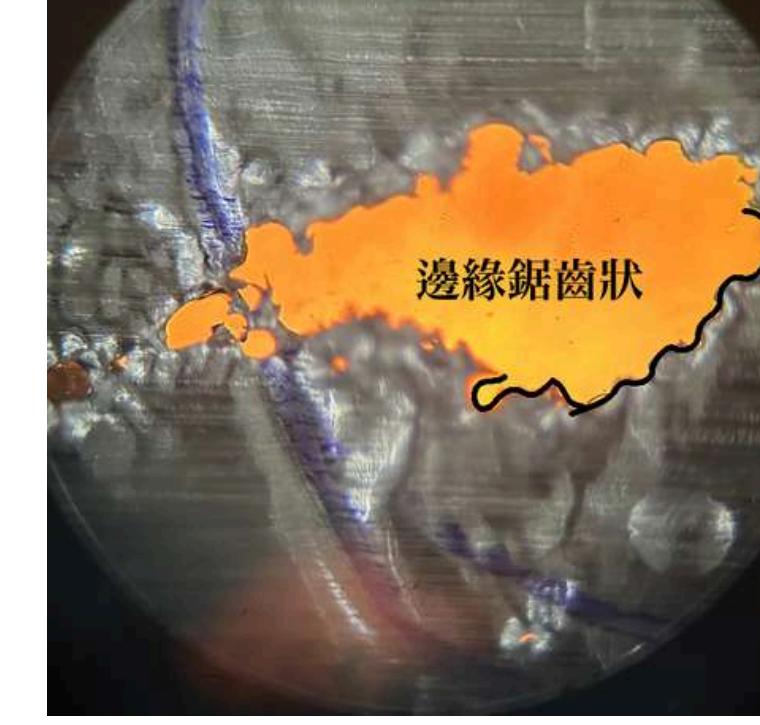
圖十二、破洞洞口總周長與時間關係圖



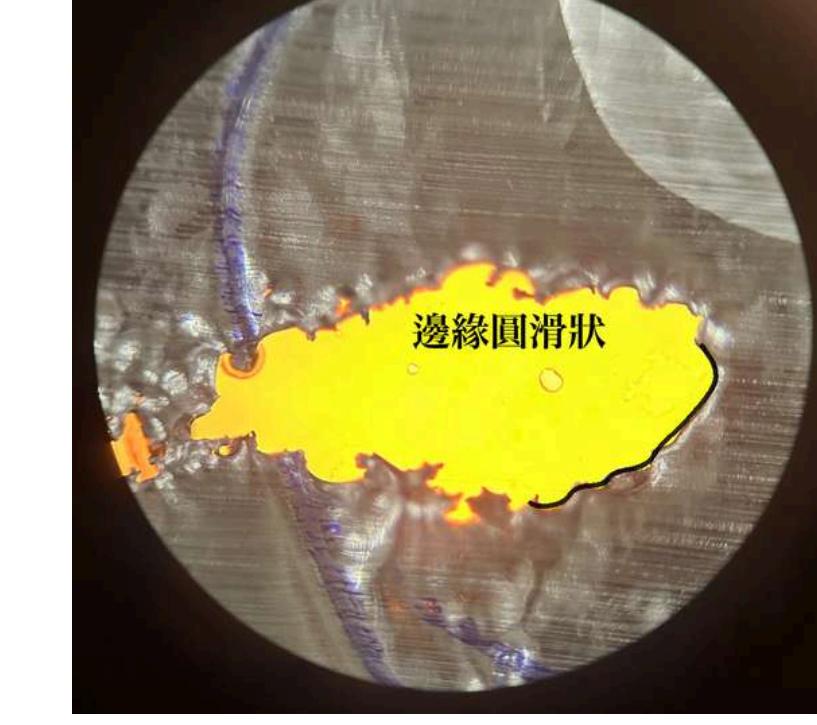
圖十三、破洞面積占水面下的面積之百分比與時間關係圖

(二) 分析微觀下氣泡附著情形

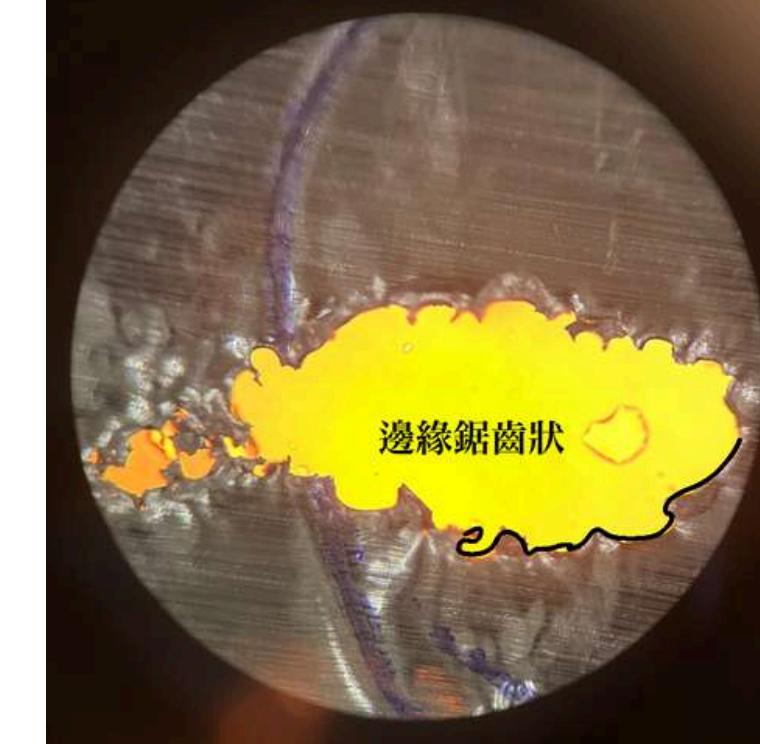
1、顯微鏡下破洞邊緣形狀變化



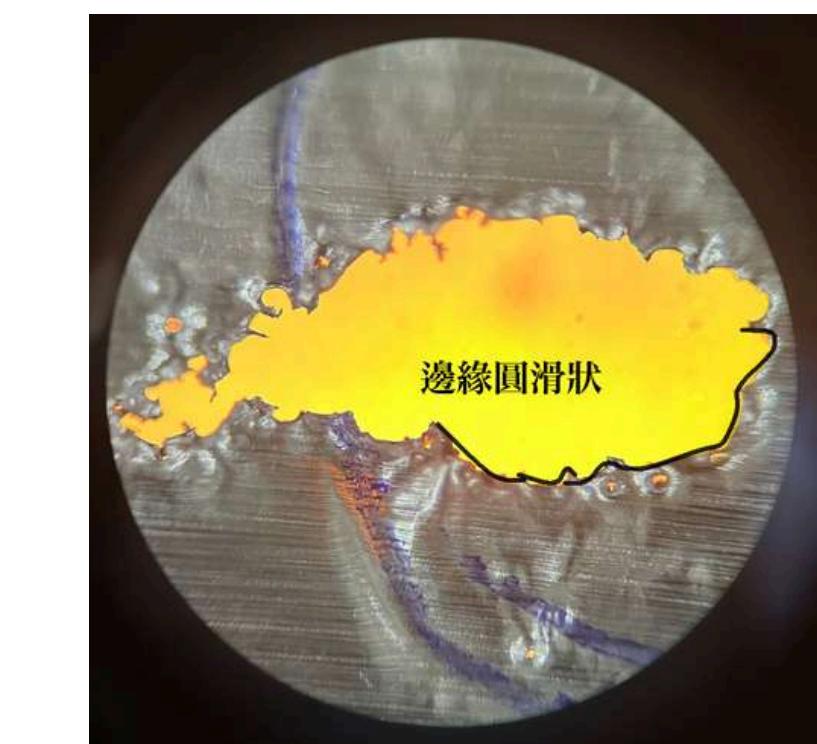
圖十四(鋸)



圖十五(圓)

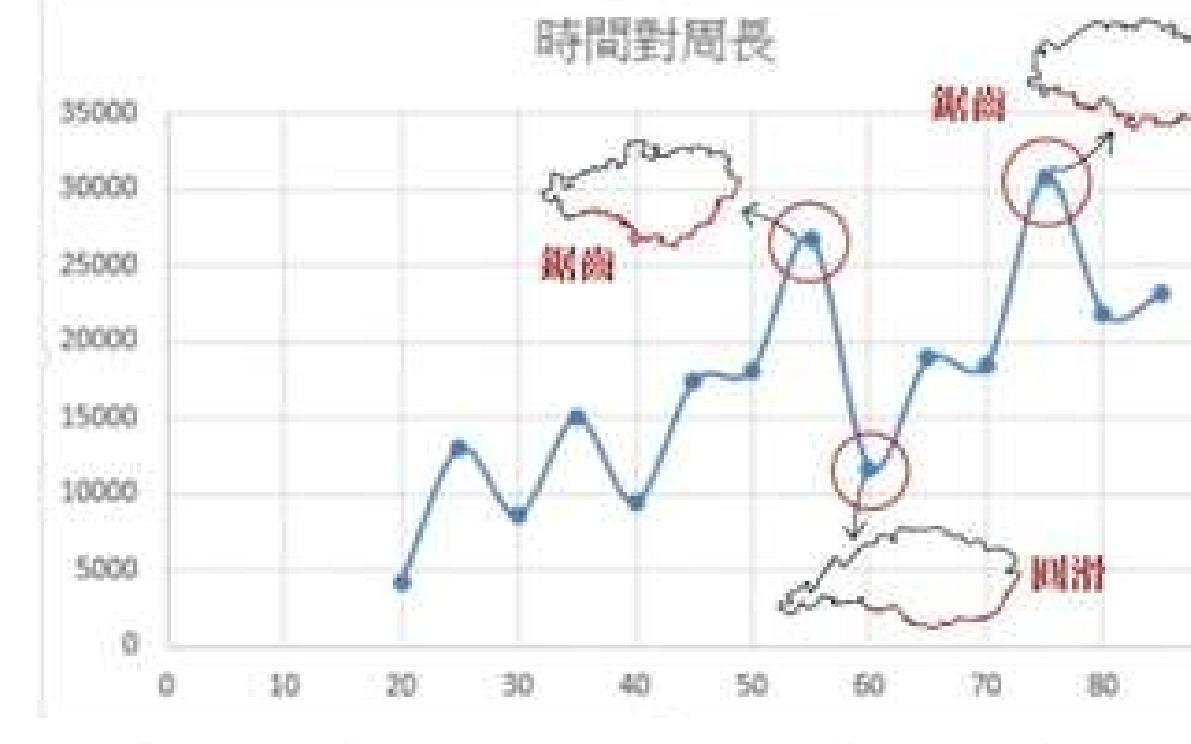


圖十六(鋸)

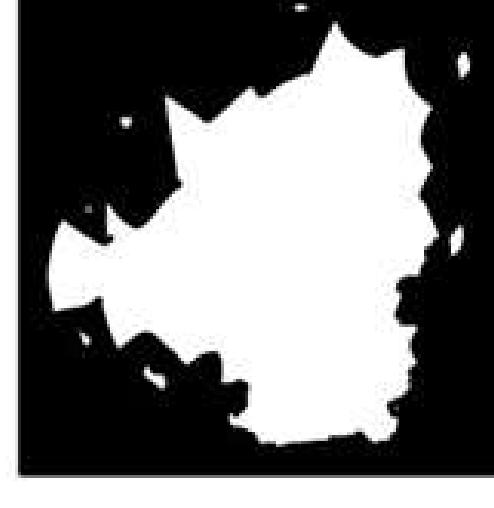
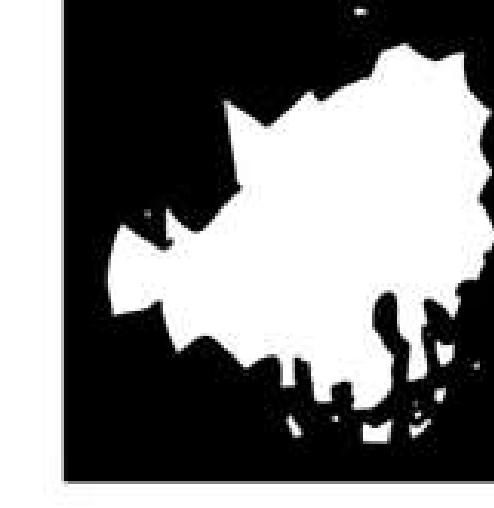
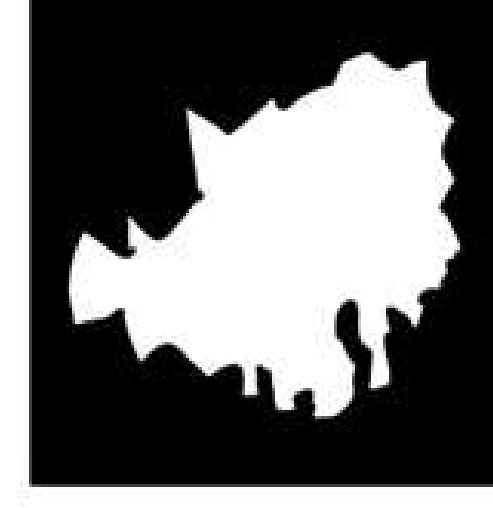


圖十七(圓)

2、顯微鏡下破洞時間對周長的關係



圖十八、顯微鏡下時間對周長關係圖

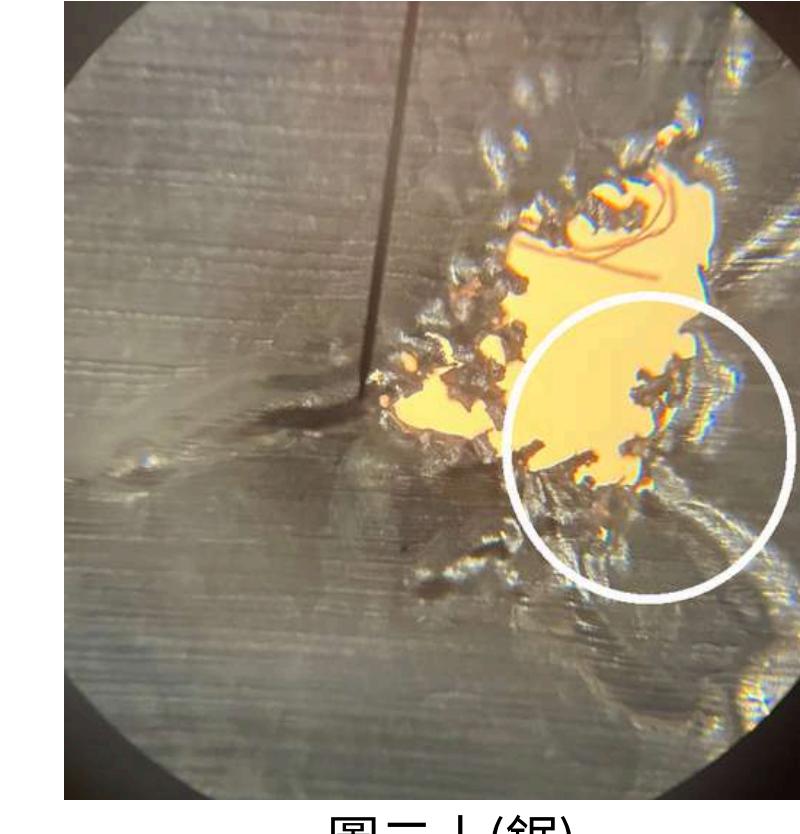


圖十九、邊緣附著模型

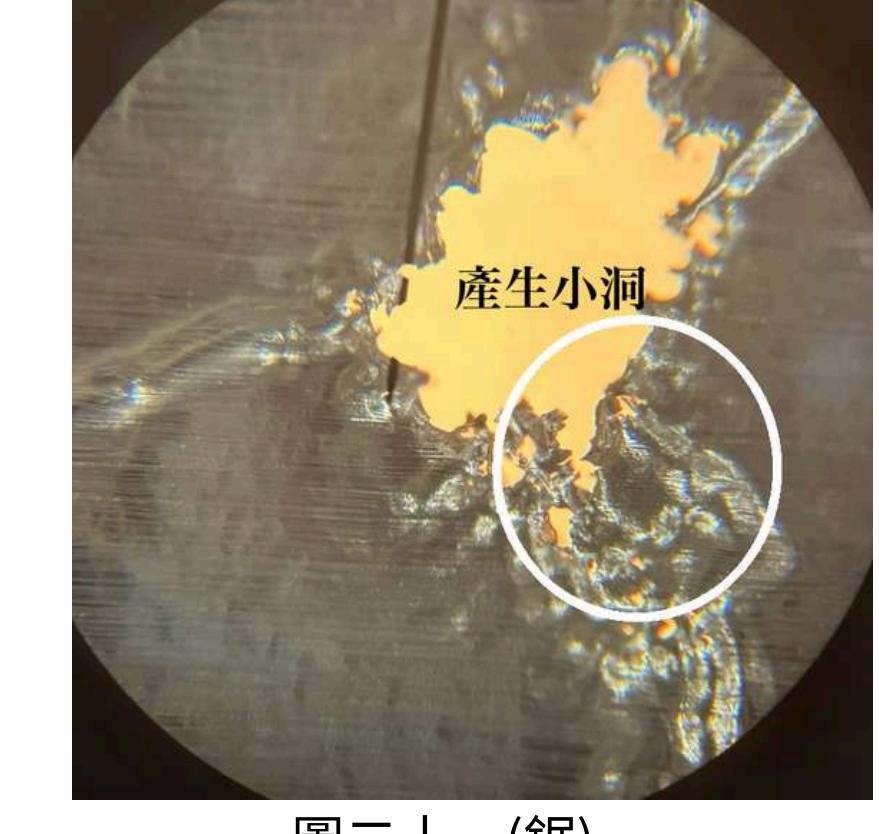
3、顯微鏡下氣泡的聚集

聚集擴大：使用顯微鏡觀察後，我們發現破洞的擴張是因為小洞的聚集

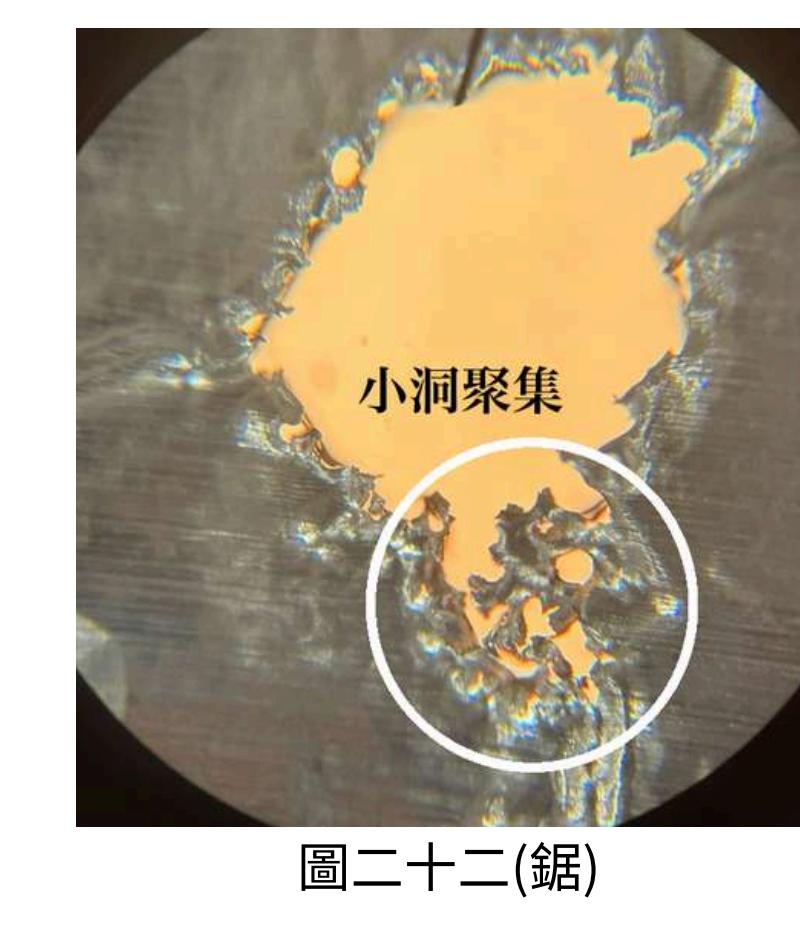
大片剝落：當小洞因聚集將一區塊完全圍住，這個區塊會因為邊緣皆被小洞破壞產生大片剝落



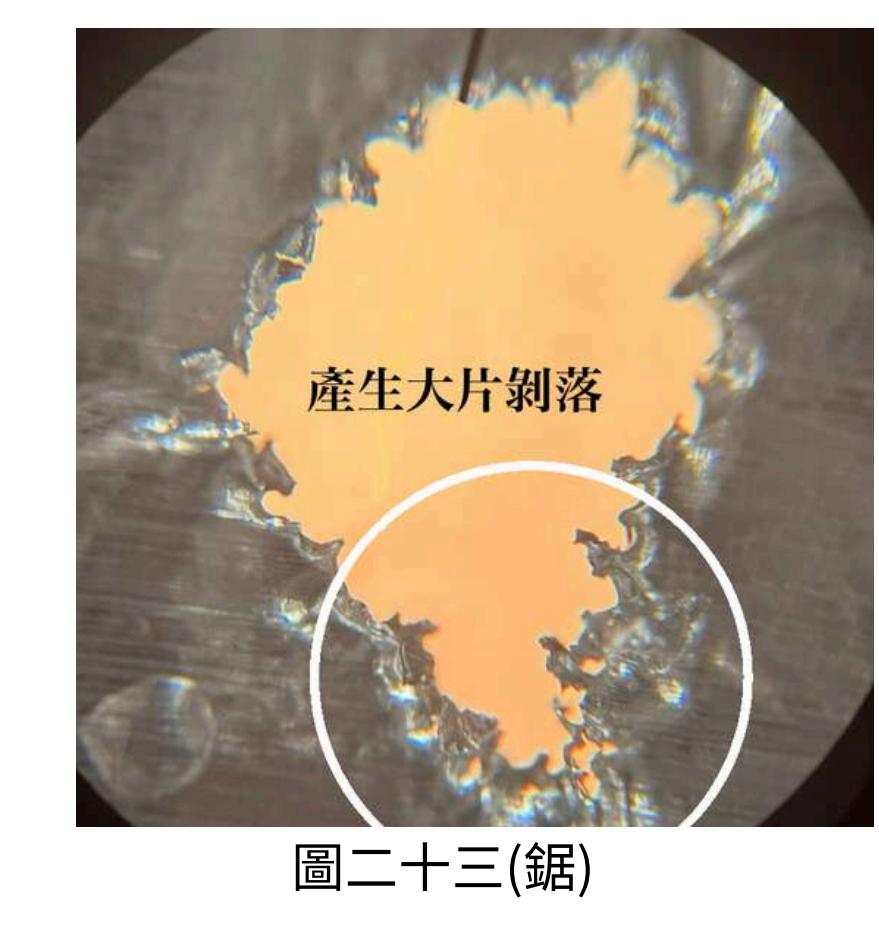
圖二十(鋸)



圖二十一(鋸)



圖二十二(鋸)

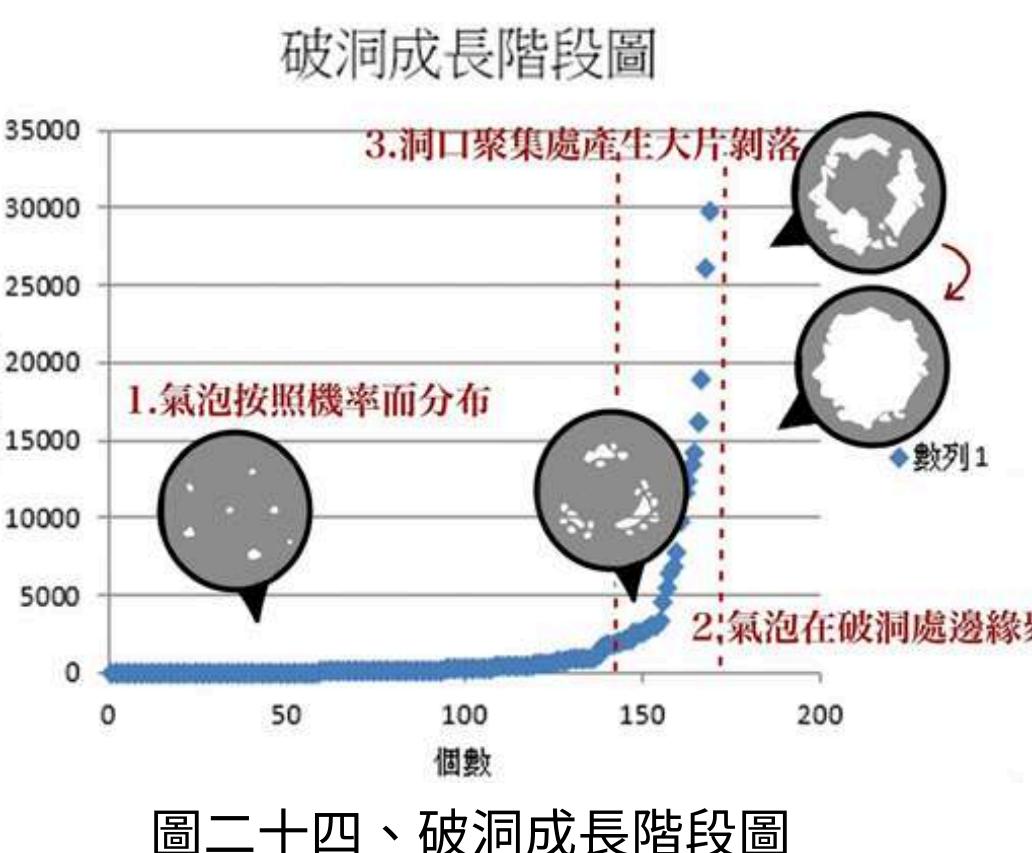


圖二十三(鋸)

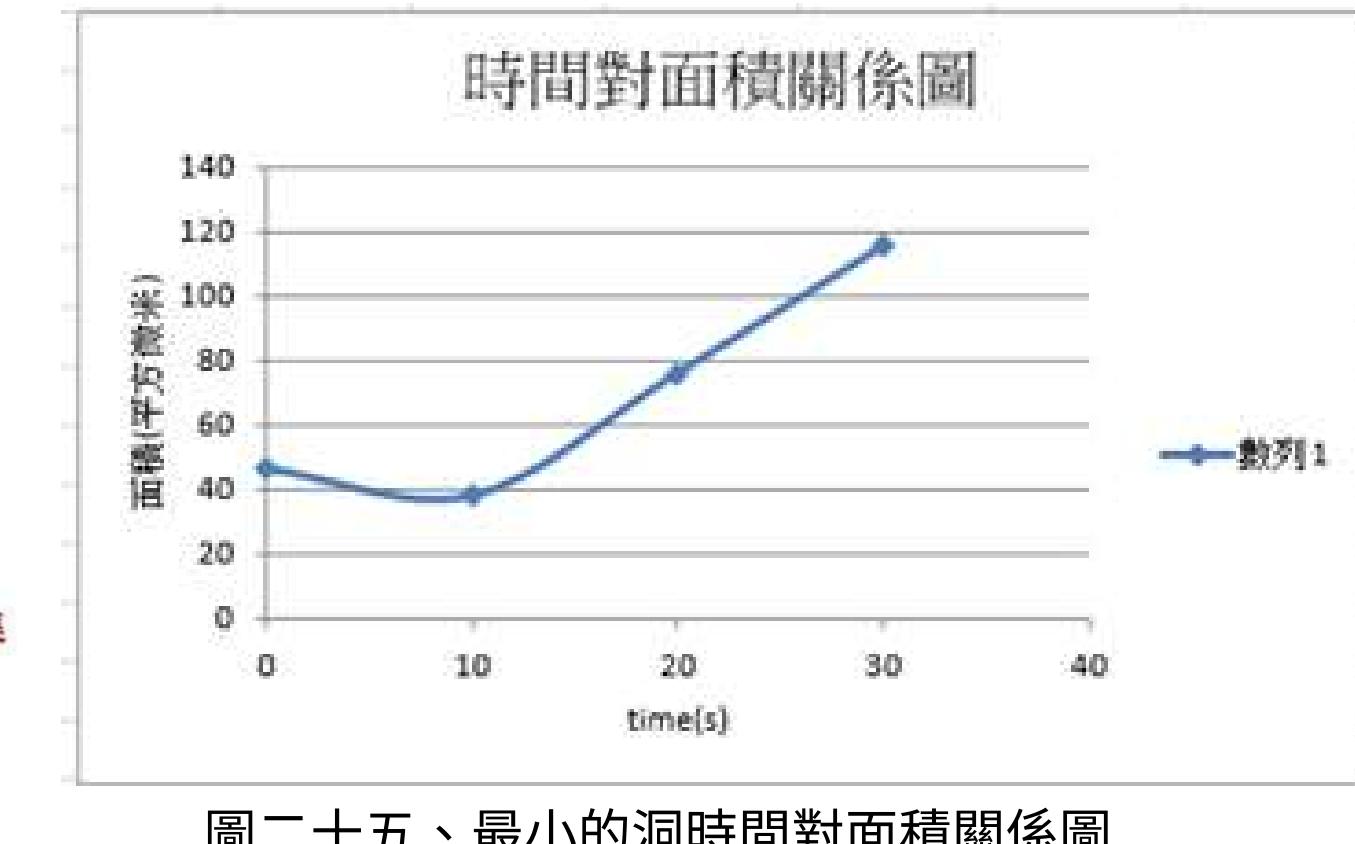
因此我們認為洞的擴張可能非其自身擴大產生，是因為一開始產生鋸齒，氣泡可能會因鋸齒而受吸引，但不會直接在邊緣產生破壞，而是在附近附著。

(三) 時變率推論氣泡附著隨時間對鋁箔紙的破壞

分析圖表後我們認為洞口面積成長分成三個階段，第一階段是在機率分布下產生的初始破洞，當洞口在機率分布下擴大到一定程度，氣泡開始在其周圍產生聚集，這時的斜率會略微上升，最後當小洞圍住一個範圍，鋁箔紙產生大片剝落，面積成長斜率最高。



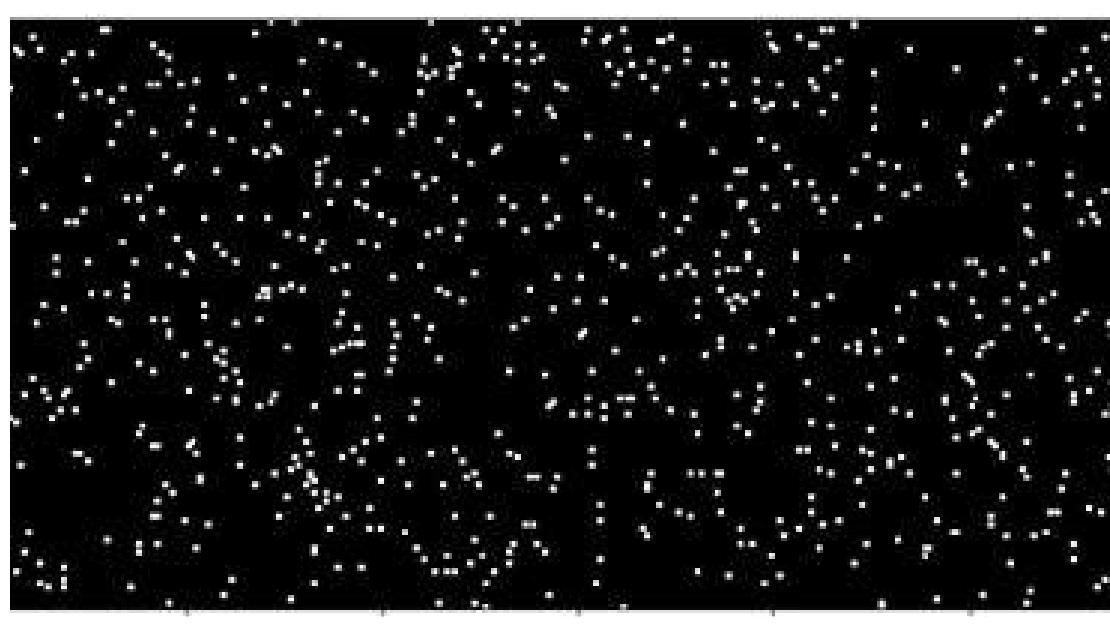
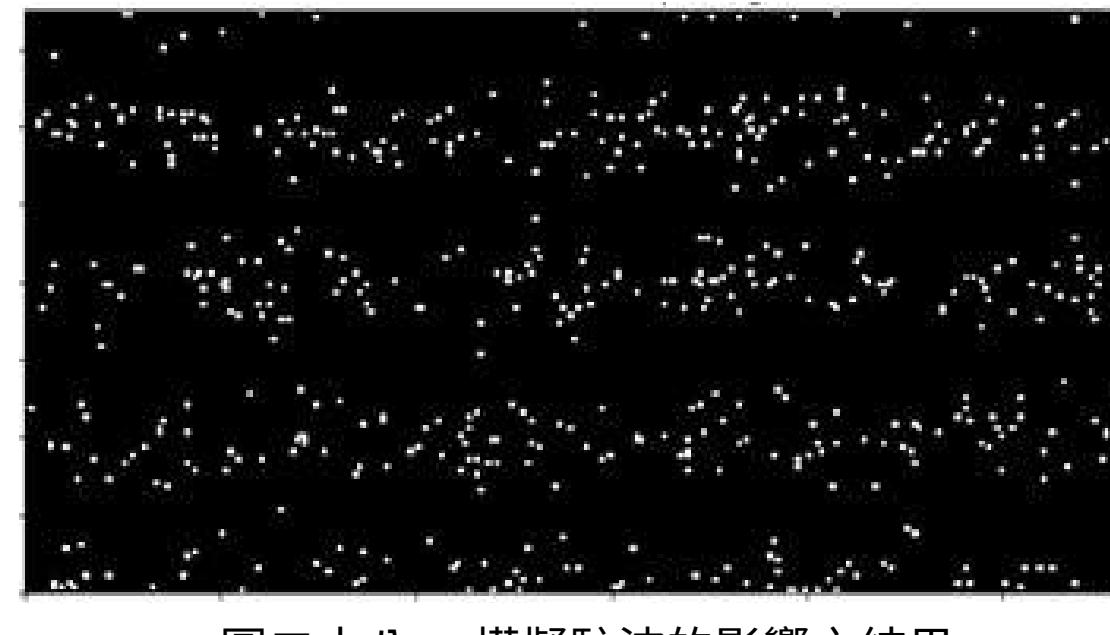
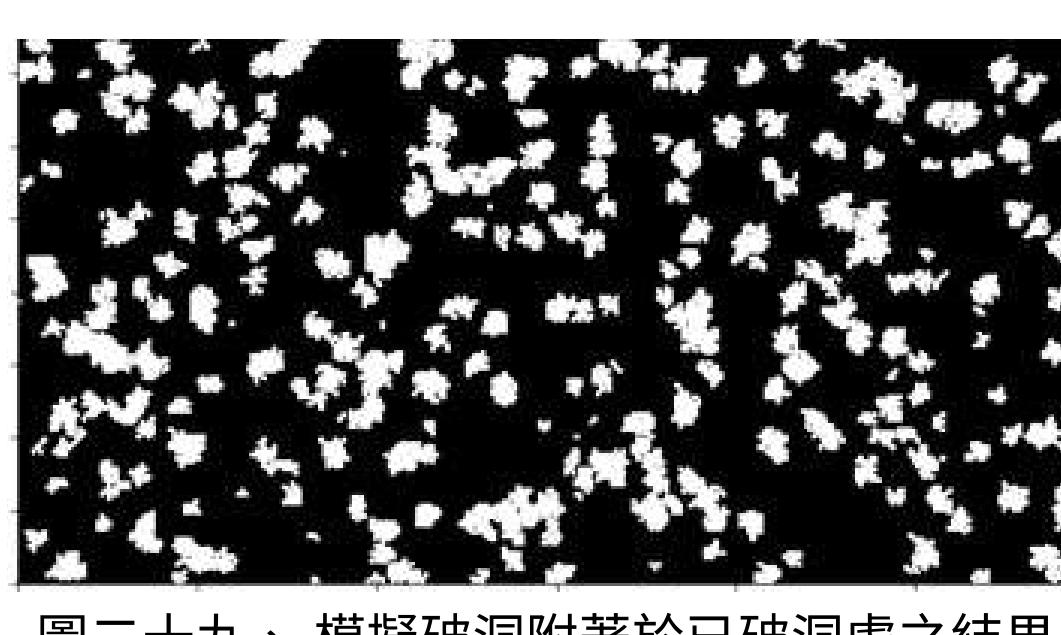
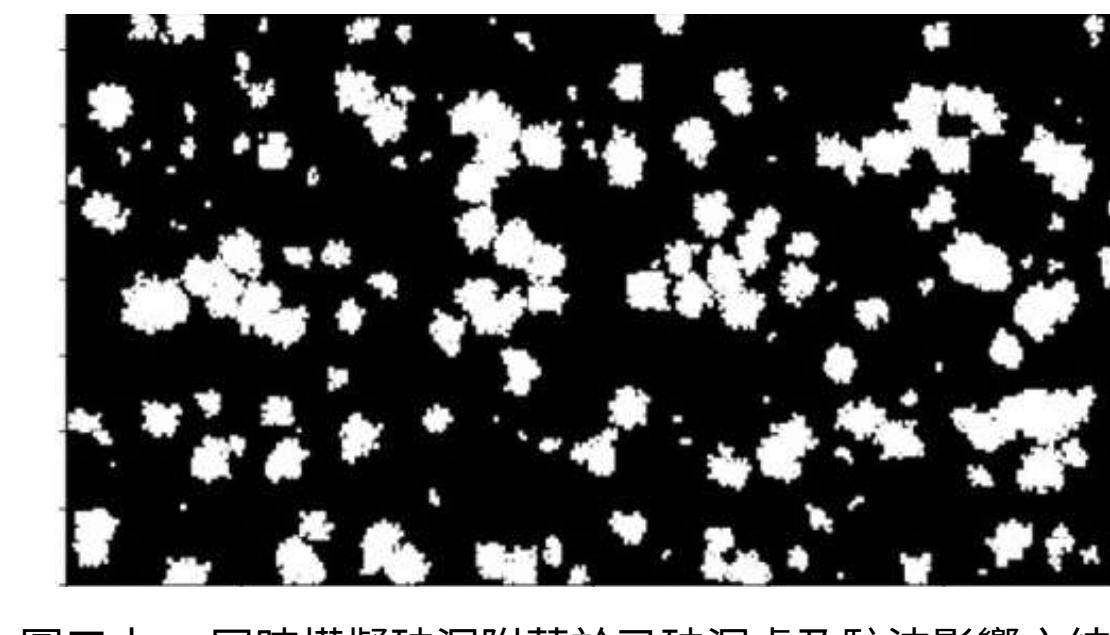
圖二十四、破洞成長階段圖



圖二十五、最小的洞時間對面積關係圖

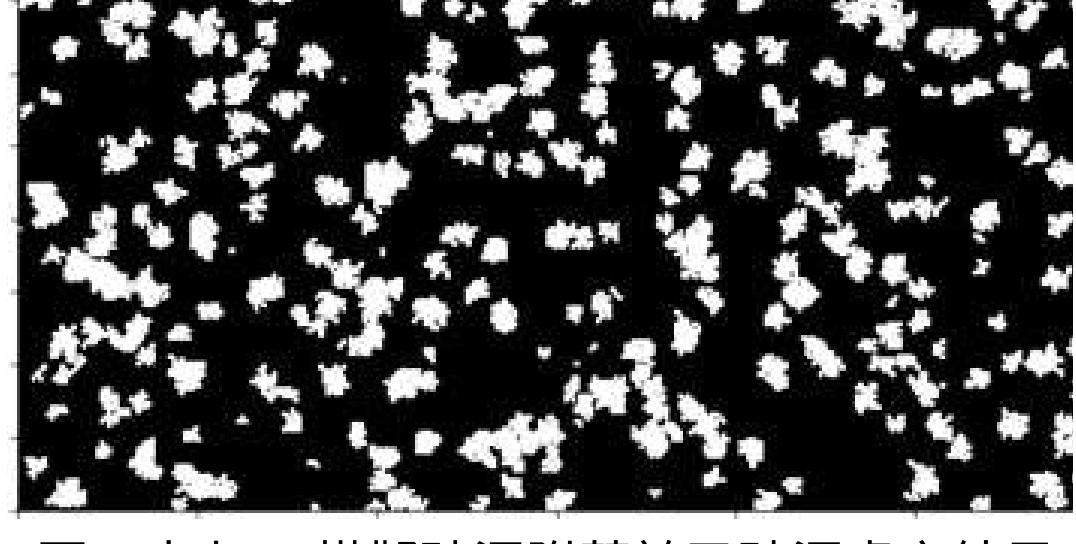
1、由周長與面積成長曲線，我們可以確認當洞口面積太小時，洞口的擴張會隨機率分布，此階段的面積成長較緩慢，不呈二次函數，也驗證了我們的破洞成長理論模型的機率分布階段。

五、利用電腦程式模擬孔洞的產生

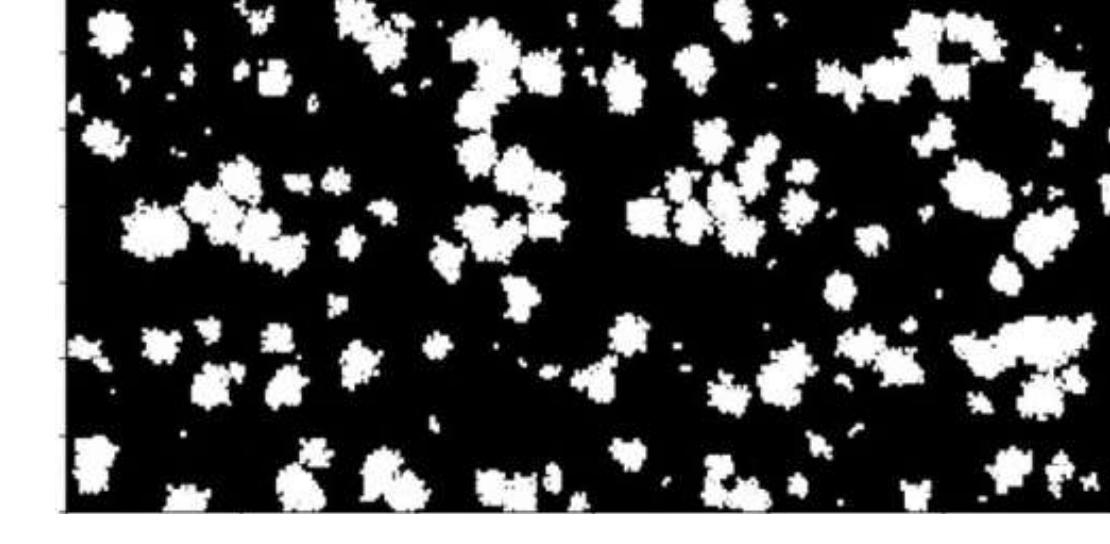
	無超音波場的影響	有超音波場的影響
無擴張		
有擴張		

圖二十七、模擬破洞完全隨機分布於鋁箔紙上的結果

圖二十八、模擬駐波的影響之結果



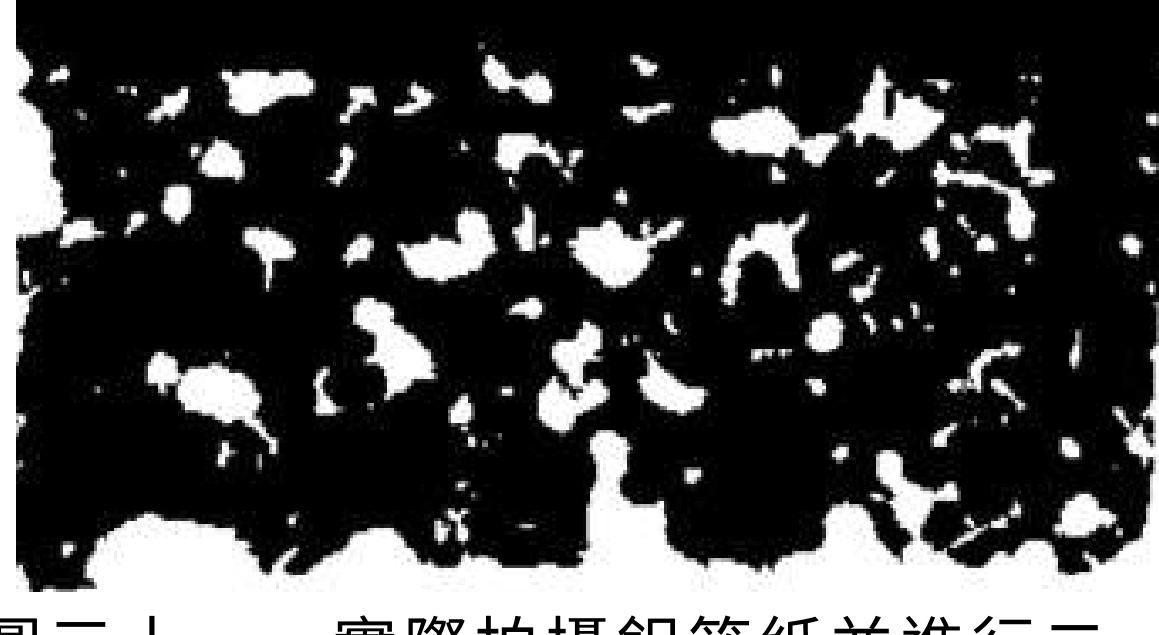
圖二十九、模擬破洞附著於已破洞處之結果



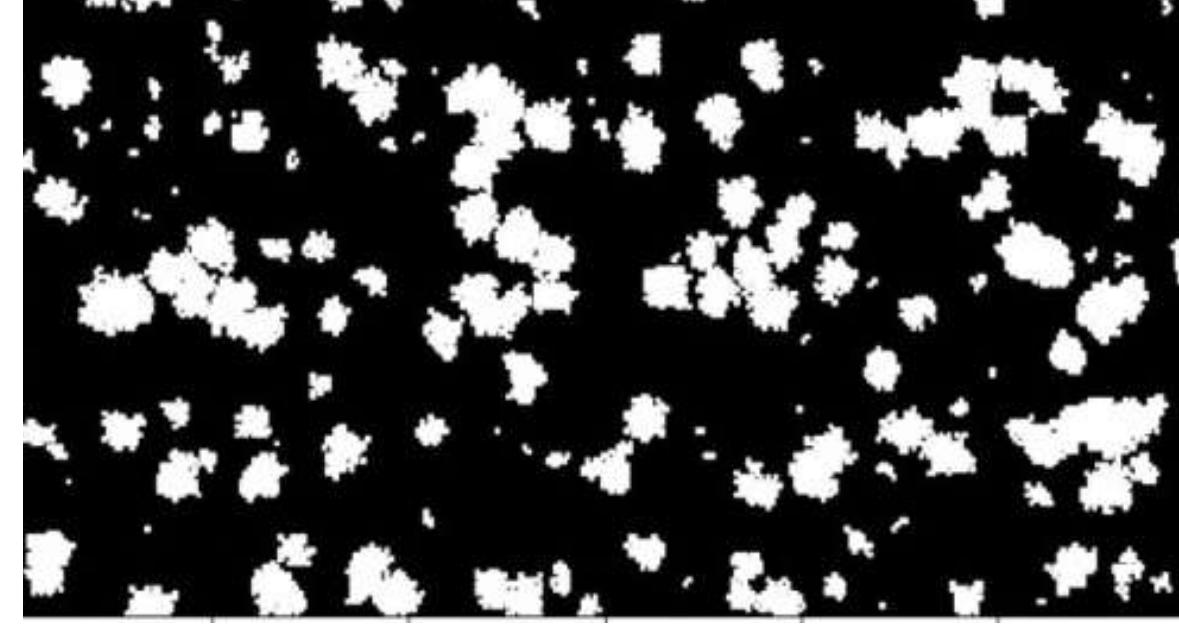
圖三十、同時模擬破洞附著於已破洞處及駐波影響之結果

與實際拍攝並進行二值化處理的圖片進行比對後，可以看見，有同時模擬擴張與超音波場影響的圖片最符合實際情況。

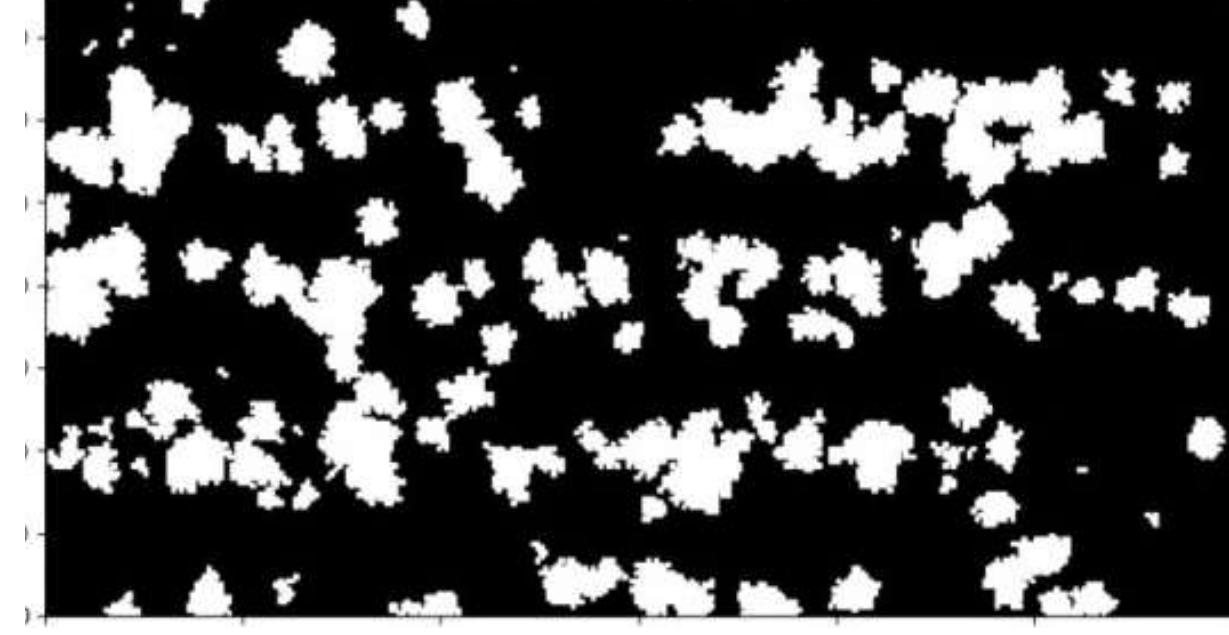
即便如此，我們發現白色破洞區域中間可能出現應該要呈現白色的黑色封閉小洞，破洞的形狀及大小差異依然有些不符合實際情況，因此我們會在後續的實驗中排除這些問題持續優化我們的模擬結果。



圖三十一、實際拍攝鋁箔紙並進行二
值化處理的圖片



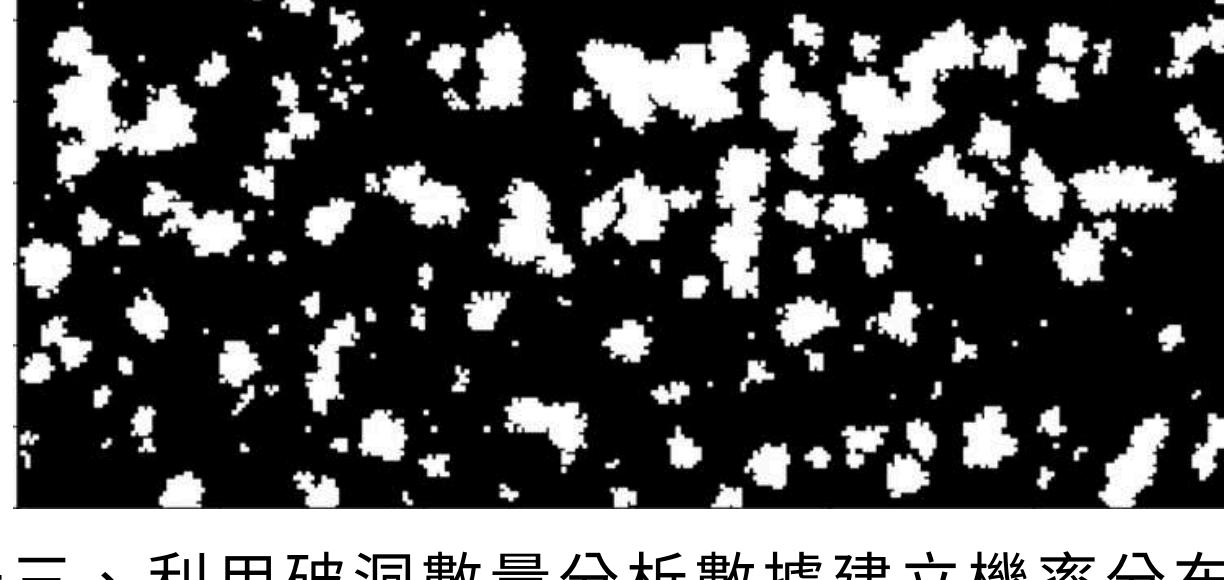
圖三十、同時模擬破洞附著於已破洞處及駐波影響之結果



圖三十二、排除白色破洞區域中間出現的黑色封閉小洞及過小的黑色區域之結果

上圖(圖三十)為僅模擬擴張與超音波場影響的圖片，可以看見，許多白色區塊聚集後中間會出現非常小塊的黑色區域，但在實際情況下，那些過小的鋁箔紙會因金屬疲勞而剝落，形成較大的孔洞。

下圖 (圖三十二) 的模擬結果排除了封閉黑色區域並且讓白色區域周圍過小的黑色區域自動變為白色，較貼近實際情形。



圖三十三、利用破洞數量分析數據建立機率分布之結果

參、結論

一、氣泡產生位置的特性

我們成功利用超音波洗淨機產生空蝕效應，並提出鋁箔紙產生破洞的模型，分析鋁箔紙的破洞分佈，我們模擬出腔體內節腹線高度，並使用壓力感測器確認了氣泡會在節線處產生氣泡並發生空蝕現象，證明了駐波和空蝕效應的直接關係；皺褶處也會產生氣泡，且皺褶處會吸引原本在節線處的氣泡，使節線處的破洞分布較不明顯。

二、了解氣泡的附著過程

(一) 在巨觀下，我們繪製了時間分別對周長和面積的關係圖，由此推論氣泡會在邊緣附著，進而使用顯微鏡在微觀下觀察破洞的變化

(二) 破洞會因為從邊緣開始擴大，而有鋸齒和圓滑之間的變化，此變化會導致周長在微觀下呈現高低起伏，和巨觀下的正比有所落差。

(三) 在微觀觀察後，我們由新破洞的產生位置推論了氣泡的附著位置，氣泡不會直接在邊緣附著而是會在洞口附近產生新的小洞，當小洞逐漸聚集則會和原本的洞口結合，使得洞口面積擴大，若小洞聚集造成一部份的金屬周圍都被氣泡侵蝕則會產生大片剝落。

(四) 分析整張鋁箔紙，我們得到了破洞時變率的圖表，藉以得知破洞的破壞分成三個階段，第一段的機率分布，第二階段的小洞聚集，第三階段的大片剝落。

(五) 透過文獻(YanLi1etal, 2020)我們知道了氣泡有一定的大小，因此我們想從一個破洞剛生成開始，了解他後續的成長情形，經過實驗，我們得知破洞在還很小的時候，面積成長非常緩慢，符合破洞成長階段的機率分布。

三、利用電腦程式模擬孔洞的產生

(一) 我們成功利用電腦程式模擬不同模型，將兩項變因綜合起來的模型是最貼近實際情況的，後續我們排除白色區域中間的小洞，再將過小的黑色區域也排除，產生的結果又更貼近了實際情形。

(二) 針對水平分布的模擬，我們透過數量分析建立出的破洞機率分布讓孔洞的分布相較原先的餘弦函數更貼近實際情形。

(三) 利用程式模擬的結果，雖無法完全重現空蝕效應對鋁箔產生的破壞，但也證實了我們在先前實驗中推測的破洞產生機制皆正確。

肆、參考文獻

一、Paun,Viorel-Puiu&Patrascoiu,Constantin(2010,January3)Ideal Cavitation Erosion Process and Characteristic Erosion Curves. Revista de Chimie-Bucharest-Original Edition,61(3),281.
[356503796 Ideal Cavitation Erosion Process and Characteristic Erosion Curves](https://doi.org/10.1002/RCHE.201003079)

二、鄭永銘(2020年 8月 1日)。氣功破瓶。
<https://masters.tw/255834/break-a-bottle-with-bare-hands>

三、MarcusWeber,JudithWeber(2022)。神奇物理學。商周出版。

四、程貴恆、蔡承圻、簡敬倫(2023)。「蝕」破天驚 - 超聲波場中空蝕效應之破壞情形分析。
<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/63/senior.html>

五、Weiwei Xu, Xiaoke He, Xiao Hou,Zhihao Huang, Weishu Wang(2021, May2). Influence of wall roughness on cavitation performance of centrifugal pump, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 43(314),8-11.
https://www.researchgate.net/figure/influence-of-wall-roughness-on-pump-cavitation-performance-a-Effect-of-roughness-on-head_fig4_351897877

六、YanLi1,DaweiZhang1,PeiyuZhang(2020,March31).Study on transdermal drug delivery with microneedle array, Materials Science and Engineering 768,4.
340313814 Study on transdermal drug delivery with microneedle array