

2025年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號	100025
參展科別	工程學
作品名稱	非對稱反摺溝槽陣列過熱表面之液滴自推性能 及冷卻效率

就讀學校	臺北市立建國高級中學
指導教師	賴奕帆
作者姓名	陳柏睿

關鍵詞	<u>液滴自推、萊頓弗羅斯特溫度、噴霧冷卻</u>
-----	---------------------------

作者簡介



我是本作品的作者，建國中學高三數資班學生陳柏睿。

在高一時，對於物理科學及工程學科的喜愛經由高中課程觸發，並藉著專題研究課程的機會，得以和臺大機械所呂明璋教授的實驗室合作，更深入的探討熱傳學及流體的工程研究。

在兩年的研究過程中，無論是實驗方法操作，或是理論推導及研讀論文，在學長及教授的幫助下我得以踏入工程研究的大門，與實驗室一同完成此研究，並有機會能在臺灣國際科展與眾多研究者切磋交流，實為一大幸事。

感謝實驗室前輩們的教導，以及科教館提供如此珍貴的交流機會，使我得以在研究的道路上不斷摸索前進，向更多的未知探索。

2025年臺灣國際科學展覽會

研究報告

區別：

科別：工程學科

作品名稱：

非對稱反摺溝槽陣列過熱表面之液滴自推性能及冷卻效率

關鍵詞：液滴自推、萊頓弗羅斯特溫度、噴霧冷卻

編號：

（編號由國立臺灣科學教育館統一填列）

摘要

工業中時常會運用噴霧冷卻(圖 0.1)，以液滴的潛熱變化冷卻高溫表面。因此為了提升高溫噴霧冷卻的效率，本研究基於過往文獻與 (Hsu, 2023) 共同研究微奈米結構表面 ARG 上液滴的碰撞運動，並由實驗推論高溫表面蒸氣層和氣泡推力的作用。接著由單一液滴碰撞實驗推導實驗和理論受力模型並進行比較。最後進行單一液滴冷卻實驗並推論連續液滴冷卻實驗結果。本研究發現 ARG 表面的各運動特性均優於文獻，且利用液滴的受力更全面地了解液滴運動和冷卻效率的關係，更在最後驗證其冷卻效率優於對照組，並發想探討連續液滴冷卻的實驗方法，以更貼合工業上實際的噴霧冷卻。經過此研究，ARG 表面能夠實際應用於工業上高溫表面的噴霧冷卻。

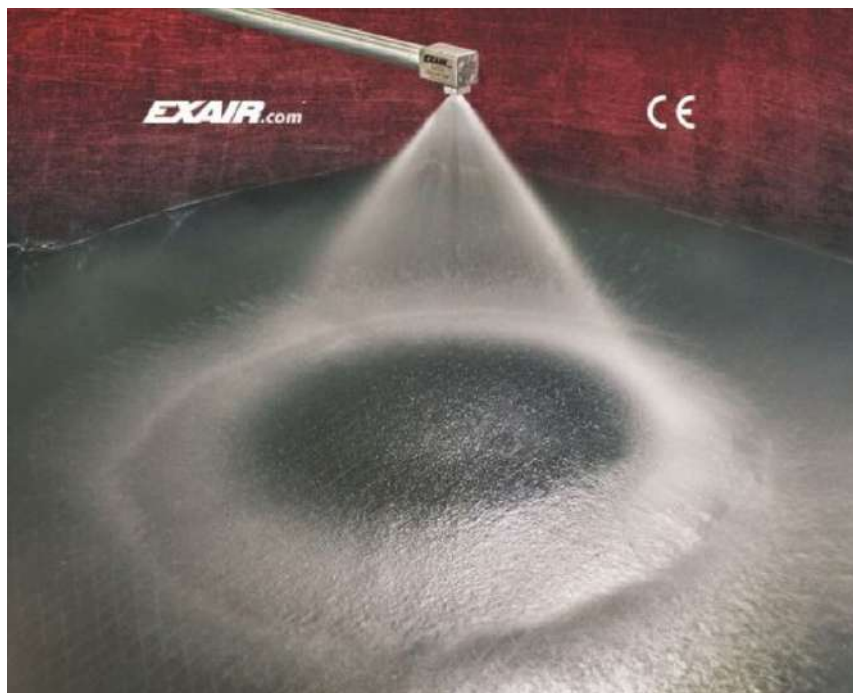


圖 0.1 噴霧冷卻（圖片來源：參考文獻[1]）

ABSTRACT

In industrial applications, spray cooling (Figure 0.1) is commonly used to cool high-temperature surfaces through the latent heat change of droplets. To improve the efficiency of high-temperature spray cooling, this study, building on previous literature and joint research with Hsu (2023), investigates the collision dynamics of droplets on micro-nano structured surfaces (ARG). The study experimentally infers the effects of the vapor layer and bubble thrust on high-temperature surfaces. Furthermore, it derives a force model from single droplet collision experiments, comparing it with theoretical models. Finally, single-droplet cooling experiments are conducted, followed by an extrapolation to continuous droplet cooling experiments.

The study finds that the dynamic characteristics on ARG surfaces outperform those reported in the literature. By comprehensively analyzing the forces acting on droplets, a deeper understanding of the relationship between droplet motion and cooling efficiency is achieved. The cooling efficiency of the ARG surface was also experimentally validated as superior to the control group. The research explores methods for continuous droplet cooling experiments, aligning more closely with practical industrial spray cooling applications. Through this study, ARG surfaces are shown to be viable for practical industrial applications in high-temperature spray cooling.



Figure 0.1 Spray Cooling (Image source: Reference[1])

壹、前言

一、研究動機

工業中也有許多情況需要應用過熱表面的液滴冷卻，如何將工業過程中產生的熱能有效排除而不影響原功能是產業發展中所必須克服的問題。因此設計出能夠提升熱傳效率的表面並應用至各種裝置是非常重要的。

在過往的過熱表面相關研究中，是利用降低液滴滴落表面後在表面上的停留時間（以下稱接觸時間）、提升液滴滴落表面後的橫向運動速度（以下稱液滴自推速度）以及提升液滴汗表面之間蒸氣層堆積到一定厚度的臨界溫度（以下稱 LFP, Leidenfrost Point, 將在參、研究方法中做詳細解釋），以達到提升高溫表面冷卻效率的目的。

但在文獻中，並沒有同時達到三要求的表面結構設計，也無實際的冷卻測試。因此本研究希望設計出綜合三種優點的表面結構，並實際測試其冷卻效率。

二、文獻探討

（一）降低接觸時間

1.原理

表面的熱通量會隨著液滴停留在表面上的時間增加而下降（Pañao & Moreira, 2005）（圖 1.1），因此降低液滴接觸時間有助於提升冷卻效率，同時能夠結合液滴自推性能讓下一滴水滴滴到表面而不是前一滴水滴上，造成水滴在表面上的堆積。

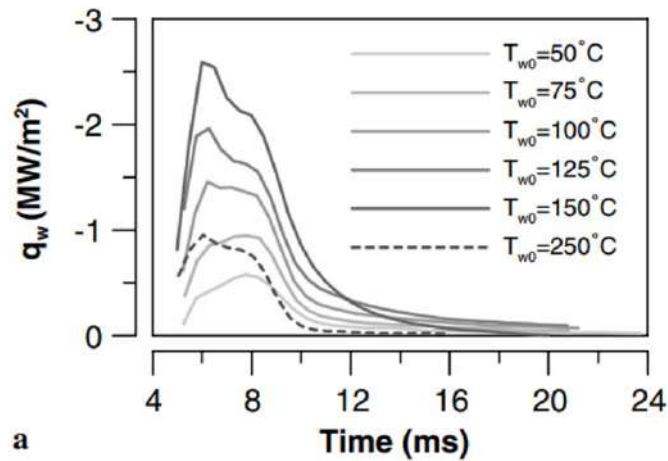


圖 1.1 接觸時間與表面熱通量（圖片來源：Pañao & Moreira, 2005）

2.作法：破壞液滴彈跳過程

(1)塗層（Bird, 2013）

此研究利用塗層破壞液滴在表面上的彈跳過程（圖 2.2），原應回縮彈起的液滴卻向四周彈跳，因而降低了接觸時間。

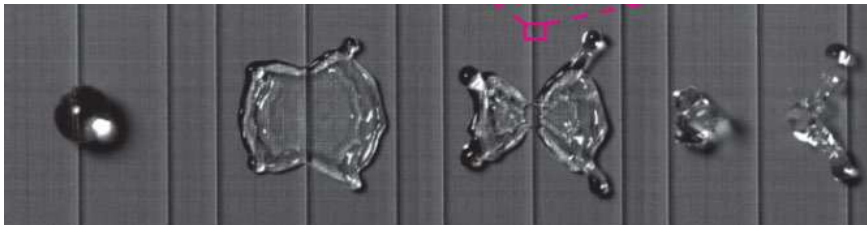


圖 1.2 塗層破壞液滴彈跳過程（圖片來源：Bird, 2013）

(2)結構（Sahoo, 2018）、（Huang, 2022）

文獻中利用微奈米 V 型溝槽結構（Sahoo, 2018）（圖 1.3）或是雙反摺結構（Huang, 2022）（圖 1.4）給予液滴邊緣不對稱的氣泡動量因而拉伸，破壞液滴彈跳過程，進而降低接觸時間。且此種方式相比於塗層約 200°C 的熔點限制，能夠將降低接觸時間的特性維持至約 500°C，因此本研究也使用此種方式。

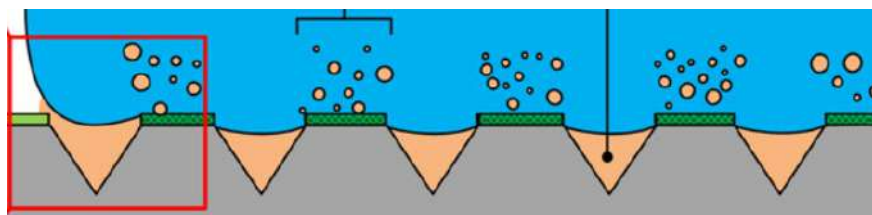


圖 1.3 微奈米 V 型溝槽結構（圖片來源：Sahoo, 2018）

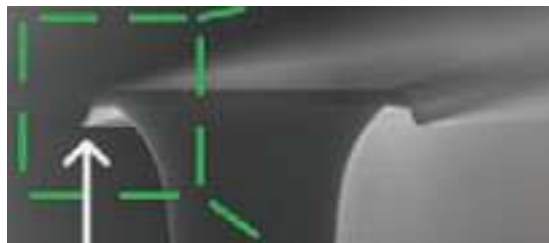


圖 1.4 雙反摺結構（圖片來源：Huang, 2022）

（二）提升液滴自推性能

1.目的

液滴自推性能代表液滴受到結構給予的橫向作用力，朝向單一方向運動的現象。而越高的液滴自推速度除了能夠結合低接觸時間讓下一滴水滴更快的滴到表面上，同時也能夠增加表面和液滴之間蒸氣的排出，不讓熱傳率低的蒸氣阻礙熱傳，進而提升冷卻效率。

2.作法：側向推力

文獻中利用斜向奈米柱狀結構（Agapov, 2014）（圖 1.5）給予高速（ $We=280$ ）滴落的水滴側向的推力，進而在 $325^{\circ}\text{C}\sim 450^{\circ}\text{C}$ 的溫度範圍內產生 0.3m/s 的液滴自推速度。

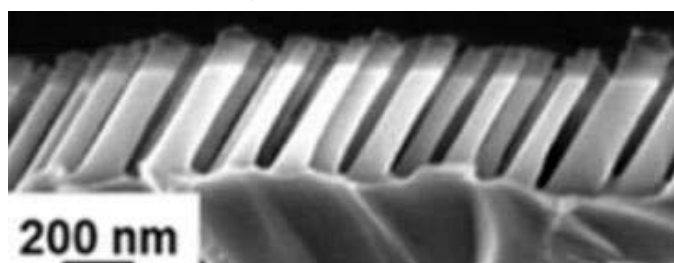


圖 1.5 斜向奈米柱狀結構（圖片來源：Agapov, 2014）

(三) 提升 LFP

1.目的

LFP 是液滴與表面之間被過厚的蒸氣層阻擋而使其運動不受表面結構影響，並大幅降低熱傳效率(稱為 LFE)的臨界溫度。因此提升 LFP 有助於提升表面熱傳效率，並提升結構特性，如接觸時間及自推速度，出現的溫度範圍。

2.做法：排出蒸氣層

(1)吸水表面 (Kwon, 2013)

此文獻中利用結構本身的吸水能力(圖 1.6)讓蒸氣不易堆積在表面，進而提升 LFP。

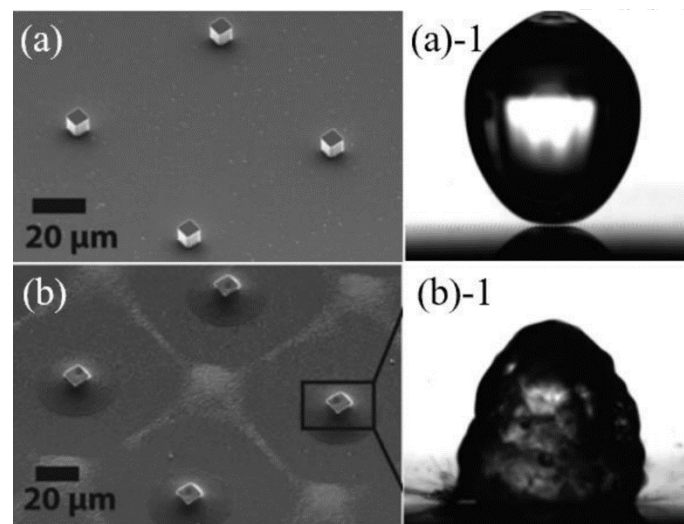


圖 1.6 (a)單層微結構 400°C出現 LFE (b)度上奈米粒子提升吸水性及 LFP

(圖片來源：Kwon, 2013)

(2)蒸氣逸散通道 (Huang, 2022)

此研究利用結構之間的溝槽排出蒸氣層，以提升 LFP 至 500°C。

三、研究目的

- (一) 降低接觸時間
- (二) 提升液滴自推性能
- (三) 提升 LFP
- (四) 提升表面冷卻效率

貳、研究設備及器材

一、實驗設備

(一) 加熱裝置

- 1. 加熱器 (加熱溫度上限 775°C)
- 2. 加熱板 (放置熱電偶、ARG 試片)
- 3. 熱電偶 (K-Type, 校正表面溫度; 紀錄軟體: Agilent BenchLink Data Logger 3)

(二) 供水裝置

- 1. Syringe Pump (低流率: 780100I; 高流率: NE-1010)
- 2. 推水針筒 (管外徑 14.3mm)
- 3. 滴水針筒 (液滴直徑 3mm, 距離試片高度 9mm)

(三) 攝影裝置

- 1. 高速攝影機 (Motion Studio, 紀錄液滴運動; 2500FPS)
- 2. IR 紅外線攝影機 (FLIR Research Studio, 紀錄表面溫度變化)
- 3. 平行光源 (補足高速攝影機所需光線)

二、實驗器材：ARG 試片（圖 2.1）

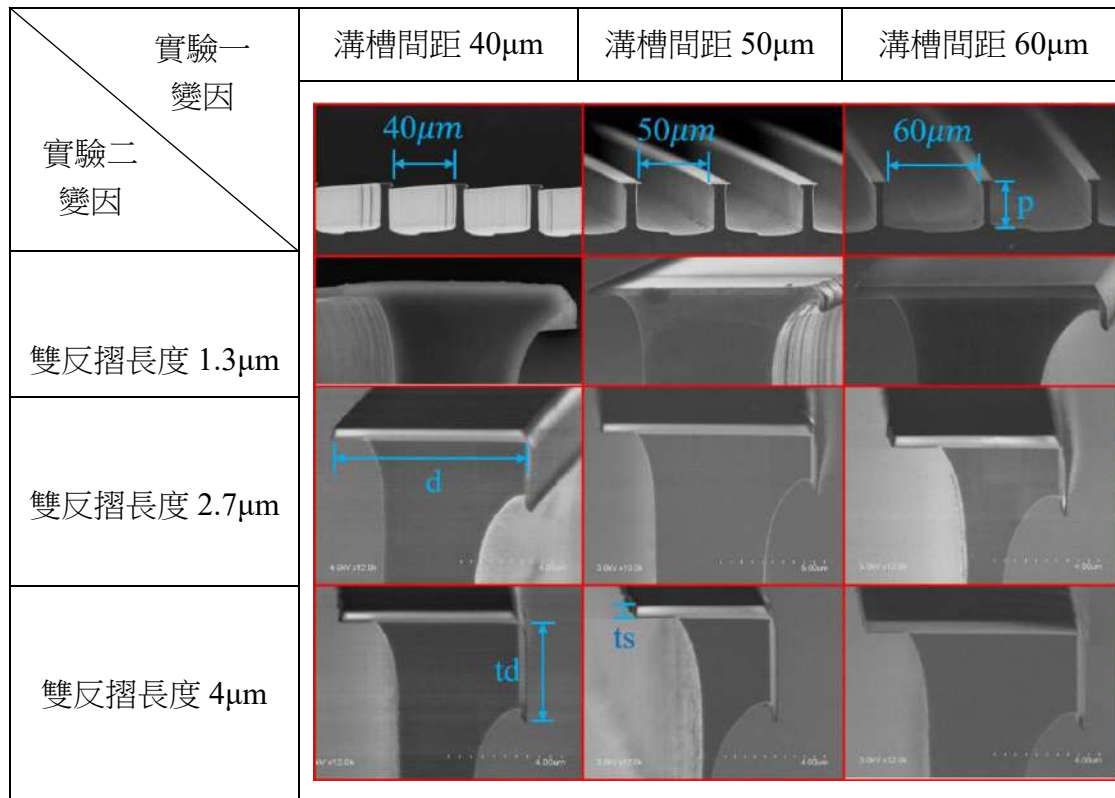


圖 2.1 ARG 試片 SEM 結構（圖片來源：修改自 Hsu, 2023）

三、分析軟體

- （一）ImageJ：分析液滴運動
- （二）Excel：分析液滴運動數據、IR 測溫數據
- （三）Origin：繪製圖表工具

參、研究過程或方法

一、研究架構圖（圖 3.1）

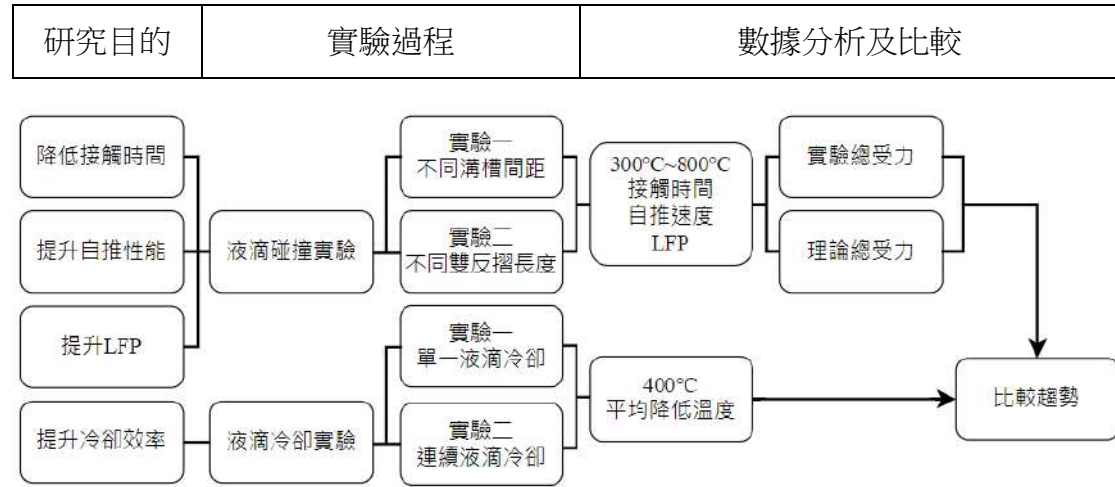


圖 3.1 研究架構圖（圖片來源：作者自行繪製）

二、實驗相關原理

（一）沸騰曲線及 Leidenfrost Effect（LFE）

在沸騰曲線（圖 3.2）中，縱軸的表面熱通量依橫軸的表面過熱溫度

$$T_{\text{過熱}} = T_{\text{表面}} - T_{\text{飽和}} = T_{\text{表面}} - 100(^{\circ}\text{C})$$

分成四個階段，而本研究中所關注的是從 B 點到 C 點的階段，其表面熱通量隨溫度上升逐漸下降，而 C 點即為 LFP，也就是發生 LFE 的臨界溫度。此時在水滴尚未碰觸表面時蒸發形成的蒸氣層抑制熱傳的作用下表面熱傳效率最差。

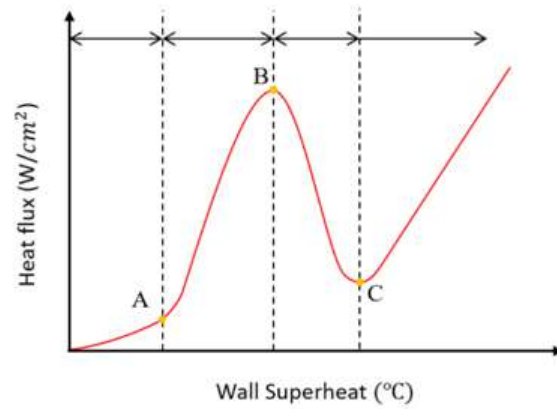


圖 3.2 沸騰曲線（圖片來源：Hsu, 2023）

此時蒸氣層完全阻隔表面和液滴（圖 3.3）。

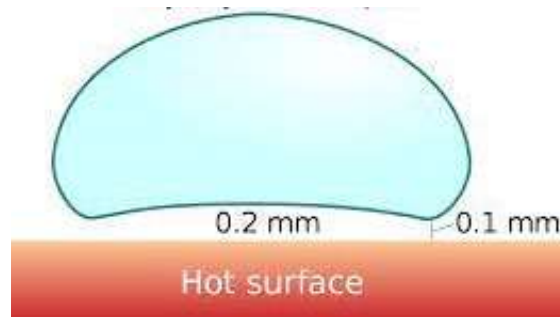


圖 3.3 LFE 蒸氣層堆積示意圖（圖片來源：維基百科）

在 ARG 試片上，LFE 將導致液滴的運動無關乎表面結構，液滴彈跳過程未被破壞（圖 3.4）、（圖 3.5），且蒸氣層熱傳效率極差，因此接觸時間高且自推速度為 0。本研究以此特性觀測實驗中的 LFP。

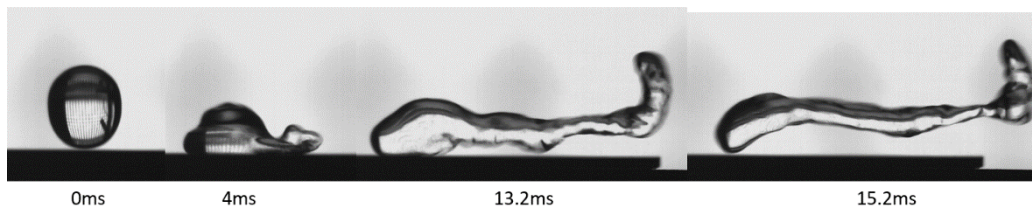


圖 3.4 475°C(<LFP)破壞液滴彈跳過程（圖片來源：作者自行拍攝繪製）

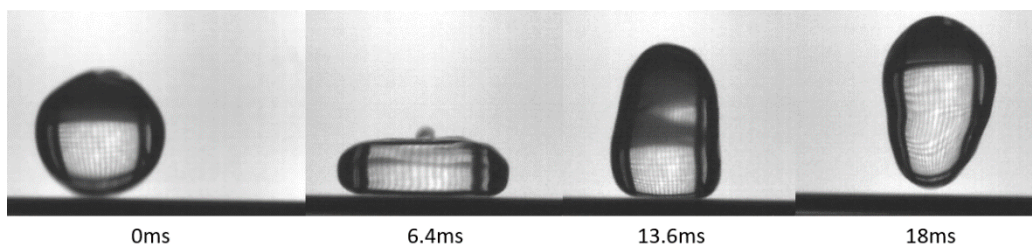


圖 3.5 800°C(>LFP)完整液滴彈跳過程（圖片來源：作者自行拍攝繪製）

（二）接觸角與楊氏方程式

液滴與表面的接觸角代表此表面的親水性或疏水性程度，接觸角越小代表表面越親水，反之，接觸角越大則代表表面越疏水。其成因是固（S）、液（L）、氣（G）三相交界線（三相線）上的表面張力平衡所造成（圖 3.6）。

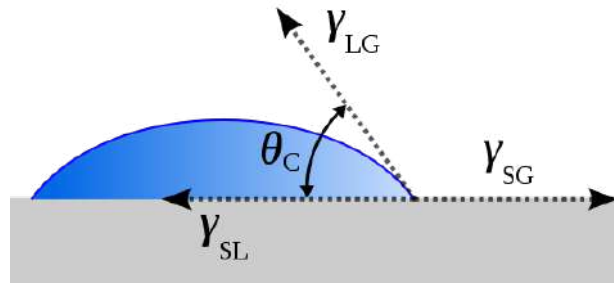


圖 3.6 三相線上的力平衡（圖片來源：維基百科）

由此，可以推導出楊氏方程式

$$\gamma_{SG} = \gamma_{SL} + \gamma_{LG} \cos \theta_c$$

1. Wenzel 狀態 (Wenzel, 1936)

此文獻中提到在具有微結構的表面上（圖 3.7），液滴的實際接觸角 θ_w 和相同材質光滑平面上的接觸角 θ_c 會有以下關係式：

$$\cos \theta_w = r \cos \theta_c$$

其中 r 代表實際接觸面積和投影面積的比值。

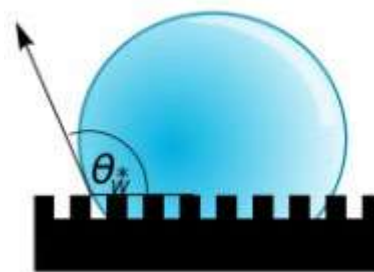


圖 3.7 Wenzel 狀態（圖片來源：維基百科）

2.Cassie-Baxter 狀態 (Cassie; Baxter, 1944)

此文獻中提到當液滴懸浮於微結構上，實際液滴接觸角 θ_{CB} 和相同材質光滑平面上的接觸角 θ_c 會有以下關係式

$$\cos \theta_{CB} = f_1 \cos \theta_c - f_2$$

其中 f_1 、 f_2 分別為液固接觸面積、液氣接觸面積佔總投影面積的比率。

且在忽略微結構表面粗糙度及液滴在微結構之間下垂部分(圖 3.8)時，

$f_1 + f_2 = 1$ ，因此

$$\cos \theta_{CB} = f_1(\cos \theta_c + 1) - 1$$

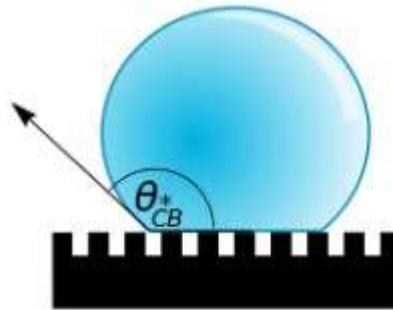


圖 3.8 Cassie-Baxter 狀態 (圖片來源：維基百科)

3.ARG 試片

經過量測 ARG 試片在常溫時的接觸角，其值與 Cassie-Baxter 模型計算得出之接觸角 θ_{CB} 相差最多僅 3.8%，且證明雙反摺長度與溝槽間距皆與接觸角成正相關。而 135°左右的接觸角也顯示 ARG 試片為疏水性結構。

三、實驗架設（圖 3.9）

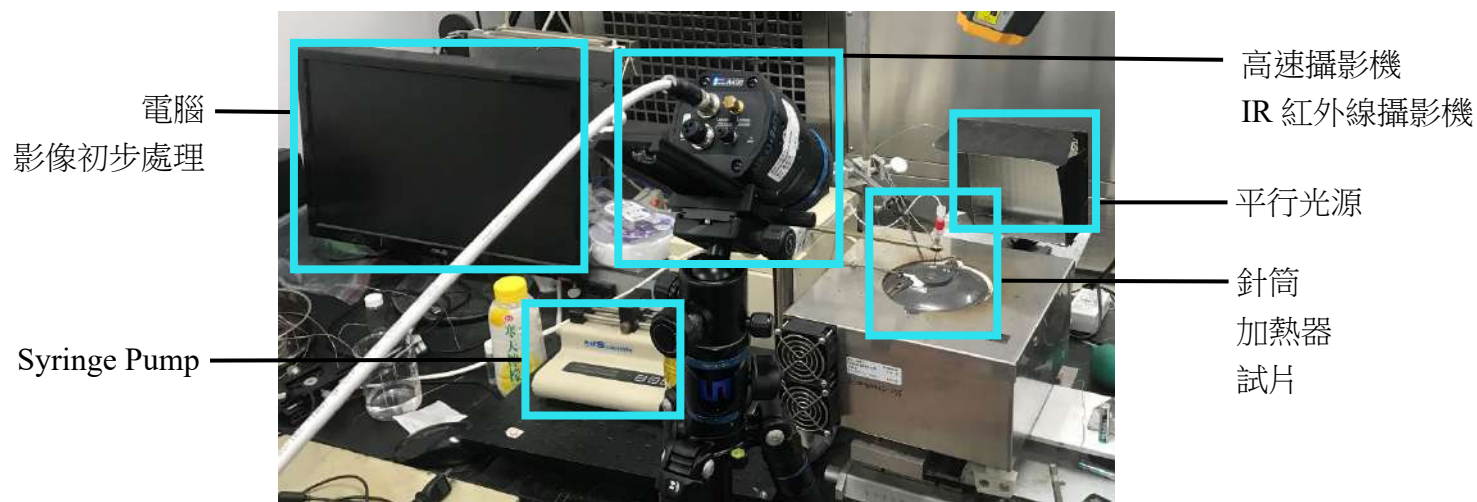


圖 3.9 實驗架設圖（圖片來源：作者自行拍攝繪製）

四、實驗步驟

（一）實驗前準備

- 1.以丙酮、異丙醇及蒸餾水依序清洗試片，並用氮氣噴槍吹乾。
- 2.將高速攝影機或 IR 紅外線攝影機架設於水平放置的試片前並對焦。
- 3.開啟加熱器，加熱至熱電偶溫度達到目標溫度（ $300^{\circ}\text{C}\sim 800^{\circ}\text{C}$, 25°C 為間距）

（二）液滴碰撞實驗

- 1.以高速攝影機紀錄單一液滴落下並拉伸彈跳的影像。
- 2.記錄熱電偶在實驗期間紀錄的溫度，以確保表面溫度恆定。

（三）液滴冷卻實驗

1.單一液滴冷卻實驗

以 IR 紅外線攝影機記錄單一液滴滴落 ARG 表面期間表面的溫度變化，觀測平均冷卻溫度。

2.連續液滴冷卻實驗

調整 Syringe Pump 的流率，使表面在恢復初始溫度之前滴落下一滴水滴，以模擬噴霧冷卻。

五、數據分析

（一）高速影像

1. 影像處理

(1) 將高速攝影機影像匯入 ImageJ 中，並擷取液滴恰滴落（圖 3.10）及彈起的兩幀（圖 3.11）。

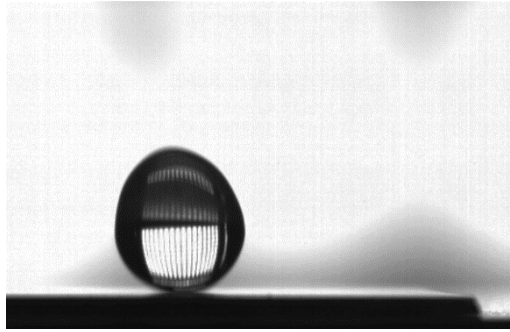


圖 3.10 液滴滴落（圖片來源：作者自行拍攝）

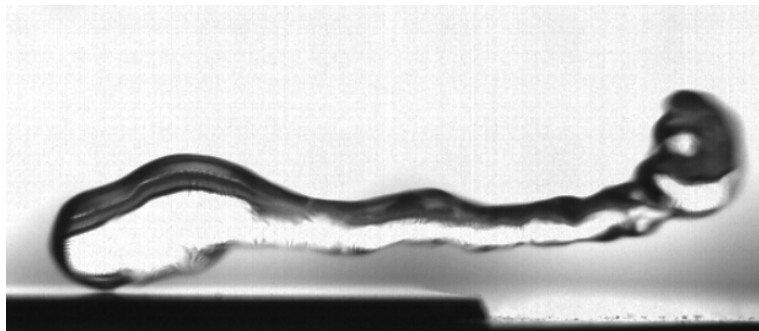


圖 3.11 液滴彈起（圖片來源：作者自行拍攝）

(2) 將兩幀相對時間相減（ $t_2 - t_1$ ）即為液滴接觸時間 t_c 。

2. 液滴運動性能數據（圖 3.12）

(1) 將兩幀做二元化處理(Process—Binary—Make Binary)。

(2) 填滿兩幀影像中水滴的空隙，必要時手動填滿(Process—Binary—Fill Holes)。

(3) 分離水滴與表面(Process—Binary—Watershed)。

(4) 計算液滴質心座標及最大拉伸長度(Analyze—Measure)。

(5)兩幀質心位置 x 座標差 $x_2 - x_1$ (最大自推位移)，除以接觸時間 t_c 即為平均自推速度 v 。即

$$v = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1}$$

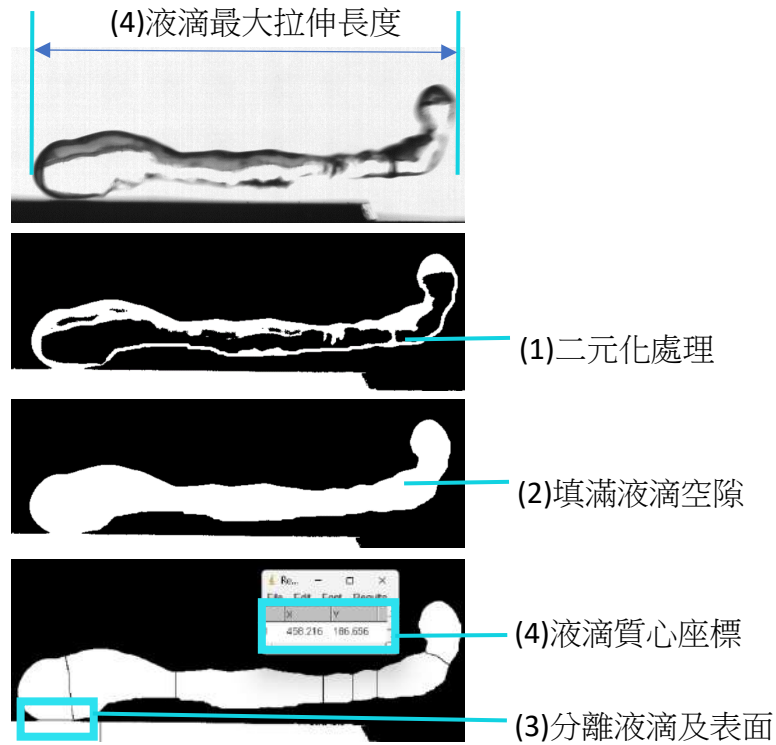


圖 3.12 高速影像處理 (圖片來源：作者自行拍攝)

以上同種結構之數據皆取 3 次實驗數據做平均及標準差分析。

(二) IR 紅外線測溫影像

1. 單一液滴冷卻

- (1)將 IR 紅外線攝影機的溫度變化數據匯入 Excel。
- (2)對照 IR 攝影機內影片，選取液滴恰彈起時拍攝到的表面溫度 (圖 3.13) 作為可用數據，而非拍攝到液滴本身。

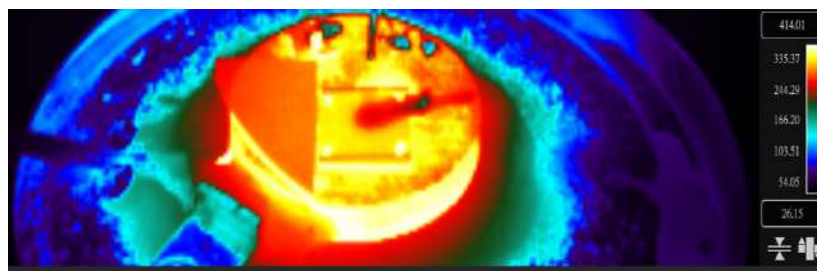


圖 3.13 單一液滴冷卻影像 (圖片來源：作者自行拍攝)

(3)一種結構取 3 數據取平均，以最低溫的拍攝時間作為相對時間基準，並匯入 Origin 作圖。

2.連續液滴冷卻

連續液滴冷卻實驗的拍攝時間通常為 30~60 秒，若以單一液滴冷卻實驗的分析方式將耗費太多時間在觀察影片中是拍攝到液滴恰彈起時的表面抑或是拍攝到液滴本身。

因此本研究將連續液滴的數據不論是拍攝到液滴本身、液滴彈起時的表面或是已回復初始溫度的表面的溫度數據取平均值（圖 3.14）。

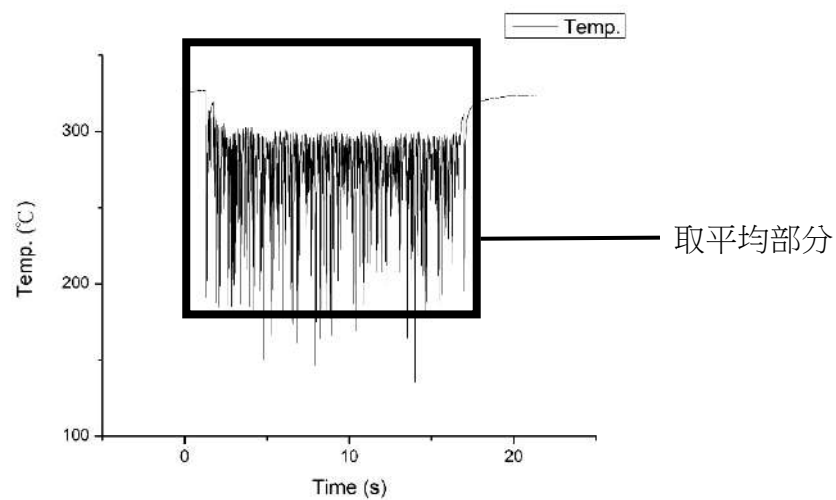


圖 3.14 連續液滴冷卻分析（圖片來源：作者自行繪製）

實際分析步驟如下：

- (1)將 IR 紅外線攝影機的溫度變化數據匯入 Excel。
- (2)將開始低落水滴後的溫度數據取平均值。
- (3)將數據匯入 Origin 作圖。

肆、研究結果

此部分圖表除有特別註明，皆為作者自行繪製。

一、接觸時間

（圖 4.1~4.3）為水滴在九種 ARG 結構上接觸時間與表面溫度的關係：

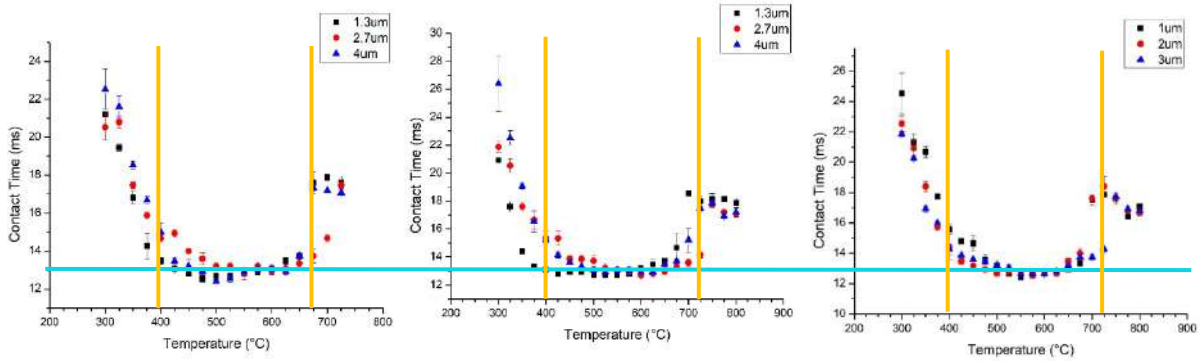


圖 4.1 溝槽間距 40μm

圖 4.2 溝槽間距 50μm

圖 4.3 溝槽間距 60μm

接觸時間隨溫度的趨勢可分為三個溫度區間：

（一）300°C~400°C：接觸時間降低。

（二）400°C~LFP：維持穩定 13ms（藍線）。

（三）LFP~800°C：接觸時間顯著升高的臨界溫度即為 LFP，此時接觸時間維持穩定 18ms

二、平均自推速度

（圖 4.4~4.7）為水滴在九種 ARG 結構上接觸時間與表面溫度的關係，其中（圖 4.7）為固定雙反摺長度，不同溝槽間距的實驗結果：

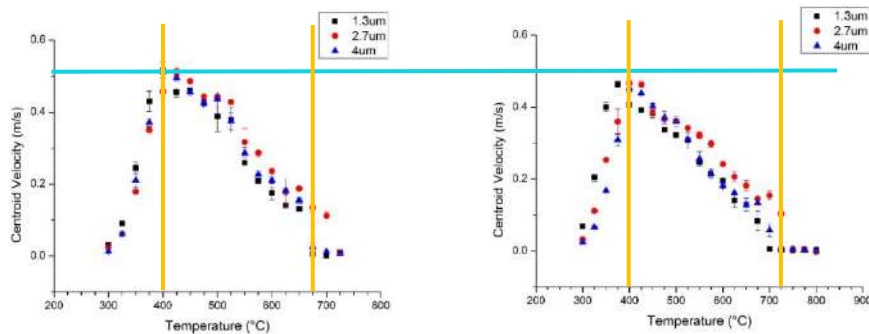


圖 4.4 溝槽間距 40μm

圖 4.5 溝槽間距 50μm

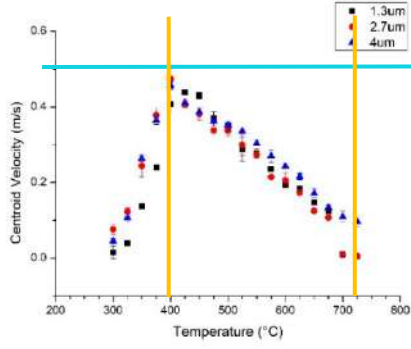


圖 4.6 溝槽間距 60μm

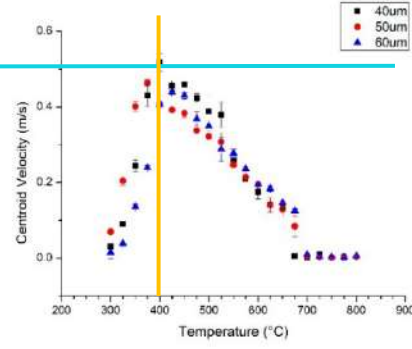


圖 4.7 雙反摺長度 1.3μm

平均自推速度隨溫度的趨勢可分為三個溫度區間：

- (一) 300°C~400°C：自推速度上升。
- (二) 400°C~LFP：達到最大值約 0.5m/s 後逐漸降低（藍線）。
- (三) LFP~800°C：自推速度降至 0 的臨界溫度即為 LFP，此時自推速度維持穩定 0

三、總受力

為了更完整的分析液滴的運動以及釐清液滴運動對於冷卻的影響，本研究以實驗和理論兩種方式推導液滴總受力。

(一) 實驗總受力

利用實驗數據反推而得的液滴總受力稱為實驗總受力，由牛頓第二運動定律可知液滴總受力為

$$F_e = ma$$

其中下標 e 代表實驗值， m 為液滴拉伸區質量， a 為液滴加速度

為了得知 a 的值，本研究假設液滴在表面上受力平均，也就是做等加速度運動。因此平均質心速度為

$$v = \frac{1}{2} \frac{D_{max} - D_i}{t_c}$$

且質心加速度為

$$a = \frac{v}{0.5t_c} = \frac{D_{max} - D_i}{t_c^2}$$

而在本研究中假設液滴拉伸後為底面半徑 D_{min} ，柱高 D_{max} 的圓柱體，由此可得液滴拉伸區質量

$$m = \rho_{l,sat} \frac{\pi D_{min}^2}{4} (D_{max} - D_i)$$

若假設拉伸前後之液滴質量相等，即可得

$$\frac{1}{6} \pi D_i^3 \rho_l = \rho_{l,sat} \frac{\pi D_{min}^2}{4} * D_{max}$$

其中 $\rho_{l,sat}$ 和 ρ_l 分別代表 100°C和常溫 20°C時的水密度。由上式可得

$$D_{min}^2 = \frac{2}{3} \frac{D_i^3}{D_{max}} \frac{\rho_l}{\rho_{l,sat}}$$

因此

$$m = \frac{1}{6} \frac{\pi D_i^3 \rho_l}{D_{max}} (D_{max} - D_i)$$

代入

$$F_e = ma$$

整理後可得實驗總受力

$$F_e = \frac{1}{6} \pi \rho_l \frac{D_i^4}{t_c^2} \left(\frac{D_{max}}{D_i} - 1 \right) \left(1 - \frac{D_i}{D_{max}} \right)$$

圖（4.8~4.11）為水滴在九種 ARG 結構上實驗總受力與表面溫度的關係，其中（圖 4.11）為固定雙反摺長度，不同溝槽間距的實驗結果：

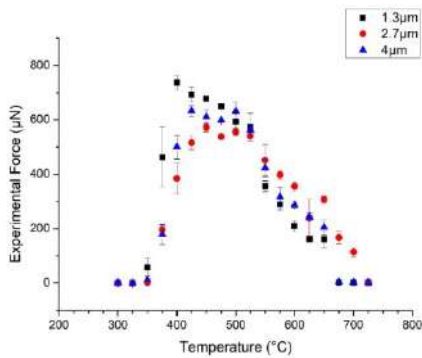


圖 4.8 溝槽間距 40μm

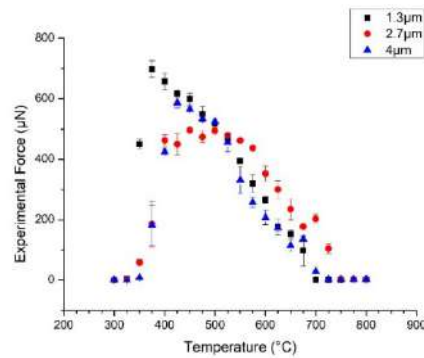


圖 4.9 溝槽間距 50μm

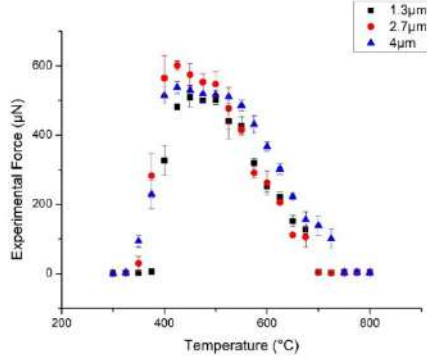


圖 4.10 溝槽間距 60μm

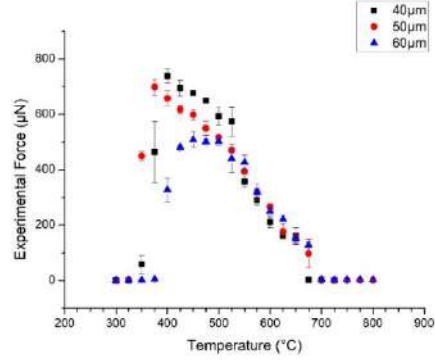


圖 4.11 雙反摺長度 1.3μm

其趨勢與自推速度類似，原因為假設液滴受力平均，平均速度正比於加速度及受力。

(二) 理論總受力

理論受力 F_t 是由朝向液滴自推方向的氣泡推力 F_{bubble} 和與之反向的黏附力 F_{ad} 共同造成，即

$$F_t = F_{bubble} - F_{ad}$$

根據牛頓第二運動定律

$$F_{bubble} = \frac{dp}{dt} = v \frac{dm}{dt} = \dot{m}v$$

其中 $\dot{m}$ 為質量流率，也就是接觸時間內液滴蒸發的質量。假設表面供給熱

$$dQ = q_{total} * A_{eff} dt$$

其中 A_{eff} 表示雙反摺部分造成向右氣泡推力的有效面積，其具體推導方式如下（圖 4.12）：

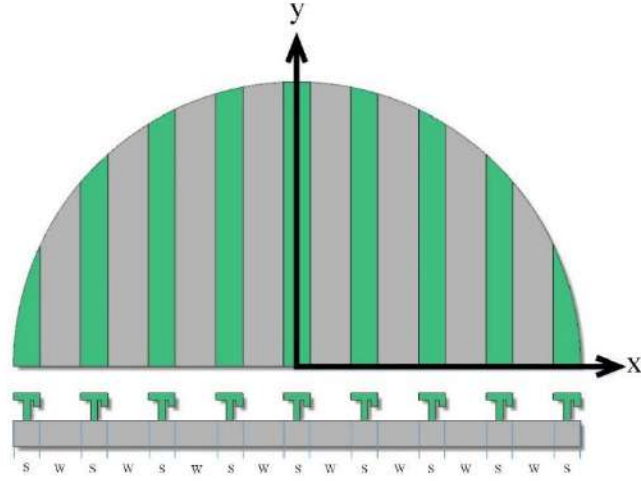


圖 4.12 有效面積計算（圖片來源：Hsu, 2023）

假設液滴投影面積第一象限內有 n 條 ARG 結構，且每條 ARG 結構頂部近似為長方形，則

$$L_{1,right} = \sum_{i=1}^n \sqrt{r^2 - \left(\frac{2i-1}{2}s + (i-1)w\right)^2}$$

$$L_{1,left} = \sum_{i=1}^n \sqrt{r^2 - \left(\frac{2i-1}{2}s + iw\right)^2}$$

$$L_{2,right} = \sum_{i=1}^n \sqrt{r^2 - \left(\frac{2i-1}{2}s + iw\right)^2}$$

$$L_{2,left} = \sum_{i=1}^n \sqrt{r^2 - \left(\frac{2i-1}{2}s + (i-1)w\right)^2}$$

其中下標數字為象限數，接著為同一條柱狀結構左右側長度； r 為液滴半徑； s 為柱狀結構寬度； w 為溝槽間距。將以上結果乘上對應雙反摺長度 l_d 或單反摺寬度 l_s 再相加、乘 2 即為整個圓形投影面積下的 A_{eff} ：

$$A_{eff} = 2[(l_d L_{1,right} - l_s L_{1,left}) + (l_d L_{2,right} - l_s L_{2,left})]$$

因此可得

$$dm_{bubble} = \frac{dQ}{h_f} = \frac{q_{total} * A_{eff}}{h_f} dt$$

其中 h_f 為液體蒸發潛熱， m_{bubble} 為氣泡質量。而由於此時氣泡受限於水滴中，因此假設液滴被推開體積與產生氣泡體積相同，即

$$V_l = \frac{dm_l}{\rho_l} = V_v = \frac{dm_{bubble}}{\rho_v}$$

其中 ρ_l 及 ρ_v 為 100°C時水和水蒸氣的密度。因此

$$dm_l = \frac{\rho_l}{\rho_v} \frac{q_{total} * A_{eff}}{h_f} dt$$

即

$$F_{bubble} = \frac{\rho_l}{\rho_v} \frac{q_{total} * A_{eff}}{h_f} * v$$

此處 v 應使用表面熱傳即蒸氣層堆積機制推導，但目前參考書中僅有不考慮蒸氣層情況下的氣泡擴張速度（Carey, 1992）。因此目前 v 使用實驗數據中的速度項作為代替。

黏附力為水滴停留吸附於表面上的傾向倒置的與自推反方向的作用力。文獻中（Dupré, 1869）指出分離液滴與表面，也就是消滅系統中液固介面而產生新的液氣、固氣介面時所需的單位面積最小能量 γ_{ad} 為

$$\gamma_{ad} = \gamma_{SG} + \gamma_{LG} - \gamma_{SL}$$

帶入楊氏方程式並乘上固液介面面積 S_{ls} 後整理可得 W_{ad}

$$W_{ad} = \gamma_{LG} S_{ls} (1 + \cos \theta_c)$$

而 S_{ls} 即為 A_{eff} 加上柱狀結構頂部接觸面積，即

$$S_{ls} = A_{eff} + s \left(\frac{L_{1,right} + L_{1,left} + L_{2,right} + L_{2,left}}{2} \right) * 2$$

最後除以做功路徑，也就是以液滴初始半徑 r_0 為半徑的圓周長，即可得到黏附力 F_{ad}

$$F_{ad} = \frac{\gamma_{LG} S_{ls} (1 + \cos \theta_c)}{2\pi r_0}$$

四、實際冷卻效率

在受力模型中，可以發現 400°C時液滴有最大受力，滿足低接觸時間及高自推速度；而就結構討論，雙反摺長度較溝槽間距並無顯著影響。因此本研究以 IR

紅外線攝影機實際觀測液滴在不同溝槽間距之 ARG 表面上的冷卻情形，包含單一液滴以及連續液滴的冷卻。

(一) 單一液滴冷卻

(圖 4.13) 為雙反摺長度 $1.3\mu\text{m}$ 的 ARG 結構以及對照組純矽 (Si) 試片在 400°C 時的單一液滴冷卻效率：

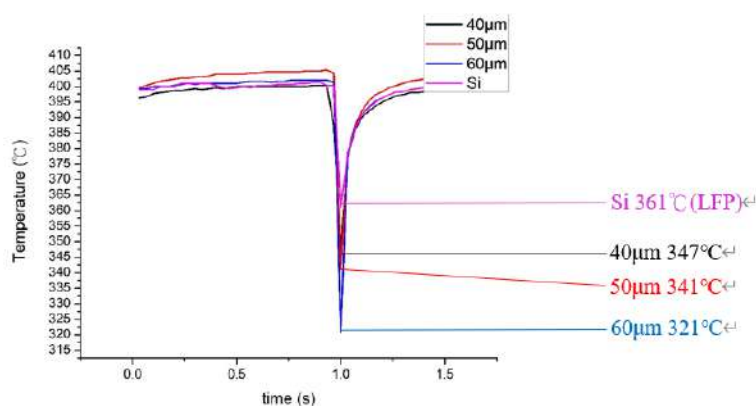


圖 4.13 雙反摺長度 $1.3\mu\text{m}$ 單一液滴冷卻效率

可以發現溝槽間距 60 微米的 ARG 結構冷卻效率最佳，其次是 $50\mu\text{m}$ ，最差的是 $40\mu\text{m}$ ，但皆優於作為對照組的純矽片。此趨勢如同液滴總受力中的趨勢，但與液滴自推速度之趨勢相反，其原因為自推速度的影響應在連續液滴的冷卻中較為顯著。

(二) 連續液滴冷卻

延續單一液滴冷卻實驗，本研究調整 Syringe Pump 的流率，分析一段時間內連續液滴冷卻 400°C 表面的溫度平均值，以更貼近噴霧冷卻的實際情況。

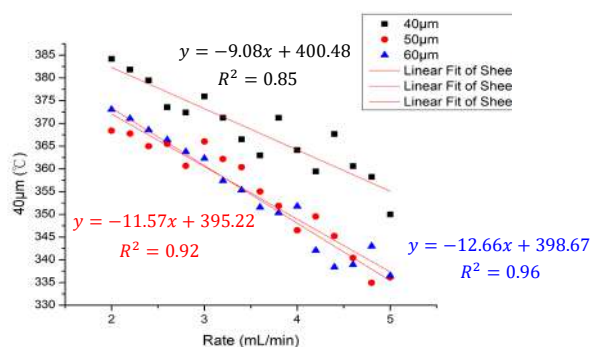


圖 4.14 雙反摺長度 $1.3\mu\text{m}$ 連續液滴冷卻效率

如（圖 4.14）所示，ARG 結構的連續液滴冷卻效率與單一液滴冷卻效率趨勢相同，皆為溝槽間距 $60\mu\text{m} \div 50\mu\text{m} > 40\mu\text{m}$ 。而在高流率的情況下，可以發現液滴受力較大的溝槽間距 $40\mu\text{m}$ 結構受流率影響較大，其冷卻效率在單位溫度變化內的下降量(即圖中回歸直線斜率絕對值) 較大，印證前述自推受力在連續液滴冷卻作用較為明顯的猜想。

伍、討論

一、三應變變因隨溫度變化趨勢以及可能機制

（一） $300^{\circ}\text{C} \sim 400^{\circ}\text{C}$

此溫度區間中隨著溫度逐漸上升，接觸時間快速下降，而自推速度快速上升，代表隨著溫度的上升，熱傳效率也隨之上升。本研究推測其原因為此時表面與水滴之間的溫差主導熱傳效率的高低，且其與表面溫度與熱傳效率皆呈現正相關。

（二） $400^{\circ}\text{C} \sim \text{LFP}$

此溫度區間中隨著溫度逐漸上升，接觸時間為維持穩定 13ms ，而自推速度逐漸下降，代表隨著溫度的上升，熱傳效率也隨之下降。本研究推測其原因為此時表面與水滴之間的蒸氣層厚度主導熱傳，且其與表面溫度呈正相關，卻因蒸氣熱傳效率極差，因此與熱傳效率呈現負相關。也因此 400°C 為 ARG 結構熱傳效率最佳的溫度。

（三） $\text{LFP} \sim 800^{\circ}\text{C}$

在溫度高於 LFP 後，熱傳與結構幾乎無關，而是受表面蒸氣層主導，因此此時熱傳效率極差，出現高接觸時間且無自推現象，助於蒸氣層堆積而使熱傳效率變差。

二、三應變變因隨結構變化趨勢及可能機制

（一）接觸時間

接觸時間以溝槽間距 $60\mu\text{m}$ 為最低，因而單一液滴冷卻效率最佳；而

雙反摺長度影響不顯著。

（二）自推速度

最大平均自推速度以溝槽間距 $40\mu\text{m}$ 為最快，因有效接觸面積大而氣泡推力較稀疏的 ARG 結構：溝槽間距 $50\mu\text{m}$ 、 $60\mu\text{m}$ 大；而由於液滴下垂程度因接觸時間短及自推速度高而有限，雙反摺長影響不顯著。

（三）LFP

LFP 以溝槽間距 $50\mu\text{m}$ 、 $60\mu\text{m}$ 最大，達到 725°C ，比溝槽間距 $40\mu\text{m}$ 的 ARG 結構高約 50°C 。因稀疏的結構有助於排出蒸氣，進而提升 LFP。

二、不同受力模型趨勢及比較

（圖 5.1）為雙反摺長度 $1.3\mu\text{m}$ 實驗總受力與理論總受力的比較，可以發現其趨勢皆與自推速度類似，其原因為實驗總受力中假設液滴受力平均，而理論總受力中代入速度項。

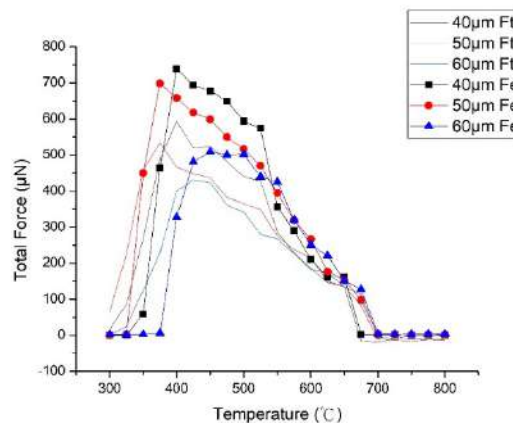


圖 5.1 實驗總受力與理論總受力比較（圖片來源：作者自行繪製）

而圖中也能發現同種結構的理論總受力相比於實驗總受力略低約 $200\mu\text{N}$ ，是目前理論無法解釋的現象，也將是後續研究的方向之一。

三、實際冷卻效率

（一）單一液滴冷卻效率

1. 液滴受力與冷卻效率

本研究在單一液滴冷卻效率的實驗中發現其冷卻效率趨勢與液滴

總受力趨勢呈現負相關，前者為溝槽間距 $60\mu\text{m}$ 最佳，其次為 $50\mu\text{m}$ ，最差為 $40\mu\text{m}$ ；而後者則完全相反。其主要原因來自液滴自推及受力主要作用在下一滴水滴可以更快地滴落表面，不致前後兩滴水滴結合，提升最大流率的上限，同時提升連續液滴的冷卻效率。

而單一液滴冷卻的趨勢則需要考慮表面在當下溫度的熱傳效率。沸騰曲線中低於 LFP 越多的溫度，其熱傳效率越佳。因此可推論具有越高 LFP 的表面，在同一溫度的熱傳效率會越好。而 ARG 結構中，溝槽間距越大的結構具有比其他兩者更大體積的溝槽空間能使蒸氣向側邊排出，因此 LFP 的趨勢為溝槽間距 $60\mu\text{m} > 50\mu\text{m} > 40\mu\text{m}$ ，可用以解釋單一液滴的冷卻效率趨勢

2.提升 LFP 有助於提升表面熱傳

在實驗中純矽片在 400°C 時已達到 LFP，蒸氣層的堆積以及液滴垂直彈跳使前後兩滴水滴也更容易結合，並堆積在試片上緩慢沸騰，皆導致熱傳效率大幅降低。因此證明提升 LFP 有助於提升表面熱傳效率。

（二）連續液滴冷卻效率

本研究透過在 400°C 進行的連續液滴冷卻實驗發現其冷卻趨勢如同單一液滴冷卻實驗，原因亦為 LFP 與同溫度下之表面熱通量呈正相關。雖然在實驗過程中發現流率越高時水滴的結合現象越明顯，但由於 Syringe Pump 的流率限制，未能觀測到流率持續上升時自推速度不足以使前後兩滴液滴分離而在表面上接觸沸騰的現象，也就是尚未觀測到雙反摺長度 $1\mu\text{m}$ 之 ARG 結構在表面溫度 400°C 時流率的上限值。

陸、結論

一、三應變變因與過往文獻之比較

（一）接觸時間

本研究以溝槽間距 $60\mu\text{m}$ 的 ARG 結構比文獻中類似的雙反摺結構 (Huang, 2022) 降低了 1~2ms 的接觸時間，最低來到 13ms。

（二）自推速度

本研究以溝槽間距 $40\mu\text{m}$ 的 ARG 結構在 $We=9.1$ 的低落下速度情況下比文獻中的斜向奈米柱狀結構 (Agapov, 2014) 在 $We=280$ 的情況下提升了約 0.2m/s 的自推速度，最大來到 0.5m/s ，不僅提升了熱傳效率，更降低了所需的能量。

（三）提升 LFP

本研究以溝槽間距 $50\mu\text{m}$ 及 $60\mu\text{m}$ 的 ARG 結構相比於文獻中的雙反摺結構 (Huang, 2022) 提升了約 150°C ，來到 725°C ，成功提升了熱傳效率以及擴展冷卻適用溫度範圍。

二、研究之創見性與突破

本研究除了優化液滴在過熱微奈米結構表面上的運動性能，同時也實際測試了運動性能和實際冷卻之間的關係，更能貼合實際應用在噴霧冷卻上的情境。

三、未來展望

未來希望持續進行不同流率下的 ARG 結構連續液滴冷卻實驗，優化連續液滴冷卻的實驗，研究結構以及流率對於冷卻效率的影響。

柒、參考文獻資料

- [1] HollowStream Liquid Atomizing Spray Nozzle. (2021, November 15). Plant Engineering. <https://www.plantengineering.com/products/hollowstream-liquid-atomizing-spray-nozzle/>
- [2] Hsu, T. Y., & Lu, M. C. (2023). Droplet Self-propulsion on the Asymmetric Reentrant Microgroove Surface. [Unpublished master's thesis]. National Taiwan University. <https://doi.org/10.6342/NTU202303808>
- [3] M. Panão. & A. Moreira. (2005) Thermo-and fluid dynamics characterization of spray cooling with pulsed sprays. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 30(2), 79-96.
- [4] Bird, J. C., Dhiman, R., Kwon, H. M., & Varanasi, K. K. (2013). Reducing the contact time of a bouncing drop. *Nature*, 503(7476), 385-388.
- [5] Sahoo, V., Chou, C. Y., Lo, C. W., & Lu, M. C. (2018). Elongated bouncing and reduced contact time of a drop in the janus state. *Langmuir*, 34(37), 10874-10879.
- [6] Huang, C. T., Lo, C. W., & Lu, M. C. (2022). Reducing Contact Time of Droplets Impacting Superheated Hydrophobic Surfaces. *Small*, 18(13), 2106704.
- [7] Agapov, R. L., Boreyko, J. B., Briggs, D. P., Srijanto, B. R., Retterer, S. T., Collier, C. P., & Lavrik, N. V. (2014). Asymmetric wettability of nanostructures directs Leidenfrost droplets. *Acs Nano*, 8(1), 860-867.
- [8] Kwon, H. M., Bird, J. C., & Varanasi, K. K. (2013). Increasing Leidenfrost point using micro-nano hierarchical surface structures. *Applied Physics Letters*, 103(20), 201601.
- [9] Wenzel, R. N. (1936). Resistance of solid surfaces to wetting by water. *Industrial & Engineering Chemistry*, 28(8), 988-994.
- [10] Cassie, A. B. D., & Baxter, S. (1944). Wettability of porous surfaces.

Transactions of the Faraday society, 40, 546-551.

[11] Carey, V. P. (1992). Liquid-vapor phase change phenomena; Hemi-sphere: New York.

【評語】 100025

本計畫以建構微奈米結構表面概念探討液滴在表面的移動速度和對表面產生的冷卻效率，建議可後續探討不同液滴大小與不同速度液滴來碰撞接觸表面探討其冷卻效率將能更符合提出之研究動機，以利切合實際應用性。