

中華民國第 61 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

051802

微結構下的魔術師 —— 萊頓佛斯特的溫度效應

The study of Leidenfrost effect on micro structure surface by using frequent water droplet.

學校名稱：新北市立丹鳳高級中學

作者： 高二 莊皓亘 高二 蔡宇綸	指導老師： 詹堯舜 陳年謀
-------------------------	---------------------

關鍵詞：萊頓佛斯特效應、微結構、動力學

摘要

“leidenfrost effect” 是水滴能在熱表面產生蒸氣層並隨機跳動。我們便設想利用此特殊蒸氣層達到讓水滴往固定方向前進，甚至優化其加速結構。

我們設計 (角度 $\theta = 30^\circ$ 、 45° 、 60°) \times (高度 $h = 1.0\text{ mm}$ 、 1.5 mm 、 2.0 mm)共 9 種具數學意義的微結構。測量微結構在(160°C - 350°C)溫度下水滴的速度、生命週期，並獨創「珠光粉慢動作攝影」研究形變、熱流。

我們提出未有文獻紀錄的空腔體積、有效接觸面、水滴外部形變機制、內部熱流循環等機制。利用上述資訊建構運動模型，發現 $\theta = 60^\circ$ 、 $h = 1.0\text{ mm}$ 水滴有最快的速度。且發現高溫段(表面溫度 $\geq 300^\circ\text{C}$)，任何微結構，生命週期差距都極小。我們獨創性提出水滴在微結構下“leidenfrost effect”數學模型，理論值與數據吻合，成功解釋水滴的運動機制。

壹、研究動機

一、動機

常理說水往低處流是大家已知的觀念，但我們思考著是否能顛覆這個觀念，讓水滴在不施加外力的情況下，也能夠讓水滴有辦法克服地心引力，往指定方向作出向上爬升的運動。為了達到實驗目的，我們了解到了“leidenfrost effect”，當水滴接觸到遠超於水滴沸點的固體表面時，水滴下方會瞬間產生出一層蒸氣層，此蒸氣層則成為上方液體與熱表面之間的隔熱層，大幅延緩水滴蒸發的速率。我們實驗也圍繞著此效應設計，我們思考著下方的蒸氣層功用是否只僅限於延緩上方水滴的蒸發速率，在普通的光滑表面時能夠使水滴呈現圓潤球狀，那在具有微結構的表面是否能對水滴造成不一樣的影響，而不同形狀的微結構是否對水滴也有影響。

二、微結構設計

(一)、微結構發想

在讓水滴做出向上爬升的運動前，我們需要一個能使水滴朝指定方向前進的力，於是我們從蒸氣層對於上方水滴的力作為發想，在原為平面的光滑熱表面上，蒸氣層能給予上方水滴推力使其不接觸到熱表面，我們則試想著將這些推力變換方向，使蒸氣層支撐上方水滴的力轉化為推動水滴前進的力。而要將蒸氣層

的力變換方向無疑需要從水滴最先接觸的表面作為起始，若將光滑表面設計成斜面，且是無數細小且一致的傾斜表面，我們則能將蒸氣層給予的力轉為推動上方水滴朝統一方向前進的運動。

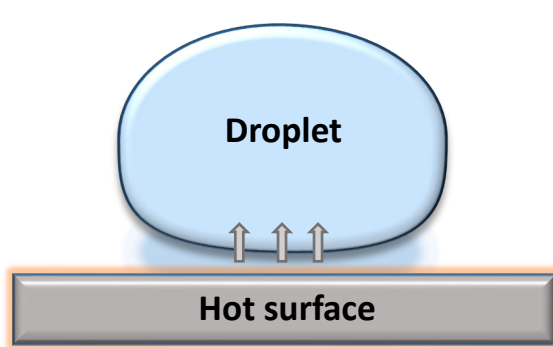


圖 1(a)：液滴在高溫光滑平面的推力示意

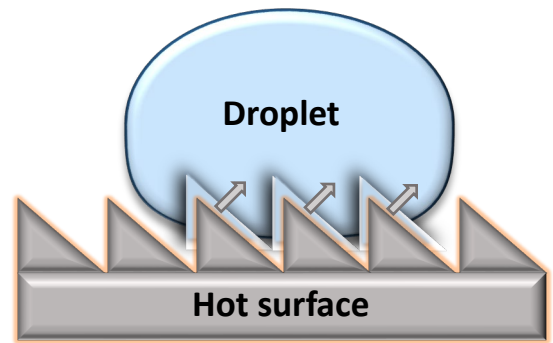


圖 1(b)：液滴在高溫微結構表面的推力示意圖

(二)、微結構多樣化

在微結構的能夠帶動蒸氣層推進的情況下，那改變為結構的大小，彼此間的間距，甚至是更改微結構上眾多細小斜面的傾斜角度。我們便設計出 9 種微結構模組，變動微結構上組成鋸齒狀的眾多三角形的大小、角度。分別是 30°、45°、60°的直角三角形，及直角三角形上的大小，三角形的高則為 1.0、1.5、

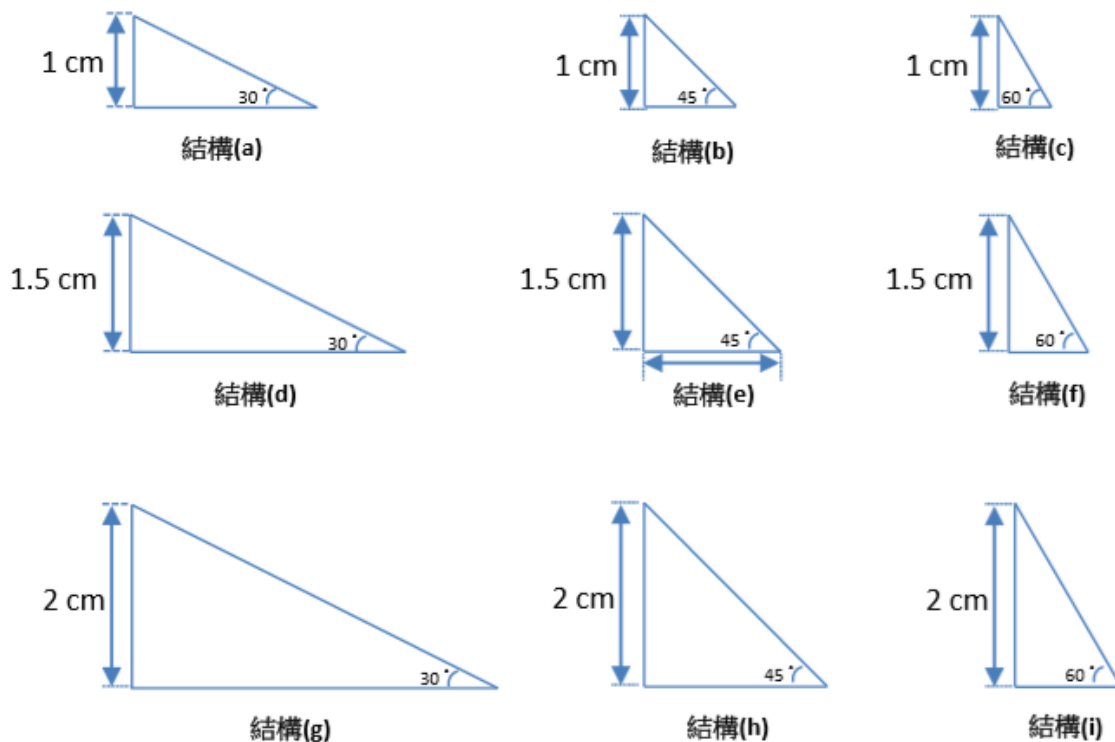


圖 2(a) 9 種金屬表面微結構圖示

貳、研究目的

- 一、對比水滴在平坦面與具有微結構的熱表面上的運動模式。
- 二、以結構 e 微結構為主，探討不同溫度下在具微結構的熱表面對水滴運動速度的影響。
- 三、探討水滴在相同溫度及高度下，3 種不同傾斜角之熱表面(結構 d、e、f)上運動行為差異。
- 四、探討水滴在相同溫度及相同傾斜角下，3 種不同高度之熱表面(結構 b、e、h)上運動行為差異。
- 五、探討水滴的大小是否對運動速度有關。
- 六、透過結構 b、d、e、f、h 實驗數據建立水滴在微結構熱表面上的運動理論模型。
- 七、以結構 a、c、g、i 驗證運動理論模型。

參、研究設備與器材

卡式瓦斯爐	刻度吸量管	手機腳架	紅外線溫度計	智慧型手機
				
用於加熱鋁塊	用於吸水並固定水滴大小	用於固定手機及方便拍攝	用於隨時觀測微結構表面溫度	用於錄製實驗過程的拍攝器材



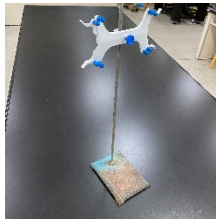


水平儀	圓盤力學桌	滴定管腳架	金色珠光粉	慢動作相機
				
用於確認微結構表面呈水平狀態	可調整三個支撐點的高度以確保微結構呈水平狀態	用於固定刻度吸量管，可控制刻度吸量管與熱表面間的高度	將珠光粉與水混合滴在微結構上方方便觀察形變及熱流變化	較高幀數的相機才辦法拍出水滴跑動細微變化

圖 3 實驗器材一覽圖

微結構規格表

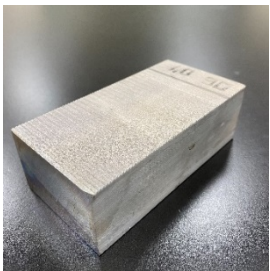

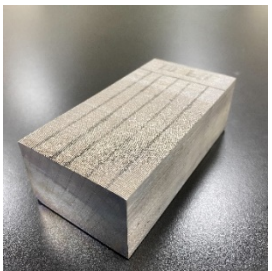
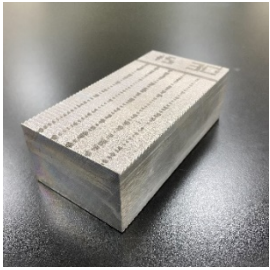

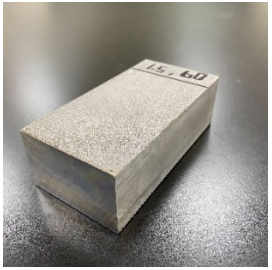
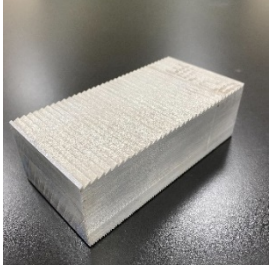


微結構高度 \ 微結構角度	30°	45°	60°
1.0 mm			
1.5 mm			
2.0 mm			

圖 2(b) 9 種金屬表面微結構

肆、研究過程或方法

我們所需要的微結構表面的模具材料需要具備耐高溫、可乾燒且不易氧化、比熱小以方便加熱。在切割出微結構的方式也需要慎選，要精準且不會對材料本身造成損害，以及加工時間不可耗費過多時間，價格也須符合學校所能申請之預算。最後我們採用鋁作為微結構的材料，而切割出微結構的方式我們曾考慮利用 CNC 電腦銑床，但須要利用特製的燕尾銑刀，但由於價格昂貴且須訂做，會花費大量時間等待，經過再三尋找與思考，最後我們選用線切割當作切割出微結構的方法，能夠精密切割出細微的紋路也不須特製刀頭，所以工時也相較縮短非常多，價格也貼近我們所能負荷。我們聯絡金屬工廠購買鋁塊，並親自聯繫線切割的工廠談鋁塊的微結構設計及商量價錢，並將我們的設計圖交給工廠請他們幫忙切割，最後才產出我們最終的九組微結構表面。

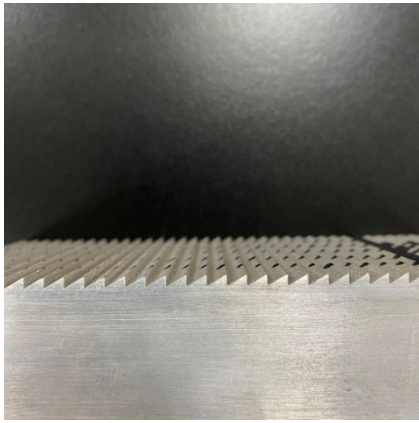


圖 4(a)：金屬微結構成品表面

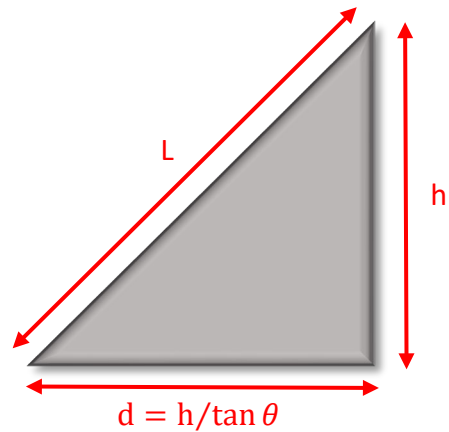


圖 4(b)：微結構各項代號示意圖

- 一、將鋁塊放置在卡式瓦斯爐上利用水平儀確保平面無任何傾斜，狀態完全水平。
- 二、鋁塊開始在瓦斯爐上加熱。
- 三、利用紅外線溫度計嚴謹控制溫度。
- 四、控制刻度吸量管與微結構表面的距離，讓水滴落下的高度相同，並確保水滴落下時接觸到熱表面時初速為零，如圖 5(水滴低落區域)。
- 五、在微結構表面畫出起始線，定下水滴的移動距離，如圖 5(水滴出發起始線距終點 10cm)。

六、在微結構表面劃出寬為 1 cm 的水滴跑道，確保記錄下的路徑一致，不會發生偏移，如圖 5 (兩條黑線間隔寬 1 cm)。

七、利用手機錄影紀錄並記錄水滴跑完路程所需花費時間。

八、使用 tracker 分析每組實驗，並將其轉換為數據，如圖 6。

九、利用鋁箔紙包裹呂快周圍，並傾斜使水滴停留在熱表面，以測量水滴生命週期。

十、在水中加入金色珠光粉方便觀察熱流變化。

十一、利用慢動作相機來拍攝水滴運動時的形變及熱流方向，並放入 tracker 加以分析。

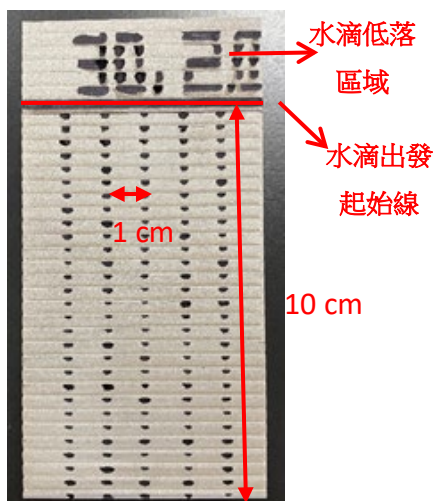


圖 5：金屬表面實驗區域說明

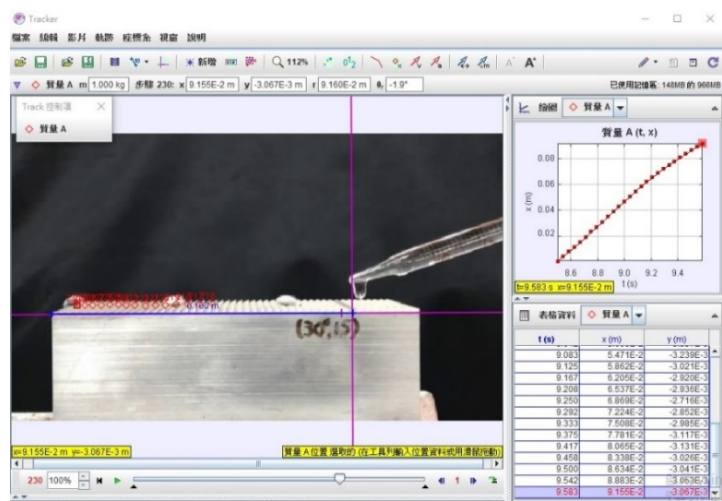


圖 6：分析軟體 tracker 界

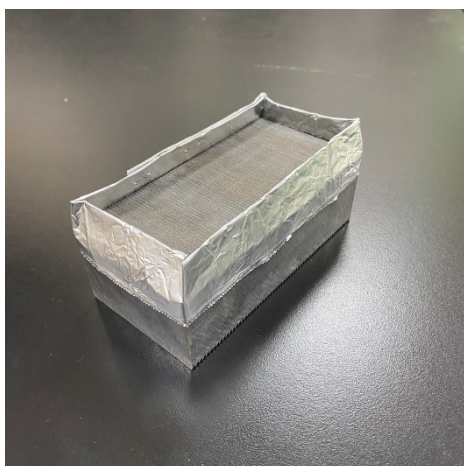


圖 7：鋁箔紙包裹示意圖

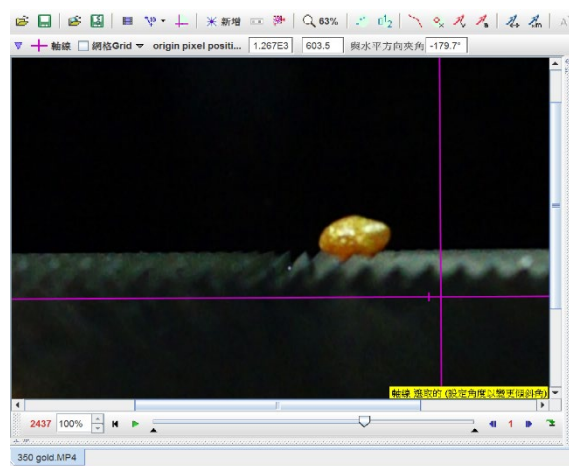


圖 8：tracker 分析形變過程及熱流之界面

伍、研究結果

一、水滴在平坦面與具有微結構之熱表面上的運動模式差異:

當水滴在普通的光滑熱表面時，水滴會呈現渾圓水珠狀，在大幅降低沸騰速度的同時，也會產生不規則運動亦或是靜止不動。而當水滴在具有微結構的規律鋸齒狀熱表面時，水滴會往同一方向移動，而我們所設計的微結構也確實產生出我們所期待的效果，蒸氣層在微結構上能給予上方水滴一股反作用力，推動上方水滴產生一個向前推進的動力。

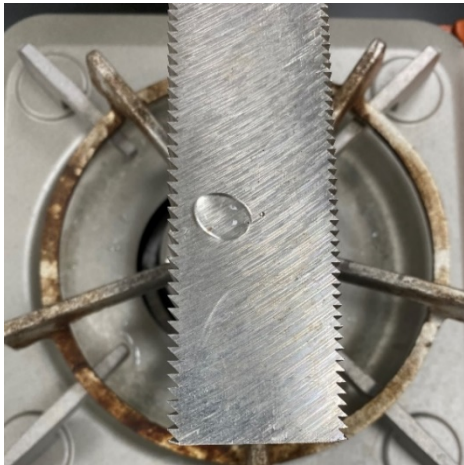


圖 9(a)：水滴在高溫光滑表面時靜止不動的狀態

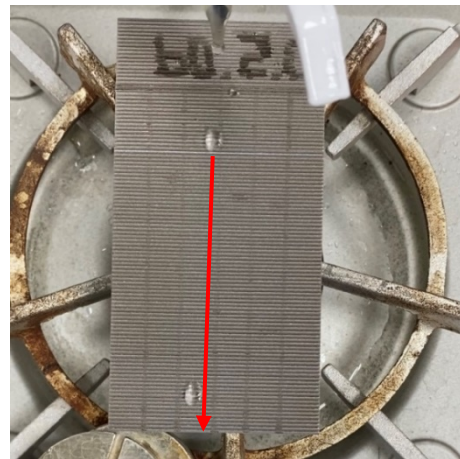


圖 9(b)：水滴在高溫微結構表面的高速運動狀態

二、以結構 e 為主，探討不同溫度下在具微結構的熱表面對水滴運動時間的影響

- (一)、控制變因: 微結構的高度及角度、移動距離、路徑、水滴低落高度、水平狀態。
操作變因: 溫度
- (二)、溫度對水滴運動時間差異:

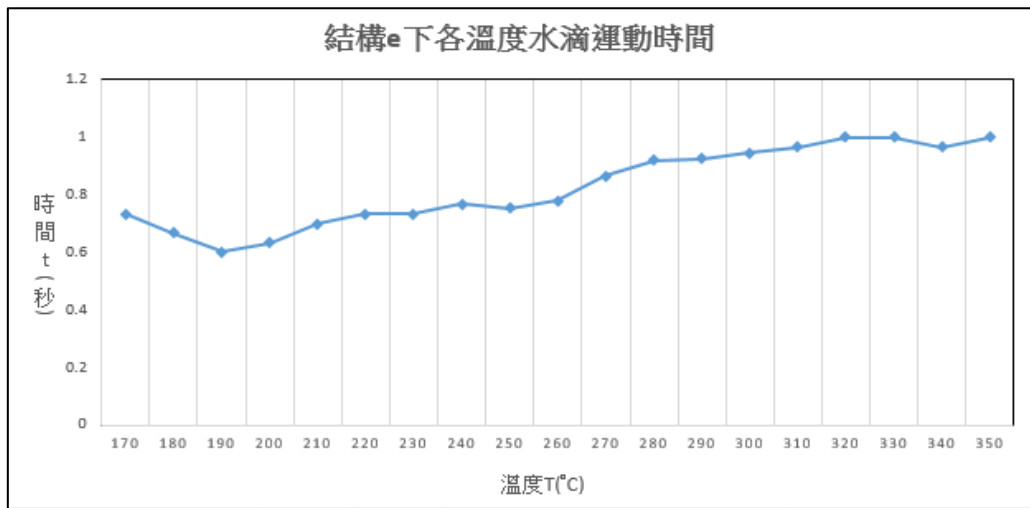


圖 10：水滴在結構 e 各溫度跑完全程所需花費的時間

表 1：水滴在結構(e)各溫度跑完全程所需花費時間

實驗結構(e) h = 1.5mm e = 45°	T(°C)	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250
	t(s)	X	0.73	0.66	0.6	0.63	0.7	0.73	0.73	0.76	0.75
	T(°C)	260	270	280	290	300	310	320	330	340	350
	t(s)	0.78	0.86	0.92	0.92	0.94	0.96	1	1	0.96	1

由表(一)可看出水滴在 190°C 時，跑完路程所需花費的時間最短，也代表著 190°C 時，水滴的運動速度會是最快的，而在 170°C 及 180°C 時，水滴運動時間逐漸減少，且是趨近於等速減少，也就是在 170°C 到 190°C，水滴運動速度與溫度成正比。但當水滴過了 190°C 時，水滴跑完路程的時間卻是隨著溫度升高開始增加，也就代表著過了 190°C 水滴的運動速度是逐漸減慢的。

(三)、溫度對水滴運動狀態差異:

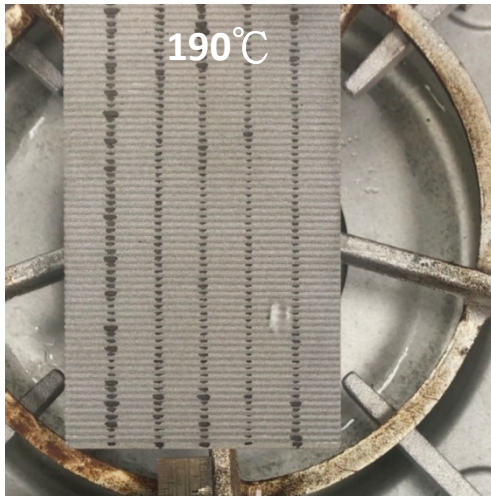


圖 11(a)：水滴在結構 e、190°C 時的運動狀態

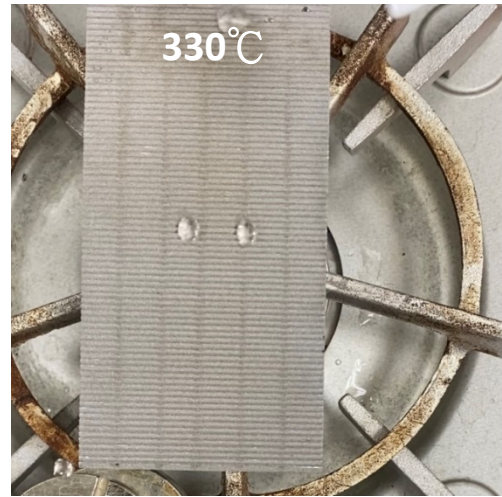


圖 11(b)：水滴在結構 e、330°C 時的運動狀態

190°C 時的水滴，在前進的過程中較為不穩，移動速度也相對較快，前進的同時渾圓水滴狀較不明顯，如圖 11(a)。330°C 時的水滴，在前進的過程中比起 190°C 時穩定許多，但移動速度卻慢了许多，移動過程中的水滴，形狀也保持在渾圓水滴狀，整體看起來也滑順許多，如圖 11(b)。

三、探討水滴在相同溫度及高度下，3 種不同傾斜角之熱表面(結構 d、e、f)上運動行為差異

(一)、控制變因：溫度、移動距離、路徑、水滴低落高度、水平狀態。

操作變因：同高度不同傾斜度的微結構

(二)、微結構角度對於水滴運動速度的影響

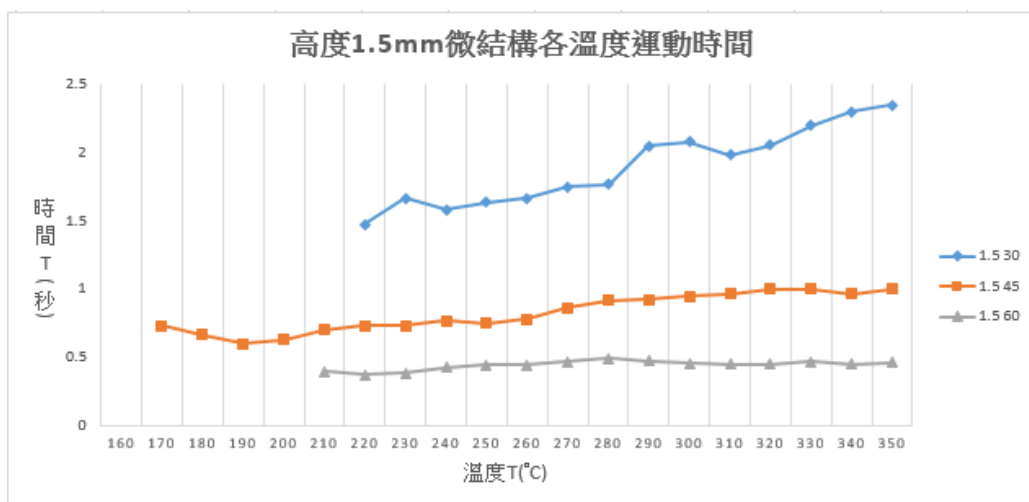


圖 12：水滴在高度 1.5 mm、不同傾斜度的各溫度運動時間

表 2：水滴在高度 1.5 mm、不同傾斜度的各溫度運動時間

結構種類	T(°C)	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250
結構(d) h = 1.5mm e = 30°	t(s)	X	X	X	X	X	X	1.47	1.66	1.58	1.63
結構(e) h = 1.5mm e = 45°		X	0.73	0.66	0.6	0.63	0.7	0.73	0.73	0.76	0.75
結構(f) h = 1.5mm e = 60°		X	X	X	X	X	0.4	0.37	0.38	0.42	0.44
結構種類	T(°C)	260	270	280	290	300	310	320	330	340	350
結構(d) h = 1.5mm e = 30°	t(s)	1.66	1.75	1.76	2.04	2.07	1.98	2.05	2.2	2.3	2.35
結構(e) h = 1.5mm e = 45°		0.78	0.86	0.92	0.92	0.94	0.96	1	1	0.96	1
結構(f) h = 1.5mm e = 60°		0.44	0.46	0.49	0.47	0.46	0.45	0.45	0.47	0.45	0.46

在同高度不同傾斜度的微結構下，傾斜度大跑完路程所需花費的時間最短，在比較同一溫度時，傾斜度為 60°的微結構的運動速度比 30°以及 45°都還要快。且由三者數據所繪製出的折線圖都沒任何交點，可見三者的數據差異十分巨大，也可看出傾斜度大的微結構較不會受到溫度的影響。

(三)、不同傾斜程度的微結構對於水滴運動狀態的影響



圖 13(a)

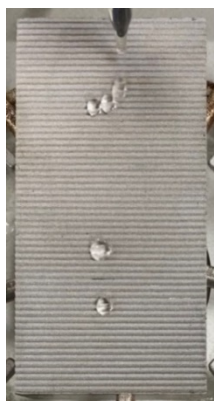


圖 13(b)



圖 13(c)

在同高度不同傾斜度下，傾斜度低的微結構，只有大的水滴能平順跑完路程，較小的水滴則會在幾個鋸齒間停滯徘徊，或者是在移動的過程中與其他小水滴結合

成較大的大水滴後才開始平順移動，如圖 13(a)、(b)、(c)小水滴結合過程。

四、探討水滴在相同溫度及傾斜角下，3 種不同高度之熱表面(結構 b、e、h)上運動行為差異

(一)、控制變因: 溫度、移動距離、路徑、水滴低落高度、水平狀態。

操作變因: 同傾斜度不同高度的微結構

(二)、微結構高度對於水滴運動時間的影響

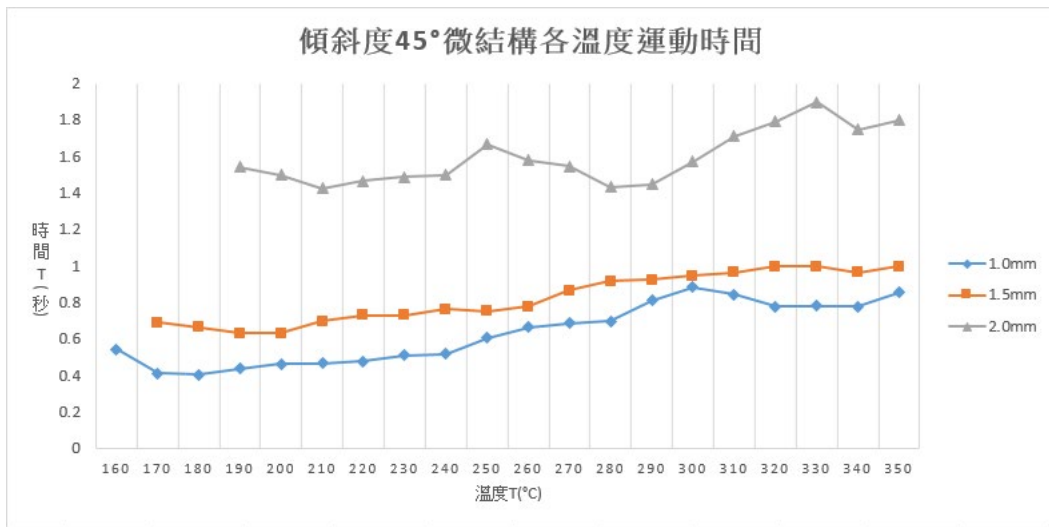


圖 14 水滴在傾斜度 45°、不同高度的各溫度運動時間

表 3 水滴在傾斜度 45°、不同高度的各溫度運動時間

結構種類	T(°C)	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250
結構(d) h = 1.0mm θ = 45°	t(s)	0.54	0.41	0.4	0.44	0.46	0.46	0.48	0.51	0.51	0.60
結構(e) h = 1.5mm θ = 45°		X	0.73	0.66	0.6	0.63	0.7	0.73	0.73	0.76	0.75
結構(f) h = 2.0mm θ = 45°		X	X	X	1.54	1.5	1.42	1.46	1.8	1.5	1.66
結構種類	T(°C)	260	270	280	290	300	310	320	330	340	350
結構(d) h = 1.0mm θ = 45°	t(s)	0.66	0.68	0.7	0.81	0.88	0.84	0.78	0.78	0.78	0.85
結構(e) h = 1.5mm θ = 45°		0.78	0.86	0.92	0.92	0.94	0.96	1	1	0.96	1

結構(f) h = 2.0mm θ = 45°		1.57	1.54	1.43	1.45	1.57	1.71	1.79	1.9	1.75	1.8
-------------------------------	--	------	------	------	------	------	------	------	-----	------	-----

在同角度不同高度的情況下，微結構的高度越低，水滴跑完路程所需花費的時間越短。由圖例可見，高度為 1.0 mm 與 1.5 mm 的微結構跑完路程所需花費時間差異並不大，且趨勢線幾近相同，相比高度為 1.5 mm 及 2.0 mm 的微結構相比，兩者花費的時間差距非常大，且運動狀態非常不穩定，跑完路程的時間忽大忽小，也是受鋸齒間的間距影響導致水滴的運動速度沒有如高度較小的微結構有規律的線性關係。

(三)、微結構高度對於水滴運動狀態的影響

在三種微結構都能讓水滴順利跑完全程的同一溫度下，高度為 1.0 mm 的微結構明顯比 1.5 mm 及 2.0 mm 的微結構還要更穩定，水滴的運動軌跡完全筆直，且運動過程中幾乎沒有受阻時的震盪或波動。而 2.0 mm 的微結構的水滴運動狀態相比之下則十分不穩定，運動軌跡左右偏移的機率高出許多，運動過程的晃動程度在與 1.0 mm 與 1.5 mm 的微結構相比下也十分劇烈，水滴整體的運動狀態緩慢且受較多變動影響，導致數據的偏差也較為其餘兩者大。

五、探討水滴的大小是否對運動速度有關

經多次實驗及觀察，我們發現到相同大小的水滴在各個微結構上跑動狀態不同，不是所有都能平順的跑完全程。像是在高度 1.5 mm 、傾斜度 30° 的微結構下，小的水滴會停滯在幾個間距間上停滯不前，只有較大的水滴能平順的跑完全程。而在高度 1.0 mm 、傾斜度 60° 的微結構下情況則相反，在普通大小的水滴會在接觸微結構瞬間產生小型爆炸

並分裂成多個較小的水滴，較大的水滴反而沒辦法在間距小、傾斜度大的微結構下做出往前推進的運動，只有小水滴能平順跑完全程。同的水滴大小有時也間接決定了水滴的運動速度，在我們的多次的實驗觀察中，間距大的微結構適合大水滴跑動，而水滴越大，運動速度也越快。而小水滴在間距小的微結構下，運動速度反而比較快，也看出了不同規格的微結構適合不同大小的水滴跑動。

陸、討論

一、微結構設計理念正確性

驗證水滴在具有微結構的熱表面狀態下，的確如我們所設想的情況做出相同的推進運動，也同時應證了在下方的蒸氣層不僅可以支撐住上方水滴，更可以做出帶動上方水滴前進的能力。而理想的實驗結果也代表著微結構設計理念的正確性，也為我們接下來的實驗設下更穩定的基礎以及更有可信度的實驗結果。

二、水滴在不同溫度的相同微結構上運動速度變化

在最初設想的情況下，水滴接觸熱表面產生的蒸氣層促使水滴前進，所以蒸氣層會直接動力，因此我們認為溫度越高，蒸氣層越厚，推動水滴的力也會隨之越大。在另一層面，微結構的斜面可視為推動水滴前進的動力，而微結構上每個細小三角形的高則會成為運動過程中的阻力。所以當蒸氣層越厚時，上方水滴就會被蒸氣層抬的越高，受到的阻力也會隨之變小，如圖 15(a)、(b)的變化關係。而當阻力變小時，速度也會相對提升。

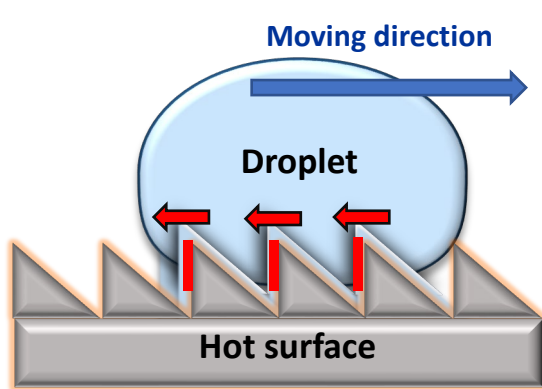


圖 15(a)水滴在較低溫微結構表面的阻力示意圖

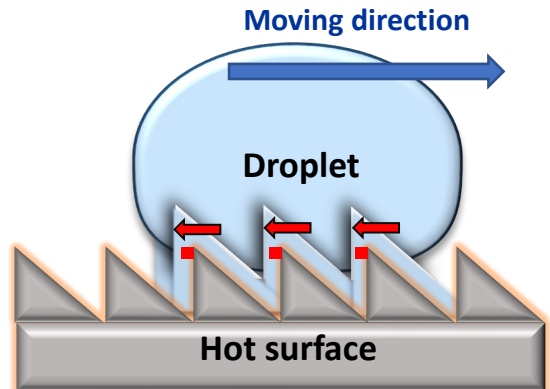


圖 15(b)水滴在較高溫微結構表面的阻力示意圖

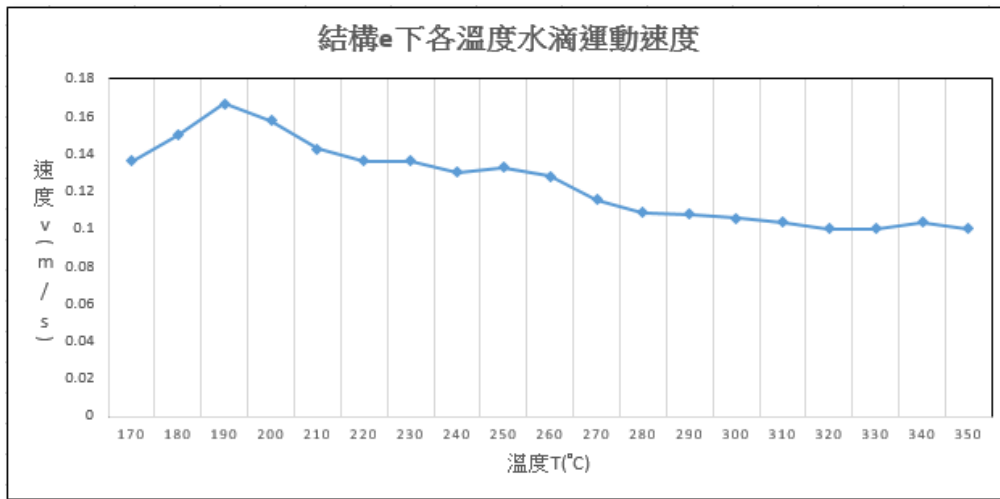


圖 16 水滴在結構 e 各溫度的運動速度

表 4 水滴在結構 e 各溫度跑完全程所需花費的時間 藍色格先升後降的趨勢

實驗結構(e) h = 1.5mm e = 45°	T(°C)	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250
	v(m/s)	X	0.13	0.15	0.66	0.57	0.42	0.13	0.13	0.13	0.13
	T(°C)	260	270	280	290	300	310	320	330	340	350
	v(m/s)	0.12	0.11	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

但經多次實驗及數據探討，我們發現實際情況與理想情況不吻合，於是我們重新思考和觀察整個現象的所有變因，考慮了理想狀況的各項變因，因而發現了一個被忽略，但實際影響卻十分巨大的變因，那就是蒸氣層對於微結構推力面的影響，蒸氣層會影響阻力面對於水滴運動的影響，同時也會影響推力面對於水滴運動的影響，溫度升高導致蒸氣層變厚的同時，蒸氣層將水滴抬高，減少水滴對於阻力面的有效接觸，進而減少推力面對於水滴的有效推力，所以當溫度升到一定程度時，推力面對於水滴有效接觸也會開始減少，少了推力面給予的有效接觸，水滴的運動速度也會自然而然地降低。

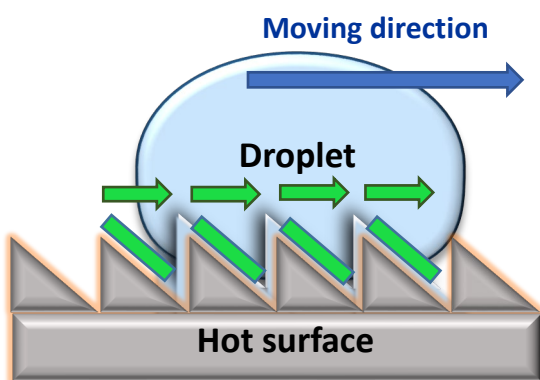


圖 17(a)水滴在較低溫微結構表面的推力示意圖

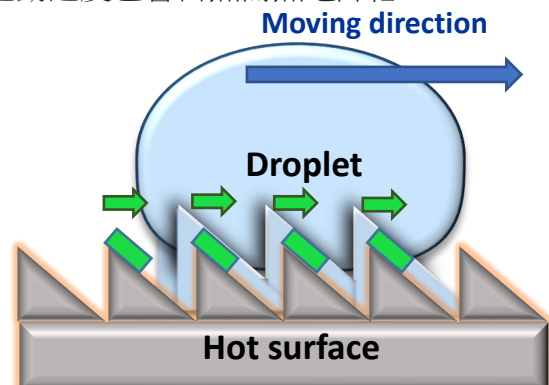


圖 17(b)水滴在較高溫微結構表面的推力示意圖

三、同高度、不同傾斜度對水滴運動狀態和速度的影響

微結構的傾斜程度決定了兩個鋸齒間間距，傾斜程度與兩個鋸齒間間距成反比，傾斜度 30° 是三種傾斜度微結構中，間距最大的，反之傾斜度 60° 則是三種傾斜度微結構中，間距最小的。

當水滴大小固定的情況下，微結構的間距決定了一個水滴所能佔據到的鋸齒數。而據我們所知，水滴在微結構上的運動狀態主要就是受推力面以及阻力面給予水滴的力影響，又因微結構構造的不同會使蒸氣層分布狀態受影響，主導水滴運動快慢的則是水滴與微結構間的有效接觸面，決定水滴與微結構間的有效接觸面則是蒸氣層厚度，所以當蒸氣層的厚度受到影響時，推力面以及阻力面對於水滴的作用力及有效接觸面都會因此受影響，如圖 18(a)、(b)、(c)。

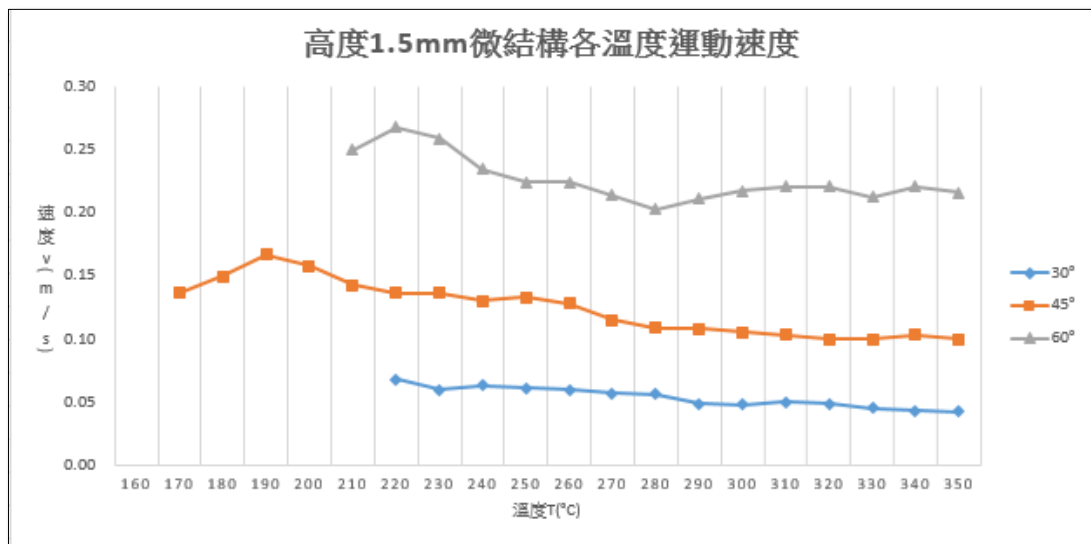
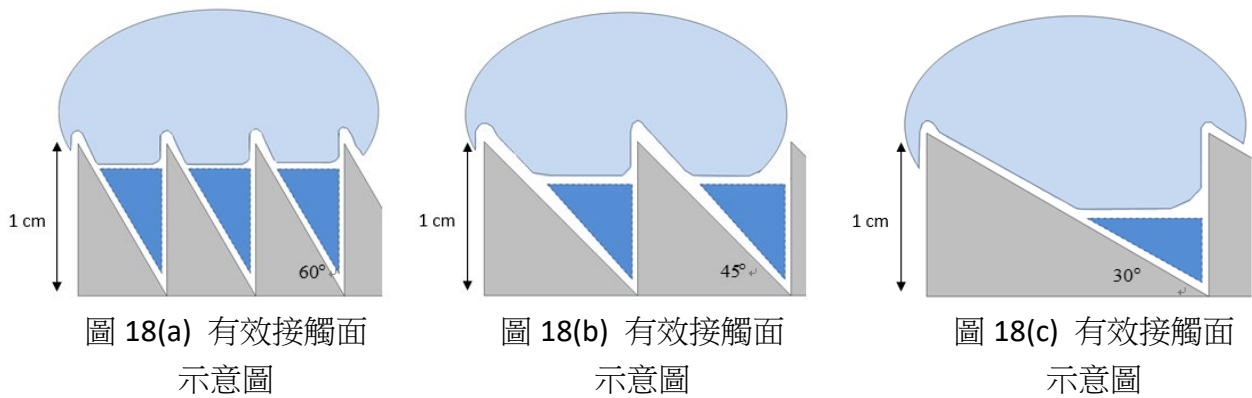


圖 19 水滴在高度 1.5mm、不同傾斜度的各溫度運動速度

表 5 水滴在高度 1.5mm、不同傾斜度的各溫度運動速度

結構種類	T(°C)	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250
結構(d) h = 1.5mm e = 30°	v(m/s)	X	X	X	X	X	X	0.07	0.06	0.06	0.06
結構(e) h = 1.5mm e = 45°		X	0.14	0.15	0.17	0.16	0.14	0.14	0.14	0.13	0.13
結構(f) h = 1.5mm e = 60°		X	X	X	X	X	0.25	0.27	0.26	0.23	0.22
結構種類	T(°C)	260	270	280	290	300	310	320	330	340	350
結構(d) h = 1.5mm e = 30°	v(m/s)	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04
結構(e) h = 1.5mm e = 45°		0.13	0.12	0.11	0.11	0.11	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
結構(f) h = 1.5mm e = 60°		0.22	0.21	0.20	0.21	0.22	0.22	0.22	0.21	0.22	0.22

水滴能夠在微結構上做出向前推進的運動是建立在蒸氣層能夠支撐水滴，且蒸氣層中，需要微結構傾斜面給予水滴的向前推力大高度面給予的反向阻力，而使推力及阻力合力關係發生變化的主導權則在蒸氣層的厚度及分布狀態，蒸氣層的厚度溫度來控制，不同的微結構造成相異蒸氣層分布時，觸發水滴開始運動的兩個主要條件即是微結構的樣式及微結構的表面溫度。

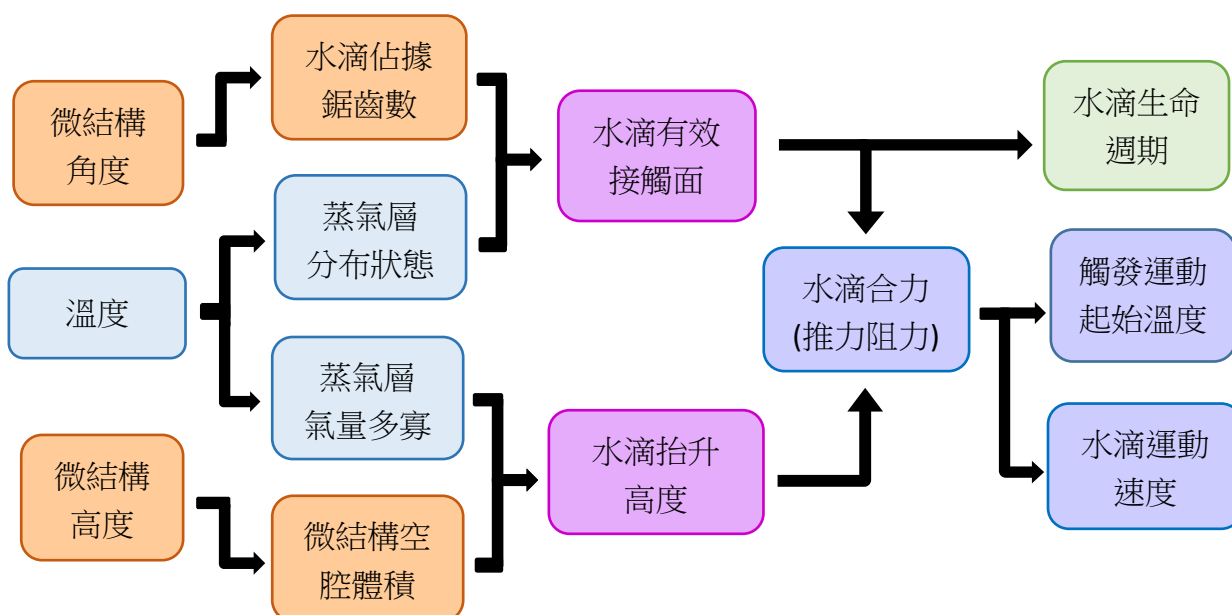


圖 20 現象推理結構圖

四、同傾斜度、不同高度的微結構對水滴運動狀態和速度的影響

微結構在傾斜度 θ 相同的情況下，微結構的高度 h 與鋸齒間距成正比，所以單看微結構給予水滴的力時，傾斜面與高度面給予推力的阻力成一定比例。因此在傾斜度相同，但高度相異的情況下，主導水滴運動快慢的是水滴大小以及蒸氣層與微結構間的分布狀態。

在高度與間距都較小的微結構，正常大小的水滴觸發推進運動的起始溫度較低且運動速度也較快，起始溫度較低的原因是因為蒸氣層在初始成形時，厚度雖不大，但卻足以越過高度較小的微結構，因為阻力小所以較薄的蒸氣層就可以讓水滴開始作出推進的運動。相反的，在高度較高的微結構，水滴向前推進的觸發條件則是利用更厚的蒸氣層來使水滴抬高，也就是影響水滴推力面與阻力面之合力來觸發水滴做出推進運動，如圖 21(a)、(b)、(c)，而讓蒸氣層增厚的方法則是讓表面溫度升高，所以在高度較高的微結構要觸發推進運動的起始溫度才會較高。

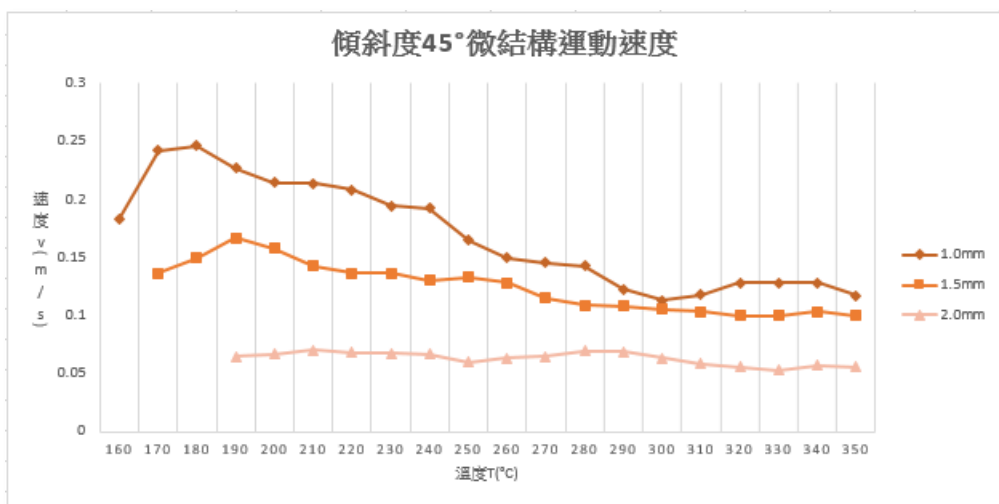
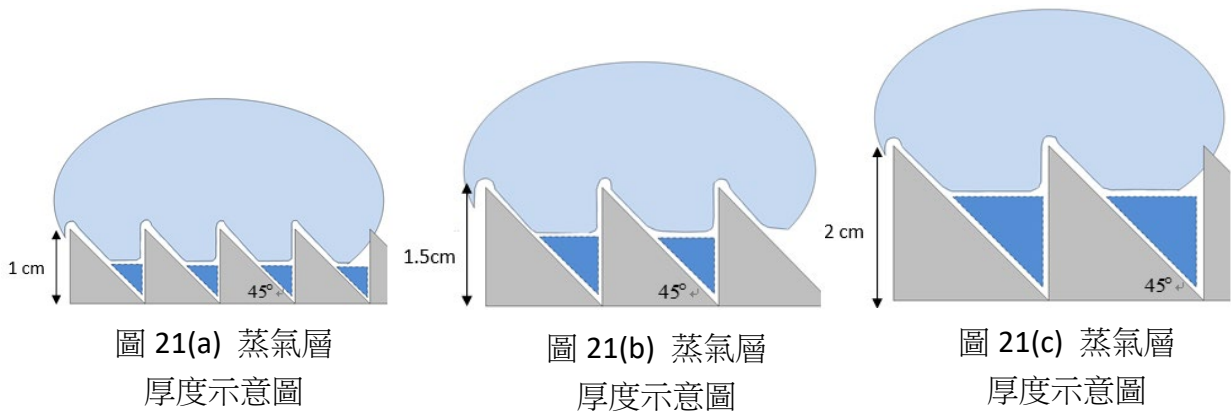


圖 22 水滴在傾斜度 45° 、不同高度的各溫度運動速度

表 6 水滴在傾斜度 45°、不同高度的各溫度運動速度 膚色格速度變化最平緩

結構種類	T(°C)	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250
結構(d) h = 1.0mm e = 45°	v(m/s)	0.18	0.24	0.25	0.23	0.21	0.21	0.21	0.19	0.19	0.16
結構(e) h = 1.5mm e = 45°		X	0.14	0.15	0.17	0.16	0.14	0.14	0.14	0.13	0.13
結構(f) h = 2.0mm e = 45°		X	X	X	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06
結構種類	T(°C)	260	270	280	290	300	310	320	330	340	350
結構(d) h = 1.0mm e = 45°	v(m/s)	0.15	0.15	0.14	0.12	0.11	0.12	0.13	0.13	0.13	0.12
結構(e) h = 1.5mm e = 45°		0.13	0.12	0.11	0.11	0.11	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
結構(f) h = 2.0mm e = 45°		0.06	0.06	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06	0.05	0.06	0.06

圖 23 顯而易見的資訊則是三者速度的差異，可看出高度 2.0mm 的微結構與其他兩個高度 1.0 mm 以及 1.5 mm 的微結構相比，水滴跑完路程所需花費的時間明顯差異很大，因為在傾斜度相同但高度較高的微結構下，鋸齒彼此的間距也會和高度成正比，前者說明推力面與高度面給予的力成比例縮放，所以間距變大時，水滴能開始推進的最小尺寸理論上也需成比例放大，才有辦法使蒸氣層體積成比例放大，放大後的傾斜面推力與高度面阻力才能達成讓水滴推進的最低比例。所以高度為 2.0 mm 的趨勢線，因水滴大小不成定值才會使趨勢線沒有正常的幅度擺動及前後數據差異過大。

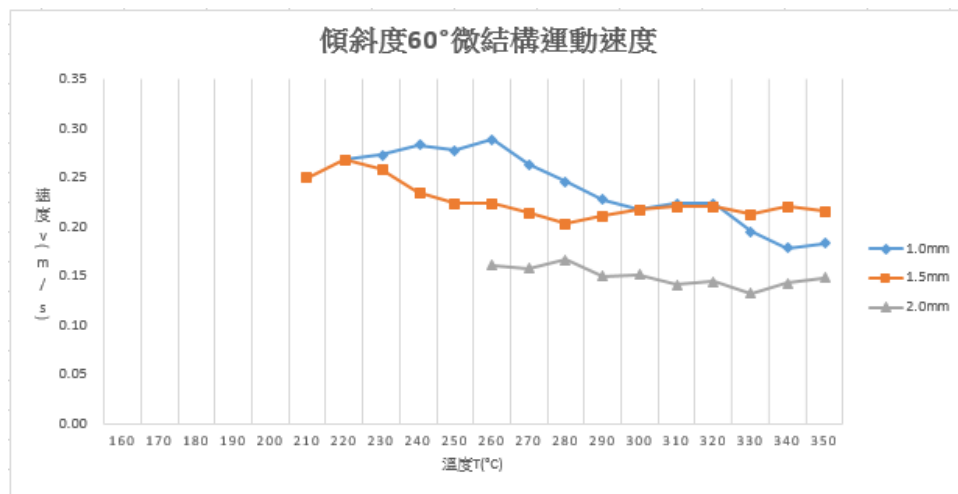


圖 23 水滴在傾斜度 60°、不同高度的各溫度運動速度

表 7 水滴在傾斜度 60°、不同高度的各溫度運動速度 藍色格速度變化最大

結構種類	T(°C)	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250
結構(d) h = 1.0mm e = 60°	v(m/s)	0.18	0.24	0.25	0.23	0.21	0.21	0.21	0.19	0.19	0.16
結構(e) h = 1.5mm e = 60°		X	0.14	0.15	0.17	0.16	0.14	0.14	0.14	0.13	0.13
結構(f) h = 2.0mm e = 60°		X	X	X	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06
結構種類	T(°C)	260	270	280	290	300	310	320	330	340	350
結構(d) h = 1.0mm e = 60°	v(m/s)	0.15	0.15	0.14	0.12	0.11	0.12	0.13	0.13	0.13	0.12
結構(e) h = 1.5mm e = 60°		0.13	0.12	0.11	0.11	0.11	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
結構(f) h = 2.0mm e = 60°		0.06	0.06	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06	0.05	0.06	0.06

圖 23 中三項數據的斜率差異看似不重要卻間接證明了上述推論的合理性，上述說微結構的比例縮放時，所需的水蒸氣體積也需成比例縮放，在較小比例的微結構，起始溫度較低是因為蒸氣量不需要過多即可推動水滴前進，但如果硬是將溫度抬高到蒸氣量過多的情況，那水滴的運動狀態必定也隨之改變，如圖 24(a)、(b)。在蒸氣層厚度超越微結構高度面後，水滴不再受阻力面影響，那同樣受蒸氣層厚度所控制的傾斜面推力勢必也會受影響，蒸氣量過多導致傾斜面與水滴的有效接觸隨蒸氣層增厚而減少，運動速度也會變小，如圖 21。



圖 24(a) 低溫蒸氣量
多寡示意圖

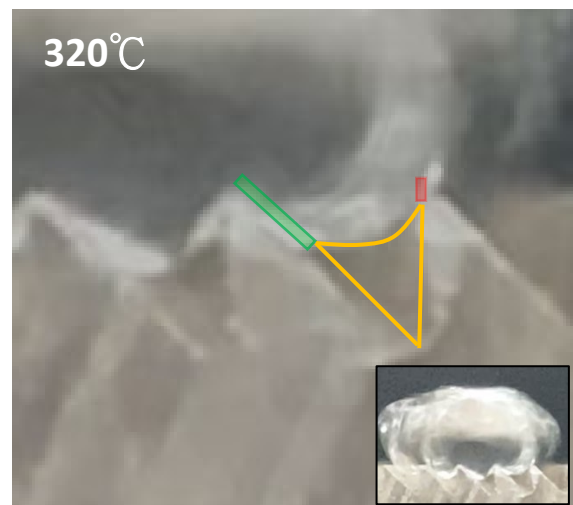


圖 24(b) 高溫蒸氣量
多寡示意圖

同溫下，表面能給予水滴的蒸氣量相同，蒸氣量填補進不同微結構間的溝槽，填補的比例也會有差異，在比例大的微結構，相同蒸氣量能填補的空隙相對較少，溫度升高時，對於速度的影響也會較小，反之比例小的微結構速度變化會較明顯，兩者比較會使比例大的微結構速度變化曲線相對平緩。

五、在特定微結構上時，不同水滴大小對水滴運動狀態及速度的影響

微結構在傾斜度 θ 相同、高度不同的情況下，高度越高時，觸發水滴開始前進的起始溫度也會增高，因為水滴在相同溫度所產生的蒸氣量是相同的，水滴抬升的幅度相同，此時也代表著阻力越大。因此在較低溫時，推力面對於蒸氣層的力還不足以使水滴在高度較高、阻力也較大的微結構上推進。

但當水滴加大兩到三倍時，大水滴卻可以在低於正常大小水滴的起始溫度下進行推進運動，原因是大水滴的蒸氣覆蓋體積較正常水滴多，體積大代表有更多微結構的傾斜面能給予水滴前進的推力，兩者受到的阻力大小也相同，大水滴在比例較大的微結構時，向前推進的速度才會比較快，所以相比之下在傾斜度 θ 相同，但微結構高度面較高的情況下。大水滴的運動狀態較正常水滴穩定，推進速度也較快。

而在比例較小的微結構時，適合的水滴大小及正常水滴在接觸此微結構時的運動狀態也會產生差異，如鋸齒間距 1.0 mm、傾斜度 60° 的微結構下，正常水滴在接觸到微結構表面時，會產生小型爆炸，當水滴分裂到適合在此微結構上進行運動的大小時，水滴才會開始前進。原因是在傾斜度高、比例又小的微結構上，正常大小的水滴會因同時接觸到過多微結構尖端，在落下的同時瞬間產生大樣水蒸氣，又因表面為較尖銳的鋸齒，接觸的瞬間受熱程度極不平均，導致水滴在接觸此熱表面時瞬間產生爆炸，並分裂至能夠正常進行推進運動的水滴大小為止。

經過多次的實驗及觀察，我們得出的結論為任何微結構都會篩選適合自身大小的水滴，比例較極端的微結構所適合的水滴大小也較為特殊，也和上述論點一致，若要讓水滴在微結構上進行推進運動，就需要相應大小的水滴和前文提到的觸發水滴開始做出推進運動的最低溫度。

六、理論數學模型

我們設想影響水滴推力速度的因素為微結構傾斜面給予水滴的正向推力($F_{forward}$)、高度面給予水滴的反向阻力($F_{reverse}$)、水滴與微結構間的摩擦力($F_{friction}$)及水蒸氣的黏滯力($F_{viscous}$)，傾斜面給予的正向推力要扣除掉其他三項反向推力，才會是水滴最終的運動合力(F)，如式 1-1。

表 8 數學理論模型代號一覽表

正向推力	反向阻力	摩擦力	黏滯力	單齒合力
$F_{forward}$	$F_{reverse}$	$F_{friction}$	$F_{viscous}$	F
蒸氣推力	溫度氣壓	黏滯係數	水滴速率	單位齒距
F_{steam}	$\Delta P_{(T)}$	η	v	A
蒸氣厚度	斜面接觸	垂直接觸	單齒距力	摩擦係數
e	A_L	A_R	F	μ_s
佔據齒數	水滴直徑	單一齒距	起始溫度	當下溫度
N	D	d	$T_{started}$	T
整體合力	投影體積	壓力差	有效推力	有效阻力
F_{total}	A_{total}	ΔP	R_{eff}	F_{eff}

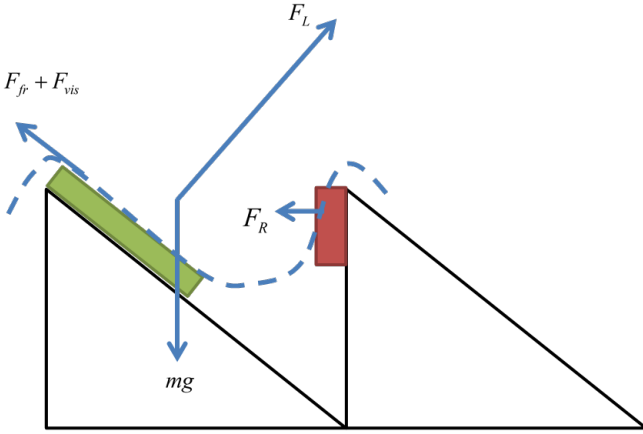


圖 25 單一間距力學分析示意圖

$$\begin{aligned}
 F &= F_{forward} - F_{reverse} - F_{friction} - F_{viscous} \\
 &= F_L \times \sin \theta - F_R - F_{fr} - F_{viscous}
 \end{aligned} \tag{1-1}$$

蒸氣水滴造成的氣體推力(F_{steam})等於壓力差與接觸體積的乘積，流體黏滯造成的阻力、溫度變化造成的蒸氣壓($\Delta P_{(T)}$)、正比於黏滯係數(η)、水滴速率(v)與單位齒距水滴投影體積(A)，反比於蒸氣層厚度(e)，如式 1-2。

$$\begin{cases}
 F_{steam} = \Delta P_{(T)} \times A_{eff} \\
 F_{viscous} = -\eta \frac{v}{e} A
 \end{cases} \tag{1-2}$$

令斜面的接觸體積為 A_L ，垂直面接觸體積為 A_R ，單位齒距內可提供的力(F)如式 1-3。

$$\begin{aligned}
 F &= \Delta P_{(T)} \times A_L \times \sin \theta - \Delta P \times A_R - mg/N \times \mu_s - \eta \frac{v}{e} A \\
 &= \Delta P_{(T)} (A_L \times \sin \theta - A_R) - \eta \frac{v}{e} A
 \end{aligned} \tag{1-3}$$

水滴大小所佔據的微結構距齒數(N)為水滴直徑大小 D 與單一微結構齒距 d 之比值：

$$N = D / d$$

根據圖 4，單一微結構的齒距 d 大小與微結構高度 h 、微結構角度 θ 的關係為：

$$d = h / \tan \theta$$

所以水滴整體所受到的合力(F_{total})大小與單位與微結構距齒數(N)的關係如下。且單位齒距水滴總接觸體積(A)與微結構距齒數(N)的乘積為總投影體積 A_{total} 。

$$\begin{aligned}
 F_{total} &= N \times \left[\Delta P_{(T)}(A_L \times \sin \theta - A_R) - \eta \frac{v}{e} A \right] \\
 &= \frac{D \times \tan \theta}{h} \Delta P_{(T)}(A_L \times \sin \theta - A_R) - \eta \frac{v}{e} A_{total}
 \end{aligned}
 \tag{1-4}$$

因水滴與微結構表面的有效接觸會隨蒸氣層的變厚有所改變，所以我們利用以下公式來預測水滴在蒸氣層厚度增減時，水滴運動速度的變化。

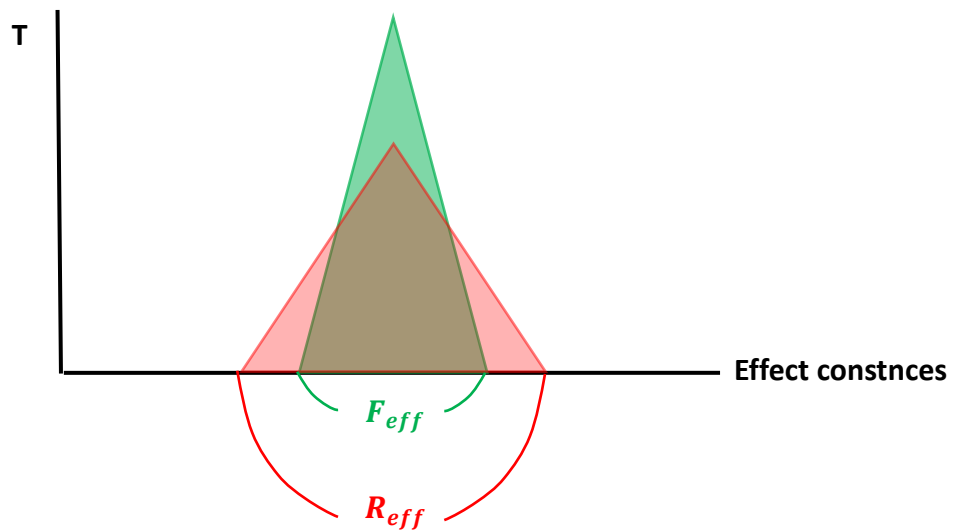


圖 26 水滴隨溫度升高與微結構有效接觸面之數學模型

經過以上公式整合，得出以下結論公式，主要說明水滴在整個運動過程中，所有不同情況下的速度變化。

ΔP = 壓力差、 F_{eff} = 水滴蒸氣造成的有效推力、 R_{eff} = 水滴蒸氣造成的有效阻力、 $T_{started}$ = 此微結構要使水滴開始做出推 進運動的最低溫度、 T = 當下溫度

$$F = F_{eff}(T_{static} - T) - 1/2 R_{eff}[(T_{static} - T) + |T_{static} - T|]
 \tag{1-5}$$

七、終端速度與運動模型關係

我們從高度 1.5mm 微結構深入驗證，當溫度超過 300°C 時，水滴會處在” 典型萊頓佛斯特效應” ，運動速度維持幾乎定值，由力學原理上可知水滴在烙下瞬間基本以達到終端速度，運動過程中所受到的合力為零，才造成速度維持固定。而此時阻力相較於水滴黏滯力，小到幾乎可視為零。故根據推論出來的運動模型(1-4 式)中

$$\begin{aligned}
 F_{total} &= N \times \left[\Delta P_{(T)}(A_L \times \sin \theta - A_R) - \eta \frac{v}{e} A \right] \\
 &= \frac{D \times \tan \theta}{h} \Delta P_{(T)}(A_L \times \sin \theta - A_R) - \eta \frac{v}{e} A_{total}
 \end{aligned}
 \tag{1-4}$$

高溫 → 垂直介面阻力太小 → $A_R = 0$

高溫 → 水滴速度維持等速 → 合力 $F_{total} = 0$

由(1-4 式)中可以推論 $\sin \theta \times \tan \theta$ 正比於 水滴速度 v

(1) $\theta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 代入(1-4 式) 後，在此三個角度下理論水滴速度比為

$$\begin{aligned}
 V_{30} : V_{45} : V_{60} &= \sin 30 \times \tan 30 : \sin 45 \times \tan 45 : \sin 60 \times \tan 60 \\
 &= 1 : \sqrt{6} : 3\sqrt{3} = 1 : 2.4 : 5.2
 \end{aligned}$$

(2)由圖 19 中我們將 290°C 以上的水滴速度值取平均實驗值為：

$$V_{30} : V_{45} : V_{60} = 0.04 : 0.10 : 0.22 = 1 : 2.5 : 5.5$$

由上述的高溫下的水滴速度實驗值比例與運動模型中的理論值比例幾乎相同，故可以驗證研究中的運動理論模型是符合並可以解釋真實的運動行為。

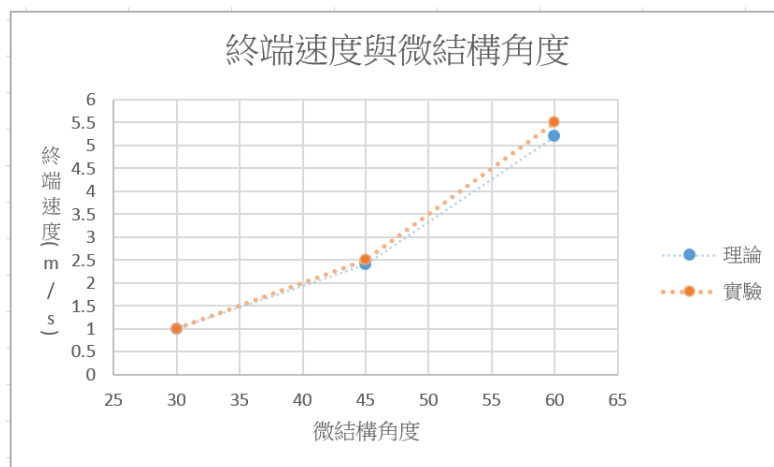


圖 27 水滴終端速度與微結構角度關係圖

八、水滴生命週期

高溫表面使水滴產生出蒸氣層並隔絕水滴與熱表面的接觸，進而延長水滴停留在熱表面上的時間，而水滴在熱表面上的停留時間就是此水滴的生命週期，利用實驗測出九種微結構在不同溫度時的生命週期。而我們也發現到“非典型萊頓佛斯特效應”，也就是水滴在較低溫時，雖可產生出蒸氣讓水滴暫時停留，但時間卻十分短暫，與典型萊頓佛頓佛斯特效應不符，也就是此時的蒸氣層此時還不足以支撐水滴在高溫表面上生存，經實驗結果我們也將生命週期二十秒以下的結果稱“非典型萊頓佛斯特效應”。

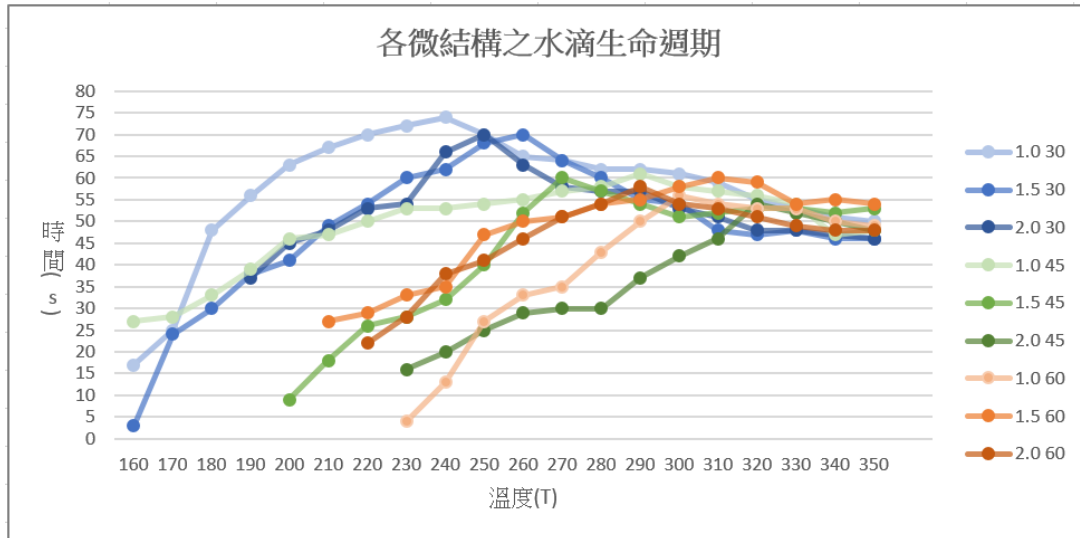


圖 28 水滴在各微結構、各溫度下的生命週期

表 9 水滴在各微結構、各溫度下的生命週期 橘色格為萊頓佛斯特點

結構種類	T(°C)	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250
結構(a) h = 1.0mm θ = 30°	t(s)	17	25	48	56	63	67	70	72	74	70
結構(b) h = 1.5mm θ = 30°		3	24	30	38	41	49	54	60	62	68
結構(c) h = 2.0mm θ = 30°		X	X	X	37	45	48	53	54	66	70
結構(d) h = 1.0mm θ = 45°		27	28	33	39	46	47	50	53	53	54
結構(e) h = 1.5mm θ = 45°		X	X	X	X	9	18	26	28	32	40

結構(f) h = 2.0mm $\theta = 45^\circ$		X	X	X	X	X	X	X	16	20	25
結構(g) h = 1.0mm $\theta = 60^\circ$		X	X	X	X	X	X	X	4	13	27
結構(h) h = 1.5mm $\theta = 60^\circ$		X	X	X	X	X	27	29	33	35	47
結構(i) h = 2.0mm $\theta = 60^\circ$		X	X	X	X	X	X	22	28	38	41
	T(°C)	260	270	280	290	300	310	320	330	340	350
結構(a) h = 1.0mm $\theta = 30^\circ$	t(s)	65	64	62	62	61	59	55	53	51	50
結構(b) h = 1.5mm $\theta = 30^\circ$		70	64	60	55	54	48	47	48	46	46
結構(c) h = 2.0mm $\theta = 30^\circ$		63	58	57	57	53	51	48	48	47	46
結構(d) h = 1.0mm $\theta = 45^\circ$		55	57	58	61	58	57	56	54	47	48
結構(e) h = 1.5mm $\theta = 45^\circ$		52	60	57	54	51	52	53	53	52	53
結構(f) h = 2.0mm $\theta = 45^\circ$		29	30	30	37	42	46	54	52	50	48
結構(g) h = 1.0mm $\theta = 60^\circ$		33	35	43	50	56	54	53	53	50	49
結構(h) h = 1.5mm $\theta = 60^\circ$		50	51	54	55	58	60	59	54	55	54
結構(i) h = 2.0mm $\theta = 60^\circ$		46	51	54	58	54	53	51	49	48	48

經多次實驗及觀察，我們發現水滴生命週期的變化都存在一規律性，也就是會先有上升的趨勢，之後再慢慢下降，造成此現象的原因與上述所說造成水滴運動速度變化的接觸面問題，隔絕水滴所需的蒸氣量會與接觸面消耗水滴的蒸氣量達到一個平衡，在低溫時蒸氣量無法將水滴抬非常高，接觸面也較大，蒸發量高導致生命週期短，而到較高溫時則因此時蒸氣量已大於水滴生存所需，也就是把溫度繼續抬高只會導致水滴在接觸熱表面的瞬間產生過量蒸氣層，使蒸發量越過平衡值，導致生命週期變短，也就是當熱表面

過 310°C 時，水滴瞬間產生的過量蒸氣層足以抬升水滴使其感受不到微結構差異。且最後所有微結構在高溫的情況下會接近平緩且一致，也就是水低在接觸到一定高溫時，此時蒸氣層已可將水滴抬至一定高度，使接觸面兩水滴接觸及小，只有水滴本身轉換成蒸氣層的消耗，而此項變因在不同微結構上都會是類似的結果，所以在高溫段才会有生命週期接近一致的情況。

九、水滴形變頻率及熱流變化

水滴在微結構上的運動變化非常微小且速度非常快，微小的變化非肉眼所能察覺，於是想真正證實我們提出的理論就必須利用到更高階的設備，也就是“高速攝影”，能拍出高幀數的慢動作影片，高階手機最高只能拍出 240 幀的慢動作，但這對於實驗的細微觀察及真正細節是遠遠不夠的，幀數不足導致細微變化沒辦法體現，也因焦距不夠造成放大後會變模糊，我們曾加裝凸透鏡來加強放大效果，但也因多層凸透鏡導致景深不夠，無法實際拍出我們想要的效果，於是我們自行查找，並租借了一台 960 幀的“慢動作相機”，能拍出較清晰的形變過程及細微的熱流變化。

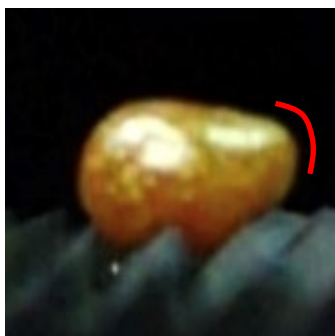


圖 29(a)水滴運動形變圖

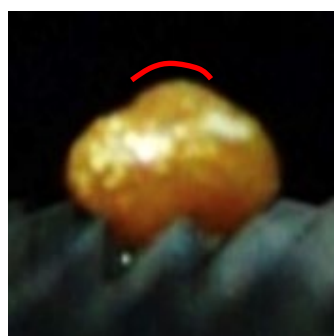


圖 29(b)水滴運動形變圖

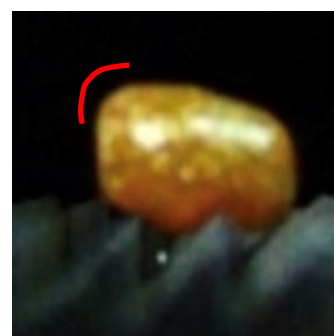


圖 29(c)水滴運動形變圖

經過慢動作相機拍攝水滴的運動過程，我們發現水滴在微結構上前進會產生特殊的形變，使其運動狀態看似為滾動，於是我們便研究此運動產生的形變是否存在規律，也對此形變的生成原因產生疑問，並利用慢動作相機放慢 40 倍，再匯入 tracker 放慢 30 倍，共放慢 1200 倍來觀察水滴運動的形變及規律。

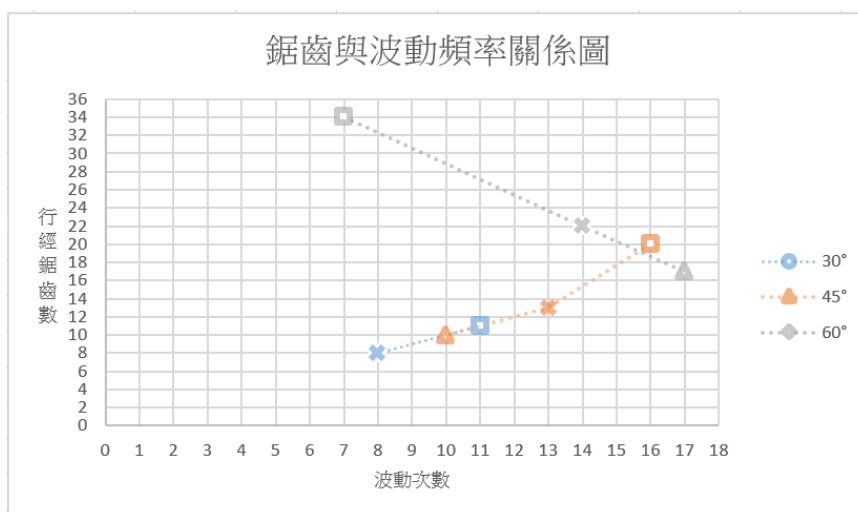




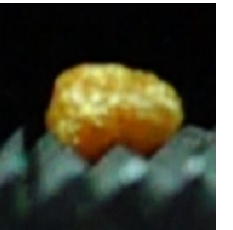







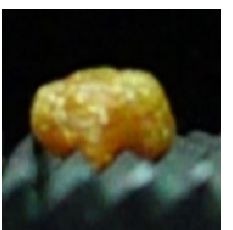




圖 30 水滴行經鋸齒數與波動次數關係圖

透過實驗數據我們可以發現，水滴在大部分的微結構上，經過的鋸齒數與其產生的形變波紋比值為 1:1，由此我們推測造成水滴形變其實是微結構本身造成，水滴的尾端在離開最後一格間距時，微結構最後給予水滴的推力結合水滴本身的凝聚力，會使水滴在末端產生波，而在間距較大的微結構上，每離開一個間距，水滴便會產生一個波紋，所以水滴產生的每個波紋中，才會使水滴有著類似滾動的運動狀態發生，但觀察間距小的 60°時，由於間距太密集，水滴行經後不會產生相等的波紋，因速度太快導致水滴在經過時無發生明顯的形變，但觀測回速度時，我們又可以發現 60°的速度是最快的，也就是速度和波紋是沒有實際關聯的，也推斷出水滴運動並不是靠滾動，也就是波紋造成的只是單純形變，與動力來源並無關聯。

表 10 水滴在微結構熱表面運動之慢動作攝影

0.000 s	0.002 s	0.004 s	0.006 s	0.008 s
				
0.010 s	0.012 s	0.014 s	0.016 s	0.018 s
				
0.020 s	0.022 s	0.024 s	0.026 s	0.028 s
				

為了更深入探討水滴動力來源，我們便加入其他物質融合於水滴中，希望能藉由她的流動方向來判斷水滴中間的熱流變化，而珠光粉效果最為顯著，於是我們便藉由珠光粉在水滴中的變化來觀察水滴內部的熱流。

放慢 1200 倍後我們觀察到水滴中央與鋸齒尖端接觸的部分會產生熱流，使珠光粉匯集進而有深色帶，且方向和變化過程經多組數據比對，也確定此熱流變化為一規律，並藉此觀察推論出水滴動力是與微結構接觸產生一小型熱流，並由多個小熱流結合成整體熱

流循環，並有著順時鐘方向的旋轉，結合上述水滴外部運動狀態，得出水滴的外部形變系統與內部熱流系統是兩個獨立系統，彼此間無直接影響關聯，也畫出水滴運動的兩主要系統利用示意圖說明。

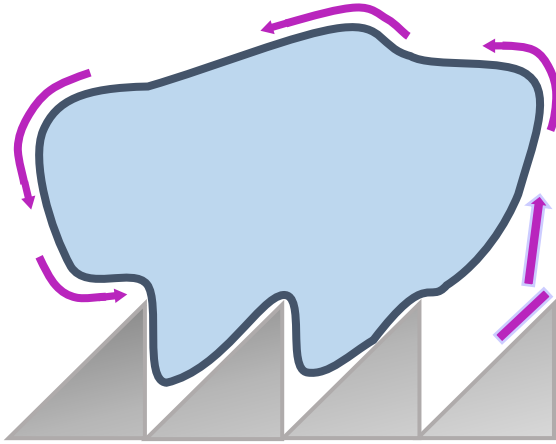


圖 31 水滴外部形變系統示意圖

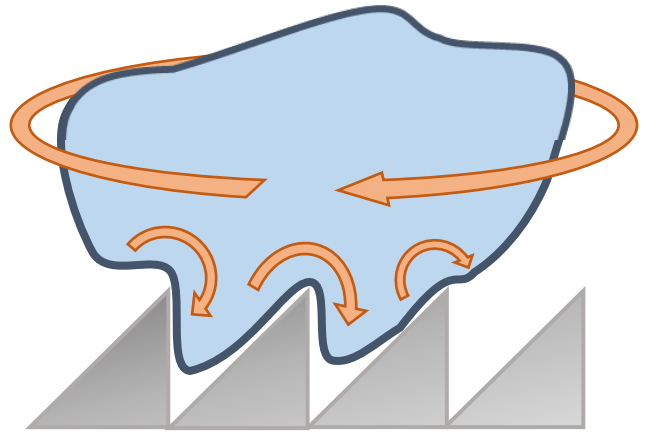


圖 32 水滴內部熱流系統示意圖

柒、結論

- 一、水滴在有”leidenfrost effect”後，會順著微結構推力面移動，並在一特定溫度點以下運動速度會加快，以上則減慢。
- 二、在微結構傾斜度 30°、45°、60°，水滴運動速度為慢、中、快，觸發水滴開始運動的起始溫度點則為中、低、高。
- 三、在微結構傾斜度相同的狀況下，高度越高，水滴開始動的起始溫度也需成比例增高。微結構比例越小，運動速度變化較顯著，反之，比例越大速度變化也越不明顯。
- 四、微結構高度 1.5mm，30°、45°、60°的水滴「終端速度」經實驗值與理論值比對後幾乎吻合。我們便提出獨創的”leidenfrost effect”與微結構的運動理論模型，成功解釋此實驗的運動機制。

$$\begin{aligned}
 F_{total} &= N \times \left[\Delta P_{(T)}(A_L \times \sin \theta - A_R) - \eta \frac{v}{e} A \right] \\
 &= \frac{D \times \tan \theta}{h} \Delta P_{(T)}(A_L \times \sin \theta - A_R) - \eta \frac{v}{e} A_{total}
 \end{aligned}$$

五、在高溫段的水滴速度實驗值比例與運動模型中的理論值($\sin\theta \times \tan\theta$)比例幾乎相同

$$\text{理論值} : \text{實驗值} = (1 : 2.4 : 5.2) : (1 : 2.5 : 5.5)$$

可以驗證研究出的運動理論模型符合並可以解釋真實的運動行為

六、結合低溫區與高溫區的運動狀態，提出數學公式:

$$F = F_{eff}(T_{static} - T) - 1/2 R_{eff}[(T_{static} - T) + |T_{static} - T|]$$

來預測水滴在不同溫度下的推力大小。

七、水滴在各為結構的生命週期都會有先上升後下降的趨勢，而在過某一溫度點後，縮有命週期會接近一致。

八、水滴在微結構上運動會使水滴末端產生波，使其運動狀態看似為滾動，但實際狀況仍為上述所說的推動原理造成。

九、水滴會在接觸的每個微結構尖端產生一小型熱流，並結合成整體的順時鐘熱流循環，而此造成動力的熱流循環與水滴的外部形變無關連。

捌、參考資料及其他

1. Heng Xie,Zhiwei Zhou (2007) A model for droplet evaporation near Leidenfrost point International Journal of Heat and Mass Transfer 50 5328–5333
2. Lieshuang Zhong,Zhiguang Guo (2013) The Effect of Surface Topography and Wettability on Leidenfrost Effect The Royal Society of Chemistry J. Name., 2013, 00, 1-3
3. H. Linke,B. J. Alemán,L. D. Melling',M. J. Taormina,M. J. Francis,C. C. Dow-Hygelund, V. Narayanan,R. P. Taylor,A. Stout (2006) Self-Propelled Leidenfrost Droplets The American Physical Society PRL 96, 154502
4. Vishal TALARI,Prakhar BEHAR,Yi LU,Evan HARYADI,Dong LIU (2018) Leidenfrost drops on micro/nanostructured surfaces Higher Education Press and Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2018

【評語】 051802

本作品探討水滴在超熱具微結構表面上的運動，實驗設計數種表面微結構，進行在數種表面溫度下，探討水滴運動行為。類似實驗在有探討如 2012 台灣國際科展及 ISEF 團隊已有理論及實驗討論。本作品增加表面微結構型態及溫度，有詳實的實驗觀察及記錄，內容豐富，但數據解讀聚焦在力的分析，比較聚焦在現象的討論，可再探索物理機制，探究水滴對稱破壞所引起的運動，以顯現新穎物理現象。

作品簡報

微結構下的魔術師——

萊頓佛斯特的溫度效應

**The study of Leidenfrost effect on micro structure surface
by using frequent water droplet.**

高級中等學校組
物理與天文學科

介紹

相異溫度

- 不同溫度(160°C-350°C)
- 水滴運動速度影響

相異規格

- 不同高度、角度微結構
- 水滴運動速度影響

理論模型

建立水滴運動理論模型

生命週期

- 不同規格、溫度
- 水滴生命週期變化

形變熱流

- 慢動作攝影
- 水滴形變及內部熱流

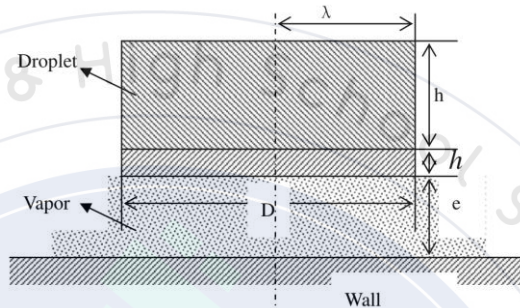


Fig. 1. Schematic of droplet and vapor model.

Moreover, the drop weight induces a radial Poiseuille flow of vapor outside the layer. The lubrication approximation is used due to the small thickness of vapor film. Thus, the flow rate has a scale of $e^3 \Delta P / \eta \lambda$, where ΔP is the pressure imposed by the drop and η the vapor viscosity. The pressure is from the drop weight, so that $\Delta P = \rho_l g h$. By integrating the pressure over the contact area in term of the mass change, it gives

$$\frac{dm}{dt} = -\rho_v \frac{2\pi \rho_l^3}{3\eta} \rho_l g h,$$

Fig.1 Leidenfrost 蒸氣動力公式^[1]

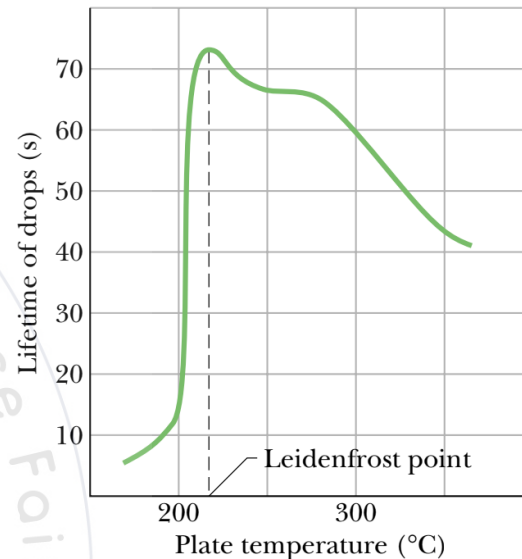


Fig.2 平面上水滴生命週期^[2]

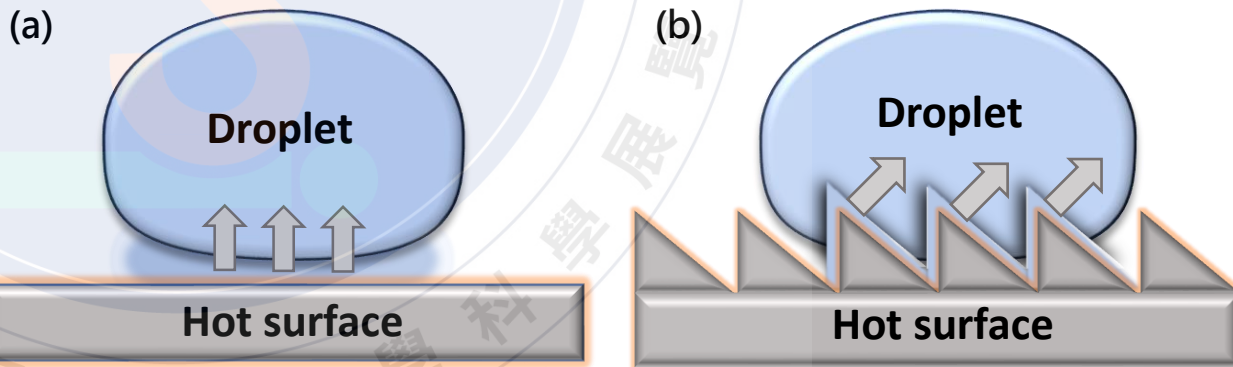


Fig.3 微結構設計發想

研究設備與器材

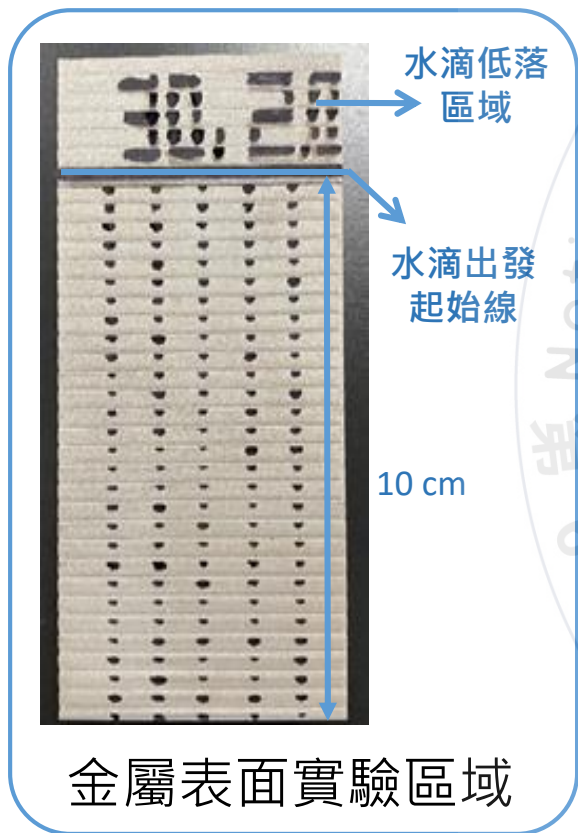


Fig.4(a) 金屬表面俯視圖

高度、角度為設計變項，決定微結構規格。

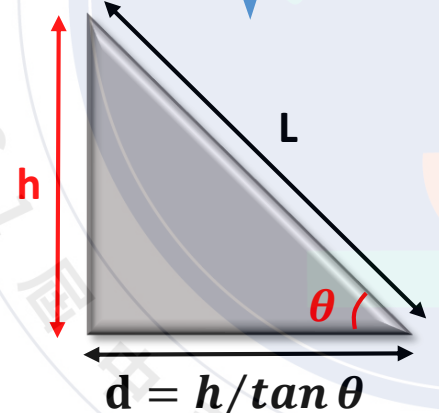
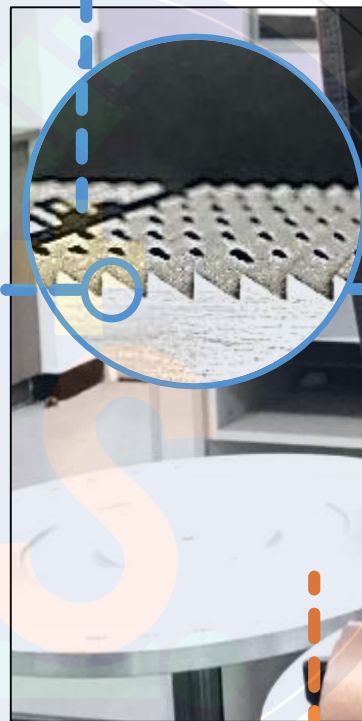


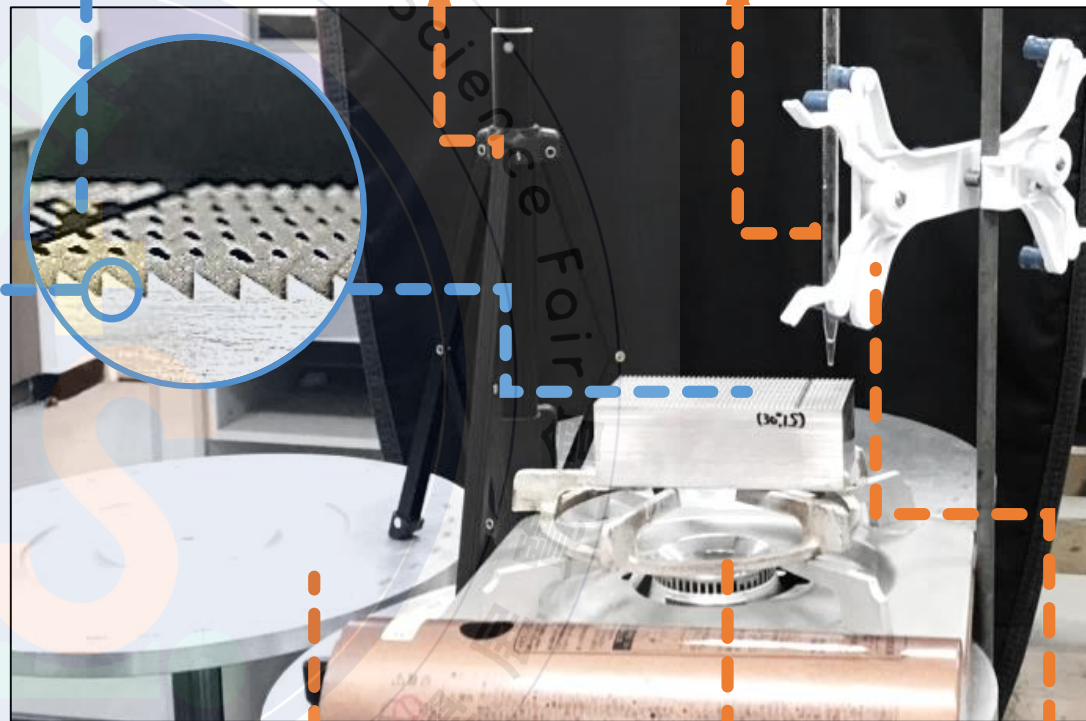
Fig.4(b) 微結構參數

測量基準線



手機腳架

刻度滴管



圓盤力學桌

金屬圓形爐架

滴定管腳架

Fig.4(c) 實驗器材組

不同高度下水滴運動速度

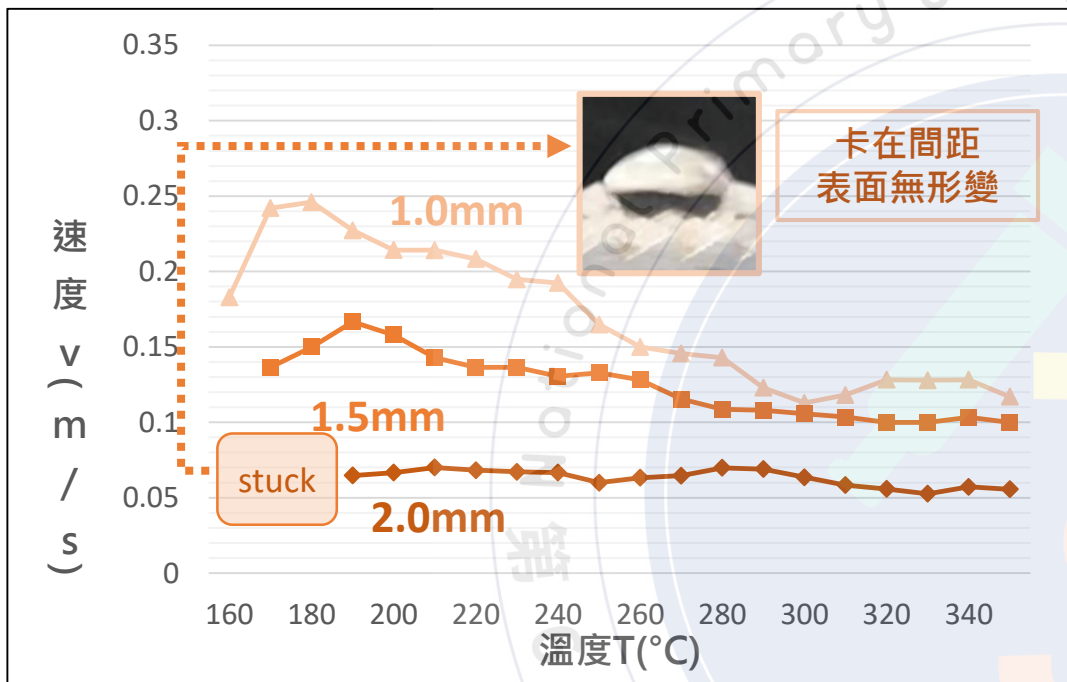


Fig.5(a) 傾斜度45°各溫度運動速度

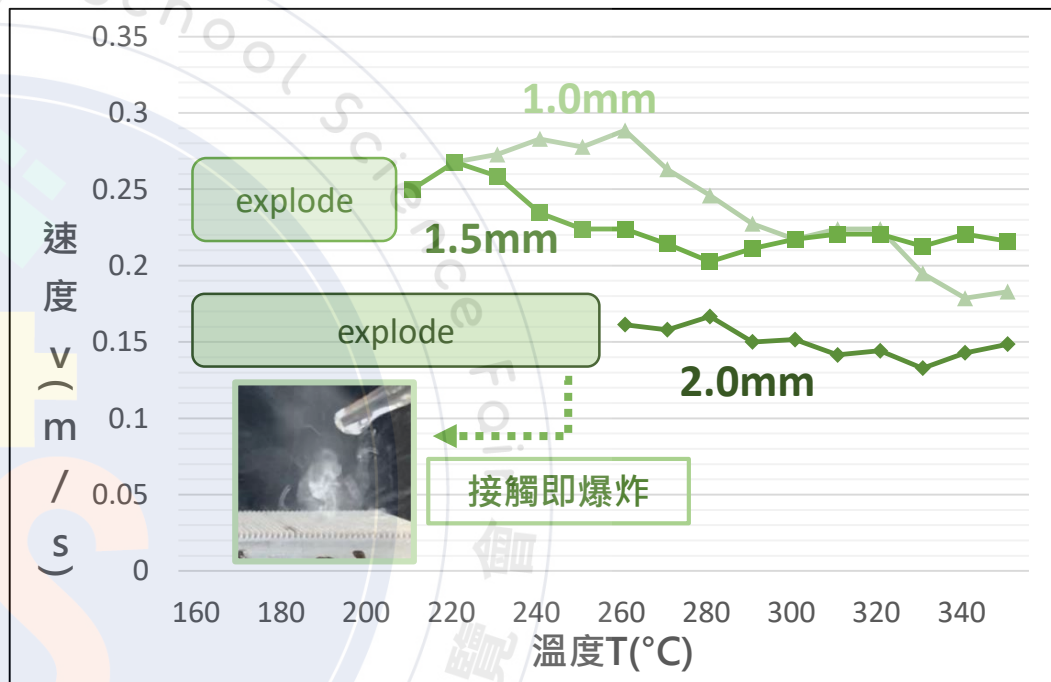


Fig.5(b) 傾斜度60°各溫度運動速度

(一) 比例小 微結構 速度起伏較明顯

(三) 比例大 微結構 速度變化較無規律

(二) 比例小 微結構 最高速度較高

不同角度下水滴運動速度

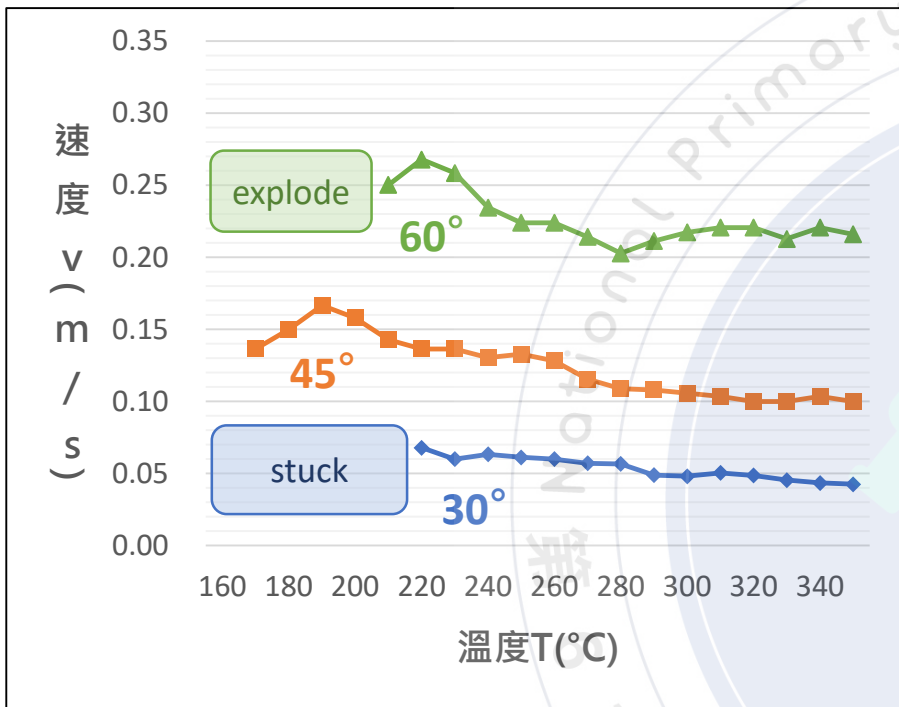


Fig.6(a)高1.5mm各溫度運動速度

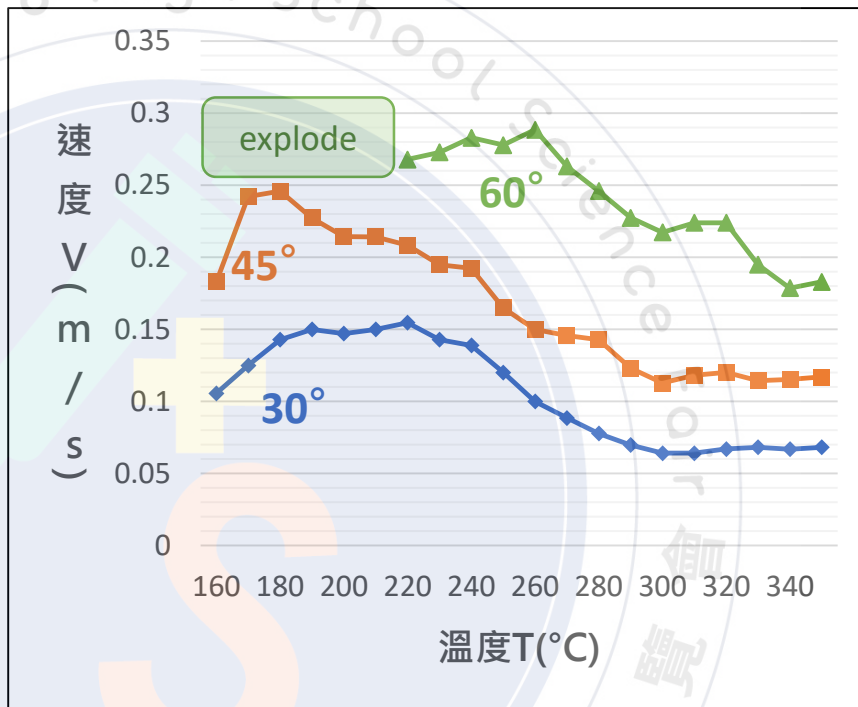
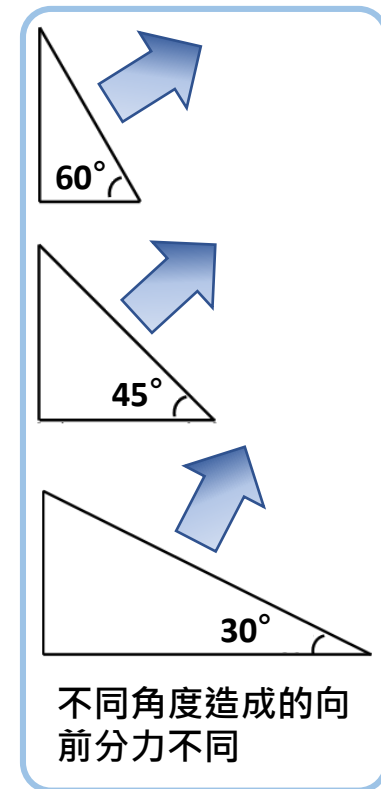


Fig.6(b)高1.0mm各溫度運動速度



(一) 各微結構均有一**運動速度最高點**

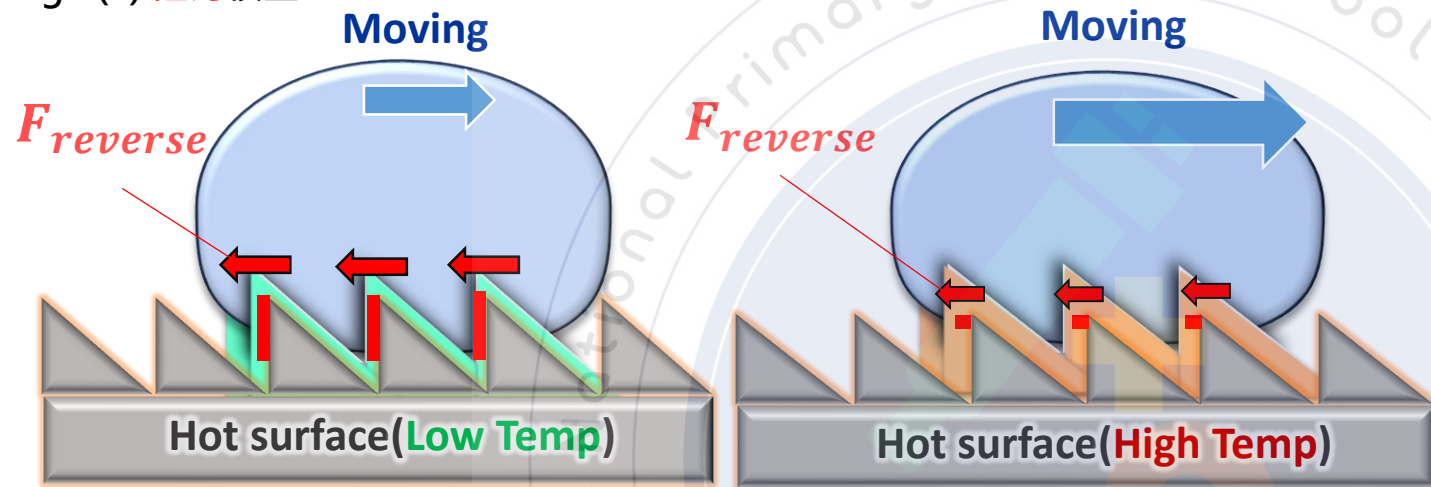
(三) 傾斜角度越大運動速度也會越大

(二) 速度趨勢會有一**先上升後下降**的規律

(四) **低溫**時比例**小**微結構會**爆炸**，比例**大**微結構水滴則會**停滯**

高低溫下水滴運動力圖變化

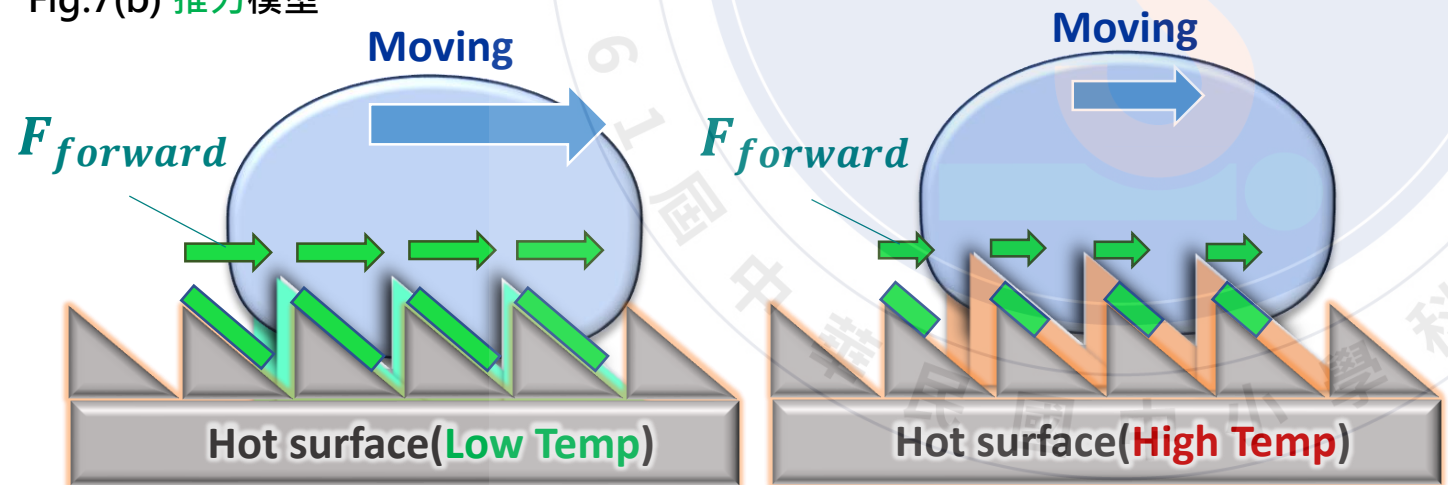
Fig.7(a) 阻力模型



(一) 溫度直接決定動力?

(二) 溫度升高，蒸氣層增厚，水滴被抬升，阻力面減少、蒸氣力越大，速度上升。

Fig.7(b) 推力模型



(三) 隨溫度升高，水滴速度先升後降，重新思考後發現阻力面減少也會使推力面減少。

(四) 太高溫速度反倒越來越小

實際空腔體積與阻力示意圖



Fig.9(a) 不同高度的**阻力**模型

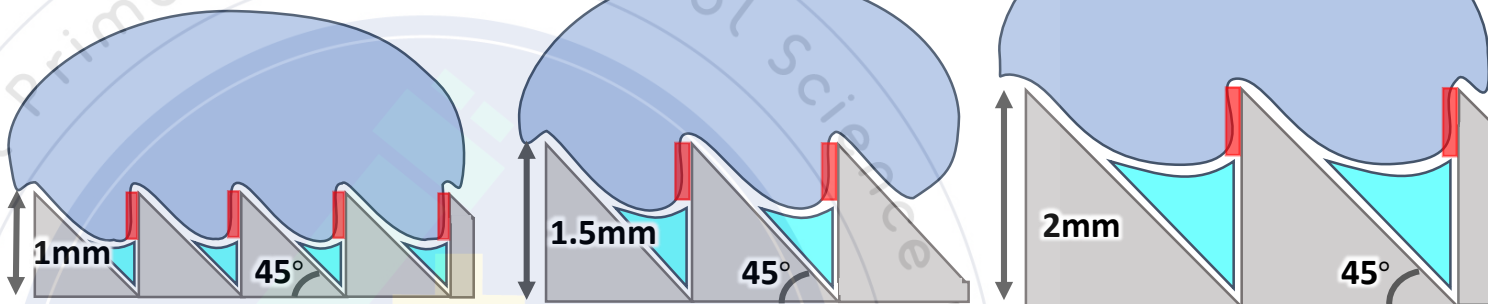
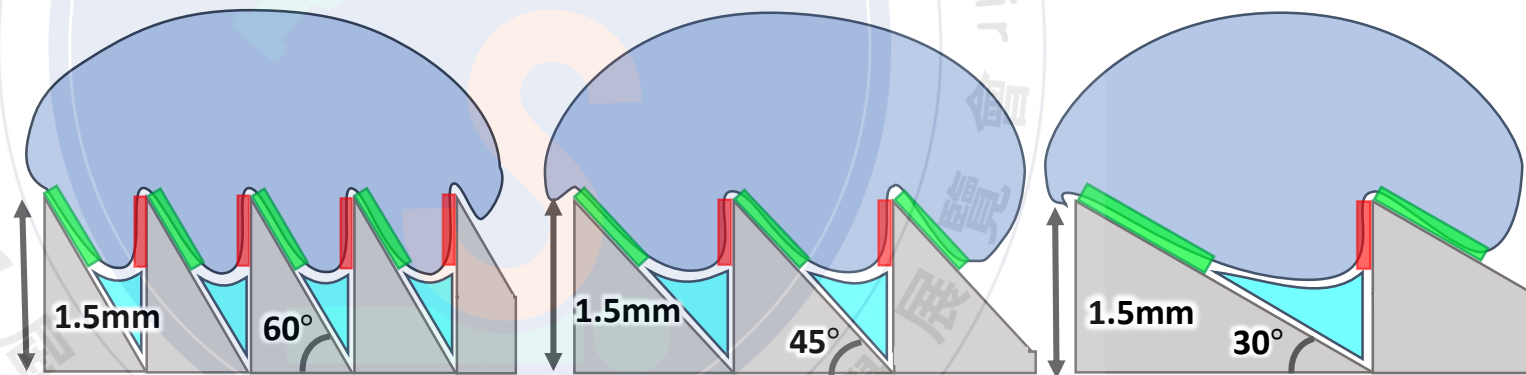


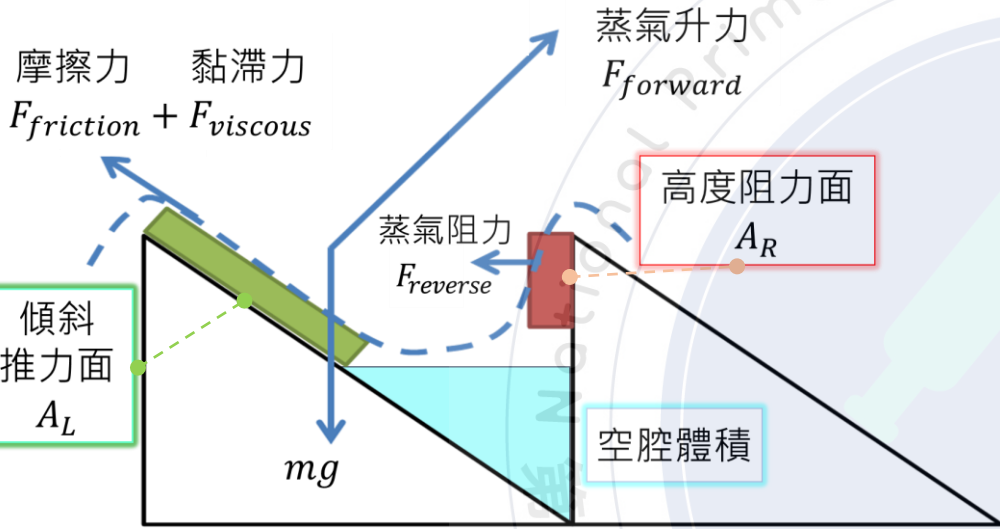
Fig.9(b) 不同角度的**推力**模型



“空腔體積”由蒸氣層隔絕出的空間，水滴運動需有足夠溫度製造出**最小空腔體積**，水滴須保持圓潤球形避免尖端爆炸，將阻力減至一定程度方可做出運動，為**水滴前進的根本原因**。

"leidenfrost effect" 與微結構之數學公式

Fig.10 運動力圖整合模型



$$F = F_{forward} - F_{reverse} - F_{friction} - F_{viscous}$$

$$= F_L \times \sin \theta - F_R - F_{fr} - F_{viscous}$$

忽略空氣摩擦力 (1)

$$F = \Delta P_{(T)} \times A_L \times \sin \theta - \Delta P_{(T)} \times A_R - \eta \frac{v}{e} A$$

$$= \Delta P_{(T)} (A_L \times \sin \theta - A_R) - \eta \frac{v}{e} A$$

(2)

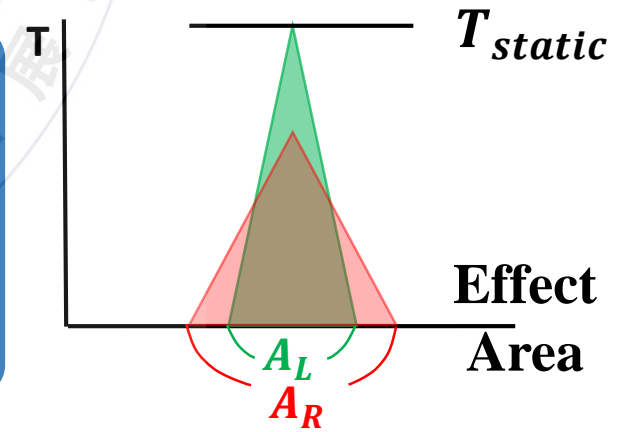
整個水滴在整個運動過程所有情況下的速度變化

$$F_{total} = N \times \left[\Delta P_{(T)} (A_L \times \sin \theta - A_R) - \eta \frac{v}{e} A \right]$$

$$= \frac{D \times \tan \theta}{h} \Delta P_{(T)} (A_L \times \sin \theta - A_R) - \eta \frac{v}{e} A_{total}$$

(3)

Fig.11 數學理論模型



終端速度與運動理論模型

$$F_{total} = \frac{D \times \tan \theta}{h} \Delta P_{(T)} (A_L \times \sin \theta - A_R) - \eta \frac{v}{e} A_{total} = 0 \quad \text{承(3)}$$

高溫 → 垂直介面阻力過小 → $A_R = 0$

高溫 → 水滴速度維持等速 → 合力 $F_{total} = 0$

可推論 $\sin \theta \times \tan \theta$ 正比水滴速度 v

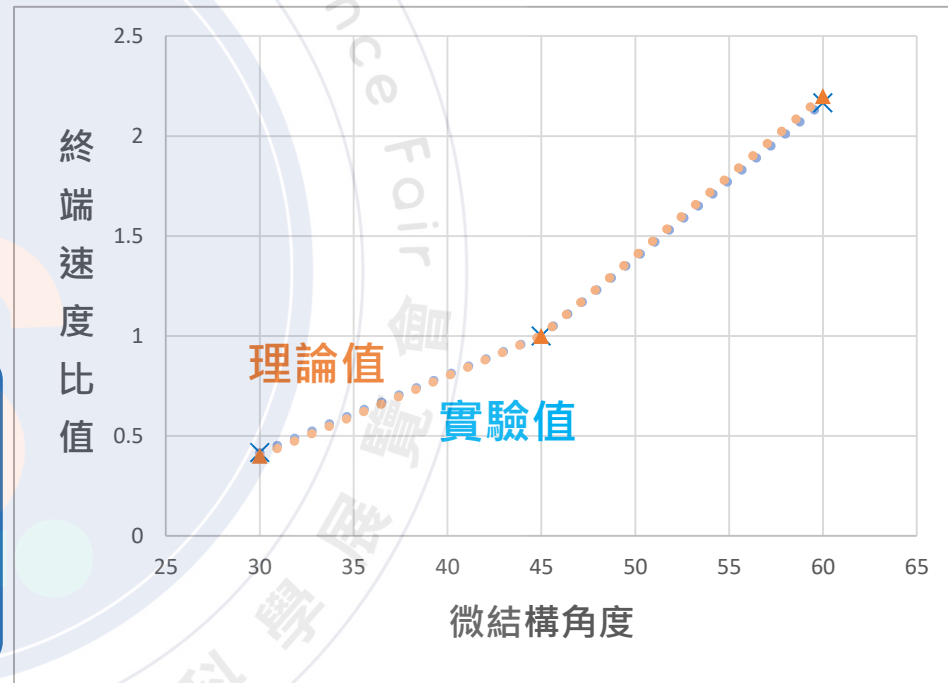
理論值： $V_{30^\circ} : V_{45^\circ} : V_{60^\circ}$ 實驗值： $V_{30^\circ} : V_{45^\circ} : V_{60^\circ}$

= $1 : \sqrt{6} : 3\sqrt{3}$

= $0.04 : 0.10 : 0.22$

= $0.42 : 1 : 2.17$

= $0.4 : 1 : 2.2$



理論與實驗值完全吻合，可解釋真實運動行為

Fig.12 終端速度理論與實驗值探討 (350°C, 1.5mm)

水滴在不同微結構下的生命週期

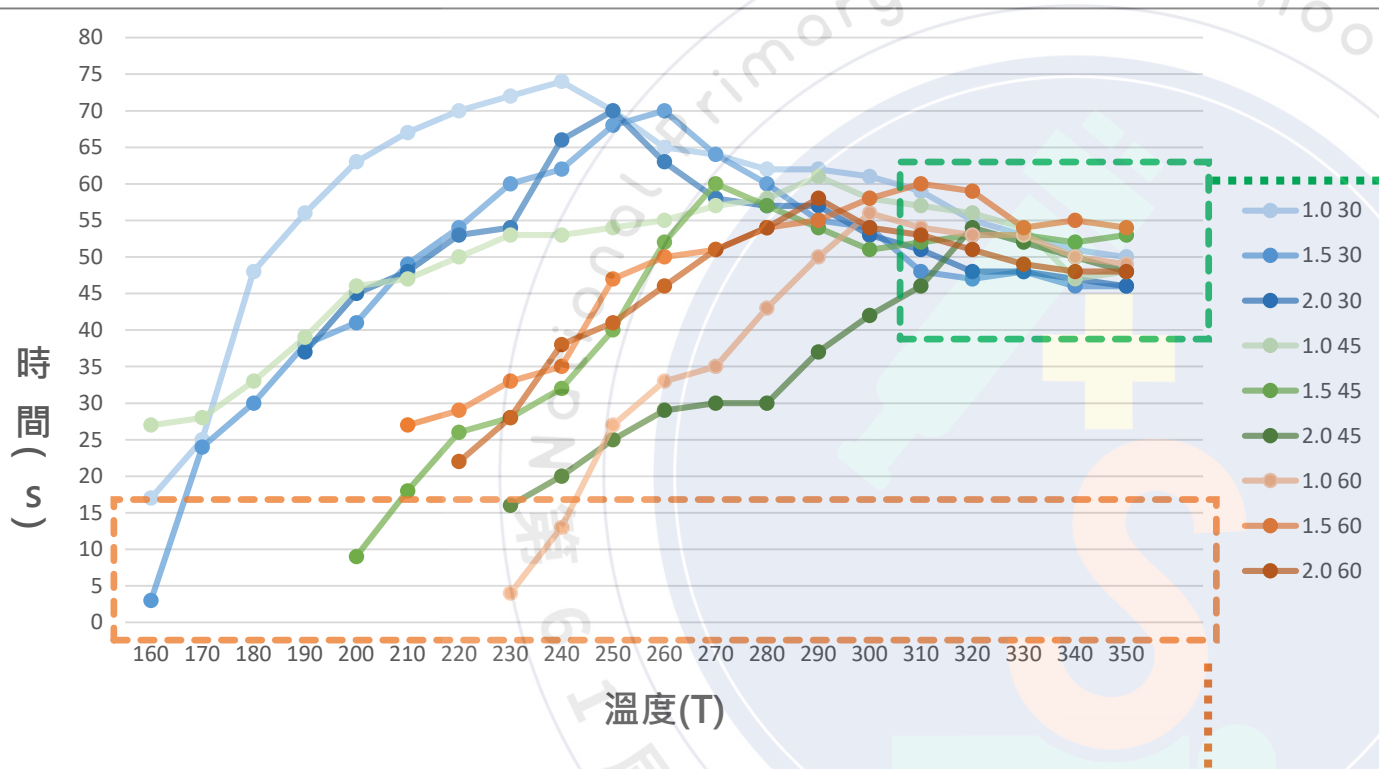


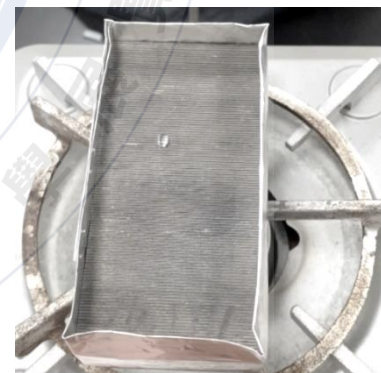
Fig.13 各微結構之水滴生命週期

(一) 生命週期20秒以下 “非典型萊頓佛斯特效應”

(二) 所有趨勢線都先上升後下降的趨勢

(三) 隔熱所需的蒸氣量會與接觸面消耗水滴的蒸氣量達到一個平衡點

(四) 過310°C後，過量蒸氣層抬升水滴使其感受不到微結構差異，造成生命週期在高溫段接近平緩且一致



生命週期

實驗設備：

傾斜使水滴停滯在同一位置

Fig.14

水滴在運動時的形變及熱流變化

為方便觀察，在水滴中加入**珠光粉**

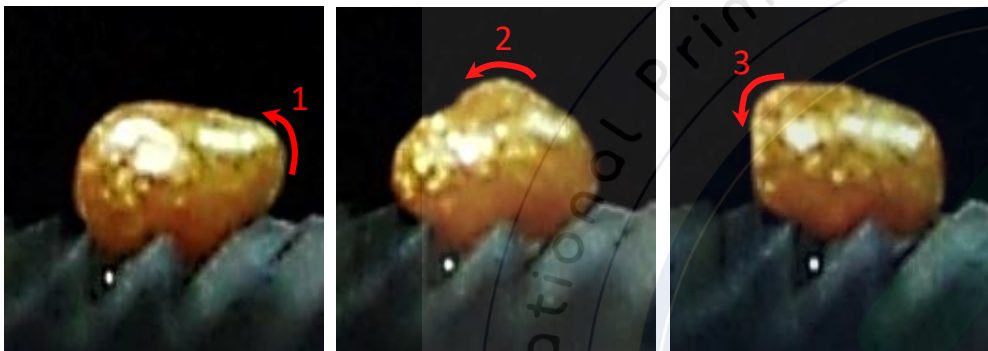


Fig.15 波紋造成形變類似滾動狀態

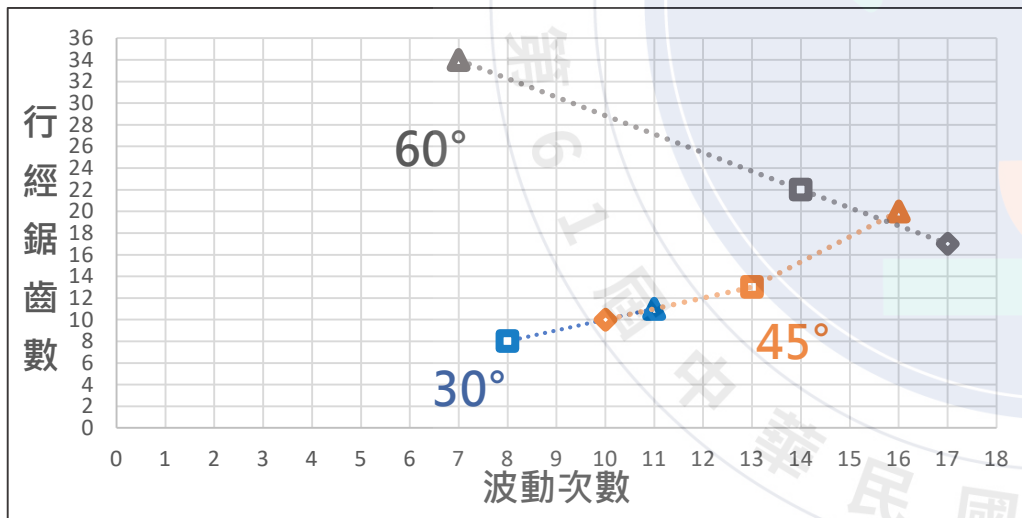


Fig.16 鋸齒與波動關係圖

Table.1 慢動作水滴運動拍攝

0.000 s	0.002 s	0.004 s	0.006 s	0.008 s
0.010 s	0.012 s	0.014 s	0.016 s	0.018 s
0.020 s	0.022 s	0.024 s	0.026 s	0.028 s



Fig.17 接觸產生熱流變化與動力來源

結論

- 一、所有微結構，水滴速度皆呈現先升後降。微結構傾斜度越大，速度越高。
- 二、傾斜度相同的狀況下，微結構高度越高，水滴的啟動溫度越高。
- 三、微結構比例越小，速度變化越顯著。反之，比例越大速度變化越不顯著。
- 四、本實驗首創數學模型，成功模擬高溫下水滴的運動。可供後續進一步研究。

$$F_{total} = \frac{D \times \tan \theta}{h} \Delta P_{(T)} (A_L \times \sin \theta - A_R) - \eta \frac{v}{e} A_{total}$$

- 五、結合低溫區與高溫區的運動狀態，提出推力與有效面積相關，數學公式如下：

$$F = A_L (T_{static} - T) - 1/2 A_R [(T_{static} - T) + |T_{static} - T|]$$

- 六、所有微結構，生命週期皆先升後降，高溫段趨平緩一致。
- 七、微結構會使水滴末端產生表面波，使其運動狀態看似為滾動。
- 八、水滴接觸的微結構尖端產生造成動力的熱流循環，整體熱流呈順時鐘循環與表面形變無關。

參考文獻

1. Heng Xie, Zhiwei Zhou (2007) A model for droplet evaporation near Leidenfrost point
International Journal of Heat and Mass Transfer 50 5328–5333

2. J. D. Bernardin, I. Mudawar (1999) The Leidenfrost Point: Experimental Study and Assessment
of Existing Models. Transactions of the ASME 894, Vol. 121