

中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國中組 物理科

佳作

030101

液滴與固體表面的碰撞行為探討

學校名稱：臺南市立復興國民中學

作者：	指導老師：
國一 陳仲薇	黃吉楠
	黃怡綸

關鍵詞：液滴、固體表面、碰撞行為

摘要

本研究利用注射器與蠕動泵浦穩定產生直徑 3mm 液滴，並以高速攝影觀察其撞擊行為。實驗發現液滴撞擊乾燥固體表面時，表面粗糙度對接觸角影響不明顯，親水與疏水材質則導致「錨定」或反彈翻轉。進一步研究顯示，液滴撞擊濕潤表面時，親水材質易拉緊液滴表面使其回彈，超疏水碳黑表面則造成液滴彈跳分離。針對濕潤 IC 晶片進行熱交換分析，結果指出高韋伯數液滴可打破錨定產生飛濺與擴散，顯著提升散熱效果，當韋伯數達 193.3 時降溫幅度達 8.6°C ，效能較低韋伯數提升近 80%。本研究證實韋伯數與表面性質對液滴撞擊行為具關鍵影響，對液冷與熱管理技術應用具有潛力。

壹、前言

一、研究動機

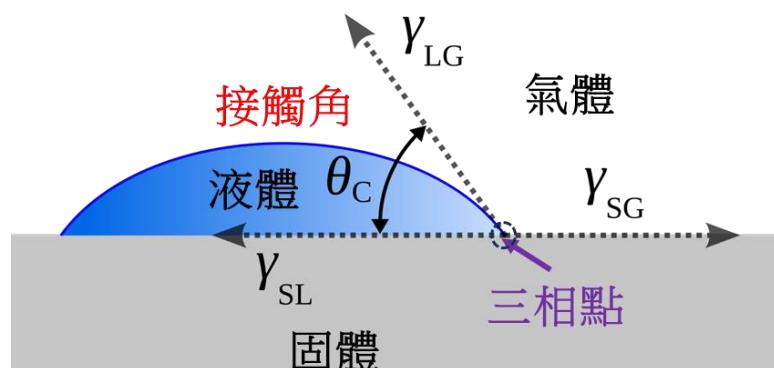
近年來高效能的人工智慧(artificial intelligence, AI)快速發展，AI 晶片在高速運算時會產生大量熱能，導致晶片過熱，影響運算功能，甚至造成損壞，為了確保 AI 晶片的效能穩定，需要高效率且低耗能的液冷技術支撐數據中心運作，液冷技術是利用液滴撞擊晶片促進熱交換，所以瞭解液滴與固體表面的行為可以幫助 AI 液冷技術的發展。此外，工業噴塗中液滴分布可以提高塗層的均勻性，在農業噴灑中控制液滴行為也可以提高農藥覆蓋效率等，本研究希望可以透過液滴與固體表面的接觸行為來瞭解日常生活中許多的科技應用。

二、文獻回顧

接觸角(Contact Angle, θ)又稱水滴角，是量測材料親水或疏水的重要指標，接觸角是當液體與固體接觸時，在固體、液體與氣體三種都接觸到的地方稱為三相點，沿著液體與氣體交界面的切線方向所形成在液體表面與固體表面之間的夾角，如圖 1 所示。接觸角是由三個不同界面相互作用的一個系統，當一個小液滴在一單位橫向的固體表面，會由楊氏方程所定義光滑表面上界面張力的平衡與接觸角的關係，如方程式(1)。接觸角通常為 0~180 度，當 $\theta=0$ 度時，表面完全濕潤，當 $\theta=180$ 度時，表面完全不濕潤。接觸角的大小與表面的親水性或疏水性有關，當物體與水滴的接觸角越大，疏水性越高，當物體與水滴的接觸角越小，親水性越高。

$$\gamma_{SG} = \gamma_{SL} + \gamma_{LG} \cos \theta_C \quad \dots \dots \dots \text{方程式(1)}$$

其中， γ_{SG} 為固體和氣體之間的表面張力， γ_{SL} 為固體和液體之間的表面張力， γ_{LG} 為液體和液體之間的表面張力， θ 為接觸角。



(資料來源：本研究繪製)

圖 1、接觸角的定義

一般而言，水滴在表面形成得接觸角，如果接觸角小於 10 度，表面屬於超親水性；如果接觸角介於 10~90 度之間，表面屬於親水性；如果接觸角介於 90~140 度之間，表面屬於疏水性；如果接觸角大於 140 度，表面屬於超疏水性。接觸角與表面能可以用來瞭解材料抑制親水性或疏水性的能力[1]。

吳昱良[2]探討液滴撞擊固體表面時的傳播現象研究獲得當表面張力與密度比值大，或當液滴速度快時，液滴形變越明顯，但其形變量有一最大值，而其薄水層傳播速度會隨時間增加而減少，但其環狀波在彈回時幾乎是呈等速度的彈回。若是液體表面張力較撞擊面附著力大者，或撞擊面溫度超過攝氏 400 度時，在其薄水層達到最大直徑時，便會向內收縮，形成一顆水珠。林怡寧等人[3]水珠滴落到固液表面之擴散探討，說明水珠擴散速率：乾玻璃表面 < 薄水膜(水層厚度與水珠直徑比值<<1)< 水層(水層厚度與水珠直徑比值 ≥ 1)；水珠撞擊較深水層($h/D > 1$)時，可分為三個階段，每個階段的 n 值越來越大，表水珠擴散速率越來越快。許景茹等人[4]探討奈米碳黑砂紙疏水性質與水滴在其表面滾動機制，顯示碳黑砂紙上水滴體積越大，水滴的長短軸比值、接觸角皆增加，液滴接觸固體表面積的比例會變小，滾動角也變小。透過砂紙顆粒與碳黑可模擬出如植物葉片表面的突起物與絨毛。根據理論所推得的液滴接觸固體表面積之比例越大，滾動角越大，因水滴與載體間形成空氣層，使水滴較容易下滑。穆亭昕等人[5]親疏有別—水滴在親疏交錯界面之運動現象探討，研究發現水滴有分割、彈跳、移動、旋轉等多樣化運動現象，水滴置於繪有親水弧線道的疏水振動平板上，會因為持續的不對稱鋪展收縮產生了振動-移動現象，且和水滴大小、振幅頻率、親疏線型、平板材質、張力黏度、角度有關。

三、研究目的

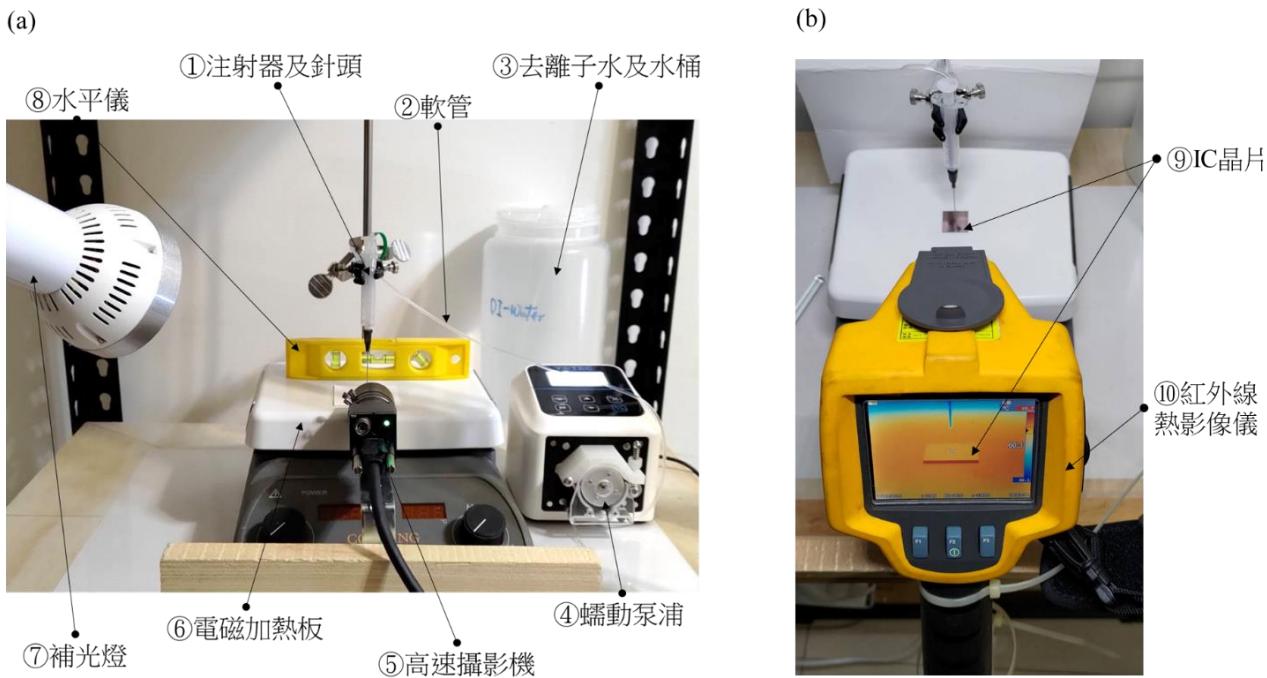
液滴與固體表面接觸行為是一個涉及流體動力學、界面科學及熱傳導的複雜現象，廣泛應用於噴墨列印、塗層技術、燃油霧化、農業噴灑及電子冷卻等領域。因此訂出了以下研究目的：

- (一)液滴撞擊乾燥的固體表面行為研究，探討接觸角特性。
- (二)探討液滴碰撞乾燥的疏水性與親水性固體界面行為。
- (三)液滴撞擊濕潤的固體表面行為研究，探討表面張力特性。
- (四)探討液滴碰撞濕潤的固體表面錨定現象臨界韋伯數。
- (五)液滴以不同韋伯數條件碰撞濕潤的 IC 晶片表面行為研究，探討慣性力與表面張力的關係。
- (六)探討液滴以不同韋伯數條件碰撞高溫 IC 晶片之散熱行為。

貳、研究設備及器材

一、實驗設備

本實驗設備，如圖 2 所示，圖 2(a)包括：①注射器及針頭，②軟管，③去離子水及水桶，④蠕動泵浦(YOTEC SQ80S)，⑤高速攝影機(WORK POWER WP-GUK30)，⑥電磁加熱板(CORNING PC-420D)，⑦投射燈，⑧水平儀，以及圖 2(b)包括：⑨IC 晶片(實驗使用的不同固體表面材料)與⑩紅外線熱影像儀(FLUKE Ti-32)，進行液滴碰撞固體表面之散熱現象探討。實驗進行時，以蠕動泵浦與軟管連接水桶與注射器，啟動蠕動泵浦轉動，將去離子水輸送進入注射器/針頭，形成液滴產生器，以每間隔 5 秒產生一顆液滴，如圖 3 所示為液滴產生連續拍攝的照片。液滴的直徑(D)約 3mm(體積為 14.14 mm^3)，液滴靜止自然落下於實驗平台，並於實驗平台上放置不同的固體表面(材料)，實驗開始前使用水平儀調整實驗平台保持為水平的狀態。



(照片來源：本研究拍攝)

圖 2、實驗設備與器材

水的基本性質在 25°C 及 1 大氣壓(atm)條件[5]，密度(ρ)為 997 kg/m^3 ，黏度(μ)為 $8.90 \times 10^{-4} \text{ kg/(s\cdot m)}$ ，表面張力(σ)為 $72.8 \times 10^{-3} \text{ N/m}$ ，如表 1。液滴撞擊速度(V_2)會影響液滴的動量，影響液滴在固體表面展開與回縮的樣態，液滴脫離針頭的位置高度距離實驗平台(固體表面)約為 3mm，液滴靜止落下的起始速度(V_1)為 0，落下時只有受到重力加速度($g=9.8 \text{ m/s}^2$)的作用，根據等加速度運動公式(方程式 2)計算[6]，以液滴從高度($h=3 \text{ mm}=0.003 \text{ m}$)為例：液滴自由落

下接觸固體表面時的瞬間速度(V_2)為 0.24 m/s。文獻衡量液滴落下的量慣性力與表面張力的關係，決定液滴碰撞到固體表面時是否會破碎或回縮的狀態，可以採用韋伯數(We)，計算如(方程式 3)，液滴落下高度與韋伯數的關係，如表 2。

$$V_2 = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \times 9.8 \times 0.003} = 0.24 \text{ m/s}$$

其中， We 韋伯數， ρ 為液體密度， D 為液滴直徑， V_2 為液滴撞擊固體表面速度， σ 為液體表面張力。

以液滴落下高度為 3 mm(0.003 m)為例，液滴撞擊固體表面速度為 0.24m/s，計算韋伯數 (We)：

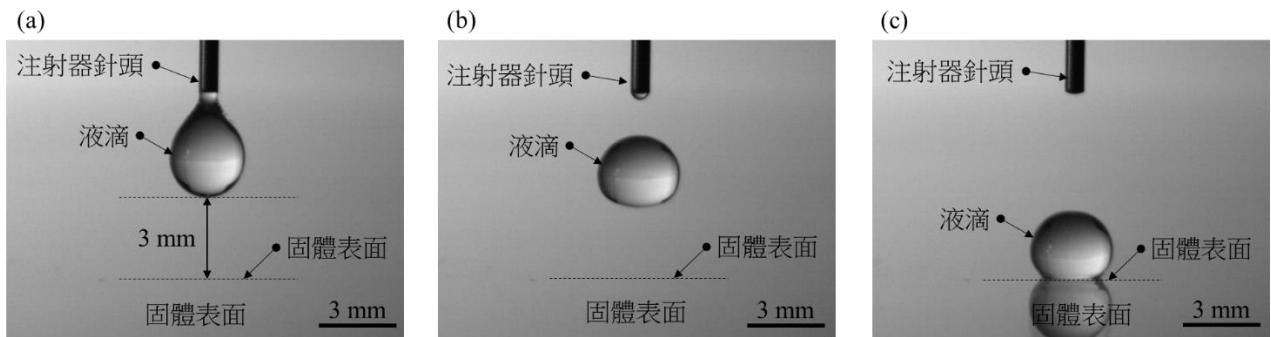
$$We = \frac{997 \times 0.003 \times 0.24^2}{72.8 \times 10^{-3}} = 2.4$$

表 1、水的基本性質

基本物性	標準狀況 (25°C, 1 atm)
密 度(ρ)	997 kg/m ³
黏 度(μ)	8.90×10^{-4} kg/(s·m)
表面張力(σ)	72.8×10^{-3} N/m

表 2、液滴落下高度與撞擊速度及韋伯數的關係

液滴落下高度 h(mm)	液滴撞擊速度 V ₂ (m/s)	韋伯數 (We)
3	0.24	2.4
4	0.28	3.2
5	0.31	4.0
6	0.34	4.8
7	0.37	5.6
8	0.40	6.4
9	0.42	7.2
10	0.44	8.1
100	1.40	80.5
200	1.98	161.1
240	2.17	193.3

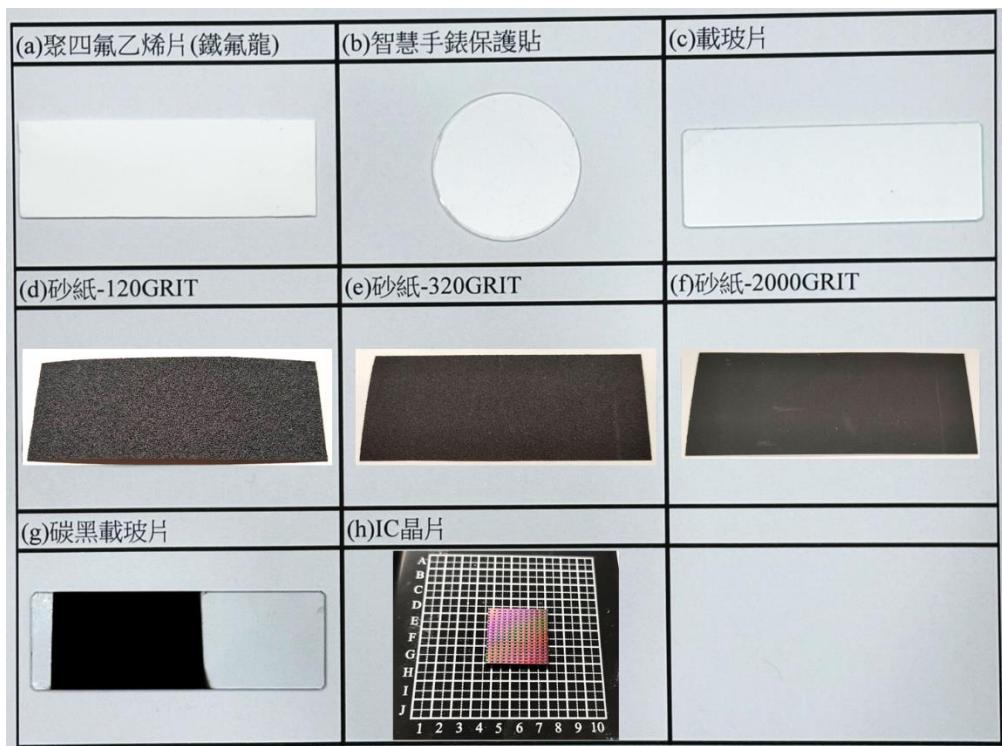


(照片來源：本研究拍攝)

圖 3、液滴產生與掉落的過程

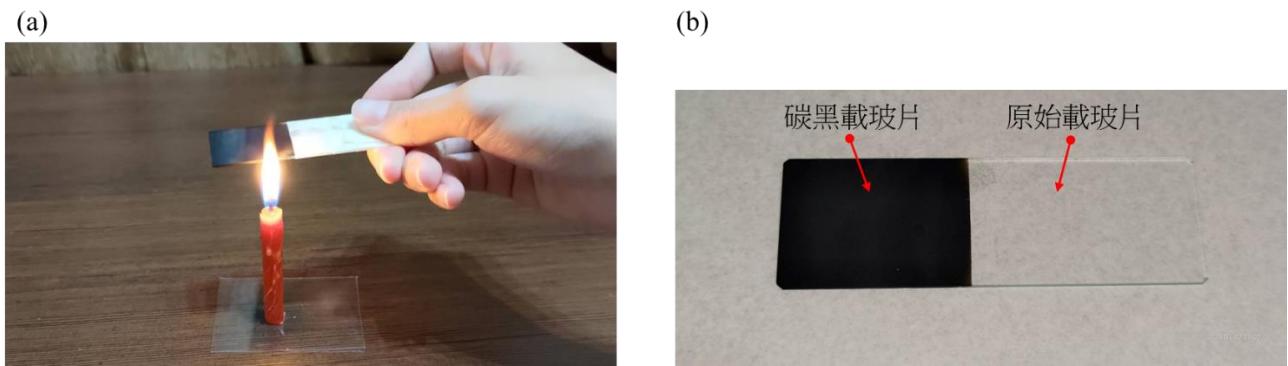
二、實驗材料

實驗使用了 8 種固體材料，如圖 4 所示，包括：(a)聚四氟乙烯(鐵氟龍)，(b)智慧手錶保護貼(玻璃)，(c) 載玻片，(d)砂紙-120GRIT，(e)砂紙-320GRIT，(f) 砂紙-2000GRIT，(g)碳黑載玻片，(h)IC 晶片，其中，碳黑載玻片是以蠟燭燻黑載玻片，如圖 5 所示；進行觀察液滴與各種固體表面的接觸行為，並以高速攝影機拍攝結果。以輪廓測量儀 (α -step, KLA Tencor D-300)測量各材料的表面粗糙度，呈列彙整，如表 3 所示。



(照片來源：本研究拍攝)

圖 4、實驗使用的 8 種不同固體表面材料



(照片來源：本研究拍攝)

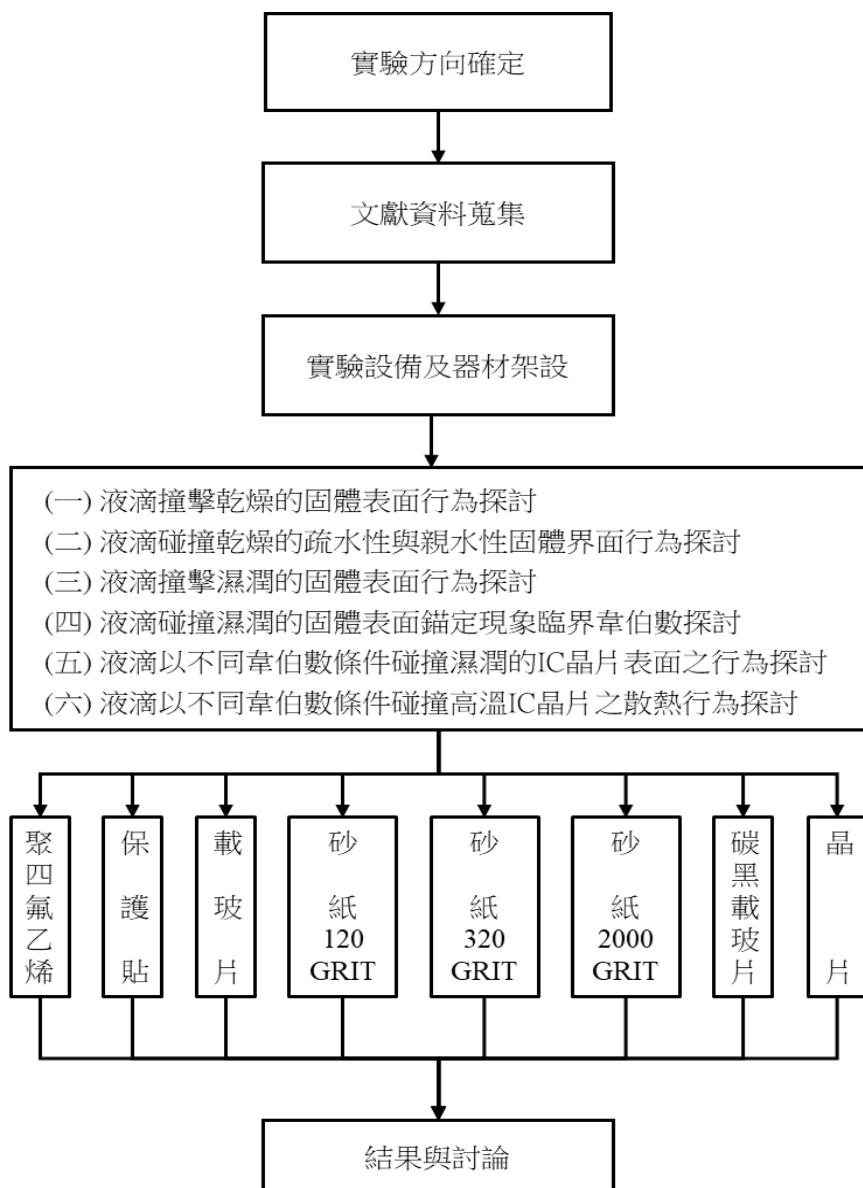
圖 5、碳黑載玻片。(a)以蠟燭熏黑載玻片，(b)碳黑載玻片(左側)/原始載玻片(右側)

表 3、8 種不同的固體表面(材料)的表面粗糙度

編號	固體表面(材質)	平均表面粗糙度 (μm)
(a)	聚四氟乙烯片(鐵氟龍)	0.25 - 0.28
(b)	智慧手錶保護貼(玻璃)	0.004 – 0.005
(c)	載玻片(玻璃)	0.006 – 0.008
(d)	砂紙-120GRIT	42 - 44
(e)	砂紙-320GRIT	17 - 19
(f)	砂紙-2000GRIT	3 - 4
(g)	碳黑載玻片(玻璃)	0.02 -0.06
(h)	IC晶片	0.002 – 0.006

參、研究過程或方法

本實驗擬定實驗方向後，進行相關文獻及資料蒐集與閱讀，並且規劃實驗與實驗設備及器材架設，實驗進行液滴靜止自然落下於實驗平台撞擊實驗平台上不同的固體表面(材料)包括：(a)聚四氟乙烯片(鐵氟龍)，(b)智慧手錶保護貼(玻璃)，(c) 載玻片，(d)砂紙-120GRIT，(e)砂紙-320GRIT，(f) 砂紙-2000GRIT，(g)碳黑載玻片(以蠟燭燻黑載玻片)，及(h)IC 晶片等8種固體表面，本研究分別針對：(一)液滴撞擊乾燥的固體表面行為研究，探討接觸角特性。(二)探討液滴碰撞乾燥的疏水性與親水性固體界面行為。(三)液滴撞擊濕潤的固體表面行為研究，探討表面張力特性。(四)探討液滴碰撞濕潤的固體表面錨定現象臨界韋伯數。(五)液滴以不同韋伯數條件碰撞濕潤的 IC 晶片表面行為研究，探討慣性力與表面張力的關係。(六)探討液滴以不同韋伯數條件碰撞高溫 IC 晶片之散熱行為。研究流程圖，如圖 6。



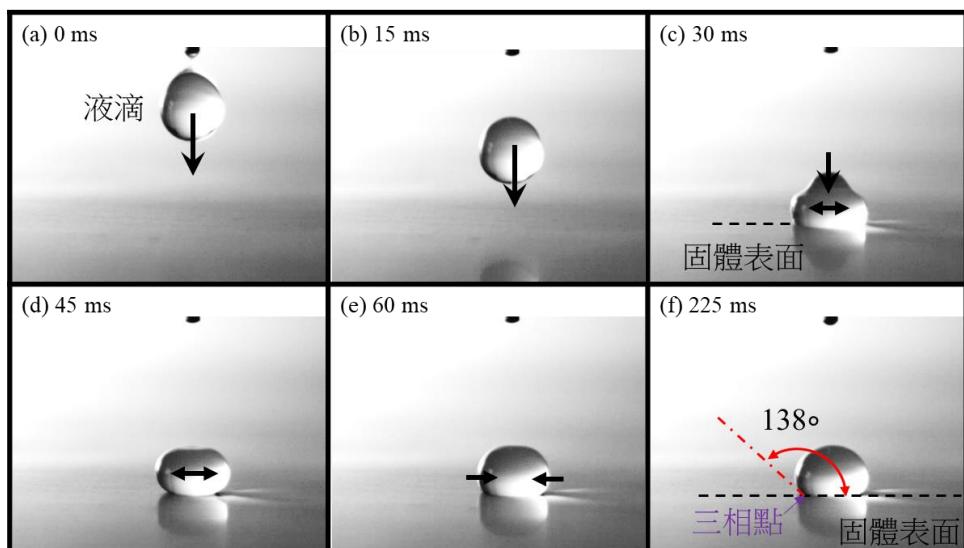
肆、研究結果

一、液滴碰撞乾燥的固體表面行為探討

液滴碰撞乾燥的固體表面接觸行為研究條件為：當液滴脫離針頭前為 0 ms，位置高度距離實驗平台(固體表面)約為 3mm，液滴靜止落下的起始速度(V_1)為 0；液滴落下撞擊固體表面之韋伯數(We)為 2.4。

(一) 聚四氟乙烯(鐵氟龍)

液滴碰撞乾燥的聚四氟乙烯表面接觸行為，如圖 7。液滴大約在 30 ms 之前已撞擊及固體表面，並在開始表面上進行展開行為(圖 7(c)及圖 7(d))；在完全展開後，會開始進行回縮行為(圖 7(e))，反覆幾次後，經過大約 225 ms 最終於固體表面上靜止穩定(圖 7(f))，量測液滴在聚四氟乙烯表面的接觸角大約為 138 度(圖 7(f))，聚四氟乙烯(鐵氟龍)表面屬於疏水特性。

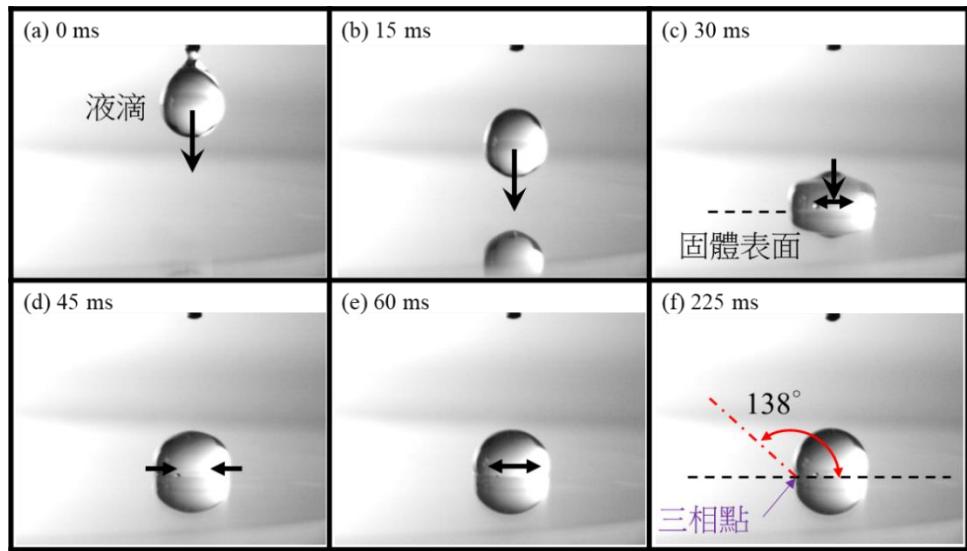


(照片來源：本研究拍攝)

圖 7、液滴碰撞乾燥的聚四氟乙烯表面接觸行為

(二) 智慧手錶保護貼(玻璃)

液滴碰撞乾燥的智慧手錶保護貼(玻璃)表面接觸行為，如圖 8。液滴大約在 30 ms 之前已撞擊及固體表面，並在開始表面上進行展開行為(圖 8(c)及圖 8(d))；在完全展開後，會開始進行回縮行為(圖 8(e))，反覆幾次後，經過大約 225 ms 最終於固體表面上靜止穩定(圖 8(f))，量測液滴在智慧手錶保護貼(玻璃)表面的接觸角大約為 138 度(圖 8(f))，智慧手錶保護貼(玻璃)表面屬於疏水特性。

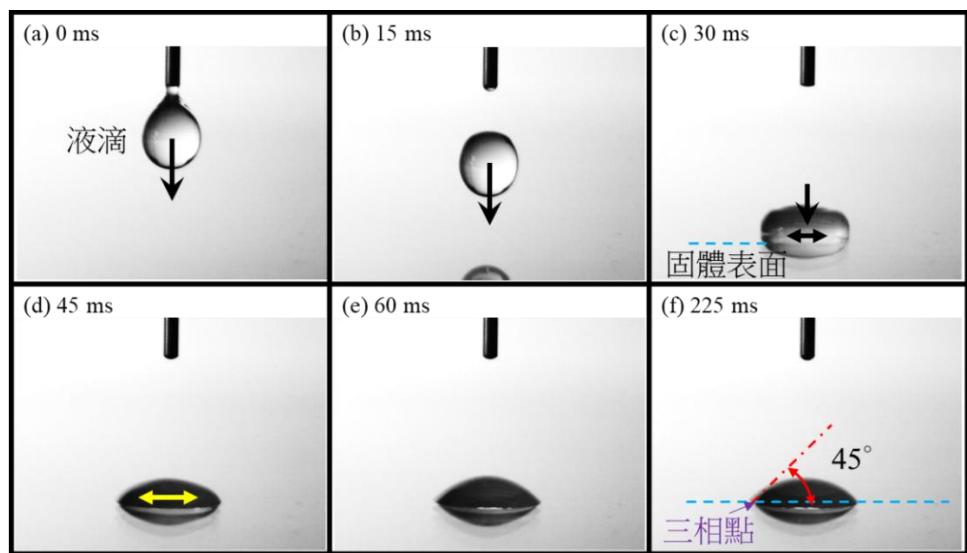


(照片來源：本研究拍攝)

圖 8、液滴碰撞乾燥的智慧手錶保護貼表面接觸行為

(三) 載玻片

液滴碰撞乾燥的載玻片表面接觸行為，如圖 9。液滴大約在 30 ms 之前已撞擊及固體表面，並在開始表面上進行展開行為(圖 9(c)及圖 9(d))；在完全展開後，會開始進行回縮，並且液滴就在固體表面上隨即穩定(圖 9(e))，量測液滴在載玻片表面的接觸角大約為 45 度(圖 9(f))，載玻片(玻璃)表面屬於親水特性。

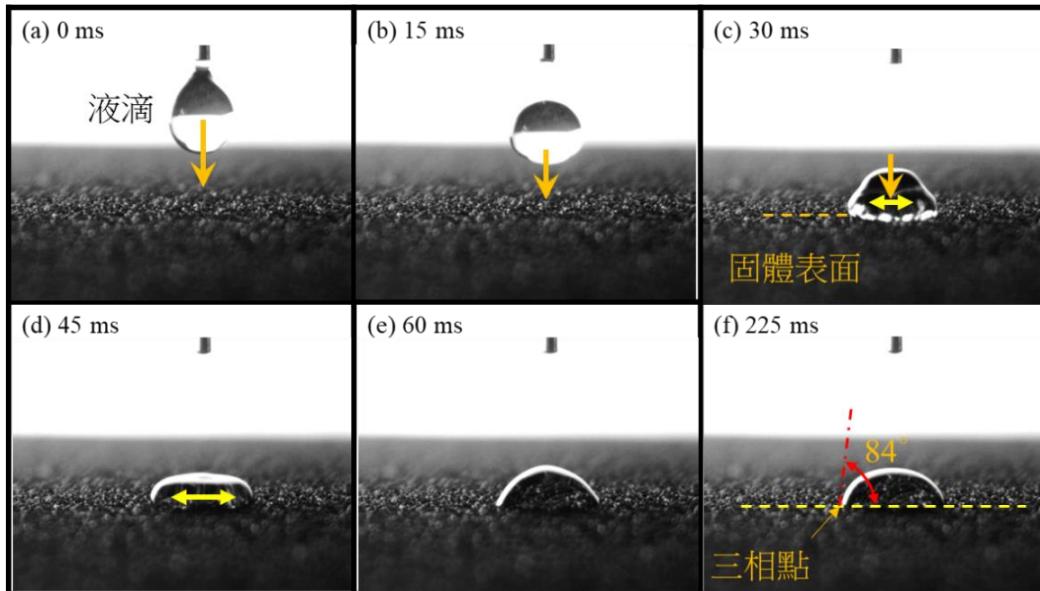


(照片來源：本研究拍攝)

圖 9、液滴碰撞乾燥的載玻片表面接觸行為

(四) 砂紙-120GRIT

液滴碰撞乾燥的砂紙-120GRIT 表面接觸行為，如圖 10。液滴大約在 30 ms 之前已撞擊及固體表面，並在開始表面上進行展開行為(圖 10(c)及圖 10(d))；在完全展開後，會開始進行回縮，並且液滴就在固體表面上逐漸穩定(圖 10(e))，量測液滴在砂紙-120 GRIT 表面的接觸角大約為 84 度(圖 10(f))，砂紙-120 GRIT 表面屬於親水特性。

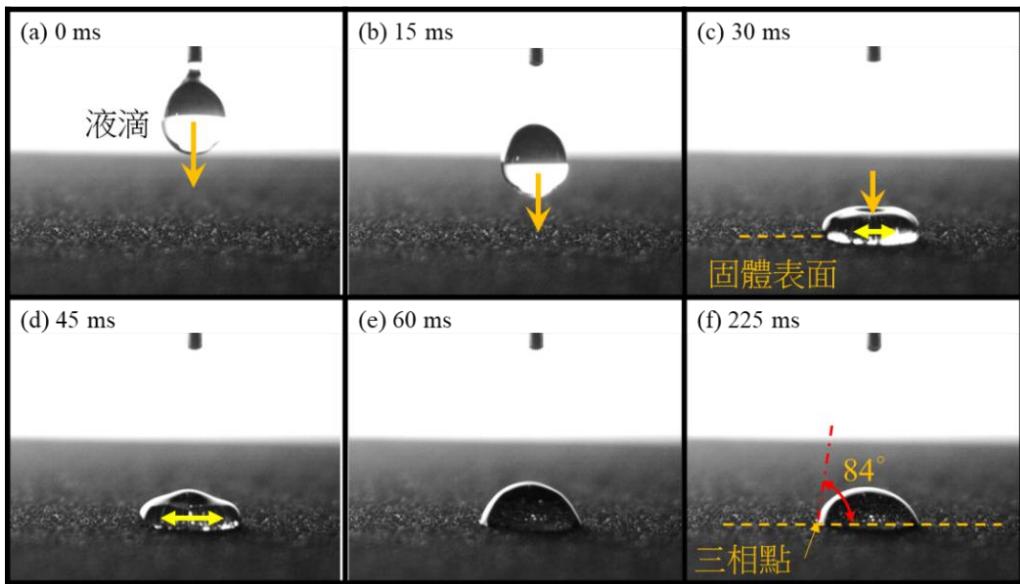


(照片來源：本研究拍攝)

圖 10、液滴碰撞乾燥的砂紙-120GRIT 表面接觸行為

(五) 砂紙-320GRIT

液滴碰撞乾燥的砂紙-320GRIT 表面接觸行為，如圖 11。液滴大約在 30 ms 之前已撞擊及固體表面，並在開始表面上進行展開行為(圖 11(c)及圖 11(d))；在完全展開後，會開始進行回縮，並且液滴就在固體表面上逐漸穩定(圖 11(e))，量測液滴在砂紙-320GRIT 表面的接觸角大約為 84 度(圖 11(f))，砂紙-320GRIT 表面屬於親水特性。

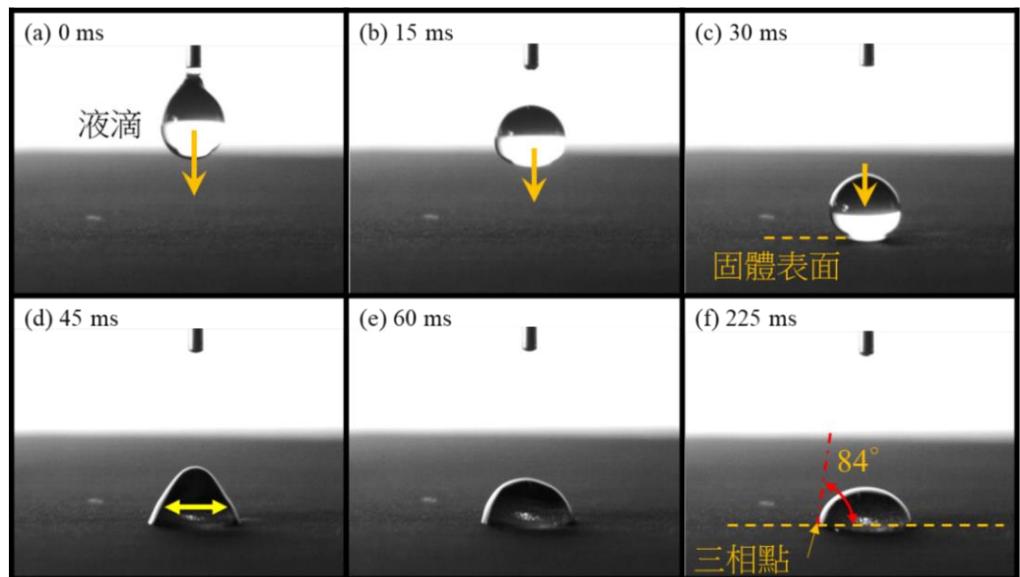


(照片來源：本研究拍攝)

圖 11、液滴碰撞乾燥的砂紙-320GRIT 表面接觸行為

(六) 砂紙-2000GRIT

液滴碰撞乾燥的砂紙-2000GRIT 表面接觸行為，如圖 12。液滴大約在 30 ms 之前已撞擊及固體表面，並在開始表面上進行展開行為(圖 12(c)及圖 12(d))；在完全展開後，會開始進行回縮，並且液滴就在固體表面上逐漸穩定(圖 12(e))，量測液滴在砂紙-2000GRIT 表面的接觸角大約為 84 度(圖 12(f))，砂紙-2000GRIT 表面屬於親水特性。

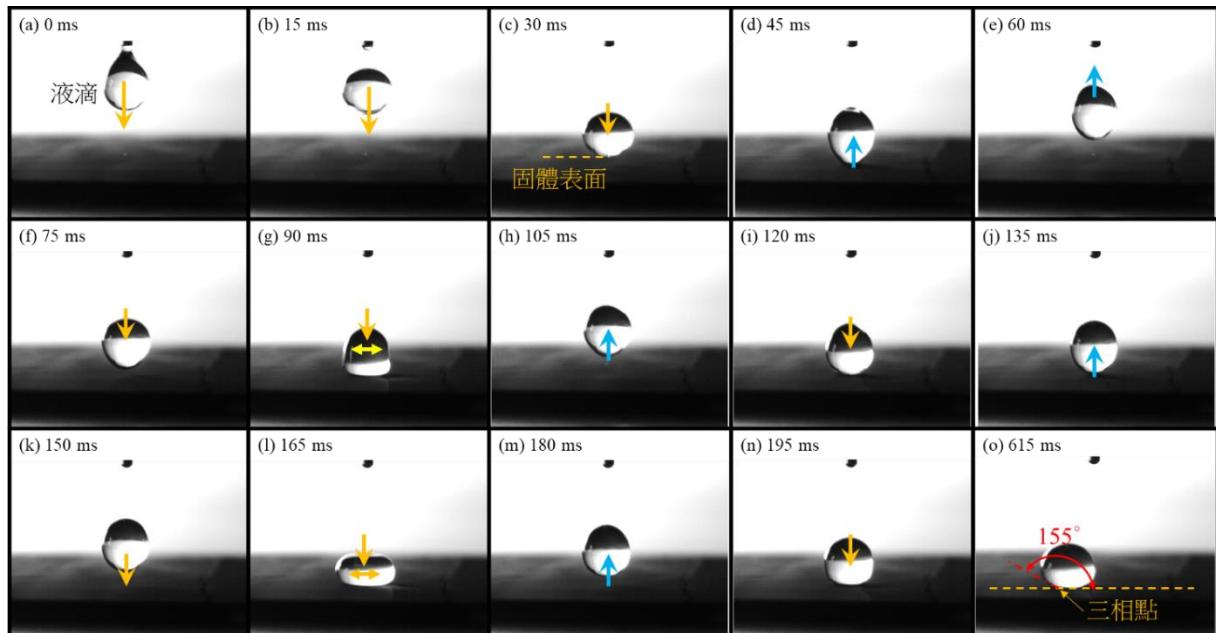


(照片來源：本研究拍攝)

圖 12、液滴碰撞乾燥的砂紙-2000GRIT 表面接觸行為

(七) 碳黑載玻片

液滴碰撞乾燥的碳黑載玻片表面接觸行為，如圖 13。液滴大約在 30 ms 時碰及固體表面(圖 13(c))，隨即在表面上反彈行為(圖 13(d)及圖 13(e))；再次落於固體表面及微展開行為(圖 13(f)及圖 13(g))，隨即液滴就像一顆皮球多次的在固體表面上的彈跳；反彈行為如圖 13(h)、(J)、(m)所示，掉落/展開行為如圖 13(i)、(k)、(l)、(n)所示；大約經過 615 ms 後液滴才在固體表面上逐漸穩定(圖 13(o))，量測液滴在碳黑載玻片表面的接觸角大約為 155 度，碳黑載玻片表面屬於超疏水特性。

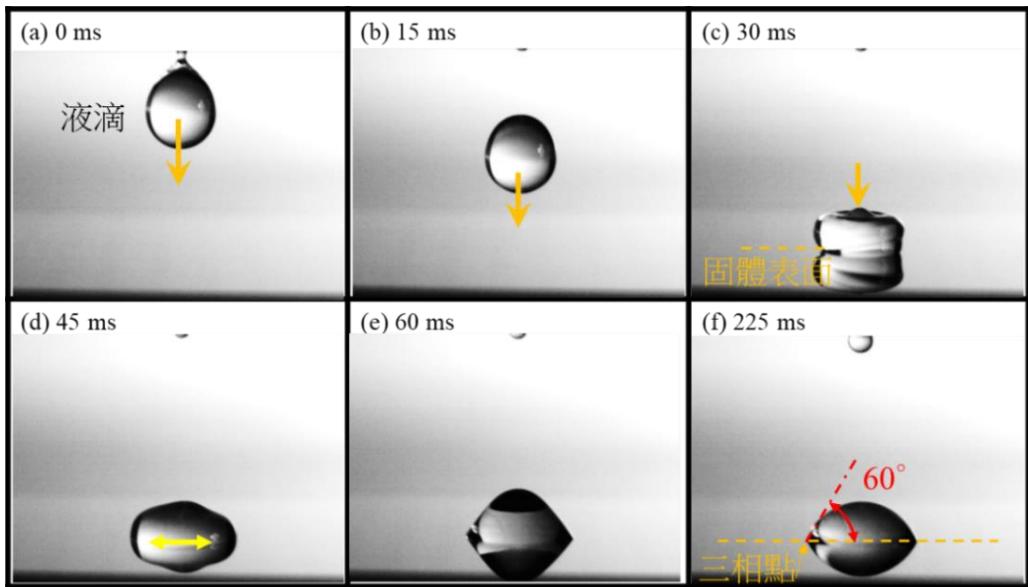


(照片來源：本研究拍攝)

圖 13、液滴碰撞乾燥的碳黑載玻片表面接觸行為

(八) IC 晶片

液滴碰撞乾燥的 IC 晶片表面接觸行為，如圖 14。液滴大約在 30 ms 之前已撞擊及固體表面，並在開始表面上進行展開行為(圖 14(c)及圖 14(d))；在完全展開後，會開始進行回縮，並且液滴就在固體表面上逐漸穩定(圖 14(e))，量測液滴在 IC 晶片表面的接觸角大約為 60 度(圖 14(f))，晶片表面屬於親水特性。

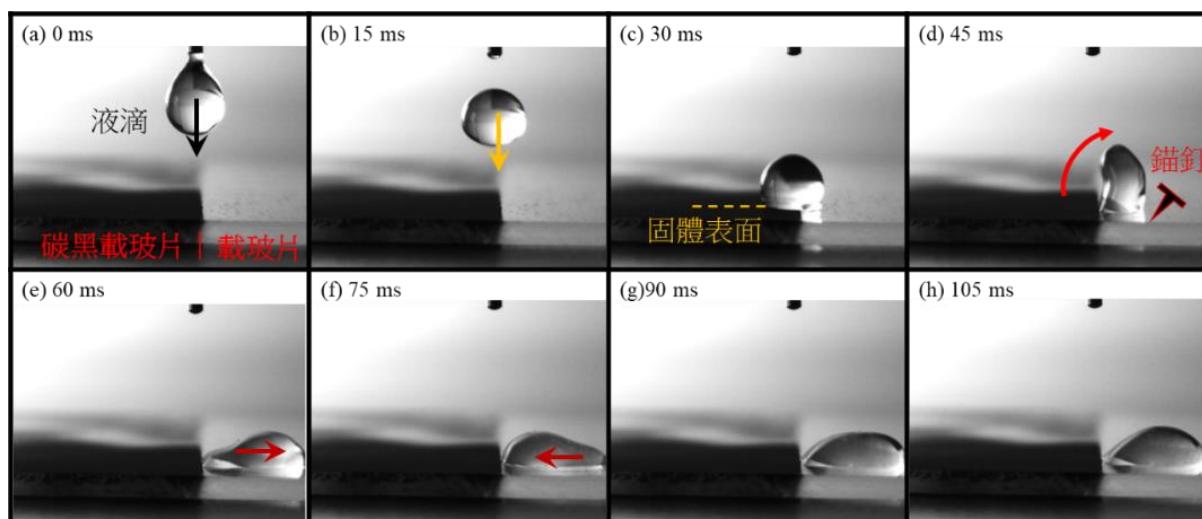


(照片來源：本研究拍攝)

圖 14、液滴碰撞乾燥的 IC 晶片表面接觸行為

二、液滴碰撞乾燥的疏水性與親水性固體界面行為探討

液滴碰撞乾燥的碳黑載玻片(超疏水性)與載玻片(親水性)固體界面行為探討，如圖 15，左側為碳黑載玻片(超疏水性)，右側為載玻片(親水性)。液滴大約在 30 ms 之前已撞擊及固體表面(圖 15(c))，發現在右側載玻片(親水性)的三相點液滴出現壓縮的波紋，左側為碳黑載玻片(超疏水性)卻沒有；液滴的右側被載玻片的親水性出現「錨定現象」將液滴牢牢拉緊，而液滴的左側就像皮球的出現反彈行為，造成液滴就像會“翻筋斗”的樣子，直接從左側翻轉到致右側(圖 15(d))，液滴經過翻轉後出現不平衡的單一側展開和與縮回行為(圖 15(e)、(圖 15(f))，之後在固體表面上逐漸平衡穩定(圖 15(h))。



(照片來源：本研究拍攝)

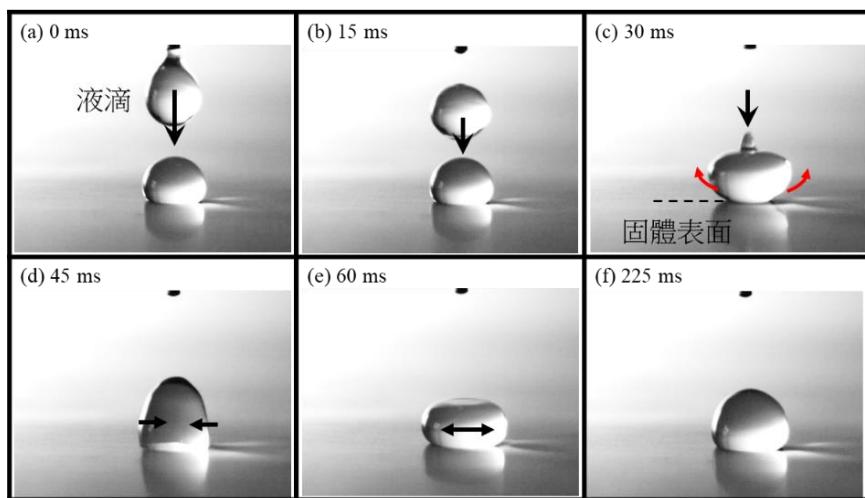
圖 15、液滴碰撞乾燥的疏水性與親水性固體界面行為(左側為碳黑載玻片，右側為載玻片)

三、液滴碰撞濕潤的固體表面行為探討

液滴碰撞濕潤的固體表面接觸行為研究條件為：當液滴脫離針頭前為 0 ms，位置高度距離實驗平台濕潤固體表面約為 1~2mm，液滴靜止落下的起始速度(V1)為 0；液滴落下撞擊固體表面之韋伯數(We)為 2.4。

(一) 聚四氟乙烯(鐵氟龍)

液滴碰撞濕潤的聚四氟乙烯表面接觸行為，如圖 16。液滴大約在 30 ms 碰及第一顆一滴，此時第一個液滴三相點接觸角脫離固體表面，表面直接被第二個液滴破壞，第二顆液滴直接融入於第一個液滴中(圖 16(c))，在於固體表面上進行縮回及展開後(圖 16(d)及圖 16(e))，逐漸穩定(圖 16(f))。

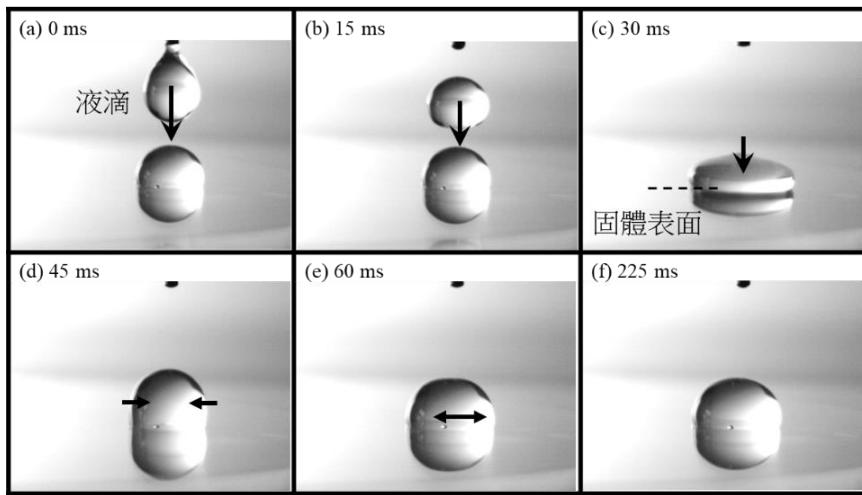


(照片來源：本研究拍攝)

圖 16、液滴碰撞濕潤的聚四氟乙烯表面接觸行為

(二) 智慧手錶保護貼(玻璃)

液滴碰撞濕潤的智慧手錶保護貼(玻璃)表面接觸行為，如圖 17。液滴大約在 30 ms 碰及第一顆一滴，此時第二個液滴直接直接融入於第一個液滴中(圖 17(c))，在於固體表面上進行展開及縮回後(圖 17(d)及圖 17(e))，逐漸靜止穩定(圖 17(f))。

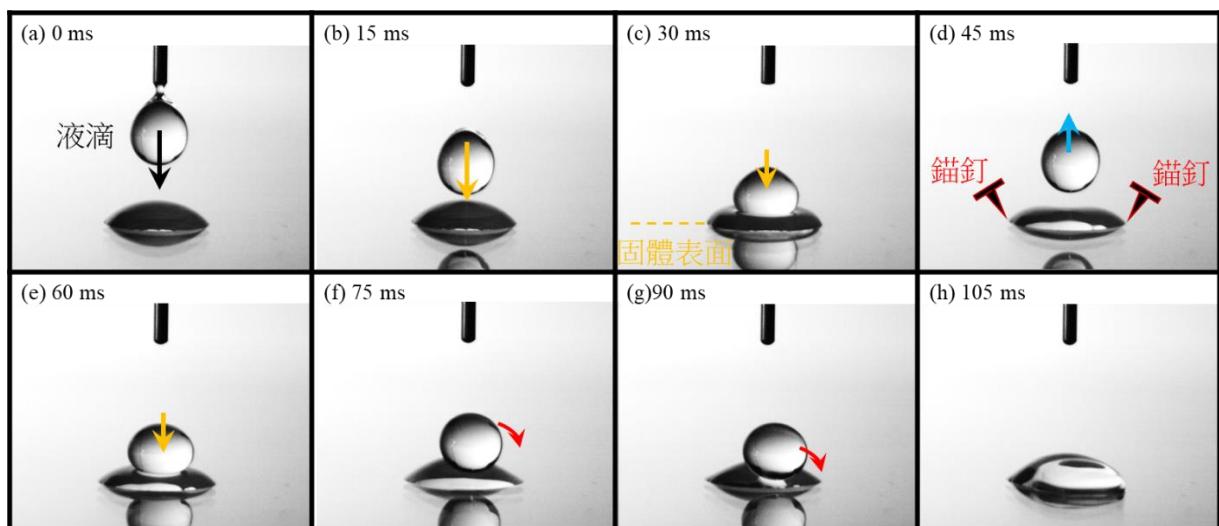


(照片來源：本研究拍攝)

圖 17、液滴碰撞濕潤的智慧手錶保護貼(玻璃)表面接觸行為

(三) 載玻片

液滴碰撞濕潤的載玻片(玻璃)表面接觸行為，如圖 18。液滴大約在 30 ms 碰及第一顆一滴(圖 18(c))，此時第一個液滴三相點像被錨釘定住的樣子，並將第一個液滴表面拉緊(圖 18(d))，第一個液滴表面就像一張繃緊的帳棚，將第二個液滴進行回彈(圖 18(d))，第二個液滴再次落在第一個液滴表面(圖 18(e))後，在第一個液滴表面滾動並滾落(圖 18(f)、圖 18(g))，最後在第一個液滴與固體表面的三相點與第一個液滴發生融合(圖 18(h))。第一個液滴表面被親水性固體表面拉緊的現象，本研究把它稱作「錨定現象」。

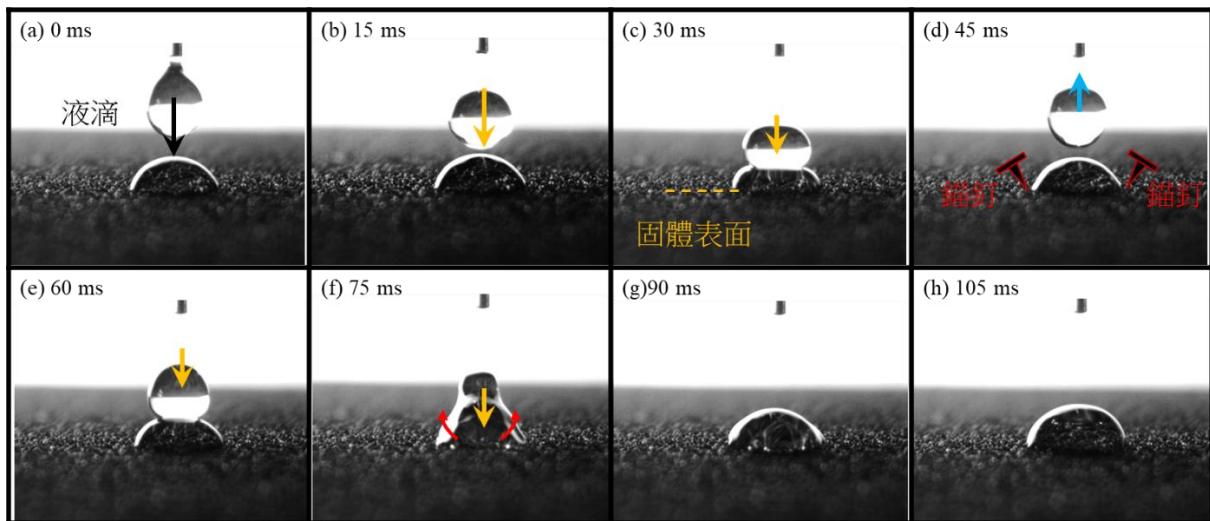


(照片來源：本研究拍攝)

圖 18、液滴碰撞濕潤的載玻片(玻璃)表面接觸行為

(四) 砂紙-120GRIT

液滴碰撞濕潤的砂紙-120GRIT 表面接觸行為，如圖 19。液滴大約在 30 ms 碰及第一顆一滴(圖 19(c))，此時第一個液滴三相點相同出現「錨定現象」，將第一個液滴表面拉緊(圖 19(d))，並將第二個液滴進行回彈(圖 19(d))，第二個液滴再次落在第一個液滴表面後(圖 19(e))，並破壞了第一個液滴表面，並與第一個液滴發生融合(圖 19(f))，在固體表面上逐漸穩定(圖 19(g)-(h))。

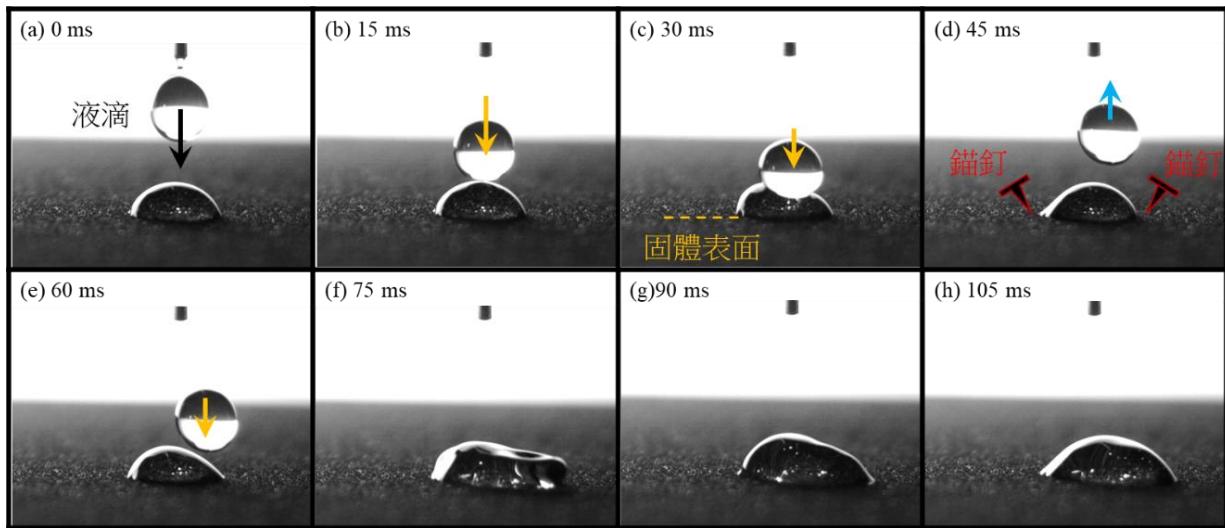


(照片來源：本研究拍攝)

圖 19、液滴碰撞濕潤的砂紙-120GRIT 表面接觸行為

(五) 砂紙-320GRIT

液滴碰撞濕潤的砂紙-320GRIT 表面接觸行為，如圖 20。液滴大約在 30 ms 碰及第一顆一滴(圖 20 (c))，此時第一個液滴三相點相同出現「錨定現象」，將第一個液滴表面拉緊(圖 20 (d))，並將第二個液滴進行回彈(圖 20 (d))，第二個液滴再次落在第一個液滴表面後(圖 20 (e))，直接落在三相點破壞了第一個液滴表面，直接與第一個液滴發生融合(圖 20 (f))，在固體表面上逐漸穩定(圖 20 (g)-(h))。

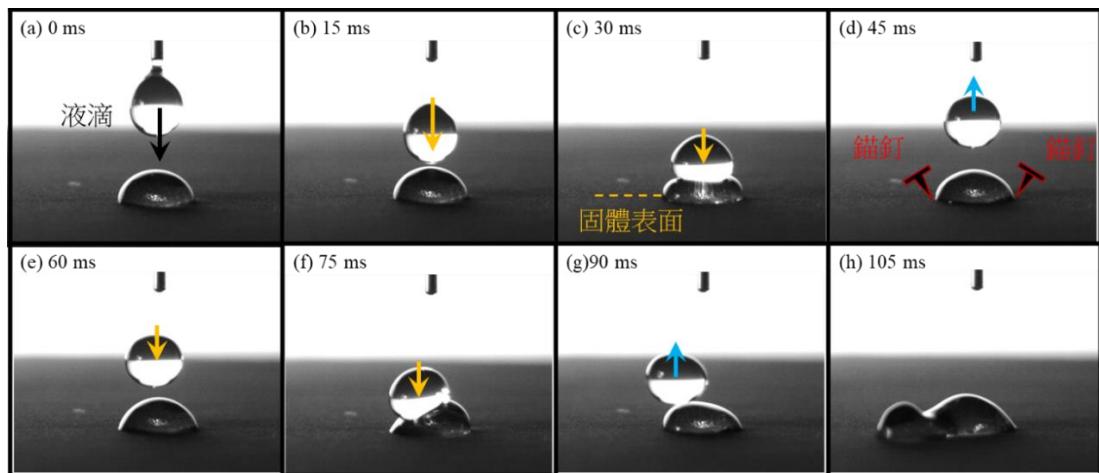


(照片來源：本研究拍攝)

圖 20、液滴碰撞濕潤的砂紙-320GRIT 表面接觸行為

(六) 砂紙-2000 GRIT 表面

液滴碰撞濕潤的砂紙-2000GRIT 表面接觸行為，如圖 21。液滴大約在 30 ms 碰及第一顆一滴(圖 21(c))，此時第一個液滴三相點相同出現「錨定現象」，將第一個液滴表面拉緊(圖 21(d))，並將第二個液滴進行回彈(圖 21(d))，第二個液滴再次落在第一個液滴表面後(圖 21(e))，發生第二次回彈及掉落(圖 21(f)-圖 21(h))，最後在第一個液滴與固體表面的三相點與第一個液滴發生融合，在固體表面上逐漸穩定。



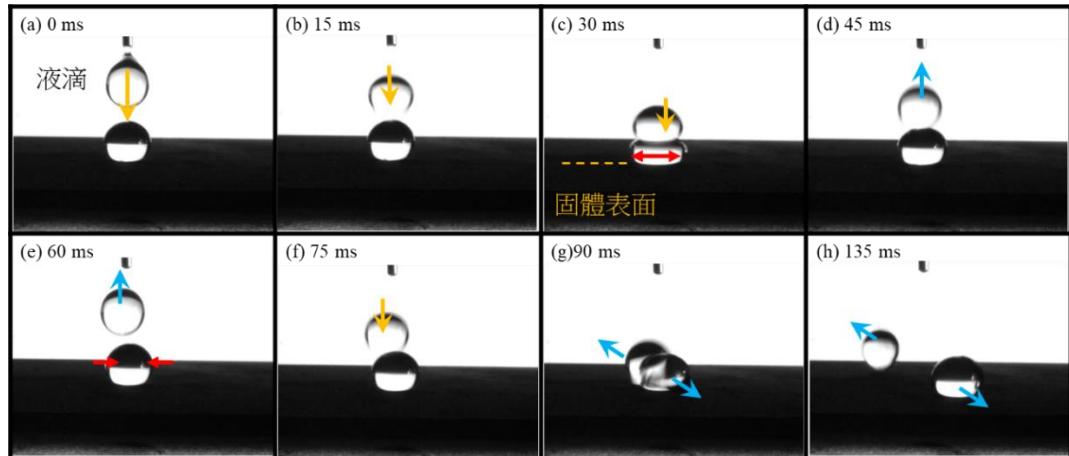
(照片來源：本研究拍攝)

圖 21、液滴碰撞濕潤的砂紙-2000GRIT 表面接觸行為

(七) 碳黑載玻片

液滴碰撞濕潤的碳黑載玻片表面接觸行為，如圖 22。液滴大約在 30 ms 碰撞第一個液滴，此時第一個液滴被擠壓(圖 22(c))，當第一個液滴被擠壓後將第二個液滴進行回彈(圖

22(d)、圖 22(e))，第二個液滴再次落在第一個液滴表面後(圖 22(f))，兩個液滴發生第二次碰撞，因為碳黑載玻片對於第一個液滴沒有抓取力，兩個液滴第二次碰撞不在中心位置，造成兩個液滴同時彈開，就像兩個皮球撞擊一樣的彈跳分離(圖 22(g)-圖 22(h))，最後兩個液滴滾出拍攝範圍。

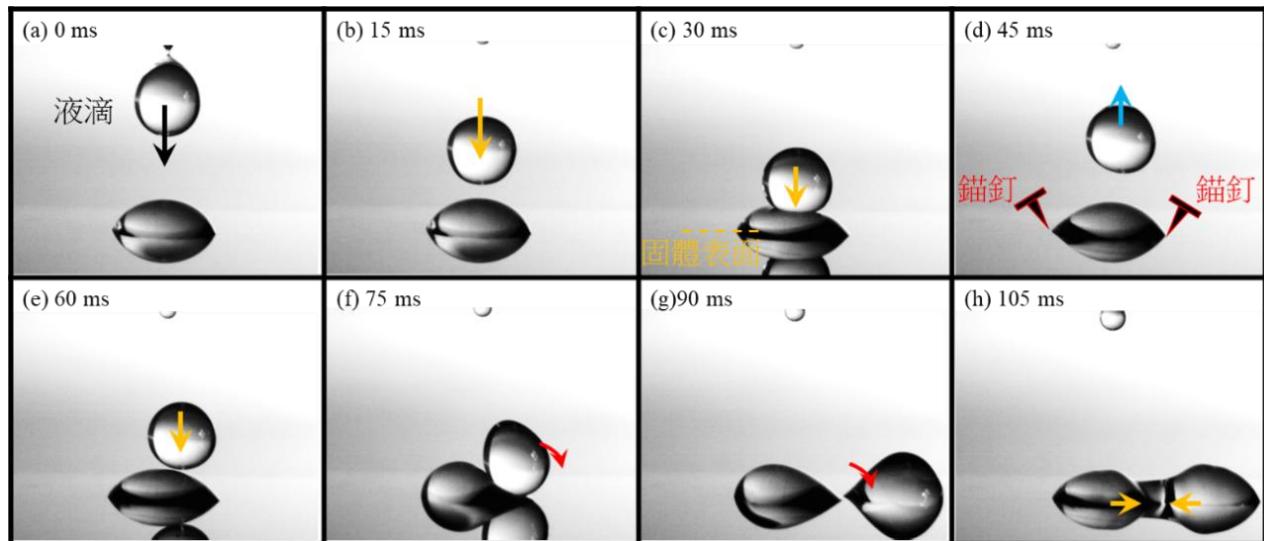


(照片來源：本研究拍攝)

圖 22、液滴碰撞濕潤的碳黑載玻片表面接觸行為

(八) IC 晶片

液滴碰撞濕潤的 IC 晶片表面接觸行為，如圖 23。液滴大約在 30 ms 碰及第一顆一滴(圖 23(c))，此時第一個液滴三相點相同出現「錨定現象」，將第一個液滴表面拉緊(圖 23(d))，並將第二個液滴進行回彈(圖 23(d))，第二個液滴再次落在第一個液滴表面後(圖 23(e))，並滾落於第一個液滴表面(圖 23(f)-(g))，接著與第一個液滴在三相點發生融合(圖 23(h))。

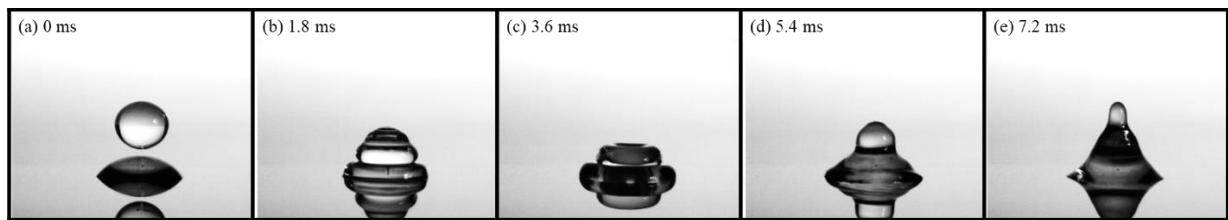


(照片來源：本研究拍攝)

圖 23、液滴碰撞濕潤的 IC 晶片表面接觸行為

四、液滴碰撞濕潤的固體表面錨定現象臨界韋伯數探討

前述研究發現在親水性固體表面滴液滴碰撞濕潤的固體表面會有錨定現象的發生，本小節透過提高液滴落下高度時，提升液滴撞擊濕潤固體表面的慣性力，當慣性力突破液體表面張力時，即可打破錨定現象，如圖 24 所示，以 IC 晶片為例，液滴碰撞濕潤的晶片表面時打破錨定現象，液滴不會發生反彈，是液滴被下方濕潤液體擠壓而產生噴柱的現象，如圖 24(d)-(e)。將液滴碰撞濕潤五種的親水性固體表面(載玻片、砂紙-120GRIT、砂紙-320GRIT、砂紙-2000GRIT 及 IC 晶片)慣性力突破液體表面張力的臨界韋伯數，整理如圖 25 所示。結果顯示：在 IC 晶片與載玻片慣性力突破液體表面張力的臨界韋伯數約為 6.4；在砂紙-2000GRIT 慣性力突破液體表面張力的臨界韋伯數約為 7.2；在砂紙-320GRIT 慣性力突破液體表面張力的臨界韋伯數約為 5.6；在砂紙-120 GRIT 慣性力突破液體表面張力的臨界韋伯數約為 4.0。



(照片來源：本研究拍攝)

圖 24、液滴碰撞濕潤的親水性固體表面(以 IC 晶片為例)當慣性力突破液體表面張力現象

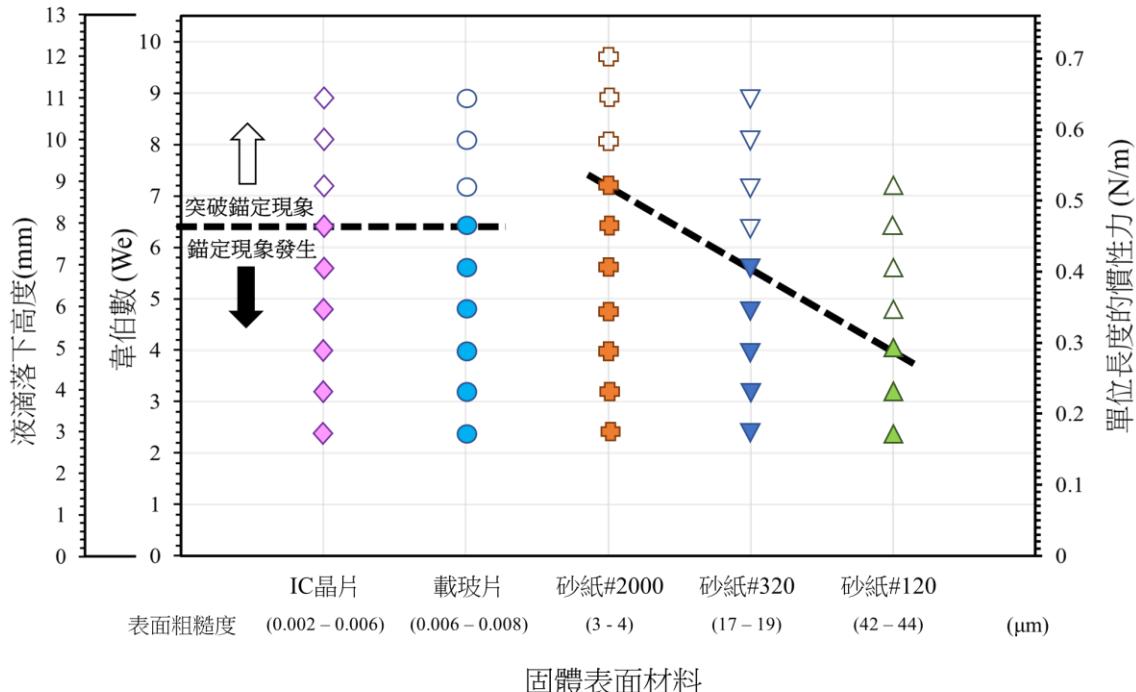


圖 25、液滴碰撞濕潤五種親水性固體表面之慣性力突破液體表面張力臨界韋伯數

(圖片來源：本研究繪製)

五、液滴以不同韋伯數條件碰撞濕潤的 IC 晶片表面之行為探討

液滴以不同韋伯數(速度)條件下碰撞濕潤的固體表面，當慣性力小於液體表面張力時，產生錨定現象，將液滴進行反彈；當慣性力突破液體表面張力時，液滴被下方濕潤液體內聚力擠壓，產生了噴柱現象。將液滴落下高度提高，也是提升液滴撞擊濕潤固體表面的韋伯數，探討液滴碰撞濕潤的固體表面之行為。圖 26 為液滴碰撞濕潤的晶片表面結果：圖 26(a)所示，當韋伯數為 2.4，慣性力小於液體表面張力，發生錨定現象，將液滴產生反彈行為。圖 26(b)所示，當韋伯數為 8.1 時，慣性力突破液體表面張力，液滴被下方濕潤液體內聚力擠壓，而液滴產生噴柱現象。圖 26(c)所示，當韋伯數為 80.5 時，液滴的慣性力大於液體的橫向阻力，將下方濕潤表面的液體往外推擠產生環狀的型態。圖 26(d)所示，當韋伯數提升至 161.1 時，液滴慣性力的推擠速度大於下方液體向外擴散的速度，而產生了像似碗狀的型態。圖 26(e)所示，當韋伯數繼續提升到 193.3 時，動能力繼續傳遞到碗狀液體圍牆的上端，而發生飛濺小液珠的冠狀樣貌。

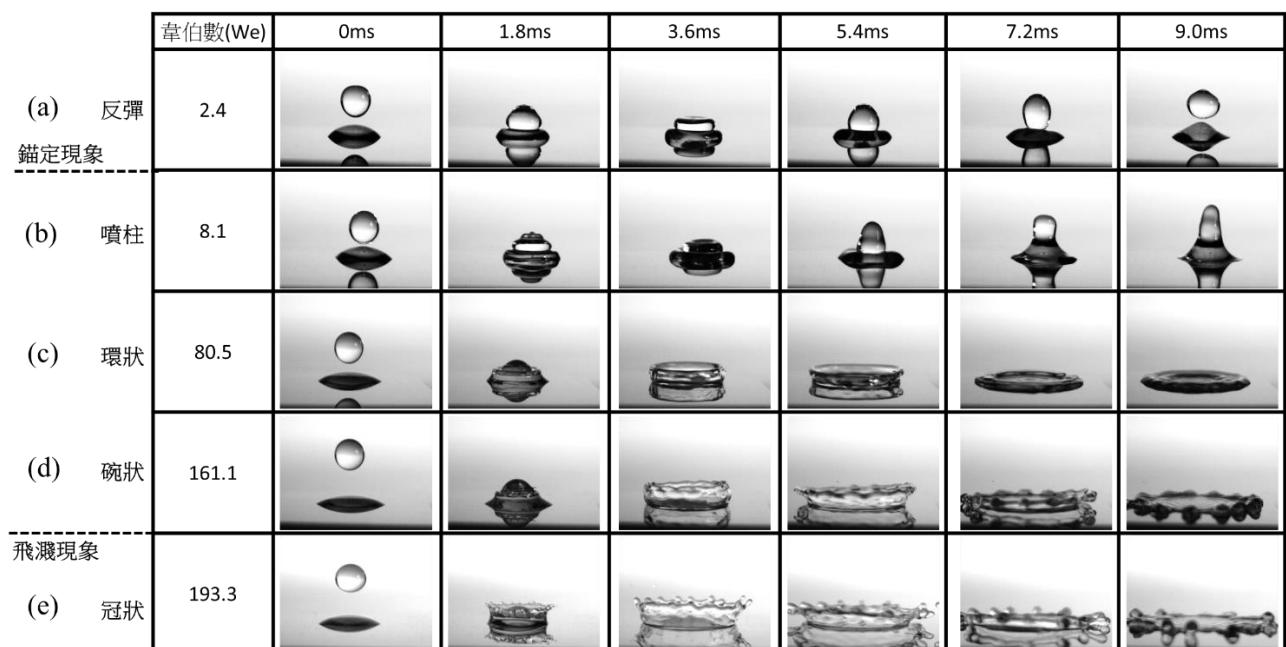


圖 26、液滴以不同韋伯數(速度)碰撞濕潤的晶片表面之行為探討

(圖片來源：本研究拍攝)

六、液滴以不同韋伯數條件碰撞高溫 IC 晶片之散熱行為探討

前一小節探討，清楚顯示液滴以不同韋伯數條件下碰撞濕潤的 IC 晶片表面，會發生反彈、噴柱、環狀、碗狀及冠狀等不同型態的樣貌發生，本節探討不同韋伯數條件下碰撞高溫的晶片表面對於散熱行為探討表現，本實驗以電磁加熱板將晶片加溫至約 85.7°C，以連續滴落 5 個液滴方式，觀察並記錄晶片表面的溫度表現，如圖 27 所示為紅外線熱影像儀的拍攝照片結果。圖 27(a)所示，當韋伯數為 2.4，因為錨定現象，造成液滴與濕潤表面沒有交互行為產生熱交換，所以液滴維持較低溫，同時晶片表面將溫速度緩慢，晶片由起始約 85.7°C 至連續滴落 5 個液滴後晶片溫度約 80.9°C，降低約 4.8°C。圖 27(b)所示，當韋伯數為 8.1，因為慣性力已突破液體表面張力，造成液滴與濕潤表面有交互行為產生熱交換，所以晶片表面溫度下降幅度比韋伯數為 2.4 略多，但液滴整體仍維持在原處，所以溫度下降趨於平緩，晶片由起始約 85.7°C 至連續滴落 5 個液滴後晶片溫度約 79.9°C，降低約 5.8°C。圖 27(c)所示，當韋伯數為 161.1，因為慣性力已突破液體表面張力，加上慣性力的推擠液體外擴產生充足交互行為，所以晶片表面溫度下降速度提升，液滴雖有往外擴散，液體鋪平範圍較大，晶片由起始約 85.7°C 至連續滴落 5 個液滴後晶片溫度約 79.5°C，降低約 6.2°C。圖 27(d)所示，當韋伯數為 193.3，除了充足熱交互行為，加上飛濺現象將熱量帶離原來位置，晶片表面溫度下降明顯，晶片由起始約 85.7°C 至連續滴落 5 個液滴後晶片溫度約 77.1°C，降低約 8.6°C，相較韋伯數為 2.4，大幅提升 80%以上的散熱效果，結果彙整如圖 28 所示。

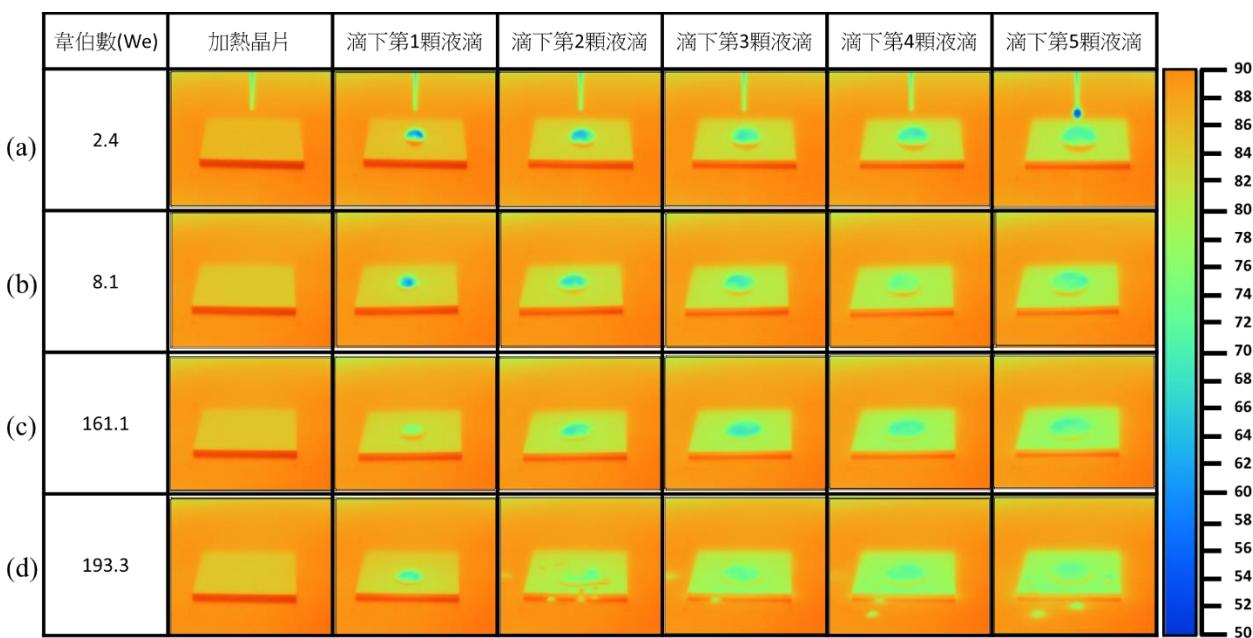


圖 27、紅外線熱影像儀的拍攝照不同韋伯數條件液滴碰撞高溫 IC 晶片之散熱結果
(圖片來源：本研究拍攝與繪製)

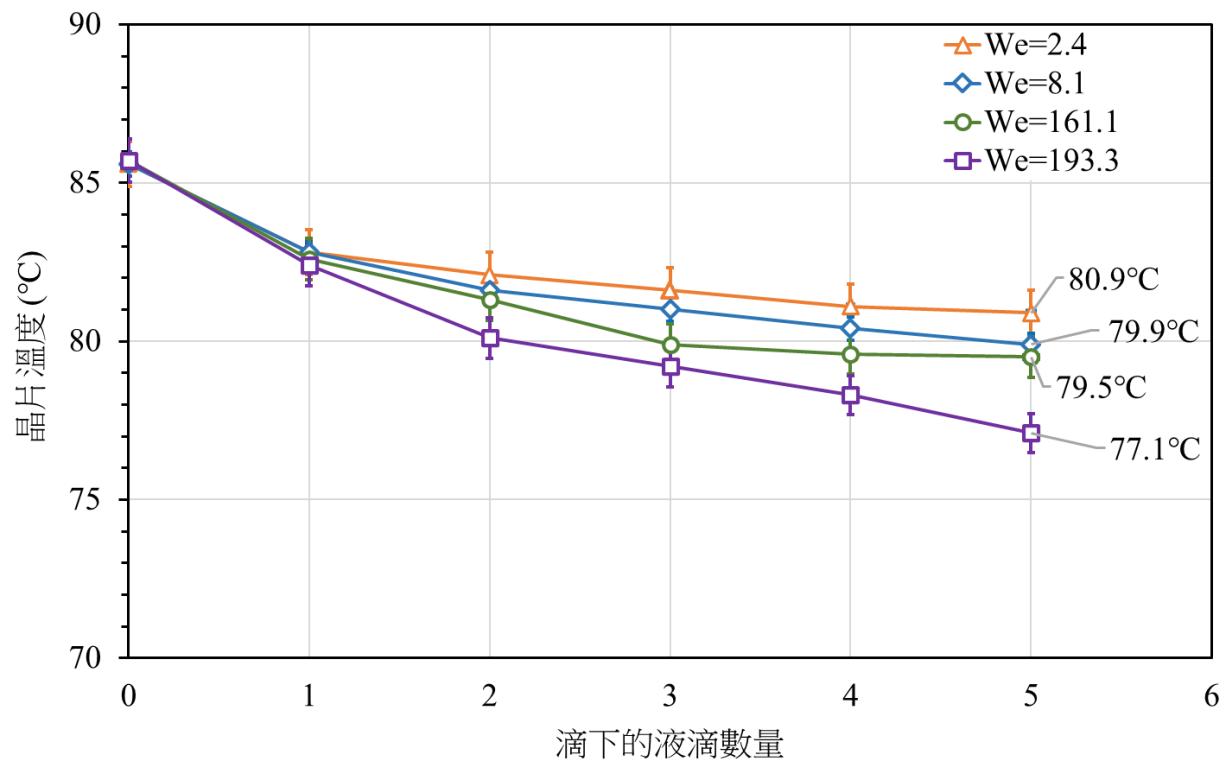


圖 28、不同韋伯數條件，以連續滴落 5 個液滴之 IC 晶片表面的溫度表現結果
(圖片來源：本研究繪製)

伍、討論

一、隨著人工智慧技術的高速發展，AI 晶片在高頻運算過程中產生大量熱能，若無妥善散熱，不僅將影響晶片的運算穩定性，更可能導致晶片永久性損壞。因此，發展高效率且低耗能的液冷散熱技術成為現今資料中心(Data Center)運營的關鍵核心技術。液冷技術的運作原理主要仰賴液滴撞擊 IC 晶片表面進行熱交換，因此，深入理解液滴在不同條件下與固體表面的動態行為，對於 AI 系統熱管理具有高度應用參考價值。

二、本研究利用注射器、針頭及蠕動泵浦，製作出穩定的液滴產生器，並以高速攝影機連續拍攝照片，以韋伯數 2.4 條件觀測到液滴自由落下，接觸固體表面瞬間行為。

(一) 液滴撞擊乾燥的固體表面行為研究，探討接觸角特性實驗觀察結果綜整，如表 4 所示。

針對親水性表面，接觸角隨粗糙度增加而變小；針對疏水性表面，接觸角隨粗糙度增加而變大。然而，本實驗結果發現，表面粗糙度對接觸角影響不大。其中原因可能來自於液滴完全貼覆於表面上，當表面過於粗糙時，因液滴表面張力特性而無法有效貼覆表面，使液滴懸浮在粗糙處，下面的空氣縫隙將影響接觸角結果。

表 4、液滴撞擊乾燥的固體表面行為結果綜整

固體材料	聚四氟乙烯	保護貼	載玻片	砂紙#120	砂紙#320	砂紙#2000	碳黑載玻片	IC 晶片
粗糙度 (μm)	0.25-0.28	0.004-0.005	0.006-0.008	42-44	17-19	3-4	0.02-0.06	0.002-0.006
接觸角 (度)	138	138	45	84	84	84	155	60
表面	超疏水性	超疏水性	親水性	親水性	親水性	親水性	超疏水	親水性
回縮行為	有	有	稍微有	稍稍回縮	稍稍回縮	稍稍回縮	反彈行為	稍微有
最終穩定時間(ms)	約225	約225	約60	約60	約60	約60	約600	約60

(二) 探討液滴碰撞乾燥的疏水性與親水性固體界面行為，液滴滴落在具高低表面能介面處時，表面能差異使得液滴自低表面的疏水性表面翻轉至高表面能的親水性表面。

(三) 液滴撞擊濕潤的固體表面行為研究，探討表面張力特性，實驗觀察結果綜整，如表 5 所示。低速度(低韋伯數)液滴撞擊親水性表面上的液滴時，因前者慣性力小於後者表面張力，因而出現了錨定現象(表面液滴)以及反彈過程(掉落液滴)；相對的，相同液滴撞擊疏水性表面上的液滴時，由於後者表面張力較小，使得錨定現象(表面液滴)消失，且表面液滴的表面張力小於掉落液滴的慣性力，因而兩者產生融合現象。

(四) 探討液滴碰撞濕潤的固體表面錨定現象臨界韋伯數及不同韋伯數條件碰撞濕潤的晶片表面行為的結果可發現，提高掉落液滴的撞擊速度(或韋伯數)可提高其慣性力，當此慣性力大於表面液滴的表面張力時，原本親水性表面液滴的錨定現象與掉落液滴的反彈

現象將消失，轉為兩液滴融合過程；且在此過程中隨著撞擊速度(或韋伯數)的增大，依序出現噴柱、環狀、碗狀以及冠狀等形狀的融合液滴。這些行為變化與液滴的慣性力與表面張力的交互關係密切相關，不僅影響液滴與晶片表面的接觸面積與時間，也直接反映在熱交換效能上。例如，低韋伯數下的反彈現象幾乎無法產生有效熱交換，而高韋伯數($We = 193.3$)所造成的冠狀飛濺則能大幅提升熱散效能，晶片降溫效率提升超過 80%。由於晶片屬親水性表面，因此撞擊液滴需較高的速度表現，一方面使其與表面液滴融合，在融合過程中與晶片表面產生熱交換；另一方面較高的速度表現可使其撞擊後產生冠狀型態的飛濺，在飛濺過程中熱量帶走，進而達到降溫冷卻效果。

表 5、液滴撞擊濕潤的固體表面行為結果綜整

固體材料	聚四氟乙烯	保護貼	載玻片	砂紙 120	砂紙 320	砂紙2000	碳黑載玻片	IC晶片
表面	超疏水性	超疏水性	親水性	親水性	親水性	親水性	超疏水性	親水性
錨定現象	無	無	有	有	有	有	無	有
回彈	無	無	有	有	有	有	有	有
行為簡述	直接融入並進行展開及縮回(接觸角被破壞)	直接融入並進行展開及縮回	回彈數次後滾落，在三相點融合	回彈一次後破壞表面與之融合	回彈一次後破壞表面與之融合	回彈兩次後掉落在三相點與之融合	回彈兩次後掉落，兩個液滴各自彈跳分開	回彈數次後滾落，在三相點融合

三、除了資料中心應用外，液滴動態行為的研究也與多項產業應用密切相關。在工業噴塗技術中，液滴分布狀態決定了塗層的均勻性與覆蓋品質；在農業噴灑應用中，掌握液滴撞擊葉面或作物表面的行為有助於提高農藥附著率與使用效率。進一步地，於微流體技術、3D 列印、噴墨印刷等領域，液滴動態控制皆是關鍵參數之一。因此，本研究結果不僅可用於 AI 晶片液冷優化設計，也能作為多項液滴應用技術的參考依據。本研究對於不同應用有著不同的效應：

- (一) 在噴墨列印技術，液滴在不同表面上的濕潤與擴散行為的觀察，可應用於提升噴墨列印的精確性與效率。通過調控液滴尺寸、速度及目標表面的粗糙度，可以優化墨水在紙張或其他基材上的沉積行為，避免過度擴散或不均勻分布。
- (二) 在固體表面的熱傳導特性，對高效能液冷技術(如電子元件散熱)具有重要啟示。特別是在高溫環境下液滴的內縮與蒸發行為，可用於設計更有效的冷卻機制，提升熱管理效率。
- (三) 液滴撞擊固體表面的動態行為研究，可應用於工業噴塗過程，例如汽車塗裝或防腐塗層。通過調整液滴的動量與表面粗糙度，可以實現更均勻的塗層分佈，減少材料浪費並提升產品品質。

(四) 液滴操控技術與觀察結果，可應用於微流體裝置的設計，例如醫療診斷晶片或化學反應器。

液滴在微小尺度下的穩定性與濕潤特性，能幫助精確控制液體流動與反應過程。

(五) 在材料表面改進研究揭示了表面粗糙度與液滴行為的關聯性，這可用於開發新型表面材料。

例如，設計具有特定粗糙度的防水或自潔表面，提升其在日常生活或工業中的應用價值。

四、本研究結果說明調整固體表面的親疏水特性、液滴碰撞的條件(韋伯數)或改變液體的表面張力，可以增強或減弱錨定效應或呈現出多種撞擊後的型態表現，以適應特定應用需求。各種撞擊行為在應用中的影響取決於具體需求：它可能提升液滴的穩定性與附著力(如噴塗、冷卻)，也可能帶來過度固定或分布不均的挑戰(如列印、微流體)。因此，在實際應用中，需根據目標(如效率、均勻性或動態性)設計表面特性與液滴參數，以充分利用或避免個現象的影響。本研究的觀察為這些調控提供了實驗基礎，具有重要的實用指導意義；未來的研究可以調整液滴參數調控，改變液滴的初始速度、尺寸或表面張力等參數，有助更完善實驗的結果。

陸、結論

本研究利用注射器、針頭及蠕動泵浦，製作出穩定的液滴產生器，每次可產生直徑 3mm(體積為 14.14mm^3)的單一顆液滴，高速攝影機最快可達每間隔 1.8 毫秒連續拍攝照片實驗進行觀察。

一、液滴撞擊乾燥的固體表面行為探討：其接觸角與固體表面粗糙度沒有相關性，聚四氟乙稀(鐵氟龍)表面接觸角約為 138 度，屬於疏水性；智慧手錶保護貼(玻璃)表面接觸角也約為 138 度，屬於疏水性；載玻片表面接觸角約為 45 度，屬於親水性；砂紙-120GRIT、-320GRIT、-2000GRIT 表面接觸角皆約接觸角 84 度，屬於親水性；碳黑載玻片表面接觸角約為 155 度，屬於超疏水性，IC 晶片表面接觸角約為 60 度，屬於親水性。液滴落下撞擊濕潤的固體表面之接觸行為的觀察結果顯示：聚四氟乙稀(鐵氟龍)、智慧手錶保護貼(玻璃)的疏水性表面。此外，液滴碰撞乾燥的疏水性與親水性固體界面行為探討，研究發現液滴的一側會被固體表面的親水性出現「錨定現象」將液滴牢牢拉緊，而另一側則會像皮球的出現反彈，造成液滴自己產生翻轉的能力，就像會“翻筋斗”的樣子。

二、液滴撞擊濕潤的固體表面行為探討：當第二個液滴滴落與第一液滴表面接觸時，第二顆液滴會與第一顆液滴直接融合成一體的大液滴；載玻片及砂紙-120GRIT、-320GRIT、-2000GRIT 的親水性表面，當第二個液滴滴落與第一液滴表面接觸時，出現「錨定現象」，固體的親水性將第一顆液滴表面拉緊，第一顆液滴表面不易被第二顆液滴擊破，而會將第二顆液滴進行回彈行為。液滴碰撞濕潤的碳黑載玻片表面接觸行為液滴碰撞第一個液滴時，第一個液滴被擠壓後將第二個液滴進行回彈，因為碳黑載玻片對於第一個液滴沒有抓取力，當第二個液滴再次落碰撞第一個液滴表面，造成兩個液滴就像兩個皮球撞擊一樣的同時彈跳分開。

三、液滴碰撞濕潤的固體表面的臨界韋伯數及散熱探討：液滴在不同韋伯數條件下撞擊親水性濕潤固體表面之行為及其熱交換效果。當液滴慣性力小於液體表面張力時，將產生錨定現象，液滴反彈且與濕潤表面之交互作用有限，導致熱交換效果不明顯；當慣性力突破液體表面張力時，液滴能打破錨定，與下方濕潤液體發生強烈交互作用，進而產生噴柱、環狀擴散、碗狀堆積與冠狀飛濺等多種典型動態型態。研究亦分析不同材質與粗糙度之親水性固體表面對臨界韋伯數的影響，結果顯示：IC 晶片與載玻片的臨界韋伯數約為 6.4，砂紙-2000 GRIT 為 7.2，砂紙-320 GRIT 為 5.6，砂紙-120 GRIT 則僅為 4.0，顯示表面性質顯著影響液滴行為轉換的門檻。進一步針對液滴撞擊加熱 IC 晶片的熱交換實驗結果顯示，較高韋伯數($We = 193.3$)在產生飛濺現象下，能有效促進熱能移除，使 IC 晶

片溫度從 85.7°C 下降至 77.1°C ，降幅達 8.6°C ，相較低韋伯數條件($\text{We} = 2.4$)之降幅 4.8°C 提升超過 80%。

本研究證實韋伯數調控下的液滴動力行為，不僅決定撞擊模式，更對於熱傳效能具有顯著影響，未來可作為發展高效液冷系統與熱管理應用之重要參考依據；液滴與固體表面接觸行為是一個涉及流體動力學、界面科學及熱傳導的複雜現象，期盼透過此液滴與固體表面的接觸現象探討，有助於於噴墨列印、塗層技術、燃油霧化、農業噴灑及電子冷卻等領域應用研究。

柒、參考文獻資料

- 一、表面張力。維基百科-自由的百科全書。
- 二、吳昱良(2012)。[液滴撞擊固體表面時的傳播現象](#)。2012年臺灣國際科學展覽會。
- 三、林怡孝、魏伊廷、吳盈蕙等(1997)。[水珠滴落到固液表面之擴散探討](#)。中華民國第47屆中小學科學展覽會。
- 四、許景茹、劉暢等(2018)。[翻滾吧水滴—奈米碳黑砂紙疏水性質與水滴在其表面滾動機制之探討](#)。中華民國第58屆中小學科學展覽會。
- 五、穆亭昕、邱量、洪子晴(2023)。[親疏有別—水滴在親疏交錯界面之運動現象探討](#)。中華民國第63屆中小學科學展覽會。
- 六、水性質表。維基百科-自由的百科全書。
- 七、若芽(2022)。[為什麼在下雨天時，你不會被雨滴狠狠痛扁?](#)。泛科學 PanSci。

【評語】030101

本作品以液滴撞擊不同親疏水性表面的行為為出發點，嘗試將研究成果應用於晶片冷卻，展現出作者對科學應用性的深入思考。更值得肯定的是，整體實驗設計縝密，觀察與測量皆具高度的細緻度與系統性，並能引入韋伯數進行定量分析。建議未來可再進一步探索韋伯數的物理意涵，讓分析更為精準；同時鼓勵作者發掘此研究在日常生活中更多元的應用場景，以強化作品的實用價值。

作品海報

液滴與固體表面的碰撞行為探討

摘要

- ◎ 本研究利用注射器、針頭與蠕動泵穩定直徑約3mm的單一液滴，透過高速攝影機拍攝液滴自由落下碰撞乾燥與濕潤的固體表面的行為探討。
- ◎ **液滴撞擊乾燥表面研究**：固體表面不同親疏水特性，直接影響接觸角結果。理論上親水表面粗糙度增大會降低接觸角，疏水表面則相反；實驗發現砂紙粗糙度對於接觸角的影響不顯著，可能是因液滴懸浮於粗糙表面，形成空氣縫隙的結果。
- ◎ **液滴撞擊濕潤表面研究**：發現親水性材質會拉緊液滴表面出現「錨定現象」，使第二顆液滴回彈；超疏水碳黑表面則造成液滴彈跳分離；液滴落於親疏水材質界面，液滴出現一半錨定，另一半反彈，造成了翻轉行為。撞擊疏水性表面則產生融合，主要是因為表面張力與慣性力之間的相對大小關係。
- ◎ **韋伯數對液滴碰撞行為影響**：韋伯數愈高，慣性力愈大，超越表面張力時錨定與反彈現象消失，轉為融合，並產生噴柱、環狀、碗狀到冠狀的飛濺等行為。高韋伯數可有效提升晶片散熱效率，冠狀飛濺型態可使晶片散熱效果提升約80%。

研究目的

液滴與固體表面接觸行為是涉及流體動力學、界面科學及熱傳導的複雜現象，本研究目的如下：

- 一、固體的表面特徵與液滴接觸角的關聯。
- 二、液滴的表面張力與液滴落下慣性力的關係。
- 三、液滴落下的慣性力與晶片溫度變化的關係。

方法與設備

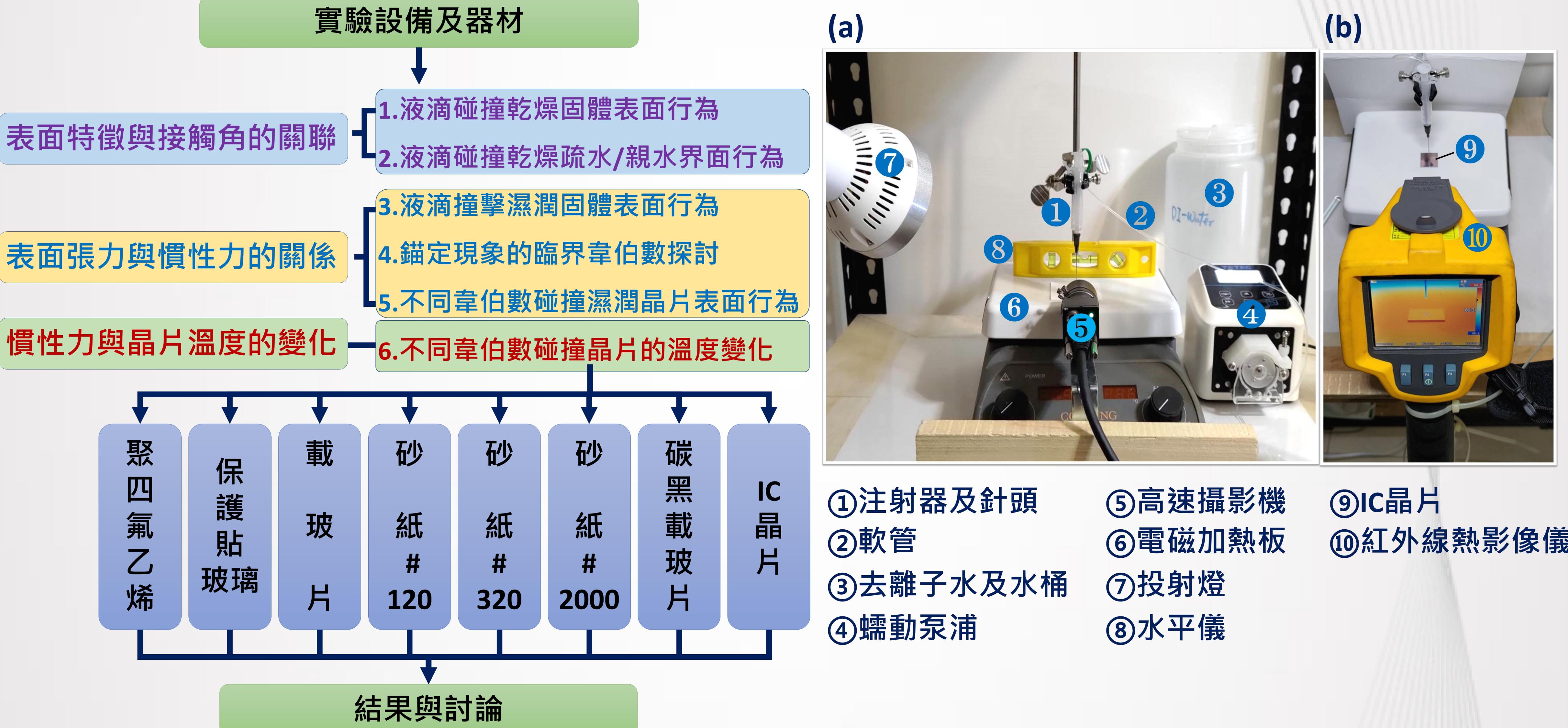
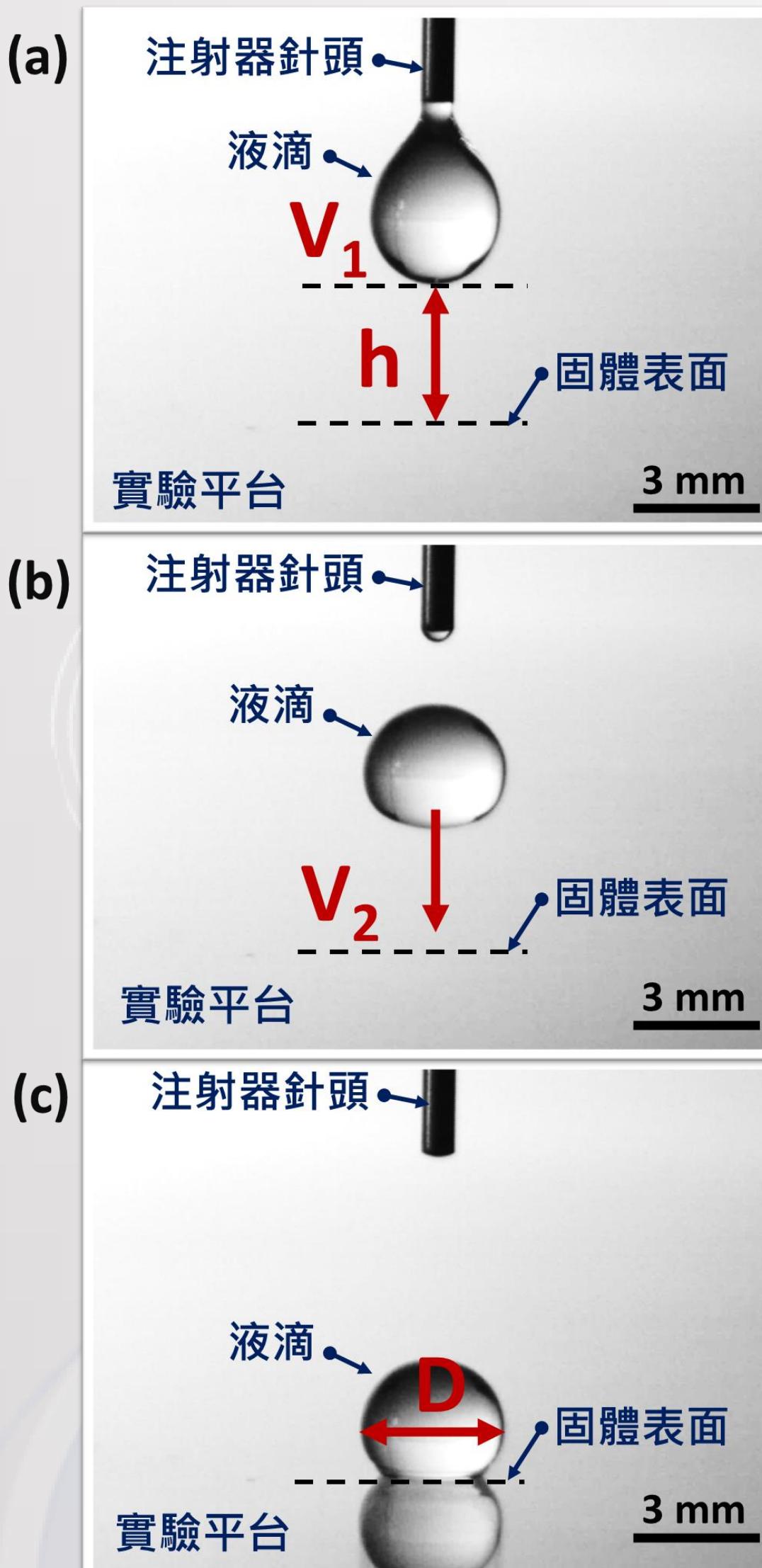


圖1、研究方法

圖2、實驗設備



$$\text{韋伯數(We)} = \frac{\text{慣性力}}{\text{表面張力}}$$

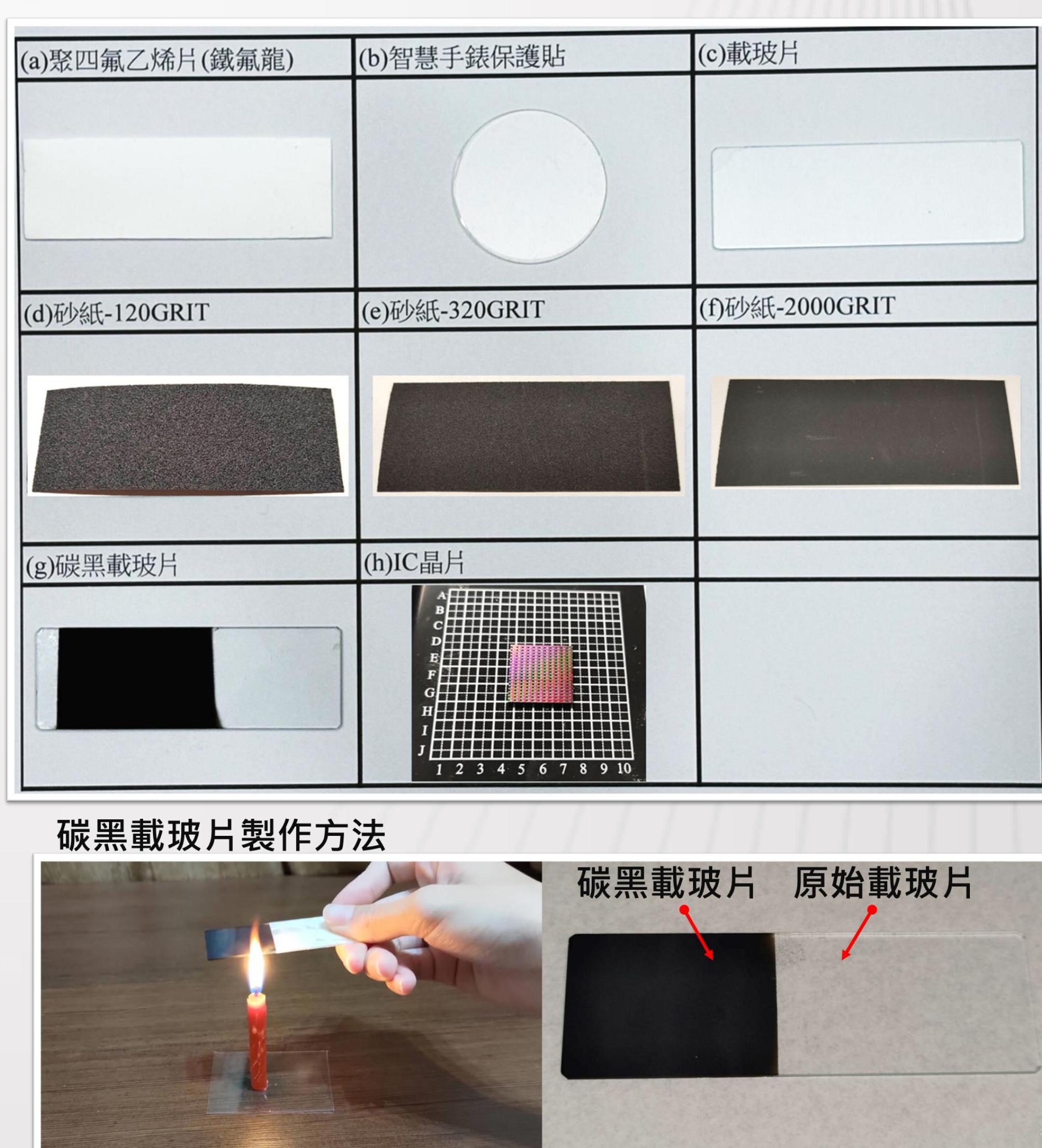
$$We = \frac{\rho D V_2^2}{\sigma} = \frac{\rho D \times 2gh}{\sigma}$$

$$V_2^2 = V_1^2 + 2gh$$

We : 韋伯數、 ρ : 液體密度、
D : 液滴直徑、 σ : 液體表面張力、
h : 液滴落下高度、
 V_1 : 液滴落下初始速度(=0)、
 V_2 : 液滴撞擊固體表面速度。

圖3、液滴產生及液滴碰撞的韋伯數定義

圖4、八種不同固體表面材料



一、液滴碰撞乾燥的固體表面行為探討

- 觀測液滴於固體表面的行為：親水性的載玻片與砂紙只稍微展開和回縮行為；疏水性的鐵氟龍、智慧手錶保護貼有明顯的展開及回縮行為；超疏水性的碳黑載玻片發生完全反彈行為。
- 觀測液滴於固體表面穩定的時間：親水性的載玻片、IC晶片與砂紙約需60ms；疏水性的鐵氟龍、智慧手錶保護貼約需要225 ms；超疏水性的碳黑載玻片約需要615ms才能穩定。
- 觀測液滴的接觸角：載玻片(45°)、IC晶片(60°)及三種不同粗糙度砂紙(84°)屬於親水性；鐵氟龍(138°)、智慧手錶保護貼(138°)屬於疏水性；碳黑載玻片(155°)屬於超疏水性。實驗發現砂紙粗糙度對於接觸角的影響不顯著。

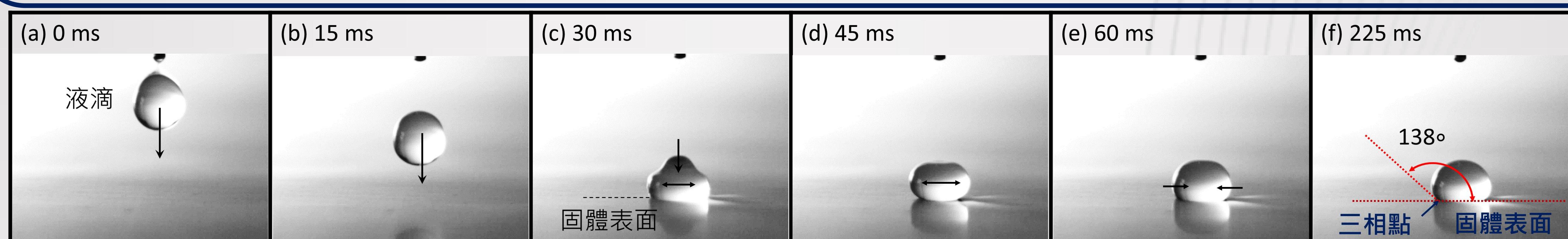


圖5、液滴碰撞乾燥的固體表面行為(鐵氟龍)

固體材料	載玻片	IC晶片	砂紙 120GRIT	砂紙 320GRIT	砂紙 2000GRIT	聚四氟乙烯 (鐵氟龍)	智慧手錶保護 貼(玻璃)	碳黑載玻片
接觸角	45°	60°	84°	84°	84°	138°	138°	155°
穩定狀態								

圖6、液滴在固體表面穩定狀態的接觸角

二、液滴碰撞乾燥的疏水性與親水性固體界面行為探討

- 研究發現液滴接觸到固體表面時：在親水(右)側的液體三相點出現壓縮的波紋，超疏水(左)側沒有。
- 液滴在親水(右)側表面出現「錨定現象」將液滴牢牢拉緊，而液滴的在超疏水(左)側表面出現完全反彈行為，造成液滴就像會“翻筋斗”可以產生翻轉的能力，直接從左側翻轉到至右側。

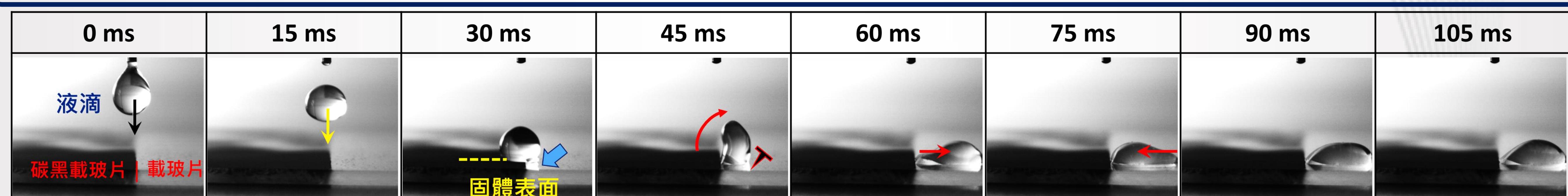


圖7、液滴碰撞乾燥的疏水性與親水性固體界面行為

三、液滴碰撞濕潤的固體表面行為探討

- 液滴於濕潤表面穩定的狀態：在親水性的載玻片與三種砂紙在反彈後最後在三相點發生融合；疏水性的鐵氟龍、智慧手錶保護貼發生直接融合；超疏水性的碳黑載玻片回彈兩次後掉落，兩個液滴各自彈跳分開。
- 液滴於濕潤表面的行為：疏水性的鐵氟龍、智慧手錶保護貼沒有回彈行為。親水性的載玻片與三種不同粗糙度砂紙及超疏水性的碳黑載玻片有完全回彈行為。
- 液滴於濕潤表面的現象：親水性的載玻片、IC晶片與三種不同粗糙度的砂紙皆有明顯的「錨定現象」。

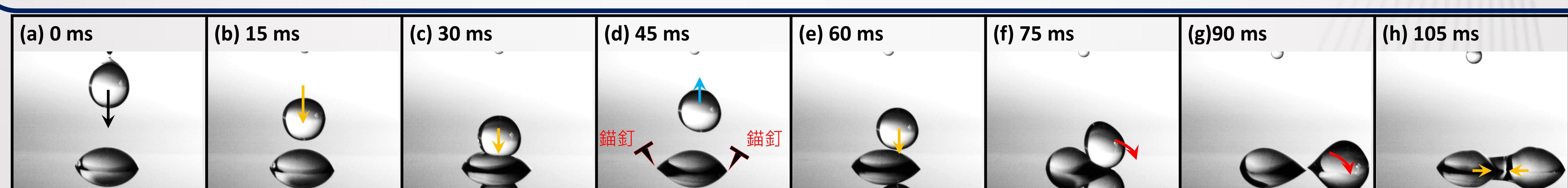


圖8、液滴碰撞濕潤的親水性固體表面行為(晶片)

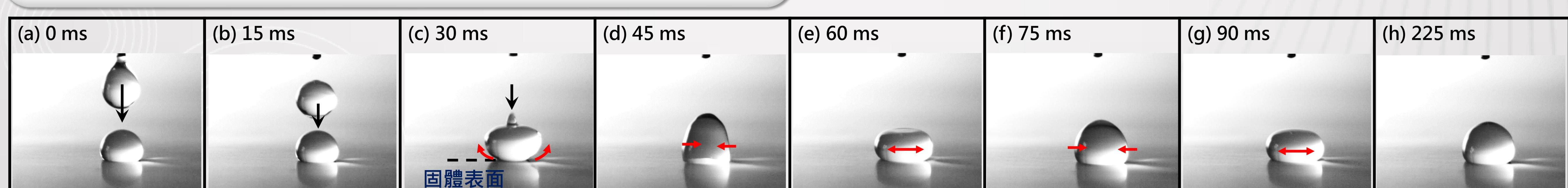


圖9、液滴碰撞濕潤的疏水性固體表面行為(鐵氟龍)

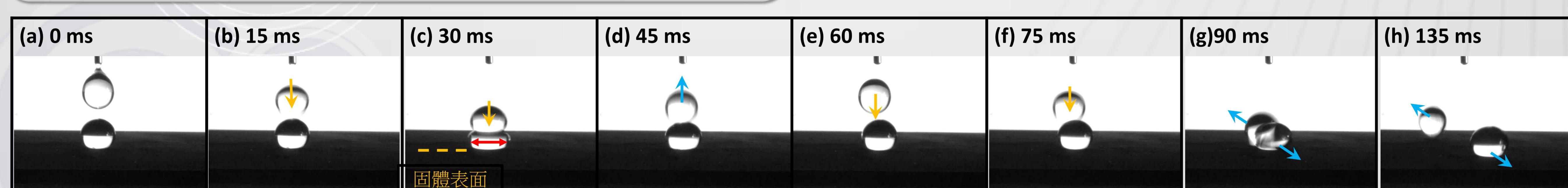


圖10、液滴碰撞濕潤的超疏水性固體表面行為(碳黑載玻片)

四、液滴表面張力與慣性力的關係及對晶片的散熱影響探討

- 當增加液滴撞擊的慣性力時，會產生不同的動態行為，當韋伯數由2.4逐漸增加到193.3時，液滴撞擊後會產生：噴柱現象→環狀擴散→碗狀堆積→冠狀飛濺現象。
- 液滴撞擊濕潤表面的散熱效果隨韋伯數增加而提升。當韋伯數為2.4時因錨定現象，熱交換有限，僅降溫4.8°C；隨韋伯數增至8.1與161.1，液滴與表面交互加強，降溫提升至5.8°C與6.2°C；韋伯數達193.3時，因飛濺將熱量帶離，降溫達8.6°C，散熱效果相較低韋伯數提升約80%。

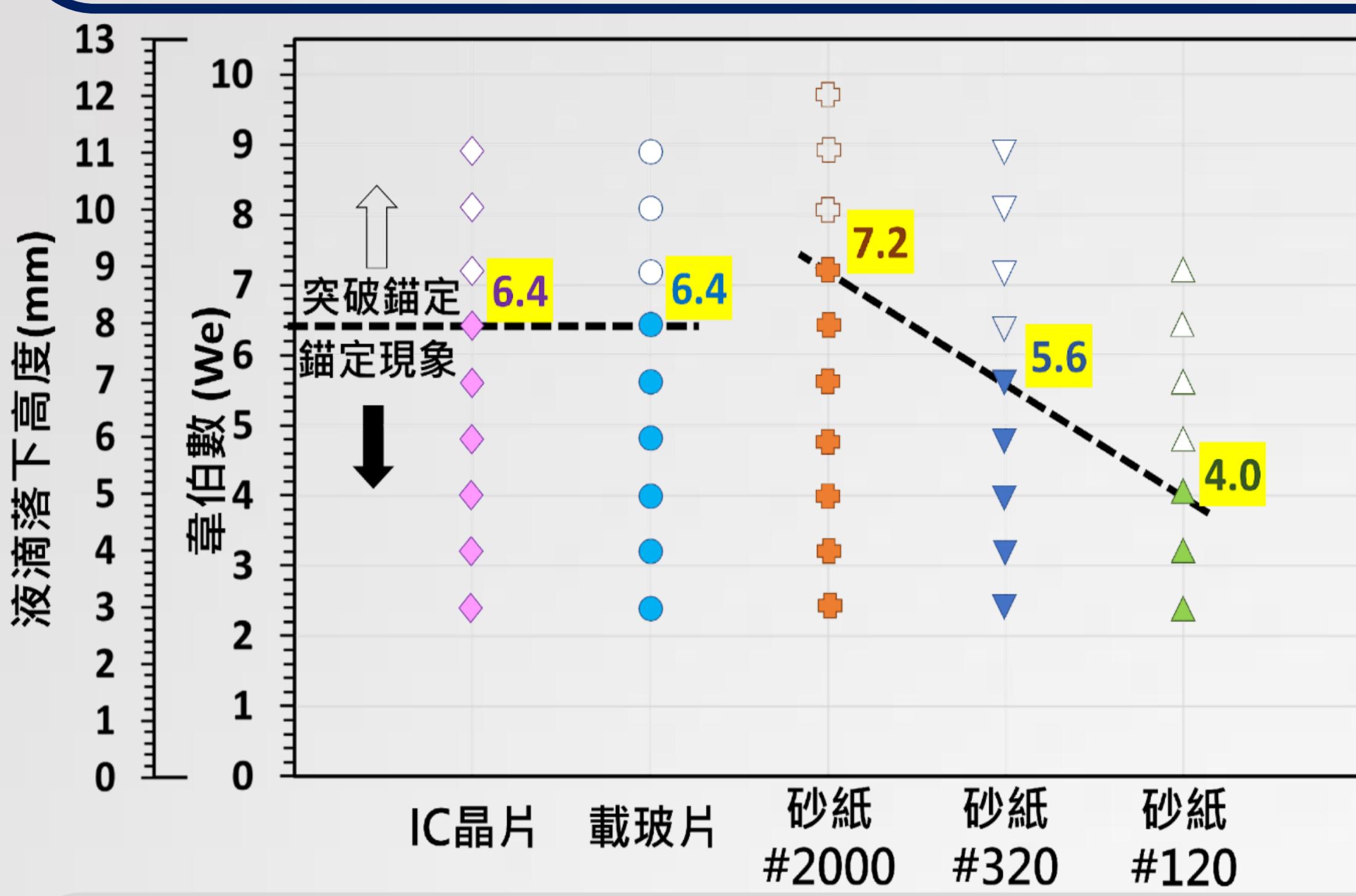


圖11、慣性力突破液體表面張力的臨界韋伯數

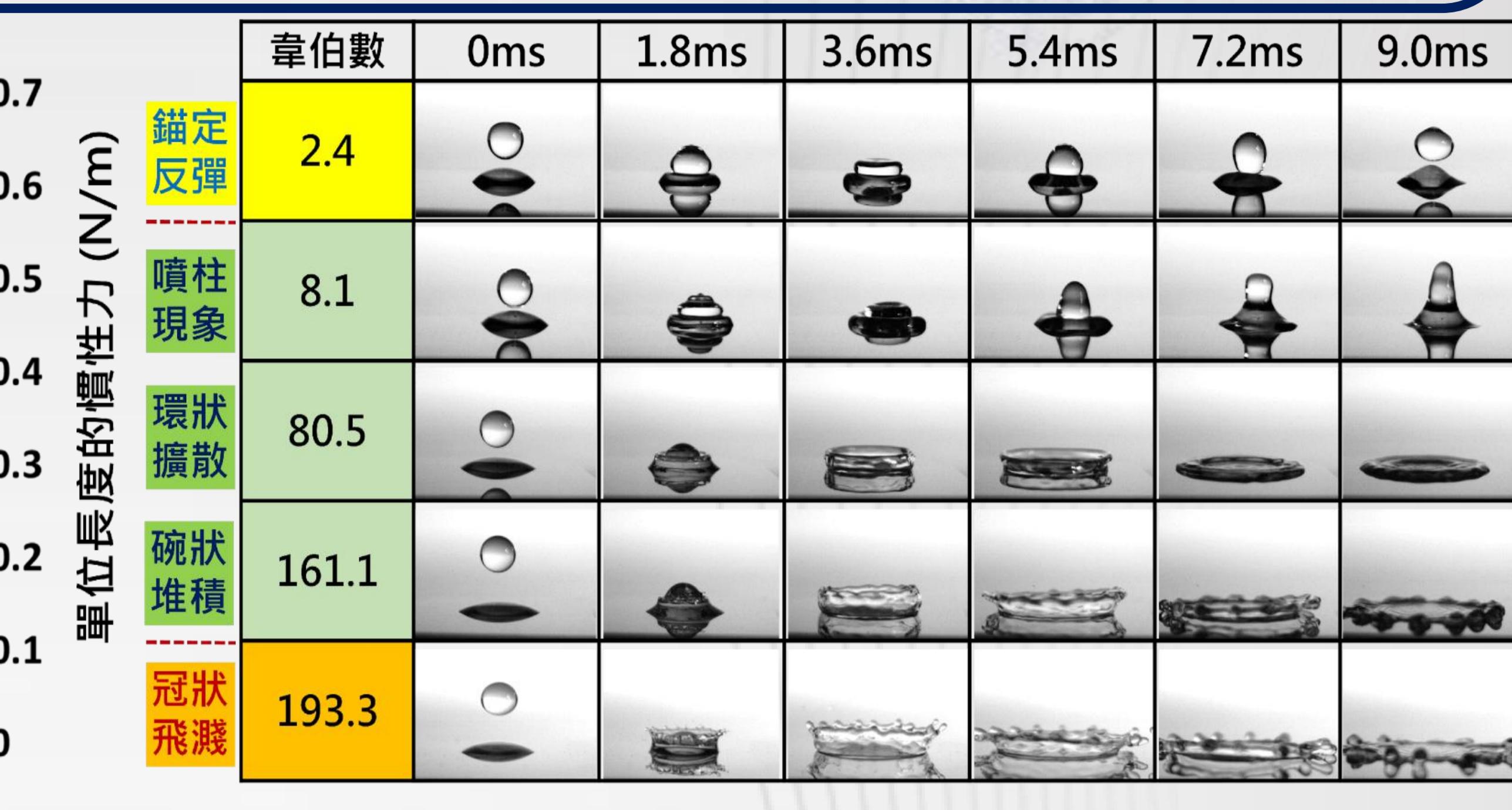


圖12、不同韋伯數碰撞濕潤的晶片表面行為

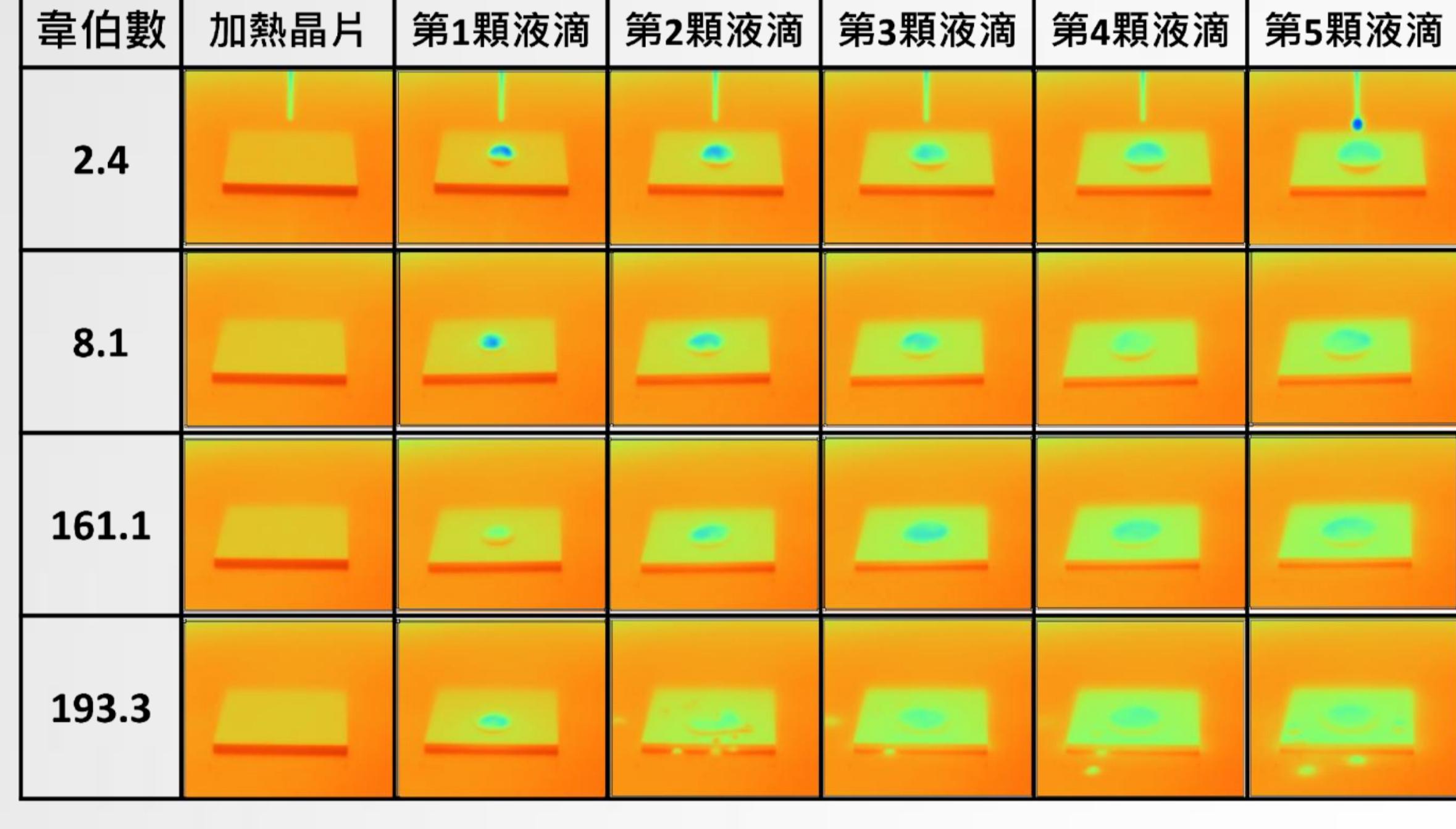


圖13、不同韋伯數液滴碰撞晶片的熱影像結果

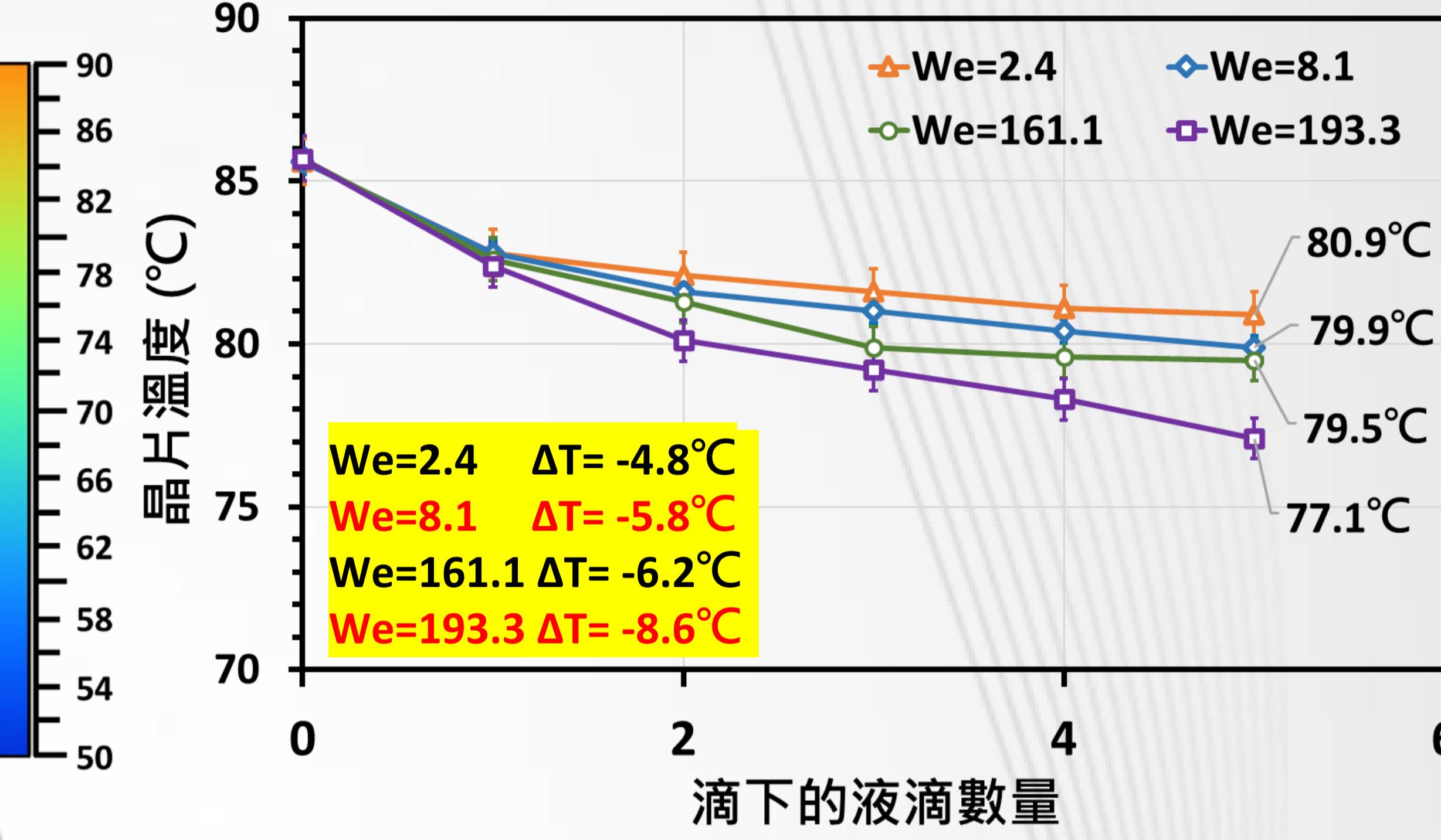


圖14、連續液滴碰撞晶片的溫度改變結果

肆 結 論

- 液滴碰撞乾燥固體表面，疏水性表面有較明顯擴張及回縮行為；超疏水性表面液滴在表面上出現彈跳行為；親水性表面液滴則快速穩定下來。液滴落於疏/親水交界處，在親水側出現「錨定」將液滴牢牢拉緊，在疏水側像皮球的反彈，液滴呈現類似“翻筋斗”的動態行為。
- 液滴碰撞濕潤固體表面，親水性表面（載玻片、砂紙與晶片），「錨定現象」導致第一液滴穩固，使第二液滴產生回彈；超疏水性表面（如碳黑載玻片），因無抓取力，兩液滴碰撞後如皮球般同時彈跳分離，顯示潤濕表面特性顯著影響液滴交互行為。
- 液滴在不同韋伯數條件下撞擊濕潤固體表面之行為，慣性力不足時產生錨定，慣性力超越表面張力時產生噴柱、環狀擴散、碗狀堆積與冠狀飛濺等動態行為。不同材質與粗糙度改變臨界韋伯數，顯示表面性質會影響液滴行為轉換的臨界門檻。
- 不同韋伯數碰撞濕潤晶片表面行為與晶片的溫度變化，當韋伯數低於臨界值，液滴因錨定現象僅反彈，熱交換有限；當韋伯數超過臨界值，液滴打破表面張力產生飛濺與擴散，有助熱能移除。高韋伯數(We = 193.3)下相較低韋伯數條件(We = 2.4)，使IC晶片散熱效率提升約80%。

表1、液滴撞擊乾燥與濕潤的固體表面行為結果綜整

固體材料	載玻片	IC晶片	砂紙#120	砂紙#320	砂紙#2000	聚四氟乙烯	保護貼	碳黑載玻片
粗糙度(μm)	0.006-0.008	0.002-0.006	42-44	17-19	3-4	0.25-0.28	0.004-0.005	0.02-0.06
液滴撞擊乾燥的固體表面	接觸角(度)	45	60	84	84	84	138	138
	表面	親水性	親水性	親水性	親水性	親水性	疏水性	超疏水性
	回縮行為	稍微	稍微	稍微	稍微	稍微	明顯	直接反彈
液滴撞擊濕潤的固體表面	穩定時間(ms)	約60	約60	約60	約60	約60	約225	約225
	錨定現象	有	有	有	有	無	無	無
	回彈	有	有	有	有	無	無	有
行為簡述		回彈後滾落三相點融合	回彈後滾落三相點融	回彈後滾落三相點融合	回彈後滾落三相點融合	直接融合(接觸角改變)展開及縮回	直接融合(接觸角改變)展開及縮回	回彈多次後兩個液滴各自彈跳分開

伍 未來展望

- 調整液滴參數調控，改變液滴的黏滯性(表面張力)及液體薄膜厚度等參數，可影響飛濺發生的現象與結果，有助於瞭解完整的液滴與濕潤的固體表面行為，獲得更有效的熱交換行為。
- 充分瞭解液滴在不同表面上的濕潤與擴散行為有助提升工業效能的價值，除可提升熱管理效率、噴墨列印的精確性，也可以應用在微流體裝置和新型表面材料的開發。