

具交替潤濕性微通道結構之沙漠甲蟲啟發捕霧元件設計

許庭瑜¹、薛涵宇^{*1}

¹ 國立中興大學材料科學與工程學系

E-mail: hyhsueh@nchu.edu.tw

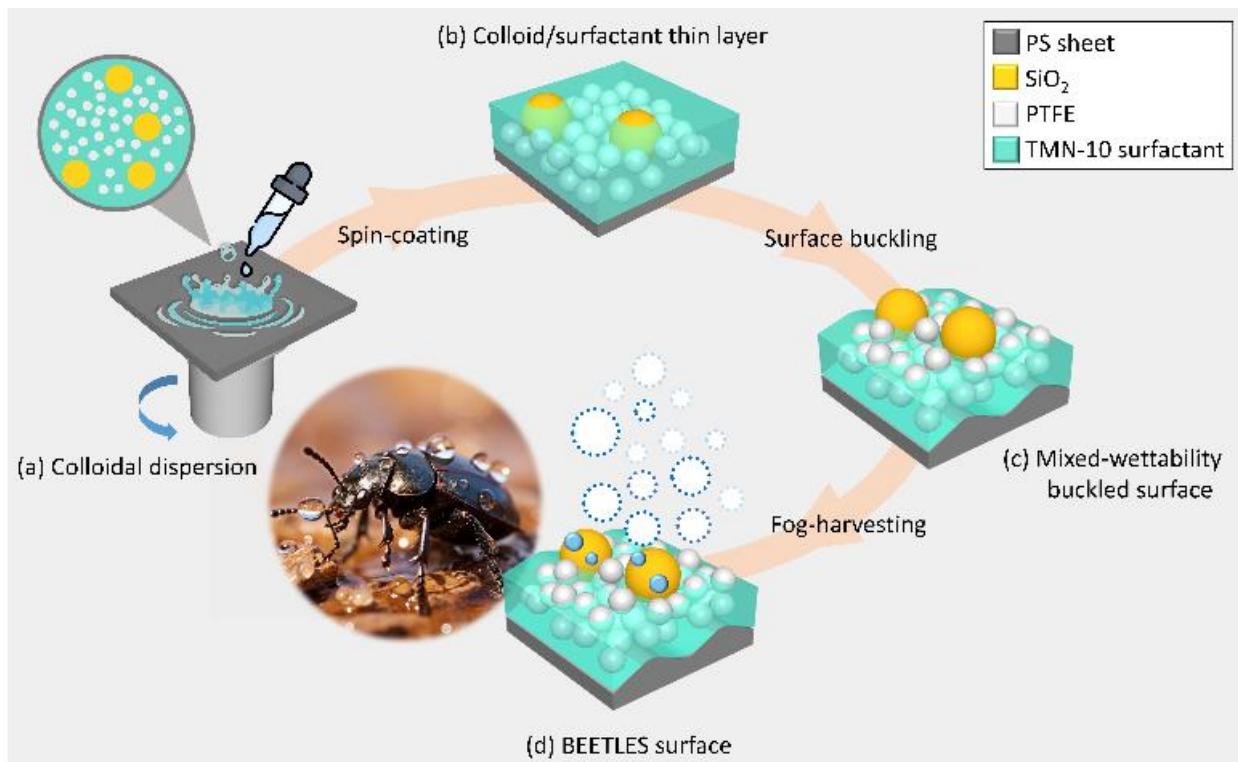
一、前言

全球缺水問題日益嚴重，乾旱帶來的不僅是生存危機，更深刻影響社會與經濟發展。如何獲取乾淨的淡水資源，是人類永續生存的重要課題，因此「有效取得淡水」也成為先進科技發展的關鍵指標之一。近年來，一種能從霧氣中捕獲水珠並加以收集利用的「捕霧集水技術」受到廣泛關注。在捕霧裝置的設計上，研究者多從自然界具有優異集水能力的生物獲取靈感，如沙漠甲蟲、仙人掌、蜘蛛絲及豬籠草等[1-2]。其中，沙漠甲蟲的仿生機制最具代表性。沙漠甲蟲的鞘翅表面具有微米級顆粒狀突起，並呈現親水與疏水區域交替分佈的圖案化結構。這些突起有助於攔截霧氣中的微小水珠；親水區可促進水珠凝結與聚集，而疏水區則可形成流動通道，使水珠順利滑落與輸送[3]。此外，當環境濕度上升時，沙漠甲蟲會展現特有的「背霧行為 (fog-basking)」，牠會將身體前傾以增加迎風面積，藉此提升捕捉霧滴的效率[4]。本研究受到沙漠甲蟲鞘翅結構的啟發，設計出一種兼具微通道與交替潤濕性表面的新型捕霧集水元件。該元件的表面由分散親水顆粒於疏水顆粒懸浮液後，塗佈於可熱縮之聚苯乙烯基板上製成。經熱縮處理後，尺寸較大的親水顆粒形成表面突起，能促進霧滴的凝結與捕獲；而疏水性屈曲表面則構成微通道，利於水珠的快速輸送與收集。除此之外，本研究亦結合鳥巢蕨漏斗狀葉片的幾何結構，實現雙仿生設計，進一步提升霧滴攔截效率與大尺度定向水流導引效果。

二、沙漠甲蟲仿生表面的設計與製作

為了模仿沙漠甲蟲鞘翅表面的特性，本研究選用聚四氟乙烯 (polytetrafluoroethylene, PTFE) 與二氧化矽 (SiO_2) 顆粒作為主要材料[5]，分別代表疏水與親水區域。PTFE 具有低表面能與高疏水性，其多個 C-F 鍵賦予材料優異的化學穩定性與抗腐蝕性；而 SiO_2 為自然界常見的親水性物質，無毒且容易合成，適合作為模仿甲蟲翅鞘中「凝結點」的材料。如圖一(a) 所示，首先將 PTFE 顆粒、 SiO_2 顆粒、去離子水與非離子型界面活性劑 Triton X-10 (TMN-10) 混合，製備出含有親疏水粒子的分散液，並以攪拌方式使其均勻分佈。TMN-10 屬於烷基苯氧基聚乙氧基乙醇類界面活性劑，能包覆 PTFE 顆粒形成穩定膠束 (micelles)，促進其在水相中的分散性。接著，如圖一(b) 所示，選用具可熱收縮性之聚苯乙烯 (PS) 薄片作為基板，以乙醇清洗後再經紫外臭氧 (UV-ozone) 處理，去除表面污染物並提高親水性。隨後，將前述混合分散液以旋轉塗佈法 (spin coating) 均勻塗佈於 PS 薄片上，形成初步的複合薄膜。完成塗佈後，在 140°C 下進行熱處理，使 PS 薄片釋放內部預應力而產生約 60% 的面縮比。此過程中，薄膜表面自發形成微米級皺褶結構，並伴隨 TMN-10 的熱遷移，促使 PTFE 顆粒暴露於表層形成超疏水區，而 SiO_2 顆粒則形成親水區域，如圖一(c) 所示。

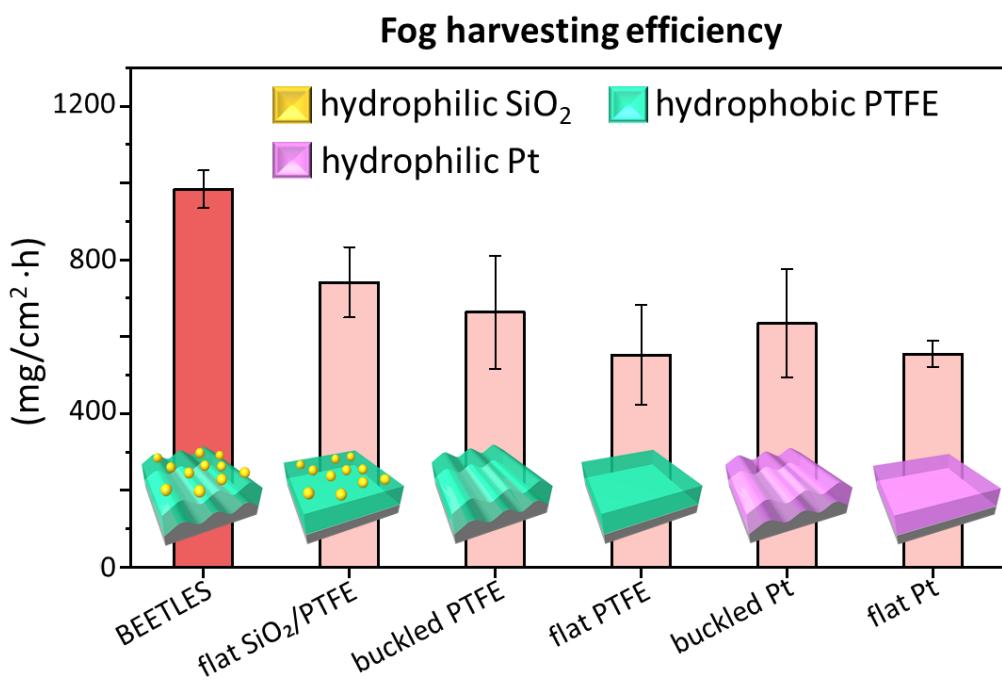
最終得到的仿生表面具有交替分佈的親水-疏水圖案與多尺度皺褶微結構，能有效模擬沙漠甲蟲翅鞘的集霧特性。我們將此捕霧集水元件命名為 BEETLES 表面 (*Buckled-Engineered Efficient Texture for Liquid Extraction and Scavenging*)，如圖一(d) 所示。



圖一、沙漠甲蟲仿生表面製造流程示意圖[5]。

三、捕霧性能與表面結構特性之探討

為了探討表面潤濕性與皺褶結構對捕霧效率的影響，本研究製備了六種不同的樣品表面，包括覆有全親水性顆粒（鉑，Pt）、全疏水性顆粒（聚四氟乙烯，PTFE），以及親水-疏水混合顆粒（ SiO_2/PTFE ）的平面與皺褶型表面，並進行捕霧性能測試，如圖二所示。結果顯示，無論表面的潤濕傾向為何，皺褶表面皆展現出高於平面表面的捕霧效率。其主要原因在於皺褶結構可提供更大的有效接觸面積，使霧滴更容易在表面凝結，同時皺褶間形成的微通道有助於水滴的導流與傳輸。綜合比較可知，與平面表面相比，皺褶結構的集水效率約提升 30%。另一方面，在不同潤濕性組合的比較中， SiO_2/PTFE 混合表面在捕霧效率上明顯優於僅覆 Pt 或 PTFE 顆粒的表面。雖然由全 PTFE 顆粒構成的皺褶表面具有極高的疏水性（水接觸角約 155.75° ），但因其難以從空氣中攔截霧滴，導致捕霧效果不佳。相反地，全親水性 Pt 表面雖能快速凝結水珠，卻缺乏有效的排水能力，導致水滴滯留，降低集水效率。綜合以上結果，本研究證明：同時具備皺褶結構、親疏水交替表面與顆粒狀突起的仿生結構可達到最佳捕霧效能，其集水速率高達 $983.55 \text{ mg cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ，展現出沙漠甲蟲啟發設計在水資源收集技術上的潛力。



圖二、各類仿生表面在捕霧測試中的效率比較，包括 BEETLES 表面、親疏水顆粒平面，以及親水與疏水皺褶與平面樣品。[5]。

參考文獻：

- [1] Z. H. Yu, T. X. Zhu, J. C. Zhang, M. Z. Ge, S. H. Fu and Y. K. Lai, *Adv. Funct. Mater.* **2022**, *32*, 2200359.
- [2] X. Y. Zhou, H. Y. Lu, F. Zhao and G. H. Yu, *ACS Mater. Lett.* **2020**, *2*, 671–684.
- [3] A. R. Parker and C. R. Lawrence, *Nature*, 2001, **414**, 33–34.
- [4] T. Norgaard and M. Dacke, *Front. Zool.*, 2010, *7*, 23.
- [5] T. Y. Xu, C. C. Hung, C. Y. Juan, P. C. Tseng, H. Y. Hsueh, *J. Mater. Chem. A*, **2025**, DOI: 10.1039/D5TA05905D.