

昆蟲的斥水奈米結構與應用

文·圖／盧彥文

在金庸著名的武俠小說《射鵰英雄傳》中，「鐵掌水上飄」裘千仞輕功蓋世，可以在水上快速行走。而在昆蟲界裡，也有一位很有名的水上飄，那就是平時在池塘、溪流邊常看到的水黽。水黽具有在水面上移動的神奇能力。為了瞭解這神奇的能力，科學家們對它們做了研究，發現它們的腳上有著很特殊的、纖細的絨毛，是奈米等級的微小結構^[1]。這些小結構，使水滴無法在水黽身體附著，不但可以防水，還可以在水上行走。

不只水黽，這種利用微小結構造成水珠無法附著的現象，也發生在蜻蜓、蜉蝣、草蛉等昆蟲上。這些昆蟲跟其他大小相近的種類相比，有著較大面積的翅膀。為了避免環境中的微小顆粒、水滴的黏附造成飛行上的困難，它們的翅膀有著纖細絨毛的結構達到防水、防汗^[2]。不過，對雙翅目、膜翅目等翅膀較小的種類，或是蜚蠊目、異翅目、鞘翅目等昆蟲的影響較為輕微，並沒有類似的結構。

許多植物也有相似的微小結構^[3]。例如：蓮花葉表面有奈米等級的絨毛結構，與葉面上的水珠有較大的接觸角，相對接觸面積變得小，只要稍為傾斜，水珠就會滾離葉面，造成了表面超疏水（superhydrophobic）的特性。基於這樣的特性，水珠在滾動時可以輕易地把灰塵帶走，達到自我潔淨（self-cleaning），也就是古人所說的出淤泥而不染。蓮花葉、海芋葉、薊罌粟、芋葉、甘藍等都有近似的結構與功能。

微小表面結構與斥水理論

也就是說物體表面有這種特殊微小結構，就具有超疏水、自我潔淨的能力？關於這一點，還需要對水珠與物體表面的接觸情形進行瞭解。首先，常見的物理力場在微觀上對液體的形狀與運動，與其在巨觀尺度的角色有所不同。舉例來說，小水珠在固體表面的重力影響並不明顯，液體、固體、氣體三相之間的表面張力（surface tension）主宰了液珠的形狀與移動。當液體的表面張力較大時，液珠有著近似圓球狀結構，接觸角大於90度，此時固體表面較為疏水性。而當液體的表面張力小時，小於90度的接觸角，液體會潤濕固體表面，固體表面具有親水性。

放大觀察時可以發現表面上有不同程度的粗糙結構，在親水性的粗糙表面，液體會潤

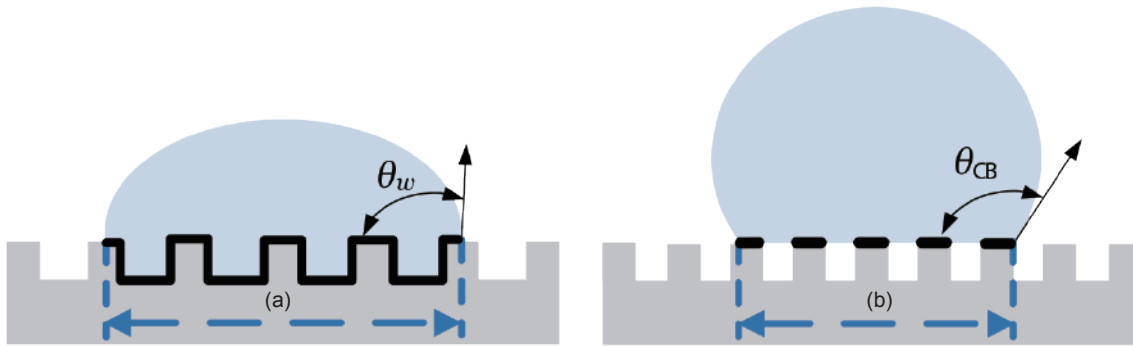


圖1：液滴與固體基材表面之接觸（潤濕）的兩種狀態：(a)Wenzel狀態，其表觀的接觸角為 θ_w ；(b)Cassie-Baxter狀態，其表觀的接觸角為 θ_{CB} 。

濕，滲入並且填滿結構間，變得更加親水。而在疏水性的粗糙表面，會產生兩種狀態：Wenzel與Cassie-Baxter狀態（圖1）。

在Wenzel狀態，液面會滲入且填滿結構間，接觸表面積大，液珠在移動時容易有遲滯現象（hysteresis）。反之，在Cassie-Baxter狀態，液面會像吊橋一樣懸掛在粗糙結構間，液面下方與結構之間有微小的空氣腔體，狀似“懸浮”其上。在這種情形下的液珠可以較輕易移動，摩擦力較小，表面滑溜，遲滯現象極微小。因其接觸角比相同材料的平滑面更大，有較高疏水能力，若大於 150° 是超疏水表面。最有名的Cassie-Baxter的範例就是前文提及的蓮葉效應（lotus effect）。同樣地，水黽以及有疏水、自潔能力翅膀的昆蟲，也是如此。

在這邊介紹一個特別的名詞叫做fakir（中譯為法基爾）。這個字源自阿拉伯語，是指中東和南亞地區的一些虔誠的伊斯蘭教修士，平日低誦敬神，以化緣為生，有著與佛教及印度



圖2：這張照片是赫伯特·龐廷（Herbert Ponting）在1907年拍攝，照片中一位在印度瓦拉納西城（Varanasi）的印度教聖人，正坐在釘床上修行。

教的修士相近的生活方式。這些修士在修道時，會靜坐在釘床上冥想（如圖2）。而1991年諾貝爾物理獎的得主法國的Pierre-Gilles de Gennes（皮埃爾-吉勒·德熱納）博士便使用“fakir”這個名詞來形容液珠在微小結構表面上呈現Cassie-Baxter的狀態，如同fakir靜坐在“釘床”上。

實際應用

這幾年，有越來越多的例子將這種微小結構的超疏水表面應用在人們日常生活當中。例如：德國的Sto Group所發展Lotusan®防水矽樹脂塗料，當中混入具有微米大小的矽樹脂（micro-silicone），牆面因此有著極佳的疏水性及自潔能力，可以讓雨水輕易地帶走汙漬。這種牆面還能防止滲水、避免過度潮濕、藻類和黴菌不易附著生長。而且相對於利用化學方式處理的疏水表面，因是採用物理性的微小結構，可以更耐久、耐磨損，售價又不貴，CP值高。


在航空業，這種超疏水表面也有極特別的應用。在容易下雪、結冰的地區若機翼或引擎出現結冰，會嚴重影響飛航的安全，因此在起飛前都需要進行移除結冰（deice）。目前的方法是將除冰劑灑在機身表面，但這些除冰劑主要成分為乙二醇（ethylene glycol, EG）或丙二醇（propylene glycol, PG），都具有毒性。如果可以利用微小結構所形成超疏水表面技術，讓水分子無法在機身停留，能防止結冰，又免除了使用毒性除冰劑的疑慮，環保、耐久。

此外，還可以利用微小結構來增強沸騰、冷卻液珠的效果^[4]，或是防止霧水在玻璃、手機面板、電子器件表面或太陽能面板上凝結。超疏水能力讓液珠處在Cassie-Baxter狀態，因此，水從液體到固體、或是從液體到氣體的相變化行為會改變，影響了液珠凝結、蒸發、沸騰時的相變化行為。

有一種非常重要的應用是在飛機、風力渦輪機的葉片、或是水底推進器的表面上，來減低空氣或是其他流體造成的阻力。也可以應用在石油工業，減少在輸送管傳送原油時的流體阻力、減低輸送時所需的能量。在古典流體力學裡，常用的假設是流體與固體表面之間的分力吸引力，使得流體在邊界表面接觸處的流動速度為零，也就是無滑移（no-slip）的邊界條件。而在超疏水表面，液珠容易滑動、接觸角極大、極小的遲滯效應和些微表面摩擦力，使得流體與固體表面的吸引力變小，無滑移的邊界條件不成立，流體阻力（drag force）可以減低^[5]。這樣的應用將可以節省大量的能源，近年相關研究、應用實例正蓬勃發展。

挑戰與展望

上述利用微小結構所形成的超疏水、自潔能力有著諸多的應用層面，相對於其他以化學

表面改質的方式也有較為耐久、耐用、耐磨損的優點。而目前的關鍵挑戰在於製程技術的發展，如何能大面積地製造微小結構，減少成品缺陷，保持均質性，並且維持成本，將決定這項受大自然啟發的仿生技術能否被普及使用。相關的知識與技術的發展，不僅有豐富學術研究價值，對工業界更有實質上的利基，前景可期。（本篇文章的部分研究內容報告於2013年昆蟲仿生學之發展研討會^[6]）（本專題策畫／生機系陳世銘教授&化工系陳文章教授）

參考資料：

- [1] X. Gao, L. Jiang, “Water-repellent legs of water striders” , *Nature*, 2004, 432, pp.36
- [2] T. Wagner, C. Neinhuis, W. Barthlott, “Wettability and contaminability of insect wings as a function of their surface sculptures” , *Acta Zoologica*, 1996, 77, pp. 213-225
- [3] W. Barthlott, C. Neinhuis, “Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces,” *Planta*, 1997, 202, pp. 1-8
- [4] Z. Yao, Y.-W. Lu, S.G. Kandlikar, “Effects of nanowire height on pool boiling performance of water on silicon chip” , *International Journal of Thermal Science*, 2011, 50, pp.2084-2090
- [5] C. Lee, C.-J. Kim, “Underwater restoration and retention of gases on superhydrophobic surfaces for drag reduction” , *Physical Review Letters*, 2011, 106, 014502
- [6] 盧彥文 (Y.-W. Lu), “從水黽的斥水結構到物質相變在工程上的應用” , 昆蟲仿生學之發展研討會, 2013, 台北



盧彥文小檔案

於 1993 年自農業機械工程系畢業，2004 年取得美國加州大學洛杉磯分校機械工程系博士。2004-2009 年間，先後於美國羅格斯大學（Rutgers University）和羅徹斯特理工學院（Rochester Institute of Technology）擔任助理教授，並主持美國政府與業界多項科技研究計畫。2009 年回生物產業機電工程系（農業機械工程系為其前身）任教。研究專長為仿生學、生物微奈機電系統。近年來致力於發展並推廣仿生系統的設計觀念、經濟動物育種的晶片檢驗技術。