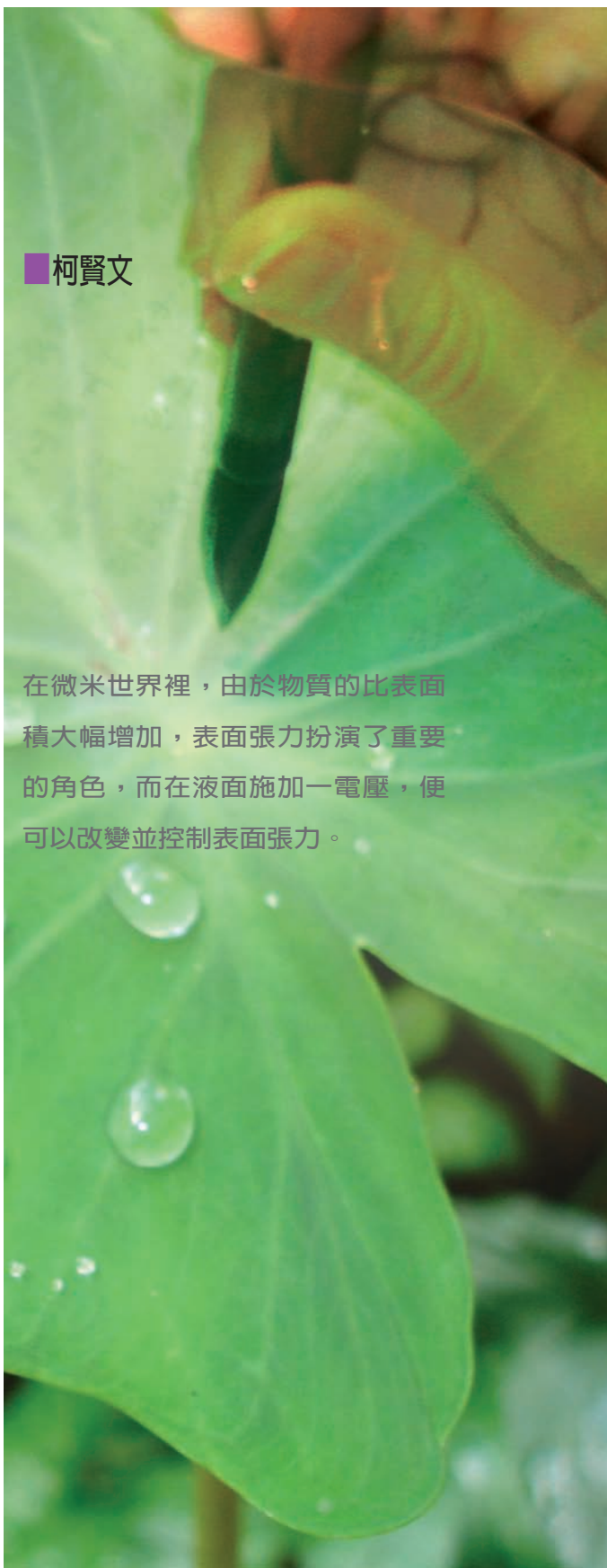


表面張力的應用

■ 柯賢文

在微米世界裡，由於物質的比表面積大幅增加，表面張力扮演了重要的角色，而在液面施加一電壓，便可以改變並控制表面張力。



液體和固體都有表面，表面和體材在特性上有很大的差異，最明顯的就是表面上的分子由於相鄰分子數目較少，所量測或表現出來的性質也和體材迥異。液態物質表面性質的量測重點是表面張力，表現出來的有毛細、潤濕、成泡等現象。固態物質的表面具有物理和化學吸附的特性，可以藉由吸附的多寡來量測多孔性物質或粉末的表面積。表面吸附是化學反應中催化作用必經的步驟，影響反應速率具體而微。電極的表面則會凸顯出離子的吸附和擴散雙層（double layer）的現象，這種特性在電化學的反應中扮演著很重要的角色。

不管是微米或奈米世界，當物體微小化時，首先面臨的就是表面積和體積比值的增加，而且是和微小化的程度成正比，也因此微米世界裡，表面張力扮演著主要的角色。

表面問題

表面原子或分子較同一相中大部分其他粒子有更多的自由能，因為緊鄰它的原子少了一半，且它和相鄰的氣相分子接觸的作用力也微不足道。表面自由能是每單位表面積所具有的能量，它的單位和表面張力相同。同一質量的液體以球形的表面積最小，因此水珠通常以球形方式存在，這樣才符合自由能最小化的自然法則。

現舉例說明表面能的大小，1 莫耳的水（18 公克）打散成 800 奈米直徑的水珠時，可產生 6.7×10^{13} 個，其表面積達 135 平方公尺。已知水在攝氏 20 度時的表面能是 0.073 焦耳/平方公尺，把 18 公克的水變成極小的水珠後，增加的表面能量約有 10 焦耳。仿間所謂的活化水或奈米水不知是否指此而言，欲使一瓶水中有無數個奈



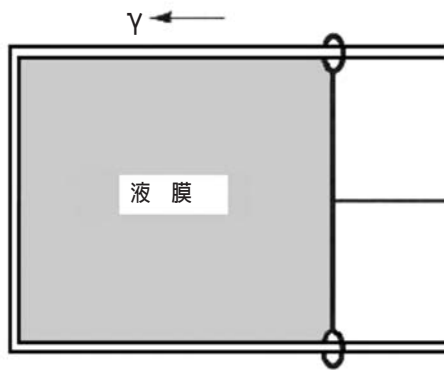
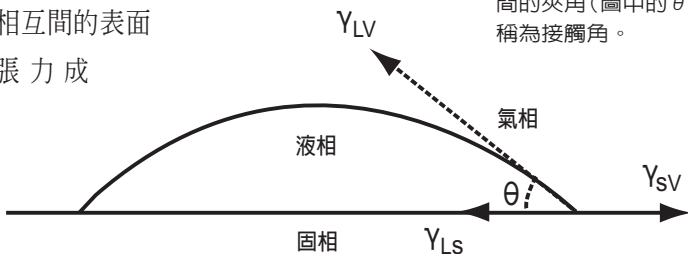
照片來源：張志玲

肥皂泡能夠不破，是界面活性劑的關係。

米水是非常不穩定的。當水珠互相接觸時，必然合為一相以降低自由能，它們立即成為一般的液體，使水珠個別獨立存在是不可能的。

表面張力的量測可利用一個相當簡單的實驗來了解。一個單面開口的U形金屬線框，內有一片液體薄膜，薄膜的開口端與一可移動的細線接觸。由於薄膜內的分子對表面分子的吸引，使細線有被拉向薄膜的傾向，量測把細線自膜拉開所需的力，就可求得這個液體的表面張力。表面張力是指液體表面每單位長度施加的力量，它的單位是牛頓/公尺，若把表面張力單位的分子與分母同乘以公尺，其結果就是每單位面積的能量。

表面張力存在於不同相之間的界面，並非只限於液—氣之間，其他如液—固和氣—固之間也有，甚至不互溶的兩液相之間也有表面張力，它們更正確的名稱應為界面張力。一液滴在固體表面上，在氣、固、液三相的交會點相互間的表面張力成



用來量測液體表面張力的簡單實驗裝置，若細線恰要與薄膜分開時，施於細線的拉力是 F ，表面張力 γ 就等於 $\gamma = F/2L$ ，這裡的 $2L$ 是膜與細線兩側接觸的總長度。

異相物質交會點，相互間的表面張力成一平衡狀態（ γ 是表面張力），因而產生了液相—固相界面的接觸角。自液—固接觸點沿液面畫一切線，其與固體面間的夾角（圖中的 θ 角）稱為接觸角。

一平衡狀態，因此產生了液相與固相界面的接觸角。

液滴在固體表面上有兩種極端的情況，如果液體完全潤濕固體表面，則接觸角趨近於 0 ，如水在玻璃表面上。如果液體完全不潤濕固體表面，則接觸角趨近於

180 度，這時液體成為球滴，如水銀在玻璃上或水在鐵氟龍表面上。

表面張力現象

在日常生活中，可以觀察到很多與表面張力有關的現象，譬如毛細管中液體的上升或下降、水珠會以球形存在、自來水筆的墨水不會因地心引力而滴出等，都和表面張力有關。前面已經述及液體會以球形存在，是什麼力量使其不致變形呢？早在19世紀拉/楊兩位科學家即發現液滴界面的液體相比氣體相壓力大，這個壓力差有賴表面張力加以平衡或壓制，均勻的力量使其成為球形。

毛細管的水與管壁的接觸角小於 90 度，就表示水與管壁的附著力較水分子間的內聚力大，由於附著力與表面張力的相



照片來源：張志玲

毛筆上的墨汁不會滴下來，是毛細現象的關係。

互作用，一垂直毛細管端的液滴會被吸住，並和重力達到平衡，這是自來水筆的墨水不會因地心引力而滴出的原因。便宜的原子筆往往因表面張力的控制不良而不順暢或油墨溢出。

另一個與表面張力有關的現象是近年常被討論的「蓮花現象」。宋朝周敦頤的〈愛蓮說〉中有一句「予獨愛

蓮之出污泥而不染」，細心觀察蓮花、芋頭及甘藍菜的葉面，只要用水稍加清洗，表面污染物就可大致清洗乾淨，它們確實可以達到出污泥而不染的效果。德國巴斯洛得（W. Barthlott）教授發現水在葉面上的接觸角介於 $130\sim 160$ 度之間，比疏水性石蠟的 110 度還大，接觸角大顯示水珠不易潤濕表面。

在電子顯微鏡下觀察上述花葉，可發現表面上有大小約 $100\sim 200$ 奈米的纖毛結構。由於表面的粗糙度，使水珠有如漂浮在纖毛上，很難停留在上面。當灰塵漂附在蓮葉面上時，其纖毛的結構使兩者之間的接觸面積減少，附著力也因而減少。而當水珠在葉面上滾動時，和灰塵的接觸是全面的，因此水珠很容易把葉面上的灰塵帶走，這就是蓮葉出污泥而不染的原因。

因此，蓮葉的自潔功能是由於奈米的表面纖毛結構使其具有與水的超高接觸角。了解這種自然界神奇功能的原理後，可以運用在建築物的外牆、汽車的烤漆、衛浴設備的瓷釉上，達到自潔的功效，成為真正的「不沾鍋」。

控制及應用

表面張力既然牽涉到這麼多的特殊現



照片來源：張志銘

芋葉上的水珠具有極大的接觸角，容易在葉面上滾動而把灰塵帶走。



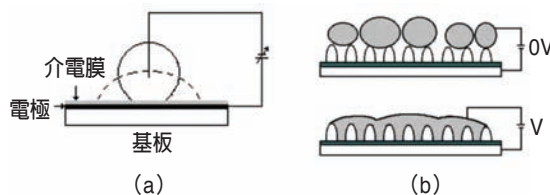
水滴在水龍頭下被表面張力撐住，直至被重力超越時才以球狀滴下。

象，那麼該如何去控制乃至應用這些現象呢？在與表面張力有關的各種現象中，接觸角扮演著極為重要的角色，藉由改變表面張力可以控制接觸角，進而應用由表面張力所牽涉到的各種現象。

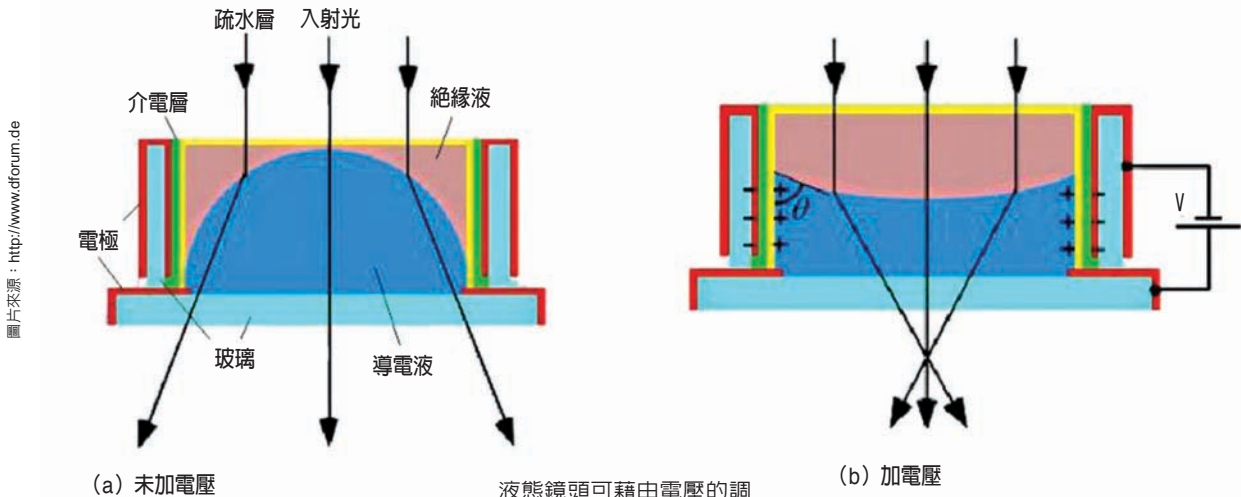
一個系統的毛細管直徑已經固定，不容改變，而接觸角可以藉由表面處理或潤濕劑來改變，但是這種技術不能發揮即時控制的效果。當液體表面累積有電荷時，由於同性相斥的關係，拉伸薄膜所需的力就會減少，表面張力也因而降低。電濕潤（electrowetting）就是利用這種現象，在液面施一電壓，藉由表面張力的減少和接觸角的改變，掌控液一固間的潤濕狀態。

先前，我們只知毛細管現象的壓差是由毛細管的半徑或液體的內聚力與附著力來決定，它們

(a) 液滴的電濕潤現象，液滴在未加電壓前呈接觸角較大的球形，加電壓後接觸角變小，液滴變得較平坦。(b) 奈米表面的潤濕。



蓮葉的自潔功能是由於具有與水的超高接觸角及奈米的表面纖毛結構。了解這種自然界神奇功能的原理後，可以運用在建築物的外牆、汽車的烤漆、衛浴設備的瓷釉上，達到自潔的功效，成為真正的「不沾鍋」。



都是已經固定的數值。如今可經由施加電壓來改變表面張力，進而控制壓差，這個結果對於控制微流道的液體流動有很大的意義，不須依賴笨拙或複雜的機械原理。

另一個有趣的應用是液滴接觸角可隨施加電壓而改變。未加電壓時，較大的表面張力產生較大的接觸角，使液滴呈球形。施加電壓時，因表面張力的減小，接觸角也隨著降低，致使液滴可潤濕基板。奈米表面的空隙不容易潤濕，清潔時會產生死角，化學反應時也會使有效面積減少，電濕潤可以解決這種困境。

液態鏡頭 (liquid lens) 是近年發展出來電濕潤的具體應用，除兩個電極之外，包括兩種互不相溶的絕緣液和導電液，其間當然有介面存在，而且兩液體的光折射係數也不同。其設計為液態鏡頭未加電壓時，入射光無法聚焦。當施加電壓時，由於絕緣液和導電液界面的接觸角改變，兩者之間的曲面因而改變，鏡頭的焦距也改

液態鏡頭可藉由電壓的調整，改變絕緣液和導電液界面的接觸角，以控制鏡頭的焦距。

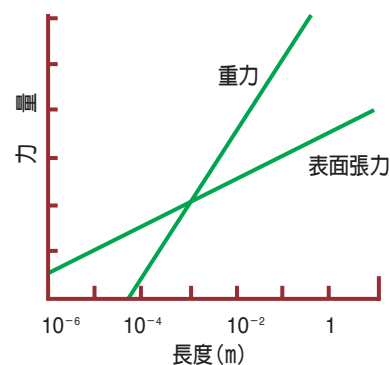
變，使入射光能夠聚焦成像。

液態鏡頭的絕緣液和導電液必須不互溶，兩者折射係數的搭配也非常重要。液態鏡頭的焦距可設計成由電極電壓控制，成為可變焦鏡頭，能有效改善機械式鏡頭需要伸縮的空間及產生噪音的困擾。如果在基板上做成矩陣式薄膜液態鏡頭，則可由聚焦的控制成像，它的用途是電子紙 (electronic paper)。

在微米的世界裡，由於表面積與體積的比值很大，表面張力扮演非常重要的角色。當尺寸小於1毫米時，表面張力的重要性逐漸明顯，且和尺寸成反比，當尺度小至數十微米時，表面張力就成為主導的力量了。

表面張力的理論已經發展了一百多年，人們幾乎不需思索就可加以應用，電濕潤更是幾乎被遺忘的科技，在教學過程中少有提及。雖然沒有高科技的深奧學問可言，隨著微機電系統及奈米科技的發展，它應可占有一席之地。 □

不同尺度下重力及表面張力的相對重要性



液態鏡頭是近年發展出來電濕潤的具體應用，液態鏡頭未加電壓時，入射光無法聚焦。當施加電壓時，由於絕緣液和導電液界面的接觸角改變，兩者之間的曲面因而改變，鏡頭的焦距也改變，使入射光能夠聚焦成像。

柯賢文
台灣科技大學