

掌握「相變化」規律， 陳信龍開拓奈米結構與材料應用新可能

文字／鸞九辰 攝影／劉國泰

誰

說排隊一定要有人指揮？在奈米世界裡，高分子不需要藍圖，就能依循物理規律自行排列，形成球、柱、層等不同奈米結構。這些肉眼看不見的「自組裝」，不僅展現豐富的高分子物理現象，也為晶片微縮、智慧藥物與新材料發展提供新的可能。第二十九屆終身榮譽國家講座主持人、清華大學化學工程學系特聘講座教授陳信龍，長期探索高分子自組裝及結構轉變規律，從基礎研究出發，拓展奈米結構的多樣性與潛在應用。

高分子會自己排隊？下一代晶片製程的潛在解方

一般人聽到「高分子」，腦海浮現的不外乎塑膠或橡膠，但在陳信龍眼中，高分子世界更加精彩。

「把高分子想像成由珠子串成的長鏈，每顆珠子就像一個小分子單元，透過原子間的『共價鍵』連結，形成一條長鏈。」他以直觀的比喻拆解專業術語：若整條長鏈由同一種珠子組成，稱為「均聚物」；若由兩種以上不同珠子構成，

則稱為「共聚物」；若不同種類的珠子各自成段，再彼此連接，就形成「嵌段共聚物」。

更有有趣的是，當一段珠子親水、另一段親油，兩者如水與油般互不相容，卻又因共價鍵相連而無法完全分離，只能在奈米尺度中彼此分隔，形成規則的球狀、柱狀或層狀結構。這種「微相分離」所產生的自發排列，就是嵌段共聚物「自組裝」的重要基礎，也是陳信龍長期鑽研的核心。

「高分子自組裝就像水會自然往低處流，是由熱力學驅動的自發過程。」陳信龍解釋，相較於傳統半導體製程以光刻、蝕刻等「由上而下」的方式製作圖案，嵌段共聚物可藉由「由下而上」的自組裝，配合分子結構與製程條件的調控，自發形成高度規則的次十奈米週期結構，為傳統圖案化技術在極小尺度所面臨的挑戰提供另一種可能的解方。

然而，要讓自組裝結構符合實際需求，關鍵仍在於理解並掌握其形成與轉變的規律。因此，如何精準控制高分子在奈米尺度下的排列，已成為自組裝研究的重要課題。

化學工程學系

Department of Chemical Engineering

陳信龍

工程及應用科學領域

第二十九屆國家講座主持人獎

清華大學化學工程學系特聘講座教授

掌握高分子結構的轉換，為什麼具有工業價值？

過去，高分子物理學界普遍認為，嵌段共聚物形成的球狀結構主要以「體心立方堆積」(BCC)存在。但陳信龍自二〇〇三年發表「面心立方堆積」(FCC)球體結構，至二〇〇七年發現少見的「四方堆積圓柱」，再到近年揭示HCP六方緊密堆積球相與Frank-Kasper複雜晶格，逐步拓展了人們對高分子自組裝結構多樣性的認識，也顯示軟物質能如金屬合金等硬物質一般，形成豐富而複雜的有序結構。

陳信龍解釋：「軟物質不是指摸起來柔軟，而是其結構容易隨溫度、壓力或環境變化而改變，高分子就是其中一類；相較之下，金屬的結構轉變通常需要很高的溫度。」為什麼要研究這些排列結構？他回答：「結構決定材料的性質與功能，而性質與功能又影響材料的應用。因此，了解結構的多樣性與形成機制，是未來發展新材料功能與應用的重要基礎。」

但比起「發現新結構」，陳信龍更重視「了解結構如何轉變」。他說：「發現新結構就像發現一座新城市；研究結構轉變的機制，則像建立城市之間的道路與地圖。掌握這些道路與地圖，才有機會依照需求控制材料形成所需要的結構。」

比方說，根據「奧斯瓦爾德階段定律」(Ostwald's Step Rule)，分子從無序狀態轉變為最穩定排列結構時，未必一



步到位，而可能先形成「過渡態」。就像全校同學聽到地震警報跑到操場避難，起初先各自站定（過渡態），之後再由班長集合、排成整齊隊伍，最後形成穩定而有秩序的狀態。

「如果材料在過渡態具有最符合需求的結構與性質，就可以透過加工條件的控制，將這個結構保留下來，而不一定要到達最終的平衡狀態。」陳信龍強調，雖然他從事的是基礎研究，但對結構形成與轉變機制的理解，也能為材料加工與製程控制提供重要的科學基礎。

奈米級的影子戲，用X光看見DNA的動態變化

想「看見」奈米世界的結構演變，陳信龍經常使用國家同步輻射研究中心的「小角度X光散射」（SAXS）。它不像顯微鏡能直接拍攝奈米結構，反而更像「看影子猜形狀」，從X光散射訊號反推出材料內部的奈米結構。

他解釋：「當X光照射材料時，會與材料中的電子作用而產生散射。我們得到的不是直觀影像，而是存在於『倒空間』的散射圖譜，必須透過數學分析，從中解析出真實空間的結構資訊，就像從牆上的影子推測物體的形狀。」

相較於電子顯微鏡通常需要將樣品製成薄片，部分樣品還需染色，SAXS的重要優勢是可以進行「原位測量」：樣品能在接近實際環境的狀態下觀測，並改變溫度、壓力或酸鹼值，即時追蹤奈米結構變化，應用於蛋白質、藥物釋放及基因載體

等研究。

以「DNA打包」為例，人體細胞中的DNA長達數公尺，卻必須高度壓縮於微小的細胞核中。自然界主要利用帶正電的「組蛋白」與帶負電的DNA結合並加以組織；陳信龍團隊則利用高度分支、近似球形且表面帶正電的PAMAM樹狀高分子作為人工奈米載體，模擬這項行為。

「DNA就像一條細長的線，逐步纏繞於樹狀高分子上，最終摺疊成緻密的奈米結構。」陳信龍生動描繪SAXS所觀測到的景象，讓原本隱藏在溶液中的奈米結構演變得被解析，為基因傳遞系統的設計提供重要的結構依據。

此外，為提升X光散射資料解析效率，陳信龍與美國橡樹嶺國家實驗室（Oak Ridge National Laboratory）合作，將AI深度學習導入SAXS資料分析，利用深度自編碼器（autoencoder）大幅縮短分析時間。他說：「除了提升速度，更重要的是降低SAXS資料解析的門檻，讓研究人員能更有效率地取得結構資訊。」

來自大自然的智慧材料，挑戰次十奈米自組裝極限

近年來，陳信龍的研究也擴及醣類、纖維素等可再生資源，不僅著眼於環境永續，更希望利用天然分子獨特的結構與分子間作用力，開拓高分子自組裝的新可能。

「纖維素、澱粉及葡萄糖都來自天然資源，不會造成廢棄

塑膠問題。」陳信龍表示，醣類分子具有剛硬的環狀結構與豐富的氫鍵作用，與其他分子間的強烈不相容性，使天然高分子即使在低分子量下仍能發生微相分離與自組裝，進而形成小於十奈米的精細結構，這也是團隊得以探索次十奈米結構的重要基礎。

這類奈米自組裝結構也具有發展環境響應型材料的潛力。陳信龍以抗癌藥物載體為例說明，若設計能感應酸鹼值變化的奈米微胞，使其在正常生理環境下保持穩定，進入偏酸性的腫瘤微環境或癌細胞內的酸性胞器後，結構便發生崩解並釋放藥物，即有機會提高藥物釋放的選擇性，達到更精準的治療效果。這也說明掌握奈米結構及其轉變規律的重要性。

把失敗當養分，讓基礎知識變成改變的力量

從高分子物理的基礎研究，到半導體、光電與生醫材料的潛在應用，陳信龍始終認為：「研究應造福社會，而非將自己關在象牙塔中。」他也勉勵年輕學子，研究可以追求創新與前瞻，但若缺乏物理、化學與數學的扎實基礎，研發之路將難以致遠。

回首三十年的研究歷程，陳信龍坦言：「九成實驗或許會失敗，但失敗也是最好的養分，能幫助我們找到正確的方向。只要保持熱忱與好奇心，這些辛苦與挫折，終將化為繼續前進的動力。」