

專題報導

陶瓷與人類文明

以大自然為師

仿生陶瓷

生物體的組成含有許多陶瓷材料，如貝殼、骨頭、牙齒等。
這些陶瓷材料多為奈米級複合陶瓷材料，
不僅性質優異，也可做為我們無限創意的模仿對象。



■ 段維新

您是否覺得金碧輝煌的宮牆樓瓦，秦俑戰士身上的盔甲，有許多神似的地方，它們的排列都很像魚身上的鱗。數千年前，中國人設計屋瓦，盔甲的靈感也許正是得自魚鱗，果真如此，中國人很早就有「仿生陶瓷」了。

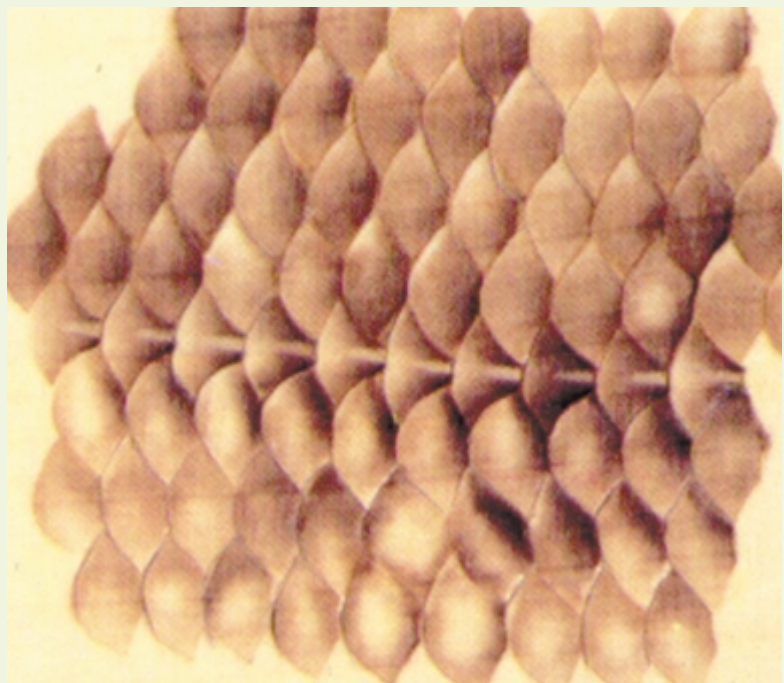
再以電燈為例，距今一千七百餘年前仍未發明電燈時，晉朝的車胤已經知道利用收集螢火蟲來照明，而電燈燈管內螢光粉的作用也正與螢火蟲發光有許多異曲同工之處。如果當年晉朝已有專利制度，車胤很可能就不需靠捕捉螢火蟲來念書，已經成為大富翁了。

以大自然為師也許正是科學的起源，因絕大多數的科學都以觀察為起點，而大自然的動物、植物及礦物提供了源源不絕的觀察對象，也啟發了人類無限的創意。在歷經數千年以大自然為師的過程後，科學的領域愈分愈多，也愈專業，材料科學逐漸成為一門獨立的學科，且隨著精密分析儀器的進展，製造工藝的突破，人工產品具有質佳價廉的絕對優勢，師法自然的必要性也漸為人們所淡忘。但在許多科學的發展遇上了瓶頸時，師法自然的重要性則又慢慢浮現。

以陶瓷為例，一九八〇年代，歐美日等科技先進國家如火如荼地發展全陶瓷引擎，在一九八五年，陶瓷研發人員信心滿滿地預言一九九〇年汽車用全陶瓷引擎可大量生產，而二〇〇〇年飛機上也將使用全陶瓷引擎。但在政府及產業界投入天文數字的研究經費後，陶瓷材料的韌性及可靠度仍無法大幅提升，研究人員已放棄全陶瓷引擎的開發，取而代之的是小型陶瓷零件的製造，而研究規模也大幅縮水。

這時有少數學者開始思考突破困境的可能方向，以大自然為師的必要性又再度被重視，而「仿生陶瓷」遂重現江湖。

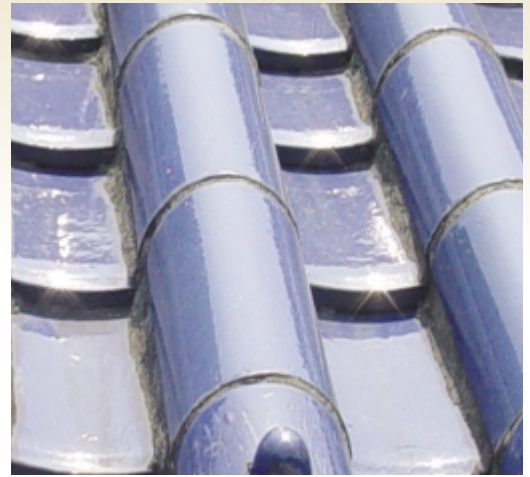
仿生學（biomimetic）這個字大約是在一九六〇年首次出現，是指以模仿生物系統特徵或研發類似生物系統工作方式的科學。若搜尋工程學資料庫（Engineering Index），在一九七〇年代時以仿生學為研發依據的論文只有二篇，一九八〇年代也只有45



魚鱗。



屋瓦。



屋瓦。

篇，而一九九〇年代時與研發仿生學相關的論文大幅增加到1,083篇，顯示仿生學已漸受重視。

在仿生陶瓷方面，學者先利用高解析度的電子顯微鏡觀察如貝殼、蛋殼、海膽脊椎等的微結構，這些有系統的研究發現生物體內的無機物大都以碳酸鈣為主，而有機物則以蛋白質為主。以海螺的貝殼為例，它是一種層狀堆疊的複



秦朝戰士。



秦俑戰士身上的盔甲。

合材料，其中碳酸鈣占九十九重量百分比，蛋白質只占有重量的百分之一。碳酸鈣的晶粒大小只有兩百奈米長，一百奈米寬，且其中有大量的雙晶存在，而位於碳酸鈣晶界上的蛋白質尺寸更小，只有10奈米左右。

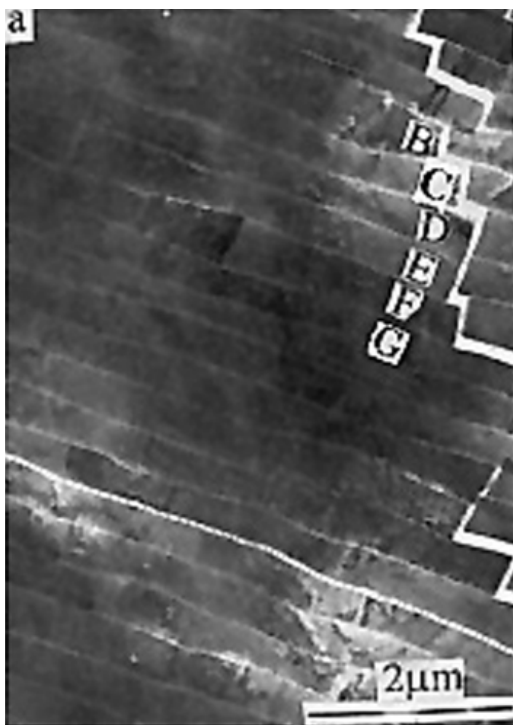
碳酸鈣強度低且極脆，但是貝殼的強度卻可高達100百萬帕（MPa），破壞韌性更可達 $10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ 以上，此韌性是玻璃的十倍以上，也是一般工程陶瓷的兩倍。海螺在室溫下，以便宜的原料碳酸鈣製造了性質優異的奈

米複合材料。

貝殼之所以具有高韌性，與其特殊微結構有密不可分的关系。貝殼具層狀堆疊的組織，層與層之間的強度較碳酸鈣更低，在貝殼承受外力時，破壞裂縫會沿著層與層間移動，這種能量釋放的方式，裂縫較難快速傳遞，而使貝殼不易破裂。

藉由這些觀察，陶瓷學者開始模仿生物的微結構，重新設計及製造工程陶瓷。例如那時仍在華盛頓大學（目前在普林斯頓大學）的阿克塞（I. A. Aksay）教授對碳化硼／鋁複合材料系統，有系統地探討仿生陶瓷的優越性。

他的研究群先將碳化硼粉末混以金屬鋁粉末，以燒結方式製作顆粒韌化的陶瓷複合材料，其強度及韌性分別只有 50 MPa 及 $2 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ 。當他們以接近生物材料的微結構加以設計，以碳化硼層與金屬鋁層交互堆疊製作層狀複合材料，其強度及韌性則高達 350 MPa 及 $16 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ ，是顆粒複合材料機械性質的八倍之



破壞裂縫會沿著貝殼特殊層狀堆疊的微結構之間移動。

多。

他們的層狀複合材料的陶瓷層厚度為150 微米，若陶瓷層厚度能減小到奈米尺度，則強度及韌性應可再大幅提升。可見透過模仿生物結構而製作的仿生陶瓷，有可能突破陶瓷的宿命——脆性。

生物

（含動植物）經數十億年的演進，在歷經嚴苛非生即死的物競天擇的淘汰賽後仍能存活的，它們身上的材料也不斷改善，以求生存。現今的分析



海螺貝殼的微結構。

儀器更為精密，製

造設備更為先進，例如最近的《自然》（*Nature*）期刊即報導了以掃描穿隧儀移動分子，證明製造的精準度已到達「埃」（angstrom， 10^{-10} 公尺）尺寸的境界。因此，模仿生物結構將更為精準，希望能透過模仿生物的研究，大幅改善陶瓷的性質，而擴展工程陶瓷的應用領域。□

段維新

台灣大學材料科學及工程學系