

撼動千年冶金！

葉均蔚讓臺灣站上材料科學之巔

文字／鸞九辰 攝影／謝慕郁

從

古老的青銅器到現代波音七四七的鋁合金機身，數千年來，冶金法則始終遵循著同一原理——以一種金屬為主，再添加少量其他元素以強化性能。因為元素愈多，金屬愈易脆裂。

然而，第六十八屆學術獎得主、中央研究院院士暨清華大學材料科學工程學系特聘研究講座教授葉均蔚，卻撼動了這條千年定律，催生出材料科學的全新領域——「高熵合金」

（High-entropy Alloys）。他因此被譽為「高熵合金之父」，更讓臺灣成為這項革命性材料的發源地，站上全球材料科學的最前線。

熵，混亂程度的指標

「在熱力學中，熵（Entropy，符號為S）是用來衡量系統的亂度。」葉均蔚表示，相較於溫度、壓力、體積、質量等熱力學參數，「熵」相對抽象難懂。從字型上看，「熵」由「火」與「商」組成，反映其定義與熱量（Q）和溫度（T）有關，數學公式即為： $S \parallel Q / T$ 。

簡單來說，一個系統的排列組合方式愈多，亂度愈高，熵

值就愈大。以白球與黑球為例，分開堆放時沒有亂度，混合後則排列方式增多，亂度與熵值便隨之上升。

「高熵合金，含五種以上的金屬元素，但沒有單一元素的原子比例超過三五%。就好比是一杯由五種以上水果打成的綜合果汁，沒有以任何一種果汁為主，」葉均蔚解釋，過去的理論認為，混合多種元素會產生大量脆而硬的「化合物」（compounds），導致材料容易碎裂；但他基於熱力學定律推論：當材料中的金屬元素增加時，高熵效應（High-Entropy Effect）反而能促進元素間的融合。這種混亂且互溶的狀態，能讓系統更穩定更韌，因為它抑制了排列有序且易碎的脆性化合物之形成。

最終，實驗結果證實了他的推論，自此開創全新的材料配方世界。這些材料可彌補傳統材料在應用上的不足與瓶頸，但他強調：「高熵材料並非愈多元素愈好，且任意選擇，關鍵在於針對應用需求進行合理設計。」例如：選用高熔點元素才可開發耐高溫材料，應用於航太與國防；選用具生物相容性的元素，才有望成為比現有醫材更優越的人工關節等植入物。

高熵材料研發中心

High Entropy Materials Center

教育部 科技部 高等教育深耕計畫

Higher Education Sprout Project by MOE and MOST

葉均蔚

工程及應用科學領域

第六十八屆學術獎

清華大學材料科學工程學系特聘研究講座教授



「這就像一名專業廚師，在調配美味佳餚前，必須先了解各種食材的特性！」葉均蔚將設計高熵合金的過程比擬為烹飪，建議材料科學家需深入理解各元素性質及各元素之間的相互作用，方能設計出性能優異的高熵材料。

開車時的靈光乍現，成就高熵合金之父

自碩、博士研究開始，葉均蔚一直在追求強度和韌性都優於傳統合金的製程技術，甚至發明「往復式擠型法」(reciprocating extrusion)，以如同揉麵糰般反覆鍛鍊金屬的製程，改善材料性能，並因此獲得七國專利。

「我研究這項技術，不斷地提升鋁合金及鎂合金等輕量化合金的性能，成果雖然卓著，但也是撞上天花板，達到極限。為尋求再突破，我轉而從最根本的『材料成分』著手，開始嘗試五種以上的元素配方。」葉均蔚解釋，三十年前開車行駛於新竹鄉間小路時，突然萌生「高熵或許能穩定系統」之革命性靈感而開始探索，並笑稱自己向來在開車、搭高鐵或坐飛機時的「速度感」下特別能激發靈感。

若深究葉均蔚的創新力，或許可回溯至童年。他透露：「我是在宜蘭南澳鄉下長大的孩子。童年時期物質匱乏，和玩伴比賽陀螺時，陀螺都是自己研究自製的，因而培養出透過手腦併用來解決問題的创新能力。」

八年磨一劍，深蹲是為了躍得更高！

早在一九九五年，葉均蔚便萌生高熵合金的初步想法，並在約一個月後成功製備出完整樣品，證實理論可行；但深謀遠慮的他同時做出一項足以讓全球學者跌破眼鏡的決定：在累積足夠的研究成果前，不發表任何一篇論文。

「我知道，當『高熵合金』一發表，勢必帶動全世界競相投入！所以，我要累積足夠的實力，我要讓臺灣成為公認的發源地，走在世界的最前沿，」葉均蔚語氣平靜地訴說著當年決定沉潛的原因。



這是一場長達八年的「蹲馬步」。直至二〇〇四年，葉均蔚一口氣連發五篇論文，立即震撼全球，隨後每年平均十篇，其中一篇論文至今已引用一萬四千次以上；這種策略性的學術布局，不僅確立臺灣在「高熵合金」領域的領先地位，更讓他在全球逾千萬名科學家總排名第一〇三位，材料領域則位居亞軍，科學影響力舉世矚目。

鮮少人知道，成為一名創新者，不僅需要毅力，更需要勇氣。在登頂之前，葉均蔚曾面對排山倒海的質疑與嘲諷，包括申請國科會計畫時，曾被一名國內資深教授批評：「這項計畫若通過，以後可能會鬧國際笑話。」

「聽到這番話時，就像拿了一把短刀刺進我的心臟。」葉均蔚回憶當時心情，但隨即莞爾一笑：「我很快就釋懷了！我想，正因為他們不了解，才會有這樣的批評，也才會輪到我來做！」由此，不難看出葉均蔚的氣度與格局。

高熵原理，為材料科學開創無限可能

目前，高熵合金已實際應用在兩萬多臺數位控制機械加工（CNC）機臺之關鍵元件「蝸輪」上，葉均蔚引以為傲地說：「相較於傳統蝸輪易磨損，常需停機調整或更換而影響加工精密度及產能，高熵合金蝸輪更耐磨、耐高溫，大幅提升產業效率。」

在安全應用方面，葉均蔚開發了「無毒、無火花」安全工具，利用中熵合金取代過去具毒性的含鈹銅基合金，不僅可達到中碳鋼的硬度水平，無論如何敲擊及施力，工具都不會產生火花！他解釋：「相較於傳統鋼鐵工具因含碳，撞擊時易產生火花，恐在瓦斯外洩或化學場所引發爆炸，中熵合金能大幅提高工業安全。」

葉均蔚的研究不止於金屬，他已將「熵合金」延伸至其他材料。例如：開發高熵固態電解質，以解決鋰電池的安全性問題；研發能抵抗海水侵蝕的中熵不鏽鋼，以及導入陶瓷、高分子等領域，為材料科學的未來開啓無限可能。

高熵哲學：擁抱多元差異，創造和諧穩定

對葉均蔚而言，「熵」不僅是科學中亂度的參數，高熵化更是一種人生哲學。他深有所感地說：「高熵合金中，多種相異元素為追求整體系統的穩定而和諧共存，這啓示我們，無論社會或個人，唯有擁抱多元、互相包容，方能達到更穩定且卓越的狀態。」

同樣地，他亦鼓勵學子們進行「高熵學習」，廣泛涉獵不同領域知識，以激發創新潛能，並期許將「利他」（Benefiting others）作為人生目標：「我們都是宇宙一三七·九億年演化的結晶，應當珍惜和尊重生命，並肩負起延續文明、利他助人的責任。」

