

科技部新聞稿

突破材料學迷思，開創「金屬調合學」新領域

台灣學者「高熵合金」研究發現獲登「自然(Nature)」專題報導

105.6.3

過去幾千年來，人類製造合金皆以鐵、鋁等某一種金屬為主，再添加少量其他金屬，以改善性質。若添加多種且大量的其他金屬，所得合金勢必很脆。這種迷思終於被清華大學材料工程系教授葉均蔚所推翻，2004年首先發表混合5、6種以上等比例金屬，由實驗證明可得到性能優秀的合金，在科技部經費長期支持下，研究團隊開創了全新的材料研究及應用領域。此翻轉傳統合金概念的高熵合金也因而受到最高點數的期刊注意，在5月19日出版的自然(Nature)期刊作了專題報導「多元金屬合成的更強更韌更延合金」，認可清華大學葉均蔚為創造出高熵合金的第一人，並以神奇的「金屬調合學」來形容，不但匯集傑出的研究成果，更訪問世界多位著名學者，對高熵合金的起源、發展及未來作一描述。

第二代高熵合金性能可更勝第一代

被譽為「高熵合金之父」的葉均蔚並不以此成就為滿足，他在11年前之後發表的第一代高熵合金，含5種以上金屬元素，每種元素以相同比例的原子數混合而成，變得更強(抗折斷)、更韌(抗變形)，且耐高溫、腐蝕、輻射、磨擦。7年前開始，他進而發表第二代進化版高熵合金，每種元素的原子數以不同比例調配，證明性能可更優於第一代的高熵合金。

高熵合金帶來了全新的材料科技，自然期刊特別跨海派出記者，對此推出專題報導「金屬調合學—更強、更韌、更展延：運用簡單新配方，冶金學家正創造性能卓越的新一代合金」，訪問葉均蔚等多位學者及實驗室，並指出高熵合金的應用潛力無窮，可從高溫爐的內襯到超輕量太空材料，已吸引了中國、歐洲、美國等地研究機構的資金投入。

駕車鄉間 想出合金新配方

這篇報導也提到了這奇妙點子的起源，1995年5月的某一天，葉均蔚駕車在新竹新埔的鄉間道路奔馳時，腦中突然閃現合金新配方概念。

葉均蔚解釋，傳統合金幾乎都以某一金屬元素為主，添加少量的其他元素，比如在鐵中加0.02~2%的碳成為碳鋼，鐵加18%的鉻、8%鎳成為304不銹鋼，鋁合金的鋁至少在80%以上，這種少量添加的合金概念受限於傳統合金觀念，認為其他金屬的添加量越多，就會合成越多的脆性化合物，令合金變脆、易碎，甚至無法合成，所以即使有人想過也不敢再越雷池。

時常逆向思考的葉均蔚，產生了一種靈感，何不將4或5種金屬以等比例混合在一起？這樣不同元素原子可能的排列方式就會大幅增加，產生無序或高熵（high entropy）效應，促進每個元素原子在原子層之間隨機散佈，而抑制相異原子排列有序的脆性化合物，使材料反而得到韌性。因為多元素的混合，帶來大家忽略的高熵效應，因此葉均蔚將此類合金取名為高熵合金（high entropy alloys）。

轉翻不可能 尋獲合金寶礦

「所有人都說這樣造合金不可能，不然為何古今中外沒有冶金師這樣做過？但我就是不相信。」葉均蔚搖頭笑道。他駕車回到清大的當天，立刻找來學生，進實驗室開始試煉他的合金新配方。

沒有多久，葉均蔚就造出了硬度超過不鏽鋼、且可耐攝氏一千度而不軟化的新合金，他領悟已尋到合金領域的「寶礦」，翻轉了人類有史以來製造合金的概念。但在當時，高熵合金的概念還未得到世人認可，「許多學術界的長輩好意提點我，說我研究做得很認真，只可惜觀念錯誤、走偏了路。」葉均蔚憶及過往，不禁莞爾。

沈潛9年 開創研究新領域

葉均蔚是地道的「清華人」，花蓮高中畢業考上清大之後，在清大攻讀學士、碩士、博士、擔任教師，除了當兵那兩年，他在19歲之後就不曾離開過清大。住在學校宿舍的他，常年在實驗室研究到三更半夜。在發現高熵合金後，葉均蔚決定要把這項研究成果留在清大，在研究完整成熟之前，絕不發表。

沈潛投入研究9年後，葉均蔚及團隊終於在2004年於學術期刊發表5篇高熵合金的創見，在發表多篇具份量的論文後，引起學術界注意，帶動研究風潮。2013起，高熵合金的論文篇數大幅成長，至2015年底已超過1000篇，清大就占了至少120篇。目前全球至少有3百個研究單位投入高熵合金研究，包括美國數個國家級實驗室、軍方實驗室、著名大學及大型產業等。

新配方合金 一一問世

自然期刊報導指出，高熵合金研究領域發展快速，中國材料科學家張勇2009年發表一種由鈷、鉻、銅、鐵、鎳及鋁所合成的合金，強度比純鋁強14倍以上，且延展性也近3倍。2011年，葉均蔚設計一款含鈷、鉻、鐵、鎳、鋁及鈦的合金，耐磨性是傳統耐磨鋼的2倍。在2014年，德國波鴻魯爾大學的材料工程家Easo George團隊製造一款含鈷、鉻、鐵、錳、鎳的合金，在液態氮低溫下也不致脆化，可應用在低溫儲槽、天然瓦斯管線及太空船上。

自然期刊引用美國空軍實驗室的材料科學家丹尼爾·密若可(Daniel Miracle)所說：「我們不是在談一個窄小範圍的材料，而是如何結合不同元素的寬廣哲學」，極有可能發現嶄新、令人激奮的事物。」密若可去年與同事估算，若在26個金屬元素中，任取3個、4個、5個、或6個元素以等原子比來調配，即可產生31萬餘種合金。就像「調酒」一樣，儘管不是每種配方都有用，但可能性仍十分驚人。

葉均蔚表示，若再加上非等量原子比例、或微量添加的模式，能調配出的合金種類就更多了。他帶領的研究團隊還將同樣的觀念應用到陶瓷材料，將多元金屬元素與約 50% 的碳、氮、硼、矽及氧結合，製成「高熵陶瓷」，產製出許多新的陶瓷材料。如同此篇專題報導最末引用美國橡樹林國家實驗室前任合金領域主管艾索·喬治(Easo George)所言，「我們現在擁有無比富饒的領域可供探索了。」

著書立論 成為開路先鋒

在 2004 年之前，高熵合金是杳無人煙的新世界，沒有任何參考書或論文可供指引，葉均蔚為它命名、定義，並提出核心效應及基本原理，帶領研究團隊成為此一全新研究領域的開路先鋒。他在 2014 年與國際知名材料學家合著「高熵合金」，成為全世界第一本完整介紹高熵合金的著作。葉均蔚的第二本著作「高熵合金--原理及應用」也在上月出版，可望成為材料學的經典教材。

葉均蔚指出，突破了傳統合金的性能及使用壽命限制，高熵合金的應用潛力驚人。過去 10 年來，常見性能優異的高熵合金被發表，突破傳統材料的許多瓶頸，已指日可待。例如可耐攝氏 1150 度 C 以上效率再提升 4% 噴射引擎葉片及零件、超高壽命的刀具模具、超硬及抗沾黏鍍膜、耐高溫（900 度 C）耐輻射損傷的新一代核電廠材料、-60~+200 度 C 極低電阻溫度係數的薄膜電阻、室溫或更高溫的超導材料、耐磨耐刮的手機外殼等。「有了更輕、耐高溫的高熵合金以及超導材料，有一天我們也能造出類似飛碟的碟型飛行器。」葉均蔚說。

清大研究團隊已與國內數家知名廠商進行高熵合金的合作應用，並與日本材料科學研究院(NIMS)合作引擎葉片耐高溫噴塗，今年還將與德國知名的團隊合作高熵超合金(high-entropy superalloys)。

台灣研究 揚名國際材料學界

葉均蔚強調，高熵合金的研究源自於台灣本土，得到科技部、經濟部、清華大學與國內許多位學者幫助，才能使國際材料學界認可，在實事求真求是的學術競爭裡，台灣成為顛覆傳統迷思首創高熵合金的發源地，實屬罕見。今年 11 月 6 至 9 日還將由清大、科技部、經濟部、工研院、材料學會、美國 TMS 學會，在高熵合金的誕生地—新竹清華大學舉辦第一屆「高熵材料國際會議」，將研究能量推向另一高峰。

註：熵(entropy)，讀音商，為熱力學上代表亂度的參數。愈多種元素混合，亂杜越大，熵也就越大。

合金演進史

分類	時間	配方觀念	舉例	特性
傳統合金	1 萬年前~迄今	一種金屬元素為主, 添加少量的其他元素, 以改善性質	1. 碳鋼: 鐵中含 0.02~2% 碳 2. 304 不銹鋼: 鐵-18% 鉻-8% 鎳 3. 鋁合金: 鋁 > 80%	比單一金屬強韌, 但添加越多其他金屬, 越易脆化
高熵合金 (第一代)	1995 年開始研究, 2004 年正式發表	含 5 個以上金屬元素, 每種元素約等原子比	CoCrFeMnNi HfNbTaTiZr	因高熵效應可抑制化合物的形成, 比傳統合金更強韌或更優越性能
高熵合金 (第二代)	2009 年正式發表, 開啟非等原子比合金研究	含 5 個以上金屬元素, 元素間非等原子比	Al _{0.3} CrFe _{1.5} MnNi _{0.5} Co _{1.5} CrFeNi _{1.5} Ti _{0.5}	非等原子比合金提供更優越性能

製表 / 葉均蔚