

葉均蔚教授開創「金屬調合學」新領域



國立清華大學
NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY

2016 首頁故事

葉均蔚教授開創「金屬調合學」新領域

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。這種迷思終於被本校材料工程系葉均蔚教授所推翻，在 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，自此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」，認可葉均蔚教授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」的葉均蔚教授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」，訪問葉教授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，葉教授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。

葉教授解釋，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教授，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，因此葉教授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。」葉教授搖頭笑道。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，葉均蔚教授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。」葉教授憶及過往，不禁莞爾。

沈潛 9 年 開創研究新領域

葉均蔚教授是地道的「清華人」，花蓮高中畢業考上清華之後，在這裡攻讀學士、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華園。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，葉教授決定要把這項研究成果留在清華，在研究完整成熟之前，絕不發表。

沈潛投入研究 9 年後，葉教授及團隊終於在 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，本校就占了至少 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，在液態氦低溫下也不

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。

葉均蔚教授表示，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，高熵合金是否無人煙的新世界，沒有任何參考書或論文可供指引，葉均蔚教授為它命名、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。葉教授的第二本著作「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。

葉教授指出，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。

本校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

葉均蔚教授強調，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，亂數越大，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	Al0.3CrFe1.5MnNi0.5 Co1.5CrFeNi1.5Ti0.5	非等原子比合金提供更優越性能

製表／葉均蔚



利用「高熵合金」材料進行3D雷射列印，可做出各種形狀的產品

At first glance, the machine seems to be building a miniature cityscape. A ring of molten iron four jets of powdered metal into a downward-pointed laser beam, which fuses the colliding grains in a bright orange glow. The mixed grains then solidify on the growing tip of a small pile of metal alloy. Once the pile is 1-2 centimeters high, the platform that holds it shifts to the side, and the machine starts to build another one right next door. The result looks like a forest of tiny skyscrapers.

In reality, these towers, generated at the Ames Laboratory in Iowa, reflect a major shift in how researchers think about alloys. The standard recipe — used for technologies ranging from ancient swords and arrowheads to modern jet engine turbines — is to take a useful metal and mix in a pinch of this or a touch of that to improve its properties. One classic example is the addition of carbon to iron to make steel.

But the machines at Ames are making experimental samples of **high-entropy alloys**, which consist of four, five or more elements mixed together in roughly equal ratios. The deceptively simple recipe can yield alloys that are lighter and stronger than their conventional counterparts, while being much more resistant to corrosion, oxidation or even wear. Eventually researchers hope, this approach could even produce alloys that have magnetic or electrical properties never seen before, leading to whole new generations of technology.

"We have almost explored everything for traditional alloys," says Yong Zhang, a materials scientist with the State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials at the University of Science and Technology Beijing. **"For high-entropy alloys, the science is very new,"** he says — so new that researchers have yet made the leap from lab to market. But some researchers are working to make that happen, seeing potential applications that range from high-temperature furnace linings to ultralight aerospace materials. And the field has attracted funding from research agencies in China, Europe, the United States and elsewhere.

"We're not talking about a narrow class of materials, but an extremely broad philosophy on how to combine elements," says David Miracle, a materials scientist at the Air Force Research Laboratory at the Wright-Patterson Air Force Base in Ohio. "The opportunity to find something new and exciting is very high." Last year, he and his colleagues estimated that almost 115,000 different alloys can be made by combining exactly equal proportions of 3, 4, 5 or 6 metallic elements from a set of just 16. More possibilities can come from varying the proportions or expanding the choice of elements.

But not every combination is a winner, says Kozo George, a materials engineer at Ruhr University Bochum in Germany. Scientists are still learning what works and what doesn't. Still, he says, **"the space available for applications is really huge, and we have only looked at a small portion of the Universe."**

The idea for high-entropy alloys first struck metallurgist Jia Wang in 1995, while he was driving through the Taiwanese countryside. The physics of conventional alloys was already well understood, says Jia, who works at National Tsing Hua University in Hsinchu, Taiwan. At the atomic level, pure metals have a regular crystal structure that sits on top of layers of identical atoms. Often, those layers slip past each other easily, which makes the metal too soft to be useful. That's a

High-entropy alloys must be used in better settings than jet-engine blades.

BY KIANZHI LIU

224 | NATURE | VOL 522 | 16 MAY 2016

© 2016 Macmillan Publishers Limited. All rights reserved.

高熵合金耐高溫刀

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」，認可葉均蔚教授為創造出高熵合金的第一人



高熵合金耐高溫刀

高熵合金鍍膜