



超能材料之二

強度、韌性，以及延展性（或稱塑性），是衡量金屬以及其他工業用材料的三個重要指標，但根據傳統材料科學觀點，三者往往是此消彼長的關係；針對最常用的鋼材而言，若提升強度會導致其韌性降低，導致材料脆性增加，變得「很硬但很脆」。香港大學機械工程系副主任黃明欣帶領團隊近年突破框架，成功研發出三個指標同時達到史無前例高水平的「超級鋼」，一次過滿足既強且韌兼可塑的三個願望！

團隊並正研究將生產工序大幅簡化的第二代「超級鋼」，讓成本進一步更低，於汽車、航空、國防、建築等領域開拓更廣闊的應用前景。其中在汽車製造上，「超級鋼」特性既可成為車的「脊梁」，更能像海綿吸水般將撞擊的動能吸收，加強安全保障。

●香港文匯報記者 郭虹宇

專注鋼材研究十多

年的黃明欣早前接受香港文匯報專訪時指，高端鋼材要求的三種屬性，包括強度（屈服強度）、韌性（不容易折斷碎裂）和延展性（能伸延扭曲）有着此消彼長的關係，即提升其中一種屬性的功能時，其餘的一或兩種會相應降低，三者無法俱得。為找到能突破此僵局的方法，團隊「在探索製造鋼的過程中，先定了一個優化鋼材的大方向，並持續不斷修正，逐漸研發出了『超級鋼』。」

「超級鋼」，又稱D&P鋼，該名字是源於該材料是通過嶄新的「變形及配分（Deformed & Partitioned）」方法而製成，令其擁有高屈服強度（~2GPa）、極佳韌性（102MPa.m^{1/2}）、良好延展性（19%的均勻延伸率）並兼具低成本的特性，突破傳統瓶頸。

取代傳統鋼 亦更環保

經過技術不斷提升，團隊正投入第二代「超級鋼」的研究。黃明欣指，第二代「超級鋼」具備第一代優點，包括位錯、分層開裂等特性（見另稿）。而相較於第一代，第二代「超級鋼」的碳含量由第一代的0.5%減少至0.2%，金屬鈦的含量由第一代0.7%降低至0.1%。而雖然強度略有下降，但在製造工業上，不同於第一代「超級鋼」需要經過熱軋、溫軋、回火、冷軋、回火等工序，第二代「超級鋼」只需要熱軋即可，大幅度地簡化了生產工序，令製作更簡單成本更低。

應用方面，黃明欣表示，以「超級鋼」製作的高強鋼筋，可以直接利用於建造業，取代傳統鋼材應對需求；如需要達到同等強度，若選用「超級鋼」，鋼材用量相對減少，亦降低生產鋼材所產生的二氧化碳，有望為達到「碳中和」的目標作出貢獻。

於航空國防等領域具前景

另外，「進一步開發『超級鋼』達至極高的韌性，而高韌性是工業化應用的先決條件，研究成果為實現『超級鋼』的工業化應用往前邁進了一大步。這新超級鋼材具備潛力，應用於製造高級防彈衣、高強橋樑纜索、汽車及裝甲運兵車的輕量化、航空航天領域、建築領域的高強螺栓和螺母等多方面。」黃明欣欣喜道。

而其中在汽車應用上，他指，「超級鋼」不僅能使汽車輕量化，還能在劇烈的撞擊中加強對乘客的保護。由於「超級鋼」分層開裂特性，使其在受到撞擊時內部的組織結構會進行分層開裂，沿着主裂紋的正上方、正下方分層

超級鋼 破傳統 既強且韌兼可塑

研簡化生產工序降低成本 成汽車「脊梁」加強安全保障



●黃明欣手持樣本演示鋼材的硬度。

裂開，而裂開的縫隙會吸收撞擊時的動能，再透過變形，將動能轉為熱能，「像海綿吸水一樣，將動能大部分吸收，保護乘客安全。」

在汽車內部零件的應用上，黃明欣說，B柱（B pillar）是汽車的「脊梁」之一，位於前後車門之間汽車的側面，在汽車發生側面撞擊時，B柱需要抵抗側面撞來的壓力，變形程度不可很嚴重，嚴重變形會壓到人體，更不能斷裂。他表示，「超級鋼」的强度高抗壓、韌性高不易變形，加上可塑性強不易斷，認為「B柱最好的材料非『超級鋼』莫屬」，而「本領」如此高強的「超級鋼」的鋼板僅1.1mm至1.2mm厚，與一把尺子厚度差不多，又輕又好，期望未來能在汽車製造上有進一步的發展。



●黃明欣及其帶領的博士生黃成鵬。

香港文匯報記者 攝

「國之重器」助微觀層面揭新機制

工欲善其事，必先利其器，黃明欣團隊在「超級鋼」研發突破的過程中，便利用了「國之重器」、位於東莞的中國散裂中子源（CSNS）進行實驗，利用中子的穿透能力，首次從微觀層面揭示了「超級鋼」分層開裂韌性的新機制。相關論文去年於國際頂尖期刊《科學》發表，也是中國散裂中子源首個在《科學》發表的用戶實驗成果。

黃明欣團隊與中國散裂中子源通用粉末衍射儀（GPPD）團隊合作，對鋼樣本進行了系統研究，以具有高穿透能力、高分辨率、無損等優勢的中子衍射（neutron diffraction）為研究手段，分析「超級鋼」的複雜組織結構特徵。團隊通過GPPD獲得「超級鋼」的相體積分數和位錯密度等重要微觀參數，開創性地發現其中分層開裂令韌性增加的新機制。

中國散裂中子源是世界上第四台散裂中子源，亦是粵港澳大灣區首個國家重大科技基礎設施，於2018年投入正式運行。截至今年10月，其註冊用戶超過2,600個，約五分一來自大灣區，包括港澳用戶58個，為包括材料工程、量子科學、生命科學等領域提供重要的實驗支援。



●團隊在「超級鋼」研發過程中，利用了中國散裂中子源做實驗。圖為東莞松山湖中國散裂中子源。資料圖片

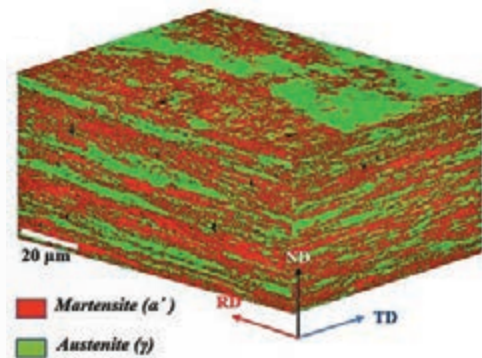


●黃明欣專注深耕鋼材領域十年如一貫。香港文匯報記者 攝

調控原子位錯 強度延展性佳

傳統上，材料的強度和延展性像「魚和熊掌」般難以兼得，比如陶瓷、非晶材料等，具有很高的硬度和強度，但幾乎沒有延展性，難以進行工業加工。黃明欣的團隊從鋼材原子位錯（dislocation）結構入手進行調控，達到强度高、延展性好的特性，成為「超級鋼」的基礎。

黃明欣指，一般材料的原子是有秩序的排布，越是趨於完美的結構，應該是所有的原子排布有序，或排列對稱，如出現原子位錯，對不齊、錯位，就像是「瑕疵」，根據科學界一貫的認知，位錯密度高的材料的強度很高，但延展性會下降，「如果調控好不是這樣，就像生物領域的基因工程，人為地對基因進行調控；而鋼材方面，我們做的是人為地對『超級鋼』的位錯進行調控，『超級鋼』的位錯密度是10的16次方每平方米，對大量的位錯密度進行系統的調控，透



●「超級鋼」的3D立體組織結構，呈獨特片層狀結構。港大圖片

過調控軋鋼的溫度及化學成分等，達到想要的强度高、延展性強的效果，一舉突破傳統認知。」

●香港文匯報記者 郭虹宇

不同鋼材比較

名稱	屈服強度	斷裂韌性	延展性	成本 (每公斤)	綜合優缺點
D&P 超級鋼	2,200MPa	101MPa.m ^{1/2}	15%至20%	少於1美元	高強度、高韌性、高延展性、低成本。
其他典型工業鋼：					
馬氏體時效鋼	1,900MPa至2,400MPa	40至80MPa.m ^{1/2}	2%至5%	6至10美元	高強度、高韌性；但延展性極低，且價格昂貴。多用於航空及國防工業。
雙相鋼	300MPa至600MPa	40至50MPa.m ^{1/2}	8%至15%	少於1美元	強度較低，韌性也較低，但價格便宜，適合大規模生產應用。多用於汽車工業。
淬火及配分鋼 (汽車工業)	900MPa至1,400MPa	50至70 MPa.m ^{1/2}	5%至15%	少於1美元	強度、延展性和韌性都比雙相鋼有所提高。已有部分鋼種實現了商業化應用。
高熵合金	300MPa至1,000MPa	100至200MPa.m ^{1/2}	10%至60%	多於10美元	較新的材料，具較好的強度、延展性和斷裂韌性結合。但發展尚不成熟，且價格昂貴。

數據來源：受訪者提供

整理：香港文匯報記者 郭虹宇

似書裂成一片片 增鋼材斷裂韌性

黃明欣表示，團隊數年前首次透過調控位錯結構達到兼具強度與延展性的「超級鋼」，測試時也發現其令人驚喜的高韌性。隨後團隊花3年時間，探究「超級鋼」的韌性為何如此高，終於破解了當中重要的分層開裂（multi-delamination）理論特質。

「普通的材料開裂，是順着材料的肌理開裂，而『超級鋼』像樹幹一樣開裂，或者說是像一本書的書脊開裂，裂為幾十頁上百頁，沿着主裂紋，在正上方及正下方垂直裂開」，而

這些微小裂紋能有效吸收由外力引致的能量，從而大幅提高鋼材的斷裂韌性。他解釋說。其他材料中只有鋁合金在低溫時才会有分層開裂的情況，但低溫環境卻大大限制了有關特性的應用，相較下，「超級鋼」能在室溫內分層開裂，應用層面明顯更廣。

黃明欣並提到，團隊還在進一步探索分層開裂的情況，包括於「超級鋼」分層開裂的裂縫處加入原子錳負極，調控每一層開裂的間距適宜得當，希望能在材料及相關科學理論有更多突破。

●香港文匯報記者 郭虹宇