

台大參與兩岸三地合作發展極高強度、高延性、低成本新穎鋼鐵材料

2017年08月25日

汽車、航太、及能源工業都需要高強度且高延性的金屬材料來提高能源效率並降減溫室氣體排放量。然而，金屬材料的強度和延性經常是魚與熊掌不可兼得，增加強度的同時往往導致材料延展性下降，進而影響料成形性與衝擊性能。兩岸三地年輕學者合作研究突破過往材料差排理論，大幅提高強度同時仍使材料兼具延展性。此項研究於2017年08月24日發表於《*Science*》期刊，篇名為《*High dislocation density induced large ductility in deformed and partitioned steels*》，全文請參照連結 [B. B. He et al., *Science*, 10.1126/science.aan0177 \(2017\)](https://doi.org/10.1126/science.aan0177)。

「金屬材料經過塑性變形，差排密度提高，故強度提高，但延展性變差，此稱為加工硬化。」

這段敘論述幾乎可以被視為材料科學的定律，而香港大學機械工程系黃明欣博士過去便一直思索以提高「可動差排」密度來維持塑性的理論與可能性，合作團隊中北京科技大學羅海文博士認為能以中錳鋼合金系統來進行材料設計，而台灣大學顏鴻威與程冠儒則以電子顯微鏡技術進行機構解析。該團隊認為以調配雞尾酒的方法能夠使材料的顯微結構更複雜，若能同時有效控制複雜顯微結構以及變形組織演化，則有機會提高可動差排密度來維持塑性，最後團隊以「變形繼以配分 (deformation & partition, D&P)」的技術實現了此具有突破性機械性能的鋼鐵材料。此新穎合金具有 2.0GPa 以上之降伏強度（材料抵抗塑性變形的能力），而其均勻延伸率仍可達到 16% 以上。

研究團隊設計了 Fe-10Mn-0.47C-2Al-0.7V (in wt. %) 的中錳鋼來實現變形繼以配分 (D&P) 的製程，通過適量冷軋變形，隨後進行低溫回火 (400 °C) 得到高差排密度的 D&P 鋼，此特殊鋼的介穩態沃斯田鐵鑲嵌在高差排密度的麻田散鐵中（詳見圖 1）。麻田散鐵是在冷軋的過程由沃斯田鐵相變形成的，而在低溫回火時，麻田散鐵中的碳會配分給沃斯田鐵，保留了麻田散鐵的差排密度，同時避免了中高碳麻田散鐵的脆性，更值得注意的是，此類型差排雖然密度極高，卻能夠維持其滑移的自由度。另一方面，獲得碳配分的沃斯田鐵能在材料變形過程中相變態形成麻田散鐵，輔助性地共同維持了材料的高均勻延伸率(延性)。

相較於普遍使用的超高強度汽車鋼（圖 2: DP 780 和 Q&P 980）和應用於航空及國防工業的麻時效鋼，新開發的 D&P 鋼不僅具有更高的屈服強度，而且擁有更好的延伸率。研究團隊中的幾位學者近期已經獨立發表許多突破強度和延性之間抵換的新型鋼種（詳見圖 2），其中包含黃明欣團隊於 2015 年研發的納米雙晶鋼(Nano Twin Steel)，顏鴻威團隊於 2015 年發表的超細晶雙相鋼(UFG-Duplex Steel)，羅海文於 2016 年發表的相變/雙晶誘發應變中錳鋼(TRIP/TWIP M-Mn Steel)，但是鋼鐵之強度都停滯在約 1500 MPa 左右，透過合作蒼萃三人過去的顯微結構控制技術與經驗，使 D&P 鋼之機械性大幅突破過去之研究成果。

除了差排理論與機械性能上的突破，D&P 鋼不僅達到了麻時效鋼的強度（圖 2: Maraging Steel），並具有優異的延展性，而其原材料價格僅有麻時效鋼的 20%。因此，通過顯微結構與缺陷的複雜化與可控化，研究團隊在降低經濟成本的同時得到了超高強度的鋼鐵。因此，D&P 鋼具有工業生產的潛力，而「如何調配可動差排」這樣的概念亦能廣泛應用於汽車、航太、以及能源等工程材料領域當中。

此研究由香港大學主導，協同北京科技大學、台灣大學和香港城市大學的青年科學家共同合作所完成的，為兩岸三地青年科學家成功合作的例子。顏鴻威博士師承台灣材料顯微結構大師楊哲人教授，於 2014 年 8 月回到台灣大學任教，並成立「顯微結構與缺陷物理研究團隊」，透過此研究指導程冠儒同學相關學理與技術，團隊成員特別感謝台灣大學與科技部材料學門的經費補助，使其能在 2015 年研究室草創狀態下就展開 D&P 鋼之顯微結構與變形機制剖析研究，其間獲英國 Oxford Instruments 設備助拳，最後於 2016 年底順利完成這項合作研究。台灣大學自陸志鴻校長 1972 年建立第一部穿透式電子顯微鏡，至楊哲人教授建立先進鋼鐵組織控制學群，迄今已經有超過 40 年歷史，而程冠儒同學繼承了台大悠久的顯微結構分析傳統，並展現驚豔之研究成果，相當難得。未來台大將持續深耕顯微結構與缺陷分析之專業教育、先進設備、以及前瞻應用研究。

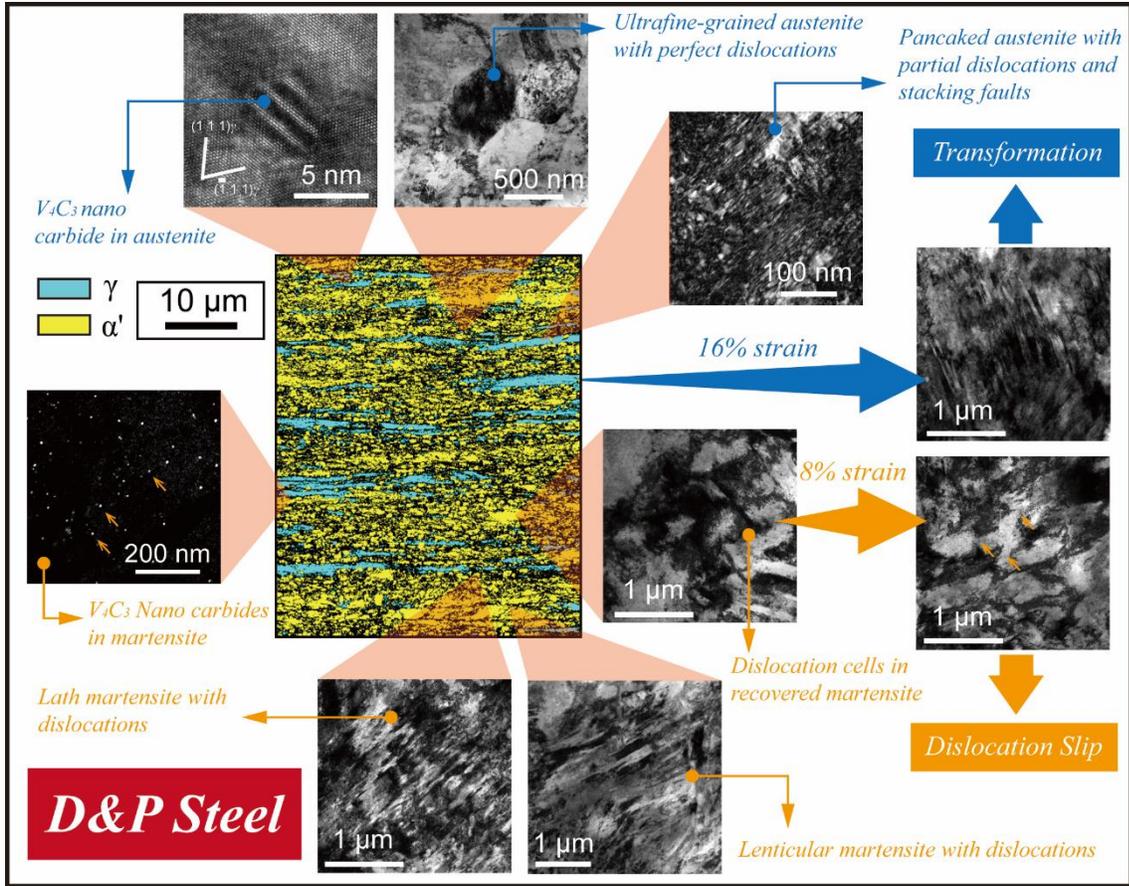


圖 1 高強度且高延性 D&P 鋼之內部顯微結構與奈米結構，麻田散鐵與沃斯田鐵相中皆包含相當高密度的差排缺陷(圖片中之顯微結構剖析工作皆完成於台灣大學)。

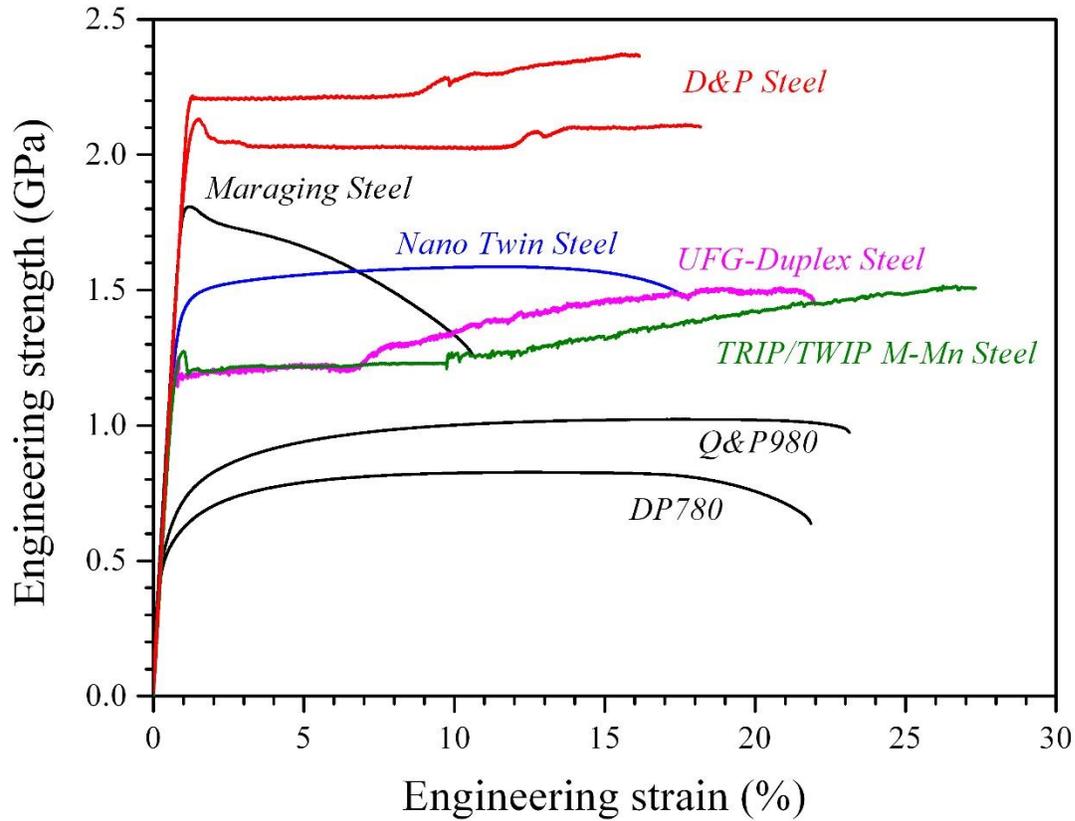


圖 2 D&P 鋼與其他高強度鋼在拉伸性能方面的比較。傳統高強度鋼包含航太用的麻時效鋼、汽車用的雙相 (DP780) 鋼和淬火&配分 (Q&P980) 鋼，而先進高強度高延性鋼包含納米雙晶鋼 (Nano Twin Steel)、超細晶雙相鋼(UFG-Duplex Steel)和相變/雙晶誘發應變中錳鋼(TWIP/TRIP M-Mn Steel)。