



太空產業用鈦金屬發展現況與趨勢

財團法人金屬工業研究發展中心執行長 / 林秋豐
財團法人金屬工業研究發展中心資深產業分析師 / 陳靖惠
財團法人金屬工業研究發展中心產業分析師 / 李盈瑩

關鍵字：太空產業、鈦合金、鈦鋁介金屬、Space X、難加工材

一、前言

近年來，人類加快了探索太空的腳步，且因應5G與太空商業化趨勢的發展下，亦帶動衛星與火箭的蓬勃發展，根據市場預估，自2019年開始，未來十年全球每一年將發射約900顆的衛星。然而太空環境十分複雜，須面對高溫、極寒、真空、輻射、震動、腐蝕等各種極端惡劣條件，因此在設計上不僅需考慮結構的特點，更須注重材料的選擇與使用。以太空飛行器而言，甚至更需要進一步追求輕量化結構以節省燃料與提昇任務效益，因而使得各式特殊金屬材料與相關製程的研發應運而生。

目前最常被拿來應用的金屬材料主要有高溫超合金、鋁合金及鈦合金。高溫合金一

般以鐵、鎳、鈷等為基材，是指能在600°C以上的高溫及一定應力條件下長期運作不失效的金屬材料，目前市面上以鎳基高溫合金（Inconel 718）應用範圍最廣，佔比達80%，其次為鎳-鐵基，佔比14.3%，鈷基佔比最少，佔比約5.7%。鎳基高溫合金由於其耐高溫及高強度的特性，常使用於飛機的渦輪噴射引擎的葉片上，即使在高達800-900°C的條件下仍有相當不錯的機械強度表現。而鋁合金最廣為人知的便是阿波羅登月計畫使用的火箭載具—農神五號（Saturn V），其主要結構大多即是鋁合金製成。鈦合金與鎳基超合金一樣，屬於典型的難加工材材料，雖然相較其他金屬的成本較為高昂，但由於其穩定的化學性質，良好的耐高溫、耐低溫、抗強酸強鹼，以及出色結構強度，在航太、汽車、機械製造等領域都被大量應用，尤其在



航太工業中佔有十分重要的地位，也被喻為是「太空金屬」。因此本文便聚焦於鈦金屬進行說明。

二、鈦金屬於太空產業之應用現況

金屬鈦具有銀灰光澤，在地殼中約占總重量的0.42%，目前已知全球約有超過一千萬噸以上鈦礦，不屬於稀有金屬，因此其應用來源無虞。鈦在熔煉中，常會加入少量的鐵（Fe）、鈦（V）、或鉬（Mo）等元素，製成鈦合金材料，鈦合金材料是一種性能優異的金屬材料，具有抗強酸、抗強鹼、抗鹽水腐蝕的穩定結構，加上其硬度高、密度小，重量輕，同時具有耐高溫特性，使其在國防與航太領域備受歡迎，由於其重量僅有鐵的1/2，卻像銅一樣經得起拉伸重捶，因此應用範圍包括機翼結構、起落架、艙門、發動機風扇和壓縮機低溫段工作的葉片、盤、機匣等零件等。此外，鈦合金亦是製造運載火箭、火箭發動機箱、太空船組件及衛星大多數結構和壓力容器部件的首選，由於它們與腐蝕性推進劑的優異相容性，包含推進劑箱或碳纖維的環氧樹脂複合材料壓力容器（COPV）與高壓氮氣儲罐等亦為其常見的應用。

鈦金屬若從晶體結構來看主要可分為四種類型：近 α 型、 $\alpha+\beta$ 型、介穩型 β /近 β 型，以及穩定 β 型合金。其中近 α 型鈦合金在低溫及高溫範圍中都有應用，CP-Ti即為近 α 鈦合

金，由於其優異的抗應力腐蝕性能，因此被用於製造長時間運行的衛星推進器箱；而Ti-5Al-2.5Sn-ELI則因其優異的斷裂韌性（低至20 K）而被製造用於低溫的球形高壓氮氣儲氣瓶。

（ $\alpha+\beta$ ）型的Ti-6Al-4V是目前用量最大的鈦合金種類，適用於高強度應用的退火及固溶處理，常被應用於火箭和酬載衛星部件。此外與Ti-6Al-4V相似但組成不同的其他（ $\alpha+\beta$ ）型鈦合金，如BT-14、Ti-3Al-2.5V也開始少量被應用。其與Ti-6Al-4V相比，在室溫下雖然近 β 型鈦合金之強度表現不輸Ti-6Al-4V，但目前在太空應用上仍不如Ti-6Al-4V一樣廣泛。然而值得注意的是，近 β 型鈦合金其實具有更好的冷成形性，若改用具有較高比強度的近 β 鈦合金製成氣瓶和推進劑罐，將有望使原先使用（ $\alpha+\beta$ ）型鈦合金（Ti-6Al-4V）製成的部件重量大幅減輕。

【表1】列出了在航太應用中常用的近 β 型和穩定 β 型鈦合金的應用與特性。

三、鈦合金的新進展

自1980年代以來，為滿足發動機用材料需求，600°C高溫鈦合金即相繼問世，代表合金有英國的IMI834、美國的Ti-1100以及俄羅斯的BT18y和BT36，合金體系均為Ti-Al-Sn-Zr-Mo-Si系。IMI834（Ti-5.8Al-4Sn-3.5Zr-0.7Nb-0.5Mo-0.35Si）是由英國的IMT公司和Rolls-Royce公司在1984年聯合開發的近 α 型

表 1 航太應用中常用的近 β 型和穩定 β 型鈦合金

	合金成份	應用	特性
1	<i>Ti-13V-11Cr-3Al</i>	彈簧、機身和起落架	強度 ~1300 MPa
2	<i>Beta III</i> (<i>Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn</i>)	飛機高強度鍛件、 連接零件	冷加工性 室溫強度 ~1400 MPa
3	<i>Beta C</i> (<i>Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr</i>)	高強度鍛件、 彈簧和緊固件	室溫強度 ~1300 MPa
4	<i>Ti-10V-2Fe-3Al</i>	波音 777 起落架、 直升機主旋翼	熱成形性 室溫強度 ~1250 Mpa 熱強度高達 588 K (室溫強度的 80%)
5	<i>Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn</i>	波音 777、 微小的連接零件	冷成形性 室溫強度 ~1400 MPa
6	<i>Timetal LCB</i> (<i>Ti-4.5Fe-6.8Mo-1.5Al</i>)	飛機彈簧	室溫強度 ~1400 Mpa 用鐵代替鈳降低成本
7	<i>Timetal 21 S</i> (<i>Ti-15Mo-3Nb-3Al-0.2Si</i>) <i>Beta CEZ</i> , <i>Ti-8Mo-8V-2Fe-3Al</i>	高強度鍛件	中等抗潛變性
8	<i>BT-22</i> (<i>Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe</i>)	俄羅斯軍用飛機 起落架、氣瓶	室溫強度 ~1300 MPa

資料來源：JMR/金屬中心 MII 研究團隊整理

鈦合金，也是國際上首件使用溫度可達 600°C 的高溫鈦合金。而後2009年中國大陸改進傳統鈦合金，研發出近 α 型的新型高溫鈦合金 Ti-750，在短時間內的使用溫度可達 750°C 。而後國際上開始研究透過微量元素的添加來提高性能，比如加入鎢（W）提高合金的高溫性能，元素矽（Si）強化了鈦金屬 α 相以提高合金的抗潛變性，而鈮（Nb）和鋯（Zr）的加入則改善了合金的加工性能。以下便針對鈦合金的幾個新進展進一步加以說明。

1. 鈦鋁介金屬

與其他高溫合金和耐火合金相比，鈦鋁介金屬因其較低的密度，且在高溫下的高比

模數和強度因而在近年來受到許多關注。鈦鋁介金屬主要可分類為基於 γ （TiAl）的鋁化物（ γ 鋁化物）和基於 α_2 （Ti₃Al）的鋁化物（ α_2 鋁化物）。 α_2 鈦鋁化物可承受溫度有 873 K，而 γ 鈦鋁化物通常由鈦含量為36%至50%的TiAl和Ti₃Al兩相組成，其可承受溫度更高達1273 K。

由於是金屬間化合物，需努力透過TMP或添加合金元素（例如B, C, Mn, V, Cr）改變化學成分以改善這些其延展性。考慮到該合金固有的延展性差和適度的抗氧化性，將Nb和Cr等元素添加到二元合金（Ti-Al）中能有效改善，也成為最著名的 γ -鋁化物之一的第四代鈦鋁介金屬。



γ 鈦鋁介金屬可用於美國許多航太計劃中，例如可重複使用的運載火箭、NASA Future X飛機、X-38飛機和其他戰略任務。矽磚是用於重複運載火箭的熱保護的最常用材料之一，但因其十分脆弱，任何與太空碎片的碰撞都會損壞矽磚，將導致太空船基礎結構暴露於高熱之中，造成嚴重故障。因此對於太空碎片撞擊的問題而言，更安全的熱保護系統將是金屬熱保護系統（MTPS）。通過使用基於鈦鋁介金屬的MTPS，與矽磚相比將有更高的溫度應用優勢，可在較低密度和較高溫度性能間進行權衡，目前使用Inconel-718箔片實現MTPS的類似處理順序已得到證明、並測試合格，可用於可重複使用之運載火箭之上。

2. 鈦基複合材料（Titanium Matrix Composites; TMCs）

鈦基複合材料是用於高溫環境下的太空應用候選材料，與SiC、Al₂O₃和Si₃N₄結合所得之複合材料稱為異位複合材料，而硼化鈦晶須（TiB）是製造TMC所需的增強材料之一，硼化鈦晶須透過將載荷轉移到鈦基體上，因而提供了增強複合材料所需的橋樑。根據研究發現，與未增強的鈦合金相比，TiB晶須大幅改善了潛變和高循環疲勞強度。

目前鈦基複合材料（TMCs）已被提出作為高溫應用的候選材料，與鋼和鎳基材料相比，鈦基材料具有較佳的強度和剛性。與超合金相比，高溫下的TMCs可在維持相同強度

下，減輕50%的重量，因此可望應用於發動機及壓縮機葉片，然而因鈦合金的抗潛變能力主要取決於同素異形 α 相和 β 相的分佈及大小，因此未來若能對材料的晶相做更出的控制，這類新型鈦基複合材料在太空領域中的應用將會更為廣泛。

3. 添加微量元素（矽、硼、碳）

根據近期國際研究發現，當在CP-Ti、近 α 和（ $\alpha+\beta$ ）鈦合金（例如Ti-6Al-4V）中添加微量的矽、硼或碳時，將可達到晶粒細化的作用，是一種透過改變材料的平均晶粒尺寸來強化材料的方法，研究中指出，可透過晶粒細化改善各種鈦合金的超塑性。以鈦合金Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe（Ti-55511）為例，由於其具有較高的比強度而被開發作為俄羅斯軍用飛機起落架和承重機身的材料，目前嘗試透過添加0.06-0.12 wt%的硼將Ti55511合金的鑄態晶粒尺寸從1200-2400 μm 更改為300-600 μm ，發現硼添加之後不僅導致晶粒細化，且可使Ti55511合金中的晶界從平面界面變為樹枝狀/鋸齒狀界面，且在晶界處的硼化鈦晶須可有效地限制晶粒尺寸，而這些發現與含有0.025-0.15 wt%硼的CP-Ti合金研究結果相似。而向Ti-55511合金中添加0.06 wt%的硼可顯著改善斷裂，同樣在硼改性的Ti-6Al-4V和其他近 β Ti合金中也發現了超塑性特徵得到改善。

除了上述的硼改性合金之外，各國亦持續進行新型態合金的開發，如TIMET公司所

開發出的鈦合金Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo（可簡稱為Ti-6246），在高達573 K的中間溫度下具有出色的強度，此種合金是可氣冷硬化的，與Ti-6Al-4V相比具有更高的可硬化性，因此有潛力替代衛星推進劑罐和氣瓶應用上的Ti-6Al-4V。而稱為Beta-21S的Ti-15Mo-2.7Nb-3Al-0.2Si則是可軋製成片/箔的較新鈦合金之一，它已被開發為碳化矽纖維分散TMCs的基質，用於美國國家太空飛機（NASP）。

此外，Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1Si和Ti-17則是美國ATI公司開發的兩種合金，適用於高達750 K的抗潛變應用。TIMETAL-108成分為Ti-4.8Al-3V-0.6Fe-0.18O是美國TIMET公司根據MIL-DTL-46077 4類標準開發用於裝甲應用的合金，已對該合金在5-78 mm厚度範圍內彈道或超高速沖擊（HVI）性能進行評估，它在面對球形彈藥和模擬彈丸碎片（FSP）的測試中表現出優異的抵抗力，因此這種合金可作為可重複使用的太空載具之

候選材料，鑑於低地球軌道空間環境中空間碎片的威脅日益增加，此類材料的開發是一項重大進展。【表2】整理出航太應用中之新型鈦合金。

四、結語

過去六十年中，鈦合金在太空應用領域已有舉足輕重之地，且繼續成為研發設計者的首選，近年來性能越來越高階的新型鈦合金陸續被開發，包括本文提及之 γ 鈦鋁介金屬未來將替代低壓渦輪葉片的鎳基超合金，有望替代火箭發動機中的鎳基高溫合金鑄件，甚至是鈦合金在二次加工製程中，摩擦攪拌焊接也被成功證明可降低大型電子束焊接機的需求，而結合積層製造與摩擦攪拌焊接用於製作大型太空結構（如推進劑罐）也成為先進國家研發與應用之重點。美國與紐西蘭的小型火箭開發商Rocket Lab，其火箭Electron使用的主引擎Rutherford，也是採

表 2 航太應用中之新型鈦合金

	合金成份	應用	特性
1	<i>Ti-6246</i> <i>Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo</i>	美國 TIMET 公司開發、有望替代衛星推進劑罐和氣瓶應用	可氣冷硬化、在高達 573 K 溫度下具出色強度
2	<i>Beta-21S</i> <i>Ti-15Mo-2.7Nb-3Al-0.2Si</i>	被開發為碳化矽纖維分散 TMCs 的基質、用於美國國家太空飛機	可軋製成片 / 箔
3	<i>TIMETAL-108</i> <i>Ti-4.8Al-3V-0.6Fe-0.18O</i>	美國 TIMET 公司開發、適用於太空載具	對球形彈藥和模擬彈丸碎片有優異抵抗力
4	<i>Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1Si</i>	美國 ATI 公司開發	可用於高達 750 K 的抗潛變應用

資料來源：本研究整理



用了金屬積層製造技術，從管件、燃燒艙到噴嘴全部一體成形，不但降低製造時間與成本，也大幅縮短了研發團隊的反應時間，同時提高太空任務規劃的彈性。而隨著SpaceX開發的第一節可回收火箭Falcon 9問世，未來在太空領域中所應用的金屬材料，勢必也將面臨循環回收的挑戰，因此金屬材料發展與應用研究未來與太空產業發展的進程，將形成密不可分、相輔相成的關係。而臺灣過去以金屬基礎工業技術聞名於國際，深厚的材料研發與加工製程能力也讓臺灣許多中小企業成為SpaceX供應鏈的重要夥伴，未來隨著太空產業而帶動之太空經濟，臺灣廠商也可以開始思考如何提前布局，相信臺灣在這場星際戰爭中一定不會缺席。