

# 鈦合金 航太扣件 之發展與應用

文/ 劉文海

## 一. 前言

鈦合金研究起源於航太，航太工業的發展也促進了鈦合金的發展。鈦合金具有强度高、重量輕、耐腐蝕、耐高溫、抗燃燒、無磁性等優點，鈦合金比鋁合金的使用溫度高出150-200°C，因此對於在飛行器結構中因工作溫度過高而不能採用鋁合金扣件的部位，鈦合金將是一種較好的選擇。此外，鈦合金和複合材料相容性佳，因此，隨著先進軍民用飛機鈦合金和複合材料用量的不斷增加，對鈦合金扣件的需求日益增加。在美國軍民用飛機上，鈦合金扣件已基本取代了合金鋼扣件。

## 二. 鈦合金航太扣件種類與特性

航太用鈦合金扣件主要包括鉚釘、螺栓及特種扣件三大類，其中，使用量最大的是鈦合金螺栓。鈦合金螺栓按其用途可分為普通鈦螺栓、高鎖螺栓、艾迪螺栓(Eddie bolt)及干涉型螺栓等。普通鈦螺栓按頭型分為沉頭螺栓、六角螺栓、十二角螺栓、十二角法蘭等。高鎖螺栓是一種可單面安裝的螺紋扣件，是飛機上大量使用的扣件之一，按受力狀況可將其分為抗拉型和抗剪型。艾迪螺栓(圖1)是第四代螺母系統，該系統的負荷可控制，不易損傷零件，適合連接複合材料。干涉型螺栓是一種利用干涉配合連接來提高結構疲勞壽命的螺栓，在民用飛機上，幾乎所有不可拆卸的扭剪型扣件都採用了干涉配合技術。

在同樣的強度指標下，鈦合金扣件比鋼的重量要輕70%，且與碳纖維複合材料的電極電位相近，鈦合金又成為複合材料唯一的連接材料。鈦之彈性係數低(約100GPa)，降伏强度高，彈性應變量大且無磁性，對於防止緊固螺栓的鬆動和防磁場干擾至關重要。此外，鈦合金在各種氣候條件下都具有很高的抗腐蝕性，鈦合金的疲勞強度和對應力集中的敏感性優於類似用途的鋼，這也是其被廣泛用作航太扣件的另一個重要原因。



圖1 艾迪螺栓外觀 (資料來源: <https://www.howmet.com>)

## 三. 鈦合金種類與特性

圖2為鈦合金之擬二元相圖，鈦合金可由其 $\beta$ 穩定元素的添加量來區分類別及相的組成，當含量少時為 $\alpha$ 型/類 $\alpha$ 型(near  $\alpha$ )鈦合金，含量多為 $\beta$ 型，介於中間者則為 $\alpha$ - $\beta$ 型。另外， $\beta$ 型又可細分為亞穩型(metastable)及穩定型(stable)，前者的Mo當量控制於10~25，後者則是>25。

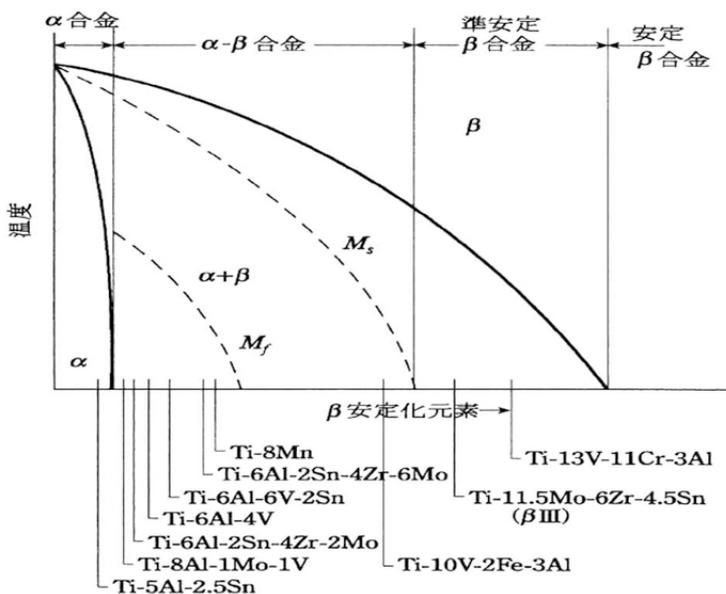


圖2 鈦合金之擬二元相圖 (資料來源: 輕金屬, 第65卷 第9號(2015))

### 1. $\alpha$ 型/類 $\alpha$ 型:

退火狀態為六方密排(HCP)的 $\alpha$ 相(或 $\alpha$ 相加微量金屬間化合物)，加工硬化率較大，成型性較差，且不可進行熱處理強化，強度不如其他



二類。 $\alpha$ 型合金具有良好的抗潛變性、可銲性，是高溫耐蝕下使用的首選合金，且無冷脆性，也適合在低溫環境中使用，如純鈦、Ti-3Al-2.5V。 $\alpha$ 型合金鍛造性較差，容易產生鍛造缺陷，可藉由減少每道次加工率和頻繁熱處理來控制鍛造缺陷。類 $\alpha$ 型之室溫強度高於 $\alpha$ 型，其潛變強度高於其他類鈦合金。

### 2. $\alpha$ - $\beta$ 型：

退火組織為 $\alpha+\beta$ 相，室溫強度及塑性高於 $\alpha$ 型，耐蝕性亦佳，但銲接性和耐熱性低於 $\alpha$ 型鈦合金。熱加工性能良好，但冷作成型困難，可進行熱處理強化，具有較高之潛變強度及高溫抗拉強度，使用溫度最高能到500°C，為目前應用最廣泛之鈦合金，如 Ti-6Al-4V、Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo。

### 3. $\beta$ 型：

退火或淬火狀態為體心立方(BCC)的單相 $\beta$ 固溶體，成型性在三類合金中最優，另外有少部分擁有優異抗蝕特性。常用的熱處理方法是先固溶處理，然後在450~650°C時效，其 $\beta$ 基地上會析出細小的 $\alpha$ 第二相，這就是 $\beta$ 合金的強化機制。由於 $\beta$ 鈦合金比其他類鈦合金在時效時析出更多的 $\alpha$ 相，含有更多的 $\alpha$ - $\beta$ 相介面阻礙差排運動，因此 $\beta$ 鈦合金的室溫強度最高，且具有優異的斷裂韌性，但其淬火組織不夠穩定，耐熱性不高，使用溫度一般低於200°C，代表性合金包括Ti-10V-2Fe-3Al、Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn及Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr、Ti-35V-15Cr等。

每種類型鈦合金的晶體結構皆由兩相形成，即 $\alpha$ 相和 $\beta$ 相，並且每相的數量、大小和形態都不同，這極大地影響了可鍛性和機械性能。 $\beta$ 穩定元素（如Mo、V、Cr、Fe等）越多，則 $\beta$ 相越多，通常具有更好的可鍛性（冷加工性）。另一方面，如果 $\beta$ 穩定元素數量過多，則 $\beta$ 相變點（ $\alpha+\beta$ 兩相區域和單相 $\beta$ 之間的轉變溫度）會降低，因此 $\alpha$ - $\beta$ 型合金在兩相區域鍛造時，變形阻力變高，故需要更大的鍛壓力。因此，有必要根據應用場合和所需特性選擇合適的合金和鍛造方法的組合，鈦合金材料特性之傾向整理如圖3，代表性鈦合金之機械性質比較如表1。

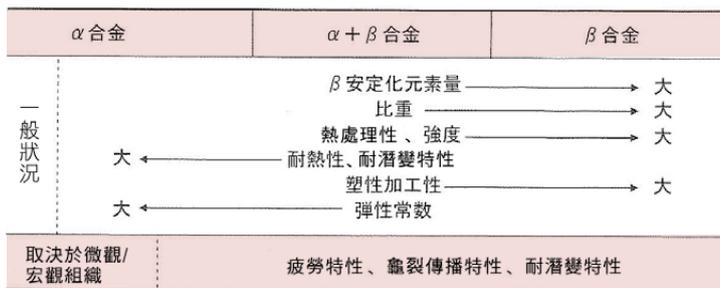


圖3 鈦合金材料特性之傾向 [資料來源：特殊鋼，2019年7月]

合金種類	成分	熱處理	拉伸性質		
			拉伸強度 [MPa]	耐力 [MPa]	延展率 [%]
$\alpha$ 合金	Ti-5Al-2.5Sn	退火	860	800	16
$\alpha + \beta$ 合金	Ti-8Al-1Mo-1V	退火	1,000	950	15
	Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	退火	980	890	15
	Ti-3Al-2.5V	退火	680	590	20
	Ti-6Al-4V	退火	980	920	14
		析出	1,170	1,100	10
		Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo	析出	1,270	1,180
$\beta$ 合金	Ti-13V-11Cr-3Al	析出	1,270	1,230	8
	Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr	析出	1,440	1,370	7
	Ti-15Mo-5Zr-3Al	析出	1,470	1,450	14
	Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al	析出	1,230	1,110	10

表1 代表性鈦合金之機械性質比較 [資料來源：特殊鋼，2019年7月]

在各種類型的鈦材中， $\alpha$ 型及 $\alpha$ - $\beta$ 型廣為所知的應用於多元化產業上，而 $\beta$ 鈦合金雖然早在1950年代就已開始發展，但受限於高成本、熔煉不易等因素，大部分國家僅使用在國防及航太軍事上，因此其特性相較於 $\alpha$ 型及 $\alpha$ - $\beta$ 型較鮮為人知。近年來， $\beta$ 鈦合金由於其優異的特性，開始漸漸往民航、生醫、工業、民生及體育用品等市場發展而備受矚目。

## 四. 鉚釘類扣件用鈦合金材料

對鉚釘來說，最重要的是材料的冷加工性，只有冷態塑性好的材料製造的鉚釘，才能夠進行冷鉚接安裝。通常在對強度要求不太高而對耐蝕性能要求高的部位採用鈦合金鉚釘， $\beta$ 型鈦合金由於在固溶狀態下為單一的 $\beta$ 相，且由於其具有體心立方的原子結構，所以該類合金具有十分優異的冷加工性能，非常適用於製造鈦合金鉚釘。

### 1. Ti-5Mo-5V-8Cr-3Al (中國牌號TB2)

TB2鈦合金是一種亞穩定型鈦合金，該合金在固溶處理狀態下具有優異的冷成形性和銲接性，適用於各類冷打鉚釘，有時也用於小規格螺栓的製造。其使用溫度一般在300°C以下，航太扣件可在短時間內使用到500°C。

### 2. Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al (中國牌號TB5)

TB5鈦合金是一種亞穩定 $\beta$ 型鈦合金，最初是由美國TIMET公司進行量產。該合金冷成形能力與純鈦相當，可在固溶狀態下進行各種複雜零件的冷成形(如鉚釘鉚接)，時效後室溫抗拉強度可達1000MPa以上。由於其V元素含量高，抗高溫氧化性能較差，一般在200°C以下的工作環境中使用，但該合金具有優異的抗腐蝕性。

### 3. Ti-45Nb合金

Ti-45Nb合金為一種鉚釘專用材料，其突出的優點是塑性高(伸長率可達20%以上，斷面收縮率高達60%-80%)，冷加工性能優異，其剪切強度( $\geq 350$ MPa)和抗拉強度( $\geq 450$ MPa)均高於純鈦，並且冷變形抗力低於純鈦，非常適合做複合材料連接用鉚釘材料。Ti-45Nb合金於1974年列入AMS 4982規範，2002年修訂為AMS 4982C。美國在航太鉚釘產品中，Ti-45Nb合金已經全面取代純鈦。該合金與Ti-6Al-4V合金搭配，製成的雙金屬鉚釘，已經在空客和波音飛機上獲得大量應用。

對於要求剪切剪强度高，在安裝過程中不允許鉚釘桿變形的鉚釘，一般採用雙金屬鈦合金鉚釘，該鉚釘是由Ti-6Al-4V釘桿和Ti-45Nb頭部組成，經過慣性摩擦壓接，緊密融合在一起而形成了一個整體實心鉚釘。這種雙金屬鉚釘在鉚接時，只需用較小的衝擊力就可以使Ti-45Nb鉚釘頭產生塑性變形，而Ti-6Al-4V鉚釘桿卻不變形。雙金屬鈦合金鉚釘在B-1轟炸機、波音等飛機上廣泛用於鈦合金構件及複合材料構件的鉚接。如美國F-14戰鬥機機翼前緣使用4000支該雙金屬鉚釘，其疲勞性能與高鎖螺栓相當，而成本可降低50%，重量輕30%~40%，這種雙金屬鉚釘的成本要低於其他 $\beta$ 型鈦合金鉚釘。



## 五. 螺栓類扣件用鈦合金材料

用來製造螺栓的鈦合金材料，一般要求其熱處理後獲得高的抗拉強度和剪切強度，通常要求其強度水準與飛機結構中常用的ASTM 4340(中國牌號30CrMnSiA)高強度中碳調質合金鋼相當。

### 1. Ti-6Al-4V(抗拉強度 $\geq 1100\text{MPa}$ 級)

Ti-6Al-4V鈦合金(ASTM Gr.5, 中國牌號TC4)最初由美國在1954年首先研製成功，目前已經發展成為一種國際性的鈦合金，已在航太、民生等工業中得到廣泛應用，廣泛用於製造飛機結構中的樑、框、起落架、扣件、發動機風扇、壓氣機盤、機匣、葉片等，目前占鈦合金產量的一半以上。該合金具有良好的成型性和超塑性，合金 $\alpha$ - $\beta$ 轉變溫度為 $980\sim 1010^\circ\text{C}$ ，長期工作溫度可達 $350\sim 400^\circ\text{C}$ 。但由於Ti-6Al-4V是 $\alpha$ - $\beta$ 雙相合金，不能冷打成形，其釘頭必須熱鍛，熱處理需真空水淬和時效，對加工設備及技術要求高。熱鍛的缺點為：胚料加熱時易出現局部燒傷和過熱以及表面氧化，同時不易實現自動化連續製造、生產效率低。

### 2. Ti-3Al-5Mo-4.5V(前蘇聯牌號BT16)(中國仿製牌號TC16)

BT16為前蘇聯開發之扣件專用冷鍛鈦合金，該合金是麻田散體型 $\alpha$ + $\beta$ 雙相鈦合金， $\beta$ 穩定係數為0.83，接近臨界成分。該鈦合金主要用於製造工作溫度 $350^\circ\text{C}$ 以下的航太扣件，合金 $\alpha$ - $\beta$ 轉變溫度為 $860\pm 20^\circ\text{C}$ 。較小的 $\beta$ 晶粒和在退火狀態下高達25%的 $\beta$ 相體積比率決定了BT16合金具有優異的室溫加工塑性，所以該合金可在室溫下完成扣件頭部的冷打成形，因而明顯提高螺栓生產效率、降低生產成本，隨後在固溶時效熱處理後其強度可達 $1030\sim 1180\text{MPa}$ 。前蘇聯鈦合金螺栓類扣件主要採用BT16鈦合金製造，使用了幾十年沒有出現任何品質事故。

### 3. Ti-10Mo-8V-1Fe-3.5Al(中國牌號TB3)

TB3鈦合金亦是一種可直接冷鍛及熱處理強化的亞穩定 $\beta$ 型鈦合金，主要優點是固溶處理狀態具有優異的冷成形性，其冷鍛比(Dt/Do)可達2.8，固溶+時效處理後可獲得高的強度，主要用於製造使用溫度低於 $300^\circ\text{C}$ 的 $1100\text{MPa}$ 級高強度航太螺栓，也可用於鉚釘材料。

### 4. Ti-6Al-2.5Mo-1.5Cr-0.5Fe-0.3Si(俄羅斯牌號BT3-1)(中國仿製牌號TC6)

BT3-1是俄羅斯研製的可耐 $500^\circ\text{C}$ 以下高溫的鈦合金扣件材料，在俄羅斯已得到廣泛應用。與TC4鈦合金相比，該材料對溫度具有較高的敏感性，其扣件製造更困難。TC6合金是一種綜合性能良好的麻田散體型 $\alpha$ + $\beta$ 雙相

鈦合金，一般在退火狀態下使用，也可進行適當的熱處理強化。該合金之抗氧化性和耐腐蝕性非常優異，其製造的零部件可在 $400^\circ\text{C}$ 下長時間工作6000h以上、 $450^\circ\text{C}$ 下長時間工作2000h以上。等溫退火處理後室溫抗拉強度大於 $980\text{MPa}$ ，降伏強度大於 $840\text{MPa}$ 、延伸率大於10%、斷面收縮率大於25%。 $400^\circ\text{C}$ 高溫拉伸強度大於 $720\text{MPa}$ 、延伸率大於14%、斷面收縮率大於40%。為了進一步提高其使用強度，也可進行固溶+時效處理。

### 5. Ti-3Al-2.7Nb-15Mo( $\beta 21\text{S}$ )

$\beta 21\text{S}$ 合金是美國TIMET公司1989年為NASP計畫研製開發的亞穩定 $\beta$ 型鈦合金，抗拉強度大於 $1280\text{MPa}$ ，具有優異的冷熱加工性能、深的淬透性、高的抗潛變性、高的抗氧化性和良好的抗腐蝕性，該合金於1994年首先被列入美國的ASTM標準中，美國主要使用該合金製造太空梭用鈦基複合材料及波音777等飛機發動機吊艙部件。由於該合金採用的 $\beta$ 穩定元素為高熔點、抗氧化的鉬和鈮，而非TB2、TB3鈦合金採用的抗氧化性能差的鈮，所以該合金製造的扣件長時間使用溫度可達 $550^\circ\text{C}$ ，徹底解決了傳統高強度 $\beta$ 鈦合金扣件使用溫度低(不高於 $300^\circ\text{C}$ )的問題。中國仿製該合金牌號稱為TB8，圖4為該鈦合金螺栓外觀。



圖4 1280MPa級TB8鈦合金螺栓(資料來源：航空製造技術，2013年第16期)

未來航太技術的發展趨勢要求新型扣件的比強度高，即要求重量輕、強度高。所以美國、俄羅斯、法國等航太強國都在積極開發抗拉強度 $1200\text{MPa}$ 以上的高強度鈦合金材料及扣件。近年來，美鋁公司開發出Timetal 5553(Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr)鈦合金高強度螺栓，其固溶時效後抗拉強度達 $1300\text{MPa}$ 以上、抗剪強度大於 $745\text{MPa}$ 、延伸率大於10%，各項性能指標完全達到了典型的 $1250\text{MPa}$ 鍍鎳合金鋼扣件規範的要求。SPS航空扣件集團採用SPS TITANTM761鈦合金加工製造的螺栓產品Aerlite180，其抗拉強度可達 $1240\text{MPa}$ 、抗剪強度可達 $745\text{MPa}$ ，達到了許多合金鋼和耐蝕合金扣件的強度水準，同時減重40%。

## 六. 結語

目前航太用鈦合金扣件70%以上仍以Ti-6Al-4V為主，因其密度低、疲勞性佳、成份簡單。雖然 $\beta$ 鈦合金冷鍛加工成本低，缺點是密度高，強度雖與Ti-6Al-4V相當，但疲勞性能不如Ti-6Al-4V，而且成分複雜，半成品成本高。由於同樣需要進行真空時效處理，所以成品扣件的成本仍較高。隨著全球航太工業對飛行器性能要求的不斷提高，未來高性能鈦合金航太扣件對其製造材料提出了更高強度、更高斷裂韌性、更高疲勞性且冷加工性能良好之要求。■

### 參考資料

- 「チタン合金」，特殊鋼，2019年7月
- 長田卓，「航空機向けチタン合金とその鍛造技術」，輕金屬，第65卷第9號(2015)
- Nicholas Gwilym Jones，「Microstructural Evolution of Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr」，Imperial College London, UK, October 2008
- 董瑞峰等，「航空緊固件用鈦合金材料發展現狀」，航空製造技術，2018年第61卷第4期
- 薛祥義等，「鈦合金材料在我國航空緊固件中的應用」，航空製造技術，2013年第16期
- 倪沛彤等，「宇航飛行器緊固件用鈦合金的發展」，鈦工業進展，2012年6月
- 伍昭憲，「 $\beta$ 鈦合金的基礎特性與航太市場應用」，台灣輕金屬協會會刊，2016年3月31日
- 金和喜等，「航空用鈦合金研究進展」，中國有色金屬學報，2015年2月
- <https://www.howmet.com>

