

航空扣件所使用的材料，相較其他扣件消費市場來說，囊括範圍廣泛許多。一開始人們可能會相當納悶為何如此，但是如果考慮到飛機和太空船廣泛的種類及性能需求，這就顯得相當合理。一如大部分的扣件產品，航空扣件也需要展現良好的強度。然而，航空扣件不僅需要在室溫下展現其強度，在不少情況中，還需要能在高溫或零下等極端環境維持強度。事實上，某些航空扣件甚至得在兩種極端情境中切換，同時還得保持良好運作。

除了要在極端環境中保有強度外，航空扣件還得擁有強大的耐蝕力、抗氧化力和疲勞強度，同時更得輕如鴻毛。上述因素便是構成航空工程學的基本元素，也繼而造成了不同材料的選擇與設計。

航空扣件主要分為四個種類：

- 一、鋼鐵與合金鋼
- 二、CRES (抗腐蝕鋼)
- 三、輕量材料
- 四、適用於高溫、零下與其餘極端環境之材料

無論是哪個種類，航空扣件通常會具備和疲勞強度有關的需求。這導致了針對原料的特殊需求，因為通常在製造其他普通的工業用扣件時，並不需要這類原料。同時，這類特殊需求也等於為航空扣件市場帶來了特定的標準規範。尤其許多特殊材料都得在真空中進行熔煉，有些甚至需要熔煉二至三次。反覆的真空製程可以使更多雜質浮出表面，將其移除後，便可得到一批更「乾淨」、質地更純粹的原料。這會創造很大的優勢，因為雜質會減輕疲乏強度並降低韌性。

另一項航空製造商常用的製程，便是把線材材料表層去除。這在鋼鐵與合金鋼原料中稱作「無縫脫碳處理」；在非鐵金屬或其他特製金屬中則稱作「無縫處理」。這類線圈通常稱作「刮過」或是「削過」的線圈，也代表上述移除材料表層的方法。然而，無論是使用何種製程，都是為了要製造出高品質的表面，以避免原料表面的微小瑕疵導致製造商往後生產的扣件產生表面裂痕。同時，這對於改善承受週期性負荷的扣件之疲勞強度來說，也特別重要。

設計者在選擇原料時，通常會考量材料的性質是否符合零件實際應用的需求。例如噴射機引擎中的扣件就可能需要承受極高的溫度。在之後的段落中，我們將會探索上述四個航空扣件的材料分類，各是由哪些不同的材料所組成。



航空扣件材料入門

文/Laurence Claus

鋼鐵與合金鋼

目前為止，在任何市場領域，普通碳鋼與合金鋼仍是製造扣件最普遍採用的材料。普通碳鋼是一種只由碳跟鋼鐵所組成，表面有裂隙的合金。合金中的碳含量越高，其質地便會越堅固。雖然碳材本身就能提供不錯的強度，但和指定元素做成合金後，強度還能繼續提升。含有微量合金元素像是鉬、鉻或是鎳等等的鋼鐵則稱為合金鋼。合金鋼和普通碳鋼的不同之處在於，合金鋼含有某些特定的合金元素。

即便某些普通低碳鋼(例如SAE 1022)會被用於製造較不重要或說較「普通」的航空零件，這些材料的使用在航空領域中較少見。航太扣件大多是以SAE 8740、SAE8640、SAE4340作為原料，這些全都是含有鉬、鉻或是鎳的合金鋼。這類合金鋼和中等碳量混合後，能提供良好的硬度以及強度。另外，這類材料通常會經過熱處理，以便提供從120ksi到180ksi的抗拉強度(註：ksi為機械強度單位，表示單位面積所承受之壓力，單位為每平方英尺承受一千磅力)。

不銹鋼

在航太領域中，把各式具有良好耐蝕力或抗氧力的材料稱作抗腐蝕鋼(CRES)是相當常見的。其中一個著名的材料便是A286(一種鋼鎳合金)，不過即使A286屬於耐蝕材料，我還是想將其放在鎳合金的部分，稍後一併討論。在這個部分，我們將只針對不銹鋼進行討論。

不銹鋼有五個不同的種類：沃斯田體不銹鋼、肥粒體不銹鋼、麻田散體不銹鋼、析出硬化型不銹鋼、雙相不銹鋼。雖然這些都被稱為不銹鋼(鉻含量最少11.5%比例)，彼此之間仍具有相當明顯的不同性質。然則，它們都會在表層產生富含鉻的氧化物三氧化二鉻，只要有氧氣存在，這種氧化物便能不斷生成，因而能夠提供不銹鋼抵擋銹蝕的能力。

沃斯田體不銹鋼

當人們「想」到不銹鋼時，他們想到的可能大多是屬於這個種類的不銹鋼。沃斯田體不銹鋼常用於製作廚具以及我們日常生活中的昂貴家電。這類材料通常不具磁性、無法熱處理、且在這五種不銹鋼中，具有最佳的耐蝕力。沃斯田體不銹鋼的加工硬化率相當高，這通常會提高材料製作的難度，但沃斯田體不銹鋼的製程其實並不需要另外加熱。在美國，這類材料的編號有兩種，200系列跟300系列。雖然一般的扣件多由304與316所製成，其實302、302HQ、321、204-Cu也能用於扣件製造。

使用這類材料的航太應用領域其實和運用這類材料的工業設備類似，不需要太高的強度，反倒需要良好的耐蝕力，這表示若具備上述需求，設計者便會選用沃斯田體不銹鋼。

析出硬化型不銹鋼

航太領域也會使用析出硬化型不銹鋼來製造扣件，其中最普遍的兩個型號為17-4 PH與PH 13-8Mo。這類不銹鋼可以藉由溶液熱處理或老化來加固，簡單來說，便是將材料加熱至溶液狀，材料冷卻後，便會產生新的原子結構，進而分離（沉澱）出固溶體。這類金屬混合物比起未經沉澱的型態來得更為堅硬。

析出硬化型不銹鋼大致上和沃斯田體等級的不銹鋼擁有相同的耐蝕力，但卻擁有更佳的強度。良好強度與耐蝕力的結合，便是析出硬化型不銹鋼吸引設計者選用的原因。

即便如此，析出硬化型材料卻擁有中等偏高的加工硬化率，這使得其較難進行加工，製造商因而較不青睞此種材料。

其他不銹鋼種類

雖然以下三類不銹鋼在航太領域中較為冷門或根本不使用，瞭解這些材料各自的性質及彼此間的不同，仍是相當重要。

肥粒體不銹鋼通常只含有微量的鎳，雖然其擁有中度的耐蝕力，但卻明顯遜於沃斯田體不銹鋼與析出硬化型不銹鋼。肥粒體不銹鋼具有磁力、無法熱處理、強度相對較低、並擁有中等的加工硬化率。因而硬化在其製程中幾乎不是問題，且製程也不需經過加熱。肥粒體不銹鋼的編號為400系列。不過，使用者在此需特別注意，因為麻田散體不銹鋼的編號也是400系列。所以，除非已經將編號背得滾瓜爛熟，否則要辨別不銹鋼屬於肥粒體或麻田散體，還是必須細心查詢。

麻田散體不銹鋼的鉻含量通常在12%與17%之間。在這五種不銹鋼中，麻田散體不銹鋼的耐蝕力是最弱的。然則，雖然有這樣的限制，麻田散體不銹鋼卻可以藉由熱處理達到高強度。除此之外，麻田散體不銹鋼的特殊之處也在於，其具有磁性，並擁有中等偏低的加工硬化率。因此，在所有需要冷鍛技術製造的材料中，麻田散體不銹鋼是最容易製作的。另外，如上所述，麻田散體不銹鋼與肥粒體不銹鋼的編號相同，皆為400系列。

雙相不銹鋼對於市場來說相當新穎，基本上是由各半的沃斯田體不銹鋼和肥粒體不銹鋼製成，因而多少能改善肥粒體不銹鋼的缺點，但還是無法達到和沃斯田體不銹鋼相同的等級。

輕量材料

航空領域中最有趣的兩項材料絕對非鋁和鈦莫屬，其屬於所謂的「輕量材料」，因為比起鋼鐵或鎳合金，這類材料擁有極低的密度。雖然在比較絕對強度時，輕量材料通常會敗下陣腳，但若是比較相對於重量的強度，輕量材料便有相當亮眼的表現。由於飛機與太空船的設計者對重量極度敏感，輕量材料的強度重量比，自然使其別具吸引力。

鋁

鋁的重量是鋼鐵的三分之一，所以即便其強度比鋼鐵還低很多，其強度重量比卻優於鋼鐵。鋁不具磁性、具備極高的導熱性與導電性，同時，若是經過陽極氧化處理，還能擁有極佳的耐蝕力。鋁合金常用於鑄造與鍛造中，為了區別，其命名方式分屬兩個不同的系統，製造扣件所使用的鋁合金屬於後者。

其中，鍛鋁又分為八個不同的種類。其區別方式為一組四位數的號碼，從第一碼（編號一至八）便能得知其屬於何種合金。四位數中，第一碼代表主要的合金元素；第二碼代表其變型；末兩碼是流水號，代表該合金中不同合金的特定順序。規則中唯一的例外是1000系列的合金，在這類合金中，末兩碼代表的是鋁含量超過百分之99，例如1050鋁代表該合金含有百分之99.5的鋁。

鋁合金的命名通常還會在基本的四位數字後，附帶一組額外的字母與號碼。這組額外的代碼是所謂的「煉度命名」，分為以下五類：「F」表示同製造；「H」表示應變硬化；「O」表示退火；「T」表示熱處理；「W」則表示溶液熱處理。其中，唯一和扣件有關的是「T」命名代碼：「T4」代表經過溶液熱處理與自然老化的材料；「T6」代表經過溶液熱處理與人工老化的材料；「T73」則代表經過溶液熱處理與過度老化（一種用於改善應力腐蝕的溫度環境）的材料。

製造扣件所使用的鋁合金其實只是冰山一角，事實上，除了用於鉚釘的純鋁合金外，製造扣件常用的鋁合金只有三種：2024（銅鋁合金）、6061（鎂鋁矽合金）、7075（鎂鋁鋅合金）。在這三者之中，又只有2024和7075用於航空領域。在T6溫度下，7075鋁合金擁有鋁合金中最高的強度，83ksi的抗拉強度。即便其絕對強度不是太高，但考量到強度重量比時，7075鋁合金的表現雖非最佳，也算得上名列前茅。

鈦

鈦是擁有最佳強度重量比的材料，與鋼鐵相比，其少了百分之45的密度，卻具有高達138ksi的絕對強度，這使得鈦成為強度重量比排行榜的冠軍。鈦具備低密度與高強度，因而常常用於製造飛機與其他擁有這種需求的產品。雖然鈦最大的特點是其強度重量比，我們也不該忽略其在極端環境中所展現的強大耐蝕力。這項特性，使得鈦也大量運用在具備化學製程的領域，像是製紙業、海水淡化、石油工業等。鈦的特性還包括良好的溫度性能、不具磁性、熱膨脹係數低、並具備生物相容性（因而能夠用於人類的骨髓移植）。然則，鈦在室溫下極難製造，必須經過加熱才能進行額外處理。

隨著外在環境的變化，許多材料都會以不同的內部結構（階段）存在。鈦也不例外，其隨著外界的溫度，呈現兩種不同的形貌。在室溫下（或說在攝氏890度以下的環境），鈦以 α 態存在；超過攝氏890度則以 β 態存在。 α 型鈦具備可焊性、無法熱處理、擁有中等偏低的強度、良好的缺口韌性與延展性，並在低溫時具備良好的力學性質。在所有型態的鈦中， α 型鈦和純鈦擁有最佳的耐蝕力與抗氧力，並在高溫時擁有最佳的潛變強度。 β 型鈦則可經熱處理、通常具備可焊性、擁有高強度與良好的可塑性，並在中等溫度下擁有良好的潛變強度。由於 β 態處於高溫階段，所以若要使其在低於攝氏890度的環境下達到穩定狀態，就必須加入穩定劑。

另外，材料科學家其實已經有辦法製造同時以兩種型態存在的鈦合金，也就是所謂的 α - β 型鈦，其特性綜合某些兩者所擁有的最佳特性。事實上，製造扣件最普遍的鈦材料便屬於 α - β 型鈦，名為Ti6Al-4V，簡稱「6-4 鈦」，該合金擁有至少138ksi的抗拉強度。

不過，即便Ti6Al-4V在用於扣件製造的鈦合金中已是最普遍的一種，其仍然擁有一些限制。在富含氯的環境中，Ti6Al-4V將會遭到應力腐蝕，因而在製造過程、切割過程、或是使用含有鹵素的潤滑油時，都應特別謹慎。Ti6Al-4V在製程中也同樣需要加熱，然則，若是溫度太高，鈦本身所具備的強大親和力，將會使其和氧氣、氮氣、氫氣產生化學反應（這三種氣體皆是一般環境中空氣所含之成分）。若是曝露在超過臨界溫度的環境中，便會產生一層堅硬易脆的「 α 層」。當鈦分離出 α 層時，只能利用機械將其移除（然而這不是個簡單的程序），否則便得宣告報廢。

適用於高溫、零下與其餘極端環境之材料

在航空或某些特定的領域中，扣件常常必須面對極端環境，像是在噴射機引擎中就得承受高溫；在太空中則要承受低溫等。在這些情況下，最大的挑戰便是如何維持強度以及對抗氧化，制式的高強度扣件材料可能無法勝任，所以我們必須尋求超合金的幫助。在高溫環境中能保有高強度者、在低溫環境中能保持韌性者或在最極端的環境中抵抗氧化者，皆可稱為超合金。

A286合金

A286屬於鋼鎳合金的一種，到目前為止，其是航空領域中最常使用的鎳合金，且因為其非常普遍，常聽說有消費者指名購買A286，但事實上並不需要用到這麼高的規格。在耐蝕力部分，A286大約和304不銹鋼相等。

A286可以經由溶液硬化與老化來進行熱處理，最高在華氏1200度的高溫下，仍能保有強度與耐蝕力。在航空領域中，大部分的A286都擁有精密的製程，以便進行一到兩次的真空熔煉。A286擁有數種不同的強度等級包括120/130ksi、160/180ksi、200ksi以上，視幾項因素而定，例如線材是否在成形前便已預先旋緊以及熱處理流程的步驟與順序等。

718合金

718合金又名英高鎳合金，和A286合金相同，皆屬於較普遍的鎳合金。其在室溫下擁有超過200ksi的強度，最多在高達華氏1300度的高溫下，仍能保有絕佳的降伏強度、抗拉強度、與潛變破斷強度，並可以經由溶液硬化與老化來進行熱處理。英高鎳合金在室溫下相當難以製造，因而在製造與滾製螺紋時，需要額外進行加熱。

鎳基超合金

鎳基超合金屬於鎳超合金的一種，含有高比例的鎳、鉻以及鈷。鎳基超合金在高達華氏1400度的高溫下，仍能保有絕佳的強度、耐蝕力與應力破斷強度，最高到華氏1800度還能維持運作。另外，其耐蝕力也非常強，幾乎不會出現氧化現象，因而相當適合在極端環境中使用。鎳基超合金也可經由溶液硬化與老化來進行熱處理。和英高鎳合金相同，其在室溫下擁有高達200ksi的抗拉強度，但在華氏1300度以上的環境中，其性能比英高鎳合金更佳。同樣地，其在室溫下也極難製造，必須經過加熱才能進行額外處理。

哈氏合金

哈氏合金是由鎳、鉻、鐵、鉬所組成的超合金，其在最高介於華氏1400度至1600度間的高溫下仍能保有絕佳的強度與耐蝕力。這類材料對於應力腐蝕龜裂特別有一套，尤其是在富含氯的環境下，因此哈氏合金常用於航空引擎或是石化產品中。其熱處理方式包含溶液熱處理與老化，並且擁有中等的可塑性。

多元合金

扣件製造中較普遍的兩種多元合金為MP35N與MP159。這類材料在室溫下擁有240至260ksi的抗拉強度。雖然其在高溫環境下的表現，不如前述材料那麼良好，仍可說是綽綽有餘，MP35N可承受華氏700度左右的高溫；MP159則是華氏1100度。這類材料在高溫與零下環境中皆擁有良好的強度與耐蝕力，因而可說是鎳合金中用途最多的一種，其同時也是製造扣件的合金中，耐蝕力最好的，即便在酸性環境中也能運作。

AMS規範

在航太領域中，上述所有的材料皆由不同的航空材料規範（簡稱AMS）管控，其目前是由美國汽車工程師協會（簡稱SAE）的航空部門進行發展與維護。若是任職於航空領域，瞭解這些規範可說是相當重要，因為AMS針對如何妥善選擇不同的材料以及如何對其進行熱處理，提供了重要的相關資訊。

總結

要瞭解製造航空扣件的材料，其實需要付出不少心力，因為其囊括範圍相當廣泛，並不像扣件工業中的其餘部門，使用的材料種類較為單純（例如鋼鐵和不銹鋼等）。因而在航空領域中，要成為一個服務全面的生產者，就必須對所有材料及其最佳製程都相當瞭解。

同時，有一件事也相當清楚，那就是上文提到的某些材料，確實有資格稱為「超級」材料，其在室溫下的強度能超過200psi，並能在高溫或零下的環境中，保有這樣的強度。同時，這些超級材料即便在最極端的環境下，也擁有絕佳的耐蝕力。（註：psi為機械強度單位，表示單位面積所承受之壓力，單位為每平方英寸承受一磅力。）

這些材料才是真正的「超級合金」，製造這些材料的公司應該要為其性能感到驕傲，因為並非所有扣件經銷商都擁有製造超級合金的能力。