



Service & Integration & Innovation

鈦合金的熱處理

鈦及鈦合金熱處理的效果包括：

- (1) 降低製造加工時產生的殘留應力 (應力釋放) 。
- (2) 增加延展性、加工性、尺寸與結構之穩定性 (退火) 。
- (3) 增加強度 (固溶熱處理與時效處理) 。
- (4) 一些特殊性能如斷裂韌性、疲勞強度及高溫潛變強度的最佳化 。

不同類別之退火處理 (如單式、雙式、 β 及再結晶退火)，固溶體熱處理及時效處理皆可加以使用已達成選擇性之機械特性。應力釋放及退火可阻止於一些腐蝕環境之優先化學沖蝕，也可防止變形及調質，便於後續之成形及加工操作。



鈦及鈦合金對於熱處理的反應與金屬組成及鈦合金元素對 α - β 結晶轉換之影響有關，並非所有熱處理週期皆可適用於鈦合金，因為不同合金基於不同目的而設計，如合金 Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr(Ti-17)及 Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo 為重斷面強度而設計，Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo 及 Ti-6Al-2Nb-1Ta-1Mo 及 Ti-6Al-4V-EVI 為鹽水溶液耐應力腐蝕及高斷裂韌性而設計，Ti-5Al-2.5Sn 及 Ti-2.5Cu 為軟焊，Ti-6Al-6V-2Sn，Ti-6Al-4V 及 Ti-10V-2Fe-3Al 為低到中溫之高強度而設計。表一為不同商業化之鈦合金，當熱處理包含有接近 β 轉換之加熱，則每一個加熱之轉換溫度皆須正確。

鈦加工業者一般對每一供應之熱處理皆須驗證其 β 轉換溫度，特定合金之 β 轉換溫度隨加熱不同而有變化，主要受化學組成所影響，特別是 O 組成， β 轉換溫度決定方法包括差熱分析 (DTA)，及每 5° (10°F) 增量到預期 β 轉換溫度之金相檢驗。

氧與鐵成分對熱處理後之機械性能有明顯的影響，應認知：

1. 氧與鐵成分必須於接近特定最大值以滿足某些商業化純等級之強度標準。
2. 氧成分必須接近特定最大值以滿足固溶及時效處理 Ti-6Al-4V 之強度水平。
3. 鐵成分必須足夠低，使潛變及應力斷裂特性最佳化，大部分耐潛變合金之鐵組成須低於 0.05wt%。

α - β Ti 鈦熱處理摘要

熱處理類別	熱處理週期	微結構
雙重退火	於 50~75°C(90~135°C) 低於 $T_{\beta}(a)$ 下固溶處理，空冷及時效處理，於 540~675°C (1000~1250°F) 處理2~8 hrs	主要為 α 加上 Widmanstatten α - β 區
固溶處理與時效處理	低於 T_{β} 在 40°C(70°F) 固溶處理，在 515~675°C (995~1250°F) 處理 2~8 hrs	主要為 α ，加上回火 α 或 β - α 混合物
β 退火	高於 T_{β} 於 15°C (30°F) 固溶處理，空冷及在 650~760°F (1200~1400°F) 穩定化 2 hrs	Widmanstatten α - β 聚集微結構
β 淬火	高於 T_{β} 於 15°C (30°F) 固溶處理，水淬及在 650~760°F (1200~1400°F) 回火 2 hrs	回火之 α 相
再結晶退火	925°C (1700°F) 4hrs，於 50°C/h 冷卻到 760°C (1400°F)，空冷	於晶粒週界三相點 α 與 B 等軸

應力釋放

鈦及鈦合金之應力釋放不致影響其強度與延展性，應力釋放處理降低不須要之殘留應力，其來自 (1) 非均勻之熱鍛造或冷成形及矯直造成之變形 (2) 板材或鍛件非對稱之加工 (3) 鑄件之軟焊及冷卻應力之去除可維持形狀之穩定性，且消除不利狀況，如壓縮降伏強度之損失，即所謂之 **Bauschinger** 效應。

當對稱形狀於退火狀態利用中度切削及均勻原料去除時，應力釋放可能無法達成。但由同樣合金製造於高速加工，利用粗糙與最終加工於 540°C (1000°F) 應力釋放到更精密尺寸。

當製造程序可調整利用退火或硬化作為應力釋放步驟，個別之應力釋放即可省略，如鍛造應力可於加工前利用退火釋放應力，大而薄的環形材料可利用於退火狀態粗糙加工及固溶處理、淬冷、部分時效、最終加工、最終時效等有效加工使變形量最低，部分時效處理可釋放淬火應力，最終時效處理可釋放最終加工應力之釋放。

應力釋放溫度之冷卻速率並不重要，均勻之冷卻較為重要，特別在 $480\sim 315^{\circ}\text{C}$ ($900\sim 600^{\circ}\text{F}$)，油冷與水淬皆不宜，因為不同之冷卻可感應殘留應力，爐冷及空冷是可接受的。



鈦及鈦合金退火可增加斷裂韌性、室溫韌性、尺寸及熱穩定性及耐潛變性，由於改善 1、2 種特性可能犧牲其它特性，因此退火週期應依處理目的加以選擇。

一般退火處理包括：

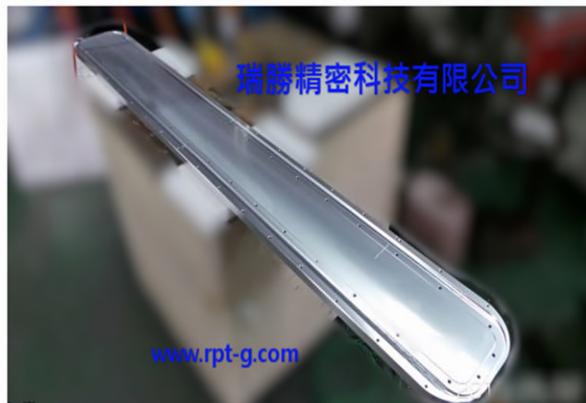
1. 加工退火
2. 雙重退火
3. 再結晶退火
4. β 退火

加工退火為一般目的之處理加工品，它並非全部退火，於重型加工產品微結構中可能保留冷加工或熱加工雙重退火，可改變相的形狀大小及分布到所需範圍，以改善耐潛變性及斷裂韌性。

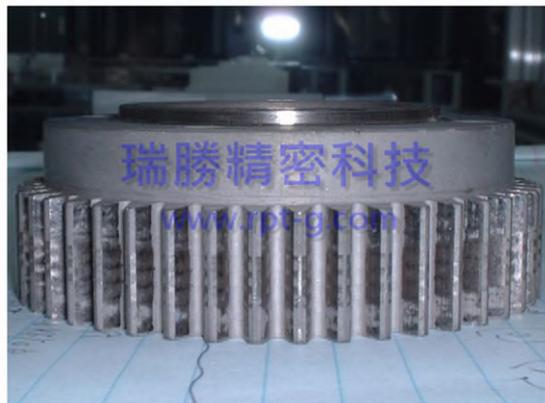
鈦合金之矯直、定型與壓平有必要以達到尺寸需求，棒材矯直到精密度及片材之拉平對鈦製造商形成主要之問題。與鋁合金不同，冷卻時鈦不易矯直，主要由於這些合金高降伏強度及彈性模數造成明顯之回彈，因此鈦合金之矯直主要利用潛變矯直與熱矯直，而前者較後者更普遍。

矯直定型與拉平可利用適當治具與退火一起進行，組件與治具可於退火溫度直接進入爐體操作，與退火溫度下許多鈦合金之耐潛變性甚低，可於退火時矯正。利用理想治具與精密秤重，片狀金屬加工及薄複雜鍛件之矯直均可得到滿意結果，低於 315°C (600°F) 之均勻冷卻可改善效果。

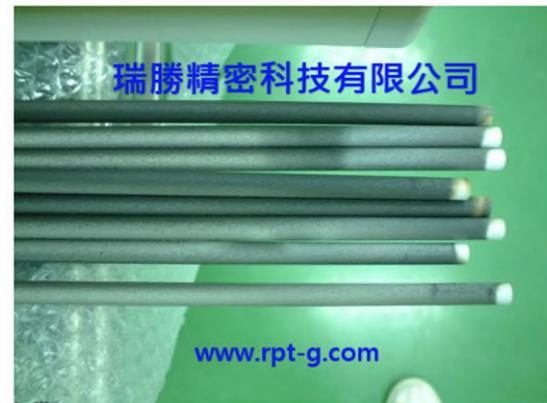
潛變矯直對大部分鈦合金於退火或時效處理製程可立即進行，若退火 / 時效處理溫度低於 $540\sim 650^{\circ}\text{C}$ ，須達所需潛變矯直之時間可延長，潛變矯直可利用普通或複雜治具及裝載系統，它與組件複雜性及矯直程度有關於熱作或模具矯直，組件可加熱到退火或時效溫度，經熱矯直再於熱矯直溫度下作應力釋放。



鈦合金材料真空閥門封板



鈦材料披覆驅動齒輪



PVD 真控設備用陽極棒

α - β 或 β 合金利用固溶或時效處理可得到不同的強度水平，對 Ti-2.5Cu 合金，可利用 Ti_2Cu 析出之傳統時效硬化強化與 Al 合金 Guinier-Preston 區域形成類似，鈦合金熱處理反應與低溫時高溫 β 相之不穩定度有關。 α - β 合金加熱到固溶熱處理溫度可生成高比例之 β 相，這種相之分布可利用淬冷維持，隨後之時效處理可使不穩定之 β 相分解而得到高強度，商業化之 β 合金，一般利用固溶化熱處理僅須時效處理即可。

清洗後鈦組件可負載到夾治具上，接觸到加熱與淬冷介質，同樣合金之後與薄組件可一同固溶處理，但處理時間可由最大截面決定，對大部分合金，每 25mm 厚度須 20~30 分鐘達到所需溫度。

鈦合金達到高強度熱處理之最終步驟包括再加熱到時效處理溫度 425~650°C，時效處理造成淬冷超飽和殘留 β 相之分解，選擇性的時間與溫度組合與所需強度有關，固溶熱處理與過度時效處理易增加強度且同時維持理想之韌性與尺寸穩定度。

是當之時效處理可生成高強度及理想之延展性與冶煉穩定性， α - β 合金為達到高強度之熱處理一般變數大，與操作類別及所需特性有關，如加工之延展性與適用性，特別在設計時斷裂韌性很重要，且須低強度以改善設計壽命時格外重要。

有些高度 β 穩定化之 α - β 合金時效處理時， β 相首先轉換為 w 介穩態過渡相，殘留之 w 相在合金熱處理操作時易生成易脆不可接受性，可利用嚴苛淬冷及快速再加熱到操過時效溫度 425°C (800°F) 而加以避免。由於粗糙 α 相之形成，這種處理可能不致生成最佳強度特性，理想之時效處理溫度與時間可使反應完全，經常被使用，超過 425°C (800°F) 之時效處理一般很理想可完全反應。

介穩定態之 β 合金一般不須固溶熱處理，最終之熱作及空冷使這些合金狀態與固溶處理狀態類似，在 790°C 之固溶處理於時效處理後可得較均勻特性， 480°C (900°F) 之時效處理 8 hrs~60 hrs 其抗拉強度可達 (1-1.38 Gpa (160-2001ksi))，超過 60 hrs 之時效處理可得更高強度，若合金含有鉻及 Ti-Cr 化合物，其延展性及斷裂韌性將降低，冷作材料較短之時效處理其強度之增加將操過愣作所得， β 合金操作高於 315°C 更長時間不好，因為易導致冶煉不穩定性延展性之損失。

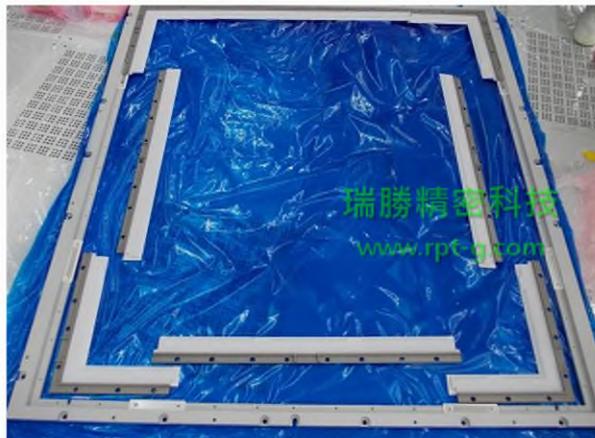
- 有些物理特性如切口拉深強度、斷裂韌性、耐疲勞性對有些合金可利用一些特殊熱處理強化，這些處理包括：
- (1) Ti-6Al-4V 之固溶處理及過度時效處理：於 955°C (1750°F) 加熱 1 hr，水冷 705°C 持溫 2H 再空冷，可改善切口拉深強度，斷裂韌性，潛變強度，其強度水平與正規退火所得類似。
 - (2) Ti-6Al-4V 及 Ti-6Al-4V-ELI 再結晶退火，於 925°C ~ 935°C (1700 ~ 1750°F) 加熱 4hrs，以不高於 $56^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 速率冷卻到 480°C ，空冷到室溫，在低水平強度下可改善斷裂韌性及疲勞龜裂成長。
 - (3) Ti-6Al-4V、Ti-6Al-4V-ELI、Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo、Ti-6Al-4V 或 Ti-6Al-4V-ELI 之 β 退火於 1010 ~ 1040°C 加熱 5 分鐘到 1 hr，以 $85^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 或更高速率空冷到 650°C ，再於 730 ~ 790°C 之加熱 2 hr，空冷，可改斷裂韌性，高循環疲勞強度及耐應力腐蝕。Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo，於 1020°C 加熱 $\frac{1}{2}$ hr，空冷，於 595°C 保溫 8 hrs，空冷，可改善高溫潛變強度及斷裂韌性， α - β 合金之 β 退火易形成低抗拉延展性，再結晶退火可取代斷裂臨界飛機組件之 β 退火。

(4) Ti-5.8Al-4Sn-3.5Zr-0.7Nb-0.5Mo-0.3Si (1M1834) 之高 α - β 固溶處理，自溫度淬冷得到小樣品之 β 轉變曲線繪製溫度與 β 相百分比圖，選擇固溶處理溫度得到 85~88% β 相，加熱 2 hr，油淬，於 700°C 時效處理 2 hr，空冷，可得極佳之潛變與疲老特性組合及室溫抗拉特性。

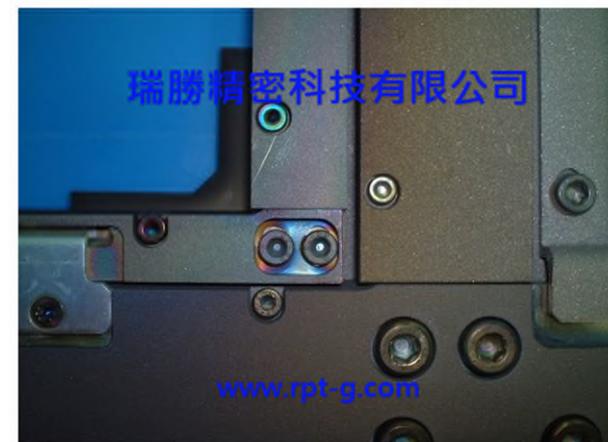
鈦合金中少量之 H_2 (100~200ppn) 可被容忍，高氫含量可能造成組件之破損，氫之捕集不僅於熱處理時發生也在去除 α 相之酸洗操作生成，氫捕集數量可由化學分析法檢驗出，若高氫含量被測知，則需有真空退火。



鈦合金材料 PVD Carrier 部品



鈦合金材料 MASK



鈦合金材料固定螺絲

熱處理時鈦組件應清洗與乾燥，勿使用自來水清洗鈦組件、油脂、油漆、指印或其它異物應自表面去除，由於高溫時鈦之反應性易導致汙染與淬性，且增加應力腐蝕的敏感性，因此表面清潔尤其必要，清洗後組件必須使用清潔手套進行處理防止再汙染，若組件需矯直，或於治具熱處理，治具應無任何異物及汙垢。

鈦於高溫化學活性甚強，於空氣中立即氧化，氧化並非鈦處理最值得關切之處，但它是鈦片成形操作之問題。為阻止氧之附著，清潔片金屬組件必須作抗氧化之噴塗被覆，在 760°C 左右，這種被覆最有效，但其使用並不會於熱處理後完全消除表面結構處理之需求，氫之最大含量在 125~200 ppm，視合金與加工型態而異，超過此極限，氫脆可能於鈦合金發生，易降低衝擊強度，切口抗拉強度而造成龜裂。

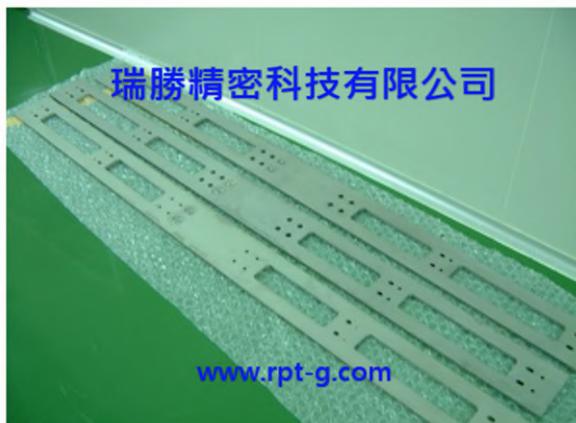
除了高真空、鹽浴、化學鈍性氣體，如氫氣，所有熱處理氣體皆含有於鈦退火溫度之氫氣，碳氫化物之燃燒可生成氫，形成不完全燃燒之副產品，電爐空氣氣體由於水蒸氣之破壞也含有氫，由於鈦中可容許少量氫的存在，且鈍性介質很昂貴，大部分鈦處理於含有氧化氣體之傳統爐體進行，煙道氣體中至少含有 5% 過量之氧，氫吸收速率隨溫度而增加。

應力釋放、加工退火及時效處理皆可使氫氣之附著降低，固溶熱處理或 β 退火可實質造成氫氣吸收之發生。若無保護氣體，電爐可使氫氣之附著最低，氧化氣體對氫氣附著降低之 2 種方法：(1)可降低周遭氣體氫氣之偏壓，(2)可提供鈦之保護表面氧化物阻止氫氣之附著。

熱處理時鈦吸收氮氣速率比氧慢，不致造成汙染問題，乾燥之氣體鈦鍛件熱處理作為低成本保護氣體在處理後，其吸收量很大，氮氣會形成一硬脆化合物，一氧化碳與二氧化碳在熱鈦存在下會分解，行程表面之氧化。

高殘留應力鈦組件曝露於高於 290°C 氯化物下易造成應力腐蝕，鹽類及一些脫脂液之氯化物在高於 315°C 溫度下易造成應力腐蝕龜裂，這可在實驗室測試立即驗證，且於熱處理時發生，熱鹽龜裂不是操作很明顯的問題，熱加工應小心避免氯化物之汙染。

大組件固溶熱處理需要考慮成長範圍，加熱之成長可能於冷卻後滯留，這種成長可能於固溶溫度較長之保溫時間或降低加熱速率而增加。



鈦合金材料 PVD 部品



鈦合金材料導引滾輪



中空鈦管軸心滾輪組

鈦之任何熱處理皆應有維持氧化氣體，爐體於正常放熱氣體操作下，也可於吸熱龜裂氫氣體下或氫氣體下操作，由於氫氣吸附之危險，鈦加工應徹底燃燒，若尺寸大小形狀不容許可利用隨後之酸洗及加工去除銹皮，可於 760°C 抗氧化披覆以降低汙染物，真空或氫氣可加以使用。

於傳統爐體作鋼材之退火可使鈦退火或應力釋放，這些爐體包括電爐，氣體點火或油點火，這些操作之溫控設備應保持 $\pm 15^{\circ}\text{C}$ 以內。

真空退火爐可為冷壁或熱壁式，可用氣體或電力加熱，冷壁電力真空爐最常於鈦，最大爐體操作溫度與加熱元素及輻射屏蔽有關，980°C 之最大溫度對所有鈦合金皆適用，熱壁電爐及氣體點火真空爐以商業化生產應用。

退火所造成可被容許，在 705°C 或更低溫之氫氣逸散很低，成本也無法被接受，730°C 之溫度是最低溫，溫度最好在 760~790°C，在 760°C 時，於 Ti-6Al-4V 合金 13~25mm 截面 100 ppm 氫氣之去除在壓力 $< 10\mu\text{m}$ 下約需 2 hr。

對長薄之片材與擠壓件，中空柱狀件及長鍛件於浸漬淬冷時為降低變形量，組件經常垂直懸吊於電加熱爐，重量經常連接片材底部以改善加熱之平整度便於片板降低進入淬冷槽體。

使用鈦組件用夾具或組合物可防止變形量，鈦合金及夾治具之熱膨脹特性需加以考慮，鈦合金與夾治具最好在時效處理溫度範圍內有相同之熱膨脹特性。軟鋼成本低，在利用無電鍍鎳被覆後於時效處理溫度可耐氧化，若利用軟鋼夾治具，軟鋼於鈦合金熱膨脹係數之差異可避免處理組件不必要之成長或變形。

鈦及鈦合金於熱處理關鍵考慮因素及須避免的項目包括以下幾點：

1. 後處理汙染金屬的去除。
2. 熱處理前，組件治具與爐體之清潔 (不可使用自來水來清洗鈦材質組件)。
3. 物容許溫度超過 β 轉換溫度 (除非特定的 β 退火製程)，溫控至少低於 β 轉換溫度 15°C 。
4. 於所需溫度下將冷組件放入至爐體操作。
5. 堆積及支撐組件應容許有路徑到加熱及淬冷介質處。
6. 觀察淬冷延遲需求，保證時效處理之硬化反應。
7. 檢驗強度需求選擇最佳之熱處理操作。
8. 檢驗強度需求選擇理想之時效處理週期。
9. 所有熱處理完成時去除 α 相。
10. 所有製程結束時檢查氫氣之存在。
11. 物依賴鈍氣氣體或真空以阻止氧之汙染。
12. 保證可信賴之 β 轉換溫度，在 α - β 範圍溫度處理時，須注意每一產品之加熱。
13. 熱處理後，認知氧與鐵對機械反應之明顯影響。
14. 物依賴硬度測試作為熱處理影響之量測。

1. 新型材料 β 钛合金的热处理: 曾珍 ; 江西环境工程学院,江西,赣州,341000 ; 化学工程与装备 2009年 12期 (2009/07) , 139-140
2. BT20钛合金大锻件的热处理: 杨延清 ; 张晶宇 ; 温力 ; 陈彦 ; 周义刚 ; 西北工业大学,陕西,西安,710072 ; 钛工业进展 2003年 02期 (2003/07) , 14-17
3. 钛合金材料的热处理工艺及控制研究: 刘全军 ; 郭初阳 ; 齐江江 ; LIU Quanjun ; GUO Chuyang ; QI Jingjing 新技术新工艺 2016年 07期 (2016/08) , 69-73,93
4. SP700钛合金的热处理/阳极氧化工艺研究: 王悔改 ; 河南科技大学 材料科学与工程学院,河南 洛阳,471003 ; 王悔改 ; 宋延沛 ; WANG Hui-gai ; SONG Yan-pei 表面技术 2015年 06期 (2015/07) , 22-26,48
5. 以鹼性溶液與熱處理法進行鈦合金表面改質之研究: 馮國治 ; Guo-Jr Feng 臺灣大學機械工程學研究所學位論文 2006年 (2006/01) , 碩士
6. 鈦合金Ti-6Al-4V及真空硬鋸後固溶時效熱處理的研究: 李國勳 ; Kuo-Hsun Lee 臺灣大學機械工程學研究所學位論文 2019年 (2019/01) , 博士
7. Effect of Quenching Temperature on the Mechanical Properties of Cast Ti-6Al-4V Alloy Reham Reda ; Adel A. Nofal ; Abdel-Hamid A. Hussein ; urnal of Metallurgical Engineering 2卷1期 (2013/01) , 48-54

報告結束

Thank you

