

鋁合金鑄件之熱處理

爲了改變某種性質的加熱和冷卻程序皆可認爲是熱處理，但並不是每種鋁合金皆需熱處理，如鑄態即能符合性能要求或無法熱處理者，特別是壓鑄件，熱處理時會產生起泡，一般是無法熱處理。

(1) 鋁合金熱處理的目的

對鋁合金而言，提到熱處理這個名詞時，直覺都是認爲是時效硬化熱處理，因此鋁合金大致可分爲可熱處理型和非處理型兩種，前者可藉時效硬化增加強度和硬度，後者則否，但鋁合金鑄件的熱處理目的主要爲：

(a) 均質化處理

鑄件在鑄態的顯微組織並不均勻，這是因爲鑄件的凝固屬非平衡凝固，因此合金元素會偏析至共晶組成中，固而在樹枝晶間造成濃度梯度，合金之偏析程度視合金含量和凝固速率而定。均質化處理的目的是使合金元素之分佈達到均勻，而使鑄件性質均質化。

(b) 消除應力

鑄件由鑄造和固溶時的高溫冷卻下來時，會產生殘留應力，欲消除此殘留應力，應將鑄件加熱至降伏應力低於此殘留應力的溫度。

(c) 改善尺寸安定性和加工性

組織改變時，如過渡相或微細矽晶的析出，會使鑄件尺寸隨時間而變化，爲了保持加工前後的尺寸精度，鑄件需加熱而使過飽合溶質形成安定的析出相。

(d) 強度、延性、韌性和耐蝕性最適化

用以提升機械性質和耐蝕性的熱處理最廣爲使用，將共晶組成相顆粒球狀化和時效硬化熱處理可增加機械性質，合金元素均勻固溶和重新固溶如 Mg_2Si 之易氧化相可改善耐蝕性，但並無使鑄件所有性質皆達最佳化之熱處理，通常某一性質達到最大值時，其他性質會有所犧牲。

(2) 時效硬化熱處理

時效硬化合金系統的基本特徵為相圖中的第二相溶解度隨溫度降低而減少，但過飽和固溶體在時效處理時，必須析出整合性的微細析出相才具有強化作用，對鋁合金而言，可以時效硬化的合金系統為：

- (a)鋁－銅合金：析出 CuAl_2
- (b)鋁－銅－鎂合金：鎂可強化析出
- (c)鋁－矽－鎂合金：析出 Mg_2Si
- (d)鋁－鋅鎂合金：析出 MgZn_2
- (e)鋁－鋅－鎂－銅合金

①固溶化處理

固溶化處理時會產生下列效應：(a)使時效硬化所需的元素固溶，(b)使得未固溶的相球狀化和(c)均質化。

鑄態時大部份的時效硬化元素皆包含在不同的析出相中，固溶化處理的第一個目的係使這些析出相中的元素分解並固溶到 α －鋁中成為溶質。

固溶化處理的第二個作用係使未能完全溶解的相球狀化，在 3xx 系列的鋁－矽－鎂和鋁－矽－銅－鎂合金，超過固溶度的矽以片狀、層狀或纖維狀(後兩者為經調質處理者)之型態存在，在固溶化處理時，共晶矽會發生球狀化和粗大化，以纖維狀共晶矽之球狀化速率最快，但共晶矽隨固溶化時間增長而產生粗大化的現象，則與鑄態時的型態無關。

固溶化處理第三個作用是使顯微組織均質化，除了可消除微觀偏析所產生的結晶偏析(Coring)現象外，組成相中的元素在固溶時可重新均勻分佈，但某些相特別是富鐵介金屬相，含有無法固溶的元素，固溶化處理對其影響甚小。

(a)固溶化處理溫度

為了提高時效硬化元素的固溶濃度，提高固溶化處理的溫度有助於原子擴散和固溶度。固溶化處理溫度主要是由合金元素的含量和溫度控制的偏差量來決定，商用固溶爐一般的溫度偏差量約在 $\pm 5^\circ\text{C}$ 左右，但對某些高合金的高強度鋁合金，容許的溫度偏差量更為狹窄，固溶線和共晶溫度差距較大的

合金容許較大的偏差量。

凝固時形成的非平衡相可能造成局部熔解，如固溶化溫度超過局部組成相的共晶溫度而產生的熔解稱為初期熔解，雖然有研究指出，鋁—矽—銅—鎂合金中的三元共晶相的初期熔解影響並不大，但如初期熔解的分佈過為廣泛時可能造成鑄件脆化，因此應精確控制合金的成份和固溶化處理的溫度。

利用兩階段加熱方式可以避免初期熔解的產生，鑄件先加熱至共晶溫度以下使非平衡相固溶，再將溫度升至最終的固溶化溫度，以固溶較多的時效硬化元素和得到較佳的均質化。

(b)固溶化處理時間

固溶化處理時間主要是由合金元素的擴散速率和顯微組織的粗細所控制，擴散速率的控制因素為原子大小和固溶化溫度，而這兩者幾為固定，但顯微組織的粗細是由凝固速率所控制，每個鑄造製程都不相同，例如永久模鑄件的凝固冷卻速率較砂模鑄件為快，樹枝晶間距、析出相顆粒距離都較小，固溶速率和均質化速率皆較快，因此可縮短固溶化處理時間。薄壁鑄件或冷激鑄件的冷卻速率較快，亦可得到較微細的組織，良好調質的鋁—矽合金中的共晶矽球狀化速率相當快，而未調質者即使經過相當長時間的固溶化處理，亦可能無法產生球狀化的共晶矽，在鋁—矽—鎂合金中，矽和鎂的微觀偏析並不嚴重，完全調質的鑄件可能在相當短的時間內即可使 Mg_2Si 固溶和均質化。

②淬火處理

當鑄件由固溶化溫度冷卻下來，時效元素的固溶度會下降，而由過飽和的 α -鋁析出並擴散至晶界，此過程在 $260\sim 400^\circ\text{C}$ 時最為快速，因此需採用快速冷卻或淬火方式使溶質維持在固溶化溫度時的固溶度至室溫左右，淬火處理為時效硬化處理最重要的程序，為了避免在淬火處理時產生過早析出，淬火時需符合下列兩點要求：

(a)由固溶爐中取出鑄件至淬火液之間的時間應儘量短，尤其是通過前述快速析出的溫度範圍。

(b) 淬火液的量、吸熱能力和流動速率應足以負荷鑄件冷卻至室溫之需求，任何方式的淬火中斷皆有可能造成快速析出。

雖然最快的淬火冷卻速率可以增加時效硬化的強度，但也增加殘留應力和變形的程度，因此淬火速率的選擇應依鑄件之合金種類和設計而加以調整，以減少鑄件之殘留應力和變形。

③時效處理

淬火後固溶於 α - 鋁中之過飽和時效元素會自然析出，但此過程在室溫時可能相當緩慢，7xx 系列的鋁－鋅－鎂合金在室溫經過數天或數週之後，即可明顯硬化－此稱為自然時效，但大多數的合金需加熱至適當的溫度以加速時效過程－此稱為人工時效。

在時效過程初期，隨著時間增加而使析出的組織逐漸發展，強度和硬度會增加至一最大值，進一步時效會使硬度下降，此即為過度時效，時效過程亦會影響材料的延性，在淬火狀態時的延性最高，隨著硬化過程而使延性下降，過度時效時喪失硬化機構而使延性增加。退火處理以得到最大的延性可視為極度的過度時效。

(3) 鋁合金熱處理符號(煉度)說明

鋁合金的煉度主要是用以表示包括時效、應力消除、安定化和退火等熱處理，但並未包括淬火方法，第一個數字代表熱處理的時間和溫度，其後加上的數字用以說明其差異，以下說明各種煉度所代表的意義和變數：

①固溶和時效煉度

(a)T4：固溶化處理和自然時效至適當的穩定狀態，自然時效可能持續緩慢進行，特別是在較高溫的使用場合，組織的穩定性可能無法符合要求。

(b)T6：固溶化處理和人工時效，對鑄件而言，T6 處理通常代表最佳強度和延性的組合，一般的時效溫度為 145～160℃，時間則為 3～5 小時。

(c)T61：固溶化處理和人工時效至最高強硬度，與 T6 的差異為強度和穩定性增加但延性降低，時效處理為 150～170℃ 保持 6～10 小時。

(d)T7：固溶化處理和過度人工時效或安定化，此處理可增加延性、熱安定性和應力腐蝕破裂的抵抗性，時效處理為 190～225℃ 保持 4～6 小時。

(e)T71：固溶化處理和過度人工時效至更安定的狀態，此處理可更增加熱安定性、應力腐蝕破裂的抵抗性和降低強度，時效處理為 225～260℃ 保持 4～6 小時。

T4 處理可視為其他固溶化和時效處理的基礎，鑄件經固溶化處理後進行人工時效之前，在室溫時亦會產生自然時效，對鋁－矽－鎂合金而言，人工時效之前的室溫潛伏期太長會降低強度和延性，T4 處理亦可用於無法藉時效處理硬化的非熱處理型合金。

②非熱處理型合金的固溶化處理

T4：固溶化處理以固溶或球狀化共晶組成

對鋁－鎂合金(520)進行固溶化處理以固溶凝固時所產生的網狀共晶組成，可以得到良好的延性，但不會產生時效硬化。在室溫以上時效會在晶界產生析出物，因而降低強度、延性和應力腐蝕破裂抵抗。對鋁－矽合金(444)的固溶化處理可使網狀共晶組成球狀化，延性可以加倍，高溫時效會使 444 合金產生成長現象。

③應力消除或安定化處理

(a)T5：由鑄造溫度冷卻後進行人工時效(未經固溶化處理)，時效處理為 205～260℃ 保持 7～10 小時。

在許多場合，鑄態的機械性質即可符合應用上的要求，但可能有不穩定的顯微組織和殘留應力，生長現象成為鑄態應用的主要限制時，以 T5 處理相當有效。

為了利用 T5 處理來改善機械性質，鑄造後應立即水淬，以產生過飽和固溶體，對砂模和金屬模鑄造相當有效且方便，溶質在冷卻通過 260～400℃ 溫度範圍時會析出，但淬火時有部份溶質會保留固溶狀態而在 T5 處理時產生時效硬化。

(b)T51：增加 T5 處理的時效溫度以提高安定性。

(c)T551：增加 T5 處理的時效時間以提高安定性。

④退火

(a)O：對非熱處理型之鋁－鎂合金，加熱到 345～425℃ 保持 2～5 小時再空冷，以消除應力。

(b)O：對砂模和金屬模鑄件，加熱到 260～370℃ 保持 2 小時再空冷，以消除應力和增加熱安定性。

(c)O：對壓鑄件，加熱到 260～370℃ 保持 4～6 小時再爐冷或空冷，以消除應力和增加延性。

鑄件的強度要求不高，但需要優良的尺寸安定性時需進行退火處理退火處理亦可消除壓鑄件的殘留應力，退火處理可視為強烈的安定化處理，較 T5 處理的溫度為高，退火時會使固溶於基地內的相析出，此過大的析出相並無強化效果，而造成鑄件軟化。