

第六章 熱處理

Heat Treatment

改變鋼料的加熱溫度與冷卻速度時，可以得到各種不同的組織，並且可以把這些組織維持到常溫。因為組織不相同，其機械性質亦不相同，所以可對鋼施行適當的加熱與冷卻處理措施，以調整它的性質；例如，想用鋼來製作複雜形狀的製品，可以施行適當的熱處理把鋼變軟，成為易於加工的狀態；又若想鋼作為耐磨損的用途，可以施行另種熱處理，把它變硬成為耐磨損的狀態。

所謂『熱處理』係指鋼料加熱到臨界溫度（Critical Temperature）範圍，然後再用不同的冷卻速度冷至常溫，其間，急冷者可得到高硬度及高強度，慢冷者則效果相反。常見的熱處理操作有：

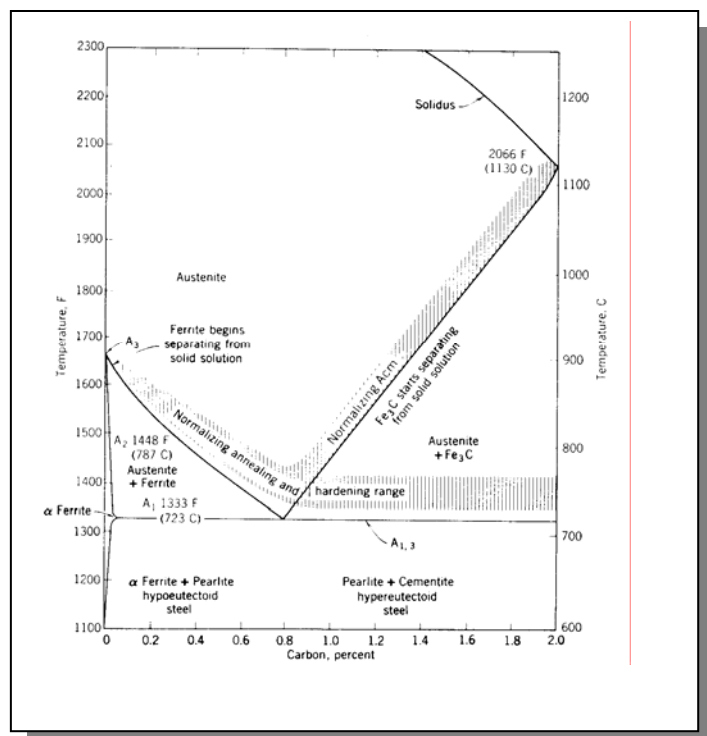
- 退火（Annealing）
- 淬火（Quenching ,Hardening）
- 回火（Tempering）
- 正常化（Normalizing）
- 球狀化（Spheroidizing）
- 表面硬化

一、鐵-碳化鐵平衡圖 Equilibrium Diagram

將各種碳含量不同的鋼料的逆變率曲線試出，並令其臨界溫度為縱座標，含碳量為橫座標，即可得到如右圖的曲線。圖中所包括含碳量的範圍最高為2%，因此僅能稱之為部份鐵及碳化鐵平衡圖。

依據平衡圖可以了解某一含碳量的鋼，以緩慢的速度加熱或冷卻時，在何種溫度下：

1. 鋼有何種相？
2. 各種相的化學成份？
3. 各種相的量關係如何？
4. 各種相的存在狀態如何？

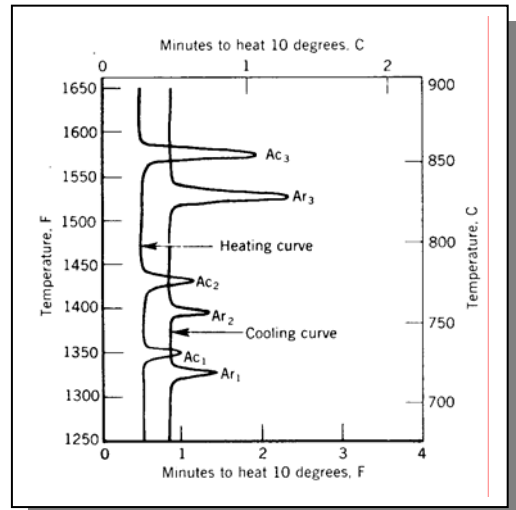


至於前述中所稱的「逆變率曲線」與「臨界溫度 Critical Temperature」？

將SAE1020鋼（含碳量0.20%）自室溫緩慢加熱，每隔一定時間記錄其溫度一次，所繪製出的曲線，稱為逆變率曲線（Inverse Rate Curve），其中縱座標為溫度，橫座標為每上升或下降 10°F 所需要的時間。圖中顯示，除了若干點的升溫或降溫需要較長的時間外，其餘部份大都為直線，表示升溫或降溫速度均一不變；其中，升溫中有三個溫度的升溫速度有明顯變化，而降溫中亦有三個溫度有顯著變化，不過這三個溫度較升溫者為低。

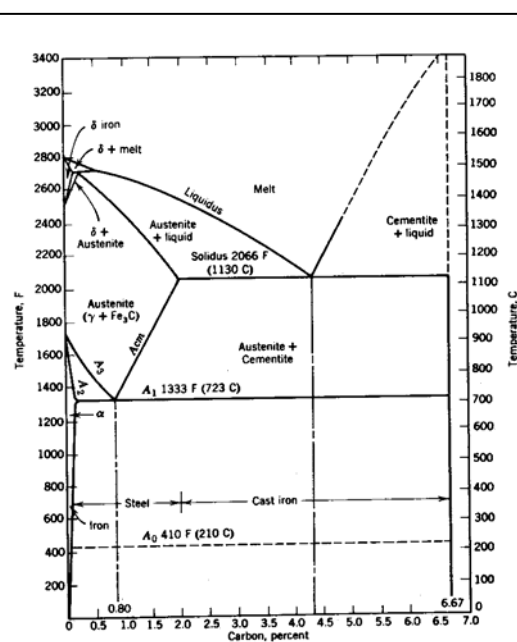
這個變化顯示金屬在此溫度時，必須吸取或放出更多的熱量，也就是說在這個溫度下，金屬結構上的變化或原子格子的重新安排，需要較多的熱能。而此溫度即稱為『臨界溫度』或『臨界點』；升溫時分別為 Ac_1 、 Ac_2 、 Ac_3 （其中，字母c是取自法文chauffage的自首，其意思是指加熱），降溫時分別為 Ar_1 、 Ar_2 、 Ar_3 （其中，字母r是取自法文refroidissement的自首，其意思是指冷卻）。

金屬在臨界溫度點上的變化，稱為同素體變化（Allotropic Change），是一種可逆的原子結構變化，其間的化學成份不變，但伴隨著相關物理性質的改變，如電阻、原子結構格子及磁性等皆隨之變化。



綜合以上的說明，以一塊含碳量0.20%且已被加熱到 1600°F 附近的碳鋼為例，在 Ar_3 點以上時，鋼是 γ 鐵的碳固溶體，稱為沃斯田鐵（austenite），其鐵原子以面心立方晶體排列，係非磁性的；當冷卻至 Ar_3 點以下時，鐵原子形成體心立方晶格所組成的新結構，稱為肥粒鐵（ferrite）或 α （alpha）鐵（ α （alpha）鐵中含有固溶的碳，碳的溶解速度遠低於 γ 鐵）；當鋼繼續冷卻到 Ar_1 ，形成額外的ferrite，在 Ar_1 線以下，殘留的沃斯田鐵變成另一種新的結構，稱為波來鐵（pearlite）。至於，其所以稱為pearlite的原因，則是因為其外觀類似珍珠貝（mother-of-pearl）。

另外，當鋼的含碳量近乎0.2%時，肥粒鐵從沃斯田鐵中初析（first rejected from）出來的溫度，隨著含碳量的增加而降低，直到



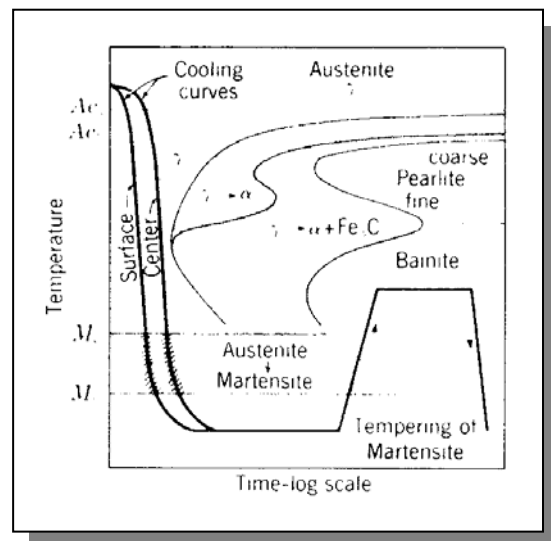
鐵碳平衡圖（含碳量超過6.7%）

含碳量為 0.80% 止（至此，即沒有游離的肥粒鐵從沃斯田鐵中析出），此時的鋼稱為亞析鋼（eutectoid），其組成是 100% 的波來鐵。而此時（共析點）的溫度，即為任何金屬固溶體發生變化的最低溫度，是沃斯田鐵平衡的分解成肥粒鐵與雪明碳鐵（cementite）（稱為碳化鐵： Fe_3C ）；至於鋼的含碳成分高過共析點者，稱為過共析鋼（hypereutectoid steels）其在鐵及碳化鐵平衡圖中可以找出一條標有 A_{cm} 的線，此線表示碳化鐵從沃斯田鐵中析出的溫度；至於鋼的含碳成分高過共析點者，則稱為亞共析鋼（hypoeutectoid steels）。

二、恒溫變態圖 Isothermal Transformation Diagram

鐵及碳化鐵平衡圖可用於機件各種熱處理中，作為選擇加熱溫度之用，但因其僅侷限於緩慢冷卻條件下，無法提供有關冷卻速率的效應、時間、晶體組織或在某一種高溫下淬火所能獲得的組織資料；因此，為了指示出任一種鋼料，以不同的熱處理方式所能獲得的組織，遂發展出恒溫變態圖，或稱之為時間—溫度—變態圖（Time-Temperature-Transformation Diagram/T-T-T Diagram），此圖對於熱處理的選擇與實施助益頗大。

如圖所示，某種鋼料在 A_{c3} 臨界溫度以上時全部為沃斯田化，若欲得到麻田散鐵（Martensite）組織，則必須自 A_{c3} 溫度以上以極快的速度冷卻，且不得與變態圖相交。圖中，冷卻速度從麻田散鐵變態開始溫度 M_s 及變態終了溫度 M_f 通過。



一般而言，時間溫度變態曲線因鋼的含碳量、合金種類及成份、沃斯田鐵晶粒的大小而異，不過，一般的合金成份，大都可以將全部曲線向右推移，也就可以有更多的時間來冷卻，得到完全的麻田散鐵組織，而不至於觸及曲線的鼻端（曲線彎曲處）。

三、淬火 Quenching、硬化 Hardening

所謂『淬火』是指將鋼料加熱到適當溫度（亞共析鋼為 A_{c3} 以上、共析鋼和過共析鋼為 A_{c1} 以上），保持適當時間後，使它急冷的操作而言，以阻止 A_{r1} 變態（波來鐵變態）而得到高硬度的麻田散鐵組織。

把鋼加熱到變態點以上的高溫，使它完全變成 γ 固溶體（就是沃斯田化）後，若以緩慢的方式冷卻時，沃斯田鐵狀態的鋼會在 A_{r1} 點變成波來鐵狀態；但是若從 A_{r1} 點以上的高溫急冷於水中，則沃斯田鐵 \rightarrow 變波來鐵的變態便會被阻止，而得到高硬度的麻田散鐵組織。

（一）淬火硬度

麻田散鐵的硬度很高，但很脆，且其硬度與鋼的含碳量有關；含碳量低者，硬度也低，含碳量高者，硬度也高。但含碳量在0.6%以上時，硬度則大致相同。

（二）淬火溫度

淬火溫度由鋼的成份來決定，亞共析鋼的淬火溫度在A₃線以上30~50°C的範圍；過共析鋼為A₁線以上30~50°C的範圍。淬火溫度過高時，沃斯田鐵晶粒會生長而變粗，所以淬火後的機械性質會變差，甚至發生裂痕。

另外，熱處理中的加熱速率也很重要，如果加熱過快，造成外面比內面熱，不能得到均勻的組織，若物體的外形不規則，加熱速率必須稍緩，以避免撓曲及龜裂。

（三）淬火裂痕

淬火時，若冷卻至M_s點以下時，冷卻速度仍然很快，則會導致材料內部所生成的麻田散鐵量不均勻，進而產生不均勻的應力，使材料發生變形或發生裂痕。

（四）淬火液

淬火效果受淬火液的影響很大，淬火液從高溫鋼料奪取熱量的速度越快，淬火效果越佳；而影響淬火液的淬火能力的因素有：

- 淬火液的比熱。
- 淬火液的導熱度。
- 淬火液的黏性。
- 淬火液的揮發性。

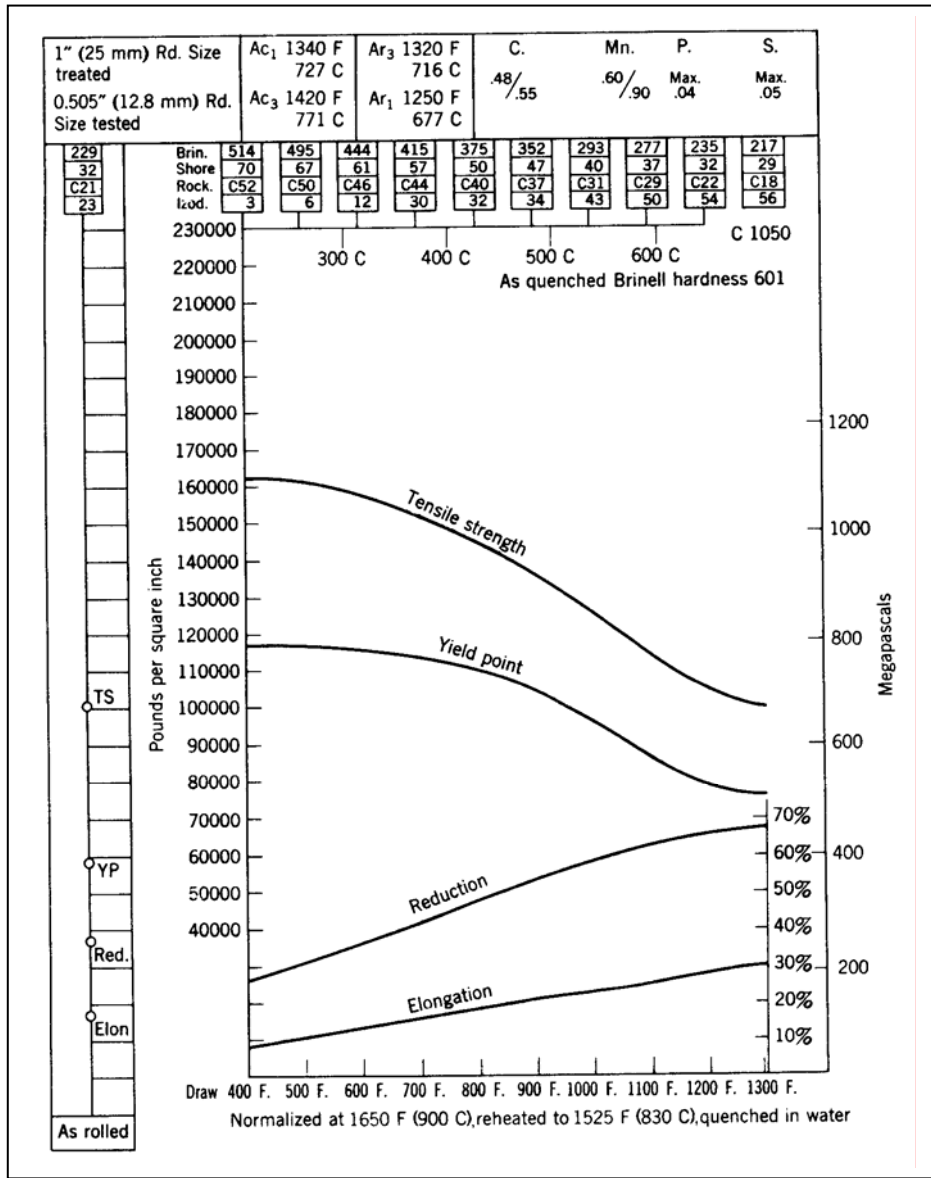
一般而言，比熱及導熱性大，黏性小而難於揮發者，淬火效果大。水是最常用的淬火液，但在M_s點附近卻因冷卻速度快，容易導致材料裂痕。而油的淬火效果比水差，但較不容易發生淬火裂痕，其淬火效果在60~100°C範圍內的淬火效果最佳。

四、回火 Tempering or Drawing

雖然淬火後的鋼強度大硬度高，但卻很不實用。因此，若把淬火鋼加熱到A₁變態點以下的適當溫度時，不但可以除去淬火鋼內部的應力，又可以調節硬度以得到適當的強韌性，這種操作過程叫作『回火』。

圖示為細晶粒AISI 1050鋼以水淬火，再加熱至臨界範圍的某溫度，接著回火於各種溫度時的機械性

質變化情形。



回火操作固然是以控制溫度為主，但停留在該處的時間長短亦有頗大的影響，那是因為大部份的軟化作用，於達到該溫度的開始數分鐘內即行完成，而在停留期間內，軟化的作用卻仍然持續進行。

除了上述的方法外，另外有兩種作法，是將淬火與回火同時於一次舉行，也就是先中斷淬火，急冷至某一規定溫度，保持若干時間，再急冷至常溫：

(一) 沃斯田回火法 (Austempering) (圖A)

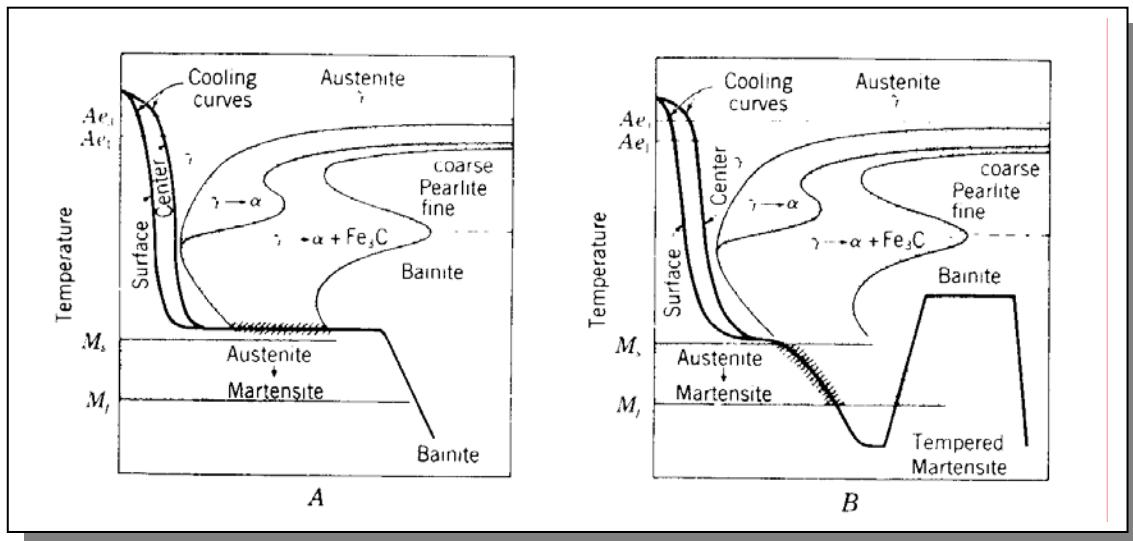
鋼料自高溫先急冷至某一溫度，隨即保持於該溫度適當時間，再急冷至常溫。其中，水平的冷卻線部份，通過變態曲線的全部，故可稱之為恆溫變態，其作用係將沃斯田鐵轉變成另一種硬度頗高的組

織，稱之為變韌鐵（Bainite）的過程。

此外，急速冷卻線的部份不得與變態圖的鼻端相接觸。

（二）麻田回火法（Martempering）（圖B）

鋼料由沃斯田鐵溫度急冷至 M_s 以上，在此溫度稍待，俟內外溫度一致後，然後冷於空氣中。再由此加熱至適當溫度（依鋼的含碳量與合金量而定），再以任何速度冷卻至常溫。由於其通過麻田散鐵變態區，因此可得到回火的麻田散鐵組織。

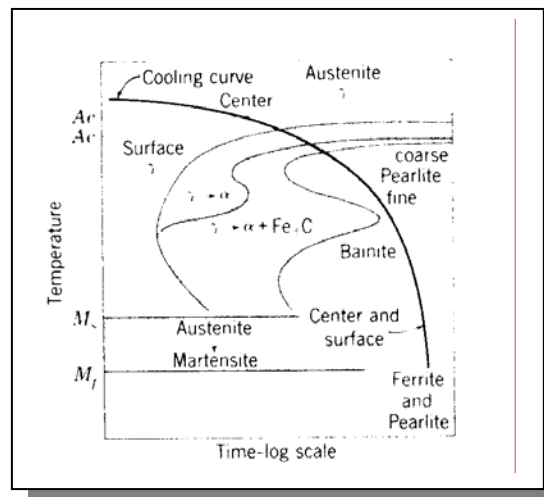


五、退火 Annealing

所謂『退火』是指將鋼料加熱到適當溫度，保持適當時間後使它慢慢冷卻的操作而言。其主要目的為：

- 消除由冷卻或由常溫加工、高溫加工所產生的應力；
- 降低硬度；
- 改良機械切削性或常溫加工性；
- 調整結晶組織；
- 得到所需的機械性質或物理性質；
- 消除化學成份的不均勻性。

退火處理過程，鋼的變態曲線如圖所示；其中，冷卻曲線所顯示的緩慢過程稱之為完全退火（Full Annealing）。這種處理方式能將前所存留的組織一掃而光，進而組成一種新的細緻組織，除可消除既存的應力，也可以達到完全的軟化，使其易於切削及適於各種

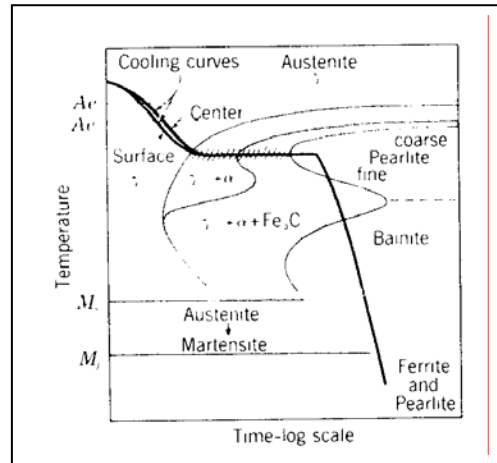


冷作造形。

(一) 等溫退火 (Isothermal Annealing)

如圖所示，其特點是能將退火的時間大幅度縮減。其中，鋼料自退火溫度迅速冷卻至沃斯田鐵，能在最短時間變態成較軟的肥粒鐵碳化物集合 (aggregate)，並在此溫度保持足夠的時間，使沃斯田鐵完全變成波來鐵。在轉變完成之後，即可以任何方式冷卻至常溫。

至於晶粒的細度，則視所選用的轉變溫度而定。



(二) 加工退火 (Process Annealing)

所謂加工退火係指鋼料於加工過程中，加熱至略低於臨界溫度的範圍，再令其緩慢冷卻；此法常用於鋼板的軋滾及鋼線的抽拉，其雖然不能得到類似完全退火的高柔韌性及延展性，但因加熱溫度低，不至於導致鋼的脫碳 (Decarburize) 及產生銹皮 (Scale) 等缺點。

六、正常化 Normalizing

鋼的正常化處理是加熱至臨界溫度範圍以上約 $10\sim 40^{\circ}\text{C}$ 的溫度，而後令其在靜止的空氣中冷卻至室溫；此法常用於中、低碳鋼及合金鋼組織的均勻化用途，可釋除內部應力，並獲得某種機械性質。

七、球狀化 Spheroidizing

鋼的球狀化處理是使鋼中雪明碳鐵由片葉狀，改為圓球狀的處理法。其處理方式為將鋼加熱到恰在臨界溫度之下，保持相當長的時間後，即可得到該項組織，這種球狀組織可增加鋼料的加工性及切削性。此法主要用於過共析鋼而需要加工的機件上。

八、表面硬化

(一) 碳化法 (Carburizing)

使鋼料與固體、液體或氣體的碳素材料相接觸，並加熱至 Ac_1 臨界溫度以上，使鋼吸收碳素而成為

碳鐵的固溶體，其表面部份則可成為高碳鋼。

(二) 碳氮化法 (Carbonitriding)

碳氮化法又稱乾氰化法 (Cyaniding)，是將工作物置於富有氮與碳的氣體中，並加熱至臨界溫度以上，以吸收空氣中的碳及氮。

(三) 氰化法

氰化法亦稱液碳氮化法，係將工作物置於熔化的氰化鈉鹽浴槽中，加熱至略高於Ac1的溫度，依硬化層的深度需求，停留若干時間，然後以水或油淬化之。

(四) 氮化法 (Nitriding)

將工作件置於密閉的阿摩尼亞氣體中，加熱至510°C左右，經過相當時間後，使阿摩尼亞氣的氮與金屬化合成為硬度極高的氮化物。