

机械工人造叶学习材料 344

鋼的熱处理淺說

裴 汲 編



机 械 工 业 出 版 社

前 言

热处理就是将金属与合金用不同的速度加热和冷却来改变金属的性质，使金属与合金达到适于我们应用的目的的方法。

我国古代，人民流传着许多关于制造宝剑的传说。我们的祖先早在几千年以前就会炼剑，在春秋战国时代，已经能够炼钢，并且知道运用锻造和热处理的方法。根据历史的记载，当时有一个有名的匠师，曾经制造出两把有名的宝剑，一把取名“干将”，一把取名“莫邪”，这两把宝剑锋利无比。宝剑要能够锋利无比，除了要有良好质量的钢材外，还要能够正确地运用热处理方法。

在汉书上也记载着刀剑的热处理方法。有“清水淬其锋”；还说明“淬谓烧而以水坚之也”的道理，就是说将烧到红热温度的刀剑，淬入水中，就能够使刀剑刚强锋利。

在明朝的时候，有一位名叫宋应星的人，他著有“天工开物”一书，在书中对各种热处理的方法和应用，叙述得也很详尽。在这本书的“锤锻”一章中，叙述说：凡熟铁钢铁，已经炉锤，水火未济，其质未坚，乘其出火之时，入清水淬之，名曰健钢。这里很明确地说明钢的热处理过程和它的重要性，即钢铁要有坚强的性能，必须将它加热以后，再入清水中快速冷却后才能得到。在这本书上还叙述锤刀的热处理方法。他们还知道运用松木，火矢，豆豉等混合为粉末，作为固体渗碳剂来渗碳。还叙述已经入水淬硬后的钢件，可以再“入火退去健性”的退火方法。

以上的一些事例，说明我们的祖先在几千年以前，就懂得了利用加热和冷却的方法，来改变钢铁的性质，以利于应用。可是，我们先辈在钢铁热处理方面的成就，只限于直觉地掌握了热处理

2

的手艺，而沒有能够知道鋼鉄在什么样的条件下会有这种特殊的变化？因此，一直停留在一定的阶段，不能深入地研究和进步。

在原子时期的今天，科学日新月异，各方面显示出对鋼鉄热处理有特殊的要求。在机器制造业，造船业以及在有色金属方面，热处理的作用占据着极为重要的地位。为了增加机器的寿命，減輕机器的重量，节约各种金屬結構、机器零件和各种工具的金屬消耗量，都是和运用热处理的方法有重大关系的。要使鋼鉄和各种有色金属能够适合我們使用的目的，是要靠运用正确的热处理方法来得到的。

我国經過第一个五年計劃以来，机器制造业工厂中的热处理車間，已經逐漸改变了过去落后的面貌。在比較大的机器制造厂的热处理車間，例如長春第一汽車制造厂的热处理車間中，已拥有机械化和自动化的热处理設備，并且有流水綫的生产路綫。

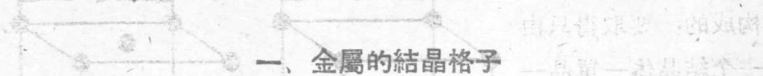
在热处理的工艺方面，气体渗碳，高频率感应加热和其他新的方法，使我国的机器制造工业，無論在提高产品的质量方面，节约金屬消耗方面，都前进了一大步。

随着工业的發展，我国的各專門学院和中等专业学校，也都設立了金相热处理專業，以培养为热处理而服务的人才；各工厂中和技工学校，也培养了許多热处理技术工人。这些措施，保证了祖国社会主义建設事业的飞跃發展。

一 金屬的构造和性質

凡是金屬都具有特殊的金屬光澤。所有的金屬，都具备可以延展的，坚强的性質；同时还善于傳热和导电。因为金屬有这些优点，所以在工业上和日常生活中都得到广泛地采用。因此，我

們對金屬的構造進行研究，有特殊重大的意義。



一、金屬的結晶格子

自然界中所見到的物體都是極小的質點所組成的，我們把這些小質點叫做原子。如果物體的原子排列成很有規律的結構，我們就把這種物體叫做結晶體。所有的金屬都是結晶體。

我們如果用眼睛直接觀察一塊銅，銅，鉛或其他金屬的時候，會覺得金屬是十分均勻的、細致的。但是用金相顯微鏡來看，就會發現有的金屬表面是粒狀的，纖維狀的結晶組織(圖1)。結晶體的排列有一定的次序，方向；它們會形成一種“空間格子”。用X光照射結晶體，可以了解各種原子在結晶格子裡排列的情況。X光射線的研究結果還告訴我們，在金屬之間最常見的“空間格子”有三種類型。

第一種類型是“體心立方格子”。這種結晶格子裡的原子，位

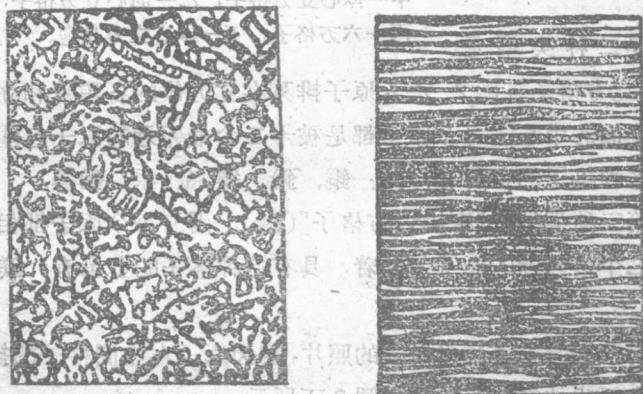


圖1 純鐵的晶粒。

在立方體的各頂點和立方體的中心(圖2、甲)。但是金屬是由無數

ACS88/02

个結晶体—單晶—所构成的，要取得只由一个結晶体—單晶—所构成的金屬，在一般条件下是办不到的。所謂“空間格子”只是給我們对結晶体构造的一个概念。因此，“体心立方格子”上的每一个原子实际上是被八个最邻近的原子包圍着的。具有这种格子的金屬有：

鋰、鉻、鈳、鉬、鎢等。

第二种类型是

“面心立方格子”(圖 2、乙)，原子排列在立方体的各頂点和立方体的六个面的中心，每个原子都是被十二个最邻近的原子包圍着。具有这种格子的金屬有：鋁、銅、鉛、鎳、金、銀、鉑等。

第三种类型是“密排六方格子”(圖 2、丙)，每个原子都相互間被十二个最邻近的原子包圍着。具有这种格子的金屬有：鎂、鋅、鋁、鈹等。

科学家們利用 X 光射綫的照片，認為原子在空間格子的排列，大致象硬球被包装那样，如圖 2 丁所示。

原子在格子里的排列，对物質的許多性質有着很大的影响。这种結晶体还有“异向性”的特性，所謂“异向性”就是說結晶体在

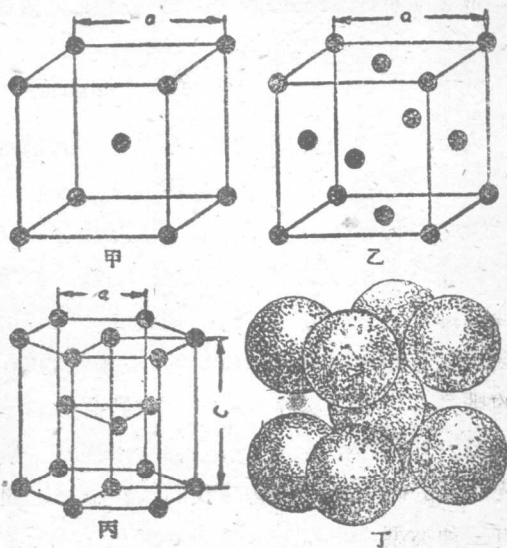


圖 2

甲—体心立方格子；乙—面心立方格子；
丙—六方格子；丁—体心立方晶胞。

不同的方向上的性質有不一致的現象。結晶体沿某些方向比沿另一些方向容易破坏，它的导热性在不同的方向上也是不一致的。

二、同素异形性

大家知道，石墨是可以用来制造铅笔芯的，它的質地很軟，并且是一种灰黑色、不透明的物質。金剛石也是大家所熟悉的东西，它是一种透明而且非常堅硬的物質。在已經知道的一切物質中間，沒有比金剛石再堅硬的了。但是，这二种物質都是結晶的碳。为什么石墨和金剛石的性質有这样大的差別呢？这就是由于它們之間的結晶格子不同。

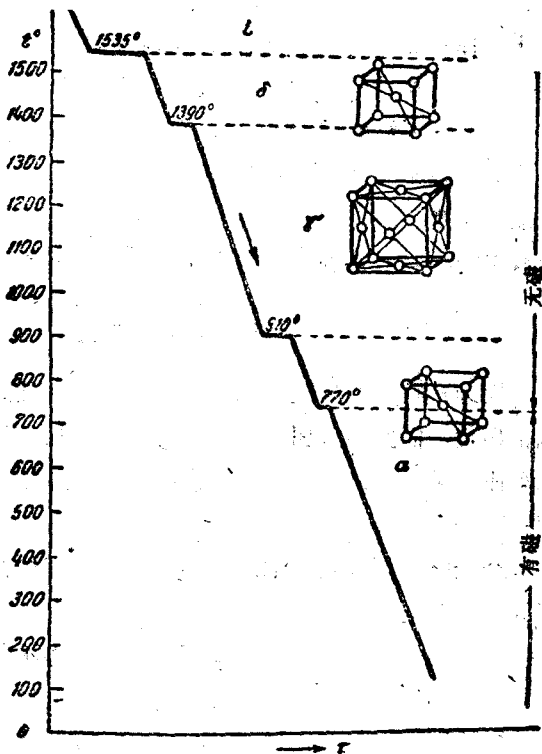


圖3 鐵的同素异形轉變圖。

在金屬中間也会时常見到这种現象。將鉄加热以后，在不同的溫度中，就会發生不同的結晶格子的組織。在室溫时鉄的結晶格子是“体心立方格

子”，具有这种格子的鉄称为 α （阿尔發）鉄。当加热到 910°C 以上的溫度时， α 鉄的結晶格子就开始轉变为“面心立方格子”，此时另称为 γ （軋馬）鉄。如果繼續加热到 1390°C 时， γ 鉄的結晶格子又开始轉变为“体心立方格子”了，这种鉄的新形态和 α 鉄的格子相同，但是所处的溫度和性質不同，另称为 δ （台尔踏）鉄。在室溫的时候， α 鉄有磁性，但是到 1390°C 时， δ 鉄虽然和 α 鉄有相同的結晶格子，但是磁性消失了。这种轉变情况如圖3所示意。一种物質能够形成不同的結晶形态，这种性質就叫做同素异形性。

鉄、鋅、鎳、鈷、錳、鎢、錫等金屬，也可以由一种結晶形态轉变为另一种結晶形态，即能發生同素异形轉变化。同素异形变化可以因溫度，压力的变动和因混入雜質而發生。这种同素异形性，对鉄來說，具有特別重大的意义，这一点我們在以后將談到。

三、合金的构造

因为純粹金屬的硬度和强度都很差，而且煉制純粹金屬的成本也很昂貴，因此純粹金屬在工业上就很少采用。冶金学家就研究將二种或二种以上的元素，使它們熔合在一起以得到一种复杂的物質——合金。

合金的性質决定于它的化学成分和內部的构造，合金的构造可分以下几类：

第一类 二种元素彼此間互不溶解，也不形成化合物；在它們冷却凝固以后的合金中，形成为二种不同元素紧密的机械混合物。形成机械混合物的元素，完全保留了該元素原有的性能，二种元素的合金就具有这些元素的平均性能。例如，假定元素A原有的硬度为布氏硬度單位200，元素B原有的硬度为布氏硬度單位100，結果这二种元素合金的硬度則依据它們之間含量的多少，界

于布氏硬度 100 到 200 之間。鉛和錫的合金就是機械混合物，如果
用顯微鏡來看這種合金，便能分辨出鉛和錫的微小結晶體（圖 4）。

第二類 我們如果將糖倒入水
里，糖的小粒子就逐漸被水溶解而變
為糖水。如果把二種金屬加熱熔化成
液態，一種金屬的原子均勻地分布在
另外一種金屬里边，它們溶解在一起
的情況，和砂糖溶解在水里有相似之
處。當這種合金冷卻凝固的時候，被
溶解金屬的原子，仍然均勻地分散在
另一種金屬里边，形成固溶體。

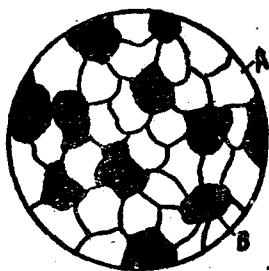


圖 4 機械混合物的顯
微組織示意圖。

多數金屬具有形成固溶體的特性，象鐵和碳、鎳、錳、硅等
元素都能夠形成固溶體。在固溶體里，被溶解的金屬原子“分散”
在另一金屬的原子之間，而固溶體是一種結晶體，它也有各種不
同的構造。

如果固溶體里所含的不同金屬的原子，它們的體積大小差不
多（原子間的直徑大小之差小於 15%），這種固溶體的構造則是一
種元素的原子置換在另一種元素晶格上的原子（圖 5），這種合金
的固溶體，稱為置換固溶體。鐵和鎳、鉻、錳的合金，就屬於此
類。如果固溶體里所溶解的原子之間的直徑相差大於 15%，就不
會形成固溶體了。

另外一種固溶體稱為間隙固溶體，這種固溶體多半是非金屬
元素溶入金屬里；這種非金屬元素的原子，如果比金屬的原子小
得多的時候，就間隙在金屬的原子之間，形成了間隙固溶體（圖
6）。形成這種固溶體的合金有鐵和碳，氮等。

固溶體有一種特殊的性質，它的結晶體里的原子在不停地進

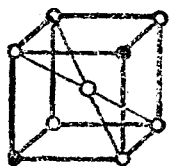


圖5 置換固溶體示意圖（黑的原子替換了原有原子）。

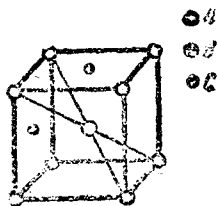


圖6 間隙固溶體示意圖（黑的原子間隙在金屬原子之間）。

行振蕩運動。當一個振蕩着的原子在極其短促的時間內，離開在結晶格子里的位置的時候，鄰近的原子便能跳到空着的位置上去。如果所處的温度愈高，原子的移位也就愈活潑。別的“外界”的元素的原子如果和合金固溶體相接觸，也能够跳越到合金表面層里的結晶格子的空位上去。這些“外界”的原子還能穿透、擴散到合金的內部去，就是說能够溶解到合金中去。

第三類 二種或二種以上的元素熔合時，合金的個別部分互相化合在一起。例如，鎢和碳化合，合金里便形成一種新的組織部分——碳化鎢。這種新的組織的性能與原有的元素完全不同，稱為化合物。化合物的結晶體在合金的組織里單獨存在，好像作為機械混合物組成部分之一。合金是沒有單獨由化合物組成的。

鐵碳合金在工業上應用最廣，鐵碳合金中含碳量在0.05~1.7%之間稱鋼，含碳量超過1.7%則稱鑄鐵。由於工業上的需要，還有在碳素鋼中分別加入其他元素如鎳、鉻、錳、硅、鎢、鉬、鈮、鈦等煉製成的合金鋼，加入以上各種元素的合金鋼，其機械性能大大地提高。現在已經製成了的和正在研究的工程用合金已有數千種。

二 鋼在加熱和冷卻過程中的組織轉變

熱處理的過程，就是將鋼材制成的機器零件或坯料，在爐中加熱到一定的溫度和保溫，再用不同的冷卻速度使之冷卻，來改變鋼內部的組織和它的強度，耐磨性，韌性等機械性能的操作方法。熱處理的一般目的，約有下列幾項：

1. 鋼件經過了各種熱加工（如鍛造、鑄造、延壓、焊接等）和冷加工（如車、刨、銑、冷沖壓以及其他的冷作等）以後，在加工的過程中（受到外力的作用）使鋼的內部組織往往變得不均勻；結果在同一个零件中，它的機械性能也表現得很不均勻，因此就不符合做機器零件的要求。也就是說，鋼件經過了熱加工或冷加工之後，鋼的內部產生了殘余應力，這種殘余應力會削弱機器零件的機械性能，必須用熱處理的方法來消除它。

2. 用熱處理的方法可以減低鋼件的硬度，增加鋼件的延展性和韌性。

3. 用熱處理的方法可以提高鋼件的強度、硬度、耐磨性、耐蝕性等。可以增加切削工具的切削能力或改善鋼的切削加工性（使鋼材容易被切削）。

4. 用熱處理的方法改善鋼的內部組織，增加鋼的機械性能，以符合應用的要求。

5. 使鋼的表面層硬化而內部仍舊保持原有的組織。

6. 使鋼的表面層的化學成分改變，以適合應用的要求。

熱處理的主要操作有：退火、正火、調質、淬火、表面淬火、回火以及滲碳、滲氮、氰化、滲金屬等化學熱處理的方法。

一、鉄碳平衡圖“鋼”的部分

热处理工作者对鋼材进行热处理的时候，了解鋼在加热和冷却过程中其内部的組織转变的情况是很必要的。鉄碳平衡圖就可以帮助我们了解这种过程，因此我們首先要学习和熟悉鉄碳平衡圖的内容。对热处理来说，鉄碳平衡圖中“鋼”的部分，即对含碳量在1.7%以下的部分是很重要的。同时，在热处理时固相线是最高温度的边限，所以对液态部分也应用不大。

圖7是鉄碳平衡圖鋼的部分，在叙述平衡圖之前，必須先介紹一下平衡圖上各組元(相)的特性。因为在不同的温度中，鉄碳合金会形成不同的“相”，現在将平衡圖上的各个相和它們的特性，分別介紹如下：

鉄素体 在一般的情况下，要得到純鉄相当困难；它总是含有一些杂质。为了科学上的目的，才制成了比較純的鉄，其中所含的杂质的总含量不超过0.01%。鉄的本身是質軟可塑的亮灰色金屬，比重是7.86克/厘米³。

当研究鉄的組織时，在显微镜下可以看到不規則的光亮晶粒，这些晶粒間有細網状的晶界(圖8)。純鉄在金相学上称为“鉄

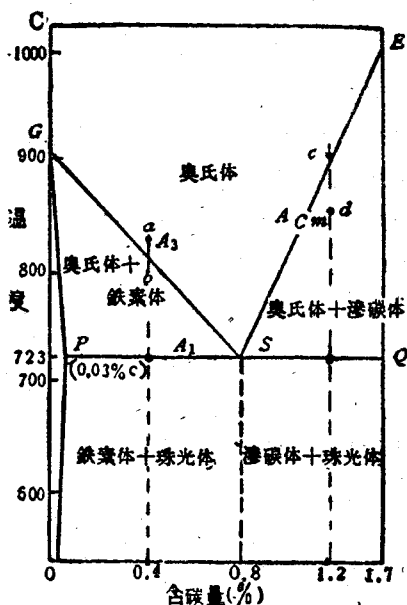


圖7 鉄碳平衡圖鋼的部分
温度含碳量(%)。

素体”，它可以形成三种同素异形体，即 α 、 γ 、 δ 鐵。

渗碳体 渗碳体是鐵碳平衡圖上組元之一，碳在鐵—碳合金中并不是单独存在的，它是和鐵化合为渗碳体存在的，其实鐵碳平衡圖实际上是鐵—渗碳体平衡圖。渗碳体具有一种复杂的菱形格子，它的熔点約为 1550°C ，要准确地确定它的熔点是不可能的。因为到 1550°C 以上的溫度时，随着熔化同时即分解为鐵和石墨。渗碳体硬而脆，几乎没有塑性，它的硬度要比鐵高 10 倍，达布氏硬度 800 个單位。

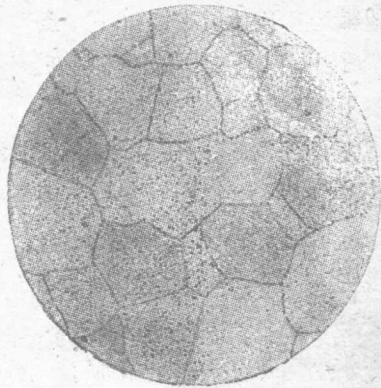


圖 3 鐵素体的显微組織圖
200 倍。

奥氏体 鐵碳合金根据含碳量的不同，从 $723\sim 1490^{\circ}\text{C}$ 的溫度範圍內，称为碳在 γ 鐵中的固溶体；这种固溶体以冶金学家奧斯丁氏的名字命名，故称为奥氏体。在 1145°C 时， γ 鐵本身能够溶解最大量的碳达到 1.7%，在 $723\sim 1145^{\circ}\text{C}$ 溫度範圍內，奥氏体对碳的溶解量随溫度升高而增加。奥氏体的硬度不高，只有布氏硬度 $170\sim 220$ ，但是韌性很好。

現在我們可以討論一下鋼从高溫緩慢冷卻到室溫时所發生轉變的过程。

圖 7 縱軸代表溫度的高低，橫軸代表合金中渗碳体的含量。

圖上 GS 、 SE 溫度曲綫以上为奥氏体的組織，按照合金的含碳量不同，奥氏体存在的溫度也不一样（沿 GS 、 SE 綫变化）。例如含碳量 0.4% 的合金，在圖上可以看出，在大約 840°C 溫度时的

組織為奧氏體(在GS綫以上 a 點);當溫度下降到大約 780°C 時(在GS綫以下 b 點),奧氏體就開始分解,首先析出鐵素體,當溫度繼續下降,到PSQ綫的溫度的時候(723°C),由於奧氏體析出鐵素體後(鐵素體不溶解碳),未轉變部分的奧氏體中含碳量有顯著增加。這種情況,可以用日常生活中某些情況來譬喻,如一個杯中盛有9份水和1份鹽,這時杯中含鹽量為十分之一,如果將杯中9份水去了5份,只保留4份水和1份鹽,那時杯中的含鹽量就濃了,成為五分之一;奧氏體中析出了不溶解碳的鐵素體(好象去了一部分水),所以含碳量增加了。到 723°C 時奧氏體中的含碳量達到0.8%,也是奧氏體在這個溫度時的溶解碳的數量達到最大飽和點的時候。溫度繼續下降到 723°C 以下後,這種奧氏體就全部分解為滲碳體和鐵素體組成的緊密機械混合物。這種機械混合物是由滲碳體和鐵素體共析而成的,叫做“共析體”。在形成共析體的時候,它的結構常常由片狀的鐵素體和片狀的滲碳體組成,在顯微鏡下看起來,好象珠母一樣,因此共析體又叫“珠光體”圖9(亞共

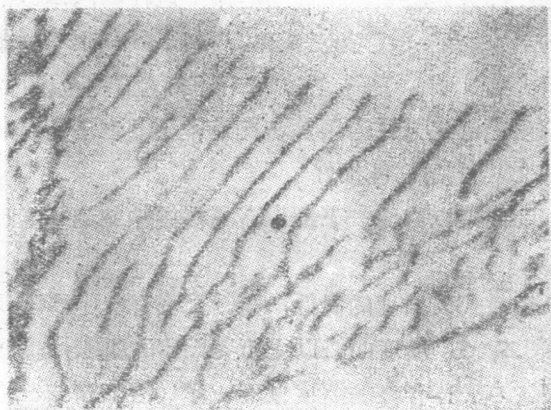


圖9 珠光體的金相組織。

析鋼的組織為鐵素體加珠光體)。

含碳量比較高的合金，例如含碳量 1.2% 的高碳鋼，這種合金按碳的濃度在平衡圖上處在 S 點的右方 (圖 7)，當溫度約在 870°C 時 (SE 綫以上 c 點) 它的組織為奧氏體。溫度下降到 SE 綫以下 d 點 (例如 850°C) 時，奧氏體因溫度下降含碳的濃度達到過飽和點，就析出過剩的滲碳體 (因為溫度下降，奧氏體對碳的溶解度降低)，一直到 PSQ 綫的溫度 (723°C)，奧氏體中的含碳量 (溶解度) 為 0.8%，當合金的溫度低於 723°C 時，剩餘的奧氏體分解為珠光體。所以含碳量 1.2% 的鋼從 723°C 以下溫度到室溫的組織為滲碳體加珠光體。

這裡我們必須注意一種情況，在平衡圖上可以看出，即含碳量 0.8% 鋼，它的奧氏轉變過程與含碳量在 0.4% 和 1.2% 的鋼完全不同。這種鋼的奧氏體組織冷到 S 點 (723°C) 以下時，即直接分解為珠光體。這是因為鋼的含碳量正好為奧氏體分解時溶解碳的最大飽和度。這種含碳量 0.8% 的鋼就稱為共析鋼。為區別起見，低於 0.8% 含碳量的鋼稱為亞共析鋼，高於 0.8% 含碳量的鋼稱為過共析鋼。

以上敘述的是鐵碳合金從高溫冷卻時組織轉變的過程。如果將鋼從室溫加熱到一定的溫度，鋼的組織結構也會在各個溫度區域內回復轉變為平衡圖上原有的組織。但是這種加熱或冷卻的轉變過程，是不考慮時間因素的，是在非常緩慢的情況下進行的。如果鋼從奧氏體組織以極快的速度冷卻，則鋼形成的室溫組織不是珠光體，而是另外一種結構。關於這點我們在以後將加以討論。為了使緩慢冷卻時鋼的組織結構的概念更加清楚，可以參看亞共析鋼、共析鋼和過共析鋼的結構組織示意圖 (圖 10)。

鋼內部組織開始轉變時的溫度稱為“臨界溫度”或“臨界點”。

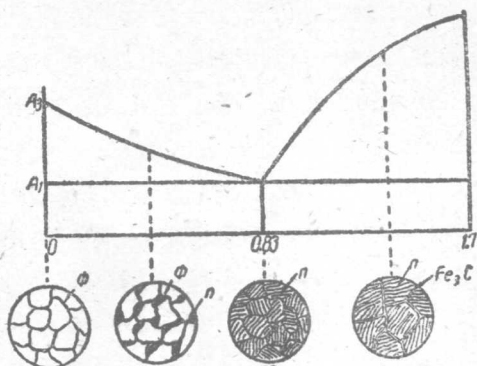


圖10 亞共析鋼，共析鋼，過共析鋼組織示意圖：

Ф—鐵素體；П—珠光體； Fe_3C —滲碳體。

通常對碳素鋼來說，當奧氏體冷卻開始析出鐵素體或滲碳體的溫度，或加熱轉變為奧氏體的溫度，均稱為高臨界溫度。同樣奧氏體分解為珠光體或珠光體轉變為奧氏體的溫度為低臨界溫度。鋼的臨界溫度都用字母“A”來表示，高臨界點以 A_3 （亞共析鋼）或 A_{cm} （過共析鋼）來表示，低臨界點以 A_1 （ $723^{\circ}C$ ）表示（圖7）。可是鋼在加熱和冷卻時的幾個“臨界點”並不相同，為了區別起見，一般以 Ac_1 、 Ac_3 分別表示加熱時的二個“臨界點”，而以 Ar_1 、 Ar_2 分別表示冷卻時的二個“臨界點”。另外 A_2 系表示鋼的磁性轉變點（ $768^{\circ}C$ ），超過這個溫度，鋼便無磁性。

二、鋼在加熱和冷卻過程中的幾種主要金相組織和性能

在鐵碳平衡圖上可以看出，對亞共析鋼加熱的溫度不超過 Ac_1 點（ $723^{\circ}C$ ）時，鋼的組織仍然為室溫時的組織鐵素體加珠光體，如果加熱的溫度超過 Ac_1 點，則組織中珠光體部分開始轉變為奧氏體，溫度繼續上升到 Ac_3 點後，剩下的鐵素體也全部溶入奧氏體，這時鋼全部已為奧氏體的組織。如果將奧氏體再緩慢冷卻，則

經過同樣的轉變回復到原有室溫的組織。這些轉變過程，一般鋼都相似，不過轉變的溫度不同罷了。

用另外的操作過程，將奧氏體狀態的鋼冷卻速度加快，則轉變的結果全不相同。例如，共析鋼室溫時原來的組織是珠光體，當將這種鋼加熱轉變成奧氏體的状态後，用比較快的速度冷卻，此時由奧氏體析出的滲碳體和鐵素體薄片要比緩慢冷卻時析出的細得多，這種細片狀的組織要在高倍數的顯微鏡下才能看到，這種組織另稱為索氏體。因為奧氏體析出的薄片長大（聚集）要有較多的時間，冷卻速度較快時就使薄片來不及長大。如果冷卻速度再行加快，則奧氏體的析出物要比索氏體有更細密的結構，這種組織另稱為托氏體。如果將奧氏體以最快的速度冷卻（例如每秒鐘 $\sim 200^{\circ}\text{C}$ 以上），則奧氏體轉變的結果得到一種針狀組織，這種組織有很高的硬度，稱為馬氏體。這種組織是由于冷卻速度極快，鋼的原子來不及移動以致不能進行結合過程；也就是說奧氏體的晶粒來不及析出滲碳體和鐵素體的混合物（圖 11）。

因此，我們可以将鋼加熱到奧氏體的組織狀態，然後用不同的冷卻方法，以得到鋼的不同性質的組織結構。研究證明，這些不同的組織，有不同的機械性能，可以供我們工程上應用。

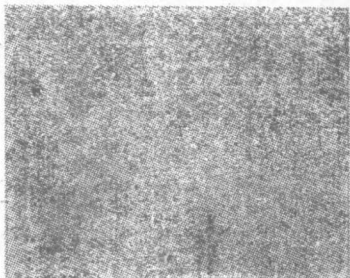
這幾種組織結構的機械性能，列如表 1。

熱處理的目的就是改變金屬或合金的性能；但是這種變化與平衡圖上的情況不同。因為平衡圖上顯示的只是說明鋼的轉變過程，而熱處理的目的則是要求永久改變金屬或合金的性能；所以冷卻的方式必須有所改變。

所有的熱處理工藝規程，都不外乎將鋼加熱到一定的溫度和保溫以後，隨即用不同的冷卻速度冷下來，使鋼的組織產生預期的轉變。



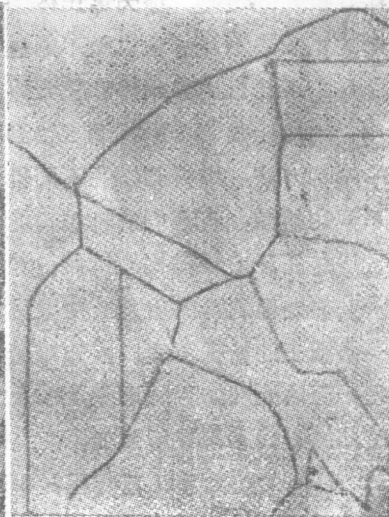
甲)



乙)



丙)



丁) 圖11 甲—珠光体; 乙—索氏体; 丙—托氏体; 丁—馬氏体; 戊)
 戊—奧氏体的金相圖。