

474988

熱處理的原理

工具機手冊 第七冊



金屬工業發展中心 編譯



熱處理的原理

工具機手冊 第七冊

余 聖 雄 譯

版 權 所 有
不 准 翻 印

中 華 民 國 六 十 八 年 十 一 月 出 版

工 具 機 手 冊 之 (七)

熱 處 理 的 原 理

編 譯 者：金 屬 工 業 發 展 中 心

發 行 者：經 濟 部 國 際 貿 易 局

印 刷：佳興印刷局企業有限公司

前 言

我國工具機製造，近年來各機種不論在產量和品質上，都有長足的進步，與國外各廠產品，已可媲美，且已大量出口。經濟部國際貿易局鑑於唯有改進產品品質，始可保持已有的市場和進一步拓展外銷，乃于民國六十七年十二月委託本中心編撰工具機手冊約四十冊，內容包括切削加工工具機的製造技術、沖壓模具、塑膠模具、壓鑄技術、鑄造技術、熱處理、表面處理、控制系統等，提供有關本業工廠技術員工參考，希冀由本手冊的刊行，能解答工廠中一部份所遭遇的問題；至於有關工具機書籍已刊載的內容，在本手冊中不再贅述，謹於篇首，簡介如上，至於編撰時間倉促，容有不週，尙祈不吝指正！

原 序

數百年前，冶金科學未誕生時，鋼已是用作一般用途。日本武士道所佩用的 Sumarai 大典劍，在一千年前已著稱是美好和藝術品。Toledo 和 Damascus 的製劍者也因為他們的手工藝和所用鋼的品質，連帶的使其城市聞名。這些人雖不知冶金學為何，但他們的製作技藝卻非常好。

雖然金相學仍是在慶祝它的百年，而在這短短的歷史中已累積儲備了很多的知識。

現階段探討這樣的知識，其工作目的在於蒐集有關鋼的熱處理基本資料。理論上的名辭是應儘可能的避免使用；雖然，仍有很多有關鋼的構成要素所形成組織的重要名稱。本課題發展中，所用的這些或其他有關的名辭的定義，在本冊敘述中也一再重複的提及。

有關於鋼滲碳硬化的金相照片和曲線圖，是要感謝提供的英國化工業普通化學組和英國鋼公司經常所供應的第一章中用作說明的大部份金相照片。The Mond Nickel Co. 在第五章內提供了說明滲碳錯誤和核心破裂等優異的照片等，特此簡介。

有關鑄鐵的熱處理知識還可以參考本叢書第五、六兩冊中有關的資料，本文不再贅述。

目 錄

	頁次
第 一 章	1
加熱及淬火對結晶構造之影響；緩慢冷卻的影響；碳含量的影響；平衡圖；共析的形成；逆速率冷卻曲線	
第 二 章	16
質量對淬火的影響；使用合金鋼的理由；硬化能；硬化的方法	
第 三 章	23
正常化；空冷所得的結晶構造；回火；硬度和韌性的關係；結晶粒度；McQuaid-Ehn 試驗法；退火	
第 四 章	32
奧斯田鐵；相變態機構；S 曲線；奧斯回火；麻回火；時控淬火；過冷處理；鑄鐵的熱處理	
第 五 章	45
滲碳；固體滲碳；液體滲碳；氣體滲碳；滲氮	

熱處理的原理

第一章

各種高、中、低碳鋼經過加熱及淬火後，結晶構造及硬度的改變，緩慢冷卻的影響；碳含量的影響；簡單的平衡圖；共析的形成；逆速率冷卻曲線。

鋼是一種以鐵和碳為主要成分的合金，此外還有一些故意加入的少量錳及矽，另外還有一些元素我們把它們當成不純物，因為它們並非我們所需要，但無法很容易（花很少金錢）把它們除去。

碳鋼和其他各類鋼料不同，我們將之分為低、中、高碳鋼三種。由這三個名詞，我們很容易區分出其使用目的。低碳鋼、軟構造用鋼、或表面硬化鋼（指滲碳用低碳鋼）是含碳量在0.12~0.18的鋼料。碳不是以單元素或游離原子分佈在這些金屬中，而是和鐵形成化合物。因此它所佔的體積比單元素或游離狀態所應佔的體積約大15倍。碳在鋼中的重要性並非它所佔的相對體積而是它在經過加熱及各種不同冷卻後對內部構造及機械性質可觀改變的影響。

中碳鋼熱處理的影響

如果我們考慮一支含碳量約0.4%的中碳鋼圓棒。它也含錳及矽以及一般的雜質，這些額外的元素不必多加考慮，因為它們不會影響所得結果的一般特性，這個鋼料可以假設它是剛從軋鋼廠出來的或稱“剛軋好”（as-rolled）的鋼料。

如果將一片切好之鋼料，經過研磨、腐蝕後放在顯微鏡下，就可看到和圖1相同的金相。圖1中白亮的區域代表肥粒鐵（Ferrite），它是源自拉丁“Ferrum”是鐵的意思。肥粒鐵事實上幾乎是純鐵。條紋狀的區域是波來鐵（Pearlite），他所以如此稱呼，因為它的形狀像是珍珠之母（mother of pearl）。當倍率再放大時就像圖2的樣子。黑色層是雪明碳鐵（Cementite），夾在兩條黑色層之間的是肥

粒鐵。雪明碳鐵是鐵的碳化物，其化學式是 Fe_3C ，它是在高溫形成的，亦是一種硬且脆的材料，物理性質和玻璃相近似。

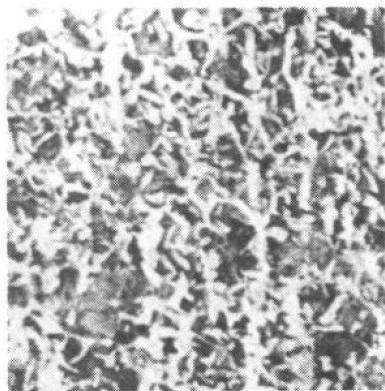


圖1 碳鋼軋好狀態白色區域是肥粒鐵黑色及灰色是波來鐵



圖2 像圖1之結晶（波來鐵及肥粒鐵）放大倍肥粒鐵成白條狀

肥粒鐵相反地是軟且韌，它最多能夠被伸長50%。它很韌因此對衝擊的抵抗力很强。

α 鐵（肥粒鐵）及 γ 鐵，一鐵在各種不同溫度下具有四種不同的形態。

它們是(1) α 鐵(2) β 鐵(3) γ 鐵及(4) σ 鐵。這些僅 α 鐵及 γ 鐵尚屬重要。鐵在低溫及比較高的溫度下是以 α 鐵狀態存在，這和我們剛才討論的肥粒鐵是相同的。 γ 鐵只有在高溫才存在而且它的結晶構造及物理性質和 α 鐵不同。在圖2白色區域是 α 鐵它是立體的。

構成這晶體的原子形成一個有規則的幾何圖案是由立方體的空間所組成，立方體的8個角的位置是由鐵原子所佔據，中間對角線的交點處則由其他原子所佔據。因為中心的原子所佔的位置是在立方體的中心所以稱 α 鐵為“體心立方”(Body centred cubic, 或B.C.C.)。它的結晶構造和 γ 鐵不同， γ 鐵雖然也有立方體的8個角落的鐵原子，但在立方體六個面的中心另各有一個原子，而在立方體的中心無原子存在。因此 σ 鐵稱為“面心立方”(Face centred cubic 或F.C.C.)。

在兩種結晶中，都是由這種基本的立方體很有規則的堆積而成，這種堆積的圖案或稱結晶格子向三度空間延伸，一直碰到晶界為止。

在體心立方中，每一個角落的原子是由 8 個立方體所均分，因此 8 個原子中其實一個立方體只佔有 $8 \times \frac{1}{8} = 1$ 個原子再加上中心部份的原子一共是 2 個原子，因此，體心立方結構造的每一立方體總共有兩個原子。

面心立方中，則 8 個角落的每一個原子仍由 8 個立方體平分，而每一個面上中心的原子則由兩個立方體所平分，因此每一立方體總共有 $8 \times \frac{1}{8} + 6 \times \frac{1}{2} = 4$ 個原子，這是 γ 鐵的結構。

這種結晶構造上的差別使 α 鐵及 γ 鐵的物理及機械性質也不同。其中一個比較特殊的是 γ 鐵可以固溶碳原子。而 α 鐵則無法固溶碳，但是能形成化合物叫鐵的碳化物。

硬度和韌性——回到圖 1 及圖 2 中碳鋼的金相，我們就有顯微組織的概念，肥粒鐵或 α 鐵，由於它的結晶構造及它在整個組織中均勻分佈，給這種材料帶來了既軟又韌且又會吸收衝擊的特性。波來鐵是由肥粒鐵及鐵的碳化物混合而成，因此它結合硬及軟的材料而變成一種有強度、有硬度又有韌性的材料。

它具有下列機械特性：1. 拉力強度 40 tons/in²，2. 降伏強度 18 tons/in²，3. 硬度 Brinell 190，4. 伸長率 20%，5. 斷面收縮率 40%。

拉力強度和硬度是相關的性質，一個增加另一個必然隨之而增加。但是延展性及韌性則隨着材料變硬而減少。硬度的改變及顯微組織的改變可以說是熱處理的結果。

我們如果把這些中碳鋼切成的圓形試片，放進裝有溫度控制的實驗室爐中。爐溫升到會對試片的組織或硬度產生改變的溫度，如 650 °C，然後取出一個試片淬於水中，其淬火時之溫度由溫度計的表上記錄。經過淬水後，該試片的硬度仍然是 Brinell 190，而且顯微組織也無多大變化。

麻田散鐵的形成——第二個試片在爐溫為 723°C 時取出淬於水中，這時硬度就有明顯改變由 Brinell 190 升至 220，顯微組織也有所變化，這可由圖 3 看出來，圖上我們可以看出有一種第三成份出現在原

有波來鐵的位置。這個成份的特徵是呈針狀稱之為麻田散鐵。麻田散鐵在鋼的熱處理當中佔了一個很重要的角色，因此我們必須了解它的來源及特徵。

能夠固溶碳素的 γ 鐵它只在高溫才存在。這高溫是由 723°C 開始。在此溫度體心立方結構的 α 鐵變成面心立方結晶的 γ 鐵。

假設在圖 2 中已經有了 γ 鐵夾在板狀的鐵的碳化物之間，而且 γ 鐵能夠使這鐵之碳化物溶於其中。如此很自然這些鐵的碳化物會消失，而由 γ 鐵來取代它的位置。最後的結果稱為奧斯田鐵 (Austenite)。這種變化發生在鋼尚在暗紅色，而且多晶固體時。因此這種奧斯田鐵仍為固溶的結晶。

急冷的效果：—這是鋼在淬火時所必須具備的條件，急冷可以使碳化物 (Fe_3C) 保留在固溶裏，但是無法阻止 γ 鐵再變成 α 鐵的形態。雖然 γ 鐵想完全變成 α 鐵原來的樣子，但是受到微細的碳化物 (Fe_3C) 的阻止而無法得逞，因此，最後的結晶構造和 α 鐵不太相同。這種形式的結晶構造及微細的碳化物顆粒 (次顯微大小) 兩者結合而成的特性，也可以說是硬度的定義。這種新的結晶就叫麻田散鐵。

硬度的增加是由於由小的麻田散鐵晶粒分布在整個材料裏，但是它仍受到波來鐵的限制 (在 723°C)，因此時波來鐵區域變成固溶狀態。整個材料是由麻田散鐵及波來鐵組成。

第三個試片現在再取出馬上淬於冷水中。此試片的淬火溫度是 735°C 。比上一個試片溫度高 12°C 。我們再將此試片做試驗。

此試片的硬度為 Brinell 250，而試片中大部份的組織，是由麻田散鐵所佔據，它所佔比例比前面所說還大，這些麻田散鐵幾乎佔據了原來波來鐵的位置，肥粒鐵區域則部份尚未消失，但它的多少須視麻田散鐵及留下來的波來鐵而定。

現在將爐溫升到 750°C ，然後再取出第四個試片淬於水中，此時硬度有顯著上升。此時的硬度為 Brinell 480，而組織也有顯著不同。此時波來鐵都消失掉，受而代之以是麻田散鐵。另外肥粒鐵也顯著的減少，因為不只波來鐵變成奧斯田鐵，而且奧斯田鐵也逐漸吸收已變成 γ 鐵的肥粒鐵。

在淬火之際，試片中包含兩種成份——奧斯田鐵及 γ 鐵。當急速冷卻的時候，奧斯田鐵變成硬的麻田散鐵，而 γ 鐵則變成 α 鐵也就是顯微組織中的肥粒鐵，在 750°C 時肥粒鐵以 γ 鐵形態存在，而它代表着過多的鐵（含碳量太少）無法變成奧斯田鐵。在更高的溫度下奧斯田鐵在到達飽和點之前，能夠吸收更多 γ 鐵。這可由 775°C 淬火的試片來證明，此一試片大都是麻田散鐵而且硬度也高達 Brinell 565。

最高的硬度——最後一個試片其淬火溫度是 790°C 它的組織幾乎全是麻田散鐵，例如圖 4 所示。此時奧斯田鐵已吸收了全部的肥粒鐵，在淬火時則變成麻田散鐵。而且硬度達 Brinell 595，這是含 C:0.4%，Mn:0.75% 左右的中碳鋼所能得到的最高硬度。

本研究的目的至此已達成；也就是鋼能經熱處理逐漸改變其硬度一直到全部都硬化的程度。

中碳鋼逆硬化程序

很明顯地鋼之所以硬化，因為我們使它形成一種新的組織——麻田散鐵。而這種組織是由奧斯田鐵急冷或淬火而來。奧斯田鐵則是 γ 鐵固溶碳素形成一個固溶體而成。

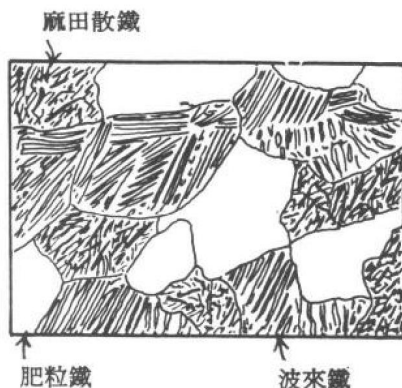


圖 3 麻田散鐵之圖解表示麻田散鐵出現於 0.4% C 碳鋼經 723°C 淬火處理。肥粒鐵在此溫度不受影響。



圖 4 0.4% C 碳鋼全硬化（放大直徑 50 倍）材料之結晶構造是麻田散鐵，其硬度是 600 Brinell。

如果我們將上述程序倒過來，可以得到一些知識，爲了這個們我們將爐溫先昇超過 790°C 以確定即使再高過此溫度也不會有何不同。

這一個適當的溫度是 840°C ，在此爐溫取出一試片淬火，我們可以得到和 790°C 淬火所得相同硬度及組織。

然後第2個試片在 790°C 淬火，可得硬度爲 Brinell 595/600，組織也全是麻田散鐵。 745°C 及 735°C 淬火的試片所得結果也和第一、第二一樣。

事實上要一直到 720°C 淬火所得結果才有所變化。這個變化是硬度降至 Brinell 585。由顯微組織可以解釋這個道理；因爲在 720°C 淬火的試片有肥粒鐵出現在麻田散鐵的組織裏。在 735°C 及 720°C 之間， γ 鐵從奧斯田鐵析出，當淬火時它沒有變成麻田散鐵而變成 α 鐵。

兩個試片在 690°C 及 575°C 取出淬火，使此程序連續下去。此時肥粒鐵在麻田散鐵的組織中形成島狀。此時肥粒鐵可使硬度分別降至 Brinell 470 及 Brinell 420。

下一個試片是在 660°C 取出淬火，此時硬度更低，這是因爲這時候已經有數量可觀的波來鐵出現了。

這時又有三種成份出現：一肥粒鐵、波來鐵及麻田散鐵。在這一連串的過程中隨着麻田散鐵的減少，肥粒鐵逐漸增加，最後甚至有波來鐵的出現，此時硬度只有 Brinell 260。

另一個試片在 650°C 淬火，它的硬度只有 Brinell 187 它的組織全部無麻田散鐵。這時肥粒鐵及波來鐵以它原來的比例再度出現。

淬火溫度若再度降低的話，則不會再有任何變化發生。

由以上的事實我們須注意到，在各種不同淬火溫度中，爐子是逐漸在冷卻。從高溫到低溫緩慢冷卻過程鋼的特性只在一個很窄的溫度範圍內產生變化：— $730-650^{\circ}\text{C}$ 在稍低於 650°C 則所有會發生的組織變化早就變化完成。而且這種改變發生在緩慢冷卻的鋼中只是逐漸恢復它原來的組織而已。因此這種成份的鋼當在 650°C 以下冷卻，不管空冷、水冷或油冷，它都是軟的。

低碳鋼熱處理的改變

一個類似的實驗程序將用在低碳鋼上，它的成份是：C 0.15%，Mn 0.38%，Si 0.20%，它的顯微組織如圖 5 所示。

在無熱處理的軟的情況下它的硬度是 Brinell 180，它的結晶構造是波來鐵及肥粒鐵。和含 0.4% C 的中碳鋼比較起來，波來鐵的比例佔的比較少，因為波來鐵含有較多之碳量，而我們考慮的低碳鋼其含碳量才為前述中碳鋼之 $\frac{1}{3}$ 而已。

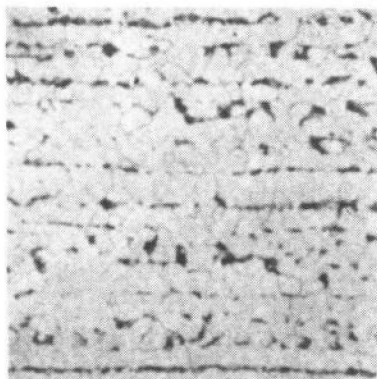


圖 5 0.15% C 低碳鋼，剛軋過後硬度為 Brinell 180，肥粒鐵及波來鐵之結晶有向壓軋方向伸長之趨勢。

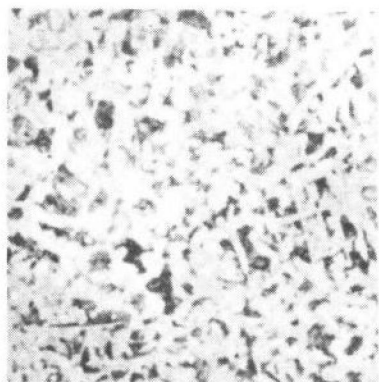


圖 6 0.28% C 碳鋼軋過之材料。它之硬度是 Brinell 185，結晶組織介於 0.15% C 及 0.4% C 碳鋼之間。

此類鋼材加熱至某一溫度然後淬於水中，然後觀察其組織之變化。首先觀察到的變化是在 723°C 淬火的試片，它的硬度可提高到 Brinell 210。組織的改變也和前述中碳鋼相同，部份波來鐵變成麻田散鐵，其他則為未變化的波來鐵及肥粒鐵。

當淬火溫度逐漸升高時，組織及硬度的改變也和前述相同，麻田散鐵的比例隨着波來鐵之減少而增加，一直到淬火溫度為 740°C 時，可以得到麻田散鐵及肥粒鐵的組織但沒有波來鐵，硬度為 Brinell 275。

當溫度再度升高時，就有一點和前面不太一樣。在 0.4% C 中碳

鋼；當淬火溫度為 790°C 時就全部變成麻田散鐵，但是低碳鋼則在此溫度仍有一部份肥粒鐵未變態，既使在 830°C 淬火也未能使肥粒鐵完全消失，雖然此時硬度已達 Brinell 360。一直到 860°C 淬火的時候，整個組織才完全變為麻田散鐵，此時硬度約為 Brinell 425。

我們必須注意這麼高的硬度一定要淬火的低碳鋼試片很小時才能達到，當試片太大時則冷卻速率會受影響。這在後面我們將更詳細討論。

如果比較這兩種材料的熱處理，我們可以發現低碳鋼和中碳鋼變硬的溫度相同。但是中碳鋼約在 790°C 可以得到最高硬度，而低碳鋼則需要 860°C 才可得到。兩者之間組織之改變和淬火溫度的關係大致相同，雖然中碳鋼之最大硬度比低碳鋼高。

含0.28%碳鋼之熱處理

為了進一步瞭解上兩種材料相異及相同的地方，我們再選用一種材料做上述之實驗，此材料之碳含量介於上述兩種材料之間。

我們採用之材料成份是：C 0.28%，Mn 0.6%，Si 0.2% 它剛經軋過之組織如圖 6 所示。

在未經熱處理時此種材料之硬度為 Brinell 185。它組織當中波來鐵所佔比例也介於前述兩種鋼料之間，因為波來鐵對肥粒鐵之比例之增減是由碳含量之高低有關，碳含量高則比例高，反之則低。

首先觀察到組織有所改變的是在 723°C ，此時它的硬度增加至 Brinell 215，這是因為在此溫度已有一部份波來鐵變成麻田散鐵了。當溫度逐漸增高時，麻田散鐵隨着波來鐵之減少而增加。當溫度到達 740°C 時，硬度是 Brinell 444，組織幾乎全是麻田散鐵及肥粒鐵。當溫度到達 810°C 時就可以得到完全麻田散鐵之組織，硬度約達 Brinell 560。

含碳量對全硬化溫度之影響 (全部變成麻田散鐵之溫度)

我們可以將前面實驗中所看到有規則的變化，用圖形表示出來，

如圖 7 所示，橫軸是碳含量，縱軸是產生組織改變的溫度。碳含量從左到右增加，溫度從下到上增加，含 0.15% C 低碳鋼開始硬化的溫度及最後全硬化的溫度就可劃在圖上，其他兩種材料也是相同地劃在圖上。

在圖上線 AB 是水平表示各種鋼料其他成份相同而只考慮碳含量改變時，開始硬化的溫度是相同的。在上述三種鋼料中 Si 及 Mn 大致相同，而三種鋼料開始硬化之溫度為 723°C。

CD 線表示最低的全硬化溫度隨着碳含量而改變，碳含量愈高則全硬化溫度也就愈低。

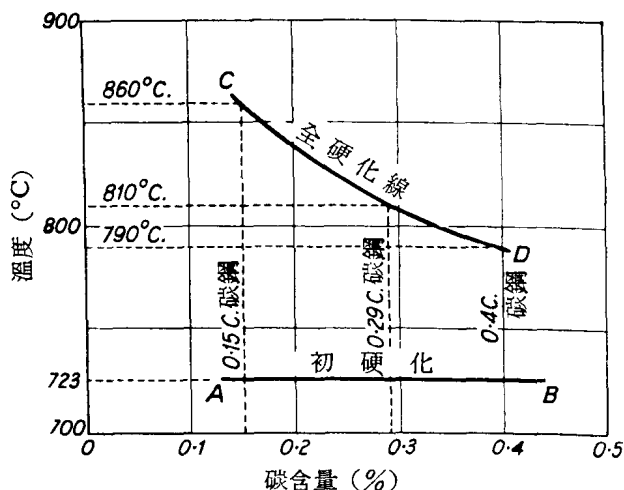


圖 7 鐵—碳平衡圖之基本型式。表示全硬化溫度隨碳含量而改變。

由劃圖 7 所需之實驗方法及圖 7 之製作方式我們可以做出鐵—碳平衡圖，如圖 8 所示。這個圖概括的範圍從純鐵經過碳鋼的區域一直到鑄鐵，其碳含量從 0 到 5 %。

共 析 鋼

一直到現在為止我們都沒有提到高碳鋼之組織。高碳鋼有點特殊

，其變化特性和中、低碳鋼不同。如果參考圖 7 我們可以發現全硬化曲線 CD 隨着碳含量之增加而降低。這條曲線事實上會降低到碰到 AB 線而後止。AB 線 (723°C) 是開始硬化的曲線，因此 AB 和 CD 之交點表示某一個碳含量之鋼材其開始硬化之溫度和全硬化之溫度相同。

我們現在參考圖 8 這是比較完整的鐵- 碳平衡圖，可以找出 0.85 % C 之鋼料其全硬化溫度是 723°C ，用 E 點來表示，這表示 0.85 % C 之鋼材在 723°C 會有如下之組織變化：

(a) α 鐵變成 γ 鐵 (b) γ 鐵固溶波來鐵中之碳化物而形成奧斯田鐵。

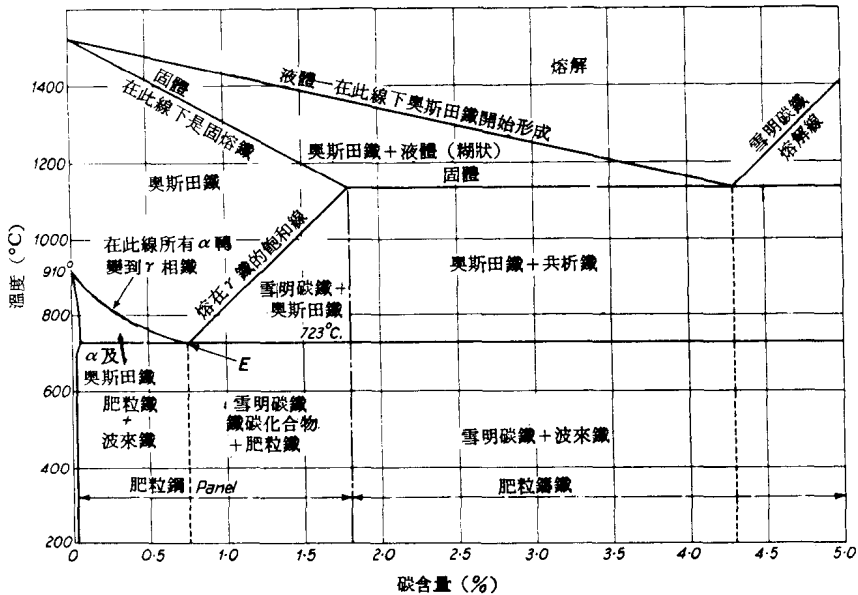


圖 8 鐵- 碳平衡圖

這個 0.85% C 之鋼材在 723°C 很快就變成奧斯田鐵，因為事實上在軟的狀態它只有一種組織——波來鐵。我們必須記住波來鐵是第一個發生變化的組織。因此如果只有波來鐵則相變態只需在一個溫度下產生。

碳含量之當量：在一般商業性的製造條件下，我們不可能產生沒有 S 及 P 之雜質而只加 Mn 及 Si 之鋼料。雜質及所加之 Mn 及 Si 對鋼料之影響是增加“碳當量”。說得清楚一點我們可以造出一種鋼含碳量約在 0.75%，而且含有適量之 Mn 及 Si，另外還有少量之 P 及 S（各約 0.05%）此種鋼的組織就可完全是波來鐵。

另外，在鋼中，純鐵在高溫需要約 0.9% 的碳使 γ 鐵飽和，並含一部份碳化物 (Fe_3C)，這飽和之奧斯田鐵當冷卻下來時變成波來鐵，形成含 0.9% C 的鋼其組織在軟化狀態完全是波來鐵。相同的組織可由 0.75% C 再加雜質 (P & S) 及添加物 (Mn & Si) 而得到。結果是這些雜質及添加物增加碳含量形成波來鐵的能力。這可解釋為何一般鐵碳平衡圖上 E 點之位置在 0.8~0.9% C 有所改變而非固定。這一點叫共析點，而此點鋼之組成叫共析。因為這一個特殊成份的完全固溶溫度比其他碳含量之鋼要低。

過共析鋼——某些鋼材其含碳量超過了需要形成共析組織的碳含量或全波來鐵組織之碳含量。這些鋼材的特性，也可以用前面之實驗方法測知。將許多試片置入爐中加熱，在某一溫度取出淬火，測定其硬度，觀察其顯微組織，我們取 1.1% C 之鋼料剛軋過的狀態，此時材料之硬度為 Brinell 220，而且大部份是波來鐵。不過還是有一點區別的，除了條狀的波來鐵外，另外在晶粒有白色的點及在晶界上有白色的網狀物，這些可由圖 9 看出來。這是鐵的碳化物——雪明碳鐵 (Fe_3C)，當緩慢冷卻時它無法保留在奧斯田鐵之固溶體內，故沒有變成波來鐵。這是因為它的碳含量已起過需要形成全波來鐵所需之碳含量。這過量之碳在此變成單立的組織——雪明碳鐵。這種鋼叫過共析鋼。

當溫度改變時我們可以發現這種 1.1% C 的高碳鋼有很多重要的變化，首先在 670°C 取出一試片淬於水中，它以後的意外變化為：——此時硬度約 Brinell 200，而原來成夾板狀的波來鐵，變成了球狀，