

鋼的熱處理

李 國 華 校
涂 銘 旌 編

龍 門 聯 合 書 局 出 版

鋼的熱處理

李國華校

涂銘旌編

江苏工业学院图书馆
藏书章

龍門聯合書局出版

前 言

I. 本書取材於下列各書

1. Werkstattbücher. 機械製造法叢書 Heft 7-8 Härten u. Vergüten 淬火與調質 Brennhärten 火焰淬火。
2. Holler: Autogenschweißen 氣鐸學。
3. Rapatz: Edelstahl. 精鍊鋼。
4. Scheer: Was ist Stahl 什麼是鋼。
5. V.D.I. 德國工程師學會雜誌。
6. Werkstatt u. Betrieb 德國機械製造雜誌。
7. Paul. Schimpke: Technologie der Maschinenbaustoffe. 金工工藝學。
8. Werkstoffhandbuch, Stahl u. Eisen. 材料手冊, 鋼鐵之部。

II. 本書可作中等技術人員和工科學生參考之用。

III. 本書着重鋼的熱處理的一般原理, 以及淬火工場設備與作業的闡述, 使讀者對鋼的熱處理有一基本的概念。

IV. 本書表面淬火一章, 除滲碳硬化法, 氮化法外, 對各種新式表面淬火法; 高頻率電流淬火法, 火焰淬火法, 浸液淬火法等特作重點介紹。

V. 本書初稿已由同濟大學工學院熱處理教授李國華先生校閱。但最近本書內容增補頗多, 故於排版時, 再請李先生校改一過。

目 錄

第一章 金相學概念

第一節	合金的形成及其冷凝過程	1
第二節	鐵碳合金的冷凝情狀圖	6

第二章 熱處理

第一節	鋼的煨燒	11
	1. 煨燒對鋼料組織的影響	11
	2. 煨燒的種類	11
	3. 正確的煨燒	12
	4. 煨燒時所發生的錯誤	13
第二節	鋼的淬火和調質	15
	1. 淬火和調質	15
	2. 淬火回火對鋼料機械性質的影響	16
	3. 淬火回火對純碳素鋼組織的影響	21
第三節	表面淬火	31
	1. 工件表面化學成分改變的表面淬火法	32
	I. 滲碳硬化法	32
	II. 氮化使硬化	37
	2. 工件表面化學成分不變的表面淬火法	39
	I. 火焰淬火法	39
	II. 高頻率電流淬火法	49

	III. 浸液淬火法	54
第四節	其他使鋼料變硬的方法	56
	1. 冷加工硬化	56
	2. 時效硬化	58

第三章 合金鋼

第一節	鋼的合金	60
	1. 概論	60
	2. 合金元素對奧斯田體等溫變態的影響	62
	3. 合金元素對鋼冷卻變態時的影響	63
	4. 依合金元素的分類	65
	5. 依結晶組織的合金鋼的分類	65
第二節	各種合金鋼的性質及其用途	66
	1. 碳素鋼	66
	2. 錳鋼	67
	3. 鎳鋼	68
	4. 鉻鋼	69
	5. 鎳鉻鋼	71
	6. 鉻錳鋼	72
	7. 矽鋼	73
	8. 鈷鋼	74
	9. 鎢鋼	74
	10. 鉬鋼	75
	11. 鈮鋼	76
	12. 不銹鋼, 耐酸鋼, 耐熱鋼	76
	13. 高速鋼	80
	14. 高速切削用硬質合金	81

第四章 淬火工場設備與作業

第一節	淬火工場設備	83
	1. 加熱設備	83
	2. 測量高溫設備	91
	3. 冷卻設備	95
第二節	淬火作業	99
	1. 各種鋼料的熱處理	99
	2. 淬火錯誤的發生及其防止的方法	105
	3. 如何防止淬火時工件表面的氧化和脫碳	108

第四章 淬火工場設備與作業

第一節 淬火工場設備	83
1. 加熱設備	83
2. 測量高溫設備	91
3. 冷卻設備	95
第二節 淬火作業	99
1. 各種鋼料的熱處理	99
2. 淬火錯誤的發生及其防止的方法	105
3. 如何防止淬火時工件表面的氧化和脫碳	108

第一章 金相學概念

第一節 合金的生成和冷凝過程

1. 金屬的結晶組織 所有的金屬材料,大體都和一般固體一樣,由結晶體構成。固體非結晶性的,非常的稀少(例如玻璃和琥珀)。構成金屬組織的結晶,是小而圓的顆粒,它們之間沒有規定的接觸面(或稱晶界)。當熔化了的金屬冷凝時,結晶體便開始滋長,完成結晶核,儘量的向外伸張,直到碰到鄰近的結晶,互相阻止繼續滋長為止。這樣形成了接觸面的無定規和偶然性。圖 1. 表示一純鐵的單獨結晶顆粒。形狀的變動性很大,只要加外來作用到一定的限度(加熱和機械力),就能夠將它改變。其尺寸 a 大致在 $1/100$ 和 $1/5$ mm 之間。圖 2. 雛形的說明三個結晶顆粒,接觸面的情形;小圓表示核心(結晶核)冷凝時從這點起,結晶體向每一個方向滋長。



圖 1. 結晶顆粒。

2. 結晶體之構造 現在我們應該知道,結晶的情形,在外表看來,很不規則。但實際上它的內部結構,却井井有條;原子或原子羣有規則的排列在結晶格子中。第三圖表示一小段立方形的結晶格子,

原子(用球形表示的)猶如排列在一個小立方體的四角上,這個立體稱為格子單位晶格。單位晶格一個個的連結起來,它的邊長很小很小

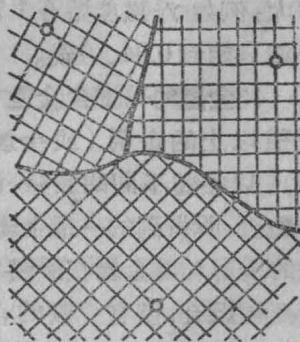


圖 2. 結晶顆粒想像圖。

(如圖示),只有百萬萬分之三到四個 mm.。因此我們可以這樣說;結晶格子各方面都可以當做沒有限制看待,但事實上它到結晶接觸面便受到了限制,自然而然的停止了。

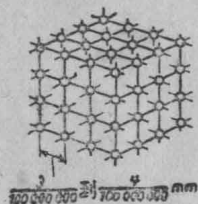


圖 3.

在一個相同的結晶內,結晶格子單位的位置到處都是相同而平行。但是各個不同的結晶,則由於它們之間,結晶格子位置的不同性而有所區別,例如第二圖中用細線網表示出來的情形一樣。

3. 純鐵的結晶格子 純鐵有兩種不同的結晶格子(圖 4),但它們的基本形狀都是正方形。其中一個格子是體心立方體,除了在立方體的四角以外,在它的重心還有一個原子。另外一個格子,是面心立方體,在每一個立方體平面的中心也都有一個原子。面心體結晶格中的原子相互之間的距離比體心體的窄一些。由於純鐵的結晶格子不同,我們稱體心體的純鐵叫 α -鐵。稱面心體的純鐵,叫 γ -鐵。同時如上面所說的,原子排列有緊密的的不同,於是我們可以知道 γ -鐵的密度比 α -鐵大。另外就他們的物理性質來說, α -鐵有磁性, γ -鐵沒有磁性, γ -鐵對各種元素的熔合性比 α -鐵為大,例如 γ -鐵能熔合 1.7% 碳而 α -鐵只能到 0.04% 碳。

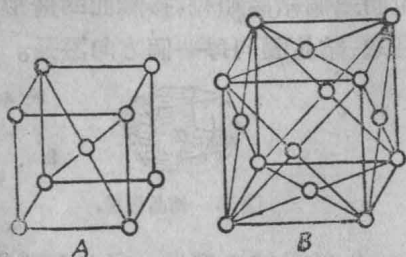


圖 4. 純鐵的立體結晶格子。

A. 體心立方體(α -鐵)

B. 面心立方體(γ -鐵)

4. 金屬的可成合金性 合金是兩種以上的金屬(或金屬和非金屬),以各種不同的成分,混合熔成液體後,所得到的一種金屬。大多數的金屬和非金屬在液體狀態時都能互相熔合,僅有少數的合金當其中某一種成分的含量超過一定的百分比的時候,便不能互相熔合了。例如;鉛錫、鉛銅、鉛鋁、鐵錫、鉛鎳、和鉛錳等合金即是。惟有在液體狀態時能完全互相熔合的金屬,才能製成有用的合金。

5. 冷凝曲線 當合金冷凝的時候,我們可以量得它的溫度下降的

速度。若以橫座標表示時間，縱座標表示溫度，即可繪出金屬的冷凝曲線。此種曲線的形狀，起初較陡，然後漸平；如果是純金屬，則曲線在凝固點處有水平的一小段（在合金中也有此情形），因為金屬的溫度下降至此點時，已全部凝固，雖然在冷卻過程中並不加熱，但此時金屬內部的結晶熱全部放出，因此金屬能在此時保持溫度不變，至一段時間。例如圖5中的合金冷凝曲線，在溫度 t_1 前較陡，降至 t_1 後較平，到溫度 t_2 時有一停止點，自此點開始有一小段的水



圖5.

由此可知；溫度 t_1 至 t_2 之間的範圍內是結晶產生的過程，溫度高於 t_1 時，合金全為液體狀態，低於 t_2 時，合金全為固體狀態，在 t_1 與 t_2 之時間，有固體（結晶體），也有液體存在。

6. 冷凝情況圖 某一合金，若變更它的合金成分間各種不同的重量比（例如在鉛錫合金中，每次變更10%的含錫量），則得各種不同的冷凝曲線，每一冷凝曲線有它的曲折點和停止點。若以縱軸表溫度，橫軸表合金成分的重量比，將各種成分的冷凝曲線上的曲折點和停止點填入圖中，然後分別連接起來，便得此種合金的冷凝情況圖。

因為合金成分間的互相熔合性不同，這種情況圖也有數種，下面我們將把跟以後應用有關的幾種，拿來個別的進行討論。

第一種冷凝情況；兩種金屬在固體時也如在液體時一樣的能完全互相熔合者。

圖6是銅鎳合金的冷凝情況圖。從圖左的鎳銅各種成分的冷凝曲線中可以看出；純金屬（曲線1和3）只有一個停止點，但是銅鎳合金（60% Cu + 40% Ni）却有一凝固區域，如果我們將所有冷凝曲線的停止點填入左邊的坐標中，即可繪成 ACB 和 ADB 線，得出銅鎳合金的冷凝情況圖。所有的合金，當溫度在 ACB 線以上時全部為熔液， ACB 線稱為液限線。當溫度下降到 ACB 線以下時，合金溶液（或母液）中析出混熔結晶體。溫度下降到 ADB 線以下時合金完全變為固體。 ADB 線稱為凝限線或稱凝固線。在此線以下所得到的混熔

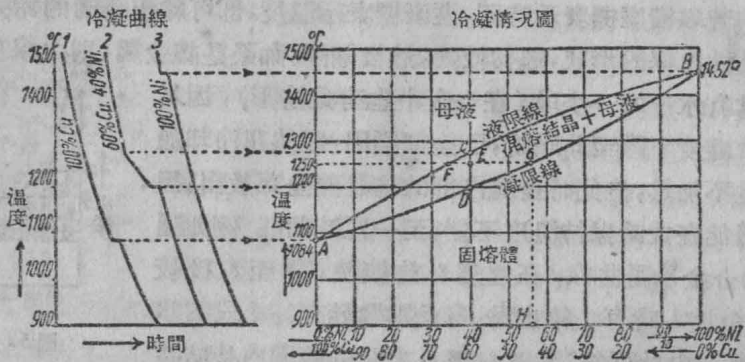


圖 6.

結晶體稱為固熔體*。

從上面的冷凝情況圖中，可以讀出；所有銅鎳合金成分的關係。

例如成分為 60% Cu 40% Ni 的銅鎳合金，在溫度為 1275°C (C 點) 時，還是液體，但冷卻繼續進行時，便從液體中析出混熔結晶體，溫度下降愈大，析出的結晶也愈來愈多，到溫度為 1200°C (D 點) 時，所有的都變成了固熔體。在冷凝過程中，每一溫度析出的混熔結晶和液體(母體)的重量比不同，其比值可從冷凝情況圖中讀出。例如上述成分的合金，冷卻到 E 點時，我們作 EF 和 EG 線，於是得出重量比值 $\frac{\text{混熔結晶}}{\text{熔液(母液)}} = \frac{EF}{EG}$ 。這時析出的混熔結晶的成分，可由 G 點往下劃得的 H 點讀出為 57% Ni 和 43% Cu (這表示在 1250°C 溫度時，所能完全凝固的固熔體成分)。溫度再往下降，混熔結晶中從熔液(母液)奪取更多的銅，亦即結晶含銅的成分增加，直到停止點 D 時，它的成分才變為 40% Ni + 60% Cu。

* 固熔體——將酒精加入水中，溶質(酒精)的分子或原子便散佈在溶劑(水)中，溶解成為均勻的溶液。同樣的，在固體狀態時，碳原子(溶質)固體熔解在純鐵(溶劑)中，便產生我們所說的固熔體。

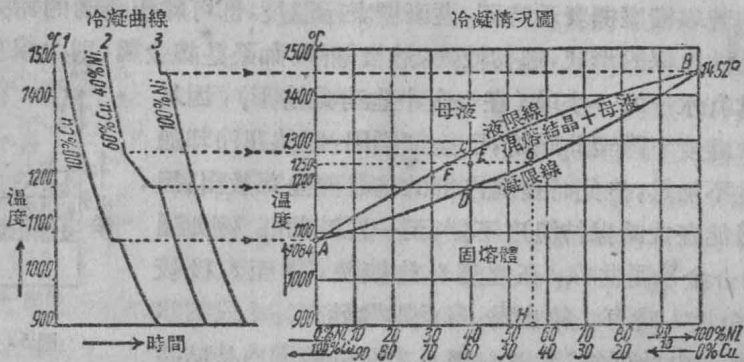


圖 6.

結晶體稱為固熔體*。

從上面的冷凝情況圖中，可以讀出；所有銅鎳合金成分的關係。

例如成分為 60% Cu 40% Ni 的銅鎳合金，在溫度為 1275°C (C 點) 時，還是液體，但冷卻繼續進行時，便從液體中析出混熔結晶體，溫度下降愈大，析出的結晶也愈來愈多，到溫度為 1200°C (D 點) 時，所有的都變成了固熔體。在冷凝過程中，每一溫度析出的混熔結晶和液體(母體)的重量比不同，其比值可從冷凝情況圖中讀出。例如上述成分的合金，冷卻到 E 點時，我們作 EF 和 EG 線，於是得出重量比值 $\frac{\text{混熔結晶}}{\text{熔液(母液)}} = \frac{EF}{EG}$ 。這時析出的混熔結晶的成分，可由 G 點往下劃得的 H 點讀出為 57% Ni 和 43% Cu (這表示在 1250°C 溫度時，所能完全凝固的固熔體成分)。溫度再往下下降，混熔結晶中從熔液(母液)奪取更多的銅，亦即結晶含銅的成分增加，直到停止點 D 時，它的成分才變為 40% Ni + 60% Cu。

* 固熔體——將酒精加入水中，溶質(酒精)的分子或原子便散佈在溶劑(水)中，溶解成為均勻的溶液。同樣的，在固體狀態時，碳原子(溶質)固體熔解在純鐵(溶劑)中，便產生我們所說的固熔體。

圖中在熔限線以上的區域 I 內完全為溶液，純鉛在 327°C 凝結為純鉛結晶。純銻在 631°C 凝為純銻結晶。共晶合金在 245°C 立即凝為很細密的鉛銻結晶。例如成分為 $90\% \text{Pb} + 10\% \text{Sb}$ 的合金（曲線 2），溫度下降至熔限線時（約 260°C ）即開始凝固，從溶液中析出純鉛結晶，因此在區域 II 中又有液體又有純鉛結晶，結晶數目隨冷却進行而增加，最後到剩餘的溶液（母液）中的鉛銻含量達到共晶點的成分時便全部同時凝固，因此在區域 IV，純鉛結晶置於共晶合金中。

成分為 $60\% \text{Pb} + 40\% \text{Sb}$ （曲線 4）的合金，在 435°C （F 點）開始從熔液中析出純銻結晶，因此區域 III 中有純銻結晶也有液體，等到溫度降至凝限線時，剩餘的溶液變為共晶合金的成分，便完全凝固，這樣在區域 V 內，純銻結晶置於共晶合金中。在共晶點左邊的合金稱為亞共晶合金，右邊的稱為過共晶合金。

當上述的合金冷却到 350° （G 點）時，劃直線 HGJ ，便得出重量比值 $\frac{\text{析出結晶}}{\text{母液}} = \frac{GH}{GJ}$ 。析出結晶的成分為 $100\% \text{Sb}$ （J 點）。此時溶液的成分（從 H 點向下看到 K 點）為 $28\% \text{Sb} + 72\% \text{Pb}$ 。溫度繼續下降，溶液便沿熔限線下降到 D 點，變為共晶點的成分，完全凝固。

第二節 鐵碳合金的冷凝情狀圖

1. 純鐵 純鐵的熔點為 1528°C ，從冷凝曲線上的停止點中可以看出，它在固態時還有多種結晶變化。溶液剛凝固以後，所得到的鐵稱為 δ -鐵。在 1401° 時 δ -鐵變為 γ -鐵（在圖 8 中的 Ar_4 ），在 998°C 時有第二個停止點 Ar_3 ，這時 γ -鐵變為 β -鐵。在第三個停止點 Ar_2 （ 769° ）時， β -鐵轉變成 α -鐵，開始磁化。自此以後， α -鐵直到完全冷却也保持不變。事實上 α -鐵並不是真正的純鐵，其中總多少有一些碳素固體熔解和其他的雜質。它在金相學中，被稱為肥粒體。將完全冷却了的純鐵加熱，則這四個停止點必相反的次第出現，不過由 β -鐵變為 α -鐵的停止點 Ac_3 是 906°C （圖 8）， Ac_2 和 Ar_2 相同。 Ac_1 和 Ar_1 在純鐵

圖中在熔限線以上的區域 I 內完全為溶液，純鉛在 327°C 凝結為純鉛結晶。純銻在 631°C 凝為純銻結晶。共晶合金在 245°C 立即凝為很細密的鉛銻結晶。例如成分為 $90\% \text{Pb} + 10\% \text{Sb}$ 的合金（曲線 2），溫度下降至熔限線時（約 260°C ）即開始凝固，從溶液中析出純鉛結晶，因此在區域 II 中又有液體又有純鉛結晶，結晶數目隨冷却進行而增加，最後到剩餘的溶液（母液）中的鉛銻含量達到共晶點的成分時便全部同時凝固，因此在區域 IV，純鉛結晶置於共晶合金中。

成分為 $60\% \text{Pb} + 40\% \text{Sb}$ （曲線 4）的合金，在 435°C （F 點）開始從熔液中析出純銻結晶，因此區域 III 中有純銻結晶也有液體，等到溫度降至凝限線時，剩餘的溶液變為共晶合金的成分，便完全凝固，這樣在區域 V 內，純銻結晶置於共晶合金中。在共晶點左邊的合金稱為亞共晶合金，右邊的稱為過共晶合金。

當上述的合金冷却到 350° （G 點）時，劃直線 HGJ ，便得出重量比值 $\frac{\text{析出結晶}}{\text{母液}} = \frac{GH}{GJ}$ 。析出結晶的成分為 $100\% \text{Sb}$ （J 點）。此時溶液的成分（從 H 點向下看到 K 點）為 $28\% \text{Sb} + 72\% \text{Pb}$ 。溫度繼續下降，溶液便沿熔限線下降到 D 點，變為共晶點的成分，完全凝固。

第二節 鐵碳合金的冷凝情狀圖

1. 純鐵 純鐵的熔點為 1528°C ，從冷凝曲線上的停止點中可以看出，它在固態時還有多種結晶變化。溶液剛凝固以後，所得到的鐵稱為 δ -鐵。在 1401° 時 δ -鐵變為 γ -鐵（在圖 8 中的 Ar_4 ），在 998°C 時有第二個停止點 Ar_3 ，這時 γ -鐵變為 β -鐵。在第三個停止點 Ar_2 （ 769° ）時， β -鐵轉變成 α -鐵，開始磁化。自此以後， α -鐵直到完全冷却也保持不變。事實上 α -鐵並不是真正的純鐵，其中總多少有一些碳素固體熔解和其他的雜質。它在金相學中，被稱為肥粒體。將完全冷却了的純鐵加熱，則這四個停止點必相反的次第出現，不過由 β -鐵變為 α -鐵的停止點 Ac_3 是 906°C （圖 8）， Ac_2 和 Ar_2 相同。 Ac_1 和 Ar_1 在純鐵

前面已經說過，鐵碳合金中的碳並不是獨立存在，而是與鐵化合成碳化鐵 Fe_3C ，因此我們可以當它做鐵和碳化鐵的合金，橫軸座標再註上碳化鐵的百分數。含碳到 0.36% 鐵的凝固過程*，本來並不如情況圖中的簡單，但因這個過程在應用上沒有多大意義，因而 AC 和 AE 線開端的地方 (A 點附近) 精簡了。

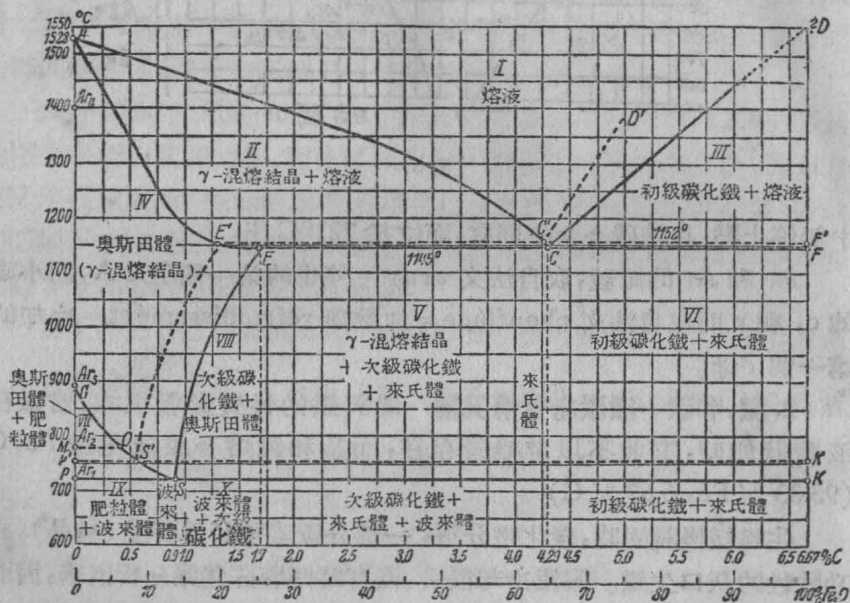


圖 9.

ACD 線為熔限線，在此線以上的區域 I 內，全部為溶液， AEF 線為凝限線，在此線以下全部凝為固體。含 0% C 的純鐵在 1528°C 突然凝固，此後它的幾個停止點在圖中次第出現。在區域 II 和 III 內溶液中析出固態結晶；在 AC 線下部析出的並不是純粹的 α -鐵結晶，而是 α -鐵和碳化鐵的混熔結晶，這種固熔體在金相學上稱之為奧斯田

* δ -鐵變 γ -鐵的過程。 δ -鐵的性能和 α -鐵同，可以說在高溫時存在的 α -鐵。不同處祇有 δ -鐵不能磁化。

體。在 CD 線下部析出純碳化鐵結晶因直接從熔液中析出的，所以稱為初級碳化鐵。上述的冷凝過程，區域 II 可用銅鎳合金的冷凝情況圖，區域 III 可用鉛錫合金相圖中的區域 III 互相比較說明。當含碳量增加時，熔限線下降，直到最低點 C 得 4.29% C 的共晶點，繼而再上升。在共晶點時熔液突然凝固成為 1.7% C 的混熔結晶和碳化鐵的混合物，在金相學上稱為來氏體。在 C 點的左邊的合金稱為亞共晶合金，在 C 點的右邊者稱為過共晶合金。在區域 V 內 γ -混熔結晶置於共晶合金中。鐵的含碳量愈靠近 C 點時， γ -混熔結晶也就愈來愈少，到 C 點時完全消滅無存，而全為共晶的來氏體。越過 C 點在區域 VI 內為初級碳化鐵結晶置於來氏體中。 EF 線為共晶線。

凝限線 AE 表示含 0—1.7% C 鐵碳合金的凝固溫度，從 1528°C 降至 1145°C (E 點)，自此以後，凝限線才為一水平直線 EF ，因此 γ -混熔結晶最多只能熔合 1.7% 的碳，便達到飽和狀態了。含 1.7% C 的鐵碳合金凝固後，完全是 γ -混熔結晶，含碳大於 1.7% 時便有來氏體出現了。

在前面我們所討論的 Cu-Ni 和 Pb-Sb 合金，當他們的溫度冷卻到凝限線以後，便完全凝固再不會變化了。但是鐵碳合金却不然，當它在固體狀態時，其結晶組織還要發生變態的行為。相圖中 GOS ， SE 線與 AC ， CD 線有相類似的意義；在 GOS 線以下，從奧斯田體中析出肥拉體結晶 (α -鐵)，在 SE 線以下，從奧斯田體中析出碳化鐵結晶，為了不是從熔液裏直接析出來的，與初級碳化鐵相區別稱它為次級碳化鐵。因此在區域 VII 內有奧斯田體和肥拉體。區域 VIII 內有奧斯田體和次級碳化鐵。 S 點又與 C 點相仿，因此稱為共析點。也即是說在此點 (721°C) 時固熔體便立即變態為含 0.9% C 的波來體——肥粒體和碳化鐵的混合物，互相夾隔。這種組織呈似珠貝的光彩。 PSK 線稱為共析線， S 點左邊的合金，稱為亞共析鋼。區域 IX 內有肥粒體也有波來體。含碳量愈與 S 點靠近時，組織中的肥粒體結晶愈少，到 S 點完全消滅無存而為波來體。在 S 點右邊也稱為過共析鋼(到

1.7% C 爲止)。區域 X 內次級碳化鐵置於波來體中。在凝限線 EC 以下的區域 V 內也有 γ -混熔結晶存在，這種結晶剛一過 EC 線時即沿 ES 線在奧斯田體的晶界上，析出網狀的次級碳化鐵，溫度冷到共析線 SK 以下時變爲波來體和網狀碳化鐵。但是區域 VI 內的鐵碳合金到 SK 線下並不變態。

在冷凝情況圖中， G 點相當於停止點 Ar_3 ， O 點爲停止點 Ar_2 。 P 點爲停止點 Ar_1 ，沿 GO 線 γ -鐵變態爲不可磁化的 α 鐵 (β 鐵)，沿 OS 線 γ -鐵變態爲 α -鐵。

前面所討論的冷却過程，都假定其冷却速度很小，使在每一溫度上結晶都保持平衡。若冷却快，則愈多小結晶核，來不及生成結晶，因此合金組織也愈纖細，而另成一系統。若冷却慢，則碳化鐵可分解石墨(碳)和鐵。正常的冷却情形則無石墨產生，而只有碳化鐵。碳化鐵煨後亦可分解成石墨和鐵，所以鐵和碳化鐵爲較不穩定，而鐵和石墨(碳)則爲穩定者。這種穩定的鐵石墨冷凝情況圖如圖 9 虛線所示。石墨的析出——含矽量高，和經過 $E'C'F'$ 線時冷却速度較低，都能幫助石墨的析出——一部由於溶液凝固時，在 $C'D'$ 線下析出片狀的初級石墨(含矽量高時 $C'A$ 線下也可有石墨析出)，另一部則在 $E'O'$ 線下凝固後因結晶的變化而析出者。含碳量 4.25% (O' 點)則有一石墨共晶合金。

註：各種金相組織顯微鏡圖，參閱本書末頁。