

精密科技

精密機械用材料

FUNCTIONAL MATERIALS & DEVICES
for ENGINEERING USE

賴耿陽譯著

著者 —

東京大学助教授 工学博士

石 橋 顯 吉

東京大学講師 工学博士

河 東 田 隆

東京大学教 授 工学博士

菅 野 卓 雄

東京大学教 授 工学博士

舟 久 保 隆 康

日立金属株式会社 工学博士

山 川 和 郎

東京大学助教授 工学博士

岡 部 洋

東京大学助教授 工学博士

河 野 敏 哉

東京大学助教授 工学博士

多 田 邦 雄

東京大学助教授 工学博士

柳 田 博 明

復漢出版社印行

精密科技

精密機械用材料

FUNCTIONAL MATERIALS & DEVICES
for ENGINEERING USE

賴耿陽譯著

著者 —

東京大学助教授 工学博士

石 博 顯 吉

東京大学講師 工学博士

河 東 田 隆

東京大学教授 工学博士

菅 野 卓 雄

東京大学教授 工学博士

舟 久 保 熙 康

日立金属株式会社 工学博士

山 川 和 郎

東京大学助教授 工学博士

岡 部 洋 一

東京大学助教授 工学博士

河 野 照 哉

東京大学助教授 工学博士

多 田 邦 雄

東京大学助教授 工学博士

柳 田 博 明

復漢出版社印行

中華民國七十一年二月一日出版

精密機械用材料

原著者：

代著者：舟久保熙康

譯著者：賴

耿陽

出版者：復漢出版

社

地址：台南市德光街六五一號

郵政劃撥三一五九一號

發行人：沈

岳林

印刷者：國發印刷廠

打字者：克林照相植字排版打字行

版權所有
翻印必究

平裝 二角
精裝 二角四分

本社業經行政院新聞局核准登記局版台業字第〇四〇二號

序

今後的高精密、小形、多機能、高可靠性機械的設計只有靠材料革命才能實現。不只是選別現有的材料，而是要設計可實現必要機能的材料、人工製造。實例之一是LSI等電子電路用的半導體材料、離子選擇性合成高分子材料等滿足必要機能的新機能性材料的設計、製造。

一般的機械技術者是因為有鐵、塑膠，才加利用，若迫問為什麼要用鐵？可能提不出明確的理由。另一方面，今天已能設計可發揮目標機能的材料，兩者的意識差距更大。

將材料作成機械時，單靠材料的潛在機能還不夠，須兼慮成形、加工、接合、裝配、應力、溫度、外氣等改變材料潛在機能的各種要因等。

在此狀況下，機械技術者須瞭解鐵為什麼強？鋁為什麼弱？如何增強？站在實際材料的機械、電、磁性機能的立場，究明為何會發生這些機能？材料分野對機械技術者是一片“材料原始森林”，不易有系統瞭解，單純的鐵材料、非鐵材料、非金屬材料分類，無法解除混淆。

本書居於利用者欲知的材料機能分類觀點，編輯素來的材料研究。但材料的潛在機能及使用條件的多變顯在機能多種多樣，實無法以一單行本面面顧到。

不只敘述機械性強度材料，精密機械材料已普遍使用電、磁、光等軟體機能材料，範圍之廣，不容機械技術者只瞭解金屬材料。何況，以材料機能為主體的新材料設計、開發也天天進步中，合成高分子材料、生物材料已是實用的普通材料。今天的機械不只利用材料達成必要機能，新的材料性機能也反過來改變素來的機械設計，不再是附屬的學問，難怪有心人一再呼籲重視材料科學，實大勢所趨。

精密機械用材料 / 目次

第一章 剛・彈・塑性機能用材料…………… 1

- 1-1 剛性…………… 1
- 1-2 彈性…………… 2
 - 1-2-1 彈性的種類…………… 2
 - 1-2-2 擬彈性的原因…………… 3
- 1-3 剛性機能材料…………… 6
 - 1-3-1 鑄鐵…………… 7
 - 1-3-2 鑄鐵的衰減能…………… 18
- 1-4 彈性機能材料…………… 28
 - 1-4-1 彈簧…………… 28
 - 1-4-2 實現彈簧性(彈性機能)的方法…………… 29
 - 1-4-3 一方向凝固材料…………… 57
 - 1-4-4 金屬間化合物…………… 59
 - 1-4-5 碳纖維…………… 60
- 1-5 耐疲勞機能用材料…………… 60
- 1-6 塑性機能材料…………… 61
 - 1-6-1 加工硬化…………… 61
 - 1-6-2 潛變…………… 72
 - 1-6-3 雙晶變形…………… 75
 - 1-6-4 組織異方性…………… 75

第二章 電子機能材料…………… 78

- 2-1 半導體裝置用材料…………… 78
 - 2-1-1 半導體裝置用材料…………… 78
 - 2-1-2 半導體的性質…………… 80
 - 2-1-3 電子裝置與半導體材料…………… 84
 - 2-1-4 結語…………… 110
- 2-2 光電子工學用材料…………… 111
 - 2-2-1 序論…………… 111
 - 2-2-2 發光材料…………… 113
 - 2-2-3 光調變偏向材料…………… 116
 - 2-2-4 光周波數變換材料…………… 122
 - 2-2-5 光傳送材料…………… 124
 - 2-2-6 光記憶材料…………… 125
 - 2-2-7 光檢出材料…………… 126
- 2-3 磁記憶材料…………… 128
 - 2-3-1 磁記憶…………… 128
 - 2-3-2 磁性材料的物性…………… 128
 - 2-3-3 磁泡記憶…………… 130

2-3-4 磁心記憶.....131	料.....133
2-3-5 磁帶、磁碟、 磁鼓.....133	2-4 接點材料.....135
2-3-6 記憶用磁性材	2-4-1 基礎.....135
	2-4-2 接點材料各論143
第三章 磁性機能材料.....146	
3-1 用為機能材料的磁 性材料.....146	3-4-3 磁異方性.....153
3-2 磁性材料的物理量146	3-4-4 磁應變.....154
3-2-1 磁化強度.....146	3-4-5 非可逆磁壁移 動.....155
3-2-2 磁化曲線、磁 滯曲線及減磁 曲線.....147	3-5 有各種變換機能的 磁性材料.....155
3-2-3 各種磁特性值148	3-5-1 將電能變換為 其他電能者...156
3-3 製造法與特性.....148	3-5-2 將電能變換為 機械能者.....159
3-3-1 合金組成與特 性.....148	3-5-3 將機械能變換 為電能者.....164
3-3-2 鑄造及加工...150	3-5-4 將機械能變換 為其他機械能 者.....165
3-3-3 熱處理.....151	
3-4 磁性體的磁化機構151	
3-4-1 磁區.....152	
3-4-2 磁區的觀察...153	
第四章 機能性陶瓷材料.....166	
4-1 陶瓷材料的特色...166	性與機能的特 色.....169
4-1-1 單結晶的賦形 性與機能.....166	4-2 用為機能材料的陶 瓷.....171
4-1-2 玻璃相生成式 賦形法與機能 上的特色.....168	4-2-1 絕緣性.....171
4-1-3 燒結體的賦形	4-2-2 電介質性.....172
	4-2-3 強電介質與光

學陶瓷.....174	4-2-8 陶瓷磁性體...182
4-2-4 陶瓷壓電體...175	4-2-9 耐熱、硬質、 高強度材料...184
4-2-5 焦電性陶瓷...176	4-2-10 絕熱、多孔質 材料.....187
4-2-6 半導體陶瓷...177	
4-2-7 離子導電性陶 瓷.....179	

第五章 機能性有機・高分子材料188

5-1 有機、高分子材料188	材料的加工性216
5-1-1 高分子材料的 發展.....188	5-4-4 碳纖維.....218
5-1-2 高分子材料的 特色.....190	5-5 轉換體.....220
5-1-3 高分子材料的 種類.....193	5-5-1 electret...220
5-2 高分子絕緣材料...195	5-5-2 壓電性高分子223
5-2-1 高分子物質的 電性質.....195	5-5-3 焦電性與非線 形光學效果...225
5-2-2 絕緣材料要求 的其他物性...198	5-5-4 溫度偵知器...226
5-3 彈性材料.....199	5-5-5 光—電變換元 件.....227
5-3-1 橡膠彈性.....199	5-6 情報記錄材料.....227
5-3-2 彈性材料要求 的其他物性...202	5-6-1 記憶用材料...228
5-3-3 新彈性材料...204	5-6-2 印刷用感光材 料.....233
5-4 耐熱性高分子材料206	5-6-3 複印用感光材 料.....234
5-4-1 耐熱性與化學 構造.....206	5-6-4 表示用材料...235
5-4-2 各種耐熱性高 分子材料...208	5-7 光學材料.....241
5-4-3 耐熱性高分子	5-7-1 光學纖維.....241
	5-7-2 雷射用色素...243
	5-8 膜材料.....246
	5-8-1 半透膜.....246
	5-8-2 離子交換膜...253

第1章 剛・彈・塑性機能用材料

1.1 剛 性

吾人製造，使用機械時必要的剛性是指承受荷重時，位移為0，或應力變動時應變為0，因而一般所謂的構造用材料是指剛性材料。

機械設計通常在圖面上要求剛性，使用中的零件尺寸精度為±數 μm 以內，表面平坦度也常要求±數以內 μm 以內，現場須選擇材料，檢討加工法，實現所定要求。

製造機械時，常提到剛性，不過，實際的材料中，不可能完全剛性，實體機械的剛性不易實現，須設法達成接近的狀態，滿足設計者的要求。

不幸的是吾人長期使用碳鋼製造機械，碳鋼的特異處是有彈性限度、降伏點。一般的材料多少會因荷重而發生永久應變。但一般誤認碳鋼在彈性限度前為彈性變形，不發生永久應變。一般認為金屬材料在耐力以內的小應力範圍即使承受反覆應力，也幾可不計永久應變。但實際上，對0.2%耐力的殘留應變，循環100次後的殘留應變有時達0.6~2%，波來鐵基地的球狀石墨鑄鐵為此5倍，經Al為10倍，Ni-Cr鋼更大。少許耐力程度的應力反覆100次，就有此等尺寸變化，但目前的機械技術者大都疏忽此項事實。

對構造用材料的剛性有不良影響的現象之一為潛變(creep)，在高溫要求剛性的鐵鋼材料承受一方向的靜性荷重時，即使是彈性限度以下的應力，也會發生永久應變。鐵鋼材料反覆承受彈性限度以下的應力 $10^5 \sim 10^6$ 次而突然破壞的疲勞現象也是目前積極追究原因的分野。腐蝕現象也是降低剛性的大原因。

以上列示有損剛性的若干主要因素，但剛性減損不只是產生永久應變或破熱，有時，材料有彈性應變存在也成問題，此時，在實用的材料不可能實現剛性。

構造用零件材料要求剛性，不只常溫，也要求高、低溫剛性，主要採用鐵鋼材料，高張力鋼、強韌鋼、超強力鋼等為構造用材料的主力，一部份用強韌化非鐵合金。

鐵鋼、非鐵合金材料的強韌化只是改善彈性，而不是剛性。因而，謀求剛性的方法之一是將傳統材料強韌化，其次是以新法強韌化，最後是如鑄鐵材料之類吸收來自外部的變動應力。

1.2 彈 性

彈性是外力施加於材料後，外力消失時，產生的變形為0，亦即不殘留永久變形，因而，負荷時的應力—應變曲線與解除負荷時的應力—應變曲線未必要一致，但一般誤認彈性是應力、應變曲線為直線，負荷—解除負荷都在同一直線上。

吾人常用的碳鋼在一般的環境條件下，大致為無遲滯性(hysteresis)的直線變化。但高溫時，不純物少的高純度純鐵、結晶粒度粗大時，上述的直線關係就不成立。鋁、銅、鑄鐵、不銹鋼等在通常的使用條件下，直線關係也不成立。

在一般使用的工業用材料，應變並不正比於應力。

1.2.1 彈性的種類

材料受應力而產生應變的內部要因有結晶格子的彈性移動、轉位的運動、雙晶的形成、固體摩擦、原子的運動、磁伸縮(magnetostriction)等多個因子，依它們發生應力的環境條件，同時或單獨作用。

彈性應變如圖 1-1 (a)所示，解除材料產生的應力時，殘留應變為0，應力—應變的迴線為閉合式，但彈性應變可依迴線的形狀分類如下：

- (1) 是否正比於應力。
- (2) 是否伴有遲滯性。
- (3) 瞬間發生或伴有遲滯現象

表 1-1 示於分類，線形關係如(a)所示，無遲滯，而且瞬間成立，可說是完全彈性，(b)也無遲滯，而且瞬間成立，但不成線形關係，在實際材料中，並無此舉動。

此外的應變即使是彈性應變，但不是完全彈性，應變不在瞬間成立

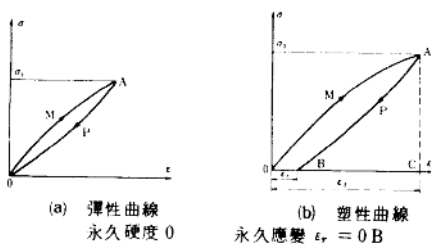


圖 1.1 彈、塑性曲線模式圖

，無遲滯現象，故為非線形彈性，這有(c)所示不遲滯的場合與(d)所示產生滯的場合。(d)是即使解除負荷，殘留應變也不立即成 0，隨時間而消滅，稱為粘彈性。

吾人一般使用的材料屬於(c)及(d)，總括稱為擬彈性。

亦即，吾人使用的材料不可能為完全彈性的材料，最多只是擬彈性。

(c)的原因在轉位的瞬間且復原性移動、內部摩擦，磁伸縮、雙晶等。
(d)是伴有轉位遲滯的復原性移動等。

圖 1-1(b)的永久變形相當於圖 1-1(e)(f)，(e)是轉位的瞬間且不復原的大距離移動等。(f)是轉位的大距離移動與其衍生新的轉位或轉位上升運動等所致，此圖的遲延現象稱為粘塑性。

1.2.2 擬彈性的原因

(a)固體摩擦 材料中常散存性質、性能大異的粒子，在與基地的界面發生應力的變動，呈現伴有遲滯的彈性舉動，稱為固體摩擦。

此材料的具體例為鑄鐵，其 rheology model (流變學模型) 如圖 1-2 所示，表示界面固體摩擦的摩擦板與表示基地(matrix)線形彈性變化的彈簧平行而設，此 Maxwell Type 模型最能表現實際的結果。

調查其拉伸試驗的應力—應變關係，先從平衡狀態施加拉伸應力，達 s 應力值前，摩擦板不開始滑動，超此以上時產生滑動，正比於應力的增加而發生應變，即使解除拉伸應力，在應力值降到摩擦板開始逆向

表 1.1 變形樣式的分類

				時間的影響	主要機構	
彈 性 變 形	比例的變形			0	原子與多少轉位的瞬間可逆運動。轉位的大部分靜止。	
	不成比例的變形	無遲滯的變形		0	實際不存在。	
		有遲滯的變形	瞬間的變形		0	轉位的瞬間可逆運動（往路與復路不同）。界面摩擦，磁氣效果，雙晶。
			有時間遲滯的變形		顯著	轉位有時間遲延的復原運動。
		塑性變形	瞬間的變形		0	固着而不復原，轉位的瞬間大移動。
	有時間遲滯變形			顯著而大	轉位的大移動，固着，也伴有增殖或上升運動	

滑動之前，亦即應力減少 $2s$ 之前，全體的應變量保持一定，圖 1-3 示此狀態，應力再減少的話，隨彈簧的收縮，應變成直線減少，在應力回到 0 的點，殘留圖中 OA 所示的永久伸度，若再增加應力，先在相當於



圖1.2 Maxwell Rheology model
(彈簧與摩擦板平行配置)

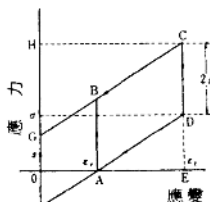


圖1.3 圖1.1的拉伸曲線

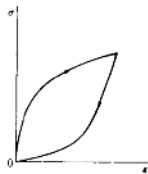


圖1.4 實際的拉伸曲線

2s 的 AB 垂直線上移動，其次為 BC, CD, DA。

在實際的材料中，有上示模型舉動的部份很多，s 值各異，BC 的斜度不同，而且它們串聯或並聯，實際的曲線不成圖 1-3，而是圖 1-4 的形狀。

此種固體摩擦源自純機構性現象，並非熱活性過程，因而不能除去熱處理之類溫度變化所發生的殘留應變。此固體摩擦現象也與應力的變化速度無關。

(b)轉位的移動 欲保持一定的應力作用時，原子或轉位急速移動相對於其應力的一定值，停留於其新位置，有時這些移動為連續增大的過程。

但此應力消失時，產生的應變為可逆性復原，或途中的經路雖不同，却仍復原，或永久不復原。可逆性復原時，應變的狀態只取決於應力，相當於表 1-1(a)(b)。中途不同，最終復原時為彈性變形，往返的曲線不對稱，吸收(c)的遲滯性所示的能量，有時為伴有時間遲滯的復原現象(d)。

如轉位永久移動其位置的話，試料產生巨觀的殘留應變。這通常是移動的轉位固著於各種結晶格子上不均質（析出物，粒界，其他轉位）部份所致的障礙，不進行復原運動所致。形成(e)的完全塑性或(f)的粘塑性曲線。這可從外部加熱等供給能量，解脫原子或轉位的圍着，可回復

原狀態。

應變增大是發生新轉位或轉位上升所致，例如發生於潛變現象之類保持相當高的一定應力時。

原子或轉位的移動會受應力的變動速度——亦即時間的影響。

(c)變形雙晶 在稠密（最密）六方晶或立方晶組成的結晶構造，承受應力時，形成雙晶而變形，雙晶領域的原子以雙晶面為界，與不變形領域的原子成對稱位置。

雙晶變形為時間上的迅速現象，無時間的影響，但變形時頗需能量，其應力應變循環曲線與表 1-1 (c)所示者相同。

例如 $\text{Mg}-0.6\% \text{Zr}$ 鑄造合金在金屬中有最高的衰減能，可匹敵塑膠材，而且輕量，當成太空船用材料，用為忌諱振動的計測器類安裝部、引擎安裝部用材料等，這是利用反覆應力形成可逆雙晶而吸收大能量。

轉位在以上的剛性及彈性有很高的重要性，金屬材料由以一定格子間隔配列的三次元原子數作構造組成。此理想構造不見於實際材料的生成過程，亦即內部一定有構造缺陷。此構造缺陷會使結晶格子網發生應變，增高內部應力（材料強度），並隨外部環境的變化而增加，更增強效果，容易形成結晶構造的永久變形，可行塑性加工，亦即有結晶構造，其中有構造缺陷，這是金屬材料的強化與塑性加工乍見似乎相反的兩種現象。

1.3 剛性機能材料

機械性剛性機能可用剛性材料實現，諸如工作母材的機床、精密測定機的機床及其他機械的構造零件材。工作母機的機床要求不同被切削物的切削阻力等而撓曲——亦即要求剛性。

承受變動應力的工作母機機床的剛性須藉材料本身的機能保持，不利用任何附屬裝置。

工作母機常用米漢納鑄鐵、FC25 等鑄鐵、SS41 之類熔接性良好的構造用鋼等。為達成剛性機能，鑄鐵與鋼利用完全不同的性質。

機械用材料要求的基本條件為成形性，縱然可滿足剛性或彈性機能，若成形性不良，也成不了機械，鑄鐵長久用為工作母機用構造材料的

首要理由在容易鑄造成形。最近由熔接用強力鋼取代的原因也在熔接技術進步，容易成形。

用為剛性機能材料的片狀石墨鑄鐵。

片狀石墨鑄鐵——亦即灰口鑄鐵為最一般性的鑄鐵材料、鑄造性良好、容易作業、價格低。

1.3.1 鑄鐵

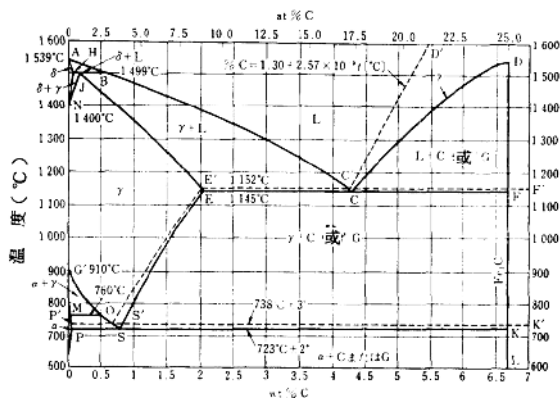
沃斯田鐵最大碳固溶量 2.0wt % 以上的 Fe-C 合金稱為鑄鐵，以下者為碳鋼，C 量（碳含量）少者稱為純鐵。鐵或鋼常被稱為 Fe-C 合金，因鐵或鋼很多不同的性質取決於 Fe 結晶中共存的 C 之狀態。

碳與鐵的合金狀態複雜、微妙。在碳含量少的碳鋼，碳的影響較微妙，碳原子與 Fe 原子的相關。碳原子與轉位的相互作用產生很多機能，或影響所得機能的可靠性。鑄鐵領域的碳狀態取決於其金屬組織狀態變化的效果。實際上，鑄鐵各種性質中，含碳與轉位的相關性等不大成問題。

圖 1-5 為 Fe-C 系狀態圖，各相的組織示於圖中，結晶構造示於圖內表中，L 表示熔液， γ 為固相的沃斯田鐵， α 為固相的肥粒鐵，鐵的沃斯田鐵可固溶的最大碳固溶量為 2.0wt %。在常溫，大部份碳成為雪明碳鐵 (Fe_3C) (圖中 C) 或 (及) 石墨 (G) 存在，固溶於基地 α 相中的 C 量極少，約 10ppm 以下。因而，常溫使用的鑄鐵組織為基地 α 相或 (及) α 相與雪明碳鐵的共析組織組成的波來鐵與雪明碳鐵或 (及) 石墨共存的組織。C 量相同的熔液注入模中製成機械零件時，也因液一固的凝固速度、凝固後從高溫固體狀態冷卻到常溫期間共析變態的冷卻速度快慢而有不同的常溫組織。

鋼的基地 α 相與波來鐵組織與鑄鐵相同，異於鑄鐵之處在缺少石墨。石墨的形狀、分佈、量等因溫度變化而千變萬化，這是鑄鐵的機能及機能變動的最大原因。介入微視性 α 相鐵之體心立方構造中的過飽和游離狀態碳之不安定存在狀態對鋼的機械性性質或其變動有重大影響。鑄鐵中雪明碳鐵、石墨的碳及固溶碳之總和稱為全碳量 (total carbon)。

(a) 流動性 C、Si 都會增大流動性，Mn、P 也改善流動性，S 却



各相的結晶構造及居裡點如下示。

相	結晶形	格子常數(Å)	居裡點(°C)
α (肥粒鐵)	體心立方	$a = 2.86$ (200°) $a = 2.90$ (300°)	768 —
γ (沃斯田鐵)	面心立方	$a = 3.64$ (900°) $a = 3.67$ (1300°)	—
δ	體心立方	$a = 2.93$ (1435°)	—
石墨	六方體	$a = 2.46$ $c = 6.78$	—
Fe ₃ C (雪明碳鐵)	斜方晶	$a = 4.5144$ $b = 5.0787$ $c = 6.7297$	215

碳對肥粒鐵的固溶量如下示。

400°	500	600	700	720	750	800	850
0.002%	0.004	0.010	0.016	0.020	0.016	0.012	0.006

沃斯田鐵的格子常數隨碳的固溶量如下變化。

$$a(20^\circ\text{C}) = 3.548 + 0.045 \times (\text{C}\%)$$

碳對沃斯田鐵的最大固溶量用顯微鏡及熱膨脹測定時為 1.7 %
，用滲碳平衡實驗及熱力學測定為 2.0 %。

圖 1.5 Fe-C 合金狀態圖

降低流動性，C, Si, Mn, P, S 稱為鑄鐵五元素。

(b)組織 鑄鐵凝固後的組織不只取決於其化學組織，也受凝固過程冷卻條件影響。其組織的構成要素為石墨、雪明碳鐵及基地（沃斯田鐵）。剛凝固後的鑄鐵標準組織依凝固時，亦即液一固的冷卻速度快慢順序而成為

I) 雪明碳鐵+基地〔白口鑄鐵〕

II) 石墨+雪明碳鐵+基地〔班鑄鐵〕

III) 石墨+基地〔灰口鑄鐵〕

這是液一固的高溫組織，在吾人使用的常溫組織，更隨固一固的冷卻，基地的沃斯田鐵組織依通過共析變態點時的冷卻速度而有各種變化，亦即沃斯田鐵變成波來鐵，冷卻速度愈慢時，波來鐵愈肥粒鐵化，常溫的基地組織依速度的快慢順序而出現。

I) 波來鐵 II) 波來鐵+肥粒鐵 III) 肥粒鐵

此時，波來鐵中的雪明碳鐵及上述剛凝固後的組織中雪明碳鐵也分解成為肥粒鐵與石墨——亦即石墨化。這些石墨在基地中擴散，析出於既存石墨的周緣，量的影響不大，普通冷卻產生的常溫基地大都指以上三種。

鑄鐵中的雪明碳鐵有液相晶出的初晶雪明碳鐵與固相析出的波來鐵雪明碳鐵2種，前者，游離於組織中，破斷面白硬，有害切削性。後者是肥粒鐵與雪明碳鐵薄層交替成為層狀，使鑄鐵硬而強。因夾有軟質肥粒體，所以不脆，耐摩耗，層狀波來鐵與鋼同樣，因球狀化現象而使其雪明碳鐵球狀化，改善韌性，不損耐摩耗性。

鑄鐵含大量促進石墨化的Si，游離雪明碳鐵與波來鐵雪明碳鐵對溫度不安定，因熱而產生石墨化現象，這在400℃以上開始，隨溫度而增快，波來鐵雪明碳鐵是600℃：游離雪明碳鐵是900℃以上時急速進行。波來鐵雪明碳鐵主要析出於相近的既存石墨上，游離雪明碳鐵一度消失後，其附近析出新的塊狀石墨，無論如何，雪明碳鐵石墨化的話，鑄鐵異常膨脹，影響製品尺寸。雪明碳鐵消失會增大伸度、硬度、強度大降，所以，供鑄鐵用時，要十分注意其熱履歴。

圖1-6為凝固時產生的粒滴斑鐵（ledebarite）組織，板式棒狀雪明碳鐵中散存沃斯田鐵（常溫變為波來鐵）非常硬，通常發生於急冷

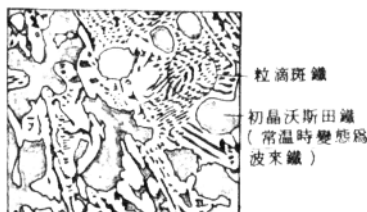


圖1.6 粒滴斑鐵（沃斯田鐵 - 波來鐵共晶）組織
白色部分：雪明碳鐵 黑色部分：波來鐵

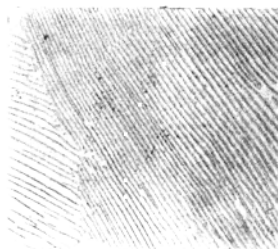
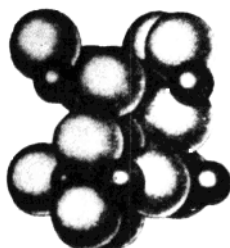


圖1.7 鑄鐵的波來鐵 1500 倍 $\times$ 2 (carbon replica, germanium shadow, 50 kV 電腦照片)



Fe_3C 的構造（單位格子由，12 個鐵原子和 4 個碳原子的直方晶系構造組成）

圖1.8

的部份。

圖1-7為波來鐵（肥粒鐵—雪明碳鐵）組織，肥粒鐵、雪明碳鐵交替或層狀析出，只肥粒鐵較強韌而有耐摩耗性，所以要求強度的鑄鐵基地要成為波來鐵。

圖1-8為雪明碳鐵（ Fe_3C ）的結晶模型，其單位格子有鐵原子12個與碳原子4個組成的直方晶系構造，非常硬且脆。

波來鐵的層狀析出方向在全體為隨意型，但若使雪明碳鐵配列於一方向，其機械性強度有顯著的異方性。例如波來鐵+石墨試片中的雪明碳鐵配列於軸方向的拉伸試片是抗拉強度 $70 \text{ kg} / \text{mm}^2$ ，全應變量 7.5 %，