

合金熱處理之理 論與運用原則

工業學院圖書館
藏書章

松 壽 編著

大東書局出版

合金熱處理之理論與運用原則內容提要

(一)對錯綜複雜的熱處理理論,本書作一全面性的、系統性的基本介紹,使讀者獲得一個基礎,可進而鑽研各種深奧的專著。(二)根據這些基本理論得出一些熱處理的基本運用原則,使讀者在實際的技術操作上有一些理論的準繩。(三)本書對鋼鐵之熱處理與非鐵合金之熱處理聯系起來討論,使熟悉鋼鐵熱處理之技術人員能運用其技術到非鐵合金上。(四)全書用深入淺出的敘述,以便稍有物理及化學基礎的讀者亦能閱讀參考。本書是以技術幹部及工科學生為主要對象。

合金熱處理之理論與運用原則 書號 5139

編著者	金松壽
校閱者	王樹良
出版者	大東書局 上海福州路 310 號
印刷者	導文印刷所 上海威海衛路 357 弄

32 開 39 印刷頁 47,000 字 定價 3,500 元
一九五四年五月初版

(0001—2000)

上海市書刊發行業營業許可證出 043 號
上海市書刊發行業營業許可證發 061 號

前 言

1. 熱處理是一門既重要又深奧的技術。開始學習的終感覺它錯綜複雜，難於捉摸；實際工作的技術幹部又感到理論繁多，難於貫通。本書則用綜合的方法討論熱處理之理論與運用原則；對熱處理作一有系統的全面性的巡禮，指出它的各種門徑及鑽研方法，以供技術幹部及工科學生之參考。

2. 因為本書只是系統性的理論與基本原則之討論，它並不描述各項細節之精細技術與較深理論，所以本書不能代替各種熱處理之專著，拿來應用。相反地，它只能充作鑽研及閱讀各種專著的基礎知識與橋樑，使讀者有了一全面性的基本理論後，更能領悟各種專著之內容及掌握其技術。

3. 因為熱處理的基本理論，對鋼及非鐵合金，大致是相同的。因此，本書除討論鋼之熱處理外，亦討論非鐵合金之熱處理，以便從事鋼鐵熱處理工作者亦能推廣他的技術到非鐵合金部門；同時，亦可供從事非鐵合金工作者之參考。

作者雖有如上的願望，但因限於個人學識之淺陋，內容遺誤之處，自所難免，尚祈專家予以指正為幸。

金松壽於杭州浙大

目 錄

第一章 合金性質與組織的關係

- 1. 合金之組織..... 1
- 2. 組織與性質的關係..... 4
 - (甲)組織成份之分佈 (乙)組織成份之相對份量 (丙)晶粒之大小與形狀
- 3. 組織成份的性質與合金性質之關係.....10
 - (甲)純金屬 (乙)固溶體之性質 (丙)金屬間化合物

第二章 平衡組織與變化速率

- 1. 合金組織與平衡相圖之關係.....20
- 2. 金屬間的固體溶解度.....24
- 3. 界面能與穩定結構.....29
- 4. 變化速率.....30

第三章 熱處理對合金組織及性質之改變

- 1. 種類與目的.....32
- 2. 熱處理時可能發生的結構變化.....34
 - (甲)元素份量之改變 (乙)組織成份之改變 (丙)無秩序——有秩序間的變化 (丁)異晶構造的變化 (戊)晶粒的變化 (己)體積之改變、內張力、變形與破裂

第四章 熱處理條件之選擇原則

- 1. 熱處理之選擇.....52
 - (甲)熱處理目的之考慮 (乙)合金成份之考慮 (丙)金屬製品的大小、外形之考慮
- 2. 熱處理條件之選擇.....59
 - (甲)加熱溫度 (乙)加熱之速度 (丙)加熱保持之時間 (丁)冷卻速度

附 錄

第一章 合金性質與組織的關係

1. 合金之組織

工程上常需要強度或硬度較純金屬更大之材料，並可藉熱處理而改變其組織與性質，以適應特別場所之應用。有時且欲使它結合數種特別之性能，故常需在某主要金屬中，配合加入適當份量之其他合金元素，使成為合金。合金的性質與組織有着密切的關係。我們若能明瞭這種關係，我們便可從合金的組織來判斷合金的性質；我們希望得到有某種性質的合金時，則可製造或處理某種合金，使它賦有所需要的組織。

二種(或二種以上)的合金成份在熔融狀態時，大多數均能互相溶合成完全均勻的液體溶液。但在凝固成固體合金時，則可能有二種情形：

(一)單相合金 即可能凝結成為一塊均勻的固體。此處所謂“均勻”，意即各成份的原子互相混合或化合得非常均勻，整塊的合金，全由一種單純的晶體構成，即使用顯微鏡亦不能觀察到整塊固體的任何部份間有何不同。這種組織稱為單相合金。單相合金可以是一種各成份原子互相混合均勻的固體溶液（亦稱固溶體）；亦可以是一種各成份原子互相化合而成的純粹的金屬

間化合物^①。單相合金的性質當然要看各成份元素是否形成固溶體或是形成金屬間化合物而定。初看起來，單相合金無所謂組織問題。實際上，單相合金雖為一種均勻的結晶固體，但並非為一塊巨大的晶體，而是由無數小晶粒疊接構成。因為當熔融金屬冷卻凝固時，即產生無數之金屬小晶體，此等晶體生長變大成為晶粒，等到與相隣晶粒碰接為止。故事實上，一塊金屬通常均為許多晶粒疊接而成，而每個晶粒並無機會發展生長其完全的結晶外形。金屬塊（無論是單相合金或純金屬）經酸類侵蝕後在顯微鏡下觀察，即有圖 1 所顯露之線紋。此等線紋即為晶粒與晶粒間之界面^②。晶粒界面處為結晶最後生長之地方，故為若干易蝕之雜質最後聚集之處所。單相合金既為無數晶粒所構成，晶粒之大小，界面之分佈，亦可說均是組織問題。金屬

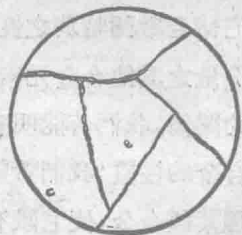


圖 1

之強度不僅決定於每個晶粒內部之強度，亦與晶粒界面間之結合力有着密切關係。通常金屬因疲勞、拉壓等產生之斷裂，均發生於晶粒內部；而因震動等產生之突然破裂，往往發生於晶粒界面。微量雜質（若能分佈於界面）常能影響金屬之強度，此亦為一個重要的原因。構成的晶粒愈小（數目愈多），所形成的晶粒界面當愈大，界面的分佈亦當愈均勻，有害雜質對界面間的結合力之影響亦要減低許多。晶粒愈小，因機械處理及熱處理而發生於界面間的一部份內應力，亦可較少而較均勻。此外，構成一塊金屬

① Intermetallic compound ② Crystal boundary

無數晶粒的內部，原子排列雖為井井有條，而有一定型式的結晶格子(圖2)；但晶粒與晶粒的疊接時結晶格子的方向往往並不一致(圖2)。晶粒愈小，數目愈多，對整塊金屬的均勻性往往可以增加一些。

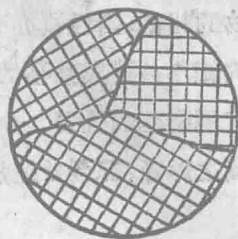


圖 2

(二)多相合金 合金的液體溶液凝固時，亦可以產生好幾種結晶固體。亦即凝固的合金固體內包含二種或二種以上之固體相態。它們或為二種純金屬晶粒之混合物；或為一種純金屬及一種固溶體結晶構成；或為一種純金屬及一種化合物所組成；或為一種固溶體及一種化合物構成的混合物。它們亦可由二種以上的純金屬固溶體及化合物等構成。這些都稱為多相合金。多相合金既為數種不同晶體的混合物，在多相合金內此等不同晶體之相對份量，分佈的情形，晶粒的大小與形狀稍有變化，合金的組織亦便不同。多相合金的組織，可以非常複雜，並常可用熱處理加以變化，而可使它獲得多樣的性質。所以在工程上應用之合金，很少為純粹之固溶體或金屬間化合物構成之單相合金而多選用多相合金。

合金大多數為混合物，我們要了解合金的性質，首先要解決混合物之性質決定於什麼？從各種混合物之研究(包括合金、木材、混凝土等)，現在可以確定這一點，混合物之性質主要決定於：

(1)構成混合物之各種固相物質的性質。若這些組織成份(要注意：組織成份與元素成份不同，組織成份可能是純金屬，或固溶體或化合物)是堅強的，由它們組成的合金，亦容易獲得堅強的

性質。若每一種組成成份的性質都很脆弱，則不能得到堅強的性質。但組成成份的性質並不能完全決定混合物之性質；(2)混合物的組織，對性質亦有決定性的影響，例如硬而脆的碳化鐵 Fe_3C 的細小晶體與強韌的純鐵^①的混合物，若有佳良的組織亦可賦有極堅強的性質。今將混合物的組織與成份的性質對混合物性質之影響，綜合分述於下面二節：

2. 組織與性質的關係

混合物的組織包含三個主要意義：(a)組織成份之分佈，即這些成份晶體在合金內是怎樣互相混合與分佈的；(b)組織成份的相對份量；(c)各成份晶體之大小及外形。合金的組織可說主要由這三因素所規定。實際上，這三因素是互相關連與相互影響的。例如，各成份的晶體若很細小，有時(並不一定)它們的分配就很均勻。

(甲)組織成份之分佈

藉金相學可以獲得每種合金組織之主要知識。按照分佈情形，合金之組織約略可分為二部份：(1)不連續部份(圖3之黑塊，圖4之白塊)，通常為合金凝固時最先結晶而出之各種固相成份(並非一定如此)；(2)連續部份(圖3之白塊及圖4之黑塊)。通常為最後結晶析出之易溶質(並非一定如此)。比較起來說，連續部份的組成對合金性質之影響更大。例如，用水泥黏結砂礫而成混凝土時，水泥常為連續部份(砂礫為不連續部份)，

① Ferrite

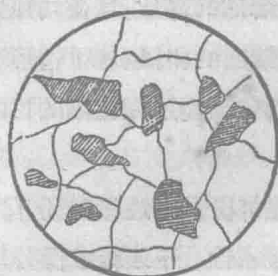


圖 3

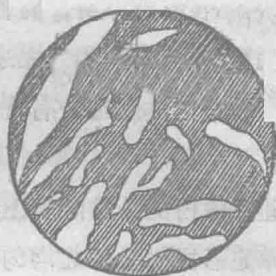


圖 4

水泥的性質對混凝土的強度常有決定性的影響。合金的組織與混凝土雖有不同，但連續部份的重要性對於二者倒頗相同。合金之若干機械性質如抗拉強度、延伸率及導電性等主要決定於連續部份之物質。例如鑄鐵（可認為是鐵炭合金）之強度主要決定於由 Fe_3C 與純鐵共凝構成之連續部份，而與不連續部份的石墨關係較少（並非沒有關係）。黃銅的強度主要決定於鋅在銅中的 α 固溶體及銅鋅的 β 化合物 CuZn 共凝析出之連續部份，而與不連續部份之 β -化合物 Cu-Zn 的關係較少。合金之硬度普通決定於最硬部份之硬度，或為連續部份，或為不連續部份。

在許多合金的實際情況中，有時亦很難分清那一成份為連續部份，那一種成份為不連續部份（圖 5），尤其是在那些含有片狀及塊狀外形的晶粒的合金組織中。有時在合金的某一區域中，甲成份為連續部份，而在另一小區域中，乙成份卻可視為連續部份；在這種情形下，甲乙二組織成份對合金性質之影響均屬同樣重要。無疑地，鑄鐵脆弱之主要原因是由於塊片狀石墨晶粒的交

疊連接，而使石墨本身的脆性賦於鑄鐵的緣故。球墨鑄鐵與韌性鑄鐵的製造，亦即針對這點來改變鑄鐵的組織。若干情形下之鋼及非鐵合金之熱處理，有時亦是為着改變這種組織的目的而進行的。

組織成份的分佈除與上述連續部份及不連續部份有關外，且須確定各成份分佈之均勻性與緻密性。不連續成份分散在連續成份中可以很均勻，有時亦可以並不均勻。分散的均勻性對於金屬樣品的均勻性當有相連關係。此亦常為熱處理目的之一。並且大多數情形，構成連續部份的易熔質（亦稱共凝質^①見第二章）常由二種（或二種以上）的成份組成。易熔質或由二種純金屬（如 Zn-Sn 合金），或由二種固溶體（如鎳鉻合金^②）二種化合物；或由一種純金屬與一種固溶體；或一種固溶體與一種化合物等等晶體在液體凝固時同時析出，並相間混合而成一比較均勻緻密之組織。此等組織的緻密性對於合金的強度起着很大的作用。若合金的連續部份是由一種強韌的細小晶粒與另一種堅硬的細小晶粒相間疊合而成的緻密組織，則往往可使此合金賦有很大

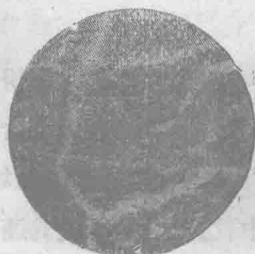


圖 5



圖 6

① eutectic mixture ② nichrome

的強度與硬度。例如鋼中的珠光體或稱波來體^①組織即是由極細小的純鐵片層與 Fe_3C 片層交錯疊合的緻密組織(圖 6), 因而性質非常堅強。鑄鐵的連續部份雖亦是 Fe_3C 與淨鐵晶體的混合物, 但 Fe_3C 的晶片要大得多, 與淨鐵的疊合交錯的緻密性亦不及波來體, 所以它的強度亦較差。熱作黃銅(含 Zn 38-44%) 為強韌之固溶體(即 α -成份) 與很硬的 CuZn (即 β 成份) 晶粒之混合物, 若用適當之熱處理(回火), 使晶粒不太大及混合分配均勻密緻, 則其抗拉強度(可至 50 公斤/公厘²) 要較僅由 α -固溶體所構成之 α -黃銅為大。

(乙) 組織成份之相對份量

組織成份的相對份量對於合金的性質當有很大的關係。例如, 對於標準狀態的鋼, 碳素在 0.89% 以下的是由純鐵與波來體構成。純鐵較波來體有較大的延伸率, 但抗拉強度與硬度卻不及後者。若鋼內的碳份愈多, 則波來體對純鐵的相對比例便要增加, 因而強度與硬度亦隨之增大, 同時延伸率卻隨之減少。因此同為亞共析鋼(即含碳 $< 0.89\%$), 其強度與硬度可以相差頗大。純鐵之抗拉強度約為 35 公斤/公厘², 波來體之抗拉強度約為 88 公斤/公厘², 若 F 是純鐵的百分率, P 是波來體的百分率, 則標準組織下之亞共析鋼之強度約略可由下式表示:

$$\text{抗張力} = \frac{35F + 88P}{100}$$

過共析鋼(含碳 $> 0.89\%$) 在標準狀態下由波來體與 Fe_3C 構成, Fe_3C 為極硬而脆的成份, 碳份增多即增加過共析鋼的硬度。

① pearlite

含碳份不太少的各種鋼，均可加以熱處理改變其組成，它可以含有若干份量的波來體及奧斯田體（碳在 γ -鐵中的固溶體），或若干份量的波來體及麻田體（碳在 α -鐵中的固溶體）。改變波來體與奧斯田體或麻田體等的相對份量，即可得到不同的強度與硬度等等。

有用之非鐵合金材料多數係由強韌之固溶體及堅硬的金屬間化合物構成。例如硬鋁^①由 Al-Cu 固溶體與 CuAl_2 構成；黃銅為 Cu-Zn 固溶體與銅鋅之 β 化合物構成；青銅為 Cu-Sn 固溶體與銅錫之 δ -化合物組成。欲得到很大的強度，化合物的份量不可太多，所以多數合金內成份元素配合的比例，均僅較最大溶解度稍大，使它們間除產生固溶體外，稍有若干化合物之形成。例如，鋅在銅中的最大溶解度為 37%，而熱作黃銅之含鋅量約為 38-44%，錫在銅中的最大溶解度為 14%（在較高溫度），常溫下之溶解度頗少，而通常青銅內之含錫量約為 10% 左右。

（丙）晶粒之大小與形狀

無論鋼的組織為波來體、奧斯田體或麻田體等等，晶粒愈細小，常有愈佳的強度與韌度，對於非鐵合金亦往往如此。黃銅在較低溫度（如 650°C ）回火有較小的晶粒組織，有較善之抗拉強度與硬度，延性亦為改善，而在較高溫度（如 800°C ）回火之黃銅則有較大晶粒，強度與硬度即較低落。我們來比較一下表一中所列示的鋼組織中的主要組織成份及性質，其中波來體、騷必體^②、托氏體^③，可說均由微細之純鐵與 Fe_3C 晶粒交錯構成，不過純

鐵與 Fe_3C 之晶粒以托氏體中為最纖細，騷必體次之；而在波來體中比較要大一些，所以硬度亦以托氏體為最大（硬而較為不脆），騷必體次之（比波來鐵硬，但比托氏體軟）波來體又次之。

晶粒的形狀對合金的性質亦有很大的影響。例如，呈條狀的波來體約具有 200 的布氏硬度，但顆粒狀的波來體之硬度卻只

表一

名 稱	布氏硬度(據 Felton)	組 織
純 鐵	100	
Fe_3C	800	
波 來 體(碳份0.89%)	200	微細的 Fe_3C 與純鐵之混合物
騷 必 體(碳份0.89%)	275	纖細的 Fe_3C 與純鐵之混合物
托 氏 體(碳份0.89%)	400	比騷必體的晶粒還要纖細
奧斯田體	550	碳在 $\gamma\text{-Fe}$ 中的固溶體
麻 田 體	800	碳在 $\alpha\text{-Fe}$ 中的固溶體

有 157。在粒狀波來體中的 Fe_3C 與純鐵均呈極細的粒狀結構均勻的分佈在一起，在過共析鋼內最初析出之 Fe_3C 常發達為針狀且交錯相連而成網狀組織（即連續部份），因此，使抗拉強度、降伏點及延伸率都趨低落。欲使此等過共析鋼所製造之工具賦有適當之強度與韌度而保持它的硬性，必須破壞此網狀組織的針形 Fe_3C 而使 Fe_3C 晶粒變成球形，即所謂球狀化。使堅硬的 Fe_3C 球狀化對於其他鋼料亦常需要，因為在加工時（即車銑、鉋時）工具容易切削，切削力亦可減小。在黃銅內常加少量的鉛（2%）亦因為鉛是完全不溶於銅的，常以孤離的球形狀態分佈於銅內，故能使黃銅易於切削。

由上面所述，可以明瞭合金可因組織成份分佈的狀態，相對

的份量、晶粒的大小與形狀，而變得非常複雜與不同，使合金顯示不同的性質。

3. 組織成份的性質與合金性質之關係

上一節僅談到一些組織與合金性質的關係。但合金之性質亦決定於組織成份的性質，我們常希望合金內含有，或藉熱處理使合金含有某些優良性質的成份，所以在下面即將簡單介紹一些基本成份的性質。構成合金組織的基本成份不外乎三類：(甲)純金屬；(乙)金屬之固溶體；(丙)化合物。

(甲)純金屬

純金屬的物理及機械性質，請參考各種專著，此處不擬加以介紹，僅着重指出二點：(一)金屬均為晶體結構。在金屬晶體架子內，原子並非固定不動。所謂原子在晶體架上的位置，僅為原子振動時的平衡位置。晶體若受拉力，使二原子間的距離大於平衡位置時，原子間的吸力，將大於斥力，產生一種恢復原狀的力，即平常所謂應力(在多種晶體結合的金屬塊中，應力的情形更為複雜)。若拉開不遠時，應力與應變成正比。晶體若受壓力，使二原子間的距離小於平衡位置時，斥力將大於吸力，產生一種恢復的應力，此種應力亦與應變成正比。在一定限度內，晶體有此種恢復原狀的應力，即足說明金屬之彈性。若晶體所受外力繼續增加，超過原子間的恢復力時，內部結晶面間即開始滑動而產生永久變形，再繼續增加外力，最後卒至斷裂。一定晶架的金屬有它一定的抗拉強度、硬度與延伸率。但當晶架因機械處理、熱處理，

或其他原因，發生歪曲或晶面間已稍發生過滑動，原子排列已稍變形（已非完全正規的排列），抵抗外力之能力往往增加，即晶架變形常可增加抗拉強度與硬度，而延展性韌性等往往相反地減小；（二）第二點要注意的是同一種純金屬有時可有數種晶架即數種不同的原子排列方法，即所謂同素異晶體。例如，純鐵在 906°C – $1,403^{\circ}\text{C}$ 之間為面心體構造，^① 稱為 $\gamma\text{-Fe}$ ；冷至 906°C 以下時，即變為體心構造，^② 稱為 $\alpha\text{-Fe}$ 。構造改變，性質亦隨着改變。例如， $\gamma\text{-Fe}$ 對碳的溶解度較大，而 $\alpha\text{-Fe}$ 則甚少。由此可知鋼的結構必因不同之熱處理而不同。迄今已知有七種金屬元素即鐵(Fe)、鈷(Co)、錳(Mn)、鉻(Cr)、錫(Sn)、銻(Ce)、鉍(Tl)、可以有數種異晶體。

(乙)固溶液之性質

固溶體（即固體溶液）為合金中最有用的成份，它有許多優良及特別之性質，對合金的關係最大，故在下面作較詳細的討論。

金屬固溶體有二種型式：即無次序固溶體^③與有次序固溶體^④。二種型式的固溶體性質顯有差異，不過二種型式有時常可互相轉換。無次序固溶體中，溶質的原子取代了一部份溶劑原子後，即在溶劑之晶體架上作無次序而任意的排列；在有次序固體溶液中，溶質原子則完全有規則有次序的排列在溶劑晶體架上。好像溶質原子本身間亦存有一種晶架，所以這種固溶體之晶架

① face-centred cubic ② body-centred cubic

③ disordered solid solution ④ ordered solid solution

亦稱為重疊晶架^①。因為溶質與溶劑原子間排列如此有規則，與金屬間化合物相像，所以它們之性質亦與金屬化合物接近。通常所指的固溶體大多係指無次序固溶體而言。當溶質原子遠比溶劑原子為小時，溶質原子即可充填在溶劑原子所疊積之間隙中。氫、碳、硼、氮等元素在金屬中之固體溶液常屬於此類。

抗拉強度與硬度：金屬固溶體中，一部份溶劑原子既被溶質原子所代替，而溶質原子之性質（如大小、價電子數等）與溶劑原子終有若干差別，故溶劑保有之晶架不免因溶質原子之影響而多少改形，故溶劑晶體之性質乃受影響而改變。正如在純金屬中所提示的情形一樣，晶格的變形使它對外力的抵抗力增高，故固溶體之抗拉強度與硬度均比純金屬為大（由表二可以看出）。此為一個重要有用的規則，很少例外。

表二 溶質對純鐵(α -Fe)機械性質之影響

合 金	抗 拉 強 度 (公斤/公厘 ²)	硬 度(布氏單位)	% 延 伸 率 (50公厘直徑樣品)
純 粹 鐵	25.4	67	48%
2.2%矽(Si)	47.5	164	38
4.7%矽	52.1	218	6
6.5%鎢(W)	41.5	145	37
10.1%鎢	43.5	149	36
3.95%鉬(Mo)	43.5	154	34
6.0%鉬	44.0	158	28
2.9%釩(V)	29.4	101	48
6.0%釩	32.2	132	10

Zn 或 Sn 在 Cu 中的固溶體，其強度與硬度均較純銅為大；Cu 在 Al 內之固溶體，其強度與硬度均較純鋁為大。鋼中的奧斯

① superlattice