

高等学校教学用书

合金热处理原理

A. A. 包赤瓦尔 著

高等教育出版社

高等学校教学用书



合金热处理原理

A. A. 包赤瓦尔著
謝希文 唐棣生譯

高等教育出版社



本書系根据苏联国立黑色及有色冶金科技書籍出版社(Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии)出版的苏联科学院通訊院士、教授 А. А. 包赤瓦尔(А. А. Бочвар)博士的名著“合金热处理原理”(Основы термической обработки сплавов) 1940 年第五版譯出。

原書曾經苏联有色金屬人民委員部教育司(ГУУЗ НКМД)審定作为高等工業学校用教科書。書中詳細地敘述了黑色金屬和有色金屬及合金各种不同型式的热处理的原理。本書是这方面的一本很好的著作,可供大學生及研究生用。

合金热处理原理

A. A. 包赤瓦尔著

謝希文 唐棣生譯

高等教育出版社出版

北京琉璃廠一七〇號

(北京市書刊出版業營業許可證出字第〇五四號)

京華印書局印刷 新华書店总經售

書号15010•162 開本 $78 \times 116 \frac{1}{2}$ 印張 $10 \frac{8}{16}$ 字數254,000

一九五六年十二月北京第一版

一九五六年十二月北京第一次印刷

印數0091—9,000 定價(10) 洋1.60

目 录

譯者序	5
序	6
緒論 热处理的一般性質及其分类	7
第一章 第一类热处理——退火	21
A. 金属退火时所进行的过程的实质	21
B. 金属及合金鑄件在加热时不發生相变的退火	35
C. 經過机械加工的金属在加热时沒有相变的退火	45
D. 关于再結晶作用的結論	96
第二章 第二类及第三类热处理的一般原理 (相变重結晶及淬火)	98
A. 关于相变速度是决定金属状态的性質的复杂数值的概念	98
B. 相变時間及总相变速度	108
C. 状态的应力对相变速度的影响	111
D. 杂质及原始組織状态对相变速度的影响	117
E. 合金成分对相变速度的影响	118
F. 不同形式的相变重結晶及淬火的特点	124
G. 相变重結晶及淬火时机械性能变化的一般規律	127
第三章 回火現象的一般理論(时效、沉淀、分散硬化)	129
A. 回火时所發生的現象的实质	129
B. 合金的成分对于固溶体分解过程的影响	137
C. 应力对固溶体分解过程的影响	139
D. 回火形式的分类	140
E. 回火时机械性能变化的一般規律	142
第四章 第二类热处理——相变重結晶 (退火、常化、一次处理)	144
A. 鑄造合金的热处理	144
B. 經机械加工的合金的热处理	160
C. 等溫处理举例	178
第五章 第三类及第四类热处理——淬火及回火	180

A. 鋼的淬火及回火	180
B. 輕鋁合金的淬火及回火	252
C. 銅合金的淬火及回火	285
D. 鎂合金的淬火及回火	296
E. 鉛合金及錫合金的淬火和回火	298
F. 結論	299
第六章 第五类热处理——化学热处理	300
A. 鋼的滲碳	301
B. 鋼的氮化或滲氮	307
C. 鋼的鋁化法(滲鋁)	311
第七章 在不同的热处理操作中加热及冷却的基本技术	312

譯 者 序

本書系苏联学者 A. A. 包赤瓦尔有名的著作之一。凡学过普通金屬学及热处理課的人都知道將热处理給以系統分类的就是 A. A. 包赤瓦尔。本書中，他按照自己的分类法將金屬及合金的热处理給以極詳盡的說明。書是 1940 年的版本，但本書的价值从下列事实可以看出：苏联所出的各种金屬学及热处理教科書中，講到热处理时列举的主要参考書之一便是本書，而且教科書中关于热处理分类的方法便是依据作者的分类法。書中講有色合金热处理篇幅也較多。

作者对書中談到的一些問題的看法，还有些可考慮的地方，譬如关于馬氏体本性的問題，作者所極力主張的，与現在大家所一致公認的看法是有些出入的。然而这并不影响本書作为一本很好的参考書。

本書前三章及第四章一部由謝希文同志負責翻譯，第四章后部及第五六二章由唐棣生同志負責翻譯。譯者二人由于学識所限，难免有許多譯得不妥处，祈知者予以指正。

謝希文 唐棣生于北京

序

第五版“合金热处理原理”一書和以前諸版一樣，主要是為從事有色金屬及其合金工藝學方面的專業人員之用。

然而，一方面由於有色合金方面的專家經常要接觸到工具鋼及結構鋼；另一方面，由於在對鋼及鑄鐵進行熱處理時所能觀察到的一些現象有許多是可資借鏡的；因此在本書中不僅敘述了有色合金的熱處理過程，而且還包括鋼及鑄鐵的熱處理過程。

由於考慮到必需足夠詳盡地敘述金屬及合金在熱處理時，有時為眼睛所看不見的一些難於了解的过程的實質；同時也由於在有色金屬工業中缺少獨立的热處理車間，而熱處理部分的設備及生產組織也要在合金的生產及加工的課程中學習到——我認為讀者的主要注意力應當集中到合金內部所進行的过程，以及組織及性能的改变，這些改变就是上述过程的結果，我們就是为了要得到這些变化而進行熱處理。

同時，由於把主要注意力放到合金中的相變所服從的基本規律上，所以數據上的材料及純敘述性的材料就盡量縮減。

在寫本書時，曾估計到讀者在学习合金熱處理課程以前已經熟習了普通金相學，X-射綫學，壓力加工理論及冶金爐等課程。

和以前諸版比較，本版大大地更新了，特別是鋼及輕合金的熱處理部分。

A. A. 包赤瓦爾

緒論

热处理的一般性質及其分类

当溫度改变时，所有金屬及合金的性能都改变了。所产生的性能变化可分为兩类：

- 1) 当溫度恢复到原来的数值时，性能的变化消失；
- 2) 当溫度恢复到原来的数值后，性能的变化仍然全部或部分地保留下来。

第一类变化(或变形)可比拟为彈性变形，而第二类变形可比拟为金屬經机械加工所引起的永久变形。

金屬的热膨脹或縮小可以作为溫度略有改变时所呈現的体积彈性变形的例子。加热到發生自發的晶粒長大的溫度时所观察到的体积变化，可作为体积永久变形的例子。

这种体积的变化即使在終止溫度的作用后仍不会消除。

所有其他性能，例如导电率、硬度、断裂强度等，都可能具有彈性变形式的及永久变形式的变化。一切性能的永久变化都是与金屬組織的永久变化密切联系着的，而且金屬組織的永久变化可以是晶粒形狀及大小的改变，或是晶体內部構造的改变，最后，或是晶粒化学成分的改变。

热处理的目的就是改变金屬或合金的性能，这当然是指的永久变化而不是在去除热的作用后就消失的变化。所以热处理課程所研究的对象恰恰就是性能的永久变化与热作用的基本因素的关系。这些因素就是作用的溫度及時間。溫度—時間曲綫(圖 1)可以表示任何热作用的特征。

为了表示溫度变化过程的全部特征，除了必須給出起始溫度及最高溫度外，还需要給出加热時間，在最高溫度停留的時間及冷

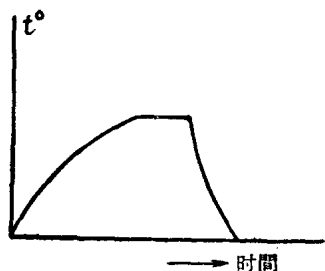


圖 1. 簡單熱處理圖解。

却時間。

我們可以不指出加熱或冷卻時間的長短，而代以平均的加熱或冷卻速度 $\frac{t_{\max} - t^0}{T}$ ，式中 T 為時間；或者為了更準確地表示過程的特徵，指出在一定溫度的真實速度，即 $\frac{dt}{dT}$ 值。形式較複雜的熱處理要經過二次甚至三次的重複加熱及冷卻。

圖 2 為包括常化、淬火及回火的複雜熱處理示意圖。

由於熱處理的目的是得到性能的永久變化，因此首先必需研究什麼時候有可能得到永久變化以及能得到如何的永久變化，由此確定原則上可能進行熱處理的條件，然後在詳盡地熟習了這些變化的性質後，

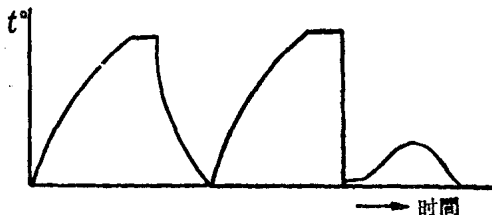


圖 2. 複雜熱處理圖解。

從而轉為了解熱處理在技術上可以實現的條件及其是否有益。

我們在研究金屬及合金的性能經過熱處理後所能觀察到的所有的變化時，可以將這些變化分為五大類，與此相應，我們將有五類熱處理。

1. 第一類的變化是自發地進行的，這種變化的產生只需加熱到某一溫度，在這溫度下，原子的動能變得如此的大，以致原子可以在晶粒內移動或者從一個結晶格架移到另一個去，即從一個晶粒到另一個去。

原子在晶粒內移動的現象可以使晶格的原子層變直（晶粒受彈性應力的作用而變形時，晶格會歪曲）。晶格的原子層變直後，

應力消除，晶粒重新獲得較高的塑性。上述現象通常叫做恢復（恢復到變形前原有的性能）。原子從一個晶粒移到另一個晶粒的現象可以使一個晶粒靠另一晶粒的消失來長大，並且在有足夠的發展時，可以完全改變金屬的組織。這種現象在變形的金屬加熱時可以看到，通常叫做再結晶（新的、重複的結晶）。

自發進行的、不可逆的變化除了恢復和再結晶外，還有濃度的變化；這種變化是借助於擴散，使由於晶內偏析所引起的成分不均勻趨於均勻。在未經變形的合金鑄件中，也可以用擴散的方法使濃度均勻（在一個晶粒內）。

在多相合金中，不平衡鑄造狀態的特点是過早地出現新相。平衡基體溶液的濃度或使之均勻化可以使聚集出的第二相消失（由於溶解）。同時，如果溶解的第二相具有較大的脆性（例如在鋁合金中的 CuAl_2 ，青銅中的 $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ 等），則經過這種均勻化後，可以大大地增加合金的塑性。

以上所討論的各種現象具有一個普遍特點，即所有這些現象都是促使確立穩定的物理-化學平衡和組織上的平衡。

所有這些過程都是不可逆的，並且是自發進行的（溫度夠高時），同時還放出熱。

當濃度有顯著的局部變化並伴隨著樹枝狀組織的消失，以及晶粒大小有更顯著的變化時，不能不影響到金屬的機械及化學性能。如果由於濃度均勻化或是晶粒長大所引起性能變化的趨向合乎我們的要求，那末我們就可以用人為的方法來引起這些變化而將金屬或合金加熱，即進行熱處理。當濃度均勻化時，由於枝晶的軸與軸間空隙之間的微電偶消失，使合金的化學穩定性增加。晶粒長大的過程（在一定限度內）將伴隨著延伸率及埃利克遜數（число Эриксона）（在立方系金屬中）的增加，同時使斷裂強度、硬度及電阻降低。換句話說，在晶粒變粗的過程中，即在再結晶過程

中,如同在恢复过程中一样,性能变化的趋向与机械加工时相反。此外,在任何情况下加热都会很好地去掉内部的弹性应力。

如果需要去除金属由于机械加工而增高的硬度,只要进行热处理就行。退火并伴随着机械加工对于有色金属来说是最重要的热处理操作之一。根据需要发生的性能变化,可将退火分为下列几类:

- 1) 为了消除内部应力及部分消除冷加工硬化作用的退火(恢复);
- 2) 为了消除冷加工硬化作用的退火(再结晶),以及
- 3) 为了增加合金铸件的化学稳定性(平均成分或均匀化),以及多相合金中为了提高塑性的退火。

为了表示退火的性质,必需指出最高温度——这个最高温度可以在很大的范围内变动——及在此温度停留的时间。加热或冷却的速度在这种情况下不起很大的作用,当加热或冷却的速度很小时,其影响就相当于增加了保温时间。

2. 第二类变化与第一类变化不同,只能发生在某些金属及合金中,即仅仅发生在一些在固体状态中有任何相变的金属及合金中。这种相变对于纯金属来说,就是从一种同素异构体转变到另一种同素异构体,而对于合金来说,则除此以外,还有相与相之间互相溶解限度的改变。简单地说,具有相变是可能得到第二类变化的必要条件。第二类变化是由于通过相变温度时所发生的重结晶所引起的,这种变化在加热时会部分地或完全消除原有的组织,而在反过来冷却时,则会恢复正常的物理-化学(但不是组织上的)平衡。合金冷却后,其组织组成物与加热前一样,但这些组织组成物的形状及分布情形可能和以前完全不同。

通过相变点进行重结晶时,也可能伴随着通常晶粒的长大(再结晶)。这种重结晶不需要预先经过机械加工(这是再结晶所必需

的), 并且可同样地在合金鑄件中或是經過机械加工的合金中进行。

重結晶过程与第一类过程(再結晶、扩散)在本質上的区别在于前者是可逆的过程, 而后者是不可逆的过程。再結晶时長大的晶粒不能用任何的加热和任何的冷却使其回复到原来的大小, 而由第二类重結晶得到的晶粒則可以用反复的重結晶使其形狀按照我們的願望来变小或增大。

引起相变重結晶的热处理通常叫做退火, 这个名称可能会与第一类退火混淆。最好使第二类热处理与第一类热处理有所区别, 而把第二类热处理叫做相变重結晶。

为了要得到相变重結晶, 自然, 最低限度必需將合金加热到相变开始溫度以上。

为了說明相变重結晶的特征, 除了像第一类退火一样地必需給出最高加热溫度及保溫時間以外, 还要給出加热速度, 以及冷却速度, 后者尤其重要, 因为冷却速度对于相反的轉变过程具有决定性的影响。进行相变重結晶在不同的情况下具有不同的目的。有些合金用普通的再結晶不能去除变形的痕迹(即消除織構, 去除內应力), 这时往往用相变重結晶来消除它。通常还用相变重結晶使鑄造合金的粗大組織变得比較細小, 因而减少了合金的脆性。在上述两种情况下, 有时故意將加热好的成品从爐中取出放在空气中以加速其冷却, 这样可以得到較細而且强度較高的組織, 这种热处理操作叫做常化。

如果希望成品在其以后的加工前适当地軟化, 則情形和以上相反, 需要緩慢地冷却(最低限度在某一定的溫度範圍內)。在实际中对于这些不同形式的相变重結晶采用了总的名詞——退火。

其次, 相变重結晶还用来將脆相的片狀(針狀)組織变成有害較少的圓形顆粒狀組織。这种热处理操作叫做球化。球化的機構

是基于一个相中大小及形狀不同的晶粒在另一相晶粒中的溶解度不一样,而最不稳定的晶粒或晶粒的个别区域具有最大的表面(較大的表面自由能)。

如果在相变重結晶时使用很快的冷却速度,則相反的轉变就会进行得不完全。那时我們將得到第三类变化。

3. 第三类变化是指金屬在热处理时所引起的变化不接近于稳定的物理-化学上及組織上的平衡状态,而是相反地,远离这种平衡状态。这类变化之所以可能發生是基于金屬中所有的过程及所有的变化都不是在瞬時間內發生的,而是在一段時間内进行的。有一些过程因进行的速度極大,即使用所能达到的最大的溫度变化速度也不足以阻止其进行。在另一种情形下,过程的速度是如此的小,以致我們可以用某一速度来改变溫度,使过程来不及完成,因而我們得以在任何溫度下直接固定金屬在較高或較低溫度时所具有的状态。

到現在为止,还不能將在較低溫度时所具有的状态經久地固定在較高的溫度。仅可能有这样一类的短時間固定:例如可以使两种晶粒的混合物在互相溶解以前过热。可是在許多情況下可以將高溫时所具有的状态固定在低溫下。为了达到这目的,首先必需使冷却速度大于相反的变化过程的速度,其次,所选择的溫度(例如室溫)必需如此地低,以致物質的粘性不允許其回到較稳定的状态。將不稳定的状态固定下来的热处理叫做淬火。

任何合金在原則上可能或不可能淬火的条件是合金在加热时是否有任何的相变。这个条件能否滿足可以根据該合金的状态圖的形狀来决定。如果某一合金加热时会在固体状态中有任何的相变(只有不須超过固相綫的金屬热处理才具有实际意义),在原則上是可能进行淬火的。淬火在技术上可以實現的条件是能不能得到比相变过程速度更大的冷却速度。在分析淬火的現象时,我們

還將簡短地介紹現代得到大的冷卻速度的方法及其測量方法。舉例來說，我們可以从 Fe-C ， Cu-Zn ， Cu-Sn ， Cu-Al 等二元合金的狀態圖的形狀斷定所有的 Fe-C 合金，含鋅大於 32% 的 Cu-Zn 合金，含錫大於 2-3% 的 Cu-Sn 合金以及含鋁大於 9% 的 Cu-Al 合金都可以淬火。所有這些合金的淬火不僅是可能的，而且在實際上都是做得到的。在所有的情況下，淬火完全或部分地固定了高溫時所具有的組織，然而並不是在所有的情況下，保留這種組織會得到所希望的性能的变化。像黃銅的淬火直到目前還沒有引起任何的注意，因為由於淬火而引起性能的变化並不合乎理想（例如含 35% Zn 的合金），或是效果很小（例如含 44% Zn 的合金）。

至於談到純金屬類的例子，我們知道所有具有同素異構轉變的金屬在原則上都可以進行淬火。但只有錫的淬火是可以得到的，而且是如此的容易，以致不需要增加冷卻速度就可以得到這種淬火。平常在室溫或更低的溫度看到的白錫就是淬火的。

為了表示淬火的特征，必需給出最高溫度、在此溫度的保溫時間，以及最要緊的——冷卻速度。最好給出在相變（即我們想用淬火阻止其進行的相變）溫度時的真正冷卻速度。淬火時的最高加熱溫度是和相變重結晶時一樣的決定於相變溫度。這裡應當適當地提起：首先將淬火溫度與相變溫度聯繫起來的是 Л. К. 切爾諾夫。

在大多數情形下，淬火可以將固溶體的狀態固定下來（solution treatment）。在有些情形下，將固溶體淬火可以增加硬度及斷裂強度，而在另一些情形下則減低之。

淬火不是別的，而是過冷到一個溫度，使相變在這溫度由於物質的粘性大而不能進行（例如 Al-Cu ），或是由於相變速度小尚不能開始（例如 Sn ）。

3a. 真正的淬火——即得到在高溫時所具有的組織而使之不發生變化——常常是得不到的，因為在冷卻時由於所產生的熱應力的作用使得在比較低的溫度時就已經發生了相變。當過冷度非常大以及在分解出和形成的相的晶粒內具有很大的應力時，相變不同於在過冷度較小時重結晶所得的結果。即儘管溫度較低，在有應力的結晶介質中相變進行快得多；其次，介質的異向性大大地影響到分解物的顯微組織，分解產物的分散性很高，而所形成的相的晶格歪曲到這樣的程度，以致可以把它看作是中間介穩定相。通常由這樣的相變重結晶所得到的狀態也叫做淬火狀態。雖然這個名稱不完全正確，但由於習慣用這個名稱，我們就只好採用這名稱。

獲得上述結果的熱處理可以看作是一種得到中間高度分散狀態或介穩定狀態的新的淬火形式，或是一種真正淬火連同回火的一個聯合操作（見第四節）。當然，這種熱處理形式可以看作是在過冷度及介質的應力很大的特殊條件下相變重結晶的個別情況。

4. 合金的淬火狀態是介穩定的、不穩定的狀態，但如要使其恢復到穩定的狀態，必須使合金的原子有一定的活動能力，因此，如果淬了火的合金所處的溫度較低，則合金不會自發地開始恢復到穩定的狀態。如果淬了火的合金周圍的溫度對於該合金是如此的高，以致合金的原子有可能在晶格內移動，則可自發地恢復到穩定的狀態，即開始進行自發的回火或時效。合金的溫度愈高，則自發的回火進行得愈快。當溫度對於自發的回火來說過于低時，則必須將合金加熱以增加原子的活動能力，使合金能恢復到穩定的狀態。合金的這種加熱叫做人工回火或人工時效。

由於在大多數情形下，淬火是將固溶體狀態固定下來，所以回火是將淬火固溶體分解為其組成物的過程（precipitation treatment 沉淀處理）。固溶體的分解不可避免地必需經過幾個階段：

- 1) 由固溶體沉淀出的原子應該聚集在一定的中心。
 - 2) 如果從固溶體中沉淀出金屬間化合物，則應形成它的分子。
 - 3) 在這樣形成的分解核心附近應該發生沉淀物晶粒的長大。
- 在第一個分解階段，沉淀物的晶格以及基體固溶體的晶格，由於濃度不均勻而產生的應力的影響應當受到歪曲。

前兩個階段發生在第三階段之前，因此在低溫回火時，主要是進行前兩個分解過程，雖然無疑的，所有的階段都是一個緊接着一個的。在有些合金中，淬火固溶體的分解可以在淬火的時候就進行了（如鋼淬火成馬丁氏體時），另一些合金則在室溫時效時發生分解（例如硬鋁），還有一些合金則需要升高溫度才能開始分解，即進行人工回火（例如鉍青銅）。

由於回火時淬火固溶體的分解是在較低的溫度下進行的，因此高度分散性的混合物是固溶體分解的產物。已經沉淀出的微粒隨着回火溫度的升高及在此溫度停留時間的增長而進行長大及聚集。沉淀出的微粒愈細，則合金的硬度愈大。

在前兩個分解階段中發生晶格的歪曲或者最低限度破壞了晶格的均勻性，因而電阻及硬度增加。在第三階段，即結晶沉淀物聚集時，晶格的正常組織恢復，而電阻及硬度降低。

如上所述，使淬火固溶體分解的熱處理叫做回火，但是由於不同的回火階段對合金機械性能的影響不同，應當將在接近固溶體開始分解的溫度時的“強化”回火和在較高溫度時的“軟化”回火區分開。強化回火常常叫做分散硬化現象。

高溫回火的產物通常和正常的緩慢冷卻時所形成的組成物一樣，回火的合金也是由與退火合金同樣的相所組成。因此可以說，回火使合金恢復到物理-化學上平衡的狀態。然而回火合金的組織及其性能却大大地不同於退火合金的。為了表示回火的特

征,必須給出加熱溫度及在此溫度停留的時間。在大多數情形下,加熱及冷卻速度沒有很大的作用(見第五章關於回火脆性部分),其影響在於:減低加熱或冷卻速度相當於增加一些保溫時間。回火如同再結晶一樣是不可逆的過程,同時在進行時會自發地放出熱。

5. 到目前為止,所有分析過的在金屬中進行的變化都不與周圍介質起化學作用。在一些與周圍介質起作用的过程中,滲碳過程引起了工業上的注意。所有這些過程的原理是純粹的擴散或是擴散結合着氧化反應(燃燒)。

所有這些化學熱處理過程都改變了成分(虽然是局部的)。這里包括鋼的滲碳,鑄鐵(可鍛鑄鐵)的白心可鍛化退火,滲氮,鋁化,硅化等過程。滲碳過程常常是單獨的操作,但更常和淬火及回火結合起來。

在熟習了熱處理的形式及其名稱後,我們應當簡略地談一下熱處理所能得到的結果,即指出金屬經過不同形式的熱處理後,其性能會起何種程度的變化。

我們就每一種熱處理舉一兩個例子:

1. 冷加工鋼具有下列的機械性能:

$$\sigma_b = 45 \text{ 公斤/毫米}^2, \delta = 1-2\%.$$

經過正確的退火後可得到:

$$\sigma_b = 22 \text{ 公斤/毫米}^2, \delta = 45\%.$$

由於熱處理而產生的變化從 100—2000%。

2. 含 0.2%C 的鑄鋼脆性較大(衝擊韌性及伸長率小):

$$\sigma_b = 45 \text{ 公斤/毫米}^2, \delta = 15\%, \rho = 2 \text{ 公斤—米/厘米}^3$$

經過常化(相變重結晶)後可得到:

$$\sigma_b = 48 \text{ 公斤/毫米}^2, \delta = 29\%, \rho = 9 \text{ 公斤—米/厘米}^3$$

δ 及 ρ 值的變化約各為 100% 到 350%。