



大和久重雄著 王 龍 祥譯

S曲線

—熱處理恒溫變態曲線—

正言出版社印行



江苏工业学院图书馆

藏書章

王龍祥譯

S曲線

—熱處理恒溫變態曲線—

正言出版社印行

序

最近，S 曲線逐漸在熱處理圈裡成爲一個相當熱門的話題。所謂 S 曲線，乃指將沃斯田鐵化狀態的鋼件急冷卻至某一溫度，然後在該溫度下保持恒溫讓它進行恒溫變態，所測得的變態進行情形，通常縱軸取溫度，橫軸取時間，以表示各溫度下的變態進行過程。由於沃斯田鐵是在過冷狀態下進行變態的，所以 S 曲線又稱爲過冷沃斯田鐵的恒溫變態圖（isothermal transformation diagram）。

以往，淬火的種種現象與性質，總覺得是朵霧中花，甚難捉摸。然而，這些問題都因 S 曲線的問世，而獲得解決了。S 曲線可詳盡地提供給我們，過冷沃斯田鐵在各種溫度下的變態進行過程。

最近，傳統的熱處理技術之所以全有一日千里的突破性飛進，實乃歸功於 S 曲線的研究與變態特性的洞悉。近來，工業上出現的優秀熱處理技術，諸如，沃斯回火（anstempering），麻回火（martempering），沃斯退火（ausannealing）及變韌鐵（bainite）等等，都是 S 曲線的研究所推演出來的產物。

目前，利用熱處理技術來強化特殊鋼的需求愈來愈大，熱處理技術的進步與卓越熱處理技術的運用已是迫不及待的了。然而，熱處理技術的研究與發展，S 曲線是其千里之駒。首先必須對 S 曲線有深刻的體認，然後才能事半功倍地步入熱處理的康莊大道。

本書的主旨在於解說 S 曲線及其攸關種種，書中盡收海內外各家所發表的 S 曲線圖，以及有關 S 曲線的論文與實驗結果，並作有系統的分析。但願本書可替熱衷此方面的熱處理技術者，帶來莫大的方便與幫助，如果能如此，那也算是達到了本書的使命，這是本人最希望也是最高興的事。

最後，特於此向書中所引用之論文的研究者，致最高的敬意。同

時，也向百忙抽空大力協助圖表之安排與整理的栗原利喜雄先生與赤須英夫先生，表示無限的感激。

著者 大和久重雄

新版序

「S 曲線」一書自出版以來，已歷時十多年，在這十多年中，S 曲線的研究日新月異，尤其是導自此 S 曲線的新熱處理技術，其進步情形更是一日千里。鑒於此因，特將原來的 S 曲線一書作全面的修改，以期呼應最新時代的熱處理技術。本書主要的增訂部份大致如下：

- (1) 加熱速度與高壓因素對 S 曲線的影響。
- (2) 殘留沃斯田鐵的 S 曲線。
- (3) 增添 C. C. T. 曲線以及添加元素對它的影響。
- (4) 增添 T. T. A. 曲線（逆 S 曲線）與 C. H. T. 曲線。
- (5) 由 S 曲線衍生的最新熱處理技術（三次元的熱處理，及其他）。
- (6) S 曲線的矛盾。

這次全面改訂增補以後，S 曲線的最近運用傾向、問題點以及其應用面等都有詳細的解說，讀者當能明瞭在握。本人對本「S 曲線」一書具有相當堅強的信心。最後，深盼各位能靈活掌握本書內容，巧妙運用之。

著者 大和久重雄

譯者序

大家都知道，熱處理之功用乃在於增加鐵鋼材料的強度、硬度及韌性等各種機械性質。當然，所要求目的不同，處理的方法也必然不同。熱處理之所以會改善鋼的機械性質，主要乃因鋼有種種不同的變態。變態不同，其化學與物理性也會隨之不同。探索有關鋼種變態的種種問題時，鐵碳平衡狀態圖雖仍是其最基本的憑依。但是，平衡狀態圖所能提供給我們的資料太有限，充其量也只不過能提示我們一些，諸如正常化、退火、回火及淬火等的處理溫度罷了。至於，平常處理作業上，經常見到的急冷、連續冷卻、……等，很少能由平衡狀態圖上獲得充份的資料，因為實際的熱處理作業都是非平衡狀態。

為滿足實際熱處理作業的需要，終於有 S 曲線產生。S 曲線是 E. S. Davenport 與 E. C. Bain 於 1930 年首度發表的。由於 S 曲線（恒溫變態曲線）的出現，種種新技術的熱處理方法也都相繼勃起。近來，隨著高張力鋼的發展，熱處理技術又邁向一新的方向，為探討熔接作業上的安全性及其他機械性質，鋼的連續變態曲線（C.C.T 曲線）也應急而生。以往，由於測定技術較差，問世的 S 曲線與 C.C.T. 曲線並不多，尤其是 C.C.T. 曲線方面，測定作業更是困難。近來，測定方法已有相當改進，不管 S 曲線或 C.C.T. 曲線都已比較容易繪製。

最近十多年來，某些方面的熱處理，已由過去的 2 次元熱處理（只考慮時間與溫度）轉入 3 次元熱處理（考慮時間、溫度與外力）了，這些最新方向的熱處理技術，也都一一彙集在本書第二編中。

本書，在內容方面，原著者認為是他甚有把握的一本書；在翻譯方面，亦是本人最感滿意的一本書。書中除了盡力譯出著者的原意之外，還於艱難之所，節錄其他研究者的理論，以便利更深入地了解。

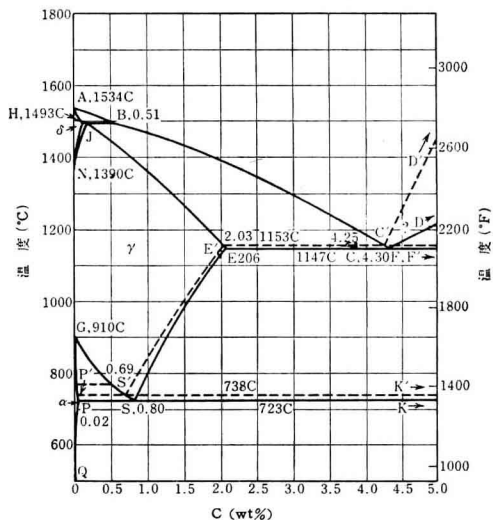
熱處理是本人志趣所在，翻譯之時態度嚴謹，並已盡最大力量，力極無錯。然而，內容廣泛，付印匆促，倘仍有錯誤之處，尚請前輩後進不吝指教，本人當不勝感激。

王龍祥 高雄

1976年 12月

總 說

對一個研究鋼鐵材料的人來說或是對一個始終與鋼鐵材料為伍的工程師來說，鐵碳平衡狀態圖（equilibrium diagram）真可說是必備的工作道具。鐵碳平衡狀態圖主要是用於表現碳鋼與含碳量在平衡狀態下的關係以及溫度對它們的影響，圖 1 所示者就是所謂的 Fe-C 系平衡狀態圖，相信諸君在基礎鋼鐵材料學內已研究得相當透徹。一般來說，Fe-C 系平衡狀態圖所表現的資料是將碳鋼從高溫下以極慢的速度冷卻下來時組織狀態的變化情形。既然，Fe-C 系平衡狀態圖所表現的資料是極慢速度下的組織變化，那麼在較快速度下或甚至在淬火作業的急速冷卻下，組織狀態究竟會有什麼變化、究竟會產生什麼變態也就無法從該平衡狀態圖中獲得了。所以說，對一個專門或從事於熱處理的技術工程師來說，除了須擁有平衡狀態圖以外，還得有



第 1 圖 Fe-C 系平衡狀態圖

“急速冷却速度下”的組織變化表示圖。高溫的鋼鐵在急速冷却狀況下，其過冷的沃斯田鐵究竟在什麼溫度下會發生什麼樣的變態、產生什麼樣的組織呢？用以表示這些過冷沃斯田鐵的變態關係與安定性的曲線圖就是所謂的 S 曲線（S-Curve）。S 曲線其實也就是過冷沃斯田鐵在各種恒溫狀態下，變態開始的時間點與變態完成的時間點所連成的曲線，通常縱軸選定為變態溫度而橫軸選定為變態時間且以對數座標來表示時間。由於所連成的曲線非常像英文字母“S”，故一般習慣上喜歡稱呼它為 S 曲線，事實上它的正確名稱應該稱為過冷沃斯田鐵的恒溫變態圖（Isothermal transformation diagram），最近也有人稱它為 T.T.T. 曲線（Time Temperature Transformation diagram）或 I- 曲線（Isothermal-transformation diagram）。橫縱上的變態所需時間之所以要用對數來表示乃因為短時間的變化與長時間的變化均可彙集顯現於一個圖上，當然同圖中短時間部份的變化情形要比長時間部份的變化情形明確盡析一些。

由 S 曲線我們可獲得以下各種資料。

- (1) 了解過冷沃斯田鐵於恒溫狀態下開始發生變態及完成變態的時間，同時也可看出完成全部變態所需的時間。
- (2) 在各種不同溫度的恒溫狀態下會產生什麼變態、變成什麼組織（層狀型……波來鐵，上變韌鐵；針狀型……麻田散鐵、下變韌鐵）。
- (3) 添加元素對組織、機械性質以及淬火性等的影響。
- (4) 沃斯田鐵的粒度與淬火性間的關係。

正如大家所熟悉的，向來的熱處理方法都是將鐵鋼加熱至高溫然後讓它連續性的冷卻下來，如果冷却方式是採取爐冷（冷却速度很慢），我們就稱之為退火（annealing）；如果是空冷（冷却速度中庸），我們就稱之為正常化（normalization）；如果是油冷或水冷（冷却速度很快），我們就稱之為淬火（quenching）。像這種採用連續性冷却方式的熱處理我們稱之為連續冷却變態處理或簡稱為 C.C.T

處理 (continuous-cooling-transformation treatment) , 除了連續冷卻變態處理之外, 還有一種熱處理是利用恒溫變態原理進行處理的, 這種利用恒溫變態原理進行的熱處理方式我們稱之為恒溫變態處理或簡稱為 T.T.T. 處理 (time-temperature-transformation treatment) 。一般來說, T.T.T. 處理優於 C.C.T. 處理, T.T.T. 處理具有幾種 C.C.T. 處理所沒有的優點與特性, 它們是縮短處理時間, 增高生成物的強韌性, 提高處理爐的使用度等。T.T.T. 處理技術可謂熱處理技術的“新展望”, 近來一直很受各界的重視。

T.T.T. 處理技術大致可分為以下幾種類型:

- (1) 恒溫變態退火 (isothermal annealing)
- (2) 恒溫變態淬火 (isothermal hardening)
 - a. 恒溫回火 (austempering)
 - b. 麻回火 (martempering)
 - c. 麻淬火 (marquenching)
- (3) 恒溫變態回火 (isothermal tempering)
- (4) 三次元的熱處理 (3D heat treatment)

進行上述這些 T.T.T. 處理時, 當然 T.T.T. 曲線 (或稱 S 曲線) 是絕對必要的。相反的, 進行 C.C.T. 處理時, C.C.T. 曲線也就絕對必要的。C.C.T. 曲線也就是連續冷卻變態曲線, 有人簡單的稱它為 C-T 曲線 (cooling-transformation diagram) 或稱之為 (anisothermal transformation diagram) 。

S 曲線首次的露面是出現於 1930 年美國人 E. S. Daxenport 與 E. C. Bain 的研究報告上。其後, 美國鋼鐵公司 (United States Steel Corporation) 的研究室又繼續作詳細研究並於 1937 年發表 S 曲線的詳細資料。接着, 德國的 Max-Planck (1954 年) 、英國的 Iron and Steel Inst. (1956 年) 、德國的 IRSID (1960 年) 又相繼發展各別研究出來的 S 曲線集。

目 錄

總說

第一篇 S 曲線

一、S 曲線的求法	1
1.1 組織學的方法	1
1.2 利用溫度漸變爐的方法	6
二、相關 S 曲線的名稱與特性	8
2.1 與 S 曲線有關的名稱	8
2.2 S 曲線的特性	11
2.3 S 曲線的 4 種類型	13
三、影響 S 曲線的因子	14
3.1 最高加熱溫度的影響	14
3.2 添加元素的影響	17
3.3 偏析的影響	27
3.4 加熱速度的影響	29
3.5 外力的影響	31
3.6 壓力的影響	36
四、碳鋼及特殊鋼的 S 曲線與組織	39
4.1 碳鋼的 S 曲線	39
4.2 特殊鋼的 S 曲線	43
五、殘留沃斯田鐵	62
六、恆溫變態生成的物質	64
七、S 曲線的產生機構	71
八、S 曲線與 C 曲線	79

2 目 錄

九、S曲線與C.C.T.曲線	83
9.1 S曲線與C.C.T.曲線間的關係	83
9.2 Grange-Kiefer 法	88
9.3 利用Liedholm法求C.C.T.曲線	99
9.4 等速C.C.T.曲線與不等速C.C.T.曲線的比較	104
9.5 利用Steven法求C.C.T.曲線	108
9.6 合金元素對C.C.T.曲線的影響	114
9.7 合金鋼的C.C.T.曲線	138
十、T.T.A.曲線	142
10.1 碳鋼的T.T.A.曲線	142
10.2 構造用合金鋼的T.T.A.曲線	156
十一、C.H.T.曲線	167

第二篇 S 曲線的應用

一、S曲線與初析線的關係	173
二、S曲線與淬火性	175
三、S曲線與臨界冷卻速度	175
四、S曲線與熔接的安全冷卻速度	178
五、恒溫變態粒狀化	183
六、恒溫變態退火	186
七、恒溫變態正常化	190
八、沃斯回火	191
九、特殊型沃斯回火	199
9.1 沃斯回火再回火	199
9.2 昇溫沃斯回火	200
十、沃斯回火表面硬化法	201
十一、麻回火	207
十二、麻淬火	208

十三、特殊型麻淬火	215
13.1 改良型麻淬火	215
13.2 麻淬火中斷回火	216
13.3 Ms 淬火	217
十四、沃斯回火・麻淬火表面硬化法	219
十五、時間淬火	220
十六、熱浴淬火	227
十七、高速鋼的變韌鐵處理	229
17.1 變韌鐵淬火	229
17.2 變韌鐵回火	230
17.3 變韌鐵淬火・回火	232
十八、三次元的熱處理	233
18.1 沃斯加工	236
18.2 沃斯田輥壓	239
18.3 沃斯田抽拉	240
18.4 沃斯輥壓回火	241
18.5 熱作珠擊法	241
18.6 麻加工	242
18.7 鍛造淬火與壓延淬火（直接淬火）	245
18.8 熱磁場處理	247
十九、S曲線的矛盾	249
19.1 斷續冷卻與 S 曲線	249
19.2 保持長時間後的冷卻與 S 曲線	250
19.3 冷卻曲線與變態開始線相交 3 次的場合	251
19.4 Ms 線的長度與形狀	252
19.5 回昇加熱與 S 曲線	253
19.6 諸君請莫忘	254

第三篇 S 曲線圖集

I. T.T.T. 曲線	259
II. C.C.T. 曲線	345
III. T.T.A. 曲線	367
IV. C.H.T. 曲線	368
附錄 溫度換算表	369

第一篇 S 曲線

一、S 曲線的求法

S 曲線圖的繪製方法大致可分別為組織學方法、硬度測定法以及磁氣測定法等四種，目前以組織學方法最受歡迎，同時測定結果也較準確，以下我們來看看如何利用組織學方法來繪製或求出 S 曲線。

1.1 組織學的方法

利用組織學繪製 S 曲線的原理與方法大致如圖 1.1 所示。首先我們將實驗試片加熱至變態點 (A_{e_1}) 以上的溫度讓試片的組織完全變為沃斯田鐵之後，繼續將沃斯田鐵狀態的試片投入熔融的恒溫金屬浴中或熔融的恒溫鹽浴中，以進行所謂的熱淬火 (hat-quench)。此時熔融的恒溫金屬浴或鹽浴 (通稱熱浴) 的溫度應設定在 A_{e_1} 變態點以下的溫度。

在恒溫的熱浴中，各個試片的浸漬時間各不相同，有的讓它浸漬 P_1 時間，有的讓它浸漬 P_2 時間，有的 P_3 、 P_4 …… (參閱圖 1.1)；各個試片浸漬時間到時立即將試片取出並投入水中或鹽水中，以急速冷卻淬火之。淬火完成之後，再將各塊試片研磨與酸蝕，以便進行顯微鏡的檢查工作。

沃斯田鐵狀態的試片投入恒溫熱浴槽 (圖 1.1 中的熱浴溫度為 T_1) 中時，隔一段時間以後沃斯田鐵狀態的組織就會開始產生變態，而且要相當一段時間之後才能完全完成變態。這些已完成波來變態 (沃斯田鐵→波來鐵) 的組織急冷到常溫以後，仍能維持其波來鐵組織；但是那些尚未產生波來變態的沃斯田鐵組織急冷到常溫以後，却

2 一. S 曲線的求法

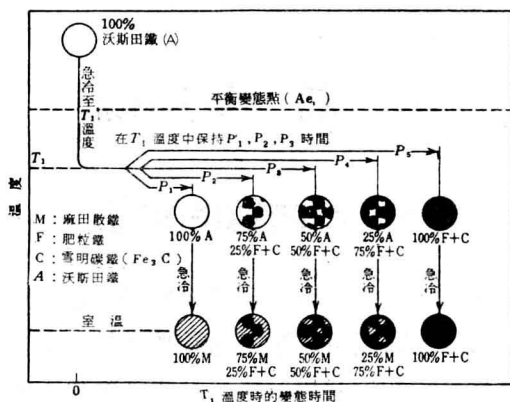


圖 1-1 利用顯微組織求 S 曲線的方法

會變成麻田散鐵。根據上述這個特性，我們只要檢查或測定常溫下試片中的波來鐵量與麻田散鐵量各有多寡，即能輕易地推測出 T_1 溫度下該試片中的沃斯田鐵量與波來鐵量各有若干，換句話說，由此我們可明顯推斷出 T_1 溫度下經過 P_i 時間後，該試片中含有多少量的沃斯田鐵完成波來變態。

在圖 1.1 中，A 表示沃斯田鐵、M 表示麻田散鐵、F 表肥粒鐵、C 表示雪明碳鐵，此外波來鐵則以 F + C 表示之。圖 1.1 是一個簡單的示性圖，圖中顯示 P_1 時間時，全部沃斯田鐵都尚未發生變態，此時若將試片取出急冷於水或油中，全塊試片的組織將會完全變成麻田散鐵（註一）；在 P_2 時間時已有 25% 的沃斯田鐵完成波來變態，因此急冷至常溫後該塊試片將會含有 25% 的波來鐵組織及 75% 的麻田散鐵組織； P_3 時為 50%， P_4 時為 75%， P_5 時則全部沃斯田鐵都已變成波來鐵，故其常溫組織為 100% 的波來鐵組織。

註一：圖 1.1 只作表示性說明，事實上麻田散鐵中還可能存有殘留沃斯田鐵（retained austenite）。

圖 1.2 ~ 圖 1.4 是顯微組織測定的實際測定結果。圖 1.2 表示共析鋼於 705°C (1300°F) 的恒溫槽中波來變態的進行情形，其中，

(a) 為浸漬於恒溫槽 320 秒以後拿出來淬火的情形，此時變態已經發生了。照片中白色的部份是麻田散鐵，條狀（層狀）黑白相同的部份是波來鐵。

(b) 為浸漬 1150 秒的情形，完成波來變態的量已增多，約 25 %

(c) 為浸漬 1320 秒的情形，完成波來變態的量又更多，約 50 %

(d) 為浸漬 1450 秒的情形，完成波來變態的量約達 75 %。

(e) 為浸漬 4000 秒的情形，沃斯田鐵組織已完全變為波來鐵組織，因此圖中所見的全部都是波來鐵。

圖 1.3 表示亞共析鋼於 705°C (1300°F) 的恒溫槽中肥粒鐵的初析以及波來變態的進行情形。(a) 圖中灰黑圈圈所圍繞的部份表示肥

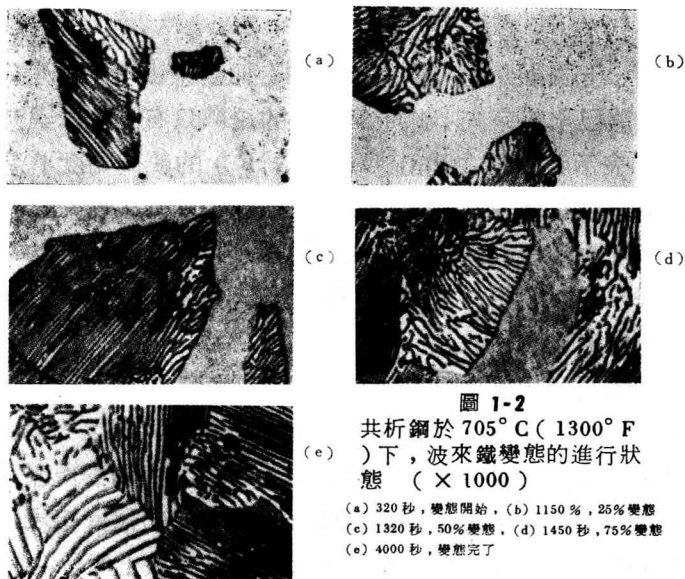


圖 1-2

共析鋼於 705°C (1300°F)

下，波來鐵變態的進行狀

態 ($\times 1000$)

(a) 320 秒，變態開始，(b) 1150 秒，25% 變態

(c) 1320 秒，50% 變態，(d) 1450 秒，75% 變態

(e) 4000 秒，變態完了