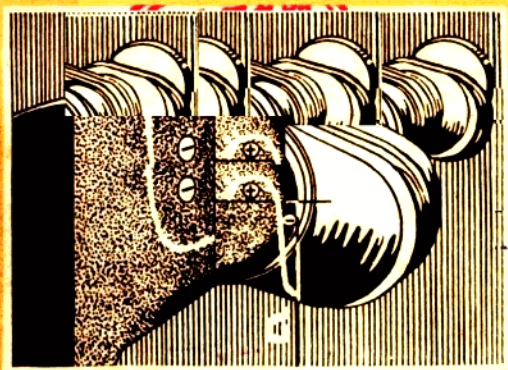


高頻熱處理叢書

第 4 冊

鋼件高頻淬火後的組織和性能

〔苏联〕Г. Ф. 高洛文著



科學技術出版社

高頻熱處理叢書

第 4 冊

鋼件高頻淬火後的組織和性能

[蘇聯] Г. Ф. 高洛文著

劉 德 馨 譯

張 立 之 校

科學技術出版社

內 容 提 要

这本小册子对钢在热处理时产生的转变过程给予了一个基本的概念,并叙述了表面淬火后零件的性能。

这本小册子可供工业部門中从事高頻电流加热工作的有关人员参考。

鋼件高頻淬火后的組織和性能

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ, ЗАКАЛЕННЫХ ПРИ ВЫСОКОЧАСТОТНОМ НАГРЕВЕ

原 著 者 (苏联) Г. Ф. ГОЛОВИН

原出版者 ~~Машиностроение~~ 1954年版

譯 者 刘 德 馨

科 学 技 術 出 版 社 出 版

(上海福建路336弄15号)

上海市書刊出版業營業許可證出字079号

上海市印刷四厂印刷 新華書店上海發行所总經售

*

統一書号:15119·419

开本 787×1092 紙 1/32 · 印張 1 1/4 · 字數 25,000

一九五六年十二月第一版

一九五六年十二月第一次印刷 · 印數 1—4,000

定价:(10)二角

原 序

苏联学者斯大林獎金获得者苏联科学院通訊院士 В. П. 沃洛格金 (Вологдин) 教授研究出的用高频表面加热法进行鋼零件热处理的先进新方法, 在工业上已广泛应用, 所以就要求进一步詳細研究淬火后制件的性狀。苏联学者是研究与鋼零件表面淬火有关的强度問題和金属学問題的开路先鋒。

“В. П. 沃洛格金教授”高频电流科学研究院以及許多其他部門(其中尤其要提到斯大林鋼鐵学院、中央机器制造科学研究院、莫斯科斯大林汽車厂等)的研究結果証明, 用感应加热进行零件表面淬火的方法, 能显著地提高零件的耐久性, 同时并可減輕重量和提高强度, 还可能用普通碳素鋼来代替稀缺的合金鋼。

在这本小冊子內討論的, 是关于用高频表面淬火法来提高零件質量的一些基本問題。

目 錄

原序

緒論	1
1. 鋼的組織	2
2. 鋼的性能	9
3. 鋼的淬火	11
4. 感应加热时的表面淬火	14
5. 感应加热时鋼組織转变的特性	16
6. 表面淬火后的碳素鋼和低合金鋼的組織和性能	20
7. 制件的表面强化	24
8. 殘留內应力	25
9. 应力和强度	28
10. 应力和变形	31
11. 复杂形狀制件的表面淬火范例	33
結論	36

緒 論

对于鋼制件和生鉄制件的表面淬火，以及对于待鍛造或待模压的鋼坯的穿透加热，都已广泛采用着感应加热法。近来感应加热法还应用于施行穿透淬火的制件的加热。

待鍛造或待模压的坯料的穿透加热時間是比較長的，所以在加热期間鋼內应产生的全部組織变化，能来得及完成。因此，鍛造前的感应加热在这一点上来說是沒有任何特点的。可以很有把握地肯定：如果鋼坯被加热到鍛造溫度，則这时鋼組織就已适合于这一道工序。只在少有的情況下，在含有多量特殊成分的特种鋼的制件进行快速加热时，这样的判断才可能不充分正确。

因此，坯料穿透加热的规范，通常不根据鋼內組織的变化来决定，而只从可使整个截面获得均匀加热的最有利条件上着想^①。

在化学成分复杂的鋼料加热时，也須考虑到組織的变化。但是这里不可能介紹一般的方法，在每一种情況下必須个别确定最少的容許加热時間。

进行穿透淬火的制件在感应加热时，加热速度也是比較慢的。但在很多情況下，就要設法創造出保証优良淬火的加热条件来。特別是在工具鋼加热时，这一点更为重要。

① 參看 В. Н. 包格丹諾夫(Богданов)著“鍛造生产中的高频电流”，本書的第 12 册。

在采用 B. П. 沃洛格金的方法进行淬火前鋼件高频电流表面加热时，鋼內組織的轉变起着特別重要的作用。表面淬火的特色是加热速度快。采用这样快速加热时有很多特点，因此必須特別对待溫度規範的選擇。这些特点决定着所获得的淬火层的質量，所以也在很大程度上决定着处理后制件的性能。

除了在鋼加热和冷却时发生的組織轉变外，还应特別注意到制件在淬火后总会产生的內应力和变形。在高频表面淬火中，应力的分布情况是特殊的，并且可能相当大。現在还不可能十分精确地預計出在使用表面淬火規範时所产生的殘留內应力的大小，但对应力分布的情况和符号（拉伸或壓縮）的判断几乎是沒有錯誤的。

殘留应力在决定淬火后制件的性能上极为重要，因此，在选择淬火方法、淬火层形狀、加热規範等时，应考慮到殘留应力。在許多情况下，所产生的殘留应力能引起淬火后的制件变形，特别是当局部淬火时。在規定淬火层的形狀时，常須注意到这一点，使变形尽可能减到最小。

只在良好的淬火层質量与合适的殘留內应力分布相配合时，才能获得性能很好的淬火制件。

这本小冊子以下各节的材料，將介紹在选择可使上述两个因素达到最好配合的加热規範时应采用的方法。

1. 鋼的組織

鋼內主要元素是鉄，鉄的原子構成結晶格子。任何种牌号的鋼所必需的第二个元素是碳；碳在鋼內的数量不超过 2%（按重量計）。

鋼的組織可以用鐵原子和碳原子的相互排列狀態來說明其特點。此時所涉及到的問題是關於鋼的原子結構，原子結構可用X光分析法測定之。

固態的鋼是由相互緊密結合的許多小晶體構成的，這些小晶體叫做晶粒。鋼的晶粒度可以在斷面上清楚地看出。在放大100倍和更多倍的顯微鏡下觀察用特種試劑浸蝕過的金屬磨片時，能看出晶粒的大小和形狀。在顯微鏡下能夠看到的鋼的組織叫做显微組織。

如果不用顯微鏡而用肉眼觀察特別浸蝕過的磨片，則可以看到的是粗視組織，這種組織顯示出在肉眼可見範圍內不用特別放大就可以識別出組織的不均勻性。

鐵晶格內碳原子的分布情況及構成显微組織和粗視組織的質點形狀和大小，決定着鋼的性能和折斷特性。

純鐵組織隨着溫度升高而發生變化。

當溫度低於 910°C 時，鐵的結晶格子是立方體的。晶格的

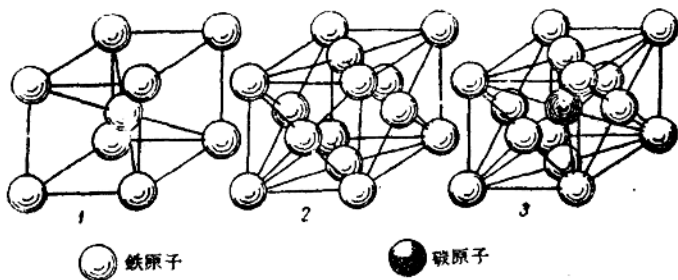


圖 1. 鋼的原子結構

1—體心立方晶格： α -鐵結晶格子的晶胞，是由在立方體頂點的八個原子和在立方體中心的一個原子構成；2—面心立方晶格： γ -鐵結晶格子的晶胞，是由在立方體頂點的八個原子和在立方體每面中心的六個原子構成；3—溶在 γ -鐵內的碳原子位於立方晶胞的中心（奧氏體組織）。

晶胞是由位于立方体顶点的八个原子和在立方体中心的一个原子构成。

但是应当注意到，結晶格子是由直接相互连接的許多晶胞構成的。因此，位于晶胞顶点的每个原子是属于八个相鄰的晶胞共有的，即每个晶胞中只有 $1/8$ 个原子。所以每一晶胞計有 $8 \times 1/8 = 1$ 个顶点原子和一个中心原子，共有两个原子。

結晶格子的構造呈体心立方体的鉄叫做 α -鉄(图 1-1)。

温度高于 910°C 时，結晶格子也是立方体的。晶格的晶胞有八个位于立方体顶点的鉄原子，但立方体的中心是没有原子的，而在每个面的中心却有一个鉄原子。

但是在这种情况下，每个晶胞也只有一个位于顶点的原子。位于各面中心的原子是属于两个相鄰的晶胞共有的。因为这样的原子在晶胞内有六个，故每个晶胞有 $6 \times 1/2 = 3$ 个原子。共有 $3 + 1 = 4$ 个原子。

具有面心立方体結晶格子的鉄叫做 γ -鉄(图 1-2)。

当温度为 910°C 时，鉄由一种类型轉变为另一种类型。当 α -鉄轉变为 γ -鉄时，要吸收热量，因此，在加热过程中当温度达到 910°C 时，温度的增高要暂时停止，直至轉变完成为止。

冷却时， γ -鉄轉变为 α -鉄也是在恒温下发生，因为这一过程能析出热量。

当往鉄内加入碳时，一部分的碳原子就滲入鉄的晶格内，分布在鉄原子之間，但是仅一部分結晶格子的晶胞被碳原子填满。碳原子在鉄的晶格内的分布是没有一定秩序的，它們能够从一个晶胞移进另一个晶胞内(扩散)。这种組織叫做碳在鉄中的固溶体。

碳在 α -鉄中的固溶体叫做純鉄体，而在 γ -鉄中的固溶体

則叫做奧氏體。

純鐵體只能含很少量的碳(室溫時, 可含 0.008% 的碳), 因為在 α -鐵的晶格內沒有碳的位置。

在 γ -晶格內, 立方體的中心是空的, 此處能夠被碳所占据(圖 1-3)。因此, 奧氏體所含有的碳比純鐵體多得多, 並且溫度愈高, 能溶在奧氏體內的碳就愈多。

如果往鋼內加入的碳比鐵內能溶的碳多, 過剩碳的原子就牢固地與鐵原子結合在一起, 因而形成碳化鐵 (Fe_3C) 型的複雜結晶組織。這種組織叫做滲碳體。

在室溫時, 鋼通常是由純鐵體和滲碳體組成的; 在顯微鏡下觀察顯微組織時, 純鐵體和滲碳體極易辨別。在高溫下, 鋼是由奧氏體或奧氏體和滲碳體(如果碳量超過碳在 γ -鐵內的溶解度時)組成的。

使 γ -鐵結晶格子重新改組為 α -鐵的溫度是決定於含碳量。隨著含碳量的增多, 這一溫度就與含碳量成比例地由 910°C (為純鐵時) 降低到 723°C (當含碳量為 0.8% 時)。含碳量低於 0.8% 的鋼冷卻時, 鐵晶格重新改組並形成純鐵體的開始溫度叫做臨界點 A_3 。

碳在 γ -鐵內的極限溶解度也決定於溫度: 溫度從 1140°C 降到 723°C 時, 碳在 γ -鐵內的極限溶解度就從 2.0% 降到 0.8%。

這樣, 在溫度為 723°C 和碳量為 0.8% 時, 就有一個特殊的點: 在冷卻期間, 在這一點上同時發生兩個過程: γ -鐵轉變為 α -鐵和由固溶體內析出過剩的碳, 而過剩碳在純鐵體晶粒內就形成了片狀或圓粒狀的滲碳體夾雜物。這一個特殊的點叫做共析點, 而含碳量為 0.8% 的鋼就叫做共析鋼; 溫度 723°C 叫做共析轉變溫度, 這一溫度用臨界點 A_1 表示。

由純鐵體晶粒和橫貫于這些晶粒間的薄片狀滲碳體構成的共析鋼組織叫做珠光體(圖2)。

在含碳量少于0.8%的鋼組織內，即在亞共析鋼內，除了珠光體之外，還存在着沒有滲碳體夾雜物的游離純鐵體區。

在含碳量多于0.8%的鋼組織內，即在過共析鋼內，除了珠光體之外，還有着通常分布在珠光體晶界上的單獨的滲碳體。

由于鋼料生產條件的不同及熱加工和熱處理條件的不同，在含碳量相同的鋼料內可能有不同的顯微組織。上述的顯微組織是在緩慢冷卻下獲得的。鋼料從具有奧氏體組織的加熱狀態緩慢冷卻(常常就在原來加熱的爐子里跟爐子一同冷卻)的熱處理工序，叫做退火。

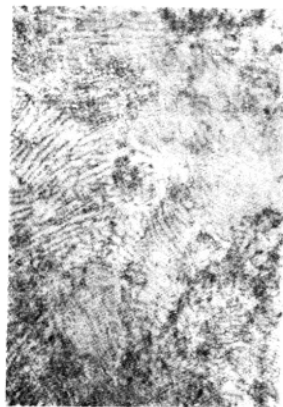
冷卻的速度對顯微組織有很大影響。首先，冷卻得愈快，冷卻後所獲得的鋼的晶粒愈細。並且，增加冷卻速度還能造成細粒狀的滲碳體。如果滲碳體的質點細小到用普通顯微鏡不可能辨別，此時，這種顯微組織就有一個專門名詞——屈氏體。如果以高速度冷卻亞共析鋼，游離純鐵體的晶粒就將來不及析出或只局部析出，組織也將由細片狀的珠光體或屈氏體和微量的純鐵體組成。

當冷卻得極為迅速時，固溶體內碳就來不及由鐵的晶格內析出，因而也來不及形成滲碳體；轉變只限于 γ -鐵結晶格子重新改組為 α -鐵。碳以溶在 α -鐵內的狀態被保留下來。碳在 α -鐵內的過飽和固溶體叫做馬氏體。

冷卻後滲碳體分布的狀況和晶粒的大小決定于鋼的加熱條件。如果將鋼緩慢地加熱到奧氏體狀態，並在此溫度下保持較長的時間，那麼，奧氏體的晶粒就會長大。如果將鋼迅速地加熱，且加熱到很高的溫度，晶粒也將會長大。當具有粗晶粒奧氏



1



2



3



4

图 2. 碳素钢的标准显微组织

1—纯铁体有着均一品粒的组织；2—含碳量为 0.8% 的共析钢，有着由纯铁体和以一定形式横贯于纯铁体晶粒间的片状渗碳体所构成的珠光体组织；3—含碳量少于 0.8% 的亚共析钢组织，由纯铁体晶粒和珠光体组成；4—含碳量多于 0.8% 的过共析钢组织，由珠光体晶粒和位于珠光体晶界上的渗碳体组成。 $\times 400$ 。

体組織的鋼冷却时，能获得具有粗晶粒珠光体和完全不同于一般分布状态的过剩組織成分的純鉄体和滲碳体的鋼。这些純鉄体和滲碳体呈長形析出，彼此間成一定角度而橫貫于鋼的晶粒間。这种組織叫做过热組織，它使鋼的机械性能降低。

鋼成分內存在的其他元素的雜質，对鋼組織也有很大影响。其中有一些元素因限于鋼的冶煉操作条件是不可避免的，如錳、硫、磷、矽和氧。这些雜質通常只有微量存在，对鋼組織的影响也很小。

除不可避免的雜質外，还往往有意地加进一些特殊元素，以期改变鋼的組織和性能。用于这方面的金属有：鉻、錳、鎳、矽、鎢及一些其他金属。

通常，特加的雜質能使鋼內形成較細的晶粒，减小滲碳体，因而可以改进鋼的机械性能。特加雜質的影响在淬火后最为显著。

表 1 所列，是普通碳素鋼和特种鋼的成分。

表 1 各种牌号的碳素鋼和特种鋼的成分

鋼 牌 号	化 学 成 分 (%)		
	碳	錳	鉻
40	0.35~0.45	0.5~0.8	—
45	0.40~0.50	0.5~0.8	—
Y8	0.75~0.85	0.5~0.8	—
Y12	1.15~1.25	0.5~0.8	—
50Г	0.45~0.55	0.7~1.0	—
45Г2	0.40~0.50	1.4~1.8	—
40X	0.85~0.45	0.5~0.8	0.8~1.1
ИХ15	0.95~1.10	0.2~0.4	1.3~1.65

2. 鋼的性能

鋼的質量決定于鋼的各種性能，其中主要的有硬度、強度、塑性以及沖擊韌性。

材料抵抗另一更硬物體侵入其內的性能叫做硬度。硬度是在硬度試驗儀器——硬度計上測定，硬度計有着各種類型：一類硬度計是將鋼球壓入被試驗金屬的表面，另一類硬度計是將金剛石壓印頭壓入被試驗金屬的表面。每種硬度計各有其獨特的硬度刻度。最常使用的，是以鋼球壓入而測定出的布氏硬度(H_B)或以金剛石錐體壓入而測定出的洛氏硬度(H_{RC})。

強度和塑性是在試驗機上試驗特制試樣的斷裂而測定的。拉伸時，試樣起初是作彈性的伸長，即于卸除負荷後能恢復原有的尺寸。當負荷達到一定程度時，就出現永久伸長。永久伸長率為0.2%時的應力（即施于試樣原始的單位截面積上的負荷），稱為屈服點，並以 σ_r 公斤/平方公厘來表示。相當於支持試樣不斷裂的最大負荷的應力，叫做強度極限，並以 $\sigma_{пч}$ 公斤/平方公厘來表示。

以百分數表示的試樣斷裂時的伸長與其原長度之比，叫做延伸率，並以 $\delta\%$ 表示。以百分數表示的試樣斷裂前截面積的減小數值與其原截面積之比，叫做斷面收縮率，並以 $\psi\%$ 表示。

在沖擊負荷下試樣橫向折斷時消耗的功，叫做沖擊韌性，通常以 a_k 公斤·公尺/平方公分表示^①。

純鐵或純鐵體是韌軟而強度很小的材料。純鐵體有下列特

① 有關金屬性能的詳細內容請參看 Д. О. Славин 著的“Свойства металлов”，1952 Гостехиздат。

性:

布氏硬度	$H_B = 80$
强度极限	$\sigma_{ny} = 30 \text{ 公斤/公厘}^2$
延伸率	$\delta = 45\%$
断面收缩率	$\psi = 75\%$
冲击韧性	$a_n = 20 \text{ 公斤·公尺/公分}^2$

增加含碳量,因而在鋼組織內出現滲碳体微粒,能显著地提高鋼的硬度和强度,但塑性却降低(图3)。

滲碳体具有高的硬度和强度。滲碳体伸入并橫貫于鉄晶粒

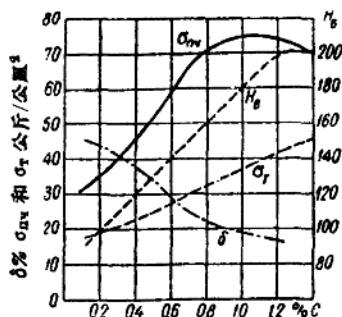


图3. 增加含碳量时鋼强度的增高和可塑性的降低(当含碳量很高时强度的降低是因鋼的脆性增加所致)。

σ_{ny} ——强度极限;
 σ_T ——屈服点;
 δ ——延伸率;
 H_B ——硬度。

之間,这样就扭歪了鉄的結晶格子,使晶格比較強硬而减少可塑性。含碳量增到0.8%时,硬度能增高到 $H_B 180 \sim 200$,强度极限增加到 $\sigma_{sp} = 70 \sim 75$ 公斤/平方公厘,同时使延伸率降低 $2/3 \sim 3/4$,而断面收缩率和冲击韧性也将降低 $1/2 \sim 2/3$ 。

上述对比关系是正常的鋼組織的特点。这些狀況能随着許多的因素而有所改变。例如,純鉄体晶粒的减小一般总能提高强度;由于过热而引起的鋼晶粒的增大,能使冲击韧

性显著下降,而实际上可能仍保持原有的强度;滲碳体夹杂物变細,能增高强度。鋼內有特种金属元素存在,通常能提高鋼的强度和韧性。

以上所举的一些特性决定着作为材料的鋼的性能，但是对于用这种鋼制造的制件的性能却往往还不能提供完整的概念。大部分制件总是在循环变化的負荷条件下工作着，外部的应力时时改变，反复地时而变为張应力，时而又变为压应力。在循环負荷的条件下，鋼經受不住与强度极限相等的应力，而制件也会在相当小的应力下破裂。金属疲劳了。

金属抗疲劳的应力叫做耐勞性。在任意多次的循环下制件仍不破裂的最大应力叫做耐勞极限。耐勞极限通常不超过拉伸强度极限的50~60%。

应当指出，复杂形狀的制件在比較小的負荷时就能发生疲劳破裂。因为在这样的制件上外部負荷的应力分布得不均匀，当整个零件上的平均負荷还不大时，在应力集中的地方已可能达到耐勞极限的数值。

耐勞强度首先决定于金属表面层的性能和制件表面的状态。金属表面层的性能可用热处理——特别是制件的淬火来改变。

3. 鋼的淬火

鋼的淬火是以两道工序进行的：1. 將鋼加热到具有奥氏体組織的溫度；2. 通常是在水內或油內进行迅速冷却。淬火的結果，鋼的硬度和强度便提高；同时可塑性則降低。

淬火时鋼內产生些什么变化呢？

如果將加热到高温的含碳量为0.8%的鋼緩慢地冷却，那末，在溫度为723°C时，即当达到临界点 A_1 时，奥氏体就完全分解为純鉄体和滲碳体。当冷却得非常迅速时，在200~250°C时

才开始发生組織的变化。而在这种情况下,正如前述,碳来不及从铁的晶格內析出,来不及形成滲碳体的分子,甚至在 γ -铁重新改組成 α -铁之后,碳也还被阻留在晶格內。因而就形成了碳在 α -铁內的固溶体,这种固溶体就叫做馬氏体。当含碳量少于0.8%的鋼(亞共析鋼)淬火时,过剩的純铁体也不析出,而形成碳濃度为中等的馬氏体。

因为碳在 α -铁內的正常溶解度是极小的,所以馬氏体是过飽和的固溶体。結晶格子被大量透入的碳扭歪,因而破坏了正确的立方体結構。这样的扭歪使金属在压缩和拉伸时铁原子难以移动,而这种难以移动的程度比在有相当粗大的滲碳体質点透入时更大。这种組織的硬度和强度特别高。

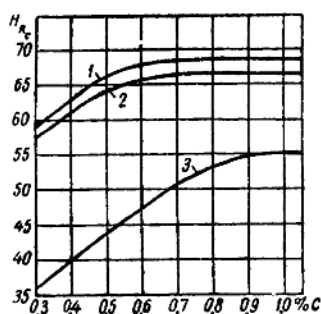


图 4. 随着含碳量的增加而淬火鋼硬度的增高。

1—高频淬火后的硬度; 2—普通淬火后的硬度; 3—具有50%馬氏体組織的硬度。

(含碳量大于0.6~0.7%时硬度增高的缓慢,是因淬火鋼組織內除有馬氏体外还有殘留奧氏体所致。具有50%馬氏体的区域的硬度决定着淬火层的边界。)

以移动,而这种难以移动的程度比在有相当粗大的滲碳体質点透入时更大。这种組織的硬度和强度特别高。

馬氏体的显微組織的特征是呈針狀結構。

馬氏体的硬度决定于鋼內的含碳量(图4)。当含碳量增加到0.6~0.7%时,硬度急剧地增高。繼續增加碳的含量时,硬度的增高就已經不显著了。这是由于在200~250°C时开始的奧氏体轉变为馬氏体的过程,甚至冷却到室温时也不会全部結束。一部分的奧氏体不

发生变化。这种奧氏体一般被称为殘留奧氏体,它很軟,因而降低了淬火鋼的平均硬度。碳的濃度愈高,殘留奧氏体的数量就