

# 鋼的回火

唐宗杰編著

机械工业出版社

## 內 容 簡 介

本书是参考苏联书刊、国内资料以及实际的試驗結果和生产經驗編写的。內容包括回火轉变的基本原理、回火对淬火鋼的机械性能和內应力的影响、鋼的回火脆性、回火工艺的制訂、碳素鋼和合金鋼的回火工艺、鋼的快速回火以及回火加热用的介质和常用回火加热炉的結構和特性。

本书資料丰富，切合实用，可供从事热处理的技术員工参考。

編著者：唐宗杰

NO. 3132

1960年1月第一版 1960年1月第一版第一次印刷

787×1092 1/32 字数44千字 印張2 0,001—4,040册

机械工业出版社(北京阜成門外百万庄)出版

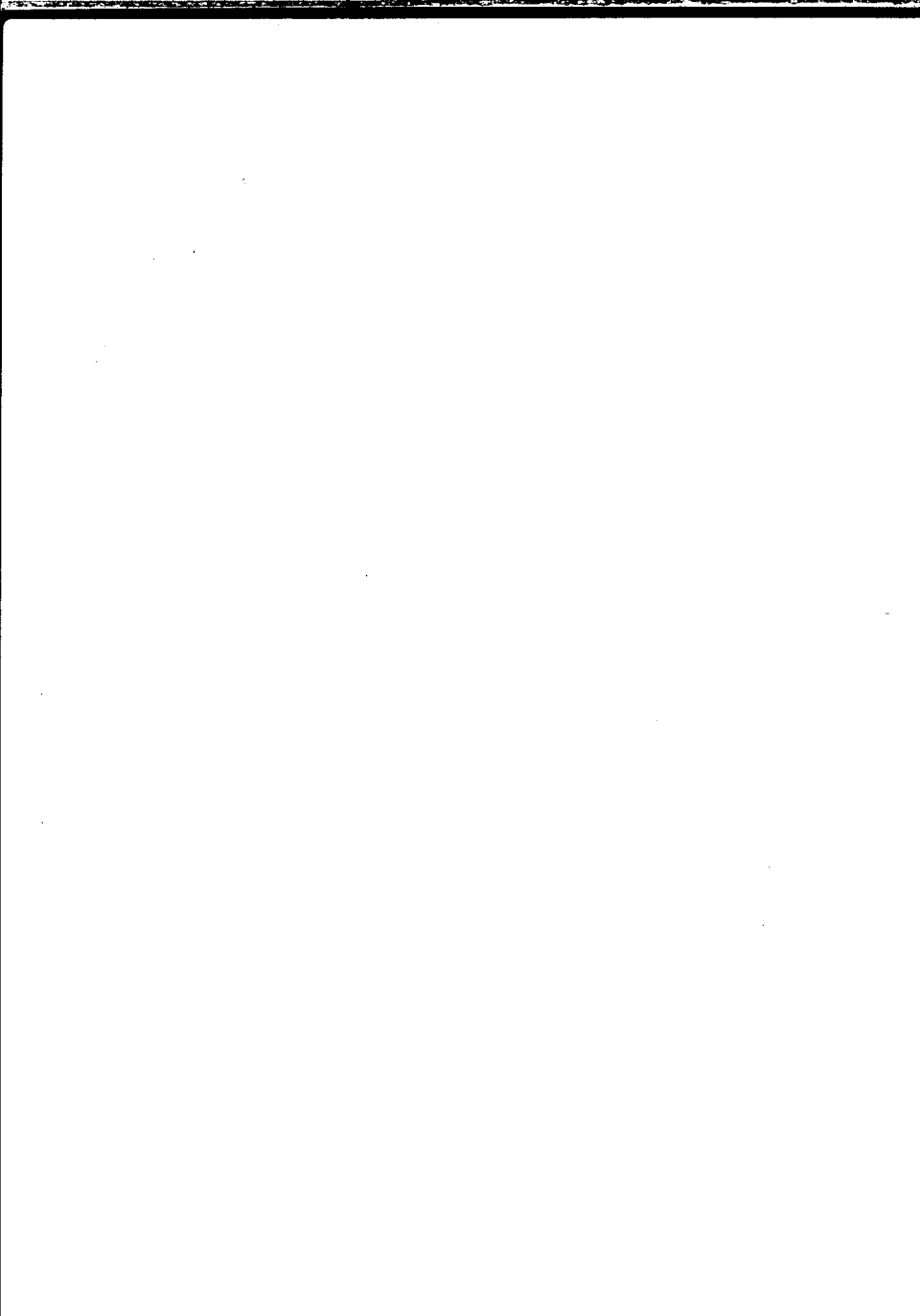
机械工业出版社印刷厂印刷 新华書店發行

北京市書刊出版业营业  
許可証出字第008号

統一書号 T15033·2013

定 价 (10) 0.28元

第一章	回火的目的和转变的基本原理	3
第二章	回火对淬火钢的机械性能的影响	8
第三章	回火对淬火钢的内应力的影响	11
第四章	钢的回火脆性	14
第五章	影响回火质量的因素	21
第六章	怎样制订回火工艺	27
第七章	碳素钢的回火工艺	31
第八章	合金钢的回火工艺	35
第九章	钢的快速回火	48
第十章	回火操作用的设备	55
附录		62



## 第一章 回火的目的和转变的基本原理

零件由于在机器中工作的情况不同而有不同的要求。有的要求很高的强度（如齿轮、轴、曲轴等），有的要求耐磨（如滚珠轴承、量规等）；有的要求高的强度和足够的韧性（如键杆、弹簧等）。要满足这些性能的要求，除采用高级的或者特殊的钢材外，还须运用热处理方法。热处理中的淬火虽然能使钢的硬度和强度提高，但还不能达到各种性能的综合要求，必须与回火相配合。

回火是把淬硬的钢加热到下临界点（ $A_{c1}$ ）以下的各种温度保温，随后在空气中或在水、油中冷却，使淬火的钢从不稳定的组织转变为较稳定组织的热处理方法。所以回火和其他热处理方法同样地包括了加热、保温、冷却三个阶段。所不同的回火是属于加热不超过临界温度因而没有相变的热处理操作。

**回火的目的** 钢在淬火后是处在一种应力的状态之下，并且具有很高的硬度和大的脆性，所以不能在实际中使用，必须经过回火。回火的主要目的是：

- 1) 消除或减低淬火时所引起的内应力。
- 2) 降低淬火件的硬度。
- 3) 提高淬火钢的韧性减少脆性。

**淬火组织的不稳定性** 钢加热到临界温度（ $723^{\circ}\text{C}$ ）以上后，钢的内部就发生变化，钢中的碳溶解到 $\gamma$ 铁中，而成为碳和铁的固溶体，这种固溶体称为奥氏体。因为淬火时冷却很快，因此溶解在奥氏体中的碳来不及从奥氏体中析出，因而使奥氏体分解为铁素体-渗碳体结构的过程不能进行。此时 $\gamma$ 铁已转变为 $\alpha$ 铁，所

以形成了碳在 $\alpha$ -鐵中的过飽和固溶体，这种固溶体称为正方馬氏体或淬火馬氏体。淬火后还有一部分未曾轉变的奧氏体，就是殘留奧氏体。所以淬火鋼的組織是正方馬氏体和殘留奧氏体的混合組織（在高碳鋼中还有部分未溶解的碳化物）。

奧氏体轉为馬氏体是无扩散的轉变过程，是在低溫（200°C以下）形成的，甚至在零度以下70~80°C奧氏体还能轉变成馬氏体。而在室溫时，这种殘留奧氏体轉变成馬氏体的过程仍能繼續进行，但轉变的速度很慢。所以殘留奧氏体是不稳定的組織。

另一方面，正方馬氏体在室溫（20°C）时，也进行分解。在表1中可以看到，在0°C时馬氏体是足够稳定的，需要340年才能分解一半。但在室溫（20°C）时，只要6年的時間就有一半的馬氏体分解。所以說正方馬氏体也是不稳定的組織。

表1 回火时馬氏体的半分解期

回火溫度°C	半分解期	回火溫度°C	半分解期
0	340年	60	3天
20	6.4年	80	7小时50分
40	2.5月	100	50分
		120	8分

既然淬火鋼中正方馬氏体和殘留奧氏体在室溫都要发生变化，所以說淬火鋼的組織是不稳定的。

**回火的轉变过程** 如果把回火溫度提高到120°C时，仅需8分钟就能使馬氏体分解一半。所以回火既能使殘留奧氏体轉变成馬氏体，又能加速馬氏体的分解过程。

回火中馬氏体的分解过程，可以分为下面四个溫度区域：

1. 80°~200°C的第一种轉变（馬氏体的分解）：在这种轉变

中可分为二个阶段。在 $80\sim 150^{\circ}\text{C}$ 的第一阶段中，正方馬氏体中所溶解的微細碳化物逐漸地析出。这时候所析出的碳化物是极分散的，同时不具有磁性。由于馬氏体中碳化物析出，所以使正方馬氏体中的含碳量减少（例如含碳1.4%的鋼淬火后馬氏体中的含碳量为1.18%，經 $150^{\circ}\text{C}$ 回火后就降低到0.52%）。由于碳的析出，使馬氏体的正方性减小，晶格长度縮短，而获得含碳0.3%左右的立方馬氏体——即回火馬氏体。

在 $150\sim 200^{\circ}\text{C}$ 的第二阶段中，扩散过程已能进行，碳化物的析出加速并形成較稳定的組織。由回火馬氏体和碳化物微粒所組成的混合物仍保持高的硬度，这是因为碳化物微粒沉淀在組織的空隙中，而使組織的晶粒不易滑动所致。同时内应力却显著地降低。

經過第一种轉变后的組織是含0.3%左右碳的回火馬氏体和殘留奧氏体的混合組織。

2.  $200\sim 300^{\circ}\text{C}$ 的第二种轉变（殘留奧氏体的轉变）：在 $200^{\circ}\text{C}$ 以上时殘留奧氏体就开始析出碳化物而轉变成回火馬氏体。由于殘留奧氏体分解为回火馬氏体，因而引起鋼的体积的膨脹。同时回火馬氏体中碳还繼續析出，从0.3%左右的碳降低到0.1~0.2%的碳。并且析出的碳化物更明显地发生聚集。所以引起鋼的硬度下降。經過这种轉变后的組織为含碳0.1~0.2%的回火馬氏体和碳化物的混合組織。

3.  $300\sim 400^{\circ}\text{C}$ 的第三种轉变（再結晶过程）：此时馬氏体繼續析出碳化物，直到含碳量和室溫时的含碳量一样，即馬氏体全部分解形成鉄素体与碳化物的混合物；同时碳化物开始聚集。在这一轉变中主要是消除内应力和以前轉变中所保存的塑性变形影响，我們称此轉变为再結晶过程。在溫度較低（ $400^{\circ}\text{C}$ 以下）时得

到回火馬氏体和屈氏体的混合組織（硬度約为  $H_B 400 \sim 600$ ）。在  $400^\circ\text{C}$  时几乎全部是屈氏体（硬度  $H_B 330 \sim 400$ ）。

4.  $400 \sim 650^\circ\text{C}$  的第四种轉变（聚集过程）：这时候碳化物的聚集繼續发展；鋼的硬度降低韧性提高。在  $400 \sim 550^\circ\text{C}$  时获得回火索氏体，在  $620^\circ\text{C}$  时获得細片状珠光体組織。

虽然回火过程分为四种轉变，但每种轉变都是相互关联而不是截然分开的。

**組織的特性** 馬氏体和奥氏体在物理和机械性能上是不同的。馬氏体有磁性而奥氏体无磁性；馬氏体的体积大而奥氏体体积小；馬氏体硬度很高（ $H_B 600 \sim 760$ ）而奥氏体硬度低（ $H_B 170 \sim 220$ ）；馬氏体很脆几乎没有韧性而奥氏体有很高的韧性。

屈氏体、索氏体都是鉄素体和渗碳体的混合物。由于回火温度不同而使分解出来的鉄素体和渗碳体的顆粒大小不同。索氏体在放大 500 倍的显微镜下就能区别开鉄素体和渗碳体，而屈氏体需要放大 2000~3000 倍时才能区别。此外屈氏体通常保留着馬氏体的位向，所以在显微镜下，屈氏体和回火馬氏体不易識別，因此又称它为針状屈氏体。

屈氏体的硬度約为  $H_B 330 \sim 410$ ，弹性高韧性大。索氏体的塑性較大而韧性亦大，硬度約为  $H_B 230 \sim 320$ 。

**合金元素对回火过程的影响** 合金鋼中的合金元素对回火过程的影响，是使鋼的每种轉变的温度区域改变，并且使某些过程显得强烈。

合金元素对第一种轉变的第一阶段（ $80 \sim 150^\circ\text{C}$ ）所进行的分解速度几乎和碳鋼相同。因为合金元素在这时还无法进行扩散。在轉变第二阶段（ $150 \sim 200^\circ\text{C}$ ）鋼件含鉻、錳、钒、鉬等元素使馬氏体中的碳化物析出困难，因而減慢了第二阶段的轉变。所以



合金鋼比碳鋼在較高的溫度回火后，還能保持較高的硬度。例如含碳1.4%的碳鋼在250°C回火后硬度為 $R_c 59$ 。當含2%鉬時，要在350~400°C回火后才能得到相同的硬度。含2%的鎢時要在400°C回火才達到相同硬度。

合金元素對第二種轉變（殘留奧氏體的分解）的影響很大。錳和鉻強烈地阻止殘留奧氏體的分解，鎳、鉬、鎢的影響較小，鈷幾乎沒有影響。由於合金元素加入鋼中，使奧氏體的穩定性增加了。因此使殘留奧氏體分解比較困難，必須提高回火溫度，甚至回火幾次后才能使殘留奧氏體分解。

例如在合金元素較多的高速鋼中，淬火后殘留奧氏體數量很多。淬火后硬度為 $R_c 60\sim 62$ 。但是經過550°~570°C三次回火后，才能使殘留奧氏體接近完全分解，并轉變成回火馬氏體，因而使硬度提高到 $R_c 63\sim 65$ 。這種在回火后硬度升高的現象稱為“二次硬化”或“次生硬化”，好像又經過“淬火”一樣。

合金元素可使馬氏體中碳的析出過程減慢。含錳和鎳的鋼沒有影響，而含鉻、鉬、鎢的鋼可使馬氏體的分解延遲100°C左右。在400~500°C時硅不阻止碳從馬氏體中析出，但在400°C以下時，硅強烈地減慢了馬氏體的分解。

當鋼中含鎳6%以下或含鈷3.5%以下時，促使回火中碳化物的聚集，并減小碳化物的分散程度。鋼中含釩在1.4%以下，鉬在1.2%以下，鉻在7%以下，錳在2.5%以下或硅在3%以下時，能阻礙碳化物的聚集，并增大碳化物的分散度。

合金元素阻礙碳化物的聚集，也就能使合金鋼在較高的溫度回火后，仍保持有細小的屈氏體或索氏體組織，因而使鋼具有高的強度和硬度。

## 第二章 回火对淬火钢的机械性能的影响

淬火工件經回火后，从外表的变化上通常可以看到硬度的下降。但是淬火工件經回火后硬度的降低，并不是說明工件就不耐用。因为对工件所要求的不仅仅是硬度，而是工件的各种性能(强度、韌性、塑性等)的配合。即使是切削用的要求高硬度的高碳工具鋼刀具，在淬火后也要經過  $150^{\circ}\sim 170^{\circ}\text{C}$  的回火。这样既能保持原有的高硬度，又能减少內应力，使刀具的韌性显著的提高，增加了刀具的使用寿命。所以了解回火对淬火鋼的机械性能的影响有重大的意义。

首先研究一下回火对淬火的碳鋼的影响。图1表示了各种含碳量鋼的回火溫度-硬度的变化。回火时硬度的变化是和鋼中含碳量有关的。从图中可以看到高碳鋼在  $100^{\circ}\text{C}$  以下回火时，硬度稍微有些提高。这是因为馬氏体分解的第一阶段中，有极微細的碳化物析出而使硬度上升。但在含碳低的 ( $< 0.83\%$ ) 鋼中就没有这种情形。随着溫

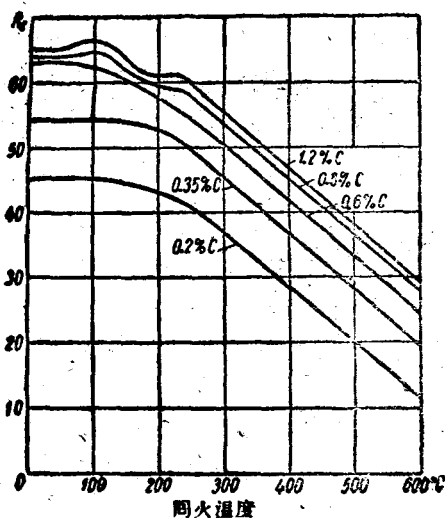


图1 不同含碳量的鋼的回火溫度-硬度关系。

度的繼續提高，使已析出的碳化物粒子粗化和馬氏体中碳的繼續析出，而使硬度逐漸下降。

当溫度在 200~250°C 时，在高碳鋼中可看到硬度停止下降，甚至稍有增加。这种現象是由于鋼中殘留奧氏体轉变成較硬的回火馬氏体的关系。鋼中含碳量愈少，馬氏体的正方性就愈小，而保留下来的殘留奧氏体也愈少。因此在含碳少的鋼中，在 100~250°C 範圍內硬度上升的現象就不明显。溫度超过 300°C 时，由于馬氏体轉化为屈氏体-馬氏体，因此硬度迅速下降。各种碳鋼硬度下降的速度基本上是相同的。

除了回火溫度-硬度的变化以外，其他的机械性能的变化也和回火溫度有着密切的关系。图 2 表明了含 0.4% 碳的中碳鋼經淬火后回火溫度和机械性能的变化关系。

从图中可知，机械性能的变化比硬度的变化要复杂得多。随着回火溫度的提高，除了弹性极限 ( $\sigma_e$ ) 在 300°C 附近有提高以外，断裂强度 ( $\sigma_B$ ) 逐漸下降，而塑性 ( $\psi, \delta$ )

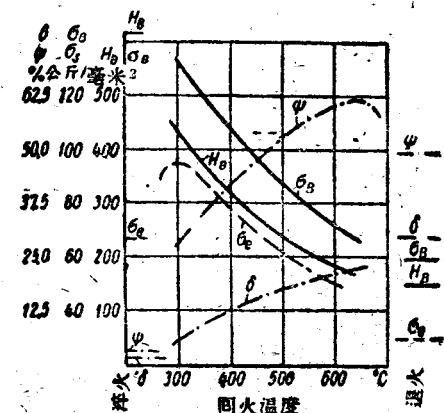


图 2. 40鋼的机械性能和回火溫度的关系。

却随着回火溫度的升高而增加。到 600°C 时韧性和塑性达到了最高点。这些机械性能的变化是由于鋼中的組織从馬氏体分解成为屈氏体索氏体的变化而引起的。

在低温回火时虽然只有正方馬氏体分解为立方馬氏体和析出

碳化物，但对鋼的机械性能已經起了极大的变化。表 2 是 40X 鋼回火温度和强度韌性的关系。在低温回火后，由于消除了淬火时所造成的内应力，因此在 150°~175°C 回火后，硬度并沒下降，但冲击韌性已从淬火后的 1.2 公斤米/厘米<sup>2</sup> 提高到 8.5 公斤米/厘米<sup>2</sup>，而且强度也有所提高。

所以我們必須在不影响硬度要求的条件下，进行适当的温度

表 2 40X 鋼回火温度和强度韌性的关系 (回火 1 小时)

回火温度 °C	$a_K$	$\sigma_B$	$R_C$
淬火后	1.2	178	51~53
150	8	197	
175	8.5	200	
200	7	195.5	
225	4.8	188.5	
250	4.2	183	
275	2.4	172	
300	2.8	166	48~50

回火。这样既能保持淬火后原有的硬度又能消除内应力和提高工件的韌性和强度。

回火对淬火合金鋼的机械性能的影响，和碳鋼基本上有相同的变化

(见图 3)。

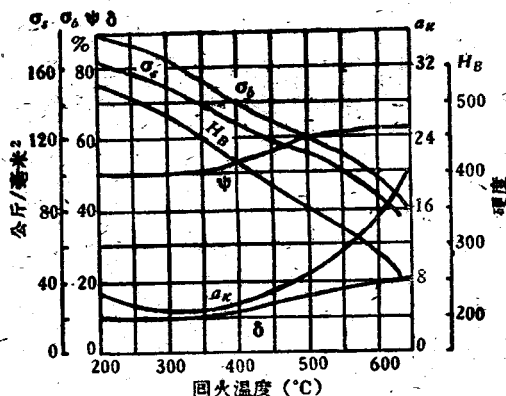


图 3 40XHMA 的机械性能和回火温度的关系。

在低温回火时，合金钢中的铬、镍、钨等元素，增大了低温回火钢的抗弯脆性强度，少量的钼和钛也起着良好的作用，而硅、锰不发生影响。硅、镍对高合金钢中回火马氏体的韧性起着最好的影响，锰对回火马氏体的韧性的影响较小。

在高温回火时，由于钢中含有铬、钨、钼、钒等元素，合金碳化物的聚集过程减慢，因此使合金钢在较高温度回火后，仍具有较高的强度、硬度。硅、锰由于增加了铁素体的强度，所以使高温回火后的索氏体组织也具有高的强度和韧性。

### 第三章 回火对淬火钢的内应力的影响

钢料在淬火后是处在应力的情况下。这些内应力包括有热应力和组织应力两个方面。由于钢在急冷（淬火）时，使钢的表面和心部的温度相差很大，造成冷却的不均匀而引起的应力，称为热应力。钢料冷得愈快热应力也就愈大。热应力在钢的表面上造成压应力，而在心部造成拉应力。钢在淬火急冷的同时，在钢的内部发生组织的转变（由奥氏体转变成马氏体）。由于奥氏体所占的体积比马氏体要小，淬火后钢料的体积要涨大（例如0.58%碳的碳钢经淬火后体积增加0.46%）；马氏体是过饱和的 $\alpha$ 铁，由于多余的碳原子存在于 $\alpha$ 铁的晶格中使 $\alpha$ 铁的结晶格子受到歪曲；而且钢在淬火时整个体积的各个部分不可能同时发生马氏体的转变；由于这许多原因就造成了应力，这部分应力称为组织应力。

如果在淬火钢中这二种内应力的总和超过了钢的屈服强度时，就会使钢料发生变形。如果应力超过了钢的断裂强度时，就会造成裂纹而使工件报废。如果在钢的局部（即应力集中点）内应力超过断裂强度，就会产生微细的裂纹，用肉眼不易分辨，要用显

微鏡放大后才能发现。

鋼中內應力的大小是隨工件的大小、材料成份、處理方法等不同而變化的。例如直徑 180 毫米的零件在水淬後表面的拉應力可達到 60 公斤/毫米<sup>2</sup>。直徑 640 毫米的零件雖然進行正火處理，但在表面的壓應力亦有 20~30 公斤/毫米<sup>2</sup>，而心部也有相同數值的拉應力。所以對於大型工件的正火處理，不能認為冷卻得很慢而不進行回火，這樣會造成工件開裂的危險。

圖 4 表示了 45 鋼的回火溫度、保溫時間和內應力的變化關係。淬火後內應力為 21 公斤/毫米<sup>2</sup>，經 450°C 回火 3 小時後降到 12.5 公斤/毫米<sup>2</sup>，在 580°C 回火 3 小時降到 3 公斤/毫米<sup>2</sup>，而

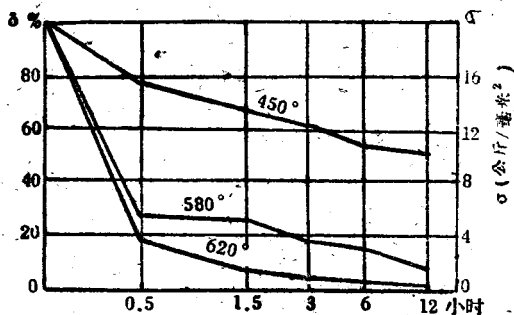


圖 4 45 鋼在 450°、580°、620°C 回火的時間-應力關係。

在 620°C 回火 3 小時後已基本完全消除。在圖中可以看出回火保溫開始的半小時內，內應力降低得很明顯（45 號鋼在 620°C 回火半小時應力已消除 80%），繼續延長保溫時間應力變化就很小。

圖 5 是各種鋼經淬火後在不同溫度回火 12 小時後內應力消除的情況。由於合金元素加入到鋼中，使回火消除應力的效果降低。例如 45 鋼在 450°C 回火 12 小時後應力從 21 公斤/毫米<sup>2</sup> 降低到 10.5 公斤/毫米<sup>2</sup>，而 35XM 鋼僅降到 17 公斤/毫米<sup>2</sup>。含鋁、鉻的鋼這種影響較明顯，含鎳的鋼影響較小。

在圖 6 中，雖然淬火及正火後的內應力相同，但經同樣回火

后，消除内应力的效果不同。經12小时回火后正火的内应力已降到4公斤/毫米<sup>2</sup>，而淬火的仅降到8公斤/毫米<sup>2</sup>，几乎相差一倍。

根据以上分析结果，可以提出下面几点：

1. 回火温度是消除内应力的主要因素。回火温度愈高，内应力消除得愈多。回火温度高到600°C以上时，内应力已经能全部消除。

2. 回火保温开始的阶段内应力降低得最快，以后降低就逐渐缓慢。所以回火保温时间通常在2~3小时后就足够了。

3. 合金钢中的内应力比碳钢不容易消除。所以合金钢回火保温时间应该较长。

4. 在同样条件下回火时，淬火钢被消除应力的效果比正火的钢要小。

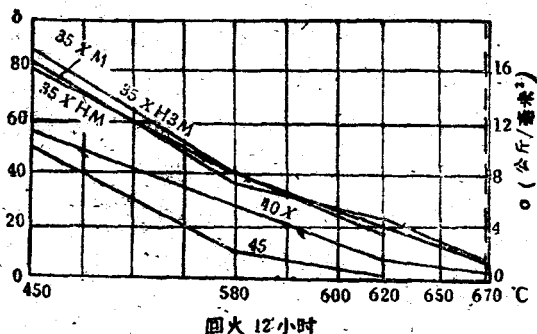


图5 45、40X、35XM、35XH3M、35XF1M钢的温度-应力关系。

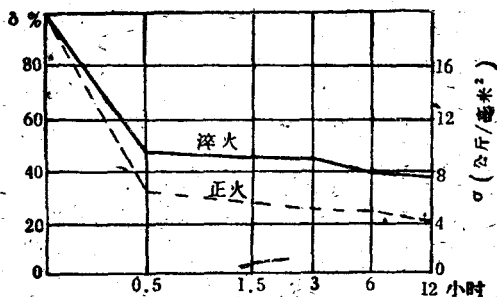


图6 35XM钢经淬火或正火后在580°C回火时间-应力关系。

## 第四章 鋼的回火脆性

淬火后的碳鋼在400°C以下回火时冲击韌性的变化很少。超过400°C回火后冲击韌性就显著地增加(见图7)。碳鋼在20°~400°C回火后虽然用普通的冲击試驗看不出韌性的很大变化,但如果用扭轉冲击試驗时,在200~300°C范围内就出現韌性急剧的降低。

許多合金鋼作普通的冲击試驗时,在一定的回火溫度下出現韌性下降。图8表示鉻鎳鋼的冲击韌性与回火溫度的关系。在

250°~400°C和450°~650°C二个溫度区域中出現韌性的降低,这种现象叫做回火脆性。

### 回火脆性的特点

在250°~400°C区域内回火脆性的特性是: 1. 几乎所有的鋼或多或少的有这种脆性。可能只有含碳低于0.3%的碳

鋼不出現这种脆性。2. 只在淬火鋼回火时发生。3. 这种脆性和回火后的冷却速度无关。4. 鋼中加入任何合金元素都不能消除这

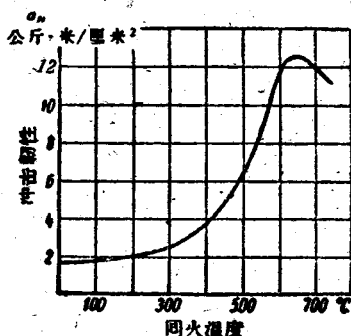


图7 40鋼冲击韌性与回火溫度的关系。

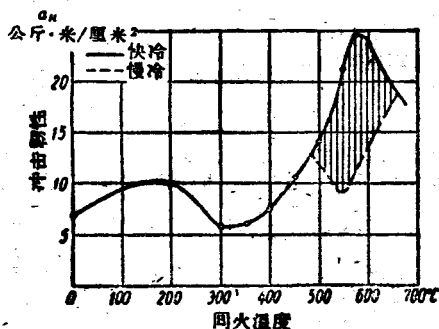


图8 鉻鎳鋼(0.3% C 1.47% Cr 3.4% Ni)的冲击韌性与回火溫度的关系。



种脆性。5. 如果先在  $400^{\circ}\text{C}$  以上温度回火后再在  $250^{\circ}\sim 400^{\circ}\text{C}$  回火时不再出现这种脆性。所以在  $250^{\circ}\sim 400^{\circ}\text{C}$  区域内出现的回火脆性叫做[第一种不可逆脆性]●。

在  $450^{\circ}\sim 650^{\circ}\text{C}$  区域内出现的脆性的特性是：1. 仅某些合金钢才有这种脆性。2. 它不单是在淬火回火时出现，并且在正火回火后甚至在退火回火时也能出现。3. 这种脆性的出现和回火后的冷却速度有关。4. 钢中加入某些合金元素（钼、钨等）可以消除这种脆性。5. 如果在第一次高温回火后快冷不使脆性出现，但在第二次高温回火后慢冷时，脆性又重新出现。根据这些特性在  $450^{\circ}\sim 650^{\circ}\text{C}$  区域内的回火脆性叫做[可逆脆性]——又称[钢的回火脆性]。

但在很多结构钢中，还发现另一种回火脆性。这种脆性只在淬火后于  $450^{\circ}\sim 550^{\circ}\text{C}$  温度内回火时出现，与回火后的冷却速度无关。虽然这种脆性的温度区域和[可逆脆性]一致，但性质却完全不同。因此这种脆性叫做[第二种不可逆脆性]。

产生回火脆性的原因 回火脆性产生的原因，还未澈底明了，目前认为有以下几点原因。

[第一种不可逆脆性]的温度区域符合于残留奥氏体的分解温度范围。由于残留奥氏体的分解，使原有的韧性组织（奥氏体的韧性大）的数量减少，这样更显出了马氏体的脆性，因此引起钢的韧性的降低。这一因素在  $225^{\circ}\sim 300^{\circ}\text{C}$  起着主要作用。另一方面，在此温度区域里同时发生马氏体的分解，有可能在组织中析出分散的碳化物。由于碳化物的出现引起回火钢脆性的出现。这个因素在  $300^{\circ}\sim 350^{\circ}\text{C}$  时起主要作用。

[第二种不可逆脆性]产生的原因，有人认为也是和残留奥氏

● 不可逆就是不再重复的意思。