

钟士红 编著

钢的回火工艺 和回火方程

GANG DE HUI HUO GONG YI
HE HUI HUO FANG CHENG

机械工业出版社



TG 161.5

277

钢的回火工艺和回火方程

钟士红 编著



机械工业出版社

(京)新登字054号

内 容 提 要

本书从工艺角度出发,在理论分析的基础上,介绍钢的回火曲线和回火方程的基本原理、表达方式及其应用。提出一些与回火工艺有关的新概念和新方法,例如温度和时间的当量关系、两次回火的累积效应等。并对电子计算机在回火工艺中的应用作了详尽介绍。

书中配有大量实例,既有理论深度,又解决实际问题。可供从事金属材料及热处理工作的技术人员、工人和在校师生参考。

钢的回火工艺和回火方程

钟士红 编著

责任编辑:韩会民 责任校对:孙志筠
封面设计:姚毅 版式设计:冉晓华
责任印制:王国光

机械工业出版社出版(北京皇城根外大街22号)

邮政编码:100037

(北京市书刊出版业营业性可复制字第111号)

机械工业出版社北京印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 新华书店经销

*

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ · 印张 $13^{3/8}$ · 插页 2 · 字数 295 千字

1993年8月北京第1版 · 1993年8月北京第1次印刷

印数 0 001—2 300 · 定价: 11.50元

*

ISBN 7-111-03624-7/TG·795

前 言

本书从工艺角度出发，对回火曲线和回火方程作了较为详尽的理论分析，并在试验结果的基础上，介绍回火曲线和回火方程的各种表达方式。回火曲线和回火方程主要用来制定回火工艺，同时对一些与回火工艺有关的实际问题，例如两次回火的累积效益，回火温度和回火时间的当量关系等，也都可以通过回火曲线和回火方程进行分析，并提供解决这些实际问题的具体方法。另外，回火曲线和回火方程实现了工艺参数的数模化，从而为回火工艺的计算机化，自动化以及建立工艺参数的档案管理系统提供了理论依据。本书第八章对电子计算机在回火工艺方面的应用作了较为详尽的介绍。为了完整起见，钢在回火时组织转变的基本原理也作了适当的阐述。为此，从《钢的热处理》（由胡光立、李崇谟、吴锁春编著，国防工业出版社出版，1985年版本）和《金属热处理原理》（由刘云旭主编、机械工业出版社出版、1981年版本）两书中，直接借用了不少资料，在此向编著者表示感谢。

目前，我国对于回火曲线和回火方程的研究、测试、收集和整理工作还刚刚开始。希望本书能为这项工作的开展作出一点微薄的贡献。

本书从理论分析出发，解决回火工艺中的实际问题，并配有大量实例。因此，不仅可供从事金属材料及热处理工作的工程技术人员和工人阅读，而且也可作为金属材料和热处

理专业的学生、研究生和教师的参考书。

由于笔者水平有限，加之书中许多观点都是首次提出，难免出现错误和不足，敬希广大读者批评指正。

编著者

一九九二年十二月

目 录

第一章 钢在回火时的转变	1
第一节 钢在回火时的组织转变	2
一、马氏体中碳的偏聚	9
二、马氏体的分解	11
三、残余奥氏体的转变	16
四、碳化物类型的转变	17
五、 α 相状态的变化及碳化物的聚集长大	21
第二节 合金元素对回火转变的影响	27
一、合金元素提高钢的回火稳定性	27
二、合金元素引起的二次淬火现象	33
三、合金元素的二次硬化作用	35
第三节 钢在回火时力学性能的变化	41
一、淬硬组织回火时力学性能的变化	41
二、过冷奥氏体分解产物回火时力学性能的变化	50
第四节 回火脆化现象	52
一、回火马氏体脆性(TME).....	53
二、回火脆性(TE).....	58
第二章 钢的回火工艺	78
第一节 制定回火工艺的基本准则	79
一、回火性能与回火温度和回火时间的关系	79
二、内应力与回火温度和回火时间的关系	82
三、回火时间的基本含义	84
四、制定回火工艺的基本准则	87
第二节 钢的回火工艺	88
一、回火温度的选择	89
二、回火时间的确定	91

第三章 钢的回火参数和回火基本曲线	95
第一节 回火 P 参数和回火 P 曲线	95
一、回火 P 参数	96
二、回火 P 曲线的测定方法	102
第二节 回火 λ 参数和回火 λ 曲线	110
一、回火 λ 参数	110
二、回火 λ 曲线的测定方法	136
第三节 末端淬火试样的回火基本曲线	141
一、淬火组织对回火 P 曲线的影响	142
二、末端淬火试样的回火 P 曲线	143
第四章 钢的回火动力学曲线	150
第一节 回火动力学曲线的表示方法	150
第二节 回火动力学曲线的测定方法	154
一、等温回火动力学曲线的测定方法	154
二、等时回火动力学曲线的测定方法	155
三、等值回火动力学曲线的测定方法	156
第五章 影响回火曲线的因素	166
第一节 碳对回火基本曲线的影响	166
第二节 合金元素对回火基本曲线的影响	169
一、硅的影响	170
二、钼的影响	170
三、钨的影响	172
四、钒的影响	173
五、铬的影响	174
六、钛的影响	175
七、铌和钽的影响	178
八、锰和镍的影响	179
九、钴的影响	183
十、铜的影响	183
十一、铅的影响	185

十二、磷的影响	185
十三、铍的影响	185
第三节 淬火温度对回火基本曲线的影响	188
第六章 钢的回火方程	190
第一节 参数法	191
一、 <i>L-M</i> 法	191
二、 <i>G-D</i> 法	195
第二节 泰勒级数展开法	200
一、试验方法	200
二、试验结果分析	200
三、回火方程的推导方法	206
第三节 解析-图示法	225
第四节 <i>P</i> 值法	232
第五节 <i>λ</i> 值法	244
第六节 状态方程法	254
第七节 碳钢的回火方程	261
一、碳钢的回火图	262
二、碳钢的回火方程	267
第七章 回火曲线和回火方程的应用	278
第一节 预测力学性能	278
一、利用回火曲线预测力学性能	278
二、利用回火方程预测力学性能	284
第二节 制定回火工艺	289
一、利用回火曲线制定回火工艺	290
二、利用回火方程制定回火工艺	296
第三节 调整回火温度和回火时间	301
第四节 钢在回火过程中温度和时间的当量关系	305
一、恒温过程中温度和时间的当量关系	305
二、温度变化时温度和时间的当量关系	310
第五节 钢在回火过程中回火参数的加法原理及其应用	314

一、 P 参数的加法原理	315
二、 λ 参数的加法原理	319
第六节 钢的两次回火的累积效应	320
一、 P 参数法	321
二、 λ 参数法	325
三、累积效应表达式的应用	327
第八章 电子计算机在回火工艺中的应用	334
第一节 绘制回火曲线	334
一、绘制 P 曲线	335
二、绘制 λ 曲线	340
三、绘制回火动力学曲线	351
第二节 推导回火方程	363
一、 $L-M$ 法	363
二、 $G-D$ 法	372
三、泰勒级数展开法	375
四、 P 值法	387
五、状态方程法	395
第三节 预测力学性能	397
一、利用回火曲线预测力学性能	397
二、利用回火方程预测力学性能	401
第四节 制定回火工艺	407
一、利用回火曲线制定回火工艺	407
二、利用回火方程制定回火工艺	409
第五节 磁盘文件管理	411
一、文件的概念及命名	411
二、磁盘文件管理	413
各种硬度及强度近似值换算表	418
参考文献	420

第一章 钢在回火时的转变

回火是紧接着淬火的一种热处理操作。也往往是钢制零件在整个热处理生产过程中的最后一道工序，一般都是通过控制回火操作的工艺参数使零件获得所需要的性能。因此，回火操作进行得正确与否对零件的使用寿命有着决定意义。

钢件淬火后获得的组织，主要是马氏体或马氏体加残余奥氏体。马氏体与残余奥氏体在钢的临界点以下的温度范围内都是亚稳相。根据热力学条件，它们具有转变到稳定相（铁素体及奥氏体）的倾向。在这温度范围内加热时，马氏体及奥氏体都将分解或转变。这些过程进行的程度随钢的成分、淬火后的组织、所选的回火工艺参数而异。随着回火温度的不断升高，或回火时间的不断延长，最终将转变成铁素体及碳化物的复相组织。

回火处理可以在 A_{c1} 以下很宽的温度范围内进行，钢的性能也就可以在很宽的范围内变化。为了保证钢件回火后获得所需的性能，必须掌握回火工艺参数（温度、时间）对淬火钢件组织形态和性能的影响。因此，研究钢在回火时的组织转变规律和影响这些组织转变的因素及其对性能的影响，从而找出适应钢件在各种服役条件下的组织形态，这对生产实践有着重要的意义。

本章主要讨论碳钢在回火过程中组织和性能变化的一般规律以及合金元素对回火转变的影响，同时对钢的回火脆化现象也作了较为详细的介绍。

第一节 钢在回火时的组织转变

钢经过淬火，所得的组织是马氏体加一定量的残余奥氏体。淬火钢中残余奥氏体的含量随钢中碳及合金元素的含量而异。对于普通碳素钢来说，当含碳量小于0.5%时，残余奥氏体 (A_r) 的量常常小于2%；含碳量为0.8%时， A_r 约为6%；含碳量为1.25%时， A_r 可能超过30%。对于合金钢来说，随着所含合金元素的种类和数量的不同， A_r 量的变化幅度可能更大。在这一节里，我们首先研究碳钢的回火，因此马氏体是主要的组织成分。

淬火钢中的马氏体和残余奥氏体是极不稳定的。这是因为：1) 马氏体中溶解的碳是高度过饱和的，即使是含碳0.7%的钢，马氏体中的含碳量也十倍于铁素体在727℃时的平衡含碳量。2) 马氏体中有很高的应变能，这与马氏体中高密度的位错和孪晶等亚结构有关。3) 马氏体中有很高的界面能，这又与大量马氏体片和条束的存在(增加界面面积)有关。4) 马氏体中残存的奥氏体处于过冷状态，并承受着应力和应变的作用。根据铁碳状态图，在 A_c1 温度以下的最终稳定组织，只能是平衡状态的铁素体与渗碳体的混合物。正是由于马氏体和残余奥氏体的这种不稳定状态与状态图所规定的稳定状态的自由能差，提供了转变的驱动力，使得回火转变成为一种自发倾向。换句话说，马氏体和残余奥氏体本身随时都满足转变为铁素体加渗碳体这种混合物的热力学条件，一旦动力学的条件允许，转变就会自动进行。

这个动力学条件就是原子具有足够的活动能力，回火则是采用加热等手段，促使原子的活动能力增加，从而使转变达到所要求的程度。

淬火钢在回火过程中所发生的组织转变，一般都伴随着许多物理性能的变化。在钢的各种相和组织中，从比容来看，完全处于过饱和状态的马氏体的比容最大，奥氏体的比容最小，而珠光体则介于两者之间，钢中不同组织组成物的比容与其含碳量的关系见图1-1。

这样，淬火时奥氏体向马氏体的转变必将引起体积膨胀，与此相反，回火时马氏体发生转变将使体积缩小，而残余奥氏体的转变则引起体积胀大。从储存相变潜热来看，残余奥氏体全部保存了加热时由珠光体（或铁素体加渗碳体的混合物）转变为奥氏体时所吸收的潜热，淬火马氏体则在冷却时发生马氏体转变而放出一部分的潜热。因此，淬火马

氏体和残余奥氏体在发生回火转变时均有热量放出，但后者放出的热量要大大多于前者。由此可见，通过淬火钢在回火时物理性能的变化，可以研究马氏体和残余奥氏体的转变过程。

淬火碳素钢试样，在不同回火温度下的体积变化和比热情况，如图1-2和图1-3所示。图中表明，淬火碳素钢在回火时，物理性能有四个突然变化，这些变化表征了在相应的温度下，比较集中的发生了某种组织转变。其转变的类型可以

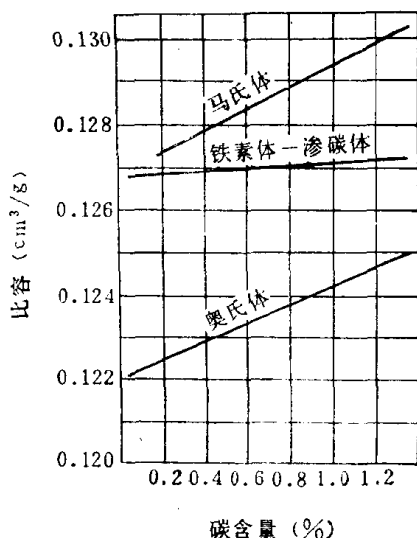


图1-1 钢中马氏体、奥氏体和铁素体-渗碳体混合物的比容与含碳量的关系

从回火钢中存在的相状态来分析。根据图中的试验结果，淬火高碳钢在回火过程中所发生的组织转变列于表1-1中。

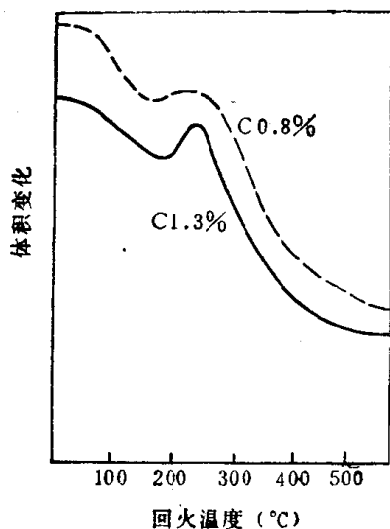


图1-2 碳素钢回火时的膨胀曲线

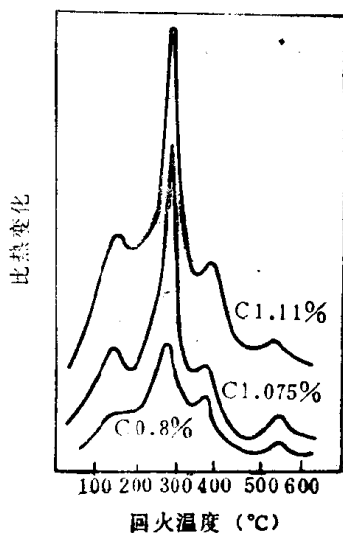


图1-3 碳素钢回火时的热分析曲线

表1-1 碳素钢回火时的组织转变与物理性能变化的关系

温度范围 (°C)	长度变化	放热情况	回火转变类型	相变的性质
80~170	减小	放热	I	$\alpha' \rightarrow M'$
250~300	增大	大量放热	I	$A_R \rightarrow M'(B)$
300~400	减小	放热	II	$M' \rightarrow T'$
450~600	减小	放热	IV	$T' \rightarrow S'$

由表1-1可知，淬火碳素钢在回火加热时发生的转变，大致可以划分为四种不同的相变类型。

第一类回火转变(I) 淬火钢在这个温度范围内加热，

即使体积缩小，又有少数热量放出，因此这是一种马氏体分解反应，转变产物称为回火马氏体(M')。回火马氏体是一种 α 相与细微碳化物的混合物，其显微组织见图1-4b、c。

第二类回火转变(Ⅱ) 这是一种既增大体积的转变，又有大量热量放出的反应，因此是一种残余奥氏体的分解转变，其转变产物为回火马氏体或贝氏体(B)。

第三类回火转变(Ⅲ) 这类转变既缩小体积又有热量放出。在发生这类转变时，从具有一定过饱和度的 α 相中继续析出碳化物、亚稳定的碳化物转变成较稳定的渗碳体，其转变产物称为回火屈氏体(T')。回火托氏体是 α 相与渗碳体的混合物，见图1-4d。

第四类回火转变(Ⅳ) 这也是一种缩小体积和放出热量的转变。在发生这类转变时， α 相发生回复、再结晶，碳化物聚集长大及球化，其转变产物称为回火索氏体(S')，见图1-4e。

淬火低碳钢，因残余奥氏体量很少，除残余奥氏体转变极不明显外，与淬火高碳钢回火情况基本相似。根据不同的回火温度，也可获得回火马氏体、回火托氏体和回火索氏体组织。

其它试验方法，如金相、X射线、电子显微分析等的研究结果表明，上述分析是正确的。综合各种方法的研究结果，淬火碳钢在回火时的组织转变概况列于表1-2。

应该指出，淬火碳素钢在等温回火或在缓慢加热回火条件下，回火时发生的不同类型的转变是在不同温度范围内进行的，但这些温度范围可以相互重叠。换句话说，在同一温度，淬火钢中可能进行着几种不同的变化。钢在回火后表现出来的性能是这些变化的综合结果。另外，随着回火温度的

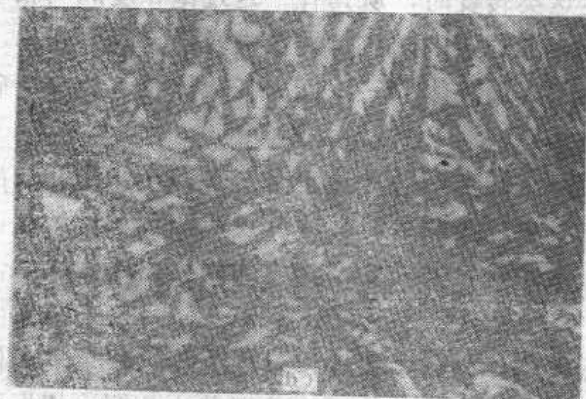
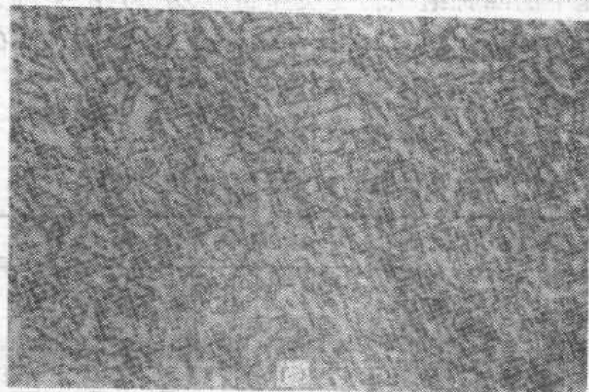
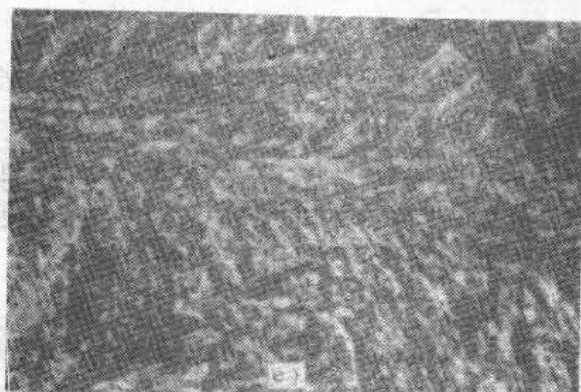


图1-4 高碳钢(C1.3%)1150°C水淬后经
a) 淬火马氏体(白色)和残余奥氏体(灰色) b), c) 100°C回火1h和
回火托氏体 e) 600°C回火1h, 回火索氏体 f) 700°C回火1h, 铁



不同温度回火后的显微组织 $\times 1000$
 200℃回火1h, 回火马氏体(黑色)和残余奥氏体(灰色) d) 300℃回火1h,
 索氏体加粒状渗碳体

提高, 回火转变是连续进行的, 而转变类型则是根据转变的一些特性人为划分的。由于所采用的研究方法不同, 各种研究方法的精度也不断提高, 加之即使是同一转变, 也会在试样的各处先后发生, 因此不同的研究者给出的温度范围必然有一些差异。对我们来说, 重要的了解转变的特点, 而不必过分拘泥于温度值

根据在不同温度范围所发生的组织转变的基本特点, 钢在回火过程中的四种组织转变类型可以分为五个部分来叙述, 这五个部分是: 1) 马氏体中碳的偏聚, 2) 马氏体的分解, 3) 残余奥氏体的转变, 4) 碳化物类型的转变, 5) α 相状态的变化及碳化物的集聚长大。

表1-2 淬火碳素钢回火时的组织转变情况

回火温度 ($^{\circ}\text{C}$)	组织转变类型	回火时组织结构变化		回火产物
		板条状(位错)马氏体	片状(孪晶)马氏体	
80~250	马氏体分解	马氏体中的碳原子偏聚在位错线附近的间隙位置	1) 从马氏体中析出 ϵ -碳化物 2) 马氏体的正方度下降, 碳含量降低	回火马氏体
200~300	残余奥氏体转变		残余奥氏体转变为回火马氏体或贝氏体	回火马氏体
250~400	碳化物类型的转变	1) 马氏体中碳原子全部析出, 在马氏体内或晶界面上形成渗碳体 2) α 相保持板条状形态	1) ϵ -碳化物溶解, 形成 χ -碳化物, χ -碳化物再转变为渗碳体 2) α 相中的孪晶亚结构消失	回火托氏体
400~700	α 相的回复、再结晶、渗碳体的集聚和球化	1) 片状渗碳体球化 2) α 相回复, 位置密度降低 3) 在600 $^{\circ}\text{C}$ 以下 α 相基本上仍保持板条状或片状形态 4) 在600 $^{\circ}\text{C}$ 以上球状渗碳体集聚粗化, α 相再结晶成为等轴状晶粒		回火索氏体