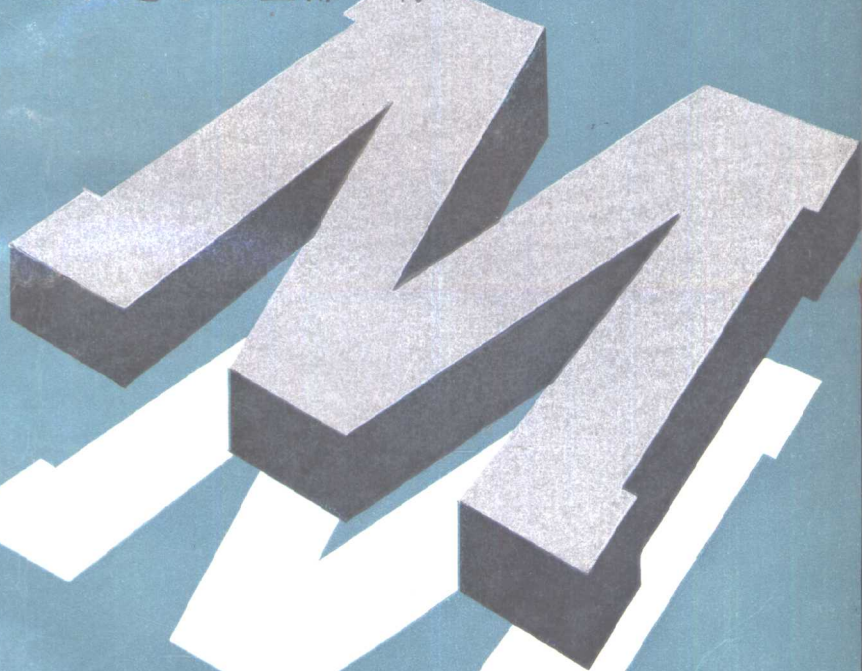


模具制造工人技术培训教材

# 模具材料与热处理

---

机械电子工业部 编



机械工业出版社

模具制造工人技术培训教材

# 模具材料与热处理

机械电子工业部 编



机械工业出版社

(京)新登字054号

本书由机械电子工业部组织编写的模具工人技术理论培训教材，全套共7册。本书共分五章，主要内容包括模具钢热处理工艺理论基础及设备；冷作模具用钢及其热处理；热作模具用钢及其热处理；模具热处理质量检测与控制；模具失效分析及提高模具寿命的途径等。本书的特点是理论结合实际，既有操作技术，又有基本理论分析，对解决现场技术问题有实用价值。

本书可作为中、高级模具工人培训教材，也可供有关技术人员参考使用。

本书由机械电子工业部北京机电研究所陈蕴博、武兵书编写，由机械电子工业部北京机电研究所刘迨审稿。

## 模具材料与热处理

机械电子工业部 编

责任编辑：王明贤 责任校对：张晓蓉  
封面设计：肖 晴 版式设计：胡金瑛  
责任印制：王国光

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

邮政编码：100037

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

机械工业出版社京丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092<sup>1</sup>/<sub>32</sub>·印张6<sup>1</sup>/<sub>4</sub>·字数135千字

1993年11月北京第1版·1993年11月北京第1次印

印数 0 001—8 000·定价：5.00元

ISBN 7-111-03632-8/TG·798

# 模具制造工人培训教材

## 编委会名单

主任：许发樾

副主任：张晓林

顾问：张荫朗

委员：（按姓氏笔画排列）王济成 方康华 邓石城

杨晓毅 杨博泉 陈蕴博 周平之 钟秉毓

储家佑

# 前 言

## (代 序)

模具是工业生产中使用极为广泛的主要工艺装备。采用模具生产零部件，具有高效、节材、成本低、保证质量等一系列优点，是当代工业生产的重要手段和工艺发展方向。许多现代工业的发展和技术水平的提高，在很大程度上取决于模具工业的发展水平。因此，模具工业已成为国民经济的基础工业之一。

目前，我国模具工业比较落后，与国民经济发展不相适应。为此，在1989年3月，国务院颁布的《关于当前产业政策要点的决定》中，把支持发展模具工业摆到了发展国民经济的重要战略地位。

振兴我国模具工业的根本任务之一是加强人才培养，大力提高模具工业职工队伍的素质。对此，除社会各类大、中专学校相关专业积极培养更多的适应模具工业发展的毕业生外，大力发展模具职业技术教育，逐步建立全国性的和以工业城市为中心的初、中、高三级模具制造工人教育培训网，形成模具制造工人的培训与教育体系，从而不断地提高模具制造工人队伍的素质，已是今后工作的重要一环。当前，尤为迫切的是抓好模具设计、数控机床编程及操作人员 and 高级模具制造工人的培训。培训一定要注重实效和规范化，这就需要有一套好的培训计划、大纲和实用的培训教材。

中国模具工业协会教育培训咨询委员会受机械电子工业部教育司的委托，并在其指导下，参考国际模协和德、美、日本等国的模具工人培训计划、大纲，编制了符合我国国情

的《模具工人培训计划、培训大纲》，并成立了模具制造工人培训教材编委会，根据大纲，组织有关院校和企业富有实践经验的专家，编写了《模具钳工工艺学》、《模具制造工艺和装备》、《模具公差与检测》、《模具材料与热处理》、《模具结构与设计基础》、《模具常用机构与机械基础》、《模具制造电气基础》等七种配套的中、高级模具制造工人培训教材。考虑到机电部统编的机械工人技术理论培训教材中已有较好的工具钳工培训教材，其初级部分完全适用于培训初级模具制造工人，各培训教育部门可选择使用，故未编写初级模具制造工人培训教材。

这套教材具有较强的针对性，注重了实践性和实用性，内容包括了我国模具企业在生产中采用的先进、典型结构、参数和图表，以及生产装备和工艺技术；同时注意了基础知识的系统性和广泛性，紧密结合模具生产技术，介绍了机械、电工、电子及计算机应用、压力加工、机床与工具、数学、制图等方面的基础知识，以适应现代模具生产采用高、新技术装备快，模具制造工人学习掌握高超操作技艺的需要。

这套教材也可以作为中专和技校相应专业的教材和模具工程技术人员的参考用书。

这套教材的问世，是我国模具行业的一件大事，为此，谨向为这套教材的编、审和出版付出辛勤劳动的同志们表示衷心的感谢。希望使用这套教材的单位和同志们多提宝贵意见，以便不断修订完善。

中国模具工业协会 理事长

杨 健

1992年10月1日

# 目 录

## 前言

## 第一章 模具钢热处理工艺理论基础及设备 .....1

### 第一节 模具钢热处理工艺理论知识 .....1

### 第二节 模具钢热处理设备及其选用 .....28

### 复习题 .....44

## 第二章 冷作模具用钢及其热处理 .....46

### 第一节 冷作模具的选材与热处理特点 .....46

### 第二节 冷作模具的热处理工艺 .....60

### 第三节 冷作模具热处理操作技术 .....97

### 复习题 .....116

## 第三章 热作模具用钢及其热处理 .....117

### 第一节 热作模具的失效形式及对模具材料的要求 .....117

### 第二节 热作模具钢及模具选材 .....120

### 第三节 锤锻模具用钢及热处理工艺 .....122

### 第四节 中、小机锻模和热挤压模具用钢及其热处理工艺 .....135

### 第五节 金属压铸模具用钢及热处理工艺 .....144

### 第六节 热冲裁模具用钢及热处理工艺 .....149

### 复习题 .....151

## 第四章 模具热处理质量检测与控制 .....152

### 第一节 对模具用钢的原材料要求 .....152

### 第二节 模具热处理常见的缺陷和防止方法 .....158

### 第三节 模具热处理变形与开裂 .....164

### 第四节 模具热处理质量的检查内容与方法 .....174

|     |                         |     |
|-----|-------------------------|-----|
| 第五节 | 模具热处理质量的检查标准 .....      | 176 |
| 复习题 | .....                   | 180 |
| 第五章 | 模具的失效分析及提高模具寿命的途径 ..... | 181 |
| 第一节 | 模具的失效分析 .....           | 181 |
| 第二节 | 提高模具使用寿命的途径 .....       | 185 |
| 复习题 | .....                   | 192 |

# 第一章 模具钢热处理工艺理论基础及设备

金属材料，特别是钢铁材料是模具的主要用材。要提高模具的质量及服役性能，除正确选择钢材品种外，关键是必须合理地制定热处理工艺，并根据热处理工艺要求和模具性能要求恰当地选用热处理设备。

## 第一节 模具钢热处理工艺理论知识

固态金属材料，如模具钢，在其化学成分不变的情况下，通过不同的加热过程和不同的冷却条件，可以大幅度地改变其性能，这就是模具要进行热处理的最基本依据。

虽然钢铁材料的性能，受到许多方面因素的影响，是一个复杂的问题，但长期的实践和研究表明：决定钢铁材料性能的基本因素是它们内部的微观结构，即内部的结构和组织状态。而热处理过程是改变它们的结构和组织的最有效方法。

### 一、钢在加热时的组织转变

加热是钢铁材料热处理过程中的主要环节，要正确制定模具热处理工艺，得到所需要的性能，就必须首先了解模具钢在加热过程中的内部组织变化。

1. 奥氏体的形成 作为铁-碳合金，如低碳钢、中碳钢、高碳钢(碳素工具钢等)，在加热时，最主要变化就是形成奥氏体，这也是淬火、退火、正火等热处理工艺的基本条件。所谓奥氏体是碳原子固溶于铁的面心立方晶格间隙中的

固溶体，或称  $\gamma$ -Fe。

从Fe-Fe<sub>3</sub>C相图中可以看到，碳钢在A<sub>1</sub>点(727℃)以下时，组织没有任何变化，当温度超过A<sub>1</sub>点后，就会出现奥氏体，只是随合金成分的不同，钢中的奥氏体所含比例不同，而且全部转为奥氏体的温度也不同。

Fe-Fe<sub>3</sub>C相图是在平衡状态下测定出来的，它不能反映奥氏体的形成过程，成分均匀和晶粒大小等变化过程的全部情况。

奥氏体的形成大致可分为四个阶段：奥氏体的形核，奥氏体晶核的长大，碳化物的溶解和奥氏体的均匀化。

钢在加热前的原始组织一般是珠光体(铁素体和渗碳体的混合物)和铁素体(碳在铁的体心立方晶格间隙中的固溶体)，或珠光体与渗碳体组织，它们的晶体结构与奥氏体的晶体结构是不同的。奥氏体形成时，首先奥氏体晶核在铁素体和渗碳体相界面上形成，然后靠渗碳体的溶解而获得碳原子供应，不断长大成奥氏体。

在奥氏体化的过程中，其初始阶段，即原始组织全部转变为奥氏体时，奥氏体的碳浓度仍然是不均匀的。在原来是碳化物的区域，碳含量较高，而在原铁素体的中心地带，碳含量则较低，因此要得到均匀的奥氏体，就需要延长加热时间，通过碳原子的扩散，达到碳含量的均匀分布。在合金钢中，奥氏体还存在合金元素的均匀分布问题。这种使奥氏体内元素分布趋于均匀的过程称为奥氏体的均匀化。

在实际的热处理过程中，并不要求达到奥氏体的完全均匀化，而是根据材料、使用条件和对性能的要求，来控制奥氏体形成的不同阶段。

奥氏体的形成是一个扩散过程，因此凡是影响扩散的一

些因素如温度，成分等等都将影响奥氏体的形成速度。因此，热处理参数的制定，必须根据材料中成分的不同而认真对待。

2. 奥氏体晶粒长大及其控制 在一般的结构钢和模具钢中，奥氏体组织是一种高温相，室温下的组织大都是奥氏体的转变产物，因此奥氏体的晶粒大小(或称晶粒度)必然影响它的转变产物的晶粒尺寸并进而影响这些转变产物的使用性能(主要是力学性能)。因此研究钢的晶粒度及其控制方法，具有重要的实际意义。例如用高碳工具钢制造的工具，淬火加热时奥氏体晶粒粗大，则其转变产物(马氏体)也变得粗大，具有这种粗大马氏体组织的工具使用时容易崩刃，而具有粗大马氏体组织的模具使用中则易开裂和崩断。

奥氏体晶粒度有两种：一种是起始晶粒度，它是指珠光体刚刚全部转变为奥氏体时的奥氏体晶粒度；一种是实际晶粒度，它是指钢在具体的热处理或热加工条件下实际获得的奥氏体晶粒度。实际

晶粒一般都比起始晶粒大。因为在实际热处理中，总有一个加热和保温阶段，晶粒会有不同程度增大。

不同的钢种，奥氏体晶粒的长大倾向并不相同。加热温度与奥氏体晶粒长大的关系如图1-1所示。曲线1为本质粗晶粒

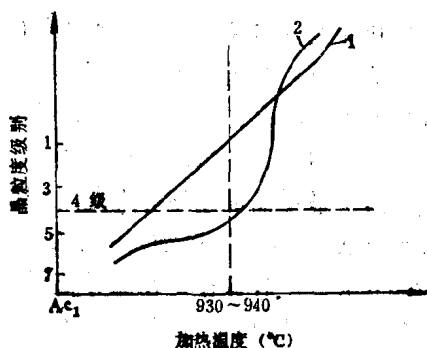


图1-1 加热温度与奥氏体晶粒长大的关系

1—本质粗晶粒钢 2—本质细晶粒钢

4  
钢；曲线2为本质细晶粒钢。

本质晶粒度并不是指具体的晶粒，而是表示某种钢的奥氏体晶粒长大的倾向性。本质晶粒度已有标准方法测定，参见YB27—77。

奥氏体晶粒度按其尺寸可分为12级（一般结构钢分为8级），尺寸越小，级别越高。

除了奥氏体化温度影响奥氏体晶粒度外，合金元素的作用也是明显的，其规律是：Al、Ti、Zr，V强烈阻止晶粒长大；W、Mo、Cr能够阻止晶粒长大；Si、Ni、Cu的作用较弱；Mn、P、C能促进晶粒长大。

控制奥氏体晶粒长大的措施有：

（1）合理选择加热温度和加热时间 加热温度越高，奥氏体晶粒长大倾向越大，实际晶粒越粗。保温时，随着保温时间延长，奥氏体晶粒也长大。但相比之下，温度升高比保温时间延长对晶粒长大影响更大。

（2）合理选择钢的原始组织 一般来说，片状珠光体比粒状珠光体容易过热，因为片状碳化物溶解快，转变为奥氏体速度快，奥氏体形成后，就较早开始长大。因此，高碳的模具钢在淬火之前最好进行球化处理。

（3）加入一定量的合金元素 奥氏体晶粒的长大主要是通过扩散使晶界迁移形成大晶粒吞并小晶粒，进而均匀长大来完成的，所以可以加入一定量的合金元素，限制或推迟晶粒的长大。一种途径是在晶界上形成某些弥散的化合物，如碳化物、氮化物等。这些化合物对晶界移动起到机械阻碍作用。但是当这些阻碍物溶解的时候，则晶粒会很快长大。另一途径是有些元素吸附在晶界上，降低了晶界迁移的动力，同样也可延迟晶粒的长大。

3. 加热速度对奥氏体形成的影响 在实际热处理过程中, 加热是连续进行的。在连续加热的条件下, 奥氏体的形成有如下特点:

1) 随着加热速度增大, 奥氏体的形成移向高温区域。在连续加热时, 加热速度会改变  $Ac_1$ 、 $Ac_3$  和  $Ac_{cm}$  点的位置。这些点通常都是随加热速度的增加而提高, 其中  $Ac_3$  点提高的更为明显。图1-2是 C0.83% 钢在不同加热速度下奥氏体的形成情况。

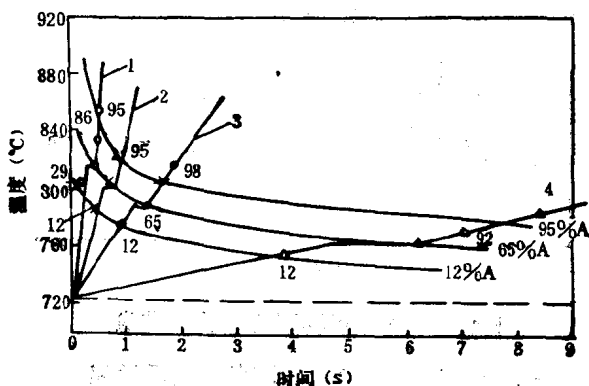


图1-2 C0.83%钢奥氏体形成情况

1—850°C/s    2—350°C/s    3—60°C/s    4—10°C/s

2) 加热速度、加热温度和奥氏体均匀性之间的关系,是随着加热速度增加,奥氏体成分均匀性变差。如欲使奥氏体成分趋于均匀化,则需加热到更高的温度,保温更长时间。因此,在连续加热时,奥氏体是在一个温度范围内形成的,而且随加热速度的增大,形成温度增高。

3) 钢中的原始组织对连续加热时的奥氏体形成有很大的影响, 原始组织中分散度小, 特别是有大块碳化物和自由

铁素体时，奥氏体的均匀化将移向高温。

从以上几点可以看出，如果钢件（特别是合金钢）在连续加热时形成奥氏体，那么它的转变终了的温度势必很高，而且工件的内外温差变大，淬火时工件质量难以保证，因此实际生产中，大多采用连续加热与等温加热相结合的方法。图1-3为热作模具钢4Cr5MoV1Si(H13)淬火时的实际加热曲线。

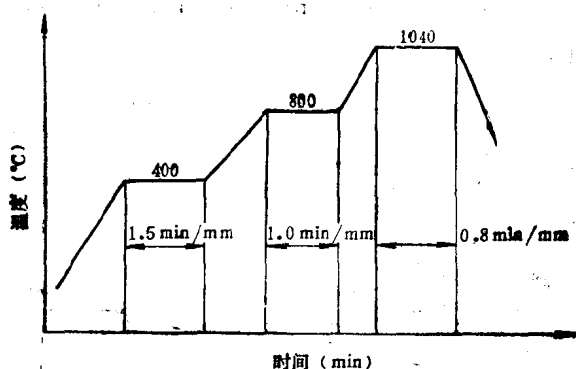


图1-3 4Cr5MoV1Si钢淬火加热曲线

## 二、钢中奥氏体在冷却时的转变产物及性能

钢加热到奥氏体状态，用不同的介质冷却，冷却到不同的温度，奥氏体转变产物在组织和性能上有很大的差别。冷却到 $A_1$ 点温度以下的奥氏体称为过冷奥氏体。这时的温度与 $A_1$ 点之差称为过冷度。过冷奥氏体是一种不稳定的组织，它将随时间的延长而发生组织转变。通过对过冷奥氏体转变规律的研究，奠定了钢的热处理理论基础，并推动了热处理工艺的发展。

1. 钢中过冷奥氏体的等温转变 过冷奥氏体之所以不稳定，是因为其化学自由能较高，根据能量最小原理，它会

自发地向能量较低的组织转变，二者之间的化学自由能差便是相变的推动力(或称驱动力)。由此说明，决定过冷奥氏体转变产物的组织和硬度的根本因素是转变温度。

过冷奥氏体等温转变情况，可以从奥氏体等温转变图中看到。这种图反映了奥氏体在 $A_1$ 点以下不同温度保温时，恒温时间和转变量之间的关系。最基本的和直观的测定奥氏体转变图的方法是金相法，它是将一组奥氏体化的薄铜片试样，迅速冷却到各个不同的等温温度，在每个温度保温不同时间，然后迅速冷却(淬火)，未转变的奥氏体这时转变为马氏体，然后在显微镜下观察转变产物及数量。当有1%~2%分解产物出现时，其相对应的保温时间定为转变起始点；当有98%以上分解产物时，把该保温时间定为转变终止点。图1-4是共析碳钢等温转变测定过程示意图。

为了方便和更准确，还可用其他方法辅助金相法进行测定，如硬度法、膨胀法、磁性法等。由于奥氏体等温转变曲线的形状与英文字母“C”相似，因此又称“C”曲线。

从“C”曲线上可以看出，它的一个明显特点是过冷奥氏

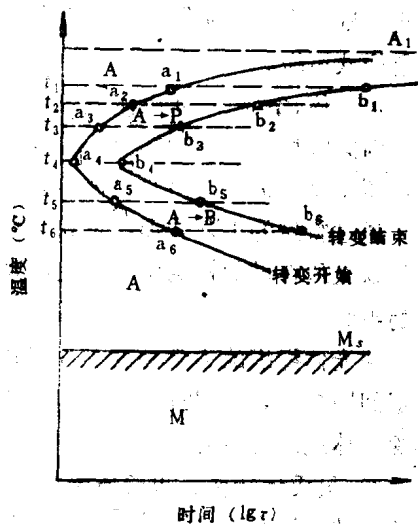


图1-4 共析钢过冷奥氏体等温转变图

A—奥氏体 P—珠光体 B—贝氏体  
M—马氏体

体在不同等温温度下分解时都有一个孕育期。孕育期最短处称为C曲线的“鼻尖”。

在奥氏体等温转变图上，可以划分为三个区域，即珠光体相变区、贝氏体相变区和马氏体相变区。虽然不同的钢种的C曲线形状不尽相同，但这三个类型的相变是基本上都存在的。现以T8钢过冷奥氏体等温转变图来说明这三类转变过程及转变产物的组织和性能。

1) 珠光体转变。从 $A_1$ 点到 $550^{\circ}\text{C}$ 温度范围内，奥氏体等温分解为片状铁素体和片状渗碳体的机械混合物，呈片状组织。等温转变的温度越低，形成的铁素体和渗碳体就越细，按片层的粗细分别称为珠光体、索氏体(细珠光体)和托氏体(极细珠光体)。珠光体和索氏体在金相显微镜下可以分辨，托氏体则需在电子显微镜下才能分辨，在金相显微镜下呈现黑色团状组织。

珠光体、索氏体、托氏体只是片层间距不同，没有本质差别，因此统称珠光体型相变。同时由于珠光体型相变温度较高，原子易于扩散，因此也称其为扩散型相变。

通过特殊的工艺处理，可获得粒状珠光体组织，这种形态的珠光体在过共析钢中较常见，是模具钢热处理中希望得到的组织。

珠光体组织的力学性能与片层状结构的层间距离有关，片层间距越小，强度越高。表1-1是共析碳钢不同处理后得到的珠光体组织的性能。

2) 贝氏体转变。贝氏体是过饱和碳的铁素体和渗碳体非片层状的混合物，其形态、性能与形成过程与珠光体均不相同。贝氏体的形成温度在 $240\sim 550^{\circ}\text{C}$ 之间(中、高碳及合金钢也在这一温度范围)。

表1-1 各类珠光体组织的力学性能

| 冷却速度(°C/min)    | 组织形态  | $\sigma_s$ (MPa) | $\delta$ (%) | HBS  |
|-----------------|-------|------------------|--------------|------|
| ~1              | 粗珠光体  | ~550             | ~5           | ~180 |
| ~6              | 珠光体   | ~870             | ~15          | ~230 |
| ~600            | 索氏体   | ~1100            | ~10          | ~270 |
| 45钢(淬火+500°C回火) | 回火索氏体 | ~850             | ~20          | ~230 |

根据贝氏体形态,可分为上贝氏体和下贝氏体。

钢中的上贝氏体是成束平行排列的条状铁素体和条间夹有相平行的渗碳体所组成的非层状组织。在中、高碳钢中形成温度为350~550°C。在转变量不多时,金相显微镜下呈羽毛状。

典型的下贝氏体,是针状铁素体和其内部成行地沉淀有碳化物的组织。对于中、高碳钢,其形成温度在350°C~ $M_s$ 。此时,其铁素体含碳量比上贝氏体中铁素体有更大的过饱和度。

贝氏体具有较高的强度和较好的韧性,下贝氏体比上贝氏体力学性能更为优良。

贝氏体的强度和硬度主要取决于铁素体条的宽度和单位面积内碳化物形态和数量,而其塑性和韧性则主要取决于它的亚结构中位错形态和密度。

一般来说,贝氏体的力学性能随转变温度而不同,转变温度越低,钢的强度、硬度相应提高,并且塑性和韧性也均有提高。T8钢的上贝氏体硬度为45HRC左右,下贝氏体硬度可达55HRC左右。

3) 马氏体转变。马氏体实质上是碳在 $\alpha$ -Fe中的过饱和固溶体。图1-5是马氏体晶体结构示意图。图中 $\times$ 处是碳原子,马氏体转变发生在 $M_s$ (马氏体转变开始点)与 $M_f$ (马氏体