

金属材料及成形工艺

宋金虎 主编

清华大学出版社
北京交通大学出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书是根据教育部最新颁布的《高等职业学校专业教学标准》中对本课程的要求，并参照最新颁布的相关国家标准和职业技能等级考核标准修订而成的，主要内容包括金属材料性能的认知，金属材料组织结构的认知，钢的热处理，常用金属材料的选择，铸造成形，金属压力加工，焊接成形，金属切削加工，机械零件成形方法的选择。书中大量实例均来自生产实际，注重内容的实用性与针对性。

本书可作为高等职业院校、高等专科学校、高级技工学校、技师学院、成人教育学院等大专层次的理工科类金属材料及成形工艺课程的教材，也可供中等专业学校机械类专业的学生选用，同时可作为广大自学者的自学用书及工程技术人员的参考书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签，无标签者不得销售。

版权所有，侵权必究。侵权举报电话：010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目 (CIP) 数据

金属材料及成形工艺 / 宋金虎主编. —北京：北京交通大学出版社；清华大学出版社，2022. 1

ISBN 978-7-5121-4614-3

I. ①金… II. ①宋… III. ①金属材料-成型-工艺-职业教育-教材 IV. ①TG39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2021) 第 230384 号

金属材料及成形工艺

JINSHU CAILIAO JI CHENGXING GONGYI

责任编辑：韩素华

出版发行：清华大学出版社 邮编：100084 电话：010-62776969

北京交通大学出版社 邮编：100044 电话：010-51686414

印刷者：

经 销：全国新华书店

开 本：185 mm×260 mm 印张：15 字数：384 千字

版 次：2022 年 1 月第 1 版 2022 年 1 月第 1 次印刷

印 数：1~3 000 册 定价：49.00 元

本书如有质量问题，请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评，我们表示欢迎和感谢。

投诉电话：010-51686043, 51686008；传真：010-62225406；E-mail: press@bjtu.edu.cn。

前 言

本书是根据教育部最新颁布的《高等职业学校专业教学标准》中对本课程的要求，并参照最新颁布的相关国家标准和职业技能等级考核标准修订而成的，它主要研究金属材料的性能及其对加工工艺方法的影响、各种工艺方法自身的规律性及相互联系与比较、各种加工方法的加工工艺过程和结构工艺性，着重阐述常用金属材料及主要加工方法的基本原理和工艺特点，全面讲述机械零件常用材料的选用、毛坯的选择、机械零件的加工方法和工艺路线的拟订。其兼有基础性、实用性、知识性、实践性与创新性等特点，是培养高素质技术技能人才的重要基础课程之一。

在编写本书时，编者从职业教育的实际出发，注重实践性、启发性、科学性，做到概念清晰，重点突出，对基础理论部分，以必需和够用为原则，以强化应用为重点。体现了面向生产实际，突出职业性的精神，体现了职业教育的特点。以学生为主体，能力要素与职业素养形成并重，有机嵌入钳工、焊工、车工、铸造工、锻造工等职业标准和职业技能等级考核标准。内容排列根据零件加工流程，由简到繁，由易到难，梯度明晰，程序合理，按照工学结合的模式，以工作过程为导向，以典型零件为载体，采用项目式教学方式，每个项目按照“项目引入”“项目分析”“任务（任务引入、任务目标、相关知识、任务实施）”“知识扩展”“复习思考题”的学习流程进行设计，便于实现教学做一体化教学。改变专业技术类教材传统面貌，将人文、质量、工匠等元素有机融入书中，强化学生职业素养养成；借助信息技术，拓展资源丰富，读者扫描书中二维码可以阅读相应的资源，有助于读者多形式学习。

本书可作为高等职业院校、高等专科学校、高级技工学校、技师学院、成人教育学院等大专层次的理工科类金属材料及成形工艺课程的教材，也可供中等专业学校机械类专业的学生选用，同时可作为广大自学者的自学用书及工程技术人员的参考书。

本书按总课时 64 学时编写，在实际教学中，教师可适当增减。金属材料及成形工艺实践性比较强，建议授课教师根据不同教学内容和特点进行现场教学，教学环境可考虑移到专业实训室、金工车间、企业生产车间中，尽量采用“教、学、做”一体的教学模式。

本书由山东交通职业学院宋金虎担任主编，项目 1、项目 9 由王真编写，项目 2 由陈伟栋编写，项目 3 由刁希莲编写，项目 4 由许永平编写，绪论、项目 5~项目 7 由宋金虎编写，项目 8 由滕文建编写，宋金虎负责全书的统稿、定稿。一汽-大众汽车有限公司、潍柴雷沃重工股份有限公司等企业对本书的编写提供了技术支持和建设性意见，在此深表感谢！另外，本书在编写过程中，参考了许多文献资料，编者谨向这些文献资料的编著者及支持编写工作的单位和个人表示衷心的感谢。

由于许多新技术、新工艺纷纷出现，再加之编者水平有限，书中难免有疏漏和欠妥之处，恳切希望广大读者批评指正，以求改进。

编者

2021 年 11 月

目 录

绪论	1
项目 1 金属材料性能的认知	3
任务 金属材料力学性能的认知	4
项目 2 金属材料组织结构的认知	11
任务 2-1 金属材料晶体结构的认知	12
任务 2-2 铁碳合金状态图的应用	21
项目 3 钢的热处理	30
任务 3-1 钢的热处理的认知	31
任务 3-2 钢的普通热处理	37
任务 3-3 钢的表面热处理	43
任务 3-4 零件常见热处理缺陷分析及预防措施	46
项目 4 常用金属材料的选择	51
任务 4-1 工业用钢的选择	52
任务 4-2 铸铁的选择	57
任务 4-3 非铁合金及粉末冶金的选择	61
项目 5 铸造成形	68
任务 5-1 铸造成形的认知	69
任务 5-2 铸造成形方法的选择	79
任务 5-3 铸造成形工艺设计	92
任务 5-4 铸件结构工艺性分析	103
项目 6 金属压力加工	112
任务 6-1 金属压力加工的认知	113
任务 6-2 锻造结构工艺设计	115
任务 6-3 板料冲压结构工艺设计	122
项目 7 焊接成形	134
任务 7-1 焊接成形的认知	136
任务 7-2 焊接方法的选择	142
任务 7-3 焊接结构材料的选择	149
任务 7-4 焊接结构工艺设计	154
任务 7-5 常见焊接缺陷产生原因分析及预防措施	160
项目 8 金属切削加工	163
任务 8-1 金属切削加工的认知	164
任务 8-2 切削加工方法的选择	180
任务 8-3 零件切削加工工艺过程的制定	203

项目 9 机械零件成形方法的选择	219
任务 9-1 机械零件失效的认知	220
任务 9-2 机械零件材料的选择	222
任务 9-3 零件毛坯成形方法的选择	226
参考文献	231

项目 3

钢的热处理

【项目引入】

齿轮是依靠齿的啮合传递扭矩的轮状机械零件，可实现改变转速与扭矩、改变运动方向和改变运动形式等功能。齿轮的材料选定以后还需要进行恰当的热处理来提高材料的使用性能，延长零件的使用寿命，改善材料的工艺性能，提高加工质量，减少刀具的磨损。



【项目分析】

钢的性能不仅取决于它的化学成分，还取决于钢的内部组织结构（金相组织）。为了提高钢材的使用性能，通常采用两种办法来解决：一种办法是调整钢的化学成分，特别是加入某些合金元素，即采用合金化的方法，来使钢材达到使用性能的要求；另一种办法是进行钢的热处理，对钢材进行正确的热处理，能提高钢材的性能，使它能够在各种不同的条件下使用。事实上，绝大多数机械零部件都是经过了热处理这一工艺过程的。

本项目主要学习：

钢的热处理的基本概念，钢的普通热处理，钢的表面热处理，零件常见热处理缺陷分析及预防措施，热处理新技术。

1. 知识目标

- ◆ 掌握钢的热处理的常见方法，熟悉钢的热处理过程中组织和性能产生的变化。
- ◆ 熟悉钢的普通热处理工艺和特点，理解淬透性与淬硬性的概念。
- ◆ 熟悉钢表面淬火的的目的、方法、工艺特点、适用场合及钢表面化学热处理的的目的和方法。

- ◆ 掌握常见热处理缺陷、产生原因及预防措施。
 - ◆ 熟悉常用的热处理新技术。
2. 能力目标
- ◆ 能够根据材料的使用性能，正确选用常规热处理方法并能确定其工序位置。
 - ◆ 能够分析热处理缺陷产生的原因并确定其预防措施。
3. 素质目标
- 培养吃苦耐劳精神和工匠精神。
4. 工作任务
- 任务3-1 钢的热处理的认知
- 任务3-2 钢的普通热处理
- 任务3-3 钢的表面热处理
- 任务3-4 零件常见热处理缺陷分析及预防措施



大国工匠：指尖打造
导弹精确制导

任务3-1 钢的热处理的认知

■ 任务引入

对钢进行正确的热处理，能提高钢材的性能，使它能够在各种不同的条件下使用。那么，钢的热处理方法有哪些？在热处理过程中钢的组织 and 性能会发生怎样的变化？

■ 任务目标

掌握钢的热处理的常见方法，熟悉钢的热处理过程中组织和性能产生的变化。

■ 相关知识

一、钢的热处理的分类

所谓钢的热处理，就是把钢在固态下加热、保温、冷却，使钢的内部组织结构发生变化，以获得所需要的组织与性能的一种工艺。

根据加热、冷却方式的不同及组织、性能变化特点的不同，钢的热处理方法可分为三大类。

1. 整体热处理

整体热处理是指对热处理件进行穿透性加热，以改善整体的组织和性能的处理工艺，分为退火、正火、淬火、淬火+回火、调质、稳定化处理、固溶（水韧）处理、固溶处理+时效等。

2. 表面热处理

表面热处理是指仅对工件表层进行热处理，以改变其组织和性能的工艺，分为表面淬火+回火、物理气相沉积、化学气相沉积、等离子化学气相沉积等。

3. 化学热处理

化学热处理是指将工件置于一定温度的活性介质中保温，使一种或几种元素渗入它的表层，以改变其化学成分、组织和性能的热处理工艺。根据渗入成分的不同又分为渗碳、渗氮、碳氮共渗、渗其他非金属、渗金属、多元共渗、熔渗等。

根据热处理在零件生产过程中的位置和作用的不同，热处理还可分为预备热处理和最终

热处理。

二、钢的热处理工艺曲线

尽管热处理的种类很多，但通常所用的各种热处理过程都是由加热、保温和冷却 3 个基本阶段组成。如图 3-1 所示为最基本的热处理工艺曲线。

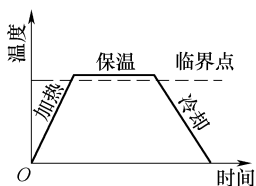


图 3-1 钢的热处理工艺曲线

热处理作为机器零件及工模具制造过程中的重要加工工艺，其目的不是改变材料的形状，而是通过改变金属材料的组织和性能来满足工程中对材料的服役性能和加工要求。所以，选择正确和先进的热处理工艺对于改善金属材料的工艺性能、零件使用性能、提高产品质量、延长零件的使用寿命、节约材料等

均具有重要的意义。因此，热处理在机械制造行业中被广泛的应用，例如，汽车、拖拉机行业中需要进行热处理的零件占 70%~80%；机床行业中占 60%~70%；轴承及各种模具则达到 100%。

三、钢的加热

钢在固态下会发生相变，经热处理后组织、性能会发生变化。

对不同成分和组织的钢，在进行加热或冷却时，如果加热或冷却速度非常缓慢，钢的组织变化规律和铁碳相图一致，即铁碳相图所揭示的成分、组织、温度的对应规律，正是热处理时平衡条件下材料组织的变化规律。

图 3-2 所示为钢在加热或冷却时 Fe-Fe₃C 相图上各相变点的位置的一部分。碳钢在缓慢加热至奥氏体状态，或由奥氏体状态缓慢冷却到室温时，它们的临界转变温度相同，分别为 A₁、A₃、A_{cm}。在实际热处理时，加热或冷却不可能非常缓慢，相变是在不平衡条件下进行的，和铁碳相图的临界温度相比发生一定的滞后现象，即需要有一定的过热或过冷，组织转变才能进行。加热和冷却速度越快，滞后现象越严重。通常把碳钢在加热时的实际临界温度标以字母“c”，如 A_{c1}、A_{c3}、A_{cm}，而把实际冷却时的临界温度标以字母“r”，如 A_{r1}、A_{r3}、A_{rcm}。

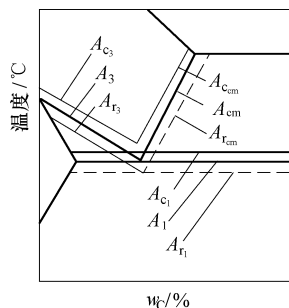


图 3-2 Fe-Fe₃C 相图上各相变点的位置

1. 奥氏体的形成

大多数热处理工艺都要将钢加热到临界温度以上，获得全部或部分奥氏体组织，然后以不同的速度冷却，使奥氏体转变为不同的组织，获得不同的性能。

奥氏体的形成是通过成核和长大的机制来完成的。以共析钢为例，其转变过程可分为 4 个步骤。

(1) 奥氏体晶核的形成：奥氏体晶核易于在铁素体与渗碳体相界面上形成。这是因为相界面处碳原子浓度相差较大，有利于获得形成奥氏体晶核所需要的碳浓度；在铁素体与渗碳体相界面处，原子排列不规则，铁原子有可能通过短程扩散形成奥氏体形核所需要的结构；在铁素体与渗碳体相界面处，杂质及晶体缺陷如空位、位错密度较高，具有较高的畸变能，容易满足奥氏体形核所需要的能量，所以在两相的相界上为形核产生提供了

良好的条件。

(2) 奥氏体的长大：奥氏体晶核形成之后，它一面与渗碳体相接，另一面与铁素体相接。其含碳量是不均匀的，与铁素体相接处含碳量较低，而与渗碳体相接处含碳量较高，因此在奥氏体中出现了碳的浓度梯度，引起碳在奥氏体中不断地由高浓度向低浓度扩散。随着扩散的进行，破坏了原先碳浓度的平衡，这样势必促使铁素体向奥氏体转变及渗碳体的溶解。碳浓度破坏平衡和恢复平衡的反复循环过程，就使奥氏体逐渐向渗碳体和铁素体两方面长大，直至铁素体全部转变为奥氏体。

(3) 残余渗碳体的溶解：在奥氏体形成过程中，铁素体比渗碳体先消失，因此奥氏体形成之后，还残余未溶渗碳体。这部分未溶的残余渗碳体将随着时间的延长，继续不断地溶入奥氏体，直至全部消失。

(4) 奥氏体均匀化：当残余渗碳体全部溶解时，奥氏体中的碳浓度仍然是不均匀的，在原渗碳体处含碳量较高，而在原铁素体处含碳量较低。如果继续延长保温时间，通过碳的扩散，可使奥氏体的含碳量逐渐趋于均匀。

亚共析钢在室温下的平衡组织为珠光体和铁素体，当缓慢加热到相变点 A_{c1} 时，珠光体转变为奥氏体，若进一步提高加热温度，则剩余铁素体将逐渐转变为奥氏体。在温度超过 A_{c3} 时，剩余铁素体完全消失，全部组织为较细的奥氏体晶粒。若再继续提高加热温度，奥氏体晶粒将长大。

过共析钢在室温下的平衡组织为珠光体和渗碳体。当缓慢加热到 A_{c1} 时，珠光体转变为奥氏体，若进一步提高加热温度，则剩余渗碳体将逐渐溶入奥氏体中。在温度超过 A_{cm} 时，剩余渗碳体完全溶解，组织全部为奥氏体，此时奥氏体晶粒已经粗化。

2. 奥氏体晶粒的长大及影响因素

奥氏体晶粒的大小不一，奥氏体形成后的晶粒大小直接影响钢冷却转变及转变后的组织和性能。实践证明，当加热时获得的奥氏体晶粒越细，热处理后钢的强度、塑性、韧性越高。

影响钢奥氏体晶粒大小的因素有以下几项。

1) 加热温度和保温时间

奥氏体晶粒随着加热温度升高和保温时间的延长而长大，加热温度比保温时间的影响更明显。为了得到细晶粒组织，钢在热处理时应严格控制加热温度。另外，晶粒的长大是通过原子的扩散来完成的，所以合理地控制保温时间也会有效地防止晶粒长大。

2) 加热速度

在加热温度相同时，加热速度越快，奥氏体的实际形成温度越高，其形核率和长大速度越大，奥氏体起始晶粒度越小。因此，在实际生产中，常利用快速加热、短时保温来获得细小的奥氏体晶粒。

3) 合金元素的影响

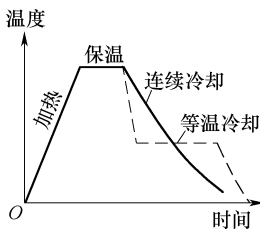
在一定范围内，随着奥氏体中碳含量的增加，晶粒长大倾向增大，但碳量超过一定值后，碳能以未溶碳化物状态存在，反使晶粒长大倾向减小。另外，在钢中，用 Al 脱氧或加入 Ti、Zr、V、Nb 等强碳化物形成元素时，奥氏体晶粒长大倾向减小；而 Mn、P、C、N 等元素促使奥氏体晶粒长大。

4) 钢的原始组织

通常来说，钢的原始组织越细，其相界面越多，奥氏体的形成速度就越快；碳化物弥散度越大，则奥氏体的晶粒越小。

四、钢的冷却

钢的最终性能决定于钢在冷却转变后的组织。奥氏体化后的组织在不同的条件下冷却可得到不同的组织和性能。当奥氏体温度在 A_1 线以上时，奥氏体是稳定的。当奥氏体被冷却至 A_1 线以下时将会发生转变，奥氏体此时处于过冷状态，这种奥氏体称为过冷奥氏体。由于冷却过程为非平衡过程，因此不能依据铁碳相图来判定和分析其组织转变，过冷奥氏体的转变产物随转变温度和冷却速度不同而不同，性能也有很大的差别。



钢的热处理工艺有两种冷却方式：等温冷却和连续冷却，冷却方式示意图如图 3-3 所示。等温冷却就是使加热到奥氏体的钢先以较快的冷却速度冷却到 A_1 线以下一定的温度，然后进行保温，使奥氏体在等温下发生组织转变。连续冷却就是使加热到奥氏体的钢在温度连续下降的过程中发生组织转变。

1. 过冷奥氏体的等温冷却转变

1) 过冷奥氏体等温冷却转变曲线

过冷奥氏体在不同温度等温保持时，保温温度与转变开始和转变结束时间及转变产物的关系曲线图，称为等温转变图（TTT 图）或等温转变曲线。下面以共析钢为例研究等温冷却时的组织转变。

将含碳质量分数为 0.8% 的共析钢制成若干试样，将其加热到 A_1 线以上使其奥氏体化，然后将试样分别投入温度不同的恒温盐浴中，测出奥氏体在各个温度下开始转变及完成转变所需的时间。在以“温度-时间”为坐标的图上将所有的转变开始点和终止点分别标注，再连接起来，便可获得共析钢的等温转变曲线，如图 3-4 所示。因等温转变曲线的形状类似“C”，故称作“C 曲线”。

2) 过冷奥氏体等温冷却转变产物的组织和性能

在 C 曲线中， A_1 线以上是奥氏体稳定存在区；在 A_1 线以下、转变开始线以左的区域是奥氏体的不稳定存在区，称过冷奥氏体区，此区中的过冷奥氏体要经一段孕育期才开始发生组织转变；在转变终止线的右方是转变产物区；在两条曲线之间是转变过渡区，过冷奥氏体和转变产物同时存在；水平线 M_s 为马氏体转变开始温度线， M_f 为马氏体转变终止温度线，在 $M_s \sim M_f$ 之间为马氏体转变温度区。

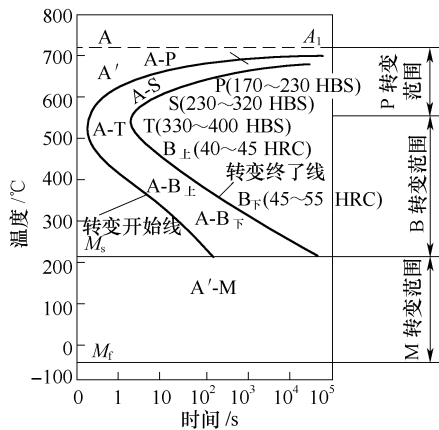


图 3-4 共析钢奥氏体等温转变曲线

过冷奥氏体在各个温度进行等温转变时，都要经过一段孕育期——纵坐标到转变开始线之间的时间间隔。孕育期越长，表示过冷奥氏体越稳定。由图 3-4 可知，过冷奥氏体在不同温度下的稳定性是不相同的。在 550 °C 以上，随过冷度增加，孕育期缩短；在 550 °C 以

下, 随过冷度增加, 孕育期增加。在 550 ℃ 时, 孕育期最短, 过冷奥氏体最不稳定, 转变速度最快, 被称为 C 曲线的“鼻尖”。

共析钢过冷奥氏体在 3 个不同的温度区间, 可发生 3 种不同的转变。 A_1 至“鼻尖”之间称高温转变区, 其转变产物是珠光体; “鼻尖”至 M_s 之间称中温转变区, 转变产物是贝氏体; M_s 以下称低温转变区, 转变产物是马氏体。

(1) 珠光体。珠光体是铁素体和渗碳体的机械混合物, 转变的温度范围在 $A_1 \sim 550$ ℃。由于转变温度较高, 原子具有较强的扩散能力, 其转变为扩散型转变, 转变产物为铁素体片层与渗碳体片层交替重叠的层状组织, 即珠光体组织。在此范围内, 由于过冷度不同, 所得到的珠光体的层片厚薄、性能也有所不同, 为区别起见分为 3 类。

① 珠光体 (P)。在 $A_1 \sim 650$ ℃ 形成, 片层距离较大, 一般在光学显微镜下放大 500 倍即可分辨出层片状特征。

② 索氏体 (S)。在 650~600 ℃ 形成, 片层较细, 平均层间距离为 0.1~0.3 μm , 要用高倍显微镜 (1 000 倍以上) 才能分辨。强度、硬度及塑性均较珠光体高 (25~30 HRC)。

③ 屈氏体 (T)。在 600~550 ℃ 形成, 片层更细, 平均层间距离小于 0.1 μm , 只能在电子显微镜下放大 2 000 倍以上才能分辨出其层片结构。其强度、硬度更高 (35~40 HRC)。

索氏体、屈氏体与珠光体并无本质上的差别, 都是珠光体类型的组织, 只是形态上有粗细之分, 它们之间的界限也是相对的。

(2) 贝氏体。贝氏体是含碳过饱和的铁素体与渗碳体或碳化物的混合物, 以符号 B 表示。转变的温度范围在 550 ℃ ~ M_s , 根据转变温度和组织形态不同, 贝氏体一般可分为上贝氏体和下贝氏体。上贝氏体显微组织为羽毛状, 由于韧性低, 生产上很少采用。下贝氏体是在 350 ℃ ~ M_s , 等温转变形成的, 在显微镜下呈黑色针状。

下贝氏体中的碳化物细小、分布均匀, 它不仅具有较高的强度和硬度 (45~55 HRC), 还有良好的韧性和塑性。因此在钢的组织转变时希望得到这样的组织。

(3) 马氏体。马氏体是碳在 $\alpha\text{-Fe}$ 中的过饱和固溶体, 具有体心正方晶格, 以符号 M 表示。转变的温度范围在 $M_s \sim M_f$ 。大量碳原子的过饱和会造成晶格的畸变, 使塑性变形的抗力增加。另外, 由于马氏体的比体积比奥氏体的大, 当奥氏体转变成马氏体时会发生体积膨胀, 产生较大的内应力, 引起塑性变形和加工硬化。因此马氏体具有高的强度和硬度, 为 62~65 HRC。马氏体的碳含量越高, 强化作用越大, 则硬度也越高, 但脆性越大。

当奥氏体转变后, 所产生的 M 的形态取决于奥氏体中的含碳量, 含碳量 < 0.6% 的为板条状马氏体; 含碳量在 0.6%~1.0% 为板条状和针叶状混合的马氏体; 含碳量 > 1.0% 的为针叶状马氏体。这两种不同形态的马氏体具有不同的机械性能, 随着马氏体含碳量的增加, 形态从板条状过渡到针叶状, 硬度和强度也随之升高, 而塑性和韧性也随之降低。

在 M_s 以下奥氏体并不能全部转变为马氏体, 而或多或少地保留一些残余奥氏体。高碳钢淬火后残余奥氏体可达 10%~15%。

2. 过冷奥氏体的连续冷却转变

1) 过冷奥氏体连续冷却转变曲线

在实际生产中, 钢的热处理大多数是在连续冷却条件下进行组织转变的, 如炉冷、空冷、油冷和水冷等。因此, 分析过冷奥氏体连续冷却转变曲线具有重要的实用意义。

用来表示钢奥氏体化后, 在不同冷却速度的连续冷却条件下, 过冷奥氏体转变开始及转

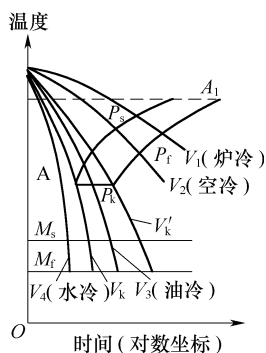


图 3-5 共析钢的连续冷却转变曲线

变终了的时间与转变温度之间的关系曲线，称为过冷奥氏体连续冷却转变曲线，简称 CCT 曲线。共析钢的连续冷却转变曲线如图 3-5 所示。

它也是由实验方法测定的，与等温转变曲线相比，连续冷却转变曲线稍靠右下一些，并且只有等温转变曲线的上半部分，即共析钢在连续冷却时，只发生珠光体和马氏体转变，不发生贝氏体转变，这是因为共析钢贝氏体转变的孕育期很长，当过冷奥氏体连续冷却通过贝氏体转变区内尚未发生转变时就已过冷到 M_s 点而发生马氏体转变，所以不出现贝氏体转变。由共析钢的 CCT 曲线可知，连续冷却的奥氏体存在一临界冷却速度 V_k 。当冷却速度小于 V_k 时，奥氏体就会分解形成珠光体；而当冷却速度大于 V_k

时，奥氏体就不能分解而转变成马氏体。

由于钢在冷却介质中的冷却速度不是恒定值，且受环境因素和操作方式影响较大，因而 CCT 曲线既难以测定，也难以使用。生产中往往用 C 曲线来近似地代替 CCT 曲线，对过冷奥氏体的连续冷却组织进行定性分析，作为制定热处理工艺的参考。

2) 过冷奥氏体连续冷却转变产物的组织和性能

由于奥氏体的连续冷却转变曲线测定比较困难，因此在生产实际中，常利用同种钢的等温转变曲线来定性分析过冷奥氏体连续冷却转变过程。其方法是将连续冷却曲线画在钢的 C 曲线上，根据冷却速度线与 C 曲线相交的位置大致估计在某种冷却速度下实际转变所获得的组织和力学性能。在图 3-5 中， V_1 相当于炉冷（退火），转变产物为珠光体； V_2 相当于空冷（正火），转变产物为索氏体； V_3 相当于油冷（淬火），转变产物为托氏体和马氏体； V_4 相当于水冷（淬火），转变产物为马氏体和残余奥氏体。 V_k 称为临界冷却速度，它是获得全部马氏体组织的最小冷却速度。 V_k 越小，钢在淬火时冷却速度越容易大于 V_k ，所以就更容易获得马氏体组织，即钢接受淬火的能力越大。连续冷却转变由于不是在一个温度而是在一个温度范围内进行的，组织往往不是单一的，根据冷却速度的变化，有可能是珠光体+索氏体、索氏体+托氏体或托氏体+马氏体等。

■ 任务实施

根据加热、冷却方式的不同及组织、性能变化特点的不同，钢的热处理方法可分为三大类：整体热处理（退火、正火、淬火、淬火+回火、调质、稳定化处理、固溶（水韧）处理、固溶处理+时效等），表面热处理（表面淬火+回火、物理气相沉积、化学气相沉积、等离子化学气相沉积等），化学热处理（渗碳、渗氮、碳氮共渗、渗其他非金属、渗金属、多元共渗、熔渗等）。根据热处理在零件生产过程中的位置和作用的不同，热处理还可分为预备热处理和最终热处理。

钢的热处理，就是把钢在固态下加热、保温、冷却，使钢的内部组织结构发生变化，以获得所需要的组织与性能。钢的最终性能决定于钢在冷却转变后的组织，奥氏体化后的组织在不同的条件下冷却可得到不同的组织和性能。

任务 3-2 钢的普通热处理

■ 任务引入

成分相同的两根钢丝加热的温度相同，放在水中冷却的一根硬而脆、很容易折断，放在空气中冷却的一根较软、有较好的塑性、可以卷成圆圈而不断裂。为什么？

■ 任务目标

熟悉钢的普通热处理工艺和特点，理解淬透性与淬硬性的概念。能够根据材料的使用性能，正确选用常规热处理方法并能确定其工序位置。

■ 相关知识

将金属加热到一定温度，并保持一定时间，然后以一定的冷却速度冷却到室温，这个过程称为热处理。常用的热处理工艺方法有以下 5 种。

一、钢的退火

1. 钢的退火工艺

钢的退火是指将工件加热到高于或低于临界点 (A_{c_3} 或 A_{c_1}) 的某一温度，保温一定时间后，以缓慢的冷却速度（一般随炉冷却）进行冷却的热处理工艺。

2. 退火的目的

退火的目的是消除钢的内应力、降低硬度、提高塑性、细化组织及均匀化学成分，以利于后续加工，并为最终热处理做好组织准备。

3. 退火工艺种类

根据钢的成分、组织状态和退火目的不同，退火常分为完全退火、球化退火、去应力退火、扩散退火和再结晶退火等。

1) 完全退火

完全退火又称重结晶退火，一般简称为退火，是将工件加热至 A_{c_3} 以上 $30\sim 50\text{ }^\circ\text{C}$ ，保温一定时间后，随炉缓慢冷却或埋在砂中（或石灰中）冷却到 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 以下，空冷至室温的工艺过程。

完全退火一般常作为一些不重要工件的最终热处理，或者作为某些重要工件的预先热处理。主要用于亚共析成分的各种碳钢和合金钢的铸、锻件及热轧型材，不宜用于过共析钢，因为当其被加热到 $A_{c_{cm}}$ 线以上退火后，二次渗碳体以网状形式沿奥氏体晶界析出，使钢的强度和韧性显著降低，也为以后的热处理留下了隐患（如淬火时容易产生淬火裂纹）。

完全退火的目的主要在于细化铸造状态下或锻造后的粗大晶粒；降低硬度，便于切削加工；消除内应力。

2) 球化退火

通常将共析钢或过共析钢加热到 A_{c_1} 以上 $20\sim 30\text{ }^\circ\text{C}$ ，保温一定时间后，随炉缓慢冷却至 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 以下，再出炉空冷，将珠光体中的渗碳体由片状转化为球状的一种工艺。

球化退火主要用于共析钢和过共析钢制造的刀具、量具和模具等零件。在一定条件下，球化退火也可用于亚共析钢，使亚共析钢的塑性变形能力提高，以适应冷冲压、快速锻打等

工艺的需要。

球化退火主要目的在于得到球状珠光体，以降低钢的硬度，改善切削加工性能，并为以后的淬火做好组织准备。

3) 去应力退火（低温退火）

将工件缓慢（100~150 ℃/h）加热到 500~650 ℃，经适当时间保温后，随炉缓冷（50~100 ℃/h）至 200~300 ℃，再出炉空冷。去应力退火的特点是加热温度低于 A_1 ，所以在退火过程中没有组织变化，其内应力的消除主要是通过钢在 500~650 ℃ 保温后随后缓慢冷却中消除的。

4. 退火工艺的应用

为了消除铸件、锻件、焊接结构体、热轧件、冷拉件等的内应力，必须进行去应力退火。如果这些应力不消除，零件在切削加工或以后的使用过程中将引起变形或开裂。为此，大型铸件如车床床身、内燃机气缸体、汽轮机隔板等必须进行去应力退火。

二、钢的正火

1. 钢的正火工艺

正火是把亚共析钢加热到 A_{c3} 以上 30~50 ℃；过共析钢加热到 A_{cm} 以上 30~50 ℃，保温后在空气中冷却的工艺。各种退火和正火的加热温度范围及工艺曲线如图 3-6 与图 3-7 所示。

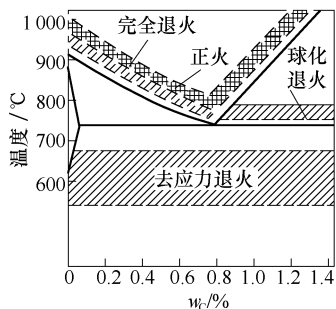


图 3-6 各种退火、正火加热温度范围示意图

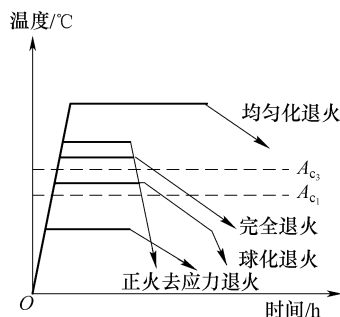


图 3-7 各种退火、正火的工艺曲线示意图

2. 正火的目的

正火的目的是细化晶粒，消除网状渗碳体，并为淬火、切削加工等后续工序做组织准备。

3. 正火的应用

正火的主要应用如下。

- (1) 用于普通结构零件，作为最终热处理。
- (2) 用于低、中碳结构钢，作为预先热处理，可获得合适的硬度，便于切削加工。
- (3) 用于过共析钢，作为球化退火前的准备工序来抑制或消除网状二次渗碳体的形成，利于碳化物的球化。

4. 正火与退火的区别

正火与退火相比较，其主要区别在于退火是随炉缓慢冷却，而正火是在空气中冷却。根据

钢的过冷奥氏体转变曲线可知，由于正火的冷却速度比退火的快，所以正火时奥氏体分解温度要比退火的低一些，相应的组织也不一样，正火后的组织比退火细，硬度和强度也有所提高。

三、钢的淬火

1. 钢的淬火工艺

钢的淬火是指将工件加热到 A_{c_3} 或 A_{c_1} 以上 $30\sim 50\text{ }^\circ\text{C}$ 奥氏体化后，保温一定的时间，然后以大于临界冷却速度冷却（一般为油冷或水冷），获得马氏体或（和）贝氏体组织的热处理工艺。

2. 淬火的目的是

淬火的目的是获得马氏体或贝氏体，提高钢的机械性能。它是强化钢材最重要的热处理方法。因此，重要的结构件，特别是承受动载荷和剧烈摩擦作用的零件，以及各种类型的工具等都需要进行淬火。

3. 淬火的加热温度

马氏体大小取决于奥氏体晶粒大小。为了使淬火后得到细而均匀的马氏体，首先要在淬火加热时得到细而均匀的奥氏体。为了防止奥氏体晶粒粗化，一般淬火温度不宜太高，只允许超出临界点 $30\sim 50\text{ }^\circ\text{C}$ 。碳钢的淬火加热温度范围如图 3-8 所示。

亚共析钢的淬火加热温度是 A_{c_3} 以上 $30\sim 50\text{ }^\circ\text{C}$ ，此时可全部得到奥氏体，淬火后得到马氏体组织。如图 3-8 所示。若加热温度过高，则引起奥氏体晶粒粗大，使钢淬火后的性能变坏；若加热温度过低，则淬火组织中尚有未溶铁素体，使钢淬火后的硬度不足。

过共析钢的淬火温度是 A_{c_1} 以上 $30\sim 50\text{ }^\circ\text{C}$ ，这时得到奥氏体和渗碳体组织，淬火后奥氏体转变为马氏体，而渗碳体被保留下来，获得均匀细小的马氏体和粒状渗碳体的混合组织。由于渗碳体的硬度比马氏体还高，所以钢的硬度不但没有降低，而且还可以提高钢的耐磨性。如果将过共析钢加热到

$A_{c_{cm}}$ 以上，这时渗碳体已全部溶入奥氏体中，增加了奥氏体的含碳量，因而钢的 M_s 点下降，从而使淬火后的残余奥氏体量增多，反而降低了钢的硬度和耐磨性。另外，当温度高时还将使奥氏体晶粒长大，在淬火时易形成粗大马氏体，使钢的韧性降低。

对于合金钢，除了少数使奥氏体晶粒容易长大的 Mn、P 元素以外，大多数合金元素会阻碍奥氏体晶粒长大，所以需要稍微提高它们的淬火温度，使合金元素充分溶解和均匀化，以便获得较好的淬火效果。

4. 常用淬火介质

淬火冷却速度是决定淬火质量的关键，淬火冷却速度必须大于临界冷却速度 V_k 才能获得理想的淬火组织。但太快必然产生很大的淬火内应力，为获得良好的淬火效果，应选择合理的冷却介质，以达到合理的冷却速度。最常用的冷却介质是水、盐水和油。

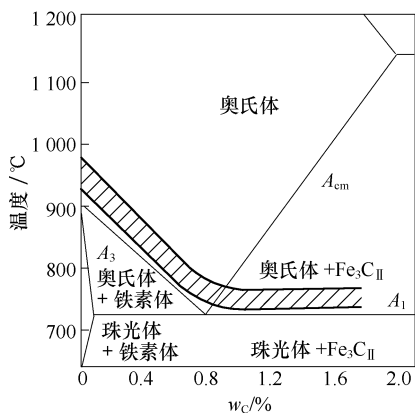


图 3-8 碳钢的淬火加热温度范围

(1) 水。水是应用最为广泛的淬火介质，来源广、价格低、成分稳定不易变质，而且具有较强的冷却能力。但它的冷却特性并不理想，在需要快冷的 650~500℃ 范围内，它的冷却速度较小；而在 300~200℃ 需要慢冷时，它的冷却速度比要求的大，这样易使零件产生变形甚至开裂，因此有一定的局限性，所以只能用作尺寸较小、形状简单的碳钢零件的淬火介质。

(2) 盐水。为提高水的冷却能力，在水中加入 5%~15% 的食盐成为盐水溶液，其冷却能力比清水更强，在 650~500℃ 范围内，冷却能力比清水提高近 1 倍，这对于保证碳钢件的淬硬来说是非常有利的。用盐水淬火的工件，容易得到高的硬度和光洁的表面，不易产生淬不硬的软点，相比清水，这是盐水的优点。但是盐水在 300~200℃ 范围，冷速仍像清水一样快，使工件易产生变形，甚至开裂。生产上为防止这种变形和开裂，采用先盐水快冷，在 M_s 点附近再转入冷却速度较慢的介质中缓冷。所以盐水主要用于形状简单、硬度要求高而均匀、表面要求光洁、变形要求不严格的碳钢零件的淬火，如螺钉、销、垫圈等。

(3) 油。一般采用矿物油，如机油、变压器油和柴油等。机油一般采用 10 号、20 号、30 号机油，油的号越大，黏度越大，闪点越高，冷却能力越低，使用温度相应提高。

油的冷却能力比水弱，不论是 650~550℃ 还是 300~200℃ 都只有水的冷却能力的几分之一。油的优点是在 300~200℃ 的马氏体形成区冷却速度很慢，不易淬裂；并且它的冷却能力很少受油温升高的影响，平常在 20~80℃ 范围内均可使用。油的缺点是在 650~550℃ 的高温区冷却速度慢，使某些钢不易淬硬，并且油在多次使用后，还会因氧化而变稠，失去淬火能力。因此，在工作过程中必须注意淬火安全，要防止热油飞溅，还需防止油燃烧引起火灾的危险。

油广泛地用来作为各种合金或小尺寸的碳钢工件的冷却介质。

常用冷却介质的冷却能力见表 3-1。

表 3-1 常用冷却介质的冷却能力

冷却介质	冷却速度/ (℃/s)	
	在 650~550℃ 区间	在 300~200℃ 区间
水 (18℃)	600	270
水 (50℃)	100	270
水 (74℃)	30	200
10% NaOH 水溶液 (18℃)	1 200	300
10% NaCl 水溶液 (18℃)	1 100	300
50℃ 矿物油	150	30

(4) 其他淬火介质。除水、盐水和油外，生产中还用硝酸盐浴或碱浴作为淬火冷却介质。

在高温区域，碱浴的冷却能力比油强而比水弱，硝酸盐浴的冷却能力比油略弱。在低温区域，碱浴和硝酸盐浴的冷却能力都比油弱。碱浴和硝酸盐浴具有流动性好，淬火变形小等优点，因此这类介质广泛应用于截面不大、形状复杂、变形要求严格的碳素工具钢、合金工具钢等工件，作为分级淬火或等温淬火的冷却介质。由于碱浴蒸气有较大的刺激性，劳动条件差，所以在生产中使用得不如硝酸盐浴广泛。

5. 常用的淬火方法

为了使工件淬火成马氏体并防止变形和开裂，单纯靠选择淬火介质不能完全满足淬火的

质量要求,所以热处理工艺上还应在淬火方法上加以解决。目前使用的淬火方法较多,以下介绍其中常用的几种,如图3-9所示。

1) 单液淬火法

单液淬火就是将已加热到奥氏体化的钢件在一种淬火介质中连续冷却至室温的操作方法,这是生产中最常用的一种淬火方法。如碳钢在水中淬火,合金钢在油中淬火,较大尺寸的碳钢工件在盐水中淬火等均属单液淬火法。这种方法的优点是操作简单,易实现机械化和自动化,但水淬容易产生变形与开裂,油淬容易产生硬度不足或硬度不均匀现象,主要适用于截面尺寸无突变,形状简单的工件。

2) 双液淬火法

双液淬火法是将工件奥氏体化后先浸入冷却能力较强的介质中,在组织即将发生马氏体转变时转入冷却能力弱的介质中冷却的方法。最常用的双液淬火法是水淬油冷,它是根据水和油的冷却特性提出的。水在 $650\sim 550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时冷却能力很大,而油在 $300\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时冷却能力较小,因此把两种介质结合起来应用,扬长避短,既克服了单一介质使用时的缺点,又发挥了它们各自的优点。即对于形状复杂的碳钢工件,先在水中冷却,以防止过冷奥氏体分解,当冷却到约 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,急速从水中取出移至油中继续冷却,使过冷奥氏体以比较缓慢的冷却速度转变成马氏体,减小了变形和开裂的危险。缺点是工件表面与心部温差仍较大,工艺不好掌握,操作困难。所以适用于形状复杂程度中等的高碳钢小零件和尺寸较大的合金钢零件。

3) 分级淬火法

将工件加热至奥氏体化后浸入温度稍高或稍低于 M_s 点的盐浴或碱浴中,保持适当时间,在工件整体都达到冷却介质温度后取出空冷,以获得马氏体组织的淬火方法,称为分级淬火法,又叫作热浴淬火法。

分级淬火法的主要优点,就是使工件产生变形和裂纹的可能性减小,硬度也比较均匀,而且操作容易,但由于在热状态下的盐浴冷却能力较低,故分级淬火法主要用于外形复杂或截面不均匀的小尺寸精密零件,如刀具、模具和量具。

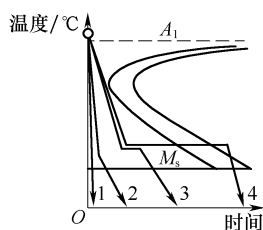
4) 等温淬火法

这一方法类似分级淬火法,但是奥氏体的转变是在 M_s 点稍上的温度区域进行,因此淬火后的组织不是马氏体,而是下贝氏体,故又称贝氏体淬火。等温淬火法是将奥氏体化后的工件淬入稍高于 M_s 温度的硝盐浴或碱浴中,并停留足够的时间,使过冷奥氏体转变为下贝氏体,然后在空气中冷却。

等温淬火法的优点是能够使工件得到较高的强度和硬度,同时具有良好的韧性,并可以减少或避免工件的变形和开裂。缺点是工件的直径或厚度不能过大,否则,心部将因冷却速度慢而转变为索氏体,达不到淬火的目的。等温淬火法主要用于一些不但形状较复杂,而且具有较高硬度和冲击韧性的工具、模具(弹簧、螺栓)等工件。

5) 冷处理

冷处理就是将淬火钢继续冷却至室温以下的某一温度,并停留一定时间,使残余奥氏体转变为马氏体,然后再恢复到室温。



1—单液淬火法; 2—双液淬火法;
3—分级淬火法; 4—等温淬火法

图3-9 各种淬火方法示意图

冷处理的目的是尽量减少钢中残余奥氏体，以获得最大数量的马氏体，从而提高钢的硬度和耐磨性，并稳定钢件的尺寸。因此，冷处理主要用于要求高强度、高耐磨性的零件，以及高精度的量具和精密偶件等。

6. 钢的淬透性与淬硬性

1) 淬透性与淬硬性的概念

淬透性表示钢在淬火时获得马氏体的能力，在规定条件下，它决定了钢材淬硬层深度和硬度分布的特性。淬硬性是指钢在理想条件下进行淬火硬化（得到马氏体组织）所能达到的最高硬度的能力。淬硬性与淬透性是两个不同的概念，淬硬性主要与马氏体中的含碳量有关，含碳量越高，淬火后硬度越高。合金元素的含量则对它无显著影响。所以，淬硬性好的钢淬透性不一定好，淬透性好的钢淬硬性也不一定高。例如，碳的质量分数为 0.3%、合金元素的质量分数为 10% 的高合金模具钢 $3\text{Cr}_2\text{W}_8\text{V}$ 淬透性极好，但在 $1\ 100\ ^\circ\text{C}$ 油冷淬火后的硬度约为 50 HRC；而碳的质量分数为 1.0% 的碳素工具钢 T10 钢的淬透性不高，但在 $760\ ^\circ\text{C}$ 水冷淬火后的硬度大于 62 HRC。

2) 影响淬透性的因素

钢的淬透性主要取决于过冷奥氏体的稳定性，稳定性越好，淬火临界冷却速度越低，则钢的淬透性越好。因此，凡是影响奥氏体稳定性的因素均影响钢的淬透性，主要影响因素有以下两点。

(1) 钢的化学成分。钢中含碳量越接近共析成分，过冷奥氏体越稳定，淬透性越好。除钴外，大多数合金元素溶于奥氏体后，使 C 曲线右移，降低临界冷却速度，提高钢的淬透性。

(2) 奥氏体化温度及保温时间。提高奥氏体化温度将使奥氏体晶粒长大，成分更均匀，从而限制珠光体等的生核率，降低钢的冷却速度，增大淬透性。

四、钢的回火

工件在淬火之后，其中的马氏体与残余奥氏体都是不稳定组织，它们有自发向稳定组织转变的趋势。为了促进这种转变，可进行回火。回火是指工件在淬硬后，重新加热到 A_1 以下的某一温度，保温一段时间，然后冷却到室温的热处理工艺。回火是最终热处理工艺。

回火总是伴随在淬火之后，因为工件淬火后硬度高而脆性大，不能满足各种工件的不同性能要求，需要通过适当回火的配合来调整硬度、减小脆性，得到所需的塑性和韧性；同时工件淬火后存在很大内应力，如不及时回火，往往会发生变形甚至开裂。另外，淬火后的组织结构（马氏体和残余奥氏体）是处于不稳定的状态，在使用中要发生分解和转变，从而将引起零件形状及尺寸的变化，利用回火可以促使它转变到一定程度并使其组织结构稳定化，以保证工件在以后的使用过程中不再发生尺寸和形状的改变。

根据钢在回火后组织和性能的不同，按回火温度范围可将回火分为低温回火、中温回火和高温回火 3 种。

1) 低温回火

低温回火温度是在 $150\sim 250\ ^\circ\text{C}$ 。回火后得到回火马氏体组织，硬度一般为 58~64 HRC。低温回火的目的是保持高的硬度和耐磨性，降低内应力，减少脆性。主要适用于刃具、量具、模具和轴承等要求高硬度、高耐磨性的工具和零件。

2) 中温回火

中温回火温度是在 350~500 ℃。回火后得到回火屈氏体组织, 硬度为 35~45 HRC。中温回火的目的是要获得较高的弹性和屈服极限, 同时又有一定的韧性。主要用于弹簧、发条、热锻模等零件的处理。

3) 高温回火

高温回火温度是在 500~650 ℃。回火后得到回火索氏体组织, 硬度为 200~350 HRC。高温回火的目的是要获得强度、塑性、韧性都较好的综合机械性能。

当淬火钢回火时, 随着回火温度的升高, 通常其硬度、强度降低, 而塑性、韧性提高, 但是在 250~350 ℃及 500~650 ℃范围内回火时, 钢的冲击韧性反而显著降低, 这种脆化现象称为回火脆性。淬火钢在 250~350 ℃回火时所产生的回火脆性称为低温回火脆性; 淬火钢在 500~650 ℃范围内回火后出现的脆性称为高温回火脆性。

五、钢的调质处理

在工厂里习惯地把淬火加高温回火相结合的热处理称为调质处理。调质处理在机械工业中得到广泛应用, 主要用于承受交变载荷作用下的重要结构件, 如连杆、螺栓、齿轮及轴类等。

调质处理可作为最终热处理, 但由于调质处理后钢的硬度不高, 便于切削加工, 并能得到较好的表面质量, 故也作为表面淬火和化学热处理的预备热处理。

■ 任务实施

成分相同的两根钢丝加热的温度相同, 但采用了不同的冷却方式, 即采用了不同的热处理方法, 钢的内部组织发生了不同的变化, 得到了不同的力学性能。所以, 成分相同的两根钢丝虽然加热的温度相同, 放在水中冷却的一根硬而脆, 很容易折断, 放在空气中冷却的一根较软, 有较好的塑性, 可以卷成圆圈而不断裂。

任务 3-3 钢的表面热处理

■ 任务引入

齿轮是依靠齿的啮合传递扭矩的轮状机械零件, 这就要求表面具有高硬度和耐磨性, 而心部仍然具有一定的强度和足够的韧性。怎么办呢?

■ 任务目标

熟悉钢表面淬火的的目的、方法、工艺特点、适用场合及钢表面化学热处理的目的和方法。

■ 相关知识

一、钢的表面淬火

表面淬火是将工件的表面淬透到一定深度, 而心部仍保持未淬火状态的一种局部淬火法。它是利用快速加热使钢件表层很快达到淬火温度, 而当热量来不及传到中心便立即快速冷却的方法来实现的。表面淬火的方法较多, 工业中应用最多的有感应加热表面淬火法和火焰加热表面淬火法。

1. 感应加热表面淬火

利用感应电流通过工件所产生的热效应，使工件表层、局部或表面加热并进行快速冷却的淬火工艺，称为感应加热表面淬火。

1) 感应加热的基本原理

一个线圈通以交流电，就会在线圈内部和周围产生一交变磁场。如将工件置于此交变磁场中，工件中将产生一交变感应电流，其频率与线圈中电流频率相同，在工件中形成一闭合回路，称为涡流。涡流在工件内的分布是不均匀的，表面密度大，心部密度小。通入

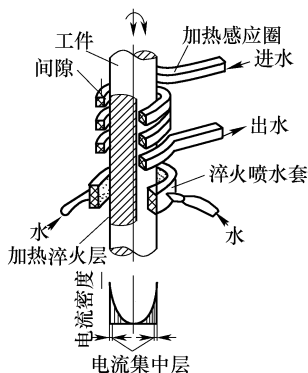


图 3-10 感应加热表面淬火示意图

线圈的电流频率越高，涡流就越集中于工件的表层，这种现象称为集肤效应。依靠感应电流的热效应，使工件表层在几秒钟内快速加热到淬火温度，然后迅速喷水冷却，使工件表面层淬硬，这就是感应加热表面淬火的基本原理，如图 3-10 所示。

2) 感应加热表面淬火的特点

感应加热表面淬火和普通淬火相比，主要有以下特点。

(1) 当感应加热时，使珠光体转变为奥氏体的转变温度升高，转变温度范围扩大，转变所需时间缩短，一般只有几秒或几十秒。

(2) 感应加热表面淬火可以在工件表层得到极细的所谓隐晶马氏体组织，所以淬火后可以得到优良的机械性能，

硬度比普通淬火稍高（高 2~3 HRC），脆性较低，同时可提高疲劳强度。

(3) 感应加热表面淬火的工件不易氧化和脱碳，变形也小。

(4) 淬硬层深度易于控制，淬火操作容易实现机械化和自动化。

感应加热表面淬火对于大批量的流水生产极为有利。但设备较贵，维修、调整也比较困难，形状复杂的零件感应器不易制造。

3) 感应加热表面淬火的应用

感应加热表面淬火主要用于中碳钢和中碳低合金钢制造的中小型工件的成批生产。当淬火时工件表面加热深度主要取决于电流频率。生产上通过选择不同的电流频率来达到不同要求的淬硬层深度。根据电流频率不同，感应加热表面淬火分为高频加热、中频加热和工频加热 3 类。感应加热表面淬火的应用见表 3-2。

表 3-2 感应加热表面淬火的应用

分类	频率范围/kHz	淬火深度/mm	适用范围
高频加热	50~300	0.3~2.5	中小型轴、销、套等圆柱形零件，小模数齿轮
中频加热	1~10	3~10	尺寸较大的轴类，大模数齿轮
工频加热	0.05	10~20	大型 (>φ300) 零件表面淬火或棒料穿透加热

2. 火焰加热表面淬火

火焰加热表面淬火是用乙炔-氧或煤气-氧的混合气体燃烧的火焰，喷射在零件表面上，使它加速加热，当达到淬火温度时立即喷水冷却，从而获得预期的硬度和淬硬层深度的一种

表面淬火方法,如图3-11所示。

火焰加热表面淬火零件的材料常用中碳钢及中碳合金结构钢,也可用于铸铁件。淬硬层深度一般为2~6 mm,若要获得更深的淬硬层,往往会引起零件表面严重过热,且易产生淬火裂纹。

火焰加热表面淬火设备简单,有乙炔发生器、氧气瓶和喷水管,小批量生产可采用手工操作,加热温度用肉眼观察,大批量生产可采用淬火机床,加热温度用光电式示差高温计测量。

这种方法主要适用于大型零件和需要局部淬火的工具或零件,如大型轴类、大模数齿轮、轧辊等。

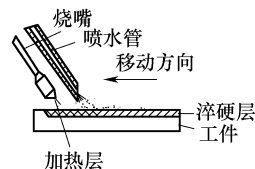


图3-11 火焰表面
淬火示意图

二、钢的表面化学热处理

化学热处理是将钢件放入一定的化学介质中加热和保温,使介质中的活性原子渗入工件表面,使表面化学成分发生变化,从而改变金属的表面组织和性能的工艺过程。这种热处理与表面淬火相比,其特点是表层不仅有组织的变化,而且还有化学成分的变化。

化学热处理的目的是使工件心部有足够的强度和韧性,而表面具有高的硬度和耐磨性;提高工件的疲劳强度;提高工件表面的抗蚀性、耐热性等性能,以替代昂贵的合金钢。

根据钢中渗入元素的不同,化学热处理有许多种,如渗碳、渗氮、碳氮共渗、渗硼、渗硫、渗硅、渗铬、渗铝等。渗入元素不同,钢的表面性能不同。渗碳、氮化、碳氮共渗可提高钢的耐磨性和疲劳强度;氮化、渗铬可提高耐蚀性;渗硫可提高减磨性;渗硅可提高耐酸性;氮化、渗硼、渗铝可提高耐热性。

在一般机械制造业中,最常用的化学热处理工艺有渗碳、渗氮、碳氮共渗等。

1. 渗碳

渗碳是向钢的表面渗入碳原子,使其表面达到高碳钢的含碳质量分数。

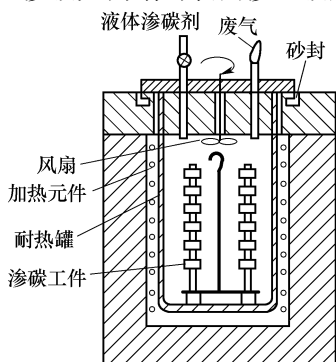


图3-12 井式气体渗碳炉
气体渗碳法

渗碳所用的钢一般是碳的质量分数为0.10%~0.25%的低碳钢和低合金钢,如15、20、20r、20CrMnTi、20SiMnVB等钢,渗碳层深度一般都在0.5~2.5 mm,渗碳后表面层的含碳量可达到0.8%~1.1%。渗碳后的工件都要进行淬火和低温回火,使工件表面获得高的硬度(56~64 HRC)、耐磨性和疲劳强度,而心部仍保持一定的强度和良好的韧性。

渗碳主要有固体渗碳和气体渗碳两种方法,应用广泛的是气体渗碳法。气体渗碳是工件在气体渗碳介质中进行的渗碳工艺,它是将工件放入密封的加热炉中,通入气体渗碳剂进行的渗碳,图3-12所示为井式气体渗碳

炉气体渗碳法。

渗碳工艺主要用于低碳钢或低碳合金钢制成的齿轮、活塞销、轴类等重要零件,能够满足表面硬而耐磨,心部强而韧,具有较高的疲劳极限的性能要求。

2. 渗氮（氮化）

在一定温度下置于一定介质中，使氮原子渗入工件表层的化学热处理工艺，称为渗氮（又叫氮化）。渗氮的目的是提高工件表层的硬度、耐磨性、热硬性、耐腐蚀性和疲劳强度。

渗氮方法有气体渗氮和离子渗氮两种。气体渗氮是把工件放入密封箱式（或井式）炉内加热（温度为500~580℃），并通入氨气，使其分解，分解出的活性氮原子被工件表面吸收，得到一定深度的渗氮层。零件不需要渗氮的部分应镀锡或镀铜保护，也可留1mm的余量，在渗氮后磨去。渗氮以后不再进行热处理，因此，为保证零件内部的机械性能，在氮化前要进行调质处理。氮化的主要缺点是时间太长，要得到0.2~0.5mm的氮化层，氮化时间需30~50h。另外，氮化层较脆、较薄，所以不能承受太大的接触压力。所用的钢材也受到限制，需使用含Al、Cr、Mo、Ti、V等元素的合金钢。

氮化常用于在交变载荷下工作的各种结构零件，尤其是要求耐磨性和高精密度及在高温下工作的零件，如内燃机的曲轴、齿轮、量规、铸模、阀门等。

3. 碳氮共渗

在奥氏体状态下同时将碳、氮原子渗入工件表层，并以渗碳为主的化学热处理工艺，称为碳氮共渗。根据共渗温度不同，可分为低温（520~580℃）、中温（760~880℃）和高温（900~950℃）碳氮共渗，其目的主要是提高工件表层的硬度和耐磨性。

（1）高温碳氮共渗（900~950℃）以渗碳为主，渗后直接淬火，加低温回火。当气氛中含有一定氮时，碳的渗入速度比相同温度下单独渗碳的速度快，而且在处理温度和时间相同时，碳氮共渗层要厚于渗碳层。

（2）低温碳氮共渗（软氮化520~580℃）以渗氮为主，主要用于硬化层要求薄、载荷小但变形要求严格的各种耐磨件及刀具、量具、模具等。

■ 任务实施

在生产中，有些零件如齿轮、凸轮、曲轴、花键轴和活塞销等，要求表面具有高硬度和耐磨性，而心部仍然具有一定的强度和足够的韧性。这时就需要对零件进行表面热处理，以满足上述要求。

任务 3-4 零件常见热处理缺陷分析及预防措施

■ 任务引入

在热处理过程中，必须严格按照工艺规范进行操作，否则容易产生热处理缺陷，使得零件的性能恶化甚至使零件报废。那么，怎样防止缺陷产生呢？

■ 任务目标

掌握常见热处理缺陷、产生原因及预防措施，能够分析热处理缺陷产生的原因并确定其预防措施。

■ 相关知识

工件在热处理过程中，特别是在淬火时，由于加热温度高，冷却速度快，很容易产生某些缺陷。在热处理过程中设法减轻各种缺陷的影响，对提高产品质量有实际意义。

一、过热与过烧

工件加热温度过高或保温时间过长而使奥氏体晶粒过度长大，导致力学性能显著降低的

现象称为过热。工件过热后形成粗大的奥氏体晶粒，强度、韧性降低，脆性显著增加。需要通过正火或退火来消除。

工件加热温度过高，致使奥氏体晶界氧化和部分熔化的现象称为过烧。过烧造成工件强度低，脆性大，并且无法补救，只能报废。

二、氧化与脱碳

工件在加热时，介质中的氧、二氧化碳和水蒸气等与之反应生成氧化物的过程称为氧化。氧化使工件表面烧损，增大表面粗糙度参数值，减小工件尺寸，甚至使工件报废。

工件在加热时介质与其表层的碳发生反应，使表层碳的质量分数降低的现象称为脱碳。脱碳使工件表面碳的质量分数降低，使力学性能下降，引起工件早期失效。

三、硬度不足和软点

钢件淬火后表面硬度低于应有的硬度，达不到技术要求，称为硬度不足。加热温度过低或保温时间过短；淬火介质冷却能力不够或冷却不均匀；工件表面不清洁及工件表面氧化脱碳等，均容易使工件淬火后达不到要求的硬度值。

钢件淬火硬化后，其表面存在硬度偏低的局部小区域，这种小区域称为软点。

四、变形和开裂

变形是当淬火时工件产生形状和尺寸偏差的现象。开裂是当淬火时工件产生裂纹的现象。

工件产生变形与开裂的主要原因，都是由于热处理过程中工件内部存在较大的内应力造成的。当热处理内应力大于钢的屈服点时，工件就会发生变形；当淬火应力大于钢的抗拉强度时，工件就会产生开裂。当淬火时，应力的产生是不可避免的，工件引起的变形一般可矫正过来，但若产生裂纹则只能报废。

■ 任务实施

过热和过烧主要都是由于加热温度过高引起的，因此，合理确定加热规范，严格控制加热温度和保温时间可以防止过热和过烧。

热处理时在获得成分均匀的奥氏体的同时，必须注意控制加热温度和保温时间，防止氧化和脱碳现象。

当工件产生硬度不足和大量的软点时，可在退火或正火后，重新进行正确的淬火处理予以补救，即可消除硬度不足和大量软点。

为了减少工件在淬火时产生变形和开裂的现象，可以从两个方面采取措施，第一，在淬火时正确选择加热温度、保温时间和冷却方式，可以有效地减少工件变形和开裂现象；第二，在淬火后及时进行回火处理。

【知识扩展】

当今热处理技术的发展，一方面要追求各类机械零部件的性能的提高，需要相应发展获得各种优异性能的热处理工艺；另一方面又要追求劳动生产率的提高，需要发展各种节约能源和高效率的工艺方法。常用的热处理新技术包括真空热处理、可控气氛热处理、形变热处理、化学热处理和电子束表面淬火。

一、真空热处理

真空热处理是真空技术与热处理技术相结合的新型热处理技术，是指工件热处理工艺的全部或部分在低于 1×10^{-5} MPa 的环境中进行热处理。真空热处理可以实现几乎所有的常规热处理所能涉及的热处理工艺，如淬火、退火、回火、渗碳及氮化，在淬火工艺中可实现气淬、油淬、硝酸盐淬火和水淬等，还可以进行真空钎焊、烧结及表面处理等，热处理质量大大提高。

真空热处理的特点有以下几点。

(1) 热处理变形小。因为真空加热缓慢且均匀，内热温差较小，热应力小，故热处理变形小。

(2) 可实现无氧化、无脱碳和无渗碳，可去掉工件表面的磷屑，并有脱脂除气等作用，从而达到表面光亮净化的效果。

(3) 可提高工件表面力学性能，延长工件使用寿命。

(4) 工作环境好，操作安全，节省能源，没有污染和公害。

(5) 真空热处理设备造价较高，目前多用于工模具、精密零件的热处理。

二、可控气氛热处理

工件在炉气成分可控的加热炉中进行的热处理，称为可控气氛热处理。

钢在空气中加热，不可避免地要发生氧化和脱碳，不仅烧损钢材造成浪费，还严重影响工件质量，因此必须采取措施防止氧化和脱碳。可控气氛热处理的主要目的就是减少和防止工件加热时的氧化和脱碳，提高工件尺寸精度和表面质量，节约钢材，控制在渗碳时渗层的碳浓度，而且可使脱碳工件重新复碳。可控气氛热处理设备通常都由制备可控气氛的生成器和进行热处理的加热炉两部分组成。目前应用较多的是吸热式气氛、放热式气氛、放热-吸热式气氛及滴注式气氛。

三、形变热处理

形变热处理是将塑性变形和热处理有机结合，以获得材料力学性能的热处理工艺。这种工艺既可提高钢的强度，改善塑性和韧性，又可节能，在生产中得到了广泛的应用。例如，将钢加热至 A_{c3} 以上，获得奥氏体组织，保持一定时间后进行形变，立刻淬火获得马氏体组织，然后在适当温度回火后，即可获得很高的韧性。

形变热处理通常可分为高温形变热处理和中温形变热处理。

高温形变热处理是将工件加热到稳定的奥氏体区域，进行塑性变形后立即进行淬火，发生马氏体相变后经回火达到所需的性能。高温形变热处理能显著提高钢的强度、塑性、韧性，并且其疲劳强度也明显提高。

中温形变热处理是将工件加热到稳定的奥氏体区域，迅速冷却到过冷奥氏体的亚稳区进行塑性变形，然后进行淬火和回火。中温形变热处理强化效果非常明显，但工艺较难实现。

该工艺广泛用于结构钢、工具钢工件，用于锻后余热淬火、热轧淬火等工艺。

四、化学热处理新技术

化学气相沉积是一种在硬质合金工具表面涂敷耐高温、耐磨材料薄层的一种化学热处理

工艺方法。其原理是将工件置于炉内加热到高温后，向炉内通入反应气（低温下可气化的金属盐），使其在炉内发生分解或化学反应，并在工件上沉积成一层所要求的金属或金属化合物薄膜的方法。化学气相沉积法的缺点是加热温度较高，目前主要用于硬质合金的涂敷。

五、电子束表面淬火

电子束表面淬火是以电子枪发射的电子束作为热源轰击工件表面，以极快速度加热工件并自冷，淬火后使工件表面强化的热处理工艺。电子束的强度大大高于激光，而且其能量利用率可达80%。电子束表面淬火质量高，淬火过程中工件基体性能几乎不受影响，是很有前途的热处理新技术。电子束在很短时间内轰击表面，表面温度迅速升高，而基体仍保持冷态。当电子束停止轰击时，热量迅速向冷基体金属传导，从而使加热表面自行淬火。电子束表面淬火不受钢材种类限制，加热区域小，加热速度快，不需冷却介质，淬火质量高，工件表面光洁，没有工业污染，热处理后工件硬度比一般热处理高，并具有良好的力学性能。目前主要用于精密零件和关键零件的局部表面淬火。



复习思考题

- 解释下列名词
 - 奥氏体、过冷奥氏体、残余奥氏体；
 - 珠光体、索氏体、屈氏体、贝氏体、马氏体；
 - 临界冷却速度 (V_k)；
 - 退火、正火、淬火、回火、调质处理；
 - 淬透性、淬硬性。
- 珠光体类型组织有哪几种？它们在形成条件、组织形态和性能方面有何特点？
- 贝氏体类型组织有哪几种？它们在形成条件、组织形态和性能方面有何特点？
- 马氏体组织有哪几种基本类型？它们的形成条件、晶体结构、组织形态和性能有何特点？马氏体的硬度与含碳量关系如何？
- 何谓连续冷却及等温冷却？试绘出奥氏体这两种冷却方式的示意图。
- 说明共析钢C曲线各个区、各条线的物理意义，并指出影响C曲线形状和位置的主要因素。
- 确定下列钢件的退火方法，并指出退火目的及退火后的组织。
 - 经冷轧后的15钢钢板，要求降低硬度；
 - ZG35的铸造齿轮；
 - 锻造过热的60钢锻坯；
 - 具有片状渗碳体的T12钢坯。
- 淬火的目的是什么？亚共析钢和过共析钢淬火加热温度应如何选择？
- 说明45钢试样 ($\phi 20\text{ mm}$) 经 $700\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $760\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $840\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $1\ 100\text{ }^\circ\text{C}$ 温度加热，保温并在水中冷却得到的室温组织。

10. 淬透性与淬硬层深度两者有何联系和区别？影响钢淬透性的因素有哪些？
11. 用正火和调质热处理一批 45 钢的零件，硬度要求 220~250 HB。两种工艺都能达到硬度要求。试分析两种热处理后产品的组织和性能的差别。
12. 现有低碳钢和中碳钢齿轮各一个，为了使齿面具有高硬度和高耐磨性，应进行何种热处理？并比较经热处理后两种钢组织和性能上有何不同？
13. 试说明表面淬火、渗碳、渗氮热处理工艺在用钢、性能、应用范围等方面的差别。