

高等学校试用教材

铸钢及其熔炼

大连工学院李隆盛 主编

前 言

本书是根据 1978 年高等学校一机部对口专业座谈会上的分工及同年 5 月铸造专业教材编审计划会议讨论通过的《铸钢及其熔炼》编写大纲进行编写的。

本书包括铸钢材料及铸钢的熔炼两个部分。在铸钢材料部分中包括铸造用的碳钢、低合金钢和高合金钢，以金属学理论为基础，论述如何通过适当控制钢的化学成分、创造适宜的铸造条件以及采取正确的热处理方法，以得到高质量的铸钢件。在铸钢的熔炼部分中包括电弧炉炼钢、感应电炉炼钢及近年来国内外新发展的一些炼钢方法，以物理化学及冶金原理为基础，论述如何冶炼高质量的钢液，以保证钢的优良性能。书的内容尽量作到理论联系实际，深入浅出。书后还附有炼钢用原材料的规格及有关使用这些原材料的知识。

本书主要作为高等工科院校铸造专业的教材。也可供从事铸造工作的工程技术人员作参考。

本书的第二章由甘肃工业大学彭镜鑫同志编写，其余各章及附录由大连工学院李隆盛同志编写。全书由李隆盛同志负责主编。初稿完成后，由内蒙古工学院李治远同志主审。修改稿经第一机械工业部教材编辑室黄循同志审阅，最后经编者再修改后定稿。

第一机械工业部沈阳铸造研究所为本书提供了一部分铸造合金钢的金相照片，在此表示深切的谢意。

本书中所采用的单位及其代号

本书采用国际单位制 (SI) 以及规定与国际单位并用的单位。在下表中列出本书中用到的一些单位及其代号, 并附有这些单位与常用工程单位之间的换算关系。

单位的名称与代列表

序号	物理量 (或工程量) 的名称	国际单位		常用工程单位		换算关系
		名称	代号	名称	代号	
1	长度	米 厘米 毫米 微米	m cm mm μm	米 厘米 毫米 微米	m cm mm μm	—
2	面积	平方米 平方厘米	m ² cm ²	平方米 平方厘米	m ² cm ²	—
3	体积	立方米 立方厘米	m ³ cm ³	立方米 立方厘米	m ³ cm ³	—
4	时间	秒 分 小时	s min h	秒 分 小时	s min h	—
5	速度	米每秒 厘米每秒	m/s cm/s	米每秒 厘米每秒	m/s cm/s	—
6	加速度	米每秒平方 厘米每秒平方	m/s ² cm/s ²	米每秒平方 厘米每秒平方	m/s ² cm/s ²	—
7	质量	千克(公斤) 克 吨	kg g t	千克(公斤) 克 吨	kg g t	—
8	密度	千克每立方米 吨每立方米	kg/m ³ t/m ³	千克每立方米 吨每立方米	kg/m ³ t/m ³	—
9	力	牛顿	N	公斤力	kgf	$1\text{ N} \approx \frac{1}{10}\text{ kgf}$ $1\text{ kgf} \approx 10\text{ N}$
10	压强	牛顿每平方米	N/m ²	工程大气压	at	$1\text{ N/m}^2 \approx 1 \times 10^{-5}\text{ at}$ $1\text{ at} \approx 10^5\text{ N/m}^2$
11	应力	牛顿每平方米 百万牛顿 每平方米	N/m ² * MN/m ² **	公斤力每 平方毫米	kgf/mm ²	$1\text{ N/m}^2 \approx 1 \times 10^{-7}\text{ kgf/mm}^2$ $1\text{ kgf/mm}^2 \approx 1 \times 10^7\text{ N/m}^2$ $1\text{ MN/m}^2 \approx \frac{1}{10}\text{ kgf/mm}^2$ $1\text{ kgf/mm}^2 \approx 10\text{ MN/m}^2$

* 在国外, N/m²又称为帕斯卡, 以代号Pa表示。

** 在国外, MN/m²又称为百万帕斯卡, 以代号MPa表示。

(续)

序号	物理量 (或工程量) 的名称	国际单位		常用工程单位		换算关系
		名称	代号	名称	代号	
12	热量、能量、功	焦耳	J	卡 千卡 公斤力·米	cal kcal kgf·m	$1 \text{ J} = 239 \times 10^{-3} \text{ kcal}$ $= 239 \times 10^{-3} \text{ cal}$ $\approx 0.1 \text{ kgf} \cdot \text{m}$ $1 \text{ kcal} = 4186.8 \text{ J}$ $1 \text{ cal} = 4.1868 \text{ J}$ $1 \text{ kgf} \cdot \text{m} \approx 10 \text{ J}$
13	冲量特性	焦耳每平方米	J/m^2	公斤力米 每平方厘米	$\text{kgf} \cdot \text{m}/\text{cm}^2$	$1 \text{ J}/\text{m}^2 = 1 \times 10^{-6} \text{ kgf} \cdot \text{m}/\text{cm}^2$ $1 \text{ kgf} \cdot \text{m}/\text{cm}^2 = 1 \times 10^6 \text{ J}/\text{m}^2$
14	断裂韧性	牛顿每米的二分之三次方	$\text{N}/\text{m}^{3/2}$	公斤力每厘米的二分之三次方	$\text{kgf}/\text{cm}^{3/2}$	$1 \text{ N}/\text{m}^{3/2} = 1 \times 10^{-4} \text{ kgf}/\text{cm}^{3/2}$ $1 \text{ kgf}/\text{cm}^{3/2} = 1 \times 10^4 \text{ N}/\text{m}^{3/2}$
15	动力粘度	牛顿秒每平方米	$\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$	达因秒每平方厘米	$\text{dyn} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$ ***	$1 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2 \approx 10 \text{ dyn} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$ $1 \text{ dyn} \cdot \text{s}/\text{cm}^2 \approx \frac{1}{10} \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$
16	温度	开尔文 摄氏温度	K °C	摄氏温度	°C	$\text{K} \approx 273 + ^\circ\text{C}$ $^\circ\text{C} \approx \text{K} - 273$
17	导热系数	焦耳每米秒摄氏温度	$\text{J}/\text{m} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$	千卡每米秒摄氏温度	$\text{kcal}/\text{m} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$	$1 \text{ J}/\text{m} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C} = 239 \times 10^{-3} \text{ kcal}/\text{m} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$ $1 \text{ kcal}/\text{m} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C} = 4186.8 \times \text{J}/\text{m} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$
18	电压	伏特	V	伏特	V	—
19	电流	安培	A	安培	A	—
20	电阻	欧姆	Ω	欧姆	Ω	—
21	电功率 (有功功率)	千瓦	kW	千瓦	kW	—
22	电功率 (视在功率)	千伏安	kVA	千伏安	kVA	—
23	电流频率	赫芝	Hz	赫芝	Hz	—
24	磁通量	韦伯	Wb	麦克斯韦	Mx	$1 \text{ Wb} = 1 \times 10^8 \text{ Mx}$ $1 \text{ Mx} = 1 \times 10^{-8} \text{ Wb}$

*** 达因秒每平方厘米 ($\text{dyn} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$) 通常又称为泊, 以代号 P 表示。

目 录

绪论	1	§ 4-1 概述	97
第一篇 铸钢材料		§ 4-2 三相电弧炉的结构及主要 技术性能	97
第一章 铸造碳钢	2	§ 4-3 碱性电弧炉氧化法炼钢	103
§ 1-1 概述	2	§ 4-4 碱性电弧炉吹氧返回法炼钢	126
§ 1-2 碳钢的结晶过程和铸态组织	4	§ 4-5 碱性电弧炉不氧化法炼钢	129
§ 1-3 热处理及钢的金相组织和机械性能	9	§ 4-6 酸性电弧炉炼钢	130
§ 1-4 基本元素对机械性能的影响	14	§ 4-7 钢的浇注	131
§ 1-5 气体和非金属夹杂物对机械性能的影响	15	第五章 感应电炉炼钢	136
§ 1-6 铸造性能	19	§ 5-1 概述	136
第二章 铸造低合金钢	27	§ 5-2 感应电炉炼钢中特有的电现象	137
§ 2-1 概述	27	§ 5-3 无芯感应电炉的结构	138
§ 2-2 合金元素在钢中的作用	28	§ 5-4 酸性感应电炉炼钢工艺	141
§ 2-3 铸造低合金钢的主要类别及钢种	38	§ 5-5 碱性感应电炉炼钢工艺	142
§ 2-4 低合金钢铸件的热处理	49	第六章 炼钢技术的新发展	144
§ 2-5 低合金钢的铸造性能特点	51	§ 6-1 真空感应电炉炼钢	144
第三章 铸造高合金钢	54	§ 6-2 盛钢桶吹氩处理	147
§ 3-1 概述	54	§ 6-3 氩氧脱碳法和真空氩氧脱 碳法	148
§ 3-2 高锰钢	54	§ 6-4 电渣熔铸	152
§ 3-3 铸造不锈钢	63	§ 6-5 等离子炉炼钢	156
§ 3-4 铸造耐热钢	79	§ 6-6 炼钢技术的新趋向	158
§ 3-5 铸造低温钢	93	附 录 炼钢用原材料	160
第二篇 铸钢的熔炼		§ 附-1 概述	160
第四章 电弧炉炼钢	97	§ 附-2 金属材料	160
		§ 附-3 耐火材料	166
		§ 附-4 其它材料	167
		§ 附-5 原材料的保管和处理	168

绪 论

铸钢在工业上的应用是极为广泛的。1977 年全世界铸钢件的产量达到 1214 万吨, 占全世界铸件总产量的 15.5%。合金钢铸件的用量很大, 如 1978 年日本合金钢铸件占铸钢件的比重达 43%。由于铸钢具有高的强度、塑性和韧性, 因而在重型机械中常用于制造承受巨大载荷的重型零件, 例如轧钢机的机架就是用碳钢铸成的。大型轧钢机的机架铸件的重量常达百吨以上。世界上最大的轧钢机机架重达 350 吨。此外, 重型水压机的横梁等, 也都是重量在几十吨以上的铸钢件。在交通运输业中, 铸钢件的应用也是很普遍的。例如铁路车辆上有很多种受力很大而又承受冲击作用的零件, 如摇枕、侧架、车轮及联结器(车钩)等, 都是铸钢件。又例如轮船上受力极大的零件, 如锚和锚链等, 也都是铸钢件。

有些钢种(例如高锰钢)具有能抵抗摩擦的特性, 因而用来制造在干摩擦(没有润滑的条件下经受磨料的摩擦)下工作的机器零件, 例如挖掘机的抓斗前壁及斗齿, 圆锥式破碎机的轧臼壁及狼牙板等。不锈钢对硝酸等腐蚀性介质具有耐蚀性, 在化学工业设备中广泛用来制作阀、泵及容器。此外, 耐热钢和耐低温钢用来铸制在高温(温度高达 $800\sim 900^{\circ}\text{C}$)和低温(温度低至 -196°C)条件下工作的机器零件, 在加热炉及低温设备上使用。

近年来, 随着科学技术的发展, 铸钢件在原子能和宇航科学中也得到应用。原子能发电站用来容纳原子反应堆的容器是在高温和高压条件下工作的。为了保证安全, 容器是采用含铬、镍和钼的不锈钢制成的。国外有一座原子反应堆所用容器的盖, 是不锈钢铸件, 其重量达到 287 吨。在火箭上需要一些高强度的铸钢件。目前已经有用抗拉强度达到 $1270\text{MN}/\text{m}^2$ ($127\text{kg}/\text{mm}^2$) 的超高强度钢铸成的零件。由于钢的强度很高, 所以在设计上可以大大缩小零件的断面面积, 因而使得零件可以作得很轻巧。

为了能铸出质量良好的铸钢件, 需要很好地掌握冶炼、铸造及热处理等一系列的生产环节。在钢的冶炼方面, 不仅要保证炼出的钢液在化学成分上符合技术要求, 而且还应特别重视对钢液采取精炼的措施, 以便尽量除去钢液中所含有的气体和夹杂物质。实际上, 精炼钢液是保证铸钢质量的重要条件之一。为了能铸出质量良好的铸钢件, 还必须采用合理而完善的铸造工艺。在铸造工艺方面, 不仅要保证铸钢件在结构形状及尺寸上符合技术要求, 而且还应特别重视对铸件的凝固过程进行控制, 以便保证铸件具有良好的内在质量。只有对铸件的凝固过程进行正确而有效的控制, 才能得到组织致密的、无缩孔和裂纹等内部缺陷的健全铸件。铸件热处理也是保证铸钢件质量的重要环节之一。通过热处理, 能够改善钢的金相组织, 提高其机械性能及其它的特殊使用性能(如抗磨性及耐蚀性等)。通过热处理还能消除在铸造过程中产生的铸造应力, 防止铸件产生变形和开裂。

近年来, 随着生产和科学技术的迅速发展, 国内外在铸钢方面的发展是很快的。很多新的钢种和新的冶炼技术不断出现。铸造的技术水平也在不断地提高。我们要学习铸钢方面的基础知识, 开展这方面的科学研究工作, 为发展我国的机器制造工业以及其它工业和科学文化事业, 促进早日实现四个现代化作出贡献。

第一篇 铸钢材料

在铸钢生产中，为了保证铸件质量，必须使钢的性能符合技术要求。此外，还应不断发展新的铸造钢种，以满足生产和科学技术日益发展的需要。为此就应该学习有关铸钢材料方面的知识。

钢的种类是很多的。当按照化学成分进行分类时，可分为碳素钢（一般称为碳钢）和合金钢。在合金钢中又按照合金元素含量的多少分为低合金钢、中合金钢和高合金钢。低合金钢中合金元素的含量（当钢中同时存在有几种合金元素时以它们的总含量计算）在5%以下；中合金钢中合金元素的含量为自5%至10%；高合金钢中合金元素的含量在10%以上。当按照钢的用途进行分类时可分为碳素结构钢、碳素工具钢、合金结构钢、合金工具钢、不锈钢、耐热不起皮钢以及一些专门用途的钢（如弹簧用钢、轴承用钢、钢轨用钢、桥梁用钢、锅炉用钢等）。这些钢一般是用轧制的方法制成各种钢材。铸造生产上只用到其中的一部分。作为铸造材料用的主要有铸造碳钢、铸造低合金钢和铸造高合金钢（包括高铬钢、铬镍钢和高锰钢等）。其中高锰钢和高铬钢由于其本身性能的特点，不可能用轧制或锻压的方法来加工，因而只是作为铸造材料来使用。

本篇内容共分为三章：第一章——铸造碳钢；第二章——铸造低合金钢；第三章——铸造高合金钢。

第一章 铸 造 碳 钢

§ 1-1 概 述

生产上对铸造碳钢的要求是具有一定的机械性能。机械性能的主要指标通常指的是强度（屈服强度 σ_s 和抗拉强度 σ_b ）、塑性（延伸率 δ 和断面收缩率 ψ ）以及韧性（冲击韧性 α_k ）。近年来，随着科学技术的发展，在机械设计上对钢的机械性能提出了一些新的要求，例如为了评定钢的抵抗断裂破坏方面的能力而定的断裂韧性 K_{Ic} 等。

钢的机械性能由它的金相组织所决定，而金相组织则基本上是由钢的化学成分、结晶条件和热处理所决定。碳钢的化学成分除铁以外，主要包括碳、硅、锰、磷和硫。在这五种元素之中起主要作用的是碳，含碳量的多少直接影响钢的金相组织和机械性能，铸造碳钢就是以含碳量划分规格的。硅和锰的含量要求控制在一定范围内，在范围内波动时，对钢的机械性能没有显著的影响。磷和硫降低钢的机械性能，是有害的杂质，要求控制在一定的限度以下。表1-1列出国家标准（GB979-67）中关于铸造碳钢的化学成分的规定。钢号中的“ZG”表示铸钢，其后的数字表示钢中含碳量的公称值（以万分之几表示）。

表1-1 铸造碳钢的化学成分

钢 号	化 学 成 分, %		
	C	Mn	Si
ZG 15	0.12~0.22	0.35~0.65	0.20~0.45
ZG 25	0.22~0.32	0.50~0.80	0.20~0.45
ZG 35	0.32~0.42	0.50~0.80	0.20~0.45
ZG 45	0.42~0.52	0.50~0.80	0.20~0.45
ZG 55	0.52~0.62	0.50~0.80	0.20~0.45

注: 1. 各种级别的铸件P、S含量如下:

铸件级别 I II III
P及S, % ≤ 0.04 ≤ 0.05 ≤ 0.06

2. 钢中Ni、Cr、Cu残余含量不超过0.3%。

除技术条件要求规定外, 一般不作分析。

在冶炼碳钢时, 有时会由于在金属炉料中夹带有合金废钢, 因而所炼的钢中含有一些合金元素, 其中比较常见的有Ni、Cr和Cu。少量的合金元素对钢的性能并无显著的影响, 但是当含量提高时, 其作用也随之增大, 以至于影响到对钢的质量控制。因此, 在铸造碳钢的化学成分中, 对合金元素的含量作了如表1-1中注2的规定。

由于碳钢中的主要元素是铁和碳, 所以在研究钢的金相组织及热处理时, 可将钢近似地作为铁碳二元合金来研究。在铁碳二元合金中, 含碳量小于2.14%的属于钢的范围。在钢中又以含碳量0.765%为界限, 将钢区分为亚共析钢、共析钢和过共析钢。含碳量小于0.765%的为亚共析钢, 含碳量等于0.765%的为共析钢, 含碳量大于0.765%的为过共析钢。铸造碳钢的含碳量是自0.12~0.62%, 属于亚共析钢的范围(图1-1的影线范围)。铸造碳钢又按照含碳量划分为三类。含碳量小于

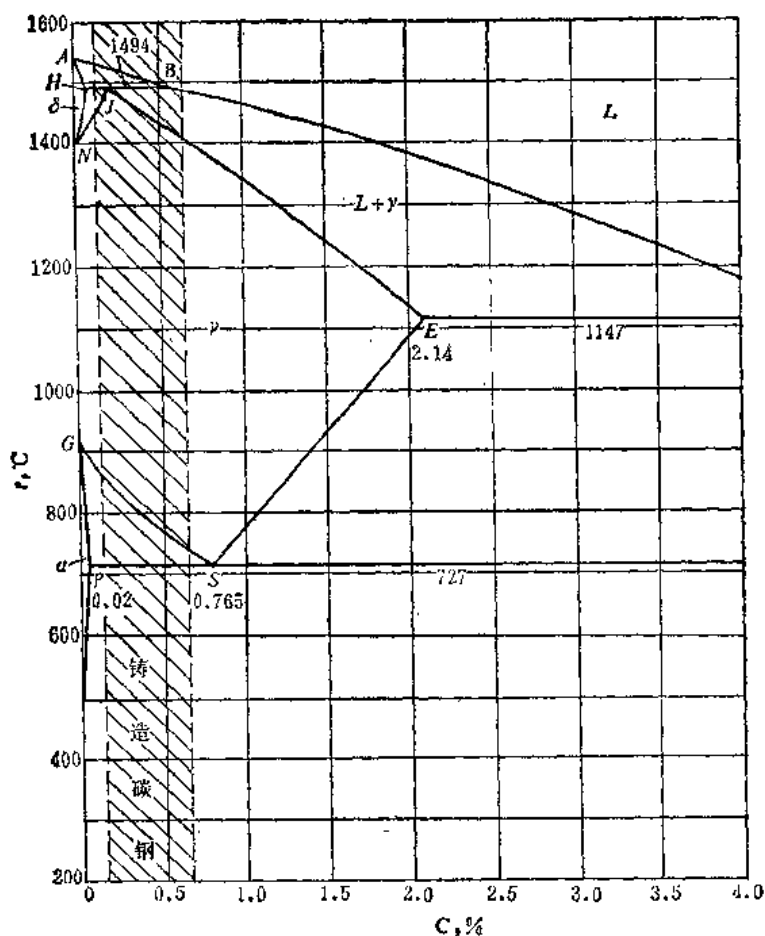


图1-1 铸造碳钢在铁-碳状态图上的位置*

0.20%的属于低碳铸钢, 含碳量为0.2~0.5%的属于中碳铸钢, 含碳量大于0.5%中属于高

* 状态图引自日本金属学会编: 金属データブック (1974) P. 422。

碳铸钢。

热处理对钢的性能有重要的影响。铸造状态下的钢的机械性能较低，特别是不耐冲击。通过热处理可以改善金相组织，提高机械性能，特别是提高韧性。热处理还能消除铸件中的残余应力，避免铸件在使用过程中发生变形和裂纹。因此，铸钢件总是要经过热处理以后才使用的。

本章的主要内容是阐明铸造碳钢的化学成分、金相组织和机械性能之间的关系，以及如何通过热处理来改善钢的金相组织和提高机械性能。此外也要讲到碳钢的铸造性能。

§ 1-2 碳钢的结晶过程和铸态组织

一、结晶过程

碳钢的结晶过程可以分为两个阶段：由钢液开始结晶起至完全凝固、形成奥氏体止为第一阶段；由奥氏体开始再结晶、析出铁素体（亚共析钢）起至共析转变终止为第二阶段。通常称第一阶段为钢的一次结晶过程，第二阶段为钢的二次结晶过程。实际上，在两次结晶过程之间，在钢通过奥氏体区的温度区间中，还发生奥氏体的粒化过程。参看图 1-1。

1. 一次结晶 当温度降至液相线（ AB 线）温度以上时，钢完全处于液体状态。当温度稍低于液相线温度时，有高温铁素体 δ 析出。当温度不断降低时，结晶过程持续进行。温度降到包晶温度时，发生包晶转变，生成奥氏体。当温度继续下降，穿过 $L + \gamma$ 区时，又有奥氏体自钢液中析出。此析出过程一直进行到 JE 线的温度为止。至此，一次结晶过程进行完了。

2. 奥氏体枝晶的粒化 在一次结晶过程中，奥氏体是以树枝状的形态析出的。一次结晶终止时，奥氏体具有树枝状的晶体。当温度继续下降通过状态图上奥氏体区的温度区间中，奥氏体在金相结构上虽然并没有发生转变，但是会发生晶体分裂的过程，即一个奥氏体的枝晶分裂成为若干个奥氏体晶粒。这个过程称为奥氏体枝晶的粒化。奥氏体枝晶会发生粒化的原因：一方面是一种自然的趋势，在较高的温度下粗大的晶粒处于比较稳定的状态，而在较低的温度下细小的晶粒处于比较稳定的状态，这是因为晶体的表面能与体积能随着温度的变迁而发生互相转化的结果，随着温度的降低，晶体的体积能减小而表面能增大，因此趋向于形成细的晶粒，这是内在的原因。另一方面是由于钢在冷却过程中，由于收缩的原因而产生内应力，促使大晶粒分裂成较小的晶粒，冷却速度快时，应力大，使奥氏体枝晶分裂的作用大，晶粒就比较细。正是由于奥氏体枝晶发生分裂的原因，人们在碳钢的显微组织中是看不到树枝状结晶存在的遗迹的。

3. 二次结晶 当温度下降至 GS 线与 PS 线之间的温度区间时，将从奥氏体中析出铁素体 α 。这种铁素体称为先共析铁素体。由于析出的铁素体在含碳量方面比奥氏体本身来得低，因此随着铁素体的析出，奥氏体的含碳量逐渐升高（沿 GS 线变化）。当温度降到共析转变温度时，含碳量为 s 的奥氏体发生共析转变，生成珠光体。

至此，二次结晶过程进行完了。形成的金相组织中包括有铁素体和珠光体。在温度继续下降直到常温的过程中，钢的金相组织基本上不再发生变化。

应该指出，上面讲到的在钢的一次结晶过程中，在不同的温度下从钢液中析出的奥氏体具有不同的含碳量。在二次结晶过程中，在不同的温度下从奥氏体中析出的先共析铁素体也

具有不同的含碳量。这是实际上存在的情况。固然，铁-碳合金状态图上所表示的相与相之间的关系是在平衡的条件下得到的。亦即在每一个温度下都要保持足够充分的时间使相与相之间达到平衡，其中也包括在同一个相中的不同部位处，由于存在着碳分的浓度差而引起的碳的扩散。此扩散过程将一直进行到含碳量均一化为止。如果能够达到平衡，则不论是一次结晶中形成的奥氏体，还是二次结晶中析出的铁素体，它们的含碳量都是均匀的，不存在有结晶偏析的现象。但是在铸造的条件下，实际的冷却速度并不是极其缓慢的，结晶过程总是远离平衡，这就使得结晶偏析在一定程度上被保留下来，但是通过适当的热处理可使这种偏析得到一定程度的消除，而且即使存在着结晶偏析也并不会显著降低钢的机械性能。

二、铸态组织

碳钢在铸态下的机械性能是比较差的，特别是冲击韧性低。机械性能差的原因除了可能存在有铸造缺陷（如缩孔、缩松、气孔、裂纹等）以外，很重要的是由于金相组织上存在着缺点。主要表现为晶粒粗大和魏氏组织。此外，在铸件内部还存在着内应力。

1. 晶粒粗大 钢的晶粒大小对机械性能有很大的影响。对化学成分和金相组织相同的钢，当晶粒愈细时，其机械性能愈高。机械性能高不仅表现在强度上，而且更重要地表现在塑性和冲击韧性上。

由于钢的晶粒大小在很大程度上与冷却速度有关，所以铸件愈厚大时，钢的晶粒愈粗大。铸型材料的导热性好坏，影响到传热速度，因而对晶粒度也有影响，在其它条件相同时，当用金属型铸造时，其晶粒要比用砂型铸出来的在晶粒度方面要细得多，其机械性能也较高。此外，浇注温度对钢的晶粒度也有重要的影响，当钢液的浇注温度高时，铸钢的结晶过程进展缓慢，钢的晶粒就比较粗。

当将铸态的钢进行热处理时，能使晶粒细化。晶粒细化的过程可分为两个阶段：加热过程中的细化和冷却过程中的细化。下面以一个珠光体晶粒在加热和冷却过程中的演变来说明晶粒细化的过程。当加热到奥氏体区的温度时，在一个珠光体

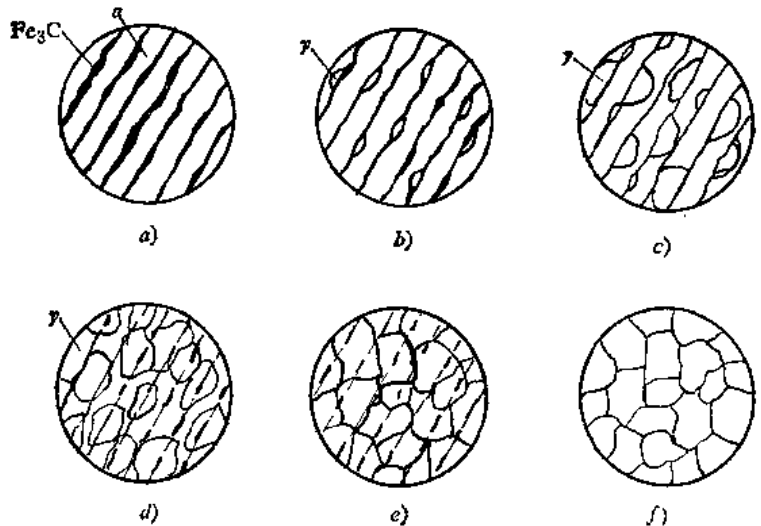


图1-2 钢在加热过程中由珠光体转变为奥氏体的过程示意图

a) 珠光体 b) 形成奥氏体核心 c) 奥氏体核心长大，渗碳体被溶解，片层变薄 d) 奥氏体继续长大，渗碳体继续被溶解，变成断续状 e) 奥氏体晶粒长成，渗碳体仅留残迹 f) 渗碳体完全被溶解，得到均匀的奥氏体

晶粒当中的渗碳体片层与铁素体片层之间的界面上形成一些奥氏体的晶核，见图1-2 b)。在随后的保温过程中，渗碳体逐渐分解，其中的碳分扩散转移到铁素体中，为奥氏体的长大创造了条件。此后，奥氏体不断长大，最后形成了若干个奥氏体晶粒，见图1-2 f)。这样，通过加热过程使晶粒得到了细化。

但是应该指出，加热的温度不能过高。如果加热温度过高，这些新形成的奥氏体晶粒就

将会互相合并而长成为粗大的晶粒。在高温下，细小的晶粒合并为粗大的晶粒使得晶体表面能减低，因而是一种自发的趋势。

当将加热的钢冷却到稍低于共析转变的温度时，奥氏体将重新变为珠光体。其过程是首先在一个奥氏体晶粒中生成若干个铁素体的晶核并开始长大，见图 1-3 a)。由于形成铁素体，使得它的两侧部分富碳，因而促使形成渗碳体片层，见图 1-3 b)。渗碳体片层的形成促使其邻近的奥氏体部分贫碳，因而又促使在这些部位形成铁素体片层，见图 1-3 c)。这样片层相间就长成了珠光体晶粒。珠光体晶粒不断长大，直到互相接触为止，见图 1-3 d)。这样，在冷却的过程中，钢的晶粒又进一步被细化了。由于在加热和冷却的过程中晶粒细化，使得钢的机械性能，特别是冲击韧性提高了。

在热处理方面，冷却速度的快慢对于细化晶粒的效果有显著的影响。冷却速度快时，从奥氏体中析出的结晶核心数目多，因而生成的晶粒数目也多，细化晶粒的效果好。例如：正火是将加热的钢在空气中冷却，冷却速度较快，而退火则是将加热的钢在退火炉中冷却，冷却速度较慢。因而正火处理的钢比退火的钢在晶粒度方面更细一些，机械性能也更高一些。

2. 魏氏组织 铸态钢中有时会出现魏氏组织。在金相显微镜下看到的这种组织的特征是铁素体呈长条形状分布在晶粒内部，并且常常是与晶粒边界成一定的角度，如图 1-4 所示。

铸钢中形成魏氏组织的倾向与钢的含碳量及铸件壁厚有关，其间的关系示如图 1-5。由图可见：含碳量中等（C 0.20~0.40%）的钢容易形成魏氏组织；铸件愈厚，也愈容易形成魏氏组织。含碳量中等的钢容易形成魏氏组织的道理如下：魏氏组织是铁素体分布于珠光体晶粒内部所构成的组织，为了要形成魏氏组织必须使铁素体和珠光体兼有一定的量，即二者各占有相当的比例。当含碳量过低时，先共析铁素体的量过多而珠光体的量过少，此时不足以形成魏氏组织；反之，当含碳量过高时，先共析铁素体过少而珠光体量过多，此时也不足以形成魏氏组织，当含碳量在 0.2~0.4% 范围内时，铁素体和珠光体都有恰当的量，因而容易形成魏氏组织。至于铸件壁厚对形成魏氏组织的影响则将在下面结合魏氏组织的形成过程来加以说明。

魏氏组织是在钢的二次结晶过程中形成的。如前面讲过的，在共析转变发生之前，先从奥氏体中析出铁素体。由于晶粒周界在结构上是不紧密的（晶格缺位多、组织疏松、空隙多），这就为铁素体的成核创造了有利的条件。因此，这种先共析铁素体的析出过程常常是在

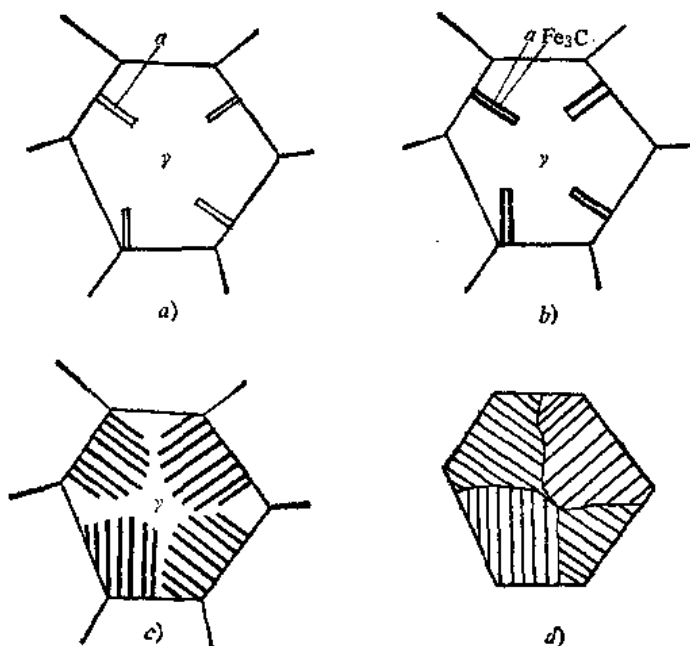


图1-3 共析转变中奥氏体转变为珠光体的过程示意图

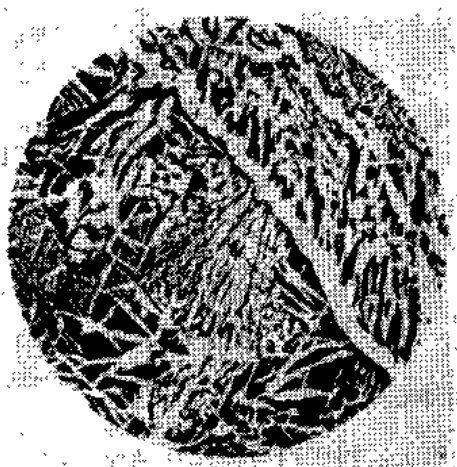


图1-4 含碳量为0.30%的碳钢在铸态下的魏氏组织 100×

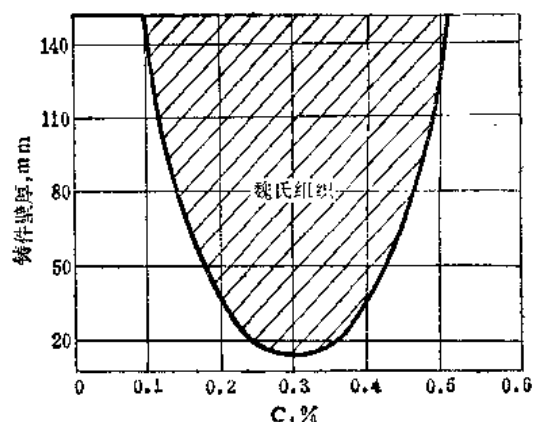


图1-5 铸件壁厚与含碳量对形成魏氏组织的影响

奥氏体晶粒周界处形成铁素体的核心，并且从这里开始成长为铁素体晶粒。

由于铁素体的含碳量与奥氏体有很大的差别，因此，伴随着铁素体的长大过程，必然要有大量的碳原子的扩散和铁原子的自扩散。而原子扩散的条件就往往成为决定晶体长大方式的关键。当铁素体的结晶核心在晶粒周界上形成以后，为了使晶体长大，需要有碳原子从奥氏体晶粒周界处往晶粒内部扩散迁移，以便让出位置。与此同时，奥氏体晶粒内部的铁原子也要往晶粒周界处扩散迁移，以便填充位置。当钢的冷却过程是以非常缓慢的速度通过状态图上GS线温度（相当于结晶过冷度很小），或是当奥氏体的晶粒足够小（相当于从晶粒周界至晶粒中心的距离短）时，铁素体的核心就会按照接近于平衡状态的结晶方式进行，即铁原子从晶粒内部扩散至晶粒周界处并沉积在铁素体核心的周围而使其长大。结果是铁素体沿着晶粒周界逐渐增厚而形成网状。图1-6表示网状铁素体的形成过程。反之，当钢的冷却是以很快的速度通过GS线温度（相当于较大的结晶过冷度），或是当奥氏体的晶粒很大（从晶粒周界至晶粒中心的距离长）时，铁素体的长大就会以另一种方式进行。这时，铁素体晶粒是以插入奥氏体晶粒内部的方式出现，而逐渐成长为长条状或片状，即形成了魏氏组织。铁素体的这种结晶取向会使原子的扩散距离缩短，从而有利于铁素体的快速形成。图1-7表示魏氏组织的形成过程。由此可以理解铸件壁厚对于形成魏氏组织的影响。当铸件愈厚时，其

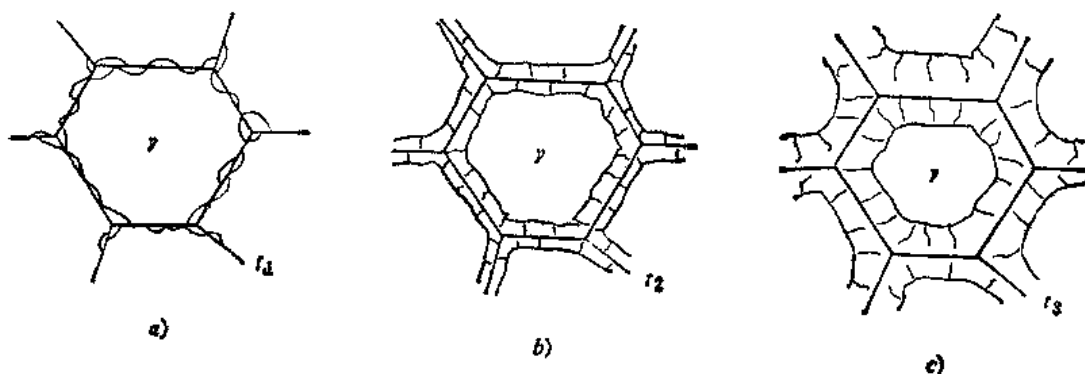


图1-6 网状铁素体的形成过程示意图

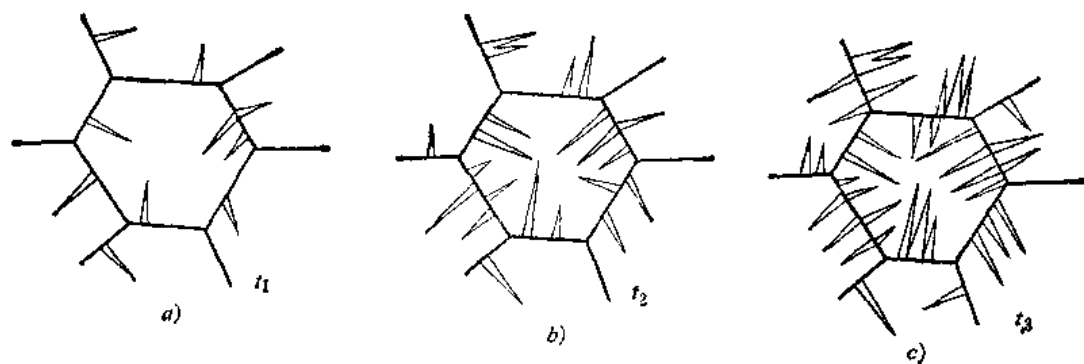


图1-7 魏氏组织的形成过程示意图

冷却速度愈慢，由一次结晶过程形成的奥氏体的晶粒愈粗大，因而愈容易形成魏氏组织。

当将钢退火或正火处理时，能使钢的晶粒显著细化。这样就改变了二次结晶的原始条件，因而很少再出现魏氏组织。这时析出来的铁素体就不再是长条状，而是颗粒状了（图1-8）。钢的机械性能也因之有所提高。

应该指出，网状铁素体也使钢的机械性能降低。但这种组织只是当钢的冷却极其缓慢，或是在钢的退火过程中加热温度过高时才会出现。

3. 内应力 由于碳钢的线收缩值大，再加上导热性比较差，因此铸钢件中总是存在着内应力。尤其是当铸件结构比较复杂或铸件上相邻部位的壁厚相差悬殊时，产生的内应力是很大的。内应力会造成铸件的变形翘曲，甚至裂纹。这也是铸钢件通常总要进行热处理的原因之一。

4. 区域偏析 以上讲的晶粒粗大、魏氏组织和内应力是碳钢铸件存在的一般性问题。对于特别厚大的铸件来说，除了这些问题以外，还存在着横断而上化学成分不均的问题。例如在特别厚大的铸件或钢锭的横断面上，含碳量是不均的，外表层的含碳量较低而中心部分的含碳量较高。这是造成断面上机械性能不均的原因之一（内外层的冷却速度不同会使晶粒度不同也是造成机械性能不均的原因）。分析断面上含碳量不均的原因要从钢的结晶过程以及由此而引起的碳分迁移现象说起。铸件总是从外表层朝向中心顺序地结晶。外表层处的钢液先开始结晶，而先结晶出来的晶体是熔点比较高而含碳量比较低（低于钢液）的 δ 铁素体，因而它附近的钢液含碳量比原来有所增加。随着结晶过程逐渐向中心部位伸展，引起了结晶区域内剩余钢液的含碳量升高的现象。这时，在未发生结晶的区域内的钢液仍然保持其原有的含碳量。这样就产生了钢液含碳量的差别，即形成了碳分的浓度梯度。在这种情况下自然会发生碳分扩散迁移的过程。扩散迁移的方向是从铸件的表面朝向中心部分（图1-9）。碳分向中心迁移的结果使得铸件外表层含碳量低而中心部分含碳量高。这种带有区域性的化学成分偏析称为区域偏析。

除了碳的区域偏析以外，硫也存在有区域偏析。硫在钢中是以FeS（单独的FeS、FeS-

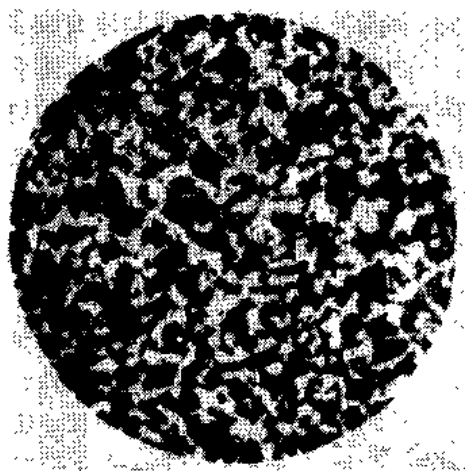


图1-8 碳钢（C 0.30%）在退火状态下的组织 100×

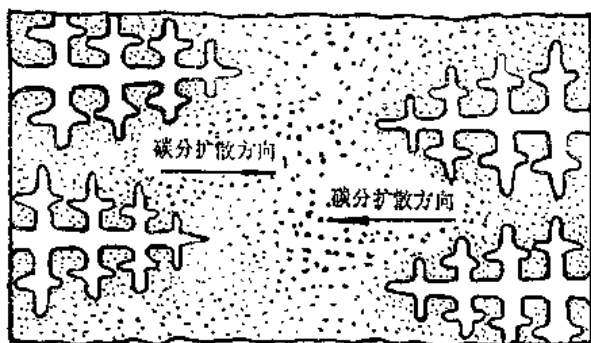


图1-9 由结晶过程引起的碳分扩散示意图

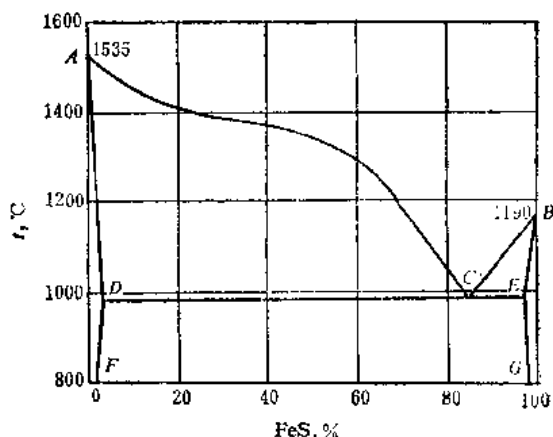


图1-10 Fe-FeS系状态图

Fe二元共晶或 FeS-FeO-Fe 三元共晶) 的形态存在。FeS 的熔点为 1190°C, 硫共晶的熔点更低; FeS-Fe 共晶的熔点为 985°C (参看图 1-10), 而 FeS-FeO-Fe 共晶的熔点仅为 900°C。由于它们的熔点都比钢低得多, 因此在钢的结晶过程中硫总是最后结晶出来, 这样就使得硫偏析到铸件的中心区域。

存在于特别厚大铸件上和钢锭上的这种区域性的化学成分偏析是在一次结晶过程, 即钢液的凝固过程中形成的。这种偏析是不可能通过热处理的方法来消除的。但对于一般的铸件说来, 由于壁较薄, 冷却较快, 结晶过程的顺序性不明显, 因而不足以形成显著的区域偏析。

§ 1-3 热处理及钢的金相组织和机械性能

一般铸钢件的热处理有三个目的: 细化晶粒、消除魏氏组织和消除铸造应力。碳钢铸件的热处理方法有全退火、正火和正火加回火。

一、全退火

将铸件加热至奥氏体区的温度并保温一段时间, 然后随炉冷却的热处理方法称为全退火。这种方法也简称为退火。

适宜的加热温度是加热至上临界温度 (A_{c1}) 以上 30~50°C。具体温度应依照钢的含碳量而定。含碳量较低的钢的加热温度较高, 含碳量较高的钢的加热温度较低, 如图 1-11 所示。采用的加热温度不应过高或过低, 加热温度过低时, 不能完成由珠光体到奥氏体的转变, 晶粒不能细化, 魏氏组织不能消除。加热温度过高时又会使钢的晶粒粗化, 而且可能出现如图 1-12 所示的过热组织。当出现这些情况时会使钢的机械性能显著下降。

保温时间的长短, 应该是有足够的时间完成由珠光体向奥氏体的转变, 并造成一定的扩散条件使奥氏体的化学成分 (含碳量) 比较均匀。具体时间应该按照铸件的壁厚而定: 铸件厚, 加热的时间就要长些。一般情况下, 25mm 厚的铸件大约需要 1 h 的保温时间。壁厚超过 25mm 时, 每增加 25mm 厚度, 须相应增加 1 h 的保温时间, 如图 1-13 所示。但当壁厚超过 150mm 以上时, 其保温时间可以比按照上述比例计算所得的数值少些。上面所说的铸件厚度系指铸件上最厚部分的厚度。

保温时间达到后, 铸件随炉冷却, 待炉冷到 200~300°C 以下时可以出炉, 在空气中进一步冷却到常温。全退火的热处理规范如图 1-14。

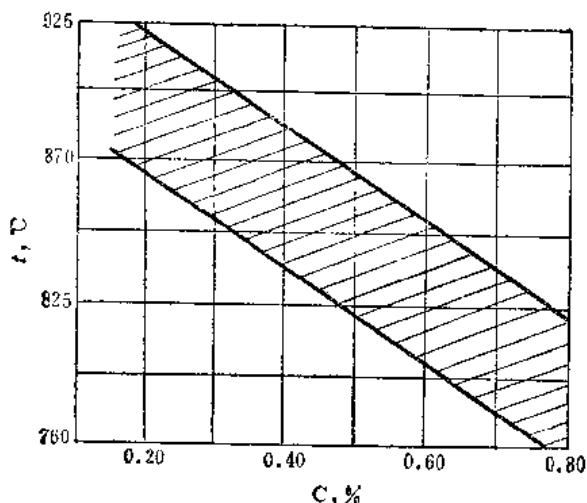


图1-11 碳钢铸件退火处理的加热温度

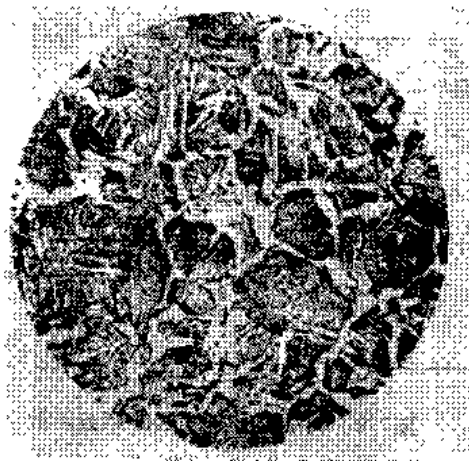


图1-12 碳钢(C 0.30%)的过热组织 100×

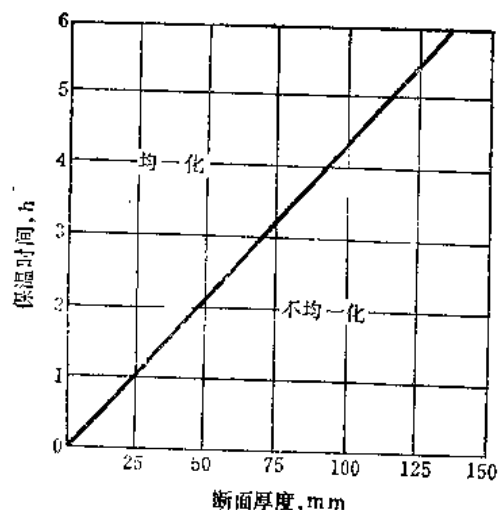


图1-13 碳钢铸件热处理的保温时间

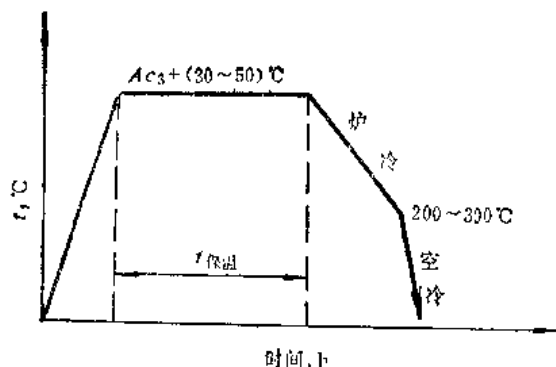


图1-14 碳钢全退火的热处理规范

不同含碳量的碳钢在全退火后的金相组织如图 1-15。由图可见,随着含碳量增加,在亚共析钢的金相组织中铁素体所占比例相对减少,而珠光体所占的比例相对增加,从机械性能来看,铁素体的强度(σ_s 、 σ_b)较低,塑性(δ %、 ψ %)较高,而珠光体则与此相反。因此,随着含碳量增加,钢的强度相应提高,而塑性则相应下降,见图 1-16。

在国家标准(GB979-67)中,规定了各种钢号的碳钢铸件经过全退火后的机械性能要求,见表 1-2。应该指出的是表中所列的数值是所要求的最低值,因此表中所列的数值比图 1-16中的数据低一些。

这种热处理方法的优点除了能提高钢的机械性能以外,还能充分地消除铸件中的内应力。由于铸件是在炉中缓慢地从高温冷却到较低的温度,因而在冷却过程中产生的内应力小,能最大限度地避免铸件发生变形或裂纹等缺陷,这种热处理方式适于处理含碳量在 0.35% 以上的钢,因为这样的钢塑性较差,铸件容易开裂。这种方法也用于处理含碳量低于 0.35%,但结构特别复杂的铸件。其缺点是占用炉子的时间较长,并且在钢的机械性能方面比正火处理的稍低。

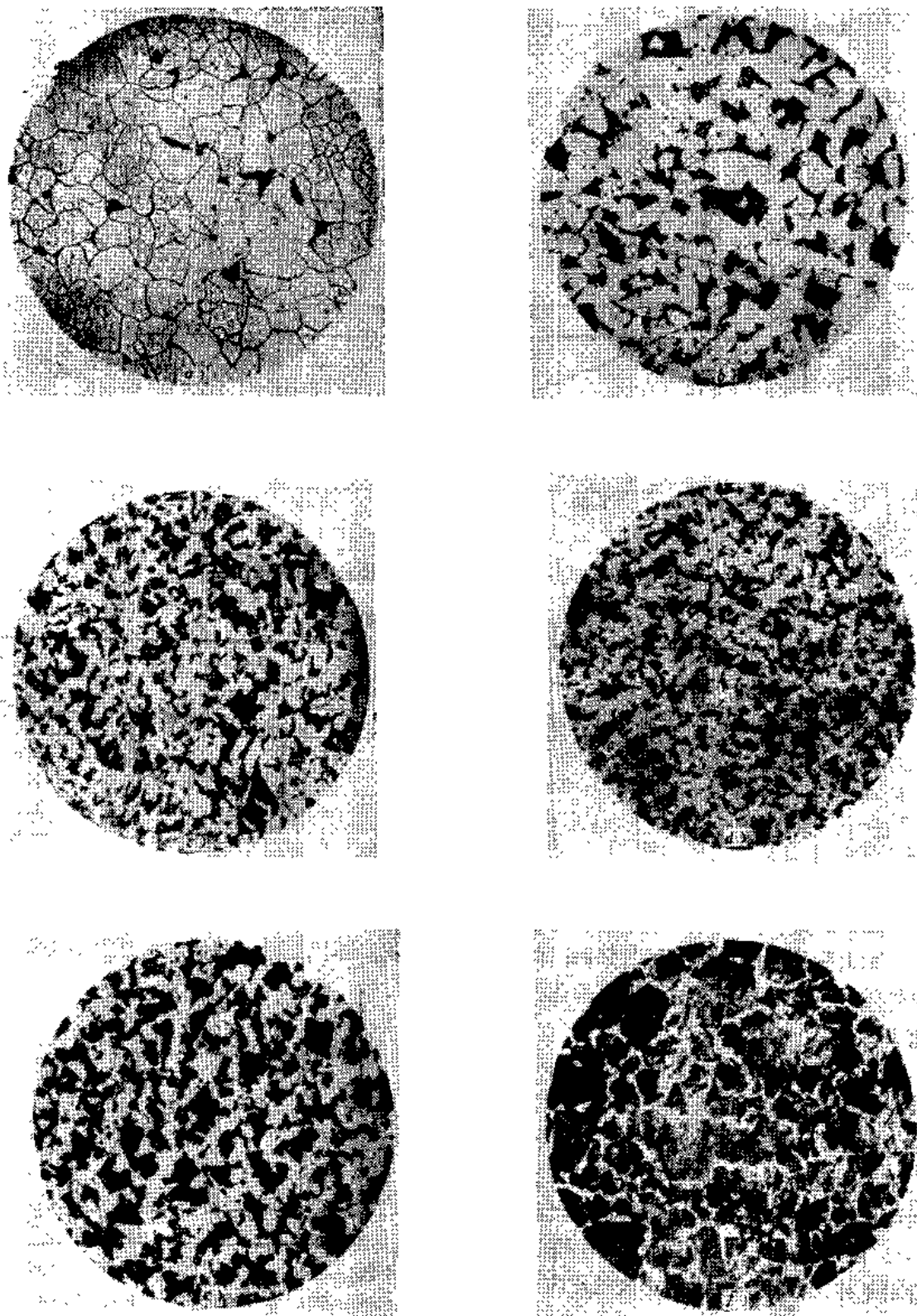


图1-15 不同含碳量的碳钢在退火状态下的金相组织(均为放大100倍), 图中白色的组织为铁素体, 黑(灰)色的组织为珠光体

a) C 0.12% b) C 0.22% c) C 0.30% d) C 0.40% e) C 0.50% f) C 0.60%

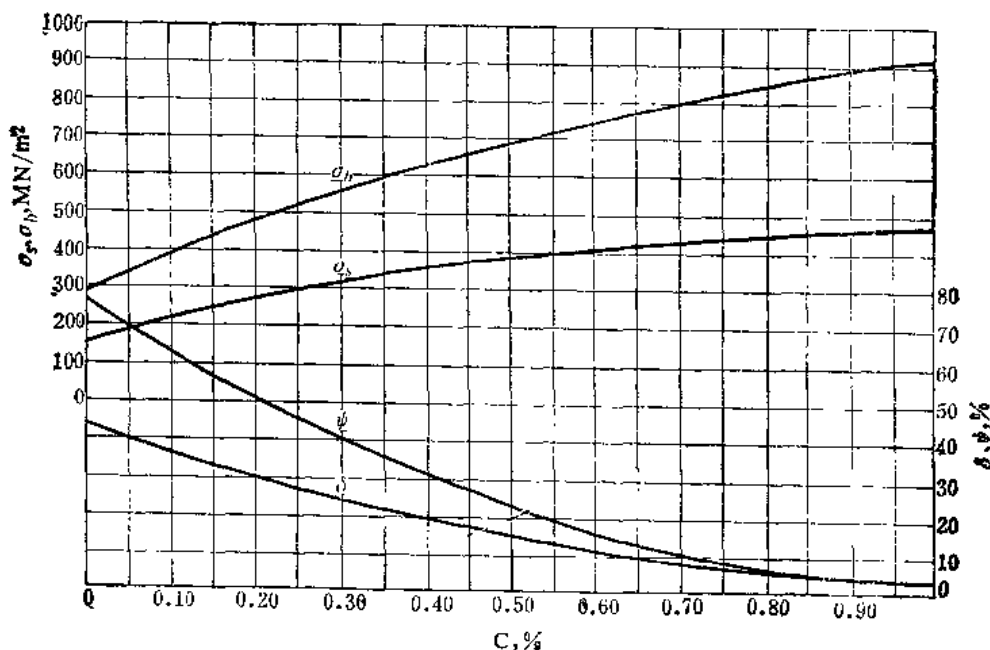


图1-16 不同含碳量的碳钢在退火状态下的机械性能

表1-2 铸造碳钢的机械性能

钢 号	机 械 性 能 (不 低 于)					
	kgf/mm^2 σ_b (MN/m^2)	kgf/mm^2 σ_s (MN/m^2)	δ_5 %	ψ %	$\text{kgf}\cdot\text{m/cm}^2$ a_k (10^5 J/m^2)	
ZG 15	40 (400)	20 (200)	25	40	6.0 (6.0)	
ZG 25	45 (450)	24 (240)	20	32	4.5 (4.5)	
ZG 35	50 (500)	28 (280)	16	25	3.5 (3.5)	
ZG 45	58 (580)	32 (320)	12	20	3.0 (3.0)	
ZG 55	65 (650)	35 (350)	10	18	2.0 (2.0)	

二、正火

正火所采用的加热温度及保温时间与全退火相同。不同之处是保温时间达到后将铸件拉出炉外进行空冷直到常温。正火的热处理规范见图 1-17。

正火的作用与全退火相同，但由于冷却速度快，钢的晶粒比全退火时更细些。而且正火处理时，由于冷却速度快，使得奥氏体能在较低的温度下发生共析转变，因而能得到分散度更大（渗碳体片层和铁素体片层更薄）的珠光体（即索氏体）。由于这些原因，正火处理的钢的机械性能，特别是冲击韧性，要比全退火处理的钢更高一些。

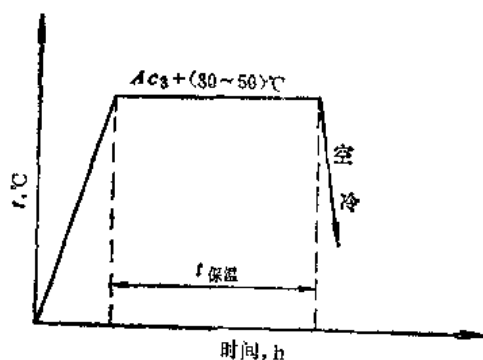


图1-17 碳钢正火的热处理规范

这种热处理方法除了能得到较高的机械性能以外，还有占用炉子时间较短、生产效率较高的优点。它的缺点是铸件的内应力比全退火来得大些。正火处理可用于含碳量在 0.35% 以