

实用建设标准指南丛书 | 丛书主编 王超  
主审 顾秦昌

建设部建筑制品与构配件产品标准化技术委员会 组织编写

# 金属(钢)结构 质量控制与检测技术

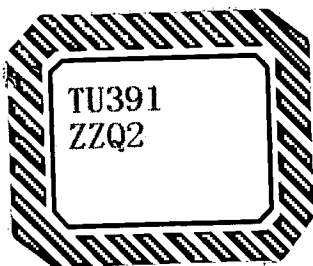
周在杞 等 编著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

# 金属(钢)结构 质量控制与检测技术

周在杞 等 编著



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

## 内 容 提 要

本书根据我国金属(钢)结构的质量控制检测技术工程实践经验和科研成果,并参考国内外的相关资料编写而成。全书共有三篇十二章,内容包括:金属与钢材,焊接与质量控制,理化检验,质量监理,制造监理,安装监理,金属(钢)结构无损检测,超声检测,电磁检测,表面检测,用于钢结构检测的标准 JG/T 203—2007《钢结构超声波探伤及质量分级法》应用指南以及条文解读等。

全书内容丰富,取材新颖,资料翔实,条理清晰,并且理论联系实际。除了在质量管理层面阐述外,还在技术层面对理化检验和无损检测在金属(钢)结构中应用,作了详尽叙述。最后,对 JG/T 203—2007《钢结构超声波探伤及质量分级法》标准进行了解读,编写了该标准的应用指南。

本书的主要读者对象为水利电力、土木工程、海洋工程、化工、机械、冶金、石油、地质、矿业、交通、桥梁以及国防工业等从事金属(钢)结构无损检测和工程质量安全控制的广大企事业单位工程技术人员。可供各级建委(建设局)、建筑工程管理处、各地工程质量监督站、建设监理公司、建筑安装公司、市政建设公司、各种工程施工企业、电力工程公司、水利水电工程公司、公路工程公司、路桥公司及各施工单位的技术人员参考使用。还可用作高等学校相关院系钢结构专业课程的参考书,也可作为钢结构探伤技术培训的教材或行业标准的应用指南。本书对于相关专业的教师和研究生也都有很好的参考价值。

### 图书在版编目(CIP)数据

金属(钢)结构质量控制与检测技术/周在杞等编著.

北京:中国水利水电出版社,2008

ISBN 978-7-5084-5367-5

I. 金… II. 周… III. ①金属结构—质量控制②金属结构—检测 IV. TU39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 029605 号

书 名	金属(钢)结构质量控制与检测技术
作 者	周在杞等 编著
出版发行	中国水利水电出版社 <北京市三里河路 6 号 100044> 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 63202266 (总机)、68367658 (营销中心) 北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市地矿印刷厂
规 格	184mm×260mm 16 开本 36.5 印张 865 千字
版 次	2008 年 7 月第 1 版 2008 年 7 月第 1 次印刷
印 数	0001—3000 册
定 价	79.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

## 编著人员名单

---

主 编 周在杞

编著人员 周在杞 周克印 周 宇 吴 洁

周 宁 韩旭鹏 饶小雁 张 巍

陆绪红 王彩男

## 前言

本书是编者根据 JG/T 203—2007《钢结构超声波探伤及质量分级法》标准诠释和专业检测人员培训的需要，总结科研成果，在长期金属（钢）结构质量控制与检测技术实践基础上，参考国内外的相关文献资料和部分专业的培训教材，统一纲目，分门别类，共同编写完成的。

编者在编制 JG/T 203—2007《钢结构超声波探伤及质量分级法》标准过程中，深感至今还没有一本比较全面叙述质量控制及无损检测技术在金属（钢）结构中应用的书籍；也缺乏适合于土木工程从事钢结构质量和安全控制新技术研发和工业企业人员、高校教师以及大学生使用的行业标准类应用指南。为了便于广大读者学习这方面的知识，在住房与城乡建设部有关部门和中国水利水电出版社组织安排下，编撰出版了这本金属（钢）结构质量控制检测技术用书，以期在该领域中发挥它的点滴作用。

本书的任务就是根据多年来在金属（钢）结构质量控制及无损检测技术的成果，阐述金属（钢）结构工程质量控制的经验方法和无损检测及其应用等，以满足工程实际需要。本书的突出重点在质量控制，包括技术和管理两个层面，即专业技术和监督管理。专业技术层面就是检测技术的应用及其实例，监督管理层面就是质量监理和督查。实施质量问题的技术归零和管理归零。本书还从使用的角度对 JG/T 203—2007《钢结构超声波探伤及质量分级法》标准条文进行全面释义，并给出了实用型的应用指南，这对我国金属（钢）结构检测技术人才的培养具有一定的指导意义，同时，这对 JG/T 203—2007《钢结构超声波探伤及质量分级法》行业标准的普及和推广也能起到一定的促进作用。

在写作上，本书力求围绕主题、述理清晰、选材恰当、编排合理、深入浅出、资料翔实。本书一律采用我国法定计量单位，附录可供读者查阅和使用。

在本书编制标准和撰写本书过程中，作者不时通过书面、邮件及当面请教了多位金属（钢）结构、金属监督和无损检测方面的专家，尤其是董石麟院士、沈建中博士和李家鳌高级工程师，使作者受益匪浅。参考和引用了国

内专家的部分著作和文献，得到严慧和肖炽教授以及诸多同仁的指导和帮助，在此深表谢忱。同时，林庆煌、陈金根、黄大鹏等还为本书提供和收集了大量的有关资料，并在文字、绘图和公式输入方面付出了辛勤劳动，谨表感激之意。

最后，作者还要特别感谢住房与城乡建设部王超和顾泰昌先生的关心和指导，他们在百忙之中审阅了书稿，并对本书的编写和出版提出了许多宝贵意见。

由于作者才疏学浅，水平有限，加之时间仓促，本书难免存在错误或不妥之处，恳请读者批评指正。

作者

2008年1月

## 前 言

### 第一篇 金属（钢）结构质量控制

<b>第一章 金属与钢材</b> .....	1
第一节 金属材料 .....	1
第二节 钢材 .....	6
<b>第二章 金属（钢）结构焊接与质量控制</b> .....	20
第一节 概述 .....	20
第二节 金属（钢）结构焊接质量管理与保证 .....	22
第三节 金属材料的焊接 .....	32
第四节 焊接应力与变形 .....	36
第五节 焊接接头及其焊后热处理 .....	38
第六节 焊接缺陷及其对策 .....	40
第七节 金属（钢）结构焊接实例 .....	45
<b>第三章 金属（钢）结构理化检验</b> .....	58
第一节 理化检验概论 .....	58
第二节 理化检验机构 .....	67
第三节 理化检验计划 .....	89
第四节 不符合项或不合格品控制 .....	95
第五节 建设工程质量检测管理办法 .....	104
第六节 金属化学分析 .....	107
第七节 机械性能试验 .....	120
第八节 金相检验技术 .....	128
<b>第四章 金属（钢）结构质量监理</b> .....	136
第一节 概述 .....	136
第二节 金属（钢）结构全过程监理 .....	148
第三节 金属（钢）结构质量监理文件 .....	154
<b>第五章 金属（钢）结构制造监理</b> .....	158
第一节 概述 .....	158

第二节	金属(钢)结构监制要点	159
<b>第六章</b>	<b>金属(钢)结构安装监理</b>	164
第一节	拼装及安装施工工艺	164
第二节	空间网格结构制作及安装	172
第三节	拼装及安装质量控制	187
第四节	拼装及安装工程通病防治	191
第五节	金属(钢)结构施工质量控制	208
第六节	金属(钢)结构施工安全控制	252
第七节	金属(钢)结构工程实例	257

## 第二篇 金属(钢)结构无损检测技术

<b>第一章</b>	<b>概述</b>	271
第一节	无损检测方法分类	271
第二节	无损检测技术特点	274
<b>第二章</b>	<b>超声检测</b>	277
第一节	超声波检测的物理基础	277
第二节	超声换能器、试块和探伤仪	294
第三节	常用超声波探伤方法和技术	314
第四节	超声波探伤技术应用	330
<b>第三章</b>	<b>电磁检测</b>	359
第一节	电磁场理论基础	359
第二节	射线检测	364
第三节	磁粉检测	403
第四节	磁记忆检测	416
第五节	涡流检测	420
<b>第四章</b>	<b>表面检测</b>	435
第一节	渗透检测	435
第二节	目视检测	442

## 第三篇 《钢结构超声波探伤及质量分级法》应用指南

<b>第一章</b>	<b>标准修编说明</b>	453
<b>第二章</b>	<b>应用指南与条文解读</b>	457
第一节	引言部分	457
第二节	正文部分	460



## 附 录

附录一	金属(钢)结构监理常用表格	515
附录二	建设工程质量检测管理办法	540
附录三	国家焊接相关标准目录	546
附录四	国家金属材料试验相关标准目录	550
附录五	国家建筑工程相关标准目录	555
附录六	国内无损检测标准目录	556
参考文献		573

# 第一篇 金属（钢）结构 质量控制

## 第一章 金属与钢材

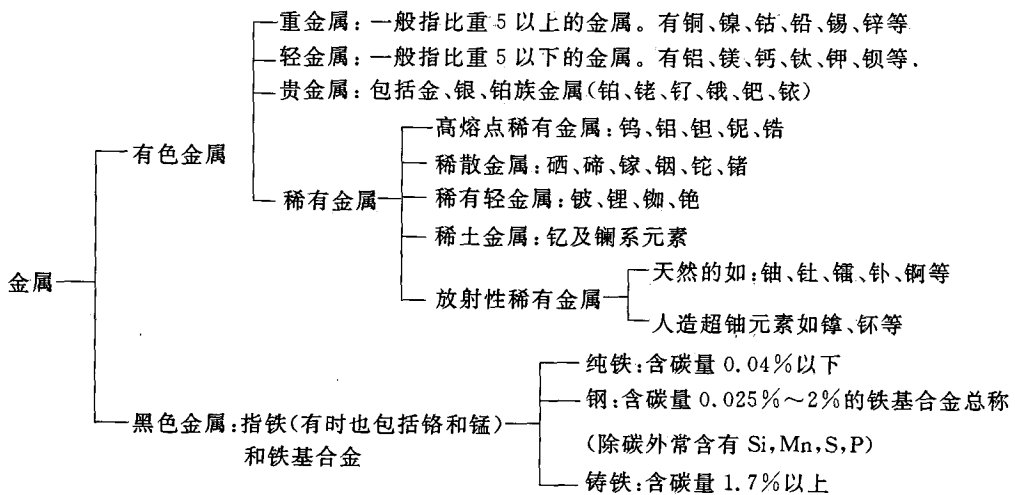
### 第一节 金属材料

#### 一、概述

##### （一）金属材料

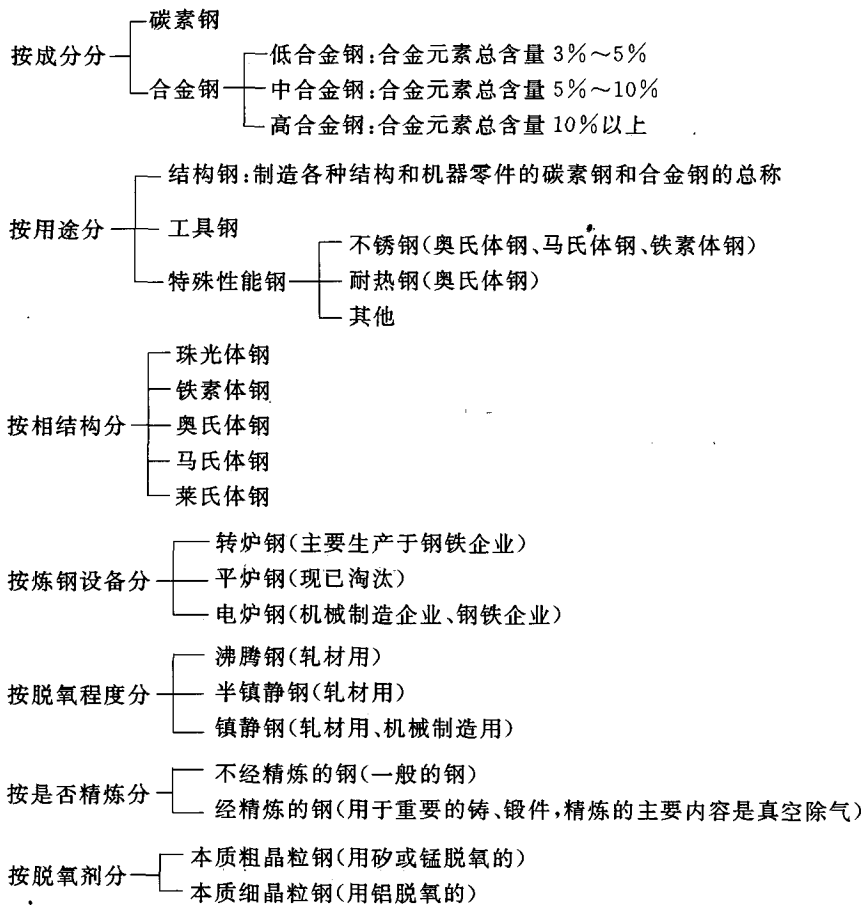
金属是富有特殊光泽而不透明的，具有导电性、导热性、延展性的物质。

##### 1. 金属分类



##### 2. 钢的分类

除了纯铁用作铁磁材料，纯铝、纯铜用作导电材料外，工程上使用的金属材料绝大部分以合金的形式出现；作为主要的铁基合金，钢在工程上被大量使用，按重量计超过90%以上。



## (二) 化学元素

### 1. 化学元素

(1) 常存的元素:在任何钢中,由于原材料及冶炼、脱氧等原因,有一些元素是恒常存在的。它们是碳、硫、磷、硅、锰,俗称五大元素。其中硫、磷是有害元素。

(2) 加入钢中的合金元素:锰、硅、铬、镍、钨、钼、钒、钛、硼、铌等。形成的合金钢有铬钢、镍钢、锰钢、硼钢、铬镍钢、锰硅钢、铬镍钼钢等。

(3) 钢中的气体:由于备料及炼钢过程等因素,钢中会含有氧、氢以及氮。其中氧和氢都是有害气体。氮有时作为成分用以提高钢的机械性能,除此之外氮也需受到控制。

### 2. 钢制品及其生产工艺

(1) 铸钢件:将熔炼好的钢水注入事先准备好的型腔,凝固后获得的钢制品。一般要经过退火或其他品质热处理。铸钢件的特点是可以铸造形状复杂的零件。但一般来说韧性(延伸率、断面收缩率及冲击韧性)较钢材、锻件要差。

(2) 钢材:通过轧制或挤压、拉拔等高效率的生产工艺加工得到的钢制品,如钢板、钢管、钢棒、型钢、焊丝、焊带等。占钢制品的绝大部分。

(3) 锻件：将钢锭或坯料加热后用锻锤或压力机等锤击或加压，使之发生塑性变形，改善金属组织，获得一定形状和尺寸的工件，称之为锻件。

## 二、金属的物理特性

### (一) 金属的晶体结构

金属是一种晶体并且是一种以金属键结合的晶体。金属晶体结构有三种基本类型，见图 1-1-1：体心立方晶格（如  $\alpha$ -Fe, W, Mo, V,  $\beta$ -Ti 等）；面心立方晶格（如  $\gamma$ -Fe, Al, Cu, Ag, Au, Pb, Ni,  $\beta$ -Co 等）；密集六方晶格（如 Mg, Zn, Be, Cd,  $\alpha$ -Ti,  $\alpha$ -Co 等）。

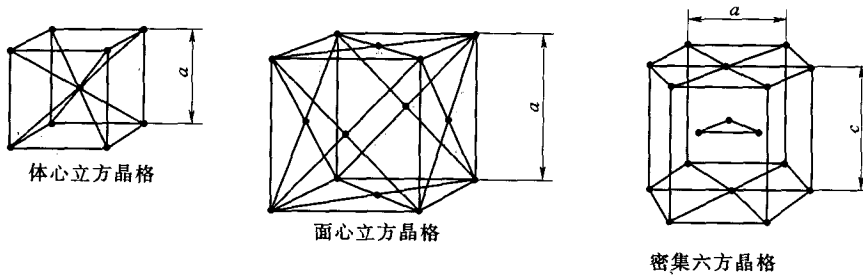


图 1-1-1 三种晶体结构

工业上实际使用的金属材料，一般来说，即使体积很小，其内部也包含了许许多多颗粒状的小晶体。每个小晶体内部的晶格位向一致，而各个小晶体彼此间位向都不同。如图 1-1-2。

这种外形不规则的小晶体通常称为晶粒。晶粒之间的界面称为晶界。这种由许多晶粒组成的晶体结构称为多晶体结构。一般金属材料都是多晶体，因此表现出来是各向同性的。

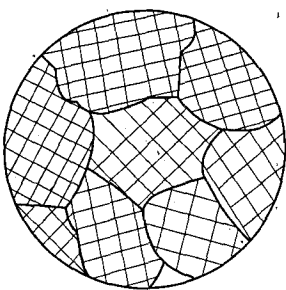


图 1-1-2 多晶体结构示意图

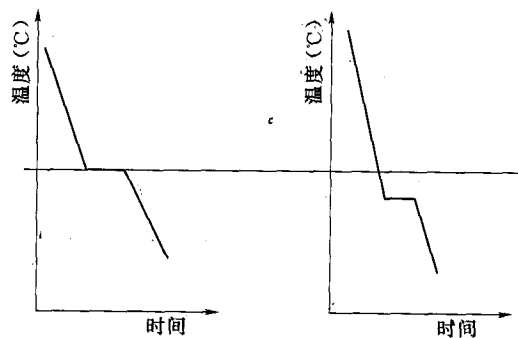


图 1-1-3 纯金属结晶时的冷却曲线

### 1. 金属的同素异构转变

(1) 纯金属冷却到结晶温度（熔点）开始结晶（凝固）。纯金属在无限缓慢的冷却条件（即平衡条件）下结晶，所得到的结晶温度称为理论结晶温度，用  $T_0$  表示。

实际生产中冷却速度较快，此时液态金属将在  $T_0$  以下某一  $T_n$  才开始结晶，这种现象称为过冷现象。 $\Delta T = T_0 - T_n$  称为过冷度，见图 1-1-3。

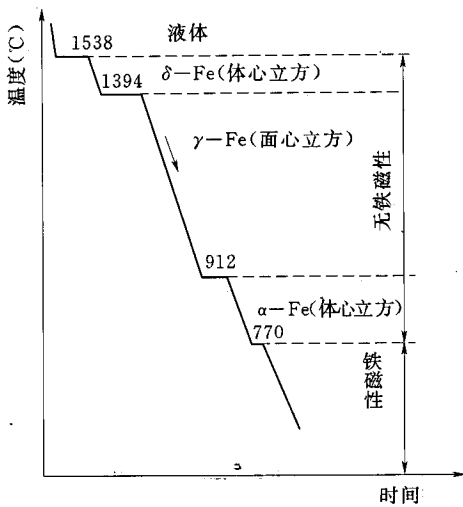


图 1-1-4 纯铁的冷却曲线

(2) 大多数金属结晶终了(完全凝固)后,在继续冷却的过程中,晶体结构不发生变化。但某些金属在固态下因所处温度不同而具有不同的晶格形式。如铁有体心立方的 $\alpha$ -Fe和面心立方的 $\gamma$ -Fe;钴有密集六方的 $\alpha$ -Co和面心立方的 $\beta$ -Co。金属在固态下随温度的改变由一种晶格变为另一种晶格的变化,称为金属的同素异构转变。这种转变过程是一种重结晶过程。图 1-1-4 为纯铁的冷却曲线。

具有同素异晶(构)性的金属或多相性的合金,在加热或冷却过程中,通过相变温度时改变晶体结构的过程叫重结晶。重结晶可以被利用来细化金属的晶粒,从而改善金属或合金

的性能。

## 2. 金属的冷塑性变形及其对金属性能与组织的影响

当金属受外力的作用时,起初发生弹性变形,当应力达到一定大小时,即过渡到塑性变形。此时去除外力,金属并不能恢复到原先的形状。

塑性变形通过滑移和孪生两种方式进行。

金属冷变形对金属性能与组织的影响如下:

(1) 冷塑性变形对金属性能影响。金属材料经冷塑性变形后,强度显著提高,而塑性则很快下降。变形愈大,性能的变化也愈大。这种现象称为加工硬化,见图 1-1-5。

工程技术上利用加工硬化来强化金属,提高金属的强度、硬度和耐磨性。特别是那些不能用热处理强化的材料,如奥氏体不锈钢。

此外,冷塑性变形对金属的导电、导磁性能也会有影响。

### (2) 冷塑性变形对金属组织结构的影响。

1) 形成纤维组织:金属在外力作用下发生塑性变形时,随着外形的变化,金属内部的晶粒形状也由原来的等轴晶粒变为沿变形方向伸长的晶粒,同时晶粒内部出现了滑移带。当变形程度很大时,晶粒被显著伸长成纤维状,称为冷加工纤维组织。形成纤维组织后,金属会具有明显的方向性,沿纤维的方向的机械性能高于垂直于纤维方向的性能。

2) 亚结构细化:金属发生塑性变形时,在晶粒外形变化的同时,晶粒内部也会细化成亚结构。随着塑性变形程度的增大,变形亚

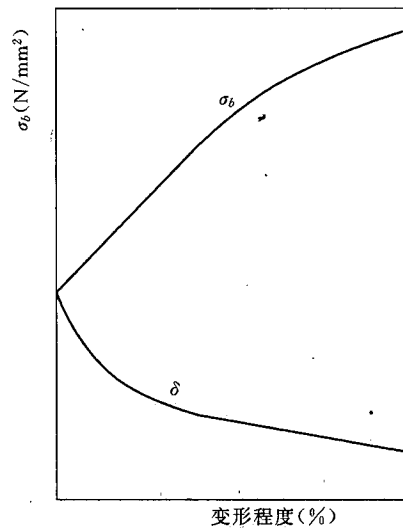


图 1-1-5 冷塑性变形对金属力学性能的影响

结构将逐渐增多并细化，见图 1-1-6。

3) 产生形变结构：由于塑性变形使金属中每个晶粒的位向趋于一致的结构，称为形变结构。金属中形变结构的形成，会使其性能呈明显的各向异性。

4) 产生残余应力：当作用于金属材料的外力去除后，仍残存于金属材料内的应力，称为残余应力，即内应力。残余应力是有害的：降低工件的承载能力；使工件尺寸形状发生变化；降低工件的耐蚀性。

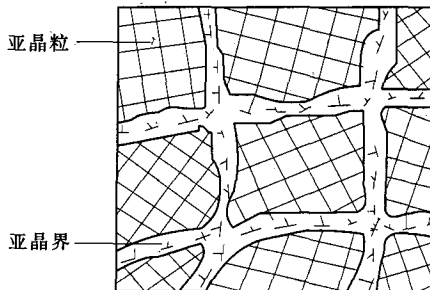


图 1-1-6 变形亚结构示意图

## (二) 变形金属的回复与再结晶

变形后的晶体，由于晶格畸变而处于不稳定状态。如对塑性变形后的金属进行加热，就会迅速发生一系列组织与性能的变化，使金属恢复到变形前的稳定状态。

这个变化过程可分为回复、再结晶、晶粒长大三个阶段。

### 1. 回复

当加热温度较低时，冷变形金属的显微组织无明显变化，仍保持纤维组织，其机械性能也变化不大，但残余应力显著降低，其他物理和化学性能（如导电率、导磁率、耐腐蚀性能等）也得到恢复。这一阶段称为回复。

### 2. 再结晶

当冷塑性变形后的金属加热到比回复阶段更高的温度时，由于原子扩散能力增大，使被拉长而呈纤维状的晶粒又变成为等轴晶粒，同时使加工硬化与残余应力也完全消除。这一过程称为再结晶。注意区别重结晶与再结晶两种现象、两个概念。再结晶改变了晶粒外形，消除了因变形而产生的某些晶体缺陷。而新、旧晶粒的晶格类型是完全相同的，再结晶不是相变过程。重结晶则完全是一个相变过程。

再结晶温度：金属的再结晶不是一个恒温过程，而是在一定温度范围内进行的过程。通常再结晶温度是指再结晶开始的温度（发生再结晶所需的最低温度），它与金属的熔点、纯度、预先变形的程度等因素有关。变形程度愈大，再结晶开始温度愈低。当预先变形程度达到一定量后，再结晶温度将趋于某一最低值。这一最低的再结晶温度，就是通常指的再结晶温度。各种纯金属的再结晶温度（ $T_{再}$ ）与其熔点（ $T_{熔}$ ）间的关系，大致可表示为  $T_{再} \approx 0.4 T_{熔}$ 。

### 3. 晶粒长大

冷塑性变形的金属经再结晶后，一般都得到细小均匀的等轴晶粒。如继续升高温度，或延度保温时间，则再结晶后形成的新晶粒又会逐渐长大。

### 4. 金属的热塑性变形加工

(1) 热加工与冷加工的区别。凡是金属的塑性变形是在再结晶温度以下进行的，称为冷加工。冷加工时必然产生加工硬化；在再结晶温度以上进行的塑性变形则称为热加工。热加工时产生的加工硬化可以随时被再结晶消除。

例如：钨的  $T_{再}$  约为  $1200^{\circ}\text{C}$ ，钨在低于  $1200^{\circ}\text{C}$  的高温下进行变形属于冷加工；铅的  $T_{再}$  约为  $3^{\circ}\text{C}$ ，铅在高于  $3^{\circ}\text{C}$  的常温下进行变形属于热加工。

(2) 热加工对金属组织与性能的影响。热加工的过程是一个不断加工硬化又不断再结晶消除硬化的过程。对于大多数的中低合金钢来说，在热加工过程中几乎体察不到加工硬化的发生。热加工的结果虽然一般不会引起加工硬化，但能使金属组织与性能发生以下显著变化：

消除铸态金属的某些缺陷：气孔和疏松，部分消除偏析，将粗大的柱状与枝晶变为细小均匀的等轴晶，改变夹杂物、碳化物的形态、大小和形状。结果可使金属的致密程度与机械性能提高。

形成热加工纤维组织：热加工时，铸态金属毛坯中的粗大枝晶及各种夹杂物，都要沿变形方向伸长，使铸态金属枝晶间密集的夹杂物，逐渐沿变形方向排列成纤维状。这些夹杂物在再结晶时不会再改变其纤维状。这样，在材料或工件的宏观试样上，可以看到沿着变形方向的一条条细线，这就是热加工件的纤维组织。纤维组织的存在，会使金属材料机械性能呈现出各向异性。

## 第二节 钢 材

### 一、钢与合金

#### (一) 铁碳合金

##### 1. 合金

(1) 合金定义。由两种或更多化学元素（其中至少一种是金属）所组成的具有金属特性的物质叫合金。由两种元素组成的合金称“二元合金”；依次还有“三元合金”、“多元合金”。

合金具有比纯金属更高的机械性能和某些特殊的物理、化学性能（如耐腐蚀、高温强度等）。因此，合金材料的应用非常广泛。如黄铜是铜和锌的合金；硬铝是铝、镁和铜的合金；碳钢、铸铁是铁和碳的合金，再加入合金元素后就成为合金钢和合金铸铁。

##### (2) 合金的结构。

1) 相。合金中具有同一化学成分且结构相同的均匀部分叫做“相”。各相之间有明显可分的界面。例如，纯金属或固溶体是一个相；珠光体是由铁素体和渗碳体两个相组成的。

2) 合金的相结构。合金的相结构可分为固溶体和金属化合物两大类。

固溶体：当合金由液态结晶成为固态时，组元之间仍能互相溶解而形成的均匀相，称为固溶体。按照溶质原子在溶剂晶格中分布情况的不同，可分为间隙固溶体和置换固溶体两种。见图 1-1-7。由于形成固溶体后溶剂金属的晶格发生畸变，使位错变形受到的阻力增大，结果使材料的强度、硬度增高。

金属化合物：由相当程度的金属键结合，并且具有明显的金属特性的化合物，称为金属化合物。如钢中的渗碳体 ( $\text{Fe}_3\text{C}$ )。反之，没有金属键结合，又没有金属特性的化合

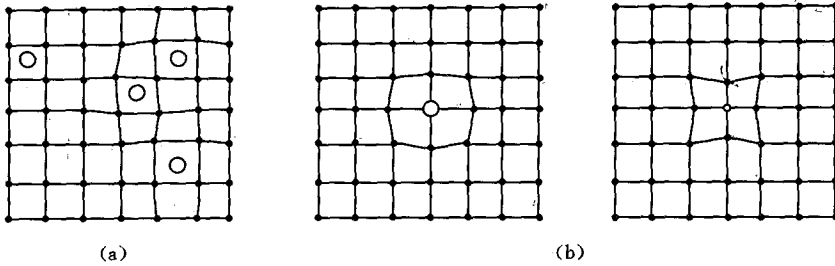


图 1-1-7 形成固溶体时的晶格畸变  
(a) 间隙固溶体；(b) 置换固溶体

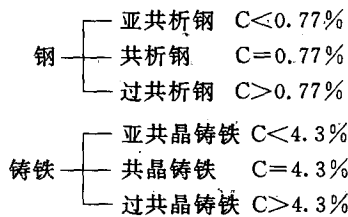
物，为非金属化合物，如钢中的 FeS 和 MnS 等。对合金性能有坏的影响，称为非金属夹杂。当合金中出现金属化合物时，通常能提高合金的强度、硬度和耐磨性，但会降低塑性和韧性。

机械混合物：如珠光体为铁素体和渗碳体的机械混合物；莱氏体在高温为奥氏体和渗碳体的混合物，在室温为珠光体和渗碳体的混合物。

### 2. 典型铁碳合金的平衡结晶过程及室温组织

(1) 分类。以含碳量的多少来区分钢和铁： $C < 2.06\%$  称之为钢； $C \geq 2.06\%$  称之为铁。

同时根据含碳量的多少又把钢和铁分别分为三类：亚共析钢，共析钢，过共析钢；亚共晶铸铁，共晶铸铁，过共晶铸铁。它们的含碳量分别为：



(2) 铁碳合金状态图。钢（和铸铁）是现代应用最广泛的合金，品种繁多成分各不相同，但都是铁和碳（以及其他金属）的合金。铁碳合金状态图是由铁和碳组成不同成分的合金，在不同温度条件下所形成各种晶体结构的关系图，见图 1-1-8。这是在极为缓慢地冷却或加热（即接近平衡）状态下的实验结果。故亦称为铁碳平衡图。它是研究铁碳合金的组织与性能关系的重要工具。

一般钢中含碳量最高不超过 2.06%；铸铁含碳量最高不超过 5%。超过此限的铁碳合金性能极脆，没有使用价值。因此，研究铁碳合金只研究 Fe-Fe<sub>3</sub>C 部分（含碳量小于 6.67%，铁碳状态图实质上是 Fe-Fe<sub>3</sub>C 状态图）。

### 3. 钢的结晶凝固和冷却过程

(1) 钢在结晶凝固过程中的一些现象。

1) 体积收缩。液态钢和固态钢，都随温度降低而发生体积收缩；从液态变为固态时，也有体积收缩。钢液在锭模（或砂型）中凝固时，先凝固成与注入钢液差不多高的外壳，



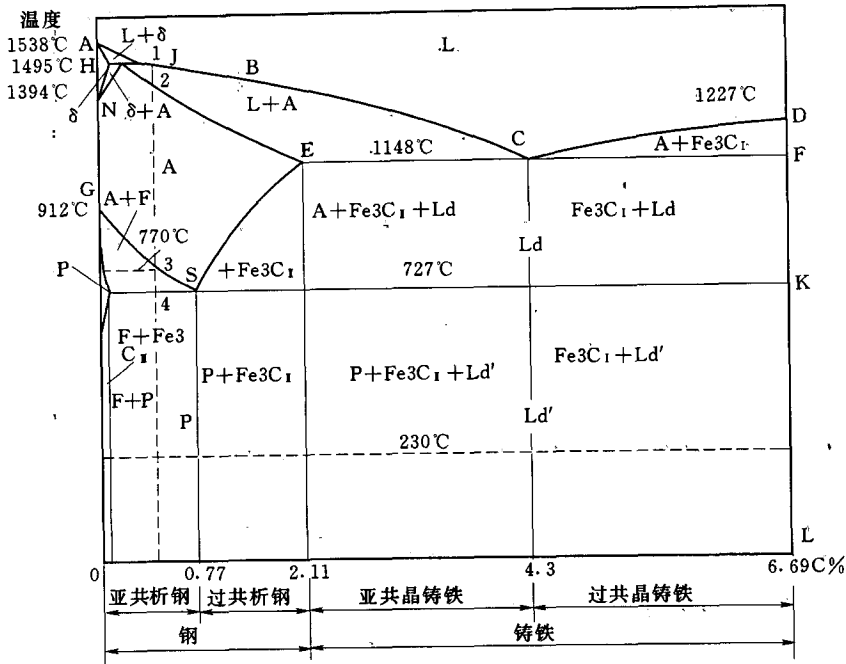


图 1-1-8 铁碳平衡状态图

L—液相；F—铁素体相（也叫 $\alpha$ 相）；A—奥氏体相（也叫 $\gamma$ 相）；Fe<sub>3</sub>C—渗碳体相（也叫C相）

中间随后凝固收缩就会向下凹下去。于是在头部形成大的空洞，即开放缩孔。若上部比下部先凝固而发生所谓搭桥现象时，还会形成封闭缩孔，又叫二次缩孔。封闭在枝状晶格架内的一点点钢液凝固时，因无钢液补充收缩，而形成细小的孔隙，也就是疏松。钢的凝固、冷却过程中的总收缩量为

$$\Delta V_{\text{总}} = \Delta V_{\text{液}} + \Delta V_{\text{凝}} + \Delta V_{\text{固}}$$

式中： $\Delta V_{\text{液}}$ 为液态下冷却的收缩量； $\Delta V_{\text{凝}}$ 为金属凝固时收缩量，即金属从液相点降到固相点中的收缩量； $\Delta V_{\text{固}}$ 为固态下冷却时收缩量。

碳素钢从浇注到室温的总收缩量可以达到10%~14%，其中约3.5%~5.7%的液态收缩和凝固收缩，对缩孔和疏松起作用，使得锻造钢锭必须带有供补缩的待切除的冒口；而浇铸铸件的砂型也必须设计有供补缩的待切除的冒口。固态下冷却的收缩会影响铸件的尺寸并使铸件产生应力。

2) 结晶偏析。钢是多元合金，凝固结晶时，不仅会造成收缩空隙，而且会造成各种元素的不均匀分布。这种不均匀分布就叫偏析。晶体含碳量总是先结晶的比后结晶的低，这样在结晶凝固中就得到了存在偏析的固体。先结晶部分含碳量较低，后结晶部分含碳量较高。其他元素在结晶时也会发生同样偏析。

偏析有枝晶偏析（微区偏析，晶内偏析）和区域偏析（大范围的宏观偏析）之分。

3) 夹杂。由于结晶偏析的原因，钢中的夹杂物容易被富集到最后凝固的区域。夹杂