

普通高等教育“十一五”国家级规划教材配套教辅

工程材料

学习指导

Student's Guide of Engineering Materials 第3版

◎ 燕山大学 崔占全

主编

◎ 江苏科技大学 孙振国



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

013044899

TB3-42
06-3

普通高等教育“十一五”国家级规划教材配套教辅

工程材料学习指导

第3版

主 编	崔占全	孙振国	
副主编	王正品	陈 扬	
参 编	朱张校	王海龙	李 慧
	戚 力	张向红	
主 审	郑明新	王天生	



机械工业出版社



北航

C1651688

TB3-42
06-3

008440810

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材——《工程材料》(第3版)(崔占全、孙振国主编)的配套教材。其内容包括四部分:第一部分工程材料内容提要与学习重点;第二部分习题及参考答案;第三部分课堂讨论;第四部分实验。

本书可作为工科院校机械类及近机类专业教材,也可供相关专业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程材料学习指导/崔占全,孙振国主编. —3版. —北京:机械工业出版社,2013.5

普通高等教育“十一五”国家级规划教材配套教辅

ISBN 978-7-111-41836-8

I. ①工… II. ①崔…②孙… III. ①工程材料-高等学校-教学参考资料 IV. ①TB3

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第051683号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:冯春生 责任编辑:冯春生 韩冰

版式设计:潘蕊 责任校对:李锦莉

封面设计:张静 责任印制:张楠

北京京丰印刷厂印刷

2013年5月第3版·第1次印刷

184mm×260mm·10.5印张·253千字

标准书号:ISBN 978-7-111-41836-8

定价:22.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

第3版前言

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材——《工程材料》（第3版）（崔占全、孙振国主编）的配套教材。自2003年第1版问世以来，由于该教材体系科学合理、内容取舍得当且深浅度适中、符合当前学时少内容广的教学现状，因此颇受使用该教材院校的师生好评，已多次重印。

本次修订是在保持第2版教材体系的基础上进行调整的，其内容包括四部分：第一部分为工程材料内容提要及学习重点；第二部分为习题及参考答案；第三部分为课堂讨论；第四部分为实验。由崔占全、威力制作了“工程材料”教学课件，力图打造“工程材料”课程的立体化教材。

参加本次修订的人员有：第一章、第四章的内容提要及学习重点，习题一、四、六及附录由燕山大学崔占全教授编写与修订；第二章的内容提要及学习重点、习题二、课堂讨论一及实验三由清华大学朱张校教授编写与修订；第三章的内容提要及学习重点、习题三、课堂讨论三及实验六由西安工业大学王正品教授编写与修订；第五章的内容提要及学习重点、习题五由河北建材职业技术学院张向红副教授编写与修订；第六章的内容提要及学习重点由江苏科技大学孙振国教授编写与修订；第七章的内容提要及学习重点、习题七由燕山大学威力副教授编写与修订；第八章及第九章的内容提要及学习重点、习题八、习题九、课堂讨论四由辽宁工程技术大学陈扬教授编写与修订；实验一、二、七由燕山大学李慧高级工程师编写与修订；课堂讨论二、实验四、实验五由江苏科技大学王海龙教授编写与修订。全书由崔占全、孙振国担任主编，王正品、陈扬担任副主编，清华大学郑明新教授、燕山大学王天生教授担任主审。

在本书的修订过程中，燕山大学赵品教授、景勤教授、杨庆祥教授、刘文昌教授、高聿为教授等人提出了许多有益建议，在此一并表示感谢！

由于编者水平所限，错误及不足之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

第2版前言

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材——《工程材料》（第2版）（崔占全、孙振国主编）的配套教材。第1版自2003年出版以来，由于该教材在“工程材料”课程的教学以及学生进一步巩固所学知识上，均起到了很好的效果，因此已多次重印，颇受使用该教材院校的好评。

本次修订，是根据《工程材料》（第2版）的修订内容进行调整的，其内容包括四部分：第一部分为工程材料内容提要及学习重点；第二部分为习题；第三部分为课堂讨论；第四部分为实验。参加本次修订的人员为：第一、四章，习题一、四、六及附录由燕山大学崔占全教授编写；第二章、习题二、讨论一及实验三由清华大学朱张校教授编写；第三章、习题三、讨论三及实验六由西安工业学院王正品教授编写；第六章由江苏科技大学孙振国教授编写；第五章及习题五由河北建材职业技术学院张向红编写；第七章及习题七由燕山大学威力编写；第八、九章，习题八、九，讨论四由辽宁工程技术大学陈扬副教授编写；实验一、二、七由燕山大学李慧高级工程师编写；讨论二，实验四、五由江苏科技大学王海龙副教授编写。全书由崔占全、孙振国担任主编，王正品、陈扬担任副主编；全书由清华大学郑明新教授、燕山大学王天生教授担任主审。

为配合本书，光盘中由威力制作了参考答案（不含习题）。

本书在修订过程中，燕山大学荆天辅、赵品、高聿为教授提出了许多有益建议，高聿为协助审阅了部分书稿，在此表示谢意。

由于编者水平有限，错误及不足之处在所难免，敬请读者批评指正。

编者

第1版前言

本书是根据第九届全国“工程材料”课程协作组会议决定编写的。其目的是为了适应我国高等教育改革形势下的教学需要,本着加强基础、淡化专业,注重宽口径培养、能力培养、素质教育的宗旨,同时考虑到各高校减少该课程学时的实际情况,我们组织了有关院校第一线教师编写了《工程材料学习指导》。本书为《工程材料》的配套教材,也可作为机械类及近机械类各专业的通用教材及相关专业的工程技术人员参考书。

本书共分四部分:第一部分工程材料内容提要及学习重点;第二部分习题;第三部分课堂讨论;第四部分实验。其中第一章、习题一由燕山大学王天生副教授编写;第二章、习题二、讨论一及实验三由清华大学朱张校教授编写;第三章、习题三、讨论三及实验六由西安工业学院王正品教授编写;第四、五章,习题四~六及附录由燕山大学崔占全教授编写;第六章由华东船舶工程学院孙振国教授编写;第七章及习题七由燕山大学杨庆祥教授编写;第八、九章,习题八、九,讨论四由辽宁工学院陈扬副教授编写;实验一、二、七由燕山大学李慧高级工程师编写;讨论二,实验四、五由华东船舶工程学院王海龙副教授编写。全书由崔占全、孙振国主编,王正品、陈扬副主编,由清华大学郑明新教授主审。

本书在编写过程中,参考和引用了一些文献资料的有关内容,并得到了机械工业出版社教材编辑室的大力支持与指导,在此一并表示感谢。

由于编写水平有限,错误及不足之处难以避免,敬请读者批评指正。

编 者

目 录

第3版前言

第2版前言

第1版前言

第一部分 工程材料内容提要及学习重点	1
第一章 材料的结构与性能	1
第二章 金属材料组织与性能的控制	6
第三章 金属材料	10
第四章 高分子材料	17
第五章 陶瓷材料	20
第六章 复合材料	23
第七章 其他工程材料	25
第八章 机械零件的失效与强化	28
第九章 典型零件的选材及工程材料的应用	30
第二部分 习题及参考答案	32
第一篇 习题	32
习题一 材料的结构与性能	32
习题二 金属材料组织与性能的控制	37
习题三 金属材料	43
习题四 高分子材料	50
习题五 陶瓷材料	51
习题六 复合材料	52
习题七 其他工程材料	53
习题八 机械零件的失效与强化	54
习题九 典型零件的选材及工程材料的应用	55
第二篇 参考答案	57
习题一 参考答案	57
习题二 参考答案	64
习题三 参考答案	73
习题四 参考答案	83
习题五 参考答案	86
习题六 参考答案	88
习题七 参考答案	90

习题八 参考答案	92
习题九 参考答案	94
第三部分 课堂讨论	96
讨论一 铁碳相图	96
讨论二 钢的热处理	98
讨论三 工业用钢	100
讨论四 材料的选择和使用	101
第四部分 实验	103
实验一 金相显微镜的使用及金相试样的制备	103
实验二 硬度试验	109
实验三 铁碳合金平衡组织观察与分析	115
实验四 碳钢热处理后的显微组织观察与分析	119
实验五 热处理操作	124
实验六 合金钢、铸铁、有色金属的显微组织观察	128
实验七 综合实验	134
附录	136
参考文献	157

第一部分 工程材料内容提要及学习重点

第一章 材料的结构与性能

三大固体材料（金属材料、高分子材料、陶瓷材料）的结合方式、结构与性能有着十分密切的关系。

一、材料的性能

（一）材料的使用性能

材料的使用性能包括力学性能、物理性能及化学性能。

1. 材料的力学性能

材料的力学性能是指材料在外加载荷作用时所表现出来的性能，包括强度、硬度、塑性、韧性及疲劳强度等。

（1）弹性和刚度 弹性是指材料产生弹性变形而不发生塑性变形或破坏的能力；刚度是指材料保持自身形状抵抗变形的能力。

（2）强度和塑性 强度是指材料在外力作用下抵抗变形和破坏的能力（包括抗拉强度、抗弯强度、抗剪强度等）；塑性是指材料在外力作用下产生塑性变形而不破坏的能力（包括伸长率、断面收缩率等）。

（3）硬度 硬度是指材料对局部塑性变形的抗力。常用的硬度测量方法是压入法，主要有布氏硬度（HBW）、洛氏硬度（HR）、维氏硬度（HV）等。陶瓷等材料还常用克努普氏显微硬度（HK）和莫氏硬度（划痕比较法）作为硬度指标。

（4）韧性

1) 冲击韧性。材料抵抗冲击载荷而不破坏的能力称为冲击韧性，其试验方法有摆锤式一次冲击试验、小能量多次冲击试验。

2) 断裂韧性。断裂韧性 K_{IC} 是表示材料抵抗裂纹失稳扩展能力的力学性能指标。

（5）疲劳 在交变应力作用下，材料所承受的应力虽然低于其屈服强度，但经过较长时间的工作会产生裂纹或突然断裂，这种现象称为材料的疲劳。将恰好在 N 次循环时失效的估计应力值称为疲劳强度。可通过合理选材、细化晶粒，减少材料和零件的缺陷，改善零件的结构设计，避免应力集中，降低零件的表面粗糙度，对零件表面进行强化处理（喷丸处理、表面淬火、化学渗镀工艺等）来提高零件的疲劳强度。

2. 材料的物理和化学性能

（1）材料的物理性能 包括密度、熔点、导热性、导电性、热膨胀性、磁性等。

（2）材料的化学性能 包括耐蚀性、抗氧化性等。

（二）材料的工艺性能

（1）铸造性能 材料铸造成形获得优良铸件的能力称为铸造性能，常用铁液的流动性、收缩性和成分偏析来衡量。

(2) 锻造性能 材料对用锻造加工方法成形的适应能力称为锻造性能,它主要取决于材料的塑性和变形抗力。

(3) 切削加工性能 材料接受切削加工的难易程度称为切削加工性能,一般用切削速度、表面粗糙度和刀具使用寿命来衡量。

(4) 焊接性能 材料是否能适应焊接加工而形成完整的、具有一定使用性能的焊接接头的特性称为焊接性能。

(5) 热处理性能 材料是否适应热处理并使其性能得以改善或强韧化的性能称为热处理性能。

二、材料的结合方式及工程材料的键性

1. 结合键

组成物质的质点(原子、分子或离子)间的相互作用力称为结合键,主要有共价键、离子键、金属键、分子键。

金属具有以下特性:良好的导电性及导热性;正的电阻温度系数,即随温度升高电阻增大;良好的强度及塑性;具有金属光泽。

2. 工程材料的键性

绝大多数金属材料的结合键是金属键,少数具有共价键和离子键,所以金属材料的金属特性特别明显。

陶瓷材料的结合键是离子键和共价键,大部分材料以离子键为主,所以陶瓷材料具有高的熔点和很高的硬度,且脆性较大。

高分子材料的结合键是共价键和分子键,即分子内靠共价键结合,分子间靠分子键结合。

3. 晶体与非晶体

所谓晶体,是指原子在其内部沿三维空间呈周期性重复排列的一类物质。

晶体的主要特点是:①结构有序;②物理性质表现为各向异性;③有固定的熔点;④在一定条件下有规则的几何外形。

所谓非晶体,是指原子在其内部沿三维空间呈紊乱、无序排列的一类物质。

非晶体的特点是:①结构无序;②物理性质表现为各向同性;③没有固定的熔点;④热导率和热膨胀性小;⑤塑性变形大;⑥化学组成的变化范围大。

非晶体的结构是近程有序,即在很小的尺寸范围内存在着有序性;而晶体内部虽然存在长程有序结构,但在小范围内存在缺陷,即在很小的尺寸范围内存在着无序性。同一物质在不同条件下,既可形成晶体结构,又可形成非晶体结构。

三、金属的结构

所谓金属,是指具有正的电阻温度系数及金属特性的一类物质。所谓合金,是指由两种或两种以上的金属或金属与非金属元素经熔炼、烧结或其他方法组合而成的具有金属特性的一类物质。

(一) 纯金属的晶体结构

1. 晶体的基本概念

把原子看成空间的几何点,这些点的空间排列称为空间点阵。用一些假想的空间直线把这些点连接起来,就构成了三维的几何格架,称为晶格。从晶格中取出一个最能代表原子排

列特征的最基本的几何单元,称为晶胞。晶胞各棱边的尺寸 a 、 b 、 c 称为晶格常数。

各种晶体物质的晶格类型及晶格常数由原子结构、原子间的结合力(结合键)的性质决定。按原子排列形式及晶格常数不同可将晶体分为七种晶系。

原子半径是指晶胞中原子密度最大方向上相邻两原子之间距离的一半。

晶胞所含原子数是指一个晶胞内真正包含的原子数目。不同晶格类型的晶胞所含原子数目是不同的。

晶格中与任意一个原子相距最近且等距离的原子数目称为配位数。

晶胞中所含原子所占有的体积与晶胞体积之比称为致密度。

2. 常见金属的晶格类型

常见金属的晶格类型包括体心立方晶格(bcc)、面心立方晶格(fcc)和密排六方晶格(hcp)。

3. 立方晶系的晶面、晶向表示方法

在晶体中,由一系列原子所组成的平面称为晶面。任意两个原子之间的连线称为原子列,其所指方向称为晶向。表示晶面的符号称为晶面指数,如(111);表示晶向的符号称为晶向指数,如[101]。

不同晶体结构中不同晶面、不同晶向上的原子排列方式和排列紧密程度是不一样的。

4. 金属的实际结构与晶体缺陷

如果一块晶体内部的晶格位向完全一致,则称该晶体为单晶体。由多晶粒构成的晶体称为多晶体。在实际晶体中原子排列存在着许多不完整性及不规则性,通常称为缺陷。缺陷按其尺寸大小可分为以下几种:

(1) 点缺陷 是指三维尺度都很小、不超过几个原子直径的缺陷,包括空位与间隙原子。

(2) 线缺陷 是指二维尺度很小而另一维尺度很大的缺陷,包括各种类型的位错(刃型位错和螺型位错)。所谓位错,是指晶体中一列或若干列原子沿一定晶面与晶向发生了某种有规律的错排现象,它也是晶体中已滑移晶体与未滑移晶体的分界线。

(3) 面缺陷 是指二维尺度很大而另一维尺度很小的缺陷。金属晶体中的面缺陷主要有晶界和亚晶界等。

(二) 合金的相结构

组成合金的最基本独立单元叫做组元。相是指合金中具有同一化学成分、同一结构和原子聚集状态,并以界面互相分开的、均匀的组成部分。所谓组织,是指用肉眼或显微镜观察到的不同组成相的形状、尺寸、分布及各相之间的组合状态。

1. 固溶体

合金的组元之间通过溶解形成一种成分及性能均匀的且结构与其中一种组元相同的固相称为固溶体。

(1) 固溶体的分类 按溶质原子在溶剂晶格中的位置不同,可将固溶体分为置换固溶体与间隙固溶体两种类型。按溶质原子在固溶体中的溶解度不同可分有限固溶体和无限固溶体两种类型。按溶质原子在固溶体中的分布是否有规律,可分为有序固溶体和无序固溶体两种类型。

影响固溶体类型和溶解度的主要因素有组元的原子半径、电化学性质和晶格类型等。

(2) 固溶体的性能 固溶体性能的特点是强度较高,特别是塑性、韧性高,因此常用作基体相。固溶体可以通过增加溶质含量来增加强度、硬度,即固溶强化。固溶强化是金属强化的重要方式之一。

2. 金属化合物

由合金组元相互作用形成晶格类型和特性完全不同于任一组元的新相,称为金属化合物,或称为中间相。金属化合物的性能特点是熔点较高、硬度高、脆性大,常用作合金中的强化相。

若组元间电负性相差较大,且形成的化合物严格遵守化合价规律,则此类化合物称为正常价化合物。若组元间形成的化合物不遵守化合价规律,但符合一定电子浓度规律(化合物中价电子数与原子数之比),则此类化合物称为电子化合物。

由过渡族元素与碳、氮、氢、硼等原子半径较小的非金属元素形成的化合物称为间隙化合物。

间隙化合物又可分为具有简单结构的间隙相和具有复杂结构的间隙化合物。当非金属原子半径与金属原子半径之比小于0.59时,形成具有简单晶格的间隙化合物,称为间隙相;当非金属原子半径与金属原子半径之比大于0.59时,形成具有复杂结构的间隙化合物。

四、高分子材料的结构与性能

(一) 高分子材料的基本概念

高分子材料是以高分子化合物为主要组分材料。

1. 高分子化合物的组成

高分子化合物的相对分子质量虽然很大,但其化学组成并不复杂,都是由一种或几种简单的低分子化合物通过共价键重复连接而成的。这类能组成高分子化合物的低分子化合物称为单体,它是合成高分子材料的原料。由一种或几种简单的低分子化合物通过共价键重复连接而成的链称为分子链。大分子链中的重复结构单元称为链节;链节的重复次数即链节数称为聚合度。

2. 高分子化合物的聚合

由低分子化合物合成高分子化合物的基本方法有以下两种:

(1) 加聚反应(加成聚合反应) 由一种或多种单体相互加成,或由环状化合物开环相互结合成聚合物的反应称为加聚反应。

(2) 缩聚反应 由一种或多种单体互相缩合生成聚合物,同时析出其他低分子化合物(如水、氨、醇、卤化氢等)的反应称为缩聚反应。

3. 高分子化合物的分类及命名

(1) 分类 按性能及用途分为塑料、橡胶、纤维、胶粘剂、涂料;按聚合物反应类型分为加聚物、缩聚物;按聚合物的热行为分为热塑性塑料、热固性塑料;按主链上的化学组成为碳链聚合物、杂链聚合物、元素链聚合物。

(2) 高分子化合物的命名 习惯命名法、商品名称、英文名称的缩写。

(二) 分子化合物的结构

1. 高分子链结构(分子内结构)

(1) 高分子链结构单元的化学组成

(2) 高分子链的形态 可分为线型分子链、支链型分子链、体型分子链。

(3) 高分子链中结构单元的连接方式

- 1) 加聚物中聚氯乙烯单体的连接方式：头-尾连接、头-头或尾-尾连接、无规则连接。
- 2) 共聚物中单体的连接方式：无规共聚、交替共聚、嵌段共聚、接枝共聚。

(4) 高分子链的构型（链结构） 可分为全同立构、间同立构、无规立构。

(5) 高分子链的构象 由于单键内旋所引起的原子在空间占据不同位置所构成的分子键的各种形象，称为高分子链的构象。

2. 高分子的聚集态结构（分子间结构）

高分子化合物的聚集态结构是指在高聚物内部高分子链之间的几何排列为堆积结构，也称为超分子结构。依分子在空间排列的规整性可将高聚物分为结晶型、部分结晶型和无定形（非晶态）三类。

(三) 高分子化合物的力学状态

(1) 线型非晶态高分子化合物的力学状态 包括玻璃态、高弹态、粘流态。

(2) 其他类型高聚物的力学状态

(四) 高分子材料的性能特点

(1) 高分子材料的力学性能特点 低强度和较高的比强度；高弹性和低弹性模量；粘弹性；高耐磨性。

(2) 高分子材料的物理及化学性能特点 高绝缘性；低耐热性；低导热性；高的热膨胀性；高化学稳定性。

(3) 高分子材料的老化及防止措施 高分子材料在长期储存和使用过程中，由于受氧、光、热、机械力、水蒸气及微生物等外因的作用，使性能逐渐退化，直至丧失使用价值的现象称为老化。老化的根本原因是在外部因素的作用下，高聚物分子链产生了交联和裂解。目前采用的防止老化措施有三种：改变高聚物的结构、添加防老剂、表面处理。

五、陶瓷材料的结构与性能

所谓陶瓷，是指用天然硅酸盐（粘土、长石、石英等）或人工合成化合物（氮化物、氧化物、碳化物、硅化物、硼化物、氟化物）为原料，经粉碎、配置、成型和高温烧制而成的一种无机非金属材料。

通常按照组织形态不同，可将陶瓷材料分为三大类：无机玻璃、微晶玻璃和陶瓷。

陶瓷的典型组织由晶体相、玻璃相、气相组成。晶体相是陶瓷的主要组成相，主要类型有硅酸盐（莫来石、长石）、氧化物（氧化物是大多数陶瓷特别是特种陶瓷的主要组成和晶体相）、非氧化合物（非氧化合物是指不含氧的金属碳化物、氮化物、硼化物和硅化物）。

陶瓷的刚度大、硬度高、拉伸强度低、弯曲强度较高、压缩强度非常高；但塑性很差、韧性很低、脆性大。另外，陶瓷的热膨胀系数低、导热性差、热稳定性低、化学稳定性高、导电性极差。

第二章 金属材料组织与性能的控制

结晶、塑性变形、热处理、合金化、表面处理等工艺对金属材料组织与性能有着十分重要的影响。在实际生产中可以通过采用不同的工艺方法和工艺参数对金属材料组织与性能进行控制,以获得所需要的工艺性能和使用性能。

一、金属的结晶

1. 纯金属的结晶

液态金属结晶的条件是要有一定的过冷度,结晶过程的推动力是液相与固相之间的自由能差。液态金属结晶是由形核和长大两个密切联系的基本过程来实现的。晶核的形成有两种方式:自发形核和非自发形核。在实际金属和合金中,非自发形核往往起优先的、主导的作用。晶体的长大有平面长大和树枝状长大两种方式,实际金属结晶时,一般均为树枝状长大方式。

1) 金属在固态下随温度的改变,由一种晶格转变为另一种晶格的现象,称为同素异构转变。

2) 典型铸锭明显地分为三个各具特征的晶区:细等轴晶区、柱状晶区、粗等轴晶区。

3) 细化铸态金属晶粒的措施包括增大金属的过冷度、变质处理、振动、电磁搅拌等。

2. 二元合金的结晶

运用合金相图分析合金的结晶过程,二元合金的基本相图有匀晶相图、共晶相图、包晶相图、共析相图等。从液相中结晶出固溶体的反应叫做匀晶反应;由一种液相在恒温下同时结晶出两种固相的反应叫做共晶反应;由一种液相和一种固相在恒温下生成另一种固相的反应叫做包晶反应;由一种固相转变成完全不同的两种相互关联的固相的反应叫做共析反应。合金处于两相时,可用杠杆定律计算出两种相分别在合金中的质量分数。合金的工艺性能、使用性能与合金相图有着密切的关系。

3. 铁碳相图

铁碳相图是研究钢和铸铁的基础,对于钢铁材料的应用以及热加工和热处理工艺的制订具有重要的指导意义。 $\text{Fe-Fe}_3\text{C}$ 相图中存在五种相:液相 L 、 δ 相、 α 相、 γ 相、 Fe_3C 相。

根据铁碳相图对典型铁碳合金的结晶过程进行分析,可研究铁碳合金的成分、组织与性能之间的关系。

工业纯铁的室温平衡组织为 F ,由于其强度低、硬度低,不宜用作结构材料。

共析钢的室温平衡组织全部为 P ,亚共析钢的室温平衡组织为 $F + P$,过共析钢的室温平衡组织为 $\text{Fe}_3\text{C}_{II} + P$ 。碳钢的强韧性较好,应用广泛。

亚共晶白口铸铁的室温平衡组织为 $P + \text{Fe}_3\text{C}_{II} + L'd$,共晶白口铸铁的室温平衡组织为 $L'd$,过共晶白口铸铁的室温平衡组织为 $\text{Fe}_3\text{C}_I + L'd$ 。白口铸铁的室温平衡组织中含有莱氏体($L'd$),其硬度高、脆性大,应用较少。

$\text{Fe-Fe}_3\text{C}$ 相图在生产中具有很大的实际意义,主要应用在钢铁材料的选用和加工工艺的制订两个方面。

本节应掌握结晶过程中形核和长大的概念,特别是非自发形核和树枝状长大的概念,以

及过冷度对结晶过程的影响规律及获得细晶的方法。掌握具有匀晶相图、共晶相图的合金的结晶过程,熟练运用杠杆定律。熟悉铁碳相图,会根据铁碳相图对典型铁碳合金结晶过程进行分析,掌握铁碳合金的成分与组织、性能之间的关系。

二、金属的塑性变形

单晶体金属塑性变形的的基本方式是滑移和孪生,滑移是位错运动的结果。多晶体金属塑性变形时,由于晶界对位错运动的阻碍作用,增大了对塑性变形的抗力。细晶粒金属材料晶界多,故强度较高,塑性好,韧性比较好。

金属塑性变形造成晶格歪扭、晶粒变形和破碎,出现亚结构,甚至形成纤维组织。当外力去除后,金属内部还存在残留内应力。塑性变形使位错密度增加,从而使金属的强度、硬度增加,而塑性、韧性下降,即产生加工硬化。

塑性变形后的金属再加热时,随着加热温度的升高,将经历回复、再结晶与晶粒长大等过程。再结晶后,金属形成新的无畸变的并与变形前相同晶格形式的等轴晶粒,同时位错密度降低,加工硬化现象消失。

再结晶的开始温度主要取决于变形度,变形度越大,再结晶开始温度越低。大变形度(70%~80%)的金属的再结晶温度与熔点的关系为

$$T_{\text{再}} = (0.35 \sim 0.40) T_{\text{熔}}$$

式中,温度单位为热力学温度(K)。

再结晶后的晶粒大小与加热温度和预先变形度有关,加热温度越低或预先变形度越大,其再结晶后的晶粒越细。但要注意临界变形度的情况,即对于一般金属,当变形度为2%~10%时,由于变形很不均匀,会出现晶粒的异常长大,导致性能急剧下降。

本节重点要掌握塑性变形的机制、加工硬化的本质及实际意义、再结晶的概念和应用以及冷、热加工的区别等。

三、钢的热处理

热处理是将固态金属或合金在一定介质中加热、保温和冷却,以改变其整体或表面组织,从而获得所需性能的一种工艺。热处理是改善金属材料的使用性能和加工性能的一种非常重要的工艺方法。

(一) 钢的热处理原理

1. 钢在加热时的组织转变——奥氏体转变

(1) 共析钢在加热时的奥氏体形成过程 奥氏体的形成过程包括:①奥氏体晶核优先在铁素体与渗碳体的界面上形成;②奥氏体晶核长大;③残留渗碳体溶解;④奥氏体成分均匀化。

(2) 奥氏体晶粒大小及控制

1) 奥氏体晶粒大小的表示方法包括:①晶粒平均直径表示;②单位体积或单位面积内所包含的晶粒个数表示;③与标准金相图片(标准评级图)相比较的方法来评定。晶粒度分为起始晶粒度、实际晶粒度、本质晶粒度。

2) 控制晶粒大小的因素有加热温度及保温时间、加热速度、钢的原始组织及化学成分。

2. 钢在冷却时的组织转变

(1) 过冷奥氏体转变图

1) 亚共析钢、过共析钢过冷奥氏体等温转变图的特点是:与共析钢不同,在奥氏体转

变为珠光体之前,有先共析铁素体或渗碳体析出。因此,在亚共析钢的等温转变图上多出一条铁素体析出线,过共析钢则多出一条渗碳体析出线。

2) 过冷奥氏体连续转变图。与过冷奥氏体等温转变图相比,其形状及位置均发生了改变。从形状上看,亚共析钢过冷奥氏体连续转变图中的珠光体、贝氏体转变区变成了两个单独区域(两个鼻尖);共析钢、过共析钢过冷奥氏体转变图无贝氏体转变区。从位置上看,过冷奥氏体连续转变图向左下方移。

(2) 过冷奥氏体转变过程、产物、组织及性能 可用等温转变图分析过冷奥氏体在不同条件下转变为各种产物(珠光体型、贝氏体型和马氏体)的转变过程、产物特征及其性能。

1) 过冷奥氏体的高温转变产物是珠光体型组织。珠光体是铁素体与渗碳体的机械混合物,转变温度越低,层间距越小。按层间距不同可将珠光体型组织分为珠光体(P)、索氏体(S)和托氏体(T)。

2) 过冷奥氏体的中温转变产物是贝氏体型组织,分为上贝氏体和下贝氏体两种类型。

3) 过冷奥氏体的低温转变产物是马氏体,马氏体是碳在 α -Fe中的过饱和固溶体。

马氏体转变是一种非扩散型转变,马氏体的形成速度很快,马氏体转变是不彻底的,总要残留少量奥氏体。马氏体形成时体积膨胀,在钢中造成很大的内应力,严重时将使被处理零件开裂。

马氏体的形态有板条状和针状(或片状)两种类型。奥氏体中碳的质量分数在0.25%以下时,基本上是板条马氏体(亦称为低碳马氏体);碳的质量分数在1.0%以上时,基本上是针状马氏体(亦称为高碳马氏体)。

高碳马氏体由于过饱和度高、内应力大和存在孪晶亚结构,所以硬而脆,塑性、韧性极差,但晶粒细化得到的隐晶马氏体却有一定的韧性。低碳马氏体由于过饱和度低,内应力小和存在位错亚结构,则不仅强度高,而且塑性、韧性也较好。马氏体的比体积比奥氏体的大。马氏体是一种铁磁相。马氏体的晶格有很大的畸变,因此它的电阻率高。

3. 钢在回火时的组织转变

回火时的组织转变过程包括:①马氏体分解(100~200°C);②残留奥氏体转变(200~300°C);③碳化物转变(300~400°C);④渗碳体的聚集长大和 α 相回复与再结晶。

(二) 钢的热处理工艺

改变金属整体组织的热处理包括退火、正火、淬火和回火四种工艺;改变金属表面或局部组织的热处理工艺有表面淬火和化学热处理两种方法。

本节的重点是运用等温转变图分析过冷奥氏体在不同条件下转变为各种产物的转变过程、产物特征及其性能,以及回火转变后各种组织的本质、形态和性能特点。在工艺方面,要抓住各类热处理工艺-组织-性能-应用的规律和特点,熟悉退火、正火、淬火、回火、表面淬火的化学热处理等热处理工艺,掌握钢的淬透性的概念和应用,能制订热处理工艺规范并对实际问题具有一定的工艺分析能力。

四、钢的合金化

合金元素在钢中的存在形式主要有两种:①合金元素溶入铁碳合金的三个基本相(铁素体、渗碳体和奥氏体)中,分别形成合金铁素体、合金渗碳体和合金奥氏体;②合金元素在铁素体和奥氏体中起固溶强化作用,合金元素与碳形成碳化物,合金碳化物熔点高、硬度高,加热时难以溶入奥氏体,故对钢的性能产生很大的影响。

V、Ti、Nb、Zr、Al 等元素强烈阻止奥氏体晶粒长大，Mn、P 促使奥氏体晶粒长大；Si、Ni、Cu 对奥氏体晶粒长大影响不大。

除 Co 以外，所有合金元素都使等温转变图往右移动，降低钢的临界冷却速度，从而提高钢的淬透性。除 Co、Al 以外，所有合金元素都使 M_s 和 M_f 点下降，其结果是使淬火后钢中的残留奥氏体量增加。残留奥氏体量过多时，钢的硬度下降，疲劳强度下降，因此应很好地控制其含量。

合金元素可提高钢的耐回火性。耐回火性是指钢对于回火时所发生的软化过程的抗力。提高耐回火性较强的元素有 V、Si、Mo、W、Ni、Mn、Co 等。

若钢中含有大量的碳化物形成元素如 W、V、Mo 等，在 400℃ 以上回火时形成和析出如 W_2C 、 Mo_2C 和 VC 等高弥散度的合金碳化物，使钢的强度、硬度升高，即产生二次硬化现象。Mo、W 可以避免高温回火脆性出现。

合金元素可以通过细晶强化、固溶强化、第二相强化使钢的强度增加。马氏体相变加上回火转变是钢中最经济、最有效的综合强化手段。合金元素使钢能更容易地获得马氏体，只有得到马氏体，钢的综合强化才能得到保证。

合金元素可使钢的韧性提高，可细化晶粒、细化碳化物、提高钢的耐回火性、改善基体（铁素体）的韧性（加 Ni）、消除回火脆性（加 Mo、W）。

本节重点掌握合金元素在钢中的作用和对钢的相变过程的影响规律，理解合金元素提高钢的强度和韧性的原因。

五、表面处理新技术

表面处理新技术包括热喷涂、气相沉积和激光强化等。

（1）热喷涂 是指利用热源将金属或非金属材料加热到熔化或半熔化状态，用高速气流将其吹成微小颗粒（雾化），喷射到工件表面，形成牢固的覆盖层的表面加工方法。

（2）气相沉积 是指从气相物质中析出固相并沉积在基材表面的一种新型表面镀膜技术，分为化学气相沉积（CVD）及物理气相沉积（PVD）两大类。利用气态化合物（或化合物的混合物）在基体受热表面发生化学反应，并在该基体表面生成固态沉积物的方法称为化学气相沉积；在真空环境中，以物理方法产生的原子或分子沉积在基材上，形成薄膜或涂层的方法称为物理气相沉积。

（3）激光强化 激光具有 $10^4 \sim 10^8 \text{ W/cm}^2$ 的高功率密度，使被照射材料表面的温度瞬时上升至相变点、熔点甚至沸点以上，并产生一系列物理或化学的现象。激光强化技术包括激光相变硬化、激光熔覆、激光熔凝等。

1) 激光相变硬化（激光淬火）。用激光束照射工件，使需要硬化的部位温度急剧上升，形成奥氏体，而工件基体仍处于冷态。停止激光照射时，加热区因急冷而实现工件的自冷淬火，获得超细化的隐晶马氏体组织。

2) 激光熔覆。用激光在基体表面覆盖一层薄的具有特定性能的涂覆材料。

3) 激光熔凝。用激光束加热工件表面，使工件表面熔化到一定深度后自冷，使熔层凝固，获得细化均质的熔凝层组织。

表面技术可以大大提高工程材料的耐蚀性、耐磨性及耐疲劳性能，可延长工件的使用寿命，因此具有重要的经济意义。

本节应重点掌握气相沉积和激光强化技术。