



全国本科院校机械类**创新型**应用人才培养规划教材

工程材料及其成形技术基础

学习指导与习题详解

主编 申荣华



北京大学出版社

全国本科院校机械类创新型应用人才培养规划教材

工程材料及其成形技术基础 学习指导与习题详解

主	编	申荣华			
编	委	丁旭	陈之奇	姜云	
		周仁贵	徐卫平	林芸	



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书是《工程材料及其成形技术基础》的配套用书,内容包括《工程材料及其成形技术基础》教材的内容提要与学习重点、课堂讨论指导、练习题、自测题及参考答案和实验指导。

本书可作为高等院校机械类、近机械类各专业学生学习“工程材料及其成形技术基础”、“工程材料”、“机械工程材料”、“材料学概论”、“金属材料及热处理”、“材料成形技术基础”等课程的辅助或参考用书,也可作为研究生考试的辅导资料。

图书在版编目(CIP)数据

工程材料及其成形技术基础学习指导与习题详解/申荣华主编. —北京:北京大学出版社, 2009.3
(全国本科院校机械类创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-14972-0

I. 工… II. 申… III. 工程材料—成形—高等学校—教学参考资料 IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 023453 号

书 名: 工程材料及其成形技术基础学习指导与习题详解

著作责任者: 申荣华 主编

责任编辑: 童君鑫

标准书号: ISBN 978-7-301-14972-0/TH·0127

出版者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> <http://www.pup6.com>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

电子邮箱: pup_6@163.com

印刷者:

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 12 印张 255 千字

2009 年 3 月第 1 版 2009 年 3 月第 1 次印刷

定 价: 20.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话: 010-62752024

电子邮箱: fd@pup.pku.edu.cn

前 言

本书是《工程材料及其成形技术基础》(申荣华、丁旭主编,北京大学出版社2008年8月出版)的配套用书,是根据工程材料及其成形技术基础教学大纲和教学基本要求编写的。工程材料及其成形技术基础是高等教育工科院校机械类和近机械类各专业学生必修的重要技术基础课程。工程材料部分的主要任务是阐述各种常用工程材料的化学成分、组织结构、强化手段或方法、使用性能及实际应用之间的相互关系与内在规律,为工程结构、机械零件的设计、制造加工和正确使用提供有关合理选材、用材的必要理论指导和实际帮助。材料成形技术基础部分是以研究制造金属机件加工工艺为主的综合性技术科学,它涉及机械制造从材料到热、冷加工各方面。因此,工程材料及其成形技术基础是学习机械零件及设计等课程和机械类相关各专业课程必不可少的先修课程之一。

本书的内容包括《工程材料及其成形技术基础》教材的各章的内容提要和学习重点、课堂讨论指导、练习题、自测题及参考答案、实验指导等部分。内容提要和学习重点部分阐述《工程材料及其成形技术基础》教材各章的基本内容和学习重点。书中提供了4次课堂讨论的内容,仅供参考选择。课堂讨论是组织学生有准备地讨论课程中重点和难点,使学生理解和掌握这些重点和基本理论,也是学生应用所学知识解决材料及其成形技术问题的一种模拟实践。习题采用多种形式突出重点,且兼顾一般,既考虑有助于对基本理论的理解和掌握,又重视培养学生运用所学理论知识分析、解决实际问题的能力。实验着重培养学生动手能力、分析问题能力和创新精神。实验指导部分安排了6个实验,其中实验1、3、4、5为基本实验,其余为选修实验。

本书可作为高等院校机械类、近机械类专业本、专科生学习“工程材料及其成形技术基础”、“工程材料”、“机械工程材料”、“材料学概论”、“金属材料及热处理”、“材料成形技术基础”等课程的辅助用书或研究生考试的辅导资料。

本书由贵州大学申荣华教授任主编,参加编写的还有贵州大学丁旭、陈之奇、姜云和周仁贵,贵州师范大学徐卫平,贵阳学院林芸。贵州大学研究生贺文建、滕飞、凌静和李乃柱对本书的编写工作也提供了帮助。本书是在编者积累的教学经验和资料以及在教学过程中使用过的工程材料及其成形技术基础的学习指导、课堂讨论、习题、试卷、实验等基础上,经过多年不断的修订补充编纂而成的。

限于编者水平,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正,以便对内容不断完善和改进。

编 者
2009年1月于贵阳

目 录

第一部分 内容提要与学习重点 1

绪论 1

第1章 零部件对材料性能的要求 3

第2章 材料的内部结构、组织与性能 6

第3章 改变材料性能的主要途径 11

第4章 常用金属材料 20

第5章 非金属材料及新型工程材料 25

第6章 工程设计制造中的材料选择 27

第7章 金属材料的液态成形技术 31

第8章 金属固态塑性成形技术 37

第9章 粉末压制和常用复合材料成形简介 41

第10章 固态材料的连接成形技术 42

第11章 有机高分子材料的成形技术 46

第12章 材料成形技术方案拟定、产品检验及再制造技术 48

工程材料及其成形技术基础总结与复习指导 49

第二部分 课堂讨论指导 53

总述 53

课堂讨论一：铁碳相图分析及应用 53

课堂讨论二：钢的热处理 56

课堂讨论三：典型零件选材与工艺路线 58

课堂讨论四：材料成形技术综合分析及应用 60

第三部分 练习题、自测题及参考答案 65

第1章 零部件对材料性能的要求 65

第2章 材料的内部结构、组织与性能 67

第3章 改变材料性能的主要途径 78

第4章 常用金属材料 88

第5章 非金属材料及新型工程材料 99

第6章 工程设计制造中的材料选择 103

第7章 金属材料的液态成形技术 110

第8章 金属固态塑性成形技术 116

第9章 粉末压制和常用复合材料成形简介 122

第10章 固态材料的连接成形技术 124

第11章 有机高分子材料的成形技术 131

第12章 材料成形技术方案拟定、产品检验及再制造技术 133

自测题1及其参考答案 136

自测题2及其参考答案 140

第四部分 实验指导 144

实验1：金属材料的力学性能实验 144

实验2：光学金相显微镜的使用及铁碳合金平衡组织观察 151

实验3：碳钢的淬火与回火 156

实验4：压力铸造及成形特点分析 158

实验5：热塑性塑料注射成形及其特点分析 163

实验6：酚醛塑料的模压成形及特点分析 166

附录 170

参考文献 186

第一部分 内容提要与学习重点

绪 论

一、内容提要

1. 工程材料及其成形技术的发展与分类

人们用各种材料制作各种人们所需的物质产品的过程称为制造加工，材料应用与材料成形技术是制造加工过程的重要组成部分。而数不清的各种机械装备又都是由性能各异的工程材料经机械制造加工成各种零件并装配而成的。从材料的设计、制备、加工、检测，到器件(零件、部件、装备)的制造加工、使用，直到回收利用，已经形成了一个巨大的社会循环。这一循环的概念提示了材料、制造加工、能源和环境之间具有强烈的交互作用，这种作用之所以显得越来越重要，是因为人类在关注经济发展的同时，也不得不面对材料和能源等资源的短缺以及人类生存环境的破坏和恶化等问题。因此，把自然资源和人类需要、社会发展和人类生存联系在一起的材料及其制造加工循环，必然要引起全社会的高度重视。

对不同的零件(产品)，则应选择相应的工程材料，并采用与之相适宜的成形方法及加工过程才能满足其性能和技术要求。而制作加工技术的突破往往成为新产品能否问世，新技术能否产生的关键，故新材料、新工艺、新技术常常是相关联的。

工程材料的种类繁多，有各种各样的分类方法。若按材料组成(或化学成分)与结合键特点，可分为金属材料、陶瓷材料、高分子材料和复合材料四大类，见表1。

表 1 材料按其组成与结合键特点分类

材 料 名 称	材 料 组 成	结 合 键
金属材料(黑色金属、有色金属)	金属为主	金属键为主
陶瓷材料	金属和非金属的化合物主	共价键和离子键为主
高分子材料	碳氢化合物为主	共价键和范德华键为主
复合材料	两种或两种以上上述材料的组合	混合键

20 世纪 50 年代前，金属材料在各类装备制造业中占绝对优势，随着零部件或装备的使用性能要求的变化，到目前已逐渐形成四大类工程材料平分秋色的格局。随着社会和科技的进步，工程材料正向高功能化、超高性能化、复合轻量和智能化的方向发展。

材料成形技术是制造加工过程的重要组成部分，是保证零部件质量的基础技术。构成机器装备的零部件的形状、大小和要求是各式各样千变万化的，因此，必须通过改变原材料的形态，使其接近或达到零部件的几何形状、尺寸大小和技术要求等，工业上把通过改

变原材料的形态从而获得毛坯或零部件的制造加工方法统称为材料成形技术。若按成形原理与成形时材料的状态主要可分为液态成形技术、固态塑变成形技术、固态连接成形技术、粉末压制成形技术、高分子材料成形技术、复(组)合成成形技术六大类,见表2。

表2 按成形原理与成形时材料的状态分类

成形技术名称	成形原理	成形时材料的状态
液态成形技术(铸造)	凝固	液态
固态塑变成形技术(锻压)	塑性变形	固态
固态连接成形技术(焊接)	凝固, 塑性变形, 粘合或两种组合	固态为主
粉末压制成形技术(粉末冶金)	贴合和嵌合	颗粒态为主
高分子材料成形技术	凝固	糊状态为主
复(组)合成成形技术	上述两种及以上的组合	混合态

成形技术是显著提高装备性能、大幅度减轻结构质量、降低制造成本和提高装备使用寿命及可靠性的关键技术,其正沿着优质、高效、精密、大型和低污染的方向发展。现代成形技术是集多种学科于一体的综合技术,是最能代表国家制造技术水平的重要方面。

2. 课程的性质及与专业的关系

(1) 工程材料及其材料成形技术是一门重要的技术基础课程,它主要是应用金相学、物理学、化学、冶金学和电子计算机等学科理论和实验的最新成就,即工程材料及其材料成形技术是建立在实验基础之上而又与工业实践紧密结合的一门技术基础课程。其课程内容以定性描述为主,具体表现为“三多”:讲授内容中名词、概念、术语“多”,定性描述、经验性总结“多”,需记忆性的内容、规律“多”。

(2) 作为一名机械工程技术人员,时刻都会遇到有关材料及其制造加工方面的问题。无论设计一台机器设备、机械零件,还是改造、加工一套工夹具,都将面临材料的选择、应用与零件加工工艺路线的制定等问题,这一切都涉及材料及其成形技术方面的问题。

(3) 学好工程材料及其成形技术基础,为学习专业课程奠定坚实的基础。

二、学习重点

学习本课程,要紧紧抓住其核心内容“材料的性能与选用、强化处理和成形技术及应用”之间的相互关系及其变化规律这个“纲”。围绕零件性能→材料及选用→强化处理→成形加工及应用为主线,结合实际,注重分析,理解前后知识的整体联系并做到综合应用。

明确本课程在机械设计与制造中的重要性、研究对象,课程的性质、主要内容概况及与专业的关系等。初步了解工程材料及其成形技术的分类,对工程材料及其成形技术课程的特点有足够的了解与认识,有的放矢地制订自己的学习计划、选择适合自己的科学学习方法。

第 1 章 零部件对材料性能的要求

一、内容提要

1. 零部件所受的各种负荷

工程构件与机械零件(以下简称构件或零件)在工作条件下可能受到:

(1) 力学负荷。零件受到的各种外力加载,在力学负荷作用条件下,零件将产生变形(如弹性变形、塑性变形等),甚至出现断裂;

(2) 热负荷。温度变化,在热负荷作用下,零件将产生尺寸和体积的改变,并产生热应力,同时随温度的升高,零件的承载能力下降;

(3) 环境介质的作用。零件服役条件状况,环境介质的作用主要表现为环境对零件表面造成的化学腐蚀、电化学腐蚀、摩擦磨损和老化等。

零件在工作条件下受到的负荷有时只受到一种负荷作用,但更多的时候将受到两种或三种负荷的同时作用。

2. 工程设计与加工工艺所需要的材料性能

机器是零件(或部件)间有确定的相对运动、用来转换或利用机械能的机械。机器一般是由零件、部件(为若干零件的组合,具备一定功能)组成一个整体,因此一部机器的整机性能除与机器构造、加工与制造等因素有关外,还取决于零部件的结构与性能,尤其是关键件的材料性能。零件的性能由许多因素确定,其中材料因素(材料的成分、组织与性能)、加工工艺因素(各加工工艺过程中对零件性能的影响)和结构因素(零件的形状、尺寸、与连接件的关系等)起主要作用,此外,使用因素也起较大作用。在结构因素和加工工艺因素正确合理的条件下,大多数零件的体积、质量、性能和寿命主要由材料因素所决定。

材料的性能是指材料的使用性能和工艺性能。材料的使用性能——材料在使用过程中所具有的功用,包括力学性能和理化性能。材料的力学性能——抗各种外力的能力,常用的材料力学性能指标及说明见表 1-1-1。

表 1-1-1 常用的力学性能指标及说明

力学性能	性能指标		说 明
	符号	名称	
强 度	σ_b	抗拉强度 (强度极限)	试样在拉断前承受的最大应力值
	σ_s	屈服强度 (屈服极限)	材料开始产生屈服现象的应力
	$\sigma_{0.2}$	条件屈服强度 (条件屈服极限)	对于没有屈服现象的材料,工程中规定试样发生标距长度 0.2% 的残余塑性变形量时所对应的应力值
	σ_{-1}	疲劳强度 (疲劳极限)	材料经受多次(钢为 10^7 次、有色金属为 10^8 次)对称循环交变应力作用而不发生破坏的最大应力值

(续)

力学性能	性能指标		说 明
	符号	名称	
塑 性	δ δ_5	延伸率	试样拉断后, 标距长度的增加量与原标距长度的百分比, 试样长度与直径之比为 5 时, 用 δ_5 表示
	ψ	断面收缩率	试样拉断处, 横截面积减缩量与原横截面积的百分比
硬 度	HBW (HBS)	布氏硬度	使淬火钢球(或硬质合金球)压入材料表面, 在单位压痕球面积上受的载荷。一般用于测量 HB < 450 较软材料、毛坯、成品的硬度
	HRC	洛氏硬度	以 120°角金刚石圆锥压头压入材料表面, 按压痕深度衡量硬度值可直接从硬度计表盘上读数, 一般用于测量经过淬火的钢件等
	HV	维氏硬度	用正四棱锥体金刚石压头压入试样表面, 所施加的载荷与压痕表面积的比值。一般用于测量经表面处理的表面层硬度或薄件的硬度
韧 性	α_k	冲击韧性 (冲击值)	一次冲断试样缺口处单位截面积上所消耗的功
断裂韧性	K_I	断裂韧性	在断裂力学中, 用来研究材料抗裂纹扩展能力的性能指标。
弹 性	σ_e	弹性极限	材料承受最大的弹性变形时所对应的应力值
	E	弹性模量	弹性范围内应力与应变的比值, 表征金属对弹性变形的抗力

材料的理化性能是指材料的物理性能——表征材料固有的物理特征, 如密度、熔点、热膨胀性、导电性等等; 材料的化学性能——表征材料抗介质侵蚀的能力, 如耐酸性、耐碱性、抗腐蚀性、抗氧化性等。

材料的工艺性能——指制造加工过程中材料适应制造加工的能力, 反映材料制造加工的难易程度, 如铸造性、可锻性、可焊性、热处理工艺性等。

材料的性能指标是设计、制造零件和工具的重要依据。

3. 工程材料的类别及主要特征

1) 工程材料的类别

现代工程材料种类繁多, 有许多不同的分类方法。工程中使用的材料常按化学组成分为四大类, 如图 1.1.1 所示。

2) 主要特征

上述四种不同的工程材料的主要特征如下:

(1) 金属材料的特征: 金属材料因具有金属键(个别含有一定量的共价键)而使其具有特殊的综合性能, 工程应用的金属材料大多在具有较高强度的同时, 还具有高度的耐热性、良好的导热导电性、特有的金属光泽、优良的工艺性能和通过热处理及表面处理可大幅度改变其原有性能的特性等, 故工程应用十分广泛。

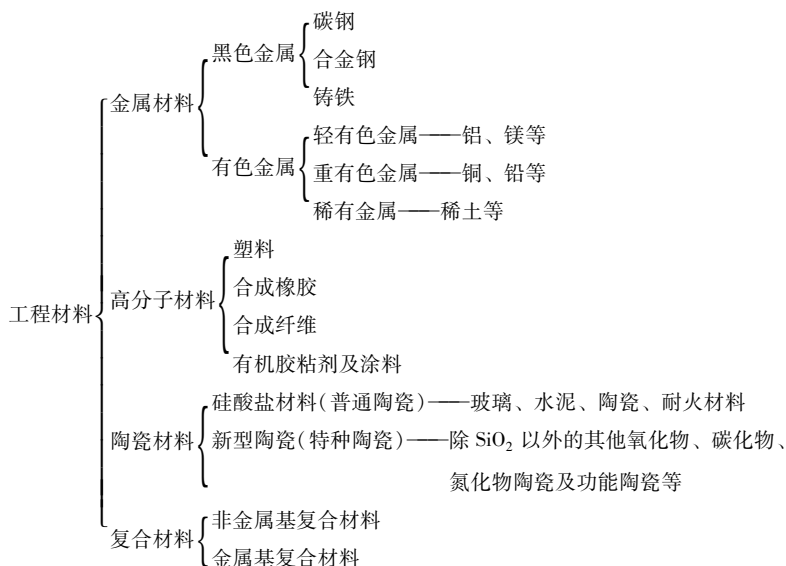


图 1.1.1 工程材料类别分类

(2) 有机高分子材料的特征：有机高分子是由许多小分子单体经聚合反应(以共价键结合为主)而形成。高分子材料(也称高聚物)大分子主链内原子间的强共价键及大分子链间的弱分子键的结合特征，使其具有一系列不同的特点如密度小，强度低(但比强度高，甚至高于钢铁)，低的弹性模量，较高的弹性，优良的电(绝缘)性能，优良的减磨、耐磨和自润滑性能，优良的耐腐蚀性能(甚至胜过一般的不锈钢)，优良的透光性和隔热、隔音性，可加工性好(可用各种方法成形及加工)等，因此它在工业中得到广泛应用。但绝对强度、刚度水平低，不耐热(小于 300℃)，可燃，易老化，使其应用又受到一定限制。

(3) 陶瓷材料的特征：陶瓷材料由一种或多种金属和非金属元素形成的具有强离子键或共价键的化合物，主要为由氧化物、碳化物、氮化物以及硅酸盐等物质组成的材料，由传统硅酸盐材料演变而来。该种工程材料熔点高、硬度高、化学稳定性高以及极高的弹性模量，具有耐高温、耐腐蚀、耐磨损、绝缘、热膨胀系数小等优点，在现代工业中已得到愈来愈广泛的应用。但抗压不抗拉，脆性大及不易加工成形使其应用受到一定限制。

(4) 复合材料的特征：由两种或两种以上物理性质和化学性质不同的物质经人工组成的兼有各组成物性能的一种多相固体材料，具有组成它的单一材料所不具备的性能，而各组成物间仍保持一定的界面。复合材料能充分发挥其组成材料的各自长处，又在一定程度上克服了它们的弱点，其成分、性能可较大范围地人为调整设计，并且材料的合成与产品的成形大多同时进行，一次完成，如常见的钢筋混凝土、沥青路面、汽车轮胎、玻璃钢制品、硬质合金刀片、甚至混纺的布料等。按基体的不同分树脂基、金属基、陶瓷基三类，具有广阔的应用前景。

二、本章重点

(1) 熟悉工程材料性能的三个方面的(力学、理化、工艺)；对表征材料的各种力学性能指标要认识并能解释其物理意义，其中重点是 σ_b 、 σ_s ($\sigma_{0.2}$)、 σ_e 、 σ_{-1} 、 δ 、 α_k 、HB、

HRC；熟悉布氏硬度和洛氏硬度各自的优缺点、相互关系和应用场合。

(2) 熟悉各类工程材料的主要特征。

第2章 材料的内部结构、组织与性能

一、内容提要

材料的种类千千万万，性能也各有不同，但影响材料性能的内在因素大致相同，分别是：化学成分、内部结构和内部组织（指材料内拥有的结构类型以及其数量、形状、大小和分布，其他物质（如夹杂物等）和现象（如气孔、缩孔、微裂纹等）的存在状况），故人们常说成分和组织。通常，材料的理化性能主要取决于成分，而力学和工艺性能既取决于成分又取决于组织。材料性能与成分和组织的关系就像数学中的复合函数关系： $P=f(x, y)$ ，其中 $y=y(n_1, n_2, n_3, \dots)$ ，可见，只要改变或改善任一个因素（自变量），都将引起材料性能的变化。

1. 材料的内部结构（简称材料的结构）

绝大多数工程材料的使用状态为固态，固态材料（物质）的结构即构成材料的原子（或分子）在三维空间的结合和排列状况。

1) 金属材料（纯金属和合金的统称）

绝大多数金属材料的结构为晶体结构，晶体内部的原子（或离子）在三维空间有规则的结合和排列，使之具有：①规则的几何外形；②确定的熔点；③各向异性。而非晶体中，原子是散乱排列的，故不具备以上特性。

由X射线结构分析表明，大多数纯金属呈体心立方、面心立方和密排六方等这三种典型的结构，其基本的结构参数见表1-2-1。

表1-2-1 三种典型金属晶体结构小结

金属名称	晶格类型	晶格特征	晶胞中原子数	原子半径	配位数	致密度/%
Cr、Mo、W、V α -Fe、 δ -Fe	体心立方 bcc	$a=b=c$ $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$	2	$3^{1/2} a/4$	8	68
Al、Cu、Ni、 γ -Fe	面心立方 fcc	$a=b=c$ $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$	4	$2^{1/2} a/4$	12	74
Mg、Cd、Zn、 Be	密排六方 hcp	$a=b \neq c$ $\alpha=\beta=90^\circ$ $\gamma=120^\circ$	6	$a/2$ ($c/a=1.633$)	12	74

纯金属具有较好的导电、导热等理化性能，但其力学性能一般较低，价格偏高，在工业上很少作为结构件材料使用。实际中大量使用的都是由两种或两种以上元素组成的具有金属特性的物质——合金，合金的结构（相结构）及特点见表1-2-2。

表 1-2-2 合金的相结构及特点

合金相结构类别	晶体学特征	性 能 特 点
固溶体 (间隙、置换)	保持溶剂组元的晶体类型	比纯金属相的强硬度高, 一定的塑韧性, 常作为结构件材料内部组织中基本主要的组成相
金属间化合物 (正常价、电子、间隙)	具有与组成组元不相同的晶体结构	多数性硬而脆, 熔点高, 常作为材料(尤其是工模具材料)内部组织中的强化相。

金属的许多性能及金属中发生的许多现象都与金属晶体中的晶面和晶向有密切关系。

实际金属材料晶体内部的原子排列和结合并不像理想晶体那样规则和完整, 总是存在着一些原子偏离理想规则的区域, 此即晶体缺陷(点缺陷、线缺陷和面缺陷)。这些缺陷造成了实际晶体的不完整性, 并对金属的许多性能产生极其重要的影响。

2) 有机高分子材料

组成高分子材料的分子链的聚集状态有晶态(分子链在空间规则排列, 如折叠状或平行状等), 部分晶态(分子链在空间部分规则排列)和非晶态(分子链在空间无规则排列, 亦称玻璃态或无定形态)。

在实际生产中获得完全晶态的聚合物是很困难的, 大多数聚合物都是部分晶态或完全非晶态。通常用聚合物中结晶区域所占的重量或体积百分数即结晶度来表示聚合物的结晶程度, 聚合物的结晶度变化范围很宽, 为 30% ~ 90%, 特殊情况下可达 98%, 而一个大分子链可以同时穿过许多晶区和非晶区。一般情况下, 结晶度高的高聚物, 其强度、硬度、密度、耐热性、耐蚀性均较高, 但弹性、塑性、透明性则有所下降。

3) 陶瓷材料

陶瓷材料一般均为多组元系, 其组成相可分为固溶体和化合物两大类, 但其具体内容和组织组成物要比金属的金相组织复杂得多。

陶瓷材料的结构由晶体相、非晶体相和气相构成, 而晶体相是最主要的组成相。

2. 晶体材料的相图与组织形成

1) 金属的凝固

由液体转变成固体的过程, 称为凝固; 若凝固所得到的固体为晶体, 则称为结晶。通常, 金属在固态下均是晶体, 故金属的凝固又叫金属的结晶。

结晶过程的推动力是液相和固相之间要有自由能差(ΔF), 即结晶过程需要过冷。过冷是金属结晶的必要条件。金属结晶包括形核和长大两个过程。金属结晶的结果是形成由许多晶粒(相互间位向不同的小晶体)所组成的多晶体组织。由于细晶粒材料具有较好的常温力学性能, 因而细化晶粒就成为结晶过程中控制组织以提高使用性能的一个重要手段。

金属结晶的基本规律是研究金属内部组织转变的基础。结晶过程中形核及长大的概念以及结晶的规律, 在固态相变中也具有普遍意义。

大多数金属在晶态时只有一种晶格类型, 其晶格类型不随温度而改变。少数金属(如铁、锡、钛等)在晶态时, 其晶格类型会随温度而改变, 这种现象称为同素异构(或异晶)转变。其中, 从液态变为晶态的过程称为结晶(一次结晶), 从一种晶态变为另一种晶态的过程称重结晶(二次或三次结晶)。一般情况下, 材料的相变是一形核、长大的原子扩散或聚集过程, 并伴有相变潜热的产生或吸收, 以及体积的变化。

2) 二元合金结晶相图

由于合金具有强度大、硬度高、韧性好、耐磨、耐蚀、耐热等优良性能,因此在工程上使用的金属材料绝大多数是合金。二元合金是最简单、最基本的合金。

(1) 组织与相的关系和区别。相是按其物质的化学成分和晶体结构的基本属性来划分的。相是指材料中结构相同、化学成分及性质均一的组成部分,相与相之间有界面分开。因此,凡是化学成分相同,晶体结构与性质相同的物质,不管其形状是否相同,不论其分布是否相同,统称为一个相。

组织一般是指是用肉眼或在显微镜下所观察到的材料内部所具有的某种形态或形貌,实质上它是一种或多种相按一定方式相互结合所构成的整体的总称。组织是显微尺度,结构是原子尺度。相构成了组织,组织决定了性能,这是一个重要的观点。

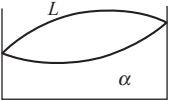
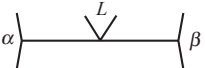
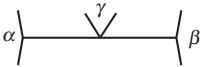
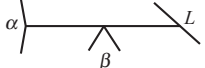
合金的组织是由单相固溶体或化合物组成,也可由一个固溶体和一个化合物或两个固溶体和两个化合物等组成。正是由于这些相的形态、尺寸、相对数量和分布的不同,才形成了各种各样的组织。组织可由单相构成,也可由多相构成。组织是材料性能的决定因素。在相同的条件下,不同的组织对应着不同的性能。

人们把在合金相图分析中出现的“显微组织”称为组织组分。实际上相组分就表示“相”,组织组分就表示“组织”。

(2) 二元合金相图。合金相图是合金成分、温度与合金系所处状态间关系的简明图解。它反映了合金系在给定条件下的相平衡关系,是研究相与组织转变规律的重要工具。

与纯金属不同的是,在二元合金系中,随着组成元素加入量的变化,合金中的相和组织也要发生相应改变,根据其组织转变规律及性能特征来区分相图,并确定反应类型,归纳见表 1-2-3。

表 1-2-3 二元合金相图

相图类型	图形特征	转变式	说 明
匀晶转变		$L \rightarrow \alpha$	一个液相经过一个温度范围转变为一种固相
共晶转变		$L \rightarrow (\alpha + \beta)$	恒温下, 由一个液相 L 同时结晶出两个不同成分的固相 α 和 β , 构成机械混合物(称共晶体)
共析转变		$\gamma \rightarrow (\alpha + \beta)$	恒温下, 由一个固相同时结晶出两个不同成分的固相 α 和 β , 构成机械混合物(称共析体)
包晶转变		$\alpha + L \rightarrow \beta$	恒温下, 由液相和一个固相 α 相互作用生成一种新的固相 β

在对各类相图的认识和应用中,要特别注意区分各种相与组织,分析典型合金的结晶过程,画出结晶过程示意图,并应用杠杆定律计算平衡状态下相与组织的相对量。

(3) 铁碳合金相图。碳钢和铸铁是工业中应用范围最广的金属材料,它们都是以铁和

碳为基本组元的合金，通常称之为铁碳合金。铁是铁碳合金的基本成分，碳是主要影响铁碳合金性能的成分。虽然碳钢和铸铁都是铁碳合金，但性能却很不相同，这可以从铁碳合金相图中得到充分的解释。所以铁碳合金相图是研究钢铁材料的有力工具，是研究碳钢和铸铁成分、温度、组织及性能之间关系的理论基础，也是制定各种热加工工艺的依据。

铸铁的含碳量最高不超过 5%，再高就变得很脆，而无实用价值。所以作为铁碳合金二元相图，左侧的组元为 Fe，右侧的组元取 Fe_3C （即 $w_{\text{C}} = 6.69\%$ ），已经是足够的了。所以铁碳合金相图实际上是 Fe- Fe_3C 相图。本章要求熟练掌握下列内容：

① 熟记铁碳相图，能默画出铁碳相图，记住重要点的温度、成分和意义（B、C、E、F、P、S 点）以及一些重要线的意义（ECF、PSK、GS、ES 线）。

② 弄清铁碳合金中的基本相和基本组织的本质、特征和性能。

固态下，铁碳合金中的基本相有高温 δ 铁素体、铁素体、奥氏体和渗碳体四种，前三种属于固溶体，后者属于化合物。固溶体具有好的塑性和韧性，而化合物的硬度高脆性大。

由基本相所形成的铁碳合金的基本组织有铁素体、奥氏体、渗碳体（一次、二次、三次渗碳体之分）、珠光体、莱氏体（有低温与高温莱氏体之分）五种。其特点归纳列于表 1-2-4，表 1-2-5。

③ 运用铁碳相图，分析典型成分的铁碳合金的结晶过程（用冷却曲线表示），计算平衡组织中组成相及组织组成物的相对质量，参见表 1-2-6。

④ 熟悉铁碳合金室温平衡组织示意图，正确识别各组织组成物和组织特征。如：过共析钢（T12 钢）室温平衡组织为 $\text{P} + \text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}$ ，其组织特征是白色网状 $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}$ 包围在层片状 P 周围。

⑤ 铁碳合金的成分组织一性能之间的关系。对于亚共析钢，根据碳含量可求出组织组成物的相对质量，进而可估算其性能（强度、硬度、塑性）。

⑥ 弄清一些重要概念：同素异构转变、奥氏体、珠光体、低温莱氏体、共析渗碳体、二次渗碳体。

表 1-2-4 铁碳合金相图的典型组织、特性

名称		符号	晶体结构	组织类型	定义	$w_{\text{C}}/\%$	存在温度范围/ $^{\circ}\text{C}$	组织形态特征	主要力学性能
铁素体		F	BCC	间隙固溶体	C 溶于 $\alpha - \text{Fe}$ 中	≤ 0.0218	≤ 912	块、片状	塑、韧性良好
奥氏体		A	FCC	间隙固溶体	C 溶于 $\gamma - \text{Fe}$ 中	≤ 2.11	≥ 727	块、粒状	塑、韧性良好
渗碳体	一次	$\text{Fe}_3\text{C}_{\text{I}}$	复杂晶格的金属化合物	—	从 L 中析出	—	≤ 1227	粗大片、条状	硬而脆
	二次	$\text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}$	—	间隙化合物	从 A 中析出	6.69	≤ 1148	网状	硬而脆
	三次	$\text{Fe}_3\text{C}_{\text{III}}$	—	—	从 F 中析出	—	≤ 727	断续细片状	降低钢的塑性
珠光体		P	(F + Fe_3C) 两相组织	机械混合物	从 A 中析出 F + Fe_3C	0.77	≤ 727	层片、粒状	强韧性良好

(续)

名称		符号	晶体结构	组织类型	定义	$w_c/\%$	存在温度范围/ $^{\circ}\text{C}$	组织形态特征	主要力学性能
莱氏体	高温	Ld	($\text{Fe}_3\text{C} + \text{A}$) 两相组织	—	从 L 中析出 $\text{A} + \text{Fe}_3\text{C}$	—	727 ~ 1148	短杆、或 鱼骨状	硬而脆
	低温	Ld'	($\text{Fe}_3\text{C} + \text{P}$) 两相组织	机械混合物	因 Ld 中的 A 转变而得 ($\text{P} + \text{Fe}_3\text{C}_{\parallel}$) + Fe_3C	4.3	≤ 727	短杆、或 鱼骨状	硬而脆

表 1-2-5 铁碳合金中的渗碳体

名称	符号	母相	形成温度/ $^{\circ}\text{C}$	组织形态	分布情况	对性能的影响
一次渗碳体	$\text{Fe}_3\text{C}_{\text{I}}$	L	> 1148	粗大板条状	在莱氏体上	增加硬脆性
二次渗碳体	$\text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}$	A	727 ~ 1148	网状	在 A 或 P 晶界上	严重降低强度和韧性
三次渗碳体	$\text{Fe}_3\text{C}_{\text{III}}$	F	< 727	短条状	数量极少(沿晶界)	降低塑韧性(常忽略不计)
共晶渗碳体	$\text{Fe}_3\text{C}_{\text{共晶}}$	Lc	1148	块、片状	是莱氏体的基本相	产生硬脆性
共析渗碳体	$\text{Fe}_3\text{C}_{\text{共析}}$	As	727	细片状	与片状 F 构成层片状 P	提高综合力学性能

表 1-2-6 铁碳合金的分类、相组分与组织组分的计算

Fe - C 合金	组织	相组成		组织组成物	
纯铁	F	F	100%	F	100%
亚共析钢	F + P	F, Fe_3C	$\text{Fe}_3\text{C}\% = \text{C}/6.69 \times 100\%$ $\text{F}\% = 1 - \text{Fe}_3\text{C}\%$	F, P	$\text{P}\% = \text{C}/0.77 \times 100\%$ $\text{F}\% = 1 - \text{P}\%$
共析钢	P			P	100%
过共析钢 亚共晶白口铸铁	$\text{P} + \text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}$ $\text{P} + \text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}} + \text{Ld}'$			P, $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}$	$\text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}\% = (\text{C} - 0.77)/(6.69 - 0.77) \times 100\%$ $\text{P}\% = 1 - \text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}\%$
				P, $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}$, Ld'	$\text{Ld}'\% = (\text{C} - 2.11)/(4.3 - 2.11) \times 100\%$ $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}\% = (2.11 - 0.77)/(6.99 - 0.77) \times (1 - \text{Ld}'\%)$ $\text{P}\% = 1 - \text{Ld}'\% - \text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}\%$
共晶白口铸铁	Ld'			Ld'	100%
过共晶白口铸铁	Ld' + $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{I}}$			Ld', $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{I}}$	$\text{Fe}_3\text{C}_{\text{I}}\% = (\text{C} - 4.3)/(6.69 - 4.3) \times 100\%$ $\text{Ld}'\% = 1 - \text{Fe}_3\text{C}_{\text{I}}\%$

材料的组织取决于其成分及工艺过程。

二、本章重点

(1) 晶体结构的基本概念, 三种典型晶格(体心立方、面心立方和密排穴方)的原子排列规律及基本参数。

(2) 实际金属中的三类晶体缺陷(点、线、面缺陷)。

(3) 材料的结构及特点。

(4) 过冷度的概念, 过冷度对结晶过程的影响规律。

(5) 结晶过程中形核和长大的概念, 自发形核、非自发形核、树枝状长大。

(6) 获得细晶粒的方法。

(7) 熟练掌握铁碳合金相图的全貌, 要能默画出铁碳合金相图, 并能标出图上的特性点(G 、 C 、 E 、 F 、 P 、 S)、线(ECF 、 PSK 、 GS 、 ES)的温度和成分, 能填上各区域的相和组织的组成。

(8) 画冷却曲线, 分析典型铁碳合金的结晶过程, 应用杠杆定律计算在室温下平衡组织中的相和组织组成物在整个合金中占的质量百分数, 特别是钢的部分。

(9) 弄清铁碳合金的成分、组织与性能之间关系, 即随含碳量的变化, 其组织和性能的变化规律(图 1.2.1)。

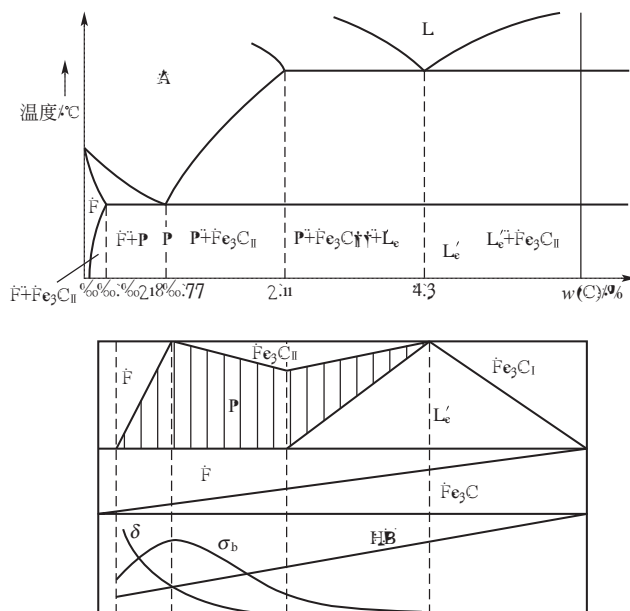


图 1.2.1 铁碳合金的成分、组织与性能关系图

第 3 章 改变材料性能的主要途径

一、内容提要

材料的性能是由其化学成分和内部组织结构决定的, 通过改变材料的成分或采用不同

的加工处理工艺来改变其组织结构以改变材料性能,后者是工程上采用的主要手段。

1. 金属的热处理

热处理是将固态金属或合金在一定介质中加热、保温、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(尤其是钢)的使用性能和加工性能的一种非常重要的工艺方法。在机械工业中,绝大部分重要零件都要经过适当的热处理才能满足使用要求。

本部分内容理论联系实际,具有重要的应用价值,也是本课程的重点内容之一。

本部分的主要内容可分为热处理原理和热处理工艺两部分。

1) 热处理原理

以过冷奥氏体的等温转变曲线(C曲线或TTT曲线)为中心,以钢的化学成分、组织结构与性能之间的关系为主线,分析钢中的各种组织转变规律。其主要内容是:钢在加热时的奥氏体化过程;钢在冷却时由过冷奥氏体在不同条件下转变为各种产物(珠光体型、贝氏体型和马氏体型)的转变过程;钢的回火转变过程。学习中要注意弄清各种不同成分的钢在不同冷却条件下所形成各种组织的特征及其与性能的关系,见表1-3-1。

表 1-3-1 过冷奥氏体等温转变的类型、产物、性能及特征

组织名称	符号	转变温度/℃	相组成	转变类型	特 征	HRC
珠光体型	珠光体	P	A1 ~ 650	扩散型 (铁原子和碳原子都扩散)	片层间距 0.6 ~ 0.8 μm, 500 倍分清	10 ~ 20
	索氏体	S	650 ~ 600		片层间距 0.25 μm, 1000 倍分清细珠光体	25 ~ 30
	托氏体	T	600 ~ 550		片层间距 0.1 μm, 2000 倍分清极细珠光体	30 ~ 40
贝氏体型	上贝氏体	B _上	550 ~ 350	半扩散型 (铁原子不扩散, 碳原子扩散)	羽毛状: 在平行密排的过饱和 F 板条间不均匀分布短杆(片状) Fe ₃ C。脆性大, 工业上不应用	40 ~ 45
	F 贝氏体	B _下	350 ~ 240		针状: 在过饱和 F 针内均匀分布(与针轴成 55° ~ 65°)细小颗粒 ε 碳化物。具有较高的强度、塑性、硬度、塑性和韧性	50 ~ 60
马氏体	针状马氏体 $w(C) \geq 1.0\%$ (高碳、孪晶)	M	240 ~ (-50)	非扩散型 (铁原子和碳原子都不扩散)	① M 变温形成, 与保温时间无关; ② M 生长率非常大(达 10 ³ m/s); ③ M 转变不完全性, $w(C) \geq 0.5\%$, 钢中存在残余奥氏体; ④ M 硬度与含碳量有关	64 ~ 66
	板条马氏体 $w(C) \leq 0.2\%$ (低碳、位错)					30 ~ 50