

* 高等院校材料科学与工程专业规划教材 *

工程材料

与成形技术基础



王少刚 主编
郑勇 汪涛 副主编



GCCL



国防工业出版社
National Defense Industry Press

高等院校材料科学与工程专业规划教材

工程材料与成形技术基础

王少刚 主编

郑勇 汪涛 副主编

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

《工程材料与成形技术基础》是高等工科院校机械类或近机械类各专业学生必修的一门重要专业技术基础课。本书中内容包含工程材料与成形工艺基础两大部分。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、金属热处理原理与工艺、组织结构、使用性能及实际应用等方面的基础理论和基本知识,为机械零件及工程结构等的设计、制造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。材料成形工艺基础部分的主要任务是讲述金属机件成形工艺,主要包括:金属材料铸造、压力加工和焊接生产过程的基本原理、材料的热加工工艺性能、各种热加工工艺的特点和适用范围、机械零件的结构工艺性等知识;此外,为了适应经济与社会发展,拓宽学生的知识面,教材中有意识地增加了部分先进的材料成形工艺简介方面知识,具有一定的时代特色。

本书可作为高等工科院校机械类及机电类专业本科生使用教材,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程材料与成形技术基础/王少刚主编. —北京:国防工业出版社,2008. 2

高等院校材料科学与工程专业规划教材

ISBN 978-7-118-05521-4

I. 工... II. 王... III. 工程材料—成型—高等学校—教材 IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 199592 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 22½ 字数 522 千字

2008 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 36.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

本书是根据教育部机械类及相关专业对该课程的教学要求,结合学校相关专业的实际需要,并充分考虑该课程的教学规律以及学生的学习特点、规律编写而成的。

《工程材料与成形技术基础》是机械工程类、机电工程类、飞行器设计类、飞行器环境控制与救生类、动力工程类、动力装置控制类、民航飞机与发动机、汽车与摩托车、工业管理工程类专业一门重要的专业技术基础课。随着科学技术的不断发展,各种新材料、新工艺不断涌现,此外,为了与国际接轨,国家有关部门对一些材料的牌号标准进行了多次修订和补充。基于这种情况,组织编写一本具有国防特色、适应本科专业教学的材料及成形工艺教材就成为急需。

本书在编写过程中,始终贯穿一条主线,即材料的组成—结构—性能—应用,为了保持教材内容的先进性,书中既吸纳了多年的教学改革成果,又融入了最新的科研成果,尤其强调教材的系统性、科学性、先进性和实践性,给学有余力的同学预留了很大的学习空间,增加了部分拓展内容,教师在教学过程中可根据专业需要对相关内容进行取舍,书中全面贯彻最新的国家标准。此外,为了学生便于复习,全书每章中均进行了总结,给出了相关的一些重要概念和内容提要以及一定量的复习思考题,有利于学生理清思路,把握重点和难点。

本书由长期担任《工程材料学》、《工程材料与热加工基础》和《热加工工艺基础》等本科生课程的教师编写。在长期的教学和科研工作中,他们积累了丰富的教学经验,充分发挥了每位教师的教学科研专长,力求做到理论联系实际,充分体现目前教育教学改革提出的“厚基础、宽口径、强能力、高素质”培养目标要求,全书在注重知识性和实用性以及结构完整性的同时,考虑到学科的发展,补充了工程材料及材料成形工艺方面的新技术、新工艺,有利于培养学生的创新思维和工程意识,以提高学生的分析问题和解决问题的能力。

本书由南京航空航天大学材料科学与技术学院王少刚任主编,由南京工业大学材料学院马立群教授主审。参加本教材编写的人员有:王少刚(绪论和第11章)、郑勇(第1章)、汪涛(第2章)、潘蕾(第3章和第8章第3节)、顾

冰芳(第4章和第6章)、陈铭(第5章)、刘子利(第7章和第9章)、苏新清(第8章第1节和第2节)、陈明和(第10章)、冯晓梅(第12章)。在全书统稿过程中得到了封小松博士的大力支持,在此表示感谢!

本书在编写过程中,参阅并引用了国内外大量相关的文献、手册及教材,在此谨向原作者表示衷心的感谢!

由于教材编写时间仓促,加上编者水平有限,书中缺点和错误之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

编者

2007年12月

目 录

绪论	1	第3章 金属的结晶、变形与再结晶	40
第1章 工程材料及力学性能	5	3.1 金属的结晶及铸件晶粒大小控制	40
1.1 工程材料的分类	5	3.1.1 冷却曲线及结晶一般过程	40
1.2 工程材料的主要力学性能	7	3.1.2 同素异构转变	42
1.2.1 单向静拉伸载荷下材料的力学性能	7	3.2 塑性变形与再结晶	42
1.2.2 硬度	10	3.2.1 塑性变形方式及机制	43
1.2.3 材料在冲击载荷下的力学性能	13	3.2.2 塑性变形对金属组织与性能的影响	48
1.2.4 材料在疲劳载荷下的力学性能	14	3.2.3 变形金属加热时的组织与性能	51
1.2.5 材料的高温力学性能	16	3.3 金属的热加工	52
1.2.6 断裂韧性	19	3.3.1 热加工与冷加工的区别	52
本章小结	21	3.3.2 热加工时组织和性能的变化	52
思考题与习题	22	本章小结	53
第2章 材料的微观结构	24	思考题与习题	54
2.1 原子键合机制	24	第4章 二元合金相图	57
2.2 金属晶体结构	26	4.1 二元合金相图的建立	57
2.2.1 晶体结构与空间点阵	27	4.2 二元合金相图的基本类型	58
2.2.2 常见金属的晶格类型	28	4.3 相图与合金性能之间的关系	64
2.2.3 实际金属的晶体结构	30	4.4 铁碳合金相图	65
2.2.4 晶向指数与晶面指数	30	本章小结	75
2.2.5 晶体缺陷	32	思考题与习题	75
2.3 合金的相结构	35		
本章小结	37		
思考题与习题	38		

第5章 金属热处理	77	7.2.1 镁的性质	153
5.1 钢的热处理原理	77	7.2.2 镁的强化机制和合金 元素的作用	154
5.1.1 钢在加热时的组织 转变	77	7.2.3 变形镁合金和铸造 镁合金	156
5.1.2 钢在冷却时的组织 转变	79	7.2.4 镁合金的特点和 应用	157
5.2 钢的热处理工艺	83	7.3 钛及钛合金	158
5.2.1 退火与正火	84	7.3.1 钛的特性	159
5.2.2 淬火与回火	85	7.3.2 钛合金的合金化 及其分类	159
5.3 表面热处理	91	7.3.3 钛及钛合金的热 处理	160
5.3.1 表面淬火	91	7.4 铜及铜合金	161
5.3.2 化学热处理	93	7.4.1 纯铜	161
本章小结	95	7.4.2 黄铜	162
思考题与习题	96	7.4.3 青铜	165
第6章 常用工程金属材料	98	本章小结	167
6.1 铁碳合金	98	思考题与习题	167
6.1.1 碳钢	98	第8章 常用非金属材料及复合 材料	169
6.1.2 铸铁	101	8.1 高分子材料	169
6.2 合金钢	112	8.1.1 高分子化合物的 基本概念	169
6.2.1 概述	112	8.1.2 高分子材料的结构	169
6.2.2 合金元素在钢中的 主要作用	113	8.1.3 高分子材料的性能 特点	172
6.2.3 合金结构钢	116	8.1.4 常用高分子材料 简介	173
6.2.4 合金工具钢	126	8.1.5 高分子材料的成型 加工	177
6.2.5 特殊性能钢	133	8.2 陶瓷材料	179
本章小结	144	8.2.1 陶瓷的概念及分类	179
思考题与习题	145	8.2.2 陶瓷材料的物质结构 和显微结构	179
第7章 有色金属及其合金	146	8.2.3 陶瓷材料的性能 特点	180
7.1 铝及铝合金	146		
7.1.1 纯铝的性能特点与 应用	146		
7.1.2 铝合金的强化机制和 常用合金化元素的 作用	147		
7.1.3 形变铝合金	149		
7.1.4 铸造铝合金	152		
7.2 镁及镁合金	153		

8.2.4	陶瓷的制备工艺	181	10.5	锻件及冲压件的结构工艺性	267
8.3	复合材料	182	10.6	塑性成形新技术	272
8.3.1	复合材料的定义与分类	182		本章小结	281
8.3.2	复合材料的性能特点	184		思考题与习题	282
8.3.3	复合材料的成形工艺	185	第 11 章 焊接		283
8.3.4	常见复合材料及其应用	190	11.1	焊接成形理论基础	283
	本章小结	192	11.2	常用金属焊接方法	298
	思考题与习题	192	11.2.1	熔化焊	298
第 9 章 铸造		194	11.2.2	压力焊与钎焊	309
9.1	铸造工艺理论基础	194	11.3	常用金属材料的焊接性	313
9.1.1	铸造成形概述	194	11.4	焊接结构工艺性	317
9.1.2	合金的铸造性能	194	11.5	焊接成形新技术	323
9.2	砂型铸造	204		本章小结	327
9.2.1	造型与造芯方法	205		思考题与习题	327
9.2.2	铸造工艺设计	209	第 12 章 工程材料及毛坯成形方法选择		329
9.2.3	铸造成形工艺设计示例	214	12.1	工程材料的选择	329
9.3	特种铸造	215	12.1.1	机械零件的失效分析	329
9.4	液态成形新技术	224	12.1.2	材料的选择原则及应用实例	332
	本章小结	227	12.2	毛坯成形方法选择	339
	思考题与习题	228	12.2.1	毛坯成形方法选择原则	339
第 10 章 压力加工		230	12.2.2	毛坯的分类	341
10.1	压力加工的理论基础	231	12.2.3	毛坯成形选择应用实例	343
10.2	自由锻	238		本章小结	348
10.3	模锻	246		思考题与习题	349
10.3.1	锤上模锻	247	参考文献		350
10.3.2	压力机上模锻	253			
10.3.3	胎模锻造	257			
10.4	板料冲压	258			

绪 论

工程材料与成形技术基础,是高等工科院校机械类或近机类各专业学生必修的一门重要的专业技术基础课程,主要讲述常用工程材料及机械零件成形工艺方法,即从选择材料到毛坯或零件成形的综合性课程。通过本课程的学习,可获得机械零件制造过程中常用的工程材料及材料成形工艺方面的知识,培养学生工艺分析的能力,了解现代工程材料及其成形的先进工艺、技术和发展趋势,为后续课程学习和工作实践奠定必要的基础。

任何设备或机器,从大型产品,如飞机、船舶、火车机车、大型发电机组,到细微的零件产品,如微电子产品、仪器、仪表等,都是由许多零件组装而成。这些零件无一例外的都是由一定的材料经过加工成形而获得的。其所采用的材料或者由金属,或者由非金属,或者由两者的组合而构成。对于机器零件,传统的生产过程一般是先根据设计及使用性能要求合理选择材料,然后采用铸造、压力加工或焊接等成形工艺方法将材料制作成零件的毛坯(或半成品),再经切削加工制成尺寸符合技术要求的零件,有时还需经过热处理,最后将零件装配成为机器。材料选择、材料成形、切削加工及热处理这几个过程也会相互穿插进行。

由于机械零件的制造生产过程一般是把设计者的设想变为实际产品的过程,因此必须着重考虑以下两方面的问题:首先必须考虑用什么材料制造,通常由设计者根据零件的工作条件、工作环境、价格等因素做出选择;然后,还要决定用什么方法进行加工成形,以使用较高的效率,较低的成本获得符合设计的毛坯或零件。工程材料的选择是进行毛坯或零件生产的前提,而合理的加工成形工艺是获得最终的毛坯或零件产品的必经阶段。因此,设计和制造一个合格的零件或毛坯,首先需要对常用的工程材料有所了解,并根据实际情况进行材料选择;其次需要对常用的材料成形工艺特点和原理有深入的认识,以便选择合适的成形加工工艺。实际上,材料选择与成形工艺也是相互联系、不可分割的,必须综合起来进行考虑。

材料成形加工的主要任务是解决材料形成零件或零件毛坯、控制其内部组织与性能,以获得所需要的几何形状、尺寸和质量的毛坯件或零件。材料成形的工艺方法通常有液态成形(铸造)、塑性成形(压力加工)、连接成形(焊接)等方法。每种成形工艺都有自己的特点和适用对象,在对成形工艺进行选择时,需要综合考虑材料的种类、性能、零件的形状尺寸、工作条件和使用要求、生产批量和制造成本等多种因素,目标是技术上可行、质量上可靠、成本上低廉。而要合理选择毛坯种类和制造方法,就必须掌握各种材料的性能、特点、应用及其成形过程,包括各种成形方法的工艺实质、成形特点和选择原则等。因此,本课程的实质就是要解决两方面的问题,一是合理选材,这需要了解常用的工程材料的性能特点;二是选择材料成形工艺,主要包括铸造、锻压、焊接和热处理等。

通常,人们把“材料”定义为:能用于制造人类生活和生产中有用器件的物质。工程

材料则是现代制造工艺技术的研究对象。纵观人类利用材料的历史,从某种意义上讲,人类的文明史就是材料的发展史。每一种重要新材料的发现和使用,都将人类支配自然的能力提升到一个新的高度。材料科学中的每一次重大发现,都会引起生产技术的革命,大大加速社会发展的历史进程,给社会生产和人们生活带来巨大变化,把人类物质文明向前推进。在石器时代,人类就懂得如何利用岩石、动物的骨骼和皮毛、贝壳、木材等材料来制作工具。而人类使用金属材料的历史已经大约有 6000 年,我国早在公元前 3200 年到公元前 2300 年,就掌握了矿石炼铜、铜及青铜合金的精炼技术,并学会了采用铸造的方法来获得各种工具和武器,到商周时期则形成了灿烂的商周青铜文化。在公元前 600 多年,我国就发明了生铁和铸铁技术,在战国时代中期,用铸铁制造的农具、手工工具取代了青铜器而成为主要的生产工具,到汉代已有“先炼铁后炼钢”的技术,居世界领先地位。中国在铁器时代,为人类文明的进步做出了很大贡献。人类进入 15 世纪后,炼铁高炉在欧洲得到了迅速发展,炼钢技术在蒸汽机出现之后也得以快速发展。进入 20 世纪后半叶,新材料层出不穷,高分子材料、半导体材料、先进陶瓷材料和复合材料等被大量使用,材料的发展进入了丰富多彩的时代。从 20 世纪 70 年代开始,人们把材料、信息和能源作为构筑人类现代社会大厦的三大支柱,其中材料可以说是社会进步的物质基础与先导。通常,一个国家使用的材料品种或数量的多寡已经被用于作为衡量其科学技术和经济发展水平的重要标志。无论是交通、能源、航空航天、通讯信息、核工程、海洋工程、生物工程等领域都是建立在新材料开发的基础上的。以空间技术发展为例,如果没有各种耐高温材料、复合材料、烧蚀材料、涂层材料的研制成功,就很难想象今天航天飞机能够遨游太空,更不可能实现登月飞行;如果没有隐身材料的出现,就很难实现低空突防。专家预言,21 世纪材料科学技术的发展重点将朝着具有功能化、复合化、智能化、微型化及与环境相协调化特征的方向发展。

材料成形技术是一门研究如何利用加热或加压的方法将材料加工成机器零件或零件毛坯,并研究如何保证、评估、提高这些部件和结构的安全可靠度和寿命的技术科学。传统意义上的材料成形技术一般包括铸造成形、锻压成形、焊接成形,随着非金属和复合材料的广泛使用,非金属材料成形等工艺技术也获得了快速的发展。在大部分的材料成形过程中,材料除了发生几何尺寸的变化,还会发生成分、组织结构及性能的变化。因此材料成形学科的任务不仅是要研究如何使机器零件获得必要的几何尺寸,更重要的是要研究如何通过过程控制获得一定的化学成分、组织结构和性能,从而保证机器部件的安全可靠度和寿命。因此,材料成形技术不仅仅包括一些获得材料形状和尺寸的工艺过程,如铸、锻、焊等,也包括保证材料组织和性能的热处理工艺。

我国已经成为制造大国之一,“中国制造”的产品遍布全世界,仅次于美国、日本、德国而位居世界第四位。材料成形加工是制造业的重要组成部分,据统计,全世界 75% 的钢材要经过塑性加工,45% 的金属结构用焊接得以成形。因此,材料成形技术在现代工业发展中占据着重要的地位。近年来,我国的材料成形技术已有了突飞猛进的发展,在材料成形工业中取得了一系列成就,例如三峡水利工程中,其水电站的水轮机转轮直径 10.7m,高 5.4m,重达 440t,为世界最大、最重的不锈钢焊接转轮;同样,三峡水电站的电机定子座和蜗壳的结构也是巨大的,其中电机定子座直径 22m,高 6m,重 832t,是在我国焊接的最大钢结构机座;蜗壳进水口直径 12.4m,总重量 750t,为世界最大、最重的焊接蜗

壳。此外,还有西气东输工程中的石油管道铺设、300000t 超级大型原油轮、17900t 的半冷半压液化气船、总重量达千吨级且壁厚为 280mm 的大型热壁加氢反应器、直径 18m 高 22m 的真空空间环境模拟装置、“神舟”号载人飞船等都是材料成形工艺的重大成就。

人类社会进入新世纪之后,现代科学技术呈现着迅猛发展的势头,并且由于计算机、生物工程、空间技术、新材料、新能源等领域的科技进步以及学科的进一步交叉、融合,在某些方面已经逐渐形成一些新兴技术的主体,但材料科学在其中仍发挥着基础性和关键性的作用。比如飞机、火箭、卫星等,要求载重量更大,飞得更快、更高、更远;仪器、仪表和电子产品要求更精确、更可靠、寿命更长;汽车和火车等,要求更快捷、更安全、舒适和美观。这一切需要的满足无不根植于新材料的开发使用和新的加工成形技术的出现和发展。比如目前载重量最大的客机,欧洲空中客车的 A380 大型飞机,就大量采用了复合材料并使用了激光焊接来替代某些铆接结构,这使得飞机在保证安全性的前提下,自重得以大大降低,实现载重量的增加。从现代制造技术的发展过程可以发现,新世纪的材料与材料成形技术的发展具有如下特点:首先是新材料的出现使传统成形工艺的技术构成逐渐发生了变化;其次是新能源的出现和引入,使材料成形工艺具有了更大的灵活性和更多的选择。新材料的开发一方面对材料成形技术提出了新的要求,另一方面为制造新的材料成形工艺设备提供了可能。而新工艺设备的开发,可以使传统的成形工艺进一步得到改造,通过改善工艺条件、优化工艺参数等,可以实现加工工艺的高效化、精密化、强韧化和轻量化,形成优质、高效、低耗、轻污染的先进适用工艺。例如,随着新的工程材料的出现和发展,焊接技术从传统的以“焊钢”为中心,逐渐发展成连接工程塑料、工程陶瓷、复合材料,甚至是异种材料的综合连接技术。新能源的出现和引入材料成形加工领域,进一步扩展了材料成形工艺的加工范围。例如激光、电子束、离子束、超声波、电磁、射流等在材料成形加工中的使用,形成了全新的特种加工技术;此外,复合能源,比如激光与电弧、激光与等离子弧,以及激光与激光的组合,为材料的焊接、切割、塑性成形、表面处理等提供了更多的装备选择。这些变化使得传统的材料成形工艺在生产效率和加工精度等方面得到了大幅度提高。

综合来看,材料成形技术在 21 世纪的发展过程中,逐步形成“精密”、“快速”、“复合”、“优质”、“信息化”和“绿色”的特征。所谓精密成形技术,是使毛坯的形状、尺寸和表面质量更接近零件要求。随着微型传动机件、微型机器人、大规模集成电路、光电器件的发展,要求成形加工微细化和超精度化。从尺度上看,已进入亚微米和纳米技术领域,表现为近无加工余量的成形方法,如近净成形(Near Net Shape Technique)和净成形(Net Shape Technique)技术,包括近净铸造成形、精密塑性成形、精密焊接与切割、精密热处理、表面改性等领域,使机械零件具有精确的外形、高的尺寸精度和形位精度、好的表面粗糙度等。快速的成形技术特征表现为各种新型高效成形工艺不断涌现,生产效率的不断提高、新产品研制周期不断减少。复合的材料成形特征为多种新能源和能源载体被引入到成形加工工艺中,形成多种新型成形方法与改性技术,此外还表现为多种加工工艺的集成制造。优质的成形技术特征是指成形产品的近无缺陷、零缺陷。信息化的材料成形工艺特征是指在成形加工中大量应用各种信息和控制技术。绿色的材料成形特征是指成形加工向清洁生产方向发展。从以上的特征来看,现代科学的发展使材料成形技术的内容远远超出了传统的热加工范围。现代材料成形技术可拓展为:一切用物理、化学、冶金原理制造机器

部件和结构,或改进机器部件化学成分、微观组织及性能,并尽可能采用复合制造、绿色制造、信息化制造获得优质毛坯或零件的现代制造方法。尽管各种材料成形新技术、新工艺应运而生,新的制造理念不断形成,但是,铸造、锻压、焊接、热处理及机械加工等传统的常规成形工艺至今仍是量大面广、经济适用的技术。因此,通过采用各种技术手段对常规成形工艺不断改进和提高,以实现零件加工过程的高效化、精密化、轻量化和绿色化,具有很大的技术和经济意义。因此,对上述有关材料及加工成形基本理论知识的学习非常重要。

本课程的主要内容包括:

(1)工程材料:材料的性能、组织结构、化学成分以及它们之间的关系和改变材料性能的方法。常用工程材料的分类、性能特点、应用及选材方法等。

(2)材料成形工艺基础:主要包括液态成形(铸造)、塑性成形(压力加工)和连接成形(焊接)等近现代材料成形技术中共同的基本规律及物理现象本质,各种成形技术的基本原理和理论基础,材料成形过程中影响材料质量和制品性能的因素及缺陷形成原因,以及非金属材料 and 复合材料的性能特点和成形工艺简介。

通过本课程的学习,使学生对常用工程材料及材料成形过程和成形基本原理有较全面的了解;使学生真正建立起生产过程的基本知识,了解新材料的发展趋势,掌握现代制造和工艺方法,培养学生的工程素质、实践能力和创新设计能力。能从本质上认识和分析材料成形过程中所产生的实际问题和提出解决问题的途径;为今后学习具体零件或结构的工艺设计、其它制造成形技术的工艺方法、设备控制等课程,为开发新材料、新的成形工艺技术奠定坚实的理论基础。

本课程的教学目的及要求:

通过本课程学习,使学生达到以下基本要求:

- (1)了解工程材料的发展、分类及其在现代工业生产中的重要作用;
- (2)了解材料组成—结构—性能—应用之间的内在关系和规律,重点掌握材料的力学性能(强度、塑性和韧性等)、晶体结构(晶格类型和晶体缺陷等)、金属的结晶过程和塑性变形方式和规律;
- (3)重点掌握铁—碳相图、金属的热处理原理与工艺、以及各种常见强化金属材料的方式;
- (4)熟悉各种常用工程材料的牌号、成分特点、热处理特点及其在实际生产中的应用范围,达到能够合理选择材料以及正确制定热处理工艺;
- (5)了解和掌握铸造、锻压和焊接成形的理论基础,各种常见成形工艺方法的原理、特点及其适用范围,达到能够在实际生产中合理选择毛坯成形工艺。

本教材适宜的学时数为40~60学时,部分内容可根据各专业不同培养要求作为选学内容。由于本课程内容较多,涉及面宽,知识点多、细、全,课程性质侧重叙述性,因此,要求教师在课堂讲述时,尽可能结合具体的工程应用实例进行讲述,避免过多的枯燥乏味讲授,同时应用多媒体辅助教学,特别是针对各种成形工艺过程,由于学时数少,许多设备的工作原理难以讲述清楚,因此应结合动画演示和教学录像片播放,可能会起到意想不到的效果,关键是要调动学生学习的积极性和学习兴趣,让学生真正体会到该课程无论是在今后的专业学习还是在日常工作、生活当中都具有重要作用,使学生由被动学习转为主动学习,同时布置适量的课外复习与思考题,往往会起到事半功倍的效果。

第 1 章 工程材料及力学性能

1.1 工程材料的分类

材料是人类生产活动和生活所必需的物质基础。材料的使用情况标志着人类文明的发展水平。人类发展的历史按照人类所使用的材料种类划分为石器时代、青铜器时代、铁器时代等,材料的使用和发展成为人类文明史的里程碑。在当今社会,能源、信息和材料已成为现代技术的三大支柱,而能源和信息技术的发展又依托于材料。因此,材料的研究和开发在世界各国都处于非常重要的地位。

迄今为止,人类发现和使用的材料种类繁多。而工程材料主要是指用于机械、车辆、船舶、建筑、化工、能源、仪器仪表、航空航天等工程领域中的材料,用来制造工程构件和零件,也包括一些用于制造工具的材料和具有特殊性能(如耐腐蚀、耐高温等)的材料。

工程材料的种类繁多,应用广泛,分类方法也很多。通常根据材料的本性或其结合键的性质将工程材料分为:金属材料、无机非金属材料、高分子材料和复合材料。按照化学组成又可将其进一步细分,如图 1-1 所示。

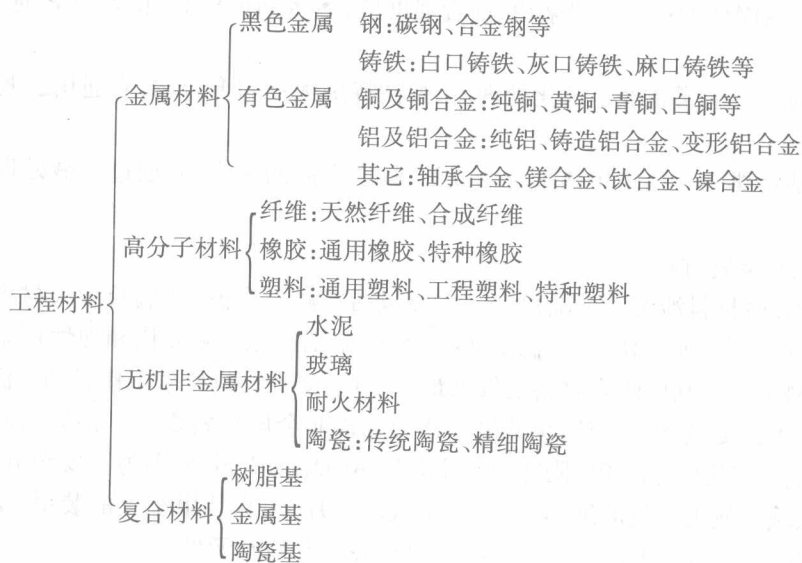


图 1-1 工程材料的分类

1. 金属材料

目前金属材料仍然是应用最广泛的材料。金属材料的结合键主要为金属键。金属键是无方向性的,将原子维持在一起的电子并不固定在一定的位置上。当金属发生弯曲等

变形时,只是变动键的方向,并不使原有键发生破坏。因此,金属具有良好的塑性。在电压作用下,电子云中的价电子将发生运动,因而金属具有良好的导电性。正离子在热的作用下,振荡加剧并传递热量,因而金属具有良好的导热性。工业上把金属及其合金分为两大部分:

(1)黑色金属——铁和以铁为基的合金。应用最广的是黑色金属。以铁为基的合金材料占整个结构材料和工具材料的90%以上。黑色金属的工程性能优越,价格也比较便宜,是最重要的工程金属材料。

(2)有色金属——黑色金属以外的所有金属及其合金。按照其性能特点,有色金属可分为轻金属(密度小于 $4.5\text{g}/\text{cm}^3$)、易熔金属、难熔金属、贵金属、铀金属、稀土金属和碱土金属等。

2. 高分子材料

高分子材料为有机合成材料,亦称聚合物,在工程上是发展最快的一类新型结构材料。高分子材料是由相对分子质量很大的大分子组成,高分子内的原子之间由很强的共价键结合,而高分子链之间则是由范德瓦耳键或氢键结合。高分子材料具有较强的耐腐蚀性能及很好的绝缘性。与无机非金属材料一样,高分子材料按其分子链排列的有序与否,可分为结晶聚合物和无定形聚合物两类。结晶聚合物的强度较高,结晶度决定于分子链排列的有序程度。工程上通常根据力学性能和使用状态将高分子材料分为三大类:

(1)塑料——主要指强度、韧性和耐磨性较好的、可制造某些机器零件或构件的工程塑料。在工程塑料中,受热后有极好的延性和成型性的,称为热塑性塑料;在受热后失去延性的,称为热固性塑料。一般来说,前者强度低,后者强度较高,但均有轻质、耐腐蚀等特点。

(2)橡胶——通常指经过硫化处理的、弹性特别优良的聚合物,有通用橡胶和特种橡胶两种。

(3)合成纤维——指由单体聚合而成的、强度很高的聚合物,通过机械处理所获得的纤维材料。

3. 无机非金属材料

无机非金属材料涉及的范围很广。主要包括:陶瓷、水泥、玻璃及耐火材料。该类材料大都具有熔点高、硬度高、化学稳定性好、耐高温、耐磨损、耐氧化和弹性模量大等优良性能,且原料丰富。其中陶瓷材料的发展最为迅速,受到材料科学工作者的广泛关注。陶瓷材料是应用历史最悠久、应用领域最广泛的无机非金属材料之一。传统的陶瓷材料由黏土、石英、长石等组成。新型陶瓷材料主要以 Al_2O_3 、 SiC 、 Si_3N_4 等为主要组分,已用作航空航天等领域中航天飞机的绝热涂层、发动机的叶片、坦克装甲车上的装甲、工模具和轴承等,还可作为先进的功能材料,用于制作电子元件和敏感元件。

4. 复合材料

复合材料是由两种或两种以上固体物质组成的材料,一般由基体材料(树脂、金属、陶瓷)和增强剂(颗粒、纤维、晶须等)复合而成。由于复合材料可以由各种不同种类的材料复合组成,所以它的结合键非常复杂。它既保持所组成材料的各自特性,又具有组成后的新特性,且它的力学性能和功能可以根据使用需要进行设计、制造,是一类特殊的工程

材料,有着日益发展的应用前景。如玻璃钢是由玻璃纤维布与热固性高分子材料复合而成的,而玻璃钢的性能既不同于玻璃纤维,也不同于组成它的高分子材料。目前作为工程材料使用的复合材料主要有两类:树脂基复合材料和金属基复合材料。

1.2 工程材料的主要力学性能

材料的力学性能是指材料在外加载荷作用下或载荷与环境因素(温度、环境介质)联合作用下所表现出来的行为,即材料抵抗外加载荷引起的变形和断裂的能力。采用各种不同的试验方法,测定材料在一定受力条件下所表现出的力学行为的一些力学参量的临界值或规定值,作为力学性能指标或机械性能指标。材料的力学性能指标是设计计算、材料选用、工艺评定和材料检验的重要依据,具有很大的实用意义。本节将分别阐述几种常用力学性能指标的物理意义和工程意义。

1.2.1 单向静拉伸载荷下材料的力学性能

在工业生产中,测量材料力学性能最常用的是静载方法。单向静载拉伸试验是工业中应用最广泛的材料力学性能试验方法之一。这种试验方法的特点是温度、应力状态和加载速率是确定的,并且常用标准的光滑圆柱试样进行试验。试验时在试样的两端缓慢地施加载荷,使试样的工作部分受轴向拉力作用沿轴向伸长,一般进行到拉断为止。通过拉伸试验可以测定出材料最基本的力学性能指标,如屈服强度、抗拉强度、延伸率和断面收缩率等。

一、拉伸力—伸长曲线和应力—应变曲线

为了确保金属材料处于单向拉伸状态,以衡量它的各种性能指标,对试样的形状、尺寸和加工状态等均有一定要求。拉伸试样分为三个部分:工作部分、过渡部分和夹持部分,如图1-2所示。

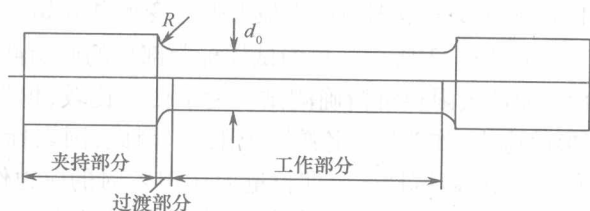


图1-2 拉伸试样

试样拉伸过程中,在拉伸试验机上通常可自动绘制出载荷和试样伸长变形量之间的关系曲线,称为拉伸力—伸长曲线或 $p-\Delta L$ 曲线。如图1-3所示为低碳钢的 $p-\Delta L$ 曲线,曲线中的横坐标值和纵坐标值均与试样的几何尺寸有关。若将纵坐标以应力 σ ($\sigma = p/F_0$)表示,横坐标以应变 ε ($\varepsilon = \Delta l/l_0$)表示,则这样的曲线与试样尺寸无关,可代表材料的力学性能,此曲线称为应力—应变曲线,或 $\sigma-\varepsilon$ 曲线,如图1-4所示。应力—应变曲线的形状与拉伸力—伸长曲线的形状相似,只是坐标不同。应力—应变曲线的纵坐标表示应力,单位为MPa,横坐标表示应变,单位为百分数(%)。

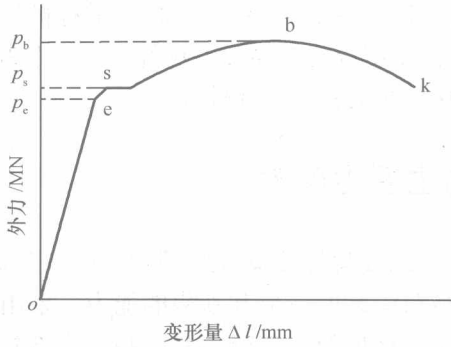


图 1-3 低碳钢的拉伸力—伸长曲线

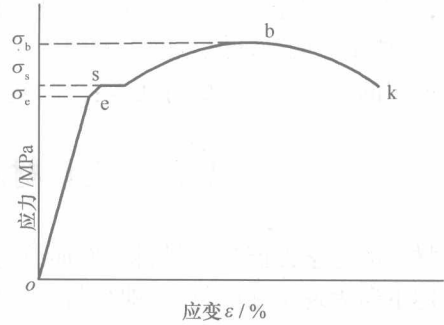


图 1-4 低碳钢的应力—应变曲线

由 $\sigma - \varepsilon$ 曲线可知,当拉应力较小时,试样的应变随应力的增加而增加。拉应力在 σ_e 以下阶段,试样在受力时发生变形,卸除拉应力后变形能完全恢复,该过程为弹性变形阶段。当拉应力达到 σ_s 后,试样产生塑性变形。最初,在试样的局部区域产生不均匀屈服塑性变形,曲线上出现平台或锯齿,随后进入均匀塑性变形阶段。当达到最大拉应力 σ_b 时,试样再次产生不均匀塑性变形,在局部区域产生缩颈。最后在拉应力 σ_k 处,试样发生断裂。

综上所述,金属材料在外力的作用下,变形过程一般可分为三个阶段:弹性变形、塑性变形和断裂。通过拉伸试验可以揭示材料在静载荷作用下的力学行为,即弹性变形、塑性变形和断裂三个基本过程,还可以确定材料的最基本的力学性能指标。

二、强度

强度的物理意义是表征材料对塑性变形和断裂的抗力。由拉伸试验可测定材料的弹性极限、屈服强度和抗拉强度等强度指标。

1. 弹性极限 σ_e 和弹性模量 E

弹性极限 σ_e 是试样由弹性变形过渡到弹—塑性变形时所承受的应力,即 $\sigma_e = p_e / F_0$ (MPa), 式中, p_e 为试样在弹性变形范围内产生最大弹性变形并开始有微量塑性变形时所承受的力(单位为 MN), 如图 1-3 所示。 F_0 为试样标距部分的原始截面积(单位为 m^2)。

在实际拉伸试验中,弹性极限很难精确测试。为了便于比较,根据零件的工作要求,规定产生一定残余变形的应力,作为“规定弹性极限”。因此,国家标准中把弹性极限称为“规定残余伸长应力”。规定以试样残余伸长量为 0.01% 时的应力作为“规定残余伸长应力”,并以 $\sigma_{0.01}$ 表示。弹性极限表征材料对微量塑性变形的抗力。

对于某些零件,如精密弹簧、气压式仪表中的包端管、膜盒、波纹管以及枪炮管等在工作中不允许产生微量的塑性变形, σ_e 是其主要性能指标。设计时主要应根据弹性极限来选材,否则它们将不能长期正常工作,或虽能工作而起不到应有的作用。

材料在弹性变形范围内的应力与应变的比值称为弹性模量,以 E 表示,单位为 GPa, 即: $E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$ 。弹性模量 E 表征材料对弹性变形的抗力。其值的大小反映了材料弹性变形的难易程度。材料的 E 越大,表征材料产生一定量的弹性变形所需要的应力也越大,即不容易产生弹性变形,反之亦然。在工程上弹性模量称为材料的刚度。对于一个零件来说,当零件的结构、尺寸都已确定的前提下,零件的刚度取决于材料的弹性模量。

弹性模量主要取决于金属本性,与晶体结构和原子间距有密切的关系。合金化、热处理、冷塑性变形对弹性模量的影响较小,因此,金属材料的弹性模量是一个对组织不敏感的力学性能指标。

2. 屈服强度 σ_s

在图 1-3 的拉伸力—伸长曲线中,当外力增加到 p_s 时出现平台阶段,表明此时拉力虽不增加,但试样却继续伸长,即试样产生屈服现象。这时若卸去载荷,则试样的变形不能全部恢复,将保留一部分残余变形。这种不能恢复的残余变形叫做塑性变形。s 点是材料从弹性状态过渡到塑性状态的临界点,它所对应的应力为材料在外力作用下开始发生塑性变形的最低应力值,称为屈服极限或屈服强度。以 σ_s 表示,单位为 MPa,即: $\sigma_s = \frac{P_s}{F_0}$ 。式中, p_s 为屈服时的外载荷, F_0 为试样的原始截面积。

对于拉伸力—伸长曲线上不出现明显屈服现象的材料,国家标准中规定以试样产生 0.2% 塑性变形时的应力值作为该材料的屈服极限,并以 $\sigma_{0.2}$ 表示。

屈服强度表征材料对明显塑性变形的抗力。绝大多数机器零件,如紧固螺栓等,都是在弹性范围内工作,不允许产生明显的塑性变形,因此屈服强度是设计和选材的主要依据之一。

3. 抗拉强度 σ_b

试样能承受的最大载荷除以原始截面积所得的应力,称为抗拉强度或强度极限,并以 σ_b 表示,单位为 MPa,即: $\sigma_b = \frac{P_b}{F_0}$ 。式中, p_b 为拉断前试样所能承受的最大载荷, F_0 为试样的原始截面积。

对塑性材料来说,在 p_b 以前试样为均匀变形,而在 p_b 以后,变形将集中在试样的薄弱处,发生集中变形,试样上产生颈缩。由于颈缩处截面急剧减小,所以试样所能承受的载荷迅速下降,直到最后断裂。抗拉强度的物理意义是表征材料对最大均匀变形的抗力,表示材料在拉伸条件下能够承受最大载荷时的相应应力值。

零件设计时一般不允许产生过量的塑性变形,常用 σ_s 或 σ_b 作为设计依据。但从保证零件不产生断裂的安全角度出发,同时考虑到 σ_b 的测量方便,也往往将 σ_b 作为零件设计的依据,但要采用更大的安全系数。

三、塑性

塑性的物理意义是表征材料断裂前具有塑性变形的能力。塑性指标常用金属断裂时的最大相对塑性变形来表示,如拉伸时的延伸率 δ 和断面收缩率 Ψ ,两者均为无单位量纲。

1. 延伸率 δ

试样拉伸断裂后的相对伸长值称为延伸率,即

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100\%$$

式中, l_0 为试样原始标距长度; l_1 为试样拉断后的标距长度。

对于拉伸时形成颈缩的材料来说, δ 值大小包括均匀变形部分伸长率和缩颈部分的集中变形伸长率两部分。根据试验结果,对同一材料制成的几何形状相似的试样,均匀变