



教育部高等职业教育

示范专业规划教材

模具设计与制造专业

工程材料与热处理

黄晓明 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

赠电子课件

教育部高等职业教育示范专业规划教材
模具设计与制造专业

工 程 材 料

与 热 处 理

主 编	黄晓明	
副主编	冯 伟	吴荣华
参 编	魏绍生	周家琥
主 审	王章忠	



机械工业出版社

本书编写时注重理论与实践的有机结合,以必需和够用为原则,对传统的教学内容和课程体系进行了整合,以模具材料的性能及热处理工艺为主线,并重点突出这一主线。本书内容主要包括:金属材料及其性能、金属学及热处理基础、模具用钢、模具钢热处理工艺分析及应用、模具的选材及热处理工艺实例、非金属材料与复合材料简介等。

本书为高职高专院校模具设计与制造专业教材,也可供从事工程材料课程教学的教师及相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程材料与热处理/黄晓明主编. —北京:机械工业出版社,2009.1

教育部高等职业教育示范专业规划教材. 模具设计与制造专业

ISBN 978-7-111-25734-9

I. 工... II. 黄... III. ①工程材料—高等学校:技术学校—教材②
热处理—高等学校:技术学校—教材 IV. TB3 TG15

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第192913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:郑丹 责任编辑:于奇慧 版式设计:霍永明

责任校对:张玉琴 封面设计:鞠杨 责任印制:杨曦

三河市国英印务有限公司印刷

2009年2月第1版第1次印刷

184mm×260mm·9.25印张·223千字

0001—4000册

标准书号:ISBN 978-7-111-25734-9

定价:16.00元

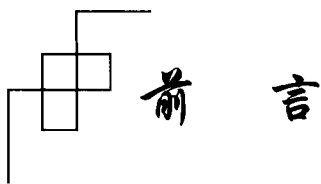
凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010)68326294

购书热线电话:(010)88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010)88379171

封面无防伪标均为盗版



本书是为适应当前我国高职高专教育发展的需要,体现职业教育特色,满足高职高专院校不断深化的教学改革的需要而编写的。

本书编写注重理论和实践的有机结合,以必需和够用为原则,对传统的教学内容和课程体系进行了整合,以模具材料的性能及热处理工艺为主线,既讲述了金属材料性能、结晶过程及热处理的原理,又突出了模具材料的性能及热处理工艺。

本书主要包括金属材料及其性能、金属学及热处理基础、模具用钢、模具钢热处理工艺分析及应用、模具的选材及热处理工艺实例、非金属材料与复合材料简介等内容。

本书为高职高专模具设计与制造专业教材,也可作为从事工程材料教学的教师及相关工程技术人员参考用书。

本书由黄晓明主编,冯伟、吴荣华任副主编。全书共分六章,绪论、第一章由魏绍生编写;第二章第一、二节,第六章由黄晓明编写;第二章第三节由周家琥编写;第三章由吴荣华编写;第四、五章由冯伟编写。

南京工程学院王章忠教授任本书主审,对全书提出了宝贵的修改意见,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免有欠妥之处,恳请读者批评指正,以求改进。

本书配有电子教案,凡使用本书作为教材的教师可登录机械工业出版社教材服务网 www.cmpedu.com 注册后下载。咨询邮箱: cmpgaozhi@sina.com。咨询电话:010-88379375。

编 者



目 录

前言	
绪论	1
第一章 金属材料及其性能	3
第一节 金属材料的生产过程	3
第二节 金属材料的物理性能和 化学性能	6
第三节 金属材料的力学性能	8
第四节 金属材料的工艺性能	17
复习思考题	18
第二章 金属学及热处理基础	19
第一节 金属的结构与结晶	19
第二节 铁碳合金相图	33
第三节 钢的热处理	44
复习思考题	62
第三章 模具用钢	64
第一节 钢的简介	64
第二节 模具钢的分类及性能	80
第三节 冷作模具钢	83
第四节 热作模具钢	86
第五节 塑料模具钢	88
复习思考题	91
第四章 模具钢热处理工艺分析及 应用	92
第一节 冷作模具钢热处理工艺 分析及应用	92
第二节 热作模具钢热处理工艺 分析及应用	98
第三节 塑料模具钢热处理工艺 分析及应用	104
复习思考题	109
第五章 模具的选材及热处理工艺 实例	111
第一节 冷作模具的选材及热处 理工艺	111
第二节 热作模具的选材及热处 理工艺	116
第三节 塑料模具的选材及热处 理工艺	120
复习思考题	124
第六章 非金属材料与复合材料 简介	125
第一节 工程塑料	125
第二节 合成橡胶	132
第三节 陶瓷材料	135
第四节 复合材料	137
复习思考题	140
参考文献	141

绪 论

随着科学技术和工业生产的飞速发展以及全球经济一体化的深入,模具工业在国民经济中所发挥的作用越来越明显,机械、电子、汽车、轻工、建材和国防工业等的发展,均要求模具工业的发展与之相适应。可以说,模具工业已成为国家新技术产业化的重要组成部分;同时,模具技术水平的高低与产品的质量、效益和新产品的开发能力具有密切关系,它也是衡量一个国家工业水平高低的重要标志之一。企业对模具人才在数量上和质量上都提出了更高的要求,因此培养高级模具技术人才就显得尤为重要,这不仅关系到企业本身的生存和发展,而且对中华民族的伟大复兴的事业也是一项刻不容缓的大事。

一、金属材料(模具)及热处理的发展

金属材料的发展史可上溯到几千年前,可以说和人类的文明史相互并进。公元前 4000 年左右,人类已使用自然的金、铜。在公元前 2800 年左右,铁已经能够熔炼。在 16 世纪前,我国在金属材料发展方面一直处于世界领先地位。大量出土的上古时代青铜器,例如河南安阳出土的司母戊大方鼎,说明在商代(公元前 1562 ~ 1066 年)就有了高度发达的青铜技术。春秋战国时期(公元前 770 ~ 475 年)开始大量使用铁器,如兴隆战国铁器遗址中发掘出了浇铸农具用的铁模,说明了冶铸技术已从泥砂造型进入铁模造型的先进阶段。在西汉时,采用煤作炼铁的燃料,要比欧洲早一千七八百年。在东汉时,发明了反复锻打钢的方法,即最原始的形变热处理工艺。东魏、北齐间的“浴以五牲之溺,淬以五牲之脂”即现代所说的水淬、油淬。历史充分说明,我国古代劳动人民在金属材料及其工艺方面取得了辉煌的成就,为人类文明做出了巨大的贡献。

19 世纪,冶金学家和晶体学家为金属材料的发展做出了重要贡献,奠定了金属材料的基础,如金属学、金相学、相变和合金钢等。

二、金属材料(模具材料)的应用

模具是现代工业生产的重要工艺装备。随着工业技术的迅速发展,在国民经济的各个领域都越来越多地依靠模具来进行加工,有力推动了机械制造、矿山冶金、交通运输、石油化工、电子仪表、宇宙航行等现代化工业的发展。原子弹、氢弹的试验成功以及人造月球卫星和载人宇宙飞船的发射成功等,标志着我国金属材料,特别是模具材料的应用及其工艺都达到了新的水平。

近年来新材料、新工艺、新设备以及现代检测手段的不断出现及应用,推动着现代工业和科学技术的发展。例如,钢材强韧化热处理新工艺的应用,在发挥材质性能潜力方面取得了明显的效果。少切削,无切削新工艺的应用正在改变着某些传统金属产品的面貌。利用气体雾化制粉后采取热等静压(HIP)的粉末冶金工艺可以生产出韧性和耐磨性都很好的合金模具钢。所有这些都取得了明显的技术经济效果。

三、学习本门课程的目的和方法

《金属材料及热处理》是一门研究金属学基础、热处理、金属材料及工程材料等综合性的基础课程。其主要任务是论述有关钢铁生产与质量, 金属材料的成分、组织、性能之间的关系及其变化规律, 改善和提高材料性能的各种热处理方法, 工程材料的应用, 特别是模具材料的应用。实践表明, 在生产过程中, 合理地选用材料及热处理工艺, 科学地制订加工工艺规范, 妥善安排工艺路线, 在提高产品质量、延长使用寿命, 节省材料、缩短生产周期、降低成本等方面都起着重要作用。本课程是模具专业学生在学习中获得金属材料知识、模具材料知识和热处理知识不可缺少的一门课程。

学习本课程应达到的基本要求是:

1. 钢铁的生产与质量

了解钢铁冶炼方法及影响钢材质量的因素, 使学生初步认识原材料的来源与冶金质量的控制。

2. 机械工程材料的性能及应用

了解常用金属材料及热处理与性能之间的关系。了解金属材料的强度、塑性、硬度、冲击韧度等主要力学性能指标及其测试方法。

3. 金属学基础

了解金属和合金的组织结构、结晶过程、二元合金相图的基本理论, 从而掌握铁碳相图及其应用, 掌握金属和合金的成分、组织、性能之间的关系及其变化规律。

4. 热处理

了解常用钢铁材料热处理的基本原理和工艺方法, 掌握各类热处理方法的目的、应用及其在零件加工过程中的地位与作用, 以便根据零件的技术要求正确选定热处理工艺方法和合理安排工艺路线。

5. 机械工程材料

了解钢的分类, 模具材料的分类、应用、使用性能和工艺性能; 掌握冷作模具钢、热作模具钢、塑料模具钢的性能、应用及其热处理; 并熟练掌握模具钢的选材及热处理工艺。对常用工程塑料、合成橡胶、陶瓷材料和复合材料等非金属材料的性能及应用等基本知识作一般了解。

这门课程是一门理论性和实践性较强的技术基础课, 教学内容与生产实际紧密结合。学习本课程以金工实习为基础, 强调理论和实践相结合。

第一章 金属材料及其性能

第一节 金属材料的生产过程

一、金属材料的分类及其定义

金属是指具有良好的导电性和导热性，有一定的强度和塑性，并具有光泽的物质，如钢、铝和铜等。金属材料是由一种金属元素或几种金属元素以及金属元素和非金属元素组成的，并具有金属特性的材料，包括金属和合金两类。

纯金属由于它的强度、硬度一般都较低，而且冶炼提纯技术复杂，在使用上受到较大的限制。目前在机械制造、矿山冶金、交通运输、石油化工、电子仪表、宇宙航行等行业广泛使用的是合金状态的金属材料。

合金是指两种或两种以上的金属元素或金属与非金属元素组成的金属材料。例如：我国在公元前两千多年前使用的青铜，主要是由铜、锡两种金属元素组成的合金；目前使用比较广的碳素钢是由铁和碳组成的金属材料。

金属材料在机械工程中重要的作用，主要是由于金属材料具有比其他材料优越的性能，如物理性能、化学性能、力学性能及工艺性能等，能够满足生产和科学技术发展的需要。

金属材料通常还可分为黑色金属（钢铁材料）和非铁金属两大类。

1. 黑色金属

黑色金属一般是指以铁为主（如各种钢和生铁）而形成的金属材料。

2. 非铁金属

非铁金属一般是指除黑色金属以外的其他金属材料，如铜、铝、镁、钛、锡、铅等。

除此之外，还出现了许多新型的特殊性能的金属材料，如粉末冶金材料、非晶态金属材料、纳米金属材料、超导合金以及新型的金属功能材料（形状记忆合金、超细金属隐身材料、超塑性金属材料）等。

二、钢铁的冶炼及毛坯的生产

钢铁是铁和碳的合金，按碳的质量分数 w_c 进行分类，包括：工业纯铁（ $w_c < 0.0218\%$ ）、钢（ $w_c = 0.0218\% \sim 2.11\%$ ）和生铁（ $w_c > 2.11\%$ ）。

铁矿石经高炉冶炼而得生铁，它是炼钢和铸造的主要原材料。

钢的生产是以生铁为主要原料。生铁装入高温的炼钢炉里，通过氧化作用使生铁中的碳和杂质的含量达到钢液的需要，而后将钢液浇铸成钢锭，经过热轧或冷轧后，制成各种类型的型钢。图 1-1 所示为钢铁材料的生产过程示意图。

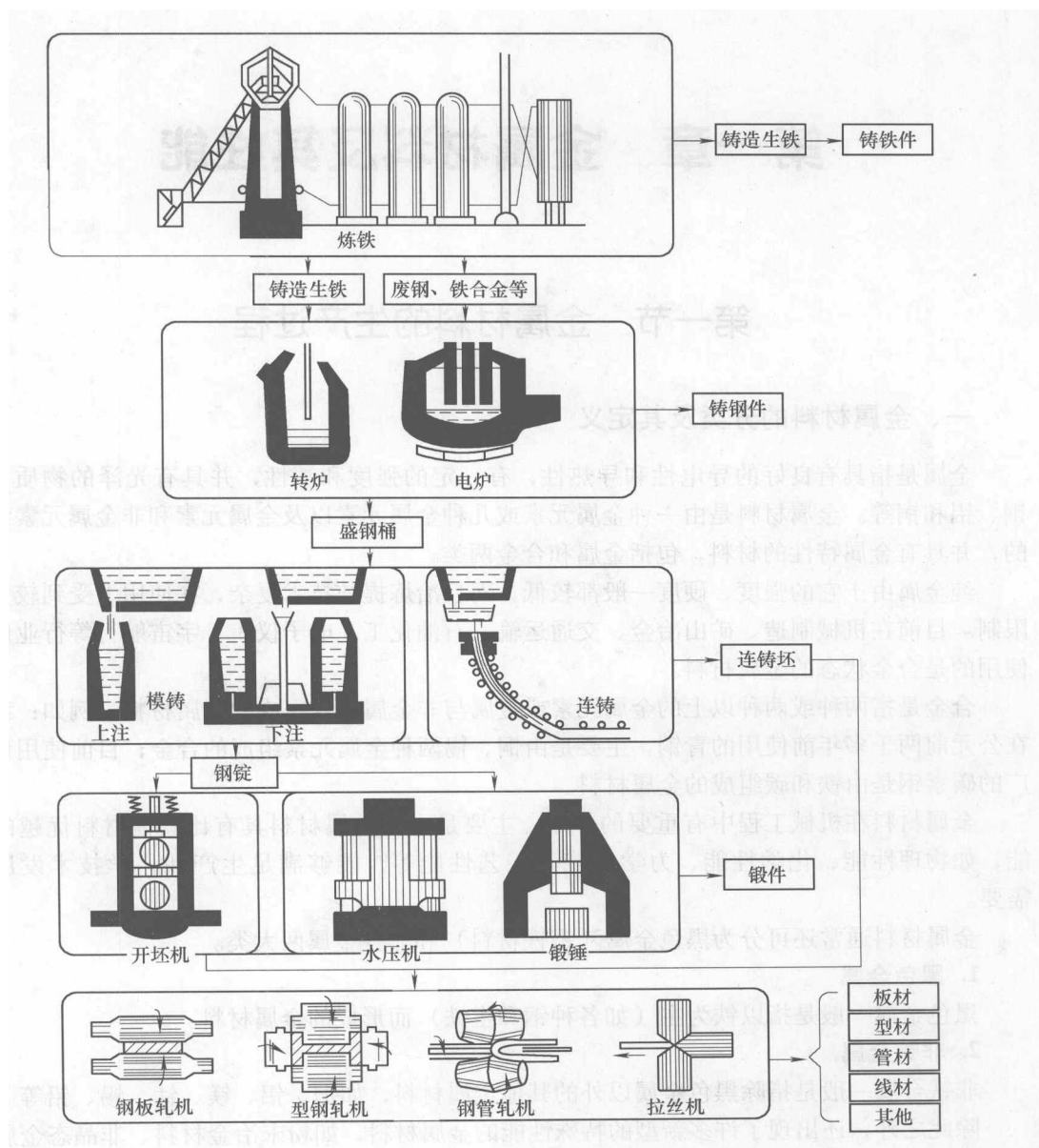


图 1-1 钢铁材料的生产过程示意图

三、炼铁

自然界中的铁，绝大多数是以化合物形式存在的。铁的氧化物是炼铁用的主要原料，如赤铁矿、磁铁矿、菱铁矿、褐铁矿等称为铁矿石。铁矿石中还含有硅、锰、硫、磷等元素的氧化物杂质，这些杂质称为脉石。炼铁就是从铁矿石中提取铁及其有用元素形成铁的过程。钢铁工业生产铁的主要方法是高炉炼铁，其主要原料是铁矿石（ Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 ）、燃料（焦炭）和熔剂（石灰石）。

焦炭是炼铁的燃料，其作用有两方面：一方面为炼铁提供热量；另一方面焦炭在不完全

燃烧时产生 CO，作为还原剂。熔剂是使铁矿石中的脉石和焦炭燃烧后的灰分转变成炉渣（漂浮在钢液表面），与铁液分离。常用的熔剂是石灰石（ CaCO_3 ）。

炼铁时需要将炼铁原料分批分层装入高炉中，在高温和压力的作用下，经过一系列的化学和物理过程得到铁。冶炼出的铁溶有碳、硅、锰、硫、磷等杂质元素，这种铁称为生铁。生铁为高炉冶炼的产品。一般生铁分为两类：铸造生铁和炼钢生铁。

1. 铸造生铁

铸造生铁的断口呈暗灰色，硅的含量较高，常用于生产复杂的铸件。

2. 炼钢生铁

炼钢生铁的断口呈亮白色，硅的含量较低，常用于炼钢。

炉气和炉渣是高炉炼铁产生的副产品。炉气中含有大量的 CO、 CH_4 和 H_2 等可燃性气体，有较高的经济价值，可回收利用。炉渣的主要成分是 CaO 、 SiO_2 ，可用于制造水泥、渣棉和渣砖等建筑材料。

四、炼钢

炼钢是在炼钢炉中，以生铁和废钢为主要原料，加入熔剂（石灰石、氟石）、氧化剂（ O_2 、铁矿石）和脱氧剂（铝、硅铁、锰铁）等，利用氧化作用将碳及其他杂质元素减少到规定的化学成分范围之内，得到需要的钢材。所以，炼钢是一个氧化过程。

1. 炼钢的方法

炼钢的方法一般常用有转炉炼钢和电炉炼钢，它们的特点见表 1-1。

表 1-1 转炉炼钢和电炉炼钢的特点比较

炼钢的方法	热源	主要原料	主要特点	产 品
氧气转炉	氧化反应的化学热	生铁、废钢	冶炼速度快，生产率高，成本低。钢的品种较多，质量较好，适合于大量生产	非合金钢和低合金钢
电弧炉	电能	废钢	炉料通用性大，炉内气氛可以控制，脱氧良好，能冶炼难熔合金钢，钢的质量优良，品种多样	合金钢

2. 钢的浇铸

钢液经脱氧后，少数用来浇铸成铸钢件，其余都浇铸成钢锭或连铸坯。钢锭是轧钢或锻造大型锻件的毛坯。而连铸法由于生产率高，钢坯质量好，节约能源，生产成本低，得到广泛采用。

3. 炼钢的最终产品

钢锭经过轧制最终形成板材、管材、型材、线材及其他类型的材料。

(1) 板材常用于造船、锅炉和压力容器；分冷轧和热轧钢板。薄板轧制后可直接交货或经过酸洗镀锌或镀锡后交货使用。

(2) 管材有无缝钢管和有缝钢管两种。无缝钢管常用于石油、锅炉等；有缝钢管常用于制作煤气及自来水管道等。

- (3) 常用的型材有方钢、圆钢、扁钢、角钢、工字钢、槽钢等。
- (4) 丝材是用圆钢或方钢经过冷拔而成的。
- (5) 其他材料主要是指要求具有特种形状与尺寸的异形钢材，如齿轮轮坯等。

第二节 金属材料的物理性能和化学性能

金属材料的种类很多，为了充分发挥金属材料本身的性能潜力，就必须首先了解金属及其性能。金属是具有特殊光泽而不透明，富有延展性、导热性及导电性的结晶物质，它的性能一般分为使用性能和工艺性能。使用性能一般指物理性能、化学性能和力学性能等，反映了金属在使用过程中所表现出来的特性；工艺性能一般指铸造性能、锻压性能、焊接性能及切削加工性能等，反映金属材料在制造加工过程中的各种特性。

一、物理性能

金属的物理性能有密度、熔点、导热性、导电性、热膨胀性和磁性等。

1. 密度

密度用来表示某种材料单位体积的质量。用符号 ρ 表示。

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-1)$$

式中 m ——金属的质量；

V ——金属的体积；

ρ ——金属的密度。

密度是工程材料的特性之一。在实际工作中，某些机械零件选材时，必须考虑金属的密度，如在航空工业领域中，密度是选用材料的关键性能指标之一。在计算大型零件的质量时，常用密度公式求质量。

2. 熔点

材料由固态转变为液态时的熔化温度称为熔点。纯金属都有固定的熔点，而合金的熔点取决于成分。根据熔点不同，金属可分为低熔点（低于 700°C ）金属和难熔金属两大类。例如锡、铅、锌等属低熔点金属，钨、钼、铬、钒等属难熔金属。

熔点是制定热加工（冶炼、铸造、焊接等）工艺规范的重要依据之一。常用低熔点金属制造印刷铅字和电路上的熔丝等；难熔金属可用于制造耐高温零件，如喷气发动机的燃烧室需用高熔点合金制造等。

3. 导热性

材料传导热量的能力，称为导热性。导热性能是工程上选择保温或热交换材料的重要依据之一，也是确定机件热处理保温时间的一个参数。

金属导热能力的大小常用热导率 λ 表示。热导率说明维持单位温度梯度（即温度差）时，在单位时间内，流经物体单位横截面的热量，单位是 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。金属材料的热导率越大，说明导热性越好。一般说来，金属越纯，其导热能力越强。

导热性好的金属散热也好，在制造散热器、热交换器等零件时，就要注意选用导热性好的金属。

4. 导电性

材料能够传导电流的能力，称为导电性。金属导电性的好坏，常用电阻率 ρ 表示。长 1m、截面积为 1mm^2 的物体在一定温度下所具有的电阻值，叫做电阻率，单位是 $\Omega \cdot \text{m}$ 。电阻率越小，导电性就越好。

电导率是电阻率的倒数，是表示材料导电能力的性能指标。显然，电导率大的金属，电阻值小，则导电性好。在金属中，银的导电性最好，其次是铜和铝；合金的导电性比纯金属差。工业上常用导电性好的金属制作导电材料，如纯铜、纯铝制作导电材料；而用导电性差的材料制作电热元件，如铜合金（康铜——铜、镍、锰合金）制作电阻材料。

5. 热膨胀性

材料随温度变化体积发生膨胀或收缩的特性，称为热膨胀性。一般材料都具有热胀和冷缩的特点。热膨胀的大小用线胀系数或体胀系数来表示。线胀系数的计算公式为（体胀系数约为线胀系数的 3 倍）

$$\alpha_l = \frac{L_2 - L_1}{L_1 t} \quad (1-2)$$

式中 L_1 ——膨胀前的长度；

L_2 ——膨胀后的长度；

t ——温度差；

α_l ——线胀系数。

在工程实际中，许多场合要考虑热膨胀性。例如，相互配合的柴油机活塞和缸套之间间隙很小，既要允许活塞在缸套内往复运动，又要保证气密性，这就要求活塞与缸套材料的热膨胀性要相近，以避免二者卡住或漏气。又如铸造冷却时工件的体积收缩、精密量具因温度变化而引起读数误差等。

6. 磁性

金属材料在磁场中被磁化而呈现磁性强弱的性能，称为磁性。按磁性来分，金属材料可分为以下几种：

- (1) 铁磁性材料——在外加磁场中能强烈被磁化的金属，如铁、镍、钴等。
- (2) 顺磁性材料——在外加磁场中呈现十分微弱的磁性的金属，如锰、铬、钼等。
- (3) 抗磁性材料——能够抗拒或减弱外加磁场的磁化作用的金属，如铜、金、银、铅、锌等。

铁磁性材料中，铁及其合金（包括钢与铸铁）具有明显磁性。镍和钴也具有磁性，但远不如铁。

磁性只存在一定温度范围内，在高于一定温度时，其磁性就会消失。这一温度称为居里点。如铁的居里点为 769°C ，镍为 358°C ，钴可达 1150°C 。

常用金属的物理性能见表 1-2。

二、化学性能

金属及合金的化学性能主要是指它们在室温或高温时抵抗各种介质的化学浸蚀的能力，一般包括耐腐蚀性、抗氧化性和化学稳定性。

表 1-2 常用金属的物理性能

材料	弹性模量 E/GPa	切变模量 G/GPa	伸长率 $\delta(\%)$	密度 $\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	线胀系数 α_l $/10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}$
铝合金	69	26	23	2770	23
黄铜	102	38	40	8350	18.9
青铜	115	45	20	7650	18
灰铸铁	90	41	8	7640	10.5
可锻铸铁	170	83	12	7640	12
低碳钢	207	80	25	7800	11.7
镍铬钢	208	82	12	7800	11.7
木材	9	1	—	550	—

1. 耐腐蚀性

金属材料在常温下抵抗周围介质（如大气、燃气、油、水、酸、碱、盐等）腐蚀的能力，称为耐腐蚀性，简称耐蚀性。腐蚀对金属的危害很大。

2. 抗氧化性

几乎所有的金属都能与空气中的氧作用形成氧化物，这称为氧化。如果氧化物膜结构致密，则可保护金属表层不再进行氧化，否则金属将受到破坏。金属在高温下对氧化的抵抗能力，称为抗氧化性，又称抗高温氧化性。在实际使用中，有许多零件在高温状态下工作，制造这些零件的材料就要求具有良好的抗氧化性。

3. 化学稳定性

金属材料的化学稳定性是耐腐蚀性和抗氧化性的总称。在高温下工作的锅炉、加热设备、汽轮机、喷气发动机、火箭、导弹等的零件应选择热稳定性好的材料制造；在海水、酸、碱等腐蚀环境中工作的零件，必须采用化学稳定性良好材料，例如，化工设备通常采用不锈钢来制造。

第三节 金属材料的力学性能

一、材料的受力与变形

金属材料在实际使用中受外力和内力的作用，必然产生变形。下面简述这些力和变形。

1. 外力

外力就是指载荷，也称负载或负荷。不同性质的载荷作用于金属材料上，金属材料就表现出不同的力学性能。因此，了解载荷分类就很有必要，载荷一般分静载荷、冲击载荷、交变载荷。

- (1) 静载荷：指大小不变或是缓慢变化的载荷。
- (2) 冲击载荷：指大小突然变化的载荷。
- (3) 交变载荷：指大小、方向随时间发生周期性变化的载荷，又称循环载荷。

载荷按其作用形式不同，又可分为拉伸、压缩、剪切、扭转和弯曲等。图 1-2 所示为不同作用形式载荷的示意图。

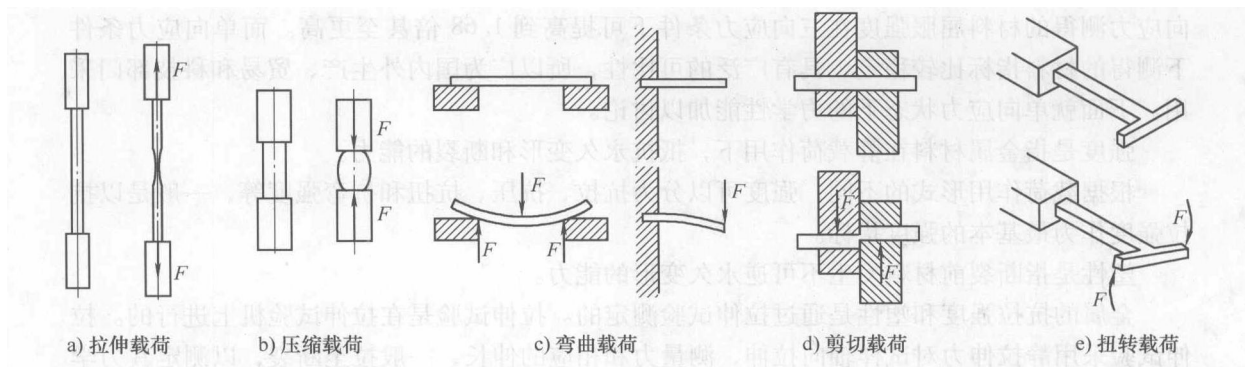


图 1-2 载荷的作用形式

2. 变形

金属材料受载荷作用后,形状和尺寸发生变化,称为变形。变形按卸除载荷后能否完全消失,分为弹性变形和塑性变形两种。

(1) 弹性变形:材料在载荷作用下发生变形,当载荷卸除后,变形也完全消失。这种随载荷的卸除而消失的变形称为弹性变形。

(2) 塑性变形:当作用在材料上的载荷超过某一限度,此时若卸除载荷,大部分变形随之消失(弹性变形部分),但是留下了部分变形不能消失。这种不能随载荷的去除而消失的变形称为塑性变形,又称永久变形。

3. 内力和应力

当材料在外力作用下不能产生位移时,它的几何形状和尺寸将发生变化,这种形变称为应变。材料发生形变时内部产生了大小相等但方向相反的反作用力抵抗外力,定义单位面积上的这种反作用力为应力。或物体由于外因(受力、湿度变化等)而变形时,在物体内部各部分之间产生相互作用的内力,以抵抗这种外因的作用,并力图使物体从变形后的位置回复到变形前的位置。在所考察的截面某一点单位面积上的内力称为应力。可用下式表示

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1-3)$$

式中 F ——外力;

A ——横截面积;

σ ——应力。

注意:应力往往不是均匀地分布在截面上。若零件截面有突变,如有孔或沟槽等存在时,在其附近的很小范围内应力显著升高,这种应力局部增大的现象称为应力集中。实践证明,应力集中对零件的安全使用是不利的,而一般计算物体应力是以均匀分布为条件的。

金属材料在载荷的作用下所表现出来的一系列力学特性,如强度、硬度、塑性、韧性和疲劳等,称为金属材料的力学性能。这些力学性能指标反映了金属材料在各种形式载荷作用下抵抗变形或破坏的某些能力,它与各种加工工艺也有密切关系,是选用金属材料的重要依据。

二、强度、塑性及其测定

金属在单向应力、双向应力和三向应力条件下会得出力学性能差别很大的试验结果。单

向应力测得的材料屈服强度在三向应力条件下可提高到 1.68 倍甚至更高。而单向应力条件下测得的材料指标比较稳定, 具有广泛的可比性, 所以广为国内外生产、贸易和科技部门采用。下面就单向应力状态下的力学性能加以讨论。

强度是指金属材料在静载荷作用下, 抵抗永久变形和断裂的能力。

根据载荷作用形式的不同, 强度可以分为抗拉、抗压、抗扭和抗弯强度等, 一般是以抗拉强度作为最基本的强度指标。

塑性是指断裂前材料发生不可逆永久变形的能力。

金属的抗拉强度和塑性是通过拉伸试验测定的。拉伸试验是在拉伸试验机上进行的。拉伸试验采用静拉伸力对试样轴向拉伸, 测量力和相应的伸长, 一般拉至断裂, 以测定其力学性能。拉伸试验方法简单, 测量数据准确, 是工程上广泛采用的力学性能试验方法之一。

1. 拉伸试验和力-伸长曲线

(1) 拉伸试样: 拉伸试样的形状有圆形和矩形等, 在国家力学拉伸实验标准中, 对试样的形状、尺寸及加工要求都有明确的规定。圆形试样是最常见的, 这里以圆形试样为例。图 1-3 为圆形标准拉伸试样, 图中 d_0 表示试样原始直径, L_0 表示试样原始标距, 它是试样的有效长度。

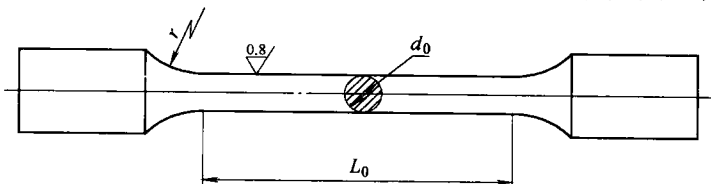


图 1-3 标准拉伸试样

根据标距长度与直径之间的关系, 试样可分长试样 ($L_0 = 10d_0$) 或短试样 ($L_0 = 5d_0$)。

(2) 拉伸试验: 用缓慢拉伸力对试样轴向拉伸, 测量力和相应的伸长, 拉至断裂, 测定其力学性能。在拉伸过程中, 拉伸机上的自动绘图装置绘制出拉伸力与伸长量的关系曲线, 这条曲线称为力-伸长曲线。

(3) 力-伸长曲线: 图 1-4 所示为低碳钢的力-伸长曲线, 低碳钢在拉伸试验过程中明显地表现出不同的变形阶段, 所以用低碳钢的力-伸长曲线来说明材料的拉伸特性。而工程上使用的金属材料多数没有明显的屈服现象。

由图 1-4 可见, 低碳钢在拉伸过程中其 $F-\Delta l$ 的关系有以下几个阶段:

Oe ——弹性阶段。试样变形完全是弹性的, 卸载后试样恢复原状。在 e 点以下, 试样伸长随载荷成正比地增加, 超过比例伸长力 F_e 后, $F-\Delta l$ 不成正比关系, 最大弹性伸长力为 F_e 。

es ——屈服阶段。当载荷超过 F_s 时卸载, 伸长的试样只能部分地

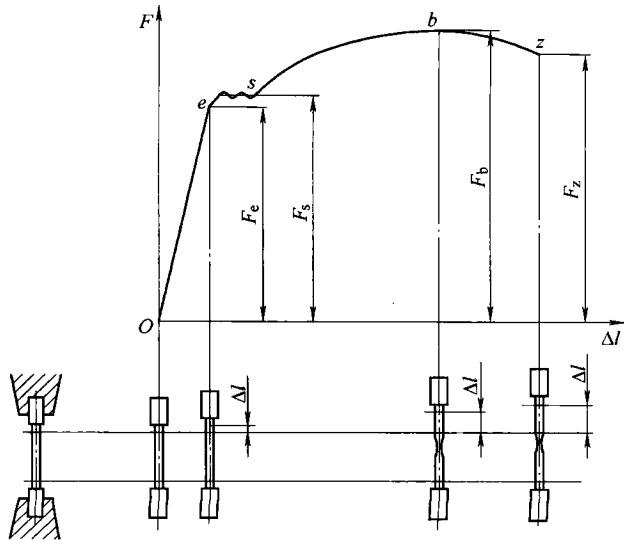


图 1-4 低碳钢的力-伸长曲线

恢复, 保留一部分残余变形 (塑性变形)。当继续保持载荷时, 力指示器的指针停止转动或开始往回转, 拉伸曲线图上出现平台或锯齿状, 说明这时载荷不变或减少, 而试样却继续伸长, 这种现象叫做屈服。屈服平台恒定的力为屈服力 F_s , 屈服后材料开始出现明显塑性变形。

sb——强化阶段。在屈服阶段以后, 欲使材料继续伸长, 必须继续施加更大的力。随着塑性变形增大, 材料变形抗力不成比例地逐渐增加, 这种现象叫做形变强化 (或称为加工硬化)。拉伸曲线上的最大力为 F_b , 即为材料在拉伸时的最大力。在此阶段试样变形均匀。

bz——局部塑性变形阶段。当载荷达到 F_b 后, 试样抗力下降, 施加的力也随之下降, 而变形继续增加。这时试样的某一部分横截面急剧缩小, 出现“缩颈”。这时变形主要局限于缩颈附近, 直到断裂。 F_r 为断裂点应力。

2. 强度和塑性指标

(1) 屈服点和屈服强度: 屈服点 σ_s 表示材料在试验过程中, 载荷不增加 (保持恒定) 仍能继续伸长时的应力。其计算公式为

$$\sigma_s = \frac{F_s}{A_0} \quad (1-4)$$

式中 F_s ——试样发生屈服时的载荷;

A_0 ——试样原始横截面积;

σ_s ——屈服点。

有的金属材料的屈服点极不明显, 在测量上有困难, 因此为了衡量材料的屈服特性, 规定产生永久残余塑性变形等于一定值 (一般为原长度的 0.2%) 时的应力, 称为条件屈服强度或简称屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 。即

$$\sigma_{0.2} = \frac{F_{0.2}}{A_0} \quad (1-5)$$

式中 $F_{0.2}$ ——残余伸长率为 0.2% 时的载荷;

A_0 ——试样原始横截面积;

$\sigma_{0.2}$ ——规定残余伸长率达 0.2% 时的应力。

材料的屈服点是机械零件设计时的主要依据, 也是评定金属材料性能的重要指标之一。为保证零件正常工作, 材料的屈服点应高于零件的工作应力。

(2) 抗拉强度: 试样拉断前承受的最大标称拉应力, 用符号 σ_b 表示。即

$$\sigma_b = \frac{F_b}{A_0} \quad (1-6)$$

式中 F_b ——试样拉断前承受的最大载荷;

A_0 ——试样原始横截面积;

σ_b ——抗拉强度。

零件在工作中所承受的应力超过抗拉强度, 会产生断裂。所以, 抗拉强度也是机械设计和评定金属材料质量的主要依据。

(3) 断后伸长率: 试样拉断后标距的伸长与原始标距的百分比, 用 δ 表示, 其计算公式为

$$\delta = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (1-7)$$

式中 L_1 ——试样拉断后的标距；

L_0 ——试样原始标距；

δ ——断后伸长率。

短、长试样的断后伸长率分别用符号 δ_5 、 δ_{10} 表示。断后伸长率能够在数值上准确地反映材料塑性变形的能力。

(4) 断面收缩率：试样拉断后缩颈处横截面积的最大缩减量与原始横截面积的百分比，用 ψ 表示，其计算公式为

$$\psi = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\% \quad (1-8)$$

式中 A_0 ——试样原始横截面积；

A_1 ——试样拉断后缩颈处最小横面积；

ψ ——断面收缩率。

断后伸长率和断面收缩率都是衡量金属材料塑性好坏的主要指标，其值越大，表示材料的塑性越好。用断面收缩率表示最大变形量比断后伸长率更合理，而且其值不受试样标距长短的影响，所以 ψ 值比 δ 值更能反映材料的塑性。

三、硬度及其测定

固体有软硬之分，金属也有软硬之别，有的固体用手就可以感觉出其软硬，而常用的金属材料用手无法分辨其软硬。一般金属用刻划法和压入法来确定其硬度。金属材料抵抗局部变形，特别是塑性变形、压痕或划伤的能力，是衡量金属软硬的依据，称为硬度。

硬度试验一般采用压入法，操作简单、迅速，被广泛使用。测定硬度的方法很多，最常用的有布氏硬度试验法、洛氏硬度试验法和维氏硬度试验法三种。

1. 布氏硬度

图 1-5 所示为布氏硬度试验过程的原理。

布氏硬度试验是将一定直径的硬质合金球，以相应试验力压入试样表面，经规定保持一定时间后卸除试验力，用测量的表面压痕直径计算硬度的一种压痕硬度试验。布氏硬度是 1900 年由瑞典工程师 J. B. Brinell 提出的。布氏硬度定义为球冠形压痕面积除所施加的载荷，即

$$\text{HBW} = 0.102 \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1-9)$$

式中 HBW——用硬质合金球试验时的布氏硬度值；

D ——压头球体直径；

d ——压痕平均直径；

F ——试验力。

从式 (1-9) 可以看出，当试验力 F 和球体直

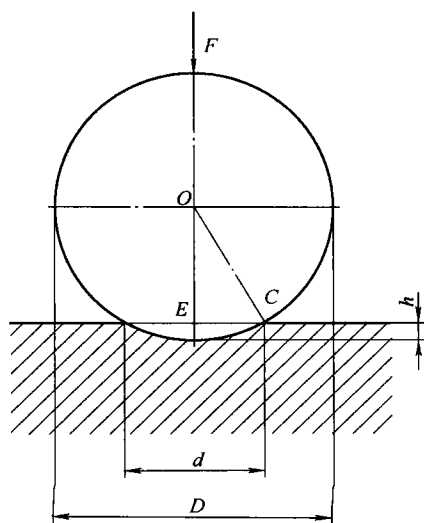


图 1-5 布氏硬度试验原理示意图