



普通高等教育“十三五”规划系列教材

工程材料及机械制造基础

◎主 编 李 清

◎主 审 陈金水



华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>

普通高等教育“十三五”规划系列教材

工程材料及机械制造基础

主 编 李 清

主 审 陈金水

华中科技大学出版社

中国·武汉

内 容 提 要

本书以金属零件的制造成形为主线,在介绍材料成形机理的基础上,讲述现今主流的制造方法,并通过知识点引申的方式,介绍非金属材料的成形方法和技术,培养学生的自学能力,从而使学生对整个制造技术有一个整体认识,并会选择材料及制造方法。全书分为9章,包括工程材料的基本知识、钢的热处理及表面工程技术、液态成形技术、压力加工、连接成形、粉末冶金、切削加工、数控加工与计算机辅助制造、特种加工。各章后面均有引申知识点和复习思考题。

本书可以作为高等学校工科相关专业的教材,也可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程材料及机械制造基础/李清主编. —武汉:华中科技大学出版社,2016.6
21世纪高等学校机械设计制造及其自动化系列教材
ISBN 978-7-5680-1515-8

I. ①工… II. ①李… III. ①金属加工-工艺学-高等学校-教材 IV. ①TG

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 321892 号

工程材料及机械制造基础

李 清 主 编

Gongcheng Cailiao ji Jixie Zhizao Jichu

策划编辑:万亚军

责任编辑:刘 飞

封面设计:原色设计

责任校对:何 欢

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)81321913

录 排:武汉三月禾文化传播有限公司

印 刷:武汉鑫昶文化有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:18.75

字 数:473千字

版 次:2016年6月第1版第1次印刷

定 价:37.50元



华中出版

本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

前 言

2011年,教育部高等学校机械基础课程教学指导分委员会在调研全国工程材料及机械制造基础系列课程的基础上,编制了《工程材料及机械制造基础课程教学基本要求》(以下简称《基本要求》)。本书是参照《基本要求》的精神编写的,同时还汲取了天津大学、河北工业大学、中国民航大学、天津科技大学、天津职业大学等多所学校十多年来在金属工艺学课程教学理念、教学内容、教学体系、教学方法与手段等方面进行教学改革所取得的研究成果,借鉴了国内外知名大学机械基础教育所取得的成功经验,强化了机械制造基础教学体系和创新能力培养的主线。

全书分为9章,包括工程材料的基本知识、钢的热处理及表面工程技术、液态成形技术、压力加工、连接成形、粉末冶金、切削加工、数控加工与计算机辅助制造、特种加工。各章后面均有引申知识点和复习思考题。本书可以作为高等学校工科各专业工程材料及机械制造基础系列课程(金属工艺学课程)的教材,也可供相关工程技术人员参考。

本书在规范教学内容、强调知识结构和强化创新意识培养等方面具有特色。书中既有需要掌握的必修内容,又有可深入提高的拓展指南,体现了分类教学、规范化与多样性相统一、拓宽专业培养口径、规范内容最小化和核心内容最低标准等原则,可作为近机械类和非机械类各工科专业的教材或教学参考用书。

本书由天津大学李清主编,陈金水教授主审。具体编写分工如下:绪论由天津大学车建明编写;第1章由中国民航大学景微娜、李蕊编写;第2章和第6章由天津大学王玉果编写;第3章和第4章由天津科技大学朱征编写;第5章由天津大学李清和天津职业大学闫红编写;第7章由天津大学王攀峰编写;第8章由河北工业大学曹文杰编写;第9章由天津大学李清编写。本书的编写还得到了编者所在院校领导的指导与帮助,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在不足之处,恳请学界同仁和广大读者批评指正。

编 者

2015年11月于北洋园

目 录

绪论	(1)
第 1 章 工程材料的基本知识	(5)
1.1 材料的主要性能	(6)
1.2 铁碳合金	(16)
1.3 常用金属材料	(27)
引申知识点	(35)
复习思考题	(36)
第 2 章 钢的热处理及表面工程技术	(38)
2.1 钢的热处理	(38)
2.2 表面工程技术	(60)
引申知识点	(72)
复习思考题	(72)
第 3 章 液态成形技术	(73)
3.1 合金的铸造性能	(73)
3.2 砂型铸造	(78)
3.3 特种铸造	(97)
引申知识点	(104)
复习思考题	(105)
第 4 章 压力加工	(107)
4.1 金属塑性变形基础知识	(107)
4.2 锻造	(112)
4.3 板料冲压	(130)
4.4 其他塑性成形工艺	(135)
引申知识点	(139)
复习思考题	(139)
第 5 章 连接成形	(141)
5.1 焊接理论	(142)
5.2 熔焊	(151)
5.3 压焊(固态焊)	(159)
5.4 钎焊	(164)

5.5 焊接工艺设计简介	(165)
引申知识点	(170)
复习思考题	(170)
第6章 粉末冶金	(172)
6.1 金属粉末的特性	(172)
6.2 粉末制备技术	(175)
6.3 粉末冶金成形技术	(182)
引申知识点	(196)
复习思考题	(196)
第7章 切削加工	(197)
7.1 金属切削基础知识	(197)
7.2 典型表面加工方法	(211)
7.3 典型零件切削加工工艺过程	(223)
7.4 零件结构的工艺性	(232)
引申知识点	(241)
复习思考题	(245)
第8章 数控加工与计算机辅助制造	(248)
8.1 数控机床及数控加工工艺特点	(248)
8.2 数控加工编程基础	(253)
8.3 数控加工与 CAM	(255)
引申知识点	(258)
复习思考题	(258)
第9章 特种加工	(259)
9.1 电火花加工	(259)
9.2 电化学加工	(271)
9.3 激光加工	(276)
9.4 电子束加工与离子束加工	(278)
9.5 超声加工	(282)
9.6 3D 打印技术	(284)
引申知识点	(288)
复习思考题	(289)
参考文献	(290)

绪 论

1. 课程的内容与要求

工程材料及机械制造技术是研究常用工程材料及其制造工艺方法的科学,是一门综合性的技术基础课程。随着科学技术的不断发展,材料的种类越来越多,制造方法层出不穷。本书抓住成形机理这个主线进行分章讲解,以金属材料为例,从材料本身的性质入手,介绍了八种主流的制造工艺。

工程材料及机械制造技术不仅是高等学校工科类学生的一门技术基础必修课,也是非工科类学生提高工程素质的一门重要公共课程。开设本课程的主要目的,在于使学生了解机械制造的一般过程和基本知识,掌握常用金属材料的性能、常规与先进制造技术的基本原理、工艺特点,初步建立现代制造工程和生产过程的概念,培养工程素养及创新意识,其教学特点具有很强的实践性,它是实现理工与人文社会学科融合的有效途径。

当前,我国正在实施科教兴国、人才强国战略,中央发出了“大众创业、万众创新”的战略号召。在这种情况下,推进素质教育,优化知识结构,重视能力培养,着力提高学生的学习能力、实践能力、创新能力就显得尤为重要。本课程在培养基础宽厚、素质高、能力强、富于创新精神的人才方面将发挥重要作用。

2. 金属工艺发展历史

金属工艺的发展与人类文明的发展同步。金属材料的生产和应用是人类征服自然、发展生产力的智慧结晶,是人类社会发展的重要里程碑。

公元前 5000 年左右,埃及人开始冶炼铜,并用铜制造工具和武器。公元前 1800 年左右,中国进入青铜器时代。中国青铜器制造技术发展非常快,到商代进入全盛期,工艺上已达到相当高的水平。商代铸造的后母戊鼎形状雄伟,气势宏大,纹饰华丽,工艺高超,它的质量为 832.8 kg,是世界上迄今出土的最重的青铜器。

公元前 1400 年左右,人类掌握了冶炼铁的技术,开始大量地生产铁,并在很多场合用铁代替了铜。中国在公元前 6 世纪出现了铁制品,在公元前 513 年铸出了世界上最早见于文字记载的铸铁件——晋国铸刑鼎,在商代和西周时期制造出了辘轳、鼓风机等工具。

从东汉到宋元时期,中国的机械技术在上长期居于领先地位。

1405 年,明朝郑和率领庞大的船队(240 艘海船、27400 名船员,主船长 137 m)进行了 7 次远航,访问了 30 多个国家。郑和船队航行时间之长、规模之大、范围之广,达到了当时世界航海事业的顶峰,也反映出了中国当时的机械制造水平之高。

1637 年,明朝末年的学者宋应星所著的《天工开物》一书,系统而全面地记载了中国农业、工业及手工业的生产工艺和经验,其中包括金属的开采与冶炼、铸造和锤锻工艺,船舶、车辆、武器、工具的结构和制作方法的等。图 0-1 是天工开物中记载的中国古代锤锻制造技术的图示。《天工开物》被译成多种文字流传于世,是一部在世界科技史上占有重要地位的科技著作,也是《金属工艺学》的先祖。

郑和船队和《天工开物》是中国古代科学技术辉煌的两个重要标志。



图 0-1 古代锤锻技术

需要说明的是,第一次工业革命以前,工程结构中使用的主要材料还是木材。车床和其他少数机床已经有了,但其结构是木制的,用来加工木质零件。金属(主要是铜和铁)仅用以制造仪器、钟表、泵和木结构机械上的小型零件。金属加工主要靠工匠的精工细作来达到所需要的精度。

18 世纪,第一次工业革命从英国发起。蒸汽机作为动力机,取代了人力、水利和畜力,开创了以机器代替手工劳动的时代。蒸汽机的出现,促进了蒸汽机车、蒸汽轮船等新机械的发明,引发了交通运输的革命。炼铁高炉的鼓风机有了新的动力,高炉的容量加大,冶炼温度提高,铁的质量也提高,产量也成倍增长。蒸汽机的制造,要求以从未有过的尺寸公差等级加工大型金属零件,从而促成了金属切削技术的第一次大发展,车床也由木质结构逐渐改为金属结构,出现了可制造金属零件的镗床和铣床。大型的集中的工厂生产系统,取代了分散的手工业作坊。金属材料的加工进入机械化时代,金属材料的使用量大幅增长,金属工艺水平大幅提高。

19 世纪中叶,随着发电机和电动机的发明,世界进入了电气时代。电灯、电车、电钻、电焊机等许多电器产品和技术如雨后春笋般地涌现出来。随着内燃机的发明,出现了汽车和飞机,从而对机器的运转速度、零部件的加工精度、生产效率提出了更高的要求。因此,磨床、插齿机、滚齿机、自动机床、组合机床、精密机床相继发明和使用,各种专用的切削机床趋于完备。大批量生产模式出现,标准化、系列化逐步走向完善,金属材料的加工工艺伴随着机械制造业开始迈向自动化和现代化,金属零部件的加工精度达到了纳米级。

2012 年,杰里米·里夫金在他的《第三次工业革命——新经济模式如何改变世界》中这样阐述:目前新兴的可再生能源技术和互联网技术的出现、使用和不断融合,将带给人类生产方式以及生活方式的再次巨大变革。

第三次工业革命将迎来制造业的数字化发展,其核心特征是工业化与信息化深度融合:一是更智能的计算机软件,数字化的规模大大提高了生产速度并降低了成本;二是新材料的出现,新材料比旧材料更轻、更坚固、更耐用;三是更灵巧的机器人,下一代制造业机械设备将能够抓取、装运、暂存、拾取零部件和进行清理打扫等;四是基于网络的制造业服务商出现,促成完整的产业链;五是新的制造方法(如 3D 打印技术)不断出现并使用。

3. 材料制造的内涵

制造一般指通过人工或机器使原材料或半成品成为可供使用的物品(即产品)。制造过

程一般需要相应的资源和活动,并产生相应的附加值。

随着历史的发展和技术的进步,制造的含义在不断扩展。制造的含义有狭义和广义之分。狭义制造指产品的制作过程,这也是一般意义上人们对制造的理解,例如,齿轮的制造、汽车的制造等。而广义制造指产品的全生命周期过程,是一个涉及产品设计、材料选择、生产规划、生产过程、质量保证、经营管理、市场销售和服务的一系列相关活动和工作的总称。本书内容属狭义制造范畴。材料的制造方法可以分为三大类:材料成形(变形)加工、材料分离加工和材料增量加工,如图 0-2 所示。



图 0-2 材料加工方法

通常情况下,根据材料在加工过程中的温度,人们将金属材料的加工分为冷加工和热加工两大类。在金属再结晶温度以下进行的加工称为冷加工,而在高于金属再结晶温度进行的加工称为热加工。铸造、锻造和焊接是金属材料的常见热加工方法,是将金属原材料加工成毛坯或产品的主要方法,人们习惯称之为成形加工。车削、铣削、磨削等切削加工以及特种加工等是金属材料的冷加工方法,人们习惯称之为机械加工。

随着工程材料种类的增多和材料加工技术的快速发展,制造产品的材料已不局限于金属材料,无机非金属材料、高分子材料和复合材料已广泛应用于生产和生活的各个领域,相应的材料成形方法也不仅仅是铸造、锻造和焊接,材料成形也包含粉末冶金、塑料成形、复合材料成形以及表面成形等方法。可见,材料成形的范围是不断扩展的。

材料成形不仅可以制造毛坯,也可以直接制造出成品零件,机械加工是在毛坯的基础上进行的,可制造出更高精度的零件。图 0-3 所示为零件的制造过程示意图,可以看出零件的制造过程主要由成形加工和机械加工两部分组成。从这个意义上看,制造技术可分为机械加工制造技术和成形加工制造技术两大类。

在不同的机械制造业中,各种金属制造方法所占地位及其产品比重有很大不同。例如:轴承工业中,磨削加工占有最大工作量;锅炉、轮船等,主要由钢板的焊接结构件组成;机



图 0-3 零件的制造过程

床工业中,铸件所占的比重很大;而仪表工业中,冲压件用得较多等。各种制造方法都在朝着高质量、高生产率和低成本的方向迅速发展。各种少切削、无切削加工,以及增材制造的新工艺发展,已使越来越多的零件改变了传统的制造工艺,从而节省了大量的材料并大幅度提高了生产率。此外,各种加工工艺过程的机械化、自动化的迅猛发展,已改变了并正在改变着整个机械制造工业的面貌。

下面以齿轮的制造过程为例,说明零件制造过程中所涉及的材料制造技术。齿轮是典型的盘套类零件,在工作时齿面承受较高的接触应力和摩擦力,齿根承受较大的弯曲应力,有时还承受冲击载荷。因此,对齿轮的力学性能要求较高,要求齿面有高的硬度和耐磨性,齿轮心部有足够高的强度和韧度。齿轮的工作条件不同,材料和制造方法也存在差异。下面列举齿轮的几种不同的制造方法。

(1) 对于低速、轻载齿轮,常用低碳钢或中碳钢锻造成形,再经机械加工、调质等工序。

(2) 对于高速、重载齿轮,常采用 20CrMnTi、20CrMo 等合金结构钢锻造成形,再经机械加工、渗碳等工艺。

(3) 对于要求不高的齿轮,可以采用灰口铸铁、球墨铸铁等材料铸造成形。

(4) 对于精度和强度要求不高的传动齿轮,如仪器设备、家用器具、玩具等齿轮,可选用尼龙、聚碳酸酯、聚甲醛等塑料注射成形方法制造。

(5) 对于一些强度和硬度较高的小型齿轮,可选用铁基粉末冶金方法制造。

综上所述,不同零件的制造工艺是不同的。对具有一定尺寸和形状精度要求的机械零件而言,一般都需要利用材料成形工艺制造毛坯,并经机械加工和热处理获得成品。

4. 本课程的学习方法

在学习本课程之前,学生应先修工程制图和工程训练等课程,需具备一定的机械产品和机械加工方面的感性知识,以及机械制图和金属材料的基础知识。

本课程的特点之一是涵盖的知识面广,融多种学科知识、多种工艺方法为一体,体现了多学科的交叉与渗透,信息量大。因此,学习时应注重课程内容的相关性。另一特点是实践性强,且教学中以叙述性知识为主,因此,在学习中应注重理论联系实际,要结合在前期工程训练的实践经历和平时日常生活中接触到的机械产品的实例,进行联想思维,加深对所学内容的理解。此外还要认真完成本课程的作业和工艺设计练习,通过独立思考,搞懂并掌握相关内容。

本课程中所学的知识在以后的专业课程学习、课程设计和毕业设计,以及将来的社会实践中都会一再用到,应充分利用这些机会,反复练习,扎实掌握,并进行巩固和提高。

要充分认识到本课程在培养学生的工程意识、创新意识、综合素质和解决工程实际问题的能力方面,具有其他课程难以替代的作用。

第 1 章 工程材料的基本知识

材料是人类用来制造各种产品的物质,是人类生活和生产的物质基础。历史证明材料是社会进步的物质基础和先导,是标志人类进步的里程碑。历史学家根据产品材料的不同,将人类生活分为石器时代、青铜器时代、铁器时代、水泥时代、硅时代和新材料时代。当今,人们把材料、信息、能源作为现代文明的三大支柱。

工程材料是用来制造工程构件、机械零件和工具的材料。工程材料应用于机械、车辆、船舶、建筑、化工、能源、仪器仪表、航空航天等工程领域。工程材料一般按化学成分,分为金属材料、无机非金属材料、高分子材料和复合材料四大类(见图 1-1)。

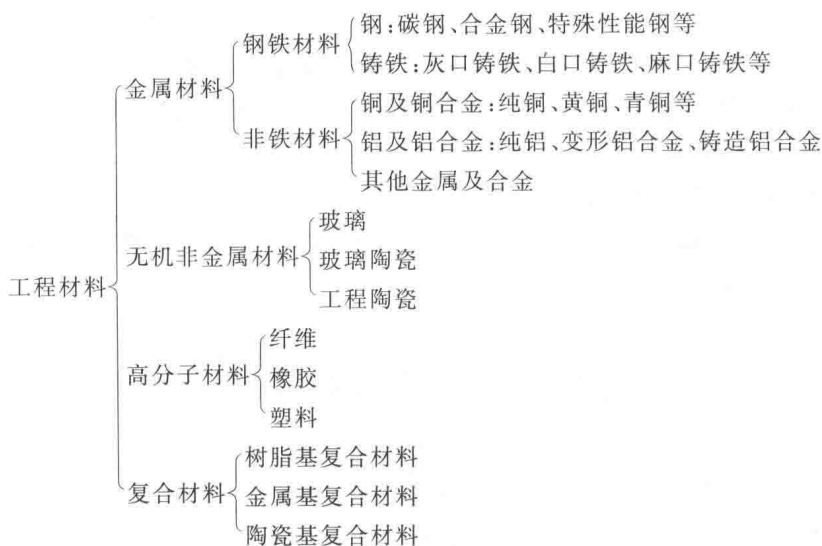


图 1-1 工程材料分类

目前,金属材料是机械工业最重要的工程材料,其中包括金属和以金属为基的合金。金属材料具有良好的力学性能、物理性能、化学性能及加工工艺性能,能满足机器零件的使用要求。金属材料还可以通过热处理改变其组织和性能,进一步扩大使用范围。

无机非金属材料具有硬度高、熔点高、耐高温、绝缘性和耐蚀性好等优点,新型无机材料已发展成为重要的高温材料和功能材料,渗透到各应用领域。但无机非金属材料的塑性和韧度远低于金属材料,严重影响其使用范围。

高分子材料是有机合成材料,也称聚合物。它具有较高的强度、良好的塑性、较强的耐蚀性能,很好的绝缘性和质量轻等优良性能,是工程上发展最快的一类新型结构材料。目前,在工业中已部分代替金属材料,广泛应用到电子信息、生物医药、航空航天、汽车工业、包装、建筑等各个领域。高分子材料种类很多,工程上通常根据力学性能和使用状态将其分为三大类:塑料、橡胶、合成纤维。但高分子材料的力学性能不如金属材料的力学性能,强度有一定局限,易出现应力松弛和蠕变,并且高分子材料的耐老化性能、耐高温性能也较差。

随着科技的不断发展,对材料性能提出了越来越高的要求,金属、高分子、陶瓷等单一材料已不能满足强度、韧度、刚度、质量、耐蚀性等多方面的要求。如果将高强度、高弹性模量的材料与高韧度的材料结合在一起,使其取长补短,可大大提高材料的性能,从而产生一种新型的材料——复合材料。

复合材料是由两种或两种以上的材料组成,各组成材料基本保持其原有各自的物理和化学性能,彼此之间有明显界面的材料。复合材料最大的特点是其性能比其组成材料的性能优越得多,大大改善了组成材料的弱点。例如,汽车的玻璃纤维挡泥板,单独使用玻璃太脆,单独使用聚合物材料则强度太低,然而将这两种单一材料经复合后得到了高强度、高韧度的新材料,而且质量很轻。复合材料具有许多优点:① 比强度和比模量高;② 抗疲劳性能和抗断裂性能好;③ 高温性能好;④ 耐磨减震性能优良。因此,复合材料得到了越来越广泛的应用。以往的民用飞机中,复合材料仅应用于雷达罩、整流罩、舱门等次要受力构件。随着技术不断发展,复合材料已应用于机身、机翼、发动机叶片、发动机罩等主要承重结构的制造,波音 787“梦幻飞机”的复合材料使用量达到 50% 以上,可以说,今后将是复合材料的时代。

金属材料有比高分子材料高得多的模量,比陶瓷高得多的韧度、可加工性、磁性和导电性,在工程材料中占有十分重要的地位。金属材料在大型民用运输机的结构质量中占 50% 以上。以最先进的空客 A380 飞机为例,金属材料的用量占到 60% 以上。为降低飞机结构质量,提高飞机结构效率,飞机结构需选用综合性能优良的材料,选用轻质、高强度和高模量的材料,同时为确保飞机的安全性和经济性,还应考虑材料的韧度、抗疲劳性能、抗断裂性能、耐蚀性等诸多方面。

1.1 材料的主要性能

材料的性能决定了它的使用范围、使用寿命,以及加工适应性,是产品设计、制造过程中最重要的考虑因素。材料性能包括使用性能和工艺性能两方面。其中,使用性能是指材料在正常使用条件下安全、可靠工作所具备的性能,包括力学性能、物理性能、化学性能等;工艺性能是指材料的可加工性,也就是材料在加工制造过程中反映出来的性能,包括锻造性能、铸造性能、焊接性能和切削加工性能等。

1.1.1 金属材料的力学性能

材料的力学性能是其在外力作用下表现出的性能,其主要指标有静载荷作用下的强度、硬度、塑性,动载荷作用下的冲击韧度、断裂韧度,交变载荷作用下的疲劳强度等。这些力学性能指标都可利用试验方法测得。静载荷是载荷缓慢地施加在零件上,加载后载荷大小和方向不随时间发生改变的载荷。动载荷是载荷以较高速度施加在零件上,形成冲击的载荷。交变载荷是载荷大小、方向或大小和方向随时间呈周期性变化的载荷。

1.1.1.1 强度和塑性

1. 拉伸试验和拉伸曲线

金属在静载荷下抵抗塑性变形或断裂的能力称为强度。强度大小通常用应力来表示。根据载荷作用方式不同,强度可分为抗拉强度、抗压强度、抗弯强度、抗剪强度和抗扭强度五

种。一般以抗拉强度作为判别金属强度高低的指标。金属的抗拉强度是通过拉伸试验测定的。

进行金属材料室温拉伸试验时,首先必须将金属材料制成符合国家标准 GB/T 228—2010 的标准试样,如图 1-2 所示。然后在拉伸试验机上对试样施加轴向静拉力 F ,随载荷的不断增大,试样被拉长,直到拉断。试验机将自动记录每一瞬间的载荷 F 和伸长量 ΔL 。利用静拉力 F 和试样伸长量 ΔL 的数值变化可得到力-伸长量的变化曲线,即拉伸曲线,图 1-3 (a)所示为低碳钢的力-伸长量拉伸曲线。

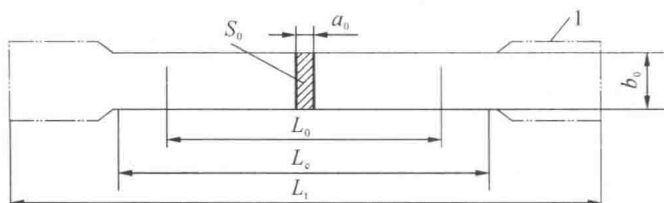


图 1-2 拉伸试样

S_0 —平行长度的原始横截面积; L_0 —原始标距; l —夹持头部; L_c —平行长度;
 a_0 —试样原始厚度或管壁原始厚度; L_1 —试样总长度; b_0 —试样平行长度的原始宽度

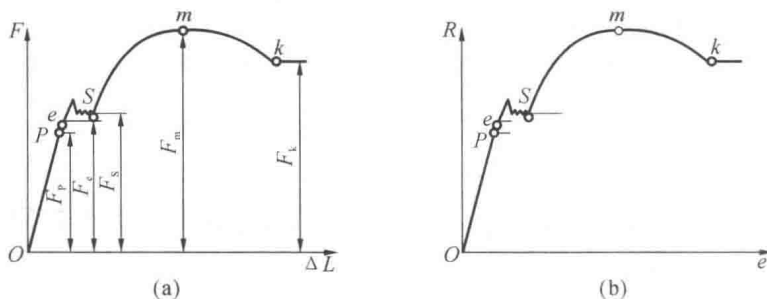


图 1-3 低碳钢拉伸曲线

(a) 拉伸力-伸长量曲线($F-\Delta L$ 曲线) (b) 应力-应变曲线($R-e$ 曲线)

为使曲线能够直接反映出材料的力学性能,可将纵坐标的静拉力改为用应力 R 表示,即试样单位横截面的拉应力 $R = \frac{F}{S_0}$;应变即试样单位长度的伸长量 $e = \frac{\Delta L}{L_0}$ 。由此绘成如图 1-3

(b)所示的应力-应变曲线。 $R-e$ 曲线和 $F-\Delta L$ 曲线形状相同,仅坐标含义不同。

拉伸曲线能反映金属材料在拉伸载荷作用下的变形过程,如图 1-3 所示,当静拉力未达到 e 点以前,试样只产生弹性变形,此时载荷 F 与伸长量 ΔL 为线性关系,当载荷去除后试样将恢复到原始长度。当载荷超过 e 点之后,试样除了发生弹性变形外,还发生塑性变形,外力去除后试样不能恢复到原始长度,形成永久变形。当外力达到 S 点时,图上出现一近似水平段或者锯齿状线段,这表示载荷虽未增加,但试样仍继续发生塑性变形而伸长,这一现象称为屈服, S 点称为屈服点。此后,随载荷增大,塑性变形明显加大,当载荷达到 m 点时,试样开始变细,出现颈缩,颈缩截面缩小,使继续发生变形所需的载荷下降。载荷达到 k 点时,试样在颈缩处断裂。

2. 弹性和刚度

弹性是金属材料受外力作用产生变形,当外力去除后能恢复原来形状的性能。随外力消失而消失的变形,称为弹性变形。弹性变形量大小与外力成正比,服从胡克定律。弹性变形阶段所对应的最大应力,称为弹性极限。对于弹性零件,如弹簧片、板等,弹性极限是主要

的性能指标。弹性模量表征材料产生弹性变形的难易程度,其值是材料在弹性变形范围内的应力与应变的比值,以 E 表示(单位为 MPa),即

$$E = \frac{R}{e} \quad (1-1)$$

材料的弹性模量越大,产生一定量的弹性变形所需要的应力越大,即材料越不容易产生弹性变形。弹性模量主要取决于材料内部的组织结构,常用的材料强化手段对弹性模量影响较小。在工程上,弹性模量被称为材料的刚度,反映了材料抵抗弹性变形的能力。

3. 强度

强度是金属材料在外力的作用下,抵抗塑性变形和断裂的能力,工程上金属材料的强度主要指屈服强度 R_e 和抗拉强度 R_m ,单位为 MPa。

1) 屈服强度 R_e

拉伸试验中,载荷达到 S 点时材料出现屈服, S 点是材料从弹性变形过渡到塑性变形的临界点。当金属材料出现屈服现象时,载荷不增加,试样仍能继续伸长,此时的应力值称为材料的屈服极限或屈服强度,用 R_e 表示。屈服强度分为上屈服强度和下屈服强度。

$$R_{eH} = \frac{F_{sH}}{S_0} \quad (1-2)$$

式中: R_{eH} ——上屈服强度,即试样发生屈服而载荷首次下降前的最高应力(MPa);

F_{sH} ——上屈服载荷,即试样发生屈服而载荷首次下降前的最高载荷(N);

S_0 ——试样的原始截面面积(mm^2)。

$$R_{eL} = \frac{F_{eL}}{S_0} \quad (1-3)$$

式中: R_{eL} ——下屈服强度,是指在屈服期间不计初始瞬时效应时的最低应力(MPa);

F_{eL} ——下屈服载荷,是指在屈服期间不计初始瞬时效应时的最低载荷(N);

S_0 ——试样的原始截面面积(mm^2)。

有一些金属材料如退火的轻金属、退火及调质的合金钢等,在拉伸过程中没有明显的屈服现象,无法确定屈服极限。有些脆性材料如铸铁,不仅没有屈服现象,而且也不会产生颈缩。表征这类材料的屈服强度时,一般工程上规定,以试样产生 0.2% 塑性变形时的应力,作为该种材料的规定塑性延伸强度,用 $R_{p0.2}$ 表示。

2) 抗拉强度 R_m

抗拉强度是金属材料断裂前所能承受的最大应力,即试样所能承受的最大载荷与试样原始截面面积的比值,用 R_m 表示,即

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad (1-4)$$

式中: R_m ——试样在断裂前所承受的最大应力(MPa);

F_m ——试样在断裂时所承受的最大载荷(N);

S_0 ——试样的原始截面面积(mm^2)。

工程上大多数零件都是在弹性范围内工作的,如果产生过量的塑性变形,零件会失效,因此多以屈服强度作为强度设计的主要依据。对于脆性材料,由于其断裂前不发生塑性变形,无屈服强度可言,在强度计算时以抗拉强度为依据。

R_e 和 R_m 的比值称为屈强比,其数值一般为 0.5~0.75。屈强比越小,材料的可靠性越高,即使超载也不会马上断裂;屈强比越大,材料的利用率越高,但可靠性将下降。

金属材料的强度与化学成分和工艺过程,尤其是热处理工艺有密切关系。纯金属的抗拉强度较低,但合金的抗拉强度明显提高。如铜为 600 MPa,铝为 400 MPa,而铜合金的抗拉强度为 600~700 MPa,铝合金的抗拉强度为 400~600 MPa。通过强化处理或冷热加工,可提高材料的屈服强度和抗拉强度。碳质量分数为 0.4% 的铁碳合金的抗拉强度为 500 MPa,经淬火和高温回火后,其抗拉强度提高到 700~800 MPa。

4. 塑性

塑性是材料在静载荷作用下产生塑性变形而不被破坏的能力,以材料断裂后塑性变形的大小来表征,常用的塑性指标是断后伸长率 A 和断面收缩率 Z 。

1) 断后伸长率 A

试样断裂后,其标距的伸长与原始标距的百分比称为断后伸长率,即

$$A = \frac{l_u - l_0}{l_0} \times 100\% \quad (1-5)$$

式中: l_0 ——拉伸试样原始标距(mm);

l_u ——拉伸试样拉断后的标距(mm)。

2) 断面收缩率 Z

试样拉断后,缩颈处截面积的最大缩减量与原始截面积的百分比,即

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100\% \quad (1-6)$$

式中: S_0 ——拉伸试样原始截面面积(mm²);

S_u ——拉伸试样断裂处的截面面积(mm²)。

用断面收缩率表示塑性比用断后伸长率表示更能说明真实变形情况。当 $A > Z$ 时,材料无缩颈,为脆性材料特征;而 $A < Z$ 时,材料有缩颈,为塑性材料特征。

A 和 Z 的数值越大,表示材料的塑性越好。在使用中一旦超载,塑性变形还能避免材料突然断裂,从而增加零件的安全性。同时,良好的塑性是金属材料进行轧制、锻造、冲压、焊接的必要条件。

1.1.1.2 硬度

硬度是金属材料表面抵抗局部变形(特别是塑性变形、压痕、划痕)的能力,是衡量金属软硬的指标。硬度直接影响材料的耐磨性,刀具、量具、磨具的耐磨表面都应具有较高的硬度。工程上常用的硬度有布氏硬度、洛氏硬度、维氏硬度等。

1. 布氏硬度

金属材料布氏硬度试验标准 GB/T 231.1—2009 规定,布氏硬度的测试是以直径为 D 的硬质合金球为压头,在规定的试验力 F 作用下,将压头压入被测金属的表面,如图 1-4 所示,保持规定时间后卸除试验力,然后在两垂直方向测得表面压痕直径,求得压痕平均直径 d ,以载荷 F 与压痕面积 S 的比值作为布氏硬度值,用 HBW 表示,即

$$HBW = \frac{F}{S} = 0.102 \times \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1-7)$$

式中: F ——试验力(N);

S ——球面压痕表面积(mm²);

d ——压痕平均直径(mm);

D ——压头直径(mm)。

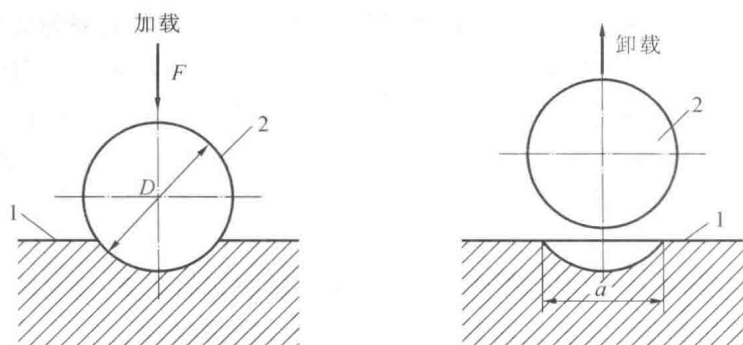


图 1-4 布氏硬度测试原理

1—被测件；2—压头

布氏硬度的单位是 N/mm^2 ，但习惯上只写数值不标单位。硬度值越高，表明材料越硬，耐磨性越好。传统的布氏硬度计以淬火钢球为压头，用 HBS 表示。

布氏硬度试验是使用最早、应用最广泛的硬度试验方法，主要适用于灰口铸铁、非铁金属、各种软钢等硬度不是很高的材料。采用布氏硬度，试验值较稳定，准确度较洛氏硬度试验值高，重复性好，但材料表面压痕较大，不宜用于成品零件和薄壁件的硬度检测。

2. 洛氏硬度

洛氏硬度试验采用锥角为 120° 、顶部曲率半径为 0.2 mm 的金刚石圆锥体或直径为 1.588 mm 的硬质合金球作为压头，施加一定的压力压入材料表面，根据压痕深度来确定材料的硬度。试验时如图 1-5 所示，先加初始试验力，压头在位置 1；然后加主载荷，压头在位置 2；保持主载荷一定时间后，卸除主载荷，在保留初始试验力的情况下，压头在位置 3。故由于主载荷引起的塑性变形而使压头压入深度为 $h = h_3 - h_1$ 。洛氏硬度值采用一个常数 c 减去 h ，并用每 0.002 mm 的压痕深度为一个硬度单位

$$\text{HR} = \frac{c - h}{0.002}$$

式中： c 为常数，对于 HRC、HRA， c 取 0.2 ；对于 HRB， c 取 0.26 。洛氏硬度没有单位，试验时硬度值直接从硬度计的表盘上读出。

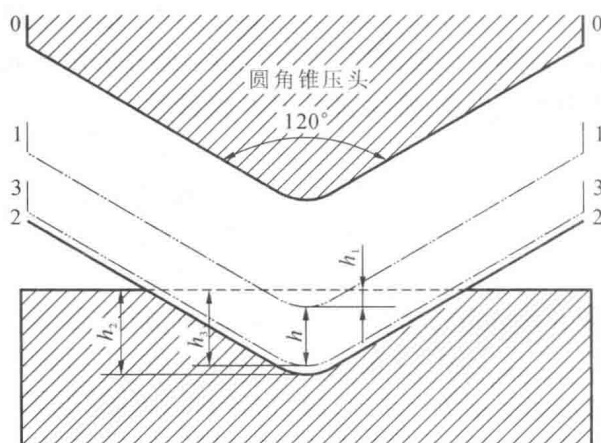


图 1-5 洛氏硬度试验原理图

为了使一台硬度计能测试从软到硬各种材料的硬度，其压头和载荷可以变更，可用 9 种不同符号表示。常用的有三种，即 HRA、HRB 和 HRC。表 1-1 给出了几种测试规范。

表 1-1 洛氏硬度测试规范

硬度符号	压头类型	主载荷	使用测试范围	硬度值有效范围
HRA	120°金刚石圆锥形压头	588.4 N	硬度极高的材料,如硬质合金	70 HRA 以上
HRB	φ1.58 mm 淬火钢球	980.7 N	硬度较低的材料,如退火钢、铸铁	25~100 HRB
HRC	120°金刚石圆锥形压头	1471.1 N	硬度较高的材料,如淬火钢、调质钢	20~67 HRC

洛氏硬度试验操作简单、迅速、压痕小、不损伤零件,多用于成品检验。其缺点是测量的硬度值重复性差,不均匀,需多测几个点取平均值。多用于钢铁原材料、非铁金属、经淬火后的工件、表面热处理工件及硬质合金等的硬度测试。

3. 维氏硬度

维氏硬度试验原理和上述两种硬度试验的类似:采用锥面夹角为 136°的金刚石四棱形锥体,在一定载荷下保持一定时间后卸载,得到具有正方形基面的压痕,以压痕对角线长度来衡量硬度值的大小,用 HV 表示。

维氏硬度广泛应用在精密工业和材料研究中,由于试验时所施试验力小,压痕深度浅,故可用于测定薄片金属材料、表面淬硬层、各种涂层等的表面硬度。维氏硬度值具有连续性,可测定很软到很硬的各种金属材料的硬度,且准确性高。其缺点是压痕小,对试件表面质量要求较高。

1. 1. 1. 3 韧度

1. 冲击韧度

在生产实践中,很多机器零件都会受到冲击载荷的作用,如空气锤的锤杆、锻压机的冲头、火车挂钩、活塞销等。由于瞬时冲击引起的变形和应力比静载荷要大得多,因此必须考虑金属材料抵抗冲击载荷的能力。

冲击韧度是金属材料断裂前吸收变形能量的能力。韧度好的金属材料断裂时吸收能量较多,不易发生脆性断裂。金属材料的冲击韧度常用摆锤冲击弯曲试验机来测定。把待测材料制成如图 1-6 所示的标准缺口试样,再将试样放置在试验机支座上,将具有一定重量 G 的摆锤自一定高度 H 自由下落,冲断试样,摆锤凭借剩余的能量又上升到高度 h 。摆锤冲断

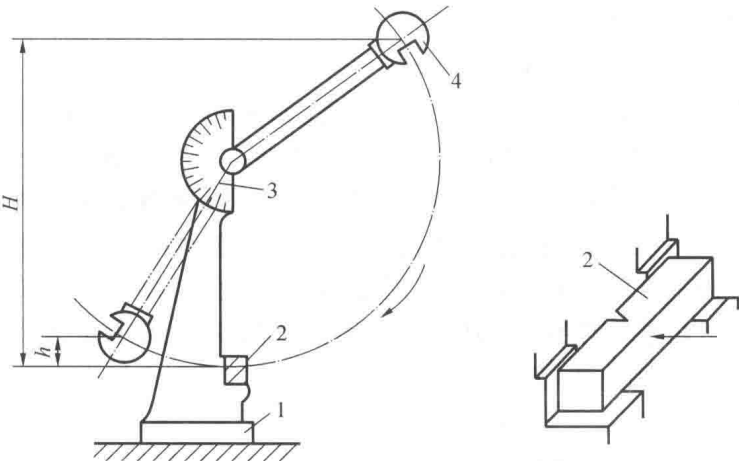


图 1-6 摆锤冲击试验示意图

1—冲击试验机底座;2—试样;3—刻度盘;4—摆锤