

工程材料及成形工艺基础

主 编 齐乐华
副主编 朱明 王俊勃

西北工业大学出版社
NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY PRESS

【内容简介】 本书为适应 21 世纪人才培养需求并遵循机械基础课程体系改革精神,在总结近年来的探索、改革和实践经验的基础上编写而成。

本书对传统金属工艺学内容进行了精选,全书分材料、工艺两大部分。材料部分除介绍材料的力学、物理性能及其结构外,还重点介绍了金属材料、陶瓷材料和复合材料的组成、性能、制备、应用和发展趋势,材料的强化方法和改性,产品设计与选材的关系等;工艺部分以介绍各种毛坯的成形方法为主,强化工艺设计,重在培养学生分析问题和解决问题的能力,并大篇幅增加了新材料、新技术、新工艺内容,如非金属材料、复合材料及其成型,高能率成形,精密焊接,各种成形方法的发展趋势等。

本书可作为高等工科院校机械类及机电类本科教材,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

工程材料及成形工艺基础/齐乐华主编. —西安:西北工业大学出版社,2002.3
ISBN 7-5612-1431-6

. 工... . 齐... . 工程材料—成形—加工—高等学校—教材 . TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 095986 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072 电话:(029)8493844

网 址:<http://www.nwpup.com>

印 刷 者:西安市向阳印刷厂

开 本:787 mm × 1 092mm 1/16

印 张:17.5

字 数:420 千字

版 次:2002 年 3 月第 1 版 2002 年 3 月第 1 次印刷

印 数:1~2 000 册

定 价:22.00 元

前 言

本书为适应 21 世纪人才培养需求并遵循机械基础课程体系改革精神,在总结近年来的探索、改革和实践经验的基础上编写而成。

本书对传统金属工艺学内容进行了精选,全书分材料、工艺两大部分。材料部分除介绍材料的力学、物理性能及其结构外,还重点介绍了金属材料、陶瓷材料和复合材料的组成、性能、制备、应用和发展趋势,材料的强化方法和改性,产品设计与选材的关系等;工艺部分以介绍各种毛坯的成形方法为主,强化工艺设计,重在培养学生分析问题和解决问题的能力,并大篇幅增加了新材料、新技术、新工艺内容及其发展趋势,如非金属材料、复合材料及其成型,高能率成形,精密焊接等。

本书除绪论外,共分 14 章,包括材料的种类与性能、材料的结构、凝固与变形、二元合金相图及其应用、金属热处理及材料改性、金属材料、合金钢、有色金属及其合金、非金属材料及复合材料、机械零件失效分析及选材、铸造、压力加工、焊接、非金属材料及复合材料成型、毛坯成形方法选择及结构设计。

本书可作为高等工科院校机械类及机电类本科教材,也可供有关工程技术人员参考。使用本书时,可结合各专业的具体情况进行调整,有些内容可供学生自学。

本书由齐乐华教授担任主编,朱明副教授、王俊勃副教授担任副主编。参加本书编写的有:西北工业大学齐乐华教授(绪论、第 2 篇第 11~12 章、第 13 章第 3 节、第 14 章第 1、3、4、5 节)、朱明副教授(第 1 篇第 6~9 章),西安工程科技学院王俊勃副教授(第 1 篇第 1~5 章)、屈银虎副教授(第 2 篇第 10 章、第 13 章 1、2 节、第 14 章第 2 节)。

本书承蒙西安交通大学范群成教授主审,西北工业大学陈国定教授、葛文杰教授、孙根正教授、高满屯教授、吴立言副教授、李建华副教授以及许多老师为本书的编写提供了宝贵意见,西安理工大学葛利玲副教授提供了金相照片,在此一并表示衷心感谢。

本书编写力求适应高等教育的改革与发展,但由于编者水平有限,难免出现错误和不足之处,敬请读者批评指正。

编 者

2001 年 12 月

目 录

绪 论.....	1
----------	---

第 1 篇 工程材料

第 1 章 材料的种类与性能.....	5
1.1 材料的种类	5
1.2 材料的性能	6
第 2 章 材料的结构、凝固与变形.....	14
2.1 金属的晶体结构与结晶.....	14
2.2 塑性变形与再结晶.....	19
2.3 非金属材料的结构.....	27
2.4 材料的同素异构现象.....	31
第 3 章 二元合金相图及其应用	33
3.1 相图的建立.....	33
3.2 匀晶相图.....	34
3.3 共晶相图.....	36
3.4 其他相图.....	40
3.5 相图与性能的关系.....	41
3.6 铁碳合金相图.....	42
第 4 章 金属热处理及材料改性	50
4.1 钢的热处理原理.....	50
4.2 钢的退火与正火.....	56
4.3 钢的淬火.....	57
4.4 钢的回火.....	61
4.5 钢的表面热处理.....	63
4.6 钢的其他热处理.....	66
4.7 其他材料的强化方法.....	67
4.8 材料的表面处理技术.....	68

第 5 章 金属材料	71
5.1 碳钢.....	71
5.2 铸铁.....	76
第 6 章 合金钢	84
6.1 合金元素在钢中的作用与钢的分类.....	84
6.2 结构钢.....	86
6.3 工具用钢.....	91
6.4 不锈钢.....	94
6.5 耐热钢与耐热合金.....	98
第 7 章 有色金属及其合金.....	104
7.1 铝及铝合金	104
7.2 钛及钛合金	108
7.3 铜及铜合金	112
第 8 章 非金属材料及复合材料.....	116
8.1 陶瓷材料	116
8.2 复合材料	121
第 9 章 机械零件失效分析及选材.....	125
9.1 机械零件失效及分析	125
9.2 选材的一般原则	127
9.3 选材的实际过程	129

第 2 篇 材料成形工艺基础

第 10 章 铸造	131
10.1 铸造成形理论基础.....	131
10.2 砂型铸造.....	141
10.3 特种铸造.....	149
10.4 常用合金铸件生产特点.....	154
10.5 现代铸造技术与发展趋势.....	157
第 11 章 压力加工	167
11.1 压力加工理论基础.....	168
11.2 常用锻造方法.....	173

11 3	板料冲压.....	187
11 4	现代塑性加工技术与发展趋势.....	195
第 12 章	焊接	202
12 1	焊接工程理论基础.....	203
12 2	常用焊接方法.....	214
12 3	常用金属材料的焊接.....	221
12 4	现代焊接技术与发展趋势.....	225
第 13 章	非金属材料及复合材料成型方法简介	231
13 1	塑料件成型.....	231
13 2	陶瓷件成型.....	234
13 3	复合材料成型.....	237
第 14 章	毛坯成形方法选择及结构设计	246
14 1	毛坯成形方法选择.....	246
14 2	铸件结构设计.....	253
14 3	锻件结构设计.....	257
14 4	冲压件结构设计.....	259
14 5	焊接结构设计.....	261
主要参考文献	268

绪 论

材料科学和制造科学同信息科学与生物科学一样,被认为是促进人类文明与发展的四大关键领域,对国民经济的发展起着重要作用。面对市场经济和全球化竞争的挑战,要为国民经济的发展做出重要贡献,就要十分重视材料成形与制造业的发展。

机械制造的生产过程一般是先用铸造、压力加工或焊接等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精确的零件,最后将零件装配成为机器。为了改善毛坯和工件的性能,常须在制造过程中穿插进行热处理。

毛坯材料和成形方法的选用直接影响零件的质量、成本和生产率。要合理选择毛坯种类和制造方法,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、成形特点和选用原则等。

在材料生产及其成形工艺的历史上,我们的祖先有过辉煌的成就,为人类文明做出了重大贡献。我国在原始社会后期开始有陶器,在仰韶文化和龙山文化时期制陶技术已相当成熟;青铜冶炼始于夏代,至商周时代(公元前16世纪~公元前8世纪)冶铸技术已达到很高水平,形成了灿烂的青铜文化;公元前7世纪~公元前6世纪的春秋时期,我国已开始大量使用铁器,白口铸铁、麻口铸铁、可锻铸铁相继出现,比欧洲国家早1800多年;在大约3000年前,我国已采用铸造、锻造、淬火等技术生产工具和各种兵器。大量的历史文物,如河南安阳武官村出土的商代司母戊鼎,重875 kg,在大鼎四周,有蟠龙等组成的精致花纹;湖北江陵楚墓中发现的埋藏了2000多年的越王勾践的宝剑,至今仍异常锋利,金光闪闪;陕西临潼秦始皇陵出土的大型彩绘铜车马,由3000多个零、部件组成,综合采用了铸造、焊接、凿削、研磨、抛光及各种连接工艺,结构复杂,制作精美;河南南阳汉代冶作坊出土的9件铁农具,有8件是黑心韧性铸铁,其质量与现代同类产品相当;现存于北京大钟氏内明朝永乐年间制造的大钟(重46.5 t),其上遍布经文20余万字,其浑厚悦耳的钟声至今仍伴随着华夏子孙辞旧迎新……均显示出中华民族在材料、成形方法及热处理等方面的卓越成就,以及对世界文明和人类进步所做出的显著贡献。春秋时期的《考工记》中关于钟鼎和刀剑不同的铜锡配比的珍贵记载,是世界上出现最早的合金配比规律;明朝(1368—1644年)宋应星所著《开工天物》一书,记载了冶铁、铸钟、锻铁、焊接(锡焊和银焊)、淬火等多种金属成形及改性方法及日用品的生产技术和经验,并附有123幅工艺流程插图,是世界上有关金属加工工艺最早的科学论著之一。

然而,18世纪以后,由于长期的封建统治和闭关自守,以及上百年来帝国主义的侵略和压迫,严重束缚了我国科学技术的发展,造成了与工业发达国家之间大的差距。

新中国成立以后,特别是近几十年来,我国工业生产迅速发展,取得了举世瞩目的成就。20世纪60年代我国自行设计、自行生产的12000 t水压机,是制造大型发电机、大型轧钢机、大型化工容器和大型动力轴一类锻件的必备设备;我国人造地球卫星、洲际弹道导弹及长征系

列运载火箭的研制成功,均与机械制造工艺水平的发展密切相关。我国是世界上少数几个拥有运载火箭和人造卫星发射实力的国家。这些飞行器的壳体均是选用铝合金、钛合金或特殊合金薄壳结构,采用胶接(或黏结)及钨极氩弧焊、等离子弧焊、真空电子束焊、真空钎焊和电阻焊等方法焊接而成。我国成功生产了世界上最大的轧钢机机架铸钢件(重 410 t)和长江三峡巨型水轮机发电机组特大型零、部件;锻造了 196 t 汽轮机转子;进行了 15 MPa 氢反应器及 3×10^8 W 电站锅炉的焊接,并能够建造 150 000 t 的超大型船舶。

20 世纪 80 年代以后,世界各国对新材料的开发都非常重视。光电子信息材料、先进复合材料、先进陶瓷材料、新型金属材料、高性能塑料、超导材料等不断涌现,并迅速投入使用,给社会生产和人们的生活带来了巨大的变化。近年来,精密成形技术也不断产生,使毛坯的形状、尺寸和表面质量更接近零件要求。近净成形(Near Net Shape Technique)和净成形(Net Shape Technique)技术迅速发展,包括近净形铸造成形、精密塑性成形、精密焊接(人造卫星硅太阳能电池制造中硅片表面的焊接,每个焊点仅为 $0.18 \sim 0.5 \text{ mm}^2$)与精确连接、精密热处理、表面改性等专业领域,使机械构件具有精确的外形、高的尺寸精度和形位精度、好的表面粗糙度。国际机械加工技术学会预测,本世纪初精密成形与磨削加工相结合,将逐渐取代大部分中、小零件的切削加工,到 2010 年,它所成形的公差可相当于磨削精度。

当今之世,科学技术迅猛发展,微电子、计算机、自动化技术与制造工艺和设备相结合,形成了从单机到系统,从刚性到柔性,从简单到复杂等不同档次的多种自动控制加工技术;成形加工过程的计算机模拟、仿真与并行工程、敏捷化工程及虚拟制造相结合,已成为网络化异地设计与制造的重要内容;应用新型传感器、无损检测等自动监控技术及可编程控制器、新型控制装置可以实现系统的自适应控制和自动化控制;工业机器人更是涉及众多新的领域,现代机械制造系统,是以提高企业竞争力为目标,把先进技术与经济效果紧密结合,包含自动化技术、计算机控制与辅助技术、设计与工艺技术、材料技术,以及财会金融与工商管理,已非传统意义的机械制造。

近年来,科学家们又提出智能结构系统的概念,它是以生物界的方式感知结构系统的内部状态和外部环境,并及时作出判断和响应。智能结构系统是在结构中集成传感器、控制器及执行器,赋予结构健康自诊断、环境自适应及损伤自愈合等某些智能功能与生命特征,达到增强结构安全、减轻质量、降低能耗和提高性能总目标的一种仿生结构系统。可以预见,随着该系统的产生和应用,全球制造业将发生巨大变化。

尽管各种新技术、新工艺应运而生,新的制造理念不断形成,但铸造、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,常规工艺的不断改进和提高,并通过各种途径实现高效化、精密化、轻量化和绿色化,具有很大的技术经济意义。本课程也是学习上述基本知识的入门课程。

《工程材料及机械制造基础》(含《工程材料及成形工艺基础》、《机械加工工艺基础》)是机械类专业必修的一门主干技术基础课,也是近机类和部分非机类专业普遍开设的一门课程,旨在使学生建立生产过程的基本知识,了解新材料,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。

学生在学完本课程以后,应达到以下基本要求:

1. 建立工程材料和材料成形工艺与现代机械制造的完整概念,培养良好的工程意识;
2. 掌握金属材料的成分、组织、性能之间的关系,强化金属材料的基本途径,钢的热处理原

理及方法,常用金属材料、非金属材料 and 复合材料的性质、特点、用途和选用原则;

3.掌握各种成形方法和常用设备的基本原理、工艺特点和应用场合,具有合理选择毛坯成形方法的能力;

4.掌握零件(毛坯)的结构工艺性,并具有设计毛坯和零件结构的初步能力;

5.了解与本课程有关的新技术、新工艺。

本课程融多种工艺方法为一体,信息量大,实践性强,叙述性内容较多,必须在金工教学实习获得感性认识的基础上进行课堂教学,才能收到预期效果。应以课堂教学为主,同时辅之以电教片、多媒体 CAI、实物与模型、课堂讨论等多种教学手段和形式,以增强学生的感性认识,加深其对教学内容的理解;教学过程中应注意理论联系实际,使学生在掌握理论知识的同时,提高分析问题和解决问题的工程实践能力;学生应注意观察和了解平时接触到的机械装置,按要求完成一定量的作业及复习思考题;对于课程中结构工艺性内容,尚须在后继课程及课程设计、毕业设计中反复练习、提高,运用所学知识尝试解决有关问题,才能较好地掌握本课程内容,扩大课堂教学效果。

第 1 章 材料的种类与性能

1.1 材料的种类

人类生活、生产的过程是使用材料和将材料加工成成品的过程。材料使用的能力和水平标志着人类的文明和进步程度。人类发展的历史时代按人类对材料的使用分为石器时代、青铜器时代、铁器时代等。在当今社会,能源、信息和材料已成为现代化技术的 3 大支柱,而能源和信息的发展又依托于材料。因此,世界各国都把材料的研究、开发放在突出的地位,我国的“863”计划把材料列为 7 个优先发展的领域之一。

迄今为止,人类发现和使用的材料种类繁多。而工程材料主要指用于机械工程和建筑工程等领域的材料。工程材料种类很多,用途广泛,有许多不同的分类方法,通常按其组成进行分类,如图 1-1 所示。

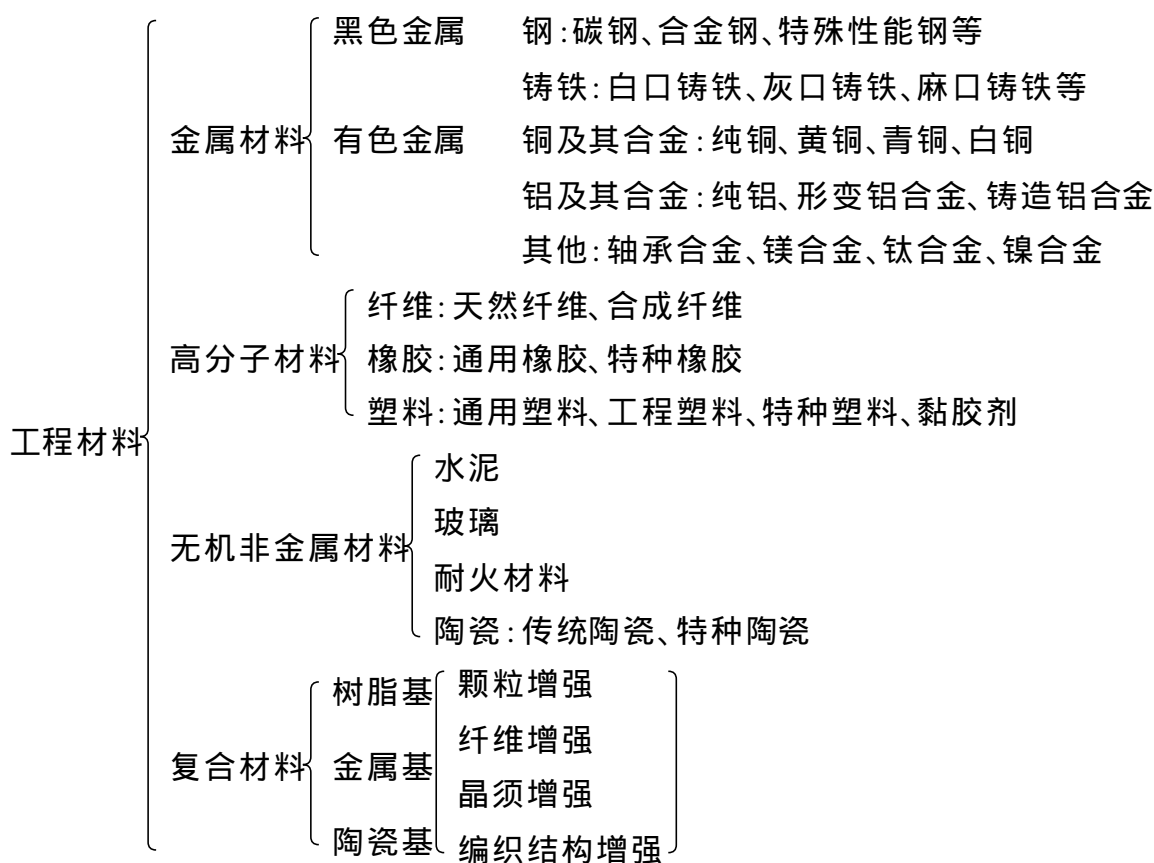


图 1-1 工程材料分类

金属材料包括钢铁、有色金属及其合金。由于金属材料具有良好的力学性能、物理性能、化学性能及工艺性能,能采用比较简便和经济的工艺方法制成零件,因此金属材料是目前应用最广泛的材料。

高分子材料包括塑料、橡胶等。因其原料丰富,成本低,加工方便等优点,发展极其迅速,目前已在工业上得到广泛应用,并将越来越多地被采用。

无机非金属材料主要是陶瓷材料、水泥、玻璃、耐火材料。它具有不可燃烧性、高耐热性、高化学稳定性、不老化性以及高的硬度和良好的耐压性,且原料丰富,受到材料工作者和特殊行业的广泛关注。

复合材料是由基体材料(树脂、金属、陶瓷)和增强剂(颗粒、纤维、晶须)复合而成的。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,所以自1940年玻璃钢问世以来,复合材料的应用领域在迅速扩大,品种、数量和质量有了飞速发展。

1.2 材料的性能

工程材料的性能分为使用性能和工艺性能。使用性能是指在服役条件下能保证安全可靠工作所必备的性能,其中包括材料的力学性能(机械性能)、物理性能、化学性能等。工程材料使用性能的好坏,决定了它的使用范围和寿命。对绝大多数工程材料来说,其力学性能是最重要的使用性能。工艺性能是指材料的可加工性。其中包括锻造性能、铸造性能、焊接性能、热处理性能及切削加工性等。

1.2.1 静载时材料的力学性能

静载是指对试样缓慢加载。最常用的静载试验有拉伸、压缩、硬度、弯曲、扭转等,利用这些试验方法,可以测得各种力学性能指标,这里主要讨论强度、塑性和硬度指标。

1. 强度

强度是指在外力作用下,材料抵抗变形和断裂的能力。

强度指标常通过拉伸试验测定。在标准试样的两端缓慢地施加拉伸载荷,使试样的工作部分受轴向拉力 F ,并引起试样沿轴向产生伸长 l ,随着 F 值的增加, l 也相应增大,直到试样断裂为止。由载荷(拉力)与变形量(伸长量)的相应变化,可以绘出拉伸曲线。图1-2(a)所示为退火低碳钢的拉伸曲线。如果把拉力除以试样的原始截面积 S_0 ,则得到拉应力(单位面积上的拉力),把伸长量 l 除以试样的标距长度 l_0 ,得到应变(单位长度的伸长量)。根据 σ 和 ϵ ,可以画出应力-应变曲线(图1-2(b))。应力-应变曲线不受试样尺寸的影响,可以从曲线上直接读出材料的一些常规力学性能指标。静载拉伸下材料的力学性能指标主要有以下几个。

(1) 弹性极限 σ_e 和弹性模量 E :在拉伸曲线上, e 点以前产生的变形是可以恢复的变形,叫做弹性变形, e 点所对应的弹性变形阶段的最大应力,称为弹性极限,以 σ_e 表示(单位为MPa),对一些弹性零件如精密弹簧等, σ_e 是主要的性能指标。

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

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

弹性模量 E 表征材料产生弹性变形的难易程度。材料的 E 大, 表示材料产生一定量的弹性变形所需要的应力也大, 即不容易产生弹性变形, 反之亦然。弹性模量在工程上称为材料的刚度。显然, 在零件的结构、尺寸已确定的前提下, 其刚度取决于材料的弹性模量。

弹性模量主要取决于材料内部原子间的作用力, 如晶体材料的晶格类型、原子间距, 而其他强化手段对弹性模量的影响较小。

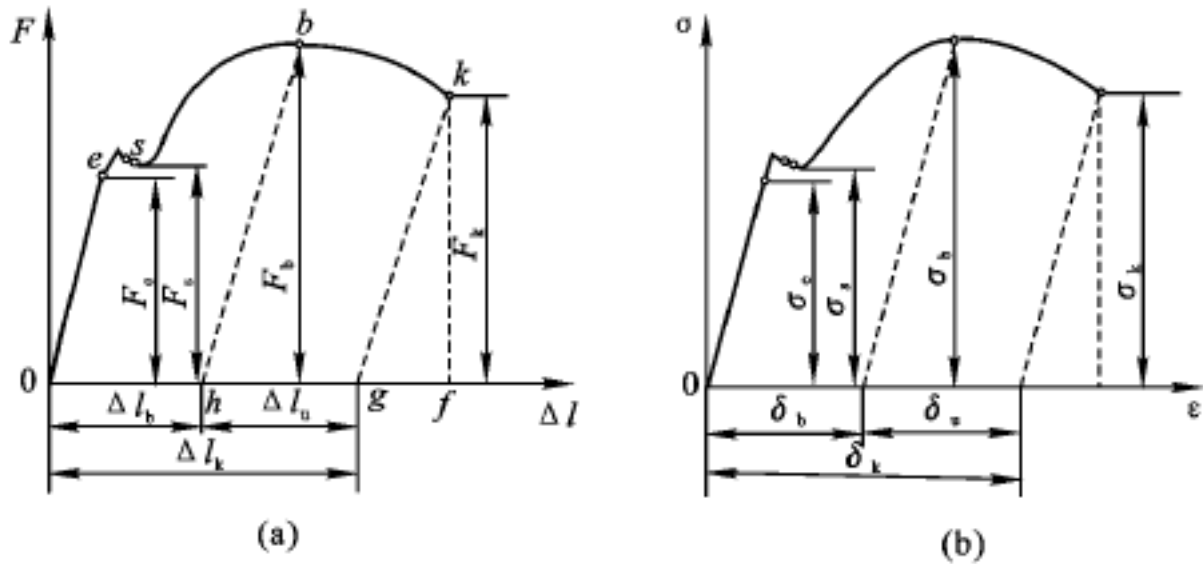


图 1-2 退火低碳钢的拉伸曲线(a) 和应力-应变曲线(b)

(2) 屈服强度 σ_s : 在图 1-2 所示的拉伸曲线中, 在 s 点出现一水平线段, 这表明拉力虽然不再增加, 但变形仍在继续。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, 用 σ_s 表示 (单位为 MPa), 即

$$\sigma_s = \frac{F_s}{S_0}$$

式中 F_s —— 对应于 s 点的外力;
 S_0 —— 试样的原始横截面积。

由于有很多材料的拉伸曲线上没有明显的屈服点 (图 1-3), 无法确定屈服极限, 因此规定试样产生 0.2% 塑性变形时的应力值为该材料的屈服极限, 称为条件屈服极限, 以 $\sigma_{0.2}$ 表示, 即

$$\sigma_{0.2} = \frac{F_{0.2}}{S_0}$$

式中, $F_{0.2}$ 为产生 0.2% 残余伸长量 l 的载荷, 其确定方法是首先在拉伸图上截取 $0d = 0.2\% l$, 过 d 点做平行于拉伸曲线弹性变形阶段的平行线与拉伸曲线交于 s 点, 再过交点 s 做水平线, 与 F 轴的交点即为 $F_{0.2}$ 。

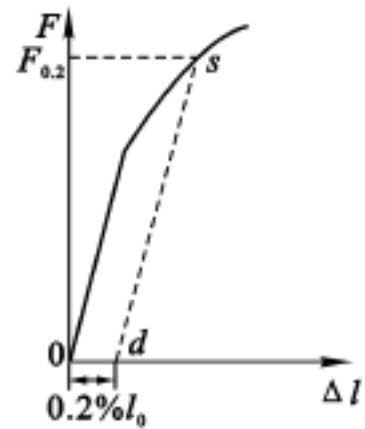


图 1-3 图解法确定 $\sigma_{0.2}$

工程中大多数零件都是在弹性范围内工作的, 如果产生过量塑性变形就会使零件失效, 所以屈服强度是零件设计和选材的主要依据之一。

(3) 抗拉强度 σ_b : 试样拉断前最大载荷所决定的应力值, 即试样所能承受的最大载荷除以

原始横截面积,以 S_0 表示(单位为 MPa),有

$$\sigma_b = \frac{F_b}{S_0}$$

式中, F_b 为试样所能承受的最大载荷。

抗拉强度的物理意义是表征材料对最大均匀变形的抗力,它是设计和选材的主要依据之一。因为有些材料几乎没有塑性或是低塑性脆性材料,因此 σ_b 是这类材料的主要设计指标。

强度指标还有断裂强度 σ_k 。它是材料拉断时最大载荷所对应的强度。

2. 塑性

断裂前材料发生塑性变形的能力叫做塑性。塑性以材料断裂后塑性变形的大小来表征。拉伸时用延伸率(%)和断面收缩率(%)表示,两者均无单位量纲。

(1) 延伸率(%)表示试样拉伸断裂后的相对伸长量,即

$$= \frac{l_k - l_0}{l_0} \times 100\%$$

式中 l_0 ——拉伸试样原始标距长度;

l_k ——拉伸试样拉断后的标距长度。

(2) 断面收缩率(%)表示试样断裂后截面的相对收缩量,即

$$= \frac{S_0 - S_k}{S_0} \times 100\%$$

式中 S_0 ——拉伸试样原始横截面积;

S_k ——拉伸试样拉断处的横截面积。

在实际工作中对试样的尺寸做出规定,通常用 $l_0 = 5d_0$ 或 $l_0 = 10d_0$ 两种试样来测定伸长率,用 δ_5 或 δ_{10} 表示, d_0 为圆截面试样的直径。同一材料所测得的 δ_5 一般比 δ_{10} 大 20% 左右。因此,对于不同材料,只有用 δ_5 与 δ_5 比较或 δ_{10} 与 δ_{10} 比较才是正确的。

3. 硬度

硬度是衡量材料软硬程度的指标,表征材料抵抗比它更硬的物体压入或刻划的能力。因为硬度的测定总是在试样的表面上进行,所以硬度也可以看做是材料表面抵抗变形的能力。

硬度是材料力学性能的一个重要指标,在材料制成的半成品和成品的质量检验中,硬度是标志产品质量的重要依据。常用的硬度有布氏、洛氏、维氏、显微硬度等。

(1) 布氏硬度:用一定的载荷 F ,将直径为 D 的淬火钢球或硬质合金球压入被测材料的表面(图 1-4),保持一定时间后卸除载荷,以载荷与压痕表面积 S 的比值,作为布氏硬度值,用 HB 表示,即

$$HB = \frac{F}{S} = \frac{F}{Dh} = \frac{2F}{D[D - (D^2 - d^2)^{\frac{1}{2}}]}$$

式中, d 为压痕直径。

布氏硬度的单位为 N/mm^2 ,但一般不标出。硬度值越高,表明材料越硬。

采用布氏硬度试验的优点是压痕面积大,不受微小不均匀硬度的影响,试验数据稳定,重复性好。但不适用于成品零件和薄壁件的硬度检验。

硬度的表示方法:压头为钢球时用 HBS,适用于布氏硬度值在 450 以下的材料;压头为硬质合金球时用 HBW,适用于布氏硬度在 650 以下的材料。硬度值写在符号 HBS 或 HBW 之前,符号之后按下列顺序用数值表示试验条件: 球体直径(mm); 试验力(N); 力保持时间

(s), 如 120HBS 10/ 1000/ 30。

(2) 洛氏硬度: 在先后两次施加载荷(初载荷 F_0 及总载荷 F) 的条件下, 将标准压头(顶角为 120° 的金刚石圆锥或直径为 1.588 mm ($1/16$ 英寸) 的钢球) 压入试样表面, 然后根据压痕的深度来确定试样的硬度。

根据压头和压力的不同, 洛氏硬度用 3 种不同符号表示, 即 HRA, HRB 和 HRC, 最常用的是 HRC。它们的数值可以直接从硬度试验机的仪表盘上读出。

洛氏硬度的测定操作迅速、简便, 压痕面积小, 适用于成品检验, 但由于接触面积小, 当硬度不均匀时, 数值波动较大, 故须多打几个点取平均值。必须注意, 不同方法、级别测定的硬度值无可比性, 只有查表转换成同一级别后, 才能比较硬度值的高低。

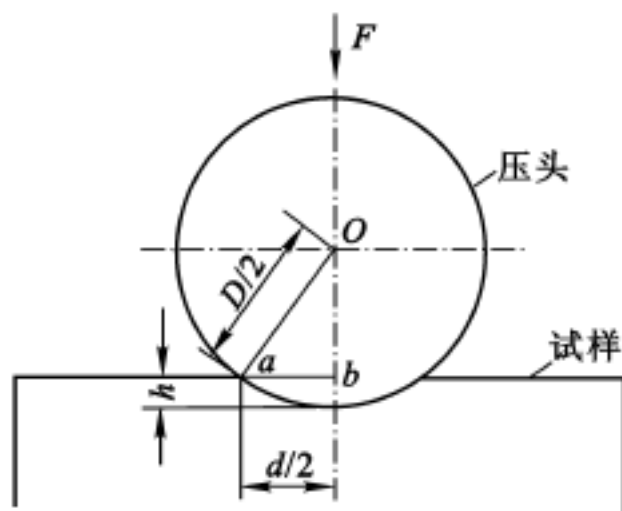


图 1-4 布氏硬度实验原理

1.2.2 其他载荷作用下材料的机械性能

1. 冲击韧性 k

在生产实际中, 许多机构和零部件都受到冲击载荷的作用, 如锻锤的锤杆、冲床的冲头等, 因此表征材料在冲击力作用下的力学性能非常重要。

冲击韧性简称韧性, 是材料在冲击载荷作用下抵抗变形和断裂的能力。一般用 k 表示(单位为 J/m^2)。

冲击韧性值一般是用一次摆锤冲击试验来测定(图 1-5): 把待测材料的标准缺口试样放在试验机支座上, 将具有一定重量 G 的摆锤自一定高度 H 自由落下, 冲断试样, 并摆过支承点升至高度 h 。摆锤冲断试样所消耗的冲击功用 A_k 表示(单位为 J), 有

$$A_k = GH - Gh$$

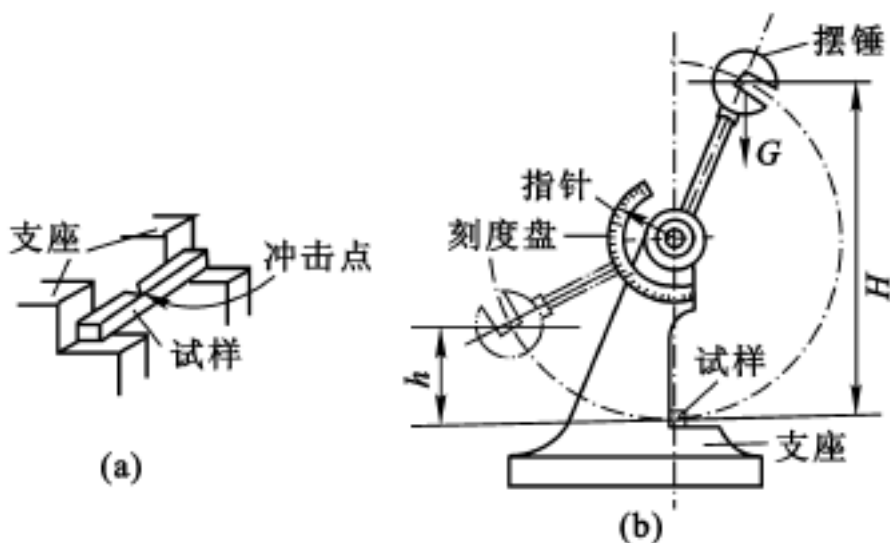


图 1-5 摆锤冲击实验示意图

(a) 试样放置 (b) 冲击试验机

用试样缺口处的横截面积 $S(m^2)$ 去除 A_k 即得材料的冲击韧性值 k (单位为 J/m^2)。

$$k = \frac{A_k}{S}$$

实际上,在冲击载荷下工作的机械零件,很少是受大能量一次冲击而破坏的,往往是经受过小能量的多次冲击,因冲击损伤的积累引起裂纹扩展而造成断裂,故用 k 值来反映冲击韧性有一定的局限性。研究结果表明,金属材料承受小能量多次重复冲击的能力取决于材料强度和塑性的综合性指标。

2. 断裂韧性

工程上使用的材料常常存在一定的缺陷,如夹杂物、气孔、微裂纹等,这些缺陷都可看做裂纹。它们的存在容易导致材料局部的应力集中,在远低于屈服强度的外加应力下,裂纹尖端的应力可能已远超过屈服点,引起裂纹快速扩展而使材料断裂。由于实际断裂应力与原始裂纹尖度、裂纹的形状、加载方式及材料抵抗裂纹扩展的能力有关,因此用应力强度因子 K_{I} (单位为 $\text{MN}/\text{m}^{3/2}$) 表示材料中裂纹各点应力随外加应力变化的比例关系,即

$$K_{I} = Y a^{\frac{1}{2}}$$

式中 Y —— 与裂纹形状、加载方式及试样几何尺寸有关的量,为无量纲系数;
 σ —— 外加应力(MPa);
 a —— 裂纹半长度(m)。

对某一个有裂纹的构件,在外力增大或裂纹增长时,裂纹尖端的应力强度因子也随之增大,当 K_{I} 达到某一临界值时,裂纹突然失稳扩展,发生快速脆断。这一临界值称为材料的断裂韧性,用 K_{Ic} 表示,它反映了材料抵抗裂纹扩展的能力。 K_{Ic} 可通过试验测定,它是材料常数,与材料本身的成分、组织与结构有关。

3. 疲劳强度

有许多机器零件如轴、齿轮、弹簧、活塞连杆等,都是在交变载荷下工作的,它们工作时所承受的应力一般都低于材料的屈服强度。零件在这种交变动载荷作用下,经过较长时间的工作而发生断裂的现象称为疲劳。因此疲劳是机件在循环或交变应力作用下,经过一段时间产生失效的现象。疲劳断裂往往无先兆,会产生突然断裂,危害很大,疲劳强度就是用来表征材料抵抗疲劳的能力。

疲劳强度是通过测定材料在重复的交变载荷(钢的交变次数为 $10^6 \sim 10^7$ 周次、有色金属的交变次数为 $10^7 \sim 10^8$ 周次)作用下而无断裂的最大应力得到的,用 σ_{-1} 表示(单位为 MPa)。

4. 磨损

机器运转时,任何零件在接触状态下的相对运动都会产生摩擦,导致零件磨损,最后失效。按磨损的破坏机理,磨损可分为:黏着磨损、磨粒磨损、腐蚀磨损、接触疲劳。

(1) 黏着磨损:又称咬合磨损。其实质是相对运动的两个零件表面总是凸凹不平的,在接触压力作用下,由于凸出部分首先接触,有效接触面很小。当压力较大时,凸起部分便会发生严重的塑性变形,从而使材料表面接触点发生黏着(冷焊)。随后,在相对滑动时黏着点又被剪切而断掉,造成黏着磨损。

(2) 磨粒磨损,它是当摩擦副一方的硬度比另一方的硬度大得多时,或者在接触面之间存在着硬质粒子时所产生的磨损,其特征是接触面上有明显的切削痕迹。

(3) 腐蚀磨损:是由于外界环境引起金属表面的腐蚀产物剥落,与金属表面之间的机械磨损(磨粒、黏着)相结合而出现的磨损。

(4) 接触疲劳:是滚动轴承、齿轮等一类机件的接触表面,经接触压应力的反复长期作用后所引起的一种表面疲劳剥落损坏现象,其损坏形式是在光滑的接触面上分布有若干深浅不同的针尖或豆状凹坑,或较大面积的表层压碎。

1.2.3 材料的高温和低温性能

1. 高温性能

材料在长时间的恒温、恒应力作用下,发生缓慢塑性变形的现象称为蠕变。蠕变的一般规律是温度越高,工作应力越大,则蠕变的发展越快,产生断裂的时间就越短。

金属材料在高于一定温度下,承受的应力即使小于屈服点,也会出现蠕变现象。因此在高温下使用的金属材料,应具有足够的抗蠕变能力。工程塑料在室温下受到应力作用就可能发生蠕变。

蠕变的另一种表现形式是应力松弛,它是指承受弹性变形的零件,在工作过程中总变形量保持不变,但随时间的延长工作应力自行逐渐衰减的现象。如高温紧固件,若出现应力松弛,将会使紧固失效。

在高温下,材料的强度是用蠕变强度和持久强度来表示的。蠕变强度是指材料在一定温度下、一定时间内产生一定永久变形量所能承受的最大应力。例如 $\sigma_{0.1/1000}^{600} = 88 \text{ MPa}$,表示在 600°C 下,1 000 h 内,引起 0.1% 变形量所能承受的最大应力值为 88 MPa。而持久强度是指材料在一定温度下、一定时间内所能承受的最大断裂应力。例如 $\sigma_{100}^{800} = 186 \text{ MPa}$,表示工作温度为 800°C 时,约 100 h 所能承受的最大断裂应力为 186 MPa。

2. 低温性能

随着温度的下降,多数材料会出现脆性增加的现象,严重时甚至发生脆断。可通过材料的冲击功与温度的变化关系来确定材料的韧、脆状态转化。当温度降到某一值时,冲击功 A_k 值会急剧减小,使材料呈脆性状态。材料由韧性状态转变为脆性状态的温度 T_k 称为冷脆转化温度。材料的 T_k 低,表明其低温韧性好。

1.2.4 材料的物理性能

物理性能是指材料的密度、熔点、热膨胀性、磁性、导电性与导热性等。

1. 密度

材料的密度是指单位体积中材料的质量。常用金属材料的密度如表 1-1 所示。一般将密度小于 $5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 的金属称为轻金属,密度大于 $5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 的金属称为重金属。抗拉强度 σ_b 与密度 ρ 之比称为比强度;弹性模量 E 与密度 ρ 之比称为比弹性模量。这两者也是考虑某些零件材料性能的重要指标。如密度大的材料将增加零件的重量,降低零件单位重量的强度,即降低比强度。一般航空、航天等领域都要求材料具有高的比强度和比模量。

2. 熔点

熔点是指材料的熔化温度。金属都有固定的熔点,常用金属的熔点如表 1-1 所示。陶瓷的熔点一般都显著高于金属及合金的熔点,而高分子材料一般不是完全晶体,没有固定的熔点。

合金的熔点决定于它的化学成分,是金属与合金的冶炼、铸造和焊接等重要的工艺参数。熔点高的金属称为难熔金属(如 W, Mo, V 等),可以用来制造耐高温零件,在燃气轮机、航空、航天等领域有广泛的应用。熔点低的金属称为易熔金属(如 Sn, Pb 等),可以用来制造保险丝、

防火安全阀等零件。

3 热膨胀性

材料的热膨胀性通常用线膨胀系数表征。陶瓷的热膨胀系数最低,金属次之,高分子材料最高。常用金属的线膨胀系数如表 1-1 所示。对精密仪器或机器零件,热膨胀系数是一个非常重要的性能指标。在异种金属焊接中,常因材料的热膨胀性相差过大而使焊件变形或破坏。

4 磁性

材料能导磁的性能叫做磁性。磁性材料可分为软磁性材料和硬磁性材料,前者是指容易磁化,导磁性良好,但外磁场去掉后,磁性基本消失的磁性材料(如电工用纯铁、硅钢片等)。后者是指去磁后仍保持磁场,磁性不易消失的磁性材料(如淬火的钴钢、稀土钴等)。许多金属(如 Fe, Ni, Co 等)均具有较高的磁性。但也有不少金属(如 Al, Cu, Pb 等)是无磁性的。非金属材料一般无磁性。

5 导热性

材料的导热性用热导率(也称导热系数)来表征。材料的热导率越大,导热性越好。一般来说,金属越纯,其导热能力越大。常用金属的热导率如表 1-1 所示。金属及合金的热导率远高于非金属材料。

导热性好的材料其散热性也好,可用来制造热交换器等传热设备的零、部件。而导热性差的材料如高合金钢,在锻造或热处理时,加热和冷却速度过快会引起零件表面与内部大的温差,产生不同的膨胀,形成过大的热应力,引起材料发生变形或开裂。

6 导电性

材料的导电性一般用电阻率表征。通常金属的电阻率随温度升高而增加,非金属材料则与此相反。金属一般具有良好的导电性。导电性与导热性一样,是随合金成分的复杂化而降低的,因而纯金属的导电性总比合金要好。常用金属的电阻率如表 1-1。高分子材料都是绝缘体,但有的高分子复合材料也有良好的导电性。陶瓷材料虽然也是良好的绝缘体,但某些特殊成分的陶瓷却是有一定导电性的半导体。

表 1-1 常用金属的物理性能

金属名称	符号	密度 (20 ℃) (kg · m ⁻³) × 10 ³	熔点 / ℃	热导率 W / (m · K)	线膨胀系数 (0 ~ 100 ℃) K ⁻¹ × 10 ⁻⁶	电阻率 (· m) × 10 ⁻⁸
银	Ag	10.49	960.8	418.6	19.7	1.5(0 ℃)
铝	Al	2.698	660.1	221.9	23.6	2.655(0 ℃)
铜	Cu	8.96	1083	393.5	17.0	1.67 ~ 1.68(20 ℃)
铬	Cr	7.19	1903	67	6.2	12.9(0 ℃)
铁	Fe	7.84	1538	75.4	11.76	9.7(0 ℃)
镁	Mg	1.74	650	153.7	24.3	4.47(0 ℃)
锰	Mn	7.43	1244	4.98(-192 ℃)	37	185(20 ℃)
镍	Ni	8.90	1453	92.1	13.4	6.84(0 ℃)
钛	Ti	4.508	1677	15.1	8.2	42.1 ~ 47.8(0 ℃)
锡	Sn	7.298	231.91	62.8	2.3	11.5(0 ℃)
钨	W	19.3	3380	166.2	4.6(20 ℃)	5.1(0 ℃)