



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

第2版

工程材料

燕山大学 崔占全 主编
江苏科技大学 孙振国



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

工 程 材 料

第 2 版

主 编 崔占全 孙振国

副主编 王正品 陈 扬

参 编 朱张校 戚 力 张向红

主 审 郑明新 王天生



机械工业出版社

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。内容分为三篇：第一篇为工程材料的基本理论，包括材料的结构与性能、金属材料组织与性能的控制；第二篇为常用工程材料，包括金属材料、高分子材料、陶瓷材料、复合材料、其他工程材料（功能材料、纳米材料等）；第三篇为机械零件的失效、强化、选材及工程材料的应用。

本书建立了以“工程材料”为主的教材体系；精简传统内容，强化非金属材料、新型材料及选材的知识。可作为工科院校机械类及近机类专业教材，也可供相关专业的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

工程材料/崔占全, 孙振国主编. —2 版. —北京: 机械工业出版社, 2007. 7

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-111-11496-3

I. 工… II. ①崔…②孙… III. 工程材料-高等学校-教材
IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 111048 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
责任编辑: 冯春生 版式设计: 冉晓华 责任校对: 陈延翔
封面设计: 王伟光 责任印制: 洪汉军
北京京丰印刷厂印刷

2007 年 9 月第 2 版第 1 次印刷

184mm×260mm · 16.5 印张 · 404 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-11496-3

定价: 25.00 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) 88379715

封面无防伪标均为盗版

第2版前言

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。第1版自2003年出版以来,由于体系合理,符合当前课时少内容多的教学现状,已多次重印,颇受使用该教材院校的好评。

本次修订,基本保持第1版的教材体系,将知识点的前后顺序进行了调整,增加了“纳米材料的制备与合成”等新知识,力图使本书的结构更加合理,知识更趋于完善。在修订此教材时,将配套的《工程材料学习指导》(含工程材料内容提要及学习重点、习题、课堂讨论、实验等内容)同时进行了修订,并由崔占全、威力制作了相应的教学课件及习题参考答案(光盘中),努力构建“工程材料”课程的立体化教材。

本书分为三篇,共9章。绪论、第一章、第二章第六节、第四章、第六章及附录由燕山大学崔占全教授编写;第二章第一节、第二节由清华大学朱张校教授编写;第二章第三节、第四节,第三章第二节、第三节由江苏科技大学孙振国教授编写;第二章第五节、第三章第一节由西安工业学院王正品教授编写;第五章由河北建材职业技术学院张向红讲师编写;第七章由燕山大学威力讲师编写,第三章所有新标准由燕山大学威力修订;第八章、第九章由辽宁工程技术大学陈扬副教授编写。全书由崔占全、孙振国担任主编,王正品、陈扬担任副主编;全书由清华大学郑明新教授、燕山大学王天生教授担任主审。

本书修订过程中,燕山大学荆天辅、赵品、高聿为教授提出了许多有益建议,高聿为协助审阅了部分书稿,在此表示谢意。

由于编者水平有限,错误及不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

编者

第1版前言

根据第九届全国“工程材料”课程协作组会议的决议,为适应我国高等教育改革形势下的教学需要,本着加强基础、淡化专业、加强能力和素质教育的宗旨,同时考虑到各高校减少该课程学时的实际情况,组织相关院校的一线教师编写了本书。

《工程材料》是工科院校机械类及近机类专业开设的一门技术基础课教材。本书在编写过程中注意了以下几个问题:

- 1) 建立以工程材料为主的教材体系。
- 2) 精简传统内容,强化非金属材料及选材的内容。
- 3) 编入功能材料、纳米材料、零件失效与强化等新材料、新工艺、新技术。
- 4) 教材体系更符合教学规律。
- 5) 对工程材料的应用作了较详尽的介绍。

编者本着改革的愿望,力图使本教材体系更加符合机械类及近机类专业的培养目标。当然,一个科学、合理的教材体系的建立不是一朝一夕就能完成的,不可能一次性就能完全突破旧的框架,仅以此书作为教材改革的一次尝试。

本教材共分为三篇,计九章。绪论、第二章第六节、第四章、第五章、第六章及附录由燕山大学崔占全教授编写;第一章由燕山大学王天生副教授编写;第二章第一节、第二节由清华大学朱张校教授编写;第二章第三节、第四节,第三章第二节、第三节由华东船舶学院孙振国教授编写;第二章第五节、第三章第一节由西安工业学院王正品教授编写;第七章由燕山大学杨庆祥教授编写;第八章、第九章由辽宁工程技术大学陈扬副教授编写。全书由崔占全、孙振国主编,王正品、陈扬副主编;由清华大学郑明新教授主审。

本书在编写过程中,参考和引用了一些文献资料的有关内容,并得到了机械工业出版社教编室的大力支持与指导,在此一并感谢!

由于编者水平有限,错误及不足之处难以避免,敬请读者批评指正。

编者

目 录

第2版前言

第1版前言

绪论	1
----------	---

第一篇 工程材料的基本理论

第一章 材料的结构与性能	3	控制	45
第一节 材料的性能	3	第一节 纯金属的结晶	45
第二节 材料的结合方式及工程材料 的键性	12	第二节 合金的结晶	51
第三节 金属的结构与性能	15	第三节 金属的塑性加工	66
第四节 高分子材料的结构与性能	26	第四节 钢的热处理	74
第五节 陶瓷材料的结构与性能	35	第五节 钢的合金化	90
第二章 金属材料组织与性能的		第六节 表面技术	93

第二篇 常用工程材料

第三章 金属材料	105	第三节 金属陶瓷(硬质合金)	185
第一节 工业用钢	105	第六章 复合材料	189
第二节 铸铁	135	第一节 概述	189
第三节 有色金属及其合金	144	第二节 复合材料的增强机制及 性能	190
第四章 高分子材料	165	第三节 常用的复合材料	193
第一节 工程塑料	165	第七章 其他工程材料	198
第二节 橡胶与合成纤维	173	第一节 功能材料	198
第三节 合成胶粘剂和涂料	176	第二节 纳米材料	208
第五章 陶瓷材料	179	第三节 未来材料的发展方向	216
第一节 概述	179		
第二节 常用工程结构陶瓷材料	181		

第三篇 机械零件的失效、强化、选材及工程材料的应用

第八章 机械零件的失效与强化	217	第二节 典型零件的选材及工艺 路线设计	226
第一节 零件的失效形式与分 析方法	217	第三节 工程材料的应用	232
第二节 工程材料的强化与强韧化	220	附录 金属热处理工艺的分类及代号 (GB/T 12603—1990)	253
第九章 典型零件的选材及工程材 料的应用	223	参考文献	256
第一节 选材的一般原则	223		

绪 论

一、材料科学的重要地位与作用

材料是人类用来制造各种有用物件的物质。它是人类生存与发展、改造自然的物质基础，也是人类社会现代文明的重要支柱。因此历史学家将人类发展分为石器时代、青铜器时代、铁器时代、水泥时代、钢时代、硅时代和新材料时代，人类使用材料的七个时代的开始时间见表 0-1。

表 0-1 人类使用材料的七个时代的开始时间

公元前 10 万年	石器时代
公元前 3000 年	青铜器时代
公元前 1000 年	铁器时代
公元 0 年	水泥时代
1800 年	钢时代
1950 年	硅时代
1990 年	新材料时代

无论远古时代，还是生产力高度发达的今天，无论是工业、农业、现代国防，还是日常生活均离不开材料。同样，20 世纪的四项重大发明，即原子能、半导体、计算机、激光器也离不开材料科学的发展。仅以计算机为例，1946 年由美国研制的埃尼阿克（ENIAC）电子数值积分计算机，共用 18000 多只电子管，质量达 30t 有余，占地 170m²，每小时耗电 150kW，真可谓“庞然大物”。半导体材料出现后，特别是 1967 年大规模集成电路问世，使计算机微型化，才使计算机进入办公室及普通百姓人家。现在一台微型计算机如果其功能和第一台电子管计算机相当，其运行速度却快了几百倍，体积仅为原来的三十万分之一，质量仅为六万分之一。中国“两弹一星”、“航天工程”及未来的“嫦娥工程”（探月工程）等尖端技术的发展也离不开材料，因此，新材料技术已成为当代技术发展的重要前沿。1981 年日本的国际贸易和工业部选择了优先发展的三个领域：新材料、新装置和生物技术。材料科学的发展及进步成为衡量一个国家科学技术水平的重要标准。今天人们已强烈地认识到材料科学对社会发展与进步的作用，无论是专门从事材料研究的材料科技人员，还是经济专家、财政金融界的银行家、企业界巨头，以及经济决策人的国家领导阶层，都密切注意材料研究的动向和发展趋势，以便及时把握住时机，作出正确判断与决策，以使在世界经济发展的竞争中占有一席之地。材料科学的发展在国民经济中占有极其重要的地位，因此，材料、能源、信息被誉为现代经济发展的三大支柱。

二、工程材料的分类

工程材料是指具有一定性能，在特定条件下能够承担某种功能、被用来制取零件和元件的材料。工程材料种类繁多，有许多不同的分类方法。

1. 按材料的化学组成分类

(1) 金属材料 金属材料可分为黑色金属材料（钢和铸铁）及有色金属材料（除钢铁以外的金属材料）。有色金属材料种类很多，按照它们特性的不同，又可分为轻金属、重金

属、贵金属、稀有金属和放射性金属等多种。金属材料仍然是目前应用最广泛的工程材料。

(2) 无机非金属材料 无机非金属材料包括水泥、玻璃、耐火材料和陶瓷等。它们的主要原料是硅酸盐矿物, 又称硅酸盐材料。

(3) 高分子材料 高分子材料按材料来源可分为天然高分子材料(蛋白、淀粉、纤维素等)和人工合成高分子材料(合成塑料、合成橡胶、合成纤维)。按性能及用途可分为塑料、橡胶、纤维、胶粘剂、涂料。

(4) 复合材料 由于多数金属材料不耐腐蚀, 无机非金属材料脆性大, 高分子材料不耐高温, 人们把上述两种或两种以上的不同材料组合起来, 使之取长补短、相得益彰就构成了复合材料。复合材料由基体材料和增强材料复合而成。基体材料有金属、塑料、陶瓷等, 增强材料有各种纤维和无机化合物颗粒等。

2. 按材料的使用性能分类

(1) 结构材料 结构材料是以强度、刚度、塑性、韧性、硬度、疲劳强度、耐磨性等力学性能为性能指标, 用来制造承受载荷、传递动力的零件和构件的材料, 可以是金属材料、高分子材料、陶瓷材料或复合材料。

(2) 功能材料 功能材料是以声、光、电、磁、热等物理性能为指标, 用来制造具有特殊性能的元件的材料, 如大规模集成电路材料、信息记录材料、充电材料、激光材料、超导材料、传感器材料、储氢材料等都属于功能材料。目前功能材料在通信、计算机、电子、激光和空间科学等领域中扮演着极其重要的角色。

在人类漫长的历史发展过程中, 材料一直是社会进步的物质基础与先导。21 世纪, 材料科学必将在当代科学技术迅猛发展的基础上朝着精细化、超高性能化、高功能化、复杂化(复合化和杂化)、生态环境化和智能化的方向发展, 从而为人类社会的物质文明建设作出更大贡献。

三、本课程的任务与内容

“工程材料”是研究材料的化学成分、组织结构、加工工艺与性能关系的一门科学。它是机械制造、机械设计、机械电子等机械类和近机类各专业的技术基础课。其目的是使学生获得有关工程结构和机械零件常用的金属材料和非金属材料的基础理论知识, 并使其初步具备根据零件工作条件和失效方式合理地选择与使用材料, 正确制订零件的冷、热加工工艺路线的能力。

“工程材料”的内容包括:

(1) 工程材料的基本理论 即材料的结构与性能、金属材料的组织与性能控制(纯金属凝固、合金凝固、金属塑变与再结晶、钢的热处理、钢的合金化)。

(2) 常用工程材料 即金属材料(工业用钢、铸铁、有色金属及合金)、高分子材料、无机非金属材料、复合材料、功能材料、纳米材料。

(3) 机械零件的失效、强化、选材及工程材料的应用 “工程材料”是以化学、物理、材料力学及金属工艺学和金工教学实习为基础的课程, 在学习时应联系上述基础课程的有关内容, 以加深对本课程内容的理解。同时, 本课程又是设计选材的基础, 在今后学习有关专业课程时, 还应经常联系本书的有关内容, 以便进一步掌握所学的知识。此外, “工程材料”是一门从生产实践中发展起来, 而又直接为生产服务的科学, 所以学习时不但要学习基本理论, 而且要注意联系生产实际及实验条件。

第一篇 工程材料的基本理论

第一章 材料的结构与性能

固体材料（包括金属材料、高分子材料和陶瓷材料）的性能主要取决于其化学成分、组织结构及加工工艺过程。在制造、使用、研究和发展固体材料时，材料的内部结构是非常重要的研究对象。所谓结构就是指物质内部原子在空间的分布及排列规律。本章将重点讨论常用工程材料即金属材料、高分子材料、陶瓷材料的结构与性能。

第一节 材料的性能

工程材料是目前应用最广泛的材料。它之所以被广泛使用，主要原因是其具有优良的使用性能和工艺性能。所谓使用性能，是指材料制成零件或构件后为保证正常工作及一定使用寿命应具备的性能，包括力学性能、物理和化学性能。所谓工艺性能，是指材料在加工成零件或构件过程中材料应具备的适应加工的性能，包括铸造性能、锻造性能、切削加工性能、焊接性能及热处理工艺性能。

一、材料的使用性能

（一）材料的力学性能

材料的力学性能是指材料在外加载荷作用时所表现出来的性能，包括强度、硬度、塑性、韧性及疲劳强度等。

1. 弹性与刚度

图 1-1a 为低碳钢的工程应力-应变图（ σ - ϵ 图）。

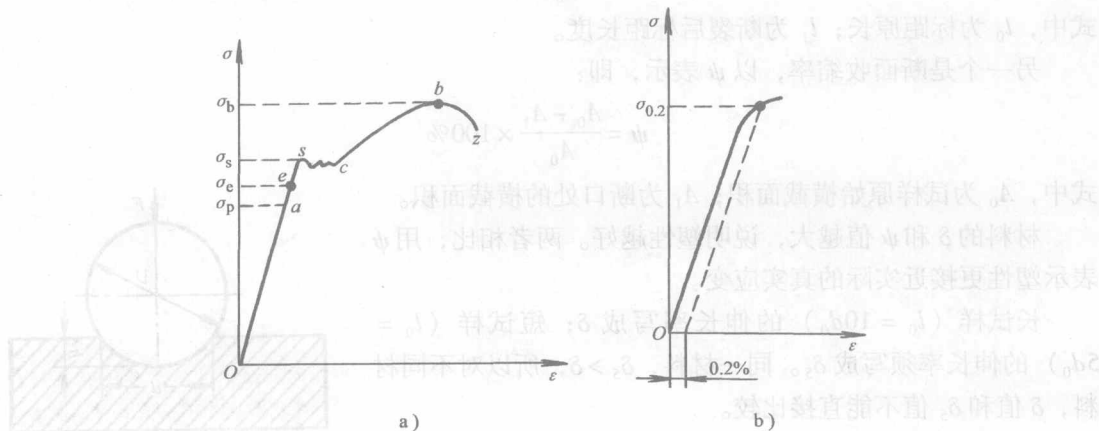


图 1-1 低碳钢和铸铁的应力-应变图

在图中 σ - ε 曲线上, Oa 段为弹性阶段, as 为弹-塑性变形阶段, z 点发生断裂。当去掉外力后, 变形立即恢复, 这种变形称为弹性变形, 其应变值很小; 当外力去除后不能恢复的变形称为塑性变形。材料在外力作用下, 产生裂纹后被分为两部分的现称断裂。 e 点的应力 σ_e 称为弹性极限。 Oe 线中 Oa 部分为一斜直线, 因应力与应变始终成比例, 所以 a 点应力 σ_p 称为比例极限。由于 e 点和 a 点很接近, 一般不作区分。

材料在弹性范围内, 应力与应变的比值 σ/ε 称为弹性模量 E (单位 MPa)。 E 标志材料抵抗弹性变形的能力, 用以表示材料的刚度。 E 值主要取决于各种材料的本性, 一些处理方法 (如热处理、冷热加工、合金化等) 对它影响很小。零件提高刚度的办法是增加横截面或改变截面形状。金属的 E 值随温度升高逐渐降低。

2. 强度和塑性

强度是指材料在外力作用下抵抗永久变形和破坏的能力; 塑性是指材料在外力作用下产生塑性变形而不破坏的能力。

(1) 强度 根据外力的作用方式, 有多种强度指标, 如抗拉强度、抗弯强度、抗剪强度等。其中以拉伸试验所得强度指标的应用最为广泛。

如图 1-1a, 当试验应力 σ 超过 e 点时, 试件除弹性变形外, 还产生塑性变形。在 sc 段, 其应力几乎不增加但应变增加的现象, 称为屈服。 s 点的应力 σ_s 称为屈服点。

有些塑性材料没有明显的屈服现象发生, 如图 1-1b 所示, 对这种情况, 用试件标距长度产生 0.2% 塑性变形时的应力值作为该材料的屈服强度, 以 $\sigma_{0.2}$ 表示 (亦称条件屈服强度)。屈服强度是零件 (特别是不允许产生明显变形的零件) 设计的主要依据, 也是材料强度的重要指标。脆性材料不考虑屈服强度。

材料发生屈服后, 其应力与应变的变化如图 1-1a 所示, 到 b 点应力达最大值 σ_b 。 b 点以后, 试件产生“颈缩”, 迅速伸长, 应力明显下降, 在 z 点断裂。最大应力值 σ_b 称为抗拉强度。它也是零件设计和评定材料时的重要强度指标。 σ_b 测量方便, 如果单从保证零件不产生断裂的安全角度考虑, 可用 σ_b 作为设计依据, 但所取安全系数要大些。

(2) 塑性 材料的常用塑性指标有两个。一个是伸长率, 以 δ 表示, 即:

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

式中, l_0 为标距原长; l_1 为断裂后标距长度。

另一个是断面收缩率, 以 ψ 表示, 即:

$$\psi = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\%$$

式中, A_0 为试样原始横截面积; A_1 为断口处的横截面积。

材料的 δ 和 ψ 值越大, 说明塑性越好。两者相比, 用 ψ 表示塑性更接近实际的真实应变。

长试样 ($l_0 = 10d_0$) 的伸长率写成 δ ; 短试样 ($l_0 = 5d_0$) 的伸长率须写成 δ_5 。同一材料, $\delta_5 > \delta$, 所以对不同材料, δ 值和 δ_5 值不能直接比较。

3. 硬度

硬度是指材料对局部塑性变形、压痕或划痕的抗力。

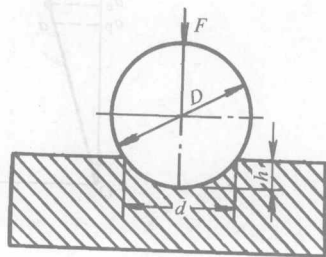


图 1-2 布氏硬度试验原理图

通常,材料越硬,其耐磨性越好。同时通过硬度值可估计材料的近似 σ_b 值。硬度试验方法比较简单、迅速,可直接在原材料或零件表面上测试,因此被广泛应用。常用的硬度测量方法是压入法,主要有布氏硬度(HB)、洛氏硬度(HR)、维氏硬度(HV)等。陶瓷等材料还常用克努普氏显微硬度(HK)和莫氏硬度(划痕比较法)作为硬度指标。

(1) 布氏硬度 试验规范见表1-1、表1-2,试验方法如图1-2所示,即用直径为 D 的硬质合金球,以相应的试验力压入试样表面,保持规定的时间后去除外力,在试样表面留下球形压痕。布氏硬度值是试验力除以压痕球冠表面积。在试验中,硬度值不需计算,是用刻度放大镜测出压痕直径 d ,然后对照有关附录查出相应的布氏硬度值,其硬度值用HBW表示。

表1-1 不同条件下的试验力

硬度符号	球直径 D/mm	试验力-压头球直径平方的比率 $0.102 \times F/D^2$	试验力 F/N
HBW 10/3 000	10	30	29 420
HBW 10/1 500	10	15	14 710
HBW 10/1 000	10	10	9 807
HBW 10/500	10	5	4 903
HBW 10/250	10	2.5	2 452
HBW 10/100	10	1	980.7
HBW 5/750	5	30	7 355
HBW 5/250	5	10	2 452
HBW 5/125	5	5	1 226
HBW 5/62.5	5	2.5	612.9
HBW 5/25	5	1	245.2
HBW 2.5/187.5	2.5	30	1 839
HBW 2.5/62.5	2.5	10	612.9
HBW 2.5/31.25	2.5	5	306.5
HBW 2.5/15.625	2.5	2.5	153.2
HBW 2.5/6.25	2.5	1	61.29
HBW 1/30	1	30	294.2
HBW 1/10	1	10	98.07
HBW 1/5	1	5	49.03
HBW 1/2.5	1	2.5	24.52
HBW 1/1	1	1	9.807

表1-2 不同材料的试验力-压头球直径平方的比率

材 料	布氏硬度 HBW	试验力-压头球直径平方的比率 $0.102F/D^2$
钢、镍合金、钛合金		30
铸铁 ^①	<140	10
	≥ 140	30
铜及铜合金	<35	5
	35 ~ 200	10
	>200	30

(续)

材 料	布氏硬度 HBW	试验力-压头球直径平方的比率 $0.102F/D^2$
轻金属及合金	<35	2.5
	35~80	5
		10
		15
	>80	10
		15
		1
铅、锡		

① 对于铸铁的试验, 压头球直径一般为 2.5mm、5mm 和 10mm。

布氏硬度的优点是具有较高的测量精度, 因其压坑面积大, 比较真实地反映出材料的平均性能。另外, 由于布氏硬度与 σ_b 之间存在一定的经验关系, 如热轧钢的 $\sigma_b = (3.4 \sim 3.6) \text{ HBW}$, 冷变形铜合金 $\sigma_b \approx 4.0 \text{ HBW}$, 灰铸铁 $\sigma_b \approx 1.7 (\text{HBW} - 40)$, 因此得到广泛的应用; 但不能测定高硬度材料。

(2) 洛氏硬度 试验原理如图 1-3 所示。它是以一定尺寸的淬火钢球或以顶角以 120° 的金刚石圆锥压入试样表面。试验时, 先加初试验力, 然后再加主试验力。压入试样表面之后经规定时间去除主试验力。在保留初试验力的情况下, 根据试样表面压痕深度 ($h = h_1 - h_0$) 确定被测材料的洛氏硬度。为了能用一种硬度计测定较大范围的硬度, 常用三种硬度标尺, 见表 1-3。

表 1-3 常用洛氏硬度的实验条件及应用范围

硬度标尺	压头类型	总试验力/N	硬度值有效范围	应用举例
HRC	120° 金刚石圆锥体	1471.0	20~67HRC	一般淬火钢件
HRB	$\phi 1/16$ " 钢球	980.7	25~100HRB	软钢、退火钢、铜合金等
HRA	120° 金刚石圆锥体	588.4	60~85HRA	硬质合金、表面淬火钢等

洛氏硬度试验的优点是操作迅速、简便, 可由表盘上直接读出硬度值。由于其压痕很小, 故可测量较薄工件的硬度。其缺点是精度较差, 硬度值波动较大, 通常应在试样不同部位测量数次, 取平均值为该材料的硬度值。

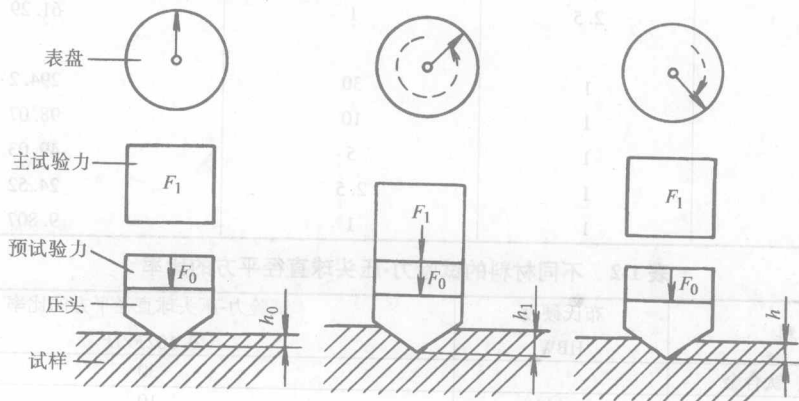


图 1-3 洛氏硬度测量原理图

(3) 维氏硬度 布氏硬度不适于检测较高硬度的材料。洛氏硬度虽可检测不同硬度的材料, 但不同标尺的硬度值不能相互直接比较。而维氏硬度可用统一标尺来测定从极软到极

硬的材料。

维氏硬度试验原理与布氏法相似,也是以压痕单位表面积所承受试验力大小来计算硬度值的。它是用对面夹角为 136° 的金刚石四棱锥体,在一定试验力作用下,在试样试验面上压出一个正方形压痕,如图1-4所示。通过设在维氏硬度计上的显微镜来测量压坑两条对角线的长度,根据对角线的平均长度,从相应表中查出维氏硬度值。

维氏硬度试验所用试验力可根据试样的大小、厚薄等条件来选择。试验力按标准规定有49N、98N、196N、294N、490N、980N等。试验力保持时间:黑色金属10~15s,有色金属为 $(30 \pm 2)s$ 。

维氏硬度可测定从很软到很硬的各种材料。由于所加试验力小,压入深度较浅,故可测定较薄材料和各种表面渗层,且准确度高。但维氏硬度试验时需测量压痕对角线的长度,测试手续较繁,不如洛氏硬度试验法那样简单、迅速。

4. 韧性

(1) 冲击韧性 许多机械零件在工件中往往受到冲击载荷的作用,如活塞销、锤杆、冲模和锻模等。制造这类零件所用的材料不能单用在静载荷作用下的指标来衡量,而必须考虑材料抵抗冲击载荷的能力。材料抵抗冲击载荷而不破坏的能力称为冲击韧性。为了评定材料的冲击韧性,需进行冲击试验。

1) 摆锤式一次冲击试验。冲击试样的类型较多,常用的标准试样如图1-5所示。

一次冲击试验通常是在摆锤式冲击试验机上进行的。试验时将带缺口的试样安放在试验机的机架上,使试样的缺口位于两支架中间,并背向摆锤的冲击方向。

摆锤从一定的高度落下,将试样冲断。冲断时,在试样横截面的单位面积上所消耗的功称为冲击韧度,用符号 a_K 表示。由于冲击试验采用的是标准试样,目前一般用冲击吸收功 A_K 表示冲击韧性值。

必须说明的是,使用不同类型的试样(U形缺口或V形缺口)进行试验时,其冲击吸收功分别为 A_{KU} 或 A_{KV} ,冲击韧度则分别为 a_{KU} 或 a_{KV} 。

2) 小能量多次冲击试验。实践表明,承受冲击载荷的机械零件很少由一次能量冲击而遭破坏,绝大多数是在小能量多次冲击作用下破坏的,如凿岩机风镐上的活塞、冲

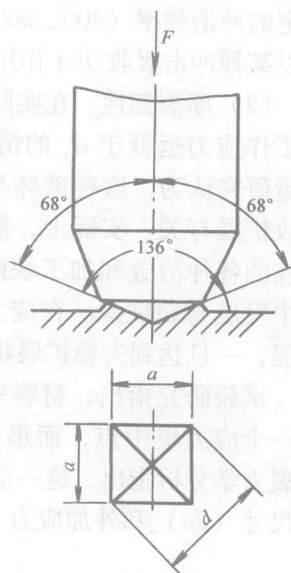


图1-4 维氏硬度试验原理图

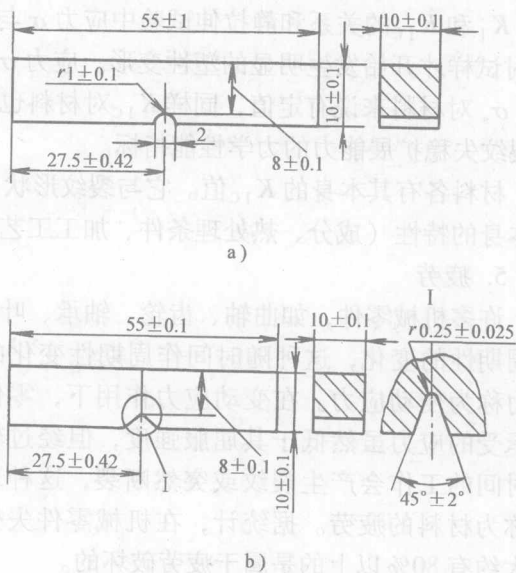


图1-5 标准冲击试样

a) U形缺口试样 b) V形缺口试样

模的冲头等。所以上述的 a_k 值是不能代表这种零件抵抗多次小能量冲击的能力的。

小能量多次冲击试验是在落锤试验机上进行的。如图 1-6 所示, 带有双冲点的锤头以一定的冲击频率 (400、600 次/min) 冲击试样, 直至冲断为止。多次冲击抗力指标, 一般是以某种冲击吸收功 A 作用下开始出现裂纹和最后断裂的冲击次数来表示的。

(2) 断裂韧性 在实际生产中, 有的大型转动零件、高压容器、船舶、桥梁等, 常在其工作应力远低于 σ_s 的情况下突然发生低应力脆断。大量研究认为, 这种破坏与零件制作本身存在裂纹和裂纹扩展有关。实际上, 制件及其材料本身不可避免存在的各种冶金和加工缺陷, 都相当于裂纹源或在使用中发展为裂纹源。在应力作用下, 这些裂纹源进行扩展, 一旦达到失稳扩展状态, 便会发生低应力脆断。

试验研究指出, 材料中存在裂纹时, 裂纹尖端就是一个应力集中点, 而形成应力分布特殊的应力场。

断裂力学分析指出, 这一应力场强弱程度可用应力场强度因子 K_I 来描述。 K_I 值的大小与裂纹尺寸 ($2a$) 和外加应力 (σ) 有下式关系:

$$K_I = Y\sigma\sqrt{a}$$

式中, Y 为裂纹形状系数, 与裂纹形状、加载方式和试样几何形状有关的一个无量纲的系数 (具体数值可根据试样条件查手册); σ 为外加应力 (MPa); a 为裂纹的半长 (m)。

由上式可见, 随应力 σ 的增大, K_I 不断增大, 当 K_I 增大到某一定值时, 可使裂纹前沿某一区域内的内应力大到足以使材料分离, 从而导致裂纹突然失稳扩展而发生断裂。这个 K_I 的临界值, 称为材料的断裂韧度, 用 K_{Ic} 表示, 单位是 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。

K_I 和 K_{Ic} 的关系和静拉伸试验中应力 σ 与 σ_s 的关系一样, 当试样应力 σ 增加到材料的 σ_s 时试样才开始发生明显的塑性变形。应力 σ 是不断变化的值, 同样, K_I 也是不断变化的值; σ_s 对材料来说有定值, 同样 K_{Ic} 对材料也有定值。换言之, 断裂韧度 K_{Ic} 是表示材料抵抗裂纹失稳扩展能力的力学性能指标。

材料各有其本身的 K_{Ic} 值。它与裂纹形状、大小无关, 也和外加应力无关, 只决定于材料本身的特性 (成分、热处理条件、加工工艺等情况)。

5. 疲劳

许多机械零件, 如曲轴、齿轮、轴承、叶片和弹簧等, 在工作中各点承受的应力随时间作周期性的变化, 这种随时间作周期性变化的应力称为变动应力。在变动应力作用下, 零件所承受的应力虽然低于其屈服强度, 但经过较长时间的工作会产生裂纹或突然断裂, 这种现象称为材料的疲劳。据统计, 在机械零件失效中大约有 80% 以上的是属于疲劳破坏的。

机械零件之所以产生疲劳断裂, 是由于材料表面或内部有缺陷 (夹杂、划痕、尖角等)。这些地方的局部应力大于屈服强度, 从而产生局部塑性变形而开裂。这些微裂纹随应力循环

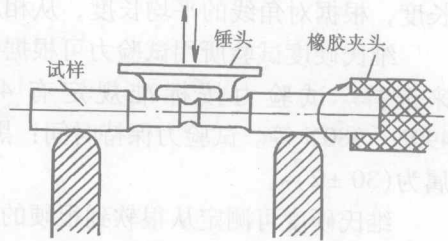


图 1-6 多次冲击弯曲试验示意图

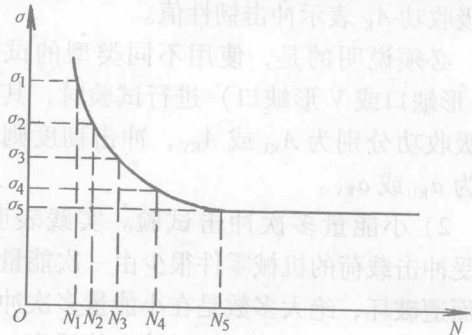


图 1-7 疲劳曲线

次数的增加而逐渐扩展,使承载的截面面积大大减少,以致不能承受所加载荷而突然断裂。

(1) 疲劳曲线和疲劳强度 疲劳曲线是指变动应力与循环次数的关系曲线,如图 1-7 所示。曲线表明,金属承受的变动应力越大,则断裂时应力循环次数 (N) 越小;反之,则 N 越大。

同时看到,当应力低于一定值时,试样可经受无限次周期循环而不破坏,此应力值称为材料的疲劳强度,用 σ_r 表示。对于对称应力循环的疲劳强度用 σ_{-1} 表示。实际上,材料不可能作无限次交变应力试验。对于黑色金属,一般规定应力循环 10^7 周次而不断裂的最大应力称为疲劳极限,有色金属、不锈钢等取 10^8 周次。

(2) 提高零件抗疲劳的方法 可通过合理选材,细化晶粒、减少材料和零件的缺陷;改善零件的结构设计,避免应力集中,减小零件的表面粗糙度;对零件表面进行强化处理(喷丸处理、表面淬火、化学渗镀工艺等)都可提高零件的疲劳强度。

(二) 材料的物理性能

1. 密度

单位体积物质的质量称为该物质的密度:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

式中, ρ 为物质的密度 (kg/m^3); m 为物质的质量 (kg); V 为物质的体积 (m^3)。

密度小于 $5 \times 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$ 的金属称为轻金属,如铝、镁、钛及它们的合金。密度大于 $5 \times 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$ 的金属称为重金属,如铁、铅、钨等。金属材料的密度直接关系到由它们所制构件和零件的自重。轻金属多用于航天航空器上。

2. 熔点

材料从固态向液态转变时的温度称为熔点,纯金属都有固定的熔点。熔点高的金属称为难熔金属,如钨、钼、钒等,可以用来制造耐高温零件,如在火箭、导弹、燃气轮机和喷气飞机等方面得到广泛应用。熔点低的金属称为易熔金属,如锡、铅等,可用于制造熔丝和防火安全阀零件等。

3. 导热性

导热性通常用热导率来衡量。热导率的符号是 λ ,单位是 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。热导率越大,导热性越好。金属的导热性以银为最好,铜、铝次之。合金的导热性比纯金属差。在热加工和热处理时,必须考虑金属材料的导热性,防止材料在加热或冷却过程中形成过大的内应力,以免零件变形或开裂。导热性好的金属散热也好,在制造散热器、热交换器与活塞等零件时,选用导热性好的金属材料。

4. 导电性

材料能够传导电流的能力称导电性,通常用电导率来衡量,电导率越大,材料导电性越好。金属导电性以银为最好,铜、铝次之。合金的导电性比纯金属差。电导率大的金属(纯铜、纯铝)适于制造导电零件和电线。电导率小的金属或合金(如钨、钼、铁、铬)适于做电热元件。

5. 热膨胀性

材料随着温度变化而膨胀、收缩的特性称为热膨胀性。一般来说,金属受热时膨胀体积增大,冷却时收缩体积缩小。热膨胀性用线胀系数 α_l 和体胀系数 α_v 来表示,即:

$$\alpha_l = \frac{L_2 - L_1}{L_1 \Delta t} \quad \alpha_v = 3\alpha_l$$

式中, α_l 为线胀系数 ($1/K$ 或 $1/^\circ C$); L_1 为膨胀前长度 (m); L_2 为膨胀后长度 (m); Δt 为温度变化量 (K 或 $^\circ C$)。

由膨胀系数大的材料制造的零件, 在温度变化时尺寸和形状变化较大。轴与轴瓦之间要根据其膨胀系数来控制其间隙尺寸; 在热加工和热处理时也要考虑材料的热膨胀影响, 以减少工件的变形和开裂。

6. 磁性

材料可分为铁磁性材料 (在外磁场中能强烈地被磁化, 如铁、钴等)、顺磁性材料 (在外磁场中只能微弱地被磁化, 如锰、铬等) 和抗磁性材料 (能抗拒或削弱外磁场对材料本身的磁化作用, 如铜、锌等) 三类。铁磁性材料可用于制造变压器、电动机、测量仪表等。抗磁性材料则用于要求避免电磁场干扰的零件和结构材料, 如航海罗盘等。

铁磁性材料当温度升高到一定数值时, 磁畴被破坏, 变为顺磁体, 这个转变温度称为居里点, 如铁的居里点是 $770^\circ C$ 。

一些金属的物理性能及力学性能见表 1-4。

表 1-4 一些金属的物理性能及力学性能

金 属	铝	铜	镁	镍	铁	钛	铅	锡	锑
元素符号	Al	Cu	Mg	Ni	Fe	Ti	Pb	Sn	Sb
密度 $/10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	2.70	8.94	1.74	8.9	7.86	4.51	11.34	7.3	6.69
熔点/ $^\circ C$	660	1083	650	1455	1539	1660	328	232	631
线胀系数 $/10^{-6} ^\circ C^{-1}$	23.1	16.6	25.7	13.5	11.7	9.0	29	23	11.4
百分电导率 (%)	60	95	34	23	16	3	7	14	4
热导率/ $\text{J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$	2.09	3.85	1.46	0.59	0.84	0.17			
磁化率	21	抗磁	12	铁磁	铁磁	182	抗磁	2	
弹性模量/MPa	72400	130000	43600	210000	200000	112500			
抗拉强度/MPa	80~110	200~240	200	400~500	250~330	250~300	18	20	4~10
伸长率 (%)	32~40	45~50	11.5	35~40	25~55	50~70	45	40	0
断面收缩率 (%)	70~90	65~75	12.5	60~70	70~85	76~88	90	90	0
布氏硬度 HBW	20	40	36	80	65	100	4	5	30
色泽	银白	玫瑰红	银白	白	灰白	暗灰	苍灰	银白	银白

(三) 材料的化学性能

1. 耐蚀性

材料在常温下抵抗氧、水蒸气及其他化学介质腐蚀破坏作用的能力称耐蚀性, 碳钢、铸铁的耐蚀性较差; 钛及其合金、不锈钢的耐蚀性好。在食品、制药、化工工业中不锈钢是重

要的应用材料。铝合金和铜合金也有较好的耐蚀性。

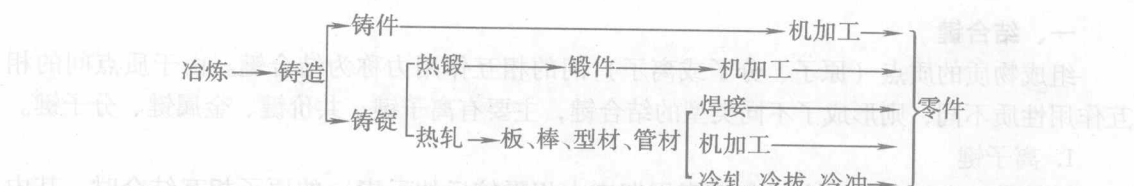
2. 抗氧化性

材料在加热时抵抗氧化作用的能力称抗氧化性。加入 Cr、Si 等合金元素,可提高钢的抗氧化性。如合金钢 4Cr9Si2 中含有质量分数为 9% 的 Cr 和质量分数为 2% 的 Si,可在高温下使用,制造内燃机排气阀及加热炉炉底板、料盘等。

材料的耐蚀性和抗氧化性统称化学稳定性。在高温下的化学稳定性称为热稳定性。在高温条件下工作的设备,如锅炉、汽轮机、喷气发动机等部件和零件应选择热稳定性好的材料来制造。

二、材料的工艺性能

金属材料的一般加工过程如下:



在铸造、锻压、焊接、机加工等加工前后过程中,往往还要进行不同类型的热处理。因此,一个由金属材料制得的零件其加工过程十分复杂。工艺性能直接影响零件加工后的成本与质量,是选材和制订零件加工工艺路线时应考虑的因素之一。

1. 铸造性能

材料铸造成形的能力称为铸造性能,常用流动性、收缩性和偏析来衡量。

(1) 流动性 是熔融金属的流动能力。流动性好的金属容易充满铸型,从而获得外形完整、尺寸精确、轮廓清晰的铸件。

(2) 收缩性 铸件在凝固和冷却过程中,其体积和尺寸减少的现象称为收缩性。铸件收缩不仅影响尺寸,还会使铸件产生缩孔、疏松、内应力以及变形与开裂等缺陷,故铸造用金属材料的收缩率越小越好。

(3) 偏析 金属凝固后,铸锭或铸件化学成分和组织的不均匀现象称为偏析。偏析严重的铸件各部分的力学性能会有很大的差异,从而降低铸件质量。一般来说,铸铁比钢的铸造性能好。

2. 锻造性能

材料锻造成形的能力为锻造性能。它主要取决于材料的塑性和变形抗力。塑性越好、变形抗力越小,材料的锻造性能越好。例如,纯铜在室温下就有良好的锻造性能,碳钢在加热状态下锻造性能较好,铸铁则不能锻造。

3. 切削加工性能

材料切削的难易程度称为切削加工性能。一般用切削速度、加工表面粗糙度和刀具使用寿命来衡量。影响切削加工性能的因素有工件的化学成分、组织、硬度、热导率和形变硬化程度等。一般认为材料具有适当硬度(170~230HBW)和足够的脆性时较易切削。所以灰铸铁比钢的切削加工性能好,碳钢比高合金钢切削加工性好。改变钢的化学成分和进行适当热处理可改善钢的切削加工性。

4. 焊接性能