



普通高等教育“十三五”规划教材
河南省“十二五”普通高等教育规划教材

工程材料与 成形工艺基础

第2版

徐晓峰 主编



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十三五”规划教材
河南省“十二五”普通高等教育规划教材

工程材料与成形工艺基础

第 2 版

主 编 徐晓峰
副主编 张万红 梁新合
参 编 贾利晓 杨正海



机械工业出版社

本书为适应 21 世纪培养高级工程技术人才的需要,按照“宽口径、厚基础、重实践、广适应”的培养模式,遵循教育部工程材料与机械制造基础系列课程指导组对教学内容的基本要求,总结多年来教学探索和实践经验,在第 1 版的基础上修订而成。本书修订后在内容和结构上都做了较大的更新。

本书主要包括工程材料、材料成形与机械加工工艺三部分。工程材料部分除介绍金属材料的组织结构、性能、相图和热处理工艺外,还介绍了金属材料的改性处理和强化处理方法,并介绍了非金属材料 and 复合材料;材料成形工艺部分介绍了金属的液态成形、塑性成形和材料的连接成形方法,还介绍了非金属材料和复合材料的成形方法,以及现代成形技术等内容;机械加工工艺部分介绍了切削加工工艺的基础知识、切削加工方法的选择、机械加工零件的结构工艺性与现代先进机械加工新技术等内容。

本书可作为高等工科院校本科机械类及近机类专业的教材,也可作为高等职业技术学校、高等专科学校相关专业的教材,还可供从事相关工程技术领域工作的技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

工程材料与成形工艺基础/徐晓峰主编.—2 版.—北京:机械工业出版社,2017.9

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-111-57904-5

I. ①工… II. ①徐… III. ①工程材料-成型-高等学校-教材
IV. ①TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 214896 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:刘小慧 责任编辑:刘小慧 程足芬 刘丽敏

责任校对:肖琳 封面设计:张静

责任印制:孙炜

保定市中国画美凯印刷有限公司印刷

2018 年 1 月第 2 版第 1 次印刷

184mm×260mm·19 印张·520 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-57904-5

定价:45.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88379833

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88379649

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

第 2 版前言

本书按照“宽口径、厚基础、重实践、广适应”的培养模式，为适应 21 世纪培养高级工程技术人才的需要而编写。在内容选择上，本着实用、精炼的原则，以介绍机械制造过程中的材料选用、毛坯生产、机械加工的基本理论和方法为主，既包括传统的加工方法，又吸收了生产实践中广泛应用的新技术、新工艺，在保证内容的科学性、完整性的同时，也体现了先进性和相对稳定性。

按照机械工程及相关工程专业的教学要求，本次修订对内容和结构进行了更新和充实。本书系统地介绍了材料科学与工程、材料成形科学与工程的基础理论，紧密结合材料加工和材料成形学科的现状和发展动向，列举了较多的应用实例，补充了计算机及数值模拟技术在材料学和材料加工工程行业应用的相关内容，介绍了行业前沿的科技成果。编者力求适应机械工程学科教学改革的要求，加强了对学科基础理论的阐述，增加了相关设备内容的简单介绍，提高了知识体系的完整性。本书具有知识量大、内容新、数据翔实、结构合理、紧密联系生产实际等特点。

本书共有 11 章，包括工程材料、金属的液态成形、金属的塑性成形、材料的连接成形、非金属材料 and 复合材料的成形、现代成形技术及发展趋势、切削加工的基础知识、零件表面的加工方法、机械零件的结构工艺性、机械加工工艺过程和先进制造技术。在编写时，以工艺方法为主线，深入浅出地讲述了相关工艺知识，使学生不仅知其然，也能初步知其所以然，为后继课程的学习建立必要的工程概念，培养初步的工程意识。

本书可作为高等工科院校本科机械类和近机类专业的教材，也可作为高等职业技术学校、高等专科学校相关专业的教材，还可供从事相关工程技术领域工作的技术人员参考。

2015 年本书经审定被列为河南省“十二五”普通高等教育规划教材。

本书由河南科技大学徐晓峰教授任主编，张万红、梁新合任副主编。参加编写的人员有（按章节顺序）：洛阳理工学院贾利晓（第 1 章第 1.1~1.5 节）、河南科技大学杨正海（第 1 章第 1.6 节，第 5 章，第 9 章，第 11 章）、河南科技大学徐晓峰（第 2 章，第 6 章）、河南科技大学张万红（第 3 章，第 4 章）、河南科技大学梁新合（第 7 章，第 8 章，第 10 章）。

本书由刘舜尧教授、陈拂晓教授审阅，在此表示衷心的感谢。在编写本书的过程中，参阅了部分国内外相关教材、科技著作及论文，在此一并向参考文献的作者表示感谢。

本书得到了河南科技大学教材出版基金的资助，在此表示感谢。

本书的编写力求适应高等教育改革与发展的需要，涉及的专业面较广，但由于编者学识所限，书中不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

编者

第 1 版前言

本书根据“宽口径、厚基础、重实践、广适应”的培养模式，为适应 21 世纪培养高级工程技术人才的需要而编写。在内容选择上本着实用、精炼的原则，以介绍机械制造过程中的材料选用、毛坯生产、机械加工的基本理论和方法为主，既包括传统的加工方法，又吸收了生产实践中广泛应用的新技术、新工艺，以体现机械制造的发展方向，同时保证教材内容的科学性、继承性和相对稳定性。

本书共有 12 章，包括工程材料、金属的液态成形、金属的塑性成形、材料的焊接成形、非金属材料 and 复合材料的成形、现代成形技术及发展趋势、毛坯成形方法选择及质量控制、切削加工的基础知识、零件表面的加工方法、机械零件的结构工艺性、机械加工工艺过程和现代制造技术及发展趋势。在编写时，以工艺方法为主线，深入浅出地讲述了相关工艺知识，使学生不仅知其然，也能初步知其所以然，为后继课程的学习建立必要的工程概念和工程意识。

本书可作为高等学校工科院校本科机械类和近机类专业的教材，也可作为高等职业技术学校、高等专科学校相关专业的教材。在使用本书时，可根据专业的具体情况调整授课内容。本书还可供从事相关工程领域工作的技术人员参考。

本书由河南科技大学徐晓峰任主编，张万红、贾利晓任副主编。参加编写的有：河南科技大学徐晓峰（第 2 章，第 6 章 6.1、6.2 节，第 7 章）、成国煌（第 8 章，第 11 章）；洛阳理工学院贾利晓（第 1 章 1.1~1.5 节）；河南科技大学杨正海（第 1 章 1.6 节，第 5 章，第 12 章）、张万红（第 3 章，第 6 章 6.3、6.4 节）、于华（第 4 章，第 6 章 6.5、6.6 节）；洛阳理工学院张赛珍（第 9 章，第 10 章）。

本书由刘舜尧教授、陈拂晓教授审阅，在此表示衷心的感谢。在编写本书的过程中，参阅了部分国内外相关教材、科技著作及论文，在此一并向参考文献的作者表示感谢。

本书得到了河南科技大学教材出版基金的资助，在此表示感谢。

本书的编写力求适应高等教育改革与发展的需要，但由于编者学识所限，书中错误和不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

编者

目 录

CONTENTS

第 2 版前言

第 1 版前言

| | |
|----------------------------|------------|
| 第 1 章 工程材料 | 1 |
| 1.1 工程材料的种类与主要性能 | 1 |
| 1.2 金属材料的结构与结晶 | 7 |
| 1.3 铁碳合金 | 13 |
| 1.4 金属热处理 | 19 |
| 1.5 常用金属材料 | 30 |
| 1.6 非金属材料 and 复合材料 | 37 |
| 复习思考题 | 47 |
| 第 2 章 金属的液态成形 | 50 |
| 2.1 金属液态成形工艺原理 | 50 |
| 2.2 常用液态成形合金 | 59 |
| 2.3 砂型铸造成形工艺 | 69 |
| 2.4 特种铸造 | 79 |
| 2.5 铸件结构设计 | 87 |
| 2.6 金属液态成形中的数值模拟 | 93 |
| 复习思考题 | 93 |
| 第 3 章 金属的塑性成形 | 97 |
| 3.1 金属塑性成形工艺原理 | 98 |
| 3.2 金属塑性成形工艺方法 | 105 |
| 3.3 锻件与冲压件的结构设计 | 123 |
| 3.4 其他塑性成形工艺方法 | 126 |
| 3.5 数值模拟技术在塑性成形中的应用 | 129 |
| 复习思考题 | 131 |
| 第 4 章 材料的连接成形 | 133 |
| 4.1 金属焊接成形工艺原理 | 133 |
| 4.2 常用焊接成形方法 | 142 |
| 4.3 常用金属材料的焊接 | 152 |
| 4.4 焊接成形件的工艺设计 | 156 |
| 4.5 焊接成形中的数值模拟技术 | 165 |
| 4.6 其他连接成形方法简介 | 165 |

| | |
|------------------------------------|------------|
| 复习思考题 | 167 |
| 第5章 非金属材料 and 复合材料的成型 | 169 |
| 5.1 高分子材料的成型 | 169 |
| 5.2 陶瓷件的成型 | 172 |
| 5.3 复合材料的成型 | 176 |
| 复习思考题 | 181 |
| 第6章 现代成形技术及发展趋势 | 182 |
| 6.1 快速成形技术的类型及应用 | 182 |
| 6.2 粉末冶金成形技术 | 185 |
| 6.3 半固态成形技术 | 189 |
| 6.4 精密成形和超塑性成形技术 | 194 |
| 6.5 高能率成形 | 196 |
| 6.6 连接成形新技术 | 198 |
| 6.7 现代成形技术发展趋势 | 203 |
| 复习思考题 | 203 |
| 第7章 切削加工的基础知识 | 205 |
| 7.1 切削加工的分类 | 205 |
| 7.2 切削运动与切削要素 | 205 |
| 7.3 切削加工刀具 | 208 |
| 7.4 切削加工过程 | 212 |
| 7.5 材料的切削加工性 | 218 |
| 7.6 金属切削条件的合理选择 | 219 |
| 复习思考题 | 222 |
| 第8章 零件表面的加工方法 | 223 |
| 8.1 切削加工方法 | 223 |
| 8.2 零件表面加工方法的选择 | 244 |
| 复习思考题 | 253 |
| 第9章 机械零件的结构工艺性 | 254 |
| 9.1 零件结构设计的基本原则 | 254 |
| 9.2 切削加工对零件结构工艺性的要求 | 254 |
| 复习思考题 | 259 |
| 第10章 机械加工工艺流程 | 260 |
| 10.1 机械加工工艺流程的基本概念 | 260 |
| 10.2 工件的安装与夹具的基本知识 | 262 |
| 10.3 机械加工工艺流程的制订 | 266 |

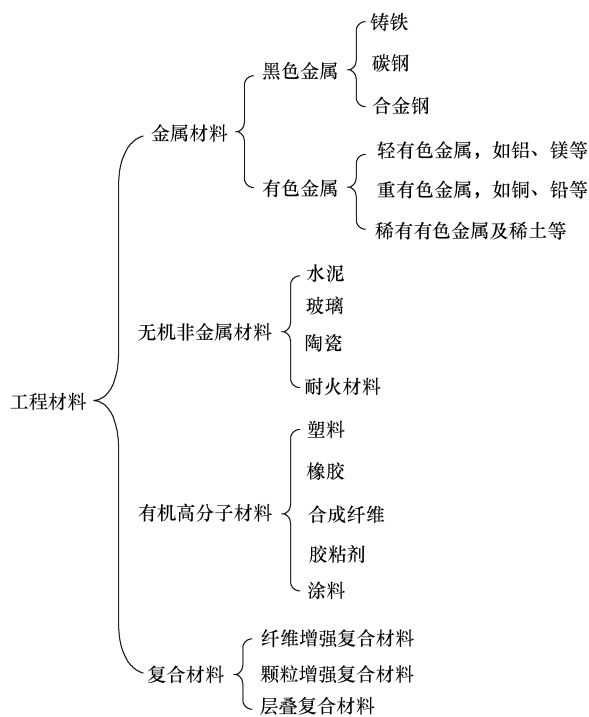
| | |
|------------------------------|------------|
| 10.4 典型零件工艺过程分析 | 274 |
| 复习思考题 | 279 |
| 第 11 章 先进制造技术 | 281 |
| 11.1 数控加工技术 | 281 |
| 11.2 高速切削加工技术 | 283 |
| 11.3 超精密加工 | 284 |
| 11.4 纳米加工技术 | 286 |
| 11.5 柔性制造系统 | 288 |
| 11.6 虚拟制造技术 | 290 |
| 11.7 计算机辅助设计和计算机辅助制造技术 | 291 |
| 复习思考题 | 293 |
| 参考文献 | 294 |

1.1 工程材料的种类与主要性能

1.1.1 工程材料的种类

材料是人类社会活动的物质基础，是人类赖以生存和发展的重要条件。材料科学与技术是衡量一个国家经济实力与技术水平的重要标志，因此世界各国都把对材料的研究开发放在突出的地位。

人们通常所说的材料是指可供人类使用的各种材料，即能够用于制造工程结构、零件或其他产品的物质。人类使用的材料种类繁多，性能各异，本节仅介绍常用的工程材料。常见的工程材料按照化学成分可分成如下类别：



在众多工程材料中，金属材料不仅来源丰富，而且具有优良的使用性能和工艺性能，还可通过不同的成分配制和采用不同的加工工艺来改变其组织和性能，因此应用最广泛。

无机非金属材料的塑性和韧性远低于金属材料，但具有耐高温、耐腐蚀、抗压强度高优点。其中，特种陶瓷材料具有独特的力学性能和物理、化学性能，能够满足工程技术的特殊要求，是发展宇航、原子能和电子等高、精、尖科学技术不可缺少的材料，已成为高温材料和功能材料的主力军。

有机高分子材料的某些力学性能不如金属材料，但它们具有金属材料不具备的某些特殊

性能,如耐腐蚀、电绝缘、质量轻等。有机高分子材料来源丰富,价格低廉,因此发展很快,应用日益广泛,已成为工程上不可缺少的重要材料。

复合材料是指由两种或两种以上组分组成,具有明显界面和特殊性能的人工合成的多相固体材料。复合材料能够综合各类材料的优点,通过成分设计使各组分的性能互相补充并彼此关联,从而获得新的性能,因此是一种很有发展前途的材料。

工程材料还可以根据性能特点分为结构材料 and 功能材料两大类。结构材料是以强度、刚度、塑性、韧性、硬度、疲劳强度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。结构材料可以是金属材料、无机非金属材料、高分子材料或复合材料。功能材料是以声、光、电、磁、热等物理性能为性能指标,用来制造具有特殊性能元件的材料。功能材料有很多,如超导材料、储氢材料、光学材料、激光材料等。

1.1.2 工程材料的力学性能

工程材料的力学性能是指工程材料在各种外力作用下抵抗变形或破坏的能力,是机械制造领域选用金属材料的主要依据,而且与各种加工工艺也有密切关系。工程材料力学性能范围较广,根据试验温度不同,力学性能可分为高温力学性能和常温力学性能,本书主要介绍常温力学性能。材料在加工及使用过程中所受的外力称为载荷,根据载荷作用性质不同,对材料的力学性能要求也不同。载荷按其作用性质不同,可分为静载荷、冲击载荷和交变载荷三类。

1. 静载荷下材料的力学性能

静载荷是指大小不变或变化过程缓慢的载荷。最常用的静载试验有拉伸、压缩、弯曲、扭转等,利用这些不同的试验,可测得材料的各种力学性能指标。材料的静载力学性能指标主要有强度、塑性和硬度等。

(1) 强度 强度是指材料在外力作用下抵抗变形和断裂的能力。材料的强度指标通过拉伸试验测定。图 1-1a 所示为退火低碳钢的拉伸试样。试验时,将试样装夹在万能材料试验机上,缓慢加载拉伸。随着载荷的增加,试样逐渐伸长,直至试样被拉断。载荷 (F) 与相应的试样伸长量 (ΔL) 可由试验机或人工绘成拉伸曲线。根据应力(单位面积上的内力)、应变(单位长度上的变形量)与载荷、伸长量之间的关系,可得到相应的应力-应变曲线(图 1-1b)。从应力-应变曲线上可读出材料的几个强度指标。

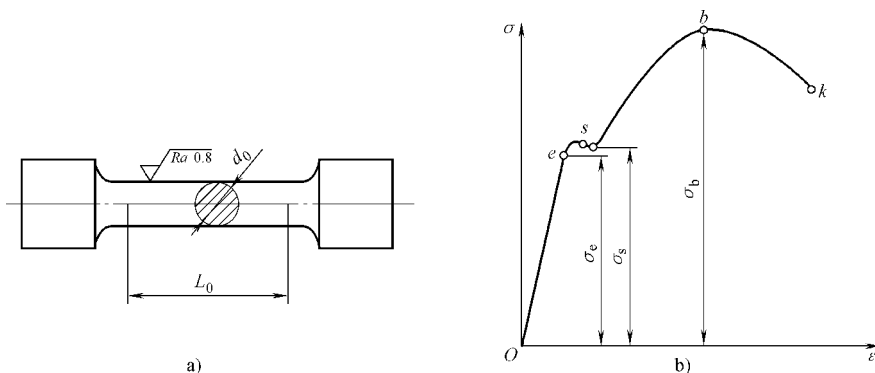


图 1-1 退火低碳钢的拉伸试样示意图及应力-应变曲线

a) 拉伸试样示意图 b) 应力-应变曲线

1) 屈服强度 σ_s^{\ominus} 。在拉伸过程中,应力变化不大,试样急剧增大的现象称为屈服,此时所对应的应力称为材料的屈服强度 σ_s 。屈服强度也可以认为是拉伸过程中,材料产生明显塑

[⊖] GB/T 228.1—2010 中,屈服强度分为上屈服强度 (R_{eH}) 和下屈服强度 (R_{eL})。

性变形时的最小应力，其值为

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

式中 F_s ——材料产生屈服现象时的最小载荷 (N)；

S_0 ——试样的原始横截面积 (mm^2)。

对于没有明显屈服现象的金属材料 (如铸铁、高碳钢等)，通常以标距长度产生 0.2% 塑性变形所对应的应力作为屈服强度，称为条件屈服强度，用 $\sigma_{0.2}$ 表示。

2) 抗拉强度 σ_b 。抗拉强度 σ_b 是指材料在拉断前所能承受的最大应力，表征材料抵抗断裂的能力。其值为

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

式中 F_b ——试样拉断前所承受的最大载荷 (N)。

屈服强度和抗拉强度都是机械零件设计和选材的重要依据，也是评定金属材料强度的重要指标。机械零件在工作时，一般不允许产生明显的塑性变形。

(2) 塑性^① 塑性是指材料在载荷作用下产生塑性变形而不断裂的能力。常用的塑性指标有断后伸长率 δ 和断面收缩率 ψ ，它们也是通过拉伸试验测得的。

1) 断后伸长率 δ 。断后伸长率是指试样被拉断后标距的伸长量 ΔL 与原始标距长度 L_0 之比，即

$$\delta = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100\% = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100\%$$

式中 L_u ——试样断裂后的标距长度 (mm)；

L_0 ——试样的原始标距长度 (mm)。

2) 断面收缩率 ψ 。断面收缩率 ψ 是指试样拉断后，试样横截面积的最大缩减量与原始横截面积之比，即

$$\psi = \frac{\Delta S}{S_0} \times 100\% = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100\%$$

式中 S_0 ——原始横截面积 (mm^2)；

S_u ——拉断处的最小横截面积 (mm^2)。

显然， δ 、 ψ 越大，表明材料断裂前产生的塑性变形量越大，即塑性越好。

(3) 硬度 硬度是指材料抵抗局部变形，特别是抵抗塑性变形、压痕或划痕的能力。材料的硬度是材料塑性与弹性的综合反映，是衡量材料软硬程度的指标。在材料制成的半成品和成品的质量检验中，硬度是表示产品质量的重要依据。常用的硬度指标有布氏硬度、洛氏硬度和维氏硬度等。

1) 布氏硬度。布氏硬度的测定方法如图 1-2 所示，在一定载荷 F 的作用下，将硬质合金球压入被测材料表面，保持一定时间后卸除载荷，测量材料表面

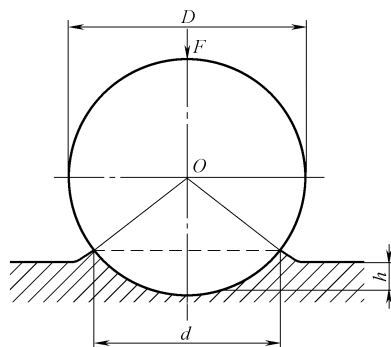


图 1-2 布氏硬度测量原理示意图

① GB/T 228.1—2010 中，抗拉强度符号用 R_m 表示。

② GB/T 228.1—2010 中，断后伸长率、断面收缩率分别用 A 、 Z 表示。

留下的压痕直径 d ，并由此计算出压痕的球缺面积，此球缺单位面积上所承受的载荷即为布氏硬度值。布氏硬度值的计算公式为

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

式中 F ——试验载荷 (N);
 S ——压痕表面积 (mm^2);
 D ——压头直径 (mm);
 d ——压痕直径 (mm)。

布氏硬度试验的优点是压痕面积较大，能较好地反映材料的平均硬度；数据较稳定，重复性好。布氏硬度的缺点是测试麻烦，压痕较大，不适于薄壁试样的检验。

2) 洛氏硬度。如图 1-3 所示，洛氏硬度的测定是将一个标准压头压入试样表面，通过测量压痕深度来确定材料的硬度。常用的压头有两种：顶角为 120° 的金刚石圆锥体压头和直径为 1.5875mm 的淬火钢球压头。洛氏硬度有 HRA、HRB、HRC 等多种表示方法，其中 HRC 最常用，其有效范围是 $20\sim 67\text{HRC}$ ，大量用于淬火及回火钢件的硬度测试，其数值可以直接从硬度试验机的表盘上读出。

洛氏硬度试验的优点是压痕较小，可用于成品零件的质量检验，并且测试效率较高。但由于压痕较小，对组织较粗大且不均匀的材料，如灰铸铁、滑动轴承合金等测得的硬度值不够准确。

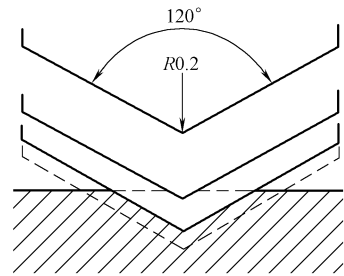


图 1-3 洛氏硬度测量原理示意图

3) 维氏硬度。维氏硬度的试验原理与布氏硬度基本相同，在一定载荷下将正四棱锥体形状的金钢石压头压入试样表面，测量压痕对角线长度，根据所加的载荷和对角线平均长度查表后得到材料的硬度值，用 HV 表示。

维氏硬度测量精确，硬度测量范围大，可很好地测量薄试样的硬度。维氏硬度所加载荷较小时又称为显微硬度，用 HM 表示，可用于测量试样表面各种组成相的硬度。

2. 动载荷下材料的力学性能

动载荷是指由于运动而产生的作用于构件上的载荷，根据作用性质的不同分为冲击载荷和交变载荷。材料的主要力学性能指标有冲击韧性、疲劳强度和断裂韧性。

(1) 冲击韧性 冲击韧性是指在冲击载荷较大时，材料抵抗变形、断裂破坏的能力，其大小一般用一次摆锤冲击试验时试样缺口吸收的冲击吸收功来表示。

摆锤冲击试验的原理如图 1-4 所示。试验时，将加工好的带缺口的标准试样放置在试验机的支座上，然后，将质量为 m 的摆锤抬升到一定高度 H_1 ，使其获得位能 mgH_1 ；释放摆锤，冲断试样，摆锤继续上升到高度 H_2 。若忽略摩擦和空气阻力等，则冲断试样所消耗的能量，即冲击吸收能量为 $A_K = mg(H_1 - H_2) = G(H_1 - H_2)$ ，单位为 J。一般来说，对强度相近的材料，冲击吸收能量数值越大，则材料抵抗大能量冲击破

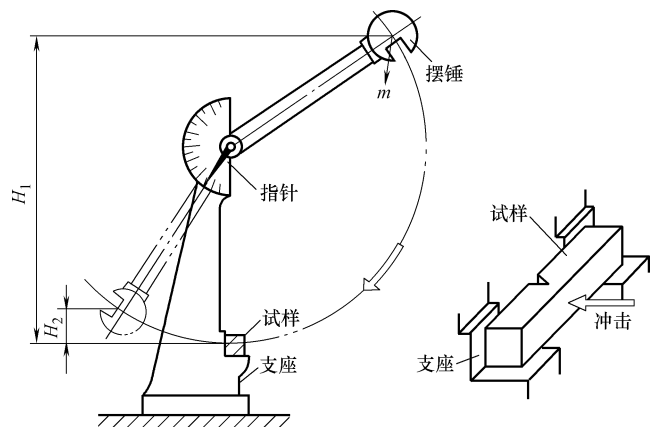


图 1-4 摆锤冲击试验原理

坏的能力越好,即冲击韧度越好,在受到冲击时不易断裂。但是,在冲击载荷作用下工作的零件,很少是受大能量一次冲击而破坏的,往往是经受小能量多次冲击,由于冲击损伤的积累引起裂纹扩展而造成断裂。冲击吸收能量值对材料内部组织缺陷十分敏感。

(2) 疲劳强度 许多机械零件,例如轴、齿轮、轴承、弹簧等,在工作中承受的是交变载荷。交变载荷是指其大小和方向随时间发生周期性循环变化的载荷,又称循环载荷。在交变载荷作用下,虽然零件所受应力远低于材料的屈服强度,但在长期使用中往往会突然发生断裂,这种破坏过程称为疲劳断裂。

如图1-5所示,材料承受的交变应力 σ 越小,断裂前的应力循环次数 N 越多,当应力达到 σ_5 时,曲线与横坐标平行,表明当应力低于此值时,材料可经受无限多次循环而不断裂,这个应力值就称为疲劳强度,当应力对称循环时,疲劳强度用 σ_{-1} 表示。实际上,工程上采用黑色金属在经受 10^7 次、有色金属在经受 10^8 次交变应力作用下,不发生破坏时的应力作为材料的疲劳强度,表示材料抵抗疲劳破坏的能力。

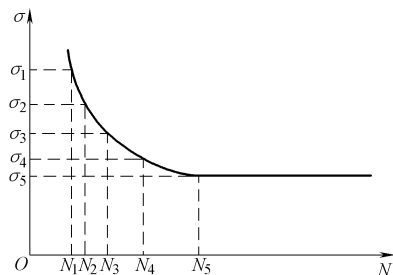


图 1-5 疲劳曲线示意图

材料的疲劳强度与其化学成分、内部组织及缺陷、表面划痕及零件截面突然改变等有关。设计零件时,为了提高零件的疲劳强度,应改善结构设计避免应力集中;提高加工工艺以减少内部组织缺陷;还可以通过降低零件表面粗糙度和表面强化(如表面淬火、喷丸处理等)的方法提高表面加工质量。

(3) 断裂韧度 传统设计理论认为零件的最大工作应力小于材料的许用应力时是安全可靠的,但某些高强度材料零件和中、低强度材料制造的大型工件往往在工作应力远低于材料的屈服强度时就发生脆性断裂,这种在低于材料屈服强度时发生的脆性断裂称为低应力脆断。研究表明,造成低应力脆断的根本原因是材料中宏观裂纹的扩展,断裂韧度就是表示材料抵抗裂纹失稳扩展的能力,用 K_{IC} 表示,单位为 $MN/m^{3/2}$ 。

在材料中存在着各种各样的缺陷,如气孔、夹杂物和微裂纹等,这些缺陷在材料受力时相当于裂纹,在其前端产生应力集中,形成应力场,该应力场的强弱用 K_I 表示,称为应力场强度因子。在载荷作用下, K_I 不断增大,当其增大到某一临界值 K_{IC} 时,材料会发生脆性断裂。这个临界值 K_{IC} 就称为材料的断裂韧度。断裂韧度对材料的成分、组织和结构很敏感。

1.1.3 工程材料的物理、化学及工艺性能

1. 工程材料的物理性能

工程材料的物理性能包括密度、熔点、导热性、导电性、热膨胀性和磁性等,各种机械零件由于用途不同,对材料的物理性能要求也有所不同。

(1) 密度 单位体积某种物质的质量称为该物质的密度,用 ρ 来表示。对于金属材料,按照密度的大小可分为轻金属和重金属。一般,密度小于 $5g/cm^3$ 的金属称为轻金属,如铝、镁、钛及其合金;而密度大于 $5g/cm^3$ 的金属则称为重金属,如铁、铅、钨等。非金属材料的密度相对较小,例如,陶瓷的密度为 $2.2\sim 2.5g/cm^3$,各种塑料的密度更小,一般都在 $1.0\sim 1.5g/cm^3$ 之间。

实际生产中,一些零部件的选材必须考虑材料的密度,如汽车发动机中要求采用质量轻、运动时惯性小的活塞,多采用低密度的铝合金制成。在航空领域中,密度更是选用材料的关键性能之一。

(2) 熔点 熔点是指材料的熔化温度,它是制订冶炼、铸造、锻造和焊接等热加工工艺规范的一个重要参数。纯金属一般有固定的熔点,合金的熔点取决于成分,根据熔点高低,

金属材料可分为难熔金属和易熔金属。

(3) 导热性 材料传导热量的性能称为导热性,用热导率 λ 表示。导热性好的材料(如铜、铝及其合金)常用来制造换热器等传热设备的零部件。导热性差的材料(如陶瓷、木材、塑料等)可用来制造绝热零件。

在制订铸造、焊接、锻造和热处理等热加工工艺时,必须考虑材料的导热性,防止材料在加热和冷却过程中形成过大的内应力而造成变形与开裂。

(4) 导电性 材料传导电流的能力称为导电性。常用其电导率 γ 来表示,但用其倒数(电阻率 ρ)更方便。金属的电阻率常随温度的升高而增加,而非金属的电阻率随温度的升高而降低。

(5) 热膨胀性 材料随着温度变化而发生体积膨胀或收缩的特性称为热膨胀性。一般来说,材料受热时膨胀而使体积增大,冷却时收缩而使体积减小。热膨胀性的大小用线胀系数 α_l 和体胀系数 α_v 来表示。在制订加工工艺时,应考虑材料的热胀影响,尽量减小工件的变形和开裂。

(6) 磁性 通常把材料被磁场吸引或磁化的性能叫作磁性,用磁导率 μ 来表示材料磁性的大小。具备显著磁性的材料称为磁性材料,可分为铁磁性材料、顺磁性材料和抗磁性材料。磁性只存在于一定的温度范围内,当温度升高到一定值时,磁性就会消失,这个温度称为居里点,如铁的居里点为 770°C 。

2. 工程材料的化学性能

工程材料的化学性能主要是指材料在室温或高温时抵抗各种介质化学侵蚀的能力,主要包括耐蚀性、抗氧化性和化学稳定性等。

(1) 耐蚀性 耐蚀性是指材料在常温下抵抗周围各种介质腐蚀的能力。金属材料在腐蚀性介质中常常会发生化学腐蚀或电化学腐蚀,因此,对金属制品的腐蚀防护十分重要。在金属材料中,碳钢、铸铁的耐蚀性较差;钛及其合金、不锈钢的耐蚀性较好;铝和铜也有较好的耐蚀性。非金属材料,如陶瓷材料和塑料等都具有优良的耐蚀性。

(2) 抗氧化性 材料在加热时抵抗氧化作用的能力称为抗氧化性。金属及合金抗氧化的机理是材料在高温下迅速氧化后,能在表面形成一层连续而致密并与母体结合牢固的膜阻止进一步氧化。在钢中加入Cr、Ni、Si等元素,可大大提高钢的抗氧化性。在高温下工作的发动机气门、内燃机排气阀等零部件,就是采用抗氧化性好的42Cr9Si2等材料来制造的。

(3) 化学稳定性 化学稳定性是材料耐蚀性和抗氧化性的总称。高温下的化学稳定性又称热稳定性。在高温条件下工作的设备(如锅炉、汽轮机、火箭等)上的零部件需要选择热稳定性好的材料来制造。

3. 工程材料的工艺性能

工程材料的工艺性能是指工程材料适应某种加工的能力,按照工艺方法不同,可分为铸造性能、塑性成形性能、焊接性能、热处理性能和切削加工性能。

(1) 铸造性能 铸造是将液态金属浇注到铸型型腔中,经冷却凝固和清理后得到具有一定形状、尺寸和性能的铸件的工艺过程,也称液态成形。金属及合金在铸造工艺中获得优良铸件的能力称为铸造性能。衡量铸造性能的主要指标有流动性、收缩性和偏析倾向等。金属材料中,灰铸铁和青铜的铸造性能较好。

(2) 塑性成形性能 塑性成形是利用金属在外力作用下所产生的塑性变形,来获得具有一定形状、尺寸和力学性能的毛坯或零件的生产方法。用塑性成形的方法获得合格零件的难易程度称为塑性成形性能。塑性成形性能的好坏主要与金属的塑性和变形抗力有关,也与材料的成分和加工条件有很大的关系。塑性越好,变形抗力越小,材料的塑性成形性能就越好。例如,黄铜和铝合金在室温下就有良好的塑性成形性能,碳钢在加热状态下塑性成形性能较

好，铸铁、铸铝、青铜则几乎不能采用塑性成形方法。

(3) 焊接性能 焊接是通过加热、加压或者既加热又加压的方式将金属或其他材料（如塑料）连接起来的一种制造工艺及技术。焊接性能是指材料对焊接加工的适应性，即在一定的焊接工艺条件下，获得优质焊接接头的难易程度。对碳钢和低合金钢，焊接性主要与材料的化学成分有关，如低碳钢具有良好的焊接性，高碳钢、合金钢和铸铁的焊接性较差。

(4) 热处理性能 热处理是改变材料性能的主要手段，在热处理过程中，材料的成分、组织和结构发生变化。热处理性能是指材料热处理的难易程度和产生热处理缺陷的倾向，其衡量的指标或参数很多，如淬透性、淬硬性、回火稳定性、回火脆性、氧化与脱碳倾向及变形开裂倾向等。

(5) 切削加工性能 切削加工性能是指材料在切削加工时的难易程度。切削加工性能一般由工件切削后的表面粗糙度及刀具寿命等来衡量。影响切削加工性能的因素主要有工件的化学成分、组织状态、硬度、导热性和形变强化等。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，就材料的种类而言，铸铁、铜合金、铝合金和一般碳钢都具有较好的切削加工性能。改变钢的化学成分和进行适当的热处理，是改善钢切削加工性能的重要途径。

1.2 金属材料结构与结晶

1.2.1 金属的晶体结构

1. 金属的理想晶体结构

(1) 晶体结构的基本概念

1) 晶体与非晶体。自然界中的一切固态物质，按其内部粒子的排列情况可分为晶体和非晶体两大类。凡内部粒子呈规则排列的固态物质称为晶体，如食盐、雪花、固态金属等都是晶体。凡内部粒子呈无规则堆积的固态物质，称为非晶体，如普通玻璃、松香等都是非晶体。晶体具有固定的熔点，而非晶液体与固态之间的转变是一个逐渐过渡的过程；晶体具有各向异性的特征，而非晶体则是各向同性的。在一定条件下，晶体与非晶体可以互相转化。

2) 晶格与晶胞。在晶体中，原子按一定的规律在空间有规则地堆垛在一起，如图 1-6a 所示。为了便于分析晶体中原子排列的规律，通常以通过各原子中心的假想直线把它们在三维空间里的几何排列形式描绘出来，形成如图 1-6b 所示的三维空间格架，这种表示晶体中原子排列形式的空间格架叫作晶格，晶格的结点代表原子中心的位置。由于晶体中原子排列具有

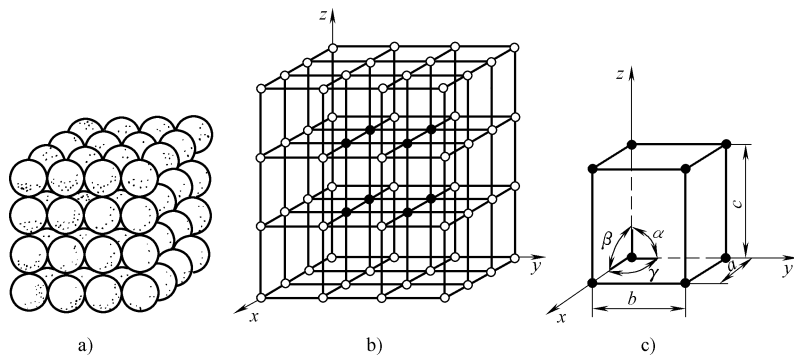


图 1-6 晶体中原子排列示意图

a) 原子堆垛模型 b) 晶格 c) 晶胞

规律性,因此可以从晶格中取出一个能完全代表晶格结构特征的最基本的几何单元,这种基本单元叫作晶胞。晶胞的大小和形状常以晶胞的棱边长度 a 、 b 、 c 及棱边夹角 α 、 β 、 γ 来表示,如图 1-6c 所示。晶胞的棱边长度一般称为晶格常数或点阵常数,单位为 nm ; 棱边夹角又称为轴间夹角。

(2) 三种常见的典型晶体结构 工业上使用的金属元素中,除少数具有复杂的晶体结构外,绝大多数都具有比较简单的晶体结构,其中最常见金属晶体结构有体心立方晶格、面心立方晶格和密排六方晶格三种类型,如图 1-7 所示。

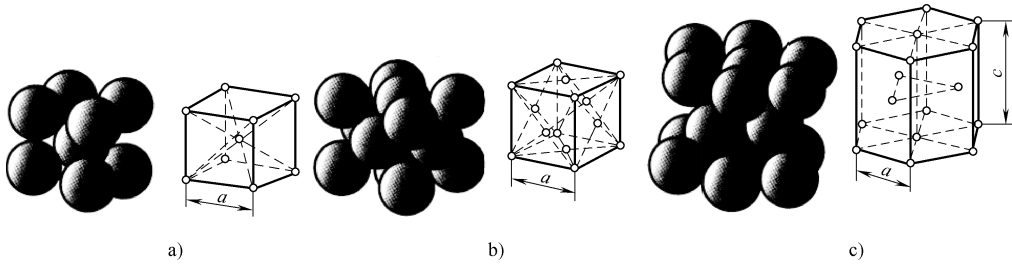


图 1-7 三种典型晶体结构示意图

a) 体心立方晶格的晶胞 b) 面心立方晶格的晶胞 c) 密排六方晶格的晶胞

1) 体心立方晶格。体心立方晶格的晶胞模型如图 1-7a 所示。晶胞的三个棱边长度相等,三个棱间夹角均为 90° ,构成立方体。除了在晶胞的八个顶角上各有一个原子外,在立方体的中心还有一个原子。具有体心立方结构的金属有 $\alpha\text{-Fe}$ 、 Cr 、 V 、 Nb 、 Mo 、 W 等。

2) 面心立方晶格。面心立方晶格的晶胞如图 1-7b 所示。在晶胞的八个顶角上各有一个原子,构成立方体,在立方体六个面的中心各有一个原子。具有面心立方结构的金属有 $\gamma\text{-Fe}$ 、 Cu 、 Ni 、 Al 、 Ag 等。

3) 密排六方晶格。密排六方晶格的晶胞如图 1-7c 所示。在晶胞的 12 个顶角上各有一个原子,构成六方柱体,上底面和下底面的中心各有一个原子,晶胞内还有三个原子。具有密排六方晶格的金属有 Zn 、 Mg 、 Be 、 $\alpha\text{-Ti}$ 、 $\alpha\text{-Co}$ 、 Cd 等。

2. 金属的实际晶体结构

(1) 单晶体与多晶体 晶体内部的晶格位向完全一致的晶体称为单晶体。在工业生产中,只有经过特殊制作才能获得单晶体。实际使用的金属材料,其内部包含许多颗粒状的小晶体,每个小晶体内部的晶格位向一致,而各个小晶体彼此间位向都不同,这种外形不规则的小晶体称为晶粒。晶粒与晶粒之间的界面称为晶界。这种由许多晶粒组成的晶体称为多晶体。一般金属材料都是多晶体。

(2) 晶体缺陷 研究发现,实际金属的结构与理想晶体的结构存在一定的差异,在实际金属中总是不可避免地存在着一些原子偏离规则排列的不完整区域,通常把这些不完整区域称为晶体缺陷。根据几何形态特征,可以将晶体缺陷分为点缺陷、线缺陷和面缺陷三种类型。

1) 点缺陷。点缺陷的特征是三个方向上的尺寸都很小,相当于原子的尺寸。常见的点缺陷有空位、间隙原子和置换原子三种,如图 1-8 所示。

空位是指未被原子占据的晶格结点;间隙原子是指处于晶格间隙中的原子;置换原子是指占据在原来基体原子平衡位置上的异类原子。它们主要是在结晶过程中原子堆积不完善、外来原子溶入或已

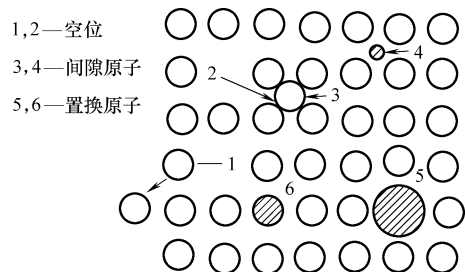


图 1-8 晶体中的各种点缺陷